

## 論文 強度・剛性・靱性を兼ね備えた高性能耐震要素の構造実験

諏訪田 晴彦<sup>\*1</sup>・福山 洋<sup>\*2</sup>・向井智久<sup>\*3</sup>・野村設郎<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究は、高靱性セメント系複合材料（HPFRCC）を利用して RC 耐震壁のような高い剛性および強度に加えて靱性能にも優れた新しい耐震要素（靱性壁）を開発することを目的としたものである。本論文では、その第一段階として靱性壁の考え方を示した上で、モデル試験体の水平加力実験を行い、主に荷重-変形関係について RC 耐震壁と比較検討した。その結果、靱性壁は RC 耐震壁に近い剛性および強度を有し、かつ優れた靱性能を付与できることが確認された。

**キーワード**：高靱性セメント系複合材料（HPFRCC）、耐震要素、強度、剛性、靱性

## 1. はじめに

現在、既存不適格建築物の耐震補強は、わが国における地震防災上の喫緊の課題である。現在行われている耐震補強の多くは、不足している耐震性能を、現行の建築基準法が要求するレベルまで向上させるという思想に基づいている。しかし、建築基準法は最低基準であるため、極めて稀に発生する大地震に対して、人命を守ることを目的としており、兵庫県南部地震以降に重要視されるようになった修復性については直接的には担保されていない。これは、本来設計者が建築主との合意の基に適切な設計目標のレベルを設定することにより担保されるべきものである。しかしながら、兵庫県南部地震において、新耐震基準に基づいて設計された建築物の中に、人命は守ったものの大きな損傷を受け、その修復に莫大な費用を要するため取り壊されたものが少なからず存在した。これと同様のことが耐震補強を施した建築物にも生じる可能性は否定できない。また、設計荷重を上回る地震入力（過大入力）を受けられる可能性に対しても、ある程度対応していく必要がある。このような背景から、修復性（地震後の建築物の使用性や安全性を当初保有していたレベルに回復させる

時の容易さ）や過大入力をも考慮した、より高性能な耐震補強技術を確立することは重要な課題であると考えられる。

著者らは、これまでに高靱性セメント系複合材料（以下、HPFRCC：High Performance Fiber Reinforced Cement Composite）が持つ、優れた材料特性に着目し、せん断スパン比 1.0 程度の短スパン部材（以下、HPFRCC ダンパーと称す）に適用し、その構造性能について実験的に検討を行ってきた<sup>1), 2)</sup>。その結果、 $6\text{N/mm}^2$  程度の高いせん断応力下においても  $1/25\text{rad}$  程度の大変形まで安定した復元力特性が得られることが確認された。本研究では、このような特徴を有する HPFRCC ダンパーを鉄筋コンクリート（以下、RC）造架構に組み込むことにより、強度、剛性および靱性を兼ね備えた新しい高性能耐震要素（以下、靱性壁）を開発し、修復性や過大入力なども考慮できる、より高性能な耐震補強技術を確立することを目的とした。

## 2. 靱性壁の目標性能

靱性壁の開発に当たり、まず目標性能の設定を行った。

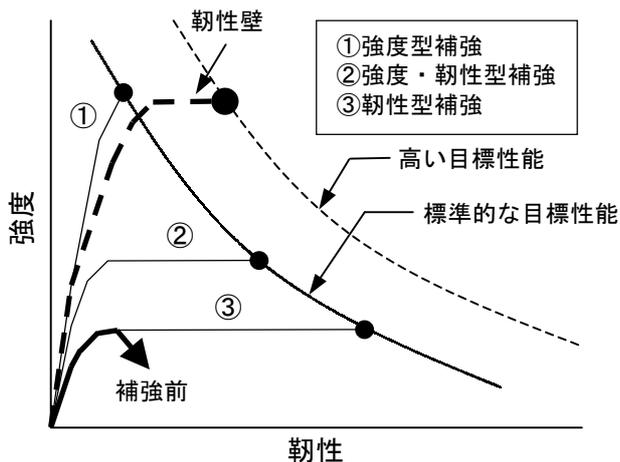
図-1 は、耐震補強によって耐震性を高める

\*1 独立行政法人建築研究所 構造研究グループ研究員（正会員）

\*2 独立行政法人建築研究所 構造研究グループ上席研究員 工博（正会員）

\*3 独立行政法人建築研究所 構造研究グループ研究員 博士（工学）（正会員）

\*4 東京理科大学 理工学部建築学科教授 工博（正会員）



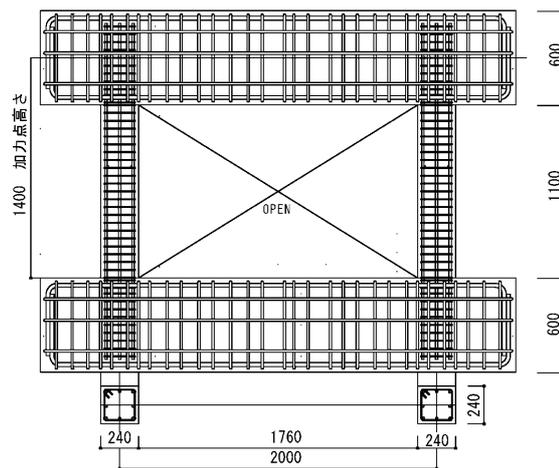
図－1 耐震補強の目標性能の考え方

場合の考え方<sup>3)</sup>と靱性壁の目標性能を模式的に示したものである。RC造建築物の耐震補強は、その抵抗形式により、強度抵抗型、靱性抵抗型および強度・靱性抵抗型に分類されるが、靱性壁はこの中の強度型のものに靱性能を付与させたものである。これにより、エネルギー吸収能の観点からは、従来の耐震壁の2～3枚分の性能を有するような極めて高性能な耐震要素が実現できる。本研究では、この靱性壁と強度抵抗型である耐震壁の性能を実験的に比較することにより、その実現可能性を検討する。

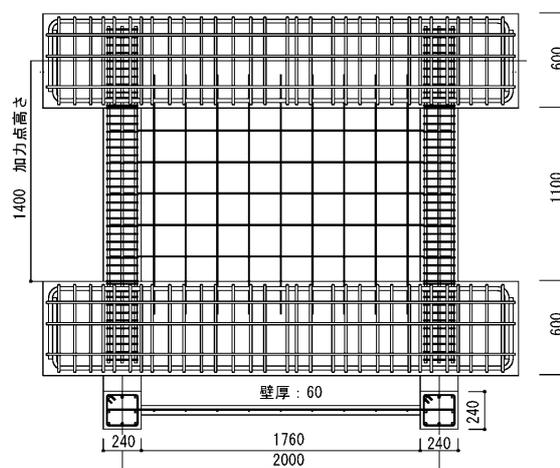
### 3. 実験概要

#### 3.1 試験体

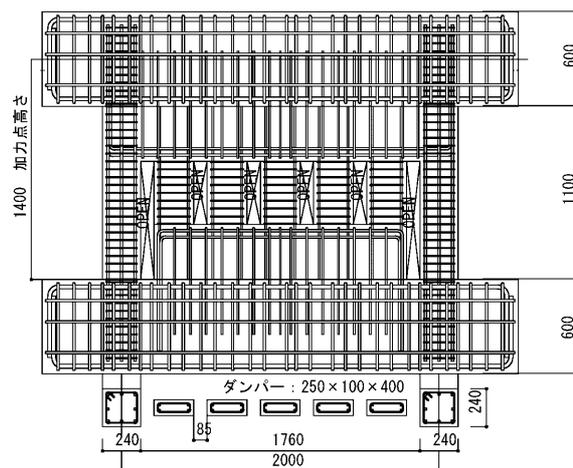
試験体は、実大の1/3スケールの縮小モデルで、靱性壁試験体と比較用のRC耐震壁試験体およびRCフレーム試験体の計3体を計画した。配筋図を図－2に示す。柱断面は全ての試験体で240mm×240mmとし、主筋は8-D13、せん断補強筋は□-D6@50とした。使用したコンクリートの設計基準強度は24N/mm<sup>2</sup>である。RC耐震壁の壁筋は縦横ともD6@200とし、コンクリートは柱と同一のものを使用した。靱性壁に組み込まれるHHPFRCCダンパーは、長さを400mm、断面を200mm×100mmとし、主筋は4-D10、せん断補強筋は□-D6@50とした。使用したHHPFRCCは、水セメント比0.45、砂セメント比0.4のモルタルマトリックスにポリエチレ



(a) RCフレーム試験体



(b) RC耐震壁試験体



(c) 靱性壁試験体

図－2 試験体配筋図

ン繊維とスチールコードをそれぞれ体積混入率で1%混入したものを使用した。なお、HHPFRCCダンパーは回転変形が卓越するという特徴を有

表-1 材料特性一覧

鉄筋の種類	降伏応力度	降伏時歪み度	ヤング係数
	N/mm <sup>2</sup>	μ	kN/mm <sup>2</sup>
D4	401	2319	188
D6	340	2241	162
D10	352	2083	177
マトリクス	圧縮	ヤング係数	引張
	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
コンクリート	28.0	27.5	-
HPFRCC	47.0	17.2	2.4

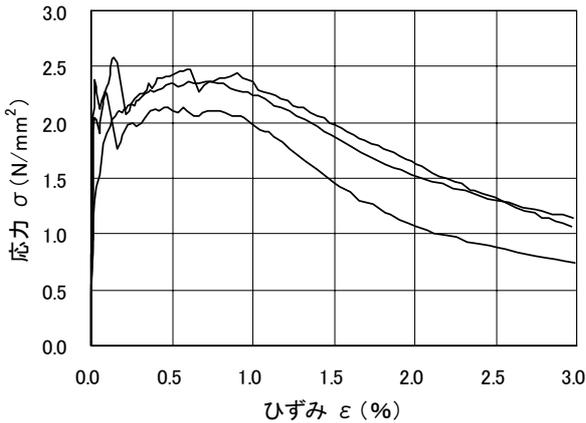


図-3 HPFRCCの引張応力-引張ひずみ関係

するため、取り付く梁に付加的なモーメントを作用させ、梁の損傷を助長することが懸念される。そこで、上スタブの下端部分にはダンパーの取り付けスタブと梁補強を兼ねた比較的剛強なたれ壁（柱断面と同一）を計画した。下スタブの上端部分の腰壁は、梁補強は兼ねず、柱のクリアスパンを HPFRCC ダンパーよりも長くするために柱とは縁を切ったが、やはりダンパーの取り付けスタブの意味から垂れ壁と同一の断面とした。なお、全ての試験体の共通因子である柱の配筋については、本実験では先ず、小さな変形で柱がせん断破壊することを避けるため、曲げ降伏先行型となるよう計画した。これは実際の適用時には、柱を連続繊維シートなどによる補強と併用する可能性を考慮している。

使用した材料特性一覧を表-1に、使用したHPFRCCの引張応力-引張ひずみ関係を図-3に示す。なお、HPFRCCの引張試験は、図-4に示すφ100mm円柱供試体の両端固定型直接引張試験<sup>4)</sup>によった。

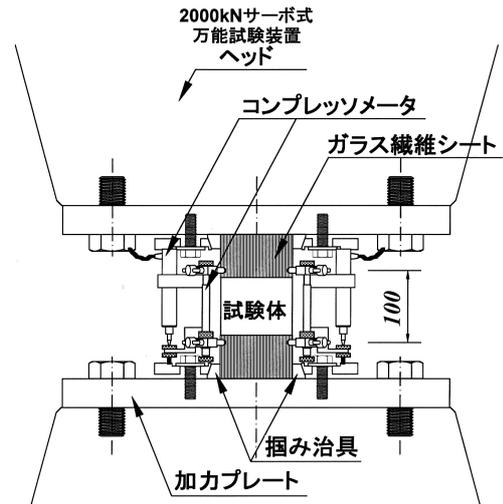


図-4 HPFRCCの引張試験方法<sup>4)</sup>

### 3.2 実験方法

加力は図-5に示すように、2台のアクチュエータにより柱の上部にそれぞれ軸力を作用させ、2台の水平ジャッキを押し側と引き側に設置し、試験体に加えるせん断力を1/2ずつ負担させた。加力スケジュールは図-6に示すような正負交番繰返し载荷とし、各試験体で共通と

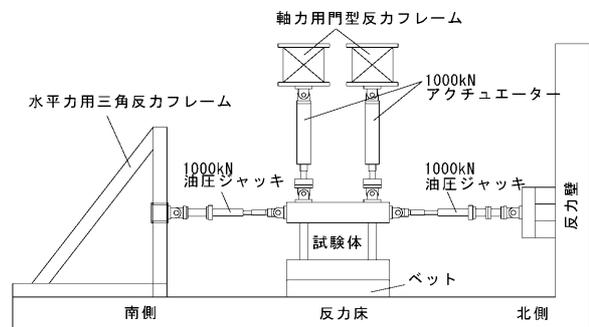


図-5 加力システム

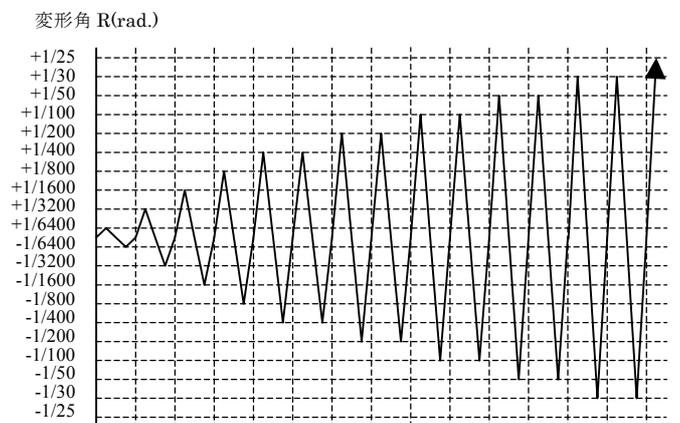
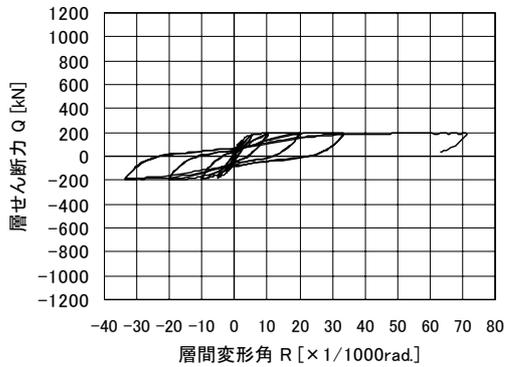


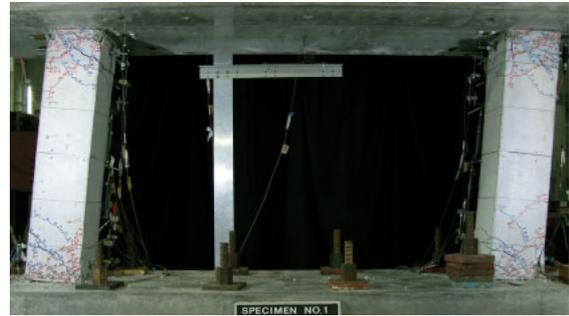
図-6 加力スケジュール

したが、靱性壁試験体では、 $1/100\text{rad}$ のサイクルまでを他の試験体と同様に一定軸力（軸力比：0.1）で加力後、一度変形を0に戻し、ダン

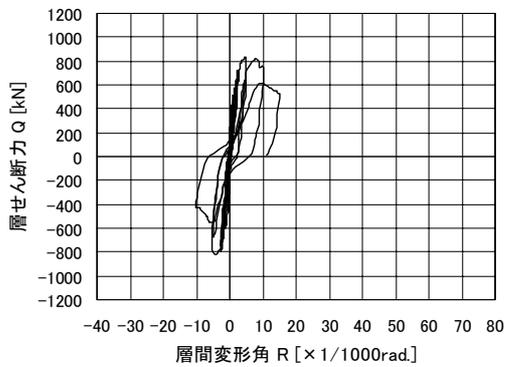
パーの回転変形に伴う架構の浮き上がり変位を拘束するように軸力を増大させる荷荷方法に変更し、再加力した。これは、直交梁などの曲げ



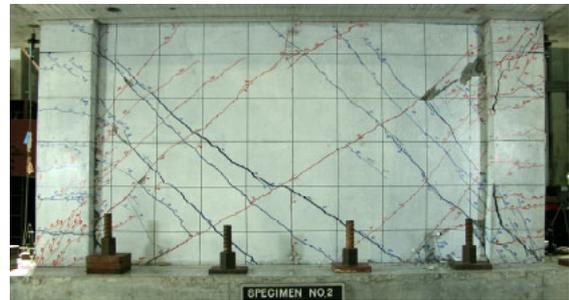
(a) RC フレーム



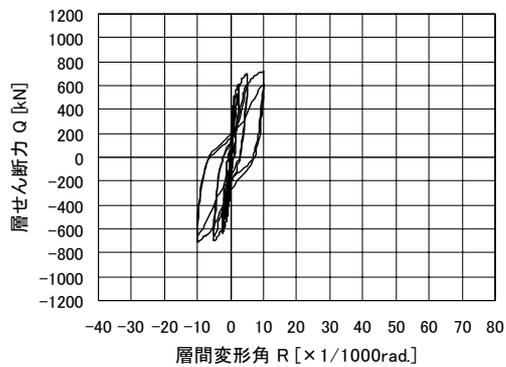
(a) RC フレーム



(b) RC 耐震壁



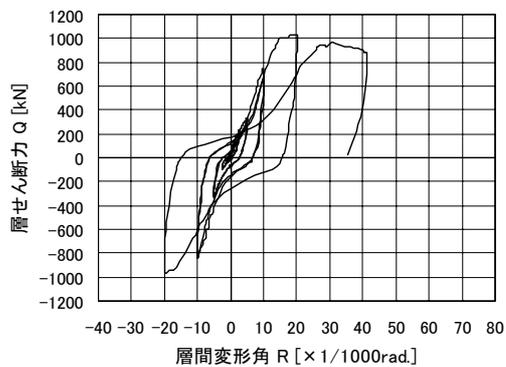
(b) RC 耐震壁



(c) 靱性壁（一定軸力加力）



(c) 靱性壁（一定軸力加力）



(d) 靱性壁（変形拘束加力）



(d) 靱性壁（変形拘束加力）

図-7 Q-R関係

写真-1 最終破壊状況

戻しによる拘束効果を模擬したものであり、これらの梁の降伏に相当する軸力までは拘束する方針とした。その結果、1/100rad.のサイクルにおいては、最大498kN（軸力比：0.31）、1/50rad.のサイクルにおいては、最大615kN（軸力比：0.38）の軸力が引張側柱上のアクチュエータに作用した。なお、これ以降はほぼ一定軸力とした。

#### 4. 実験結果

各試験体の層せん断力-層間変形角関係（以下、Q-R 関係）を図-7に最終破壊状況を写真-1にそれぞれ示す。

RC フレーム試験体は、±1/400rad.の加力時に両柱の柱頭および柱脚に曲げひび割れが発生した後、±1/200rad.の加力時にこれら全ての箇所主筋が降伏した。その後、±1/50rad.の加力時にはかぶりコンクリートの圧壊が見られるようになり、1/30rad.最初の加力時に柱主筋の一部が圧縮降伏した。その後正側加力（北側）にて1/14rad.まで加力を行い、柱脚部の一部のせん断補強筋が降伏したが、顕著な耐力の低下は生じなかった。

RC 耐震壁試験体は、±1/3600rad.の加力時に壁脚に斜めひび割れが発生した後、1/800rad.の加力時において壁板中央部を横切る顕著なせん断ひび割れが発生した。1/400rad.の加力時には、壁脚の一部の縦筋が降伏するとともに、柱頭および柱脚部においても主筋の降伏が見られた。さらに、柱脚部にせん断ひび割れが発生した。その後、-1/200rad.の加力時に南側の壁脚部に圧壊が生じ、耐力が低下した。±1/100rad.加力時には、さらに壁板の圧壊が進み、それと同時に壁板、柱頭および柱脚のせん断ひび割れの拡幅が見られた。その後、正側加力にて1/66rad.まで加力を行い、実験を終了した。本試験体の最大耐力を決定した破壊モードは、壁板の圧壊によるせん断破壊である。

靱性壁試験体は、先にも述べたように1/100rad.まで他の試験体と同様に一定軸力（軸

力比：0.1）のもとで加力を行った後、その軸力を保ったまま、1度水平力および水平変形を0に戻し、HPFRCCの回転変形に伴う上スタブの浮き上がり変形を拘束しながら水平力を加える変形拘束加力を行った。

まず、一定軸力加力については、±1/1600rad.の加力時に柱頭および柱脚に曲げひび割れが発生した後、±1/800rad.の加力時には、5体全てのHPFRCCダンパーの主筋が降伏した。±1/400rad.の加力時には、HPFRCCダンパーにせん断ひび割れが発生し始めるとともに、回転変形（浮き上がり変形）に伴う柱の輪切り状のひび割れが目立つようになり、柱頭（ここでは垂れ壁との交点）および柱脚において主筋の降伏が生じた。また腰壁の一部にもひび割れが発生した。±1/200rad.の加力時には、柱主筋の降伏が進行し、±1/100rad.の加力時には、HPFRCCダンパーのせん断ひび割れ（HPFRCC特有の極めて微細なひび割れ）が増加した。ただし、柱際に設置されたダンパーでは、取り付く腰壁のへり部分のコンクリートが剥落したため、反力がうまく取れなくなり、加力方向によっては、せん断ひび割れの増加が見られなかった。なお、この現象については、腰壁（ダンパーの取り付けスタブ）を適切に配筋することにより十分に改善できるものと考えられる。

次に変形拘束加力については、一定軸力加力で経験した±1/100rad.までは大きな変化は見られなかったが、この変形を過ぎたあたりから変形拘束による付加軸力の効果によって耐力が上昇し始め、±1/50rad.の加力時において、HPFRCCダンパーの圧壊およびせん断補強筋の降伏が発生し、せん断力が頭打ちとなった。また、柱の一部にもせん断補強筋の降伏が見られた。その後、正側加力にて1/25rad.まで加力を行ったが、+1/50rad.時のせん断力には到達せず、緩やかな耐力低下が見られた。

#### 5. 考察

図-8は各試験体のQ-R関係の包絡線を比

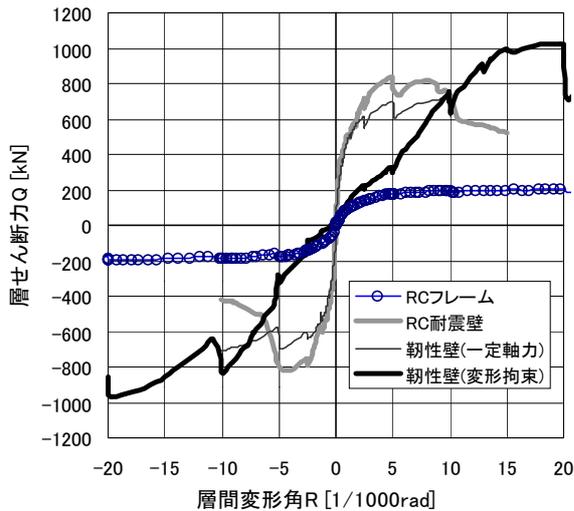


図-8 各試験体の包絡線の比較

較して示したものである。この図からもわかるように、靱性壁（一定軸力加力）は、RC フレームに対し、強度および剛性が大幅に増大しており、RC 耐震壁とほぼ同等レベルの強度と剛性が実現されている。また、最大耐力時の変形については、RC 耐震壁が 1/200rad の変形で耐力低下を生じたのに対し、靱性壁では、同一条件の一定軸力加力でこれを上回り、1/100rad.まで安定した挙動を示し、さらに変形拘束加力に切りかえてからも 1/50rad.まで耐力の低下は見られなかった。これらのことから、限定されたモデル試験体の結果ではあるが、HPFRCC ダンパーを RC 架構に組み込んだ靱性壁は、RC 耐震壁と同等レベルの強度と剛性を有し、かつ RC 耐震壁を大きく上回る靱性を実現できることが明らかとなった。

## 6. まとめ

本論では、HPFRCC ダンパーを RC 架構に組み込んだ新しい高性能耐震要素（靱性壁）の開発に向けた第一段階として、実大の 1/3 スケールのモデル試験体について静的水平加力実験を行い、RC フレーム試験体および RC 耐震壁試験体と比較検討した。その結果、靱性壁の強度および剛性は、RC フレームを大きく上回り、RC 耐震壁とほぼ同等のレベルを確保でき、かつ RC 耐震壁を上回る靱性（変形能）を確保できるこ

とが明らかとなった。

今後は、靱性壁の耐力、変形能の評価法確立に向け、有限要素解析等を利用して、靱性壁の抵抗機構を詳細に分析する予定である。

## 謝辞

本研究は、(社)建築研究振興協会に設置された「高靱性セメント複合材料・部材の製造システムと損傷制御要素の設計法に関する共同研究委員会」(委員長:三橋博三 東北大学大学院教授)の研究の一環として行われたものであり、委員のみなさまには心から感謝の意を表します。また、実験に際して多大なご協力を頂いた東京理科大学卒論生の渡辺烈氏、山岸匠氏には心から感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 諏訪田晴彦, 福山 洋, 梁 一承:セメント系部材の履歴特性コントロールに関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, 2002.
- 2) 諏訪田晴彦, 福山 洋:高靱性型セメント系複合材料を用いた応答制御要素の復元力特性に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, 2003.
- 3) 財団法人日本建築防災協会:既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針 同解説, 2001.
- 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