

超縮小模型を用いた鉄筋コンクリート構造の簡易振動実験手法の開発
- 超小型模型による鉄筋コンクリート造の復元力特性の再現性 -
DEVELOPMENT OF A SIMPLIFIED SHAKING TABLE TEST METHOD FOR
REINFORCED CONCRETE STRUCTURES USING ULTRA SMALL-SCALED MODELS
Reproduction of Restoring Force Characteristics of Reinforced Concrete Members by Ultra small-scaled Models

境有紀*, 徳井紀子**, 真田靖士***, 山内成人****,
中埜良昭*****, 諏訪田晴彦*****, 福山洋*****,
Yuki SAKAI, Noriko TOKUI, Yasushi SANADA, Naruhito YAMAUCHI,
Yoshiaki NAKANO, Haruhiko SUWADA and Hiroshi FUKUYAMA

We planned to develop a simplified shaking table test method using ultra small-scaled models simulating reinforced concrete structures. Ultra small-scaled models are made of HPFRCC and longitudinal bars. As they do not have transverse bars, we can make very small specimens with less work and lower costs. Therefore, this method makes it possible to conduct shaking table tests using many kinds of input strong ground motions or tests of multi-storied and spanned buildings which were quite difficult with ordinary scaled specimens. In this paper, we made ultra small-scaled model specimens using HPFRCC and carried out shaking table tests to investigate whether these models perform similarly to actual reinforced concrete members. From the results of the tests, we found that ultra small-scaled models using HPFRCC performed similarly to reinforced concrete members and we could control those restoring force characteristics by changing details of HPFRCC and longitudinal bars.

Keywords: *ultra small-scaled model, shaking table test, reinforced concrete, HPFRCC (High Performance Fiber Reinforced Cement Composite), shaking table, restoring force characteristics*

超縮小模型, 振動実験, 鉄筋コンクリート, HPFRCC (高靱性繊維補強セメント複合材料), 振動台, 復元力特性

1. はじめに

建築構造物の強震地動下における動的挙動を把握し、耐震性能を評価する方法の一つとして、振動台を利用して実際に地震動を構造物に入力する振動実験が挙げられる。振動実験の条件は、実際の強震地動下における構造物に近く、その動的挙動を把握するのに極めて有効な手段であると言える。しかし、鉄筋コンクリート（以下、RC）造を対象とした振動実験は、その実施に大きな経費と労力を要する。その理由として、RC 造は横補強筋の配筋などの関係から縮小率に限界があるため、試験体がある程度の大きさにならざるを得ない、ということがある。それに伴い、振動台の容量の制限から構造物全体の振動実験を実施できる施設は全国的にも数が限られてしまう。また、最大規模の振動台を使ったとしても、その容量の制限から振動実験の試験体はある程度縮小せざるを得ず、RC 造の場合は横補強筋などの配筋が細くなり、試験体製作には大きな労力を要する。そのため、製作できる試験体の数も限られてしまい、入力できる地震動の数も限定せざるを得ない。

そこで、近年開発が進められてきた高靱性繊維補強セメント複合

材料（以下、HPFRCC: High Performance Fiber Reinforced Cement Composite）に着目した。HPFRCC とは、モルタルやセメントペーストにそれぞれ $10\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$ 程度の径を有するポリエチレン繊維やポリビニルアルコール繊維などの補強繊維を混入したものであり、ひび割れ発生後に歪硬化や数多くの微小なひび割れが一様に分布するひび割れ性状（マルチプルクラッキング）等の特性を有し、混入する繊維の種類や量によって最大圧縮強度以降の応力低下が緩やかになり、横補強筋によって拘束されたコンクリートと類似の材料特性を示すことが報告されている¹⁾²⁾³⁾。横補強筋を配する代わりに HPFRCC を用いれば、配筋は主筋のみで施工が非常に容易になる。また、横補強筋を配する必要がないので縮小率を上げて数多くの試験体を容易かつ安価に製作することができる。

そこで、HPFRCC を用いた超縮小模型によって RC 造を模擬し、その動的挙動の把握、検証を行う簡易振動実験手法の開発研究を計画した。本稿ではその第一段階として、実際に HPFRCC を用いて超縮小模型を作製し、主として超縮小模型で RC 造の様々な復元力特性が再現できるかについて検討を行った。

* 筑波大学大学院システム情報工学研究科 助教授 工博 Assoc. Prof., Graduate Sch. of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba, Dr. Eng.

** 東京大学大学院 大学院生

Graduate Student, Graduate Sch. of Eng., Univ. of Tokyo

*** 東京大学地震研究所 助手 博士(工)

Research Assoc., Earthquake Research Inst., Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

**** 東京大学生産技術研究所 技術官

Technical Assoc., Inst. of Industrial Science, Univ. of Tokyo

***** 東京大学生産技術研究所 助教授 工博

Assoc. Prof., Inst. of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

***** 国土交通省国土技術政策総合研究所 研究官

Researcher, National Inst. for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land, Infrastructure and Transport

***** 独立行政法人建築研究所 上席研究員 工博

Chief Researcher, Building Research Inst., Dr. Eng.

2. 本実験手法開発の目的とコンセプト

提案する簡易振動実験手法の利点は、HPFRCC を利用することにより試験体を非常に小さく、容易かつ安価に製作できることにある。よって、より少ない労力と経費で多数の試験体を作製することが可能となり、例えば、多数の試験体を必要とする入力地震動をパラメタとする実験、振動台の容量制限から実施できなかった多層多スパン構造物を対象とした振動実験等、従来困難、あるいは不可能であった実験研究の実現が期待できる。

具体的な研究開発の第一段階としては、HPFRCC と主筋のみより製作した超縮小模型で、降伏までに徐々に剛性が低下し、降伏後に履歴ループを描くという RC 造特有の復元力特性が再現できるか、更には、配筋、調合など試験体の様々な詳細を変化させることにより復元力特性をコントロールできるかがまず課題となる。それが可能なら、様々な復元力特性の「メニュー」とそれを再現する「レシピ」が提供できることになり、実大あるいは実大の 1/2 ~ 1/3 程度の静的部材実験で得られた復元力特性を「メニュー」から選び、それを再現する「レシピ」に従って超縮小模型試験体を作製し、それを組み立ててフレーム構造を作製して振動実験を行う、といった活用方法が考えられる。

一般に建物全体の強震地動下の挙動を把握するためには、このような、実大、あるいは実大の 1/2 ~ 1/3 程度の静的実験で部材の復元力特性を把握した後、部材および復元力特性をモデル化し、それを組み立てたフレーム構造の地震応答解析を行うことが多い。しかしながら、地震応答解析には様々な解析仮定があり、その妥当性が十分に検証されているとは言えない。本研究の提案する簡易振動実験手法が実現すれば、地震応答解析との比較を行うことによって、その妥当性、様々な解析仮定の検証を行うことができ、修正すべき点があればそれを提示することも可能になる。また、地震応答解析ではモデル化が難しい複雑な構造物に対して、地震応答解析の代わりに本手法を用いることも考えられる。

超縮小模型を使うことによる大きな問題として、スケール効果が挙げられる。まず考えられるのは、試験体の縮小による復元力特性などの構造性能の変化である。本稿は、横補強筋の代わりに HPFRCC を用いることとともに、試験体を縮小しても RC 造の復元力特性が得られるかどうかを確認することを目的としている。更に、試験体の縮小によりその固有周期が短くなり、それに伴って入力地震動の時間刻みを短くすることによって歪速度が上昇することによる耐力の上昇などの影響が考えられる。これについては、歪速度による耐力の上昇を考慮に入れて試験体の復元力特性を把握する実験方法、具体的には、静的正負交番繰り返し載荷の代わりに、振幅が徐々に大きくなるサイン波を入力する方法について検討する。また、試験体端部が塑性化すると危険断面位置付近に歪が集中するが、その領域（以下、単に歪領域）を拡大させることによって、歪速度の上昇を低減する方法についても検討を行う。

ただし、超縮小模型であらゆる RC 造構造物を再現することは困難と考えられ、どのようなものがどの程度再現できるかを検討し把握していくことが必要となる。そこで、本論文では第一段階として線材一次元曲げのせん断力 - 変位関係の復元力特性を対象として実際に超縮小模型を作製し、復元力特性を再現、コントロールできるかどうかについて検討した。

表 1 試験体一覧

試験体名	端部固定方法	繊維混入率 Vf (%)	主筋配筋	主筋加工
P10M	プレート	1.0	4-M4	無し
S10M	スタブ	1.0	4-M4	無し
P05M	プレート	0.5	4-M4	無し
S05M	スタブ	0.5	4-M4	無し
P10F	プレート	1.0	4-4	無し
S10F	スタブ	1.0	4-4	無し
P10S	プレート	1.0	4-4	ストロー被覆
P10P	プレート	1.0	4-M4	プレストレス

試験体名 X??Y X: 端部固定方法 (P: プレート, S: スタブ), ??: 繊維混入率 (10: 1.0%, 05: 0.5%), Y: 主筋 (M: ネジ鋼, F: 丸鋼, S: 丸鋼ストロー被覆, P: ネジ鋼プレストレス)

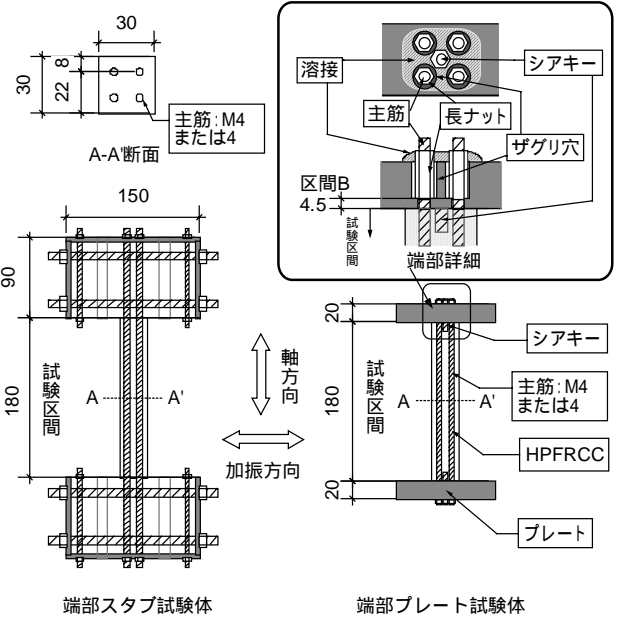


図 1 試験体詳細図 (単位: mm)

表 2 HPFRCC の調合条件

繊維混入率 Vf (%)	W/C (%)	S/C (%)	単位量 (kg/m³)			
			水	セメント	砂	繊維
1.0	45	40	469.7	1043.7	417.5	9.8
0.5			472.1	1049.2	419.7	4.9

W/C: 水セメント比, S/C: 砂セメント比, セメント: 普通ポルトランドセメント (比重 3.16), 細骨材: 接着剤用砂 7 号比重 2.61, 繊維: ポリエチレン繊維 (繊維径 12 μm, 繊維長さ 15mm)

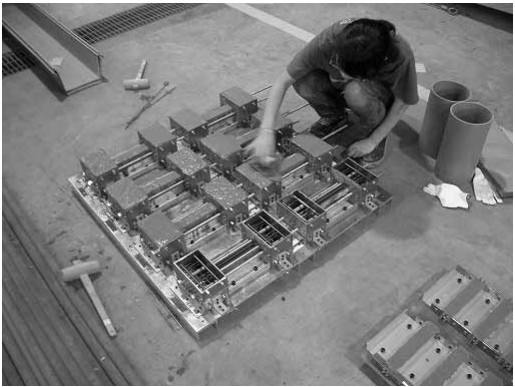


写真 1 コンクリート打設の様子 (中央が端部スタブ、右下が端部プレート試験体)

3. 試験体

RC 造を構成する柱を想定し、実際に HPFRCC と主筋のみを用いて超縮小模型を計画、製作した。部材レベルで RC 造の復元力特性を再現できれば、それを組み立てて架構を作ることが可能になる。

試験体一覧を表1に、試験体詳細図を図1に示す。試験体は、断面が30mm×30mm、高さ180mmの柱を想定した線材で、主筋を模擬したネジ鋼M4あるいは丸鋼4とコンクリートと横補強筋を模擬したHPFRCCにより構成される。配筋は、4-M4あるいは4-4とした。引張鉄筋比はそれぞれ2.19%、2.79%である。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）を体積率で1.0%、または0.5%混入したものとした。セメントは早強ポルトランドセメントを用いた。

試験体は、通常のスタブ付きの試験体と端部に20mm厚のプレートを配し、主筋とシアキーをナットにより固定した試験体の2種類とした。前者は、構造物を一体打ちで製作する場合、後者は、多数の単一部材をより簡便に製作する場合、および、これらを連結して構造物をより簡便に製作することを想定している。後者では、図1の区間B（長さ4.5mm）で主筋がフリーになることにより、試験体端部の危険断面位置より外側に歪領域を拡大し、試験体の縮小による歪速度の影響を低減する効果も狙っている。

復元力特性をコントロールするためのパラメタは、HPFRCCの繊維混入率（1.0%、0.5%）、主筋の種類と加工方法（ネジ鋼、丸鋼、丸鋼ストロー被覆、ネジ鋼プレストレス）とした。主筋がネジ鋼の試験体は付着が良好な紡錘形の復元力特性、丸鋼のものは付着を低減、丸鋼ストロー被覆のものは、丸鋼にストローを被せることにより更に付着を低減してスリップを伴う復元力特性、ネジ鋼プレストレスはネジ鋼に予め引張力を与えて、より紡錘形の太った履歴ループの復元力特性を再現することを狙っている。プレストレス力は各ネジ鋼につき両端合わせてナット1回転分とした。繊維混入率1.0%、主筋ネジ鋼のもの（P10M、S10M）を基本形とし、繊維混入率0.5%で主筋ネジ鋼としたもの（P05M、S05M）、繊維混入率1.0%で主筋を丸鋼としたもの（P10F、S10F）は端部プレートと端部スタブの試験体を作製した。主筋加工を施したもの（丸鋼ストロー被覆、ネジ鋼プレストレス）は、端部プレート、繊維混入率1.0%のもののみ（P10S、P10P）とした。同一試験体の復元力特性の同一性を見るために、各試験体について同じものを2体ずつ製作した。

試験体の製作は、まず、アルミアングルで型枠を作製し、型枠に主筋、シアキー、プレートを設置する。そして、HPFRCCを練り混ぜ打設する（写真1）。練り混ぜは20モルタルミキサーを使用し、文献4)に従って行った。HPFRCCの調合条件を表2に示す。超縮小模型は、製作が容易で一度の多くの試験体を作製することができる。材料、製作費も1体当たり数千円程度であった。

使用したHPFRCCの円柱型供試体（直径100mm、高さ200mm）による圧縮および引張試験⁵⁾結果を図2、表3に示す。繊維混入率0.5%のサンプルについては計測区間外の破壊により最大耐力後の下り勾配を計測することができなかった。主筋（M4、4）の引張試験結果を図3、表4に示す。材料試験結果とM4のネジ山のピッチ（0.7mm）から、試験体P10Pのプレストレス力は409.23（N/mm²）となった。

4. 実験方法

加振システムを試験体が端部スタブの場合について図4に示す。端部プレート試験体の場合もプレートの上に端部スタブ試験体と

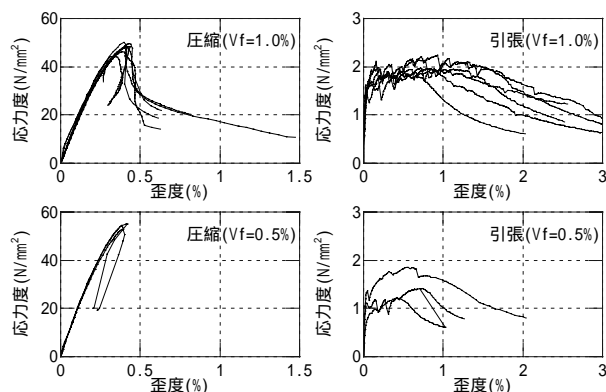


図2 HPFRCCの材料試験結果（Vf：繊維混入率）

表3 HPFRCCの材料特性

試験体	材齢 (日)	ヤング係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度 時歪度(%)	引張強度 (N/mm ²)
P10M	19	1.95×10^4	45.74	0.34	2.00
S10M	19	1.95×10^4	45.74	0.34	2.00
P05M	19	1.92×10^4	54.08	0.39	1.49
S05M	19	1.92×10^4	54.08	0.39	1.49
P10F	19	1.95×10^4	45.74	0.34	2.00
S10F	19	1.95×10^4	45.74	0.34	2.00
P10S	19	1.95×10^4	45.74	0.34	2.00
P10P	18	1.69×10^4	47.68	0.40	2.14

ヤング係数は1/3圧縮強度時の割線剛性。各試験値は3サンプルの平均。

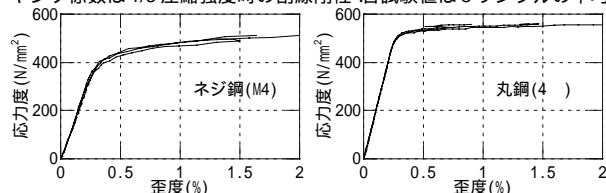


図3 鉄筋の材料試験結果

表4 鉄筋の材料特性

主筋種類	断面積 (mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)
M4	9.87	1.74×10^5	449.83
4	12.57	1.95×10^5	533.10

降伏強度は0.2%オフセット値。表中の各試験値は3サンプルの平均値。M4の断面積は、JISによる有効径3.545mmより算出。

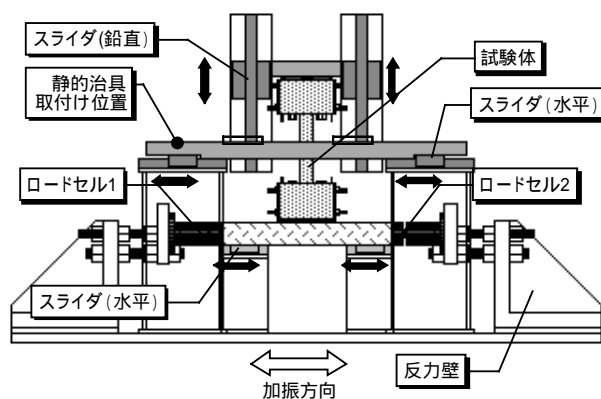


図4 加振システム（端部スタブ試験体）

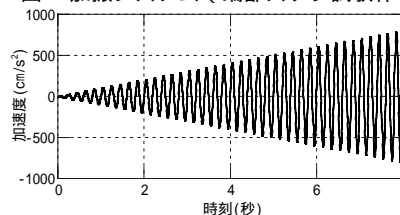


図5 漸増サイン波

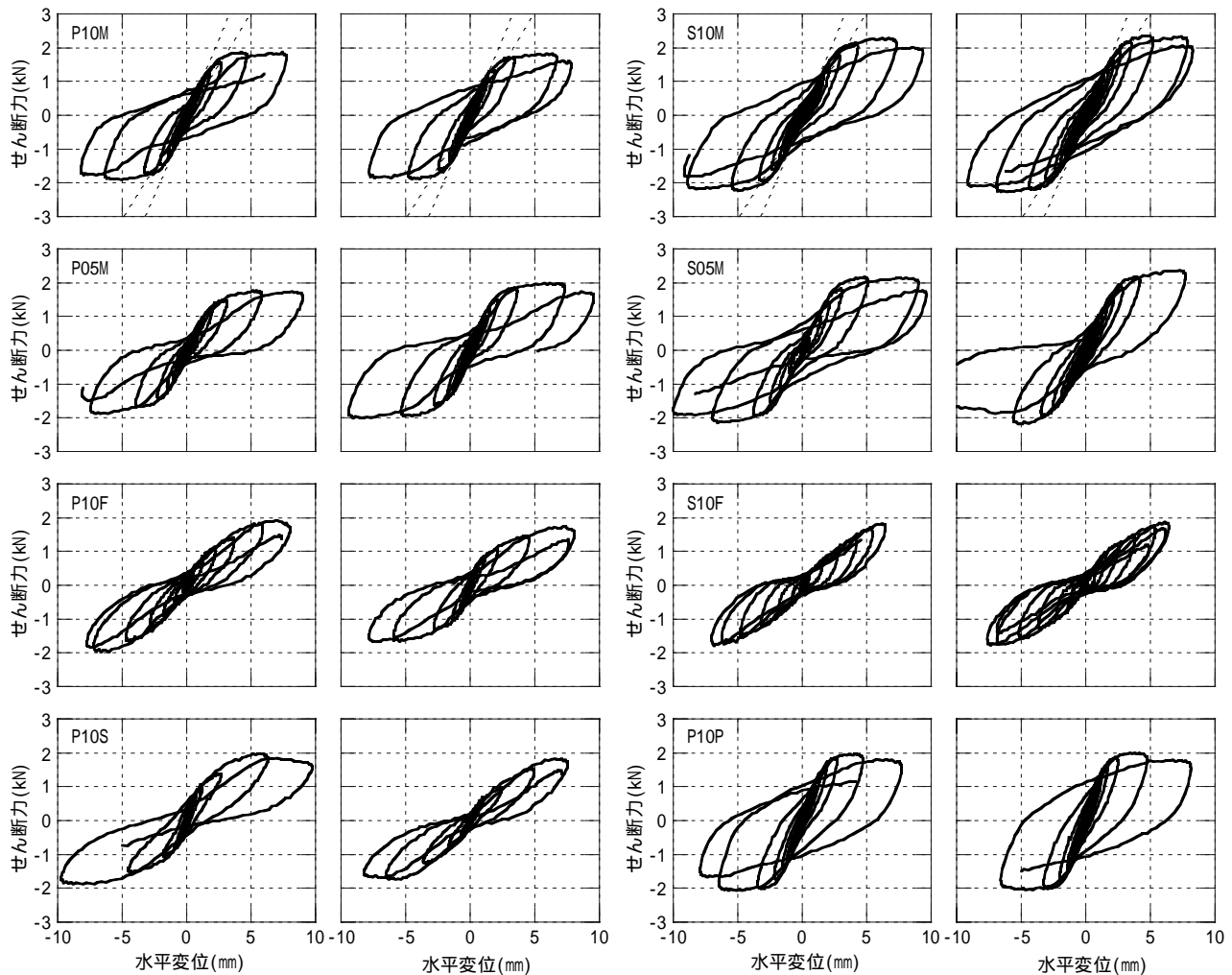


図6 復元力特性（せん断力 - 水平変位関係）

同じ大きさのスタブを固定して図4と同様に取り付けた。加振システムは、上下スタブの平行かつ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に変形させ、試験体に逆対称モーメントを作用させることができるいわゆる建研式とした。これを実現するために加振方向および鉛直方向にそれぞれスライダが設置されている。今回は軸力は作用させなかった。上下スタブの相対水平変位をレーザ式変位計で、試験体に作用するせん断力をロードセルおよび加速度計で計測し、データ収録のサンプリング間隔は0.002秒とした。また、試験体の破壊性状、破壊経過を記録するため加振後の目視による観察に加え、ビデオカメラによる動画撮影を行った。錘の総重量は330kgとし、材料試験結果に基づいて算出した試験体の弾性固有周期は0.07～0.08秒程度となった。

試験体の復元力特性を把握するための加振は、図5に示す振幅が徐々に大きくなるサイン波（以下、漸増サイン波）を用いた。一般に用いられる静的正負交番載荷ではなく、動的な漸増サイン波を用いたのは、歪速度の影響を考慮に入れて試験体の復元力特性を把握するためである。今回の実験では塑性率4程度までの復元力特性の把握を目的とし、漸増サイン波の周期を試験体の塑性率4程度の等価周期に対応する0.2秒（試験体弾性周期の約3倍）とした。漸増サイン波による加振は、振動実験の加振システムをそのまま用いることができ、手軽に短時間で行うことができるというメリットもあ

る。また、漸増サイン波に加えて試験体 P10M に周期特性の違う2つの地震動（具体的な地震動の説明は7章で述べる）を入力した。以上の加振はいずれも一方向とした。

5. 実験結果

復元力特性の把握を目的として漸増サイン波を入力したときの各試験体のせん断力 - 水平変位関係を、同一試験体2つずつを左右に並べて図6に示す。まず基本形の試験体 P10M, S10M は、降伏までに徐々に剛性が低下し、降伏後に履歴ループを描くというRC造の復元力特性が再現できていることがわかる。P10M, S10M は主筋にネジ鋼を使用しており、想定した付着が良好なエネルギー吸収能力に優れた紡錘形の復元力特性となっている。降伏点剛性低下率（弾性剛性は材料試験結果（表3, 4）から算定した）は0.2～0.3程度となり（図6に降伏点剛性低下率0.2と0.3に対応した剛性を2本の点線を示している）、一般のRC造とほぼ同じ値となった。ここで、P10M と S10M を比較すると、端部スタブの S10M は、端部プレートの P10M 場合に比べて耐力がかなり大きくなっている。これは、スタブがあることによって危険断面位置の曲げひび割れ発生後も HPRCC が引張力を負担できることと、端部プレートのは、主筋の歪領域が危険断面位置より外側に拡大しているため、試験体の縮小による歪速度の影響を低減する効果が現れていること、の2つ

が原因と考えられる．これについては，6. 実験結果の解析値との対応で詳しく検討を行う．

繊維混入率を 0.5%とした P05M, S05M は，繊維混入率を 1.0%とした P10M, S10M と比較するとややスリップが現れた復元力特性となった．S05M の耐力が P05M より大きくなったのは P10M, S10M と同様である．主筋を丸鋼として付着を低減させた P10F, S10F では，想定したスリップを起こしたエネルギー吸収に乏しい復元力特性が得られた．P10M と S10M を比較すると S10M の方がより大きなスリップ性状が現れている．これは端部プレートの場合，主筋の丸鋼が危険断面から 4.5mm の位置で長ナットに固定されているのに対して，端部スタブの場合はスタブからの抜け出しによる影響があったと考えられる．また，丸鋼にストローを被せて更に付着の低減を狙った P10S は丸鋼の P10F と比較してその復元力特性にさほど大きな違いは見られなかった．同一 2 体の試験体の復元力特性にもややばらつきが見られる．主筋にプレストレスをかけた P10P は想定した，より紡錘形の復元力特性が得られた．今回は主筋にプレストレスをかけたが，通常のプレストレスコンクリートのように緊張材にプレストレスをかければ紡錘形とは反対に瘦せた履歴ループを描く復元力特性を再現することも可能と考えられる．この方法は振動実験で錘を載せる関係で想定する軸力が得られないときの対処方法としても有効かもしれない．

以上のことから，HPFRCC の繊維混入率，主筋の種類と加工方法を変えることにより超縮小模型でも想定される RC 造の様々な復元力特性が再現されることがわかる．また，丸鋼にストローを被覆した P10S を除いていずれの試験体についても同一試験体なら復元力特性もほぼ同じものが再現されている．これは，想定する復元力特性を再現する材料，配筋などの「レシピ」に従って試験体を作製すれば，ほぼ想定する復元力特性が再現できることを示している．

6. 実験結果の解析値との対応

ここでは，従来の RC 造に用いられる略算式，あるいは解析方法により超縮小模型の曲げ耐力と降伏点剛性を計算し，実験結果との比較を行う．従来の RC 造に適用されている方法が超縮小模型にも適用できるかどうかを確認することにより，超縮小模型の復元力特性発現のメカニズムが従来の RC と同様であることを確認するという目的もある．また，端部スタブと端部プレート試験体の耐力の違いの原因についても検討を行う．ここでは，主筋がネジ鋼の付着が良好な P10M, S10M を解析対象とする．

図 6 の P10M と S10M について，それぞれ左側の試験体の第一象限を抜き出して図 7 に細い実線で示す．まず RC 規準⁶⁾に示された曲げ耐力の略算式（式(1)），および菅野式⁷⁾（式(2)）によって曲げ耐力，降伏点剛性を求め，図 7 に点線で示す．弾性剛性は，材料試験結果（表 3, 4）から求めた．

$$M_y = 0.9 a_t \sigma_y d \quad (1)$$

$$\alpha_y = (0.043 + 1.64 n_p + 0.043 a / D + 0.33 \eta_0) \left(\frac{d}{D} \right)^2 \quad (2)$$

ここで， a_t : 引張鉄筋の断面積， σ_y : 引張鉄筋強度， d : 有効せい， n : ヤング係数比， p_t : 引張鉄筋比， a : シアスパン長さ， D : 部材せい， η_0 : 軸力比（ $=N/bD B$ ）， N : 軸力， b : 部材幅， B : コンクリート圧縮強度である．

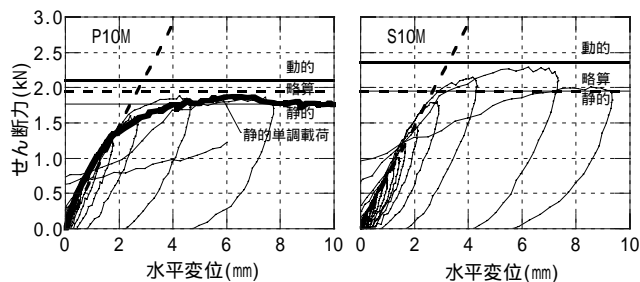


図 7 動の実験結果と解析値，静的単調荷試験結果の対応（せん断力 - 水平変位関係）

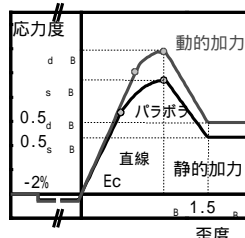


図 8 HPFRCC の材料モデル

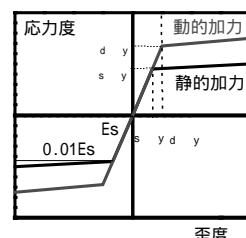


図 9 主筋の材料モデル

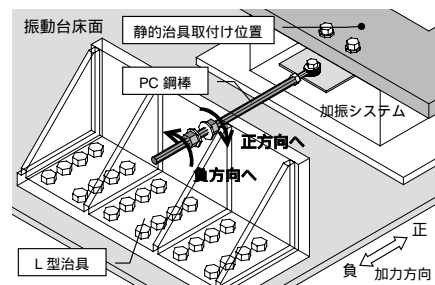


図 10 静的加力治具

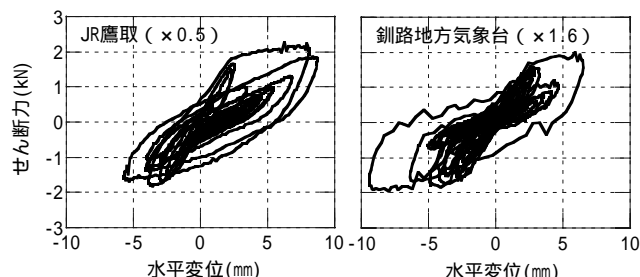


図 11 地震動を入力した時の復元力特性（試験体 P10M）

試験体 P10M については，ほぼ式(1)(2)による略算値で耐力および降伏点剛性が算定可能であることがわかる．しかしながら，S10M に対しては耐力が過小評価となっている．これは，S10M にスタブが付いているため HPFRCC が引張力を負担することが一因と考えられる．

そこで，HPFRCC の引張力を考慮に入れ，平面保持の仮定に基づいた断面解析を行った．HPFRCC と鉄筋の応力度 - 歪度関係は，材料試験結果（表 3, 4，図 2, 3）に基づき図 8, 9 のようにモデル化した．即ち，HPFRCC については，圧縮側は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．引張側は，端部スタブの場合は，圧縮側と同一の傾きを持つ直線で表し，応力度が引張耐力（=圧縮耐力の 1/20）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．端部プレートの場合は，引張応力は負担しないものとした．

断面解析による曲げ耐力を図 7 に細い実線（図中で静的と表示）で示す。P10M については、略算値と同様、ほぼ実験値と一致する結果が得られた。S10M については、スタブがあることによって危険断面位置の曲げひび割れ発生後も HPFRCC が引張力を負担できることが考慮されているため、P10M の耐力より大きい値となったが、依然として実験値より小さな値となっている。これは、試験体の縮小によりその固有周期が短くなり、それに伴って入力地震動の時間刻み（ここでは漸増サイン波の周期）を短くすることによって歪速度が上昇することによる、耐力の上昇が原因と考えられる。

そこで、歪速度の影響を考慮に入れた断面解析を行った。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、主筋の降伏強度と歪速度との関係式⁸⁾をそれぞれ式(3)(4)に示す。

・ HPFRCC（コンクリート）

$$\begin{aligned} & \left| \begin{array}{l} \dot{\epsilon} < 10^4 \mu/\text{秒} \text{ のとき } \sigma_B = \sigma_B \\ \dot{\epsilon} > 10^4 \mu/\text{秒} \text{ のとき } \sigma_B = (0.06 \log \dot{\epsilon} / + 0.94) \sigma_B \\ \sigma_B = (0.02 \log \dot{\epsilon} / + 0.98) \sigma_B \end{array} \right. \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、 σ_B 、 σ_B ：それぞれ動的および静的加力時の圧縮強度、 σ_B 、 σ_B ：それぞれ動的および静的加力時の弾性係数である。

・ 鉄筋

$$\begin{aligned} & \left| \begin{array}{l} \dot{\epsilon} < 10^2 \mu/\text{秒} \text{ のとき } \sigma_y = \sigma_y \\ \dot{\epsilon} > 10^2 \mu/\text{秒} \text{ のとき } \sigma_y = (0.05 \log \dot{\epsilon} / + 0.90) \sigma_y \end{array} \right. \quad (4) \end{aligned}$$

ここで、 σ_y 、 σ_y ：それぞれ動的および静的加力時の降伏強度である。

歪速度の値は、部材中央高さに反曲点をもつ逆対称の三角形の曲率分布を仮定して実際の実験結果から 1 ステップごとに求めた。歪速度の影響を考慮に入れた断面解析による曲げ耐力の計算値を図 7 に実線（図中で動的と表示）で示している。端部スタブの S10M については曲げ耐力の実験値とほぼ対応していることがわかる。これに対して、端部プレートの P10M では、逆に歪速度を考慮すると耐力が過大評価になった。これは P10M では危険断面位置の外側に主筋がフリーの部分（図 1 の区間 B）があり、主筋の危険断面位置での歪領域がこの部分に拡大することにより歪速度の影響が緩和されていて、想定した歪速度の上昇が発生していないためと考えられる。

そこで、動的および静的載荷時の端部プレート試験体の耐力を実験的に比較するため、試験体 P10M の静的単調載荷試験を行った。加力は、静的治具取り付け位置（図 4）に PC 鋼棒取り付け（図 10）、L 型治具で反力を取って、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。結果を図 7 に太線で示している。静的単調載荷試験結果は漸増サイン波による動的試験結果とほぼ対応しており、試験体 P10M では端部をプレートに固定し主筋にプレートの中にフリーの部分を設けることで動的と静的の差がほとんどなくなっている。よって、この方法が試験体の縮小によりその固有周期が短くなり、それに伴って入力地震動の時間刻みを短くすることによって歪速度が上昇して耐力も上昇することを押さえるのに有効であることがわかる。

7. 地震動を入力した場合

最後に地震動を入力し、復元力特性を漸増サイン波と比較した。試験体は P10M（ただし使用した HPFRCC は P10P のバッチ）、加振システム、測定は漸増サイン波を入力した場合と同じである。入力

地震動は、周期特性の異なる 1995 年兵庫県南部地震の JR 鷹取⁹⁾と 1993 年釧路沖地震の釧路地方気象台（建築研究所設置のもの）の 2 つとした。試験体の弾性周期を、中低層 RC 造建物を想定した 0.3 秒程度に対応させるため、時間刻みを 1/4 とし、応答塑性率を 4 程度とするため予備解析を行い、振幅を JR 鷹取が 0.5 倍、釧路地方気象台が 1.6 倍とした。また、加振は一方方向なので、水平 2 成分をベクトル合成して最大となる方向のものとした。得られた復元力特性を図 11 に示す。地震動が入力された場合も漸増サイン波の場合と同様の復元力特性が再現されることが確認される。

8. まとめと今後の予定

試験体製作に伴う経費および労力を節減する HPFRCC を用いた超縮小模型による簡易振動実験手法開発の第一段階として、実際に HPFRCC を用いた超縮小模型を作製し、線材一次元曲げのせん断力 - 変位関係の復元力特性を把握するための振動実験を行った。その結果、超縮小模型でも従来の RC 造と同様の復元力特性が得られ、配筋、調合などの試験体の様々な詳細を変えることにより復元力特性を変化させることができた。また、曲げ耐力、降伏剛性などは、RC 造に用いられる略算式や曲げ解析で算定したものとほぼ対応した。よって、超縮小模型で線材一次元曲げを対象とした RC 造のせん断力 - 変位関係の復元力特性をほぼ模擬できることが確認された。

今後は、軸力、シアスパン比、プレストレスなど更に多くのパラメタについて検討し、部材も線材だけではなく、耐震壁、床などの面材に適用した場合、縮小率をもっと上げた場合の検討などを行っていく。そして、超縮小模型でフレーム構造を組み立て、強震地動下における RC 造の動的挙動を把握するための振動実験の実現、その実施方法の開発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振動実験手法の開発に関する研究」(研究代表者：境有紀)、筑波大学学内プロジェクト研究費助成研究(B)を用いて行った。試験体型枠と加力治具の製作は、東京大学生産技術研究所試作工場の協力を得た。実験実施の際、筑波大学第三学群田中崇博君、東京大学生産技術研究所中埜研究室の皆さんの協力を得た。強震記録は、JR 総合技術研究所、建築研究所より提供を受けた。査読者のコメントにより論文を改善することができた。

参考文献

- 1) 関田徹志: 高性能繊維補強セメント材料の設計技術の現状, コンクリート工学, Vol.38, No.6, pp.9-16, 2000.6.
- 2) 福山洋, 倉本洋: スマートコンクリート - 高靱性コンクリート -, コンクリート工学, Vol.39, No.1, pp.104-109, 2001.1.
- 3) 諏訪田晴彦, 福山洋, 梁一承: セメント系部材の履歴コントロールに関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1597-1602, 2002.
- 4) 諏訪田晴彦, 福山洋, 磯雅人: 構造物の高性能化に向けた高靱性セメント系複合材料の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.133-138, 2001.
- 5) 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.
- 6) 鉄筋コンクリート構造規準・同解説, 日本建築学会, 1999.
- 7) 菅野俊介: 鉄筋コンクリート部材の復元力特性に関する実験的研究, 東京大学学位論文, 1970.
- 8) 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
- 9) 中村豊, 上半文昭, 井上英司: 1995 年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析(), JR 地震情報, No.23d, 1996.3.