

蝶形プレキャストコンクリートブロックを用いた鉄筋コンクリート耐震壁の開発

株式会社竹中工務店 技術研究所
掛 悟 史, 石 川 裕 次

1. はじめに

2013 年 11 月に「改正耐震改修促進法」が施行され、不特定多数の者および避難弱者が利用する建築物のうち大規模なもの等については、耐震診断を行い報告することを義務付けし、その結果を表示することが義務化された(図 1)。耐震改修促進法は施行された 1995 年から 21 年経っている。これは 1995 年 1 月に発生した阪神淡路大震災において、多くの旧耐震設計建物(1980 年以前の設計)が倒壊、大破に至ったことから、現行の耐震基準に満たない建物の耐震補強が急務であると判断され施行されたものである。その結果、日本国内で耐震補強が進み、2011 年に発生した東日本大震災における地震被害を最小限に留めた大きな要因となった。

しかしながら、ホテルや病院など不特定多数の人が常時利用する建物には、これまで建物の機能を停止してまで耐震改修工事を行うことが中々出来なかった建物が多く存在する。そこで、このような建物でも建物機能を稼働させながら耐震改修工事が行える新たな工法が必要となってきた。

そこで、筆者らは上記の耐震改修のニーズに応えることに加え、近年の建設作業員数の減少を鑑み、施工者の職種を限定しない工法とするため、プレキャスト化を図った新しい耐震補強工法として、蝶形プレキャストコンクリートブロックを用いた鉄筋コンクリート耐震壁の開発を行った(写真 1)。

2013 年 12 月から実用化を図ってきた本工法は、2016 年 8 月現在 28 棟(使用ブロック数累計 92,000 個)に適用されている。以下に本工法の概要から実施例までを紹介する。

2. 本工法の概要

2.1 構成要素

本工法の概要を図 2 に示す。本工法は、既設の RC 造骨組の構面内に蝶形をしたプレキャストコンクリートブロックをエポキシ樹脂で接着しながら積み上げ、高強度グラウトをブロック空洞部および周辺骨組との隙間に充填することで耐震壁を構築するものである。蝶形ブロックは、図 2 に示すように傾斜する上下面をかみ合わせて積層する。その結果、地震時に蝶形ブロックの傾斜面に垂直抗力が発生し、



図 1 平成 25 年改正耐震改修促進法パンフレット¹⁾



(a) 全景



(b) 拡大図

写真 1 施工完了時の状態(カラーブロック使用例)

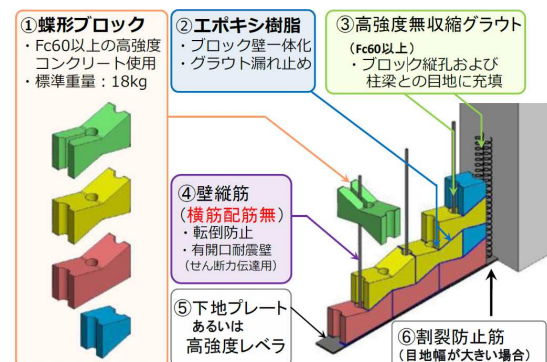


図 2 蝶形ブロックを用いた RC 耐震壁の概要

地震による水平力が作用した際に上下方向力が作用し、通常の RC 耐震壁の縦横筋と同様な機能を果たす。そのため、本工法では地震時に作用する水平力を上階から下階へ伝達するための壁縦横筋が不要となる。本工法は主に 6 つの構成要素によって構成される。

- 1) 蝶形ブロック;Fc60 以上の高強度コンクリートを使用したプレキャストブロックを使用しており、ブロック形状はセンターホールタイプ、壁上部用スリットタイプ、最下部用下辺フラットタイプおよび半割タイプの 4 種類とした。スリットタイプはブロックを前方から挿入し、ブロックを回転して所定の位置に設置できる。またブロック空洞部は縦孔のみとなる工夫をしている。
- 2) エポキシ樹脂;蝶形ブロックを短工期で施工するため各ブロックの上下・左右面に塗布し、ブロック積層時にブロック同士を接合する。またグラウト充填時には溢れ出し防止の役割を果たす。
- 3) 高強度無収縮グラウト;ブロックの高強度化に合わせて、ブロック空洞部および既設骨組との隙間に Fc60 以上の高強度無収縮グラウトを充填し、RC 耐震壁としての一体化を図る。
- 4) 壁縦筋;フェールセーフという観点から、主にブロックの面外方向への転倒を防止するために壁縦筋を配筋する。本工法は従来の耐震壁工法とは異なり、壁横筋を使用せずに特殊なブロック形状によるブロック同士の連結力によって、地震時に水平力を負担させる。
- 5) 下地プレートまたは高強度レベラー;本工法では、第 1 層のブロックの水平度が重要であるため、下地プレートまたは高強度レベラーを施工する。
- 6) 割裂防止筋;既設 RC 骨組と蝶形ブロック壁部の隙間に充填する高強度無収縮グラウトのひび割れ発生を防止する。



(a) コンクリート打設工事状況



(b) 圧送管設置状況

写真 2 RC 耐震壁増し打ち工法における施工上の課題

2.2 本工法の特長

本工法は耐震改修促進法（2013 年改正）で示されたホテル、大型店舗、オフィスおよび病院などの不特定多数の人が使用しながら耐震改修を行う建物を主な研究開発の対象と位置付けてきた。これまでに開発された耐震改修工法は写真 2 のように、工事階について建物使用者が退避しなければいけなかったため、本工法は図 3 に示すような工事階でも居ながら施工できるように、可能な限り低騒音、低振動、低粉塵を実現できる工法とした。また稼働中の建物への影響を最小限とするため、工事エリアへ搬入する建築資材の量を最小限とし、狭小施工を可能にする工法とした。本工法の主な特長を以下に示す。

- 1) ブロック形状を蝶形とすることで、壁横筋が不要とすることができる。そのため、壁筋設置時のアンカー工事を約 1/5 程度に低減することができ騒音、振動および粉塵を低減できる。
- 2) ブロック空洞率を 10～20%と小さくすることで、



図 3 本工法イメージ図
(建物機能を稼働しながらの施工を実現)

工事エリアに搬入する高強度グラウト等の建築資材を最小限にすることができ、狭小施工が可能となる。(従来工法では型枠状ブロックが使用されており、空洞率が 40～60%であったため、多くのグラウト材を工事建物内に搬入して施工する必要があった。)

- 3) ブロックの断面形状を工夫し、グラウトを充填するブロック空洞部は縦孔のみとした。
- 4) 施工に必要な数だけ蝶形ブロックを小運搬することができるため、施工時間や運搬時間が限定された場合にでも施工が可能となる。
- 5) 建物内で大がかりなコンクリート圧送管を設置せずに施工できる。
- 6) 工場で製作されたコンクリートブロックを積層するため、高品質な耐震壁を構築できる。

2.3 適用範囲

これまでに図 4 に示す 6 種類の蝶形ブロック RC 耐震壁について構造実験を実施し、指定評価機関「株式会社日本 E.R.I.」による構造性能評価 (ERI-K13012-04) を取得している。なお下記の 6 種類については、既設 RC 骨組の構面内に耐震ブロック壁を新設する場合のみならず、既設 RC 壁に蝶形ブロックを増設する場合においても適用可能である。

1) 無開口タイプ;既設 RC 骨組の構面内に蝶形ブロックを積層し、高強度グラウトをブロック空洞部および周辺骨組との隙間に充填することで耐震壁を構築する。

2) ドア開口タイプ;蝶形ブロック壁内にドア開口を設けた耐震壁であり、開口周辺はブロック壁からの圧縮力を処理できる H 形鋼等の補強鉄骨を設置する。

3) 両袖壁タイプ;既設 RC 独立柱の両側に蝶形ブロックを積層する。蝶形ブロックの端部はブロック壁からの圧縮力を処理できる補強鉄骨を設置する。

4) 片袖壁タイプ;既設 RC 独立柱の片側に蝶形ブロックを積層する。蝶形ブロックの端部は両袖壁同様、補強鉄骨を設置する。

5) 設備開口タイプ;蝶形ブロック壁内の既設梁や既設柱に隣接した箇所に設備配管用の小開口 (開口周比 0.2 以下) を設置する。開口周辺は溝形鋼等の補強鉄骨を設置する。設計方針として無開口タイプと同等なせん断耐力が得られるように補強鉄骨の設計を行う。図 4 (e) に示すように主な対角線領域にある場合と、領域外にある場合で補強鉄骨のスペックを変える。

6) 窓開口タイプ;蝶形ブロック壁内に窓開口を設置する。設置可能な開口周比上限値は 0.4 であり、開口周辺は溝形鋼等の補強鉄骨を設置する。

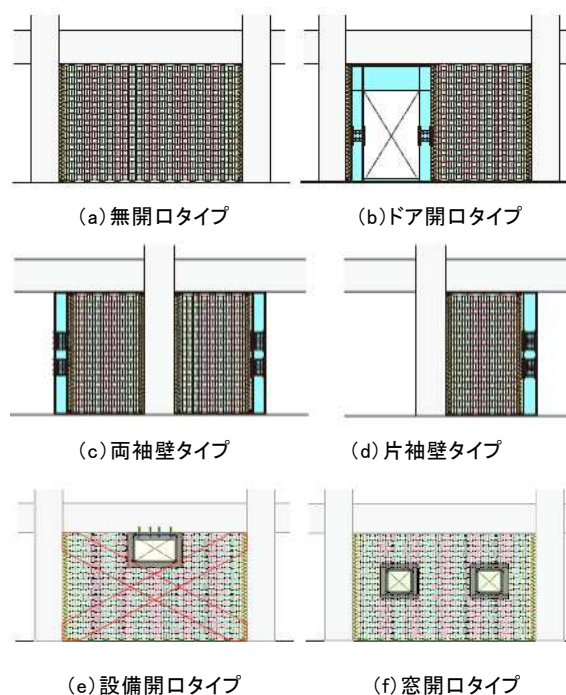


図 4 本工法の適用範囲

3. 蝶形ブロック RC 耐震壁の耐震性能

3.1 主な実験概要

本工法はこれまでに既設 RC 骨組を補強した蝶形ブロック壁の耐震性能を検証するため、実物の約 1/3 スケールの試験体を用いた構造実験を実施してきている。ここでは、代表的な構造実験の概要について示す。図 5 に主な試験体の形状および配筋詳細を示す。基準となる RC 門形フレーム試験体 F01 および蝶形ブロック壁試験体 2 体の計 3 体である。各試験体は以下のように設定した。

1) F01 試験体(既設 RC 骨組)

蝶形ブロックの有無による水平耐力を確認するための RC 門形フレームの基準試験体である。柱断面および水平荷重の作用位置は全試験体とも共通である。

2) B101 試験体(蝶形ブロック耐震壁)

既設骨組に蝶形ブロックをエポキシ樹脂でブロック間を接着しながら積層し、ブロック空洞部および既設骨組との隙間に高強度グラウトを充填した試験体である。

3) B302 試験体(有開口蝶形ブロック耐震壁)

B101 試験体のブロック壁内にドア開口を有しており、開口周辺を H 形鋼の補強鉄骨枠で補強した試験体である。なお、鉄骨の脚部については、ブロック壁からの圧縮力を伝達させるため、下端プレートを設置した。

なお、既設 RC 骨組のコンクリート強度は $22.4 \sim 29.1 \text{ N/mm}^2$ である。また蝶形ブロックのコンクリート強度は $\text{Fc}60$ 以上とし実強度 $66.1 \sim 69.7 \text{ N/mm}^2$ であり、高強度グラウトは $79.4 \sim 102.1 \text{ N/mm}^2$ であり、蝶形ブロックのコンクリート強度以上のものを使用した。

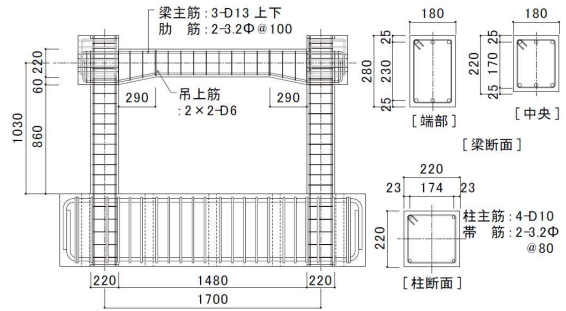
3.2 加力計画

写真 3 に加力装置を示す。実験は試験体下部のスタブを PC 鋼棒で固定し、試験体上部の 1000kN ジャッキにより柱軸力を導入した。柱軸力は一定軸力として、各試験体ともに長期軸力に相当する $\eta=0.10$ の軸力比 ($\eta=N/(B \cdot D \cdot f'_c)$, N : 柱軸力, B : 柱幅, D : 柱せい, f'_c : 既設 RC 骨組コンクリート強度) を付帯柱頂部に加えた。その後、壁頂部の左右端部に設置した 1000kN ジャッキにより水平力(せん断力)を作用させ、正負交番繰り返し載荷を行った。

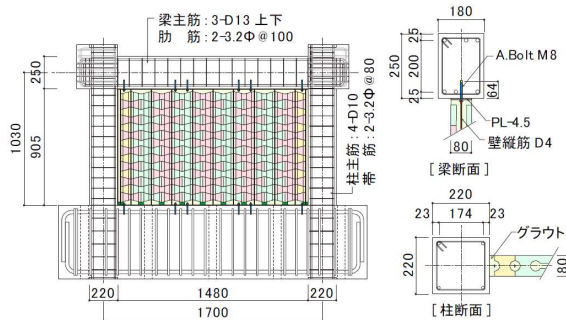
3.3 実験結果

図 6 に蝶形ブロック RC 耐震壁試験体のせん断力-水平変形角関係を示す。各試験体のせん断力-水平変形角関係には既設 RC フレーム試験体の包絡曲線も併せて示す。

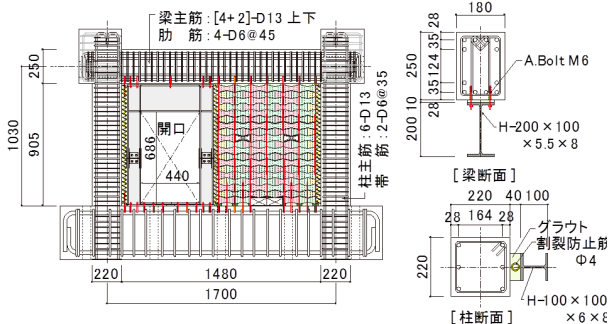
既設 RC 骨組試験体である F01 試験体は、柱頭および柱脚の柱主筋が引張降伏し、水平変形角 $R=+15, -11 \times 10^{-3} \text{ rad}$ において最大耐力を記録した。蝶形ブロック壁を構築した



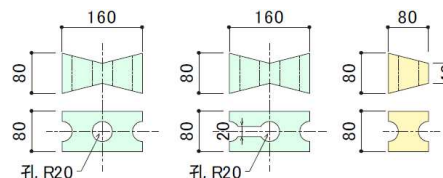
(a) F01 試験体 (既設 RC 門形フレーム)



(b) B101 試験体(蝶形ブロック RC 耐震壁)



(c) B302 試験体(ドア開口ブロック耐震壁)



(d) 蝶形ブロックの形状寸法

図 5 試験体形状および配筋詳細²⁾



写真 3 加力装置

B101 試験体は、水平変形角 $R=3.3 \times 10^{-3} \text{rad}$ の载荷サイクルにおいて、ブロック壁対角線方向に沿ったせん断ひび割れが生じ、 $R=7.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ の载荷サイクルにおいて最大耐力を記録し、その後変形角が増加するとともに、ブロック壁のせん断ひび割れが進展し、緩やかな耐力低下が生じた。またドア開口を有する B302 試験体は、B101 試験体同様、水平変形角 $R=3.3 \times 10^{-3} \text{rad}$ の载荷サイクルにおいてブロック壁の対角線方向に沿ったせん断ひび割れが生じ、水平変形角 $R=+20, -10 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に最大耐力を記録した。両試験体とも蝶形ブロック壁はほぼ無筋状態にもかかわらず、最大耐力以降に急激な耐力低下せず、通常の RC 耐震壁と比較し、高い変形能力を発揮した。これは蝶形ブロックの斜面を介して垂直抗力が作用し、通常の RC 耐震壁の壁筋と同様な機構を発揮し、蝶形ブロック壁が一体となり機能したためと考えられる。

また B101 試験体および B302 試験体では蝶形ブロック壁上の対角線上にひび割れが発生し、最終破壊時までに蝶形ブロックコンクリートの圧壊現象が確認され、両試験体ともに蝶形ブロック壁を介して圧縮力を伝達していることが確認された。図 7 に試験体の最終破壊状況から推察される蝶形ブロック RC 耐震壁の応力伝達メカニズムを示す。蝶形ブロック RC 耐震壁の水平耐力は、蝶形ブロック壁の圧縮ストラットによる水平力と既設 RC 柱のせん断力の和、補強鉄骨を設置した場合は前述の 2 つの耐力に鉄骨柱のせん断力を累加した耐力と考えられる。

また蝶形ブロック RC 耐震壁を構築したことによる耐震補強効果の検討を行うため、RC 骨組試験体の最大耐力と蝶形ブロック RC 耐震壁の最大耐力を比較した。その結果、既設骨組に蝶形ブロック壁を構築することで最大耐力が 3.40～4.94 倍向上することが確認された。また初期剛性については、蝶形ブロック壁を構築することで 8.58～9.23 倍向上することが確認され、本工法による耐震補強効果を確認した。

本工法では同一断面の在来工法による RC 耐震壁を増設した場合に比べ、初期剛性は約 2/3 倍程度となるが、RC 耐震壁を増設した場合と同様なせん断強度を発揮すると共に、耐震補強において重要な部材角 $1/250, 1/150 \text{rad}$ 時に適正なせん断耐力を確保でき、急激な耐力低下をせずに最大耐力後も安定した復元力特性を示した。

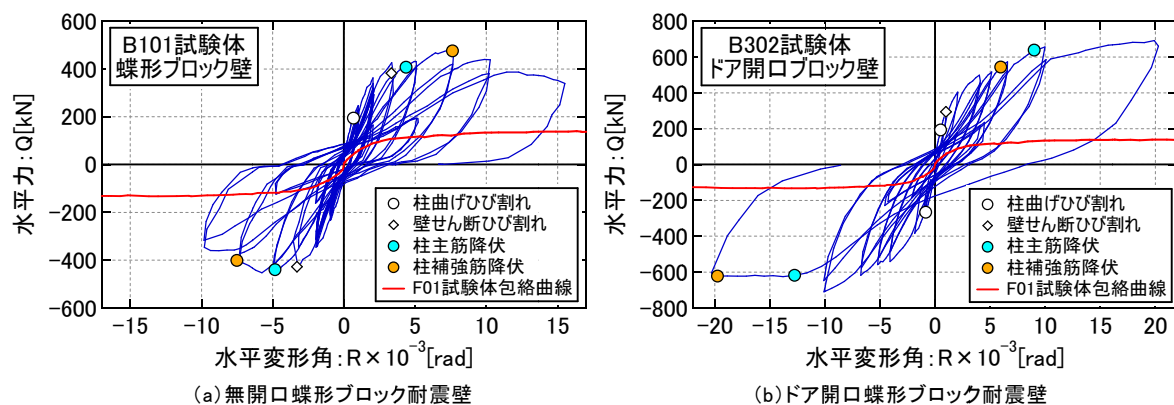


図 6 水平力-水平変形角関係

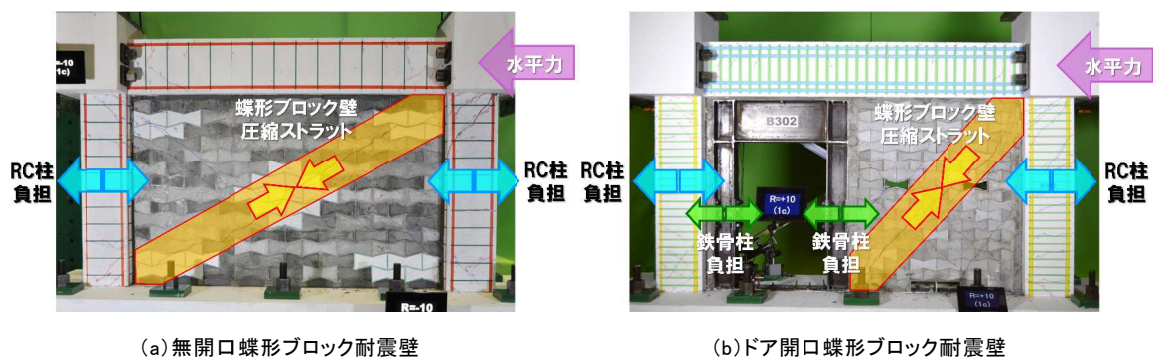


図 7 応力伝達メカニズム

4. 適用プロジェクト

ここでは、本工法の代表的な適用事例として工事階での居ながら施工が可能だったテナントオフィスの事例を紹介する³⁾。

本工法は東京都港区に建設されたオフィスビルの耐震改修工事に採用された。当該プロジェクトではオフィスビル内に複数のテナントが入っており、各テナントの営業活動を阻害しない工法の採用が望まれていた。本工法は前述の通り、アンカー工事を最小限にできるため、低騒音、低振動および低粉塵を可能にしており、プレキャストブロックの積層作業が主作業であることから、あらかじめ使用するブロックや接着剤等の資材を工事エリア内にストックしておくことで、狭いスペースでの作業が可能になる。写真 4 に本工法による耐震改修工事状況を示す。共用部側にて工事用仮囲いを設けて耐震改修工事の工事エリアとテナントエリアを明確に区分した。仮囲いの幅は約 1.5m であったが、このわずかな空間の中で資材搬入、アンカー工事、ブロック積みおよびグラウト充填の一連の工事を実施することができた(写真 5)。また蝶形コンクリートブロックはプレキャストコンクリート工場にて製作を行い、現場内 1 階ストックヤードに仮置き、毎週末ごとに台車にて仮囲内に場内小運搬を行い、平日の日中作業にてブロック積み作業を実施した。当該プロジェクトでは、実施工においてブロック積み作業時に音や粉塵はほとんど発生せず、建物内の同じフロアにおいて執務を行いながらの同時施工を可能にした。

5. まとめ

本稿では、蝶形プレキャストコンクリートブロックを用いた鉄筋コンクリート耐震壁について、耐震性能および適用プロジェクトでの実施例について示した。その結果、既設 RC 骨組に耐震壁を構築することにより、最大耐力が 3.40～4.94 倍向上することを確認した。また実際のプロジェクトにより、本工法が目標とする工事階においても居ながら施工ができることを確認した。2013 年から実用化を図ってきた本技術は現在、建築分野における様々なニーズに対応できる居ながら耐震工事が行える技術として確立している。今後は急速に進んでいる駅施設の建築化に対応できる耐震補強工法としてインフラの防災という観点から土木構造物への適用も視野に入れて開発を積極的に推進させていきたい。

【参考文献】

- 1) 建築性能基準推進協会:平成 25 年改正耐震改修促進法パンフレット, 2013.12
- 2) 石川 裕次, ウサレム ハッサン, 川野 翔平, 掛 悟史:蝶形ブロックを用いた RC 耐震壁の耐震性能,コンクリート工学年次論文集,Vol.38,No.2, pp. 1081-1086, 2016.7
- 3) 山本 芳通, 伊藤 英幸, 石川 裕次, 竹田 喜則:高強度コンクリートブロックを用いた耐震補強壁工法の実用化,コンクリート工学,Vol.53,No.7, pp. 635-640, 2015.7



(a) 工事エリア仮囲い状況



(b) 作業エリア内部

写真 4 本工法による耐震改修工事状況



(a) ブロック製作
(PCa 工場出荷前)



(b) 人力による搬入状況



(c) 人力によるブロック積み



(d) 現地型枠のみとした
グラウト充填

写真 5 施工手順³⁾