

疲労と凍害の複合損傷を受けた RC 床版の耐疲労性に対する低減率

日大生産工[院] ○勝呂翔平 日大生産工 阿部 忠 日大生産工 水口和彦

1. はじめに

積雪寒冷地域の道路橋 RC 床版は、大型車両の繰り返し走行による疲労と凍害による複合損傷（本論文では、主たる原因が疲労によるものとする）を受けている。RC 床版の疲労損傷に関しては、多くの研究者により実験研究が進められ、破壊メカニズムや耐疲労性が評価され^{1), 2), 3), 4)}、寿命の推定や補修・補強対策が提案されている。しかしながら、既往の研究においては、疲労と凍害の複合損傷を受けた RC 床版の寿命の推定を定量的に評価する研究は行われていない。また、RC 床版のコンクリートの品質（強度、水セメント比（W/C））が、疲労と凍害の複合劣化に及ぼす影響についての研究はあまり行われていないのが現状である。

そこで本研究では、水セメント比（W/C）の異なる 2 タイプの供試体を製作し、輪荷重走行疲労実験による疲労と凍害（凍結・融解）を繰り返すサイクル実験を行い、乾燥状態での輪荷重疲労実験による等価走行回数に対する低減率を評価する。さらに、乾燥状態と凍結・融解の繰り返しを受けた場合の動弾性係数を測定し、低下率を求め、積雪寒冷地域に建設される RC 床版のコンクリート材料の品質改善などを提言するとともに、長寿化対策および疲労と凍害を受ける RC 床版の寿命推定法の一助としたい。

2. 供試体概要

2.1 供試体寸法および鉄筋の配置

本実験に用いる供試体寸法は、2002 年改訂の道路橋示方書・同解説（以下、道示とする）⁵⁾の規定に基づいて、その 1/2 モデルとし、輪荷重の走行範囲のみを考慮した寸法とする。よって、供試体寸法は、全長 1,600mm、支間 1,200mm、幅 300mm、厚さ 130mm の板構造とした。鉄筋の配置は、軸方向に輪荷重を走行させることから、引張側の配力筋に 100mm 間隔で配置し、有効高を 95mm とする。また、圧縮側には引張鉄筋量の 1/2 を配置した。なお、本来の主鉄筋は配力筋の外側に配置した。供試体寸法および鉄筋の配置を図-1 に示す。

2.2 使用材料

本実験で使用した供試体のコンクリートには、

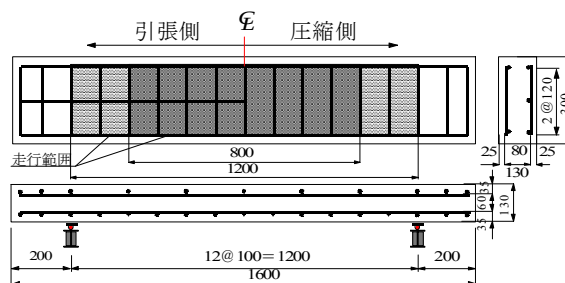


図-1 供試体寸法および鉄筋配置

表-1 コンクリートの示方配合

供試体	設計基準強度 (N/mm ²)	W/C (%)	S/a	単位量(kg/m ³)				AE 減水剤 (kg/m ³)
				W	C	S	G	
RC57	24.0	57	45.5	170	298	817	1008	2.68
RC50	30.0	50	53.3	172	344	761	1027	3.27

表-2 コンクリートおよび鉄筋の材料特性値

供試体	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋 (SD295A, D10)		
		降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
RC57	27.2	370	511	200
RC50	35.5			

普通ポルトランドセメントと 5mm 以下の砕砂、5mm ～ 20mm の砕石を使用した。本実験ではコンクリートの配合において水セメント比（W/C）が耐疲労性に及ぼす影響についても検証するため、水セメント比を 57%、および 50% の 2 タイプの配合条件とする。ここで、本供試体に用いるコンクリート示方配合を表-1 に示す。次に、鉄筋には SD295A D10 を使用した。コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表-2 に示す。ここで、供試体記号をそれぞれ RC57, RC50 とする。

3. 実験方法および等価走行回数

3.1 実験概要

本実験は、輪荷重走行疲労実験から疲労と凍害の複合損傷を受けた場合の RC 床版コンクリートの水セメント比（W/C）が耐疲労性に及ぼす影響および疲労と凍結・融解の繰り返し作用を受けた場合の耐疲労性および動弾性係数による劣化について検証する。よって、実験では水セメント比（W/C）の異なる 2 タイプの供試体を用いて、乾燥状態に

**Evaluation of decreased fatigue resistance ratio
by the frost and wheel tracking combined damaged RC slabs
by
Shohei SUGURO, Tadashi ABE, Kazuhiko MINAKUCHI**

における輪荷重走行疲労実験および輪荷重走行疲労実験と凍結・融解を繰り返す実験を行い、それぞれの等価走行回数から、疲労寿命推定に適用する低減率を評価する。

3.2 輪荷重走行疲労実験

輪荷重走行疲労実験は、供試体の上面を幅 250mm の車輪を連続走行させる実験である。荷重条件は、道示に規定する活荷重 100kN に衝撃の影響を考慮した 150kN を輪荷重設置面 500mm×200mm に作用する 1.0mm² あたりの荷重に換算すると 1.5N/mm² (=150,000/(500×200))となる。そこで、本実験の車輪設置面が 250mm×40mm であることから初期荷重を 15kN (=1.5×250×40) とした。

(1) 乾燥状態での輪荷重走行疲労実験

実験方法は、乾燥状態で疲労を与える供試体の走行範囲は、床版中央から± 600mm (1,200mm)、の範囲を荷重 15kN で 2 万回走行し、その後、走行範囲を床版中央から± 400mm (800mm) の範囲に荷重を 20kN 載荷し、破壊するまで走行させる疲労実験である。輪荷重走行疲労実験における損傷状況は、供試体の端部から 200mm (荷重無載荷)、200mm ～ 400mm (荷重 15kN 走行)、400mm ～ 800mm (荷重 20kN 走行) の範囲とし、輪荷重走行による動弾性係数を診断する。なお、たわみの計測は走行回数 1, 10, 100, 1,000, 5,000 回、それ以降は 5,000 回ごとに計測する。ここで、乾燥状態で実験する供試体記号を、それぞれ RC57-D, RC50-D とする。

(2) 凍結・融解作用および輪荷重走行疲労実験

1) 凍害(凍結・融解)作用

本実験では、輪荷重走行疲労実験において走行回数 5,000 回走行ごとに供試体を 12 時間水槽に入れ、ひび割れから水を浸透させる。その後、空気式凍結装置を用いて 12 時間凍結・融解作用を与える。凍結・融解のプログラムは、常温から 3 時間後に氷点下 30℃に達し、その状態で 6 時間作用させ、その後 3 時間で常温の 20℃となる条件とした。

2) 輪荷重走行疲労実験と凍結・融解

輪荷重走行疲労実験による疲労と凍害作用を与える実験での走行範囲および荷重載荷条件は、乾燥状態における実験方法と同様とする。よって、荷重 15kN で走行範囲 1,200mm を 2 万回走行する。疲労と凍結・融解は 5,000 回走行ごとに 4 サイクル行う。次に、走行範囲 800mm を荷重 20kN 載荷し、供試体が破壊するまで輪荷重走行疲労実験を行う。疲労と凍結・融解は 5,000 回走行ごとにサイクルを繰り返す。供試体の記号を、それぞれ RC57-F, RC50-F とする。また、たわみの計測は乾燥状態と同様とする。

表－3 等価走行回数

供試体	等価走行回数	等価走行回数比	
		F/D	RC57/RC50
RC57-D	2,143,660	—	—
RC57-F	985,308	0.46	—
RC50-D	2,954,512	—	1.38
RC50-F	1,471,436	0.50	1.49

(3) 走行疲労実験における等価走行回数

本実験では 2 万回走行で荷重を増加させる段階状載荷としたことから、等価走行回数を算出して耐疲労性を評価することとする。等価走行回数は、マイナー則に従うと仮定すると、式(1)で与えられ、式(1)における S-N 曲線の傾きの逆数 m には松井ら⁹⁾が提案する 12.7 を適用する。

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

ここで、 N_{eq} ：等価走行回数(回)、 P_i ：載荷荷重(kN)、 P ：基準荷重(15kN)、 n_i ：実験走行回数(回)、 m ：S-N 曲線の傾きの逆数 (=12.7)

4. 結果および考察

4.1 等価走行回数

輪荷重走行疲労実験における等価走行回数および等価走行回数比を表－3 に示す。

水セメント比 57%の供試体は、乾燥状態で疲労実験を行った RC57-D と疲労と凍害の複合劣化を与えた RC57-F の等価走行回数比は 0.46 となり、低減率は 54%である。また、水セメント比 50%の供試体の場合は、乾燥状態で疲労実験を行った RC50-D と疲労実験と凍害を繰り返した RC50-F の等価走行回数比は 0.50 となり、低減率は 50%である。次に、水セメント比 57%と 50%の供試体の比較では、水セメント比 50%の供試体は乾燥状態および疲労と凍害の複合損傷を与えた供試体で、それぞれ 1.38 倍、1.49 倍となり、水セメント比 50%、すなわちセメント量を多くし、圧縮強度を高くすることで耐疲労性が向上する結果となった。

4.2 たわみと等価走行回数の関係

本実験におけるたわみと等価走行回数の関係を図－2 に示す。

(1) 供試体 RC57-D, RC57-F

乾燥状態で輪荷重走行疲労実験を行った、水セメント比 57%の供試体 RC57-D の初期たわみは 0.65mm であり、20,000 回走行では 2.23mm である。その後の荷重増加によりたわみは徐々に増加し、等価走行回数 1.75×10^6 回走行後急激に増加し、破壊している。破壊時のたわみは 10.5mm である。

疲労と凍害の複合劣化を与えた供試体 RC57-F の

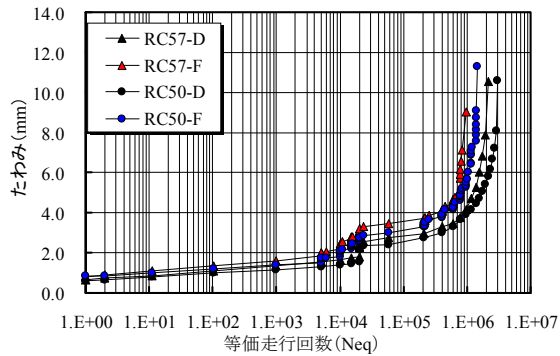


図-2 たわみと等価走行回数との関係

初期たわみは 0.82mm であり、その後の荷重増加と走行を繰り返すことにより、徐々にたわみが増加している。等価走行回数 0.79×10^6 回付近からたわみが急激に増加し始めており、乾燥状態と比較して 40%程度の走行回数から増加している。これは湿潤状態によるセメント成分の溶出により、たわみが増加が著しくなったものと考えられる。破壊時のたわみは 9.03mm である。

(2) 供試体 RC50-D, RC50-F

水セメント比 50%の供試体 RC50-D の初期たわみは 0.61mm であり、等価走行回数の増加に伴ってたわみもわずかに上昇している。等価走行回数 2.72×10^6 回から急激にたわみが増加し、破壊に至っている。破壊時のたわみは 10.61mm である。よって、水セメント比 50%、すなわち圧縮強度を高めることでたわみの増加が抑制され、耐疲労性が向上する結果となった。また、RC50-F の初期たわみは 0.83mm であり、その後の走行によりたわみが増加している。急激な増加は見られないものの、増加傾向は乾燥状態の供試体に比して大きい。これも湿潤状態で輪荷重走行したことにより、ひび割れが擦り磨きされた結果であると考えられる。破壊時のたわみは 11.2mm である。

4.3 コア採取による劣化診断と動弾性係数の関係

本供試体におけるコア採取箇所は、荷重無載荷の位置（コア NR）、15kN で 20,000 回走行した位置（コア A）、そして、荷重 20kN で破壊するまで走行した位置（コア B）の 3 ヶ所とする。動弾性係数の算出はコンクリート標準示方書に準拠し、共鳴振動により算出した。動弾性係数・相対動弾性係数を表-4 に示す。

(1) 供試体 RC57-D, RC57-F の動弾性係数低下率

供試体 RC57-D のコア 57D-NR の動弾性係数は 47.78 kN/mm^2 であり、この動弾性係数値を基準に動弾性係数低下率を比較検討する。コア 57D-NR に比してコア 57D-A, 57D-B は、それぞれ相対動弾性係数は 0.87, 0.85 となり最大で 15%動弾性係数

表-4 コンクリートの動弾性係数

コア名称		縦寸 (mm)	直径 (mm)	断面積 (mm ²)	質量 (g)	一次共鳴 周波数 (Hz)	動弾性 係数 (kN/mm ²)	相対動 弾性係 数
57D	NR	134.1	46.0	1661.1	563.5	16205	47.78	1.00
	A	133.0	46.0	1661.1	524.8	15855	41.62	0.87
	B	132.0	46.0	1661.1	512.2	15946	40.46	0.85
57F	NR	132.3	46.0	1661.1	565.6	15891	45.50	0.95
	A	130.0	46.0	1661.1	514.4	15718	39.94	0.84
	B	128.1	46.0	1661.1	506.9	15207	36.67	0.77
50D	NR	132.7	46.0	1661.1	563.8	16406	48.49	1.00
	A	132.4	46.0	1661.1	534.8	16214	44.83	0.92
	B	131.5	46.0	1661.1	527.9	16193	43.83	0.90
50F	NR	133.0	46.0	1661.1	563.4	16333	46.09	0.95
	A	131.7	46.0	1661.1	525.0	15863	41.58	0.86
	B	130.4	46.0	1661.1	522.9	15746	40.71	0.84

が低下している。また、質量に関してはコア 57D-NR に比して 57D-A, B で、それぞれ 38.7g, 51.3g 減少している。これは、走行疲労を受けることでセメントが粉体となり質量が減少したためである。次に、供試体 RC57-F のコア 57F-NR の相対動弾性係数はコア 57D-NR に比して 0.95 となり、凍害作用により 5%低下している。同様に、コア 57F-A, B の相対動弾性係数は、それぞれ 0.84, 0.77 低下している。質量は 57F-NR に比して、コア 57F-A, B でそれぞれ 51.2g, 58.7g 減少しており、コア 57D-A, 57D-B に比して減少量が多くなっている。

(2) 供試体 RC50-D, RC50-F の動弾性係数低下率

供試体 RC50-D のコア 50D-NR の動弾性係数は 48.49 kN/mm^2 であり、コア 50D-A, B の相対動弾性係数は 0.92, 0.90 である。また、質量はコア 50D-NR に比してコア 50D-A, B で、それぞれ 29.0g, 35.9g 減少しているものの、水セメント比 57%のコアと比べると質量の減少は抑制されている。次に、供試体 RC50-F のコア 50F-NR の相対動弾性係数はコア 50D-NR に比して 0.95 となり、凍害作用により 5%低下した。また、コア 50F-A, B の相対動弾性係数はそれぞれ 0.86, 0.84 となっており、質量は最大で 40.5g 減少している。よって、水セメント比 50%、すなわち圧縮強度を高めることで支圧強度が向上し、セメント成分の溶出が抑制されたものと考えられる。

以上より、疲労と凍害の複合損傷を受ける RC 床版は、乾燥状態に比べ動弾性係数の低下が確認された。これは輪荷重走行によりセメント成分が溶出したことによるものと考えられる。したがって、積雪寒冷地における道路橋 RC 床版のコンクリートは水セメント比を 50%以下とし、さらに完全に防水工を施すことで積雪寒冷地域の RC 床版の長寿命化が図れるものと考えられる。

5. 疲労と凍害を受ける RC 床版の低減率の適用

5.1 RC 床版の S-N 曲線式

松井らは 1964 年の道示に準拠して、鉄筋に丸鋼を用いた RC 床版供試体を用いて床版を対象に輪荷

重走行疲労実験を行い、一部に異形鉄筋を用いた供試体も含めた S-N 曲線式を提案している⁶⁾。また、はり幅 B を考慮した押抜きせん断力学モデルおよび耐荷力式も併せて提案されている¹³⁾。

一方、阿部らは 1980 年改訂および 2002 年改訂の道示に準拠した RC 床版を対象に輪荷重走行疲労実験を行い、S-N 曲線式を提案している³⁾。また、走行荷重実験を行い、押抜きせん断力学モデルおよび耐荷力式も併せて提案されている³⁾。

しかし、輪荷重走行による疲労と凍害を受けた RC 床版の疲労寿命の推定についての S-N 曲線式は提案されていないのが現状である。そこで、輪荷重走行による疲労と凍害の複合損傷を受ける 1964～1973 年改訂の道示で設計された RC 床版の寿命予測には、松井らが提案する S-N 曲線式および押抜きせん断耐荷力式を用い、1980 年以降の道示により設計された RC 床版には阿部らが提案する S-N 曲線式および押抜きせん断耐荷力式を用いることとすると、RC 床版の破壊に至る等価走行回数は式(2)として与えられる。

$$N_f = 10^{\{[\log(C) - \log(P/P_{sx})]/K\}} \quad (2)$$

ここで、 N_f ：破壊走行回数、 P ：基準荷重(kN)、 P_{sx} ：押抜きせん断耐荷力(kN)、 C ：S-N 曲線における S 値(1964-73 年床版 1.520, 1980 年以降床版 0.996)、 K ：S-N 曲線における曲線の傾き(1964-73 年床版 0.07835, 1980 年以降床版 0.06417)

積雪寒冷地域の疲労と凍害の複合損傷を受ける RC 床版の寿命の推定には、破壊に至る繰返し回数 N_f に、本提案する等価走行回数に対する低減係数 β_F を乗じることを提案する。よって、疲労と凍害の複合損傷を受ける RC 床版の破壊等価走行回数 N_{EF} は式(3)として与えられる。

$$N_{EF} = N_f \cdot \beta_F \quad (3)$$

ここに、 N_{EF} ：疲労と凍害を受ける RC 床版の破壊等価走行回数、 β_F ：低減係数(コンクリートの設計基準強度 24N/mm^2 ：低減係数 = 0.46, 設計基準強度 30N/mm^2 ：低減係数 0.50)

以上より、疲労と凍害の複合劣化を受けた 1964～1973 年床版および 1980 年以降の RC 床版の破壊走行回数 N_{EF} は式(3)より算出することを提案する。

6. まとめ

水セメント比の異なる 2 タイプの RC 床版供試体

を用いて輪荷重走行疲労実験による疲労と凍害作用の繰返しによる複合損傷を与え、耐疲労性の低減率を検証した結果、以下の知見が得られた。

(1) 乾燥状態で輪荷重走行疲労実験した供試体と疲労と凍結・融解作用を与えた供試体の等価走行回数の比は水セメント比 57%, 50%で、それぞれ 0.46, 0.50 となり、疲労と凍害の複合損傷を受けることで 54%, 50%耐疲労性が低下する結果となった。

(2) 輪荷重走行疲労実験における、水セメント比 57%の供試体と水セメント比 50%供試体の等価走行回数を比較すると、乾燥状態での実験では 1.38 倍、疲労、凍害作用を与えた実験では 1.49 倍となった。よって、積雪寒冷地域の RC 床版コンクリートの水セメント比を 50%, すなわちコンクリートの設計基準強度を 30N/mm^2 以上とすることを提案する。

(3) たわみと等価走行回数の関係から、疲労と凍害の複合損傷を受けた RC 床版は、乾燥状態に比べてたわみの増加が大きくなる傾向が見られた。

(4) 供試体から採取したコアから動弾性係数を算出した結果、凍結・融解作用を受けることで乾燥状態の場合に比して 5%程度動弾性係数の低下することが判明した。

(5) 本実験から得られた等価走行回数に対する低減率は、RC 床版の S-N 曲線式から算定される破壊走行回数に乗じることで、疲労と凍害を受けた RC 床版の寿命とすることを提案する。

参考文献

- 1) 新銀武, 鈴木大輔, 出戸秀明, 岩崎正二: 積雪寒冷地の塩化物供給を考慮した床版寿命診断に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 13 巻, pp. 347-354, 2005.
- 2) 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.
- 3) 阿部忠, 木田哲量, 高野真希子, 川井豊: 道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力および耐疲労性の評価, 土木学会論文集 A1, pp. 39-54, 2011.
- 4) 川井豊, 阿部忠, 木田哲量, 高野真希子: 道路橋 RC 床版の S-N 曲線に関する一考察, 第 7 回 道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp. 263-268, 2012.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I, II, 2002.
- 6) 松井繁之: 道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版, 2007.