

論文 UFC の曲げ疲労性状に関する載荷方法および供試体寸法による影響

川上 順史^{*1}・角掛久雄^{*2}・仙波 歩^{*3}

要旨：超高強度短繊維補強コンクリートが近年利用されている。しかし、短繊維補強コンクリートは供試体によっては繊維の配向性¹⁾や寸法効果²⁾といった問題が発生することが明らかになっている。そこで、供試体寸法や載荷方法の一般的な指標を定めておく必要がある。そのため本研究では超高強度短繊維補強モルタルの曲げ疲労試験における供試体寸法や試験方法による影響を把握することを目的に、寸法の異なる部材に対して静的曲げ試験を行い比較したうえで曲げ疲労試験を行い、考察を行った。

キーワード：UFC，疲労性状，載荷方法，寸法効果

1. はじめに

近年建設コストの削減，工期の短縮，労働力の減少，自然環境問題への関心の高まりおよび耐用年数の向上などコンクリート工事を取り巻く環境が変化している。そのため、それらの諸問題に適用できる合理的，経済的かつ環境負荷の小さなコンクリートなどの社会的ニーズが高まっている。そこで、近年適用され注目されているのが超高強度短繊維補強コンクリート(UFC と呼ぶ)である。非常に高い力学的性能から鉄筋を配筋する必要がなく，断面の薄肉化や重量の軽減といった効果を見込めるところが特徴である。施工例としては歩道橋や道路橋の床版といった変動荷重を受けやすい部材などに用いられることが多いが，疲労特性に関する研究はほとんどなされていない。

また，超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)³⁾(以降 UFC 指針)では曲げ疲労試験においてフランス・Bouygues 社における気中曲げ疲労試験⁴⁾を参考に純曲げに対して 50×50×550mm という寸法の供試体を用いられている。しかし，本田らの超高強度繊維補強コンクリートの構造性能に関する基礎的研究⁵⁾では 100×100×400mm といった一般的な曲げ供試体を用い 3 点曲げで疲労試験を行っている。また，短繊維補強コンクリートにおける配向性の問題¹⁾や曲げ・引張強度において無視できない寸法効果²⁾が存在することが明らかとなっているため，供試体寸法や試験方法による影響といったものを把握しておくことが必要であると考え。

そこで，本研究では UFC の曲げ疲労試験における断面形状やスパン，試験方法などによる影響を把握することを目的として静的曲げ試験および曲げ疲労試験を行った。

2. 実験概要

2.1 配合

表 1 配合

W/P (%)	単体量(kg/m ³)			補強用鋼繊維 (vol%)
	水	プレミックス材料	高性能減水剤	
10.6	230	2160	32	2

本研究で用いる UFC の配合はポルトランドセメント，ボゾラン材，無機粉体，細骨材をあらかじめ混合しておいたものであるプレミックス材料，水，高性能減水剤および 2.0vol% の補強用鋼繊維(引張強度 2700N/mm²，繊維径 0.2mm，繊維長 15mm の鋼繊維)で構成されている。配合の詳細は表 - 1 に示す。

2.2 実験方法

(1) 静的曲げ試験方法

供試体寸法および載荷方法による曲げ強度への影響を把握することを目的として静的曲げ試験を行った。

供試体寸法は一般的な曲げ強度試験用の供試体⁶⁾である 100×100×400mm の供試体，UFC 指針³⁾の曲げ疲労試験例の寸法との比較を行うために 50×50×550mm の供試体，寸法効果の影響を確認するために 50×50×550mm の供試体を基準としせん断スパン比を一定として断面高さを 1.5 倍(50×75×740mm)，2.0 倍(50×100×920mm)と変化させた供試体を用いて純曲げ区間を 100mm と統一して実験を行った。供試体の概要は図 1 に示す。

打設は供試体の片端 1 方向から 1 層で流し込み，合流部や打ち重ね部が生じないように打設した。養生は打設 1 日後に脱型して 28 日間水中養生を行い，以降気中養生を行った。また，打設面を背面として実験を行った。つまり，3 種類の幅 50mm の供試体においては全て打設時の高さ方向を 50mm としている。計測項目は荷重，支点変位，載荷点変位，中央変位及び下縁ひずみである。供試体数及び実験パラメータは表 - 2 に，供試体名称の説明を図 - 2 に示す。

*1 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻 (現 東海旅客鉄道株式会社) (学生会員)

*2 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻 (正会員)

*3 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻

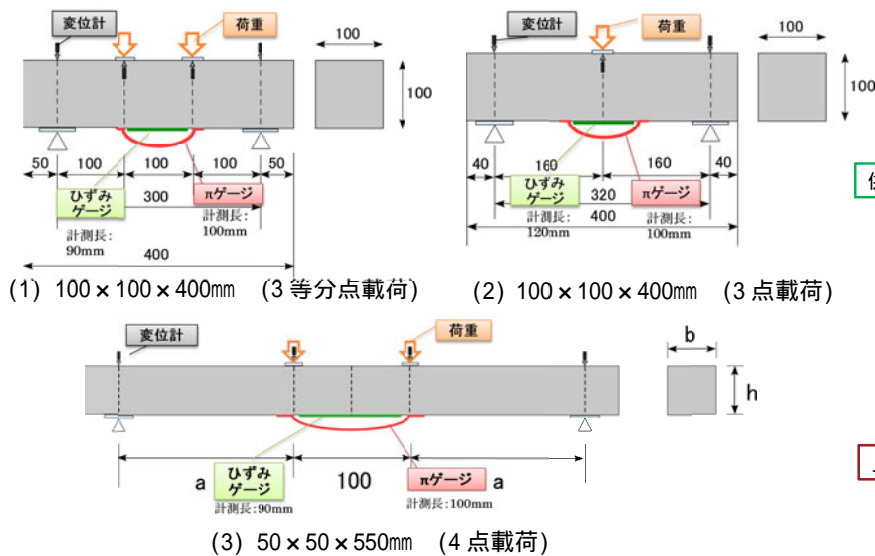


図 1 試体概要図

表 2 実験パラメータ

	供試体寸法(mm)	載荷方法	長さ(mm)			せん断 スパン比	静的曲げ 試験(体)	曲げ疲労試験(体)						
			a	b	h			上限荷重(%)	85	75	70	60	50	
(1)	100×100×400	4点曲げ	/	/	/	1.0	6							
(2)	100×100×400	3点曲げ	/	/	/		1.6	36						
(3)	50×50×550	4点曲げ	180	50	50	3.6	5							
	50×75×740	4点曲げ	270	50	75	3.6	5							
	50×100×920	4点曲げ	360	50	100	3.6	5							

(2) 曲げ疲労試験方法

静的曲げ試験結果を踏まえ、供試体寸法および載荷方法による曲げ疲労試験の影響を把握するために曲げ疲労試験を行った。

供試体寸法における実験では静的曲げ試験でも実施した UFC 指針³⁾での供試体寸法である 50×50×550mm の供試体と一般的な曲げ強度試験用寸法である 100×100×400mm の供試体を用いて純曲げ疲労試験を行い比較した。載荷方法における検討のため既研究⁷⁾の 100×100×400mm の供試体による 3 点載荷(図 - 1(2))の実験結果とも比較を行った。各疲労試験は静的曲げ試験から得られた最大荷重 P_s を基準強度として、その平均値から荷重の振幅を決定し、上限荷重をパラメータとして実施した。サンプリング数は 1 周期 40 点であるが、計測装置の関係上、適宜間隔を置いて 1000 回ごとに計測を行った。実験パラメータは表 - 2 に示す。

- ・ 載荷速度：5Hz(最大 200 万回、その後静的曲げ載荷)
- ・ 上限荷重： P_s の 85%~50%
- ・ 下限荷重： P_s の 5%
- ・ 破壊条件：荷重が上限荷重の 95% まで上がらなくなった時点で破壊とみなす。

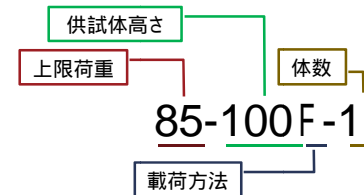
3. 静的曲げ試験結果

3.1 曲げ強度

静的曲げ試験結果の一覧を表 - 3 に示す。表における破壊位置とは終局ひび割れが純曲げ区間の内か外どちら



(1) 静的曲げ試験供試体



(2) 曲げ疲労試験供試体

図 2 供試体名称

で発生したかを区別しており、さらに打設時に型枠の端部付近より UFC を片端 1 方向に流し込んでいるため、区間外の場合はその際の流し込み位置から見て破壊した位置が手前側か奥側かで区別をしている。ただし、大きく区間内からはずれた供試体がないため、ここでは曲げ強度においては純曲げ区間外も含めて全供試体で平均化している。参考として打設場所も時期も異なるが、100×100×400mm の 3 点載荷実験⁷⁾の結果も併せて示す。

表より曲げ強度からは寸法効果や試験方法による曲げ強度の変化は見られなかった。各供試体内でのばらつきは 10% ほどであり比較的安定した結果が得られた。また、破壊位置は断面高さが 100mm(50-100F, 100-100F) の供試体において純曲げ区間外で破壊に至る供試体が多く見られた。50-100F においては手前側で多く破壊しており、供試体長さが長くなると配向性による影響が発生しやすいと考えられる。しかし、100-100F においては一貫性が見られなかったため、配向性による影響は小さいと考えられる。これは幅 50mm の供試体に比べてせん断スパン比が小さいのが原因ではないかと考えられる。

破壊形式としては全ての供試体において、複数の微細ひび割れが発生した後に最終的には 1 本のひび割れによって破壊に至った。なお、参考値である 100T の曲げ強度は他と近似しているが、一般的に 3 等分点載荷に比べ 3 点載荷は強度が大きくなる傾向にあり、28 日強度の 3 等分点載荷に比べ 8% 程度大きな値となっている。

3.2 部材角

表 3 静的曲げ試験結果一覧

供試体名	供試体寸法 (mm)	載荷方法	曲げ強度平均 (N/mm ²)	破壊位置
50-50F-1	50 × 50 × 550	4点載荷	39.6	区間内
50-50F-2				区間内
50-50F-3				区間外 手前側
50-50F-4				区間内
50-50F-5				区間内
50-75F-1	50 × 75 × 740	4点載荷	41.2	区間内
50-75F-2				区間内
50-75F-3				区間内
50-75F-4				区間内
50-75F-5				区間内
50-100F-1	50 × 100 × 920	4点載荷	40.6	区間外 手前側
50-100F-2				区間外 手前側
50-100F-3				区間外 手前側
50-100F-4				区間内
50-100F-5				区間内
100-100F-1	100 × 100 × 400	4点載荷 (3等分点載荷)	38.9	区間外 奥側
100-100F-2				区間外 手前側
100-100F-3				区間外 奥側
100-100F-4				区間外 手前側
100-100F-5				区間外 手前側
100-100F-6				区間内
100-100T	100 × 100 × 400	3点載荷	39.9	

図 - 3 において縦軸に曲げモーメントを最大曲げモーメントで無次元化したもの、横軸に部材角をとり、各供試体での比較を行った。ここでは純曲げ区間内で破壊に至った供試体のみで比較を行った。

1 体しかないが 100-100F と他で大きく異なっている。せん断スパン比の等しい幅 50mm の供試体において初期勾配の差はあまり見られなかった。その後は 50-75F と 50-100F ではほとんど同じ挙動を示したが、50-50F においては部材角がやや大きくなる傾向が見られた。せん断スパン比は同じとしているが、断面高さが異なるため高さによる影響を踏まえたら高さが低くなるほど変形しやすくなるはずであるが、断面高さによる影響が明確にはならなかった。せん断スパン比の小さな 100-100F では当然のことながら変形は小さくなった。

そこで、曲げ応力度 σ と部材角 R の比率を梁理論より算定した場合の修正部材角で比較することとした。梁理論による部材角 R は以下の式(1)であらわされる。

$$R = \frac{(3l - 4a)}{3Eh} \sigma \quad (1)$$

ここで l : スパン長, a : せん断スパン長, h : 断面高さ, E : ヤング係数(全供試体平均)

図 - 4 に梁理論における 50-50F の時の部材角を 1 とした時の他の部材角比率を得られた部材角に対して乗じたものを修正部材角としてグラフに示す。

幅 50mm の供試体においては曲げ強度が異なるためピークは若干異なるが、部材角 0.02 付近までは概ね一致しており、梁理論による検証でみるとピークまでの挙動においては断面高さによる影響はあまりないことがわかる。100-100F はせん断スパン比が小さいため、梁理論による変形に適合しないが類似した挙動となった。

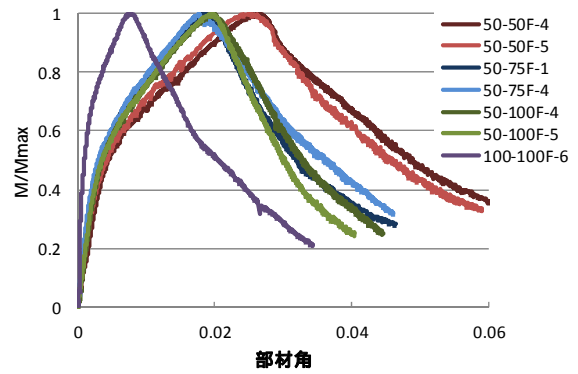


図 3 曲げモーメント - 部材角

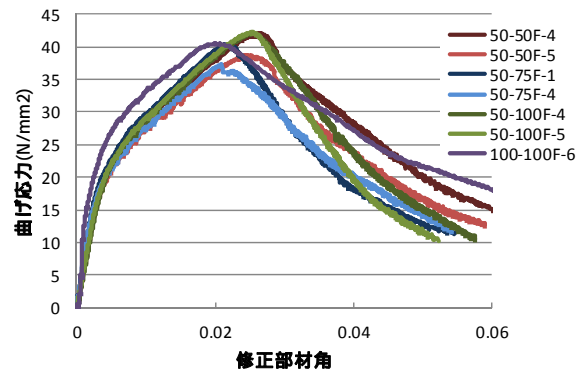


図 4 曲げ応力 - 修正部材角

4. 曲げ疲労試験結果

4.1 結果一覧

表 - 4 に曲げ疲労試験結果の一覧を示した。表 - 3 と同様にひび割れが卓越して破壊した位置もあわせて示す。100T に関しては純曲げ区間を設けていないため破壊位置を示していない。

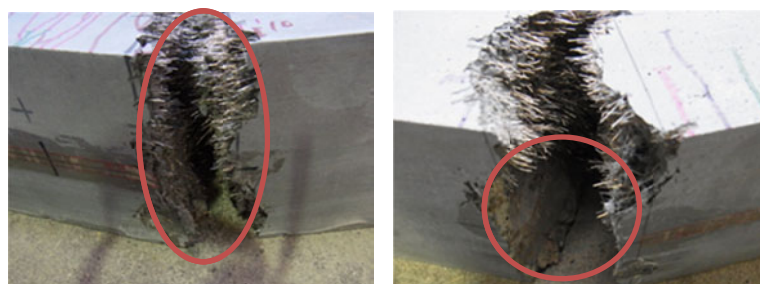
繰り返し回数に関しては 50F の供試体において上限荷重が大きい時点から 100 × 100mm 断面の供試体に比べて疲労寿命が長く、また、85-50F-3 を除いて破壊位置による疲労寿命への影響はあまり見られなかった。また、100 × 100mm 断面の供試体では載荷方法に関わらず上限荷重ごとの疲労寿命の差がやや大きく、破壊位置による疲労寿命への影響が大きい。100T と比較して上限荷重が大きいときには 100F の方が疲労寿命が短い傾向が見られたが、上限荷重が 70% 以下については同様な傾向となった。この原因としては 100F は 100T と比べて最大曲げモーメントの領域が広いいため、曲げモーメントの影響を受けやすくなるため、繊維の配向性の影響を受けやすくなったことが原因ではないかと考えられる。

破壊位置に関しては 50 × 50mm, 100 × 100mm 断面ともに打設方向と破壊位置の関係性といったものは確認されなかった。静的曲げ試験結果も踏まえて考えると、本実験程度の断面では長さが 500mm 程度の供試体においては打設による配向性の影響は少ないと考えられる。

図 - 5 に破壊性状の写真を示す。ここでは 100F におけ

表 - 4 曲げ疲労試験結果一覧

供試体名	繰り返し回数(回)	破壊位置	
85-50F-1	22,043	区間外	奥側
85-50F-2	38,663	区間内	
85-50F-3	2,576	区間外	手前側
75-50F-1	87,870	区間内	
75-50F-2	705,285	区間内	
75-50F-3	803,066	区間内	
70-50F-1	2,000,000	破壊せず	
70-50F-2	403,976	区間外	奥側
70-50F-3	545,961	区間内	
60-50F-1	2,000,000	破壊せず	
60-50F-2	2,000,000	破壊せず	
85-100F-1	51	区間外	奥側
85-100F-2	56	区間内	
85-100F-3	18	区間外	手前側
70-100F-1	325,837	区間内	
70-100F-2	6,165	区間内	
70-100F-3	17,594	区間内	
60-100F-1	2,000,000	破壊せず	
60-100F-2	236,991	区間内	
60-100F-3	22,539	区間外	手前側
50-100F-1	2,000,000	破壊せず	
50-100F-2	426,361	区間外	奥側
50-100F-3	2,000,000	破壊せず	
85-100T-1	460		
85-100T-2	665		
85-100T-3	432		
70-100T-1	168,602		
70-100T-2	6,716		
70-100T-3	6,871		
60-100T-1	902,385		
60-100T-2	199,201		
60-100T-3	2,000,000		
50-100T-1	2,000,000		
50-100T-2	642,957		
50-100T-3	2,000,000		



(1) 85-100F-3 (2) 50-100F-2

図 - 5 破壊性状

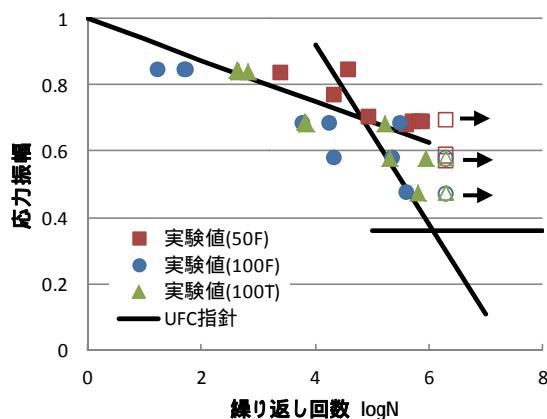


図 - 6 S - N 曲線

る 1 例を示したが、すべての供試体において繊維の抜け出しは見られるが、断面の大きさに関わらず図 - 5(2)のように上限荷重が70%以下になると徐々に繊維の抜け出しだけではなく引張縁側の繊維が破断して破壊に至る傾向が見られた。

4.2 S - N 曲線

図 - 6 に UFC 指針³⁾による疲労強度式と本研究で得られた実験値を比較した S - N 曲線を示す。縦軸に応力振幅、横軸に繰り返し回数 logN を示している。なお、破壊に至らなかった供試体においては白抜きで示した。

UFC 指針³⁾での疲労強度算定式に用いられた供試体と同様の寸法である 50F では、すべての供試体において S - N 曲線の安全側で破壊に至った。100T においては上限荷重 70%以上において一部指針より危険側となったが、100F においては指針より危険側で破壊に至る結果が多く見られた。このことからせん断スパン比が小さい方が疲労寿命が小さくなる傾向があり、上限荷重が大きいとより顕著になることがわかった。

4.3 軟化勾配

図 - 7 では静的曲げ試験から得られた $P - \delta$ と曲げ疲労試験から得られた $P - \delta$ との関係を示した。曲げ疲労試験から得られた $P - \delta$ に関しては繰り返し回数が 1 ~ 10 回と破壊に至る直前のみの $P - \delta$ を示している。

すべての供試体において静的曲げ試験から得られた軟化勾配と曲げ疲労試験から得られた軟化勾配が概ね同じ軌道を描いて破壊に至る傾向が見られた。特に、100T(図 - 7(4) ~ (6))においては上限荷重に関わらず静的曲げ試験の軟化勾配に差し掛かる付近で疲労破壊に至る傾向が見られた。しかし、100F(図 - 7(1) ~ (3))や 50F(図 - 7(7) ~ (8))での実験結果からは上限荷重が小さくなるにつれてそのような傾向を確認することはできなくなった。このことから試験方法に関わらず、静的曲げ試験の軟化勾配から曲げ疲労破壊に至る終局変位を予測することは難しいと考えられる。

また、50F では 100F、100T と比較して変位が大きくなるにつれて最大荷重まで荷重が上がらず、なだらかに破壊に至る傾向が見られた。これは供試体自身の耐力低下と靱性が高いことに加えて 50F の方が荷重に対して変位が大きいうえに、全試験での載荷条件を統一して 5Hz と早い載荷速度としていることから、試験機の設定において変位振幅が大きくなると正確に荷重振幅を追従しにくくなることが要因であると考えられる。なお 図 - 7(7)、(8)の疲労試験時の破壊付近の $P - \delta$ は破壊条件とした上限荷重の 95%以下の状態であり、破壊時の軟化曲線として上限の包絡線は比較可能であると判断して示した。また、実載荷時の上限荷重が小さくなることによる影響は

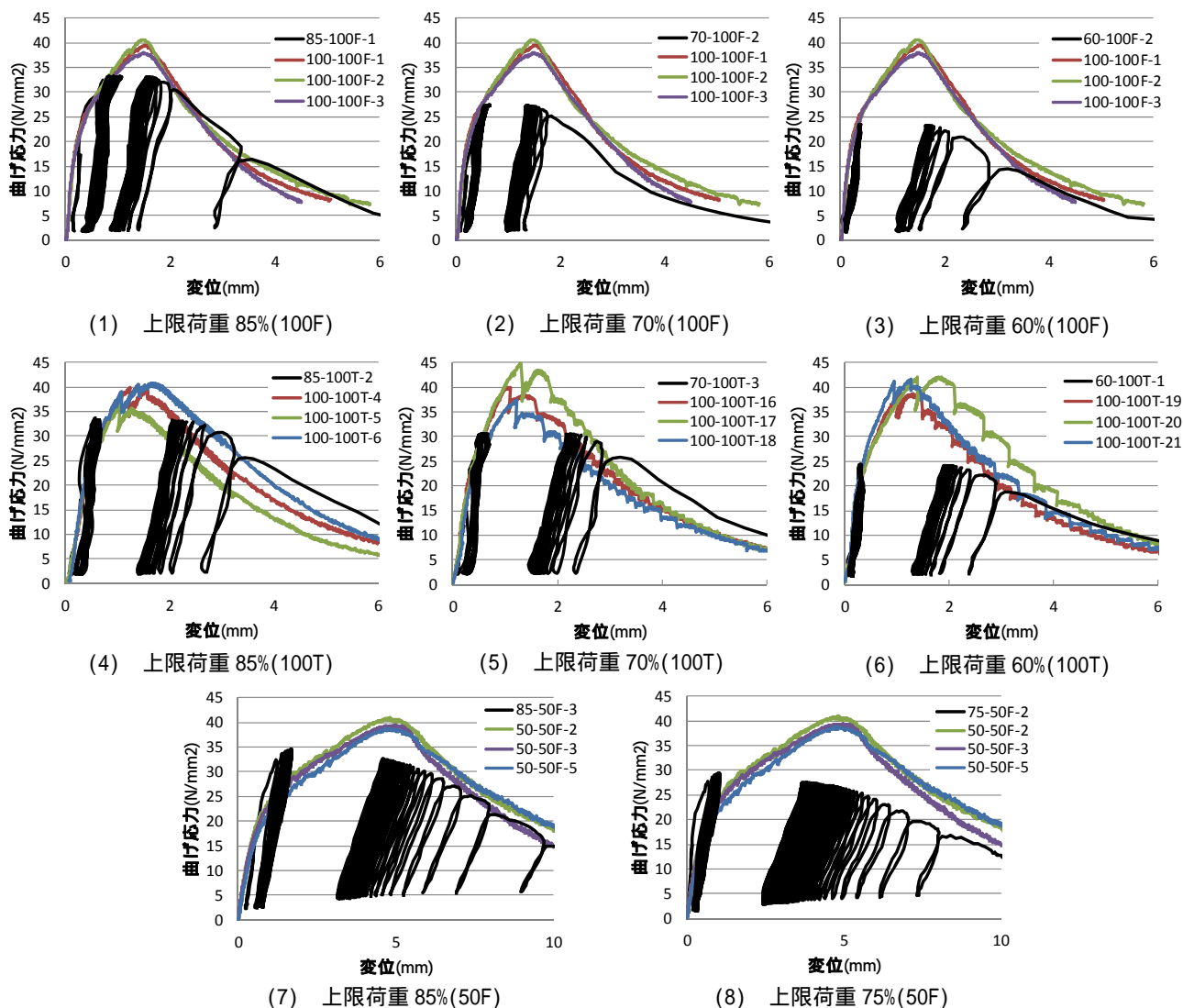


図 7 軟化勾配

疲労寿命の長いもので数百回程度であり、影響が小さいものと考えられるが、本節以外の検討では破壊条件とした上限荷重の95%まで低下した範囲で比較した。

4.4 部材角 - 繰り返し回数

図 - 8 ~ 10 に回転角 - 繰り返し回数関係を示した。破壊直前の回転角が得られている供試体は上限荷重の95%時点の回転角を示しており、破壊に至らなかった供試体および破壊直前の回転角が得られていない供試体においては計測できている最後の回転角を示している。なお、200万回で破壊しなかった供試体については同様の傾向を示したため、1つのみを例示している。

図 - 8 ~ 10 においてすべての供試体で上限荷重が大きいほど繰り返し回数が少ない段階から大きな回転角が得られるという傾向が得られた。ただし、100T に比べ純曲げ試験である 100F や 50F の方が初期部材角が大きく、部材角の増加も大きくなっている。200万回で破壊しなかった供試体においても、破壊した供試体の直前までと同様に増加しており、局所的な破壊進展の生じ方が疲労

寿命に大きく影響することがわかる。

図 - 11 には各供試体における終局部材角と繰り返し回数の関係を示した。終局部材角とは上限荷重の95%までしか増加しなくなった時点の部材角としている。

図 - 11 から 100F, 100T とともに終局部材角が繰り返し回数に関わらず 0.015 ~ 0.02 となっていることから、一定の終局部材角が得られると推定される。しかし、50F においては一定の終局部材角を得ることはできなかった。これは図 - 7 のように上限荷重が徐々に低下することが影響しているものと考えられる。

5. まとめ

UFC に対して供試体寸法および載荷方法をパラメータに静的曲げ試験および曲げ疲労試験を実施した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 本実験のような比較的小さい 100mm 以下の断面の供試体では静的試験による曲げ強度において断面寸法による違いはほとんど確認されなかった。

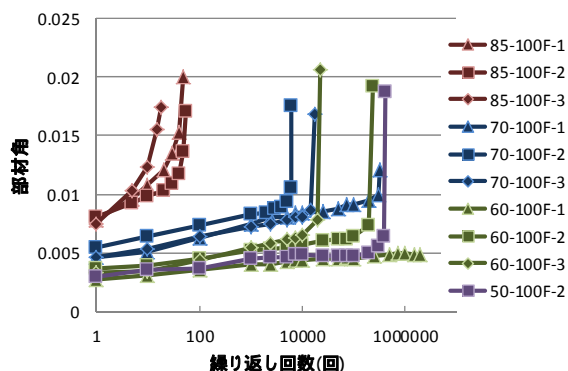


図 8 部材角 - 繰り返し回数(100F)

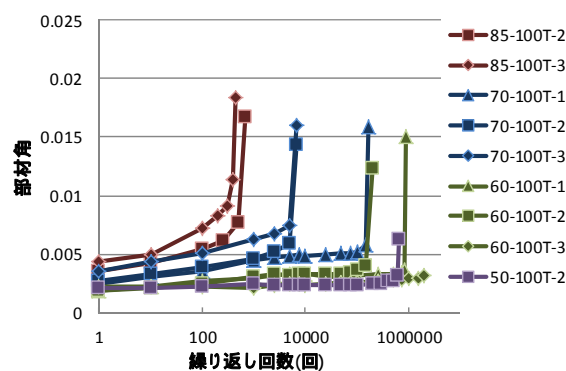


図 9 部材角 - 繰り返し回数(100T)

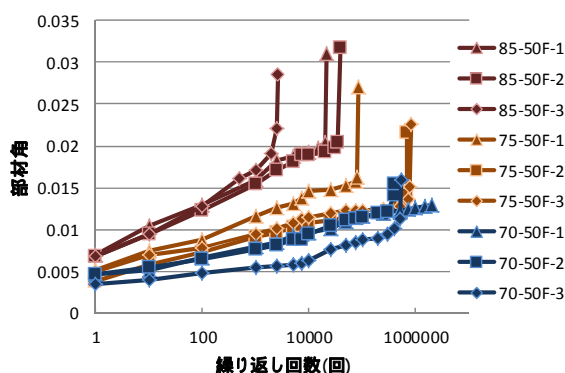


図 10 部材角 - 繰り返し回数(50F)

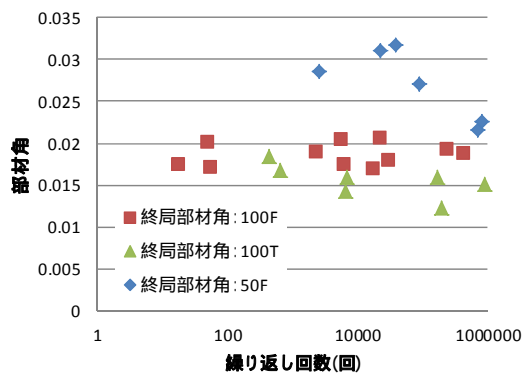


図 11 終局部材角

- (2) せん断スパン比が等しく，断面高さをパラメータとした静的曲げ試験において得られた曲げ応力と部材角の関係は概ね梁理論における部材角の断面高さごとの比率と同等の結果が得られ，曲げ挙動において断面高さの影響はほとんどなかった。
- (3) 曲げ疲労試験において 50×50×550mm の供試体が最も疲労寿命が長くなる傾向が得られた。また，100×100×400mm の供試体では 3 等分点载荷の方が 3 点载荷に比べて上限荷重が 70% 以上では疲労寿命が短くなる傾向が得られた。
- (4) 静的曲げ試験および曲げ疲労試験から得られた $P - \theta$ を比較すると 100×100×400mm の供試体では 3 点载荷試験では曲げ疲労試験による変位が静的曲げ試験から得られた $P - \theta$ の軟化勾配にさしかかると破壊に至る傾向が見られたが，その他の試験ではそういった傾向を確認することはできなかった。
- (5) 部材角 - 繰り返し回数の関係から 100×100×400mm の供試体においては 3 点载荷と 3 等分点载荷ともに終局部材角が繰り返し回数に関わらず 0.015 ~ 0.02 となっていることから，一定の終局部材角が得られると推定される。
- (6) 以上より供試体形状および载荷方法により静的曲げ試験においては影響はほとんどないが，曲げ疲労

試験においては疲労性状に影響が見られることを明らかにした。

参考文献

- 1) 内田裕市：繊維補強コンクリート構造物の設計技術の現状と課題，コンクリート工学，Vol.50，No.5，pp.468-472，2012
- 2) 浦野登志雄，村上聖，下田誠也：繊維補強コンクリートの寸法効果に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.293-294，2006
- 3) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)，2004
- 4) Bouygues' Technical Report：The fatigue strength of Reactive Powder Concrete，2000
- 5) 本田智昭，一宮利通，曾我部直樹，日紫喜剛啓：超高強度繊維補強コンクリートの構造的な性能に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.637-642，2006
- 6) 土木学会：2002 年制定 コンクリート標準示方書[規準編]JIS 等関連規準，pp.291-293，2002
- 7) 川上順史，上田真彦，角掛久雄：超高強度短繊維補強モルタルの曲げ疲労破壊性状，土木学会年次学術講演会講演概要集，V-205，2011