

論文 PCa カーテンウォール剥落防止対策に関する実験的研究

萩野谷学*1・神谷隆*2・村上勝英*3・小野潤一郎*4

要旨：超高層建築物の外装ではプレキャスト板を使用したカーテンウォール形式が多く使用されている。設計時に想定した地震動よりも大きな地震が生じた場合、外装材が接触してコンクリートの一部の剥落が考えられる。また、築40年以上が経過した超高層建築物が多くなってきた昨今、プレキャスト板の経年劣化に伴うコンクリートの剥落防止対策が進んでいるとは言い難い。そこで、コンクリートを対象としてポリウレア樹脂を吹付け塗膜する剥落防止工法を提案し、プレキャスト板を対象とした実大要素実験を実施した。その結果、ポリウレア樹脂を用いた塗膜補強は剥落対策に対して十分に効果が期待できることを確認した。

キーワード：カーテンウォール、プレキャスト板、剥落防止、ポリウレア樹脂、剥落荷重

1. はじめに

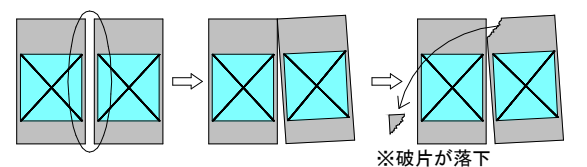
建物の外装に使用されるカーテンウォールの部材には、プレキャスト板（以降、PCa板と略す）が用いられることが多い。取付けは地震時の変位に追従する形式としてスウェイ方式とロッキング方式がある。また、これらのPCa板は地震時の変位に対して部材同士が接触しないようにクリアランス（目地）が設けられている。しかし、近年の地震工学等の進歩により、設計当初より想定地震動が大きくなっており、地震時には設計上考慮した目地寸法以上に変形する恐れがあり、部材同士が接触しPCa板の一部が崩落することが考えられる。特にPCa板を使用している超高層建築物では、地震によって建物が大きく揺れた場合には注意が必要である。これまで超高層建築物は、固有周期を長くすることで地震に対しては比較的利益な建物と考えられてきた。しかし近年では強大地震を経験したことで、地震時の長周期成分が建物の固有周期と一致すると、建物は過大な変形と長時間に亘って揺れが生じることが確認された。こうしたことを踏まえて、現在超高層建築物は地震対策として地震時の変形を抑制するために制振ダンパー等を取付ける補強対策が講じられている。このように超高層建築物に対する主体構造の補強対策は進んでいるものの、構造体補強後も原設計当初の建物の想定最大層間変形角等を満足出来ない場合もあり、非構造部材、特にカーテンウォールに用いるPCa板に対する補強対策が進んでいるとは言い難い状況にある。また、コンクリートの劣化に伴う剥落防止技術の開発は1990年頃から産官学が協力して技術確立が進められ、ピンネット工法が開発^{1,2)}され、1998年には建設省（現国土交通省）「建築改修工事監理指針」に外壁改修工法として採用され普及が加速した。

また、壁部材の剥落対策の研究は、PCa板の壁が地震

挙動に伴って剥落する事象に対する剥落防止対策の研究は極めて少ない状況にある。こうした状況を踏まえて本研究は、超高層建築物のPCaカーテンウォールを対象として施工性に優れた剥落防止工法を提案し、剥落防止対策技術の構築に取り組むこととする。そこで本研究では目地を有するPCaカーテンウォールを対象とした実大要素実験を行い、地震時の揺れによる建物変形を考慮して、PCa板の変形性状と剥落対策を施した場合の補強効果等を把握し、剥落対策を実用化するためのデータの蓄積を行う。

2. 提案する剥落防止工法の概要

超高層建築物の外壁は、あらかじめ工場で作製されたPCa板をファスナーと呼ばれる接合金物を用いて設置される場合が多い。こうした構造物に対して地震力が作用すると構造物全体が大きく揺れる現象が起こる。その時、PCa板についても図-1に示すようにPCa板同士が接触しその一部が剥落する危険性が考えられる。そこで、筆者らは靱性に優れたポリウレア樹脂をPCa板に吹付けて塗膜する剥落防止工法を提案する。本工法の特徴としては、対象となるPCa板に対してポリウレア樹脂を吹付けることで、地震時の揺れやその後の余震による揺れによってPCa板が接触してその一部が剥落することを防ぐことで、地上を利用する人々を危険から守ることが可能にできる。



※PCa板はクリアランスを設けた状態で取付けている
※地震時にはPCa板同士が接触する可能性がある
※破片が落下
※接触することで剥落した破片が落下する

図-1 PCa板の剥落現象

*1 矢作建設工業（株） エンジニアリングセンター 博士(工学)（正会員）

*2 矢作建設工業（株） 建築事業本部 理事（正会員）

*3 （株）日建設 エンジニアリング部門構造設計グループ 技師長兼技術センター 知財管理室長 博士(工学)

*4 （株）日建設 エンジニアリング部門構造設計グループ 構造設計部長兼構造技術室長

本工法に適用するポリウレア樹脂の塗膜構成を図-2 に示す。

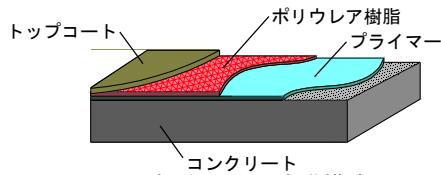


図-2 提案工法の塗膜構成

3. 実験概要

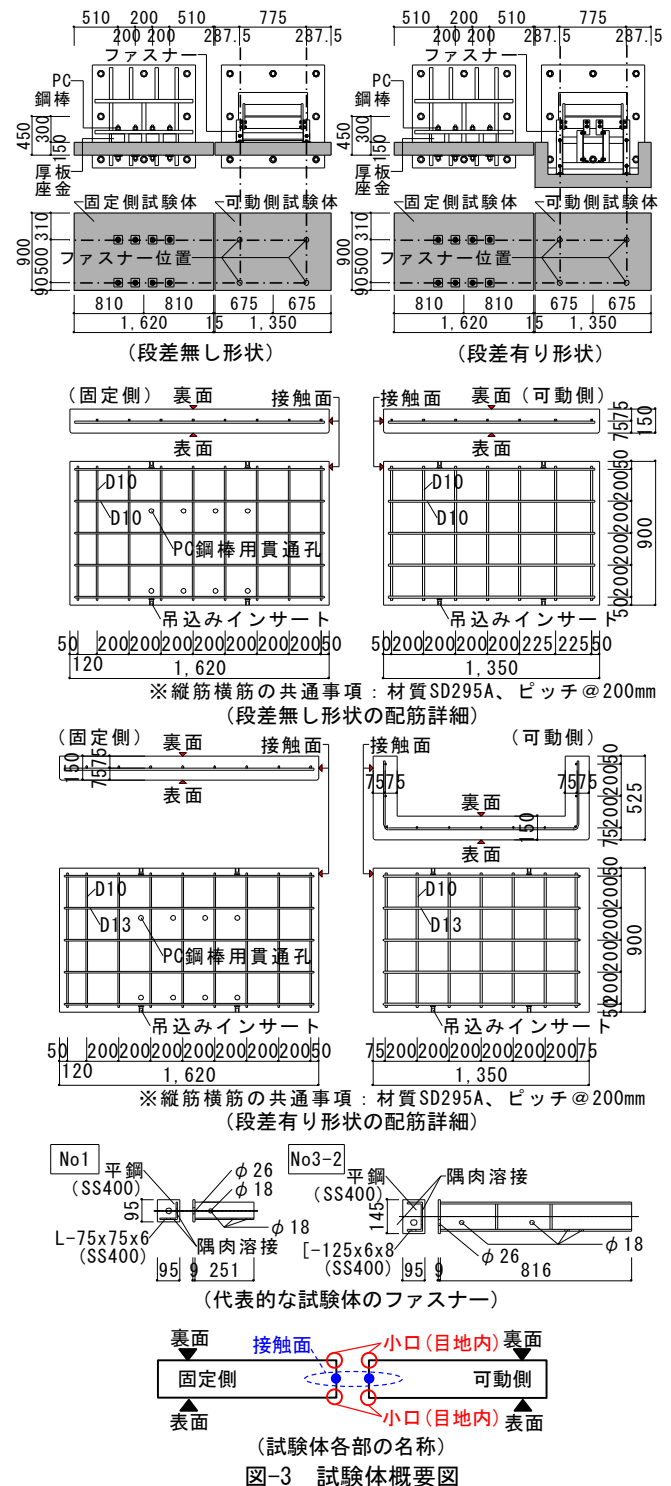
3.1 試験体概要

超高層ビルに使用している PCa 板の接合方法はスウェー方式或いはロッキング方式といった可動形式となっていることが一般的である。また、実際に取付けられている PCa 板間の目地が施工不良により設計値より狭くなっている場合がある。更には近年検診が必要となってきた長周期地震では、設計時に想定していた以上の変形が生じる可能性がある。そこで、PCa 板の目地部を対象に PCa 板同士が接触した場合に生じる剥落現象を再現し、提案工法の有効性を確認するために実大要素実験を行った。本実験の試験体一覧を表-1 に示す。実験変数は試験体形状と塗膜方法とした。ここで、No5 は No1 を、No6 は No2 を再利用した試験体である。再利用方法は No1 と No2 の実験において PCa 板同士が接触した部分に対して、反対側に位置する部分を利用（180 度反転させて利用）することとした。そのため、実験では壁の天端高さが若干低くなっている。更に、No3-2 は No3-1 を、No4-2 は No4-1 を再利用した試験体である。これらはファスナーの形状を変更し再加力した試験体である。また、補強試験体はポリウレア樹脂（膜厚 2mm）により表面または裏面に対して塗膜補強した形状となっている。試験体の形状及び寸法は図-3 に示す。試験体は PCa 板（可動形式部：幅 2400mm 高さ 3300mm 程度、固定形式部：幅 1100mm 高さ 3300mm 程度）に対して接触する部分の挙動が確認できる寸法とした。また、実験では PCa 板を取付ける可動形式部と固定形式部の形状として、図-3 に示すように段差が有る場合と無い場合を設定した。更に、可動形式部と固定形式部の PCa 板の間には 15mm のクリアランスを設けた。また、図-3 には代表的な試験体のファスナー形状も併せて示す。また、本実験は PCa 板同士が接触時に生じる剥落を対象としていることから、ファスナー及び鉄筋等の材料試験は実施していない。ただし、コンクリートは試験体製作の都合上、早強コンクリート（ $F_c=27\text{N/mm}^2$ ）を用いたことから、試験時のコンクリート強度を把握するために材料試験を実施した。

コンクリートの材料特性は表-2 に、ポリウレア樹脂の物理特性は表-3 に示す。

表-1 試験体一覧

試験体	試験体形状 段差の有無	試験体の天端 高さ mm	塗膜方法 (膜厚：2mm)			ファスナー形状 (SS400)	可動柱の拘束
			表面	裏面	塗膜形式		
No1	無し	3910	-	-	-	L-75x75x6	上部
No2			全面	-	表面から 50mm巻込み		
No3-1			-	-	-		
No3-2	有り	3910	-	-	-	[-125x65x8 L-75x75x6 [-125x65x8	上部と 中間部
No4-1			全面	-	表面から 50mm巻込み		
No4-2			全面	-	表面から 50mm巻込み		
No5	無し	3690	接触面から 200mm	接触面から 200mm	小口巻込み 無し	L-100x100x6	上部と 中間部
No6			全面	全面	小口巻込み 有り		



3.2 荷重方法

試験体への荷重は、図-4 に示すような荷重装置を組立て、柱脚がピン支持となっている柱に接合された水平ジャッキ（引張・圧縮 1000kN、ストローク±300mm）による一方向静的漸増荷重とする。また、水平荷重は水平ジャッキに取付けられているロードセルにより検出し、試験体の水平方向変位量は柱に取付けた変位計によって測定した。荷重プログラムについては、剥落荷重を基準に荷重制御で行うことを想定したが、各試験体の剥落荷重を推定することは難しいことから、段差が無い場合と段差が有る場合の無補強試験体 No1 と No3 の実験をもとに確定することにした。それで、荷重は PCa 板同士が接触して 1kN、3.8kN（1 サイクル終了後に水平方向変位量として 1.5mm 変形させた時点の荷重）と荷重制御で行い、その後、No1 は 8.6kN、No3 は 14kN で剥落現象が生じた。この結果より、段差が無い場合の試験体は剥落荷重 $P_{PI}=8.6\text{kN}$ 、段差が有る場合の試験体は剥落荷重 $P_{P3}=14.0\text{kN}$ を基準にして、1.5、2.0、2.5、3.0、4.0、5.0 といった比率による荷重制御を基本として実験を行った。ただし、No5 及び No6 は剥落荷重 P_{PI} を基準にして、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 といった比率による荷重制御を基本とした。また、すべての試験体を対象として柱の回転角が 1/150 以降において変形が卓越する場合は、柱の回転角で制御した。実施した実験の荷重プログラムは表 4 に示す。各サイクルの基本的な繰返し回数は 3 回とした。ただし、表 4 で色が付いているサイクルは繰返し回数を 1 回とし、No4-1 の 1 サイクル目の繰返し回数は 2 回として実験を行うことにした。

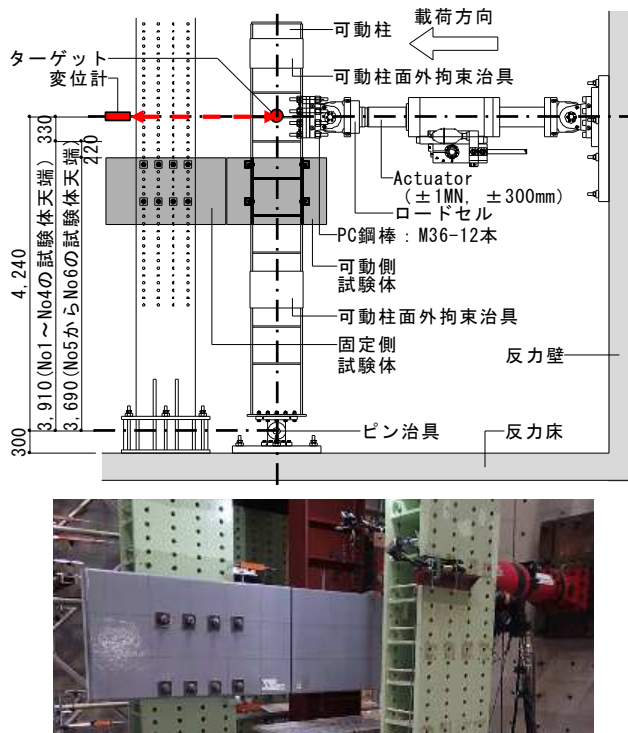


図-4 荷重概要図

表-2 材料特性（コンクリート）

試験体	圧縮強度 N/mm ²	ヤング係数 N/mm ²
コンクリート	25.7	25467

表-3 ポリウレア樹脂の物理特性（常温 23℃）

項 目	数 値	規格
引張強さ (N/mm ²)	20	JIS A 6021
引裂強さ (N/mm)	67	
破断時の伸び (%)	128	
引張弾性率 (N/mm ²)	289	JIS A 1191

表-4 実施した実験の荷重プログラム

サイ クル	No1	No2	No3-1	No3-2	No4-1	No4-2	No5	No6
1	1kN	1kN	1kN	-	1kN	1kN	1kN	1kN
2	3.8kN	3.8kN	3.8kN	3.8kN	3.8kN	3.8kN	3.8kN	3.8kN
3	1.0P _{PI}	1.0P _{PI}	1.0P _{P3}	-	1.0P _{P3}	1.0P _{P3}	1.0P _{PI}	1.0P _{PI}
4	1.5P _{PI}	-	1.5P _{P3}	-	1.5P _{P3}	1.5P _{P3}	2.0P _{PI}	2.0P _{PI}
5	2.0P _{PI}	2.0P _{PI}	2.0P _{P3}	-	2.0P _{P3}	2.0P _{P3}	3.0P _{PI}	3.0P _{PI}
6	2.5P _{PI}	-	2.5P _{P3}	2.5P _{P3}	2.5P _{P3}	2.5P _{P3}	4.0P _{PI}	4.0P _{PI}
7	3.0P _{PI}	3.0P _{PI}	-	3.0P _{P3}	-	3.0P _{P3}	5.0P _{PI}	5.0P _{PI}
8	4.0P _{PI}	4.0P _{PI}	-	4.0P _{P3}	-	4.0P _{P3}	7.0P _{PI}	7.0P _{PI}
9	28.26mm 6.67x10 ⁻³ rad.	5.0P _{PI}	-	5.0P _{P3}	-	5.0P _{P3}	9.0P _{PI}	9.0P _{PI}
10	33.92mm 8.0x10 ⁻³ rad.	28.26mm 6.67x10 ⁻³ rad.	-	-	-	6.0P _{P3}	11.0P _{PI}	11.0P _{PI}
11	42.40mm 1.0x10 ⁻² rad.	33.92mm 8.0x10 ⁻³ rad.	-	-	-	-	13.0P _{PI}	13.0P _{PI}
12	-	42.40mm 1.0x10 ⁻² rad.	-	-	-	-	16.0P _{PI}	16.0P _{PI}

4. 実験結果

4.1 履歴性状と損傷状況

各試験体の水平荷重-水平方向変位関係を図-5 に示す。ここで、図-5 は水平ジャッキに取付けられているロードセルが検知した値と固定側柱に取付けた変位計によって計測される水平方向の変位量を示している。また、実験終了時における各試験体の損傷状況を写真-1 に示す。更に、ポリウレア樹脂によって塗膜補強した試験体については、実験終了後に PCa 板同士が接触した部分のポリウレア樹脂の除去を実施したので、その状況を写真-2 に示す。各試験体の履歴性状と損傷状況について以下に示す。

1) No1 : ①3 サイクル（1 回目：1.0P_{PI}=8.6kN）で可動側 PCa 板の裏面上部においてコンクリートが剥落する状況が確認された。また、この時の水平変位は 15.68mm で可動柱回転角≒1/270 相当であった。②3 サイクルの 1 回目以降においては水平変位が増大するにしたがってコンクリートの剥落は可動側 PCa 板の裏面上部から下部へと進展していく状況が確認された。

2) No2 : ①10 サイクル（1 回目：目標水平変位 28.26mm）に向かう水平変位が 21.64mm で固定側 PCa 板の裏面中央部近傍において曲げひび割れが確認された。②曲げひび割れが発生した以降の変形では、水平変位が増大するにしたがって直線的に水平荷重が増大する傾向を示した。

③12 サイクル（1 回目：目標水平変位 42.4mm）に向かう水平変位 32.46mm で可動側 PCa 板のポリウレタ被覆のない裏面上部と下部においてコンクリートが脆性的に剥落する状況が確認された。また、この時点の水平荷重は 94.4kN で No1 と比較すると剥落荷重は約 11 倍程度上昇する結果であった。以上の結果、クリアランス部分にコンクリート表面から裏面に向かって 50mm 程度補強したポリウレタ樹脂同士の接触によってコンクリート表面を拘束できていたことで No1 に比べると剥落する荷重が増大したものと考察される。また、大変形領域ではポリウレタ樹脂で補強していないコンクリート部分が接触し増大した応力がその部分に流れたことにより脆性的にコンクリートが剥落したものと考察される。しかしながら、片面ではあるもののコンクリート表面にポリウレタ樹脂によって補強することでコンクリートの剥落は十分に抑制できるものと考察される。また、実験終了後のポリウレタ樹脂で補強した部分の損傷状況については写真-2 で示しているように剥落による損傷は確認されなかった。

3) No3-1：①3 サイクル（1 回目： $1.0P_{p3}=14.0\text{kN}$ ）で可動側 PCa 板（コの字型）の裏面上部においてコンクリートが剥落する状況が確認された。また、この時点の水平変位は 23.64mm で、可動柱回転角 $\approx 1/179$ 相当であった。

②4 サイクル（2 回目： $1.5P_{p3}=21.0\text{kN}$ ）で可動側 PCa 板（コの字型）の表面と側面に曲げひび割れが発生した。また、この時の水平変位は 28.92 mm で可動柱回転角 $\approx 1/146$ 相当であった。③曲げひび割れが発生した以降の変形においては荷重が増大することなく変形が進む傾向にあったこと、更には試験体を取付けているファスナーの曲げ変形が若干確認されたため、最終的には 6 サイクル（3 回目： $2.5P_{p3}=35.0\text{kN}$ ）で載荷を終了した。

4) No3-2：No3-1 の最終破壊状況を確認するために可動側 PCa 板（コの字型）のファスナーサイズを変更し、No3-1 の試験体を用いて載荷を行った実験結果である。①No3-1 が到達した最大耐力以降の変形においては緩やかな耐力上昇を示しながら変形が進む傾向にあった。②最終的にはコの字壁に発生した曲げひび割れによる亀裂幅の進展が顕著になったため、9 サイクル（3 回目： $5.0P_{p3}=70.0\text{kN}$ ）で載荷を終了した。

5) No4-1：①6 サイクル（1 回目： $2.5P_{p3}=35.0\text{kN}$ ）で可動側 PCa 板（コの字型）のファスナーの曲げ変形が目視確認できたため載荷を終了した。また、この時の水平変位は 44.98mm で可動柱回転角 $\approx 1/94$ 相当であった。なお、この時点においては試験体にひび割れ等の損傷は確認されなかった。

6) No4-2：No4-1 に対して可動側 PCa 板（コの字型）のファスナーサイズを変更して載荷を行った実験結果である。①6 サイクル（3 回目： $2.5P_{p3}=35.0\text{kN}$ ）で可動側 PCa

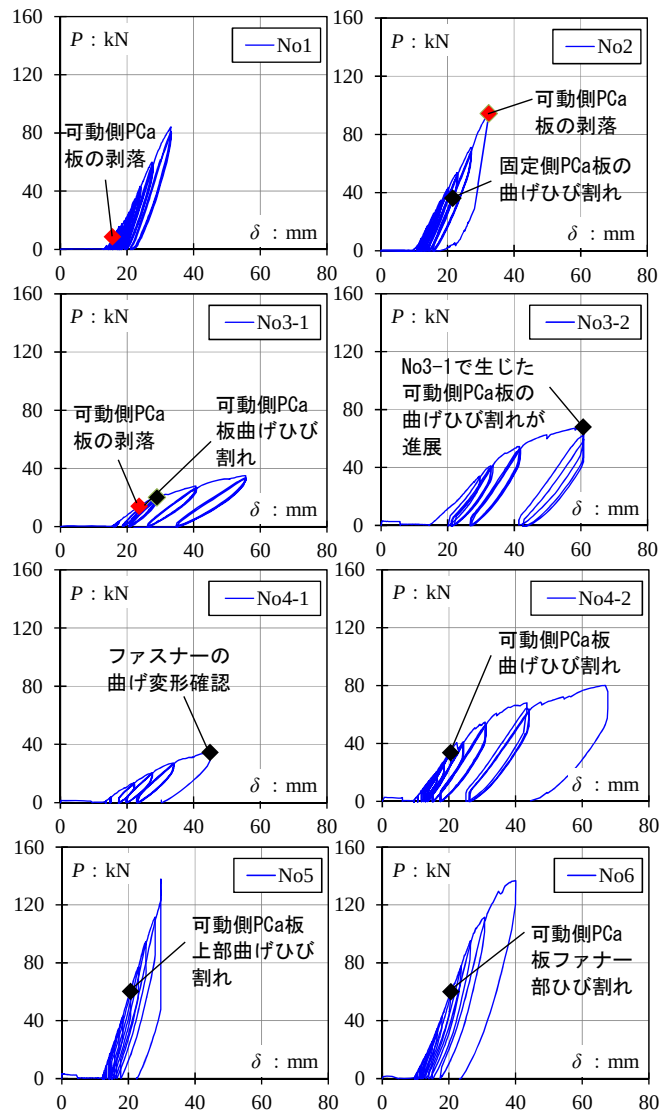


図-5 水平荷重-水平方向変位関係

板（コの字型）に曲げひび割れが発生した。また、この時の水平変位は 20.58mm で可動柱回転角 $\approx 1/206$ 相当であった。②曲げひび割れが発生した以降の変形においては 9 サイクル（1 回目： $5.0P_{p3}=70.0\text{kN}$ ）に向かう途中の水平荷重が 68.1kN で可動側 PCa 板（コの字型）表面に対してポリウレタ樹脂で補強した部分に曲げひび割れが進展し段差が生じていることが目視によって確認できた。また、この時の水平変位は 43.4mm で、可動柱回転角 $\approx 1/98$ 相当であった。③9 サイクル（1 回目： $5.0P_{p3}=70.0\text{kN}$ ）以降については緩やかな耐力上昇を示し、最終的には可動側 PCa 板（コの字型）の側面部分が曲げひび割れの進展によって急激に変形する状況であったため、10 サイクル（1 回目： $6.0P_{p3}=70.0\text{kN}$ ）に向かう途中の水平変位が 67.68mm で載荷を終了した。以上の結果、可動側 PCa 板（コの字型）に曲げひび割れが発生した以降の変形に対して No3-2 と No4-2 を比較すると水平変位で 15mm 程度水平変形を抑制することができていた。なお、本試験体は剥落する状況は確認されなかった。



写真-1 実験終了時における各試験体の損傷状況

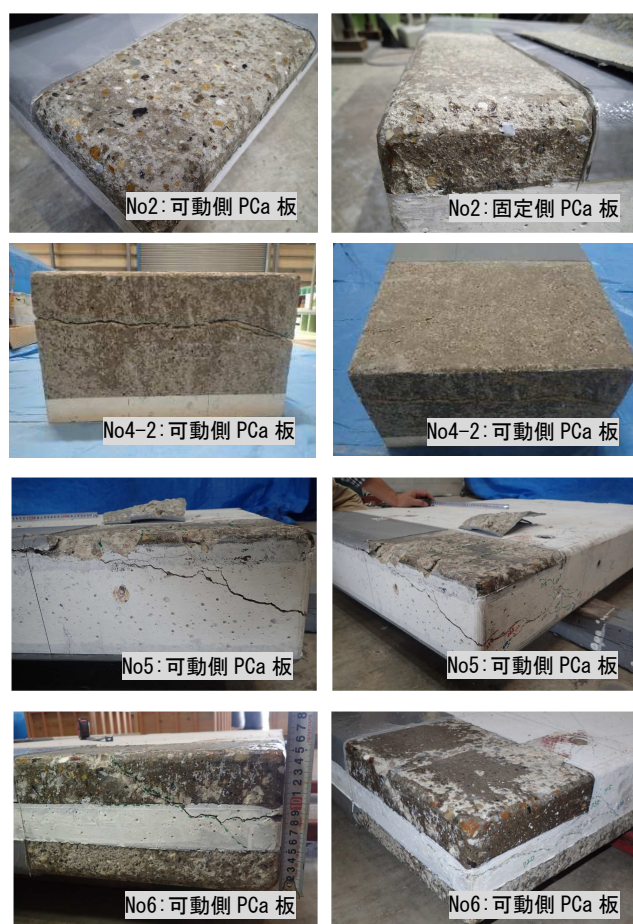


写真-2 実験終了後の接触部分の損傷状況

7) No5 : ①8 サイクル (1 回目 : $7.0P_{PI}=60.2\text{kN}$) で可動側 PCa 板上部にひび割れが発生した。また、この時の水平変位は 20.66mm で可動柱回転角 $\approx 1/205$ 相当であった。②8 サイクル (1 回目) 以降においては変形が進むにしたがって直線的に荷重が増大する傾向を示し、最終的には 12 サイクル (1 回目 : $16.0P_{PI}=137.6\text{kN}$) で可動側 PCa 板上部に発生したひび割れが大きく進展したことで可動側 PCa 板のファスナーの曲げ変形が大きくなったことが目視で確認されたため載荷を終了した。また、この時の水平変位は 29.74mm で可動柱回転角 $\approx 1/98$ 相当であった。

8) No6 : ①履歴性状は No5 とほぼ同じ結果を示した。以上の結果、No5 と No6 は載荷中にコンクリートが剥落する状況は確認されなかった。更に、実験終了後に試験体の損傷状況を確認すると、写真-2 で示しているようにポリウレア樹脂がコンクリートの剥落を防止していたことが確認できた。また、No5 と No6 を比較すると、履歴性状および損傷状況共に同じ結果を示していることから、クリアランス部分に対する補強方法の違いによる履歴性状および損傷状況への影響は小さいものと考察される。

よって、すべて試験体の履歴性状と損傷状況の結果、PCa 板表面に対してポリウレア樹脂で補強することで剥落は十分に抑制できるものと考察される。

4.2 耐力評価

実験結果で得た4.1節図-5で示している水平荷重-水平方向変位関係を基に、PC板同士が接触した以降の各サイクルの1回目の最大値を結んだ荷重変形曲線を図-6に示す。また、耐力上昇率と累積エネルギー倍率を表-5に示す。ここで、表-5に示す耐力上昇率はポリウレア樹脂で塗膜補強していない試験体で得た剥落荷重に対する各試験体の最大荷重の比率を示している。また、累積エネルギー倍率は図-6の荷重変形関係を基にポリウレア樹脂で塗膜補強していない試験体で得た剥落荷重に到達した時点の累積エネルギーに対する各試験体の変形が15mm

(クリアランス15mm+各試験体の変形15mm=30mm：可動柱回転角 $\approx 1/141$)までの累積エネルギーの比率を示している。この結果、耐力上昇率と累積エネルギー倍率については、ポリウレア樹脂を用いた塗膜補強の有無による差異は無い結果であった。ただし、段差有り形状のNo3-2とNo4-2の比較と段差無し形状のNo5とNo6においては履歴に差異が見られる。No3-2とNo4-2の両試験体は段差有り形状のNo3-1とNo4-1を再利用した試験体であることから、特にNo3-2はNo3-1の実験時におけるコの字壁の曲げひび割れによる損傷を大きく受けた影響によるものと考察される。また、No5とNo6は塗膜形状の違いを比較した試験体であるが、部分的に塗膜補強を施したNo5の方が累積エネルギー倍率が大きい結果であった。しかしながら、その差は比較的小さいことを踏まえると本実験では塗膜補強の違いがPC板の性能に及ぼす影響は小さいものと考察される。よって、本実験では塗膜補強を施したことによる耐力上昇は比較的小さいものと考察される。ただし、すべての試験体は、PC板同士が接触した以降は剥落の有無や塗膜補強の有無に関係なく耐力上昇することを踏まえると、PC板を取付けているファスナーに対する影響は懸念事項として挙げられる。

5. まとめ

本研究は地震時の変位によって建物が変形する場合におけるPCa板の変形性状と剥落対策を施した場合の補強効果を把握し、剥落対策を実用化することを目的としてクリアランスを有するPCa板を対象とした要素実験を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 設計目地寸法以上の変形が作用した場合には、剥落対策を施していないPCa板同士が接触するとコンクリートが早期に剥落する。
- 2) 設計目地寸法以上の変形が作用した場合には、剥落対策としてポリウレア樹脂でPCa板表面を塗膜補強すると、PCa板同士が接触してもコンクリートの剥落を防止することができる。
- 3) PCa板同士が接触する近傍に対して部分的にポリウレ

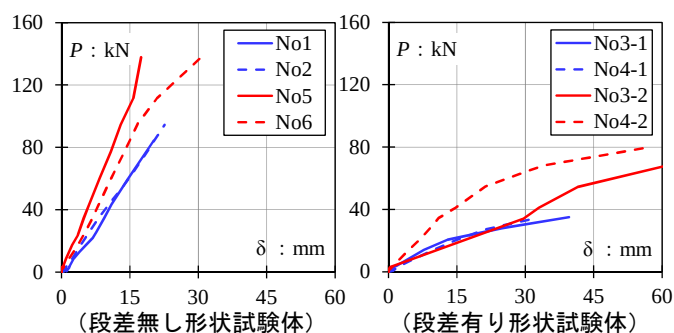


図-6 荷重変形関係

表-5 耐力上昇率と累積エネルギー倍率

試験体名	最大荷重 P_{max} kN	剥落荷重 P_p kN	耐力 上昇率 P_{max}/P_p	累積エ ネルギー ΣW kN・mm	剥落時の累積 エネルギー ΣW_{pp} kN・mm	累積エネ ルギー倍 率 $W_p = \Sigma W / \Sigma W_{pp}$
No1	84.2	8.6	9.79	418.26	7.89	53.00
No2	94.4	8.6	10.98	463.75	7.89	58.77
No3-1	35	14	2.50	190.72	57.80	3.30
No3-2	67.9	14	4.85	158.89	57.80	2.75
No4-1	34.4	14	2.46	158.80	57.80	2.75
No4-2	80.1	14	5.72	340.67	57.80	5.89
No5	137.9	8.6	16.03	809.93	7.89	102.64
No6	136.8	8.6	15.91	607.70	7.89	77.01

ア樹脂を塗膜するだけで十分に剥落防止効果がある。

- 4) ポリウレア樹脂による塗膜補強方法は、目地部分の小口(目地内)を巻き込む場合と巻き込まない場合における履歴性状および破壊性状に差異は無く、共に剥落防止効果が確認できた。
- 5) ポリウレア樹脂による塗膜補強方法による耐力上昇は比較的小さい。

以上の結果、ポリウレア樹脂を用いた塗膜補強は剥落対策に対して十分な効果を期待できることが確認できた。また、建物の水平変形が大きくなるとPCa板同士の接触に伴って、ポリウレア樹脂による塗膜補強の影響に関係なくPCa板が負担する荷重が増大することから、PCa板を取付けているファスナーへの影響が大きくなる。

よって、ポリウレア樹脂による塗膜補強の有無に関わらずファスナーに対する検討も重要であることが確認できた。

参考文献

- 1) 佐々木他：アンカーピンとネットを併用した外壁改修工法に関する研究(その1～5) 工法の概要と施工物件の実態調査、日本建築仕上学会・1993年研究発表論文集、1993.10, pp169-188
- 2) 渡辺博司他：アンカーピンとネットを併用した外壁改修工法に関する研究(その6～8) 温冷繰返後の下地圧縮歪への追従性試験、日本建築仕上学会・1994年研究発表論文集、1994.10, pp.065-076