

論文 アンボンド PC 鋼材圧着工法と剥離性接合目地によるリユース架構に関する基礎研究

巽 英明^{*1}・中塚 侑^{*2}・溝口 茂^{*3}

要旨：本研究は，载荷によって新たに曲げひび割れが入らない大きさを持つコンクリートブロック，プレストレス力の解放によってブロック単体に復させる剥離性接合目地，及びエネルギー吸収性能を高める座屈抑止用鞘鋼管付き普通鉄筋を用いた付加ダンパー等で構成される，アンボンド PC 圧着工法によるリユース型 PC 架構に関する基礎研究である。

キーワード：リユース架構，アンボンド PC 鋼材，圧着型梁，剥離性，接合目地

1. はじめに

循環型社会からコンクリートを見た場合，材料としてのリサイクルについての研究は行われているが，構造部材・架構としてのリユースに関する研究はほとんどない。その理由として，重量の大きいコンクリート部材の輸送・揚重の課題やリユースを可能とする接合方法に関する資料がないことなどが考えられる。

本研究は，軽微な輸送・揚重手段に対応する適切な大きさをもつ，高耐久プレキャストコンクリートブロックを，既報¹⁾で示した剥離性目地を介して，アンボンド PC 鋼材によるプレストレス力の導入・解放で圧着・解体できる，さらに地震時のエネルギー吸収を目的として座屈抑止用鞘鋼管付き普通鉄筋をダンパー材として付加したリユース架構に関する基礎研究である。

2. 実験概要

2.1 試験体計画

試験体は以下の条件を満足するように計画した。

1. 部材に使用するコンクリートブロックは曲げひび割れ間隔に関する研究²⁾で

明らかにされた，曲げひび割れが新規に入らないブロックの大きさを有する。すなわち図-1に示すように，梁せいの長さを持つブロックを使用する。

2. アンボンド PC 圧着工法に関する研究結果³⁾に従って，高復元性を確保するために式(1)で示すプレストレス係数 p を 0.75 以上の約 0.85 とした。ここで， T_{py} は PC 鋼材の降伏荷

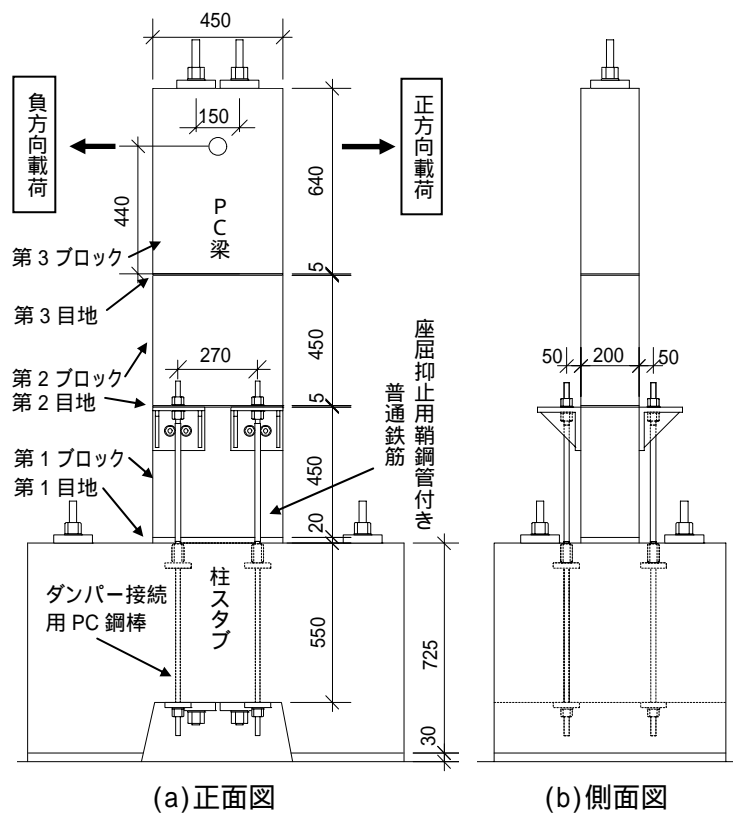


図 - 1 試験体概要図

*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (正会員)

*2 大阪工業大学 工学部空間デザイン学科教授 工博 (正会員)

*3 高周波熱錬(株)製品事業部 (正会員)

重, T_{ry} は普通鉄筋の降伏荷重を表している。

$$\lambda_p = \frac{T_{py}}{T_{py} + T_{ry}} \quad (1)$$

3. ダンパー材として使用する普通鉄筋が圧縮・引張に対し履歴エネルギーを吸収できるように、普通鉄筋の座屈を鋼管で抑止する仕様とした。
4. 図 - 1 中に示すスタブ内に配置しているダンパー材接続用の PC 鋼棒には、普通鉄筋の引張力によって伸びないように、普通鉄筋の耐力以上の緊張力を予め与える。
5. エネルギー吸収材としての普通鉄筋を有効に作用させるため、図 - 1 に示す第 2 目地においてひび割れ(目地の開き)が発生しないように設計した。すなわち、式(2)で示されるように、第 1 目地位置のモーメントが式(3)で与えられる M_1 時に、第 2 目地位置のモーメントがアンボンド PC 鋼材による曲げ耐力(M_p)を上回らないように普通鉄筋量を決めた。ここで、アンボンド鋼材であるため、 M_p の算出にあたっては鋼材張力を P_0 とし、普通鉄筋による曲げ耐力 M_r の算出には降伏荷重 T_{ry} を用いた。応力中心間距離 j_p, j_r はそれぞれ $(7/8) d_p$ および $(7/8) d_r$ とした。また、式中の a はせん断スパン比を示す。

$$M_p > \frac{(a-1)}{a} M_1 \quad (2)$$

$$M_1 = M_p + M_r \quad (3)$$

$$M_p = P_0 \cdot j_p \quad (4)$$

$$M_r = T_{ry} \cdot j_r \quad (5)$$

6. 第 1 ブロックには、普通鉄筋の引張力による曲げせん断ひび割れが生じる恐れがあるため、

せん断補強筋を配筋する。なお、第 2 ブロックはひび割れが生じないとするため無筋コンクリートとした。

2.2 材料特性

表 - 1 および 2 に試験体製作に使用したコンクリート・目地モルタル・PC 鋼棒・普通鉄筋の材料特性を示す。また、座屈抑止用鋼管は、内径 18.2mm, 厚さ 2mm, 普通鉄筋とのあきが 2.6mm のものを用いた。

2.3 載荷及び測定方法

載荷は、図 - 1 中に示す方向に正負交番繰り返し載荷を、状態が 2 種に異なる試験体について行った。まずダンパーを取り外した状態の試験体(以下、N-UPC と略記)に対し部材角 R が 0.4%(1/250), 0.7%(1/150), 1.0%(1/100) を各載荷段階で各 3 回の繰り返し載荷を行い、その後同一の試験体にダンパーを取り付け(以下、D-UPC と略記)、再び $R=0.4%, 0.7%, 1.0%, 1.3%(1/75), 2.0%(1/50), 3.3%(1/30)$ の載荷段階で各 3 回の繰り返し載荷を行った。

荷重はジャッキに取り付けたロードセルにより、部材角は載荷点に取り付けた変位計によってそれぞれ測定した。また、圧縮縁ひずみ度および中立軸位置は、図 - 2 に示すように、コンクリート中に埋め込んだネジ棒を介して取り付け変位計の測定値から、圧縮側の変位と引張側の変位が柱・梁接合面中立軸を中心として変形適合すると仮定して求めた。目地部の平均付着応力(σ_v)-ずれ変形(S)関係を調べるため、第 1・第 2 目地の中央部分に変位計を取り付けた。載荷直前・載荷中の PC 鋼材張力を調べるため、梁

表 - 1 コンクリート・目地モルタルの材料特性

	コンクリート	目地モルタル
圧縮強度	80.0 N/mm ²	51.3 N/mm ²
割裂強度	6.38 N/mm ²	3.46 N/mm ²
ヤング係数	3.77E+04 N/mm ²	1.92E+04 N/mm ²

表 - 2 PC 鋼棒・普通鉄筋の材料特性

	PC 鋼棒	普通鉄筋
外径	26 mm	13 mm
降伏応力度*	1002 N/mm ²	323 N/mm ²
弾性係数	2.01E+05 N/mm ²	2.08E+05 N/mm ²
ひずみ硬化開始点		3.08 %

*0.2%永久ひずみ相当応力

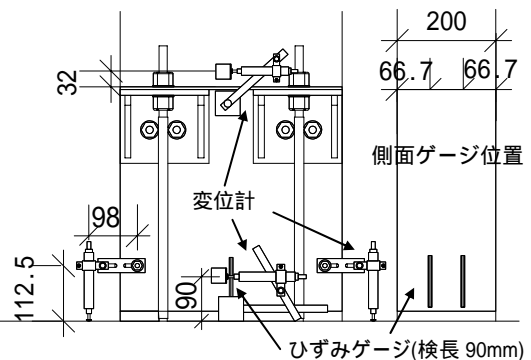
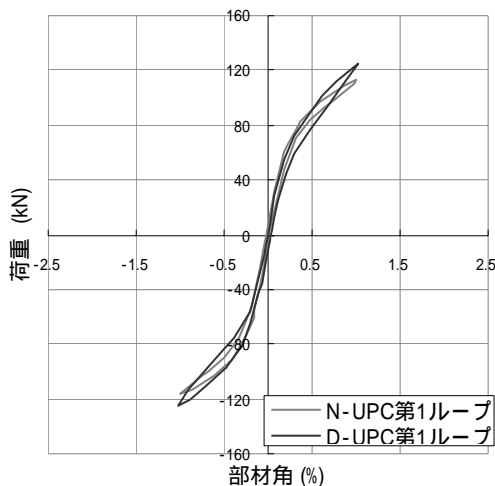


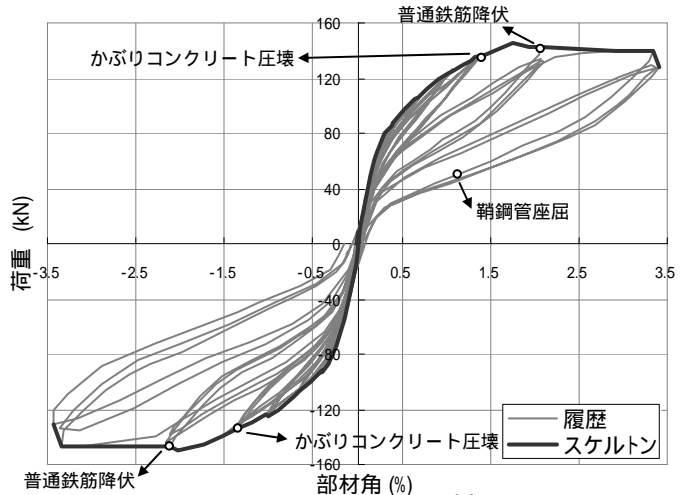
図 - 2 測定装置取り付け概要

表 - 3 各部の損傷過程

部材角	コンクリート	圧着目地	目地開口幅	PC鋼材	普通鉄筋
0.4%	$\epsilon = 0.07\%$	損傷なし	1.0mm	弾性	弾性
0.7%	$\epsilon = 0.12\%$	縦ひび割れ発生	2.0mm	↓	↓
1.0%	$\epsilon = 0.17\%$, 縦ひび割れ発生		3.5mm		
1.3%	かぶりコンクリート圧壊	↓	4.5mm	↓	↓
2.0%	↓		7.0mm		
3.3%	↓		18.0mm		



(a) R=1.0%時での履歴ループの比較



(b) D-UPC の Q-R 関係

図 - 3 荷重(Q) - 部材角(R)関係

部・スタブ部の第 1 目地付近に検長 1mm のひずみゲージを鋼材周方向の対称位置に貼付した。载荷中の普通鉄筋のひずみ度を測定するため、検長 1mm のひずみゲージを鋼材周方向の対称位置に貼付した。また、圧壊以前のコンクリートひずみを測定するため、図 - 2 に示す位置に検長 90mm のひずみゲージを貼付した。

3. 実験結果

3.1 部材の損傷過程と荷重 - 変形関係

表 - 3 は、目視および測定データによる、コンクリート、圧着目地部、目地開口幅および PC 鋼材と普通鉄筋の損傷状況をまとめたものである。まず、部材圧縮側コンクリート・圧着目地は $R = 0.7\%$ 時に至るまで共に健全であり損傷は見られなかった。 $R = 1.0\%$ 時では、圧縮側コンクリートに組み立て鉄筋に沿う材軸方向のひび割れが、また、圧着目地部には圧縮縁に近い側面位置で圧縮応力による横膨張ひずみに起因すると推測される縦ひび割れが観察された。 $R = 1.3\%$ 時ではかぶりコンクリートの圧壊が確認され、 $R = 2.0\%$ 時にはコンクリートと目

地部におけるそれら現象が進展した。一方、部材引張側の第 1 目地部目開きは、 $R = 0.4\%$ 時に於いて既に 1.0mm 生じ、 $R = 2.0\%$ に至るまでほぼ比例的に進展していった。 $R = 3.3\%$ 時には、PC 鋼材が降伏したため、急激に開口幅が増大した。この時、第 2 目地において目地の開きは目視で観察されなかった。

図 - 3(a)は $R = 1.0\%$ における、N-UPC および D-UPC の荷重(Q) - 部材角(R)関係を比較したものである。同図によれば、表 - 3 から分かるように、コンクリート、PC 鋼材および普通鉄筋が弾性域にあるため、極めて高い復元性を示している。また、付加された普通鉄筋量が余り大きくないため、両試験体の初期剛性には余り差は見られないが、D-UPC の $R = 1.0\%$ 時耐力は N-UPC のそれに比べ、実験での普通鉄筋ひずみ測定値から算出した耐力増分 9.1kN だけ大きかった。図 - 3(b)に D-UPC の繰り返し Q-R 関係を示すが、細線は繰り返し履歴曲線、太線はスケルトンカーブを表している。同図によれば、 R が 0.7% 以下の小さい範囲では、構成材料がいずれもほぼ弾性であるため、アンボンド PC 鋼材を用いた部材

の特徴である顕著な高復元性を示している。 $R = 1.3\%$ ではコンクリートの圧壊が観察されたが、損傷は写真 - 1 の様に軽微なものであった。これに対し、 $R = 2.0\%$ 時では普通鉄筋の降伏によって履歴ループのふくらみが急増したが、復元性はなお高いものであった。PC 鋼材の降伏も生じた $R = 3.3\%$ では、ふくらみが一層増加した。



写真 - 1 第1ブロック
圧壊状況 ($R = 1.3\%$)

3.2 復元力, エネルギー吸収性能

図 - 4 は N-UPC, D-UPC の各ループにおける残留変形率の部材角に対する変化を示したものである。ここで、残留変形率とは荷重が零時の残留変形量を当該荷重ステップの除荷開始時変形量で除した値をいい、各ループにおける正側と負側の平均値を示している。また、 $R = 0.4\%$ 時は残留変形量も除荷開始時変形量も共に小さく、データのばらつきが大きく影響するため、図では $R = 0.7\%$ 以降のデータを示している。同図によると、 $R = 3.3\%$ 時を除いて、概ね 2%以下に留まっており、高復元性というアンボンド PC 鋼材を用いた PC 部材の特徴がよく現れている結果となった。 $R = 3.3\%$ 時の残留変形率は繰り返し荷重によって増加する傾向にあるが、これは PC 鋼材が降伏したことによる残留変形であると推測される。

図 - 5 は各ループの等価粘性減衰定数 (heq) の部材角に対する変化を示している。 heq は荷重 - 変形関係によって得られるデータを区分的線形とし求めている。また、同図は図 - 4 と同様の理由により $R = 0.7\%$ 以降のデータを示している。

同図によると、N-UPC の heq は R に関わらず概ね 2%程度で一定値を保っているのに対し、D-UPC の heq は R の増大に伴い増加する傾向がみられた。特に、 $R = 2.0\%$ 時における第 1 ループの heq は急増するが、これは表 - 3 で示されたように、普通鉄筋の降伏に起因する現象である。次に、鉄筋の塑性化が一層進行すると予想される R

$= 3.3\%$ 時で heq の増加率が減少しているが、これは写真 - 2 に示すように、 $R = 2.0\%$ 時には観察されなかった圧縮側 (写真左側) の鞘鋼管付き普通鉄筋の座屈が $R = 3.3\%$ 時のループで生じたためと考えられる。写真 - 3 は、写真 - 2 と異なって屈曲が明確でなかった鞘鋼管付普通鉄筋を試験終了後に鋼管を開いて調べたものであるが、普通鉄筋が鋼管内で波打っている状態が観察され、鞘鋼管が座屈抑止に有効であったことがわかる。

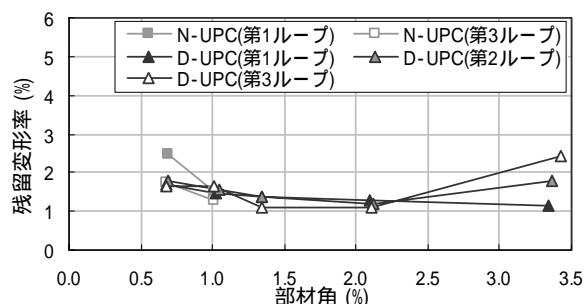


図 - 4 残留変形率の比較

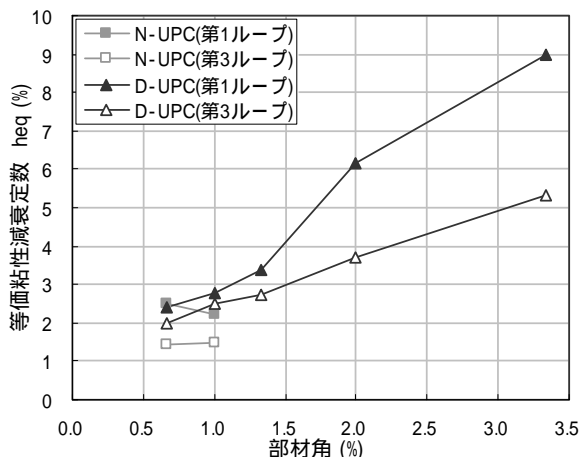
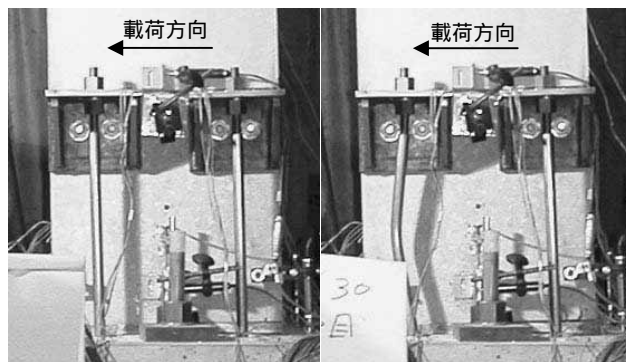


図 - 5 等価粘性減衰定数 heq の比較



(a) $R = 1/50$ (b) $R = 1/30$
写真 - 2 鞘鋼管付き普通鉄筋の様子



写真 - 3 鞘鋼管内の普通鉄筋の様子

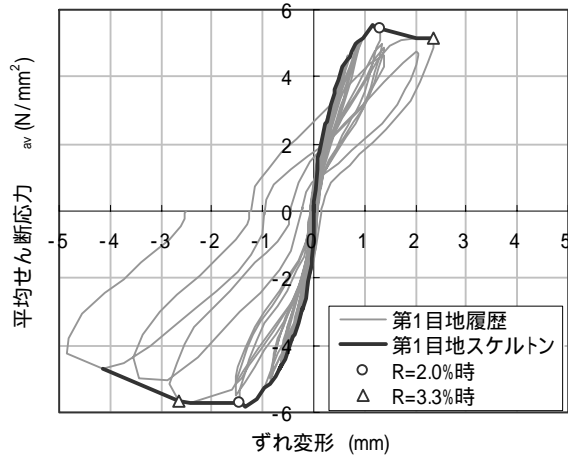


図 - 6 第 1 目地の τ_{av} -S 関係

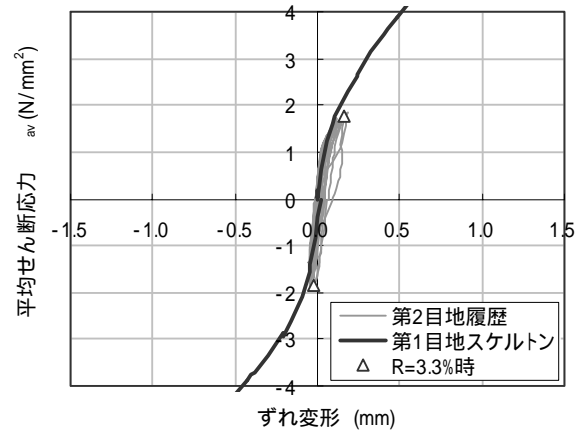


図 - 7 第 2 目地の τ_{av} -S 関係

3.3 剥離性接合目地部のせん断伝達性能

図 - 6 に第 1 目地の平均せん断応力 (τ_{av}) - ずれ変形(S)関係を, 図 - 7 に第 2 目地の τ_{av} - S 関係を示す。このとき, τ_{av} は, 荷重を圧着面積で除した値であるが, 圧着面積としては第 1 目地では中立軸深さに梁幅を乗じたもの, 第 2 目地では全断面からシーすなどの断面欠損を除いた面積を用いている。第 1 目地についての図 - 6 によると, $R=2.0\%$ 以下の繰返し載荷では, 荷重が零時の滑り量は殆ど零に戻り, 剥離性目地はほぼ健全であったと推測される。これに対し $R=3.3\%$ 時では, 目地部のせん断応力は 6N/mm^2 程度

の最大値後から低下し, また, ずれ変形は繰返し載荷によって増加する傾向が見られ, 特に負側では漸増破壊の状況となっている。

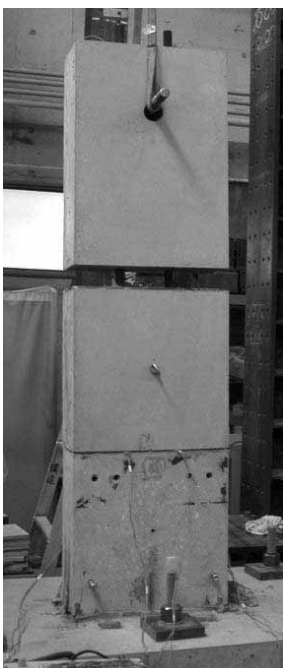
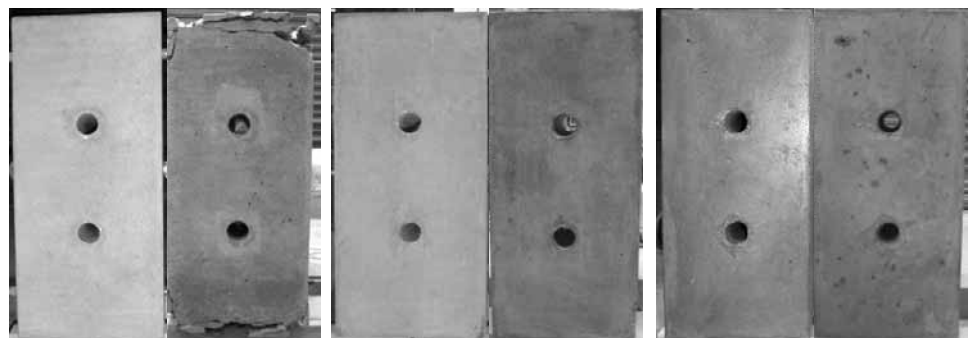


写真 - 4 解体の様子



(a) 第 1 目地接合面

(b) 第 2 目地接合面

(c) 第 3 目地接合面

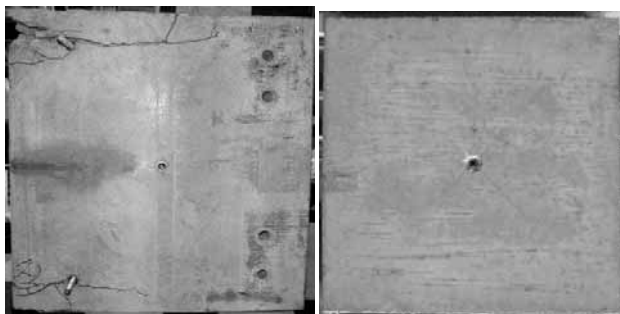
写真 - 5 試験前後における接合面の状態 (左: 試験前, 右: 試験後)

この理由として, 第 1 ブロックの圧壊の進展による圧着面積の減少などが考えられる。第 2 目地についての結果を示した図 - 7 によれば, 図中に併記した第 1 目地のスケルトンカーブから分かるように, τ_{av} - S 関係は第 1 目地の同関係とほぼ同じと考えられる。また, $R=3.3\%$ 時の τ_{av} が 2N/mm^2 程度であることから, 同目地部は目開きのないほぼ全断面有効の状態であると推測される。

3.4 部材の解体とコンクリートブロックのリユース性

実験終了後, プレストレス力を解放し部材の解体を行った。各ブロックは写真 - 4 に示すようにブロックの自重で分離できる程の良好な剥離性であった。写真 - 5 に試験前後の接合面の状態を示す。目地モルタルは目地剥離後, 微量のセメント成分が接合面に付着していたが, 布で擦り取る程度で試験前の平滑な状態に戻すことが出来た。

写真 - 6 は実験終了後の第 1・第 2 ブロックの損傷を側面で表したものである。第 1 ブロックでは曲げひび割れ、せん断力による斜めひび割れは入らないものの、圧壊による損傷を受けている。しかし、 $R=0.7\%$ まで同ブロックには全く損傷が観察されなかったため、この程度の変形までは全てのブロックが無補修でリユース出来ると思われる。一方、無筋コンクリートである第 2 ブロックは、第 1 ブロックに損傷が集中するので、 $R=3.3\%$ の変形を経験後においても計画通り、曲げひび割れ・せん断ひび割れ・圧壊などの損傷は全く観察されなかった。第 3 ブロックも第 2 ブロックと同様、無損傷であった。



(a)第 1 ブロック (b)第 2 ブロック
写真 - 6 試験後のブロックの損傷

4. まとめ

剥離性接合目地を介してアンボンド PC 鋼材圧着工法によってコンクリートブロックを一体化し、エネルギー吸収用の鞘鋼管付き普通鉄筋によるダンパーデバイスを外付けした PC 梁部材に関する実験を行い以下の成果を得た。

- (1) 柱スタブと接する第 1 ブロックは、部材角 1.0%で材軸に沿う軽微なひび割れ、1.3%でコンクリートの圧壊が観察されたものの、3.3%の大変形に耐えた。無筋コンクリートの第 2 ブロックには新規のひび割れは全く発生しなかった。
- (2) 実験終了後のプレストレス力の解放による架構の解体時、ブロックの接合面は殆ど初期の状態を保っており、剥離性接合目地の優れ

た性能が実証された。

- (3) 鞘鋼管付き普通鉄筋を外付けすることによって、プレストレス係数 p を 0.85 程度とした PC 架構の荷重 - 変形関係は、大変形時でも零に近い変形まで復する高復元性と、5~9%程度の等価粘性減衰定数となるエネルギー吸収能を示した。
- (4) 鞘鋼管付き普通鉄筋は、実験終了後の調査で波形変形が観察され、鋼管の座屈抑制効果によって圧縮にも有効に作用したと推測された。

[謝辞]

本研究は平成 17 年度科学研究費基盤研究 C (一般)「付着制御が拓くプレレストコンクリートの新技術に関する基礎研究」(研究代表者：中塚侑，大阪大学大学院工学研究科建築工学専攻助教授，課題番号：17560508)の一部として行った。また、試験体製作については(株)ピーエス三菱，目地材については電気化学工業株式会社の多大なる御援助を賜った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 巽英明，中塚侑，島田崇博：リユース PC 建築物を対象とした剥離性接合目地のせん断特性に関する実験研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2 分冊，構造，pp.785-788，2005.9
- 2) 小島一高，中塚侑，坂田博史：プレレスト(鉄筋)コンクリート曲げ部材のひび割れ性状に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.2，pp.703-708，2004
- 3) 菅田昌宏，中塚侑：アンボンド PC 圧着工法によるエネルギー吸収型高復元性部材の荷重 - 変形関係に関する実験的検討，日本建築学会構造系論文集，第 584 号，pp.153-159，2004.10