

論文

[2143] 長繊維補強筋を用いたコンファインドコンクリートの応力・ひずみ関係に関する実験的研究

正会員 ○窪田敏行 (近畿大学建築学科)

正会員 村上雅英 (近畿大学建築学科)

1. はじめに

炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維などの連続長繊維を鉄筋コンクリート構造における鉄筋の代替材として利用する目的で種々の実験研究が行われている。これらの長繊維を建築物の柱やはりの曲げ主筋またはせん断補強筋として利用可能にするためには、部材の弾塑性域における挙動を知る必要がある。本研究では、補強されたコンクリートの基本的な性質である圧縮力を受けたときの応力・ひずみ関係を対象とした。本研究では、炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維の3種類の長繊維を横拘束補強筋として用いた各柱および円柱の中心圧縮試験を行い、その応力・ひずみ関係、特に、最大耐力、最大耐力以降の耐力低下について、補強筋量、補強筋の種類、断面形状の違いによる比較検討を、また、鉄筋を補強筋として用いたときの応力・ひずみ関係の既往の表示式との比較検討をした結果をまとめた。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、図1に示すように、15cm角と15cmφの断面をもち高さ45cmの角柱と円柱である。補強筋は6φ(公称)とし、かぶりコンクリートが無い状態を想定して外周面に沿って横補強筋を配筋した。また、各試験体とも横補強筋の間隔を固定するために6φの鉄筋を軸方向に、円柱の場合は3本、角柱の場合は4本を配筋した。試験体の実験変数は、表1に示すように補強筋の種類(アラミド

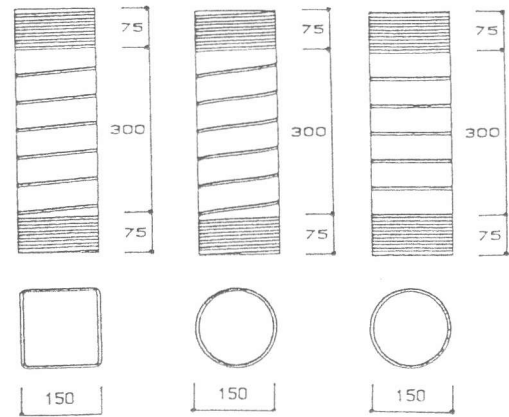


図1 試験体形状

表1 試験体一覧

P <sub>v</sub> (%)	アラミド繊維		ガラス繊維		炭素繊維	
	角柱	円柱	角柱	円柱	角柱	円柱
0.76(@100)	QA-08-240 QA-08-360 QA-08-600		QG-08-240 QG-08-360 QG-08-600		QC-08-240 QC-08-360 QC-08-600	HC-08-360
1.01(@75)	QA-10-360	SA-10-360	QG-10-360	HG-10-360	QC-10-360	HC-10-360
1.51(@50)	QA-15-240 QA-15-360 QA-15-600		QG-15-240 QG-15-360 QG-15-600		QC-15-240 QC-15-360 QC-15-600	HC-15-360
2.01(@37.5)	QA-20-360		QG-20-360		QC-20-360	HC-20-360
3.02(@25)	QA-30-360 QA-30-600	SA-30-360	QG-30-360 QG-30-600		QC-30-360 QC-30-600	HC-30-360
0.00			QN-00-360	NN-00-360		

繊維、ガラス繊維、炭素繊維)、補強筋量(体積比 $P_v=0.76\sim 3.01\%$ の間の5種類)、コンクリート強度(240,360,600kgf/cm<sup>2</sup>の3種類)である。試験体名のQは角柱、SとHは円柱、続く数字は横補強筋比(%)を10倍にして丸めた値、最後の数字はコンクリート強度を表す。各試験体の上下7.5cm間は、その試験体に使われている補強筋を1.25cm( $P_v$ で約6%)間隔に配筋して拘束を大きくし主な試験区間を高さ方向中央30cmとした。アラミド繊維は、角柱、円柱共にスパイラル、ガラス繊維と炭素繊維は、角柱ではスパイラル、円柱では閉鎖型とした。スパイラル筋の断面は全て円形である。円柱の閉鎖型補強筋に用いたガラス繊維および炭素繊維の断面は長方形であるが、繊維の含有体積比はスパイラル筋と等しくしている。ただし、アラミド繊維は綾織りになっているため、スパイラル筋加工時に偏平になっている部分もある。また、角スパイラルの隅角部の曲げ加工方法については、エポキシ樹脂を含浸させた各繊維束を角パイプに巻き付けた後硬化させる方法によった。

スパイラルの場合は中央部30cm間と上下7.5cm間で補強筋を連続させ、その端部は1巻分を重ねエポキシモルタルで固めてずれないようにした。

使用材料の力学的性質を表2に示す。長繊維補強筋の引張試験結果は、本試験体用補強筋と同じ繊維含有率を持つ同断面積の直線材を同時に製

作しその試験片にひずみゲージを貼り計測したものである。強度算出に際しては、試験片の公称断面積を用いた。また、コンクリート強度は、10cmφ×20cmのシリンダーによる圧縮試験結果である。

## 2.2 実験方法

圧縮の加力には500ton圧縮試験機を用いた。加力は準静的な一方向単調載荷とし最大荷重以降横補強筋が破断するまで加力することを原則とした。加圧面は破壊による変形が一部に集中しないように上下加圧板を試験機に固定した。また、試験体の上下面と加圧板との間は石膏により密着させた。縦ひずみは、図2に示すように、試験体高さ方向中央20cm間と31cm間で、試験体に埋め込んだ6φのボルト間を計測治具に取り付けた変位計(ストローク25mm)で測定した。20cm間のひずみは相対する2面で、31cm間のひずみは4面で測定した。また、横ひずみは、図2に示すように十字方向4箇所で高さ方向中央位置で変位計により測定した。角柱試験体の場合は対角方向の他、側面に直角な方向についても測定した。ただし、以下に示す縦ひずみは、31cm間で測定した4つの平均とし、横ひずみは対角方向で測定した4つの平均とした。補強筋のひずみは中央点を含む高さ方向3点ひずみゲージにより測定した。

表2 材料の力学的性質

補強筋 (単位: Kgf/mm <sup>2</sup> )						
	アラミド繊維		ガラス繊維		炭素繊維	
	スパイラル	7-7°	スパイラル	7-7°	スパイラル	7-7°
引張強度	117.5	142	110	165	160	
ヤング係数	5950	4530	4200	11800	13000	
コンクリート (単位: Kgf/cm <sup>2</sup> )						
	F <sub>c</sub> =240	F <sub>c</sub> =360	F <sub>c</sub> =600			
圧縮強度	260.7	325.7	504.7			
ヤング係数	1.89×10 <sup>5</sup>	2.26×10 <sup>5</sup>	2.76×10 <sup>5</sup>			

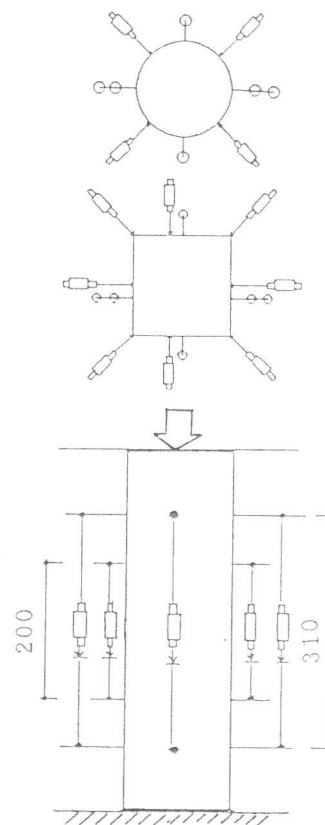


図2 ひずみの計測

### 3. 実験結果および考察

#### 3. 1 最大耐力および最大耐力時のひずみ

表3に最大耐力および最大耐力時のひずみを示した。F c = 360kgf/cm<sup>2</sup>の角柱試験体の最大耐力は、アラミド繊維で330~382kgf/cm<sup>2</sup>、平均357.8kgf/cm<sup>2</sup>、ガラス繊維で334~363kgf/cm<sup>2</sup>、平均348.7kgf/cm<sup>2</sup>、炭素繊維で375~424kgf/cm<sup>2</sup>、平均値で390.8kgf/cm<sup>2</sup>となっており、アラミド繊維とガラス繊維はほぼ同じ耐力で炭素繊維がやや高い耐力となっている。また、横補強筋量が多いほうが最大耐力がやや大きくなる傾向も見られる。F c = 240kgf/cm<sup>2</sup>の角柱試験体とF c = 600kgf/cm<sup>2</sup>の角柱試験体の最大耐力はF c = 360kgf/cm<sup>2</sup>の角柱試験体と同じ傾向で、アラミド繊維とガラス繊維がほぼ同じ耐力で炭素繊維がやや高い耐力となっており、また、補強筋が多い方がやや高い耐力となっている。F c = 360kgf/cm<sup>2</sup>の円柱試験体では横補強筋量が多くなると角柱に比べて最大耐力はかなり大きくなっており、炭素繊維では横補強筋比が3.0%の試験体の最大耐力は722kgf/cm<sup>2</sup>にまで達した。

最大耐力時の縦ひずみは角柱試験体では、そのほとんどが0.2~0.4%の範囲に入っているのに対して、円柱試験体では、最大4%を越えるものもある。断面の形状、補強筋の種類、コンクリート強度にかかわらず、補強筋量が多くなると最大耐力時のひずみも大きくなっている。

表3 最大耐力および最大耐力時のひずみ

アラミド繊維	耐力 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	ひずみ (%)	ガラス繊維	耐力 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	ひずみ (%)	炭素繊維	耐力 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	ひずみ (%)
QA-08-360	348.3	0.211	QG-08-360	334.4	0.253	QC-08-360	374.8	0.250
QA-10-360	330.4	0.268	QG-10-360	334.6	0.272	QC-10-360	386.2	0.268
QA-15-360	374.2	0.268	QG-15-360	363.2	0.273	QC-15-360	398.6	0.322
QA-20-360	354.3	0.266	QG-20-360	353.7	0.275	QC-20-360	370.2	0.328
QA-30-360	381.9	0.298	QG-30-360	357.5	0.309	QC-30-360	424.0	0.406
QA-08-240	244.7	0.198	QG-08-240	253.3	0.222	QC-08-240	276.0	0.243
QA-15-240	261.6	0.302	QG-15-240	259.2	0.264	QC-15-240	281.7	0.395
QA-08-600	595.9	0.254	QG-08-600	579.8	0.245	QC-08-600	604.6	0.277
QA-15-600	588.6	0.338	QG-15-600	582.6	0.282	QC-15-600	620.6	0.353
QA-30-600	608.1	0.304	QG-30-600	562.9	0.343	QC-30-600	664.3	0.357
SA-10-360	344.7	0.183	HG-10-360	330.8	0.309	HC-08-360	332.1	0.180
						HC-10-360	369.8	0.253
						HC-15-360	435.9	1.752
						HC-20-360	546.5	2.438
SA-30-360	697.1	4.316	HG-30-360	579.9	3.098	HC-30-360	722.3	2.676
補強筋無し			QN-00-360	324.2	0.277	NN-00-360	352.5	0.244

#### 3. 2 応力・ひずみ関係

図3に圧縮応力-縦ひずみ関係の実験結果を、断面形状、コンクリート強度、補強筋の種類別に示した。縦ひずみは2.2%までとしているが矢印はその先まで加力をしていることを示す。圧縮応力-縦ひずみ関係の形は、①縦ひずみが0.2~0.4%付近で最大耐力に達しその後急激に耐力が低下するもの、②最大耐力以降やや緩やかに耐力低下をするもの、③縦ひずみが0.2~0.4%から傾きは緩やかになりそれ以降も耐力低下せず上昇を続け、補強筋の破断と同時に急激に耐力低下を起こすものに大別できる。なお、ほぼ垂直に耐力低下しているのは横補強筋が破断した時であり、階段状になっているのは横補強筋の破断が順次起こっていることを示している。①の形は、横補強筋無しの試験体とF c = 600kgf/cm<sup>2</sup>の炭素繊維の試験体にみられる。③の形は、円柱試験体の補強筋量が多いもののみみられる。縦ひずみが2~4%の時に最大耐力に達し横補強筋の破断により急激な耐力低下が起きている。②の形は、その他の試験体みられる。最大耐力以降

の耐力低下は、コンクリート強度が大きいほど、横補強筋量が少ないほど大きくなっている。

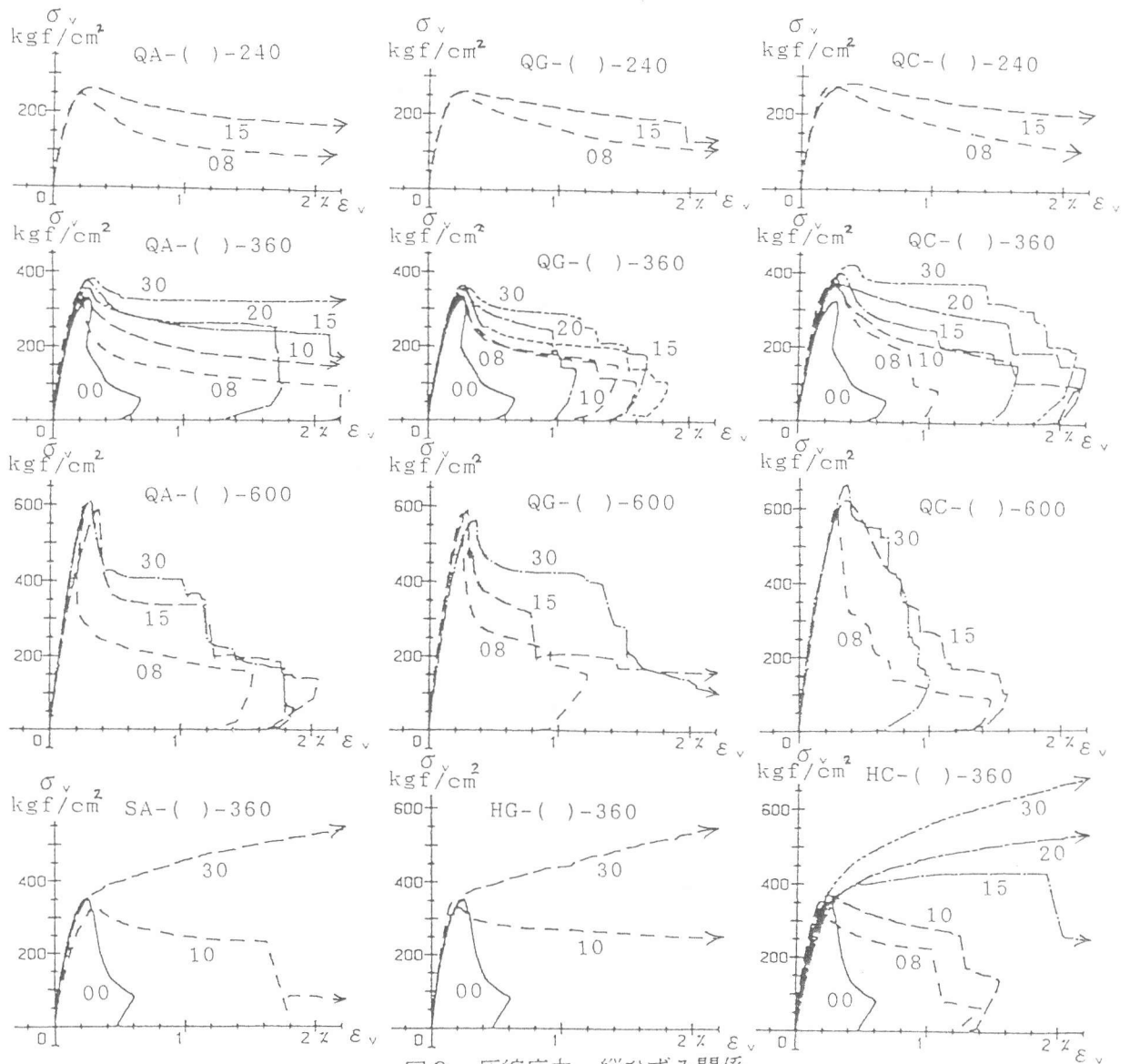


図3 圧縮応力・縦ひずみ関係

### 3.3 横ひずみ

図4は、3.2節に示した応力ひずみ関係の形が①、②、③のものからそれぞれQC-15-600、QC-20-360、HC-20-360を選び、圧縮応力( $\sigma_v$ )－縦ひずみ( $\epsilon_v$ )関係を実線で、変位計で測定された横ひずみ( $\epsilon_h$ )－縦ひずみ( $\epsilon_v$ )関係を破線で、また、ひずみゲージで測定された補強筋のひずみ( $\epsilon_r$ )－縦ひずみ( $\epsilon_v$ )関係を一点鎖線で表わし、重ねてプロットしたものである。横ひずみは最大耐力より少し手前から急激に増加している。変位計による横ひずみもひずみゲージによる横ひずみも、最大耐力以降少しまではほぼ同じ動きをしているが、その後は変位計による横ひずみが急増しているのに対し、ひずみゲージによる横ひずみの増加はかなり緩やかである。最大耐力以降試験体の回りのコンクリートが剥落し始めるため、変位計による横ひずみの計測値は浮き上がったコンクリートの表面の動きを計測した値と考えられるが破壊が急激に進んでいることを示している。特に角柱試験体では、ひずみゲージの測定値は最大でも約0.5%となっており材料試験結果からの炭素繊維の破断時のひずみ約1.2~1.3%に比べるとかなり小さい値となっている。

図5に同じ試験体のひずみゲージにより測定された横ひずみの高さ方向の分布を示した。○印

が最大耐力時のひずみ、△印がその点で経験した最大ひずみを表している。上部のひずみが大きくなっている理由は、コンクリートの打設方向が上部からであったためと考えられる。角柱試験体では、大部分の試験体でコンクリートの圧壊による塑性膨張に伴い隅角部付近の補強筋に曲げ引張り応力が付加され、その部分で補強筋が破断した。しかしながら、ひずみゲージは辺の中央に貼ったため、その位置で測定されたひずみの最大値は破断時のひずみまで達しなかった。一方、円柱試験体では角柱試験体のような局所的な2次応力が生じなかったため、補強筋のひずみの最大値は約1.5%であり、破断時のひずみ付近まで達した。

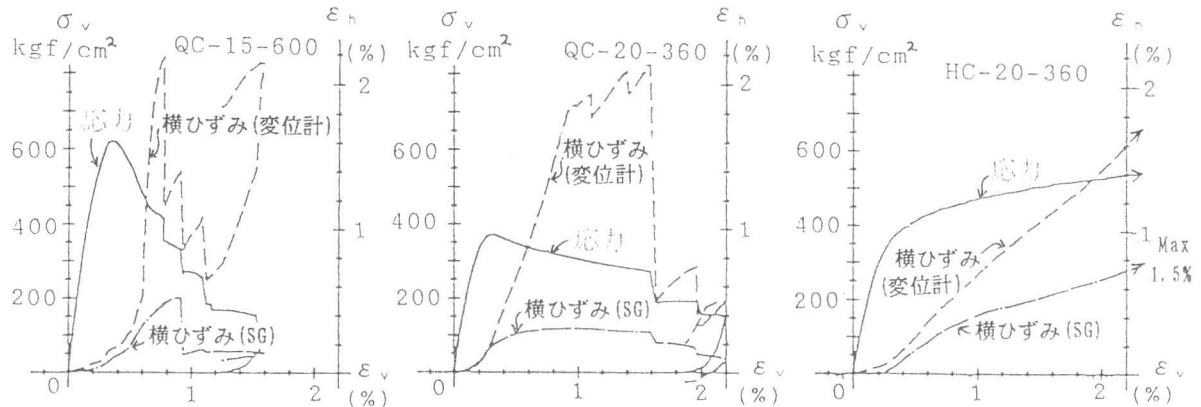


図4 圧縮応力・縦ひずみ関係と横ひずみ・縦ひずみ関係

図6は、角柱試験体について最大耐力時の横ひずみの平均値にヤング係数を掛けて求めた補強筋の応力度を補強筋量に対してコンクリート強度別に示したものである。ただし、応力度は水平方向の成分とした。実線はアラミド繊維、点線はガラス繊維、一点鎖線は炭素繊維である。コンクリート強度にかかわらず補強筋量が多くなると応力度が大きくなっている。また、炭素繊維はアラミド繊維やガラス繊維と比べてヤング係数が約2倍であり、横拘束効果が大きいので、炭素繊維は他と比べて大きな応力度になっており、繊維の違いによる耐力上昇の程度差と対応している。

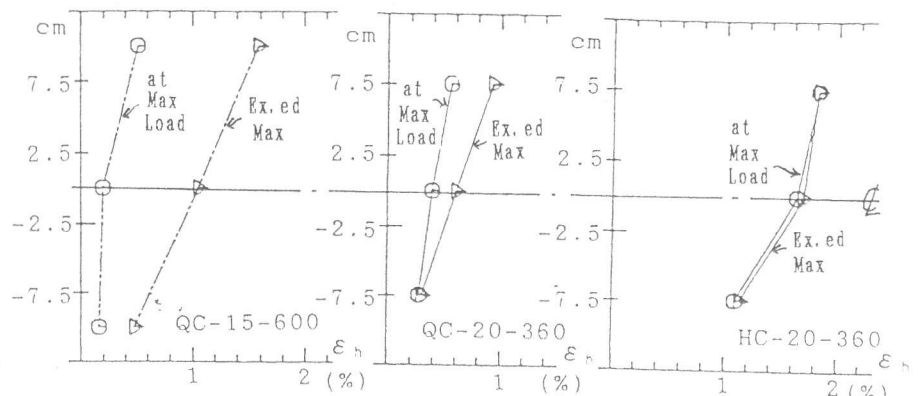


図5 横ひずみの高さ方向分布

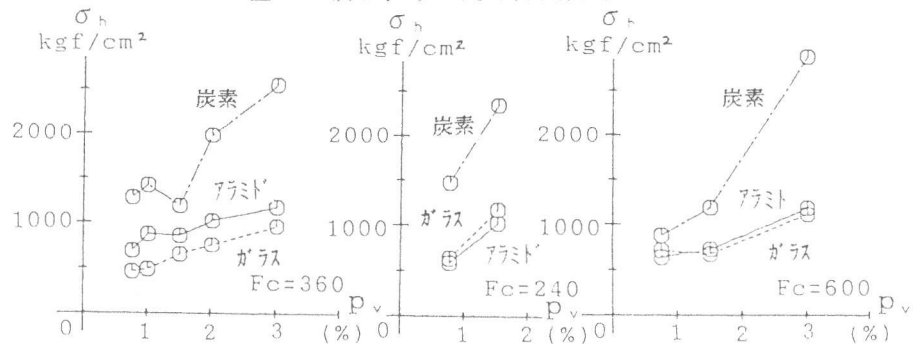


図6 最大耐力時の横ひずみ

### 3. 4 既往の表示式との比較

鉄筋で横補強したコンクリートの応力・ひずみ関係の表示式が幾つか提案されている。このうち3つの表示式をもちいて角柱QC-20-360の実験結果について比較を試みた。図7は、文献[1]、[2]、[3]に示される式による計算結果との比較である。図中の実線は実験値であり、破線はそれぞれの式の中で使われている鉄筋の降伏強度の代わりに補強材の破断強度を用いて計算したものである。いずれの計算結果も実験値と大きく異なり、同じひずみ時の耐力はかなり大きく評価されている。これは、横補強筋が隅角部で直線材としての強度よりもかなり低い強度で破断しているためと、さらに、補強筋のヤング係数が鉄筋と比べて小さく最大耐力時の横拘束力が小さくなっていたためと考えられる。

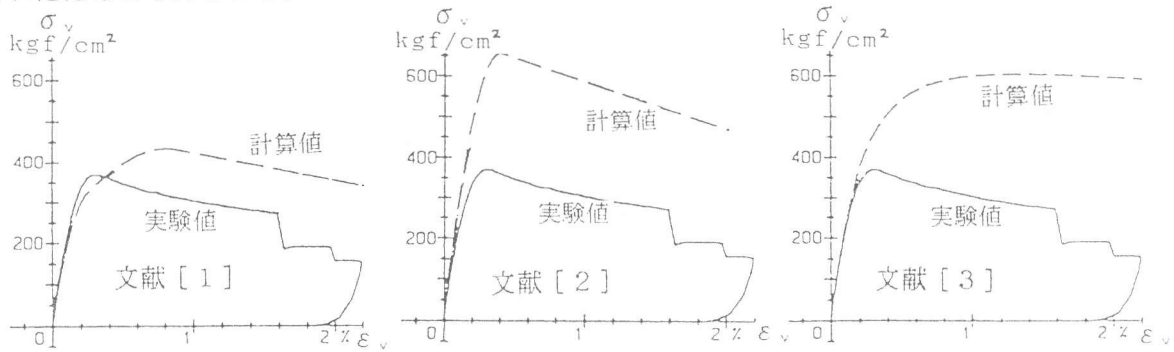


図7 既往表示式との比較 (QC-20-360の場合)

### 4. まとめ

長繊維を横補強筋とした角柱および円柱の圧縮試験を行ない、以下の知見を得た。

- ①最大耐力は補強筋量が多くなると大きくなり、アラミド繊維、ガラス繊維に比べて炭素繊維の方が大きく、これは最大耐力時の横拘束効果の違いによるものと確認された。
- ②円柱で補強筋量の多い試験体は、数パーセントの縦ひずみまで耐力上昇をしたが、他は0.2～0.4%の縦ひずみ時に最大耐力に達した。
- ③長繊維補強筋を用いた場合の応力-ひずみ関係は、既往の鉄筋を用いた場合の応力-ひずみ関係表示式では表現不可能であり、長繊維補強筋の力学的特性を考慮した応力-ひずみ関係式を開発する必要がある。

### 参考文献

- 1) 西山峰広、六車熙、渡辺史夫：横拘束によるコンクリート系部材の曲げ靱性改善、コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム論文集、II、pp. 33-44、1988.3.
- 2) Scott, B.D., Park, R., and Priestley, M.J.N.: Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates, Jou. of ACI, Vol. 79, No. 4, pp. 296-305, 1982.7-8
- 3) Mander, J.B., M.J.N. Priestley: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of Structural Div., Proc. of ASCE, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826, 1988.8.

### 謝辞

本研究は、建設省新素材総プロ「長繊維補強コンクリートWG」（委員長園部泰寿筑波大学教授）の一環として行ったものである。試験体製作にあたっては、熊谷組、清水建設、三井建設の協力を得た。また、実験の実施およびデータ整理に近畿大学建築学科卒論生、糸井、加藤、田伏君の協力を得た。委員長ならびに関係諸氏に感謝の意を表します。