

論文 PVA 短繊維混入軽量コンクリート製 RC 梁の疲労耐久性

中村 拓郎*1・野々村 佳哲*2・田口 史雄*3・栗橋 祐介*4

要旨: ポリビニルアルコール(以下, PVA)短繊維を混入した軽量コンクリートの疲労耐久性を検討するために, せん断補強鉄筋のない RC 梁の定点載荷疲労実験を実施した。その結果, PVA 短繊維混入軽量コンクリート製 RC 梁の疲労耐久性は, 一般的なコンクリート製 RC 梁と同等以上となることが明らかになった。また, せん断疲労破壊に至った繰返し載荷回数は, 既存の平均疲労寿命推定式と概ね一致した。さらに, 示方書の設計疲労耐力式を用いて疲労寿命を安全側に設計できることが示唆された。

キーワード: 軽量コンクリート, PVA 短繊維, 疲労耐久性, RC 梁

1. はじめに

軽量コンクリートを適用した橋梁上部構造の軽量化によって, 下部構造の断面縮小等の経済効果や耐震性向上効果が期待される。しかしながら, 軽量コンクリートは同配合の一般的なコンクリートよりも各種強度や弾性係数が小さく¹⁾, 構造部材としてのせん断耐力も小さくなる²⁾ことが指摘されている。こうした軽量コンクリートの弱点を補うひとつの手法として各種繊維材料の利用が検討され, 耐荷機構や耐荷力算定式に関する研究が広く行われている^{3,4)}。この一方で, 繊維補強を施した軽量コンクリート製 RC 部材の繰返し載荷による疲労耐久性に関する研究は少ないのが現状である。

著者らは, これまでにポリビニルアルコール(以下, PVA)短繊維の混入による軽量コンクリート製 RC 部材のせん断耐力や耐衝撃性能の向上効果を確認してきた^{5,6)}。PVA 短繊維混入軽量コンクリートの実用化のためには, 構造部材としての疲労耐久性の検証も行う必要がある。

RC 梁の疲労耐久性は, 曲げ疲労とせん断疲労に分類される。PVA 短繊維の混入は RC 部材のせん断耐力を向上させることから, 疲労耐久性に関してもせん断疲労耐力の向上が期待される。一般的なコンクリート製 RC 梁のせん断疲労に関する研究は, これまでにも行われており⁷⁾, 上田らはせん断補強鉄筋のない RC 梁の荷重振幅の影響を考慮した平均疲労寿命推定式を提案している⁸⁾。

PVA 短繊維を混入したコンクリートでは, 一般的なコンクリートと疲労破壊性状が異なることも考えられるため, 既存の平均疲労寿命推定式や設計疲労耐力式の適用性も含めて, その疲労耐久性を確認する必要がある。

本研究では, PVA 短繊維混入軽量コンクリート製 RC 梁の疲労耐久性を明らかにするために, せん断補強鉄筋のない RC 梁の定点載荷疲労実験を実施し, 一般的なコンクリート(以下, 普通コンクリート)や軽量コンクリートと比較することで, PVA 短繊維の混入がせん断破壊型の RC 梁の疲労耐久性に及ぼす効果を検討した。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの配合と使用材料

本研究では, PVA 短繊維混入軽量コンクリート LF とともに, 比較用として普通コンクリート N, 軽量コンクリート L を作製した。これらの配合を表-1 に, 使用材料を表-2 に示す。N では細骨材, 粗骨材ともに一般的な天然骨材を使用し, L, LF では細骨材に天然骨材を, 粗骨材に人工軽量骨材の頁岩系非造粒型軽量骨材を用いた。LF では体積比 0.5% の PVA 短繊維を混入した。なお, LF は良好なポンプ圧送性と耐凍害性が確認されている配合であり, 絶乾状態の軽量骨材を水中浸漬させることによって吸水率を 17.0% に調整し, フレッシュ時の流動性および粘性を確保するために高炉スラグ微粉末と増粘

表-1 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	W/B (%)	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×%)	PVA 短繊維 (vol.%)
				W	C	BS	S	G					
N	39.5	-	39.5	162	411	-	697	1083	-	0.9	-	-	-
L	34.5	32.3	54.9	150	435	30	920	350	0.30	-	1.25	0.05	-
LF	34.5	32.3	54.9	150	435	30	920	350	0.24	-	1.25	0.05	0.5

*1 (独)土木研究所 寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 耐寒材料チーム 研究員 博(工) (正会員)

*2 (独)土木研究所 寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 耐寒材料チーム 研究員

*3 (独)土木研究所 寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 耐寒材料チーム 上席研究員 博(工) (正会員)

*4 室蘭工業大学大学院 工学研究科 暮らし環境系領域 講師 博(工) (正会員)

表-2 コンクリートの使用材料

配合名	種類	記号	物性および主成分
N	普通ポルトランドセメント	C	密度：3.16 g/cm ³ ，比表面積：0.33 m ² /g
	白老産陸砂	S	絶乾密度：2.67 g/cm ³ ，粗粒率：2.64，吸水率：1.27 %
	峯朝産碎石	G	最大寸法：25 mm，絶乾密度：2.70 g/cm ³ ，吸水率：0.44 %
	AE 減水剤	-	主成分：リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
L, LF	早強ポルトランドセメント	C	密度：3.14 g/cm ³ ，比表面積：0.45 m ² /g
	高炉スラグ微粉末	BS	密度：2.91 g/cm ³ ，粉末度：4000 cm ² /g
	苫小牧産陸砂	S	絶乾密度：2.67 g/cm ³ ，粗粒率：2.71，吸水率：1.36 %
	頁岩系非造粒型軽量骨材	G	最大寸法：15 mm，絶乾密度：1.25 g/cm ³ ，表乾密度：1.37 g/cm ³ ，粗粒率：0.81，単位容積質量：64.7 kg/l
	AE 剤	-	主成分：天然樹脂酸塩
	高性能 AE 減水剤	-	主成分：ポリカルボン酸エーテル系化合物
	増粘剤	-	主成分：水溶性セルロースエーテル
LF	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 引張強度：0.88 GPa，弾性係数：28.0 GPa，破断ひずみ：7 %

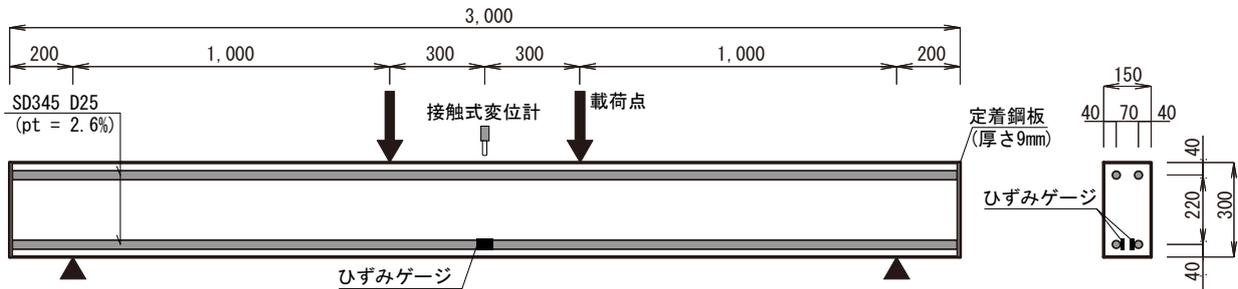


図-1 RC 梁試験体の概要図

剤を混入している。

2.2 コンクリートの基礎物性試験

RC 梁試験体に用いた各コンクリートのフレッシュ性を把握するために、スランブを JIS A 1101，スランブフローを JIS A 1150，空気量を JIS A 1128 に準拠して測定した。なお，PVA 短繊維混入軽量コンクリートのフレッシュ性は，ポンプ圧送後に測定した。

硬化コンクリートの力学特性を確認するために，圧縮強度試験を JIS A 1108，割裂引張強度試験を JIS A 1113 に準拠して実施した。また，PVA 短繊維を混入した LF では，ひび割れ発生後の引張強度(以下，残存引張強度)を簡易的な一軸引張試験⁹⁾によって測定した。PVA 短繊維はひび割れ発生後のコンクリートのじん性能を向上させる特徴を有しており，残存引張強度は，後述の短繊維分担せん断耐力 V_F の算出に用いている。

2.3 定点荷重疲労実験

(1) RC 梁の製作

PVA 短繊維混入軽量コンクリート製 RC 梁(LF 試験体)はポンプ圧送後に，普通コンクリート製 RC 梁(N 試験体)および軽量コンクリート製 RC 梁(L 試験体)はプラント練混ぜ後に打設した。RC 梁の概要図を図-1 に示す。試験体は，高さ 300mm，幅 150mm，長さ 3,000mm，純スパン長 2,600mm の複鉄筋 RC 梁であり，せん断スパン比は 3.85 とした。主鉄筋には SD345D25 を用いて，主鉄筋比

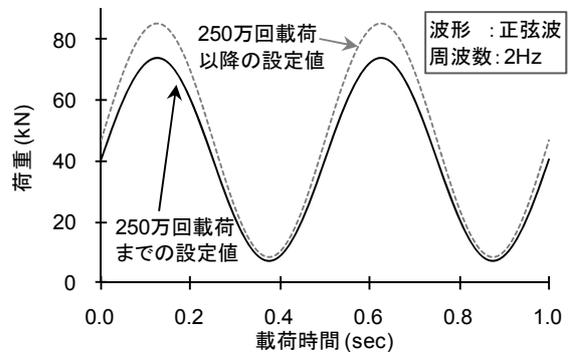


図-2 繰返し荷重の波形

は 2.6% とした。なお，PVA 短繊維の混入によるせん断疲労耐久性の向上効果を明確にするために，せん断補強鉄筋を配置せず，せん断破壊型の RC 梁として設計した。

(2) 荷重方法

繰返し荷重は，電気油圧サーボ機構で動的最大加振力 ± 100 kN の加振機を用いて，スパン中央より 300mm の位置での対称 2 点集中荷重とした。繰返し荷重における上限荷重は 73.7kN，下限荷重は上限荷重の 10% とし，荷重速度は 2Hz の正弦波とした(図-2)。上限荷重は，一般的にせん断補強鉄筋のない RC 梁の 100 万回荷重時の疲労耐力が静的せん断耐力の約 60% とされていることを参考に，後述の N 試験体のせん断耐力計算値の 65% とした。また，疲労破壊(終局)は，上限荷重が荷重不能または試

表-3 コンクリートの基礎物性と RC 梁のせん断耐力

配合名	フレッシュコンクリート性状			硬化コンクリートの力学特性				RC 梁のせん断耐力	
	スランブ (cm)	スランブフロー (mm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	残存引張強度 (N/mm ²)	計算値 (kN)	実験値 ¹²⁾ (kN)
N	9.0	-	4.1	53.8	31.8	3.17	-	113	119
L	-	635	7.9	41.7	20.0	2.81	-	104	116
LF	-	585	6.6	50.0	19.9	3.56	0.11	118(111) [*]	125

※()内の値は、コンクリート分担せん断耐力 V_c の値

験体の変位が急増した点とした。なお、250 万回載荷で終局に至らなかった場合には、実験期間短縮のために、それ以降の上限荷重を N 試験体のせん断耐力計算値の 75%である 85.0kN とした。

(3) 測定項目

測定項目は、載荷荷重、スパン中央変位(以下、中央変位)、鉄筋ひずみとした。これらは、所定回数(1, 100, 1000, 1万, 10万, 50万, 以降 50万回載荷毎)の繰返し載荷終了後に載荷を一時中断し、静載荷を行うことによって計測した。また、これらの測定に併せて静載荷における下限荷重時に、ひび割れのトレースおよびクラックスケールによる最大ひび割れ幅の計測を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 コンクリートの基礎物性と RC 梁のせん断耐力

RC 梁試験体に用いたコンクリートの基礎物性と RC 梁のせん断耐力を表-3 にまとめる。せん断耐力計算値は、コンクリート標準示方書[設計編](以下、示方書)のせん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力式¹⁰⁾を用いて、部材係数 γ_b は考慮せずにコンクリート分担のせん断耐力 V_c として算出した。なお、示方書では、軽量コンクリートのせん断耐力は一般的なコンクリートの 70%としてよいとされているが、表中の L および LF 試験体の計算値には、 V_c を 70%に低減しない値を示している。また、PVA 短繊維を混入した LF 試験体の計算値には、PVA 短繊維によるせん断耐力の向上効果を反映させるために、示方書に準拠して算出した V_c に、短繊維分担のせん断耐力 V_F を加算した。 V_F は、せん断ひび割れ発生後、ひび割れを架橋する短繊維がせん断耐力を分担するという考えから、式(1)により算出した。

$$V_F = b \times (z / \tan \theta) \times f_r \quad (1)$$

ここに、 V_F : 短繊維分担せん断耐力、 b : ウェブ幅、 $z=d/1.15$ 、 d : 有効高さ、 f_r : 残存引張強度、ひび割れ角度 θ を 45 度と仮定した。

短繊維分担のせん断耐力を考慮したせん断耐力計算値は、PVA 短繊維を混入した普通コンクリート製 RC 梁において、実験値に近い値を示し、かつ安全側に評価

できることを既往の研究¹¹⁾で確認している。

また、本研究の試験体と同時に製作した RC 梁を用いた静載荷実験も別途実施しており¹²⁾、その結果をせん断耐力実験値として表中に示した。N 試験体よりも圧縮強度が小さい LF 試験体の実験値が、N 試験体の実験値よりも大きくなっており、短繊維分担のせん断耐力を考慮したせん断耐力計算値と同様の傾向となっている。

3.2 PVA 短繊維軽量コンクリート製 RC 梁の疲労耐久性

(1) 疲労破壊時のひび割れ性状と載荷回数

各試験体における最大ひび割れ幅を付記したひび割れ図を図-3, 4, 5 に示す。いずれの試験体においても終局時にはアーチ状の斜めひび割れが認められ、PVA 短繊維混入軽量コンクリートでも普通および軽量コンクリートと同様にせん断破壊型の破壊性状を示している。

N 試験体では、繰返し載荷初期に曲げひび割れが先行して発生し、1 万回載荷から 10 万回載荷の間に試験体片側一方に斜めひび割れが発生した。その後、上限荷重の載荷が可能であったことから繰返し載荷を継続したところ、約 81 万回載荷時に他方にも斜めひび割れが発生するとともに中央変位が急増して終局となった。L 試験体では、N 試験体と同様に曲げひび割れが先行して発生し、約 3.8 万回と少ない繰返し載荷回数で斜めひび割れに進展するとともに中央変位が急増して終局となった。

PVA 短繊維を混入した LF 試験体でも曲げひび割れが先行して発生し、1 万回載荷程度では N, L 試験体と同様のひび割れ性状が確認された。ただし、250 万回載荷までは最大ひび割れ幅の顕著な増加も認められず、終局には至らなかった。なお、LF 試験体では格子状のひび割れが試験体全体で認められ、曲げモーメントの小さい支点付近でも発生している。これは、乾燥収縮等に起因したと考えられる試験体表面の微細ひび割れが繰返し載荷によって拡大したものと推察される。その後、上限荷重を増加させて実験を継続すると、300 万回載荷時に試験体片側一方に斜めひび割れが確認され、約 321 万回載荷で他方にも斜めひび割れが発生するとともに、上限荷重の載荷が不可能となった。また、斜めひび割れ上には、PVA 短繊維の架橋(図-6)、引抜け、破断が確認されており、短繊維の架橋効果によって斜めひび割れの発生が抑制されていたと考えられる。

圧縮強度やせん断耐力が LF 試験体と同程度の N 試験体の疲労寿命が約 81 万回荷重であったことに対して、LF 試験体の疲労寿命は約 321 万回荷重となっており、PVA 短繊維を混入することによって軽量コンクリート製 RC 梁の疲労耐久性が向上し、一般的なコンクリート製 RC 梁と同等以上となることが明らかになった。

なお、中央変位の急増によって終局とした N, L 試験体では、定点荷重疲労実験終了後に静的荷重を行うことで、上限荷重の荷重が不可能なことも確認している。

(2) 荷重-変位, ひずみの関係

各試験体における荷重と中央変位の関係を図-7 に示す。いずれの試験体でも 1 回荷重除荷時の下限荷重において残留変位が認められた。N 試験体では、試験体片側一方に斜めひび割れが確認された 10 万回荷重以降で荷重-変位曲線の傾きが小さくなっている。繰返し荷重にともなう斜めひび割れの発生によって、剛性が低下したと考えられる。早期に疲労破壊に至った L 試験体では、1 万回荷重以降の計測を行っていないため、N 試験体の様な剛性の低下は確認できていない。また、PVA 短繊維を混入した LF 試験体では、250 万回荷重まで荷重-変位曲線の傾きに顕著な変化は認められず、上限荷重を増加させた後、斜めひび割れが確認された 300 万回荷重時に剛性の低下が認められた。

上/下限荷重時の中央変位と荷重回数の関係を図-8 に示す。繰返し荷重回数の増加にともなう中央変位の変化は、いずれの試験体においても上/下限荷重時で概ね同様の挙動を示している。N 試験体では、斜めひび割れの発生と対応するように 10 万回荷重以降に中央変位の増加が認められた。L 試験体では、荷重初期より緩やかに中央変位が増加している。また、LF 試験体では、N, L 試験体と同様のひび割れ性状を示した 1 万回荷重までは、上/下限荷重重荷時の中央変位に変化は認められなかった。その後、繰返し荷重にともなう中央変位は緩やかに増加し、上限荷重を増加させた 250 万回荷重以降では中央変位も大きくなっている。

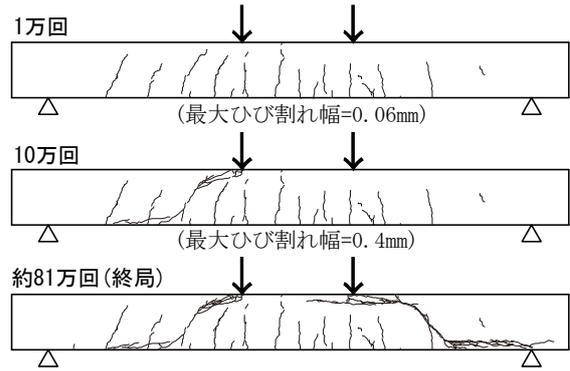


図-3 ひび割れ図(普通コンクリート N)

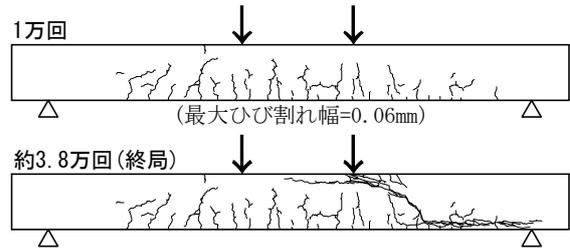


図-4 ひび割れ図(軽量コンクリート L)

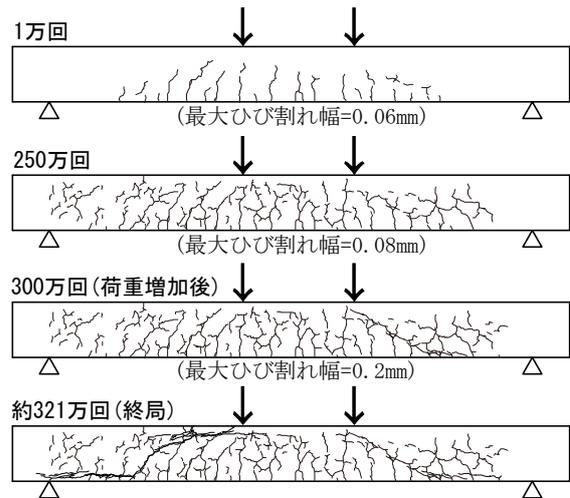


図-5 ひび割れ図(PVA 短繊維軽量コンクリート LF)



(メッシュ幅:100mm)
図-6 斜めひび割れ上で架橋する PVA 短繊維

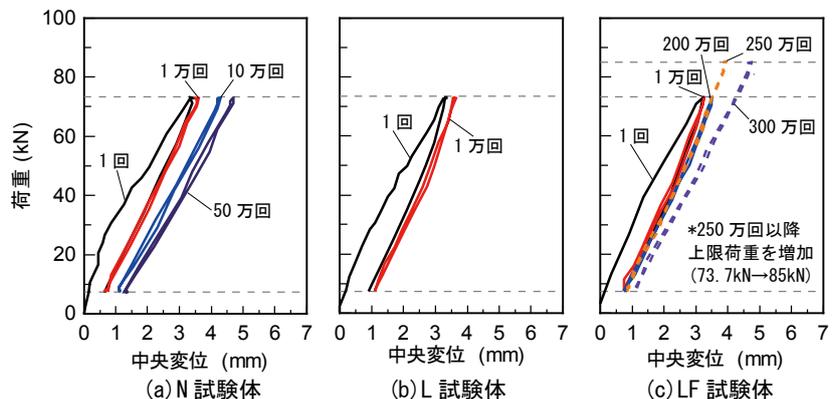


図-7 荷重と中央変位の関係

次に、上/下限荷重時の鉄筋ひずみと載荷回数の関係を図-9に示す。N, L, LF試験体ともに、終局時まで鉄筋ひずみに顕著な変化は認められず、繰返し載荷中に鉄筋の降伏がないことも確認している。

(3)平均疲労寿命推定式の適用性

せん断補強鉄筋のないRC梁のせん断疲労について、上田らは平均疲労寿命推定式を提案している⁸⁾。上田らの推定式を式(2)に、推定式の検討時に用いられた岡村・桧貝のせん断耐力計算式¹³⁾を式(3)に示す。

$$\log_{10}(V_{\max}/V_{cu}) = -0.036(1-r|r|)\log_{10}N_f \quad (2)$$

$$V_{cu} = 0.20f'_c{}^{1/3}(0.75+1.40d/a)(1+\beta_p+\beta_d)b_wd \quad (3)$$

ここに、 V_{\max} : 上限荷重, V_{cu} : せん断耐力計算値¹³⁾, r : 下限/上限荷重の比(本研究では $r=0.1$), N_f : 疲労寿命, $\beta_p=(100p_w)^{1/2}-1$, $\beta_d=(1000/d)^{1/4}-1$, f'_c : コンクリートの圧縮強度, a : せん断スパン, d : 有効高さ, p_w : 引張鉄筋比($=A_s/(b_wd)$), b_w : ウェブ幅, A_s : 引張鉄筋断面積とした。

上田らの推定式と本研究における疲労寿命の関係を図-10に示す。図には、せん断耐力実験値¹²⁾、桧貝・岡村の式によるせん断耐力計算値を用いた荷重比(上限荷重/せん断耐力)と疲労寿命の関係を試験体毎にプロットした。なお、LF試験体は、繰返し載荷開始時(上限荷重増加前)の上限荷重値でプロットし、計算値には前述の短繊維分担分のせん断耐力を加算している。

上田らの推定式は、実験値の計算値に対する比の平均値および変動係数が最適となるように提案されている。

表-4に示すように岡村・桧貝の式によるせん断耐力計算値が実験値よりも1割程度小さく、この計算値を用いた場合、上田らの推定式よりも下側に位置する結果となった。一方、実験値を用いた荷重比と疲労寿命の関係は、PVA短繊維を混入したLF試験体でも上田らの推定式による点線と概ね一致した。ただし、LF試験体では、250万回載荷以降で上限荷重を増加させたことから実際の疲労寿命はさらに大きくなると推察される。しかし、本実験結果のみではPVA短繊維の混入による疲労寿命の向上効果を定量的に評価することは難しい。このため、上限荷重や荷重振幅、試験体寸法、短繊維混入率等の影響を考慮したPVA短繊維を混入した場合の疲労耐久性向

表-4 せん断耐力の実験値と計算値の比較

試験体名	実験値 ¹²⁾ (kN)	計算値	
		示方書式	岡村・桧貝の式
N	119	113 (1.05)	132 (0.90)
L	116	104 (1.11)	121 (0.96)
LF	125	118 (1.06)	136 (0.92)

※ ()は実験値/計算値

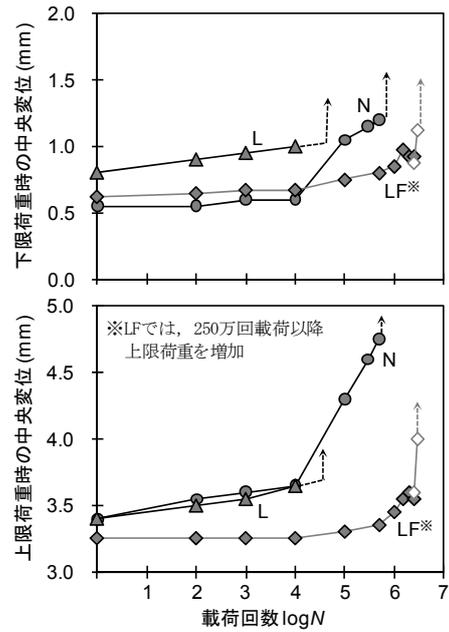


図-8 中央変位と載荷回数との関係

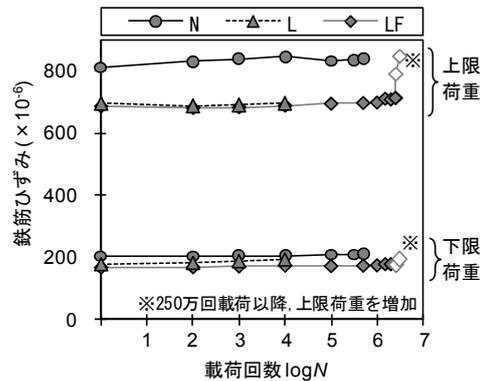


図-9 上/下限荷重時の鉄筋ひずみ

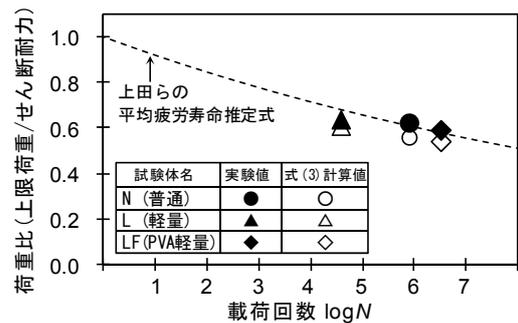


図-10 平均疲労寿命推定式と疲労寿命の関係

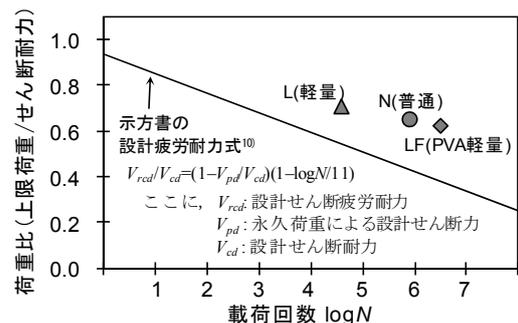


図-11 設計疲労耐力式と疲労寿命の関係

上効果や推定精度について別途検討する必要がある。

(4) 示方書の設計疲労耐力式の適用性

次に、PVA 短繊維混入軽量コンクリートの実用化のために、現行の示方書にある設計方法の適用性を検討する。上田らの推定式が平均疲労寿命を推定していることに対して、示方書の設計疲労耐力式では生存確率が考慮されている¹⁴⁾。示方書の設計疲労耐力式と本研究における疲労寿命の関係を図-11に示す。なお、設計疲労耐力式における設計せん断耐力 V_{cd} には表-3で示した示方書の設計せん断耐力式を用いた計算値を、設計せん断疲労耐力 V_{rd} には上限荷重値、永久荷重によるせん断力 V_{pd} には下限荷重値を用いた。いずれの試験体においても設計疲労耐力式によって安全側に評価されている。実際の設計時には部材係数を適用することや、前述のPVA短繊維混入による疲労耐久性の向上効果によって、より安全側の設計値になると考えられる。このように、PVA短繊維混入軽量コンクリート製RC梁の疲労耐力の設計にも、示方書の設計方法を適用できることが示唆された。ただし、示方書の設計疲労耐力式は200万回程度以下の範囲で適用することが望ましいとされていることや、PVA短繊維による疲労耐久性の向上効果を適切に反映させるためには、疲労寿命が200万回載荷以下/以上となるような実験結果も必要であり、今後の課題としたい。

4. まとめ

本研究では、定点載荷疲労実験によってせん断破壊型のPVA短繊維混入軽量コンクリート製RC梁の疲労耐久性を検討した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) PVA短繊維混入軽量コンクリート製RC梁の疲労耐久性は、一般的なコンクリート製RC梁と同等以上であることが明らかになった。
- (2) PVA短繊維混入軽量コンクリート製RC梁の疲労寿命は、一般的なコンクリート製RC梁の平均疲労寿命推定式と概ね一致した。
- (3) 示方書の設計疲労耐力式を用いてPVA短繊維混入軽量コンクリート製RC梁の疲労寿命を安全側に設計できることが示唆された。

謝辞：室蘭工業大学の岸徳光教授には実験計画全体のご指導を、三井住友建設株式会社の三上浩博士には実験実施の際にご助言を、ドーピー建設工業株式会社の松井敏二氏にはRC梁試験体製作にご協力を頂きました。ここに付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：高性能軽量コンクリート研究員会報告書，pp.54-60，2000.8

- 2) 二羽淳一郎・岡本享久・前堀伸平：高品質軽量コンクリートの構造部材への適用，コンクリート工学，Vol.38，No.12，pp.3-9，2000.12
- 3) 崔 智宣，山口浩平，日野伸一，園田崇智：鋼繊維補強軽量2種コンクリートRCはりのせん断耐力評価に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.1273-1278，2010.7
- 4) 河野克哉，二羽淳一郎，大滝晶生：ポリプロピレン短繊維で補強した高強度軽量RCはりのせん断強度式，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.1549-1554，2007.7
- 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，Vol.30，No.1，pp.315-320，2008.7
- 6) 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，pp.1237-1247，2006.3
- 7) 例えば，国分正胤，桧貝 勇：繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリートはりのせん断性状，セメント技術年報，Vol.25，pp.348-352，1971
- 8) 上田多門，岡村 甫，S. A. Farghaly，榎本松司：せん断補強のないはりのせん断疲労強度，コンクリート工学，Vol.20，No.9，pp.89-98，1982.9
- 9) 中村拓郎：簡易直接引張試験によるPVA短繊維混入コンクリートの残存引張強度の評価，寒地土木研究所月報，第689号，pp.29-34，2010.10
- 10) 土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書[設計編]，pp.132-141，pp.159-160，2007.3
- 11) 田口史雄，岸 徳光，三上 浩，栗橋祐介：PVA短繊維の架橋効果によるRC梁のせん断耐力向上効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.283-288，2005.7
- 12) 工藤雅史，岸 徳光，三上 浩，安達 優：ポンプ圧送可能な寒冷地仕様PVA短繊維混入軽量コンクリート製RC梁の静載荷実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.1267-1272，2010.7
- 13) Okamura, H. and Higai, T: Proposed Design Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement, Proc. Of JSCE, No.300, pp.131-141, Aug. 1980
松下博通，高倉克彦：限界状態設計法におけるコンクリートの疲労強度の特性値とせん断疲労耐力の設計用値，コンクリート工学，Vol.22，No.8，pp.14-23，1984.8