

ハイブリッドプレキャスト耐震壁の水平加力実験 — デジタル画像相関法による計測 —

著：Brian J.Smith, Michael J.McGinnis, Yahya C.Kurama
訳：高津比呂人

本論文では、地震地域で使用するための“ハイブリッド”プレキャストコンクリート耐震壁（Hybrid Precast Concrete Shear Wall：以下、HSW とする）の挙動と設計に関する現在進行中の研究プロジェクトを紹介する。ここでの HSW とは、水平力に対して、普通鉄筋と高強度のアンボンド PC 鋼材の併用により抵抗するものである。普通鉄筋は引張・圧縮で降伏するように設計されており、地震エネルギーを吸収する。アンボンド PC 鋼材によりセルフセンタリング機構が発揮され、大地震後の壁の水平残留変位を低減する。PC 鋼材と普通鉄筋の両方が耐震壁の水平強度に寄与する効率の良い構造である。

本論文では、実物の 0.4 倍スケールの HSW 試験体の繰返し水平加力実験結果について報告する。その挙動は、従来の計測システムと同時にデジタル画像相関法を用いて計測を行っており、これらの計測方法は、ベースパネルと基礎の間のジョイント部分を詳しく調査するために用いた。実験結果から、HSW システムでは壁が剛体として挙動し、基礎梁とベースパネルの間の水平接合部の開閉による変形が支配的であることが確認された。

キーワード：デジタル画像相関法、水平接合部、ハイブリッド耐震壁、プレキャストコンクリート、耐震実験

1. はじめに

コンクリートの耐震壁は、建物に作用する水平荷重の大部分を負担する。本研究における HSW の構成は、図 - 1 に示すように、長方形の壁パネルを積み重ねることによって構築される。この構造システムは高品質でかつ施工が易しく、セルフセンタリング機構（大地震後に地震前の位置に復元する）と十分なエネルギー吸収性能により優れた耐震性能を示す。

壁パネルと基礎間の PC 圧着力は、ダクト内に配置されたマルチストランドケーブルによって導入される。鋼材とコンクリート間の付着を生じさせないようにするため、ダクト内のグラウトは実施しない。したがって、ストランドは端部のアンカーのみで定着されている。ベ-

スパネルと基礎の間の水平接合部に隙間が生じるので、大きな水平変形を受けても壁パネルに発生する損傷はわずかである。除荷時には、PC 鋼材の復元力によってこの隙間が閉じるため、壁の残留変位はほとんどゼロとなる。アンボンド PC 鋼材を使用することで、ストランドの降伏が遅れるので、コンクリートに伝達する引張応力が減少（すなわち、ひび割れが減少）する。基礎の水平接合部を貫通して配置されている普通鉄筋は、ベースパネルと基礎の隙間が開閉することによって降伏し、エネルギー吸収するように設計されている。普通鉄筋は、低サイクル疲労破壊を防ぐために、あらかじめ決めておいた長さの付着をプラスチックスリーブで覆うことで除去している。PC 鋼材と普通鉄筋の両方が水平力に抵抗する、効率的な構造となっている。

HSW は優れた性能を示すにもかかわらず、ACI 318⁽¹⁾ の第 21 章（耐震構造に関する規定）の要件を満たしていないため、このままでは実構造物に適用できない。適用するには、実験もしくは解析によって ACI 318 規準に沿った一体打ちのコンクリート構造と同等以上の強度やじん性をもっていることを証明する必要がある。

“特別な”鉄筋コンクリート耐震壁として HSW を評価する方法として、ACI ITG-5.1⁽²⁾ に従って評価する方法がある。

2. 実験の目的

このプロジェクトの主な目的は、HSW 構造を実験的・解析的に評価し、ACI ITG-5.1 の条件を満たすことを検証することであり、新システムの (1)耐震設計方法 (2)解析モデルと設計ツール (3)実用的なガイドラインを構築することである。

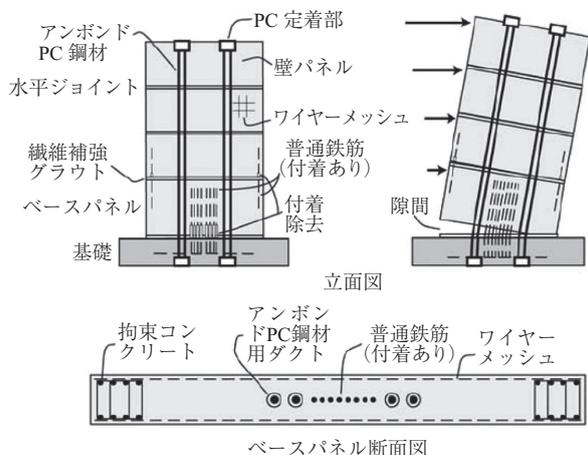


図 - 1 ハイブリッドプレキャストコンクリート耐震壁

○ 海外文献 ○

本論文では、HSWのベースパネルと基礎の間の水平接合部の挙動に焦点をあてた実験について報告しており、ここで示す応答結果は、デジタル画像相関法を用いて得られたものである。

3. 実験概要

本論文で報告するのは、4階建て、建築面積約3900m²の駐車場ビルを想定した6つのHSW試験体のうちの1つである。図-2に試験体を示す。

試験体は、ACI ITG-5.1の最小縮小倍率の制限を満たす0.4倍のものとした。同じく要件を満たすため、壁板は2つに分割して製作した。下部壁パネルは、ベースパネルを模擬し、上部壁パネルは2～4階を模擬したものである(上階の壁パネル間のジョイントでは隙間が生じないので、単一のパネルとした)。壁板の幅は2.43m、アスペクト比は2.25とした。ベースパネルの高さは1.45m、厚さは159mmとした。PC鋼材は壁中央から南北229mmの位置にそれぞれ3本の直径13mmの鋼材(設計引張強度1862MPa)を配置した。アンボンド長さは、基礎梁下端から壁の頂部までの5.48mとした。ベースパネルと基礎梁のジョイントには、直径19mmの普通鉄筋(測定降伏強度448MPa)4本を、それぞれ壁中央から南北に76mmおよび152mmの位置に配置した。ベースパネルと上部壁パネルのジョイントには、直径19mmの普通鉄筋を両端部にそれぞれ1本配置した。水平力は、基礎梁天端から3.66mの位置に加力した(せん断スパン比1.5)。

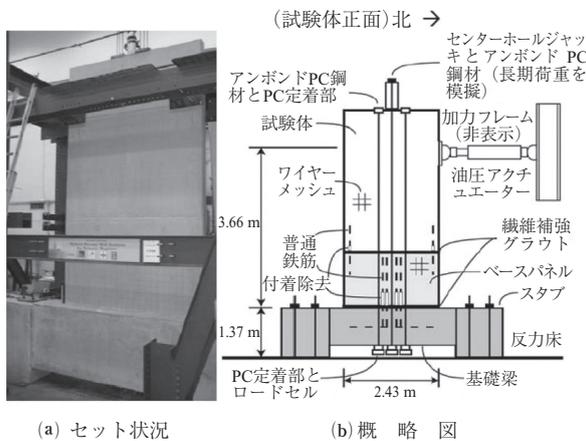


図-2 試験体の概要

4. 計測システム

実験では、2つの異なる計測システムを用いた。1つは、従来の変位計やロードセルおよびひずみゲージを使った方法(図-3)で、もう一方が、3次元デジタル画像相関法(3D-DIC: 3-Dimensional Digital Image Correlation)を使った非接触の計測方法である。

図-4に3D-DICシステムの概要を示す。3D-DICシステムは2つのカメラから構成されており、面内および面外変形を計測することができる。ここでは、3D-DIC



図-3 変位計による計測

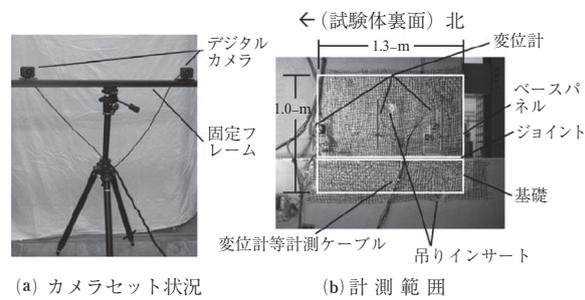


図-4 3D-DICシステム概要

システムを用い、図-3に示す白く塗装されたベースパネルの約1/4を計測した。3D-DICシステムでは、目標物の表面にストキャスティック・パターンと呼ばれる不規則な模様を施し、加力の前後で立体写真が保存される。保存されたデジタル画像は、数ピクセル四方のファセット(訳者注:変形前の画像において規準となる微小領域)に分割される。このファセットを、連続したパターンとして追跡し、写真を用いた三角測量法の原理により、3次元の変位やひずみに変換する。3D-DICの精度は、計測視野の大きさに依存しており、ここでは幅1.3m、高さ1mの視野で平面内の変形の誤差は約±30ミクロンである。

このシステムの利点は、設置が簡単で、全領域にわたって計測が可能であることである。逆に欠点は、かぶりコンクリートがはく落すると計測できなくなること、試験体内部の計測ができないことである。

5. 実験結果

試験体への加力は、各サイクル3回ずつの正負繰返し漸増載荷で実施した。正側の最大変形角は1.9%、負側は-1.55%で、いずれも壁脚部の拘束コンクリート部分の圧壊が生じた。図-5にベースシアールと変形角の関係を示す。この試験体は、コンクリート強度が設計値を下回ったこと、拘束コンクリート部分のフープの配筋上の不備により当初の目論見よりも小さな変形角で破壊した。

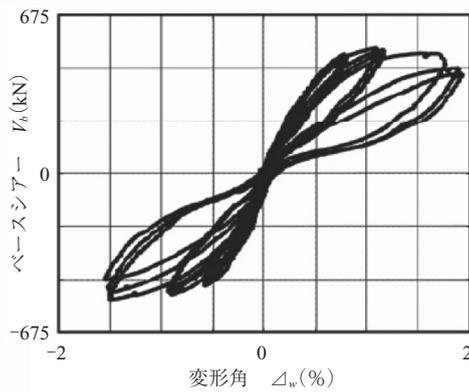


図 - 5 ベースシアアと変形角の関係

5.1 ベースパネルのひずみ分布

図 - 6 に、3D-DIC で計測した変形角 0.25 %、0.40 %、0.80 % 時の鉛直方向ひずみ（軸ひずみ）分布を、その際の試験体の写真とともに示す。ひずみ分布のうち一部、白く抜けている部分は、変位計を設置していた位置である。

変形角 0.25 % のときに、壁パネルの先端で圧縮ひずみが 1 525 μ に達した。変形角 0.80 % では、軸ひずみが増加していること、塑性ヒンジ領域が斜めひび割れにより区切られていることが分かる。変形角 0.40 % での写真とひずみプロットより、3D-DIC でひび割れ発生とその位置を優れた精度で追跡できていることが分かる（注：ひずみプロットの赤い領域はひび割れ幅を表すものではない）。

5.2 ベースパネルのせん断変形

図 - 7 (a) に 3D-DIC（点線）と変位計（実線）で計測したベースパネルのせん断変形角の推移を示す。3D-DIC での計測は、ベースパネルの約 1/4 の部分について実施し、変位計での計測はベースパネル全体で実施した。想定とおり 3D-DIC の計測部分に予想とおり変形が集中している様子が分かる。しかしながら、全体変形に占めるせん断変形の割合は、図 - 7 (b) に示すとおり非常に小さいことから、全体変形がベースパネルと基礎梁の間の隙間が開くことによって生じ、壁パネルはほぼ剛体として挙動していたことが分かる。

5.3 隙間の開閉とベースパネルの中立軸位置

図 - 8 (a), (b) に 3D-DIC で計測した変形角 0.8 % の 1 サイクル目の鉛直および水平変位を示す。変形は、剛体回転がほとんどを占めており、試験中に測定されたせん断ひずみが小さいことと一致した結果となった。図 - 9 (a) に、3D-DIC と変位計で計測した壁両端の基礎梁とベースパネルとの開口変位の比較を示す。図より、2つのシステムでの計測値はほとんど一致していることが分かる（3D-DIC の計測は南端だけだったため、北端の計測結果は、南端のものを外挿した値とした）。図 - 9 (b) にはベースパネル脚部（基礎から約 25 mm 上方）の鉛直変位の分布を示す。変位の変動開始位置が中立軸位置に相当する。

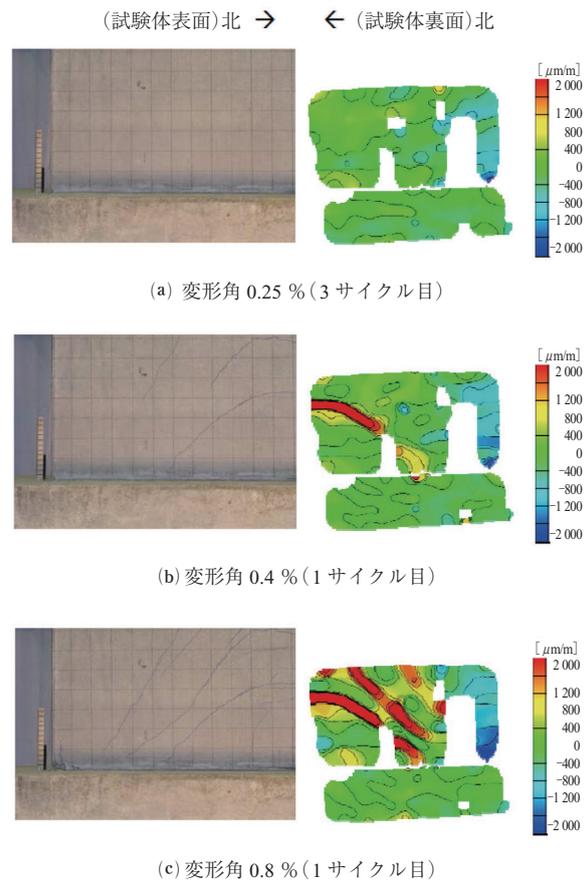


図 - 6 鉛直方向ひずみの分布

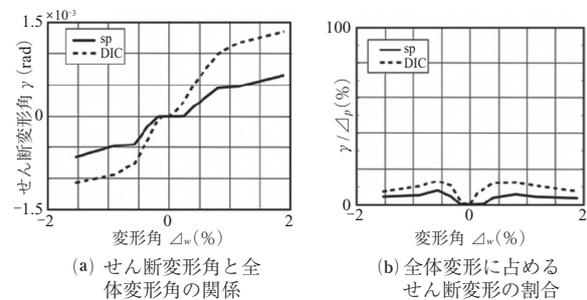


図 - 7 ベースパネルのせん断変形

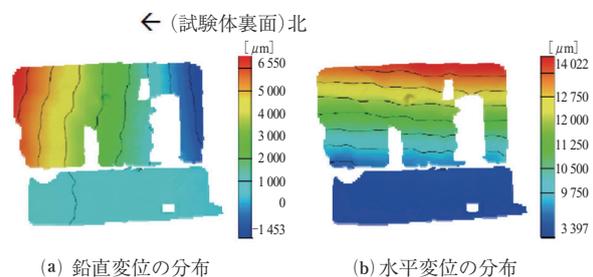


図 - 8 3D-DIC で計測した変位の分布（変形角 0.8 %）

5.4 ベースパネルの水平ずれ

ベースパネルと基礎梁の 3D-DIC による計測値の差か

○ 海外文献 ○

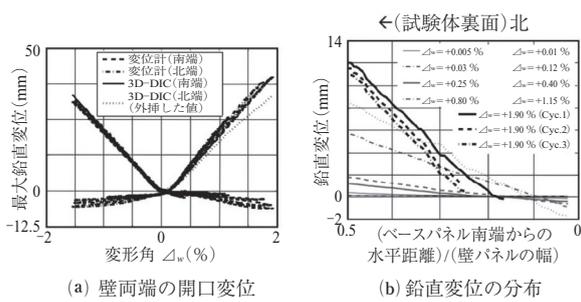


図 - 9 3D-DIC と変位計の計測値の比較

らベースパネルの水平ずれ変位が算定できる。図 - 10 に壁中央および南端の水平ずれ変位を示す（カメラの配置の関係から、南端では正加力時（圧縮となる側）のみの計測結果を示す）。

$\Delta_w = +1.90\%$ のピーク時のベースパネルの水平ずれ変位は約 2 mm であった。このずれ変形は、耐震壁の構造性能に影響を与えるものではなかった。また、図 - 10 に示す水平ずれ変位と変形角の関係は線形であることから、壁両端でコンクリートの圧壊が生じたことが、水平

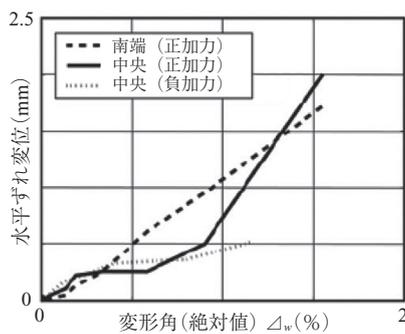


図 - 10 ベースパネルの水平ずれ変位

ずれ変形の増加に繋がっていないことがわかる。また、ベースパネルと上部パネル間に水平ずれは生じていなかった。

6. ま と め

本論文では、地震地域で使用できる HSW の設計と挙動に関する現在進行中の研究プロジェクトで得られた結果を示した。ここでは、従来の変位計を用いた計測方法に加え、3次元デジタル画像相関法（3D-DIC システム）による計測を行った。

3D-DIC システムによる計測結果から、HSW が剛体として挙動し、基礎梁とベースパネルの間の水平接合部の開閉による変形が支配的であることが確認された。また、ひずみ分布図からベースパネルのひび割れ発生位置や塑性ヒンジ領域を確認することができた。

Reprinted from the Proceedings of the 2010 fib 3rd International Congress and PCI Annual Convention/Bridge Conference with the permission of the Precast/Prestressed Concrete Institute, copyright 2010, www.pci.org

原 典

Brian J. Smith, Michael J. McGinnis and Yahya C. Kurama: Full-Field Lateral Response Investigation of Hybrid Precast Concrete Shear Walls, 3rd fib Inter-national Congress, Paper ID 148, 2010

参 考 文 献

- 1) "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-08)", American Concrete Institute, 2008
- 2) "Acceptance Criteria for Special Unbonded Post-Tensioned Precast Structural Walls Based on Validation Testing (ACI ITG-5.1)", American Concrete Institute, 2007

【2012年4月23日受付】