

アンボンドPCaPC壁の耐震性能評価に関する実験研究

東京工業大学			○北村 史登
東京工業大学	正会員	工博	河野 進
東京工業大学		工博	渡邊 秀和
鹿島建設		工修	岡安 隆史

Abstract : In the 2011 Tohoku Earthquake, lightly reinforced concrete (RC) walls suffered severe damage in many residential and government office buildings. Even if such damage does not affect the building safety, it can stop the continuity of the building functions. Therefore, an upgrading to improve its seismic behavior is required. Four specimens were tested to improve damage reduction and continuity of operation performance by utilizing prestressed and precast technology with a vertical slit. As the result, precast prestressed concrete(PCaPC) wall with vertical slit can reduce flexural cracks and shear cracks. Also the PCaPC specimen can prevent spalling and residual drift better compared to RC specimen despite the same shear capacity of RC.

Key words : PCaPC , Vartical slit , Damage reduction

1. 序論

1. 1 背景

1981年に導入が始まった新耐震設計法では、まれに発生する中小地震に対しては建物が継続使用できること、極めてまれに発生する大地震に対しては建物が倒壊しないことを基本方針として設計が行われている。しかし、1995年に発生した兵庫県南部地震や、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、新耐震設計法を用いて設計された鉄筋コンクリート造建物において、建物の損傷が倒壊などの重大な被害でもないにも関わらず、玄関周りの雑壁やベランダ周りの方立壁、庁舎建築物の開口周辺の雑壁に大きな被害が生じた。そのため、防水性、遮音性、気密性、防犯性等の建築物の住まいとしての機能が損なわれ、住民が避難を余儀なくされ、結果的に建物が取り壊しとなるケースが散見された。このことから近年、地震後の継続使用を建物の重要な性能と認識する機運が高まっている。

1. 2 目的

過去の研究¹⁾において、谷らは損傷低減および構造性能改善を目的として、RC造非耐力壁の実大部材実験を実施し、壁端部に拘束領域を設けることで水平耐力および曲げ変形性能の向上や、ひび割れの低減に一定の効果が見られた。ただし、依然として、曲げひび割れや、せん断ひび割れ、最大耐力後のコンクリートの圧壊などの損傷が顕著であり、さらなる損傷低減が必要である。そこで、過去の研究で行った試験体を基準試験体として、新たに損傷低減方法を変化させた3体の壁試験体で静的載荷実験を行った。本研究では、アンボンド・プレキャスト・プレストレストコンクリート(以下アンボンドPCaPC)および縦スリットの技術を用いて、2次壁を構造要素として活用することを想定し、建物の構造性能の向上を目指すとともに、その壁に発生する曲げひび割れ、せん断ひび割れの低減、コンクリートの剥離・圧壊の防止、壁の残留変形の抑制といった大地震後の継続使用性確保を目的とした。そして、コンクリート・PC鋼棒・鉄筋の応力状態、壁の残留変形および最大残留ひび割れ幅といった指標から、プレストレストコンクリート造建築物の性能評価型設計施工指針(案)³⁾を用いて、各試験体の部材変形角ごとに各種限界状態の判定を行い、継続使用性能の評価を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

谷ら¹⁾のNSW6を基準試験体とし、新たに3体の壁試験体を製作した。試験体諸元と耐力計算結果を表-1に示す。一体打ち試験体のNSW6, 7の曲げ耐力計算値 Q_{mu} は文献²⁾に基づき算定し, PCaPC試験体NSW6Aおよび7Aは断面解析により算定した。せん断耐力計算 Q_{su} (mean式)は全ての試験体で文献²⁾に基づき算定した。試験体の寸法と配筋を図-1に示す。全ての試験体で, 壁端部に拘束領域を設けた。NSW6Aは一体打ちである基準試験体NSW6をプレキャスト化して, 厚さ20mmの目地モルタルを介して2本のアンボンドのPC鋼棒により圧着した。また, 端部にザグリを設けることで曲げ変形時に生じる壁端部の圧縮力を小さくし, かぶりコンクリートの剥落を防止することを計画した。図-1(c)に壁端部の詳細を示す。ザグリは壁際から左右100mmずつ設けられており, 壁板とスタブの接地面はNSW6と同様900mmである。NSW7は基準試験体NSW6の中央に幅50mmの縦スリットを設けることでせん断スパン比を大きくし, せん断ひび割れの抑制を計画した一体打ち試験体である。NSW7AはNSW7をプレキャスト化してPC鋼棒で圧着することで, さらなる損傷低減を図った。なお, NSW6AにはPC鋼棒一本に導入緊張力170kN(0.2%永久伸びに対する荷重の80%)の計340kN, NSW7AにはPC鋼棒一本に180kN(0.2%永久伸びに対する荷重の70%)の導入緊張力を与えた。コンクリートおよび目地モルタルの力学的性状を表-2に, 鉄筋およびPC鋼棒の力学的性状を表-3に示す。

表-1 試験体諸元表

試験体名	壁厚 (mm)	壁長さ (mm)	壁高さ (mm)	拘束域縦筋	拘束域帯筋	拘束域外縦筋	壁横筋	F_c (N/mm ²)	せん断スパン (mm)	PC鋼棒	緊張力 (kN)	軸圧縮力 (kN)	PS導入率 (%)	Q_{mu} (kN)	Q_{su} (kN)		
NSW6	200	900	1800	4-D13	D10@100	D10	D10@100 ダブル ($\rho_{wr}=0.71\%$)	24	900	φ17	170×2	599	4.20	488	551		
NSW6A		1100		40				440								749	
NSW7		450×2 間隔50		6-D10				24								274	463
NSW7A		40		φ19				180×2								5.85	230

F_c : コンクリート設計基準強度

表-2 コンクリート材料特性

試験体	コンクリート			目地モルタル	
	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
NSW6	22.2	2.16	24.9		
NSW6A	36.8	3.02	26.7	84.8	29.8
NSW7	17.0	1.95	24.4		
NSW7A	34.2	3.26	28.0	68.5	26.1

表-3 鋼材材料特性

試験体	鋼材の種類	降伏応力度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
NSW6	D13	373	533	178
	D10	380	506	172
NSW6A	D10	361	499	170
	φ17	1022	1140	200
NSW7	D10	361	499	170
NSW7A	D10	361	499	170
	φ19	1026	1139	200

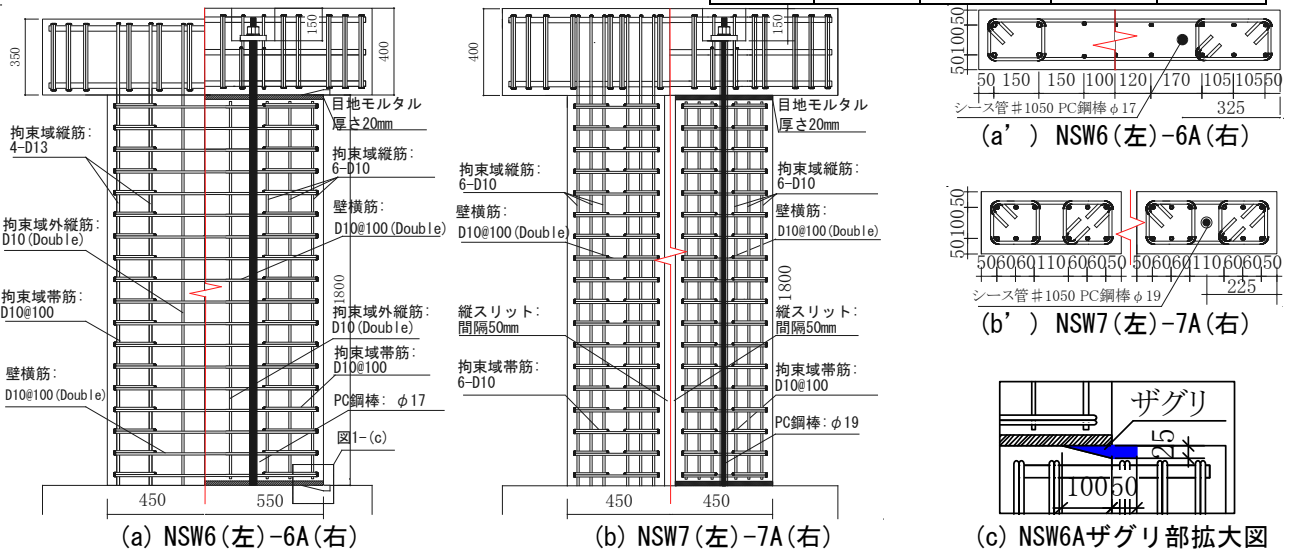


図-1 試験体配筋図

2. 2 加力方法

載荷装置図を図-2に、加力サイクルを図-3に示す。載荷方法は、4000kN鉛直ジャッキ2本により軸圧縮力599kNを一定に保持しながら、上下スタブの平行を保持するように制御し、3000kN水平ジャッキにより水平力を与えた。載荷は上下スタブの相対水平変位を壁高さ(1800mm)で除した部材角Rにより制御した。水平加力は正負交番繰返し漸増載荷とし、 $R=\pm 1/800$ (0.125%)で1回、 $R=\pm 1/400$ (0.25%)、 $\pm 1/200$ (0.5%)、 $\pm 1/133$ (0.75%)、 $\pm 1/100$ (1.0%)、 $\pm 1/67$ (1.5%)、 $\pm 1/50$ (2.0%)、 $\pm 1/33$ (3.0%)、 $\pm 1/25$ (4.0%)で2回ずつ繰返し、NSW7、7Aは1/16.7 (6.0%)、NSW6は1/20 (5.0%)の載荷で終了した。なお、NSW6Aにおいては1/25 (4.0%)の2サイクル目で残存耐力がピーク時の80%以下となり、載荷を終了した。

3. 実験結果

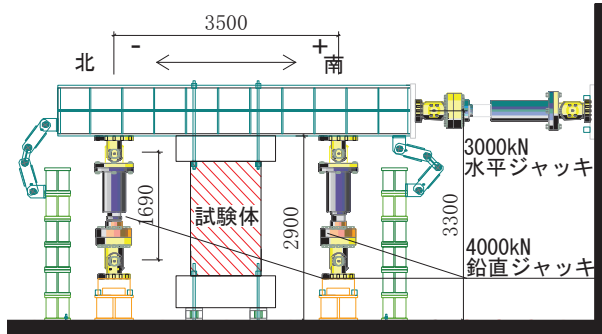


図-2 載荷装置

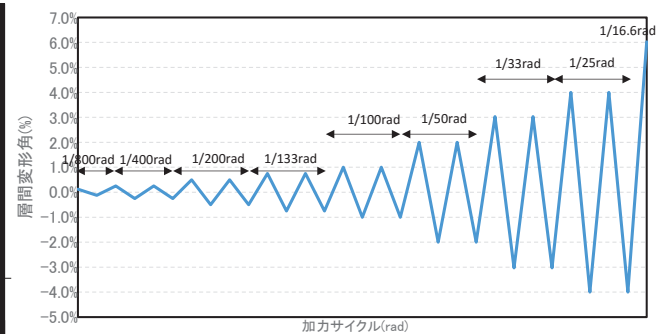
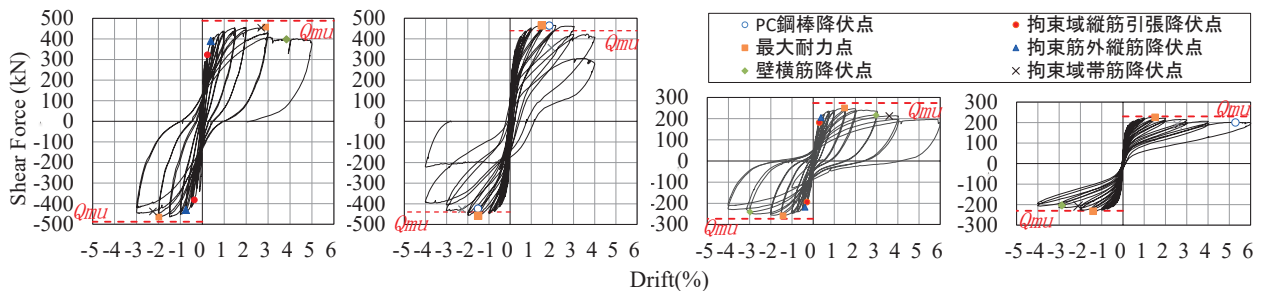


図-3 加力サイクル

3. 1 水平荷重 - 部材変形角

各試験体の水平荷重-層間変形角の関係を図-4に示す。試験体NSW6においては縦筋の引張降伏後も耐力は上昇し、 $R=+3.0\%$ 、 -2.0% において最大耐力(+457kN、-465kN)を迎えた後、端部の圧壊が顕著となったものの、最大耐力の80%まで低下せずに安定した挙動を示した。試験体NSW6AはPCaPC試験体で、縦筋がスタブに定着していないため、縦筋は引張降伏せず、最大耐力(+465kN、-458kN)に達した。最大耐力以降、PC鋼棒が降伏し、 $R=3.0\%$ 以降コンクリート圧縮領域の圧壊が著しくなり耐力低下に至った。履歴性状は正側でせん断滑りにより残留変形が多少残っているが、一体打ちと比較して原点指向型の履歴特性を示していることが確認できた。試験体NSW7においては縦スリットを設けたため、初期剛性や水平耐力がNSW6、6Aと比較して低下した。また、 $R=+1.48\%$ 、 -1.42% において最大耐力(+251kN、-259kN)に達した後、端部において、コンクリートの圧壊が見られたものの、 $R=6.0\%$ で最大耐力の80%の水平耐力となり、終始安定した挙動を示した。NSW7AはNSW6Aと同様、原点指向型の履歴性状を示し、 $R=1.51\%$ 、 -1.41% において最大耐力(+226kN、-232kN)に達した。他の試験体と比較して、コンクリートの損傷が軽微であり、 $R=6.0\%$ においても最大耐力の85%以上の残存耐力を有し、最も安定した挙動を示した。なお、一体打ち試験体であるNSW6、7においては、実験値における曲げ最大耐力が計算値 Q_{mu} を下回っているが、これは圧縮側コンクリートの損傷により応力中心間距離が計算の仮定より小さくなったためと考えられる。



(a) NSW6

(b) NSW6A

(c) NSW7

(d) NSW7A

図-4 水平荷重と部材変形角の関係

3. 2 最大ひび割れ幅

除荷時およびピーク時において、観測された最大ひび割れ幅と加力サイクルとの関係を図-5に示す。なお、ひび割れ幅の計測は0.05mm刻みのクラックスケールを用いる方法と、壁側面に貼付したPIゲージによる2つの計測方法を用いた。図-5に壁板のひび割れ幅の最大値の推移を示す。最大ひび割れ幅の計測では壁板に発生したひび割れ幅を記録した。なお、除荷時における目地部での開きはNSW6A, 7AともにR=1/100(1.0%)まで発生しなかった。また、図-5(b)には文献³⁾に記載されている各限界状態に対する最大残留ひび割れ幅の値を併記する。PCaPC試験体であるNSW6A, 7Aでは目地部に变形が集中し(目開き)、NSW7AではR=1/200(0.5%)、NSW6AではR=1/100(1.0%)まで目視によるひび割れは観測されなかった。また、NSW7AではR=1/133(0.75%)、NSW6AではR=1/100(1.0%)まで最大残留ひび割れ幅は使用限界の基準値0.2mmを下回り、R=1/50(2.0%)においても修復限界Iを下回る結果となった。このことから、アンボンドPCaPCによる損傷低減効果が確認できる。ただし、一体打ち試験体に発生するひび割れは曲げひび割れが支配的であり、ピーク時の最大ひび割れ幅に対して、除荷時に半分以上小さくなるが、PCaPC試験体では一定軸力(599kN)に加え、PC鋼棒による緊張力が大きく影響しているため、壁板に発生するひび割れは、いずれも、曲げ圧縮領域の圧縮力による軸方向のひび割れであり、除荷時においてもひび割れが閉じない傾向にあった。一方、中央に縦スリット設け、負担モーメントを抑えたNSW7試験体では、最大残留ひび割れ幅に関しては基準試験体NSW6とほとんど差は見られなかった。

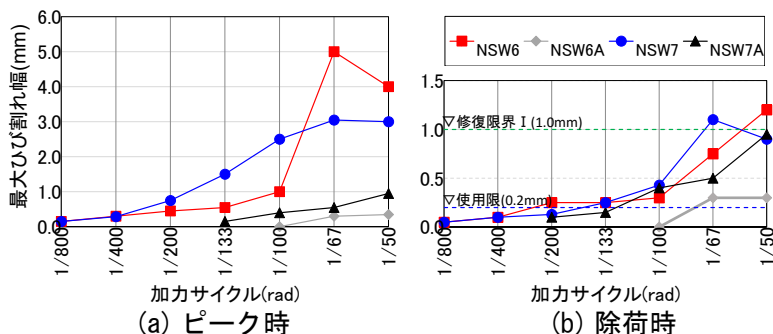


図-5 壁板に発生したひび割れ幅最大値推移

3. 3 残留ひび割れ図

各試験体の1/100(1.0%)サイクル終了時における残留ひび割れの分布状況を図-6に示す。図中、正載荷時に発生した損傷を青(破線)、負載荷時に発生した損傷を赤(実線)で示す。また、最大残留ひび割れ発生位置を併記する。R=1/100(1.0%)時においてはNSW6では曲げせん断ひび割れ、せん断ひび割れが壁板全体に発生し、最大耐力を迎えたR=+1/33(3.0%)および-1/50(2.0%)サイクル以降、端部での圧壊が顕著であった。一方でNSW7ではNSW6と比較して、せん断スパン比が大きいため、曲げ変形が卓越した。そのため、曲げひび割れが支配的であり、全サイクルを通して、せん断ひび割れは確認されなかった。また、R=1/50(2.0%)においても、損傷は上下スタブ面から450mmの範囲に集中し、壁板中央部での損傷はほとんど確認されなかった。NSW6A, 7AではR=1/100(1.0%)では、変形の多くが目地部に集中したため、壁板の損傷はほとんど確認されなかった。ただし、圧縮による縦方向のひび割れが両試験体共に発生した。NSW6Aではザグリを設けることにより、NSW6と比較して端部でのかぶりコンクリートの剥落を大幅に低減することができた。

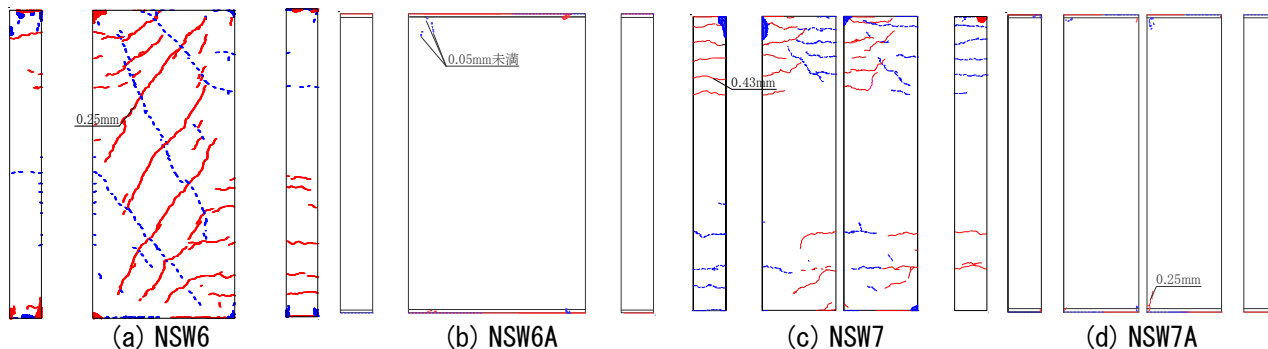


図-6 残留ひび割れ図 (R=1/100(1.0%))

3. 4 残留変形角

各試験体の除荷時の部材変形角の推移を図-7に示す。また、最大ひび割れ幅の推移と同様に文献³⁾に記載されている、各限界状態の限界値を併記する。R=+1/100(1.0%)除荷時において一体打ちであるNSW6は残留変形角0.16%と使用限界の上限0.1%を上回り、NSW7では0.26%と修復限界Iの判定となった。一方、PCaPC試験体であるNSW6A、7AはいずれもR=±1/100(1.0%)において残留変形角は0.1%未満であり、アンボンドPCaPC化による高い残留変形抑制効果が確認できた。

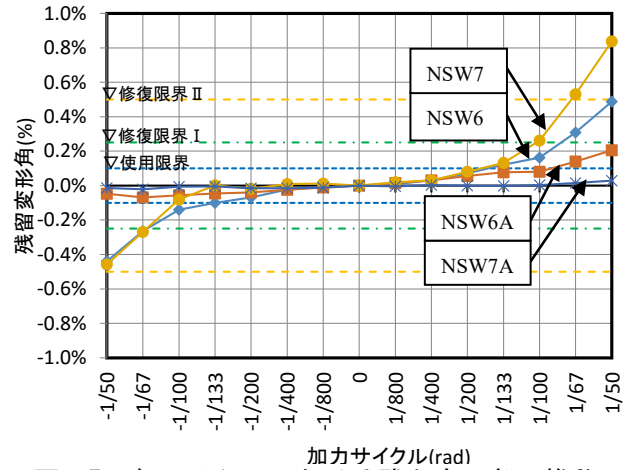


図-7 各サイクルにおける残留変形角の推移

4. 限界状態の評価

本章では各試験体の損傷状況を元に各種限界状態の判定を行う。表-4に文献³⁾による各種限界状態の目安を示す。表は梁部材を想定したものだが、今回は壁に準用し評価を行う。また、表中の括弧内の記述は本研究での運用を示す。例えば、付着の悪いPC鋼材における「使用限界」は、材料試験により得られた0.02%オフセット法によるひずみ、残留変形における「使用限界」は、0.1%以下とした。さらに、コンクリートの「修復限界I」以降の判定は目視で行い、残留ひび割れ幅はクラックスケール(壁前面)とPIゲージ(壁側面)で計測した値を用いた。図-8に正載荷時での各試験体の、使用限界を青色のハッチングで示し、修復限界Iを緑色、修復限界IIを橙色、安全限界を黄色として、各部材の各種限界状態をそれぞれ示した。一体打ち試験体であるNSW6とNSW7は両試験体共に、修復限界Iはコンクリートの状態、修復限界IIは鉄筋の状態、安全限界は、かぶりコンクリートの圧壊により決定した。ただし、縦スリットを設け、端部での負担圧縮力を低減したNSW7はR=1.48%で安全限界となり、NSW6がR=0.75%で安全限界に達するのに対して、大幅に修復限界IIの範囲を拡大することができた。NSW6A、7Aでは両試験体共に修復限界Iはコンクリートの状態、修復限界IIはPC鋼棒の状態で決定していることがわかる。ただし、NSW6AはNSW7Aと比較して、負担モーメントも大きく、PC鋼棒の径がφ17(導入緊張力170kN、NSW7Aはφ19)であるためPC鋼棒の弾性限界がR=0.37%と早い段階で達し、R=1.79%でわずかな降伏となり、安全限界に達した。なお、かぶりコンクリートの軽微な圧壊および圧壊は、それぞれR=1.29%、2.96%であり、圧壊に対しては全試験体の中で最も発生が遅かった。このことから、ザグリを設けることによる端部のコンクリートの損傷低減効果が確認できた。NSW7AはアンボンドPCaPCかつ縦スリットの設置により、修復限界I、修復限界IIに達するのが、それぞれR=0.74%、1.88%であり、他試験体と比べ高い損傷制御性能を発揮したことが確認された。

表-4 部材の限界状態の目安

限界状態	λ	具体的な損傷の状態					残留変形	残留ひび割れ幅
		普通鉄筋	PC鋼材		コンクリート			
			付着がよい	付着がわるい	一般の曲げ部材	その他		
使用限界	1~0.75 0.75~0.5 <0.5	わずかな降伏を許容(材料試験降伏歪) 弾性範囲(材料試験降伏ひずみ)	弾性範囲 0.2%オフセット 耐力点以下	判断対象にはしない	0.9σB以下 (材料試験ひずみで判断) (14/15λ+0.2)σB 以下(材料試験ひずみで判断) 2/3σB以下(材料試験ひずみで判断)	0.75σB以下	ほぼゼロ(0.1%以下)	0.2mm程度以下
修復限界I		鉄筋降伏を許容(ひずみ1.0%)	わずかな降伏を許容	弾性範囲(0.02%オフセットひずみ)	軽微なかぶりコンクリートの圧壊を許容(写真:軸方向の軽微なひび割れ時)		1/400程度以下	1mm程度以下
修復限界II		主筋が座屈しないこと(目視,写真判断)	降伏許容	わずかな降伏を許容(材料試験降伏ひずみ)	コアコンクリート部分が健全であること(圧縮線のかぶりコンクリート剥落)		1/200程度以下	2mm程度以下
安全限界		主筋の破断が生じないこと(目視,写真判断)	破断しないこと	降伏許容(破断しないこと)	コアコンクリートに圧壊が生じないこと(写真判断)		部材角の上限値 4%	

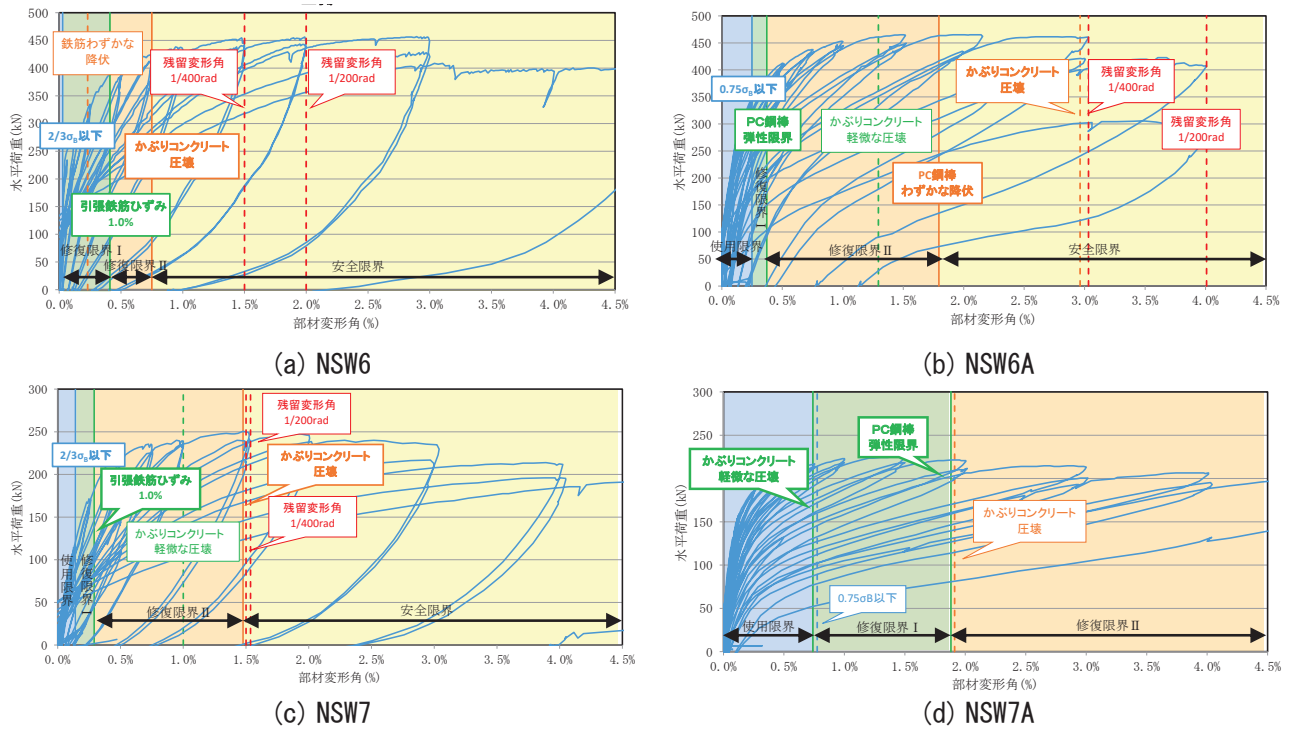


図-8 各種限界状態

5. まとめ

本研究ではRC壁の水平耐力確保とひび割れ低減を目指した構造システムを構築することを目的として、製作方法（一体打ち、PCaPC）、縦スリットの有無などを実験変数として実験を行い、各種限界状態を規定する指標に基づき損傷評価を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- RC一体打ちで、中央に縦スリットを設置し、せん断スパン比を大きくし、モーメント耐力を下げることで、せん断ひび割れ、曲げひび割れさらに端部での圧壊といった損傷を低減させることができた。
- PCaPC化した試験体NSW6A, 7Aでは、一体打ちの試験体NSW6, 7と同等のモーメント耐力を有しながら、曲げひび割れやせん断ひび割れといった損傷を大幅に低減させることができ、かつ残留変形角も大幅に抑制することができた。ただし、外力と導入緊張力が軸力として作用したため圧縮によるひび割れが発生した。
- NSW6Aでは端部にザグリを設けることで、かぶりコンクリートでの負担圧縮力が低減され、剥落や圧壊といった損傷に対して有効であることが確認された。
- 発生時期はそれぞれ異なるが、各限界状態の判定において、一体打ち、PCaPC試験体の修復限界 I はコンクリート、修復限界 II は一体打ちでは、鉄筋の応力状態が決定要因となりPCaPC試験体ではPC鋼棒の状態が決定要因となった。安全限界は一体打ち試験体ではかぶりコンクリートの圧壊、PCaPC試験体ではPC鋼棒の応力状態により決定した。

参考文献：1) 谷昌典, Eko YUNIARSIYAH, 向井智久, 河野進：損傷低減および構造性能改善を目指したRC造方立壁部材の実大実験, JCI工学年次論文集, Vol. 37, No. 2, pp. 901-906, 2015. 7. 2) 国土交通省住宅局建築指導課ほか監修：2007年版建築物の構造関係技術基準解説書. 3) プレストレストコンクリート造建築物の性能評価型設計施工指針(案)・同解説, 日本建築学会, 2015年

謝辞：本研究は、国土交通省の平成27年度住宅市場整備推進等事業費補助金、東京工業大学応用セラミックス研究所全国共同利用の補助を受けて実施しました。また、本研究の一部は平成27年度科学研究費基盤研究B(2015)および基盤研究A(2016)（河野進）によるものです。最後になりますが、B4の桑原君と富田君には試験体製作から実験に至るまで、多大なるご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。