

## 아파트 건물의 구조 벽체에 대한 반응수정계수

한상환<sup>1)\*</sup> · 오영훈<sup>2)</sup> · 이리형<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>한양대학교 <sup>2)</sup>한양대학교 초대형구조시스템연구센터

(2001년 3월 28일 원고접수, 2001년 10월 8일 심사완료)

### Investigation on Response Modification Factor of RC Structural Walls in Apartment Buildings

Sang-Whan Han<sup>1)\*</sup>, Young-Hun Oh<sup>2)</sup>, and Li-Hyung Lee<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Architectural Engineering., Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

<sup>2)</sup> STRESS, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

(Received on March 28, 2001, Revised on October 8, 2001)

#### ABSTRACT

Korea is classified into low and moderate seismic zone from the view-point of seismic hazard level. Korean seismic provisions has been developed based on UBC and ATC 3-06. Thus, in calculation of design base shear according to Korean provisions response modification factor (R) is included in the formula of design base shear. The major role of this factor is to reduce the elastic design base shear whereby structures can behave in inelastic range during design level earthquake ground motions(mean return period of 475 yrs.). R factor is assigned according to material and structural systems. In this study, R factor for bearing wall system is considered. Most of the walls of apartment buildings in Korea resist gravity and seismic loads simultaneously so that this wall system can be classified into bearing wall system. Structural details of these walls are different from those used in Japan and U.S.. They are all rectangular in sectional shape rather than barbell in shape, and also have special lateral reinforcement details at the boundaries of a wall. In Korean seismic design provisions(1988), two different values(3.0 and 3.5) of R factor are assigned to the bearing wall systems according to the wall details. However, in updated seismic provisions(2000), only one value is assigned to R factor(3.0) irrespective of wall details. In this study, the design base shear values in Korean seismic design provisions(1988, 2000), ATC 3-06, UBC are compared. Also experimental study was carried out to evaluate the seismic performance of structural walls. For this purpose, five test specimens were made which have special details used in apartment bearing wall systems in Korea. Based on the results of this study, response modification factor for bearing wall system is discussed.

**Keywords :** response modification factor, seismic design provisions, structural walls, structural details

#### 1. 서 론

반응수정계수는 내진설계에서 밀면전단력 산정에 필요한 하나의 요소이다. 반응수정계수는 횡력계수 또는 강도저감계수로도 불려져 왔다. 내진설계에서 설계지진(design earthquake) 하중은 건물이 위치할 지역에서 건물의 수명을 50년이라 가정할 때 초과확률이 10%인 지진으로 정하고 있다. 이러한 지진하중은 재현주기(return period)로 환산하면 475년 만에 한번 발생하는 지진이다.

이렇게 발생빈도가 낮은 하중에 대하여 구조물이 탄성적으로 거동하도록 설계하는 것은 경제적이지 않기 때문에 기준에서는 설계지진력이 작용할 때 내진설계한 건물이 비선형 거동을 할 수 있도록 허용하고 있다. 이를 위하

여 내진규정에서는 반응수정계수(R factor)를 도입하고 있다. 큰 지진에 대하여 구조물이 비탄성 거동하기 위해서는 적절한 구조상세로 연성능력을 확보해야 한다. 하지만 연성능력은 각 재료 및 시스템에 따라 다르기 때문에 현행기준에서는 반응수정계수를 재료 및 시스템에 따라 다르게 제안하고 있다.

반응수정계수는 1959년 SEAOC(Structural Engineers Association of California)<sup>1)</sup>에서 만든 내진설계 기준인 "Blue Book (Recommended Lateral Force Requirements and Commentary)"에 수평력계수(K)라는 명칭으로 처음 소개되었다. 이후 1961년 ICBO(International Conference of Building Officials)에서 제정한 UBC(Uniform Building Code)<sup>2)</sup>와 1978년 ATC(Applied Technology Council)<sup>3)</sup>에서 제정한 기준들에서 반응수정계수의 형태가 변경되어 소개되었다. 반응수정계수는 최근의 기준(NEHRP-97<sup>4)</sup>, UBC-97)에서도 밀면전단력 산정식에 도입되어 있다. 국

\* Corresponding author

Tel : 02-2290-1715 Fax : 02-2291-1716

E-mail : swhan@hanyang.ac.kr

내에서도 내진설계기준(대한건축학회, 1988) 제정시 미국의 UBC와 ATC 3-06(Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings) 기준을 기초로 하였으므로 밀면전단력 산정식에 반응수정계수가 도입되어 있다.

본 논문의 내용은 내력벽 시스템 아파트 건물의 벽체에 대한 반응수정계수 제안에 관한 것이다. 이를 위하여 반응수정계수에 관련한 기존 연구를 조사하여 반응수정계수의 구성요소를 분석한다. 국내 내진기준에서 반응수정계수 산정의 문제점을 조사하고 반응수정계수 값들을 국외 기준의 반응수정계수 값들과 비교한다. 또한 아파트 벽체 및 전단벽에 대한 기존의 국내·외 실험연구를 활용하여 그 구조성능을 평가한다. 이러한 연구내용의 결과를 기초로 아파트 내력벽 시스템에 대한 반응수정계수를 제안한다.

## 2. 반응수정계수의 구성과 일반적인 문제점

반응수정계수는 설계지진(재현주기 475년) 발생시 구조물의 비탄성 거동을 허용하는 계수라 할 수 있다. 즉, 비탄성설계응답스펙트럼(Inelastic Design Response Spectrum, IDRS)은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 설계지진시 요구되는 탄성설계응답스펙트럼(Linear Elastic Design Response Spectrum, LEDRS)을 반응수정계수( $>1$ )로 나누어 구하게 된다. 따라서 탄성설계응답스펙트럼보다 작은 비탄성설계응답스펙트럼을 이용해 밀면전단력을 산정하여 설계하게 되므로 구조물은 설계지진 작용시 비탄성 거동을 하게 된다. 밀면전단력 산정식은 기준들마다 다소 차이가 있지만 일반적으로 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$V = \frac{C_s W}{R} \dots\dots\dots (1)$$

위 식에서  $C_s$ 는 LEDRS이고  $W$ 는 건물의 중량이고,  $R$ 은 반응수정계수(허용응력설계가 기초인 경우  $R_w$ )이다. 따라서  $C_s/R$ 이 IDRS라고 할 수 있고 위 식에서 만약  $R$ 로 나누지 않은 밀면전단력을 이용하여 구조물을 설계하게 되면 구조물은 설계지진하중 작용시 탄성거동하게 될 것이다.

반응수정계수의 구성요소는 미국 U.C. Berkeley 대학의 연구자<sup>5)</sup>에 의하여 처음 제안되었는데 구성요소는 보유강도(reserve strength), 연성(ductility), 점성감쇠(viscous damping)로 각각 다음과 같이 구분한다.

$$R = R_\mu \times R_S \times R_\xi \dots\dots\dots (2)$$

여기에서,  $R_S$ 는 강도계수(strength factor),  $R_\mu$ 는 연

성계수(ductility factor),  $R_\xi$ 는 감쇠계수(damping factor)를 나타내고 있다.

반응수정계수에 관련한 연구는 많은 연구자들에 의하여 진행되어 왔다<sup>6,7,8)</sup>. 많은 연구가 진행되었음에도 불구하고 현재 사용하는 반응수정계수는 다음과 같은 문제들이 지적되고 있다.

- 1) 건물의 높이, 평면 형태, 구조의 배치와는 무관하고 주어진 구조방식이 동일하면 같은 값을 적용하고 있다<sup>9,10)</sup>.
- 2) 반응수정계수( $R$ )는 구조물의 주기에 따라 변하는 값이지만, 현행 기준에서 사용하는  $R$  값은 구조물의 고유주기와 무관한 값으로 정해져 있다<sup>11,12,13,14)</sup>.
- 3) 반응수정계수는 구조물의 연성, 초과강도 등의 구성요소로 이루어져 있으나 한 개의 계수로는 이러한 구성요소의 영향을 명확하게 설명하기 힘들다<sup>9)</sup>.
- 4) 내진설계 기준 및 지침에서 사용하고 있는 반응수정계수를 사용하여 내진설계를 했을 때, 구조물마다 동일한 수준의 위험도(또는 안전성)를 보장하기 힘들다<sup>13,14)</sup>.

## 3. 국내 내진설계 기준의 반응수정계수 문제점

내진설계 기준의 밀면전단력 산정방법은 허용응력설계 또는 강도설계를 기초로 발전되었다. 대표적인 것으로는 미국의 UBC(ICBO, 1988, 1994)가 허용응력설계를 기초로 하고 있고, NEHRP 기준과 ATC 3-06은 강도설계를 기초로 하고 있다. 국내 내진기준과 미국 UBC-94 및 ATC 3-06 기준에서의 밀면전단력 산정식은 Table 1과 같다.

국내의 1988년 내진기준은 밀면전단력의 그 수준을 평가할 때 ATC 기준과 같이 강도설계를 기초로 한 것인지 UBC와 같이 허용응력설계를 기초로 한 것인지가 모호하다. 2000년 기준(이하 KSDP 2000이라 함)<sup>15)</sup>에서 하중계수들과의 관계를 보면 허용응력설계를 기초로 한 것이라 할 수 있으나 밀면전단력의 구성요소나 표기방법, 밀면전단력의 크기가 강도설계법을 기초로 한 밀면전단력과 유사하다고 할 수 있다. 또한, 국내 기준에서 사용하는 값은 허용응력에 기초한 반응수정계수( $R_w$ )이므로 강도설계를

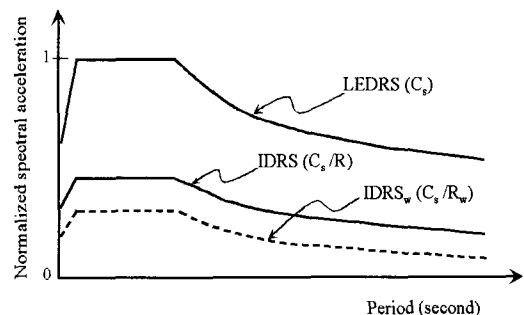


Fig. 1 Design response spectrum and R factor

기초로 하는 반응수정계수(R) 값 보다 커야 하지만 오히려 작을 값을 가지고 있다(Table 2). 이러한 상대적으로 낮은 반응수정계수 값은 식(1)의 밀면전단력 값을 크게 할 수 있다.

하지만 우리나라 기준에서는 식(1)의 동적계수를 ATC 3-06이나 UBC에 비하여 낮은 값을 사용하고 있으므로 반응수정계수와 동적계수의 상이성을 동시에 고려한 밀면전단력의 차이를 비교해야 할 것이다. Table 1에서 보면 동적계수가 UBC와 ATC에서는 각각 2.75와 2.5를 상한치로 두고 있는데 우리기준만 1.75를 사용하고 있는 것을 알 수 있다. 상한치의 규정은 유효최대지반가속도(EPA)와 최대가속도스펙트럼 값의 비로 정해지기 때문에 국내 기준의 동적계수 상한치 1.75는 이러한 점에서 타당하지 않은 값이라 할 수 있다. 이렇게 우리나라 기준에서는 UBC와 ATC와 비교할 때 밀면전단력식에서 작은 동적계수와 반응수정계수를 사용하고 있다.

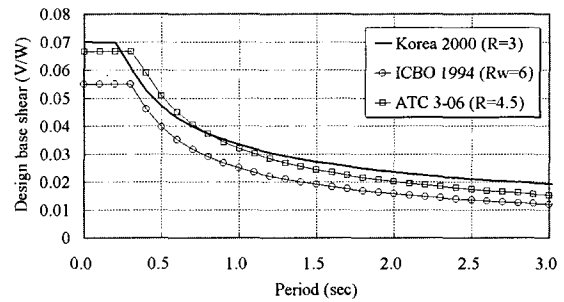
그러나 반응수정계수는 위에서 언급한 바와 같이 단지 밀면전단력 값을 조정하기 위한 목적으로 만들어진 것이 아니라 그 구성요소인 구조물의 연성, 보유강도 등을 포함하는 계수이다. 따라서 단지 다른 기준의 밀면전단력 수준과 유사하게 하기 위하여 반응수정계수를 조정하는 것은 타당하지 않다. 그러나, 반응수정계수를 제시할 수 있는 국내 연구자료가 충분하지 않은 점을 감안한다면, UBC와 ATC 기준의 밀면전단력 수준을 참작하여 보다 합리적인 반응수정계수가 제시될 수 있는 방향을 모색해야 할 것이다.

Fig. 2 (a) 및 (b)는 각각의 내진기준에서 규정하고 있는 밀면전단력 값을 비교한 것이다. 이 비교를 위해서 지

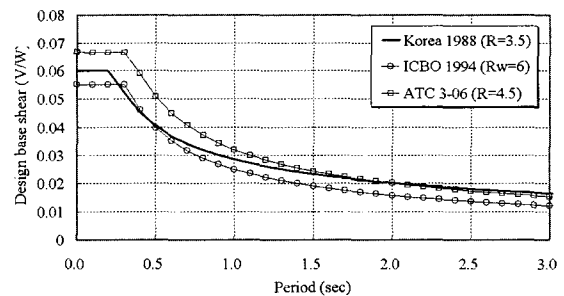
역계수는 모두 0.12(A=0.12, Z=0.12, A<sub>a</sub>=A<sub>v</sub>=0.12)로 했으며, 중요도계수(I)는 1.0으로 하고 지반계수는 모두 1.0으로 했다. 이 그림에서 나타난 것과 같이 반응수정계수를 3.0으로 사용한 경우 국내 기준에서 사용하는 밀면전단력의 값이 ATC 기준에서 제시한 값에 비하여 전 주기에 걸쳐 대부분 큰 것을 알 수 있다.

반응수정계수를 3.5를 사용한 경우 주기 전구간에 걸쳐 UBC(1994)의 밀면전단력 값 보다 큰 것을 알 수 있다. 또한, 국내 기준의 경우 주기가 길어지면 밀면전단력의 값이 UBC와 ATC 기준에 비하여 커지는 것을 알 수 있다.(주기 2.0초 이상의 경우 UBC 값에 비해 약 30% 증가).

Fig. 2의 결과에 의하면 국내 기준의 밀면전단력 값은 UBC와 유사하게 하기 위하여 반응수정계수를 조정해야 한다면 주기가 1.1초 이하인 경우 3.5로 정하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 주기가 1.1초 이상인 경우 3.5에 30% 가량 증가시킨 값을 사용하는 것이 타당하다고 판단된다.



(a) For R=3.0 in Korea seismic design provision



(b) For R=3.5 in Korea seismic design provision

Fig. 2 Design base shear for bearing wall system

Table 1 Comparison of base shear formulas

Korea (2000)	UBC (1994)	ATC 3-06 (1978)
$V/W = \frac{AIC}{R}$	$V/W = \frac{ZIC}{R_w}$	$V = C_s W$
$C = \frac{S}{1.2\sqrt{T}} < 1.75$	$C = \frac{1.25S}{T^{2/3}} < 2.75$	$C_s = \frac{1.2 A_v S}{R T^{2/3}} < \frac{2.5 A_a}{R}$
A(zone factor) I (importance) S (soil factor)	Z(zone factor) I (importance) S (soil factor)	A <sub>v</sub> , A <sub>a</sub> (zone factor) S(soil factor)
Working stress	Working stress	Ultimate strength design

Table 2 Comparison of response modification factor for structural walls

Structural systems	Earthquake resisting systems	R (ATC, 1978)	R <sub>w</sub> (ICBO, 1994)	R (Korea, 1988)	R (Korea, 2000)
Bearing wall system	RC shear walls	4.5	6	3	3
	Reinforced masonry shear walls	3.5	6		
	Unreinforced, partially reinforced masonry shear walls	1.25	-	3.5	
	RC shear walls having boundary elements like tied columns	-	-		
Frame system	RC shear walls	5.5	8	-	4

그러나, 반응수정계수의 결정은 밀면전단력의 단순비교 뿐 만 아니라 구조물의 상세와 성능수준에 대한 검토가 있어야 한다. 구조 벽체의 상세, 관련된 기준들에 대한 조사와 벽체들에 대한 구조성능 평가에 관련한 실험 결과를 다음 장들에서 조사 분석하였다.

#### 4. 대상 아파트건물 구조벽체의 상세 특성

국내 아파트 내력벽에서 사용하는 벽체는 중·약진 지역 중·고층 건물에 적합하도록 개발된 벽체라고 할 수 있다. 특이한 점은 미국의 경우와는 다르게 내부공간의 유용성을 위하여 단부에 경계기둥이 있는 바벨형이 아니라 장방향 단면을 갖는다. Fig. 3 및 Table 3에는 이러한 벽체들의 상세가 나타나 있다.

또한 휨철근이 경계부분( $0.1l_w$ ;  $l_w$ 는 벽체의 길이)에 집중되어 있으며 단부에는 단부의 횡구속을 위하여 특별히 U형 횡보강철근과 타이철근을 배근한다. 이 단부 횡보강근은  $20d_b$  ( $d_b$ 는 철근직경) 이상의 정착길이를 가지는 U형 횡보강근과  $6d_b$  이상의  $135^\circ$  및  $90^\circ$ 의 구부림각을 갖는 타이철근으로 양단부의 벽체길이 10%에 해당하는 부분의 콘크리트를 구속한다.(W2-0 시험체(단부의 횡구속이 없음)를 제외한 시험체)

#### 5. 구조 벽체에 대한 상세 기준

국내 내력벽 설계를 위한 철근콘크리트설계기준은 미국의 ACI 318(Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, 1995, 1999)<sup>16)</sup>을 기초로 하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 우선 ACI 318에서 구조 벽체에 요구하는 상세 기준을 조사한다. ACI 318에서는 구조벽에 관련한 기준은 11장 전단과 비틀림, 14장 압축력과 휨을 받는 벽, 21장 내진규정에 나타나 있다.

벽체는 크게 보통벽체와 특수벽체로 나눌 수 있다. 보통벽체(ordinary reinforced concrete wall)는 ACI 1장에서

18장까지의 설계조항을 만족하도록 설계된 것이고, 특수벽체(special reinforced concrete wall)는 보통벽체의 요구조건과 함께 21장(6절)을 추가로 만족시켜야 한다.

ACI 318-95에 따르면 중·약진 지역에서는 벽체의 단부에 작용하는 압축응력이  $0.2 f'_c$  이상인 경우에도 경계부재가 요구되지 않으며, 강진지역에서도 압축응력이  $0.2f'_c$  미만인 경우 U자형 스트립을 사용하여 횡구속을 하도록 규정하고 있다. 하지만, 지진구역에 따라 전단벽의 경계부재 및 단부횡보강 설계에 관한 규정을 다르게 명시하고 있지만, 반응수정계수 R은 동일한 값을 사용하고 있는 상황이다. ACI 318-99에서도 보통벽체의 경우는 단부에 U형 보강철근을 요구하지 않는다. 특수벽체의 경우에도 ACI 318-99 (21.6.6.3절)를 따르면 제한된 경우에 대해서만 경계기둥과 그에 관한 상세를 요구하고 있다.(ACI 318-99 21.6.6).

또한, UBC-94, UBC-97, ATC 3-06 등(NEHRP 기준(1997) 제외)에는 내력벽 시스템(bearing wall system)에서 벽체에 관하여 보통벽체와 특수벽체를 구분하고 있지

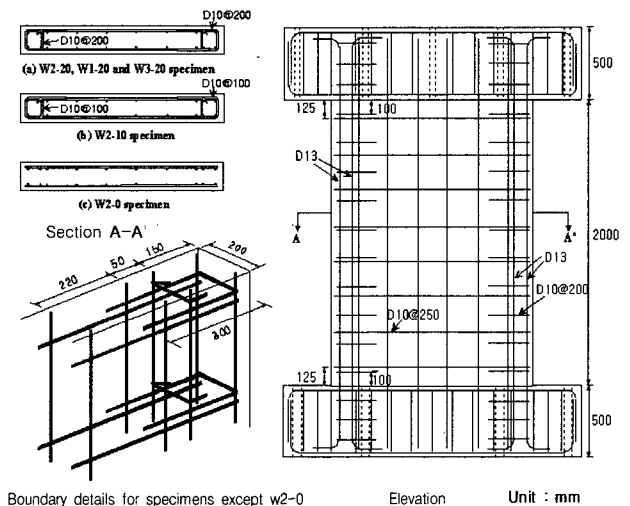


Fig. 3 Different details of bearing walls tested

Table 3 Sectional properties and test parameters for specimens

Specimen	Section shape	Moment to shear ratio (M/Q · D)	Axial load (N/A <sub>g</sub> · f' <sub>c</sub> )	f' <sub>c</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	f <sub>y</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	Boundary flexural rebar	Horizontal reinforcement ρ <sub>h</sub>	Vertical reinforcement ρ <sub>v</sub>	Boundary confining rebar
W1-20		1.0	0.10	270	4000	4-D13	0.0028 (D10@250)	0.0028 (D10@250)	D10@200
W2-0		2.0	0.10	270	4000	4-D13	0.0028 (D10@250)	0.0028 (D10@250)	-
W2-20		2.0	0.10	270	4000	4-D13	0.0028 (D10@250)	0.0028 (D10@250)	D10@200
W2-10		2.0	0.10	270	4000	4-D13	0.0036 (D10@200)	0.0028 (D10@250)	D10@100
W3-20		3.0	0.10	270	4000	4-D13	0.0028 (D10@250)	0.0028 (D10@250)	D10@200

않으며 상세에 관한 언급에서는 경계기둥에 대한 조건은 나타나 있지 않다.

따라서, 중·약진 지역인 우리나라의 경우 단부 부분에 배근한 U형 횡보강근과 타이철근은 엄밀하게 말하면 기준에서 요구되지는 않는 것이라 할 수 있다. 하지만, 우리 내진기준(1988년)의 경우 반응수정계수를 벽체에 경계기둥이 있는 경우에는 3.5로 정하고, 경계기둥이 없는 경우에는 3.0으로 정하고 있다.

## 6. 기존 연구결과로 평가한 구조벽의 변형성능

### 6.1 미국의 연구결과 고찰

Cardenas와 Magura<sup>17)</sup>의 연구결과에 의하면, 벽체의 수직 휨철근을 단면에 균등히 배근하는 경우보다는 단부에 1/3을 집중시킨 경우가 휨내력 및 변형능력 면에서 우수하고 결과적으로 벽체의 에너지소산능력을 향상시킬 수 있다고 지적하고 있다. 한편, PCA의 연구진(W.G. Corley, A.E. Fiorato, and R.G. Oesterle)<sup>18)</sup>에 의한 전단벽의 실험 연구는 다양한 단면형상(장방형, 바벨형, 플랜지형)을 갖는 벽체를 대상으로 수행되었으며, 이들은 휨과괴 및 전단과괴가 골고루 발생할 수 있도록 실험계획을 설정하였다. 이들의 실험결과 중에서 주목할 만한 사항은 벽체의 형태(바벨형 혹은 장방형 단면)와 전단스팬비와 관계없이 모든 시험체들은 연성비 3 이상, 변위각 1.5% 이상의 변형능력을 보유하고 있는 것으로 평가되었다.

한편, 1985년 발생한 칠레지진에서 Vina del Mar 시의 건물에 대한 피해의 정도를 조사한 Wallace와 Moehle<sup>19)</sup>의 연구결과는 매우 중요한 결과를 지적하고 있다. 1985년 3월 3일에 발생한 칠레지진은 규모 7.8의 강진이다. Vina del Mar 시에는 대략 400여 동의 현대식 RC 건물들이 위치하고 있었으며, 이 건물들은 대부분 전단벽을 횡력저항 요소로 채택하고 있었다. 전단벽의 설계에 대한 칠레의 규정은 미국의 UBC 및 ACI에서와 같은 경계부재의 조항을 포함하고 있지 않다. 미국 기준에 비하여 상대적으로 덜 엄격한 구조벽의 설계조항(경계 기둥 및 단부 횡보강근이 없음)에 의하여 설계되었지만(국내 내력벽 시스템에 적용하는 구조 상세와 유사하거나 완화되어 있음), 칠레의 RC 건물들은 1985년 지진에서 우수한 거동특성을 보여주었으며, 큰 피해도 입지 않은 것으로 보고되었다<sup>19)</sup>.

### 6.2 국내 아파트 내력벽 상세를 갖는 벽체의 구조실험

아파트 벽체와 유사한 상세 조건을 가진 벽체를 5개 만들어 실험을 수행하였다. 시험체의 변수는 유효 전단스팬비, 횡보강근의 유무 및 간격이다. Table 3에는 시험체에 관한 내용이 있다. 벽체 실험을 위하여 최대 골재직경은

19 mm 슬럼프값은 9 cm, 설계기준강도는 270 kgf/cm<sup>2</sup>인 콘크리트를 사용하였다. 시험체 제작에 사용된 철근은 직경이 10, 13, 25 mm(D10, 13, 25)를 사용하였으며 사용된 철근의 항복강도는 4000 kgf/cm<sup>2</sup>이다.

시험체는 실제 벽체들의 시공상황과 여건을 감안한 배근상세가 될 수 있도록 계획하였다. 양단부에는 단부 수직철근의 집중을 고려하기 위하여 4-D13의 수직철근을 배근하였다. 단부 횡보강근은 무배근한 경우와 배근된 경우로 구분되며, 횡보강근이 배근된 경우의 상세는 수직철근의 두께방향 간격을 유지하기 위하여 폭고정근을 사용하는 시공상황을 활용하기 위하여  $20d_b$  ( $d_b$ 는 횡보강근 직경) 이상의 정착길이를 가지는 U형 횡보강근과 추가로  $6d_b$  이상의 135° 및 90°의 구부림 각을 갖는 타이철근을 사용하였다. 횡보강근은 양단부의 벽체길이 10%에 해당하는 부분의 콘크리트를 구속하기 위하여 배근되었으며, 배근간격의 영향을 검토하기 위하여 수직배근간격을 달리 하였다. 이러한 배근상세의 특성과 실험변수들은 Fig. 3 및 Table 3에서 보여주고 있다.

실험은 변위제어 방식으로 반복가력(quasi-static cyclic test)하였다. Fig. 4에는 작용한 하중과 시험체의 설치상황이 나타나 있다. 시험체는 실물크기로 제작하였으며, 각 시험체별로 의도한 전단스팬비를 맞추기 위하여 두 개의 축방향 가력기(actuator)를 이용하여 진도모멘트를 각 하중단계별로 횡력에 비례하도록 작용하게 하였다. 본 연구의 실험연구에 대한 재료강도, 설치상황, 하중 및 게이지 부착위치 등에 대한 자세한 내용은 저자의 논문<sup>20,21)</sup>에 자세히 기술되어 있다.

### 6.3 실험 결과

실험결과중 반응수정계수와 관련된 구조성능인 변위와 연성비가 Table 4에 나타나 있다. 본 실험연구의 벽체의 경우 모든 시험체가 최상부 변위각( $\theta_{max}$ ) 1.5%를 넘었으며 변위연성비 역시 3.0을 상회하였다. 이는 Wallace와 Moehle<sup>19)</sup>의 연구결과에서 지적된 바와 같이 경계기둥이 없는 내력벽 시스템도 효과적인 횡력 저항시스템이 될 수 있음을 보여주는 결과이다. 또한, Cardenas와 Magura<sup>17)</sup>의 연구결과와 같이 벽체의 단부에 수직철근이 집중되어 있어 우수한 구조성능을 갖는 것으로 판단된다. 그리고, 모든 벽체에 대하여 실험으로부터 얻어진 최대강도는 기준에 따른 계산식에 의한 강도보다 크게 나타났다. 따라서 본 연구에서 대상으로 한 상세를 가진 벽체는 그 연성능력이 우수하므로( $\theta_{max} > 1.5\%$ ,  $\mu > 3.0$ ) 중·약진지역에서 중층이나 고층 전단벽이나 내력벽 구조에 사용하는 것은 타당하다고 할 수 있다.

특히 중·약진지역에서는 최근 지주는 발생하지는 않지

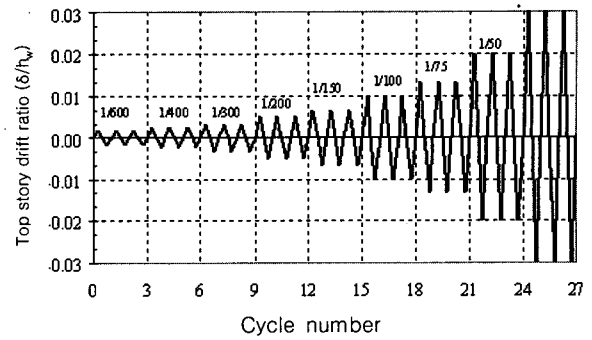
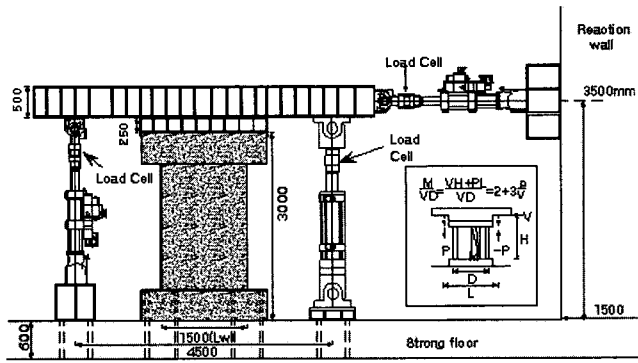


Fig. 4 Testing setup and applied displacement history

Table 4 Observed strengths and deformation capacities of specimens

Specimen	Cracking load $V_{cr}$ (t)	Yield load $V_y$ (t)	Max. load (test) $V_{max}$ (t)	Max. load (cal.) $V_{max}$ (t)	$\frac{V_{max (test)}}{V_{max (cal.)}}$	Yield displacement $\Delta_y$ (cm)	Maximum displacement $\Delta_{max}$ (cm)	Displacement ductility $\mu_{\Delta}$	Drift ratio $\theta_u$ (%)
W1-20	30.3	64.6	67.3	63.2	1.06	1.52	5.96	3.9	2.0
W2-0	17.1	31.3	37.1	31.6	1.17	1.39	6.44	4.6	2.2
W2-20	19.0	35.6	39.4	31.6	1.24	1.24	8.09	6.5	2.7
W2-10	15.4	31.9	37.7	31.6	1.19	0.93	8.59	9.2	2.9
W3-20	9.62	19.5	31.8	21.1	1.50	0.98	8.52	8.7	2.8

만 큰 지진(예를들면 판내부 지진)에 대하여 구조물이 저항능을 가져야 한다는 것을 고려한다면 벽체의 성능평가의 중요하다고 할 수 있다. 본 실험에서 흥미있는 결과는 단부 횡보강근(U형 횡보강근과 타이철근)양에 따라 벽체의 변형능력이 좋아진다는 것이다. 따라서, 아파트 내력벽에 사용하는 단독 벽체의 구조성능은 예상했던 것 보다 상당히 우수하다고 할 수 있으며, 중·약진지역의 경우 아파트 벽체의 경계기둥을 설치하지 않아도 적절한 벽체의 두께와 단부 배근상세를 가지면 우수한 성능을 갖게 할 수 있다고 판단된다.

한편, Fig. 5에는 Table 5에 나타나 있는 여러 기관(PCA<sup>22,23,24</sup>) Northwestern 대학<sup>25</sup>, UC Berkeley<sup>26</sup>)에서 수행한 다양한 변수의 40개의 구조벽 실험결과인 최대변위각을 최대전단응력도의 관계로 나타나 있다. 최대변위는 내력이 80% 유지될 때의 변위로 평가하였다. 또한, Fig. 6에는 각 시험체에 대한 변위연성비와 최대전단응력도의 관계를 보여주고 있다. 이 구조벽들의 실험변수는 단면형상(장방형, 바벨형, 플랜지형), 철근의 배근양, 전단스팬비, 경계요소의 상세, 축력비, 가력방법 등이다. Fig. 5에 나타난 결과에 따르면 구조벽의 경우 PCA에서 실험한 전단지배형 시험체 1개를 제외하고는 모두 변위각 1.5%를 넘는 것으로 나타났다. 특히 변위각 1.5%는 내진기준에서 설계수준의 지진하중 발생시 허용하는 제한치(NEHRP 1994)이기도 하다. 따라서 구조벽의 경우 실험변수와 관계없이 1.5% 이상의 변형능력을 가지고 있다고 할 수 있다.

또한 변위 연성비의 경우 PCA와 Berkeley에서 실험한 전단지배형 구조벽 3개가 변위연성비 3을 넘지 않는 것으로 나타났다. 특히 SEAOC(1988) 기준<sup>1)</sup>에 따르면 전단벽 방식의 경우 반응수정계수를 8로 정하고 있고, 최대변위산정시는 지진하중에 대한 탄성변위에  $3/8(R_w)$ 을 곱하여 산정하도록 하고 있다. 이는 결국 전단벽 시스템에 사용되는 벽체의 경우 변위연성비가 3 이상을 확보해야 하는 것으로 해석할 수 있다. 따라서 대부분의 벽의 경우 그 구조상세나 단면형태가 달라도 상당히 우수한 변형능력을 가지고 있다고 할 수 있다. 이는 Wallace와 Moehle<sup>19)</sup>의 연구결과와 마찬가지로 현행 기준(ACI 318-94, KSDP 2000 기준)의 구조벽에 대한 설계 요구조건이 다소 완화될 필요가 있다고 판단할 수 있다.

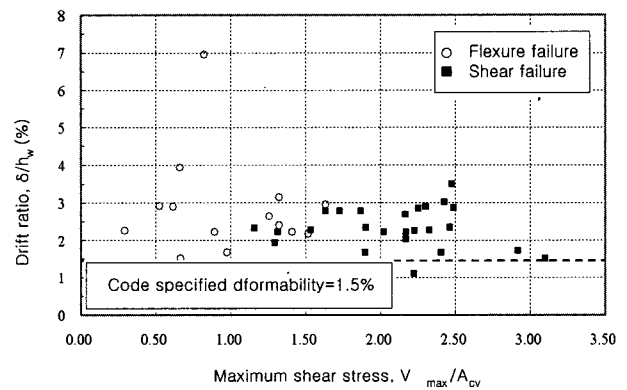


Fig. 5 Maximum shear stress vs. drift ratio

Table 5 Specimens for evaluating the deformability

Specimen	Aspect ratio	$\frac{P}{A_g f_{ck}}$ (%)	$\mu_d$	$\theta_u$ (%)	Loading	Failure mode	Institute
R1	2.4	0.40	7.7	2.3	Cyclic	Flex.	PCA
R2	2.4	0.40	6.2	2.9	Cyclic	Flex.	PCA
R3	2.4	7.00	2.2	1.7	Cyclic	Shear	PCA
R4	2.4	7.50	3.4	1.7	Cyclic	Flex.	Northwestern
B1	2.4	0.30	7.4	2.9	Cyclic	Flex.	PCA
B2	2.4	0.30	4.1	2.3	Cyclic	Shear	PCA
B3	2.4	0.30	10.1	3.9	Cyclic	Flex.	PCA
B4	2.4	0.30	15.6	6.9	Mono.	Flex.	PCA
B5	2.4	0.30	4.5	2.8	Cyclic	Shear	PCA
B6	2.4	14.10	2.4	1.7	Cyclic	Shear	PCA
B7	2.4	7.90	3.8	2.9	Cyclic	Shear	PCA
B8	2.4	9.30	4.2	2.9	Cyclic	Shear	PCA
B9	2.4	8.90	4.0	3.0	Cyclic	Shear	PCA
B10	2.4	8.60	4.3	2.8	Cyclic	Shear	PCA
B11	2.4	0.30	4.4	2.8	Cyclic	Shear	PCA
B12	2.4	0.40	3.5	2.2	Cyclic	Shear	PCA
F1	2.4	0.40	3.0	1.1	Cyclic	Shear	PCA
F2	2.4	7.60	4.8	2.2	Cyclic	Shear	PCA
F3	2.4	5.90	4.6	2.2	Cyclic	Flex.	Northwestern
CI-1	2.88	1.00	3.5	2.3	Cyclic	Flex.	PCA
SW1	1.28	7.90	6.0	3.5	Cyclic	Shear	Berkeley
SW2	1.28	7.60	2.9	1.7	Cyclic	Shear	Berkeley
SW3	1.28	7.80	8.7	5.7	Mono.	Shear	Berkeley
SW4	1.28	7.50	3.6	2.3	Cyclic	Shear	Berkeley
SW5	1.26	7.30	5.0	2.4	Mono.	Shear	Berkeley
SW6	1.26	7.00	4.4	2.3	Cyclic	Shear	Berkeley
US-J	2.78	4.90	5.8	1.5	Cyclic	Flex.	PCA

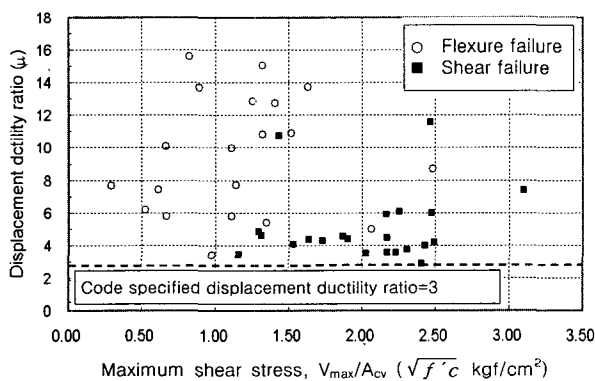


Fig. 6 Maximum shear stress vs. displacement ductility

구조부재와 시스템거동의 연관성을 평가하기 위하여 추후에 구조벽을 가진 시스템에 대한 연구도 진행하는 것이 바람직하다.

### 7. 결 론

본 연구에서는 우리나라 아파트에서 사용하는 내력벽

시스템에 대한 반응수정계수에 대하여 평가하였다. 이 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 우리나라의 기준도 미국의 기준을 기초로 하여 개발되었기 때문에 미국에서 사용하는 반응수정계수와 다음과 같은 동일한 문제가 있다.

① 반응수정계수가 건물의 높이, 평면형태, 구조의 배치와는 상관없이 주어진 구조방식이 동일하면 같은 값으로 정해져 있다. ② 반응수정계수는 구조물의 주기와 무관하게 정해져 있다. ③ 반응수정계수는 지진구역에 따라 구조물의 보유강도가 다르므로 이를 고려하여야 한다. ④ 내진설계 기준 및 지침에서 사용하고 있는 반응수정계수를 사용하여 내진설계를 했을 때, 모든 내진구조방식에 대하여 동일한 수준의 위험도(또는 안전성)를 보장하기 힘들다.

2) 국내 내진기준은 UBC와 ATC를 참고하여 제정되었지만, 반응수정계수 및 동적계수가 다른 값으로 설정되었기 때문에 밀면전단력의 크기 역시 다른 수준으로 조정되었다. 원칙적으로 반응수정계수는 조정계수라기 보다는 연

성계수와 강도계수가 곱해진 형태이며, 구조물의 성능과 관계된 계수이다. 연성계수와 강도계수의 곱으로 표시한 반응수정계수의 제시는 합리적인 수준의 합의를 이끌어낼 정도로 충분한 연구결과가 국내외적으로 부족한 상황이다. 따라서, 차후 내진기준의 개정시 이를 반영할 수 있도록 많은 연구들이 필요하다.

3) 우리나라의 경우 밀면전단력 산정식은 허용응력설계를 기초로 하고 있다. 내력벽 시스템에 대한 반응수정계수를 3.0을 사용하는 경우는 강도설계법을 기초로 하는 ATC 3-06 기준의 밀면전단력 보다 국내 기준의 밀면전단력이 크며, 반응수정계수 3.5를 쓰는 경우에도 ATC 기준보다 대부분 작으나 UBC 보다 크다. 따라서, 국내 내력벽 시스템의 밀면전단력은 허용응력설계를 기초로 하는 UBC-94의 밀면전단력 수준으로 결정되는 것이 타당하다. 이를 위하여 반응수정계수를 조정한다면 주기가 1.1초 이하인 경우 반응수정계수를 3.5로 정하는 것이 타당할 것으로 판단되며, 주기가 1.1초 이상인 경우 3.5에 30% 가량 증가시킨 값을 사용하는 것이 타당하다고 판단된다.

4) UBC 94, 97 그리고 ATC 3-06 기준 모두 내력벽에 사용하는 벽체에 경계기둥을 가져야 한다는 제한조건은 없다. ACI에서도 중·약진지역의 경우 보통벽체(ordinary wall)을 사용하도록 허용하고 있는데, 이 벽체의 경우 우리나라와 달리 단부에 U형 횡보강근이나 타이철근을 요구하고 있지 않다. 따라서, 우리나라의 내력벽이 미국의 기준들에서 요구하는 것 보다 강화된 구조상세를 적용하고 있다고 할 수 있다.

5) 본 연구에서 수행한 실험결과에 따르면 Wallace의 연구결과와 마찬가지로 강진지역의 전단벽에 대해 요구되는 경계기둥이 없을지라도 실험된 벽체들은 양호한 변형 성능을 보여주고 있다. 또한, 변형성능은 단부 횡보강근의 양을 늘림으로써 향상되는 결과를 보여주고 있다.

### 감사의 글

이 연구를 지원해 준 한양대학교 초대형구조시스템 연구센터와 주택공사 주택연구소에 감사를 표한다.

### 참고문헌

1. SEAOC "Recommended Lateral Force Requirements and Tentative Commentary," CA. 1988.
2. ATC "Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings," Applied Technology Council Report ATC 3-06, Palo Alto, CA. 1978.
3. ICBO "Uniform Building Code," International Conference on Building Officials, Whittier, CA.

- 1994, 1997.
4. BSSC "NEHRP Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulation for New Buildings," Part 1 and 2, FEMA, Washington, D.C. 1988, 1991, 1994.
5. Uang, C.M., and Bertero, V.V. "Earthquake Simulation Tests and Associated Studies of a 0.3 Scale Model of a Six Story Concentrically Braced Steel Structure," EERC, UCB/ EERC Report-86/10, UC at Berkeley, CA. 1986.
6. Whittaker et al. "Earthquake Simulation Tests and Associated Studies of a 0.3 Scale Model of a Six Story Eccentrically Braced Steel Structure," EERC, UCB/EERC Report-87/02, UC at Berkeley. 1987.
7. Foutch, D. A. et al. "Seismic Testing of Full Scale Steel Building-Part I," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 11, 1987. pp.2111~2129.
8. Osteraas, J. D., and Krawinkler, H., "Strength and Ductility Considerations in Seismic Design," John A. Blume Earthquake Eng. Center, Report No. 90, Stanford Univ., CA. 1990.
9. ATC "Structural Response Modification Factors," ATC Report, ATC-19, CA. 1995.
10. ATC "A Critical Review of Current Approaches to Earthquake-Resistant Design," ATC Report-34, CA. 1995.
11. Riddell, R. and Newmark, N. M. "Statistical Analysis of the Response of Nonlinear Systems Subjected to Earthquakes," Structural Research Series No. 468, Dept. of Civil Eng., Univ. of Illinois. 1979.
12. Miranda, E and Bertero, V.V. "Evaluation of Strength Reduction Factors for Earthquake Resistant Design," *Earthquake Spectra*, EERI, Vol. 10, No. 2, 1994. pp.357~379.
13. Han, S. W., and Wen, Y. K., "Methods of Reliability Based Seismic Design - I. Equivalent Nonlinear Systems," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, No. 3, Vol. 123. 1997.
14. Han, S. W., and Wen, Y. K., "Methods of Reliability-Based Seismic Design - II, Calibration of Code Parameters," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, No. 3, Vol. 123. 1997.
15. Architectural Institute of Korea "Load Provisions for Building Structures," Korea. 2000.
16. American Concrete Institute "Building Code and Commentary," ACI 318-95 & 99, MI. 1995, 1999.



17. Cardenas, A. E., and Magura, D. D., "Strength of High-Rise Shear Walls-Rectangular Cross Section," *PCA Research and Development Bulletin*, Skokie, IL., 1972. pp.1~25.
18. Corley, W. G., Fiorato, A. E. and Oesterle, R.G. "Structural Walls," *ACI SP 72-4*, ACI, Detroit, MI., 1981. pp.77~131.
19. Wallace, J. W., and Moehle, J. P., "Ductility and Detailing Requirements of Bearing Wall Building," *Journal of the Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 6, 1992. pp.1625~1644.
20. Han, S. W., Oh, Y. H., and Lee, L. H., "Investigation on the Structural Performance of the Slender Structural Walls with Different Details," *Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM'99)*, Seoul. 1999.
21. 오영훈, 벽식구조 아파트 건물의 전단벽에 대한 반응수정계수 평가, 한양대 박사학위논문, 1999. pp.182~235.
22. Morgan, B.J. et. al. "U.S.-Japan Quasi Static Test of Isolated Wall Planar Reinforced Concrete Structure," PCA Report, Construction Technology Division, Skokie, IL. 1986.
23. Oesterle, R. G., et. al. "Earthquake Resistant Structural Walls-Tests of Isolated Walls," PCA Report, Construction Technology Division, Skokie. 1976.
24. Oesterle, R. G., et. al. "Earthquake Resistant Structural Walls-Phase II," PCA Report, Construction Technology Division, Skokie, IL. 1979.
25. Oesterle, R.G. "Inelastic Analysis for In-plane Strength of Reinforced Concrete Shear Walls," Ph.D. Thesis, Northwestern University. 1986.
26. Vallenias, J. M., Bertero, V. V., and Popov, E. P., "Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Structural Walls," UCB/EERC-79/ 20, UC Berkeley. 1979.

## 요 약

우리나라의 지진위험도는 중·약진 지역으로 분류될 수 있으며, 최근 자주 발생하지는 않지만 큰 지진(예를들면 판내부 지진)에 대하여 구조물이 저항성능을 가져야 한다는 것을 고려한다면 벽체의 성능평가는 중요하다고 할 수 있다. 본 논문의 내용은 내력벽 시스템 아파트 건물의 벽체에 대한 반응수정계수의 평가에 관한 것이다. 이를 위하여 반응수정계수에 관련된 기존 연구를 조사하여 반응수정계수의 구성요소를 분석하였다. 또한, 국내 내진기준에서 반응수정계수, 동적계수 산정의 문제점을 ATC와 UBC 기준들의 밀면전단력의 크기와 비교하여 나타내었다. 그리고, 아파트 벽체 및 전단벽에 대한 기존의 국내·외 실험연구를 활용하여 그 구조성능을 평가하였으며, 이러한 연구내용의 결과를 기초로 허용응력도 설계용 지진하중을 규정하는 국내 내진규정의 내력벽 시스템에 대한 반응수정계수를 제안한다.

**핵심용어 :** 반응수정계수, 내진 기준, 구조 벽체, 배근 상세