

# 論文 高靱性セメント系複合材料を用いた二次壁の耐震性能に関する実験的研究

諏訪田 晴彦\*1

**要旨:** 本研究では、完全スリットを設けずに二次壁の損傷を低減する一つの方法として、ひずみ硬化型の引張特性と微細ひび割れの分散発生機構を有する高靱性セメント系複合材料（以下、本論文では SHCC と呼ぶ）を二次壁に用いることを提案し、その基本的な耐震性能を調べるために、RC 試験体と SHCC 試験体の同一変位での多数回繰返し加力を含む正負交番繰返し漸増水平加力実験を行った。実験の結果、SHCC 試験体は RC 試験体よりも初期剛性は低いものの、最大耐力が向上する傾向が見られ、1/400rad.以上の変形角において明確な損傷低減効果が得られることがわかった。

**キーワード:** 高靱性セメント系複合材料, 二次壁, 水平力一層間変形角関係, ひび割れ幅

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造の集合住宅等において、廊下に面する壁には、玄関扉や小窓など複数の開口を有する壁（以下、本論文では二次壁と呼ぶ）が配置される場合が多い。

図-1 は、2005 年の福岡県西方沖地震および 2011 年の東北地方太平洋沖地震で見られた二次壁の被害例である。近年の地震被害では、新耐震設計基準の施行（1981 年）以前の建築物を除き、著しい躯体被害を生じるケースは比較的少なく、図に示すように二次壁の被害が散見される。

建築物の構造関係技術基準解説書<sup>1)</sup>には、二次壁の取扱いに関して、構造躯体の被害を回避することができればよいだけでなく、設計に当たって、二次壁自体の破壊制御も同時に検討されなければならないと記述されているが、現時点において、柱梁架構と二次壁の境界部に完全スリットを設ける方法以外で二次壁の破壊や損傷を適切に制御し得る方法が確立されているとは言えない。なお、柱梁架構と二次壁の境界部に完全スリットを設けることは、二次壁の損傷を軽減するための有効な手段である一方、漏水対策や防火対策などの留意事項も多く、施工上の不具合が発生しやすくなる上、二次壁自体の耐震的な効果を建築物からそぎ落としてしまっているとの見方もある。最善の方法であるかどうかについては、今後、大いに議論が必要であろうと考えている。

こうした背景に基づき本研究では、完全スリットを設けずに二次壁の損傷を低減する一つの方法として、ひずみ硬化型の引張特性と微細ひび割れの分散発生機構を有する高靱性セメント系複合材料（以下、本論文では SHCC と呼ぶ）を二次壁に用いることを提案し、その基本的な耐震性能を調べるために、同一変位での多数回繰返し加



図-1 二次壁の地震被害例

力を含む正負交番繰返し漸増加力条件の下で、RC 造と SHCC 造の二次壁の水平力一層間変形角関係および損傷状況について、縮尺模型試験体の構造実験に基づく比較検討を行った。なお、本論においては二次壁が取り付く柱の損傷は検討の対象としないこととした。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

図-2 に試験体配筋図を示す。試験体は上下に加力スタブを有する 1 層 1 スパンの平面架構試験体で、縮尺は実大の 1/2.5 程度を想定した。側柱の配筋および使用コンクリートは RC 試験体および SHCC 試験体ともに共通とし、主筋は 8-D13、帯筋は D6@50mm（帯筋比=0.53%）とし、コンクリートは早強ポルトランドセメントを使用した呼び強度 24N/mm<sup>2</sup> のものとした。壁板の厚さ（40mm）および開口部の形状寸法は RC 試験体と SHCC

\*1 国土交通省国土技術政策総合研究所 建築研究部構造基準研究室 研究官 博士（工学）（正会員）

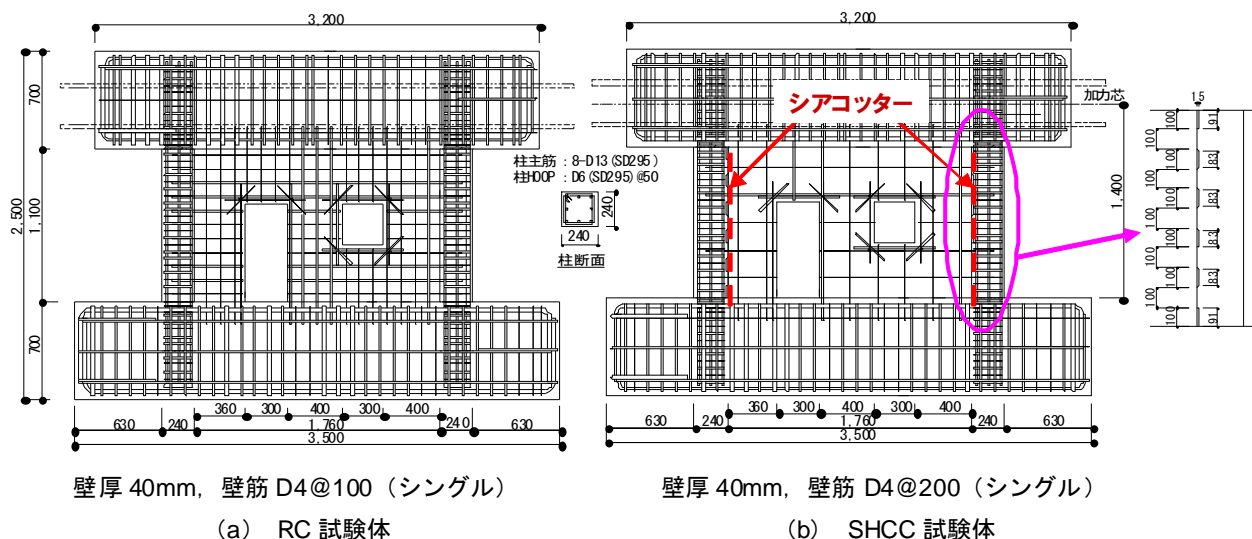


図-2 試験体配筋図

表-1 SHCC の調合表

W/C	W/B	S/B	Vf [vol.%]
0.560	0.392	0.499	2.0

W : 水  
 C : セメント  
 S : 砂  
 B : バインダー (セメント+フライアッシュ)  
 Vf : 繊維混入率

表-2 コンクリート及び SHCC の圧縮試験結果

	圧縮強度 [MPa]	圧縮強度時歪 [%]	ヤング係数 [GPa]	
コンクリート	34.4	0.238	25.4	
SHCC	1バッチ	33.3	0.522	11.2
	2バッチ	35.3	0.491	12.8
	3バッチ	35.4	0.508	12.0
	平均	34.7	0.507	12.0

表-3 鉄筋の引張試験結果

種別	降伏強度 [MPa]	ヤング係数 [GPa]	引張強度 [MPa]
D4(SD295A)	367	173	511
D6(SD295A)	351	189	515
D13(SD295A)	364	180	484

試験体で共通としたが、壁筋は RC 試験体では D4@100mm シングル (壁筋比=0.35%) とし、SHCC 試験体では D4@200mm シングル (壁筋比=0.18%) とした。また、RC 試験体の壁板のコンクリートには、柱に使用したコンクリートと同一のものを使用して一体で打設し、SHCC 試験体の壁板は、表-1 に示す調合の SHCC をプレキャストで作成し、3 週間程度養生した後に RC 部分を打設する施工手順とした。なお、SHCC 壁板と RC 柱の境界部 (鉛直接合部) は、SHCC 側に高さ 15mm、幅 100mm のシアコッターを 100mm 間隔で設け、RC 柱のかぶりコンクリート部分に埋め込ませる形状とした。

本実験で使用した SHCC は、公称長さ 12mm、公称径

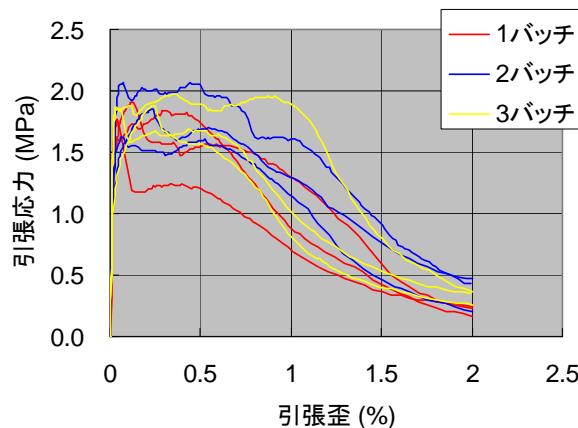


図-3 SHCC の引張応力-ひずみ関係

0.037mm、公称引張強度 1620MPa の PVA 繊維を体積混入率で 2.0% 混入しており、比較的繊維混入率が高いものであるが、練りあがり時のフロー値は 230mm 程度確保されている。

表-2 に試験体を使用したコンクリートおよび SHCC の圧縮試験結果を、表-3 に鉄筋の引張試験結果をそれぞれ示す。また、図-3 に円柱供試体 (直径 100mm、高さ 200mm) を用いた SHCC の直接引張試験<sup>2)</sup>より得られた応力-ひずみ関係を示す。SHCC のヤング係数はコンクリートの約半分程度であるが、これには SHCC には粗骨材を使用していないことと、空気量がやや多め (平均 9.7%) であることが影響しているものと考えられる。

## 2.2 実験方法

図-4 に加力装置図を示す。図からもわかるように、本試験体は上部の加力スタブが剛強であるため、試験体に導入される鉛直力はスタブを介して壁部へも伝わることになるが、できるだけ柱に鉛直力を作用させるため、スタブ上面の側柱軸上にピン支承とピンローラー支承を

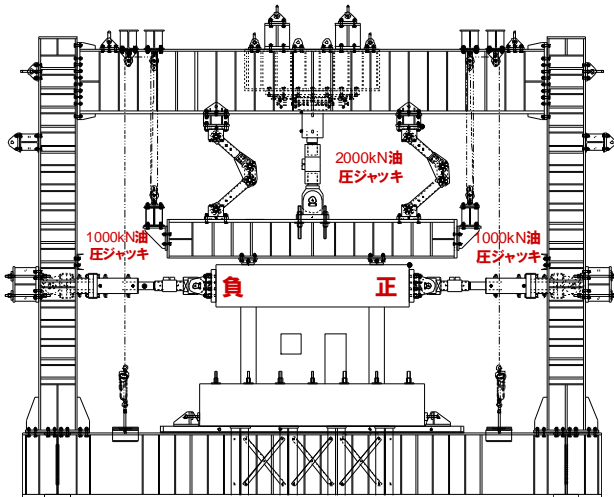


図-4 加力装置

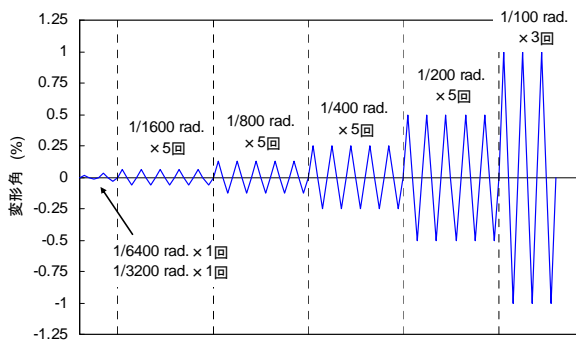


図-5 水平力の加力パターン

設置して鉛直力を導入した。なお、鉛直力は柱1本あたりの軸力比で0.1とした。水平力は試験体の左右に油圧ジャッキを設置して、それぞれのジャッキに試験体に作用させる水平力の1/2ずつを負担させるように制御した。

図-5に水平力の加力パターンを示す。加力は層間変形角制御の正負交番繰り返し漸増加力とし、 $\pm 1/6400\text{rad}$ . (約0.016%)と $\pm 1/3200\text{rad}$ . (約0.031%)を1サイクル加力した後に、 $\pm 1/1600\text{rad}$ . (約0.063%)、 $\pm 1/800\text{rad}$ . (0.125%)、 $\pm 1/400\text{rad}$ . (0.25%)、 $\pm 1/200\text{rad}$ . (0.5%)をそれぞれ5サイクル加力し、最後に $\pm 1/100\text{rad}$ . (1.0%)を3サイクル加力する計画とした。なお、層間変形角は図-2中に示した加力芯位置の変形角とした。

### 3. 実験結果

図-6に実験から得られた水平力-層間変形角関係を示す。

RC試験体における最終加力サイクルまでの損傷過程は以下の通りである。

- ①  $\pm 1/6400\text{rad}$ . (0.016%) 加力時に窓開口の隅角部にひび割れが発生。
- ②  $\pm 1/3200\text{rad}$ . (0.031%) 加力時にドア開口の隅角部

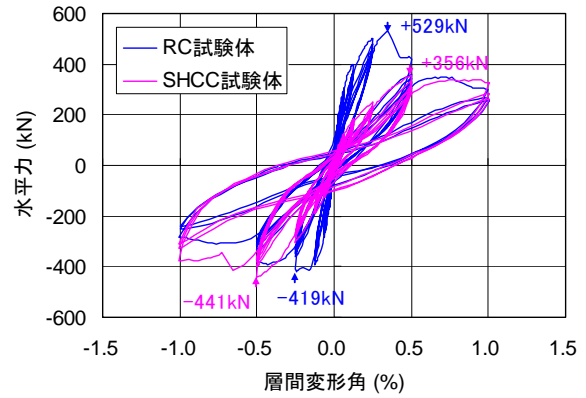


図-6 水平力-層間変形角関係

にひび割れが発生。

- ③  $+1/1600\text{rad}$ . ( $+0.063\%$ ) 加力時にドア開口側の袖壁にせん断ひび割れが発生。なお、同一変形角における2~5サイクル目までの加力では、1サイクル目の耐力に対する耐力低下の度合いは比較的小さい。
- ④  $-1/1600\text{rad}$ . ( $-0.063\%$ ) 加力時に窓開口側の袖壁にせん断ひび割れが発生。また、方立て壁に曲げひび割れが発生。なお、同一変形角における2~5サイクル目までの加力では、1サイクル目の耐力に対する耐力低下の度合いは比較的小さい。
- ⑤  $+1/800\text{rad}$ . ( $+0.125\%$ ) 加力時に窓開口側の袖壁および方立て壁にせん断ひび割れが発生。同時に③で生じたドア開口側の袖壁のひび割れも増加。なお、同一変形角における2~5サイクル目までの加力では、1サイクル目の耐力に対する耐力低下の度合いは比較的小さい。
- ⑥  $-1/800\text{rad}$ . ( $-0.125\%$ ) 加力時にドア開口側の袖壁および方立て壁にせん断ひび割れが発生。同時に④で生じた窓開口側のせん断ひび割れも増加。なお、同一変形角における2~5サイクル目までの加力で大きな変化は見られなかった。
- ⑦  $+1/400\text{rad}$ . ( $+0.25\%$ ) 加力時に窓開口下の腰壁にせん断ひび割れが発生。なお、同一変形角における2~5サイクル目までの加力では、1サイクル目の耐力に対する耐力低下の度合いは比較的小さい。
- ⑧  $-1/400\text{rad}$ . ( $-0.25\%$ ) 加力時に窓開口側の袖壁および方立て壁に圧壊を伴う大きなせん断ひび割れが発生し、耐力が頭打ちとなった。なお、同一変形角における2~5サイクル目までの加力では、コンクリートの圧壊や剥落が進行し、1サイクル目の耐力に対する耐力低下の度合いも大きくなった。

- ⑨ +1/200rad. (+0.5%) 1 サイクル目の加力途中の +1/286rad. (+0.35%) 時に窓開口側の袖壁およびドア開口側の袖壁に圧壊を伴うせん断ひび割れの拡幅が生じるとともに、方立て壁のせん断ひび割れにも拡幅が生じて耐力が急激に低下した。その後+1/200rad. (+0.5%) まで加力し、同一変形角における 2~5 サイクル目までの加力では、コンクリートの圧壊や剥落が進行し、1 サイクル目の耐力に対する耐力低下の度合いが大きくなった。
- ⑩ -1/200rad. (-0.5%) 加力時には、⑧で生じた窓開口側袖壁および方立て壁のひび割れ幅の拡幅や圧壊が進行し、-1/400rad. (-0.25%) 加力時の耐力には回復せず緩やかな耐力低下挙動を示した。なお、同一変形角における 2~5 サイクル目までの加力では、コンクリートの圧壊や剥落が進行し、1 サイクル目の耐力に対する耐力低下の度合いが大きくなった。
- ⑪ ±1/100rad. (±1.0%) 加力時には、圧壊領域の拡大に伴うコンクリートの剥落が顕著となり、明らかな耐力低下挙動を示した。
- SHCC 試験体における最終加力サイクルまでの損傷過程は以下の通りである。
- ① ±1/3200rad. (0.031%) 加力時に窓開口およびドア開口の隅角部にひび割れが発生。
- ② ±1/1600rad. (±0.063%) 加力時には、①で発生したひび割れの長さが 1 サイクル目でわずかに進展し、同一変形角における 2~5 サイクル目までの加力でひび割れ本数が増加した。
- ③ +1/800rad. (+0.125%) 加力時には、ドア開口の隅各部近傍にさらにひび割れ本数が増加した。なお、同一変形角における 2~5 サイクル目までの加力では、大きな変化は見られなかった。また、窓開口側の袖壁と側柱との境界部（下部）に目開きを確認された。
- ④ -1/800rad. (-0.125%) 加力時には、ドア開口および窓開口の隅各部近傍にひび割れ本数が増加した。なお、同一変形角における 2~5 サイクル目までの加力で大きな変化は見られなかった。また、窓開口側の袖壁と側柱との境界部（上部）に目開きを確認された。
- ⑤ +1/400rad. (+0.25%) 加力時には、窓開口側袖壁、ドア開口側袖壁および方立て壁にせん断ひび割れが発生。なお、同一変形角における 2~5 サイクル目までの加力で大きな変化は見られなかった。
- ⑥ -1/400rad. (-0.25%) 加力時には、隅各部のひび割れの長さが進展するとともに本数も増加し、窓開

口側袖壁、ドア開口側袖壁および方立て壁にせん断ひび割れが発生。なお、同一変形角における 2~5 サイクル目までの加力で大きな変化は見られなかった。

- ⑦ +1/200rad. (+0.5%) 加力時には、ドア開口側の袖壁および方立て壁のせん断ひび割れ本数が増加し、窓開口側袖壁と側柱の境界部（下部）の目開きが拡大した。なお、同一変形角における 2~5 サイクル目までの加力で壁板の損傷に大きな変化は見られなかったが、1 サイクル目の耐力に対する耐力低下の度合いがやや大きくなった。
- ⑧ -1/200rad. (-0.5%) 加力時には、窓開口側袖壁、ドア開口側袖壁および方立て壁のせん断ひび割れ本数が増加し、窓開口下の腰壁部にせん断ひび割れが発生。なお、同一変形角における 2~5 サイクル目までの加力で壁板の損傷に大きな変化は見られなかったが、1 サイクル目の耐力に対する耐力低下の度合いがやや大きくなった。
- ⑨ +1/100rad. (+1.0%) 加力時には、壁脚のすべりが顕著となり耐力がわずかに低下した。壁板には新たなひび割れが生じなくなった。なお、同一変形角における 2~3 サイクル目までの加力で壁板の損傷に大きな変化は見られなかったが、1 サイクル目の耐力に対する耐力低下の度合いがやや大きくなった。
- ⑩ -1/100rad. (-1.0%) 1 サイクル目の加力途中の、-1/154rad. (0.65%) で、方立て壁のせん断ひび割れが拡幅して耐力が 50kN 程度低下したが、それ以降はその耐力を保持したまま、-1/100rad. (-1.0%) に到達した。なお、同一変形角における 2~5 サイクル目までの加力で壁板の損傷に大きな変化は見られなかったが、1 サイクル目の耐力に対する耐力低下の度合いがやや大きくなった。

#### 4. 実験結果の比較に基づく考察

##### 4.1 水平力一層間変形角関係について

図-6からもわかるように、SHCC 試験体は RC 試験体に比べ、初期剛性がかなり低い。これは、表-2に示した材料試験結果からも明らかなように、SHCC のヤング係数がコンクリートの半分程度であることに加えて、試験体上下スタブと壁板の境界部（水平接合部）にシアコッターを設けなかったことに起因していると考えられる。また、最大耐力については、正側加力では RC 試験体を下回るが、負側加力では RC 試験体を上回った。これは、図-7に示す壁脚部のすべり量一層間変形角関係からもわかるように、正側では壁脚のすべりが最大耐力の支配要因であったが、負側ではすべり量が小さく、

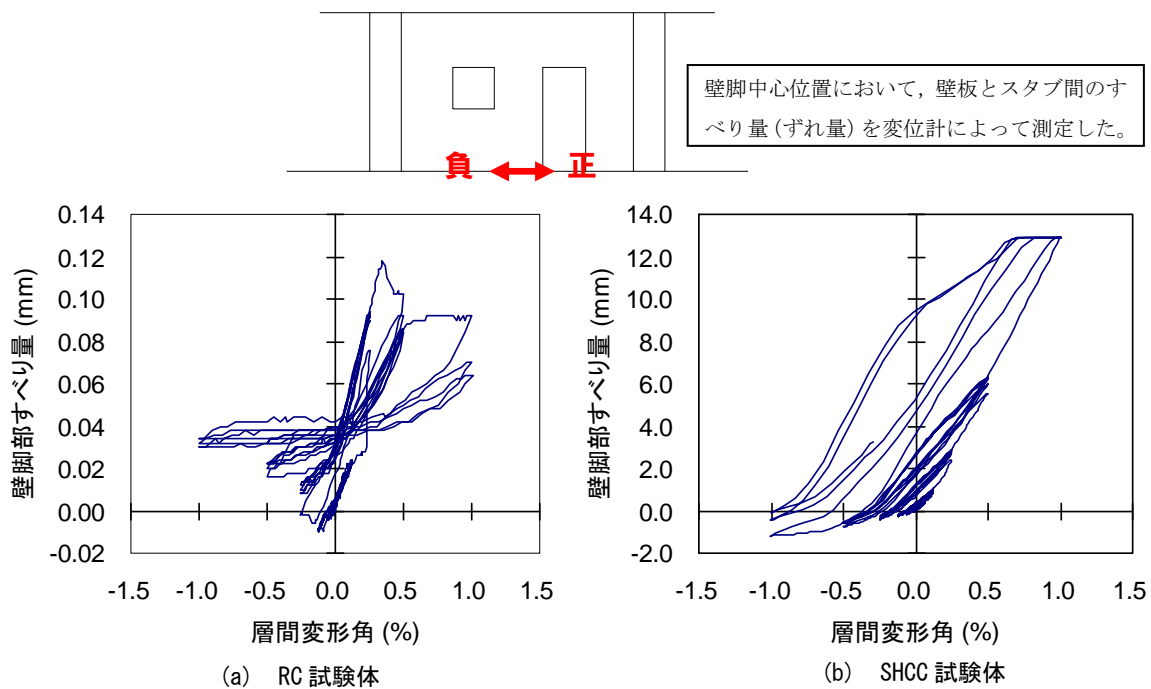


図-7 壁脚中央部のすべり量-層間変形角関係

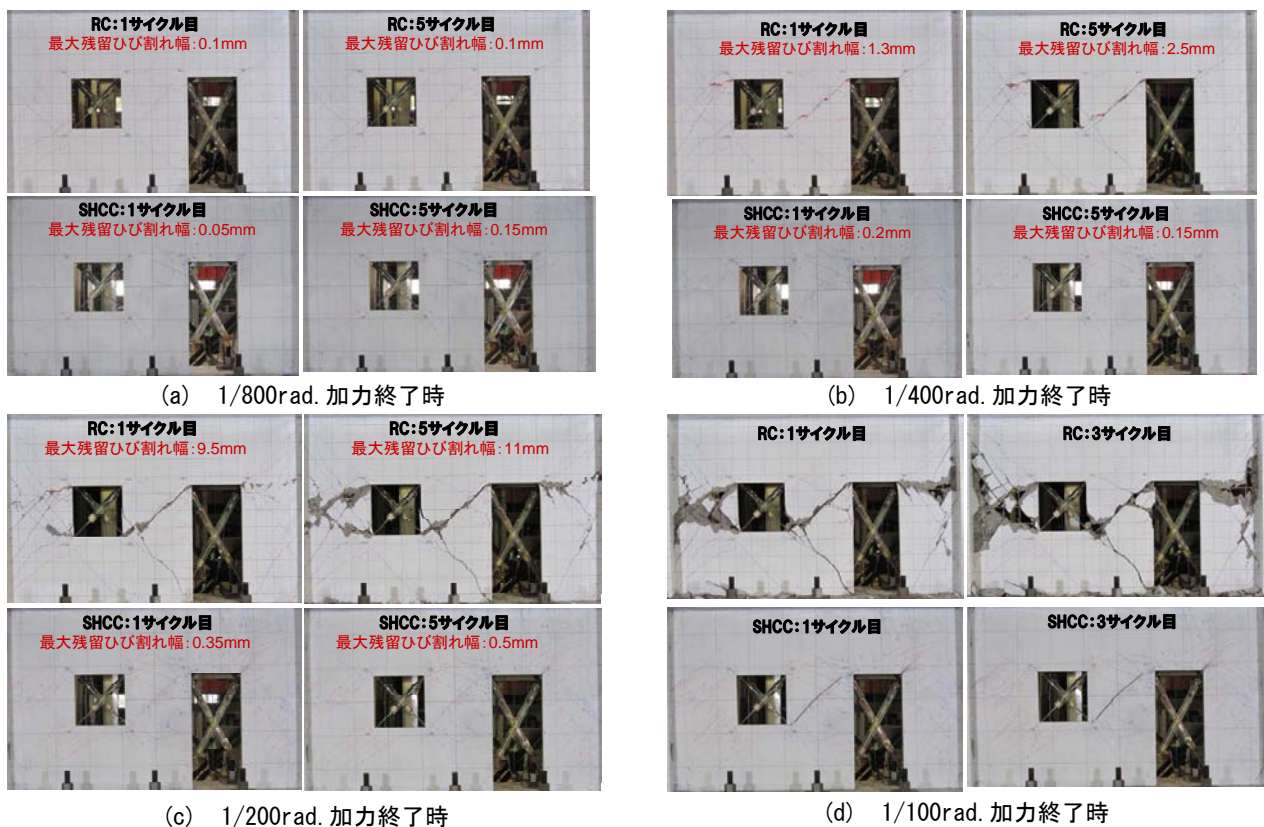


図-8 各変形角の損傷状況の比較

SHCC の引張特性が耐力に大きく貢献したためと考えられる。

最大耐力を発揮する変形角以下では、同一変形角における多数回繰り返し加力による耐力低下の度合いは、RC 試験体も SHCC 試験体も比較的小さく、材料による差は小さいと考えられる。

#### 4.2 ひび割れ幅について

図-8 に各変形角における損傷状況の比較を示す。なお、図中には実験時にクラックスケールによって測定した最大残留ひび割れ幅を記述している。(a)に示す1/800rad.加力終了時では、RC 試験体と SHCC 試験体に

大きな差は見られないが、(b)に示す 1/400rad.加力終了時および(c)に示す 1/200rad.加力終了時では、SHCC 試験体は RC 試験体に比べて最大残留ひび割れ幅がかなり小さくなっている。また、RC 試験体は同一変形角における繰り返し加力によってひび割れ幅が拡幅するが SHCC 試験体ではあまり大きな変化はない。

これらの比較の結果、二次壁に SHCC を用いることで、壁筋を半分にしても 1/400rad. (0.125%) 以上の変形角では、かなりの損傷低減効果が得られることがわかった。

#### 4.3 最終破壊性状について

図-8の(d)は最終破壊状況(1/100rad.加力終了時)を示したものであるが、これを見ると RC 試験体ではひび割れの拡幅、コンクリートの圧壊や剥落などの激しい破壊が壁板の広範囲に生じているのに対して、SHCC 試験体では限定的なひび割れ(本実験では方立て壁のひび割れ)が拡幅する程度に抑えることができていることがわかる。ちなみにひび割れの本数については、RC 試験体に比べ SHCC 試験体のほうが圧倒的に多いが、そのほとんどは SHCC 特有の微細ひび割れの分散発生機構(マルチプルクラッキング)によるもので、ひび割れ幅は 0.05~0.15mm 程度であった。なお、鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説<sup>3)</sup>では耐久性に関する許容ひび割れ幅の最小値を 0.3mm としており、SHCC のひび割れ幅に関する寸法効果が現時点では不明であるが、多くは補修不要となる可能性がある。

#### 4.4 壁脚部のすべりが損傷に及ぼす影響について

本実験では、4.1でも述べたように正側の加力において SHCC 試験体の最大耐力が壁脚部(壁板とスタブの境界面)のすべりに支配され、RC 試験体の最大耐力を下回った。このため壁板部に入力されるせん断力が小さくなり、その結果として RC 試験体よりも SHCC 試験体の損傷が小さくなっていることも事実である。しかし、負側の加力においては、図-6および図-7からも明らかのように SHCC 試験体の壁脚部のすべりは比較的小さく、最大耐力は RC 試験体を上回り、壁板部に入力されるせん断力は RC 試験体と同等以上であると判断できる。この点から、4.3および4.4における壁板部の損傷に関する考察結果は概ね妥当であると考えられる。

#### 5. まとめ

地震時における二次壁の損傷や破壊を制御するための一つの手段として、二次壁にひずみ硬化型の引張特性と微細ひび割れの分散発生機構を有する SHCC を用いることを提案し、その有効性を検証することを目的として、RC 試験体と SHCC 試験体の同一変形における多数回繰

り返し加力を含む正負交番漸増繰り返し水平加力実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) SHCC 試験体の初期剛性は正側加力および負側加力ともに RC 試験体を大きく下回った。なお、この結果には SHCC のヤング係数がコンクリートの 1/2 程度であることと、スタブと壁板の境界部にシアコッターを設けなかったことが影響していると考えられる。
- (2) SHCC 試験体の最大耐力は、正側加力では RC 試験体を下回ったが、負側加力では RC 試験体を上回った。なお、SHCC 試験体の正側加力における最大耐力の支配要因は、壁脚の境界面のすべりであった。
- (3) 最大耐力を発揮するまでの変形角では、同一変形角における多数回繰り返し加力による耐力低下の度合いは RC 試験体も SHCC 試験体もあまり大きくない。
- (4) 二次壁に SHCC を用いることで、壁筋を RC 試験体の半分にしても 1/400rad.以上の変形角でかなりの損傷低減効果が得られた。
- (5) 最終破壊状況(1/100rad.加力終了時)において、RC 試験体ではひび割れの拡幅、コンクリートの圧壊や剥落などの激しい破壊が広範囲に生じたのに対して、SHCC 試験体では限定的なひび割れが拡幅する程度で多くのひび割れは 0.05~0.15mm 程度に抑えられた。なお、本実験では SHCC 試験体の正側加力の最大耐力が壁脚のすべりによって支配されたため、今後、壁脚のすべりを抑止したディテールでの実験を行う予定である。

#### 謝辞

本研究は、平成 22 年度科学研究費補助金(研究代表者、諏訪田晴彦)により行ったものである。

また、本研究を実施するにあたり、(株)クラレの小川敦久博士には SHCC に使用する各材料を提供していただくとともに調査計画に関しても多大なるご協力を頂いた。ここに記し、深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省住宅局建築指導課，国土交通省国土技術政策総合研究所，(独)建築研究所，日本建築行政会議監修，建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会編集，(財)日本建築防災協会，(財)日本建築センター編集協力：2007 年版 建築物の構造関係技術基準解説書，日本官報販売協同組合，平成 19 年 8 月
- 2) 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一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，第 539 号，pp.7-12, 2001.1
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説，2004