

取替 RC 床版の耐荷力・耐疲労性の評価および
施工技術に関する研究

小 野 晃 良

第1章 序論

1.1	はじめに	1
1.2	既往の研究	3
1.2.1	取替床板	3
1.2.2	間詰部の開閉	3
1.2.3	寿命推定に関する理論式	3
1.3	本論文の目的と構成	5
	第1章参考文献	8

第2章 道路橋および取替床板の現状

2.1	はじめに	10
2.2	橋梁の現状および予防保全型維持管理計画	11
2.2.1	日本の道路橋の現状	11
2.2.2	日本の道路橋の課題	12
2.3	道路橋床版の損傷および予防保全型維持管理計画	13
2.3.1	道路橋床版の損傷	13
2.3.2	予防保全型維持管理計画	15
2.4	道路橋示方書・同解説の変遷	16
2.4.1	道路橋示方書の変遷	16
2.4.2	道路橋示方書の変遷による床版厚	17
2.5	道路橋床版の補強対策	18
2.5.1	健全性の判定区分における補修・補強対策	18
2.6	取替床板の現状およびPC床版構造	20
2.6.1	取替床板の現状	20
2.6.2	RC床版およびPC床版の設計厚	21
2.6.3	取替PC床版の継手構造の一例	23
2.7	本提案する取替RC床版の施工法案の概略	26
2.8	まとめ	30
	第2章参考文献	31

第3章 取替RC床版の耐荷力の検証および破壊メカニズム

3.1	はじめに	33
3.2	取替RC床版の継手構造	33
3.2.1	取替RC床版の継手構造の概略	33
3.2.2	取替RC床版に用いる継手部の突起形状および配置状況	34
3.3	引き抜き試験による付着応力度	35

3.3.1	引き抜き試験法および供試体	35
3.3.2	引き抜き試験の結果および考察	36
3.4	取替RC床版供試体に用いる継手寸法	43
3.4.1	継手部突起寸法	43
3.4.2	本実験供試体の継手長	44
3.5	供試体の使用材料・寸法	45
3.5.1	使用材料	45
3.5.2	供試体寸法および鉄筋配置	47
3.6	取替RC床版の施工手順	48
3.6.1	取替RC床版A	48
3.6.2	取替RC床版B	49
3.7	実験方法および最大耐荷力	50
3.7.1	耐荷力実験の概要	50
3.7.2	走行荷重試験方法	50
3.8	結果および考察	51
3.8.1	実験最大耐荷力	51
3.8.2	荷重とたわみの関係	51
3.8.3	荷重とひずみの関係	52
3.8.4	破壊時のひび割れ状況	53
3.9	まとめ	56
	第3章参考文献	57

第4章 取替RC床版の耐疲労性の検証および破壊メカニズム

4.1	はじめに	59
4.2	取替RC床版構造	60
4.3	供試体の使用材料・寸法	60
4.3.1	使用材料	60
4.3.2	供試体寸法および鉄筋配置	62
4.3.3	取替RC床版の施工手順	64
4.4	実験方法および等価走行回数	64
4.4.1	実験概要	64
4.4.2	輪荷重走行疲労実験方法	65
4.5	結果および考察	65
4.5.1	等価走行回数	65
4.5.2	たわみと等価走行回数	67
4.5.3	ひずみ等価走行回数	70

4.5.4 損傷状況	72
4.6 まとめ	77
第4章参考文献	79

第5章 輪荷重走行荷重実験における間詰部の開閉幅およびたわみ振幅が耐荷力に及ぼす影響

5.1 はじめに	81
5.2 各種間詰部の損傷事例	82
5.3 取替RC床版の継手構造	84
5.4 供試体寸法および使用材料	84
5.4.1 供試体寸法および鉄筋配置	84
5.4.2 使用材料	86
5.5 界面の引張強度およびせん断強度に関する実験	86
5.5.1 直接引張試験	87
5.5.2 一面せん断試験によるせん断強度	89
5.6 取替RC床版の施工手順	90
5.6.1 プレキャスト床版の製作	90
5.6.2 取替RC床版の設置手順	91
5.7 輪荷重走行荷重実験方法	93
5.8 輪荷重走行荷重実験結果および考察	94
5.8.1 最大耐荷力および破壊モード	94
5.8.2 開閉幅と走行距離の関係（輪荷重走行荷重実験）	94
5.8.3 荷重と開閉幅の関係	96
5.8.4 たわみと走行距離および荷重とたわみ振幅の関係	97
5.8.5 荷重とたわみの関係	98
5.8.6 破壊状況	99
5.9 まとめ	101
第5章参考文献	102

第6章 取替RC床版間詰部の開閉幅が耐疲労性に及ぼす影響

6.1 はじめに	104
6.2 取替RC床版の継手構造	104
6.3 供試体寸法および使用材料	105
6.3.1 供試体寸法および鉄筋配置	105
6.3.2 使用材料	106
6.4 取替RC床版の施工手順	107

6.4.1	プレキャスト床版の製作	107
6.4.2	取替RC床版の設置手順	108
6.5	輪荷重走行疲労実験方法および等価走行回数	108
6.5.1	輪荷重走行疲労実験方法	108
6.5.2	輪荷重走行疲労実験における等価走行回数	109
6.6	輪荷重走行疲労実験による結果および考察	109
6.6.1	等価走行回数	109
6.6.2	開閉幅と走行距離の関係	110
6.6.3	開閉幅と等価走行回数関係	112
6.6.4	たわみと走行距離およびたわみ振幅と等価走行回数の関係	113
6.6.5	たわみと等価走行回数の関係	116
6.6.6	輪荷重走行疲労実験における破壊状況	117
6.7	まとめ	118
	第6章参考文献	120

第7章 取替RC床版の押抜きせん断耐荷力および疲労寿命推定法

7.1	はじめに	122
7.2	供試体の使用材料・寸法	123
7.2.1	使用材料	123
7.2.2	供試体寸法および鉄筋配置	124
7.3	輪荷重走行荷重実験方法および輪荷重走行疲労実験	127
7.3.1	実験装置の概要	127
7.3.2	走行荷重試験方法および押抜きせん断耐荷力	127
7.3.3	輪荷重走行疲労実験方法および等価走行回数	127
7.4	輪荷重走行実験および輪荷重走行疲労実験による押抜きせん断耐荷力・ 等価走行回数	128
7.4.1	押抜きせん断耐荷力	128
7.4.2	等価走行回数	128
7.5	輪荷重走行疲労実験におけるRC床版のS-N曲線	139
7.5.1	松井らや土木研究所が提案するS-N 曲線式	139
7.5.2	阿部らが提案するRC床版のS-N曲線	130
7.5.3	輪荷重走行荷重実験および輪荷重走行疲労実験における破壊状況と阿部らが 提案する押抜きせん断力学モデルとの整合性	131
7.5.4	阿部らが提案する押抜きせん断耐荷力評価式	133
7.5.5	押抜きせん断耐荷力の算定およびS-N曲線式	134
7.6	まとめ	139

第7章 参考文献	140
----------	-----

第8章 地方自治体が管理する橋梁の床版取替工事におけるRC床版の施工技術

8.1 はじめに	142
8.2 橋梁概要, 点検結果および施工技術	142
8.3 橋梁定期点検・健全性の評価および対策	143
8.3.1 道路橋長寿命化修繕計画に伴う橋梁点検	143
8.3.2 詳細点検による健全性の判定	144
8.3.3 対策工法	146
8.4 取替RC床版設計・継手部構造および配置形状	146
8.4.1 取替RC床版の実用性の検証	146
8.4.2 取替RC床版の寸法	146
8.4.3 継手構造	147
8.5 プレキャストRC床版の製作	149
8.5.1 使用材料	149
8.5.2 型枠およびプレキャストRC床版の製作	150
8.6 床版取替工事における施工フロー	151
8.6.1 I期線側施工	151
8.6.2 II期線側施工	152
8.7 取替RC床版の施工	152
8.7.1 既設RC床版の撤去工事	152
8.7.2 取替RC床版の施工 (I期線)	152
8.7.3 II期線側の施工	153
8.7.4 伸縮装置の設置	155
8.7.5 橋面防水工およびアスファルト舗装	156
8.8 大型車両を用いた荷重載荷試験	156
8.8.1 荷重載荷条件	156
8.8.2 たわみの計測結果	158
8.9 まとめ	158
第8章 参考文献	160

第9章 総括

総括	161
----	-----

謝辞	168
----	-----

Evaluation of load- carrying capacity and fatigue resistance of replacement RC slabs and research on construction technology

Kosuke ONO

This study was conducted to develop replacement RC slabs to extend the service life of degraded RC slabs of road bridges.

In this work, a slabs was designed, 3/5 model test specimens were produced, and wheel load running tests and wheel load running fatigue tests were conducted to verify the load-carrying capacity and fatigue resistance. In both tests, cracks accompanied by spalling occurred at the boundary of the infill part. To reduce this, high- resistance epoxy resin adhesive was used at the boundary of the infill part.

The punching shear load resistance of the RC slabs and consistency with the S-N curve equation of the RC slabs were verified based on the test results, so the replacement RC slabs developed in this study was adopted in a real bridge.

The findings of the study are as follows.

- (1) In the tests, the proposed replacement RC slabs obtained improved load-carrying capacity and fatigue resistance compared with the existing RC slabs.
- (2) The proposed replacement RC slabs exhibited cracking at the boundary of the infill part associated with spalling in both the tests. A high- resistance epoxy adhesive was applied to the boundary of the infill part, resulting in an improvement in fatigue resistance.
- (3) Agreement with the S-N curve equation for RC slabs was verified using the punching shear capacity and the equivalent number of running cycles obtained from the tests. The experimental punching shear capacity was a close approximation to the value proposed by Abe et al. (within 93%). Based on this, the consistency of the results with the S-N curve equation was verified, and the life of replacement RC slabs can be estimated.
- (4) The proposed replacement RC slabs was adopted to extend the service life of a re-degraded RC slabs. This replacement RC slabs can be installed in a short time and has excellent constructability at a lower cost.

第1章 序 論

1.1 はじめに

我が国の橋梁数は2022年現在で73万橋が供用されている。その多くは1960年代の高度経済成長期に建設され、2021年の調査では32%、10年後の2031年では約57%へと増大することになる^{1.1)}。老朽化した橋梁や寿命に達した橋梁の維持更新費用は年々増加し、これを管理している地方自治体の財政的な負担が大きくなっていくことが懸念される。2007年にアメリカのミネソタ州で橋梁が落橋するなどの大事故も発生した^{1.2)}。我が国においても、国道に供用されている橋梁を調査した結果、落橋寸前や緊急対応の必要な橋梁が存在し、急遽補強対策が実施された。

国土交通省では損傷が顕在化した後、大規模な修繕を実施する事後保全対策から、橋梁を点検し、損傷が軽微な段階で計画的に修繕する予防保全型維持管理計画へと政策転換^{1.3)}を行い、2009年から都道府県庁および政令都市で橋長15m以上の橋梁を対象に「道路橋長寿命化修繕計画策定事業」が開始された^{1.4)}。その後、市町村全ての自治体で「道路橋長寿命化修繕計画」が実施されている。2014年発行の橋梁定期点検要領^{1.5)}においては橋長2.0m以上の全ての橋梁を対象に修繕計画が実施され、低コストで長寿命化が図られる修繕が実施されている^{1.6)}。

道路橋の点検および長寿命化修繕計画における最も損傷が著しい部材は、コンクリート床版である。積雪寒冷地域では融雪剤や凍結防止剤の散布による塩害と凍害による複合劣化により、他の地域と比較して寿命が短い。早いものでは30年程で撤去された事例もある^{1.7)}。このような複合劣化による取替工事においては、地方自治体の鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版とする）以外にも国道^{1.8)}やNEXCO東日本の高速道路^{1.9)}においても実施されている。

複合劣化や疲労によるRC床版の損傷に対する補修工事は、ポットホールが発生している部分や土砂化している付近のコンクリートの部分補修が多い。当初は、RC床版下面に鋼板を接着する鋼板接着補強や炭素繊維連続シートによる接着補強などによる接着補強が多く採用されていた^{1.10)}。

1994年以降の道路橋示方書・同解説^{1.11)}（以下、道示とする）の改定に伴うB活荷重に対応するために超速硬コンクリートに鋼繊維を配合した鋼繊維補強コンクリート（以下、SFRCとする）上面増厚補強^{1.12)}、さらにはポリマーセメントモルタル吹き付けによる下面増厚補強が施されている^{1.13)}。しかし、老朽化が著しいRC床版の補強対策においては補強後のRC床版に再劣化が生じ、取替を余儀なくされている事例もある^{1.9)}。再劣化の多くは、床版内部の水平ひび割れ、補修・補強コンクリートとの打ち継ぎ界面のはく離などが多く、長寿命化修繕計画では数回の補強サイクルが計画されているものの、実際には既設RC床版の損傷が著しくなることから、2次

補強が困難な橋梁も多いのが現状である^{1.14)}。これらのことから、主げたを残してプレキャスト化したプレストレストコンクリート床版（以下、PC 床版とする）へと取替工事が進められている^{1.15)~1.17)}。プレキャスト PC 床版を並列して一体化する取替床版は高速道路を中心に開発されている場合が多く、製作技術も高度なため、限られた製作工場で作製され、設置においても高度な技術が要求されている。

我が国の橋梁数約 73 万橋の内、地方自治体が管理する橋梁は約 66 万橋が供用され、この内全てが道示に規定される 1 等橋（活荷重 20tf (196kN)）や B 活荷重（25tf (245kN)）で設計された橋梁だけではなく、2 等橋（14tf (137.2kN)）や A 活荷重（17.5tf (171.5kN)）で設計された橋梁も多く供用されている。

交通量の少ない地方自治体の橋梁取替床版においては、既往の取替床版は交通量が多い、少ないに関係なく PC 構造のプレキャスト床版が採用されることが多い。とくに、交通量の少ない地方自治体の橋梁取替床版においては、建設地域のコンクリート二次製品を製作出来る工場で作製が可能な RC 構造の取替床版が望ましい。

国土交通省では、建設生産システム全体の生産性向上を図り、魅力ある建設現場を目指す取り組みとして「i-Construction（建設現場の生産性革命）」^{1.18)}が進められている。道路橋 RC 床版の取替 RC 床版の開発においても「i-Construction」の方針を十分に満足できるものと期待できる。

そこで本研究では、地方自治体が管理する橋梁の取替床版を対象に、架設地域に最も近い、地元コンサルによる設計、架設地域に所在するコンクリート二次製品工場で作製し、地域建設企業が施工可能な RC 構造としたプレキャスト RC 床版および施工法の提案を行うものである。

本研究において、最も特徴となるのは、取替床版の継手部および間詰部である。

本研究で採用する継手構造は、鉄筋端部を鍛造加工し、主筋に三角形の突起、配力筋には円形の突起を設けた継手構造である。

これらの材料試験を実施し、それぞれの強度を明らかにする。

次に、RC 床版の軸直角方向および軸直角方向と軸方向の 2 方向に継手構造を有する間詰部を設け、輪荷重走行荷重実験より最大耐荷力を評価する。輪荷重走行疲労実験より耐疲労性を評価し、実用性を検証する。

さらに、間詰部接合面のはく離に伴うひび割れの発生を抑制する技術の提案を行う。取替 RC 床版の寿命推定の提案および実橋における施工技術についても提案し、取替 RC 床版が「i-Construction」の方針に適合するかについても、実橋 RC 床版での実施工を基に評価し、地方自治体が管理する道路橋 RC 床版の取替工事における設計・製作・施工法の一助としたい。

1.2 既往の研究

1.2.1 取替床版

取替床版および施工法について各研究機関や各企業では、それぞれのプレキャスト化した取替床版が提案され、実用化されている^{1.15), 1.16), 1.19), 1.20)}。既往の取替床版の構造の多くはプレキャスト化し、橋軸直角方向（主筋方向）を PC 構造とした取替床版である^{1.15), 1.16)}。このプレキャスト PC 床版には各企業で開発された継手構造が採用され、間詰幅は 300mm 程度である。継手部構造は橋軸方向筋（配力筋方向）にナットを取付けした合理化継手構造^{1.15)}やループ継手構造^{1.16)}などが提案され、いずれも輪荷重走行疲労実験を実施し、耐疲労性が評価され実橋で採用されている。

以上より、筆者らは地方公共団体が管理する老朽化した RC 床版を対象として、RC 構造としたプレキャスト床版を提案する。

1.2.2 間詰部の開閉

土木学会鋼構造シリーズ「道路橋床版の維持管理マニュアル 2020」^{1.21)}においては、プレキャスト PC 床版の間詰部コンクリート界面は、一般に RC 構造となるため他の部位に比べて弱点になりやすくひび割れの損傷が懸念されていると記載されている。

例えば、間詰部と PC 床版部との界面のひび割れ幅に関する実験においては、表ら^{1.22)}は合理化継手構造の取替 PC 床版を用いて輪荷重走行疲労実験を実施している。供試体は 2017 年改定道示に準拠して製作した供試体を用いて正曲げで 100 年相当、その後、疲労試験と負曲げ載荷を行っている。その結果、疲労と負曲げ試験時に左側界面のひび割れ幅の増加率は 67% である。破壊時のひび割れ状況においても間詰部側のせん断キーの上下にひび割れが発生しているものの漏水は発生していない。いずれにおいても疲労による間詰部界面がひび割れの発生し開閉することが確認されている。一方、阿部ら^{1.23)}は道示に規定する床版寸法の 3/5 モデルしたプレキャスト床版間に幅 300mm の間詰部を設け、継手構造をループ型にして製作し、コンクリートを打ち込みした取替 RC 床版 2 体を用いて、荷重 100kN で 20,000 回走行の輪荷重走行疲労実験を行い、接合部のはく離による開閉幅について検証している。これによると、輪荷重の走行によりプレキャスト床版と間詰部の接合部は疲労により間詰部側面の左右の平均ひび割れ幅 0.31mm となる報告をしている。

1.2.3 寿命推定に関する理論式

道路橋 RC 床版の寿命予測式には、輪荷重走行疲労実験結果に基づく S-N 曲線式が用いられ、破壊までの寿命予測や破壊までの車両走行回数をもとに劣化係数を適用して維持管理に利用されている。

松井ら^{1.24)}は、輪荷重走行疲労実験機を用いて 1964 年設計基準に準拠した RC 床版の疲労実験を実施し、輪荷重 P を押抜きせん断耐荷力 P_{sx} で除した無次元化輪荷重 (P/P_{sx}) を縦軸に用いた S-N 曲線式を提案している。また、松井らは、押抜きせん断耐荷力 P_{sx} についてもはり状化した RC 床版の押抜きせん断力学モデルおよび耐荷

方式も併せて提案している^{1.25)}。その後、土木研究所では 1996 年改定の設計基準に準拠して製作した RC 床版を用いて輪荷重走行疲労実験を行い、土研式を提案している。土研式では、S-N 曲線式の押抜きせん断耐荷力 P_{sx} は松井らが提案する押抜きせん断耐荷力式が用いられている^{1.26)}。

一方、阿部らは日本大学生産工学部で開発した輪荷重走行振動実験機により、1994 年の設計基準に準拠した RC 床版供試体を用いて 20,000 回走行ごとに荷重を増加する段階荷重載荷疲労実験を行い、S-N 曲線式を提案した^{1.27), 1.28), 1.29)}。S-N 曲線式に用いる押抜きせん断耐荷力に関しては、松井らが提案した力学モデルを修正した RC 床版の押抜きせん断力学モデルおよび押抜きせん断耐荷力式を提案し、疲労寿命予測を行っている^{1.27)}。RC 床版の耐疲労性の評価において、線形累積疲労被害則（以下、マイナー則と呼ぶ）を適用し、松井らが提案する S-N 曲線式の傾きの逆数の絶対値 $m=12.7$ を用いて算定された等価走行回数に基づき評価してきた^{1.27), 1.28), 1.29)}。

マイナー則の適用性は、金属材料などでは特別な変動応力の載荷パターンを除いてすでに多くの研究によってほぼ安全側の評価を与えることが確認されているが、コンクリートにおいてはマイナー則の妥当性が否定されているわけではないものの、載荷パターンや載荷の休止期間の影響を受けることが報告されており^{1.30), 1.31)}、その適用性に関しては十分検討されているとは言えない。小梁川ら^{1.32), 1.33)}は、舗装コンクリートを対象にコンクリートにおけるマイナー則の適用性を実験的に示しているが、RC 床版に関しての研究はこれまで行われていないようである。

阿部ら^{1.27), 1.28), 1.29)}の研究においても、輪荷重疲労実験において、マイナー則を適用した段階荷重載荷実験結果に基づく耐疲労性の評価については、一定荷重振幅下での疲労実験を行っていないことから、その妥当性については未検証であった。そのため、一定荷重振幅下で破壊に至るまで輪荷重走行疲労実験を行い、過去に行った段階荷重載荷により得られた等価走行回数との整合性の検証が必要と考えられた。さらに、RC 床版の S-N 曲線式における無次元化輪荷重 (P/P_{sx}) については、阿部らは終局曲げモーメント時の断面力の釣合いを基に求められる押抜きせん断耐荷力 P_{sx} を適用することを提案している^{1.27), 1.28), 1.29)}。この押抜きせん断力耐荷力式における圧縮域の等価応力ブロックの寸法は、主筋方向および配筋方向に対してそれぞれ求め、これらの平均値を用いて算定することを提案している。また、1994 年改定の道示に準拠して設計した RC 床版の 1/2 モデルおよび 3/5 モデルの供試体を用いた輪荷重走行疲労実験結果を基に、押抜きせん断耐荷力式および S-N 曲線式を評価した。そこで本研究においては 1994 年改定の道示に準拠した RC 床版を用いた阿部ら^{1.27), 1.28), 1.29)}が提案する RC 床版の押抜きせん断耐荷力式および S-N 曲線式を用いて、取替 RC 床版の輪荷重走行実験から得られた押抜きせん断耐荷力、および輪荷重走行試験から得られた等価走行回数を基に寿命推定式である取替 RC 床版の S-N 曲線式を提案する。

1.3 本論文の目的と構成

道路橋 RC 床版は、老朽化の進行や道示の改定に伴い、さらには補修・補強した RC においても再劣化が生じている。老朽化に対しては、国土交通省、橋梁定期点検要領に基づいて点検し、損傷度から健全性を判定して修繕が実施されている。道示の改定に伴う補強法においては「道路橋長寿命化修繕計画」では、建設当時の耐荷力を維持する対策が検討されるが、交通量の多い国道や主要道路においては B 活荷重に対応する補強法も検討される。一方、既に補強した RC 床版において、再劣化あるいは再々劣化が生じた場合は取替床版工事を検討される。取替床版の設計においては B 活荷重、あるいは A 活荷重で設計されている。既往の取替床版の多くは、PC 構造としたプレキャスト床版を橋桁上に並列されている場合が多い。しかし、地方公共団体では全てが B 活荷重（あるいは一等橋）で設計されているわけではなく、A 活荷重（あるいは二等橋）で設計されている橋梁も多い。これらのことから、本研究では RC 構造としたプレキャスト床版を橋軸方向に並列し、プレキャスト床版間に本提案する突起を設けた継手部とした間詰部を設けた取替 RC 床版を提案し、輪荷重走行荷重実験により耐荷力性能を検証し、輪荷重走行疲労実験により耐疲労性を検証する。さらに、間詰部接合面が輪荷重の走行に伴い、界面のはく離の抑制のための接着を用いた施工法の提案、さらには疲労寿命推定のための力学性状の検証、実施工における技術の提案を行い、道路橋 RC 床版取替工事における設計法・施工法への一助とするものである。

本論文は、全 9 章で構成されており、以下に各章ごとの内容を述べる。

第1章「序論」では、社会インフラの老朽化の現状と道路橋 RC 床版維持管理の概要を述べる。また、老朽化や再劣化する RC 床版の取替工事を対象とした本提案する取替 RC 床版の必要性および実用化のための各種実験による性能評価からの実用性についても述べ、本提案する取替 RC 床版の性能評価に関する検証、施工の合理化・省力化、安全施工等についての位置付けを論じる。

第2章「道路橋および取替床版の現状」では、橋梁の現状を述べるとともに、道路橋の部材の中で最も損傷が著しい RC 床版の損傷状況、取替床版の現状についても述べる。また、国土交通省が示す i-Construction(建設現場の生産性革命)のトップランナー施策の全体最適の導入として、プレキャスト製品や合理化機械継手などの工場製作化が進められている中、本研究で提案する取替 RC 床版が i-Construction 施策に寄与できる合理化機械継手を用いたプレキャスト RC 床版として、合理化施工が可能な床版取り替え工事について論じる。

第3章「取替 RC 床版の耐荷力の検証および破壊メカニズム」では、取替 RC 床版の継手構造について主筋および配筋突起形状の引張試験を行い、引張強度を明らかにして継手長の検証を行う。次に、取替 RC 床版の最大耐荷力および破壊メカニズムを検証するために、1994 年改定以降の道示に基づいて設計し、その 3/5 モデルとした取替 RC 床版に 2 タイプの間詰部を設けた取替 RC 床版を用いた。実験では輪荷重走行疲労試験機を用いて、1 走行毎に荷重を増加する輪荷重走行荷重実験を行い、取替 RC 床版の最大耐荷力および破壊メカニズムから実用性を評価する。

第4章「取替 RC 床版の耐疲労性の検証および破壊メカニズム」では、取替 RC 床版の耐疲労性を検証するために 2 種類の間詰部を設けた取替 RC 床版を用いて、輪荷重走行疲労実験を行い、実験走行回数を作用荷重から得られる等価走行回数を得て検証する。また、プレキャスト RC 床版を並列して一体化したことから、輪荷重疲労実験における RC 床版および本提案する継手構造付近の破壊メカニズムを検証する。

第5章「輪荷重走行荷重実験における間詰部の開閉幅およびたわみ振幅が耐荷力に及ぼす影響」では、取替 RC 床版におけるプレキャスト床版と間詰部の接合面のはく離に伴うひび割れの発生を抑制するために接合面に付着用接着剤である高耐久型エポキシ系接着剤（以下、接着剤）を用いてはく離の抑制効果を検証する。付着面の強度試験として、接着剤「あり」、「なし」のコンクリート円柱供試体を製作し、直接引張試験による界面の引張強度、一面せん断試験におけるせん断強度を検証する。次に、プレキャスト床版側面に接着剤「あり」、「なし」の取替 RC 床版供試体を用いて輪荷重走行荷重実験を行い、耐疲労性および接合面の開閉幅、たわみ振幅が耐荷力性能に及ぼす検証を行い、各種取替床版の接合面のはく離に伴うひび割れの抑制効果の一助としたい。

第6章「取替RC床版間詰部の開閉幅が耐疲労性に及ぼす影響」では、第 5 章と同様に取替 RC 床版におけるプレキャスト床版と間詰部の接合面のはく離に伴うひび割れの発生を抑制するために接合面に接着剤を用いてはく離の抑制効果を検証する。付着面の強度試験として、接着剤「あり」、「なし」のコンクリート円柱供試体を製作し、直接引張試験による界面の引張強度、一面せん断試験におけるせん断強度を検証する。次に、プレキャスト床版側面に接着剤「あり」、「なし」の取替 RC 床版供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を行い、耐疲労性および接合面の開閉幅、たわみ振幅が耐疲労性に及ぼす検証を行い、各種取替床版の接合面のはく離に伴うひび割れの抑制効果の一助としたい。

第7章「取替 RC 床版の押抜きせん断耐荷力および疲労寿命推定法」では、第3章、第5章の結果から最大耐荷力を得て押抜きせん断耐荷力を検証する。第4章と第6章の結果から、松井らが提案する S-N 曲線式の傾きの逆数の絶対値 $m = 12.7^{1.25}$ を適用して得られた等価走行回数より耐疲労性の検証を行う。そして、阿部らが提案する RC 床版の S-N 曲線式との整合性を検証し、取替 RC 床版の寿命推定の一助とする。

第8章「地方自治体が管理する橋梁の床版取替工事における RC 床版の施工技術」では、地方自治体が管理する再劣化した RC 床版を補強するために詳細点検および調査を行い、健全性を評価し、再劣化した RC 床版の補強対策を述べる。また、プレキャスト RC 床版の製作から設置および間詰部のコンクリート打ち込みから完成するまでの施工フローを示す。さらに、取替 RC 床版設置前後で荷重載荷試験を行い、主桁の変形から取替 RC 床版の効果を示し、地方自治体が管理する橋梁の取替 RC 床版の設計法および施工技術の一助としたい。

第9章「総括」では、各章における結論を総括して、本論文の主な研究成果をまとめるとともに、将来への展望について論じている。

以上より、本研究で得られた知見は、道示の改訂による耐荷力不足、再劣化により補強対策が困難な道路橋 RC 床版において、従来は PC 構造としたプレキャスト床版を連結する取替床版が採用されていたが、本提案する取替床版は RC 構造のプレキャスト床版であり、架設地域の二次製品工場で製作し、輸送できることからコストの縮減と工期の短縮も可能となり、橋梁の構造に併せて長寿命化が図られるものと期待できる。これらの設計、製作、施工の一連について国土交通省が推奨する「i-Construction（建設現場の生産性革命）」におけるコンクリートの生産性の向上を図るための対策の一つであると考えられ、地方公共団体の取替床版の発展に大きく寄与するものである。

第1章参考文献

- 1.1) 国土交通省中部地方整備局：我が国の道路メンテナンスの現状，2022.8
- 1.2) 井上 雅夫，藤野 陽三：米国ミネソタ州での落橋事故の社会的影響，土木学会論文集 F，66 巻，PP.14-26，2010.
- 1.3) 国土交通省：地方自治体の長寿命化修繕計画に関する最近の動向，国土交通省道路局国道・防災課道路保全企画室，2010.
- 1.4) 千葉県県土整備部道路環境課：千葉県橋梁長寿命化修繕計画，2011.
- 1.5) 国土交通省：橋梁定期点検要領，2014. 2019.
- 1.6) 千葉県県土整備部道路環境課：千葉県橋梁長寿命化修繕計画，2016.
- 1.7) 阿部忠，岩崎正二，伊藤清志，大塚裕太：塩害・凍害の複合劣化を受けた RC 床版の劣化診断および上面増厚補強法による耐疲労性の評価，セメント・コンクリート論文集，No. 67，pp.537-544，2014.2
- 1.8) 平成 20 年度一般国道 106 号法師渡橋橋梁補修工事，
<http://www2.pref.iwate.jp/~hp6017/miyakonyuusatu/H20/houshiwataribashi-kyouryouh-osyuu/tokki.pdf>
- 1.9) 池上浩太郎，吉原直樹，井野耕志：プレキャスト PC 床版を用いた床版取替工事－複雑な線形・形状を有する「綱木川橋」への適用，IHI 技報 Vol.56 No.1,PP.56-64，2016.
- 1.10) 土木学会：道路橋床版の維持管理マニュアル，2012
- 1.17) 日本道路橋会：道路橋示方書・同解説 I，II，III，1773，1994
- 1.11) (財)高速道路調査会：上面増厚工法設計施工マニュアル，1995.
- 1.12) RC 構造物のポリマーセメントモルタル吹付け補修・補強工法協会：ポリマーセメントモルタル吹付け工法によるコンクリート構造物の補修補強設計・施工マニュアル(案)，2011.
- 1.13) 高野真希子，阿部忠，木田哲量，小森篤也，児玉孝喜，小川洋二：47 年供用した RC 床版の CFSS 下面補強および SFRC 上面増厚補強による耐疲労性，構造工学論文集，Vol. 57A，pp. 1286-1295.2011.
- 1.14) 水野浩，松井繁之，大西弘志，杉山俊幸，街道浩：床版取替用プレキャスト合成床版の合理化継手の疲労耐久性評価，構造工学論文集 Vol.58A，pp.1112-1122，2013.
- 1.15) 中村定明，三浦尚：RC ループ継手の力学挙動に関する基礎的研究，土木学会論文集 No.774/V-65，pp.17-26，2004.
- 1.16) 新名勉，林大輔，小林顕，輿石正己，国井優嗣：プレストレスジョイントで接合したプレキャスト PC 床版の耐疲労性評価，第 10 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp17-22，2018.

- 1.18) 国土交通省大臣官房技術調査課：i-Construction ～建設現場の生産性革命～，
i-Construction 委員会，2016
- 1.19) 日本橋梁建設協会：鋼橋伸縮装置設計の手引き，～道示平成 29 年 11 月版対応～
～（改訂第 4 版）～，2019.5
- 1.20) 日本道路ジョイント協会：伸縮装置の設計ガイドライン，2019.4
- 1.21) 土木学会：鋼構造シリーズ「道路橋床版の維持管理マニュアル 2020」pp.25-26，
2020.10
- 1.22) 表真也，吉松秀和，中山良直，松井繁之，林川俊郎：床版取替へ用プレキャスト
ト床版の合理化継手の開発，構造工学論文集，Vol.60A，pp.1169-1177，2014.3
- 1.23) 阿部忠，伊藤清志，児玉孝喜，小堀規行，深川克彦：接着剤塗布型橋面コンク
リート舗装法における耐疲労性の評価に関する実験研究，構造工学論文集，
Vol.66A，pp.650-661，2020.3
- 1.24) 前田幸雄，松井繁之，田中敏幸：鉄筋コンクリート床版に関する 2,3 の考察，
昭和 46 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集，1971.
- 1.25) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，2007.
- 1.26) (社)土木学会性能照査設計分科会：道路橋床版の性能照査 型設計，道路橋床
版の設計の合理化と耐久性の向上，pp. 65-93，2004.
- 1.27) 阿部忠，木田哲量，高野真希子，川井 豊：道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐
荷力および耐疲労性の評価，土木学会論文集 A1，pp.39-54，2011.1
- 1.28) 阿部忠，木田哲量，水口和彦，川井 豊：輪荷重走行疲労実験における車輪寸
法が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響および評価法，構造工学論文集，Vol.57A，
pp. 1305-1315，2011.3
- 1.29) 阿部忠，木田哲量，徐銘謙，澤野利章：道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷
力評価式に関する研究，構造工学論文集，Vol. 53A，pp. 199-207，2007.
- 1.30) 白石隆義，溶接構造物の疲労強度，溶接学会誌，第 42 巻，第 3 号，pp.73-81，1973
- 1.31) Hilsdorf, H.K. and Kesler ,C.E.: Fatigue Strength of Concrete under Varying Flexural
Stress,ACI Journal, Oct., pp.1059-1075, 1966.
- 1.32) 小梁川雅，米谷裕：変動曲げ疲労荷重下における舗装用コンクリートの累積疲
勞に関する研究，土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集第 5 部，
pp.150-151，1994
- 1.33) 小梁川雅，野田悦郎，伊藤正秀：供用履歴を受けたコンクリート舗装の疲労特
性に関する研究，土木学会舗装工学論文集 第 9 巻 2004 年 12 月，pp149-156

第2章 道路橋および取替床版の現状

2.1 はじめに

近年、我が国の道路橋の維持管理においては、2009年以降、予防保全型維持管理計画へと政策転化され、地方自治体では「道路橋長寿命化修繕計画」^{2.1)}を立案し、毎年計画書に基づいて維持管理が進められており、損傷が健全性の判定区分Ⅳ^{2.2)}について緊急対応の必要な道路橋については修繕が実施され、長寿命化が図られている。しかし、道路橋長寿命化修繕計画に基づいた維持管理が進められてから既に10年以上が経過している^{2.3)}。よって、既に補修補強された部材についても再劣化による損傷が発生している。また、道路橋示方書・同解説^{2.4)}(以下、道示とする)においても1994年以前の橋梁の設計荷重は20tf(198kN)で1等橋、2等橋に分けられていた^{2.5)}。しかし、1994年改定道示^{2.6)}以降の設計荷重は25tf(245kN)へと増大され、B活荷重、A活荷重と改訂された。設計荷重の改訂によって重要路線や緊急路線は補強対策が講じられたが、一般道路においては現状のまま使用されている。

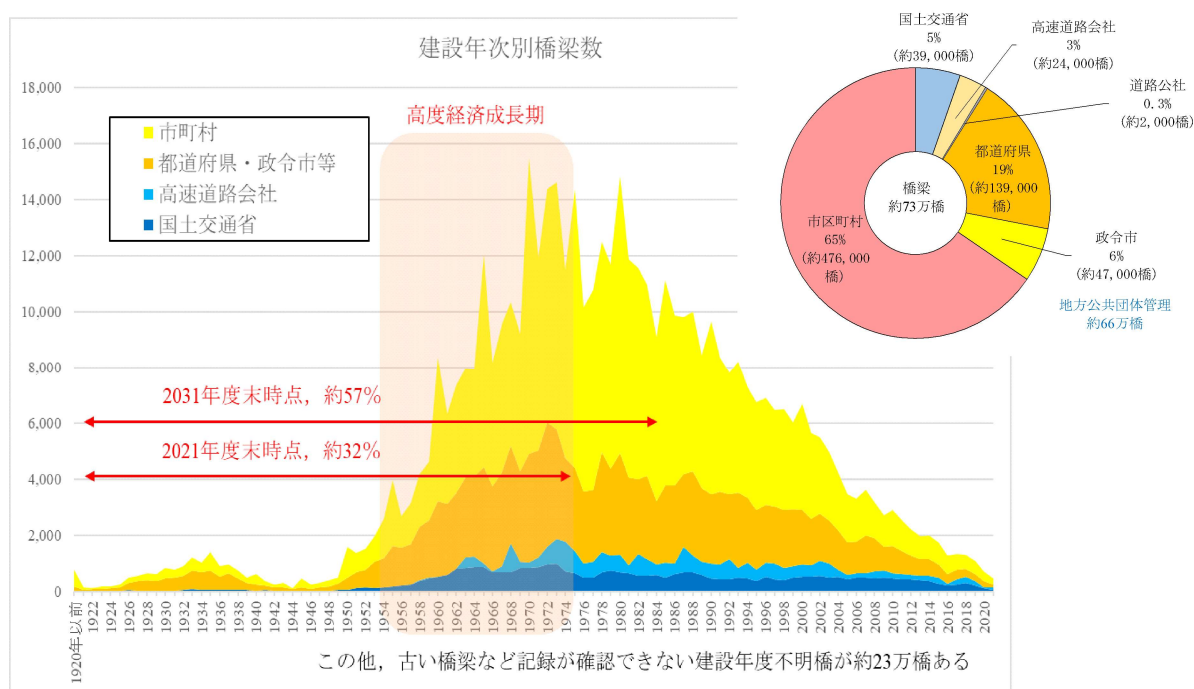
道路橋部材の中で最も損傷が著しい部材は道路橋床版である。特に、積雪寒冷地域のコンクリート系床版は、融雪剤の散布による塩害と凍結・融解による凍害の影響で、大規模な修繕が実施されているものの再劣化による床版取り替え工事も進められている^{2.7)}。取替床版においては交通量の多い、少ないに関係なくPC構造のプレキャスト床版^{2.8), 2.9), 2.10)}を並列され、特殊継手部を有する間詰部が設けられ、設置後、間詰部に超速硬コンクリートを打ち込んで一体化している。PC構造のプレキャスト床版の製作においてもプレストレス作業が可能な大規模な製作工場が必要となり、地方自治体の近隣での製作も困難であると同時に遠距離の場合は輸送コストも高価になる。よって、地方自治体が管理する橋梁においてB活荷重、さらにはA活荷重での設計をし、これをその地域のコンクリート二次製品製作工場での製作を可能とするRC構造としたプレキャスト床版を特殊な鉄筋を用いた継手構造とする取替RC床版を提案するものである。

そこで第2章では、橋梁の現状を述べるとともに、道路橋の部材の中で最も損傷が著しいRC床版の損傷状況、取替床版の現状についても述べる。また、国土交通省が示すi-Construction(建設現場の生産性革命)^{2.11)}のトップランナー施策の全体最適の導入として、プレキャスト製品や合理化機械継手などの工場製作化が進められている中、本研究で提案する取替RC床版がi-Construction施策に寄与できる合理化機械継手を用いたプレキャストRC床版として合理化施工が可能な施工方法について論じる。

2.2 橋梁の現状および予防保全型維持管理計画

2.2.1 日本の道路橋の現状

現在、供用されている橋梁の多くは、高度経済成長期に多く建設されている^{2.12)}。ここで、2022年現在の橋梁数を図－2.1(1)に示す^{2.12)}。橋長2.0m以上の橋梁は約73万橋^{2.13)}である。道路管理者別に分類すると図－2.1(2)に示すように、国土交通省が約5%、高速道路会社約3%、都道府県が約19%、政令市が約9%、市町村道が約65%である。よって、地方公共団体が管理する橋梁は全体の90%である。次に、建設後50年が経過する橋梁数は2021年の調査では32%、10年後の2031年では約57%へと増大することになる。



(1) 建設年代別橋梁数

(2) 管理者別橋梁数

図－2.1 建設年度別施設数^{2.12)}、^{2.13)}

従来は損傷が顕在化した時に架け替えも含めた大規模な修繕が事後的な維持管理としてなされていた。しかし、老朽化する橋梁の増大に伴い、損傷が軽微な段階で、計画的に維持管理する予防保全型維持管理へと政策が転換され、道路橋長寿命化修繕計画が始まった。これによって、緊急対応の必要な橋梁の修繕が実施された。その後、2011年から市町村が道路橋長寿命化修繕計画が始まった。2014年には橋長2.0m以上の橋梁全てが対象となり、2014年度及び2015年度点検で健全性または予防保全の観点から措置（補修・補強対策）を講ずることが望ましい状態（判定区分Ⅰ・Ⅱ）と診断された橋梁のうち、修繕等の措置を講じないまま、5年後の2019年度及び2020年度点検において、早期又は緊急に措置を講ずべき状態（判定区分Ⅲ・Ⅳ）へ遷移

した橋梁の割合は全道路管理者合計で 4 % である。建設後経過年数に比例して、判定区分Ⅰ・Ⅱから判定区分Ⅲ・Ⅳに遷移した割合が高くなっているとの報告である。

一方、近年、高度経済成長期に建設された橋梁において立地環境の厳しい場所などに建設された道路橋においては老朽化や損傷が著しく、地方公共団体が管理する橋梁では、1等橋から2等橋へと車両の重量を軽減（交通車両の重量制限や片側交互規制）するなどの通行規制が年々増加している^{2.14)}。地方公共団体管理橋梁の通行規制等の推移は、橋梁点検が開始された2007年以降および2009年から制定された「道路橋長寿命化修繕計画策定事業」により、老朽化した橋梁の増大に伴って、増加している。増加の要因の1つに、地方公共団体の修繕費用が膨大となる橋梁や1994年改定の道示による設計活荷重の増大により、B活荷重車両の通行が困難な橋梁においては交通規制がとられて、軽微な修繕が実施されている。今後、車両規制を減少させるためにも、コスト縮減効果が図れる補修・補強技術の開発が重要であると考える。

2.2.2 日本の道路橋の課題

(1) 建設業者数の減少

建設業者数の減少や建設業就業者数の減少など、建設産業における労働力不足が深刻な問題となっている。ここで、建設業就業者の高齢化の進行状況を図-2.2に示す^{2.15)}。

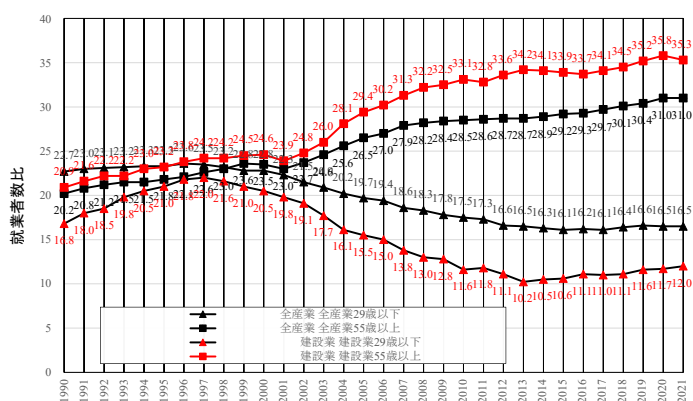


図-2.2 建設業就業者の高齢化の進行^{2.15)}

建設業者数は、2022年度は約47万業者で、1999年のピーク時から約23%の減少している。その後年々減少している。また、建設業就業者の55歳以上の割合が35.3%であり、高齢化が顕著である。併せて29歳以下の若者の就業者数も建設業においては12.0%であり、全産業の16.5%と比較しても若者の人材不足が顕著となっている。

(2) 建設業者数の減少に伴う解決策

2025年には、団塊の世代が75歳以上の後期高齢者になり、建設産業における労働力不足はより深刻な問題になることがわかっている。このような背景を受けて、建設業における人手不足を、あらゆる方法を駆使し具体的に解決していかなければならない。とくに、コンクリート工事における型枠工・鉄筋工の不足に対する施策は急務であり、合理化施工を見据えた補修・補強対策工法の開発は重要な課題である。

国土交通省^{2.11)}では、「ICTの全面的な活用（ICT土工）」等の施策を建設現場に導入することによって、建設生産システム全体の生産性向上を図り、もって魅力ある建設現場を目指す取り組みである **i-Construction** が進められている。これは建設業において、調査・測量から設計・施工・維持管理までのあらゆるプロセスで、ICTの活用をはじめとした様々な分野の産学官が連携して、IoT、人工知能（AI）などの革新的な技術の導入を進めることで、生産性が高く魅力的な新しい建設現場を創出することを目的とした新たな取り組みである。とくに、ボックスカルバートの補強技術や施工においても **i-Construction** を取り入れた材料・補強技術の開発が急務となっている。よって、本提案する取替 RC 床版においても **i-Construction** を取り入れた製作・施工法を提案する。

2.3 道路橋床版の損傷および予防保全型維持管理計画

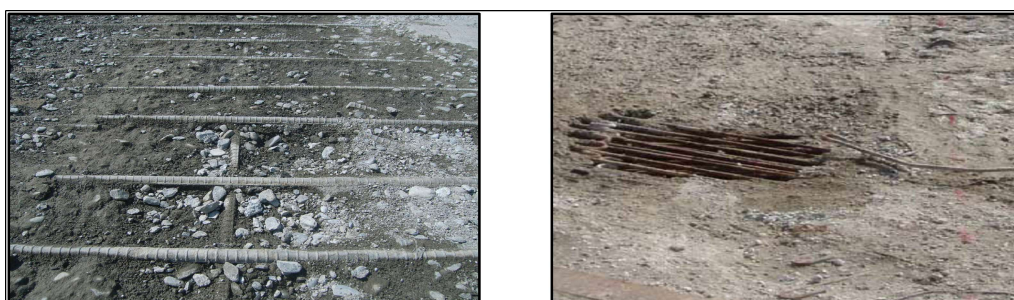
2.3.1 道路橋床版の損傷

RC 床版の損傷事例を写真－2.1 に示す。

写真－2.1(1), 1)は積雪寒冷地域の RC 床版であり、地域の基幹となる国道に建設された道路橋 RC 床版である。この地域は冬期は凍結されることから融雪剤や凍結防止剤の散布による塩害の影響で鉄筋には錆びが発生していた。写真に示す鉄筋は交通の影響により、錆びの発生は見られない。また、冬期においては凍結・融解の影響によりコンクリート上面は土砂化している。この橋梁は供用開始後 33 年で撤去され、その後 PC 構造のプレキャスト床版で取替工事が行われた。写真－2.1(1), 2)も同様に積雪寒冷地域の RC 床版であり、冬期間は雪に覆われることから、融雪剤の散布は少ない。しかし、周辺は酸性の強い温泉地帯であり、河川には温泉水が流出し、そのため鉄筋の腐食は著しい。コンクリートは土砂化が著しく陥没している。この橋梁はコンクリートの打ち換え補強が施された。

次に、写真－2.1(2)は、中部地方の交通量の多い国道に建設された橋梁であり、既に RC 床版上面はコンクリート補修、下面には炭素繊維連続シート（CFS）が格子状に接着補強され、上下からの補修、補強が施された床版である。冬期は凍害の影響を受けることから凍結防止剤の散布が行われ、鉄筋に錆びの発生も見られる。RC 床版内部コンクリートが土砂化により脆弱化して上面には陥没（写真－2.1(2), 1)）下

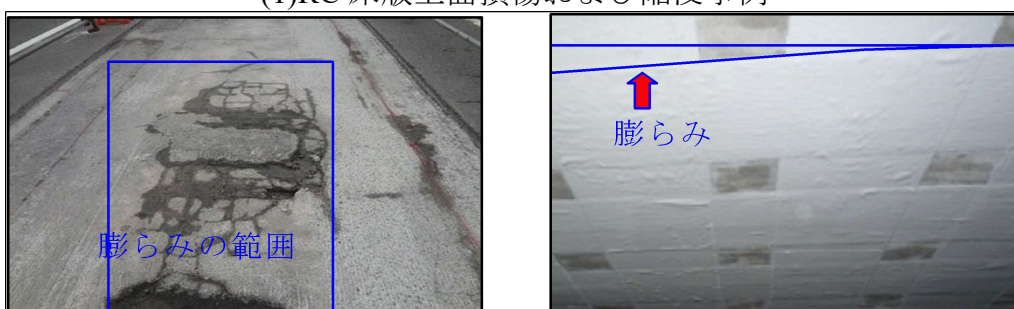
面の CFS には膨らみも見られる (写真－ 2.1(2), 2))。この補強対策としては、コンクリートによる部分打ち換えと下面には CFS を格子状に接着補強された。



1)凍害による土砂化

2)土砂化と陥没

(1)RC 床版上面損傷および陥没事例



1)RC 床版上面損傷

2)CFS 補強の変状

(2)上面補修と CFS 接着補強法の陥没事例



1)部分的な陥没²⁻¹⁶⁾

2)抜け落ち

(3)鋼板接着補強法の抜け落ち事例

写真－ 2.1 RC 床版の損傷事例

また、写真－ 2.1(3)は、下面に鋼板接着補強された RC 床版であり、RC 床版上面には陥没が見られ (写真－ 2.1(3), 1))、その後の走行で抜け落ちした (写真－ 2.1(3), 2))。鋼板の錆びおよび接着ボルトの錆びにより抜け落ちしたものである。鋼板接着補強した RC 床版は鋼板表面に錆びが発生するが、内部の損傷状況が点検・診断が出来ないことから、点検には注意する必要がある。この床版は部分打ち換え補強された。

2.3.2 予防保全型維持管理計画

(1) 予防保全型維持管理の流れ

2007年に国土交通省では橋梁点検要領(案)^{2.17)}が発行され、これに基づいて橋梁点検が実施され、2009年に都道府県庁および政令都市を対象に道路橋長寿命化修繕計画事業がスタートし、15m以上の橋梁を対象とした道路橋長寿命化修繕計画が立てられ、これに基づいて修繕が実施され、緊急対応の必要な橋梁の修繕が開始された。その後、2011年から市町村を対象とした道路橋長寿命化修繕計画事業がスタートした。2014、2019年には橋梁点検要領が改定^{2.2)}され、2.0m以上の橋梁全てが近接目視による点検が5年ごとに行われ、道路橋長寿命化修繕計画が立案され、さらに2019年にも橋梁点検要領が改定され、現在に至っている。現在は道路橋長寿命化修繕計画に基づいて、低コストで平準化した予算のなかで安全・安心が確保できる維持管理手法である「予防保全型維持管理（道路橋長寿命化修繕計画）」が実施されている。ここで、予防保全型維持管理の流れを図-2.3に示す^{2.3)}。

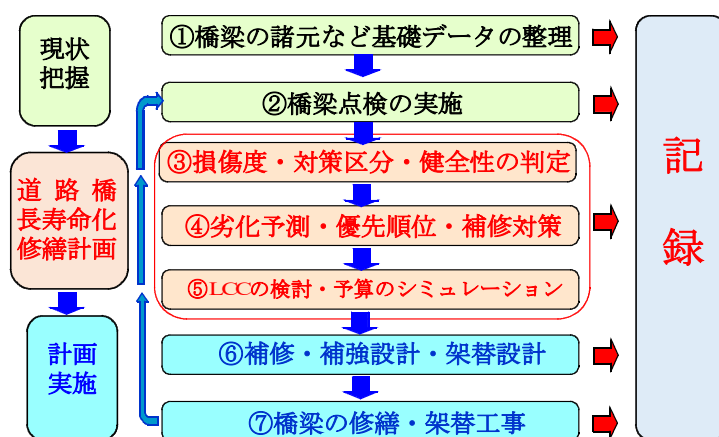


図-2.3 予防保全型維持管理の流れ^{2.18)}

予防保全型維持管理の流れは図-2.3に示すように、

(1)[現状把握]では、①橋梁調査を行い、橋梁の諸元などの基礎データを整理する。次に、②橋梁定期点検要領（国土交通省：橋梁点検要領（案）平成26年）^{2.2)}に基づいて5年ごとに橋梁点検を実施し、損傷状況を判定し、記録する。

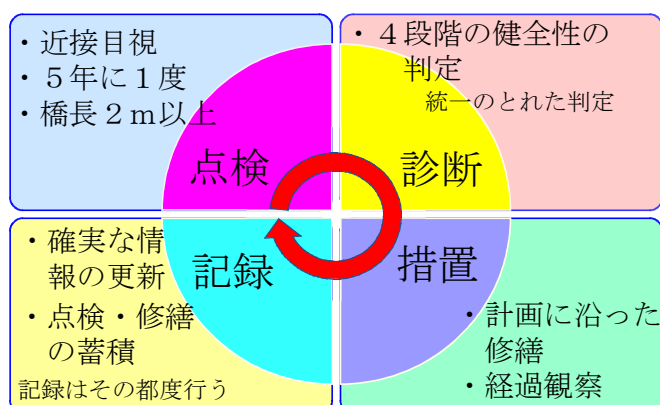
(2)[道路橋長寿命化修繕計画]では、②橋梁の定期点検の結果から部位ごとに損傷の状況を把握し、損傷度から修繕するための③対策区分および健全度の評価の判定区分を行う。そして、④判定された橋梁および部位の健全度から劣化予測し、補強対策を検討する。その後、⑤維持管理期間（建設後50年または100年）を定め、その期間の修繕費用を算定し、予算の平準化を行う。なお、修繕費用については、対策工法の選定、寿命予測し、ライフサイクルコスト（LCC）を算定する。次に、道路橋長寿命化修繕計画が立案された後、

(3)[計画実施]では、⑥補修・補強設計を実施する。長寿命化修繕計画では建設した当時の機能を回復することが基本であるが、橋梁の設計基準に対応する補強設計が重要となる。設計後、⑦修繕、補修・補強が行われる。

(4)[記録]は、橋梁の諸元、点検結果から修繕・掛け替え工事まで、全てを記録す。

(2) メンテナンスサイクル

橋梁のメンテナンスサイクルを図－ 2.4 に示す。



図－ 2.4 メンテナンスサイクル^{2.18)}

橋梁のメンテナンスサイクル^{2.2)}は図－ 2.4 に示すように「点検」では、2014年の橋梁定期点検要領および公共団体独自の点検要領に基づいて5年ごとに橋梁点検を実施する。その後、「診断」では部位ごとに損傷度・対策区分・健全性を判定し、修繕をするための4段階の健全性を判定する。そして、「措置」では、修繕計画に沿った修繕を実施し、修繕後は経過観察が必要となる。最後の「記録」では「点検」、「診断」、「措置」で全ての記録を行うが、ここでは確実な情報の更新など当該橋梁が利用されている期間はこれを保存するものである。

以上のように、道路橋においては5年ごとに橋梁点検を実施し、損傷度から健全性の判定区分を行い、優先順位を決めて計画的な維持管理手法が構築され、コストの縮減効果が得られると同時に橋梁の長寿命化が可能となる。

2.4 道路橋示方書・同解説の変遷

2.4.1 道路橋示方書の変遷

(1) 道路橋の設計荷重の変遷

道路橋に関する設計基準は、1926年(大正15年)6月に「道路構造に関する規則案(内務省土木局)」^{2.19)}が定められ、1994年(平成6年)改定^{2.6)}、現在の「道示」^{2.20)}に至るまで多くの改訂が繰り返され、この規定に基づいて設計が行われてきた。

道路橋の設計基準は、交通量の増加に伴い、1956年5月(昭和31年)の「鋼道路橋設計示方書」^{2.21)}から基準の明確化などRC床版の設計基準の本格的な整備が行わ

れた。とくに、車両の大型化により設計自動車荷重が 20tf (196kN) へと引き上げられ、1993 年 (平成 5 年) 11 月の政府からの規制緩和により、大型自動車総重量が引き上げられたことを受け、1994 年 (平成 6 年) 2 月の道示^{2.6)} では、設計活荷重が 20tf (196kN) から 25tf (245kN) へと引き上げられ現在に至っている。

補強法について、1994 年以前の道示の規定に基づいて設計された道路橋においては、1994 年改定以降の道示に対応するために、荷重差における主げたの割り増し補強が必要になると考える。

(2) 道路橋RC床版の設計基準の変遷

道路橋の RC 床版に関する道示の変遷による基準を表- 2.1 に示す。

表- 2.1 道路橋示方書の変遷による RC 床版の基準

	橋の等級	自動車荷重 T荷重	曲げモーメント式(車両進行方向直角 連続版)		鉄筋の許容応力(SD30)	最小床版厚*1	配筋筋量
	等級		主鉄筋方向	配筋筋方向			
昭和31年5月(1956.5) 鋼道路橋設計示方書	1等橋	T-20、P=8.0tf	$M_{L(i+j)} = \frac{0.4 \cdot P(L-1)}{L+0.4(1+i)}$ $i=20(50+L)$	規定なし	規定なし	有効厚さ11cm	主筋断面の25%以上
	2等橋	T-14、P=5.6tf					
昭和39年6月(1964.6) 鋼道路橋設計示方書	同上	同上	同上	同上	1.800 kgf/cm ² (SSD49)	同上	同上
昭和48年2月(1973.2) 道路橋示方書・同解説	1等橋	T-20、P=8.0tf (9.6tf)	$M_{L(i+j)}=0.8(0.12L+0.07)P$	$M_{L(i+j)}=0.8(0.10L+0.04)P$	1.400 kgf/cm ²	$d_0=3L+11 \geq 16\text{cm}$ (1等橋)	左欄の配筋方向モーメント式により計算
	2等橋	T-14、P=5.6tf					
昭和55年2月(1980.2) 道路橋示方書・同解説 平成2年2月(1990.2) 道路橋示方書・同解説	1等橋	同上	$M_{L(i+j)}=0.8(0.12L+0.07)P$	$M_{L(i+j)}=0.8(0.10L+0.04)P$	許容応力度1400 kgf/cm ² に対して、200 kgf/cm ² 程度余裕を持たせる	$d_0=3L+11 \geq 16\text{cm}$ $d=k_1 \cdot k_2 \cdot d_0$ k_1 ; 交通量の係数 k_2 ; 付加曲げモーメントの係数	同上
	2等橋	同上					
平成6年2月(1994.2) 道路橋示方書・同解説	B活荷重 A活荷重	T-25、P=10.0tf	$M_{L(i+j)}=0.8(0.12L+0.07)P \cdot k_a$ $L \leq 2.5$ の場合 $k_a=1.0$ $2.5 < L \leq 4.0$ の場合 $k_a=1.0+(L-2.5)/12^{*2}$	同上	同上	同上	同上
平成8年12月(1996.12) 道路橋示方書・同解説 平成14年3月(2002.3)	B活荷重 A活荷重	P=100kN	同上	同上	同上	同上	同上
平成29年11月(2017.11) 道路橋示方書・同解説	B活荷重 A活荷重	同上	同上	同上	許容引張応力度120N/mm ²	同上	同上

注*1: d; 床版厚さ(cm) (少数第1位を四捨五入する。ただしd₀を下まわらないこと)。d₀; 道路示方書に規定される床版の最小全厚(cm) (少数第2位を四捨五入し、少数第1位まで求める)。k₁; 大型車両の計画交通量による割増係数、k₂; 床版を支持する桁の剛性が著しく異なるため生じる付加曲げモーメントの係数で k₂=0.9√M/M₀ ≥ 1.00として与えられる。*2: 割増係数 (床版支間方向が車両進行方向に直角な場合の支間方向割増係数)。

2.4.2 道路橋示方書の変遷による床版厚

設計基準の変遷に伴う荷重、設計活荷重曲げモーメント、最小床版厚について、床版支間 2.0m、大型車両の 1 日 1 方向あたりの計画交通量 2,000 台以上とした場合についての比較を表- 2.2 に示す。

例えば、床版支間 2.0m の RC 床版の設計では 1964 年改定の鋼道路橋設計示方書

に基づいて設計すると 1994 年改定の道示と比較すると主鉄筋の曲げモーメント比は 0.46, 最小床版厚は 15cm であり, 6cm の不足となる。また, 1973 年の道路橋示方書・同解説では主鉄筋・配力筋の曲げモーメント比は 0.96, 床版厚は 17cm で 4cm の不足となる。1980 年改定道示では主鉄筋・配力筋の曲げモーメント比は 1.00, 床版厚は 21cm で, 現行道示の B 活荷重となった 1994 年改定以降の道示と同等である。したがって, 1980 年以前に設計された RC 床版は 4cm ~ 6cm の厚さが不足する結果となり, 補強においては断面厚を厚くし, 鉄筋量も補強する必要があると考える。

以上のように, コンクリート橋および RC 床版の補強対策においては, 道路橋長寿命化修繕計画において, どの時代の基準を対象として補強設計を行うのかが重要である。一般的に重要路線や交通量の多い道路橋においては, 1994 年改定の道示に規定する B 活荷重を考慮した補強設計がなされている。本来の維持修繕においても元の耐荷力を維持する修繕工事である。よって, 道路橋長寿命化修繕計画における補強設計は橋梁定期点検要領に示す部位を点検し, その後, 健全性の判定区分を決めて補強対策を実施することに加え, 道示に規定する B 活荷重を満足するための補強対策が必要になると考える。

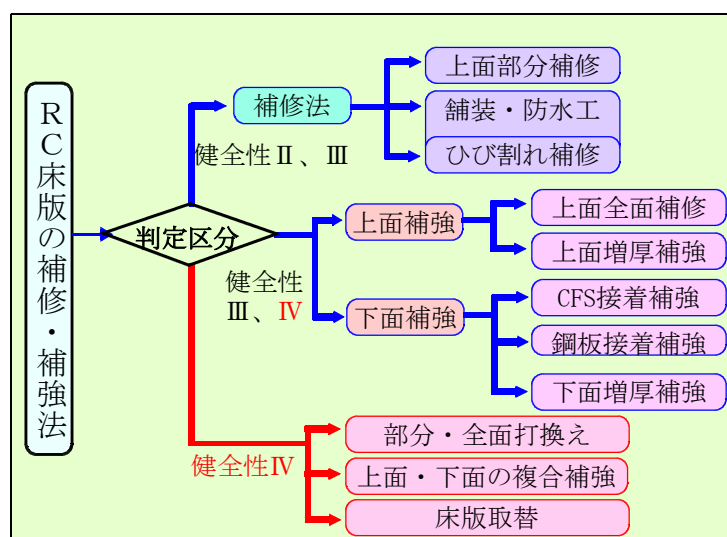
表 2.2 設計荷重の変遷に伴う荷重・曲げモーメント・床版厚
(支間 2.0m, 交通量 2,000 台以上)

設計基準	活荷重 (P)	B活荷重比	曲げモーメント式				最小床版厚	床版厚差
			主鉄筋	B活荷重比	配力筋	B活荷重比		
昭和31年5月 (1956.5) 鋼道路橋設計示方書	8.0 (tf)	0.80	1.14 (tf・m)	0.46	—	—	15 (cm)	6 (cm)
昭和39年6月 (1964.6) 鋼道路橋設計示方書	8.0 (tf)	0.80	1.14 (tf・m)	0.46	—	—	15 (cm)	6 (cm)
昭和48年2月 (1973.2) 道路橋示方書・同解説	8.0 (tf)	0.80	2.38 (tf・m)	0.96	1.84 (tf・m)	0.96	17 (cm)	4 (cm)
昭和55年2月 (1980.2) 道路橋示方書・同解説	8.0 (tf)	0.80	2.38 (tf・m)	0.96	1.84 (tf・m)	0.96	21 (cm)	0 (cm)
平成6年2月 (1994.2) 道路橋示方書・同解説	10.0 (tf)	1.00	2.48 (tf・m)	1.00	1.92 (tf・m)	1.00	21 (cm)	—
平成8年12月 (1996.12) 道路橋示方書・同解説	100.0 (kN)	1.00	24.80 (kN・m)	1.00	19.20 (kN・m)	1.00	210 (mm)	—
平成14年3月 (2002.3) 道路橋示方書・同解説	100.0 (kN)	1.00	24.80 (kN・m)	1.00	19.20 (kN・m)	1.00	210 (mm)	—
平成24年3月 (2012.3) 道路橋示方書・同解説	100.0 (kN)	1.00	24.80 (kN・m)	1.00	19.20 (kN・m)	1.00	210 (mm)	—

2.5 道路橋床版の補強対策

2.5.1 健全性の判定区分における補修・補強対策

道路橋長寿命化修繕計画では, 健全性の判定区分に応じて補修・補強対策が講じられている。健全性の判定区分における補修・補強対策について図 2.5 に示す。



図－2.5 健全性の判定区分における補修・補強対策^{2.17)}

(1) 健全性の判定区分Ⅱ（予防保全段階）^{2.2)}

構造物の機能に支障は生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態であり、ほとんどが軽微な損傷であることから補修の対象となる。例えば、橋面防水工やひび割れ注入工、断面修復工、RC床版上面の部分補修が行われている。

(2) 健全性の判定区分Ⅲ（早期措置段階）^{2.2)}

構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態であり、補強対策が必要となる。補強対策には、交通規制が必要となる上面補強と交通規制を必要としない下面からの補強に区分される。

上面からの補強法については、上面損傷や設計基準の変遷に伴う耐荷力性能の向上を図るためのコンクリートで上面を増厚する補強が検討される。一方、下面からの補強法については、2方向ひび割れの発生を抑制するために炭素繊維連続シートあるいはアラミドシートを用いた下面接着補強が検討される。また、鉄筋の露出やコンクリートのはく落などの下面損傷や耐荷力性能の向上を図るためには、引張補強筋を配置したセメントモルタル吹付けによる下面増厚補強が検討される。

(3) 健全性の判定区分Ⅳ（緊急措置段階）^{2.2)}

構造物の機能に支障が生じている、または生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態である。これらについては、基本的には上面補強および下面補強が検討されている。しかし、鉄筋の露出、かぶり不足、さらに設計厚が確保されていない床版に疲労によるひび割れと漏水・遊離石灰が発生した場合は、上面および

下面からの複合補強が必要となる。また、抜け落ち寸前の床版については、脆弱部を除去し、コンクリートの部分打ち換え補強も検討される。さらに、塩害・凍害の複合劣化を受け、上面損傷と下面に2方向ひび割れや漏水・遊離石灰の発生などが認められるRC床版はプレキャスト化した床版取替も検討される。また、既に判定区分ⅢのRC床版を、上面・下面からの増厚補強やCFSや鋼板により接着補強した床版が再劣化した場合は取替床版が必要となる。

以上のように、健全性の判定区分によりそれぞれの補修・補強対策が検討するとともに、設計基準の変遷過程に基づいて、補強設計を行う必要がある。

2.6 取替床版の現状およびPC床版構造

2.6.1 取替床版の現状

劣化したRC床版の取替床版の主な種類を図-2.6、図-2.7に示す。大きく分類するとRC床版、PC床版、鋼コンクリート合成床版、鋼床版、I型鋼格子床版となる。RC床版は図-2.6に示すように場所打ちRC床版がある。場所打ち床版は、老朽化したRC床版を撤去し、主げた上に型枠を設置して鉄筋を配置してコンクリートを打ち込む工法であり、新設橋梁の床版施工と同様である。この場所打ち床版は図-2.7(1)に示すよう長期間の通行止めが必要なことから、取替PC床版^{2.8), 2.9), 2.10)}が採用されている。また、取替RC床版については、現在、筆者らが開発を進めている。

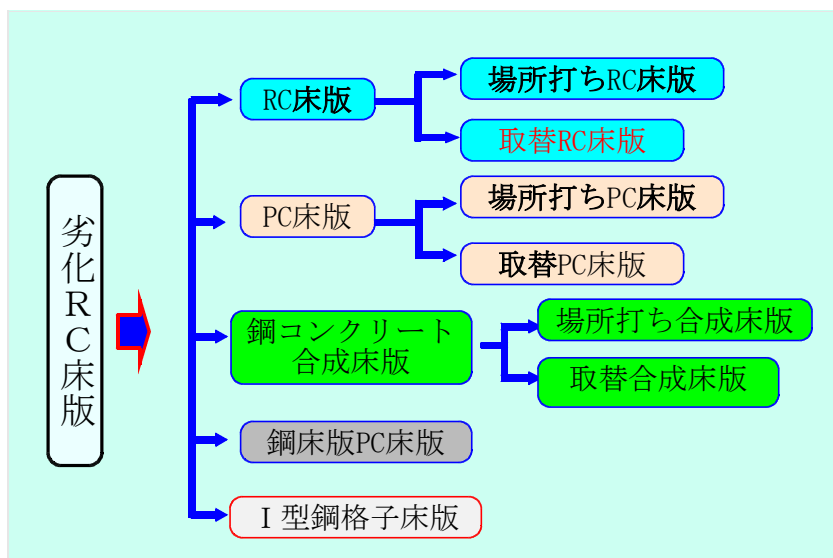
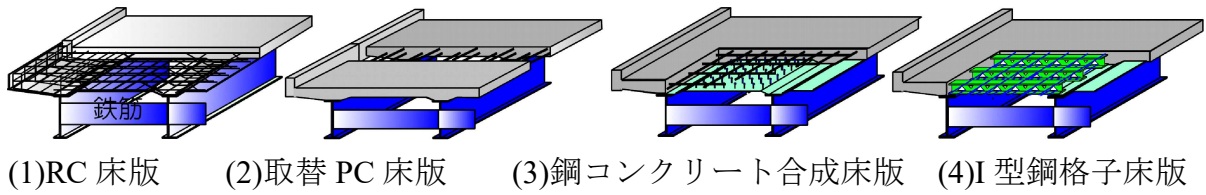


図-2.6 劣化したRC床版の取替床版の種類



図－ 2.7 取替床版の種類

PC 床版には、同様に場所打ち PC 床版と取替 PC 床版があり、この内、場所打ち床版は工事期間が長期にわたることから、近年は取替 PC 床版へと移行されている。取替 PC 床版は図－ 2.7(2)に示すように、PC 構造としたプレキャスト床版を工場で作製し、架設現場において橋桁上に設置し、これを各企業が開発した継手構造で一体化している。これによって工期の短縮が図られている。同様に鋼合成コンクリート床版においても場所打ち合成床版と取替合成床版がある。取替合成床版は図－ 2.7(3)に示すように鋼板を型枠として用い、スタッドを設け、鉄筋を配置してコンクリートを打ち込んで合成構造とした床版であり、現場施工であることから新設同様の工期が必要となる。RC 床版の取替えに鋼床版の検討されている。橋床版は軽量であるという特徴を生かして合理的な取替え工事が実現できる。モデル橋梁による試算の結果では、コンクリート床版を鋼床版化することで上部構造の重量を 50%程低減が可能である。鋼床版の開発成果について、実物大モデルを用いた疲労耐久性の確認試験、提案構造の有する疲労寿命の評価が評価されている。鋼床版の取替については比較的新しい構造であることから取替工事は行われていないと考えられる。

I 型鋼格子床版は図－ 2.7(4)に示すようにグレーチング床版があり、強度部材と型枠が一体としてプレファブ型の床版である。工場製作されたパネルを配置し、簡単な接続と付属品の取付で、コンクリートの打設が可能となる。施工においては支保工と型枠が不要となることから、工期の短縮が図れる床版である。

以上のように、劣化した RC 床版の取替床版は多種に渡っている。しかしながら、本研究においては、架設地域のコンクリート二次製品の工場で作製可能な RC 構造とした取替 RC 床版についての開発を行い、地方自治体が管理する道路橋床版の取替工事の一助としたい。

2.6.2 RC床版およびPC床版の設計厚

劣化した RC 床版の取替床版は図－ 2.7 に示すように多種に渡っている。本研究で開発する取替 RC 床版に最も近く、また、RC 床版の取替工事で最も採用され、プレキャスト PC 床版を設置する場合に発生する継手部の構造についても類似している。よって、ここでは、現状の RC 床版および PC 床版について述べる。

最小床版厚の設計^{2.20)}

1) RC 床版

RC 床版を B 活荷重で最小厚を設計する。RC 床版の最小厚は式(2.1)より算出する。1 日 1 方向の計画交通量は 2000 台以上とする。

$$d = k_1 \cdot k_2 \cdot d_0 = k_1 \cdot k_2 \cdot (30L + 110) \quad (2.1)$$

ここに、 d : 床版厚(mm), k_1 : 大型車両の交通量による係数, k_2 : 床版を支持する桁の剛性が著しく異なるために生じる付加曲げモーメント係数 (= 1.0)。 L : 設計支間(m)

2) PC 床版

PC 床版に、1 方向にのみ床版の支間の方向に平行にプレストレスを導入する場合の車道部分の最小全厚さ、RC 床版の支間の方向が車両進行方向に直角な場合 (式(2.1)) の 90 % であり、式(8.3)として与えられている (道示Ⅲ) ^{2.20)}。

$$d = 0.9 (k_1 \cdot k_2 \cdot d_0) = 0.9 \{k_1 \cdot k_2 \cdot (30L + 110)\} \quad (2.2)$$

RC 床版および PC 床版の床版全厚(mm)および重量 (kN/m²) を表-2.3 に示す。

B 活荷重対応で設計した場合の RC 床版厚は支間 2.0m の場合 210mm となり、1964 年、1973 年道示の床版厚と比較するとそれぞれ 60mm、40mm の増厚となり、死荷重の増大が懸念される。RC 床版は現場施工されることから、交通規制の影響を受ける。これに対して PC 構造とした取替床版は、プレキャスト版を工場で製作し、架設現場で並列にして、各種継手構造で一体化されることから、工期の短縮が図られる床版である。よって、工期短縮および地域の活性化を図るためには、

表- 2.3 床版全厚および重量

床版支間 (m)	RC床版			PC床版		
	床版厚 (mm)	単位重量 (kN/m ³)	重量 (kN/m ²)	床版厚 (mm)	単位重量 (kN/m ³)	重量 (kN/m ²)
2.0	210	24.5	5.1	190	24.5	4.7
2.5	230	24.5	5.6	210	24.5	5.1
3.0	250	24.5	6.1	230	24.5	5.6
3.5	270	24.5	6.6	240	24.5	5.9

地元企業でプレキャスト床版が製作でき、主筋方法および配力筋方向を RC 構造とした取替 RC 床版が必要となる。

2.6.3 取替PC床版の継手構造の一例

(1) 既往の取替床版

取替床版の多くは、軸直角方向に PC 鋼材を配置し、軸方向には鉄筋を配置する。これらの構造としたプレキャスト版を工場で製作して、架設現場で並列に並べて一体化し、その上に橋面防水工を施し、アスファルト舗装を舗装して完成となる。ここで、取替床版の接合方法の一例を図-2.8 に示す。

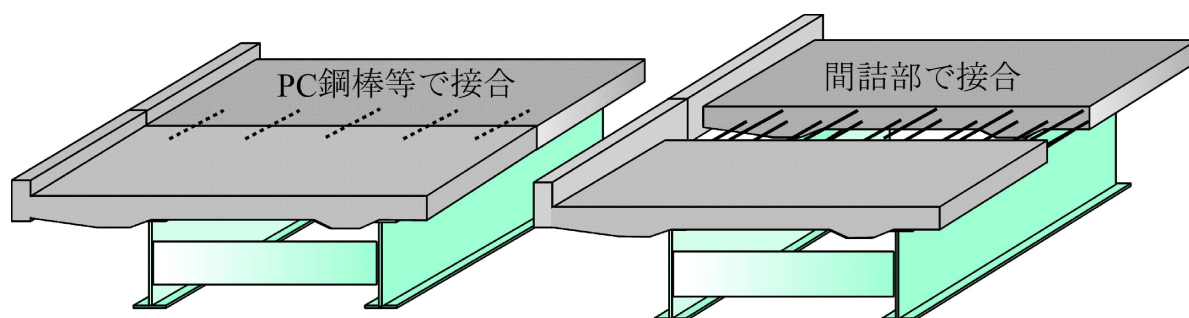


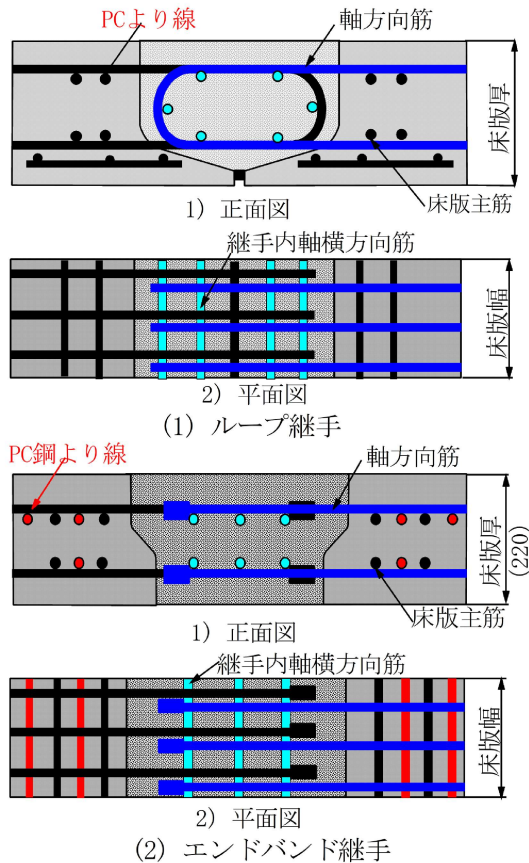
図- 2.8 取替 PC 床版の接合方法

図-2.8(1)に示すように、床版は主げた上に並列した後、各企業で開発された継手材料、例えば PC 鋼棒やボルトなどを用いて、締め付けして一体化する事例もある^{2.22)}。図-2.8(2)に示すように主げた上にプレキャスト版を並列し、隣接したプレキャスト版端部から継手長を考慮した軸方向筋をラップさせ、型枠を設置して間詰部にコンクリートを打ち込み、一体化する方法がある^{2.8), 2.9), 2.10)}。また、取替床版には PC 構造や RC 構造、合成構造があり、コンクリート系材料も超高強度繊維補強コンクリート (UFC) 材 (圧縮強度 150N/mm^2 以上) から普通コンクリート (圧縮強度 40N/mm^2 以上) まで多種に渡っている。本章では、地方公共団体が管理する橋梁を対象に RC 構造とした取替 RC 床版について述べる。

(2) 取替PC床版の継手構造

取替床版はあらかじめ工場でプレキャスト版を製作し、架設現場で橋軸方向に並べて一体化する。この場合、継手構造は各開発会社が特徴ある。一般的にはプレキャスト版の主筋方向 (橋軸直角方向) は PC 構造とし、間詰部を RC 構造とする場合が多い。ここで、間詰部の継手構造の一例を図-2.9 に示す。

プレキャスト PC 床版を用いる場合の一般的な継手構造として図-2.9(1)に示すループ継手が用いられている^{2.10)}。ループ継手の曲げ半径の制約 (2.5ϕ 以上) や塩害対策としての必要かぶりから床版厚を薄くすることができず、既設床版に比べて床版厚が増加する。これに対して図-2.9(2)に示すエンドバンド継手^{2.23)}を用いた場合の床版厚は 220mm となり、死荷重の増加は約 5% であった。また、プレキャスト合成床版の合理化を図るために、間詰め幅を大幅に縮小できる床版継手構造 (以降、合理化継手と称する)^{2.8)}もある。



図－ 2.9 間詰部の継手構造の一例^{2.9)}

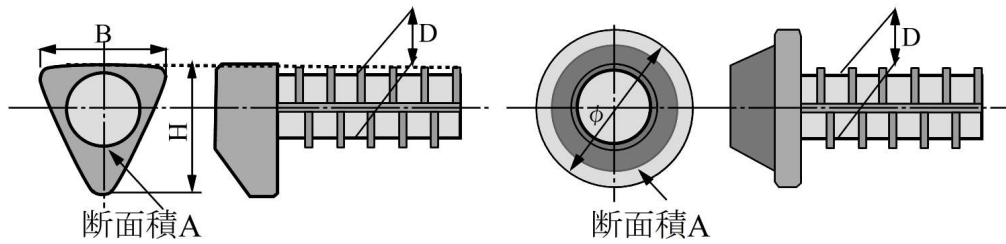
この合理化継手は、先端をねじ切りし、ナットを設置した配力鉄筋を交互に配置し、間詰め部のコンクリートおよび鉄筋やアンカープレートによるせん断抵抗によって応力伝達を図り、間詰め幅を 200mm としたものである。これらは、継手構造の一例であるが、プレキャスト版は基本的な構造は PC 構造である。

(3) 本研究で提案する継手構造

1) 継手部の構造

取替 PC 床版における間詰部を設けた継手構造には図－ 2.9 に示すようにループ状に加工した鉄筋の内側橋軸方向に鉄筋を配置した構造や鉄筋端部に突起を設けたエンドバンド継手、さらには鉄筋端部にナットを設けた継手構造など、各企業が開発した特殊な継手構造である。本提案する取替 RC 床版の突起においては、主筋となる橋軸方向に間詰部を設けた場合の突起形状および配力筋となる橋軸直角方向に間詰部を設けた場合の突起形状を図－ 2.10、写真－ 2.2 に示す。

主筋となる突起の形状は図－ 2.10(1)、写真－ 2.2(1)に示すように三角形とする。配置においては三角形の底辺をかぶり側とする。また、配力筋の突起は円形とし、図－ 2.10(2)、写真－ 2.2(2)にしめす。配置は主筋の内側となる。



(1)主筋の突起形状

(2)配力筋の突起形状

図－ 2.10 取替 RC 床版継手用突起構造



(1)主筋の突起形状

(2)配力筋の突起形状

写真－ 2.2 取替 RC 床版継手用突起構造

表－ 2.4 突起の寸法および突起断面積

鉄筋配置	異形棒鋼	B	H	φ	断面積 (mm ²) A
主筋	D13	28	25		418
	D16	34	30		430, 614
配力筋	D13			30	707
	D16			37	807, 1,075

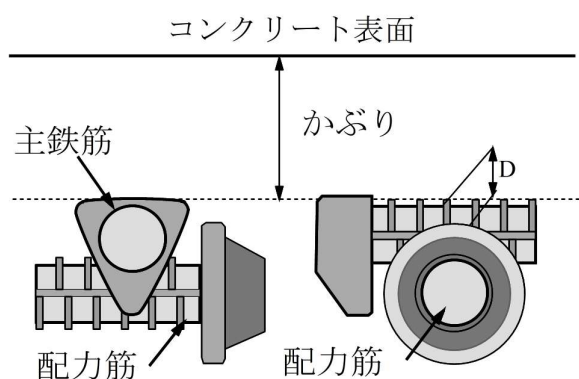
2) 突起の寸法および断面積

使用鉄筋は RC 床版に使用されている SD345 の D13, D16 とした。ここで、突起の寸法および突起断面積を表－ 2.4 に示す。寸法は図－ 2.10 に示す各部位の記号で説明する。まず、D13 を用いた場合の主筋の幅 B は 28mm, H が 25mm であり、突起の断面積は 418mm² である。同様 D16mm の場合の幅 B は 34mm, 高さ H は 30mm であり、断面積は 430mm², 614mm² の 2 タイプとなる。次に、配力筋の突起形状は円形であり D13 の場合は φ30mm, 断面積は 707mm² である。D16 は、φ37mm, 断面積は 870mm², 1075mm² である。なお、突起断面積については、支圧効果を考慮しない継手構造とした場合の断面積であり、必要に応じて自由に製作することが可能である。また、通常の RC 床版においては D13, D16 が一般的に使用されているが設

計において必要となった場合は D19, D22 の製作も可能である。

3) 継手部のかぶり

本提案する取替 RC 床版用の継手部の突起形状および寸法は図－ 2.10, 写真－ 2.2 および表－ 2.4 に示したが、鉄筋の組み立てにおけるかぶり状況を図－ 2.11 に示す。配置においては図－ 2.13 に示すように、主筋の三角形の底面を上側に配置し、その下に配力筋が配置される。主筋の底辺を上にする事で図－ 2.11 に示すように異形鉄筋上からのかぶりが確保され、道示に規定するかぶりは通常の異形棒鋼と同様の配置となる。次に、配力筋の突起は円形であり主筋の内側に配置される。よって、それぞれの突起は鉄筋配置に悪影響を及ぼさない配置となる。また、鉄筋の最小間隔 40mm の確保も問題なく配置される。これらのことから間詰部を橋軸直角方向に設けた場合の継手部は配力筋方向のみとなり突起は円形のみとなる。また、主筋を用いる場合は、幅員が広い場合や、片側通行の交通規制が必要な場合に橋軸直角方向および橋軸方向の継手構造が必要な場合に用いる継手構造である。



図－ 2.11 本提案する継手構造とかぶりの関係

2.7 本提案する取替RC床版の施工法案の概略

(1) 取替RC床版の概略

従来の取替床版においては橋軸直角方向に幅員全体に渡るプレキャスト PC 床版を製作し、橋軸方向、主げた方向に並列して、間詰部コンクリートにコンクリートを打ち込む施工法である。本提案する取替 RC 床版においては、間詰部を主げた方向に設けて、コンクリートを打ち込みする施工法である。この場合の継手部の突起形状は図－ 2.10(2)に示す円形突起を設ける。

一方、地方公共団体が管理する老朽化した道路橋 RC 床版の取替工事において、一車線毎に施工する対策が必要となる。そこで、本提案する取替 RC 床版の施工においては幅員方向および主げた方向に間詰部を設けた施工技術について述べる。ここで、2 方向に間詰部を設けた取替 RC 床版の施工概略を図－ 2.12 に示す。地方公共団体の管理する橋梁においては、用地の制約から仮橋の設置は困難であることが

多いことから交通規制の基で取替床版工事は片側車線を1期工事，1期工事終了後，2期工事を行う方法とする。

1) 1期工事

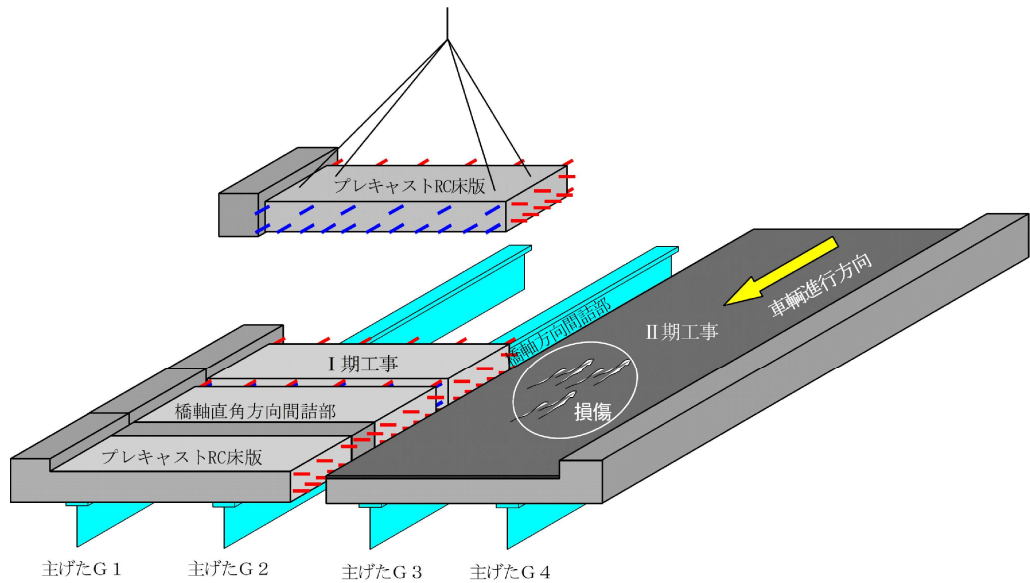
例えば，4主桁構造のRC床版においては，左側車線を軸方向の床版中央を切断し，左側から順次，老朽化した床版を撤去し，同時に本提案する工場で作成したプレキャスト化した床版を順次輸送し，図－2.12(1)に示すように，主げた上の橋軸方向に取替RC床版を並列に並べる。プレキャストRC床版を順次設置する。この場合の橋軸方向のプレキャスト床版間には継手を有する間詰部が発生する。橋軸方向主げた上にプレキャストRC床版を設置後，超速硬コンクリートを打ち込み平滑に仕上げる。片側を施工後は，橋面防水工を施し，アスファルト舗装を舗装し，片側車線を完成する。次に，図－2.12(2)に示すように，右側車線の老朽化したRC床版を順次撤去し，左側車線同様に順次，パネルを橋軸方向に並列に設置し，間詰部に早強コンクリートを打ち込み表面仕上げをする。1期工事終了後は交通開放する。

2) 2期工事

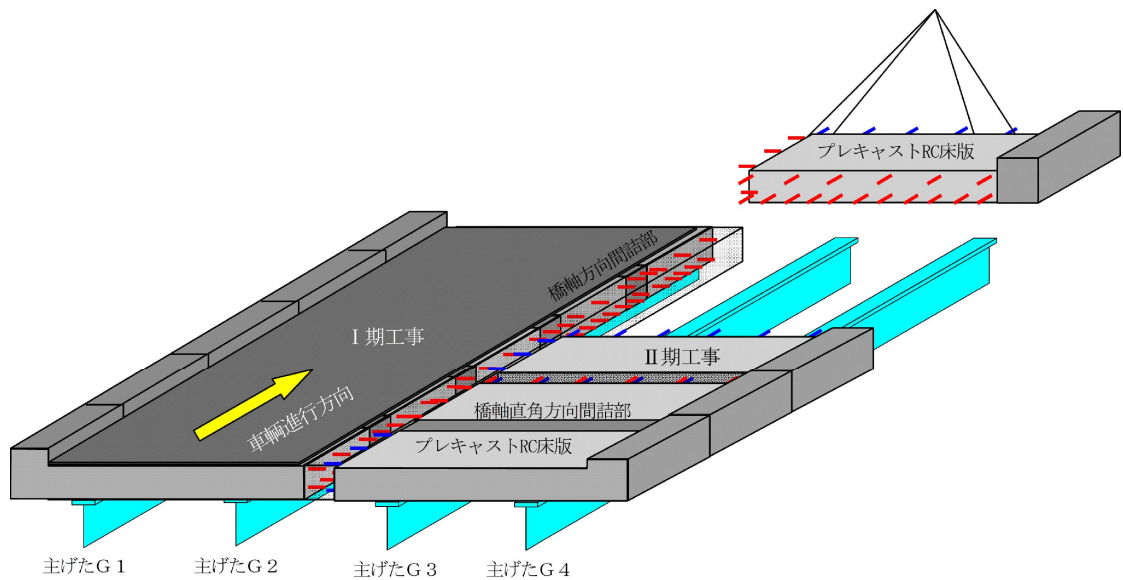
2期工事は，舗装，老朽化したRC床版を撤去し，1期工事と同様にプレキャストRC床版を並列に配置する。設置終了後は幅員中央の橋軸方向に間詰部が生じる。橋軸直角方向の間詰部には円形突起を設ける。軸方向の間詰部は主筋が交差することから図－2.10(1)に示す三角形の突起を設ける。最後に，橋軸方向の間詰部に軸方向筋を配置し，早強コンクリートを打ち込み，表面仕上げを行い，養生する。間詰部コンクリートの強度が道示に規定するコンクリートの設計基準強度 24N/mm^2 確保された後，並列しながら一体化するものである。橋軸方向に並列することで間詰部が生じることから，付着力を確保するための継手構造が必要となる。実施工については第8章で述べることとする。

以上より，取替RC床版の実用性を評価するための耐荷力性能（第3章，第5章）および耐疲労性（第4章，第6章）の評価においては，実施工を考慮し，橋軸直角方向および橋軸直方向と橋軸方向に図－2.10に示す継手構造を設けた間詰部を考慮した供試体を用いる必要がある。

本研究で提案する取替RC床版工法は，第8章で示す施工実績をもとにNETISを取得しており，在来工法である場所打ちRC床版と比較において現場の施工日数を93.88%短縮することが評価されている。



(1)1期工事

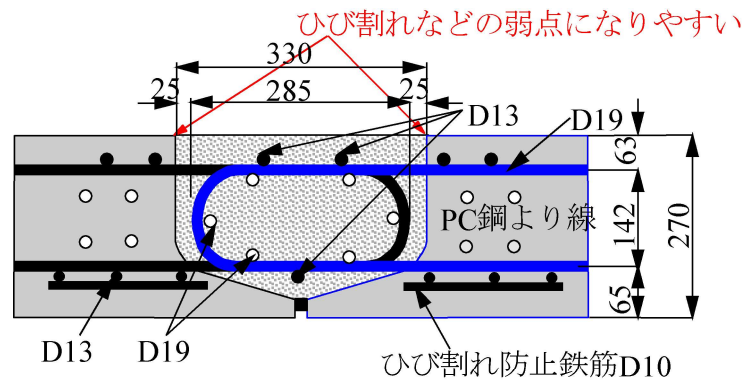


(2)2期工事

図－ 2.12 取替 RC 床版の施工概要

(2) 間詰部を有する取替床版およびPC橋の漏水の現状

土木学会鋼構造シリーズ「道路橋床版の維持管理マニュアル 2020」^{2.24)}においては、プレキャスト PC 床版の間詰部コンクリート打ち継ぎ部は、一般に RC 構造となるため他の部位に比べて弱点になりやすくひび割れの損傷が懸念されていると記載されている^{2.24)}。ここで、打ち継ぎ部のひび割れ（想定）を図－ 2.13 に示す。プレキャスト床版と間詰部の界面のはく離に伴う、ひび割れ発生について、阿部ら^{2.25)}は、道示に規定する床版寸法の 3/5 モデルしたプレキャスト床版間に幅 300mm の間詰部を設け、継手構造をループ型にして製作し、コンクリートを打ち込みした取替 RC 床版 2 体を用いて、



図－ 2.13 打ち継ぎ部のひび割れ（想定）



(1) 床版打ち継ぎ目の漏水

(2) PC床版間詰部の漏水

写真－ 2.3 間詰部および界面の損傷事例

荷重 100kN で 20,000 回走行の荷重輪荷重走行疲労実験を行い、接合部のはく離である開閉幅について検証している。これによると、輪荷重の走行によりプレキャスト床版と間詰部の接合部が疲労により間詰部側面の左右の平均ひび割れ幅 0.31mm となる報告をしている。

以上のように、疲労実験においても間詰部界面がはく離に伴うひび割れが発生するものの耐疲労性の評価においては問題ない結果が得られている。また、図－ 2.13 に示す間詰部については、既に実橋で採用されている。しかし、長寿命化を考慮するならば漏水による劣化対策が必要であると考えられる。

次に、実橋の打ち継ぎ部のひび割れ状況を写真－ 2.3 に示す。写真－ 2.3(1)は歩道部のプレキャスト床版の打ち継ぎ部のはく離およびひび割れ状況である。また、写真－ 2.3(2)はプレストレストコンクリート T 桁橋（以下、PCT 桁橋とする）の主げた間の間詰部のはく離に伴うひび割れが発生し、漏水・遊離石灰が発生した状況である。いずれの PC 床版においても横締め PC ケーブルが配置されている。

以上のように、プレキャスト床版および PCT 桁橋の間詰部界面が疲労の進行に伴い、はく離に伴うひび割れが発生している。よって、プレキャスト版の界面およびコンクリートの打ち継ぎ部のはく離に伴うひび割れを抑制する対策が重要な課題であると考えられる。

プレキャスト床版を本提案する継手構造（図－ 2.10，図－ 2.11）を有する間詰部界面においても，疲労の進行による間詰部界面のはく離に伴うひび割れの発生を抑制する工法の提案も必要であり，これを取り入れることでより長寿命化が図られるものと考えられる。

2.8 まとめ

第 2 章では，橋梁および取替床版の現状について述べ，本研究のテーマである取替 RC 床版の必要性および特長である継手構造，施工手順の概略について，以下の知見が得られた。

- (1) 我が国の橋梁の現状においては 73 万橋が供用されており，現状においては 5 年ごとに点検し，維持管理されている。しかし，既に補強した RC 床版においては，再劣化による損傷が発生し，取替床版が検討されている。
- (2) 道路橋の課題は，建設業者数の減少や建設業就業者数の減少など，建設産業における労働力不足が深刻な問題となっている。この解決策の 1 つに，国土交通省が推奨する「ICT の全面的な活用（ICT 土工）」等の施策であり，本研究テーマにおける取替 RC 床版も建設生産システム全体の生産性向上が図れる取替 RC 床版および施工法においては i-Construction を取り入れた技術であると考えられる。
- (3) 既存の取替床版は PC 構造が主体であり，本研究の提案する RC 構造の検討が行われていないのが現状である。地方の経済活性化においてもその地域の二次製品を有効活用し，その地域の施工会社が施工できる取替 RC 床版が必要となる。
- (4) 取替 RC 床版の継手構造においては主鉄筋には三角形の突起，配力筋には円形の特殊鉄筋継手を用いることから，最小継手長を有する間詰部を設けた構造を用いて取替 RC 床版の概略を述べた。また，施工において工事規制を考慮した i-Construction を取り入れた施工手順について提案する。
- (5) 現在提案されている取替床版は床版を橋軸方向に並列して，各企業が提案する継手構造を用いて，一体化されているものの，疲労が進行することによって，間詰部界面がはく離し，漏水が発生している。これは間詰部を有する PC 橋においても漏水が発生していることから，界面の付着力を高め，漏水を防止する技術の必要性を述べる。

第2章参考文献

- 2.1) 国土交通省：地方自治体の長寿命化修繕計画に関する最近の動向，国土交通省道路局国道・防災課道路保全企画室，2010.
- 2.2) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，2014，2019
- 2.3) 千葉県県土整備部道路環境課：千葉県橋梁長寿命化修繕計画，2016.11
- 2.4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I，II，1973
- 2.5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I，II，1980
- 2.6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I，II，1994
- 2.7) 平成 20 年度一般国道 106 号法師渡橋橋梁補修工事，
<http://www2.pref.iwate.jp/~hp6017/miyakonyuusatu/H20/houshiwataribashi-kyouryouh-osyuu/tokki.pdf>
- 2.8) 水野浩，松井繁之，大西弘志，杉山俊幸，街道浩：床版取替用プレキャスト合成床版の合理化継手の疲労耐久性評価，構造工学論文集 Vol.58A，pp.1112-1122，2013.3
- 2.9) 角本周，山本敏彦，城戸靖彦，三浦泰博：九州自動車道・向佐野橋における RC 床版取替へ工事，第七回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.201-206，2012.6
- 2.10) 中村定明，三浦尚：RC ループ継手の力学挙動に関する基礎的研究，土木学会論文集 No.774/V-65，pp.17-26，2004.
- 2.11) 国土交通省大臣官房技術調査課：i-Construction ～建設現場の生産性革命～，i-Construction 委員会，2016.4
- 2.12) 国土交通省中部地方整備局：我が国の道路メンテナンスの現状，2022.8
- 2.13) 国土交通省：道路メンテナンス年報，2022.8
- 2.14) 国土交通省道路局：老朽化の現状・老朽化対策の課題，2019
- 2.15) 国土交通省：国土交通白書 2020
- 2.16) 長野県建設部道路管理課：神戸橋の損傷と対応について，第 29 回日本道路会議，2011.11
- 2.17) 国土交通省道路局：道路橋点検要領(案)，2007
- 2.18) 阿部忠：道路橋床版の健全性評価と長寿命化対策，建設図書，2021.9
- 2.19) 内務省：道路構造に関する規則案，1926
- 2.20) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I，II，2017
- 2.21) 日本道路協会：鋼道路橋設計示方書，1956
- 2.22) 新名勉，林大輔，小林顕，輿石正己，国井優嗣：プレストレスジョイントで接合したプレキャスト PC 床版の耐疲労性評価，第 10 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp17-22，2018.

- 2.23) 吉松秀和, 松井繁之, 大澤浩二, 中山良直, 水野浩, 表真也: 床版取替え用プレキャスト PC 床版の合理化継手の開発, 構造工学論文集, Vol.60A, pp. 1159-1168, 2014.
- 2.24) 土木学会: 鋼構造シリーズ「道路橋床版の維持管理マニュアル 2020」 pp.25-26, 2020.10
- 2.25) 阿部忠, 伊藤清志, 児玉孝喜, 小塚規行, 深川克彦: 接着剤塗布型橋面コンクリート舗装法における耐疲労性の評価に関する実験研究, 構造工学論文集, Vol.66A, pp.650-661, 2020.3

第3章 取替RC床版の耐荷力の検証および破壊メカニズム

3.1 はじめに

積雪寒冷地域である東北地方の道路橋 RC 床版は融雪剤や凍結防止剤の散布による塩害と凍害の複合劣化により、コンクリート上面が土砂化し、建設後 30 数年で撤去した事例もある^{3.1)}。また、道路橋 RC 床版の設計基準は、1994 年の道路橋示方書・同解説（以下、道示とする）^{3.2)} では自動車荷重が 198kN から 245kN へと増大され、床版の設計荷重においても B 活荷重へと改定された。老朽化が著しい RC 床版や、現行道示に規定する床版厚と差異が生じ耐荷力性能が劣る床版は、道示の基準を満足する取替床版の開発が急務となっていることから、各企業で開発が進められている。取替床版およびその施工法について各研究機関や各企業では、それぞれのプレキャスト化した取替床版が提案され、実用化されている^{3.3), 3.4), 3.5), 3.6)}が、これらは取替 PC 床版が主である。一方、筆者らは、交通量の少ない老朽化した RC 床版を対象とした取替床版にはプレキャスト化した取替 RC 床版が提案し、実用化されている^{3.7), 3.8), 3.9), 3.10), 3.11)}。これらの取替床版については輪荷重走行疲労実験を行い、耐疲労性の評価がなされているものの、耐荷力性能である押抜きせん断耐荷力の検証するための実験および理論押抜きせん断耐荷力との整合性に関する研究は行われていないのが現状である。

そこで第 3 章では、取替 RC 床版の継手構造について主筋および配力筋突起形状の引張試験を行い、引張強度を明らかにして継手長の検証を行う。次に、取替 RC 床版の最大耐荷力および破壊メカニズムを検証するために、1994 年改定以降の道示に基づいて設計し、その 3/5 モデルとした取替 RC 床版に 2 タイプの間詰部を設けた取替 RC 床版を用いた。実験では輪荷重走行疲労試験機を用いて、1 走行毎に荷重を増加する輪荷重走行荷重実験を行い、取替 RC 床版の最大耐荷力および破壊メカニズムから、実用性を評価する。

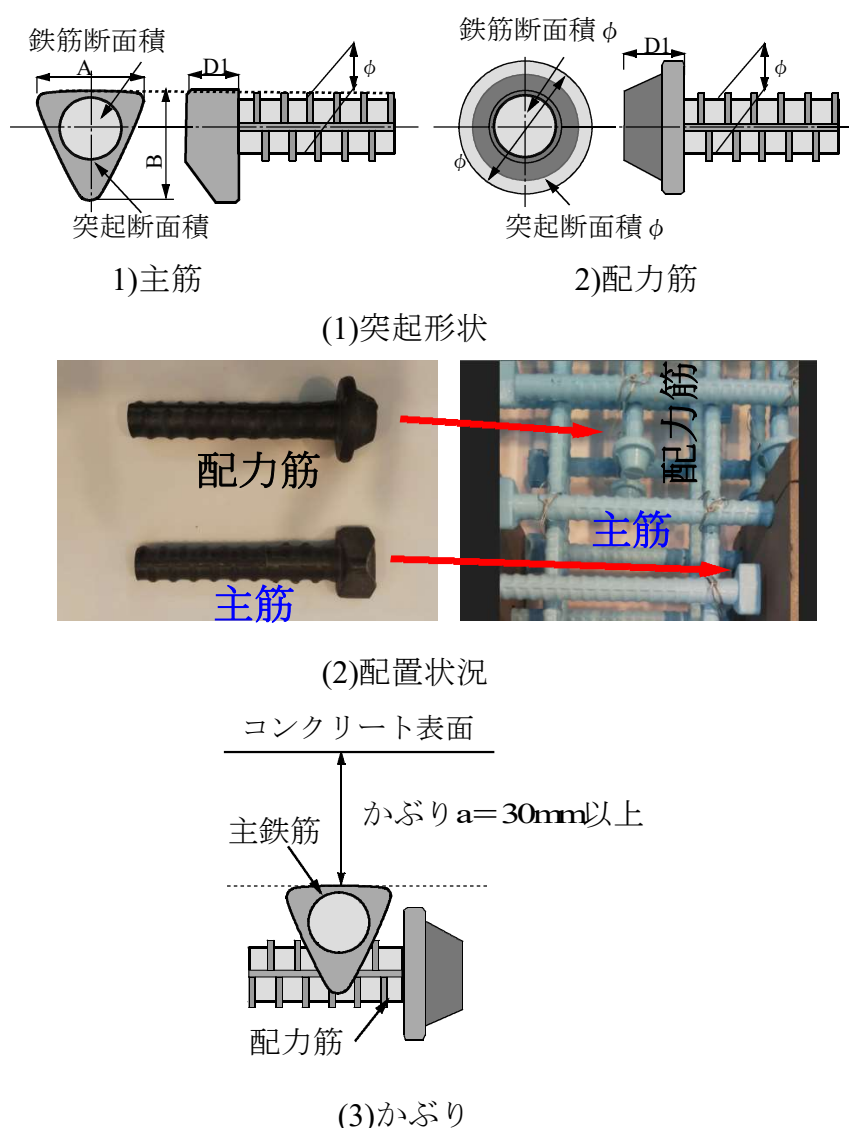
3.2 取替RC床版の継手構造

3.2.1 取替RC床版の継手構造の概略

取替 RC 床版は、地方公共団体が管理する道路橋を対象とした床版であり、従来の取替 PC 床版工法と同様にプレキャスト版を工場で作製し、現地で橋軸方向に並列しながら一体化するものである。橋軸方向に並列することで間詰部が生じることから、付着力を確保するための継手構造が必要となる。そこで、本論文で用いる突起形状および配置状況を以下に示す。

3.2.2 取替RC床版に用いる継手部の突起形状および配置状況

取替 RC 床版に用いる鉄筋端部の突起形状および間詰部構造を図－ 3.1 に示す。



図－ 3.1 継手部鉄筋の突起形状および配置状況

主鉄筋の突起形状は、図－ 3.1(1), 1)に示すように、D13 に対して辺長 A、高さ B とする三角形とする。また、配力筋の突起形状は図－ 3.1(1), 2)に示すように、円形の突起形状とする。次に、鉄筋の配置方法は図－ 3.1(2)に示すように、主筋の三角形底面側をかぶり側とし、頂点側を内側に配置する。主鉄筋の内側に円形の突起を設けた配力筋を配置することで突起部のかぶりは図－ 3.1(3)に示すように従来の鉄筋配置と同様に確保できる配置となる。

3.3 引き抜き試験による付着応力度

3.3.1 引き抜き試験法および供試体^{3.12)}

(1) 引き抜き試験概要

本実験に用いる取替 RC 床版の軸直角方向である主筋および軸方向筋である配力筋の継手部の突起形状を用いた場合の機械式定着継手とコンクリートの付着性能を検証するために引き抜き試験を実施し、荷重と変位の関係から検証する。

(2) 供試体

引き抜き試験用供試体は、取替 RC 床版におけるプレキャスト RC 床版間の間詰部を考慮した。施工においてはプレキャスト RC 床版を並列した後、間詰部を超速硬セメントを用いた超速硬コンクリートが打ち込まれている。本引き抜き試験においては、コンクリートには普通ポルトランドセメントを用い、要求性能は材齢 28 日で 40N/mm^2 以上を発現するコンクリートとする。ここで、本実験に用いたコンクリートの配合条件を表-3.1 に示す。供試体は、打設後 14 日間蒸気養生を行い、材齢 14 日と材齢 28 日の圧縮強度を確認し、材齢 14 日で 40N/mm^2 以上の圧縮強度を確認している。

表-3.1 引き抜き試験用コンクリートの配合条件

スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)					減水剤	AE剤
			セメント	水	細骨材	粗骨材			
						15mm	20mm		
12	35.0	43.2	443	155	732	484	484	3.1	3.99

引き抜き試験に用いる鉄筋には D13, D16 の 2 種類を用いた。ここで、鉄筋の種類、継手部の諸元および材料特性値を表-3.2 に示す。

表-3.2 鉄筋の種類、継手部の諸元および材料特性値

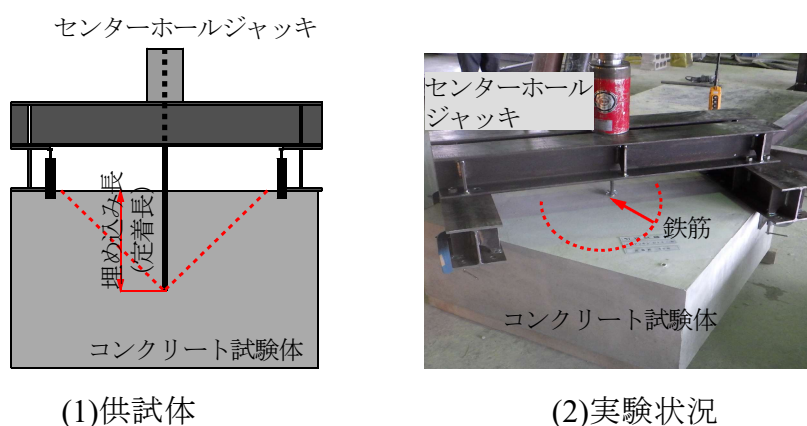
鉄筋 (SD345)	公称断面 (mm^2)	突起形状	基本定着長 (mm)	伸び -18%	降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)
D13	126.7	直	330	117mm	366	539	200
		三角 (図-3.1(1)、1))	200				
		円形 (図-3.1(1)、2))	200				
D16	198.6	直	400		402	555	200
		三角 (図-3.1(1)、1))	240				
		円形 (図-3.1(1)、2))	240				

次に、定着長は、コンクリート強度から決定される表-3.2 に示す基本定着長を 100%とし、それぞれ 75%の定着長を埋め込み、コンクリートを打ち込みして製作した。

(3) 試験方法

鉄筋定着部継手構造は図－ 3.1 に示すように、SD345 の鉄筋 D13 および D16 鉄筋端部を鍛造加工により主筋端部を三角形状、配力筋端部を円形の突起形状に加工した。また、突起を設けない鉄筋は通常の異形鉄筋であり、それぞれの継手長を表－ 3.2 に示した。

試験方法は、図－ 3.1 に示した鉄筋定着部構造を有した供試体を作成し、引き抜き試験を実施した。試験は図－ 3.2 に示すようにコンクリート供試体中央にそれぞれの定着長を埋め込みした。



図－ 3.2 供試体および実験状況

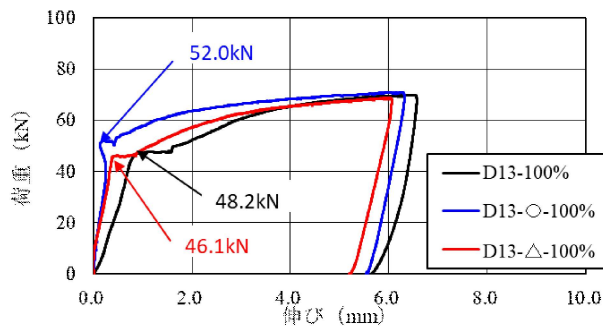
引き抜き試験は、埋め込んだ定着長端部から 45° 円錐形範囲を避けて、引き抜きジャッキ支持治具を設置し、引き抜きはセンターホールジャッキ 200kN を用いた。引抜き試験の範囲は、センターホールジャッキストロークの条件から 15mm~110mm の範囲とし、最大荷重の上限を設定せず、ストローク限界まで引き抜き試験を実施した。センターホールジャッキチャック頭部からコンクリート供試体埋め込み部までの伸びは材料特性値より 117mm 程度と予測されることから鉄筋が破断する直前で試験を終了する。

3.3.2 引き抜き試験の結果および考察

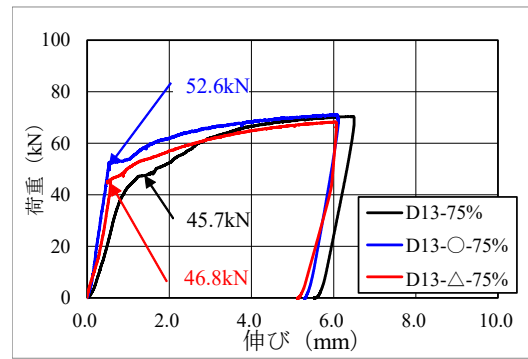
(1) 荷重と鉄筋の伸びの関係

1) D13

D13 の異形鉄筋の荷重と伸びの関係を図－ 3.3 に示す。図－ 3.3(1), 1)より、D13mm の異形鉄筋を 300mm 埋め込みした供試体 D13-100 %の弾性限度の最大値の荷重はそれぞれ 48.2kN、伸びは 0.88mm である。また、D13 に円形突起を設け、200mm 埋め込みした供試体 D13-○-100 %、三角形状の突起を設けて 200mm 埋め込みした供試体 D13-△-100 %はそれぞれ 52.0kN、46.1kN、伸びは 0.19mm、0.495mm である。

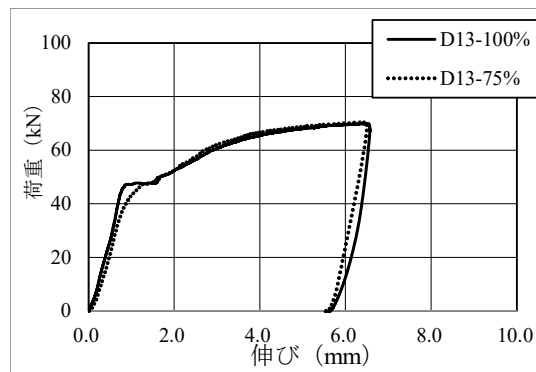


1)D13 を 100 %埋め込み

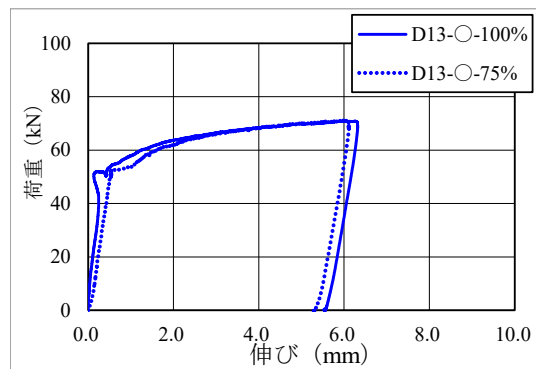


2)D13 を 75 %埋め込み

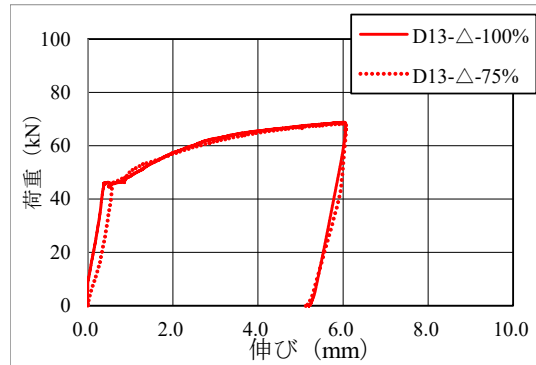
(1)埋め込み長 100%および 75%の荷重と伸びの関係



(2)D13-100%, D13-75%の鉄筋の荷重と伸びの関係

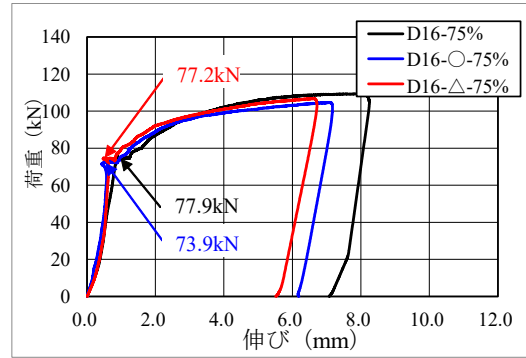
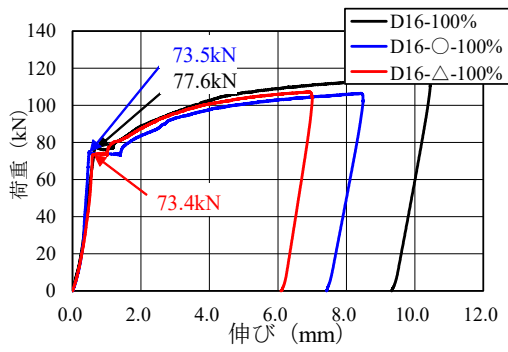


(3)D13-○-100%, D13-○-75%の鉄筋の荷重と伸びの関係



(4)D13-△-100%, D13-△-75%の鉄筋の荷重と伸びの関係

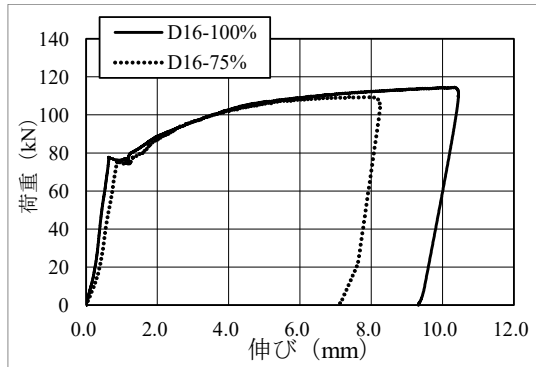
図－ 3.3 荷重と伸びの関係



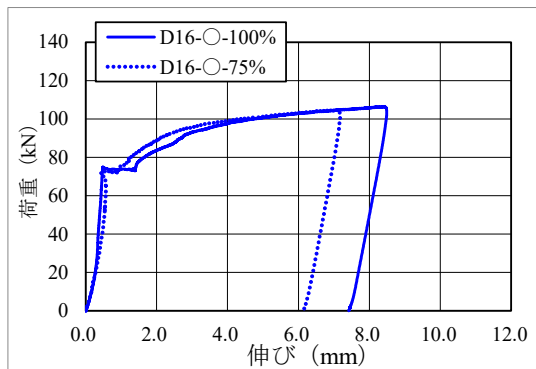
1)D16 を 100 %埋め込み

2)D16 を 75 %埋め込み

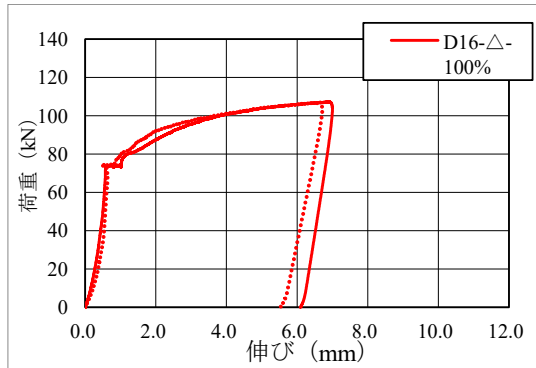
(1)埋め込み長 100%および 75%の荷重と伸びの関係



(2)D16-100%, D16-75%の鉄筋の荷重と伸びの関係

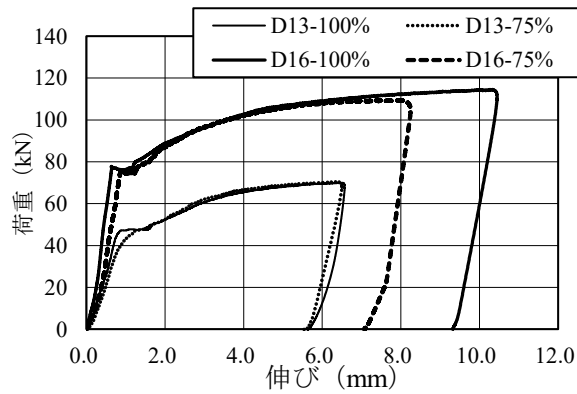


(3)D16-○-100%, D16-○-75%の鉄筋の荷重と伸びの関係

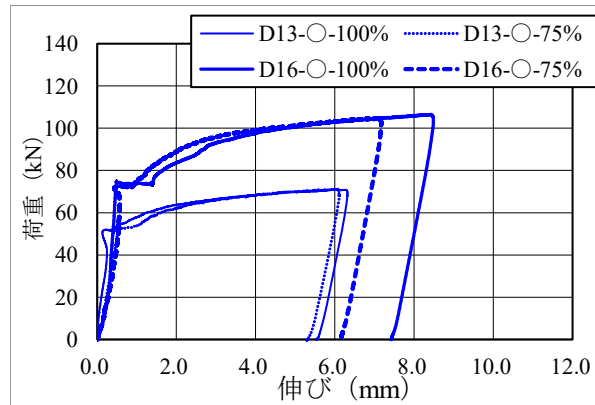


(4)D16-△-100%, D16-△-75%の鉄筋の荷重と伸びの関係

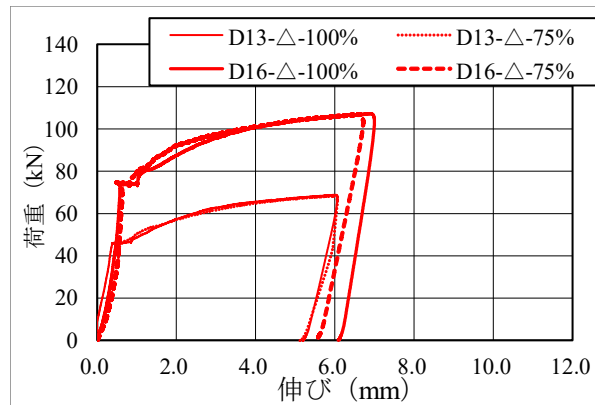
図－ 3.4 荷重と伸びの関係



(1) 異形鉄筋



(2) 円形突起



(3) 三角形突起

図－ 3.5 D13 および D16 の荷重と伸びの関係

図－ 3.3(2), 2)より D13mm の異形鉄筋を 300mm の 75 % の 225mm 埋め込みした供試体 D13-75 % の弾性限度の最大荷重はそれぞれ 45.7kN, 伸びは 1.16mm である。また, D13 に円形突起を設け, 200mm の 75 % の 150mm 埋め込みした供試体 D13-O-75 %, 三角形状の突起を設けて 150mm 埋め込みした供試体 D13-△-100 % はそれぞれ 52.6kN, 46.8kN, 伸びは 0.58mm, 0.54mm である。

次に, 異形鉄筋, 円形突起, 三角形突起を設けたそれぞれの荷重と伸びの関係を

図－ 3.4(2), (3), (4)に示す。異形鉄筋 300mm および 75 %の 225mm 埋め込みした供試体の伸びはともにほぼ同等な増加傾向を示している。同様に、円形突起および三角形突起を設けた供試体ともに同等な増加傾向を示し、大きな差異は見られない。

2) D16

D16 の異形鉄筋の荷重と伸びの関係を図－ 3.4 に示す。図－ 3.4(1), 1)より、D16mm の異形鉄筋を 400mm 埋め込みした供試体 D16-100 %の弾性限度の最大値の荷重は 77.6kN、伸びは 0.75mm である。また、D16 に円形突起を設け、240mm 埋め込みした供試体 D16-○-100 %、三角形の突起を設けて 240mm 埋め込みした供試体 D16-△-100 %はそれぞれ 73.5kN、73.4kN であり、伸びは 0.49mm、0.61mm である。

図－ 3.4(1), 2)より、D16mm の異形鉄筋を 400mm の 75 %の 300mm 埋め込みした供試体 D16-75 %の弾性限度の最大値の荷重は 77.9kN、伸びは 1.09mm である。また、D16 に円形突起を設け、240mm の 75 %の 180mm 埋め込みした供試体 D16-○-75 %、三角形の突起を設けて 180mm 埋め込みした供試体 D16-△-100 %はそれぞれ 73.9kN、77.2kN、伸びは 0.47mm、0.69mm である。

次に、異形鉄筋、円形突起、三角形突起を設けたそれぞれの荷重と伸びの関係を図－ 3.4(2), (3), (4)に示す。異形鉄筋 400mm および 400mm の 75 %の 300mm 埋め込みした供試体 D16-100 %の伸びと供試体 D16-100 %の最大伸びを比較すると D16-100 %の 80 %である。円形突起を設けた供試体は D16-○-100 %の伸びに対して 85%である。三角形突起を設けた供試体 D16-△-100 %に対して伸びは 96%である。

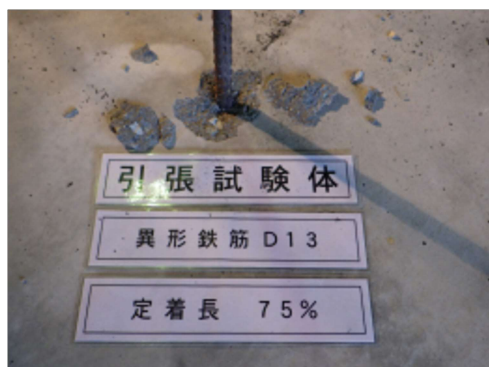
3) D13とD16の比較

D13-100%の埋め込み長 300mm と D16-100%の埋め込み長 400mm の引き抜き試験による弾性限度の最大値を比較すると D13 に対して D16 は 1.61 倍の荷重である。同様に D13-○-100%の埋め込み長 200mm と D16-○-100%の埋め込み長 240mm の場合は D16 が 1.41 倍、D13-△-100%と D16-△-100%の場合は 1.59 倍である。たわみの増加傾向もほぼ比例している。また、D13-75%の埋め込み長 225mm と D16-75%の埋め込み長 300mm の引き抜き試験による弾性限度の最大値を比較すると D13 に対して 1.11 倍の荷重である。D13-○-75%の埋め込み長 150mm と D16-○-75%の埋め込み長 180mm の場合は 1.05 倍、D13-△-75%と D16-△-75%の場合は 1.15 倍である。たわみの増加傾向もほぼ比例している。

次に、D13-100%のコンクリートの圧縮強度は 30N/mm^2 、周長 40mm、埋め込み長 300mm の引き抜き試験による弾性限度の最大値の荷重 48.2kN の時点の付着応力度は 4.01N/mm^2 であり、材料係数 $\gamma_c = 1.3$ を考慮すると 3.08N/mm^2 である。また、D13-○-100 と D13-△-100%の埋め込み長 200mm の付着応力度はそれぞれ 6.50N/mm^2 、 5.76N/mm^2 であり、材料係数 $\gamma_c = 1.3$ を考慮すると 5.00N/mm^2 、 4.43N/mm^2 である。D13-75%の埋め込み長 225mm、突起を設けた、D13-○-75%と D13-△-75%の埋め込み長 150mm での付着応力度はそれぞれ 11.78N/mm^2 、 11.20N/mm^2 、材料係数 $\gamma_c = 1.3$ を考慮するとそれぞれ 9.06N/mm^2 、 8.61N/mm^2 であり、いずれも道示に規定する安全率を考慮した設計基準強度 40N/mm^2 時の付着強度 2.0N/mm^2 を十分確保される



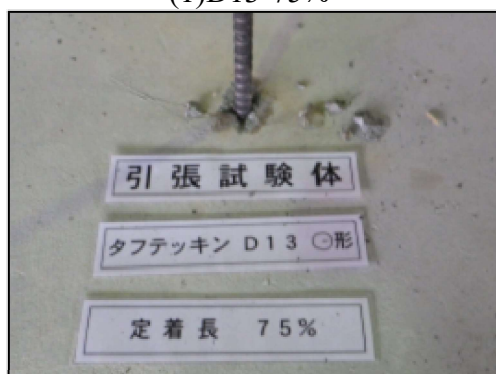
(1)D13-100%



(1)D13-75%



(2)D13-〇-100%



(2)D13-〇-75%



(3)D13-△-100%



(3)D13-△-75%

図- 3.6 引き抜き試験によるコンクリートの損傷状況(D13)

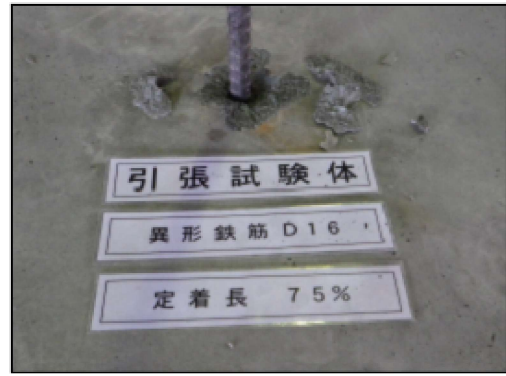
結果が得られた。

D16-100%のコンクリートの圧縮強度は 30N/mm^2 、周長 50mm 、埋め込み長 400mm の引き抜き試験による弾性限度の最大値の荷重 77.6kN の時の付着応力度は 4.85N/mm^2 、材料係数 $\gamma_c = 1.3$ を考慮すると 3.73N/mm^2 である。また、D16-〇-100 と D16-△-100%の埋め込みは 240mm であり、付着応力度はそれぞれ 7.66N/mm^2 、 7.65N/mm^2 であり、材料係数 $\gamma_c = 1.3$ を考慮すると 5.89N/mm^2 、 5.88N/mm^2 である。

D16-75%のコンクリートの圧縮強度は 30N/mm^2 、周長 50mm 、埋め込み長 300mm の引き抜き試験による弾性限度の最大値に対する付着応力度は 6.49N/mm^2 、材料係数 $\gamma_c = 1.3$ を考慮すると 4.99N/mm^2 である。



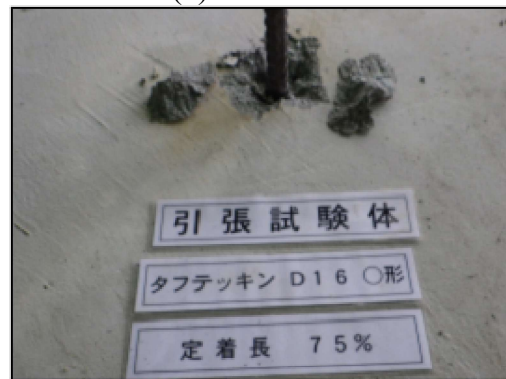
(1)D16-100%



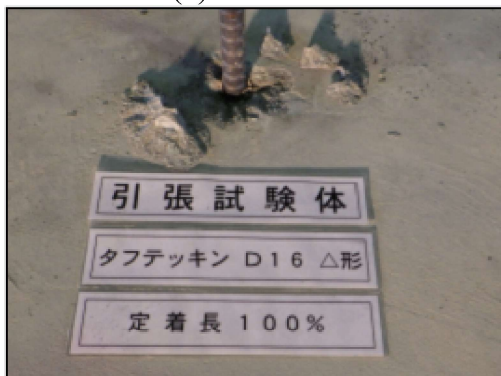
(1)D16-75%



(2)D16-○-100%



(2)D16-○-75%



(3)D16-△-100%



(3)D16-△-75%

図- 3.7 引き抜き試験によるコンクリートの損傷状況(D16)

また、D16-○-100 と D16-△-100%の埋め込み長は 180mm であり、付着応力度はそれぞれ 10.26N/mm^2 、 10.7N/mm^2 、材料係数 $\gamma_c = 1.3$ を考慮すると 7.89N/mm^2 、 8.24N/mm^2 である。いずれも道示に規定するコンクリート設計基準強度 40N/mm^2 の場合の付着強度 2.0N/mm^2 を十分確保される結果が得られた。

(2) 引き抜き試験による破壊状況

D13 および D16 の異形鉄筋および異形鉄筋の端部に円形突起、三角形突起を設け、埋め込み長 100%および 75%の場合のコンクリート表面の損傷状況を図- 3.6 および 3.7 に示す。この損傷状況は弾性限度内の最大値の荷重ではなく、その後の荷重載荷によるもので鉄筋の破断前の荷重である。D13 および D16 とともにコンクリート表面

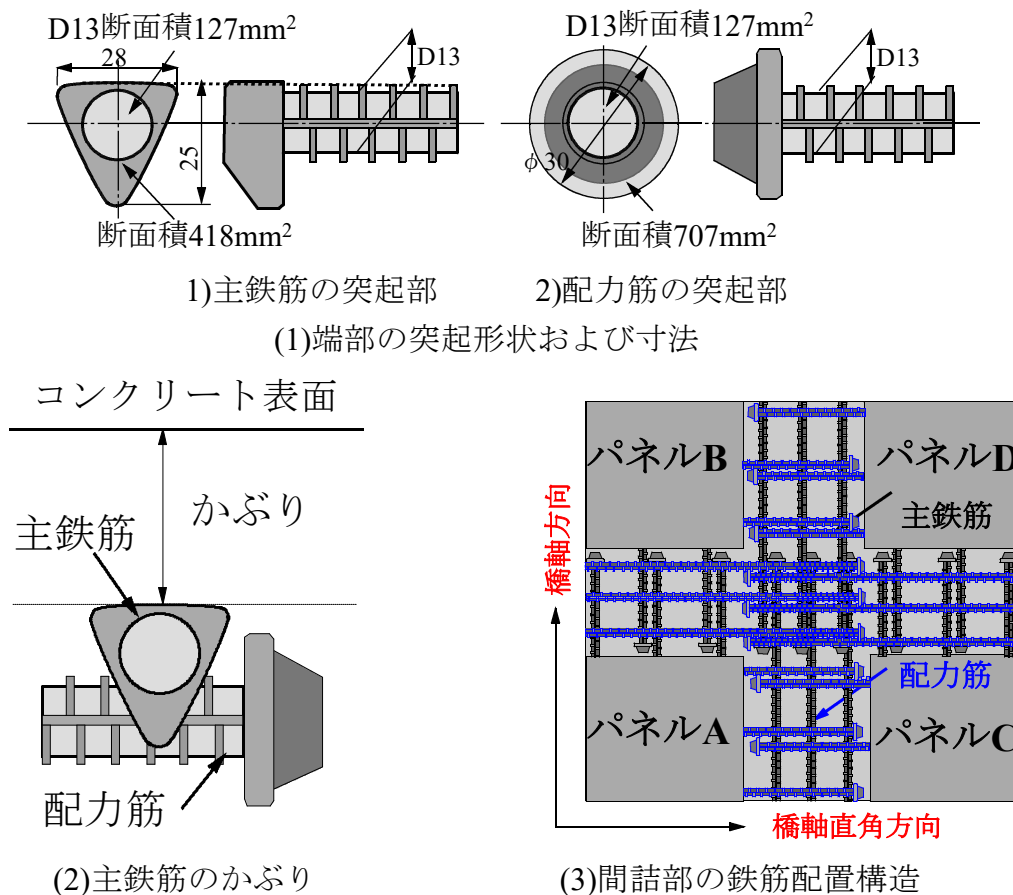
に円錐形の損傷がみられるものの鉄筋の破断は見られない。

3.4 取替RC床版供試体に用いる継手寸法

3.4.1 継手部突起寸法

本実験に用いる主鉄筋および配力筋には D13 を用いる。よって、主筋、配力筋の突起寸法を図－3.8 に示す。

主鉄筋の突起形状は、図－3.8(1),1)に示すように、D13 に対して底辺幅が 28mm、高さ 25mm の三角形とし、付着面積は 277mm^2 であり、異形鉄筋と併せて付着力確保するものである。また、配力筋の突起形状は図－3.8(1),2)に示すように、D13 に対して $\phi 30\text{mm}$ の円形とし、付着面積は 580mm^2 である。次に、鉄筋の配置方法は図－3.8(2)に示すように、主筋の三角形底面側をかぶり側とし、頂点側を内側に配置する。



図－3.8 鉄筋端部の突起形状および間詰部構造

主鉄筋の内側に円形の突起を設けた配力筋を配置することで突起部のかぶりが確保できる配置となる。軸方向、軸直角方向および交差部の間詰部の鉄筋配置構造は

図－ 3.8(3)に示す配置となる。

継手長に関する引き抜き試験では、鉄筋 D13 の継手長 200mm の 75%で降伏荷重から破壊荷重へ移行するまで引き抜き試験を行った。その結果、円形突起および三角形突起とし、付着長 150mm での弾性限度の最大値の荷重における付着応力度はそれぞれ 11.78N/mm²、11.2N/mm² である。よって、両突起構造は継手長 150mm 以上で付着力が道示に規定する安全率を考慮した付着応力度 2.0N/mm² を十分確保される結果が得られた。

3.4.2 本実験供試体の継手長

継手長の算定は道示Ⅲ^{3.13)} に基づいて式(3.1)より算定する。

$$L_a = \frac{\sigma_{sa}}{4\tau_{0a}} \times \varphi \quad (3.1)$$

ここに、 L_a : 付着応力度より算出する重ね継手長(mm)、 σ_{sa} : 鉄筋の引張応力度 (= 200N/mm²)、 τ_{0a} : コンクリートの付着応力度 (= 2.0N/mm²) φ : 鉄筋径

フック付き鉄筋の定着長は道示Ⅲ^{3.13)} より式(3.2)として与えられている。

$$L_l = L_a \cdot 2/3 \quad (3.2)$$

次に、定着に必要とされる鉄筋の長 L は、定着体 D_l の長さを加えた値とする。本実験に用いる突起長 D_l は以下を考慮する。

(1) 鉄筋径以上にし、引き抜き抵抗力を高くする。

(2) 定着体の径

1) 鍛造可能な範囲でできるだけ大きくした。

2) 丸形は直交配置する鉄筋外縁を超えないようする。これにより丸形定着体は、かぶり決定に影響しない。

3) 頭頂部にあるリブは、圧縮時の表面積を稼ぐのと類似品との差別化も考慮した。

異形鉄筋 SD345D13 の主筋に図－ 3.8(1), 1)に示す三角形の突起、配力筋には図－ 3.8(1), 1)に示す円形の突起形状とし、断面積はそれぞれ 418mm²、配力筋の突起面積を 707mm² とした。また、定着体 D_l は 14mm とし、継手長を算定する。

式(3.1)より継手長を算出すると $L_a = 325$ mm である。これにフック付き鉄筋の定着長 $L_l = 213$ mm、これに定着体 $D_l = 14$ mm を考慮すると $L = 231$ mm となる。

主筋、配力筋に D13 を用いた場合の継手長は 231mm 以上である。しかし、本実験に用いる輪荷重走行疲労実験装置の輪荷重幅は 300mm であることから、軸方向間詰部に最も過酷な荷重条件とするたために、輪荷重幅 300mm と同一寸法とした

幅 300mm とする。よって、継手長は 20mm 余裕を考慮し、280mm とする。

以上のように、軸方向および軸直角方向の鉄筋端部に突起を設けた継手構造は、間詰部の付着性が確保できる構造であると考えられる。

3.5 供試体の使用材料・寸法

3.5.1 使用材料

輪荷重走行荷重実験に用いる取替 RC 床版供試体は、2 タイプ製作する。A タイプの供試体名称は取替 RC 床版 A とし、供試体記号を R.RC-R-A (Replacement RC slab-Running load-A type)、取替 RC 床版 B を R.RC-R-B (Replacement RC slab-Running load-B type) とする。

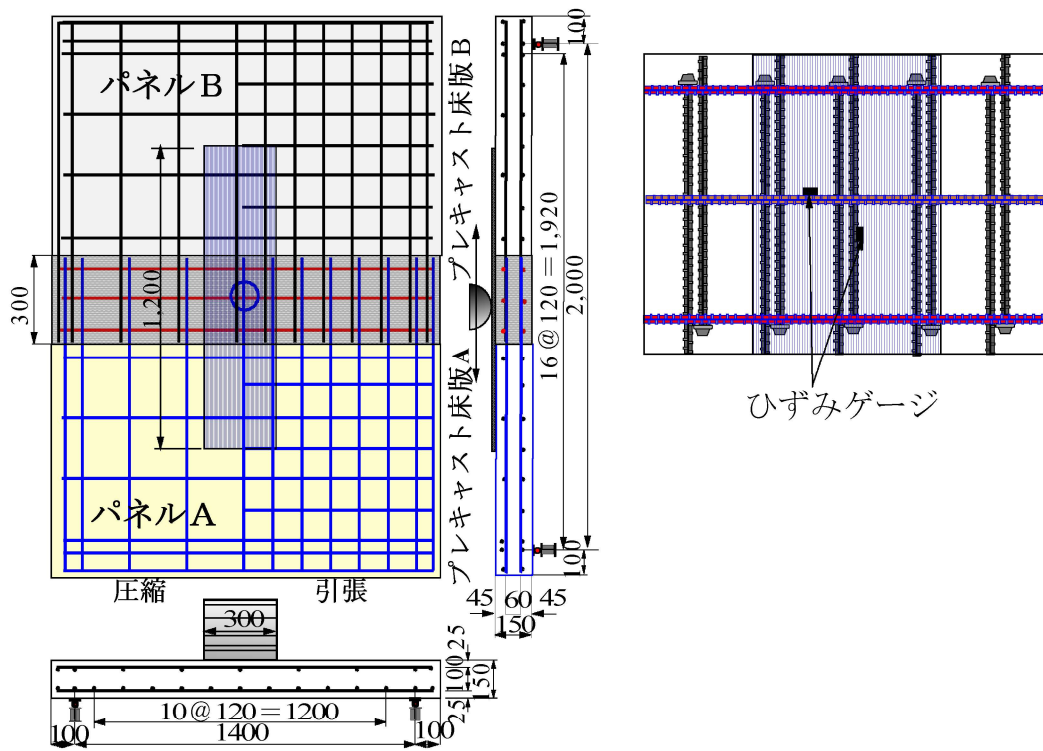
取替 RC 床版 A, B に用いる材料としてプレキャスト RC 床版部には、普通ポルトランドセメントに最大骨材寸法 20mm の砕石、最大骨材寸法 5mm の砕砂を使用し、配合条件を表－ 3.3 に示す。取替 RC 床版の要求性能は、コンクリートの圧縮強度を 40N/mm² を目標とする。これは、阿部ら^{3,14)}の研究による圧縮強度を高めることで耐疲労性が大幅に向上する結果が得られていることから、圧縮強度 40N/mm² を目標とする配合条件とする。鉄筋には SD345, D13 を用いる。ここで、プレキャスト RC 床版のコンクリート圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表－ 3.4 に示す。

表－ 3.3 コンクリートの配合条件

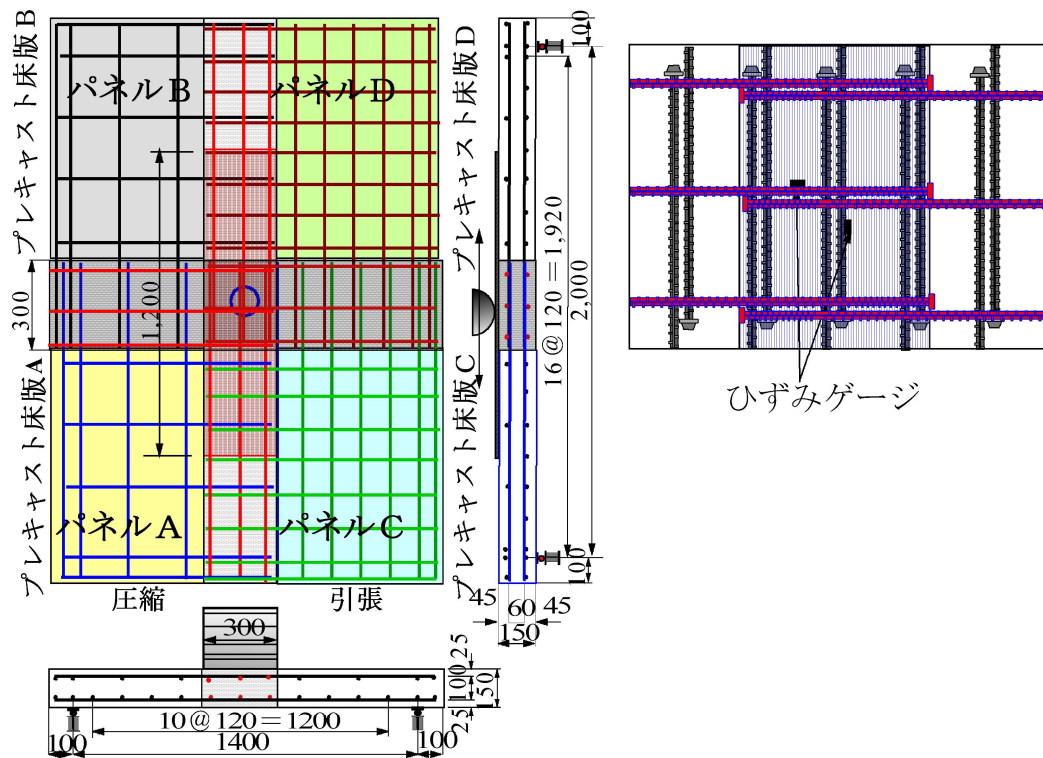
取替RC 床版	スラン プ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				減水剤 (C×%)	AE剤 (C×%)
				C	W	S	G		
床版部	10±2.5	35.0	43.2	443	155	732	968	3.1	0.004
間詰部	8±2.5	32.9	40.0	450	148	710	1157	9.0	0.004

表－ 3.4 材料特性値

取替RC 床版	圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋 (SD345)			
		使用鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
床版部	56.4	D13	366	539	200
間詰部	48.3				



(1)取替 RC 床版 A (R.RC-R-A)



(2)取替 RC 床版 B (R.RC-R-B)

図－3.9 供試体寸法および鉄筋配置状況

間詰部のコンクリートには、現場での施工時間を 8 時間以内として、要求性能は材齢 3 時間で道示に規定するコンクリートの設計基準強度 24N/mm^2 以上、材齢 14 日で 40N/mm^2 以上確保できる配合とする。よって、コンクリートには超速硬セメントに最大骨材寸法 20mm の砕石、最大骨材寸法 5mm の砕砂を使用し、配合条件を表- 3.3 に併記する。また、鉄筋はプレキャスト RC 床版部と同様に SD345, D13 を用いる。ここで、材齢 28 日の間詰部のコンクリート圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表- 3.4 に併記する。表- 3.4 より、プレキャスト部の材齢 28 日のコンクリートの圧縮強度は 56.4N/mm^2 と要求性能である 40N/mm^2 以上は確保されている。次に、間詰部のコンクリートの発現強度は、材齢 3 時間で 34.9N/mm^2 、材齢 14 日は 48.3N/mm^2 である。よって、打設 3 時間後の強度が 24N/mm^2 以上であり、並列後の施工の省力化が図られる材料である。

3.5.2 供試体寸法および鉄筋配置

取替 RC 床版 A, B は、1994 年改定の道示に準拠し、その 3/5 モデルとする。本供試体は、実験装置の車輪幅が 300mm であり、道示に規定する輪荷重幅 500mm に対して 3/5 モデルであることから、実験供試体も 3/5 モデルとした。なお、取替 RC 床版供試体の間詰部の寸法 300mm は、取替 RC 床版 B の軸方向の間詰部に直接輪荷重を負荷させるために車輪幅 300mm と合わせて 300mm とし、軸直方向の間詰部も同一寸法とした。ここで、取替 RC 床版 A, B 供試体の寸法を図- 3.9 に示す。また、取替 RC 床版供試体の間詰部の配筋状況を図- 3.8 に示す。

(1) 取替RC床版A

取替 RC 床版 A 供試体の寸法は図- 3.9(1)に示すように、床版支間方向 1,600mm、軸方向 2,200mm、床版厚 150mm とする。なお、床版支間は 1,400mm、軸方向の支間を 2,000mm とする。プレキャスト床版部は軸方向の寸法 850mm であり、引張側の軸直角方向および軸方向に D13 を 120mm 間隔で配置した。また、圧縮側には引張鉄筋量の 1/2 を配置した。

間詰部の寸法は、軸方向支間中央（支点から 1,000mm）に継手長 280mm を考慮し、幅 300mm を設けた。間詰部の構造および鉄筋の配置状況は図- 3.9(1)に示すように間詰部の主鉄筋は D13 を上下に 3 本並列配置した。継手部の構造は、主筋の内側に配力筋が配置され、端部は図- 3.8(1)に示す円形の突起を設けた鉄筋を配置する。

(2) 取替RC床版B

取替 RC 床版 B 供試体の間詰部の寸法は、図- 3.9(2)に示すように、全長、床版厚、支間は取替 RC 床版寸法と同様である。軸方向の支点から 1,000mm（支間中央）および軸直角方向の中央にそれぞれ幅 300mm を設けた。これは、輪荷重幅 300mm と同じ幅とした。間詰部の構造および配筋は図- 3.9(2)に示すように、主鉄筋は

D13 を上下に 3 本並列配置した。継手部の鉄筋は主筋方向のかぶりを確保するために図－ 3.8(1)に示す三角形の突起を設けている。突起部は主筋の上縁と同位置となることからかぶりは確保されている。一方、配力筋は主筋の内側に配置され、図－ 3.8(1)に示す円形の突起を設けた鉄筋を配置した。

3.6 取替RC床版の施工手順

3.6.1 取替RC床版A

(1) プレキャスト床版の製作

取替 RC 床版 A の供試体の施工手順を写真－ 3.1 に示す。プレキャスト床版は、実橋での施工を考慮し、工場で製作する。写真－ 3.1 に示すように、円形突起を設けた鉄筋を用いて、図－ 3.9(1)に示す寸法で組立し、専用の鋼製型枠に設置（写真－ 3.1(1)）し、設置後、プレキャスト床版のコンクリートを表－ 3.3 に示す配合条件で練り混ぜし、コンクリート打設する（写真－ 3.1(2)）。その後、表面仕上げし（写真－ 3.1(3)）、8 時間蒸気養生を行い、脱型する（写真－ 3.1(4)）。脱型後、間詰部側面コンクリートの目荒しして（写真－ 3.1(5)）、完成となる（写真－ 3.1(6)）。

(2) 取替RC床版Aの設置手順

実橋における鋼げた上の設置を想定した設置手順を（写真－ 3.2）に示す。工場で作成したプレキャスト RC 床版 A, B を軸方向に並列する（写真－ 3.2）。その後、間詰部に型枠を設置し、間詰部に鉄筋を配置する。間詰部のコンクリートは表－ 3.3 に示す間詰部コンクリートの配合条件で練り混ぜする。



(1)鉄筋を型枠に設置



(2)コンクリート打ち込み



(3)表面仕上げ



(4)脱型

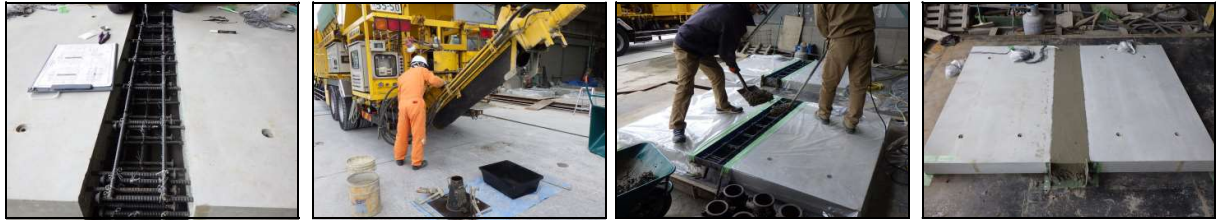


(5)目荒し



(6)プレキャスト版完成

写真－ 3.1 プレキャスト床版 A の製作手順



(1)プレキャスト
床版設置

(2)移動プラントで
練混ぜ

(3)コンクリート
打ち込み

(4)完成

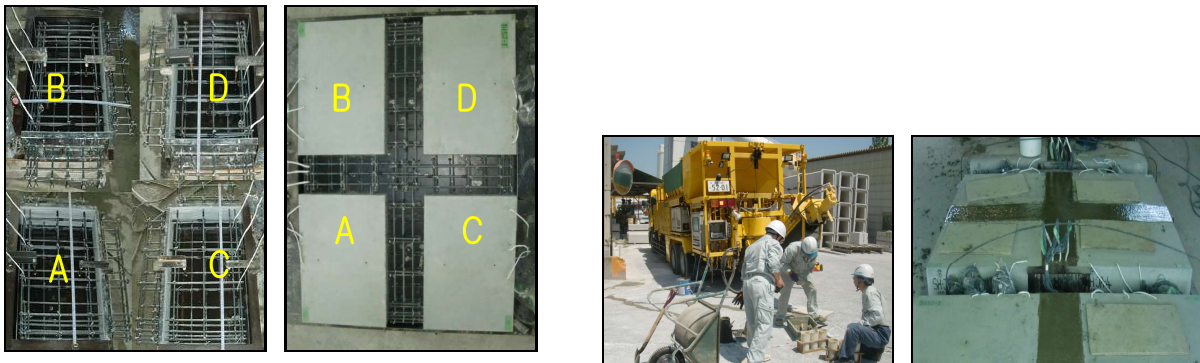
写真－ 3.2 プレキャスト床版 A の設置手順

練混ぜは実施工程を考慮して移動式プラントを用いた（写真－ 3.2(1)）。コンクリートは超速硬セメントを用いたことから，凝結終結時間が 25 分程度であるので，練り混ぜ後，直ちに間詰部に打ち込み（写真－ 3.2(3)），表面仕上げする。表面仕上げ後は常温で 12 時間養生し，脱型し，完成となる。

3.6.2 取替RC床版B

(1) プレキャスト床版の製作

取替 RC 床版 B 供試体の製作方法も同様に写真－ 3.3(1)に示すプレキャスト床版 A, B, C, D の鉄筋を組み立て後，鋼製型枠に設置し，それぞれにコンクリートを打ち込み，プレキャスト床版を製作する。プレキャスト床版完成後は，図－ 3.9(2)に示す寸法で組み立てする（写真－ 3.3(4)）。間詰部に型枠と鉄筋を配置する。同時に超速硬コンクリートを移動プラントで練混ぜし，間詰部にコンクリートを打ち込み，表面仕上げして，養生し，完成となる。



(1)型枠に鉄筋配置

(2)プレキャスト
床版設置

(3)移動プラントで
練混ぜ

(4)完成

写真－ 3.3 プレキャスト床版 B の設置手順

3.7 実験方法および最大耐荷力

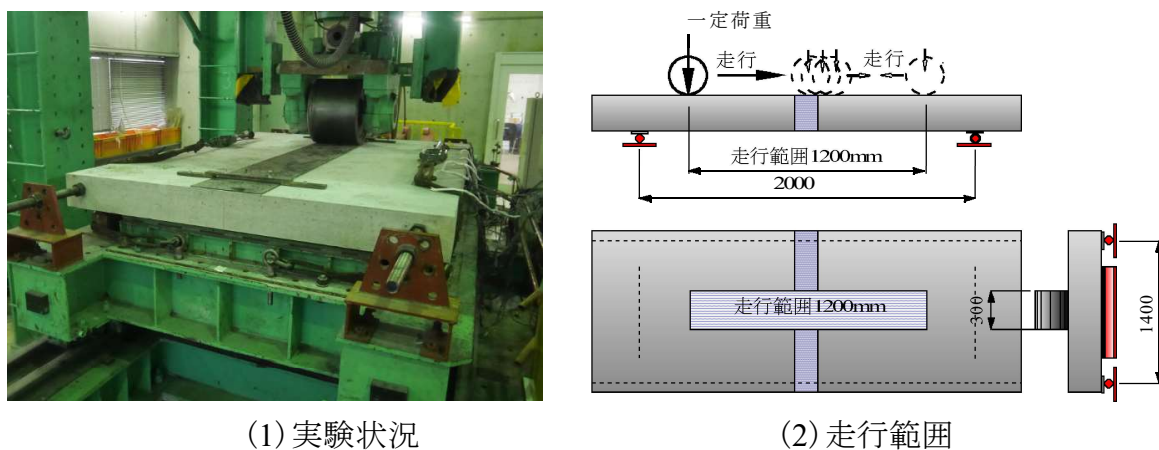
3.7.1 耐荷力実験の概要^{3.15)}

取替 RC 床版供試体の輪荷重走行荷重実験による最大耐荷力の評価には、輪荷重走行試験機を用いる。実験装置の荷重装置には車輪（幅 300mm，直径 450mm）を取り付け，最大荷重 500kN まで載荷が可能である。試験体を台車に設置し，その台車をモータとクランクアームにより水平方向に走行させるものである。本実験装置は最大 2000mm までの走行が可能である。

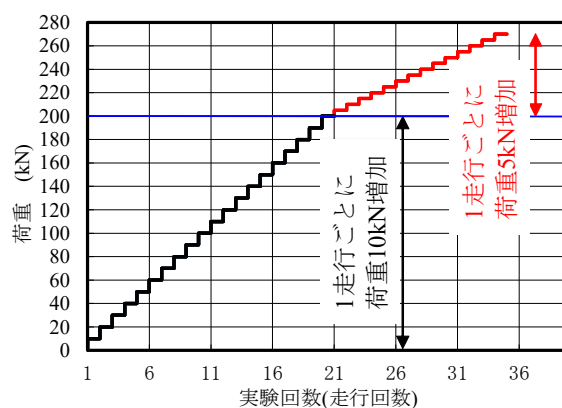
3.7.2 走行荷重試験方法

(1) RC床版および取替RC床版供試体

輪荷重走行荷重実験の状況を図－ 3.10(1)，走行範囲を図－ 3.10(2)に示す。



図－ 3.10 実験概略



図－ 3.11 輪荷重走行荷重実験による荷重条件

輪荷重走行荷重実験は，図－ 3.10 に示すように，幅 300mm の輪荷重を軸方向に 1,200mm の範囲を 1 走行し，1 走行毎に荷重を 10kN 増加させ，破壊するまで荷重増加と走行を繰り返す方法である。ここで，荷重条件を図－ 3.11 に示す。なお，輪荷

重走行荷重実験は疲労実験と異なる実験である。本実験では、床版中央に車輪を停止し、床版中央のたわみ・ひずみを計測する

(2) 最大耐荷力の評価

輪荷重走行荷重実験において、荷重載荷し、1,200mm の走行した最大荷重を実験供試体の最大耐荷力とする。走行中に破壊した場合の荷重を破壊荷重とする。

3.8 結果および考察

3.8.1 実験最大耐荷力

輪荷重走行荷重実験による最大耐荷力を表－3.5 に示す。

軸直角方向に間詰部を設けた取替 RC 床版 R.RC-R-A-1 供試体の最大耐荷力は 250.8kN であり、取替 RC 床版 R.RC-R-A-2 供試体は 260.9kN、最大耐荷力の平均は 255.8kN である。

次に、2 方向に間詰部を設けた取替 RC 床版 R.RC-R-B-1 供試体の最大耐荷力は 265.9kN、取替 RC 床版 R.RC-R-B-2 供試体は 265.9kN、最大耐荷力の平均は 265.9kN である。間詰部を 2 方向に設けた供試体の耐荷力が 1.04 倍向上している。これは走行方向および軸直角方向の間詰部に配置された鉄筋量が多いためと考えられる。

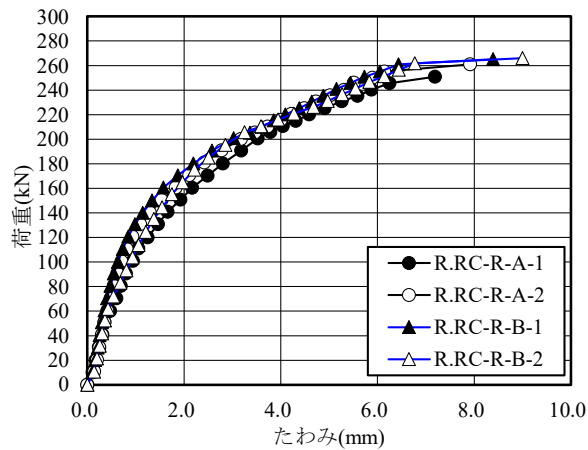
表－3.5 最大耐荷力

供試体名称	最大耐荷力 (kN)	平均耐荷力 (kN)	耐荷力比 (B/A)
R.RC-R-A-1	250.8	255.8	—
R.RC-R-A-2	260.9		
R.RC-R-B-1	265.9	265.9	1.04
R.RC-R-B-2	265.9		

3.8.2 荷重とたわみの関係

床版中央の荷重とたわみの関係を図－3.12 に示す。

取替 RC 床版 A 供試体および B 供試体ともに同等の増加傾向を示している。最大耐荷力時のたわみは取替 RC 床版 R.RC-R-A-1 が 7.19mm、A-2 が 7.92mm である。また、取替 RC 床版 R.RC-R-B-1、B-2 それぞれで 8.40mm、8.89mm である。2 方向に間詰部を設けた取替 RC 床版 B 供試体は、軸方向の間詰部には主筋方向がダブルで配置され、本取替 RC 床版の特徴でもある鉄筋端部の三角形の突起により付着力も高く、全体的に剛性が高まることから、たわみの増加が抑制されている。



図－ 3.12 荷重とたわみの関係

3.8.3 荷重とひずみの関係

荷重とひずみの関係を図－ 3.13 に示す。計測位置は図－ 3.9(1), (2)に示す位置である。

(1) 主鉄筋

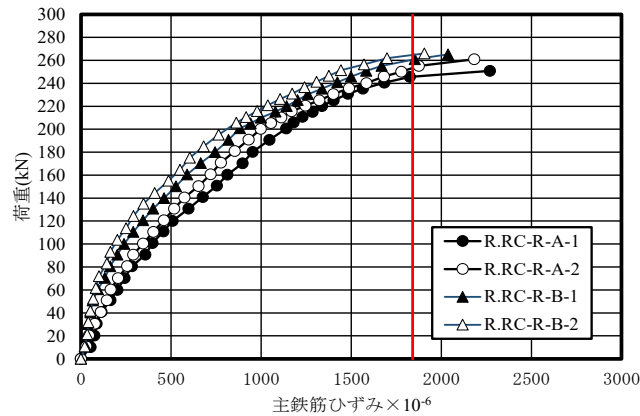
軸直下方向（主鉄筋）の荷重とひずみの関係は図－ 3.13(1)に示すように、軸方向に間詰部を設けた供試体取替 RC 床版 A のひずみの増加傾向はほぼ線形的に増加している。鉄筋の降伏ひずみは表－ 3.2 に示す鉄筋の降伏強度が 366N/mm^2 であることから 1830×10^{-6} である。

取替 RC 床版 R.RC-R-A-1 および A-2 の鉄筋ひずみが降伏に至った荷重はそれぞれ 245.7N/mm^2 , 252.5N/mm^2 であり、降伏後は急激にひずみが増加し、破壊に至っている。

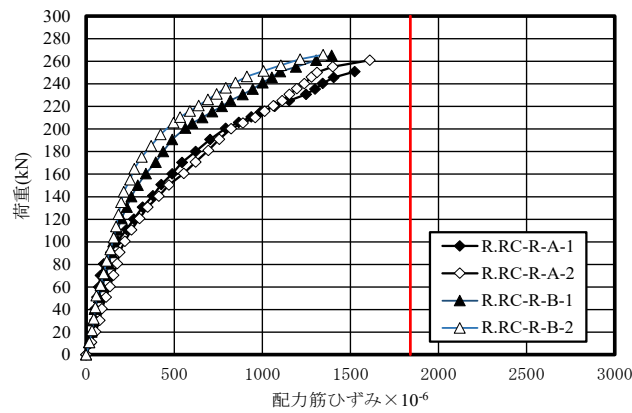
次に、軸直角方向および軸方向に間詰部を設けた供試体取替 RC 床版のひずみは、取替 RC 床版 A と比較してひずみの増加は抑制されている。これは、交差部の鉄筋量が取替 RC 床版 A と比較して多く配置していることにより、剛性が向上したものと考えられる。降伏ひずみに達した荷重は取替 RC 床版 R.RC-R-B-1 および R.RC-R-B-2 でそれぞれ 260.02kN , 264.4kN である。降伏後はひずみが増加し、破壊に至っている。

(2) 配力筋

軸方向（配力筋）の荷重とひずみの関係を図－ 3.13 (2) に示す。取替 RC 床版 R.RC-R-A-1 および A-2 はひずみが 400×10^{-6} 付近まで線形的に増加する。その後はひずみの増加がやや大きくなるものの破壊まではほぼ線形的に増加するが、降伏ひずみに達していない。



(1)主鉄筋ひずみ



(2)配力筋ひずみ

図－ 3.13 荷重とひずみの関係

次に、取替 RC 床版 R.RC-R-B-1 および B-2 においてもひずみが 400×10^{-6} 付近まで線形的に増加し、その後の荷重増加でひずみの増加もやや大きくなるものの線形的に増加している。取替 RC 床版 A の増加傾向に対して、ひずみの増加は大幅に抑制されている。これは、この継手長でも突起と併用すれば重ね継手同様に荷重伝達ができていると考えられる。

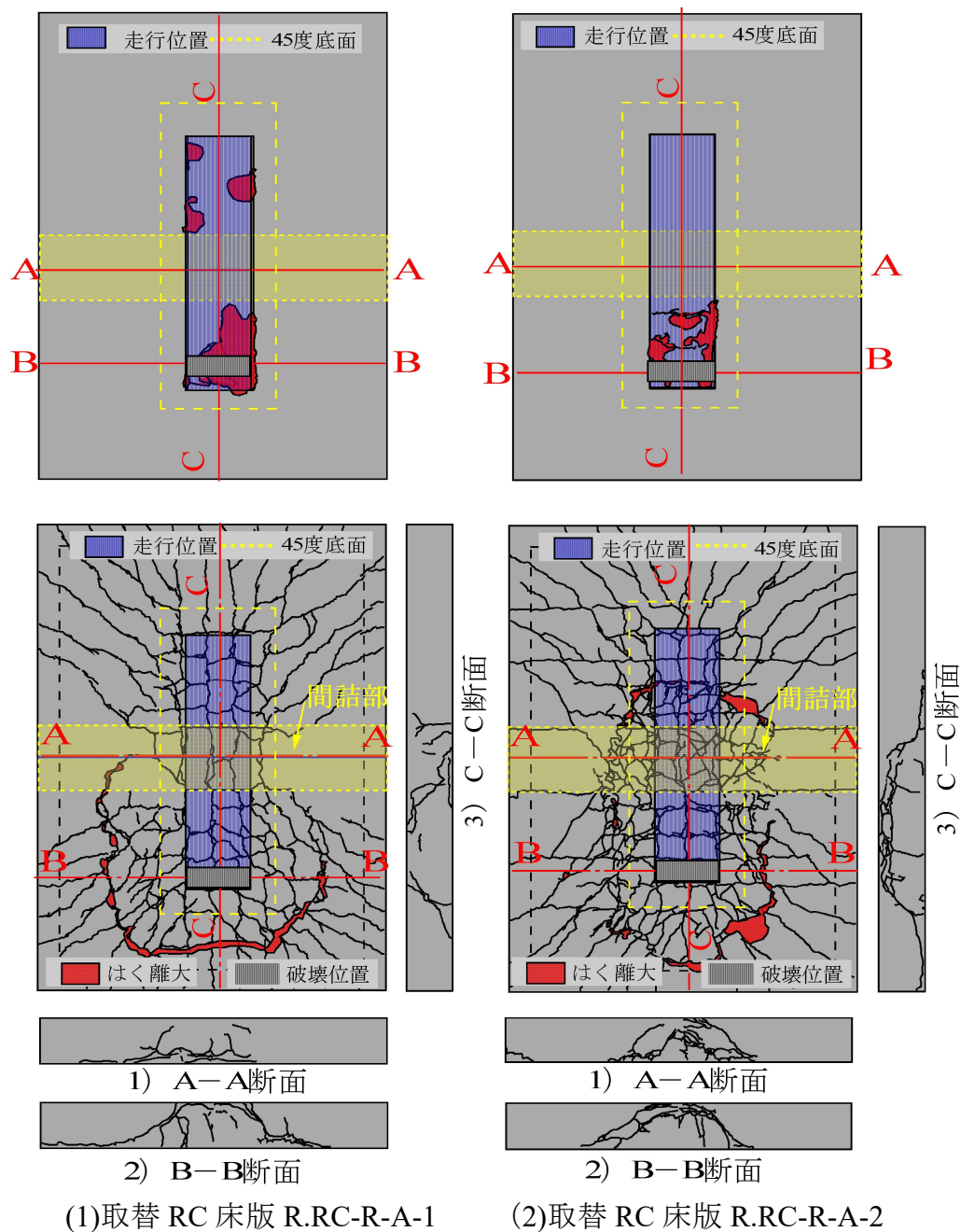
3.8.4 破壊時のひび割れ状況

輪荷重走行荷重実験における破壊時のひび割れ状況のを図－ 3.14 に示す。

(1) 取替RC床版A

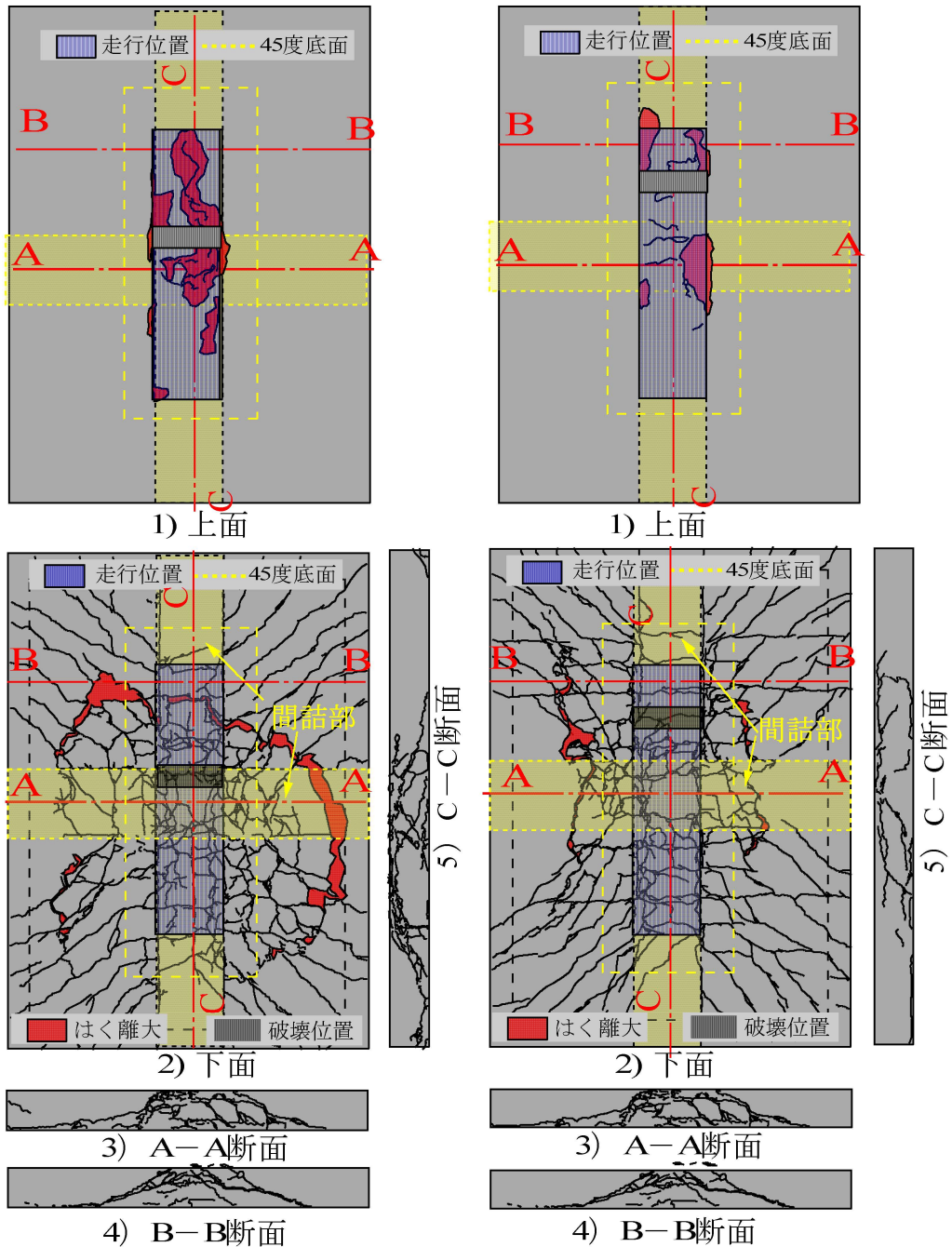
取替 RC 床版 R.RC-R-A-1 および A-2 のひび割れ状況をそれぞれ図－ 3.14(1), (2) に示す。

取替 RC 床版 R.RC-R-A-1 の上面のひび割れ状況は下面は間詰部を除いた RC 床版部に 2 方向のひび割れが発生している。破壊は床版中央から 500mm 付近で押抜きせん断破壊となっている。破壊付近は荷重載荷位置から 45 度底面にダウエルの影響



図－ 3.14 軸直角方向に間詰部を設けた供試体

によるはく離が見られる。次に、切断面 A-A は図－ 3.14(1).1), (2).1)に示すように輪荷重走行位置のみにひび割れが発生している。この位置はプレキャスト床版部の鉄筋量に対して、多く配置されていることから、ひび割れの発生が抑制されている。破壊位置の切断面 B-B は図－ 3.14(1).2), (2).2)に示すように荷重載荷位置から 45 度で押抜きせん断破壊となる斜めひび割れが発生している。軸方向の切断面 C-C(図－ 3.14(1).3), (2).3))においても輪荷重走行位置から 45 度に斜めひび割れが発生し、押抜きせん断破壊となるひび割れ形状を呈している。



(1)取替 RC 床版 R.RC-R-B-1

(2)取替 RC 床版 R.RC-R-B-2

図－ 3.15 軸直角方向・軸方向に間詰部を設けた供試体

(2) 取替RC床版B

取替 RC 床版 R.RC-R-B-1 および B-2 のひび割れ状況を図－ 3.15(1), (2)に示す。

取替 RC 床版 B-1 の上面のひび割れ状況は輪荷重走行により床版下面には 2 方向のひび割れが発生している。破壊は床版中央から 150mm 付近の間詰部とプレキャスト床版との界面付近で押抜きせん断破壊となっている。破壊付近は荷重載荷位置

から 45 度底面にダウエルの影響によるはく離が見られる。次に、切断面 A-A は図－ 3.15(1).1), (2).1)に示すように走行位置から斜めひび割れが発生している。切断面 B-B (図－ 3.15(1).2), (2).2) も同様に押抜きせん断破壊形状を示している。また、切断面 C-C 断面 (図－ 3.15(1).3), (2).3) においては圧縮鉄筋付近に水平ひび割れが発生している。

3.9 まとめ

2 種類の間詰部を有する取替 RC 床版の最大耐荷力を評価するために輪荷重走行荷重実験を行った。その結果以下の知見が得られた。

- (1) 本提案する継手部鉄筋の付着強度を得るために引き抜き試験を行った結果、D13 の異形鉄筋を用いて円形突起および三角形突起を設けた 200mm および 150mm の埋込長においても道示に示す付着応力度を十分に満足する結果が得られた。同様に D16 の場合も埋め込み長 240mm, 180mm において、道示に示す付着応力度を満足している。よって、本提案する継手部鉄筋の突起は充分の付着力が得られる結果となった。
- (2) 軸直角方向に間詰部を設けた取替 RC 床版 A の最大耐荷力の平均は 255.8kN である。また、2 方向に間詰部を設けた供試体取替 RC 床版 B の最大耐荷力の平均は 265.9kN であり、間詰部直上に輪荷重を走行させたにもかかわらず耐荷力が 1.04 倍向上する結果が得られた。
- (3) R.RC-R-A-1, A-2, B-2 の破壊状況は、輪荷重が走行中にプレキャスト版で輪荷重の設置面から斜めひび割れが発生する押抜きせん断破壊となった。また、R.RC-R-B-1 の破壊状況は、間詰部とプレキャスト床版の界面付近で走行中に押抜きせん断破壊となった。

第3章参考文献

- 3.1) 伊藤清志, 阿部忠, 岩崎正二, 大塚祐二: 塩害・凍害の複合劣化を受けた RC 床版の上面増厚補強法による耐疲労性の評価, コンクリート構造物の補修・補強アップグレード論文・報告集, 第13巻, pp.373-381, 2013.11
- 3.2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I, II, 1994
- 3.3) 中村定明, 三浦尚: RC ループ継手の力学挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集 No.774/V-65, pp.17-26, 2004.11
- 3.4) 水野浩, 松井繁之, 大西弘志, 杉山俊幸, 街道浩: 床版取替用プレキャスト合成床版の合理化継手の疲労耐久性評価, 構造工学論文集 Vol.58A, pp.1112-1121, 2012.3
- 3.5) 大柳修一, 大林敦裕: 既設床版の半断面床版取替工法の開発(輪荷重疲労載荷試験), ピーエス三菱技報, 第13号, 2015
- 3.6) 新名勉, 林大輔, 小林颯, 興石正己, 国井優嗣: プレストレスジョイントで接合したプレキャスト PC 床版の耐疲労性評価, 第10回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.17-22, 2018
- 3.7) 高橋明彦, 阿部忠, 小野晃良, 大西弘志, 久田真: 間詰部を設けた取替 RC 床版の耐疲労性の評価に関する実験研究, 構造工学論文集, Vol. 65A, pp.655-664, 2019.3
- 3.8) 小野晃良, 阿部忠, 高橋明彦, 武田秀人: 2方向に間詰部を設けた取替 RC 床版の耐荷力・耐疲労性の検証および実橋における施工技術, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.2, pp.1309-1314, 2020.7
- 3.9) 小野晃良, 阿部忠, 木村延久, 高橋明彦: 走行荷重が作用する取替 RC 床版の最大耐荷力および破壊メカニズムに関する実験研究, 第11回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.29-34, 2020
- 3.10) 小野晃良, 阿部忠, 水口和彦, 川井豊: プレキャスト床版に突起型継手を設けた取替 RC 床版間詰部の開閉幅が耐疲労性に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.68A, pp.711-721, 2022.3
- 3.11) 小野晃良, 阿部忠, 水口和彦, 大西弘志: 取替 RC 床版接合面に接着剤を用いた場合の耐荷力性能と耐疲労性の検証および開閉幅の抑制効果, セメント・コンクリート論文集, Cement Science and Concrete Technology 75 (1), pp.278-285, 2022.3
- 3.12) 小野晃良, 高橋明彦, 類家慧史, 大西弘志, 久田真: 特殊頭部鉄筋を有した鉄筋継手の引き抜き性状について, 土木学会第73回年次学術講演会 CS8-025, pp.49-50, 2018.8
- 3.13) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 III, 1994

- 3.14) 阿部忠, 木田哲量, 高野真希子, 川井豊: 道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力および耐疲労性の評価, 土木学会論文集 A1, pp.39-54, 2011.1
- 3.15) 阿部忠, 木田哲量, 高野真希子, 澤野利章, 加藤清志: 静荷重・走行荷重を受ける RC 床版の押し抜きせん断耐力, 構造工学論文集, Vol.50App. 919-926,2004

第4章 取替RC床版の耐疲労性の検証および破壊メカニズム

4.1 はじめに

積雪寒冷地域である北海道や東北地方の道路橋 RC 床版は融雪剤や凍結防止剤の散布による塩害と凍害に疲労損傷が複合され、劣化が著しい^{4.1), 4.2)}。凍害は、コンクリート内の空隙に侵入した水分の凍結融解の繰り返しにより、融解水がコンクリートに侵入し、輪荷重の繰り返しによりセメント成分が滲出して RC 床版コンクリートのスケーリングと舗装面にポップアウトが発生する^{4.3), 4.4)}。さらに走行を繰り返すことで土砂化へと発展し、補修・補強が困難となり、取替床版が必要となる^{4.5)}。建設後 30 数年で撤去されている事例も報告されている。

道路橋 RC 床版の設計基準も改定され 1994 年以降の道路橋示方書・同解説（以下、道示とする）^{4.6)}では 245kN へと増大された。交通荷重の増加に対して道示は逐次、改定されているが地方自治体が管理する多くの道路橋はその道示の改定に伴う規定にそって建設されており、補修や補強が追いついていない実情がある。よって、老朽化が著しい RC 床版や、現行道示に規定する床版厚と差異が生じ、耐荷力性能が劣る床版は、道示の基準を満足する取替床版の開発が急務となっている。既往の取替床版は交通量が多い、少ないに関係なく PC 構造のプレキャスト床版が開発されている。しかし、交通量の少ない地方自治体の橋梁取替床版においては、建設地域のコンクリート二次製品を製作出来る工場があれば、誰でも製作が可能な RC 構造が要望されている。とくに、地方自治体における道路橋は 1994 年改定以前の道示では 1 等橋、2 等橋に区分されている中、幹線道路以外の橋梁には 2 等橋で設計されている。よって、地方自治体が求める取替床版は地域の地場産業で製作が可能であること、さらに現行道示における B 活荷重が 1 日計画交通量 2,000 台以上の橋梁、および A 活荷重での橋梁に対応した RC 構造の取替床版が望まれる。

第 3 章では、B 活荷重で設計し、その 3/5 モデルとした供試体を用いて耐荷力性能および破壊メカニズムを検証した。しかし、実橋での実用性を評価するためには輪荷重走行実験による耐疲労性の評価および取替 RC 床版には間詰部が設けられているが、これらの構造が弱点とならないかについて破壊メカニズムの検証が必要となる。

そこで第 4 章では、取替 RC 床版の耐疲労性を検証するために 2 種類の間詰部を設けた取替 RC 床版を用いて、輪荷重走行荷疲労実験を行い、実験走行回数を作用荷重から得られる等価走行回数を得て検証する。また、プレキャスト RC 床版を並列して一体化したことから、輪荷重走行疲労実験における RC 床版および本提案する継手構造付近の破壊メカニズムを検証する。

4.2 取替RC床版構造(4.7), (4.8), (4.9), (4.10), (4.11)

取替 RC 床版は、地方公共団体が管理する道路橋を対象とした床版であり、従来の取替 PC 床版工法と同様にプレキャスト版を工場で製作し、現地で橋軸方向に並列しながら一体化するものである。橋軸方向に並列することで間詰部が生じることから、付着力を確保するための継手構造が必要となる。第4章で用いる継手部の構造は第3章と同様とする。取替 RC 床版に用いる鉄筋端部の突起形状および間詰部構造を図-4.1に示す。

主鉄筋の突起形状は、図-4.1(1)に示すように、D13 に対して底辺幅が 28mm、高さ 25mm の三角形とし、付着面積は 277mm^2 であり、異形鉄筋と併せて付着力保するものである。また、配力筋の突起形状は図-4.1(2)に示すように、D13 に対して $\phi 30\text{mm}$ の円形とし、付着面積は 580mm^2 である。

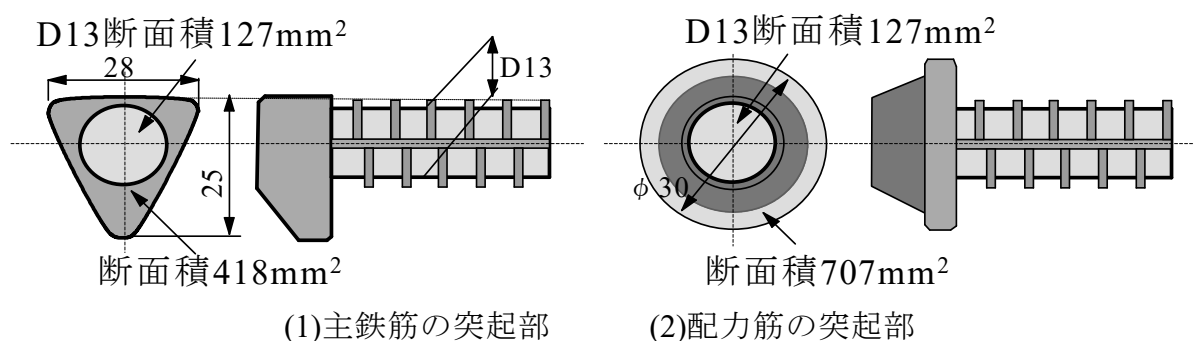


図-4.1 端部の突起形状および寸法

継手長に関する引き抜き試験では、第3章で評価したように継手長 200mm の 75% の付着長 150mm で弾性限度の最大値の荷重において突起形状を三角形とし、付着長 150mm の付着応力度はそれぞれ 11.20N/mm^2 , 11.78N/mm^2 , 材料係数 $\gamma_c = 1.3$ を考慮するとそれぞれ 8.61N/mm^2 , 9.06N/mm^2 であり、コンクリートの圧縮強度 40N/mm^2 における付着応力 2.0N/mm^2 を超える結果が得られている。さらに、継手長の算定においても必要継手長 230mm であるが、本供試体には 280mm の継手長とした。

以上のように、軸方向および軸直角方向の鉄筋端部に突起を設けた継手構造は、間詰部の付着性が確保できる構造であると考えられる。

4.3 供試体の使用材料・寸法

4.3.1 使用材料

(1) RC床版供試体

輪荷重走行疲労実験に用いる供試体は、圧縮強度の異なる RC 床版を 2 タイプ製作する。道示に基づいてコンクリートの設計基準強度を 24N/mm^2 以上とした供試

体と取替 RC 床版供試体の圧縮強度と同様に 40N/mm^2 以上とした供試体の 2 タイプを製作しコンクリートの圧縮強度が床版の耐疲労性においてどのような影響を及ぼすか検証した。RC 床版供試体のコンクリートには、普通セメントと 5mm 以下の砕砂および $5\text{mm} \sim 20\text{mm}$ の砕石を使用した。RC 床版供試体のコンクリートの設計基準強度は道示に規定する 24N/mm^2 および取替床版の要求性能であるコンクリートの圧縮強度 40N/mm^2 を目標とした 2 種類の配合条件とし、供試体名称はそれぞれ RC-A, RC-B とする。ここで、本実験に用いる RC 床版コンクリートの配合条件を表-4.1 に示す。次に、供試体の鉄筋には SD345, D13 を用いる。コンクリートの圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表-4.2 に示す。表-4.2 より、供試体 RC-A の材齢 28 日の圧縮強度は 30.3N/mm^2 供試体 RC-B の圧縮強度は 49.6N/mm^2 である。鉄筋の降伏強度は 355N/mm^2 である。

表-4.1 コンクリートの配合条件

供試体名称	スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				減水剤 (C×%)	AE剤 (C×%)	
				セメント	水	細骨材	粗骨材			
RC-A	10±2.5	54.0	47.1	341(普)	184	804	948	3.4	0.003	
RC-B	10±2.5	35.0	43.2	443(普)	155	732	968	3.1	0.004	
取替RC 床版A, B	床版部	10±2.5	35.0	43.2	443(普)	155	732	968	3.1	0.004
	間詰部	8±2.5	32.9	40	450(超)	148	710	1157	9.0	0.004

表-4.2 材料特性値

供試体名称	設計基準強度 (N/mm^2)	圧縮強度 (N/mm^2)	鉄筋 (SD345)			
			使用鉄筋	降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)
RC-A	24.0(材齢28日)	30.3(材齢28日)	D13	355	498	200
RC-B	40.0(材齢28日)	49.6(材齢28日)	D13	355	498	200
取替RC床 版A, B	床版部	40.0(材齢28日)	D13	366	539	200
	間詰部	40.0(材齢14日)				

(2) 取替RC床版供試体

取替 RC 床版供試体 A, B に用いる材料は、プレキャスト RC 床版部については RC 床版供試体および第 3 章で用いたコンクリートおよび鉄筋と同様とした。床版部の普通コンクリートおよび間詰部の超速硬コンクリート配合条件を表-4.1 に示す。取替 RC 床版の要求性能は、コンクリートの圧縮強度を 40N/mm^2 を目標とする。間詰部のコンクリートには、現場での施工時間を 8 時間以内として、要求性能は材齢 3 時間で道示に規定するコンクリートの設計基準強度 24N/mm^2 以上、材齢 14 日で 40N/mm^2 以上確保できる配合とする。次に、鉄筋には SD345, D13 を用いる。

プレキャスト RC 床版のコンクリートおよび間詰部の超速硬コンクリートの圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表-4.2 に示す。

4.3.2 供試体寸法および鉄筋配置

本供試体の寸法および鉄筋配置は第3章と同様であり、図-4.2に示す。実験供試体は図-4.2(1)に示すよう実験装置の車輪幅が300mmであり、道示に規定する輪荷重幅500mmに対して3/5モデルであることから、実験供試体も3/5モデルとし、第3章と同様とした。

(1) RC床版供試体

RC床版供試体の寸法は図-4.2(2)に示すように、床版支間方向1,600mm、軸方向2,200mm、床版厚150mmとする。なお、床版支間は1,400mm、軸方向の支間を2,000mmとする。鉄筋は複鉄筋配置とし、引張側の軸直角方向および軸方向にD13を120mm間隔で配置した。また、圧縮側には引張鉄筋量の1/2を配置した。

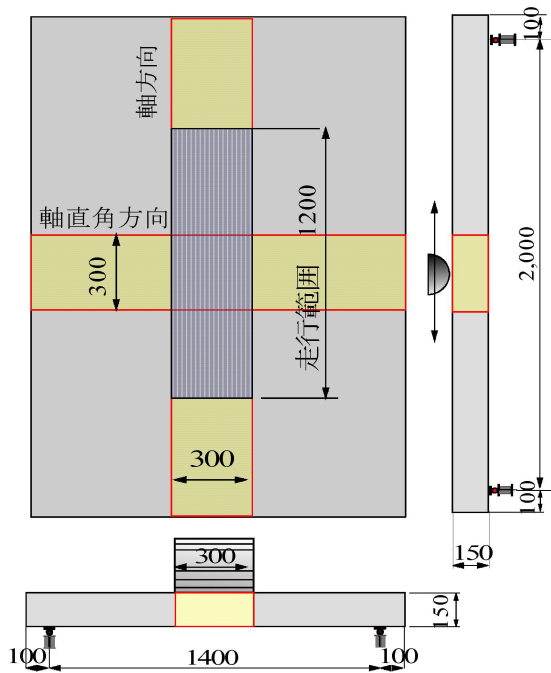
(2) 取替RC床版A

取替RC床版A供試体は図-4.2(3)に示すように、プレキャスト版であるパネルAとパネルBを並列した状態の床版のパネルAとパネルBの軸方向に重ね継手構造を設けた間詰部を有する供試体を製作する。供試体寸法は床版支間方向および軸方向は、RC床版同様である。また、床版支間も同様である。間詰部の寸法は、軸方向支間中央(支点から1,000mm)に継手長280mmを考慮し、幅300mmを設けた。鉄筋の配置状況は写真-4.3(1)に示すように間詰部の主鉄筋はD13を上下に3本並列配置した。継手部の構造は、主筋の内側に配力筋が配置され、端部は図-4.1(2)に示す円形の突起を設けた鉄筋を配置する。突起部は主筋のかぶり内となる。取替RC床版A供試体の記号をR.RC-F-A (Replacement RCslab-Fatigue-A type)とする。

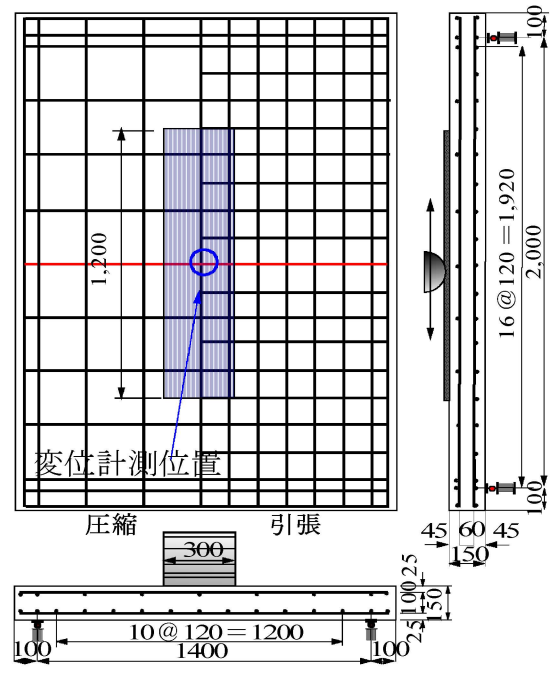
(3) 取替RC床版B

取替RC床版B供試体の図-4.2(4)に示すように、プレキャスト版であるパネルA、B、C、Dを組み合わせた状態の床版である軸方向と軸直角方向に重ね継手構造を設けた間詰部を有する供試体を製作する。

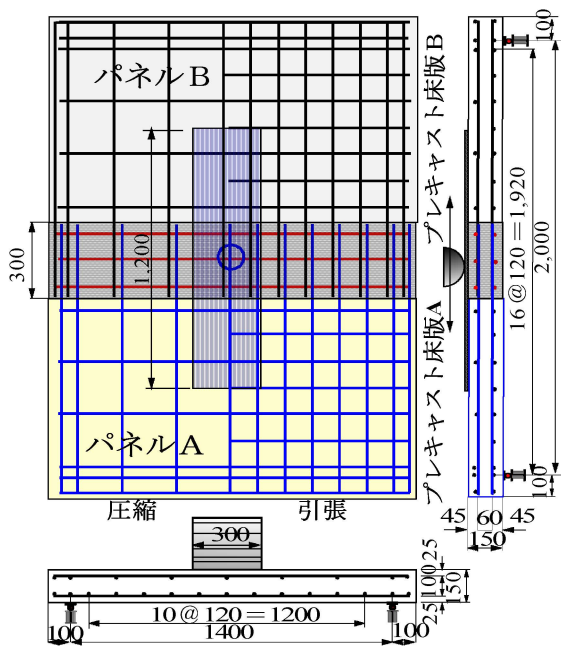
供試体寸法は全長、床版厚、支間はRC床版同様である。間詰部の寸法は、軸方向の支点から1000mm(支間中央)および軸直角方向の中央に幅300mmを設けた。これは、輪荷重幅300mmと同じ幅とした。間詰部の配筋は写真-4.3(2)に示すように、主鉄筋はD13を上下に3本並列配置した。継手部の鉄筋は主筋方向のかぶりを確保するために図-4.1(1)に示す三角形の突起を設けている。突起部は主筋の上縁と同位置となることからかぶりは確保されている。一方、配力筋は主筋の内側に配置され、図-4.1(2)に示す円形の突起を設けた鉄筋を配置した。取替RC床版B供試体の記号をR.RC-F-B (Replacement RC slab-Fatigue-B type)とする。



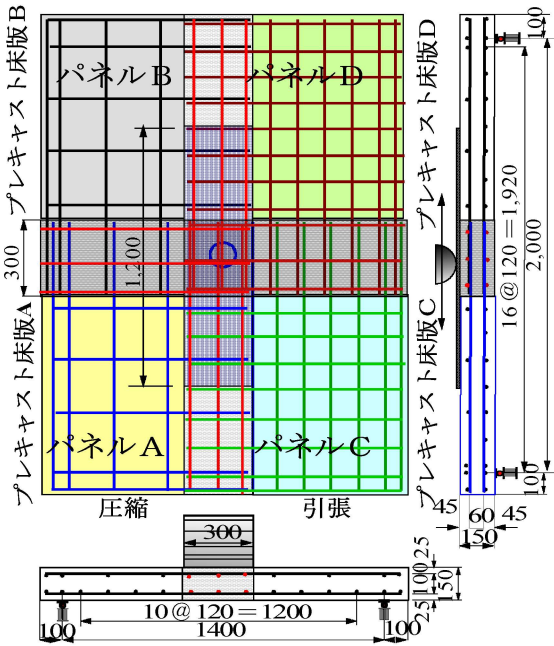
(1)供試体寸法



(2)RC 床版供試体

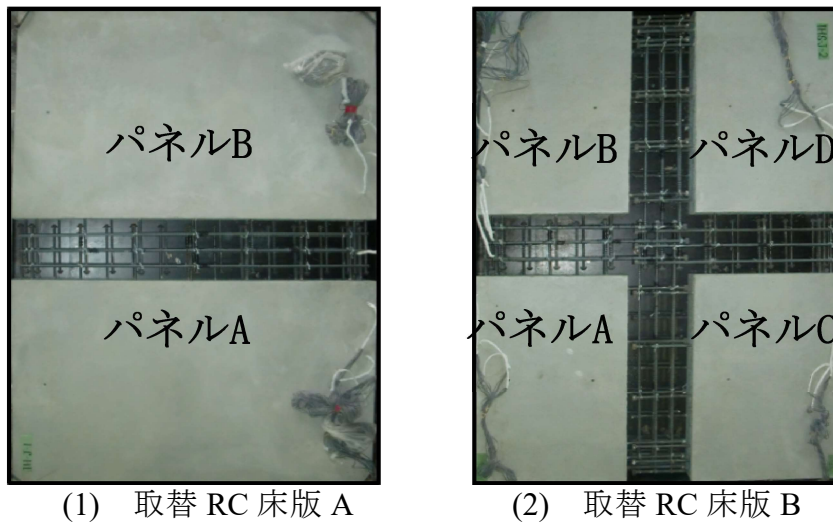


(3)取替 RC 床版 A



(4)取替 RC 床版 B

図 - 4.2 供試体寸法および鉄筋配置状況



図－ 4.3 取替 RC 床版の間詰部の配筋状況

4.3.3 取替RC床版の施工手順

取替 RC 床版 A および取替 RC 床版 B の製作は第 3 章と同様である。プレキャスト床版を並列した状態を図－ 4.3 に示す。この状態で間詰部に超速硬コンクリートを打設した。

4.4 実験方法および等価走行回数

4.4.1 実験概要

RC 床版および取替 RC 床版供試体の耐疲労性の評価には、輪荷重走行疲労試験機を用いる。ここで、RC 床版供試体を用いた輪荷重走行疲労試験の状況を写真－ 4.1 に示す。



写真－ 4.1 輪荷重走行疲労試験の状況

実験装置は写真－ 4.1 に示すように、荷重装置に車輪（幅 300mm，直径 450mm）を取り付け、荷重は 500kN まで載荷が可能である。試験体を台車に設置し、その台車をモータとクランクアームにより水平方向に連続走行させるものである。本実験装置を用いて、破壊時までの走行回数から等価走行回数を算定し、耐疲労性を評価する。

4.4.2 輪荷重走行疲労実験方法

(1) 実験方法

輪荷重走行疲労実験は、RC 床版供試体および取替 RC 床版供試体ともに幅 300mm の輪荷重を軸方向に 1,200mm の範囲を繰返し走行させる実験である。また、輪荷重走行疲労実験における初期荷重は 100kN から走行を開始し、4 万回走行ごとに荷重を 20kN ずつ増加する段階荷重載荷とする。140kN で 4 万回走行後は荷重 150kN に増大する。各実験において輪荷重走行 1, 10, 100, 1,000, 5,000 回および 5,000 回以降は 5,000 回走行ごとにたわみを計測した。

(2) 走行疲労実験における等価走行回数

本実験における輪荷重走行疲労実験は、段階荷重載荷による輪荷重走行疲労実験では、耐疲労性の評価はマイナー則に従うと仮定すると等価走行回数 N_{eq} の算定式は式(4.1)として与えられる。なお、式(4.1)における基準荷重 P は設計活荷重の 3/5 に安全率 1.2 を考慮した 72kN として等価走行回数を算出する。S-N 曲線の傾きの逆数 m の絶対値は、松井らが提案し、既往研究においても実績の多い 12.7 を適用する^{4.12), 4.13)}。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n (P_i/P)^{m \times n_i} \quad (4.1)$$

ただし、 P_i : 載荷荷重 (kN), P : 基準荷重 (= 72kN), n_i : 実験走行回数 (回), m : S-N 曲線の傾きの逆数 (= 12.7)^{4.12), 4.13)}

4.5 結果および考察

輪荷重走行疲労実験における等価走行回数 N_{eq} および RC 床版供試体の等価走行回数比を表－ 4.3 に示す。

4.5.1 等価走行回数

(1) RC床版

コンクリートの設計基準強度 24N/mm^2 ($\sigma_{28}=30.3\text{N/mm}^2$) の供試体 RC-A の実験走行回数 n_i は 54,000 回、式(4.1)より算定した等価走行回数 N_{eq} は 11.789×10^6 回である。これに対してコンクリートの設計基準強度 40N/mm^2 ($\sigma_{28}=49.6\text{N/mm}^2$) の供試体 RC-B の実験走行回数 n_i は 69,500 回、式(4.1)より算定した等価走行回数 N_{eq} は 21.971×10^6 回で

表－4.3 実験・等価走行回数および等価走行回数比

供試体	実験走行回数および等価走行回数					合計等価走行回数	等価走行回数比	
	荷重	100kN	120kN	140kN	150kN		RC-A比	RC-B比
RC-A	実験走行回数	40,000	14,000			54,000	—	0.54
	等価走行回数	2,593,806	9,196,173			11,789,979		
RC-B	実験走行回数	40,000	29,500			69,500	1.86	—
	等価走行回数	2,593,806	19,377,651			21,971,457		
R.RC-F-A-1	実験走行回数	40,000	40,000	40,000	4,501	124,501	22.50	12.07
	等価走行回数	2,593,806	26,274,781	186,107,271	50,297,372	265,273,230		
R.RC-F-A-2	実験走行回数	40,000	40,000	40,000	5,550	125,550	23.49	12.61
	等価走行回数	2,593,806	26,274,781	186,107,271	62,019,644	276,995,502		
R.RC-F-B-1	実験走行回数	40,000	40,000	40,000	5,350	125,350	23.30	12.51
	等価走行回数	2,593,806	26,274,781	186,107,271	59,784,702	274,760,560		
R.RC-F-B-2	実験走行回数	40,000	40,000	40,000	5,750	125,750	23.68	12.71
	等価走行回数	2,593,806	26,274,781	186,107,271	64,254,586	279,230,444		

ある。圧縮強度 30.3N/mm^2 の供試体 RC-A の 1.86 倍となる。よって、圧縮強度を高くすることで耐疲労性が大幅に向上する結果が得られた。この 2 タイプの RC 床版供試体の等価走行回数を基準に取替 RC 床版の耐疲労性を検証する。

(2) 取替RC床版A

供試体取替 RC 床版 A は、プレキャスト RC 床版を橋軸方向に並列に並べ、軸直角方向に間詰部を設けた床版である。この取替 RC 床版 A のプレキャスト RC 床版コンクリートの圧縮強度は、材齢 28 日で 56.4N/mm^2 、間詰コンクリートの材齢 14 日で圧縮強度が 48.3N/mm^2 である。供試体 R.RC-F-A-1 の実験走行回数 n_i は 124,501 回、式(4.1)より算定した等価走行回数 N_{eq} は 265.273×10^6 回である。設計基準強度 24N/mm^2 ($\sigma_{28}=30.3\text{N/mm}^2$) の供試体 RC-A の等価走行回数に対して、22.50 倍となり、本提案する取替 RC 床版は、圧縮強度も高いことから耐疲労性が大幅に向上する結果となった。また、取替 RC 床版供試体と同様の圧縮強度を目標とした供試体 RC-B の等価走行回数と比較すると 12.07 倍である。次に、供試体 R.RC-F-A-2 の実験走行回数 n_i は 125,550 回、等価走行回数 N_{eq} は 276.995×10^6 回である。供試体 RC-A の等価走行回数に対して、23.49 倍、設計基準強度 40N/mm^2 ($\sigma_{28}=49.6\text{N/mm}^2$) の供試体 RC-B の 12.61 倍である。供試体取替 RC 床版 A は軸方向の床版支間中央に幅 300mm の間詰部を設け、鉄筋の付着長は 280mm である。配力筋の端部には円形の突起を設け、継手部は床版部の 2 倍の鉄筋量となり、さらに間詰部のコンクリートには超速硬セメントを用いた超速硬コンクリートを打ち込んだことから間詰部の耐荷力が向上し、等価走行回数が向上したものと考えられる。よって、間詰部は弱点とならず取替床版全体の等価走行回数が向上する結果となった。

(3) 取替RC床版B

供試体取替 RC 床版 B は、2 車線における 1 車線側の施工が修した後に、2 車線側を施工した場合、橋軸方向の間詰部が必要となる。そこで、輪荷重走行方向と橋軸直角方向に間詰部を設けた取替 RC 床版である。この取替 RC 床版 B のプレキャスト RC 床版および間詰コンクリートの圧縮強度は取替 RC 床版 A と同様である。

供試体 R.RC-F-B-1 の等価走行回数 N_{eq} は 274.760×10^6 回である。供試体 RC-A の等価走行回数に対して 23.30 倍、供試体 RC-B の 12.51 倍である。また、橋軸直角方向に間詰部を設けた供試体取替 RC 床版 A に対して 1.04 倍の等価走行回数を得られた。次に、供試体 R.RC-F-B-2 の実験走行回数 n_i は 125,750 回、等価走行回数 N_{eq} は 279.230×10^6 回である。供試体 RC-A の等価走行回数に対して 23.68 倍、供試体 RC-B の 12.71 倍である。したがって、軸直角方向および軸方向に幅 300mm の間詰部を設けた場合においても、交差部および輪荷重直下の間詰部は弱点とならず耐疲労性が向上する結果得られた。これは、間詰部の交差部は鉄筋量も多く、またコンクリートには超速硬セメントを用いた超早強コンクリートであることから間詰部が強化され、本提案する取替床版の等価走行回数が向上したものと考えられる。

以上より、軸直角方向および軸直角方向と軸方向に幅 300mm（輪荷重幅と同様）を設けて、実橋での施工を考慮した場合においては間詰部上を車両が連続走行した場合においても耐疲労性が大幅に向上することから、実用的な取替 RC 床版であると考えられる。

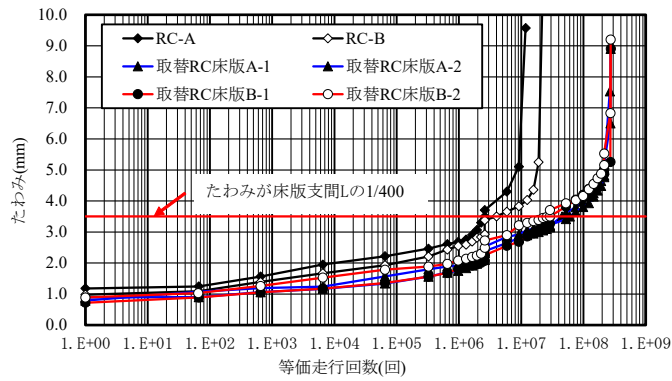
4.5.2 たわみと等価走行回数の関係

たわみと等価走行回数の関係を図－4.4 に示す。なお、図－4.4 には阿部ら^{4.14)}が提案する維持管理の目安である床版中央のたわみが、床版支間 L の $1/400$ である 3.5mm のたわみも併記した。

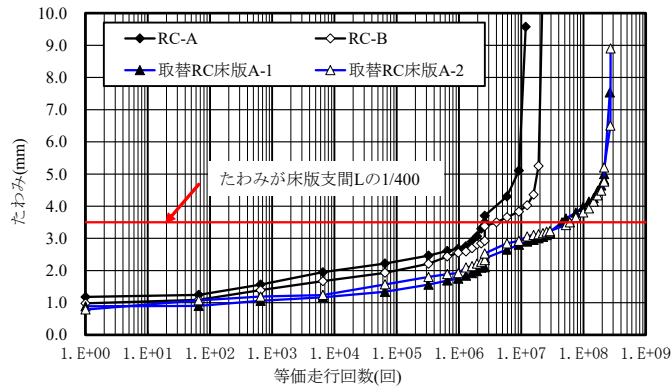
(1) RC床版

コンクリートの圧縮強度が 30.3N/mm^2 の供試体 RC-A のたわみと等価走行回数の関係は、図－4.4(1)に示すように、荷重 100kN 載荷し、1 走行後の初期たわみは 1.18mm である。その後の走行によりたわみが徐々に増加し、走行回数 40,000 回走行後（等価走行回数 2.593×10^6 回）で 3.41mm である。たわみが床版支間 L の $1/400$ である 3.50mm に達した時点の等価走行数は 2.594×10^6 回である。荷重を 120kN に上げ、1 走行後のたわみは 3.70mm である。その後の走行においてもたわみの増加が著しくなり、荷重 120kN で 14,000 回走行（等価走行回数 11.789×10^6 回）のたわみは 9.60mm となり、破壊に至った。

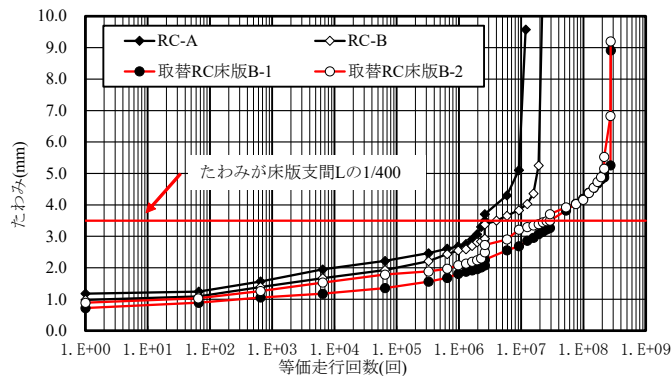
一方、コンクリートの圧縮強度が 49.6N/mm^2 の供試体 RC-B の荷重 100kN で 1 走行後のたわみは 1.09mm であり、供試体 RC-A のたわみを下回っている。40,000 回走行後のたわみは 2.90mm、荷重を 120kN に増加し、1 走行後のたわみは 3.38mm である。この時点で供試体 RC-A のたわみの 91% である。たわみが 3.50mm に達した時点の等価走行回数は 4.008×10^6 回であり、供試体 RC-A の等価走行回数の 1.5 倍である。この付近からたわみの増加がやや大きくなっている。等価走行回数 21.971×10^6 回の最大たわみが 10.5mm である。よって、要求性能であるコンクリートの圧縮強度 40N/mm^2 を目標とした配合により、耐久性が大幅に向上する結果が得られた。



(1)全供試体



(2)RC 床版および取替 RC 床版 A



(3)RC 床版および取替 RC 床版 B

図－4.4 たわみと等価走行回数の関係

(2) 取替RC床版A

供試体取替 RC 床版 A のコンクリートの圧縮強度は供試体 RC-B と同様の配合であるが、材齢 28 日の圧縮強度は 56.4N/mm^2 である。間詰部の超速硬セメントを用いた超早強コンクリートは材齢 14 日で 48.3N/mm^2 である。取替床版供試体 A のたわみと等価走行回数の関係は図－4.4(2)に示すように、供試体 R.RC-F-A-1 の荷重 100kN で 1 走行後のたわみは 0.89mm である。荷重 100kN で 40,000 回走行後のたわみは 2.10mm、荷重 120kN に増加し、40,000 回走行（等価走行回数 28.868×10^6 回）後のたわみは 3.15mm で

ある。たわみの計測位置は間詰部の中央であることから、鉄筋が左右のプレキャスト版から定着長 280mm が重ね継手となり、間詰部の曲げ剛性が向上し、たわみの増加が抑制されている。たわみが 3.50mm に達した時点の荷重は 140kN、等価走行回数は 45.100×10^6 回であり、供試体 RC-B の等価走行回数の 11.3 倍である。その後のこの付近からたわみの増加がやや大きくなっている。その後の走行においてもたわみは僅かに上昇している。等価走行回数 265.273×10^6 回の最大たわみが 7.55mm である。次に、供試体 R.RC-F-A-2 のたわみは供試体 R.RC-F-A-1 と比較してやや上回っている。荷重 100kN で 40,000 回走行（等価走行回数 2.593×10^6 回）後のたわみは 2.32mm、荷重 120kN に増加し、40,000 回走行（等価走行回数 28.868×10^6 回）後のたわみは 3.23mm である。たわみが 3.50mm に達した時点の等価走行回数は 62.200×10^6 回であり、供試体 RC-B の等価走行回数の 15.1 倍である。等価走行回数 276.995×10^6 回の最大たわみが 8.90mm である。

以上より、軸直角方向の間詰部は、鉄筋の配置量も多く、軸方向の鉄筋端部は円形状の突起を設けたことから付着力も向上し、耐久性が大幅に向上する結果が得られた。よって、本提案する取替床版構造の間詰部は曲げ剛性が向上することから、弱点とならず耐疲労性が向上することから、実用的な床版構造と言える。

(3) 取替RC床版B

供試体取替 RC 床版 B のコンクリートの圧縮強度および軸直角方向、軸方向の間詰部に用いた超早強コンクリートも同時施工したことから取替 RC 床版 A と同様である。取替 RC 床版 B のたわみと等価走行回数の関係は図-4.4(3)に示すように、荷重重 100kN で 1 走行後のたわみは 0.72mm である。この時点で取替 RC 床版 A のたわみより僅かに下まわっている。これは交差する間詰部には軸直角方向および軸方向で鉄筋が交差し、曲げ剛性が向上した結果である。供試体 R.RC-F-B-1 は荷重 100kN で 40,000 回走行後のたわみは 2.07mm、荷重 120kN に増加し、40,000 回走行後のたわみは 3.26mm である。たわみの計測位置は間詰部の中央であることから、鉄筋が左右のプレキャスト版から定着長 280mm が重ね継手となることから曲げ剛性が向上し、たわみの増加が抑制されている。たわみが 3.50mm に達した時点の荷重は 140kN、等価走行回数は 28.873×10^6 回であり、供試体 RC-B の等価走行回数の 7.20 倍、取替 RC 床版 A の平均に対しては 0.55 倍である。軸方向の幅 300mm 間詰部直上を輪荷重が走行したことから取替 RC 床版 A の中央のたわみを上回っている。たわみが床版支間 L の 1/400 を超えた付近からたわみの増加がやや大きくなっている。等価走行回数 274.760×10^6 回の最大たわみが 8.91mm である。

次に、供試体 R.RC-F-B-2 は荷重 100kN で 40,000 回走行後のたわみは 2.49mm、荷重 120kN に増加し、40,000 回走行（等価走行回数は 28.873×10^6 回）後のたわみは 3.50mm である。供試体 RC-B の等価走行回数の 7.20 倍、取替 RC 床版 A の平均に対しては 0.55 倍である。軸方向の幅 300mm 間詰部直上を輪荷重が走行したことから取替 RC 床版 A の中央のたわみを上回っている。等価走行回数 279.230×10^6 回

の最大たわみが 9.20mm である。

以上より、軸直角方向および軸方向に間詰部を設けた床版中央は、鉄筋の配置量も多く、橋軸直角方向の主筋には三角形、橋軸方向の配力鉄筋の端部に円形の突起を設けたことから付着力も高く、耐久性が大幅に向上する結果が得られた。よって、本提案する取替 RC 床版構造における軸直角方向および軸方向の間詰部は、曲げ剛性が向上することから、弱点とならず耐疲労性が向上することから、実用的な床版構造と言える。

4.5.3 ひずみと等価走行回数との関係

ひずみと等価走行回数の関係を図－4.5 に示す。なお、図－4.5 には表－4.2 に示す鉄筋の材料特性値より降伏ひずみは 1820×10^{-6} を併記した。

(1) RC床版

供試体 RC-A の主鉄筋のひずみと等価走行回数との関係は図－4.5(1), 1)に示すように、荷重 100kN 載荷し、1 走行後の初期ひずみは 489×10^{-6} であり、その後の走行によりひずみが徐々に増加し、走行回数 40,000 回走行後(等価走行回数 2.593×10^6 回)で $1,313 \times 10^{-6}$ である。降伏ひずみに達した等価走行回数は 5.610×10^6 回である。その後、荷重増加と走行を繰り返すことでひずみも著しく増加し破壊した。供試体 RC-B の主鉄筋のひずみと等価走行回数との関係は、荷重 100kN 載荷し、1 走行後の初期ひずみ 434×10^{-6} であり、その後の走行によりひずみが徐々に増加し、走行回数 40,000 回走行後(等価走行回数 2.593×10^6 回)で $1,224 \times 10^{-6}$ であり、供試体 RC-A を下まわっている。降伏ひずみに達した等価走行回数は 18.100×10^6 回である。コンクリートの圧縮強度が高い供試体 RC-B はたわみの増加傾向と同様に供試体 RC-A を下まわっている。

次に、配力筋のひずみについて考察する。配力筋のひずみは図－4.5(2), 1)に示すように供試体 RC-A および供試体 RC-B の初期ひずみは 295×10^{-6} , 243×10^{-6} と小さい。コンクリートの圧縮強度高い供試体 RC-B が僅かに低下している。両供試体とも荷重増加と走行を繰り返すことでひずみが増加するものの降伏ひずみに達していない。

(2) 取替RC床版A

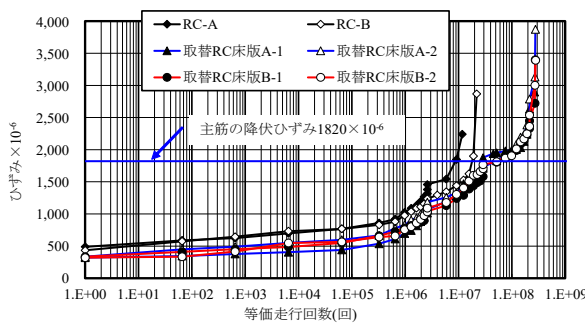
供試体 R.RC-F-A-1 の主筋のひずみと等価走行回数との関係は図－4.5(2)に示すように、荷重 100kN 載荷し、1 走行後の初期ひずみ 320×10^{-6} である。その後の走行によりひずみが徐々に増加しているものの供試体 RC-B と比較したひずみの増加が抑制されている。降伏ひずみに達した等価走行回数は 28.870×10^6 回である。供試体 RC-B の 1.6 倍である。その後の荷重増加および走行を繰り返すことでひずみも増加している。しかし、主筋は間詰部中央に配置された鉄筋であることから、鉄筋量も多く、ひずみの増加は抑制されている。また、供試体 R.RC-F-A-2 も同等な増加傾向を示している。降伏ひずみに達した等価走行回数は 52.131×10^6 回である。その後、荷重増加と走行を繰り返すことでひずみの急激な増加が見られない。

次に、配力筋のひずみであるが、供試体 R.RC-F-A-1 および供試体 R.RC-F-A-2 の

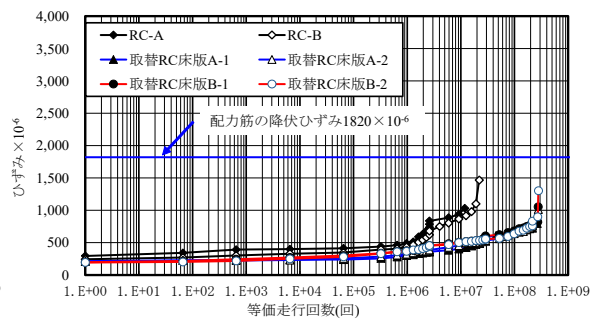
初期ひずみはそれぞれ 214×10^{-6} , 208×10^{-6} である。その後、両供試体ともにひずみの増加傾向は同様であり、いずれも降伏ひずみに達していない。

(3) 取替RC床版

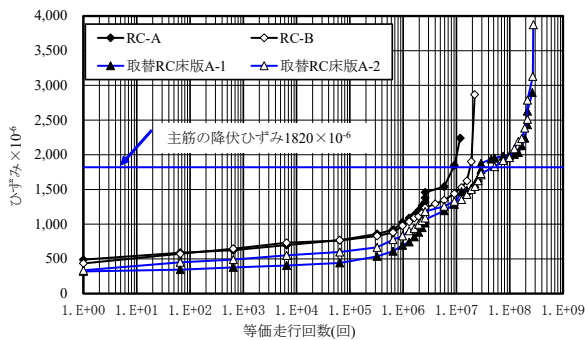
供試体 R.RC-F-B1 の主筋のひずみと等価走行回数(回)の関係は図-4.5(2)に示すように、荷重 100kN 載荷し、1 走行後の初期ひずみ 335×10^{-6} であり、供試体取替 RC 床版 A-1 とほぼ同等である。降伏ひずみに達した等価走行回数は 55.800×10^6 回であり、降伏ひずみ達した等価走行回数も増大している。ひずみの計測位置は床版中央の主筋であり、この位置は間詰部が交差し、鉄筋量も多い位置であり、たわみの増加と同様にひずみの増加も抑制されている。



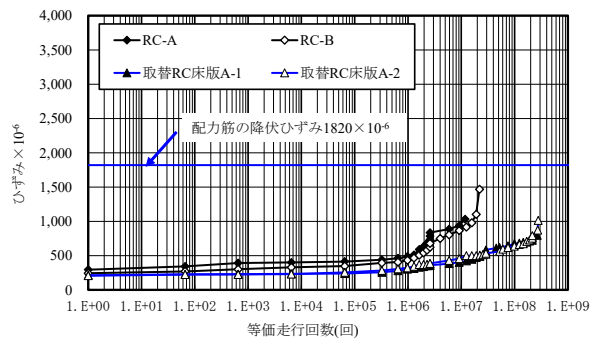
1)全供試体



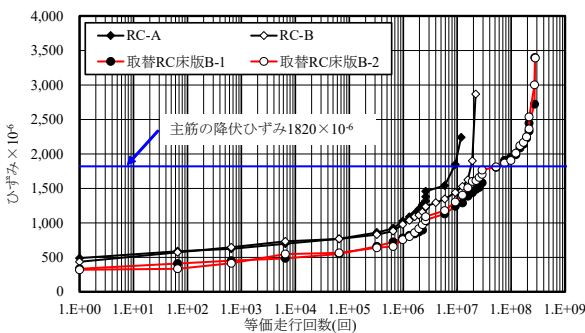
1)全供試体



2)RC 床版および取替 RC 床版 A

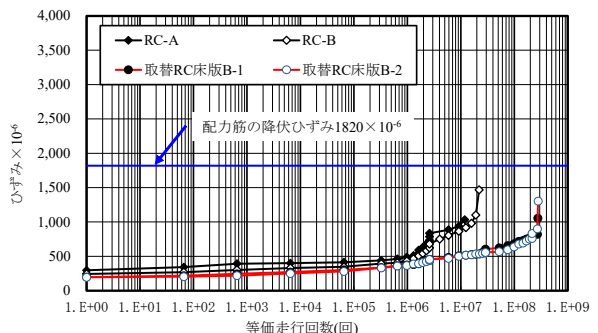


2)RC 床版および取替 RC 床版 A



3)RC 床版および取替 RC 床版 B

(1)主筋



3)RC 床版および取替 RC 床版 B

(2)配力筋

図-4.5 ひずみと等価走行回数(回)の関係

供試体 R.RC-F-B-2 は荷重 100kN 載荷し、1 走行後の初期ひずみ 320×10^{-6} である。降伏ひずみに達した等価走行回数は 55.500×10^6 回である。供試体取替 RC 床版 B の降伏後の荷重増加および繰り返し走行による急激なひずみの増加が見られない。

次に、配力筋のひずみであるが、供試体 R.RC-F-B-1 および供試体 R.RC-F-B-2 の初期ひずみはそれぞれ 197×10^{-6} 、 194×10^{-6} と供試体取替 RC 床版 A-1 および A-2 の初期ひずみを下回っている。その後、両供試体ともにひずみの増加傾向は同様であり、いずれも降伏ひずみに達していない。

以上より、軸直角方向および軸直角方向と軸方向に間詰部を有する両取替 RC 床版の主筋、配力筋とひずみと等価走行回数との関係においては、間詰部を設けない RC 床版供試体のひずみの増加が下回り、間詰部の継手構造は弱点とならず実用的である結果が得られた。

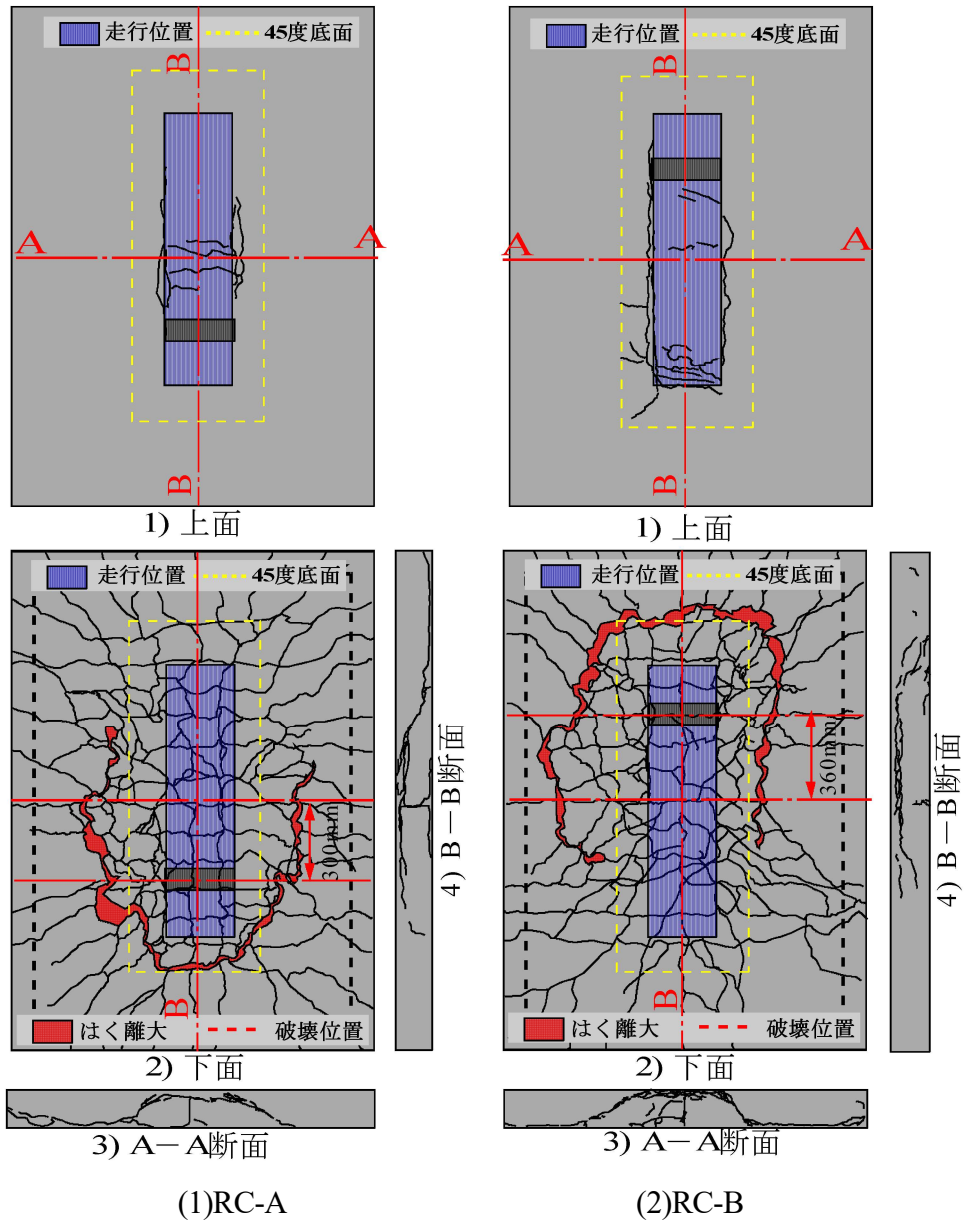
4.5.4 損傷状況

(1) RC床版

RC 床版の破壊時の損傷状況を図－ 4.6 に示す。なお、走行範囲を青枠で図－ 4.6 に示した。また、輪荷重走行位置が 45 度底面の範囲を黄色の破線、赤ははく離範囲である。

RC 床版供試体 RC-A の上面のひび割れ状況は図－ 4.6(1), 1)に示すように、走行面中央にひび割れ損傷が見られる。下面のひび割れ状況は図－ 4.6(1), 2)に示すように、供試体 RC-A のコンクリートの圧縮強度は 30.3N/mm^2 、等価走行回数 11.789×10^6 回である。床版下面には 2 方向のひび割れが発生し、輪荷重の走行位置から 45 度底面の外側および破壊位置には、ダウエル効果の影響が及ぼすことによるはく離が見られる。破壊は輪荷重走行中、床版中央から 300mm 付近で押抜きせん断破壊となった。切断面 A-A は図－ 4.6(1), 3)に示すように、輪荷重設置面から 45 度の斜めひび割れが発生している。切断面 B-B は図－ 4.6(1), 4)に示すように、破壊位置で 45 度の斜めひび割れが発生している。破壊は床版中央から 300mm の位置で押抜きせん断破壊となった。

次に、供試体 RC-B の上面のひび割れ状況は図－ 4.6(2), 1)に示すように、輪荷重の折り返し付近にひび割れが見られる。供試体 RC-B のコンクリートの圧縮強度は 49.6N/mm^2 、等価走行回数 21.971×10^6 回である。破壊時のひび割れ状況は、供試体 RC-A の等価走行回数の 1.86 倍であるが、下面のひび割れは図－ 4.6(2), 2)に示すように輪荷重走行による 2 方向ひび割れが発生している。輪荷重走行範囲から 45 度底面の外側にはダウエルの影響によるはく離が発生している。切断面 A-A は図－ 4.6(2), 3)に示すように、輪荷重設置面から 45 度の斜めひび割れ、切断面 B-B は図－ 4.6(2), 4)に示すように、破壊位置で 45 度の斜めひび割れが発生している。破壊は床版中央から 360mm の位置で押抜きせん断破壊となった。



図－ 4.6 RC 床版供試体のひび割れ損傷

以上のように供試体 RC-A, B は輪荷重走行による 2 方向ひび割れが、鉄筋配置位置付近に格子状に発生している。また、45 度底面にはダウエル効果の影響によるはく離が見られ、RC 床版特有の押抜きせん断破壊である。

(2) 取替RC床版A

供試体 R.RC-F-A の破壊時の損傷状況を図－ 4.7 に示す。なお、走行範囲を青枠で図－ 4.7 に示した。また、輪荷重走行位置が 45 度底面の範囲を黄色、赤は、はく離範囲である。

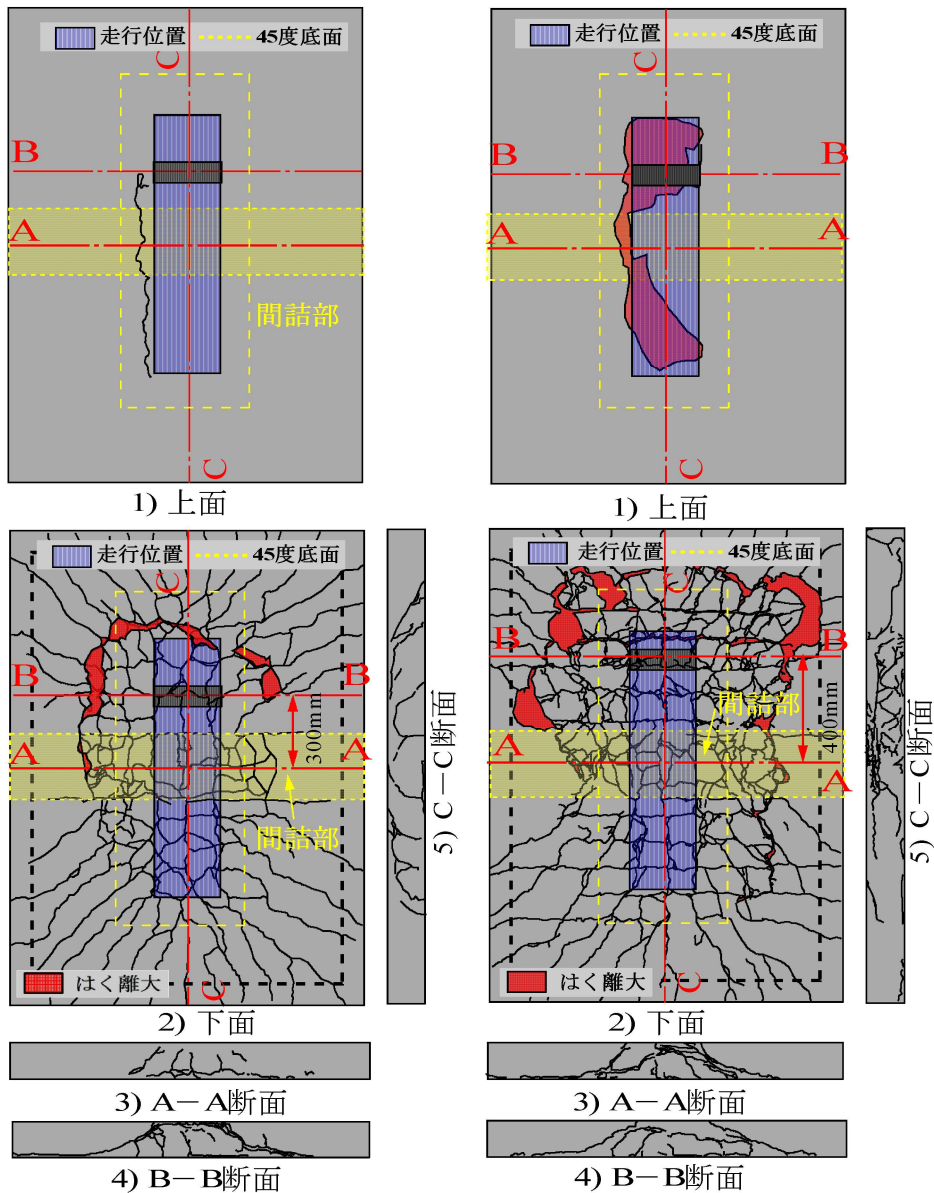
供試体 R.RC-F-A のプレキャスト部の圧縮強度は 56.4N/mm^2 、間詰部は 48.3N/mm^2 の圧縮強度である。供試体 R.RC-F-A-1 の上面のひび割れ状況は図－ 4.7(1), 1)に示

すように、走行面に沿った軸方向のひび割れが見られる。また、間詰部の界面にはひび割れが見られない。下面のひび割れ状況は図－ 4.7(1), 2)に示すように、輪荷重走行位置付近は2方向のひび割れが発生している。また、輪荷重走行位置から45度底面の外側にはダウエル効果の影響によるはく離が見られる。間詰部界面にそったひび割れも発生している。床版支間中央に、軸直角方向に幅 300mm の範囲の間詰部を設けたが、配力筋方向の鉄筋端部に円形の突起を設けたことから、付着力の低下に伴う損傷が見られない。さらに、間詰部は鉄筋がダブルで配置することから、輪荷重走行中に間詰部での破壊は見られない。切断面 A-A, B-B は図－ 4.7(1), 3) および 4)に示すように、輪荷重設置面から45度の斜めひび割れが発生している。切断面 C-C は図－ 4.7(1), 5)に示すように、破壊位置で45度の斜めひび割れが発生している。破壊は床版中央から300mmの位置で押抜きせん断破壊となった。

次に、供試体 R.RC-F-A-2 の破壊時の損傷状況を図－ 4.7(2)に示す。供試体 R.RC-F-A-2 の等価走行回数は 276.995×10^6 回である。供試体 R.RC-F-A-2 の上面のひび割れ状況は図－ 4.7(2), 1)に示すように、走行面には上面コンクリートの損傷が著しい。これは、等価走行回数が大幅に向上したことによる損傷である。なお、間詰部の界面にはひび割れが見られない。下面のひび割れ状況は図－ 4.7(2), 2)に示すように、輪荷重走行位置付近は2方向のひび割れが発生し、輪荷重走行位置から45度底面の外側にはダウエル効果の影響によるはく離が見られる。間詰部界面にそったひび割れも発生している。

床版支間中央に、軸直角方向に幅 300mm の範囲の間詰部を設けたが、配力筋方向の鉄筋端部に円形の突起を設けたことから、付着力の低下に伴う損傷が見られない。切断面 A-A, B-B は図－ 4.7(1), 3)および 4)に示すように、輪荷重設置面から45度の斜めひび割れが発生している。切断面 C-C は図－ 4.6(2), 5)に示すように、B パネル側の損傷が著しい。破壊は床版中央から400mmの位置で押抜きせん断破壊となった。

以上より、取替 RC 床版 A は試験体中央で幅 300mm の間詰部を設けたが、継手部の鉄筋に円形の突起を設けたことから付着切れに伴う損傷が見られない。また、鉄筋がダブル配置となることから、間詰部は弱点とならず耐疲労性が向上した。



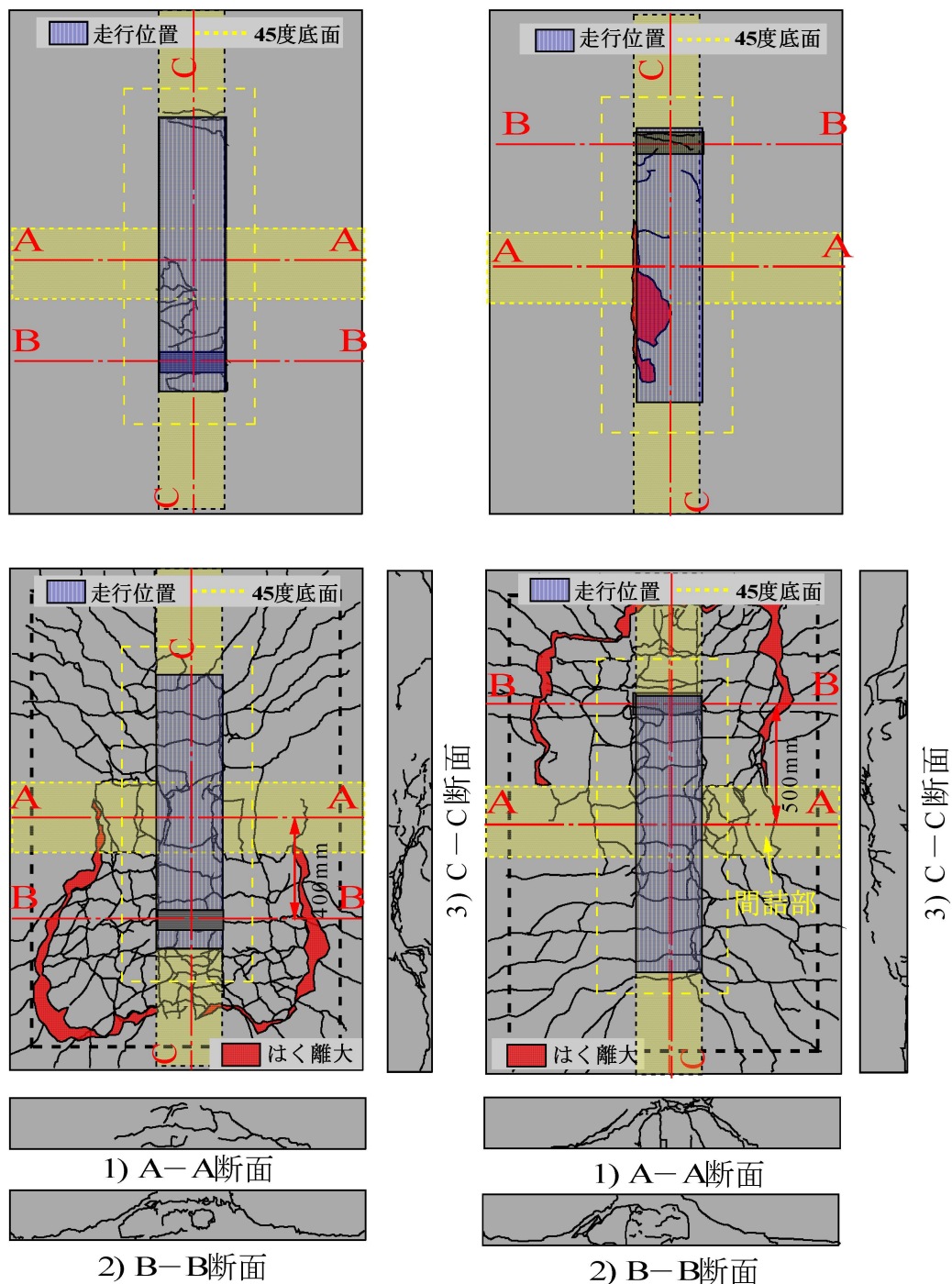
(1)取替 RC 床版 A-1 (R.RC-F-A-1) (2)取替 RC 床版 A-2 (R.RC-F-A-2)

図－4.7 取替 RC 床版 A のひび割れ損傷

(3) 取替RC床版B

取替 RC 床版 B の破壊時の損傷状況を図－4.8 に示す。取替 RC 床版 B のプレキャスト部および間詰部の圧縮強度は取替 RC 床版 A と同様である。供試体 R.RC-F-B-1 の等価走行回数は 274.760×10^6 回である。供試体 R.RC-F-B-1 の上面のひび割れ状況は図－4.8(1), 1)に示すように、走行面に軸直角方向のひび割れが見られるものの大きな損傷は見られない。下面のひび割れ状況は図－4.8(1), 2)に示すように取替 RC 床版 A とほぼ同等である。この床版は床版中央で 2 方向に間詰部を設け、軸方向の間詰部上を輪荷重走行による疲労実験を行ったものである。輪荷重走行範囲には 2 方向のひび割れ

が発生し、輪荷重走行位置から 45 度底面の外側にはダウエル効果の影響によるはく離が見られる。この供試体は 4 主桁における内側 2 主桁の中間部に間詰部を設けた構造である。この軸方向の間詰部上を輪荷重が走行した場合においても、中央の間詰部の交差位置は主筋端部に三角形の突起、配力筋には円形の突起が設けられ、それぞれが重ね



(1)取替 RC 床版 B-1(R.RC-F-B-1) (2)取替 RC 床版 B-2 (R.RC-F-B-2)

図－4.8 取替 RC 床版 B のひび割れ損傷

継手構造となることから交差部はそれぞれがダブル配置となることから破壊しにくい構造である。切断面 A-A, B-B は図－ 4.8(1), 3)および 4)に示すように、輪荷重設置面から 45 度の斜めひび割れが発生し、内部に水平ひびわれも発生している。切断面 C-C は図－ 4.8(1), 5)に示すように、破壊付近に集中してひび割れが発生している。破壊は床版中央から 400mm の位置で押抜きせん断破壊となった。

供試体 R.RC-F-B-2 の等価走行回数は 279.230×10^6 回である。上面のひび割れ状況は図－ 4.8(2), 1)に示すように、走行面に軸直角方向のひび割れと一部にはく離が見られるものの大きな損傷は見られない。下面のひび割れ状況は図－ 4.8(2), 2)に示すように供試体 R.RC-F-B-1 とほぼ同等である。2 方向に間詰部を設けているが間詰部には大きな損傷が見られない。輪荷重走行範囲には 2 方向のひび割れが発生し、輪荷重走行位置から 45 度底面の外側にはダウエル効果の影響によるはく離が見られる。切断面 A-A, B-B は図－ 4.8(2), 3)および 4)に示すように、輪荷重設置面から 45 度の斜めひび割れが発生し、内部に水平ひびわれも発生している。切断面 C-C は図－ 4.8(2), 5)に示すように、破壊付近に集中してひび割れが発生している。破壊は床版中央から 500mm の位置で押抜きせん断破壊となった。

以上より、取替 RC 床版 B は供試体中央に軸直角方向と軸方向に幅 300mm の間詰部を設けたが、本提案する継手部構造は弱点とならず耐疲労性が向上する結果となった。よって、押抜きせん断破壊はプレキャスト部である RC 床版で破壊に至る結果となった。

4.6 まとめ

近年、RC 床版の老朽化や設計基準の変遷に伴い、現行道示の規定を満足したプレキャスト床版へと取替されている。そこで、鉄筋端部に 2 タイプの突起を設けた継手部を有する取替 RC 床版を提案し、耐疲労性の検証を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 本提案する鉄筋端部に 2 タイプの突起を設けた鉄筋を主筋および配力筋方向に配置し、間詰部で重ね継手構造とした。実験供試体は施工条件を考慮してパネルを工場で作製し、間詰部を設けた供試体のコンクリートには超速硬セメントを用いた超早強コンクリートを打ち込み施工した。その結果、本構造は施工性にも優れた取替 RC 床版である。
- (2) コンクリートの設計基準強度 24N/mm^2 ($\sigma_{28}=30.3\text{N/mm}^2$) の供試体 RC-A とコンクリートの設計基準強度 40N/mm^2 ($\sigma_{28}=49.6\text{N/mm}^2$) の供試体 RC-B の等価走行回数 N_{eq} は、供試体 RC-A の 1.86 倍となり、圧縮強度を高くすることで耐疲労性が大幅に向上する結果が得られた。
- (3) 輪荷重走行疲労実験では、軸直角方向に間詰部を設けた取替 RC 床版 A 供試体の等価走行回数は、同一設計基準強度で配合したコンクリートで作製した RC 床版供試体 RC-B に対して、12.1 倍の等価走行回数を得られた。また、軸方向および軸直角方向の 2 方向に間詰部を設けた供試体は RC-B に対して 12.5 倍の等価走行回数を得

られ、間詰部が弱点とならず耐疲労性が向上する結果が得られた。

- (4) RC 床版および取替床版の軸方向の支間中央のたわみと等価走行回数において、取替 RC 床版 A, B の間詰部鉄筋の付着を考慮し、280mm の継手長とし、先端部にそれぞれの突起を設けたことから、間詰部の剛性が高まり、輪荷重走行によるたわみの増加が抑制され耐疲労性が大幅に向上する結果が得られた。
- (5) 輪荷重走行疲労実験における破壊状況は、RC 床版および取替 RC 床版 A, B ともに、輪荷重の走行による 2 方向のひび割れが発生し、輪荷重 45 度底面の外側にはダウエル効果によるはく離が発生し、破壊は押抜きせん断破壊となった。間詰部を設けた 2 タイプの供試体においても破壊はプレキャスト版である RC 床版で破壊に至ることから、間詰部は弱点とならず、耐疲労性が向上する結果が得られた。
- (6) 輪荷重走行疲労実験における等価走行回数および荷重とたわみの関係、破壊時の損傷状況においても、RC 床版以上の耐疲労性が評価されたことから、本提案するプレキャスト化した取替 RC 床版構造は実用的であると考えられる。

第4章参考文献

- 4.1) 三田村浩, 佐藤京, 本田幸一, 松井繁之: 道路橋RC床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響. 構造工学論文集 Vol.55A, pp.1420-1431, 2009.3
- 4.2) 伊藤清志, 阿部忠, 岩崎正二, 大塚祐二: 塩害・凍害の複合劣化を受けたRC床版の上面増厚補強法による耐疲労性の評価, コンクリート構造物の補修・補強アップグレード論文・報告集, 第13巻, pp.373-381, 2013.11
- 4.3) 高橋明彦, 阿部忠, 小野晃良, 大西弘志, 久田真: 打ち継ぎ目を有するRCプレキャスト床版の耐疲労性の検証に関する実験研究, 第10回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp29-34, 2018.11
- 4.4) 水口和彦, 阿部忠, 勝呂翔平: 輪荷重走行による疲労と凍害の複合劣化を受けたRC部材の耐疲労性評価, セメント・コンクリート論文集, Vol.70, pp.421-427, 2017.3
- 4.5) 岩手県宮古地方振興局土木部: 法師渡大橋ほか橋梁補修詳細設計業務委託報告書, 2008.7
- 4.6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説I, II, 2002
- 4.7) 高橋明彦, 阿部忠, 小野晃良, 大西弘志, 久田真: 間詰部を設けた取替RC床版の耐疲労性の評価に関する実験研究, 構造工学論文集, Vol. 65A, pp.655-664, 2019.3
- 4.8) 小野晃良, 阿部忠, 高橋明彦, 武田秀人: 2方向に間詰部を設けた取替RC床版の耐荷力・耐疲労性の検証および実橋における施工技術, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.2, pp.1309-1314, 2020.7
- 4.9) 小野晃良, 阿部忠, 木村延久, 高橋明彦: 走行荷重が作用する取替RC床版の最大耐荷力および破壊メカニズムに関する実験研究, 第11回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp29-34, 2020
- 4.10) 小野晃良, 阿部忠, 水口和彦, 川井豊: プレキャスト床版に突起型継手を設けた取替RC床版間詰部の開閉幅が耐疲労性に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.68A, pp711-721, 2022.3
- 4.11) 小野晃良, 阿部忠, 水口和彦, 大西弘志: 取替RC床版接合面に接着剤を用いた場合の耐荷力性能と耐疲労性の検証および開閉幅の抑制効果, セメント・コンクリート論文集, Cement Science and Concrete Technology 75 (1), pp278-285, 2022.3
- 4.12) 松井繁之: 道路橋床版設計・施工と維持管理, 森北出版, 2007.10
- 4.13) 川井豊, 阿部忠, 木田哲量, 高野真希子: 道路橋RC床版のS-N曲線に関する一考察, 第七回路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.263-268, 2012.6
- 4.14) 阿部忠, 木田哲量, 高野真希子, 小森篤也, 児玉孝喜: 輪荷重走行疲労実験

における RC 床版上面増厚補強法の耐疲労性の評価法, 構造工学論文集, Vol.
56A, pp. 1270-1281, 2010.3

第5章 輪荷重走行荷重実験における間詰部の開閉幅およびたわみ振幅が耐荷力に及ぼす影響

5.1 はじめに

道路橋長寿命化修繕計画事業が地方自治体で取り組みされてから十数年以上が経過し、毎年平準化された予算の中で小規模から大規模な修繕が実施され、長寿命化が図られている^{5.1), 5.2)}。しかし、既に大規模な修繕が実施された RC 床版においては再劣化が生じ、健全性が失われている^{5.3)}。また、1994 年改定の道路橋示方書（以下、道示とする）^{5.4)}以前に設計された RC 床版は床版厚が薄い。例えば 1973 年改定道示^{5.5)}で設計された RC 床版は現行道示と比較すると床版厚が 40mm 程薄く、補強工事においては大規模な修繕対策が必要となる。とくに、劣化が著しい床版や補強後に再劣化した床版は、既設 RC 床版を撤去し、耐荷力性能や耐疲労性の向上、施工においては工期の短縮が図れる取替床版が検討されている。既往の取替床版の構造の多くはプレキャスト化し、橋軸直角方向（主筋方向）を PC 構造とした取替床版であり、各企業が開発された継手構造が採用され間詰部長も 300mm 程度である。継手部構造は橋軸方向筋（配力筋方向）にナットを取付けした合理化継手構造^{5.6)}やループ継手構造^{5.7)}などが提案され、いずれも輪荷重走行疲労実験を実施し、耐疲労性が評価され実橋で採用されている。

一方、筆者ら^{5.8), 5.9), 5.13), 5.14)}は、主筋および配力筋方向ともに異形鉄筋を配置したプレキャスト RC 床版構造を提案した。継手構造は主筋には三角形状、配力筋には円形の突起を設けて、道示に規定する RC 床版の鉄筋配置が可能な構造とし、間詰部幅を 300mm とした構造である。この取替 RC 床版においては輪荷重走行疲労試験を実施し、耐疲労性を評価し、実橋においても採用されている。

以上のように取替 PC 床版および取替 RC 床版においても、耐荷力性能や耐疲労性は評価されているが、プレキャスト床版と間詰部との界面が輪荷重の繰り返し走行による疲労の進行に伴って、打ち継ぎ界面ははく離に伴うひび割れの発生が懸念される。プレキャスト床版間の界面のはく離に伴うひび割れの発生は、雨水の浸透により寿命低下に大きく影響すると考えられる。阿部ら^{5.10)}の実験においても疲労が進むにつれプレキャスト床版と打ち継ぎコンクリートとの界面ではく離が確認されている。

そこで、第 5 章では、取替 RC 床版におけるプレキャスト床版と間詰部の界面のはく離に伴うひび割れの発生を抑制するために界面に付着用接着剤である高耐久型エポキシ系接着剤（以下、接着剤）を用いてはく離の抑制効果を検証する。付着面の強度試験として、接着剤「あり」、「なし」のコンクリート円柱供試体を製作し、直接引張試験による界面の引張強度、一面せん断試験によるせん断強度を検証する。

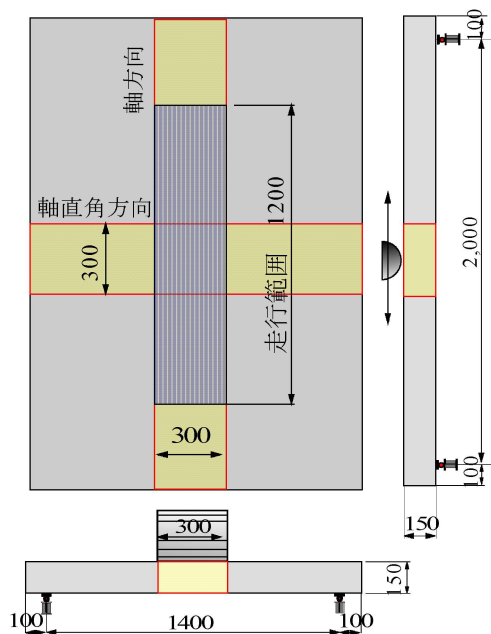
次に、プレキャスト床版側面に接着剤「あり」、「なし」の取替 RC 床版供試体を用いて輪荷重走行荷重実験を行い、最大耐荷力および界面の開閉幅、たわみ振幅が耐荷力性能に及ぼす検証を行い、各種取替床版の界面のはく離に伴うひび割れの抑制効果の一助としたい。

5.2 各種間詰部の損傷事例

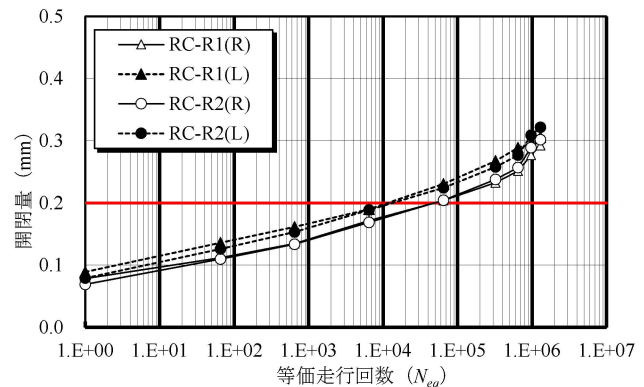
土木学会鋼構造シリーズ「道路橋床版の維持管理マニュアル 2020」^{5.11)}においては、プレキャスト PC 床版の間詰部コンクリートの打ち継ぎ部は、一般に RC 構造となるため他の部位に比べて弱点になりやすくひび割れ発生などの損傷が懸念されると記載されている。

間詰部と PC 床版部との界面のひび割れ幅に関する実験においては、表ら ^{5.12)}は合理化継手構造の取替 PC 床版を用いて輪荷重走行疲労実験を実施している。供試体は 2017 年改定道示に準拠して製作した供試体を用いて正曲げで 100 年相当、その後、疲労試験と負曲げ載荷を行っている。その結果、疲労と負曲げ試験時に左側界面のひび割れ幅の増加率は 67% である。破壊時のひび割れ状況においても間詰部側のせん断キーの上下にひび割れが発生しているものの漏水は発生していない。いずれにおいても疲労による間詰部界面がひび割れの発生し開閉することが確認されている。

一方、阿部ら ^{5.10)}は道示に規定する床版寸法の 3/5 モデルしたプレキャスト床版間に幅 300mm の間詰部を設け、継手構造をループ型にして製作し、コンクリートを打ち込みした取替 RC 床版 2 体を用いて、荷重 100kN で 20,000 回走行の輪荷重走行疲労実験を行い、接合部のはく離による開閉幅について検証している。ここで、



図－ 5.1 供試体寸法



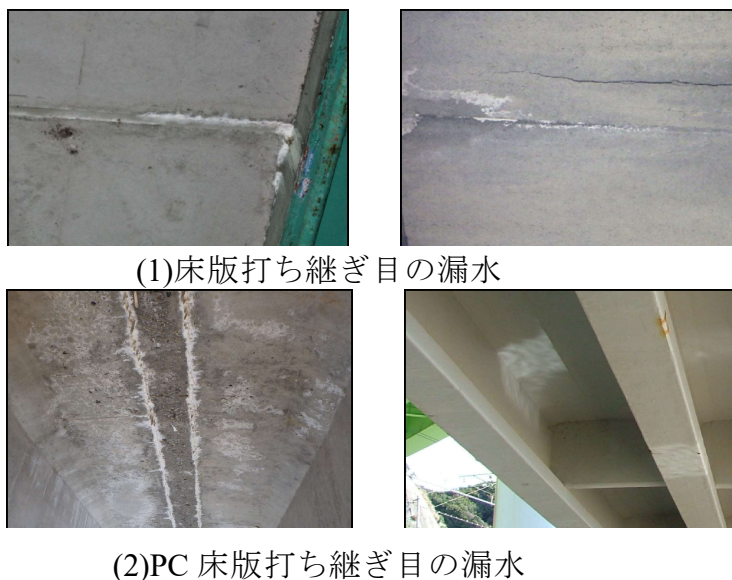
図－ 5.2 開閉量と等価走行回数の関係

供試体寸法を図－ 5.1 に示す。本研究で用いた取替 RC 床版寸法と同等である。

図－ 5.1 に示すように間詰部幅は 300mm，継手構造はループ状である。間詰部開閉幅の左側の π ゲージを L，右側を R としている。実験は 20,000 回走行後コンクリート舗装を舗設する試験を実施するための試験体でもある。間詰部の開閉幅の検証は，輪荷重走行疲労実験の走行回数 20,000 回，等価走行回数 123.219×10^6 回までの開閉幅と等価走行回数の関係を図－ 5.2 に示す。取替 RC-R1(L)の開閉幅が 0.2mm を超えた等価走行回数は 19,000 回である。また，取替 RC-R1(R)は 58,000 回である。等価走行回数 123.219×10^6 回走行ではそれぞれ 0.30mm，0.29mm である。一方，取替 RC-R2(L)および取替 RC-R1(R)がひび割れ幅 0.20mm を超えた等価走行回数はそれぞれ 24,100 回，59,100mm である。また，等価走行回数 123.219×10^6 回の開閉幅はそれぞれ 0.32mm，0.30mm である。

以上より，間詰部の開閉はかなり早い段階で発生する結果が得られている。なお，本実験より得られた間詰部の開閉量は，開閉量の抑制効果の検証のために用いた供試体であり，現在，提案されている取替床版とは継手構造が異なるものである試験体であった。

次に，実橋のコンクリート打継ぎ界面の損傷状況を写真－ 5.1 に示す。写真－ 5.1(1)は歩道部のプレキャスト床版の打継ぎ部のはく離およびひび割れ状況である。また，写真－ 5.1(2)は PCT 桁橋の主げた間の間詰部のはく離および漏水・遊離石灰の発生状況である。いずれの PC 床版においても横締め PC ケーブルが配置されている。



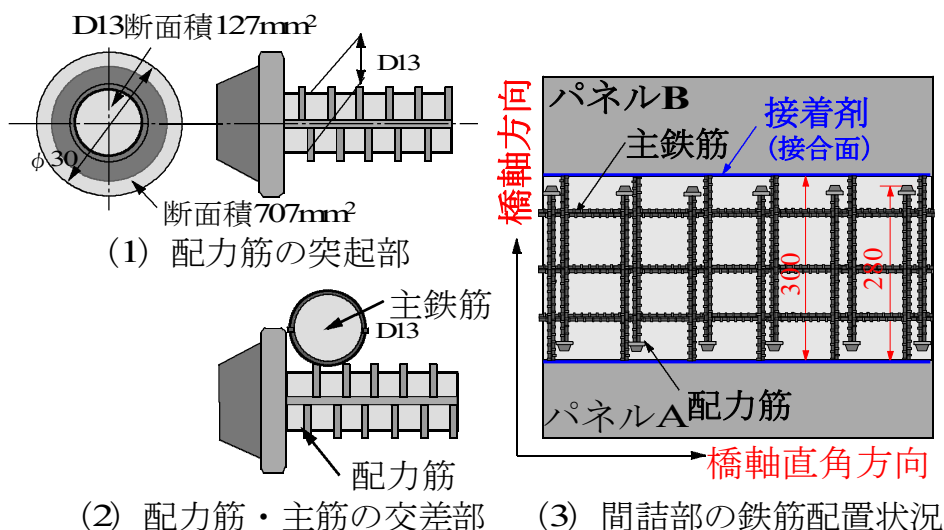
写真－ 5.1 コンクリート打ち継ぎ界面の損傷状況

以上のように，プレキャスト床版および PC 橋の間詰部界面が疲労の進行に伴い，はく離に伴うひび割れが発生している。よって，プレキャスト版の界面およびコン

クリートの打継ぎ界面のはく離に伴うひび割れを抑制する対策が重要な課題であると考えられる。

5.3 取替RC床版の継手構造^{(5.8), (5.13), (5.14)}

本実験に用いる取替 RC 床版の継手構造を図－ 5.3 に示す。



図－ 5.3 配力筋方向の継手構造

一般的に取替 RC 床版の継手は、橋軸方向の配力筋が継手となる。そこで、橋軸方向の配力筋の継手構造は図－ 5.3(1)に示すように、付着力を高めるために円形の突起を設けた。本取替 RC 床版供試体の配力筋には D13 の鉄筋を用いることから端部に直径 30mm の円形の突起（断面積 707mm^2 ）を設ける。なお、橋軸直角方向の主筋の突起形状を三角形とし、底辺側がかぶりとなる。鉄筋配置においては図－ 5.3(2)に示すように橋軸直角方向が主筋となり、配力筋は橋軸方向で主筋の内側に配置されることから突起はかぶりに影響を与えない構造である。また、継手長は図－ 5.3(3)に示すように 280mm とし、間詰部幅は 300mm である。

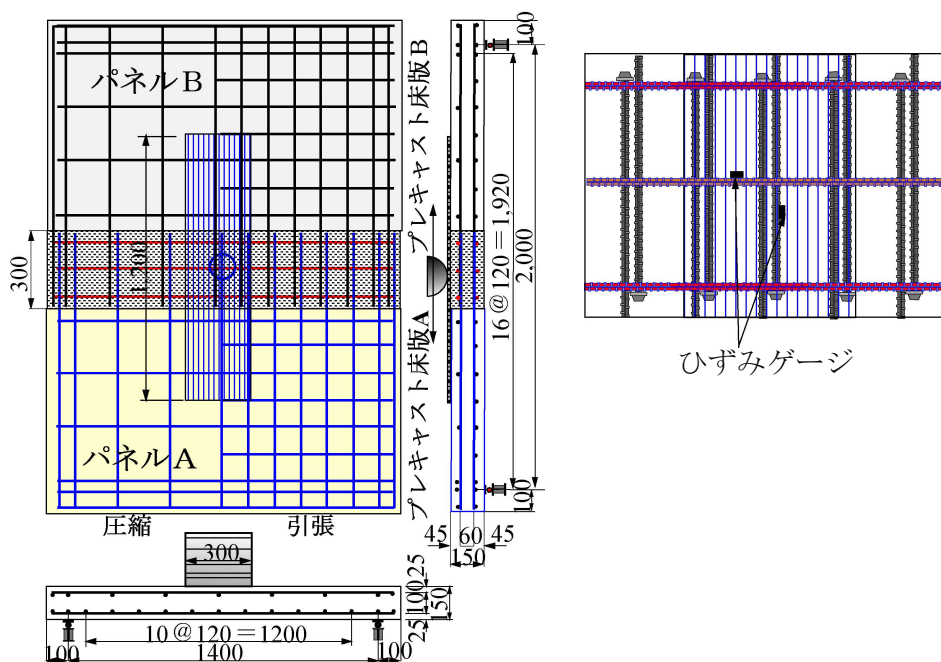
5.4 供試体寸法および使用材料

5.4.1 供試体寸法および鉄筋配置

取替 RC 床版供試体は、1994 年改定以降の道示^{5.4)}に準拠し、その 3/5 モデルとする。ここで、供試体寸法を図－ 5.4 に示す。

走行実験および輪荷重走行疲労実験に用いる取替 RC 床版供試体寸法は図－ 5.4 に示すように、床版支間方向 1,600mm、軸方向 2,200mm、床版厚 150mm とする。なお、床版支間は 1,400mm である。引張側の主鉄筋および配力筋には D13 を 120mm 間隔で配置し、圧縮側には引張鉄筋量の 1/2 を配置した。

プレキャスト床版側面の界面には 5mm 程度の目荒しを設け、超速硬コンクリートを打ち込んだ供試体および側面の凹凸面に接着剤を塗布し、超速硬コンクリートを打ち込んだ供試体を 2 体製作した。輪荷重走行実験における接着剤なし、ありの供試体名称をそれぞれ R.RC-R-N (Replacement RC slab-Running load-Normal), R.RC-R-A (Replacement RC slab-Running load-Adhesive) とする。



図－ 5.4 1 方向に間詰部を設けた供試体寸法

表－ 5.1 コンクリートの配合条件

取替RC 床版	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位体積量 (kg/m ³)				減水剤 (C×%)	AE剤 (C×%)
				C	W	S	G		
床版部	10±2.5	34.0	46.0	471	160	763	901	5.2	0.004
間詰部	8±2.5	34.0	40.0	450	148	710	1157	9.0	0.004

W：水，C：セメント，S：砕砂，G：砕石

表－ 5.2 材料特性値

取替RC 床版	圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋 (SD345)			
		使用 鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
床版部	60.3	D13	366	539	200
間詰部	61.7				

5.4.2 使用材料

(1) プレキャストRC床版

プレキャスト RC 床版部のコンクリート材料には、普通ポルトランドセメントに最大骨材寸法 20mm の碎石、5mm の砕砂を使用し、配合条件を表－ 5.1 に示す。コンクリートの要求性能は、圧縮強度 40N/mm^2 を目標とした。鉄筋には SD345, D13 を用いる。ここで、プレキャスト RC 床版のコンクリート圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表－ 5.2 に示す。

(2) 間詰部コンクリート

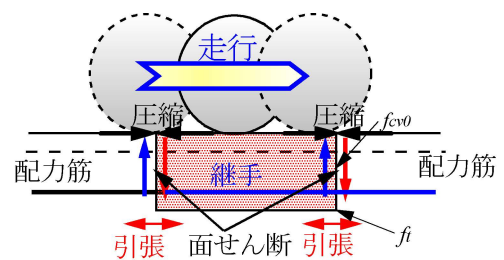
間詰部のコンクリートの要求性能は材齢 3 時間で道示に規定するコンクリートの設計基準強度 24N/mm^2 以上発現し、材齢 14 日で 40N/mm^2 以上発現する配合とする。よって、コンクリートは超速硬セメントに最大骨材寸法 20mm の碎石、5mm の砕砂を使用し、配合条件を表－ 5.1 に併記した。また、間詰部の鉄筋には、プレキャスト床版部と同様に SD345, D13 を配置する。ここで、材齢 28 日の間詰部コンクリートの圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表－ 5.2 に併記する。なお、間詰部コンクリートの発現強度は材齢 3 時間で 34.9N/mm^2 である。

(3) 付着用接着剤

付着用接着剤は RC 床版および鋼床版のコンクリート増厚補強法において、打継ぎコンクリートとの付着性を向上させるために開発された接着剤である^{5.15)}。そこでプレキャスト床版側面に接着剤を塗布して界面の付着性能を高めることとする。ここで、接着剤の性能試験の結果を表－ 5.3 に示す。メーカー公表値からコンクリートとの付着強さは 3.7N/mm^2 以上である。

表－ 5.3 付着用接着剤の性能

項目	接着剤	備考
外観	主剤	白色ペースト状
	硬化剤	青色液状
混合比(主剤：硬化剤)	5：1	重量比
硬化物比重	1.42N/mm^2	JIS K 7112
圧縮強さ	102N/mm^2	JIS K 7181
圧縮弾性係数	3976N/mm^2	JIS K 7181
曲げ強さ	41N/mm^2	JIS K 7171
引張せん断強さ	15N/mm^2 以上	JIS K 6850
コンクリート付着強さ	3.7N/mm^2 ※	JIS A 6909



図－ 5.5 間詰部界面の引張・面せん断状況^{5.16)}

5.5 界面の引張強度およびせん断強度に関する実験

取替床版上面に輪荷重が作用することでプレキャスト床版と間詰部との界面は、はく離や界面に沿ってひび割れが発生する。ここで、プレキャスト RC 床版と間詰部界面の力学モデルを図－ 5.5 に示す。図－ 5.5 より、界面は輪荷重の走行により下面には引張応力が作用し、はく離や曲げひび割れが発生する。また、輪荷重の作用に

よって間詰部とプレキャスト床版の界面は縦ずれである一面せん断応力度が作用し、縦ずれによるはく離が発生する。よって、界面のはく離およびひび割れの発生を抑制するために引張強度 f_t とせん断強度 f_{cv0} を高める必要がある。そこで、本研究では界面に打継ぎコンクリートとの付着性を高めるために接着剤（表－ 5.3）を塗布する工法を提案し、基礎実験として試験用に加工した円柱供試体を用いて界面の直接引張試験および一面せん断試験を行い、引張強度 f_t およびせん断強度 f_{cv0} を評価する。



写真－ 5.2 プレキャスト床版の凹凸面



(1)接着剤なし

(2)接着剤あり

写真－ 5.3 引張試験

5.5.1 直接引張試験

(1) 試験体の製作

直接引張試験は直径 100mm、高さ 200mm のサミットモールドを用いて、表－ 5.1 に示すプレキャスト床版の配合条件で製造したコンクリートを打ち込み、圧縮強度が発現した後、直径 100mm、高さ 100mm のテストピースを製作する。コンクリート表面には凝結遅延剤を塗布し、サミットモールドから脱型し、ワイヤーブラシで削り、水洗いして凹凸を設けた。ここで、凹凸状態を写真－ 5.2 に示す。

接着剤を用いない(以下、接着剤なしとする)試験体には 100mm×100mm 円柱に 5mm の凹凸を設けた後、100mm×200mm の鋼製型枠に挿入し、残りの 100mm に表－ 5.1

に示す間詰部用の超速硬コンクリートを打ち込む。供試体寸法は 100mm×200mm である。なお、一面せん断試験用供試体も同様に製作する。

次に、接着剤を用いる供試体（以下、接着剤ありとする）も同様に 100mm×100mm 円柱の片側表面に 5mm の凹凸を設けて 100mm×200mm の鋼製型枠に挿入し、凹凸面に表－ 5.3 に示す接着剤を塗布する。塗布後、超速硬コンクリートを打ち込む。供試体は接着剤なし、および接着剤ありとも各 3 体製作した。

(2) 引張試験および強度

引張試験は、写真－ 5.3(1), (2)に示すように直接引張試験を行い、破壊面付近の引張強度を評価する。

実験方法は、円柱試験体に引張試験用治具を接着し、これをインストロン型万能試験機に設置する。試験速度は JIS A 6909 の規定に基づき 2mm/min とする。なお、引張強度 f_t は式(5.1)より算出する。

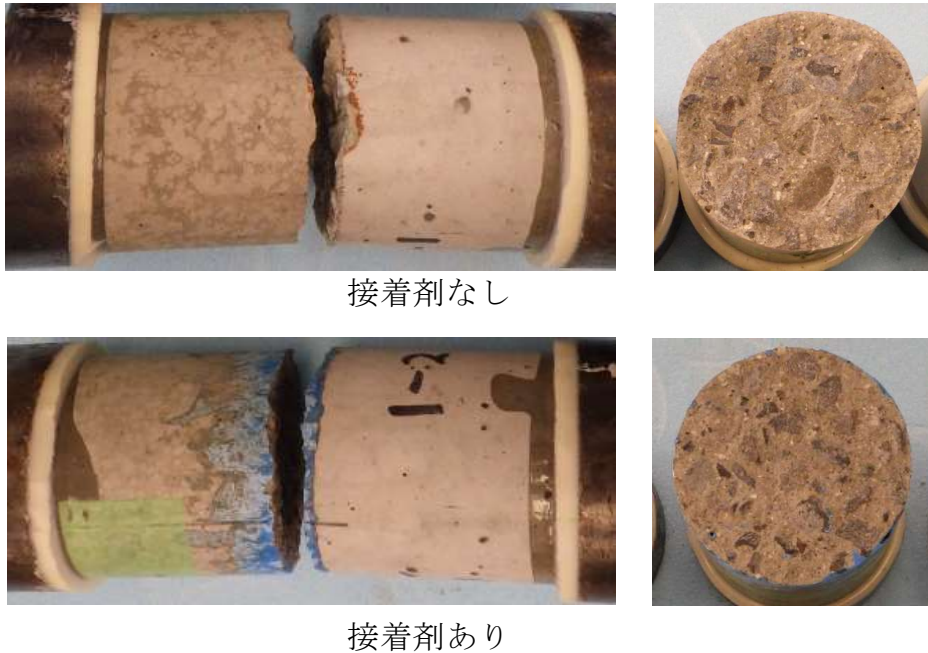
$$f_t = P/A_s \quad (5.1)$$

ここで、 f_t ：引張強度 (N/mm²)、 P ：破壊荷重 (N)、 A_s ：破壊面積 (mm²)

式(5.1)より算出した引張強度の結果を表－ 5.2 に、破壊状況を写真－ 5.4 示す。接着剤なしの引張強度の平均は 2.75N/mm² であり、破壊状況は、凹凸面とコンクリートとの界面で引張破壊した。また、接着剤ありの引張強度の平均は 3.26N/mm² であり、接着剤を塗布することで 1.18 倍の引張強度が得られた。破壊状況は、接着剤なしの供試体と同様に凹凸面とコンクリートとの界面の超速硬コンクリート側で引張破壊した。よって、接着剤を塗布することで引張強度が向上することから界面のはく離に伴うひび割れの発生が遅延するものと考えられる。

表－ 5.2 引張試験による引張強度

接着剤	供試体名	荷重(kN)	引張強度 (N/mm ²)	平均
無し	1体目	21.8	2.78	2.75
	2体目	22.0	2.80	
	3体目	21.0	2.67	
有り	1体目	25.3	3.22	3.26
	2体目	26.0	3.31	
	3体目	25.4	3.23	



写真－ 5.4 破壊状況の一例

5.5.2 一面せん断試験によるせん断強度

(1) 試験体の製作

一面せん断試験は引張試験に用いた供試体と同様の手順で製作した。供試体は接着剤なしおよび接着剤ありともに3体製作した。

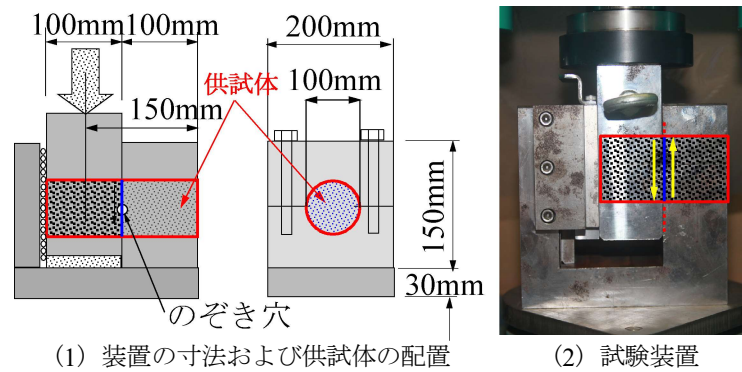
(2) 一面せん断試験および強度

一面せん断試験は、阿部ら^{5.17)}が開発したモードⅡ型（縦ずれ）の一面せん断試験装置を用いて一面せん断試験を行い、増厚界面のせん断強度 f_{cv0} を評価する。ここで、阿部らが開発した、モードⅡ型の一面せん断試験装置およびせん断面を図－ 5.4 に示す。コンクリートの圧縮試験は、コンクリートの圧縮載荷法 JIS A 1108 の規定に基づき、加圧速度を毎秒 $0.6\text{N}/\text{mm}^2$ で行った。

また、モードⅡ型一面せん断試験装置を用いて、一面せん断試験用供試体を界面でせん断破壊となるように供試体を設置する（図－ 5.4）。一面せん断試験法より得られる強度をせん断強度 f_{cv0} と定義し、式(5.2)より算出する。

$$f_{cv0} = P/A_s \quad (5.2)$$

ここで、 f_{cv0} ：せん断強度 (N/mm^2)、 P ：破壊荷重 (N)、 A_s ：一面せん断面積 (mm^2)



図－ 5.6 一面せん断試験

表－ 5.5 一面せん断試験によるせん断強度

接着剤	供試体名	荷重 (kN)	せん断強度 (N/mm ²)	平均
無し	1体目	45.0	5.73	6.22
	2体目	51.5	6.56	
	3体目	50.0	6.37	
有り	1体目	60.5	7.70	7.53
	2体目	59.0	7.51	
	3体目	58.0	7.38	

せん断強度を式(5.2)より算出した結果を表－ 5.5 に示す。接着剤なしのせん断強度の平均は 6.22N/mm²、接着剤ありのせん断強度の平均は 7.53N/mm² であり、接着剤を塗布することで 1.21 倍のせん断強度が得られた。破壊はプレキャスト床版側面の凹凸内で一面せん断張破壊した。よって、接着剤を塗布することで縦ずれである一面せん断強度が向上し、輪荷重走行による界面でのずれによるはく離が抑制される結果が得られた。

5.6 取替RC床版の施工手順

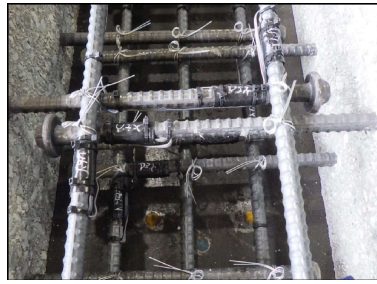
5.6.1 プレキャスト床版の製作

プレキャスト床版の製作手順を写真－ 5.5 に示す。

型枠はプレキャスト床版 A と B の 2 タイプを製作し、それぞれの型枠に主筋および円形の突起を設けた配力筋 (図－ 5.1) を配置する (写真－ 5.4(1))。次に、普通コンクリートを表－ 5.1 に示す配合で練混ぜし、打ち込みする (写真－ 5.4(3))。表面仕上げし (写真－ 5.4(4))、養生して完成となる (写真－ 5.4(5))。プレキャスト床版 A と B 側面には 5mm の程度の凹凸 (目荒し) を設けた (写真－ 5.4(6))。



(1)鉄筋配置



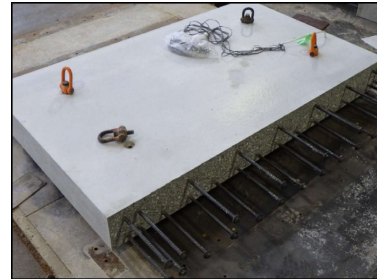
(2)間詰部



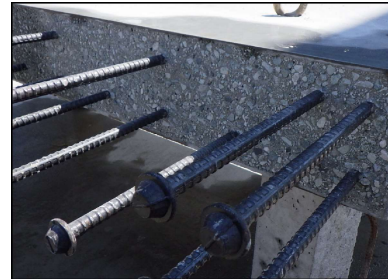
(3)コンクリート打設



(4)表面仕上げ



(5)プレキャスト版完成



(6)目荒し作業

写真－ 5.5 プレキャスト床版の施工手順



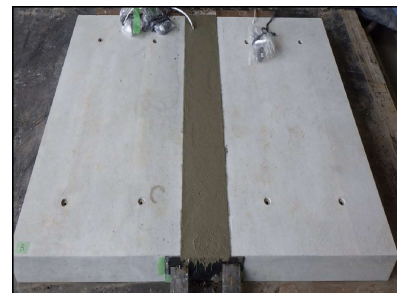
(1)プレキャスト床版設置



(2)移動プラントで練混ぜ



(3)コンクリート打ち込み



(4)表面仕上げ。完成

写真－ 5.6 接着剤なしの取替 RC 床版の施工手順

5. 6. 2 取替RC床版の設置手順

(1) 接着剤なしの取替RC床版

取替 RC 床版の施工手順を写真－ 5.6 に示す。プレキャスト床版 A と B を設置する (写真－ 5.6(1))。設置後、実橋での設置と同様に間詰部コンクリートには超速硬

コンクリート（表－ 5.1）を練混ぜする。練混ぜは実橋での設置を考慮して移動式プラントを用いた（写真－ 5.6(2)）。練混ぜ後直ちに間詰部に打ち込みし（写真－ 5.6(3)），表面仕上げして完成となる（写真－ 5.6(4)）。

(2) 接着剤ありの取替RC床版

施工手順は写真－ 5.7(1)に示すように、プレキャスト床版を設置し、主筋を組立した後、プレキャスト床版側面に接着剤を塗布する（写真－ 5.7(2)）。接着剤の硬化時間は 120 分程度であることから、接着剤の塗布と同時に超速硬コンクリートを移動プラントで練混ぜし（写真－ 5.7(3), (4)），打設する。最後に表面仕上げし、養生して完成となる（写真－ 5.7(5)）。

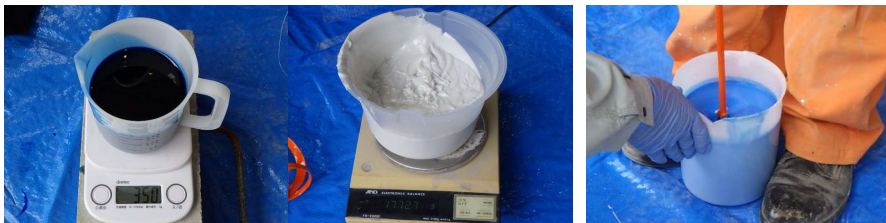
以上 2 種類の供試体をそれぞれ 2 体製作して輪荷重走行荷重実験および輪荷重疲労実験に用いる。



(1)プレキャスト床版設置



(2)付着用接着剤塗布



(3)付着用接着剤混合



(4)移動プラントで練混ぜ



(5)コンクリート打ち込み

写真－ 5.7 接着剤ありの取替 RC 床版の製作手順

5.7 輪荷重走行荷重実験方法^{5.18)}

本実験では、第3章と同様に1走行ごとに荷重を増加する段階荷重載荷による輪荷重走行荷重実験を行い、接着剤を用いた場合の効果および間詰部の開閉幅およびたわみ振幅を検証するとともに接着剤の耐荷力性能を検証する。

輪荷重走行荷重実験による走行状態、開閉幅の計測位置を図-5.7、荷重載荷条件を図-5.8に示す。実験は幅300mmの輪荷重を床版中央に停止し、荷重を載荷し、支点CおよびD間を走行し、元の床版中央までの1走行2,400mm（片側1,200mm）を走行させる。荷重載荷条件は図-5.6に示すように段階荷重載荷とし荷重250kNまでは1走行ごとに10kNずつ増加させ、250kN以降は5.0kNずつ増加させ、破壊に至るまで走行と荷重増加を行う。また、荷重50kNから200kNまでは50kNごと、200kN以上は20kN増加ごとに1走行を動的に計測し、走行時に発生する開閉幅およびたわみの挙動を検証する。

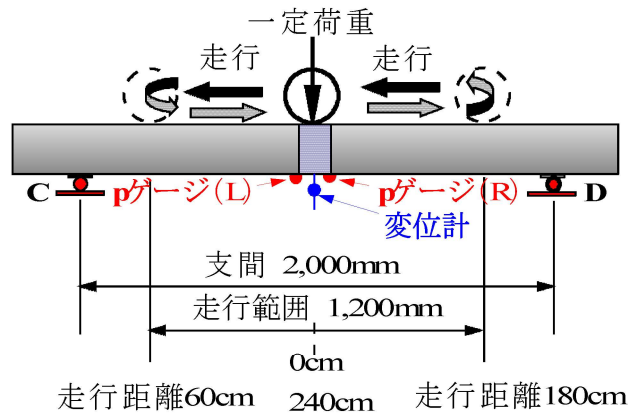


図-5.7 走行範囲および開閉幅計測位置

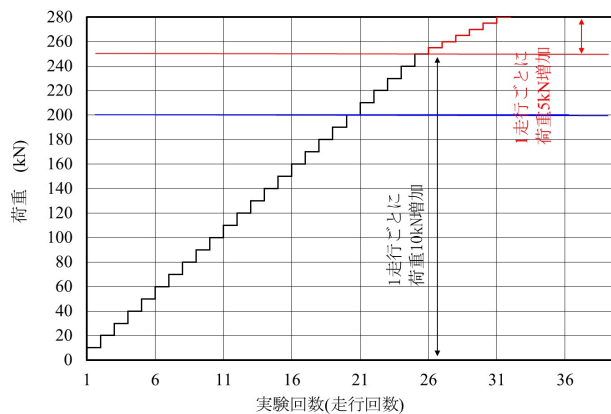


図-5.8 輪荷重走行荷重実験および輪荷重実験における荷重条件

5.8 輪荷重走行荷重実験結果および考察

5.8.1 最大耐荷力および破壊モード

輪荷重走行荷重実験による最大耐荷力および破壊モードの結果を表－ 5.6 に示す。

表－ 5.6 最大耐荷力および破壊モード

供試体名称	最大耐荷力 (kN)	耐荷力比	破壊モード
R.RC-R-N	260.4	—	プレキャスト床版Bで押抜きせん断破壊
R.RC-R-A	260.6	1.00	プレキャスト床版Aで押抜きせん断破壊

接着剤なしの供試体 R.RC-R-N の最大耐荷力は 260.4kN である。破壊はプレキャスト床版 B を走行中押抜きせん断破壊となった。これに対し、接着剤ありの供試体 R.RC-R-A の最大耐荷力は 260.6kN であり、破壊はプレキャスト床版 A を走行中に押抜きせん断破壊となった。なお、両供試体ともに破壊はプレキャスト床版内であることから耐荷力においては、接着剤あり、なしとで差異は見られない。また、この最大耐荷力は押抜きせん断耐荷力 P_{max} となる。

5.8.2 開閉幅と走行距離の関係（輪荷重走行荷重実験）

輪荷重走行荷重実験による開閉幅と走行距離の関係を図－ 5.9 に示す。なお、縦軸の開閉幅は mm で、横軸の走行距離は cm 単位で表記している。図－ 5.9 には荷重 50kN から 200kN までは 50kN ごと、260kN で走行した場合の 1 走行 240cm を動的に計測した結果である。

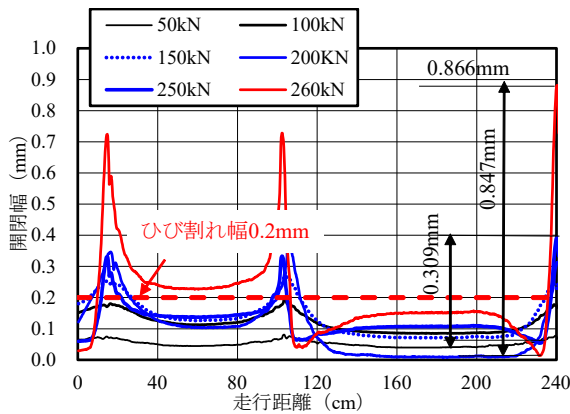
(1) 供試体 R.RC-R-N

供試体 R.RC-R-N の π ゲージ(L)の開閉幅と走行距離の関係は図－ 5.9(1), 1)に示すように輪荷重が左側界面(L)（走行距離 15cm）を通過するとき開口し、輪荷重が通過後は閉口し、支点 C 側を折り返して再度左側界面(L)（走行距離 105cm）を通過する際に開口し、通過後閉口を繰り返す。その後、右支点 D 側（走行距離 1,80cm）を折り返して元の床版中央（走行距離 240cm）に停止させる。

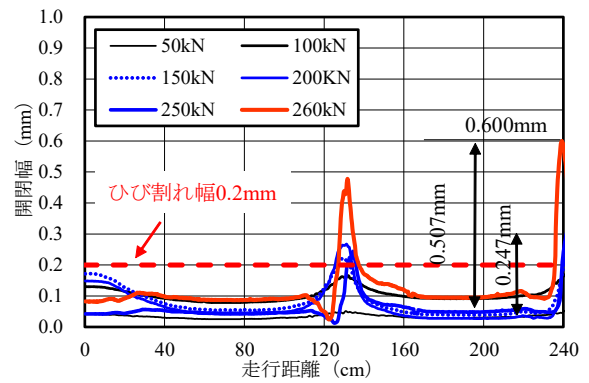
荷重 100kN の走行までは開口部のひび割れ幅が橋梁定期点検要領に示すひび割れ幅 0.2mm 以下である。荷重 150kN での走行においてひび割れ幅 0.2mm を超えるものの荷重が通過した後は 0.2mm 以下であり、ひび割れ開閉振幅も小さい。最大荷重 260.4kN での走行では、1 走行後の開閉幅の最大値が 0.866mm、開閉幅の最小値が 0.015mm であり、開閉幅の最大値と最小値の差は 0.847mm である。ここで、最大値と最小値の差を開閉範囲として以下に示す。この挙動は 1 走行を動的に計測することで検証される結果である。

また、右界面の π ゲージ(R)の開閉幅は、15cm 位置が左側 π ゲージ(L)を通過し、60cm が左側折り返し地点である。135cm 付近が右界面(R)上を通過し、180cm 付近が右側折り返し地点であり、225cm 付近が再度、右側界面(R)、240cm が元の位置である。

図-5.9(1), 2)に示すように π ゲージ(L)と開閉幅と比較して開閉量が小さい。ひび割れ幅 0.2mm を超えた荷重は 200kN である。荷重 200kN で走行した場合の開閉幅の最大値は 0.30mm, 開閉範囲が 0.247mm である。荷重 260.4kN で走行した場合の最大値は 0.600mm, 開閉範囲は 0.507mm である。

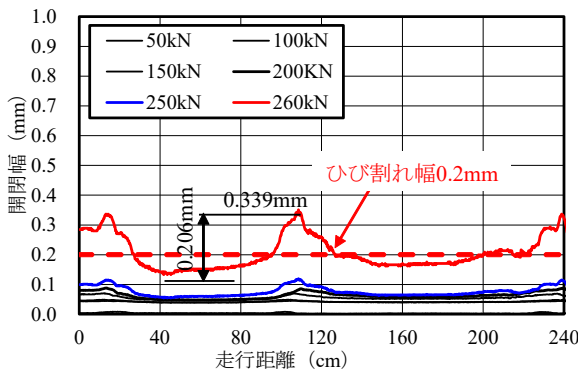


1)計測点(L)

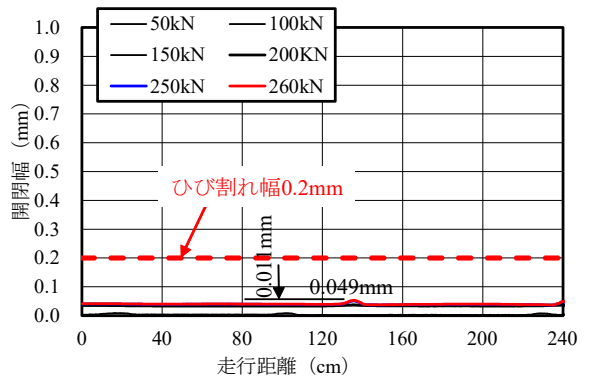


2)計測点(R)

(1)接着剤なし (R.RC-R-N)



1)計測点(L)



2)計測点(R)

(2)接着剤あり (R.RC-R-A)

図-5.9 開閉幅と走行距離の関係 (輪荷重走行荷重実験)

(2) 供試体R.RC-R-A

供試体 R.RC-R-A の π ゲージ(L)の開閉幅と走行距離の関係は図-5.9(2), 1)に示す。図-5.7(2), 1)に示すように荷重 200kN までは、接着剤の効果により、ひび割れ幅は 0.2mm 以下である。荷重 260.6kN での走行で 0.2mm を超えた。開閉幅は 0.339mm,

最小値が 0.133mm, 開閉範囲が 0.206mm である。

一方, π ゲージ(R)の開閉幅は図- 5.9(2), 2)に示すように輪荷重が通過するときにやや開閉がみられるものの開閉幅の最大値が 0.05mm である。

以上より, 接着剤なしの供試体は速い段階ではく離に伴うひび割れが発生するが, 接着剤ありは付着界面の引張強度および界面のせん断強度が高いことから, はく離に伴うひび割れの発生は見られず, 接着剤は間詰部のはく離対策として有効的な材料および施工法であると考えられる。

5.8.3 荷重と開閉幅の関係

図- 5.9 に示す段階荷重ごとの荷重と開閉幅の関係を図- 5.10 に示す。図- 5.10 には橋梁定期点検要領^{5.19)}に示す RC 床版のひび割れ幅 0.2mm を併記した。また, π ゲージ(L)および(R)の計測結果を供試体名称の後に(L), (R)として図- 5.10 に示した。

供試体 R.RC-R-N の界面 (L) の開閉幅は, 荷重 20kN 走行後で 0.05mm であり, その後の荷重増加と走行で開閉幅の増加が著しく, ひび割れ幅 0.2mm に達した時点の荷重は 110kN である。最大荷重時 260.4kN で開閉幅が 0.86mm である。また, 界面(R)においても荷重 100kN まではほぼ同様の増加傾向を示している。ひび割れ幅 0.2mm

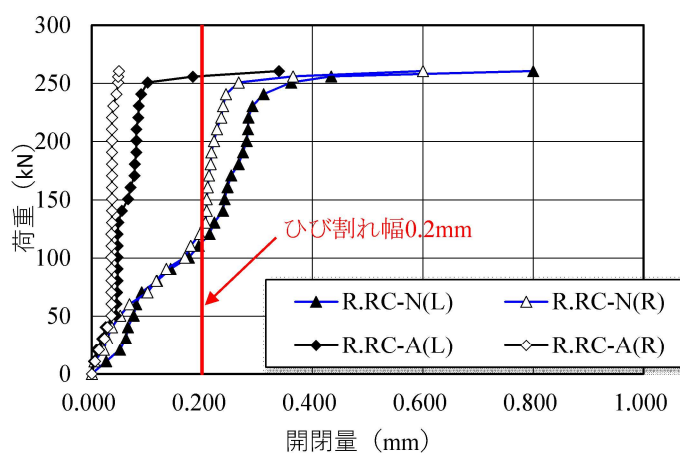


図- 5.10 荷重と開閉幅の関係

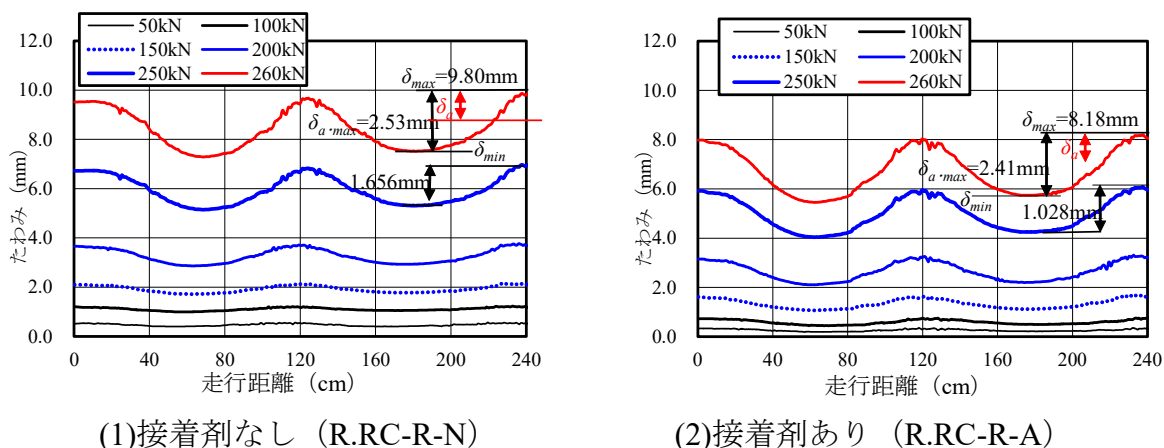
に達した時点の荷重は 120kN であり, 荷重 240kN 以降は開閉幅の増加が著し, 最大耐荷力 260.6kN で 0.6mm である。

一方, 供試体 R.RC-R-A の界面(R)は, 走行荷重 20kN で開閉幅は 0.01mm, 荷重 250kN での走行後の開閉幅は 0.09mm と, 荷重の増加による開閉幅の進展はほとんど見られない。ひび割れ幅 0.2mm に達した荷重は 255kN を超えた付近であり, 最大荷重 260.6kN で開閉幅が 0.339mm である。また, 界面(R)の開閉幅は, 荷重 250kN で走行まではほとんど開閉幅の増加は見られず 0.05mm である。

5. 8. 4 たわみと走行距離および荷重とたわみ振幅の関係

(1) たわみと走行距離の関係

取替 RC 床版軸方向中央のたわみと走行距離の関係を図－ 5.11 に示す。なお、縦軸のたわみはmmで、横軸の走行距離はcm単位で表記している。たわみと走行距離の関係は図－ 5.10 に示す開閉幅と走行距離の関係と同様に、荷重 50kN ごとおよび最大荷重 260kN で 1 走行した結果である。図－5. 9に示す走行距離 0cm, 120cm, 240cm の位置が床版中央である。



図－ 5.11 たわみと走行距離の関係

接着剤なしの供試体 R.RC-R-N は、荷重 50kN で走行した場合の最大たわみが 0.507mm である。最大値と最小値の差（以下、たわみ範囲とする）は 0.107mm である。最大荷重 260.4kN で走行した場合のたわみの最大値 9.80mm であり、たわみ範囲は 2.53mm である。

一方、供試体 R.RC-R-A のたわみは、接着剤なしの供試体のたわみの増加傾向に対して、接着剤の効果により開閉幅が抑制されて、併せてたわみの増加も抑制されている。荷重 50kN で走行した場合の最大たわみが 0.335mm、たわみ範囲は 0.04mm である。最大荷重 260.6kN で走行した場合のたわみの最大値は 8.18mm であり、たわみ範囲は 2.41mm である。接着剤なしの供試体たわみの 83% である。

以上より、荷重増加と走行を繰り返すことでたわみ範囲が大きくなっている。また、プレキャスト床版側面に接着剤を塗布することで開閉が抑制され併せてたわみの増加も抑制される結果となった。

(2) 荷重とたわみ振幅の関係

一定荷重走行におけるたわみと走行時刻の関係では床版中央のたわみは図－ 5.11 に示すように、1 走行におけるたわみの最大値と最小値の差であるたわみ範囲が荷重増加とともに増大する。一般的に応力振幅が大きくなることが耐疲労性の低下要因と言われている^{5.20), 5.21)}。そこで、一定荷重で走行した最大たわみ δ_{max} と最小たわみ

δ_{max} との差の 1/2 をたわみ振幅 δ_a と定義し、式(5.3)より算定する。本来ならば応力振幅を求めて考察すべきであるが本論文ではたわみの関係から考察する。

$$\delta_a = \frac{\delta_{max} - \delta_{min}}{2} \quad (5.3)$$

ここで、 δ_a : たわみ振幅 (mm), δ_{max} : 1 走行時の最大たわみ (mm), δ_{min} : 1 走行時の最小たわみ (mm)

たわみ振幅 (式(5.3)) の結果を図- 5.10 に示す。輪荷重走行荷重実験における供試体 R.RC-R-N のたわみ範囲の比は図- 5.10 に示すように、荷重の増加に伴い、たわみ範囲が大きくなっている。荷重 50kN でたわみ振幅が 0.05mm である。最大荷重 260.4kN でたわみ振幅がそれぞれ 1.26mm である。荷重の増加に従いたわみ振が大きくなっている。

一方、供試体 R.RC-R-A の荷重 50kN のたわみ振幅は 0.57mm であり、接着剤なしの供試体と同等である。最大荷重 260.4kN では 1.17mm である。たわみ振幅は接着剤

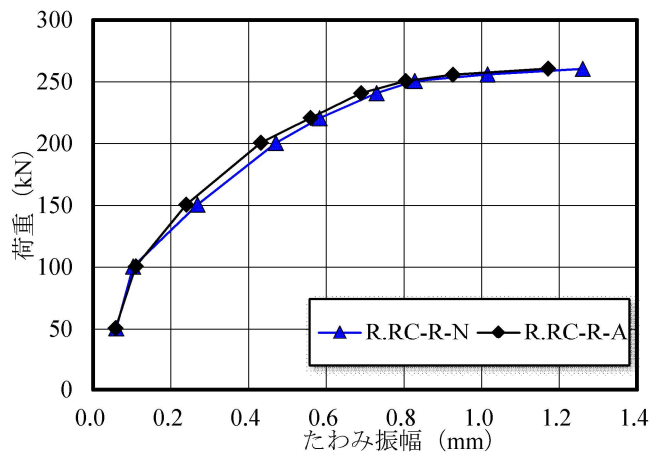


図- 5.12 荷重とたわみ振幅の関係

なしの供試体に比して僅かに下まわっているもののほぼ同等である。

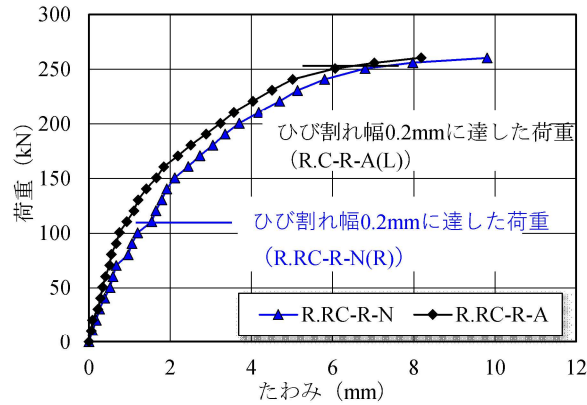
以上より、段階荷重載荷による輪荷重走行荷重実験においては、たわみ振幅に大きな差異がみられないことから接着剤あり、接着剤なしで、剛性の低下はほとんど見られない結果が得られた。

5.8.5 荷重とたわみの関係

取替 RC 床版供試体の軸方向中央で計測した荷重とたわみの関係を図- 5.13 に示す。

接着剤なしの供試体 R.RC-R-N の荷重とたわみの関係は荷重 70kN まで線形的に増

加し, 荷重 80kN で増加が大きくなっている。ひび割れ幅 0.2mm に達した荷重は 120kN であり, 100kN からたわみも急激に増加している。最大荷重 260.4kN 時のたわみは 9.80mm である。



図－ 5.13 荷重とたわみの関係

一方, 接着剤ありの供試体 R.RC-R-A の荷重とたわみの関係においては, 荷重 100kN 付近までは線形的に増加し, その後の荷重増加と走行によりたわみの増加はやや大きくなるものの荷重 200kN 付近まで線形的に増加している。ひび割れ幅 0.2mm に達した荷重は 250kN である。最大荷重 260.4kN 時のたわみは 8.18mm である。

以上より, 接着剤を用いることで開閉幅の増加が抑制され, 同様にたわみの増加も抑制されている。

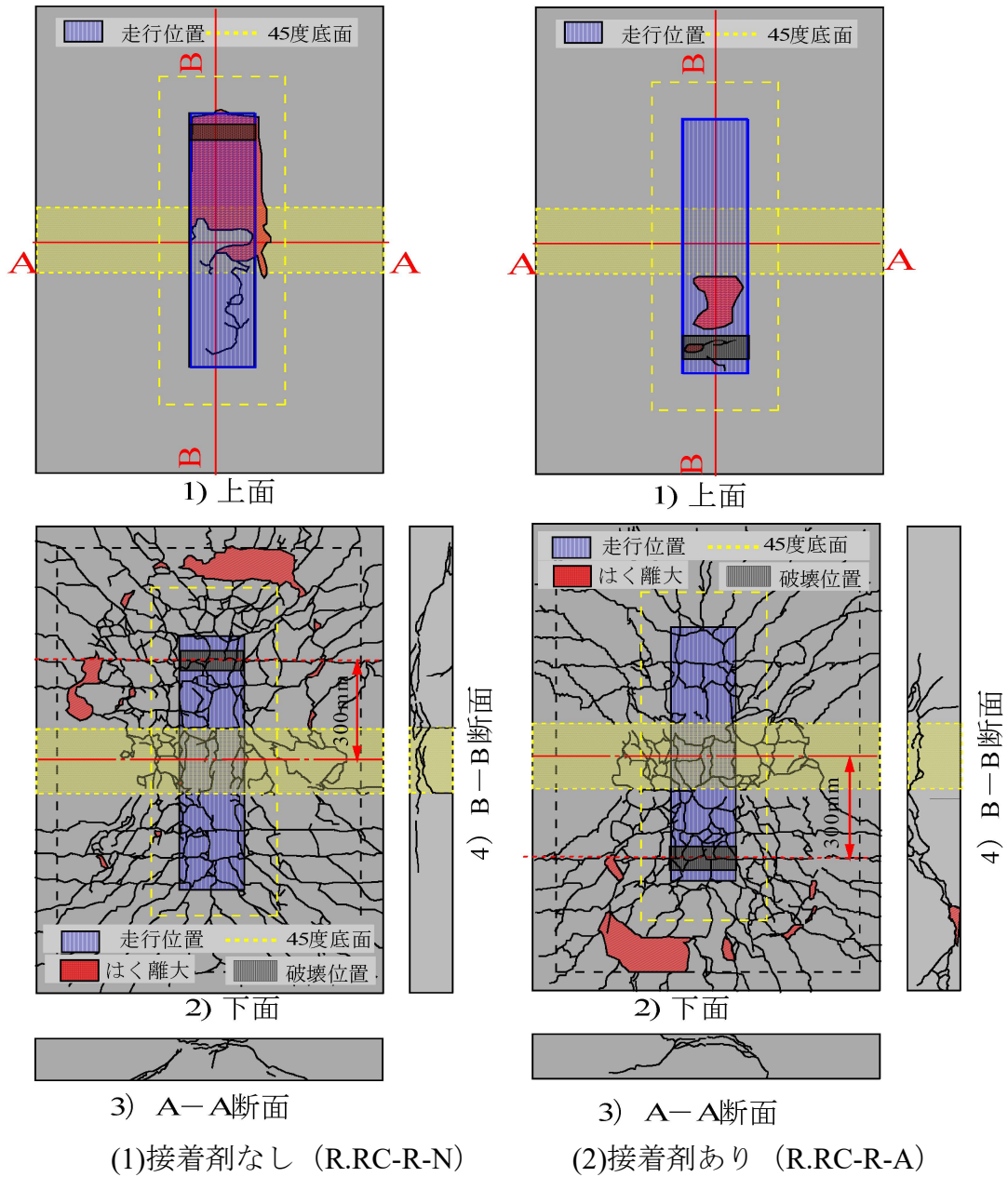
5.8.6 破壊状況

破壊時の走行面の損傷および下面のひび割れ状況を図－ 5.14 に示す。

接着剤なしの供試体 R.RC-R-N の上面の損傷状況は図－ 5.14(1), 1)に示すように, 走行面のプレキャスト床版 B 側に部分的な損傷がみられるものの走行面以外の箇所の損傷が見られない。下面は図-5.14(1), 2)に示すように, 走行位置から 45 度範囲には 2 方向ひび割れが発生し, 破壊位置の輪荷重設置面から 45 度底面はダウエル効果の影響によりはく離が見られる。破壊位置は床版中央から支点 D 側の 300mm 付近で押抜きせん断破壊となっている。間詰部界面ははく離に伴うひび割れが発生している。また, 間詰部は配力筋が重ね継ぎ手であり, 高強度コンクリートであることから, 2 方向ひび割れは発生するもの拡散範囲が少なく, 大きな損傷はみられない。

一方, 接着剤ありの供試体 R.RC-R-A の上面の損傷状況は図－ 5.14(2), 1)に示すように上面は走行面のプレキャスト床版 A 側の一部に損傷が見られる。下面は図－ 5.14(2), 2)に示すように 2 方向のひび割れが発生している。破壊位置の輪荷重設置面から 45 度底面はダウエル効果の影響によりはく離している。破壊位置は中央から支

点 C 側の 300mm 付近で押抜きせん断破壊となっている。間詰部ははく離に伴うひび割れは見られない。また、重ね継ぎ手構造と高強度コンクリートにより、ひび割れの拡散が抑制され、大きな損傷は見られない。



図－ 5.14 輪荷重走行荷重実験による損傷状況

以上より、接着剤なしの場合は界面がはく離に伴うひび割れが発生するが接着剤ありの供試体は接着の効果によりひび割れの発生は見られない。

5.9まとめ

- (1) 普通コンクリート側面に 5mm の目荒しを設けて、直接超速硬コンクリートを打ち込んだ接着剤なしの円柱供試体と側面に接着剤を塗布して超速硬コンクリートを打ち込んだ接着剤ありの円柱供試体の引張試験結果は、接着剤を塗布することで引張強度が 1.18 倍である。また、一面せん断試験によるせん断強度は 1.21 倍である。よって、走行荷重が作用した場合に間詰部の開閉幅の進展が抑制されるものとする。
- (2) 輪荷重走行荷重実験の結果から、接着剤なしの供試体 R.RC-R-N の最大耐荷力は 260.4kN であり、接着剤ありの供試体 R.RC-R-A の最大耐荷力は 260.6kN であり、最大耐荷力においては、接着剤あり、なしとで差異は見られない。
- (3) 輪荷重走行荷重実験における間詰部の開閉幅と走行距離を動的に見た場合、接着剤なしの供試体は開閉幅の変動挙動が著しい。荷重とひび割れ幅の関係においては、接着剤なしの場合、ひび割れ幅 0.2mm に達した時点の荷重は 110kN であるが、接着剤ありの場合、ひび割れ幅 0.2mm に達した荷重は 255kN を超えた付近であり、接着剤の効果を確認できた。
- (4) たわみと走行位置の関係では、接着剤なしの場合、最大荷重 260.4kN で走行した場合のたわみの最大値 9.80mm であり、接着剤ありの場合、たわみの最大値は 8.18mm と接着剤なしの供試体たわみの 83%と接着剤を用いることで開閉幅の増加が抑制され、たわみの増加も抑制されている。荷重とたわみ振幅の関係においては、接着剤あり、接着剤なしで、剛性の低下はほとんど見られない結果が得られた。
- (5) 破壊状況は、接着剤なしの供試体は間詰部界面にはく離に伴うひび割れが発生している。これに対して接着剤ありの供試体はひび割れ発生が見られない。これは接着剤の効果によるものである。また、破壊は全てプレキャスト床版内で輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。

第5章参考文献

- 5.1) 国土交通省道路局国道・防災課道路保全企画室：地方自治体の長寿命化修繕計画に関する最近の動向，2010.
- 5.2) 千葉県県土整備部道路環境課：千葉県橋梁長寿命化修繕計画，2016.
- 5.3) 阿部忠，伊藤高，今野貴元，中島博敬，伊藤清志：供用開始後3回の補強を施し60年経過した道路橋RC床版の劣化診断および健全度評価，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第19巻，pp.543-548，2019.10
- 5.4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1994.
- 5.5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1973.
- 5.6) 水野浩，松井繁之，大西弘志，杉山俊幸，街道浩：床版取替用プレキャスト合成床版の合理化継手の疲労耐久性評価，構造工学論文集 Vol.58A，pp.1112-1122，2013.3
- 5.7) 中村定明，三浦尚：RC ループ継手の力学挙動に関する基礎的研究，土木学会論文集 No.774/V-65，pp.17-26，2004.
- 5.8) 高橋明彦，阿部忠，小野晃良，大西弘志，久田真：間詰部を設けた取替床版の耐疲労性の評価に関する実験研究，構造工学論文集，Vol.65A，655-664，2019.3
- 5.9) 小野晃良，阿部忠，水口和彦，川井豊：プレキャスト床版に突起型継手を設けた取替RC床版間詰部の開閉幅が耐疲労性に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol.68A，pp.711-721，2022.3
- 5.10) 阿部忠，伊藤清志，児玉孝喜，小堺規行，深川克彦：接着剤塗布型橋面コンクリート舗装法における耐疲労性の評価に関する実験研究，構造工学論文集，Vol.66A，pp.650-661，2020.3
- 5.11) 土木学会：鋼構造シリーズ「道路橋床版の維持管理マニュアル2020」pp.25-26，2020.10
- 5.12) 表真也，吉松秀和，中山良直，松井繁之，林川俊郎：床版取替へ用プレキャスト床版の合理化継手の開発，構造工学論文集，Vol.60A，pp.1169-1177，2014.3
- 5.13) 小野晃良，阿部忠，高橋明彦，武田秀人：2方向に間詰部を設けた取替RC床版の耐荷力・耐疲労性の検証および実橋における施工技術，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.2，pp.1309-1314，2020.7
- 5.14) 小野晃良，高橋明彦，類家 慧史，大西弘志，久田真：特殊頭部鉄筋を有した鉄筋継手の引き抜き性状について，土木学会第73回年次学術講演会CS8-025，pp.49-50，2018.8
- 5.15) 阿部忠，伊藤清志，児玉孝喜，小堺規行，深川克彦：接着剤塗布型橋面コンクリート舗装法における耐疲労性の評価に関する実験研究，構造工学論文集，Vol.66A，pp.650-661，2020.3

- 5.16) 阿部忠：橋梁床版の健全性評価と長寿命化対策，建設図書，pp.214，2021.9
- 5.17) 阿部忠，木田哲量，高野真希子，川井豊：道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力および耐疲労性の評価，土木学会論文集 A1，pp.39-54，2011.
- 5.18) 阿部忠，木田哲量，高野真希子，澤野利章，加藤清志：静荷重・走行荷重を受ける RC 床版の押し抜きせん断耐力，構造工学論文集，Vol. 50A，pp. 919-926(2004)
- 5.19) 国土交通省道路局：橋梁定期点検要領，2014，2019.
- 5.20) 松井繁之，前田幸雄：道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案，土木学会論文集，第 374 号/I-6，pp.419-426，1986
- 5.21) 松井繁之：道路橋床版設計・施工と維持管理，森北出版，2007.

第6章 取替RC床版間詰部の開閉幅が耐疲労性に及ぼす影響

6.1 はじめに

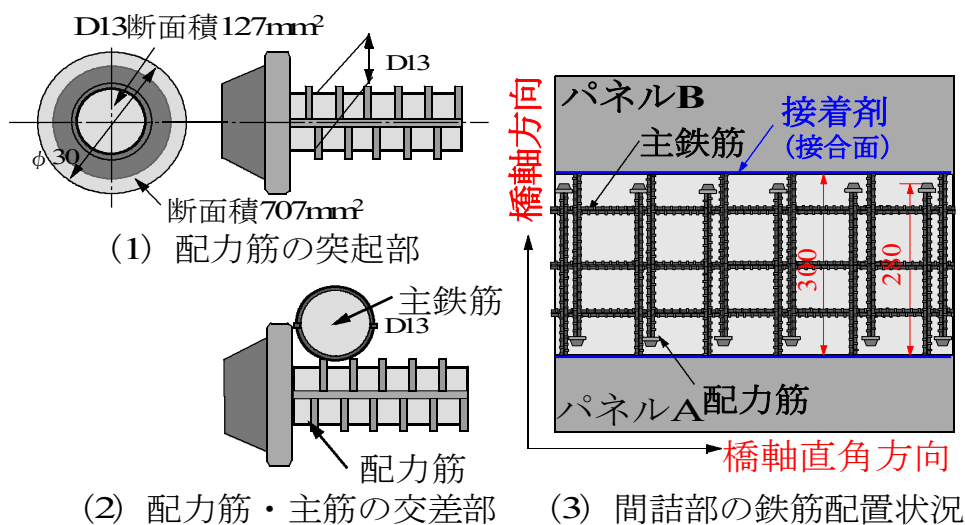
道路橋長寿命化修繕計画事業が地方自治体で取り組みされてから十数年以上が経過し、毎年平準化された予算の中で小規模から大規模な修繕が実施され、長寿命化が図られている^{6.1), 6.2)}。第5章で述べた通り、既に大規模な修繕が実施された RC 床版においても再劣化が生じ^{6.3)}、各企業が取替床版の開発を進めている。その多くが、継手構造を用いたプレキャスト PC 床版であり、継手部構造は橋軸方向筋（配力筋方向）にナットを取付けした合理化継手構造^{6.4)}やループ継手構造^{6.5)}などが提案され、いずれも輪荷重走行疲労実験を実施し、耐疲労性が評価され実橋で採用されている。一方、筆者ら^{6.6), 6.7), 6.8), 6.9), 6.10)}は、主筋および配力筋方向ともに異形鉄筋を配置したプレキャスト RC 床版構造を提案した。継手構造は主筋には三角形状、配力筋には円形の突起を設けて、道示に規定する RC 床版の鉄筋配置が可能な構造とし、間詰部幅を 300mm とした構造である。この取替 RC 床版においては輪荷重走行疲労試験を実施し、耐疲労性を評価し、実橋においても採用されている。以上のように取替 PC 床版および取替 RC 床版においても、耐荷力性能や耐疲労性は評価されている。また、第5章で示した通り、土木学会鋼構造シリーズ「道路橋床版の維持管理マニュアル 2020」^{6.11)}においては、プレキャスト PC 床版の間詰部コンクリート界面は、一般に RC 構造となるため他の部位に比べて弱点になりやすくひび割れの損傷が懸念されていると記載されている^{6.11)}。プレキャスト床版間の界面のはく離に伴うひび割れの発生は、雨水の浸透により寿命低下に大きく影響するものと考えられる。筆者らの実験においても疲労が進むにつれプレキャスト床版と間詰部コンクリートとの界面ではく離が確認されている。

そこで本章では、取替 RC 床版におけるプレキャスト床版と間詰部の界面のはく離に伴うひび割れの発生を抑制するために界面に付着用接着剤である高耐久型エポキシ系接着剤（以下、接着剤）を用いてはく離の抑制効果を検証する。プレキャスト床版側面に接着剤「あり」、「なし」の取替 RC 床版供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を行い、耐疲労性および界面の開閉幅、たわみ振幅が耐疲労性に及ぼす検証を行い、各種取替床版の界面のはく離に伴うひび割れの抑制効果の一助としたい。

6.2 取替RC床版の継手構造^{6.7), 6.8), 6.10)}

本実験に用いる取替 RC 床版の継手構造を図-6.1 に示す。一般的に取替 RC 床版の継手は、橋軸方向の配力筋が継手となる。そこで、橋軸方向の配力筋の

継手構造は図－ 6.1(1)に示すように、付着力を高めるために円形の突起を設けた。本取替 RC 床版供試体の配力筋には D13 の鉄筋を用いることから端部に $\phi 30$ mm の円形の突起（断面積 707mm^2 ）を設ける。また、橋軸直角方向の主筋の突起形状は三角形とし、三角形底辺側がかぶりとなる。鉄筋配置においては、図－ 6.1(2)に示すように橋軸直角方向が主筋となり、配力筋は橋軸方向で主筋の内側に配置されることから突起はかぶりに影響を与えない構造である。継手長は図－ 6.1(3)に示すように 280mm とし、間詰部幅は 300mm である。なお、本章では主筋方向の継手構造は設けないこととする。



図－ 6.1 取替 RC 床版の継手構造

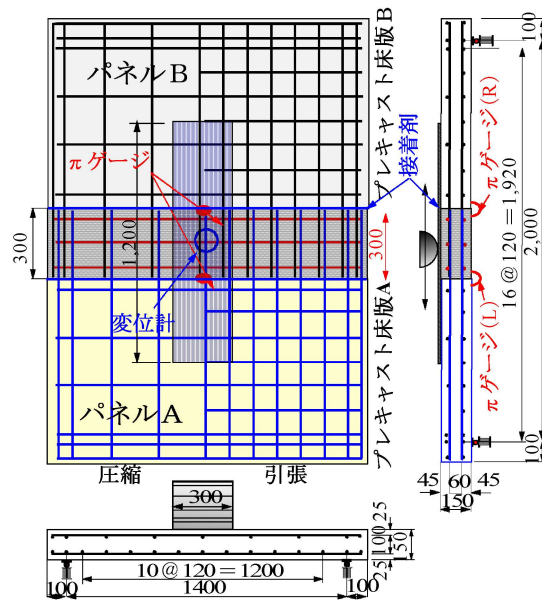
6.3 供試体寸法および使用材料

6.3.1 供試体寸法および鉄筋配置

取替 RC 床版供試体は、1994 年改定以降の道路橋示方書・同解説^{6.12)}（以下、道示とする）に準拠し、その 3/5 モデルとする。供試体寸法は、第 5 章と同様とし、図－ 6.2 に示す。

走行実験および輪荷重走行疲労実験に用いる取替 RC 床版供試体寸法は図－ 6.2 に示すように、床版支間方向 $1,600\text{mm}$ 、軸方向 $2,200\text{mm}$ 、床版厚 150mm とする。なお、床版支間は $1,400\text{mm}$ である。引張側の主鉄筋および配力筋には D13 を 120mm 間隔で配置し、圧縮側には引張鉄筋量の $1/2$ を配置した。

プレキャスト床版側面の界面には 5mm 程度の目荒しを設け、直接超速硬コンクリートを打ち込んだ供試体および側面の凹凸面に接着剤を塗布し、超速硬コンクリートを打ち込んだ供試体を 2 体製作した。輪荷重走行疲労実験における接着剤なし、ありの供試体名称をそれぞれ R.RC-F-N (Replacement RC slab-Fatigue-Normal), R.RC-F-A (Replacement RC slab-Fatigue-Adhesive) とする。



図－ 6.2 1 方向に間詰部を設けた供試体寸法

6.3.2 使用材料

使用材料については、第 5 章と同様に、下記の通りの材料を用いる。

(1) プレキャストRC床版

プレキャスト RC 床版部のコンクリート材料には、普通ポルトランドセメントに最大骨材寸法 20mm の砕石、5mm の砕砂を使用し、配合条件を表－ 6.1 に示す。コンクリートの要求性能は、圧縮強度 40N/mm^2 を目標とした。鉄筋には SD345、D13 を用いる。ここで、プレキャスト RC 床版のコンクリート圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表－ 6.2 に示す。

(2) 間詰部コンクリート

間詰部のコンクリートの要求性能は材齢 3 時間で道示に規定するコンクリートの設計基準強度 24N/mm^2 以上発現し、材齢 14 日で 40N/mm^2 以上発現する配合とする。よって、コンクリートは超速硬セメントに最大骨材寸法 20mm の砕石、5mm の砕砂を使用し、配合条件を表－ 6.1 に併記した。また、間詰部の鉄筋には、プレキャスト床版部と同様に SD345、D13 を配置する。

表－ 6.1 コンクリートの配合条件

取替RC 床版	スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				減水剤 (C×%)	AE剤 (C×%)
				C	W	S	G		
床版部	10±2.5	34.0	46.0	471	160	763	901	5.2	0.004
間詰部	8±2.5	32.9	40.0	450	148	710	1157	9.0	0.004

※ W:水, C:セメント, S:細砂, G:砕石

表－ 6.2 材料特性値

取替RC 床版	圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋 (SD345)			
		使用 鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
床版部	60.3	D13	366	539	200
間詰部	61.7				

表－ 6.3 付着用接着剤の性能

項目		接着剤	備考
外観	主剤	白色ペースト 状	異物混入なし
	硬化剤	青色液状	
混合比(主剤：硬化剤)		5：1	重量比
硬化物比重		1.42N/mm ²	JIS K 7112
圧縮強さ		102N/mm ²	JIS K 7181
圧縮弾性係数		3976N/mm ²	JIS K 7181
曲げ強さ		41N/mm ²	JIS K 7171
引張せん断強さ		15N/mm ² 以上	JIS K 6850
コンクリート付着強さ		3.7N/mm ² ※	JIS A 6909

ここで、材齢 28 日の間詰部コンクリートの圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表－ 6.2 に併記する。なお、間詰部コンクリートの発現強度は材齢 3 時間で 34.9N/mm² である。

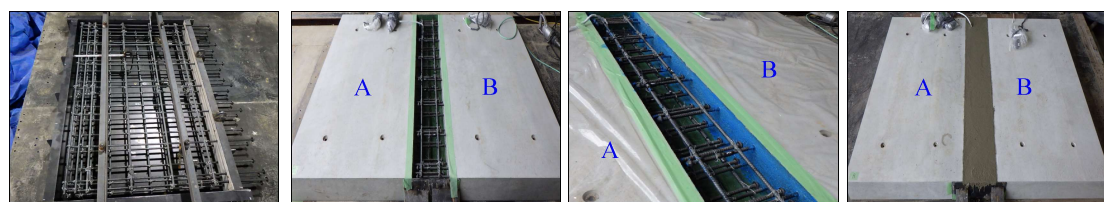
(3) 付着用接着剤

付着用接着剤は第 5 章と同様の接着剤を用いる。RC 床版および鋼床版のコンクリート増厚補強法において、打継ぎコンクリートとの付着性を向上させるために開発された接着剤である (6.13), (6.14)。ここで、接着剤の性能試験の結果を表－ 6.3 に示す。メーカー公表値からコンクリートとの付着強さは 3.7N/mm² 以上である。

6.4 取替RC床版の施工手順

6.4.1 プレキャスト床版の製作

プレキャスト床版の製作手順は第 5 章と同様であり、写真－ 6.1 に示す。



(1) 鉄筋配置

(2) 取替RC床版設置

(3) 接着剤塗布

(4) 取替RC床版完成

写真－ 6.1 RC 床版の施工手順

プレキャスト床版 A と B の 2 タイプの型枠を製作し、それぞれの型枠に主筋および円形の突起を設けた配力筋を配置する（写真－ 6.1(1)）。次に、普通コンクリートを表－ 6.1 に示す配合で練混ぜし、打ち込みし、表面仕上げし、養生して完成となる（写真－ 6.1(2)）。プレキャスト床版 A と B 側面には 5mm の程度の凹凸（目荒し）を設けた。

6.4.2 取替RC床版の設置手順

(1) 接着剤なしの取替RC床版

取替 RC 床版の施工手順は、プレキャスト床版 A と B を設置する。間詰部に主鉄筋を配置し（写真－ 6.1(2)）、実橋での設置と同様に間詰部コンクリートには超速硬コンクリート（表－ 6.1）練混ぜする。練混ぜは実橋での設置を考慮して移動式プラントを用いた。練混ぜ後直ちに間詰部に打ち込みし、表面仕上げして完成となる（写真－ 6.1(3)）。

(2) 接着剤あり取替RC床版

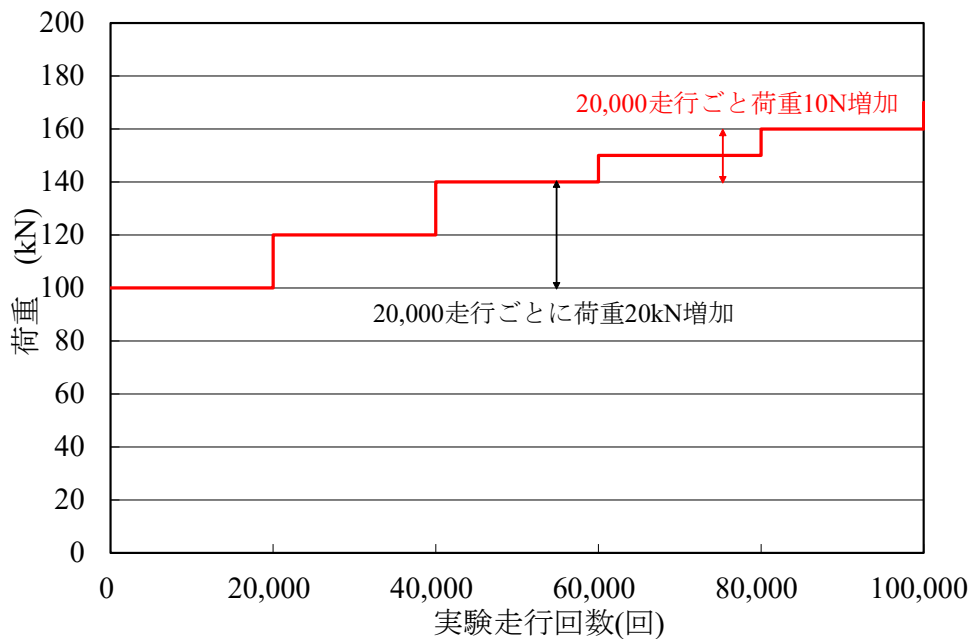
施工手順は、プレキャスト床版を A, B を設置し、間詰部に主筋を組立し（写真－ 6.1(2)）、プレキャスト床版側面に接着剤を塗布する（写真－ 6.1(3)）。接着剤の硬化時間は 120 分程度であることから、接着剤の塗布と同時に超速硬コンクリートを移動プラントで練混ぜし、打設する。最後に表面仕上げし、養生して完成となる（写真－ 6.1(3)）。

以上、2 種類の供試体を体製作して輪荷重走行疲労実験に用いる。

6.5 輪荷重走行疲労実験方法および等価走行回数

6.5.1 輪荷重走行疲労実験方法

輪荷重走行疲労実験は、取替 RC 床版供試体上面に幅 300mm の輪荷重を軸方向に 1,200mm の範囲を繰り返し走行させる実験である。なお、床版上面には幅 300mm、厚さ 4.5mm の鋼板を設置する。輪荷重走行疲労実験における初期荷重は 100kN とし、20,000 回走行ごとに荷重 20kN 増加させる。荷重 140kN 以降は 20,000 回走行ごとに荷重 10kN ずつ増加させ、破壊に至るまで荷重増加と走行を繰り返す（図－ 6.3）。計測は実験走行回数 1, 10, 100, 1,000 回, 5,000 回, 以降は 5,000 回走行ごとに開閉幅およびたわみを計測する。また、走行回数 1, 10,000 回走行後は 10,000 回ごとに開閉幅およびたわみを動的に計測し、開閉幅およびたわみの変動挙動を検証する。



図－ 6.3 輪荷重走行疲労実験における荷重条件

6.5.2 輪荷重走行疲労実験における等価走行回数

本実験における段階荷重载荷による輪荷重走行疲労実験では、耐疲労性の評価はマイナー則に従うと仮定すると式(6.1)として与えられる。式(6.1)は、載荷荷重 P_i を基準荷重 P で除した値の S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値 m 乗に実験走行回数を乗じることにより破壊までの等価走行回数が算定される。基準荷重 P は、本取替 RC 床版は 3/5 モデルとしたことから、道示に規定する B 活荷重 100kN の 3/5 に安全率 1.2 を考慮し、72kN とする^{6.15)}。また、S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値 $m = 12.7$ を適用する^{6.16), 6.17)}。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P} \right)^m \times n_i \quad (6.1)$$

ここに、 N_{eq} ：等価走行回数（回）、 P_i ：載荷荷重（kN）、 P ：基準荷重（kN）、 n_i ：実験走行回数（回）、 m ：S-N 曲線の傾きの逆数（=12.7）

6.6 輪荷重走行疲労実験による結果および考察

6.6.1 等価走行回数

輪荷重走行疲労実験における等価走行回数 N_{eq} および等価走行回数比（= R.RC-F-A/R.RC-F-N）を表－ 6.4 に示す。

表－ 6.4 実験走行回数および等価走行回数

供試体	実験走行回数および等価走行回数						合計走行回数	等価走行回数比
	荷重	100kN	120kN	140kN	150kN	160kN		
R.RC-F-N	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	20,000	301	80,301	—
	等価走行回数	1,296,903	13,137,391	93,053,635	223,494,212	7,634,271	338,616,413	
R.RC-F-A	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	20,000	3,001	83,001	1.20
	等価走行回数	1,296,903	13,137,391	93,053,635	223,494,212	76,114,442	407,096,584	

間詰部にコンクリートを直接打ち込んだ供試体 R.RC-F-N の式(3)より算出した等価走行回数の最大(以下、破壊等価走行回数とする)は、 338.616×10^6 回である。次に、プレキャスト RC 床版の橋軸方向側面に 5mm の凹凸と側面に接着剤を用いた供試体 R.RC-F-A の破壊等価走行回数は 407.096×10^6 回であり、等価走行回数を比較すると 1.20 倍である。これは接着剤を塗布することで引張強度およびせん断強度が向上し、はく離に伴うひび割れの発生が抑制され耐疲労性が向上したものと考えられる。

6. 6. 2 開閉幅と走行距離の関係

輪荷重走行疲労実験におけるプレキャスト RC 床版と間詰部界面の開閉幅と等価走行回数の関係を図－ 6.4 に示す。また、 π ゲージの計測位置は図－ 6.2 に示すように間詰部左側を(L)，右側を(R)とする。

図－ 6.4 に示した開閉幅と走行距離の関係においては 1 走行を動的に計測して結果であり、1 走行時の開閉幅の挙動を示したものである。また、 π ゲージの計測位置と走行距離については図－ 6.2 に示すとおりである。

(1) R. RC-F-N

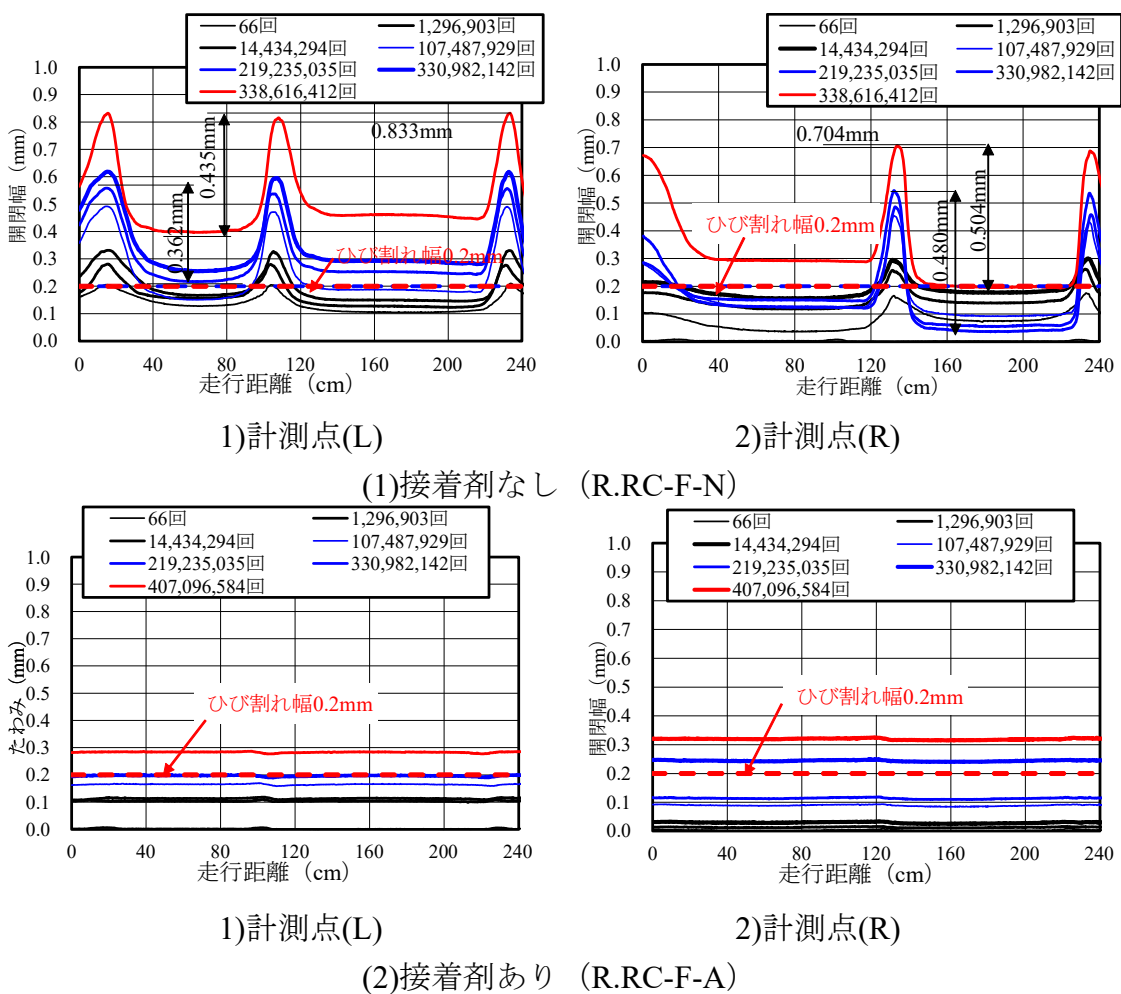
供試体 R.RC-F-N の π ゲージ(L)の開閉幅と走行距離の関係は図－ 6.4(1)，1) に示すように輪荷重が左側界面(L) (走行距離 15cm) を通過するとき開口し、輪荷重が通過後は閉口し、支点 C 側を折り返して再度左側界面(L) (走行距離 105cm) を通過する際に開口し、通過後閉口を繰り返す。その後、右支点 D 側 (走行距離 180cm) を折り返して元の床版中央 (走行距離 240cm) に停止させる。

供試体 R.RC-F-N(L)が荷重等価走行回数 66 回での開閉幅の最大値は 0.209mm，最小値が 0.100mm であり，最大値と最小値の差 (以下，開閉範囲とする) が 0.109mm である。橋梁定期点検要領^{6,18)}に示すひび割れ幅 0.2mm に達したのは等価走行回数 35 回であり，かなり早い段階で 0.2mm に達している。破壊等価走行回数 338.616×10^6 回では開閉幅の最大が 0.833mm，最大開閉範囲が 0.435mm である。

次に，右界面の π ゲージ(R)の開閉幅は，15cm 位置が左側 π ゲージ(L)を通過し，60cm が左側折り返し地点である。135cm 付近が右界面(R)上を通過し，180cm

付近が右側折り返し地点であり、225cm 付近が再度、右側界面(R)、240cm が元の位置である。

供試体 R.RC-F-N(R)は等価走行回数 66 回の開閉幅は最大値 0.175mm、開閉範囲が 0.199mm である。橋梁定期点検要領に示すひび割れ幅 0.2mm に達した等価走行回数は 3,500 回である。破壊等価走行回数 338.616×10^6 回での開閉幅の最大値 0.704mm、最大開閉範囲は 0.504mm である。



図－ 6.4 開閉幅と走行距離の関係

以上より、プレキャスト RC 床版側面に 5mm 程度凹凸面を設け、直接超速硬コンクリート打ち込み一体する方法の場合は、等価走行回数 35 回で補修の目安である 0.2mm に達したことから、ひび割れを抑制する対策を講じる必要がある。

(2) R.RC-F-A

供試体 R.RC-F-A については等価走行回数による開閉幅を考察する。

プレキャスト RC 床版界面に 5mm の凹凸と凹凸面に付着用接着剤を塗布し

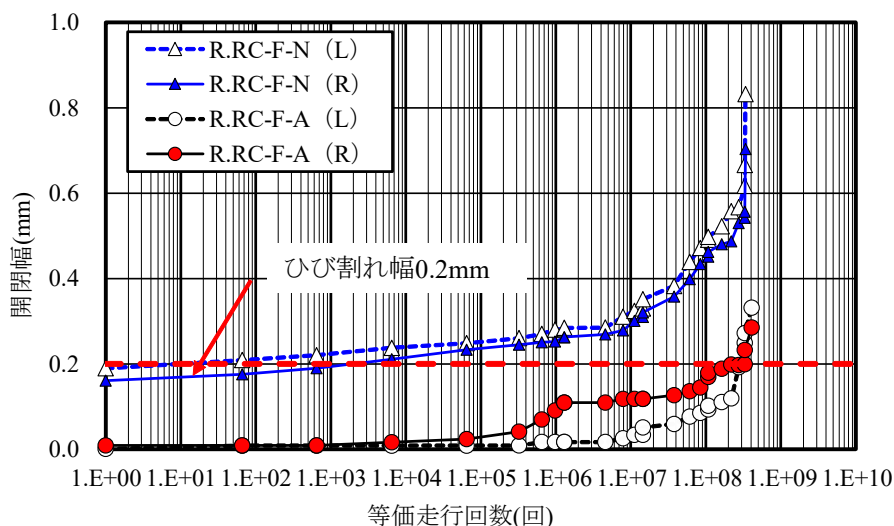
た供試体 R.RC-F-A(L)は、等価走行回数 66 回後の開閉幅は 0.008mm である。ひび割れ幅 0.2mm に達した等価走行回数は 284.000×10^6 回であり、破壊等価走行回数の約 70%である。破壊等価走行回数 407.096×10^6 回で最大開閉幅が 0.330mm である。

次に、供試体 R.RC-F-A(R)も同様の挙動を示しており、等価走行回数 66 回後の開閉幅は 0.008mm である。等価走行回数の増加により開閉幅がやや増加している。ひび割れ幅 0.2mm に達した等価走行回数 330.982×10^6 回であり、破壊等価走行回数 80%である。等価走行回数荷重の最大 407.096×10^6 回で最大開閉幅が 0.33mm である。

以上より、プレキャスト RC 床版側面に 5mm の凹凸を設けに付着用接着剤を塗布することで、ひび割れ幅 0.2mm に達する等価走行回数は(L), (R)で破壊等価走行回数のそれぞれ 70%, 80%となっており、終局時付近まで一体性を保持し、接着剤なしの場合に比して大幅にひび割れを抑制する結果となった。

6.6.3 開閉幅と等価走行回数関係

開閉幅と等価走行回数の関係を図－ 6.5 に示す。なお、開閉幅の値は一走行時の最大値である。また、図－ 6.5 には橋梁定期点検要領に示すひび割れ幅 0.2mm を併記した。



図－ 6.5 開閉幅と等価走行回数の関係

(1) R.RC-F-N

図－ 6.7 より、供試体 R.RC-F-N(L)は、等価走行回数 35 回走行後に開閉幅が橋梁定期点検要領に示すひび割れ幅 0.2mm に達している。等価走行回数 275.108×10^6 回以降から開閉幅の増加が著しい。破壊等価走行回数 338.616×10^6

回での開閉幅は 0.833mm である。

次に、供試体 R.RC-F-N(R)は、等価走行回数 3,500 回走行でひび割れ幅 0.2mm に達している。その後の荷重増加と繰り返し走行によって開閉幅は緩やかに増加し、等価走行回数 275.108×10^6 回から増加が著しくなっている。破壊等価走行回数 330.982×10^6 回では開閉幅が 0.703mm である。

(2) R. RC-F-A

供試体 R.RC-F-A(L)は間詰部界面に接着剤を塗布したことで、開閉幅が大幅に抑制されている。ひび割れ幅 0.2mm に達した等価走行回数は 282.000×10^6 回であり、0.2mm を超えた付近から開閉幅の増加はやや大きくなっている。等価走行回数 407.096×10^6 回で開閉幅は 0.285mm である。

供試体 R.RC-F-A(R)は、供試体 R.RC-F-A(L)と比較して開閉幅がやや大きい。等価走行回数 0.324×10^6 回までは開閉幅は 0mm であり、その後の走行から開閉幅がやや大きくなり、等価走行回数 276.000×10^6 回でひび割れ幅が 0.2mm に達した。破壊等価走行回数 407.096×10^6 回で、開閉幅が 0.331mm である。

以上より、接着剤なしの場合は早期に開閉幅が 0.2mm に達するのに対し、接着剤ありの供試体においては開閉幅が 0.2mm に達する等価走行回数は、破壊走行回数の最大 67%となっており、輪荷重走行疲労実験においては接着剤の有無が開閉幅および耐疲労性に及ぼす影響が大きいことが判明した。

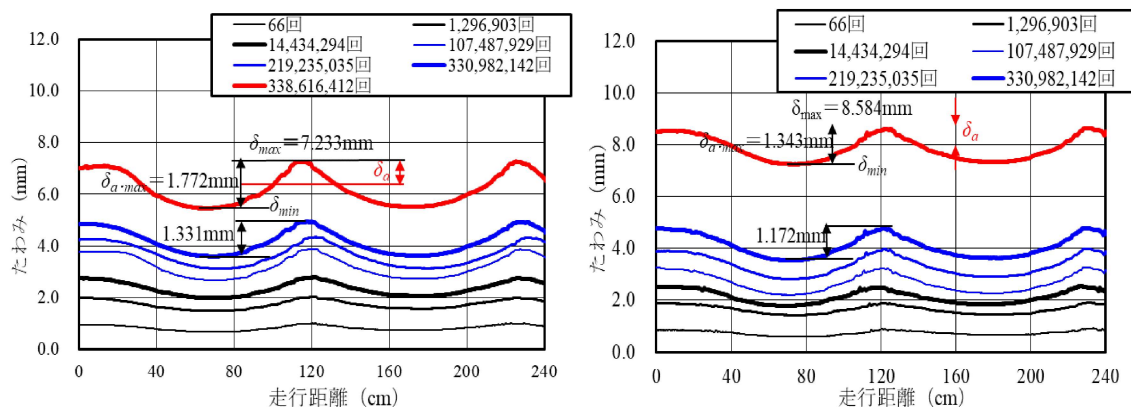
6. 6. 4 たわみと走行距離およびたわみ振幅と等価走行回数の関係

(1) たわみと走行距離の関係

輪荷重疲労実験によるたわみと走行距離の関係を 1 走行について動的に計測した結果を図－ 6.6 に示す。なお、図－ 6.6 に示す等価走行回数は開閉幅と等価走行回数と同様とする。

供試体 R.RC-F-N は、図－ 6.6 に示すように等価走行回数 66 回での最大たわみ 0.985mm、たわみの変動範囲（最大たわみと最小たわみの差、以下、たわみ範囲とする）は 0.300mm である。等価走行回数 330.982×10^6 回で 4.935mm、たわみ範囲は 1.333mm である。破壊等価走行回数 338.616×10^6 回では 7.233mm、たわみ範囲が 1.772mm である。

一方、供試体 R.RC-F-A は、等価走行回数 66 回での最大たわみ 0.891mm、たわみ範囲が 0.312mm である。破壊等価走行回数 407.096×10^6 回では 8.584mm、たわみ変動範囲は 1.343mm である。接着剤なしと有りの供試体のたわみ範囲を比較すると、接着剤なしの供試体のたわみ範囲が有りの供試体より大きくなっていることが分かる。



(1)接着剤なし (R.RC-F-N)

(2)接着剤あり (R.RC-F-A)

図－ 6.6 たわみと走行距離の関係

床版のたわみは、主として活荷重たわみと残留たわみの和から成る。残留たわみは、コンクリートのひび割れの伸展に伴い生じる不可逆性のもので、活荷重たわみはその時点の床版剛性（曲げ剛性およびせん断剛性）を反映した可逆性のものである。輪荷重走行実験におけるたわみ範囲は、実橋における活荷重たわみに相当する。たわみ範囲の増加は、床版の曲げ剛性あるいはせん断剛性の低下を示している。走行回数に伴うたわみ範囲の増加割合の比較から、接着剤なしの場合の方が床版の剛性の低下が大きくなっていることが分かり、これが耐疲労性の低下の要因と考えられる。

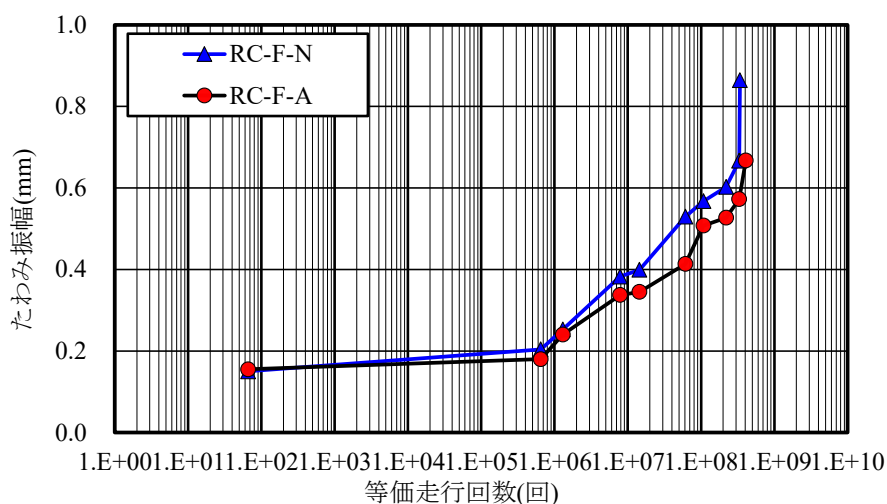
(2) たわみ振幅と等価走行回数の関係

輪荷重走行疲労実験におけるたわみと走行距離の関係を表した図－ 6.6 から、1 走行における床版中央のたわみの最大値と最小値の差であるたわみ範囲が荷重増加とともに増大することが分かる。

前述したように、実験におけるたわみ範囲は実橋での活荷重たわみに相当するものである。活荷重たわみの変化と疲労損傷との関係は多くの既往の研究(6.19)-6.22)においても検討されている。松井ら(6.19)、(6.20)は、活荷重たわみと引張側コンクリート無視の理論たわみ（主鉄筋・配力鉄筋の断面積、有効高を考慮した直交異方性板理論値）と比較することにより、輪荷重走行載荷では活荷重たわみが引張側コンクリートを無視した直交異方性板理論値に到達するまで増加し、これを超えた後に増加傾向が顕著になり間もなく破壊に至ることをもとに、活荷重たわみが引張無視時の計算たわみに到達した時点を使用限界としている。

コンクリートの引張側無視の断面に達しても活荷重たわみが増加するのは、走行荷重によって断面に作用するせん断力、ねじりモーメントが常に交番することから、ひびわれ面の磨耗が継続し、せん断剛性と曲げ剛性ともに徐々に低

下していくためと考えられている。



図－ 6.7 たわみ振幅と等価走行回数の関係

図－ 6.7 は、式(6.2)で表される δ_a をたわみ振幅（たわみ範囲の 1/2）と定義し、たわみ振幅と等価走行回数の関係を示したものである。

$$\delta_a = (\delta_{max} - \delta_{min}) / 2 \quad (6.2)$$

ここで、 δ_a ：たわみ振幅（mm）、 δ_{max} ：1 走行時の最大たわみ（mm）、 δ_{min} ：1 走行時の最小たわみ（mm）

輪荷重走行疲労実験における供試体 R.RC-F-N のたわみ振幅は、図－ 6.7 に示すように、等価走行回数の増加に従い増加している。等価走行回数 66 回のたわみ振幅が 0.15mm、破壊等価走行回数 338.616×10^6 回で 0.865mm である。

一方、供試体 R.RC-F-A の等価走行回数 66 回のたわみ振幅が 0.155mm、等価走行回数 407.096×10^6 回で 0.668mm である。接着剤なしの供試体のたわみ振幅を下回っている。

プレキャスト床版継手部が健全な状態においては、継手を有さない RC 床版の既往の輪荷重走行実験結果と同様、走行回数の増加に伴い曲げひび割れの進展に伴ってたわみ振幅は増加する。一方、継手部の間詰めコンクリートとの境界部に損傷が発生し進行するにつれて、継手部で橋軸方向の曲げ剛性およびせん断剛性が局部的に低下し増加の勾配は大きくなる。

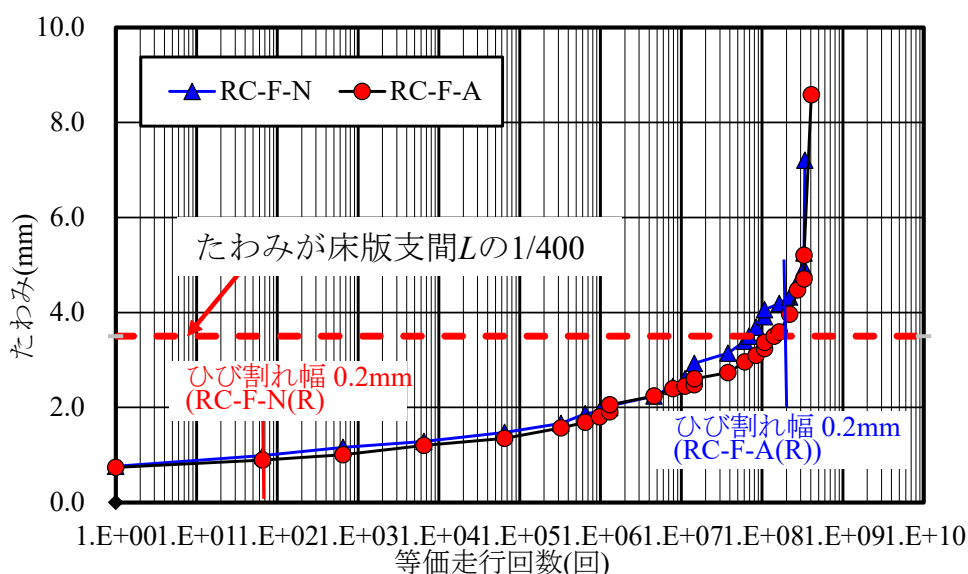
プレキャスト床版継手部の損傷は床版全体から見れば局所的な現象である。輪荷重走行によるたわみは床版全体の曲げ剛性とせん断剛性に依存する鉛直変

位の積分値であることから、継手部の局部的損傷がたわみに及ぼす影響は小さいと考えられる。しかし、輪荷重走行疲労実験によるたわみ振幅と走行回数との関係を示した図－ 6.7 から、接着剤なしの供試体に比して、ありの供試体は平均 13%たわみ振幅が低下しており継手部の耐久性能の違いが明瞭に表れていることが分かる。このことから、接着剤ありの供試体の等価走行回数が接着剤なしの供試体の 1.20 倍の向上に繋がったものとする。

以上から、たわみ振幅の変化から継手部の疲労損傷の発生や進展の状態を推定できる可能性があることが分かる。

6.6.5 たわみと等価走行回数の関係

取替 RC 床版の橋軸方向および橋軸直角方向中央たわみ（活荷重たわみと残留たわみの合計値）と等価走行回数の関係を図－ 6.8 に示す。なお、RC 床版ではたわみが床版支間 L の $1/400$ に達した付近から増加が著しくなることが報告^{6.23)}されていることから、たわみが床版支間の $1/400$ の 3.5mm を図－ 6.8 に併記した。また、ひび割れ幅が 0.2mm に達した等価走行回数も併記した。



図－ 6.8 たわみと等価走行回数の関係

供試体 R.RC-F-N の初期たわみは 0.76mm である。また、開閉幅 0.2mm に達した等価走行回数 66 回のたわみは 0.985mm である。たわみが床版支間 L の $1/400$ に達した時点の等価走行回数は 69.100×10^6 回である。その後荷重増加と走行を繰り返すことで、たわみが増加し、破壊等価走行回数 338.616×10^6 回で 7.20mm で、輪荷重が走行中に左支点から 950mm の位置で押抜きせん断破壊となった。

一方、供試体 R.RC-F-A の初期たわみは 0.74mm である。接着剤を塗布した供試体のたわみはやや下回っている。その後の荷重増加および走行を繰り返すことでたわみは増加するものの、接着剤を塗布しない供試体 R.RC-F-N のたわみを下回っている。たわみが床版支間 L の 1/400 に達した時点の等価走行回数は 140.600×10^6 回であり、供試体 R.RC-F-N の 2.03 倍である。開閉幅 0.2mm に達した等価走行回数 284.000×10^6 回のたわみは 4.50mm である。輪荷重が走行中に供試体取替と同様に、左支点から 950mm の位置で押抜きせん断破壊となった。

以上より、たわみと等価走行回数の関係においても付着用接着剤を用いることで、プレキャスト床版と間詰部界面のはく離やたわみの増加が抑制され、耐疲労性が向上する結果となった。

6.6.6 輪荷重走行疲労実験における破壊状況

破壊時の走行面の損傷および下面のひび割れ状況を図-6.9 に示す。

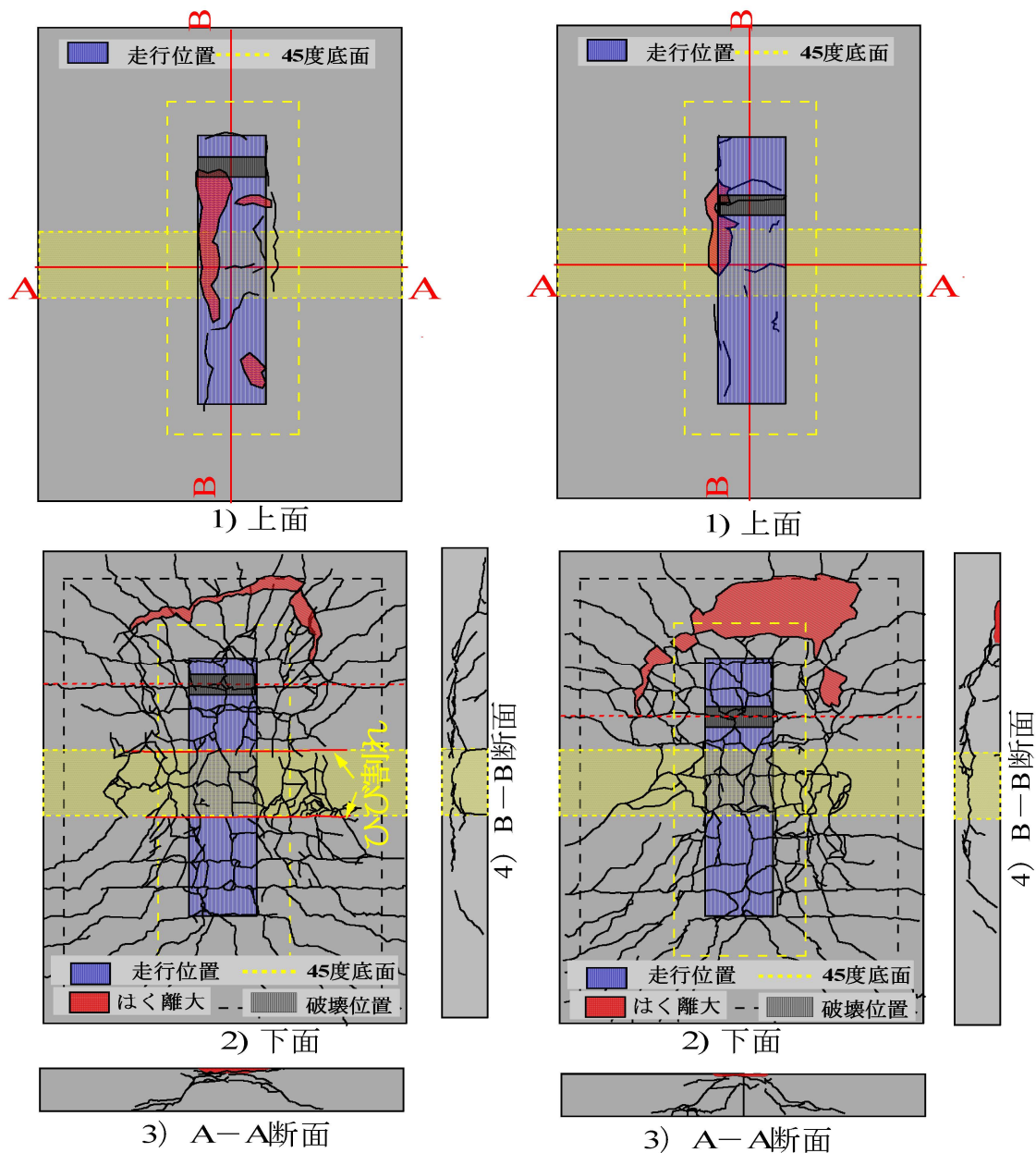
(1) R.RC-F-N

接着剤なしの供試体 R.RC-F-N の上面の損傷状況は図-6.9(1), 1)に示すように、走行面にひび割れや部分的な損傷がみられるものの走行面以外の箇所の損傷が見られない。間詰部界面にもひび割れの発生は見られない。下面は図-6.9(1), 2)に示すように、2 方向ひび割れが発生し、破壊位置はプレキャスト床版 A 側であり、ダウエル効果の影響によりはく離が見られる。プレキャスト床版と間詰部界面ははく離に伴うひび割れが発生している。

(2) R.RC-F-A

接着剤ありの供試体 R.RC-F-A の上面の損傷状況は図-6.9(2), 1)に示すように上面は走行面のプレキャスト床版 A 側の一部に損傷が見られる。下面は図-6.9(2), 2)に示すように 2 方向のひび割れが発生している。破壊位置のプレキャスト床版 A 側で押抜きせん断破壊となっている。プレキャスト床版と間詰部界面は接着剤の効果によりはく離の発生が見られない。

以上より、間詰部を有する取替床版、本実験の間詰部の方向は異なるものの輪荷重走行による疲労が進行するにしたがって、間詰部界面にはく離が生じるものと考えられる。床版全体としての耐疲労性は評価されているが、耐疲労性の向上、間詰部の劣化を抑制する方法の 1 つとして提案したい。



(1)接着剤なし (R.RC-F-N)

(2)接着剤あり (R.RC-F-A)

図- 6.9 輪荷重走行実験による損傷状況

6.7 まとめ

- (1) 輪荷重走行疲労実験における等価走行回数は接着剤なしの供試体に対して接着剤ありの供試体は 1.20 倍の等価走行回数を得られた。これは、第 5 章の結果から引張強度およびせん断強度が高く、付着力が向上したためと考えられる。
- (2) 輪荷重走行疲労実験における間詰部の開閉状況は、接着剤なしの供試体は開閉幅の変動挙動が著しい。たわみと走行距離の関係から得たたわみ振幅

が大きく、剛性の低下が等価走行回数の増加とともに増加している。一方、接着剤ありの供試体は間詰部の振幅も小さく、ほぼ一定の挙動を示している。また、たわみ振幅においても接着剤ありの供試体が 13 %ほど下回っていることから耐疲労性の向上が図られたと考える。

- (3) 破壊状況は、接着剤なしの供試体は間詰部界面にはく離に伴うひび割れが発生している。これに対して接着剤ありの供試体はひび割れ発生は見られない。これは接着剤の効果によるものである。また、破壊は全てプレキャスト床版内で輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。
- (4) 取替 RC 床版および PCT 桁橋は間詰部を有し、輪荷重の繰り返し走行により、打ち継ぎコンクリート界面がはく離に伴うひび割れが発生し、漏水による遊離石灰が発生している事例が多い。これははく離を抑制する施工技術として、高耐久型エポキシ系接着剤を側面に塗布することで、打ち継ぎコンクリートと一体化が図られ、耐疲労性が向上するものと考えられる。

第 6 章参考文献

- 6.1) 国土交通省道路局国道・防災課道路保全企画室：地方自治体の長寿命化修繕計画に関する最近の動向，2010.
- 6.2) 千葉県県土整備部道路環境課：千葉県橋梁長寿命化修繕計画，2016.
- 6.3) 阿部忠，伊藤高，今野貴元，中島博敬，伊藤清志：供用開始後 3 回の補強を施し 60 年経過した道路橋 RC 床版の劣化診断および健全度評価，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 19 巻，pp.543-548，2019.10
- 6.4) 水野浩，松井繁之，大西弘志，杉山俊幸，街道浩：床版取替用プレキャスト合成床版の合理化継手の疲労耐久性評価，構造工学論文集 Vol.58A，pp.1112-1122，2013.3
- 6.5) 中村定明，三浦尚：RC ループ継手の力学挙動に関する基礎的研究，土木学会論文集 No.774/V-65，pp.17-26，2004.
- 6.6) 高橋明彦，阿部忠，小野晃良，大西弘志，久田真：間詰部を設けた取替床版の耐疲労性の評価に関する実験研究，構造工学論文集，Vol.65A，655-664，2019.3
- 6.7) 小野晃良，阿部忠，高橋明彦，武田秀人：2 方向に間詰部を設けた取替 RC 床版の耐荷力・耐疲労性の検証および実橋における施工技術，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.2，pp.1309-1314，2020.7
- 6.8) 小野晃良，阿部忠，木村延久，高橋明彦：走行荷重が作用する取替 RC 床版の最大耐荷力および破壊メカニズムに関する実験研究，第 11 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp29-34，2020
- 6.9) 小野晃良，阿部忠，水口和彦，川井豊：プレキャスト床版に突起型継手を設けた取替 RC 床版間詰部の開閉幅が耐疲労性に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol.68A，pp711-721，2022.3
- 6.10) 小野晃良，阿部忠，水口和彦，大西弘志：取替 RC 床版接合面に接着剤を用いた場合の耐荷力性能と耐疲労性の検証および開閉幅の抑制効果，セメント・コンクリート論文集，Cement Science and Concrete Technology 75 (1),pp278-285,2022.3
- 6.11) 土木学会：鋼構造シリーズ「道路橋床版の維持管理マニュアル 2020」pp.25-26，2020.10
- 6.12) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1994.
- 6.13) 阿部忠，伊藤清志，児玉孝喜，小堺規行，深川克彦：接着剤塗布型橋面コンクリート舗装法における耐疲労性の評価に関する実験研究，構造工学論文集，Vol.66A，pp.650-661，2020.3

- 6.14) 阿部忠：橋梁床版の健全性評価と長寿命化対策，建設図書，pp.214, 2021.9
- 6.15) 阿部忠，木田哲量，高野真希子，川井豊：道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力および耐疲労性の評価，土木学会論文集 A1, pp.39-54, 2011.
- 6.16) 松井繁之：道路橋床版設計・施工と維持管理，森北出版，2007.
- 6.17) 川井豊，阿部忠，木田哲量，高野真希子：道路橋 RC 床版の S-N 曲線に関する一考察，第七回路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.263-268, 2012.6
- 6.18) 国土交通省道路局：橋梁定期点検要領，2014, 2019.
- 6.19) 松井繁之：道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究，大阪大学学位論文，1984.11
- 6.20) 松井繁之，前田幸雄：道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案，土木学会論文集，第 374 号/I-6, pp.419-426, 1986.10
- 6.21) 横山広，長屋優子，関口幹夫，堀川都志雄：自走式試験機による道路橋床版の使用限界の評価，第 4 回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.49-54, 2004.11
- 6.22) 石崎茂，松井繁之：2 方向支持された RC 床版の劣化機構と耐久性評価法に関する研究，土木学会論文集，No.738/I-64, pp.257-270, 2003.7
- 6.23) 阿部忠，木田哲量，高野真希子，小森篤也，児玉孝喜：輪荷重走行疲労実験における RC 床版上面増厚補強法の耐疲労性の評価法，構造工学論文集 Vol.56A, 2010.3

第7章 取替RC床版の押抜きせん断耐荷力および疲労寿命推定法

7.1 はじめに

地方自治体が管理する道路橋 RC 床版においては、補修・補強法が施されながら数十年が経過し、再劣化が生じ、その対策として取替 RC 床版が提案されている^{7.1)}。取替床版においては床版厚を最小厚さとすることから一般的には PC 構造とした取替床版が提案され、高速道路等で実施工されている^{7.2), 7.3), 7.4)}。しかし、地方自治体が管理する橋梁床版は交通量が少なく、B 活荷重だけではなく、A 活荷重や 2 等橋で設計された橋梁も多いことから、筆者らは地方道を対象とした取替 RC 床版構造を提案し、輪荷重走行疲労実験など各種試験を実施し、耐疲労性を評価した^{7.5)}。

筆者らの取替 RC 床版において既往の研究では、1994 年以降に改訂された道路橋示方書・同解説（以下、道示とする）^{7.6)}に規定する B 活荷重対応とした RC 床版供試体を用いて輪荷重走行荷重実験および輪荷重走行疲労実験を行い、耐荷力性能および耐疲労性の検証を行った。第 3 章、第 5 章では、軸直角方向および軸直角方向と軸方向に間詰部を設けた 2 タイプの取替 RC 床版供試体を用いて耐荷力性能を検証し、第 4 章、第 6 章では輪荷重走行疲労実験および耐疲労性の検証を行い、実験における耐疲労性を評価した。

RC 床版の寿命推定式には、松井らにより 1964 年改訂の鋼道路橋設計基準^{7.7)}に基づいた RC 床版および一部に異形鉄筋を配置した RC 床版を用いて輪荷重走行疲労実験を行い S-N 曲線式^{7.8)}および S-N 曲線式に適用する押抜きせん断耐力式^{7.9)}が提案されている。また、土木研究所^{7.10)}においても 1996 年改訂の道示に準拠して製作した RC 床版を用いて輪荷重走行疲労実験を行い S-N 曲線式を提案している。なお、押抜きせん断耐力式には松井らが提案する押抜きせん断耐力式が適用されている。

一方、阿部ら^{7.11), 7.12)}は 1994 改訂の道示に基づいて設計し、モデル化した RC 床版を用いて輪荷重走行疲労実験を行い S-N 曲線式および輪荷重走行荷重実験による破壊荷重付近の押し抜きせん断耐力式^{7.11), 7.12), 7.13)}を提案し、寿命推定が行われている。よって、予防保全型維持管理計画における取替 RC 床版の寿命予測における押抜きせん断耐荷力および S-N 曲線式との整合性の検証が必要となる。

そこで第 7 章では、第 3 章の輪荷重走行荷重実験の結果に、第 5 章の輪荷重走行荷重実験の結果を加え、取替 RC 床版の最大耐荷力と押抜きせん断耐荷力を検証する。次に、第 4 章の輪荷重走行疲労実験の結果に、第 6 章の輪荷重走行疲労実験を加え、松井らが提案する S-N 曲線式の傾きの逆数の絶対値 $m =$

12.7 を適用して得られた等価走行回数より耐疲労性の検証を行う^{7,8)}。そして、阿部らが提案する RC 床版の S-N 曲線式との整合性を検証し、取替 RC 床版の寿命推定の一助とする。

7.2 供試体の使用材料・寸法

7.2.1 使用材料

押抜きせん断力の算定においては材料の力学特性が必要となる。そこで、各章で用いた取替 RC 床版コンクリートの配合条件および材料特性値を示す。

取替 RC 床版供試体のプレキャスト RC 床版部のコンクリート材料には、普通ポルトランドセメントに最大骨材寸法 20mm の碎石，最大骨材寸法 5mm の砕砂を使用し，配合を表－7.1 に示す。

各章で用いた供試体は製作時期および実験時期が異なることから 3 タイプに分類した。間詰部を1方向軸直角方向に設けた供試体記号を R.RC-A，間詰部を橋軸直角方向と橋軸方向の 2 方向に設けた供試体を R.RC-B，プレキャスト RC 床版側面に接着剤を塗布した供試体を R.RC-C とした。

プレキャスト RC 床版のコンクリート圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表－7.2 に示す。

間詰部のコンクリートには，現場での施工時間を 8 時間以内として，要求性能は材齢 3 時間で道示^{7,6)}に規定するコンクリートの設計基準強度 24N/mm^2 以上，材齢 14 日で 40N/mm^2 以上確保できる配合とする。コンクリートには超速硬セメントに最大骨材寸法 20mm の碎石，最大骨材寸法 5mm の砕砂を使用し，配合を表－7.1 に併記する。

表－7.1 コンクリートの配合

供試体記号	コンクリートの使用箇所	スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)				減水剤 (C×%)	AE剤 (C×%)
					C	W	S	G		
R.RC-A1, A2	床版部	10±2.5	35.0	43.2	443	155	732	968	3.1	0.004
R.RC-B1, B2	間詰部	8±2.5	32.9	40.0	450	148	710	1157	9.0	0.004
R.RC-A3	床版部	10±2.5	34.0	46.0	471	160	763	901	5.2	0.004
R.RC-C1	間詰部	8±2.5	32.9	40.0	450	148	710	1157	9.0	0.004

表－7.2 コンクリートの圧縮強度および材料特性値

供試体記号	コンクリートの使用箇所	圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋 (SD345)			
			使用鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
R.RC-A1, A2	床版部	56.4	D13	366	539	200
R.RC-B1, B2	間詰部	62.4				
R.RC-A3	床版部	60.3	D13	366	539	200
R.RC-C1	間詰部	61.7				

ここで、材齢 28 日の間詰部のコンクリート圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表 7.2 に併記する。表 7.2 より、R.RC-A1, A2 および R.RC-B1, B2 プレキャスト床版の実験時のコンクリートの圧縮強度は 56.4N/mm^2 と要求性能である 40N/mm^2 以上は確保されている。次に、間詰部のコンクリートの実験時の圧縮強度は 62.4N/mm^2 である。また、R.RC-A3 および R.RC-C1 はプレキャスト床版のコンクリートの圧縮強度は 60.3N/mm^2 、間詰部のコンクリートの発現強度は、実験時は 61.7N/mm^2 である。

7.2.2 供試体寸法および鉄筋配置

供試体寸法および鉄筋配置は各章で示した通りであるが、取替 RC 床版の寸法の概略をあらためて図 7.1(1)に示す。

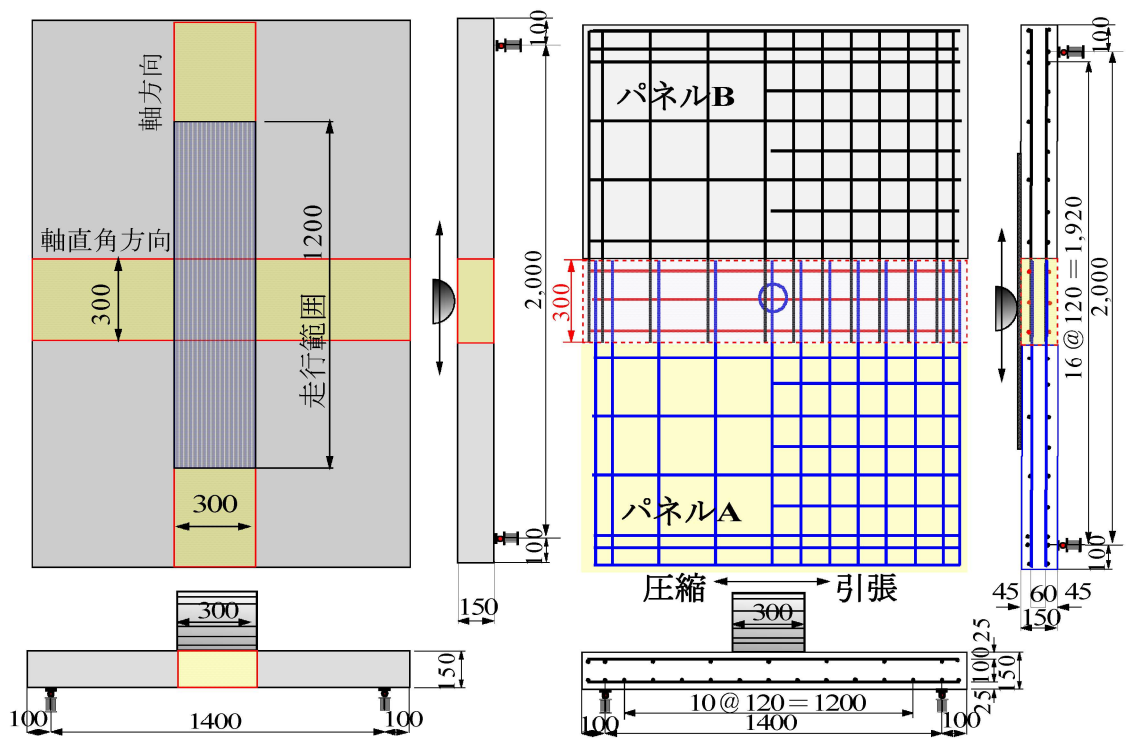
輪荷重走行荷重実験に用いた軸直角方向に間詰部を設けた供試体記号を R.RC-R-A (Replacement RC slab-Running load-A) とし、軸直角方向および軸方向に間詰部を設けた供試体記号を R.RC-R-B とする。プレキャスト RC 床版側面に接着剤を塗布した供試体記号を R.RC-R-C とする。

次に、耐疲労性の評価のために輪荷重走行疲労実験に用いた供試体は各 2 体である。供試体記号を R.RC-F-A (Replacement RC slab-Fatigueload-A) および R.RC-F-B, R.RC-F-C とする。取替 RC 床版 A, B 供試体の寸法および鉄筋配置を図 7.1(2), (3)に示す。

(1) 取替RC床版A (R.RC-R-A, R.RC-F-A)

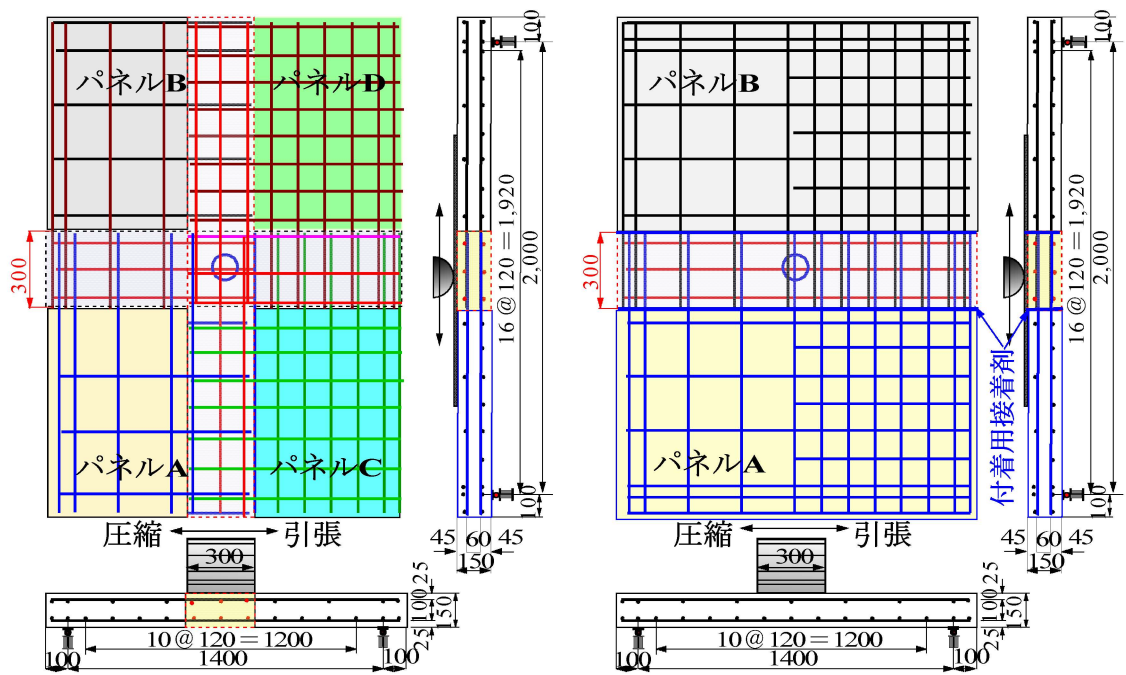
取替 RC 床版 A 供試体の寸法は図 7.1(2)に示すように、床版支間方向 $1,600\text{mm}$ 、軸方向 $2,200\text{mm}$ 、床版厚 150mm とする。なお、床版支間は $1,400\text{mm}$ 、軸方向の支間を $2,000\text{mm}$ とする。プレキャスト床版部は軸方向の寸法 850mm であり、引張側の軸直角方向および軸方向に D13 を 120mm 間隔で配置した。また、圧縮側には引張鉄筋量の $1/2$ を配置した。

間詰部の寸法は、軸方向支間中央（支点から $1,000\text{mm}$ ）に継手長 280mm を考慮し、幅 300mm を設けた。間詰部の配力筋の配置状況は、主鉄筋には D13 を上下に 3 本並列配置した。継手部の構造は、主鉄筋の内側に配力筋を配置し、端部は図 7.2(1), (2)に示す円形の突起を設けた鉄筋を配置した。



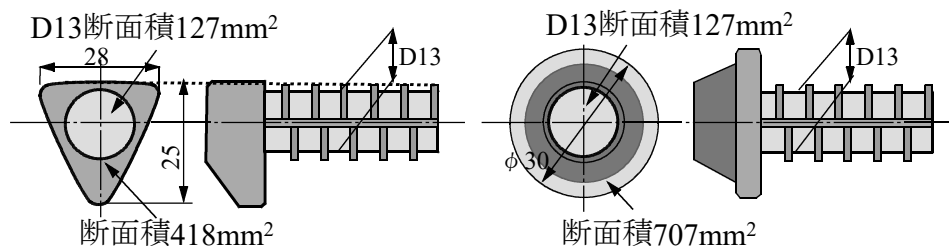
(1)供試体概略寸法

(2)取替 RC 床版 A(R.RC-R/F-A)



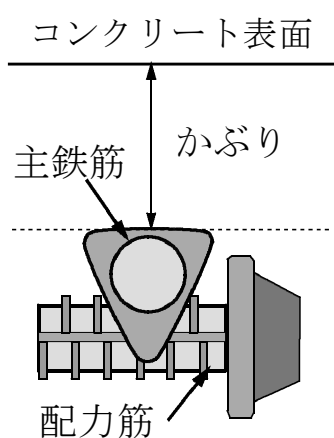
(3)取替 RC 床版 B(R.RC-R/F-B) (4)取替 RC 床版 C(R.RC-R/F-C)

図－ 7.1 供試体寸法および鉄筋配置

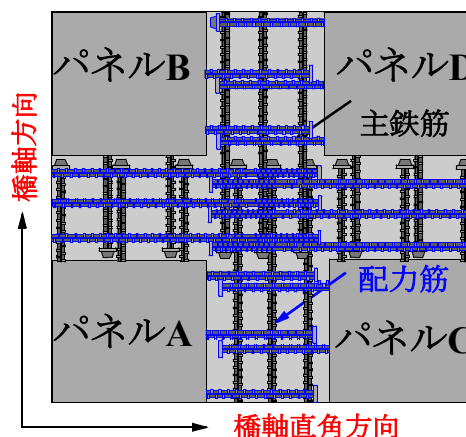


1)主鉄筋の突起部 2)配力筋の突起部

(1)端部の突起形状および寸法



(2)主鉄筋のかぶり



(3)間詰部の鉄筋配置構造

図－ 7.2 鉄筋端部の突起形状および間詰部構造

(2) 取替RC床版B (R. RC-R-B, R. RC-F-B)

取替 RC 床版 B 供試体の間詰部の寸法は、図－ 7.1(3)に示すように、全長、床版厚、支間は取替 RC 床版と同様である。軸方向の支点から 1,000mm (支間中央) および軸直角方向の中央にそれぞれ幅 300mm を設けた。これは、輪荷重幅 300mm と同じ幅とした。間詰部の構造および配筋は、主鉄筋には D13 を上下に 3 本並列配置した。継手部の鉄筋は主鉄筋方向のかぶりを確保するために三角形の突起を設けている。突起部は主鉄筋の上縁と同位置となることからかぶりは確保されている (図－ 7.2(2))。一方、配力筋も D13 を上下に 3 本並列配置した。配力筋は主鉄筋の内側に配置され、図－ 7.2 (1), 2)に示す円形の突起を設けた鉄筋を配置した (図－ 7.1(4))。

(3) 取替RC床版C (R. RC-R-C)

取替 RC 床版 C 供試体の寸法は図－ 7.1(4)に示すように、寸法・鉄筋配置は取替 RC 床版 A 供試体と同様であり、床版支間方向 1,600mm、軸方向 2,200mm、床版厚 150mm とする。なお、床版支間は 1,400mm、軸方向の支間を 2,000mm

とする。プレキャスト床版部は軸方向の寸法 850mm であり，引張側の軸直角方向および軸方向に D13 を 120mm 間隔で配置した。また，圧縮側には引張鉄筋量の 1/2 を配置した。この軸直角方向側面に付着用接着剤を塗布した。付着用接着剤の付着強度はメーカー公表値から 3.7N/mm^2 以上である。

間詰部の寸法は，軸方向支間中央（支点から 1,000mm）に継手長 280mm を考慮し，幅 300mm を設けた。間詰部の配力筋の配置状況は，主鉄筋には D13 を上下に 3 本並列配置した。継手部の構造は，主鉄筋の内側に配力筋を配置し，端部は図－ 7.2 (1)(2)に示す円形の突起を設けた鉄筋を配置する。

7.3 輪荷重走行荷重実験方法および輪荷重走行疲労実験

7.3.1 実験装置の概要

取替 RC 床版供試体の輪荷重走行荷重実験による最大耐荷力の評価および輪荷重走行疲労実験には，輪荷重走行疲労試験機を用いた。

実験装置の荷重装置には車輪（幅 300mm）を取り付け，最大荷重 500kN まで載荷が可能である。試験体を台車に設置し，その台車をモータとクランクアームにより水平方向に走行させるものである。本実験装置は最大 2000mm までの走行が可能であるが図－ 7.1(1)に示すように本実験では 1200mm を走行させる。

7.3.2 走行荷重試験方法および最大耐荷力

(1) 輪荷重走行荷重実験方法

輪荷重走行荷重実験方法は，第 3 章，第 5 章に示す。

(2) 最大耐荷力

輪荷重走行荷重実験において，荷重を載荷し，1,200mm を走行した最大荷重を実験供試体の最大耐荷力 P_{max} とする。なお，走行中に破壊した場合の荷重を破壊荷重とする。

7.3.3 輪荷重走行疲労実験方法および等価走行回数

(1) 輪荷重走行疲労実験方法

輪荷重走行疲労実験方法については，第 4 章，第 6 章に示す。

(2) 等価走行回数

本実験における段階荷重載荷による輪荷重走行疲労実験では，耐疲労性の評価はマイナー則に従うと仮定すると式(7.1)として与えられる。式(7.1)は，載荷荷重 P_i を基準荷重 P で除した値の S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値 m 乗に実験走行回数を乗じることにより破壊までの等価走行回数が算定される。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P} \right)^{m \times n_i} \quad (7.1)$$

ここに、 N_{eq} ：等価走行回数（回）、 P_i ：載荷荷重（kN）、 P ：基準荷重（kN）、 n_i ：実験走行回数（回）、 m ：S-N 曲線の傾きの逆数（=12.7）^{7.8), 7.9)}

7.4 輪荷重走行荷重実験および輪荷重走行疲労実験による最大耐荷力・等価走行回数

7.4.1 最大耐荷力 P_{max}

輪荷重走行荷重実験による最大耐荷力を表－7.3 に示す。

取替 RC 床版供試体 R.RC-R-A1 の最大耐荷力は 250.8kN であり、供試体 R.RC-R-A2 は 260.9kN, 最大耐荷力 P_{max} の平均は 255.8kN である。また、取替 RC 床版供試体 R.RC-R-B1 の最大耐荷力 P_{max} は 265.9kN, 供試体 R.RC-R-B2 は 265.9kN, 最大耐荷力 P_{max} の平均は 265.9kN である。

一方、取替 RC 床版供試体 R.RC-R-A3 の最大耐荷力 P_{max} は 260.4kN であり、供試体 R.RC-R-A1, A2 の平均値と比較して 1.02 倍であるが、これは取替 RC 床版コンクリートの圧縮強度の違いによるものである。また、付着用接着剤を塗布した供試体 R.RC-R-C1 の最大耐荷力 P_{max} は 260.6kN である。実験値を用いての S-N 曲線式についてはこの押抜きせん断耐荷力を適用する。破壊モードは押抜きせん断破壊である。

表－7.3 最大耐荷力 P_{max}

供試体名称	最大耐荷力 (kN)	平均最大耐荷力(kN)	最大耐荷力比
R.RC-R-A1	250.8	255.8	—
R.RC-R-A2	260.9		
R.RC-R-B1	265.9	265.9	—
R.RC-R-B2	265.9		
R.RC-R-A3	260.4	260.4	1.02
R.RC-R-C1	260.6	260.6	1.00

7.4.2 等価走行回数

(1) 等価走行回数

第 4 章、第 6 章の輪荷重走行疲労実験における荷重履歴、実験走行回数 n_i と式(1)より算定した等価走行回数 N_{eq} および破壊モードを表－7.4 に示す。

表－7.4 等価走行回数および破壊モード

供試体	等価走行回数	破壊モード
R.RC-F-A1	265,273,230	プレキャスト床版Aで押抜きせん断破壊
R.RC-F-A2	276,995,502	プレキャスト床版Aで押抜きせん断破壊
R.RC-F-B1	274,760,560	プレキャスト床版Bで押抜きせん断破壊
R.RC-F-B2	279,230,444	プレキャスト床版Aで押抜きせん断破壊
R.RC-F-A3	338,616,413	プレキャスト床版Aで押抜きせん断破壊
R.RC-F-C1	407,096,584	プレキャスト床版Aで押抜きせん断破壊

供試体 R.RC-F-A1 は、図－7.1(2)に示すように、軸方向支間中央で軸直角方向に間詰部を設けた床版である。供試体 R.RC-F-A1 の等価走行回数 N_{eq} は 265.273×10^6 回である。供試体 R.RC-F-A2 の等価走行回数は 276.995×10^6 回である。また、床版中央で2方向に間詰部を設けた供試体 R.RC-F-B1 の等価走行回数は 274.760×10^6 回、供試体 R.RC-F-B2 は 279.230×10^6 回である。

一方、供試体 R.RC-F-A3 の等価走行回数 N_{eq} は 338.616×10^6 回である。また、付着用接着剤を用いた供試体 R.RC-F-C1 は 407.096×10^6 回である。破壊モードは輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。

以上より、輪荷重走行疲労実験における等価走行回数を基に RC 床版の S-N 曲線式との整合性を検証する。

7.5 輪荷重走行疲労実験におけるRC床版のS-N曲線

7.5.1 松井らや土木研究所が提案するS-N曲線式

(1) 松井らが提案するS-N曲線・押抜きせん断耐荷力

RC 床版の S-N 曲線式として松井らは輪荷重走行疲労実験を行い、S-N 曲線式(7.2)を提案している。

また、松井ら^{7.8), 7.10)}は、輪荷重走行の繰り返しにより RC 床版が貫通ひび割れを発生し、はり状化することを踏まえ、はり状化した場合の押抜きせん断耐荷力 P_{sx} の算定式(7.2)を提案し、輪荷重走行疲労実験における最大作用荷重 P をはり状化した押抜きせん断耐荷力 P_{sx} で除して無次元化した $S=P/P_{sx}$ を縦軸とした式(7.2)で表される S-N 曲線式を示している。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.52 \quad (7.2)$$

ここに、 P ：基準荷重、 P_{sx} ：式(7.3)で与えられるはり幅 B の押抜きせん断耐荷力 (kN)、 N ：繰り返し回数 (回)

式(7.2)における S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値は $m=12.7$ である。RC 床版の耐疲労性の評価式として、松井らが提案する S-N 曲線式の縦軸 S には、いずれ

も実験荷重 P を松井らが提案した輪荷重の繰り返しによるはり状化後の押抜きせん断耐荷力 P_{sx} で無次元化した無次元荷重 P/P_{sx} が用いられている。なお、松井らの提案式^{7.8)}は、1964年の道示以前の基準に従って設計された供試体が用いられており、配力鉄筋量が少なくはり状化が生じ易い床版である。よって、S-N曲線式(7.2)に適用するはり幅 B を考慮した押抜きせん断耐荷力は式(7.3)として与えられる。なお、式(7.3)における中立軸 X_m の算定は許容応力度設計法における中立軸の算定式が用いられている。

$$P_{sx} = 2B(f_{cv0} \cdot X_m + f_t \cdot C_m) \quad (7.3)$$

ただし、

$$B = b + 2d_d$$

$$f_{cv0} = 0.252f'_c - 0.00251f'_c{}^2$$

$$f_t = 0.269f'_c{}^{2/3}$$

ここに、 P_{sx} ：はり幅 B を考慮した押抜きせん断耐荷力 (kN)， b ：載荷板の配筋方向の辺長 (mm)， X_m ：主鉄筋の中立軸の位置 (mm)， d_d ：引張側配筋の有効高さ (mm)， C_m ：引張主鉄筋のかぶり (mm)， f_{cv0} ：コンクリートのせん断強度 (N/mm²)， f_t ：コンクリートの引張強度 (N/mm²)， f'_c ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

(2) 土木研究所が提案するS-N曲線

土木研究所^{7.11)}では、1973年、1996年改訂道示に準拠して製作したRC床版供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を行い、S-N曲線式(7.4)を提案している。式(7.4)におけるS-N曲線の傾きの逆数の絶対値は $m=18.3$ である。土木研究所^{7.11)}の提案するS-N曲線式における S 値も P/P_{sx} で整理されており、押抜きせん断耐荷力 P_{sx} には松井らが提案する式(7.3)が適用されている。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.0545 \log N + \log 0.956 \quad (7.4)$$

ここに、 P ：基準荷重， P_{sx} ：式(7.3)で与えられるはり幅 B の押抜きせん断耐荷力 (kN)， N ：繰り返し回数 (回)

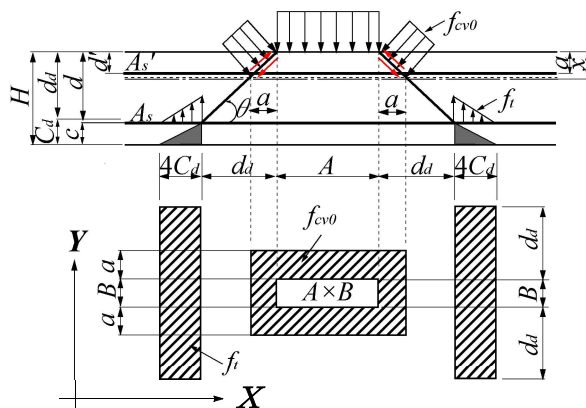
7.5.2 阿部らが提案するRC床版のS-N曲線

阿部らは1994年改訂道示に準拠して設計したRC床版の1/2、3/5縮尺モデルとした供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を実施し、松井らが提案するRC床版のS-N曲線式の傾きの逆数の絶対値 $m=12.7$ を適用した等価走行回数と走行荷重が及ぼす押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$ の関係からS-N曲線式(7.5)を提案している^{7.12, 7.13, 7.14)}。式(7.5)におけるS-N曲線の傾きの逆数の絶対値は $m=15.5$ である。式(7.5)に適用する破壊荷重付近の押抜きせん断力学モデルを図-7.3に

示す。

$$\log(P/P_{s.max}) = -0.06417 \log N + \log 0.996 \quad (7.5)$$

ここに、 P ：基準荷重、 $P_{s.max}$ ：押抜きせん断耐荷力 (kN)、 N ：繰り返し回数 (回)

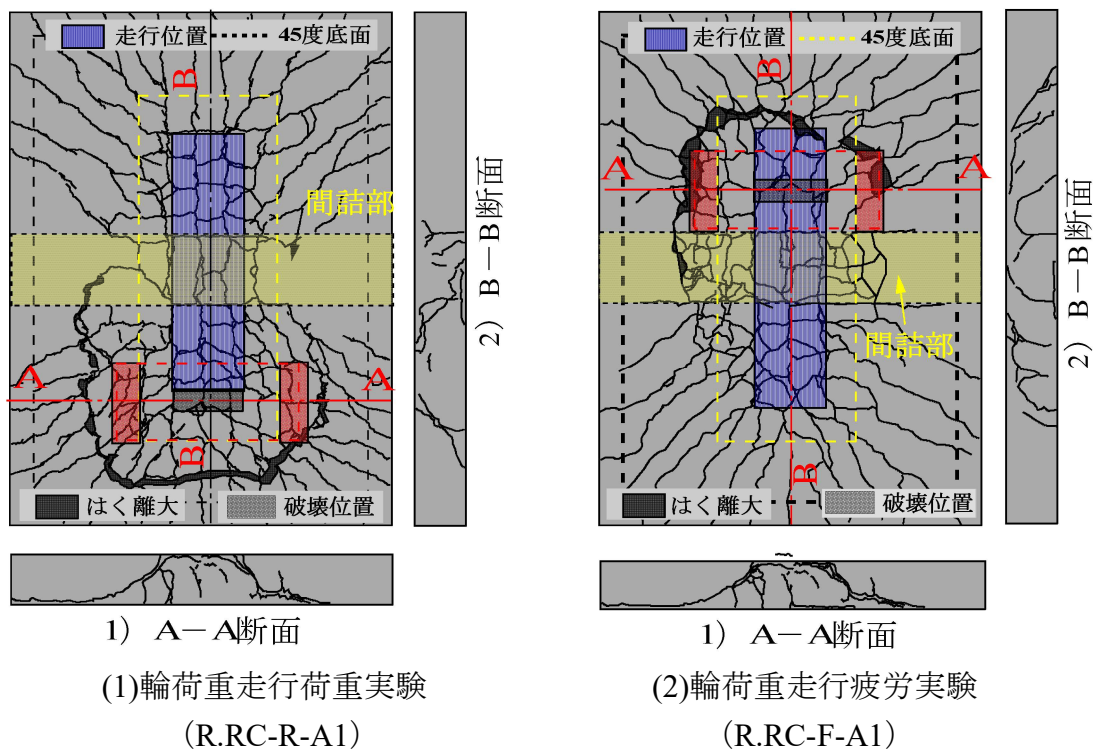


図－ 7.3 押抜きせん断力学モデル^{7.13)}

7.5.3 輪荷重走行荷重実験および輪荷重走行疲労実験における破壊状況と阿部らが提案する押抜きせん断力学モデルとの整合性

(1) 輪荷重走行荷重実験による破壊状況

輪荷重走行荷重実験における破壊時のひび割れ状況の一例を図－ 7.4 に示す。取替 RC 床版 A の供試体 R.RC-R-A1 のひび割れ状況は図－ 7.4(1)に示すように、下面は間詰部を除いたプレキャスト床版部に 2 方向のひび割れが発生している。破壊はパネル A 側で床版中央から 500mm 付近で押抜きせん断破壊となっている。破壊位置付近は荷重載荷位置から 45 度底面にダウエル効果によるはく離が見られる。次に、床版中央の軸直角方向の切断面 A-A は図－ 7.4(1), 1) に示すように輪荷重走行位置のみにひび割れが発生している。この位置はプレキャスト床版部の鉄筋量に対して、多く配置されていることから、ひび割れの進展が抑制されている。破壊位置の切断面 A-A は図－ 7.4(1), 1)に示すように荷重載荷位置から 45 度で押抜きせん断破壊となる斜めひび割れが発生している。軸方向の切断面 B-B は図－ 7.4(1), 2)に示すように破壊位置から 45 度に斜めひび割れが発生し、押抜きせん断破壊となるひび割れ形状を呈している。



図－ 7.4 破壊状況および力学モデルとの整合性

他の供試体においても破壊位置は異なるものの全てプレキャスト RC 床版で押抜きせん断破壊となっている。

図－ 7.3 に示す阿部らが提案する押抜きせん断力学モデルと破壊位置の関係においてはほぼ整合性が得られている。よって、押抜きせん断耐荷力の評価においては阿部らが提案する押抜きせん断耐荷力の評価式を適用する。

(2) 輪荷重走行疲労実験における破壊状況

輪荷重走行疲労実験における取替 RC 床版の損傷状況を図－ 7.4 に併記した。

取替 RC 床版 A の供試体 R.RC-F-A1 の下面のひび割れ状況は図－ 7.4(1)に示すように、輪荷重走行位置付近に 2 方向のひび割れが発生している。また、輪荷重走行位置から 45 度底面にはダウエル効果の影響によるはく離が見られる。破壊は輪荷重が走行中にパネル B 側で床版中央から 300mm の位置で押抜きせん断破壊となった。破壊位置の切断面 A-A は図－ 7.4(1), 1)に示すように荷重載荷位置から 45 度で押抜きせん断破壊となる斜めひび割れが発生している。軸方向の切断面 B-B は図－ 7.4(1), 3)に示すように、輪荷重走行位置から 45 度に斜めひび割れが発生し、押抜きせん断破壊となるひび割れ形状を示している。

他の供試体においても破壊位置は異なるものの全てプレキャスト RC 床版で輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となっている。よって、輪荷重走行疲労実

験においても阿部らが提案する押抜きせん断力学モデルと破壊位置の関係と整合性が得られている。よって、S-N 曲線式との整合性の検証に用いる押抜きせん断耐荷力の評価においては阿部らが提案する押抜きせん断耐荷力の評価式を適用する。

7.5.4 阿部らが提案する押抜きせん断耐荷力評価式

阿部らが提案する RC 床版の破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$ を式(7.6)に示す。

$$P_{s,max} = f_{cv0}\{2(B + 2a)a + 2(A \times a)\} + f_t\{4(2d_d + B)C_d\} \quad (7.6)$$

ただし、

$$f_{cv0} = 0.688f_c^{0.610} \leq f_c = 80\text{N/mm}^2$$

$$f_t = 0.269f_c^{2/3}$$

ここに、 A , B : 輪荷重の軸直角方向, 軸方向の辺長 (= 300×49mm), a : 主鉄筋方向 a_x , 配力鉄筋方向 a_y の等価応力ブロックの平均値 (mm) ($= (a_x + a_y)/2$), C_d : ダウエル効果の影響を示す寸法効果 (mm) である主鉄筋のかぶり C_x ($= c_x + D_x/2$, c_x : 主鉄筋かぶり, D_x : 主鉄筋の直径) と配力筋方向のかぶり C_y ($= c_y + D_x + D_y/2$, c_y : 配力筋かぶり, D_y : 配力筋の直径) の平均 (mm) ($= (C_x + C_y)/2$), d_d : 主鉄筋の有効高さ (d_x) と配力筋方向の有効高さ (d_y) の平均 (mm) ($= H - C_d$), H : 床版全厚 (mm), f_{cv0} : コンクリートのせん断強度 (N/mm^2), f_t : コンクリートの引張強度 (N/mm^2), f_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

RC 床版の破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力式(7.6)は、主鉄筋および配力筋方向の等価応力ブロックの平均値 a ($= (a_x + a_y)/2$) の範囲に、コンクリートのせん断強度 f_{cv0} による押抜きせん断耐荷力と主鉄筋および配力筋方向のかぶりの平均値 C_d ($= (C_x + C_y)/2$) の範囲にコンクリートの引張強度 $f_t^{7.16}$ による押抜きせん断耐荷力の合計である。そこで、主鉄筋、配力筋方向の等価応力ブロック a は式(7.7)として与えられる。なお、式(7.7)における等価応力ブロック a は一般式であり、引張鉄筋は降伏するものの圧縮鉄筋は降伏しない場合の条件式である^{7.17)}。本来、等価応力ブロック a の算出には、鉄筋の降伏強度 f_{yd} を適用するが、破壊荷重付近の等価応力ブロックを算定することから鉄筋の引張強度 f_y (表- 7.2) を適用する。また、等価応力ブロック a は主鉄筋方向 a_x , 配力筋方向 a_y をそれぞれ求め、その平均値を a とする。本供試体はモデル化したことから主鉄筋および配力筋方向の有効幅 b は床版支間 L からせん断スパン比^{7.12), 7.13), 7.14)}を除いた曲げ領域の距離 ($= L - (2.5d \times 2)$, L : 床版支間, d : 有効高) とする。よって、主鉄筋は軸方向支間からせん断スパン比を除くと 1,000mm 以上となるので $b = 1,000\text{mm}$, 配力筋方向は軸直角方向支間からせん断スパン

比を除くと 840mm となる。

等価応力ブロック： a

$$a/d = m/2 [p - p'(\varepsilon'_{cu} \cdot E_s/f_y) + \sqrt{\{p - p'(\varepsilon'_{cu} \cdot E_s/f_y)\}^2 + p' \cdot 4\beta/m \cdot d'/d \cdot \varepsilon'_{cu} \cdot E_s/f_y}] \quad (7.7)$$

ただし、 $m = f_y/0.85f'_c$, $p = A_s/(b \cdot d)$, $p' = A'_s/(b \cdot d)$, $\beta = 0.8$

ここで、 f_y ：鉄筋の引張強度(= 539N/mm² (表- 2)), A_s ：主鉄筋および配力筋の引張側の鉄筋量 (= 1056mm²), A'_s ：主鉄筋および配力筋の圧縮側の鉄筋量 (= 528mm²), d ：有効高さ(主鉄筋：125mm, 配力筋：112mm), d' ：圧縮鉄筋図心から表面までの距離 (mm), b ：部材幅 (主鉄筋方向 1,000mm, 配力筋方向 840mm), E_s ：鉄筋のヤング係数, ε'_{cu} ：コンクリートの終局ひずみ (=0.0035), f'_c ：コンクリートの圧縮強度 (= 56.4N/mm² (表- 7.2))

7.5.5 押抜きせん断耐荷力の算定およびS-N曲線式

(1) 押抜きせん断耐荷力： $P_{s.max}$

輪荷重走行荷重実験および輪荷重走行疲労実験における破壊状況は、間詰部を軸直角方向に設けた供試体 R.RC-R-A, R.RC-F-A および 2 方向に間詰部を設けた供試体 R.RC-R-B, R.RC-F-B はともにプレキャスト床版部で押抜きせん断破壊となっている。また、輪荷重走行荷重実験における供試体 R.RC-R-B1 は間詰部とプレキャスト部との打継目上で押抜きせん断破壊となっている。本実験供試体は 1994 年改定道示以降の B 活荷重を考慮した床版供試体である。また、取替 RC 床版の寿命推定は破壊荷重付近で評価する。よって、実験による最大耐荷力と押抜きせん断耐荷力の評価式には、阿部ら^{7.14)} (以下、文献 14)が提案する力学モデル (図- 7.3) および押抜きせん断耐荷力式(7.6)を用いることとする。

以上より、実験最大耐荷力 P_{max} と押抜きせん断耐荷力 $P_{s.max}$ の関係を表- 7.5 に示す。供試体 R.RC-R-A の押抜きせん断耐荷力 $P_{s.max}$ (式(7.6)) は表- 7.6 に示すように 247.9kN であり、実験による最大耐荷力と比較すると供試体 R.RC-R-A1 および供試体 R.RC-R-A2 のそれぞれ 98 %, 95 %である。

次に、供試体 R.RC-R-B 押抜きせん断耐荷力 $P_{s.max}$ は 247.9kN であり、実験による最大耐荷力と比較すると軸直角方向に間詰部を設けた供試体 R.RC-R-B1, R.RC-R-B2 とともに実験値の 93%, 供試体 R.RC-R-A3, R.RC-R-C1 は 98 %であり、破壊時の 90 %以内の耐荷力が評価され、文献 7.12), 7.13)に示す結果と近似している。

表－ 7.5 取替 RC 床版の諸元および押抜きせん断耐荷力

供試体記号		R.RC-F-A1, A2 R.RC-F-B1, B2	R.RC-R-A3 R.RC-R-C1
設計支間 (mm)		1400 mm	1400 mm
床版厚 (mm)		150 mm	150 mm
圧縮強度 (f_c)		56.4 N/mm ²	60.3 N/mm ²
主鉄鉄筋	引張鉄筋(A_s)	1056 mm ²	1056 mm ²
	圧縮鉄筋(A'_s)	528 mm ²	528 mm ²
配力鉄筋	引張鉄筋(A_s)	1056 mm ²	1056 mm ²
	圧縮鉄筋(A'_s)	528 mm ²	528 mm ²
鉄筋降伏強度(f_{ud})		295 N/mm ²	295 N/mm ²
鉄筋引張強度(f_y)		440 N/mm ²	440 N/mm ²
有効高	主鉄筋(d_m)	125.0 mm	125.0 mm
	配力筋(d_d)	112.0 mm	112.0 mm
かぶり厚	主鉄筋(c_m)	25.0 mm	25.0 mm
	配力筋(c_d)	38.0 mm	38.0 mm
かぶりの平均 (C_d)		31.5 mm	31.5 mm
等価応力ブロック	主鉄筋(a_m)	14.7 mm	14.1 mm
	配力筋(a_x)	19.4 mm	18.6 mm
等価応力ブロックの平均(a)		17.0 mm	16.4 mm
中立軸の位置 (X_m)		3.7 cm	3.7 cm
押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$		247.9 kN	254.3 kN
理論式による破壊走行回数 N_f (回)		219.611 $\times 10^6$ 回	326.484 $\times 10^6$ 回

表－ 7.6 実験耐荷力および押抜きせん断耐荷力

供試体記号	最大耐荷力 P_{max} (kN)	押抜きせん断 耐荷力 $P_{s,max}$ (kN)	理論値と実験値の 比 ($P_{s,max}/P_{max}$)
R.RC-R-A1	250.8	247.9	0.99
R.RC-R-A2	260.9		0.95
R.RC-R-B1	265.9		0.93
R.RC-R-B2	265.9		0.93
R.RC-R-A3	260.4	254.3	0.98
R.RC-R-C1	260.6		0.98

以上より、実験最大耐荷力と式(7.6)から算定した押抜きせん断耐荷力はほぼ近似する結果が得られた。したがって、S-N 曲線式の縦軸 S 値の評価が可能であると考えらる。

(2) S-N曲線

S-N 曲線式における縦軸 S と等価走行回数を表－ 7.7 に示す。

本実験供試体の基準荷重 P を輪荷重走行荷重実験による供試体 R.RC-R-A1 および A2 の実験耐荷力はそれぞれ 250.78kN, 260.88kN で除した縦軸 S ($=P/P_{max}$) は 0.287, 0.276 となる。供試体 R.RC-R-B1 および B2 の最大耐荷力はそれぞれ 265.86kN, 265.90kN で除した縦軸 S は 0.271 となる。同様に供試体 R.RC-R-A3, C1 の最大耐荷力は 260.40kN, 260.60kN であり、 S は 0.276 である。そこで、実験耐荷力から得られた S 値と等価走行回数 N_{eq} の S-N 曲線式との関係を図－ 7.5(1)に示す。

一方、基準荷重 P と式(7.6)より算出した押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$ より、 S 値は 0.290 となる。そこで、押抜きせん断耐荷力から得られた S 値と等価走行回数 N_{eq} の S-N 曲線式との関係を図－ 7.5(2)に示す。なお、図－ 7.5 には松井らや土木研究所による S-N 曲線式も併記した。間詰部を軸直角方向に設けた供試体 R.RC-F-A の走行実験による最大耐荷力 P_{max} と輪荷重走行疲労実験による

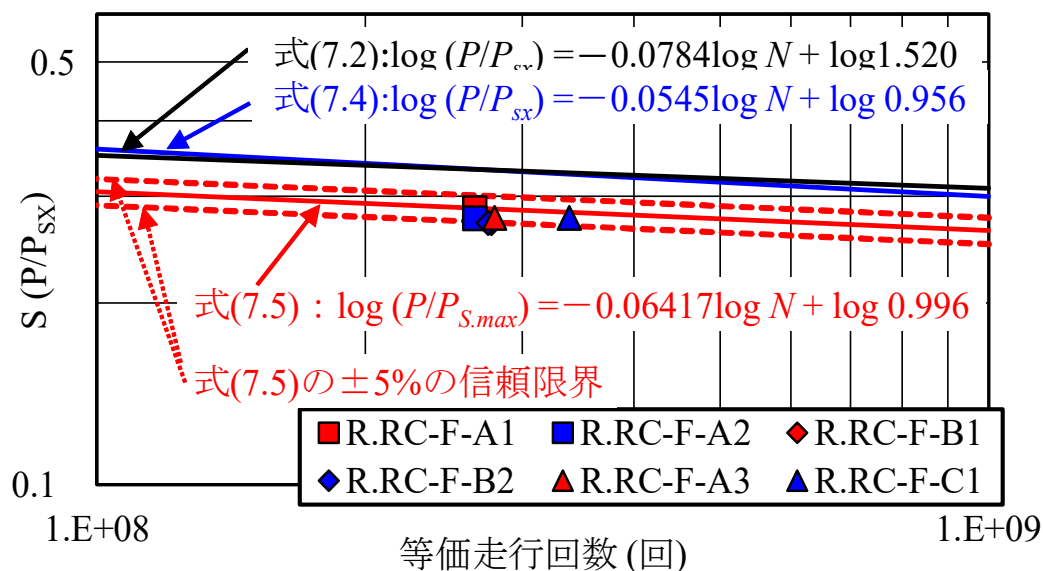
表－ 7.7 S 値と等価走行回数
(1)実験耐荷力と等価走行回数

供試体記号	P (kN)	P_{max} (kN)	$S=P/P_{max}$	供試体記号	N_{eq} (回)
R.RC-R-A1	72	250.8	0.287	R.RC-F-A1	265,273,230
R.RC-R-A2		260.9	0.276	R.RC-F-A2	276,995,502
R.RC-R-B1		265.9	0.271	R.RC-F-B1	274,760,560
R.RC-R-B2		265.9	0.271	R.RC-F-B2	279,230,444
R.RC-R-A3	72	260.4	0.276	R.RC-F-A3	338,616,413
R.RC-R-C1		260.6	0.276	R.RC-F-C1	407,096,584

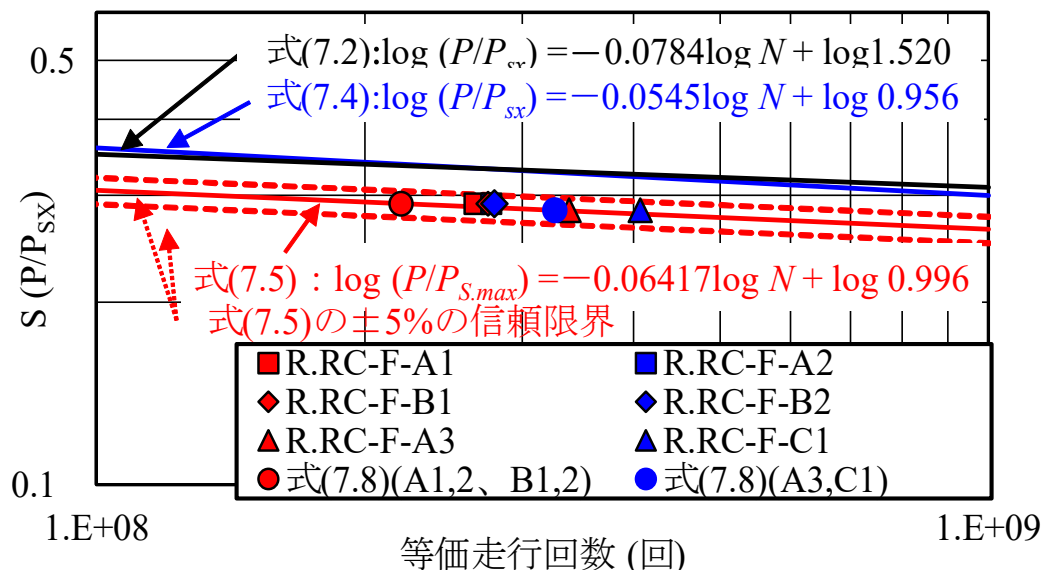
(2)押抜きせん断耐荷力と等価走行回数

供試体記号	P (kN)	P_{max} (kN)	$S=P/P_{max}$	供試体記号	N_{eq} (回)
R.RC-F-A1	72	247.9	0.290	R.RC-F-A1	265,273,230
R.RC-F-A2				R.RC-F-A2	276,995,502
R.RC-F-B1				R.RC-F-B1	274,760,560
R.RC-F-B2				R.RC-F-B2	279,230,444
R.RC-R-A3	72	254.3	0.283	R.RC-F-A3	338,616,413
R.RC-R-C1				R.RC-F-C1	407,096,584

等価走行回数 N_{eq} の関係は図- 7.5(1)に示すように阿部らが提案する S-N 曲線上付近にプロットされ、近似している。間詰部側面に接着剤を塗布した供試体 R.RC-F-C も同様に近似している。また、間詰部を 2 方向に設けた供試体 R.RC-F-B の供試体は S-N 曲線式の下方にプロットされているものの信頼限界 95% の範囲にプロットされ、ほぼ整合性が得られていると考えられる。



(1)実験耐荷力と等価走行回数



(2)押抜きせん断耐荷力を用いた等価走行回数

図- 7.5 RC 床版の S-N 曲線式との整合性

次に、モデル化した供試体の基準荷重 P と破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$ から得られた S 値と輪荷重走行疲労実験から得られた等価走行回数 N_{eq} の関係は図－ 7.5(2)に示すように、阿部らが提案する S-N 曲線式の僅かであるが上方にプロットされている。これは、式(7.6)より得られた押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$ は破壊荷重の 93 %～ 99 %であるために上方にプロットされた結果である。いずれにおいても信頼限界 ± 5 %内^{7.18)} にプロットされている。よって、マイナー則を適用し得られる等価走行回数は適切であり、提案した押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$ についても破壊荷重付近であることから、S-N 曲線式は、破壊荷重付近の寿命推定が可能であると考えられる。また、プロットされた S と N の関係は文献 18)に示す S-N 曲線の ± 5 %の信頼限界内にプロットされた。よって、本実験より得られた等価走行回数と押抜きせん断耐荷力との整合性が得られたと評価できる。また、取替 RC 床版のプレキャスト部の寿命推定は RC 床版の S-N 曲線式の適用が可能であると考えられる。

(3) 破壊走行回数とS-N曲線との整合性の検証

破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$ と基準荷重 P の関係から破壊走行回数を算定する。破壊走行回数は S-N 曲線式の関係から式(7.8)として与えられる。

$$N_f = 10^{m(\log C - \log S)} \quad (7.8)$$

ここで、 N_f : 破壊までの走行回数, C : S-N 曲線の切片 (= 0.996), m : 式(5)に示す S-N 曲線の傾きの絶対値の逆数 (= 1/0.06417), S : 基準荷重 ($P/P_{s,max}$)

モデル化した取替 RC 床版供試体 R.RC-F-A1, A2 および R.RC-F-B1, B2 の基準荷重 $P = 72\text{kN}$ を押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max} = 247.9\text{kN}$ で除した S 値は 0.290 となる。これらを式(7.8)に適用した破壊走行回数 N_f は 219.610×10^6 回である。同様に供試体 R.RC-F-A3, C1 の破壊走行回数 N_f は 326.484×10^6 回である。ここで、実験等価走行回数と基準荷重を押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$ で除し、無次元化した S 値を式(7.8)に適用して得られた等価走行回数を図－ 7.5(2), 等価走行回数と破壊走行回数の関係を表－ 7.8 に示す。

表－ 7.8 等価走行回数と理論による破壊走行回数

供試体記号	P (kN)	P_{max} (kN)	$S=P/P_{max}$	N_{eq} (回)	N_f (回)	理論値/実験値 (回)
R.RC-F-A1	72	247.9	0.290	265,273,230	219,610,870	0.83
R.RC-F-A2				276,995,502		0.79
R.RC-F-B1				274,760,560		0.80
R.RC-F-B2				279,230,444		0.79
R.RC-R-A3	72	254.3	0.283	338,616,413	326,484,410	0.96
R.RC-R-C1				407,096,584		0.80

実験による等価走行回数 N_{eq} を比較すると取替 RC 床版 A 供試体 R.RC-F-A1, A2 のそれぞれの比は 83%, 79%, 取替 RC 床版 B 供試体 R.RC-F-B1, B2 はそれぞれ 80%, 79%となり、破壊走行回数が安全側に算定される結果となり、整合性が得られたと評価できる。同様に取替 RC 床版 A 供試体 R.RC-F-A3, C1 は 96%, 80%となり、近似している。

7.6 まとめ

- (1) 輪荷重走行荷重実験による最大耐荷力 P_{max} と阿部らが提案する押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$ とを比較すると、実験による最大耐荷力に対して、間詰部を軸直角方向に設けた供試体は 96%、2 方向に間詰部を設けた供試体が 93%となり、ほぼ近似する結果が得られた。
- (2) 輪荷重走行疲労実験における耐疲労性の評価においては、軸直角方向に間詰部を設けた供試体の等価走行回数と、2 方向に間詰部を設けた供試体の等価走行回数を比較すると、2 方向に間詰部を設けた供試体の等価走行回数が僅かに上回っている。よって、間詰部は弱点とならない結果となった。
- (3) RC 床版の S-N 曲線式との整合性の検証では縦軸 $S = P/P_{s,max}$ と輪荷重走行疲労実験から得られた等価走行回数 N_{eq} の関係においては、阿部らが提案する RC 床版の S-N 曲線式上の信頼限界値の $\pm 5\%$ 内にプロットされた。よって、RC 床版の寿命推定式である S-N 曲線式との整合性が得られた。S 値と S-N 曲線式から得られる破壊走行回数 N_f に対して、間詰部を軸直角方向に設けた供試体の実験等価走行回数は 81%、2 方向に間詰部を設けた供試体 79%となり、ほぼ近似し、安全側に評価される結果となった。
- (4) 取替 RC 床版の寿命推定は阿部らが提案する破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力式および S-N 曲線式を適用することで寿命推定が可能と考えられる。

第7章参考文献

- 7.1) 岩手県宮古地方振興局土木部：法師渡大橋ほか橋梁補修詳細設計業務委託報告書，2008.
- 7.2) 中村定明，三浦尚：RC ループ継手の力学挙動に関する基礎的研究，土木学会論文集 No.774/V-65，pp.17-26，2004.
- 7.3) 角本周，山本敏彦，城戸靖彦，三浦康博：九州自動車道・向佐野橋における PC 床版取替工事，第7回道路橋床版シンポジウム論文報告集，土木学会，PP.43-48，2012.
- 7.4) 大柳修一，大林敦裕：既設床版の半断面床版取替工法の開発(輪荷重疲労載荷試験)，ピーエス三菱技報，第13号，2015.
- 7.5) 高橋明彦，阿部忠，小野晃良，大西弘志，久田真：間詰部を設けた取替床版の耐疲労性の評価に関する実験研究，構造工学論文集，Vol.65A，655-664，2019.
- 7.6) 日本道路橋会：道路橋示方書・同解説 I，1994.
- 7.7) 日本道路協会：鋼道路橋設計示方書・鋼道路橋製作示方書解説，1964.
- 7.8) 松井繁之：道路橋床版設計・施工と維持管理，森北出版，2007.
- 7.9) 川井豊，阿部忠，木田哲量，高野真希子：道路橋 RC 床版の S-N 曲線に関する一考察，第7回道路橋床版シンポジウム論文報告集，土木学会，PP263-268，2012
- 7.10) 前田幸雄，松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力の評価式，土木学会論文集，No. 348，V-1，pp.133-141，1984.
- 7.11) 中谷晶一，内田賢一，西川和廣，神田昌幸，宮崎和彦，川間重一，松尾伸二，道路橋床版の疲労耐久性に関する実験，国総研資料，第28号，2002.
- 7.12) 阿部忠，木田哲量，高野真希子，川井 豊：道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力および耐疲労性の評価，土木学会論文集 A1，pp.39-54，2011.
- 7.13) 阿部忠，川井豊：輪荷重走行疲労実験における RC 床版の押抜きせん断耐荷力および S-N 曲線式との整合性の評価，コンクリート工学論文集，第30巻，pp1-10，2019.
- 7.14) 阿部忠，木田哲量，徐銘謙，澤野利章：道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力評価式に関する研究，構造工学論文集，Vol.53A，pp.199-207，2007.
- 7.15) 阿部忠，木田哲量，高野真希子，澤野利章，加藤清志：静荷重・走行荷重を受ける RC 床版の押抜きせん断耐力，構造工学論文集，Vol.50A，pp.919-926，2004.
- 7.16) 岡村甫：コンクリート構造の限界状態設計法，コンクリートセミナー 4，共立出版，pp. 17-18，1979.

- 7.17) 岡田清ほか：鉄筋コンクリート工学，鹿島出版(1997)
- 7.18) 川井豊，中村聖三，阿部忠：信頼度を考慮した道路橋 RC 床版の疲労耐久設計について，構造工学論文集，Vol.62A，pp.1160-1167，2016.

第8章 地方自治体が管理する橋梁の床版取替工事における RC床版の施工技術

8.1 はじめに

地方自治体が管理する橋梁は、交通量が少なく、B 活荷重だけではなく、A 活荷重や 2 等橋で設計された橋梁も多いことから劣化した床版の取替には、RC 構造の取替床版が必要となる。PC 構造は RC 構造と比較して耐疲労性が高いが、斜角や曲線を有する橋梁などのプレキャスト PC 床版の製作・設置工事では高度な技術が要求される。地方自治体が管理する橋梁の床版取替においては、プレキャスト床版の製作・設置工事は地元企業が請け負うことが多く、そのためには施工が容易でコストの縮減効果が期待できる RC 構造とした取替床版が要求されていた。RC 構造とした取替床版について、著者ら^{8.1), 8.2), 8.3), 8.4)}はモデル化した取替 RC 床版を用いて輪荷重走行疲労実験を行い、耐疲労性を検証した。その結果、橋軸直角方向と橋軸方向の 2 方向に間詰部を設けた取替 RC 床版は、継手部が弱点とならず耐疲労性が大幅に向上し、実用性が評価された。

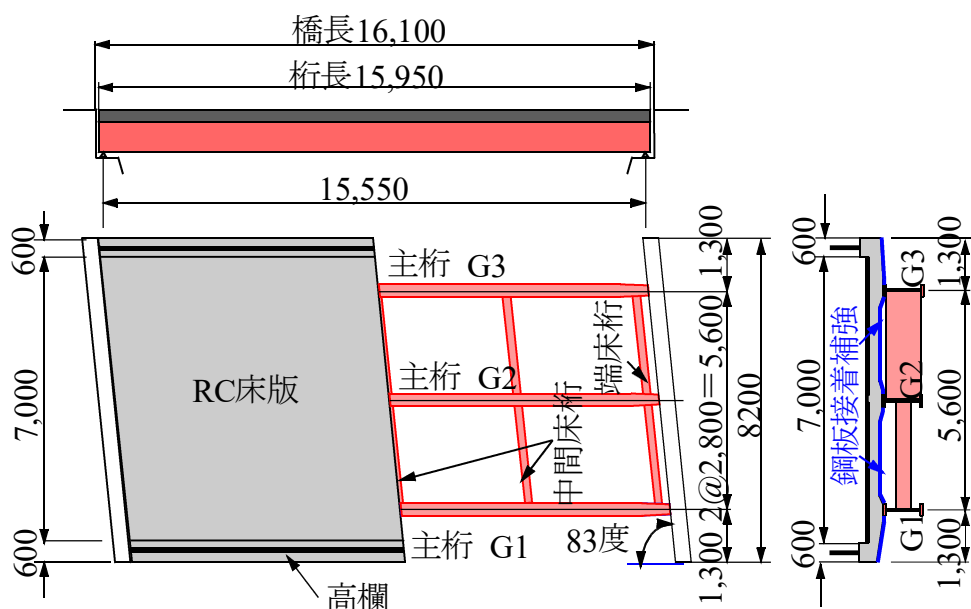
そこで第 8 章では、地方自治体が管理する再劣化した RC 床版を補強するために詳細点検および調査を行い、健全性を評価し、再劣化した RC 床版の補強対策を述べる。また、プレキャスト RC 床版の製作から設置および間詰部のコンクリート打込みから完成するまでの施工フローを示す。さらに、取替 RC 床版設置前後で荷重載荷試験を行い、主桁の変形から取替 RC 床版の効果を示し、地方自治体が管理する橋梁の取替 RC 床版の設計法および施工技術の一助としたい^{8.5), 8.6)}。

8.2 橋梁概要、点検結果および施工技術

山形県上山市が管理する赤山橋は、1974 年に山形県の県道橋として建設され、新たなバイパス建設に伴い、2006 年に市道橋として上山市に移管された。移管にあたっては RC 床版下面に鋼板接着補強が施された。1974 年当時は防水層を設置する規定はなかったことから、漏水や融雪剤散布による塩害と凍害を受け、2015 年の橋梁点検で床版下面に接着補強した鋼板に発錆やはく離が発生するなどの再劣化が確認された。このため、2018 年に床版取替などの対策が検討された。ここで、赤山橋の概略寸法を図－ 8.1、諸元を表－ 8.1 に示す。橋長は 16.1m、幅員は 8.2m（有効幅員 7.0m）、斜角 83 度の鋼桁橋であり、1972 年改定の道路橋示書・同解説^{8.7)}（以下、道示とする）に基づいて 2 等橋（荷重 137.2kN（14tf））で設計された橋梁である。

表－ 8.1 赤山橋の諸元

項目	橋梁諸元
橋 名	赤山橋
所 在	山形県上山市字赤山地区
橋梁形式	鋼合成単純H形桁橋
橋 長	L=16.1m
有効幅員	W=7.0m
斜 角	$\theta = 83^\circ$
設計荷重	14ton (2等橋)
適用基準書	道路橋示方書(1972年)
鋼板接着補強厚	厚さ4.5mm(2005年)
供用開始	1974年



図－ 8.1 赤山橋の概略寸法

この橋梁を管理する上山市では 2015 年に橋梁点検を行い、道路橋長寿命化修繕計画では、RC 床版の再補強が計画されていた橋梁である。しかし、2017 年に補強に伴う詳細点検では、再劣化した RC 床版内のコンクリートが脆弱化し、再補強では困難であると判断し、2018 年に取替 RC 床版が計画された。

8.3 橋梁定期点検・健全性の評価および対策

8.3.1 道路橋長寿命化修繕計画に伴う橋梁点検

(1) 橋梁点検および対策

道路橋長寿命化修繕計画では、近接目視により各部位を点検し、健全性の判定区分を行い、劣化が著しい部位から修繕を実施する。長寿命化修繕計画における赤山橋の健全性の判定区分では、RC床版が健全性Ⅱ、塗装部は健全性Ⅲと判定された。よって、RC床版は橋面補修とアスファルト舗装打換え、塗装は塗替え補修工事が計画されていた。

(2) 補修・補強工事に伴う詳細点検

2017年に実施した詳細点検は、国土交通省の橋梁定期点検要領^{8.8)}に基づいてRC床版および他の部位の点検を行った。ここで、詳細点検結果の一例を写真－8.1に示す。損傷状況は写真－8.1(1)に示すように、伸縮装置付近のアスファルト舗装の一部にポットホールやコンクリートに土砂化が見られる。また、RC床版下面は写真－8.1(2)に示すように鋼板接着補強が施されているが鋼板と主桁の一部に腐食が発生している。



(1)橋面の損傷状況

(2)床版下面の損傷

写真－8.1 損傷状況の一例

8.3.2 詳細点検による健全性の判定

(1) RC床版コンクリートの内部診断

RC床版の下面には4.5mm厚の鋼板が接着補強されているために床版コンクリート内部のひび割れ状況や漏水状況が不明であった。そこで詳細点検・調査では、RC床版コンクリートからコア採取して内部の損傷状況を診断した。

コア採取は主桁G2（中央主桁）とG3（外側主桁）の中央付近から採取する。床版支間中央付近の床版厚は170mmであり、コンクリートコアドリルを用いてφ100mm、深さ170mmのコアを採取した。ここで、床版中央付近から採取したコアの内部診断結果を写真－8.2に示す。コア採取によるコンクリート内部の損傷状況は写真－8.2(1)に示すように、ひび割れが層状に発生している。また、採取したコアは写真－8.2(2)に示すように水平ひび割れのためにコアが分断されている。数カ所からコア採取した結果、広範囲にわたり水平ひび割れが発生していることが確認された。したがって、圧縮試験は困難である。



(1)コア内部の損傷 (2)水平ひび割れによる損傷

写真－ 8.2 コア採取による内部診断結果

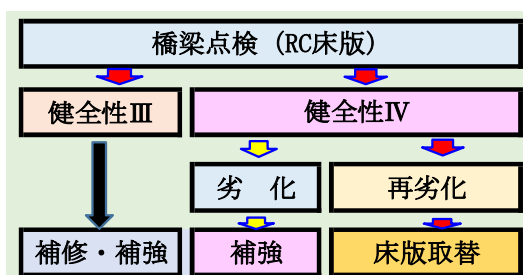
そこで、比較的健全な主桁 G3 上の RC 床版からコア採取した。床版厚はハンチの厚さを加えると 250mm であることから φ100mm、深さ 250mm のコアを 3 本採取した。

(2) RC床版コンクリートの圧縮強度

G3 主桁（外側主桁）上の RC 床版から φ100mm×250mm の円柱コアを圧縮試験用に φ100×200mm に切断加工して圧縮試験を行った。コンクリートの圧縮強度の平均は 18.0N/mm² であった。1972 年改定の道示では、コンクリートの設計基準強度は 21N/mm²（1994 年改定の道示では 24N/mm²）であるが、大幅に下回る結果となった。よって、この RC 床版コンクリートは圧縮強度の低下と水平ひび割れの発生が著しいことから、耐荷力性能および耐疲労性の低下が著しいと考えられる。

(3) RC床版の健全性の判定

近接目視による RC 床版の点検では、健全性の判定区分は II であったが、詳細点検およびコア採取による内部診断の結果では、広範囲にわたり水平ひび割れが層状に発生していた。これは、目視点検では確認できない。一般的に、コンクリートの圧縮強度は設計基準値を下回った場合は、耐疲労性が大幅に低下する結果が報告されている^{8,9)}。よって、詳細点検・調査後の RC 床版の健全性判定区分は IV と判定され、緊急措置での対策を検討した。



図－ 8.2 健全性の判定区分と対策

8.3.3 対策工法

橋梁点検における健全性の判定区分と対策についての概略を図－8.2に示す。

RC床版の損傷が健全性の判定区分Ⅲでは、補修・補強が計画される。健全性の判定区分Ⅳは、緊急措置が必要な損傷であるが、補強前に劣化した場合は、補強対策が計画される。本橋梁のRC床版は既に鋼板接着補強が施されていたが、鋼板が腐食し、再劣化したことから、一般的な補強法としては、鋼繊維補強コンクリート(SFRC)上面増厚補強、あるいは鋼板を撤去して新たに下面増厚補強法、さらには上面・下面からの併用補強も検討されたが、内部コンクリートの損傷が著しいことから補強では耐疲労性が期待出来ないと判定された。そこで、床版取替を検討した結果、交通量が少なく、斜角を有し、床版厚さが薄いことから、PC構造と比較してコストの縮減効果が期待できる取替RC床版が採用された。

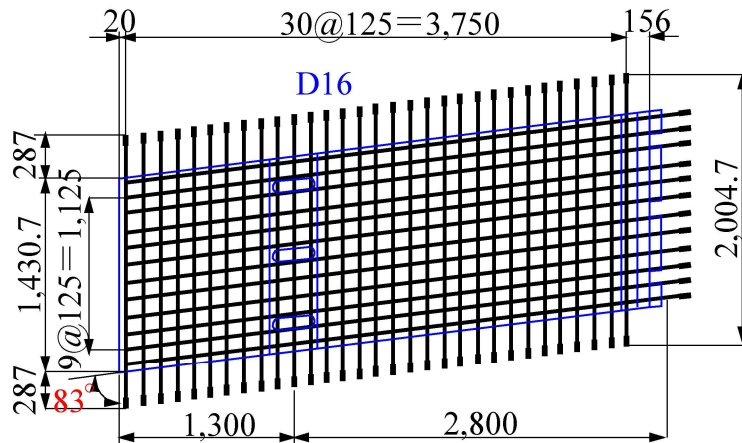
8.4 取替RC床版設計・継手部構造および配置形状

8.4.1 取替RC床版の実用性の検証

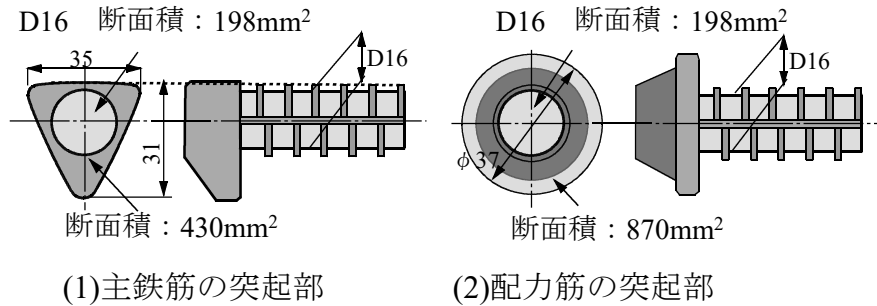
取替RC床版は、地方自治体が管理する道路橋を対象に開発された床版であり、従来の取替PC床版工法と同様にプレキャスト版を工場で作製し、現地で橋軸方向に並列しながら一体化するものである。取替RC床版の実用性の評価として著者ら(8.1), (8.2), (8.3), (8.4), (8.10)は1994年以降の改定の道示^{8.11)}に準拠し、3/5モデルとし、橋軸方向および橋軸直角方向と橋軸方向に間詰部を設けた取替RC床版供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を行い、耐疲労性を検証し、実用性を評価している。また、取替RC床版の押抜きせん断耐荷力および寿命推定についても提案している^{8.10)}。これらの結果によると、取替RC床版は、施工においてはプレキャスト版を橋軸方向に並列に設置し、間詰部にコンクリートを打ち込み一体化するものである。主筋および配力筋の継手構造は付着性を有する特殊な突起が設けられている。

8.4.2 取替RC床版の寸法

本橋梁の概略寸法は図－8.1に示すように、主桁間隔が2,800mmである。RC床版は1972年改定の道示に基づいて2等橋として設計され、床版厚は170mm、鉄筋にはD13mmが使用されていた。取替RC床版の設計は1994年改定道示に基づいてA活荷重で設計すると床版厚は200mmとなる。しかし、修繕計画においては「供用時の状態に戻す」修繕が実施されることから、取替RC床版の設計厚は既設RC床版同様に170mmとし、死荷重の軽減を図った。また、鉄筋はD13であるが、主鉄筋および配力筋方向ともにD16を125mm間隔で配置し、A活荷重対応させた。プレキャスト版の寸法は、幅の全長は4,125mm、橋軸方向は2,004.7mmとし、鉄筋配置状況を図－8.3に示す。



図－ 8.3 取替 RC 床版の鉄筋配置



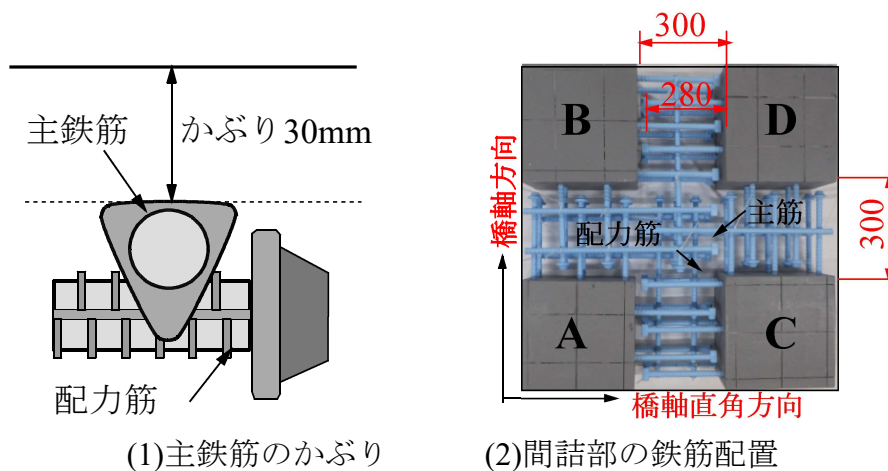
図－ 8.4 継手部の突起形状および寸法

8.4.3 継手構造

プレキャスト版の主筋および配力筋に D16 を用いた場合の継手部の突起構造および寸法を図－ 8.4 に示す。

(1) 主筋方向

主筋の端部の突起は図－ 8.4(1)に示すように、D16 を用いた場合の底辺幅が 35mm、高さ 31mm の逆三角形とし、付着面積は 430mm^2 であり、鉄筋と併せて付着力を確保する継手構造である^{8.1)}。



図－ 8.5 かぶりと間詰部の鉄筋配置

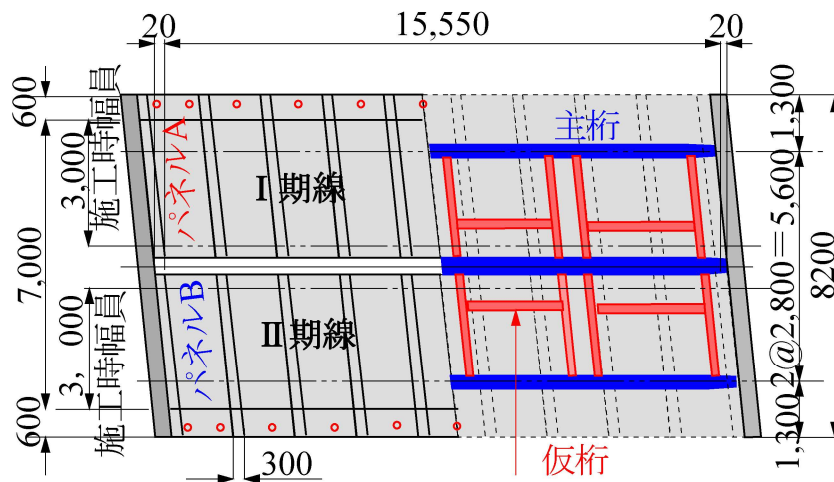
(2) 配力筋方向

間詰部を橋軸直角方向に設ける場合は、軸方向の配力筋方向が継手構造となる。図－ 8.4(2)のように D16 の鉄筋を用いた場合は $\phi 37\text{mm}$ の円形の突起形状とすることで、付着面積は 870mm^2 となる。

次に取替 RC 床版の設置工事は、交通規制を行い、左車線側を I 期線側、右側を II 期線側とした。I 期線側に設置した後、II 期線側に設置する。この場合、橋軸方向と橋軸直角方向に間詰部が生じ、主筋継手と配力筋継手構造が必要となる。しかし、本継手構造の突起形状は図－ 8.5(1)に示すように主筋は逆三角形の突起を設け、内側に円形の突起が配置することで既往の鉄筋配置と同様にかぶり 30mm の確保が可能となる。また、継手長は 280mm とし、重ね継ぎ手構造とする。橋軸直角方向および橋軸方向の交差部の鉄筋配置状況を図－ 8.5(2)に示す。なお、継手長は鉄筋径より算出し、280mm とする。最後に橋軸直角方向および橋軸方向の間詰部にコンクリートを打ち込み一体化するものとする。

取替 RC 床版の設置および仮桁の設置状況を図－ 8.6 に示す。橋梁の幅員は 8,200mm であることから、通行止めを行い、プレキャスト RC 床版に地覆を設けて幅 8,200mm、橋軸方向を 2,004.7mm としたの製作も可能であるが、本工事は片側を車両規制し、左車線側 I 期工事側をパネル A、II 期工事側をパネル B とする。間詰部は継手長 280mm であることから 300mm とした。

次に、主桁間隔は図－ 8.1 に示すように、3 主桁構造であり、中央主桁上が橋軸方向の継手部となり、パネル A および B を設置した場合に支持することが出来ないことから、図－ 8.6 に示すように、取替 RC 床版を支持するために主桁断面と同様の I 型梁部材を仮桁として設置する。



図－ 8.6 取替 RC 床版の設置における仮桁の設置

8.5 プレキャストRC床版の製作

橋梁は橋長 16,100mm，幅員 8,200mm（有効幅員 7,000mm），斜角 83 度である。主桁間隔は 2,800mm の 3 主桁である。よって，プレキャスト版のパネル A の寸法は図－ 8.3 に示すように，4,125×2,004.7mm，主桁上で橋軸方向に幅 300mm の間詰部を設ける。また，橋軸直角方向の間詰部も幅 300mm である。

8.5.1 使用材料

(1) プレキャスト床版部

取替 RC 床版のプレキャスト RC 版のコンクリートには，普通ポルトランドセメントに最大骨材寸法 20mm の砕石，最大骨材寸法 5mm の砕砂を使用し，配合条件を表－ 8.2 に示す。取替 RC 床版の要求性能は，コンクリート設計基準強度 40N/mm^2 を目標とする。鉄筋には SD345，D16 を用いる。ここで，プレキャスト RC 床版の鉄筋の材料特性値を表－ 8.3 に示す。プレキャスト部のコンクリートの圧縮強度は材齢 28 日の結果であり，圧縮強度は 56.4N/mm^2 である。

(2) 間詰部

間詰部のコンクリートには，現場での施工時間を 8 時間以内として，要求性能は材齢 3 時間で道示^{8.11}に規定するコンクリートの設計基準強度 24N/mm^2 以上，材齢 14 日で 40N/mm^2 以上を確保できる配合とする。よって，コンクリートには超速硬セメントを使用し，配合条件を表－ 8.2 に併記した。また，鉄筋はプレキャスト RC 床版部と同様に SD345，D16 を用いる。ここで，間詰部の鉄筋の材料特性値を表－ 8.3 に併記する。間詰部コンクリートの材齢 14 日の圧縮強度は 48.4N/mm^2 とであり，要求性能である 40N/mm^2 以上が確保されている。

表－ 8.2 コンクリートの配合条件

取替RC 床版	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)				減水剤 (C×%)	AE剤 (C×%)
				C	W	S	G		
床版部	10±2.5	35.0	43.2	443	155	732	968	3.1	0.004
間詰部	8±2.5	32.9	40.0	450	148	710	1157	9.0	0.004

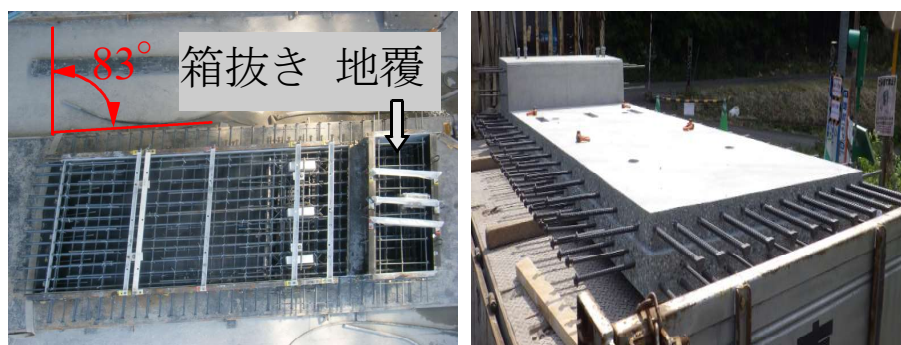
表－ 8.3 コンクリートおよび鉄筋の材料特性値

取替RC 床版	圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋 (SD345)			
		使用鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
床版部	56.4	D16	366	539	200
間詰部	48.3				

8.5.2 型枠およびプレキャストRC床版の製作

プレキャスト RC 床版の製作に伴い、写真－ 8.3 (1) に示す鋼製型枠を 3 タイプ製作した。まず、I 期線側のプレキャスト RC 床版製作用に橋軸方向端部の床版用 1 タイプ、中間部床版用 2 タイプの計 3 タイプの型枠を製作した。その型枠を用いて、I 期線側 9 枚のプレキャスト RC 床版を製作する。その後、II 期線側のプレキャスト RC 床版の製作寸法に合わせ鋼製型枠を調整して転用し、II 期線側のプレキャスト RC 床版を 9 枚製作した。

次に、プレキャスト RC 床版の製作は、山形市内の所在するコンクリート二次製品製作会社に依頼した。現地までの輸送時間は 40 分程である。ここで、取替 RC 床版型枠およびプレキャスト化した取替 RC 床版を写真－ 8.3 に示す。写真－ 8.3(1)は、鋼製型枠に鉄筋を配置した状況であり、地覆および主桁に設置の際のジベル筋位置も箱抜きした。プレキャスト RC 床版コンクリートは表－ 8.2 に示す配合とし、養生は全てシートを用いた湿潤養生を行った。製作期間は 30 日である。



(1)型枠および鉄筋配置

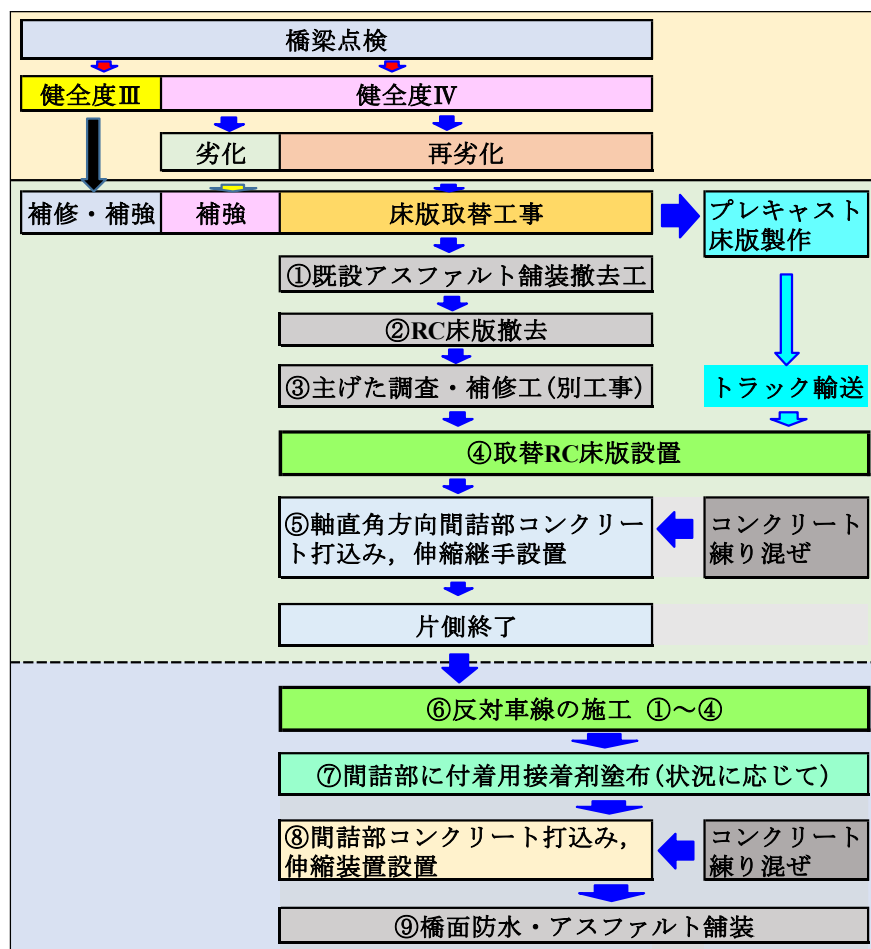
(2)プレキャスト RC 床版

写真－ 8.3 プレキャスト RC 床版製作

写真－ 8.3(2)はプレキャスト床版が完成した状態である。取替 RC 床版は I 期および II 期線側で各 9 パネル，合計 18 パネルを製作した。

8.6 床版取替工事における施工フロー

本工事においては地域の生活道路となっていることから，片側交通規制のもとで施工を実施する。ここで，床版取替工事における施工フローを図－ 8.7 に示す。



図－ 8.7 赤山橋における取替 RC 床版施工フロー

8.6.1 I期線側施工

取替 RC 床版が設計された後は，近隣のコンクリート二次製品製作工場プレキャスト版を製作する。図－ 8.7 に示すように，①アスファルト舗装を撤去し，②床版取替に先立ち，片側の RC 床版を支持するための仮桁の設置を行う。なお，仮桁は工事終了後に撤去する。その後，既設 RC 床版を撤去する。次に，③主桁の損傷箇所を補修し，併せて取替 RC 床版設置のためのジベル筋を設置する。次に，工場で

製作したプレキャスト版をトラック輸送し現場に搬入する。④取替 RC 床版をクレーンで主桁上に設置し，併せて伸縮装置と防護柵を設置する。次に，⑤橋軸直角方向の間詰部および伸縮装置に鉄筋組立と超速硬コンクリートの打設，表面仕上げ，3時間の湿潤養生し，⑥仮アスファルト舗装を施したのち交通解放する。

8.6.2 II期線側施工

I期線側に取替 RC 床版を設置し，間詰部コンクリートを打ち込んだ後は，交通解放し，⑦ II 期線側車線の施工を行う。施工は①～④の手順で施工する。橋軸方向の間詰部が主桁上となることから負の曲げモーメント対策としてプレキャスト床版側面に打ち継ぎコンクリートとの付着性の向上を図るために⑧高耐久型エポキシ系接着剤を塗布（付着強さ $3.7\text{N}/\text{mm}^2$ 以上）する。本工事においては主桁上に間詰部を設けたことから付着用接着剤を用いた。⑨コンクリートを打ち込み，一体化を図り，最後に⑩ I 期工事の仮舗装を撤去し，橋面防水工およびアスファルト舗装を施す。最後に仮桁を撤去して完成となる。

8.7 取替RC床版の施工

8.7.1 既設RC床版の撤去工事

施工フローに基づいて老朽化した RC 床版を撤去する。ここで，劣化床版の撤去および主桁補修・ジベル筋取り付け・仮桁設置状況を写真－8.4に示す。

撤去に先立ち，図－8.7に示す施工フロー①に基づいて，アスファルト舗装を切削機で全面撤去する（写真－8.4(1)）。次に，施工フロー②に示す RC 床版の撤去作業を行う。まず，RC 床版上面に引き抜き作業を行うために山留め材を設置し，道路通行者の安全を確保したうえで，既設 RC 床版を切断する。切断は，橋軸方向と橋軸直角方向に幅 2,000mm 間隔とした。撤去は H 形梁部材を支点とする仮設材にセンターホールジャッキを取り付けし，ジャッキによる引き抜きにより RC 床版を撤去した（写真－8.4(2)）。撤去に要する時間は I 期線で 6 時間程度である。ここで，撤去した RC 床版の状況を写真－8.4(3)に示す。センターホールジャッキで引き抜きした後の既設 RC 床版コンクリートは原型をとどめてないほど劣化が著しい。よって，詳細点検・調査で得られた健全性の判定区分IVは適切な判断であったといえる。I 期線の床版を撤去した後は施工フロー③に示すように，主桁の補修および新設プレキャスト RC 床版を設置・調整の後，スタッドジベル筋の取付けを行う（写真－8.4(4)）。

8.7.2 取替RC床版の施工（I期線）

(1) プレキャスト版の設置

プレキャスト版は工場で製作し，設置に併せて施工現場までトラック輸送する。



(1)舗装撤去



(2)床版撤去



(3)撤去後の床版



(4)スタッドジベル筋の取付け

写真－ 8.4 劣化床版の撤去および主桁補修・ジベル筋取り付け状況

プレキャスト版は地元企業で製作したことから設置現場まで 40 分程度であり、大型車両 5 台で 9 枚搬入した。ここで、取替 RC 床版の設置状況を写真－ 8.5 に示す。

設置はクレーンを用いた（写真－ 8.5(1)）。架設後設置位置の調整を行ったのち、主桁上フランジ上面にスタッドジベルの溶接と間詰め部の配筋、型枠設置を行う（写真－ 8.5(2)）。

(2) 橋軸直角方向間詰め部コンクリートの打ち込み

プレキャスト版の設置が終了した後は、橋軸直角方向間詰め部にコンクリートを打ち込む。本橋梁は片側施工のため、早期解放を考慮し、間詰めコンクリートには超速硬コンクリートを用いた。ここで、配合条件を表－ 8.2 に示した。間詰め部のコンクリートの発現強度は、材齢 3 時間で 34.9N/mm^2 、材齢 14 日で 48.3N/mm^2 である。よって、打設 3 時間後の強度が 24N/mm^2 以上であり、施工時間の短縮が図られる材料である。コンクリートの練混ぜには専用の移動プラント車（写真－ 8.5(4)）を用いた。間詰め部にコンクリートを打設した後は、表面仕上げし、養生する（写真－ 8.5(5)）。その後、材齢 3 時間で圧縮強度 24N/mm^2 以上発現しているか、簡易圧縮試験を行い確認した後に、仮アスファルト舗装を舗装して交通解放した。

8.7.3 II期線側の施工

施工フロー⑦に示すように I 期線側の①～④までの施工法と同様であることか、⑧間詰め部に付着用接着剤塗布からの施工法を示す。

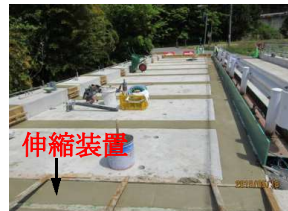


(1)取替 RC 床版設置

(2)間詰部の鉄筋配置

(3)設置終了

(4)移動プラントで練混ぜ



(5)間詰部打設

(6)接着剤塗布

(7)伸縮装置設置

(8)完成

写真－ 8.5 取替 RC 床版の施工手順

(1) 橋軸方向間詰部の施工

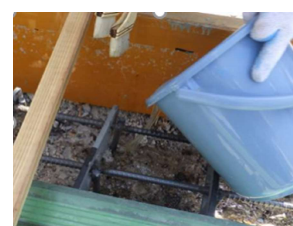
橋軸方向間詰部は、G2 主桁上であることから負の曲げモーメントの発生する位置でもある。そこで、負曲げ対策として I 期線側と II 期線側のプレキャスト RC 版側面に付着用接着剤を塗布することとする。

(2) 付着用接着剤塗布工

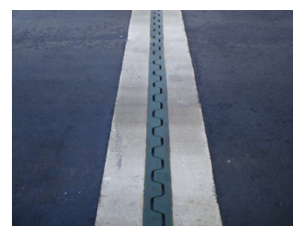
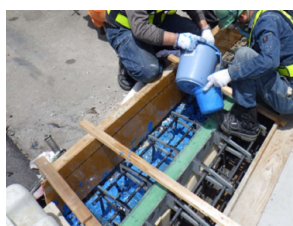
本橋梁は、3 主桁であることから中央の主桁上が橋軸方向の継手部となり、輪荷重が作用することでプレキャスト版と間詰部界面の上面には負の曲げモーメントが作用することになり、間詰部界面にはく離に伴うひび割れの発生が懸念される。そこで、プレキャスト版コンクリートと間詰部コンクリートとの付着力を高めるために、プレキャスト版の側面に高耐久型エポキシ系接着剤（以下、付着用接着剤とする）を塗布する。ここで、接着剤の材料特性値を表－ 8.4 に示す。表－ 8.4 に示すように、直接引張試験によるコンクリートの付着強さは $3.7\text{N}/\text{mm}^2$ を有している。施工においては、プレキャスト RC 床版橋軸方向の側面に付着用接着剤を $0.9\text{kg}/\text{m}^2$ 、平均厚 1.0mm 程度で塗布する（写真－ 8.5(6)）。この接着剤の硬化時間は常温で 120 分程度であることから、塗布後直ちに超速硬コンクリートを打ち込み、平滑に仕上げ、養生する（写真－ 8.5(7)）。併せて伸縮装置を設置する（写真－ 8.5(8)）。

表－ 8.4 浸透性接着剤・付着用接着剤の特性値

項目		付着用接着剤	浸透性接着剤
外観	主剤	白色ペースト状	無色液状
	硬化剤	青色液状	無色液状
混合比		5 : 1	10 : 3
硬化物比重		1.42	1.2
圧縮強度		102.9N/mm ²	104.4N/mm ²
圧縮弾性係数		3,976N/mm ²	3,172N/mm ²
曲げ強さ		41.6N/mm ²	92.8N/mm ²
引張せん断強さ		14.9N/mm ²	14.0N/mm ²
コンクリート付着強さ		3.7N/mm ² 以上	2.6N/mm ²



(1)伸縮装置設置 (2)接着剤注入孔削孔 (3)浸透性接着剤注入 (4)浸透性接着剤塗布



(5)付着用接着剤塗布 (6)コンクリート練混ぜ (7)表面仕上げ・養生 (8)完成

写真－ 8.6 橋台コンクリート補修・伸縮装置の設置

8.7.4 伸縮装置の設置

取替 RC 床版の設置後は施工フロー⑨に示す伸縮装置の設置を行う。ここで、伸縮装置の設置状況を写真-8.6 に示す。

橋台と取替 RC 床版へ伸縮装置の設置には、超速硬コンクリートを打ち込む。本橋梁の橋台コンクリートは脆弱化し、ひび割れの発生など損傷が著しい。伸縮装置の設置に当たっては、脆弱化している橋台コンクリートをブレーカではつり、脆弱したコンクリートを撤去し、鉄筋も防錆処理する。次に、伸縮装置を設置する（写真－ 8.6(1)）。橋台コンクリートの劣化が著しくひび割れの発生していることから補修を施す。補修法は φ10mm の孔を深さ 300mm まで削孔し（写真－ 8.6(2)）、浸透性接着剤（表－ 8.4）を注入する（写真－ 8.6(3)）。この浸透性接着剤はひび割れ幅 0.05mm 以上に浸透し、微細なひび割れ補修に用いられている。付着強さは 2.6N/mm² である。本補修においては橋台コンクリートはつり面から深さ 1.0m 付近まで浸透した。浸透

性接着剤の硬化時間は 8 時間であることから翌朝まで養生した。次に、設置においては一般社団法人日本橋梁メンテナンス協会^{8,12)}が推奨する EQM-J 工法を採用した。この工法は、ブレーカによるはつり作業で発生する微細なひび割れ補修に浸透性接着剤（写真－ 8.6(4)）、超速硬コンクリートとの付着力を向上させるために付着用接着剤を塗布する（写真－ 8.6(5)）。2 種類の接着剤を用いることで橋台コンクリート表面を強固にするとともに、超速硬コンクリートとの付着力が向上し、界面でのはく離が抑制されることになる。

次に、超速硬コンクリートを移動プラント車で練混ぜする（写真－ 8.6(6)）。伸縮装置へコンクリート打設後、表面仕上げをし、養生する（写真－ 8.6(7)）。最後に橋面アスファルト舗装を施し、完成となる（写真－ 8.6(8)）。以上の方法で、伸縮装置を設置した。

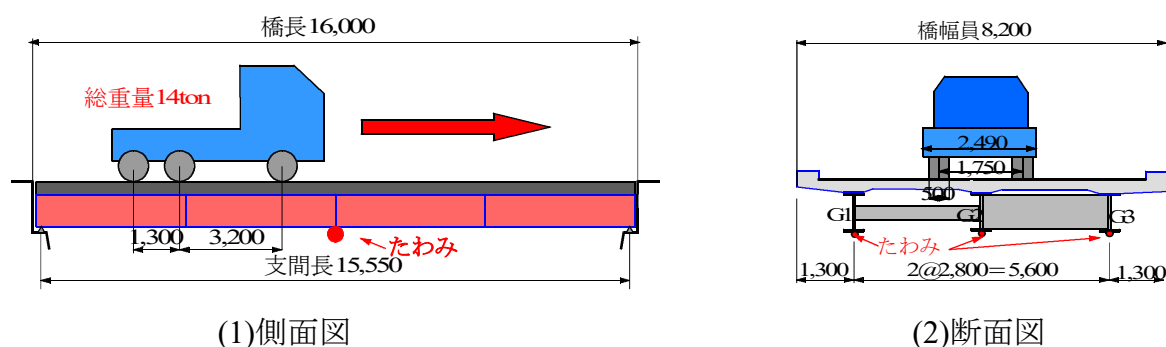
8.7.5 橋面防水工およびアスファルト舗装

最後に施工フロー⑩に示す、仮舗装を撤去し、橋面防水工およびアスファルト舗装を施す。橋面防水工およびアスファルトの舗設工は一時的に全面通行止めにして、工事を実施した。防水工はシート防水を行い、50mm 厚のアスファルト舗装を舗設した（写真－ 8.5(8)、写真-8.6(8)）。

8.8 大型車両を用いた荷重載荷試験

8.8.1 荷重載荷条件

取替床版を設置する前と設置後において載荷試験を行った。実験に用いた車両は総重量 14ton のタンデム式のダンプトラックを用いた。ここで、走行状態および載荷位置を図－ 8.8 に示す。



図－ 8.8 載荷試験および載荷位置図

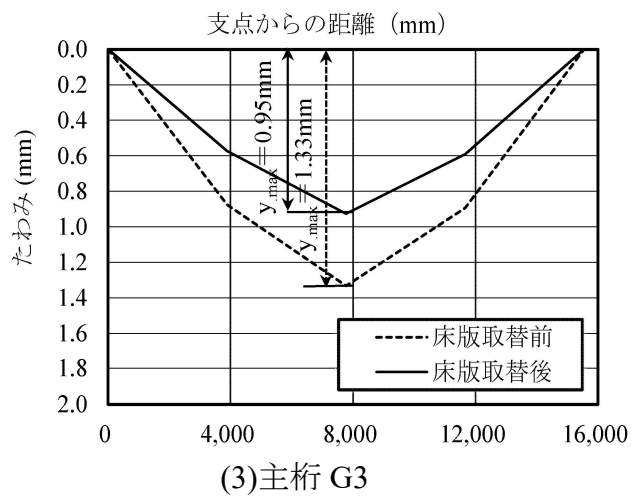
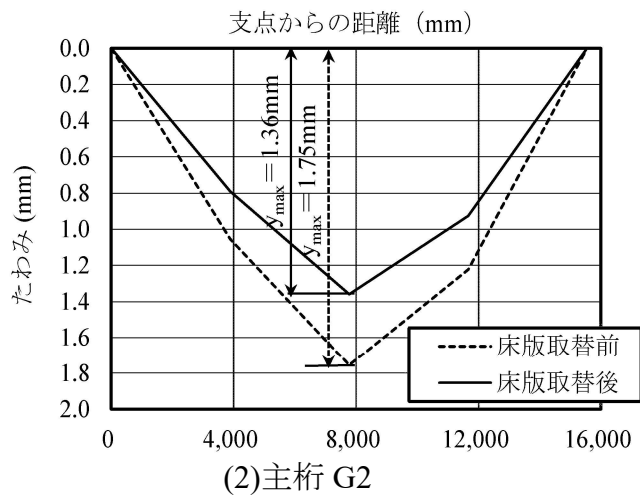
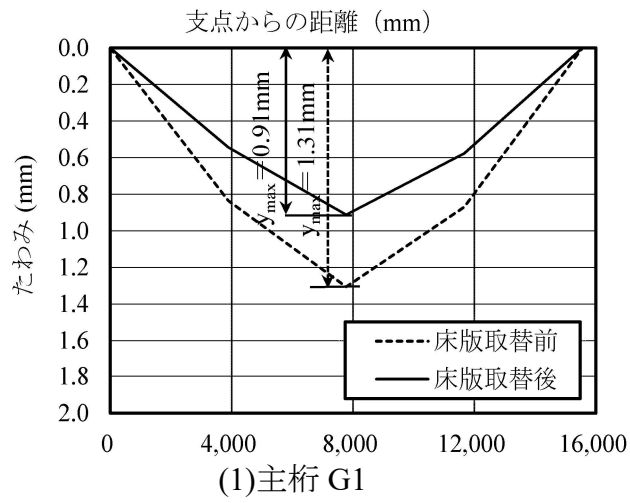


図- 8.9 たわみと支間の関係

8.8.2 たわみの計測結果

各主桁のたわみの状況を図－8.9に示す。

主桁 G1 の取替床版設置前の支間中央のたわみは図－8.9(1)に示すように 1.31mm である。これに対して取替 RC 床版設置後のたわみは 0.91mm であり，設置前のたわみに比して約 68.7% であり，30% も減少している。また，主桁 G2 は図－8.9(2)に示すように，取替床版設置前のたわみは 1.75mm，取替 RC 床版設置後のたわみは 1.36mm である。設置前のたわみに比して約 77.7% であり，23% 減少している。また，本実験は主桁 G2 を跨いで荷重を載荷したことから主桁 G1 に対して取替床版設置前および設置後でそれぞれ 1.34，1.48 倍のたわみが増加している。次に，主桁 G3 のたわみは図－8.9(3)に示すように取替床版設置前のたわみは 1.33mm，取替 RC 床版設置後のたわみは 0.95mm である。主桁 G1 同様に 30% 減少している。

以上より，既設 RC 床版のたわみに対して取替 RC 床版設置後はたわみの増加が大幅に抑制され，床版の長寿命化が図られると同時に主桁の応力減少にも繋がる結果が得られた。

8.9 まとめ

- (1) 鋼板接着補強した RC 床版の再劣化後の点検においては，橋梁定期点検要領に基づいて点検し，健全度評価を行うと同時に，既設 RC 床版からコンクリートコアを採取し，内部の損傷状態を調査・診断し，その上で補強対策を検討する必要がある。
- (2) 補強においては既設コンクリートの圧縮強度が道示に規定する設計基準強度を満足していることを調査する。さらに，取替 RC 床版を採用する場合は，各種取替床版と地域の交通量，設計状態を考慮し，ライフサイクルコストの低減が図られると同時に長寿命化となる取替床版の選定する必要がある。
- (3) 本橋梁は交通量が少なく，2等橋で設計されていたことから取替 RC 床版の設計においては 1994 年改定以降の道示に基づいて設計し，床版厚は既設 RC 床版と同様とした。なお，応力度について鉄筋量で調整し，1994 年改定の道示に示す許容応力度以下とした。
- (4) プレキャスト RC 床版の型枠は 3 セット製作した。プレキャスト RC 床版の製作は，架設現場に近い，地元企業で製作し，架設現場までトラック輸送し，設置はクレーンを用いた。取替工事においては施工フローに基づいて片側車線ごとに I 期，II 期線に分けて施工した。
- (5) 既設 RC 床版の撤去に要する時間は I 期線で 6 時間程度である。また，設置に要する時間も 6 時間程度であり，熟練することでさらに短縮が図られるものと考えられる。
- (6) 設置後の間詰部のコンクリートには材齢 3 時間で圧縮強度 24N/mm^2 以上発現でき

る超速硬コンクリートを用いた。練混ぜには専用の移動式プラント車を用いて、練混ぜから橋軸直角方向の間詰部（9m³）に打ち込み、表面仕上げした。コンクリートの打ち込みから表面仕上げまでの時間は3時間程度である。

- (7)本橋梁は3主桁であること、橋軸方向の間詰部が主桁上となることから、負の曲げモーメントが発生する。よって、間詰部上面に引張応力が発生し、間詰部との界面のはく離が懸念されることから、付着強さ 3.7N/mm² 以上有する付着用接着剤（高耐久型エポキシ系接着剤）を塗布し、負曲げ対策を実施した。この工法も取替床版の間詰部のはく離対策としては新工法である。
- (8)取替 RC 床版設置前と設置後における荷重載荷試験を行った結果、劣化した既設 RC 床版に対して、新設の取替 RC 床版を設置することでたわみが大幅に減少する結果が得られた。よって、床版および主桁の長寿命化に大きく貢献するものと期待できる。
- (9)本研究において提案するプレキャスト取替 RC 床版は、国土交通省が推進する i-Construction^{8.13)}を満足し、地方企業が地方のインフラを維持更新するという点において、地方創生に資する工法であると考ええる。

第8章参考文献

- 8.1) 小野晃良, 阿部忠, 高橋明彦, 武田秀人: 2 方向に間詰部を設けた RC 床版の耐荷力・耐疲労性の検証および実況における施工技術, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No2, pp1309-1314, 2020.
- 8.2) 小野晃良, 阿部忠, 木村延久, 高橋明彦: 走行荷重が作用する取替 RC 床版の最大耐荷力および破壊メカニズムに関する実験研究, 第 11 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp29-34, 2020
- 8.3) 小野晃良, 阿部忠, 水口和彦, 川井豊: プレキャスト床版に突起型継手を設けた取替 RC 床版間詰部の開閉幅が耐疲労性に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.68A, pp711-721, 2022.3
- 8.4) 小野晃良, 阿部忠, 水口和彦, 大西弘志: 取替 RC 床版接合面に接着剤を用いた場合の耐荷力性能と耐疲労性の検証および開閉幅の抑制効果, セメント・コンクリート論文集, Cement Science and Concrete Technology 75 (1), pp278-285, 2022.3
- 8.5) 久田真: セメント新聞, 山形県上山市・赤山橋でのプレキャスト RC 床版の実証実験, 2019.9.23
- 8.6) 小野晃良, 阿部忠, 重松伸也, 大西弘志, 久田真, 熊谷光記: 橋梁と基礎, 地方自治体が管理する中小橋梁におけるプレキャスト RC 床版の取替工事, 2022.2
- 8.7) 日本道路橋協会: 道路橋示方書・同解説 I, 1972
- 8.8) 国土交通省道路局: 橋梁定期点検要領, 2014
- 8.9) 阿部忠, 木田哲量, 高野真希子, 川井 豊: 道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力および耐疲労性の評価, 土木学会論文集 A1, pp.39-54, 2011
- 8.10) 阿部忠, 小野晃良, 木内彬喬, 高橋明彦, 大西弘志, 久田真: 取替 RC 床版の押抜きせん断耐荷力および疲労寿命推定法に関する実験研究, 構造工学論文集, Vol.66A, pp.741-751, 2020
- 8.11) 日本道路橋協会: 道路橋示方書・同解説, 1994
- 8.12) 一般社団法人日本橋梁メンテナンス協会: HP, nbma.jp/sekouJisseki.html
- 8.13) 国土交通省大臣官房技術調査課: i-Construction ～建設現場の生産性革命～, i-Construction 委員会, 2016

第9章 総 括

総括

高度経済成長期に整備された道路橋は、国民の生活環境を快適にし、経済活動を効率的なものにすることに大きく貢献してきた。しかし、建設後 50 年以上が経過し、老朽化による損傷が著しくなっている。一度補強対策を講じた橋梁においても、再劣化による損傷も発生し、補強対策が困難な橋梁も見られる。50 年が経過する道路橋においては設計基準の変遷に伴い、設計活荷重の増加、あるいは鉄筋量、床版厚が、1994 年改定以降の設計基準（道路橋示方書・同解説）と比較して不足している。1993 年道路構造令で改定された B 活荷重の車両を通行させるためには、床版厚を厚くするなどの補強対策必要となる。既に補強された床版が再劣化による損傷が見られる場合は、取替床版が検討される。既往の取替床版の構造の多くが PC 構造である。しかし、地方公共団体が管理する道路橋床版においては、必ずしも B 活荷重対応する RC 床版ではなく、A 活荷重で設計する RC 床版も多く架設されている。このようなことから、B 活荷重および A 活荷重に対応できる地方公共団体が管理する RC 床版の取替対策として RC 構造とした取替床版が必要となる。従来の PC 構造とした取替床版は限定された工場での製作が必要となる。RC 構造とした取替床版（以下、取替 RC 床版とする）は建設地域に最も近い、コンクリート二次製品工場での製作が可能となることから、輸送コスト・輸送時間の短縮も図れ、施工までのライフサイクルコストの低減効果が得られる。

本研究では、道路橋 RC 床版の設計荷重の変遷に伴い、耐荷力および耐疲労性の低下、既に補修・補強された RC 床版が再劣化が生じた場合の取替 RC 床版が耐荷力および耐疲労性を評価し、実用性を検証するために取替 RC 床版を用いて、走行荷重実験により耐荷力性能を検証し、輪荷重走行疲労実験により耐疲労性の検証を行った。

次に、間詰部の接合面が輪荷重の走行疲労により、はく離に伴うひび割れが発生する。この問題は取替 RC 床版が、長期間の使用により、雨水の浸透がなされた場合は、ひび割れ発生位置から漏水により老朽化が促進される。

そこで、本研究においてはプレキャスト RC 床版側面に高耐久型エポキシ系接着剤を塗布し、間詰部にコンクリートを打ち込みして一体化する工法の提案もおこなった。

さらに、取替 RC 床版の寿命推定のために RC 床版の S-N 曲線式との整合性を検証した。

取替 RC 床版の施工においては、国土交通省が示す i-Construction（建設現場の生産性革命）施策に寄与できる合理化機械継手を用いるプレキャスト RC 床版として、合理化施工が可能となることも実橋での取替工事を実施した。近年、深刻となっている鉄筋工等の技能労働者の人手不足に関しても、本提案する取替 RC 床版はプレキャスト部分を近隣の工場で作成し、架設現場まで輸送することで、在来工法である場所打ち RC 床版と比較して現場施工日数を大幅に短縮することが可能であることを示し、i-Construction に対応可能であり、さらには地方創生に資することを示した。

本論文は、全 9 章で構成されており、各章において得られた知見を以下に示す。

第1章「序論」では、社会インフラの老朽化の現状と道路橋 RC 床版維持管理の概要を述べた。また、老朽化や再劣化する RC 床版の取替工事を対象とした本提案する取替 RC 床版の必要性および実用化のための各種実験による性能評価からの実用性についても述べ、本提案する取替 RC 床版の性能評価に関する検証、施工の合理化・省力化、安全施工等についての位置付けを論じた。

第2章「道路橋および取替床版の現状」では、橋梁の現状を述べるとともに、道路橋の部材の中で最も損傷が著しい RC 床版の損傷状況、取替床版の現状についても述べた。また、国土交通省が示す i-Construction(建設現場の生産性革命) のトップランナー施策の全体最適の導入として、プレキャスト RC 床版などの工場製作化が進められている中、本研究で提案する取替 RC 床版が i-Construction 施策に寄与できる合理化機械継手を用いるプレキャスト RC 床版として、合理化施工が可能な床版取り替え工事について論じた。第2章で得られた知見は、以下に示す通りである。

- (1) 我が国の橋梁の現状においては73万橋が供用されており、現状においては5年ごとに点検し、維持管理されている。しかし、既に補強した RC 床版においては、再劣化による損傷が発生し、取替床版が検討されている。
- (2) 道路橋の課題は、建設業者数の減少や建設業就業者数の減少など、建設産業における労働力不足が深刻な問題となっている。この解決策の1つに、国土交通省が推奨する「ICTの全面的な活用 (ICT 土工)」等の施策であり、本研究テーマにおける取替 RC 床版も建設生産システム全体の生産性向上が図れる取替 RC 床版および施工法においては i-Construction を取り入れた技術であると考ええる。
- (3) 既存の取替床版は PC 構造が主体であり、本研究において提案する RC 構造の検討が行われていないのが現状である。地方の経済活性化においてもその地域の二次製品を有効活用し、その地域の施工会社が施工できる取替 RC 床版が必要となる。
- (4) 取替 RC 床版の継手構造においては主鉄筋には三角形の突起、配力筋には円形の特殊鉄筋継手を用いることから、最小継手長を有する間詰部を設けた構造を用いて取替 RC 床版の概略を述べた。また、施工において工事規制を考慮した i-Construction を取り入れた施工手順について提案する。
- (5) 現在提案されている取替床版は床版を橋軸方向に並列して、各企業が提案する継手構造を用いて、一体化されているものの、疲労が進行することによって、間詰部界面がはく離し、漏水が発生している。これは間詰部を有する PC 橋においても漏水が発生していることから、界面の付着力を高め、漏水を防止する技術の必要性を述べた。

第3章「取替RC床版の耐荷力の検証および破壊メカニズム」では、取替 RC 床版の継手構造について主筋および配力筋突起形状の引張試験を行い、引張強度を明らかにして継手長の検証を行った。次に、取替 RC 床版の最大耐荷力および破壊メカニズムを検証するために、1994年改定以降の道示に基づいて設計し、その3/5モデルとした取替 RC 床版に2タイプの間詰部を設けた取替 RC 床版を用いた。実験では輪荷重走行疲労試験機を用いて、1走行毎に荷重を増加する走行荷重実験を行い、取替 RC 床版の最大耐荷

力および破壊メカニズムから実用性を評価した。第 3 章で得られた知見は、以下に示す通りである。

(1) 本提案する継手部鉄筋の付着強度を得るために引き抜き試験を行った結果、D13 の異形鉄筋を用いて円形突起および三角形突起を設けた 200mm および 150mm の埋込み長においても付着応力度が道示に示す付着応力度を十分に満足する結果が得られた。同様に D16 の場合は埋め込み長 240mm, 180mm においても道示に示す付着応力度を満足している。よって、本提案する継手部鉄筋の突起は充分の付着力が得られる結果となった。

(2) 軸直角方向に間詰部を設けた取替 RC 床版 A の最大耐荷力の平均は 255.8kN である。また、2 方向に間詰部を設けた供試体取替 RC 床版 B の最大耐荷力の平均は 265.9kN であり、間詰部直上に輪荷重を走行させたにもかかわらず耐荷力が 1.04 倍向上する結果が得られた。

(3) 取替 RC 床版 A の破壊状況は、輪荷重が走行中にプレキャスト供試体のパネル A 内で輪荷重の設置面から斜めひび割れが発生する押抜きせん断破壊となった。また、取替 RC 床版 B の破壊状況もプレキャスト版内で走行中に押抜きせん断破壊となった。

第4章「取替RC床版の耐疲労性の検証および破壊メカニズム」では、取替 RC 床版の耐疲労性を検証するために 2 種類の間詰部を設けた取替 RC 床版を用いて、輪荷重走行荷疲労実験を行い、実験走行回数を作用荷重から得られる等価走行回数を得て検証した。

また、プレキャスト RC 床版を並列して一体化したことから、輪荷重疲労実験における RC 床版および本提案する継手構造付近の破壊メカニズムを検証した。第 4 章で得られた知見は、以下に示す通りである。

(1) 本提案する鉄筋端部に 2 タイプの突起を設けた鉄筋を主筋および配力筋方向に配置し、間詰部で重ね継手構造とした。実験供試体は施工条件を考慮してパネルを工場で作製した。間詰部を設けた供試体のコンクリートには超速硬セメントを用いた超速硬コンクリートを打ち込み施工した。その結果、本構造は施工性にも優れた取替 RC 床版である。よって、実橋においても、同様の配合条件および施工条件での実施が可能である。

(2) 輪荷重走行疲労実験におけるプレキャスト化した取替 RC 床版において、軸直角方向に間詰部を設けた取替 RC 床版 A 供試体の等価走行回数は、同一条件で配合したコンクリートで作製した RC 床版供試体 RC-B に対して、12.1 倍の等価走行回数を得られた。また、軸方向および軸直角方向の 2 方向に間詰部を設けた供試体は 12.5 倍の等価走行回数を得られ、間詰部が弱点とならず耐疲労性が向上する結果が得られた。

(3) RC 床版および取替床版の軸方向の支間中央のたわみと等価走行回数においては、取替 RC 床版 A および B の間詰部は鉄筋の付着を考慮し、280mm の継手長とし、先端部にそれぞれの突起を設けたことから、間詰部の剛性が高まり、輪荷重走行によるたわみの増加が抑制され耐疲労性が大幅に向上する結果が得られた。

(4) 輪荷重走行疲労実験における破壊状況は、RC 床版および取替 RC 床版 A, B ともに、輪荷重の走行による 2 方向のひび割れが発生し、輪荷重 45 度底面の外側にはダウエル効

果によるはく離が発生し、破壊は押抜きせん断破壊となった。間詰部を設けた 2 タイプの供試体においても破壊はプレキャスト版である RC 床版で破壊に至ることから、間詰部は弱点とならず、耐疲労性が向上する結果が得られた。

(5) 輪荷重走行疲労実験における等価走行回数および荷重とたわみの関係、破壊時の損傷状況においても、RC 床版以上の耐疲労性が評価されたことから、本提案するプレキャスト化した取替 RC 床版構造は実用的であると考えられる。

第5章「輪荷重走行荷重実験における間詰部の開閉幅およびたわみ振幅が耐荷力に及ぼす影響」では、取替 RC 床版におけるプレキャスト床版と間詰部の接合面のはく離に伴うひび割れの発生を抑制するために接合面に付着用接着剤である高耐久型エポキシ系接着剤（以下、接着剤）を用いてはく離の抑制効果を検証した。付着面の強度試験として、接着剤「あり」、「なし」のコンクリート円柱供試体を製作し、直接引張試験による界面の引張強度、一面せん断試験におけるせん断強度を検証した。次に、プレキャスト床版側面に接着剤「あり」、「なし」の取替 RC 床版供試体を用いて走行荷重実験を行い、耐疲労性および接合面の開閉幅、たわみ振幅が耐荷力性能に及ぼす検証を行い、各種取替床版の接合面のはく離に伴うひび割れの抑制効果の一助としたい。第 5 章で得られた知見は、以下に示す通りである。

(1) 普通コンクリート側面に 5mm の目荒しを設けて、超速硬コンクリートを打ち込んだ接着剤なしの円柱供試体と側面に接着剤を塗布して超速硬コンクリートを打ち込んだ接着剤ありの円柱供試体の引張試験結果は、接着剤を塗布することで引張強度が 1.17 倍である。また、一面せん断試験によるせん断強度は 1.21 倍である。よって、走行荷重が作用した場合に間詰部の開閉幅の進展が抑制されるものと考えられる。

(2) 走行荷重実験の結果から、接着剤なしの供試体 R.RC-R-N の最大耐荷力は 260.4kN であり、接着剤ありの供試体 R.RC-R-A の最大耐荷力は 260.6kN であり、最大耐荷力においては、接着剤あり、なしとで差異は見られない。

(3) 走行荷重実験における間詰部の開閉幅と走行距離を動的に見た場合、接着剤なしの供試体は開閉幅の変動挙動が著しい。荷重とひび割れ幅の関係においては、接着剤なしの場合、ひび割れ幅 0.2mm に達した時点の荷重は 110kN であるが、接着剤ありの場合、ひび割れ幅 0.2mm に達した荷重は 255kN を超えた付近であり、接着剤の効果を確認できた。

(4) たわみと走行位置の関係では、接着剤なしの場合、最大荷重 260.4kN で走行した場合のたわみの最大値 9.80mm であり、接着剤ありの場合、たわみの最大値は 8.18mm と接着剤なしの供試体たわみの 83%と接着剤を用いることで開閉幅の増加が抑制され、たわみの増加も抑制されている。荷重とたわみ振幅の関係においては、接着剤あり、接着剤なしで、剛性の低下はほとんど見られない結果が得られた。

(5) 破壊状況は、接着剤なしの供試体は間詰部界面にはく離に伴うひび割れが発生している。これに対して接着剤ありの供試体はひび割れ発生が見られない。これは接着剤の効果によるものである。また、破壊は全てプレキャスト床版内で輪荷重が走行中に

押抜きせん断破壊となった。

第6章「取替RC床版間詰部の開閉幅が耐疲労性に及ぼす影響」では、第5章に続き、取替RC床版におけるプレキャスト床版と間詰部の接合面のはく離に伴うひび割れの発生を抑制するために接合面に付着用接着剤である接着剤を用いてはく離の抑制効果を検証する。プレキャスト床版側面に接着剤「あり」、「なし」の取替RC床版供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を行い、耐疲労性および接合面の開閉幅、たわみ振幅が耐疲労性に及ぼす検証を行った。各種取替床版の接合面のはく離に伴うひび割れの抑制効果の一助としたい。第6章で得られた知見は、以下に示す通りである。

- (1) 輪荷重走行疲労実験における等価走行回数は接着剤なしの供試体に対して接着剤ありの供試体は1.2倍の等価走行回数を得られた。これは引張強度およびせん断強度が高く、付着力が向上し、たためと考えられる。
- (2) 輪荷重走行疲労実験における間詰部の開閉状況は、接着剤なしの供試体は開閉幅の変動挙動が著しい。たわみと走行距離の関係から得たたわみ振幅が大きく、剛性の低下が等価走行回数の増加とともに増加している。一方、接着剤ありの供試体は間詰部の振幅も小さく、ほぼ一定は挙動を示している。また、たわみ振幅においても接着剤なしの供試体が13%ほど下回っていることから耐疲労性の向上が図られたと考える。
- (3) 破壊状況は、接着剤なしの供試体は間詰部界面はく離に伴うひび割れが発生している。これに対して接着剤ありの供試体はひび割れ発生は見られない。これは接着剤の効果によるものである。また、破壊は全てプレキャスト床版内で輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。
- (4) 取替RC床版およびPCT桁橋は間詰部を有し、輪荷重の繰り返し走行により、打ち継ぎコンクリート界面はく離に伴うひび割れが発生し、漏水による遊離石灰が発生している事例が多い。はく離を抑制する施工技術として、高耐久型エポキシ系接着剤を側面に塗布することで、打ち継ぎコンクリートと一体化が図られ、耐疲労性が向上するものと考えられる。

第7章「取替RC床版の押抜きせん断耐荷力および疲労寿命推定法」では、道路橋RC床版の劣化に伴う取替RC床版において軸直角方向と軸直角方向および軸方向に間詰部を設けた2種類の取替RC床版を用いて、第3章、第5章の輪荷重走行荷重実験による最大耐荷力を検証し、第4章、第6章の輪荷重走行疲労実験の結果から、松井らが提案するS-N曲線式の傾きの逆数の絶対値 $m = 12.7$ を適用して得られた等価走行回数より耐疲労性の検証を行った。そして、阿部らが提案するRC床版のS-N曲線式との整合性を検証し、取替RC床版の寿命推定の一助としたい。第7章で得られた知見は、以下に示す通りである。

- (1) 走行荷重実験による最大耐荷力 P_{max} と阿部らが提案する押抜きせん断耐荷力 $P_{s,max}$ とを比較すると、実験による最大耐荷力に対して、間詰部を軸直角方向に設けた供試体は96%、2方向に間詰部を設けた供試体が93%となり、ほぼ近似する結果が得られた。
- (2) RC床版のS-N曲線式との整合性の検証では縦軸 $S = P/P_{s,max}$ と輪荷重走行疲労実験から得られた等価走行回数 N_{eq} の関係においては、阿部らが提案するRC床版のS-N曲

線式上の信頼限界値の $\pm 5\%$ 内にプロットされた。よって、RC 床版の寿命推定式である S-N 曲線式との整合性が得られた。S 値と S-N 曲線式から得られる破壊走行回数 N_f に対して、間詰部を軸直角方向に設けた供試体の実験等価走行回数は 81%、2 方向に間詰部を設けた供試体 79% となり、ほぼ近似し、安全側に評価される結果となる。

(3) 間詰部を有する取替 RC 床版の寿命推定は、これまでの既往研究である阿部らが提案する破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力式および S-N 曲線式を適用することで寿命推定が可能と考えられる。

(4) 取替 RC 床版の寿命推定は阿部らが提案する破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力式および S-N 曲線式を適用することで寿命推定が可能と考えられる。

第8章「地方自治体が管理する橋梁の床版取替工事におけるRC床版の施工技術」では、地方自治体が管理する再劣化した RC 床版を補強するために詳細点検および調査を行い、健全性を評価し、再劣化した RC 床版の補強対策を述べた。また、プレキャスト RC 床版の製作から設置および間詰部のコンクリート打ち込みから完成するまでの施工フローを示した。さらに、取替 RC 床版設置前後で荷重載荷試験を行い、主桁の変形から取替 RC 床版の効果を示し、地方自治体が管理する橋梁の取替 RC 床版の設計法および施工技術の一助としたい。

(1) 鋼板接着補強した RC 床版の再劣化後の点検においては、橋梁定期点検要領に基づいて点検し、健全度評価を行うと同時に、既設 RC 床版からコンクリートコアを採取し、内部の損傷状態を調査・診断し、その上で補強対策を検討する必要がある。

(2) 補強においては既設コンクリートの圧縮強度が道示に規定する設計基準強度を満足していることを調査した。さらに、取替 RC 床版を採用する場合は、各種取替床版と地域の交通量、設計状態を考慮し、ライフサイクルコストの低減が図られると同時に長寿命化となる取替床版の選定する必要がある。

(3) 本橋梁は交通量が少なく、2 等橋で設計されていたことから取替 RC 床版の設計においては 1994 年改定以降の道示に基づいて設計し、床版厚は既設 RC 床版と同様とした。応力度について鉄筋量で調整し、1994 年改定の道示に示す許容応力度以下とした。

(4) プレキャスト RC 床版の型枠は 3 セット製作した。プレキャスト RC 床版の製作は、架設現場に近い、地元企業で製作し、架設現場までトラック輸送し、設置はクレーンを用いた。取替工事においては施工フローに基づいて片側車線ごとに I 期、II 期線に分けて施工した。

(5) 既設 RC 床版の撤去に要する時間は I 期線で 6 時間程度である。また、設置に要する時間も 6 時間程度であり、熟練することでさらに短縮が図られるものと考えられる。

(6) 設置後の間詰部のコンクリートには材齢 3 時間で圧縮強度 24N/mm^2 以上発現できる超速硬コンクリートを用いた。練混ぜには専用の移動式プラント車を用いて、練混ぜから橋軸直角方向の間詰部 (9m^3) に打ち込み、表面仕上げした。コンクリートの打ち込みから表面仕上げまでの時間は 3 時間程度である。

(7) 本橋梁は 3 主桁であること、橋軸方向の間詰部が主桁上となることから、負の曲げ

モーメントが発生する。よって、間詰部上面に引張応力が発生し、間詰部との界面のはく離が懸念されることから、付着強さ 3.7N/mm^2 以上有する付着用接着剤（高耐久型エポキシ系接着剤）を塗布し、負曲げ対策を実施した。この工法も取替床版の間詰部のはく離対策としては新工法である。

(8) 取替 RC 床版設置前と設置後における荷重載荷試験を行った結果、劣化した既設 RC 床版に対して、新設の取替 RC 床版を設置することでたわみが大幅に減少する結果が得られた。よって、床版および主桁の長寿命化に大きく貢献するものと期待できる。取替床版設置前後でたわみを計測することで将来的な修繕時期を把握するための目安とすることができると思われる。

(9) 本研究において提案するプレキャスト取替 RC 床版は、国土交通省が推進する i-Construction を満足し、地方企業が地方のインフラを維持更新するという点において、地方創生に資する工法であると思われる。

以上より、本論文で提案する「取替 RC 床版」は、地方公共団体を対象として提案した。とくに、交通量の少ない地方道においては現行道示に規定する B 活荷重や A 活荷重、1994 年改定以前の設計基準である 1 等橋、2 等橋で設計され橋梁も多く存在している。これらの橋梁床版の取替工事においては、現在最も多く採用されている PC 構造とした取替床版は、製作工場や技術者も限られているのに対して、本提案する取替 RC 床版は、架設地域に最も近い、コンクリートの二次製品工場で製作が可能となり、コストの低減も図れ、施工性にも優れたている。さらに国土交通省が推奨する i-Construction（建設現場の生産性革命）における、コンクリートの生産性の向上を図るための対策の一つである、合理化機械継手を用いることで、プレキャスト RC 床版に対応できる取替床版および工法であると考えられる。第 8 章で述べたように、山形県の上山市で採用され、これをもとに特許に加えて NETIS も取得し、2022 年 9 月には岩手県の上路式トラス橋にも採用され、社会的にも認知され始めている。

本研究で得られた知見が、国や地方自治体が管理する鉄筋コンクリート部材の長寿命化計画の一助になれば幸いである。

謝 辞

本論文は、株式会社小野工業所が日本大学生産工学部名誉教授博士(工学)阿部忠先生とご縁を頂き、その指導とお力添えのもと共同研究を行った成果を取りまとめたものです。

本取替 RC 床版は、阿部先生の長年にわたる研究とお力添えがなくては完成し得なかったものです。ここに謹んで感謝の意を捧げます。

本研究の遂行に当たりまして多大なるご指導とご鞭撻を賜り、ご審査を下さいました日本大学教授博士(工学)水口和彦先生、日本大学教授工学博士澤野利章先生、日本大学教授博士(工学)師橋憲貴先生に心からお礼申し上げます。

本研究におきましては工学博士川井豊先生にご指導を頂き、本研究に関する実験および計測等において支援を頂きました日本大学准教授博士(工学)野口博之先生にも大変ご尽力を頂きました。御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり日本大学生産工学部ハイテク・リサーチ・センターの保有する「輪荷重走行疲労実験装置」および「材料試験機」を利用させていただき、無事に論文を取りまとめることができ、取替 RC 床版の実用化をすることができました。

本取替 RC 床版の共同研究にあたっては、東北大学大学院教授・インフラマネジメント研究センター長 博士(工学)久田真先生、岩手大学理工学部教授博士(工学)大西弘志先生、株式会社後関製作所 代表取締役社長 後関亮作氏にも多大なご尽力を頂きました。厚く御礼を申し上げます。

高耐久エポキシ系接着剤の開発者である鹿島道路株式会社執行役員技術開発本部長 博士(工学)児玉孝喜氏に技術的なご助言を頂き、博士(工学)伊藤清志氏には施工にあたりご指導を頂きました。御礼を申し上げます。

取替 RC 床版の供試体作成や赤山橋の施工においては、山形県上山市役所建設課の皆様、株式会社東栄コンクリート工業 代表取締役 博士(工学)新田裕之氏、株式会社小野工業所 元取締役 博士(工学)高橋明彦氏、株式会社小野工業所の皆様に大変お世話になりました。ありがとうございます。

本学への通学、博士論文について理解と応援をして頂いた TAKUMINO ホールディングス株式会社、株式会社小野工業所、株式会社橋梁保全研究所、株式会社香取ベンダーテクニカルの TAKUMINO グループ同僚諸兄、常に支えとなってくれる妻と子供たちに感謝を申し上げ結びといたします。