

論文 鉄筋を有する高強度繊維補強モルタル部材の曲げ挙動

塩永 亮介^{*1}・佐藤 靖彦^{*2}・J.C. Walraven^{*3}

要旨：100 N/mm² 以上の圧縮強度を有し，鋼繊維を混入した高強度繊維補強モルタルを適用した鉄筋コンクリート部材の変形性能および耐荷性能を把握するため，薄肉の試験体による曲げ載荷試験を実施した。実験のパラメータとして，鉄筋量および鋼繊維の混入率，種類，配向性を変えることで，それらが部材の曲げ靱性やひび割れ性状に与える影響を定量的に把握した。さらに，直接引張試験より得られた引張応力下の力学モデルを適用した非線形 FEM 解析による検証解析により，鉄筋を有する高強度繊維補強モルタル部材の耐荷挙動のシミュレーションを可能とした。

キーワード：高強度，鋼繊維補強，曲げ靱性，ひび割れ，FEM 解析

1. はじめに

高強度かつ高靱性なセメント系複合材料は，その優れた材料特性を生かして構造部材に適用することにより，部材断面の縮小，必要鋼材量の削減，長期耐久性の向上など多くの合理化が図れる次世代の建設材料として期待されている。現在，国内外で様々な高強度繊維補強コンクリート（もしくはモルタル）の研究開発が進められ，そのいくつかは実構造物への適用も果たしている。2004年には，土木学会より超高強度繊維補強コンクリートを対象とした設計指針案¹⁾が発行され，今後もそれらの適用構造は増加していくと推測される。しかしながら，現段階での適用工事の多くは工場製作を基本としたプレストレストコンクリート（以下，PC）構造が主であり，鉄筋コンクリート（以下，RC）構造への適用はまだあまり報告されていない。その理由には，この種の材料に対する特殊養生の必要性や収縮ひびわれによる耐久性低下への懸念などが挙げられるが，鋼繊維の混入により得られた高い曲げ靱性を活かし，鋼材量の削減や断面合理化を図る上では，RC 構造への適用効果の方が大きいことも十分考えられる。

そこで，既報²⁾ではまず鉄筋を有する高強度繊維補強モルタル（圧縮強度 120 N/mm² 程度）部材の一軸引張試験を実施し，テンションスティフニングを考慮した同材料の平均応力-平均ひずみ関係を把握した。その検討の中では，鋼繊維の混入率や種類，配向性がテンションスティフニングに与える影響を評価した。それに対し本論文では，鉄筋を有する高強度繊維補強モルタル部材の曲げ性能を把握することを目的とした。本材料の特性を生かしやすい薄肉の板構造を対象とし，無筋および鉄筋を有する板試験体を用いた静的曲げ載荷試験を実施した。さらに，非線形 FEM 解析により実験結果のシミュレート

を行い，高強度繊維補強モルタルの引張軟化モデルの妥当性を評価した。

2. 実験概要

2.1 配合

本研究で用いた高強度繊維補強モルタルの主な材料特性を表 - 1 に示す。目標強度を 130 N/mm² とした高強度モルタルに鋼繊維を容積比率で 1.6 vol.% 混入したものを標準とした。骨材は，最大寸法 2.0 mm で粒度調整

表 - 1 高強度繊維補強モルタルの材料特性

目標強度 (N/mm ²)	骨材の最大寸法 (mm)	水粉体比 (cm)	鋼繊維混入率 (vol.%)	スランブフロー (cm)
130	2.0	21.0	1.6	60~80

表 - 2 混入した鋼繊維の種類

繊維長さ (mm)	繊維径 (mm)	アスペクト比
13	0.16	81.3
20	0.30	66.7
6	0.16	37.5

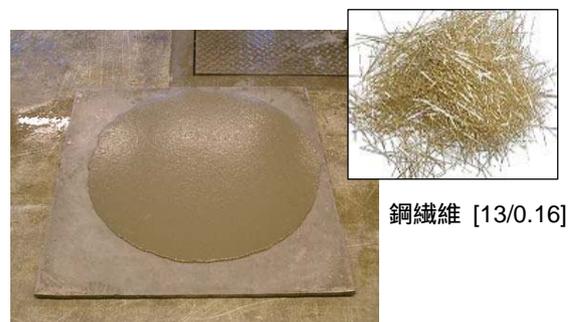


図 - 1 高強度繊維補強モルタルと鋼繊維

*1 株式会社 IHI 基盤技術研究所 工修 (正会員)

*2 北海道大学大学院 工学研究科環境創生工学専攻 准教授 工博 (正会員)

*3 デルフト工科大学 (オランダ) Full Professor

した細骨材を用い、結合材には早強ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末およびシリカ系微粉末を添加したものをを用いた。鋼繊維は、引張強さ 2000 N/mm² 以上の鋼製の短繊維であり、表 - 2 に示すようにアスペクト比 (=繊維の長さ / 径の比) の異なる 3 種類をそれぞれのケースで混入した。練り上がり性状は、いずれの配合においてもスランプフロー値 60 ~ 80 cm, V ロート流下時間 10 ~ 15 秒の範囲に入るものであり、図 - 1 に示されるように材料分離がなく、十分な自己充填性を有するものである。なお本材料は、打込み後に熱養生や蒸気養生等を施す必要はなく、一般的な湿潤養生 (温度 20 , 相対湿度 85% 以上) で所定の強度に達するものである。

本実験で検討したケースの一覧を表 - 3 に示す。パラメータとして、鋼繊維の混入率を 0, 0.8, 1.6 vol.% の 3 ケースとし、このうち 1.6 vol.% の配合ケースについては、鋼繊維の種類 (アスペクト比) を変えた 3 ケースを作製した。さらに、鋼繊維の配向性の影響を評価するため、アスペクト比が 81.3 の鋼繊維を混入したケースでは、試験体製作時に型枠へモルタルを流し込む方向を調整することで鋼繊維の配向性を違えた。製作方法の詳細は、既報 2) にも示すとおりであるが、鉄筋方向と平行にモルタルを流し込んだ試験体を X 配向、直交して流し込んだ試験体を Y 配向とした。

2.2 試験体

試験体は、寸法が 700×200×50 mm の薄板試験体とし、厚さ方向の中心に径 10 mm の異形鉄筋をかぶり 20 mm として配置した。本実験では、鉄筋量の違いによる影響も評価するため、表 - 3 に示したそれぞれの実験ケースに対して、図 - 2 に示すように無筋の試験体のほか、鉄筋本数を 2 本 (鉄筋比 1.57%) および 4 本 (鉄筋比 3.14%) とした試験体を作成した。試験体はそれぞれのケース 1 体ずつ作成したが、無筋の供試体については、その結果にバラツキが生じやすいことが予想されるため、同一条件の試験体を 3 体作製した。また、各ケースで同一バッチから圧縮強度および割裂強度用の試験体も作成した。

2.3 荷重試験要領

曲げ荷重試験は、図 - 3 に示すように支点間距離を 600 mm, 等曲げモーメント区間を 200 mm とした三等分点荷重となるように荷重治具をセットした。鉄筋の降伏までは荷重制御で鉛直荷重を加え、鉄筋降伏以降は変位制御に変更し、荷重がほぼゼロに落ちるまで荷重を続けた。鉛直方向の変位は、試験体両側面で中央点および荷重点に図 - 3 のように計測治具を介して LVDT (変位計) を設置し、また試験体の底面においては、等曲げ区間での平均ひび割れ幅を計測するため 75 mm 間隔で 3 連の LVDT を設置した。

表 - 3 実験ケース

No.	目標強度 (N/mm ²)	混入率 (Vol.%)	アスペクト比 [長さ/径]	配向性*1
1	130	0	-	-
2		0.8	81.3	X
3				Y
4		1.6	81.3	X
5				Y
6				66.7
7		37.5	X	

*1: X は鋼繊維と鉄筋と平行方向、Y は直交方向

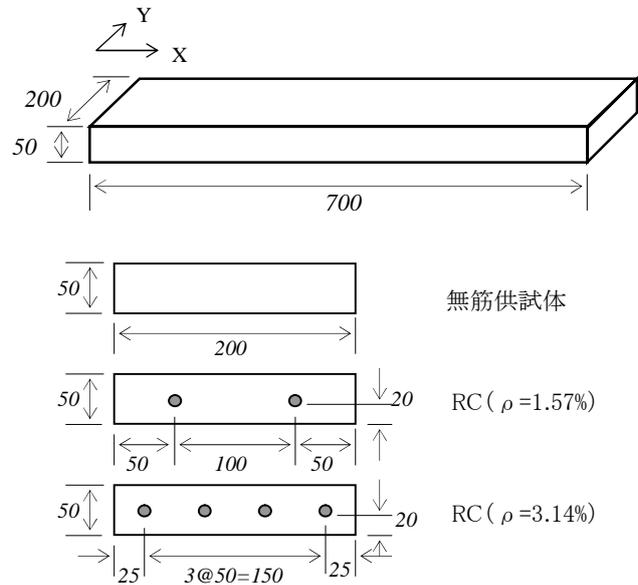


図 - 2 曲げ試験体図面 (単位:mm)

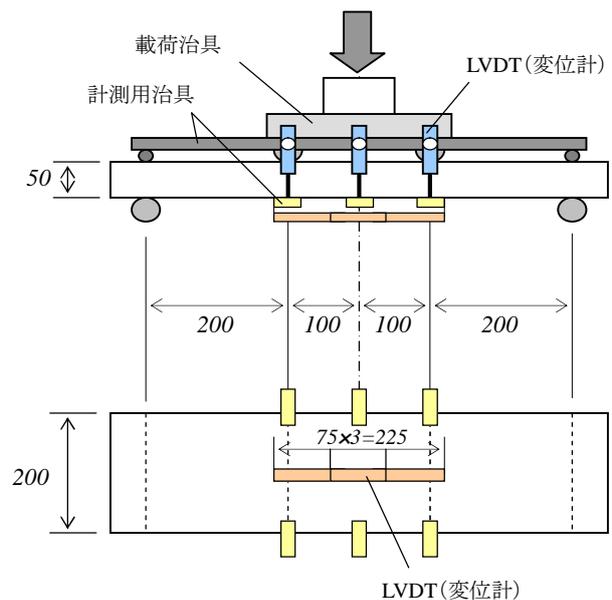


図 - 3 試験要領と測定項目

3. 実験結果

3.1 強度試験結果

圧縮強度、割裂強度、静弾性係数の試験データを表 - 4 に示す。圧縮強度は材齢 28 日で、鋼繊維なしの配合 No.1 で 128 N/mm^2 であり、繊維混入率の増加に伴い少々の強度増加がみられた。割裂強度では、さらに繊維混入率の影響が高く、繊維なしでは 10 N/mm^2 程度に対して $1.6 \text{ vol.}\%$ 混入の配合では 1.5 倍以上の割裂強度を有した。破壊面での鋼繊維の架橋効果が割裂強度の増進に大きく影響していると考えられる。

3.2 曲げ試験結果

(1) 荷重 - 変位関係

無筋の試験体における荷重 - 変位の結果を図 - 4 に示す。それぞれの結果は、同一条件の供試体 3 体の平均値で示されている。また鉛直変位は、図 - 3 に示した載荷点間に取り付けた 6 つの変位計の平均値としている。

鋼繊維を混入していない No.1 では、5 kN 以下でひび割れ後すぐ破断する脆性的な破壊に起こしたのに対し、残りの鋼繊維混入のケースはいずれも初期ひびわれ時の荷重が増加するとともに、ひび割れ後も荷重がさらに増加した。最大荷重到達後は、徐々に曲げ変形が進行し最終的には鋼繊維が抜け出して破断に至った。図 - 4 (a)からは、鋼繊維混入率の増加によって最大荷重が増加し、荷重-変位関係下の面積も増加することが示されている。しかしながら、鋼繊維の配向性が Y 方向、つまり断面に作用する引張力に対して直交方向に配向したケース (No.3, No.5) では、繊維混入率が同等である X 方向のケース (No.2, No.4) に対して最大荷重が約 2~3 割低下し、それにより荷重-変位関係下の面積も約 1/2 に減少した。No.2 と No.5 のケースを比較すれば、鋼繊維の混入率が $0.8 \text{ vol.}\%$ であっても、その繊維が荷重方向の配向であれば、2 倍の混入率 $1.6 \text{ vol.}\%$ に近い曲げ性能が得られる可能性があることを示している。さらに図 - 4 (b)では、鋼繊維が同じ混入率および配向性であっても、アスペクト比 (長さ / 径) が異なる鋼繊維を用いた場合、部材の最大荷重や靱性能が大きく変化することを示している。アスペクト比の大きな鋼繊維を使用した方が、より大きい最大荷重および曲げ靱性を発揮できることを示している。

鉄筋を有する RC 試験体のうち、鉄筋 2 本 (鉄筋比 1.57%) のケースの結果を図 - 5 に、鉄筋 4 本 (鉄筋比 3.14%) のケースの結果を図 - 6 に示す。図 - 4 と同様に (a) は繊維混入率および配向性の影響を (b) にアスペクト比の影響を評価した。荷重 - 変位関係では、無筋試験体における傾向と同様に鋼繊維を混入することによって、最大荷重が増加し、さらに曲げ剛性も高まることを示している。これは混入されている鋼繊維が、断面内

表 - 4 強度試験結果

No.	繊維混入率	アスペクト比	圧縮強度 (N/mm^2)	割裂強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)
	(vol.%)				
1	0	-	128	9.7	45.8
2,3	0.8	81.3	134	14.8	45.9
4,5			141	17.2	47.0
6	1.6	66.7	138	17.4	47.4
7		37.5	141	14.7	46.7

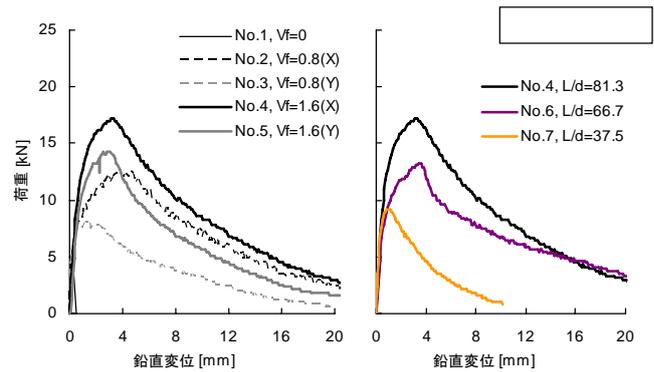


図 - 4 曲げ試験結果 (無筋供試体)

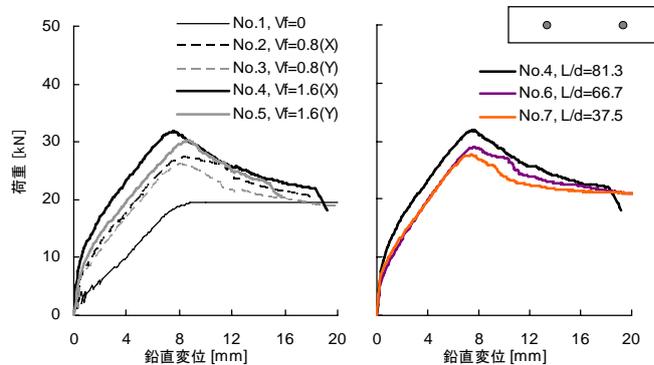


図 - 5 曲げ試験結果 (RC 供試体: $\approx 1.57\%$)

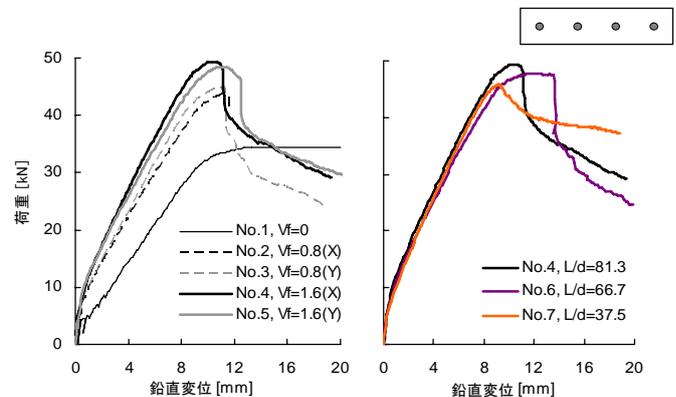


図 - 6 曲げ試験結果 (RC 供試体: $\approx 3.14\%$)

表 - 5 曲げ強度と平均ひび割れ幅

No.	混入率 (vol.%)	アスペクト比 (-)	配向性	曲げ強度 [N/mm ²]			平均ひび割れ幅 ^{*2} [mm]	
				無筋	2本	4本	2本	4本
1	-	-	-	6.80	23.44	41.25	0.50	0.36
2	0.8	81.3	X	14.77	32.81	52.27	0.15	0.09
3			Y	9.61	31.42	53.67	0.15	0.08
4	X		20.63	37.97	59.06	0.11	0.08	
5	Y		17.11	36.09	58.12	0.13	0.09	
6	1.6	66.7	X	15.94	34.92	57.19	0.15	0.08
7		37.5	X	11.02	33.28	55.08	0.18	0.11

*2:20 kN 時の試験体底面の変位を、その間のひび割れ本数で除した値

の引張力を分担し、鉄筋と同様に引張鋼材として十分作用しているためと考えられる。この効果は、鋼繊維の混入率が高いほど、配向性が作用力に平行にあるほど、アスペクト比が大きいほど高い。また図 - 6 に示す鉄筋比 3.14% の RC 試験体における鋼繊維混入のケースは、最大荷重到達後に急激な耐力低下を示しているが、これは鋼繊維の混入により引張鋼材量が増加し、部材の破壊モードが曲げ引張破壊から、部材の圧縮縁での圧壊に変わってしまったためである。

(2) 曲げ強度と平均ひび割れ幅

曲げ試験における最大荷重から計算した曲げ強度の一覧を表 - 5 に示す。鉄筋量の増加によって、当然部材の曲げ強度は増加しているが、鋼繊維混入率の増加によっても、大きく曲げ強度が向上している。その程度は、鉄筋を有する鋼繊維補強モルタル部材の場合、鋼繊維未混入の試験体の曲げ強度に対して、0.8 vol.% の混入で約 30% 増、1.6 vol.% の混入で約 50% 増の曲げ強度の増加がみられた。さらに鋼繊維の配向が X 方向のもの、アスペクト比が高いものほどやや最大曲げ強度が高い。

また表 - 5 には、鉄筋を有する RC 試験体に発生したひび割れ幅も示した。ひび割れの計測については、個々のひび割れ幅計測が困難なため、平均ひび割れとして整理した。平均ひび割れ幅は、試験体底面に取り付けられた 3 つの変位計で得られた変位をその測点間に発生したひび割れ本数で除することで平均ひび割れ幅を計算した。また同条件で比較するため、いずれも荷重 20 kN 時の平均ひび割れ幅を示している。これによると鋼繊維未混入の試験体 (No.1) では、いずれも荷重 20 kN で 0.2mm を越す平均ひび割れ幅であったが、鋼繊維を混入したケースではいずれも 0.2 mm 以下に抑えられていた。代表的な試験体底面のひび割れ図として、図 - 7 に鋼繊維未混入である No.1 試験体の底面の図を、図 - 8 に鋼繊維混入 0.8 vol.% とした No.2 試験体のひび割れ図を示す。図 - 7 より、無筋試験体の曲げ試験では、一箇所にひび割れが発生したと同時に破壊に至ったが、内部に鉄筋を配置することでひび割れはある程度分散された。また、その効

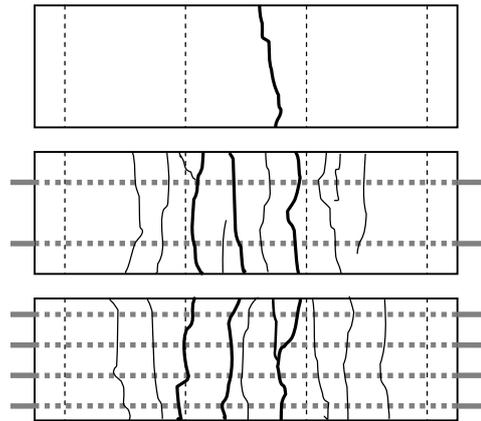


図 - 7 ひび割れ図 (No.1: 鋼繊維なし)

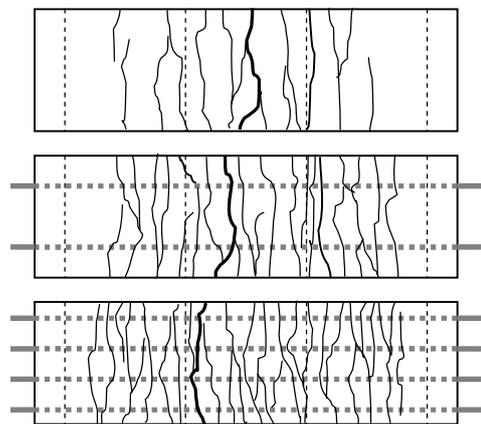


図 - 8 ひび割れ図 (No.2: 鋼繊維 0.8vol.%)

果は鉄筋本数 (鉄筋比) が大きいほど高くなっている。さらに、鋼繊維混入の試験体の結果である図 - 8 と比較すると、無筋の試験体であってもひび割れ面での鋼繊維の架橋効果により、ひび割れは分散された。さらに鉄筋を配置した場合、その鋼繊維のひび割れ面での架橋効果と鉄筋とコンクリートの付着によるテンションステイフニングが複合的に作用し、さらにひび割れ分散性は高まり、個々のひび割れ幅が非常に小さく抑えられた結果となった。

4. 解析評価

4.1 解析概要

鋼繊維を混入したコンクリートもしくはモルタルの耐荷挙動のシミュレーションにおいては、特に引張応力下における力学モデル(応力-ひずみ関係)の構築が重要と考えられる。そこで、前章までに示した高強度繊維補強モルタル板の曲げ試験結果に対し、別途実施された直接引張試験で得られた引張モデルを適用した非線形 FEM 解析を実施した。これより、鋼繊維の混入率が異なる高強度繊維補強モルタルの引張構成則モデル化の妥当性を評価した。

解析モデルを図 - 9 に示す。曲げ供試体の 1/2 を対象とした 2 次元平面応力要素モデルを用いて、実験と同様に載荷点に強制変位を与えた。鉄筋は離散鉄筋モデルとして所定の断面を有した棒要素を要素内に埋め込み、また鉄筋とモルタルとの付着は完全付着とした。

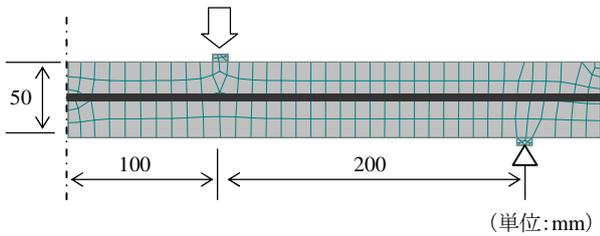


図 - 9 曲げ供試体の FEM 解析モデル

4.2 直接引張試験と引張軟化モデル

同配合の高強度繊維補強モルタルを用いて実施した直接引張試験³⁾の結果を図 - 10 に示す。直接引張試験は図に示したようにダンベル型の試験体を用いて、鉛直方向へ一軸引張荷重を行い、試験体の両側面で計測した変位から同材料の応力-ひずみ関係を抽出した。実験は、鋼繊維の混入率が 0, 0.8, 1.6 vol.% となる 3 配合に対して実施しており、鋼繊維は長さ/径が 13/0.16 mm のものを用いている。なおこの実験では、試験体の作成過程上、鋼繊維の配向性は変えておらず、鋼繊維は鉛直方向に並

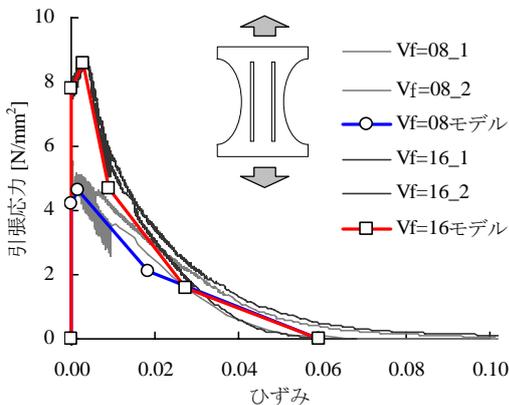


図 - 10 直接引張試験結果と引張軟化モデル³⁾

びやすくなっているため 0.8, 1.6 vol.% のケースは表 - 3 で示す X 配向の No.2 および No.4 の実験ケースに相当する。

図 - 10 は、実験で得られた荷重 - 変位関係から試験体ごとの応力-ひずみ関係を算出したものである。それに対し、各結果の平均をとるように 0.8 および 1.6 vol.% のケースで簡易的にモデル化し、それらを FEM 解析において要素の力学特性として与える引張軟化モデルとした。

4.3 解析結果

無筋の曲げ試験体における実験値と解析値の比較を図 - 11 に、鉄筋が 2 本および 4 本の RC 試験体における実験値と解析値の比較を図 - 12 に示す。いずれも直接引

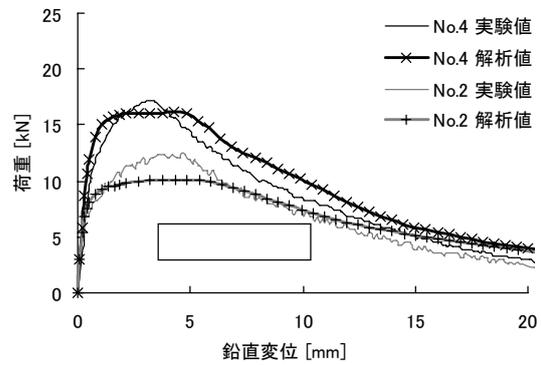


図 - 11 実験・解析結果の比較 (無筋試験体)

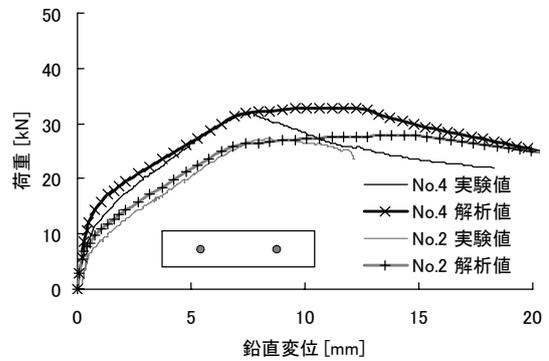


図 - 12 実験・解析結果の比較 (=1.57%)

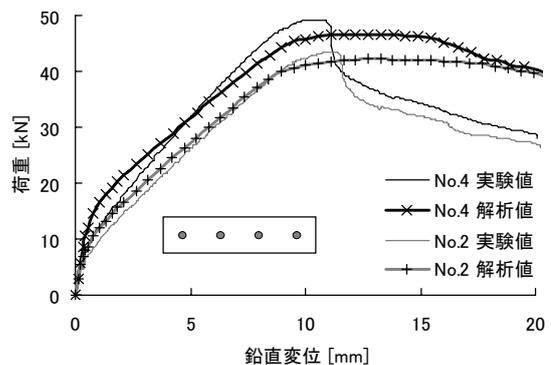


図 - 13 実験・解析結果の比較 (=3.14%)

張試験で得られた引張軟化モデルを要素特性に適用しており、No.2(鋼繊維混入率 0.8 vol.%)および No.4(1.6 vol.%)のケースの比較を示している。無筋試験体の比較では、解析値が実験値に比べて最大荷重近傍で少々の差があるが、ピーク後の軟化領域ではいずれのケースとも実験値に近い挙動を示しており、概ね良好な解析結果を考えられる。また鉄筋を有する RC 試験体の比較では、最大荷重までの挙動は実験値にほぼ近いが、部材の降伏後の挙動で大きく差がみられた。実験では、部材降伏後徐々に荷重が下がっていくのに対して、解析値は荷重の増加に対して、変位がほぼ一定に進行した。先に述べたように、特に 1.6 vol.%の試験体では実際、圧縮縁での破壊を引き起こしたのに対し、FEM 解析結果では曲げ破壊が先行する傾向を示している。この原因としては、解析における要素の力学モデルの中で、圧縮領域における鋼繊維混入の影響を考慮していないことが考えられる。そのため、鋼繊維が材料の圧縮特性に与える影響をさらに把握していく必要がある。また、せん断特性に対しても鋼繊維は多分に影響すると考えられ、今後の課題としてあげられる。

5. まとめ

高強度かつ高靱性の特性をもつ高強度繊維補強モルタルを適用した薄板試験体の曲げ試験およびそれに対する非線形 FEM 解析評価より、以下の結論が得られた。

- (1) 高強度モルタルへ鋼繊維を混入することによって、本来脆性的な材料性能から曲げ靱性の高い材料へと改善された。その効果は、鋼繊維の混入率が高いほど、鋼繊維の配向性が作用引張力に平行なほど、さらに鋼繊維自身のアスペクト比(長さ/径)が高いほど大きい。
- (2) 比較的薄い RC 板部材に高強度繊維補強モルタルを適用した場合、部材の剛性が非常に高くなり、最大(降伏)荷重も鋼繊維未混入のケースと比較して大きく増加した。鋼繊維が引張鋼材として十分荷重分担に寄与していることが示された。
- (3) 鋼繊維の混入によって、部材に発生するひび割れは細かく分散されるとともに、個々のひび割れ幅の低減にも大きく影響することを確認した。
- (4) 高強度繊維補強モルタルを適用した薄板試験体の挙

動解析においては、同材料における直接引張試験の結果から得られる引張モデル(応力-ひずみ関係)を用いて非線形 FEM 解析を行うことで、十分な精度で部材の耐荷挙動がシミュレーションできることを確認した。

本実験に対する評価の中で、鋼繊維の配向性は、部材の耐荷性能やひび割れ分散性能に大きく影響する因子の一つであることが示されたが、今後の課題としてこの配向性自体を定量化し、材料の力学特性に与える影響度を評価する必要がある。さらには、引張・曲げ性能のみでなく、高強度繊維補強モルタルの圧縮性能およびせん断特性を把握することも課題である。これらから、より高精度な非線形部材挙動シミュレーションを可能とするともに、より多くの実験データベースの蓄積によって、この種の材料の力学的モデル構築の一般化を図っていく。

謝辞

本研究は、(財)国際石油交流センター(JCCP)の専門家養成事業の一環で、第一著者がオランダ・デルフト工科大学での留学時に実施した研究成果であります。本業務・派遣を助成していただいた JCCP 関係各位、また研究・実験を指導、協力していただいたデルフト工科大学の職員および学生一同にはこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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)，2004.09
- 2) 塩永亮介,佐藤靖彦,Walraven J.C.:鉄筋を有する高強度繊維補強モルタル部材の引張挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.29，pp.1459-1464，2007.07
- 3) Pansuk W., Sato Y., den Uijl J.A. Walraven J.C.: Influence of Fiber Content on Uniaxial Tensile Behavior of UHPFRC，第 62 回土木学会年次学術講演会，-222，pp.443-444，2007.09