

アルカリシリカ反応により劣化した道路橋 RC 床版の  
構造性能評価とその補強方法に関する研究

Study on structural performance evaluation and strengthening on  
RC road bridge deck deteriorated due to alkali silica reaction

令和 3 年 9 月

岸良 竜



# 目次

## 第1章 序論

1.1 本研究の背景	2
1.2 本研究の目的	4
1.3 本論文の構成	4

## 第2章 既往の研究

2.1 概説	10
2.2 ASRによるコンクリート構造物の劣化の現状	10
2.2.1 ASRの抑制対策の現状	10
2.2.2 ASRによるコンクリート構造物のひび割れ	10
2.2.3 道路橋RC床版におけるASR劣化事例	11
2.3 ASRが生じたRC部材(はり、柱)の構造性能	14
2.3.1 RCはりの静的耐力	15
2.3.2 RC柱の静的耐力	17
2.3.3 繰返し荷重下の挙動	18
2.4 ASRが生じたRC床版の構造性能	18
2.4.1 RC床版の静的耐力および疲労耐力	18
2.4.2 ASRが生じたRC床版の静的耐力および定点疲労耐力	23
2.4.3 ASRが生じたRC床版の移動荷重に対する疲労耐力	24
2.5 ASRが生じたコンクリート構造物に対する補修・補強方法	27
2.6 本研究に関する課題の整理	28

## 第3章 部分打替え補強したASRと疲労の複合劣化RC床版の耐疲労性評価

3.1 概説	36
3.2 部分打替えの概要	36
3.3 実験概要	38
3.3.1 使用材料およびコンクリートの配合	38
3.3.2 供試体の概要	40
3.3.3 部分打替えの概要	41
3.3.4 実験方法	43
3.3.5 測定項目および方法	46
3.4 結果および考察	47
3.4.1 活荷重たわみ	47
3.4.2 供試体下面のひび割れ状況	48

3.4.3 供試体断面のひび割れ状況	49
3.4.4 共振周波数	50
3.5 まとめ	52

#### 第4章 鋼主桁上 RC 床版の ASR による劣化性状評価

4.1 概説	56
4.2 実験概要	56
4.2.1 使用材料およびコンクリートの配合	56
4.2.2 供試体の概要	58
4.2.3 測定項目および方法	60
4.3 結果および考察	63
4.3.1 コンクリートの膨張挙動	63
4.3.2 床版供試体のひび割れ発生状況	66
4.3.3 偏光顕微鏡観察および SEM-EDS 分析	68
4.3.4 圧縮強度および静弾性係数	73
4.3.5 共振周波数	75
4.3.6 透気係数	76
4.4 まとめ	78

#### 第5章 鋼主桁上で ASR を受けた RC 床版の構造性能および部分打替えによる補強効果

5.1 概説	82
5.2 鋼主桁上で ASR を受けた RC 床版の構造性能評価	82
5.2.1 供試体の概要	82
5.2.2 静的載荷試験方法	85
5.2.3 静的載荷試験結果	86
5.3 LMC の力学特性の評価	92
5.3.1 実験概要	92
5.3.2 実験結果	94
5.4 部分打替えした ASR 劣化 RC 床版の押抜きせん断耐力評価	96
5.4.1 実験概要	96
5.4.2 実験結果	99
5.5 まとめ	104

#### 第6章 結論

6.1 概説	108
6.2 各章で得られた成果のまとめ	108



6.3 今後の課題と展望.....	111
付属資料	
ASR 劣化 RC 床版供試体の定点繰返し載荷試験.....	114
謝辞.....	121



## 第1章 序論

## 1.1 本研究の背景

わが国のインフラの多くは高度経済成長期以降に集中的に建設されており(図-1.1.1), 建設後 50 年を超えるインフラの割合が今後飛躍的に増加することが見込まれている<sup>1)</sup>. このうち道路橋は, 現在全国に約 72 万橋あるとされ, 建設後 50 年を経過する橋梁の割合が, 2019 年の 27%に対し, 10 年後の 2029 年には 52%まで急増すると予想されている. インフラは国民生活および経済活動の基盤であり, 今後は計画的に維持管理・更新を進めていく必要がある. すでに NEXCO, 首都高速道路および阪神高速道路では, それぞれ保有する道路インフラの大規模更新・大規模修繕プロジェクト<sup>2)3)4)</sup>を立ち上げ, 老朽化対策に着手している. このうち NEXCO では, 総工費約 30,200 億円のうち, 約 6 割にあたる約 1,800 億円を道路橋の床版の更新・修繕に充てるとしており, 道路橋を構成する部材の中でも, 床版の対策が急務であることが認識されつつある.

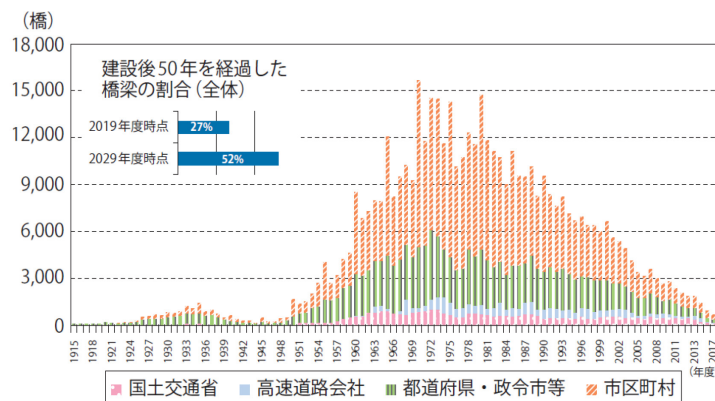


図-1.1.1 建設年度別橋梁数<sup>1)</sup>

道路橋鉄筋コンクリート(以下, RC)床版においては, 昭和 40 年代初頭に, 建設後まもない時期にコンクリートが部分的に抜け落ちるといった問題が多く発生した<sup>5)</sup>. この損傷は床版下面に亀甲上のひび割れをとめない, また比較的重交通路線で多くみられたことから, コンクリートの疲労現象として捉えられ, 定点繰返し載荷試験による疲労実験による検討が行われるようになった<sup>6)7)</sup>. しかしながら, この定点繰返し載荷では, 供試体のひび割れ発生状況や破壊までの回数等で実橋の損傷状況と乖離がみられた. これに対し, 載荷点を移動させる繰返し載荷試験を行った所, 実橋に近いひび割れが再現されたことから, 輪荷重の移動繰返し載荷が損傷の主な要因と考えられるようになった<sup>8)</sup>. その後, 松井らにより開発された輪荷重走行試験機による実験により, RC 床版の損傷メカニズムが解明され<sup>9)</sup>, また水の作用が耐疲労性を大幅に低下させることが明らかとなった<sup>10)</sup>. この床版の疲労問題と交通車両重量の引き上げへの対応として, 道路橋示方書における RC 床版に関する諸基準は繰返し変更が行われてきており<sup>11)</sup>, 現在では最小床版厚さや曲げ応力度の制限により, 間接的にはあるが RC 床版の疲労破壊は防止されている.

その後、1991年にスパイクタイヤが禁止され、東北地方や北海道などの積雪寒冷地で凍結防止剤が大量に散布されるようになって以降は、RC床版では交通荷重の繰返しによる疲労損傷に加えて、塩害や凍害、アルカリシリカ反応(以下、ASR)等のコンクリートの材料劣化との複合劣化が顕在化しつつある<sup>12)</sup>。

コンクリートの材料劣化のうち、ASRは骨材のある種の鉱物とコンクリート中のアルカリ性の水溶液による反応により、コンクリート中に異常な膨張を引き起こす現象である<sup>13)</sup>。ASRについては、1986年にJISA5308「レディーミクストコンクリート」にASR対策が盛り込まれて以降、新設構造物でのASRの発生件数は大きく減少したとみられている<sup>14)</sup><sup>15)</sup>。一方、ASRの発生が無くなったわけではなく、現行のASR劣化構造物の診断法や抑制対策の改善など、まだまだ解決すべき課題が多く残されていることが指摘されている<sup>16)</sup>。さらに、構造物のリスクに応じたASRの制御設計に向けた議論もなされており<sup>17)</sup>、ASRによる構造部材への影響を明らかにすることが求められている。

これまでRC床版におけるASRの報告事例はほとんどなかった<sup>18)</sup>が、凍結防止剤の散布が本格化して以降、RC床版におけるASRの発生事例や損傷事例の報告<sup>19)</sup>が多くみられるようになってきた(写真-1.1.1, 写真1.1.2)。著者を含む前島らの研究グループは、輪荷重走行試験機を用いた検討により、ASRによりRC床版の耐疲労性が低下し、その耐疲労性がASRの反応速度によって異なることを明らかとしている<sup>20)</sup>。この結果は、一般に実験的にASRを再現する場合、40℃等の比較的高温環境下で急速にASRを生じさせることが多く行われているのに対し、より実環境に近い条件下での検討の重要性を示唆するものである。また、ASRが生じたRC床版に対し、その劣化の程度によっては、何らかの構造的な性能を回復させる措置が必要であることを示している。ただし、ASRが生じたRC床版の構造性能に関する研究事例は少なく、その劣化機構が十分に明らかになっているとは言い難い。また、ASRが生じたRC床版の補修・補強に関する検討も極めて少ないのが現状である。

上記を踏まえると、今後のRC床版の維持管理を効果的・効率的に行うには、ASRによるRC床版の劣化性状を把握し、構造性能にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることが必要であると考えられる。また、国や地方公共団体を通じて財政状況が厳しい現状を考慮すると、床版自体の架替え(更新)が困難なケースも多くなると予想され、ASRにより劣化したRC床版に対する効果的な補強方法を明らかにすることも重要である。



写真 1.1.1 ASR 劣化した RC 床版の舗装切削後<sup>19)</sup>



写真 1.1.2 コアのひび割れ<sup>19)</sup>

## 1.2 本研究の目的

本研究では、ASR による RC 床版の劣化性状および構造性能への影響を明らかにし、効果的な補強方法を提案することを目的に実験的に検討を行った。まず、試験体レベルの評価として、ASR 劣化した RC 床版を作製し、ラテックス改質コンクリート(以下、LMC)を用いた部分打替えを行い、輪荷重走行試験機による耐疲労性の評価を行った。次に、より実態に即した評価を行うため、屋外環境下の鋼主桁上に実物大の RC 床版を作製し、約 4 年間、ASR による劣化性状を評価した。さらに、この実物大 RC 床版から試験体を切り出して静的載荷試験を行い、ASR が RC 床版の押抜きせん断耐力に及ぼす影響について実験的に検討を行った。加えて、実物大 RC 床版上で LMC を用いた部分打替えを行った後、同様に試験体を切出し、静的載荷試験を行うことで、静的耐力の向上効果を検証した。

## 1.3 本論文の構成

図-1.3.1 に、本論文の構成を示す。

第 1 章は「序論」であり、本研究の背景として、RC 床版の現状を示した後に、ASR が RC 床版の構造性能に及ぼす影響の解明および補強方法の検討の必要性を示した。ついで本研究の目的を示し、本論文の構成を示した。

第 2 章では、まず RC 床版における ASR 損傷事例を示した後に、ASR がコンクリート部材の構造性能に及ぼす影響に関する既往の研究の要点を整理した。さらに、ASR が生じたコンクリート構造物の補修・補強方法に関する検討事例を整理し、本研究で取り組むべき課題を明らかにした。その結果、ASR が RC 床版の構造性能に及ぼす影響については検討事例が少なく、十分に解明されていないことを明らかにし、また ASR をより実環境に即した条件下で再現した検討を行うことの重要性を示した。また、ASR により劣化した RC 床版に対する効果的な補修・補強方法の検討が極めて少ないことを示した。

第 3 章では、ASR と疲労を実験的に生じさせた RC 床版供試体を作製した後、床版供試体の上側の損傷部を LMC で部分的に打ち替える補強を行い、輪荷重走行試験により補強効果を検証した。その結果、輪荷重走行試験における疲労限界時の等価繰返し走行回数が補強後は補強

前の 178 倍となり、部分打替えにより ASR と疲労の複合劣化 RC 床版の耐疲労性が明確に向上することを示した。また、輪荷重走行試験後の断面観察から、部分打替えにおける既設部との一体性の確保の重要性を示した。さらに、強制振動試験がこのような補強における補強効果の評価に有用であることを示した。

第 4 章では、RC 床版における ASR 劣化性状についてより実環境に即した評価を行うことを目的として、鋼主桁上に実物大の RC 床版を架設し、約 4 年間、屋外暴露環境下で各種計測を実施した。その結果、RC 床版における ASR 膨張が床版内部の鉄筋および鋼主桁による拘束の影響を受けることを明らかにし、このことにより床版内部および外部に特徴的なひび割れが生じることを示した。また、偏光顕微鏡観察および SEM-EDS 分析により ASR の劣化状況、進行状況の評価した。さらに、ASR 劣化の検知に対する強制振動試験の有効性を確認した。

第 5 章では、鋼主桁上実物大 RC 床版から試験体を切り出して静的載荷試験を行い、ASR が RC 床版の押抜きせん断耐力に及ぼす影響について検討を行った。さらに、鋼主桁上の実物大 RC 床版上で LMC を用いた部分打替えを行った後に、同様に試験体を切り出して静的載荷試験を行い、部分打替えによる押抜きせん断耐力の向上効果を評価した。その結果、ASR が中程度～顕著に進行した RC 床版では静的耐力が明らかに低下することが判明し、その破壊形態や耐荷機構が ASR により発生した水平方向のひび割れに依存することを示した。また、部分打替えにより、ASR 劣化した RC 床版の静的耐力が約 1.5 倍増加することを示し、部分打替えが静的耐力向上に有効であることを示した。

第 6 章では、本研究で得られた主な結果を各章ごとにまとめるとともに、今後の課題について述べた。

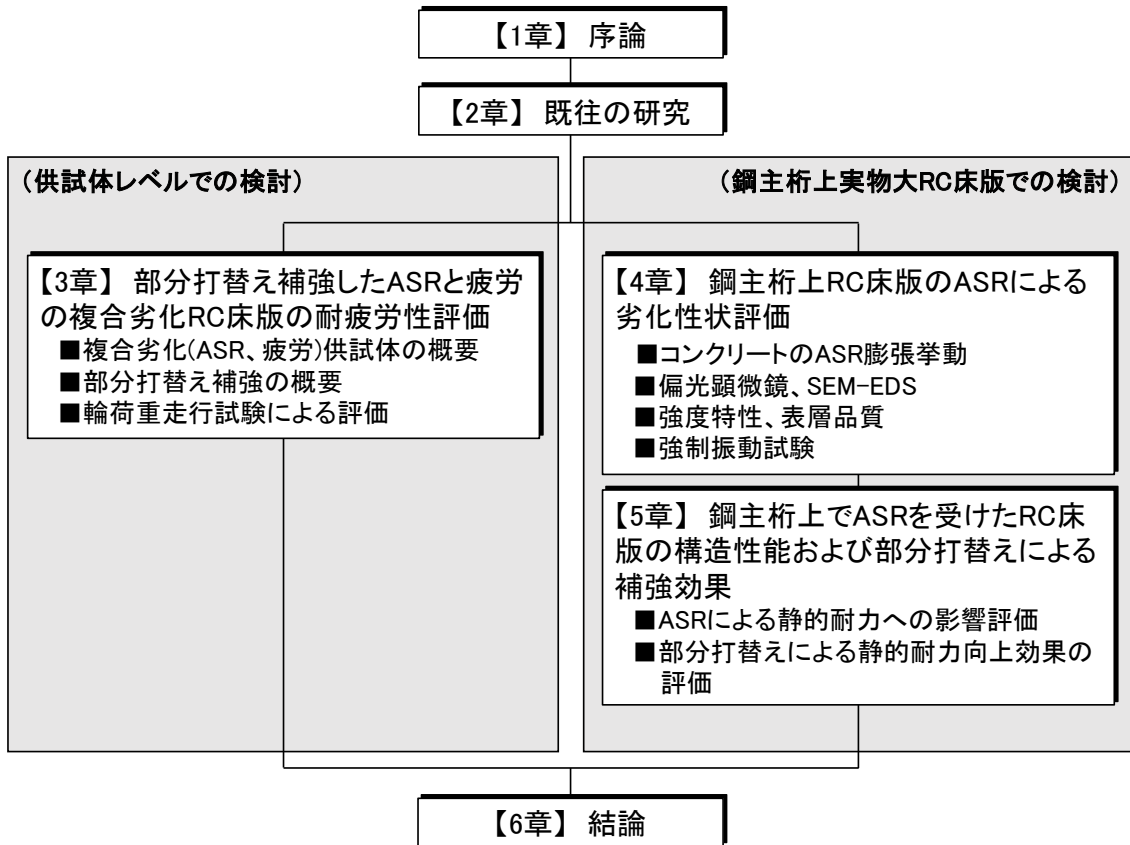


図-1.3.1 論文の構成



## 1 章の参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通白書 2020, pp.114, 2020.
- 2) 東・中・西日本高速道路株式会社：高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会報告書, 2014.
- 3) 首都高速道路株式会社：首都高速道路構造物の大規模更新のあり方に関する調査研究委員会報告書, 2013.
- 4) 阪神高速道路株式会社：阪神高速道路の長期維持管理及び更新に関する技術検討委員会提言, 2013.
- 5) 松井繁之：橋梁の寿命予測 - 道路橋 RC 床版の疲労需要予測 -, 安全工学, pp.432-440, 1991.
- 6) 飯岡豊, 桧貝勇, 村木宏行：鉄筋コンクリート床版の疲労試験, 日本道路公団試験所報告, 昭和 51 年度, pp.132-142, 1977.
- 7) 飯岡豊, 桧貝勇, 藤田信一：鉄筋コンクリート床版の疲労試験(第 2 報), 日本道路公団試験所報告, 昭和 52 年度, pp.198-209, pp.221-224, 1978.
- 8) 岡田清, 岡村宏一, 園田恵一朗, 島田功：道路橋鉄筋コンクリート床版のひび割れ損傷と疲労性状, 土木学会論文報告集, 第 321 号, pp.49-61, 1981.
- 9) 前田幸雄, 松井繁之：輪荷重動移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究, 第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.221-224, 1984.
- 10) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について, コンクリート工学年次論文集, Vol.9, No.2, pp.627-632, 1987.
- 11) 国土交通省国土技術政策総合研究所：道路橋床版の疲労耐久性評価に関する研究, 国総研資料, 第 472 号, pp.5-6, 2008.
- 12) 土木学会：鉄筋コンクリート構造の疲労破壊 - 破壊機構と性能評価の将来像を探る -, コンクリート技術シリーズ No.109, pp.204-228, 2015.
- 13) 川村満紀：コンクリート構造物の耐久性上の問題点とその対策 アルカリ骨材反応(その 1), コンクリート工学, pp.74-79, 1994.
- 14) 河野広隆, 古賀裕久：道路橋に見るアルカリ骨材反応の実態, 土木技術資料, Vol.47, No.12, pp.66-71, 2005.
- 15) 古賀裕久, 河野広隆, 渡辺博志：コンクリート構造物の健全度に関する実態調査結果, Vol.42, No.12, pp.58-63, 2000.
- 16) 日本コンクリート工学協会：作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書, 2008.
- 17) 日本コンクリート工学会：ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書, 2014.
- 18) 土木学会：道路橋床版の維持管理マニュアル 2020, p.84, 2020.
- 19) 伊戸康清, 島田守, 五島孝行, 柴田辰正, 大田孝二：アルカリシリカ反応で損傷した道路橋床版 - 橋梁インフラの維持補修事例の紹介 -, 土木技術資料 55-8, pp.56-59, 2013.

- 20) 前島拓, 子田康弘, 岩城一郎, 内藤英樹, 岸良竜, 鈴木康範, 大田孝二, 鈴木基行 : アルカリシリカ反応が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響, 土木学会論文集 E2, Vol.72, No.2, pp.126-145, 2016.

## 第2章 既往の研究

## 2.1 概説

本章では、本研究に関連する既往の研究と、本研究で取り組むべき課題を整理した。

まず2.2節でASRによるコンクリート構造物の劣化の現状として、ASR抑制対策の現状と、国内外のRC床版におけるASRの報告事例をとりまとめた。次に、ASRがRC部材の構造性能に及ぼす影響に関する既往の研究を整理し、2.3節でははりおよび柱について、2.4節ではRC床版についてとりまとめ、本研究分野における技術的課題を抽出した。2.5節では、ASRが生じたRC構造物に対する補修、補強方法に関する検討事例を収集、整理した。そして、最後にこれらの知見を整理し、本研究で取り組むべき課題を示した。

## 2.2 ASRによるコンクリート構造物の劣化の現状

### 2.2.1 ASRの抑制対策の現状

ASRは骨材のある種の鉱物とコンクリート中のアルカリ性の水溶液による反応により、コンクリート中に異常な膨張を引き起こす現象である<sup>1)</sup>。1986年にJIS A 5308「レディーミクストコンクリート」にASR対策が盛り込まれて以降、新設構造物でのASRの発生件数は大きく減少したとみられている<sup>2)3)</sup>。しかしながら、わが国の地質構造は極めて複雑であり、火山岩系、堆積岩系および変成岩系など多種多様な反応性骨材が存在する。ASRによる損傷状況は地域的条件、構造物の使用条件、環境条件でも大きく異なり、画一的な対策によりASRを抑制することは困難である<sup>4)</sup>。一部の機関では、反応性骨材の判定区分と判定区分に応じた抑制対策を独自に設定している<sup>5)</sup>ことから、現行の抑制対策が必ずしも十分でないことが窺える。現在もASRの発生が無くなったわけではなく、現行のASR劣化構造物の診断法や抑制対策の改善など、未だに解決すべき課題が多く残されていることが指摘されている<sup>6)</sup>。さらに、構造物のリスクに応じたASRの制御設計に向けた議論もなされており<sup>7)</sup>、ASRによるコンクリート部材への影響を明らかにすることが求められている。

### 2.2.2 ASRによるコンクリート構造物のひび割れ

ASRによるコンクリート構造物のひび割れは、環境条件や構造物の形状、応力状態、内部および外部からの拘束条件によって異なるものとなる<sup>8)</sup>。環境条件としては、降雨や日射に加えて路面排水などの局所的な使用状況の影響も大きく受ける。

拘束の影響については、無筋コンクリート構造物では表面に亀甲状のひび割れが生じるのに対し、RCやPC構造物では鉄筋やPC鋼材の拘束の影響を受け、これらの鋼材に沿ったひび割れが生じることが知られている。当然のことながら、RC床版においても内部に配置される主鉄筋および配力鉄筋の拘束の影響を受けるものと考えられる。これに加えて、道路橋RC床版においては、鋼主桁からも拘束を受ける可能性がある。非合成桁橋では、設計上はRC床版と鋼主桁間の力の伝達を考慮しないが、実際にはスラブアンカーを介して合成桁に近い挙動を示すとされる。三木ら<sup>9)</sup>は、供用下の既設非合成橋での載荷試験およびFEM解析により、非合成桁と設計されている場合でも実際には合成桁として挙動していることを示した。このことは、

RC床版におけるASR膨張が内部鉄筋に加え、鋼主桁の拘束の影響を受ける可能性があることを示唆している。

### 2.2.3 道路橋RC床版におけるASR劣化事例

これまでRC床版におけるASRの報告事例はほとんどなかった<sup>10)</sup>。これは、橋脚や橋台に比べRC床版は部材厚さが薄く、乾燥状態にあることによるものと考えられる。しかし、1990年に「スパイクタイヤ粉じんの発生の防止に関する法律」が施行されて以降、凍結防止剤が大量に散布されるようになった。凍結防止剤は主にNaClが使用されており、この外部から供給されるNaClは、反応性骨材を含むモルタルやコンクリートのASRを促進させることが確認されている<sup>11)</sup> <sup>12)</sup>。凍結防止剤散布環境下におけるコンクリート構造物の損傷状況の調査結果では、もともと反応性が低いコンクリートであっても、凍結防止剤に含まれるNaClの影響や凍害の影響により、ASRが促進される可能性があることが指摘されている<sup>13)</sup>。図-2.2.1に、橋梁点検結果による東北地方の橋梁におけるASRの発生状況の分布<sup>14)</sup>を示すが、凍結防止剤散布路線においてASRの発生が確定または疑われる橋梁が多く分布していることがわかる。このような影響により、近年では、RC床版におけるASRの発生事例や損傷事例が報告されるようになってきた。以下にその事例を示し、RC床版におけるASRの発生状況と劣化の特徴を整理する。

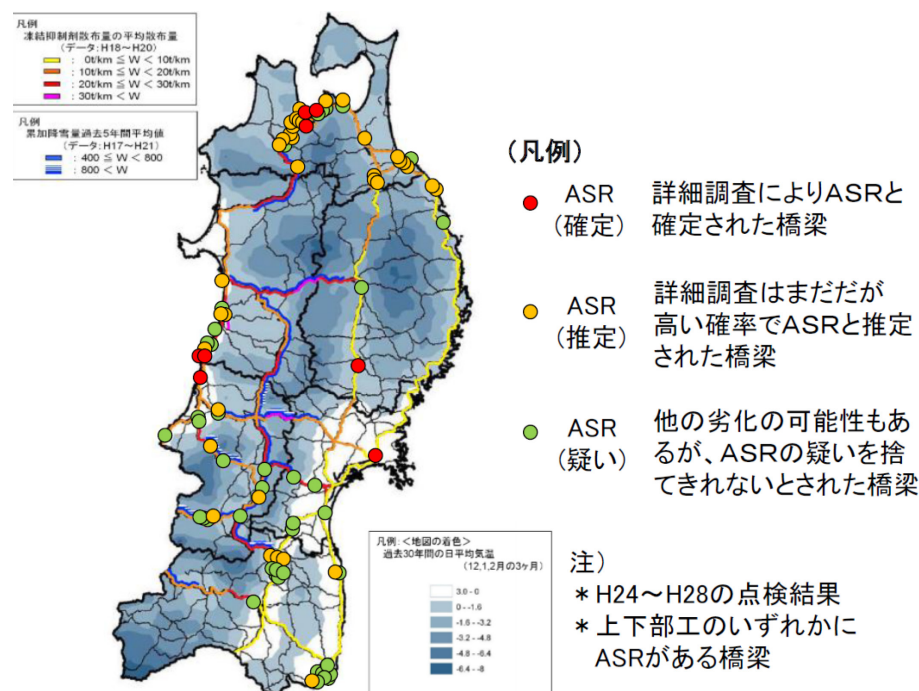


図-2.2.1 東北地方の橋梁におけるASRの発生状況の分布

伊戸ら<sup>15)</sup>は、福井県の国道 158 号線に架かる鋼鈹桁橋(昭和 42 年建設)の RC 床版における ASR 劣化事例を報告している。RC 床版は、昭和 39 年の道路橋示方書によって設計されており、3 本の主桁(桁間 2.8m)で支持された構造で、床版厚さは 18cm である。床版下面は、鋼板接着工法で補強されている。既設アスファルト舗装を撤去したところ、広範囲で床版コンクリートの砂利化がみられ、一部では鉄筋が露出している箇所もみられた(写真-2.2.1)。打音検査の結果では、床版全面にわたってコンクリートが脆弱化していることが確認され、損傷は輪荷重の走行位置に限定されるものではなかった。写真-2.2.2 は、現場から採取されたコアを蛍光樹脂含浸法により観察したものであるが、コアの水平方向に多数のひび割れが確認でき、特に下側鉄筋付近のひび割れ幅が大きかった。RC 床版の場合、橋軸および橋軸直角方向には十分に鉄筋が配置されているものの、鉛直方向にはほとんど鉄筋が配置されないため、相対的に ASR の膨張に対する拘束の小さい鉛直方向に大きく膨張した結果、水平方向のひび割れが卓越したと考えられている。また、床版下面に鋼板接着工法を施したことで、床版下面に滞水し、水的作用により ASR が促進されたことで、床版下側でより幅の大きなひび割れが生じたものと考えられる。なお、床版下面から行った鋼板の打音による調査では、ほとんどの部位で鋼板と床版の浮きが確認されている。このように、ASR が生じた RC 床版に対して床版の下側から補強を行う場合、上面から侵入した雨水の逃げ道がなくなり、再劣化を生じる可能性があることから、排水処置について事前によく検討を行う必要があるものと考えられる。



写真-2.2.1 露出した鉄筋

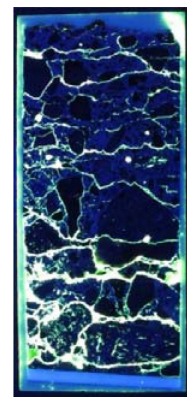


写真-2.2.2 ASRによるひび割れ

小林ら<sup>16)</sup>は、山間寒冷地である岐阜県飛騨地方の国道橋の RC 床版の劣化について詳細調査を行っている。対象橋梁は 1970 年竣工で、橋長 34m、総幅員 9.3m、設計床版厚 220mm の鋼単純非合成箱桁橋である。主な変状の特徴は、舗装路面の大きなポットホール、RC 床版上面の砂利化、RC 床版下面の多数の網目状ひび割れ、ひび割れに沿った白色の析出物、床版からの漏水および張出床版部、地覆部のスケーリングである。さらに、RC 床版撤去時の切断面には、全面にわたり水平方向のひび割れが多数確認された(写真-2.2.3)。コア供試体の観察から、粗骨材周りに反応リムおよび白色の析出物が確認され、変状の原因としては ASR および凍害の複合劣化と推定された。





写真-2.2.3 RC床版切断面の多数の水平ひび割れ

森ら<sup>17)</sup>は、北陸地方の山間部の積雪寒冷地にある供用30年以上の鋼桁RC床版について、JCI-DD3「骨材に含まれる有害鉱物の判定(同定)方法(案)」およびJCI-DD4「有害鉱物の定量方法(案)」に準拠し、ASRの発生の有無を調査している。その結果、粗骨材および細骨材に含まれる安山岩にASR反応性鉱物であるクリストバライトおよびガラスが相当量含まれることを確認し、安山岩に反応リムやASRゲルの滲出、ゲルで充填されたひび割れが認められた。RC床版下面には亀甲状のひび割れが発生し、上面では砂利化および水平方向のひび割れが確認されている。

牧ら<sup>18)</sup>は、山間部の国道の鋼単純合成桁橋(1973年竣工、供用後約45年経過)のRC床版の劣化について、偏光顕微鏡観察結果から主要な劣化要因をASRと推定している。野村ら<sup>19)</sup>は、北陸地方の高速道路橋および県道橋、中部地方の高速道路橋、東北地方の市道橋および町道橋においてASRが確認された事例を報告しており、一部のRC床版から採取したコアでは水平方向のひび割れを確認している。田中ら<sup>20)</sup>は、床版コンクリートの抜け落ちが生じた長野県松本市の単純RCT桁橋について詳細な調査を行い、コンクリートへの反応性骨材の使用とASRゲルの存在を確認している。児島ら<sup>21)</sup>は、昭和55年および昭和56年に建設された阪神高速道路西宮線および松原線のRC床版について、通常の直角に交わる2方向ひび割れと異なり、120°に交わるものが多数みられたことから、10年に渡る追跡調査を行い、残存膨張量等に疑問は残るものの、ひび割れの発生状況や使用骨材の産地、反応リムの存在などから、損傷原因をASRと判断している。奥石ら<sup>22)</sup>は、上越新幹線の消雪区間における高架橋のスラブでASRが確認された事例を報告している。

海外でも、1995年以降にベルギーのワロン地方の70橋において、「decay of the deck slabs」と名付けられた深刻なコンクリートの損傷が生じ、その原因がASRであったことが報告されている<sup>23)</sup>。なお、この時の変状の主な特徴は、RC床版下面の変色、水平方向のひび割れ、床版上面の砂利化であった。

このように、従来はASRの発生は少ないと言われてきたRC床版においても、ASRが多く生じていることがわかる。これらのASRが生じたRC床版の多くは積雪寒冷地にあり、凍結防

止剤の使用量の増加が ASR を促進した結果、ASR による劣化が顕在化した可能性が考えられる。これらの RC 床版に共通してみられる変状は、床版下面の亀甲状のひび割れや、床版上面の砂利化に加えて、床版の鉛直断面において水平方向のひび割れが多数生じていることである。

久保ら<sup>24)</sup>は、反応性骨材を使用したコンクリートを用いて RC 床版を模擬した供試体(幅 450×450mm, 厚さ 110mm)を作製し、40°Cの飽和 NaCl 溶液に浸漬することで、ASR が生じた実橋の RC 床版と同様の供試体側面の層状ひび割れを再現している。このひび割れは、床版部材においては、水平方向は主鉄筋および配力鉄筋の拘束を受けるものの、鉛直方向には鉄筋拘束が無い場合、鉛直方向に大きな膨張が生じた結果によるものとみられている。なお、実橋の RC 床版で見られる水平ひび割れは、ASR によるものと凍結融解によるものと両方あり得ると考えられるが、ASR 単独でも水平ひび割れが生じうることを久保らの結果は示している。

八戸自動車道に位置する檜山橋(PC3 径間連続合成桁, 昭和 61 年竣工)では、ASR による変状が著しいことから、一次床版の取替えに至っている<sup>25) 26)</sup>。一次床版下面は白色の析出物をともなったひび割れがみられ、上面はポットホールの発生、砂利化、鉄筋露出(腐食)が確認され(写真-2.2.4)、偏光顕微鏡観察や促進膨張試験の結果から、これらの劣化が ASR に起因するものであることが判明している。二次床版も残存膨張性を有することが確認されたものの、目立った劣化は見られず、比較的健全であると判断され、一次床版のみ取替えが行われている。



写真-2.2.4 檜山橋の一次床版の劣化状況(左:上面, 右:下面)

### 2.3 ASR が生じた RC 部材 (はり, 柱) の構造性能

ASR によりコンクリートにひび割れが生じると、円柱供試体レベルではコンクリートの圧縮強度および静弾性係数が低下し、特にその程度は静弾性係数で著しいことが知られている。一方、鉄筋コンクリート部材(以下、RC 部材)レベルでみると、ASR による構造性能への影響については、一般には鉄筋比が大きく、かつ ASR によるコンクリートの膨張が適切に拘束されるような鉄筋配置の場合には、ASR が生じても健全な RC 部材と比較して終局耐力はほぼ同等か、むしろ向上する場合もあるとされる。これは、ASR による膨張を鉄筋が拘束することにより生じるケミカルプレストレスによる効果と解釈されている。ただし、鉄筋比が極端に小さい場合などは耐力の低下が生じることも確認されている。また、ASR が載荷試験時の RC 部材の破壊モードに影響を及ぼした事例も報告されている。以下に、その詳細を述べる。



### 2.3.1 RC はりの静的耐力

小林<sup>27)</sup>, Fujii ら<sup>28)</sup>は, ASR 損傷を有する RC はり試験体の載荷試験を行っている. 試験体は, 幅 200mm, 高さ 200mm, 長さ 1700mm の長方形断面 RC はりであり, 引張鉄筋比, 圧縮鉄筋比, 腹鉄筋(スターラップ)比を試験要因としている. ASR による膨張が生じたことで, 鉄筋比に応じて引張主鉄筋には  $650\sim 1300 \times 10^{-6}$ ,  $1400\sim 1800 \times 10^{-6}$  程度の引張ひずみが生じ, このことはコンクリート断面には逆に圧縮応力が誘起されたことを示しており, この内部応力は一種のケミカルプレストレスと考えることができるとしている. ASR が生じたはり部材では, 多数のひび割れが生じてたものの, 同一配筋の健全なはり部材と比較して, 終局耐力はほぼ同等であった. 図-2.3.1 に, 載荷試験における荷重-たわみ関係を示す. 円柱供試体では, ASR が生じることによりコンクリートの弾性係数は 1/3 程度にまでに低下したにも関わらず, ASR の有無による低荷重レベルでの初期たわみには明確な差異は認められず, 部材剛性についても, 健全なはりと同様以上を保持したとしている.

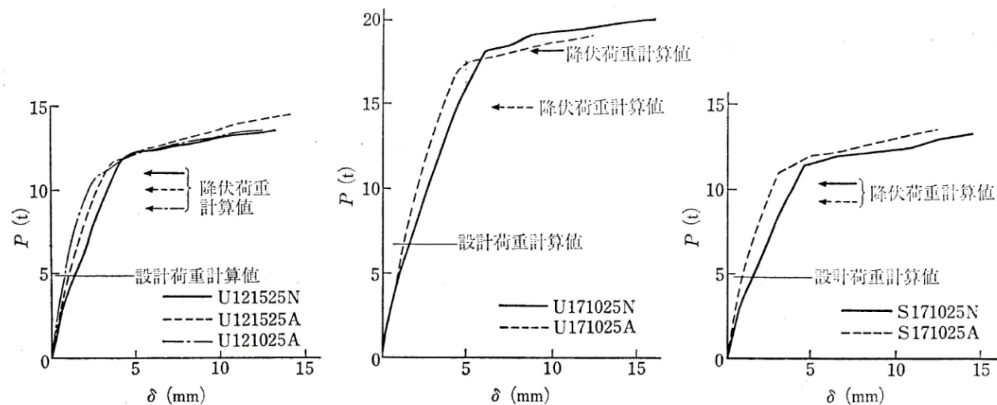


図 2.3.1 荷重-たわみ関係

小柳ら<sup>29)</sup>, Multon ら<sup>30)</sup>も同様に RC はり試験体の載荷試験の結果, アルカリ骨材反応による耐力低下は認められなかったと報告している. 棚橋ら<sup>31)</sup>は,  $40^{\circ}\text{C}$  散水養生による促進養生を約 4 ヶ月行った後, 約 2 年および約 5 年保管した RC はり試験体の載荷試験結果を比較することで, ケミカルプレストレスの効果が約 5 年経過した時点でも持続していたことを報告している. 岡田ら<sup>32)</sup>は, ASR が生じた RC はり試験体の載荷試験を行い, 円柱供試体の圧縮強度が 25~65% 低下したにも関わらず, RC はり試験体の終局耐力は, 健全なものと比較して鉄筋量に関わらず 10~20% の低下に留まったと報告している. Fan ら<sup>33)</sup>は, 事前に載荷により曲げひび割れを生じさせ, さらに曲げひび割れ発生荷重相当の載荷を継続したまま ASR 促進養生を行った試験体についても, 健全時と比較して曲げ耐力の低下はみられなかったとしている. Monette ら<sup>34)</sup>は, 事前に静的または動的に載荷を行った場合においても, ASR の有無による曲げ耐力の違いは認められなかったとしている. Abe ら<sup>35)</sup>は, ASR を生じさせたはり試験体のせん断耐力は, 健全時と比較してわずかに大きくなったと報告している. Blight ら<sup>36)</sup>は, ASR が生じたポータ

ルラーメン橋において載荷試験を行い、梁のたわみを計測した結果、構造的な危険性はなかったとしている。

ASR によりコンクリート部材の破壊モードが変化することが指摘されており、ASR が生じることではりの破壊モードがせん断破壊から曲げ破壊に移行する場合があること<sup>37)</sup>や、その逆に曲げ破壊からせん断破壊に変化する場合があること<sup>38)</sup>が報告されている。高木ら<sup>39)</sup>は、主鉄筋が定着部で破断している場合や、スターラップが折り曲げ部で破断している場合を想定し、せん断補強鉄筋および主鉄筋のフックの有無を要因とした RC はりの載荷試験を行っている。その結果、せん断補強鉄筋のない試験体においても、ASR によってせん断耐力は向上し、また破壊モードがせん断破壊から曲げ破壊に移行した場合があることを示した。せん断耐力の向上は、ケミカルプレストレスの作用に加え、せん断補強鉄筋が配置されていない場合には、ASR によるひび割れが部材軸方向に卓越して発生し、載荷時に斜めひび割れが一気に進展するのではなく、ASR による水平ひび割れが徐々に開口していくという形で発達することも寄与していると考えられている。松田ら<sup>40)</sup>も ASR による鉄筋破断を想定し、引張鉄筋の端部定着の有無を要因とした載荷試験を行っている。その結果、ASR が生じたことでせん断耐力自体は向上したものの、端部定着の有無に関わらず、ASR が生じた試験体は引張鉄筋定着部におけるコンクリートの付着割裂破壊(図-2.3.2)で終局したと報告している。これは、載荷に先行して ASR により生じていたひび割れにより、鉄筋とコンクリート間の付着が低下したことによるものとみられている。

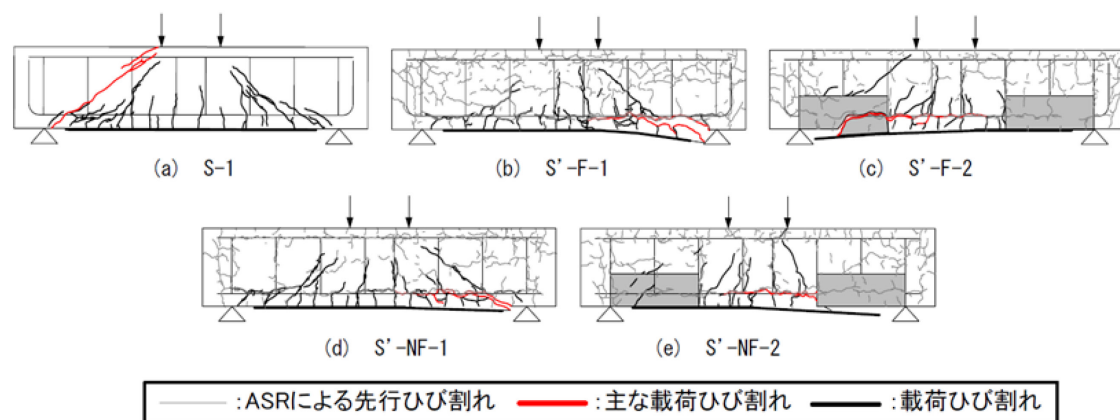


図 2.3.2 ASR が生じた RC はり部材のひび割れ

一方、小柳らは<sup>41)</sup>、極端に鉄筋比を小さくした RC はりにおいては、ASR が生じることで耐力低下および変形性能の低下が生じる場合があることを示している。試験体の寸法は幅 100mm、高さ 180mm、長さ 1700mm とし、鉄筋比を 0.13~0.92% の範囲で変化させ、載荷試験を実施している。この時、曲げひび割れが生じると同時に鉄筋が降伏する最小鉄筋比が 0.2% となる。その結果、最小鉄筋比以下の試験体においては、健全なものと比較して曲げ耐力が小さくなり、また鉄筋の破断により塑性変形域が小さい段階ではりの最終破壊が生じた。この原因

として、ケミカルプレストレスが小さかったこと、ASR 膨張拘束時に鉄筋が降伏し伸び能力が減少していたことを挙げている。蓑田ら<sup>42)</sup>は、PC はり部材ではあるが、約 15 ヶ月の屋外暴露後の載荷試験により、ASR が生じることで曲げ耐力が低下する場合があるとしている。ASR によるひび割れが載荷試験時の上縁側のコンクリートの剥離をもたらし、圧縮域の減少を生じたことが影響したものと考察している。

### 2.3.2 RC 柱の静的耐力

RC 柱についても、ASR の影響はおおむね RC はりと同様のものである。らせん鉄筋柱<sup>43)</sup>および帯鉄筋柱<sup>44)</sup>を用いた検討において、同一強度の場合は ASR が生じた RC 柱の終局耐力は ASR を生じていない柱より 10~25%高くなったとの報告がある。棚橋ら<sup>31)</sup>は、試験体の寸法を幅 100×100cm、高さ 400mm とし、軸鉄筋比と帯鉄筋間隔を試験要因として、載荷試験を実施している。その結果、無筋コンクリートの場合は ASR により 40%程度耐力低下がみられるものの、鉄筋比の増加に伴い健全な試験体との差は小さくなることから(図-2.3.3)、RC 柱では ASR により大きな耐力低下はみられなかったと結論づけている。

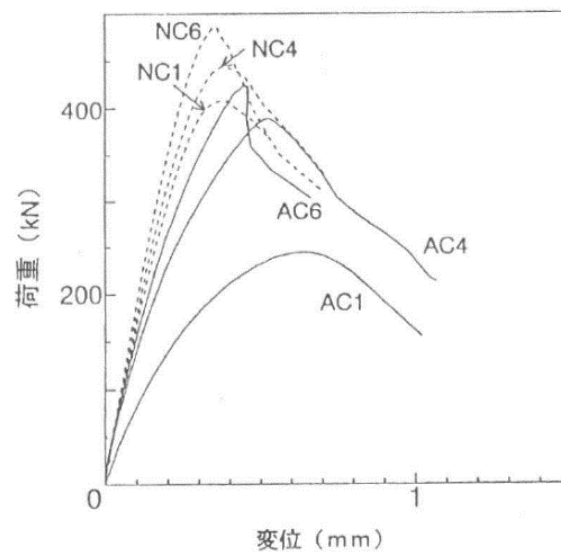


図 2.3.3 ASR が生じた RC 柱の荷重-変位関係

### 2.3.3 繰返し荷重下の挙動

地震時のように正負交番の過大な変形を受ける場合についても、ASRによるRC部材の挙動に関する研究が行われている。小林ら<sup>45)</sup>、小野ら<sup>46)</sup>、岩波ら<sup>47)</sup>はRC柱試験体に対して、三桶ら<sup>48)</sup>はRCはり試験体に対して正負の交番水平載荷試験を行っているが、いずれも耐力の低下はみられなかったとしている。ただし、岩波ら<sup>47)</sup>は、ASRにより鉄筋とコンクリートの付着の低下やかぶりコンクリートの劣化が生じ、試験体の破壊過程および破壊形態が若干異なる様相を示すことや、塑性変形抵抗性能やエネルギー吸収性能が低下することを示している。井上ら<sup>49)</sup>は、矩形断面RCはり部材について正負交番載荷試験を行っている。その結果、主鉄筋を矩形断面の上下非対称に配置した試験体ではASRにより最大耐力や変形性能が若干劣る傾向がみられ、ASRにより損傷を生じている場合に繰返し荷重を受けると、早期に圧縮域コンクリートが劣化する可能性があるとしている。久保ら<sup>50)</sup>は、RCはり試験体に対し正負交番載荷試験を行い、ASRにより最大耐力および変形性能が若干低下したと報告している。

## 2.4 ASRが生じたRC床版の構造性能

### 2.4.1 RC床版の静的耐力および疲労耐力

#### (1) 静的耐力の算定式

RC床版のようなスラブ状の部材(面部材)に局部的に荷重が作用する場合や柱からの荷重を直接支えるフーチングなどの場合、載荷部分を頂点としてコンクリートが円錐状に押し抜けるようにせん断破壊することがあり、このような破壊形状を押抜きせん断破壊という<sup>51)</sup>。

スラブは高次の不静定構造であり、その破壊は使用材料や断面諸数値等の部材条件、荷重の作用条件、支持方法などの影響を受け、破壊機構は非常に複雑である<sup>52)</sup>。このため、耐力算定法は実験式に頼るところが大きい。以下に、これまで提案されているスラブの押抜きせん断耐力の算定式のうち、主なものを示す。

#### (a) 角田式<sup>53)</sup>

角田ら<sup>53)</sup>は、合計60体の普通コンクリートを用いた単純支持RCスラブの実験結果から、以下のRCスラブの押抜きせん断耐力算定式を提案した。

$$P=0.674(b_0+3\pi d)d(\sigma_{CB})^{1/2}\{1+0.5p\sigma_{sy}/(\sigma_{CB})^{1/2}\} \quad (2.1)$$

ただし、 $p\sigma_{sy}/(\sigma_{CB})^{1/2}>3.33$  のときは、 $p\sigma_{sy}/(\sigma_{CB})^{1/2}=3.33$  とする

ここで、 $b_0$  : 載荷版の周長

$d$  : 有効高さ

$\sigma_{CB}$  : コンクリートの圧縮強度

$p$  : 鉄筋比

$\sigma_{sy}$  : 鉄筋の降伏強度

(b) 土木学会式<sup>54)</sup>

土木学会コンクリート標準示方書<sup>54)</sup>では、スラブの押抜きせん断耐力が、基本的にはりのせん断耐力算定式と同様の形式で表されるものと仮定し、以下の押抜きせん断耐力算定式を示している。本式では、載荷版端部から  $d/2$  の位置の垂直面を仮想の押抜きせん断破壊面としている。

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_\gamma \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d / \gamma_b \quad (2.2)$$

$$f_{pcd} = 0.2f_{cd}^{1/2} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad \text{ただし, } f_{pcd} \leq 1.2\text{N/mm}^2$$

$$\beta_d = (1000/d)^{1/4} \text{ (d:mm)} \quad \text{ただし, } \beta_d > 1.5 \text{ となる場合は } 1.5 \text{ とする}$$

$$\beta_p = (100p_v)^{1/3} \quad \text{ただし, } \beta_p > 1.5 \text{ となる場合は } 1.5 \text{ とする}$$

$$\beta_\gamma = 1 + 1/(0.25u/d)$$

ここで、 $V_{pcd}$  : 設計押抜きせん断耐力

$f_{cd}$  : コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

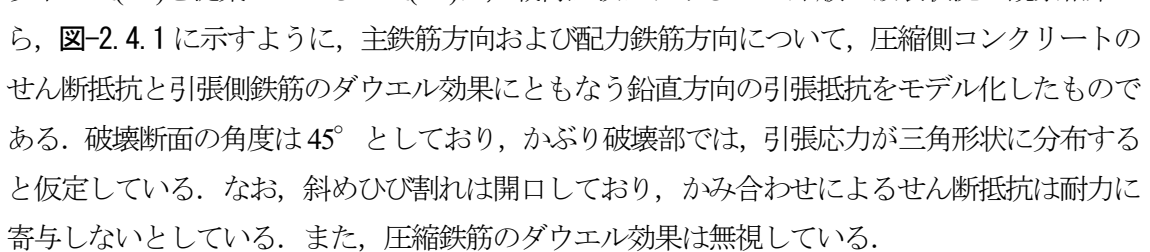
$u$  : 載荷面の周長

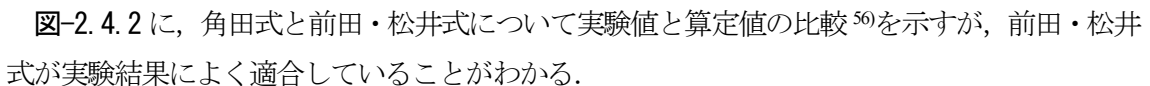
$u_p$  : 照査断面の周長で、載荷面から  $d/2$  離れた位置で算定するものとする

$d$  および  $p$  : 有効高さおよび鉄筋比で、二方向の鉄筋に対する平均値とする

$\gamma_b$  : 一般に 1.3 としてよい

(c) 前田、松井式<sup>55)</sup>

前田、松井ら<sup>55)</sup>は、道路橋 RC 床版の実験結果に角田らの提案式を適用したところ、実験値が計算値を大きく上回ったことから、比較的版厚の薄い道路橋 RC 床版に限定されるものの、以下の式(2.3)を提案している。式(2.3)は、載荷試験における RC 床版の破壊状況の観察結果から、に示すように、主鉄筋方向および配力鉄筋方向について、圧縮側コンクリートのせん断抵抗と引張側鉄筋のダウエル効果にともなう鉛直方向の引張抵抗をモデル化したものである。破壊断面の角度は 45° としており、かぶり破壊部では、引張応力が三角形に分布すると仮定している。なお、斜めひび割れは開口しており、かみ合わせによるせん断抵抗は耐力に寄与しないとしている。また、圧縮鉄筋のダウエル効果は無視している。

に、角田式と前田・松井式について実験値と算定値の比較<sup>56)</sup>を示すが、前田・松井式が実験結果によく適合していることがわかる。

$$P = f_v \{ 2(a+2x_m)x_d + 2(b+2x_d)x_m \} + f_i \{ 2(4C_d + 2d_d + b)C_m + 2(a+2d_m)C_d \} \quad (2.3)$$

$$f_v = 0.656f_c^{0.606} \quad (2.4)$$

$$f_i = 0.269f_c^{2/3} \quad (2.5)$$

ここで、 $P$  : 押抜きせん断耐力

$a, b$  : 載荷版の主鉄筋、配力鉄筋方向の辺長

$x_m, x_d$  : 主鉄筋、配力鉄筋に直角な断面の引張側コンクリートを無視したときの中立

軸深さ

- $d_m, d_d$  : 引張側主鉄筋, 配力鉄筋の有効高さ
- $C_m, C_d$  : 引張側主鉄筋, 配力鉄筋のかぶり深さ
- $f_c$  : コンクリートの圧縮強度
- $f_v$  : コンクリートのせん断強度
- $f_t$  : コンクリートの引張強度

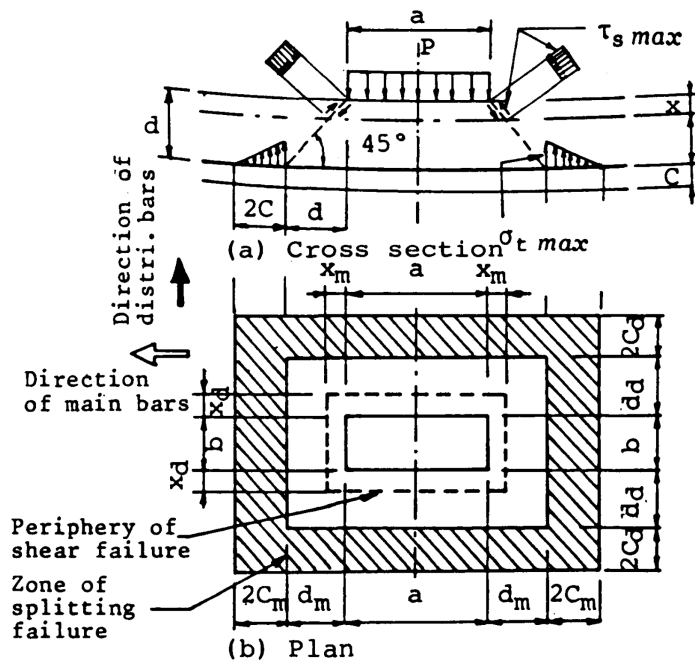


図-2.4.1 押抜きせん断耐力算定モデル

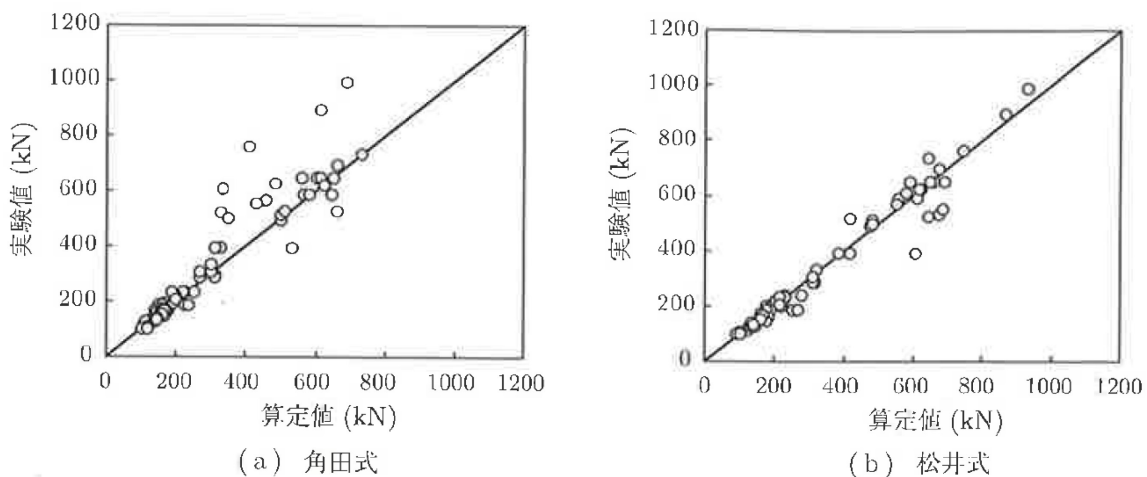


図-2.4.2 押抜きせん断耐力の実験値と算定値の比較

## (2) 疲労耐力の算定式

繰返し荷重を受ける RC スラブの押抜きせん断に対する疲労強度についても、実験結果に基づき算定式が提案されている。以下に、その主なものを示す。

### (a) 角田式<sup>57)</sup>

角田ら<sup>57)</sup>は、長辺を単純支持、短辺を自由とする一方向スラブにおける実験結果をもとに、以下の疲労押抜きせん断強度式を提案した。なお、角田らの実験においては、荷重はスラブ中央位置に固定して作用させている。

$$\log N = 14(0.85 - S_0) / (0.85 - S_u) \quad (2.6)$$

ここで、 $N$  : 破壊回数

$S_0$  : 上限荷重/静的破壊荷重比

$S_u$  : 下限荷重/静的破壊荷重比

### (b) 土木学会式<sup>54)</sup>

土木学会コンクリート標準示方書<sup>54)</sup>では、角田ら<sup>57)</sup>の研究成果に基づき、せん断補強筋のない面部材について、設計疲労耐力式を示している。なお、角田らの実験値がほぼ 200 万回以下の範囲のものであるため、本式は繰返し回数が 200 万回程度以下の範囲で適用することが望ましいとしている。また、移動する荷重が繰返し作用する場合、荷重が固定されている場合より押抜きせん断疲労耐力が著しく低下することが明らかとなっているため、荷重が移動する場合には本式は適用してはならないとしている。

$$V_{rpd} = V_{pcd} \left( 1 - V_{pd} / V_{pcd} \right) \left( 1 - \frac{\log N}{14} \right) \quad (2.7)$$

ここで、 $V_{rpd}$  : 設計押抜きせん断疲労耐力

$V_{pcd}$  : 設計押抜きせん断耐力

$V_{pd}$  : 永久荷重作用時の設計押抜きせん断力

$N$  : 繰返し回数

### (c) 松井式<sup>58)</sup>

道路橋 RC 床版においては、昭和 40 年代初頭に建設後まもない時期にコンクリートが部分的に抜け落ちるという問題が多く発生した<sup>58)</sup>。この損傷は床版下面に亀甲上のひび割れをともない、また比較的重交通路線で多くみられたことから、コンクリートの疲労現象として捉えられ、定点繰返し載荷試験による疲労実験が行われるようになった<sup>59) 60)</sup>。しかしながら、この定点繰返し載荷では、供試体のひび割れ発生状況や破壊までの回数等で実橋の損傷状況との乖離がみられた。これに対し、載荷点を移動させる繰返し載荷試験を行った所、実橋に近いひび割れが

再現されたことから、輪荷重の移動繰返し载荷が損傷の主な要因と考えられるようになった<sup>61)</sup>。その後、松井らにより開発された輪荷重走行試験機による実験により、RC床版の損傷メカニズムが解明された<sup>62)</sup>。

輪荷重走行試験により算出されるS-N曲線は配力鉄筋比や床版厚さなどの床版の諸元により異なるが、松井らはこれらの違いを統一的に表現可能なS-N曲線式として、以下を提案した<sup>58)</sup>。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.007835 \log N + \log 1.52 \quad (2.8)$$

ここで、 $P$  : 载荷荷重

$P_{sx}$  : 梁状化したRC床版の押抜きせん断耐力

$N$  : 走行回数

梁状化したRC床版の押抜きせん断耐力 $P_{sx}$ は、輪荷重走行試験において、非常に早い時期から床版上下面で発生したひび割れが貫通し、梁状化現象が生じることを考慮したものであり、以下の式で表現される。

$$P_{sx} = 2B(\tau_{smax} \cdot x_m + \sigma_{tmax} \cdot C_m) \quad (2.9)$$

ここで、 $x_m$  : 主鉄筋断面の引張側コンクリート無視時の中立軸有効高さ(mm)

$C_m$  : 引張側の主鉄筋のかぶり(mm)

$\tau_{smax}$  : コンクリートの最大せん断応力度(N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{tmax}$  : コンクリートの最大引張応力度(N/mm<sup>2</sup>)

$B$  : 梁状化した時の梁の幅(mm)

なお、 $B = b + d_d$

$b$  : 配力鉄筋方向の载荷版辺長(mm)

$d_d$  : 配力鉄筋の有効高さ(mm)

松井ら<sup>63)</sup>は、RC床版上面に湛水させた状態で輪荷重走行試験を行うことで、水の影響下では乾燥状態と比較してRC床版の耐疲労性が大きく低下することを明らかにし、水の影響下のRC床版のS-N曲線式として、以下を提案した。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.007835 \log N + \log 1.23 \quad (2.10)$$



## 2.4.2 ASRが生じたRC床版の静的耐力および定点疲労耐力

RCはりやRC柱などの部材における検討により、ASRによるコンクリートの膨張が適切に拘束される場合には、ASRが生じても健全なRC部材と比較して大きな終局耐力の低下はないとされる。一方、一般にせん断補強筋が配置されないRC床版のようなスラブ状の部材においては、ASRによる膨張に対する内部鉄筋の拘束が不十分となる可能性が考えられる。ただし、RCスラブの構造性能に及ぼすASRの影響に関する研究は数少なく、十分な知見が集まっているとは言い難い。

内田ら<sup>64)</sup>は、鉄筋比を変化させた幅800×800mm、厚さ80mmのRCスラブ試験体について4辺単純支持による中央載荷方式による載荷試験を行っている。そこで得られた結果は、ASRが生じた試験体の耐力はASRが生じていない試験体と同等もしくはそれ以上になったとするものであり、RCはりやRC柱における検討で得られている知見と同様なものであった。児島ら<sup>21)</sup>は、H-300型鋼上にRC床版供試体を作製し、促進養生によりコンクリート表面で約 $800 \times 10^{-6}$ の膨張を生じさせた後に静的載荷試験を行っているが、ASRによる床版剛性、曲げひび割れ発生荷重、破壊荷重の低下は認められなかったとしている。Clarkら<sup>65)</sup> <sup>66)</sup>も、ASRによるスラブの押抜きせん断耐力への顕著な影響は見られなかったとするものの、 $6000 \times 10^{-6}$ を超えるような過大な膨張を生じた場合には、押抜きせん断耐力の低下が生じたと報告している。田附ら<sup>67)</sup>は、ASRにより損傷を生じた完成後約24年経過している鉄道ラーメン高架橋からRCスラブ部材を切出し、気中および水中条件下で定点押抜きせん断繰返し試験を行っている。切出したRCスラブ部材の切断面には水平方向に層状のひび割れが見られ、載荷試験における斜めひび割れの発生角度にASRの影響が見られたものの、疲労強度は健全な試験体の実験結果と同程度という結果であった。これらの結果に対し、小林ら<sup>68)</sup>は、下段にのみ鉄筋を配置したRCスラブ試験体の押抜きせん断強度が、健全なものと比較して顕著に低下した結果を報告している

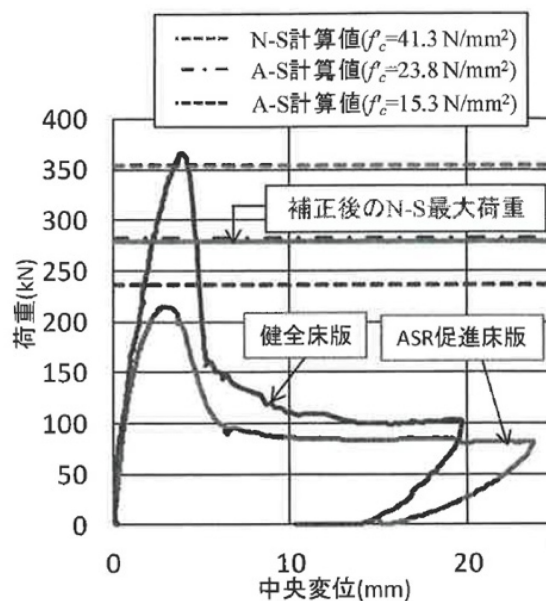


図-2.4.3 ASRが生じたRCスラブ試験体の押抜きせん断試験結果

(図-2.4.3). この理由として、床版下側だけに ASR 膨張の拘束効果が生じ、上側はむしろ引張拘束域となったことによるものと考察している。なお、疲労強度についても、静的耐力に従い小さくなったとしている。

子田ら<sup>69)</sup>は、福井県の一般国道で約 45 年供用されていた道路橋 RC 床版から切り出した試験体を用いて押抜きせん断試験を行った結果、ASR に起因する層状にひび割れにより鉄筋とコンクリート間の付着が低下し、当初の押抜きせん断耐力が発揮されない可能性があることを指摘している。

### 2.4.3 ASR が生じた RC 床版の移動荷重に対する疲労耐力

ASR が生じた RC 床版の移動輪荷重に対する抵抗性は明らかとなっていない部分が多いが、この点について、著者を含む前島らの研究グループは、輪荷重走行試験試験機を用いた実験的検討を行っている<sup>70)</sup>。

試験体は、実物大に近い幅 2000mm、長さ 3000mm、厚さ 160mm の複鉄筋 RC 床版試験体である。ASR を生じさせるために、コンクリートには反応性粗骨材を使用し、NaCl を  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  で  $10\text{kg}/\text{m}^3$  添加した。ASR 促進における環境条件は、 $50^\circ\text{C}$ 、80%RH 環境下で飽和 NaCl 溶液を試験体上面に湛水するという急速な促進環境(急速試験、記号:R)と、屋外環境下で 5%NaCl 溶液に浸漬するという緩やかな促進環境(緩速試験：記号 S)の 2 種類である。図-2.4.4 に、試験体中央に設置した埋込み型ひずみ計で測定したコンクリートのひずみを示すが、急速試験を行った場合は、比較的早期に鉛直方向(z)で  $3000\sim 5000 \times 10^{-6}$  程度の大きな膨張が生じているのに対し、緩速試験を行った場合は ASR による膨張が緩やかに生じていることがわかる。緩速試験を行った場合の鉛直方向の膨張は  $1300 \times 10^{-6}$  程度であった。

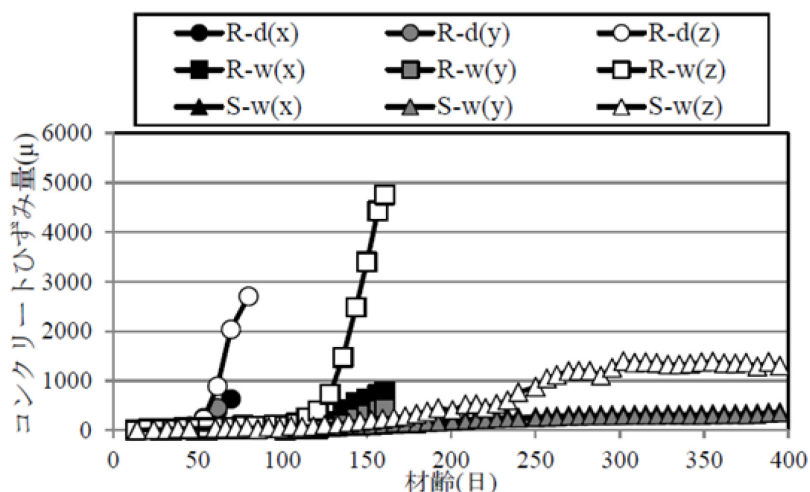


図-2.4.4 ASR 促進試験下の試験体のひずみ

輪荷重走行試験時の床版上面は、乾燥(記号:d)と水張り(記号:w)の 2 条件としている。クランクアーム式の輪荷重走行試験機を用いて、段階載荷方式により載荷した。図-2.4.5 に、活荷重

たわみと等価繰返し走行回数との関係を示す。健全な試験体(N-d)と比較して、ASRを急速に生じさせた試験体は疲労破壊に至るまでの走行回数が大きく、ASRがRC部材の静的耐力に及ぼす影響に関する従来の知見と同様に、ケミカルプレストレスにより耐疲労性が向上するという結果になった。一方、ASRを緩やかに生じさせた場合(S-w)は、疲労寿命が顕著に低下していることがわかる。このようにASRが生じたRC床版の耐疲労性は、ASR促進条件に大きな影響を受けることが明らかとなっている。

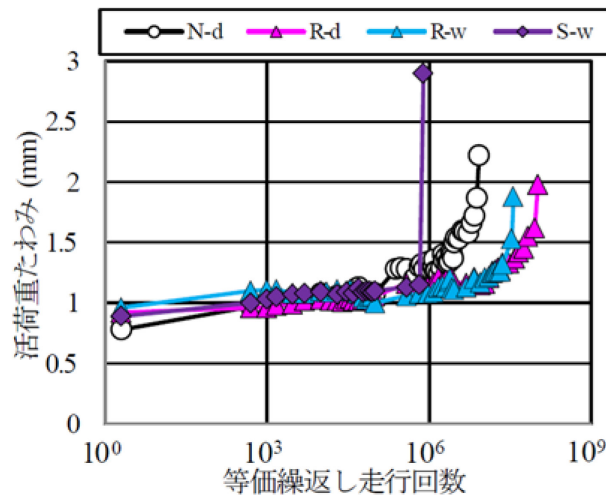


図-2.4.5 活荷重たわみと等価繰返し走行回数との関係

ASRによるコンクリート構造物の劣化が顕在化するには数年から数十年の長期間を有することを考慮すると、RC部材の構造性能へのASRの影響に関する検討は、より実環境に即した条件下で実施することが重要であると考えられる。表-2.4.1に、既往の研究におけるASR促進条件を示すが、多くは40℃以上の高温高湿度環境下で急速にASRを生じさせる方法がとられており、実環境を反映した検討事例は少ないことがわかる。また、ASRが生じることで耐疲労性が低下する可能性があることから、このような損傷が生じたRC床版においては、構造性能を回復または向上させる補強を行う必要があることが示唆される。

表-2.4.1 既往の研究における ASR 促進の方法

文献 No.	著者	反応性骨材	アルカリ添加*	ASR 促進養生条件
21	児島ら	粗骨材	NaCl, 6.8kg/m <sup>3</sup>	40°C, 100%RH(約 6 ヶ月)
27	小林	粗骨材	NaOH, 6kg/m <sup>3</sup>	40°C, 100%RH(約 5 ヶ月)
28	Fujii ら	粗骨材	NaOH, 6kg/m <sup>3</sup>	40°C, 100%RH(約 5 ヶ月)
29	小柳ら	粗骨材	NaOH, セメントの 2.3%	40°C, 散水養生
30	Multon ら	粗骨材	KOH, セメントの 1.25%	38°C, 下面浸漬(14 ヶ月) →38°C, 全面浸漬(9 ヶ月)
31	棚橋ら	粗骨材	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> , セメントの 3%	40°C, 散水養生(約 4 ヶ月)
32	岡田ら	粗骨材	NaCl, セメントの 4%	38°C, 100%RH(約 19 ヶ月) 屋外気中養生(約 19 ヶ月)
32	Fan ら	粗骨材	-	0.5N アルカリ溶液浸漬, 40°C(5~7 日)⇔24°C(2 日) (1 年)
34	Monette ら	細・粗骨材	NaOH, 1.48kg/m <sup>3</sup>	38°C, 1N NaOH 浸漬(147 日)
35	Abe ら	粗骨材	NaOH, NaCl, NaNO <sub>2</sub> , 5.8kg/m <sup>3</sup>	40°C(532 日)
37	小柳ら	粗骨材	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> , セメントの 3%	40°C, 散水養生(約 4 ヶ月)
39	高木ら	細・粗骨材	NaCl, 12kg/m <sup>3</sup>	35~40°C, 100%RH(約 8 ヶ月)
40	松田ら	細・粗骨材	NaCl, 8kg/m <sup>3</sup>	屋外暴露(約 12 ヶ月)
41	小柳ら	細・粗骨材	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> , セメントの 3%	40°C, 100%RH(約 12 ヶ月)
42	藁田ら	細・粗骨材	NaCl, 10kg/m <sup>3</sup>	屋外暴露(約 15 ヶ月)
43	Takemura ら	粗骨材	NaOH, 7kg/m <sup>3</sup>	38°C, 100%RH(16 週間)
44	竹村ら	粗骨材	NaOH, 7kg/m <sup>3</sup>	40°C, 100%RH
45	小林ら	粗骨材	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> , セメントの 1%	38°C, 100%RH(8 ヶ月) →60°C, 100%RH(3 ヶ月)
46	小野ら	粗骨材	NaOH, セメントの 2.5%	40°C, 90%RH 以上(4 ヶ月) →屋外暴露(18 ヶ月)
47	岩波ら	粗骨材	NaOH, 8kg/m <sup>3</sup>	屋外暴露(18 ヶ月, 36 ヶ月)
48	三桶ら	粗骨材	NaOH, セメントの 2.5%	記載なし
49	井上ら	粗骨材	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> , 12kg/m <sup>3</sup>	20°C, 湿布(4.5 ヶ月) →40°C, 100%RH(約 24 ヶ月)
50	久保ら	粗骨材	Na <sub>2</sub> NO <sub>2</sub> , NaCl, 12kg/m <sup>3</sup>	40°C, 100%RH(約 23 ヶ月)
64	内田ら	粗骨材	NaOH, セメントの 3%	20°C, 気中養生(8 ヶ月) →40°C, 100%RH(4 ヶ月)
65	Clark ら	細骨材	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 2.83kg/m <sup>3</sup>	38°C, 水中浸漬
66			K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 6.65kg/m <sup>3</sup>	
67	田附ら	-	-	実橋梁から切出し
68	小林ら	粗骨材	NaCl, 10kg/m <sup>3</sup>	封かん養生(28 日)→50°C, 飽和 NaCl 溶液浸漬(8~10 ヶ月)
69	子田ら	-	-	実橋梁から切出し
70	前島ら	粗骨材	NaCl, 10kg/m <sup>3</sup>	50°C, 80%RH, NaCl 溶液湛水 (約 1 ヶ月)
72	Ohno ら	粗骨材	NaOH, 8.31kg/m <sup>3</sup>	屋外, 45 ヶ月

\*アルカリ量は, Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> 換算値

## 2.5 ASRが生じたコンクリート構造物に対する補修・補強方法

ASRが生じたコンクリート構造物では、その劣化状況に応じて低下した耐久性および耐荷性を回復、向上させるために、適切な補修・補強を行う必要がある。しかしながら、ASRによる劣化がRC部材の耐久性や力学性能に及ぼす影響については体系的に整理されておらず、ASRにより損傷を受けたコンクリート構造物について補修、補強方法は確立されていないのが現状である。

ASRに対する補修では、主に今後のASRによる膨張を抑制するために、①劣化因子の遮断、②ゲルの非膨張化、③外部拘束によるコンクリートの膨張拘束、などを目的とした対応がとられている。なお、劣化状況に応じて、補修工法としてひび割れ注入や断面修復なども併用される。

ASRの劣化因子の遮断については、ASRによるコンクリートの膨張がゲルの吸水に起因するものであることから、外部からの水分の供給の遮断に着目して、遮水系および撥水系の表面被覆工法が採用されている。Durand<sup>71)</sup>は、ASRが生じた送電線の鉄塔の基礎コンクリートについて6年間の長期計測を行い、ゴム系の防水層によりコンクリートの膨張が低減できたとしている。これらの表面被覆工法は、コンクリートの部材の構造耐力には影響を及ぼさないとされている<sup>72)</sup>。一方で、表面被覆工法では、コンクリート内部の水分による膨張の恐れや、進行するひび割れに追従しうる伸び能力の必要性、ひび割れ進展以降の撥水効果の低下などが生じる恐れが指摘されている<sup>73) 74)</sup>。また、背面土砂からの水分供給を受ける橋台などのように、外部からの水分を完全に絶つのは困難な場合も多い。結果として、補修後も数年後に再劣化が生じる事例も報告されている<sup>75)</sup>。

ASRゲルを非膨張化する方法としては、亜硝酸リチウム<sup>76) 77)</sup>、プロピオン酸カルシウム<sup>78)</sup>、亜硝酸カルシウム<sup>79)</sup>などの作用に着目した検討が行われている。このうち亜硝酸リチウムについては、内部注入および表面含浸による工法が実用化されている。

補強については、ASRによる膨張抑制および耐震性の向上を目的に、ASRにより損傷した橋脚を対象に鋼板接着工法、RC巻き立て工法、PC巻き立て工法などが検討されている。PC巻き立て工法については、ASRにより損傷したRC柱部材に対する耐荷性および変形性能の向上効果が確認されており<sup>80) 81)</sup>、実橋脚での適用事例もみられる<sup>82)</sup>。鋼板接着工法については、ASR膨張の抑制に効果があるものの、鋼材の熱膨張率の高さに起因するコンクリートの温度上昇によるASR促進の可能性も指摘されている<sup>83)</sup>。

従来から損傷を受けたRC床版の耐荷力を回復させる補強方法として、損傷の程度や作業空間の制限、通行車両の安全の確保および経済性等を考慮して、床版上面からの補強として上面増厚工法が、床版下面からの補強として鋼板接着工法、下面増厚工法、炭素繊維シート接着工法などが適用されている<sup>10)</sup>。このうち、ASRが生じたRC床版に対する補強方法としては、鋼板接着工法について、室内試験で耐荷力の向上効果を確認した後に、床版上面の防水層の設置と併用する形で適用された事例<sup>21)</sup>が一部で見られるものの、ASRが生じたRC床版の補修、補強に関する検討事例は極めて少ないのが現状である。

## 2.6 本研究に関する課題の整理

第2章では、ASRによるコンクリート構造物の劣化の現状を把握するとともに、ASRがRC部材の構造性能に及ぼす影響と補修・補強方法に関する既往の研究成果について整理した。得られた知見および技術的な課題を以下に示す。

- (1) 現行の ASR 抑制対策の有効性は否定されるものではないが、必ずしも十分なものではない。凍結防止剤の散布量の増加にともない、従来は ASR の発生報告が少なかった RC 床版においても、ASR の報告事例が多くみられるようになってきている。そのため、RC 床版における ASR 劣化機構の解明が必要と考えられる。
- (2) ASR が生じた RC 床版の劣化の特徴としては、床版下面には亀甲状のひび割れが、床版の鉛直断面においては水平方向のひび割れが多数生じ、ひび割れからはゲルの滲出がみられる。また、床版上面では広範囲に砂利化が生じ、上側鉄筋が露出する場合もある。ASR が生じた RC 床版の補修・補強においては、これらの変状に対応する必要がある。
- (3) ASR による膨張は内部および外部からの拘束の影響を受け、発生するひび割れの形態は拘束の影響を反映したものとなる。RC 床版における ASR によるひび割れは、内部の主鉄筋および配力鉄筋に加えて、鋼主桁の拘束の影響を受ける可能性があり、この影響も考慮する必要があると考えられる。
- (4) RC はりや RC 柱における検討では、ASR によるコンクリートの膨張が適切に拘束される場合には、ASR が生じても健全な RC 部材と比較して大きな終局耐力の低下はないとされる。一方、RC 床版の構造性能に及ぼす ASR の影響に関する研究は数少なく、十分な知見が集まっているとは言い難い。
- (5) 輪荷重走行試験機を用いた検討により、RC 床版の耐疲労性は ASR の促進条件に大きく影響を受け、緩やかに ASR が進行した場合は、耐疲労性が顕著に低下する可能性があることが明らかとなっている。すなわち、RC 床版の構造性能に及ぼす ASR の影響については、より実環境に即した検討が必要である。
- (6) ASR により損傷を受けたコンクリート構造物に対して表面被覆工法や PC 巻き立て工法などが一部で検討されているものの、現状では補修・補強方法は確立されていない。特に ASR により損傷した RC 床版の耐荷力を回復、向上される方法についての検討が不十分である。

## 2章の参考文献

- 1) 川村満紀:コンクリート構造物の耐久性上の問題点とその対策 アルカリ骨材反応(その 1), コンクリート工学, pp.74-79, 1994.
- 2) 古賀裕久, 河野広隆, 渡辺博志:コンクリート構造物の健全度に関する実態調査結果, 土木技術資料, Vol.42, No.12, pp.58-63, 2000.
- 3) 河野広隆, 古賀裕久:道路橋に見るアルカリ骨材反応の実態, 土木技術資料, Vol.47, No.12, pp.66-71, 2005.
- 4) 鳥居和之:骨材のアルカリシリカ反応性の品質保証, コンクリート工学, Vol.39, No.5, pp.68-72, 2001.
- 5) 松田芳範, 隈部佳, 木野淳一, 岩田道敏:アルカリ骨材反応の JR 東日本版抑制対策の設定について, コンクリート工学, Vol.50, No.8, pp.669-675, 2012.
- 6) 日本コンクリート工学協会:作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書, 2008.
- 7) 日本コンクリート工学会:ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書, 2014.
- 8) 久保善司, 鳥居和之:アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化損傷事例と最新の補修・補強技術, コンクリート工学, Vol.40, No.6, pp.3-8, 2002.
- 9) 三木千壽, 山田真幸, 長江進, 西浩嗣:既設非合成連続桁橋の活荷重応答の実態とその評価, 土木学会論文集, No.647, pp.281-294, 2000.
- 10) 土木学会:道路橋床版の維持管理マニュアル 2020, 2020.
- 11) 竹内勝信, 川村満紀, 杉山彰徳:NaCl 溶液に浸漬した反応性骨材含有モルタルの膨張機構, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.917-922, 1993.
- 12) 川村満紀, 竹内勝信, 杉山彰徳:外部から供給される NaCl がアルカリシリカ反応によるモルタルの膨張に及ぼす影響のメカニズム, 土木学会論文集, No.502/V-25, pp.93-102, 1994.
- 13) 野田幹夫, 小川健, 小柳洽, 川村満紀:凍結防止剤散布環境下における ASR によるコンクリート構造物の損傷状況調査, コンクリート工学, Vol.36, No.9, pp.15-21, 1998.
- 14) <https://sip-hokuriku.com/wp-content/uploads/2019/03/am.pdf>
- 15) 伊戸康清, 島田守, 大田孝二, 五島孝行, 柴田辰正:アルカリシリカ反応で損傷した鋼道路橋 RC 床版の調査, 第 1 回北陸橋りょう保全会議, pp.63-66, 2013.
- 16) 小林孝一, 鹿野裕, 六郷恵哲:山間寒冷地における RC 床版の ASR と凍害による複合劣化の事例とその検証実験, 土木学会論文集 E2, Vol.70, No.3, pp.320-335, 2014.
- 17) 森寛晃, 久我龍一郎, 小川彰一, 久保善司:寒冷地で供用された RC 床版の劣化要因推定, コンクリート工学論文集, 第 24 巻, 第 1 号, pp.1-9, 2013.
- 18) 牧祐之, 深田宰史, 鳥居和之, 小野凌平:山間部に位置する早期劣化した道路橋床版の現状と剛性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.379-384, 2018.
- 19) 野村昌弘, 安藤陽子, 津田誠, 鳥居和之:積雪寒冷地における鋼橋 RC 床版の劣化メカニズムと補修に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.891-896, 2018.



- 20) 田中良樹, 石田雅博, 村越潤: 道路橋における凍結融解と ASR の影響を受けたコンクリートの劣化調査, 土木学会論文集 E2, Vol.72, No.3, pp.214-233, 2016.
- 21) 児島孝之, 杉江功, 丸山悟, 村山康雄: アルカリ骨材反応による RC 床版の損傷と補修, コンクリート工学, Vol.32, No.2, 1994.
- 22) 輿石逸樹: 東北・上越新幹線の橋梁と保守, 橋梁と基礎, pp.51-54, 2009.
- 23) Philippe Demars, Pierre Gilles, Eric Dondonne, Guy Lefebvre, Anne Darimont, Gabriel Lorenzi, Guy Henriet & Anne-Marie Marion: The Degradation of the Bridge Deck Slabs in Belgium Mainly Involves Alkali-Aggregate Reactions, Proceedings of ICAAR2008, 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in concrete, pp.964-972, 2008.
- 24) 久保善司, 佐古崇, 川崎文義, 横山広: 床版部材の ASR 膨張挙動と FRP シート貼付けによる膨張抑制, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1243-1248, 2009.
- 25) 高久英彰, 小野塚和博, 羽柴俊明, 安川義行: ASR 劣化を生じた橋梁(檜山橋)の補修方針について, 土木学会第 73 回年次学術講演会, VI-347, 2018.
- 26) 花房禎三郎, 綱川悠, 山口清人, 藤田秀徳: ASR 劣化を生じた橋梁(檜山橋)の補強工事における設計・施工について, 土木学会第 73 回年次学術講演会, VI-348, 2018.
- 27) 小林和夫: RC 梁部材の静的保有耐荷特性 - その 1 -, アルカリ骨材反応に関するシンポジウム, 日本材料学会, pp.113-129, 1985.
- 28) M. Fujii, K. Kobayashi, T. Kojima & H. Maehara: The Static and Dynamic Behaviors of Reinforced Concrete Beams with Cracking due to Alkali-Silica Reaction, Proceedings of the 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.126-130, 1986.
- 29) 小柳洽, 六郷恵哲, 石田裕哉: アルカリ骨材反応によるひび割れと RC 部材の性状, セメント技術年報, 39 巻, pp.352-355, 1985.
- 30) Stephane Multon, Stephane Dubroca, Jean-François Seignol, François Toutlemonde: Flexural Strength of Beams Affected by ASR, Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.1181-1190, 2004.
- 31) 棚橋和夫, 岩永武士, 小柳洽, 浅野幸夫: ASR によって劣化した RC はりおよび柱の力学挙動について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.843-848, 1996.
- 32) 岡田清, 近藤茂, 藤田哲満, 姫野元治: アルカリ骨材反応が発生した RC 構造物の耐力評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.779-784, 1988.
- 33) Shenfu Fan, John M. Hanon: Effect of Alkali Silica Reaction Expansion and Cracking on Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams, ACI Structural Journal, Vol.95, pp.498-505, 1998.
- 34) Luc Monette, John Gardner, Patrick Grattan-Bellew: Structural Effects of the Alkali-Silica Reaction on Non-Loaded and Loaded Reinforced Concrete Beams, Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.999-1008, 2000.
- 35) Michihiko Abe, Shigemi Kikuta, Yoshihiro Masuda, Fuminori Tomozawa: Experimental Study on Mechanical Behavior of Reinforced Concrete Member Affected by Alkali-Aggregate Reaction,



- Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.691-696,1989.
- 36) G E Blight, M G Alexander: The Effect of Alkali-Aggregate Reaction on the Strength and Deformation of a Reinforced Concrete Structure, 6th International Conference on, Alkalis in concrete, Research and Practice, Proceedings, pp.401-410, 1983.
  - 37) 小柳洽, 六郷恵哲, 内田裕市, 長瀬道雄: 著しい AAR 損傷を生じた RC はりの挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.947-952, 1993.
  - 38) Joop A. den Uijl, Niek Kaptijn, Joost C. Walraven: Shear Resistance of Flat Slab Bridges Affected by ASR, 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.1129-1138, 2000.
  - 39) 高木雄介, 福嶋孝啓, 大畑卓也, 小林孝一, 六郷恵哲: ASR が RC 部材のせん断耐力に与える影響およびその補修に関するモデル実験, コンクリート建造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 13 巻, pp.413-420, 2013.
  - 40) 松田豊樹, 森川英典, 湊靖文, 川口哲生: ASR が生じた RC はり部材のせん断耐荷機構と UFC パネル接着による補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.995-1000, 2010.
  - 41) 小柳洽, 内田裕市, 岩永武士, 浅野幸男: 低鉄筋比の RC 部材における ASR の膨張拘束に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.52, pp.786-791, 1998.
  - 42) 蓑田理希, 古川柳太郎, 尾花祥隆, 鳥居和之: ASR による劣化を生じた PC 梁部材の耐荷力特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1305-1310, 2007.
  - 43) Kazuo Takemura, Eiichi Tazawa, Asuo Yonekura & Yasumoto Abe: Mechanical Characteristics of Reinforced Concrete Column Affected by Alkali Aggregate Reaction, Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.665-670, 1989.
  - 44) 竹村和夫, 米倉亜州夫, 谷村充: アルカリ骨材反応を生じた帯鉄筋柱の一軸圧縮特性, 第 44 回 セメント技術大会論文集, pp.788-793, 1990.
  - 45) 小林茂敏, 森濱和正: アルカリ骨材反応を生じた部材や建造物の耐荷荷重-柱部材-, コンクリート工学, Vol.24, No.11, pp.64-69, 1986.
  - 46) 小野聖久, 広瀬剛, 本間淳史, 三桶達夫: ASR で劣化した橋脚の耐震性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.991-996, 2007.
  - 47) 岩波光保, 横田弘, 奥山和俊, 鳥居和之: ASR 損傷を受けたコンクリート柱の力学挙動と補強方法に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.704, V-55, pp.129-142, 2002.
  - 48) 三桶達夫, 長田光司, 小野聖久, 池田尚治: ASR で劣化した梁部材の耐震性能に関する実験および解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.997-1002, 2007.
  - 49) 井上晋, 三方康弘, 小林和夫, 仁枝保: ASR 損傷を生じた RC はり部材の正負交番荷重下の曲げ・せん断特性, 材料, Vol.50, No.8, pp.883-888, 2001.
  - 50) 久保善司, 山本晋, 服部篤史, 宮川豊章: ASR がコンクリート曲げ部材の耐荷性状に与える影響, 材料, Vol.50, No.9, pp.1013-1020, 2001.
  - 51) 小林和夫, 宮川豊章, 森川英典, 五十嵐心一, 山本貴士, 三木朋広: コンクリート構造学,

p.90, 1994.

- 52) 小柳洽：鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断とその設計上の取扱い，コンクリート工学，Vol.19，No.8，pp.3-13，1981.
- 53) 角田与史雄，井藤昭夫，藤田嘉夫：鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第229号，pp.105-115，1974.
- 54) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2017.
- 55) 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荷力の評価式，土木学会論文集，第348号，V-1，pp.134-140，1984.
- 56) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，2007.
- 57) 角田与史雄，藤田嘉夫：RC スラブの疲労押抜きせん断強度に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第317号，pp.149-157，1982.
- 58) 松井繁之：橋梁の寿命予測 - 道路橋 RC 床版の疲労需要予測 - ，安全工学，pp.432-440，1991.
- 59) 飯岡豊，桧貝勇，村木宏行：鉄筋コンクリート床版の疲労試験，日本道路公団試験所報告，昭和51年度，pp.132-142，1977.
- 60) 飯岡豊，桧貝勇，藤田信一：鉄筋コンクリート床版の疲労試験(第2報)，日本道路公団試験所報告，昭和52年度，pp.198-209，pp.221-224，1978.
- 61) 岡田清，岡村宏一，園田恵一朗，島田功：道路橋鉄筋コンクリート床版のひび割れ損傷と疲労性状，土木学会論文報告集，第321号，pp.49-61，1981.
- 62) 前田幸雄，松井繁之：輪荷重移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究，第6回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.221-224，1984.
- 63) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.2，pp.627-632，1987.
- 64) 内田裕市，斎藤保則，六郷恵哲，小柳洽：アルカリ骨材反応により損傷を受けた RC スラブの性状に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12，No.1，pp.841-844，1990.
- 65) L. A. Clark, K. E. Ng: The Effect of Alkali Silica Reaction on the Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs, Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.659-664, 1989.
- 66) L. A. Clark, K. E. Ng: Prediction of the Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs with ASR, The 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.167-174, 1992.
- 67) 田附伸一，津吉毅，石橋忠良，松田芳範，今井勉：ASRにより損傷した RC 部材の耐荷力に関する実験的研究，土木学会論文集，Vol.63，No.1，pp.166-177，2007.
- 68) 小林孝元，田中泰司：アルカリ骨材反応による劣化の進行した RC 床版の押抜きせん断試験，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，pp.259-264，第13巻，2013.
- 69) 子田康弘，岩城一郎，大田孝二，伊戸康清，島田守，岸良竜：ASR 劣化が生じた実道路橋

- RC床版の押抜きせん断耐力に関する実験的検討, 第68回土木学会年次学術講演会講演梗概集, I-422, 2013.
- 70) 前島拓, 子田康弘, 岩城一郎, 内藤英樹, 岸良竜, 鈴木康範, 大田孝二, 鈴木基行: アルカリシリカ反応が道路橋RC床版の耐疲労性に及ぼす影響, 土木学会論文集 E2, Vol.72, No.2, pp.126-145, 2016.
  - 71) Benoit Durand: Long-Term Monitoring Results of Concrete Electrical Tower Foundations Affected by ASR and Repaired with Different Products and Repair Methods, 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.1049-1058, 2000.
  - 72) S. Ohno, Y. Yoshida, Y. Shinozaki, T. Morikawa: The Mechanical Behavior of Beams Coated After Alkali Silica Reaction Damage, 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.697-702, 1989.
  - 73) 宮川豊章, 菅島章文, 小林和夫, 岡田清: アルカリ骨材膨張による損傷を受けたコンクリート構造物の補修, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.621-626, 1987.
  - 74) 久保善司, 服部篤史, 栗原慎介, 宮川豊章: ASRにより劣化したコンクリート構造物のシラン系表面処理による補修効果の検討, 土木学会論文集, No.690, V-53, pp.95-107, 2001.
  - 75) Koichi Ono: Assessment and Repair of Damaged Concrete Structure, 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.647-658, 1989.
  - 76) 江良和徳, 三原孝文, 山本貴士, 宮川豊章: リチウムイオンによるASR膨張抑制効果に関する一考察, 材料, Vol.58, No.8, pp.697-702, 2009.
  - 77) David B. Stokes: Development of a Lithium-Based Material for Decreasing ASR-Induced Expansion in Hardened Concrete: 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.1079-1087, 2000.
  - 78) 岩月栄治, 多賀玄治, 森野奎二: プロピオン酸カルシウムのASR抑制効果に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.61, pp.318-323, 2007.
  - 79) 落合昂雄, 兵頭彦次, 江里口玲, 山田一夫, 市川恒樹: 亜硝酸カルシウムがASR膨張抑制効果に及ぼす影響に関する検討, 第71回土木学会年次学術講演会梗概集, pp.517-518, 2016.
  - 80) 鳥居和之, 奥田由法, 石井浩司, 佐藤健一: PC鋼材巻き立てにより補強したASR損傷コンクリート柱の交番載荷試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1051-1056, 1996.
  - 81) 奥山和俊, 岩波光保, 横田弘, 鳥居和之: PC鋼材巻き立てによって補強したASR損傷コンクリートモデル柱の正負交番載荷試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.1106-1110, 2001.
  - 82) 奥田由法, 鈴木義晃, 森拓也, 久保欣也: PC巻き立て工法によるASR劣化橋脚の補強, コンクリート工学, Vol.35, No.8, pp.9-14, 1997.
  - 83) 奥田由法, 石井浩司, 鳥居和之, 松田康孝: ASR損傷コンクリート橋脚の補修・補強に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.1, pp.371-376, 1998.



### 第3章 部分打替え補強した ASR と疲労の複合劣化 RC 床版の 耐疲労性評価

### 3.1 概説

著者を含む前島らの研究グループは、輪荷重走行試験機を用いた検討により、RC床版の耐疲労性はASRの膨張速度に大きく影響を受け、緩やかにASRが進行した場合は、耐疲労性が顕著に低下する可能性があることを明らかとした<sup>1)</sup>。このことは、ASRと疲労の複合作用により損傷したRC床版に対して、構造性能を回復または向上させる措置を施す必要があることを示唆している。一方、現状ではこのように損傷したRC床版の補強に関する検討は十分に行われていない。

そこで本章では、凍結防止剤散布下におけるASRと疲労により複合劣化したRC床版を想定し、その補強方法について検討を行った。まず、ASRと疲労を実験的に生じさせたRC床版供試体を作製した後、床版供試体の上側の損傷部を除去し、ラテックス改質コンクリート(以下、LMC)を用いた部分打替えを行った。その後、輪荷重走行試験を実施することで、部分打替えによる耐疲労性向上効果を評価した。

### 3.2 部分打替えの概要

ASRと疲労の複合作用により疲労限界状態に至ったRC床版では、上側鉄筋付近の水平ひび割れの発生や、広範囲に渡る上側鉄筋近傍までの床版上面の砂利化が想定される。また、ASRにより部材内部には層状にひび割れが発生していると考えられる。したがって、特にRC床版上面のひび割れや脆弱部に対して断面修復などの措置を行う必要がある。

RC床版の補強方法には、床版上面からの補強として上面増厚工法が、床版下面からの補強として下面増厚工法や鋼板接着工法、連続繊維シート接着工法などが採用されている。床版下面からの補強は交通規制を必要としないという利点を有するものの、鋼板接着のような工法では上面から侵入した雨水の逃げ道がなくなる可能性があり<sup>2)</sup>、ASRを促進する恐れがある。また、ASRの促進や耐疲労性の低下を招く雨水や凍結防止剤は、主に床版上面からRC床版に侵入することから、ASRによる再劣化を防止し、耐疲労性を確保するためには、これらの劣化因子の侵入を抑制することも重要である。

そこで本研究では、RC床版上面の損傷箇所を除去し、新たなコンクリートに置き換える部分打替えについて検討することとした。図-3.2.1に、部分打替えの概要を示す。打替え深さは、上側鉄筋付近の水平ひび割れへの対応、既設コンクリートとの一体性の確保およびコンクリートの充填性を考慮し、上側配力鉄筋の下方20mm以上とした。なお、床版厚さについて既設の厚さからの増加がないため、下部工の追加補強や路面高さの追加調整工事も不要となる。

打替えに用いるコンクリートには、RC床版の耐荷性を向上させる力学特性や、水や凍結防止剤などの劣化因子に対する浸透抵抗性、既設コンクリートとの一体性などが要求される。また、供用下の橋梁における補強工事では早期交通開放が求められることが多く、コンクリートには速硬性も必要となる場合が多い。そこで、部分打替えに用いるコンクリートに、橋面コンクリート舗装への適用が検討されているLMC<sup>3) 4)</sup>を用いることとした。LMCは、カルシウムアルミネート系の速硬性混和材とスチレン・ブタジエンゴム(以下、SBR)ラテックスを併用した、いわゆるポリマーセメントコンクリートである。図-3.2.2～図-3.2.5に、LMCの物性例を示す<sup>5)</sup>。速硬性混和材の作用により、

材齢6時間で $24\text{N/mm}^2$ 以上の強度発現が可能である。また、SBRラテックスの使用により、乾燥収縮が小さく、水や塩化物イオンの浸透抵抗性に優れ、また既設コンクリートとの付着性の向上も期待できる。

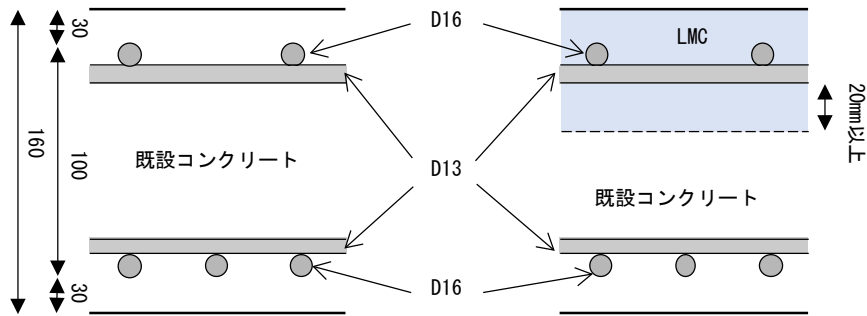


図-3.2.1 部分打替えの概要

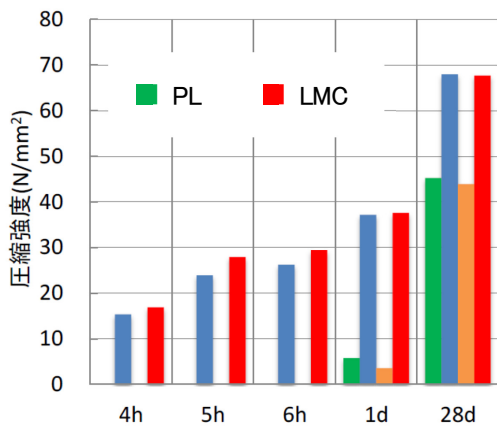


図-3.2.2 強度発現性<sup>5)</sup>

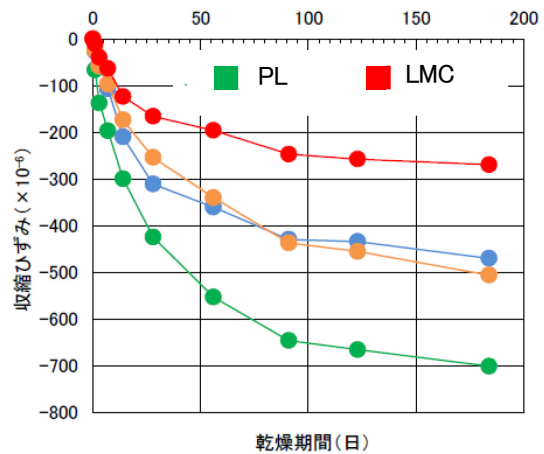


図-3.2.3 乾燥収縮<sup>5)</sup>

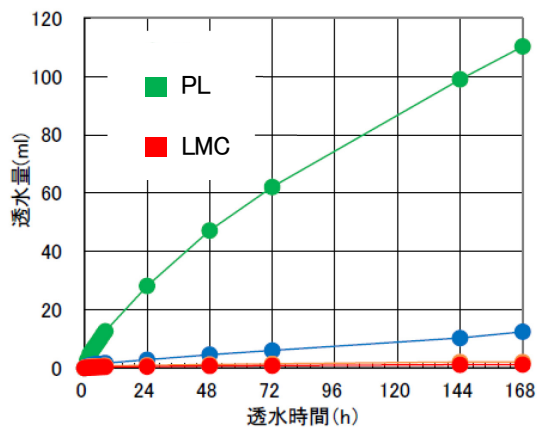


図-3.2.4 透水性<sup>5)</sup>

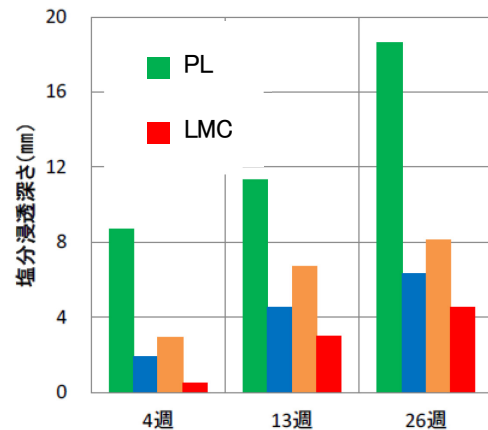


図-3.2.5 塩分浸透性<sup>5)</sup>

### 3.3 実験概要

#### 3.3.1 使用材料およびコンクリートの配合

表-3.3.1に、コンクリートの使用材料を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材には砕砂(化学法で無害)を使用した。粗骨材には、表-3.3.2および図-3.3.1に示すように化学法、モルタルバー法ともに無害でないと判定された ASR 反応性を有する砕石 2005(記号:G1)を用いた。化学混和剤には、AE 減水剤を用いた。また、ASR を促進する目的で、NaCl を添加した。LMC の材料は、セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、特殊カルシウムアルミネートと特殊硫酸塩を主成分とする速硬性混和材と、SBR ラテックス(固形分 45%)を使用した。細骨材には砕砂、粗骨材には砕石 2005 を用いた。硬化時間の調整に、オキシカルボン酸系の硬化調整剤を使用した。供試体の主鉄筋には D16(SD295A)を、配力鉄筋には D13(SD295A)を用いた。

表-3.3.3 に、供試体に使用したコンクリートの配合を示す。コンクリートの設計基準強度は 18N/mm<sup>2</sup> とし、水セメント比を 65.0%と設定した。なお、設計基準強度は昭和 39 年～昭和 46 年制定の道路橋示方書に示される最小コンクリート強度を想定したものである。NaCl はコンクリートに対して外割で 18.9kg/m<sup>3</sup>(Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> で 10kg/m<sup>3</sup>)添加した。表-3.3.4 に、LMC の配合を示す。SBR ラテックスの使用量は 115kg/m<sup>3</sup> とし、速硬性混和材の使用量は、結合材の 31%相当である。

表-3.3.1 使用材料

種類	記号	使用材料および物性
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16g/cm <sup>3</sup>
混和材	F	速硬性混和材, 密度 2.93g/cm <sup>3</sup>
細骨材 (記号:S)	S1	砕砂(花崗岩), 表乾密度 2.64g/cm <sup>3</sup>
	S2	砕砂(硬質砂岩), 表乾密度 2.59g/cm <sup>3</sup>
	S3	砕砂(花崗岩), 表乾密度 2.58g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G1	砕石 2005(安山岩), 表乾密度 2.70g/cm <sup>3</sup>
	G2	砕石 2005(頁岩), 表乾密度 2.76g/cm <sup>3</sup>
化学 混和剤	Ad	AE 減水剤, リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
	Re	硬化時間調整剤, オキシカルボン酸系
ラテックス	L	SBR 系, 固形分 45%
塩化ナトリウム	NaCl	-

表-3.3.2 アルカリシリカ反応性(粗骨材:G1)

JIS A 1145(化学法)			JIS A 1146(モルタルバー法)	
溶解シリカ量 (Sc) (mmol/L)	アルカリ濃度 減少量 (Rc) (mmol/L)	判定	材齢 26 週 膨張量 (%)	判定
624	111	無害でない	0.461	無害でない



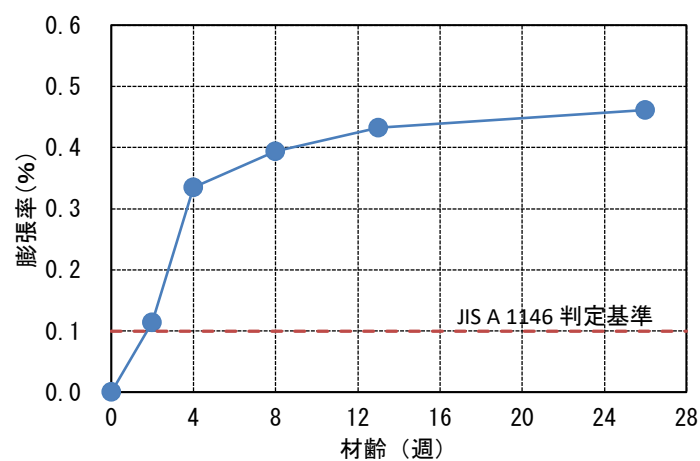


図-3.3.1 モルタルパー法の試験結果(粗骨材:G1)

表-3.3.3 コンクリートの配合

W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					Ad (C×%)	NaCl (kg/m <sup>3</sup> )	スランプ (cm)	空気量 (%)
	W	C	S1	S2	G1				
65.0	175	269	413	405	1032	1.5	18.9	11.0	4.2

表-3.3.4 LMCの配合

W/C (%)	P/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						Re (kg/m <sup>3</sup> )	スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	L	C	S3	G2	F			
34.8	14.7	59	115	353	769	941	160	1.54	18.5	2.8

### 3.3.2 供試体の概要

図-3.3.2 に、供試体の概要を示す。幅 2000mm、長さ 3000mm、厚さ 160mm の複鉄筋 RC 床版である。主鉄筋のかぶり厚は上面、下面ともに 30mm とし、引張側の主鉄筋と配力鉄筋の鉄筋中心間隔は、それぞれ 150mm と 125mm とした。ASR によるコンクリートの膨張挙動を把握するため、供試体の中央位置に埋込み型ひずみ計を設置した。

コンクリートの練混ぜには強制練りミキサ水平二軸形を用い、コンクリートの打込み後、材齢 44 日まで湿布養生を行った。表-3.3.5 に  $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$  の円柱供試体におけるコンクリートの圧縮強度および静弾性係数を示し、図-3.3.3 に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。なお、図中にはコンクリート標準示方書<sup>9)</sup>に示される両者の関係を併記している。標準養生を行った円柱供試体の材齢 28 日の圧縮強度は  $26.9\text{N/mm}^2$  で、設計基準強度を満足した。床版供試体と同様の養生を行った円柱供試体の材齢 44 日の圧縮強度は  $31.5\text{N/mm}^2$ 、静弾性係数は  $27.2\text{kN/mm}^2$  であったが、ASR 促進養生後の圧縮強度は  $18.8\text{N/mm}^2$  まで、静弾性係数は  $5.20\text{kN/mm}^2$  まで大きく低下した。

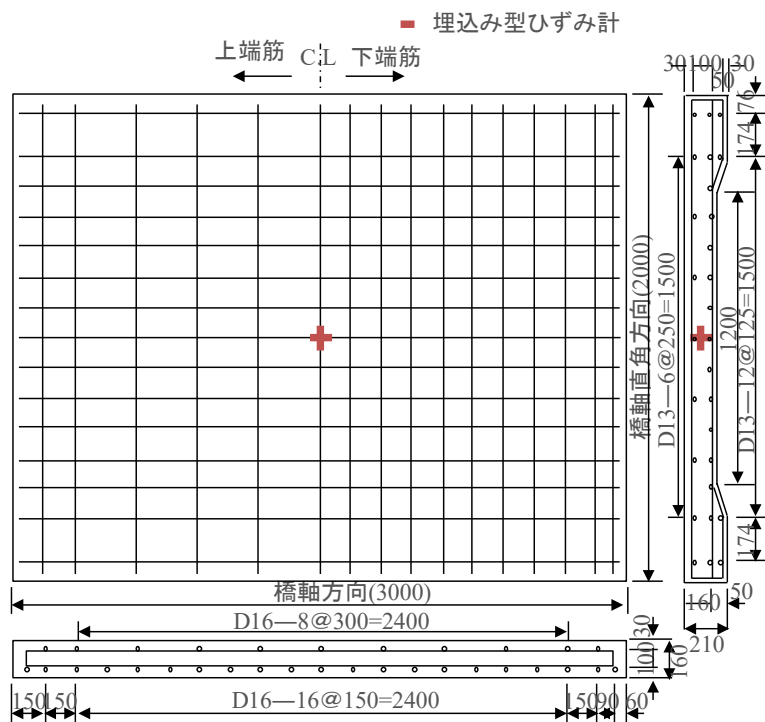


図-3.3.2 RC 床版供試体の概要

表-3.3.5 コンクリートの圧縮強度および静弾性係数

種類	材齢	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )
ASR	28 日	26.9	-
	44 日	31.5	27.2
	ASR 促進養生後	18.8	5.20
LMC	材齢 12 時間	42.1	29.0
	材齢 8 日	61.5	31.6

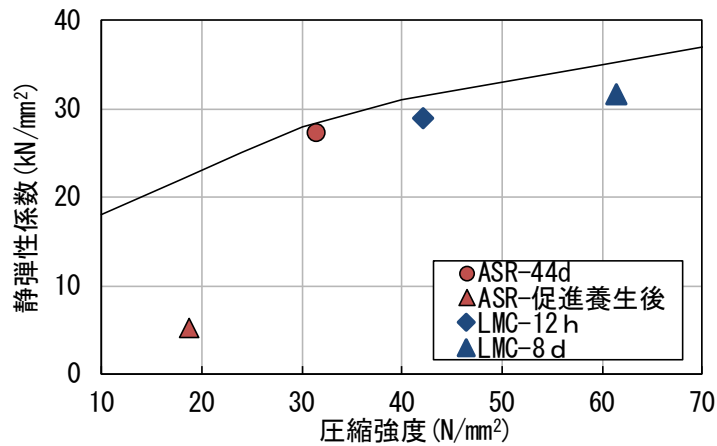


図-3.3.3 静弾性係数と圧縮強度の関係

### 3.3.3 部分打替えの概要

ASR 促進養生と輪荷重の繰返しによる損傷を与えた供試体の上面の幅 1800mm、長さ 2800mm の範囲を、上側配力鉄筋下方の約 20mm が露出するまでを目標に、ウォータージェットを用いてコンクリートを除去した。写真-3.3.1～写真-3.3.3 にウォータージェットの施工状況を示す。ウォータージェット後に測定した除去深さは、最大 112mm、最小 57mm、平均 83mm であった。本検討では NaCl を多量に添加しており、鉄筋腐食が生じることで床版の耐疲労性に影響を及ぼす可能性がある。そこで、ウォータージェット後に露出した鉄筋の目視観察を行った。その結果、鉄筋表面の発錆や孔食等は認められなかった(写真-3.3.4)。鉄筋表面の錆は高圧水により除去された可能性も考えられるが、鉄筋に顕著な断面欠損はみられなかったことから、鉄筋腐食が輪荷重走行試験結果に影響を及ぼす可能性は小さいと判断した。

LMC の製造には、傾胴式ミキサを用いた。写真-3.3.5 および写真-3.3.6 に LMC の打込み状況を示す。LMC の打込みは人力で行い、打込み完了後、材齢 8 日まで上面をブルーシートで覆い養生を行った。なお、打替え部界面への接着剤の塗布は行っていない。表-3.3.5 に、 $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$  の円柱供試体における LMC の圧縮強度および静弾性係数を示す。床版の打替え部分と同様の養生を行った円柱供試体の材齢 12 時間における圧縮強度は  $42.1\text{N/mm}^2$ 、静弾性係数は  $29.0\text{kN/mm}^2$  であり、早期強度発現性を有していることを確認した。また、材齢 8 日における圧縮強度は  $61.5\text{N/mm}^2$ 、静弾性係数は  $31.6\text{kN/mm}^2$  であった。



写真-3.3.1 供試体外観



写真-3.3.2 ウォータージェット施工状況



写真-3.3.3 ウォータージェット施工後



写真-3.3.4 内部鉄筋の外観



写真-3.3.5 LMC 打込み状況



写真-3.3.6 LMC 打込み完了後

### 3.3.4 実験方法

#### (1) 実験の手順

ASR および疲労を作用させる順番は、供試体のひび割れの発生状況等に影響を与えると考えられる。実環境下では ASR と疲労は同時並行的に進行すると考えられるが、実験的に再現することは困難である。既往の研究では、ASR 促進養生後に輪荷重走行試験を行った結果、ASR により発生したひび割れが支配的になり、その後の疲労によるひび割れが抑制されたという結果が得られている。そこで、本研究では、あらかじめ疲労によるひび割れを生じさせた後、ASR を発生させ、その後にさらに輪荷重走行試験を行うこととした。図-3.3.4 に、実験の手順を示す。まず、輪荷重走行試験装置により先行载荷を行った。次に、ASR 促進養生を行い、供試体に ASR 膨張を生じさせた。そして、再度、輪荷重走行試験を行った。このようにして ASR と輪荷重の繰返し作用を受けた供試体に対して LMC を用いた部分打替えを行った後、輪荷重走行試験を行った。

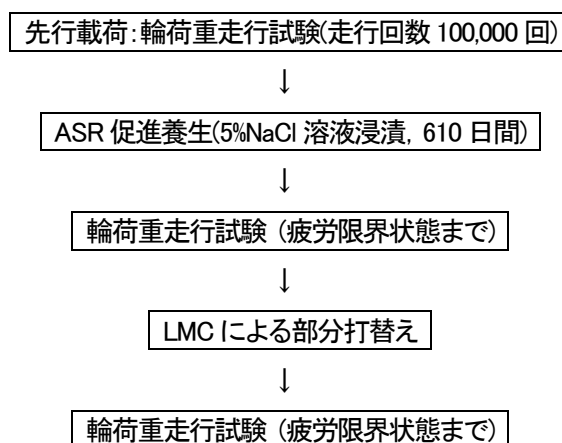


図-3.3.4 実験の手順

#### (2) 輪荷重走行試験

写真-3.3.7 に、輪荷重走行試験装置を示す。本装置は、鋼製フレームに鉄車輪を取り付けた油圧ジャッキを据え付け、モーターおよびクランクアーム(回転速度 8.97rpm)で供試体を乗せた台車を前後に 1m 往復運動させる機構である。図-3.3.5 に、供試体の支持条件を示す。既往の研究を参考に、長辺方向の 2 辺は台車支持桁に固定せず、丸鋼による単純支持とし、鉛直方向の変位のみを拘束した。また、短辺方向の 2 辺は端横桁による弾性支持とし、変位を拘束することで短辺からの曲げ破壊を防止した。また、荷重载荷時に発生する床版四隅の浮上りを防止するため、PC 鋼棒により床版を台車支持桁に固定した。载荷面となる供試体上面には、輪荷重走行範囲にベニヤ板を敷き、そこに幅 300mm、長さ 120mm の载荷ブロックを並べ、さらに载荷鉄板を載せた状態で輪荷重を走行させた。

载荷条件は、先行载荷では T 荷重における 1 車輪分の荷重である 98kN(10tf)を、実走行回数 10 万回まで走行させた。ASR 促進養生後および LMC による部分打替え後は、98kN(10tf)を基本荷重とし、図-3.3.6 に示すように走行回数が 10 万回、20 万回、25 万回、30 万回に達した際に载荷荷重を 29.4kN

ずつ段階的に増加させ、疲労限界状態に達するまで試験を行った。なお、本研究における疲労限界状態は、既往の研究<sup>8)</sup>より活荷重たわみが急増し始める状態とした。輪荷重走行試験時の床版上面の状態は、先行載荷では乾燥状態とし、ASR 促進養生後および LMC による部分打替え後は、水張り状態とした。水張り状態での試験時には、車輪の走行軌道部を中心に、長さ 2200mm、幅 1500mm の範囲に L 型アルミ鋼材を用いて土手を作製し、範囲内に養生シートを敷き詰め、その上から散水を行った。先行載荷は、コンクリートの打込み後の材齢 44 日から開始した。部分打替え後の輪荷重走行試験は、LMC の打込み後の材齢 8 日から開始した。

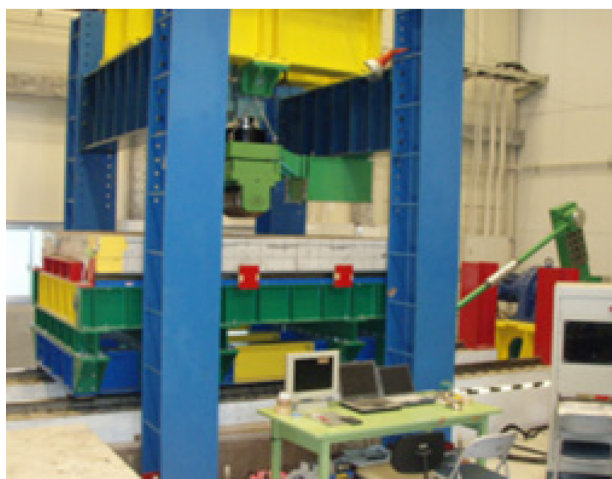


写真-3.3.7 輪荷重走行試験機

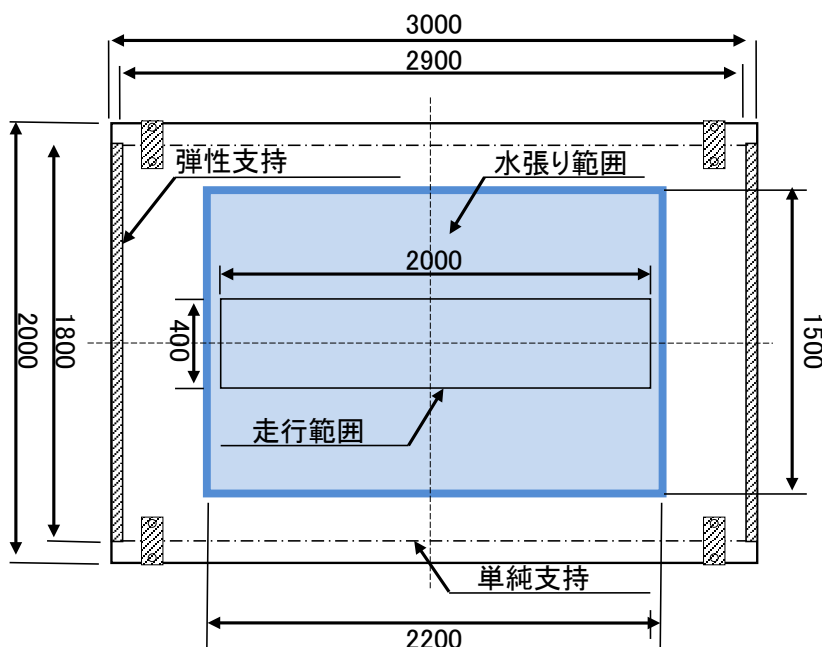


図-3.3.5 供試体の支持条件



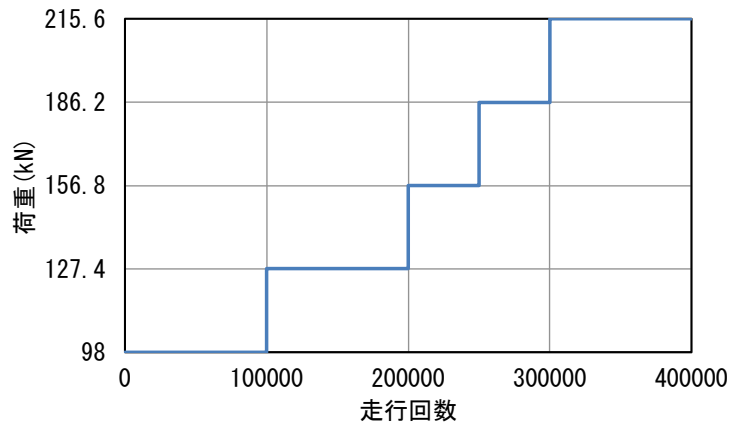


図-3.3.6 荷重ステップ

### (3) ASR 促進養生

鉄筋腐食を抑制しつつ、緩やかに ASR を促進させることを目的として、福島県郡山市の日本大学構内の屋外に水槽を設置し、供試体を 5%NaCl 溶液に 610 日間浸漬させた。この間の平均水温は 14.6°C であった。この期間の日射や雨水等の影響による NaCl 溶液濃度の変動を可能な限り小さくするため、約 3 日に 1 回の頻度で NaCl 溶液濃度を塩分濃度計で測定し、NaCl 溶液濃度を調整した。その後、輪荷重走行試験を開始するまで待機期間が生じたため、鉄筋腐食および ASR を可能な限り抑制することを目的に 132 日間真水に浸漬させた。図-3.3.7 に、ASR 促進養生中の RC 床版供試体のひずみを示す。5%NaCl 溶液に 610 日間浸漬後の供試体の ASR 膨張量は、鉛直方向で  $1076 \times 10^{-6}$ 、水平方向で  $254 \times 10^{-6}$  であった。

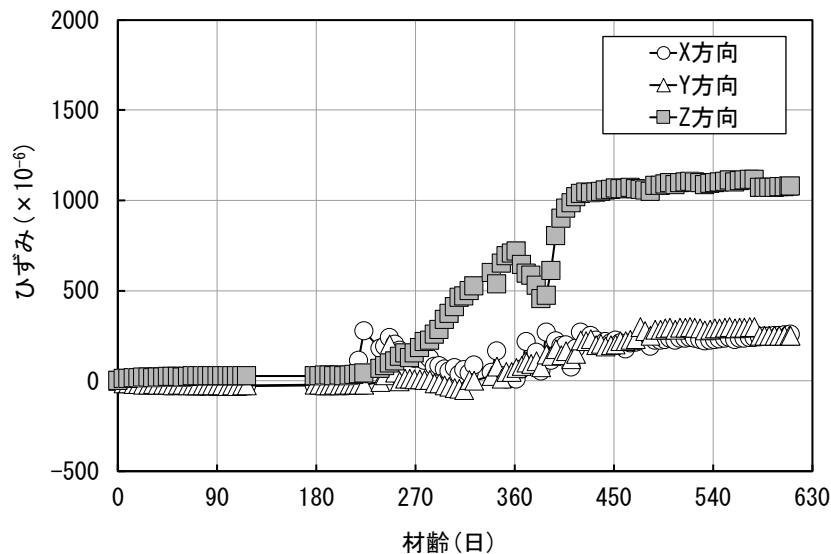


図-3.3.7 促進養生中の ASR 膨張

### 3.3.5 測定項目および方法

#### (1) 活荷重たわみ

所定の走行回数終了時点で、供試体中央に 98kN を載荷した際に発生するたわみを、高感度変位計(感度 1/100mm)で計測した。98kN 載荷時の最大たわみと、荷重を除荷した際の残留たわみの差を、活荷重たわみ(弾性変形成分のたわみ)とした。

#### (2) 供試体下面のひび割れ

供試体下面の中央の長さ 1600mm、幅 1200mm の範囲にあるひび割れをスケッチした。スケッチしたひび割れの総延長を観察範囲の面積で除して、ひび割れ密度を算出した。

#### (3) 供試体断面の損傷状況

部分打替え後の輪荷重走行試験後に、供試体の中央において橋軸方向および橋軸直角方向に切断し、供試体断面における破壊状況をスケッチした。

#### (4) 共振周波数

100~20,000Hz の電磁コイル式の小型加振器を励振器とした強制振動試験<sup>9)</sup>を行った。写真-3.3.8 に、強制振動試験機の外観を示す。本手法は、対象とする構造物に調和振動を与えることで加振方向に局所的な振動を励起させ、振動が及ぶ範囲内の共振周波数を測定するものである。ひび割れや空隙の存在によって剛性と共振周波数が低下することに注目して、部材内部の劣化、損傷を評価する。

強制振動試験には、寸法  $\phi 95\text{mm} \times 56\text{mm}$ 、重さ 1.8kg、最大加振力 50N、可変周波数 100~20,000Hz の小型加振器を使用した。加振方法は、着目する周波数帯にわたって正弦波の周波数を連続的(直線的)に増加させるスイープ加振とした。小型加振器を供試体下面の中央にあて、鉛直方向に調和振動を与え、輪荷重走行試験中の所定の走行回数ごとに共振周波数を測定した。

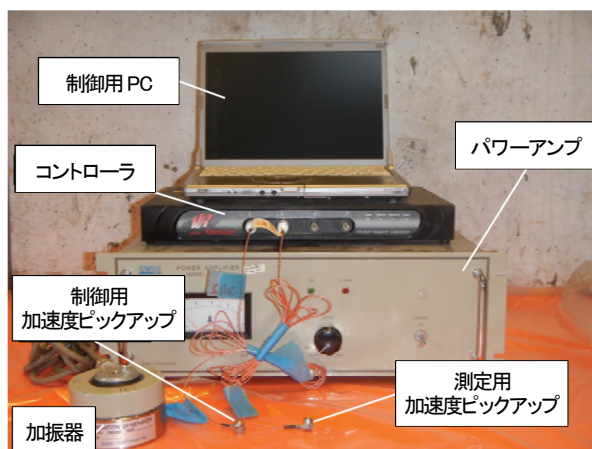


写真-3.3.8 強制振動試験機



### 3.4 結果および考察

#### 3.4.1 活荷重たわみ

本研究における輪荷重走行回数は、段階载荷における走行回数を 98kN による走行回数に換算した等価繰返し走行回数で評価した。具体的には、各荷重における走行実績を、マイナー則を仮定した式(3.1)により 98kN に換算した際の走行回数<sup>10)</sup>として求めた。

$$N_{eq} = \sum (P_i / P_0)^m n_i \quad (3.1)$$

ここで、 $N_{eq}$ ：基本荷重  $P_0$  に換算した等価繰返し走行回数、 $P_i$ ：実際に载荷した輪荷重(kN)、 $P_0$ ：基本輪荷重(98kN)、 $n_i$ ：輪荷重  $P_i$  の走行回数、 $m$ ：S-N 曲線の傾きの逆数(12.76)<sup>11)</sup>である。

図-3.4.1 に、活荷重たわみと等価繰返し走行回数の関係を示す。部分打替え前は、等価繰返し走行回数の増加にともない活荷重たわみが緩やかに増加し、約 900 万回で疲労限界状態に達した。なお、ASR 促進養生後(等価繰返し走行回数 10 万回)に活荷重たわみが若干減少しているが、これは ASR による膨張を鉄筋が拘束することでケミカルプレストレスが生じ、供試体全体の剛性がわずかに増加したためと考える。

部分打替え後は、同一等価繰返し走行回数で比較すると、部分打替え前より活荷重たわみが小さくなった。これは、損傷を受けた供試体上側のコンクリートが LMC と置き換わることで、供試体全体の剛性が回復したことを示していると考えられる。部分打替え後は、等価繰返し走行回数が増加しても、活荷重たわみは約 0.7mm で一定で推移し、その後等価繰返し走行回数 1 億回付近より徐々に増加し、約 16 億回で疲労限界状態に達した。疲労限界時の等価繰返し走行回数を比較すると、部分打替え後は部分打替え前の 178 倍であった。ASR と輪荷重の繰返し作用により疲労限界状態まで劣化した供試体を対象にしたにも関わらず、顕著な耐疲労性の向上効果が確認された。これは、供試体上面を力学特性や水の浸透抵抗性に優れる LMC で置き換えたことで、圧縮側コンクリートのせん断抵抗が向上したことや、RC 床版の耐疲労性を大きく低下させる水の浸透<sup>12)</sup>が抑制されたことなどが寄与したものと考えられる。

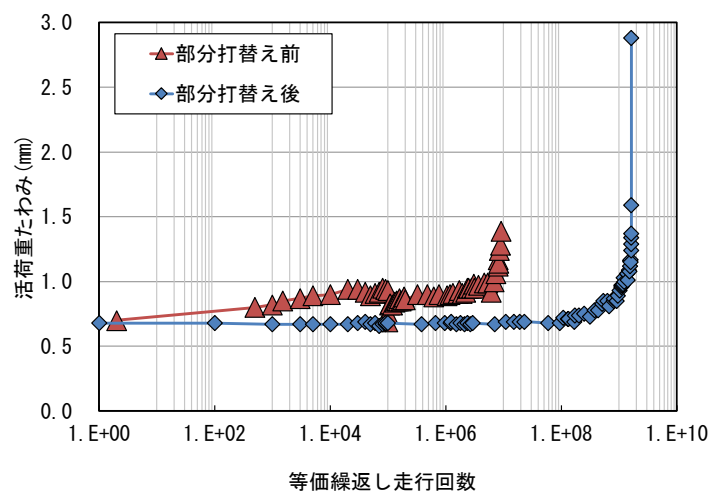


図-3.4.1 活荷重たわみと等価繰返し走行回数

### 3.4.2 供試体下面のひび割れ状況

図-3.4.2 に、ASR 促進養生後の床版下面のひび割れ状況を示す。なお、図中の赤線は新規に生じたひび割れを表す。まず、先行载荷後は、車輪の走行軌道範囲から格子状にひび割れが進展した。その後、ASR 促進養生を行うことで、先行载荷により生じたひび割れの間と供試体端部に ASR 膨張に起因すると考えられるひび割れが生じた。供試体端部に多くのひび割れが生じたのは、配筋量が多く ASR 膨張をより拘束したためと考えられる。ASR 促進養生後の载荷にともなうひび割れの発生は少なかった。

部分打替え後も輪荷重の走行により、車輪の走行軌道範囲内外で、既に生じていたひび割れの間新たなひび割れが生じた。

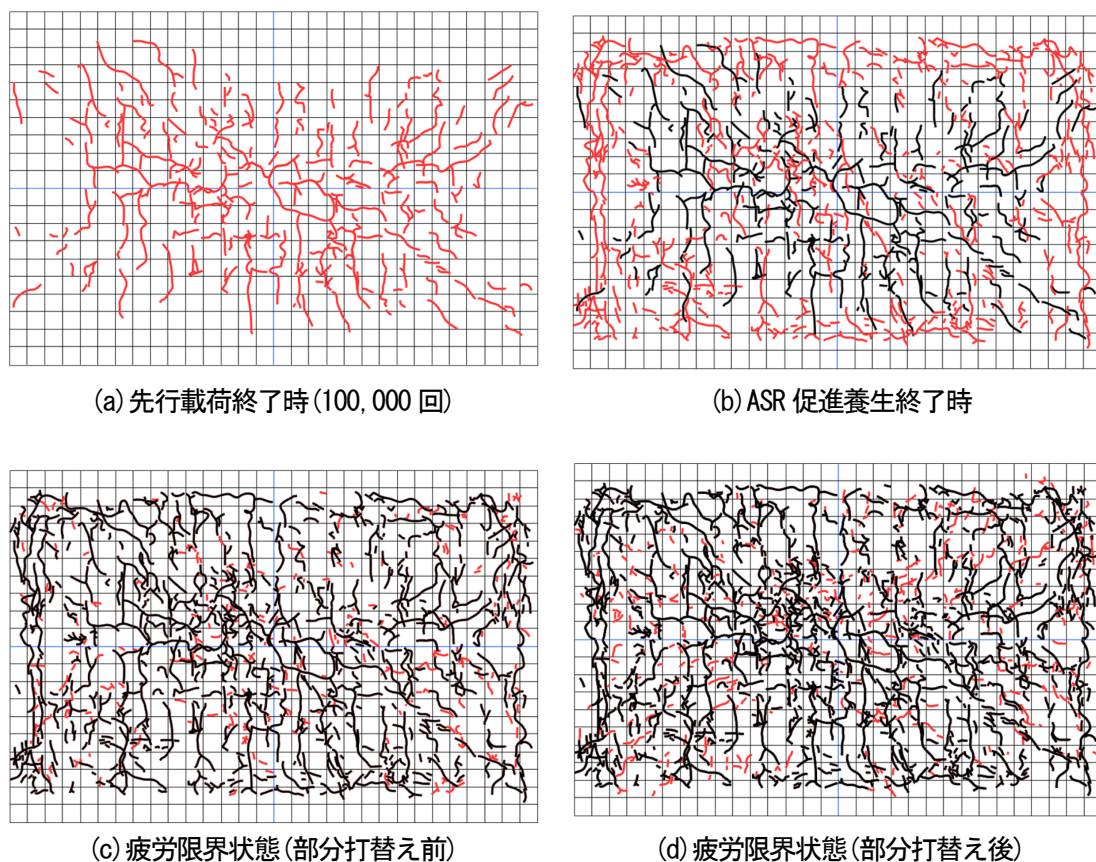


図-3.4.2 床版供試体下面のひび割れ

図-3.4.3 に、ひび割れ密度と等価繰返し走行回数との関係を示す。先行载荷（等価繰返し走行回数 10 万回まで）では等価繰返し走行回数の増加にともない、ひび割れ密度が増加した。等価繰返し走行回数 10 万回でひび割れ密度が急増しているのは、促進養生により ASR 膨張が生じたことによるものである。その後は、等価繰返し走行回数の増加にともなうひび割れ密度の変化は小さく、部分打替え前の疲労限界状態におけるひび割れ密度は  $20.2\text{m}^2$  であった。部分打替え後は、等価繰返し走行回数の増加にともなうひび割れ密度の増加は小さく、緩やかにひび割れ密度が増加した。部分打替え後の疲労限界におけるひび割れ密度は  $23.8\text{m}^2$  であった。

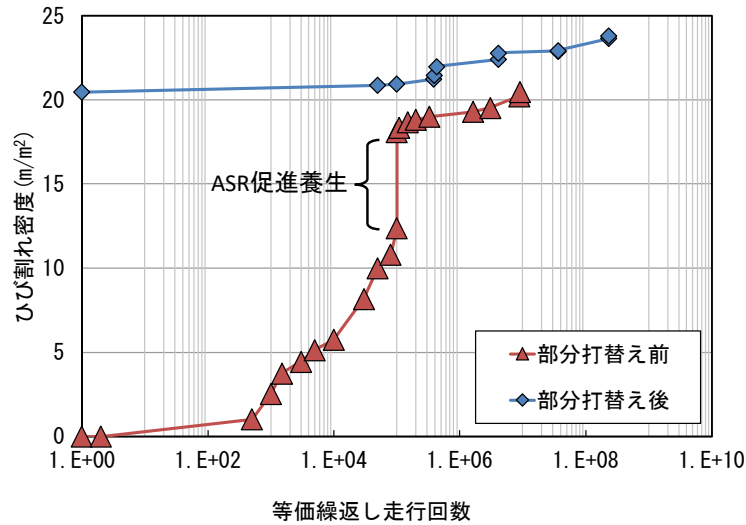


図-3.4.3 ひび割れ密度

### 3.4.3 供試体断面のひび割れ状況

写真-3.4.1 および図-3.4.4 に、部分打替え後の輪荷重走行試験後の供試体断面のひび割れ状況を示す。図中のハッチングした領域が、LMC で部分打替えした箇所である。橋軸直角方向の図をみると、載荷位置より 45 度方向にひび割れが進展しており、最終的な破壊形式が押抜きせん断破壊であることがわかる。橋軸方向の上側鉄筋付近には、床版の耐疲労性低下に影響を及ぼすとされる水平ひび割れ<sup>13)</sup>の発生が確認された。また、車輪の走行軌道範囲を中心に部分打替え箇所の界面に沿うようにひび割れが生じている。LMC は、NEXCO の構造物施工管理要領<sup>14)</sup>の上面増厚工法用エポキシ樹脂接着剤の品質基準以上の付着強度を有することが確認されている<sup>15)</sup>。本研究のように接着剤未使用時においても既設コンクリートとの一体性はある確保されていたと考えられるものの、供試体断面の観察結果から、輪荷重走行試験の終盤においては LMC と既設コンクリートの剥離もしくは付着力の低下が生じたものと考えられる。したがって、水平ひび割れの発生と、LMC と既設コンクリートの剥離、付着力の低下により、有効な床版厚さが減少し、せん断耐力が低下することで、最終的に押抜きせん断破壊に至ったものと推察する。



(橋軸直角方向)



(橋軸方向)

写真-3.4.1 供試体内部のひび割れ状況

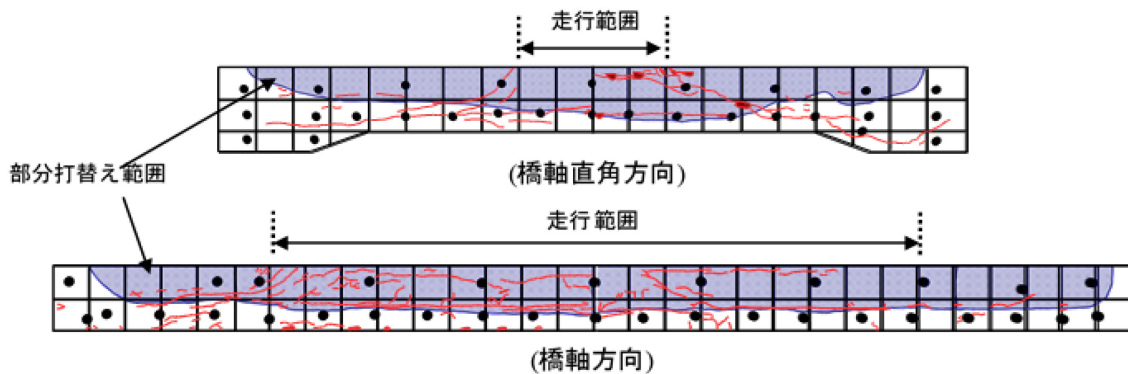


図-3.4.4 供試体内部のひび割れ状況

### 3.4.4 共振周波数

表-3.4.1 および図-3.4.5 に共振周波数比と等価繰返し走行回数との関係を示す。ここで共振周波数比は、各段階で測定された共振周波数と先行载荷前における共振周波数との比である。部分打替え前の先行载荷では、共振周波数比の変化は小さくほぼ一定で推移したが、ASR 促進養生後に 0.75 まで大きく低下した。小型加振器を用いた強制振動試験は、振動が及ぶ範囲の局所な振動による共振周波数を測定しているため、加振方向を直交するひび割れが測定値に及ぼす影響が大きいと考えられる。また、RC 床版に ASR が生じると、補強鉄筋のない鉛直方向の膨張が卓越し、水平方向のひび割れが層状に発生するとされる<sup>16)</sup>。本研究でも、ASR 促進養生により水平方向にひび割れが発生し、その影響により共振周波数比が大きく低下したものと推察される。その後、等価繰返し走行回数の増加にともない共振周波数比がさらに低下し、疲労限界状態では 0.24 であった。

部分打替え後の共振周波数比は、先行载荷前までは達しなかったものの 0.8 まで回復した。床版上側は LMC で置き換わったものの、下側には ASR と繰返し荷重により損傷を受けたコンクリートが残存しているため、健全時までは共振周波数が回復しなかったと考えられる。部分打替え後の共振周波数比は、等価繰返し走行回数の増加にともない緩やかに低下した後、300 万回付近より低下の度合いが大きくなり、約 4 億回の時点で 0.31 まで低下した。前述の通り強制振動試験は加振方向を直交するひび割れに対する感度が高いと考えられ、供試体内部の上側鉄筋位置の水平ひび割れや部分打替え部界面に沿ったひび割れにより、共振周波数が大きく低下したものと考えられる。すなわち、これらの損傷が、等価繰返し走行回数 300 万回付近より生じ始めたことを示唆する結果と推察される。なお、この時点では、活荷重たわみや床版下面のひび割れ密度には大きな変化は見られず、強制振動試験により床版内部の損傷をより早期に検出したものと考えられる。

表-3.4.1 共振周波数比

部分打替え前		部分打替え後	
等価繰返し 走行回数	共振周波数比	等価繰返し 走行回数	共振周波数比
1	1.00	1	0.80
5,000	0.95	100,000	0.72
30,000	0.97	1,521,959	0.73
100,000	0.89	2,943,919	0.64
100,000	0.75	23,059,889	0.61
3,043,919	0.73	59,109,115	0.46
8,900,768	0.34	203,306,020	0.29
9,046,410	0.24	437,358,587	0.31

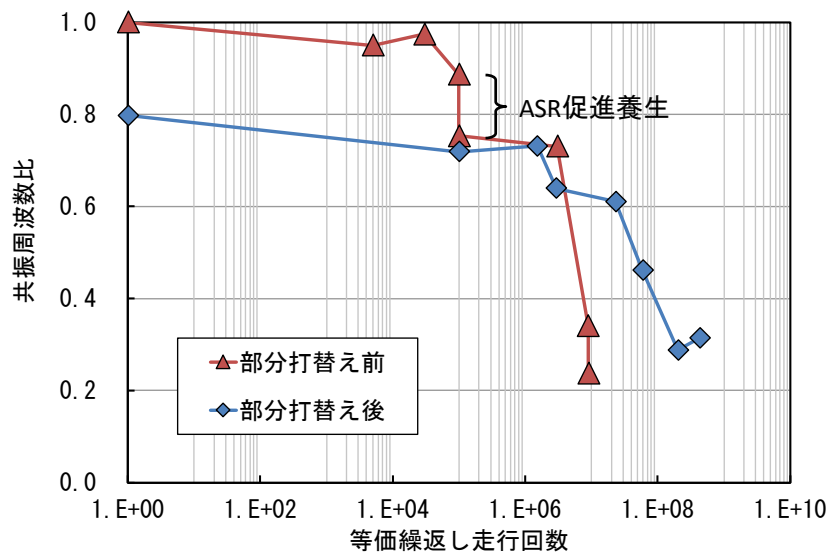


図-3.4.5 共振周波数比

### 3.5 まとめ

本章では、ASR と疲労の複合劣化を受けた RC 床版を対象に、LMC を用いた部分打替えを行い、補強後の耐疲労性について検討を行った。以下に、得られた主な結果を示す。

- (1) 疲労限界時の等価繰返し走行回数を比較すると、部分打替え後は部分打替え前の 178 倍となり、ASR と疲労により複合劣化した RC 床版に対する部分打替えによる補強効果が明確に認められた。これは、供試体上面を力学特性や水の浸透抵抗性に優れる LMC で置き換えたことで、圧縮側コンクリートのせん断抵抗が向上したことや、RC 床版の耐疲労性を大きく低下させる水の浸透が抑制されたことなどが寄与したものと考えられた。
- (2) 部分打替え前は、ASR 膨張と疲労により床版下面全体に格子状にひび割れが生じた。部分打替え後は、輪荷重の繰返しにともなう新たなひび割れの発生は少なかった。
- (3) 共振周波数比は、ASR の発生やその後の輪荷重走行試験による疲労によって大きく低下したが、部分打替え後は共振周波数比も健全時までとはいかないが増加した。すなわち、この種の非破壊検査からも耐疲労性に対する補強効果の評価が可能であると考えられた。
- (4) 輪荷重走行試験終了後の断面観察より、疲労限界が上側鉄筋付近における水平ひび割れの発生に加え、部分打替え箇所界面の剥離によって有効な床版厚さが減少し、せん断耐力が低下したことに起因したものと考えられた。このことは、RC 床版の損傷部分を新たな材料で打ち替えるような部分打替えにおける既設部との一体性の確保の重要性を示唆するものと考えられた。



### 3章の参考文献

- 1) 前島拓, 子田康弘, 岩城一郎, 内藤英樹, 岸良竜, 鈴木康範, 大田孝二, 鈴木基行: アルカリシリカ反応が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響, 土木学会論文集 E2, Vol.72, No.2, pp.126-145, 2016.
- 2) 伊戸康清, 島田守, 大田孝二, 五島孝行, 柴田辰正: アルカリシリカ反応で損傷した鋼道路橋 RC 床版の調査, 第1回北陸橋りょう保全会議, pp.63-66, 2013.
- 3) 兵頭彦次, 市川裕規, 七尾舞, 梶尾聡, 長塩靖祐, 杉山彰徳: ラテックス改質速硬コンクリートを用いた道路橋床版の長寿命化の取組み, セメント・コンクリート, No.867, pp.8-14, 2019.
- 4) 橋本雅行, 山本誠, 渡邊宗幸, 岸良竜, 小森篤也, 三田村浩: 道路橋床版の長寿命化を目的とした橋面コンクリート舗装に関する検討, 第11回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.121-126, 2020.
- 5) 郭度連, 森山守, 菊池徹, 李春鶴: ラテックス改質速硬コンクリートの基礎物性と耐久性能に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1939-1944, 2015.
- 6) 土木学会: 2017年制定コンクリート標準示方書[設計編], p43, 2017.
- 7) 広中憲, 大西弘志, 横山広, 関口幹夫, 堀川都志雄: 道路橋 RC 床版の疲労耐久性を評価するための試験方法について, 第3回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.17-24, 2003.
- 8) 前島拓, 子田康弘, 土屋智史, 岩城一郎: 塩害による鉄筋腐食が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響, 土木学会論文集 E2, Vol.70, No.2, pp.208-225, 2014.
- 9) 内藤英樹, 小林珠祐, 土屋祐貴, 杉山涼亮, 山口恭平, 早坂洋平, 安川義行, 鈴木基行: 局所振動に基づく道路橋 RC 床版の内部損傷評価, 土木学会論文集 E2, Vol.73, No.2, pp.133-149, 2017.
- 10) 土木学会: 道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上, 2004.
- 11) 松井繁之: 橋梁の寿命予測-道路橋 RC 床版の疲労寿命予測, 安全工学, Vol.30, No.6, pp.432-440, 1991.
- 12) 松井繁之: 移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について, コンクリート工学年次論文報告集9 (2), pp.627-632, 1987.
- 13) 横山広, 浦修造, 関口幹夫, 堀川都志雄: 床版の劣化現象および床版補修方法に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.451-455, 2010.
- 14) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社: 構造物施工管理要領 3 保全編, pp.106-112, 2016.
- 15) 岸良竜, 中村浩章, 兵頭彦次, 早野博幸, 丸田浩: 下地処理条件がラテックス改質コンクリートの付着特性に及ぼす影響, 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21巻, 2021.
- 16) 久保善司, 佐古崇, 川崎文義, 横山広: 床版部材の ASR 膨張挙動と FRP シート貼付けによる膨張抑制, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1243-1248, 2009.





## 第 4 章 鋼主桁上 RC 床版の ASR による劣化性状評価

## 4.1 概説

ASRに関する研究の多くは、コンクリートにアルカリを添加した上で、40℃等の高温高湿度環境下での促進養生が行われている。しかし、ASRがRC床版の耐疲労性に及ぼす影響に関して、著者を含む前島らの研究グループは、ASR促進養生における養生温度、すなわちASRの膨張速度が試験結果に影響を及ぼすことを明らかにしている<sup>1)</sup>。また、実環境のコンクリート構造物において、ASR劣化が顕在化するのには数十年を要する<sup>2)</sup>ことも考慮すると、より実環境に近い条件下での検討が必要であると考えられる。

ASRが生じるとRC床版にはひび割れが発生するが、RC床版内部のひび割れは、荷重による斜めひび割れ発生状況や押抜きせん断耐力に影響を及ぼすとされる<sup>3)</sup>。ASRによるひび割れの発生形態はASR膨張に対する内部鉄筋や外部からの拘束状況により異なるものとなる。設計上はRC床版と鋼主桁間の力の伝達を考慮しない非合成桁橋においても、実際にはスラブアンカーを介して合成桁に近い挙動を示すとされること<sup>4)</sup>を考えると、実橋のRC床版のASRによるひび割れは、主鉄筋、配力鉄筋に加えてこの鋼主桁の拘束の影響を受ける可能性がある。

そこで本章では、RC床版におけるASR劣化性状についてより実態に即した評価を行うことを目的として、鋼主桁上に実物大のRC床版を架設し、約4年間、屋外暴露環境下で各種計測を実施した。具体的には、RC床版内部に設置した埋込み型ひずみ計により、RC床版の膨張挙動をモニタリングするとともに、強制振動試験、偏光顕微鏡観察およびSEM-EDS分析、透気試験により、劣化の進行度を評価した。

## 4.2 実験概要

### 4.2.1 使用材料およびコンクリートの配合

表-4.2.1に、コンクリートの使用材料を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材には砕砂（化学法で無害）を使用した。粗骨材のG1は、化学法で無害と判定された砕石である。表-4.2.2および図-4.2.1に、粗骨材G2のアルカリシリカ反応性試験結果を示す。G2は化学法、モルタルバー法ともに「無害でない」と判定されたASR反応性を有する砕石である。また、ASRを促進する目的でNaClを使用した。

表-4.2.3に、供試体を使用したコンクリートの配合を示す。ASRが生じていない健全なコンクリートを想定した配合では、ASRについて無害と判定された細骨材、粗骨材を使用した。ASRを生じさせる配合では、粗骨材に反応性粗骨材G2を使用し、さらにNaClをコンクリートの外割で18.9kg/m<sup>3</sup>(Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>で10kg/m<sup>3</sup>)添加した。水セメント比は55.0%とした。なお、本実験に使用したコンクリートと同一材料・配合で作製した円柱供試体(φ100×200mm)について、SSW試験<sup>5)</sup>を実施したところ、促進材齢91日の時点で6000×10<sup>-6</sup>の膨張量に達することを確認している。

表-4.2.1 使用材料

種類	記号	使用材料および物性
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	砕砂(硬質砂岩), 表乾密度 2.64g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G1	砕石 2005(硬質砂岩), 表乾密度 2.72 g/cm <sup>3</sup>
	G2	砕石 2005(安山岩), 表乾密度 2.67g/cm <sup>3</sup>
化学混和剤	Ad	AE 減水剤 標準形(I種), リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
塩化ナトリウム	NaCl	-

表-4.2.2 アルカリシリカ反応性(粗骨材:G2)

JIS A 1145(化学法)			JIS A 1146 (モルタルバー法)	
溶解シリカ量 (Sc) (mmol/L)	アルカリ濃度減少量 (Rc) (mmol/L)	判定	材齢 26 週 膨張量 (%)	判定
611	123	無害でない	0.592	無害でない

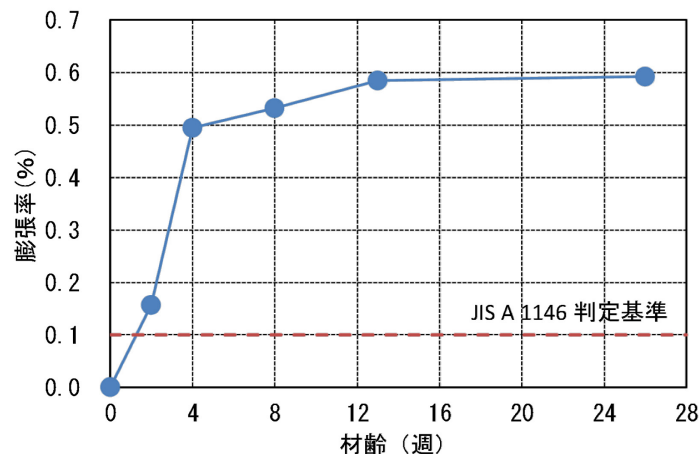


図-4.2.1 モルタルバー法試験結果(粗骨材:G2)

表-4.2.3 コンクリートの配合

種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					Ad (C×%)	NaCl (kg/m <sup>3</sup> )	スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G1	G2				
健全	55.0	47.0	172	313	834	1001	-	1.4	-	11.5	4.5
ASR	55.0	45.0	168	305	847	-	977	1.0	18.9	12.0	5.7

#### 4.2.2 供試体の概要

図-4.2.2 および図-4.2.3 に床版供試体の概要を、写真-4.2.1 に全景を示す。道路橋示方書に従った非合成鋼2主I桁橋を2連架設した。設置場所は、福島県郡山市の日本大学構内の屋外である。鋼主桁は非合成桁を想定して900-H(長さ10000mm)を使用した。また、床版の浮上り防止を目的としてスラブアンカー(丸鋼φ16)を溶接した(写真-4.2.2)。RC床版供試体は幅3500mmとし、健全な状態を想定した床版(以下、健全床版供試体)では長さを3000mmとし、ASR劣化を生じさせる床版(以下、ASR床版供試体)では長さを6285mmとした。ASR床版供試体については、5章に示すように供試体を切り出し、ASR劣化に対する補強方法の検討を行うために、橋軸方向の長さを大きくしている。設計上の厚さはいずれも210mmとしたが、健全床版供試体は別の研究も兼ねており、実橋のRC床版と同様に橋面の橋軸直角方向に排水勾配を設けたため、橋軸直角方向の中央位置の厚さが230mmとなっている。

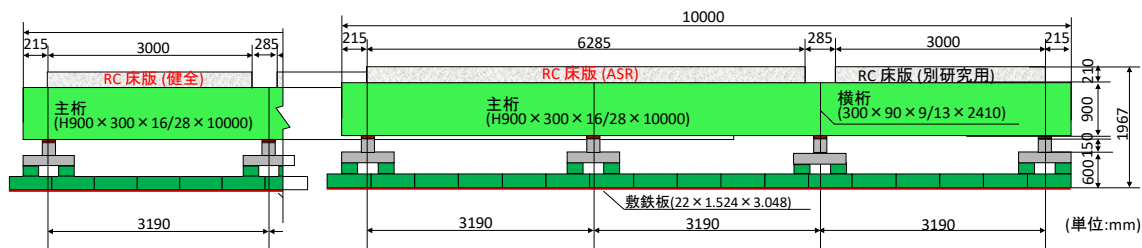


図-4.2.2 構造一般図

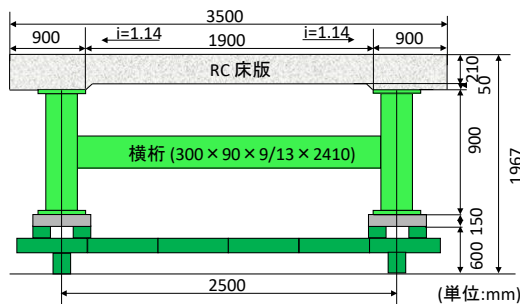


図-4.2.3 構造一般図



写真-4.2.1 RC床版供試体の外観

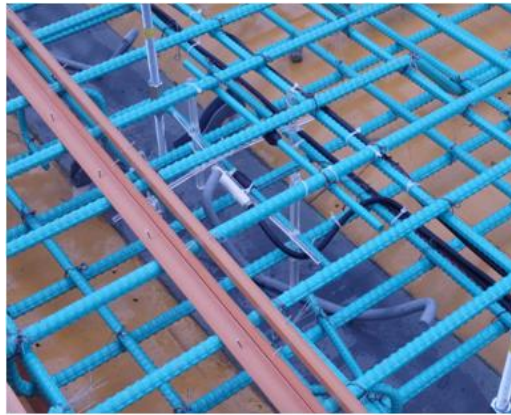


写真-4.2.2 スラブアンカーおよびエポキシ樹脂塗装鉄筋

図-4.2.4 に床版供試体の配筋図を示す。図は ASR 床版供試体のものであるが、長さが異なる以外は健全床版供試体の配筋も同様である。引張側の主鉄筋(D19, D345)と配力鉄筋(D16, D345)の鉄筋中心間隔は、それぞれ 150mm および 140mm とした。なお、ASR 床版供試体については、NaCl を多量にコンクリートに添加していることによる鉄筋腐食が懸念されたため、主鉄筋、配力鉄筋ともにエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用した(写真-4.2.2)。

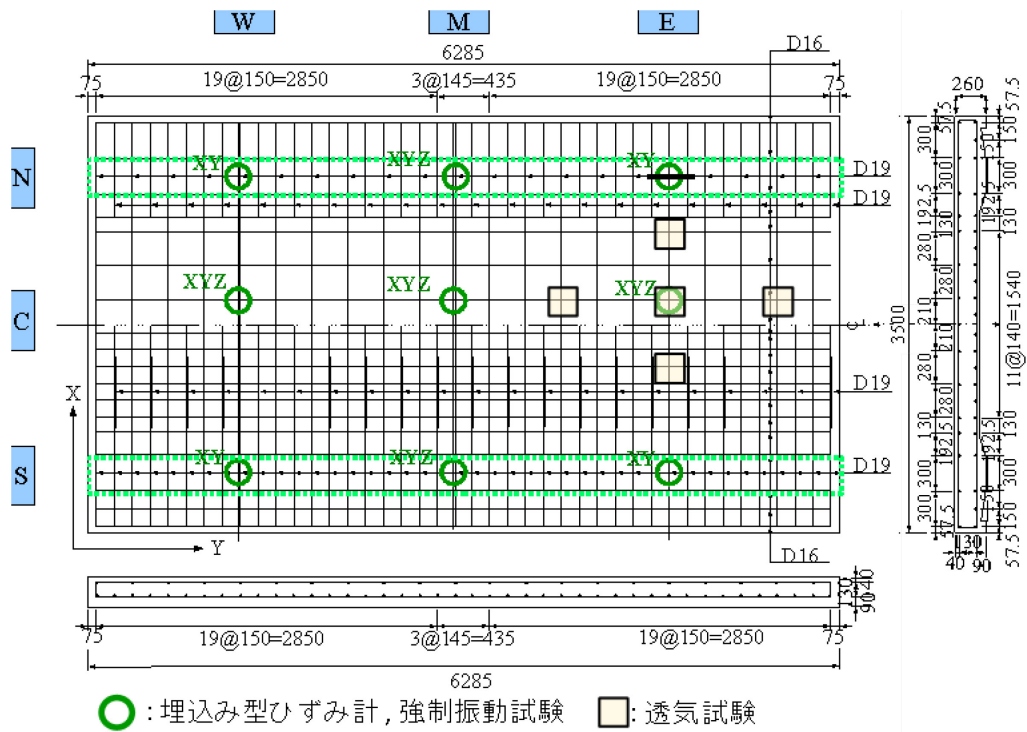


図-4.2.4 配筋図および測定位置

コンクリートの打込みは、健全床版供試体は2015年10月13日に、ASR床版供試体は2016年3月1日に実施した。健全配合のコンクリートは、レディミクストコンクリートを使用した。ASR配合のコンクリートは、移動式プラントにより製造した。床版作製後は、湿潤養生を材齢7日まで実施したが、ASR床版供試体については、ASRの促進を目的に床版上面が常に湿潤状態を保つように、床版上面に水が均等に分布する特殊加工フィルム(液体搬送シート)を養生終了後に敷設し、約3年間湿潤状態を維持した。

#### 4.2.3 測定項目および方法

##### (1) コンクリートおよび鉄筋のひずみ

床版供試体内部に低弾性タイプの埋込み型ひずみ計を設置し、コンクリートのひずみを測定した。図-4.2.4に埋込み型ひずみ計の設置位置を、写真-4.2.3に設置状況を示す。床版の中央ライン(図中のMおよびC)では、橋軸直角方向(X方向)、橋軸方向(Y方向)および鉛直方向(Z方向)の3方向に、その他の位置ではX、Yの2方向に設置した。中央ラインの主鉄筋およびその他の4点の配筋鉄筋には、ひずみゲージを貼り付け、鉄筋ひずみを測定した。これらの測定に併せて、サーミスタ温度計と高分子膜抵抗式湿度センサを用いて、外気温および相対湿度を測定した。写真-4.2.4に、外気温および湿度の測定状況を示す。



写真-4.2.3 埋込み型ひずみ計の設置状況



写真-4.2.4 外気温および湿度の測定状況

## (2) 偏光顕微鏡観察および SEM-EDS 分析

ASR の発生状況および進行程度を確認することを目的に、ASR 床版供試体からコアを採取し、肉眼・実体顕微鏡観察、偏光顕微鏡観察および SEM-EDS 分析を行った。コアは、材齢 1140 日に採取した。

まず、短径 5mm 以上の骨材を粗骨材、それ未満を細骨材として扱い、骨材の種類や形状、岩石種の観察を肉眼・実体顕微鏡および偏光顕微鏡下で行った。肉眼・実体顕微鏡観察には、コンクリートの切断面や破断面を用い、偏光顕微鏡観察には、コンクリートから作製した厚さ 20 $\mu$ m 程度の薄片試料を用いた。粗骨材の岩石種構成は、コンクリートコアの切断面における岩石種ごとの面積割合として求めた。同様に、実体顕微鏡および偏光顕微鏡下で、ASR の発生状態や ASR 反応性鉱物、その他の特徴について観察した。

次いで、偏光顕微鏡観察が終了した鏡面研磨薄片を用いて、ASR ゲル（骨材中のひび割れ・セメントペースト中のひび割れ）および代表的な未水和セメント粒子と周辺に生成した CSH ゲル（未水和エーライト・未水和ビーライト・エーライト由来の CSH ゲル・ビーライト由来の CSH ゲル）を反射電子像により観察し、化学組成の定量分析（SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, SO<sub>3</sub>）を行った。分析には、走査電子顕微鏡に併設したエネルギー分散型スペクトル検出装置を用いた。分析条件は、加速電圧 15kV、ビーム電流 0.50nA、データ取得時間 30s とし、ZAF 補正を行った。

## (3) 圧縮強度および静弾性係数

床版供試体作製時に円柱供試体(φ 100×200mm)を作製し、床版供試体の近傍の屋外で現場水中養生を行った。所定の材齢(28 日, 91 日, 182 日)で、JIS A 1108 に準拠して圧縮強度試験を、JIS A 1149 に準拠して静弾性係数試験を行った。また、床版供試体からコア供試体(φ 100mm)を採取し、圧縮強度および静弾性係数試験を実施した。試験は材齢 3 年(ASR 床版：材齢 1147 日)および材齢 4 年(健全床版：材齢 1772 日, ASR 床版：材齢 1632 日)に実施した。

## (4) 強制振動試験

ASR による劣化度を非破壊試験により評価することを目的として、100~20,000Hz の電磁コイル式の小型加振器を励振器とした強制振動試験<sup>9)</sup>を行った。本手法は、対象とする構造物に調和振動を与えることで加振方向に局所的な振動を励起させ、振動が及ぶ範囲内の共振周波数を測定するものである。ひび割れや空隙の存在によって剛性と共振周波数が低下することに着目して、部材内部の劣化、損傷を評価する。図-4.2.4 に、測定位置を示す。測定は床版下面より実施し、ASR 床版供試体では図の 9 カ所、健全床版供試体では中央ライン(図中の M および C)上の 5 カ所で測定した。



#### (5) 透気試験

所定の材齢で、トレント法<sup>7)</sup>によりコンクリートの透気係数を、Wenner法(四電極法)により電気抵抗率を測定した。図-4.2.4に測定位置を示す。健全床版供試体では、床版の上面、下面で測定を実施した。ASR床版供試体では、床版上面には液体搬送シートが敷設されているため、床版下面でのみ実施した。写真-4.2.5に、透気試験状況を示す。



写真-4.2.5 透気試験状況



## 4.3 結果および考察

### 4.3.1 コンクリートの膨張挙動

#### (1) 外気温および相対湿度

図-4.3.1に、外気温および相対湿度の測定結果を示す。なお、図中の材齢は健全供試体の作製日を基準としており、ASR床版供試体の作製日は材齢140日に該当する。外気温は季節に応じて-5～30℃の範囲で変動した。試験期間中の相対湿度は33～100%RHであり、夏季および秋季が比較的高い傾向であった。

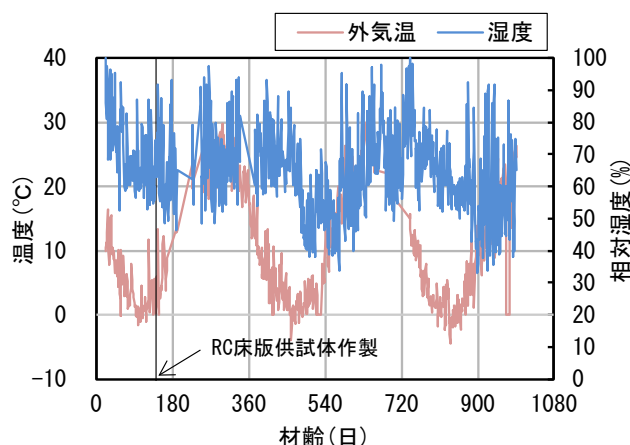


図-4.3.1 外気温および湿度

#### (2) コンクリートひずみ

図-4.3.2～図-4.3.4に、健全床版供試体およびASR床版供試体のコンクリートひずみを示す。健全床版供試体では、材齢の経過とともにコンクリートに乾燥収縮に起因すると考えられる収縮挙動を示した。材齢1000日のひずみは鉛直方向(Z方向)で $-200\sim 470\times 10^{-6}$ 程度であった。配力鉄筋による拘束により、橋軸方向(Y方向)は鉛直方向よりひずみの変化が小さい傾向にあり、 $-100\sim 290\times 10^{-6}$ 程度であった。

ASR床版供試体のひずみは、供試体作製後しばらくはほぼ一定で推移した後、材齢120日頃より膨張が顕在化した。温度の上昇にともないASRが進行したものであり、この時点の外気温は25℃程度であった。ASR床版供試体では、水平方向と比較して鉛直方向で著しい膨張を示した。これは、水平方向では主鉄筋、配力鉄筋の拘束を受けるのに対し、補強鉄筋が配置されない鉛直方向では拘束が小さいためと考えられる。材齢1000日のひずみは最大で $8200\times 10^{-6}$ であった。W-C位置の膨張量は、他の測点より $3000\times 10^{-6}$ ほど小さかった。

水平方向で比較すると、いずれの測定位置においても橋軸直角方向(X方向)より橋軸方向(Y方向)の膨張量が小さい傾向にある。鉄筋比は橋軸直角方向で1.4%、橋軸方向は1.0%であり、橋軸方向が鉄筋の拘束度は小さいにも関わらず膨張量は小さくなっている。これは、鋼主桁による橋軸方向の拘束の影響が大きいことを示していると推察される。

鉛直方向のひずみは測定位置でばらつきがみられた。また、鋼主桁の拘束の影響はCよりN

およびSで大きいと想定されるものの、橋軸方向および橋軸直角方向のひずみの測定結果は必ずしもCがNおよびSより大きくなってはおらず、測定位置でばらつきがみられる。これは、コンクリートの膨張が、内部鉄筋および鋼主桁による拘束に加えて、局所的な日射、日影による温度変化や粗骨材の反応性のばらつきの影響などを受けているためと考えられる。

ASR床版供試体では、比較的高温の夏季に大きく膨張し、冬季には膨張が停滞する挙動が反復して生じていた。一般に、温度が高いほど化学反応の反応速度は速くなり、ASRにおいても温度が高いほど膨張量が大きくなることが確認されている<sup>8)</sup>。このASRの温度依存性により、実環境下のASR膨張は、周期的な季節変動を示した。実環境下におけるこのような挙動は、竹内ら<sup>9)</sup>も報告している。ここで膨張開始を示す温度に着目すると、試験開始1年目は外気温25°C程度であるが、2年目は20°C程度、3年目は10°C程度となり、ASRの進行にともない低下する傾向であった。

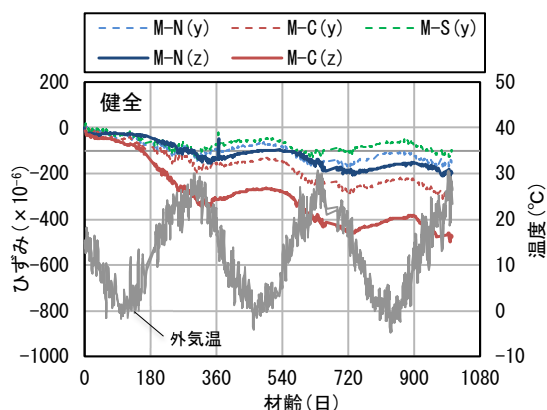
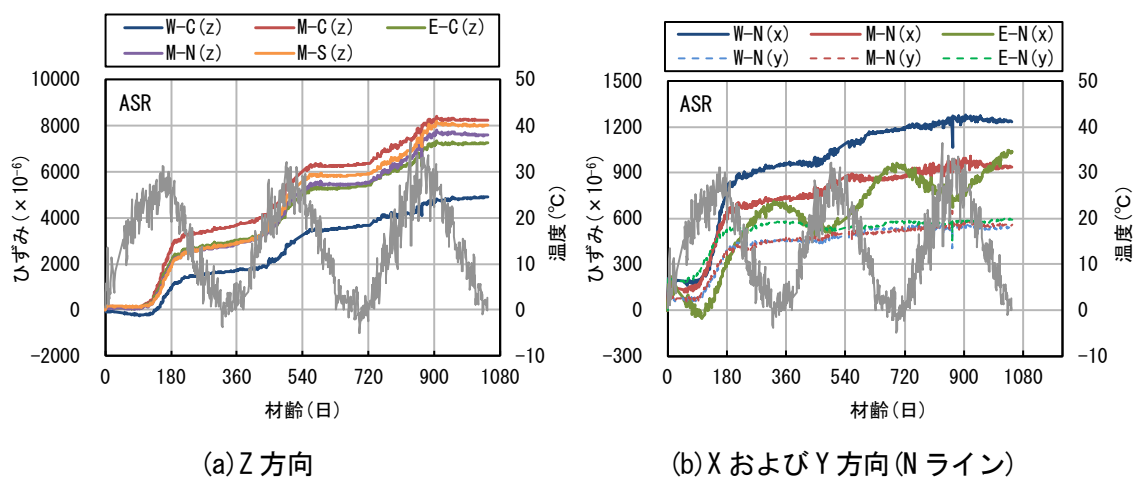


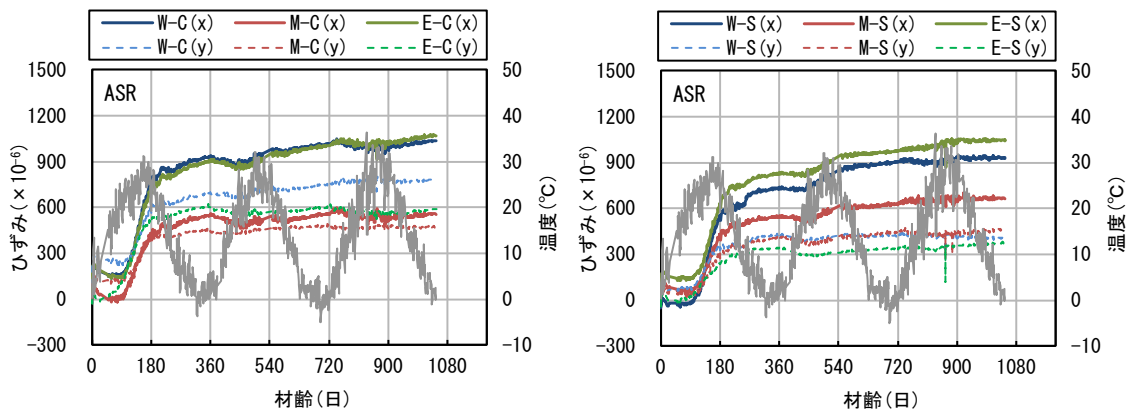
図-4.3.2 コンクリートのひずみ(健全床版供試体)



(a) Z方向

(b) XおよびY方向(Nライン)

図-4.3.3 コンクリートのひずみ(ASR床版供試体)



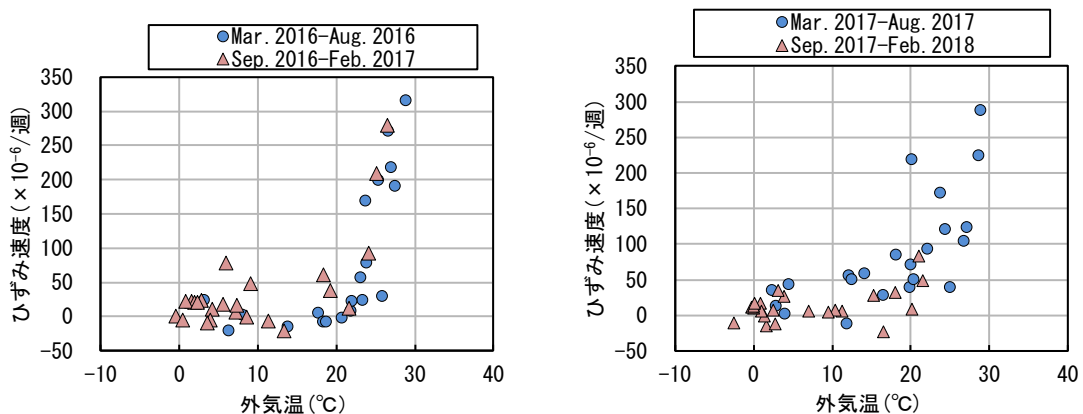
(c) X および Y 方向(C ライン)

(d) X および Y 方向(S ライン)

図-4.3.4 コンクリートのひずみ(ASR 床版供試体)

図-4.3.5 および図-4.3.6 に、鉛直方向のひずみ速度と外気温の関係を示す。ひずみ速度は、全体の挙動を把握するために週間ごとに平均化して算出した。図より、材齢の経過に伴い低温でも膨張が生じ、さらにひずみ速度のばらつきが大きくなっている。床版供試体の内部で生じた ASR ゲルに、ひび割れを通じて水分が供給されたことにより低温期でも膨張が生じたことが考えられ、水分の供給状況によってひずみ速度にばらつき生じたものと推察される。また、ひび割れの増加により、コンクリートの剛性が低下し、小さい膨張圧でも体積変化が生じ易くなったことも一因と考えられる。

1 年目から 3 年目にかけて膨張時のひずみ速度は小さくなる傾向にあり、ASR の進行は緩やかになりつつあるものの、なお継続していることが窺われた。



(a) 2016. 3~2017. 2

(b) 2017. 3~2018. 2

図-4.3.5 コンクリートのひずみ速度(ASR 床版供試体)

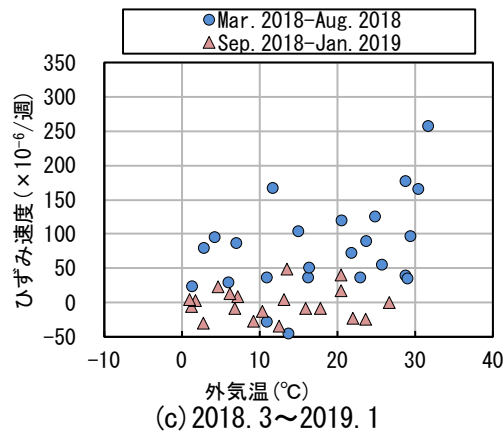


図-4.3.6 コンクリートのひずみ速度 (ASR 床版供試体)

### (3) 鉄筋ひずみ

図-4.3.7に、ASR 供試体における鉄筋ひずみを示す。コンクリートの膨張と同時期より鉄筋に引張ひずみが生じ始めているが、コンクリートの膨張がそれ以降も継続しているのに対し、鉄筋ひずみの変化は小さかった。測定位置でばらつきは見られるものの、材齢 600 日時点の鉄筋ひずみは、おおむね  $300 \sim 700 \times 10^{-6}$  程度であった。

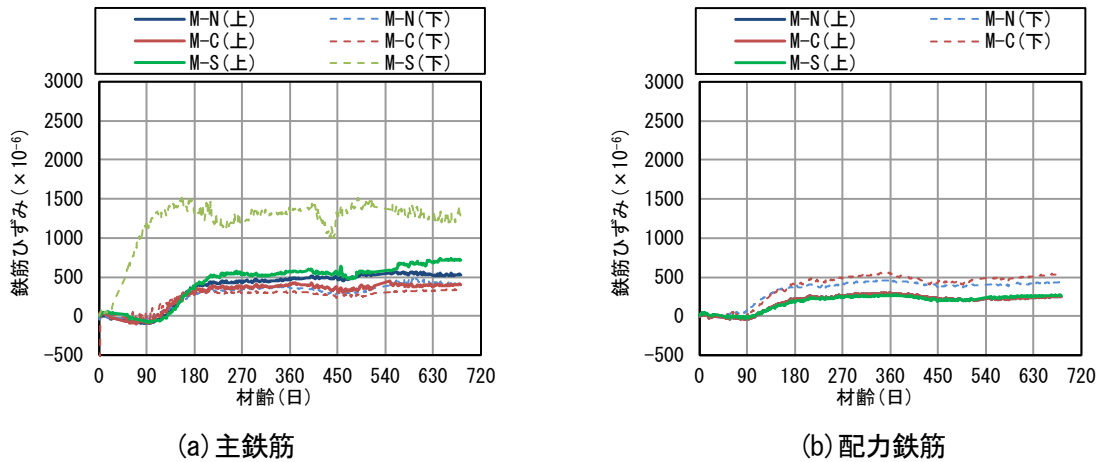


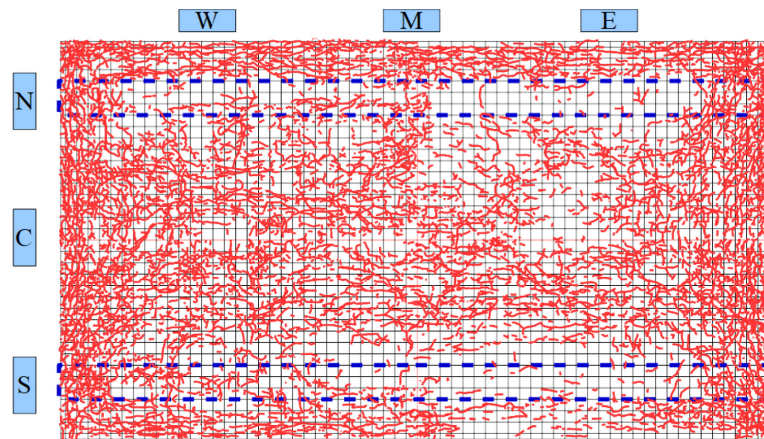
図-4.3.7 鉄筋ひずみ

## 4.3.2 床版供試体のひび割れ発生状況

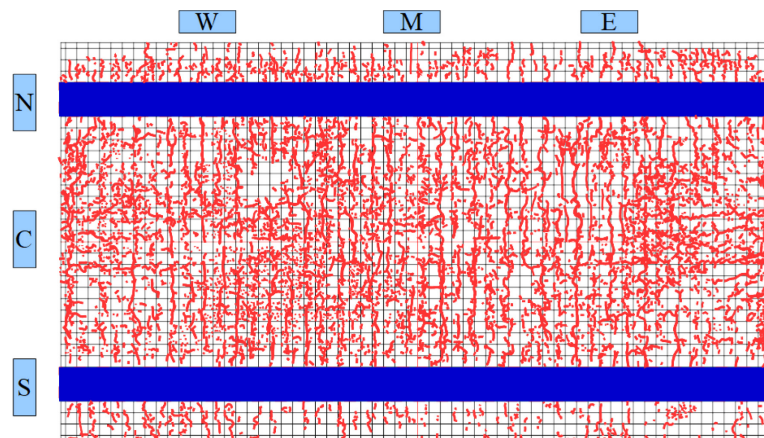
### (1) 床版上面および下面

図-4.3.8に、材齢 667 日における ASR 床版供試体の上下面に発生したひび割れの発生状況を示す。図より床版上面では、床版端部におけるひび割れが多く見られた。これは、定着確保を目的に床版端部に鉛直方向の鉄筋が配置されているため、コンクリートの膨張に対する拘束度が床版端部で大きくなったことに起因すると考えられる。また床版上面では、床版中央位置において橋軸方向へのひび割れが多く生じているが、これは床版中央位置における膨張が大きいことに加え、床版上下面で ASR の進行程度に差異が生じたことから、床版上面が凸に反るよ

うに変形し、床版中央で引張応力が大きくなったためと考えられる。一方で床版下面については、床版上面とは異なり、橋軸方向および橋軸直角方向へのひび割れが多く見られた。これは、主鉄筋、配力鉄筋および鋼主桁により橋軸方向および橋軸直角方向への変形が拘束されたことによるものと考えられる。



(a) 床版上面



(b) 床版下面

図-4.3.8 ASR 床版供試体のひび割れ発生状況

## (2) 床版供試体内部のひび割れ

写真-4.3.1に、床版供試体から採取したコアの外観を示す。鉛直方向の膨張が卓越したことで、供試体内部には水平方向にひび割れが生じていた。同様のひび割れは、ASRが生じた実橋でも観察されており<sup>10)</sup>、今回の試験は実橋での劣化状況を再現できているものと考えられる。採取したコア供試体では、上側鉄筋付近に0.5~1.0mm程度の比較的幅の大きなひび割れが生じていた。床版供試体では上面から水を供給していたため、床版供試体の上側の膨張が特に大きくなったためと推察される。上側鉄筋位置の水平ひび割れは、RC床版の疲労耐久性に大き



な影響を及ぼす<sup>11)</sup>ことが知られている。採取したコアのおおむね全てで、この位置に幅の大きなひび割れが生じていた。

写真-4.3.2に、5章で示す載荷試験用供試体を採取した際の床版供試体の切断面を示す。上側鉄筋位置の比較的大きなひび割れは、床版供試体の切断面内の複数個所で確認でき、床版内部で広範囲に生じているものと考えられる。

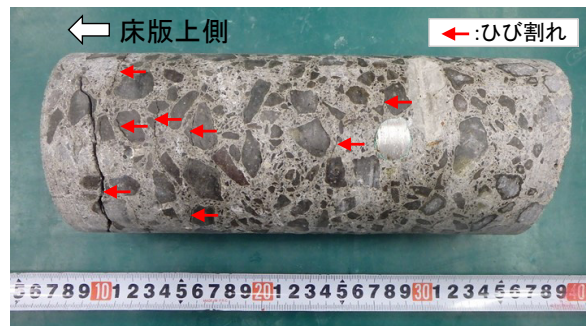


写真-4.3.1 床版内部のひび割れ状況

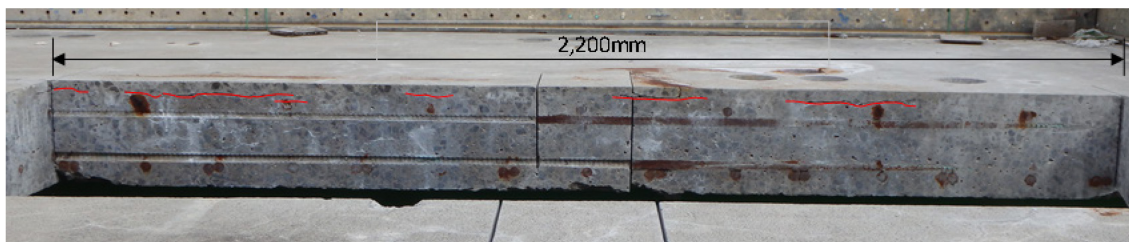


写真-4.3.2 床版切断面のひび割れ状況

#### 4.3.3 偏光顕微鏡観察およびSEM-EDS分析

##### (1) 骨材の種類および岩石種

表-4.3.1に、骨材の種類および岩石種の観察結果を示す。粗骨材は安山岩からなる砕石であり、細骨材は雲母片岩の砕砂であった。

表-4.3.1 骨材の種類および岩石種

粗骨材		細骨材	
種類	岩石種(vol.%)	種類	岩石種(vol.%)
砕石	安山岩(100)	砕砂	雲母片岩

##### (2) ASRの発生状況

写真-4.3.3に、実体顕微鏡による観察写真を示す。実体顕微鏡下において、ASRは粗骨材の安山岩に反応リムの生成、ASRゲルの滲出、ひび割れの生成が顕著に確認された。細骨材の雲母片岩には、ASRゲルの滲出までが認められた。ひび割れは、骨材同士をつないで表層に平行

な方向に卓越して進展しており，表層（上面）から深さ 10cm 程度まで認められた。

写真-4.3.4に，偏光顕微鏡による観察写真を，表-4.3.2に ASR の発生が認められた岩石に含まれる鉱物種の観察結果を示す。偏光顕微鏡観察の結果，粗骨材の安山岩に骨材内部からセメントペーストに進展する膨張ひび割れが認められ，セメントペースト中においてひび割れが，高密度に認められる箇所も存在した。ASR 反応性鉱物は，安山岩にガラスとクリストバライトが，雲母片岩に微晶質～隠微晶質石英が認められた。

表-4.3.3 に，実体顕微鏡観察および偏光顕微鏡観察に基づく ASR の進行状況を示す。Katayama<sup>12), 13)</sup>は，ASR は通常以下の順序で進行するとしている。

- 1)骨材の反応リムの形成
- 2)骨材周辺のゾル・ゲルの取り巻き
- 3)骨材内のひび割れ形成・ゲル充填
- 4)骨材を取り巻くセメントペーストへのひび割れ進展・ゲル充填
- 5)骨材から離れたセメントペーストの気泡内へのゲルの沈殿あるいは，密集したひび割れの形成

本研究でも Katayama の方法に従い，観察結果から劣化進行度を 3 段階(軽微，中程度，顕著)で推定した。すなわち，骨材に初期の反応(反応リム・ゲルの取り巻き)のみが主に認められる場合には軽微(潜伏期)と，ひび割れが多数の骨材内に生じたものや，骨材からセメントペーストにひび割れが進展し，コンクリートに劣化が生じたことを意味する場合は中程度(進展期・加速期)と，さらに反応が進行し，ひび割れに沿った気泡内へのゲルの頻繁な沈殿あるいは，密集したひび割れの形成が認められる場合は顕著(加速期，劣化期)と判定した。表-4.3.3 に示すとおり，粗骨材に反応性リムの形成，ASR ゲルの滲出，ひび割れの生成が顕著に確認され，セメントペースト中にひび割れが高密度に認められる箇所も存在したことから，ASR の劣化進行度は中程度～顕著と判定した。

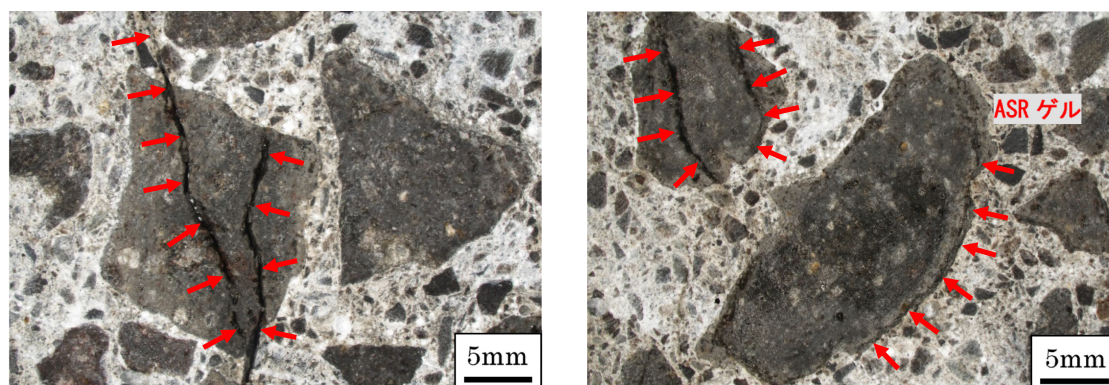


写真-4.3.3 実体顕微鏡観察結果

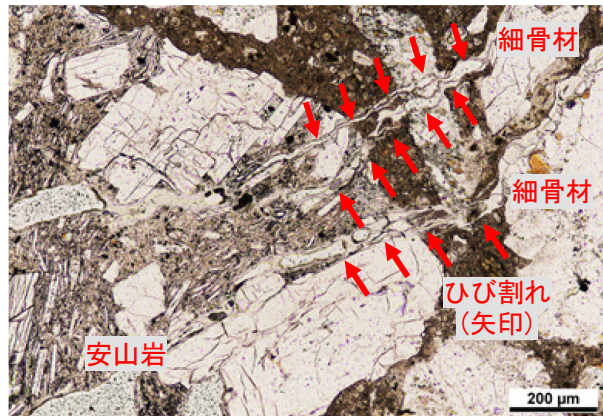


写真-4.3.4 偏光顕微鏡観察結果

表-4.3.2 ASRが発生した岩石の偏光顕微鏡観察結果

種類	岩石名	主要な構成鉱物 (おおむね構成割合の高い順に記載)
粗骨材(碎石)	安山岩	斜長石, ガラス*, クリストバライト*, 輝石, 不透明鉱物
細骨材(砕砂)	雲母片岩	石英, 斜長石, 微晶質～隠微晶質石英*, 黒雲母, 白雲母

※ASR 反応性鉱物

表-4.3.3 実体顕微鏡および偏光顕微鏡観察に基づく ASR の進行状況

岩種	進行段階 →					劣化度評価	
	i	ii	iii	iv	v		
	骨材	セメントペースト	骨材	セメントペースト			
	反応	ゲルの滲み・取り巻き	ひび割れ ゲル充填	ひび割れ ゲル充填	気泡 ゲル充填		
粗骨材	安山岩	◎	◎	◎	◎	○	中程度～顕著
細骨材	雲母片岩	○	○				軽微
総合評価						中程度～顕著	

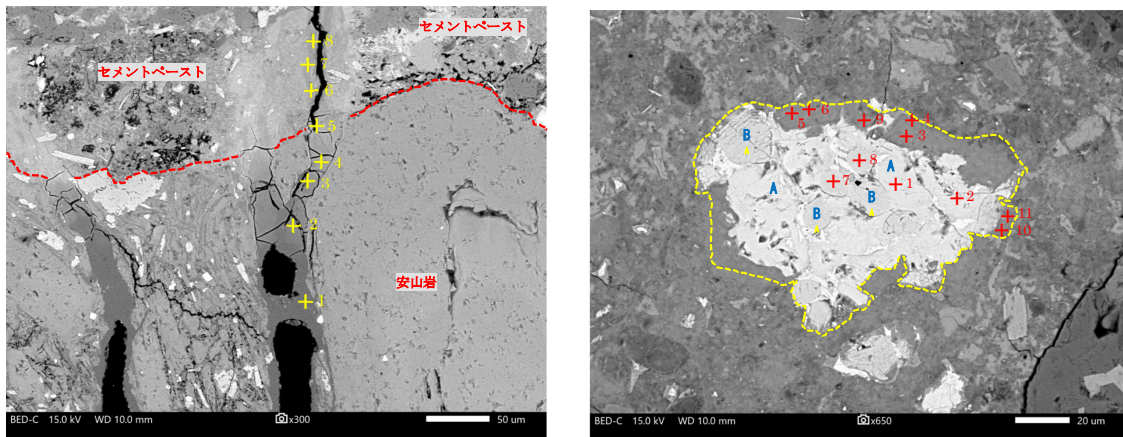
### (3) ASR ゲルの組成

写真-4.3.5 に, ASR ゲルおよび CSH ゲルの反射電子像を示す. 粗骨材およびセメントペースト中のひび割れを満たす ASR ゲルは, いずれも ASR ゲルと典型的な非晶質でゼリー状を呈する形態を示していた.

表-4.3.4 に ASR ゲルの EDS 定量分析結果を, 表-4.3.5 に CSH ゲルの EDS 定量分析結果を, 図-4.3.9 に, ASR ゲルの組成を示す. なお, 図は CaO, SiO<sub>2</sub> および Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O の定量値 (質量%) から, これらの総和が 1 となるように作成した. 図より, 骨材内部と比較してセメントペースト中の ASR ゲルは, CaO 量が大きく, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O 量が小さい傾向にある. これは, ASR ゲルが骨材からセメントペーストに移動する過程で, セメントペースト中のカルシウムとイオン交換し, アルカリ含有率が低下する<sup>14)</sup> ためである. CaO 量が 50% を超えるような高カルシ



ウム含有型のもは、ゲル自身の吸水・膨張性が大きく低下しているとされる<sup>15)</sup>が、今回の測定範囲ではセメントペースト中の ASR ゲルの化学組成は CaO(14~24%)、SiO<sub>2</sub>(35~52%)、Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O(4~9%)であることから、これには該当せず、セメントペースト中のひび割れは一定の流動性、膨張性を有している ASR ゲルで充填されていたと推察される。



(ASR ゲル)

(CSH ゲル)

写真-4.3.5 反射電子像

表-4.3.4 ASR ゲルの EDS 定量分析結果

分析箇所		SiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	[Ca/Si]	Ca/ (Na+K)
骨材内部	1	56.13	0.59	10.69	1.06	0.01	0.05
	2	54.15	6.01	8.72	0.99	0.11	0.62
	3	46.22	9.57	7.84	1.21	0.21	1.06
	4	52.56	13.91	6.20	1.09	0.26	1.91
	5	48.85	20.39	5.01	1.01	0.42	3.39
セメントペースト	6	38.15	20.85	3.43	0.75	0.55	4.99
	7	41.39	21.98	3.01	0.90	0.53	5.62
	8	35.25	20.85	2.70	0.88	0.59	5.82
	9	40.69	22.23	3.22	0.82	0.55	5.50
	10	41.14	23.96	3.47	0.91	0.58	5.47
	11	43.25	24.34	3.04	0.77	0.56	6.39
	12	52.27	19.63	5.84	1.10	0.38	2.83
	13	51.74	14.91	6.79	1.18	0.29	1.87
	14	50.90	14.73	7.40	1.36	0.29	1.68
	15	51.45	13.88	7.19	1.33	0.27	1.63

表-4.3.5 CSH ゲルの EDS 定量分析結果

分析箇所			SiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	[Ca/Si]	Ca/(Na+K)
エーライト	未水和	1	23.44	72.08	0.02	0.00	3.08	3604.00
		2	22.98	70.61	0.09	0.00	3.07	784.56
	水和	3	20.47	40.14	0.13	0.11	1.96	167.25
		4	21.25	39.72	0.13	0.00	1.87	305.54
		5	24.16	40.67	0.24	0.01	1.68	162.68
		6	24.55	40.51	0.23	0.03	1.65	155.81
ビーライト	未水和	7	28.74	62.53	0.55	0.54	2.18	57.37
		8	29.11	62.17	0.75	0.43	2.14	52.69
	水和	9	22.06	40.97	0.16	0.14	1.86	136.57
		10	24.18	40.37	0.29	0.01	1.67	134.57
		11	23.08	38.65	0.32	0.11	1.67	89.88

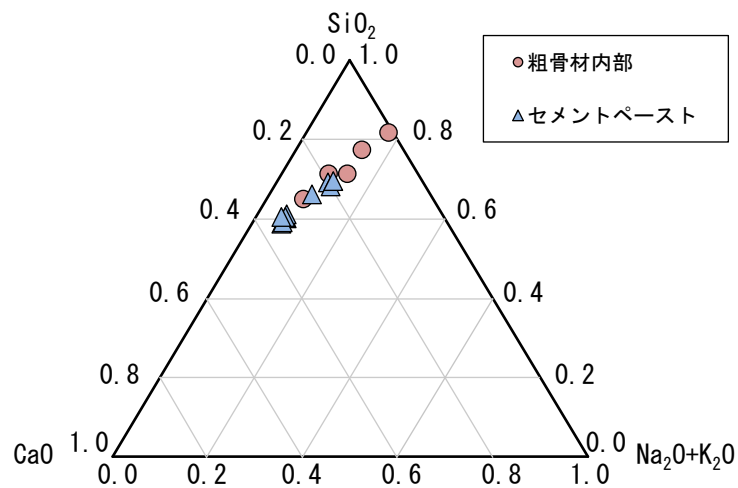


図-4.3.9 ASR ゲルの組成

ASR ゲルおよびCSH ゲルの化学組成の定量結果から、ASR ゲルと CSH ゲルの関係性のグラフを Katayama<sup>12), 13)</sup>の方法により作成した(図-4.3.10)。縦軸に Ca/Si の値を、横軸に Ca/(Na+K) の値をそれぞれ定量結果から導き、プロットした。通常 ASR ゲルは、骨材内部からセメントペーストに移動する過程でアルカリを放出すると同時に、セメントペースト中からカルシウムを吸収し、最終的に CSH ゲルと同様の組成(収斂点)に近づいていく。収斂点は、ASR ゲルの組成線と、エーライト・ビーライトの水和によって生じる 2 本の CSH ゲルの組成線の延長上の交点とされ、本研究の定量結果では、収斂点の組成は[Ca/Si]=1.5~1.7, [Ca]/[Na+K]=50~100 付近と推定される。図-4.3.10 において、ASR の組成線は短く、アルカリ比率の高い左端から赤矢印の部分までの領域に位置しており、収斂点とは隔たりがある。したがって、ASR の進行過程としては中期ステージであり、コンクリートは ASR による反応余力をなお十分に有していると考えられる。

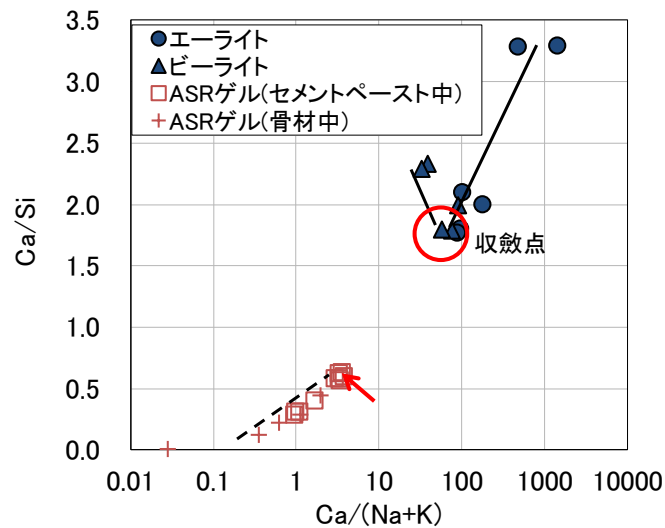


図-4.3.10 ASR ゲルおよび CHS ゲルの定量結果

#### 4.3.4 圧縮強度および静弾性係数

コンクリートの打込みと同時に作製し現場水中養生を行った円柱供試体(φ100×200mm)およびRC床版供試体から採取したコア供試体について、表-4.3.6に圧縮強度を、表-4.3.7に静弾性係数を、図-4.3.11に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。コア供試体は、材齢3年ではRC床版供試体の端部付近から、材齢4年では5章で示す載荷試験用供試体の切出し位置近傍から採取した。いずれの試験結果も供試体3本の平均値であるが、ASR床版のコア供試体のプロットには試験結果の最大値および最小値をエラーバーで示している。

図中には示方書<sup>16)</sup>に示される両者の関係を実線で示しているが、健全床版における両者の関係はおおむね示方書と同様であった。ASR床版の材齢91日の圧縮強度は46.0N/mm<sup>2</sup>であり、静弾性係数との関係も示方書と同様であったが、材齢182日より圧縮強度および静弾性係数の低下傾向がみられた。ASR床版では材齢120日頃より膨張挙動がみられたことを勘案すると、このころよりASRによりコンクリートの力学特性に変化が生じ始めたものと考えられる。ASR床版の材齢4年の圧縮強度は平均19.8N/mm<sup>2</sup>、静弾性係数は平均9.23kN/mm<sup>2</sup>であり、ASRが顕在化する前の材齢91日と比較すると圧縮強度は約4割まで、静弾性係数は約3割まで低下した。

表-4.3.6 圧縮強度

種類	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )							
	7日	28日	91日	182日	3年		4年	
	平均	平均	平均	平均		平均		平均
健全	23.3	31.0	38.1	36.1	-	-	41.1	40.8
					-		39.4	
					-		41.9	
ASR	26.1	35.4	46.0	39.7	33.2	31.5	22.7	19.8
					26.0		20.6	
					35.1		16.1	

\*材齢7日~182日：現場水中養生，材齢3年および4年：コア供試体

表-4.3.7 静弾性係数

種類	静弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )							
	7日	28日	91日	182日	3年		4年	
	平均	平均	平均	平均		平均		平均
健全	25.1	27.7	28.8	26.8	-	-	26.9	27.0
					-		24.8	
					-		29.2	
ASR	38.0	28.4	30.7	20.1	7.40	6.40	14.2	9.23
					6.10		6.17	
					5.70		7.33	

\*材齢7日~182日：現場水中養生，材齢3年および4年：コア供試体

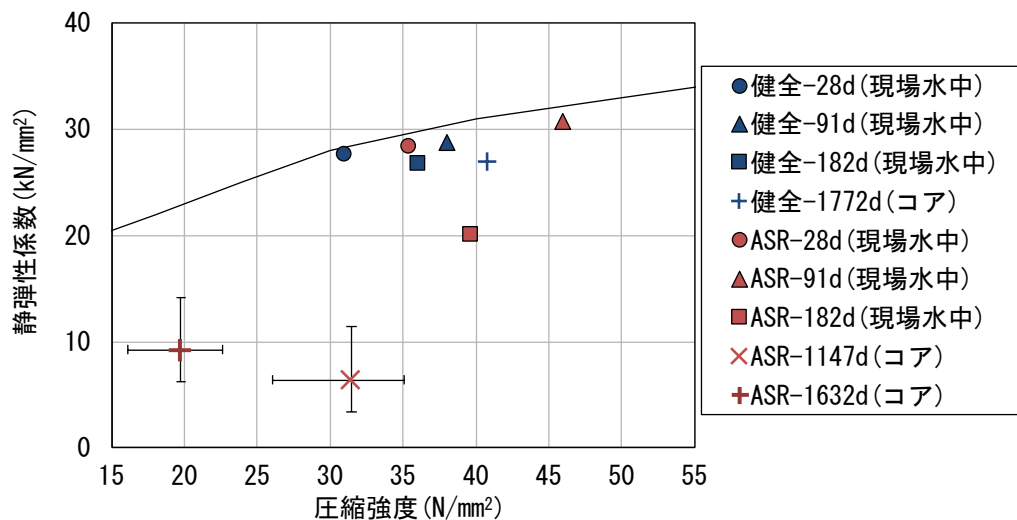


図-4.3.11 静弾性係数と圧縮強度の関係

#### 4.3.5 共振周波数

図-4.3.12 に、強制振動試験により得られた共振周波数比を示す。ここで、共振周波数比は健全床版供試体では材齢 30 日を、ASR 床版供試体では材齢 8 日を基準とした時の所定の材齢における共振周波数の比である。なお、いずれの床版も計測箇所によるバラツキはほとんどなく変動係数が 5%程度であったため、図には共振周波数比の平均値を示した。

健全供試体では、材齢の経過に関わらず共振周波数比はほぼ一定で推移し、材齢 4 年の時点では 0.97 であった。一方、ASR 床版供試体では作製後しばらくは変化が見られなかった後、材齢 139 日から 191 日にかけて共振周波数比が約 0.8 まで低下した。前述のとおり、この期間中に鉛直方向のひずみは平均で約  $1700 \times 10^{-6}$  に大きく膨張し、ASR により供試体内部にひび割れが生じ共振周波数比が低下したものと考えられる。このことは、この時期の圧縮強度および静弾性係数の低下とも整合する。すなわち、ASR の発生によるコンクリート内部のひび割れの発生や、力学的変化の検知に強制振動試験は有用であると考えられる。

これ以降も ASR 膨張は継続したにも関わらず、共振周波数比は緩慢に推移した。材齢 846 日から材齢 1132 日にかけて一時は共振周波数が 0.82 まで回復する挙動がみられたものの、材齢 4 年の時点では共振周波数は 0.73 まで低下した。ASR が生じたコンクリートに外力の作用速度が大きい共鳴振動法を適用した場合、粘弾性的性質を有する ASR ゲルはみかけ上弾性的に挙動するとされる<sup>17)</sup>。ASR 膨張が継続したにも関わらず、共振周波数が安定的に推移または一時回復する挙動を示したのは、ひび割れ間を充填する ASR ゲルの粘弾性的挙動による可能性が考えられる。一方、発生個所の違いや時間の経過による ASR ゲルの組成の変化により ASR ゲル自体の力学特性も変化し、Ca/Si 比が大きいほど ASR ゲルのヤング率が大きくなることが示唆されている<sup>18)</sup>。このような ASR ゲルの力学特性の変化もコンクリートの剛性の変化に影響を及ぼしている可能性も考えられる。

本研究の範囲では、ASR 発生の検知に対する強制振動試験の有効性が示唆された。一方、実際の構造物では、外力やその他の劣化によるひび割れが生じている場合もあり、また、本研究のような共振周波数比の回復現象とその程度によっては、ASR の検知が困難になる場合もあると考えられる。実構造物への本手法の適用については、これらの影響についても今後検討を行う必要がある。

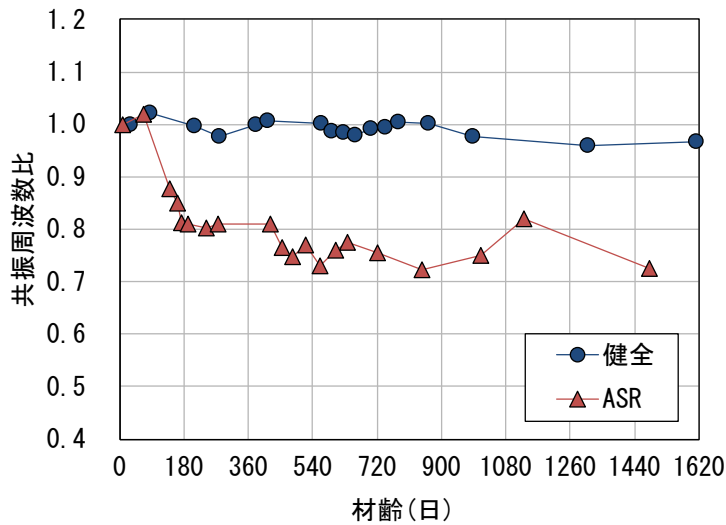


図-4.3.12 共振周波数比

#### 4.3.6 透気係数

図-4.3.13 に、透気係数の測定結果を示す。健全床版供試体の下面では、増減はあるものの材齢の経過とともに電気抵抗率および透気係数が増大する傾向であった。これは、乾燥の進行によりコンクリートの細孔中の自由水が失われ、空気の透過性が高くなっていることを示している。なお、健全床版下面には目視で確認できるひび割れは認められなかった。一方、供試体の上面では、電気抵抗率は下面での測定値と同程度か若干小さく、透気係数は下面より著しく小さくなった。材齢 987 日の時点の透気係数の平均は、下面で  $24.2 \times 10^{-16} \text{m}^2$  に対し、上面では  $0.0498 \times 10^{-16} \text{m}^2$  であった。水がかりの有無により、床版上下面での含水状態や、セメントの水和による組織の緻密さに違いが生じたことが要因と推察される。RC 床版では、水や凍結防止剤などの劣化因子が床版上面側より作用するため、床版上面のコンクリートの表層品質が重要となる。したがって、実環境下では RC 床版の上下面で透気係数が大きく異なることは、RC 床版の表層品質を評価するうえで重要な知見であるといえる。供用下の RC 床版の上面には防水層やアスファルト舗装が存在するため、これらがコンクリートの表層品質に及ぼす影響についても、今後検討が必要であると考えられる。

ASR 床版供試体の透気係数は、材齢の経過とともに増加する傾向がみられた。材齢 1171 日の時点の透気係数に着目すると、平均は  $40.6 \times 10^{-16} \text{m}^2$  でグレード 5(極劣)であった。この ASR 床版の透気係数の変化は、乾燥の影響に加え、ASR の進行による床版内部の損傷の影響と推察された。ASR により床版供試体下面には格子状に 10~20cm 程度間隔の多数のひび割れが生じていたが、透気係数の測定においては表面にひび割れが生じた後は、密着性確保のためにひび割れを避けてチャンバーを設置しており、このようにすればグレード 5 までは計測可能であった。養生条件の違いにより単純な比較は困難であるが、同時期の透気係数を比較すると ASR 床版が健全床版より大きい傾向にあり、ASR コンクリートの表層品質を評価する手段として、透気試験も有効な可能性がある。

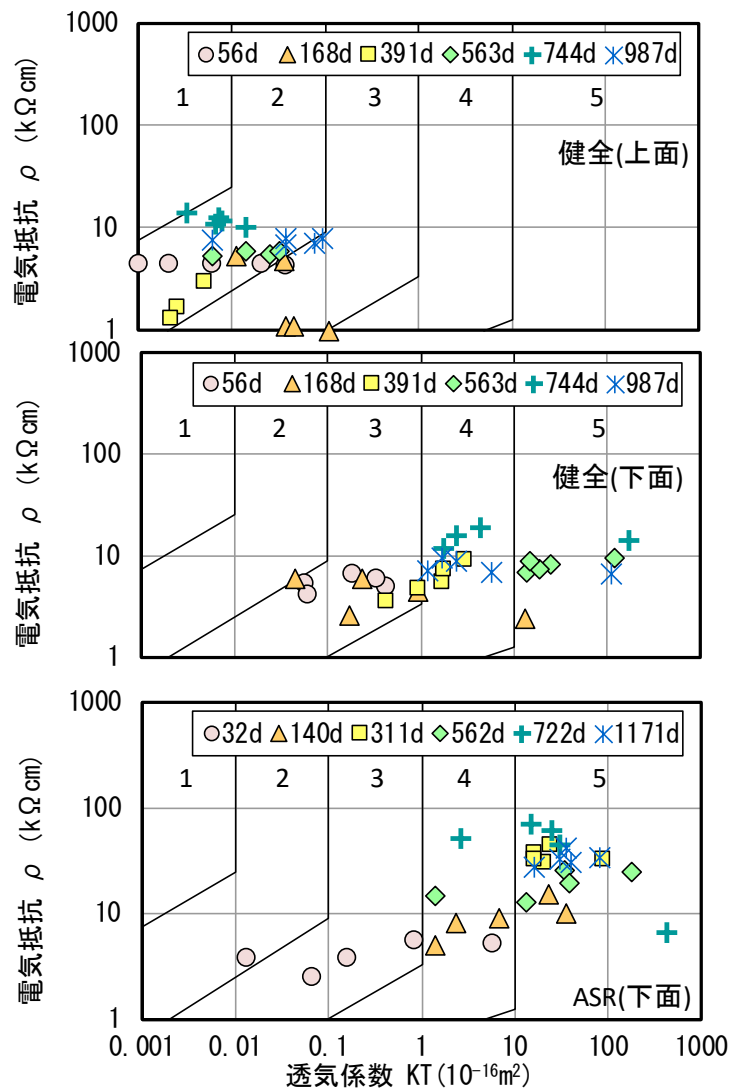


図-4.3.13 透気係数

#### 4.4 まとめ

本章では、鋼主桁上に実物大 RC 床版を架設し、屋外暴露環境下で各種計測を実施した。得られた知見を以下に示す。

- (1) RC 床版における ASR による膨張は、床版内部の鉄筋による拘束の影響を受け、水平方向より鉛直方向で卓越した。このことにより床版内部には水平方向のひび割れが生じ、耐疲労性に影響を及ぼすと考えられる上側鉄筋位置で特に幅の大きなひび割れが生じた。また、水平方向の膨張には鋼主桁の拘束も影響していた。
- (2) ASR の温度依存性により、実環境下の ASR 膨張は季節変動を示した。外気温の上昇にともない膨張挙動が生じるが、膨張開始温度は劣化の進行にともない低下することを明らかにした。
- (3) 実体顕微鏡、偏光顕微鏡観察の結果、粗骨材の反応性リムの生成、ASR ゲルの滲出、ひび割れの生成、セメントペースト中の高密度なひび割れが確認され、ASR の劣化進行度としては中程度～顕著と判定された。また、ASR ゲルおよび CSH ゲルの分析結果から、ASR の進行過程としては中期ステージであり、ASR による反応余力をなお十分に有していると考えられた。
- (4) ASR による床版供試体の膨張にともない共振周波数比は低下し、強制振動試験は ASR 劣化を検知するうえで有効な手法と考えられた。共振周波数比は、約 0.8 まで低下した後はほぼ一定で推移し、その後増加する傾向を示したものの、材齢 4 年では約 0.7 まで低下した。
- (5) 透気試験の結果、実環境下における RC 床版の表層品質は、床版の上下面で大きく異なることが明らかとなった。また、ASR の進行にともない透気係数は大きくなった。ASR によるひび割れを避ける計測を行えば RC 床版の表層付近の状態を透気係数にて評価できる可能性が示唆された。



#### 4 章の参考文献

- 1) 前島拓, 子田康弘, 岩城一郎, 内藤英樹, 岸良竜, 鈴木康範, 大田孝二, 鈴木基行: アルカリシリカ反応が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響, 土木学会論文集 E2, Vol.72, pp.126-145, 2016.
- 2) 土木学会: アルカリ骨材反応対策小委員会報告書, 2005.
- 3) 池端信哉, 佐藤克樹, 中村光: 内部ひび割れが RC スラブの押抜きせん断耐力に与える影響に関する実験的検討, 構造工学論文集 Vol.66A, pp.694-702, 2020.
- 4) 三木千壽, 山田真幸, 長江進, 西浩嗣: 既設非合成連続桁橋の活荷重応答の実態とその評価, 土木学会論文集, No.647, pp.281-294, 2000.
- 5) 三浦尚, 山本晃子: 外部から侵入する塩化ナトリウムがアルカリ骨材反応に及ぼす影響, 第 47 回セメント技術大会講演集, pp.432-437, 1993.
- 6) 内藤英樹, 小林珠祐, 土屋祐貴, 杉山涼亮, 山口恭平, 早坂洋平, 安川義行, 鈴木基行: 局所振動に基づく道路橋 RC 床版の内部損傷評価, 土木学会論文集 E2, Vol.73, No.2, pp.133-149, 2017.
- 7) R.J.Torrent and G.Frenzer: A Method for the Rapid Determination of the Coefficient of Permeability of the Covercrete, Proceedings of the International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering(NDT-CE), pp.985-992, 1995.
- 8) 黒田保, 井上正一, 吉野公, 西林新蔵: ASR 膨張に与える保存温度の影響, 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 4 巻, pp.95-102, 2004.
- 9) 竹内勝信, 川村満紀, 鳥居和之, 谷川伸: 自然環境下に曝露したコンクリートのアルカリシリカ反応による膨張とひび割れ, コンクリート工学論文集, 第 6 巻, 第 1 号, pp.11-19, 1995.
- 10) 五島孝行, 大田孝二, 梶尾聡, 鈴木康範, 伊戸康清, 島田守: アルカリ骨材反応で損傷した道路橋床版の調査, 土木学会第 68 回年次学術講演概要集, pp.835-836, 2013.
- 11) 横山広, 浦修造, 関口幹夫, 堀川都志雄: 床版の劣化現象および床版補修方法に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.451-455, 2010.
- 12) Katayama, T., Oshiro, T., Sarai, Y., Zaha, K., & Yamato, T.: Late-Expansive ASR Due to Imported Sand and Local Aggregates in Okinawa Island, Southwestern Japan. Proceedings, 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR), Trondheim, Norway, pp.862-873, 2008.
- 13) Katayama, T.: Late-Expansive ASR in a 30-Year Old PC Structure in Eastern Japan. Proceedings, 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR), Austin, Texas, USA. pp.1-10, paper 030411-KATA-05, 2012.
- 14) 片山哲哉: アルカリシリカ反応入門, コンクリート工学, Vol.52, No.12, pp.1083-1090, 2014.
- 15) 鳥居和之, 友竹博一: アルカリシリカ反応によるモルタルの膨張挙動に及ぼすセメントと

反応性骨材の組合せの影響, 土木学会論文集, No.739, V-60, pp.251-263, 2003.

- 16) 土木学会 : 2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編], p43, 2017.
- 17) 小林一輔, 森弥広 : ASR を生じたコンクリートの動弾性係数および超音波伝播速度に関する一考察, 土木学会論文集, 第 420 号, V-13, pp.245-250, 1990.
- 18) 高橋祐弥 : ASR 生成物の力学特性測定と構造解析モデルでの取扱いに関する研究動向, コンクリート工学, Vol.57, No.6, pp.464-460, 2018.

第5章 鋼主桁上で ASR を受けた RC 床版の構造性能および  
部分打替えによる補強効果

## 5.1 概説

本章では、第4章の実物大RC床版から供験体を切り出して静的載荷試験を行い、ASRがRC床版の押抜きせん断耐力に及ぼす影響について検討を行った。また、鋼主桁上の実物大RC床版上でLMCを用いた部分打替えを行った後に、同様に供験体を切り出して静的載荷試験を行い、部分打替えによる押抜きせん断耐力の向上効果を評価した。

## 5.2 鋼主桁上でASRを受けたRC床版の構造性能評価

### 5.2.1 供試体の概要

鋼主桁上に架設したRC床版供試体から、載荷試験に供する供試体を2体ずつ切り出して採取した。各RC床版において、1体は静的載荷試験に、もう1体は付属資料に示す定点繰返し載荷試験に供した。図-5.2.1に供試体の切出し位置を示す。切出し後の供試体の配筋が健全床版とASR床版で同一となるように切出し位置を設定した。供試体の切出しは、材齢4年(健全床版供試体:材齢1637日, ASR床版供試体:1497日)で行った。

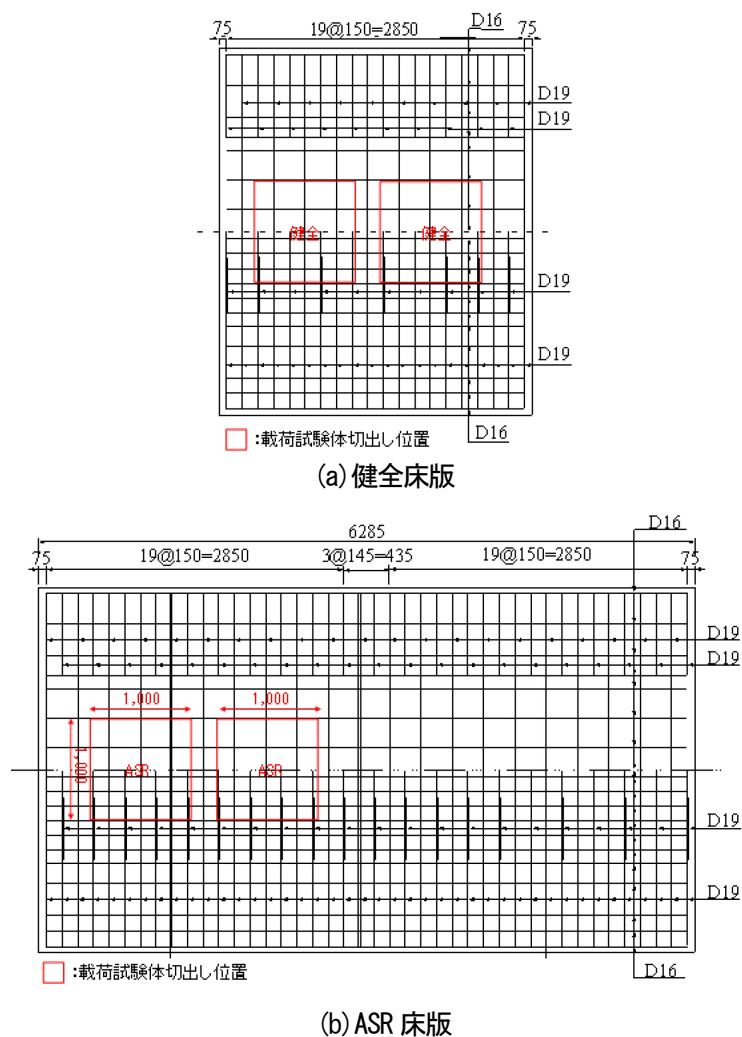


図-5.2.1 供試体の切出し位置

図-5.2.2に、切出し後の供試体の配筋を示す。切出し後の供試体の寸法は幅1000mm、長さ1000mmとし、切出し後に実測した供試体の厚さは、健全床版で233mm、ASR床版で214mmであった。なお、ASR劣化による鉄筋とコンクリートの付着状況が押抜きせん断耐力に及ぼす影響を確認するために、鋼板などによる供試体切断面における鉄筋端部の定着措置は施さなかった。

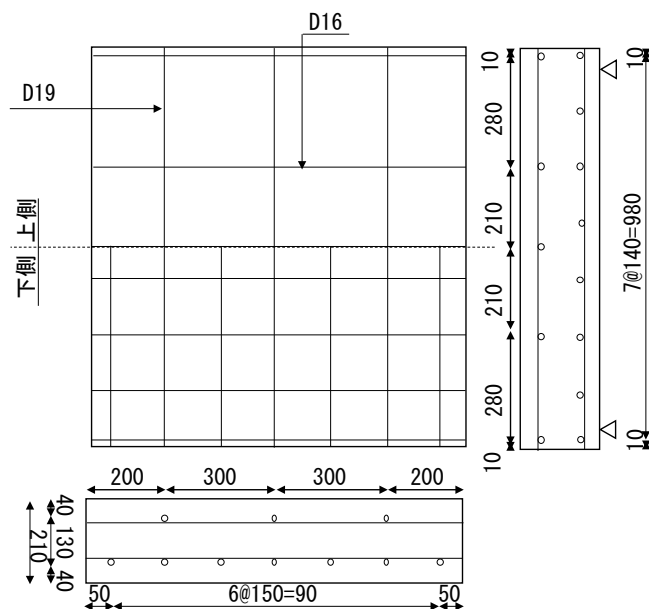
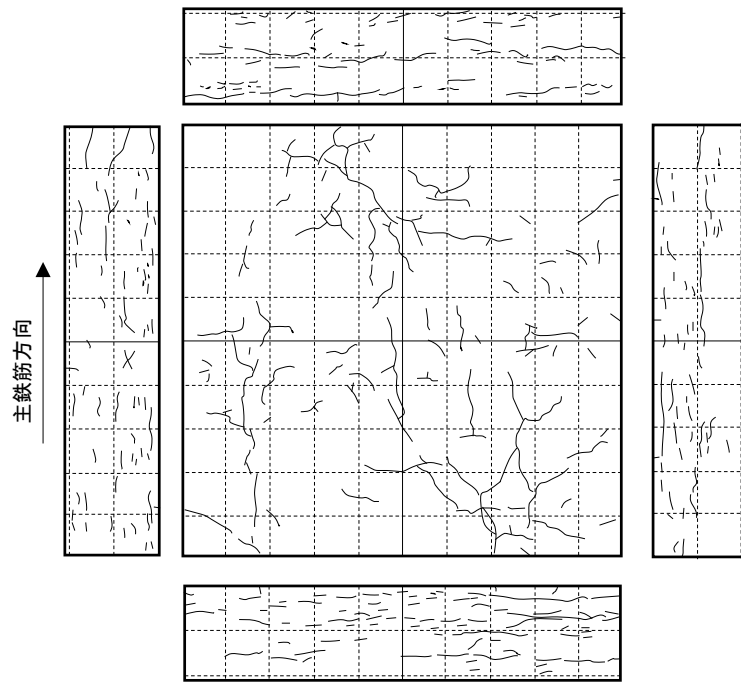
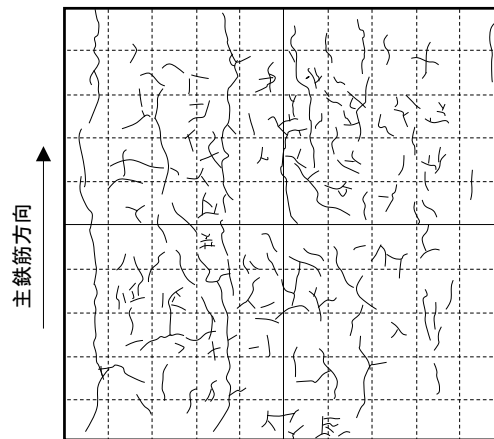


図-5.2.2 供試体の配筋図

図-5.2.3に、ASR床版から切り出した供試体(以下、ASR供試体)のひび割れ状況を示す。図は、付属資料に示す定点繰返し載荷試験に用いた供試体のものである。ASR供試体の側面には、水平方向に層状にひび割れが生じていた。これは前述のとおりASRによる膨張が内部鉄筋および鋼主桁の拘束を受けない鉛直方向で卓越したためと考えられ、同様のひび割れはASRが生じた実橋でも確認されている。ひび割れは鉄筋付近で幅が大きく、特に供試体上側では幅1.2mmの大きなひび割れが生じていた。これは屋外暴露中のASR床版上面を常に湿潤状態に保っていたため、床版上側の膨張が特に大きくなったためと推察される。目視で確認できる鉛直方向のひび割れは少なく、深さは5~15mm程度であり、RC床版供試体の上下面で確認されたひび割れの多くは、ごく表層に留まる深さであったと考えられる。なお、健全床版から切り出した供試体(以下、健全供試体)には、目視で確認できるひび割れは認められなかった。



(a) 上面および側面



(b) 底面

図-5.2.3 ASR 供試体のひび割れ状況

### 5.2.2 静的載荷試験方法

写真-5.2.1に、静的載荷試験状況を示す。支持条件は、スパン長 900mm の2辺単純支持とした。載荷は、油圧ジャッキを用いた静的載荷とし、供試体中央に 100×100mm の鋼製載荷版を設置し、一点集中載荷した。供試体端部の浮上りは特に拘束していない。

計測項目は、作用荷重およびスパン中央変位である。作用荷重はロードセルにより、スパン中央変位は供試体下面に設置した変位計により測定した。載荷は、供試体が破壊し荷重が明確に低下するまで実施した。載荷試験中および載荷試験終了後に、供試体下面のひび割れ状況を観察した。また、載荷試験終了後に供試体中央において軸方向および軸直角方向に切断し、供試体断面における破壊状況を観察した。



写真-5.2.1 静的載荷試験状況

### 5.2.3 荷重試験結果

#### (1) 荷重-中央変位関係

図-5.2.4に、静的荷重試験における荷重 - 中央変位関係を示す。最大荷重は、健全供試体で606kN、ASR 供試体で484kNであり、床版厚さの違いはあるもののASR 供試体の静的耐力は健全供試体より小さくなった。同一荷重で比較すると、健全床版よりASR床版の中央変位は大きく、ASRにより内部に生じたひび割れにより供試体の剛性が低下した可能性が考えられ、4章における共振周波数比の低下からもそのことが窺われる。最大荷重に達した後は、健全供試体と比較してASR 供試体では緩やかに荷重が低下する挙動を示した。なお、ASR 供試体では、最大荷重以降において鉄筋端部の供試体内部へのすべりが目視で確認された(写真-5.2.2)。

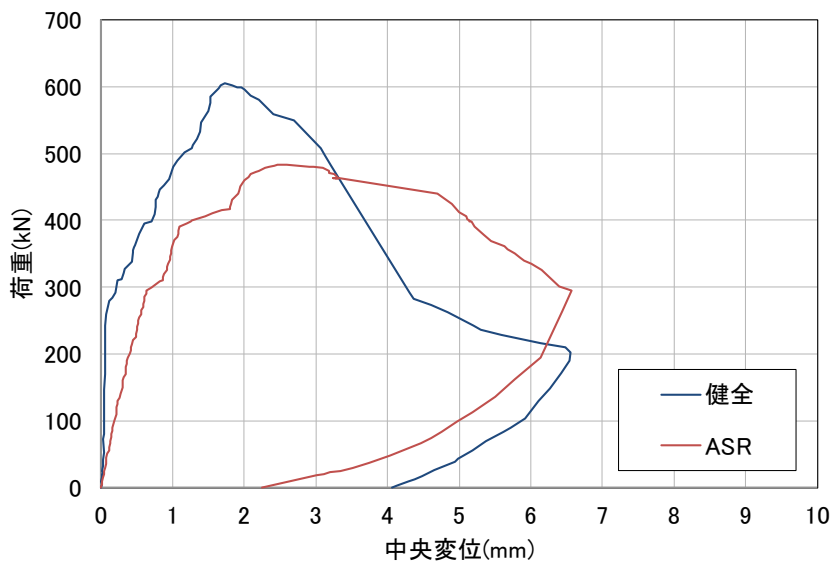


図-5.2.4 荷重 - 中央変位関係

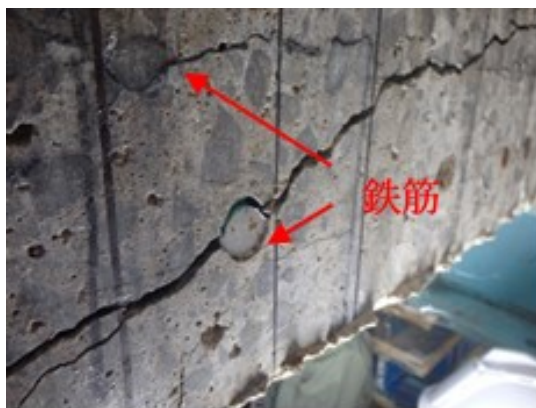


写真-5.2.2 荷重試験後のASR 供試体の側面



表-5.2.1 に、以下に示す前田・松井の式<sup>2)</sup>により各供試体の押抜きせん断耐力を算出した結果を示す。

$$P = f_v \{2(a+2x_m)x_d + 2(b+2x_d)x_m\} + f_t \{2(4C_d + 2d_d + b)C_m + 2(a+2d_m)C_d\} \quad (5.1)$$

$$f_v = 0.656f_c^{0.606} \quad (5.2)$$

$$f_t = 0.269f_c^{2/3} \quad (5.3)$$

ここで、 $P$ ：押抜きせん断耐力、 $a$ 、 $b$ ：載荷版の主鉄筋、配力鉄筋方向の辺長、 $x_m$ 、 $x_d$ ：主鉄筋、配力鉄筋に直角な断面の引張側コンクリートを無視したときの中立軸深さ、 $d_m$ 、 $d_d$ ：引張側主鉄筋、配力鉄筋の有効高さ、 $C_m$ 、 $C_d$ ：引張側主鉄筋、配力鉄筋のかぶり深さ、 $f_c$ ：コンクリートの圧縮強度、 $f_v$ ：コンクリートのせん断強度、 $f_t$ ：コンクリートの引張強度である。算出にあたってコンクリートの圧縮強度および弾性係数は、健全供試体では静的載荷試験と同じ材齢4年のそれぞれの値を、ASR供試体ではASR劣化が顕在化する前の材齢91日および材齢4年のそれぞれの値を用いた。

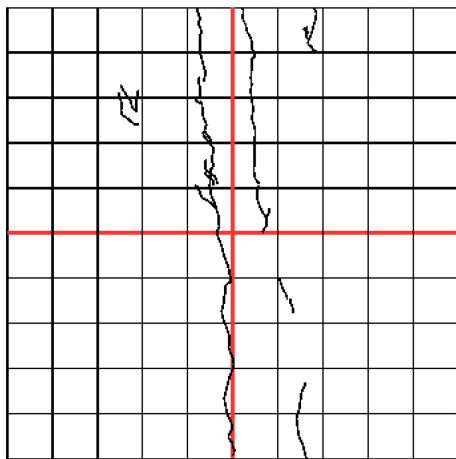
表-5.2.1より健全供試体の計算値は、実験値より若干大きくなったもののおおむね同程度と判断される。健全供試体の床版厚さをASR供試体と同一(210mm)とした場合の押抜きせん断耐力を計算すると、579kNであった。この値およびASRによる劣化が顕在化する前の材齢91日の圧縮強度(46.0N/mm<sup>2</sup>)を用いた計算値と比較すると、ASR供試体の実験値は16~20%小さく、ASRの影響によりRC床版の静的耐力が低下したものと考えられる。次項で詳述するとおり、ASR供試体は前田・松井の式的前提と異なる破壊形態となったが、参考までに載荷試験と同じ材齢4年の圧縮強度(19.8N/mm<sup>2</sup>)を用いて押抜きせん断耐力を計算すると、実験値は計算値と同程度であった。

表-5.2.1 押抜きせん断耐力の計算結果

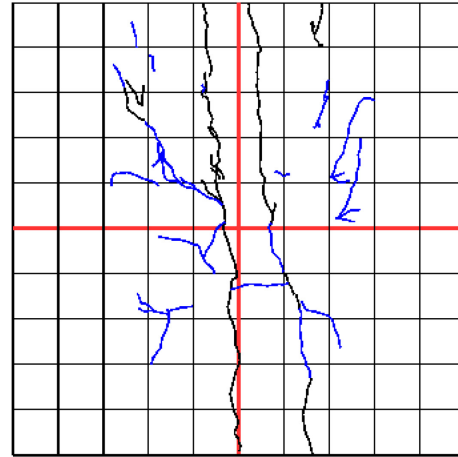
種類	床版厚さ (mm)	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	実験値 $P_{test}$ (kN)	計算値 $P_{cal}$ (kN)	$P_{test}/P_{cal}$
健全	230	40.8	606	642	0.94
	210	40.8	-	579	-
ASR	210	46.0	-	606	-
	210	19.8	484	489	0.99

## (2) 静的荷重試験後のひび割れ状況

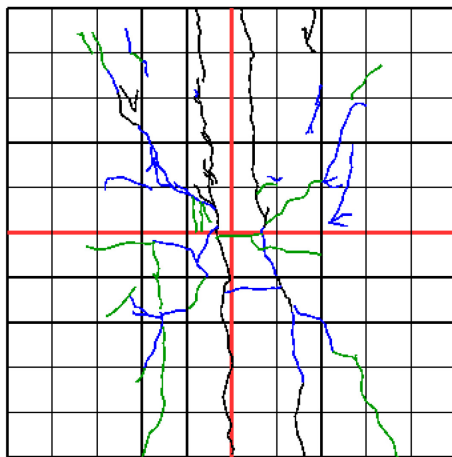
図-5.2.5 および図-5.2.6 に、静的荷重試験後の供試体下面のひび割れ状況を示す。健全供試体については、まず供試体中央に支持辺と平行方向に曲げひび割れが発生した後、供試体中央から外側に向けて格子状にひび割れが形成された。ASR 供試体については、荷重試験前に ASR により生じていたひび割れ間を連結するように、新たなひび割れが生じたものの、健全供試体と比較すると荷重により生じたひび割れは少なかった。



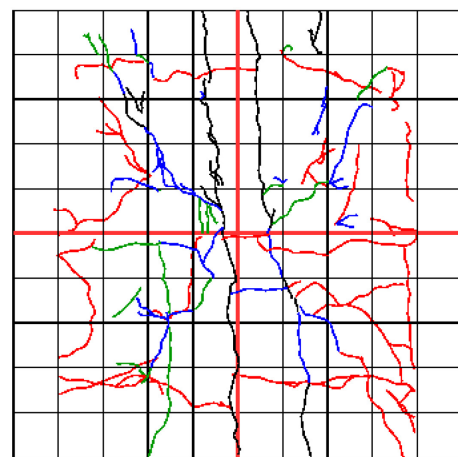
(a) 荷重荷重 300 kN



(b) 荷重荷重 400 kN



(c) 荷重荷重 500kN



(d) 荷重試験終了時

図-5.2.5 供試体下面のひび割れ状況(健全供試体)

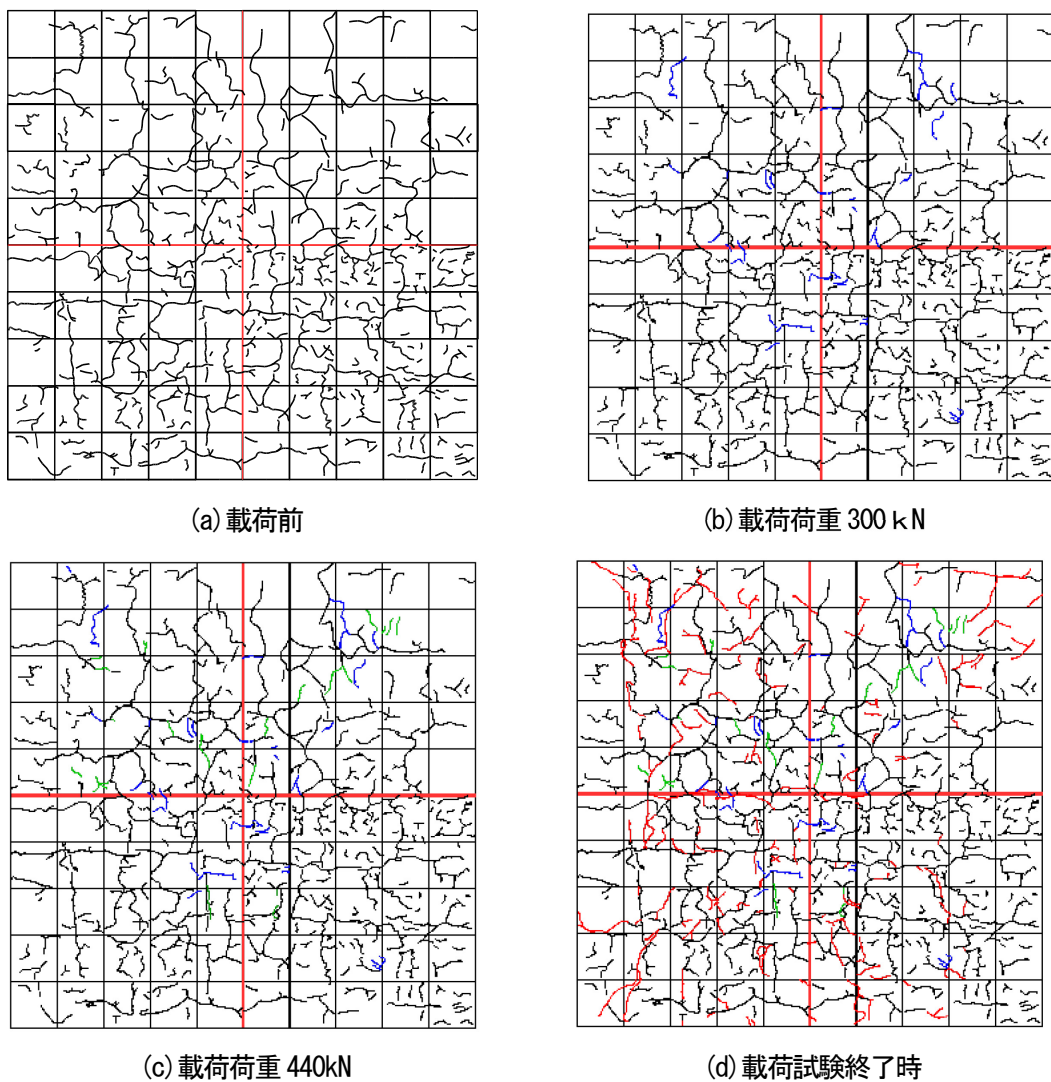


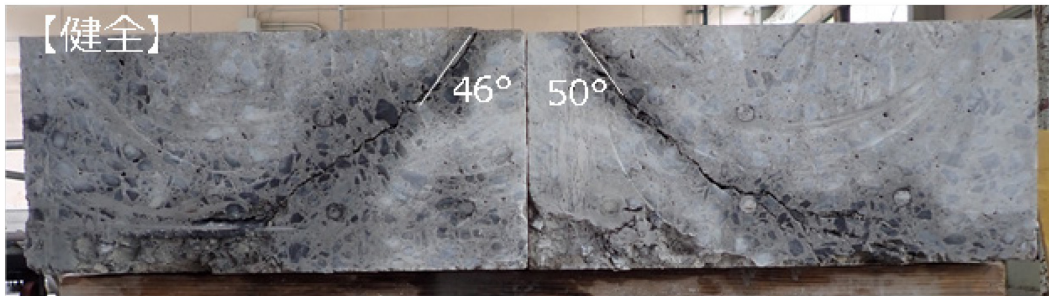
図-5.2.6 供試体下面のひび割れ状況 (ASR 供試体)

写真-5.2.3に、静的載荷試験後の供試体中央の切断面における破壊状況を示す。健全供試体では、載荷版端部からで $35\sim 53^\circ$ で斜めにひび割れが発生し、供試体下方に抜けていることがわかる。ASR 供試体では、主鉄筋方向と配力鉄筋方向でひび割れの発生状況が異なった。まず、主鉄筋方向では、斜めひび割れが載荷版端部から約 $25^\circ$ で発生しており、引張側鉄筋の支持辺付近まで進展した後、供試体側方に抜けていた。一方、配力鉄筋方向では載荷端部から約 $20^\circ$ で発生した斜めひび割れが圧縮側鉄筋位置より下方には進展せず、圧縮側鉄筋付近から供試体側面に抜けていた。ASR 供試体に生じた斜めひび割れの水平面からの角度は、いずれの方向においても健全供試体より浅かった。このような ASR が生じた供試体における斜めひび割れの変化は、田附ら<sup>3)</sup>や田中ら<sup>4)</sup>も報告しており、載荷試験前に ASR により供試体内部に生じていた水平方向の層状のひび割れが、静的載荷による斜めひび割れの発生角度に影響を及ぼしたと考えられる。また、これらの水平方向のひび割れが供試体の上側に多く見られたことにより、特に斜めひび割れの発生角度が浅くなった配力鉄筋方向では、斜めひび割れが圧縮側鉄筋付近で供試体側面方向に進展したものと推察される。このように、

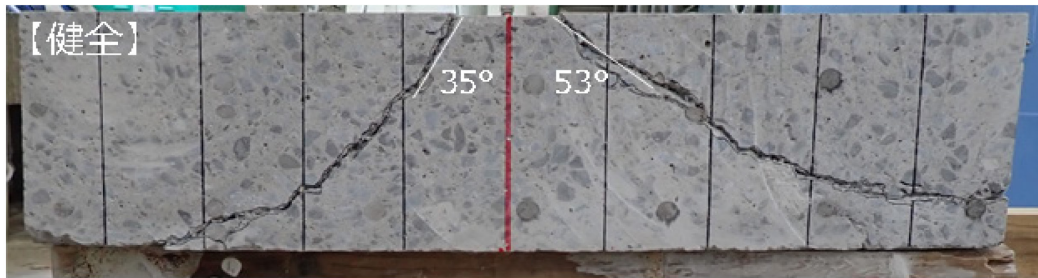
ASRによる供試体内部のひび割れが、静的載荷時のRC床版の破壊形態に影響を及ぼすことが確認された。

前田・松井の式(5.1)は、RC床版の押抜きせん断耐荷機構として、主鉄筋方向および配力鉄筋方向について圧縮側コンクリートのせん断抵抗と、引張側鉄筋のダウエル効果にともなう鉛直方向の引張抵抗をモデル化したものである。ASR供試体の破壊状況の観察結果をみると、ダウエル効果による引張抵抗は十分には発揮されておらず、式(5.1)で想定している耐荷機構から変化が生じているものと考えられる。

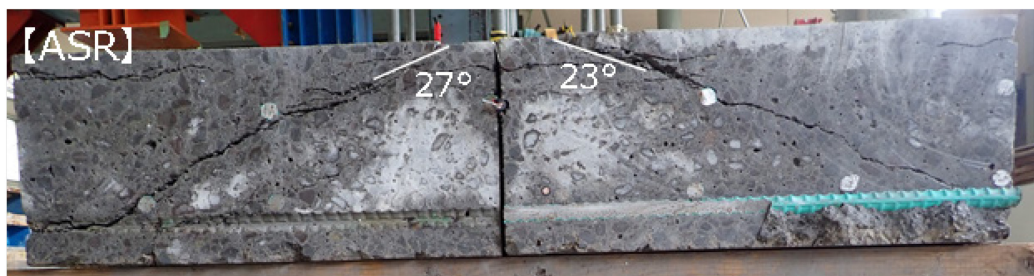
図-5.2.4のASR供試体における最大荷重以降のたわみ挙動や、載荷試験後の供試体側面で観察された鉄筋端部のすべりおよび供試体切断面におけるひび割れの進展状況を勘案すると、ASRにより供試体内部に生じた水平方向のひび割れの影響により鉄筋とコンクリート間の付着が低下したことが示唆される。ASR供試体では、ASRによって生じた水平ひび割れの影響で鉄筋とコンクリート間の付着すべりが生じやすく、かつ斜めひび割れが水平方向に誘導されたことにより、タイドアーチ的な耐荷機構が形成され荷重に抵抗していたものの、コンクリートと鉄筋間の付着力の低下により、最終的に破壊に至ったものと推察される。なお、通常のRC床版では定着確保のために端部の鉄筋に曲げ加工を施すことから、ASRによるひび割れがRC床版の破壊形態および耐荷機構に及ぼす影響については、さらに詳細に検討を行う必要がある。



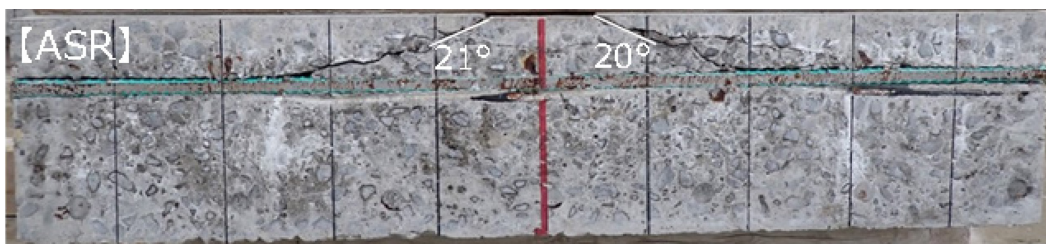
(a) 健全供試体 (主鉄筋方向)



(b) 健全供試体 (配力鉄筋方向)



(c) ASR 供試体 (主鉄筋方向)



(d) ASR 供試体 (配力鉄筋方向)

写真-5.2.3 切断面における破壊状況

### 5.3 LMCの力学特性の評価

#### 5.3.1 実験概要

##### (1) 使用材料および配合

表-5.3.1に、コンクリートの使用材料を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、カルシウムアルミネート系の速硬性混和材と、SBR ラテックス(固形分 45%)を使用した。細骨材には砕砂、粗骨材には砕石 2005 を用いた。硬化時間の調整に、オキシカルボン酸系の硬化調整剤を使用した。

表-5.3.2に、コンクリートの配合を示す。LMCの配合は、ポリマーセメント比(以下、P/C)を 14.7%とし、速硬性混和材の使用量は  $159\text{kg/m}^3$  とした。LMCに使用する速硬性混和材および SBR ラテックスが各種力学特性に及ぼす影響を把握することを目的に、比較として速硬性混和材および SBR ラテックスを使用しない普通コンクリート(配合記号:PL)および速硬性混和材のみを使用したコンクリート(配合記号:FC)についても実施した。

表-5.3.1 コンクリートの使用材料

材料	記号	種類
水	W	水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度 $3.16\text{g/cm}^3$
細骨材	S	砕砂(花崗岩), 表乾密度 $2.58\text{g/cm}^3$
粗骨材	G	砕石 2005(硬質砂岩), 表乾密度 $2.72\text{g/cm}^3$
速硬性混和材	F	速硬性混和材, 密度 $2.97\text{g/cm}^3$
ラテックス	L	SBR 系, 固形分率 45%
セッター	Re	硬化調整剤, オキシカルボン酸系粉末

表-5.3.2 コンクリートの配合

記号	W/C (%)	P/C (%)	単位量( $\text{kg/m}^3$ )						Re ( $\text{kg/m}^3$ )	フレッシュ性状	
			W	L	C	S	G	F		スランプ (cm)	空気量 (%)
PL	49.3	-	174	-	353	769	941	-	-	15.5	4.1
FC	49.3	-	173		352	766	938	159	0.89	19.0	2.0
LMC	34.6	14.7	59	115	352	766	938	159	0.73	20.0	2.9



## (2) 試験項目および試験方法

表-5.3.3 に、試験項目および試験方法を示す。圧縮強度試験、静弾性係数試験、割裂引張強度試験にはφ100×200mm の円柱供試体を用い、せん断強度試験には、100×100×400mm の角柱供試体を用いた。コンクリートのせん断強度試験は、土木学会基準 JSCE-G 553-2010 に示される二面せん断試験方法(図-5.3.1)に準拠した。写真-5.3.1 に、二面せん断試験状況を示す。LMC は材齢 1 日、7 日、28 日、91 日、182 日に、PL および FC は材齢 7 日、28 日、91 日に強度試験を実施した。LMC および FC については、材齢 6 時間でも圧縮強度試験を実施した。

表-5.3.3 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
スランプ	JISA 1101 「コンクリートのスランプ試験方法」
空気量	JISA 1128 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」
コンクリート温度	JISA 1156 「フレッシュコンクリートの温度測定方法」
圧縮強度	JISA 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」
静弾性係数	JISA 1149 「コンクリートの静弾性係数試験方法」
割裂引張強度	JISA 1113 「コンクリートの割裂引張強度試験方法」
せん断強度	JSCE-G 553-2010 「鋼繊維補強コンクリートのせん断強度試験方法(案)」

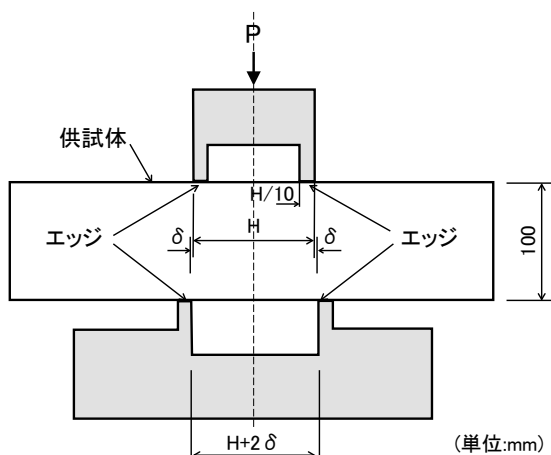


図-5.3.1 二面せん断試験方法



写真-5.3.1 二面せん断試験状況

## (3) コンクリートの練混ぜおよび供試体の作製方法

コンクリートの練混ぜは 20±3℃、60%RH 以上の恒温室内で行い、練混ぜには強制練りミキサ水平二軸形(公称容量 60L)を用いた。供試体は成型後、材齢 1 日で脱型し、所定の材齢まで 20℃水中養生を行った。



### 5.3.2 実験結果

表-5.3.4 に各種強度試験結果を示す。速硬性混和材を使用した FC および LMC の圧縮強度は、材齢 6 時間で 24N/mm<sup>2</sup> 以上であり、所要の早期強度発現性を有していることが確認できる。

図-5.3.2 に、静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。本研究におけるコンクリートの両者の関係は、おおむねコンクリート標準示方書(以下、示方書)に示される関係式と同様であった。LMC は若干下方に位置するものの、圧縮強度の増進とともに示方書に示される関係式との差は小さくなる傾向であった。したがって、LMC においても、圧縮強度が 40~70N/mm<sup>2</sup> の範囲では、示方書に示される関係式を用いても実用上問題はないと考えられる。

図-5.3.3 に、せん断強度と圧縮強度の関係を示す。両者の関係は、コンクリートの種類によらずおおむね同一の関係で表される。すなわち、速硬性混和材およびラテックスの使用がコンクリートのせん断強度と圧縮強度の关系到及ぼす影響は小さいといえる。本研究におけるコンクリートのせん断強度と圧縮強度の关系は、東山ら<sup>5)</sup>、並木ら<sup>9)</sup>、伊東<sup>7)</sup>により提案された関係式より上方に位置した。この違いは、コンクリートの配合や使用材料の相違によるものと考えられる。

図-5.3.4 に、割裂引張強度と圧縮強度の関係を示す。PL および FC については、ばらつきはみられるものの、両者の関係はおおむね示方書に示される関係式と同様であった。一方、LMC における両者の関係は、示方書の関係式より上方に位置した。これは、SBR 系ラテックスのフィルム形成により、コンクリートの引張強度特性が改善されたためと考えられる。

図-5.3.2~図-5.3.4 より、LMC の静弾性係数、割裂引張強度、せん断強度と圧縮強度の关系は、下記の式(5.4)から式(5.6)で表される。

$$E_c = \{3.1 + (f'_c - 40)/50\} \times 10^4 \quad 40 \leq f'_c < 70 \text{N/mm}^2 \quad (5.4)$$

$$f_t = 0.819 f'_c^{0.606} \quad (5.5)$$

$$f_v = 0.329 f'_c^{2.3} \quad (5.6)$$

ここに、 $f'_c$  : コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $E_c$  : コンクリートの静弾性係数(kN/mm<sup>2</sup>)、 $f_t$  : コンクリートの割裂引張強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $f_v$  : コンクリートのせん断強度(N/mm<sup>2</sup>)、

表-5.3.4 LMC の圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度およびせん断強度

材齢	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )			静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )			割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )			せん断強度 (N/mm <sup>2</sup> )		
	PL	FC	LMC	PL	FC	LMC	PL	FC	LMC	PL	FC	LMC
6 時間	-	33.4	37.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 日	-	-	41.8	-	-	29.0	-	-	4.23	-	-	7.50
7 日	35.3	58.5	52.3	31.9	34.5	30.8	2.88	4.47	4.61	6.74	9.48	9.10
28 日	45.4	65.1	61.8	33.5	37.4	34.0	2.94	3.99	5.39	7.78	9.74	9.59
91 日	52.7	72.1	69.3	38.8	39.9	36.6	3.63	3.86	4.74	8.24	11.6	10.3
273 日	-	-	70.2	-	-	35.5	-	-	5.99	-	-	11.7

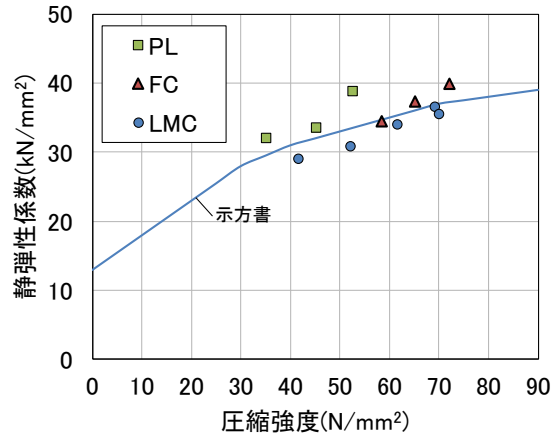


図-5.3.2 静弾性係数と圧縮強度の関係

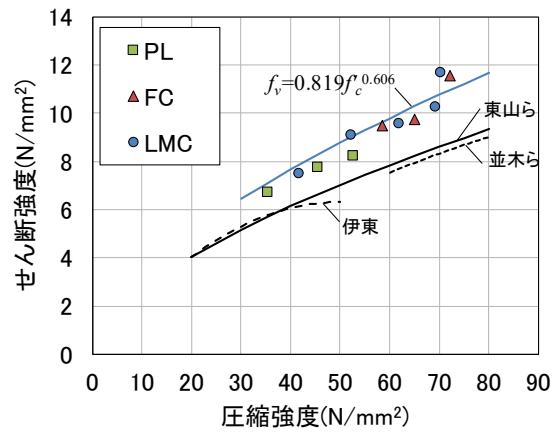


図-5.3.3 せん断強度と圧縮強度の関係

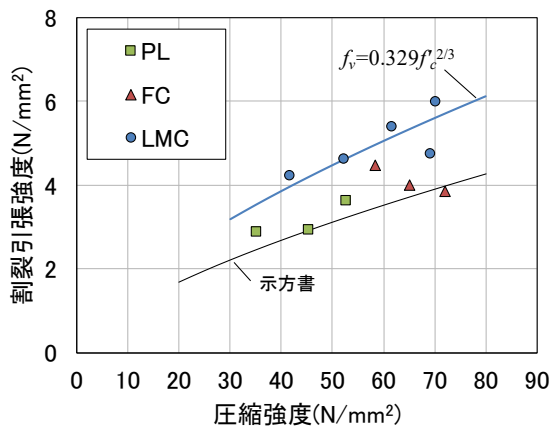


図-5.3.4 割裂引張強度と圧縮強度の関係

## 5.4 部分打替えした ASR 劣化 RC 床版の押抜きせん断耐力評価

### 5.4.1 実験概要

#### (1) 使用材料および配合

部分打替えには、LMC を使用した。使用材料は、表-5.3.1 と同一である。表-5.4.1 に LMC の配合を示す。LMC の基本的な配合は表-5.3.2 と同様であるが、打込み時の外気温に応じて、所要の可使用時間と強度発現性が得られるように、硬化調整剤の量を調整した。

表-5.4.1 LMC の配合

W/C (%)	P/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						Re (kg/m <sup>3</sup> )	フレッシュ性状			外気温 (°C)
		W	L	C	S	G	F		スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度(°C)	
34.6	14.7	59	115	352	766	938	159	0.40	16.0	1.6	14	7

#### (2) 部分打替えの概要

図-5.4.1 に、部分打替えの概要を、図-5.4.2 に部分打替えを行った範囲を示す。ASR が生じた RC 床版供試体の上側部分を上側配力鉄筋下方の約 20mm が露出するまでを目標に、ウォータージェットを用いてコンクリートを除去した。写真-5.4.1 および写真-5.4.2 に、ウォータージェットの施工状況を示す。ウォータージェットの施工後に実測した除去深さは、平均で 112mm であった。

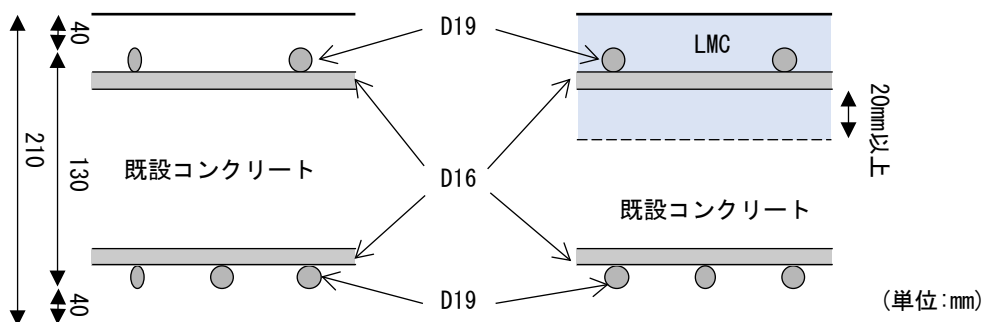


図-5.4.1 部分打替えの概要

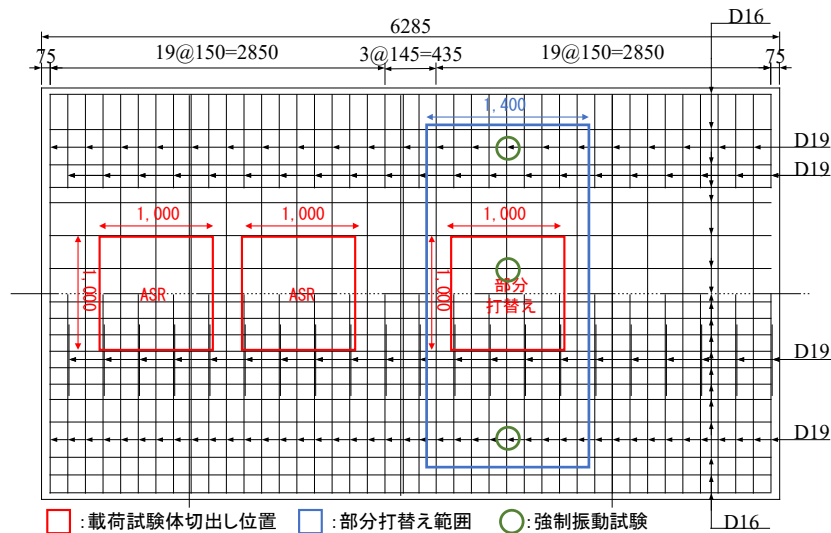


図-5.4.2 部分打替えの実施位置(青囲い部分)および測定位置



写真-5.4.1 ウォータージェット施工状況



写真-5.4.2 ウォータージェット施工後

本検討では NaCl を多量に添加しており、鉄筋腐食が生じることで床版の耐荷性に影響を及ぼす可能性がある。この懸念があるため、4章で示したとおりエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用しているが、確認のためウォータージェット後に露出した鉄筋の目視観察を行った。写真-5.4.3に、内部鉄筋の外観を示す。ウォータージェットによりエポキシ樹脂塗装鉄筋の塗装は除去され、またウォータージェットの施工から LMC の打込みまでの 10 日間で鉄筋のごく表面に発錆が認められたものの、目視観察の範囲では断面欠損や孔食等は認められなかった。したがって、NaCl の多量添加による鉄筋腐食が載荷試験結果に影響を及ぼす可能性は小さいと判断した。

LMC の製造には、傾胴式ミキサを用いた。写真-5.4.4-写真-5.4.6 に、LMC の打込み状況を示す。LMC の締固めには棒状バイブレータを用い、金鏝で表面仕上げを行った。表面仕上げ後、水分の急激な逸散を防ぐ目的に、パラフィン系の被膜養生剤を散布した。その後、翌日まで上面をブルーシートで覆い養生を行った。なお、3章と同様に打替え部界面への接着剤の塗布は行っていない。

LMC の打込みから材齢 14 日に、図-5.4.2 に示す位置にてコンクリートカッターを用いて切断し、静的載荷試験用供試体采取了。



写真-5.4.3 内部鉄筋の外観



写真-5.4.4 LMCの練混ぜ状況



写真-5.4.5 LMCの打込み状況



写真-5.4.6 LMCの打込み完了後

### (3) 試験項目および試験方法

LMCの打込み時に円柱供試体(φ100×200mm)および角柱供試体(100×100×400mm)を作製し、圧縮強度試験(JIS A 1108)、静弾性係数試験(JIS A 1149)、割裂引張試験(JIS A 1113)および二面せん断試験(JSCE-G 553-2010)を行った。供試体は作製後、翌日に脱型し、LMC打替え箇所近傍の屋外環境下で静置した。各種強度試験は、静的載荷試験と同時期の材齢368日(LMC打込み時を基準)に実施した。なお、圧縮強度試験については、材齢6時間および材齢1日でも実施した。

部分打替え前後の補強効果を、強制振動試験により評価した。測定位置を、図-5.4.2に示す。測定時に、小型加振器は床版上面に設置した。

部分打替え後に切出した供試体を用いて、静的載荷試験を行った。切出し後の供試体の寸法は、前項の健全供試体およびASR供試体と同じ幅1000mm、長さ1000mmとした。部分打替え前後で供試体厚さに変化は生じないため、供試体厚さは210mmである。健全供試体およびASR供試体と同様に、鋼板などによる供試体切断面における鉄筋端部の定着措置は施さなかった。静的載荷試験方法は、5.2節と同様である。すなわち、支持条件はスパン長900mmの2辺単純支持とし、供試体中央に100×100mmの鋼製載荷版を設置し、一点集中載荷した。供試体端部の浮上りは特に拘束していない。



## 5.4.2 実験結果

### (1) LMCの力学特性

表-5.4.2に、LMCの各種強度試験結果を示す。LMCの圧縮強度は、材齢6時間で40.5N/mm<sup>2</sup>であり、目標とした24N/mm<sup>2</sup>以上を満足した。図-5.4.3～図-5.4.5に静弾性係数、割裂引張強度、せん断強度と圧縮強度の関係を示す。図中には5.3節の室内試験で得たデータと関係式を併記しているが、室内試験で得られた関係と同様の傾向が得られていることが確認できる。

表-5.4.2 LMCの圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度およびせん断強度

材齢	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	せん断強度 (N/mm <sup>2</sup> )
6時間	40.5	-	-	-
1日	49.2	-	-	-
28日	62.1	-	-	-
368日	66.8	33.4	4.57	11.0

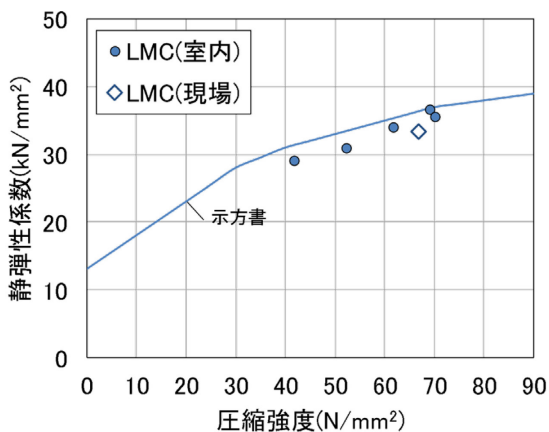


図-5.4.3 静弾性係数と圧縮強度

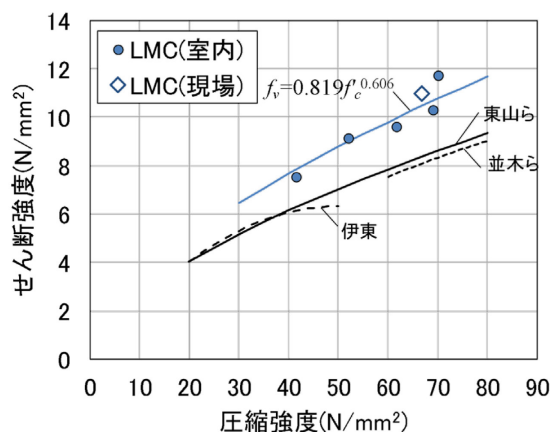


図-5.4.4 せん断強度と圧縮強度

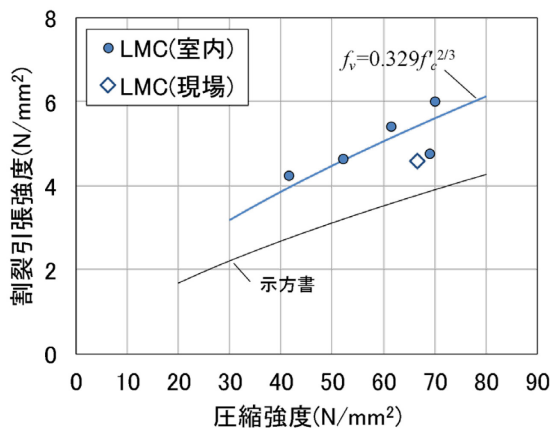


図-5.4.5 割裂引張強度と圧縮強度

## (2) 共振周波数

表-5.4.3 に、部分打替え前後の共振周波数比を示す。部分打替え後も供試体下側には ASR により劣化したコンクリートが残存するものの、ASR により 0.73 まで低下していた共振周波数比は、0.87 まで回復した。

表-5.4.3 共振周波数比

測定位置	部分打替え前	部分打替え後
①	0.73	0.83
②	0.72	0.88
③	0.74	0.90
平均	0.73	0.87

## (3) 静的載荷試験

### (a) 荷重-中央変位関係

図-5.4.6 に、静的載荷試験における荷重中央変位関係を示す。最大荷重までの荷重-中央変位関係より、ASR 供試体では健全供試体と比較して剛性の低下がみられたものの、LMC を用いた部分打替え後は剛性が回復していることがわかる。部分打替え後の最大荷重は 741kN であり、打替え前の 484kN と比較すると最大荷重が約 1.5 倍増加した。健全供試体の最大荷重 608kN と比較しても、床版厚さが若干小さいにも関わらず大きく、供試体上側を力学的特性に優れる LMC で打替えることが、静的耐力の向上に有効であることがわかる。写真-5.4.7 に、静的載荷試験後の供試体側面の状況を示す。最大荷重に達した直後に、下側鉄筋を連結するように急激にひび割れが発生し、これに伴い荷重の低下および中央変位の増加がみられた。

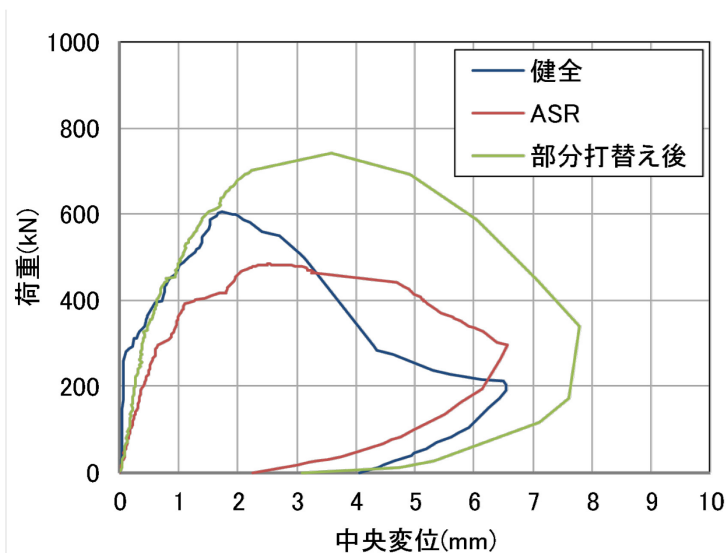


図-5.4.6 荷重-中央変位関係

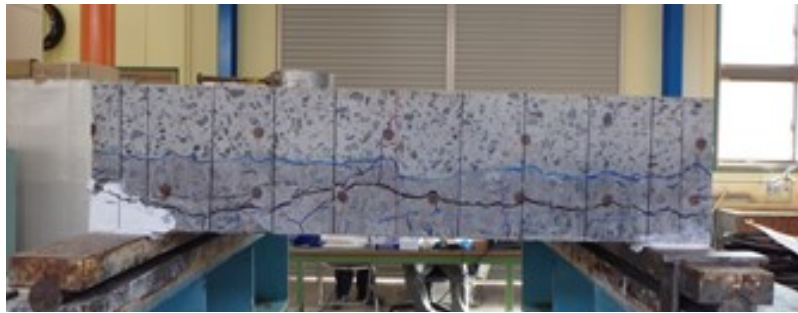


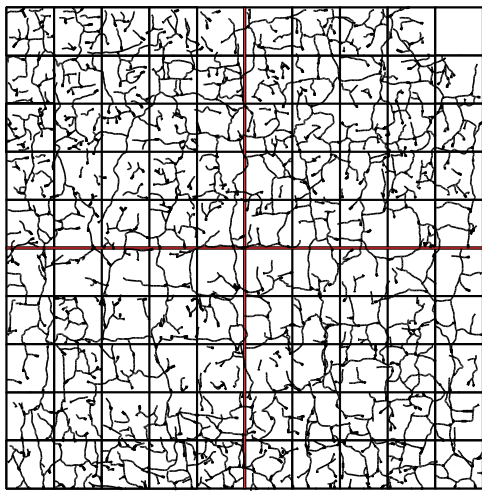
写真-5. 4. 7 静的載荷試験後の供試体側面

#### (b) 載荷試験後のひび割れ状況

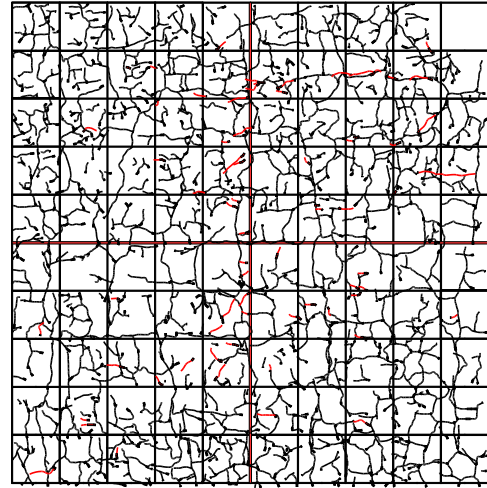
図-5. 4. 7 に、載荷試験後の供試体下面のひび割れ状況を示す。なお、図中の赤線は各段階において新規に生じたひび割れを表す。載荷試験前から、供試体下面には ASR によるひび割れが格子状に生じていた。載荷による曲げひび割れは明確には認められず。ASR により生じていたひび割れ間を連結するように、新たなひび割れが生じた。載荷による新たなひび割れの本数は少なく、床版下面のひび割れの進展状況は、部分打替えを行っていない ASR 劣化供試体と同様の傾向を示した。

写真-5. 4. 8 に、載荷試験後の供試体中央の切断面における破壊状況を示す。部分打替え後の供試体では、載荷版端部から  $55\sim 62^\circ$  で斜めひび割れが発生しており、斜めひび割れの角度は健全供試体と比較して大きくなった。これは、普通コンクリートと LMC の力学特性の違いや、上層が LMC、下層が ASR 劣化コンクリートであるといった断面構成の違いによるものと考えられる。斜めひび割れは、通常の押抜きせん断破壊で見られるように供試体下方には抜けず、下側鉄筋付近から供試体の側方に抜けていた。部分打替え供試体においては、供試体の下側は ASR による層状のひび割れが存在するため、ASR 供試体同様に斜めひび割れが水平方向に誘導されたものと考えられ、部分打替え後も ASR 劣化した既設コンクリート部における鉄筋とコンクリート間の付着が静的耐力を左右していた。部分打替え界面の剥離はみられず、静的載荷試験において LMC と既設コンクリートはおおむね一体性を維持していたものと考えられる。

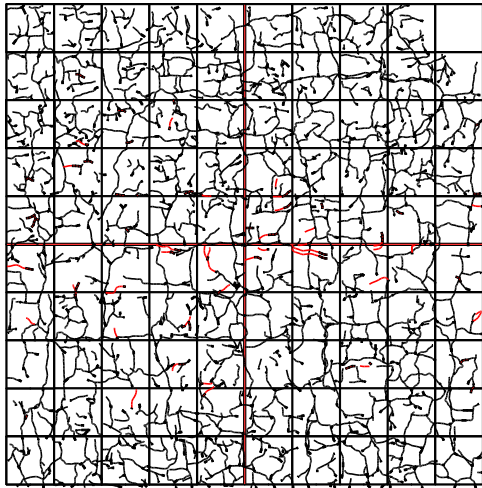




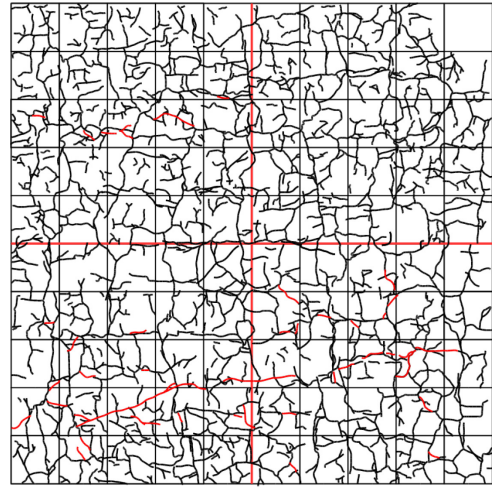
(a) 載荷試験前



(b) 載荷荷重 150kN

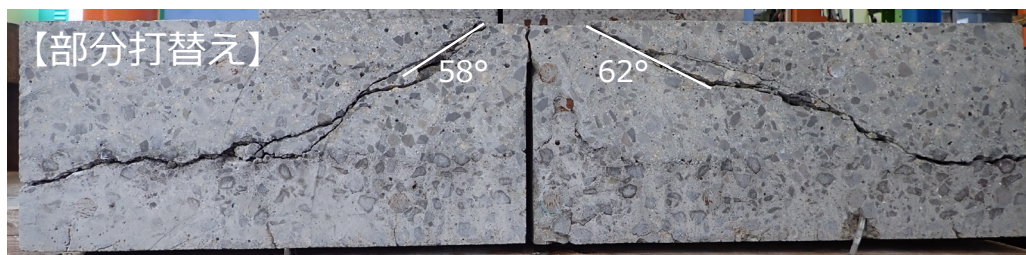


(c) 載荷荷重 450kN

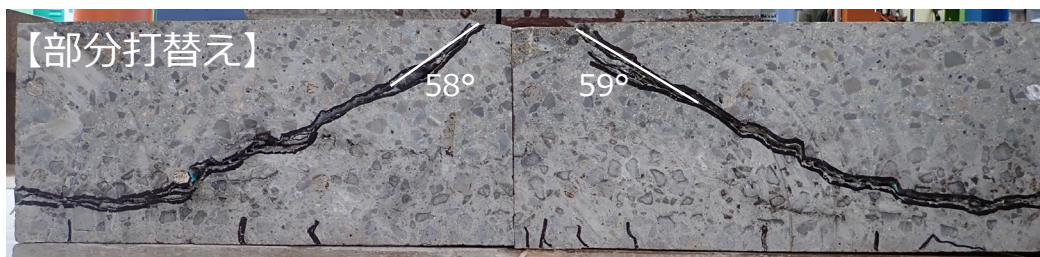


(d) 載荷試験終了時

図-5.4.7 供試体下面のひび割れ状況



(a) 部分打替え供試体(主鉄筋方向)



(b) 部分打替え供試体(配力鉄筋方向)

写真-5.4.8 切断面における破壊状況

### (c) 押抜きせん断耐力の算定

表-5.4.4 に、式(5.1)に示した前田・松井の式による押抜きせん断耐力の算定結果を示す。圧縮側コンクリートのせん断抵抗は主に LMC 部分で受け持つと考えられることから、せん断耐力の計算におけるコンクリートのせん断強度( $f_c$ )は、LMC の材齢 368 日の圧縮強度を用いて、LMC におけるせん断強度と圧縮強度の関係式(5.6)より算出した。また、引張側鉄筋のダウエル効果にともなう鉛直方向の引張抵抗は、ASR 供試体部で受け持つと考えられることから、引張強度( $f_t$ )は、ASR 供試体から採取した材齢 4 年におけるコア供試体の圧縮強度を用いて、式(5.3)より算出した。コンクリートの弾性係数は、それぞれの実験値を用いた。

押抜きせん断耐力の実験値は、計算値と比較して 3 割ほど高くなった。前述のとおり、供試体の破壊状況は斜めひび割れが供試体下方に抜けず、ASR 劣化部の下側鉄筋位置で側方に進展しており、前田・松井の式で想定している破壊機構と異なる破壊形態を示したことによるためと考えられる。

表-5.4.4 押抜きせん断耐力の計算値

種類	床版厚さ (mm)	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	実験値 $P_{test}$ (kN)	計算値 $P_{cal}$ (kN)	$P_{test}/P_{cal}$
部分打替え	210	66.8	741	573	1.29

## 5.5 まとめ

本章では、実物大 RC 床版から供験体を切り出して静的載荷試験を行い、ASR が RC 床版の押抜きせん断耐力に及ぼす影響について検討を行った。また、鋼主桁上の実物大 RC 床版上で LMC を用いた部分打替えを行った後に、同様に供験体を切り出して静的載荷試験を行い、部分打替えによる押抜きせん断耐力の向上効果を評価した。得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) 鋼主桁上に設置した RC 床版から切出した供試体内部には、ASR により水平方向に層状にひび割れが生じていた。ひび割れは床版上側で幅が大きく、幅 1.2mm 程度のものも存在した。
- (2) ASR が生じた供試体では、ASR により床版内部に発生した水平方向のひび割れの影響により、静的載荷による斜めひび割れが水平方向に誘導される傾向を示し、特に、供試体配力鉄筋方向では斜めひび割れが圧縮側鉄筋付近より水平方向に進展した。
- (3) 鋼主桁や主鉄筋、配力鉄筋による拘束を受けて、ASR が中程度～顕著に進行した RC 床版では静的耐力が明らかに低下することが判明し、その破壊形態や耐荷機構は、ASR により発生した水平方向のひび割れに依存することが確認された。
- (4) 部分打替えに使用した LMC について、静弾性係数と圧縮強度の関係、せん断強度と圧縮強度の関係、割裂引張強度と圧縮強度の関係式を導出した。LMC は、普通コンクリートと比較して、特に引張強度特性に優れていた。
- (5) 部分打替え後は、ASR により 0.73 まで低下していた共振周波数比が 0.87 まで回復し、この結果は静的載荷試験における供試体剛性の回復と整合した。
- (6) 部分打替え後の供試体の押抜きせん断耐力は、補強前の約 1.5 倍であり、LMC を用いた部分打替えが、ASR 劣化 RC 床版の静的耐力の向上に有効であることが確認された。
- (7) 部分打替え後も ASR 劣化した既設コンクリート部における鉄筋とコンクリート間の付着が静的耐力を左右していた。部分打替え部における新旧コンクリート界面の剥離はみられず、載荷試験において LMC と既設コンクリートはおおむね一体性を維持していたものと考えられた。

## 5章の参考文献

- 1) 五島孝行, 大田孝二, 梶尾聡, 鈴木康範, 伊戸康清, 島田守: アルカリ骨材反応で損傷した道路橋床版の調査, 土木学会第 68 回年次学術講演概要集, I, pp.835-836, 2013.
- 2) 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荷力の評価式, 土木学会論文集, 第 348 号/V-1, pp.133-141, 1984.
- 3) 田附伸一, 津吉毅, 石橋忠良, 松田芳範, 今井勉: ASR により損傷した RC 部材の耐荷力に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.63, No.1, pp.166-177, 2007.
- 4) 小林孝元, 田中泰司: アルカリ骨材反応による劣化の進行した RC 床版の押抜きせん断試験, 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, pp.259-264, 第 13 巻, 2013.
- 5) 東山浩士, 松井繁之, 水越睦視: PC 床版の押抜きせん断耐力算定式に関する検討, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1347-1354, 2001.
- 6) 並木哲, 山本康弘, 戸祭邦之, 黒羽健嗣: 超高強度コンクリートの各種強度の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.737-738, 1987.
- 7) 伊東茂富: コンクリートのせん断強度-コンクリートダムの滑動安定に関連して-, セメントコンクリート, No.123, pp.2-7, 1959.



## 第 6 章 結論

## 6.1 概説

近年、道路橋 RC 床版では、交通荷重の繰返しによる疲労損傷に加えて、塩害や凍害、ASR 等のコンクリートの材料劣化との複合劣化が顕在化しつつある。ASR の RC 床版の構造耐力への影響に関する既往の研究は少ないものの、著者を含む研究グループは、実環境のように緩やかに ASR が進行した場合に RC 床版の耐疲労性が低下することを明らかにしている。このことは、ASR による RC 床版の劣化機構の解明に向けては、より実環境に即した方法を用いることが重要であるとともに、低下した構造性能を回復、向上させる補強方法の確立が必要であることを示唆している。

そこで本研究では、ASR による RC 床版の劣化性状および構造性能への影響を明らかにし、効果的な補強方法を提案することを目的に実験的に検討を行った。まず、供試体レベルの評価として、ASR 劣化した RC 床版を作製し、LMC を用いた部分打替えを行い、輪荷重走行試験機による耐疲労性の評価を行った。次いで、屋外環境下の鋼主桁上に実物大の RC 床版を作製し、約 4 年間、ASR による劣化性状を評価した。また、実物大 RC 床版から供試体を切り出して静的載荷試験を行い、ASR が RC 床版の押抜きせん断耐力に及ぼす影響について実験的に検討を行った。さらに、ASR 劣化した RC 床版に対して LMC を用いた部分打替えを行い、静的耐力の向上効果を検証した。

## 6.2 各章で得られた成果のまとめ

第 2 章では、ASR によるコンクリート構造物の劣化の現状を把握するとともに、ASR が RC 部材の構造性能に及ぼす影響と補修・補強方法に関する既往の研究成果について整理した。得られた知見および技術的な課題を以下に示す。

- (1) 現行の ASR 抑制対策の有効性は否定されるものではないが、必ずしも十分なものではない。凍結防止剤の散布量の増加にともない、従来は ASR の発生が稀と考えられていた RC 床版においても、ASR の報告事例が多くみられるようになってきている。そのため、RC 床版における ASR 劣化機構の解明が必要と考えられる。
- (2) ASR が生じた RC 床版の劣化の特徴としては、床版下面には亀甲状のひび割れが、床版の鉛直断面においては水平方向のひび割れが多数生じ、ひび割れからはゲルの滲出がみられる。また、床版上面では広範囲に砂利化が生じ、上側鉄筋が露出する場合もある。ASR が生じた RC 床版の補修・補強においては、これらの変状に対応する必要がある。
- (3) ASR による膨張は内部および外部からの拘束の影響を受け、発生するひび割れの形態は拘束の影響を反映したものとなる。RC 床版における ASR によるひび割れは、内部の主鉄筋および配力鉄筋に加えて、鋼主桁の拘束の影響を受ける可能性があり、この影響も考慮する必要があると考えられる。
- (4) RC はりや RC 柱における検討では、ASR によるコンクリートの膨張が適切に拘束される

場合には、ASRが生じても健全なRC部材と比較して大きな終局耐力の低下はないとされる。一方、RC床版の構造性能に及ぼすASRの影響に関する研究は数少なく、十分な知見が集まっているとは言い難い。

- (5) 輪荷重走行試験機を用いた検討により、RC床版の耐疲労性はASRの促進条件に大きく影響を受け、緩やかにASRが進行した場合は、耐疲労性が顕著に低下する可能性があることが明らかとなっている。すなわち、RC床版の構造性能に及ぼすASRの影響については、より実環境に即した検討が必要である。
- (6) ASRにより損傷を受けたコンクリート構造物に対して表面被覆工法やPC巻き立て工法などが一部で検討されているものの、現状では補修・補強方法は確立されていない。特にASRにより損傷したRC床版の耐荷力を回復、向上される方法についての検討が不十分である。

第3章では、ASRと疲労の複合劣化を受けたRC床版供試体を作製し、LMCを用いた部分打替えを行い、補強後の耐疲労性について検討を行った。以下に、得られた主な結果を示す。

- (1) 疲労限界時の等価繰返し走行回数を比較すると、部分打替え後は部分打替え前の178倍となり、ASRと疲労により複合劣化したRC床版に対する部分打替えによる補強効果が明確に認められた。これは、供試体上面を力学特性や水の浸透抵抗性に優れるLMCで置き換えたことで、圧縮側コンクリートのせん断抵抗が向上したことや、RC床版の耐疲労性を大きく低下させる水の浸透が抑制されたことなどが寄与したものと考えられた。
- (2) 部分打替え前は、ASR膨張と疲労により床版下面全体に格子状にひび割れが生じた。部分打替え後は、輪荷重の繰返しにともなう新たなひび割れの発生は少なかった。
- (3) 共振周波数比は、ASRの発生やその後の輪荷重走行試験による疲労によって大きく低下したが、部分打替え後は共振周波数比も健全時までとはいかないが増加した。すなわち、この種の非破壊検査からも耐疲労性に対する補強効果の評価が可能であると考えられた。
- (4) 輪荷重走行試験終了後の断面観察より、疲労限界が上側鉄筋付近における水平ひび割れの発生に加え、部分打替え箇所界面の剥離によって有効な床版厚さが減少し、せん断耐力が低下したことに起因したものと考えられた。このことは、RC床版の損傷部分を新たな材料で打ち替えるような部分打替えにおける既設部との一体性の確保の重要性を示唆するものと考えられた。

第4章では、RC床版におけるASR劣化性状についてより実態に即した評価を行うことを目的として、鋼主桁上に実物大RC床版を架設し、屋外暴露環境下で各種計測を実施した。得られた



知見を以下に示す。

- (1) RC 床版における ASR による膨張は、床版内部の鉄筋による拘束の影響を受け、水平方向より鉛直方向で卓越した。このことにより床版内部には水平方向のひび割れが生じ、耐疲労性に影響を及ぼすと考えられる上側鉄筋位置で特に幅の大きなひび割れが生じた。また、水平方向の膨張には主桁の拘束も影響していた。
- (2) ASR の温度依存性により、実環境下の ASR 膨張は季節変動を示した。外気温の上昇にともない膨張挙動が生じるが、膨張開始温度は劣化の進行にともない低下することを明らかにした。
- (3) 実体顕微鏡、偏光顕微鏡観察の結果、粗骨材の反応性リムの生成、ASR ゲルの滲出、ひび割れの生成、セメントペースト中の高密度なひび割れが確認され、ASR の劣化進行度としては中程度～顕著と判定された。また、ASR ゲルおよび CSH ゲルの分析結果から、ASR の進行過程としては中期ステージであり、ASR による反応余力をなお十分に有していると考えられた。
- (4) ASR による床版供試体の膨張にともない共振周波数比は低下し、強制振動試験は ASR 劣化を検知するうえで有効な手法と考えられた。共振周波数比は、約 0.8 まで低下した後はほぼ一定で推移し、その後増加する傾向を示したものの、材齢 4 年では約 0.7 まで低下した。
- (5) 透気試験の結果、実環境下における RC 床版の表層品質は、床版の上下面で大きく異なることが明らかとなった。また、ASR の進行にともない透気係数は大きくなった。ASR によるひび割れを避ける計測を行えば、RC 床版の表層付近の状態を透気係数にて評価できる可能性が示唆された。

第 5 章では、実物大 RC 床版から供験体を切り出して静的載荷試験を行い、ASR が RC 床版の押抜きせん断耐力に及ぼす影響について検討を行った。また、鋼主桁上の実物大 RC 床版上で LMC を用いた部分打替えを行った後に、同様に供験体を切り出して静的載荷試験を行い、部分打替えによる押抜きせん断耐力の向上効果を評価した。得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) 鋼主桁上に設置した RC 床版から切出した供試体内部には、ASR により水平方向に層状にひび割れが生じていた。ひび割れは床版上側で幅が大きく、幅 1.2mm 程度のものも存在した。
- (2) ASR が生じた供試体では、ASR により床版内部に発生した水平方向のひび割れの影響により、

静的載荷による斜めひび割れが水平方向に誘導される傾向を示し、特に、供試体配力鉄筋方向では斜めひび割れが圧縮側鉄筋付近より水平方向に進展した。

- (3) 鋼主桁や主鉄筋，配力鉄筋による拘束を受けて，ASR が中程度～顕著に進行した RC 床版では静的耐力が明らかに低下することが判明し，その破壊形態や耐荷機構は，ASR により発生した水平方向のひび割れに依存することが確認された。
- (4) 部分打替えに使用した LMC について，静弾性係数と圧縮強度の関係，せん断強度と圧縮強度の関係，割裂引張強度と圧縮強度の関係式を導出した。LMC は，普通コンクリートと比較して，特に引張強度特性に優れていた。
- (5) 部分打替え後は，ASR により 0.73 まで低下していた共振周波数比が 0.87 まで回復し，この結果は静的載荷試験における供試体剛性の回復と整合した。
- (6) 部分打替え後の供試体の押抜きせん断耐力は，補強前の約 1.5 倍であり，LMC を用いた部分打替えが，ASR 劣化 RC 床版の静的耐力の向上に有効であることを示した。
- (7) 部分打替え後も ASR 劣化した既設コンクリート部における鉄筋とコンクリート間の付着が静的耐力を左右していた。部分打替え部における新旧コンクリート界面の剥離はみられず，載荷試験において LMC と既設コンクリートはおおむね一体性を維持していたものと考えられた。

### 6.3 今後の課題と展望

近年，自然災害は激甚化・頻発化しており，安心・安全な社会の実現には災害に強いインフラの整備は急務であるといえる。一方，今後，我が国では建設後 50 年を超えるインフラの割合が飛躍的に増加することが見込まれている<sup>1)</sup>。また，東京一極集中や人口減少，少子高齢化の影響によりインフラの維持管理に関わる地方公共団体の土木部門の職員数は減少することが見込まれている。現実的には財政上の制約も大きいことを考慮すると，道路インフラの合理的・効率的な維持管理の実現が求められている。そのためには，ASR などの材料劣化が生じた RC 床版に関する点検，診断，措置に関する技術を確立し，持続的なメンテナンスサイクルを実現する必要がある。

近年，ASR が生じた RC 床版の報告事例が増えてはきているものの，十分に知見が蓄積されているとは言えず，実橋の RC 床版での ASR 劣化の実態は十分に明らかになっているとは言えない。今後は，より広範な実態調査を行い，RC 床版でどのような劣化が起きているのかを明らかにすることが望まれる。また，このような実態を明らかにすることは，劣化が生じた RC 床版において ASR かどうかの点検を行う際に，変状を観察する際の着目点や，コアの採取位置を判断する場合などにも有用な情報となると考えられる。

本研究では、ASR が中程度~顕著に進行した RC 床版では、静的耐力が低下し、その破壊形態や耐荷機構が、ASR により発生した床版内部の水平ひび割れに依存することを示した。ただし、実際の RC 床版においては使用される骨材の反応性も様々であり、また気象条件や地理的条件等による環境条件も様々である。ASR が生じた RC 床版の健全性を正しく評価するには、ASR 劣化の進行状況に応じた RC 床版の残存耐力および余寿命評価が適切に行えるようになることが望ましい。現状、ASR 劣化の進行度により、RC 床版がどのくらいの耐力を有しており、また交通量等や期待する供用期間に応じてどのくらいの余寿命を有しているかを正確に見積もるのは極めて困難である。今後は、ASR による膨張量や RC 床版内部の損傷状況の程度の違いと、RC 床版の静的耐力および耐疲労性との関係を把握し、定量化が図られる必要があると考えられる。また、このような検討を実験的に全て行うには多大な労力や費用と、長期間の検討が必要である。近年では、コンクリート構造物の 3 次元解析が可能な構造システムが開発され<sup>2)</sup>、この解析システムの中では ASR と多方向ひび割れにともなう物理作用のモデル化も試みられている<sup>3)</sup>。このような数値解析を活用した検討も有効であると考えられる。ASR が促進されるような凍結防止剤散布下では、ASR に加えて凍害や塩害が複合的に作用することも考えられる。これらの凍害や塩害と ASR の複合作用が、RC 床版の構造性能に及ぼす影響についての検討も今後必要であると考えられる。

今後も財政上の制約が厳しい状況が続くことを考慮すると、劣化した RC 床版に対する合理的な補修・補強技術の確立も重要である。ASR の進行程度に応じて効果的かつ適切な補修・補強方法を選択できるようにする必要がある。それには、補修・補強効果の定量化も重要である。特に、補強については、補強後の静的耐力や耐疲労性の算定方法が確立されることが望ましい。本研究では、LMC を用いた床版上面の打替えが、ASR が中程度~顕著に進行した RC 床版の静的耐力や耐疲労性の向上に有効であることを示した。部分打替え後の RC 床版の静的耐力および耐疲労性は、使用するコンクリートの力学特性や、打替え深さが大きな影響を及ぼすと考えられるが、現状、これらの要因の影響は明らかとなっておらず、打替え後の耐力の算定方法も確立されていない。今後は、部分打替え後の RC 床版の静的耐力および耐疲労性に及ぼす打替え用コンクリートの力学特性の影響を明らかにすることが必要と考えられる。また、このような新しい技術や工法について、実際の現場に適用し、その効果を実証することで、知見を蓄積していくことも重要であると考えられる。

## 6 章の参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通白書 2020, 2020.
- 2) Maekawa, K., Ishida T. and Kishi, T.: Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor and Francis, 2008.
- 3) Takahashi, Y, Ogawa, S., Tanaka, Y and Maekawa, K.: Scale-Dependent ASR Expansion of Concrete and its Prediction Coupled with Silica Gel Generation and Migration, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.14, No.8, pp.444-463, 2016.

## 【付属資料】 ASR 劣化 RC 床版供試体の定点繰返し載荷試験

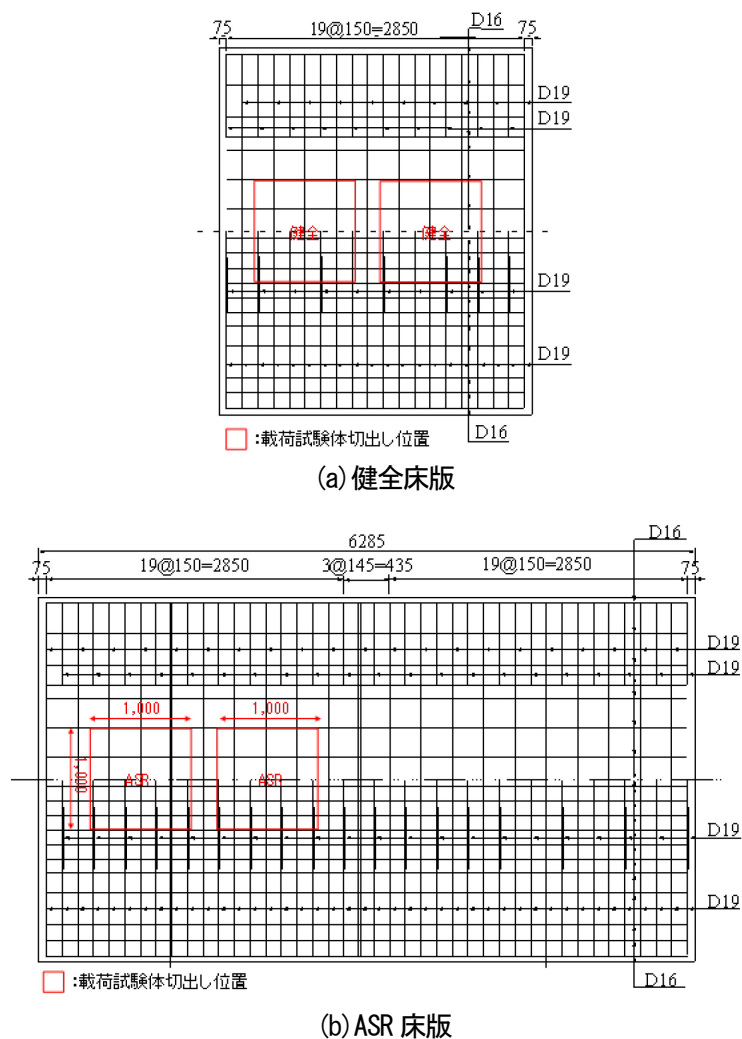
### 1 概説

第4章の実物大 RC 床版から供験体を切り出し、定点繰返し載荷試験を行うことで、ASR が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響について検討を行った。載荷回数 20,000,000 回でも破壊に至らず、試験途中の報告であるが、付属資料として添付する。

### 2 実験概要

#### 2.1 供試体の概要

鋼主桁上に架設した RC 床版供験体から、静的載荷試験用供験体と同様に、定点繰返し載荷試験に供する供験体を1体ずつ切り出して採取した。付図-2.1 に供験体の切出し位置を示す。切出し後の供験体の配筋が健全床版と ASR 床版で同一となるように切出し位置を設定した。供験体の切出しは材齢4年(健全床版：材齢1637日，ASR床版：1497日)で行った。



付図-2.1 供験体の切出し位置

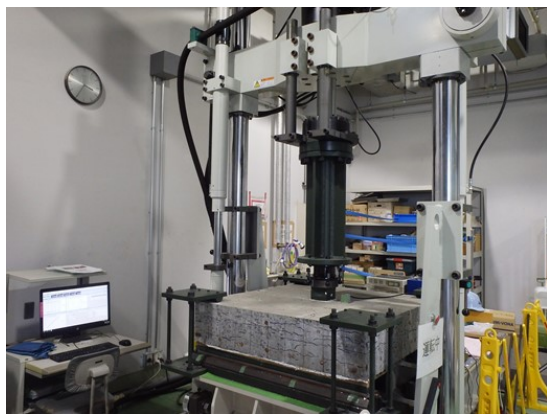
切出し後の供試体の配筋や寸法，供試体切断面における鉄筋端部の定着措置は，第4章の静的載荷試験用供試体と同様である。

## 2.2 載荷試験方法

付写真-2.1に，定点繰返し載荷試験状況を示す。支持条件は，スパン長 900mm の2辺単純支持とした。試験には，油圧サーボ式疲労試験機(最大動的試験力:±300kN)を用いた。供試体中央に 100×100mm の鋼製載荷版を設置し，一点集中載荷した。供試体の四隅は，鋼製治具により浮上りを防止した(付写真-2.2)。

付表-2.1に，載荷試験条件を示す。試験時の荷重振幅は，静的載荷試験の結果をもとに，静的耐力の49.5%を振幅の上限値，10%を下限値とした。荷重振幅の上限荷重は，健全供試体において本試験機で試験可能な最大荷重(300kN)から設定した。繰返し速度は，5Hzとした。

計測項目は作用荷重，スパン中央変位，共振周波数である。作用荷重はロードセルにより，スパン中央変位は供試体下面に設置した変位計により測定した。付写真-2.3に，変位計の設置状況を示す。所定の載荷回数終了ごとに，荷重振幅の上限値と等しい荷重を静的載荷した。また，所定の載荷回数終了ごとに強制振動試験を行い，共振周波数を測定した。その際，加振器は供試体上面に設置した(付写真-2.4)。さらに，載荷試験中の所定の載荷回数ごとに，供試体下面のひび割れ状況を観察した。



付写真-2.1 定点繰返し載荷試験状況



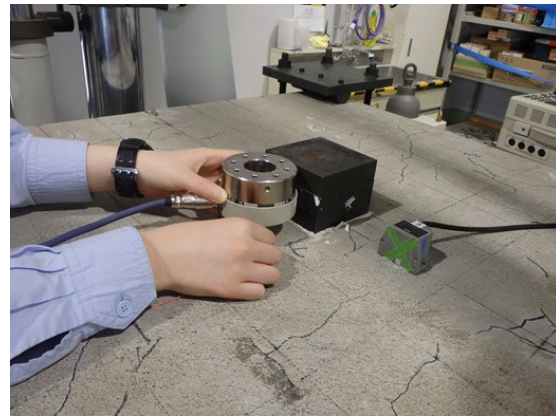
付写真-2.2 浮上り防止治具

付表-2.1 載荷条件(定点疲労試験)

供試体 種類	静的耐力 (kN)	載荷条件				繰返し 速度 (Hz)
		載荷荷重/静的耐力(%)		載荷荷重(kN)		
	実験値	上限	下限	上限	下限	
健全	606	49.5	10	300	60.6	5
ASR	484	49.5	10	240	48.4	5



付写真-2.3 変位計の設置状況



付写真-2.4 強制振動試験状況

### 3 定点繰返し载荷試験結果

#### 3.1 活荷重たわみ

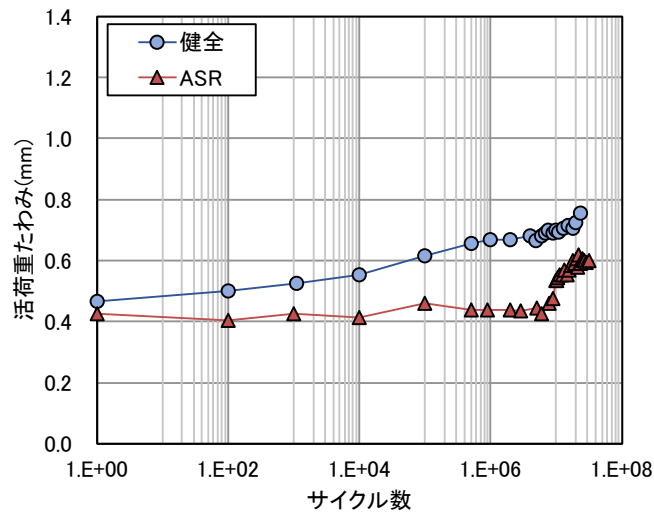
付図-3.1に、定点繰返し载荷試験における活荷重たわみとサイクル数の関係を示す。ここで、活荷重たわみは、定点繰返し载荷における上限荷重(静的耐力の 49.5%)を载荷した時の最大たわみと、荷重を除荷した際の残留たわみの差であり、弾性変形成分のたわみを表す。健全供試体においては、载荷回数の増加とともに活荷重たわみが緩やかに増加する傾向がみられた。一方、ASR 供試体では、载荷回数が増加しても活荷重たわみの変化が小さく、健全供試体とは異なる挙動を示した。ASR 供試体の活荷重たわみは、10,000,000 回付近より大きく増加する傾向を示した。健全供試体は約 2,325,000 回、ASR 供試体では 31,500,000 回まで試験を実施したが、いずれの供試体も破壊に至らなかった。

コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>に示される以下のせん断補強鉄筋のない面部材の設計押抜きせん断疲労耐力式を用いて、破壊回数を算出した。

$$V_{rpd} = V_{pcd} \left(1 - V_{pd} / V_{pcd}\right) \left(1 - \frac{\log N}{14}\right) \quad (3.1)$$

ここで、 $V_{rpd}$ ：設計押抜きせん断疲労耐力、 $V_{pcd}$ ：設計押抜きせん断耐力、 $V_{pd}$ ：永久荷重作用時の設計押抜きせん断力、 $N$ ：繰返し回数である。

付表-3.1に、計算結果を示す。式(3.1)は、角田ら<sup>2)</sup>の研究成果にもとづくものであり、その実験値が、繰返し回数がほぼ 200 万回以下の範囲のものであるため、この範囲以下で適用するのがよいとされている<sup>3)</sup>。したがって、200 万回以上繰返し载荷した場合の精度は明らかでないものの、破壊回数の計算値と本実験における载荷回数とは大きな開きがあることから、健全供試体、ASR 供試体ともに破壊に至らせるには、更なる繰返し载荷を要するものと考えられる。



付図-3.1 活荷重たわみとサイクル数の関係

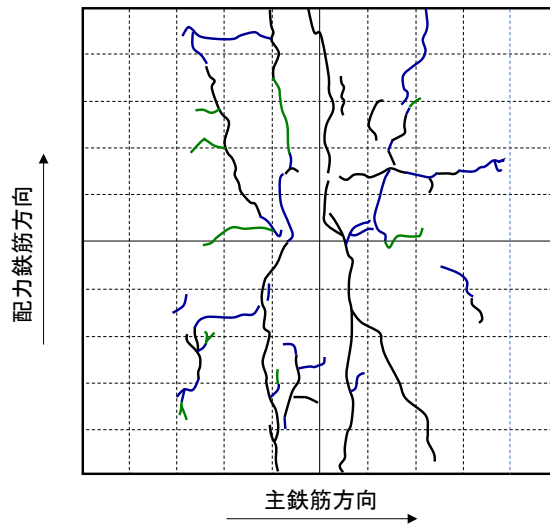
付表-3.1 定点繰返し载荷における破壊回数の計算値

種類	$V_{pcd}$ (kN)	$V_{rpd}$ (kN)	$V_{pd}$	N
健全	606	300	60.6	69,511,544
ASR	484	240	48.4	69,511,544

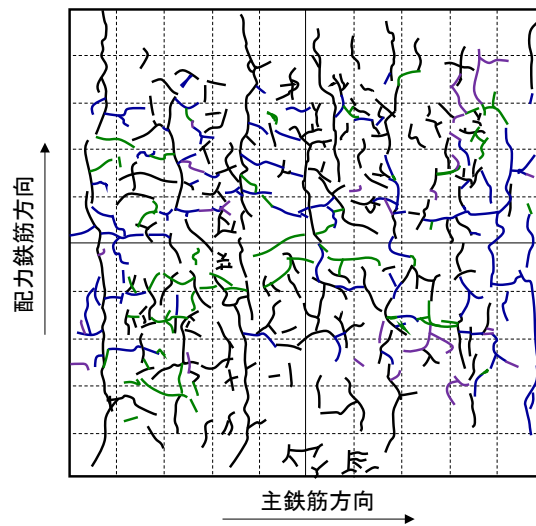
### 3.2 载荷試験後のひび割れ状況

付図-3.2 および付図-3.3 に、供試体下面のひび割れ発生状況を示す。健全供試体においては、供試体中央に曲げひび割れが生じた後、载荷回数が増加にともない、主鉄筋方向にもひび割れが進展し始めている傾向がみられるものの、20,000,000 回の時点ではひび割れは格子状までは進展しておらず、配力鉄筋方向のひび割れが多くみられた。ASR 供試体については、载荷前から ASR により生じたひび割れが主鉄筋、配力鉄筋方向にみられる。载荷回数が増加にともない、既にあったひび割れを連結するようにひび割れが増加したものの、新たに発生したひび割れの数は少なかった。このように、ASR の有無により、定点繰返し载荷におけるひび割れの発生状況に違いがみられ、事前に ASR により生じていたひび割れが支配的となり、その後の定点繰返し载荷によるひび割れの発生が抑制されることが明らかとなった。





黒:100,000回, 青:2,000,000回, 緑:20,000,000回  
 付図-3.2 健全供試体下面のひび割れ(載荷試験後)



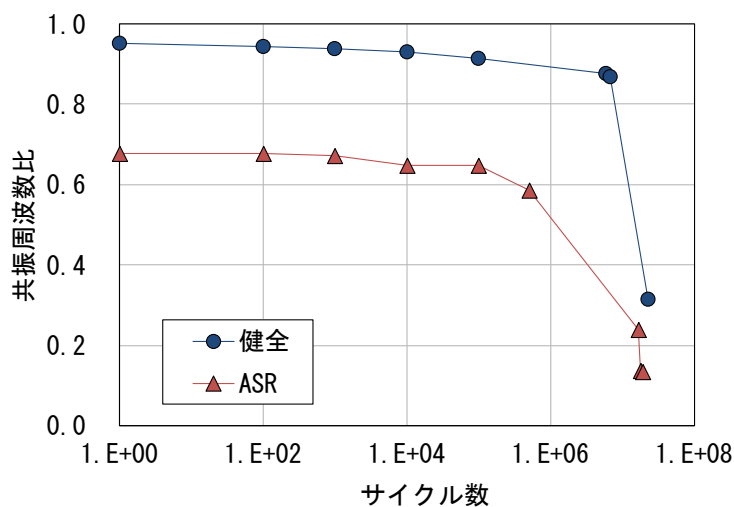
黒:載荷前, 青:100,000回, 緑:2,000,000回, 紫:10,000,000回  
 付図-3.3 ASR 供試体下面のひび割れ(載荷試験後)

### 3.3 共振周波数

付図-3.4 に、定点繰返し载荷試験における共振周波数比の推移を示す。なお、共振周波数比は、第3章で示した RC 床版供試体作製時を起点としている。まず、健全供試体の共振周波数比は、载荷回数の増加とともに緩やかに低下した後、载荷回数が約 23,000,000 回で 0.3 まで大きく低下した。定点繰返し载荷による供試体内部の損傷が大きくなり、共振周波数比が低下したものと考えられる。この時点で活荷重たわみは急増する傾向はみられていないが、定点繰返し载荷試験をさらに継続した場合、早期に供試体が疲労破壊する可能性があるものと考えられる。

ASR 供試体については、载荷に先立つ ASR 劣化により共振周波数比は約 0.7 に低下していた。その後、载荷回数の増加とともに共振周波数比が緩やかに低下し、約 17,000,000 回時点で大きく低下し、約 17,800,000 回時には 0.19 まで低下していた。ASR 供試体の活荷重たわみは、10,000,000 回付近より急増する傾向を示しており、定点繰返し载荷にともなう損傷の進行が共振周波数比は反映しているといえる。

载荷回数が約 10,000,000 回までの活荷重たわみは、健全供試体では緩やかに増加し、ASR 供試体ではほぼ一定で推移したが、この範囲の共振周波数比の変化は健全供試体と ASR 供試体で同程度であった。これは、载荷によるひび割れが供試体に対して垂直方向に生じ、強制振動試験における加振方向と同一となることから、共振周波数に与える影響が小さかったためと考えられる。



付図-3.4 共振周波数比

#### 4 まとめ

実環境下における鋼主桁上に設置した RC 床版供試体の ASR 劣化性状を評価した後、供試体を切り出し、定点繰返し載荷試験を実施し、ASR が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響について検討した。得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) 健全供試体においては、載荷回数の増加とともに活荷重たわみが緩やかに増加する傾向がみられた。一方、ASR 供試体では、載荷回数が増加しても活荷重たわみの変化が小さく、健全供試体とは異なる挙動を示した。
- (2) ASR 供試体の活荷重たわみは、載荷回数 10,000,000 回付近より大きく増加する傾向を示したものの、健全供試体は約 2,325,000 回、ASR 供試体では 31,500,000 回まで試験を実施したが、いずれの供試体も破壊に至らなかった。
- (3) 載荷回数の増加にともない、共振周波数比は緩やかに推移した後に大きく低下し、健全供試体では載荷回数 23,000,000 回の時点で 0.3 まで、ASR 供試体では約 17,800,000 回の時点で 0.19 まで低下した。

#### 付属資料の参考文献

- 1) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編：標準]，p.226，2017.
- 2) 角田与史雄，藤田嘉夫：RC スラブの疲労押抜きせん断強度に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第 317 号，pp.149-157，1982.
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書(昭和 61 年制定)改訂資料，pp.225-226，1986.

## —謝 辞—

本論文は、筆者が太平洋セメント(株)中央研究所に在職中に、日本大学工学部コンクリート工学研究室および構造・道路工学研究室と太平洋セメント(株)の共同研究として行ってきた道路橋 RC 床版に関する研究の成果をとりまとめたものです。

本研究の遂行から論文のとりまとめまで、終始懇切丁寧なご指導、ご鞭撻をいただきました主査である日本大学教授 岩城一郎先生には心より感謝の意を表します。筆者が RC 床版に関する研究に携わるようになったのは、岩城一郎先生との共同研究がきっかけです。常に実際のコンクリート構造物の長寿命化への貢献を見据えながら、同時に学術的な側面から着想する研究者としての姿勢など、多くのことを学ばせていただきました。

日本大学教授 梅村靖弘先生、日本大学教授 子田康弘先生、九州大学准教授 小山智幸先生には、快く副査をお引き受けいただきました。梅村靖弘先生には、予備審査において具体的かつ的確なご指摘と、丁寧なご助言をいただきました。子田康弘先生には、共同研究を通じてこれまで多くのご指導とご助言をいただいております。本論文の取りまとめにあたっては丁寧なご指導とご助言をいただきました。筆者が学位論文をとりまとめることができたのは、恩師である小山智幸先生に、学生時代に研究者としての基礎をご指導いただいたおかげです。本論文の予備審査においても、的確なご指摘と温かい応援をいただきました。心より感謝申し上げます。

本論文をまとめる機会を与えてくださりました太平洋セメント(株)常務執行役員 岡村隆吉博士、同執行役員中央研究所長 高野博幸博士、同中央研究所第 2 研究部長 田中敏嗣博士(現日本ヒューム(株) 執行役員技術本部長兼技術開発センター長)、同中央研究所第 2 研究部長 梶尾聡博士、同中央研究所第 2 研究部チームリーダー 河野克哉博士には、本論文のとりまとめにあたりご理解、ご配慮をいただきました。ここに深く御礼申し上げます。

実験の遂行、データの整理や解釈、論文の取りまとめなど本研究を進めるうえで、日本大学助教 前島拓博士の多大なるご助力、ご協力をいただきました。厚く御礼申し上げます。

鋼主桁上での RC 床版供試体のコンクリートの製造、施工およびその後の計測にあたっては、(株)NIPPO 村岡克明氏、白井悠博士、小野田ケミコ(株) 久我比呂氏博士のご協力、ご助力をいただきました。

LMC の製造にあたっては、太平洋マテリアル(株) 亀岡篤雄氏、郭度連博士(現 ショーボンド建設(株))、小沼孝仁氏、岡田明也氏に多大なるご助力をいただきました。

偏光顕微鏡観察にあたっては、(株)太平洋コンサルタント 安藤陽子博士のご助力をいただき、また ASR の岩石学的診断に関して貴重なご助言をいただきました。

本研究に関わる日本大学との共同研究にあたっては、太平洋セメント(株)東北支店技術部長 久保田裕康氏、鎌田和則氏のご配慮、ご協力をいただきました。

床版供試体の作製や実験の遂行、データの整理にあたっては、太平洋セメント(株)中央研究所 高木亮一氏(現 (株)安藤・間)、塩沢昌平氏、高橋英孝氏、樋口貴泰氏、市川裕規氏、小島克仁氏、立岩華英氏のご助力をいただきました。

本論文における多くの実験の遂行およびデータの整理等には，日本大学工学部コンクリート工学研究室および構造・道路工学研究室の学生の皆様の多大なるご協力をいただきました。

その他，本論文を取りまとめるにあたってご支援いただいた多くの皆様に厚く御礼申し上げます。

岸良 竜