

平成22年 5月13日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19560568

研究課題名（和文） 途上国における脆弱建物の耐震補強支援技術の開発

研究課題名（英文） Development of a seismic retrofit technology for vulnerable buildings in developing countries

研究代表者

小林 克巳（KOBAYASHI KATSUMI）

福井大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：40150297

研究成果の概要（和文）： インフィルブロック壁を有するRCフレーム構造建物の地震によるパンケーキ状崩壊を防ぐために、連続繊維を束ねて壁板に縫い付けるように取付けて耐力壁化し、フレームと一体化する方法を提案した。さらに、補強繊維量に応じた荷重・変形関係をモデル化し、補強設計を行う方法を示した。僅かな補強量でも、大変形時まで耐力低下が徐々に起こるようになる効果を期待でき、インフィルブロック壁が構面内にある限り、最終的な崩壊を免れることが期待される。

研究成果の概要（英文）： In order to prevent the pancake collapse of the deficient RC frame buildings with infill-brick wall, a simple and economical seismic retrofit scheme was proposed. That is to install a bundle of strand to infill-brick wall as sewing, and to integrate with the boundary frame. Furthermore, the relationship between the applied load and deformation was formulated depending on the amount of fiber reinforcement and a seismic retrofit design method was presented. With even a small amount of fiber reinforcement, it can be expected that the horizontal carrying load decreases gradually till large deformation. If the infill-brick wall is kept to be inside the frame, it is expected that the pancake collapse will be prevented.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 ・ 建築構造・材料

キーワード：耐震補強、地震被害、脆弱建物、インフィルブロック壁、穴あきブロック、連続繊維補強材、途上国支援、国際貢献

1. 研究開始当初の背景

地震が発生する度に、インフィルブロッ

ク壁が構面外に倒壊し、加えて柱はり接合部が脆弱なために建物がパンケーキ状に崩壊

して多数の生命が失われる。1999年トルコ・コジャエリ地震では17,000余の生命を失った。老朽化、構造の脆弱性、施工不良など被害原因は容易に理解できるが、途上国では特異なことではない。

日本においては、これまでの耐震技術を駆使して、様々な耐震補強方法が開発され実施に移されており、生命が奪われる危険は低減されつつある。途上国からみれば、日本の技術は素晴らしいが、施工まで含めて高い技術力と経済力に裏打ちされた技術で、全く次元の異なるものとは映らない。途上国を支援していくに際しては、日本で実施している技術をそのまま移転することは不可能で、「人・もの」と同時に「より安く・より簡単に」できる支援技術を開発しておく必要がある。

JICA派遣専門家として参加したチリ国の地震災害軽減技術開発プロジェクト、1999年トルコ・コジャエリ地震被害調査、さらに米国テキサス大学の研究者およびトルコ国中東工科大学の研究者等との交流を通じて、穴あきブロック壁の耐力壁化が重要な研究課題であることを認識した。穴あきブロックを組積した壁はトルコ国に限らず南米、東南アジアなどで多用されている構造であり、いったん大地震が発生して建物が崩壊すると、極めて多数の人の生命が奪われる。これらを安価に簡単に補強する方法について情報発信することは、地震災害に苦しむ諸国の何より人的被害軽減に直接的に役立つものであり、優れた耐震補強技術を持つ日本からの技術支援となり、国際貢献につながる。

穴あきブロックに大きな拘束効果を付与することは難しいと予想されるが、周辺フレームと穴あきブロック組積壁を一体化し、終局時にパンケーキ状に崩壊しない建物に改修できる“より安い・より簡単な”工法とすることを期待した。

## 2. 研究の目的

本研究計画の準備として行ってきた連続繊維ストランド束を既存鉄筋コンクリート造壁板に縫い付けるように取り付けていく方法は、途上国に多く見られる穴あきブロックを組積した非構造壁を「より安く、より簡単に」耐力壁化する方法として有力候補である。本研究では、提案した補強方法を穴あきブロックを組積した壁に適用し、穴あきブロック組積造壁の性状を明らかにして、耐力壁化を図る方法を提案することを目的とした。さらに途上国の脆弱建物の耐震補強に利用できそうな情報を収集し、耐震補強方法に関する提案をまとめて、途上国向けに情報発信することを目的とした。

## 3. 研究の方法

- (1) 連続繊維ストランド束を壁板に縫い付けるように取り付けていく方法で、鉄筋コンクリート造耐震壁で補強効果が得られるのは、補強材によるコンクリートの拘束効果によるところが大きい。穴あきブロックで構築した壁体の挙動については情報も少なく、まず穴あきブロック壁体の力学的挙動を明らかにした。穴あきブロック壁を有するフレーム、それを補強したフレームの載荷実験結果の分析を行った。
- (2) インフィル壁は周辺フレームと接合されおらず、圧縮材として水平力を伝達するので、繊維束を取り付けた壁要素の荷重・変形関係を求めれば、フレームモデルの荷重・変形関係と足し合わせることができる。繊維束を取り付けた壁要素の荷重・変形関係を求める実験を行った。繊維束を取り付けることによる補強効果は繊維束の剛性に依存するので、炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維、ビニロン繊維、ナイロン繊維、ポリエステル繊維を用いた。
- (3) 実験結果に基づいて、繊維束を取り付けた壁要素の荷重・変形関係を定式化した。
- (4) 壁要素の荷重・変形関係とフレームの荷重・変形関係を足し合わせたモデルと穴あきブロック壁を有するフレームの実験結果を比較し、モデルの妥当性を確認した。
- (5) 本研究で提案する補強方法が、実際の建物の補強方法として使えるかどうか、実際の建物のインフィルブロック壁の量を調査した。
- (6) インフィルブロック壁が全くない場合を想定し、耐震補強支援技術となりうるアイデアを収集した。「より簡単で、より安い」方法となるように、その効果を確認する実験を行い、次の研究ステップの準備とした。
- (7) 研究成果は、国内外の学会で発表し、情報発信した。

## 4. 研究成果

### (1) インフィルブロック壁の挙動

連続繊維ストランド束を束ねて、壁板に縫い付けるように取付けていく補強方法(図1)を、インフィルブロック壁に適用して耐力壁化しようとする目的で行った縮小模型実験の結果からインフィルブロック壁の挙動を検討した。インフィル壁は周辺フレームと接合

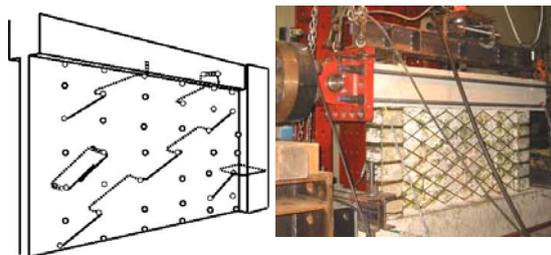


図1 連続繊維ストランド束を束ねて、壁板に縫い付けるように取付けていく補強方法

されていないので、図2に示すトラスモデルの斜材として水平力を伝達するものとし、フレームモデルと足し合わせることができる。インフィルブロック壁を有するRCフレームの実験結果から、RCフレームの実験結果を差し引けば、インフィルブロック壁の挙動とみることができる(図3)。およそ30kN辺りで剛性が変化するのは、目地の膠着力が失われた結果と考えられる。その後耐力上昇しているが、試験体の梁は、柱・壁に対して剛とみなせるので、上下方向に壁板が拘束された結果と考えられる。

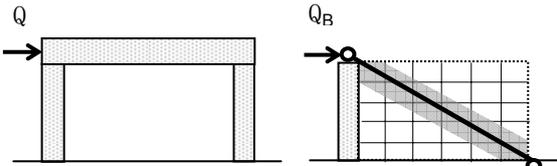


図2 フレームモデルとトラスモデル

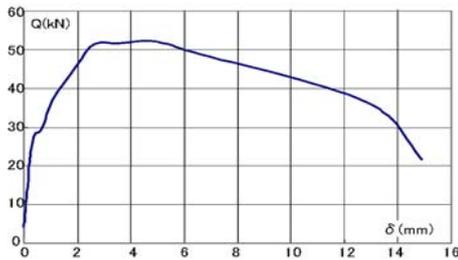


図3 フレーム内でのインフィル壁の挙動

連続繊維ストランド束を取付けて補強した試験体の結果から、無補強壁の結果を差し引けば、壁板に対する補強効果を知ることができる(図4)。

補強試験体が最大耐力を示す  $\delta=4\sim 8\text{mm}$  ( $R=1/100\sim 2/100$ ) での、補強による耐力上昇は僅かであるが、大変形時まで壁板の耐力低下を減少させ、壁フレームとして徐々に耐力低下はあるものの、補強によって一定の耐力を保持できるようになることが分かる。

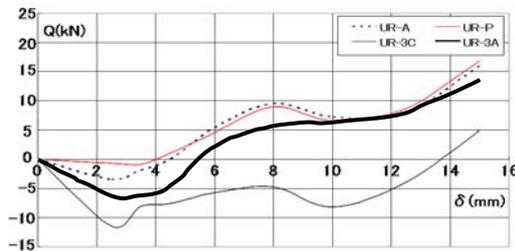


図4 壁板に対する補強効果

インフィルという性格上、実験結果のばらつきが大きくなることを考えても、耐力低下が始まる変形が大きくなり、さらに大変形時まで耐力低下が徐々に起こるようになって、

エネルギー吸収量が増加することは確実である。補強繊維を柱に巻き付けて壁と柱の一体化を図って構面外への壁の崩壊を防げば、間仕切り壁であるインフィルブロック壁を耐力壁として評価することは可能であろう。

### (2) 繊維束を取り付けた壁要素の実験

連続繊維束を取り付けた正方形の壁要素試験体の対角方向に圧縮力を加え、荷重・変形関係の定式化を行った。試験体を図5に示す。周囲にブロックを保持し、補強繊維束の定着を図るための小断面のフレームを設けた。断面中央に1-φ4を配筋したが、壁板に対する拘束力は殆どない。使用繊維は炭素、アラミド、ガラス、ビニロン、ナイロン、ポリエステルで、束ねるストランド本数によって、軸方向剛性が小さいものから大きいものまで変化させ、約30体の実験を行った。目地モルタルの圧縮強度はおよそ  $14\text{N/mm}^2$  である。

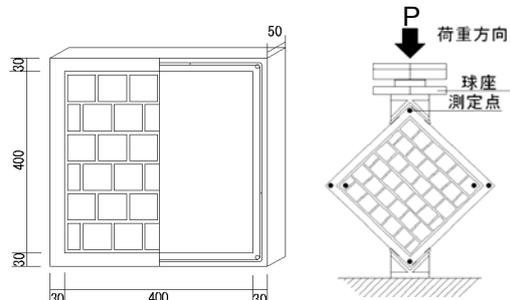


図5 試験体

水平目地方向のせん断力  $Q(P/\sqrt{2})$  とせん断変形角  $\gamma$  の関係の一例を図6に示す。どの試験体もおよそ  $Q=15\text{kN}$ 、 $\gamma=1/1000$  まで補強パラメータに関係なく荷重が増加している。目地モルタルの膠着力によって抵抗していると考えられる。その後剛性が低下して最大耐力に到るが、その剛性と荷重増加は、補強繊維量に依存している。最大耐力に達した後は  $\gamma=5/100$  付近までほぼ一定の割合で耐力低下し、以後耐力はほぼ一定となった。

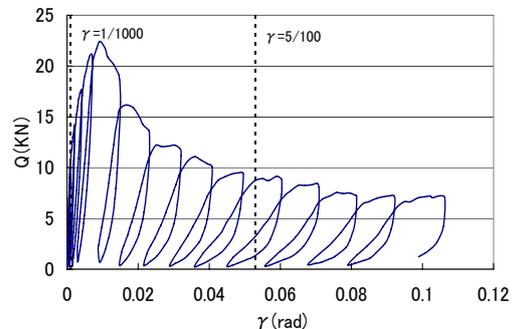


図6 実験結果の一例 (No. 3)

### (3) インフィル壁要素の荷重・変形関係 実験結果より、繊維束を取付けたブロック

壁板の挙動を図7のようにモデル化した。 $Q_{cr}$ は水平目地の面積と目地モルタル強度に依存すると考え、

$$Q_{cr} = a \sqrt{\sigma_m} \cdot t \cdot h_0 \quad (1)$$

$\sigma_m$ : 目地モルタル強度  
 $t$ : 壁厚  
 $h_0$ : 水平目地長さ

と表す。 $Q_{cr} / \sqrt{\sigma_m} \cdot t \cdot h_0$ は、補強量によらずほぼ一定で、実験結果より  $a=0.2$  とする。

$\gamma_{cr}$  から  $\gamma_u$  までの傾き  $K$  は水平及び鉛直目地を含む対角方向の目地の摩擦とそれに対する繊維束の拘束効果で、単位対角線長さ当たりの補強繊維量に依存するものと考え、

$$K = b \cdot 2 \cdot n_1 \cdot n_2 / l_d \cdot A_f \cdot E_f \cdot \cos \theta \quad (2)$$

$n_1$ : 繊維束中のストランド本数  
 $n_2$ : 対角線を横切る繊維束数  
 $l_d$ : 対角線長さ  
 $A_f$ : ストランドの断面積  
 $E_f$ : 繊維のヤング率  
 $\theta$ : 補強繊維束の方向と対角線の垂線のなす角度

と表した。実験結果より  $b=0.727$  とする。 $K$ と同様に  $\Delta Q$  も水平及び鉛直目地を含む対角方向の目地の開きに対する繊維束の抵抗力で、対角線を横切る総補強繊維量に依存するものと考え、実験結果よりその平方に比例するものとした。

$$\Delta Q = c \sqrt{n_1 \cdot n_2 \cdot A_f \cdot E_f \cdot \cos \theta} \quad (3)$$

実験結果より  $c=10.7$  とする。 $\gamma_r$  以降の残存耐力  $Q_r$  は目地の摩擦力と繊維量によると思われる。メカニズムは不明解であるが、図6のようにほぼ一定の値を示しており、概ね  $Q_{cr}$  程度であることから、一定の補強繊維量があることを前提に、暫定的に④式とした。

$$Q_r = Q_{cr} \quad (4)$$

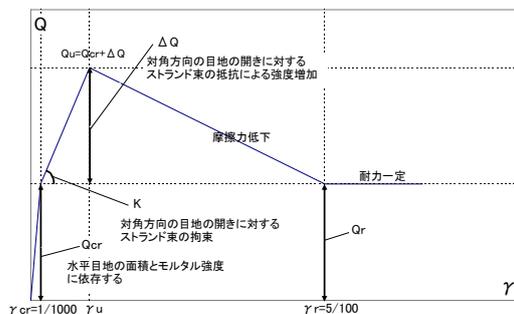


図7 モデル化したブロック壁板の挙動

#### (4) インフィルブロック壁を有するRCフレームの荷重・変形関係

図7のモデルを、インフィルブロック壁を有するRCフレームの実験結果と比較する。モデルと実験結果の比較を図8に示す。UR-3Cを除く実験結果をほぼ説明できている。ただし、大変形時の保持耐力は大きく評価してしまっている。要素実験では、周辺フレームは壁板に拘束を与えていないが、フレーム実験では上下の梁の剛性が大きいために、壁板の上下方向に拘束力が加わっており、ブロック自体の圧縮破壊が生じているためではないかと思われる。また、UR-3Cで実験結果と一致しないのは、繊維束の見かけの剛性によるものと思われる。最大耐力辺りで適合性が悪いのは、梁剛性の影響と、壁を後から施工するという構造の特徴としてのばらつきがあると思われる。

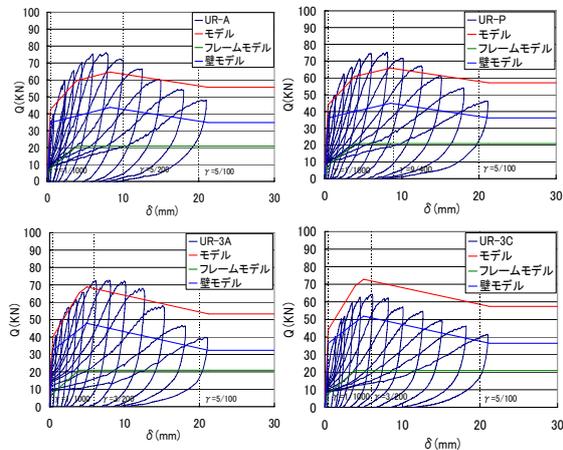


図8 モデルと実験結果の比較

#### (5) 既存建築物におけるインフィルブロック壁量

補強対象建物のインフィルブロック壁の量を把握するために、トルコにおけるRC集合住宅の壁量について検討を行った。集合住宅であれば、比較的多くの間仕切壁がインフィルブロック壁で造られているため、この耐力を期待し、水平変形角 1/50 程度まで耐力を維持できれば、倒壊を防いで終局安全性を確保する補強ができそうなことを確認した。

#### (6) インフィルブロック壁がない場合の耐震要素取付け方法のアイデア

インフィルブロック壁が全くない場合を想定し、耐震補強支援技術となりうるアイデアを収集し、「より簡単で、より安い」方法となるようにその効果を確認する実験を行い、次の研究ステップへの準備とした。すなわち、壁パネルを PCa 部材として製作し、これを接着型のコッターを介して既存フレームに取り付ける方法を試した。PCa パネルは既存建物の脆弱性を考えて、低強度でひび割れを起こしや

すいが複数のひび割れを発生させるために短繊維を混入し、低降伏点の鉄筋を埋め込んでおくことにより地震エネルギー吸収デバイスとなるように考えた。

図9にひび割れ発生状況の例を示す。図10に水平力・相対変位関係を示す。袖壁として取り付けることで、剛性、耐力とも大きくなり、また変形角が1/50程度までが大きくなっても、変形性能が確保できることが分かる。

補強効果の確認実験の範囲に留まるが、PCaパネルと接着型コッターに大きな強度は必要なく、これを安価に作れば有力な方法であることを確認した。

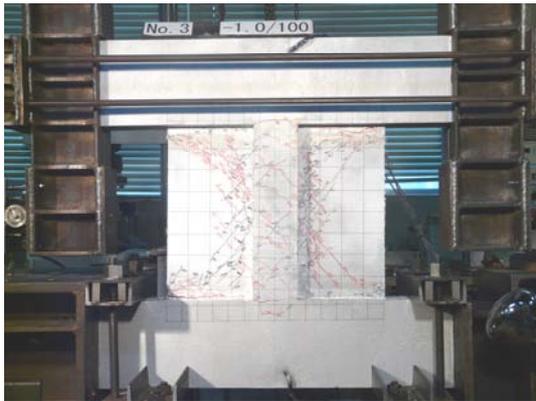


図9 ひび割れ発生状況

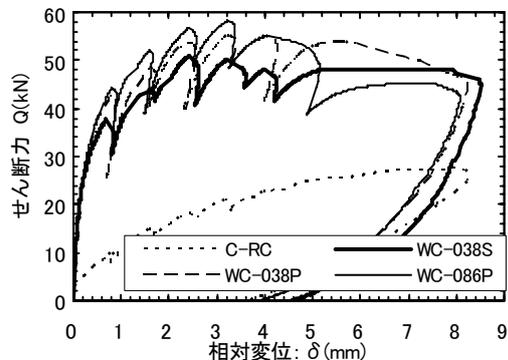


図10 水平力・相対変位関係(正側包絡線)

#### (7) まとめ

連続繊維ストランド束を既存鉄筋コンクリート造壁板に縫い付けるように取り付けていく方法で、途上国に多く見られる穴あきブロックを組積した非構造壁を「より安く、より簡単に」耐力壁化する方法として提案した。日本国内における穴あきブロックの調達が困難であり、本研究では模型実験としているが、実情に応じた穴あきブロックと利用可能な繊維を組み合わせ、本研究の方法にならって壁要素のせん断力とせん断変形角の関係、即ち①式～③式の係数 $a, b, c$ を求めなおせば、補強設計が可能になるものと思われる。

本研究期間中に、ハイチ、チリ、中国で大地震が発生し多くの生命が失われた。報道写真、被害調査写真を見る限り、本研究で対象とした構造と同種の構造も多く見られ、本研究成果が将来の耐震対策に結びついていくことを期待してやまない。また、本補強方法のアイデアは、無補強組積造にも適用可能であると思われ、今後、途上国支援を目的とした技術開発が進むことを願っている。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① 渡邊良平、小林克巳、連続繊維補強材による新しい耐震補強方法のインフィルブロック壁への適用とその効果 その2 繊維束を取り付けたブロック壁板の要素実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、査読無、C-2、981-982、2009
- ② 小林克巳、渡邊良平、連続繊維補強材による新しい耐震補強方法のインフィルブロック壁への適用とその効果 その1 曲げ降伏するRCフレーム内のインフィルブロック壁の挙動、日本建築学会大会学術講演梗概集、査読無、C-2、2009、983-984
- ③ Baris Binici, Katsumi Kobayashi, "Economical seismic retrofit schemes for vulnerable RC buildings with infill-brick wall using new FRP technologies", Proc. of the 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 査読無, CD-RM, Paper ID 12-01-0045, 2008

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

小林 克巳 (KOBAYASHI KATSUMI)  
福井大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：40150297