

論文 超軽量繊維補強コンクリートの付着性状

吉岡 昌洋¹・橘高 義典²・田村 雅紀³・高橋 仁智¹

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繊維を分散混入した比重約 1.0 程度の超軽量繊維補強コンクリートについて、RC 部材性能の一評価指標としての鉄筋の付着性状に着目し、実験とその検討を行った。結果、繊維の混入により最大付着耐力に変化は見られなかったが、割裂破壊後の耐力保持及びすべり性状の向上が確認された。また繊維補強した場合の付着性状を簡便な linear なモデルにより評価し、吸収エネルギーについて考察をした。

キーワード：軽量コンクリート、短繊維、起泡剤、付着応力度、すべり量、モデル

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などの目的から、軽量コンクリートの使用が望ましいと考えられる。これらの部材には、強度確保に加えて十分な靱性が要求されるのであるが、普通骨材よりも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ようになる。そこで短繊維を混入することで靱性能の向上が可能となる。更に超軽量繊維補強コンクリートを RC 部材として使用するためには、鉄筋の付着性状を把握することが必要となる。

本研究では、コンクリートへ繊維を混入することにより、割裂破壊発生後も剥離等が起こらず付着力が維持されることを目的として、短繊維及び空気泡がコンクリートの付着性状に及ぼす影響を実験的に検討するとともに、 τ - S 曲線のモデル化を行い、エネルギー吸収能の評価を行った。

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。セメントは早強セメントを使用し、軽量化コンクリートとするために、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。起泡剤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。短繊維には軽量性及び応力伝達性に優れるビニロン繊維¹⁾を使用し、繊維長 30mm、繊維体積率 1.0%とした。普通コンクリートに関しては骨材に碎石・砕砂を使用した。付着試験用の鉄筋は D16 を使用した。

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	ビニロン繊維 (RF1500)	比重1.30、繊維径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)
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)
G	八王子市美山産碎石	表乾比重2.66、絶乾比重2.64
S	八王子市美山産砕砂	表乾比重2.62、絶乾比重2.58
B	異形鉄筋 D16(SD345)	節のh/l=0.094、傾斜角度40度

*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)

表-2 に試験体の計画調合を示す。記号は、LP が軽量ブレンコンクリート、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 強度試験用試験体

図-1 に示す引抜き付着試験用試験体は JMC 委員会案に基づき作製した。コンクリート試験体は寸法 100×100×100mm の立方体とし、鉄筋は 700mm の異形棒鋼(D16)を使用した。鉄筋の自由端部は 10mm 露呈させ、変位計測点である端面はグラインダーを用いて研磨をした。打設時に鉄筋の一部にウレタン及びびテフロンシートを巻き、載荷面から 36mm の非付着部を設け、付着長 L を 64mm とした。打設は鉄筋が水平に固定されるように行った。なお、割裂破壊を伴う付着性状の評価を主な目的とするため、割裂破壊防止用スパイラル筋は使用しない。

また、コンクリートの引張軟化曲線(TSD)と破壊エネルギー W を評価するために、くさび割裂試験用供試体を作製した。圧縮強度試験体の寸法はφ100×200mm とし、各試験体は条件ごとに 3 体ずつ作製した。

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℃ の水中養生を施した材齢 12 週における圧縮強度とヤング係数を示す。

2.3 試験方法の概要

鉄筋の引抜き付着試験の概要を図-2 に示す。試験は 100tonf 万能試験機を用いて行った。鉄筋をチャックで挟み 0.5mm/min で載荷した。剛な載荷板に設置したアームに取り付けた変位計を鉄筋の自由端に設置し、載荷面と鉄筋自由端間の変位量 δf を計測した。同時に鉄筋の中心から 20mm の距離のコンクリート上面の点にも変位計を設置し、コンクリート部のひずみ変位量 δc も計測した。この δf から δc 差し引いた値を自由端すべり量 S とした。

表-2 計画調合

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

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

表-3 試験体の性状

記号	スランブ (cm)	スランブフロロ (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
LV	24.0	47×46	1.29	4.25	41.7	13.3
LVa	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

* 空気量は打設後の比重と調合から算定

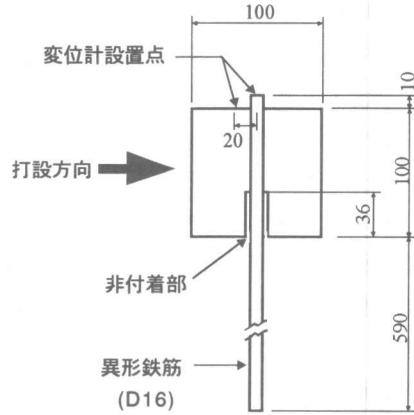


図-1 試験体断面概要図

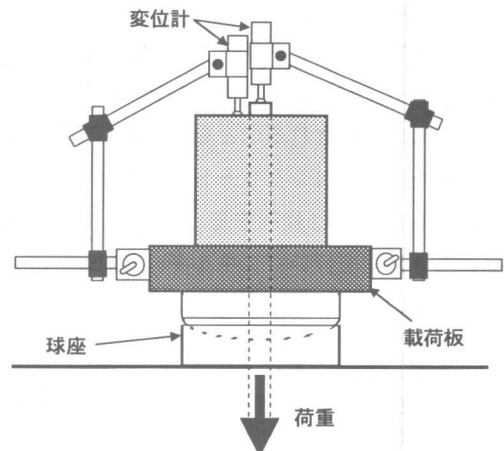


図-2 引抜き試験概要図

3. 試験結果および考察

3.1 圧縮強度および最大付着応力

各調合条件における圧縮強度と最大付着応力を図-3 に示す。圧縮強度に関しては起泡剤を添加したものは同条件の無添加の軽量コンクリートのほぼ半分の強度となった。最大付着応力を圧縮強度で除した値である付着圧縮比 τ_b/f_c を図-4 に示す。繊維混入の有無による差異は見られなかったが、起泡剤を添加したものの値が高い傾向が見られた。また、軽量コンクリートは全体的に NC よりも低い値を示したが、これは人工軽量骨材の強度が低く、骨材のかみ合い効果が期待出来ないためと推測される。

3.2 くさび割裂試験結果

コンクリートの破壊エネルギー W の結果を図-5 に示す。 W はくさび割裂試験から得られた荷重-開口変位曲線 (LPD) 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。

プレーン試験体 LPa, LP においては LPa が LP よりも若干大きい値を示しているが、NC よりも小さく脆性的である。繊維混入試験体 LF, LFa においては、NC より大きい値を示しており、靱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。

次に平均化した LPD から多直線近似解法²⁾により求めた引張軟化曲線を図-6 に示す。LP と LF を比較すると繊維混入の有無による特徴が明確に示されている。初期段階ではほぼ同様のグラフとなるが、開口変位 0.02mm 付近から差が現れる。プレーン試験体は開口変位の増加に伴い結合応力が減少していくが、繊維混入試験体では結合応力が維持され、開口変位が 0.1mm に到達しても横這いのグラフとなった。従って、開口変位 0.02mm 付近で繊維に張力が確実に伝達されるものと推測される。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結合応力が大きくなるが、最大応力後の応力降下が急激であり結合応力は一度ゼロに近くなる。これは、脆性的破壊が起きていることを

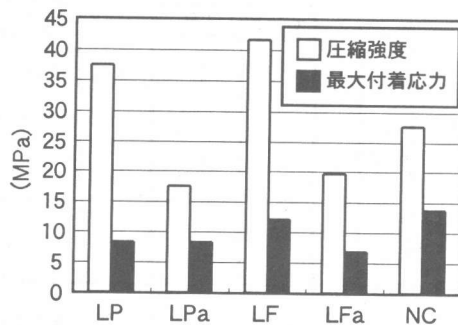


図-3 圧縮強度および最大付着応力

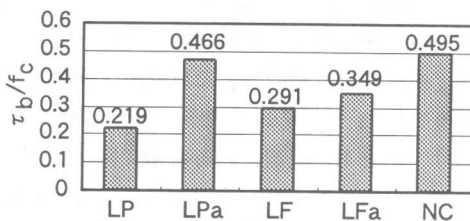


図-4 付着応力圧縮強度比

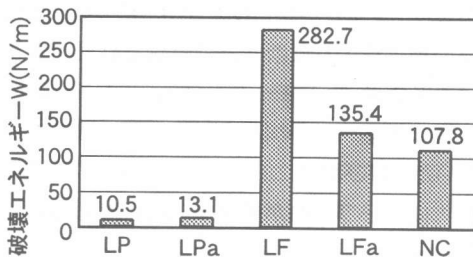


図-5 破壊エネルギー

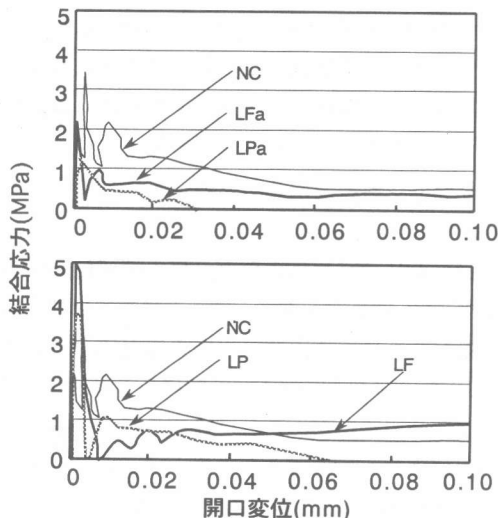


図-6 引張軟化曲線

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。

		モード	LP	モード	LPa	モード	LF	モード	LFa	モード	NC
NO.	1	T		S		Z		S		T	
	2	T		T		Z		Z		T	
	3	T		S		Z		Z		T	

図-7 ひびわれ図および破壊形態

3.3 引抜き付着試験結果

全試験体のひび割れと破壊モードを図-7に示す。図は変位計を設置した試験体上面を示したものであり、中心の円は鉄筋であり、鉄筋の2本のリブが上下に配置される状態で図示した。破壊モードはコンクリートが割裂破壊をする場合 T、ひび割れが発生せずコンクリートが剪断破壊をし引き抜けが起こる場合 S、割裂破壊後に繊維の拘束により破断すること無く鉄筋が引き抜ける場合 Z の3モードとなった。ひびわれの発生数は2本~4本の間であり、3本が多数を占めていた。ひび割れ2,3本の場合でも、リブのある縦方向にひび割れが発生する場合があることが確認出来た。

LPa と LFa においては、同一試験体3体のうち1体が異なる破壊モードを示した。これはコンクリート強度が低いために一般的な鉄筋のフシ高さとフシ間隔のアスペクト比では、コンクリートの剪断力が付着力よりも低くなり、コンクリートが剪断破壊を引き起こすためであると考えられる。

図-8に全試験体の荷重-自由端変位曲線を示す。LPは最大荷重に達すると脆性的な割裂破壊をしたため、最大荷重以後の履歴は示されない。NCは割裂破壊後も一時的に若干の耐力の残存が確認出来たが、これは碎石骨材のかみ合い効果によるものと考えられる。LPaは、基本的に大きなばらつきは確認されないが、1体が割裂破壊をし、2体はひびが入らずにコンクリート・キーの剪断破壊を起こした後に緩やかな勾配の耐力低下を示した。

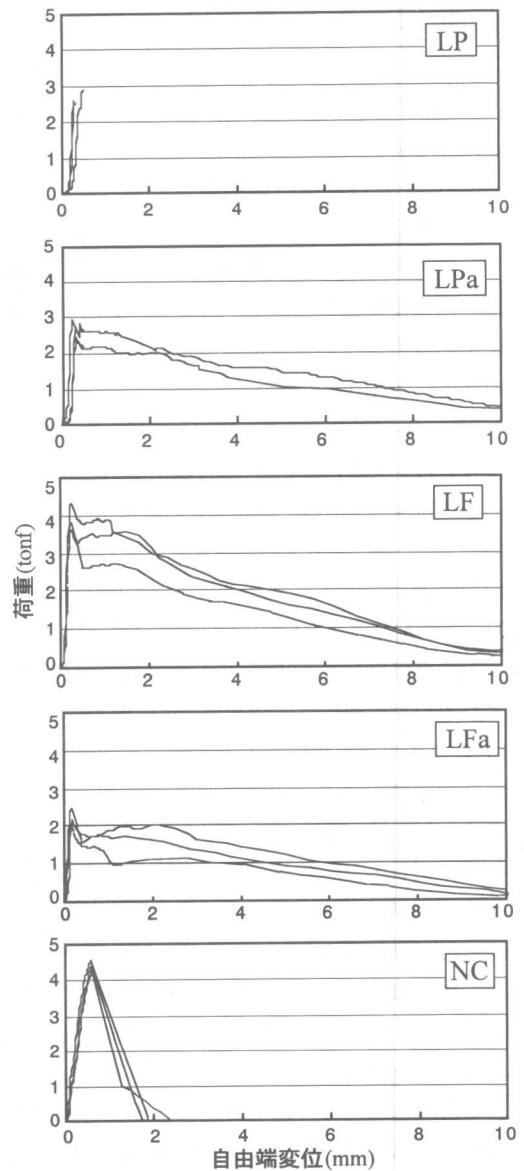


図-8 荷重-自由端変位曲線

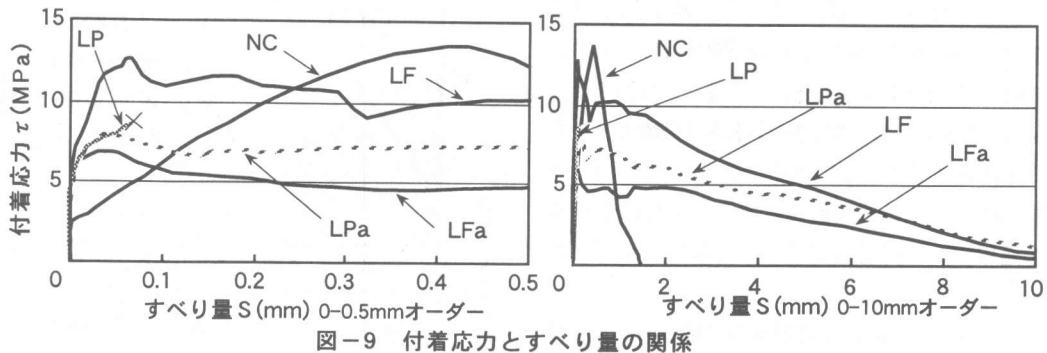


図-9 付着応力とすべり量の関係

LPa に関しては、LP と比較して耐力低下が緩慢になった。これはコンクリートの割裂が発生する以前に空気量の影響により、コンクリートの剪断破壊が発生したため、鉄筋のすべりによる自由端変位が増大するためと考えられる。

図-9 に付着応力とすべり量の関係をオーダーに分けて示す。0-0.5mm オーダーに関して、NC と比較した L シリーズの最大付着応力 τ_{bu} におけるすべり量は、極めて小さな値となった。これは L シリーズが NC と比較してヤング係数が小さく変形量が増大する傾向があり、鉄筋のすべりが生じる前にコンクリートが変形して弾性エネルギーを蓄えるためにすべりが抑制された結果であると考えられる。

0-10mm オーダーに関して、プレーン試験体は最大付着応力に到達する前後のグラフの履歴が直線的であり、急激な耐力低下を起こしている。L シリーズは繊維のブリッジング作用が起こるまでは NC と同様であるが、その後耐力が増加し、第二の強度ピーク以降は、線形的に緩慢な耐力低下を示した。

軽量繊維補強コンクリートの付着性状を破壊エネルギーにより評価するために、鉄筋自由端変位とコンクリート弾性歪み変位の差を真のすべり量 S とし、 τ - S 曲線を求めた。同グラフより示される面積は付着の破壊エネルギーと位置づけられる。そこで、この関係をモデル的に捉えることが出来れば、エネルギー評価が可能となる。そこで、破壊エネルギーを評価することを目的とした τ - S 関係のモデルを次に提案する。

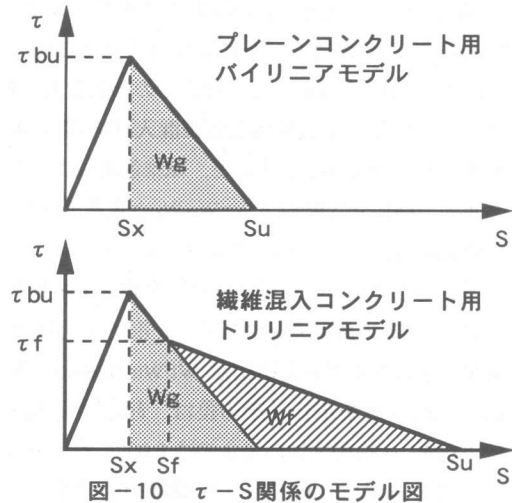


図-10 τ - S 関係のモデル図

4. τ - S 関係のモデル化

図-10 に τ - S 関係のモデル図を示す。プレーン試験体はバイリニア³⁾、繊維補強コンクリートはトリリニアでモデル化した。

弾性領域での最大付着応力を τ_{bu} 、その時のすべり量 S_x とする。これらは実測値により定まる。付着応力がゼロにおけるすべり量を S_u とし、塑性域 S_x から S_u までの面積を破壊エネルギー W_u とした場合、バイリニアでは $W_u = W_g$ となり、トリリニアでは $W_u = W_g + W_f$ の関係となる。 W_f は繊維補強の負担分エネルギーとする。バイリニアでは (τ_{bu}, S_x) を通る直線で S_x から $S=L$ (フシの間隔でここでは 10mm) までの曲線を最小二乗近似して得られた直線を求め、その直線と X 軸との交点は S_u となる。トリリニアでは繊維のブリッジング作用が現れて最初に極小値を得た時のすべり量の実測値を S_m と定め、最大付着応力時の点 (τ_{bu}, S_x) を通り、 S_x から S_m まで

の曲線を最小二乗近似して得た直線が囲む面積を W_g , S_m から $S=L$ までの曲線を近似して得た直線と X 軸との交点を S_u とする。2 直線の交点を (τ_f, S_f) とし, W_g, W_f が求まり破壊エネルギーを評価することができる。図-11 に実測グラフへのモデルの適用例を示す。この様にモデルを適用すれば付着破壊での破壊エネルギーが評価できる。

図-5 に示した, くさび割裂試験の実験より得られたモード I (引張り) の破壊エネルギー W と, 図-11 に示す付着モデルにより得られた破壊エネルギー W_u の比較を行った。その結果を表-4 に示す。プレーン試験体と繊維混入試験体の W をそれぞれ W_p, W_F とすると, 繊維効果によるエネルギー増加分 ΔW は $\Delta W = W_F - W_p$ と定義できる。この関係は, 付着モデルでの $W_f = W_u - W_g$ に相当する。そこで表-4 に示す様に, 全破壊エネルギーに対する繊維補強負担分エネルギー比率 $\Delta W / W_F$ とモデルでの面積比率 W_f / W_u の値は, 極めて相似な値を示し, その差は, 起泡剤無添加で 0.006, 起泡剤添加の場合では 0.0004 程であった。この結果は, 同モデルが繊維補強効果による破壊エネルギーに加え, 空気泡の増減による繊維補強負担分エネルギーへの影響も考慮されていると考えられる。以上より, 付着破壊によるエネルギー吸収能を評価する場合, 同モデルにより簡便にそのエネルギー吸収能の増加率が推定でき, モード I 試験での破壊エネルギーより推定可能であると考えられる。

5. まとめ

本研究では人工軽量骨材, 空気泡, 短繊維を導入した超軽量繊維補強コンクリートについて, 鉄筋の付着性状に着目した実験的検討及び空気量及び短繊維の影響を考慮した付着破壊エネルギー吸収能に関するモデル化を行った。結果, 繊維の混入により割裂破壊後の耐力保持及びすべり性状の向上が確認された。またモデルにより超軽量繊維補強コンクリートの耐力保持性能が評価できることが確認された。

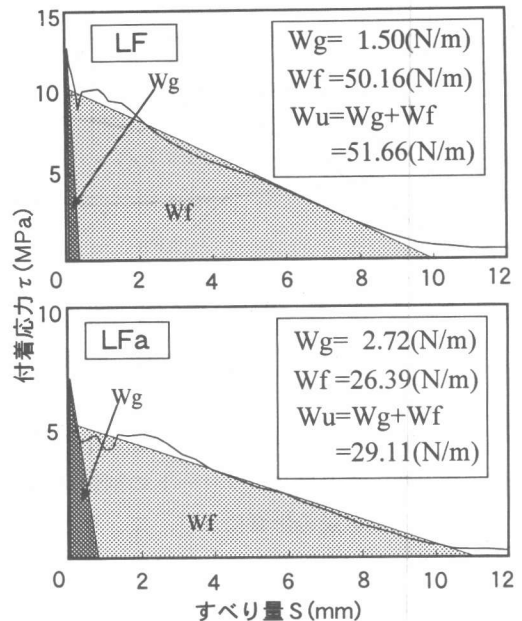


図-11 モデルの適用例

表-4 エネルギー比率の比較

起泡剤添加量(%)	W_f / W_u	$\Delta W / W_F$
0	0.97093085	0.96301291
1.0	0.90310220	0.90354114

謝辞

実験に際して多大なる助力を得た東急建設(株)大岡督尚氏に深く感謝いたします。試料提供を受けた山宗化学(株), (株)サンライト, クラレ(株)に深謝致します。

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
- 3) 西田浩之ほか: 連続繊維シートとコンクリートの付着特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1507-1512, 1999.6