

論文 超軽量繊維補強コンクリートパネルの曲げひび割れに及ぼす繊維補強の影響

高橋仁智*1・橋高義典*2・田村雅紀*3・吉岡昌洋*1

要旨: 超軽量繊維補強コンクリートパネルの曲げ破壊時のひび割れ発生に及ぼす繊維補強の影響に関し実験を行った。くさび割れ試験より引張軟化曲線を求めエネルギー吸収能を評価し、パネルの曲げ試験よりその破壊形態及びひび割れ形態との関係について検討した。本研究の結果、人工軽量骨材や空気泡を用いた試験体は短繊維を混入する事で普通コンクリートと同等以上の靱性能が得られ、空気泡と短繊維を使用することでひび割れ・歪みの集中を分散でき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, ひびわれ分散

1.はじめに

近年、軽量骨材の開発が多くなされているが、その使用目的には、高強度部材の軽量化という目的の他にも、同一強さ・重量で部材断面を厚く出来、部材剛性、断靱性等の建築性能に優れる部材を得られる点がある。このような容積効果としての骨材の役割を押し進めると、最も軽量でかつ効率のよいものは空気泡ということになる。枯渇化、低品質化、環境破壊などが問題となってきた天然骨材の代わりに独立気泡あるいは気泡を多く含む人工骨材を使用し、高強度ペーストマトリックスと組み合わせることで、効率的なコンクリート部材が得られる。特に二次部材や増設耐震壁などの軽量かつ壁厚が必要な部材への適用が考えられる。

従来の軽量気泡コンクリートは、強度の面で不十分であり、通常は特殊養生を必要とした。しかしながら現在の高強度化技術により常温での製造も可能と考えられ、省資源・省エネルギーに対しても有利であり、空気泡のみの使用では全量がセメント原料として再利用可能な材料となる。一方で、気泡を含むコンクリートにおいては、ひび割れ、収縮、引張に対する靱性等の性能低下が危惧されるが、この点については

短繊維混入による靱性向上が有効と考えられる。

本報告では、高強度ペーストマトリックス中に空気泡、人工軽量骨材、短繊維を混入した超軽量繊維補強コンクリートを作製し、引張軟化曲線から破壊特性を検討するとともに、建材用パネルの曲げ試験を行い、その破壊形態及びひび割れ形態に及ぼす繊維補強の影響について検討した。

2.実験概要

2.1 試験体の概要

表-1に使用材料を示す。セメントには二次部材への適用を考慮し早強セメントを用いた。細骨材にはガラス廃材による発泡人工軽量骨材、混和剤には高性能AE減水剤及びAE剤、短繊維には既報¹⁾より高強度コンクリートの靱性改善効果に有効であるとされたピニロン繊維を使用し

表-1 使用材料

記号	材 料	性 質
C	セメント	早強ポルトランドセメント 比重3.20
SF	シリカフェーム	SiO ₂ 96.8% 比重2.20
VF	ピニロン繊維 (RF1500)	比重1.30 繊維長30(mm)、繊維径240×720(μm) 引張強度900(GPa)、ヤング率29(GPa)
GL	発泡ガラス骨材	1号:2号:3号=8:1:1、比重0.70 最大径5mm
SP	ポリカルボン酸エーテル系	比重1.0 (SP8HE)
AE	アルキルアリルスルホン酸化合物系	比重1.0 (MA303A)
FA	アニオン酸系特殊界面活性剤	比重1.0 (FA200)
S	八王子市美山産砕砂	表乾比重2.62
G	八王子市美山産砕石	表乾比重2.66

*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 (正会員)

た。水結合材比 (W/B) は20%、起泡剤添加の有無、短繊維混入の有無により試験体を作製した。表-2に試験体の調査条件を示す。

混練には容量70リッターのオムニミキサーを使用した。あらかじめ空練りを十分に行い、短繊維と粉体を均一に分散させた後、あらかじめ混合された水、高性能AE減水剤、起泡剤を投入し、混練を行った。

圧縮強度試験用の試験体は、φ100×200mmの寸法で3体、くさび割裂試験用の試験体は、100×100×120mmの寸法で3体、パネルの曲げ試験用の試験体は300×100×900mmで2体とし、各調査条件毎に作製した。試験体は打設後1日で脱型し、その後20℃の水中で材齢12週まで養生した。表-3に各試験体のフレッシュコンクリート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

破壊靱性試験は引張破壊試験として、モードI型 (引張型) の破壊が小試験体で得られるくさび割裂試験を行った。100×100×120mmの中央にダイヤモンドカッター (刃厚1mm) により、高さの半分 (50mm) の切欠きをいれた。

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) を使用した。本試験機は図-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、クリップゲージ及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することで定変位・定荷重制御を行うことができる。

本報告では、くさび割裂試験を行うに当たり特製の治具を作製した。図-2にくさび割裂試験概要を示す。また、切欠き端部の開口変位 (CMOD) の変位速度を安定破壊が得られるようにプレーン試験体は0.0005mm/min、繊維混入試験体は0.002mm/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

表-2 試験体の計画調合

記号	W/B (%)	起泡剤添加量 (%)	質量 (kg/m ³)				空気量を0%で計算			
			水 W	セメント C	骨材 GL	混和材 SF	混和剤			繊維 VF
							SP	FA	AE	
LP	20	0	121	677	420	75	30.1	—	4.5	—
LPa	20	1.0	113	677	420	75	30.1	7.5	4.5	—
LF	20	0	118	660	420	73	29.3	—	4.4	13.0
LFa	20	1.0	110	660	420	73	29.3	7.5	4.4	13.0

* 混合比(容積)1号:2号:3号=8:1:1

表-3 各試験体の性質

記号	W/B (%)	質量 (kg/m ³)			
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
NC	65	180	277	756	1152

記号	スランプ (cm)	スランプフロップ (cm×cm)	比重	空気量* (%)	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
LP	25.5	50×50	1.29	4.73	37.4	14.7
LPa	23.5	39×39	1.04	23.79	17.6	8.6
LF	24.0	47×46	1.29	4.25	41.7	13.3
LFa	24.5	46×46	1.02	24.42	19.6	8.5
NC	16.5	19×18	2.35	0.66	27.6	29.3

* 気泡剤添加剤の空気量は打設後の比重と調合から算定

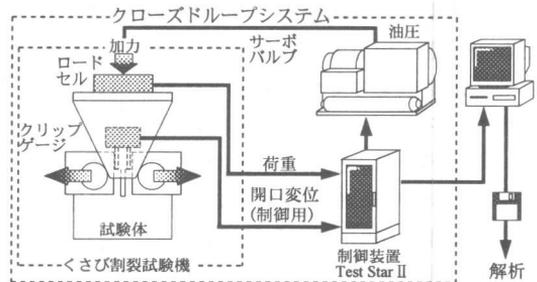


図-1 システムフローチャート

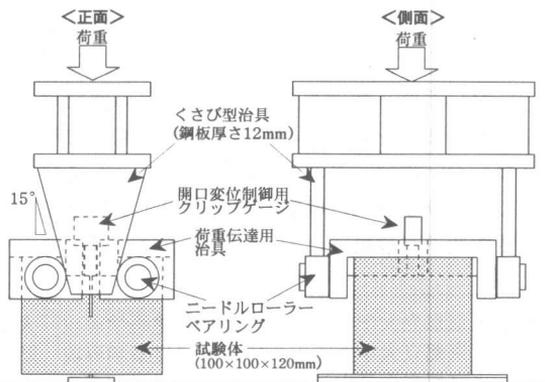


図-2 くさび割裂試験概要

-632.02) を用い、これより得られる開口変位及び荷重を引張軟化曲線解析用のデータとした。引張荷重 (P_h) は次式により鉛直荷重 (P_v) とくさび角度 θ から換算した。

$$P_h = \frac{P_v}{2 \tan \theta} \quad (1)$$

2.3 引張軟化曲線の多直線近似解析

本解析はくさび割裂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²⁾により引張軟化曲線を求めた。引張軟化曲線の初期結合応力は材料の本質的な引張強度の評価値となる。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。

2.4 パネルの曲げ試験の概要

試験には100tonfアムスラー式万能試験機を使用した。支点間スパン800mm、等分布荷重スパン400mmの2線荷重試験とし、試験体のスパン中央両端下部に荷重点変位計を取り付けた。また、試験体底面には、ひび割れ幅及び分散度を計測するために、60mmの歪みゲージを7枚貼り付け、荷重、荷重点変位とともに計測した。図-3にパネルの曲げ試験の概要を示す。

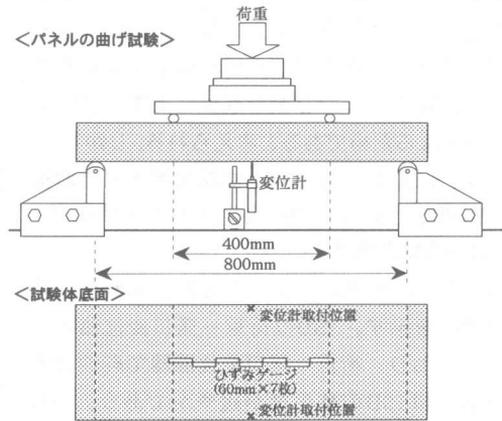


図-3 パネルの曲げ試験概要

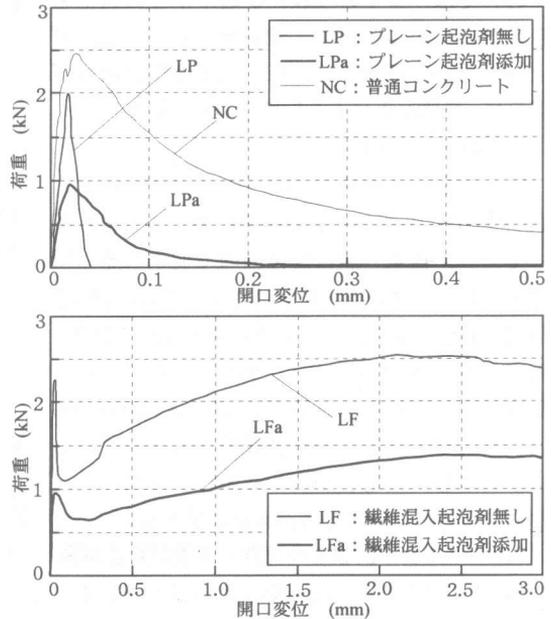


図-4 くさび割裂試験での荷重-開口変位曲線 (平均値)

3. 試験結果及び考察

3.1 荷重-開口変位曲線

図-4にくさび割裂試験より得られた荷重-開口変位曲線を示す。図中には各調査条件ごと3体の試験体のデータを平均化したものを示した。ブレン試験体においては、起泡剤無添加のLPに比べて起泡剤を添加したLPaでは強度が低下しているが、その破壊形態においては、LPが著しい脆性破壊形態を示しているのに対し、LPaは最大荷重以降の下降度がゆるくなっている。また、

普通コンクリート試験体NCとくらべるとLP, LPaどちらの試験体も曲線で囲まれる面積は小さく靱性は低い。繊維混入試験体においては、最大荷重はLF, LFaともにブレン試験体とほぼ変わらない値を示しているが、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。曲線

で囲まれる面積は、LFに比べ、LFaの方が小さくなる。これは気泡が混入する事により一本の繊維とペーストとの付着面積が減少するために伝達力が減少し、ひび割れ進展に対する抵抗力が小さくなるためであると考えられる。しかし、NCとLF及びLFaを比べると曲線で囲まれる面積は圧倒的に大きくなり靱性が著しく向上する。

3.2 引張軟化曲線

図-5に多直線解析から求めた引張軟化曲線(TSD)を示す。TSDは荷重-開口変位曲線を反映しており、荷重-開口変位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で囲まれた面積も大きくなる。プレーン試験体においては、全ての試験体が右下がりの軟化を示した。しかし繊維混入試験体においては、右上がりあるいは横這いとなる引張硬化の傾向が見られ、繊維混入により靱性能が向上している。

3.3 破壊エネルギー- G_F^{WOF}

図-6に有効破壊エネルギー G_F^{WOF} を示す。 G_F^{WOF} は単位面積あたりの破壊に要するエネルギーであり、荷重-開口変位曲線で囲まれる面積で表される。プレーン試験体においては、LPaとLPではLPaの方がLPより大きい値となっており、両者ともにNCよりも小さく脆性的となる。しかし繊維混入試験体においてはLFとLFaともにNCよりも大きくなっており靱性能が向上しているのがわかる。またプレーン試験体と異なり、起泡剤を添加しないLFの方が大きい値となる。

3.4 パネル曲げ試験での荷重-荷重点変位曲線

図-7にパネルの曲げ試験より得られた荷重-荷重点変位曲線を示す。プレーン試験体においては、LPとLPaでは図-4の引張強度と同様LPの方が倍ほど大きくなり、普通コンクリート試験体NCと同程度となった。どの試験体も最大荷重以降の破壊が著しく脆性的で安定したデータが得られなかった。繊維混入試験体においては、最大強度はこちらもプレーン試験体とほぼ変わらない値となっているが、やはり最大荷重以降の曲線の伸びが大きく靱性が向上しているのがわかる。しかし、その形状には明らかな違いが

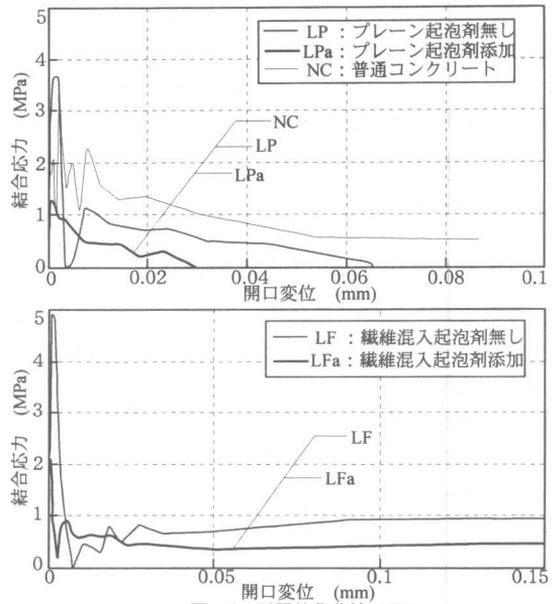


図-5 引張軟化曲線(TSD)

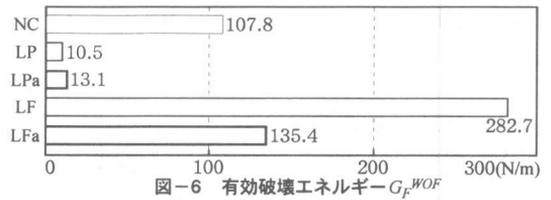


図-6 有効破壊エネルギー- G_F^{WOF}

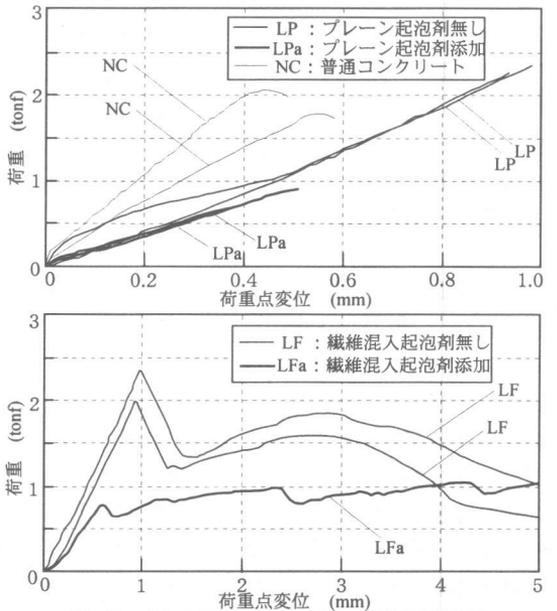


図-7 パネル曲げ試験での荷重-荷重点変位曲線

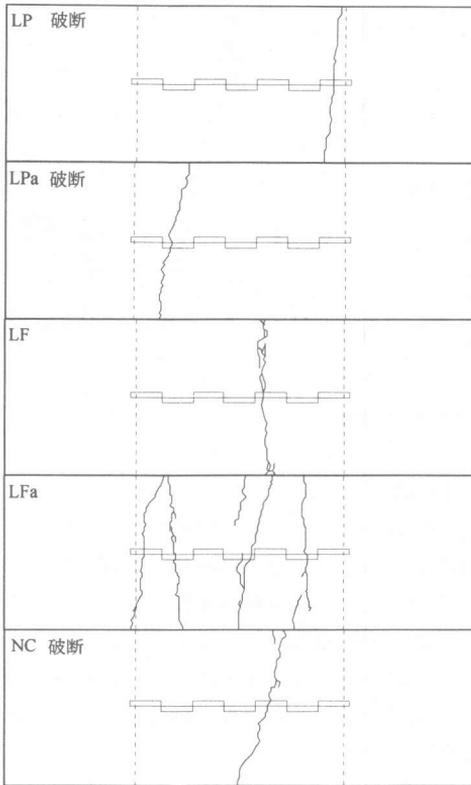


図-8 ひび割れの形態

見られる。LFの方は曲線の伸びが大きく1つの曲線になっているのに対し、LFaの方にはいくつもの山がある。これは、LFがひび割れが一本入るとそこへ応力が集中しひび割れが広がって行くのに対して、LFaの方はひび割れが一本入った後も空気泡によるひび割れ偏向効果により応力が分散され、ひび割れが何本も入るためであると考えられる。またLFの方は、荷重点変位が約3mmのあたりから曲線は下降し始めているが、LFaにおいては曲線の伸びこそLF程ではないが曲線の下降がほとんど見られない。よって、大変形が予想される部位においては有効であると考えられる。

3.5 パネルのひび割れ形態

図-8に曲げ試験終了後のパネルのひび割れ形態をしめす。図には各調合ごと2体のパネル試験体のうち1体を示した。プレーン試験体において

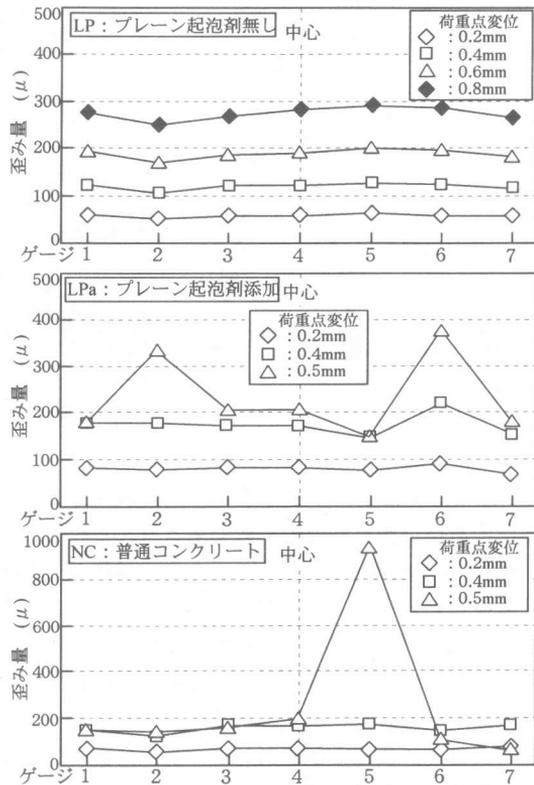


図-9 歪みの変化- プレーン試験体

は、LP、LPaともにひび割れは一本しか入らず両者に見かけ上の差異は見られない。NCについてもひび割れ形態は同様であった。繊維混入試験体においては、LFの方は若干のひび割れの分散が見られたが、ほぼプレーン試験体と同様の形態を示した。しかしLFaにおいては、その破壊形態は他の試験体とは大きく異なり、ひび割れの分散が顕著に現れている。これは、短繊維のブリッジング作用による靱性能の向上と空気泡によるひび割れ偏向効果によるものと考えられる。

3.6 パネル曲げ試験での歪みの変化

図-9に歪みの変化を示す。プレーン試験体においては、LPが最大荷重直前まで歪みがスパン全体にほぼ一様に増加し、最終的に一本のひび割れで破断しているのに対し、LPaでは最終的な破断は一本のひび割れとなっているが、破断直

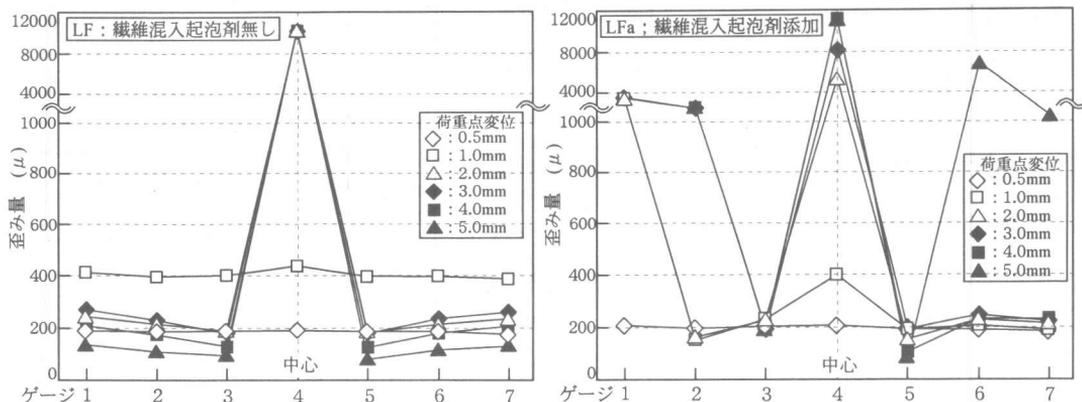


図-10 歪みの変化-繊維混入試験体

前の0.5mmでは歪みが分散している。これは空気泡によるひび割れ応力の分散効果と考えられる。NCはLPと同様の歪み形態を示した。繊維混入試験体においては(図-10), LFでは1.0mm程度まで歪みが一様に増加し, 最大荷重以降一本のひび割れのみ歪みが集中しているのがわかる。最大荷重前の一様な歪みは, LP等に比較すると大きく, 微細なひび割れが一様に分散し発生していると考えられる。これは繊維のブリッジング作用により, ひび割れに応力が集中するのを緩和しているものと考えられる。また特徴的な点として, 一様な歪みから荷重点変位が増加し, 歪みが一方所に集中してひび割れが局所化すると, 他の歪みは小さくなり, 大きな除荷が生じる。この場合には, 微細ひび割れの閉口(回復)が生じているものと考えられる。LFaでは, 最大荷重以降も歪みが一方所に集中することなく周囲に分散しているのがわかる。この理由は, 繊維のひび割れ分散効果に加えて空気泡の存在による強度低下により, 最大荷重前に表面へのひび割れ発生が多点的に生じるためと考えられる。最終的には歪みが大となる局所的なひび割れは数カ所におよび, 応力の分散作用を生じ, エネルギーの吸収を大きくしていると考えられる。

4.まとめ

人工軽量骨材, 空気量, 短繊維等を使用した試験体についてくさび割れ試験, パネルの曲げ試験を行い, その破壊形態及びひび割れ形態を検討した。その結果, 短繊維と空気泡をマトリックス中に分散混入する事により, 曲げひび割れを分散させることが出来, 靱性能が向上することが明らかとなった。

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)・大岡督尚氏に深く感謝いたします。さらに, 試料を提供して下さった, 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。

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, 一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一, 日本建築学会構造系論文集, No.497, pp.1-8, 1997.7
- 2) 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