

PVA 短繊維を混入した軽量コンクリート製 RC 床版の輪荷重走行実験

The wheel loading test of RC slab used PVA short-fiber mixed light weight concrete

(独) 土木研究所寒地土木研究所 ○正会員 安達 優 (Yutaka Adachi)
 (独) 土木研究所寒地土木研究所 正会員 三田村浩 (Hiroshi Mitamura)
 室蘭工業大学工学研究科 正会員 栗橋祐介 (Yusuke Kurihashi)
 三井住友建設 (株) 技術開発本部 フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)

1. はじめに

橋梁上部構造の軽量化は下部構造の省力化に伴う建設コスト削減や、耐震性向上に有効である。軽量化の方法として軽量コンクリートの使用が挙げられるが、軽量コンクリートは普通コンクリートと比較して、水セメント比が同等では圧縮強度が小さく、さらに、圧縮強度が同等でも引張強度やせん断強度が小さいという短所を有している¹⁾。RC 床版は輪荷重の繰返し作用によって押し抜きせん断破壊で終局に至るため、その耐久性はコンクリートの引張強度やせん断強度に大きく依存する傾向にある²⁾。そのため、RC 床版の疲労耐久性は、軽量コンクリートを使用すると、普通コンクリートを使用した場合に比べて劣ることが報告されている³⁾。

著者らは既往の研究において、軽量コンクリートに PVA 短繊維を体積比で 0.5 % 混入することで、引張性能が改善され、RC 部材のせん断耐力が普通コンクリート使用時と同等以上に向上することを確認してきた⁴⁾⁵⁾。しかしながら、既往の研究では、繰返し荷重に対する耐久性に関する検討には至っていない。床版部材への適応性を評価するには、実橋床版と同様に移動荷重の繰返し作用に対する耐久性の検証が不可欠と考えられる。

このような背景から、本研究では PVA 短繊維の体積混入率（以下、短繊維混入率）を 0.5 % とした軽量コンクリート床版の疲労耐久性の検証を目的に、PVA 短繊維混入軽量コンクリート製 RC 床版の輪荷重走行実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 RC 床版試験体

表-1 に試験体の一覧を示す。試験体数は、普通および軽量コンクリート、PVA 短繊維を 0.5 % 混入した軽量コンクリート床版の計 3 体である。

図-1 に試験体の形状および寸法を示す。試験体は、寸法が 3,000 × 2,300 × 180 mm の複鉄筋 RC 版である。主鉄筋および配力筋にはそれぞれ φ 16、φ 13 を用い、配

表-1 試験体一覧

試験体名	コンクリートの種類	短繊維混入率 (Vol.%)
N	普通	-
L	軽量	-
LF	軽量	0.5

力筋の上下鉄筋と主鉄筋の上側鉄筋は 200 mm 間隔、主鉄筋の下側鉄筋は 100 mm 間隔で配置した。なお、試験体の形状および寸法は、既往の研究⁶⁾で実験を終えている N 試験体と同一のものとしている。

2.2 使用材料

表-2 にコンクリートの配合を示す。LF 配合は、既往の研究により、良好なポンプ圧送性、凍結融解抵抗性、さらには、PC への適用に必要な圧縮強度を満足するように設定したものである。また、L 配合は、LF 配合と硬化コンクリートの特性を一致させることを目的に、LF 配合を基に混和剤により空気量を調整したものである。なお、LF および L 配合には頁岩系非造粒型の軽量粗骨材を用い、各配合ともにセメントには早強ポルトランドセメントを用いた。

表-3 に、コンクリートの材料特性を一覧にして示す。硬化コンクリートの特性に関する試験は、供試体を水中で養生し、各試験体の疲労実験終了後に行っている。なお、N 試験体の静弾性係数は既往の研究において測定していないことから、コンクリート標準示方書⁷⁾を参考に推定した値を示している。表-4 に、PVA 短繊維の寸法および材料特性値を一覧にして示す。

2.3 実験方法

試験体の支持条件は、長辺方向の 2 辺を単純支持とし、短辺方向の 2 辺は実橋床版の連続性を再現するために弾性支持とした。また、四隅には貫通ボルトを用いて浮

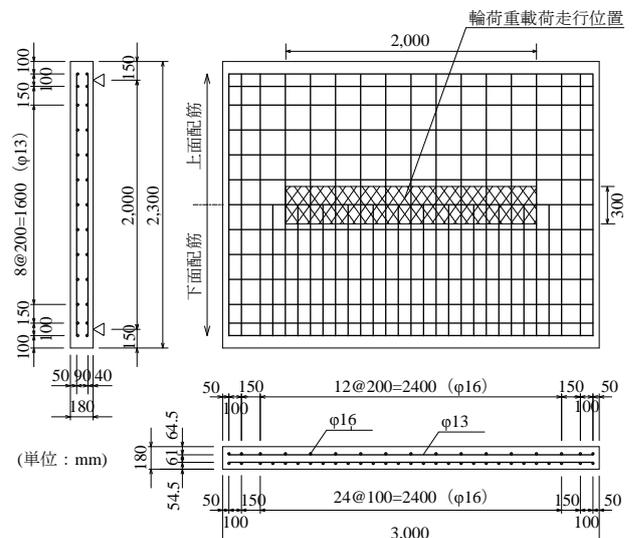


図-1 試験体の形状および寸法

表-2 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							AE剤 (C×%)	AE 減水剤 (C×%)	高性能AE 減水剤 (C×%)	増粘剤 (W×%)	短繊維 混入率 (Vol.%)
				W	P*	C	Sg	S	G						
									普通	軽量					
N	38.9	38.9	35.9	151	388	388	-	648	1158	-	-	3.88	-	-	-
L	34.5	32.3	54.9	150	465	435	30	920	-	350	3	-	1.25	0.05	-
LF	34.5	32.3	54.9	150	465	435	30	920	-	350	2	-	1.25	0.05	0.5

* P = C + Sg

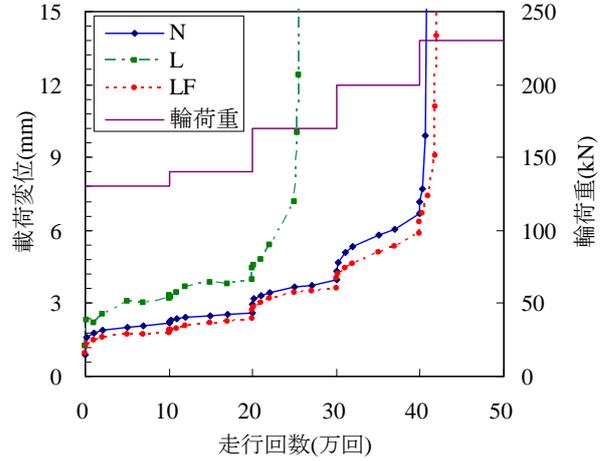
表-3 コンクリートの材料特性

配合名	フレッシュコンクリートの特性			硬化コンクリートの特性		
	スラン プ (cm)	スラン プ フロー (mm)	空気量 (%)	単位体積 質量 (g/cm ³)	圧縮 強度 (MPa)	静弾性 係数 (GPa)
N	7.5	-	4.9	2.30*	46.8	32.0*
L	-	635	7.9	1.89	44.8	24.7
LF	-	585	6.6	1.87	52.6	21.4

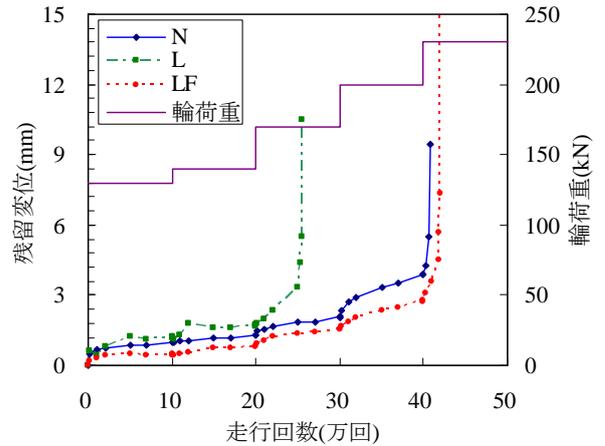
* コンクリート標準示方書⁷⁾を参考にした値

表-4 PVA 短繊維の材料特性

長さ <i>l</i> (mm)	直径 <i>d</i> (mm)	アスペクト 比 <i>l/d</i>	弾性 係数 (GPa)	引張 強度 (GPa)	破断 ひずみ (%)
30	0.66	45	29.4	0.88	7



(a) 荷重変位と走行回数の関係



(b) 残留変位と走行回数関係

図-2 変位-走行回数関係

き上がりを拘束している。

荷重方法は、実橋床版に作用する輪荷重を再現するため、輪荷重走行試験機を用いた繰返し荷重とした。輪荷重走行の範囲は、試験体中央部から前後 1 m の計 2 m の範囲で、荷重幅は 0.3 m である。荷重荷重は、既往の研究と同様に、初期荷重を 130 kN とし、140, 170, 200, 230 kN と終局に至るまで段階的に増加させた。各荷重段階における繰返し荷重回数は 10 万回とした。なお、本研究における試験体の終局の定義は、既往の研究⁶⁾と同様に変位が急増した時点としている。

測定項目は繰返し走行回数 (以下、走行回数)、試験体中央部の変位 (以下、変位)、試験体中央部の下側主鉄筋ひずみ (以下、ひずみ)、および床版下面のひび割れ延長図を基にしたひび割れ密度である。ひび割れ密度は松井らによる格子密度法により算出した³⁾。変位およびひずみは、荷重時と除荷時の 2 通りについて測定した。以下、それぞれ荷重変位および荷重ひずみ、残留変位および残留ひずみと呼ぶ。これらの測定は、各荷重段階の 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 7, 10 万回走行終了時に実施した。

3. 実験結果と考察

3.1 変位-走行回数関係

図-2 に変位と走行回数との関係を示す。各試験体の終局時の走行回数は、N, L, LF 試験体でそれぞれ、40.80, 25.47, 42.08 万回となった。

L 試験体は初期の段階から荷重および残留変位ともに他の試験体に比べ終局高い値で推移し、荷重が 170 kN へ増加すると、走行回数の増加に対する変位の増分が大

きくなり、荷重増加後約 5 万回で終局に至っている。

LF 試験体の残留変位は、終始、他の試験体よりも低い値で推移しており、健全性が高いことがわかる。

L, LF 試験体は荷重が 230 kN に増加した後、早期に終局に至っている。これは、損傷が進行していたことに加えて、荷重増加後の走行回数は、マイナー則に従うと、前後荷重の比の 12.76 乗分に換算されることになるため、荷重の増加が試験体に大きな影響を与えたことによるものと考えられる。なお、換算に使用した累乗 12.76 は、後述する式(1)による S-N 曲線の傾きの逆数を示している。

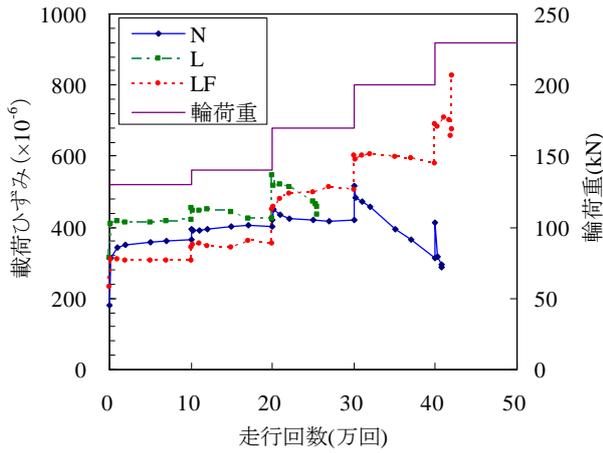


図-3 荷重ひずみ-走行回数関係

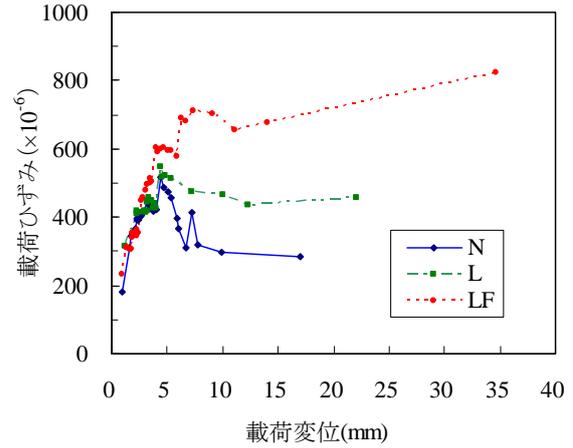


図-4 荷重ひずみ-荷重変位関係

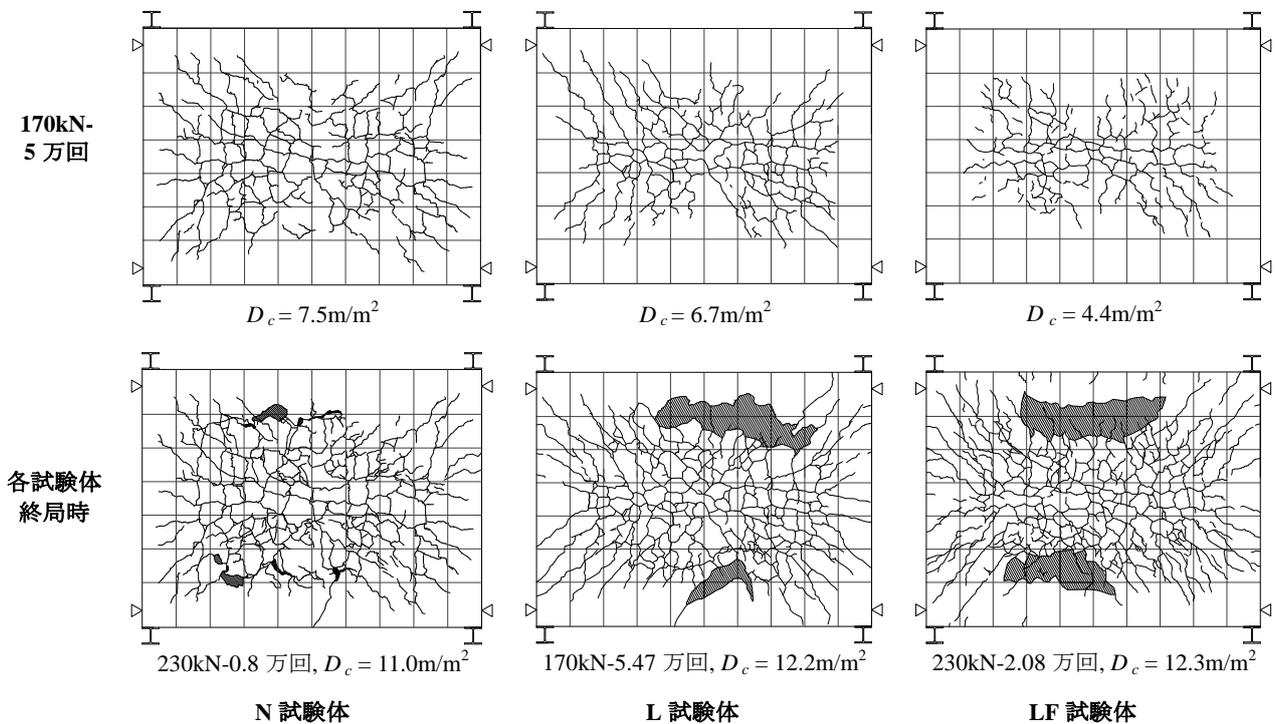


図-5 実験終了後の各試験体下面のひび割れ分布性状

3.2 ひずみ-走行回数関係

図-3に鉄筋ひずみと走行回数との関係を示す。各試験体の終局時の荷重ひずみは、N、L、LF試験体でそれぞれ 286×10^{-6} 、 458×10^{-6} 、 825×10^{-6} となった。このことから、各試験体の主鉄筋はいずれも弾性範囲内であることが分かる。図より、各試験体のひずみは、荷重や走行回数の増加に対応して増大しているが、終局に近づくにつれて走行回数の増加に伴って減少する傾向がみられる。これは、コンクリートと鉄筋との付着力が低下したことで、鉄筋の応力が徐々に解放されたことによるものと考えられる。なお、この傾向はN、L試験体でより顕著であり、LF試験体では顕著でない。

図-4には、ひずみと変位との関係を示している。図

より、N、L試験体のひずみは変位が5mm程度を超えると低下する傾向を示している。一方、LF試験体のひずみは、変位が5mmを超えた後も、緩やかに増加している。これは、コンクリートの静弾性係数が小さいことや、短繊維の架橋効果により鉄筋との付着力が保持され、鉄筋へ応力が伝達されたことによるものと推察される。

3.3 ひび割れ分布性状

図-5にL試験体の終局直前である170kN-5万回走行時と終局時における各試験体下面のひび割れ分布性状およびひび割れ密度 D_c を比較して示す。170kN-5万回時点のひび割れ発生状況を比較すると、LF試験体が最も少なく、ひび割れ密度は $4.4 \text{ m}^2/\text{m}^2$ であった。一方、N、L試験体のひび割れ密度はそれぞれ、 $7.5 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 、

表-5 各試験体における走行回数の実験値と計算値

試験体名	短繊維混入率 (Vol.%)	圧縮強度 f_c (MPa)	静弾性係数 (GPa)	せん断強度 f_v^{**} (MPa)	引張強度 f_t^{**} (MPa)	P_{sx} (kN)	P/P_{sx} ($P=150kN$)	計算値 (150kN換算) N_f (万回)	実験値 (150kN換算) N (万回)	N/N_f	普通コンクリートとの比較	短繊維混入による効果
N	-	46.8	32.0*	6.8	3.5	408	0.37	7,537	635	0.084	1.00	-
L	-	44.8	24.7	6.3	3.3	394	0.38	4,674	33	0.007	0.08	1.00
LF	0.5	52.6	21.4	7.2	3.8	424	0.35	11,943	934	0.078	0.93	11.08

* 圧縮強度から推定した値⁷⁾, ** 圧縮強度から算出した値⁸⁾

6.7 m/m² であることから、LF 試験体のひび割れ密度は、他の試験体に比べて 3~4 割程度小さく、健全性が高いことがうかがわれる。また、各試験体の終局時点におけるひび割れ分布性状を比較すると、LF 試験体のひび割れが最も分散して多数発生していることが分かる。これは、短繊維の架橋効果によってひび割れが分散したことによるものと考えられる。また、L, LF 試験体のコンクリート片が大きくはく落しているのが分かる。これは、N 試験体の終局時の載荷変位が 16 mm 程度であったのに対し、L, LF 試験体はそれぞれ 22, 35 mm 程度と大きかったことによるものと考えられる。また、各試験体の終局時点におけるひび割れ密度は、各試験体ともに 11~12 m/m² 程度で既往の文献と同程度であった³⁾。なお、コンクリート片がはく落した範囲については、ひび割れの確認ができないため、終局時のはく落範囲が広い L, LF 試験体は、測定値以上のひび割れが生じていたものと考えられる。

3.4 疲労耐久性の評価

松井らは RC 床版の輪荷重による S-N 曲線を式(1)のように提案している⁸⁾。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.52 \quad (1)$$

ここで、 P : 輪荷重, P_{sx} : 梁状化した RC 床版の押し抜きせん断耐力, N : 繰返し回数, である。なお、 P_{sx} はコンクリートのせん断強度 f_v および引張強度 f_t , 中立軸深さおよび引張側主鉄筋のかぶり深さで表され、せん断強度 f_v および引張強度 f_t は圧縮強度から算出される⁸⁾。

表-5 に、各試験体における走行回数の実験値と式(1)による計算値を一覧して示す。本実験では、荷重を段階的に増加させていることから、結果を比較するためには、増加後の走行回数を設定荷重に対する走行回数に換算する必要がある。本研究では既往の研究と同様に、換算する設定荷重 P を 150 kN とした。なお、走行回数の換算は、荷重と走行回数がマイナー則に従うものとして行っている。表より、N, L, LF 試験体の計算値 N_f は、それぞれ 7,537, 4,674, 11,943 万回となったのに対し、実験値 N は、それぞれ 635, 33, 934 万回となった。ここで、 N/N_f は、N, L, LF 試験体でそれぞれ 0.084, 0.007, 0.078 と小さい。これは、式(1)が異形鉄筋を用いた RC 床版を対象にした実験結果を基に提案されたものである一方で、本実験では試験体の鉄筋に丸鋼を用いているなど、試験体の配筋が影響したものと考えられる。ここで、N 試験体の N/N_f が試験体条件を加味した値であるものとして考え、L, LF 試験体の疲労耐久性を評価する

と、それぞれ、0.08, 0.93 となった。このことから、軽量コンクリートを用いた RC 床版の疲労耐久性は、普通コンクリートに比べて大きく低下するものの、PVA 短繊維を混入することで普通コンクリートと同程度にまで改善することが分かった。また、L 試験体に対する LF 試験体の N/N_f は 11.08 となった。このことから、短繊維混入による軽量コンクリート床版の疲労耐久性向上効果は 11 倍程度であることが分かった。

4. まとめ

本研究では、軽量コンクリートに PVA 短繊維を 0.5% 混入した場合の疲労耐久性向上効果を、RC 床版を試験体とした輪荷重走行実験により検証した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 1) 軽量コンクリートに PVA 短繊維を 0.5% 混入させることによって、疲労耐久性は普通コンクリート床版と同程度にまで向上する。
- 2) 軽量コンクリート床版の疲労耐久性は PVA 短繊維を 0.5% 混入させることによって 11 倍程度向上する。

参考文献

- 1) 笠井芳夫：軽量コンクリート，技術書院，2002。
- 2) 前田幸雄，松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐荷力の評価式，土木学会論文集，第 348 号，V-1，pp.133-141，1984.8
- 3) 松井繁之，藤井伸介，安松敏雄，藤木英一，丸井浩：人工軽量骨材の道路橋床版への適用を目指した疲労耐久性に関する研究，軽量コンクリートの性能の多様化と利用拡大に関するシンポジウム論文集，pp.119-126，2000.8
- 4) 三上浩，岸徳光，栗橋祐介，竹本伸一：せん断破壊型軽量コンクリート製 RC 梁の耐衝撃性に及ぼす PVA 短繊維混入率の影響，構造工学論文集，Vol.52A，2006.3
- 5) 田口史雄，栗橋祐介，岸徳光，三上浩：ポンプ圧送した PVA 短繊維混入軽量コンクリートを用いた RC 梁の耐荷性状，コンクリート工学論文集，2008。
- 6) 藤川守，小野貴之，安達優，三田村浩，松井繁之：積雪寒冷地における RC 床版の耐久性に関する研究，土木学会北海道支部論文報告集，第 63 号，F-4，2006。
- 7) コンクリート標準示方書 [設計編]，2007。
- 8) 松井繁之：道路橋床版設計施工と維持管理，森北出版，2007。