

既存構造体の撤去・補強を核とした WPC構造住宅ストック高度利用促進技術の開発

小泉 雅生¹

¹首都大学東京 大学院都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

本研究開発は、高度経済成長期に建設された壁式プレキャスト鉄筋コンクリート（WPC）構造住宅の活用を資する手法として、PCa壁板への開口新設手法を開発することを目的としたものである。本研究開発では、開発した手法の構造的な検証ばかりでなく、実存するWPC構造住宅の大規模改修モデル計画を策定し、その計画面からの評価、法的な検証、コスト・事業性の評価等、総合的な検証を行うことによって、即時適用可能な手法として完成させた。

キーワード 団地，集合住宅，壁式プレキャスト鉄筋コンクリート構造，改修，ストック活用

1. 研究の背景および目的

現在、日本には2000万戸以上の集合住宅があるとされており、うち2割以上が、1980年以前に建設されたものである。さらに、その半数以上が3階建て以上5階建て以下の中層集合住宅である¹⁾。これらの集合住宅が建設された当時は、住宅の大量供給が至上命題であったため、躯体の工場生産化が徹底された、壁式プレキャスト鉄筋コンクリート（以下、WPCと略す）構造が採用された集合住宅も、相当数建設されている（図1）。

これらの中層集合住宅は、そのほとんどが公共住宅であり、建物の形式としては、壁式鉄筋コンクリート構造の階段室型住宅であることが多い。年月を経た壁式構造集合住宅に、大規模な改修を加え、活用していくことの必要性は、近年、広く認知されるようになってきたが、このとき重要となるのが、階段室型住宅のバリアフリー改修や、耐震壁の一部を撤去することにより開口を新設し、狭小な住戸面積を拡大するための技術である。

こうした集合住宅ストックの活用にあたっては、躯体の健全性が問われるが、現場打ちコンクリートが採用されたストックの場合、躯体の欠損やジャンカなどの施工不良が問題となることもある。一方で、WPC構造住宅の躯体は、管理が徹底された工場内で製作されていることから、その品質は格段に高く、かつ安定していると考えられる。しかしながら、WPC構造はPCa板を接合して組み立てる特殊な構造形式であるため、その再生の鍵となる、界壁などの躯体への開口新設手法が未整備である。

そこで、本研究では、既存PCa板への開口新設を伴うWPC構造住宅の改修手法を開発することを目指す。

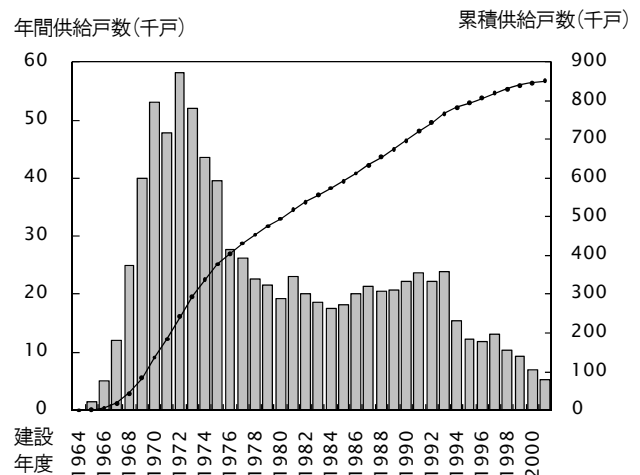


図-1 中高層PCa鉄筋コンクリート構造集合住宅の供給推移
* 棒は年間供給戸数、折線は累積供給戸数を表す。
* 文献2をもとに筆者作成。

2. WPC構造住宅ストックの躯体性状の把握

界壁への開口設置技術の開発を行うにあたって、まず、既存WPC構造住宅の躯体の性状を把握することとした。前述したとおり、WPC構造住宅に用いられるPCa板は、品質が比較的安定していると考えられる。一方で、上下階の耐震壁PCa板同士の接合部は、耐震壁板の上下辺にあらかじめ埋設された鋼材を現場溶接するものが主流であり³⁾、品質のばらつきが懸念される。そこで、民間の事業主体により1968年に建設されたWPC構造の3階建て集合住宅1棟について、X線および接合部に充填されたコンクリートを除去しての目視による水平接合部の現状調査を行った（調査期間：2008年10月～11月）。結果、

水平接合部は設計図通りの施工が行われており、溶接量も確保されていることが確認された。接合部の目地コンクリートからの雨水浸透等による接合金物の腐食（錆）についても、断面欠損を考慮しなければならないようなものは見られなかった。

また、WPC構造住宅の耐震性能を確認するため、SPHの標準設計型式の1つである「74-5PC-3DK（A9-3）」に基づき、1974年に建設された、実在する5階建てWPC構造住宅に対して、既存の構造体、およびその梁間方向の各階耐震壁の一部に、幅1m程度の開口を新設することを想定した第2次耐震診断を実施した。ここで、新設開口には補強等が行われることは想定されていないが、いずれの場合についても、耐震指標の値は、耐震性能に余裕があることを示す結果となっている。一方で、既存の耐震診断指針は、既存PCa板に開口を新設する場合を想定していないため、ここでの耐力評価は、確立した手法に準じているわけではないことに留意が必要である。

3. 研究開発の方針

上記のWPC構造住宅の躯体性状に関する調査に加え、WPC構造住宅ストックを保有する自治体へのヒアリング調査を並行して行い、これらのストックの活用に対する意識や、活用の際の法的障壁等も把握した。以上の予備的調査に基づき、本研究では、開口新設手法開発の方針を、以下の通りとした。

- 1) 既存のWPC構造住宅は、今後数十年の使用に耐える、優良な躯体を有すると仮定できるが、建設から30年以上を経たストックが大半を占めるため、開発する手法は、即時適用性の高いものとする。すなわち、現行法制度、適正な改修コスト等を踏まえた手法を開発する。
- 2) 既存の耐震診断指針は、PCa板への開口新設を想定したものではないため、開発した手法の地震時の構造性能を、実験的に検証する。

4. 開口新設工法の開発

既存のWPC構造住宅には、構造関連規定に関する既存不適格事項が存在する可能性を否定できないため、住戸規模の変更等を伴う大規模な改修を行うにあたっては、原則として耐震改修促進法に則ることが必要であると考えられる。これを前提とした場合、開口新設後の建物が、耐震改修促進法の定める耐震診断基準（第2次耐震診断の I_s 値0.6以上）を満たす場合であっても、従前の建物より耐震指標が低下すると、改修が許可されない可能性が

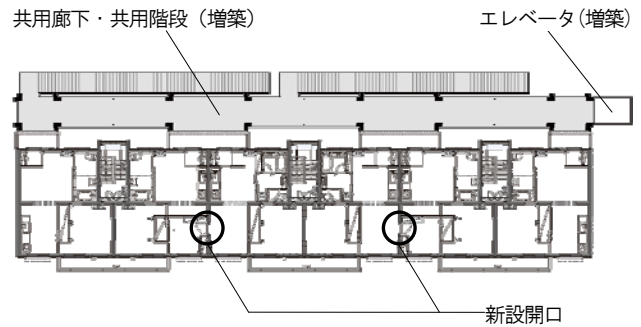


図-2 大規模改修モデル計画の一般階平面図

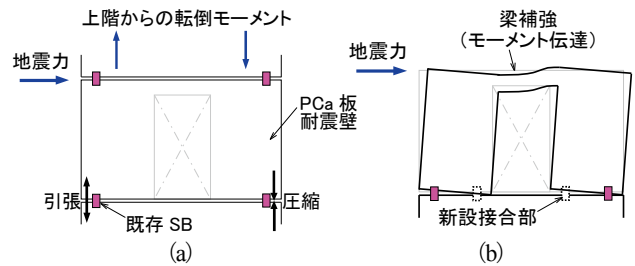


図-3 補強の概念

あることが、複数の自治体へのヒアリング調査により明らかになった。そこで、開口の新設にあたって、開口補強を施すことも想定することとし、開口新設にかかるコスト、およびその施工性を比較可能とするため、鉄筋コンクリート、あるいは鉄骨を主体とする、複数の補強工法を考案した。

さらに、改修時の様々な平面計画に対応可能とするため、各階に連続して開口を新設する工法、特定の階のみに開口を新設する工法、開口補強に伴う工事が上下階の住戸に及ばず、当該住戸内で補強が完結する工法など、開口新設のパターンも複数想定した上で補強工法を考案した。

5. 大規模改修モデル計画の策定およびその検証

考案した開口新設工法の建築計画的観点からの有効性を評価するため、自治体が保有するWPC構造住宅を対象とし、大規模改修モデル計画の策定を行った。計画に先立って、保有自治体の意向を踏まえながら、開口新設によりどのような規模の住戸が創出可能か、様々な住戸配置パターンの検討を行ったが、その結果は、先述した工法開発にも反映させている。なお、この種の大規模改修を行う場合、バリアフリー改修のニーズが高いことから、住棟北側に共用廊下とエレベータを増築し、住戸までの段差のないアクセスを実現させている（図2）。

モデル計画は、住宅性能表示制度等を参照し、現代のニーズ・水準に即した計画とした。図面はいわゆる実施図まで整備し、これに基づき、建設会社等の協力の下、施工性の評価、改修コストの算出、改修計画の事業性評

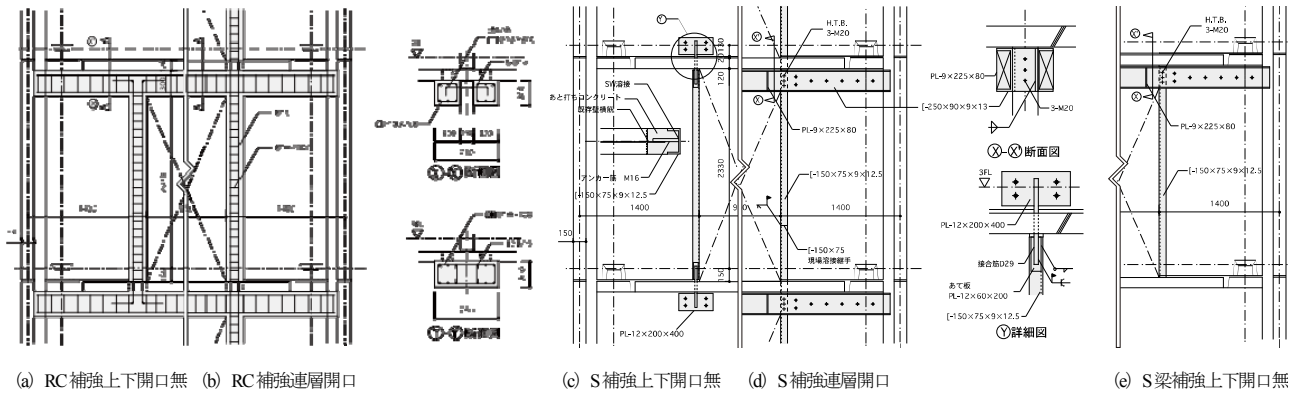


図4 補強案

価等を実施した。結果、工事費全体に対して、開口新設に要する費用は2%程度であり、改修コスト・事業性等の面においても、考案した開口新設手法の有効性が高いことが確認された。

6. 構造性能評価実験

(1) 補強計画および補強案

一般的にWPC構造耐震壁は図3 (a) に示すようにPCa板が上下1辺につき2箇所程度で接合され、水平接合部（セッティング・ベースと称す。以後SBと略す）が引抜き力を負担することで水平力により生じる転倒モーメントに抵抗している。既存壁に開口を設けるとPCa板が2つに分割され、同図 (b) のように各々が1枚の壁として挙動することになるが、開口脇にはSBが存在しないので、転倒モーメントへの抵抗力が低下する。さらに新設開口上部に残る梁状の壁は梁として機能するには配筋が不十分で耐力不足である。これらを補う目的で、以下の2通りの補強方法を考案した。

- 1) 新設開口脇のPCa壁板に上下階壁との接合部を設け、転倒モーメントに対する耐力を向上させる。
- 2) 新設開口上部に補強梁を新設し、曲げ戻しの効果を確保する。

これら両方を行うことを基本とし、鉄筋コンクリート (RC) または鉄骨 (S) を主体とした補強を行うことで、耐震要素としての機能を向上させる方針とした。

補強案を図4に示す。上下階に開口の無い場合と各階に連続して開口がある場合に対し、それぞれRC補強とS補強を提案した。

RC補強は開口脇の縦方向のRC補強柱に加え、開口上部の梁補強を行った。直交する壁と補強梁端は定着していない。上下に開口の無い場合では下階スラブ下にRC梁を増設し、そこに開口脇の補強柱の主筋を定着させた。S補強は開口脇を壁厚と同じ断面せいを有する溝形鋼で補強した。上下階に開口が無いタイプでは溝形鋼を鉄筋を介し定着用鋼板と接合し、上下階の壁と定着用鋼板をボルト締めすることで接続した。開口上部に補強梁を設

表-1 試験体一覧

試験体	連層開口	H (HW)	補強	r_{CB} (N/mm ²)	σ_B (N/mm ²)	c_{CB} (N/mm ²)
WS(無開口)	—	3.47m (1.85)	無	58.6	44.8	—
NSS(無補強上下開口無)	無		RC	67.0	48.0	—
CSS(RC補強上下開口無)			S	58.0	55.2	74.4
SSS(S補強上下開口無)			無	66.3	45.7	—
BSS(S梁補強上下開口無)			S	50.2	59.5	—
NSM(無補強上下開口有)	有	2.2m (1.17)	無	60.8	57.8	—
CSM(RC補強上下開口有)			RC	52.8	78.8	74.3
SSM(S補強上下開口有)			S	51.1	52.4	—

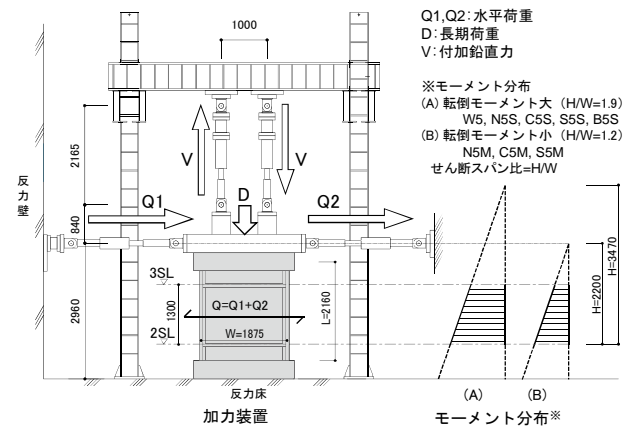


図5 加力装置および曲げモーメント分布

けずに上階壁に接続することで、無開口の上階壁に補強梁の役割を担わせ、曲げ戻しの効果が得られることを期待した。また補強部分を開口設置階のみに限定するS梁補強法も計画した。この開口脇補強鋼材の上端は補強梁と剛接されているが下端は下階に接続していない。

(2) 実験計画

a) 試験体

対象建物の2階壁、上下階 (1、3階) の壁の約1/3、2階と3階のスラブおよび直交壁の一部を取り出して、1/2に縮小したものを試験体とした。試験体一覧を表1に示す。それぞれの補強方法ならびに比較検討用の無補強試験体に対応する記号は表に示すとおりである。無開口試験体W5および試験体名の末尾にSを付した上下階に開口の無い4体 (連層開口無) と、末尾にMを付した各階に連続

して開口を有する3体（連層開口有）の全8体である。製作は実建物と同様に上下階のPCa壁板をSBの隅肉溶接によって接合し、間を敷きモルタルで充填し一体化した。

b) 加力方法

加力装置は、図5に示すように、試験体のねじれを防ぐために水平ジャッキを試験体の左右1機ずつ取り付け、一方を変位制御（作用水平力 $Q1$ ）、他方を変位制御ジャッキの荷重と同値となるように荷重制御（ $Q2 \doteq Q1$ ）とした。鉛直荷重については初期状態（水平荷重 $Q=Q1+Q2=0$ ）時に長期荷重（ $D=106kN$ ）を導入し、それに付加させる形で水平荷重 Q に比例させて転倒モーメントに相当する圧縮および引張の付加鉛直力 V を2基の鉛直ジャッキによって載荷した。無開口および上下に開口の無い試験体では「既存壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断指針」⁴⁾の連層耐力壁の場合に則り建物頂部までの高さの2/3に反曲点があると想定した転倒モーメントが作用するものとした。各階に連続して開口の有る試験体ではこれらに比べ反曲点高さを低くし水平せん断力に対する転倒モーメントの割合を小さくした。ここで、転倒モーメントを小さくしたのは、開口上部の梁のせん断力の累積によって生じる耐震壁への曲げ戻し作用が梁の剛性と耐力に依存することを考慮したためである。しかし、補強効果の比較の観点からは、試験体により加力形式が異なることは望ましくないと判断し、補強無しおよび補強あり（RC補強S補強）の平均的な値とした。図5の右図に試験体に作用するモーメント分布を示す。(A)が無開口および連層開口無試験体に、(B)が連層開口有試験体に対するものであり、2SLからの反曲点高さ（H）がそれぞれ3.47mおよび2.2mの位置に相当する。HのW（水平加力方向の耐震壁長さ）に対する比H/W（せん断スパン比）はそれぞれ1.85、1.17となる。

載荷履歴について、最初のサイクルは水平荷重制御とし水平力20kNで正負1回、以後は変位制御とした。2サイクル目以降の水平変位履歴は層間変形角をRとして、振幅が $R=0.025\%$ 、 0.05% 、 0.1% 、 0.2% 、 0.33% 、 0.5% 、 0.67% 、 1% 、 2% となるような漸増正負繰返しとした。R $=0.025\%$ のみ1回、以後各2回ずつ繰返した。層間変形角Rは上スタブ中央の水平変位を下スタブ上面からの距離（ $L=2160mm$ ）で除した値とした。

(3) 新設開口の影響

a) 実験結果

まず、無開口および開口新設のみで補強を施していない試験体について実験結果を述べ、開口設置の影響について考察する。試験体3体の最大耐力、初期剛性（ $R=+0.025\%$ 時の割線剛性）と破壊モードについて表2に、最終ひび割れ状況と荷重変形関係を図6、図7に示す。

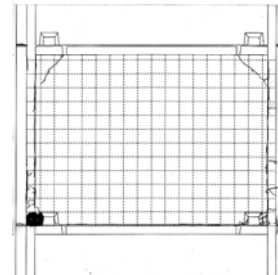
b) 無開口壁の耐震性能

WPC造建築物の耐震診断指針⁴⁾の第2次耐震診断法に則

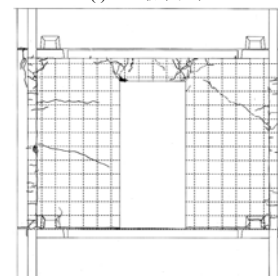
表-2 無開口および無補強試験体の実験結果一覧

試験体	せん断スパン比	最大耐力 (kN)		初期剛性 (kN/mm)	破壊モード
		正加力	負加力		
W5 (無開口)	1.85	101	103	166	F
N5S (無補強上下開口無)		105	110	53	F
NSM (無補強上下開口有)	1.17	136	132	40	F

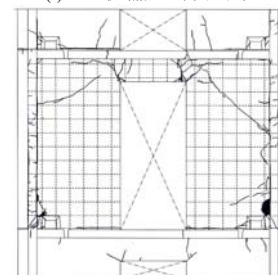
破壊モード(F:SB破断, S:PCa板せん断破断, FS:SB降伏後PCa板せん断破断), 初期剛性: $R=0.025\%$ 時の割線剛性, 耐震壁のせん断スパン比: H/W , H: 2SLから反曲点までの高さ, W: 耐震壁長さ(部材芯寸法)



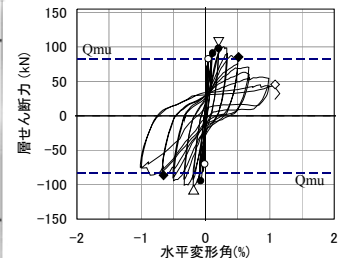
(a)W5 (無開口)



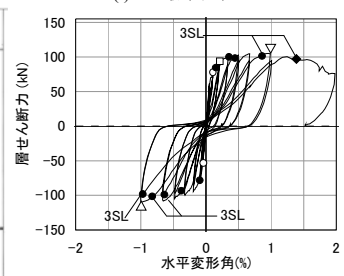
(b)N5S (無補強上下開口無)



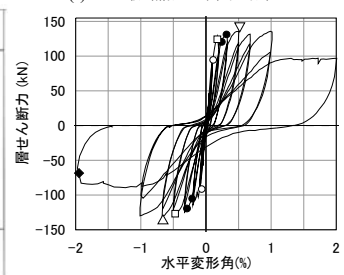
(c)NSM (無補強上下開口有)



(a)W5 (無開口)



(b)N5S (無補強上下開口無)



(c)NSM (無補強上下開口有)

図-6 最終ひび割れ状況

図-7 荷重変形関係

り、曲げ終局時のせん断力 Q_{mu} を算出した。 Q_{mu} は引張鉄筋とみなす鉄筋の総断面積に降伏応力度と中立軸からの距離を乗じたものと、軸力による傾斜復元力を合算して求めた。使用した材料特性を用いて算出した Q_{mu} は83kNであった。この値を図7(a)中に破線で示す。W5の実験結果と比較すると第2次耐震診断による無開口耐震壁の終局耐力の評価は実験の最大耐力の8割程度とやや過小であったが、安全側の評価になった。

c) 開口設置の影響

せん断スパン比（ H/W ）の大きい試験体であるN5SをW5と比較すると、最大耐力にはほぼ差がなく、変形能は大きくなった。初期剛性は無開口時の3割程度に低下した。また、復元力特性は無開口に比べ開口を設けた場合はスリップ性状を呈しエネルギー吸収能力が劣ることが分る。各階に開口のあるNSMは H/W が小さいために、最大耐力は無開口試験体（W5）の1.3倍程度になったが、その分PCa壁板の損傷が若干大きかった。

(4) 耐震補強の効果

a) 実験結果

次に、新設開口に補強を施した試験体について実験結果を述べ、補強効果について考察する。

最大耐力、初期剛性および破壊モードについて表3に、最終ひび割れ状況と荷重変形関係を図8、図9に示す。

b) 補強の効果

CSS、SSSは同じ加力モードである無補強NSSに比べ剛性が3.6倍、1.9倍、耐力が1.5倍、1.2倍と向上した。その一方で補強接続筋を定着した上下階のPCa壁板に損傷が集中したことから、補強部材の定着方法に改良の余地があると考えられる。補強が当該階で収まる方法としたBSSでは、耐力はNSSと同等であったが、エネルギー吸収能力の改善がみられたことから、開口設置前後で耐力とエネルギー吸収能力を確保するための方法として有効であると考えられる。せん断スパン比の小さい場合には、無補強試験体NSSがSB降伏による曲げ破壊であったのに対し、補強試験体CSM、SSMは壁のせん断破壊となった。それぞれ補強により剛性が4.7倍、2.5倍、耐力が2.1倍、1.6倍となった。

以上のように、せん断スパン比が大きい試験体は補強により開口のない試験体を上回る耐力が確認できた。しかし、補強接続筋を定着した上下階のPCa壁板の損傷が顕著で、定着方法に改善の必要がある。また、当該階のみで補強が収まる梁補強方法は耐力とエネルギー吸収能力の確保に有効である。せん断スパン比が小さい場合、補強効果が確認できたものの、補強により水平せん断力が高くなり、PCa壁板のせん断破壊に至った。

なお、本研究開発では、WPC構造住宅の解析的性能評価も行っているが、その結果は本稿では省略する。

7. 結論

本研究開発においては、既存WPC構造住宅への新設開口手法を開発し、その計画的妥当性の検討、および構造的評価を行い、さらにその結果を相互に反映させることによって、開発した手法の妥当性を示した。

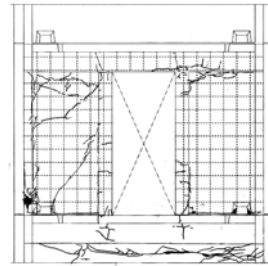
以上により、本研究開発が目的として掲げた、WPC構造住宅の改修に有効で、かつ即時適用可能な技術の整備を行うことができた。

参考文献

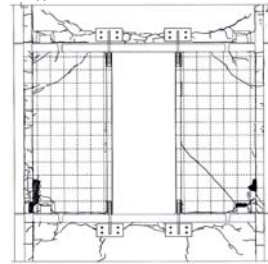
- 1) 総務省統計局：平成20年住宅・土地統計調査 確報集計，2010年3月
- 2) プレハブ建築協会：プレハブ建築協会40年史，pp.136-137，2003年1月
- 3) 高坂清一：プレハブ建築の構造計画と設計，鹿島出版会，1976年7月

表-3 補強試験体の実験結果一覧

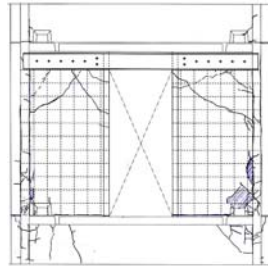
試験体	せん断スパン比	最大耐力 (kN)		初期剛性 (kN/mm)	破壊モード
		正加力	負加力		
CSS (RC補強上下開口無)	1.85	154	139	190	F
SSS (S補強上下開口無)		124	117	97	F
BSS (S梁補強上下開口無)		113	106	64	F
CSM (RC補強上下開口有)	1.17	289	271	189	FS
SSM (S補強上下開口有)		220	235	101	S



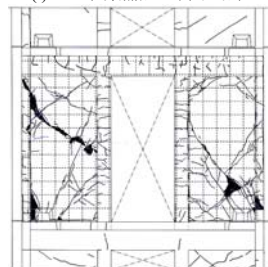
(a)CSS (RC補強上下開口無)



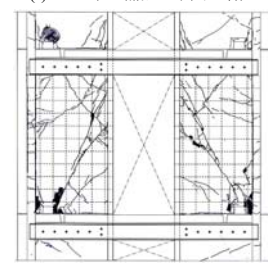
(b)SSS (S補強上下開口無)



(c)BSS (S梁補強上下開口無)

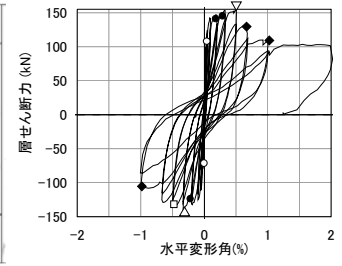


(d)CSM (RC補強上下開口有)

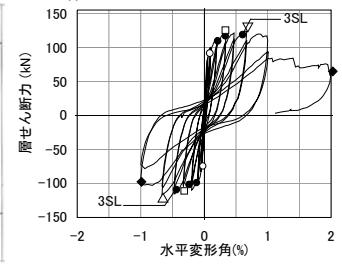


(e)SSM (S補強上下開口有)

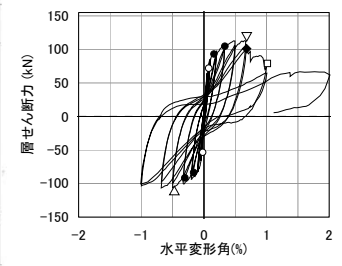
図-8 最終ひび割れ状況



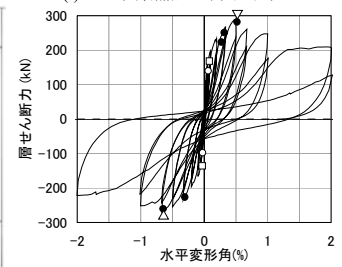
(a)CSS (RC補強上下開口無)



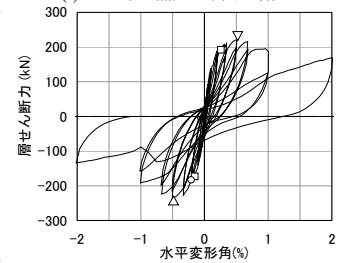
(b)SSS (S補強上下開口無)



(c)BSS (S梁補強上下開口無)



(d)CSM (RC補強上下開口有)



(e)SSM (S補強上下開口有)

図-9 荷重変形関係

- 4) 日本建築防災協会：既存壁式プレキャスト鉄筋コンクリート建築物の耐震診断指針，第2版3刷，2008年