

論文 高強度繊維補強コンクリートの破壊靱性に関する研究

結城 和宏^{*1}・上原 匠^{*2}・小畑 誠^{*3}・信田 佳延^{*4}

要旨：圧縮強度60MPa程度の高強度コンクリートを短鋼繊維で補強した場合の破壊靱性の改善について実験結果をもとに解析により検討を行った。破壊靱性の評価は引張軟化曲線を指標に用いた。引張軟化曲線の推定には曲げ供試体のたわみ荷重曲線をもとに市販の汎用有限要素法プログラムを利用した逆解析手法を用いた。得られた2直線モデルによる引張軟化曲線は修正J積分法によるものと近い形状を示し、この2直線モデルより解析されたひび割れ開口変位はレーザースペックル法で測定した実験値と良く一致した。

キーワード：高強度繊維補強コンクリート、引張軟化曲線、レーザースペックル法

1. はじめに

構造物に対する様々な要求の高まりからコンクリートの高強度化が進められている。しかしコンクリートは高強度になるほど脆性化するために繊維補強による高靱性化が注目されている。普通強度のコンクリートに対しては繊維補強の有効性はすでに多くの報告がなされているが、圧縮強度60MPa以上の高強度コンクリートの繊維補強による靱性化に関する種々の問題についてはまだ十分な検討がなされていない。そこで本研究では高強度コンクリート（圧縮強度60MPa）に短鋼繊維補強コンクリートを施した場合の破壊力学特性について考察した。さらに高靱性化の定量的な評価と設計への適用を考えて、コンクリートの破壊力学パラメータで最も重要と思われる引張軟化曲線の評価に主眼を置いた。引張軟化曲線の推定には実験の比較的容易な曲げ破壊試験の結果をもとに市販の汎用有限要素法プログラムを用いた簡単な逆解析法によって行った。この手法による引張軟化曲線や数値解析結果を他の手法によるものやレーザースペックル法によるひび割れ開口変位と比較し、手法の妥当性と実構造物への適用の可能性を考察した。

2. 実験方法

今回の実験では高強度コンクリートの破壊の特性に対する鋼繊維補強の影響を見るために鋼繊維混入率が0%、1%の2種類について曲げ破壊試験を行った。またひび割れ付近での変形を正確に把握する目的でレーザースペックル法による変位測定も同時に行った。曲げ破壊試験は基本的には「鋼繊維補強

表1 使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント 比重 3.14
細骨材	佐原産山砂 : 上の原産川砂 = 2 : 8 表乾比重 2.59 吸水率 1.47% 粗粒率 2.79
粗骨材	八王子産碎石 (硬質砂岩) 表乾比重 2.64 吸水率 0.68% Gmax 20mm
鋼繊維	長さ 30mm アスペクト比 50 比重 7.85
減水剤	高性能AE減水剤 ポリカルボン酸系 (6S1に使用) AE減水剤 リグニンスルホン酸系 (6F0に使用)
AE助剤	空気連行型 (100倍溶液にして使用)

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (正会員)

*2 名古屋工業大学講師 工学部社会開発工学科、工博 (正会員)

*3 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科、Ph.D.

*4 鹿島建設(株)技術研究所第二研究部第2研究室主任研究員、工修 (正会員)

表2 コンクリートの配合および強度

シリーズ名	目標圧縮強度 (MPa)	繊維混入量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位置 (kg/m ³)							圧縮強度 (MPa)	割裂引張強度 (MPa)	静弾性係数 (×10 ⁴ MPa)
					水	セメント	細骨材	粗骨材	鋼繊維	減水剤	AE助剤			
6F0	60	0	40	42	165	413	711	1000	—	2.48	1.65	68.7	4.50	3.27
6S1	60	1	40	42	178	445	869	754	78.5	7.64	3.11	69.6	5.18	2.90

コンクリート設計指針(案)」にもとづいて行った[1]。表1にコンクリートの使用材料の特性を、表2に各供試体のコンクリートの配合表を示す。標準水中養生後、材齢28日で載荷試験を行った。供試体の形状と載荷装置の概略は図1のとおりである。レーザース

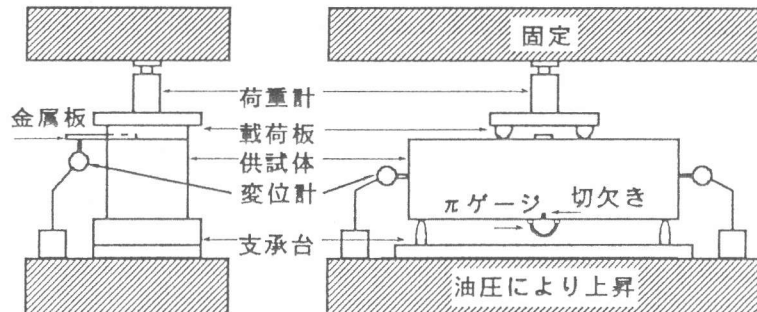


図1 供試体形状と載荷装置

ベックル法によるひび割れ幅の測定を行うために観測面が広く、たわみによる観察面の移動が少ない150×150×530mmの曲げ供試体を用いた。またスパン中央部にはひび割れ発生位置と進行方向を特定するために幅0.5mm深さ10mmの切欠きを設けている。このため載荷時の供試体の向きは打込み時の方向と上下逆とした。曲げ試験は3等分点載荷方式で行い、載荷速度は原則として最大荷重までは荷重制御で100N/sec、最大荷重点以降はたわみ量制御で100μm/min程度とした。測定項目は荷重、たわみ、下縁開口変位そしてひび割れ進行領域近傍での開口変位である。ひび割れ開口変位の測定はレーザースペックル法を用い[2]、図2に示す12点の変位量を測定し、上・中・下の高さにおいて内と外の2点の相対変位量を求めた。このためレーザースペックル法による測定のたびに載荷を停止した。表3に使用した光学設定と精度を示す。表中の精度は剛体変位させた観察面を電気抵抗式変位計(精度1μm)

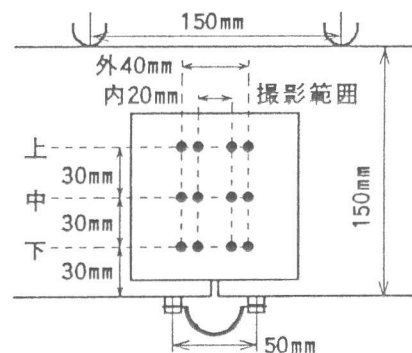


図2 ひびわれ開口変位測定位置

表3 レーザースペックル法の光学設定値および測定精度

レーザー光波長	0.6328 μm
カメラの絞り	F=5.6
カメラの倍率	m=1/3
精度	8.85 μm

とレーザースペックル法とで同時に測定して得た変位量の差の標準偏差である。今回の測定では特定位置間の相対変位量の測定が目的であるため、比較的精度のよい測定領域で測定できるように二重露光撮影間にカメラを観察面の測定する変位と同じ向きに約200μm水平移動させた。

3. 引張軟化曲線の推定

コンクリートのひび割れ破壊挙動を理解する上で最も重要なパラメータは引張軟化曲線である。この引張軟化曲線を求めるには直接引張試験を行うことが理想であるが精度良く安定した結果を得ることはかなり難しいことが知られている。そこで引張軟化曲線をはりの曲げ破壊試験によって推定する方法がこれまでも数多く提案されてきている[3]～[7]。これらの方法にはそれぞれ

に特徴があるが、考え方が直接的で簡単なこと、精度の保証された市販の強力な汎用コードをそのまま使用できること、また得られた結果はそのまま構造解析に応用するデータとして使用できることなどを考慮して本研究では有限要素法をもとにした逆解析手法を用いた。

引張軟化曲線は最も簡単なものの一つである図3のような2直線モデルを用い、パラメータ (f_t, w_1, w_2, s_1) を最小2乗法の意味で荷重たわみ曲線の解析値と実験値が最もよく一致するものを求める。このうち f_t は引張強度に相当するが直接引張試験を行っていないのでこの値として割裂試験により求められた引張強度を1.4で除した値を既知のものとしてを用いた[8]。つまり

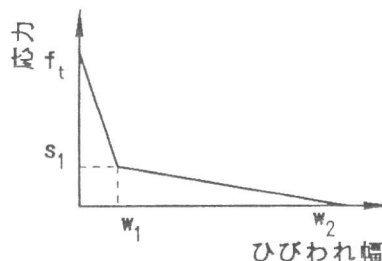


図3 引張軟化曲線のモデル

で表される差 W をできる限り小さい値にするようにパラメータを決定する。これは具体的には非線形最小2乗法を解くことに帰されるがこの解法としては適当な初期値を Gauss-Newton 法による反復法で修正していく方法を用いるものとする[6]。ただし P_M は w_1, w_2, s_1 の陽な関数でないので必要な微分等については数値微分によった。基本となる数値解析には市販の汎用非線形要素法プログラムを用いた[9]。

$$W = \sum_k (P_E(x_k) - P_M(x_k; w_1, w_2, s_1))^2$$

x_k : 観測点でのたわみ P_E : 荷重 (実験値) P_M : 荷重 (解析値)

で表される差 W をできる限り小さい値にするようにパラメータを決定する。これは具体的には非線形最小2乗法を解くことに帰されるがこの解法としては適当な初期値を Gauss-Newton 法による反復法で修正していく方法を用いるものとする[6]。ただし P_M は w_1, w_2, s_1 の陽な関数でないので必要な微分等については数値微分によった。基本となる数値解析には市販の汎用非線形要素法プログラムを用いた[9]。

図4に三等分点載荷による曲げ試験を対象とした要素分割と境界条件を示す。使用した要素はいずれも四辺形平面応力要素である。対称性を考慮しはりの半分を解析対象とした。最大荷重後の挙動も解析する必要があるので荷重載荷点Bに $-y$ 方向の変位を与える変位制御で最大たわみ5mmまでを解析しその範囲の荷重たわみ曲線に対し逆解析を適用した。なお観測点の数は50点とした。今回の曲げ破壊試験では切欠き付きのはりを対象としているのでひび割れはA-A'の面に沿って進行するものと仮定し、そのひび割れを仮想ひび割れモデルにより扱っている。ここで対称性からA-A'に弾性支床モデル[9]を用い、弾性支床のパネの特性を引張軟化曲線に一致するように与えることによってひび割れ開口後も応力を伝達する仮想ひび割れモデルをシミュレーションした。本研究では引張軟化曲線のパラメータ (w_1, w_2, s_1) の初期値を与えると以下 Gauss-Newton 法により修正しつつ数値解析を続けていくコントロールコードを用いて目標とする (w_1, w_2, s_1) を求めた。

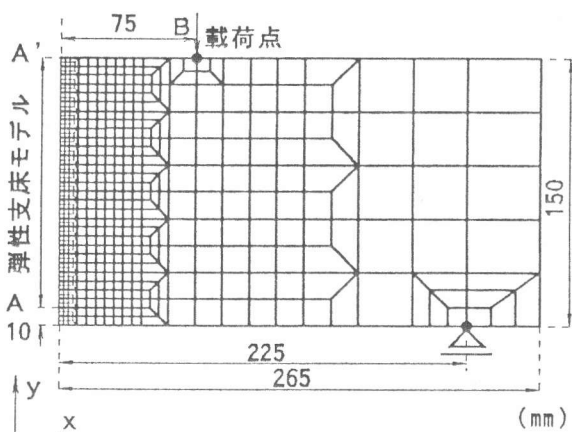


図4 要素分割および境界条件

4. 結果と考察

図5(a)(b)に実験での荷重たわみ曲線を示す。

予想されるように高強度コンクリートにおいても曲げ強度や靱性を高める上で繊維補強が有効であることがわかる。同様の条件で普通強度コンクリートを用いて行った試験の結果[2]と比較した

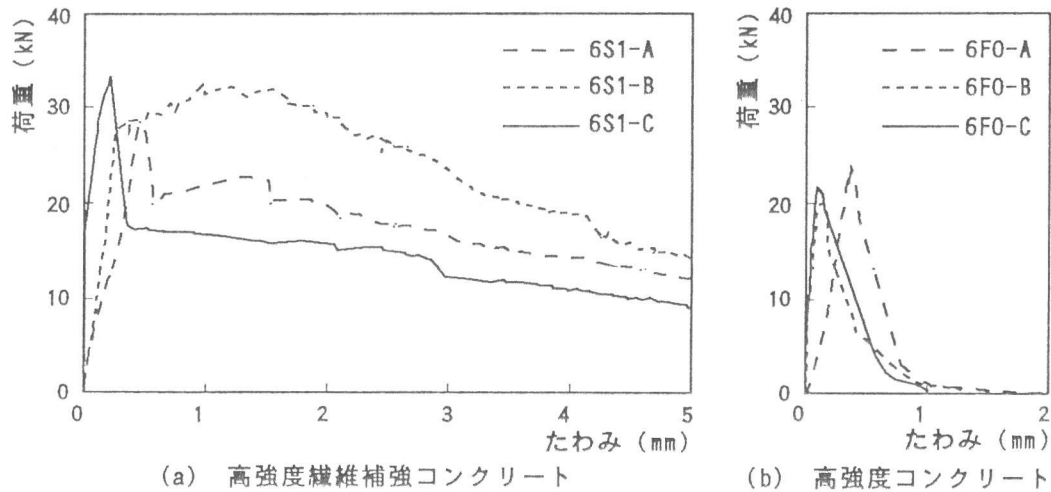


図5 荷重たわみ曲線

のが表4である。繊維の有無に関わらずコンクリートの高強度化にともない、曲げ強度に対する曲げ靱性係数の割合は、2割程度低下する傾向がみられる。しかし、繊維補強による高強度コンクリートにおける曲げ強度の増加率および曲げ靱性係数の増加率は、普通強度のコンクリートにおける増加率と同程度である。

表4 曲げ強度および靱性係数の比較

	曲げ強度 N/mm ²			靱性係数 N/mm ²			靱性係数/曲げ強度		
6 S 1	4.36	4.96	5.10	2.94	4.22	2.60	0.674	0.851	0.510
	4.81			3.25			0.675		
6 F 0	3.61	3.06	3.31	0.505	0.388	0.419	0.140	0.127	0.127
	3.33			0.437			0.131		
3 S 1	3.00	3.68	3.38	2.77	2.86	2.93	0.923	0.777	0.867
	3.35			2.85			0.851		
3 F 0	2.18	2.55	2.48	0.387	0.273	0.496	0.178	0.107	0.200
	2.40			0.385			0.160		

表5 破断面での繊維の分布

高さ (mm)	繊維の本数		
	6 S 1 - A	6 S 1 - B	6 S 1 - C
140~150	45	33	37
130~140	14	22	20
120~130	24	21	13
110~120	20	20	16
100~110	27	20	10
90~100	24	30	15
80~90	35	18	15
70~80	18	21	12
60~70	13	16	9
50~60	14	10	10
40~50	17	13	4
30~40	9	15	4
20~30	7	12	1
10~20	10	21	3
0~10	0	0	0

らつきとして説明することができる。すなわち繊維の分布が供試体下方部で粗な6S1-A, 6S1-C供試体では最大強度後ひび割れが大きく進むために急激な荷重の低下が起こる。このため高強度繊維補強コンクリートにおいても普通強度の繊維補強コンクリートと同様に繊維の分布が一様になるような配慮が大切であると言える。

次に3章で述べた逆解析法の精度を確認する目的で修正J積分法[5]により引張軟化曲線が求め

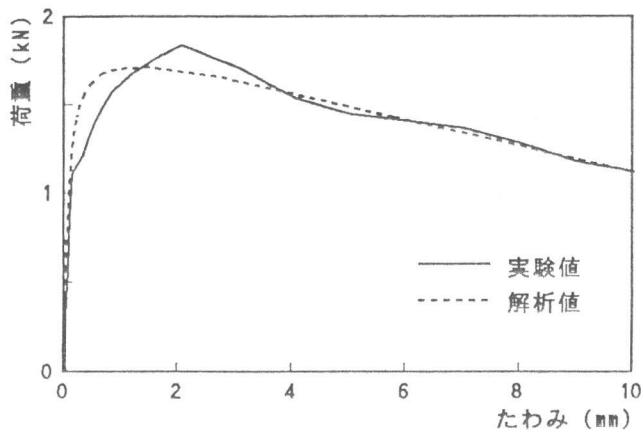


図6 荷重たわみ曲線の実験値と解析値の比較

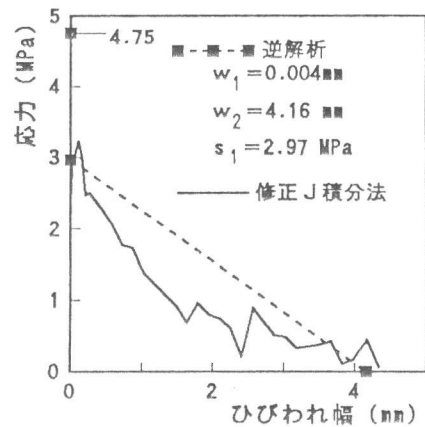


図7 引張軟化曲線

られている高強度鋼繊維補強コンクリート（圧縮強度60MPa）のRILEM試験法による切欠き付き梁の3点曲げ破壊試験の結果[10]に対してこの方法を適用した。この供試体で鋼繊維は本実験のものと同一であるが、繊維混入率は1.2%であり粗骨材は含まれていない。図6に3点集中荷重による曲げ試験の荷重たわみ曲線の実験値と逆解析により求めたものとを比較した。図7から荷重たわみ曲線を用いたデータフィットによる逆解析手法と修正J積分法

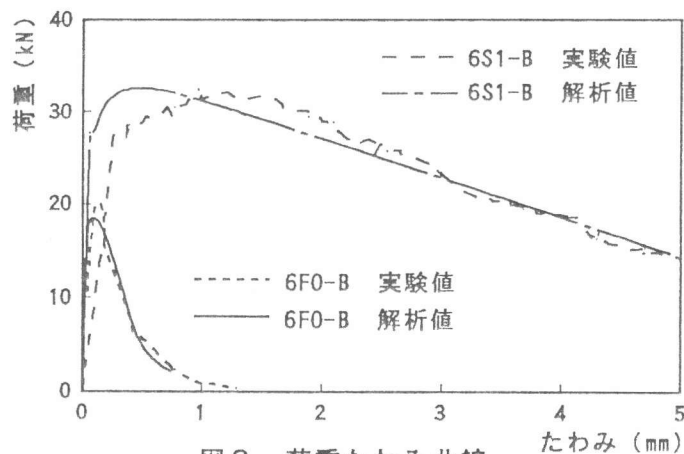


図8 荷重たわみ曲線

による引張軟化曲線は良く一致しており、弾性支床要素により仮想ひび割れモデルによる破壊の進展挙動がよく解析できていることが分かる。なおこの例では事前に行ったパラメータの感度解析の結果を参考にしてパラメータの初期値を与えた。また、各材料定数は実験値により与えた。パラメータの収束状況は比較的良く2、3回程度の修正でこの結果を得た。初期値の選択は重要で、ある程度適当な初期値以外ではパラメータが収束過程で発散しFEMによる解析が不可能になったり物理的に意味のないパラメータの値になったりした。

今回行った3等分点荷重による曲げ試験については破壊面での繊維分布が最も一様であった6S1-B供試体と繊維補強のない6F0-B供試体を対象に逆解析を行った。図8に荷重た

表6 引張軟化曲線の

パラメータ

	f_t (MPa)	w_1 (mm)	w_2 (mm)	s_1 (MPa)
6F0-B	4.50	0.004	0.453	1.20
6S1-B	3.70	0.004	6.80	1.80

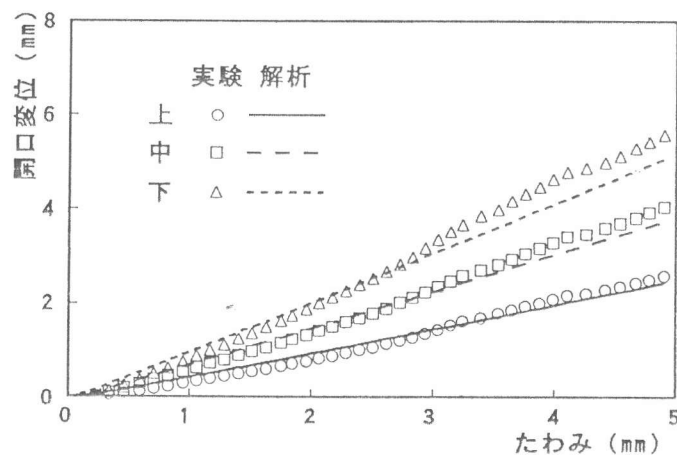


図9 たわみ開口変位関係

わみ曲線の実験値と解析値を、また表6に引張り軟化曲線のパラメータを示した。繊維補強コンクリートに関して図7に示す解析結果と比較すると繊維混入率の違いを考慮しても具体的なパラメータの値についてはやや差が見られる。仮想ひび割れモデルを用いた有限要素法解析がひび割れ近傍も含めて変形状態をどの程度正しく把握できているかを示すために、レーザースペックル法による変位測定の結果との比較を行った。図9が結果であるが、供試体の各高さでのひび割れ開口変位の実験値と解析値はかなり広いたわみの範囲で良く一致している。このことから、本研究で示したように弾性支床要素を用いると市販の汎用有限要素法プログラム解析で単にはりの曲げ耐荷力だけでなくひび割れ近傍の変位等の局所的な変形挙動も含めて精度よく解析でき、設計を含めた実用的な解析に適用することができる考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた結果は次のようにまとめることができる。

- (1) 繊維補強コンクリートにおいても高強度化による脆性化の傾向が現れるが、繊維補強による曲げ強度・曲げ靱性係数の増加率は高強度になっても同程度であり、繊維補強が高強度コンクリートに対しても有効であると言える。
- (2) 市販の汎用有限要素法プログラムを応用した逆解析により、曲げ破壊試験の結果から高強度繊維補強コンクリートにたいしても引張軟化曲線を求めることができた。この引張軟化曲線は他の方法で求めたものと比較的良好に一致した。またレーザースペックル法によるひび割れ幅測定の結果ともよく一致するものであった。したがって、これらの結果は設計を含めた実用的な構造物の解析へと応用できる見込みがあることが示された。

参考文献

- 1) 鋼繊維補強コンクリート設計・施工指針案、(社)鋼材倶楽部スチールファイバー委員会、pp77-88、1990.5
- 2) 上原匠、梅原秀哲、吉田彌智、信田佳延：繊維補強コンクリート梁のひび割れ先端における微小変形に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16、NO. 2、pp. 51-56、1994
- 3) Li, V.C. and Ward, R.J.: A novel testing technique for Post-peak tensile behavior of cementitious materials, fracture toughness and fracture energy, Balkema, 1989, pp. 304-308
- 4) 六郷恵哲、岩佐正徳、小柳治：J積分法を用いたコンクリートの引張軟化曲線の定量化、セメント・コンクリート論文集、No. 43、1989、pp. 304-309
- 5) 内田裕一、六郷恵哲、小柳治：曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測、土木学会論文集、第42巻、第26号/V-14、1991.2、pp. 203-212
- 6) Roelfstra, P.E. and Wittmann, F.H.: Numerical method to link strain softening with failure of concrete, Fracture toughness and fracture energy of concrete, 1986, pp. 163-175
- 7) Horii, H. and Nanakorn, P.: Fracture mechanics based design of SFRC tunnel lining, JCI International workshop on size effect in concrete structures, 1993, pp. 347-358
- 8) 趙力采、小林一輔、西村次男：鋼繊維補強コンクリートの引張強度試験方法について、コンクリート工学年次講演会講演論文集、pp. 405-408、1979
- 9) 日本マーク株式会社：非線形構造解析FEMプログラム MARC K-4 マニュアル、vol. A-E2、1992
- 10) 鹿島技研 未発表試料