

# 비대칭 벽식 구조의 변위기초 내진성능평가 및 보강

## Displacement-based Seismic Assessment and Rehabilitation of Asymmetric Wall Structures

하 태 휴\*                      홍 성 곁\*\*  
Ha, Tae-Hyu                      Hong, Sung-Gul

### 국문요약

편심이 있는 구조물이 지진하중을 받는 경우 비틀림의 발생으로 특정부재에 응력 및 변위가 집중되고 이는 전혀 예상치 못한 구조물의 파괴를 유발할 수 있다. 본 연구에서는 각 횡저항 부재의 한계변위를 기반으로 하여 구조물 전체의 횡변위와 비틀림각의 관계도(D-R Relationship: Displacement-Rotation Relationship)를 작성하고 변위스펙트럼을 이용하여 내진성능평가를 수행하는 방법을 제안한다. 제안된 내진성능평가의 방법은 시간이력해석의 결과를 이용해서 검증하였다. 또한 다양한 지진수준에 대해 구조물의 다른 성능수준을 기준으로 하는 다단계 내진성능평가를 수행하였다. 최종적으로 그 결과를 기준으로 D-R 관계도를 이용한 내진보강 전략을 제시하였다. 내진보강은 각 부재의 강도/강성을 증가시키는 방법과 연성도를 증가시키는 두 가지의 방법을 사용하였다. 특히 강도/강성을 증가시키는 내진보강 전략에서는 보강의 최적화를 위하여 보강전략을 최적화 문제로 구성하고 BFGS Quasi-Newton method를 이용하여 최적보강전략을 수립하는 과정을 제시하였다.

**주요어** : 비틀림, 벽식 구조, D-R 관계도, 비틀림각, 설계변위스펙트럼, 내진성능평가, 내진성능보강, BFGS Quasi-Newton 최적화

### ABSTRACT

Torsional behavior of eccentric structure under seismic loading may cause the stress and/or deformation concentration, which arouse the failure of the structure in an unexpected manner. This study suggests D-R relationship which shows the overall displacement and rotation of the system based on the ultimate displacement capacity of the each lateral load resistant member. Using the suggested D-R relationship and displacement spectrum, the seismic assessment is conducted and verified in comparison with the time history analysis result. Multi-level seismic assessment is considered which takes multiple seismic hazard levels and respective performance levels into account. Finally, based on the seismic assessment result, seismic rehabilitation process is presented. In this research, two rehabilitation methods are considered. One is done by means of stiffening/strengthening the seismic resistant members, and the other is based on the member ductility. Especially, in the first method, to optimize the rehabilitation result, the rehabilitation problem is modeled as an optimization problem, and solved using BFGS quasi-Newton optimization method.

**Key words** : torsional behavior, wall structures, D-R relationship, rotation angle, displacement spectrum, seismic assessment, seismic rehabilitation, BFGS Quasi-Newton optimization method

## 1. 서 론

편심이 있는 구조물이 지진하중을 받는 경우 횡변위 뿐만 아니라 비틀림도 발생하게 된다. 편심이 큰 구조물의 경우에는 과도한 비틀림으로 인해 전혀 예상치 못한 파괴 모드를 유발하기도 한다. 이와 같이 비틀림이 발생하는 경우 구조물의 지진거동을 예측하기 힘들기 때문에 현재의 내진설계기준에서는 구조물의 편심을 고려하는 설계보다는 편심을 제한하는 방향을 제시하고 있다.<sup>(1),(8),(11)</sup> 실제로 현재의 내진설계기준에서는 '구조물의 한 쪽 끝에서 우발 비틀림을 고려하여 계산된 최대 층변위가 양단 층변위 평균의 1.2배 이상인 경우'를 비틀림 비정형 구조물로 정의하고 이러한 구조물에 대해서는 동적해석을 수행하거나 더 큰 설계하중을 고려할 것을 권장하고 있다. 하지만 계획의 목적이나 실제 사용 중에 발생하는 구조체의 편심은 피할 수 없는 현상이므로 지금과 같은 소극적인 대처보다는 구

조물의 비틀림 자체를 고려할 수 있는 적극적인 내진설계 방법이 요구된다.

이에 본 연구에서는 구조물이 발휘할 수 있는 횡방향 및 비틀림의 최대변형을 기준으로 하여 당해 구조물의 내진성능평가 및 내진보강 전략을 수립하는 방법을 제시하고자 한다. 기존에 비틀림이 발생하는 구조물의 전단 및 비틀림 모멘트의 저항능력을 동시에 고려하고자 하는 연구가 있었다.<sup>(12),(15)</sup> 하지만 구조물에 지진하중이 작용하는 경우 구조물의 파괴에 임계적인 요소로 작용하는 것은 구조물에 가해지는 응력보다는 구조물에 발생하는 변형이라고 할 수 있다. 이에 최근 내진설계 및 내진평가에 대한 연구는 응력보다는 변위에 기초를 둔 연구가 주류를 이루고 있으며<sup>(14)</sup>, 본 연구에서도 구조물의 횡변위와 비틀림각을 고려하는 변위기초 내진성능평가 및 내진성능보강기법을 제시하고자 한다.

## 2. 변위기초 내진성능평가

앞에서도 언급하였듯이 최근의 내진설계 및 평가에 대한 연구는 하중기초방법의 한계를 극복하기 위해 구조물의 변형도를 기반으로 하는 변위기초방법이 주류를 이루고 있

\* 서울대학교 공과대학 건축학과 박사과정  
(대표저자: taehyu3@snu.ac.kr)

\*\* 정회원 · 서울대학교 공과대학 건축학과 부교수

본 논문에 대한 토의를 2005년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2005. 1. 31 / 심사종료일 : 2005. 4. 28)

다. 대표적인 변위기초 설계/평가 방법으로는 능력 스펙트럼법 (Capacity Spectrum Method)이나 직접 변위 설계법(Direct Displacement Based Design)등을 들 수 있다. 본 연구에서도 각 구조부재에 발생하는 실제 변형도를 기반으로 하여 구조물의 변형 능력에 대한 관계도를 작성하고 이를 이용하여 내진성능평가 및 보강의 과정을 수행하고자 한다. 이를 위하여 본 연구에서 채택한 비대칭 prototype 해석모델 및 해석방법을 다음과 같이 제시한다.

2.1 비대칭 모델의 설정

비틀림을 유발할 수 있는 비대칭 벽식 구조물의 거동을 살펴보기 위해 그림1과 같은 해석모델을 설정하였다. 기준 모델은 X, Y방향에 대해 각각 3개씩의 벽체를 횡저항 요소로 지니는 단층 RC벽식 구조로 설정하였다. 편심의 정도를 각각 다르게 설정하여 편심이 없는 경우(Type O), 편심길이의 30%편심을 지니는 경우(Type E1) 및 15%의 편심이 있는 경우(Type E2)를 설정하였고, 그 밖에 10%의 편심을 지니는 Type S(Stiff type)와 Type F(Flexible type)모델을 하나씩 추가하였다. 다섯 개의 기준모델이 지니는 각각의 벽량은 모두 동일하며, 바닥판의 크기는 12m 정방형으로 설정하였다. 횡하중의 재하는 Y방향만을 고려하였으며, X방향의 세 개의 벽체가 지니는 벽량의 합도 Y방향의 벽량과 동일하다. 각각의 벽체는 동일한 항복곡률을 지닌다고 가정하여 강성, 강도 및 항복곡률을 산정하였

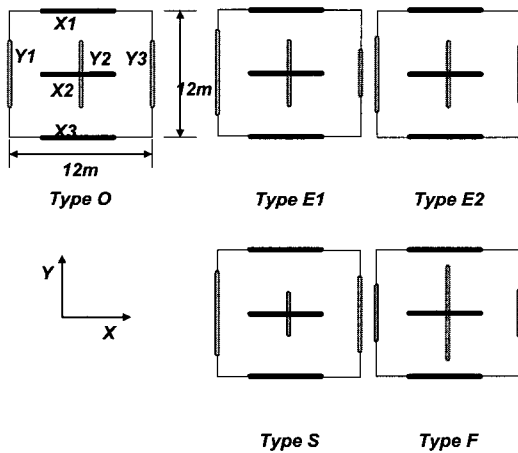


그림 1 3요소 해석모델

으며 문제를 단순화하기 위해 개별벽체의 연성도는 독립적인 요소로 가정하였다. 이로부터 얻어지는 해석모델의 상세는 표1과 같다. 슬래브가 충분한 강성을 지니고(rigid diaphragm action), 각 벽체의 면외방향 변위를 무시하면 각 모델은 X, Y방향 변위 및 회전각의 3자유도 모델로 가정할 수 있다.

2.2 횡변위 - 비틀림각도 (D-R) 관계도

기준에 Paulay와 Kan, Chopra는 벽식 구조물에 대하여 개별벽체의 항복강도만을 고려하여, 구조체가 지지할 수 있는 밀면 전단력과 그에 따른 비틀림을 구하고 하나의 평면에 그려내는 관계도(BS-T: Base Shear-Torsion relationship)를 제안하였다<sup>(12),(15)</sup>. 이 관계도는 시스템의 구조적인 거동에 대한 이해를 돕기 위한 목적에서 개발되었고 탄성 응력의 한계를 의미한다.

본 연구에서는 변위기초 설계나 평가의 과정에서 직접적으로 사용할 수 있도록, 시스템의 횡변위와 비틀림 각도의 관계에 대하여 BS-T 관계도와 유사한 관계도(D-R: Displacement-Rotation relationship)를 작성하였다. 그림2와 같이 벽식 구조물에 횡변위  $\Delta$ 와 비틀림  $\phi$ 가 발생할 때 각 벽체에 발생하는 면외 방향의 변위를 무시하고  $i$  번째 벽체의 연성도가  $\mu_i$ 이라고 한다면 벽체의 배치형상을 기준으로 가력방향(X방향)과 가력에 수직인 방향(Y방향)의 벽체에 대하여 각각 식(1)을 얻어낼 수 있다.

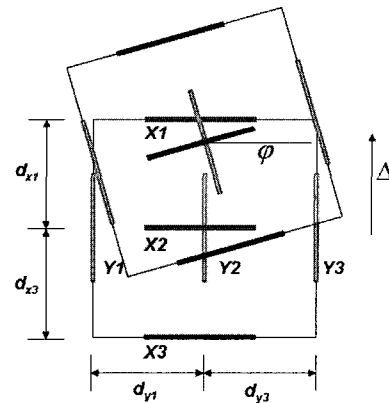


그림 2 구조체의 변형형상

표 1 해석모델 상세

Analysis Model		Type O	Type E1	Type E2	Type S	Type F
Length (m)	Wall Y1	6.0	7.8	6.9	7.8	5.1
	Wall Y2	6.0	6.0	6.0	3.3	8.7
	Wall Y3	6.0	4.2	5.1	6.9	4.2
Yield Strength (kN)	Wall Y1	84.40	118.19	99.12	130.65	61.80
	Wall Y2	84.40	85.74	85.40	25.16	189.62
	Wall Y3	84.40	51.99	71.17	118.92	46.70
Stiffness (kN/m)	Wall Y1	1620.49	2949.90	2188.65	3260.94	1008.59
	Wall Y2	1620.49	1646.25	1639.76	265.65	5279.12
	Wall Y3	1620.49	698.12	1161.45	2625.86	627.59

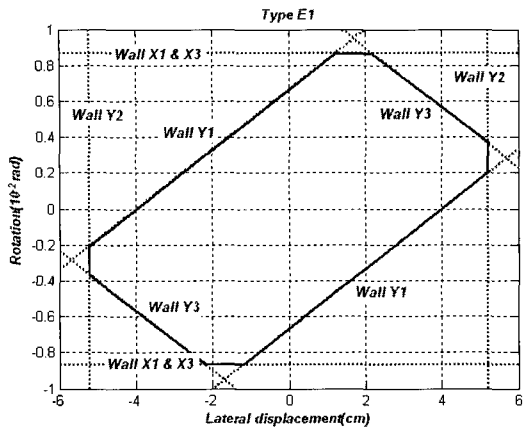


그림 3 D-R 관계도 (type E1)

$$\begin{aligned} y_i &: \varphi d_{xi} + \Delta = \mu_i u_{yi} \\ x_i &: \varphi d_{yi} = \mu_i u_{xi} \end{aligned} \quad (1)$$

표 1에서 설정한 각 벽체별 항복강도와 강성을 기준으로 하여 type E1 구조물의 각 벽체에 대한 항복변위를 설정하면 표2와 같다.

표 2 벽체별 항복변위 (Type E1)

Wall	X1~X3	Y1	Y2	Y2
Yield Disp.(m)	0.052	0.040	0.052	0.074

표 2에서 얻어진 각 벽체별 항복변위를 식 (1)에 대입하면 각 벽체에 대하여 식 (2)과 같은 변위 관계식을 설정할 수 있다.

$$\text{Wall Y1: } 6\varphi + \Delta = \pm 0.040\mu_{y1} \quad (2-1)$$

$$\text{Wall Y2: } \Delta = \pm 0.052\mu_{y2} \quad (2-2)$$

$$\text{Wall Y3: } -6\varphi + \Delta = \pm 0.074\mu_{y3} \quad (2-3)$$

$$\text{Wall X1 \& X3: } 6\varphi = \pm 0.052\mu_x \quad (2-4)$$

$$\text{Wall X2: } \text{제한조건 없음} \quad (2-5)$$

식 (2)에서 모든 벽체의 연성도가 1이라고 가정하고, 하나의 그래프에 그려낸 결과는 그림3과 같다. 그림 3의 각 직선들이 식 (2)에 나타나는 개별 벽체의 변위 한계이고 그 중 최소값들을 연결하면 구조물 전체가 발휘할 수 있는 변위의 한계라고 생각할 수 있다.

위와 같은 방법으로 다른 해석모델 구조체들에 대하여 D-R 관계도를 그리면 그림4와 같다. 그림 4의 D-R 관계도는 그림3과 마찬가지로 모든 벽체의 연성도가 1인 경우에 대하여 작성된 것이다. 그림 3과 4에서의 D-R 관계도는 개별벽체의 탄성거동을 가정하고 그려낸 것이며 실제 내진평가 및 보강의 과정에서는 각 벽체의 최대 변형도를 기준으로 한 D-R 관계도를 사용하게 된다.

### 2.3 D-R 관계도를 이용한 내진성능평가

앞에서 구해진 D-R 관계도는 각 시스템별 변위거동의 한계를 의미한다. 따라서 각 시스템의 목표변위점이 D-R

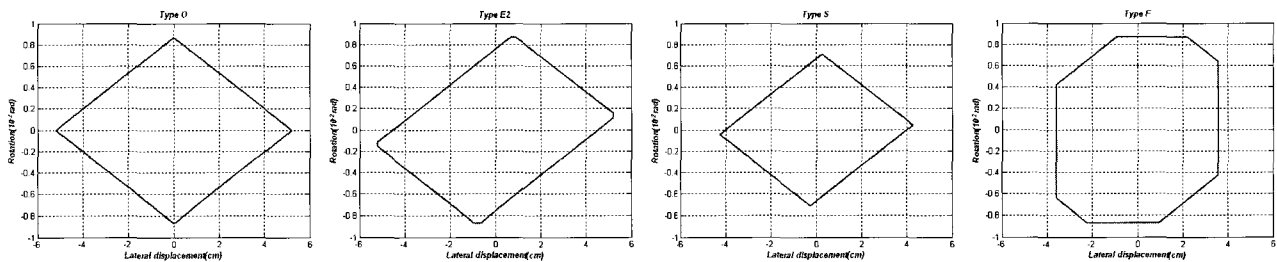


그림 4 D-R 관계도(type O, type E2, type F, type S)

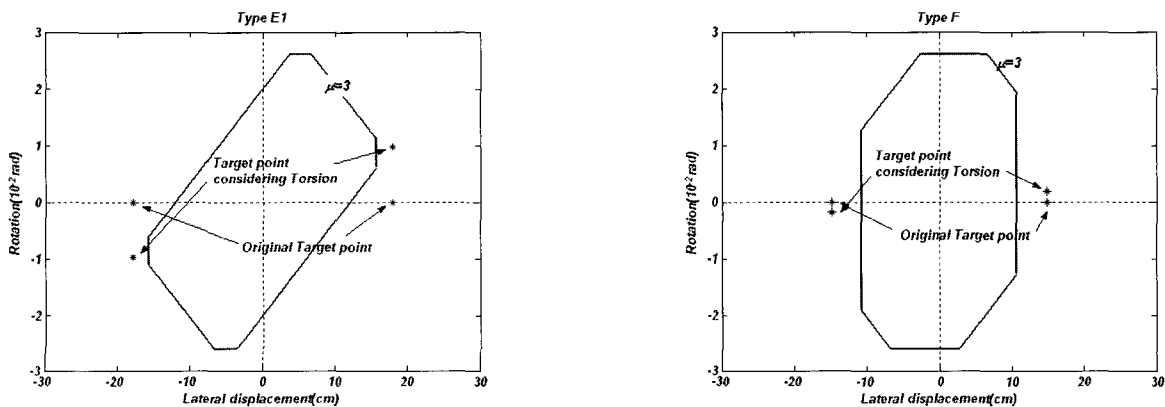


그림 5 변위스펙트럼을 이용한 내진성능평가

관계도 내부에 존재한다면 구조물이 당해지진에 대해 안전하다고 생각할 수 있다. PGA 0.2g인 지진에 대하여 설계 변위 스펙트럼을 작성하고 각 구조시스템별 유효주기에 해당하는 목표변위를 추출할 수 있다. 여기서의 목표변위는 기존의 변위기초설계법에서 사용하는 설계변위와 동일한 값으로 구조물의 횡방향 변위만을 의미하는 것이다. 시스템의 비틀림을 고려하기 위해서 식 (3)과 같이 목표비틀림각을 산정할 수 있다. 식 (3)은 구조물에 발생하는 비틀림을 각 벽체의 탄성 강성 및 배치만으로 가정한 값이다.

$$S_{d\phi} = - \frac{\sum k_{yi} d_{yi}}{\sum k_i d_i^2} S_{dy} \quad (3)$$

위와 같이 각 구조물의 목표변위-목표비틀림각을 결정하고 이를 D-R 관계도상에 표현한 것이 그림 5와 같다. 여기서의 D-R 관계도는 모든 벽체의 연성도가 3이라고 가정하고 작성하였다. 그림 5에서 X축 상에 존재하는 목표 변위점은 구조물의 비틀림을 고려하지 않은 횡방향 목표 변위점이고, X축 상에 존재하지 않는 두 점은 식 (3)을 통해 구조물의 비틀림까지 고려하여 산정한 목표변위점이다. 그

림5에서의 목표변위점(목표변위-목표비틀림각)은 모두 D-R 관계도의 외부에 존재하므로 내진평가의 결과 '구조물의 내진성능이 충분하지 않다'고 말할 수 있다.

### 2.4 시간이력해석을 통한 평가결과검증

2.3절에서 수행한 내진성능평가의 신뢰성을 검증하기 위하여 시간이력해석을 수행하고 그 결과와 비교를 통하여 평가결과를 검증하였다.

#### 2.4.1 시간이력해석을 위한 모델링 및 지반운동기록

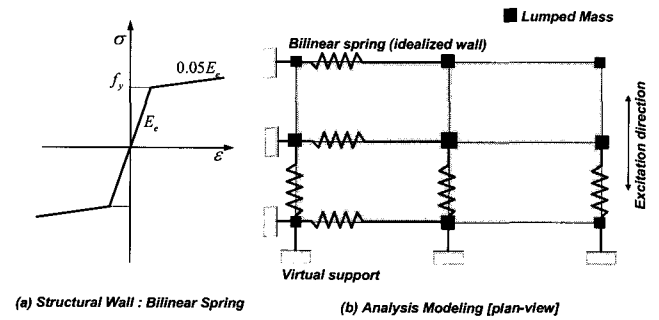
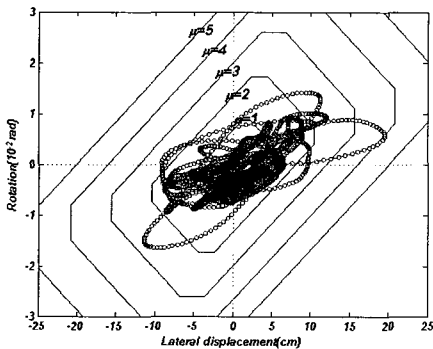
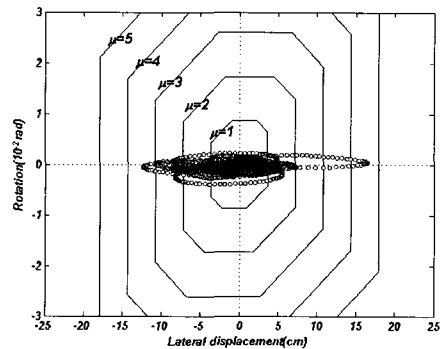


그림 6 시간이력해석을 위한 모델링방법



(a) type E1 [EI Centro]



(b) type F [EI Centro]

그림 7 내진성능평가법의 검증 [시간이력해석]

표 3 시간이력해석을 위한 지반운동기록

Ground Motion Records ( <a href="http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html">http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html</a> )					
Earthquake	Date	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	Amplification
EI Centro	1940.05.19	0.215	30.2	23.91	0.930
Kobe	1995.01.16	0.243	37.8	8.54	0.823

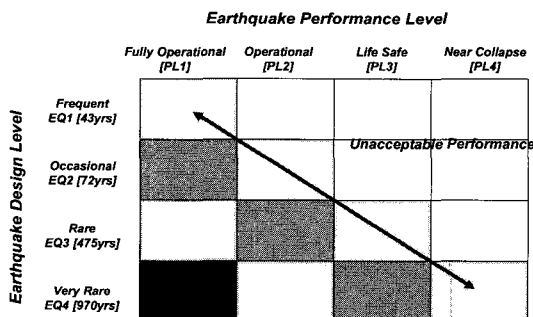


그림 8 다단계내진성능평가 [SEAOC]

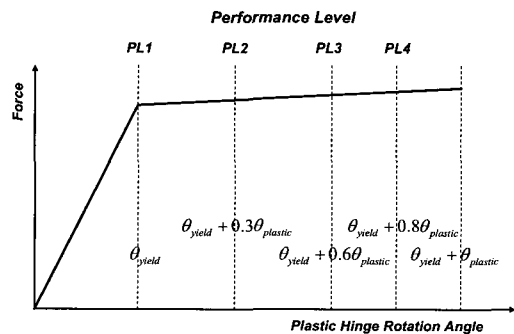


그림 9 성능수준별 변형도 [SEAOC]

그림 1과 같은 기준모델들에 대한 시간이력해석을 수행하기 위하여 그림6과 같이 모델링을 수행하였다. 각 구조벽체는 그림 6(a)와 같이 5%의 초과강도계수를 지나는 이선형 스프링으로 단순화하였다. 이선형 스프링으로 표현되는 각각의 벽체는 그림 6(b)와 같이 가상지점을 절점으로 사용하였다.

시간이력해석에 사용한 지반운동의 기록은 표3과 같다. 2.3절에서의 내진성능평가와 동일하게 지반운동의 유효최대가속도를 0.2g로 조정하여 사용하였다.

2.4.2 시간이력해석 결과를 이용한 평가결과의 검증

시간이력해석의 결과로 얻어진 각 벽체별 변위이력으로부터 시스템의 횡변위 및 비틀림각을 추출해낸 결과는 그림7과 같다. 2.3절에서 사용한 목표 변위점은 그림7에서 실제 변위이력의 결과 얻어진 최대 횡변위 및 최대 비틀림각을 비교적 정확하게 반영하고 있다. 그림7을 기준으로 내진성능평가를 수행하면 모든 구조벽체의 연성도가 3이라고 가정하는 경우 2.3절의 결과와 마찬가지로 '내진성능이 충분하지 않다'고 결론내릴 수 있다.

2.5 다단계 내진성능평가

불확실성이 큰 지진하중에 대해 하나의 지진하중을 사용하여 내진평가 및 설계를 수행하는 것은 위험이 따른다. 따라서 최근의 내진기준들은 다양한 설계지진수준에 대해 각각의 성능수준을 만족해야하는 다단계내진성능평가 방법

을 제시하고 있다. SEAOC에서는 그림 8과 같은 다단계 평가[Multi-Level Assessment] 방법을 제안하고 있다.<sup>(20)</sup> SEAOC에서 제시하는 각 지진 수준별 설계지진의 크기는 그림8과 같은 재현주기를 지나는 지진을 사용하고, 각각의 성능수준에 대해서는 그림 9과 같은 변형도를 제시하고 있다.

그림 9에서 제시하는 것과 같이 각 성능수준별 변형도를 산정하기 위해서는 각 벽체의 변형 능력은 2.3절에서와 같이 연성도로 표현하는 대신 탄성 변위와 소성변위를 구분하여 표현해야 한다. 벽체의 변형 능력에 대한 기존 연구에서 벽체의 탄성, 소성 및 최대 변형 능력은 각각 식 (4), (5)와 같이 표현된다.<sup>(18)</sup>

$$\Delta_{yield} = \phi_{yield} \frac{h_e^2}{3} \tag{4}$$

$$\Delta_{plastic} = (\phi_{ultimate} - \phi_{yield}) l_p (h_e - l_p / 2) \tag{5}$$

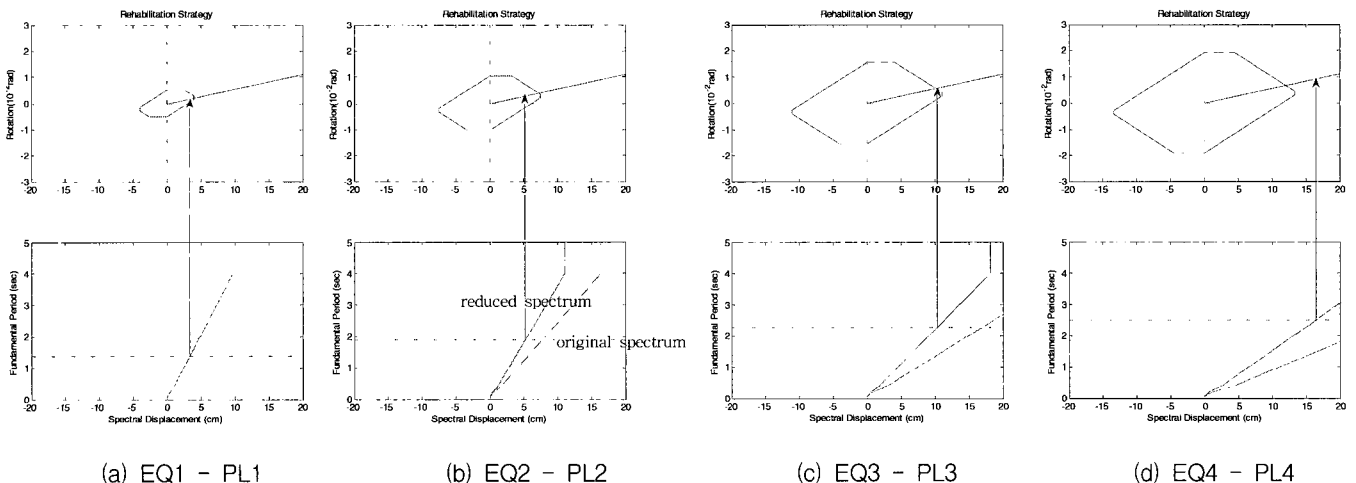
여기서, 벽체의 탄성 및 최대 소성힌지회전각은 식 (6), (7)과 같이 표현된다.

$$\phi_{yield} = \frac{k_2 \epsilon_{yield}}{l_w} \tag{6}$$

$$\phi_{ultimate} = \frac{0.072}{l_w} : \text{confined} \tag{7-1}$$

표 4 다단계내진성능평가결과

Case	$S_s (g)$	$S_1 (g)$	Result
EQ-I	0.33	0.13	OK
EQ-II	0.55	0.22	OK
EQ-III	1.0	0.4	NG
EQ-IV	1.5	0.6	NG



$$\phi_{ultimate} = \frac{0.05123}{l_w} \left( \frac{\rho_l f_y + P / A_g}{f_c'} \right)^{-0.8778} : \text{unconfined} \quad (7-2)$$

벽체의 최대변위는 식(8)과 같다.

$$\Delta_{ultimate} = \Delta_{yield} + \Delta_{plastic} \quad (8)$$

위와 같이 각 성능수준에 해당하는 벽체별 변형 능력을 산정하고 감쇠를 고려하여 각 성능수준별로 내진성능평가를 수행한 결과는 그림10과 같다. 그림10에서 사용된 설계 스펙트럼의 유효 감쇠비  $\eta$  는 식(9)와 같다.

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2 + 100\xi_{eff}}} \quad (9)$$

식(9)에서  $\xi_{eff}$  는 개별 벽체의 변형도를 고려한 시스템의 유효감쇠계수를 의미한다.

그림 10의 아래쪽 그림은 일반적으로 사용되는 설계변위스펙트럼과 감쇠를 고려한 스펙트럼을 의미한다. 위쪽의 그림은 구조물의 유효주기를 기준으로 D-R 관계도상에 목표변위를 설정하는 과정을 보여준다. 이때 각 성능수준별로 다른 D-R 곡선을 사용하게 된다. 이는 그림9에서와 같이 성능수준별로 다른 변형도를 가정하기 때문이다. 각 수준별 성능평가의 결과는 표4와 같이 요약할 수 있고 표4에서의  $S_s$  및  $S_1$  는 SEAOC에서 제시하는 각 지진수준별 가속도의 크기를 그대로 사용하였다.<sup>(20)</sup>

### 3. 내진성능보강

앞 장에서 수행한 내진성능평가의 결과를 기준으로 내진성능 보강을 수행하고자 한다. 기존의 내진보강 연구에서는 내진보강의 종류를 크게 세 가지로 나누어 설정하고 있다.<sup>(10)</sup> 각각 구조물의 강도, 강성, 연성도를 증가시키는 방법이다. 본 연구에서는 모든 벽체의 항복곡률이 동일하다고 가정하였으므로 강도와 강성은 동시에 변한다고 생각할 수 있다. 따라서 구조체의 강성 및 강도를 증가시키는 방법과 연성도를 증가시키는 방법으로 크게 두 가지의 내진성능보강 기법을 제시하고자 한다.

$$\text{Minimize } f = \Delta k_{y1} + \Delta k_{y2} + \Delta k_{y3}$$

$$\text{subject to } \left\{ \begin{array}{l} ((d_3^2 - d_1 d_3) \Delta k_3 + (d_1^2 - d_1 d_1) \Delta k_1 + \beta - d_1 \alpha) \Delta - u_m d_3^2 \Delta k_3 - u_m d_1^2 \Delta k_1 - \beta u_m \leq 0 \quad (C1) \\ (d_3^2 \Delta k_3 + d_1^2 \Delta k_1 + \beta) \Delta - u_m d_3^2 \Delta k_3 - u_m d_1^2 \Delta k_1 - \beta u_m \leq 0 \quad (C2) \\ ((d_3^2 - d_3 d_3) \Delta k_3 + (d_1^2 - d_3 d_1) \Delta k_1 + \beta - d_3 \alpha) \Delta - u_m d_3^2 \Delta k_3 - u_m d_1^2 \Delta k_1 - \beta u_m \leq 0 \quad (C3) \\ (-d_4 d_3 \Delta k_3 - d_4 d_1 \Delta k_1 - d_4 \alpha) \Delta - u_m d_3^2 \Delta k_3 - u_m d_1^2 \Delta k_1 - \beta u_m \leq 0 \quad (C4) \\ \text{Neglected} \quad (C5) \\ (-d_6 d_3 \Delta k_3 - d_6 d_1 \Delta k_1 + \beta - d_6 \alpha) \Delta - u_m d_3^2 \Delta k_3 - u_m d_1^2 \Delta k_1 - \beta u_m \leq 0 \quad (C6) \\ \Delta k_{yi} \geq 0 \quad (C7) \end{array} \right. \quad (12)$$

### 3.1 강성/강도 증가를 통한 내진보강

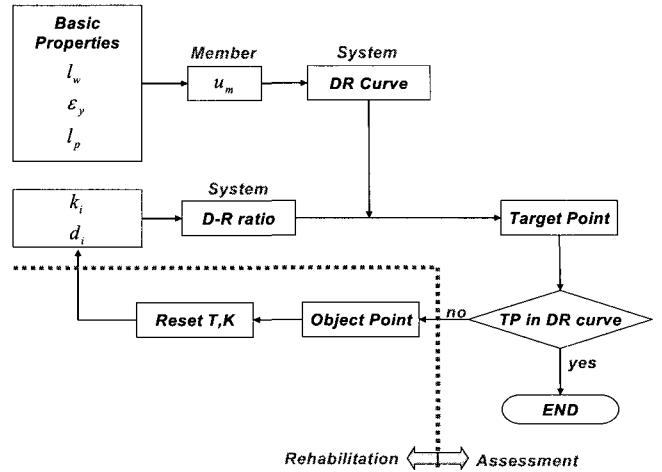


그림 11 D-R 관계도를 이용한 내진성능보강 절차 [강성/강도 증가]

D-R 관계도상의 강성/강도 증가를 통한 내진성능보강의 절차는 그림 11과 같다. 먼저 구조물의 기본정보로부터 각 부재별 최대 변형도를 산정하고 이를 이용하여 D-R 관계도를 작성한다. 이를 기준으로 그림5와 같이 내진성능평가를 수행하게 되는데 여기서 구조물의 강성 및 강도를 증가시키면 구조물의 유효주기가 감소하게 되고 목표변위도 감소하게 된다. 이러한 과정을 반복하여 목표 변위점을 D-R관계도 내부로 끌어들이는 것이 D-R 관계도를 이용한 강성중심의 내진보강전략이 된다. 단 본 연구에서 강성/강도의 변화를 통한 D-R 관계도의 변화는 없다고 가정하였다. 그 이유는 실제 벽체의 보강을 수행할 경우 그림 12과 같이 기존벽체와 완벽한 일체로 시공하기 어렵고 보강 벽체와는 무관하게 기존벽체의 최대 곡률은 그대로 유지된다고 가정할 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 그림 13과 같이 강성 및 강도의 변화로 얻어지는 새로운 목표 변위점을 보강목표점(Rehabilitation Objective Point)이라고 설정하였다. 이 때 어떤 목표 변위점을 선정하여 보강을 수행하는지에 따라서 내진보강의 결과가 크게 달라질 수 있다. 그림 13은 서로 다른 목표 변위점을 산정해서 내진보강을 수행하는 결과를 도식적으로 보여준다. 그림 13에서 기존 성능점(original tar-

get point)은 내진성능평가의 과정에서 구해진 성능점을 의미하고 강성을 증가시키는 벽체의 위치에 따라서 여러 가지의 보강목표점을 산정할 수 있다. 이때 전반적으로 시스템의 비대칭성을 줄여가는 방향으로 내진보강을 수행해야 보다 작은 보강으로 큰 효과를 얻을 수 있다.

목표 보강점의 산정은 여러 가지 방법으로 수행할 수 있지만 본 연구에서는 합리적인 보강목표점의 산정을 위해 기존 최적화이론을 이용하고자 한다. 각 벽체 강성보강의 합을 최소화 하는 최적화 문제를 설정하면 그림1의 기준모델에 대한 최적보강의 문제는 식 (10)과 같이 설정할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f = \Delta k_{y1} + \Delta k_{y2} + \Delta k_{y3} \\ & \text{subject to } \begin{cases} \Delta + d_1\phi \leq u_{m1} & (C1) \\ \Delta + d_2\phi \leq u_{m2} & (C2) \\ \Delta + d_3\phi \leq u_{m3} & (C3) \\ d_4\phi \leq u_{m4} & (C4) \\ d_5\phi \leq u_{m5} & (C5) \\ d_6\phi \leq u_{m6} & (C6) \\ \Delta k_{yi} \geq 0 & (C7) \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

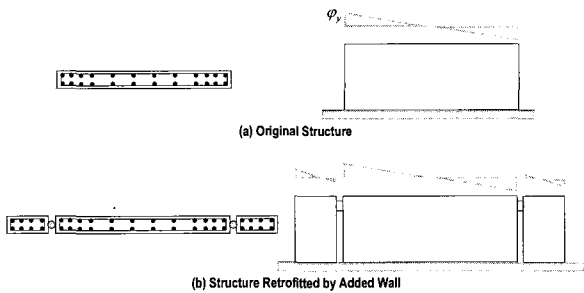


그림 12 벽체의 보강과 항복곡률의 변화

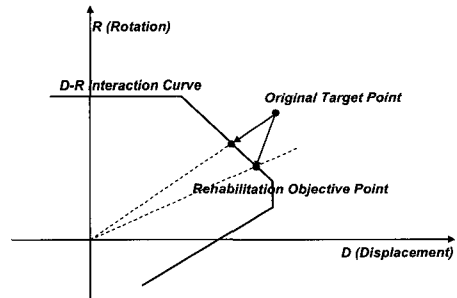


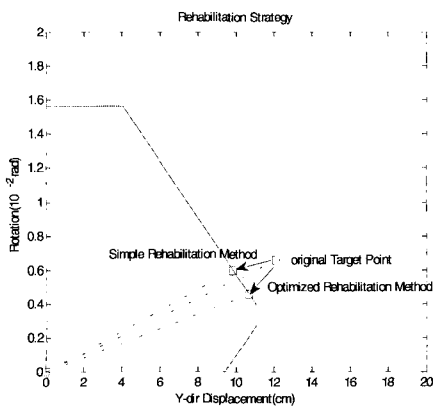
그림 13 보강목표점[Rehabilitation Objective Point]의 수립

표 5 단순보강 및 최적보강의 결과 [강성/강도 증가: EQ3-PL3]

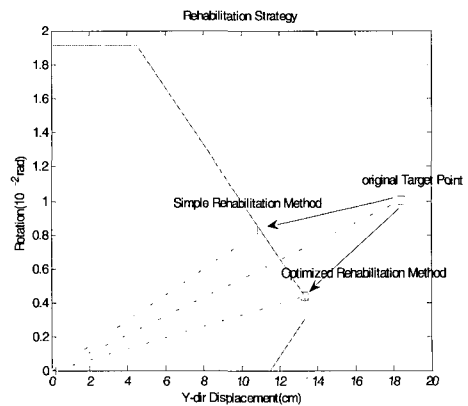
	Original	Simple Rehabilitation Result		Optimal Rehabilitation Result	
	$k_{yi}$ (kN/m)	$k_{yi}'$ (kN/m)	$\Delta k_{yi}$ (kN/m)	$k_{yi}'$ (kN/m)	$\Delta k_{yi}$ (kN/m)
Wall Y1	2949.9	3823.9	874.0	2949.9	0.0
Wall Y2	1646.3	2134.0	487.7	1646.3	0.0
Wall Y3	698.1	905.0	206.9	1209.3	511.2
Added Stiffness		-	1568.6	-	511.2
Number of Iterations		6		49(9)	

표 6 단순보강 및 최적보강의 결과 [강성/강도 증가: EQ4-PL4]

	Original	Simple Rehabilitation Result		Optimal Rehabilitation Result	
	$k_{yi}$ (kN/m)	$k_{yi}'$ (kN/m)	$\Delta k_{yi}$ (kN/m)	$k_{yi}'$ (kN/m)	$\Delta k_{yi}$ (kN/m)
Wall Y1	2949.9	7026.5	4076.6	3224.8	274.9
Wall Y2	1646.3	3921.3	2275.0	2258.1	611.8
Wall Y3	698.1	1662.9	964.8	1620.8	922.7
Added Stiffness		-	7316.4	-	1809.4
Number of Iterations		5		29(5)	



(a) EQ3-PL3 보강결과



(b) EQ4-PL4 보강결과

그림 14 Type E1에 대한 단순보강 및 최적보강의 결과 [강도/강성증가를 통한 내진보강]

각 벽체의 강성이 변화하는 경우 앞에서 제시한 구조물의 비틀림에 관한 식 (3)은 식 (11)과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi = -\frac{\sum k_{yi}d_{yi} + \sum \Delta k_{yi}d_{yi}}{\sum k_i d_i^2 + \sum \Delta k_{yi}d_{yi}^2} \Delta \quad (11)$$

식 (10)에 식 (11)을 대입하여 정리한 결과는 식 (12)과 같다. 식 (12)에서의 변수  $\alpha$  와  $\beta$  는 각각 식 (13)과 같다.

$$\alpha = \sum k_{yi}d_{yi}, \beta = \sum k_i d_i^2 \quad (13)$$

식 (12)에서 변위스펙트럼으로부터 얻어지는 y 방향의 변위  $\Delta$  는 각 벽체의 강성증분에 의해서 변화하게 되므로  $\Delta$  는 강성증분의 함수로 표현해야 한다. i 번째 벽체에  $\Delta k_{yi}$  만큼 강성이 증가하면 시스템의 유효 강성은 및 시스템의 유효주기는 식 (14), (15)와 같이 표현할 수 있다.

$$K_{eff} = \frac{\sum F_{yi}}{\min(u_m)} + \Delta k_{y1} + \Delta k_{y2} + \Delta k_{y3} \quad (14)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M_{eff}}{\sum F_{yi} + \Delta k_{y1} + \Delta k_{y2} + \Delta k_{y3}}} \quad (15)$$

식 (15)의 유효주기를 이용하면, 식 (16)과 같은 스펙트럼변위를 구해낼 수 있다.

$$\Delta = S_d = \frac{S_1 g \eta}{2\pi} \sqrt{\frac{M_{eff}}{\sum F_{yi} + \Delta k_{y1} + \Delta k_{y2} + \Delta k_{y3}}} \quad (16)$$

식 (16)을 식 (12)에 대입하고 BFGS Quasi-Newton method를 이용하여 최적화를 수행하였다.<sup>(19)</sup> 2.5절에서 내진평가를 수행한 결과 EQ3와 EQ4의 두 가지 성능수준에서 NG가 발생하였으므로 각각의 경우에 대하여 내진보

강을 수행하였다. 내진보강의 결과는 표 5~6 및 그림 14와 같이 정리할 수 있다. 그림14에서 simple rehabilitation method란 최적보강과의 비교를 위한 값으로 구조물의 강성증분을 기존 벽체의 강성에 비례하여 분배하는 경우를 의미한다.

### 3.2 연성도 증가를 통한 내진보강

연성도 증가를 통한 내진보강은 재료연성도 혹은 내진상세의 확보를 통해 부재 연성도를 증가시켜 내진보강을 수행하는 경우를 의미한다. D-R 관계도상에서 연성도 보강은 D-R 곡선 자체를 증가시켜 목표변위점을 D-R 곡선 내부로 끌어들이는 과정으로 표현된다. 이때 각 부재의 연성도를 조정하면 시스템 전체의 D-R 곡선이 변화하게 된다. 연성도의 개념에서 내진평가를 수행한 결과인 그림5에 대하여 각 부재별 연성도를 증가시켜 내진보강을 수행하는 과정은 그림15에 개념적으로 나타나 있다. 연성도 보강은 개념적으로 이해하기 쉽지만 실제 내진보강을 수행하기 어렵고 그 신뢰성을 보장하기 힘들다는 단점을 지닌다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 비틀림을 유발할 수 있는 비대칭 벽식 구조에 대하여 구조물 전체의 횡변위 및 비틀림각으로 표현되는 D-R 관계도를 제안하고 그를 이용한 내진성능평가 및 내진성능보강의 방법을 제시하였다. D-R 관계도를 이용한 내진성능의 산정은 다음과 같은 장점을 지닌다.

- 1) 기존 연구자들이 제시한 응력관계도와 마찬가지로 구조물의 거동을 쉽게 이해할 수 있으며, 비틀림이 발생하는 복잡한 거동을 하나의 관계도상에 표현할 수 있다.
- 2) 구조물의 변형을 기준으로 내진평가나 보수보강 과정에 직접적으로 활용할 수 있다.
- 3) Demand(목표변위/목표비틀림각)와 Capacity(D-R 관계도)의 관계를 매우 직관적으로 파악할 수 있으며, 구조물의 변화에도 대처가 용이하다.

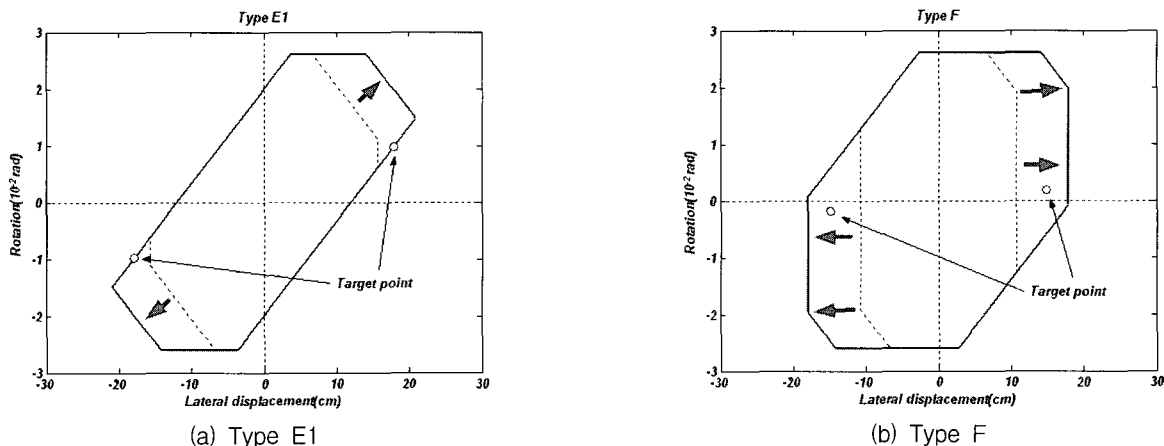


그림 15 연성도중심의 내진보강 개념



이와 같이 D-R 관계도를 이용하여 상세한 부재단위까지의 내진설계를 수행하는 데는 무리가 있겠지만 전체 구조물의 거동을 살펴보기 쉽다는 점에서 내진설계 및 평가를 위한 훌륭한 보조도구로 사용할 수 있을 것이다.

### 기 호

본 논문에 사용된 기호는 다음과 같다.

- $\phi_{yield}$  : 벽체의 항복곡률 (rad/m)
- $\phi_{ultimate}$  : 벽체의 극한곡률 (rad/m)
- $\phi$  : 시스템의 비틀림각 (rad)
- $\mu_i$  :  $i$  번째 벽체의 연성도
- $\rho_i$  : 벽체의 인장 철근비
- $\Delta$  : 시스템의 횡변위 (m)
- $\Delta_{yield}$  : 개별 벽체의 항복변위 (m)
- $\Delta_{plastic}$  : 개별 벽체의 소성변위 (m)
- $\Delta_{ultimate}$  : 개별 벽체의 최대변위 (m)
- $A_g$  : 벽체의 단면적(m<sup>2</sup>)
- $P$  : 벽체에 가해지는 압축력 (Pa)
- $S_{dy}$  : 변위스펙트럼에서 구해지는 목표변위 (m)
- $S_s$  : 짧은 주기에서의 스펙트럼변위(m)
- $S_1$  : 주기 1초에서의 스펙트럼변위(m)
- $S_{dp}$  : 목표변위로부터 얻어진 목표비틀림각 (rad)
- $T$  : 시스템의 유효주기 (sec)
- $K$  : 시스템의 유효강성 (kN/m)
- $d_i$  :  $i$  번째 벽체의 평면 중심으로부터의 거리 (m)
- $d_{yi}$  : y방향  $i$  번째 벽체의 거리 (m)
- $f_c'$  : 콘크리트 압축강도 (MPa)
- $f_y$  : 보강철근의 항복강도 (MPa)
- $h_e$  : 벽체의 유효높이 (m)
- $k_2$  : 항복곡률계수<sup>18)</sup>
- $k_{yi}$  : y방향  $i$  번째 벽체의 강성 (kN/m)
- $\Delta k_{vi}$  : 내진 보강에 의한 y방향  $i$  번째 벽체의 강성 증가분 (kN/m)
- $k'_{yi}$  : 내진보강 후 y방향  $i$  번째 벽체의 강성 (kN/m)
- $k_i$  :  $i$  번째 벽체의 강성 (kN/m)
- $l_p$  : 벽체의 소성힌지 길이 (m)
- $l_w$  : 벽체의 길이(m)

- $u_{yi}$  :  $i$  번째 벽체의 항복변위 (m)
- $u_{mi}$  :  $i$  번째 벽체의 최대변위 (m)

### 감사의 글

본 연구는 2004년도 한국 학술 진흥 재단의 지원에 의하여 연구되었습니다. (과제번호: KRF-2004-041-D00751)

### 참고 문헌

1. 대한건축학회, "건축물 하중기준 및 해설", 2000.
2. 조봉호, "변형에 기초한 비대칭 벽식 구조의 내진설계", 박사학위논문, 서울대학교, 2002.
3. 하태휴, 홍성걸, 김남희, "Adaptive Pushover를 이용한 비대칭 벽식 구조의 내진성능평가", 2004년도 춘계 한국지진공학회 학술발표회 논문집, Vol 8, No. 1, pp. 245-252, 2004.
4. ATC, "ATC-40: Seismic Evaluation and Retrofit of concrete buildings, Volume 1", Applied Technology Council, 1996.
5. BSI (British Standard Institution), Eurocode 8: Design Provisions for earthquake resistance of structures, UK, 1996.
6. Chopra A. K., Dynamics of structures, Prentice-Hall, 1995.
7. De La Llera J. and Chopra A. K., "Understanding of inelastic seismic behavior of asymmetric-plan buildings," Earthquake engineering and structural dynamics, No. 24, pp. 549-572, 1995.
8. FEMA, FEMA 273-274: NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings and Commentary, FEMA, 1997.
9. FEMA, FEMA 343: Case Studies - An Assessment of the NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA, 1999.
10. FIB, fib Bulletin 24: Seismic assessment and retrofit of reinforced concrete buildings, Sprint-Digital-Druck Stuttgart, 2003.
11. International Code Council, International Building Code 2003, Delmar Publishers, 2003.
12. Kan C. L. and Chopra A. K., "Torsional coupling and earthquake response of elastic and inelastic systems," Journal of structural engineering, ASCE, No. 107, pp. 1569-1588, 1981.
13. National Research Council: Canada's Institute for Research in Construction, National Building Code of Canada, 1995.

14. Paulay T., "Displacement-based design approach to earthquake-induced torsion in ductile buildings," *Engineering structures*, Vol. 19, No. 9, pp. 699-707, 1997.
15. Paulay T., "Some Design principles relevant to torsional phenomena in ductile buildings," *Journal of earthquake engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 273-308, 2001.
16. Prakash V., Powell G. H. and Campbell S., *Drain-2DX base program description and user guide*, version 1.10, University of California, Berkeley, 1993.
17. Prakash V., Powell G. H. and Campbell S., *Drain-3DX base program description and user guide*, version 1.10, University of California, Berkeley, 1994.
18. Priestley, M. J. N. and Kowalsky, M. J., "Aspects of Drift and Ductility Capacity of Rectangular Cantilever Structural Walls," *Bulletin, New Zealand and National Society for Earthquake Engineering*, Vol. 31, pp. 73-85, 1998.
19. Rao S. S., *Engineering Optimization: Theory and Practice*, Wiley Interscience, 1996.
20. Seismology Council, Structural Engineers Association of California, *Recommended Lateral Force Requirements and Commentary*, 7th edition, SEAOC, 1999.