

論文 両引き試験による超軽量纖維補強コンクリートの破壊特性の評価

吉岡 昌洋^{*1}・橋高 義典^{*2}・田村 雅紀^{*3}

要旨：本研究では、軽量骨材を使用し空気泡を導入する事で超軽量化を施したコンクリートに短纖維を分散混入した超軽量纖維補強コンクリートについて、引張軟化曲線等のコンクリートの破壊力学パラメータを把握した上で、RC部材性能の一評価指標として両引き試験を行い、鉄筋を埋め込んだ直方試験体と変形量の関係を把握した。特に、引張硬化現象に注目し、耐力の増加が確認された。

キーワード：超軽量コンクリート、短纖維、RC部材、引張硬化、引張軟化曲線

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躯体への負荷軽減、運搬及び施工の効率化等の目的より、軽量コンクリートの使用が望ましいと考えられる。これらの部材はその性質上十分な韌性能が要求される。しかし、普通骨材と比較して低強度な人工軽量骨材を使用し、ペーストマトリクスを高強度化した高強度化軽量コンクリートの場合、骨材の強度がマトリクス強度に対して相対的に低くなり、脆性的破壊形態を示すことが予想され、短纖維混入による韌性能の向上が必要と考えられる。この様な超軽量纖維補強コンクリートをRC部材として使用するためには、鉄筋による補強に対する破壊性状を把握する必要がある。

本報告では、高強度ペーストマトリクス中に、人工軽量骨材、空気泡、短纖維等を混入した比重1程度の超軽量纖維補強コンクリートに関してRC部材としての性能を評価する目的で、両引き試験による実験検討を行った。まず、破壊韌性試験から引張軟化曲線の逆解析に基づき各種破壊パラメータを算出し、コンクリート複合材料としての力学性状を把握した上で、両引き試験を行い、荷重と部材変形との関係を実験的に把握した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および計画調合

表-1に使用材料を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、骨材に発泡ガラス骨材、混和剤に高性能AE減水剤、混和材にシリカフュームを使用し、水結合材比(W/B)は20%とした。さらに、軽量化を図るために起泡剤を使用した。それにはアニオン酸系特殊界面活性剤を使用し、添加量は結合材重量の0%と1.0%の二段階を設定した。短纖維には軽量性及び高強度マトリクスでの応力伝達性に優れるビニロン纖維¹⁾を使用し、纖維長30mm、纖維体積率1.0%とした。普通コンクリートに関しては骨材に碎石・碎砂を使用した。両引き試験用の鉄筋にはD16を使用した。

表-1 使用材料

記号	材料	性質
C	セメント	普通ポルトランドセメント、比重3.14
SF	シリカフューム	SiO ₂ 96.8%、比重2.20
GL	発泡ガラス骨材 (D _{max} =5mm)	1号：2号：3号=8:1:1 混合比重0.70
VF	ビニロン纖維(RF1500)	比重1.30、纖維経240×720(μm) 引張強度900GPa、ヤング率29GPa
SP	ポリカルボン 酸エーテル系	比重1.0(SP8HE)
FA	アニオン酸系特殊 界面活性剤	比重1.0(FA200)
G	八王子市美山産碎石	表乾比重2.65、吸水率0.66%
S	八王子市美山産碎砂 富津市鶴岡産山砂	表乾比重2.60、吸水率1.55% 表乾比重2.58、吸水率1.74% 混合比4:1
B	異形鉄筋 D16(SD345)	節のh/l=0.094、傾斜角度40度

*1 (株)長谷工コーポレーション技術研究所 修士(工学)(正会員)

*2 東京都立大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・博士(工学)(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・修士(工学)(正会員)

表-2に試験体の計画調合を示す。記号は、LPが軽量プレーンコンクリート、LFが軽量繊維補強コンクリート、NCが普通コンクリートであり、小文字のaは起泡剤の添加を示す。混練にはオムニミキサー(70L)を使用し、空練りを1分間行い、加水後の混練を5分間行った。なお起泡剤は加水時に同時添加した。

2.2 破壊力学パラメータの評価

コンクリートの破壊力学パラメータとして引張軟化曲線(TSD)と破壊エネルギーを評価するために、くさび割裂試験用供試体（寸法 $100 \times 100 \times 120\text{mm}$ ）を作製した。モードI（引張）の破壊を小容積の試験体で得られるくさび割裂試験の概要を図-1に示す。 $100 \times 100 \times 120\text{mm}$ の試験体の中央に破壊部位の限定の為にダイアモンドカッターによりリガメント高さが試験体高さの半分の 50mm となるよう切欠きを入れ、クリップゲージを取り付けた。

破壊エネルギーの計測精度を確保するためには安定破壊が不可欠である為、安定した開口変位制御が可能なクローズドループシステム（閉回路機構）を採用するサーボ・コントロール式油圧試験機（MTS社製）を使用した。随時、制御装置がロードセルとクリップゲージから信号のフィードバックを受け、油圧サーボバルブをコントロールすることにより高精度な変位制御を可能としている。

表-3に各バッチのフレッシュコンクリートの性状及び 20°C の水中養生を施した材齢4週における標準試験体での圧縮強度とヤング係数を示す。

2.3 両引き試験の概要

両引き試験用試験体を作製した。RC部材試験体は寸法 $100 \times 100 \times 500\text{mm}$ の直方体とし、鉄筋は長さ 800mm の異形棒鋼(D16)を使用し、直方体の中心に埋め込んだ。打設は鉄筋が水平に固定されるように行った。圧縮強度試験体の寸法は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ とし、各試験体は条件ごとに3体ずつ作製した。

両引き試験の概要を図-2に示す。試験は100

表-2 計画調合

1) 軽量コンクリート

記号	W/B (%)	起泡剤添加量 (%)	単位量(kg/m ³)			空気量0%で計算		繊維
			水W	セメントC	骨材GL	混和材SF	混和剤	
LP	20	0	125	677	420	75	30.1	—
		1.0	118	73		29.3	7.5	
LF	20	0	122	660	73	73	29.3	—
		1.0	115	73		29.3	7.5	

* 混合比(容積)1号:2号:3号=8:1:1

2) 普通コンクリート

記号	W/B (%)	単位量(kg/m ³)			
		水W	セメントC	細骨材S	粗骨材G
NC	57	168	295	908	915

表-3 試験体の性状

記号	スランプ (cm)	スラロモン (cm×cm)	比重	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
LP	14.0	26×29	1.34	1.2	43.9	16.3
LPa	23.0	37×38	1.12	17.6	27.8	11.9
LF	5.0	22×22	1.34	0.7	41.8	16.1
LFa	24.0	40×40	1.05	22.3	18.1	9.3
NC	20.0	—	2.35	2.7	27.6	29.3

* 空気量は打設後の比重と調合から算定

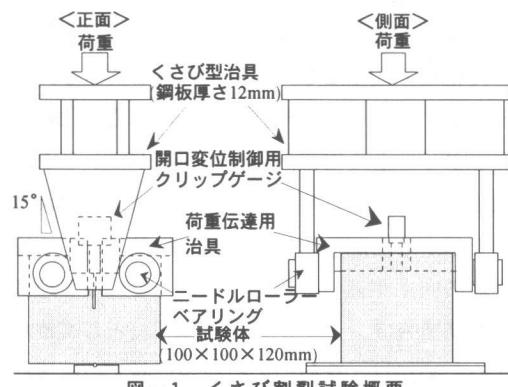


図-1 くさび割裂試験概要

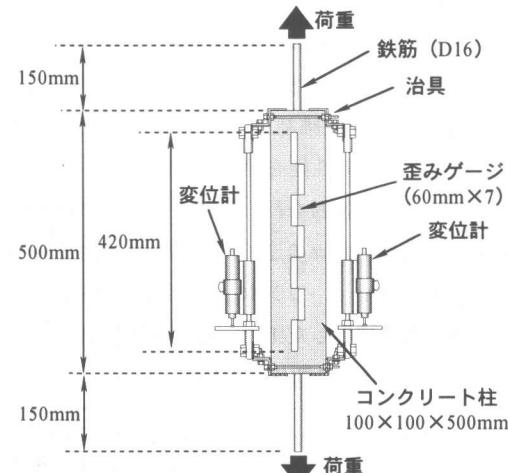


図-2 両引き試験概要図

tonf 万能試験機を用いて行った。鉄筋をチャックで挟み一定速度で載荷した。試験体の側面にはひび割れの発生状況、分散度等を計測するため、試験体の側面に検長 60mm の歪みゲージを 7 枚貼り付けた。また、試験体の変位は、図の様にコンクリートの鉄筋突出面に追従する様に治具を取り付け、両側面の変位計により 2 点の平均を取った。

3. 試験結果および考察

3.1 荷重－開口変位曲線

くさび割裂試験から得られた平均化した荷重－開口変位曲線 (L-CMOD) を図-3 に示す。LP と LF を比較すると纖維混入の有無による特徴が明確に示されている。最大応力到達までは、ほぼ同様のグラフとなるが、それ以後の挙動に差が現れた。プレーン試験体は開口変位の増加に伴い荷重が減少するが、纖維混入試験体では荷重が維持され硬化現象を示した。開口変位が 2.0mm に到達しても横這いのグラフとなった。

また、起泡剤の有無による特徴としては、起泡剤無添加の場合は全体的に荷重が大きくなるが、最大荷重後の降下が急激となる。これは、脆性的な破壊が起きていることを示している。起泡剤を添加し、多量の空気泡を含む試験体についてはその傾向は弱まっている。

3.2 引張軟化曲線

L-CMOD より多直線近似解法²⁾によって求めた引張軟化曲線 (TSD) を図-4 に示す。

起泡剤の添加の有無に関わらず、プレーン試験体は右下がりの軟化を示した。しかし、纖維混入試験体は開口変位 0.01mm 付近から違いが現れ、横這いまたは引張硬化を示した。開口変位 0.01mm で纖維に張力が伝達されるものと推測され、纖維混入により韌性能が向上している。

3.3 破壊エネルギー G_F^{WOF}

コンクリートの破壊エネルギー G_F^{WOF} の結果を図-5 に示す。 G_F^{WOF} は荷重－開口変位曲線より開口変位 2.0mm までのリガメント単位面積当たりのエネルギーを算出したものである。

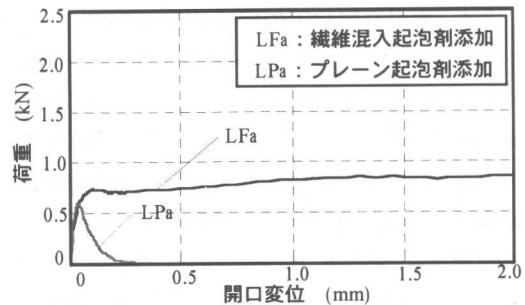
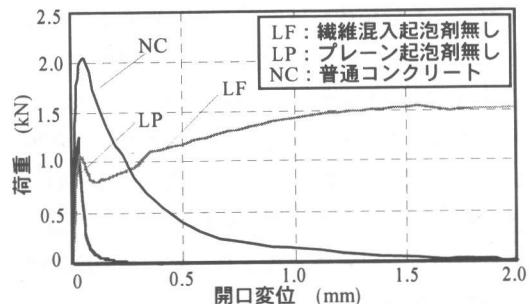


図-3 くさび割裂試験での荷重－開口変位曲線

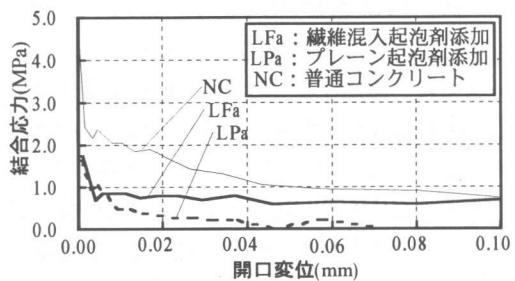
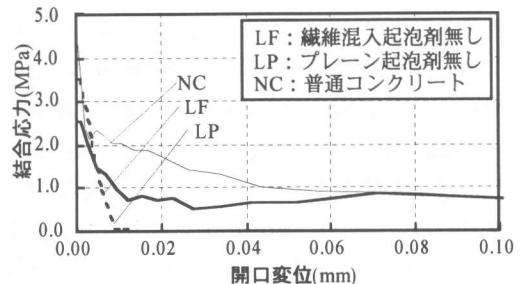


図-4 引張軟化曲線

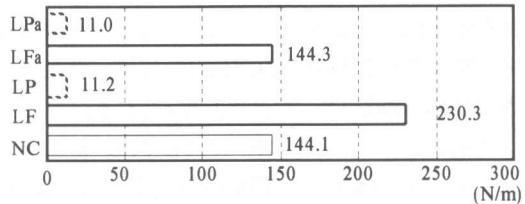


図-5 破壊エネルギー G_F^{WOF}

プレーン試験体では明らかに強度の低い LPa が LP と同等の値となったが、これは LP がより脆性的な破壊となったことを示している。NC よりもかなり小さく脆性的である。繊維混入試験体 LF,LFaにおいては、NC と同等またはそれ以上の値を示しており、韌性能が向上している。またプレーン試験体と異なり、起泡剤無添加の LF の方が大きい値となる。

3.4 両引き試験での部材変位と歪み

両引き試験での部材の変位とコンクリート側面のひずみの関係を図-6 に示す。ゲージは検長 60mm で、図-2 に示したように試験体の端部から 40mm の点を始点としてゲージ 4 の中心が試験体の中心と一致するように貼り付けており、合計検長は 420mm である。曲線の終点はひずみゲージの破断を示しており、ひびわれが発生した点とほぼ等しいと考える事が出来る。

まず、プレーン試験体の P シリーズと、繊維補強した F シリーズとを比較すると明らかな傾向の差が見られた。P シリーズは裸鉄筋の降伏点であった約 0.9mm の変位に達するまでにひずみゲージが破断しているが、F シリーズでは破断せずにひずみがほぼ一定で変位が増加する傾向が見られた。これは、繊維の拘束によりコンクリート中の応力が分散されることにより、完全破断が抑制された結果であると考えられる。

また、起泡剤を添加し気泡を導入した a シリーズでは、無添加のものよりも傾きが緩やかでひび割れを検知したゲージ数が少ない傾向がある。これは、a シリーズの方がヤング係数が低く変形を許容することに加えて、付着力が低い為であると考えられる。それに対して、起泡剤を添加しなかった試験体に関しては、普通コンクリートと比較して引張圧縮強度比が低く、引張強度が鉄筋とコンクリートの付着力と比べ相対的に低い為にひびわれの間隔が狭まり、発生したひび割れ本数が多くなったと考えられる。

普通コンクリートの NC に関しては、初期段階において一本目のひび割れが発生した以後は、鉄筋の降伏を迎えた後の大変形時まで次の

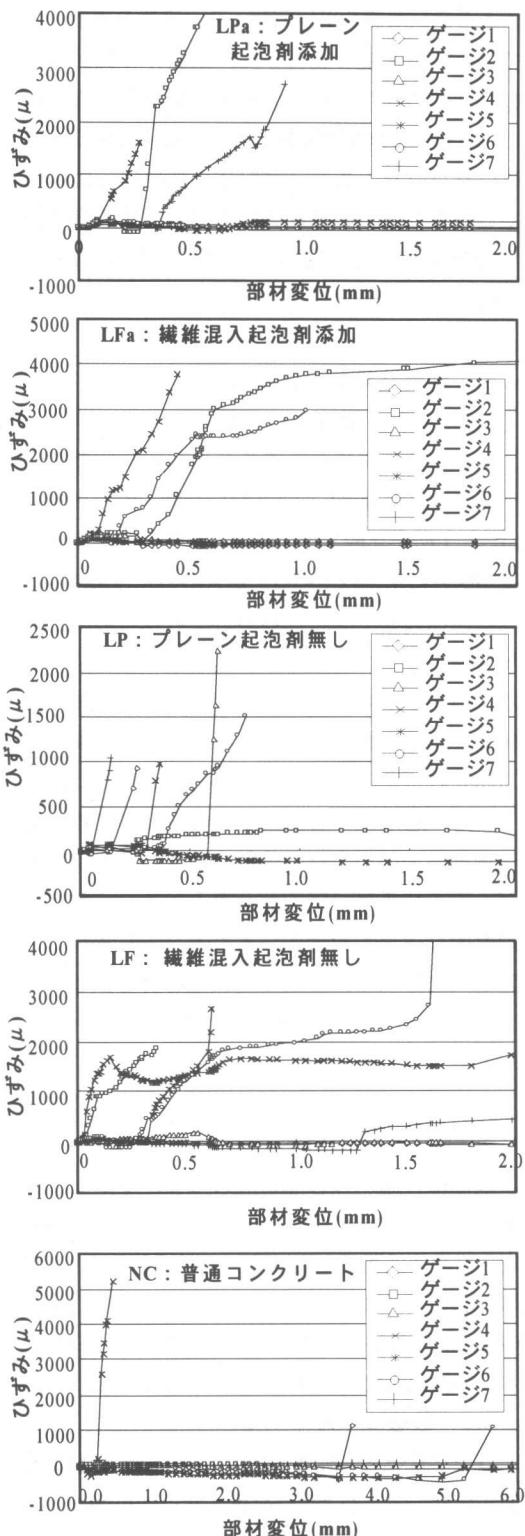


図-6 部材変位とひずみの関係

段階のひび割れは発生しなかった。

最終的に、繊維を混入した試験体においてもほぼ新たなひび割れの発生が終了した点である変位 10mm まで載荷し終了した。

3.5 ひび割れの形態

試験後の各試験体のひび割れの形態を展開図により図-7 に示す。図-7 は図-6 と対応しており、左よりゲージ 1 からゲージ 7 まで順に並んでいる。最終的に発生した 3 体の試験体の平均ひび割れ本数は LPa が 4 本、LFa が 3 本 LP が 11.3 本、LF が 2.3 本、という結果であった。尚、ひび割れは破断に達したもののみ示し、微細なひび割れは示していない。しかし、繊維補強した F シリーズは表面に微細なひび割れが多数発生しており、実際に P シリーズと F シリーズのひび割れ分布には明らかな差違が見られた。

P では発生したひび割れのひび割れ幅はほぼ均一であったのに対し、F シリーズでは変位が進むと初期に発生した 2, 3 本のひび割れの幅が集中的に増加し、その他は比較的小さな幅のひび割れが狭い間隔で発生した。これは、繊維の混入によりコンクリートの伸びに対する拘束力が、変形が進行しても維持されたため、プレーン試験体のように完全に分割されずに鉄筋の変形に追従できず、付着部周辺の内部破壊が進行した結果であると考えられる。

3.6 荷重と部材変位の関係

両引き試験により得られた荷重と部材変位の関係を図-8 に示す。破線は裸鉄筋を載荷した時のグラフである。

まず、プレーンの P シリーズと繊維を混入した F シリーズにおいて最大荷重に明らかな差が見られた。P シリーズは鉄筋が降伏を迎えた変位約 0.9mm 以降は裸鉄筋のみの最大荷重と一致したのに対し、F シリーズは鉄筋よりも高い最大荷重を得た。これは、鉄筋の降伏後の大変形時には、P シリーズは横ひび割れによるコンクリートの破断や割裂破壊等の進行により付着が低下し、鉄筋からコンクリートに応力が伝達されず、鉄筋のみが引張力を負担している状態に収束する

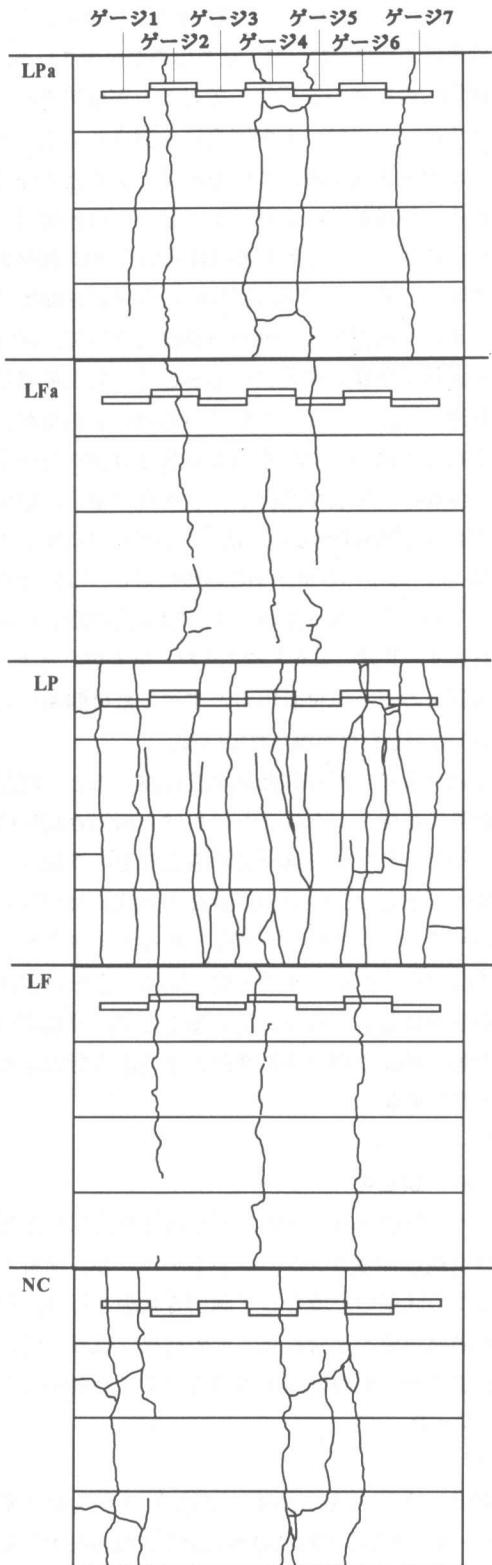


図-7 ひび割れの形態

のに対し、F シリーズでは、繊維のブリッジング効果によりひびわれ発生後も応力が伝達される。鉄筋への拘束力を保持して付着力が維持され、さらにコンクリートが完全に分割されることなく応力を伝達し続けている結果であると考えられる。繊維補強によりコンクリート自体の引張硬化に加えて、付着力の持続という RC 部材の終局耐力保持に有効な要素の向上が確認された。

また、最大荷重に向かう過程において、部材の変位が鉄筋の変位よりも小さく、最大荷重に到達した点が大きくずれている傾向があるが、これは変位が進むに連れて鉄筋とコンクリートの付着部の破壊が進行し、すべりが生じた結果であると推測できる。また、P シリーズに関しては、LP はすべり量が小さいのに対し、LPa はすべりが大きくなつたが、これは気泡の増加による強度の低減によると考えられ、筆者が前報³⁾で報告済みである付着応力とすべり量の関係において同様な結果が得られている。

以上より、得られた結果を考察すると、超軽量繊維補強コンクリートにおける両引き試験によるコンクリート部材での引張硬化の挙動は、すべり量とひび割れの進展を定量的に検討していくことにより推測が可能であると推察する。すなわち、荷重とすべり量の関係と引張軟化曲線挙動に基づく要素を用いることで、裸鉄筋の引張挙動より引張硬化挙動の予測が可能になると推測する。

4.まとめ

人工軽量骨材、気泡、短繊維等を使用した超軽量繊維補強コンクリートについて、RC 部材としての評価の一環として両引き試験を行い、その破壊形態を検討した。その結果、繊維の混入により終局耐力の向上が得られることが明らかとなった。

謝辞：本研究を実施するにあたり、我妻佳幸氏・相武生コン(株)には多大なるご協力を頂きました。また、クリスタルクレイ(株)、(株)クラレ、

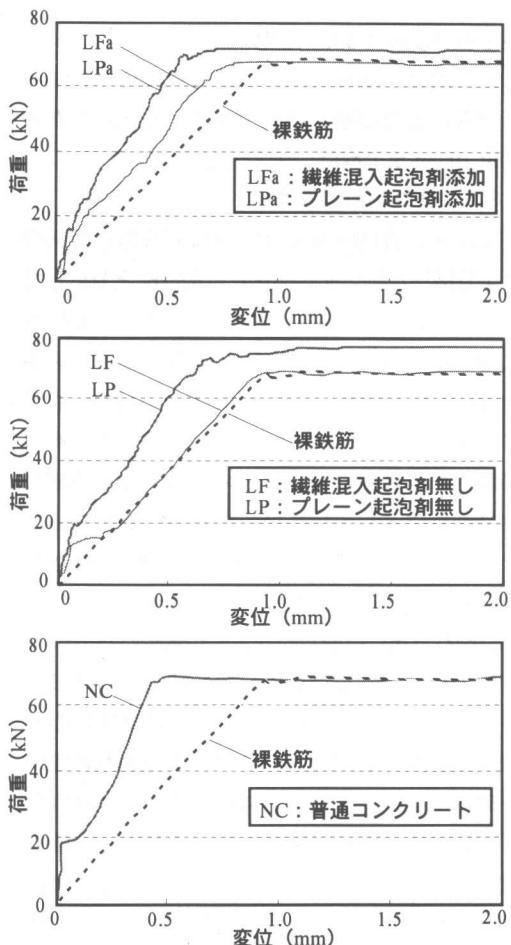


図-8 両引き試験での荷重と部材変位の関係

山宗化学(株)には実験材料の提供を頂きました。
記して謝辞を表します。

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、－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) 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
- 3) 吉岡昌洋：超軽量繊維補強コンクリートの付着性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.22, No.2, pp.1261-1266, 2000.6