

論文 鋼繊維補強コンクリートの低サイクル圧縮疲労特性

尹 亨在*1・坂下 雅信*2・西山 峰広*3

要旨: 普通コンクリートの圧縮疲労特性に関する研究は数多くあるが、鋼繊維補強コンクリートの圧縮疲労特性に関する研究は少ないため十分なデータが蓄積されていないのが現状である。本研究では、一般的なコンクリート配合を用いた鋼繊維補強コンクリートの低サイクル疲労試験を実施した。実験変数は、鋼繊維混入率を 0.0%, 0.3%, 0.5%と、上限応力の静的圧縮強度に対する比率 (S_{max}) を 80%と 90%と設定した。試験結果から繊維補強による低サイクル疲労寿命の改善が確認できた。

キーワード: 鋼繊維, 繊維補強コンクリート, 低サイクル, 疲労寿命, 疲労強度

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート部材（以下、RC 部材）のコンクリート引張抵抗性能改善や靱性向上、そして、構造部材損傷の補修などに繊維補強コンクリート（以下、FRC）の利用が増加している。地震時に大きな繰り返し荷重が作用する部材への利用も進んでいる。しかし、繊維補強コンクリートの圧縮疲労特性に関するデータや実験例は十分でない。現在建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説¹⁾（以下、RC 規準）には疲労特性に関する記述はなく、土木学会のコンクリート標準示方書「設計編」²⁾では、疲労強度式が示されているものの普通コンクリート 50N/mm²以下のみが適用範囲となっている。ただし、50N/mm²を超えるコンクリートに対しては 50N/mm²に対する設計疲労強度を用いてもよいとなっている。50N/mm²を超える高強度コンクリートと繊維補強コンクリートに関する十分なデータや研究例がほとんどないのが現状である^{3),9),10)}。さらに、土木分野でよく用いられる繊維補強セメント系材料における高サイクル疲労（最大疲労サイクル 10⁶回）や超高サイクル疲労（最大疲労サイクル 10⁹回）などに関する研究は多少あるが⁵⁾、建物で長周期地震時に想定される低サイクル疲労、すなわち、最大疲労サイクル数 200 回程度に関する研究は極端に少ない³⁾⁻⁸⁾。

本研究は、鋼繊維混入率 0.0%（以下、NC）、0.3%（以

下、SFC03）、0.5%（以下、SFC05）のコンクリート試験体を用い、 S_{max} を $0.8f_c'$ と $0.9f_c'$ と設定した圧縮疲労試験を実施し、鋼繊維補強コンクリートの圧縮疲労特性を調べることが目的としている。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1 に本研究で用いたコンクリートの配合を、表-2 にコンクリート材料特性を示す。骨材最大寸法は 20mm である。28 日強度が 60N/mm² になるように配合を計画した。鋼繊維補強コンクリートの配合に関しては鋼繊維混入率によって混和剤量を調節しながら SFC の配合を決めた。NC、SFC03、SFC05 のスランプ実測値は 14.0、

表-2 コンクリート材料特性

時期	試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	最大応力時ひずみ (%)	1/3f _c 割線弾性係数 (10 ⁴ xN/mm ²)
28 日	NC	66.2	0.25	3.12
	SFC03	65.9	0.29	3.40
	SFC05	62.8	0.30	3.48
実験時	NC	72.1	0.24	5.84
	SFC03	63.4	0.25	4.87
	SFC05	65.9	0.27	5.29

表-1 コンクリート配合

種別	目標強度 (N/mm ²)	繊維混入率 (%)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	骨材 (kg/m ³)		混和剤 (kg/m ³)	
								細骨材	粗骨材	減水剤	AE 剤
NC	60	0.0	15.0	42.0	4.5	158	376	805	943	1.88	0.19
SFC03		0.3								2.44	0.00
SFC05		0.5								3.16	

*1 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 博士課程・JSPS 特別研究員 工修 (学生会員)

*2 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 助授 工博 (正会員)

*3 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

12.4, 12.0cm, 空気量はそれぞれ 3.0, 3.7, 4.0%となった。試験体は予備を含めてそれぞれ 5 本ずつ製作し, NC と SFC03 は 4 本ずつ, SFC05 は 5 本について検討した。本研究で用いた鋼繊維は長さ 30mm, 直径 0.62mm, 引張強度 1,050N/mm²の両端フック付きものである。

図-1 にコンクリートの静的試験から得られた圧縮応力とシリンダーに取り付けた変位計(検長 100mm)による軸ひずみ関係を示す。グラフの最終点は終局点である。最大圧縮応力時ひずみを比較すると NC は平均 0.24%, SFC03 は平均 0.25%, SFC05 は平均 0.27%となり, 混入した鋼繊維量による圧縮強度時ひずみの増加が観察された。

2.2 実験方法

図-2 に荷重装置を示す。荷重波形はサイン波とし, 荷重速度は 0.25Hz とした。上限応力比 S_{max} は, 各コンクリートの静的圧縮強度の 80%と 90%の 2 段階とし, 下限応力比 S_{min} は全ての試験体で 5%とした。荷重の最大繰り返し回数は 10,000 回と設定した。また, 実験結果のばらつきを考慮し, 同じ条件で最大 5 本ずつ試験を実施した。

図-3 に示すように試験体の 4ヶ所に検長 60mm のコンクリート用ひずみゲージを貼り付けた。また, 変位計を 2ヶ所に取り付け, 検長 100mm で変形を測定した。

図-4 に荷重計画を示す。荷重は, それぞれの最大と最小応力レベルの平均応力レベルが原点になるように平均応力レベルまで静的に荷重し, 平均応力レベルに至ってから繰り返し荷重を行った。

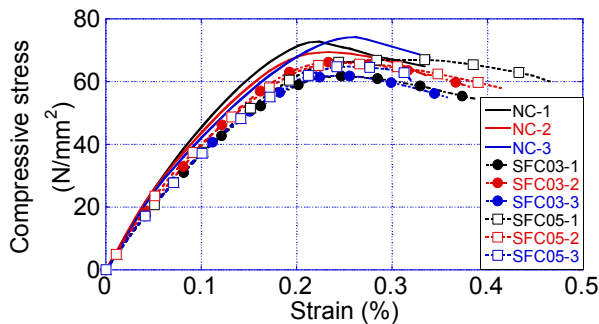


図-1 静的圧縮応力-軸ひずみ関係

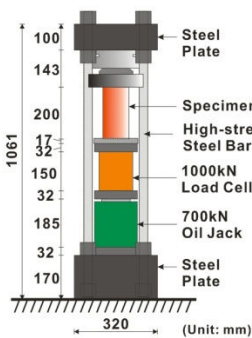


図-2 荷重装置

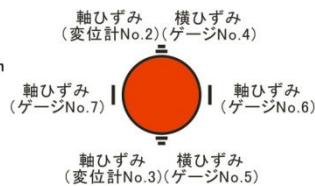


図-3 変位計およびひずみゲージ位置

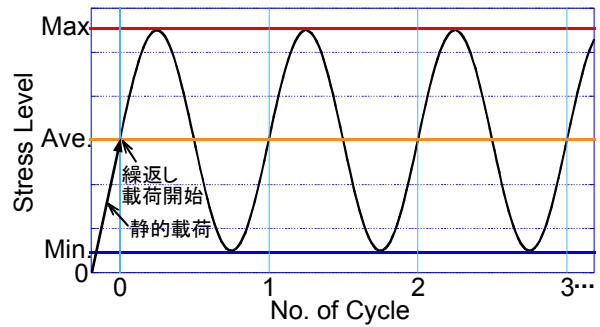


図-4 荷重計画

3. 実験結果

破壊までの繰り返し回数を表-3 に示す。10,000 回までの繰り返しで破壊しなかった試験体については「> 10,000」と記載した。同一の S_{max} であっても疲労寿命は大きく変動している。 S_{max} 80%の試験では, いずれの試験体も低サイクルの上限サイクル数とされる 200 回までの繰り返し荷重では破壊しなかった。さらに, NC と SFC05 の全ての試験体は疲労破壊に至ったが, SFC03 の 2 本は最大 10,000 回まで繰り返し荷重を行っても疲労破壊に至らなかった。一方, S_{max} 90%の場合は, SFC05 の 2 本以外はサイクル数 200 回を超えなかった。

3.1 応力-軸ひずみ関係

図-5 に代表的に, S_{max} 90%時の NC-72 と SFC03-83,

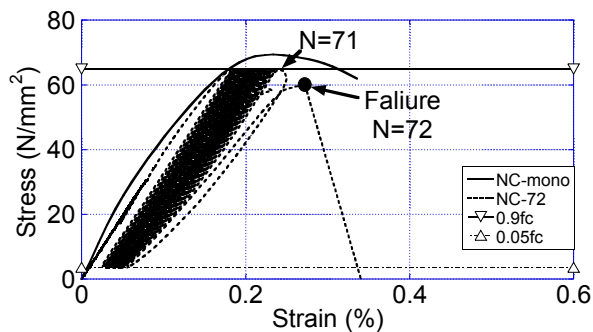
表-3 破壊回数結果

試験体		S_{max}	
		80%	90%
NC	1 本目	1401	15
	2 本目	652	72
	3 本目	335	17
	4 本目	1240	—
	平均	907	35
SFC03	1 本目	1094	137
	2 本目	>10,000	83
	3 本目	>10,000	53
	4 本目	3503	14
	平均	2299	72
SFC05	1 本目	2419	248
	2 本目	1244	101
	3 本目	1849	384
	4 本目	497	64
	5 本目	1027	—
平均	1408	200	

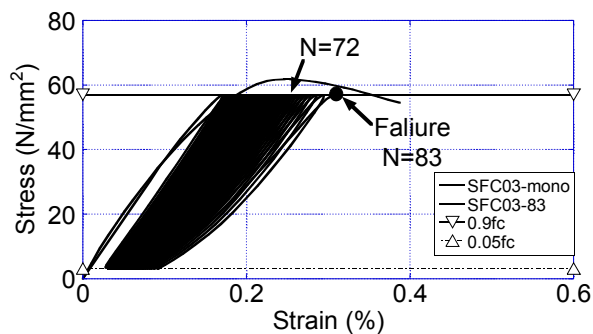
※下限応力比はいずれの試験体も 5%とした。

※繰り返し回数は最大 10,000 回までとした。

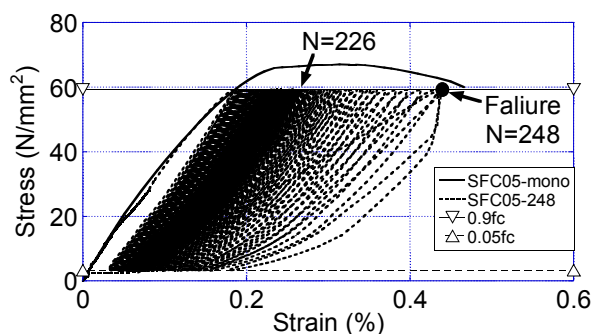
SFC05-248 シリンダーの応力-軸ひずみ関係を、図-6に各サイクルでの軸ひずみ増分を、図-7に横ひずみ増分を示す。ひずみ増分は前回サイクルピーク時のひずみに対する現サイクルピーク時のひずみの増分を意味する。試験体名の末尾の数値は疲労破壊サイクル数を示す。図-5には JIS A 1108 に従って行った静的載荷試験結果も併せて示す。徐々にひずみが進行し破壊に至っていることがわかる。図-6 から、NC-72 では、破壊直前のサイクル 71 回まではほぼ一定の軸ひずみ増分であったが、図-5 に示すように 72 サイクル目で急にひずみが増加し破壊に至った。一方、SFC03-83 はサイクル数 72 回まで、SFC05-248 は 226 回まではほぼ一定の軸ひずみ増分であったがその後、ひずみ増分が大きくなり疲労破壊に至った。図-7 に示すように、NC-72 の横ひずみ増分は破壊直前急激に増えたが、SFC03-83 と SFC05-248 の横ひずみ増分は繊維によって抑制され、少しずつ増加し疲労破壊に至



(a) NC-72



(b) SFC03-83



(c) SFC05-248

図-5 応力-軸ひずみ関係 ($S_{max}=90\%$)

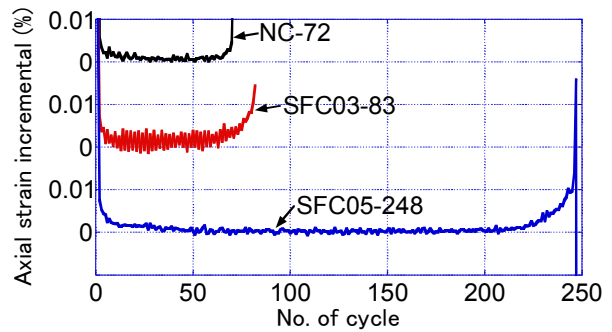


図-6 軸ひずみ増分-載荷サイクル関係

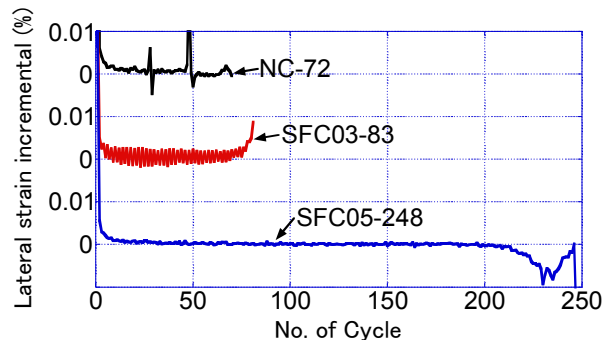


図-7 横ひずみ増分-載荷サイクル関係

った。繊維補強によりひずみ進行が異なることが観察された。このような破壊性状はこれら 3 体だけでなく実施した全ての試験体から確認できた。

3.2 破壊状況

写真-1 に実験終了後の代表的な破壊状況を示す。写真の左列は $S_{max}80\%$ 、右列は $S_{max}90\%$ 時の破壊状況である。

S_{max} とは関係なく、プレーンコンクリート NC より繊維補強コンクリート SFC03 と SFC05 の残留コンクリート部分が多いことが確認できる。混入された鋼繊維によって疲労破壊時にコンクリートの剥落や飛散が低減されている。試験終了後のシリンダーを見ると鋼繊維によってシリンダー本体とつながったコンクリート破片も観察された。破壊形式としては、NC 試験体はモルタル部の破壊が主であった。SFC03 と SFC05 では骨材の破壊が多く見られた。繊維によってシリンダーの形を保ったまま耐力が落ちる破壊形式が観察された。

4. 疲労寿命についての考察

4.1 繊維混入量による S_{max} -平均疲労寿命関係

図-8 に本研究で実施した試験体 24 本の S_{max} -平均疲労寿命 $\log N$ 関係を示す。図-8 中の直線は、土木学会コンクリート標準示方書「設計編」²⁾で示されている(1)式を表している。

$$\log N = K \frac{1-S_{max}}{1-S_{min}} = K \left(1 - \frac{S_r}{1-S_{min}} \right) \quad (1)$$



写真-1 破壊状況

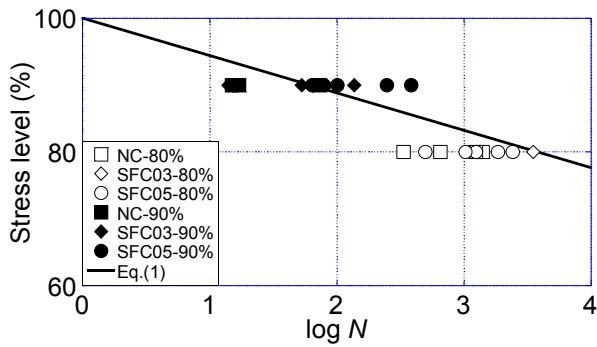


図-8 S_{max} - 平均疲労寿命関係

ここで、 K ：普通コンクリートで、水で飽和される場合あるいは軽量骨材コンクリートの場合 10、そのほかの場合 17、 S_{max} ：最大応力比、 S_{min} ：最少応力比、 $S_r = S_{max} - S_{min}$ である。本研究では、 K には、普通コンクリートに対する値 17 を用いた。式(1)は N が 200 万回以内での平均疲労寿命である。図-8 から、 S_{max} 80%時に疲労破壊した NC と SFC03、SFC05 の試験体の疲労寿命はすべて式(1)により得られる平均疲労寿命より短く、(1)式は危険側になることがわかる。しかし、 S_{max} 90%の場合、NC は 1 本、SFC03 は 2 本、SFC05 は 4 本すべてに対して安全側となっている。

本研究から得られた実験結果を用いて、表-4 に土木学会の疲労寿命算定式(1)に上限応力比 S_{max} (80%, 90%) と下限応力比 S_{min} (5%), それぞれ試験体の破壊サイクル数 N を代入し、コンクリート種類により決まる係数 K を算出した結果を示す。ここで、疲労破壊しなかった応力レベル 80%時の SFC03 試験体 2 本は「×」と記入し、平均算定にも含まれていない。表-4 から、 S_{max} 80%の場合、NC と SFC03、SFC05 の係数 K は、それぞれ平均 13.8、15.6、14.7 になった。 S_{max} 90%の場合は、NC と SFC03、SFC05 の K はそれぞれ平均 13.5、16.4、20.9 となった。

表-4 係数 K の算定結果

S_{max}^{*1} (%)	コンクリート 種類	破壊サイクル数 (N)	K^{*2}
80	NC	1401	15.0
		652	13.4
		335	12.0
		1240	14.7
		平均	13.8
	SFC03	3503	16.8
		×	×
		×	×
		1094	14.4
		平均	15.6
	SFC05	2419	16.1
		1244	14.7
		1849	15.5
		497	12.8
		1027	14.3
平均	14.7		
90	NC	15	11.2
		72	17.6
		17	11.7
	平均	13.5	
	SFC03	137	20.3
		83	18.2
		53	16.4
		14	10.9
		平均	16.4
	SFC05	248	22.8
		101	19.0
		384	24.6
64		17.2	
平均	20.9		

*1: S_{max} : 上限応力レベル, *2: 式(1)における係数 K

図-9 に表-4 の結果を用いて K と繊維混入率の関係を示す。 S_{max} 80%では繊維混入率の増加による K の変動は大きくないが、 S_{max} 90%では繊維混入率の増加とともに K も大きく増加している。これは、応力レベルが高いほど、 K に及ぼす繊維混入率の影響が大きいと考えられる。

図-10 と表-5 に本研究の実験結果と既往研究^{9),10)}で実施された圧縮強度 34.5~65.9N/mm² で鋼繊維混入率 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1.0%の SFC シリンダー98 本を用いた応力レベル-平均疲労寿命関係の回帰分析結果を示す。既往の研究によるデータでは、 S_{max} は 60%~100%, S_{min} は 3.6%~10%の範囲である。本回帰分析は、まず既往研究から鋼繊維混入率別にデータを抽出し、その後最

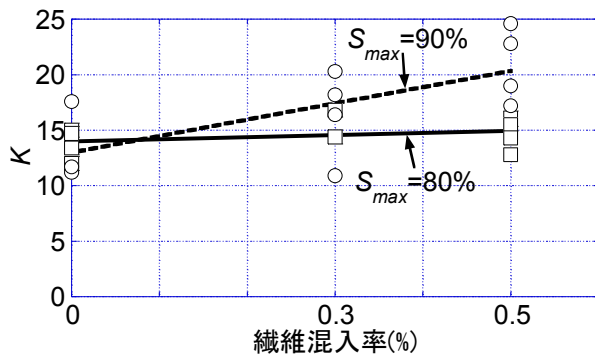


図-9 K -繊維混入率関係

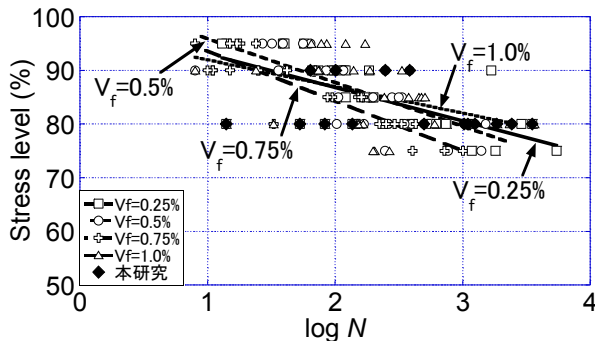


図-10 繊維混入率に対する回帰分析

表-5 回帰分析結果による 200 回疲労強度

種類	変数	回帰式	$N=200$ 回疲労強度
圧縮強度 34.5~ 65.9N/mm ² 範囲の SFC	$V_f=0.25\%$	$S_{max}=99.3-6.2\log N$	85.0%
	$V_f=0.50\%$	$S_{max}=104.1-8.2\log N$	85.3%
	$V_f=0.75\%$	$S_{max}=102.9-9.3\log N$	81.5%
	$V_f=1.00\%$	$S_{max}=97.0-5.0\log N$	85.5%

※ S_{max} : 上限応力レベル, $\log N$: 平均疲労寿命, V_f : 繊維混入率

大応力レベルに対して本研究の実験結果とともに回帰分析を行った。本研究での繊維混入率 0.3%の実験結果は、既往の研究では 0.3%のデータがなかったため、回帰分析では 0.25%のデータと一緒に扱った。

表-5 の回帰式は、

$$\text{Stress level} = A \log N + B \quad (2)$$

を最小自乗法によって決定した。本研究では、長周期地震時を想定したため、繰り返し回数 $N=200$ 回と定め、表-5 の回帰式から疲労サイクル数 200 回圧縮疲労強度を求めた。圧縮強度 34.5~65.9N/mm² 範囲での SFC の $N=200$ 回疲労強度は、表-5 に示すように鋼繊維混入率 0.25% と 0.5%, 0.75%, 1.0% 場合の疲労強度は増加一定な増減傾向を示していないことがわかる。例えば、繊維混入率 0.5% と 1.0% の場合は繊維混入率 0.25% より繊維混入率の増加によって $N=200$ 回疲労強度は 0.3% と 0.5% 増加したが、繊維混入率 0.75% の場合は繊維混入率 0.25% の場合より疲労強度が 3.5% 減少し、繊維補強コンクリートの場合、疲労サイクル数 200 回の疲労強度では繊維混入率による一定な疲労強度の増減傾向は確認できなかった。これは、繊維補強コンクリートの繊維混入率や混和剤量などが繊維分散性に及ぼす影響のため、一定な疲労強度傾向が確認できなかったと考えられる。

4.2 コンクリート圧縮強度による S_{max} -平均疲労寿命関係

本研究では、建物で長周期地震時に想定される疲労サイクル数 200 回時に対する疲労強度検討を行った。

本研究の実験結果と既往の研究³⁾⁻¹⁶⁾で実施された圧縮強度 8.68~168.2N/mm² 範囲の NC シリンダー437 本を用いた応力レベル-平均疲労寿命関係の回帰分析結果を図-11 と表-6 に示す。

表-6 に示した回帰式も式(2)を用いて最小自乗法によって求めた。その結果 NC は、圧縮強度が高強度になるほど疲労サイクル数 $N=200$ 回時の疲労強度が徐々に低下している。

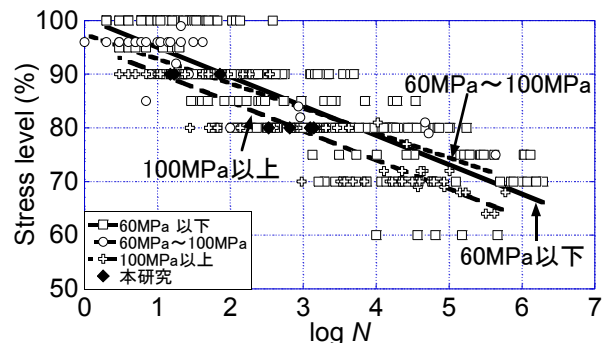


図-11 コンクリート強度に対する回帰分析

表-6 回帰分析結果による 200 回疲労強度

種類	変数	回帰式	N=200 回 疲労強度
NC	$f_c' = 60\text{N/mm}^2$ 以下	$S_{max} = 100.5 - 5.5 \log N$	87.9%
	$f_c' = 60 \sim 100$ N/mm ²	$S_{max} = 97.4 - 4.6 \log N$	86.8%
	$f_c' = 100\text{N/mm}^2$ 以 上	$S_{max} = 95.7 - 5.4 \log N$	83.3%

※ S_{max} : 上限応力レベル, $\log N$: 平均疲労寿命

5. まとめ

プレーンコンクリートと鋼繊維混入率 0.3%と 0.5%の鋼繊維補強コンクリートシリンダーを用いた圧縮疲労実験結果から以下の結論を得た。

- (1) 鋼繊維により補強された場合、特に、 $S_{max}90\%$ の時にも、プレーンコンクリートより鋼繊維補強コンクリートの疲労寿命が長い傾向があった。また、繊維による剥落や飛散抑制など改善効果が確認された。
- (2) $S_{max}80\%$ では繊維混入率の増加による K 変動は大きくではないが、 $S_{max}90\%$ では繊維混入率の増加とともに K も大きく増加する傾向が表れた。したがって、同一な繊維混入率と圧縮強度を持つ SFC の K については、応力レベルによる K の変動傾向が異なるため、応力レベルを考慮する必要があると考えられる。
- (3) 圧縮強度 34.5~65.9N/mm² 範囲での SFC は、鋼繊維混入率 0.25%と 0.5%、0.75%、1.0%の疲労強度は一定な傾向が確認できなかった。これは、繊維混入率や混和剤などが繊維分散性に及ぼす影響のためと考えられる。
- (4) プレーンコンクリートの場合、静的圧縮強度が高強度になるほど、建物で長周期地震時を想定した疲労サイクル数 200 回時の疲労強度が徐々に低下する傾向が現れた。

今後の課題・展望

応力レベルと鋼繊維混入率により疲労寿命や破壊形式などが異なるため、繊維補強コンクリートの疲労特性を把握する必要があると考えられる。

謝辞

本研究の疲労試験は京都大学大学院工学研究科の技術職員野村昌弘さんの協力をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造設計規準・同解説，2010。

- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書「設計編」，2007。
- 3) 長谷川弘明ほか：100MPa を超える高強度コンクリートの低サイクル疲労に関する実験的研究，日本建築学会学術講演梗概集，pp.201-202，2008.9。
- 4) 林宏信，児島孝之，高木宣章：高強度コンクリートの圧縮疲労特性に関する実験的研究，コンクリート年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.265-270，1999。
- 5) M. K. Lee, B. I. G. Barr : An overview of the fatigue behavior of plain and fibre reinforced concrete, Cement & Concrete Composites 26, pp.299-305, 2004.
- 6) Piet Stroeven : Low-cycle compression fatigue of reinforced concrete structures, Procedia Engineering 2, pp.309-314, 2010.
- 7) Paulo B. Cachim, Joaquim A Figueiras, Paulo A. A Pereira : Fatigue behavior of fiber-reinforced concrete in compression, Cement & Concrete Composites 24, pp.211-217, 2002.
- 8) Antonio Nanni : Fatigue Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete, Cement & Concrete Composites 13, pp.239-245, 1991.
- 9) Todorka Paskova, Christian Meyer : Low-cycle Fatigue of Plain and Fiber-Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, Vol.94, No.4, pp.273-285, July-August, 1997.
- 10) Mirosław Grzybowski, Christian Meyer : Damage Accumulation in Concrete with and without Fiber Reinforcement, ACI Materials Journal, Vol.90, No.6, pp.594-604, November-December, 1993.
- 11) 金子林爾：繰返し圧縮疲労下のコンクリートの変形挙動とエネルギー損失，日本建築学会学術講演梗概集，pp.83-84，1981.9。
- 12) 六車熙，渡邊史夫，安井 雅明，張 耀凱：超高強度コンクリートの力学的性質に関する基礎研究，日本建築学会学術講演梗概集，pp.163-164，1981.9。
- 13) 金子林爾：動的繰返し応力化におけるコンクリートの変形挙動と疲労限度，日本建築学会学術講演梗概集，pp.101-102，1982.9。
- 14) 西林新蔵ほか：変動繰返し荷重下におけるコンクリートの疲労特性に関する研究，日本材料学会，第31巻，第350号，pp.62-68，1982。
- 15) 金子林爾：動的圧縮疲労下におけるコンクリートの力学的挙動について，日本建築学会東海支部研究報告，pp.29-32，1983.2。
- 16) 六車熙，渡邊史夫，光枝良，紺谷修：水中コンクリートの低サイクル疲労に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集，pp.205-206，1984.10。