

論文

# 輪荷重走行による疲労と凍害の複合損傷を受けた RC 部材の損傷メカニズム および耐疲労性に対する低減率評価

水口和彦\*, 阿部 忠\*\*, 勝呂翔平\*\*\*

\*博士(工), 日本大学助教 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)  
 \*\*博士(工), 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)  
 \*\*\*工修, 施工技術総合研究所 研究第二部 (〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154)

本研究は、車両走行による疲労と凍害の複合損傷を受けた RC 床版の損傷メカニズムの解明およびコンクリートの圧縮強度が耐疲労性に及ぼす影響についての実験研究である。実験では、圧縮強度が異なる 2 タイプの供試体を用いて、輪荷重走行疲労実験と凍結・融解作用のサイクル試験を行った。その結果、損傷メカニズムは疲労と凍結・融解の繰り返しにより、融解時には床版コンクリート上面が湿潤状態となり、輪荷重の支圧荷重を受け、セメント成分が溶出し、スケーリングや骨材化へと損傷が進行する。また、圧縮強度を高めることで損傷速度が抑制され、耐疲労性が向上することを明らかにした。

キーワード：走行疲労, 凍害, 水セメント比, 破壊メカニズム

## 1. はじめに

RC 床版の疲労損傷に関しては、多くの研究機関で実験研究が進められ、破壊メカニズムや耐疲労性の評価が行われる<sup>1), 2)</sup>とともに、疲労寿命の推定や補修・補強対策等が提案されている。また、近年では塩害・凍害など環境条件を考慮した実験研究も数多く実施されている<sup>3), 4), 5), 6)</sup>。しかし、既往の研究においては、疲労と凍害の複合劣化を受けた RC 床版のスケーリングに至る過程や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関する研究もほとんど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 タイプの供試体に輪荷重走行疲労試験機を用いて、走行疲労と凍害（凍結・融解）を繰り返すサイクル実験を行う。実験より、疲労と凍害の複合劣化であるスケーリングや骨材の露出などの損傷メカニズムおよび乾燥状態での輪荷重疲労実験による等価走行回数との比較を行い、走行疲労と凍害および圧縮強度の違いが耐疲労性の低減率に及ぼす影響について検討することで、積雪寒冷地域における RC 床版の長寿命化対策および疲労寿命推定の一助とする。

## 2. 使用材料および供試体寸法

表-1 コンクリートの示方配合

供試体	基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	W/C (%)	S/a	単用量(kg/m <sup>3</sup> )				AE減水剤 (kg/m <sup>3</sup> )
				W	C	S	G	
RC24-	24.0	57	45.5	170	298	817	1008	2.68
RC30-	30.0	50	53.3	172	344	761	1027	3.27

表-2 材料特性値

供試体	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	鉄筋 (SD295A, D10)		
		降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
RC24-D	27.2	370	511	200
RC24-F				
RC30-D	35.5	370	511	200
RC30-F				

### 2.1 使用材料

供試体のコンクリートには、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。また、本実験ではコンクリート強度の違いによる損傷メカニズムおよび耐疲労性の評価を行うことから、コンクリートの設計基準強度を道示<sup>7)</sup>に基づいて 24N/mm<sup>2</sup> および 30N/mm<sup>2</sup> の 2 種類設定し、水セメント比 (W/C) を 57%、50% として示方配合を行った。ここで、それぞれの配合条件を表-1 に示す。なお、実験時の圧縮強度は、水セメント比 57%、50% で、それぞれ 27.2N/mm<sup>2</sup>、35.5N/mm<sup>2</sup> であった。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、供試体記号を設計基準強度ごとに、それぞれ RC24-, RC30- とする。

## 2.2 供試体寸法および鉄筋の配置

供試体の寸法は、2002年改訂の道示<sup>7)</sup>の規定に基づいて1日1方向あたりの大型車両の計画交通量を2,000台以上として設計し、その1/2モデルとした。次に、本実験装置の車輪幅とその応力分布を考慮した幅寸法として供試体の作製を行い、幅方向の寸法は本実験装置の輪荷重幅が250mmであることから300mmとし、全長1,600mm、支間1,200mm、厚さ130mmの板構造とした。鉄筋は複鉄筋配置とし、引張側の主鉄筋にD10を100mm間隔で配置し、有効高を105mmとした。圧縮側には引張鉄筋量の1/2を配置した。供試体寸法および鉄筋配置を図-1に示す。

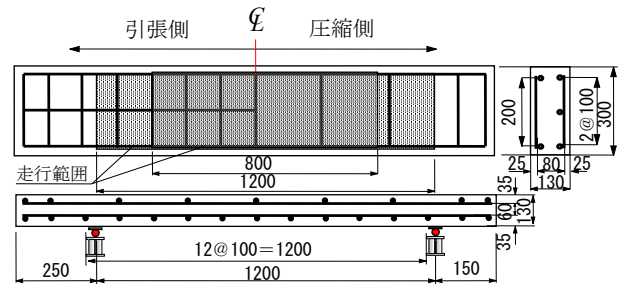


図-1 供試体寸法および鉄筋配置

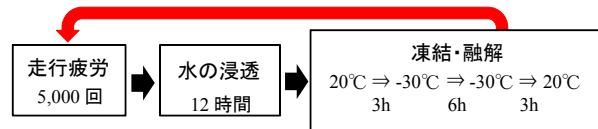


図-2 走行疲労および凍結・融解サイクル

## 3. 実験方法および等価走行回数

### 3.1 実験サイクルおよび凍害（凍結・融解）作用方法

本実験では、輪荷重走行疲労実験において5,000回走行ごとに供試体全体を水槽に12時間入れ、水を浸透させた後、空気式凍結装置を用いて12時間凍結・融解作用を与える。凍結作用は装置内温度を常温(20°C)から3時間で氷点下30°Cとなるよう設定し、その状態で6時間作用させ、その後3時間で常温に戻す条件とした。ここで、輪荷重走行疲労実験と凍害作用のサイクルを図-2に示す。

### 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。本実験の走行範囲は実験開始から2万回走行まで中央から±600mm(全長1,200mm)を連続走行し、2万回以降は±400mm(全長800mm)の区間を連続走行とし、走行回数によるコンクリートの骨材化、スケーリング状態を検証する。荷重条件は、道示<sup>7)</sup>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1.0mm<sup>2</sup>あたりの荷重を算出すると1.5N/mm<sup>2</sup>(=150000/(500×200))となる。そこで、本実験の車輪設置面が250mm×40mmであることから基準荷重を15kN(=1.5×250×40)と設定した。

実験方法は、乾燥状態で疲労を与える供試体は、初期荷重15kNで2万回走行し、その後、荷重を20kNに増加させて破壊するまで走行させる。乾燥状態で実験を行う供試体記号を、それぞれRC24-D、RC30-Dとする。次に、疲労と凍結・融解作用を繰り返す供試体は、凍結・融解作用を与えた後、荷重15kNで5,000回走行ごとに凍結・融解を4サイクル行う。その後、荷重を20kN増加し、5,000回走行ごとに、疲労と凍結・融解作用を破壊するまで繰り返し行う。疲労と凍結・融解作用を与える供試体の記号を、それぞれRC24-F、RC30-Fとする。なお、たわみの計測は走行回数1, 10, 100, 1,000, 5,000回とする。

表-3 等価走行回数

供試体	等価走行回数	サイクル数	等価走行回数比	
			F/D	RC30/RC24
RC24-D	2,143,660	—	—	—
RC24-F	985,308	10	0.46	—
RC30-D	2,954,512	—	—	1.38
RC30-F	1,471,436	12	0.50	1.49

### 3.3 走行疲労実験における等価走行回数

本実験における輪荷重走行疲労実験は、荷重を増加させる段階状荷重としたことから、等価走行回数  $N_{eq}$  を算出して耐疲労性を評価することとする。輪荷重走行による等価走行回数  $N_{eq}$  は、マイナー則に従うと仮定すると、式(1)で与えられる。

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

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<sup>8)</sup>(=12.7)

## 4. 結果および考察

### 4.1 等価走行回数

式(1)から得られた等価走行回数および等価走行回数比を表-3に示す。

#### (1) 走行疲労を受けた供試体 (RC24-D, RC30-D)

乾燥状態で輪荷重走行疲労実験を行った供試体RC24-Dの破壊時の等価走行回数は  $2.14 \times 10^6$  回である。また、供試体RC30-Dの破壊時の等価走行回数は  $2.95 \times 10^6$  回である。供試体RC24-Dの等価走行回数と比較すると、供試体RC30-Dは1.38倍の等価走行回数となった。よって、コンクリートの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。

#### (2) 疲労と凍害作用を受けた供試体 (RC24-F, RC30-F)

輪荷重走行による疲労と凍結・融解作用を受けた供試体RC-24F、RC30Fの破壊時の等価走行回数は、それぞれ  $0.98 \times 10^6$  回、 $1.47 \times 10^6$  回である。よって、供試体RC-24F

に比して供試体 RC-30F が 1.49 倍の等価走行回数となったことから、圧縮強度を高くすることで疲労と凍害の複合損傷に対しても耐疲労性が向上する結果となった。

### (3) 走行疲労と凍害作用を受ける RC 部材の低減率

乾燥状態で輪荷重走行疲労実験を行った供試体の等価走行回数と疲労と凍結・融解を与えた供試体の等価走行回数を比較(F/D)すると、供試体 RC-24 は 0.46 となり、乾燥状態の等価走行回数に対して 54%低下する結果となった。同様に、供試体 RC-30 の等価走行回数比は 0.50 となり、乾燥状態に比して 50%低下している。よって、輪荷重走行による疲労と凍害を受けることで乾燥状態における等価走行回数に比して耐疲労性が大幅に低下する結果となった。以上の結果からも、走行疲労と凍害等の複合劣化が生じる積雪寒冷地域の RC 床版では耐疲労性の低減が大きいものと予測されることから、何らかの対策を講じる必要がある。

## 4.2 損傷状況

本実験における 2 万回走行および破壊時の上面の損傷状況を図-3 に示す。また、側面のひび割れ状況を図-4 に示す。なお、図-4 における網掛けはコンクリートの欠損部分を示したものである。

### (1) 上面の損傷状況

#### 1) 走行疲労を受けた供試体 (RC24-D, RC30-D)

乾燥状態における供試体 RC-24D の等価走行回数 20,000 回走行後の損傷状況は図-3(1), 1)に示すように、コンクリートの骨材が目視で確認できものの、平滑状態を保持している。また、破壊時においてもコンクリート上面の損傷状況は図-3(1), 2)に示すように、骨材が露出しているもの平滑状態を保持している。

次に、供試体 RC-30D の損傷状況は図-3(3), 1)に示すように、等価走行回数 20,000 回では、コンクリート上面に損傷は見られず平滑状態を保持している。また、破壊時においても上面コンクリートの骨材が僅かに露出している程度で平滑状態を保持している。

以上より、乾燥状態における輪荷重走行疲労実験ではコンクリート上面の損傷において供試体 RC-30D はコンクリートの圧縮強度が高いことからほとんど損傷が見られない。

#### 2) 疲労と凍害作用を受けた供試体 (RC24-F, RC30-F)

疲労と凍害作用を受けた供試体 RC-24F の等価走行回数 20,000 回走行後の損傷状況は図-3(2), 1)に示すように、走行と凍害の繰り返しにより、骨材の露出が見られ、凹凸状態となっている。損傷メカニズムは、融解により上面が湿潤状態となり、輪荷重走行によりセメント成分が溶出し、骨材化に至っている。また、破壊時の損傷状況は、図-3(2), 2)に示すように、4.0mm 程度のスケールリングと骨材の露出が見られる。

次に、供試体 RC-30F の損傷状況は図-3(4), 1)に示すように、等価走行回数 20,000 回では、コンクリート上面

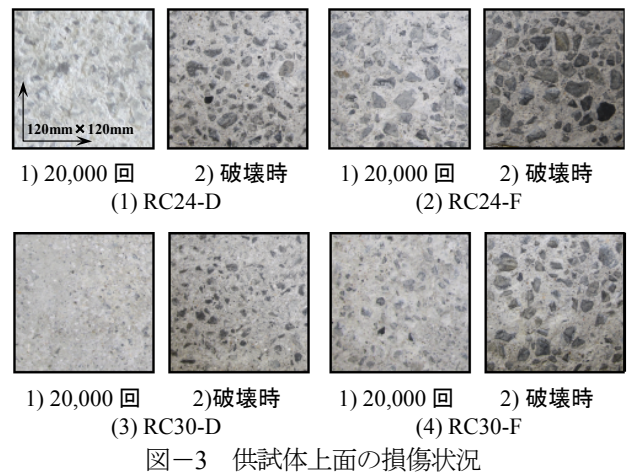


図-3 供試体上面の損傷状況

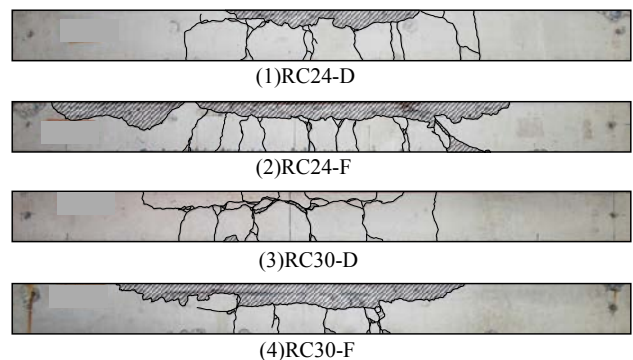


図-4 供試体側面の損傷状況

の損傷は、融解により湿潤状態となり、セメント成分の溶出により 2.0mm 程度のスケールリングと骨材が露出している。また、破壊時の損傷状況は図-3(4), 2)に示すように、3.0mm 程度のスケールリングと骨材が露出している。よって、コンクリートの圧縮強度を高くすることでスケールリングや骨材の露出は抑制される結果となった。

以上より、輪荷重走行による疲労と凍害を受ける RC 床版の損傷メカニズムは、疲労と凍結・融解を繰り返すことにより発生した微細なひび割れに水が侵入し凍結する。その後、融解により供試体上面は常時湿潤状態で輪荷重走行による支圧を受け、コンクリートのセメント成分が溶出し、スケールリングに至るものと推測できる。

### (2) 側面のひび割れ状況

#### 1) 走行疲労を受けた供試体 (RC24-D, RC30-D)

乾燥状態で輪荷重走行疲労実験を行った供試体 RC24-D のひび割れ状況は、図-4(1)に示すように、輪荷重走行により下面に発生したひび割れは、走行を繰り返すことにより上縁に進展している。破壊時には圧縮鉄筋にそった水平ひび割れが発生し、輪荷重走行中に供試体中央で曲げ破壊となった。また、供試体 RC30-D も同様に輪荷重走行により発生した下縁のひび割れは、走行を繰り返すことにより上縁に進展している。破壊は圧縮鉄筋に沿った水平ひび割れが発生し、輪荷重走行中に床版中央で曲げ破壊となった。

#### 2) 疲労と凍害作用を受けた供試体 (RC24-F, RC30-F)

輪荷重走行による疲労と凍害の作用を受けた供試体

RC24-Fのひび割れ状況は、図-4(2)に示すように、下縁に発生したひび割れが、輪荷重走行を繰り返すことで上縁に進展し、圧縮鉄筋配置付近に水平ひび割れが発生している。この供試体は上面コンクリートがスケーリングしたことから乾燥状態に比してひび割れが多く発生している。破壊は輪荷重が走行中に曲げ破壊した。また、供試体 RC30-F も同様に下縁から発生したひび割れが上縁に進展し、輪荷重走行中に曲げ破壊となった。なお、圧縮強度が高い供試体であることから、側面の角落ちは見られるがひび割れは中央付近のみとなっている。

### 4.3 たわみと等価走行回数との関係

本実験におけるたわみと等価走行回数の関係を図-5に示す。

#### (1) 走行疲労を受けた供試体 (RC24-D, RC30-D)

乾燥状態で輪荷重走行疲労実験を行った供試体 RC24-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  $1.75 \times 10^6$  回走行後、急激に増加し、破壊に至っている。破壊時のたわみは 10.5mm である。また、供試体 RC30-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わずかに上昇している。等価走行回数  $2.72 \times 10^6$  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、コンクリートの圧縮強度を高めることで、たわみの増加速度が抑制される結果となった。

#### (2) 疲労と凍害作用を受けた供試体 (RC24-F, RC30-F)

疲労と凍害の複合損傷を受けた供試体 RC24-F の初期たわみは 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、たわみが徐々に増加している。等価走行回数  $0.79 \times 10^6$  回付近からたわみが急激に増加し始めており、RC24-D に比して 40% 程度の走行回数である。これは、湿潤状態によるセメント成分の溶出に伴うスケーリングに起因したものと考えられる。なお、破壊時のたわみは 9.03mm である。また、RC30-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。この要因としても、湿潤状態で輪荷重走行したことによる上面コンクリートのスケーリングによるものと考えられる。なお、破壊時のたわみは 11.2mm である。

## 5. まとめ

- (1) 輪荷重走行疲労実験における等価走行回数は、圧縮強度の違いによる比較では、乾燥状態で 1.38 倍、疲労と凍害作用を与えた場合で 1.49 倍となり、圧縮強度の違いによる影響が顕著であった。
- (2) 乾燥状態で実験した供試体と疲労と凍害作用を受けた供試体の等価走行回数比は、それぞれ 0.46、0.50 と

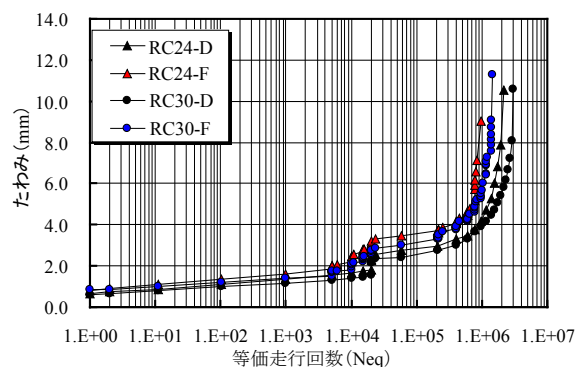


図-5 たわみと等価走行回数との関係

- なり、耐疲労性が大幅に減少する結果となった。したがって、走行疲労と凍害などの複合劣化を受ける地域では RC 床版の設計においてコンクリートの設計基準強度を高くするなどの対策を講じる必要がある。
- (3) 疲労と凍害による複合損傷のメカニズムは、融解時にコンクリート床版は常時湿潤状態となり、輪荷重走行による支圧強度を受けて、コンクリート表面のセメント成分が溶出し、これを繰り返すことによりコンクリート表面がスケーリングし骨材化に至る。さらに走行疲労と凍害を繰り返すことにより砂利化となる。
  - (4) たわみと等価走行回数との関係より、乾燥状態の供試体に比して、疲労と凍害を与えた供試体はたわみの増加が大きい傾向にあるが、圧縮強度を高くすることでたわみの増加速度を抑制することができる。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 阿部忠ほか：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.
- 3) 木田哲量ほか：走行振動応力履歴 RC 床版の塩害・凍害作用による劣化状態と耐荷力低下に関する研究, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.1300-1311, 2010.
- 4) 山下英俊ほか：北海道におけるコンクリート構造物の複合劣化に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, pp.543-548, 1994.
- 5) 出戸秀明ほか：積雪寒冷地の塩化物供給を考慮した RC 床版余寿命診断技術の提案, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.1227-1238, 2010.
- 6) 三田村浩ほか：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.
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I, II, 2002.
- 8) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版, 2007.