

# 論文 ガラス繊維シートで巻き補強したコンクリート柱の圧縮特性

豊田 浩一<sup>\*1</sup>・北山 和宏<sup>\*2</sup>・小山 明男<sup>\*3</sup>

**要旨:** エポキシ樹脂を含浸させたガラス繊維シートを巻きつけて補強したコンクリート柱の力学特性を把握するために中心軸圧縮実験を行い、その結果をまとめた。実験変数はガラス繊維シート量、コンクリート強度、試験体の断面形状および寸法であり、各試験体の実験結果を比較検討した。その結果、ガラス繊維シートで巻き補強することでコンクリート柱の圧縮靱性を向上できることを明らかにした。また、Priestley らの提案する方法によって角柱のシート破断時の軸方向ひずみを適切に評価できることを示した。

**キーワード:** ガラス繊維シート, 巻き補強, 中心軸圧縮, 円柱, 角柱, 軸ひずみ, 横ひずみ

## 1. はじめに

兵庫県南部地震以降、既存建物の耐震補強方法として新素材を柱などに巻きつける工法が注目されている。そこで本研究では、エポキシ樹脂を含浸させたガラス繊維シートで巻き補強したコンクリート円柱および角柱の中心軸圧縮実験を行い、応力度-ひずみ関係、シート破断時の軸ひずみなど基礎的な力学特性について調べた。また巻き補強したコンクリート柱のシート破断時の軸方向ひずみを Priestley らの方法[1]によって求め、実験値と比較した。

## 2. 実験計画

### 2. 1 試験体

図-1 に試験体形状、表-1 にガラス繊維シートの材料特性、表-2 に試験体一覧を示す。試験体は無筋のコンクリート柱 20 体で、φ250×500 mm の円柱が 6 体、250×250×500 mm および 400×400×800 mm の角柱がそれぞれ 10 体および 4 体である。角柱の試験体はすべて半径 25 mm で面取りをした。コンクリートの粗骨材には陸砂利（最大寸法 10mm）を用い、縦打ちした。表-3 に φ100×200mm のシリンダー試験から得られたコンクリートの特性を示す。ガラス繊維シート（目付け量 922g/m<sup>2</sup>）は幅約 3mm

のEガラス繊維束を縦繊維束（ガラス繊維とアラミド繊維で構成）に対して交互に織り込んで布

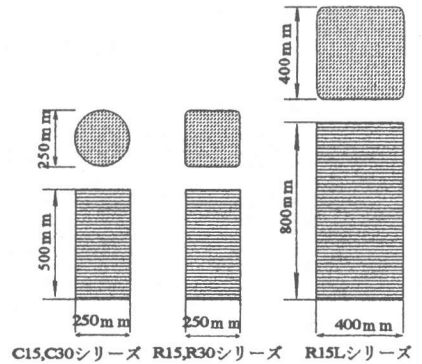


図-1 試験体形状

状に編み上げたものである。試験体のコンクリート表面に下地剤を塗布した後にエポキシ樹脂（品名 Tyfo-S, Hexcel-Fyfe 社）を含浸させたガラス繊維シートを巻き付け、表面をヘラでしごいてたるみや皺を取り除いた。その後、室内に放置して養生した。シートの重ね長さは 150 mm とした。ガラス繊維の

表-1 ガラス繊維の特性

弾性係数 (MPa)			厚さ
平均値 (X)	標準偏差 (s)	X-3s	(mm)
83768	3481	73325	0.339
引張り強度 (MPa)			破断時伸び
平均値 (X)	標準偏差 (s)	X-3s	(%)
1598	76.5	1368.5	1.7~2.1

\*<sup>1</sup> 森ビル (株) ・工修 (正会員)

\*<sup>2</sup> 東京都立大学大学院助教授・工博 工学研究科建築学専攻 (正会員)

\*<sup>3</sup> 東京都立大学大学院助手・工修 工学研究科建築学専攻 (正会員)

補強量は式(1)で示す体積比  $\rho_s$  を用いた。

$$\text{円柱} : \rho_s = 4 t_j / D$$

$$\text{角柱} : \rho_s = 2 t_j (b + h) / b h \quad (1)$$

ここで、 $t_j$  : シートの厚さ、 $b$  : 角柱断面の幅、 $h$  : 角柱断面のせい、および  $D$  : 円柱の直径である。

## 2. 2 実験変数

実験変数は表-2、3に示すように2種類のコンクリート圧縮強度、5種類のガラス繊維量、断面形状および寸法である。ガラス繊維の0.5巻きとはシートのガラス繊維束を1束おきに抜き取り、ガラス繊維量を半分にしたものである。

## 2. 3 加力方法

図-2に示す5000kN高剛性圧縮試験機で中心軸

表-2 試験体一覧

試験体名	形状・寸法	巻き数	繊維補強量
C15-0	円型断面 O-250φ	無補強	0(%)
C15-1		1巻き	0.54(%)
C15-3		3巻き	1.63(%)
C30-0	H-500mm A-156.25cm <sup>2</sup>	無補強	0(%)
C30-1		1巻き	0.54(%)
C30-3		3巻き	1.63(%)
R15-0	角型断面 □-250×250	無補強	0(%)
R15-0.5		0.5巻き	0.27(%)
R15-1		1巻き	0.54(%)
R15-2		2巻き	1.09(%)
R15-3		3巻き	1.63(%)
R30-0		H-500mm A-620cm <sup>2</sup>	無補強
R30-0.5	0.5巻き		0.27(%)
R30-1	1巻き		0.54(%)
R30-2	2巻き		1.09(%)
R30-3	3巻き		1.63(%)
R15L-0	角型断面 □-400×400		無補強
R15L-1		1巻き	0.34(%)
R15L-2		2巻き	0.68(%)
R15L-3		3巻き	1.02(%)

H: 試験体高さ、A: 断面積

表-3 コンクリートの特性

シリーズ名	圧縮強度	割裂引張り強度	ヤング係数
C15、R15、R15L	17.9(MPa)	1.78(MPa)	16878(MPa)
C30、R30	29.8(MPa)	2.44(MPa)	19190(MPa)

注: ヤング係数は圧縮強度の1/3応力時の割線剛性

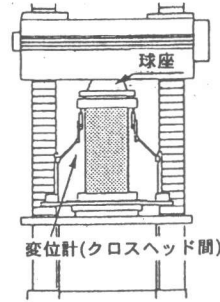


図-2 加力装置

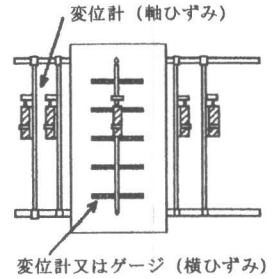


図-3 測定方法

圧縮実験を行い、実験はひずみ制御(0.02~0.04%/分)とした。測定方法を図-3に示す。円柱、角柱ともに試験体の4面に埋め込んだネジ棒間に電気式変位計を2台ずつ設置して軸変位を測定した。試験体の破壊が進行すると上下のネジ棒が平行を維持できなくなり、軸方向変位にネジ棒の回転成分が含まれることになるので、それを補正計算するために一区間に2台設置した。なお、軸ひずみの検長は円柱・角柱ともに高さ500mmの試験体では400mm、高さ800mmの角柱では640mmとした。横ひずみは、円柱では検長120mmのポリエステル・ゲージを用いて測定し、角柱ではパイ型変位計を用いて測定した。角柱の横ひずみの検長は断面が250×250mmの試験体は150mm、断面が400×400mmの試験体は300mmとした。また、クロスヘッド間の軸変位を電気式変位計で測定した。

## 3. 実験結果

### 3. 1 破壊性状

試験体破壊時の写真を図-4に示す。ガラス繊維で巻き補強した円柱の場合、シートの破断過程は、無補強の試験体が最大強度となる軸ひずみ付近で剛

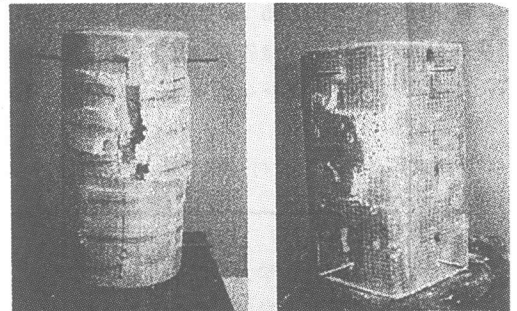


図-4 試験体破壊時の写真(左: C15-1, 右: R15-0.5)

性が大きく低下し、それ以降軸ひずみが増加するにつれて中心部が膨らみ、ほぼ中心付近で繊維シートに小さな縦ひび割れ (first crack) が発生した。その後、シートの縦ひび割れが約 6~10cm の長さになった時に、縦ひび割れの上部と下部から同時に横ひび割れが発生し、シートが完全に破断すると同時に圧縮応力度が大きく低下した。また角柱の場合、シートの破断が試験体の隅角部分で起こった以外は円柱とほぼ同様の傾向を示した。円柱・角柱ともにコンクリート強度による破壊性状の差はなく、角柱での寸法効果による違いもみられなかった。

### 3.2 圧縮応力度と軸ひずみの関係

圧縮応力度と軸ひずみの関係を図-5に示す。最大強度時

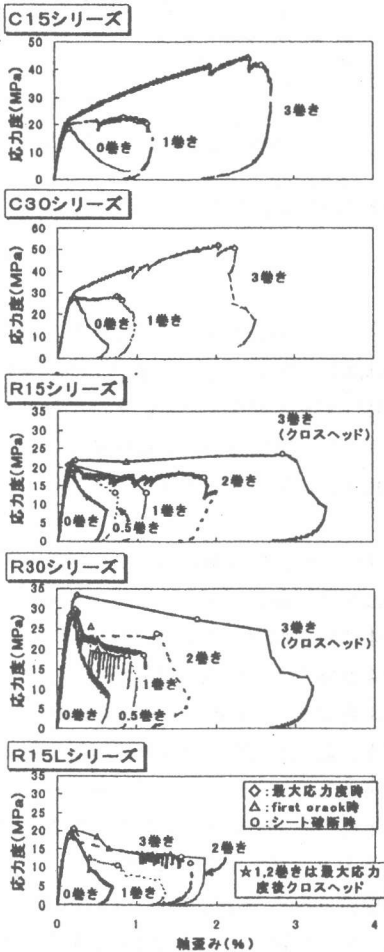


図-5 圧縮応力度-軸ひずみ関係

最大強度時を◇, first crack 発生時を△で、終局シート破断時(圧縮応力が急激に低下し始める時に対応)を○で示した。図中にクロスヘッドと記した試験体については、最大強度到達後に軸変位が急激に進み、コンクリートに埋め込まれたネジ棒

間の変位が変位計では測定できなかったため、クロスヘッド間で測定した変位を軸ひずみに代用した。円柱・角柱ともに無補強試験体が最大強度に達する軸ひずみ (0.2%程度) 付近までは同様の曲線を描いた。それ以降は円柱では剛性が低下するものの軸ひずみとともに圧縮応力度が増加した。角柱では最大強度に到達したのち応力度が低下し、その後ある程度の応力度を維持しながら軸ひずみが増加した。円柱・角柱ともにガラス繊維の巻き数が増えるに従って変形性能が向上した。応力度と軸ひずみの関係については、断面形状の影響が大きいと言える。

### 3.3 応力度と繊維補強量の関係

図-6に最大圧縮強度と補強量の関係を示す。円柱の最大強度は無補強の試験体と比べて1巻きでは

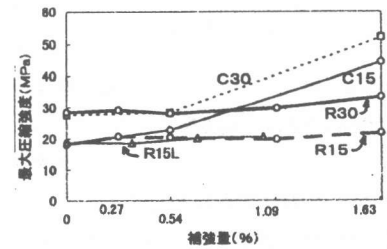


図-6 最大圧縮強度-補強量

あまり増加しなかったが、3巻きでは1.9~2.4倍と大幅に増加した。角柱の最大強度はガラス繊維量とともに漸増し3巻きでは1.17~1.21倍増加した。ただし断面が400×400mmの大きい角柱では1.09倍の増加に留まった。

図-7にシート最終破断時の圧縮応力度(図-5の○印)と補強量の関係を示す。円柱・角柱ともに補強量が増えるとシート破断時圧縮応力度は増加した。円柱の破断時圧縮応力度は最大強度時の90%~96%, 角柱では60%~87%であった。また3巻きの破断時圧縮応力度は1巻きに比べ、円柱では1.9

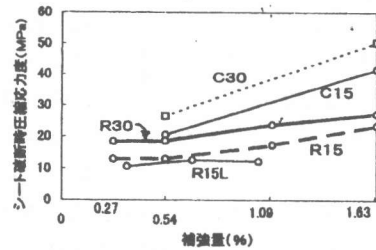


図-7 破断時圧縮応力度-補強量

~2.0倍程度、角柱では1.5~1.8倍程度増加した。ただし断面が400×

400mmの大きい角柱では15%ほどの増加にとどまり、小さい角柱(R15シリーズ試験体)の破断時圧縮応力度よりも20%~30%減少した。以上より、最大応力度、破断時圧縮応力度ともに寸法効果の影響を受けることが分かる。

### 3.4 軸ひずみと補強量の関係

図-8に最大強度時の軸ひずみと補強量の関係を示す。左の縦軸に円柱、右の縦軸に角柱の軸ひずみを取った。円柱の最大強度時軸ひずみは補強量が多いほど大きくなり、3巻きでは無補強と比べて9.7~13倍になった。また、同じ補強量では常にコンクリート強度が大きい方が最大強度時軸ひずみは小さくなった。それに対して角柱では最大強度時軸ひずみは0.16~0.25%と小さい値に分布し、3巻きでは無補強と比べて1.2~1.3倍であり、円柱と比較するとほぼ一定の値とみなせた。また同じ補強量では、コンクリート強度が大きい方が最大強度時軸ひずみは大きくなる傾向が認められた。

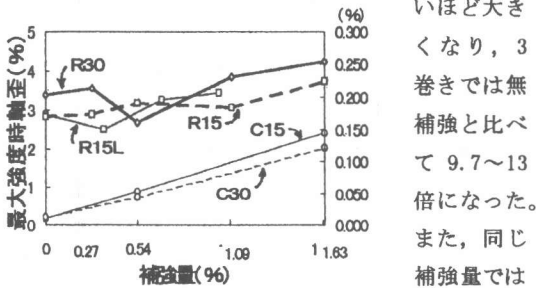


図-8 最大強度時軸ひずみ-補強量

図-9にシート最終破断時の軸ひずみと補強量の関係を示す。円柱・角柱ともに補強量が増えるにしたがってシート破断時の軸ひずみは増加した。3巻きでは1巻きと比べ円柱では2.2~2.8倍、角柱では1.6~2.5倍であった。また同じ補強量では、常にコンクリート強度が大きい方がシート破断時軸ひ

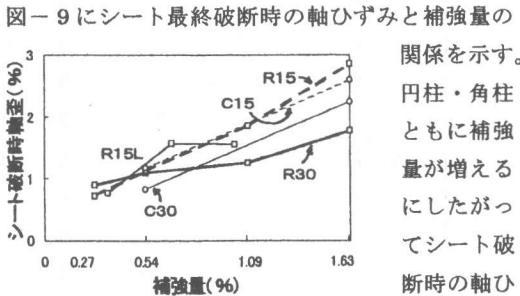


図-9 破断時軸ひずみ-補強量

ずみは小さくなった。

ずみは小さくなった。

### 3.5 ガラス繊維シートの横ひずみ

図-10に横ひずみの進行状態を示す。図中のAは初期弾性範囲で最大圧縮強度の約2/3応力時、Bは軸ひずみが0.2%時、Cは円柱では最大圧縮強度時、角柱ではfirst crack時、Dは最終的なシート破断時をそれぞれ示す。また、横ひずみの値は測定した5ヶ所の最大値を用い、実験の途中パイ型変位計が脱落した場合には変位計が残っている範囲で検討した。

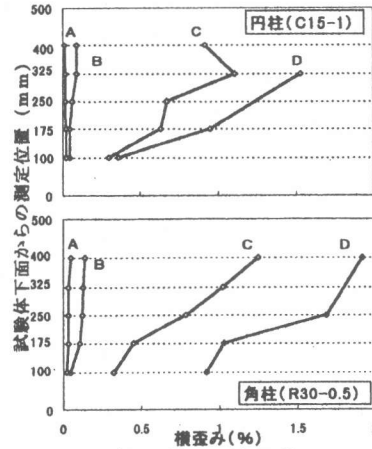


図-10 横ひずみの進行状況

図-10 横ひずみの進行状況

円柱・角柱ともに状態Bすなわち無補強のコンクリートの最大強度時まではほとんど横ひずみが生じず、それ以降軸ひずみの増加とともに横ひずみが増加した。これよりガラス繊維シートは無補強コンクリートの最大強度後に拘束力を大きく発揮することが分かる。

通常コンクリート柱が中心軸圧縮された場合、横方向のひずみは中央で最も大きくなるが、本実験においては試験体の中央部分より若干上の部分で最も大きな横ひずみが発生する傾向が見られた。この原因については不明であり、今後検討する必要がある。円柱の横ひずみは最大強度時までにかなり進んでおり、最大強度時からシート破断時までの間ではあまり増加しなかった。角柱の横ひずみは最大強度時(状態B)までほとんど進まず、最大強度時からシート破断時までの間に大きく増加した。すなわち断面形状によって横ひずみの進展に大きな違いが見られた。

### 3. 6 シート破断時横ひずみと補強量の関係

図-11 にシート破断時横ひずみと補強量の関係を示す。図中の斜線部分はガラス繊維単独で引張ったときの破断時横ひずみの範囲を示す。

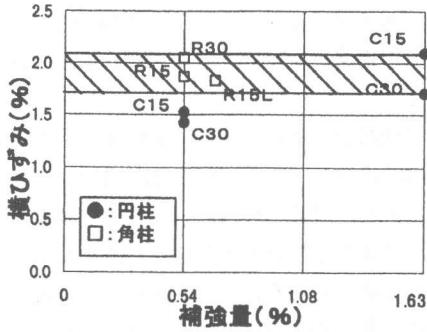


図-11 横ひずみ-補強量関係

値の最大値を用いた。ただし、この値はかならずしも破断位置のものではないことに注意を要すが、円柱ではひずみがほぼ均等に生じていることから、この値が破断時の横ひずみと考える。

最終的にガラス繊維が破断する時の横ひずみは円柱では 1.4~2.1%程度、角柱では 1.8~2.0%程度であり、円柱・角柱ともにガラス繊維が単独で破断する時のひずみ範囲にあることが分かる。これよりガラス繊維シートの破断時引張りひずみ  $\epsilon_{uj}$  の数値として 4 節で述べる 1.65%を用いることはほぼ妥当だと判断できる。

## 4. ガラス繊維シート破断時の軸ひずみの評価

### 4. 1 評価方法

合成材料を巻き付けたコンクリート柱を中心圧縮したときの合成材料破断時の軸圧縮ひずみを定量的に検討した研究はほとんどない。また中心圧縮を受けるコンクリート柱の横補強筋が破断するときの軸圧縮ひずみを定量的に評価した研究も少なく、RC角柱を対象とした Scott ら[2]およびコンクリート円柱を対象とした中塚[3]がある。しかしこれらは降伏現象を伴う鉄筋による拘束効果を対象とし、使用した実験変数の範囲に適用が限定されるため、ガラス繊維シートを連続的に巻き付けた場合には使用できない。Mander ら[4]はスパイラル筋を巻いたコンクリート円柱による中心圧縮実験においてスパ

イラル筋が破断するときに鉄筋の吸収するひずみエネルギーとコンクリートが吸収するエネルギーとが等しいと置くことによって拘束筋破断時の軸圧縮ひずみを求める方法を陰な形で示した。Priestley ら[1]は Mander らの考え方を使用して合成材料破断時の軸圧縮ひずみを陽な形で安全側に評価した。そこで簡単のためここでは Priestley らの提案した式(2)および(3)を使用して、軸方向終局ひずみ  $\epsilon_{cu}$  (繊維シートが破断して圧縮応力が急激に低下し始める時の軸ひずみ、図-5の○印に対応)を評価した。

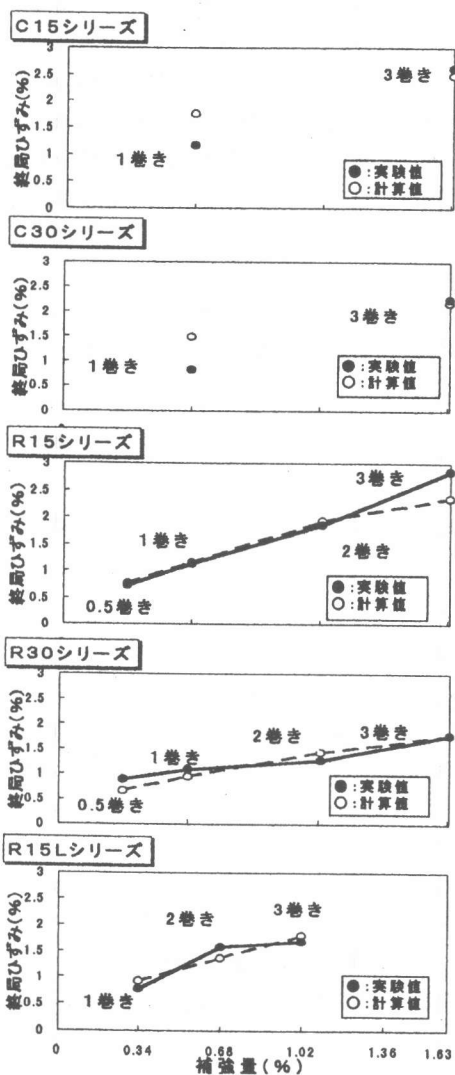
$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{2.5 \rho_s f_{uj} \epsilon_{uj}}{f'_{cc}} \quad \text{円柱の場合 (2)}$$

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.25 \rho_s f_{uj} \epsilon_{uj}}{f'_{cc}} \quad \text{角柱の場合 (3)}$$

ここで、 $\rho_s$ : 繊維補強体積比、 $f_{uj}$ : ガラス繊維の破断強度、 $\epsilon_{uj}$ : ガラス繊維の破断時ひずみ、および  $f'_{cc}$ : 拘束コンクリートの圧縮強度である。補強設計での使用を想定して、破断強度  $f_{uj}$  は平均値(X)から標準偏差(s)の3倍を引いた値(X-3s)をまるめた値(1369MPa、表-1参照)、弾性係数  $E_j$  は平均値をまるめた値(83.8GPa)を用いた。ガラス繊維の破断時ひずみ  $\epsilon_{uj}$  は  $f_{uj}/E_j$  から 1.65%とした。

### 4. 2 実験値と計算値の比較

図-12 に軸方向終局ひずみ  $\epsilon_{cu}$  の実験値と Priestley らの方法による計算値とを示す。円柱の1巻きでは実験値は計算値の60%程度に留まり、Priestley らの方法は危険側の評価となった。3巻きでは実験値と計算値とはほぼ同じであった。角柱ではコンクリート強度、寸法に関係なく Priestley らの計算値と実験値とがほぼ一致した。これより角柱については Priestley らの計算式を用いてガラス繊維シート破断時の軸方向終局ひずみを適切に評価できる。ただし断面が 400×400mm の大きい角柱では1巻きおよび3巻きの計算値が実験値よりもそれぞれ11%および7%大きくなったため Priestley らの計算式を実大の角柱に用いた場合危険側の評価となる可能性がある。



図一 12 軸方向終局ひずみの比較

### 5. まとめ

- (1) エポキシ樹脂を含浸させたガラス繊維シートでコンクリート柱を巻き補強することによって、圧縮応力度-軸ひずみ関係における変形性能が向上した。円柱では圧縮強度およびその時の軸ひずみがともに増大した。角柱では圧縮強度は1.1~1.2倍増加し、その時の軸ひずみは0.16~0.25%に分布した。
- (2) 圧縮応力度と軸ひずみの関係は断面形状の影

響が大きく、軸ひずみ0.2%以降、円柱と角柱では異なる性状を示した。

- (3) シートの最終破断に対応する軸方向終局ひずみは3巻きでは1巻きに比べ、円柱では2.2~2.8倍程度、角柱では1.6~2.5倍程度増加した。
- (4) ガラス繊維シートが最終的に破断する時の横ひずみは円柱では1.7%程度、角柱では1.9%程度であり、円柱・角柱ともにガラス繊維が単独で破断する時のひずみ範囲で破断した。補強設計時に用いるガラス繊維シートの破断時ひずみを1.65%とするのは妥当である。
- (5) Priestleyらの提案式で求めた軸方向終局ひずみは補強量の少ない円柱において実験結果を過大評価したが、それ以外の円柱・角柱では実験値とほぼ一致した。

**謝辞** 本研究は耐震補強工法検討会での分担研究であり、ご協力をいただいた昭和高分子(株)、ご助言をいただいた青山博之座長、細川洋治氏(前田建設工業)、大田勤氏(堀江建築工学研究所)、前田匡樹氏(横浜国立大学)に厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- [1] M.J.N.Priestley, F. Seible and G.M. Calvi : Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [2] Scott, B.D., R. Park and M.J.N. Priestley : Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates, ACI Journal, Jan.-Feb., 1982, pp.13-27.
- [3] 中塚信 : コンクリートの応力度-ひずみ度特性とコンクリート曲げ部材の終局域特性に関する基礎的研究, 大阪大学学位論文, 1988年.
- [4] Mander, J.B., M.J.N. Priestley and R. Park : Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol.114, No.8, August, 1988, pp.1804-1826.