

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

Effect of Loading Method and Specimen Size on Fatigue Characteristics of UFC Beams

構造及びコンクリート工学分野

川上 順史

Abstract

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。

Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete starts to use in recent years. It is clear that the problem of the orientation and the size effect of short fiber reinforced concrete occur depending on a specimen. Then, it is necessary to define the general index of specimen size and loading method. Therefore, the purpose of this research is for high strength fiber reinforced concrete to grasp the influence by the specimen size and the loading method in bending fatigue test. At first I perform a static bending test for a specimen varying in dimensions and compare it. Finally, I based on the result that I perform bending fatigue test.

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られる。

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

本研究で用いる UFC の配合はポルトランドセメント、ポゾラン材、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。

表-1 配合

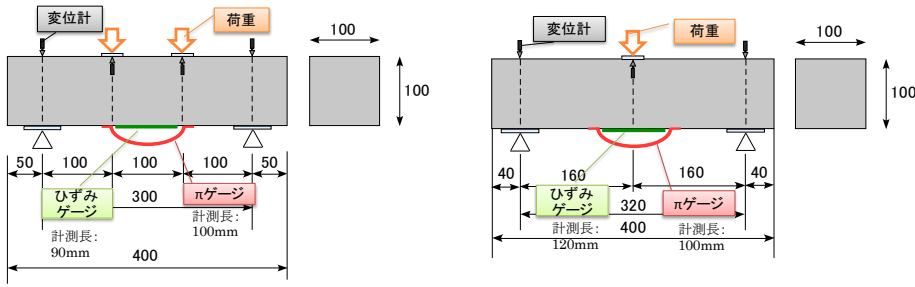
W/P (%)	単位量(kg/m ³)			補強用鋼繊維 (vol%)
	水	プレミックス材料	高性能減水剤	
10.6	230	2160	32	2

2.2 実験方法

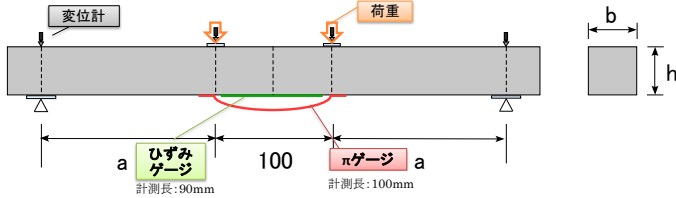
(1) 静的曲げ試験方法

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、



(1) 100×100×400mm (3等分点载荷) (2) 100×100×400mm (3点载荷)

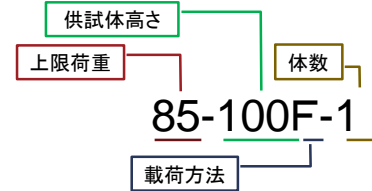


(3) 50×50×550mm (4点载荷)

図 - 1 供試体概要図



(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

T : 3点载荷, F : 4点载荷

表 - 2 実験パラメータ

	供試体寸法(mm)	载荷方法	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
(1)	100×100×400	4点曲げ	/	/	/	1.0	6	3	3	3	3	3
(2)	100×100×400	3点曲げ	/	/	/	1.6	36	3	3	3	3	3
(3)	50×50×550	4点曲げ	180	50	50	3.6	5	3	3	3	2	
	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					

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、载荷点変位、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(1)に示す。

(2) 曲げ疲労試験方法

静的曲げ試験結果を踏まえ、供試体寸法および载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。载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 点载荷(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、適宜間隔をおいて 1000 回ごとに計測を行った。実験パラメータは表-2 に、供試体名称の説明を図-2(2)に示す。

・ 载荷速度：5Hz(最大 200 万回、その後静的曲げ

载荷)

- ・ 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で発生したかを区別しており、区間外で発生した場合は打設時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 点载荷実験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 100-100F 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。破壊位置と打設方向に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。

3.2 部材角

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は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。

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

ここで l :スパン長, a :せん断スパン長, h :断面高さ

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。

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。

繰り返し回数に関しては50Fの供試体において

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	
				区間内	区間外
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	
50-100F-3				区間外	
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	
100-100F-3				区間外	
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		

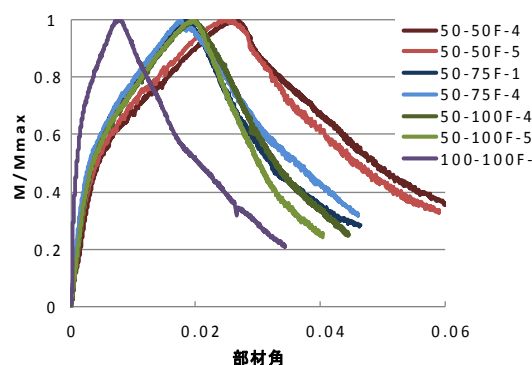


図-3 曲げモーメント-部材角

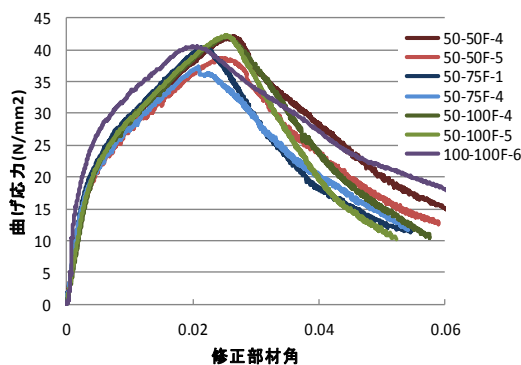


図-4 曲げ応力 - 修正部材角

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。

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

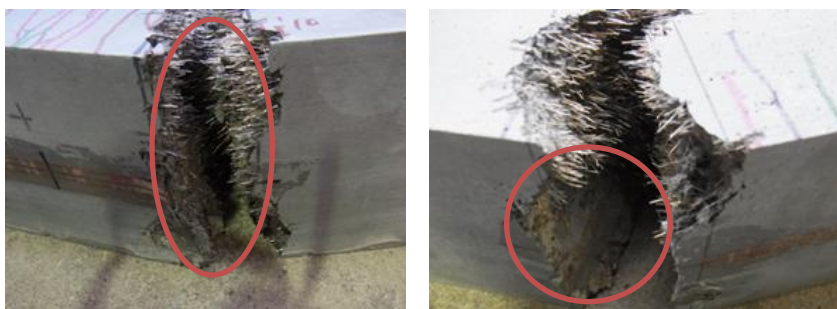
たものは確認されなかった。静的曲げ試験結果も踏まえて考えると、本実験程度の断面では長さが500mm程度の供試体においては打設による配向性の影響は少ないと考えられる。

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。



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

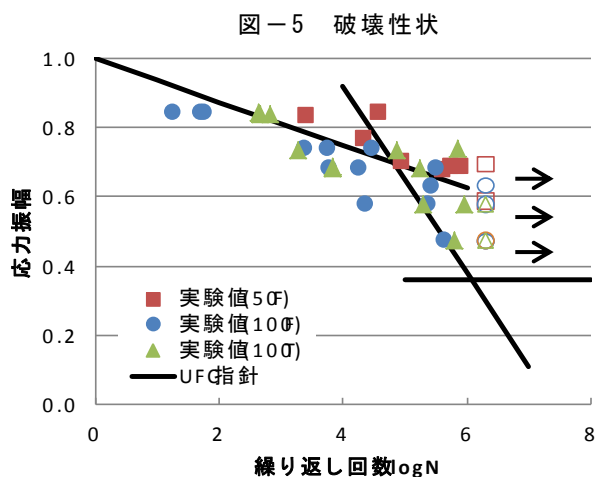


図-6 S-N 曲線

4.3 軟化勾配

図-7では静的曲げ試験から得られたP-δと曲げ疲労試験から得られたP-δとの関係を示した。曲げ疲労試験から得られたP-δに関しては繰返し回数が1~10回と破壊に至る直前のみのP-δ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においては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や50F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

表-4 曲げ疲労試験結果一覧

供試体名	繰返し回数(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	区間内
85-100F-2	56	区間内
85-100F-3	18	区間外 手前側
75-100F-1	30,338	区間内
75-100F-2	5,580	区間外 手前側
75-100F-3	2,356	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
65-100F-1	2,000,000	破壊せず
65-100F-2	261,165	区間外 手前側
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	665	
85-100T-2	432	
75-100T-1	715,519	
75-100T-2	1,913	
75-100T-3	75,973	
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	

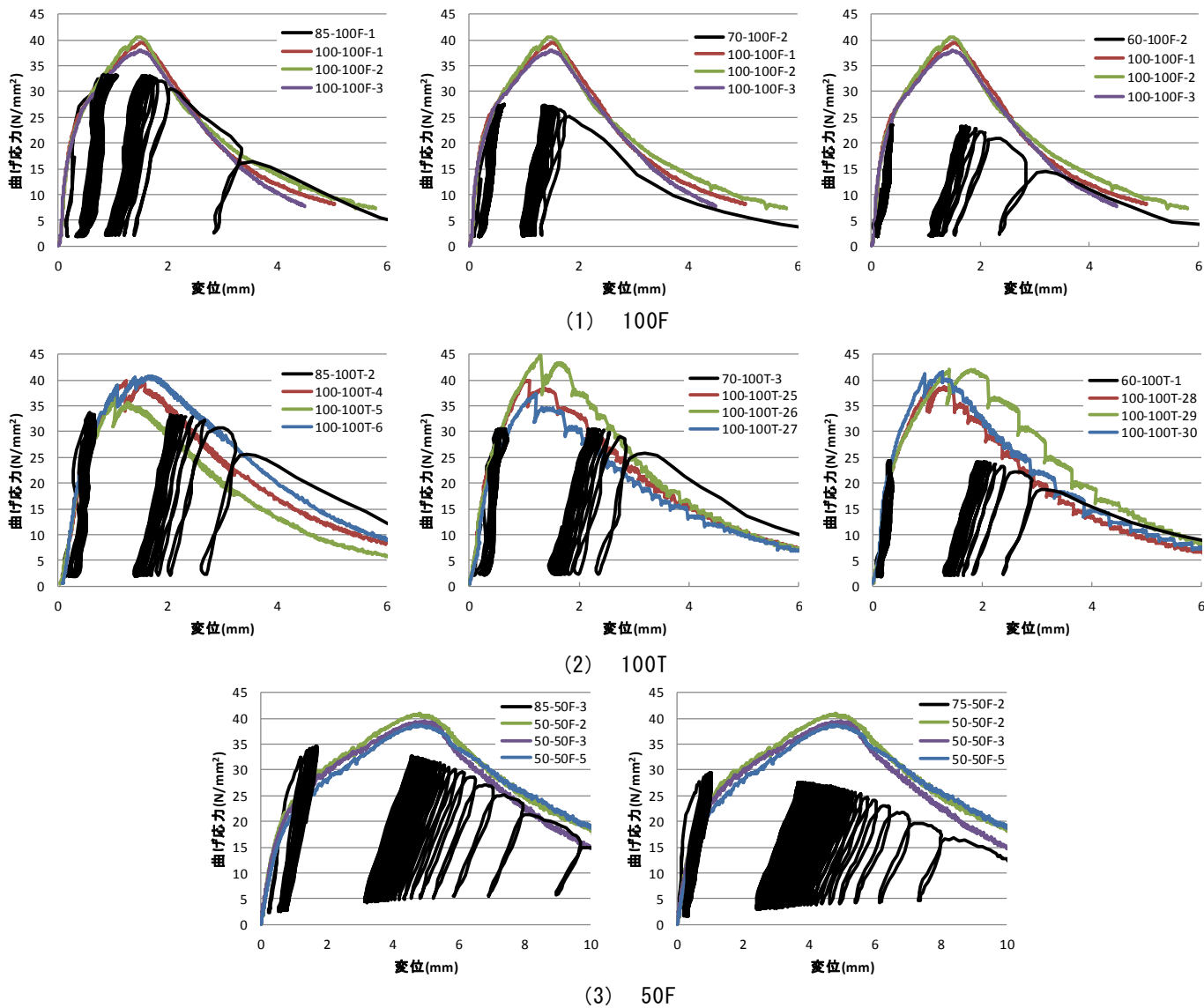


図-7 軟化勾配

は 50F の方が荷重に対して変位が大きいというに、全試験での载荷条件を統一して 5Hz と早い载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できていないことが原因であると考えられる。

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、部材角から曲げ疲労破壊が予測できるのではないかと考えられる。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载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

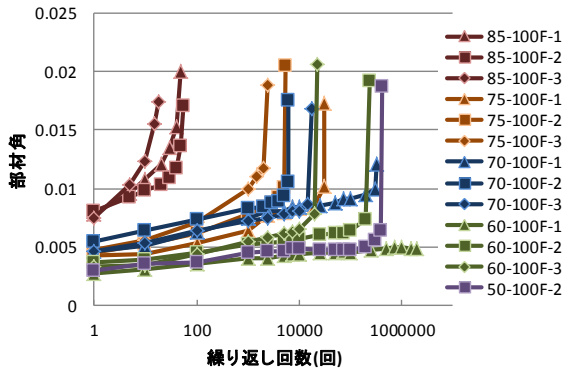


図 - 8 部材角－繰返し回数 (100F)

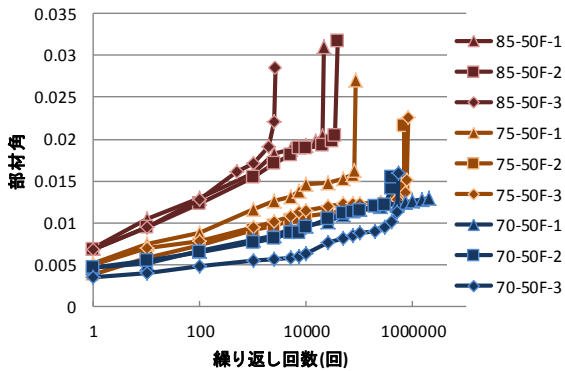


図 - 10 部材角－繰返し回数 (50F)

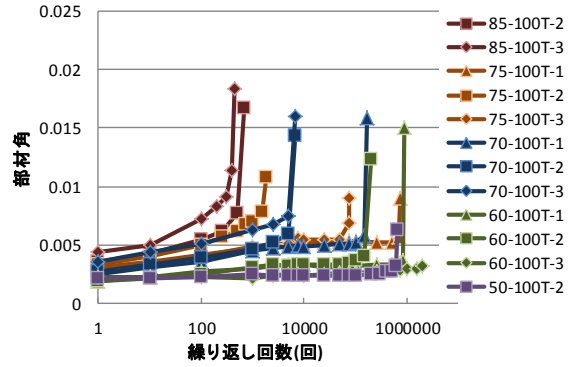


図 - 9 部材角－繰返し回数 (100T)

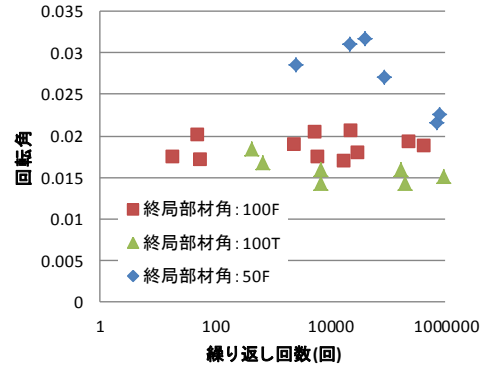


図 - 11 終局部材角

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。
- (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り、100×100×400mmの供試体では3等分点載荷の方が3点載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 $P-\delta$ を比較すると100×100×400mmの供試体では3点載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 $P-\delta$ 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－繰返し回数の関係から100×100×400mmの供試体においては3点載荷と3等分点載荷ともに終局回転角が繰返し回数に関わらず0.015～0.02となっていることから、回

転角から曲げ疲労破壊が予測できるのではないかと考えられる。

- (6) 以上より供試体形状および載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，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

討議

◆討議 [吉中 進 先生]

・静的曲げ試験および曲げ疲労試験において寸法効果によって破壊性状に影響がでたのか。

◇回答：本研究におきましては静的曲げ試験においてはせん断スパン比を一定として寸法効果による曲げ強度への影響を確認したところ、寸法効果による曲げ強度への影響は確認されませんでした。また曲げ疲労試験においては寸法の異なる供試体を用いて実験を行ってはいりますが、これは UFC 指針で用いられている $50 \times 50 \times 550\text{mm}$ の供試体と一般的な曲げ供試体である $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の供試体との比較であり、断面形状もせん断スパン比も異なっているため、単純に寸法効果による影響を見ることはできないと考えられます。

◆討議 [吉中 進 先生]

・S - N 曲線が直線ではないことの物理的な意味は

◇回答：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)においてはより精緻に評価を行うために区間よっては(0, 1)を通らない直線であらわしております。この直線は試験結果の値がその直線を下回る確率が 5%以下となるように決定されています。実験的に求められた直線であるため、勾配が変わる地点での物理的な挙動を踏まえて決定されたものではありません。本研究においては破壊時の鋼繊維の抜け出しと破断という特性が得られています。

◆討議 [谷口 与史也 先生]

・ $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の供試体において 3 点載荷と 3 等分点載荷での破壊形式による違いを比較する

必要があるのではないか

◇回答： $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の供試体における 3 等分点載荷では 3 点載荷と比べて、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ってしまいます。そのため、繊維の配向性の影響を受けやすくなるので疲労寿命が短くなったと考えられます。また、破壊形式としては載荷方法に関わらず全て曲げ破壊で破壊に至っており、破壊形式による影響はほとんどないと考えられます。

◆討議 [松村 政秀 先生]

・ひずみゲージと ϵ ゲージの挙動はどうなっているのか

◇回答：ひずみゲージは計測長 90mm でありそれに対して ϵ ゲージは計測長 100mm であることから値の比較は若干異なるのですが、傾向としては静的曲げ試験および曲げ疲労試験において、ほぼ同等の結果を得ることができました。

◆討議 [山田 卓 先生]

・超高強度繊維補強コンクリートが重要構造物に適用されている背景として過去にも曲げ疲労に関する研究が行われているはずであり、その結果との比較を行うべきではないか

◇回答：超高強度繊維補強コンクリートを用いた曲げ疲労試験に関する基礎的研究はいくつか行われているのですが、超高強度繊維補強コンクリートが用いられている構造物は基本的にひび割れを許容しておらず、疲労による影響を考慮せずに設計されています。また、製品としての性能確認のために実施されている程度であるのが現状です。そのため、曲げ疲労に関する研究はほとんどなされておりましたが、曲げ疲労に関する影響を把握しておく必要はあると考えられるため、本研究を行っています。