

積雪寒冷地における RC 床版の疲労耐久性に関する研究

Study to Durability of Reinforced Concrete Slabs in Snowy Cold Region

小野貴之*¹, 三田村浩*², 林川俊郎*³, 松井繁之*⁴
 Takayuki Ono, Hiroshi Mitamura, Toshiro Hayashikawa, Shigeyuki Matsui

*¹ 北海道大学大学院 工学研究科 (〒060-8628, 札幌市北区北 13 条西 8)
 *² 土木研究所 寒地土木研究所寒地構造チーム (〒062-8602, 札幌市豊平区平岸 1 条 3-1-34)
 *³ 北海道大学大学院 工学研究科 (〒060-8628, 札幌市北区北 13 条西 8)
 *⁴ 大阪工業大学 (〒614-8289, 京都府八幡市美濃山一ノ谷 4 番地)

In the deterioration factors of RC slabs of highway bridges, fatigue by repetition actions of wheel loads of large-sized vehicles seems to be the main factor. Some RC slab specimens were picked up from highway bridges that had been used in the snowy cold region of Hokkaido, and their durability was examined by the wheel running machine. Those slabs have charged frost damage that originates in meteorological conditions of the snowy cold region and the salt damage because of the splay of the antifreezing agent, besides the fatigue influence similar to a general region. In this study, remaining fatigue life of RC slabs in snowy cold region was quantitatively evaluated.

Key words: RC slab, wheel running machine, fatigue durability, snowy cold region

1. はじめに

道路橋の RC 床版の劣化要因は、大型車両の輪荷重の繰り返し作用による疲労劣化が主たる要因とされ、それに加え床版に生じたひび割れに雨水が浸入すると疲労耐久性が著しく損なわれるといわれている。さらに床版を取り巻く環境条件によっては床版の劣化が一層加速され、特に北海道においては、積雪寒冷な気象条件から起因する「凍害」や凍結防止剤散布による「塩害」等、過酷な状況にあるといえる。

本研究では北海道内の橋梁から積雪寒冷地特有の劣化作用を受けている床版を切り出し、輪荷重走行試験機による疲労試験を行った。輪荷重走行試験は鉄輪のほかにゴムタイヤを装着することが可能であり、より実橋に近い載荷状況を再現できるものである。この試験機を用いた実験結果より、積雪寒冷地における RC 床版の劣化プロセスを踏まえた余寿命を定量的に評価し、併せて鉄輪とゴムタイヤの相関関係を導くための実験的検討を行った。



写真-1 輪荷重走行試験機 (鉄輪式)

2. 輪荷重走行試験機

我が国の輪荷重走行試験機は、走行部の機構によりクランク式と自走式に大別される。本研究で使用したものは写真-1 に示すクランク式であり、モーターによりフライホイールを回転させ、ロッドを介して車輪を往復運動に変換させる仕組みとなっている。輪荷重試験機の諸元を表-1 に示す。

この試験機では最大 300kN までの任意の鉛直荷重を載荷することができ、車輪の往復運動によって実橋床版の破壊形態である「押し抜きせん断破壊」を再現で

表-1 輪荷重走行試験機諸元

項目		仕様
性能	最大荷重	300kN
	走行速度	1440 往復/時
	走行範囲	±1.0m
供試体寸法	橋軸方向 (車輪移動方向)	3.00m
	橋軸直角方向	支間 1.8 m~2.5m
	床版厚	16cm~40cm (治具改良により 40cm 以上可)

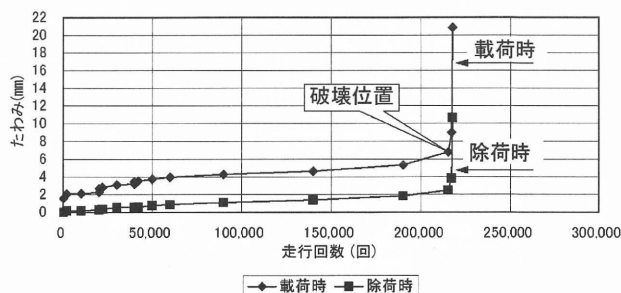


図-1 走行回数と床版中央たわみの関係

きるものである。輪荷重走行試験における床版の破壊については、たとえば図-1 に示すように、走行回数と変位量の関係において、勾配が急に立ち上がるところを「破壊回数」と定義している。



写真-2 輪荷重走行試験機（ゴムタイヤ式）

写真-2は、この試験機の手輪にゴムタイヤを装着したものであり、我が国でも例の少ないクランク式のゴムタイヤ輪荷重走行試験機として使用することができる。

鉄輪を装着した場合とゴムタイヤを装着した場合は、接地面積や最大積載荷重などが異なり、それぞれにメリット、デメリットがある。

鉄輪式の場合は、最大荷重が300kNまで載荷可能であることから、促進試験に適する等の利点がある。しかし、実車両と載荷面が異なることから実験結果の補正が必要になることや供試体上面の平滑性が実験結果に影響を与える。

一方、ゴムタイヤ式の場合、供試体の多少の不陸は吸収でき、実車両と同様なタイヤを使用することで実橋に近い載荷状況の再現が可能となる。しかし、ゴムタイヤの変形などの制約から最大荷重は150kN程度となり、鉄輪式と比べ、床版が破壊に至るまでの実験時間が長くなる。

3. 実験供試体

3.1 橋梁諸元

実験の供試体となる床版は、道内の一般国道で供用していた3橋から切り出した。各橋の橋梁諸元を表-2に、供試体諸元を表-3に示す。またこれらと対比するため、切り出した床版と同じ諸元の基準供試体を製作し、輪荷重走行試験による疲労試験を行うとともに、水の影響を明確にするため、床版上面に水を張った状態での疲労試験も実施した。

床版を切り出した橋梁は、図-2に示す凍害危険度の区分図¹⁾によると尻別橋（しりべつばし）はランク3、幌向橋（ほろむいばし）はランク4、神仙橋（しんせんばし）

表-2 橋梁諸元

橋 梁 名	幌向橋（ほろむいばし）	神仙橋（しんせんばし）	尻別橋（しりべつばし）
架 橋 位 置	北海道江別市 （一般国道 12 号）	北海道上川町 （一般国道 39 号）	北海道喜茂別町 （一般国道 230 号）
橋 種	鋼単純ポネートラス橋	単純開断面箱桁	単純合成鉄桁
橋 長	L = 48.9m	L = 56.4m	L = 60.4m
床 版 支 間	L = 2.15m	L = 2.85m	L = 3.10m
架 設 年 次	1961 年 （供用 43 年間）	1963 年 （供用 42 年間）	1968 年 （供用 37 年間）
適 用 示 方 書	昭和 31 年 鋼道路橋設計示方書	昭和 31 年 鋼道路橋設計示方書	昭和 39 年 鋼道路橋設計示方書
架 け 替 え 理 由	線形改良	床版劣化	線形改良
試 験 体 数	7	4	4

表-3 供試体諸元

橋 梁 名	幌向橋	神仙橋	尻別橋
供試体寸法 (cm)	230×300×17	230×300×18	230×300×18
鉄 筋 の 材 質	SR235	SR235	SD295
主鉄筋 (mm)	上側	φ 16@250	φ 16@250
	下側	φ 16@125	φ 16@125
配力筋 (mm)	上側	φ 9@150	φ 16@300
	下側	φ 9@150	φ 16@150
コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	41 以上	41 以上	37 以上

は最も高いランク5の地域にそれぞれ架橋されていたものである。

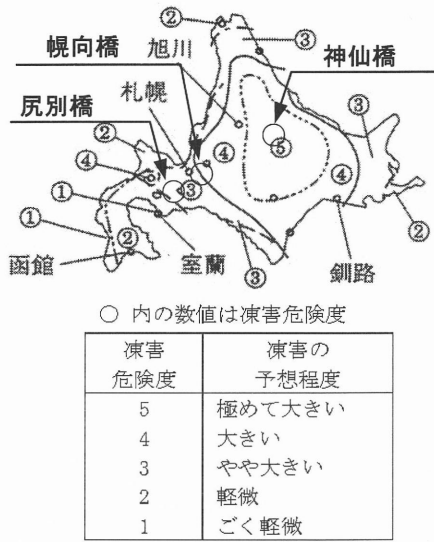


図-2 凍害危険度の区分図

3.2 既設床版の損傷評価

舗装撤去後の床版上面の状況を写真-3に、供試体を切り出した位置を図-3に示す。また、各橋の床版の損傷状況は以下のとおりである。

- 幌向橋：床版下面の状況は、ひび割れ幅は0.1mm以下、ひび割れ密度は1~2m/m²程度であった。床版上面は、広範囲にわたって砂利化現象が見られ、鉄筋位置まで影響を受けている箇所も存在した。No.3供試体の下面に遊離石灰が発生していた。
- 神仙橋：床版下面の状況は、ひび割れ幅は0.10mm~0.15mm程度、ひび割れ密度は2~6 m/m²程度であり、ひび割れ箇所から多数の遊離石灰が発生していた。床版上面は、ほぼ全面にわたってスケーリングが発生しており、鉄筋が露出している箇所も確認された。
- 尻別橋：床版下面の状況は、ひび割れ幅0.05mm以下、ひび割れ密度は4 m/m²程度であった。その他の損傷は確認されなかった。

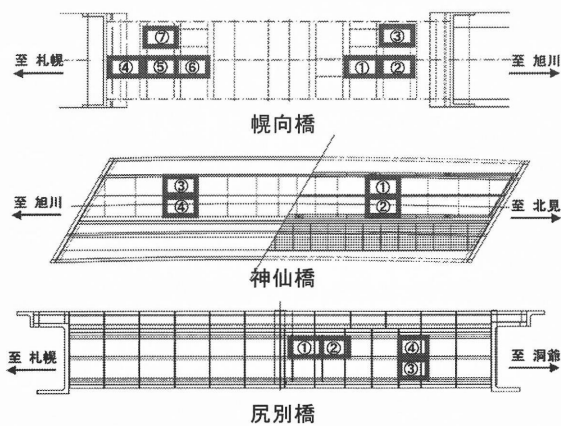


図-3 供試体の切り出し位置

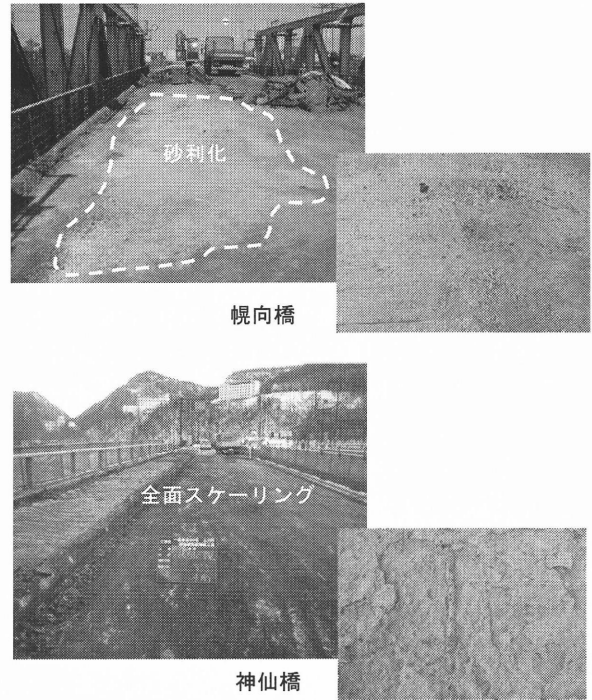


写真-3 床版上面の状況

3.3 材料試験結果からみた劣化要因の推定

床版上面に発生した砂利化現象や床版下面にみられた遊離石灰の発生要因を推定するため、供試体近傍からコアを採取し、中性化・アルカリ骨材反応・塩分量を調べた。その結果、3橋ともに中性化及びアルカリ骨材反応については、床版の耐久性を大きく低下させるような要因は確認されなかった。塩分量試験では、表面の塩分量は腐食発生限界濃度(1.2kg/m³)に近い値を示していた供試体もあったが、鉄筋位置付近では0.5kg/m³以下であり、さほど塩分は浸透していなかった。試験結果から、塩害による劣化は潜伏期の状態であり、床版の寿命低下に影響を与えていない。しかし、舗装及び床版のひび割れ等により塩分浸透の度合いは異なるため、試験値より塩分量が多い箇所が存在している可能性もある。

材料試験結果などから、本供試体の床版は、水の浸入と凍害による床版上面コンクリートの劣化状態と推察できる。また橋梁撤去時点におけるその他の環境作用の影響は小さいものと考えられる。

4. 実験方法

4.1 供試体の支持

実橋床版は橋軸方向に連続な一方方向性版としての挙動を示す。実験に使用する供試体の橋軸方向の寸法は試験機の制約より 3.0m である。したがって、これを 2 辺支持・2 辺自由の支持状態にすると、端部から早期に破壊する。そのため、支間方向（短辺部）に弾性支持部を設け、一方方向性版としての実橋の状態を擬似的に再現させる必要があった。したがって、供試体を輪荷重走行試験機の架台上に供試体を設置するときの支持方式は、走行方向（長辺部）は 2 辺単純支持、支間方向（短辺部）は 2 辺弾性支持とした。なお、実験時の床版支間は $L=2.0\text{m}$ である。

単純支持部は回転を拘束しないよう図-4 に示すとおり、架台と供試体の間に丸鋼を配置するとともに、丸鋼と供試体の間にモルタルを敷いて不陸を調整した。また、横梁となる弾性支持部は、FEM 解析で 1 方向性版でのモーメント比 (M_x/M_y) および変位量を先に算出しておき、その数値に近似する剛度を持つ H 鋼 (150×150) とした。横梁と供試体の間にはモルタルを敷いて不陸を調整した。さらに、各支持部においてはアンカーボルトにより供試体の浮き上りを防止した。

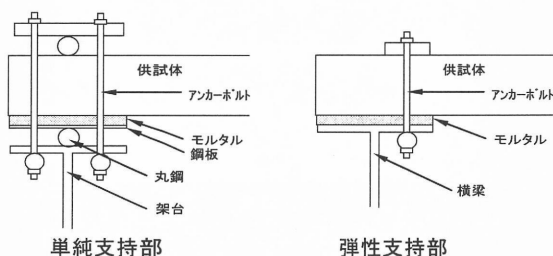


図-4 単純支持部と弾性支持部の固定方法

4.2 荷重載荷面積の確保

クランク式の輪荷重走行試験機の車輪に鉄輪を用いた場合、車輪を直接床版に接触させると載荷荷重は線荷重として床版に作用するため、適切な試験を実施することができない。そこで荷重載荷面積を確保するために車輪と床版の間に鋼製ブロックを敷設し、実交通荷重に近い荷重状態を再現した。本実験で使用した鋼製ブロック 1 個の大きさは $12\text{cm} \times 30\text{cm}$ である。

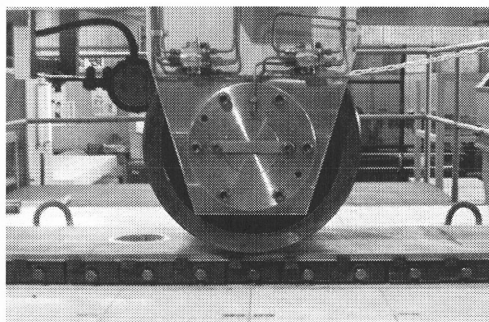
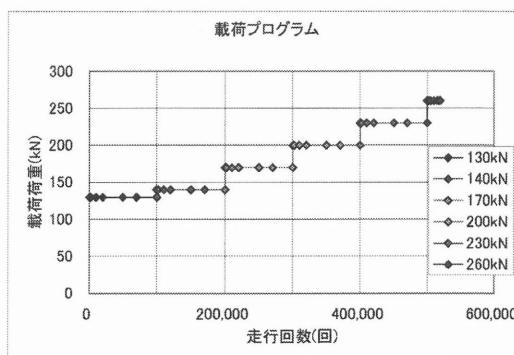


写真-4 鋼製ブロック（鉄輪の下）

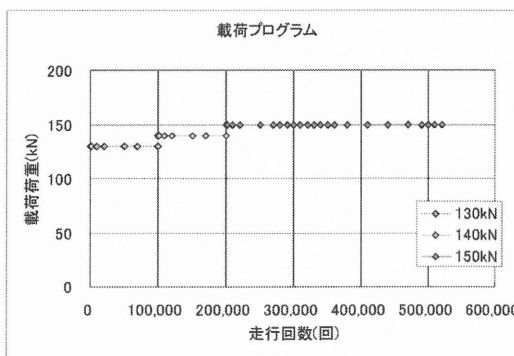
4.3 荷重載荷プログラム

実験の走行荷重は図-5 に示す階段状荷重漸増載荷プログラム（幌向橋の場合は荷重漸増幅がやや異なる）を採用し、初期荷重は実橋床版の損傷度から早期の破壊が予想されたため、やや小さめの 130kN とした。鉄輪を使用する場合は、試験機の最大荷重 300kN まで載荷できるが、ゴムタイヤの場合は 150kN を超えるとタイヤの変形量が大きくなり、ダブルタイヤが互いに接触してパーストしてしまうため、最大荷重が 150kN となるプログラムとした。

なお、ゴムタイヤには荷重による変形量を抑制するために空気の代わりに発泡ウレタンを注入した。



鉄輪の場合



ゴムタイヤの場合

図-5 荷重載荷プログラム

5. 実験結果

5.1 破壊までの走行回数

輪荷重走行試験に関する大阪大学の研究成果から横軸に破壊までの走行回数、載荷荷重 (P) と供試体のせん断耐力 (P_{sx}) の比を縦軸とした S-N 図及び S-N 式（松井式）²⁾ が示されている。この考え方に基づき、階段荷重載荷の破壊までの走行回数を 150kN の一定荷重に補正し、さらに輪荷重試験機の車輪幅を大型自動車の車輪接地幅に換算した破壊回数を表-4 に示す。カッコ内の値は、幌向橋のせん断耐力 (P_{sx}) に換算した場合の破壊回数を示している。

尻別橋と神仙橋の床版は同年代に施工され、床版厚さも同じであったが、尻別橋床版の疲労寿命低下の影響が少ないのに対し、床版下面に遊離石灰、上面にス

ケーリングが発生していた神仙橋床版は耐久性が大きく低下していることが分かる。また幌向橋は同一橋梁床版内でも、供試体を切り出した位置により、疲労寿命は大きく異なる結果となった。

表-4 破壊までの走行回数

試験体 No	走行回数	150kN 換算破壊回数 (カッコ内は幌向橋のせん断耐力に換算した場合)	
幌向橋	No.1	92 万回	534 万回
	No.2	4.3 万回	49 万回
	No.3	2.5 万回	5.4 万回
	No.4	25 万回	11 万回
	No.5	60 万回	199 万回
	No.6	45 万回	66 万回
	No.7	52 万回	35 万回
	基準	8.0 万回	94 万回
神仙橋	No.1	10 万回	24 万回 (10 万回)
	No.2	15 万回	52 万回 (33 万回)
	No.3	11 万回	26 万回 (8 万回)
	No.4	52 万回	38 万回 (32 万回) ゴムタイヤで試験
	基準	41 万回	7673 万回 (1478 万回)
尻別橋	No.1	41 万回	7455 万回 (5479 万回)
	No.2	42 万回	9837 万回 (2036 万回)
	No.3	44 万回	19720 万回 (6083 万回)
	No.4	52 万回	43906 万回 (13543 万回)

5. 2 積雪寒冷地床版の疲労耐久性

図-6は、3橋の150kN換算の破壊回数を示したS-N図である。神仙橋・尻別橋の破壊回数は疲労耐久性の低下を整理するため、表-4のカッコ内の値を図-6にプロットした。また本研究の一環として、水の影響による疲労耐久性の低下を確認するために行った水張り供試体の試験結果とその基準供試体も併せてプロットした。なお、この供試体は床版厚さ17cm、圧縮強度は約28N/mm²であり、今回実施した供試体のせん断耐力より小さいものである。さらに、架橋位置の大型車交通量(平成11年度道路交通センサス)と軸重頻度分布の測定データ³⁾から、1年間1車線あたりの換算等価繰返し輪数を算定し、各橋梁が供用期間中に受けた輪荷重の回数を推定すると、幌向橋91万回、神仙橋64万回、尻別橋79万回となった。軸重頻度分布は、他橋のデータであるため、疲労影響はやや異なることが想定されるが、参考として供用期間の疲労影響の低下を約100万回とし、点線でS-N曲線と平行にプロットした。

神仙橋の供試体及び幌向橋のNo.1, No.5以外の供試体の疲労寿命は、水の影響+供用期間の疲労影響ラインより大きく下回っており、疲労影響ラインと実橋供試体の破壊位置との差が凍害等による寿命低下と考えられる。

水張り供試体については、疲労や環境劣化の影響を受けていない基準供試体の約10分の1の走行回数で破壊した。これに対し、積雪寒冷地の凍害作用を最も受けている神仙橋供試体については、基準供試体の約170

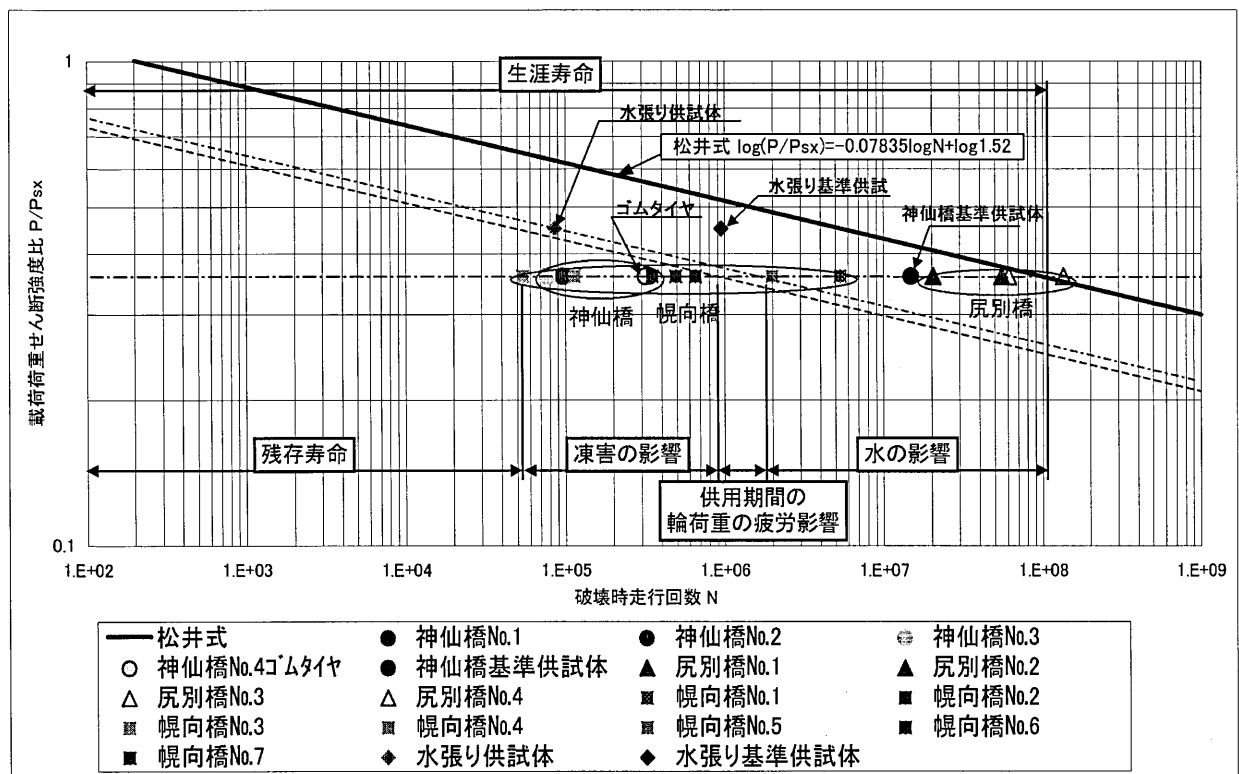


図-6 S-N図(150kN換算, Psxは幌向橋換算)

分の1～約370分の1の走行回数で破壊してしまう結果となった。このことから水の影響と凍害等の複合劣化を受けた既設床版は、疲労余寿命が著しく低下することが分かる。

広範囲に供試体を切り出した幌向橋供試体は、No.3, No.4, No.7, No.2, No.6, No.5, No.1の順で破壊し、疲労寿命は、図-7のハッチングで示す滞水し易い場所(水および凍害の影響)、及びNo.2, No.4のように伸縮装置に近い場所での寿命が短くなる結果となった。したがって、同一橋梁床版内でも床版位置により、疲労寿命は大きく異なる場合もあることから、床版の補修・補強計画では必ずしも全面的な打換えや補修・補強を行わず、状況によっては補修や補強範囲の適切な設定が必要と考えられる。

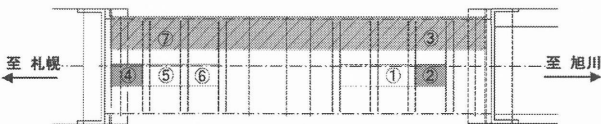


図-7 疲労寿命低下のグループ分け

5.3 積雪寒冷地床版の劣化プロセス

実験後、神仙橋供試体を切断し床版の破壊状況を確認した。床版支間方向の切断面を写真-5①に、輪荷重走行直下の切断面を写真-5②に示す。写真-5①に示すように凍害の影響を受けている床版の破壊形態も押し抜きせん断であった。また写真-5②にみられるように床版上面から上側鉄筋までは完全に砂利化しており、この部分のコンクリートは、せん断抵抗が低下していたものと推察される。

実橋から切り出した積雪寒冷地床版の破壊までのプロセスは、ひび割れ部がすりみがきされた後の押し抜きせん断で終局に至り、一般的な床版の破壊形態と同様であった。積雪寒冷地床版の耐久性の低下は、床版上面の砂利化現象に伴う、せん断耐力の低下が主因と推察できる。

5.4 鉄輪とゴムタイヤの実験結果の比較

神仙橋No.4の供試体については輪荷重試験機の手車をゴムタイヤに換えて実験を行った。結果は神仙橋No.1, No.3と比べ、破壊に至るまでの走行回数は多かったが、これは幌向橋の場合と同様に車道外側の滞水し易い場所で疲労寿命が短くなることを示していると考えられる。一方、神仙橋No.2よりやや少ない回数となったのは、実験前のひび割れ密度が、No.2の2 m/m²程度に対し、No.4はその3倍近い6 m/m²程度であったことが影響していると考えられる。

現時点でゴムタイヤによる実験を行うことができたのは1供試体のみであったため、まだ鉄輪との相関関係を導くには至っていないが、今後、ゴムタイヤを使用した実験を順次行い、データの蓄積・解析を行う予定である。

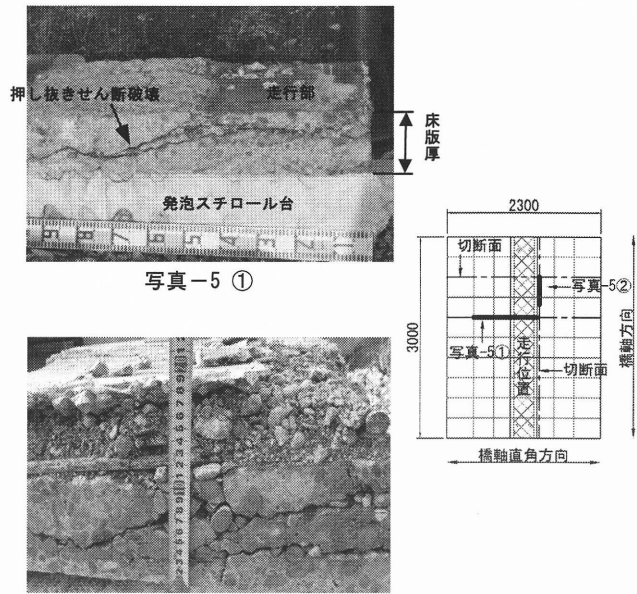


写真-5 神仙橋供試体切断面と写真撮影方向

6. まとめ

道内の供用橋梁から積雪寒冷地特有の劣化作用を受けている床版を切り出し、輪荷重走行試験機による疲労試験を行い、積雪寒冷地床版の疲労耐久性及び劣化プロセスについて評価した。本研究のまとめを以下に示す。

- (1) 水の影響による疲労寿命は約10分の1に低下するのに対し、水の影響と凍害の複合劣化を受けた既設床版の疲労余寿命は、約170分の1～370分の1という結果となった。
- (2) 同一橋梁内でも床版設置位置により、疲労寿命は大きく異なる場合もあることから、補修・補強計画では適切な範囲を設定する必要がある。
- (3) 積雪寒冷地床版の耐久性の低下は、床版上面の凍結融解作用に伴うスクレーピングや砂利化現象による、せん断耐力の低下が要因であると確認できた。
- (4) 輪荷重試験機の手車をウレタン入りゴムタイヤに換えて実験を行ったが、鉄輪との関係がまだ明確ではなく、今後のデータ蓄積が必要である。

参考文献

- 1) 長谷川寿夫ほか：コンクリート構造物の耐久性シリーズ凍害、技報堂出版、1988。
- 2) 前田、松井：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、pp221-224、1984。
- 3) 三田村、安達、石川：橋梁床版を用いた車両軸重測定と測定データから推定した床版の残存寿命、寒地土木研究所月報No.637、pp2-16、2006。