

論文 無補強ブロック造壁を有する RC 造架構の残存耐震性能の評価

崔 琥^{*1}・中埜 良昭^{*2}・高橋 典之^{*3}

要旨：ブロック造壁を有する RC 造建物の残存耐震性能の評価手法の提案を目的に、ブロック造壁を多用する韓国の学校建物を対象とした 4 体の 1 層 1 スパン実大架構の正負交番繰り返し載荷実験を行った。本論文では、2 体の無開口試験体について柱およびブロック造壁の残留ひび割れ幅と残留部材角の関係および損傷度に応じた耐震性能低減係数について検討した。その結果、本研究で用いたモデルより、柱およびブロック造壁の残留ひび割れ幅から残留部材角が概ね評価できること、本試験体における損傷度に応じた耐震性能低減係数は、被災度区分判定基準のせん断柱および RC 壁とほぼ同程度であることが明らかになった。

キーワード：コンクリートブロック造壁，残留ひび割れ幅，損傷度，耐震性能低減係数

1. はじめに

1999 年台湾・集集地震，2003 年イラン・バム地震と，大きな建物被害を伴う地震災害が世界各地で後を絶たない。これらの地域で被害要因について耐震工学の観点から考察すると，無補強組積造壁が多用されていることが挙げられる。このような構造形式は耐震性に乏しいため，地震災害を軽減するためには耐震性の向上が必要である。しかし，未改修の建物が数多く存在している現状を考慮すると，発災前の耐震改修の推進のみならず発災後の被災度の定量的な判定手法や補修・補強の要否判定のために基礎的データを蓄積することが重要であるが，これらの研究に関するデータは殆どないのが現状である。

そこで，本研究では無補強コンクリートブロック（以下，ブロック）造壁を有する RC 造建物の残存耐震性能の評価手法の提案を目的に，ブロック造壁を多用する韓国の学校建物を対象に 4 体の実大架構の静的載荷実験を行った。本論文では，2 体の無開口試験体について柱およびブロック造壁の残留ひび割れ幅と残留部材角の関係および損傷度レベルに応じた耐震性能低減係数について検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 対象建物および試験体詳細

韓国では 1988 年より 6 階建て以上の建物に対する耐震設計が義務化されたが，対象建物は図 - 1 に示すように 1980 年代における韓国の学校建物の標準設計に基づいた耐震設計がなされていない 4 階建て学校建物である。本論文では梁間方向の 1 階を想定した IW1 試験体および 4 階を想定した IW2 試験体について検討した結果を述べる。試験体の詳細を図 - 2 に示す。両試験体ともに 1 層 1 スパンの実大平面架構で，架構全体のシアパン比 (M/QD) は約 0.3 である。両試験体は柱主筋の本数および直径が異なる。

2.2 加力計画および材料特性

本試験体の加力は，1 台の水平加力用アクチュエータによりせん断力を，2 台の鉛直加力用アクチュエータにより軸力を載荷するシステムとした。試験体に作用する水平力は，正負交番で試験体の頂部部材角 0.1，0.2，0.4，0.67，1.0 および 2.0% までそれぞれ 2.5 サイクルずつ載荷する計画とした。試験体に作用する鉛直力は，IW1 試験体で 720kN × 2 台，IW2 試験体で 180kN × 2 台の一定軸力を与える計画とした。

*1 JSPS 外国人特別研究員 博(工) (正会員)

*2 東京大学 生産技術研究所教授 工博 (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所助手 博(工) (正会員)

表 - 1 ~ 表 - 3 に材料試験結果を，図 - 3 に両試験体の荷重 - 変形関係を示す。その他の実験に関する計測計画および破壊経過などの詳細内容については，文献 1)を参考されたい。

2.3 ひび割れ幅の計測方法

柱およびブロック造壁のひび割れ幅を各サイクルのピーク時および除荷時に，クラックスケールを用いて目視により計測した。図 - 4 にその計測方法を示す。

柱のひび割れ幅については，曲げひび割れ幅は柱の最外縁の幅を，せん断ひび割れ幅は最大幅部分を計測した。ブロック造壁のひび割れ幅については，ブロック造壁の水平挙動を調べるため，ブロックの縦目地に生じたひび割れ幅(図 - 4 中の (a))を，またブロック造壁の回転挙動を調べるため，ブロックの横目地のひび割れ幅(図 - 4 中の (b))を計測した。

3. 残留ひび割れ幅と残留部材角の関係

3.1 柱の残留ひび割れ幅と残留部材角の関係

文献 2)では，部材の残留変形を曲げ変形とせん断変形に分離し図 - 5 のようにモデル化した。本節ではこの手法を用い，柱の残留曲げおよび残留せん断ひび割れ幅の最大値からブロック造壁を有する RC 造架構の残留変形の評価を試みた。

表 - 1 コンクリートの材料試験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
IW1 試験体	27.29	2.28 × 10 ⁴	2.36
IW2 試験体	29.63	2.30 × 10 ⁴	2.41

表 - 2 鉄筋の材料試験結果

直径	使用箇所	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
D10	柱補強筋	404	581	1.91 × 10 ⁵
D19	IW2 試験体の柱主筋	432	599	1.95 × 10 ⁵
D22	IW1 試験体の柱主筋	498	598	1.88 × 10 ⁵

表 - 3 ブロック，モルタルの材料試験結果

ブロック (空洞部を除く有効断面積で除した値)		モルタル
単体圧縮強度	プリズム圧縮強度	圧縮強度
27.04 N/mm ²	23.29 N/mm ²	36.14 N/mm ²

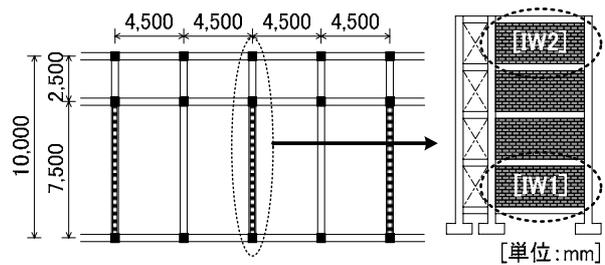


図 - 1 1980 年代の韓国学校建物の標準設計

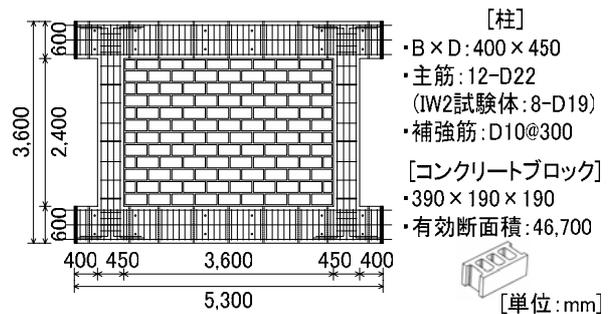


図 - 2 試験体の詳細図

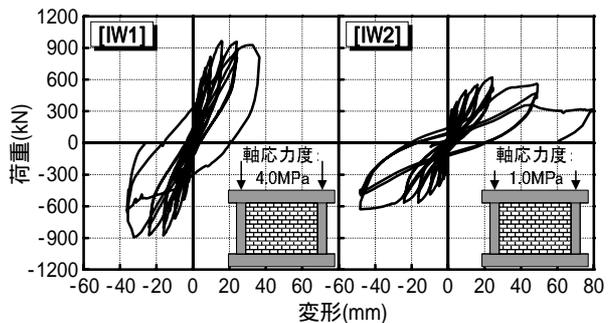


図 - 3 荷重 - 変形関係

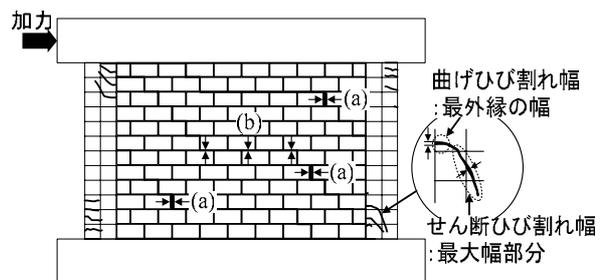
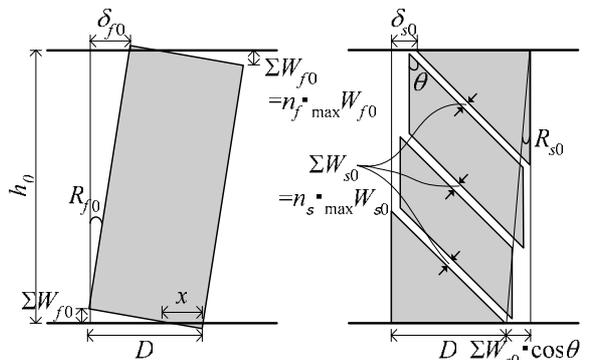


図 - 4 ひび割れ幅の計測方法



(a) 残留曲げ変形 (b) 残留せん断変形

図 - 5 柱の残留変形のモデル化²⁾

式(1)および(2)より，残留曲げひび割れ幅および残留せん断ひび割れ幅の最大値($\max W_{f0}$ および $\max W_{s0}$) から残留曲げ部材角および残留せん断部材角 (R_{f0} および R_{s0}) が求められ，柱の残留部材角は，両者の合計で評価する ($R_0 = R_{f0} + R_{s0}$)

$$R_{f0} = \frac{\Sigma W_{f0}}{D-x} = \frac{n_f \cdot \max W_{f0}}{D-x} \quad (1)$$

$$R_{s0} = \frac{\Sigma W_{s0} \cdot \cos \theta}{h_0} = \frac{n_s \cdot \max W_{s0} \cdot \cos \theta}{h_0} \quad (2)$$

ここで， R_{f0} および R_{s0} は柱の残留曲げおよび残留せん断部材角， ΣW_{f0} および $\max W_{f0}$ は柱の残留曲げひび割れ幅の合計値および最大値， ΣW_{s0} および $\max W_{s0}$ は柱の残留せん断ひび割れ幅の合計値および最大値， n_f および n_s は残留曲げおよびせん断ひび割れ幅の最大値に対する合計値の割合， D は柱せい， x は断面の圧縮縁から中立軸までの距離， h_0 は柱の内法高さ， θ はせん断ひび割れと材軸のなす角度である。

IW1 および IW2 試験体を対象に，正方向加力の除荷時の残留曲げおよび残留せん断ひび割れ幅の最大値をそれぞれ図 - 6 および図 - 7 に，式(1)および式(2)より求めた柱の残留曲げおよび残留せん断部材角と架構の残留部材角の関係を図 - 8 に示す。両試験体ともに，ひび割れ幅より求めた残留曲げと残留せん断部材角の和から架構の残留部材角が概ね評価できた。また，架構の残留部材角に対する残留曲げおよび残留せん断部材角は，せん断ひび割れ発生後の部材角 0.4% 以降それぞれ 80%，20% 程度を占めた。

3.2 ブロック造壁の残留ひび割れ幅と残留変形

両試験体のブロック造壁の縦目地に生じた残留ひび割れ幅の最大値 ($\max W_0$) と架構の残留変形 (δ_0) の比， $[\max W_0 / \delta_0]$ を図 - 9 に示す。 $[\max W_0 / \delta_0]$ は，IW1 試験体の部材角 1.5% を除いて 0.1 ~ 0.15 程度に留まり，1.0 を遥かに下回ったが，ブロック造壁の残留ひび割れ幅の最大値は残留変形に対して安定的に分布している。本研究では， $[\max W_0 / \delta_0]$ が 0.1 ~ 0.15 程度に留まる原因をブロック造壁のひび割れ発生メカニズムを用いて検討したが，その詳細は文献 3) を参考されたい。

4. 本試験体における残存耐震性能の評価

4.1 耐震性能低減係数と残留ひび割れ幅の関係

(1) 解析的検討

ブロック造壁を有する RC 造架構の耐震性能低減係数 η と残留ひび割れ幅の関係を調べるため，図 - 3 の両試験体の荷重 - 変形関係に基づき，図 - 10 に示すように荷重 - 変形関係をモデル化

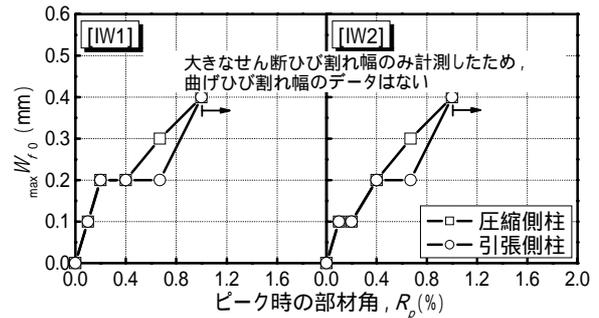


図 - 6 柱の残留曲げひび割れ幅の最大値

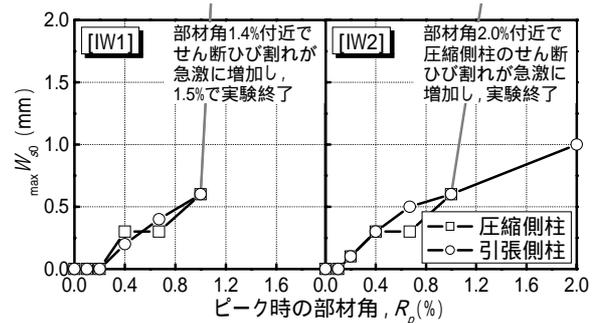


図 - 7 柱の残留せん断ひび割れ幅の最大値

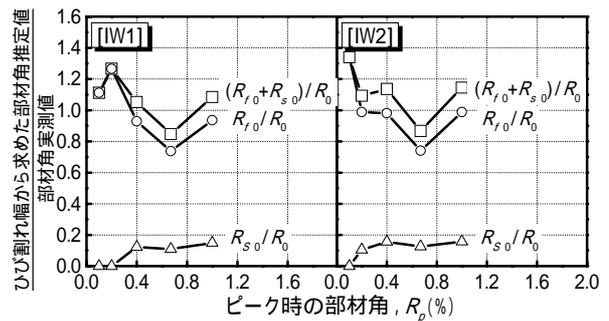


図 - 8 残留ひび割れ幅と残留部材角の関係

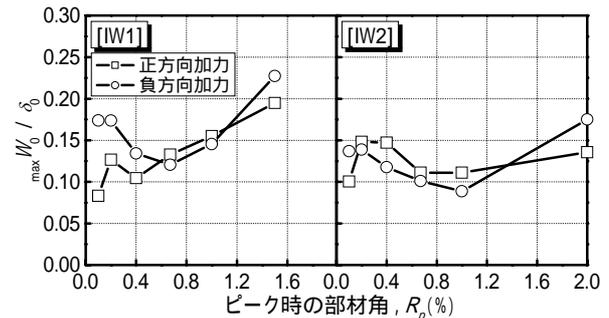


図 - 9 残留変形に対する残留ひび割れ幅の比

した。ここで、降伏荷重を Q_y 、降伏時部材角を $R_y (=0.67\%)$ とし、ひび割れ強度 Q_{cr} 、ひび割れ強度時の部材角 R_{cr} をそれぞれ $Q_y/3$ 、 $R_y/15$ とした。架構の変形能力は、終局塑性率 μ によって変化するものとし、終局部材角 R_u 以後は $(\mu+1)R_y$ を目指して耐力低下が起こるものとした。耐震性能低減係数 η は図 - 10 および式(3)に示すように、全エネルギー吸収能力 E_{max} に対する残存エネルギー吸収能力 E_r の割合として定義する。

$$\eta = \frac{E_r}{E_d + E_r} = \frac{E_r}{E_{max}} \quad (3)$$

本研究では、ブロック造壁を有する RC 造架構の履歴則を、Takeda Model を用いてモデル化した(実験結果より除荷剛性低減指数 α は 0.7 とした)。このモデルを用い、終局塑性率 μ を $\mu = 1 \sim 6$ まで変化させたときの耐震性能低減係数 η と残留部材角 R_0 との関係を図 - 11(a) に示す。

同図の結果を、耐震性能低減係数 η と残留ひび割れ幅の関係に変換するため、実験結果に基づいて $R_{f0} = 0.8R_0$ 、 $R_{s0} = 0.2R_0$ (図 - 8) および $n_f = n_s = 2$ (図 - 12) とし、 $x = 0.2D$ 、 $\theta = 45^\circ$ 、 $h_0 = 2,400\text{mm}$ とすると、式(1)および式(2)より柱の残留曲げひび割れ幅の最大値 ($\max W_{f0}$) および残留せん断ひび割れ幅の最大値 ($\max W_{s0}$) と残留部材角 (R_0) の関係が得られ、耐震性能低減係数 η と柱の残留ひび割れ幅の関係が求められる。その結果を図 - 11(b) および(c) に示す。

一方、ブロック造壁の残留ひび割れ幅については、図 - 9 の結果より、 $[\max W_0 / \delta_0]$ が 0.125 程度 (0.1 ~ 0.15 の範囲) に凡そ分布している関係を用いると、図 - 11(d) の耐震性能低減係数 η と残留部材角 R_0 の関係が、耐震性能低減係数 η とブロック造壁の残留ひび割れ幅の関係に換算できる。その結果を図 - 11(d) に示す。

(2) 実験結果による検証

図 - 11(a) ~ (d) を求める際に用いたモデル化の妥当性を検証するため、両試験体の実際の荷重 - 変形関係の包絡曲線と実験で測定した柱およびブロック造壁の残留ひび割れ幅から、耐震性能低減係数 η と残留部材角および残留ひ

び割れ幅の関係を求める。

まず、両試験体の荷重 - 変形関係の包絡曲線を図 - 13 に示す。ここで、終局部材角 R_u は最大耐力が 80% に低下する時の部材角とすると、IW1 試験体の終局塑性率はおよそ 2、IW2 試験体の終局塑性率はおよそ 3 になる。図 - 14(a) は、実験の荷重 - 変形関係から求めた耐震性能低減係

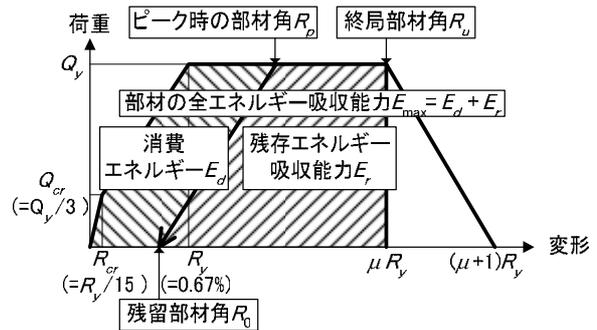


図 - 10 荷重 - 変形関係のモデル化

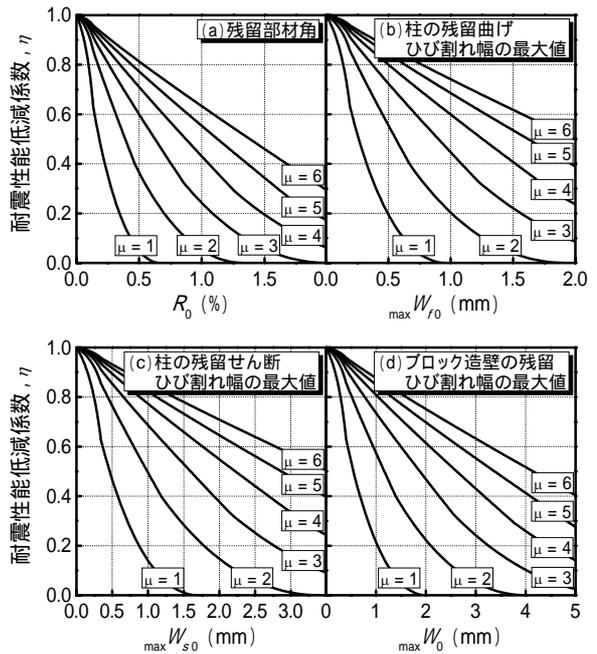


図 - 11 耐震性能低減係数と残留部材角および残留ひび割れ幅の関係

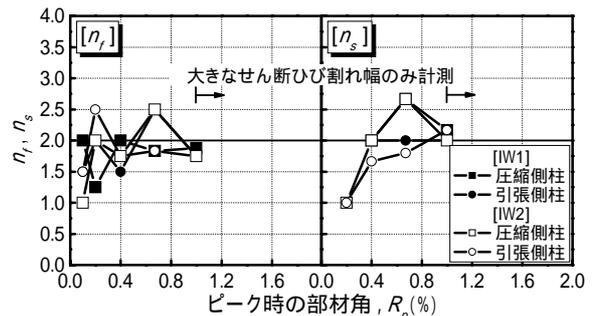


図 - 12 n_f および n_s の計測結果

数 η と残留部材角 R_0 の関係を、図-11(a)と併せて示したものである。同図から、IW1 試験体は終局塑性率が2の場合の解析結果と、IW2 試験体は終局塑性率が3の場合の解析結果とそれぞれ概ね近似しており、終局塑性率をパラメータとした耐震性能低減係数 η と残留部材角 R_0 の関係を解析的によく再現できたと考えられる。

次に、実験で測定した柱およびブロック造壁の残留ひび割れ幅を用いると、耐震性能低減係数 η と柱およびブロック造壁の残留ひび割れ幅の関係が得られる。その結果を図-14(b)~(d)に、解析の結果(図-11(b)~(d))と併せて示す。同図から、両者は、いずれも若干ばらつきが見られるものの、終局塑性率が2と3の場合を概ね近似しており、終局塑性率をパラメータとした耐震性能低減係数 η と柱およびブロック造壁の残留ひび割れ幅の関係が解析的に再現できたと考えられる。以上より、ブロック造壁を有するRC造架構について、柱およびブロック造壁の残留ひび割れ幅の最大値を計測することによって、架構の耐震性能低減係数 η を概ね判断することが可能となった。

4.2 損傷度に応じた耐震性能低減係数

各損傷度レベルに応じた耐震性能低減係数 η を評価するため、被災度区分判定基準⁴⁾および実験時に観察した破壊状況に基づき、地震発生時に被害が最も大きいと予想される1階部分を想定したIW1試験体の荷重-変形関係から、図-15に示すように損傷度を区分する。本研究では、ひび割れ発生から最大耐力に至るまでを損傷度および、かぶりコンクリートが圧壊するまでは耐力の低下がほとんど見られないため損傷度、主筋座屈、コンクリートの剥落およびせん断ひび割れ幅の急激な増加が見られる前までは損傷度、その後は損傷度と区分した。

図-16(a)~(c)に、上記の損傷度の区分結果と、図-14(b)~(d)に示した耐震性能低減係数 η と柱およびブロック造壁の残留ひび割れ幅の関係を併せて示す。図-16(a)~(c)を参考に、実験結果と解析結果の平均値から損

傷度の下限に相当する値を各損傷度レベルに応じた耐震性能低減係数 η とした。また、損傷度の時点では架構が耐力低下し始めていることから0とした。表-4に、ブロック造壁を有するRC造架構における各損傷度レベルに応じた耐震性能低減係数 η を、被災度区分判定基準で定めている耐震性能低減係数 η と併せて示す。本論文の結果と被災度区分判定基準のせん断柱およびRC壁の耐震性能低減係数 η はほぼ同様の結果となっている。これは、ブロック造壁を有するRC造架構は、若干靱性能を持っているものの、最大耐力を長く維持できずせん断破壊したため、被災度区分判定基準のせん断柱およびRC壁の耐震性能低減係数 η と同様の値であることはある程度予測可能な結果だったと考えられる。

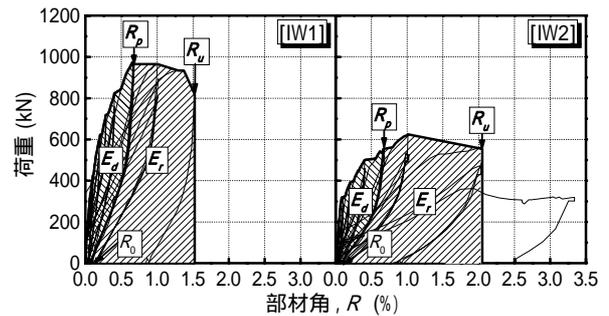


図-13 荷重-変形関係の包絡曲線

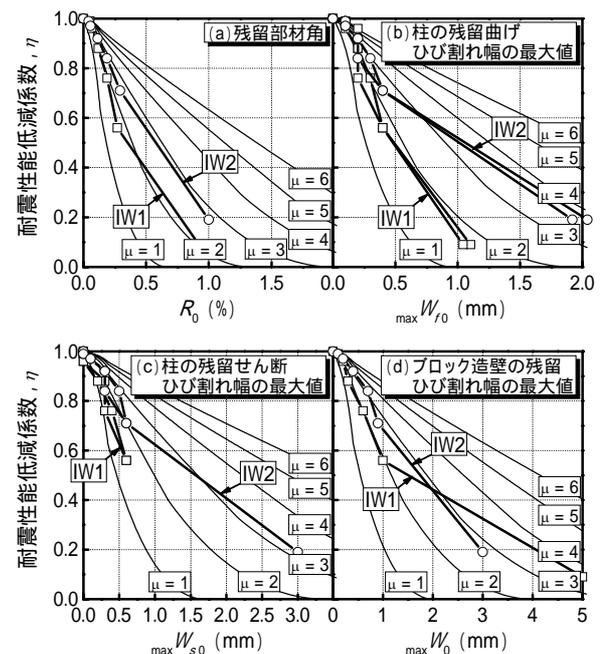


図-14 耐震性能低減係数と残留部材角および残留ひび割れ幅の関係

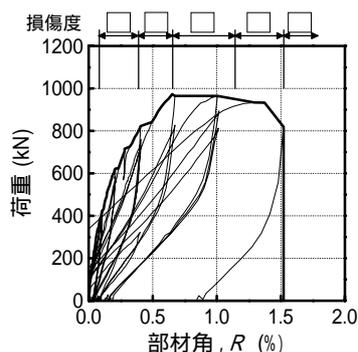


図 - 15 荷重 - 変形関係と損傷度

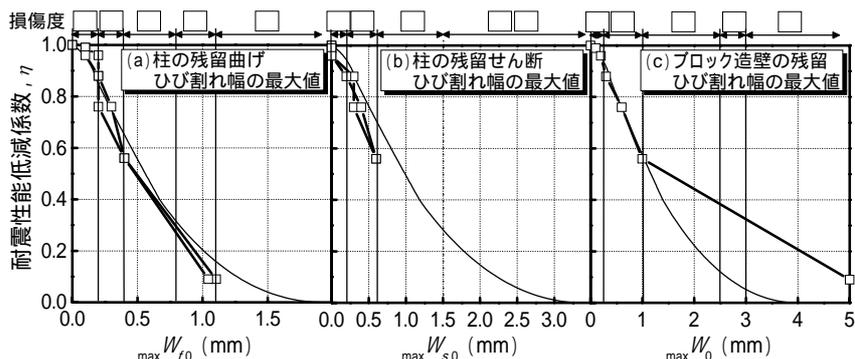


図 - 16 損傷度に応じた耐震性能低減係数 η

表 - 4 損傷度に応じた耐震性能低減係数 η

損傷度	被災度区分判定基準		本研究の結果
	曲げ柱	せん断柱 / RC 壁	
	0.95	0.95	0.90
	0.75	0.60	0.60
	0.50	0.30	0.30
	0.10	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00

5. まとめ

本研究では、韓国における 1980 年代の学校建物の標準設計に基づいたブロック造壁を有する RC 造建物の残存耐震性能の評価手法の提案を目的に、柱およびブロック造壁の残留ひび割れ幅と残留部材角の関係および各損傷度レベルに応じた耐震性能低減係数について検討を行った。本研究により得られた成果をまとめると以下のようになる。

(1) 本研究で用いたモデルより、柱の残留曲げひび割れ幅および残留せん断ひび割れ幅の最大値から架構全体の残留部材角が概ね評価できることを確認した。また、ブロック造壁の残留ひび割れ幅の最大値と架構全体の残留変形の比 ($[\max W_0 / \delta_0]$) は、0.1 ~ 0.15 程度に安定的に分布していることを確認した。

(2) 耐震性能低減係数 η と残留部材角および残留ひび割れ幅の関係について、モデル化に基づく結果と実験結果と比較した結果、両者は若干ばらつきが見られるものの、両試験体の終局塑性率である 2 と 3 をそれぞれ概ね近似しており、終局塑性率をパラメータとした耐震性能低減係

数 η と残留部材角および残留ひび割れ幅の関係がよく再現できた。これらの結果より、ブロック造壁を有する RC 造架構について、柱およびブロック造壁の残留ひび割れ幅の最大値から架構の耐震性能低減係数 η を判断することが可能となった。

(3) 各損傷度レベルに応じた耐震性能低減係数 η について、本論文の結果と被災度区分判定基準のせん断柱および RC 壁を対象とした基準値はほぼ同様であった。ブロック造壁を有する RC 造架構は、若干靱性能を持っているものの、最大耐力を長く維持できずせん断破壊したため、せん断柱および RC 壁の耐震性能低減係数 η と同様の値となったものである。

参考文献

- 1) 崔琥, 中埜良昭, 真田靖士: 無補強組積造壁を有する鉄筋コンクリート造実大架構の静的加力実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.2, pp.1183-1188, 2004
- 2) 文野正裕, 前田正樹, 長田正至: 部材の残余耐震性能に基づいた震災 RC 造建物の被災度評価法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.3, pp.1447-1452, 2000
- 3) 崔琥, 中埜良昭, 高橋典之: ブロック造壁を有する鉄筋コンクリート造架構におけるブロック造壁のひび割れ幅と変形の関係, 構造工学論文集, Vol.52B, 2006
- 4) 日本建築防災協会: 震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 2001