

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 4日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360262

研究課題名（和文） 面外転倒と梁の変形拘束を考慮した  
URM 壁付き RC 建物の被災度判定手法の実用化研究研究課題名（英文） A Practical Study on Post-earthquake Damage Evaluation of RC Buildings  
with URM wall considering Out-of-plane Failure and Beam Deformation

研究代表者

中埜 良昭（NAKANO YOSHIAKI）

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：10212094

研究成果の概要（和文）：本研究の主目的は、無補強組積造壁を有する RC 造建物の被災度判定手法の実用化に供するデータとその縮小モデルを用いた破壊実験を通じて収集・分析することで、ここではその第1段階として被災度判定手法の確立に不可欠である RC 造架構に内蔵された壁体のせん断力および破壊メカニズムを詳細に評価するため、面内方向への静的載荷実験を実施した。その結果、本実験の特徴の1つである各組積ユニットに貼り付けた3軸歪ゲージのデータから壁体に作用する対角圧縮ストラットの形成角度や等価幅などを詳細に評価することができた。また、これらの検討結果および別途に実施した組積ユニットの材料試験結果に基づき壁体の負担せん断力を算定し、架構全体の荷重-変形関係を精度良く再現することができた。

研究成果の概要（英文）：In this study, RC frames with unreinforced concrete block (CB) wall are experimentally investigated to evaluate their seismic capacity. For this purpose, one-fourth scale, one-bay specimens with/without CB wall are designed, and in-plane loading tests are carried out. In this report, the diagonal strut mechanism of CB wall including its main angle, average compressive strain, central axis, and equivalent width is discussed using principal compressive strains on CB wall. The lateral strength carried by CB wall and RC frame is also explained based on the compressive stress acting on CB wall and the curvature distribution along both columns during the test.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2010年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2011年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

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：無補強組積造壁，RC 造架構，静的載荷実験，対角圧縮ストラット，主歪

## 1. 研究開始当初の背景

近年極めて甚大な建物被害を伴う地震災害が世界各地で発生している。これらの地震災害では、無補強組積造壁（以下、URM 壁）あるいはこれを含む RC 造建物が大きな被害を受けていることが特徴として挙げられる。

しかしながら、このような建物はその地域における典型的な構造形式のひとつであるにもかかわらず、損傷が一旦生じた後の架構の強度、剛性、変形性能およびこれらに URM 壁がどのように影響を与えるかなどの耐震性能に着目した研究はほとんどない。

## 2. 研究の目的

上記の背景から、既実施した無補強コンクリートブロック造壁（以下、ブロック造壁）を有する RC 造架構の静的載荷実験<sup>(1)</sup>より、梁の変形が壁体の破壊パターンおよび架構全体の耐震性能に大きく影響することを確認した。そこで本研究では、既往の研究成果をさらに発展させるべく、ブロック造壁の対角圧縮ストラットの形成角度、幅やその負担せん断力を定量的に算定することを目的に、1/4 スケールの剛梁型および柔梁型試験体を製作し、面内方向への静的載荷実験を行った。本報告書報では主として正負交番繰り返し載荷を行った剛梁型ベアーフレーム（BFRB, **B**are **F**rame with **R**igid **B**eam）試験体および単調載荷を行った剛梁型インフィルドフレーム（IFRB, **I**nfilled **F**rame with **R**igid **B**eam）試験体の実験結果について述べる。

## 3. 研究の方法

### (1) 試験体概要

本試験体は 1980 年代における韓国の学校建物の標準設計<sup>(1)</sup>に基づいた 4 階建て学校建物の 1 階を想定した 1/4 スケールの試験体である。縮小試験体の設計方針などについては文献(1)を参考されたい。図 1 に IFRB 試験体の詳細を示す。

### (2) 材料試験結果

表 1～表 3 に各材料試験結果を示す。コンクリートの設計基準強度は 21MPa としたが、設計値を約 40% 上回った。鉄筋の降伏強度も規格降伏点強度を 5~20% 程度上回る結果となった。縮小ブロックの 3 段プリズム圧縮強度およびヤング係数はそれぞれ実大の約 80% および約 60% に留まったが、ヤング係数の増減はブロック造壁のせん断応力に大きな影響を与えないことを確認した<sup>(1),(2)</sup>。

### (3) 計測計画および加力計画

本実験の計測計画は基本的に既実施した実験と同様である<sup>(1)</sup>。本計測計画の特徴としては、ブロック造壁の対角圧縮ストラットの形成角度や幅から壁体の架構全体へのせん断力負担分を定量的に算定するため、全てのブロック（CB）ユニット（計 114 箇所）に 3 軸歪ゲージを貼り付けたことである（図 1）。

図 2 に本実験の載荷システムを示す。試験体に作用する水平力は原則として部材角 0.1, 0.2, 0.4, 0.67, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0% までとしたが、試験体の破壊状況に応じて載荷ルールを変更または載荷を終了した。

## 4. 研究成果

### (1) 架構の破壊経過および荷重-変形関係

図 3～図 5 に荷重-変形関係、最終ひび割れ計測部材角における破壊状況および両柱の曲率分布をそれぞれ示す。

### ① BFRB 試験体

本試験体では、部材角+0.065%で左柱に曲げひび割れが、部材角+0.2%で右柱に曲げひび割れが観測された。部材角+0.4%では左柱にせん断ひび割れが、部材角+0.67%では右柱にせん断ひび割れが発生し、この部材角で柱主筋が降伏した。その後、部材角+2.0%まで耐力が徐々に上昇し、部材角+2.0%で最大耐力 34.5kN を記録した。本試験体は部材角+3.0%付近で両柱のせん断ひび割れが大きく開き、最終的にせん断破壊して終局に至った。

本試験体におけるせん断力の計算結果を図 3(a)に示す。ここで初期剛性、曲げひび割れモーメントおよび割線剛性は文献 (3) により算定し、曲げ終局モーメント  $M_U$  はコンクリートかぶり厚さ（20mm）が断面せい（110mm）に比べて相対的に大きいことを考慮した上でストレスブロックに基づき精算した<sup>(4)</sup>。また、曲げ終局時せん断力  $Q_{MU}$  ( $=2M_U/h$ ) の算定時の柱の可撓長さ  $h$  は、図

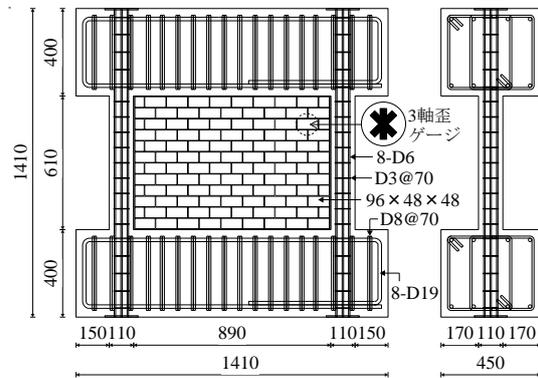


図 1 IFRB 試験体の詳細（単位：mm）

表 1 コンクリートの圧縮強度試験結果

圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 ( $\times 10^4$ MPa)	割裂強度 (MPa)
29.0	2.1	2.4

表 2 鉄筋の引張強度試験結果

直径	使用箇所	鉄筋規格	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 ( $\times 10^5$ MPa)
D6	柱主筋	SD345	371	525	2.1
D3	柱補強筋	SD390	425	495	1.9

表 3 縮小ブロックの 3 段プリズム圧縮試験結果

圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 ( $\times 10^4$ MPa)
6.5 (7.3)	1.1 (2.1)

\* 圧縮強度は空洞部を含む全矩形断面積で除した値で、( )の値は実大ブロックの結果である。

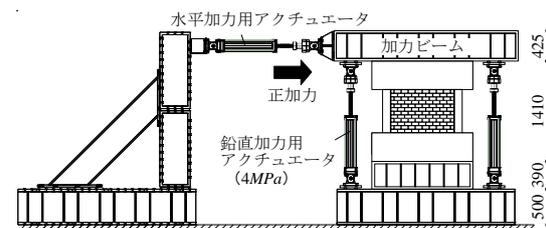


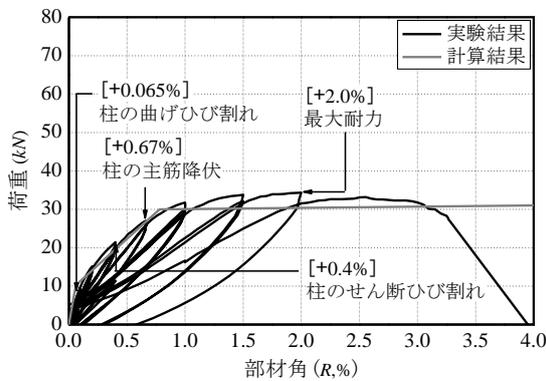
図 2 載荷システム（単位：mm）

5(a)より両柱ともに反曲点が柱高さのほぼ中央に位置したため、柱の全長さ ( $h_0=610\text{mm}$ ) を用いた。図 3(a)より、計算結果は実験結果と概ね対応する結果となった。

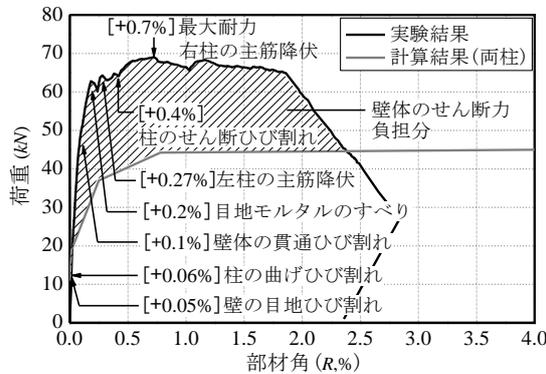
② IFRB 試験体

本試験体では、部材角+0.05%から壁体の目地ひび割れが生じ、その直後に左柱に曲げひび割れが発生した。部材角+0.1%では壁体の左下部に階段状のひび割れが発生し (図 4(b)の点線部分)、その部分が腰壁のように左柱下半分の変形を拘束したため (図 5(b)の左柱の図参照)、早い段階 (部材角+0.27%) で左柱の主筋が降伏した。その後、部材角+0.4%では左柱の柱頭部に、部材角+0.67%では右柱の柱脚部にそれぞれせん断ひび割れが生じた。また、部材角+0.7%付近では右柱の主筋が降伏し、最大耐力 69.5kN を記録した。その後、部材角 1.8%まで著しい耐力低下は生じなかったが、部材角+1.8%付近で左柱の柱頭部および右柱の柱脚部のせん断ひび割れが急激に開き、せん断破壊して終局に至った。

本試験体における両柱の負担せん断力の計算結果を図 3(b)に示す。本試験体では図 5(b)に示すとおり、部材角+0.1%で発生した壁体の左下部の階段状ひび割れによる左柱の変形拘束が荷重終了時まで続いたため、左柱の可撓長さ  $h$  は  $h_0/2$  と仮定した。一方、右柱の可撓長さ  $h$  は反曲点が柱高さのほぼ中央に位置したため、柱の内法高さ  $h_0$  を用いた。図 3(a)および(b)より、壁体の柱への変形拘束に



(a) BFRB 試験体



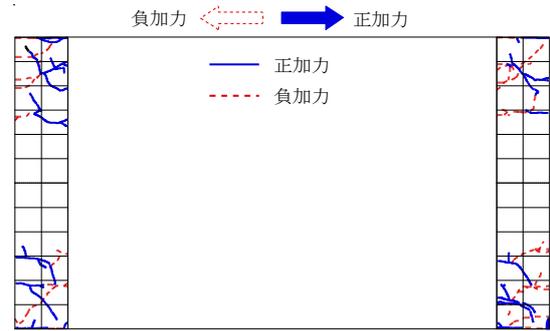
(b) IFRB 試験体

図 3 荷重-変形関係

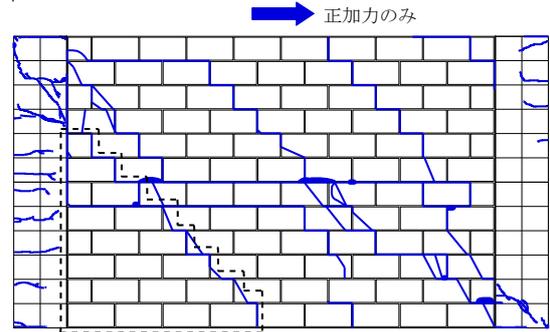
よって両柱のせん断力の和は BFRB 試験体より大きい結果となった。また、ブロック造壁の負担せん断力を、架構全体のせん断力から両柱のせん断力を差し引くことにより算定すると、ブロック全断面積に対する最大せん断応力度は約  $0.58\text{MPa}$  である (図 3(b)のハッチ部分)。

(2) 圧縮歪を用いた壁体の対角圧縮ストラットおよび負担せん断力の評価

本研究では、各 CB ユニットの 3 軸歪データを用い、壁体の対角圧縮ストラットのモデル化を行い、別途に実施した CB ユニットの材料試験結果に基づき壁体に作用するせん断力を算定する。ここでは、荷重初期段

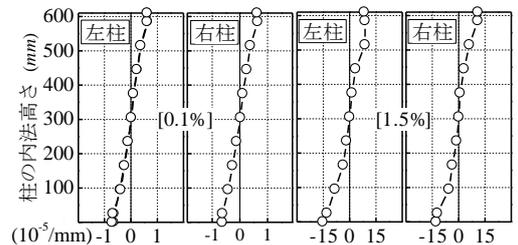


(a) BFRB 試験体 (+2.0%)

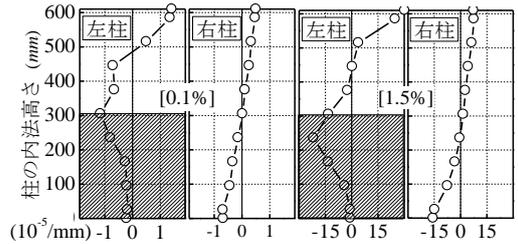


(b) IFRB 試験体 (+1.5%)

図 4 最終ひび割れ計測時のひび割れ発生状況



(a) BFRB 試験体



(b) IFRB 試験体

図 5 柱の曲率分布

階である部材角 0.2%および最大耐力が現れた部材角 0.67%を適用例として示す。

① 等価対角圧縮ストラットのモデル化

以下に、本研究で提案する壁体における対角圧縮ストラットの形成角度、等価幅および中心軸を含む等価対角圧縮ストラットのモデル化について述べる。

② 各 CB ユニットの圧縮主歪および角度

まず、一般的に使われている式(1)~(3)より各 CB ユニットの 3 軸歪データから圧縮主歪およびその角度を算出する。

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (1)$$

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy} - (\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (2)$$

$$\tan 2\theta_2 = \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \quad (3)$$

ここで、 $\varepsilon_1$  は引張主歪、 $\varepsilon_2$  は圧縮主歪、 $\varepsilon_x$  および  $\varepsilon_y$  は対角線上歪、 $\varepsilon_{xy}$  は鉛直方向の歪、 $\theta_2$  は圧縮主歪の水平方向となす角度である。

IFRB 試験体の部材角 0.2%および 0.67%における各 CB ユニットの圧縮主歪の算出結果を図 6 に示す。同図より、部材角 0.2%ではほとんどの圧縮主歪が対角線方向に分布するのに対し、部材角 0.67%では対角線方向に分布していない箇所が多数発生した。

③ 対角圧縮ストラットの形成角度

次に、上記②で算定した各 CB ユニットの圧縮主歪およびその角度を用い、壁体に作用する対角圧縮ストラットの形成角度  $\theta$  を求める。その際に、各 CB ユニットの圧縮主歪の角度  $\theta_{2j}$  を圧縮主歪  $\varepsilon_{2j}$  の重み付け平均により定義する (式(4))。ここで、水平方向となす角度  $\theta_{2j}$  が  $0^\circ$  から  $90^\circ$  の間に分布する圧縮主歪のみを算定対象とした。また、本試験体では左柱の変形を拘束する壁体部分 (図 6 の点線部分) については選定対象外とした。

$$\theta = \left( \frac{\sum_{j=1}^n \varepsilon_{2j} \times \theta_{2j}}{\sum_{j=1}^n \varepsilon_{2j}} \right) \quad (4)$$

ここで、 $\varepsilon_{2j}$  および  $\theta_{2j}$  は各 CB ユニットの圧縮主歪および角度、 $1$  は  $\theta_{2j}$  が  $0^\circ$  から  $90^\circ$  の間に分布する CB ユニットの総数である。

以上より、対角圧縮ストラットの形成角度  $\theta$  は部材角 0.2%ではおよそ  $45^\circ$ 、部材角 0.67%ではおよそ  $33^\circ$  と算定された。

④ 壁体の各区間における圧縮主歪の分布

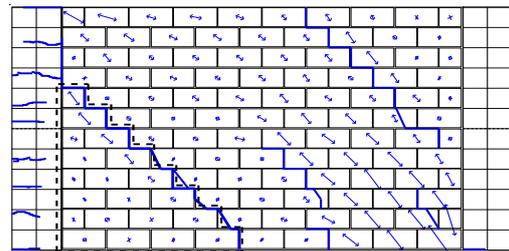
次に、壁体を対角圧縮ストラットの形成角度  $\theta$  の直角方向に均等に 15 区間に分割し (図 7 参照)、各区間  $i$  における圧縮主歪の算術平均  $\varepsilon_i$  を算定する。その結果を図 7 に示す。同図より、部材角 0.2%では圧縮主歪の平均値が対称的に分布しているのに対し、部材角 0.67%では区間 14 および区間 15 で減少する結果となった。これは図 6(b)に示したように圧縮主歪の選定対象外のものがあつたため

である。また、各区間の圧縮主歪の平均値をさらに平均した値 (以下、平均圧縮主歪) は部材角 0.2%ではおよそ  $290\mu$ 、部材角 0.67%ではおよそ  $220\mu$  である。

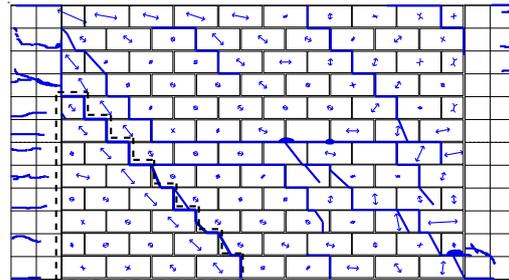
⑤ 対角圧縮ストラットの有効幅と等価幅

次に、図 8 に示す区間  $i$  における対角圧縮ストラットの有効幅  $W_{e,i}$  を算定する。ここで、有効幅とは区間ごとに本研究で定めた選定対象の圧縮主歪が存在する両端の CB ユニット間の距離を意味する。図 8 より、部材角 0.2%では各区間の有効幅がほぼ対称的に分布するのに対し、部材角 0.67%では選定対象外の圧縮主歪を有する CB ユニットがあつたため有効幅が減少する区間が見られた。

次に、対角圧縮ストラットの等価幅  $W_{eq}$  は



(a) 部材角 0.2%



(b) 部材角 0.67%

図 6 CB ユニットの歪分布

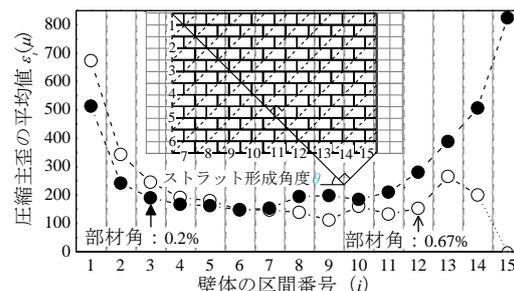


図 7 区間  $i$  における圧縮主歪の平均値

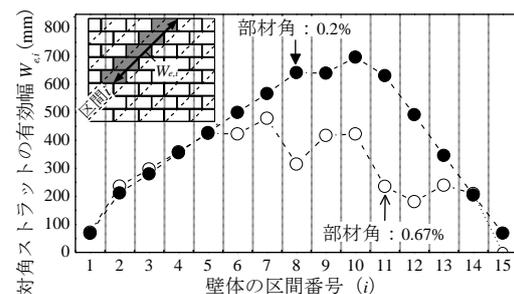


図 8 区間  $i$  における対角圧縮ストラットの有効幅

式(5)から算定する。同式は図9に示すように元のストラットおよび等価ストラットに同じ圧縮力 ( $P_{(a)}=P_{(b)}$ ) が作用すると仮定し定式化したものである。

$$W_{eq} = \left( \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i \times W_{e,i}) \right) / \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (n=15) \quad (5)$$

ここで、 $\varepsilon_i$  および  $W_{e,i}$  はそれぞれ区間  $i$  における圧縮主歪の平均値および対角圧縮ストラットの有効幅、 $n$  は分割した区間の数である。以上より、対角圧縮ストラットの等価幅は部材角 0.2% では約 315mm、部材角 0.67% では約 260mm と算定された。

◎ 対角圧縮ストラットの中心軸

最後に、区間ごとの対角圧縮ストラットの作用点をそれぞれ算出し、その中心軸を算定する。ここで、各区間  $i$  における対角圧縮ストラットの作用点  $C_{y_i}$  は、各区間  $i$  における圧縮主歪の大きさを考慮した式(6)より算出し(図10の●)、またその中心軸  $C_y$  は各作用点  $C_{y_i}$  および上記◎で求めた圧縮主歪の平均値  $\varepsilon_i$  を用い、式(7)より算定することとした。

$$C_{y_i} = \left( \sum_{i=1}^m \varepsilon_{2i} \times y_{2i} \right) / \sum_{i=1}^m \varepsilon_{2i} \quad (6)$$

$$C_y = \left( \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \times C_{y_i} \right) / \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (n=15) \quad (7)$$

ここで、 $\varepsilon_{2i}$  および  $y_{2i}$  は区間  $i$  におけるCBユニットの圧縮主歪およびその中心までの距離、 $m$  は区間  $i$  における圧縮主歪の角度  $\theta_{2j}$  が  $0^\circ$  から  $90^\circ$  に分布するCBユニットの数である。

以上の結果より、部材角+0.2%の場合の対角圧縮ストラットの等価対角圧縮ストラットのモデル化を図11に示す。

② ブロック造壁の負担せん断力の算定

上記①の検討結果およびCBユニットを用いた圧縮試験結果に基づき、IFRB試験体における壁体の負担せん断力を式(8)により算定する。

$$V_{cs} = W_{eq} \cdot t \cdot \sigma_m \cdot \cos \theta \quad (8)$$

ここで、 $W_{eq}$  は対角圧縮ストラットの等価幅、 $t$  は壁体の厚さ、 $\sigma_m$  は対角圧縮ストラットの平均圧縮主歪  $\varepsilon_m$  に対応する圧縮主応力度、 $\theta$  は対角圧縮ストラットの形成角度である。

また、式(8)の平均圧縮主歪  $\varepsilon_m$  に対応する圧縮主応力度  $\sigma_m$  は、図12および図13に示すCBユニットの  $45^\circ$  方向における圧縮応力度 ( $\sigma$ ) - 歪 ( $\varepsilon$ ) 関係から求めた。以下に、 $\sigma_m$  の求め方を示す。

③ CBユニットを用いた  $90^\circ$  および  $0^\circ$  方向の圧縮試験を行い、対角線方向に貼り付けた歪ゲージより  $\varepsilon_a$  ( $=(\varepsilon_{a1}+\varepsilon_{a2})/2$ ) および  $\varepsilon_b$  ( $=(\varepsilon_{b1}+\varepsilon_{b2})/2$ ) を算出する(図12(a)および(b))。

④ 次に、それぞれのヤング係数  $E_{ma}$  および  $E_{mb}$  を算出する。また、せん断弾性係数

$G_{ma}$  および  $G_{mb}$  を文献(5)に基づきそれぞれ  $0.4E_{ma}$  および  $0.4E_{mb}$ 、せん断歪  $\gamma_{ca}$  および  $\gamma_{cb}$  をそれぞれ  $\varepsilon_{ca}/\cos\theta$  および  $\varepsilon_{cb}/\cos\theta$  と仮定し、せん断応力度  $\tau_c$  によ

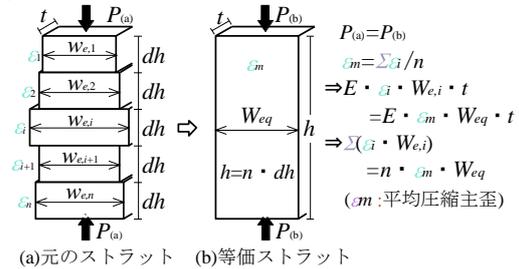


図9 対角圧縮ストラットの等価幅の算定方法

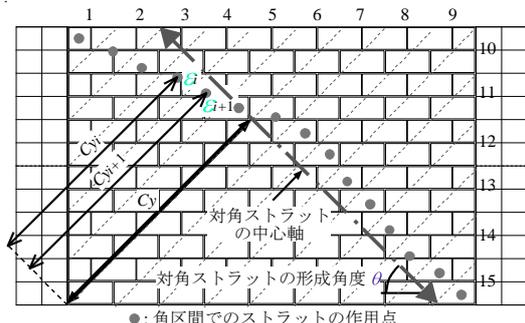


図10 対角圧縮ストラットの中心軸

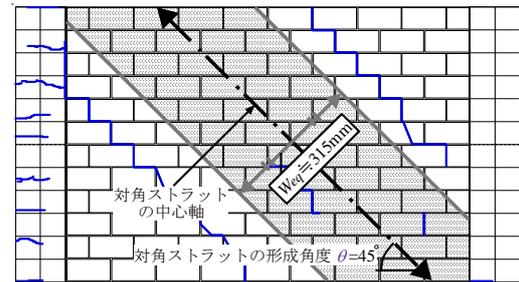


図11 等価対角圧縮ストラットのモデル化

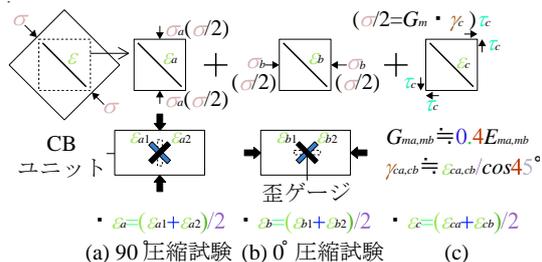


図12  $45^\circ$ 方向における応力度-歪関係

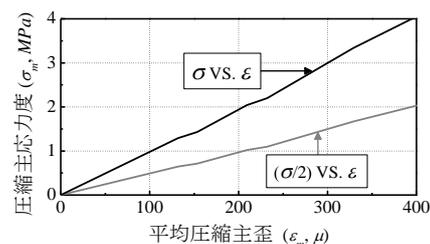


図13  $\sigma_m - \varepsilon_m$  関係

る対角線方向の歪 $\varepsilon_c$  ( $(\varepsilon_{ca}+\varepsilon_{cb})/2$ ) を算定する (図 12(c))。

- ③ 上記 3 つの歪の和 ( $\varepsilon_a+\varepsilon_b+\varepsilon_c$ ) により対角線方向の歪 $\varepsilon$ を算定し、応力度 $\sigma/2$ を 2 倍することにより、最終的に $\sigma_m-\varepsilon_m$ 関係を算出する (図 13)。

図 13 の $\sigma_m-\varepsilon_m$ 関係および式(8)より計算したブロック造壁の負担せん断力の推移と、これを考慮した架構全体の荷重-変形関係を実験結果と併せて図 14 に示す。同図より、両柱と壁体のせん断力の和により算定した架構全体のせん断力は全部材角にわたって実験結果と良く対応する結果となった。

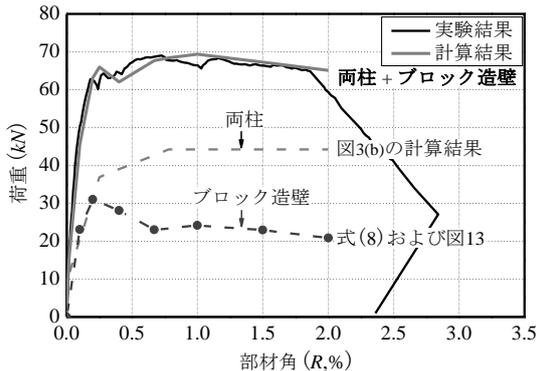


図 14 ブロック造壁および架構の荷重-変形関係

以上、本研究では URM 壁を含む RC 造架構の面内方向への静的載荷実験を実施し、壁体の負担せん断力および破壊メカニズムについて詳細に検討を行った。今後、本研究の最終目標である URM 壁を有する RC 造建物の被災度判定手法の実用化に向けて梁の変形を考慮した面外加振を含む動的載荷実験を別途計画中である。

#### 参考文献

- (1) 晋沂雄, 崔琥, 高橋典之, 中埜良昭, 梁の変形を考慮した無補強組積造壁を有する RC 造架構の静的加力実験, コンクリート工学年次論文集, 2009.7
- (2) FEMA306 : Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings, Applied Technology Council (ATC-43 Project), 1998
- (3) 日本建築学会 : 鉄筋コンクリート構造計算基準・同説明, 2010
- (4) 日本建築学会 : 鉄筋コンクリート構造計算基準・同説明, 1998
- (5) FEMA273 : NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (ATC-33 Project), 1997

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 5 件)

- ① Kiwoong JIN, Ho CHOI, Noriyuki TAKAHASHI and Yoshiaki NAKANO, Failure Mechanism and Seismic Capacity of RC Frames with URM Wall Considering Beam Deformation, 8<sup>th</sup> International Symposium on New Technologies for

Urban Safety of Mega Cities in Asia (8USMCA), Incheon, Korea, DVD-ROM, 2009.10, 査読有

- ② Ho CHOI and Yoshiaki NAKANO, Estimation of Seismic Capacity of Korean Typical School Buildings under Design Response Spectrum, 8<sup>th</sup> International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia (8USMCA), Incheon, Korea, DVD-ROM, 2009.10, 査読有
- ③ 晋沂雄, 崔琥, 高橋典之, 中埜良昭, 梁の変形を考慮した無補強組積造壁を有する RC 造架構の静的加力実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.397-402, 2009.7, 査読有

〔学会発表〕 (計 8 件)

- ① 楊勇, 晋沂雄, 崔琥, 高橋典之, 中埜良昭, 梁の変形拘束を考慮した無補強組積造壁を含む RC 造架構の耐震性能評価 (その 1 実験概要および剛梁型試験体の実験結果), (その 2 主歪を用いた壁体の対角圧縮ストラット有効幅の算定), 学術講演梗概集, 日本建築学会, 名古屋, 2012.9, (掲載決定)
- ② 晋沂雄, 崔琥, 高橋典之, 中埜良昭, 無補強組積造壁を含む RC 造架構の静的および動的載荷実験 (その 7 無補強組積造壁の復元力特性を考慮した解析的検討), 学術講演梗概集, 日本建築学会, 東京, Vol.C-2, pp.927-928, 2011.8
- ③ 崔琥, 晋沂雄, 高橋典之, 中埜良昭, 無補強組積造壁を含む RC 造架構の静的および動的載荷実験 (その 5 静的載荷実験の概要および結果), (その 6 梁変形の有無による架構の最大耐力の検討), 学術講演梗概集, 日本建築学会, 仙台, Vol.C-2, pp.907-910, 2009.8

〔その他〕

ホームページ等

<http://sismo.iis.u-tokyo.ac.jp/>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

中埜 良昭 (NAKANO YOSHIAKI)  
 東京大学・生産技術研究所・教授  
 研究者番号 : 1 0 2 1 2 0 9 4

##### (2) 研究分担者

高橋 典之 (TAKAHASHI NORIYUKI)  
 東京大学・生産技術研究所・助教  
 研究者番号 : 6 0 4 0 1 2 7 0  
 崔 琥 (CHOI HO)  
 東京大学・生産技術研究所・助教  
 研究者番号 : 4 0 5 1 2 0 0 9