論文 鉄筋コンクリート部材の復元力特性を模擬した超小型模型の挙動

徳井 紀子\*1・真田 靖士\*2・境 有紀\*3・中埜 良昭\*4

要旨:筆者らは,鉄筋コンクリート造建築構造物の模型振動実験に伴う試験体製作の労力と 経費を大幅に節減できる簡易振動実験の開発を行っている。その一環として,高靭性繊維補 強セメント複合材料と主筋のみにより構成される超小型試験体を開発した。本論文では,振 動実験で異なる耐力を示した端部固定方法の異なる2種類の試験体について静的加力実験を 実施した。そして,各試験体についてファイバーモデルによる断面解析を行い,その解析値 と実験値を比較することにより,試験体の端部固定方法および載荷方法が試験体の挙動に与 える影響の原因について検討した。

キーワード:鉄筋コンクリート,振動実験, HPFRCC, 縮小模型, 復元力特性

### 1. はじめに

筆者らは,鉄筋コンクリート(以下, RC)造 建築構造物の模型振動実験に伴う試験体製作の 労力と経費を大幅に節減できる簡易振動実験 の開発を行っている<sup>1),2)</sup>。その一環として,高 靭性繊維補強セメント複合材料(以下、 HPFRCC)と主筋のみにより構成される超小型 試験体を開発し,その試験体が一般的な RC 部 材の履歴形状を模擬できることを振動実験で 確認した。しかしながら,試験区間の詳細は同 ーであるが 端部固定方法の異なる2種類の試 験体間で 実験から得られた耐力が明らかに異 なる結果を得た<sup>2)</sup>。本報では,この2種類の試 験体の挙動について検討するため 静的加力実 験を行い,さらに,各試験体についてファイバ ーモデルによる断面解析を行い、その解析値と 実験値の比較を行った。

2.1 試験体

試験体詳細図を図 1に,試験体一覧を表 1 に示す。スタブと試験区間を一体で打ったS(ス



(a)S(スタブ)タイプ (b)P(プレート)タイプ

図 1 試験体詳細図

表 1 試験体一覧

試験 体名	端部 固定法	柱断面	シア スパン比	繊維 混入率	引張 鉄筋比
S10M	スタブ	30 × 30	2.0	1.0	2.19
P10M	プレート	(mm)	3.0	(%)	(%)

2.	振動	実験	<sup>2)</sup> 概要	
	± ず	5世 立口	「日中十	

まず 端部固定方法の異なる2種類の試験体 の耐力が有意に異なる結果となった振動実験 の概要について説明する。

*1	東京大学大	、学院 工学系研究科建築学専攻 (正会員)
*2	東京大学	地震研究所助手 博(工) (正会員)
*3	筑波大学	機能工学系助教授 工博 (正会員)
*4	東京大学	生産技術研究所助教授 工博 (正会員)

タブ)タイプ試験体と主筋とシアキーをナット により固定した P(プレート)タイプ試験体の2 種類である。試験区間は同じで,いずれも断面 が 30mm×30mm,高さ 180mmの柱部分を想定 している。使用した HPFRCC は,水セメント比 45%,砂セメント比 40%のモルタルマトリック ス中にポリエチレン繊維(繊維長さ:15mm,繊 維径:12µm)を体積比で 1.0%混入したもので, 主筋には,M4のネジ鋼を用いた。材料特性の詳 細は,4.2 節に示す。

2.2 実験方法

加振システムは,試験体上部のスタブの水平 を保持しつつ,鉛直方向への伸びを許容した状 態で,試験体を水平一方向へ変形させ,試験体 に逆対称曲げモーメントを作用させることがで きるものとした(図 2(i))。レーザ式変位計で 上下スタブの相対水平変位を,ロードセル,加 速度計により試験体に作用するせん断力を計測 した。入力には,振幅が徐々に増大するサイン 波を用いた(図 3)。

2.3 実験結果

実験結果を図 4 に示す。両タイプ共にエネル ギー吸収能力に優れた曲げ降伏型の履歴を得た。 しかしながら,S タイプの最大耐力が 2285N で あったのに対して,P タイプが 1897N と,両タ イプの耐力に 2 割程度の差が生じている。そこ で,この原因を究明するため,各タイプ試験体 について静的加力実験を行い,その結果と動的 実験の結果の比較検討を行うこととした。



3. 静的加力実験

3.1 試験体および加力システム概要

静的加力実験では,使用する試験体は動的実 験と同じである。加力は,図 2(i)中に示す静的 治具取り付け位置に同図(ii)に示すような静的 加力用治具を取り付け,ナットの締め付けを利 用した変位制御で行った。変形およびせん断力 の計測は,動的実験と同様の手法で行った。 変位履歴は,振動実験結果より得られた復元力





(ii) 静的加力治具

図 2 載荷システム



特性との比較のため,振動実験時と同一 とし,最後は正方向に押し切った。 3.2 実験結果

変形角 - ベースシア係数関係を図 5 に示す。いずれの試験体も曲げひび割れ が危険断面位置に生じ,試験区間中央部 にはほとんど損傷は見られなかった。し かし, P タイプではプレートと試験体間 で初期段階にひび割れが生じ,その後, 主としてこのひび割れが進展したため,S タイプに比べて危険断面位置にひび割れ がより集中して生じた。

ここでは,それぞれの試験体から得られた最 大耐力に着目して比較を行う。各試験体の最大 耐力値を表 2に示す。まず静的加力実験を見る と,最大耐力の実験値は,Sタイプ(2122N)の 方がPタイプ(1911N)より約1割高い値を示し た。これは,試験区間をスタブと一体打設され た S タイプ試験体では,その歪硬化特性から HPFRCC のひび割れ発生後も引張応力を負担 するが,一方,Pタイプ試験体では,試験区間 両端部において,プレート境界面にひび割れが 生じた後は,この断面位置において引張り応力 が負担できない事から,両タイプの耐力差が生 じていると考えられる。

次に,SタイプおよびPタイプの振動実験結 果と静的実験結果の耐力の差を考察すると,S タイプは,約8%の耐力上昇が確認できるのに 対して,Pタイプは,ほぼ同一の値を示した。 この違いの原因について検証するために歪速 度による材料特性の変動を考慮して平面保持 の仮定に基づくファイバーモデルによる断面 解析<sup>3)</sup>を行った。

4. ファイバーモデルによる断面解析

断面解析のフローチャートを図 6 に示す。 解析対象とした部材は正負交番繰り返し加力 であったが,ここでの加力方法は,耐力のみを 比較するためここでは,一方向単調加力とした。



表 2 各試験体における最大耐力

最大耐力(N)	振動実験	静的実験	動的 / 静的
S タイプ	2285	2122	1.08
P タイプ	1897	1911	0.99
S ፃ1プ/P ፃ1プ	1.20	1.11	



図 6 断面解析のフローチャート

4.1 解析方法

歪度と歪速度の関係は次式で表される。

$$k \dot{\varepsilon}_{i} = \Delta_{k} \varepsilon_{i} / \Delta t$$
ここで,
$$k \dot{\varepsilon}_{i} : 要素 k \text{ のステップ} i \text{ での歪速度}$$

$$\Delta_{k} \varepsilon_{i} : 要素 k \text{ のステップ} i \text{ での歪変化量}$$

$$\Delta t : 時間の変化量 (データ収録間隔)$$

試験区間における曲率分布は,材軸方向の曲 げモーメント分布に相似形とし, 逆対称の線形 分布と仮定した。

P タイプ試験体を対象とした場合は,図 1中 に示す区間 B (長さ: 4.5mm) における鉄筋の伸 びを考慮に入れた解析を行った。すなわち,ま ず試験体頂部におけるある変形 d において上記 仮定により算出される危険断面位置での曲率と 作用軸力を満足するモーメントを算定し,その ときの主筋歪度を求め,次にこの歪度が区間 B にも同様に生じるとしてその伸びによる変形 d<sub>p</sub>(式(2)-(4))を試験区間の変位に加算し,こ れが d となるように曲率を計算した (式(5))。

(2)
ĺ

$$\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\delta} \cdot \boldsymbol{D} \tag{3}$$

 $d_{P} = \theta \cdot H$ (4)

$$l = ds + dp \tag{5}$$

- ここで, *d* : 試験体に与える任意の変形
  - : 危険断面位置における引張筋の歪度 ۶ :区間 B の長さ 1
  - δ
  - : 区間 B における主筋の伸び量 D :断面せい
  - :鉄筋の伸びに起因する回転角 θ
  - : 試験区間長 Η
  - :区間 B での主筋伸びによる変形  $d_{p}$
  - :試験区間における曲げ変形(真の変形) *d* ,



図 7 Pタイプの変形定義

4.2 材料のモデル化

本解析では,各計算ステップで各要素に生じ ている歪速度に対応して HPFRCC 要素および鉄 筋要素の耐力,弾性剛性等を算出し,材料の応 力度 歪度関係を設定した。以下に,使用した 材料モデルの概要を示す。

まず,モデル化の対象となる HPFRCC および 主筋の材料試験結果を示す。HPFRCC の一軸力 学特性は,円柱型供試体(直径 100mm,高さ 200mm)を用いて圧縮強度試験<JIS A 1108>およ び引張試験<sup>4)</sup>により求めた。HPFRCCの応力度 歪度関係,材料特性をそれぞれ図 8および表 3に示す。また 主筋の材料特性を表 4に示す。

解析に用いた HPFRCC および鉄筋の応力度 HPFRCC の圧縮強度および弾性係数と歪速度と の関係式をそれぞれ式(6)および式(7)のように設 定した<sup>3)</sup>。圧縮強度に達するまでは,原点を始点 とする弾性係数の傾きを持つ直線と原点および 圧縮強度点を通る 2 次曲線と直線の組み合わせ とし、2線の交点において切り替わることとする。 引張側については、Sタイプの場合、圧縮側と同



表 3 HPFRCC の材料特性

┢	実験	試験体	材齢 (日)	ヤング 係数 <sup>1</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm²)	圧縮強度時 歪度(%)	引張強度 (N/mm²)
	動	S10M	19	1.95 × 10⁴	45.74	0.34	2.00
	的	P10M	18	1.69 × 10⁴	47.68	0.40	2.14
	静	S10M	16	1.75 × 10⁴	48.74	0.42	3
	的	P10M	18	1.69 × 10⁴	47.68	0.40	2.14
1 ヤング係数は,1/3 圧縮強度時の割線剛性							
r	2	表中の谷詞	試験値は3	サンフルの平均	目値		

### 表 4 主筋の材料特性

主筋	断面積	ヤング係数	降伏	隆伏強度時
1壬 米五	(mm <sup>2</sup> )	$(N)/m m^2$	(N1/ma ma <sup>2</sup> )	不庄(0()
俚积	(mm)	(IN/mm)	(IN/mm)	
M4 $^{2}$	9.87	1.35 × 10⁵	443.77	0.55
4 17女/上ン		1 /古		

1 降伏強度は,0.2% イノセット値 2 表中の各試験値は3サンプルの平均値

ーの傾きを持つ直線で表し,応力度が式(8)に示 す引張耐力値に達した時点から,歪度が2.0%に 至るまでその応力を維持するものとする。また, 引張耐力は,式(8)に従い,歪速度により変動す るとした。また,Pタイプの場合は,引張応力は 負担しないものとした。

[HPFRCC の圧縮強度] (6) $\dot{\varepsilon}$  > 10<sup>1</sup>  $\mu$  / sec  $_{d}\sigma_{B} = (0.06 \log |\dot{\varepsilon}| + 0.94) \cdot \sigma_{B}$  $\dot{\varepsilon} \leq 10^1 \mu / \text{sec}$  $_{d}\sigma_{B} = _{s}\sigma_{B}$ ここで,  $_{A}\sigma_{B}$ :動的加力時の圧縮強度  $\sigma_{B}$ :静的載荷材料試験の圧縮強度 [HPFRCC の弾性係数]  $\dot{\varepsilon}$  > 10<sup>1</sup>  $\mu$  / sec  $_{d}E_{B} = (0.02\log |\dot{\varepsilon}| + 0.98) \cdot {}_{s}E_{B}$ (7)  $|\dot{\varepsilon}| \leq 10^1 \mu/\text{sec}$  $_{d}E_{B} = _{s}E_{B}$  $_{d}E_{B}$ :動的加力時の弾性係数 ここで, <sub>、</sub>E<sub>B</sub>:静的載荷材料試験の弾性係数 [HPFRCC の引張強度] ・S タイプの場合

$$\sigma_t = \sigma_B / 20$$
 ( $\sigma_B = \sigma_B$ または $_d \sigma_B$ ) (8)  
P タイプの場合

$$\sigma_t = 0 \tag{9}$$

主筋の降伏強度と歪速度との関係式を式(10) のように設定した。弾性係数は, 歪速度によら ず一定である。

[鉄筋の降伏強度]

$$\begin{vmatrix} \dot{\varepsilon} \\ > 10^{2} \,\mu/\sec \\ {}_{d} f_{y} = (0.05 \log |\dot{\varepsilon}| + 0.90) \cdot {}_{s} f_{y} \\ |\dot{\varepsilon} | \le 10^{2} \,\mu/\sec$$
(10)

 $_{d} f_{y} = _{s} f_{y}$ ここで, $_{d} f_{y}$ :動的加力時の降伏強度  $_{s} f_{y}$ :静的載荷材料試験の降伏強度

# 4.3 解析結果

静的加力実験を想定して,解析を行った結果 を図 10 に示す。S タイプは,HPFRCC モデル に引張力をもたせ,P タイプは引張力を負担しな





$$s \sigma_y = 450 (N / mm^2), \quad E_s = 1.35 \times 10^5 (N / mm^2)$$
図 9 材料モデル

いものとして解析を行った結果である。両タイ プともそれぞれの耐力の実験値と解析値が良好 な対応を示す結果となった。

さらに歪速度の影響を考慮して断面解析を行 った結果と振動実験結果の比較を図 11 に示す。 P タイプは,若干解析値が実験値の耐力より大き めの値をとったが,Sタイプについては,その耐 力と概ね一致する結果を得た。また,図 12 に 示すのは,変形に伴う引張側鉄筋位置での歪速 度の推移である。ここで示す歪速度は,実験に より得られた荷重 変形関係上における部材頂 部の速度に基づいて解析より得られる歪速度値 である。これを見ると, P タイプの歪速度レベル は, 歪速度の影響が無視できる範囲ではないが, 各変形レベルにおいて,常に S タイプの歪速度 を下回っていることが分かる。また、このスタ ブの設計詳細による歪速度の違いによる強度上 昇の影響を考慮した場合、Pタイプ試験体の耐力 をより近似することが可能であった。

一方,剛性については,Sタイプでは,静的・ 動的いずれについても高めに評価される結果と なった。これは,解析で仮定した曲率分布が実 験時のそれを十分に表現するに至っていないこ とが一因と考えられるため,これに影響を与え る主筋の付着性状等については,今後確認する 必要があると考えられる。

### 5. まとめ

振動実験<sup>2)</sup>で異なる耐力を示した端部固定方 法の異なる2種類の試験体について,静的加力 実験を行い,ファイバーモデルによる断面解析 を行い,その解析値と実験値の比較検討を行っ た。その結果,次のことが分かった。

- SタイプとPタイプの静的加力実験における 耐力の差は Sタイプの HPFRCC が引張応力 を負担していることによると考えられる。
- 2) 試験体のスタブの設計詳細による歪速度の 影響を考慮に入れた場合,振動実験における 各試験体タイプの耐力を概ね再現する事が できた。

今後は,以上の知見を基に,想定する RC 部材 の復元力特性を再現できる超小型模型の製作方 法の開発を進め,立体架構への展開も視野にい れた実験手法の開発および実現に結びつけてい く予定である。

# 謝辞

本研究の一部は,科学研究費補助金基盤研究 (C)(2)「入力地震動をパラメタとした簡易震動実 験手法の開発に関する研究」(研究代表者:境有 紀)による援助を受けた。また,試験体型枠お よび加力治具製作は,東京大学生産技術研究所 試作工場の協力を得た。

## 参考文献

- 2) 徳井紀子,山内成人,真田靖士,境有紀,中



埜良昭,諏訪田晴彦,福山洋:RC部材を模 擬した超小型試験体の振動台実験,日本地震 工学会大会 2003 梗概集,pp.286-287,2003.11

- 細矢博,岡田恒男,北川良和,中埜良昭,隈 澤文俊:ひずみ速度の影響を考慮したファイ バーモデルによる鉄筋コンクリート部材の 断面解析,日本建築学会構造系論文集,第 492 号,pp.83-92,1996.4
- 4) 佐藤幸博,福山洋,諏訪田晴彦:高靭性型セ
   メント系複合材料の一軸引張 圧縮繰り返し試験方法の提案,日本建築学会構造系論文
   集,No.539,pp.7-12,2001.1