

# 잔류균열폭 및 손상도에 기초한 무보강 조적벽체를 갖는 RC 골조의 잔존내진성능 평가

## Residual Seismic Capacity Evaluation of RC Frames with URM Infill Wall Based on Residual Crack Width and Damage Class

최 호<sup>1)</sup>

Choi, Ho

**국문 요약** >> 지진피해를 입은 건물의 주된 관심사는 건물에 남아 있는 내진성능 및 여진에 대한 안전성을 판단하는데 있다. 따라서 지진피해를 입은 지역 사회의 조속한 복귀를 위해서는 건물의 잔존내진성능 평가방법을 확립해 두는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 무보강 조적채움벽체를 갖는 RC 건물의 잔존내진성능 평가방법 개발을 주목적으로, 전형적인 학교건물을 대상으로 축력레벨을 변수로 한 실스케일, 단층 1스팬 실험체를 제작하여 정적 반복가력실험을 실시하였다. 실험 중 잔존내진성능을 판정하는데 유용한 정보 중 하나인 잔류균열폭을 상세히 측정하였다. 본 논문에서는 잔류균열폭과 잔존내진성능과의 관계에 대해서 실험적, 해석적으로 검토하고 잔존내진성능 평가를 위한 각 손상도 레벨에 대응하는 내진성능 저감계수를 제안한다.

**주요어** 무보강 조적벽체, RC 건물, 잔존내진성능, 잔류균열폭, 손상도, 학교건물

**ABSTRACT** >> Following an earthquake, the major concerns for damaged buildings are their safety/risk in the event of aftershocks, and thus a quantitative damage assessment must be performed in order to evaluate their residual seismic capacity and to identify necessary actions for the damaged buildings. Post-event damage evaluation is therefore as essential for the quick recovery of a damaged community as pre-event seismic evaluation and strengthening of vulnerable buildings. The objective of this study is to develop a post-earthquake seismic evaluation method for RC frames with URM infill wall for typical school buildings. For this purpose, full-scale, one-bay, single-story specimens having different axial loads in columns are tested under cyclic loadings. During the tests, residual crack widths, which can also be found in damaged buildings, are measured in order to estimate the residual seismic capacity from the observed damage. In this paper, the relationship between the measured residual crack width and the residual seismic capacity is discussed analytically and experimentally, and reduction factors are proposed to estimate the residual seismic capacity based on the observed damage level.

**Key words** URM infill wall, RC building, Residual seismic capacity, Residual crack width, Damage class, School building

### 1. 서론

1995년 일본의 효고현 남부지진 발생 후 일본에서는 건물의 내진성능 평가뿐만 아니라 지진피해를 받은 건물의 잔존내진성능 평가의 중요성이 대두되어, 철근콘크리트(이하, RC) 부재에 대한 지진 피해도 판정방법이 확립되었다.<sup>(1),(2)</sup>

한편 최근 막대한 건물피해를 동반한 지진재해를 살펴보면 RC 골조 내에 무보강 조적채움벽체를 갖는 구조에 심각한 피해가 발생하고 있음을 알 수 있다. 이런 건물이 지진발생에 대비하여 내진성능 개선을 위한 보강 등이 전혀 이루어지지 않고 있다는 점을 고려한다면 지진발생 후의 피해도의 정량적 판정방법에 대한 기초 데이터를 축적하는 것이 매우 중요하다고 판단된다. 그러나 국내는 물론 일본 등의 지진 선진국에서도 무보강 조적벽체를 갖는 RC 골조의 잔존내진성능 평가에 대한 연구 데이터가 거의 없는 것이 현실이다.

따라서 본 연구에서는 무보강 조적채움벽체를 갖는 RC

<sup>1)</sup> 정희원·일본 동경대학 생산기술연구소, 조수  
(대표저자: choiho@iis.u-tokyo.ac.jp)

본 논문에 대한 토의를 2009년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 7. 7 / 수정일 : 2009. 9. 25 / 게재확정일 : 2009. 9. 28)

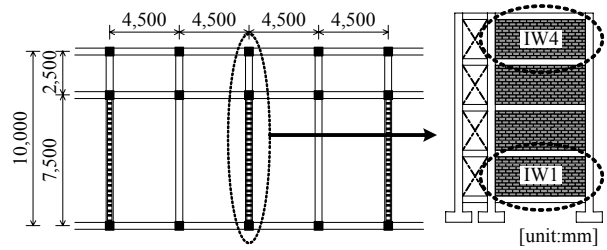
건물의 잔존내진성능 평가방법 개발을 목적으로, 무보강 콘크리트블록(이하, 블록)을 칸막이벽 등으로 많이 사용하고 있는 전형적인 기존 학교건물을 대상으로 실스케일, 단층 1스팬 실험체를 제작, 정적 반복가력실험을 실시하였다.

본 논문에서는 저자에 의해 수행된 블록벽체를 갖는 RC 골조의 정적가력실험 결과<sup>(3)</sup> 및, 저자가 발표한 RC 기둥 및 블록벽체의 잔류균열폭과 잔류변형과의 관계에 관한 연구 내용을 토대로<sup>(4),(5)</sup>, 잔류균열폭과 잔존내진성능과의 관계에 대해서 실험적, 해석적으로 상세히 검토하고, 무보강 조적채움벽체를 갖는 RC 골조의 각 손상도 레벨에 대응하는 내진 성능 저감계수를 제안하여 지진피해 조사 시 적용 가능한 정보를 제공한다.

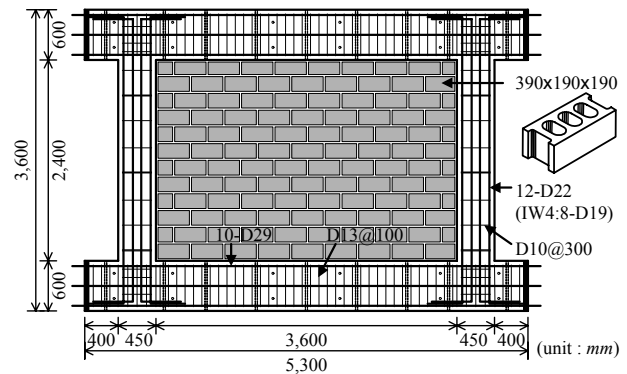
## 2. 실험개요<sup>(3)</sup>

본 연구의 대상건물은 1980년대 학교건물 표준설계에 기초한 내진설계가 적용되지 않은 4층 RC 학교건물로 설정하였다. 그림 1에 1980년대 학교건물의 표준설계 예<sup>(6)</sup>를 나타낸다. 본 연구에서는 이 중 단변방향의 1층 부분을 대상으로 한 IW1 실험체 및 4층 부분을 대상으로 한 IW4 실험체에 대해 정적 반복가력실험을 실시하였다. IW1 실험체 상세를 그림 2에 나타낸다. 두 실험체 모두 단층 1스팬의 실스케일 평면 골조이며, 기둥 배근(주근 직경 및 개수, 그림 2 참조) 및 작용 축력을 제외하고는 두 실험체의 제원은 모두 동일하다. 그림 3에 본 실험의 재하 시스템을 나타낸다. 수평력은 정적 반복가력을 원칙으로 최대변형 시 부재각  $R_p$ (=수평변위( $\delta_p$ ) / 기둥 순높이( $h_0$ )) 0.1, 0.2, 0.4, 0.67, 1.0, 2.0%를 각각 2.5 사이클씩 가력하였다. 축력에 대하여 IW1 실험체는  $1,440 \text{ kN}$ ( $720 \text{ kN} \times 2$ 개, 기둥 1개당 축응력도:  $4.0 \text{ N/mm}^2$ ), IW4 실험체는  $360 \text{ kN}$ ( $180 \text{ kN} \times 2$ 개, 기둥 1개당 축응력도:  $1.0 \text{ N/mm}^2$ )의 일정축력을 도입하였다.

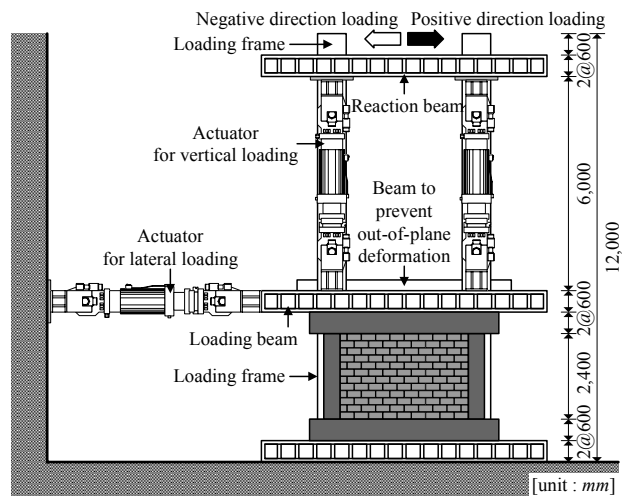
그림 4에 IW1 및 IW4 실험체의 하중-변위 관계를 나타낸다. IW1 실험체는 부재각 0.1%에서부터 기둥에 휨균열



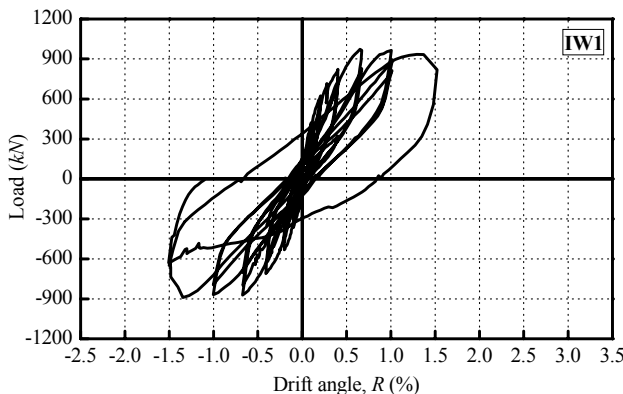
〈그림 1〉 Standard design of school buildings in the 1980s



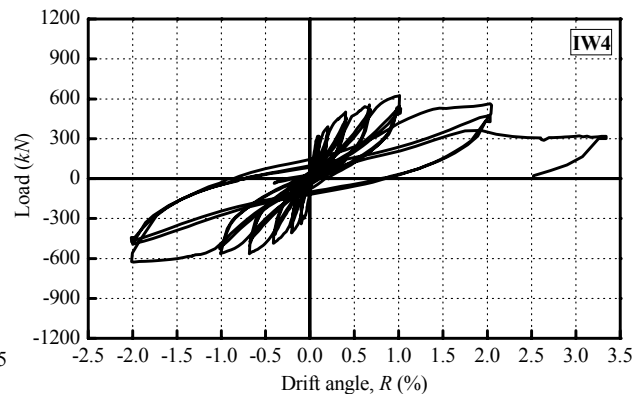
〈그림 2〉 Details of specimen IW1



〈그림 3〉 Test setup



(a) Specimen IW1



(b) Specimen IW4

〈그림 4〉 Load-drift angle relation of specimens IW1 and IW4

이, 블록 줄눈에도 균열이 발생하기 시작하였다. 부재각 0.2%에서는 블록 줄눈의 균열이 대각선 방향의 계단형태로 진전하였고, 부재각 0.4%에서는 기둥에 전단균열이 관측되었다. 부재각 0.67%에서 최대내력 960 kN을 기록한 후 부재각 1.4%에서 압축측 기둥 주각부의 전단균열이 급격히 증가하기 시작하여 부재각 1.5%에서 내력이 약 80%로 저하하였기 때문에 실험을 종료하였다. IW4 실험체의 파괴경과는 기둥 및 블록체움벽체의 균열 발생시기 및 진전상황이 IW1 실험체와 거의 동일하였다. 본 실험체는 부재각 1.0%에서 최대내력 630 kN을 기록하였고 부재각 2.0%에서 약간의 내력저하가 발생하였지만 최종 부재각인 부재각 3.33%에서 압축측 기둥 주각부의 전단균열이 급격히 증가하기 전까지는 현저한 하중저하가 발생하지 않았다.

보다 상세한 각 재료실험결과, 가력계획, 제측계획 및 실험결과는 최호<sup>(3)</sup>의 연구를 참조 바란다.

### 3. 잔류균열폭 및 손상도에 기초한 잔존내진성능 평가방법의 기본개념

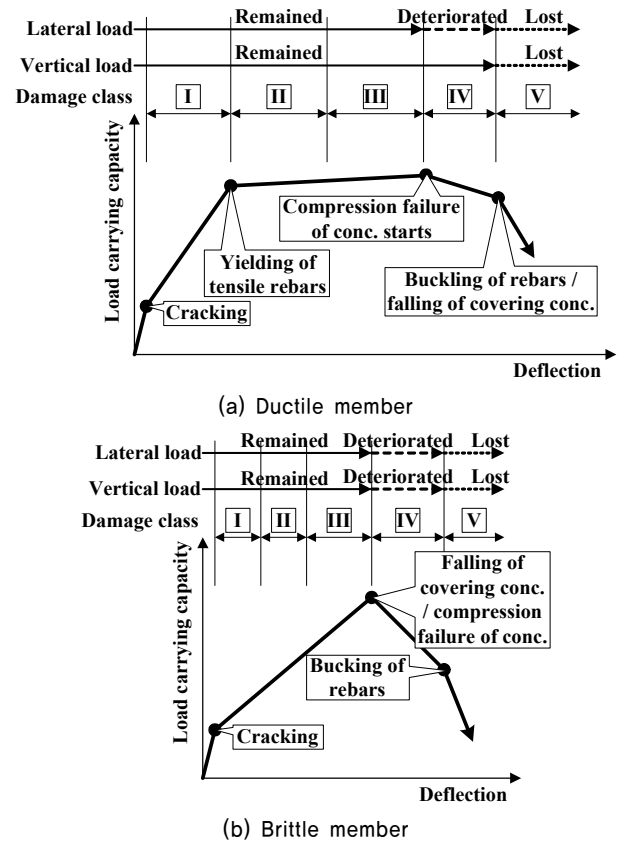
일본의 지진피해를 입은 건축물의 피해도구분 판정기준<sup>(1),(2)</sup>에서는 표 1 및 그림 5에 나타난 바와 같이 기둥 및 내력벽의 손상도를 부재의 하중-변형 관계를 토대로 부재의 변형능력(휨부재 또는 전단부재)과 잔류균열폭, 콘크리트의 파손상태 및 철근의 항복정도에 따라 손상도 I~V의 5단계로 분류하고 있다. 여기서 잔류균열폭은 건물 및 부재의 손상상태를 판단하는 중요한 정보 중 하나로, 건물 및 부재가 지진 시 경험한 응답 및 잔존내진성능을 평가하는데 있어 귀중한 정보를 제공한다. 따라서 본 연구에서는 지진에 의해 피해를 입은 건물의 잔존내진성능을 평가하는데 지진피해 현장에서 손쉽게 측정 가능한 잔류균열폭을 이용한다.

〈표 1〉 Damage class definition of RC columns and Walls<sup>(1),(2)</sup>

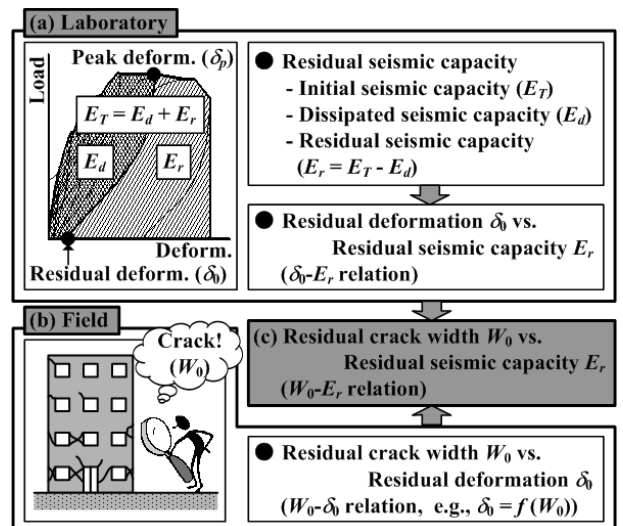
Damage class	Description of damage
I	- Visible narrow cracks on concrete surface (Crack width is less than 0.2mm)
II	- Visible clear cracks on concrete surface (Crack width is about 0.2-1.0mm)
III	- Local crush of concrete cover - Remarkable wide cracks (Crack width is about 1.0-2.0mm)
IV	- Remarkable crush of concrete with exposed rebars - Spalling off of concrete cover (Crack width is more than 2.0mm)
V	- Buckling of rebars - Cracks in core concrete - Visible vertical and/or lateral deformation in members - Visible settlement and/or leaning of the building

본 연구에서 도입한 잔류균열폭에 기초한 잔존내진성능 평가방법에 대한 기본개념을 그림 6에 나타낸다.

그림 6의 (a)에 나타난 바와 같이 부재 또는 골조에 대한 실험을 실시하여 하중-변형 관계 및 최대변형( $\delta_p$ ), 잔류변형( $\delta_r$ )과 같은 응답이 주어진다. 지진 발생 전의 초기 내진성능( $E_T$ )과 소산된 내진성능( $E_d$ )과의 차에 의해 잔존내진성능( $E_r = E_T - E_d$ )이 평가가능하다. 즉 각 잔류변형 레벨에 따



〈그림 5〉 Damage class vs. load carrying capacity<sup>(1),(2)</sup>



〈그림 6〉 Basic concept of residual seismic capacity evaluation

른 잔존내진성능을 알 수 있게 된다( $\delta_0 - E_r$  관계).

그러나 지진발생 후 건물이 경험한 최대변형 또는 잔류변형은 알 수 없기 때문에 지진피해 건물의 잔존내진성능을 평가하기 위해서는 이러한 응답량을 평가할 수 있는 정량적인 데이터가 필요하다. 본 연구에서는 그림 6의 (b)에 나타난 바와 같이 지진피해 건물에서 정량적으로 측정가능한 잔류균열폭( $W_0$ )에 초점을 맞추어 잔류균열폭-잔류변형 관계( $W_0 - \delta_0$  관계)를 실험적, 해석적으로 검토한다. 일단 전형적인 건물에 대한 잔류균열폭-잔류변형 관계( $W_0 - \delta_0$  관계, 그림 6의 (b))와 잔류변형-잔존내진성능 관계( $\delta_0 - E_r$  관계, 그림 6의 (a))가 결정되고 이 두 관계로부터 잔류균열폭-잔존내진성능 관계( $W_0 - E_r$  관계, 그림 6의 (c))가 정립된다면, 지진피해 조사 시에 각 부재에서 측정된 잔류균열폭으로부터 지진피해 건물의 잔존내진성능이 평가가능하게 된다.

본 논문에서는 무보강 블록채움벽체를 갖는 RC 골조의 잔류균열폭-잔류변형 관계( $W_0 - \delta_0$  관계) 및 잔류변형-잔존내진성능 관계( $\delta_0 - E_r$  관계)를 각각 검토하여 최종적으로 잔류균열폭-잔존내진성능 관계( $W_0 - E_r$  관계) 및 각 손상도 레벨에 대응하는 내진성능 저감계수를 제안한다.

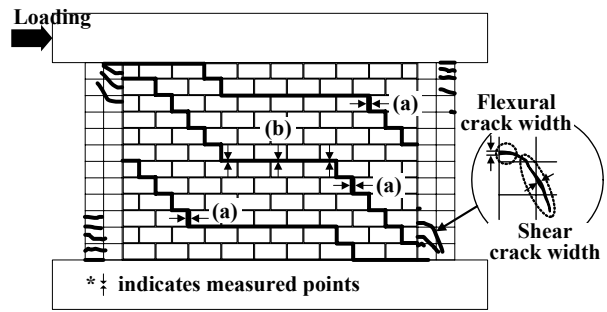
#### 4. RC 기둥 및 블록채움벽체의 잔류균열폭과 잔류변형과의 관계

##### 4.1 균열폭 측정방법

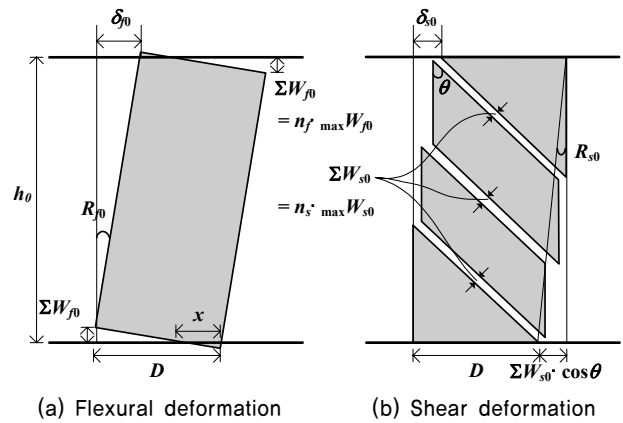
본 연구에서는 잔류균열폭과 잔존내진성능과의 관계를 검토하기 위하여 기둥 및 블록채움벽체에서 발생한 균열폭을 각 부재각의 최대변형 및 제하 시에 균열스케일을 사용하여 상세히 측정하였다. 그림 7에 기둥 및 블록채움벽체의 균열폭 측정방법을 나타낸다.

기둥의 균열폭은 기본적으로 각 기둥의 상부 및 하부에 발생한 휨균열 및 전단균열을 측정하였다. 휨균열폭은 기둥의 최외측 부분 폭을, 전단균열폭은 전단균열 중 최대폭 부분을 측정하였다. 또한 부재각 1.0%까지는 모든 균열폭을 측정하였으나 부재각 1.0% 이후부터는 측정시간 절약을 위해 각 기둥 당 주요한 균열폭 6개(휨균열폭 3개, 전단균열폭 3개)만을 측정하였다.

블록채움벽체의 균열폭은 주로 몰탈줄눈에 계단형으로 발생한 균열폭을 측정하였다. 벽체의 수평거동을 검토하기 위하여 수직줄눈에 발생한 균열폭(그림 7의 (a) 부분)을, 또한 벽체의 회전거동을 검토하기 위하여 수평줄눈의 균열폭(그림 7의 (b) 부분)을 측정하였다. 블록채움벽체도 기둥과 동일하게 부재각 1.0% 이후는 주요 균열폭만을 측정하였다.



〈그림 7〉 Crack pattern and measurement points



〈그림 8〉 Simplified model of column

##### 4.2 기둥의 잔류균열폭과 잔류변형과의 관계<sup>(4)</sup>

일본의 내진성능평가지침<sup>(7)</sup>에서는 부재의 잔류변형( $\delta_0$ )을 잔류휨변형( $\delta_{f0}$ )과 잔류전단변형( $\delta_{s0}$ )으로 분리하여 그림 8에 나타난 바와 같이 각각의 잔류변형과 잔류균열폭과의 관계를 정식화하고 있다. 이하에 본 연구에서 도입한 잔류휨변형과 잔류휨균열폭과의 정식화 및 잔류전단변형과 잔류전단균열폭과의 정식화에 대해 각각 기술한다.

##### 4.2.1 잔류휨변형과 잔류휨균열폭과의 관계

잔류휨균열폭의 합계치( $\Sigma W_{f0}$ )는  $D$ (기둥 춤)  $\times$   $R$ (부재각)과 거의 동일하게 때문에 그림 8(a)에 나타난 바와 같이 잔류휨변형( $\delta_{f0}$ )은 부재의 강제회전에 의해 평가할 수 있다. 여기서 기둥의 잔류휨균열폭의 합계치를  $\Sigma W_{f0}$ , 그 중 잔류휨균열폭의 최대치를  $\max W_{f0}$ , 잔류휨균열폭의 최대치에 대한 합계치의 비( $\Sigma W_{f0} / \max W_{f0}$ )를  $n_f$ 로 두면, 기둥의 잔류휨균열폭( $\Sigma W_{f0}$  또는  $\max W_{f0}$ )과 잔류휨변형( $\delta_{f0}$ )과의 관계는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 단 기둥의 잔류휨균열폭의 합계치는 기둥 상부 및 하부 균열폭 합계치의 평균값으로 구한다.

$$\delta_{f0} = R_{f0} \cdot h_0 = \frac{\Sigma W_{f0}}{D-x} \cdot h_0 = \frac{n_f \cdot \max W_{f0}}{D-x} \cdot h_0 \quad (1)$$

여기서,  $\delta_0$ 는 기둥의 잔류휨변형,  $R_{f0}$ 는 기둥의 잔류휨부재각,  $\Sigma W_{f0}$ 는 기둥 상하부의 잔류휨균열폭 합계의 평균치,  $\max W_{f0}$ 는 기둥의 잔류휨균열폭의 최대치,  $D$ 는 기둥 춤(=450 mm),  $x$ 는 단면 압축측부터 중립축까지 거리(=0.2D),  $n_f$ 는  $\max W_{f0}$ 에 대한  $\Sigma W_{f0}$ 의 비,  $h_0$ 는 기둥 순높이(=2,400 mm)이다.

4.2.2 잔류전단변형과 잔류전단균열폭과의 관계

기둥의 잔류전단균열폭에 대해서는 잔류전단변형( $\delta_{s0}$ )에 대응하는 잔류전단균열이 발생한다고 가정하여 그림 8(b)에 나타난 잔류전단변형 모델을 이용하여 잔류전단변형을 평가한다. 기둥의 잔류전단균열폭의 합계치를  $\Sigma W_{s0}$ , 그 중 잔류전단균열폭의 최대치를  $\max W_{s0}$ , 잔류전단균열폭의 최대치에 대한 합계치의 비( $\Sigma W_{s0} / \max W_{s0}$ )를  $n_s$ 로 두면, 기둥의 잔류전단균열폭( $\Sigma W_{s0}$  또는  $\max W_{s0}$ )과 잔류전단변형( $\delta_{s0}$ )과의 관계는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 단 기둥의 잔류전단균열폭의 합계치는 기둥에서 관측한 각 잔류전단균열폭의 합계치이다.

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

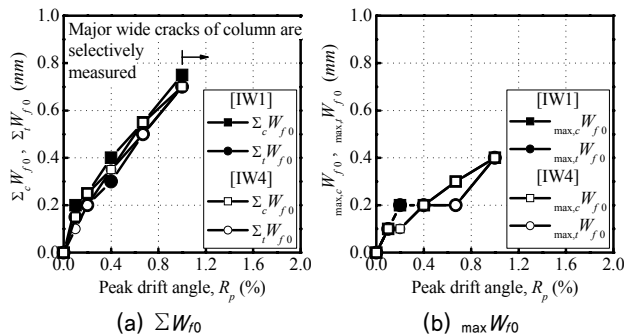
여기서,  $\delta_{s0}$ 는 기둥의 잔류전단변형,  $R_{s0}$ 는 기둥의 잔류전단부재각,  $\Sigma W_{s0}$ 는 기둥의 잔류전단균열폭의 합계치,  $\max W_{s0}$ 는 기둥의 잔류전단균열폭의 최대치,  $\theta$ 는 전단균열과 재축과의 각도(=45°),  $n_s$ 는  $\max W_{s0}$ 에 대한  $\Sigma W_{s0}$ 의 비이다.

상기의 내용을 토대로 기둥의 잔류휨균열폭 및 잔류전단균열폭과 잔류변형과의 관계를 검토하기 위해 IW1 및 IW4 실험체를 대상으로 정방향 가력의 제거 시 잔류휨균열폭의 합계치( $\Sigma_c W_{f0}$  및  $\Sigma_l W_{f0}$  (mm), 여기서 “c”와 “l”는 각각 “압축측”과 “인장측”을 의미한다. 또한 정방향 가력 시 오른쪽이 압축측, 왼쪽이 인장측이다) 및 잔류휨균열폭의 최대치( $\max_c W_{f0}$ ,  $\max_l W_{f0}$  (mm))를 그림 9(a) 및 9(b)에, 잔류전단균열폭의 합계치( $\Sigma_c W_{s0}$  및  $\Sigma_l W_{s0}$  (mm)) 및 잔류전단균열폭의 최대치( $\max_c W_{s0}$ ,  $\max_l W_{s0}$  (mm))를 그림 10(a) 및 10(b)에 각각 나타낸다. 앞서 언급한 바와 같이 부재각 1.0% 이후는 주요 균열폭만 측정하는 것을 원칙으로 하였으나, 부재각 1.0% 이후 전단균열이 크게 발생하여 최대 잔류전단균열만을 측정하였기 때문에 부재각 1.0% 이후에는 잔류전단균열폭의 최대치를 제외한 데이터는 없다.

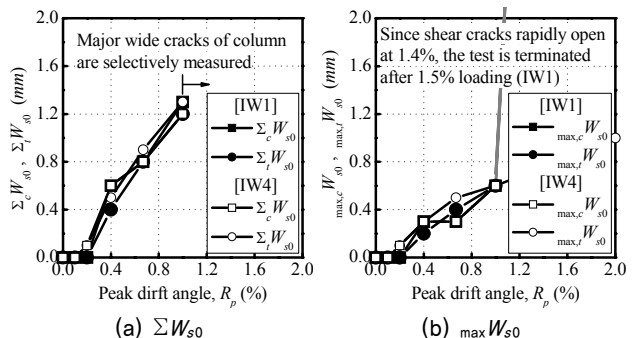
그림 9(a) 및 9(b)에 나타난 잔류휨균열폭의 합계치 및 최대치는 IW1, IW4 실험체 및 압축측, 인장측 기둥에 있어서 약간의 오차는 보이고 있으나 모두 최대변형 시의 부재각에 대해 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한

그림 10(a) 및 10(b)에 나타난 잔류전단균열폭의 합계치 및 최대치도 전단균열이 급격히 증가한 부재각 1.0% 이후를 제외하면 균열이 발생한 부재각 0.4%부터 최대변형 시의 부재각에 대해 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 기둥의 잔류휨균열폭 및 잔류전단균열폭이 지진 시 골조가 경험한 최대응답 변형량과 밀접한 관계가 있음을 의미한다.

그림 11(a) 및 11(b)에 잔류휨균열폭 및 잔류전단균열폭의 최대치에 대한 합계치의 비  $n_f$ 와  $n_s$ 를 각각 나타낸다. 문헌 (7)에서 참조한 실험결과에 의하면  $n_f$ 값은 부재의 형상비 ( $h_0 / D$ )와 전단보강근비 등에 관계없이 거의 2.0정도라고 보고하고 있다. 그림 11(a)에 나타난  $n_f$ 값도 약간의 오차는 보이고 있으나 2.0 부근에서 분포하고 있음을 알 수 있다.  $n_s$ 값에 대해서는 철근콘크리트 구조물 내진성능 평가 지침 (7)의 실험결과에 의하면 3.0~4.0정도였으나, 이  $n_s$ 값은 건물의 건설년도(전단보강근 간격, 전단보강근 양)와 부재의 형상( $h_0 / D$ ) 등에 의해 영향을 받는다고 보고되어 있다. 또한 본 실험체와 같이 조적벽체가 채워져 있는 경우는 벽체의 압축스트럿 작용에 의해 인장측 기둥(정방향 가력 시 왼쪽 기둥)의 주두부와 압축측 기둥(정방향 가력 시 오른쪽 기둥)의 주각부에 전단균열이 집중해서 발생하기 때문에 (3),(5), 그림 11(b)의 결과와 같이  $n_s$ 값은 일반적인 기둥의 1/2 정도



〈그림 9〉 Total and maximum residual flexural crack widths of both columns in specimens IW1 and IW4



〈그림 10〉 Total and maximum residual shear crack widths of both columns in specimens IW1 and IW4

인 2.0 부근에서 분포하였다.  $n_f$  및  $n_s$  값 모두 부재각 0.1% 및 0.2%에서 오차가 크게 발생하고 있으나, 이들 부재각에서는 부재의 손상도가 미비하므로 (그림 5의 손상도 I 정도) 부재각 0.4% 이후의 결과로부터 일률적으로 2.0으로 설정하였다.

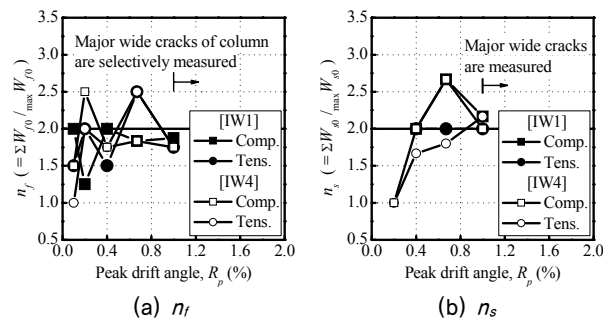
실험 중 측정한 골조의 잔류변형( $\delta_0$ )에 대한 기둥의 잔류 휨균열폭 및 잔류전단균열폭의 합계치(그림 9(a) 및 10(a))를 식 (1) 및 식 (2)에 대입하여 계산한 각각의 잔류변형( $\delta_{f0}$ ,  $\delta_{s0}$  및  $\delta_{f0} + \delta_{s0}$ )의 비를 그림 12(a)에 나타낸다. 또한 앞서 구한  $n_f$ 값 및  $n_s$ 값을 이용하여 기둥의 잔류휨균열폭 및 잔류전단균열폭의 최대치(그림 9(b) 및 10(b))로 계산한 각각의 잔류변형의 비를 그림 12(b)에 나타낸다. 여기서 잔류균열폭의 합계치와 최대치로부터 계산된 잔류휨변형( $\delta_{f0}$ ) 및 잔류전단변형( $\delta_{s0}$ )은 양측 기둥의 평균값이다. 그림 12(a)에 나타낸 바와 같이 골조의 잔류변형에 대한 잔류휨균열폭 및 잔류전단균열폭의 합계치로부터 구한 잔류휨변형 및 잔류전단변형의 비는 전단균열 발생 후인 부재각 0.4% 이후 각각 약 80% 및 20%를 차지하고 있고 그 합은 1.0 부근에서 안정적으로 분포하였다. 한편 그림 12(b)의 잔류균열폭의 최대치로부터 구한 잔류변형 결과는  $n_f$  및  $n_s$ 를 일률적으로 2.0으로 설정하였기 때문에 잔류균열폭의 합계치 결과에 비해 1.0 부근에서 더 큰 오차를 보이고 있지만 부재각 0.4% 이후는 기둥에 발생한 잔류균열폭의 최대치로부

터 골조의 잔류변형을 어느 정도 평가할 수 있음을 보여주고 있다.

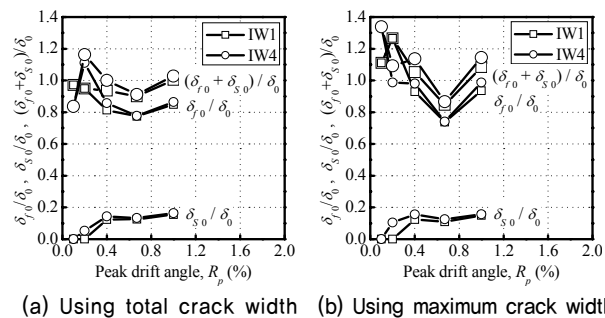
4.3 블록채움벽체의 잔류균열폭과 잔류변형과의 관계<sup>(5)</sup>

본 절에서는 블록채움벽체의 잔류균열폭과 골조의 잔류변형과의 관계에 대해서 검토한다. 그림 13(a) 및 13(b)에 IW1 및 IW4 실험체에 대해 정방향 가력의 제하 시 블록채움벽체의 수직줄눈에 발생한 잔류균열폭의 합계치( $\Sigma_{\max} W_0$ ), 잔류균열폭의 최대치( $\max W_0$ ) 및 골조의 잔류변형( $\delta_0$ )을, 그림 14에 블록채움벽체에 발생한 잔류균열폭의 최대치에 대한 합계치의 비  $n_b (= \Sigma_{\max} W_0 / \max W_0)$ 를, 그림 15에 골조의 잔류변형에 대한 블록채움벽체의 잔류균열폭의 합계치 및 최대치의 비( $\Sigma_{\max} W_0 / \delta_0$  및  $\max W_0 / \delta_0$ )를 각각 나타낸다. 여기서 잔류균열폭의 최대치( $\max W_0$ )는 블록채움벽체 내에 계단형으로 발생한 수직줄눈 중 가장 큰 잔류균열폭을 의미하며, 계단형 균열이 블록채움벽체 전체에 하나만 발생한 경우는 잔류균열폭의 합계치는 최대치와 동일하며( $\Sigma_{\max} W_0 = \max W_0$ ), 계단형 균열이 두 개 이상 발생한 경우는 각 계단형 균열의 최대치의 합계가 잔류균열폭의 합계치가 된다( $\Sigma_{\max} W_0 = \max W_{01} + \max W_{02} + \dots$ , 그림 7 참조).

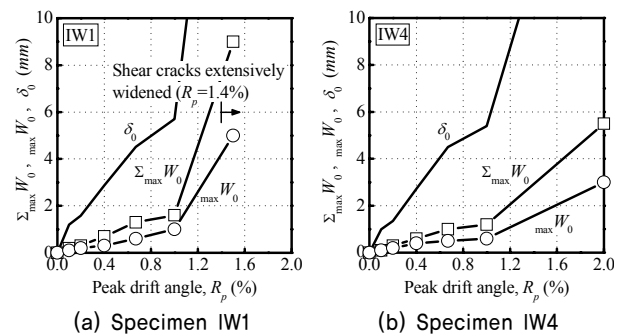
그림 13(a) 및 13(b)에 나타낸 바와 같이 IW1 및 IW4 실험체 모두 잔류변형이 급격하게 증가하기 전인 부재각



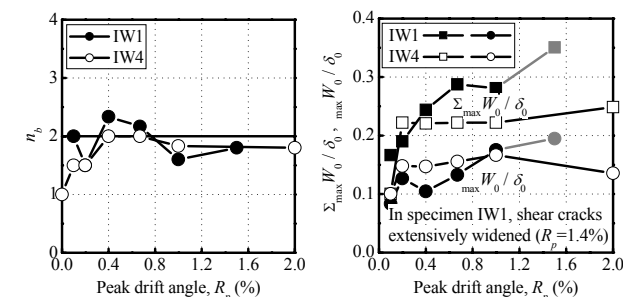
〈그림 11〉 Ratios of total residual crack width to maximum one of both columns in specimens IW1 and IW4



〈그림 12〉 Residual deformation calculated from crack width vs. residual deformation of overall frame



〈그림 13〉 Residual deformation( $\delta_0$ ) of frame, total and maximum residual crack width( $\Sigma_{\max} W_0$ ,  $\max W_0$ ) of CB wall



〈그림 14〉  $n_b (= \Sigma_{\max} W_0 / \max W_0)$  〈그림 15〉  $\Sigma_{\max} W_0 / \delta_0$  and  $\max W_0 / \delta_0$

1.0%까지는 골조의 잔류변형 및 블록채움벽체의 잔류균열폭이 어느 정도 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있어 블록채움벽체의 잔류균열폭은 잔류변형과 밀접한 관계가 있음이 예상된다. 그림 14로부터 블록채움벽체의 잔류균열폭의 최대치에 대한 합계치의 비  $n_b$  값은 약간의 오차를 보이고 있으나 두 실험체 모두 2.0 부근에서 분포하고 있다. 또한 그림 15에 나타난 바와 같이 IW1 및 IW4 실험체의 잔류변형에 대한 블록채움벽체의 잔류균열폭의 합계치 및 최대치의 비( $\sum_{\max} W_0 / \delta_0$  및  $\max W_0 / \delta_0$ )는 부재각 0.1%를 제외하고 각각 0.2~0.3 및 0.1~0.15의 범위에서 안정적으로 분포하고 있음을 알 수 있다. 이는 지진피해 조사 시 블록채움벽체에 발생한 잔류균열폭의 최대치를 측정하여 약 8 배를 하면 골조의 잔류변형을 대략 추정할 수 있다는 것을 의미한다. 한편 블록채움벽체의 잔류균열폭이 골조의 잔류변형보다 매우 작은 값을 나타내는 이유에 대해서는 최호<sup>(5)</sup> 연구의 블록채움벽체의 균열발생 메커니즘을 참고바란다.

이상으로 전형적인 기존 학교건물의 기둥 및 블록채움벽체에 발생한 잔류균열폭의 최대치로부터 골조의 잔류변형을 추정할 수 있음을 검토하였다(그림 6의 (b)).

### 5. 잔류변형과 잔존내진성능과의 관계

본 장에서는 그림 6의 (a)에 나타난 잔류변형과 잔존내진성능과의 관계( $\delta_0 - E_r$  관계)에 대해서 실험적, 해석적으로 상세히 검토한다.

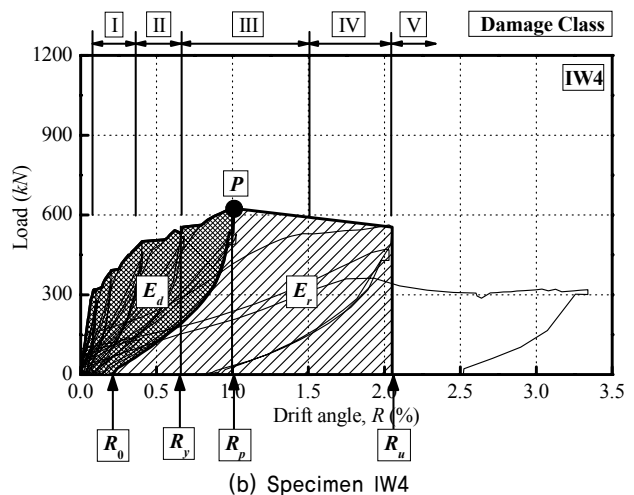
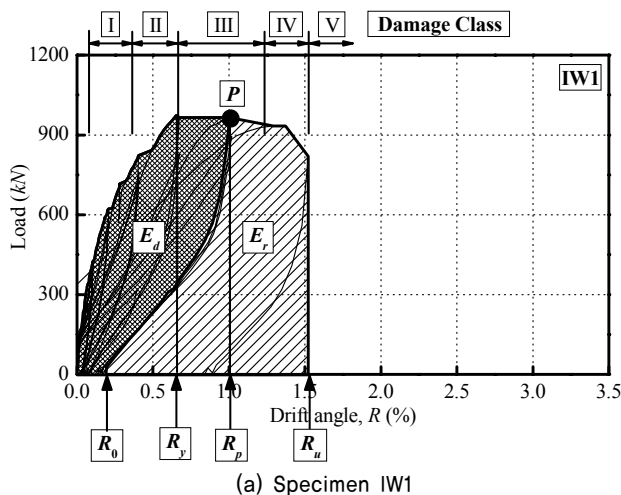
해석적 검토를 위해서 하중-변위 관계는 이하에 정의한 항복 부재각  $R_y$ , 최대 응답 부재각  $R_p$ , 잔류 부재각  $R_0$  및 중국 부재각  $R_u$ 의 네 개의 기본적인 값으로 특성화된다.

- $R_y$ : 기둥 주근이 항복할 때의 부재각  
(IW1 및 IW4 실험체 모두 부재각 1/150 (0.67%))
- $R_p$ : 구조물이 최대 응답변형에 도달할 때의 부재각
- $R_0$ : 최대 응답변형으로부터 제하한 부재각
- $R_u$ : 내력이 최대하중의 80%에 도달할 때의 부재각

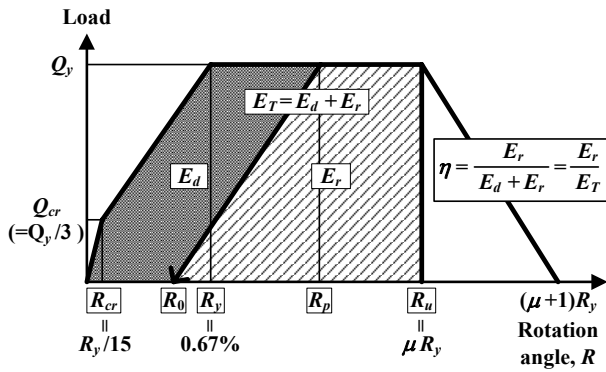
그림 16의 IW1 및 IW4 실험체의 하중-변위 곡선에 상기의 각 부재각을 나타낸다. IW1 및 IW4 실험체의 중국 시 소성률  $\mu(=R_u/R_y)$ 는 그림 16의 실험결과로부터 각각 2.0 및 3.0으로 결정하였고, 하중-변위 곡선 상의 O-P-R<sub>0</sub>로 둘러싸인 면적을 소산된 내진성능  $E_d$ 로, 남아 있는 면적을 잔존내진성능  $E_r$ 로 정의한다. 또한 상이한 내력 및 변형능력을 갖는 하중-변위 관계에 이 방법을 적용하기 위해 본 연구에서는 초기 내진성능에 대한 잔존내진성능의 비( $=E_r/E_d$ )로 무차원화한 내진성능 저감계수  $\eta$ 를 도입한다.

다음으로 잔류부재각-내진성능 저감계수 관계( $R_0 - \eta$  관계, 즉  $\delta_0 - E_r$  관계)를 실험결과와 해석적으로 비교, 검토하기 위해 그림 17에 나타난 이력모델을 이용한다. 본 이력모델의 가정사항은 다음과 같다.

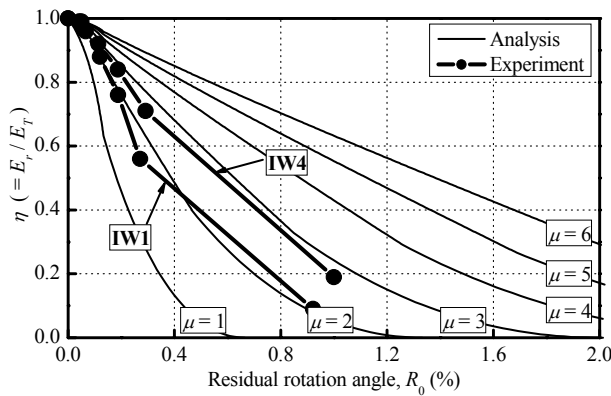
- ① 이력모델은 Takeda 모델을 이용한다. 단 항복 후 강성의 경화는 무시하며, 실험결과로부터 제하 시 강성 저감지수  $\alpha$ 는 0.7로 설정하였다.
- ② 균열하중  $Q_{cr}$ 은  $Q_y/3$ ( $Q_y$ : 항복하중), 균열부재각  $R_{cr}$ 은  $R_y/15$ ( $R_y$ : 항복부재각)로 설정하였다.
- ③ 변형능력은 중국 시 소성률  $\mu$ 에 의해 변화하며, 중국 부재각  $R_u$  이후는  $(\mu+1)R_y$ 를 향해 내력저하가 발생한다고 가정한다.



〈그림 16〉 Load-drift angle relationship of specimens IW1 and IW4



〈그림 17〉 Simplified hysteretic model



〈그림 18〉 Relationship between  $R_0$  and  $\eta$

그림 18에 실험결과 및 상기의 이력모델을 이용하여 계산한 잔류부재각-내진성능 저감계수 관계를 나타낸다. 앞서 언급한 바와 같이 IW1 및 IW4 실험체의 중국 시 소성률  $\mu$  는 각각 2.0 및 3.0이며, 각각의 중국 시 소성률에서 잔류부재각-내진성능 저감계수 관계의 해석결과가 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

이상으로 각 잔류부재각에 대응하는 전형적인 기존 학교 건물로 대표되는 무보강 조적채움벽체를 갖는 RC 골조의 내진성능 저감계수가 정의되었다(그림 6의 (a)).

## 6. 잔존내진성능의 평가

### 6.1 잔류균열폭에 의한 잔존내진성능의 평가

본 절에서는 4.2절 및 4.3절에서 검토한 기둥 및 블록채움벽체의 잔류균열폭-잔류변형 관계( $W_0 - \delta_0$  관계)와 5장에서 검토한 잔류부재각-내진성능 저감계수 관계( $R_0 - \eta$  관계, 즉  $\delta_0 - E_r$  관계)를 이용하여 잔류균열폭-내진성능 저감계수 관계( $W_0 - \eta$  관계, 즉 그림 6의 (c)의  $W_0 - E_r$  관계)에 대해서 실험적, 해석적으로 검토한다.

기둥의 잔류휨균열폭 및 잔류전단균열폭의 최대치를 해

석적으로 평가하기 위해 잔류부재각에 대한 잔류휨부재각의 비를 식 (3)에 나타낸 바와 같이  $\alpha$ 로 두고 식 (1), 식 (2) 및 식 (3)을 기둥의 잔류휨균열폭 및 잔류전단균열폭의 최대치에 대해 정리하면 식 (4) 및 식 (5)로 나타낼 수 있다. 여기서 그림 12의 결과로부터 잔류부재각에 대한 잔류휨부재각의 비  $\alpha$ 를 4/5로 가정하고, 4.2절에 나타낸 바와 같이  $x = 0.2D$  ( $D = 450 \text{ mm}$ ),  $\theta = 45^\circ$ ,  $h_0 = 2,400 \text{ mm}$ ,  $n_f = n_s = 2$  (그림 11 참조)로 두면, 그림 18의 잔류부재각-내진성능 저감계수 관계( $R_0 - \eta$  관계)로부터 그림 19(a) 및 19(b)에 나타낸 기둥의 잔류휨균열폭 및 잔류전단균열폭의 최대치-내진성능 저감계수 관계( $\max W_{f0} - \eta$  관계 및  $\max W_{s0} - \eta$  관계)가 얻어진다.

4.3절에서 언급한 바와 같이 잔류변형에 대한 블록채움벽체의 잔류균열폭의 최대치의 비( $\max W_0 / \delta_0$ )가 0.1~0.15의 범위에서 안정적으로 분포하고 있는 결과로부터 식 (6)에 나타낸 바와 같이 블록채움벽체의 잔류균열폭의 최대치를 8 배하면 대략 잔류변형을 구할 수 있다고 설정하였다. 이 관계로부터 구한 블록채움벽체의 잔류균열폭의 최대치-내진성능 저감계수 관계( $\max W_0 - \eta$  관계)를 그림 19(c)에 나타낸다.

또한 그림 9(b), 10(b) 및 그림 13에 나타낸 기둥 및 블록채움벽체의 잔류균열폭의 최대치의 실험결과를 해석결과와 함께 그림 19(a)~(c)에 나타낸다.

$$\alpha = \frac{R_{f0}}{R_{f0} + R_{s0}} = \frac{R_{f0}}{R_0} \quad (3)$$

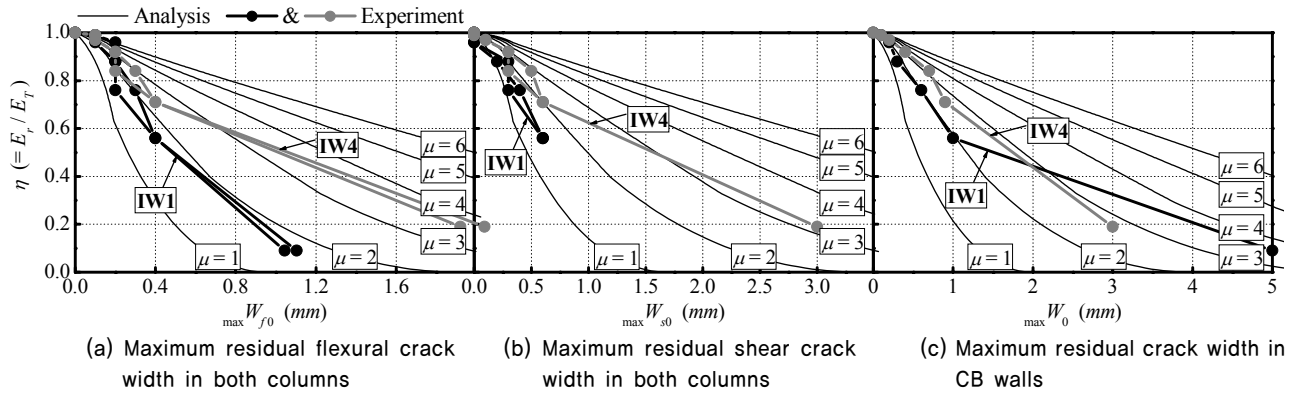
$$\max W_{f0} = \frac{\alpha \cdot (D - x)}{n_f} \cdot R_0 \quad (4)$$

$$\max W_{s0} = \frac{(1 - \alpha) \cdot h_0}{n_s \cdot \cos \theta} \cdot R_0 \quad (5)$$

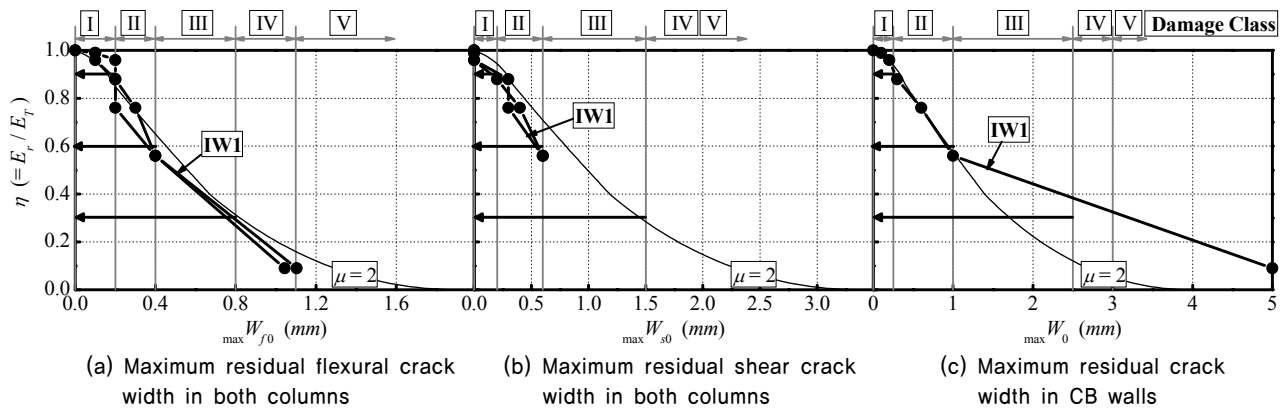
$$\max W_0 = \frac{h_0}{8} \cdot R_0 \quad (6)$$

그림 19(a) 및 19(b)로부터 기둥의 잔류휨균열폭 및 잔류전단균열폭의 최대치는 약간 오차를 보이고 있으나 기둥의 잔류균열폭의 최대치-내진성능 저감계수 관계( $\max W_{f0} - \eta$  관계 및  $\max W_{s0} - \eta$  관계)가 해석적으로 잘 재현되었다고 판단된다. 또한 그림 19(c)에 나타낸 바와 같이 블록채움벽체에 대해서도 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 이상의 결과로부터 전형적인 기존 학교건물로 대표되는 무보강 조적채움벽체를 갖는 RC 골조에 대해서 기둥 및 블록채움벽체의 잔류균열폭의 최대치로부터 골조의 내진성능 저감계수  $\eta$ 를 판단하는 것이 가능하게 되었다.





〈그림 19〉 Relationship between residual crack width and seismic capacity reduction factor



〈그림 20〉 Seismic capacity reduction factor corresponding to each damage class

〈표 2〉 Seismic capacity reduction factor  $\eta$  corresponding to damage class

Damage class	Proposed herein for RC frames with CB infill	Specified in the Guidelines <sup>(1),(2)</sup>	
		Brittle RC column / RC wall	Ductile RC column
I	0.90	0.95	0.95
II	0.60	0.60	0.75
III	0.30	0.30	0.50
IV	0.00	0.00	0.10
V	0.00	0.00	0.00

## 6.2 손상도 레벨에 대응하는 잔존내진성능의 평가

본 절에서는 실험 중 관측한 파괴상황 및 표 1, 그림 5의 정의를 토대로 전 절에서 평가한 잔류균열폭-내진성능 저감계수 관계와 더불어 무보강 조적채움벽체를 갖는 RC 골조에 대한 각 손상도 레벨에 대응하는 내진성능 저감계수를 제안한다.

표 1 및 그림 5를 토대로 평가한 IW1 및 IW4 실험체의 손상도 구분은 상기의 그림 16에 나타내었다. 이 손상도 레벨을 그림 19(a)~(c)에 적용하면 그림 20(a)~(c)에 나타난 바와 같이 된다. 여기서는 일반적으로 1층의 지진피해가 크기 때문에 IW1 실험체에 대해서만 나타내었다.

표 2에 그림 20(a)~(c)로부터 구한 각 손상도 레벨에 대

응하는 내진성능 저감계수  $\eta$ 를 일본의 피해도구분 판정기준<sup>(1),(2)</sup>에서 규정하고 있는 결과와 비교하여 나타낸다. 여기서 내진성능 저감계수  $\eta$ 는 실험결과와 해석결과의 평균값을 이용하여 각 손상도 구간의 하한치에 해당하는 값으로 설정하였고, 손상도 IV에서는 골조의 내력저하가 발생하기 시작하였기 때문에 안전측으로 0으로 설정하였다. 표 2로부터 본 논문의 내진성능 저감계수 값과 일본의 피해도구분 판정기준의 전단 기둥 및 RC 벽체의 값이 거의 동일하였다. 이는 무보강 블록채움벽체를 갖는 RC 골조가 휨항복 후 전단파괴를 하는 휨항복 선형형이지만 최대내력을 오래 유지하지 못하고 전단파괴하였기 때문에 전단 기둥 및 RC 벽과 동일한 결과가 나온 것은 어느 정도 예상 가능한 결과라고 판단된다.

이상의 결과로부터 부재 및 건물의 지진 피해정도 및 잔존내진성능을 판단하는데 있어 매우 유용한 정보인 기둥 및 블록채움벽체의 잔류균열폭과 내진성능 저감계수의 관계가 정립되었고, 무보강 조적채움벽체를 갖는 RC 골조의 각 손상도 레벨에 대응하는 내진성능 저감계수를 제안하였다. 본 연구의 대상건물이 우리나라의 전형적인 기존 학교건물이고 현 내진기준에서 학교건물이 지진발생 시 피난건물로 지정된 점을 고려한다면 본 연구결과는 학교건물에 지진피해가 발생하였을 경우 여진에 대한 안전성 평가 및 보수·보강 여부판정을 위한 매우 유용한 데이터라고 판단된다.

## 7. 결론

본 연구에서는 무보강 조적채움벽체를 갖는 RC 건물의 잔존내진성능 평가개발 개발을 목적으로 실스케일 실험체를 제작하여 정적 반복가력실험을 실시하였다. 본 논문에서는 잔류균열폭-잔류변형 관계 및 잔류변형-잔존내진성능 관계를 각각 검토하여 잔류균열폭-잔존내진성능 관계 및 각 손상도 레벨에 따른 내진성능 저감계수를 제안하였다. 본 논문에서 검토한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 기둥의 잔류휨균열폭 및 잔류전단균열폭의 최대치로부터 구한 잔류변형 및 잔류전단변형은 잔류변형에 대해 각각 80% 및 20%로 그 합은 1.0 부근에서 분포하여 기둥의 잔류균열폭의 최대치로부터 골조의 잔류변형이 어느 정도 평가 가능함을 확인하였다.
2. 블록채움벽체의 잔류균열폭의 최대치는 잔류변형에 대해 0.1~0.15로 비교적 안정적으로 분포하였기 때문에 블록채움벽체에서 측정된 잔류균열폭의 최대치를 단순히 8배 하면 잔류변형이 대략 추정 가능하다는 것을 확인하였다.
3. 잔류변형-잔존내진성능 관계에 대한 해석적 검토를 위해 Takeda 모델을 이용하여 중국 시 소성률을 변수로 해석을 실시한 결과, IW1 및 IW4 실험체의 중국 시 소성률인 2.0 및 3.0에서 실험결과와 잘 일치하였다.
4. 상기의 (1)~(3)의 결과로부터 잔류균열폭-잔존내진성능(내진성능 저감계수) 관계를 검토한 결과 실험결과와 해석결과는 거의 일치하였으며, 무보강 블록채움벽체를 갖는 RC 골조에 대해서 기둥 및 블록채움벽체의 잔류균열폭의 최대치로부터 골조의 내진성능 저감계수  $\eta$ 를 판단하는 것이 가능하게 되었다.

5. 각 손상도 레벨에 대응하는 내진성능 저감계수를 검토한 결과 본 논문의 결과와 일본의 피해도구분 판정기준의 전단 기둥 및 RC 벽체의 결과가 거의 동일하였다.

이상의 결과로부터 부재 및 건물의 지진 피해정도 및 잔존내진성능을 판단하는데 있어 유용한 정보인 기둥 및 블록채움벽체의 잔류균열폭과 내진성능 저감계수의 관계 및 각 손상도 레벨에 대응하는 내진성능 저감계수가 정립·제안되었다. 본 연구의 대상건물이 우리나라의 전형적인 기존 학교건물이고 현 내진기준에서 학교건물이 지진발생 시 피난건물로 지정된 점을 고려한다면 본 연구결과는 기존 학교건물에 지진피해가 발생하였을 경우 조속한 여진에 대한 안전성 평가 및 보수·보강 여부판정을 위한 매우 유용한 데이터라고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 첨단도시개발사업(과제번호:07도시재생B04) 지원 사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. 日本建築防災協會, 震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 日本建築防災協會, 日本, 360, 2001.
2. JBDPA(The Japan Building Disaster Prevention Association), *Standard for Seismic Evaluation of Existing Reinforced Concrete Buildings*, JBDPA, Japan, 301, 2005.
3. 최호, “무보강 콘크리트 블록채움벽을 갖는 RC 골조의 정적 가력실험,” 대한건축학회논문집 구조계, 제23권 제4호(통권 222호), 71-78, 2007.
4. 최호, “잔류균열폭을 이용한 무보강 조적벽체를 갖는 RC 기둥의 잔류변형 평가,” 대한건축학회논문집 구조계, 제25권 제7호(통권 249호), 39-46, 2009.
5. 최호, “철근콘크리트 골조에 내장된 무보강 조적채움벽체의 잔류균열폭과 잔류변형의 상관관계,” 대한건축학회논문집 구조계, 제25권 제7호(통권 249호), 55-62, 2009.
6. 건설교통부, “우리나라의 중저층 철근콘크리트 건축물의 지진 피해예측 및 보수보강법에 관한 연구,” 건설교통부, 서울, 500, 2002.
7. 日本建築学会, 鉄筋コンクリート造建築物の耐震性能評価指針(案), 日本建築学会, 日本, 400, 2004.