

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、高靱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，HFRCC，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^{1),2)}。その一環として、高靱性繊維補強セメント複合材料（以下、HFRCC）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一であるが、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²⁾。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

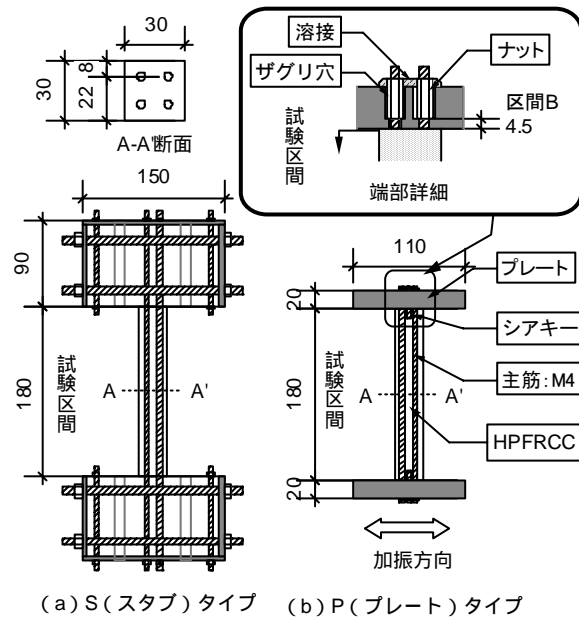


図 1 試験体詳細図

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	3.0	1.0 (%)	2.19 (%)
P10M	プレート	(mm)			

2. 振動実験²⁾概要

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:12 μ m)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

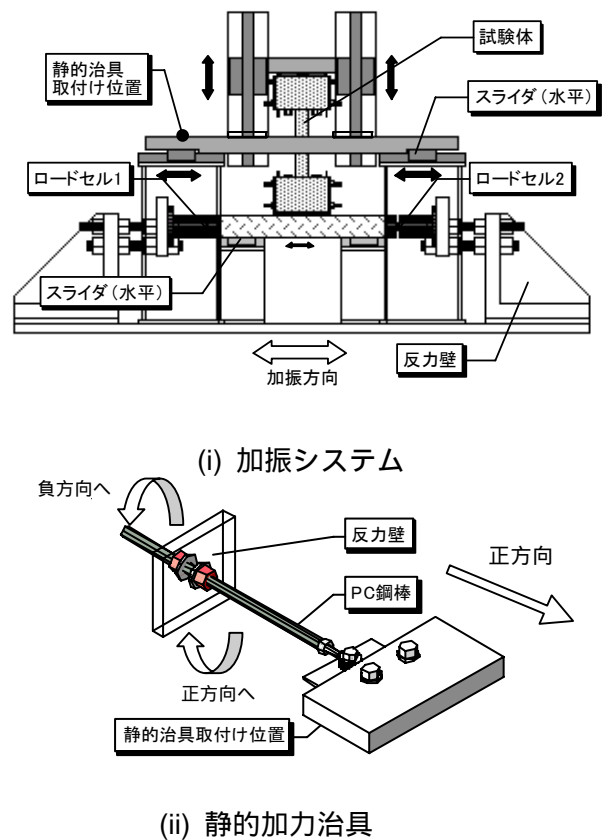


図2 荷重システム

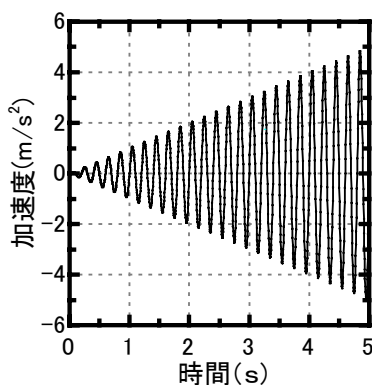
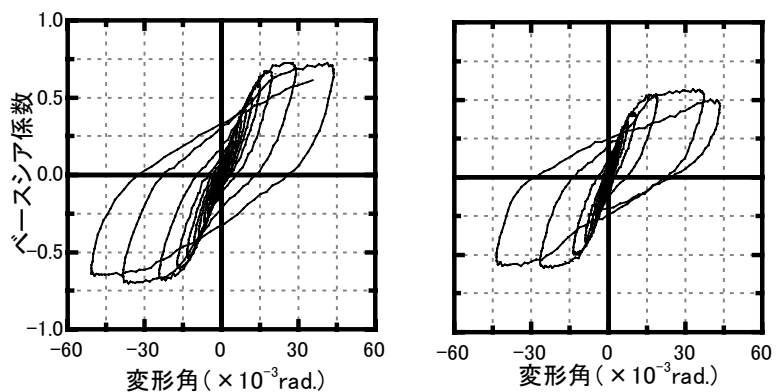


図3 入力サイン波



(a) S(スタブ)タイプ (b) P(プレート)タイプ

図4 振動実験の結果

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 HPRCC 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³⁾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。

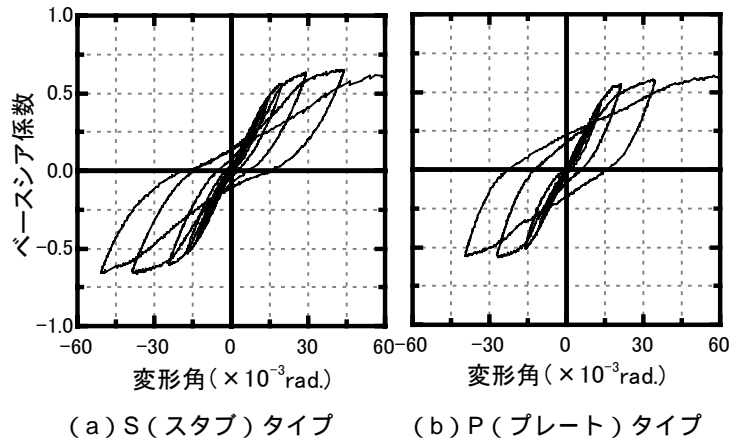


図 5 静的加力実験の結果

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タイプ/Pタイプ	1.20	1.11	

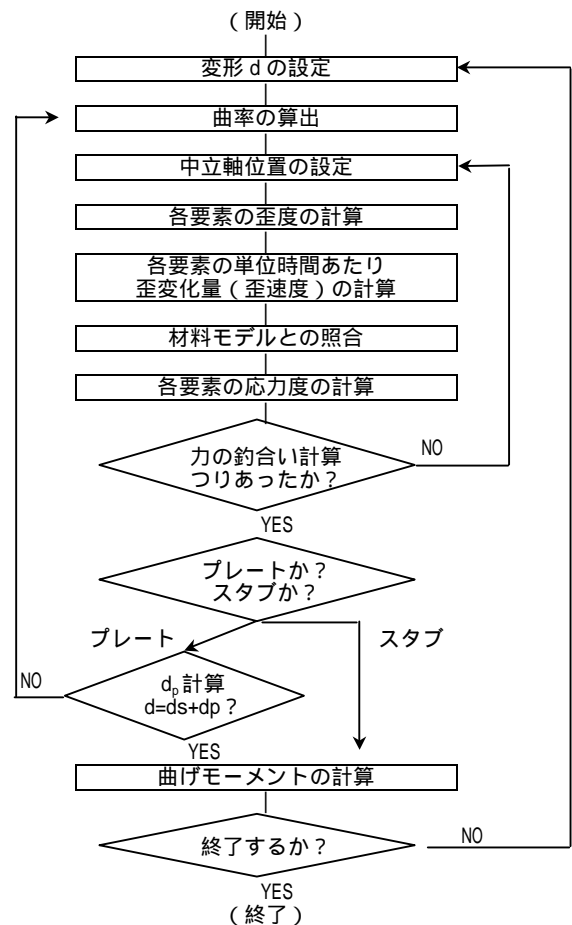


図 6 断面解析のフローチャート

4.1 解析方法

歪度と歪速度の関係は次式で表される。

$${}_k \dot{\epsilon}_i = \Delta_k \epsilon_i / \Delta t \quad (1)$$

ここで、
 ${}_k \dot{\epsilon}_i$: 要素 k のステップ i での歪速度
 $\Delta_k \epsilon_i$: 要素 k のステップ i での歪変化量
 Δt : 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_p (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))。

$$\delta = \epsilon \cdot l \quad (2)$$

$$\theta = \delta \cdot D \quad (3)$$

$$d_p = \theta \cdot H \quad (4)$$

$$d = d_s + d_p \quad (5)$$

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

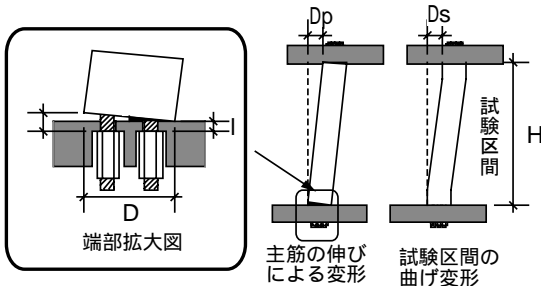


図 7 Pタイプの変形定義

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⁴⁾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 歪度関係は、図 9 に示すモデルを用いた。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³⁾。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

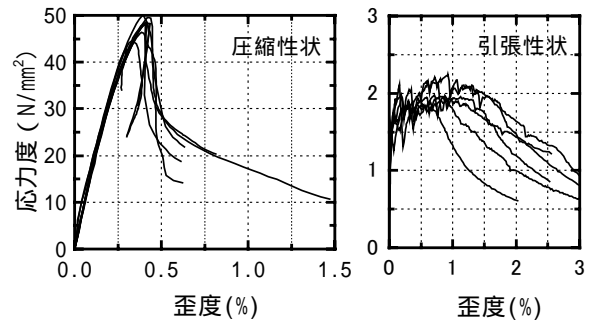


図 8 HPFRCC の応力度 歪度関係

表 3 HPFRCC の材料特性

実験	試験体	材齢 (日)	ヤング係数 ¹⁾ (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度時歪度 (%)	引張強度 (N/mm ²)
動的	S10M	19	1.95 × 10 ⁴	45.74	0.34	2.00
	P10M	18	1.69 × 10 ⁴	47.68	0.40	2.14
静的	S10M	16	1.75 × 10 ⁴	48.74	0.42	³⁾
	P10M	18	1.69 × 10 ⁴	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
 2 表中の各試験値は 3 サンプルの平均値
 3 未計測

表 4 主筋の材料特性

主筋種類	断面積 (mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏強度 ¹⁾ (N/mm ²)	降伏強度時歪度 (%)
M4 ²⁾	9.87	1.35 × 10 ⁵	443.77	0.55

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

一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]

$$|\dot{\epsilon}| > 10^1 \mu / \text{sec} \quad (6)$$

$${}_d \sigma_B = (0.06 \log |\dot{\epsilon}| + 0.94) \cdot {}_s \sigma_B$$

$$|\dot{\epsilon}| \leq 10^1 \mu / \text{sec}$$

$${}_d \sigma_B = {}_s \sigma_B$$

ここで，
 ${}_d \sigma_B$: 動的加力時の圧縮強度
 ${}_s \sigma_B$: 静的載荷材料試験の圧縮強度

[HPFRCC の弾性係数]

$$|\dot{\epsilon}| > 10^1 \mu / \text{sec}$$

$${}_d E_B = (0.02 \log |\dot{\epsilon}| + 0.98) \cdot {}_s E_B \quad (7)$$

$$|\dot{\epsilon}| \leq 10^1 \mu / \text{sec}$$

$${}_d E_B = {}_s E_B$$

ここで，
 ${}_d E_B$: 動的加力時の弾性係数
 ${}_s E_B$: 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

$$\sigma_t = \sigma_B / 20 \quad (\sigma_B = {}_s \sigma_B \text{ または } {}_d \sigma_B) \quad (8)$$

・ P タイプの場合

$$\sigma_t = 0 \quad (9)$$

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]

$$|\dot{\epsilon}| > 10^2 \mu / \text{sec}$$

$${}_d f_y = (0.05 \log |\dot{\epsilon}| + 0.90) \cdot {}_s f_y \quad (10)$$

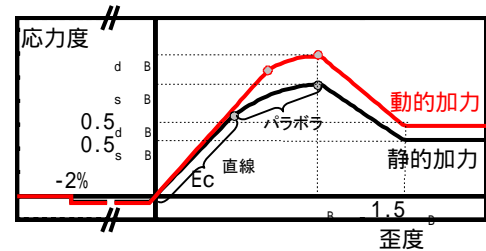
$$|\dot{\epsilon}| \leq 10^2 \mu / \text{sec}$$

$${}_d f_y = {}_s f_y$$

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

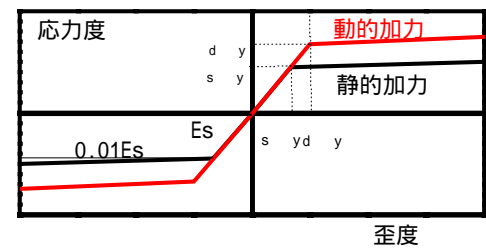
静的加力実験を想定して，解析を行った結果を図 10 に示す。S タイプは，HPFRCC モデルに引張力をもたせ，P タイプは引張力を負担しな



HPFRCC

$${}_s \sigma_B = 47(N/mm^2), \quad {}_s \epsilon_B = 0.4(\%)$$

$$E_c = 1.8 \times 10^4 (N/mm^2)$$



主筋

$${}_s \sigma_y = 450(N/mm^2), \quad E_s = 1.35 \times 10^5 (N/mm^2)$$

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²⁾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。

- 1) 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た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

- 1) 境有紀, 徳井紀子, 山内成人, 真田靖士, 中埜良昭, 諏訪田晴彦, 福山洋: 高靱性繊維補強セメント複合材料を用いた超小型模型試験体による簡易振動実験手法の開発(その1, 2, 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.857-862, 2003.9
- 2) 徳井紀子, 山内成人, 真田靖士, 境有紀, 中

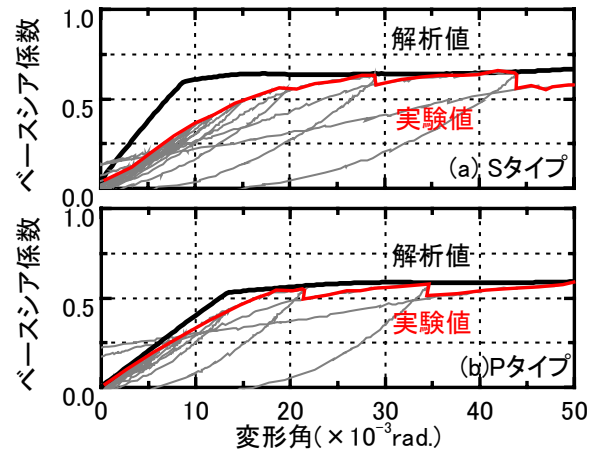


図 10 静的加力実験の解析結果

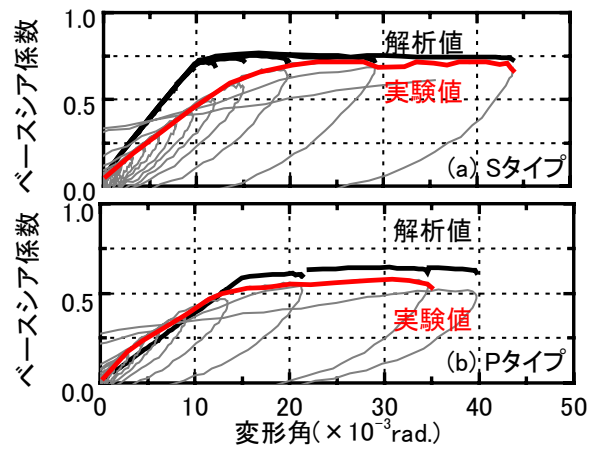


図 11 振動実験の解析結果

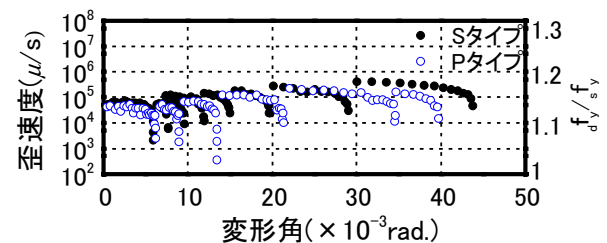


図 12 引張鉄筋位置における歪速度の推移

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

- 3) 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: 高靱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