

論文

[2139] 薄肉 GFRC 外殻 RC 柱の力学的挙動に関する研究

正会員○岡田賢一（関東学院大学工学部）  
 正会員 槇谷栄次（関東学院大学工学部）  
 正会員 柳沢延房（日本国土開発技術研究所）  
 正会員 磯 健一（日本国土開発技術研究所）

1. 序

近年、建築現場における熟練労働者（特に、型枠大工）の不足、高齢化や労働賃金の上昇は、ますます、深刻化してきており、建設白書などの統計を見ても、その労働者の数は、現在よりさらに減少することが予想され、建設コストの上昇も懸念される [1]。鉄筋コンクリート造（以下 RC造）を在来工法で施工する場合、型枠、支保工、足場などの仮設資材を大量搬入し、現場労働者の集約的手配を行うことが、今後困難になりつつある。また、最近森林資源保護の立場から、建築現場での木製型枠（ベニヤ）の使用の制限についての問題がクローズアップされている。

このような背景から、施工の合理化・省力化・短工期を目的とし、RC造においてプレキャスト（以下 PCa）部材の開発が多くなされている。このうち、軽量化をはかる目的で鉄筋を内蔵し、それ自身も構造体となり、型枠兼用可能なハーフ PCa部材（構造型枠）は、フル PCa部材に比べて、軽量化されるが、その重量はそれでも1～3 tonとなり、大型揚重機への依存度は、高く、中小の建設現場や敷地条件の制約がある場合には問題点が残されている。

著者らは、将来増えるであろう機械化施工に対応できるものとして、強度が高く軽量の薄肉打込型枠によるPC工法を開発してきた。薄肉型枠材料として、他の材料に比べて安価で製造実績の豊富なガラス繊維補強セメント（以下GFRC）を対象とし、材料特性及び構造性能への効果について研究を行い [2]、中層建物の実施工に適用し、GFRC型枠の作製から施工に至るまでの過程における品質管理・施工管理について検討し、省力化の効果を確認した [3]。

本研究では、実施工時において型枠材としてのGFRCの特性及びGFRC柱型枠による PCa部材の構造性能への効果について実測及び実験にて検討するものである。

2. GFRC柱型枠の施工

2.1 適用建物の概要

図1に、GFRC柱型枠を打込型枠として用いた建物の基準階状図を示す。建物は、RC造地上4階建てで、1, 4階の階高3.3m、2, 3階の階高2.8mの独身寮である。建物のすべての柱の施工にGFRC柱型枠を用いた。また、この建物では、柱の他に、大梁、小梁、スラブはすべてハーフ PCa部材としている。

2.2 GFRC柱型枠の形状

図2に、用いたGFRC柱型枠の形状を示す。柱の構造寸法は $B \times D = 65 \times 65$ cmであり、それ

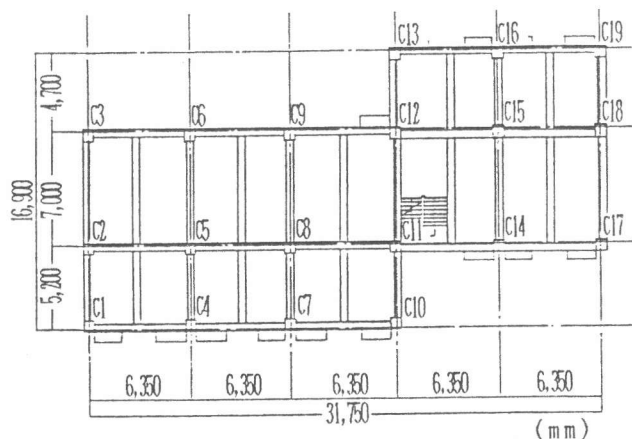


図1 建物の基準階状図

に打込まれるGFRC柱型枠の厚さは20mmとした。GFRC柱型枠は、コ字型断面材をクランプにより締結し、ロ字型閉鎖断面とするものである。

図3に、GFRC柱型枠とPCa梁部材との交差部を示す。交差部には、梁部材の建込みが可能なように切欠きを設けた。

GFRC柱型枠の肉厚、クランプの間隔は、使用するGFRCの材料特性及び打設高さ（梁上端）により求まるコンクリートの側圧から決定され、日本建築学会に「型枠の設計指針」に準じて型枠としての厚さ、フランジ間隔を求めた。

### 2.3 GFRC柱型枠の製造方法

本研究では、GFRCの製造方法のうち、比較的曲げ強度が高く得られるダイレクトスプレー法を採用した。厚さ20mmの中央部には、メッシュ状に編んだ連続繊維（メッシュ）を配置させた。これは、断面内の繊維量を増やし、曲げ強度を増すためと、建込時におけるGFRC型枠のひびわれ破壊時の剝落防止の面から設けている。

### 2.4 GFRC柱型枠の材料特性

図4に、施工建物に用いたGFRCの曲げ強度試験結果を示す。試験方法は、GRC工業会で定められた曲げ試験方法を採用した。供試体は厚さ10mmの平板より切り出された25cm×5cm×10mmの形状をし、加力は中央集中荷重とした。材料試験の結果より、採用したGFRCの弾性比例限界強度（LOP）=125～159kg/cm<sup>2</sup>（平均135kg/cm<sup>2</sup>）、最大曲げ強度（MOR）=257～334kg/cm<sup>2</sup>（平均290kg/cm<sup>2</sup>）であり、コンクリートまたは、モルタルの曲げ強度の4～5倍の値となっている。

### 2.5 GFRC柱型枠のコンクリート打設実験

本研究では、施工建物の柱6本のうち、1, 3, 4階の柱13本について、コンクリート・打設時に側圧及び表面のひずみ等の測定を行った。本報では、このうち3階の隅柱2本、内柱2本の合計4本（階高2.8m）についての側圧結果について述べる。隅柱のBタイプでは、建築学会型枠設計指針に準じて算出したクランプ間隔250mmとし、Aタイプは比較用としてクランプ間隔を設計値より広げて350mmとした。

図5に、測定を行った柱の形状、及びゲージ・圧力計の貼付位置を示す。

打設に用いたコンクリートは、スランプ18cm、

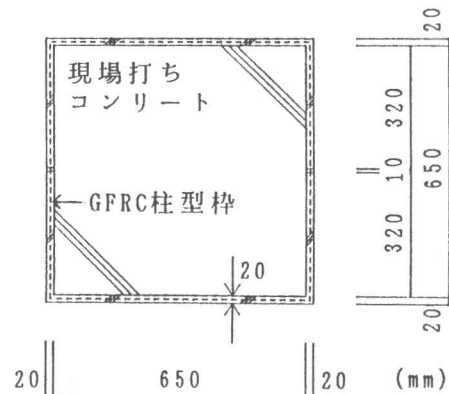


図2 GFRC柱型枠の形状

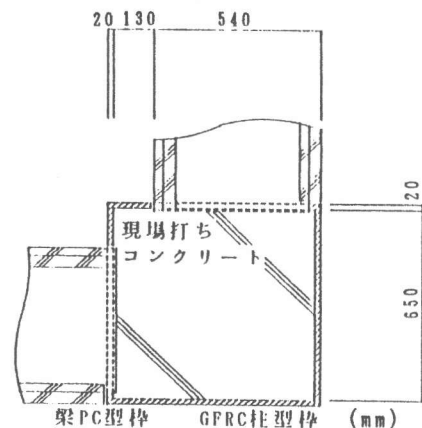


図3 GFRC柱型枠とPCa梁の交差部

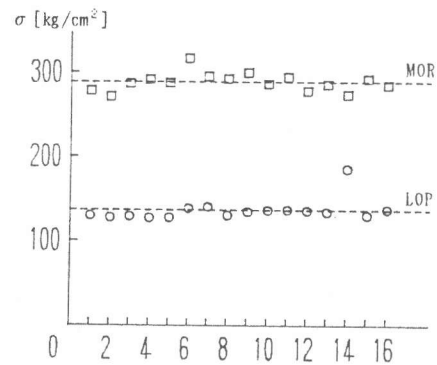


図4 GFRCパネルの曲げ強度試験結果

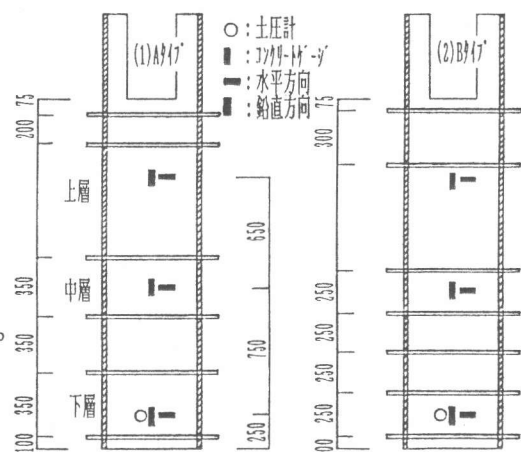


図5 ゲージ貼付け位置 (mm)

最大骨材径25mm，設計基準強度 $F_c = 240\text{kg/cm}^2$ の普通コンクリートを用いた。打設はポンプ打ちとし、柱1本あたり約60～70秒で終了するようにした。計測は、打設時に10秒ごと、打設終了後10分ごとに行った。

図6に、打設時・打設後の側圧、ひずみの時間経過を示す。また、図7に、測定結果を側圧とひずみの関係をまとめた。各柱ともコンクリートの側圧は、打設終了直後で $2.8 \sim 9.3\text{t/m}^2$ と、日本建築学会指針による型枠設計時の側圧の $4.8\text{t/m}^2$ よりも小さい値となった。

また、図6より各柱ともクランプに平行な方向のひずみは直角方向のひずみより大きい値を示している。

### 3. GFRC柱型枠 PCa柱の曲げ・せん断実験

薄肉外殻RC柱の設計手法の確立を目的とし、施工建物の柱と同断面・同寸法の実大断面からなる試験体による曲げ・せん断実験を行い、GFRC柱型枠のスキン補強効果について検討した。以下にその実験結果の概要について述べる。

#### 3.1 試験体

図8に、試験体の形状・配筋を示す。試験体は、施工建物と同様なGFRC柱型枠を用いたGFRC-1と、GFRC柱型枠を用いずに在来工法によるRC-1の2体である。GFRC-1、RC-1とも、構造体寸法 $65 \times 65\text{cm}$ で主筋12-D22，スパイラルフープ D13@100とした。GFRC型枠の肉厚は20mmとし、内面はメタル金網により目荒らし処理を施した。

試験体のコンクリート打設は下スタブ、柱部分、上スタブと3回にわけ、GFRC-1のGFRC型枠の根元には、20mmのあきを設け、コンクリート打設後、無収縮モルタルを充填した。

表1 GFRC調合表

S : C	水セメント比 (%)	減水剤混入率 (%)	短繊維混入率 (%)	
			38mm	25mm
7:10	33	0.5	3.4	1.5

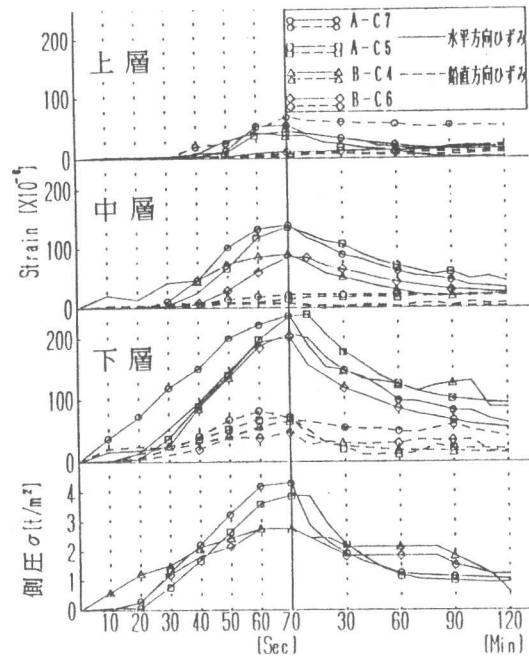


図6 側圧およびひずみの時間経過

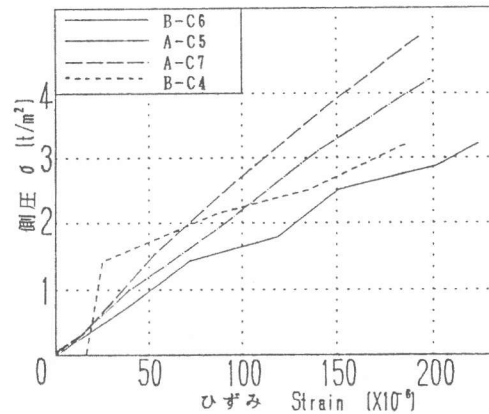


図7 側圧とひずみの関係

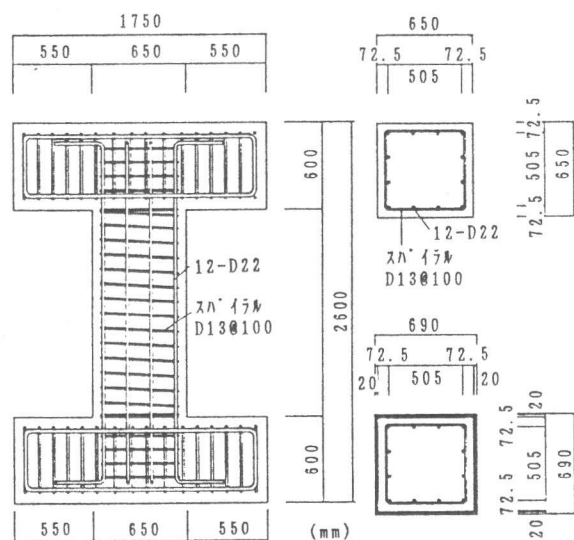


図8 試験体配筋図

### 3.2 使用材料の性質

表1に、柱型枠に用いたGFRCの調合表を示す。GFRCの曲げ強度試験結果を行った結果、最大曲げ強度 MOR = 289.9 kg/cm<sup>2</sup>であった。

表2、表3に、試験体に用いたコンクリート及び鉄筋の材料試験結果を示す。

表2 鉄筋引張試験結果

	公称断面積 (cm <sup>2</sup> )	降伏強度 $\sigma_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	引張強度 $\sigma_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	種類
D13	1.27	3560	4935	SD295A
D22	3.87	3917	5310	SD345

表3 コンクリート圧縮試験結果

試験体名	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
RC-1	192	20.1
GFRC-1	257	23.4

### 3.3 加力方法及び測定方法

図9に、試験装置を示す。加力方法は、平行クランク機構を有する加力方法とし、試験体に逆対称モーメントが加わるようにし、反力フレームに取り付けた油圧ジャッキにより水平力・軸力を同時に加力した。

荷重は、変形制御とし、部材角 R=1/2000, 1/1000, 1/500, 1/200, 1/100, 1/50, で各1回づつの正負交番繰返し荷重とした。

軸力は、軸方向応力度  $\sigma_o = 36 \text{ kg/cm}^2$  ( $\approx 0.15 F_c$ ) 一定となるように保持した。

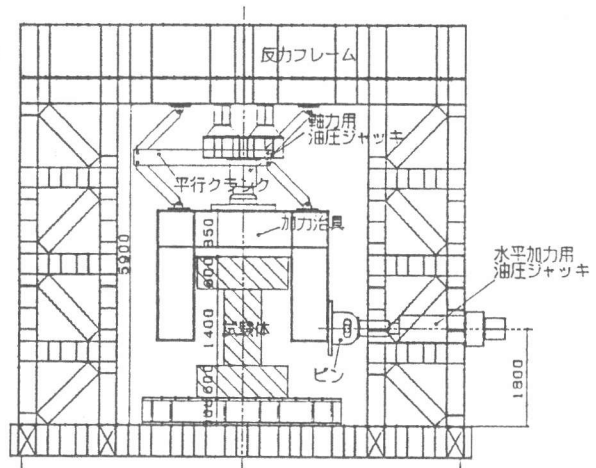


図9 載荷装置図

## 4. 実験結果及び考察

### 4.1 破壊状況

表4に、実験における諸荷重を、図10に、試験体のひびわれ状況を示す。

RC-1の破壊経過は、曲げひびわれが 40.3tで発生後 P = 76.4tで斜めひびわれが発生し、同時にフープ筋が降伏した。その後、P = 97.4t,  $\delta = 6.8 \text{ mm}$ で最大耐重に達した後、耐力の低下とともに、斜めひびわれ幅が増大し、最終的にはコンクリートの圧壊が見られた。GFRC-1の破壊経過は、曲げひびわれが型枠の付け根部分に 65tで発生後、GFRC表面におけるひびわれが発生せず 102.1tで主筋が引張降伏した。以後、変形が増加し、 $\delta = 18.7 \text{ t}$ でGFRC型枠表面に1本の斜めひびわれが発生した。最終に至るまで、GFRC型枠表面に、他のひびわれの発生がみられなかった。

表4 実験結果一覧表

		曲げひびわれ		斜めひびわれ		主筋降伏		フープ降伏		最大荷重	
		P (t)	$\delta$ (mm)	P (t)	$\delta$ (mm)	P (t)	$\delta$ (mm)	P (t)	$\delta$ (mm)	P (t)	$\delta$ (mm)
RC-1	+	40.3	0.2	76.4	3.0	91.6	9.3	76.3	5.4	97.4	6.8
	-	35.3	0.2	79.1	1.6	108.1	5.4	-	-	108.9	5.6
GFRC-1	+	65.0	1.2	135.5	18.7	102.1	3.3	-	-	135.5	18.7
	-	62.25	0.7	-	-	-	-	-	-	129.3	7.1

#### 4.2 荷重・変形曲線

図11, 12に、載荷・変形曲線を示し、図15に、その包絡線を示す。図11, 13では、ひびわれの発生、降伏時の荷重を示した。RC-1では主筋の降伏が認められず、斜めひびわれ発生後耐力の低下がみられ、せん断破壊型の変形特性を示しているのに対し、GFRC-1では、主筋の引張降伏後、耐力の低下がみられず、大変形域において斜めひびわれが発生し、曲げ破壊型の変形特性を示した。

図13では、 $\tau$ - $\delta$ の関係で示すが、GFRC-1はRC-1に比べて耐力が2割程度の増加で変形性能もかなり向上した。これは、著者らのモデル実験と同様の傾向であり、GFRCのせん断補強効果が認められた[2]。

両実験から、せん断破壊型の柱でもGFRC型枠を使用することにより、曲げ破壊型に改善できることが明らかになった。

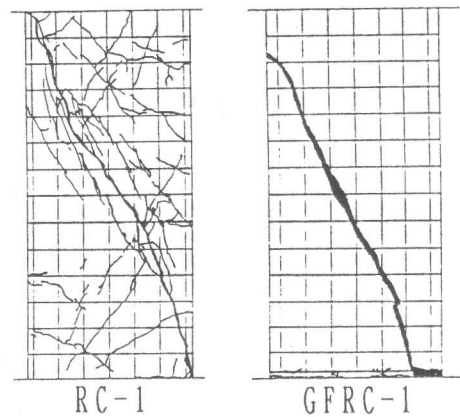


図10 破壊形状図

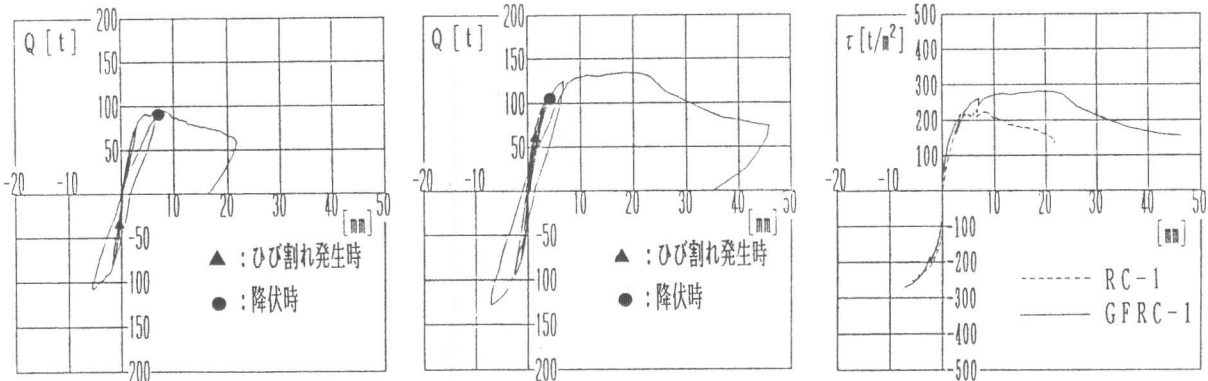


図11 荷重-変位曲線(RC-1) 図12 荷重-変位曲線(GFRC-1) 図13 包絡線

#### 4.3 GFRCによる補強効果

外殻のGFRC柱型枠中のガラス繊維のせん断抵抗により、図13のように、変形性能が向上したものと考えられる。ここでは、GFRCのせん断補強効果を理論的に把握するために、GFRC型枠 PCa柱のせん断補強耐力量を提案し、実験結果との比較検討を行った。

##### (1) せん断耐力量の提案

GRCの曲げ試験結果をもとに、GFRC型枠 PCa柱のせん断耐力量を次のように求めた。

図14に示す、GFRCパネルの曲げ試験時のスパン中央での応力度分布から、図15のようなせん断抵抗を仮定し、GFRC引張強度 $\sigma t$ と連続繊維(メッシュ)の引張力 $T_{fm}$ を求めると、GFRC型枠のせん断抵抗式は $Q_{GF}$  (1)となる[2]。

$$Q_{GF} = (2\sigma t \cdot t \cdot d + \frac{T_{fm}}{5} \cdot d) \cdot 2$$

$t$ : GFRC型枠の厚さ

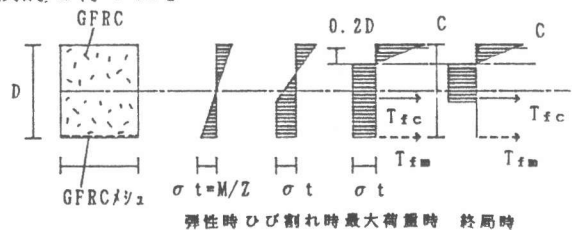


図14 GFRCパネルにおける応力度分布

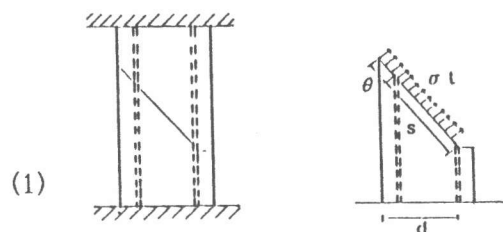


図15 短繊維によるせん断抵抗

d: 型枠も含めた有効成

(1)式をRC柱のせん断耐力式 $Q_{su1}$  ( (2)式) に累加するとGFRC型枠PC柱のせん断耐力式 $Q_{su2}$ は(3)式となる。

$$Q_{su1} = (KuKp \frac{0.115(Fc+180)}{M/Qd+0.12} + 2.7 Pw\sigma wy + 0.1\sigma o) b \cdot j \quad (2)$$

$$Q_{su2} = Q_{su1} + Q_{GF} \quad (3)$$

## (2)実験値と計算値の比較

表5に、(3)式より求めた計算値と実験値との比較を示す。

せん断破壊したRC-1の実験値はせん断耐力計算値とよく一致しているが、曲げ破壊したGFRC-1の実験値は、せん断耐力計算値を下回り、曲げ耐力計算値とよく一致した。

また、(1)式より求めたガラス繊維のせん断抵抗負担分は(3)式による全せん断抵抗の34%にあたり、GFRC-1ではせん断耐力の増加により、せん断破壊から曲げ破壊に移行したと考えられる

表5 せん断力負担率一覧表

試験体	実験値 Qu (ton)	計 算 値				Qsu/Qmu	実験値 / 計算値	
		Qsu1 (ton)	QGF (ton)	Qsu2 (ton)	Qmu (ton)		Qu/Qmu	Qu/Qsu
RC-1	108.9	95.8	—	95.8	115.6	0.83	0.94	1.14
GFRC-1	135.5	104.7	54.8	159.4	131.1	1.22	1.03	0.85

Qu : 実験値の最大荷重      Qsu1 : せん断終局耐力の計算値 (型枠を除いた)

QGF : ガラス繊維のせん断抵抗      Qsu2 : Qsu1 + QGF

Qmu : 曲げ終局耐力の計算値 (ただし、算定時にはGFRC型枠の外端を圧縮縁と仮定した。)

## 5. まとめ

以上、GFRC柱型枠の施工及びPCa柱の曲げ・せん断実験より、

- (1) 曲げ強度の高いGFRCを柱型枠として用いることにより20mmという超薄肉の打込型枠を可能にすることができ、軽量かをはかることができた。また、実施工において、コンクリートの打設実験を行い型枠として十分適用できるものであることを確認した。
- (2) GFRC柱型枠は、打込型枠材としての機能の他に、柱の強度、変形性能向上に効果があることが明らかになった。
- (3) ガラス繊維によるせん断補強効果を考慮したせん断耐力式を提案し、その妥当性を確認した。

## 参考文献

- (1) 日本建築学会：”プレキャスト鉄筋コンクリート構造の設計と施工，昭和61年10月
- (2) 岡田賢一，槇谷栄次ほか：GFRC薄肉プレキャストRC柱のせん断挙動に関する研究，日本建築学会大会梗概集，1991.9
- (3) 磯 健一，多田浩司ほか：型枠PC工法による省力化，短工期化施工，施工，12.1991
- (4) 日本 GRC工業会：GRCの物性と試験方法，昭和63年11月