

論文 鉄筋コンクリート部材を模擬した超小型試験体の履歴推定手法

徳井 紀子^{*1}・高橋 典之^{*2}・中埜 良昭^{*3}

要旨：筆者らは、鉄筋コンクリート造構造物の模型振動実験の実施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手法の開発を行なっている。その一環として、高靱性型セメント系複合材料と主筋のみで構成される超小型試験体を作製し、それが RC 部材の履歴形状を模擬できることを振動実験により確認した。本論文では、上記振動実験に加えて静的加力実験を実施し、主筋の端部定着方法と加力方法の違いを考慮した超小型試験体の破壊メカニズムに基づくファイバーモデルによる断面解析により、超小型試験体の履歴推定を試みた。

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

振動実験は、建築構造物の強地震動下における動的挙動を把握する手法として大変有効である。しかし、鉄筋コンクリート（以下、RC）造建物の場合、建物全体を対象とした実験実施は、振動台の容量制限の問題から、非常に困難であると言える。そのため、建物全体を対象とした耐震性能評価には、主に解析的な手法が用いられているが、解析で仮定している RC 部材のモデルが建物全体の挙動に与える影響を、実験により確認・検証している例は少ない。試験体規模・費用の観点から解析でしか検証されていない事象を実験的に検証するには、RC 造部材の履歴を模擬し、かつ、容易に作製できる超小型試験体を用いて骨組みを作製することで、簡易な振動実験を可能にする要素技術の開発が望まれる。

そこで、筆者らは、超小型試験体を用いた簡易振動実験手法の開発を目的として研究を行っている。既往の研究では、高靱性型セメント複合材料（以下、HPFRCC）と主筋のみで構成される試験体を提案し、その試験体が一般的な RC 部材の履歴を模擬できることを確認した¹⁾。

また、本手法において超小型試験体を用いて

振動実験を行なう場合、設計段階であらかじめ超小型試験体が持つ履歴形状を推定できることが望ましい。本論文では、振動実験に加えて静的加力実験を実施し、主筋の端部定着方法と加力方法の違いを考慮した超小型試験体の破壊メカニズムに基づく断面解析により、超小型試験体の履歴推定を試みた。

2. 振動実験概要

2.1 超小型試験体

試験体詳細図を図-1に示す。試験体パラメー

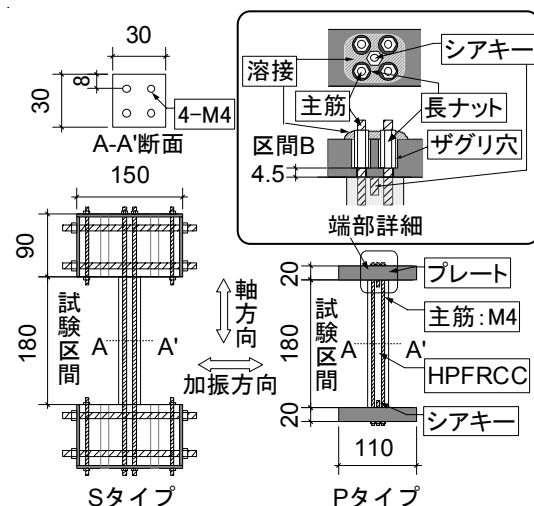


図-1 試験体詳細図 単位：mm

*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 生産技術研究所助手 博(工) (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所教授 工博 (正会員)

タを主筋の端部定着方法とし、以下の 2 種類の試験体を製作した。すなわち、一般的な柱型試験体の定着形式を採用し、端部に配したスタブと試験区間を一体で打設したスタブタイプ（以下、S タイプ）、端部にプレートを配し、主筋をナットにより固定したプレートタイプ（以下、P タイプ）で、これに動的加力を表す D を付記してそれぞれ SD, PD 試験体と表す。なお、P タイプの端部ディテールは、将来、試験体を連結することにより、簡便に骨組を製作することを意図したものである。

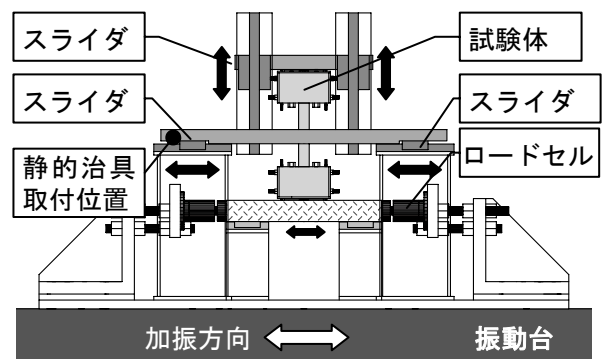
試験区間は、両試験体ともに同一で、断面が $30 \times 30 \text{ mm}$ 、高さが 180 mm の柱部材である。主筋には、M4 のネジ鋼を、HPFRCC には、水セメント比 45%、砂セメント比 40% のモルタルにポリエチレン繊維（繊維長さ： 15 mm 、繊維径： $12 \mu\text{m}$ ）を体積比で 1.0% 混入したものをそれぞれ用いた。材料特性の詳細は、4.2 節に示す。

2.2 実験方法

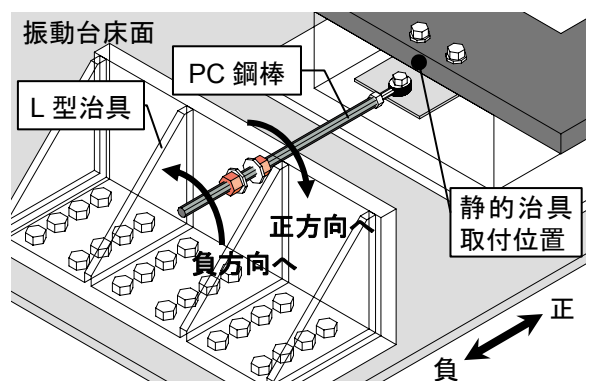
加力システムは、試験体上部のスタブあるいはプレートの水平を保持しつつ、鉛直方向への伸びを許容した状態で、試験体を水平一方向へ変形させ、試験体に逆対称曲げモーメントを作用させるものとした（図-2 (i)）。計測は、レーザ式変位計（分解能： $3 \mu\text{m}$ ）で試験体の相対変位を、ロードセルおよび加速度計により試験体に作用するせん断力を計測した。入力には、振幅が漸増するサイン波を用いた（図-3）。

2.3 実験結果

振動実験から得られたせん断力-水平変形関係を図-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形状を示した。しかし、P タイプの最大耐力が 1.90 kN であったのに対して、S タイプが 2.29 kN と、耐力に 2 割程度の差が生じている。この原因として、主筋の端部定着方法の違いと動的加力による材料特性の変動の影響の 2 つが考えられる。そこで、後者の影響を取り除いた場合の試験体の挙動を調査するため、静的加力実験を行い、その結果と振動実験結果の比較検討を行なうこととした。



(i) 加振システム



(ii) 静的加力用治具

図-2 载荷システム

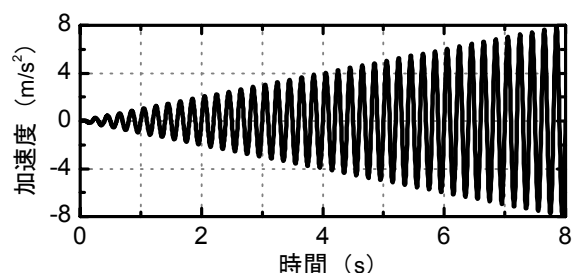


図-3 漸増サイン波

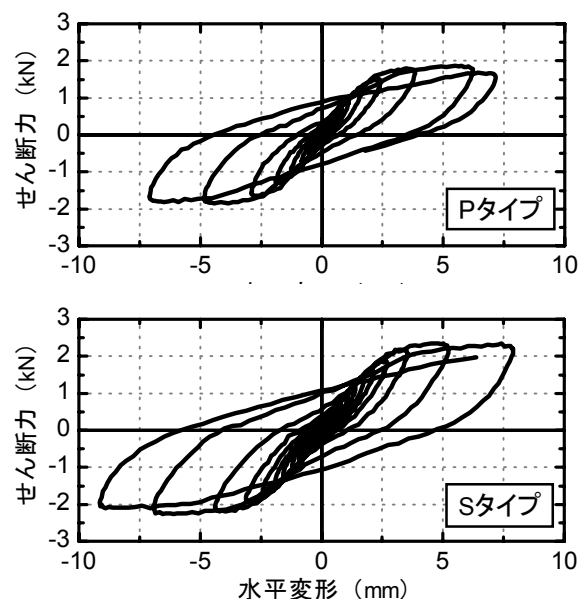


図-4 振動実験結果

3. 静的加力実験

3.1 試験体および実験方法

静的加力実験では、振動実験で用いた試験体と同様に S タイプと P タイプを用い、静的加力を表す S を付記してそれぞれ SS, PS 試験体と表す。加力は、図-2 (i) 中に示す静的治具取り付け位置に、同図 (ii) のように、PC 鋼棒を取り付け、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なった。変位履歴は、振動実験により得られた変位履歴と同一で、最後は正方向に押し切った。

3.2 実験結果

試験体の破壊性状については、両試験体とも、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が見られなかった。しかし、P タイプでは、加力の初期段階でプレートと試験区間の境界面にひび割れが生じ、その後、主にこのひび割れが進展したため、S タイプと比べ、危険断面位置にひび割れがより集中して生じた。

次に、両試験体から得られた最大耐力に着目し比較を行なう。静的加力実験から得られたせん断力-水平変形関係を図-5 に示す。静的加力実験の結果によると、P タイプの最大耐力 (1.91kN) よりも S タイプ (2.12kN) の方が約 1 割高い値を示した。これは、S タイプでは、ひび割れが発生後も HPFRCC が引張応力を負担する

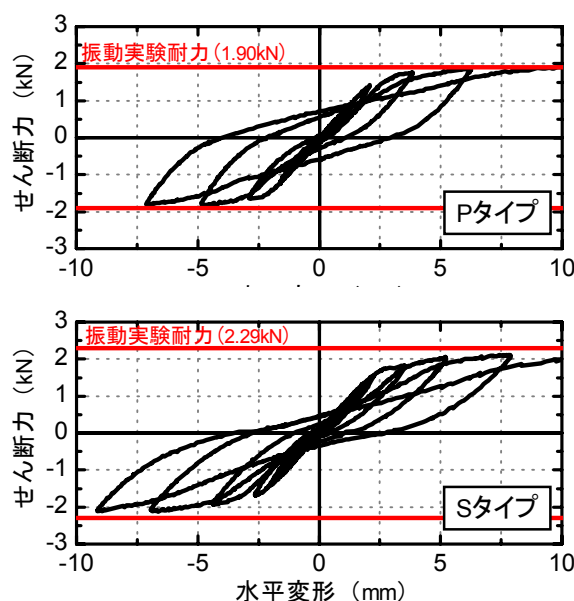


図-5 静的加力実験結果

ものの、P タイプでは、プレートと試験区間の境界面にひび割れが生じた後は、この断面で HPFRCC が引張応力を負担できないことから、両タイプに耐力差が生じたものと考えられる。

また、振動実験と静的加力実験との耐力差をみると、P タイプではほぼ同一の値であるのに対して、S タイプでは約 8% の耐力差を示した。この違いについて検証するために、動的加力時の歪速度の影響による材料特性の変動を考慮した断面解析を行なうこととした。

4. ファイバーモデルによる断面解析

4.1 解析方法

主筋の端部定着方法と加力方法の違いを考慮した断面解析により、試験体の履歴推定を試みた。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 タイプを解析対象とする場合、図-6 中の端部詳細に示すように、試験区間と主筋を固定するナットとの間に主筋がアンボンドになる区間 (長さ L : 4.5mm) を有していることに留意する必要がある。つまり、P タイプの

(試験体の全体変形 y) =

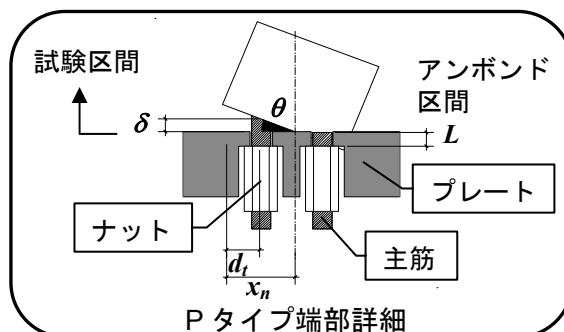
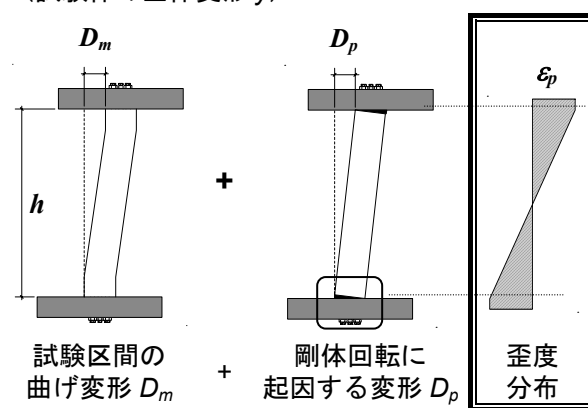


図-6 P タイプの変形定義

変形時には、アンボンド区間の主筋が伸長することにより、試験区間の剛体回転が生じていると考えられるため、それに起因する変形を考慮する必要がある。そこで、Pタイプの変形は、図-6に示すように、断面曲率を材軸方向に積分して算出する試験区間の曲げ変形 D_m と、剛体回転に起因する変形 D_p の和であると定義して解析を行うこととし、剛体回転に起因する変形 D_p は、曲げ変形 D_m を求める際に危険断面位置の主筋に生じた歪度が、アンボンド区間の主筋にも一様に分布するとして算定した(図-6, 歪度分布)。すなわち、試験体頂部におけるある変形 y において、まず、平面保持の仮定に基づいて算出される危険断面位置での曲率と軸力を満たすモーメントおよび曲げ変形 D_m を算定し、次に、その時主筋に生じている歪度 ε_p がアンボンド区間にも一様に生じるとして、式(1)から(3)の手順で算出される D_p を D_m に加算した値が、式(4)に示す条件を満たすまで、曲率を徐々に変動させて反復計算を行なった。

$$\delta = \varepsilon_p \cdot L \quad (1)$$

$$\theta = \delta / (x_n - d_v) \quad (2)$$

$$D_p = \theta \cdot h \quad (3)$$

$$y = D_p + D_m \quad (4)$$

ここで、 δ : アンボンド区間の主筋の伸び量、 ε_p : 危険断面位置における主筋歪度、 L : アンボンド

表-1 HPFRCC 材料特性※1

試験体	ヤング係数 E_c ※3 (N/mm ²)	圧縮強度 $c\sigma_B$ (N/mm ²)	圧縮強度時歪度 $c\varepsilon_B$ (%)	引張強度 σ_t (N/mm ²)
PD	1.69×10^4	47.7	0.40	2.14
SD	1.95×10^4	45.7	0.34	2.00
PS	1.69×10^4	47.7	0.40	2.14
SS	1.75×10^4	48.7	0.42	—※2

※1 表中の値は、3 サンプルの平均値、※2 未計測、

※3 ヤング係数は、1/3 圧縮強度時の割線剛性

表-2 主筋材料特性

主筋種類	断面積 A (mm ²)	ヤング係数 E_s ※1 (N/mm ²)	降伏強度 $s\sigma_y$ (N/mm ²)
M4	9.87	1.55×10^5	412

※1 降伏強度は、0.2% オフセット値

※2 表中試験値は、3 サンプルの平均値

区間長(4.5mm)、 θ : 主筋伸びに起因する回転角、 x_n : 中立軸位置、 h : 試験区間高さ、 d_t : 引張縁から主筋図心までの距離、 y : 試験体に与える任意の変形、 D_p : 剛体回転に起因する変形、 D_m : 試験区間の曲げ変形。

4.2 材料のモデル化

HPFRCC および主筋の材料特性を表-1 および表-2 にそれぞれ示す。HPFRCC の力学特性は、円柱型供試体(直径 100mm、高さ 200mm)を用い、圧縮強度試験(JIS A 1108)および引張試験²⁾で求めた。主筋の力学特性は、引張試験(JIS Z 2201)により求め、除荷剛性を調べるために繰り返し載荷を行なった。

HPFRCC の材料モデルを材料試験結果と共に図-7に示す。HPFRCC モデルの圧縮側については、材料試験に基づく最大圧縮強度点($c\varepsilon_B$, $c\sigma_B$)を通る e 関数と弾性剛性 E_c の傾きを持つ直線の組み合わせとし、2 線の交点において切り替わるものとした。また、e 関数への移行後における除荷時および再載荷時は、除荷開始点を起点とし

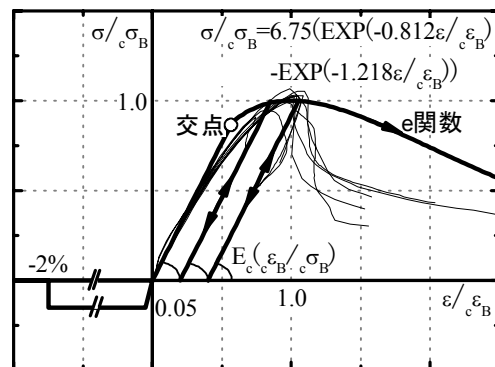


図-7 HPFRCC モデル

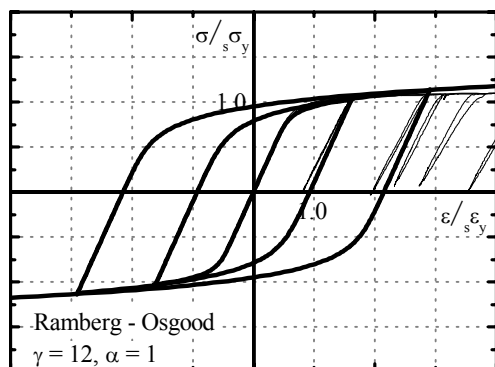


図-8 主筋モデル

た弾性剛性 E_c の勾配上で変動するものとした。
 なお、本モデルは、圧縮強度以降の軟化域を十分にモデル化していないものの、後述の全解析結果における HPFRCC 要素は、一例を除き圧縮側では圧縮強度発揮以前の範囲に収まっていることを確認している。

引張側については、3.2 節に示した異なる端部のディテールによる破壊性状の違いを考慮した。すなわち、S タイプでは、圧縮側と同一の傾きを持つ直線で表し、応力度が式 (5) に示す引張耐力 σ_t 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した。P タイプでは、引張応力は負担しないものとした (式 (6))。図-8 に主筋の材料モデルを材料試験結果と共に示す。主筋の履歴特性には Ramberg Osgood モデル ($\gamma=12$, $\alpha=1$) を用いた。

本解析では、各計算ステップで各要素に生じる歪速度 $\dot{\varepsilon}$ を算定し、その値に対応して、HPFRCC 要素および主筋要素の耐力や弾性剛性等を算出し、材料の応力度-歪度関係を設定した。HPFRCC の圧縮強度および弾性係数の歪速度との関係を式 (7) から式 (10) のように、主筋の降伏強度の歪速度との関係を式 (11) および式 (12) のように設定した³⁾。なお、各要素が除荷領域にある場合、歪速度の影響は無視した。

(1) HPFRCC の引張強度

S タイプの場合

$$\sigma_t = {}_d\sigma_B / 20 \quad (5)$$

P タイプの場合

$$\sigma_t = 0 \quad (6)$$

ここで、 σ_t : HPFRCC の引張強度

(2) HPFRCC の圧縮強度

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

$${}_d\sigma_B = (0.06 \log |\dot{\varepsilon}| + 0.94) {}_s\sigma_B \quad (7)$$

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

$${}_d\sigma_B = {}_s\sigma_B \quad (8)$$

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

(3) HPFRCC の弾性係数

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

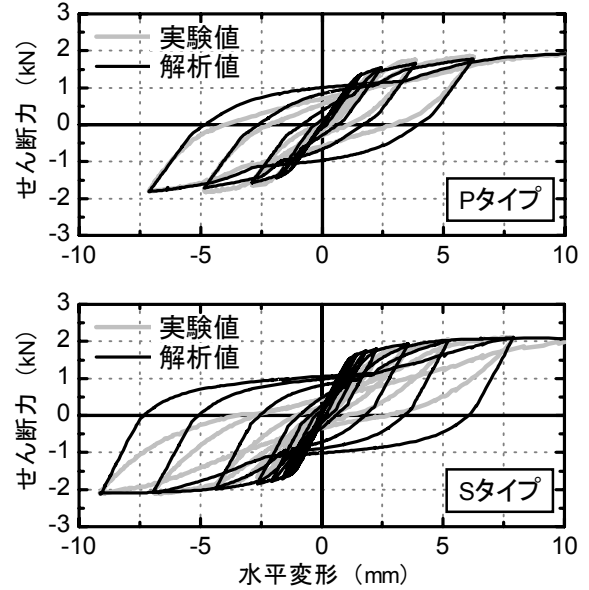


図-9 静的加力実験の解析結果

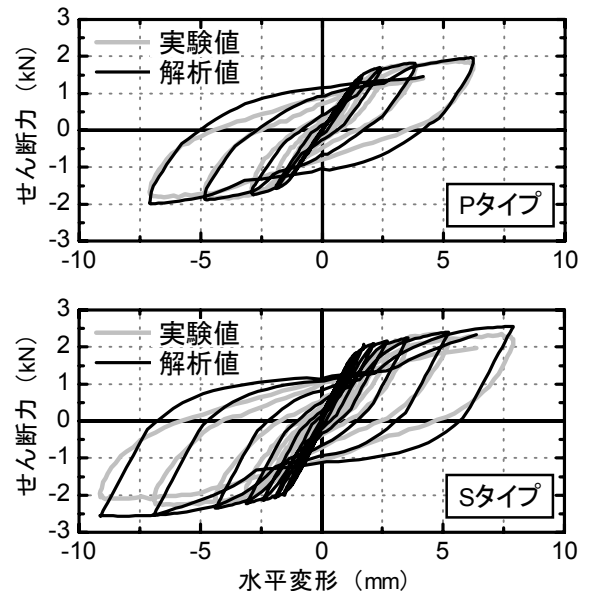


図-10 振動実験の解析結果

$${}_dE_C = (0.02 \log |\dot{\varepsilon}| + 0.98) {}_sE_C \quad (9)$$

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

$${}_dE_C = {}_sE_C \quad (10)$$

ここで、 ${}_dE_C$: 動的加力時の弾性係数

${}_sE_C$: 静的載荷材料試験の弾性係数

(4) 主筋の降伏強度

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

$${}_df_y = (0.05 \log |\dot{\varepsilon}| + 0.90) {}_sf_y \quad (11)$$

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

$${}_df_y = {}_sf_y \quad (12)$$

ここで、 ${}_df_y$: 動的加力時の降伏強度

${}_sf_y$: 静的載荷材料試験の降伏強度

4.3 解析結果

静的加力実験および振動実験を想定して解析を行なった結果を、図-9, 10 にそれぞれ示す。

P タイプについては、HPFRCC モデルに引張応力を負担させず、さらに、前節で示した変形定義に基づき解析を行なった。その結果、静的加力実験および振動実験での試験体挙動を良好に再現することができ、本論文で示した P タイプの破壊メカニズムの妥当性が立証された。今後は、試験体設計に本解析手法が有効に活用できると考えられる。

S タイプについては、HPFRCC モデルに引張応力を負担させ、試験体の変形は試験区間の曲げ変形のみを考慮して解析を行なった。静的と動的のいずれの場合についても、耐力の解析値は実験値と良好に対応したが、剛性の解析値は実験値よりも高めに評価される結果となった。これは、本試験体は断面に対して比較的太径の主筋を用いていることから、一般的な断面形状を持つ RC 部材よりもスタブ区間からの主筋の抜け出し量が多いことによると推察される。これにより、P タイプと同様に、スタブ区間からの主筋の抜け出しに起因する変形が生じていると考えられる。そこで、抜け出しに起因する変形を全体変形に対して暫定的に 20%考慮し、同様の解析を実施した結果、S タイプの履歴形状をより良好に再現できた（図-11）。しかしながら、本試験体を構成する HPFRCC とネジ鋼間の付着性状は、その材料の特殊性から、現段階では不明であるため、今後この特性を明らかにするための付着試験を実施する必要がある。

なお、いずれの解析結果も変形量の増大に伴い除荷時の履歴が、実験値と乖離する傾向があり、その度合いは S タイプでより顕著である。これは、歪度の増大に伴い主筋の材料試験結果と材料モデル（Ramberg Osgood モデル）との間に生じた除荷剛性の差によるものである。

5. まとめ

RC 造構造物を対象とした簡易振動実験手法

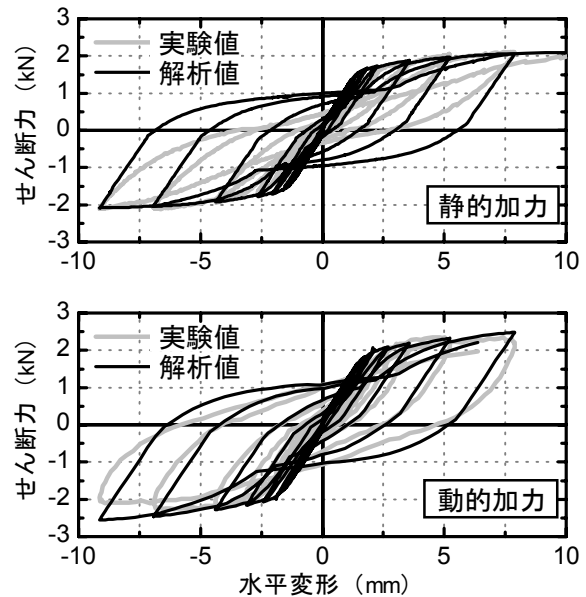


図-11 S タイプの解析結果
(抜け出しによる変形が全体変形の 20%と仮定)

開発の一環として、超小型試験体の破壊メカニズムを把握し、その履歴を推定するため、主筋の端部定着方法および加力方法の違いを考慮した断面解析を行なった。

(1) P タイプは、HPFRCC モデルに引張応力を負担させず、試験体変形にプレート内アンボンド区間における主筋伸びによる剛体回転に起因する変形を考慮して解析を行なった場合、実験での試験体の履歴形状を再現できた。

(2) S タイプについては、HPFRCC モデルに引張応力を負担させ、試験区間の曲げ変形のみを考慮して解析を行なった場合、耐力の解析値は実験値と良好に対応したが、剛性の解析値は高めに評価された。スタブ区間からの抜け出しに起因する変形を全体変形の約 20%と仮定すると、実験での試験体の履歴形状を再現できるが、解析仮定の妥当性確認のために主筋の付着性状を明らかにする必要がある。

今後は、立体架構への展開を視野に入れた実験手法の開発を検討する予定である。

参考文献

- 1) 境 有紀他：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，日本建築学会構造系論文集，No.584，pp.147-152，2004.10
- 2) 佐藤幸博他：高靱性型セメント系複合材料の一軸引張-圧縮試験方法の提案，日本建築学会構造系論文集，No.539，pp.7-12，2001.1
- 3) 細矢 博他：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，No.492，pp.83-92，1996