

凍結防止剤散布下において劣化した
道路橋 RC 床版の耐疲労性評価に
関する研究

Study on evaluation of fatigue resistance
in RC road bridge deck deteriorated by deicing salt

平成 28 年 2 月

日本大学大学院 工学研究科 土木工学専攻
前島 拓

- 要 旨 -

道路橋 RC 床版(以下, RC 床版)は, 今なお, 疲労による著しい損傷例が多く報告されている. このうち, 輪荷重単独による疲労損傷は, 既往の研究により床版下面のひび割れの進行過程による整理がなされ, 床版下面からの点検により疲労損傷度を評価することが可能となり, 現行の維持管理方法に適用されている.

一方で, 東北地方をはじめとする積雪寒冷地では, 凍結防止剤(主に NaCl)の大量散布に伴い, コンクリート構造物の塩害, 凍害, アルカリシリカ反応(ASR)が促進され, 近年, RC 床版の早期劣化が社会問題になりつつある. こういった地域の RC 床版では, 前述した床版下面による点検で変状がほとんど見られない場合であっても, 床版上面で損傷が著しく進行しているケースが多数報告されている.

このように, 凍結防止剤散布環境下にある RC 床版については, 従来の床版下面による点検では, その損傷度を適切に評価することが難しい. 今後, 対策を必要とする道路橋の増加が予想される中, インフラの更新が難しい社会情勢を踏まえると, 疲労とともに材料劣化を受けるような複合劣化が生じる RC 床版の劣化の進行を把握し, 損傷に応じた適切な対策を講じる必要があると考えられる. そのためには, 凍結防止剤散布環境下において促進される各種材料劣化が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響を解明することが重要である.

以上の背景より, 本研究では, 凍結防止剤散布環境下において促進される材料劣化のうち塩害と ASR を取り上げ, これらが道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響について実験的・解析的に検討することを目的とした.

このうち, 塩害を受ける RC 床版については, 実物大に近い RC 床版供試体を作製し, これに対して, 塩水を用いた乾湿の繰返しによって塩害促進を実施した. その際, 促進時の塩分供給方法を変えることで異なる 3 条件の鉄筋腐食状況を生じさせた. そして, 塩害による鉄筋腐食を模擬した RC 床版供試体による輪荷重走行試験を行い, その耐疲労性を実験的に評価した. 次に, 鉄筋腐食量をパラメータとした 3 次元非線形有限要素解析を実施し, 鉄筋の腐食状況と, 床版断面のひずみ分布より, 耐疲労性に及ぼす要因を解析的に検討した.

ASR を受ける RC 床版については, 反応性粗骨材を使用して作製した実物大に近い RC 床版に対して, 環境条件の異なる ASR 促進を実施することで, ASR によるコンクリートの膨張速度および損傷状況を変化させた. そして, 輪荷重走行試験により, ASR を受ける RC 床版の耐疲労性を評価した. また, 輪荷重走行試験の各段階において, RC 床版の厚さ方向に対し, 小型加振器を励振器とした

強制振動試験を実施し、RC 床版内部の損傷レベルを定量的に評価することで、ASR が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響について実験的に検討した。

本論文は「凍結防止剤散布下において劣化した道路橋 RC 床版の耐疲労性評価に関する研究」と題し、7 章から構成されている。

本論文を要約すると、以下の通りである。

第 1 章は「序論」であり、本研究の背景となる、凍結防止剤散布下における道路橋 RC 床版の現状、および各種材料劣化を受ける RC 床版の耐疲労性評価の重要性を示した後に、本研究の目的を明らかとした。

第 2 章の「凍結防止剤散布下におけるコンクリート構造物の劣化および道路橋 RC 床版の耐疲労性評価に関する既往の研究」では、まず、凍結防止剤散布下におけるコンクリート構造物のうち RC 床版の損傷事例を中心に列挙し、現状の課題を整理した。さらに、輪荷重を受ける RC 床版の耐疲労性に関する既往の研究、各種材料劣化を受ける RC 部材の耐荷性・耐疲労性に関する既往の研究、道路橋 RC 床版の耐疲労性評価に関する既往の研究の要点を整理し、本研究で取り組むべき課題を明らかとした。

その結果、材料劣化した RC 床版の耐疲労性に関する既往の研究は、実構造物に近い状態で再現された例が極めて少なく、疲労損傷機構の解明は十分になされていないことを示した。また、各種材料劣化を受けた RC 床版の耐疲労性および損傷状態を、適切に評価し得る手法は未だ確立されておらず、床版上面および床版内部の疲労損傷度を定量的に評価する手法の確立が急務であることを示した。

第 3 章の「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」では、材料劣化のうち塩害を取り上げ、これが RC 床版の耐疲労性に与える影響を検討した。まず RC 床版の腐食ひび割れや鉄筋腐食性状などを、できる限り実構造物に近い状態で再現するため、長期にわたって屋外曝露環境下に供試体を設置し、さらに電気化学的な方法ではなく、塩水を用いた乾湿の繰返しによって塩害促進を実施した。その際、促進時の塩分供給方法を変えることで異なる 3 条件の鉄筋腐食状況を生じさせた。そして、塩害による鉄筋腐食を模擬した RC 床版供試体による輪荷重走行試験より、その耐疲労性を実験的に評価した。

得られた主な結果は以下の通りである。

- 1) 塩害を受けた供試体は、健全供試体に比べ耐疲労性が低下し、鉄筋腐食減量

率 5%程度であっても、輪荷重走行試験により評価される耐疲労性が 1/10 程度にまで低下することが確認された。既往の研究により 5%程度の鉄筋腐食では静的載荷試験により評価されるはりの曲げ耐力がほとんど低下しないことが示されていることを勘案すると、鉄筋腐食に伴い発生する腐食ひび割れが、耐疲労性に及ぼす影響は極めて大きいと言える。

- 2) 凍結防止剤散布を模擬した方法により塩害促進を施した散布供試体におけるひび割れや活荷重たわみの測定結果は、床版下面に変状が表れたときには既に床版上面において劣化が顕在化しているといった、凍結防止剤散布下における実 RC 床版の現象とよく一致した傾向を示した。すなわち、上側鉄筋の腐食が顕在化する場合、床版下面に顕著なひび割れは見られないものの、活荷重たわみは顕著に増加し疲労破壊に至る挙動を示した。
- 3) 鉄筋腐食が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響は下側鉄筋に比べ上側鉄筋の方が大きいことが示唆される結果を示した。これは、上側鉄筋の腐食が大きいと、疲労荷重による鉄筋とコンクリートの間の付着が急激に低下し、これに起因して水平ひび割れが早期に発生することで著しく耐疲労性が低下するためと考えられる。

第 4 章は「鉄筋腐食が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響に関する解析的検討」である。第 3 章では、実物大の RC 床版供試体を用いた塩害促進試験と輪荷重走行試験に関する結果と考察を行い、上側鉄筋の腐食が耐疲労性に及ぼす影響が大きいことが示されたが、材料強度や腐食減量にばらつきがあり、供試体数も限られている。そこで本章では、鉄筋腐食がたわみの進展に及ぼす影響に関する考察をさらに深めるため、第 3 章の実験と同一の材料特性のもと、腐食状況を極端に設定した 3 次元非線形有限要素解析による検討を行った。本解析検討では、腐食の有無、腐食部位、腐食量等をパラメータとした計 5 ケースとし、実験と同様の段階載荷方式による解析に加え、実験的には時間的制約で試験が困難な一定荷重載荷方式によるパターンも実施した。

得られた主な結果は以下の通りである。

- 1) 腐食状況を変化させた 3 次元非線形有限要素解析により、簡略的なモデル化を行っているものの、影響因子に応じたたわみの進展を解析的に捉えることが可能であり、第 3 章で述べた実験結果と同様に、下側鉄筋が腐食したケースよりも上側鉄筋の腐食が進行したケースで疲労寿命が低下するといった現象を解析的に推定することができた。このことから、鉄筋の腐食が RC 床版の耐疲労性に与える影響については、単に腐食量だけでなく、腐食部位や腐食によるひび割れ状態の影響が非常に大きいことが明らかとなった。
- 2) 上側鉄筋が腐食したケースでは、腐食に伴い発生する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することで、上側鉄筋位置における鉛直ひずみが輪荷重の繰返し作用により早期に増大し、重ね梁のような状態となることで耐疲労性が低下することが示された。

第5章は「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」である。ここでは、材料劣化のうち ASR を取り上げ、まず、反応性粗骨材を使用して作製した RC 床版に対して、環境条件の異なる ASR 促進を実施することで、ASR によるコンクリートの膨張速度および損傷状況の異なる劣化を生じさせた。そして、ASR による劣化を受けた RC 床版による輪荷重走行試験より、ASR によるコンクリートの劣化を受けた RC 床版の耐疲労性を評価した。

得られた主な結果は以下の通りである。

- 1) ASR により劣化した RC 床版は、ASR の促進方法により床版の損傷状況及び耐疲労性が大きく異なり、急速に ASR を促した床版では、ケミカルプレストレスの影響により健全な床版に比べて耐疲労性がむしろ向上し、反対に、緩やかに ASR を促した床版では、耐疲労性が大きく低下する結果となった。一般に、ASR を生じたコンクリートでは、膨張量の増加に伴いヤング係数、圧縮強度や圧縮疲労強度が低下すると考えられるが、RC 床版では、ASR によるコンクリートや鉄筋のひずみのみならず、床版内部のひび割れ状況や水の存在の有無といった要因によりその耐疲労性が定まることが示された。
- 2) ASR 促進を実施した床版では、いずれも ASR によるひび割れが支配的となり、その後の疲労による新たなひび割れの発生が抑制される傾向を示した。特に、ASR を緩やかに促進させた床版では、ASR により発生した幅の大きなひび割れが支配的となったことで疲労によるひび割れの分散性を低下させ、その後の輪荷重走行試験では、輪荷重走行範囲直下で局所的にひび割れが進展し、急激な疲労破壊に至る傾向が示された。
- 3) ASR により劣化した RC 床版は、ASR の促進速度を変えることで、ASR 膨張量とこれに伴うケミカルプレストレスの導入量、さらにこれらの経時的な相互作用によるひび割れ性状が大きく変化し、これが、その後の輪荷重走行試験による耐疲労性に大きな影響を及ぼすものと考えられた。

第6章は「強制振動試験による道路橋 RC 床版の疲労損傷度評価」である。ここでは、小型加振器を励振器した強制振動試験により、道路橋 RC 床版の耐疲労性を評価した。

まず、50年間供用され撤去・架替えに至った実道路橋 RC 床版を切り出し、床版の下面および切断面の劣化性状と共振周波数によりその劣化度を評価した。さらに、切り出した床版に対して輪荷重走行試験を実施することで、疲労損傷の

進展による共振周波数の変化を捉え、輪荷重走行試験結果と共振周波数との関係を整理した。

次に、実道路橋 RC 床版の疲労損傷評価で得られた知見を基に、第 5 章で実験を実施した ASR を受けた RC 床版の輪荷重走行試験の各段階において、RC 床版内部の損傷レベルを定量的に評価することで、ASR が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響について実験的に検討した。

得られた主な結果は以下の通りである。

- 1) 疲労損傷の各段階において複数点の共振周波数比を計測することで、目視の点検では困難である部材内部の損傷レベルの評価及び損傷範囲の推定が可能であることが示された。特に、活荷重たわみや床版下面に発生するひび割れでは疲労限界状態に至る直前までその兆候が表れないのに対して、共振周波数比では早い段階で低下傾向が認められ、床版内部の疲労損傷を検知する上で有効な手法となり得ることが明らかになった。
- 2) ASR 劣化した RC 床版は、床版上下面のひび割れ同様に、促進方法の違いにより床版内部の損傷度が異なり、急速に ASR を促した床版では、促進後における局所的な損傷程度は小さく、その後の輪荷重走行試験では輪荷重走行範囲全域で損傷が進行した。これに対し、緩やかに ASR を促した床版では促進後における局所的な損傷が著しく、その後の輪荷重走行試験では促進後における損傷が支配的となり、局所的に内部損傷が進展することが明らかとなった。

第 7 章の「結論」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。

-目次-

1章：序論

1.1	本研究の背景	2
1.2	本研究の目的.....	3
1.3	本論文の構成.....	4

2章：凍結防止剤散布下におけるコンクリート構造物の劣化および道路橋 RC 床版の

耐疲労性評価に関する既往の研究

2.1	概説	9
2.2	凍結防止剤散布下における RC 床版の現状	10
2.3	輪荷重作用を受ける道路橋 RC 床版の耐疲労性に関する研究	12
2.3.1	輪荷重走行試験装置	12
2.3.2	輪荷重による疲労損傷が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響.....	14
2.3.3	水の作用が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響	17
2.4	各種材料劣化を受ける RC 部材の耐荷性・耐疲労性に関する研究	19
2.4.1	塩害	19
2.4.2	ASR	21
2.4.3	本節のまとめ	23
2.5	道路橋 RC 床版の耐疲労性及び損傷度評価に関する研究	23
2.5.1	非線形解析を用いた道路橋 RC 床版の損傷度評価に関する研究.....	24
2.5.2	強制振動試験による損傷度評価に関する研究.....	25
2.6	本研究に関する課題の整理.....	27

3章：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

3.1	概説	35
3.2	輪荷重走行試験の概要	35
3.2.1	輪荷重走行試験装置	35
3.2.2	試験方法	37

3.2.3	計測項目	38
3.3	供試体の概要	41
3.3.1	実験条件	41
3.3.2	供試体の形状	41
3.3.3	コンクリートの配合	42
3.4	塩害促進試験の概要	43
3.4.1	塩害促進試験	43
3.4.2	塩化物イオン濃度測定方法	44
3.4.3	鉄筋腐食減量率測定方法	44
3.5	塩害促進による RC 床版の塩害劣化状況	45
3.5.1	錆汁の発生及び鉄筋の腐食状況	45
3.5.2	塩害による腐食ひび割れの発生	46
3.5.3	塩化物イオン濃度及び鉄筋腐食減量率	47
3.6	輪荷重走行試験による耐疲労性評価	48
3.6.1	段階载荷による輪荷重走行試験結果	48
3.6.2	荷重と変位の関係	49
3.6.3	床版のたわみと等価繰返し走行回数との関係	50
3.6.4	ひび割れ発生状況及びひび割れ密度と等価繰返し走行回数との関係	54
3.6.5	断面の損傷状況	59
3.6.6	S-N 関係による耐疲労性評価	60
3.7	まとめ	61

4 章：鉄筋腐食が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響に関する解析的検討

4.1	概説	65
4.2	非線形有限要素解析の概要	65
4.2.1	検討ケース	65
4.2.2	解析モデルの概要	65
4.2.3	解析手順	66

4.3	解析結果	68
4.3.1	段階荷重および一定荷重による解析	68
4.3.2	ひずみコンター図による損傷度評価	69
4.4	まとめ	72

5章：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

5.1	概説	75
5.2	供試体の概要	76
5.2.1	実験条件	76
5.2.2	供試体の形状	76
5.2.3	コンクリートの配合及び材料特性	76
5.3	ASR 促進試験及び輪荷重走行試験の概要	78
5.3.1	ASR 促進試験の概要	78
5.3.2	輪荷重走行試験の概要	80
5.4	ASR 促進による RC 床版の劣化状況	81
5.4.1	ASR による床版コンクリートのひずみ変化	81
5.4.2	ASR による鉄筋のひずみ変化	83
5.4.3	床版に導入されるケミカルプレストレス	84
5.4.4	ASR によるコンクリートの劣化評価	85
5.4.5	ASR によるひび割れ及び ASR ゲルの発生状況	86
5.4.6	鉄筋腐食減量率の測定結果	89
5.5	輪荷重走行試験による耐疲労性評価	89
5.5.1	段階荷重による輪荷重走行試験結果	89
5.5.2	荷重と変位の関係	90
5.5.3	活荷重たわみと等価繰返し走行回数との関係	91
5.5.4	床版上下面の損傷状況	93
5.5.5	断面の損傷状況	98

5.6	ASRの反応速度がRC床版の耐疲労性に及ぼす影響の考察.....	99
5.7	まとめ.....	102

6章：強制振動試験による道路橋RC床版の疲労損傷度評価

6.1	概説.....	105
6.2	強制振動試験方法.....	106
6.2.1	振動試験の概要.....	106
6.2.2	共振周波数の測定方法.....	107
6.2.3	共振周波数の算出方法.....	107
6.3	実RC床版の疲労損傷度評価.....	108
6.3.1	対象橋梁及び供試体の概要.....	108
6.3.2	輪荷重走行試験の結果.....	112
6.3.3	共振周波数比による損傷度評価.....	115
6.4	ASRにより劣化したRC床版の損傷度評価.....	120
6.4.1	実験条件.....	120
6.4.2	共振周波数比による耐疲労性評価.....	121
6.5	まとめ.....	128

7章：結論

7.1	結論.....	132
7.2	各章で得られた成果のまとめ.....	132
7.3	今後の課題及び展望.....	134

<u>謝辞</u>	137
------------------------	-----

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景

我が国の道路橋は、1960年代以降の高度経済成長期に架設数が急増し、その数は橋長2m以上を対象とすると約60万橋、橋長15m以上を対象とすると約15万橋がストックとして存在する¹⁾。これら橋梁は、供用年数が50年を経過するものが増加し、2013年現在において国内に建設される道路橋全体の18%、2033年には67%まで上昇することが予想され、今後、多くの道路橋で経年劣化が懸念される²⁾ (図-1.1.1 参照)。しかし、昨今の厳しい社会情勢や、少子高齢化問題・人口減少問題の進展を踏まえると、道路橋の更新という手段が難しいために、その劣化機構を解明し、これに立脚した適切な維持管理を行い、延命化を図る必要があると考えられる。

道路橋 RC 床版(以下、RC 床版)は、支間長に対して床版厚が薄く、車両による輪荷重を直接受け持つ部材であるため、交通荷重による疲労によりその性能が低下する。このうち、高度経済成長期に建設された都市間高速道路や都市内高速道路の RC 床版では、建設当初と比して、交通量の増大や車両の大型化が進んだため、疲労損傷が予想以上に早く進行する問題が生じた³⁾。

こうした輪荷重単独による疲労損傷は、大型車交通量や大型車の軸重頻度などの使用条件、道路橋架設位置の環境条件、また水の影響といった複雑な要因が絡むものの、既往の研究⁴⁾により床版下面のひび割れの進行過程により整理がなされた。その結果、床版下面からの点検により疲労損傷度を評価することが可能となり、現行の維持管理方法に適用されている⁵⁾。

一方で、東北地方をはじめとする積雪寒冷地では、凍結防止剤(主に NaCl)の大量散布に伴い、コンクリート構造物の塩害、凍害、アルカリシリカ反応(ASR)が促進され、近年、寒冷地における RC 床版の早期劣化が社会問題になりつつある^{6),7)}。

こういった、積雪寒冷地における RC 床版では、前述した床版下面による点検で変状がほとんど見られない場合であっても、床版上面でかぶりコンクリートの浮きや剥離、砂利化といった損傷が著しく進行しているケースが多数報告されている^{8),9)}。このように、凍結防止剤散布環境下にある RC 床版については、従来の床版下面による点検では、その損傷度を適切に評価することが難しい。今後、対策を必要とする道路橋の増加が予想される中、インフラの更新が難しい社会情勢を踏まえると、今後は疲労とともに材料劣化を受けるような複合劣化が生じる RC 床版の劣化の進行を把握し、損傷に応じた適切な対策を講じる必要があると考えられる。そのためには、凍結防止剤散布環境下において促進される各種材料劣化が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響を解明することが重要である。

以上のような背景の下，本研究では凍結防止剤散布下における各種材料劣化が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響について実験的・解析的な検討を行った。

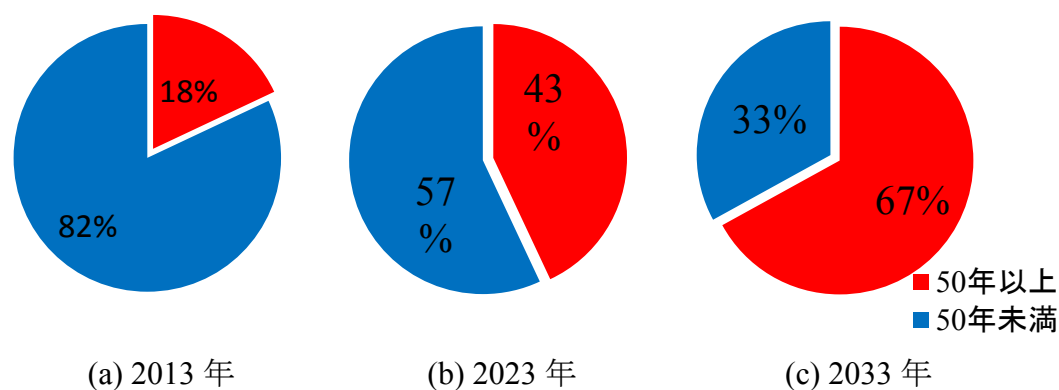


図-1.1.1 供用 50 年以上の橋梁数の推移²⁾



図-1.1.2 床版上面の砂利化⁹⁾

1.2 本研究の目的

東北地方をはじめとする積雪寒冷地域における RC 床版は，1.1 で述べたように，交通荷重による疲労と，凍結防止剤の影響による材料劣化により，早期劣化が社会問題になりつつある。今後，このような地域の RC 床版を適切に維持管理していく上では，疲労とともに材料劣化を受けるような複合劣化が生じる RC 床版の劣化の進行を把握し，損傷に応じた適切な対策を講じる必要がある。そのためにはまず，凍結防止剤散布環境下における RC 床版の各種材料劣化による耐疲労性の低下に及ぼす影響を解明することが重要になる。

そこで本研究では，材料劣化のうち塩害と ASR を取り上げ，実物大 RC 床版供試体を用いた実証実験と，最新の構造材料劣化モデル^{10),11)}により，各種材料

劣化が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響について究明することを目的とした。

まず、塩害を受ける RC 床版については、凍結防止剤散布下における鉄筋腐食の進行過程を考慮した促進方法を含めた、3 種の促進試験を実施することで、実物大 RC 床版供試体に対して異なる 3 条件の鉄筋腐食状況を生じさせた。そして、鉄筋腐食の生じた RC 床版に対して輪荷重走行試験を行い、鉄筋腐食が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響について実験的に検討した。また、実験により得られた知見を基に、鉄筋腐食量及び腐食部位をパラメータとした 3 次元非線形有限要素解析を実施することで、実験による実証と解析との両面から、塩害による鉄筋腐食が耐疲労性の低下に及ぼす要因について検討した。

次に、ASR を受ける RC 床版については、環境条件の異なる ASR 促進を実施することで、ASR によるコンクリートの膨張速度及び損傷状況の異なる劣化を実物大 RC 床版供試体に対して生じさせた。そして、輪荷重走行試験により、ASR を受ける RC 床版の耐疲労性を評価した。また、輪荷重走行試験の各段階において、小型加振器を励振器とした強制振動試験¹²⁾を実施し、RC 床版内部の損傷レベルを定量的に評価することで、ASR が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響について実験的に検討した。

1.3 本論文の構成

図-1.3.1 に本論文の構成を示す。本論文は、序論を含めた全 7 章で構成されている。第 1 章及び第 2 章では、凍結防止剤散布下における道路橋 RC 床版の現状を述べ、さらに既往の研究例を調査することで、本研究で取り組むべき課題を整理した。次に、第 3 章及び第 4 章では、凍結防止剤散布の影響により塩害を受ける RC 床版の耐疲労性に関する実験・解析結果を取りまとめた。第 5 章及び第 6 章では、材料劣化のうち ASR を取り上げ、これが RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響について実験的に検討した結果を取りまとめている。そして、第 7 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明記した。

各章の具体的な内容を以下に示す。

第 1 章は「序論」であり、本研究の背景となる、凍結防止剤散布下における道路橋 RC 床版の現状と本研究の目的を述べている。

第 2 章の「凍結防止剤散布下におけるコンクリート構造物の劣化及び道路橋 RC 床版の耐疲労性評価に関する既往の研究」では、凍結防止剤散布下におけるコンクリート構造物のうち RC 床版の損傷事例を取りまとめるとともに現状の課題を整理した。また、各種材料劣化を受ける RC 床版の耐疲労性に関する既往の研究について整理し、本研究で取り組むべき課題について述べている。

第3章の「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」では、材料劣化のうち塩害を取り上げ、これが RC 床版の耐疲労性に与える影響を実験的に検討した結果について述べている。具体的には、RC 床版の腐食ひび割れや鉄筋腐食性状などを、できる限り実構造物に近い状態で再現するため、長期にわたって屋外曝露環境下に供試体を設置し、さらに電気化学的な方法ではなく、塩水を用いた乾湿の繰返しによって塩害促進を実施した。その際、促進時の塩分供給方法を変えることで異なる3条件の鉄筋腐食状況を生じさせた。そして、塩害による鉄筋腐食を模擬した RC 床版供試体による輪荷重走行試験より、その耐疲労性を実験的に評価した。

第4章は「鉄筋腐食が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響に関する解析的検討」である。ここでは、鉄筋腐食がたわみの進展に及ぼす影響に関する考察をさらに深めるため、第3章の実験と同一の材料特性のもとに実施した、鉄筋腐食量及び腐食部位をパラメータとする3次元非線形有限要素解析の結果について述べている。

第5章は「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」である。ここでは、材料劣化のうち ASR を取り上げ、これが RC 床版の耐疲労性に与える影響を実験的に検討した結果について述べている。具体的には、まず反応性粗骨材を使用して作製した RC 床版に対して、環境条件の異なる ASR 促進を実施することで、ASR によるコンクリートの膨張速度及び損傷状況の異なる ASR による劣化を生じさせた。そして、ASR による劣化を受けた RC 床版による輪荷重走行試験より、ASR が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響について検討した。

第6章は「強制振動試験による道路橋 RC 床版の疲労損傷度評価」である。ここでは、床版内部の損傷程度を定量的に評価し得る手法として、小型加振器を励振器した強制振動試験による RC 床版の耐疲労性評価を行った。

まず、実 RC 床版を切り出し、床版の下面及び切断面の劣化性状と共振周波数によりその劣化度を評価した。さらに、切り出した床版に対して輪荷重走行試験を実施することで、疲労損傷の進展による共振周波数の変化を捉え、輪荷重走行試験結果と共振周波数との関係を整理した。次に、実道路橋 RC 床版の疲労損傷評価で得られた知見を基に、第5章で実験を実施した ASR を受けた RC 床版の輪荷重走行試験の各段階において、RC 床版内部の損傷レベルを定量的に評価することで、ASR が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響について実験的に検討した。

第7章の「結論」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。

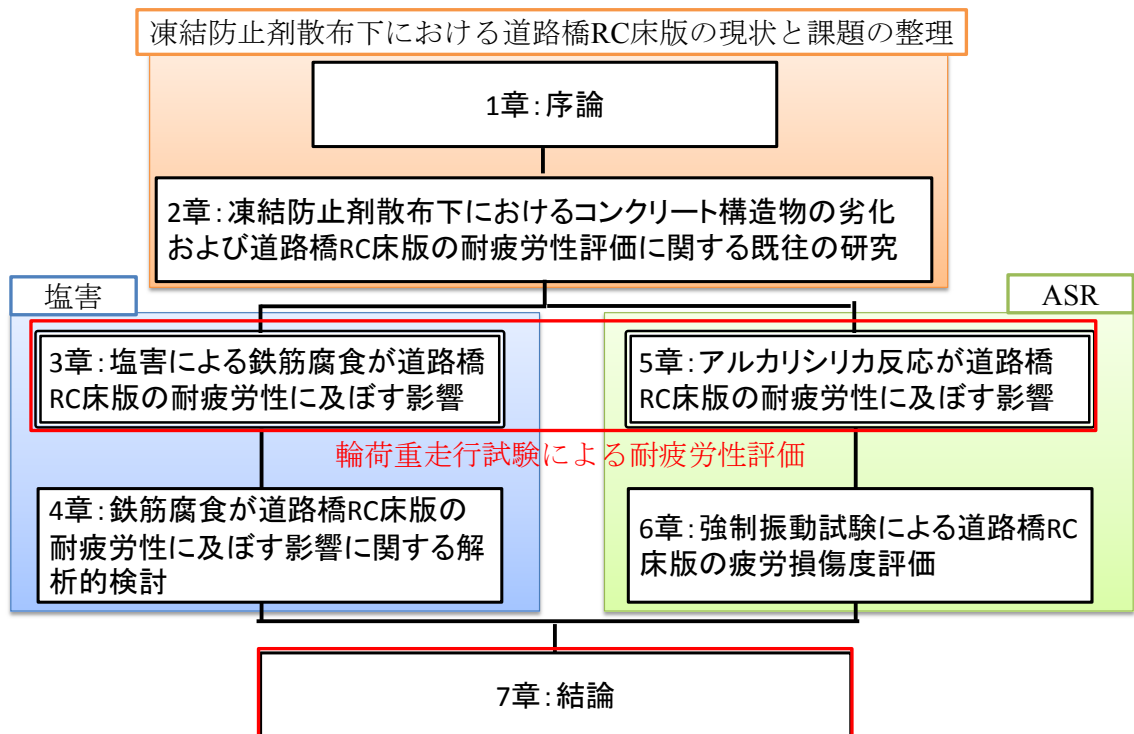


図-1.3.1 本論文の構成

参考文献

- 1) 玉越隆史, 大久保憲, 渡辺陽太: 道路橋の計画的管理に関する研究—橋梁マネジメント(BMS)—, 国土技術政策総合研究所資料, 第 523 号, 2009.
- 2) 国土交通省 HP: 道路構造物の現状(橋梁)
- 3) 中谷昌一, 内田賢一, 西川和廣, 神田昌幸, 宮崎和彦, 川間重一, 松尾伸二: 道路橋床版の疲労耐久性に関する試験, 国土技術総合研究所資料, 第 28 号, 2002.
- 4) 松井繁之: 道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版, 2007.
- 5) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】, 2008.
- 6) 日本コンクリート工学協会: 融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書・論文集, 1999.
- 7) 土木学会: コンクリート技術シリーズ No.71 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, 2006.
- 8) 関口武一, 笹井幸男, 石塚喬康: 塩害を受けた RC 床版の劣化度調査と保全工事, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.5, pp.41-49, 1994.
- 9) 三田村浩, 佐藤京, 本田幸一, 松井繁之: 道路橋 RC 床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1420-1431, 2009.
- 10) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H. : Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON Press, 2003.
- 11) Maekawa, K. Ishida, T. and Kishi, T. : Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor and Francis, 2008.
- 12) 内藤英樹, 齊木佑介, 鈴木基行, 岩城一郎, 子田康弘, 加藤潔: 小型起振機を用いた強制加振試験に基づくコンクリート床版の非破壊試験法, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.4, pp.522-534, 2011.

第 2 章

凍結防止剤散布下における
コンクリート構造物の劣化および
道路橋 RC 床版の耐疲労性評価に
関する既往の研究

2.1 概説

本章では、本研究の目的を達成するために、凍結防止剤散布下において各種材料劣化を受ける RC 部材の耐荷性・耐疲労性について研究した例をとりまとめることで、本研究に関わる研究分野の進捗状況と本研究で取り組むべき課題を整理する。

まず、凍結防止剤散布下における RC 床版の現状を明らかにすることが重要であると考え、凍結防止剤散布下において材料劣化を受ける RC 床版の劣化状況を調査した既報を中心に取りまとめた。

次に、本研究の根幹を成す、輪荷重作用を受ける RC 床版の耐疲労性に関する研究について、輪荷重走行試験を実施した既往の研究を中心に取りまとめた。また、各種材料劣化を受ける RC 部材の耐荷性・耐疲労性について研究した例をとりまとめることで、本研究に関わる研究分野の進捗状況と課題を整理した。さらに、RC 床版の耐疲労性について評価する手法として、非線形解析を用いた RC 床版の耐疲労性評価に関する研究、及び非破壊試験による RC 床版の耐疲労性評価に関する研究について整理した。

そして最後に、これらの知見を総合的に評価することで、本研究で取り組むべき課題について整理した。

図-2.1.1 には、本論文の第 3 章から第 6 章と、本章で調査を実施した既往の研究との関係を示す。



図-2.1.1 本論文の構成と本章内容との位置付け

2.2 凍結防止剤散布下における RC 床版の現状

我が国の RC 床版は、1970 年代に床版コンクリートの抜け落ちといった損傷問題が多く発生した¹⁾。これら RC 床版の損傷は、比較的交通量の多い重交通下で顕著に表れるものであることから、交通荷重による疲労問題として広く認識されるようになり、1970 年代後半からは RC 床版の疲労損傷問題に関する検討が旧日本道路公団試験研究所で開始された²⁾。その後、RC 床版の疲労損傷問題は多くの研究者により精力的に行われることとなり^{3),4)}、1980 年代には松井により輪荷重走行試験装置が開発され、RC 床版下面に発生するひび割れと疲労損傷度との整理がなされた²⁾。以上のように、RC 床版の疲労損傷については、1970 年代から 1990 年にかけて、飛躍的に機構解明が進み、現在の床版設計の礎を築いたといえる。一方、東北地方や北陸地方、北海道といった積雪寒冷地域では、1990 年代初頭におけるスパイクタイヤ禁止の法制化以来、凍結防止剤(主に NaCl)が大量に散布されるようになった。凍結防止剤に含まれる塩化物イオンは、RC 床版の塩害、凍害によるスケーリング、ASR を促進させる⁵⁾。そして、これら材料劣化の促進により、これまでに交通荷重の少ない路線ではあまり見られなかった床版部材の損傷事例が急増し、近年では凍結防止剤散布下における RC 床版の早期劣化が社会問題となりつつある⁵⁾。このような現状を鑑み、近年では研究機関及び橋梁管理者により、多くの橋梁の点検が成され⁶⁾、凍結防止剤散布下における RC 床版の現状が広く認識されている。

このうち、塩害を受けた RC 床版については、本荘ら^{7),8)}により中国地方山間部の高速道路橋における点検が成されている。その結果、点検対象とした 6 橋でいずれも床版下面からの観察で鉄筋腐食に伴ったコンクリートの浮きや剥離、また鉄筋の著しい断面欠損が確認されている。本荘らは、点検結果を基に、床版上面から凍結防止剤混じりの橋面水がひび割れなどを介して床版内部に浸透することで、鉄筋の不動態皮膜を破壊し、腐食に至るといった劣化メカニズムを提案している。また、石川ら⁹⁾による北陸地方の高速道路橋の点検結果では、床版下面でひび割れが発生する箇所では、舗装面においてもポットホールなどの変状が顕著に表れる傾向を示し、床版上面では、コンクリートの砂利化や上面鉄筋の著しい腐食が確認されている。

これらの塩害により著しく鉄筋腐食した RC 床版に関する点検では、床版下面での損傷が比較的軽微な状態であっても、舗装面で変状が発生するケースも多く確認されており、床版下面のみならず床版上面あるいは内部の損傷度を適切に評価し得る手法の確立が急務である⁹⁾。

国内で最も低温環境となる北海道の RC 床版では、凍害による損傷事例が多く報告されている^{10),11)}。凍害による劣化を受ける RC 床版では、凍結融解作用に

よりアスファルト舗装のひび割れや剥離が輪荷重直下で顕著となり、床版上面コンクリートがスケーリングにより脆弱化する(写真-2.2.2(a)). また、RC 床版下面ではひび割れが橋軸直角方向に数本見られる程度の比較的軽微な損傷であるにも関わらず、RC 床版上面については、舗装と RC 床版の境界に水の滲出が見られ、床版上面ではコンクリートのスケーリングや砂利化が発生し、実際に引きせん断破壊に至った事例¹⁰⁾もある (写真-2.2.2(b)).

一方、ASR については、従来、床版部材では橋脚や橋台に比べ部材厚が薄く乾燥状態にあることから、ASR の発生は稀であるといった知見が一般的であった¹²⁾. しかしながら、凍結防止剤の散布が本格化して以降、ASR により過大な膨張が発生した構造物の劣化事例が徐々に増加している. ASR により劣化した構造物の調査結果により、ASR による過大な膨張を起因として、コンクリートの強度低下や鉄筋とコンクリートの付着力の低下、さらには曲げ加工部や圧接部での鉄筋破断などの損傷が確認されている^{13),14),15)}.

このように、近年では ASR の発生が比較的少ないとされていた床版部材においても ASR による損傷事例が増加しており、架替えを余儀なくされた RC 床版も少なくない¹⁶⁾.

以上のように、凍結防止剤散布下にある RC 床版では、塩害や凍害、ASR といった材料劣化が進行しているケースが多く報告され、疲労と材料劣化が複合的に生じる劣化が顕在化していることは明白である.

また、これら材料劣化を受ける RC 床版では、床版下面のみならず、床版上面で損傷が著しく進行したケースが多い^{10),17)}. そのため、従来の床版下面からの点検のみでは、損傷度を適切に評価するのが難しく、通常は舗装下にある RC 床版の上面あるいは内部の損傷程度を簡易かつ適切に評価し得る手法の確立が急務であるといえる.



(a)床版上面



(b)床版下面

写真-2.2.1 塩害劣化した RC 床版の損傷事例⁸⁾



(a)床版上面のスケーリング



(b)床版の抜け落ち

写真-2.2.2 凍害劣化した RC 床版の損傷事例¹⁰⁾



写真-2.2.3 ASR 劣化した RC 床版の損傷事例¹⁶⁾

2.3 輪荷重作用を受ける道路橋 RC 床版の耐疲労性に関する研究

2.3.1 輪荷重走行試験装置

前節で述べた通り、1970年代における床版の疲労損傷問題を契機に、RC床版の疲労損傷問題に関する検討が開始され、その後の1980年代に松井により実際の輪荷重の走行状態を再現し得る輪荷重走行試験装置(写真-2.3.1)が開発された²⁾。本試験装置(図-2.3.1)は、モータの回転運動を台車の往復運動に変換する駆動部分と、一定の輪荷重値を保ちながら往復運動する台車部分とで構成されるものである。現在では、複数の研究機関が輪荷重走行試験装置を所有しており、各研究機関により所有する輪荷重走行試験装置は、その構造形式から、フライホイール等の回転力を往復運動に変換するクランク式(鉄輪式)と移動台車に駆動装置を搭載する自走式(ゴムタイヤ式)に大別される¹⁷⁾。

このうち、クランク式の試験機では動力システムが台車とは別に存在するため、载荷に必要な周辺設備の条件が許す限り、高速での荷重移動が可能なシステムとなっている。また、車輪には鉄輪を用いていることが多く、ゴムタイヤでは

載荷できない大きな荷重での試験が可能であり、床版の破壊寿命を調べるための促進試験を行うのに向いている¹⁸⁾。ただし、鉄輪を床版に直接載荷した場合、線荷重となるため、**図-2.3.2**に示される載荷ブロック(鋼製)を敷き並べることで分布載荷を可能としている。この試験装置を用いた既往の輪荷重走行試験により、従来の定点載荷及び多点載荷実験では説明のできなかった、実橋 RC 床版の損傷機構を合理的に説明できるようになり、RC 床版のひび割れ損傷による劣化や破壊は曲げモーメントによるばかりではなく、せん断疲労破壊によるものであることが明らかとなった^{2),18)}。

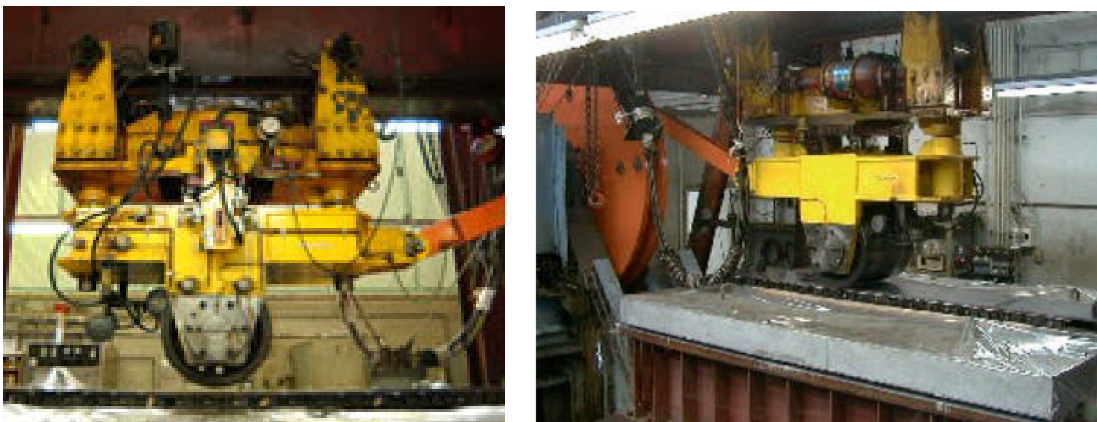


写真-2.3.1 輪荷重走行試験装置(クランク式)

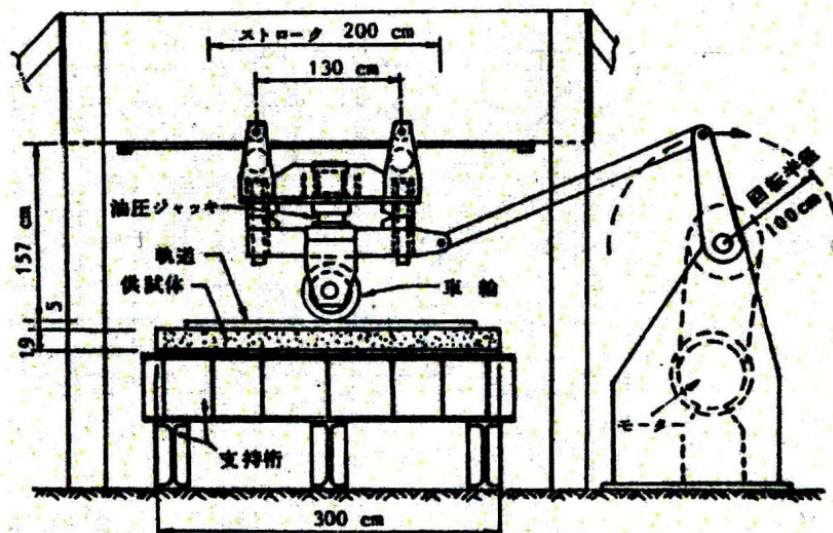


図-2.3.1 輪荷重走行試験装置の概要²⁾

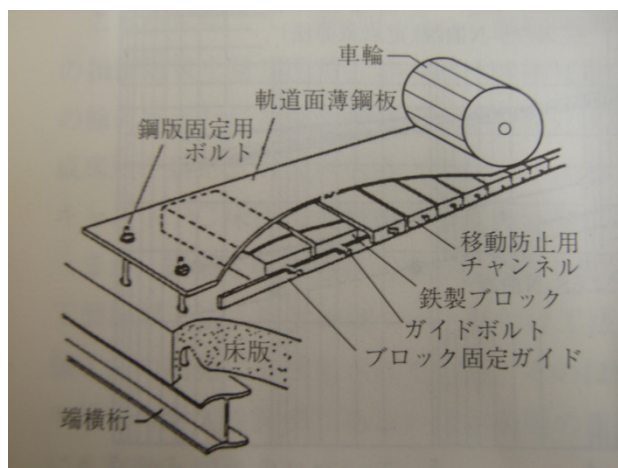


図-2.3.2 輪荷重軌道部の概要²⁾

2.3.2 輪荷重による疲労損傷が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響

(1) 床版下面に発生するひび割れ

輪荷重単独による疲労損傷に関する研究はこれまで多くの研究報告が成されている。このうち、松井らの研究¹⁹⁾では、実物大 RC 床版供試体に対し、輪荷重走行試験を行うことで、これまでの定点載荷実験などでは再現が困難であった、実橋床版に見られるような格子状に進展するひび割れの発生が確認されるなど、疲労破壊メカニズムについて説明が可能となった²⁾。これにより、走行する輪荷重の繰返しにより橋軸直角方向に貫通ひび割れが発生することで板構造が主鉄筋方向のはりやを並べたはり状に変化し、それらのはり状化した部分の主鉄筋断面がせん断破壊するといったメカニズムを明らかとし、定点繰返し載荷する疲労試験結果に対して、10,000 倍程度早く疲労破壊することを明らかとした。また、輪荷重走行試験の載荷初期から押抜きせん断破壊に至るまでのたわみ量の推移と床版下面に発生するひび割れパターン(図-2.3.3)を整理することで、床版下面からの点検により疲労損傷度を評価することを可能とした。

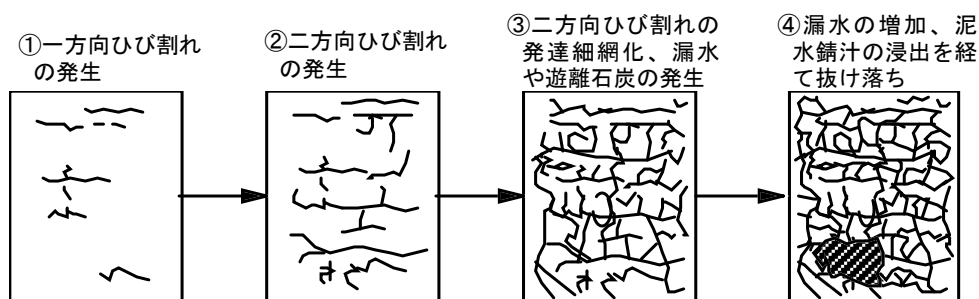


図-2.3.3 床版下面に発生するひび割れの進行過程²⁰⁾

(2) S-N 曲線

実橋床版を管理する上で、機能損失や床版の劣化度について評価する際、S-N 曲線を求めることで合理的な維持管理が可能となる²⁾。松井らの実物大の RC 床版供試体を使用した輪荷重走行試験は、従来の定点載荷実験などよりも疲労破壊に至るまでの期間が大幅に短く、効率的に多くの供試体で実験を実施することが可能となり、その結果、精度の高い S-N 曲線が求められている^{2),21-23)}。

一般に、鋼材のように材料が均一なものの疲労を考えた場合では、S-N 曲線の縦軸には応力振幅が採用される例が多い²⁴⁾が、コンクリートは不均一な材料であり、また疲労損傷の進行に伴い剛性分布が大きく変化することから、応力振幅による評価が困難である²⁵⁾。そこで、コンクリートの S-N 曲線の縦軸として、作用荷重と静的耐荷力との比をとった無次元量で評価するケースが多い²⁶⁾。従って、RC 床版においては、破壊形状が押抜きせん断破壊であることから静的耐荷力には押抜きせん断耐力を用いることが妥当である²⁾。

そこで松井らは、輪荷重による床版の疲労破壊を考える上、RC 床版の梁状化を考慮した押抜きせん断耐力式として、式(2.3.1)を提案している^{2),27)}。

$$P_{sx} = 2B(\tau_{smax} \cdot x_m + \sigma_{tmax} \cdot C_m) \quad (2.3.1)$$

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 ：引張側の主鉄筋及び配力鉄筋のかぶり(mm)

τ_{smax} ：コンクリートの最大せん断応力度(N/mm²)

なお、 $\tau_{smax} = 0.656f'_c{}^{0.606}$

σ_{smax} ：コンクリートの最大引張り応力度(N/mm²)

なお、 $\sigma_{smax} = 0.269f'_c{}^{0.667}$

f'_c ：コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

B ：梁状化した時の梁の幅(mm)

なお、 $B = b + d_d$

b ：配力鉄筋方向の載荷版辺長

d_d ：配力鉄筋の有効高さ(mm)

図-2.3.4 に S-N 曲線を示す。松井は、上記の提案式を採用し、輪荷重走行試験結果を総合的に評価することとし、輪荷重作用を受ける RC 床版の S-N 曲線を式(2.3.2)で表した^{2),22)}。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \cdot \log N + \log 1.52 \quad (2.3.2)$$

ここで、 P ：載荷荷重、 P_{sx} ：梁状化した RC 床版の押抜きせん断耐力(kN)、 N ：走行回数である。

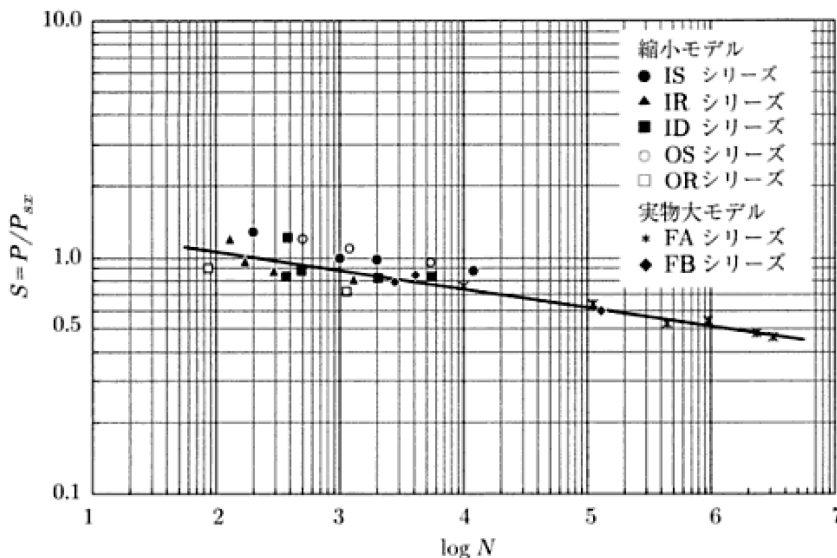


図-2.3.4 松井らによる S-N 曲線²⁾

(3) 耐疲労性に対する限界状態²⁾

RC 床版の耐疲労設計において、限界状態を定義することは重要な指標といえる。そこで、松井ら²⁾は、RC 床版の耐疲労性に対する疲労限界状態を押抜きせん断破壊、あるいは曲げ破壊により車両が RC 床版上を通行できなくなった状態と定義している。また、使用限界状態については輪荷重走行試験による RC 床版の劣化過程を以下の通りに検討することで定義している。すなわち、輪荷重走行試験の各段階における輪走行回数と疲労限界状態時の走行回数の比を疲労寿命比、そして各段階で観察されるひび割れの密度と疲労限界時に発生するひび割れの密度の比をひび割れ密度比とし、図-2.3.5 及び図-2.3.6 のように示している。そして、RC 床版の劣化過程を以下の 3 段階に区別し、説明している。

1 段階では、輪荷重が走行する軌道下で、曲げモーメントによる初期ひび割れが発生する段階であり、概ね $5 \sim 6 \text{m/m}^2$ の密度となる。この時の活荷重たわみは、床版コンクリートの全断面有効とした理論たわみの約 2 倍となる。

次に、2 段階では、ひび割れ密度、活荷重たわみともに線形的に漸増し、ひび割れ密度が 10m/m^2 程度に達し、最終ひび割れ密度の 90% 程度を示す。この段階では、ひび割れが荷重の繰返しにより深さ方向に進展する。床版下面のひび割れに段差が生じることで、床版は板としての連続性を損失する時点である。この時の活荷重たわみは引張側コンクリートを無視した板剛性による直行異方性板理論たわみに一致するか、若干大きめとなる。

最終の 3 段階では、ひび割れ密度の増加は停留するものの、たわみの増加は若干大きくなる傾向にある。この段階では、ひび割れの開閉に加え、上下方向及び水平方向のずれが著しく、ひび割れのスリット化が生じる。そして、最終的に

押抜きせん断破壊に至る。

以上のような段階別の劣化過程を整理することにより，活荷重たわみが引張側コンクリートを無視した時の理論たわみに達した時，すなわち2段階の最終段階程度(ひび割れ密度 10m/m^2 程度)を使用限界と位置づけている。

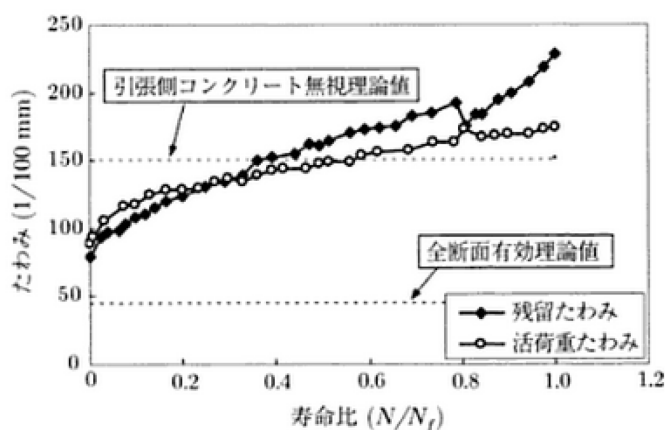


図-2.3.5 たわみと寿命比の関係²⁾

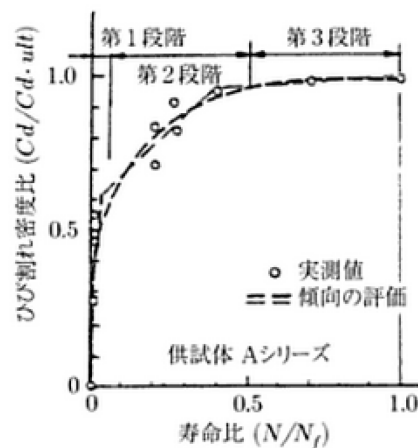


図-2.3.6 ひび割れ密度と寿命比の関係²⁾

2.3.3 水の作用が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響

疲労により床版上面にひび割れが発生した RC 床版は，一般的に遊離石灰が床版下面から観察される．このことから，雨水などが床版上下面を貫通するように発生するひび割れ中を浸透したことは明らかである²⁸⁾．また，床版上面において水が滞留するような箇所では，舗装面に変状が発生し，床版上面コンクリートが砂利化するといった現象が多く報告されている²⁹⁾．このような砂利化が発生する RC 床版では，防水工が施されておらず，また，水はけの悪い橋梁で多く確認されている．以上のことから，RC 床版の砂利化現象及び耐疲労性の低下には橋面水の有無が大きく影響すると考えられる．

そこで松井ら²⁾は，輪荷重走行試験時に床版上面に真水を湛水させることで，橋面水の有無が耐疲労性に及ぼす影響について実験的に検討している．その結果，乾燥状態での疲労とは劣化性状及び耐疲労性が大きく異なる結果を報告している．松井らの実験により，床版上面に湛水させた床版では，疲労限界状態に近づくにつれ，床版下面に発生するひび割れからの漏水が生じ，床版コンクリートの剥落が確認された²⁸⁾．また，試験終了後の床版上面では，実橋で観察されるような砂利化現象が再現され，水の影響による現象であることが明らかとされた．さらに，水の影響下では，乾燥状態よりも RC 床版の疲労寿命が $1/250$ 程度まで低下したことを報告している(図-2.3.7)．

これは、子田らの実験³⁰⁾においても同様に、湛水条件下では床版上面コンクリートの砂利化(写真-2.3.2)が確認されており、さらには疲労寿命が 1/4 程度まで低下することを報告している。

以上より、既往の研究により、水の影響下における RC 床版では、乾燥状態の実験よりも疲労寿命が大きく低下することが明らかとなった。これは、床版上面の防水工や排水の重要性を示すものであり、現行の維持管理に大きく貢献している。

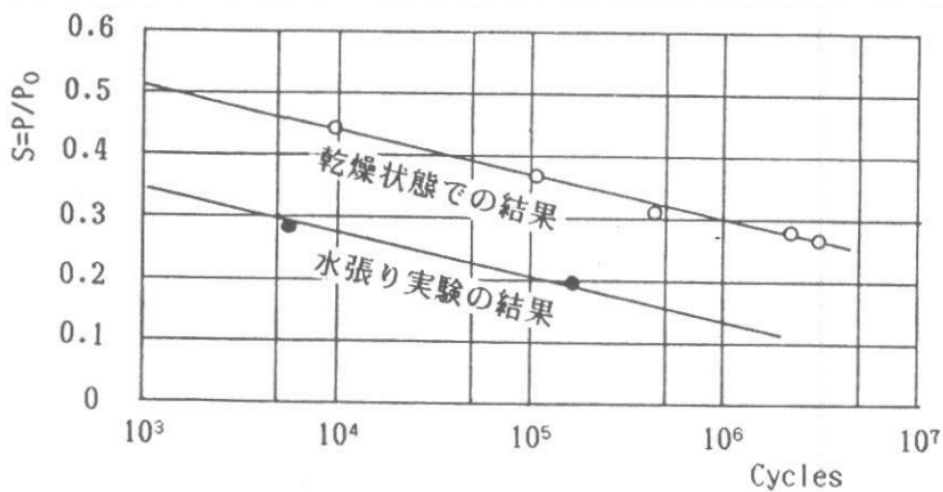


図-2.3.7 RC 床版の S-N 曲線に及ぼす水の影響²⁸⁾



写真-2.3.2 床版コンクリートの砂利化³⁰⁾

2.4 各種材料劣化を受ける RC 部材の耐荷性・耐疲労性に関する研究

輪荷重走行試験装置を用いた疲労実験により、輪荷重単独による疲労損傷は、大型車交通量や大型車の軸重頻度などの使用条件、道路橋架設位置の環境条件、また水の影響といった複雑な要因が絡むものの、既往の研究により床版下面のひび割れの進行過程により整理がなされ、床版下面からの点検により疲労損傷度を評価することが可能となった。しかし、これら既往の研究は輪荷重単独あるいは水の影響のみを考慮した実験であり、凍結防止剤散布下における材料劣化と疲労との複合劣化を受ける RC 床版の研究例は極めて少ない。そこで、本節では各種材料劣化を受ける RC 部材の耐荷性及び耐疲労性について研究した既往の研究例を取りまとめる。

2.4.1 塩害

RC 部材は、コンクリートと鉄筋の複合材料であり、引張に弱いコンクリートを鉄筋が補強する構造物である。このコンクリート中の鉄筋が塩害により腐食すれば、鉄筋断面積の減少による強度の低下、かぶりコンクリートにひび割れが発生するなど、耐荷性低下に直結する。今後、供用年数が 50 年を超えるインフラが増加することを考えると、鉄筋腐食による劣化度の把握や、鉄筋の腐食量と RC 部材の耐荷性・耐疲労性との関係を整理することは重要な課題であるといえる。こうした塩害による鉄筋腐食と RC 部材の耐荷性・耐疲労性に関する研究は数多くの報告が成されている³¹⁾。

このうち、鉄筋腐食を生じさせた RC はりの静的載荷試験では、鉄筋腐食減量率が 5%程度までは、RC はりの耐荷性に顕著な影響を及ぼすものではないが、10%以上になると影響を及ぼすことが報告されている³²⁾。

一方、塩害が RC はりの耐疲労性に及ぼす影響について行った研究^{33),34)}では、鉄筋の腐食減量率の増加に伴い疲労強度が低下するといった報告³⁵⁾が成されている(図-2.4.1)。また、松田ら³⁶⁾、橋本ら³⁷⁾による RC はりの静的載荷試験では、塩害により鉄筋腐食が生じた RC はりでは、鉄筋腐食により発生する腐食ひび割れが支配的となり、載荷によるひび割れの分散性が低下するといった報告がされている。

以上のように、塩害による鉄筋腐食が RC はりの耐荷性あるいは耐疲労性に与える影響について明らかにされつつある。

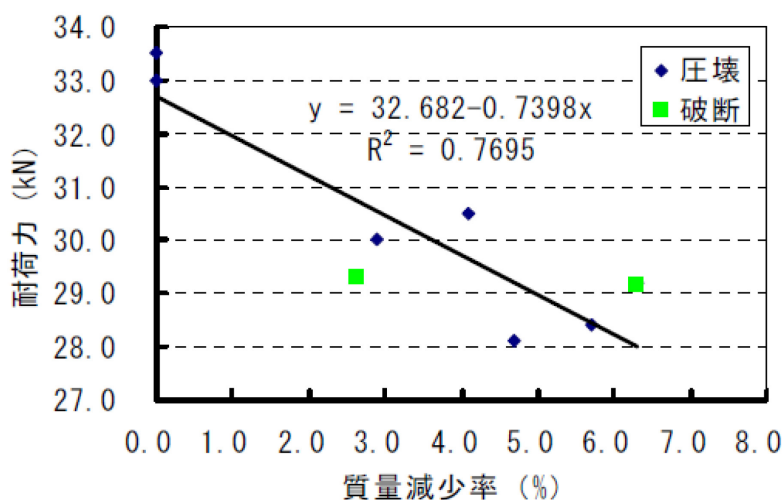


図-2.4.1 耐荷力と質量減少率の関係³⁵⁾

しかし、以上の塩害を受ける RC 構造物に関する既往の研究では、RC はりを用いた実験がほとんどで、塩害劣化が RC 床版の耐疲労性に与える影響について研究した例は極めて少ないといえる。また、これら既往の研究では、強制的に電荷を移動させる電食によって鉄筋腐食を促進しているものがほとんどである。電食による電気化学的な塩害促進は、実験期間の短縮に加え、腐食量のコントロールが可能であることから、鉄筋の腐食量が RC 部材の耐荷力などに与える影響を把握するのに有効な手段とされている。

しかし、電食と実環境下で見られる腐食とは、発生する腐食生成物が異なり、腐食過程のメカニズムや腐食に伴い発生する腐食ひび割れの発生時期・発生機構が異なることが報告されている³⁸⁾。

既往の研究では³⁹⁾、電食と乾湿の繰返しによる塩害促進試験を比較することで、腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響について検討を行っている。その結果、電食により鉄筋腐食を生じさせた RC 部材では、実環境下及び乾湿の繰返しにより鉄筋が腐食した RC 部材よりも、腐食量によって生じるひび割れの本数が増加することや、発生するひび割れの幅が大きくなるといった報告が成されている。

このような電食と乾湿繰返しとのひび割れの発生形態の違いについては、数多くの研究機関で検討が進められており、高谷らは⁴⁰⁾、電食では鉄筋腐食が生じる際、塩化酸化鉄カルシウムといった膨張性の高い腐食生成物が生成されることにより、乾湿の繰返しによる鉄筋腐食よりも、ひび割れの発生腐食量が小さくなることを明らかとしている(図-2.4.2)。

また、電食による塩害促進の場合、腐食生成物が鉄筋全長に生成されるため、鉄筋全長で一様に腐食が進行するケースが多くなることや、腐食生成物の生成

が急速であるため、クリープや腐食生成物の移動といった時間依存性のある現象が実環境下とは大きく異なることが既往の研究により指摘されている⁴¹⁾⁴³⁾。

一方、塩水を用いた乾湿の繰返しによる塩害促進を行った実験では、塩化物イオンの浸透過程や、鉄筋の腐食性状が電食よりも実環境に近いことが報告されており⁴⁴⁾、特にクリープの影響や腐食生成物の移動による腐食ひび割れの発生過程を再現する上で、有効な手段であると考えられる。しかし、乾湿の繰返しによる塩害促進は、鉄筋の腐食に長い期間を要するため、データがほとんどない。

すなわち、凍結防止剤散布環境下において塩害劣化した RC 床版の耐疲労性に関する研究は、未だ実構造物に近い状態では再現された研究例が極めて少ないことが明らかとなった。

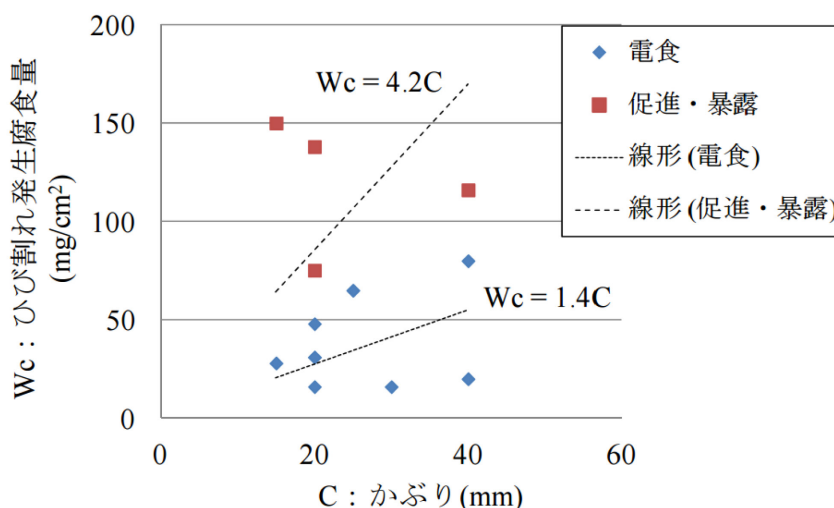


図-2.4.2 促進方法とひび割れ発生腐食量との関係³⁹⁾

2.4.2 ASR

凍結防止剤の散布が本格化して以降、ASRにより過大な膨張が発生した構造物の劣化事例が徐々に増加している。また、近年ではASRの発生が比較的少ないとされていた床版部材においてもASRによる損傷事例が増加しており、架替えを余儀なくされたRC床版も少なくない¹⁶⁾。床版部材では、主鉄筋及び配力鉄筋方向以外の鉄筋拘束がないため、ASRが生じた場合では床版厚さ方向に大きな膨張が生じ、これが床版の構造性能に大きな影響を及ぼすと考えられる⁴⁵⁾。そのため、ASRがRC床版の耐疲労性に及ぼす影響を究明し、これに立脚した構造物の維持管理方法を構築することが急務となっている。

ASRとRC部材の耐荷性・耐疲労性について検討した既往の研究では、RCはりの主鉄筋方向におけるコンクリートの膨張が 300μ から 700μ 程度では、健全なはりと同程度の耐荷性・耐疲労性を有するといった報告がなされている^{45),46),47)}。

また、ASR による劣化を与えた RC はりの曲げ載荷試験においては、ケミカルプレストレスの影響により、曲げひび割れ及びせん断ひび割れ発生荷重が増加したといった報告がされるなど、ASR によるコンクリートの膨張や、これに伴うひび割れが生じていても耐荷性がほとんど低下しないといった報告が多い^{48),49)}。また田附ら⁵⁰⁾は、ASR による損傷が生じた鉄道ラーメン高架橋からスラブ部材を切出し、せん断疲労載荷試験を実施している。切出した RC スラブ部材は、ASR 特有である層状のひび割れが多数確認されたものの、健全な供試体と比較して大きな耐疲労性の低下には至っていないことを報告している。

一方で、異常膨張による鉄筋破断の影響を受けた RC はりの曲げ載荷試験や、コンクリートを 12000 μ 程度と過大に膨張させた RC 床版供試体でのせん断疲労実験では、RC 部材の耐荷性・耐疲労性が健全な供試体よりも低下するといった報告がなされており^{51),52),53)}、過大な膨張を生じた場合では、ASR の影響によって RC 床版の構造性能が低下するといった知見も広まりつつある。

子田ら⁵⁴⁾は、北陸地方において 45 年間供用され、ASR による劣化を受けた実 RC 床版(向東洞橋)の押抜きせん断載荷試験を実施している。その結果、**図-2.4.3**に示すように、ASR 劣化を受けた RC 床版では、健全な RC 床版の半分程度の耐荷力であり、実環境において ASR 劣化を受けた RC 床版では、耐荷性の低下が顕著であり、早急に対策が必要であることを指摘している。

しかし、ASR を受ける RC 部材の構造性能に関する既往の研究例は総じて少なく、未解明な部分が多い現状にある。特に、RC 床版を対象とした研究例は極めて少なく、実験データも十分でない。また、ASR が RC 部材の耐荷性・耐疲労性に及ぼす影響を検討した既往の研究⁵⁵⁾では、高温高湿度環境下において、高濃度の塩分を RC 部材に供給するといった方法により ASR を急激に促進させているものがほとんどである。このような ASR を急激に促進させる試験では、実験期間の短縮に関しては有効であるものの、一般に ASR による構造物の劣化が顕在化するには数年から数十年要することを考えると、実環境に即した試験とは言い難い。すなわち、凍結防止剤散布環境下において ASR により劣化した RC 床版の耐疲労性に関する研究は、前節の塩害同様に、未だ実構造物に近い状態では再現された研究例がなく、定量的な評価には至っていないことが明らかとなった。

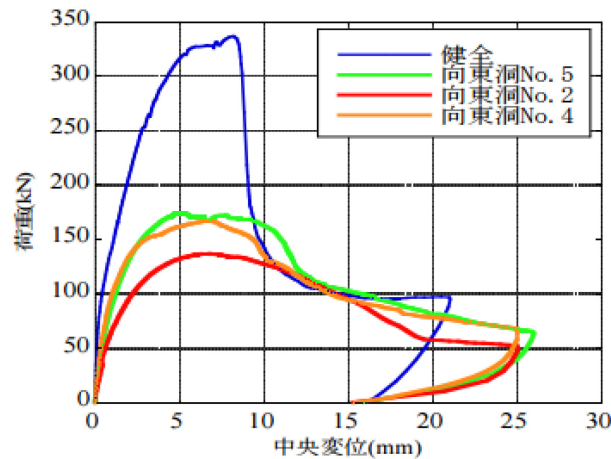


図-2.4.3 ASR 劣化した RC 床版の押抜きせん断試験結果⁵⁴⁾

2.4.3 本節のまとめ

本節では、輪荷重走行試験を用いた RC 床版の疲労試験及び各種材料劣化を受ける RC 部材の耐荷性・耐疲労性に関連する既往の研究について取りまとめた。その結果、材料劣化を受ける RC 部材の耐荷性・耐疲労性に関連する研究は、RC ばかりを用いた実験例がほとんどであり、RC 床版の疲労問題に着手した例は極めて少ないことが確認され、劣化機構の解明には至っていないことが明らかとなった。また、既往の研究では、材料劣化を RC 部材に与える際、試験期間を短縮し得る方法を採用する例が極めて多いことが示された。しかし、これらの方法による材料劣化は、実環境における劣化性状とは異なるといった指摘がなされており、材料劣化を受ける RC 床版の耐疲労性を評価する上では、実環境下における材料劣化進行過程を考慮した促進方法が重要であることが確認された。

2.5 RC 床版の耐疲労性及び損傷度評価に関する研究

2.3 で述べた通り、輪荷重走行試験では、床版に発生するひび割れといった外観上の損傷度と床版全体のたわみから、損傷度及び耐疲労性を可能であり、RC 床版の損傷機構解明に有効な手法である。しかし、材料劣化を受ける RC 床版の場合、床版内部でひび割れの発生が進行するため、外観上の変状のみではその損傷度を評価することが難しい。今後、輪荷重走行試験と床版内部に発生するひび割れの発生やその進展を評価することが可能な手法とを組み合わせることで、疲労損傷機構を解明し得ると考えられる。

一方、RC 床版の耐疲労性に関する研究は、輪荷重走行試験に限らず、数多く報告されている。特に、近年では数値解析分野においても、RC 床版の移動繰返

し載荷について、精度よく評価し得るまでに構成則が整理されるなど、RC床版の疲労に関する研究が大幅に進捗している⁵⁶⁾。そこで本研究では、床版内部のひび割れ発生及びひずみ挙動を3次元で評価可能である、前川らが開発した3次元非線形有限要素解析⁵⁷⁾を用いたRC床版の耐疲労評価手法による解析技術に着目し、材料劣化を受けるRC床版の耐疲労性評価を行うこととした。

また、近年では、RC床版内部の損傷状況の評価し得る非破壊検査手法の開発が多くの研究機関で成されている。これまでの研究により、超音波法⁵⁸⁾による評価手法や、打撃音の周波数特性に着目した評価手法⁵⁹⁾について検討が進められてきている。これらの研究成果から、床版内部の損傷と周波数特性との関係について整理が進められているものの、RC床版の疲労は、床版内部で多方向にひび割れが発生・進展するため、様々なピーク周波数が混在することから、精度の高い損傷度評価が難しい。既往の研究により、RC床版の耐疲労性については、曲げひび割れは影響が小さいのに対し、水平ひび割れについては耐疲労性を大幅に低下させる要因であることが知られていることから⁶⁰⁾、特に水平方向のひび割れの検知に特化した非破壊検査の開発が求められている。しかしながら、簡易かつ高精度な手法は未だ確立されていないのが現状である。そこで、本研究では、内藤ら⁶¹⁾が開発したRC床版内部の水平方向ひび割れの検知が可能な、小型加振器による強制振動試験に着目し、輪荷重走行試験の各段階で振動試験を実施することで床版内部の損傷を定量的に評価することとした。

以上より、本節では、RC床版の耐疲労性及び損傷度評価手法に関する既往の研究について、前川らの開発した3次元非線形有限要素解析及び内藤らの開発した小型加振器を励振器とした強制振動試験を中心に取りまとめた。

2.5.1 非線形有限要素解析を用いたRC床版の損傷度評価に関する研究

鉄筋コンクリート部材の有限要素解析は、1960年代後半にNgo, Scordlisら⁶²⁾による研究を契機に、計算機器の進歩に応じて飛躍的に技術向上が成され、現在では様々な構造物を対象とした研究が進められている⁶³⁾。このうち、前川らは⁵⁶⁾、異なる方向のひび割れの相互作用について構成則を整理することで、3次元の多方向ひび割れモデルの構築をしている。この前川らの研究成果により、荷重履歴に応じて、多方向ひび割れの発生前後における挙動を3次元で再現することが可能となり、これまでには再現が困難であった、RC床版の移動繰返し載荷について、精度よく評価し得るまでになった⁵⁷⁾。

前川らの数値解析を用いたRC床版の評価手法では、疲労損傷に伴い生じる塑性変形の進行及びコンクリート内部に生じるマイクロクラックの進展を、数値解析にパラメータとして取り込み、対数時間軸上で積分を行うことで、高速な計算が可能であり^{64),65)}、パラメトリックスタディに有効な手段であるといえる。

こうした数値解析により、RC床版に及ぼす水の影響や、乾燥収縮の影響などを含めた、多数の劣化因子とRC床版の疲労との関係が整理されている^{66),67)}。前川らは、せん断伝達と圧縮疲労に及ぼす水分の影響を材料特性として取入れた数値解析により、RC床版上面が冠水する場合には、実験同様に、数値解析においても耐疲労性の低下が顕著であることを示し、疲労作用以外の劣化因子を含めた数値解析においても、RC床版の耐疲労性が評価可能であることを示している(図-2.5.1)。一方で、材料劣化を受けるRC部材については、各種材料劣化の劣化進行過程を考慮した物理-化学モデル化^{68),69)}が進められてきているものの、材料劣化と疲労との複合劣化を受けるRC床版を対象とした研究例は未だに少ない。今後、材料劣化を受けるRC床版の疲労実験が進められれば、ここで得られたデータにより、解析モデルの向上が飛躍的に進み、材料劣化を受けるRC床版の耐疲労性を数値解析により評価できるものと期待される。

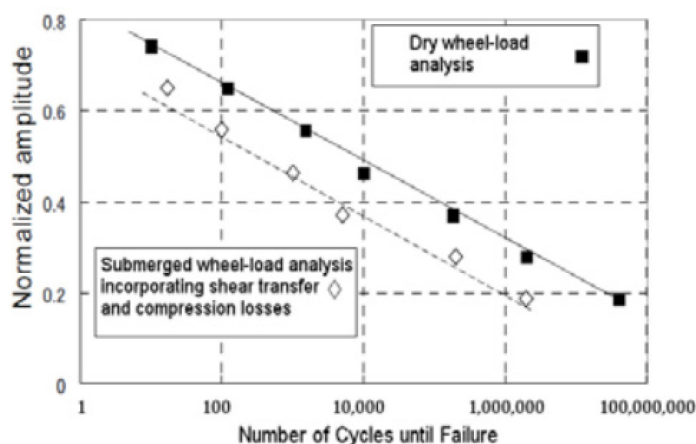


図-2.5.1 RC床版のS-N曲線に及ぼす水の影響(解析結果)

2.5.2 強制振動試験による損傷度評価に関する研究

積雪寒冷地におけるRC床版の損傷調査では床版下面の変状が殆ど観察されていない状態で、その疲労損傷が確認される調査結果が報告されている。このことは床版下面からの調査だけでは不十分であることを示唆している。このため、RC床版の上面あるいは内部の調査が可能な各種非破壊検査技術を導入し、疲労損傷を定量評価する手法が検討されている^{70),71),72)}。このうち、門らは⁷²⁾、構造物の長期連続モニタリングが可能な長尺光学ストランドセンサを採用した光ファイバセンサモニタリングシステムをRC床版に適用した疲労損傷モニタリングの可能性と、交通荷重(活荷重)で生じる床版下面の橋軸方向(走行方向)及び橋軸直交方向(走行直交方向)の平均ひずみ振幅の変化に着目し、提案する疲労損傷指標のRC床版への適用の可能性について検討している。この手法は、床版全体

のたわみ量から損傷度を推定することで、床版全域の損傷度モニタリングを行う上では有効な手法であると考えられ、維持管理への適用に大いに期待がされる。

一方で、内藤らは、RC床版内部の損傷を検知する手法として、2~20,000Hzまでの調和振動が与えられる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に着目して、コンクリート構造物内部の劣化程度を評価できる非破壊検査手法の開発を行ってきた^{61),73-76)}。前述した通り、この方法は加振器を用いて正弦波をアクティブに与えることで、床版上下面を往復する重複反射波を定常応答にするため、従来の超音波法や衝撃弾性波法と比較して床版の周波数特性を精度よく評価できると考えられている⁷⁷⁾。

内藤らは、これまでに実道路橋から切り出した撤去床版の検討、道路橋の現場試験などを行い、アスファルトの有無に依らず、共振周波数の低下によって床版内部の損傷を検知し、床版の劣化分布を推定できる可能性を示している⁷⁶⁾。しかし、共振周波数の低下が床版内部の損傷や下面の観察から判断される劣化グレードと対応する傾向は見出せたが、輪荷重走行試験などによる検討は行っていない。

また、内藤らの提案する手法は、対象構造物に対して局所的な振動を励起させるため、RC床版のように支間長に対して部材厚さが小さい場合では、縦波が卓越する⁷⁷⁾。すなわち、図-2.5.2に示すように曲げひび割れなどの加振方向に対して鉛直方向のひび割れに対しては、鈍感であるのに対して、水平方向のひび割れについては高精度で検出できると考えられる。この手法を用いて水平ひび割れを含めた床版内部の疲労損傷の発生・進展分布を段階的に捉えることができれば、床版の疲労メカニズムの解明に大きく貢献でき、さらに実務でも道路橋床版の健全性モニタリングへの活用などが大いに期待される。

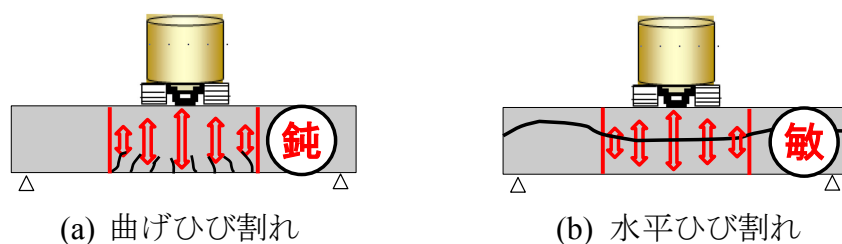


図-2.5.2 ひび割れ方向と計測感度との関係

2.6 本研究に関する課題の整理

本章では、凍結防止剤散布下における RC 床版の現状を把握すると共に、RC 床版の耐疲労性に関する既往の研究成果について取りまとめた。

その結果、材料劣化した RC 床版の耐疲労性に関する既往の研究は、実構造物に近い状態で再現された例が極めて少なく、疲労損傷機構の解明は十分になされていないことを示した。また、各種材料劣化を受けた RC 部材の耐荷性・耐疲労性を評価する上で、実環境下における材料劣化進行過程を考慮した促進方法が重要であることが示された。さらに、凍結防止剤散布下における RC 床版では、従来の床版下面からの点検のみでは、その損傷度を適切に評価するのが困難であり、床版上面あるいは内部の損傷状況を評価可能な手法の確立が急務であることが確認された。

以上を踏まえ、本研究で取り組むべき課題を以下に示す。

- 1) 凍結防止剤散布下における RC 床版では、床版上面で鉄筋の腐食が卓越するケースがあることから、凍結防止剤散布下における鉄筋の腐食進行過程を考慮した塩害促進試験を実施し、さらにその際、腐食部位の異なる鉄筋腐食状況を生じさせることで、鉄筋の腐食部位及び腐食量と耐疲労性との関係を整理する。
- 2) 凍結防止剤散布下において ASR 劣化を受ける RC 床版については、ASR の影響と RC 床版の耐疲労性に関して実験的に検討した例が未だない。そこで本研究では、ASR と耐疲労性との関係を整理するため、ASR の促進方法が RC 床版の損傷度及び耐疲労性に影響を及ぼすことを明らかとする。
- 3) 数値解析は、様々な劣化因子を含めた RC 床版の耐疲労性が評価可能であり、パラメトリックスタディに極めて有効な手法であることが示された。今後、材料劣化を受ける RC 床版の疲労実験とリンクすることで、モデル化の向上が成されれば、材料劣化が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響を数値解析により評価できると考えられる。そこで本研究では、前述した塩害を受ける RC 床版の疲労実験から得られた知見を数値解析に反映し、塩害が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響について解析的に検討を行う。
- 4) 小型加振器を用いた強制振動試験は、RC 床版の損傷状態を高精度に検知できる可能性があるが、疲労損傷の進行との関係について整理がなされていない。本研究では、床版内部の疲労損傷の発生や進展分布を段階的に捉えることが可能かを検討するため、輪荷重走行試験の各段階において強制振動試験を実施する。

参考文献

- 1) 国広哲男：道路橋床版の問題点，橋梁と基礎，Vol.2, No.7, 建設図書，1968.
- 2) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，2007.
- 3) 土木学会関西支部 鉄筋コンクリート床版疲労設計委員会：鉄筋コンクリート床版の損傷と疲労設計へのアプローチ，1977.
- 4) 岡田清，岡村宏一，園田恵一郎，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，土木学会論文集，第 321 号，pp.49-60，1982.
- 5) 日本コンクリート工学協会：融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書・論文集，1999.
- 6) 例えば，中村敏雄，清水巧，桐原進彌，中野聡：積雪寒冷地における RC 床版の損傷事例，第 7 回道路橋床版シンポジウム，pp.137-142，2013.
- 7) 本荘清司，中野将宏，藤原規雄，葛目和宏，牧博則：凍結防止剤によって塩害劣化した鋼橋 RC 床版の詳細調査，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 12 巻，pp381-388，2012.
- 8) 横山和昭，本荘清司，葛目和宏，藤原規雄：道路橋 RC 床版の鉄筋腐食を伴う劣化機構の解明に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.3, pp.1688-1692，2008.
- 9) 石川裕一：凍結防止剤の影響を受ける既設道路橋の耐久性向上に関する研究，長岡技術大学学位論文，2013.
- 10) 三田村浩，佐藤京，西弘明，渡辺忠朋：積雪寒冷地における既設 RC 床版の延命手法について，構造工学論文集，Vol.56A, pp.1239-1248，2010.
- 11) 三田村浩，佐藤京，本田幸一，松井繁之：道路橋 RC 床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響，構造工学論文集，Vol.55A, pp.1420-1431，2009.
- 12) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書，2005.
- 13) 大深伸尚，鳥居和之，池富修，川村満紀：鉄筋コンクリート堤体の耐久性調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.22, No.1, pp.43-48，2000.
- 14) 小林一輔，丸章夫，立松英信：アルカリ骨材反応診断，森北出版，1991.
- 15) 上原伸郎，幸左賢二，大代武志，山口和成：複数の鉄筋破断が生じた ASR 実構造物の鉄筋損傷評価，構造工学論文集，Vol. 59A, pp. 866-877，2013.
- 16) 五島孝行，大田孝二，梶尾聡，鈴木康範，井戸康清，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 回年次学術講演会講演概要集，pp.835-836，2013.
- 17) 関口武一，笹井幸男，石塚喬康：塩害を受けた RC 床版の劣化度調査と保全工事，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.5, pp.41-49，1994.
- 18) 阪神高速道路公団、阪神高速道路管理センター：道路橋 RC 床版のひび割れ損傷と耐久性，1991.

- 19) 鈴木統, 石井孝男, 森安宏, 松井繁之: RC 床版の輪荷重移動載荷疲労試験, 第 2 回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.155-160, 2000.
- 20) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】, 2008.
- 21) 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.
- 22) 松井繁之: 橋梁の寿命予測, 安全工学, Vol.30, No.6, pp.432-440, 1991.
- 23) 松井繁之: 道路橋コンクリート系床版の疲労設計と設計法に関する研究, 大阪大学学位論文, 1984.
- 24) 佐藤建吉: 絵とき「金属疲労」基礎のきそ, 日刊工業新聞社, 2008.
- 25) 国土交通省 国土技術政策総合研究所, 国総研資料 第 472 号, 2008.
- 26) 例えば, 岡村甫: コンクリート構造物の疲労特性, 第 22 回構造工学シンポジウム論文集, pp.127-134, 1976.
- 27) 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, No.348, V-1, pp.133-141, 1984.
- 28) 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.
- 29) 石川裕一, 青山實伸, 倉戸伸浩, 西尾守広: 劣化した道路鋼橋 RC 床版の凍結防止剤による塩分浸透特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.1393-1399, 2010.
- 30) 子田康弘, 斉藤卓也, 岩城一郎: 輪荷重走行試験による材料劣化を受けた道路橋 RC 床版の疲労耐久性評価, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 9 巻, pp.145-150, 2009.
- 31) 例えば, 山住克己, 宮本征夫, 佐藤勉: 鉄筋を腐食させた RC はりの劣化状態と耐力について, コンクリート工学年次論文集, Vol.12, No.1, pp.557-562, 1990.
- 32) 土木学会: コンクリート技術シリーズ No.85 続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, 2009.
- 33) 例えば, 西脇敬一, 大屋戸理明, 長谷川雅志, 永岡高: 鉄筋が腐食した RC 梁の疲労性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.783-788, 2002.
- 34) 例えば, Yuan, Y., Ji, Y. and Shah, S. P.: Comparison of Two Accelerated Corrosion Techniques for Concrete Structures, ACI Structural Journal, Vol. 104, No. 1, pp. 344-347, May./June 2007.
- 35) 倉知星人, 佐藤孝史, 小林孝一, 六郷 恵哲: 塩害による鉄筋の性能低下が RC はり部材の耐荷性能に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.820-824, 2008.

- 36) 松田耕作, 横田優, 米澤和宏, 松島 学: 塩害劣化を受ける鉄筋コンクリート梁の耐荷性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.834-843, 2012.
- 37) 橋本航, 森川英典, 小林秀恵: 鉄筋腐食を考慮した RC はり部材のせん断耐荷性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.3, pp.1009-1014, 2003.
- 38) 鈴木美馨, 堀口賢一, 福浦尚之, 丸屋剛: 鉄筋の腐食促進条件が腐食膨張によるひび割れの発生に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1081-1086, 2009.
- 39) 佐藤孝史, 疋田雅也, 倉知星人, 小林孝一: 電食と塩分による鉄筋の腐食が鉄筋の腐食形状に与える影響の比較, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1063-1068, 2009.
- 40) 高谷哲, 中村士郎, 山本貴士, 宮川豊章: コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.2, pp.154-165, 2013.
- 41) 森香奈子, 木嶋政智, 友田祐一, 大津政康: 電食実験によるコンクリート中の鉄筋腐食に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1137-1142, 2008.
- 42) 小林豊治, 米沢敏男, 出頭圭三: コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ 3-鉄筋腐食の診断, 森北出版, pp.197, 1993.
- 43) 森川雅行, 関博, 奥村隆: 鉄筋の腐食膨張によるひび割れ発生機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.378/V-6, pp.97-105, 1987.
- 44) 中川裕之, 田中大博, 横田優, 松島学: 塩水を用いた乾湿繰返し促進腐食実験によるひび割れモードとひび割れ発生時の腐食量, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.1, pp.744-757, 2008.
- 45) 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.
- 46) 小林和夫, アルカリ骨材反応を生じた部材や構造物の耐荷重性能-はり部材-, コンクリート工学, Vol.24, No.11, pp.70-78, 1986.
- 47) 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 はり及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.
- 48) 岩波光保, 横田弘, 鳥居和之, 鈴木義晃, 奥山和俊: アルカリ骨材反応により損傷したコンクリート部材の力学挙動と補強方法に関する提案, 港湾技研資料, No.994, 2001.

- 49) 小柳洽, 六郷恵哲, 石田裕哉: アルカリ骨材反応によるひびわれと RC 部材の性状, セメント技術年報, No.39, pp.352-355, 1985.
- 50) 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 E, Vol.63, No.1, pp.166-177, 2007.
- 51) 松田豊樹, 森川英典, 王健: ASR が生じた RC 部材のせん断耐荷性に関する実験的検討, 神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要, 第 3 号, pp.23-31, 2011.
- 52) 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 床版の押し抜きせん断試験, 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, 第 13 巻, pp259-264, 2013.
- 53) 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.
- 54) 子田康弘, 岩城一郎, 大田孝二, 伊戸康清, 島田守: ASR 劣化が生じた実道路橋 RC 床版の押し抜きせん断耐力に関する実験的検討, 土木学会第 68 回年次学術講演会概要集, 2013.
- 55) 例えば, 久保善司, 上田隆雄, 黒田保, 野村倫一: アルカリ骨材反応による膨張がコンクリートの力学的性能に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp1691-1696, 2006.
- 56) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技術堂出版, 1991.
- 57) Maekawa,K.,pimanmas,A.and Okamura,H : Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, London, 2003.
- 58) コンクリート委員会・コンクリート構造物のヘルスマonitoring研究小委員会:【委員会報告】コンクリート構造物の構造ヘルスマonitoring(SHM)の研究動向と設計手法, 土木学会論文集, No.795/V-68, pp1-16, 2005
- 59) 磯光夫, 久保田和徳, 越後滋, 橋吉宏, 歌川紀之, 中島章典: 鉄板で覆われた床版の打音法による非破壊検査に関する研究, 土木学会論文集 F4, Vol.69, No.2, pp.140-155, 2013.
- 60) 横山広, 浦修造, 関口幹夫, 堀川都志雄: 床版の劣化現象及び床版補強工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.451-456, 2010.
- 61) 内藤英樹, 大竹雄介, 渡邊孝和, 鈴木基行, 中野聡, 岩城一郎, 木皿尚宏: 反共振周波数に着目したはりの損傷位置同定に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.150-161, 2012.
- 62) Ngo D.and Scordelis A.C. : Finite Element Analysis of Reinforced

- Concrete Beams, *ACI Journal*, pp.152-163, 1967.
- 63) Fujiyama, C., Yonetsu, K., Maeshima, T. and Koda, Y. : Identifiable stress state of wind turbine tower-foundation system based on field measurement and FE Analysis, *Journal of Procedia Engineering*, 95, pp.279-289, 2014.
- 64) 藤山知加子, GEBREYOUHANNES Esayas, 千々和伸浩, 前川宏一 : 移動荷重下の床版疲労寿命に影響を及ぼす各種要因の数値解析に基づく分析, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.29, pp.727-732, 2007.
- 65) Maekawa, K., Okamura, H. and Pimanmas, A. : *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, SPON PRESS, 2003.
- 66) Koichi MAEKAWA, Tetsuya ISHIDA and Toshiharu KISHI : Multi-scale Modeling of Concrete Performance -Integrated Material and Structural Mechanics, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No. 2, pp.91-126, 2003.
- 67) 藤山知加子, 千々和伸浩, 川中勲, 前川宏一 : 移動荷重と水分の影響を同時に受ける RC 部材の疲労破壊特性, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.30, pp.883-888, 2008.
- 68) Takahashi, Y., Shibata, K., Maekawa, K. : Chemo-Hygral Modeling of Structural Concrete Damaged by Alkali silica Reaction, *Proceedings of the 1st Ageing of Materials & Structures 2014 Conference*, pp.424-431, 2014.
- 69) 村中誠, 田中泰司 : 反応機構に立脚した ASR 膨張挙動に関する物理-化学モデルの構築, *土木学会論文集 E2*, Vol.69, No.1, pp.1-15, 2013.
- 70) 例えば, 湯浅茂徳, 李正旺, 吉沢勝, 魚本健人 : AE 法による鉄筋コンクリート床版の疲労損傷評価, *土木学会論文集 No.627/V-44*, pp.251-259, 1999.
- 71) 三木千壽, 水ノ上敏雄, 小林祐介 : 光通信網を使用した鋼橋梁の健全度評価モニタリングシステムの開発, *土木学会論文集*, No.686/VI-52, pp31-40, 2001
- 72) 門万寿男, 前島拓, 子田康弘, 中野聡, 藤山知加子, 岩城一郎 : 長尺光学ストランドセンサを用いた道路橋 RC 床版の疲労損傷度評価手法に関する研究, *土木学会論文集 E2*, Vol.71, No.4, pp.323-337, 2015.
- 73) 内藤英樹, 齊木佑介, 鈴木基行, 岩城一郎, 子田康弘, 加藤潔 : 小型起振機を用いた強制加振試験に基づくコンクリート床版の非破壊試験法, *土木学会論文集 E2*, Vol.67, No.4, pp.522-534, 2011.
- 74) 宮村正樹, 子田康弘, 内藤英樹, 岩城一郎, 鈴木基行 : 振動特性に着目し

- た RC 床版の疲労損傷度評価手法に関する研究, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1251-1262, 2011.
- 75) 八嶋宏幸, 土屋祐貴, 山口恭平, 早坂洋平, 内藤英樹, 鈴木基行: 振動試験に基づく実道路橋 RC 床版の疲労損傷度評価, 土木学会第 69 回年次学術講演会概要集, I-021, 2014.
- 76) 杉山涼亮, 内藤英樹, 山口恭平, 早坂洋平, 鈴木基之: ランダム加振による RC 床版の非破壊試験法, 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, Vol.15, pp.471-476, 2015.
- 77) 長松昭男: モード解析入門, コロナ社, 2009.

第 3 章

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

3.1 概説

塩害を受ける RC 部材の耐荷性・耐疲労性に関わる既往の研究では、前章でまとめた通り、RC はりを用いた実験例^{1),2)}が多く、RC 床版の疲労に着目した研究例は極めて少ない。また、既往の研究^{3),4)}により、鉄筋腐食を生じさせる際に、乾湿繰返しによる塩害促進手法を用いた場合、電食による鉄筋腐食よりも実環境に近い劣化性状を示すことが報告されているものの、乾湿繰返しによる塩害促進を用いた実験データはほとんどない。このため、凍結防止剤散布環境下において塩害劣化した RC 床版の耐疲労性に関する研究は、未だ実構造物に近い状態では再現されておらず、鉄筋腐食量と耐疲労性との詳細な関係をはじめとする劣化現象の把握と劣化機構の解明には至っていないのが現状である。

そこで本章では、材料劣化のうち RC 床版の塩害を取り上げ、これが RC 床版の耐疲労性に与える影響を実験的に検討した⁵⁾。

具体的には、まず同一配合で作製した実物大に近い RC 床版供試体に対し、腐食ひび割れや鉄筋腐食性状などを、できる限り実構造物に近い状態で再現するため、長期にわたって屋外曝露環境下に供試体を設置し、さらに電気化学的な方法ではなく、凍結防止剤散布を考慮した NaCl 水溶液による乾湿の繰返しによって塩害促進を実施した。

その際、促進時の塩分供給方法を変えることで異なる 3 条件の鉄筋腐食状況を生じさせた。そして、塩害による鉄筋腐食を模擬した RC 床版供試体による輪荷重走行試験より、その耐疲労性を実験的に評価した。

3.2 輪荷重走行試験の概要

本研究では、RC 床版に疲労を与える手段として、輪荷重走行試験を採用した。本節では、本研究に使用した日本大学工学部所有の輪荷重走行試験装置の概要及び試験装置に関する事項や試験時における計測項目について述べる。

3.2.1 輪荷重走行試験装置

輪荷重走行試験装置は、任意の荷重を作用させながら往復運動させ、実際の輪荷重の走行状態を再現することで、実床版の疲労損傷状態を再現可能な装置である⁶⁾。

本研究で使用した輪荷重走行試験装置(写真-3.2.1)はクランク式⁷⁾であり、疲労試験による重載荷での何百万回もの移動繰返しに耐えうるように車輪に直径 300mm、幅 400mm の鉄輪を使用している。しかし、実際の車両はゴムタイヤであり、実際の載荷状態に近づけるためには車輪と供試体の間に載荷板を敷設す

るなど、軌道装置の工夫を行う必要がある。

そこで、輪荷重走行範囲には、写真-3.2.2 と図-3.2.1 に示す軌道装置を設けている。図及び写真に示すように、鉄輪による集中荷重を大型車両のダブルタイヤの接地面積を考慮した等分布荷重に変換するため、矩形の鋼製載荷ブロック(300mm×120mm×50mm)を18個敷並べ、このブロックが載荷試験中に移動しないよう、ガイドを介してボルトで個々のブロックを連結している。さらに、載荷ブロック上には、鉄輪の走行を円滑にするため、厚さ10mmの鋼板を載せた。なお、床版上面の不陸等に伴う影響を回避するための緩衝材としてベニヤ板を使用し、載荷ブロックの上下に配置した。



写真-3.2.1 輪荷重走行試験装置⁸⁾



写真-3.2.2 軌道装置

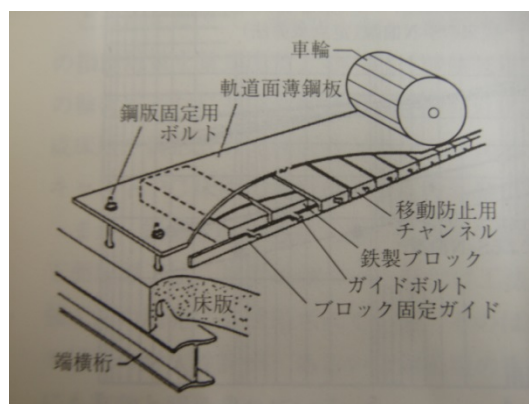


図-3.2.1 軌道装置⁶⁾

表-3.2.1 に、輪荷重走行試験装置の諸元を示す。表より、本試験装置の静的載荷能力は最大で 534kN(最大動的載荷能力 250kN)であり、荷重走行範囲は床版の中央から 500～1000mm(100mm ピッチ)の範囲で出力軸回転数は 0.897～8.97rpm(1 時間当り 54～538 回転)である。なお、本研究では輪荷重走行範囲は床版中央から 1000mm の範囲とし、回転数は最大能力である 8.97rpm とした。

表-3.2.1 試験装置諸元

項目		仕様
形状・寸法	供試体寸法	標準 長さ3000mm×幅2000mm×厚さ160～200mm
	車輪の種類	鉄輪：直径300mm×幅400mm
駆動	走行範囲	±500～1000mm
	モーター回転数	0.897～8.97 rpm
載荷	載荷荷重	静的最大荷重534kN 動的最大250kN
	シリンダーストローク	150mm(±75mm)

3.2.2 試験方法

(1) 供試体の支持条件

供試体の支持条件を図-3.2.2 に示す。支持条件は、既往の研究⁹⁾を参考とし、長辺方向の 2 辺では、支点内に介在する丸鋼により水平変位・回転変位に抵抗なく追従することが可能である単純支持とし、鉛直方向の変位のみを拘束した。一方、短辺方向の 2 辺については端横桁を利用した弾性支持とし、横桁に適切な剛性を持たせることで、短辺からの早期破壊を防止した。また、荷重載荷時に発生する床版端部の浮上りを防止するため、PC 鋼棒により床版を縦桁に固定する浮上り防止装置(写真-3.2.3)を取り付けた。

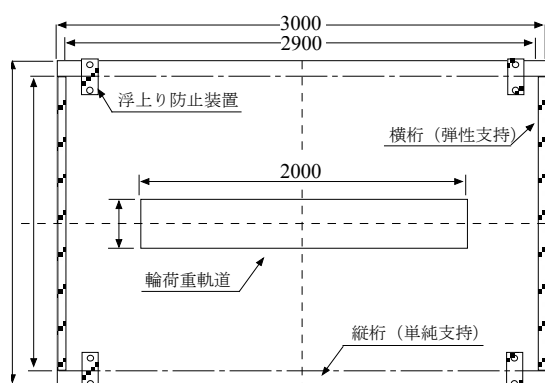


図-3.2.2 供試体の支持条件



写真-3.2.3 浮上り防止装置

(2) 載荷プログラム

図-3.2.3 に載荷プログラムを示す。本研究では、既往の研究¹⁰⁾による試験方法を参考とし、段階載荷荷重方式による輪荷重走行試験を実施した。なお、載荷プログラムは、走行回数 20 万回毎に載荷荷重を 29.4kN 増加させる方式とした。ここで、本研究における基本荷重は、T 荷重における 1 車輪分の荷重である 98kN(10tf)とした。

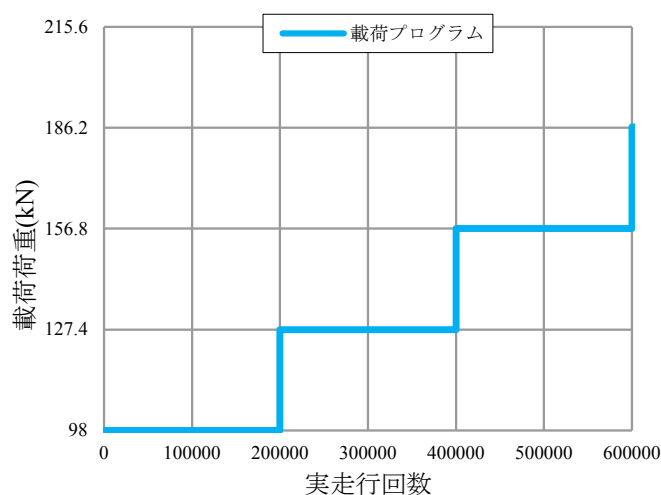


図-3.2.3 載荷プログラム

3.2.3 計測項目

(1) 等価繰返し走行回数^{10),11)}

本研究では前項で述べた通り、段階載荷荷重方式を採用していることから、走行回数を直接比較しても、適切な耐疲労性を評価できるとは考え難い。

そこで、等価繰返し走行回数に統一することで比較検討を行うこととした。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(3.2.1)により 98kN に換算した際の走行回数として求めた。

$$N_{eq} = \sum (P_i / P_0)^m n_i \quad (3.2.1)$$

ここで、 N_{eq} ：基本荷重 P_0 に換算した走行回数、 P_0 ：基本荷重(98kN)、 n_i ：荷重 P_i の走行回数、 m ：松井らによる S-N 曲線の傾きの逆数(12.76)である。

(2) 活荷重たわみ

本研究では、目標走行回数終了時点で基本荷重 98kN を供試体中央に静的載荷した際の床版に発生するたわみの計測を行った。なお、たわみの計測には高感度変位計(写真-3.2.4)を用い、供試体中央に加え、供試体中央から橋軸方向、橋軸直角方向にそれぞれ 200mm ずつ配置した(図-3.2.4)。ここで、本研究における活

荷重たわみ(弾性変形成分のたわみ)は、供試体中央に基本荷重である 98kN を静的載荷した際の最大たわみと残留たわみの差分とした。図-3.2.5 には活荷重たわみの定義を示した。なお、静的載荷によるたわみの計測は基本的には走行回数 1 万回ごとに行い、試験初期段階及び疲労限界付近では、たわみの推移を明確に判断するため、短い間隔で計測を行った。



写真-3.2.4 高感度変位計の設置状況

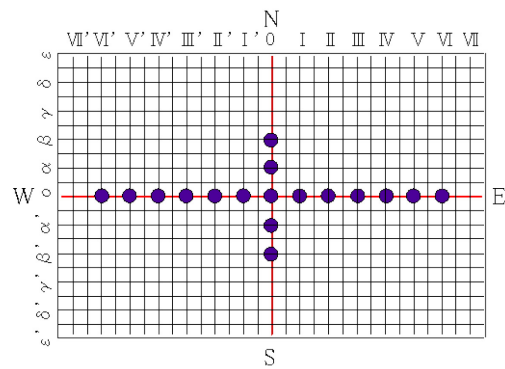


図-3.2.4 変位計設置位置

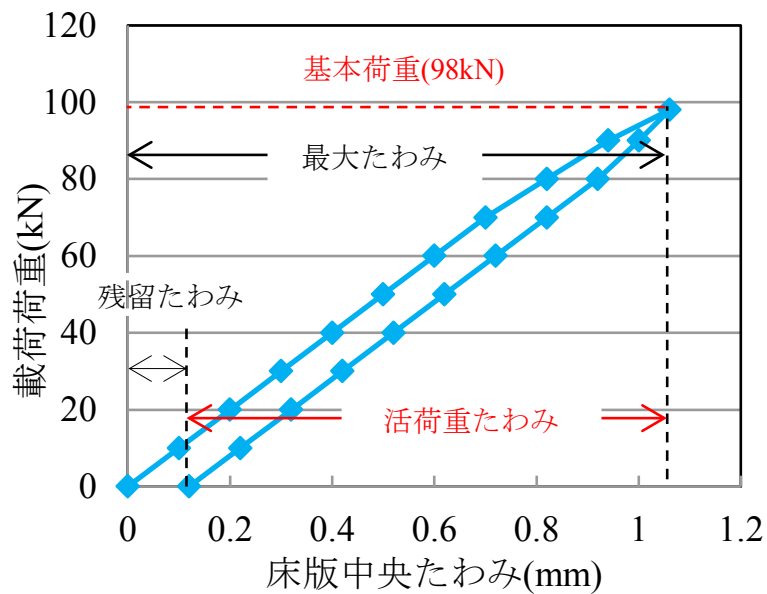


図-3.2.5 活荷重たわみの定義

(3) 床版下面に発生するひび割れの観察

本研究では、床版の損傷状態の評価をするため、所定の走行回数において、供試体下面に発生するひび割れの観察を行った。なお、ひび割れの観察は、供試体中央に基本荷重である 98kN を載荷させた状態で、床版下面から目視により行った。また、発生が確認された箇所にはマーキング及びスケッチを実施した。写真-3.2.5 にひび割れ観察状況を、図-3.2.6 にひび割れスケッチの一例を示す。なお、ひび割れの観察は、基本的には走行回数 5 万回ごとに行い、試験初期段階ではひび割れの進展を明確に把握するため、短い間隔で観察を行った。



写真-3.2.5 ひび割れ観察状況

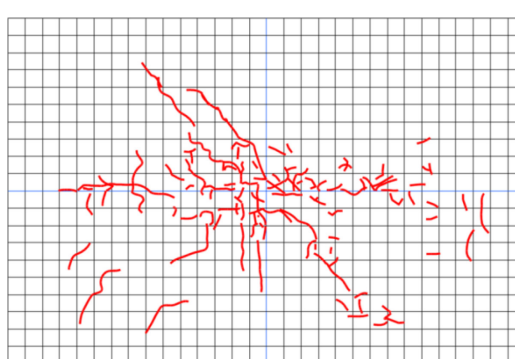


図-3.2.6 ひび割れスケッチの一例

(4) ひび割れ密度

ひび割れ密度は、供試体下面のひび割れをスケッチし、パソコン上でこれをトレースした後、画像解析ソフトによって床版中央の 1600mm×1200mm の範囲にあるひび割れの総延長を求め、式(3.2.2)により算出した。

$$C_d = C_l / A_t \quad (3.2.2)$$

ここで、 C_d ：ひび割れ密度(m/m²)、 C_l ： A_t 範囲内にあるひび割れの総延長(m)、 A_t ：対象面積(m²)であり、本研究では、1.6m×1.2m の範囲とする。

(5) 断面の損傷状況

断面の損傷状況の観察は、輪荷重走行試験終了後、RC 床版供試体を中央から 4 分割し、その断面に発生しているひび割れの確認を目視観察により行った。図-3.2.7 に断面ひび割れスケッチの一例を示す。

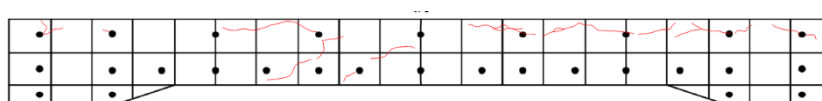


図-3.2.7 断面スケッチの一例(橋軸直角断面)

3.3 供試体の概要

3.3.1 実験条件

実験条件は、塩害による鉄筋の腐食量とその状態を塩害促進試験で変化させ、これらが耐疲労性に及ぼす影響を評価することを目的に設定した。具体的には、(1)本実験の基準となる健全な RC 床版供試体(以下、健全供試体)と、塩害を受ける床版供試体については(2)上側鉄筋と下側鉄筋のそれぞれの腐食量を同程度にしつつ、鉄筋腐食が耐疲労性の低下に影響を及ぼすかを確認するため、塩害を早期に生じさせるために塩分を内在させたコンクリートを使用した供試体(以下、内在供試体)、(3)床版全面の塩水への浸漬による塩分供給を受けることで鉄筋を腐食させ、内在供試体よりも上側と下側の鉄筋腐食を進行させた供試体(以下、浸漬供試体)、及び(4)実道路橋において凍結防止剤に起因する塩害は床版上面からの塩水浸透によることを想定し、上面からの塩水散布により上側鉄筋の方が下側鉄筋よりも腐食が進行し、上下鉄筋の間で腐食量に差異を持たせた供試体(以下、散布供試体)の合計 4 条件を設定した。

3.3.2 供試体の形状

図-3.3.1 に、供試体の形状及び寸法を示す。図より、寸法は、 $3,000\text{mm} \times 2,000\text{mm} \times 160\text{mm}$ の複鉄筋 RC 床版である。主鉄筋と配力鉄筋には各々 D16(SD295 A)と D13(SD295 A)を用い、主鉄筋のかぶりは上面、下面ともに支間 10m 以下の RC 床版の最小かぶり厚¹²⁾である 30mm とした。なお、スパン長は、1800mm である。引張側の主鉄筋と配力鉄筋の配置間隔は、それぞれ 150mm と 125mm である。

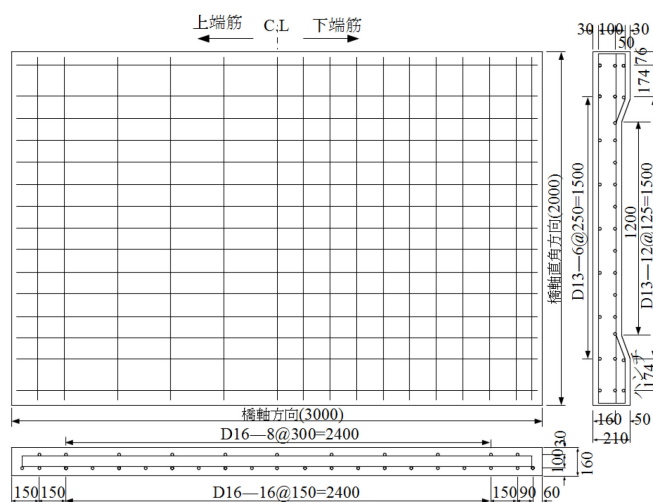


図-3.3.1 供試体形状

3.3.3 コンクリートの配合

表-3.3.1 に、使用したコンクリートの配合表を示す。コンクリートはレディーミクストコンクリートであり、水セメント比を 66%とし、健全、浸漬、散布それぞれの供試体は塩化物を添加しておらず、内在供試体にはコンクリートに対して外割で 10kg/m³ の塩化ナトリウムを使用している。なお、使用材料は、W：水道水、C：普通ポルトランドセメント(密度：3.16g/cm³)、S：硬質砂岩 砕砂(密度：2.64g/cm³)、G：安山岩 砕石(密度：2.70g/cm³)、SP：AE 減水剤である。

表-3.3.1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP
20	12	4.5	66	47.6	174	264	857	996	2.64

表-3.3.2 と表-3.3.3 に、コンクリートと鉄筋の物性を示す。各供試体の輪荷重走行試験開始時の圧縮強度は、健全供試体が 33.2MPa(材齢 405 日)、内在供試体が 39.1MPa(材齢 282 日)、浸漬供試体が 33.7MPa(材齢 830 日)、散布供試体が 34.4MPa(材齢 1070 日)である。使用鉄筋は、全供試体共通で SD295A を使用し、主鉄筋(D16)は降伏強度が 305MPa、引張強度が 503MPa であり、配力鉄筋(D13)は降伏強度が 313MPa、引張強度が 501MPa であった。

表-3.3.2 コンクリートの物性

供試体名	圧縮強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	試験開始時 材齢(日)
健全	33.2	26.9	405
内在	39.1	28.9	282
浸漬	33.7	26.5	830
散布	34.4	26.5	1070

表-3.3.3 鋼材の物性

使用鉄筋	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	降伏ひずみ (μ)
主鉄筋(D16)	305	503	198	1820
配力鉄筋(D13)	313	501	190	1813

3.4 塩害促進試験の概要

3.4.1 塩害促進試験

それぞれの供試体の塩害促進方法及び促進期間を表-3.4.1に示す。

表より、まず内在供試体は内在塩分としてコンクリートに対して外割で 10kg/m^3 の塩化ナトリウムを練混ぜ時に添加し、このコンクリートによって供試体を作製した後、載荷試験まで福島県郡山市の大学構内にて屋外曝露することで促進を行った。次に、浸漬供試体では、塩水として濃度10%のNaCl水溶液を使用し、屋外に設置した大型水槽を用い、3.5日毎のNaCl水溶液への全浸漬と乾燥という乾湿の繰返しを実施した。

散布供試体では凍結防止剤散布を模擬した促進方法として、10%のNaCl水溶液を、7日毎に供試体上面に散布するという手法を用いた。なお、浸漬供試体と散布供試体の塩害促進は、材齢78日目より開始した。

写真-3.4.1、写真-3.4.2には塩害促進状況を示した。写真の通り、本研究における塩害促進試験は、いずれの供試体も屋外環境に曝露することで実施した。また、それぞれの促進期間は、内在供試体が282日間、浸漬供試体が730日間、そして散布供試体が930日間である。なお、各供試体での促進期間は、後述する腐食ひび割れの発生とその状態、及び輪荷重走行試験装置による当研究室の載荷試験工程より定まった期間である。

このように、本研究では実際の塩害環境下に近い劣化状態をRC床版に与えるため、電食実験といった電気化学的な手法ではなく、屋外曝露環境下において乾湿の繰返しを長期にわたって実施したことが特徴であるといえ、本研究によって生じた塩害劣化については、次節より詳細に記述する。

表-3.4.1 塩害促進概要

供試体名	塩害促進方法	塩害促進期間
健全	なし	なし
内在	コンクリート練混ぜ時に塩分混入 10kg/m^3 のNaClを外割添加	282日
浸漬	塩水への全面浸漬と乾燥の繰返し 乾湿の周期：3.5日間	730日
散布	供試体上面に塩水を散布 塩水散布の周期：7日間	930日



写真-3.4.1 塩害促進状況(浸漬供試体)

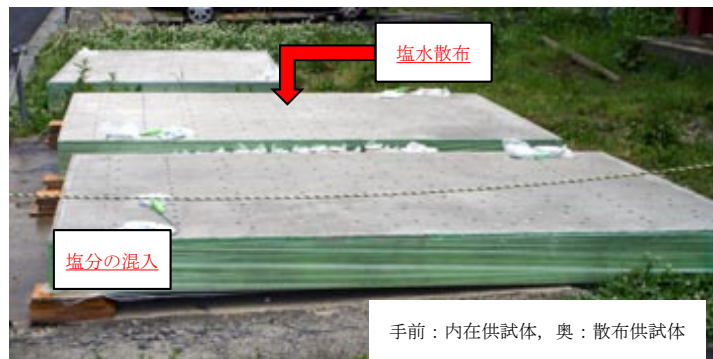


写真-3.4.2 塩害促進状況(内在供試体, 散布供試体)

3.4.2 塩化物イオン濃度測定方法

供試体の塩化物イオン濃度測定は、供試体からコア(φ32mm)を採取し、上面から15mm間隔でコアを切断し試料を作製した。その後、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠し、イオンクロマトグラフ分析法により、実施した。なお、測定に使用したコアは、輪荷重軌道直下を避けて採取し、床版厚さと同じ高さ160mmのコアを使用した。

3.4.3 鉄筋腐食減量率測定方法

図-3.4.1に、鉄筋腐食減量試験に用いた鉄筋の採取位置を示す。試験に用いた鉄筋は、輪荷重走行試験後、供試体を4分割した後、主鉄筋が4本以上、配力鉄筋が3本以上となるよう採取した。

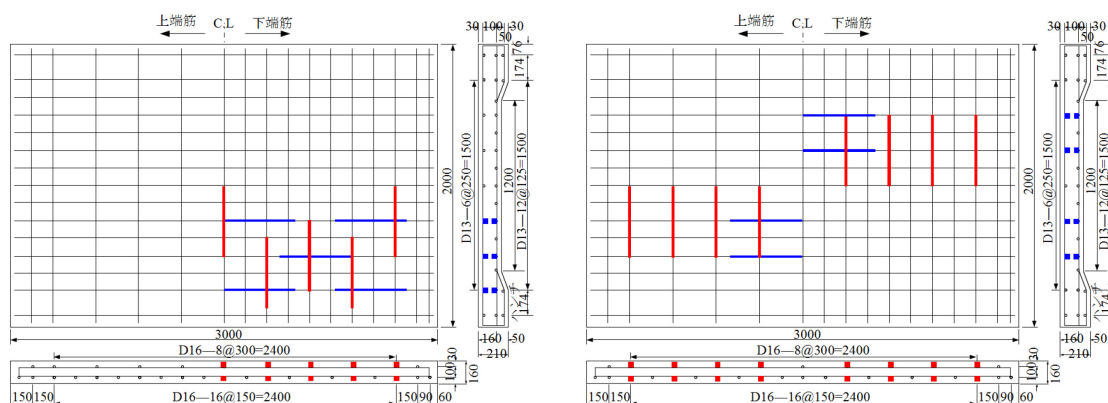
図より、浸漬供試体及び散布供試体では、圧縮、引張側の主鉄筋を300mm間隔で8本、配力鉄筋を250mm間隔で4本ずつとなるよう、2つのブロックから取り出した。

一方、内在供試体はブロックの1つから、圧縮側、引張側の主鉄筋、配力鉄筋を5本ずつ採取した。各供試体から採取した鉄筋の腐食減量率を、採取した鉄筋

を10%クエン酸ニアンモニウム溶液中に浸漬し、除錆を実施した後に、式(3.4.1)により算出した。

$$W_{loss} = (W_{init} - W_{corr}) / W_{init} \times 100 \quad (3.4.1)$$

ここで、 W_{loss} ：腐食減量率(%), W_{init} ：腐食してない鉄筋の重量(g), W_{corr} ：腐食後の重量(g)である



(a) 内在供試体

(b) 浸漬供試体, 散布供試体

図-3.4.1 鉄筋採取位置

3.5 塩害促進によるRC床版の塩害劣化状況

3.5.1 錆汁の発生及び鉄筋の腐食状況

写真-3.5.1 に、疲労試験前に観察した散布供試体上面の錆汁発生状況、写真-3.5.2に既往の研究により電食試験で散布供試体と同程度の腐食減量率15%まで鉄筋腐食させたRCはりの錆汁発生状況を示す¹³⁾。なお、写真-3.5.1は後述する図-3.5.3(b)中の点線範囲内を撮影したものであり、拡大図は写真中の黒枠範囲のものである。また、写真-3.5.2中の黄線は腐食によって生じたひび割れを示している。写真より、電食試験により鉄筋を腐食させた供試体では、錆汁が供試体全面で腐食ひび割れを中心に発生している。これに対して、乾湿の繰返しによって鉄筋腐食を促した散布供試体では、部分的に錆汁が浮き出ていることが確認された。これは、実環境下で観察されるマクロセルな腐食状況に類似していると考えられる。なお、内在供試体、浸漬供試体についても散布供試体と同様に部分的な錆汁が発生していたことを確認している。また、それぞれの供試体に発生した腐食ひび割れの最大幅は、本実験による散布供試体では0.1mmであるのに対し、

電食実験により鉄筋が腐食したケースでは 1.0mm と、同じ腐食量であっても、発生するひび割れの幅が大きく異なる結果を示した。これは、電食による腐食では乾湿繰返しによる腐食よりもひび割れの幅が大きくなるといった既往の研究同様の結果である¹⁴⁾。写真-3.5.3 に採取した鉄筋の腐食状況の一例を示す。鉄筋の腐食性状は、実環境で観察される、写真に示すような孔食がいずれの供試体においても観察された。

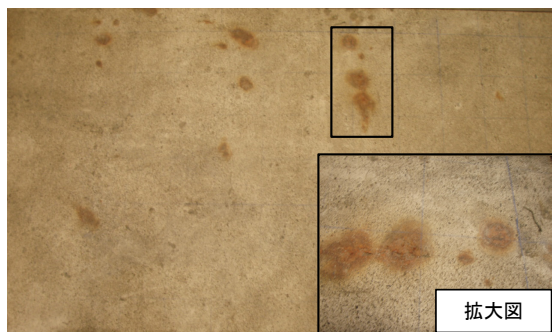


写真-3.5.1 錆汁の発生状況
(散布供試体)



写真-3.5.2 錆汁の発生状況¹³⁾
(電食試験)

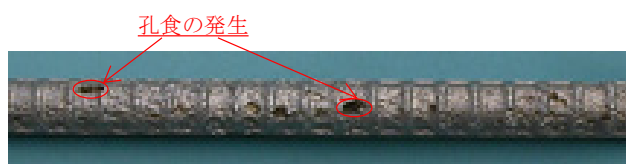


写真-3.5.3 孔食発生状況

3.5.2 塩害による腐食ひび割れの発生

図-3.5.1 から図-3.5.3 に、塩害促進を行った供試体の疲労試験前に観察した上面と下面のひび割れ発生状況を示す。図より、内在供試体では、上下面ともに主鉄筋に沿ったひび割れが発生し、配力鉄筋方向のひび割れも数本発生していた。次に浸漬供試体では、上面において内在供試体同様、主鉄筋に沿ったひび割れが発生していたが、下面においては主鉄筋に沿ったひび割れは少なく、供試体軸方向のハンチ部(図中の点線範囲)に配力鉄筋方向のひび割れが発生していた。これに対して、塩分供給面を上面とした散布供試体では、上面のみに主鉄筋に沿ったひび割れが発生し、下面においてはひび割れの発生は観察されなかった。このように、塩分供給面を変えることで、ひび割れの発生状況に差が生じる結果を示した。また、各供試体の上面における最大ひび割れ幅は、内在供試体で 0.2mm、浸漬供試体で 0.3mm、散布供試体で 0.1mm であった。

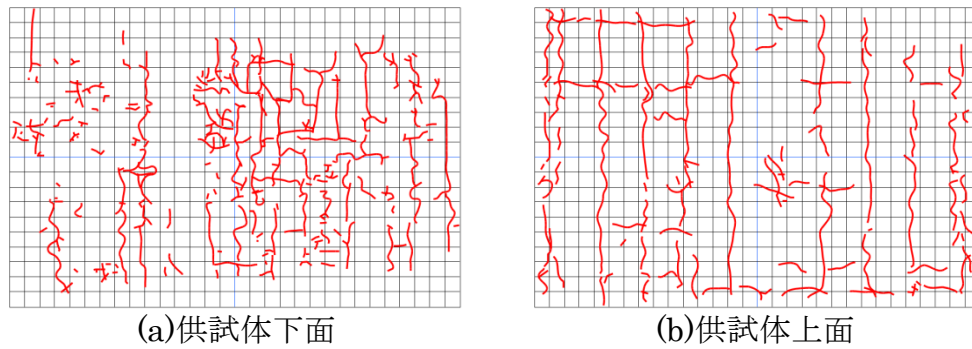


図-3.5.1 腐食ひび割れ発生状況(内在供試体)

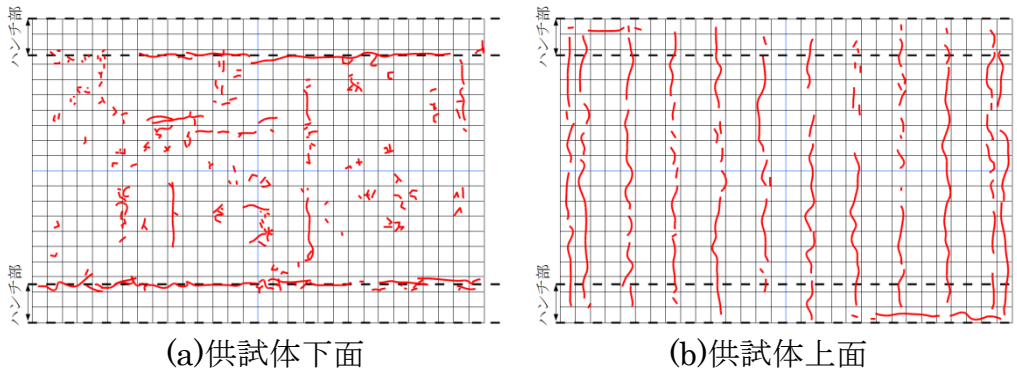


図-3.5.2 腐食ひび割れ発生状況(浸漬供試体)

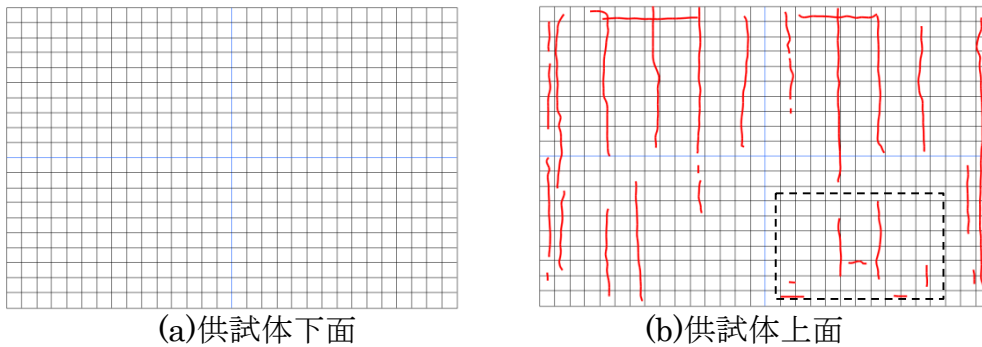


図-3.5.3 腐食ひび割れ発生状況(散布供試体)

3.5.3 塩化物イオン濃度及び鉄筋腐食減量率

図-3.5.4 に、塩害を受けた供試体の鉄筋腐食減量率及び塩化物イオン濃度の測定結果を示す。なお、図中には標準偏差の範囲も併記した。

図より、塩化物イオン濃度分布(図中の折れ線グラフ)は、内在供試体は、 $4\text{kg/m}^3 \sim 8\text{kg/m}^3$ 、浸漬供試体は $6\text{kg/m}^3 \sim 10\text{kg/m}^3$ と、上面から下面にかけて同程度の濃度を示した。散布供試体に関しては、上面では約 9kg/m^3 、下面付近では約 1kg/m^3 と、上面から下面に向けて塩分が拡散することで徐々に濃度が減少する傾向を示した。また、いずれの供試体においても鉄筋位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度 1.2kg/m^3 ¹⁵⁾ を大きく上回っていることから、コンクリート中の鉄筋が腐食環境にあることが確認された。鉄筋腐食減量率(図中の棒グラフ)については、各供試体の腐食減量率の平均を示しており、内在供試体は $3\% \sim 6\%$ 、

浸漬供試体は 8%~12%と、塩化物イオン濃度測定結果同様に、上側と下側のそれぞれの鉄筋が同程度の腐食減量率を示した。一方、散布供試体は、上側主鉄筋が約 15%であるのに対して下側主鉄筋が約 6%であり、上面付近の塩化物イオン濃度が高いことで下側よりも上側の鉄筋腐食が促進された結果を示した。この傾向は、バラツキの範囲を踏まえても同様である。また、上側の主鉄筋に着目すると、内在供試体で約 6%、浸漬供試体で約 11%、散布供試体で約 15%であり、内在、浸漬、散布の順でおよそ 5%ずつに腐食減量率が大きくなる結果であった。上下主鉄筋及び配力鉄筋の腐食減量率の平均値に関しては、内在供試体が 4.9%、浸漬供試体が 10.6%、散布供試体が 11.1%と、平均腐食減量率で整理すると浸漬供試体と散布供試体は同程度の腐食状態であった。

このように、塩害促進方法と促進日数を変えることで上下鉄筋の腐食量の大小と、凍結防止剤の侵入を模擬し上側鉄筋を下側鉄筋よりも腐食が進行している状況を供試体に与えることができた。

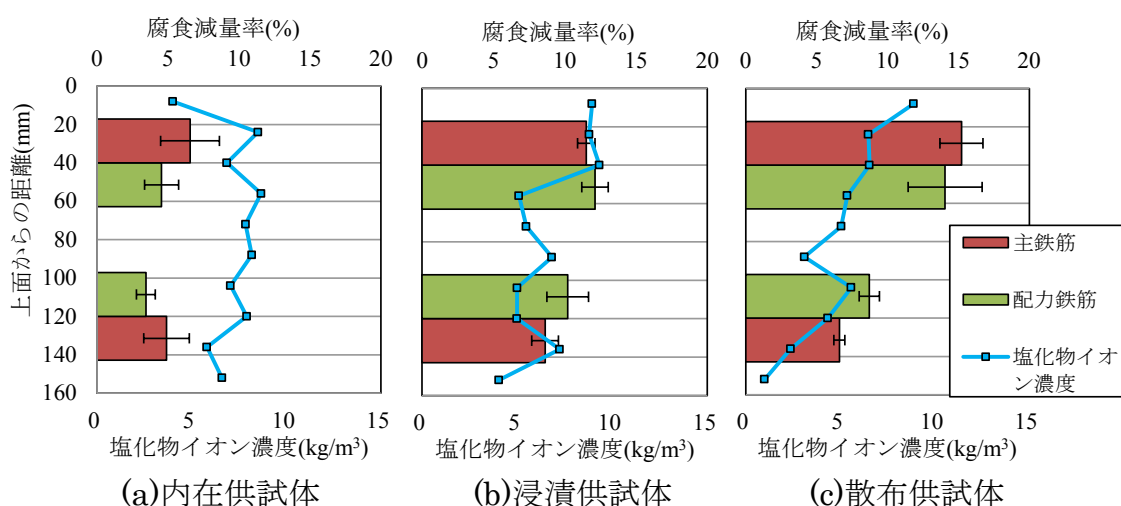


図-3.5.4 塩化物イオン濃度と鉄筋腐食減量率

3.6 輪荷重走行試験による耐疲労性評価

3.6.1 段階载荷による輪荷重走行試験結果

図-3.6.1 に、輪荷重走行試験結果として、段階载荷による载荷荷重と疲労限界状態に達した際の実走行回数との関係を示す。ここで、本研究における疲労限界状態は、活荷重たわみが急増した状態と定義した。さらに、既往の文献⁶⁾を参考として、活荷重たわみが急増した時のひび割れ密度が大凡 14m/m²以上に達していることをひび割れ観察後に確認した。

また、疲労限界状態に至った走行回数は、活荷重たわみが急増する直前に計測

を実施した走行回数とした。なお、輪荷重走行試験は、実験の都合上、健全供試体は床版下面が押抜きに至るまで実験は行なっておらず、疲労限界状態を確認した段階で試験を中断した。その他の供試体については、床版のたわみが大きく、所定の荷重が载荷困難な状況まで試験を継続させた。

図より、健全供試体が実走行回数 41 万 5000 回で疲労限界状態に達したのに対し、内在供試体は 32 万回、浸漬供試体は 25 万 6000 回、散布供試体で 22 万 3000 回と、塩害促進を行った供試体はいずれも健全な供試体よりも早期に疲労限界状態に至る結果であった。

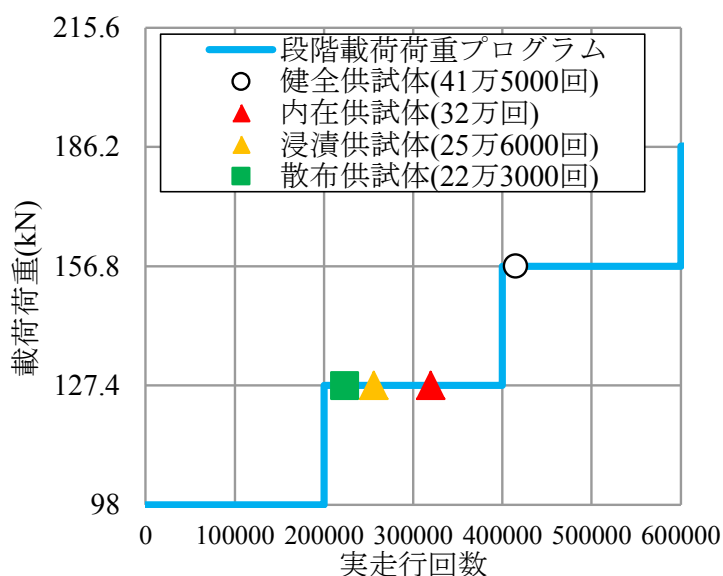


図-3.6.1 载荷荷重-実走行回数

3.6.2 荷重と変位の関係

図-3.6.2 に所定の回数ごとに静的载荷を行った際の基本荷重(本研究では 98kN)と床版中央変位の関係を示す。図より、走行回数 2 回では、健全供試体で 0.86mm、内在供試体で 1.30mm、浸漬供試体で 0.83mm、散布供試体で 0.97mm と、内在供試体で剛性が低い結果を示した。次に、2 回から 10 万回での各供試体の剛性低下は、散布供試体、健全供試体で大きく、内在供試体、浸漬供試体では、剛性の低下は小さい傾向を示した。その後各供試体で徐々に剛性が低下する傾向を示し、疲労限界状態では健全供試体で 2.85mm、内在供試体で 2.3mm、浸漬供試体で 1.87mm、散布供試体で 2.4mm と、浸漬供試体では剛性が大きく低下することなく疲労限界状態に至る結果となった。

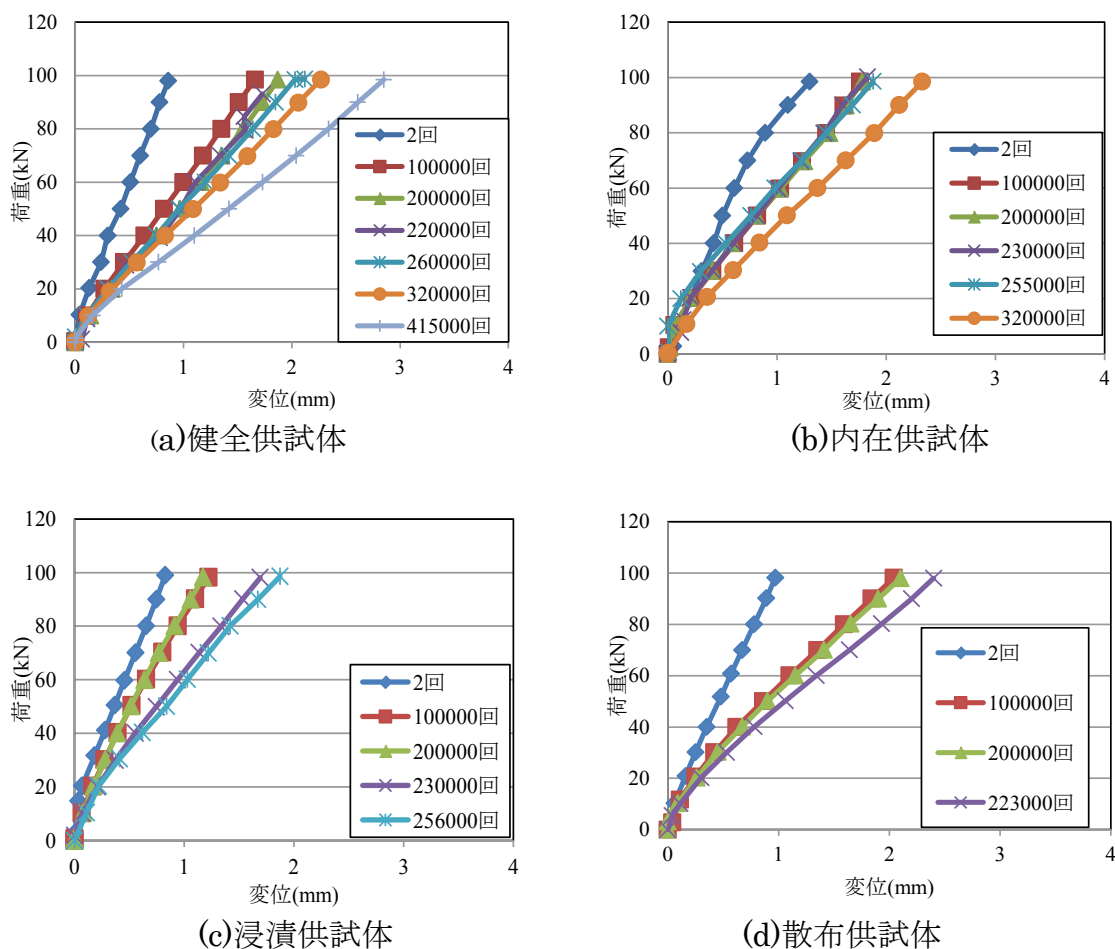


図-3.6.2 載荷荷重-床版中央変位

3.6.3 床版のたわみと等価繰返し走行回数との関係

(1) 活荷重たわみと等価繰返し走行回数との関係

図-3.6.3 に、活荷重たわみと等価繰返し走行回数との関係を示す。なお、図中には疲労限界走行回数を確認した際の、活荷重たわみが急増した点までをプロットしている。また、疲労限界後は、押抜きせん断破壊に至るまでに床版のたわみが急激に増加し、計測が困難であるため、急増の過程を矢印で示した。

図より、試験開始直後の活荷重たわみは、散布供試体と内在供試体で 1mm 程度、健全供試体と浸漬供試体で 0.8mm 程度を示し、初期状態の活荷重たわみに鉄筋の腐食が影響している傾向は認められなかった。しかし、その後の活荷重たわみの増加傾向は、それぞれの供試体で異なった。

まず、健全供試体は、等価繰返し走行回数の増加とともに活荷重たわみも増加する傾向で、活荷重たわみが 2.5mm を超えたところの約 1000 万回で疲労限界状態に達した。これに対して内在供試体の活荷重たわみは、等価繰返し走行回数で約 1 万回までは健全供試体と同様の増加傾向を示したものの、これ以降は同一

等価繰返し走行回数における活荷重たわみが健全供試体を下回り推移する傾向であった。しかし、等価繰返し走行回数が 100 万回を過ぎたあたりから活荷重たわみは急増し、約 360 万回で疲労限界状態に至った。

浸漬供試体の場合は、等価繰返し走行回数 20 万回までは活荷重たわみが一定に推移するような傾向を示し、20 万回を過ぎてから内在供試体同様に活荷重たわみが急増し、内在供試体よりも少ない約 165 万回で疲労限界状態に達した。

一方で散布供試体は、等価繰返し走行回数に対する活荷重たわみの増加量は、健全供試体よりも大きく、疲労限界状態に至るまで終始活荷重たわみが大きく、最終的には本実験条件の中では最も等価繰返し走行回数が少ない約 89 万回で健全供試体同様の増加傾向で疲労限界に至る結果となった。

このように、疲労限界状態に達する等価繰返し走行回数は、健全な RC 床版に比べ、鉄筋が腐食した RC 床版で早期に達する結果を示し、静的耐力では影響が少ないとされる鉄筋腐食減量率が 5%程度の内在水試体でも、耐疲労性には顕著な影響を及ぼすことが確認された。また、活荷重たわみの増加傾向も各塩害供試体で異なる傾向を示しており、平均的な腐食量の大小関係で疲労限界に至る走行回数を評価することが難しいと考えられ、この鉄筋の腐食と疲労限界の関係については後述で詳細に考察する。

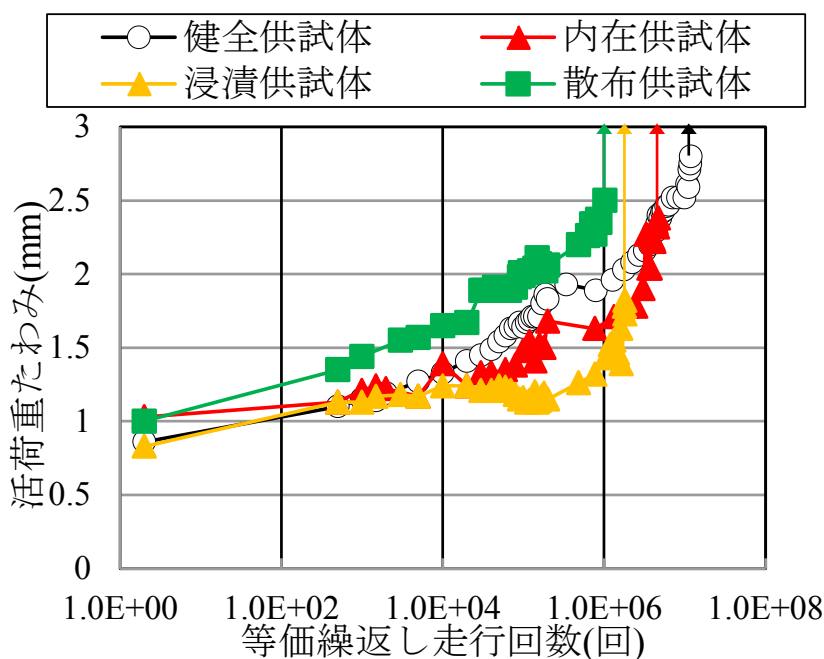


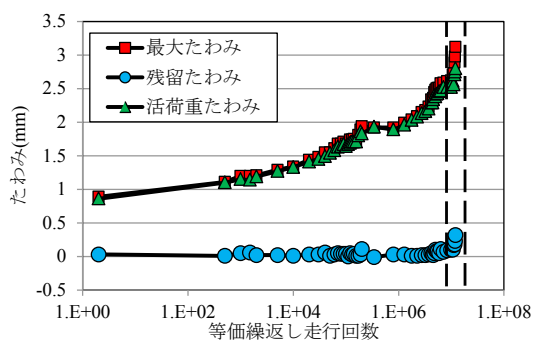
図-3.6.3 活荷重たわみ-等価繰返し走行回数

(2) 最大たわみ及び残留たわみと等価繰返し走行回数との関係

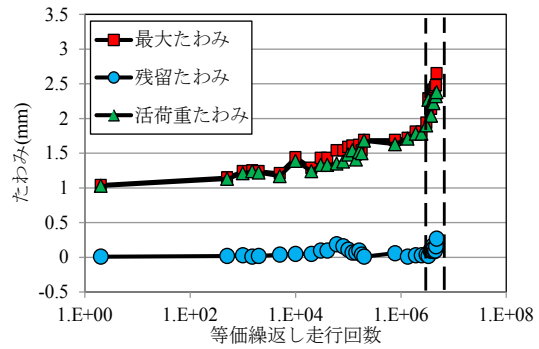
図-3.6.4 に、各供試体の最大たわみと残留たわみ、及び活荷重たわみと等価繰返し走行回数との関係を示す。なお、図中の最大たわみは、規定の走行回数時において基本荷重である 98kN を床版中央に静的載荷した際に発生するたわみ量であり、残留たわみについては、荷重を除荷した際に残留したたわみ量を示している。図より、いずれの供試体においても、疲労限界付近(図中の点線範囲内)までは、残留たわみが概ね 0mm で推移しており、活荷重たわみが最大たわみとほぼ同値で推移していることがわかる。しかし、疲労損傷が進行した疲労限界付近になると、いずれの供試体においても、残留たわみ及び最大たわみが急増する傾向となり、活荷重たわみと最大たわみに差が生じることがわかる。また、疲労限界付近では増加傾向にあった活荷重たわみが一時的に減少する傾向がいずれの供試体においても確認され、この箇所では、最大たわみが低下する一方で、残留たわみは増加する傾向を示している。

ここで、図-3.6.5 に、図-3.6.4 の点線の範囲内をピックアップしたデータの代表例として、健全供試体と散布供試体のデータを示す。なお、図中の赤の点線は、前述した活荷重たわみが一時的に減少する箇所を示している。図より、活荷重たわみが減少する箇所に着目すると、最大たわみは減少する一方で、残留たわみは増加している。また、活荷重たわみが減少した以降では、最大たわみ及び残留たわみともに増加傾向となることがわかる。そして、この段階のたわみの増加分が残留たわみよりも最大たわみのほうが大きいことから、活荷重たわみが急増する傾向になることが示された。

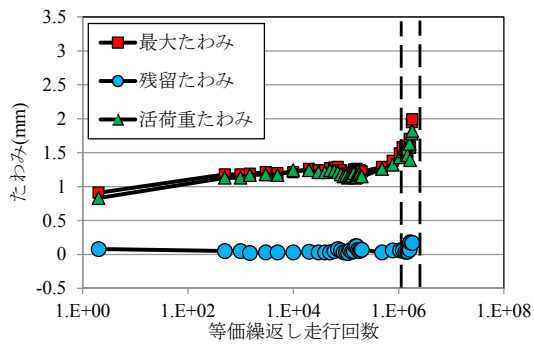
活荷重たわみが疲労限界付近で一時的に減少した要因としては、疲労損傷が進行し、床版にせん断ひび割れが発生した段階で耐荷機構がトラス機構からアーチ機構に移行したことが考えられる。アーチ機構に移行したことで、載荷点と支点を結ぶバイパスのような力の流れが形成され、コンクリートと鉄筋で応力が効率的に分散し、一時的に最大たわみが低下したと考えられる。しかし、疲労試験のように荷重が繰返し作用する場合には、力を受け持つ部分のコンクリートにのみ損傷が蓄積し、その後は急激に疲労損傷が進行したものと考えられる¹⁶⁾。また、最大たわみが減少した一方で、残留たわみが増加したことについては、疲労損傷の進行に伴い塑性変形が進行する段階であった可能性が考えられる。しかし、これらの疲労損傷に伴う耐荷機構の移行を含めた疲労損傷機構については、床版内部のコンクリート及び鉄筋のひずみ変化を疲労損傷の各段階で捉えることが重要であると考えられるが、実験データが少なく、未解明な点が多い。従って、今後は輪荷重走行試験時において、床版内部のひずみデータを定量的に評価する実験をすることで、詳細に検討する必要があると考えられる。



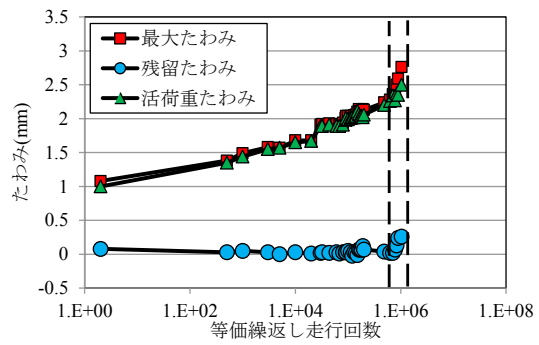
(a) 健全供試体



(b) 内在供試体

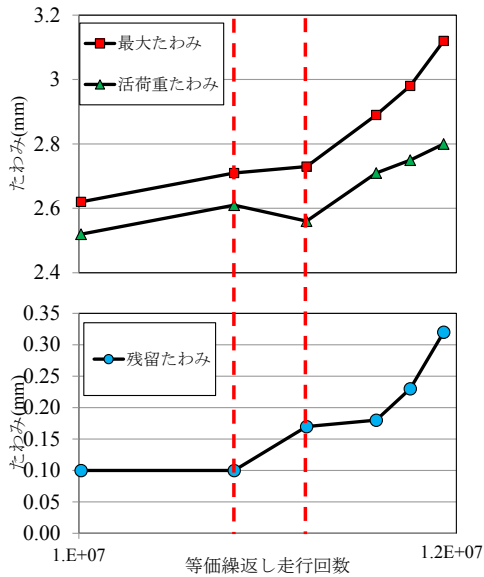


(c) 浸漬供試体

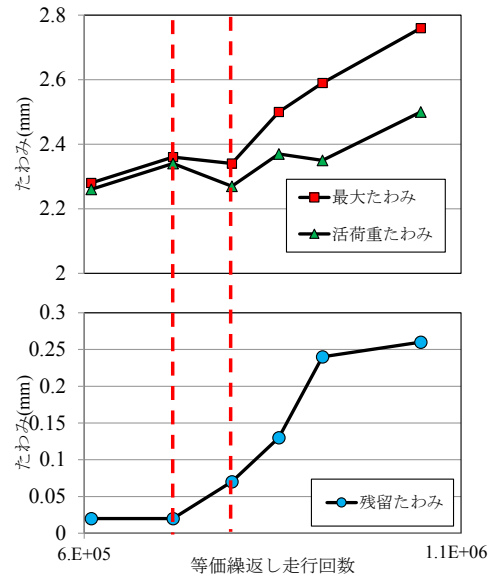


(d) 散布供試体

図-3.6.4 各種たわみと等価繰返し走行回数



(a) 健全供試体



(b) 散布供試体

図-3.6.5 活荷重たわみの低下する区間

3.6.4 ひび割れ発生状況及びひび割れ密度と等価繰返し走行回数との関係

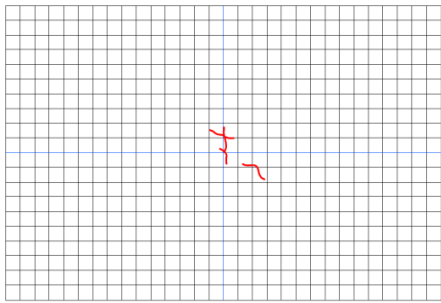
(1) 床版下面におけるひび割れの発生状況

図-3.6.6 から図-3.6.9 に、輪荷重走行試験の初期段階、途中段階と、疲労限界状態時における下面のひび割れの進展状況を示す。図-3.6.7 及び図-3.6.8 には、途中段階の例として等価繰返し走行回数 10 万回時、20 万回時のひび割れ発生状況を示す。なお、図中に示すひび割れ線のうち、青線は輪荷重走行試験前に発生していた腐食ひび割れ(図-3.5.1 から図-3.5.3 参照)、黒線は本論文中に示されるひび割れ図で、1 つ前の段階までに観察されたひび割れ、赤線は括弧内に示す走行回数終了時で新たに観察されたひび割れを示している。

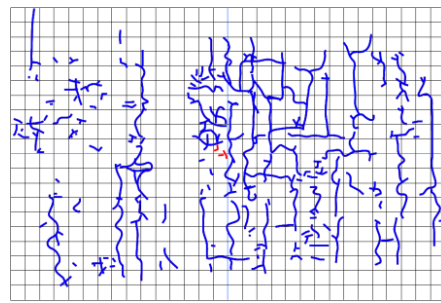
図-3.6.6 より、等価繰返し走行回数 2 回時では、いずれの供試体においても、床版中央付近に短いひび割れの発生が確認された。図-3.6.7 より、等価繰返し走行回数 10 万回時のひび割れを比較すると、健全供試体と散布供試体では、載荷軌道部の直下の領域を中心としてひび割れが概ね軸方向とその直角方向に進展している様子が観察された。内在供試体と浸漬供試体に関しては、疲労によるひび割れが腐食ひび割れから派生するように進展し、健全供試体のように長く連なるようなひび割れの進展にはなっておらず、短いひび割れが分散するような状態であった。

図-3.6.8 より、等価繰返し走行回数 20 万回時でのひび割れは、いずれの供試体においても、10 万回時までに観察されたひび割れを繋ぐように進展する傾向を示した。図-3.6.9 より、疲労限界状態におけるひび割れは、健全供試体の場合、劣化グレード¹⁷⁾における状態 III の劣化期と類似のひび割れ状態を示した。これに対して塩害床版供試体は、短いひび割れが多数発生するという特徴を示し、劣化グレードの状態 III と解釈されたが、ひび割れの毛細化が顕著であった。

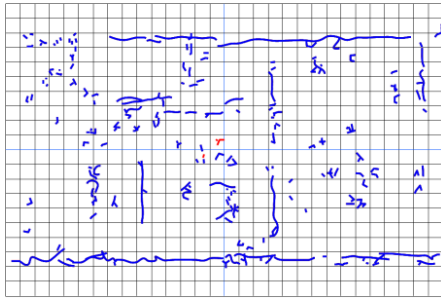
以上より、輪荷重の繰返し載荷により床版下面に発生するひび割れは、輪荷重走行試験前に生じた鉄筋腐食に伴い発生する腐食ひび割れの影響を大きく受け、塩害を受ける供試体でも発生形状が異なった。塩害を受けた RC 床版のうち、腐食ひび割れが発生した内在供試体、浸漬供試体では腐食ひび割れが派生するようにひび割れが進展する傾向を示し、反対に腐食ひび割れの確認されなかった散布供試体では、健全供試体と同様に格子状にひび割れが発生する傾向を示した。



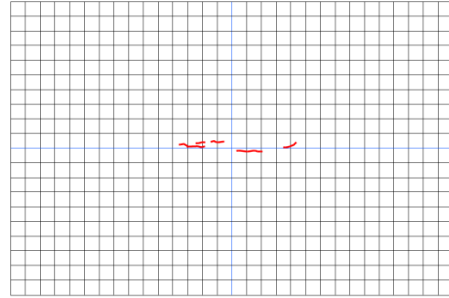
(a)健全供試体



(b)内在供試体

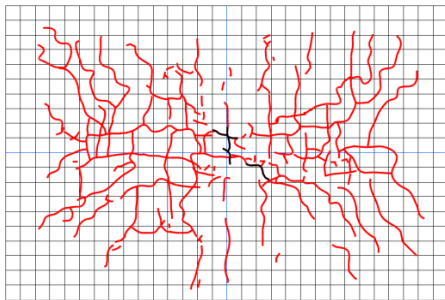


(c)浸漬供試体

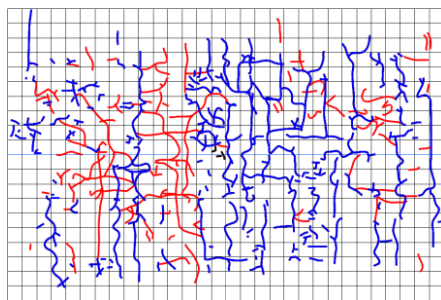


(d)散布供試体

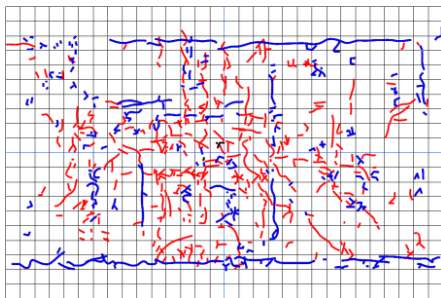
図-3.6.6 供試体下面(2回走行)



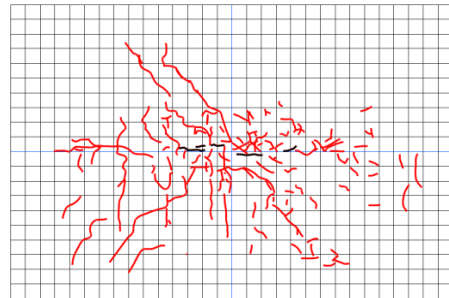
(a)健全供試体



(b)内在供試体

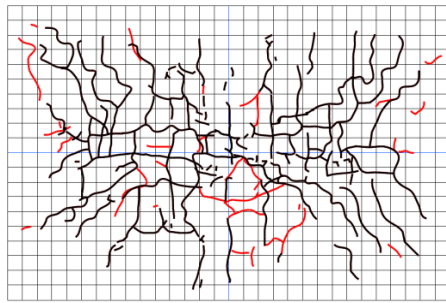


(c)浸漬供試体

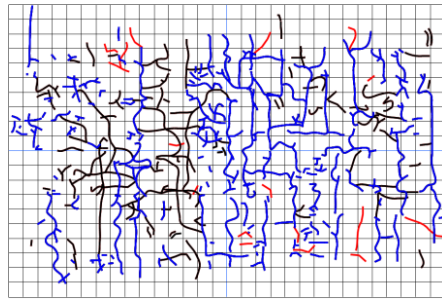


(d)散布供試体

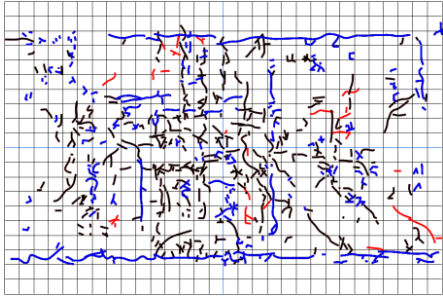
図-3.6.7 供試体下面(10万回走行)



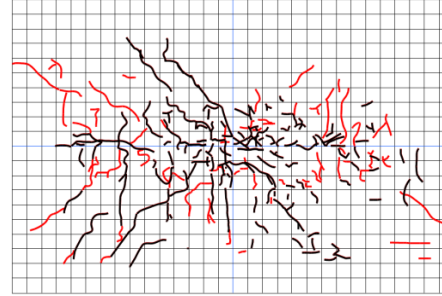
(a)健全供試体



(b)内在供試体

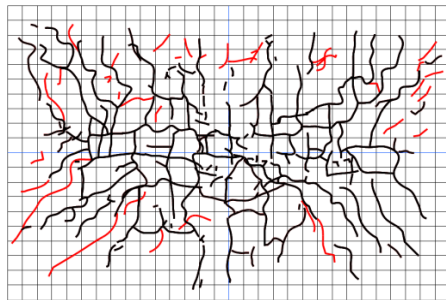


(c)浸漬供試体

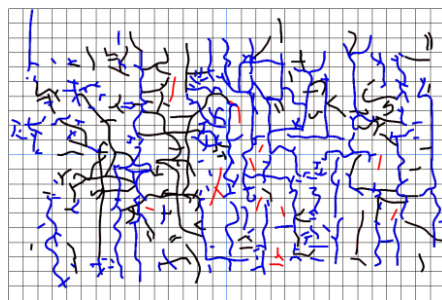


(d)散布供試体

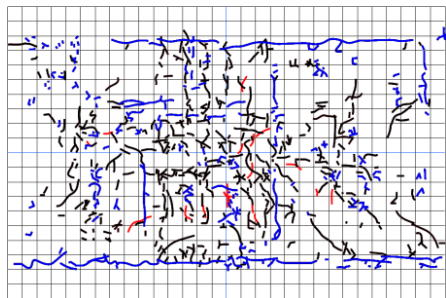
図-3.6.8 供試体下面(20万回走行)



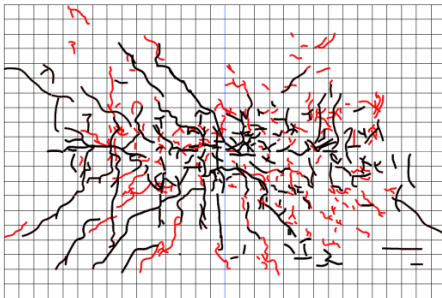
(a)健全供試体(1000万回)



(b)内在供試体(360万回)



(c)浸漬供試体(165万回)



(d)散布供試体(89万回)

図-3.6.9 供試体下面(疲労限界状態時)

(2) ひび割れ密度

図-3.6.10 に、床版下面におけるひび割れ密度と等価繰返し走行回数との関係を示す。図より、輪荷重試験前の腐食ひび割れの密度は、内在供試体が 10.4m^2 、浸漬供試体は 2.36m^2 であった。散布供試体に関しては、前述した通り床版下面には腐食ひび割れは観察されていない。

そして、輪荷重走行試験による疲労で生じたひび割れ密度の増加傾向は、健全供試体では、等価繰返し走行回数の増加に伴い、ひび割れ密度が線形に増加する傾向を示した。これは、既往の研究における健全な RC 床版の輪荷重走行試験結果と同様の結果である。

一方で、塩害を受ける供試体ではひび割れ密度の増加傾向が異なり、内在供試体及び浸漬供試体では、腐食ひび割れによって初期値が異なるものの、走行回数 1000 回までは緩やかな増加区間、その後 10 万回までは急増区間、そして再び緩やかな増加を示し、疲労限界に達した。

一方で、散布供試体では走行回数 5 万回以降から疲労限界に達するまで増加するような傾向を示した。なお、疲労限界状態時のひび割れ密度は、健全供試体が 14.9m^2 、内在供試体が 16.4m^2 、浸漬供試体が 15.2m^2 、散布供試体が 13.1m^2 であり、全ての供試体で概ね 14m^2 であった。

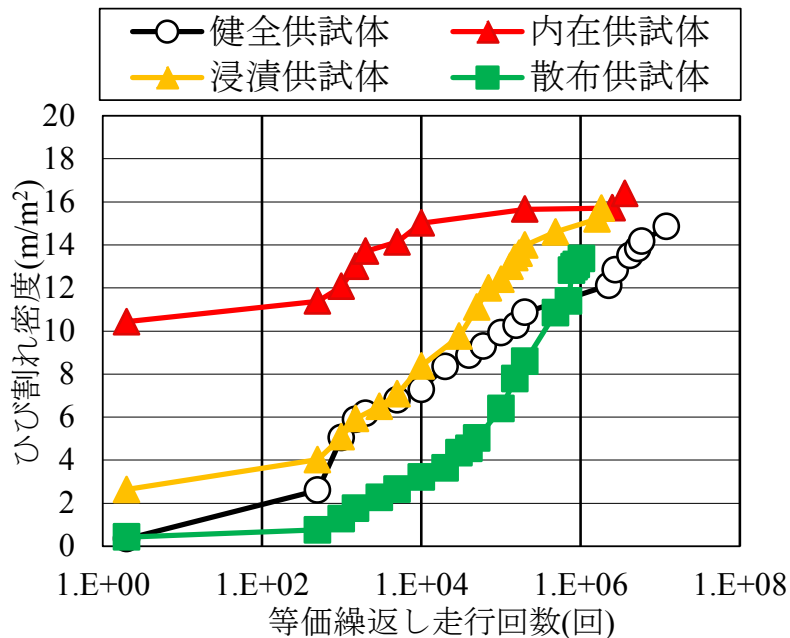


図-3.6.10 ひび割れ密度-等価繰返し走行回数

図-3.6.11 に、活荷重たわみとひび割れ密度の関係を示す。図より、健全供試体は、ひび割れ密度が増加するに従い活荷重たわみも増加しており、床版下面のひび割れで表される疲労損傷が活荷重たわみを増加させる要因であることがわかる。これに対して、内在供試体と浸漬供試体は、腐食ひび割れの量による輪荷重試験前のひび割れ密度の初期値が異なるのみで両者の関係がほぼ一致する傾向を示した。つまり、上側と下側の鉄筋腐食量に明らかな違いがない場合は疲労限界に至る過程が同様であることを示唆するものである。

一方で散布供試体は、ひび割れ密度の増加が小さい载荷初期段階からひび割れ密度の増加に伴う活荷重たわみの増加量が明らかに大きい傾向を示した。すなわち、上側鉄筋が下側よりも明らかに腐食しているような場合では、下面のひび割れ進展状況に基づいた劣化グレード以上に床版の活荷重たわみが大きく、床版の損傷が進行していることを表していると考えられた。これは、積雪寒冷地域で問題になっている床版下面に変状が表れたときには既に床版上面において劣化が顕在化し、床版の疲労損傷が進行している状態と類似する傾向と解釈され、上側鉄筋の腐食が床版の耐疲労性の低下に影響する要因と考えられた。

つまり、凍結防止剤散布環境下にある実 RC 床版については、床版下面に変状が出てからの補修・補強では安全性の確保は難しく、床版上面を定量的に評価することの重要性を示す結果となった。

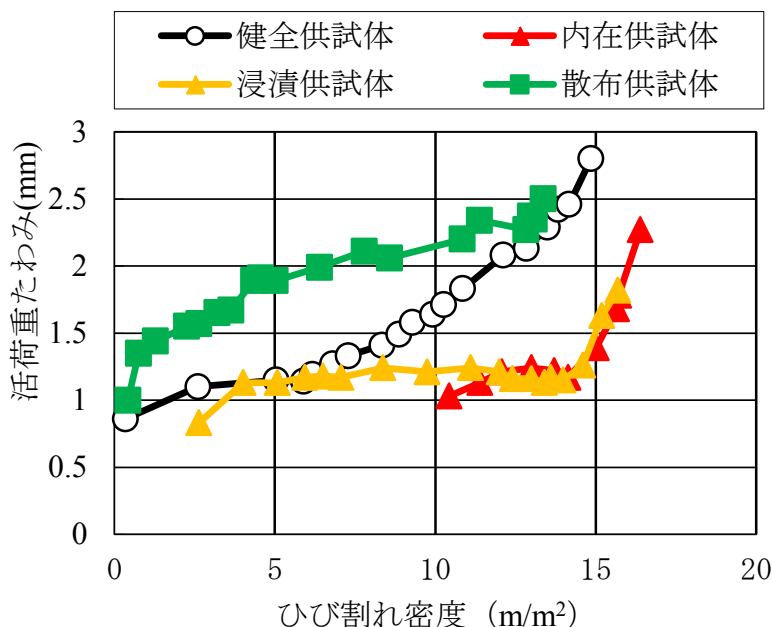


図-3.6.11 活荷重たわみ-ひび割れ密度

3.6.5 断面の損傷状況

図-3.6.12 及び図-3.6.13 に、健全供試体及び塩害を受けた供試体の断面におけるひび割れ状態を示す。図-3.6.12 及び図-3.6.13 より、健全供試体が供試体下面から曲げひび割れが進展しているのに対し、塩害を受けた供試体は、水平ひび割れの進展が見られた。また、塩害を受けた供試体でもひび割れの進展に違いがあり、内在供試体、浸漬供試体では供試体下側におけるひび割れの発生が多く、最も上側主鉄筋の腐食減量率が高い散布供試体では、供試体全延長に明確な水平ひび割れが確認された。これら断面損傷状態の観察より、RC床版の耐疲労性を低下させる要因である水平ひび割れ¹⁸⁾が、鉄筋腐食の影響により、健全なRC床版よりも早期かつ明確に発生したことでRC床版の耐疲労性を低下させることが示唆された。なお、供試体断面の観察後、鉄筋腐食減量試験に用いる鉄筋を採取した際、全ての供試体で鉄筋の破断や降伏には至っておらず、鉄筋の定着は十分に確保されていたことを確認している。

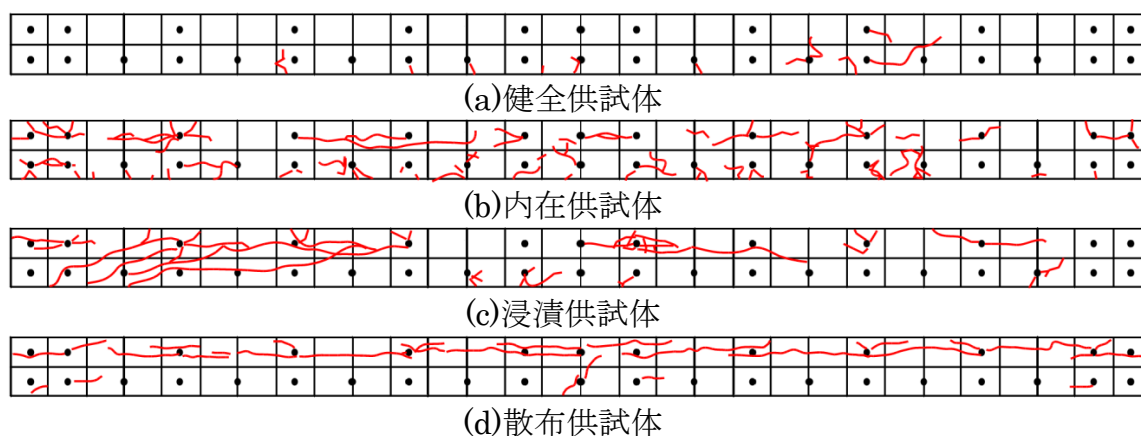


図-3.6.12 橋軸方向断面

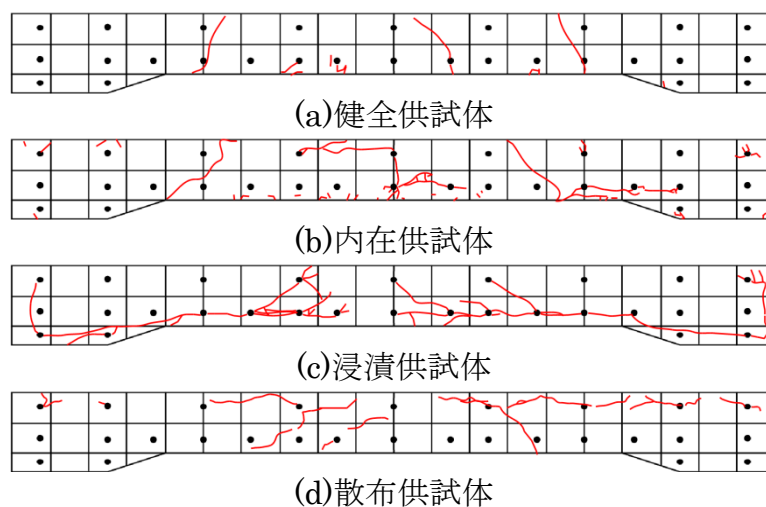


図-3.6.13 橋軸直角方向断面

3.6.6 S-N 関係による耐疲労性評価

図-3.6.14 に、載荷荷重せん断強度比(P/P_{sx})と、RC 床版における S-N 曲線による疲労寿命の理論式との比較を示す。なお、図中には比較のために当研究室で過去に輪荷重走行試験を実施した健全供試体のデータ¹⁹⁾を参考値として示している。S-N 曲線は、松井らの提案する式(3.6.1)により求めた¹⁰⁾。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \cdot \log N + \log 1.52 \quad (3.6.1)$$

ここで P : 載荷荷重(98kN), P_{sx} : 梁状化した RC 床版の押抜きせん断耐力(kN), N : 走行回数である。

図より、健全供試体はほぼ線上にあり、本試験装置を用いた場合においてもこの提案式は、RC 床版の耐疲労性を精度良く予測し得ると判断される。一方、塩害 RC 床版供試体は、いずれも理論式により描かれる S-N 曲線よりも左に位置することから、耐疲労性の低下が確認された。塩害 RC 床版供試体の疲労限界に達した回数と、式(3.6.1)より得られた縦軸と S-N 曲線の交点から得られる推定値を比較してみると、浸漬供試体は 1/9 程度(推定値: 1470 万回, 実験値: 165 万回), 内在供試体は 1/10 程度(推定値: 3580 万回, 実験値: 360 万回), 散布供試体は 1/12 程度(推定値: 1090 万回, 実験値: 89 万回)と、上側鉄筋の腐食減量率が大きくなるにつれ、耐疲労性が低下する傾向を示した。

これより、上側鉄筋の腐食が大きいと、疲労荷重によって鉄筋とコンクリートの付着が急激に低下し、これに起因して水平ひび割れが早期に発生することで著しく耐疲労性が低下するものだと考えられる。つまり、上側鉄筋の腐食の進行は、一般的に静的載荷試験による RC 床版の耐荷力に与える影響は小さいが、RC 床版の耐疲労性については支配的要因となる可能性が示唆された。

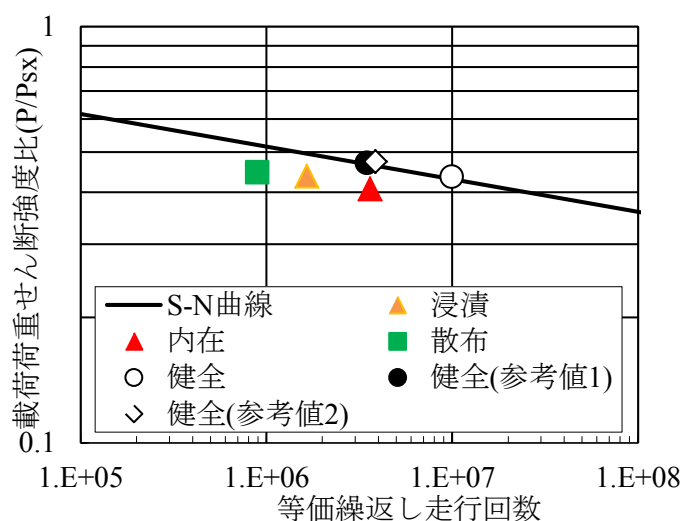


図-3.6.14 S-N 関係

3.7 まとめ

本章では、実際の塩害に近い状態を再現させた実物大 RC 床版供試体による輪荷重走行試験を行い、塩害による鉄筋腐食が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響について実験的に検討した。

本章で得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 長期的な屋外曝露環境下において、乾湿繰返し実験により塩害を促進させた結果、実物大の RC 床版供試体であっても、実環境により近い劣化性状を与えることができた。
- 2) 塩害を受けた供試体は、健全供試体に比べ耐疲労性が低下し、鉄筋腐食減量率 5%程度であっても、輪荷重走行試験により評価される耐疲労性が 1/10 程度にまで低下することが確認された。既往の研究により 5%程度の鉄筋腐食では静的載荷試験により評価されるはりの曲げ耐力がほとんど低下しないことが示されていることを勘案すると、鉄筋腐食に伴い発生する腐食ひび割れが、耐疲労性に及ぼす影響は極めて大きいといえる。
- 3) 凍結防止剤散布を模擬した方法により塩害促進を施した散布供試体におけるひび割れや活荷重たわみの測定結果は、床版下面に変状が表れたときには既に床版上面において劣化が顕在化しているといった、凍結防止剤散布下における実 RC 床版の現象とよく一致した傾向を示した。すなわち、上側鉄筋の腐食が顕在化する場合、床版下面に顕著なひび割れは見られないものの、活荷重たわみは顕著に増加し疲労破壊に至る挙動を示した。
- 4) 鉄筋腐食が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響は下側鉄筋に比べ上側鉄筋の方が大きいことが示唆される結果を示した。これは、上側鉄筋の腐食が大きいと、疲労荷重による鉄筋とコンクリートの間の付着が急激に低下し、これに起因して水平ひび割れが早期に発生することで著しく耐疲労性が低下するためと考えられる。このことから、凍結防止剤散布下において塩害による鉄筋腐食が生じた RC 床版を適切に維持管理していくには、従来の床版下面からの点検のみならず、床版上面の劣化性状を適切に評価することが重要であることが示された。

参考文献

- 1) 西脇敬一, 大屋戸理明, 長谷川雅志, 永岡高: 鉄筋が腐食した RC 梁の疲労性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.783-788, 2002.
- 2) 倉知星人, 佐藤孝史, 小林孝一, 六郷 恵哲: 塩害による鉄筋の性能低下が RC はり部材の耐荷性能に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.820-824, 2008.
- 3) 佐藤孝史, 疋田雅也, 倉知星人, 小林孝一: 電食と塩分による鉄筋の腐食が鉄筋の腐食形状に与える影響の比較, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1063-1068, 2009.
- 4) 高谷哲, 中村士郎, 山本貴士, 宮川豊章: コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.2, pp.154-165, 2013.
- 5) 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.
- 6) 松井繁之: 道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版, 2007.
- 7) 大西弘志, 永田淳, 長屋優子, 鈴木統: クランク式試験装置を用いた道路橋床版の共通輪荷重走行試験, 第 5 回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.31-38, 2006.
- 8) 子田康弘, 斉藤卓也, 岩城一郎: 輪荷重走行試験による材料劣化を受けた道路橋 RC 床版の疲労耐久性評価, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 9 巻, pp.145-150, 2009.
- 9) 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.
- 10) 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, 1996.
- 11) 土木学会: 道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上, 2004.
- 12) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説(鋼橋編), 2002.
- 13) 村上祐貴, 大下英吉, 鈴木修一, 堤知明: 鉄筋腐食した RC 梁部材の残存耐力性状に及ぼすせん断補強筋ならびに定着性能の影響に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.4, pp.631-649, 2008.
- 14) 土木学会: コンクリート技術シリーズ No.71 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, 2006.
- 15) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】, 2008.
- 16) 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

を採る-, 2015.

- 17) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，2008.
- 18) 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強工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.451-456, 2010.
- 19) 前島拓，子田康弘，岩城一郎：融雪剤による塩害を受けた道路橋 RC 床版の疲労耐久性評価，土木学会第 66 回年次学術講演会概要集，V-259, pp.517-518, 2011.

第 4 章

鉄筋腐食が道路橋 RC 床版の 耐疲労性に及ぼす影響に関する 解析的検討

4.1 概説

第3章では、実物大のRC床版供試体を用いた塩害促進試験と輪荷重走行試験に関する考察を行い、上側鉄筋の腐食が耐疲労性に及ぼす影響が大きいことが示されたが、実験では材料強度や腐食減量にばらつきがあり、供試体数も限られている。そこで本章では、鉄筋腐食がたわみの進展に及ぼす影響に関する考察をさらに深めるため、第3章の実験と同一の材料特性のもとで、腐食状況を極端に設定した3次元非線形有限要素解析¹⁾による検討を行った。本解析検討では、腐食の有無、腐食部位、腐食量等をパラメータとした計5ケースとし、実験と同様の段階載荷方式による解析に加え、実験的には時間的制約で試験が困難な一定荷重載荷方式によるパターンも実施した。

4.2 非線形有限要素解析の概要

4.2.1 検討ケース

解析ケースの概要を表-4.2.1に示す。本解析検討では腐食の有無、腐食部位、腐食量等を変化させた計5ケースを実施する。具体的には、1)上下鉄筋ともに腐食のない健全な床版(ケース1)、2)上下鉄筋が一様に5%腐食した床版(ケース2)、3)上側鉄筋のみが一様に5%腐食した床版(ケース3)、4)下側鉄筋のみが一様に5%腐食した床版(ケース4)、5)上側鉄筋が一様に0.2%腐食した床版(ケース5)である。

表-4.2.1 解析ケースの概要

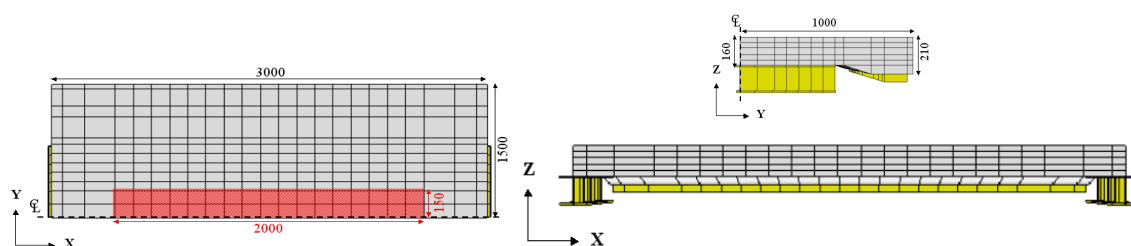
No.	鉄筋腐食	腐食部位	腐食量	腐食ひずみ有効係数	載荷方法
1	なし	---	---	---	段階載荷 と 一定載荷
2	あり	上下両側鉄筋	一様に5%	0.1	
3		上側鉄筋のみ			
4		下側鉄筋のみ			
5		上側鉄筋のみ	一様に0.2%	1.0	

4.2.2 解析モデルの概要

本解析検討では、繰返し載荷時のように主応力状態が変化する際に有効なアクティブクラック法に基づく非直交多方向固定 / 分散ひび割れモデルにより、ひび割れを表現する材料非線形有限要素解析^{1),2)}を適用し、ひび割れを内在する

有限体積に適用される鉄筋コンクリート要素の平面材料構成則モデルに基づく平面モデルを 3 次元に拡張している。コンクリートの高サイクル疲労損傷は、圧縮、引張、ひび割れ面におけるせん断伝達の各モデルの基本構成則レベルで考慮されており³⁾、RC 床版の高サイクル疲労破壊を再現できることが報告されている⁴⁾。

対象とする RC 床版は、実験供試体と同一形状、同一配筋とする。図-4.2.1 に、RC 床版の解析要素モデル図を示す⁵⁾。解析モデルは、走行面で対称性を考慮した 1/2 モデルであり、20 節点アイソパラメトリック要素にてモデル化をし、鉄筋配置に応じた要素の分割をしている。ここで、本解析モデルの要素数は 1,593、解析自由度 24,768 であり、このうち RC 試験体の要素数は 1,472 である。鉄筋位置には RC 要素、それ以外は無鉄筋コンクリートを適用し、それぞれの要素には *Tension Stiffening* 効果を考慮した。なお、床版主対象部は、鉛直方向に 5 層に分割しており、上下 2 層に水平 2 方向の鉄筋が配置されている。また、床版を支持する鋼材は弾性要素(図中の黄色着色部)とした。支持条件は、輪荷重走行試験と同じとし、長辺の単純支持はピン支承としてモデル化をし、短辺の弾性支持については、支持版を床版に剛結してモデル化した。材料特性はすべてのケースにおいて共通とし、コンクリートは圧縮強度 30.0N/mm^2 、引張強度 1.33N/mm^2 、ヤング係数 28.0kN/mm^2 、ポアソン比 0.167、鉄筋はヤング係数 200.0kN/mm^2 、降伏強度 345N/mm^2 とした。



※赤ハッチ部が走行範囲，黄色着色部が鋼材(弾性要素)

図-4.2.1 床版の解析モデル

荷重条件は、第 3 章の輪荷重走行試験における段階載荷を模擬し、98 kN から載荷を始め、215.6 kN まで 20 万回毎に 29.4 kN ずつ増加させるパターンと、98 kN で一定の荷重を保持し続けるパターンの 2 通りとする。特に後者については、実験で再現することは一般に困難であり、段階載荷のような促進載荷を余儀なくされているが、対数積分法⁶⁾を導入している数値解析では比較的容易に結果を得ることが可能である。

4.2.3 解析手順

解析手順は、初期段階に腐食部位で鉄筋腐食を考慮し、その後、疲労載荷シミ

ュレーションを実施する。鉄筋腐食に関しては、本来であれば微視的な観点からモデル化と要素分割を行い、コンクリートの水分状態や特に鉄筋周りの品質、腐食反応過程における時間依存性挙動⁷⁾、生成物の空間的な分布⁸⁾と種類⁹⁾、ひび割れからの腐食生成物の析出等を適切に考慮することが必要となる。ただし、本稿では腐食状況、特に腐食鉄筋の部位が床版の疲労応答に及ぼす影響を現実的な計算時間と労力により把握することに主眼を置き、既往の健全な状態を対象とする場合と同様の図-4.2.1の要素分割を行った上で、定着は十分に確保されている前提の下、簡易的に鉄筋腐食を扱う。コンクリートのクリープや収縮は、構造応答を評価する際に直接考慮していない。この場合、設定条件により腐食部位を特定しているが、そこに存在する全ての鉄筋は全断面、全長にわたって一様に腐食するとしていることと等価であり、各鉄筋の腐食分布を仮定するものではない。実験においても確認されたように、実際には孔食等の局所的な腐食が発生する。これについては、より詳細かつ微視的な観点からの解析的アプローチに基づく今後の検討課題としたい。

静的および高サイクル繰返し载荷を受ける、鉄筋が腐食した RC 部材に対する 3 次元解析の検証は今後も行っていく必要があるが、腐食のモデル化は *Toongoenthong and Maekawa*^{10),11)}の研究に基づいて、腐食減量率に応じた腐食減量と腐食に伴うひずみ(以下、「腐食ひずみ」と称する)を考慮して行う。腐食ひずみは、腐食によって鉄筋が膨張し、コンクリートに引張ひび割れが導入されることを模擬するものである。その際、数%以上と腐食減量率が大きい場合、上述の条件下では腐食ひずみが過大となり、耐荷力と剛性が過小に評価されてしまう。コンクリートの時間依存性挙動や腐食生成物のひび割れからの析出を考慮しておらず、比較的粗い要素分割のもとで一様な腐食を仮定していることなどによるものである。そこで、既往の鉄筋腐食を生じさせた床版部材の静的载荷実験結果と感度解析とを比較することで有効係数の予備検討を行った。その結果、腐食量を単純に入力する場合では、前述したように腐食ひずみが過大となり、耐荷力と剛性が過小に評価される結果を示したが、有効係数を 0.1 とすることで実験結果の耐荷力及び剛性を精度よく評価し得ることが明らかとなった。そこで予備検討結果と、第 3 章の乾湿の繰返しによって腐食させた実験時のひび割れ状況も勘案しつつ、表-4.2.1 のように腐食ひずみに対する有効係数を設定することとした。鉄筋の断面欠損は要素鉄筋比において考慮しつつ、モデル化を簡略化している点を踏まえ、腐食ひずみが過大にならないように配慮するものである。なお、腐食減量率が小さいケース 5 では有効係数を 1.0 とし、上側鉄筋に沿うひび割れが初期に導入され、腐食ひずみの影響が最大限現れる条件としている。瞬間的に、鉄筋を一様に腐食膨張させた場合に相当する。

一例として、ケース 2 の腐食考慮後(繰返し载荷前)のひずみコンター図を図-

4.2.2 に示す。橋軸直角方向のひび割れに対応する ϵ_{xx} については、上下面の広い範囲で数百 μ のひずみが確認でき、橋軸方向のひび割れに対応する ϵ_{yy} については、上面では外側、下面では内側でひび割れが発生していると判断される(図の緑色着色部)。大まかには、内在供試体の載荷前の状況(図-3.5.1)と類似していると言える。一方、鉛直方向ひずみ ϵ_{zz} については、水平2方向の鉄筋が配置されている上下2層で大きめのひずみが確認でき、最大 $2000\mu(0.2\%)$ 程度のひずみとなっており、他の2方向よりも1オーダー大きな値となっている。以上は、床版の形状と配筋諸元によりもたらされるものであるが、外観調査からは確認が難しい内部で水平方向のひび割れが生じる高い可能性があることは注目に値する。

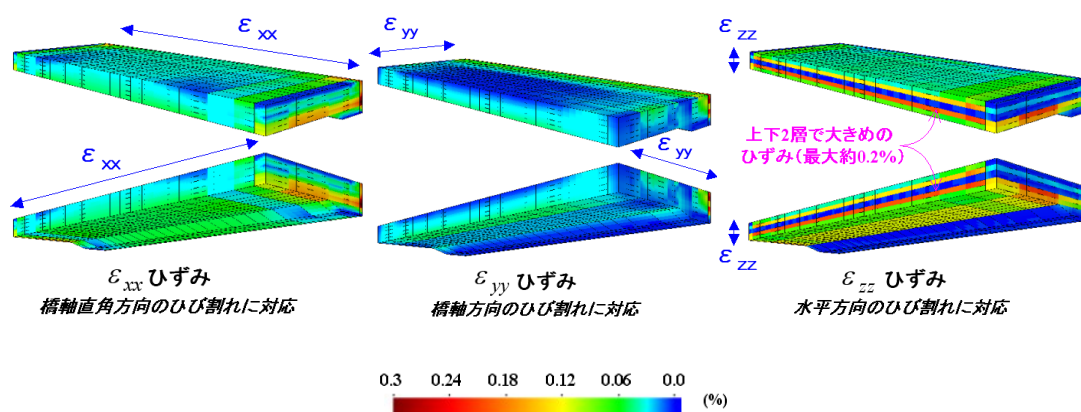


図-4.2.2 腐食後&載荷前のひずみコンター図(ケース 2)

4.3 解析結果

4.3.1 段階載荷および一定載荷による解析

図-4.3.1 に、2つの載荷パターンによる床版中央下面のたわみの進展と走行回数との関係を示す。たわみには、腐食後(ケース1を除く)かつ載荷前をゼロとし、各載荷回数時の最大値をプロットしている。段階載荷の等価繰返し走行回数は、実験と同様に等価繰返し走行回数に換算しており、たわみ値には荷重増加による成分も含まれている。図より、いずれの載荷方法においても、ケース2<ケース3<ケース4<ケース5<ケース1の順に疲労寿命が長くなっていることが分かる。腐食なしのケース1が最も寿命が長く、上下両側の鉄筋が腐食しているケース2で最も寿命が短くなっていることから、解析においても腐食が生じている場合には顕著に疲労寿命が低下していると言える。特に、腐食減量率が同じで、腐食部位が異なるケース3とケース4を比較すると、当初のたわみは下側鉄筋のみが腐食しているケース4の方が大きくなるものの、載荷が進むにつれ

て、上側鉄筋のみが腐食しているケース 3 の方が大きくなる逆転現象が確認され、腐食部位が床版の耐疲労性に及ぼす影響が、明確に現れている。

また、腐食部位が同じで、腐食減量率と腐食ひずみを変化させたケース 3 とケース 5 を比較すると、腐食の進んだケース 3 でたわみが大きい。ただし、静的耐荷力にはほとんど影響がないと想定される 0.2% の腐食減量率であっても、本研究で設定した条件下においては、疲労寿命には無視できない程度の影響が現れており、腐食による初期のひび割れ状態が耐疲労性に大きな影響を及ぼしていることが示唆される。また、段階载荷と一定载荷を比較すると、腐食の影響度合に対する感度が多少異なっており、今後の詳細な検討が必要であるが、定性的な挙動は良く一致していることが分かる。なお、腐食減量率 5% 程度では、たわみが急増するよりも前に、鉄筋の曲げ降伏が進展することはなかった。

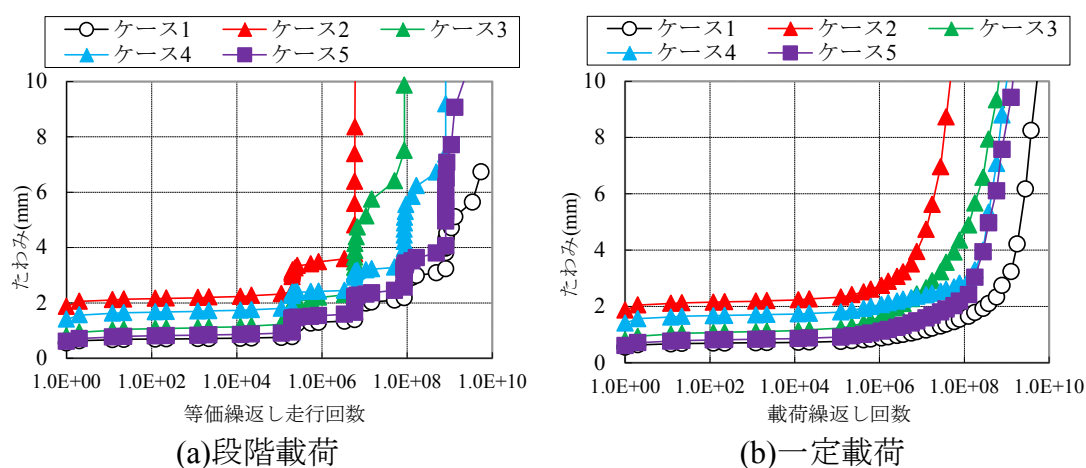


図-4.3.1 たわみの進展結果

4.3.2 ひずみコンター図による損傷度評価

図-4.3.2 に、スパン中央に輪荷重を載荷した時のひずみコンター図を示す。ここでは、単純に繰返しの影響のみを受ける一定载荷のケースから選定することとし、水平ひび割れに着目して、鉛直方向ひずみ ε_{zz} コンター図を示している。図より、腐食のないケース 1 では、繰返し载荷によって、上側鉄筋位置におけるひずみが増大し、橋軸直角方向断面の斜め方向のひび割れと結びつくことで破壊に至っている。これは、既往の輪荷重走行試験により破壊に至った RC 床版の実験事実¹²⁾と合致する。なお、解析における水平方向のひび割れは、载荷繰返し回数が 1000 万回を超えたところから徐々に発生していくことを、別途確認している。鉄筋が腐食したケース(ケース 2 からケース 5)については、腐食部位及び腐食量の違いに依らず、上側鉄筋位置におけるひずみが増大することで疲労破壊に至っている。特に、上側鉄筋が腐食しているケース 2、ケース 3、ケース

5では、走行試験前に発生した腐食ひび割れの影響により、上側鉄筋位置における鉛直方向のひずみ量が早期に増大しており、中でもケース2及びケース3では、最終的に上側表層コンクリートの一体性の喪失にも繋がり、応力を負担できなくなっているものと捉えることができる。また、下側鉄筋の腐食したケースでは、腐食ひび割れが繰返し载荷に伴う損傷と破壊に対する直接の影響は少ないと言え、部材剛性が低下することによって応力振幅が大きくなり、疲労寿命を低下させているものと推察された。

以上より、上側鉄筋が腐食したケースでは、腐食に伴い発生する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することで、上側鉄筋位置におけるひずみが早期に増大し、重ね梁のような状態となることで耐疲労性を著しく低下させることが推察された。

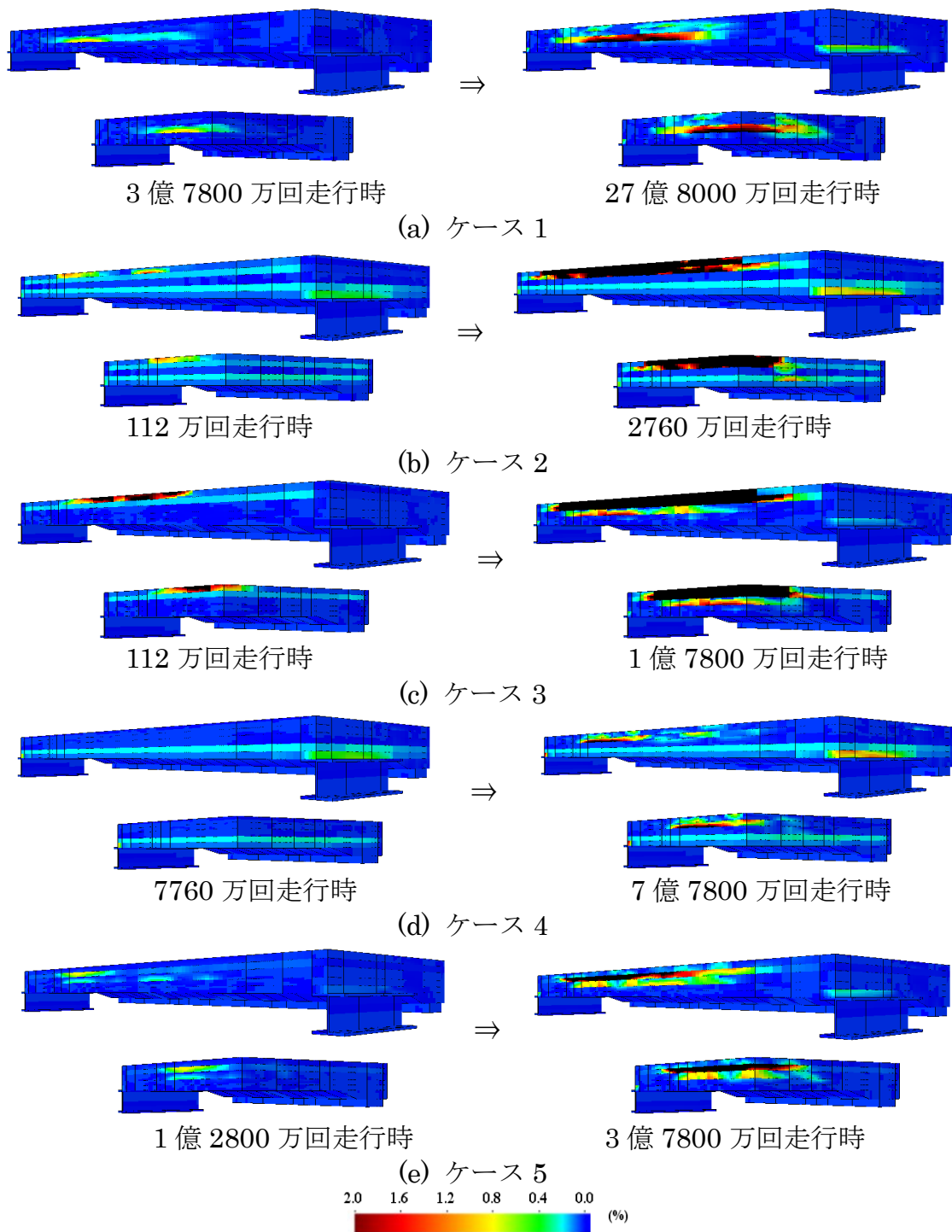


図-4.3.2 鉛直ひずみコンター図(1/2 モデルおよび橋軸直角方向分割モデル)

4.4 まとめ

本章では，腐食状況を極端に設定した 3 次元非線形有限要素解析による検討を行った。

得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 腐食状況を変化させた 3 次元非線形有限要素解析により，簡略的なモデル化を行っているものの，影響因子に応じたたわみの進展を解析的に捉えることが可能であり，第 3 章で述べた実験結果と同様に，下側鉄筋が腐食したケースよりも上側鉄筋の腐食が進行したケースで疲労寿命が低下するといった現象を解析的に推定することができた。このことから，鉄筋の腐食が RC 床版の耐疲労性に与える影響については，単に腐食量だけでなく，腐食部位や腐食によるひび割れ状態の影響が非常に大きいことが明らかとなった。
- 2) 上側鉄筋が腐食したケースでは，腐食に伴い発生する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することで，上側鉄筋位置における鉛直ひずみが輪荷重の繰返し作用により早期に増大し，重ね梁のような状態となることで耐疲労性が低下することが示された。

参考文献

- 1) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H. : Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON Press, 2003.
- 2) Maekawa, K. Ishida, T. and Kishi, T. : Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor and Francis, 2008.
- 3) 藤山知加子, 商峰, 櫻井信彰, 前川宏一 : 直接経路積分法に基づく鋼コンクリート合成床版の疲労寿命推定と損傷モード, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.1, pp.106-116, 2010.
- 4) Maekawa, K., Gebreyouhannes, E., Mishima, T. and An, X. : Three-dimensional fatigue simulation of RC slabs under traveling wheel-type loads, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.3, pp.445-457, 2006.
- 5) 子田康弘, 松本健一, 山岸宏, 土屋智史, 岩城一郎 : 収縮抑制型超速硬鋼繊維補強コンクリートを用いて部分打替えを行った道路橋 RC 床版の性能評価, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.852-865, 2013.
- 6) Maekawa, K., Toongoenthong, K., Gebreyouhannes, E. and Kishi, T. : Direct path-integral scheme for fatigue simulation of reinforced concrete in shear, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.1, pp.159-177, 2006.
- 7) Shibata, K., Honma, S., Chijiwa, N. and Maekawa, K. : Analytical evaluation on structural seismic performance of corroded RC columns subjected to higher axial compression, EASEC-13, Sapporo, Japan, Sep. 2013.
- 8) 斉藤成彦, 高橋良輔, 檜貝勇 : 鉄筋の腐食分布が RC はり部材の曲げ耐荷性状に及ぼす影響, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.4, pp.601-611, 2008.
- 9) 高谷哲, 中村士郎, 山本貴士, 宮川豊章 : コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.2, pp.154-165, 2013.
- 10) Toongoenthong, K. and Maekawa, K. : Multi-mechanical approach to structural performance assessment of corroded RC members in shear, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.3, No.1, pp.107-122, 2005.
- 11) Toongoenthong, K. and Maekawa, K. : Simulation of coupled corrosive product formation, migration into crack and propagation in reinforced concrete sections, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.3, No.1, pp.107-122, 2005.
- 12) 子田康弘, 斉藤卓也, 岩城一郎 : 輪荷重走行試験による材料劣化を受けた道路橋 RC 床版の疲労耐久性評価, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第9巻, pp.145-150, 2009.

第 5 章

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

5.1 概説

近年、凍結防止剤散布の影響により、ASR による劣化を受ける RC 床版が増加しつつある。RC 床版では、主鉄筋及び配力鉄筋方向以外の鉄筋拘束がないため、ASR が生じた場合では床版厚さ方向に大きな膨張が生じ、これが床版の構造性能に大きな影響を及ぼすと考えられる¹⁾。そのため、ASR が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響を究明し、これに立脚した構造物の維持管理方法を構築することが急務となっている。

そこで本章では、材料劣化のうち ASR を取り上げ、これが RC 床版の耐疲労性に与える影響を実験的に検討した。まず反応性粗骨材を使用して作製した実物大に近い RC 床版に対して、環境条件の異なる ASR 促進を実施することで、ASR によるコンクリートの膨張速度及び損傷状況を変化させた。そして、ASR による劣化を受けた RC 床版供試体による輪荷重走行試験より、ASR によるコンクリートの劣化を受けた RC 床版の耐疲労性を評価した。

5.2 供試体の概要

5.2.1 実験条件

表-5.2.1 に実験条件を示す。本研究では、ASR が RC 床版の耐疲労性に与える影響を検討するため、同一材料・配合で作製した RC 床版供試体に対し、高温高湿度環境下において ASR によるコンクリートの膨張を早期に促進させる試験(以下、急速試験)と、屋外曝露環境下において比較的緩やかに ASR を促進させる試験(以下、緩速試験)といった 2 種類の促進試験²⁾を実施した。また、急速試験では試験期間を変更することで、ASR によるコンクリートの劣化程度に差をつけた。さらに、輪荷重走行試験時における水張りの有無を実験条件として加えた計 4 条件を実験条件とした。

具体的には、1) 本実験の基準となる、ASR 促進を行わない健全相当の RC 床版供試体(以下、N-d)と、2) ASR が、耐疲労性に与える影響を確認するため、急速試験を 41 日間実施した RC 床版供試体(以下、R-d)、3) 急速試験を 59 日間実施することで ASR の劣化度を R-d よりも進展させ、さらに ASR により発生したひび割れに水が侵入することで、耐疲労性を急激に低下させることを想定して、輪荷重走行試験時に床版上面に真水を湛水させる水張り試験を実施した RC 床版供試体(以下、R-w)、4) ASR を緩やかに進行させるため、260 日間の緩速試験を実施し、さらに R-w 同様に走行試験時に水張りを行った RC 床版供試体(以下、S-w)の計 4 条件である。

表-5.2.1 実験条件

供試体	ASR 促進		輪荷重走行試験	
	急速試験 Rapidly	緩速試験 Slowly	乾燥 dry	水張り water
N-d	×	×	○	×
R-d	○	×	○	×
R-w	○	×	×	○
S-w	×	○	×	○

5.2.2 供試体形状

図-5.2.1 に、供試体形状を示す。なお、図中には鉄筋ひずみゲージ及び埋込み型ひずみ計の位置を併記している。図より、供試体は 3,000mm×2,000mm×160mm の複鉄筋 RC 床版であり、第 3 章で作製した供試体と同構造である。鉄筋ひずみゲージは、床版中央に加え、床版中央より橋軸方向に 900mm の位置で鉄筋のリブに貼付した。また、鉄筋により拘束される方向と自由膨張方向におけるコンクリートの膨張挙動を評価するため、橋軸方向(以下、x 方向)、橋軸直角方向(以下、y 方向)、鉛直方向(以下、z 方向)の各コンクリートひずみを計測するものとし、各床版中央位置で 3 方向に埋込型ひずみ計((株)東京測器研究所製：KM-100BT)を埋設し、R-d 及び R-w については床版端部付近にも同様にひずみ計を埋設した(写真-5.2.1)。

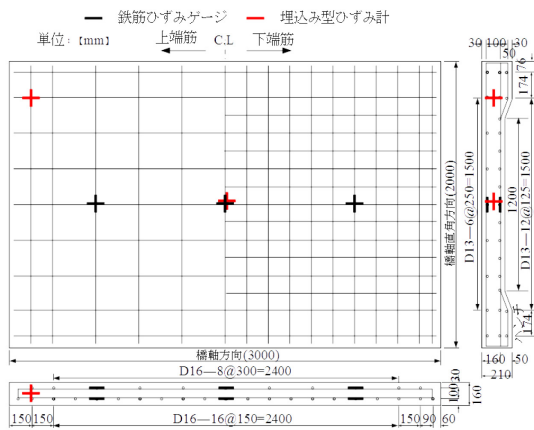


図-5.2.1 供試体形状



写真-5.2.1 埋込みゲージ

5.2.3 コンクリートの配合及び材料特性

表-5.2.2 に、コンクリートの示方配合を示す。コンクリートはレディーミクストコンクリートであり、水セメント比を 65%とした。使用材料については、C：普通ポルトランドセメント，S1：硬質砂岩 砕砂(化学法で無害と判定)，S2：花崗岩 砕砂(化学法で無害と判定)，粗骨材には安山岩 砕石(化学法，モルタルバー法ともに無害でないと判定)を使用した。また，ASR を促すことを目的に NaCl を製造時に 18.9kg/m³(Na₂O 当量で 10kg/m³)を外割で添加した。なお，本実験で使用するコンクリートと同一材料・配合により作製した φ100mm×200mm の円柱供試体の 3 本について，デンマーク法による膨張量試験を実施した結果，促進後 3 か月で膨張量が 6000μ に達しており，デンマーク法による残存膨張性の判断基準とされる 4000μ に比して大きな膨張量であることを確認している³⁾。

表-5.2.2 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法	スラップ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤(C×%)		NaCl (kg/m ³)
					W	C	S1	S2	G	AD	AE	
20	12.0	4.3	65.0	45.0	175	269	413	405	1032	0.16	4.04	18.9

表-5.2.3 に、各床版の材齢 28 日まで標準養生を行った φ100mm×200mm のテストピースにおける圧縮強度とヤング係数を示す。表より，N-d で圧縮強度 22.8MPa，ヤング係数 28.0GPa，R-d 及び R-w で圧縮強度 27.4MPa，ヤング係数 28.5GPa，S-w では圧縮強度 25.1MPa，ヤング係数 29.6GPa と，バッチ間による差が生じたものの，いずれも設計基準強度 18MPa を満足する結果を示した。

表-5.2.4 に、使用した鉄筋の物性を示す。使用鉄筋は，全供試体共通で SD295A を使用し，主鉄筋(D16)は降伏強度が 358MPa，引張強度が 527MPa であり，配力鉄筋(D13)は降伏強度が 338MPa，引張強度が 488MPa であった。

表-5.2.3 コンクリートの物性

バッチ No.	供試体	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
1	N-d	22.8	28.0
2	R-d	27.4	28.5
	R-w		
3	S-w	25.1	29.6

表-5.2.4 鉄筋の物性

使用鉄筋	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	降伏ひずみ (μ)
主鉄筋 (D16)	358	527	198	1835
配力鉄筋 (D13)	338	488	193	1826

5.3 ASR 促進試験及び輪荷重走行試験の概要

5.3.1 ASR 促進試験の概要

(1) ASR 促進方法

本研究では前述の通り、ASR が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響について検討するため、環境条件の異なる 2 条件の促進試験を行った。

まず、急速試験では、ASR によるコンクリートの膨張を急激に促進させるため、任意の温湿度で制御可能な大型環境試験装置⁴⁾(写真-5.3.1)を用いて、槽内温度 50°C、相対湿度 80%の一定環境下において飽和 NaCl(濃度 24%程度)水溶液を床版上面に湛水させることで実施した(写真-5.3.2)。なお、床版上面以外の 5 面には防水シートを貼付し、塩化物イオンの供給を床版上面に限定した。また、圧縮強度試験に用いる円柱供試体($\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$)については、同温湿度環境下での封かん養生とした。

次に、緩速試験では、実験が長期に渡ることを想定し、ASR を緩やかに促進させつつ鉄筋の腐食を抑制するため、福島県郡山市の日本大学構内にある水槽を用いて、5%NaCl 水溶液中に供試体を浸漬させた(写真-5.3.3)。また、緩速試験の際、圧縮強度試験用供試体は側面に養生シートを貼付し、5%NaCl 水溶液中に浸漬させた。なお、各養生期間途中での ASR による床版の劣化度は、鉄筋及びコンクリートの膨張ひずみの計測と、床版上面に発生するひび割れの観察により判定した。



写真-5.3.1 大型環境試験装置



写真-5.3.2 急速試験状況



写真-5.3.3 緩速試験状況

(2) 各床版の ASR 促進及び養生期間

図-5.3.1 に実験経過を示す。ここで、本実験の ASR 促進試験及び輪荷重走行試験、各種養生の期間は、後述する ASR によるコンクリートの膨張量、および輪荷重走行試験装置の載荷試験工程より決定した。図より、N-d では材齢 28 日まで湿布養生を行い、その後、輪荷重走行試験を実施した。次に、R-d では、28 日間の湿布養生後、急速試験を 41 日間行った。その後、輪荷重走行試験準備期間において鉄筋腐食を抑制する措置として、床版上面への真水の湛水(真水湛水養生)及び湿布養生を 27 日間行い、輪荷重走行試験を実施した。R-w では、材齢 9 日までの湿布養生後、R-d の急速試験が終了するまでの期間中において緩速試験を実施することで、鉄筋腐食を抑制させつつ緩やかに ASR を促進させた。その後、後述する ASR によるコンクリートの膨張が比較的小さな段階で急速試験に移行した。また、急速試験は、R-d よりも 18 日長い 59 日間行い、20 日間の真水湛水養生及び湿布養生後、輪荷重走行試験を実施した。S-w では、9 日間の湿布養生後、260 日間の緩速試験を実施した。なお、S-w では、後述するコンクリート及び鉄筋のひずみ増加量が R-d 及び R-w よりも緩慢であり、ひずみを統一するには、実験が大幅に長期化するため、床版上面におけるひび割れの発生状況

が目視上で R-d, R-w と同程度となった段階で緩速試験を終了した。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，139 日間真水に浸漬させることで ASR の発生及び鉄筋の腐食を可能な限り抑制した。

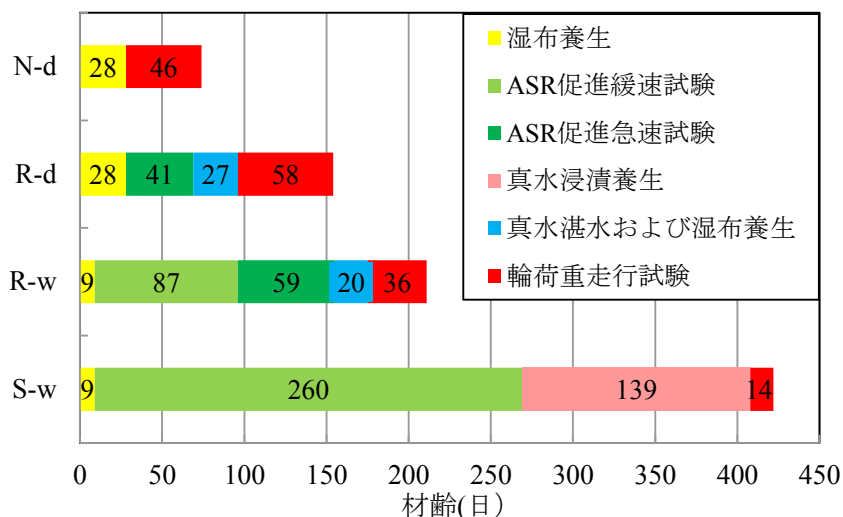


図-5.3.1 実験経過図

5.3.2 輪荷重走行試験の概要

(1) 載荷プログラム

ASR 促進後の RC 床版に疲労を与える手段として，第 3 章で示した輪荷重走行試験装置を用いた。使用した実験装置及び，試験方法，計測項目については，基本的には 3.2 に準じているが，実験時における載荷プログラムが異なる。

図-5.3.2 に，本章における載荷プログラムを示す。図より，本章では，98kN(10tf)を基本荷重とし，走行回数が 10 万回，20 万回，25 万回に達した際に，載荷荷重を 29.4kN ずつ増加させる段階載荷方式により実施した。

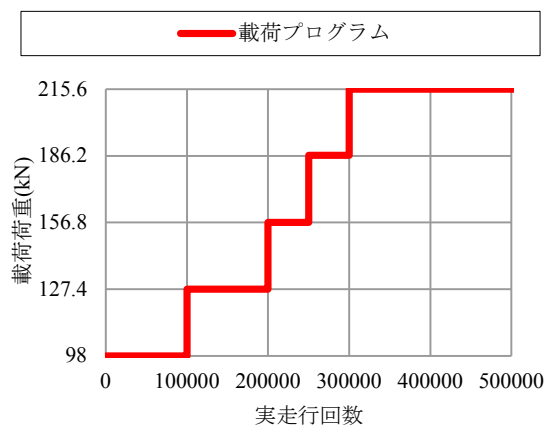


図-5.3.2 載荷プログラム

(2) 水張り試験⁵⁾

図-5.3.3 に水張り範囲を示す。水張りは、L型アルミ鋼材を用いて、輪荷重軌道を中心に長さ 2200mm、幅 1500mm の土手を作製し、漏水防止のため、水張り枠にシリコンを注入した。その後、水張り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。なお、輪荷重走行試験途中において、水が床版上面より常時 5mm を保つように留意した。写真-5.3.4 には水張り試験状況を示す。

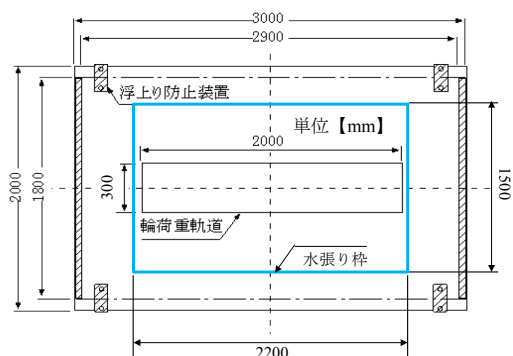


図-5.3.3 水張り範囲



写真-5.3.4 水張り試験状況

5.4 ASR 促進による RC 床版の劣化状況

5.4.1 ASR による床版コンクリートのひずみ変化

図-5.4.1 及び図-5.4.2 に、ASR 促進による床版コンクリートのひずみ変化量を示す。図-5.4.1 より、床版中央部と床版端部のひずみは、x 方向及び y 方向については同様の膨張傾向を示しており、鉄筋拘束方向については、床版中央部のひずみを計測することで、床版全体の膨張量を概ね評価できると考えられる。一方で、z 方向の膨張量については、床版端部でひずみが小さい結果を示した。これは、写真-5.2.1 に示すように、定着確保のために床版端部で鉄筋厚さ方向の鉄筋が配置されていることから、z 方向の膨張を拘束したものと推察される。

図-5.4.2 より、床版中央部のひずみは、床版を問わず鉄筋に拘束される x 方向と y 方向で同じような膨張挙動を示す一方で、z 方向では明らかに膨張量が増加する傾向を示した。これは、ASR によるコンクリートの膨張が x 及び y 方向では鉄筋に拘束されるため、鉄筋の拘束を受けにくい z 方向に進展したと考えられる⁶⁾。また、急速試験により ASR を促進させた R-d, R-w では z 方向の膨張量が急激に立ち上がる傾向を示しているのに対して、S-w では比較的緩やかに膨張する傾向を示しており、環境条件の異なる ASR 促進試験を実施することでコンクリートの膨張速度に差が生じる結果となった。

ASR 促進終了時におけるひずみは、急速試験を行った床版では、R-d の x 方向 726 μ 、y 方向 557 μ 、z 方向で 2700 μ 、R-w の x 方向 773 μ 、y 方向 452 μ 、z 方向で 4750 μ と、ASR の促進期間を変えることで、z 方向で 2000 μ 程度の差が生じる結果となった。一方で、S-w では x 方向 365 μ 、y 方向 334 μ 、z 方向で 1302 μ と、最も小さい膨張量を示した。

なお、R-d 及び R-w の z 方向のひずみが、S-w の z 方向のひずみの最終値である 1300 μ に達した際、R-d の x 方向で 322 μ 、R-w の x 方向で 300 μ と、S-w と同程度のひずみを示しており、本実験に用いた促進方法では軸方向と鉛直方向に発生するひずみの比率には大きな差がないことを確認している。

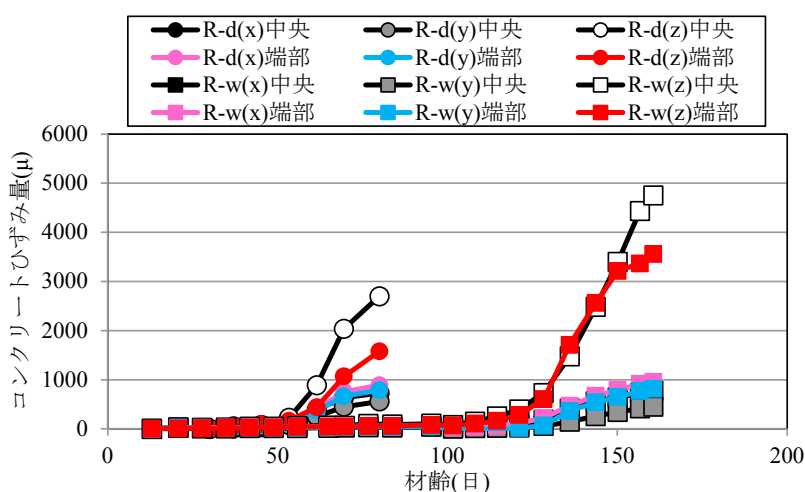


図-5.4.1 コンクリートのひずみ変化

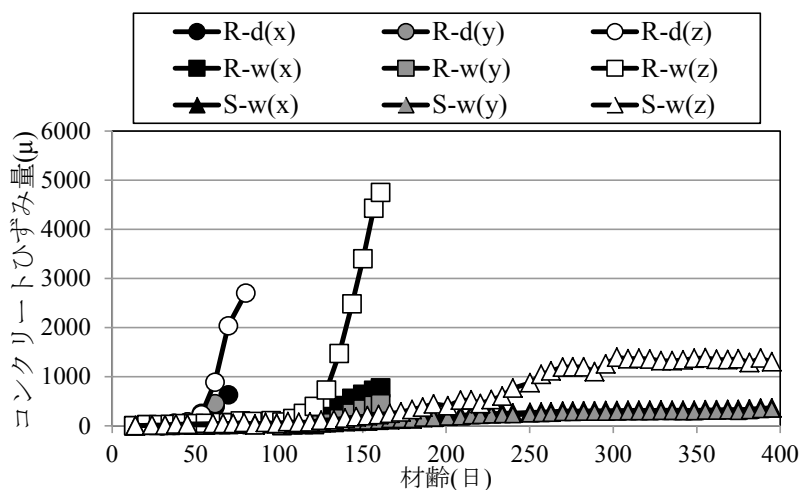


図-5.4.2 コンクリートのひずみ変化(床版中央部)

5.4.2 ASR による鉄筋のひずみ変化

図-5.4.3 に、ASR 促進による床版内部の鉄筋ひずみの変化の一例として、床版中央位置における主鉄筋のひずみ変化量を示す。図より、鉄筋ひずみは、コンクリートのひずみ同様に、急速試験を行った R-d、R-w ではひずみが急激に立ち上がる傾向を示し、緩速試験を行った S-w では、緩やかな変化を示した。

図-5.4.4 に、ASR 促進終了時における主鉄筋のひずみ分布を示す。図より、いずれの床版についても、上下鉄筋ともに床版中央部で最も大きなひずみを示し、いずれの鉄筋位置においても、緩速試験を実施した S-w で最も小さいひずみを示した。また、各床版での中央部と端部でのひずみの差異は概ね同程度であった。このようにコンクリートのひずみ変化と同様に中央よりも供試体端部付近の方がひずみは小さく、また極端な x 方向及び y 方向の両者のひずみの相違は認められなかった。すなわち、このひずみ計測から促進方法の違いによる 3 方向の ASR の膨張を概ね把握できたと考えられる。

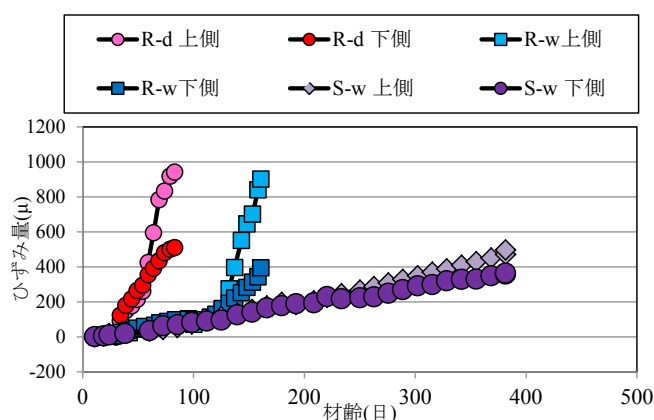
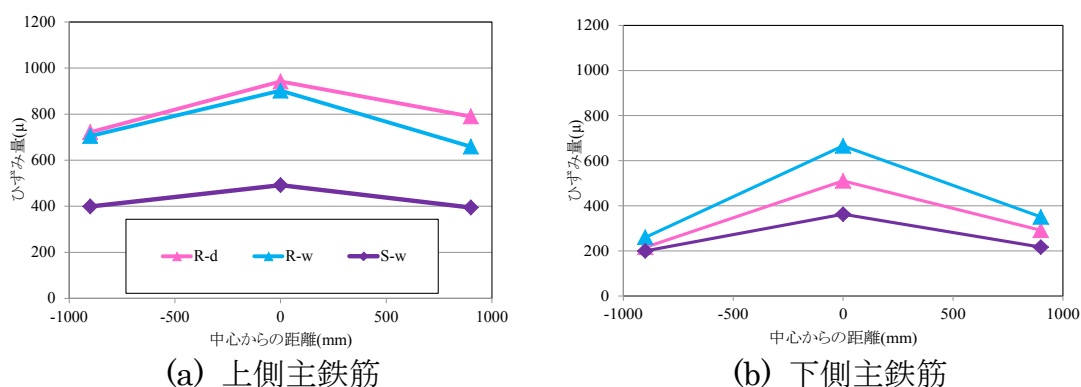


図-5.4.3 床版中央主鉄筋のひずみ変化



(a) 上側主鉄筋

(b) 下側主鉄筋

図-5.4.4 主鉄筋のひずみ分布

5.4.3 床版に導入されるケミカルプレストレス

表-5.4.1 及び表-5.4.2 に、各床版の中央位置における鉄筋のひずみとケミカルプレストレスを示す。なお、ケミカルプレストレスは、膨張エネルギー一定則を参考とした ASR が生じた RC 部材のケミカルプレストレスの算出式である (5.4.1)より算出した¹⁾。

$$\sigma_{cp} = p \times E_s \times \varepsilon_{cp} \quad (5.4.1)$$

ここで、 σ_{cp} : 導入されるケミカルプレストレス、 p : 拘束鋼材比(= A_s/A_c)、 E_s : 鋼材のヤング係数、 ε_{cp} : 鋼材に生じるひずみ、 A_s : 鉄筋の総断面積、 A_c : コンクリートの断面積である。

表より、主鉄筋のひずみはいずれの床版においても下側よりも上側で大きく、その差により床版上面が凸に反るような変形が生じたものと考えられる。また、各床版の鉄筋ひずみ及びケミカルプレストレスは、急速試験を行った R-d と R-w では、鉄筋間でのバラつきはあるものの、ケミカルプレストレスの平均値は同程度であったのに対し、緩速試験を実施した S-w ではその半分程度であった。

表-5.4.1 鉄筋のひずみ

供試体	ひずみ(μ)			
	主鉄筋		配力鉄筋	
	上側	下側	上側	下側
R-d	942	510	1036	793
R-w	902	665	681	858
S-w	492	362	356	515

表-5.4.2 床版に導入されるケミカルプレストレス

供試体	ケミカルプレストレス (MPa)	
	主鉄筋方向	配力鉄筋方向
R-d	1.9	2.4
R-w	2.1	2.0
S-w	1.1	1.1

5.4.4 ASRによるコンクリートの劣化評価

図-5.4.5に、輪荷重走行試験開始時材齢における圧縮強度試験用供試体及び床版から採取したコアによる圧縮強度とヤング係数の関係を示す。なお、図中には圧縮強度とヤング係数の設計用値⁷⁾を併せて示した。

ここで、採取コアについては、膨張量を計測している位置で採取するのが望ましいが、ASRによるコンクリートの劣化を評価する上で、疲労破壊の影響を受けていない範囲でのみコアを採取した。また、コアは後述する図-5.4.7に示す位置で床版厚さ方向にφ100mmで採取した。なお、本実験に使用した採取コアは、φ100mm、高さ160mmと、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」によって定められる供試体寸法の条件を満たしていないため参考値とし、図中には高さ直径比が2.0の強度に補正した結果を示している。

図より、各床版の試験開始時における圧縮強度試験用供試体(図中の凡例にTPと表記)の圧縮強度は、促進試験を行っていないN-d(材齢34日)で圧縮強度25.5MPa、ヤング係数26.3GPa、急速試験を実施したR-d(材齢97日)で圧縮強度34.3MPa、ヤング係数27.1GPa、R-w(材齢177日)で34.6MPa、ヤング係数25.3GPaであった。ASR促進を実施したR-d及びR-wの圧縮強度試験用供試体では、設計用値よりも若干ヤング係数が低い値を示したが、これは封かん養生ではあるものの、促進期間においてASRが多少進行した影響であると考えられる。一方で、緩速試験を実施したS-wでは圧縮強度24.6MPa、ヤング係数10.6GPaと圧縮強度、ヤング係数ともに設計用値よりも大きく低下する結果を示した。これは、促進期間においてASRが進行したことで、コンクリートの物性が大きく低下したものと推察される¹⁾。

次に、採取コアでは、促進試験を行っていないN-dよりも、ASR促進を実施したR-d、R-w、S-wで圧縮強度及びヤング係数の低下が著しい結果を得た。特に、R-d及びR-wについては、圧縮強度、ヤング係数ともにTPよりも大きく低下する結果であった。これは前述の通り、ASR促進試験中における塩分及び水分の供給条件が異なったことで、ASRの劣化程度に差異が生じたことに起因すると考えられる。それぞれの床版における採取コアの試験結果と設計用値と比較してみると、圧縮強度に対するヤング係数が大きく低下したことがわかる。これは、ASRにより床版内部にひび割れが生じたことによるものと推察され、いずれの床版についてもASRによってコンクリート内部の劣化が進行したと判断される。

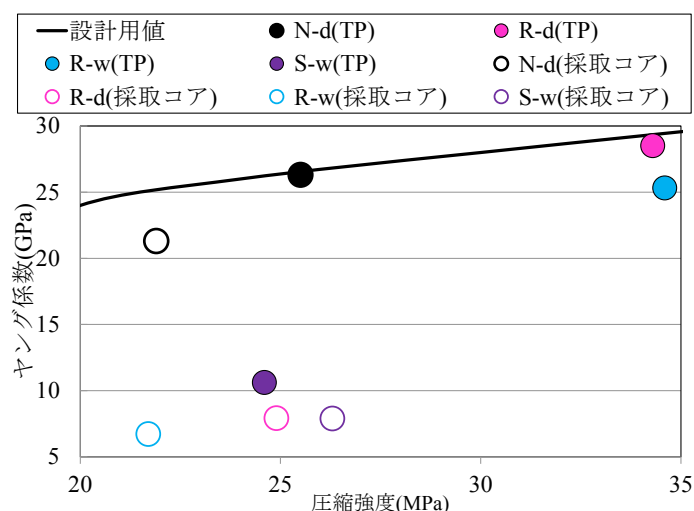


図-5.4.5 圧縮強度とヤング係数

5.4.5 ASRによるひび割れ及びASRゲルの発生状況

(1) ASRによる床版上下面のひび割れ発生状況

図-5.4.6 及び図-5.4.7 に、ASR 促進後に観察した、床版上面と下面のひび割れ発生状況を示す。なお、図中の水色で示される箇所は、前述したコアの採取位置を示している。図より、いずれの床版においても、床版上面と下面で比較すると、上面でひび割れが多く発生したことがわかる。床版上面からのみ塩分を供給した R-d, R-w のみならず、床版全面から塩分が供給される S-w についても同様の傾向であったことを考えると、床版上下面のひび割れ発生状況の違いは、鉄筋量の違いにより床版上面が凸に反るような変形が生じ、床版上面で引張応力が大きくなったことなどに起因すると考えられる。また、床版上面では、いずれの床版についても供試体端部にひび割れが多くみられたが、これは、供試体端部と中央では配筋量に差があることで、膨張に対する拘束度が異なったためと推察される。一方、床版下面では、ひび割れの発生は上面に比して少ない。また、ひび割れのほとんどが主鉄筋方向に生じており、これについては主鉄筋と配力鉄筋の配筋量の差によると考えられる。

各床版の ASR によるひび割れを比較すると、R-d, S-w よりも R-w で多く発生する結果となった。これは、R-w では前述した z 方向におけるコンクリートの膨張が大きく、これに伴いひび割れが多く生じたと考えられる。

なお、各床版に生じたひび割れの最大のひび割れ幅は、急速試験を行った R-d では、上面で 0.1mm、下面で 0.05mm、同じく急速試験を行った R-w では上面で 0.05mm、下面で 0.05mm であったのに対し、緩速試験を実施した S-w は上面で 0.1mm、下面で 0.3mm と、最もひび割れ幅が大きい結果を示した。

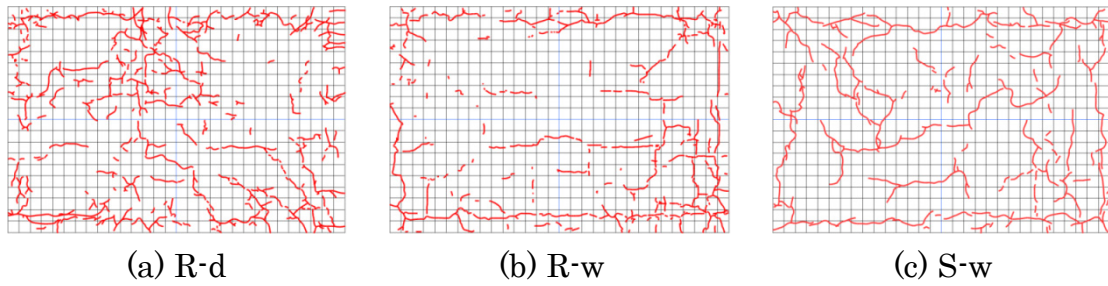


図-5.4.6 ASR 促進後のひび割れ発生状況(床版上面)

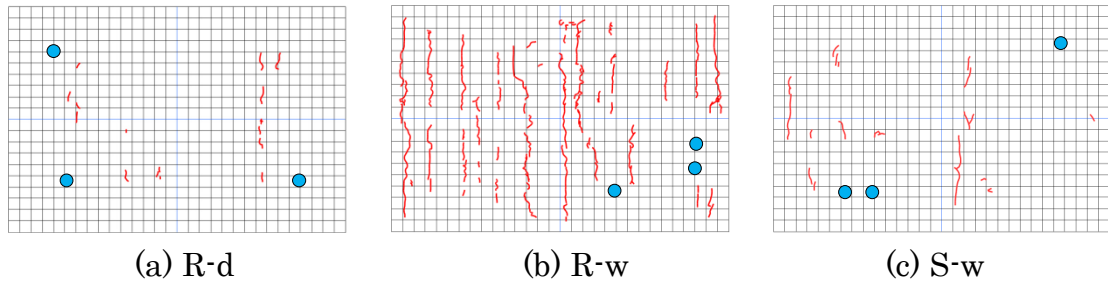


図-5.4.7 ASR 促進後のひび割れ発生状況(床版下面)

(2) 実体顕微鏡による ASR の発生状況

本実験では、床版コンクリートにおける ASR の発生有無を確認するため、実体顕微鏡を用いて反応リムの発生及び、それに伴う微細なひび割れの観察を実施した。具体的には、輪荷重走行試験後に疲労破壊の影響を受けていない範囲で、床版上面から床版厚さ方向にφ100mmで採取したコアをディスク状に切り出し、その切断面実体顕微鏡で観察した。写真-5.4.1に、実体顕微鏡によって観察した ASR の発生状況の例として、R-w と S-w の観察結果を示す。写真より、本実験で使用した床版では、骨材粒子周辺のセメントペーストに滲出物が認められ、ASR が発生していることが確認された。また、骨材には反応リム及びゲルによると思われるひび割れの発生が認められ、ASR に起因したと思われるひび割れにより、床版コンクリートの劣化が進行していることが確認された。

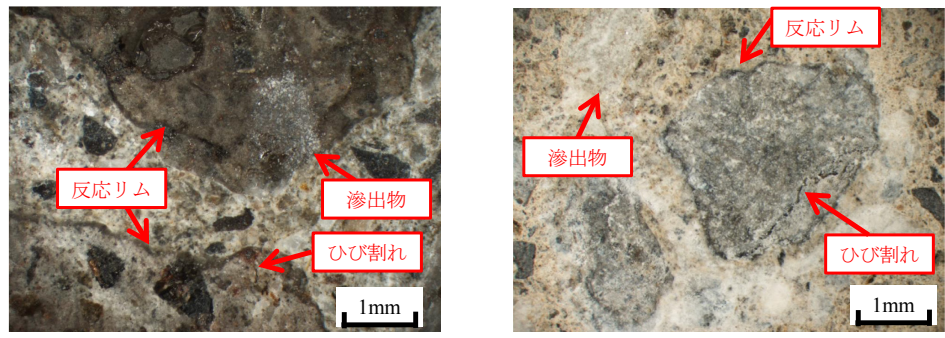


写真-5.4.1 実体顕微鏡による ASR ゲルの観察

(3) 採取コアによる微細ひび割れの観察

本実験では、ASR により発生した床版内部のひび割れを観察するため、採取コアを石膏で整形加工後、コンクリートカッターで2分割し、蛍光塗料(シアノアクリレート性)をコンクリート表面に刷毛で満遍なく塗布させることで浸透させた。その後、暗室内でブラックライトを当ててコア断面を観察した。

写真-5.4.2 に、床版内部に発生したひび割れの状況を示す。なお、写真中の赤丸は鉄筋位置を示しており、白着色部は整形時に使用した石膏である。

写真より、まず ASR 促進を行っていない N-d については、目視上では ASR によるひび割れは確認されなかった。一方で、ASR 促進を実施した床版では、いずれも ASR による劣化を生じた実床版で見られるような水平方向のひび割れが観察された⁸⁾。特に、急速試験を行った R-d 及び R-w では、水平方向のひび割れが多く見られ、ASR による床版内部の劣化が確認された。また、R-w では R-d よりもひび割れの本数が多く発生しているが、これは、床版 z 方向におけるコンクリートの膨張量の差が要因と判断される。

一方、緩速試験を実施した S-w では、目視で観察できるひび割れは R-d 及び R-w に比して少なく、ASR によるひび割れの発生は顕著でなかった。しかし、実体顕微鏡による観察では ASR に起因すると思われる微細なひび割れが観察されており、骨材周辺や骨材を横断するような微細なひび割れが多数生じていた可能性が考えられる。このような、各床版での微細なひび割れの発生機構については今後さらに究明する必要がある。

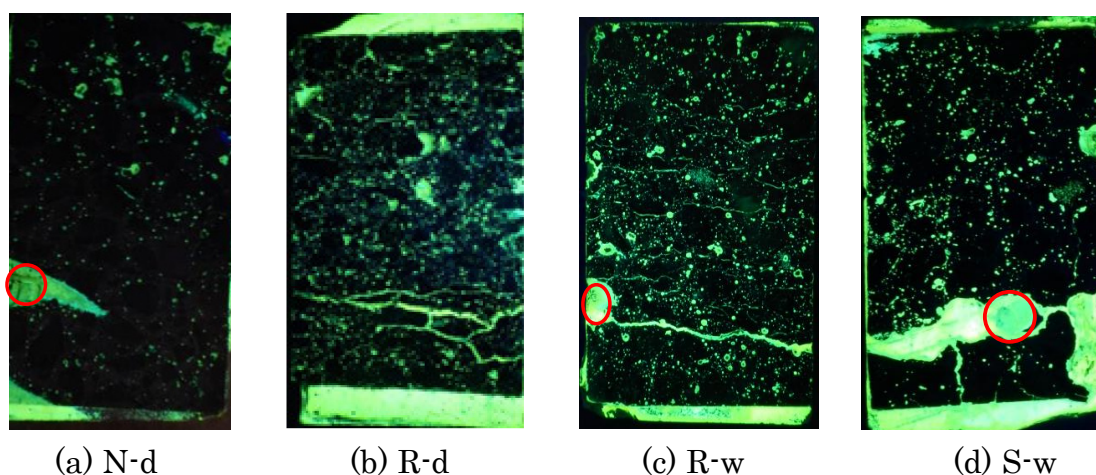


写真-5.4.2 蛍光塗料によるひび割れの観察

5.4.6 鉄筋腐食減量率の測定結果

本実験では、ASR 促進時において高濃度の塩分を床版に供給していることから、鉄筋の腐食状況を定量的に評価する必要があると判断し、輪荷重走行試験後に鉄筋腐食減量試験を実施した。試験に用いた鉄筋は、輪荷重走行範囲外の位置で鉄筋をはつり出し、上下主鉄筋、上下配力鉄筋を各床版から 1 本ずつ採取した。

表-5.4.3 に鉄筋腐食減量試験結果を示す。表より、鉄筋腐食減量率はいずれの床版についても 1.0%以下であり、本実験の範囲内では塩害が RC 床版の耐疲労性に与える影響は軽微であると判断した⁹⁾。

表-5.4.3 腐食減量試験結果

供試体	腐食減量率(%)			
	主鉄筋		配力鉄筋	
	上側	下側	上側	下側
R-d	0.66	0.79	0.80	0.79
R-w	0.54	0.70	0.66	0.70
S-w	0.58	0.68	0.58	0.81

5.5 輪荷重走行試験による耐疲労性評価

5.5.1 段階载荷による輪荷重走行試験結果

図-5.5.1 に、輪荷重走行試験結果として、段階载荷による载荷荷重と疲労限界状態に達した際の実走行回数との関係を示す。なお、輪荷重走行試験は、全ての床版で押抜きせん断破壊が生じるまで試験を継続させた。

図より、N-d が実走行回数 21 万回で疲労限界状態に達したのに対し、R-d では 26 万 9000 回、R-w は 25 万 3000 回と、急速試験を行った床版はいずれも健全な床版である N-d よりも疲労限界状態に至る走行回数が増加する結果であった。一方で、S-w では 12 万回と N-d よりも早期に疲労限界状態に至った。

このように、異なる ASR 促進に伴う損傷状況の違いにより、耐疲労性に大きく差が生じる結果を示した。この ASR 促進方法及び ASR による損傷状況の違いが RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響については次節より詳細に検討する。

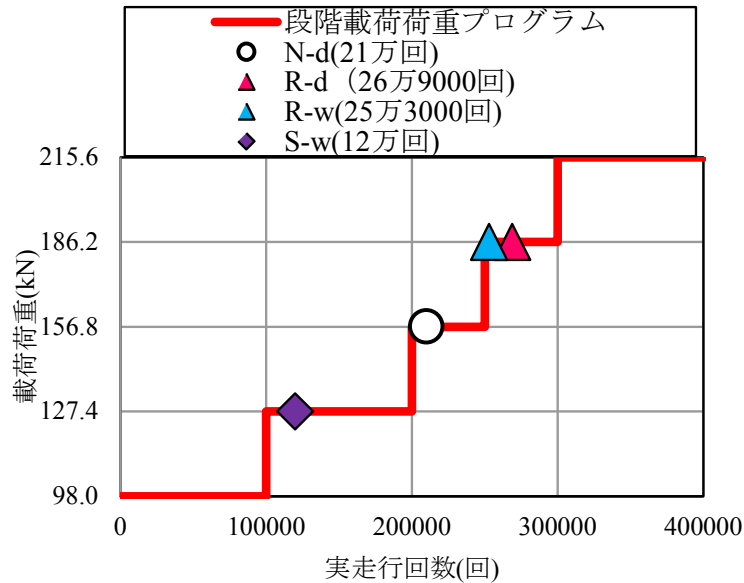


図-5.5.1 載荷荷重と実走行回数

5.5.2 荷重と変位の関係

図-5.5.2 に、所定の回数ごとに静的載荷を行った際の基本荷重(本研究では98kN)と床版中央変位の関係を示す。

図より、走行回数2回時におけるたわみは、N-dで0.77mm、R-dで0.88mm、R-wで0.96mm、S-wで0.90mmと、ASR促進を行った床版ではいずれも健全なN-dよりたわみが大きい結果を示した。これは、床版の下面及び内部に生じたひび割れにより剛性が低下したためと考えられる。

しかし、2回から10万回の間たわみ量の増加は、ASR促進を実施した床版3体では0.2mm程度であったのに対し、N-dではたわみ量の増加が0.3mmと最も大きい結果を示した。これは、前述したケミカルプレストレスの影響であると考えられ、ASR促進時において床版に導入されたケミカルプレストレスが剛性の低下を抑制したと推察される。その後のたわみ量の推移は、N-dでは輪荷重走行回数及び後述する床版下面に発生するひび割れの増加に伴い、徐々にたわみ量が増加していく傾向を示した。これに対してASR促進を行った床版では、いずれも走行回数に対するたわみの増加が小さい傾向を示した。

なお、疲労限界状態におけるたわみ量は、N-dで1.74mm、R-dで1.63mm、R-wで1.31mm、S-wで1.16mmと、水張り試験を実施したR-w、S-wでは剛性が大きく低下することなく疲労限界状態に至る結果となった。

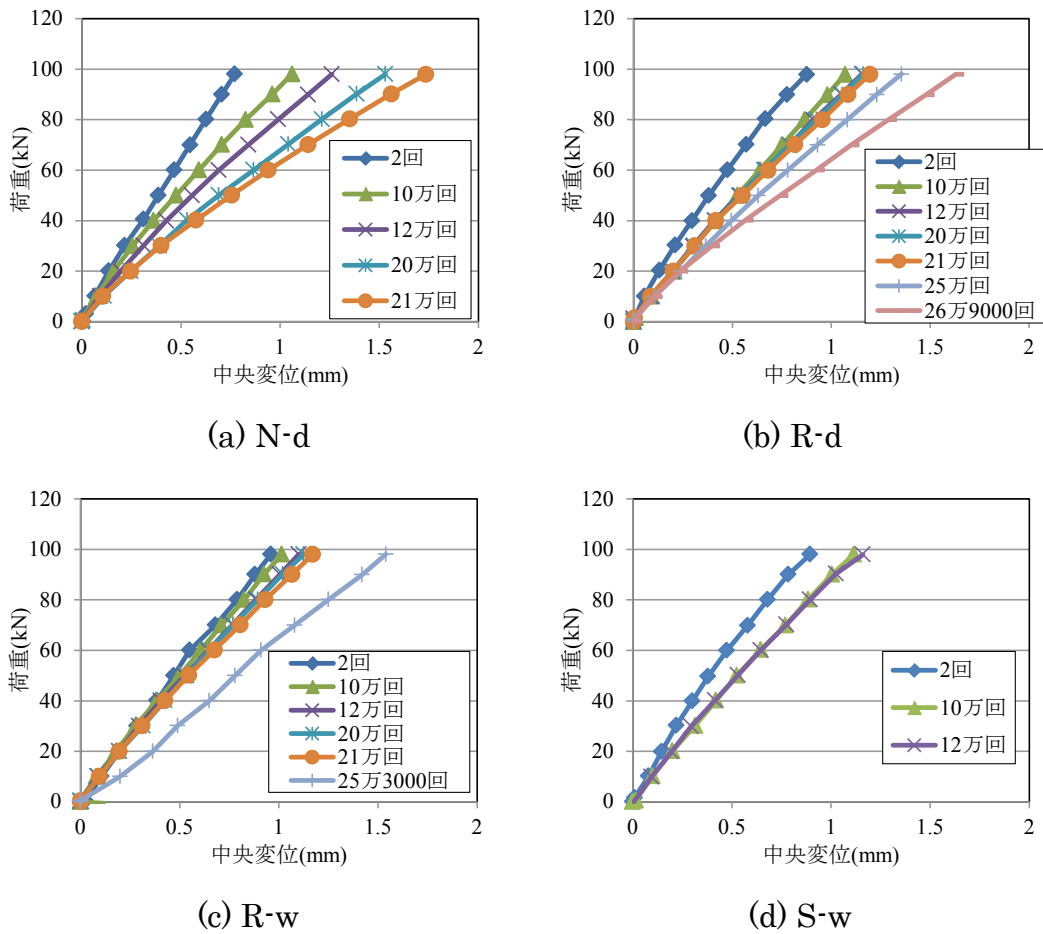


図-5.5.2 基本荷重と中央変位の関係

5.5.3 活荷重たわみと等価繰返し走行回数との関係

図-5.5.3 に活荷重たわみと等価繰返し走行回数との関係を示す。また、図中には疲労破壊に到る直前の走行回数までをプロットしている。図より、輪荷重走行試験開始直後(等価繰返し走行回数 2 回)の活荷重たわみは、N-d で 0.77mm であるのに対し、ASR 促進を行った床版では、R-d で 0.92mm、R-w で 0.96mm、S-w で 0.90mm と、いずれも初期の活荷重たわみが大きい結果を示した。これは、ASR により床版に導入されたケミカルプレストレスの影響と、床版下面及び床版内部に発生したひび割れの大小関係によるものだと考えられ、載荷初期の剛性に関しては、ケミカルプレストレスの影響以上に床版に発生したひび割れの影響が大きかったことで剛性が低下したと考えられる。しかし、その後の活荷重たわみの増加傾向は、それぞれの床版で異なった。まず、N-d では、等価繰返し走行回数の増加とともに活荷重たわみも増加する傾向で、等価繰返し走行回数が約 700 万回で疲労限界状態に達した。これに対して急速試験を実施した R-d 及び R-w では、等価繰返し走行回数 1000 万回までは、等価繰返し走行回数の増加に対

する活荷重たわみの増加量は N-d よりも小さい傾向を示した。これは、前述したケミカルプレストレスによって、剛性の低下が抑制されたためと考えられる。等価繰返し走行回数 1000 万回以降は、徐々に活荷重たわみが増加する傾向を示し、R-d では 9000 万回、R-w では 3300 万回で疲労限界状態に至る結果となり、N-d よりも走行回数が増加する結果を示した。これまでに、高温高湿度環境下において RC 部材に対して ASR 促進を実施した場合、静的な耐荷力が健全な RC 部材よりも向上するといった研究成果¹⁰⁾が報告されているが、輪荷重が作用する移動繰返し載荷実験においても、既往の研究と同様にケミカルプレストレスの作用で耐疲労性が向上する結果を示した。また、水張り試験を実施した R-w では疲労限界に達する走行回数が R-d の約 1/4 と、耐疲労性が大きく低下する結果を示した。これは、子田ら⁵⁾の研究において、健全な供試体に対して水張り試験を実施した場合、疲労限界状態に達する走行回数が乾燥状態で試験を行った供試体の約 1/4 となるといった実験結果と整合する結果であり、本実験においても水の作用により、耐疲労性が低下したと考えられる。

緩速試験を実施した S-w では、等価繰返し走行回数に対する活荷重たわみの推移は R-d, R-w と同様の傾向を示した。しかし、等価繰返し走行回数 67 万回で活荷重たわみが急激に立ち上がり、他の床版よりも明らかに少ない走行回数で疲労限界に至る結果を示した。S-w 同様に、輪荷重走行試験時において水張りを行った R-w と比較すると、S-w では R-w の約 1/50 で疲労限界に至っている。このことから、ASR が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響は、ASR の促進速度が大きく影響していることが示唆された。

このように、疲労限界状態に達する等価繰返し走行回数は、促進試験の方法で大きく異なり、急速試験で ASR を進行させた床版では、ケミカルプレストレスの影響により、健全な床版よりも耐疲労性が向上した。反対に、緩速試験で ASR 促進を進行させた床版では、ケミカルプレストレスが急速試験を行った床版の半分程度であり、ケミカルプレストレスの影響以上に ASR によるコンクリート内部の劣化の影響が大きく、耐疲労性が大きく低下した。また、S-w については、主鉄筋方向のコンクリート膨張量が静的な耐荷力には影響の少ないとされる範囲であっても、本実験においては、耐疲労性が大きく低下する結果を示した。

つまり、一般に、ASR により劣化を生じたコンクリートでは、膨張量の増加に伴い圧縮強度や圧縮疲労強度が低下すると考えられるが、RC 部材の耐疲労性については、ASR によるコンクリートや鉄筋のひずみのみならず、床版内部のひび割れ状況や水の存在の有無といった要因により評価することが重要であることが示唆された。

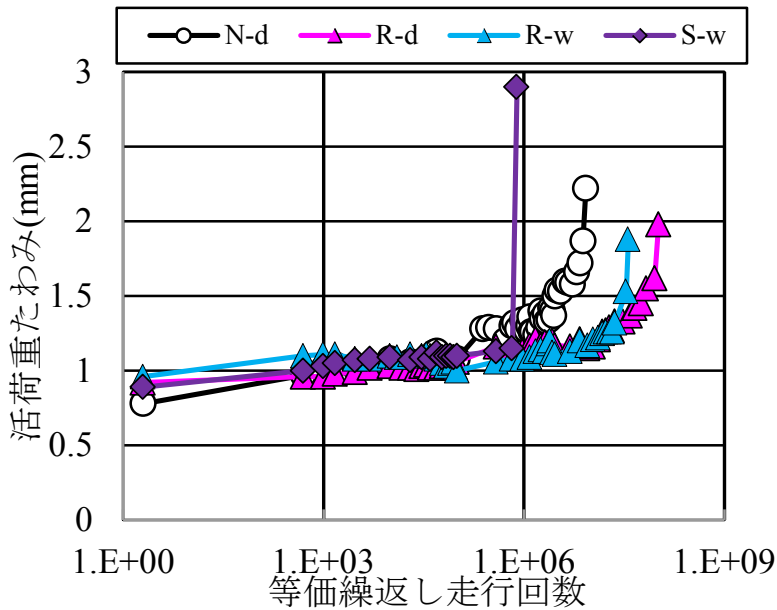


図-5.5.3 活荷重たわみと等価繰返し走行回数の関係

5.5.4 床版上下面の損傷状況

(1) 床版下面のひび割れ発生状況

図-5.5.4 及び図-5.5.5 に、輪荷重走行試験の途中段階と、疲労限界状態時における下面のひび割れの進展状況を示す。なお、図中に示すひび割れ線のうち、青線は輪荷重走行試験前に発生していた ASR によるひび割れ、黒線は本論文中に示されるひび割れ図で、1つ前の段階までに観察されたひび割れ、赤線は括弧内に示す走行回数終了時で新たに観察されたひび割れを示している。図-5.5.4 より、走行回数 10 万回時のひび割れは、N-d では輪荷重走行範囲を中心にひび割れが軸方向と軸直角方向に進展を示したのに対して、急速試験を行った R-d 及び R-w では、ASR によって生じたひび割れが連なるように進展する傾向を示した。一方で、S-w では、輪荷重走行範囲のみでひび割れが進展する傾向を示した。図-5.5.5 より、各床版の疲労限界状態時におけるひび割れは、N-d では、格子状にひび割れが形成され、床版下面のひび割れ状況に基づく劣化進行過程は状態 III¹¹⁾の劣化期と類似のひび割れ状態を示した。これに対して、ASR 促進を行った床版ではひび割れの進展が異なり、急速試験を行った R-d 及び R-w では、いずれも主鉄筋方向に生じた ASR によって発生したひび割れが連なるように形成される傾向を示した。一方で、緩速試験を行った S-w では、輪荷重走行範囲内でひび割れが進展する傾向を示し、生じたひび割れの本数も他の床版より明らかに少ない状態であった。

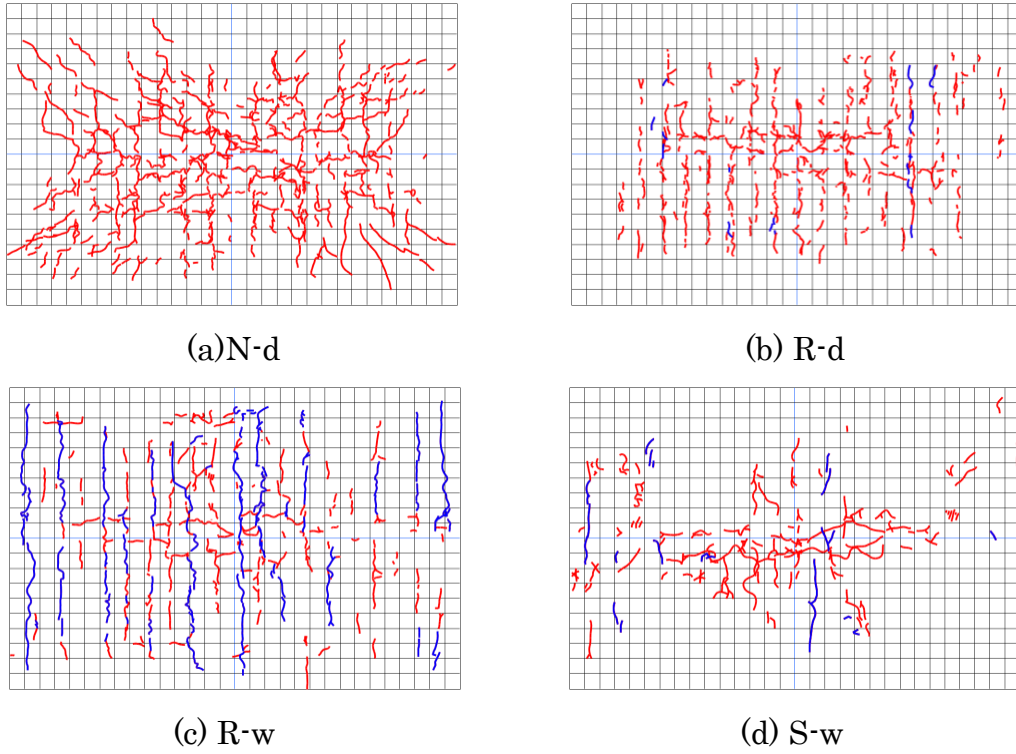


図-5.5.4 床版下面のひび割れ発生状況(等価繰返し走行回数：10 万回)

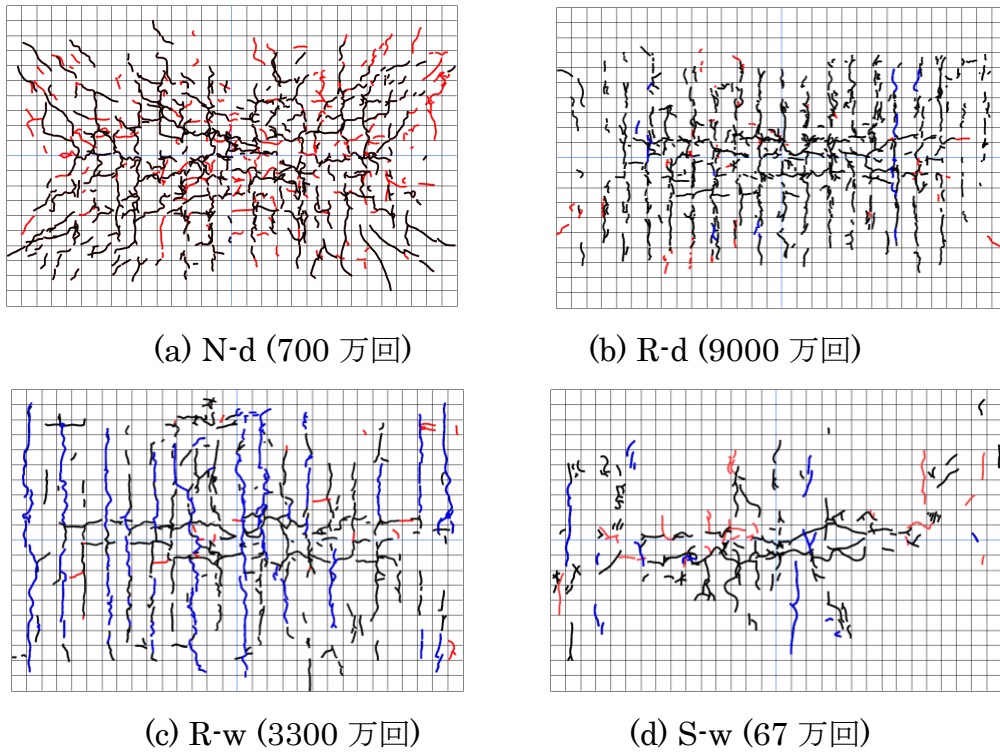


図-5.5.5 床版下面のひび割れ発生状況(疲労限界状態時)

(2) 床版下面に発生するひび割れの密度と等価繰返し走行回数の関係

図-5.5.6 に、床版下面に発生したひび割れの密度と等価繰返し走行回数の関係を示す。図より、N-d では、走行回数約 1 万回程度から密度が急激に立ち上がり、その後は緩やかに増加する結果となった。これに対して、ASR 促進を実施した床版では、ひび割れ密度の増加傾向がそれぞれ異なった。急速試験を行った R-d 及び R-w では、N-d よりも等価繰返し走行回数に伴うひび割れ密度の増加が小さい傾向を示した。これは、ケミカルプレストレスの影響により、輪荷重によるひび割れの発生が抑制されたためと考えられる。

また、R-w では、R-d よりも初期のひび割れが多く発生していたものの、疲労限界状態においては R-d よりも小さい密度を示した。これは、ASR によるひび割れが多く発生し、輪荷重走行試験前で既にひび割れ網がほぼ定まっていたことで、新たなひび割れが生じにくい状態であったと推察される。一方で、S-w では、ひび割れ密度の増加量が他の 3 体よりも明らかに小さい傾向を示し、表面上ではひび割れの発生が多くない状態で疲労限界に至った。S-w では前述した床版下面の観察により、輪荷重走行範囲に集中していたことが確認されており、また ASR によるひび割れの幅も他の床版に比して大きかった。このことから、ASR 促進時において発生した幅の大きなひび割れが支配的となり、輪走行作用によるひび割れの分散性が著しく低下し、輪荷重走行範囲直下で局所的にひび割れが進展したことで、急激な疲労破壊に至ったものと考えられる。

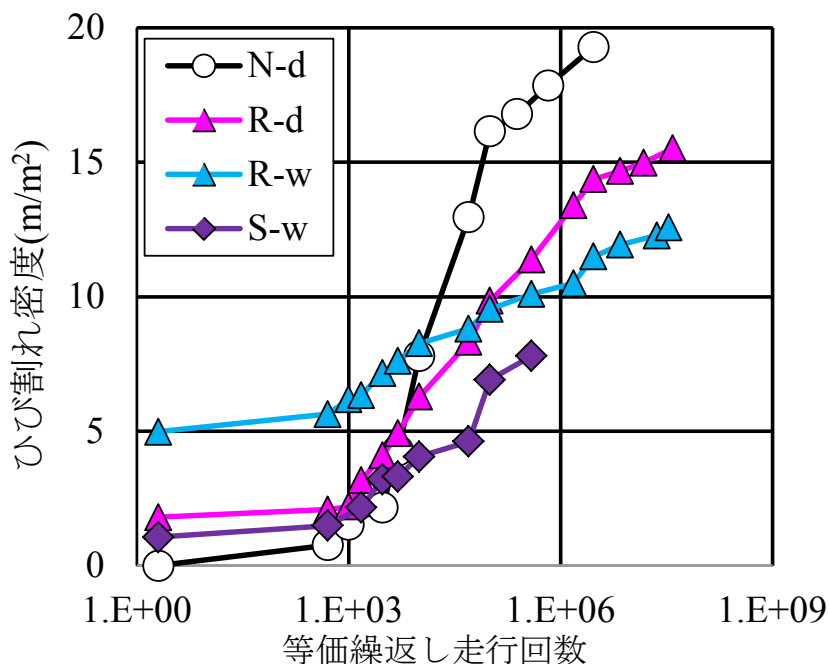
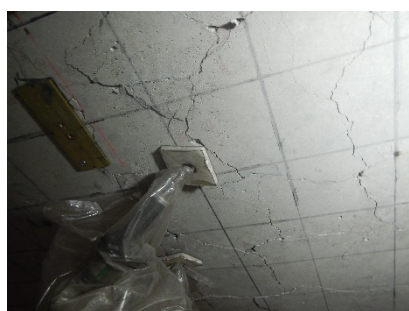


図-5.5.6 ひび割れ密度と等価繰返し走行回数の関係

(3) 床版下面の損傷状況

写真-5.5.1 に、各床版の輪荷重走行試験終了時における床版下面の損傷状況を示す。写真より、乾燥状態で試験を行った N-d 及び R-d では、床版下面で幅の大きなひび割れが格子状に発生しており、床版が押抜きせん断破壊に至っているのがわかる。一方で、水張りを実施した床版では下面の劣化性状が異なり、R-w で等価繰返し走行回数 1700 万回時、S-w で等価繰返し走行回数 10 万回時において床版下面で水染みが確認され、押抜きせん断破壊後の床版下面では写真に示すような ASR ゲルの滲出が観察された。また、急速試験を実施した R-w よりも緩速試験を実施した S-w でゲルの滲出が明らかに多いことが確認された。これは、ASR の促進速度及びその期間の違いによるものだと推察され、今後は ASR により発生するゲルの生成量と ASR の促進方法について検討していくことが重要であると考えられる。



(a) N-d



(b) R-d



(c) R-w



(d) S-w

写真-5.5.1 床版下面の損傷状況

(4) 床版上面の損傷状況

図-5.5.7 に、試験終了時における各床版の損傷状況を示す。なお、図中の青線は走行試験前に発生が確認された ASR によるひび割れ(図-5.4.6 参照)、図中の赤線は走行試験後に観察されたひび割れ、図中の赤網掛け部については、床版上面において砂利化が生じた範囲を示している。図より、床版上面の損傷は、まず

N-d では、輪荷重走行範囲の載荷ブロック直下にひび割れが多数生じており、また、走行範囲から橋軸直角方向にひび割れの発生が確認された。これは、既往の研究における健全な RC 床版上面の疲労破壊性状と同様の結果である¹²⁾。次に R-d では、走行試験前において ASR によるひび割れの発生が確認されているが、輪荷重走行に伴い発生するひび割れは、N-d と同様に輪荷重走行範囲及び橋軸直角方向への進展が観察された。つまり、床版上面が乾燥状態にある場合では、床版上面におけるひび割れの進展は ASR の有無に係わらず、輪走行作用によるひび割れのみが発生する傾向を示した。一方、床版上面に水張りを実施した R-w 及び S-w では損傷状態が大きく異なった。まず R-w では、輪荷重走行範囲を中心としたひび割れに加え、床版全域において多数のひび割れが発生した。これは、走行試験前では目視困難であった ASR による微細なひび割れに水が侵入し、ひび割れ面のすり磨きが促進され、目視可能なレベルにまでひび割れの幅が大きくなったことが要因と考えられる。また、輪荷重走行範囲内において床版コンクリートの砂利化¹³⁾が確認された。次に、S-w では R-w 同様に、広い範囲でひび割れの発生及び砂利化が確認されている。しかし、砂利化が生じた範囲は R-w よりも明らかに小さく、局所的に砂利化が生じているような状態であった。写真-5.5.2 には R-w 及び S-w の砂利化範囲を示す。

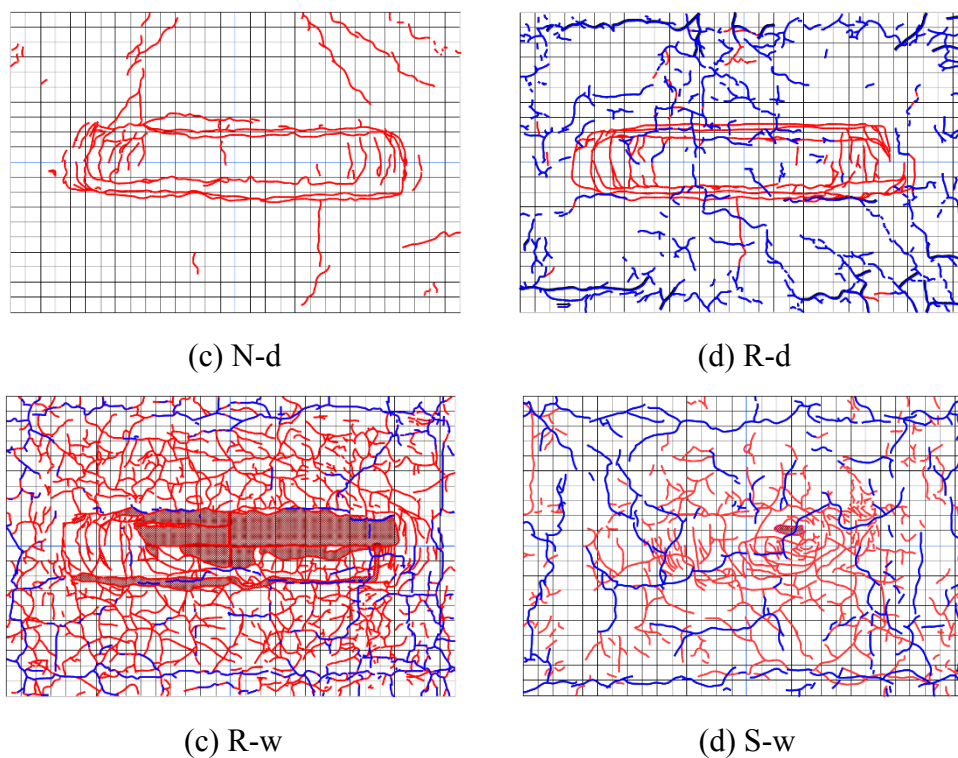


図-5.5.7 床版上面の損傷状況



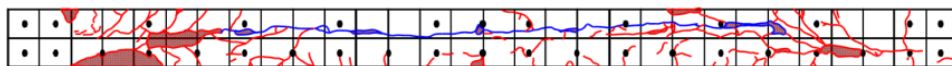
(a) R-w

(b) S-w

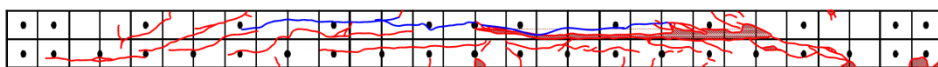
写真-5.5.2 床版コンクリートの砂利化

5.5.5 断面の損傷状況

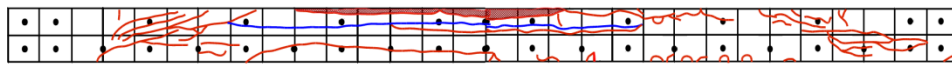
図-5.5.8 及び図-5.5.9 に、輪荷重走行試験終了後に観察した橋軸方向断面及び軸直角方向断面の損傷状況を示す。なお、図中の網掛け部はコンクリートが剥離及び砂利化した位置を示している。図より、いずれの床版についても、上側主鉄筋位置において耐疲労性を低下させる要因である水平ひび割れ¹⁴⁾(図中の青線)の進展が見られた。また、ASR を受けた床版でもひび割れの進展に違いがあり、急速試験を実施した R-d, R-w では床版全長にひび割れが分散しているのに対して、緩速試験を実施した S-w では、輪荷重走行範囲にひび割れが集中した。また、S-w では床版中央位置において上面から下面にかけて貫通するようなひび割れが発生しており、床版内部で局所的に疲労損傷が進行し、そこに床版上面から水の侵入があったことで早期に破壊に至った可能性があると考えられる。



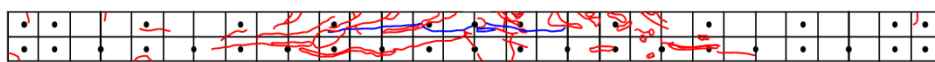
(a) N-d



(b) R-d



(c) R-w



(d) S-w

図-5.5.8 床版軸方向断面の損傷状況

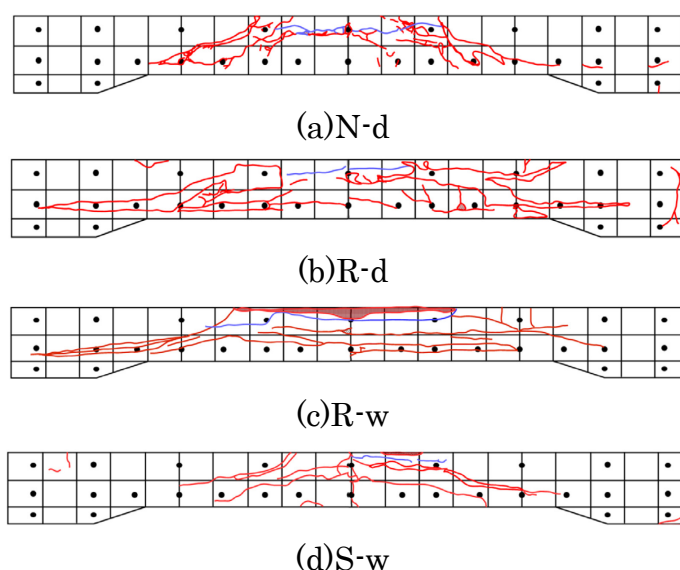


図-5.5.9 床版軸直角方向断面の損傷状況

5.6 ASRの反応速度がRC床版の耐疲労性に及ぼす影響の考察

前節までは、ASRの促進方法及び促進期間を変更することで、ASRの劣化度に差をつけたRC床版のASR促進試験及び輪荷重走行試験結果について述べた。その結果、ASRの促進方法を変更することで、ASRによるコンクリートの膨張速度、すなわちASRの反応速度が異なり、これに伴ってASRによるひび割れの発生形状に差が生じることが示された。また、輪荷重走行試験では、急速にASRを促した床版では、ケミカルプレストレスの影響により健全な床版よりも耐疲労性が向上し、反対にASRを緩やかに促した床版については、ケミカルプレストレスの影響以上に床版に発生するひび割れの影響が大きく、耐疲労性が大きく低下することが示された。このことから、ASRを受けるRC床版の耐疲労性については、ASRによるコンクリートや鉄筋のひずみ、およびこれに伴って床版に導入されるケミカルプレストレス量のみでは適切に評価することが難しく、床版に発生するひび割れの状況や水の存在の有無といった要因により評価することが重要であることが示唆された。

そこで、本節では、輪荷重走行試験時において水張りを実施したR-wとS-wの試験結果を多角的に比較することで、ASRの反応速度がRC床版の耐疲労性に及ぼす影響について検討する。

表-5.6.1 R-w と S-w の試験結果の比較

(a) ASR 促進試験後(輪荷重走行試験前)

供試体	ASRの 反応速度	耐疲労性	ASR促進試験後(輪荷重走行試験前)					
			z方向のコンク リートひずみ (μ)	ケミカルプレ ストレス (N/mm^2)	上面 (ひび割れ)		下面 (ひび割れ)	
					密度	幅(mm)	密度(m/m^2)	幅(mm)
R-w	大	高	大 (4750)	大 (2.1)	同 (4.4)	同 (0.05)	大 (4.1)	小 (0.05)
S-w	小	低	小 (1300)	小 (1.1)	同 (4.8)	同 (0.10)	小 (0.8)	大 (0.30)

(b) 輪荷重走行試験後

供試体	ASRの 反応速度	耐疲労性	輪荷重走行試験後							
			採取コア		上面 (砂利化)		下面		断面 ひび割れ	
			圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)	範囲	程度	ひび割れ			ゲルの 滲出量
							分散性	幅(mm)		
R-w	大	高	低 (21.7)	同 (6.7)	大	大	高	小 (0.20)	小	水平 ひび割れ
S-w	小	低	高 (26.3)	同 (7.9)	小	小	低	大 (0.40)	大	貫通 ひび割れ

表-5.6.1 に、R-w と S-w の試験結果の対比表を示す。なお、表中におけるコンクリートのひずみについては、ASR 促進終了時における z 方向のコンクリートひずみを示している。表より、まず ASR 促進試験後(輪荷重走行試験前)に着目すると、z 方向におけるコンクリートの膨張量(図-5.4.2) は、急速試験を実施した R-w の方が大きく、ケミカルプレストレスの導入量(表-5.4.2)についても同様の結果であった。また、z 方向における膨張量が大きいことに起因して、S-w よりも床版下面にひび割れが多く発生している (図-5.4.7)。一方で、S-w では、コンクリートの膨張量が小さく、床版下面に発生するひび割れの本数も少ないが、ひび割れの最大幅が 0.30mm と、R-w よりも大きなひび割れが発生している (図-5.5.7)。なお、床版上面については、R-w と S-w で損傷程度が同程度であり、床版上面における水圧の影響に大きな差異はないものと考えられる。

次に、輪荷重走行試験後では、採取コアによるコンクリートの物性を比較すると、R-w では TP よりも圧縮強度及びヤング係数が大きく低下しており、S-w では TP と同程度の値を示した。このことから、いずれの床版においても ASR によるコンクリートの劣化が進行していると考えられた。なお、これらコンクリートの物性低下と床版全体の剛性との関係については、第 7 章で後述する、強制振動試験¹⁵⁾により検討することとした。次に、輪荷重走行試験後における床版の劣化性状については、R-w では床版上面における砂利化の範囲及び程度が大きく、反対に S-w では砂利化の範囲が局所的であり、程度も小さい結果を示した。このことから、R-w では輪荷重の繰返し作用と水の影響によって床版上面が砂利化したことで、耐疲労性が低下し、疲労限界に至ったものと考えられた。一方で、S-w については、床版上面で砂利化が広がる前に疲労限界に達しているこ

とから、砂利化以外の影響により耐疲労性が低下したものと推察される。そこで、床版下面の損傷状況に着目すると、S-w では疲労によるひび割れの分散性が乏しい結果を示した。これは、前述の通り、ASR により発生した幅の大きいひび割れが支配的となったことに起因すると考えられる。また、床版断面のひび割れについては、R-w では水平ひび割れの発生が明確であったのに対して、S-w では水平ひび割れの発生範囲が小さく、床版上面から下面にかけて発生するひび割れの発生が確認された。

以上のことから、急速試験を実施した R-w では ASR 促進時におけるケミカルプレストレスの影響により耐疲労性を向上させ、床版コンクリートの砂利化を起因として耐疲労性が低下し、疲労限界に至ったと推察された。一方、緩速試験を実施した S-w については、ASR 促進時に発生した幅の大きなひび割れが支配的となり、疲労によるひび割れの分散性を低下させたことで、局所的にひび割れが進展し、床版上下面を貫通するひび割れに水が侵入したことによって、耐疲労性が急激に低下したと考えられた。すなわち、ASR の反応速度の大小によって、ひび割れの発生形態が異なり、これが RC 床版の耐疲労性に影響を及ぼすことが示された。

なお、輪荷重走行試験後において床版下面に滲出したゲルの量が R-w よりも S-w の方が明らかに多いことから、ASR の反応速度を変更したことによるひび割れ発生形態の違いについては、ASR ゲルの生成量や ASR ゲルの物性が影響している可能性があり、これについては今後の検討課題としたい。

5.7 まとめ

本章では、実物大 RC 床版供試体を用いた ASR 促進試験及び輪荷重走行試験を行い、ASR が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響を実験的に検討した。

本章で得られた主な結果を以下に示す。

- 1) ASR により劣化した RC 床版は、ASR の促進方法により床版の損傷状況及び耐疲労性が大きく異なり、急速に ASR を促した床版では、ケミカルプレストレスの影響により健全な床版に比べて耐疲労性がむしろ向上し、反対に、緩やかに ASR を促した床版では、耐疲労性が大きく低下する結果となった。一般に、ASR を生じたコンクリートでは、膨張量の増加に伴いヤング係数、圧縮強度や圧縮疲労強度が低下すると考えられるが、RC 床版では、ASR によるコンクリートや鉄筋のひずみのみならず、床版内部のひび割れ状況や水の存在の有無といった要因によりその耐疲労性が定まることが示された。
- 2) ASR 促進を実施した床版では、いずれも ASR によるひび割れが支配的となり、その後の疲労による新たなひび割れの発生が抑制される傾向を示した。特に、ASR を緩やかに促進させた床版では、ASR により発生した幅の大きなひび割れが支配的となったことで疲労によるひび割れの分散性を低下させ、その後の輪荷重走行試験では、輪荷重走行範囲直下で局所的にひび割れが進展し、急激な疲労破壊に至る傾向が示された。
- 3) ASR により劣化した RC 床版は、ASR の促進速度を変えることで、ASR 膨張量とこれに伴うケミカルプレストレスの導入量、さらにこれらの経時的な相互作用によるひび割れ性状が大きく変化し、これが、その後の輪荷重走行試験による耐疲労性に大きな影響を及ぼすものと考えられた。

参考文献

- 1) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書，2005.
- 2) 前島拓，子田康弘，岩城一郎，梶尾聡，岸良竜：疲労と ASR の相互作用が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響，土木学会第 70 回年次学術講演会概要集，2015.
- 3) 五島孝行，太田孝二，岸良竜，大野晃，前島拓，久保善司：アルカリシリカ反応と輪荷重疲労で複合劣化した床版の疲労耐久性，土木技術資料 56-12,pp60-63,2014.
- 4) 皆川翔平，子田康弘，岩城一郎：RC はりの耐疲労性に及ぼす環境温度および含水状態の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，pp.631-636，2015.
- 5) 子田康弘，斉藤卓也，岩城一郎：輪荷重走行試験による材料劣化を受けた道路橋 RC 床版の疲労耐久性評価，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 9 巻，pp.145-150，2009.7
- 6) 前島拓，子田康弘，岩城一郎，大田孝二，大野晃，岸良竜，久保善司：ASR により劣化した道路橋 RC 床版の耐疲労性評価，土木学会第 69 回年次学術講演会概要集，V-611，2014.
- 7) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2008.
- 8) 五島孝行，大田孝二，梶尾聡，鈴木康範，井戸康清，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 回年次学術講演会講演概要集，pp.835-836，2013.
- 9) 土木学会：コンクリート技術シリーズ No.71 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，2006.
- 10) 小柳洽，六郷恵哲，石田裕哉：アルカリ骨材反応によるひびわれと RC 部材の性状，セメント技術年報，No.39，pp.352-355，1985.
- 11) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，2008.
- 12) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，2007.
- 13) 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.
- 14) 横山広，浦修造，関口幹夫，堀川都志雄：床版の劣化現象及び床版補強工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.451-456，2010.
- 15) 内藤英樹，齊木佑介，鈴木基行，岩城一郎，子田康弘，加藤潔：小型起振機を用いた強制加振試験に基づくコンクリート床版の非破壊試験法，土木学会論文集 E2，Vol.67，No.4，pp.522-534，2011.

第 6 章

強制振動試験による

道路橋 RC 床版の疲労損傷度評価

6.1 概説

積雪寒冷地における RC 床版は、凍結防止剤の大量散布に伴い、塩害や凍害、ASR といった材料劣化が促進されることが知られており、早期劣化が社会問題となりつつある¹⁾。このような地域の RC 床版では、従来の床版下面からの点検では、変状がほとんど見られない状態であっても、床版上面で損傷が著しく進行しているケースが多く報告されている²⁾。また、第3章及び第5章で実施した、塩害及び ASR により劣化した RC 床版の輪荷重走行試験においても、床版下面のひび割れ進展状況に基づいた劣化グレード以上に、床版の損傷が進行していることを実験データから明らかにしている。つまり、凍結防止剤散布下における RC 床版については、床版下面に変状が表れてからでは補修・補強では安全性の確保が難しいといえ、通常は舗装下にある床版上面あるいは内部の損傷度を適切に評価し得る手法の重要性が示された。

こうした RC 床版内部の劣化を検知する非破壊試験法に関する研究は多く行われており、対象とする位置や範囲に応じた手法が選択されている^{3),4)}。このうち、内藤ら^{5)~11)}は RC 床版内部の損傷を検知する手法として、2~20,000Hz までの調和振動が与えられる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に着目して、コンクリート構造物内部の劣化程度を評価できる非破壊検査手法の開発を進めてきた。この手法は、2.5.2 で述べた通り、既往の研究により、アスファルトの有無に依らず、共振周波数の低下によって床版内部の損傷を検知し、床版の劣化分布を推定できる可能性を示している。しかし、共振周波数の低下が床版内部の損傷や下面の観察から判断される劣化グレードと対応する傾向は見出せたが、輪荷重走行試験などによる検討は行っていない。提案手法を用いて床版内部の疲労損傷の発生や進展分布を段階的に捉えることができれば、床版の疲労メカニズムの解明に大きく貢献でき、さらに実務でも道路橋床版の健全性モニタリングへの活用などが期待できる。

そこで本研究では、内藤らの提案する小型加振器を励振器とした強制振動試験に着目し、はじめに 50 年間供用され撤去・架替えに至った実道路橋 RC 床版を切り出し、床版の下面及び切断面の劣化性状と共振周波数によりその劣化度を評価した。さらに、切り出した床版に対して輪荷重走行試験を実施することで、疲労損傷の進展による共振周波数の変化を捉え、輪荷重走行試験結果と共振周波数との関係を整理した。そして、実道路橋 RC 床版の疲労損傷評価で得られた知見を基に、第5章で実験を実施した ASR を受けた RC 床版の輪荷重走行試験の各段階において、RC 床版内部の損傷レベルを定量的に評価することで、ASR が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響について実験的に検討した。

6.2 強制振動試験方法

6.2.1 振動試験の概要¹²⁾

本実験での強制振動試験に用いた試験装置を写真-6.2.1に示す。本実験で使用した小型加振器は、寸法 $\phi 95\text{mm} \times 56\text{mm}$ 、重さ 1.8kg、最大加振力 49 N、可変周波数 2~20,000 Hz である。なお、振動試験は、着目する周波数帯域にわたって正弦波の周波数を連続的(直線的)に上昇させるスイープ加振を用いて実施した。振動試験の概略図を図-6.2.1に示す。振動試験は、小型加振器の振動面に貼付した制御加速度ピックアップの値をデジタル振動制御装置(コンピュータ)に取り込み、これが事前にプログラムした加速度パターンと合致するようにパワーアンプから小型加振器に送る電流量をコンピュータで制御する。このとき、小型加振器周辺で床版に貼付した測定用加速度ピックアップにより応答加速度を測定し、共振曲線(図-6.2.2)を得る。これらの加速度ピックアップは、厚さ 0.6mm の両面テープによって固定している。なお、本実験の範囲では、接着剤と両面テープの接着方法の違いによって、共振周波数に大きな差異がないことを確認している。

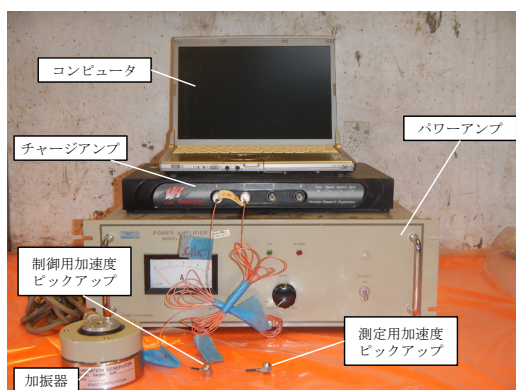


写真-6.2.1 試験装置の概要

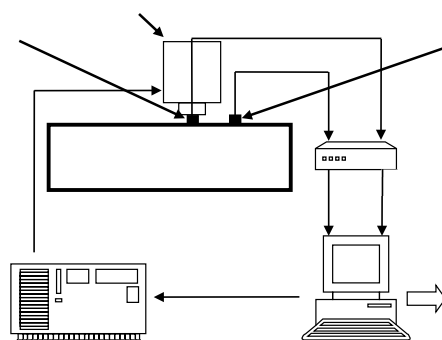


図-6.2.1 強制振動試験概略

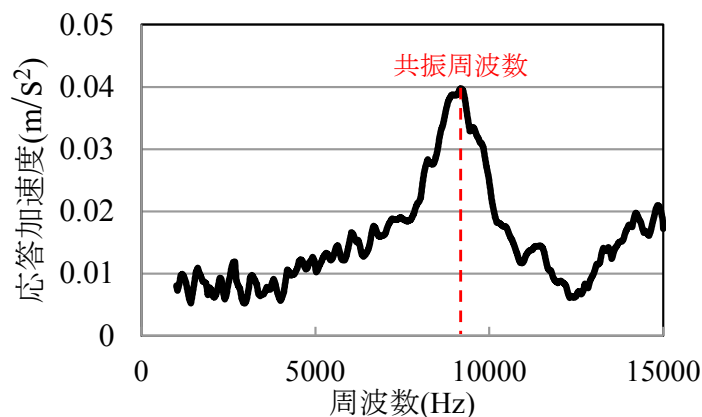


図-6.2.2 共振曲線の一例

6.2.2 共振周波数の測定方法

振動試験は、加振器の振動テーブルを床版に当て、鉛直方向(床版厚さ方向)に調和振動を与えた。試験時には、加振器と床版の間に、緩衝材として段ボールを挟むことで、加振器本体から床版に伝わる振動を防いだ。そして、加振点付近に計測用加速度ピックアップを両面テープで貼付し、床版の定常応答(鉛直方向加速度)を測定した。これにより図-6.2.3 示すように部材全体ではなく局所的な損傷を評価することが可能であり、原理として上下面で同じ計測結果が得られる。

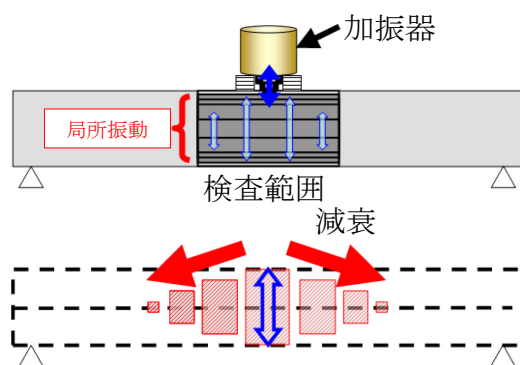


図-6.2.3 振動試験の概要

6.2.3 共振周波数比の算出方法

本研究では、健全な RC 床版における共振周波数と、損傷を受けた RC 床版の共振周波数との比(以下、共振周波数比)により健全性の評価を行う。なお、健全な RC 床版の共振周波数の理論値は、棒部材の式(6.2.1)を近似的な算定式と考えて、コンクリートの弾性波速度から求めた。

$$f = \frac{v}{2L} \quad (6.2.1)$$

ここで、 f : 共振周波数の理論値、 L : 床版厚さ、 v : コンクリートの弾性波伝播速度である。

一方、本研究のように材料劣化を受ける RC 床版を対象とする場合には、損傷程度に応じた弾性波伝播速度を考慮しなければならない。そこで、本研究では式(6.2.1)中の弾性波伝播速度 v に、1次元棒の縦波のみを与えた簡易式(6.2.2)より、コンクリート密度及び動弾性係数から健全な RC 床版の周波数の理論値の類似解を得た。なお、既往の研究により、式(6.2.2)により得られる理論値と、本提案手法によって得られる共振周波数は、概ね一致することを別途確認している。

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (6.2.2)$$

ここで、 E_d : 動弾性係数、 ρ : コンクリートの密度である。

6.3 実 RC 床版の疲労損傷度評価

6.3.1 対象橋梁及び供試体の概要^{12),13)}

(1) 対象橋梁

表-6.3.1 に橋梁諸元を示す。実験対象とした橋梁は、直轄国道の一般国道 4 号に架設されていた旧白河橋である。本橋は、1961 年より供用が開始された 5 径間単純鋼合成鈹桁橋(4 主桁)であり、橋長が 160m、幅員が 8.9m であった。写真-6.3.1 に対象橋梁の供用時の写真を示す。

表-6.3.1 橋梁諸元

橋梁名	旧白河橋
路線名	一般国道 4 号
交通量	24 時間交通量：24,656 台 24 時間大型車交通量：7355 台 (平成 22 年度交通センサス)
凍結防止剤散布量	4.5 ton/km(1 シーズン)
竣工年月	1961 年
橋長	160.10m
適用示方書	S31 鋼道路橋設計示方書



写真-6.3.1 対象橋梁

(2) 供試体の概要

実験を実施した供試体は、1)供用から撤去までの 50 年間供用され、途中床版下面の一部でモルタル系の補修材によって補修が施された床版(以下、原床版)と、2)供用 43 年目に応急的な打換えを実施した中で一部床版において鉄筋自体も更新し取り替えた状態になった床版(以下、取替え床版)の 2 体である。この 2 体の床版供試体における使用材料は異なり、原床版には丸鋼(主筋 $\phi 16$, 配力筋 $\phi 13$)、粗骨材には川砂利が使用されていた。一方、取替え床版は、異形鉄筋(主筋 D19, 配力筋 D13)、粗骨材には碎石が使用されていることが搬入時の切断面の観察に

より確認された。

図-6.3.1 に床版供試体切出し位置を示す。実験を実施した供試体の供用期間の床版位置は、原床版が第3径間(図中の赤枠)、取替え床版が第5径間のジョイント付近という大型車の衝撃荷重を含む疲労損傷を受けやすい位置(図中の青枠)であった。なお、輪荷重走行試験における輪走行の範囲は、概ね床版供試体の供用時における大型車輪距範囲上にあることを確認している。

図-6.3.2 に切り出した床版供試体の寸法を示す。実験を実施した床版供試体は、橋軸方向に3m、橋軸直角方向に2mとする範囲を切り出し、輪荷重走行試験機に設置できるよう整形した。図より、切り出した床版供試体は、排水勾配等の影響で床版厚さが異なり、原床版では最大で184mm、最小で162mmであったのに対し、取替え床版では最大で199mm、最小155mmであった。

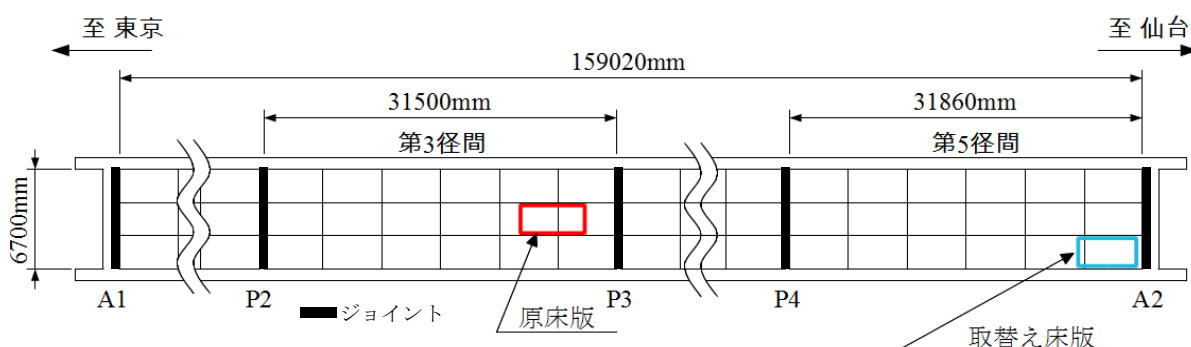


図-6.3.1 床版切出し位置

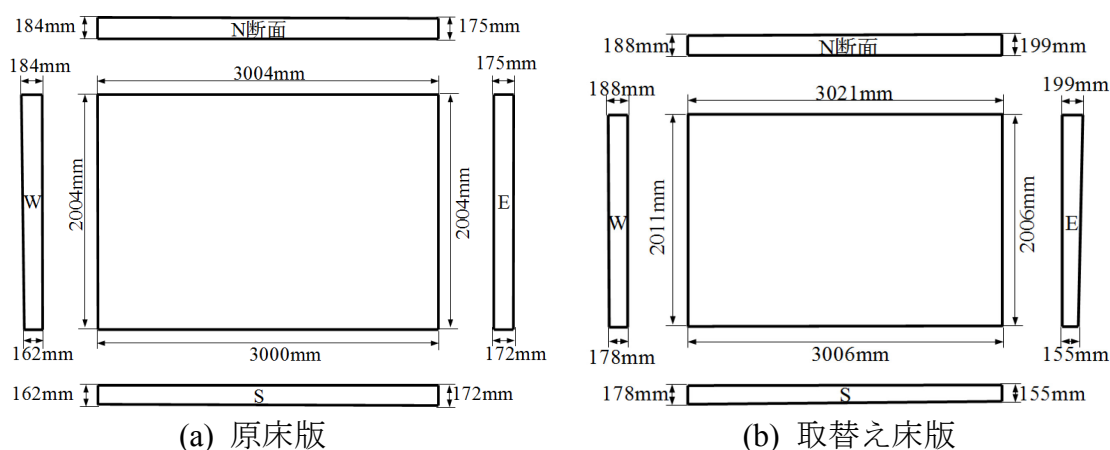


図-6.3.2 床版寸法

(3) 供試体の損傷状況

図-6.3.3 に輪荷重走行試験前に観察した、床版下面のひび割れ発生状況を示す。なお、図中には各床版四隅の床版厚さを赤文字で示している。図より、下面に発生していたひび割れは、原床版ではひび割れよりもかぶり部のコンクリートがはく離する劣化(図中の網掛け部)が多数確認され、床版下面のひび割れ状況に基づく劣化進行過程は状態Ⅳ(劣化期)¹⁴⁾程度と判定された。一方、取替え床版は、疲労荷重による軸直角方向のひび割れが進展しており、下面のひび割れ状態は状態Ⅱ(進展期)程度と判定された。なお、各床版の最大ひび割れ幅は、原床版、取替え床版ともに0.2mmであった。

図-6.3.4、図-6.3.5 に、床版切断面のひび割れ発生状況を示す。なお、断面の名称は図-6.3.2 に示される位置を示している。また、図中の黒丸(●)は、鉄筋位置を示している。図より、原床版では、S断面で床版厚さが最も小さい162mmの付近において水平ひび割れが一部確認され、N断面では水平ひび割れの発生はなく、床版端部に一部ひび割れが認められた。一方、取替え床版では、W断面端部の一部で水平ひび割れが発生し、S断面では床版全長で上側鉄筋に沿うような水平ひび割れが確認された。なお、原床版のW断面、E断面及び取替え床版のN断面、E断面にはひび割れは発生していなかった。なお、断面の観察より、各床版における軸方向断面の鉄筋比は、原床版で1.6%、取替え床版で3.3%であった。このように、供用年数が長い原床版では、床版下面のひび割れは劣化期相当であったものの、切断面には疲労限界状態の目安となる水平ひび割れの発生がほとんど認められなかった。反対に、供用年数は短いが衝撃荷重を受けやすい位置に供用されていた取替え床版では下面の損傷状態は加速期までには達してはいるものの、床版上縁側に水平ひび割れの発生が認められた。以上の観察結果より、寒冷地の道路橋床版では下面観察のみでは必ずしも床版内部の損傷状況を適切に評価できず、非破壊検査による床版内部の損傷度を把握することの重要性を示す結果となった。

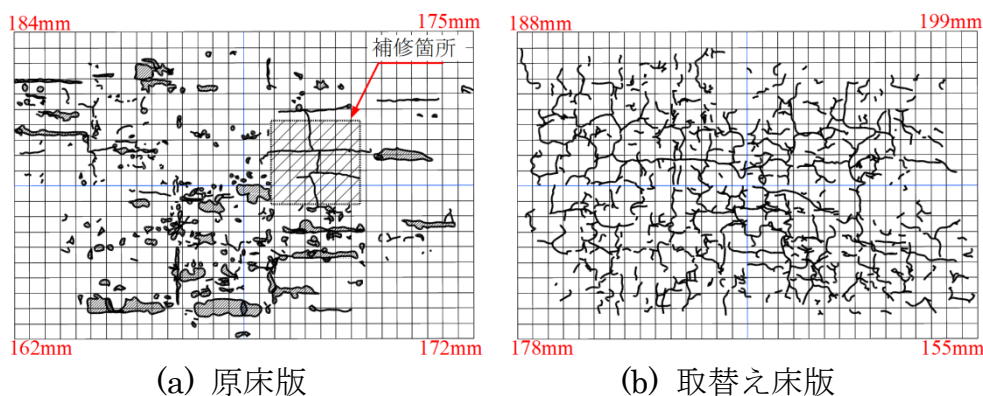


図-6.3.3 床版下面ひび割れ発生状況(載荷試験前)

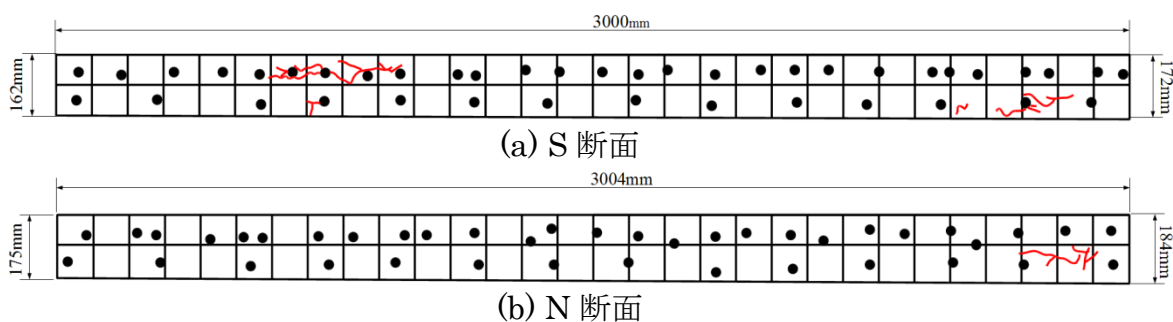


図-6.3.4 原床版切断面ひび割れ発生状況(載荷試験前)

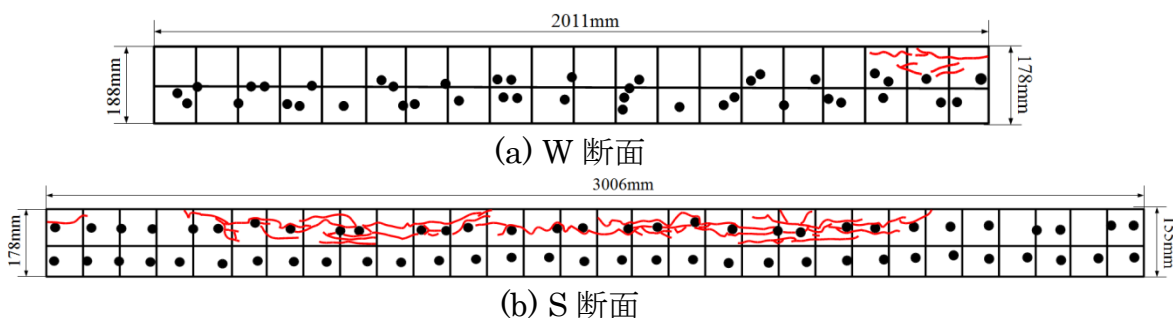


図-6.3.5 取替え床版切断面ひび割れ発生状況(載荷試験前)

図-6.3.6 に供試体より採取したコアによる圧縮強度とヤング率の関係を示す。なお、図中には圧縮強度とヤング率の設計用値¹⁵⁾を併せて示した。圧縮強度試験に用いたコアは、輪荷重走行試験後、押抜きせん断破壊の影響を比較的受けていない箇所から床版厚さ方向に採取した。図より、原床版は、圧縮強度が 33MPa から 40MPa の範囲にあり、ヤング率は供試体 6 本のうち、3 体は設計用値に近い値を示し、3 体は設計用値よりも低い値を示した。これに対して取替え床版は、圧縮強度 28MPa から 34MPa と原床版よりも低く、さらにはヤング率が 15GPa から 22GPa と設計用値よりも明らかに低い結果となった。これは、低品質の骨材が混在し、ヤング率が低くなった可能性が考えられ、この種の評価については今後の課題とする。なお、各床版の圧縮強度とヤング率の平均値は原床版で圧縮強度 33.9MPa、ヤング率 26.7GPa、取替え床版で圧縮強度 31.3MPa、ヤング率 18.4GPa であった。

また、各床版のコンクリート中の塩化物イオン濃度は、いずれの床版についても鋼材位置で腐食発生限界濃度 1.2kg/m^3 ¹⁴⁾には達しておらず、鉄筋の腐食減量率も 2%程度であることを確認しており、本実験に使用する RC 床版では、塩害の影響はさほど大きくないと判断した。

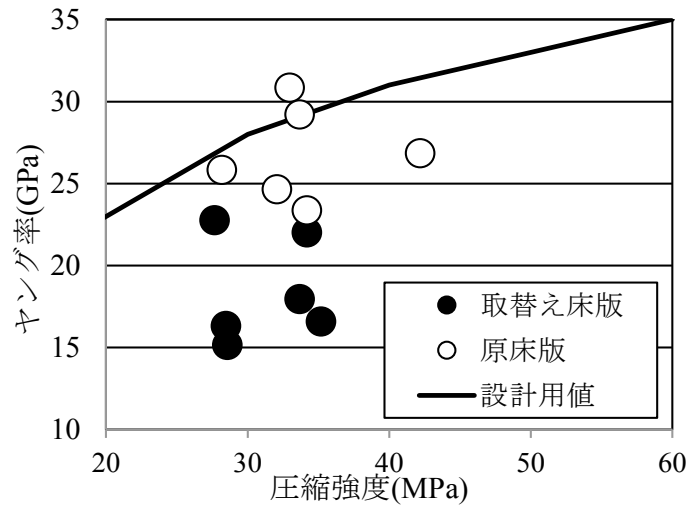


図-6.3.6 圧縮強度とヤング率の関係

6.3.2 輪荷重走行試験の結果

(1) 輪荷重走行試験の概要

本節で実施される輪荷重走行試験は、第5章における輪荷重走行試験と同一条件で行った。ただし、等価繰返し走行回数に換算する際に用いる S-N 曲線の傾きの逆数については、それぞれの使用鋼材を考慮し算出した。なお、原床版では、赤代ら¹⁶⁾の提案する丸鋼を用いた RC 床版の疲労寿命予測式の傾きの逆数である 10.96、取替え床版では松井ら¹⁷⁾の提案する異形鉄筋を用いた RC 床版の疲労寿命予測式の傾きの逆数 12.76 を用いた。

(2) 活荷重たわみと等価繰返し走行回数

図-6.3.7 に、活荷重たわみと等価繰返し走行回数の関係を示す。なお、図中には第3章で実験を実施した健全供試体(鉄筋比 1.2%)のデータも併せて示した。また、図中の点線は各床版の共振周波数を測定した回数を示している。

図より、走行回数2回の活荷重たわみは、健全供試体で 0.86mm に対し、床版厚さ及び鉄筋比が健全供試体よりも大きい取替え床版で 0.88mm と同程度の活荷重たわみを示した。これは、取替え床版ではヤング率が低いことに加え、床版断面及び下面のひび割れの影響により剛性が低下したと推察された。一方、床版厚さ及び鉄筋比が健全供試体程度 of 原床版では 1.42mm と、明らかに健全供試体よりも大きい値を示した。これは、供用 50 年が経過し疲労による損傷が著しいためと考えられた。その後の活荷重たわみの変化は、両供試体とも走行回数の増加に伴い、徐々に増加する傾向を示した。疲労限界に達した走行回数は、原床版が走行回数 230 万回であるのに対し取替え床版が走行回数 3200 万回と、原床版よりも圧縮強度が低く、また載荷前において床版切断面に水平ひび割れが確認された取替え床版の方が、疲労限界に至る走行回数は大きい結果となった。これ

は、床版厚さが大きいことから、押抜きせん断耐荷力が高く、また、異形鉄筋を使用した床版の場合、丸鋼を使用した床版よりも耐疲労性が向上することが既往の研究¹⁶⁾より明らかとされており、本実験においても使用鋼材の違いにより耐疲労性に大きな差が生じたと考えられる。

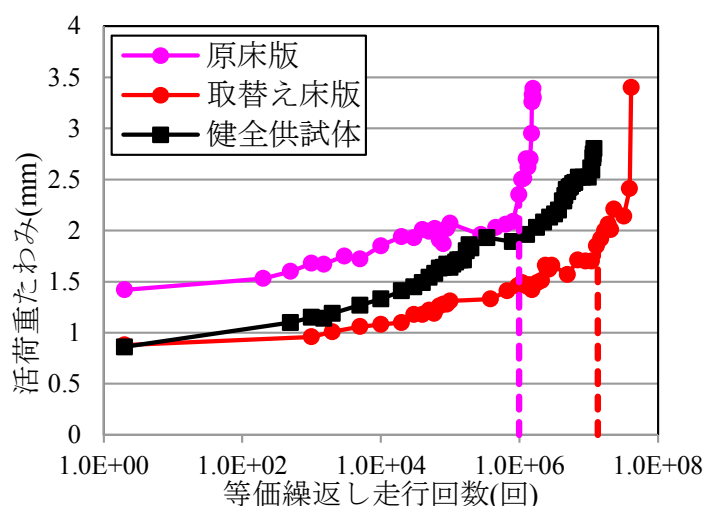


図-6.3.7 活荷重たわみと等価繰返し走行回数

(3) 床版下面のひび割れ発生状況及びひび割れ密度

図-6.3.8 に原床版及び取替え床版の疲労限界状態時に観察した下面のひび割れ発生状況を示す。図より、原床版には、短く微細なひび割れが床版全面に発生する傾向を示した。一方で、取替え床版では、輪荷重走行試験前より発生していたひび割れが発達するように下面全体へ進展する傾向であった。これら下面のひび割れ進展の違いは、使用材料の違いが疲労によるひび割れの発生形態にも影響を及ぼしたものと考えられた。

図-6.3.9 に下面ひび割れの密度と等価繰返し走行回数の関係を示す。図より、走行回数2回のひび割れ密度は、原床版は 4.84m^2 、取替え床版が 9.66m^2 であった。

その後の走行回数の増加に伴うひび割れの増加傾向は、原床版は健全供試体と同様の傾向を示したが、取替え床版ではひび割れ密度がさらに増加するような傾向であった。疲労限界のひび割れ密度は、原床版では 13.1m^2 、取替え床版が 19.9m^2 と異なった。これは、使用鋼材とその鉄筋量の違いが一因と考えられ、取替え床版の方がひび割れの分散性が良好であったことがひび割れ密度の増加傾向に影響を及ぼしたと解釈された。

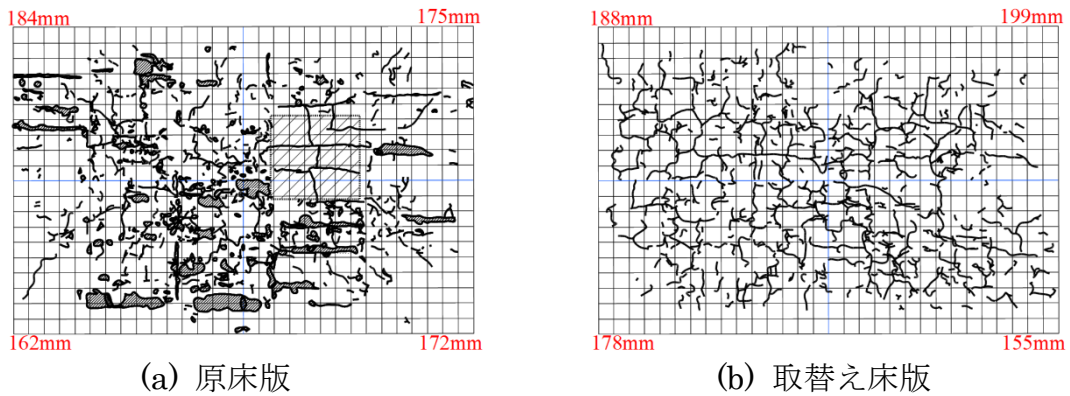


図-6.3.8 床版下面ひび割れ発生状況(疲労限界状態時)

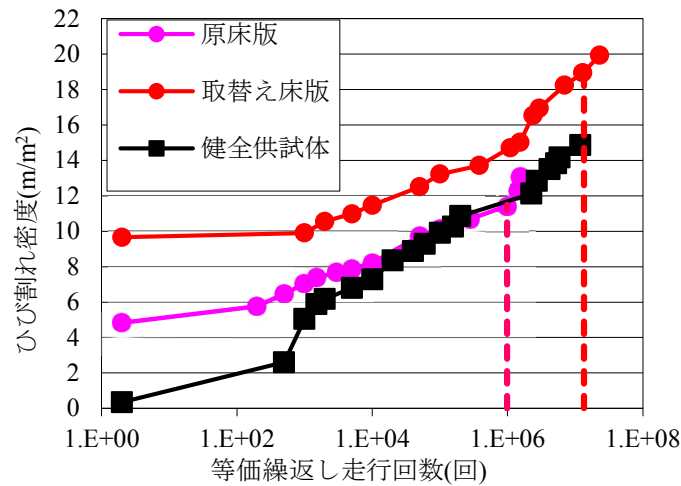


図-6.3.9 ひび割れ密度と等価繰返し走行回数

(4) 押抜きせん断破壊後の断面損傷状況

写真-6.3.2 に、原床版及び取替え床版の輪荷重走行試験後に供試体を中央より4分割した際の橋軸断面を示す。写真より、原床版と取替え床版のどちらの供試体についても RC 床版の耐疲労性を低下させる要因である水平ひび割れの発生が確認され、疲労限界がこの種のひび割れの発生に起因したものと考えられた。また、原床版については、取替え床版よりも供試体下面から上面に向けて進展しているひび割れが多く、これが供用中に発生したひび割れであれば上下面を貫通していたとも考えられる。また、原床版の補修箇所は、補修材(モルタル系)と既設コンクリートではく離が生じていた。

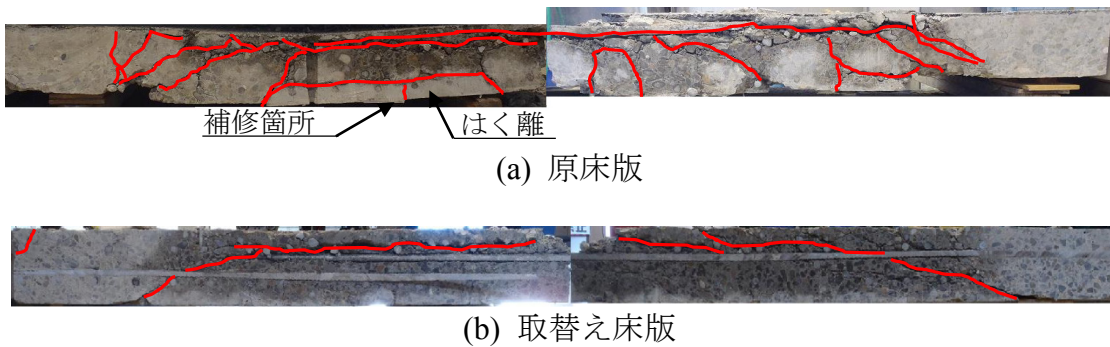


写真-6.3.2 供試体断面の損傷状況(橋軸断面)

6.3.3 共振周波数比による損傷度評価

(1) 周波数計測の概要

本実験では、スイープ周波数を 1,000~10,000Hz, 加振器の加速度振幅 5.0 m/s^2 , 測定時間 10 分間を基本とし、チャージアンプによる応答加速度のサンプリング周波数は 65,536Hz とした。振動試験は 2 体の床版供試体共に载荷試験前(輪荷重走行試験前で走行回数 0 回)と、疲労限界状態前(原床版：等価繰返し走行回数 98 万回時, 取替え床版：等価繰返し走行回数 1300 万回時)で測定した。測定箇所は、図-6.3.10 に赤丸で示す 9 点を基本とし、取替え床版の载荷試験前では、最も損傷程度が大きいと判断された S 断面付近の 3 点を加えた計 12 点(図中の黒丸) で実施した。また、共振周波数の測定は、写真-6.3.3 に示すように、RC 床版上面で測定を実施した。

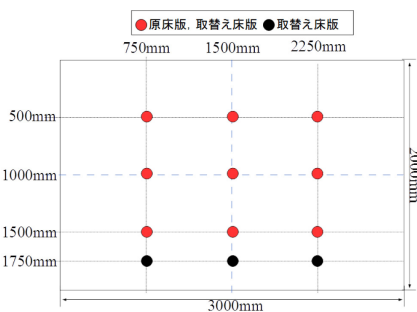


図-6.3.10 強制振動試験測定箇所



写真-6.3.3 振動試験状況

(2) 共振周波数比の算出方法

共振周波数比を求める際に用いる各測定点の共振周波数の理論値を図-6.3.11 に示す。なお、本実験では健全な状態での共振周波数比及び弾性波速度を把握していないため、健全な RC 床版の共振周波数の理論値を、床版の部材厚さより式(6.2.1)を用いて求めた。コンクリートの弾性波伝播速度は、図-6.3.6 に示した圧縮強度とヤング率の関係から、原床版では比較的健全な RC 床版として、一般的なコンクリートの弾性波伝播速度である 4000 m/s を使用した。一方で取替え床

版では、ヤング率が低いため、式(6.3.1)を用いて弾性波伝播速度を補正した。

$$v_R = v_O \times \sqrt{\left(\frac{E_R}{E_O}\right)} \quad (6.3.1)$$

ここで、 v_R ：取替え床版の弾性波伝播速度、 v_O ：原床版の弾性波伝播速度で 4000m/s、 E_R ：取替え床版のヤング率で 18.4GPa、 E_O ：原床版のヤング率で 26.7GPa である。なお、式(6.3.1)より取替え床版の弾性波伝播速度 3319m/s であった。

また、本研究に使用した床版では各断面で床版厚さが異なるため、各測定点の床版厚さを算出し、測定点毎で共振周波数の理論値を求めた。振動試験は、試験当時の制御装置の仕様により 10,000Hz までしか計測しておらず、幾つかの測定データは 10,000Hz でも応答加速度が増加しており、このようなデータについては、共振周波数比は 1.0 以上と記載した。なお、本実験後に装置の改良を行い、現在では 20,000Hz まで計測できるまでにスペックの向上が成されている。

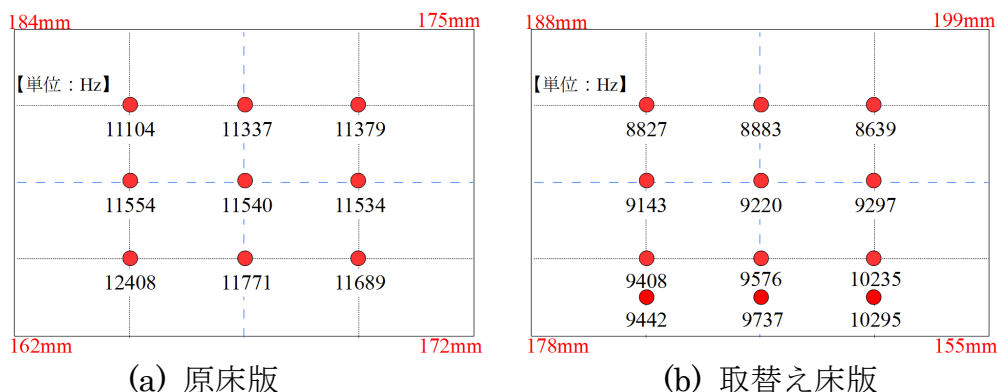


図-6.3.11 共振周波数の理論値

(3) 共振周波数比の分布(載荷試験前)

図-6.3.12 に載荷試験前に実施した強制振動試験結果として、共振周波数比の分布を示す。なお、その際に観察された床版下面のひび割れ発生状況も併せて示す。図より、載荷試験前の共振周波数比は、原床版ではひび割れ及びコンクリートの剥落が集中する箇所では共振周波数比が 0.8 程度と低下する傾向を示した。しかし、床版下面でひび割れが生じていない場合においても同程度の共振周波数比を示す箇所があることから、共振周波数の低下には床版下面の劣化性状に加え、床版内部の劣化程度が影響を及ぼしたと考えられる。また、補修部付近では共振周波数比が 0.33 と大きく低下していた。これは、床版内部の劣化性状の影響に加え、補修材であるモルタルと既設コンクリートの境界面でひび割れが生じていたことが要因であると推察された。一方、取替え床版では、床版下面の損傷は比較的軽微な状態であり、共振周波数比もほとんどの位置で 1.0 程度を示した。しかし、水平ひび割れが見られた S 断面付近では、共振周波数が明らかに低下しており、特に水平ひび割れの発生が集中する箇所では、共振周波数比が 0.3 程度と床版の劣化が顕著であった。

以上の载荷前における強制振動試験結果より、供用年数 50 年の原床版では、床版全体の劣化の進行が見られ、供用年数が 7 年と短い取替え床版では、水平ひび割れ発生箇所の付近で共振周波数比の低下が顕著であった。これは、床版切断面で観察された劣化性状に整合するような結果であった。

すなわち、強制振動試験による共振周波数比の計測は、床版下面の目視観察では検知が困難な床版内部の劣化程度を局所的に評価可能であることが示された。

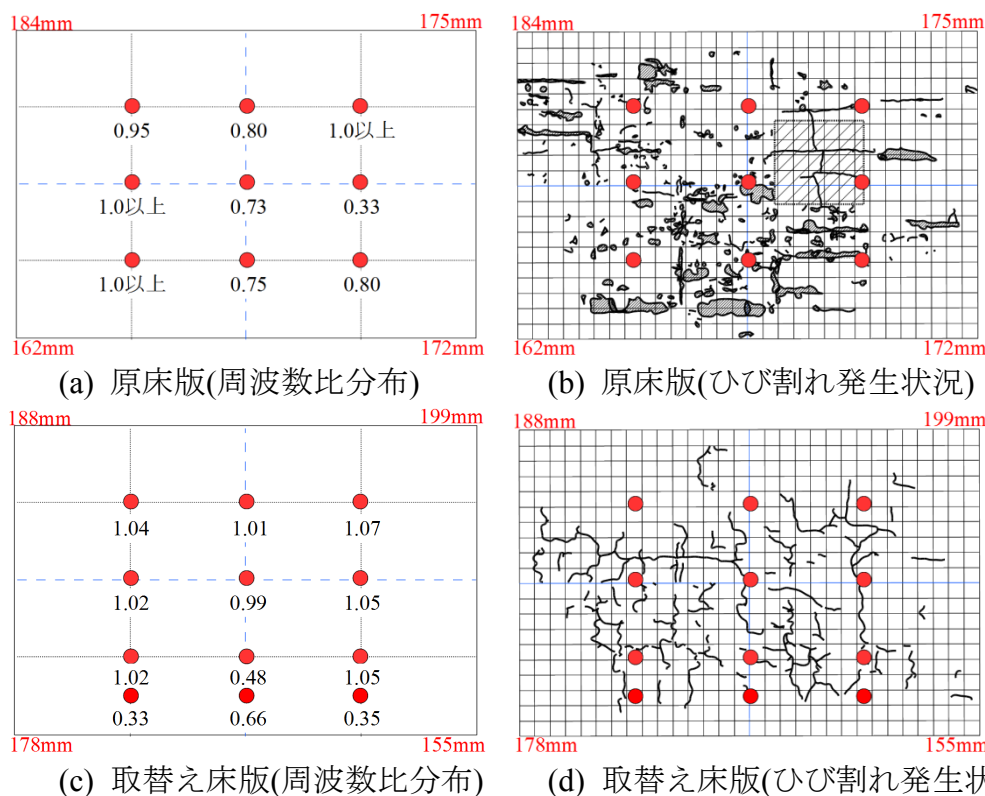


図-6.3.12 共振周波数比分布とひび割れ発生状況(载荷試験前)

(4) 共振周波数比の分布(疲労限界前)

図-6.3.13 に疲労限界状態前に実施した共振周波数比の計測結果と、その際に観察された床版下面のひび割れ発生状況を示す。図より、原床版では、輪荷重走行範囲(図中の赤点線内)を中心にひび割れの進展が見られ、同位置における共振周波数も大きく低下する傾向を示した。また、载荷試験前より共振周波数が大きく低下していた補修部については、床版下面からの観察では大きな変状は見られなかったが、本実験で設定した周波数の範囲では共振周波数を精緻に計測することができなかった。これは、疲労限界状態前で既に補修材と既設コンクリートの境界面でひび割れが生じており、共振周波数が低下したことによるものと推察される。一方で取替え床版では、原床版同様に輪荷重走行範囲でひび割れの発生及び共振周波数の低下が顕著であり、床版中央では共振周波数比が 0.34 と大きく低下した。また、载荷前で既に共振周波数比が低下していた S 断面付

近においても、共振周波数比がさらに低下する結果を示した。これは、床版厚さが薄く、疲労による損傷が早期に進行したことで、他の測定位置よりも低下が顕著であったと推察される。

また、いずれの床版においても、载荷試験前よりも各測定点で輪荷重走行範囲を中心に共振周波数比の低下が確認され、特に、原床版の補修箇所や取替え床版の S 断面付近といった载荷試験前に確認できた損傷箇所については、輪荷重走行試験による疲労損傷の進展と局所化を共振周波数の変化によって捉えられることが示唆された。

いずれの床版も疲労限界状態前の床版中央位置で共振周波数比が 0.3 以下を示した。载荷試験前における原床版の補修部及び取替え床版の水平ひび割れ発生箇所で、共振周波数比が 0.3 程度まで低下していたことを勘案すると、本実験に使用した RC 床版は、局所的ではあるものの撤去時点で疲労による損傷が著しく進行した状態であったといえる。

なお、原床版の左上位置において、载荷前よりも共振周波数比が向上しているが、これは計測のバラつきと考えられ、本実験では、同一箇所の測定でも 500Hz 程度のバラつきが見られる場合があった。このようなバラつきの評価、あるいはさらに精緻に計測できる手法を確立する必要があると考えており、これについては今後の課題としたい。

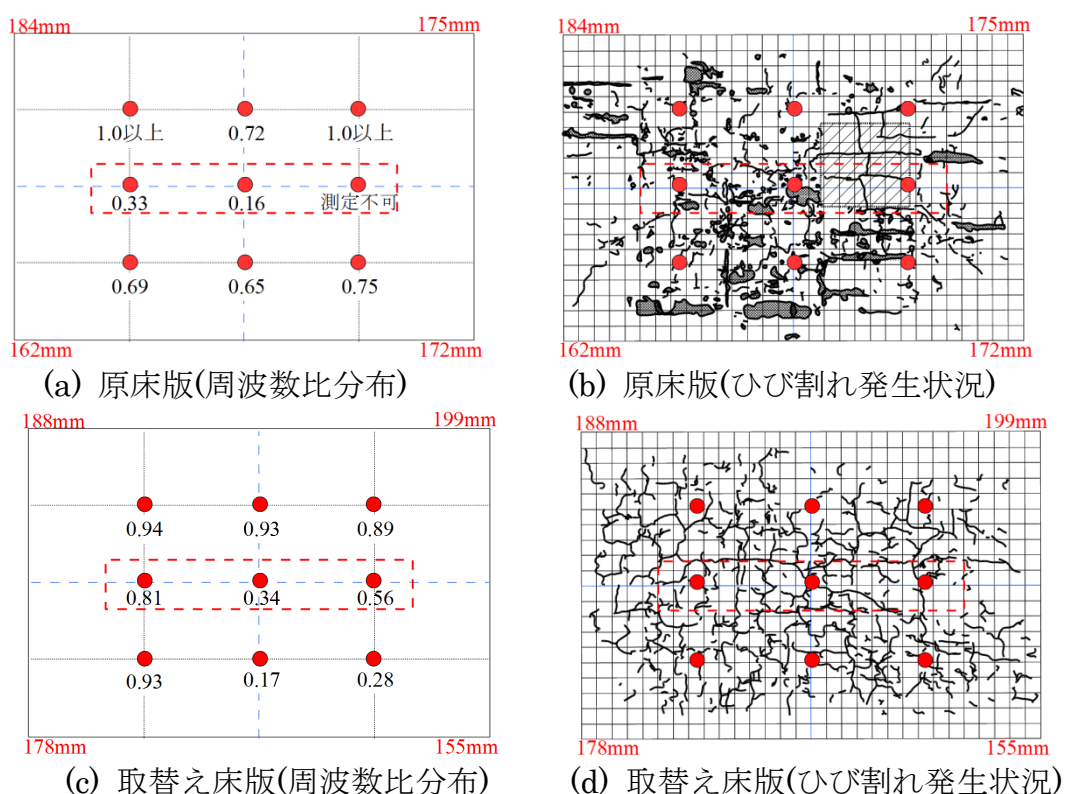


図-6.3.13 共振周波数比分布とひび割れ発生状況(疲労限界前)

写真-6.3.4 に取替え床版の共振周波数計測時(等価繰返し走行回数 1300 万回時)において水平ひび割れ発生の有無を確認するために削孔した観察孔を示す。なお、観察孔は床版中央付近で床版上面から上側主鉄筋位置までの高さで床版厚さ方向にφ32mmで削孔した。写真より、共振周波数計測時における観察孔では水平ひび割れの発生は認められなかった。しかし、その後156.8kN 載荷で実走行回数1万回(等価繰返し走行回数約400万回)の疲労試験を実施した際に再度観察したところ、上側鉄筋位置において水平ひび割れが発生していた(写真-6.3.5)。このことから、共振周波数は繰返し疲労作用によって床版内部及び下面に発生したひび割れの影響により低下するものだと考えられ、これを段階的に計測することで水平ひび割れの発生時期の予測に繋がることが期待される。

すなわち、共振周波数の低下に着目することで、水平ひび割れが発生する前段階(補修が容易な段階)での劣化・損傷の兆候を捉えることができるといえ、本提案手法は道路橋 RC 床版の予防保全への活用が大いに期待できると考える。



写真-6.3.4 観察孔(1300万回時)



写真-6.3.5 観察孔(1700万回時)

(5)本節の総括

本節で実施した実 RC 床版を用いた強制振動試験結果より、共振周波数による床版の損傷度評価は、床版下面からの観察では検知が困難な床版内部の劣化程度を評価可能であり、疲労荷重による床版内部の損傷レベル増大に伴う共振周波数の低下傾向を捉えることで、床版の損傷レベルや疲労損傷の進展範囲、局所化など、劣化の空間分布を把握できることが示唆された。

本提案手法は、外観で変状が確認できないケースや、アスファルト舗装によって床版上面の変状が確認できないケースであっても、床版内部の疲労損傷を評価できる点検手法として極めて有用であり、実橋でのモニタリングへの応用や、輪荷重走行試験との併用により床版の疲労メカニズムの解明に繋がるものと期待される。そこで、次節では本提案手法を用いた疲労メカニズムの検討として、第5章で実施された ASR 劣化を受ける RC 床版に対して、輪荷重走行試験の各段階で共振周波数による損傷度評価を行った。

6.4 ASRにより劣化したRC床版の損傷度評価

小型加振器を励振器とした強制振動試験は、前節の実験により、床版内部の疲労損傷を評価できる点検手法として極めて有用であることが示された。

一方で、5章の実験では、ASRにより劣化したRC床版は、ASRの促進速度により、床版に発生するひび割れの性状が大きく変化し、輪荷重走行試験による耐疲労性に大きな差が生じる結果を示した。しかし、輪荷重走行試験の各段階において、床版の外観上の劣化性状は観察できたものの、床版内部の劣化度については評価がされていない。そこで本章では、第5章で実験を実施したASRによる劣化を受けたRC床版に対し、輪荷重走行試験の各段階で共振周波数を計測することで、ASRによる床版内部の劣化の進展を捉え、ASRがRC床版の耐疲労性に及ぼす影響について検討した。

6.4.1 実験条件

本実験で強制振動試験を実施する供試体は、第5章の実験に用いた床版のうち、1)ASR促進を実施していないN-d、2)41日間の急速試験後に乾燥状態で輪荷重走行を実施したR-d、3)260日間の緩速試験後に、水張り状態で輪荷重走行を実施したS-wの計3体とした。なお、R-wでは、実験の都合上、共振周波数の計測を実施していない。

また、前節の実験に使用した小型加振器では10,000Hzまでの周波数しか精緻に計測ができなかったが、本節では小型加振器のスペックを向上させることで、最大20,000Hzまでの周波数を計測できるように改良している。

本節の振動試験における周波数の計測条件は、スイープ周波数を1,000～15,000Hz、加振器の加速度振幅 1.0 m/s^2 、測定時間18秒を基本とした。また、強制振動試験は各床版で計測回数が異なり、N-dでは実走行回数3万回、7万回、10万回、11.5万回、14万回、16万回時の計6回、R-dでは実走行回数0回、3.5万回、10万回、18万回、22万回時の計5回、S-wでは、実走行回数0回、5万回、10万回、押抜きせん断破壊後の計4回行った。

小型加振器による共振周波数の測定位置を図-6.4.1に示す。測定は、300mm×300mm範囲を基本とし、輪荷重走行位置に関してはより密に計測を行った。測定点はN-d、R-dで41箇所、S-wで45箇所である。共振周波数の測定は、N-d及びR-dでは床版上面で行い、水張りを行ったS-wでは床版下面で実施した(写真-6.4.1)。なお、本実験ではN-dの載荷試験前(走行回数0回時)における共振周波数の計測を実施していないため、健全なRC床版の共振周波数の理論値を、N-dのテストピース($\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$)の密度と動弾性係数から式(6.2.2)を用いて求めた。これより、健全なRC床版の共振周波数の理論値は10,596Hzであった。

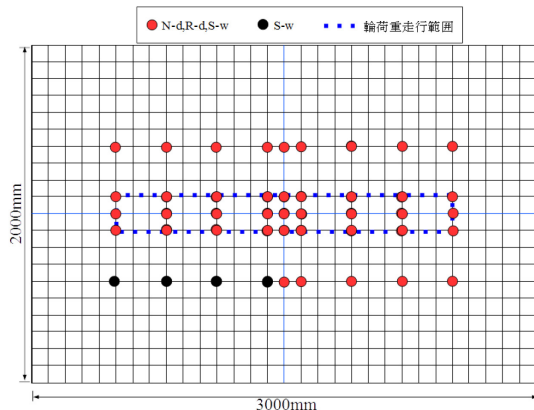


図-6.4.1 周波数測定位置



写真-6.4.1 測定状況

6.4.2 共振周波数比による耐疲労性評価

(1) 共振周波数比分布

図-6.4.2 から図-6.4.4 に、輪荷重走行試験の各段階で計測した共振周波数比の分布とひび割れの発生状況を示す。なお、図中の青線は ASR 促進後に観察されたひび割れ、赤線は輪荷重走行試験途中に観察されたひび割れを示している。

図より N-d では、等価繰返し走行回数 10 万回では、床版下面に発生するひび割れは、床版全面に発生しているのに対して、共振周波数比が 0.85 から 0.9 の範囲内にあり、共振周波数比の低下は顕著でない。その後は、輪荷重走行に伴うひび割れの進展はあまり見られなかったものの、等価繰返し走行回数 50 万回では輪荷重走行範囲内において共振周波数比が 0.7 から 0.85 の範囲までに低下し、等価繰返し走行回数 180 万回では、輪荷重走行範囲内全域で共振周波数比が 0.6 程度となり、その後、疲労限界状態に達した。この輪荷重走行に伴う共振周波数比の低下は、床版内部に発生するひび割れの影響によるものだと考えられる。

次に、R-d の走行回数 0 回では、床版下面ではひび割れの発生がなかった床版中央位置において、共振周波数比が 0.9 程度を示す箇所があり、ASR によって床版内部に生じたひび割れの影響により共振周波数が低下したと考えられた。このことから、本提案手法を用いることで、床版下面からの点検では損傷度の検知が困難な、ASR による床版内部の劣化を検知できる可能性が示された。その後は、等価繰返し走行回数 240 万回では床版中央で共振周波数比が 0.65 程度まで低下し、等価繰返し走行回数 1800 万回では N-d 同様に、輪荷重走行範囲内全域で共振周波数比が大きく低下し、疲労限界状態に至った。

最も少ない走行回数で疲労限界状態に至った S-w では、走行回数 0 回の段階で共振周波数比が 0.8 程度を示す箇所があり、他の 2 体よりも損傷レベルが大きい箇所があることが分かる。この段階の床版下面に発生するひび割れの状態では、R-d と大きな差異は見られないことから、S-w では走行試験前の段階で床版

内部の劣化が R-d よりも進行していたことが示唆された。その後の走行回数に伴う共振周波数比の低下は、床版内部の劣化の進行程度が他の 2 体よりも顕著であり、等価繰返し走行回数 5 万回時点では、共振周波数比 0.6 程度を示す箇所が輪荷重走行範囲内にあり、等価繰返し走行回数 10 万回時では輪荷重走行範囲の一部で共振周波数比が 0.6 を下回る結果を示した。この共振周波数比の低下は、ASR によるひび割れと疲労損傷によって生じるひび割れの相乗作用によるものだと考えられ、S-w では载荷前に床版内部で発生していた ASR によるひび割れが、繰返し作用を受けることで増幅し、内部損傷が進行したと推察される。また、いずれの床版においても、共振周波数比は輪荷重走行範囲を中心に低下する傾向を示したが、N-d 及び R-d では輪荷重走行範囲全域で共振周波数比の低下が確認され、S-w では輪荷重走行範囲の中心位置で局所的に共振周波数比が低下した。この共振周波数比の低下位置は、輪荷重走行試験後に観察された水平ひび割れの発生位置(図-5.5.8)と一致しており、本提案手法を用いて共振周波数比を計測することで、水平ひび割れの発生と進展を捉えられる可能性が示唆された。

以上のように、輪荷重走行試験の各段階で計測した共振周波数比のマッピングを示すことによって、これまで検出が困難であった床版内部の疲労損傷の進展状況を可視化することができた。また、本提案手法を用いた強制振動試験により、RC 床版内部に発生する ASR 及び疲労によって生じるひび割れの発生と進展を捉えられる可能性が示された。

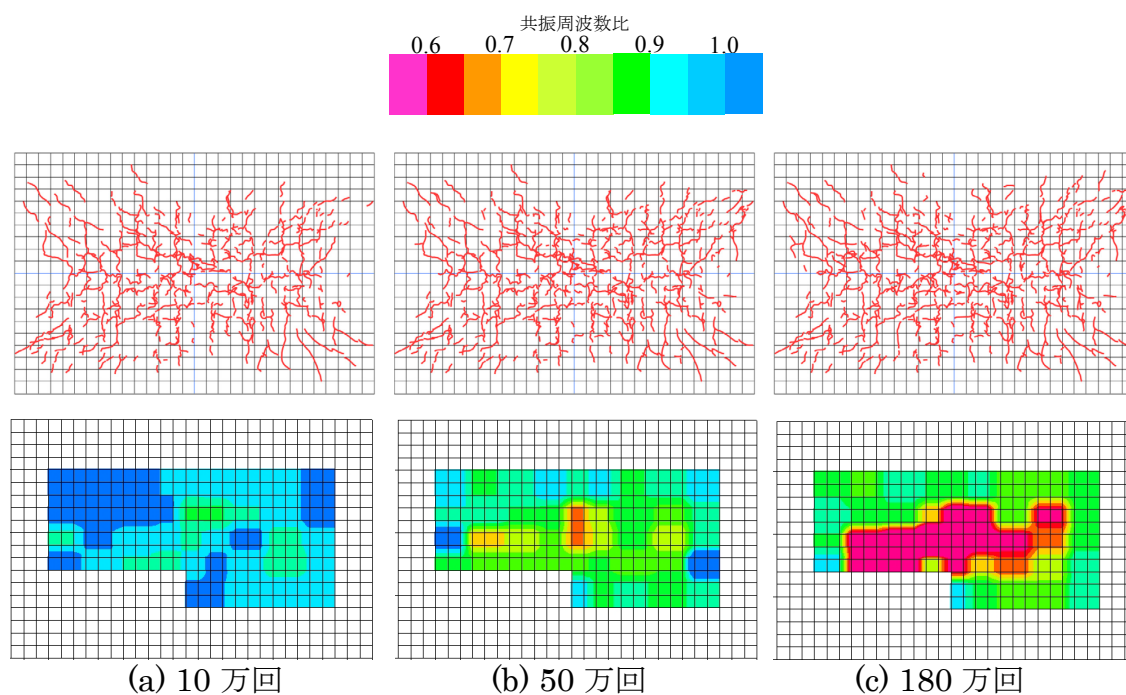


図-6.4.2 共振周波数比の分布(N-d)
(上：ひび割れ発生状況，下：共振周波数比の分布)

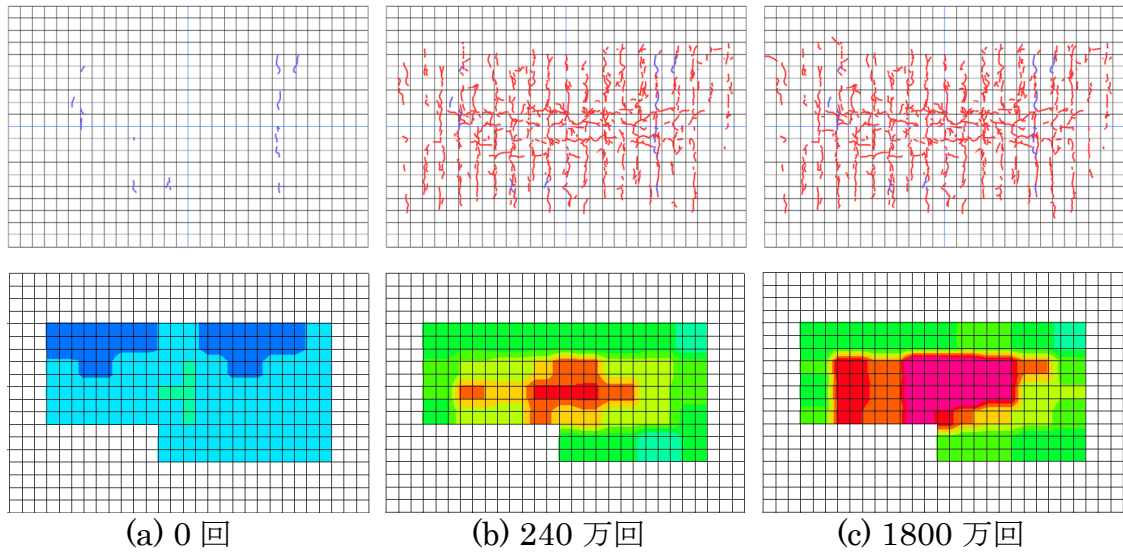


図-6.4.3 共振周波数比の分布(R-d)

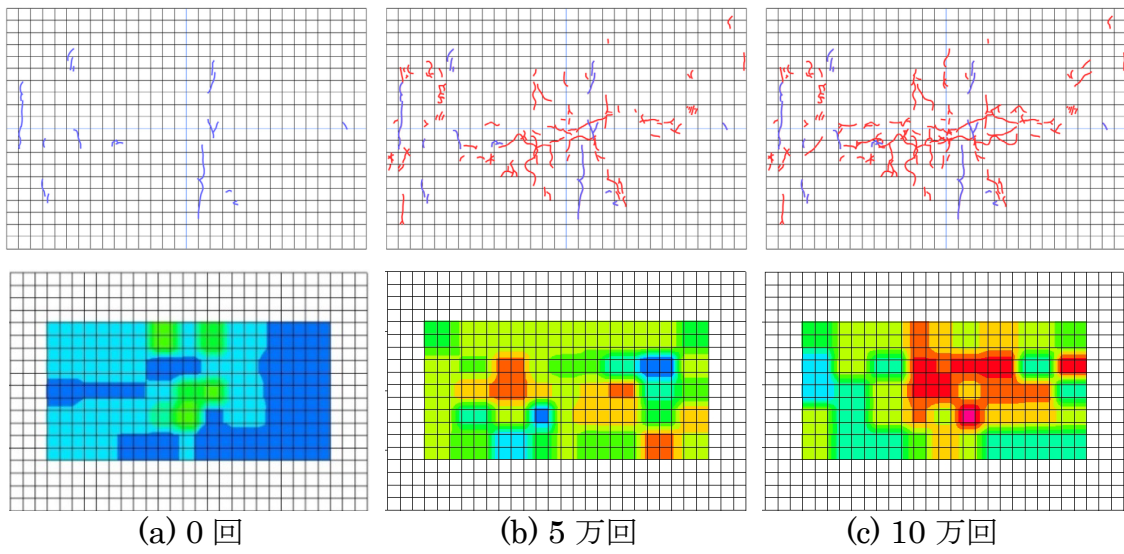


図-6.4.4 共振周波数比の分布(S-w)

(2) 共振周波数比と等価繰返し走行回数との関係

図-6.4.5 に、共振周波数比と等価繰返し走行回数との関係を示す。なお、図中には、輪荷重走行範囲内及び範囲外の共振周波数比の平均値と、床版中央位置で計測した共振周波数比を示している。

図より、N-d では、等価繰返し走行回数 5 万回までは、輪荷重走行範囲内と範囲外で共振周波数比の低下傾向に差は見られなかった。これは、輪荷重走行の初期段階では、輪荷重走行範囲に依らず、床版内部における損傷程度が小さかったと推察された。しかし、等価繰返し走行回数 10 万回以降では輪荷重走行範囲内で共振周波数比の低下が著しくなり、特に床版中央位置で共振周波数比が最も低下する傾向を示した。これは、輪荷重の繰返し作用により、輪荷重走行範囲内に水平ひび割れの発生が生じた可能性が考えられる。

次に R-d は、載荷初期段階では、輪荷重走行範囲に依らず共振周波数の低下は見られなかった。しかし、床版中央位置においては、0.9 程度を示す箇所があり、前述の通り、局所的ではあるものの、ASR による損傷が検知された。等価繰返し走行回数 5 万回までは共振周波数比の低下はいずれの計測位置においても顕著でなかったが、等価繰返し走行回数 10 万回以降では、N-d と同様に走行範囲内と床版中央で共振周波数比が大きく低下した。

S-w では、前述の通り、載荷初期段階の時点で床版中央位置に局所的な損傷が見られたことから、床版中央位置における共振周波数比が 0.85 と低下していた。しかし、輪荷重走行範囲内及び範囲外の共振周波数比はいずれも 1.0 程度であり、局所的な損傷はあるものの、床版全体の損傷度としては健全相当であると判断された。その後の輪荷重走行に伴う共振周波数比は他の 2 体よりも顕著であり、等価繰返し走行回数 10 万回時において床版中央の共振周波数比が 0.7 を示しており、床版内部におけるひび割れが早期に進展したと考えられた。

また、ASR 促進を実施した床版の輪荷重走行範囲内及び範囲外の共振周波数比に着目すると、載荷初期の段階では R-d 及び S-w のいずれにおいても、局所的な損傷は見られたものの、床版全体での損傷程度は小さいものと判断された。第 5 章において、床版から採取したコアによる圧縮強度とヤング係数が設計用値及び N-d と比して明らかに低下していたことを勘案すると(図-5.4.5)、いずれの床版においても ASR による劣化が進行していたのは明確であるが、共振周波数比ではその劣化度は検知されなかったといえる。これについては、ASR 促進時において床版に導入されたケミカルプレストレスの影響により、鉄筋拘束条件下では、床版全体で見かけの剛性が向上したことに起因すると推察された。

その後の輪荷重走行に伴う共振周波数比の低下については、R-d では健全相当である N-d と同様に、走行範囲外の共振周波数の低下はあまり見られなかったのに対し、S-w については疲労破壊の影響が大きい走行範囲外においても、共

振周波数比の低下が顕著であった。これについては、輪荷重走行試験後に観察された床版下面の状態において、水張り試験を行った床版ではASRゲルの滲出(写真-5.5.1)が多量に見られたのに対し、R-dではゲルの滲出がなかったことを考えると、S-wとR-dでは、ゲルの生成量やゲルの粘性が異なったものと考えられる。すなわち、第5章でも示された通り、ASRゲルの生成量や物性及びゲルがひび割れ充てんされることによる力学的作用については、ASRがRC床版の耐疲労性に及ぼす影響を評価する上で重要な課題であり、今後詳細に検討を進めることとする。

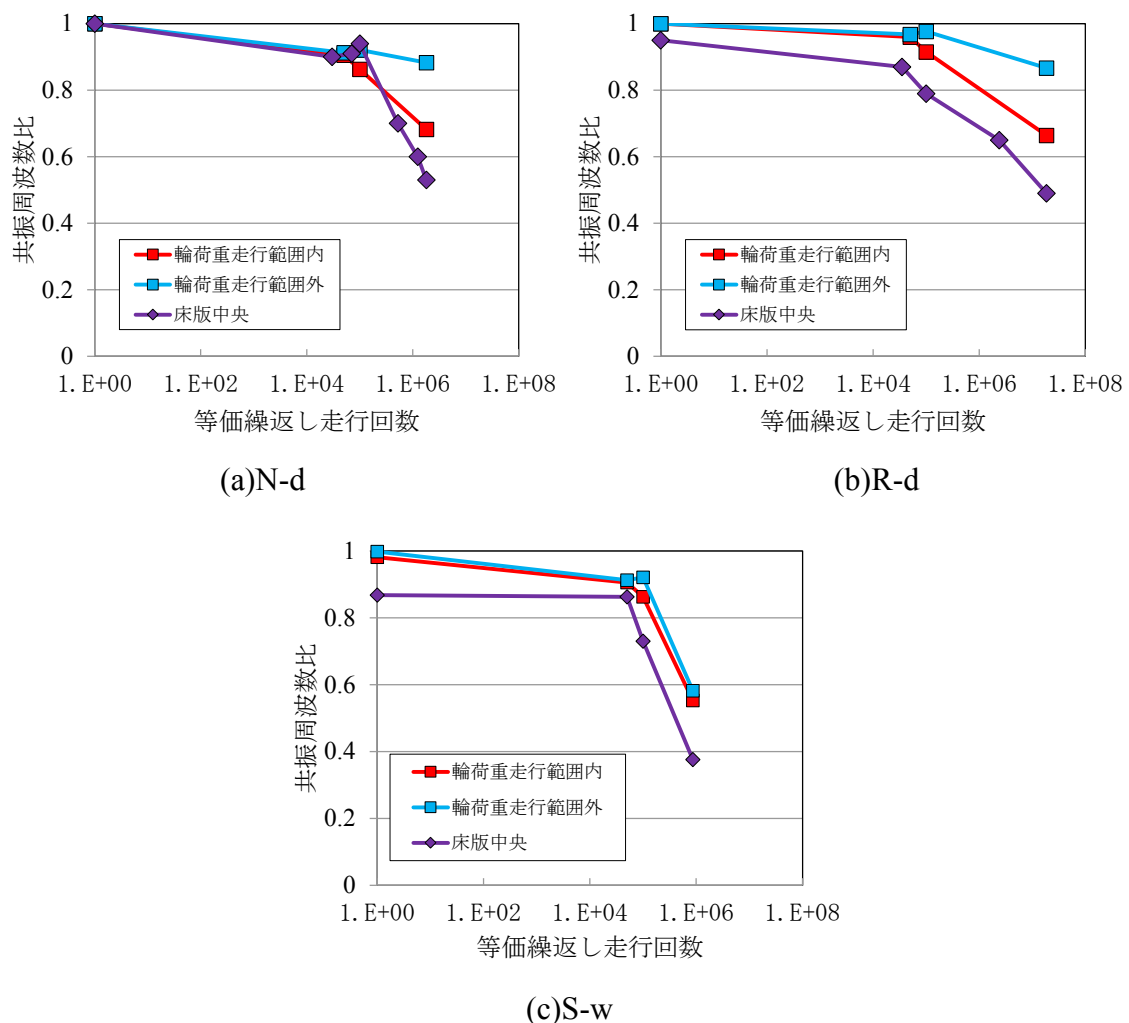


図-6.4.5 共振周波数比と等価繰返し走行回数

(3) 共振周波数比と輪荷重走行試験結果の整理

図-6.4.6 に、共振周波数比、活荷重たわみ、ひび割れ密度と等価繰返し走行回数との関係を示す。なお、共振周波数比は、最も共振周波数比の低下が見られた床版中央位置で計測されたデータを示している。まず、載荷初期の床版中央における共振周波数比は、R-d で 0.92、S-w で 0.89 であり、ASR 促進を実施した床版では、載荷試験前の段階で床版中央に損傷が認められる結果を示した。

その後、N-d 及び R-d では、等価繰返し走行回数 10 万回までは、走行回数の増加に伴い共振周波数比が徐々に低下する傾向を示した。この区間では、前述した床版下面に発生するひび割れの進展が先行しているが、これは、床版表面で観察されるひび割れの向きが床版に対して垂直であり、加振方向と同じであるために、振動試験に与える影響が小さかったと推察された。等価繰返し走行回数 10 万回から約 300 万回においては、共振周波数比が 0.6 程度まで大きく低下した。この時、N-d のひび割れ密度の増加は緩やかになっていることから、疲労荷重によってひび割れが床版内部で進展したことで周波数が低下したと考えられる。その後、等価繰返し走行回数約 300 万回以降では、N-d、R-d とともに活荷重たわみ及びひび割れ密度の増加は緩やかであるのに対し、共振周波数比は 0.5 程度まで低下する傾向を示した。

次に S-w では、等価繰返し走行回数 5 万回時では、他の 2 体と同様に共振周波数の低下は見られなかった。等価繰返し走行回数 5 万回から 10 万回までの区間では、活荷重たわみとひび割れ密度が低い値で推移しているが、共振周波数比は 0.73 まで低下した。これは、等価繰返し走行回数 10 万回時点で、床版内部におけるひび割れが他の 2 体よりも進展したと考えられ、強制振動試験による共振周波数比を把握することで、床版内部の劣化性状を推定できる可能性が示唆された。その後、等価繰返し走行回数約 67 万回で活荷重たわみが急増し、疲労限界状態に至った。

以上より、小型加振器を用いた強制振動試験は、輪荷重の繰返し載荷による床版内部のひび割れの発生・進展を局所的に捉えることが可能であり、特に、活荷重たわみや床版下面に発生するひび割れでは疲労限界状態に至る直前までその兆候が表れないのに対して、共振周波数比では早い段階で低下傾向が認められ、床版内部の疲労損傷を早期に検知することが可能であった。これは、凍結防止剤散布下で問題視される、床版下面では変状が見られない場合であっても床版の損傷が著しく進行しているといったケースについて、極めて有効な対策手法であるといえ、凍結防止剤散布下における RC 床版の適切な維持管理への活用が大いに期待できると考える。

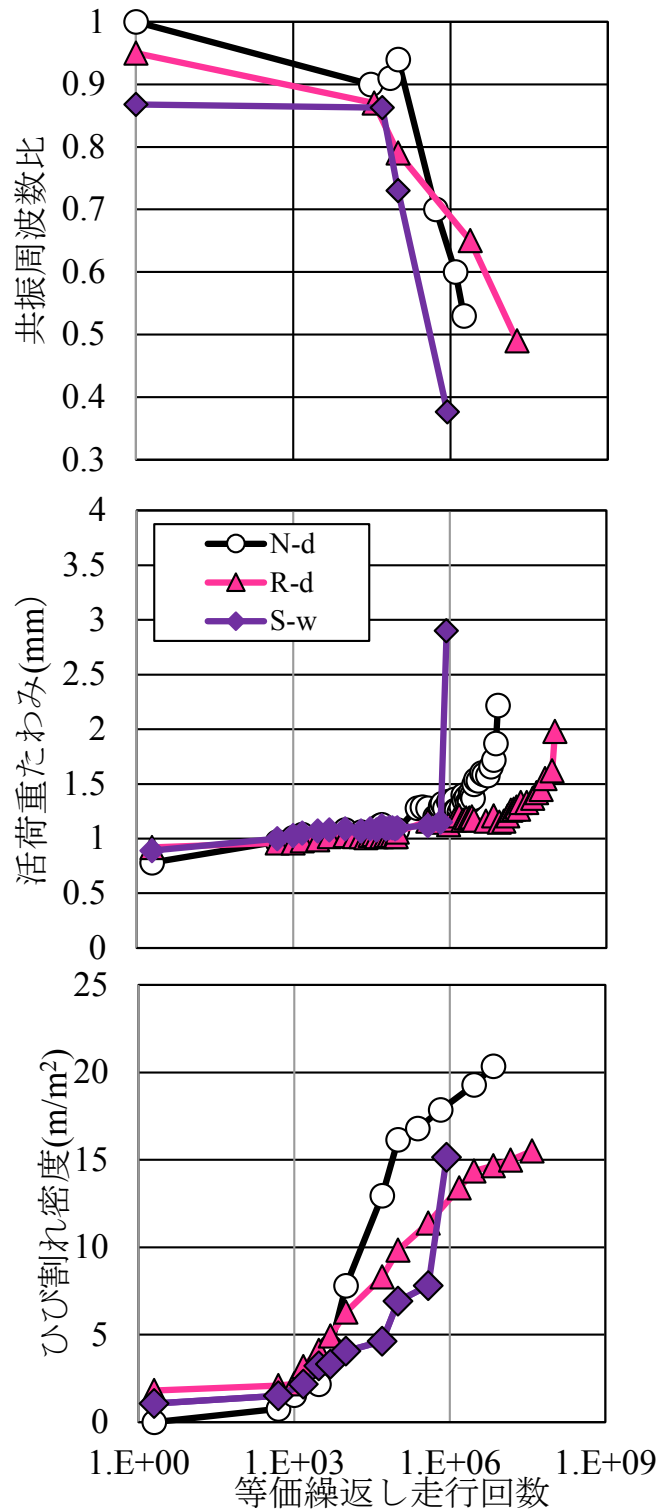


図-6.4.6 床版中央の共振周波数比と等価繰返し走行回数の関係

6.5 まとめ

本章では、小型加振器を励振器した強制振動試験に着目し、輪荷重走行試験結果における床版の損傷度と共振周波数との関係を整理することで、RC床版の耐疲労性を評価した。

本章で得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 疲労損傷の各段階において複数点の共振周波数比を計測することで、目視の点検では困難である部材内部の損傷レベルの評価及び損傷範囲の推定が可能であることが示された。特に、活荷重たわみや床版下面に発生するひび割れでは疲労限界状態に至る直前までその兆候が表れないのに対して、共振周波数比では早い段階で低下傾向が認められ、床版内部の疲労損傷を検知する上で有効な手法となり得ることが明らかになった。
- 2) ASR劣化したRC床版は、床版上下面のひび割れ同様に、促進方法の違いにより床版内部の損傷度が異なり、急速にASRを促した床版では、促進後における局所的な損傷程度は小さく、その後の輪荷重走行試験では輪荷重走行範囲全域で損傷が進行した。これに対し、緩やかにASRを促した床版では促進後における局所的な損傷が著しく、その後の輪荷重走行試験では促進後における損傷が支配的となり、局所的に内部損傷が進展することが明らかとなった。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書・論文集，1999.
- 2) 土木学会：コンクリート技術シリーズ No.71 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，2006.
- 3) 例えば，金光寿一，柳内睦人，三星智典：舗装熱を利用したサーモグラフィ法による RC 床版内部の欠陥検出に関する研究，土木学会論文集，No.732/V-59，pp.95-108，2003.
- 4) 例えば，大西弘志，岡田裕昭，内田慎哉，鎌田敏郎：道路橋 RC 床版における疲労劣化と振動特性の関係に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.1693-1698，2007.
- 5) 内藤英樹，大竹雄介，渡邊孝和，鈴木基行，中野聡，岩城一郎，木皿尚宏：反共振周波数に着目したはりの損傷位置同定に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.58A，pp.150-161，2012.3.
- 6) 内藤英樹，齊木佑介，鈴木基行，岩城一郎，子田康弘，加藤潔：小型起振機を用いた強制加振試験に基づくコンクリート床版の非破壊試験法，土木学会論文集 E2，Vol.67，No.4，pp.522-534，2011.10.
- 7) 内藤英樹，大竹雄介，齋藤知廣，鈴木基行：振動試験に基づくコンクリート部材の損傷同定に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，pp.949-954，2011.7.
- 8) 宮村正樹，子田康弘，内藤英樹，岩城一郎，鈴木基行：振動特性に着目した RC 床版の疲労損傷度評価手法に関する研究，構造工学論文集，Vol.57A，pp.1251-1262，2011.3.
- 9) 齊木佑介，内藤英樹，平岡拓朗，鈴木基行：共鳴振動法によるコンクリート内部の損傷評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1715-1720，2010.7.
- 10) 大竹雄介，内藤英樹，中野聡，鈴木基行：小型起振機を用いたコンクリート橋の強制振動試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.1459-1464，2010.7.
- 11) 八嶋宏幸，土屋祐貴，山口恭平，早坂洋平，内藤英樹，鈴木基行：振動試験に基づく実道路橋 RC 床版の疲労損傷度評価，土木学会第 69 回年次学術講演会概要集，I-021，2014.
- 12) 前島拓，内藤英樹，子田康弘，岩城一郎，鈴木基行：共振周波数の低下に着目した実道路橋 RC 床版の疲労損傷度評価，構造工学論文集，Vol.61A，pp.777-787，2015.
- 13) 前島拓，子田康弘，小山田桂夫，岩城一郎：供用後 50 年で架替えに至った

実道路橋 RC 床版の詳細調査と残存疲労耐久性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.685-690, 2013.

- 14) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，2008.
- 15) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2008.
- 16) 赤代恵司，三田村浩，渡辺忠明，岸徳光：丸鋼鉄筋を用いた RC 床版の疲労特性に関する実験的研究，構造工学論文集，vol57A，pp.1297-1304，2011.
- 17) 松井繁之：橋梁の長寿命予測-道路橋 RC 床版の寿命予測-，安全工学，Vol.30，No.6，pp.432-440，1996.

第 7 章

結論

7.1 結論

本研究では、凍結防止剤散布下において促進される各種材料劣化が、RC床版の耐疲労性に及ぼす影響を実験的・解析的に検討した。以下に、本研究により得られた成果を各章ごとに取りまとめるとともに、本研究を通して明らかとなった課題について述べる。

7.2 各章で得られた成果のまとめ

第2章では、凍結防止剤散布下におけるRC床版の損傷事例を取りまとめるとともに、輪荷重作用を受けるRC床版の耐疲労性に関する既往の研究、各種材料劣化を受けるRC部材の耐荷性・耐疲労性に関する既往の研究を整理し、本研究で取り組むべき課題を述べた。その結果、材料劣化したRC床版の耐疲労性に関する既往の研究は、実構造物に近い状態で再現された例が極めて少なく、疲労損傷機構の解明は十分になされていない現状にあることが確認された。また、材料劣化を受けるRC床版の耐疲労性を評価する上では、実環境下における材料劣化進行過程を考慮した促進方法が重要であることが示された。さらに、凍結防止剤散布下におけるRC床版では、従来の床版下面からの点検のみでは、その損傷度を適切に評価することが困難であり、床版上面あるいは内部の損傷状況の評価可能な手法の確立が急務であることを示した。

第3章では、材料劣化のうち塩害を取り上げ、塩害がRC床版の耐疲労性に及ぼす影響について実験的に検討した結果を述べた。

その結果、電食実験ではない実環境を模擬した促進試験により、実際の塩害に近い状態を再現させたRC床版に対して輪荷重走行試験を実施することで、実RC床版の挙動に近い現象を把握することができた。また、凍結防止剤散布下において塩害を受けたRC床版は、下側鉄筋よりも上側鉄筋の腐食が耐疲労性に及ぼす影響が大きく、静的載荷試験においては耐荷力に影響が少ないとされる腐食量であっても、RC床版の耐疲労性は大きく低下することが示された。

第4章では、鉄筋腐食がたわみの進展に及ぼす影響に関する考察をさらに深めるため、第3章の実験と同一の材料特性のもと、鉄筋の腐食量及び腐食部位をパラメータとした3次元非線形有限要素解析の結果について述べた。その結果、鉄筋の腐食がRC床版の耐疲労性に与える影響については、単に腐食量だけでなく腐食部位や腐食によるひび割れ状態の影響が非常に大きいことを明らか

とした。特に、上側鉄筋が腐食したケースでは、腐食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することで上側鉄筋位置におけるひずみが早期に増大し、重ね梁のような状態となることで耐疲労性が低下することが示された。

以上の第3章及び第4章により、凍結防止剤散布下におけるRC床版では、上側鉄筋の腐食量を定量的に評価することが維持管理上重要であることを示した。これは、凍結防止剤散布下におけるRC床版を適切に維持管理していく上で、重要な実務上の知見を与えるものであると考えられる。

第5章では、材料劣化のうちASRを取り上げ、これがRC床版の耐疲労性に与える影響を実験的に検討した結果について述べた。

その結果、ASRにより劣化したRC床版は、ASRの促進方法及び床版上面における水の有無により耐疲労性が大きく異なることが明らかとなり、急速にASRを促した床版では、ケミカルプレストレスの影響などにより健全な床版に比べて耐疲労性が向上し、反対に、緩やかにASRを促した床版では耐疲労性が大きく低下する結果を示した。一般に、ASRを生じたコンクリートでは、膨張量の増加に伴いヤング係数、圧縮強度や圧縮疲労強度が低下すると考えられるが、RC床版では、ASRによるコンクリートや鉄筋のひずみのみならず、床版内部のひび割れ状況や水の存在の有無といった要因によりその耐疲労性が定まることが示された。

第6章では、強制振動試験による、道路橋RC床版の新たな耐疲労性評価方法について述べた。まず、撤去された実道路橋RC床版の劣化性状と共振周波数によりその劣化度を評価するとともに、輪荷重走行試験結果と共振周波数との関係を整理した。また、実道路橋RC床版の疲労損傷評価で得られた知見を基に、第5章で実験を実施したASRを受けたRC床版の輪荷重走行試験の各段階において、RC床版内部の損傷レベルを定量的に評価することで、ASRがRC床版の耐疲労性に及ぼす影響について実験的に検討した。その結果、疲労損傷の各段階において複数点の共振周波数比を計測することで、部材の損傷レベルの評価及び損傷範囲の推定が可能であることが示された。特に、活荷重たわみや床版下面に発生するひび割れでは疲労限界状態に至る直前までその兆候が表れないのに対して、共振周波数比では早い段階で低下傾向が認められ、床版内部の疲労損傷を検知する上で有効な手法となり得ることが明らかになった。

7.3 今後の課題及び展望

本研究により、凍結防止剤散布下において塩害を受けた RC 床版は、下側鉄筋よりも上側鉄筋の腐食が耐疲労性に及ぼす影響が大きく、静的載荷試験においては耐荷力に影響が少ないとされる腐食量であっても、RC 床版の耐疲労性は大きく低下することが示された。しかし、鉄筋腐食に伴いコンクリートに生じるひび割れと鉄筋の腐食に関しては、環境条件や腐食生成物、および腐食速度により異なることが指摘されている¹⁾。本実験の範囲内では、腐食に伴い発生するひび割れが RC 床版の耐疲労性に大きな影響を与えることは明らかとなったものの、腐食生成物の生成速度や、鉄筋腐食の進行に伴い発生する腐食ひび割れの発生形態などについては未だに不明な点が多い。また、解析についても、実環境下における鉄筋腐食を再現するには、コンクリートの水分状態や、腐食反応過程における時間依存性挙動、生成物の空間的な分布と種類、ひび割れからの腐食生成物の析出等を適切に考慮したモデル化をすることが必要となる。

一方で、ASR を受ける RC 床版については、促進速度を変えたことで、ASR 膨張量とこれに伴うケミカルプレストレスの導入量、さらにこれらの経時的な相互作用によるひび割れ性状が大きく変化し、その結果、その後の輪荷重走行試験による耐疲労性に大きな差が生じる結果を示した。しかし、これらの要因の相互関係や詳細な機構については未解明な点が多く、今後、ASR の反応速度を変えた際のゲルの生成量とその物性、さらにゲルがひび割れに充てんされることによるコンクリートの力学的特性に及ぼす影響を明らかとする必要がある。

以上より、材料劣化を受ける RC 床版の耐疲労性については、化学生成物の生成や変化、移動といった、時間依存特性を有する現象について材料学の観点から検討することの重要性が示され、こうした時間依存性挙動を評価する実験手法を早急に確立する必要があると考えられる。

また、材料劣化のうち ASR については、環境条件によりその反応速度が異なり、これに伴ってコンクリートに生じるひび割れの発生形態が大きく変化し、これが耐疲労性に影響を及ぼすことが示された。このため、様々な環境条件の下に ASR を促進させることで、RC 床版内部のコンクリートや鉄筋のひずみ変化及びコンクリートに発生するひび割れの発生機構について検討する必要があると考えられる。

しかし、こうした様々な実験条件を検討する上では、輪荷重走行試験による実証実験のみでは、時間と労力を大幅に消費することが懸念される。従って今後は、任意の環境下において静的載荷試験及び疲労載荷試験が可能な環境温度制御式万能載荷試験装置²⁾や、輪荷重の繰返し載荷がコンクリートに及ぼす影響を短期間で評価し得る小型輪荷重走行試験装置³⁾といった、パラメトリックスタディに

有効な実験手法を組み合わせ、材料劣化を受ける RC 床版の耐疲労機構の解明を進めることが有効と思われる。そして、ここで得られた知見を非線形応答解析のモデルに反映することで、将来的には凍結防止剤散布下における RC 床版の余寿命評価が可能になると考えられる。

さらに、上記の実験データ及び解析データを基に、凍結防止剤散布下における道路橋 RC 床版の劣化及び損傷過程を非破壊で評価可能な強制振動試験をはじめとする点検・診断技術を確立することが急務である。加えて、劣化した RC 床版の合理的かつ効率的な補修・補強技術の開発も進めることで、最終的にはこれらを統合した維持管理システムを構築し、凍結防止剤散布下における RC 床版の延命化を実現することが重要と思われる。

参考文献

- 1) 高谷哲, 中村士郎, 山本貴士, 宮川豊章: コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.2, pp.154-165, 2013.
- 2) 皆川翔平, 子田康弘, 岩城一郎: RC はりの耐疲労性に及ぼす環境温度および含水状態の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.631-636, 2015.
- 3) 前島拓, 子田康弘, 岩城一郎: 小型輪荷重走行試験機を用いたモルタル版の疲労耐久性に及ぼす水と輪走行速度の影響評価, 土木学会第 68 回年次学術講演会, V-136, 2013.

-謝辞-

本論文は、日本大学大学院工学研究科 土木工学専攻 博士後期課程に在籍した平成 25 年 4 月からの研究成果を取りまとめたものです。本研究の遂行と本論文の作成に際し、多くの方々から暖かいご指導、ご支援、ご助言を頂きました。以下に記し、心から御礼を申し上げる次第です。

主査である日本大学 岩城一郎教授には、本研究に関して終始懇切丁寧なご指導・ご鞭撻を頂きました。学術的な知識や研究の面白さ、そして課題への取組み方など様々な示唆を受けたことが研究者を目指すきっかけとなりました。また、学外における研究発表や委員会へのオブザーバとしての参加など、数多くの勉強の場を与えていただきましたこと、心から感謝申し上げます。自身の勉強不足でご迷惑をおかけしたこともありましたが、卒業研究生として配属されてから 6 年もの間、暖かなご指導をいただきました。本当にありがとうございました。

副査を引き受けていただいた日本大学 子田康弘准教授、中村晋教授、東北大学 内藤英樹准教授、東京大学 前川宏一教授には、本研究をまとめるにあたり様々なご助言を頂きました。子田康弘准教授には、試験方法から実験データの取りまとめ方、研究に対する姿勢など数えきれないほど多くの示唆を受けました。研究室に在籍した 6 年間、毎日のように子田先生と研究が出来たことは研究者を目指す自身の大きな財産です。本当にありがとうございました。中村晋教授には本論文の取りまとめにあたってご精読いただき、各段階で大変貴重なご助言を頂きました。また岡山県で一緒に食事をした際には、研究者を目指すうえで多くのご助言を頂きました。本当にありがとうございました。内藤英樹准教授には、強制振動試験の計測方法から理論まで、懇切丁寧なご指導を頂きました。また、博士課程に進学してからは、毎年、内藤先生と 2 人での勉強会の場を与えていただき、大変勉強になりました。本当にありがとうございました。前川宏一教授には、RC 床版の疲労に関して、大変貴重なご助言を頂きました。また、前川先生から頂いた『研究を通して分かったことと分からなかったことをハッキリさせ、次のテーマにつなげることが良い研究』といった言葉を決して忘れずに、今後も研究を続けたいと思います。

第 4 章の塩害を受けた RC 床版の解析にあたっては、(株)コムスエンジニアリング 土屋智史博士に大変なご助力を頂き、また、鉄筋コンクリート構造の疲労破壊研究小委員会でも大変お世話になりました。

第 5 章の ASR を受けた RC 床版の輪荷重走行試験の遂行及び論文執筆にあたって、東北大学 鈴木基行教授、金沢大学 久保善司准教授、一般財団法人 土木研究センター 大田孝二博士、五島孝行氏、太平洋セメント(株) 梶尾聡博士、岸

良竜氏，中研コンサルタント(株) 鈴木康範博士，住友大阪セメント(株) 大野晃氏には，多くのご助言とご助力を頂きました。

東京大学生産技術研究所 田中泰司准教授，法政大学 藤山知加子准教授，東京大学 高橋祐弥助教には，本論文の作成に際して，多くのご助言を頂きました。田中先生には，平成 26 年度より研究室内の発表や実験においても，ご助力頂きました。

また，日揮(株) 門万寿男氏，阿南誠一氏，(株)福山コンサルタント 中野聡博士，(株)駒井ハルテック 江頭慶三博士，横河工事(株) 田中喜一郎氏，国土交通省東北地方整備局 小山田桂夫氏には，実験遂行及び RC 床版の耐疲労性を学ぶにあたってご助言・御協力を頂きました。

平成 22 年度から平成 27 年度の日本大学工学部コンクリート工学研究室の学生には実験遂行及びデータ整理をするにあたって，多大なご協力を頂きました。特に，輪荷重走行試験班の皆様とは昼夜ともに研究に励み，多大な御助力を賜りました。時間のかかる疲労実験や膨大なデータを整理していく中，昼夜ともに楽しく過ごせたのは皆様のおかげです。本当にありがとうございました。

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を申し上げます。

最後に，私立大学に 9 年もの間，何も言わずに通わせてくれた父と，私の我儘を許しいつも支えてくれた母，兄に感謝いたします。

平成 28 年 1 月 前島 拓