

論文 超軽量繊維補強コンクリートの破壊特性に関する研究

高橋仁智*1・橘高義典*2・小野山貫造*3・吉岡昌洋*4

要旨： 軽量骨材と起泡剤を使用し短繊維を分散混入した超軽量繊維補強コンクリートの破壊特性に関する基礎的実験を行った。切欠き梁3点曲げ試験を行い荷重-荷重点変位曲線を求め、ひび割れの進展に伴う靱性能を実験検討し、さらに逆解析により引張軟化曲線を求めエネルギー吸収能を詳細に検討した。本研究の結果、比重1で約20MPaの圧縮強度の軽量コンクリートが得られ、それらは気泡の混入によりさらに軽量化が図れ、短繊維の混入により靱性能も向上することが明らかとなった。

キーワード： 軽量コンクリート, 短繊維, 起泡剤, 破壊力学

1. はじめに

カーテンウォール等の二次部材や増設耐震壁には、自重の軽い軽量コンクリートを用いることが望ましい。これらの部材には強度の確保とともに十分な靱性能を有する事が必要となる。しかし、低強度な人工軽量骨材を使用した軽量コンクリートは脆性的な破壊形態を示す。そこで、高強度モルタルマトリックスにより強度増進をはかり、さらに短繊維を混入し、破壊時のエネルギー吸収能を向上させる高強度繊維補強軽量コンクリートの研究が増えている。一方で、モルタルの高強度化は粉体量の増加によりマトリックスの比重を増加させ、軽量骨材の浮遊・分離などの問題を生じる。そこで本報告では、モルタルマトリックス中に多量の気泡を連行し、マトリックス比重を軽量骨材に近づけ適度な分離抵抗性及びワーカビリティを有する、超軽量繊維補強コンクリートについて実験検討する。まず、マトリックス強度、空気量、繊維長、繊維混入量などを変化させた軽量コンクリートを作製し、フレッシュ性状及び力学性状を把握した。さらに、靱性能の評価として切欠き梁の3点曲げ試験を行い引張軟化曲線を求め破壊特性について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

表-1に使用材料を示す。セメントには早強セメント、骨材には発泡ガラス骨材、混和剤には高性能AE減水剤を使用した。水結合材比(W/B)は20%と30%とし前者にはシリカフュームを使用した。起泡剤には樹脂酸塩基系AE剤を使用し添加量を粉体重量の0%、0.5%、1.0%の3段階とした。表-2に使用した短繊維の種類と物性を示す。短繊維は既報より高強度コンクリートの靱性能改善効果に有効であると考察されたビニロン繊維を選定し、その容積混入率を1%とした。ま

表-1 使用材料

C	セメント	早強ポルトランドセメント 比重 3.20
SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系と架橋ポリマーの重合体
GL	発泡ガラス骨材	1号:2号:3号=8:1:1 比重 0.70
SF	シリカフューム	SiO ₂ 96.8% 比重 2.20
AE	AE剤	アルキルアリルスルホン酸化合物系
FA	起泡剤	樹脂酸塩基系AE剤

表-2 繊維の性質

記号	種類	比重	繊維長 (mm)	繊維径 (μm)	引張強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)
VF	ビニロン	1.30	15, 30	240×720	900	29

*1 東京都立大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生 (正会員)
 *2 東京都立大学大学院工学研究科建築学専攻 助教授・工博 (正会員)
 *3 東京都立大学大学院工学研究科建築学専攻 助手・工修 (正会員)
 *4 東京都立大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生

表-3 試験体の計画調合

記号	繊維長 (mm)	添加量 (%)	起 泡 剤 (%)	W / B	計画調合 (kg/m ³)							繊維	
					水	セ メ ン ト	骨 材	混和材					VF
								W	C	GL	SF		
1-a	-	-	-	-	150	677	-	75	30.1	-	4.5	-	
1-b	30	0	-	-	147	660	-	73	29.3	-	4.4	13.0	
1-c	15	-	-	-	147	660	-	73	29.3	-	4.4	13.0	
2-a	-	-	-	20	150	677	-	75	30.1	3.8	4.5	-	
2-b	30	0.5	-	-	147	660	-	73	29.3	3.7	4.4	13.0	
2-c	15	-	-	-	147	660	-	73	29.3	3.7	4.4	13.0	
3-a	-	-	-	-	150	677	-	75	30.1	7.5	4.5	-	
3-b	30	1.0	-	-	147	660	-	73	29.3	7.3	4.4	13.0	
3-c	15	-	-	-	147	660	-	73	29.3	7.3	4.4	13.0	
4-a	-	-	-	-	194	647	420	-	6.5	-	3.9	-	
4-b	30	0	-	-	189	631	-	-	6.3	-	3.8	13.0	
4-c	15	-	-	-	189	631	-	-	6.3	-	3.8	13.0	
5-a	-	-	-	30	194	647	-	-	6.5	3.2	3.9	-	
5-b	30	0.5	-	-	189	631	-	-	6.3	3.2	3.8	13.0	
5-c	15	-	-	-	189	631	-	-	6.3	3.2	3.8	13.0	
6-a	-	-	-	-	194	647	-	-	6.5	6.5	3.9	-	
6-b	30	1.0	-	-	189	631	-	-	6.3	6.3	3.8	13.0	
6-c	15	-	-	-	189	631	-	-	6.3	6.3	3.8	13.0	

た、混入する繊維は長さ30mm (試験体b) と15mm (試験体c) の2種類を用意した。表-3に試験体の調合条件を示す。

混練には30リッター二軸強制練りミキサーを使用し、空練りを30秒間行い、加水して90秒間、起泡剤を添加し混練後、短繊維を少しずつ投入しながら計7分間の混練を行った。

圧縮強度試験用供試体の寸法はφ100×200mm、破壊靱性試験用の曲げ試験体の寸法は100×100×450mmとし、各条件につき3本ずつ作製した。試験体は打設後2日で脱型し、その後20℃の水中で材齢8週まで養生した。表-4に各試験体のフレッシュコンクリートでの性状及び硬化後の圧縮強度試験結果を示す。

2.2 破壊靱性試験の概要

破壊靱性試験はRILEM法²⁾に準じた切欠き梁の3点曲げ試験とした。100×100×450mmのはり試験体の中央にダイヤモンドカッター (刃厚1mm) により、梁せいの半分 (50mm) の切欠きを入れた。支持点スパンは400mmである (スパンはりせい比 4)。

また破壊に要するエネルギー変化を精度良く把握するためには、安定破壊を得ることが重要となる。そのための試験装置として、クローズドループシステム (閉回路機構) を有するサーボ・コントロール式油圧試験機 (MTS社製) を用いた。本試験機は3点曲げによる破壊靱性試験を念頭に置き、特に変位制御を容易にするためフレーム剛性を高めている。試験機は図-1に示すように、加力部、制御装置、油圧装置等からなる。制御装置では、変位計およびロードセルからのフィードバック信号により、油圧サーボバルブを調節し定変位、定荷重制御を行うことができる。

本報告では切欠き端部のひび割れ開口変位 (CMOD) の変位速度を安定破壊が得られるようプレーン試験体では $V_p=0.02$ mm/min、繊維混入試験体では $V_p=0.04$ mm/minに設定した。CMODの計測には変位制御用の高感度クリップゲージ (MTS-632.02) を用いた。さらに荷重

表-4 各試験体の性質

記号	試験結果				
	ス ラ ン プ (cm)	ス ラ ン プ ロ ッ プ (cm×cm)	比 重	空 気 量 (%)	圧 縮 強 度 (Mpa)
1-a	28.5	80×79	1.31	3.5	32.6
1-b	18.6	-	1.32	2.3	37.1
1-c	25.0	-	1.35	0.0	38.6
2-a	27.0	54×56	0.86	36.6	11.2
2-b	26.5	49×50	0.87	35.4	12.8
2-c	26.5	47×50	0.89	33.7	18.5
3-a	19.0	30×32	1.06	22.0	20.7
3-b	23.5	43×40	0.80	41.0	6.5
3-c	21.5	35×35	0.88	35.0	9.6
4-a	26.5	-	1.17	9.3	26.1
4-b	22.1	-	1.21	6.0	29.5
4-c	21.9	-	1.21	5.9	29.5
5-a	26.0	48×48	0.85	34.5	9.7
5-b	25.5	48×48	0.83	35.4	7.9
5-c	25.5	50×52	0.83	36.0	7.5
6-a	25.0	45×48	0.84	34.7	7.7
6-b	25.0	47×48	0.77	40.1	5.8
6-c	25.5	46×53	0.82	36.0	8.6

*) 空気量10%以上は打設後の比重と調合から算定

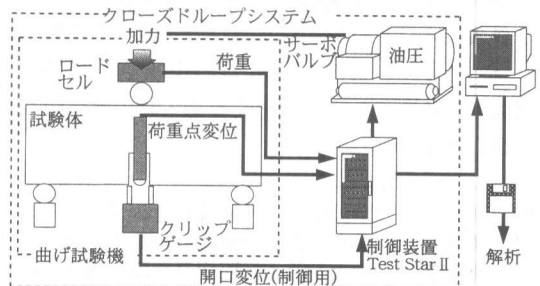


図-1 システムフローチャート

点わきの2本の変位計により荷重点変位を計測し、引張軟化曲線解析用のデータとした。荷重点変位の計測には、特製のアタッチメントを使用し、計測精度を上げるとともに変位計のセッティングを簡便にした。また、変位計は試験体に固定した治具に取り付け、試験体載荷部のくぼみによる変位計測の誤差を取り除いた。試験体および変位計の取付け概要を図-2に、変位計取付け部の詳細を図-3に示す。

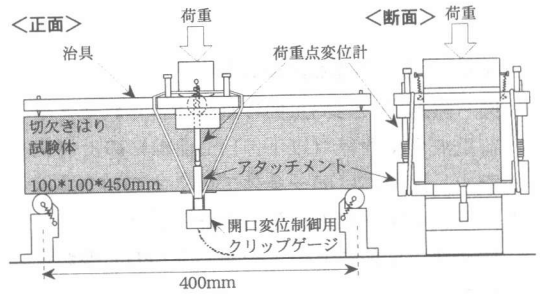


図-2 試験体および変位計取付け概要

3. 引張軟化曲線の多直線近似解析

本解析では切欠き梁 3 点曲げ試験等の破壊靱性試験から得られる荷重-荷重点変位曲線を基に、多直線近似法³⁾により引張軟化曲線を求めた。本解析法はひび割れ進展解析を進めながら多直線型の引張軟化曲線を逐次最適化し求めるものである。材料の本質的な引張強度の評価値となる引張軟化曲線の初期結合応力は、初期ひび割れの進展 (5mm) に対し、一時的に軟化勾配を 0 と仮定し (完全塑性型)、ひび割れ進展解析結果と実際の荷重-荷重点変位曲線とが合致するように求めた。

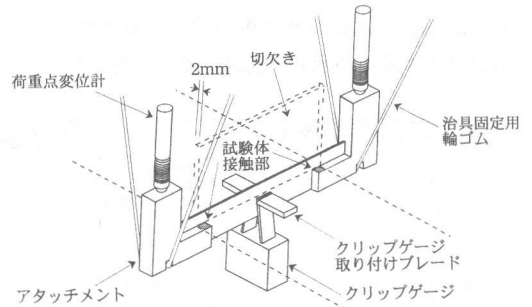


図-3 変位計取付け部詳細

4. 試験結果および考察

4.1 比重および空気量と圧縮強度の関係

比重 (打設時) 及び空気量と圧縮強度との関係を図-4にそれぞれ示す。比重が大きくなるほど圧縮強度は大きくなり、両者はほぼ比例関係にある。本実験での材料条件により、比重1で約20MPaの圧縮強度が得られた。起泡剤混入の試験体では、空気量が10%以上となりエアメータでの計測が不可能であったので、打設時の比重と調合条件から算定し求めた。図-4より、空気量が大きくなるほど圧縮強度は小さくなりこちらもほぼ負の比例関係にある。起泡剤の添加量の影響は、0.5%の添加量で十分な気泡が得られると考えられる。なお、表-4に示すように、気泡混入のコンクリートにおいても、十分なスランプ値が得られており、ワーカビリティの問題はなかった。

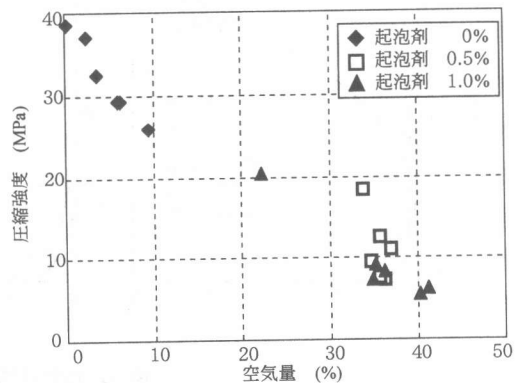
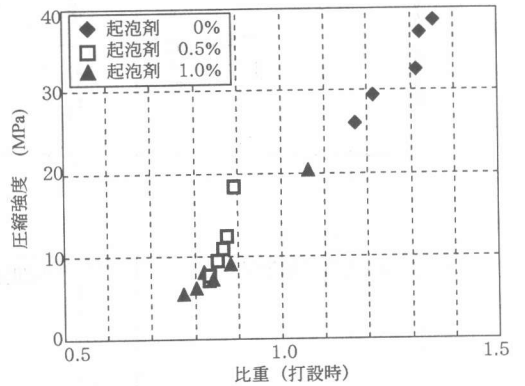


図-4 比重(打設時)及び空気量と圧縮強度の関係

4.2 荷重-荷重点変位曲線

図-5に切欠き梁3点曲げ試験で得られた荷重-荷重点変位曲線（以下、LPD曲線）の計測例を示す。図中には同一条件での3本のLPD曲線と、それらを平均化したものを示した。全ての変位速度の条件において安定したLPD曲線が得られた。

図-6に各試験条件で平均化したLPD曲線を調査条件別に示す。プレーンコンクリート（PL）に関しては、W/B=20%はW/B=30%に比べて、最大荷重は大きいが最大荷重以降の下降度が大きい

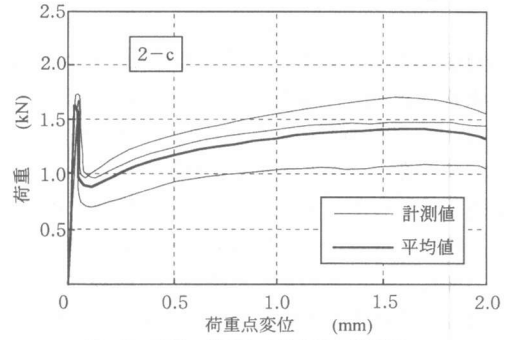


図-5 荷重-荷重点変位曲線の計測例

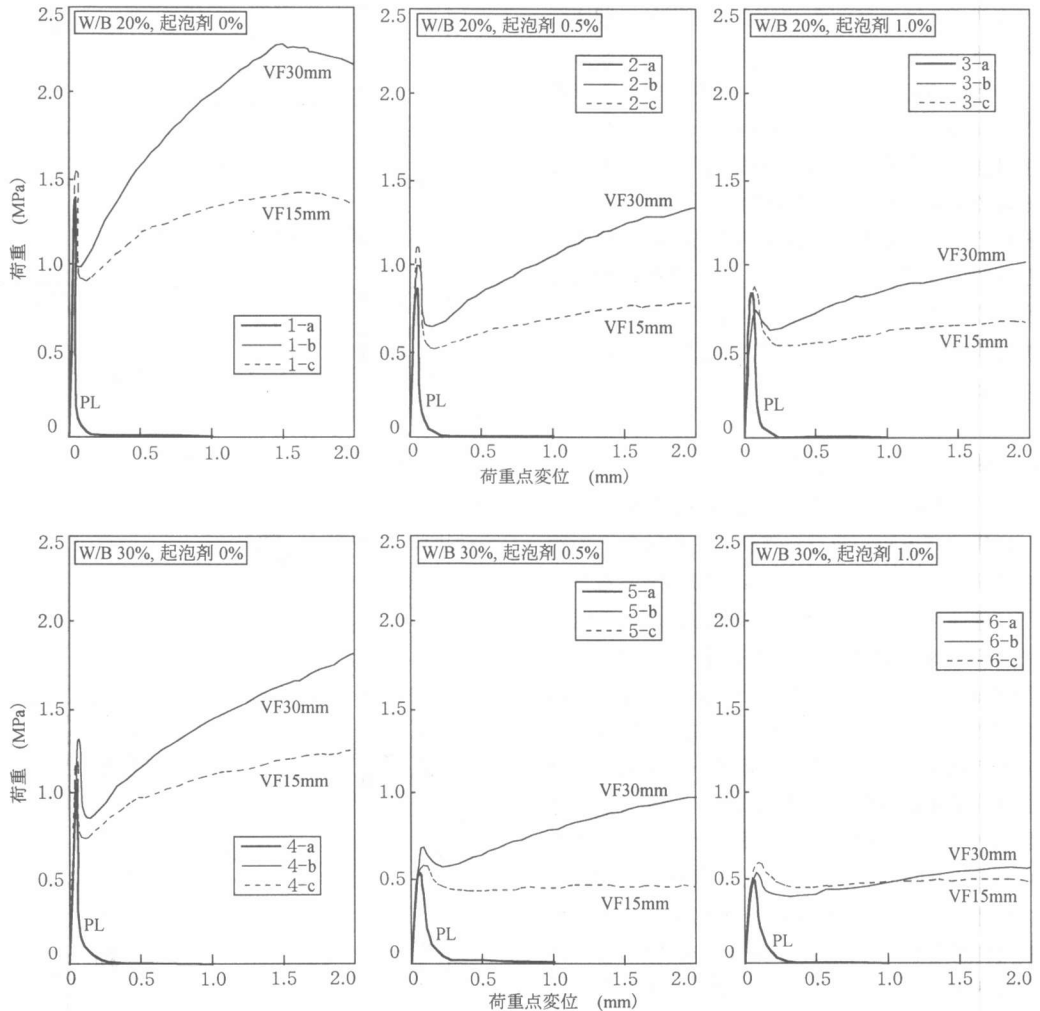


図-6 荷重-荷重点変位曲線（平均化）

く脆性的な傾向を示している。この理由として、ペースト強度が増加するほど、相対的に骨材の強度が低下することで、脆性的な破壊が起こりやすくなることが考えられる。しかしながら、 $W/B=20\%$ 、 $W/B=30\%$ とも短繊維(VF)を混入することにより、最大荷重以降の曲線の伸びが大きくなり靱性が大きく向上する。特に最大荷重直後に一旦荷重が低下するが、その後再び荷重が増加する硬化現象を示す。最大荷重以降の曲線の膨らみは、 $W/B=20\%$ が $W/B=30\%$ に比べて大きく、繊維混入(VF)の場合にはプレーン(PL)とは逆に、高強度のペーストの方が靱性に優れる。全体的に、気泡剤の混入により最大荷重

および曲線で囲まれる面積は小さくなる。繊維混入モルタルに関しては、繊維長が15mmよりも30mmの方が曲線で囲まれた面積は大きくなり靱性に優れる傾向にある。この理由は、繊維混入量が同一であっても繊維長が長いほど、一本の繊維の付着面積が大きく伝達力が大となり、ひび割れ進展に対する抵抗力が増加するためと推察できる。

4.3 引張軟化曲線

図-7にLPD曲線から多直線解析によって求めた引張軟化曲線(TSD)を示す。TSDはLPD曲線を反映しており、LPD曲線で靱性に優れるものはTSDの軟化度が緩やかであり、TSDで囲ま

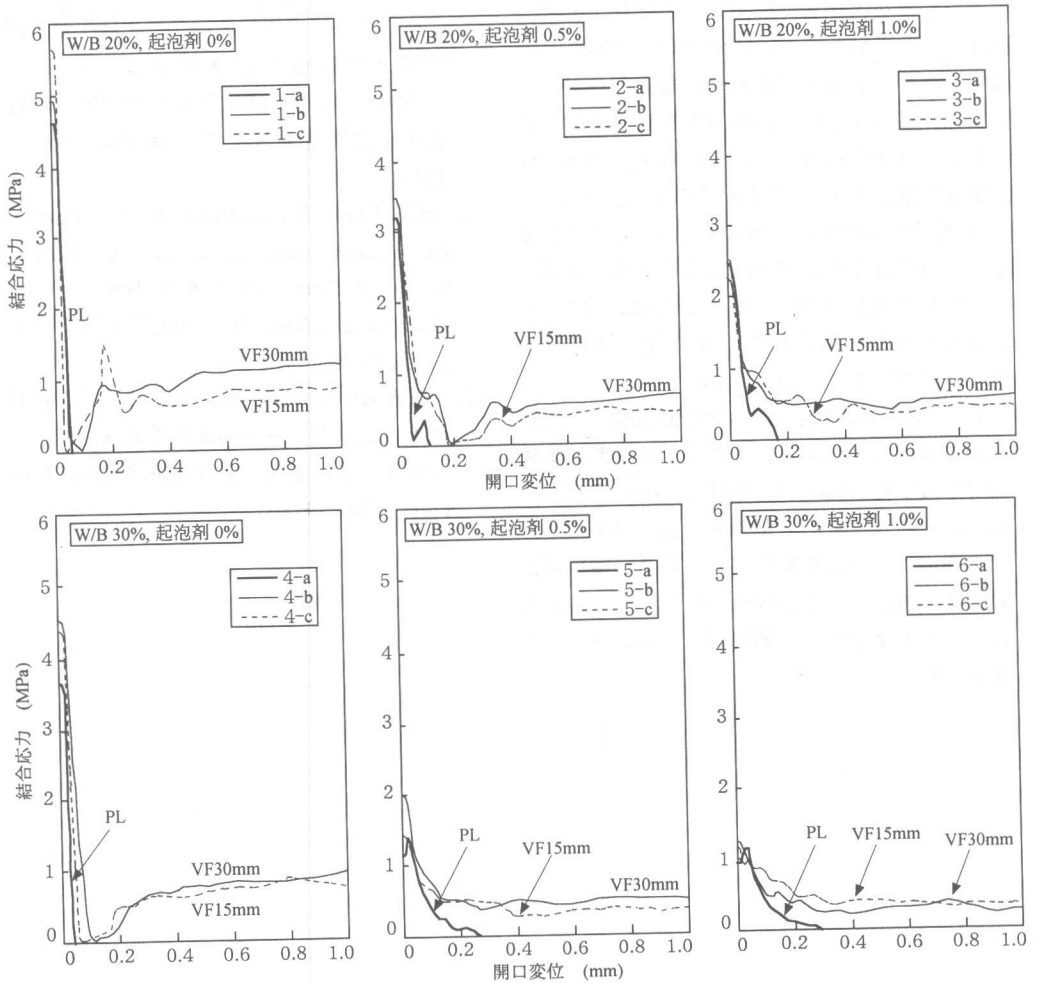


図-7 引張軟化曲線 (平均化)

れた面積も大きくなる。繊維混入試験体 (VF) においては一時的に右上がりあるいは横這いとなる引張硬化の傾向がみられる。また、一部の繊維混入試験体では初期の軟化により結合応力が0となる場合もある。この理由として、初期の軟化性状はモルタルマトリックスの性状を反映するため、特にモルタルの破壊が脆性的な場合には、繊維のブリッジ作用が有効に生じる開口変位に達する以前に、モルタルが限界ひび割れ開口変位に達してしまい伝達応力が0となることが考えられる。

5. まとめ

マトリックス強度、空気量、繊維長、繊維混入量などを変化させた試験体の切欠き梁3点曲げ試験を行い、荷重-荷重点変位曲線から求めた引張軟化曲線を求め、超軽量繊維補強コンクリートの靱性能を検討した。その結果、今回行った実験の範囲で以下のことが明らかとなった。

1) 比重が大きくなるほど強度は大きく、空気量が大きくなるほど強度は小さくなり、両者ともほぼ比例関係にある。本実験では比重1で約20MPaの強度が得られる。起泡剤の添加量は0.5%で十分な気泡が得られる。

2) 繊維混入試験体はプレーン試験体に比べ靱性能は著しく向上する。さらに、繊維混入試験体でも繊維長が15mmの試験体と30mmの試験体を比較すると後者の方が靱性能は大きくなる。この理由は、モルタルマトリックスと繊維の付着面積が30mmの試験体の方が大きく、引き抜けに対するエネルギー消費が大きくなるためと考えられる。

謝辞

本研究を行うに当たり、実験にご協力頂いた、東急建設(株)・大岡督尚氏、ご助言頂いた(株)フジタ・青木治雄氏に深く感謝いたします。さらに、試料を提供してくださった、山宗化学(株)、(株)サンライト、クラレ(株)に感謝の意を表します。

著者の1人、小野山貫造氏におかれましては1999年2月28日に逝去されました。ご冥福をお祈り申し上げます。

参考文献

- 1) 橘高義典, 大岡督尚: 高強度モルタルマトリックスの破壊パラメータに及ぼす短繊維の影響, -高強度繊維補強コンクリート(HFRC)の破壊性状に関する研究-, 日本建築学会構造系論文集, No.497, pp.1-8. 1997.7
- 2) RILEM Draft Recommendation, Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-point Bend Test on Notched Beams, Materials and Structures, Vol.18, No.106, pp.285~290, 1985.
- 3) 橘高義典; 引張軟化曲線の多直線近似解析によるコンクリートの弾塑性破壊パラメータの評価, 日本建築学会構造系論文集, No.469, pp.17~24, 1995.3