

論文 連続繊維メッシュ補強モルタル板により拘束された コンクリート柱体の圧縮特性

藤井 鉄男^{*3}・金 吉熙^{*3}・佐藤 裕一^{*2}・藤井 栄^{*1}

要旨: 連続繊維とセメント系材料とを組み合わせた複合材料の利用方法の一つとして、連続繊維を補強材とした打ち込み型枠が考えられる。筒状の連続繊維メッシュ補強モルタル板を作成し、それを打ち込み型枠として用いたコンクリート柱体の1軸圧縮試験を実施した。本実験より連続繊維メッシュの横拘束効果により繊維の弾性係数、破断ひずみ及びメッシュ軸数に応じた圧縮強度及び圧縮靱性能の増大が見られた。また繊維破断時の耐力及び軸ひずみの推定をOttoosenの多軸応力下におけるコンクリートの破壊則及び構成則を用いて行い、ほぼ良好な対応が見られた。

キーワード: 新素材, 連続繊維, 打ち込み型枠, 圧縮試験, 横拘束コンクリート

1 はじめに

本研究は、耐食性にすぐれ、軽量で且つ高強度な連続繊維をメッシュ状に成形したものを補強材としたモルタル管を作成し、これを打ち込み型枠としたコンクリート柱体の1軸圧縮試験結果について報告するものである。

2 実験概要

2.1 試験体

(1) 形状

図1に試験体形状、寸法を示す。連続繊維をメッシュ状に成形したものを補強材とした厚さ10mmのモルタル管を作成したのち、筒内部にコンクリートを打設して試験体を製作した。試験体断面は円形および正方形の2種類である。

(2) 繊維

使用したアラミド繊維は共重合タイプであり、1500デニール(直径12.4 μ mの素線1000本)または6000デニール(素線4000本)を1束線、炭素繊維はPAN系であり、素線12000本を1束線とし、メッシュ状に成形したものの(組布)を補強材としている。炭素繊維は組布形成過程で使用する樹脂及び繊維の違いによりNおよびSの2種類ある。束線の断面はなるべく扁平に作成されている。繊維

の性質を表1に示す。いずれの試験体もメッシュを4分の1周ラップさせエポキシ樹脂で接着した。

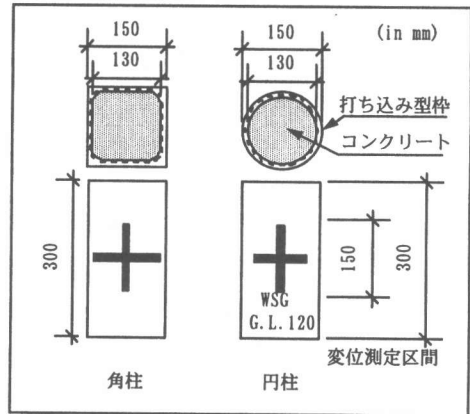


図1 試験体形状・変位測定区間

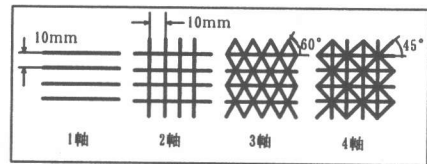


図2 メッシュ形状

表1 繊維素材の性質

	アラミド	カーボン	カーボン
	共重合タイプ	S	N
引張強度 (MPa)	3430	4900	3530
弾性係数 (GPa)	72	230	230
伸び ($\times 10^{-4}$)	46000	21000	15000
直径 (μ m)	12.4	7.2	7.3

*1 京都大学助教授 工学研究科環境地球工学専攻 工博 (正会員)

*2 京都大学助手 工学研究科環境地球工学専攻 工修 (正会員)

*3 京都大学大学院生 工学研究科環境地球工学専攻 (正会員)

また、シリーズ1では試験体両端部30mmをアラミド繊維テープで巻いて補強しており、他のシリーズでは特に補強を施していない。

(3) セメント系材料

型枠はモルタル、内部はコンクリートを使用した。試験時の内部コンクリートの圧縮強度は養生条件により22.0~32.7MPaであり、表2中に示す。

○1500-2a-2
 (メッシュ層数)2層
 (メッシュ軸数)2軸
 (繊維種類, 束線太さ)アラミド繊維1500de
 S, N: カーボン繊維
 (断面形状)○円柱, □:角柱

(4) 変動要因

実験シリーズごとの試験体一覧を表2に示す。変動要因は繊維の種類(アラミド、カーボンN、カーボンS)、繊維束線の太さ(アラミド6000de・1500de、カーボン12k)、メッシュの配向(1軸、2軸、3軸、4軸)及び補強量(1層、2層、4層)である。以下に試験体名の例を示す。

1軸の場合の補強筋断面積比は試験体材軸方向の切断面を横切る繊維全断面積をコアコンクリート断面積で除したものである。但し多軸の場合は繊維が弾性材料であることを考慮し斜め束線に対してある円周方向ひずみ時の傾斜束線ひずみの比を断面積に乗じて円周方向繊維断面積に加算することで円周方向等価補強筋比 p_f を定義する。 p_f の軸数の違いによる比率は、1軸:2軸:3軸:4軸は1:1:1.250:1.354になる。

2.2 荷重条件と計測事項

(1) 荷重条件

試験体の一端にピン座を設け、400ton万能試験機を用いて単調圧縮荷重した。試験体と圧板間には特に摩擦を低減する工夫は行っていない。

(2) 計測条件

軸方向ひずみは、試験体中央領域について変位計(検長150mm)とWSG(検長120mm)、さらに試験体両端の圧板間について変位計(検長300mm)によって計測した。また、荷重軸と直交方向の変形を変位計で、円周ひずみをWSGで計測し、試験体中央部の繊維メッシュのひずみをWSGで計測し

表2 試験体及び試験結果一覧

シリーズ	試験体名称	p_f (%)	f_c' (MPa)	σ_a (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b ($\times 10^{-4}$)
1	○1500-2a-2	0.035	32.7 (72.0)	45.9	27.7	7400
	○1500-3a-2	0.044		50.0	26.8	8400
	○1500-4a-2	0.047		50.4	29.0	6600
	○1500-2a-4	0.070		49.2	28.5	12200
	○1500-3a-4	0.087		49.5	34.3	9400
	○1500-4a-4	0.094		52.0	36.1	8000
	○6000-2a-2	0.139		50.9	41.4	12200
	○6000-3a-2	0.174		55.9	56.1	26000
	○6000-4a-2	0.188		52.9	59.3	26000
	○6000-2a-4	0.278		49.4	52.6	24400
	○6000-3a-4	0.348		47.5	41.4	13600
	○6000-4a-4	0.377		48.0	41.8	12000
	□1500-2a-2	0.035		37.0	21.4	16000
	□1500-3a-2	0.044		43.5	23.7	16000
	□1500-4a-2	0.047		40.6	23.0	18000
	□1500-2a-4	0.070		35.7	26.1	17800
	□1500-3a-4	0.087		40.9	17.2	16000
	□1500-4a-4	0.094		42.6	32.1	14600
	□6000-2a-2	0.139		44.3	37.1	16200
	□6000-3a-2	0.174		36.1	31.8	24000
□6000-4a-2	0.188	39.4	33.6	25600		
□6000-2a-4	0.278	40.9	41.5	28800		
□6000-3a-4	0.348	42.7	42.5	28000		
□6000-4a-4	0.377	36.2	44.3	36000		
2	○6000-2a-2	0.139	24.5 (47.6)	29.8	26.8	21200
				26.8	24.1	21400
				23.9	23.2	23000
				37.4	47.2	26600
	○6000-2a-4	0.278		0.0	41.4	27200
				38.7	44.7	26000
				33.9	32.1	21000
				29.4	31.1	23200
				40.8	34.9	18400
				30.9	22.9	17400
□6000-2a-2	0.139	29.1	23.8	15600		
		27.7	25.6	19000		
		30.6	30.4	28600		
□6000-2a-4	0.278	26.7	26.3	36200		
		34.8	30.1	31200		
		31.0	26.1	24600		
□6000-4a-2	0.188	31.9	24.8	20000		
		29.8	28.2	20800		
3	○1500-1a-2	0.035	22.3 (47.6)	26.1	19.4	11400
	○6000-1a-2	0.139		29.2	24.2	19000
	○1500-1a-4	0.070		30.7	19.4	14600
	□6000-1a-2	0.035		31.0	21.4	21400
	□6000-1a-4	0.070		32.2	30.8	28600
	○N-2a-2	0.142		24.5	35.1	34.1
○N-2a-4	0.284	(47.6)	38.1	42.2	10200	
□N-2a-2	0.142	22.0	32.3	29.7	6400	
□N-2a-4	0.284	(47.6)	30.4	30.3	9600	
4	○S-2a-1	0.071	22.3 (47.6)	25.6	27.9	9600
				27.7	31.1	11400
				26.8	31.1	11000
				36.2	36.3	9800
	○S-2a-2	0.142		35.7	36.0	11200
				34.1	37.1	12400
				41.4	60.3	22800
	○S-2a-4	0.284		45.0	56.9	21000
				-	57.6	-
				31.0	23.4	11000
□S-2a-1	0.071	29.7	23.7	12000		
		27.5	23.2	11000		
		28.5	25.8	15400		
□S-2a-2	0.142	32.7	29.0	14000		
		34.1	29.0	13600		
		38.7	41.0	20000		
□S-2a-4	0.284	32.2	39.1	22000		
		36.5	35.7	22600		
5	○6000-4a-2	0.188	22.3 (47.6)	29.0	33.2	28000
	○6000-2a-4	0.278		33.6	46.4	34400
	○6000-2a-2	0.139		31.2	31.4	21600

(注) P_f : 円周方向等価補強筋比 (%)

f_c' : 内部コンクリート1軸圧縮強度 (MPa)

括弧内は型枠モルタル圧縮強度 (MPa)

σ_a : 点aの圧縮応力 (MPa)

σ_b : 点bの圧縮応力 (MPa)

ϵ_b : 点bの軸ひずみ ($\times 10^{-4}$)

た。以下のひずみに関する検討はすべて圧板間の変位計測値によるものである。

3 実験結果と考察

3.1 破壊性状

(1) 破壊状況

図3にメッシュ束線太さの異なる試験体の応力-ひずみ ($\sigma - \epsilon$) 曲線を示す。以下の試験体では応力 σ は荷重をコアコンクリート (直径または一辺130mm) の断面積で除して表現している。連続繊維メッシュ補強モルタル管を用いた試験体ではカバーモルタル部分に亀裂が生じるとともに一旦、ピークまたは剛性急変点 (点a) を迎え、点a空りで荷重降下後補強量の多い場合にはさらに耐力が増大して2回目のピーク (点b) を迎えるが、補強量の少ないものはそのまま荷重が減退してゆく。試験体によっては点aと点a空り7区別の付かないものもある。表3に各試験体の特性値と実験結果の一

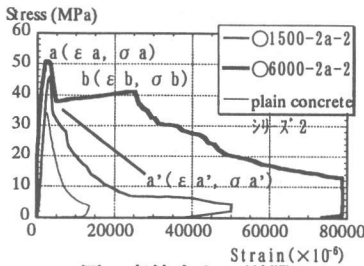
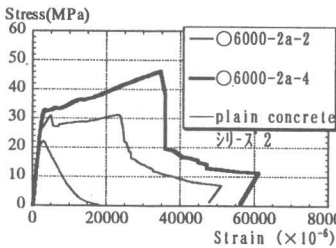
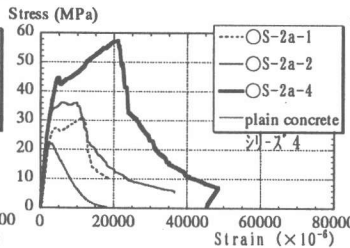


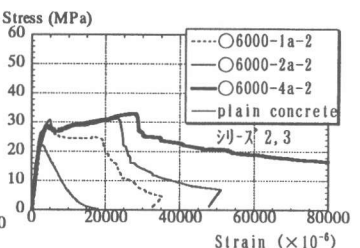
図3 束線太さの影響



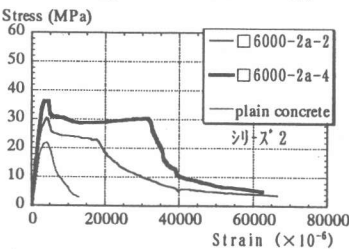
(a) 円柱 - 6000de - 2 軸



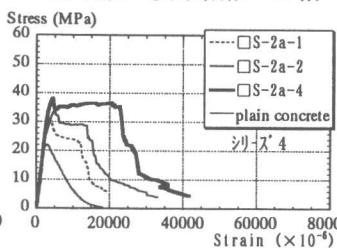
(a) 円柱 - 炭素繊維 - 2 軸



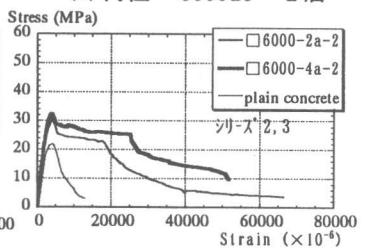
(a) 円柱 - 6000de - 2 層



(b) 角柱 - 6000de - 2 軸



(b) 角柱 - 炭素繊維 - 2 軸



(b) 角柱 - 6000de - 2 層

図4 メッシュ層数の影響
(アラミド繊維)

図5 メッシュ層数の影響
(カーボン繊維)

図6 メッシュ配向の影響
(アラミド繊維)

覧を示す。

(2) 原点から点aまでの性状

応力レベルが小さい範囲では高強度モルタル管部分の寄与でプレーンコンクリートよりも剛性が大きく、点aに近づくに従って補強量による差が現れ、点aにおける応力 σ_a は補強量の増加に伴い増大する。点aにおける軸ひずみ ϵ は補強量比に関わらず3000 μ 程度でありモルタルのみのシリンドー圧縮試験最大応力時の軸ひずみとほぼ一致することから点aはカバーモルタル部分の剥離が生じた時に相当する。

(3) 点aから点bまでの性状

補強筋量の大きい試験体ではひずみレベルが大きくなるに従い、一部繊維の破断するかすかな音を生じながら応力が増大し2回目のピーク (点b) を迎える。点b直後に連続的な大きな音と共に繊維が破断し、応力は急激に減少する。破断面はカーボンはカッターで切断した様であり、アラミドは竹ぼうき状であった。

3.2 メッシュによる横拘束効果

(1) メッシュ層数の影響

図4にアラミド繊維メッシュ試験体 (2, 4層) の $\sigma - \epsilon$ を図5にカーボン繊維メッシュ試験体 (1, 2, 4層) の $\sigma - \epsilon$ を示す。メッシュ層数が多いものほ

ど最大圧縮応力の増大、靱性能の改善がなされることが分かる。層数の多い試験体ほど点aにおける応力 σ_a が上昇し、点bの応力 σ_b 、ひずみ ε_b 両者が増大している。角柱試験体ではどの補強レベルでも円柱に見られたほどの横拘束効果が見込めない結果となっている。

(2) メッシュの配向(軸数)の影響

図6にメッシュ軸数の違う試験体の応力-軸ひずみ関係を示す。(a)の円柱試験体は第2ピーク時(点b)におけるひずみ ε_b が1軸で20000 μ であるのに対して2軸が25000 μ 、4軸が35000 μ となっており、その時の応力 σ_b もそれぞれ25、30、45MPaと上昇している。水平方向束線のみ1軸に比べて縦・斜め方向束線のある2軸、4軸の方が横拘束効果は増大することが分かる。図7に3軸メッシュの試験体の応力-束線ひずみ関係を示す。傾斜束線に引張ひずみが生じ始めるのは荷重がピークを超え軸方向ひずみが4000 μ を超えた付近からである。このように傾斜束線には軸方向の圧縮ひずみも同時に生じているため、横拘束に寄与する引張応力はなおさら小さくなっており、先に定義した円周方向等価補強筋比 p_f で与えられる関係よりも側圧効果としての有効性は低いと考えられる。しかしながら図6に得られた軸数増大に伴う

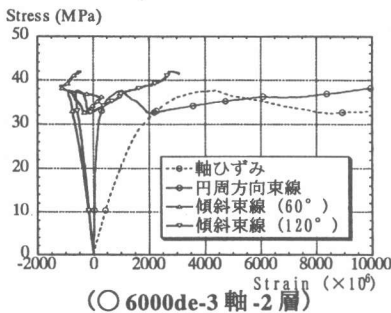


図7 応力-束線ひずみ関係

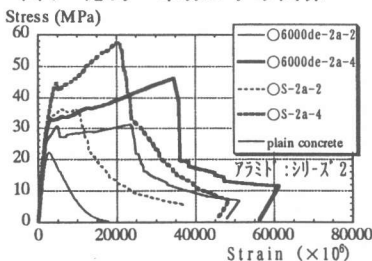


図8 繊維種類の影響(アラミド, 炭素繊維)

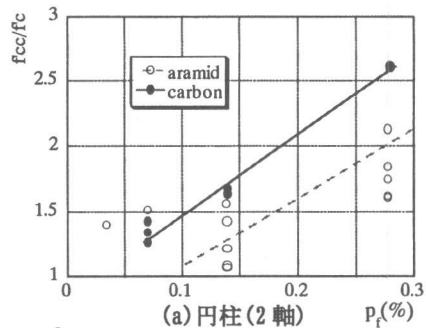
強度、靱性改善効果は傾斜束線、軸方向束線の存在がより目の細かいメッシュを構成して一様に側圧を作用させることに寄与し、局所的な損傷を分散させる方があると言える。

(3) 繊維種類の影響

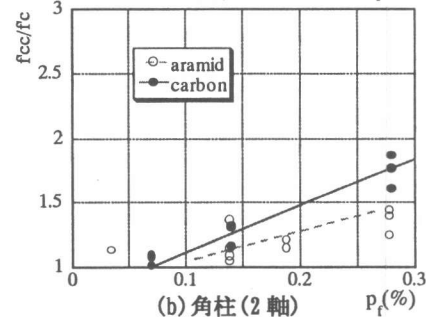
図8に補強筋比 p_f が同一レベルのアラミドとカーボンの試験体について応力-軸ひずみ関係を示す。カーボンはアラミドに比べて応力 σ_b が1.1~1.3であり、アラミドはカーボンに比べてひずみ ε_b が1.8倍~2.5倍に大きくなっている。弾性係数が小さく破断伸びの大きいアラミド繊維は靱性能改善に効果的であり、弾性係数が大きく破断伸びの小さいカーボン繊維は強度上昇に効果的であることがわかる。

(4) 強度の増大率

図9は横軸に補強筋比 p_f をとり、各実験シリーズの2軸メッシュの試験体について強度上昇率をアラミドとカーボンで比較したものである。強度上昇に必要な最低限度の補強筋比が認められる。また1.5倍の強度上昇を得るのにアラミド繊維メッシュでは円柱0.2%角柱0.3%、カーボン繊維メッシュでは円柱0.1%角柱0.2%程度の補強筋比が必要であることが分かる。



(a) 円柱(2軸)



(b) 角柱(2軸)

図9 強度上昇率-補強筋比関係

(5) 点bのひずみ増加率

最大応力が第2ピーク(点b)で決まる場合の軸ひずみ ϵ_b をブレンコンクリートの最大強度時のひずみ ϵ_0 で除したひずみ増加率と補強筋比 p_f の関係を図10に示す。各実験シリーズの2軸メッシュの試験体について比較した。円柱試験体についてカーボンとアラミドと比較してひずみ増加率は低いレベルにとどまっているが角柱試験体では繊維種類による違いが見られないことが特徴である。

(6) 束線ひずみ

図11にカーボン繊維メッシュ試験体の応力-軸ひずみ-円周方向束線ひずみ関係を示す。束線ひずみは、軸ひずみ3000 μ 付近(点aに相当、型枠に亀裂)を超えてから軸ひずみと比例関係を保ちながら増大する。補強筋比が低いほど束線ひずみの増大率が大きいことが認められる。束線ひずみが最大となる点は第2ピーク点bに対応している。最大束線ひずみはメッシュ層数の最も少ない試験体で12000 μ 程度であり、層数が増えるほど束線の最大ひずみは低下する傾向にあると言える。なおアラミド繊維メッシュでは計測できた最大束線ひずみは1.9% (O 6000-2a-4層)であった。

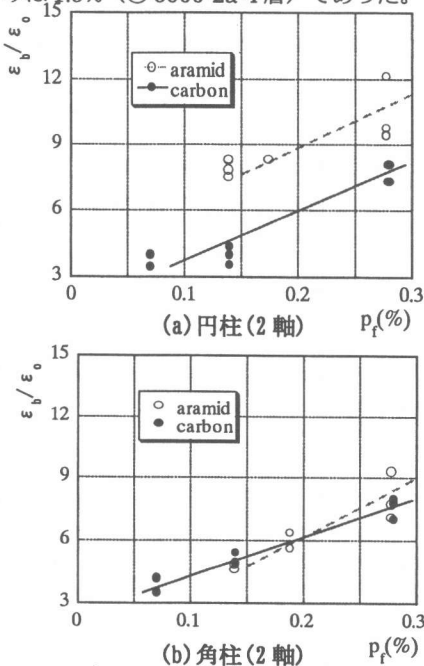


図10 軸ひずみ増加率-補強筋比関係

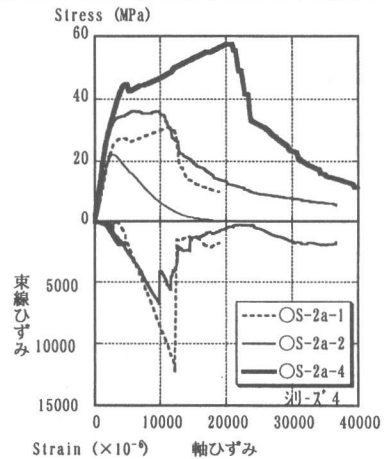
3.3 既往の多軸応力破壊モデルとの比較

(1) 既往の破壊則との対応

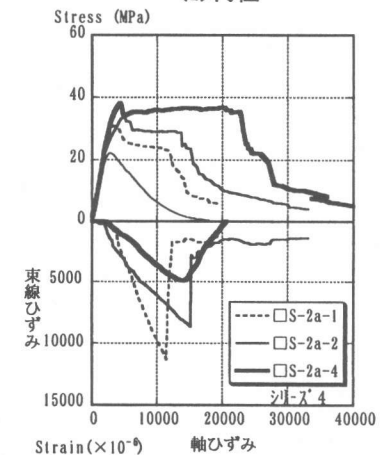
Ottosenによる多軸応力下の破壊則[1]を用いて束線破断時の耐力を算出し実験値 σ_b と比較した。計算に使用したコアコンクリートの物性仮定値を表3に示す。カーボンSの試験体(2軸のみ)について最大束線ひずみ12000 μ 時の側圧に対する最大強度の計算値と実験値を表4に示す。実験値の計算値に対する比は0.85~0.99であり、 p_f の小さい増分は過大評価の結果となった。

(2) 既往の構成則との対応

カーボンS 2軸メッシュ円柱試験体についてOttosenによる多軸応力下の構成則[2]を用いて応力-ひずみ関係を求め実験値と比較した。ここで、実験に基づき図12に示すように、側圧と軸圧の関



(a) 円柱



(b) 角柱

図11 応力-軸ひずみ-円周方向束線ひずみ関係

係を以下のように定めた。①破壊条件から実験値 σ_b を与える側圧を計算し、最大有効側圧 f_{ie} を定めた。②軸応力が $0.7f'_c$ (f'_c : コアコンクリート圧縮強度) の時点から側圧が加わり始め、軸応力が σ_b のとき側圧が f_{ie} に達するまで、軸応力と側圧が線形

表 3 コアコンクリートの物性仮定値

		OS-2a
1軸圧縮強度	$ f_c $	22.3MPa
引張り強度比	$k = f_t / f_c $	0.1
2軸圧縮強度	$ f_{sc} $	1.16 $ f_c $
compressive meridian上の1破壊点	σ_{sc}	-36.0
	τ_{sc}	31.1

表 4 破壊則による最大強度の推定

	pf (%)	f'_c (Mpa)	σ_c (Mpa)	計算値 (Mpa)	実験値/計算値 (平均値)
OS-2a-1	0.071	22.3	27.9	33.7	0.83
			31.1	33.7	0.92
			31.1	33.7	0.92
OS-2a-2	0.142	22.3	36.3	43.1	0.84
			36.0	43.1	0.83
			37.1	43.1	0.86
OS-2a-4	0.284	22.3	60.3	59.0	1.02
			56.9	59.0	0.96
			57.6	59.0	0.98

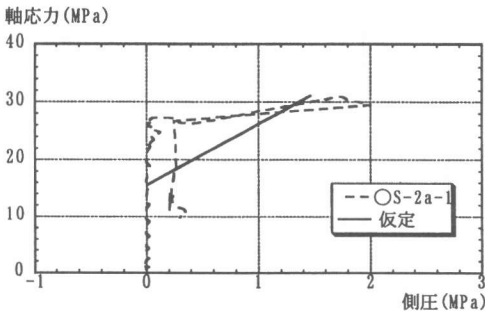


図 12 側圧 - 軸応力関係の仮定

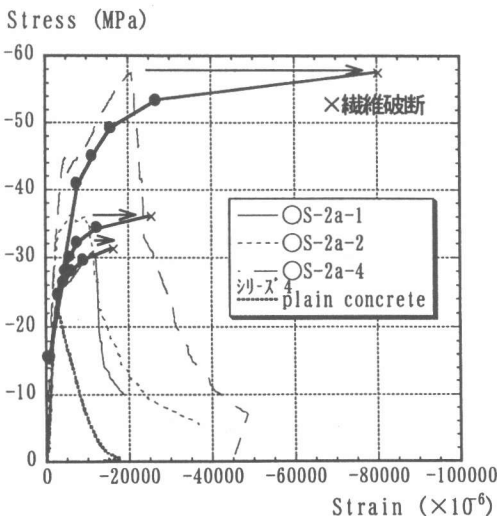


図 13 $\sigma - \epsilon$ 関係(構成則により推定)

関係を保ったまま順次コアコンクリートに加わると仮定した。図 13 に計算曲線と実験曲線を示す。a' 点以降の経路はほぼ対応しており、補強層数の増加による $\sigma - \epsilon$ 曲線の形状の違いを再現できている。今後横拘束コンクリートの性状評価に多軸応力下の構成則を適用した検討が有効と思われる。

4 まとめ

連続繊維の新しい利用方法として連続繊維メッシュを補強材としたモルタル管の作成を試み、これを打ち込み型枠としたコンクリート柱体について1軸圧縮試験を行い以下の結果を得た。①連続繊維メッシュ補強モルタル型枠の横拘束効果によりメッシュ補強量に応じた圧縮強度及び靱性能の改善がみられる。②円形断面の方が角型断面よりも横拘束効果は大きい。③アラミド繊維は靱性能改善に、カーボン繊維は強度上昇に効果的である。④メッシュが水平方向束線のものに比べ縦・斜め方向束線のある方が横拘束効果が増大する。⑤メッシュ破断による破壊時の円周方向束線のひずみは最大 12000 μ (カーボン)、19000 μ (アラミド) 程度であった。⑥既往の多軸応力下にあるコンクリートの破壊則及び構成則を適用し最大耐力及び $\sigma - \epsilon$ 関係の再現を試み、実験値と比較検討し、ほぼ良好な対応が見られた。

付記

本研究は社団法人建築研究振興協会 FRP-Hybrid 研究委員会(委員長 松崎育弘)の研究活動の一環として行われたものである。

連続繊維の素材は(株)東レ、(株)帝人から提供され、メッシュ作成に当たっては日東紡績(株)、新日本製鐵(株)の協力を得た。実験実施は(株)松村組技術研究所の協力を得た。

参考文献

- [1] Ottosen, N. S.: A Failure Criterion for Concrete. Journ. Eng. Mech. Div. ASCE, Vol. 103, EM4, Aug.1977
- [2] Ottosen, N. S.: Constitutive Model for Short-Time Loading of Concrete. Journ. Eng. Mech. Div. ASCE, Vol. 105, EM1, Feb. 1979