

論文 PVA 短繊維を混入した軽量コンクリート製 RC 床版の疲労耐久性向上効果

安達 優^{*1}・三田村 浩^{*2}・田口 史雄^{*3}・三上 浩^{*4}

要旨：本研究では、PVA 短繊維を体積混入率で 0.5 % 使用した軽量コンクリート製 RC 床版の移動荷重に対する疲労耐久性を検証するため、輪荷重走行実験を実施した。その結果、軽量コンクリート床版の疲労耐久性は PVA 短繊維を混入させることにより普通コンクリート床版と同程度にまで向上し、普通軽量コンクリート床版と比較すると 11 倍程度の疲労耐久性向上効果が得られることが明らかとなった。

キーワード：疲労耐久性、軽量コンクリート、PVA 短繊維、RC 床版、輪荷重走行実験

1. はじめに

橋梁上部構造の軽量化は下部構造の小断面化に伴う建設コスト縮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。

このような観点から、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 % とすることによる軽量コンクリート床版の疲労耐久性向上効果を検証す

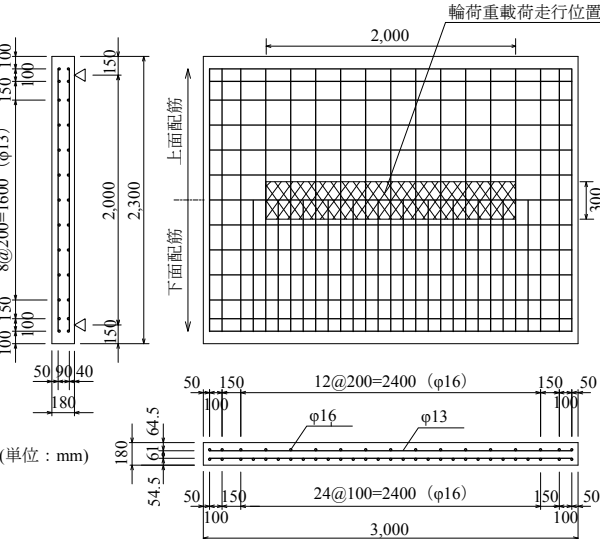
ることを目的に、PVA 短繊維混入軽量コンクリート製 RC 床版の輪荷重走行実験を実施した。

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。なお、N 試験体は既往の研究⁶⁾で実験を終えているものである。そのため、後述する実験方法や試験体の形状寸法および配筋については N 試験体と同様にしている。

図－1 に試験体の形状寸法および配筋状況を示す。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 φ16、φ13 を用い、配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。



図－1 試験体の形状寸法および配筋状況

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

*1 尾張旭市役所 土木管理課維持係技師補（正会員）
*2 （独）土木研究所 寒地土木研究所寒地構造チーム主任研究員 博(工)（正会員）
*3 （独）土木研究所 寒地土木研究所耐寒材料チーム上席研究員 博(工)（正会員）
*4 三井住友建設（株） 技術研究開発本部技術開発センター主席研究員 博(工)（正会員）

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							
								a	b	c	a	b	c					
N	38.9	38.9	35.9	151	388	388	-	453	195	-	689	469	-	-	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 使用材料の一覧

材料	記号	種類	物性および主成分
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度：3.14 g/cm ³ ，比表面積：0.45 m ² /g
混和材	Sg	高炉スラグ	密度：2.91 g/cm ³ ，粉末度：4000 cm ² /g
細骨材	S	a 幌延産陸砂	絶乾密度：2.63 g/cm ³ ，粗粒率：2.67
		b 小樽産砕砂	絶乾密度：2.63 g/cm ³ ，粗粒率：2.85
		c 苫小牧産陸砂	絶乾密度：2.67 g/cm ³ ，粗粒率：2.71，吸水率：1.36 %
粗骨材	G	a 当別産砂利	絶乾密度：2.60 g/cm ³ ，最大寸法：25mm，実績率：64.4 %
		b 小樽産碎石	絶乾密度：2.64 g/cm ³ ，最大寸法：40mm，実績率：58.8 %
		c 頁岩系非造粒型軽量骨材	絶乾密度：1.25 g/cm ³ ，表乾密度：1.37 g/cm ³ ，粗粒率：0.809，最大寸法：15 mm，単位容積質量：64.7 kg/l
混和剤	-	AE剤	天然樹脂酸塩
		AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオールとの複合体
		高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物と分子内架橋ポリマーの複合体
		増粘剤	水溶性セルロースエーテル
短繊維	-	ポリビニルアルコール短繊維	密度：1.3 g/cm ³ ，直径：0.66 mm，長さ：30 mm 弾性係数：29.4 GPa，引張強度：0.88 GPa，破断ひずみ：7 %

表-4 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 (%)		軽量粗骨材の 吸水率 (%)		単位体積 質量 (g/cm ³)	圧縮 強度 (MPa)	静弾性 係数 (GPa)	耐久性指数 DF	
		圧送前	圧送後	圧送前	圧送後	圧送前	圧送後				圧送前	圧送後
N	7.5	-	-	4.9	-	-	-	2.30*	46.8	32.0*	-	-
L	-	635	-	7.9	-	-	-	1.89	44.8	24.7	90	-
LF	-	613	585	6.5	6.6	17.04	17.01	1.87	52.6	21.4	89	90

* コンクリート標準示方書⁷⁾を参考にした値

2.2 配合と使用材料

表-2 にコンクリートの配合を，表-3 に使用材料の一覧を示す。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，さらにはプレストレストコンクリート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。

2.3 材料特性

表-4 に，コンクリートの材料特性を一覧にして示す。本研究では，短繊維混入軽量コンクリートについては，

通常のコンクリートプラントによって製造した後ポンプ圧送し，その施工性を確認した後，同コンクリートを試験体の打設に用いた。ポンプ圧送は，スクイーズ駆動式（圧送能力 90～110 m³/h）のポンプを用い，直径 120 mm，長さ 50 m の圧送管により実施した。普通コンクリートおよび軽量コンクリートについてはポンプ圧送を行わず，プラントで製造されたコンクリートを用いて打設した。なお，表-4 に示されているように，ポンプ圧送前後におけるスランプフロー，空気量および軽量骨材の吸水率の変動は小さいことを確認している。また，ポンプ圧送により，短繊維混入軽量コンクリートがスムーズに圧送されることを確認している。

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，単体体積質量，圧縮強度および静弾性係数



写真-1 輪荷重走行試験機

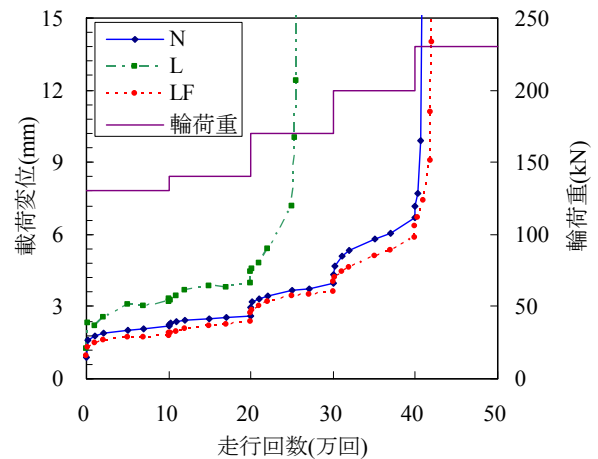
の測定は、各試験体の疲労実験終了後に行っている。なお、N 試験体の静弾性係数は測定していないことから、コンクリート標準示方書⁷⁾を参考に推定した値を示している。また、寒冷地への適用性を評価するため、圧送前後のコンクリートを使用した凍結融解試験を行った。その結果、耐久性指数は 90 程度となり、圧送後においても高い凍結融解抵抗性を有していることを確認した。

2.4 実験方法

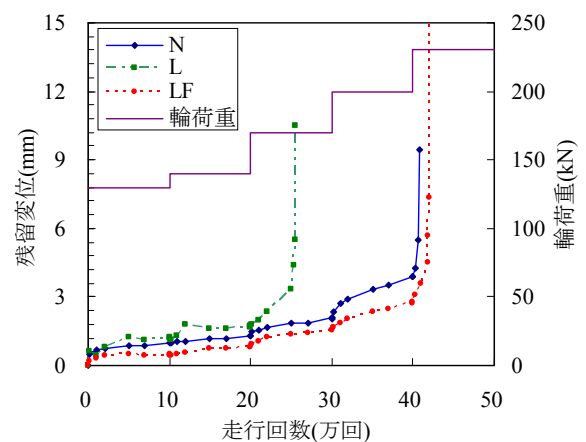
試験体の支持条件は、長辺方向の 2 辺を単純支持とし、短辺方向の 2 辺は実橋床版の連続性を再現するために弾性支持とした。また、四隅には貫通ボルトを用いて浮き上がりを拘束している。

載荷方法は、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（写真-1）を用いた繰返し載荷とした。輪荷重走行の範囲は、図-1 に示すように試験体中央部から前後 1 m の計 2 m とし、載荷幅は 0.3 m である。載荷荷重は、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。また、各荷重段階における繰返し載荷回数は 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、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）、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⁾。すなわち、あらかじめ床版下面に一定間隔で十字方向に記載した格子線とひび割れの交点数の総和を、格子線の総延長で除すことで算出した。変位およびひずみは、載荷時と除荷時の 2 通りについて測定した。以下、それぞれ載荷変位および載荷ひずみ、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, 0.2, 1, 2, 5, 7, 10 万回走行終了時に実施した。また、実験終了後には、L, LF 試験体を中心から十字に切断し、切断面のひび割れ分布性



(a) 載荷変位と走行回数の関係



(b) 残留変位と走行回数の関係

図-2 変位-走行回数関係

状を観察した。

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載荷および残留変位ともに他の試験体に比べ終始高い値で推移し、荷重が 170 kN へ増加すると、走行回数の増加に対応して両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 試験体の載荷および残留変位は、終始、他の試験体よりも低い値で推移しており、N 試験体と同等以上に健全性が高いことがうかがわれる。また、N, 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（線形累計損傷則）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

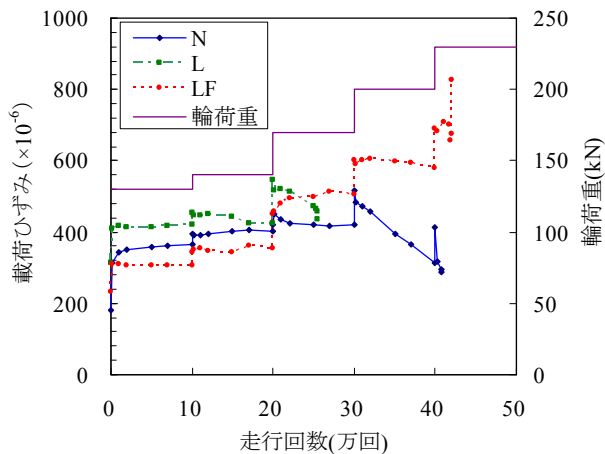


図-3 荷重ひずみ-走行回数関係

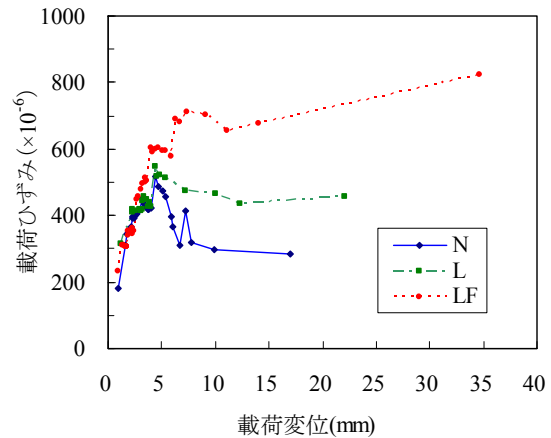


図-4 荷重ひずみ-荷重変位関係

るものと考えられる^{7,8)}。なお、換算に使用する累乗 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。

3.2 ひずみ-走行回数関係

図-3 に荷重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 μ , 458 μ , 825 μ であった。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わかる。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切れが徐々に進行したことで、主鉄筋中央部において突出して高くなっていた応力が平滑化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、荷重ひずみと荷重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 5 mm 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 5 mm 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く、変位量に対するひび割れの発生量が少ないことに加えて、短繊維の架橋効果によってひび割れ幅の拡大が抑制されたことにより、鉄筋との付着力が保持され、鉄筋へ応力伝達がな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

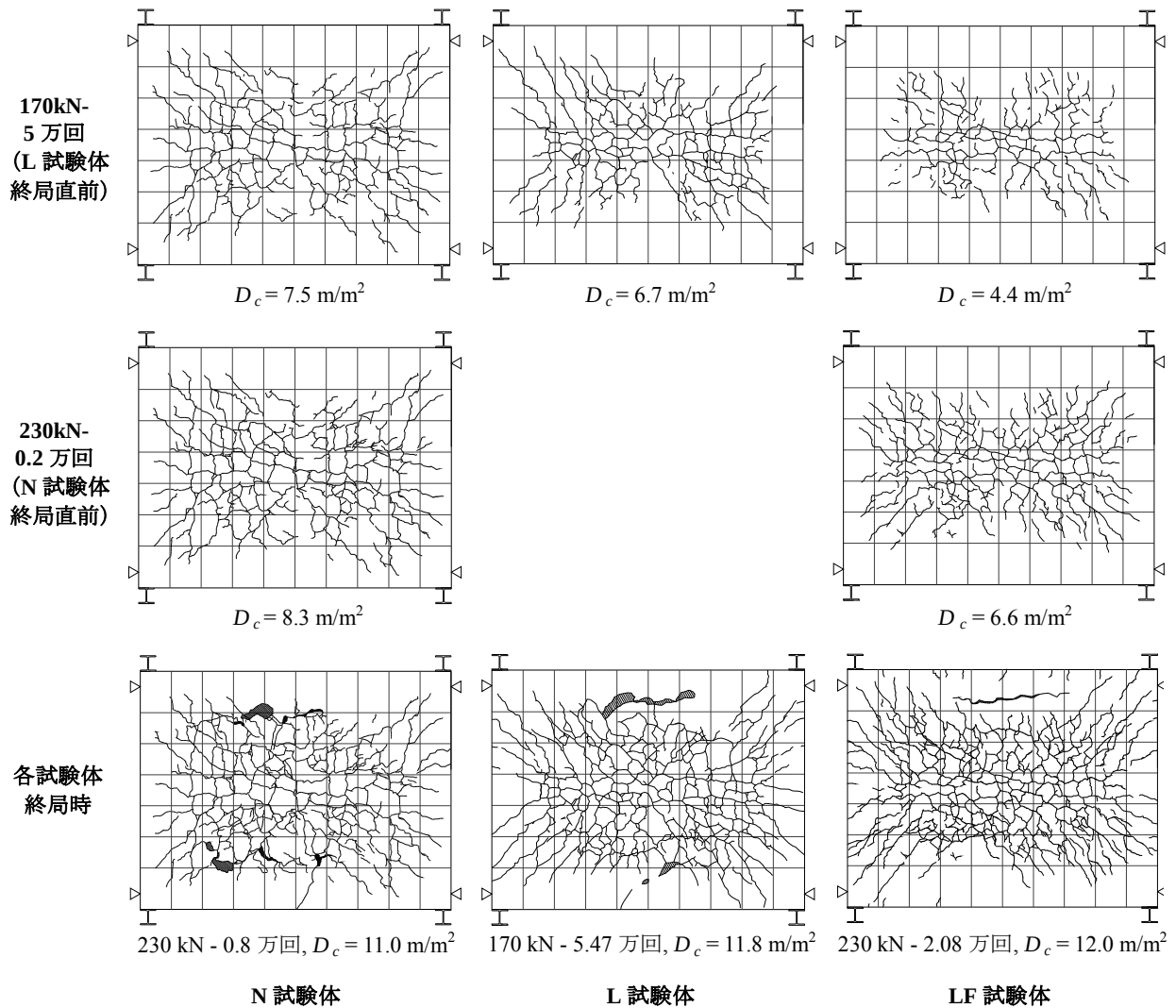
図-5 に L, N 試験体それぞれの終局直前である 170 kN - 5 万回走行時および 230 kN - 0.2 万回走行時と、終局時における各試験体下面のひび割れ分布性状およびひび割れ密度 D_c を比較して示す。図中の格子線は、ひび割れ密度を格子密度法により測定するため試験体に記載したもので、一辺の長さは 30 cm である。また、斜線部はコンクリートのはく落範囲を示している。

170 kN - 5 万回時点のひび割れ発生状況を比較すると、LF 試験体でひび割れが最も少なく、ひび割れ密度は 4.4 m/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 m/m^2 , 6.7 m/m^2 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 割程度小さいことがわかる。同様に、230 kN - 0.2 万回走行時点のひび割れ密度を比較すると、LF 試験体のひび割れ密度は N 試験体に比べて 2 割程度小さく、いずれの段階においても LF 試験体の健全性が他の試験体よりも優れていることがうかがわれる。

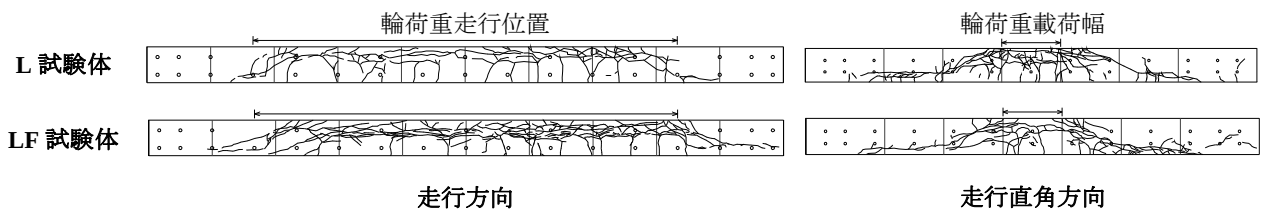
各試験体の終局時点において、ひび割れ密度は各試験体ともに 11 ~ 12 m/m^2 程度で既往の文献と同程度であった³⁾。また、ひび割れ性状を比較すると LF 試験体のひび割れが最も分散して多数発生しているが、これは、LF 試験体の走行回数が最も多いためと考えられる。また、N, L 試験体においてはコンクリートのはく落が生じているのに対し、LF 試験体では浮きや角落ちは確認されたもののはく落は生じていない。また、終局時の荷重変位は N, L 試験体でそれぞれ 16, 22 mm 程度であったのに対し、LF 試験体で 35 mm 程度と他の試験体に比べて 1.5 ~ 2.0 倍以上大きい。以上のことから、短繊維を混入することによって優れたはく落抑制効果が得られるものといえる。

図-6 に実験終了後における L, LF 試験体の輪荷重走行方向（以下、走行方向）、および輪荷重走行直角方向（以下、走行直角方向）の切断面のひび割れ分布図を示す。なお、N 試験体の切断面のひび割れ図は、既往の研究⁶⁾において詳細に確認していなかったため記載していない。なお、図中の○は切断面に対して垂直に配置している鉄筋を示し、試験体の高さ方向に伸びる線は、図-5 に示した格子線の平面位置と対応している。

走行方向の切断面図より、両試験体ともに、上側半断面では走行方向に層状にひび割れが発生し、下側半断面



図－5 実験終了後の各試験体下面のひび割れ分布性状



図－6 実験終了後の各試験体切断面のひび割れ分布性状

では床版面に対して垂直方向にひび割れが進展していることがわかる。LF 試験体の上側半断面におけるひび割れは、L 試験体よりも分散し多数発生しており、短繊維の架橋効果が発現したことがうかがわれる。下側半断面に発生した鉛直方向のひび割れは、曲げひび割れと考えられるが、試験体による分布性状の差は認められない。

走行直角方向の切断面図より、両試験体ともに、斜めひび割れが試験体上面の輪荷重載荷位置端部から下側鉄筋位置の間において約 30° の角度で発生し、下側主鉄筋に沿って走行直角方向に進展し試験体下面に至っている。図－5 に示した試験体下面のはく落位置と併せて鑑みる

と、破壊形態は押し抜きせん断破壊と判断される。

3.4 疲労耐久性の評価

松井らは乾燥状態の RC 床版が輪荷重による繰返し載荷によって終局に至るまでの走行回数と輪荷重の関係を式(1)のように提案している⁸⁾。

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

$$P_{sx} = 2 \times B \times (f_v \times x_m + f_t \times C_m) \quad (2)$$

$$B = b + 2 \times d_d \quad (3)$$

$$f_v = 0.656 f'_c{}^{0.606} \quad (4)$$

$$f_t = 0.269 f'_c{}^{2/3} \quad (5)$$

ここで、 P ：輪荷重、 P_{sx} ：梁状化した RC 床版の押し

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} ($P=150\text{kN}$)	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⁾

抜きせん断耐力, N : 繰返し回数, b : 載荷板の配力鉄筋方向の辺長, d_d : 配力鉄筋の有効高さ, f_v : コンクリートのせん断強度, f_t : コンクリートの引張強度, f'_c : コンクリートの圧縮強度, x_m : 主鉄筋に直角な断面の引張側コンクリートを無視したときの中立軸深さ, C_m : 引張側主鉄筋のかぶり深さ, である。

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にして示す。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, 計算値に対する実験値の比 (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。また, 各試験体では圧縮強度に差違があり, 実験値 N のみで疲労耐久性を比較して評価することはできない。そこで, 本研究では, 配筋の影響や圧縮強度の差異を解消するため, N/N_f を用いて疲労耐久性を評価することとした。ここで, N 試験体の N/N_f に対する L, LF 試験体の N/N_f の比は, 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わかった。また, L 試験体の N/N_f に対する LF 試験体の N/N_f の比は 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わかった。

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。
- 3) PVA 短繊維を混入することによる疲労耐久性の向上要因の一つとして, ひび割れ発生後も短繊維の架橋効果によって鉄筋へ応力伝達がなされることが考えられる。

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.