

철근콘크리트 벽식 구조물의 반응수정계수 평가에 관한 연구

Evaluation of the Response Modification Factor for RC Wall-type Structures

한 상 환* 이 리 형* 오 영 훈** 천 영 수***
Han, Sang Whan Lee, Li Hyung Oh, Young Hun Chun, Young Soo

ABSTRACT

Design lateral strength calculated by current seismic design code is prescribed to be much lower than the force level required for a structure to respond elastically during design level earthquake ground motion. Present procedures for calculating seismic design forces are based on the use of elastic spectra reduced by a strength reduction factor known as "response modification factor, R". This factor accounts for the inherent ductility, overstrength, redundancy, and damping of a structural system.

This study considers ductility and overstrength of the wall-type structure for investigating R factor. This means that R factor is determined from the product of "ductility-based R factor(R_μ) and overstrength factor(R_s). R_μ factor is calibrated to attain the target ductility ratio (system ductility capacity) and produced in the form of R_μ spectra considering the influence of target ductility, natural period, and hysteretic model. On the other hand, R_s is more difficult to quantify, since it depends on both material and system-dependent uncertain parameters. In this study R_s factor was determined from the result of push-over analysis.

1. 서론

현행 내진설계규준은 설계된 구조물이 강진시 비탄성적으로 거동할 것이라는 가정을 기초로 작성된 것이다. 이러한 이유로 내진설계규준에서는 설계지진에 대하여 탄성적으로 구조물이 거동하는데 필요한 강도보다 훨씬 낮은 값으로 설계지진력을 설정하고 있다. 즉, 설계지진력은 "반응수정계수, R"로 알려진 반응수정계수에 의해 감소된 탄성응답스펙트럼으로부터 산정된다. 반응수정계수는 구조물의 연성능력, 부가강도(overstrength), 잉여도(redundancy) 및 감쇠특성을 반영하기 위한 것이다. 그러나, 규준에서 제시하고 있는 반응수정계수는 일반적인 구조시스템을 대상으로 과거 지진발생에 따른 피해와 거동특성을 관찰한 내용을 바탕으로 결정한 수치로써 이론 및 실험적 산출근거는 미약한 상황이다.

ATC-19 및 ATC-34 보고서는 반응수정계수에 대한 문제점들을 지적하고 있는데 그 중에서 중요한 사항은 다음의 3가지로 요약할 수 있다.

- 1) 높이가 다르더라도 같은 형식의 구조시스템은 동일한 R 값을 사용한다.
- 2) R 값은 구조물의 연성능력, 감쇠특성 및 부가강도에 따른 영향을 분명하게 고려하고 있지 않다.
- 3) 지반조건에 따른 영향을 고려할 수 있는 형태로 되어 있지 않다.

* 한양대 건축공학부 교수

** 한양대 건축공학과 대학원 박사과정

*** 주택공사 주택연구소 연구원

따라서, 현재 사용하고 있는 반응수정계수는 구조시스템의 고유한 연성능력, 부가강도 및 감쇠특성 등을 합리적으로 평가함으로써 새롭게 조정되어야 할 것이다.

다음과 같은 연구들은 반응수정계수를 평가하기 위하여 수행된 대표적인 연구들이다. Uang과 Bertero(1986)는 집중가새골조(CBF)의 내진성과 반응수정계수를 평가하는 실험적인 연구를 수행했다. Whittaker(1987)와 Foutch(1987)는 다른 구조시스템에 대해서 Uang와 Bertero의 연구내용과 유사한 연구를 수행했다. 이러한 연구들은 실험을 통해서 내진설계에 사용되는 반응수정계수의 적합성을 평가한 것들이다. 한편, Osteraas와 Krawinkler(1990)는 분산모멘트골조, 외주부모멘트골조 및 가새골조를 대상으로 비선형해석을 수행하고, 부가강도 스펙트럼을 작성하였다. 이들은 구조시스템, 건물의 높이, 평면의 형상, 적용한 설계기준 및 지역적인 시공상황에 따라 부가강도가 달라진다고 지적하고 있다.

본 연구는 국내 아파트건물의 구조형식으로 일반화된 벽식 구조물을 대상으로 반응수정계수를 평가하고자 한다. 이를 위하여 기존 연구들의 평가방법과 마찬가지로 구조물의 연성능력과 부가강도를 고려하게 될 것이다. 즉, 반응수정계수는 “연성능력에 의존하는 연성계수 R_μ ”와 “보유강도계수, R_S ”의 곱으로 산정된다. R_μ 는 완전탄소성 모델 및 원점지향형 모델을 사용한 단자유도 시스템의 비선형 동적해석에 의해 평가될 것이며, R_S 는 층수가 다른 벽체들의 비선형 push-over 해석으로 산정되었다.

2. 연성계수(R_μ)의 평가

2.1 연성계수(R_μ)의 산정방법

비탄성 변형은 주어진 지반운동에 대하여 구조물의 항복강도가 낮아짐에 따라 증가하기 때문에 목표 연성비를 만족시키는 단자유도(SDOF) 시스템의 항복강도(F_y)는 반복적인 계산과정으로부터 산정된다. 이러한 과정으로부터 산정된 항복강도를 사용하여 다음과 같이 연성계수(R_μ)를 계산할 수 있다.

$$R_\mu = \frac{F_y(\mu=1)}{F_y(\mu=\mu_t)} \quad (1)$$

여기에서, $F_y(\mu=1)$ 는 목표 연성비가 1인 탄성시스템의 최대강도를 나타내며, $F_y(\mu=\mu_t)$ 는 동일한 지반운동에 대해서 목표 연성비를 만족시키기 위한 항복강도를 의미한다.

구조물의 고유주기를 변화시켜가면서 이러한 과정을 반복적으로 수행함으로써 구조물의 고유주기에 대한 연성계수(R_μ) 스펙트럼을 얻을 수 있다. 입력하중으로 사용하는 지진기록을 충분히 고려한다면 연성계수(R_μ) 스펙트럼의 평균 및 평균-표준편차 스펙트럼을 평가할 수 있다. 그림 1은 고유주기에 대한 탄성강도 $F_y(\mu=1)$ 및 비탄성 항복강도 $F_y(\mu=\mu_t)$ 스펙트럼을 보여주고 있으며, 연성계수(R_μ)를 평가하는 절차는 그림 2에 나타나 있다. 비선형 동적해석 결과로부터 계산되는 연성비(μ)는 다음과 같이 주어지게 된다.

$$\mu = \frac{\max_t |u(t)|}{u_y} \quad (2)$$

구조물이 주기가 아주 짧은 경우($T \rightarrow 0$)에는 목표 연성비와 상관없이 탄성강도 $F_y(\mu=1)$ 에 유사한 항복강도가 계산됨으로써 연성계수(R_μ)는 1로 평가될 것이다. 반대로, 시스템의 고유주기가 무한대($T \rightarrow \infty$)로 간다면 시스템의 최대변위는 항복강도와 관계없이 지반변위와 유사하게 된다. 단자유도 시스템의 항복강도는 주어진 목표 연성비와 지반운동에 대해서 다음과 같은 운동방정식으로부터 계산된다.

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + F(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (3)$$

여기에서, m , c , $F(t)$ 는 질량, 감쇠상수, 복원력을 나타내며, $u(t)$ 와 $u_g(t)$ 은 상대변위와 지반의 변위를

표시한다.

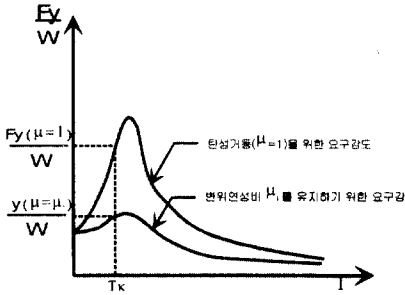


그림1. 목표 연성비를 만족시키기 위한 항복강도

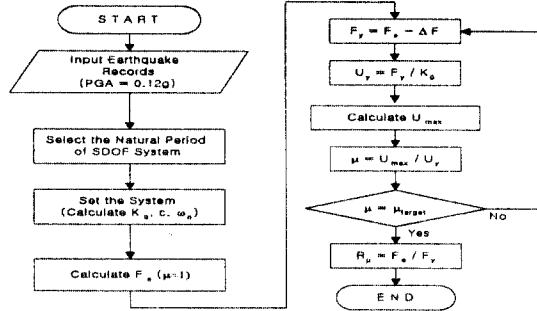


그림2. 연성계수의 평가과정

복원력 특성은 완전 탄소성모델과 원점지향형 모델로 복원력 특성을 표현하였으며, 항복후 강성은 0으로 동일하다. 그림 3에서는 원점지향형 모델을 보여주고 있다.

동적해석에 사용된 지진기록은 미국 NGDC와 USGS에서 제작한 CD-ROM으로부터 원하는 기록들을 얻을 수 있었다. BAP과 SMCAT 프로그램은 CD-ROM에서 얻은 지진기록의 수정과 지반조건의 분류를 위하여 사용되었다. S1지반으로 선정된 40개 지진기록의 최대 지반가속도(PGA)를 0.12g로 조정하여 선형 탄성응답스펙트럼(LERS)을 구하고, 이값들의 평균 및 평균+표준편차를 NEHRP 기준의 스펙트럼과 비교하여 그림4에 나타내었다.

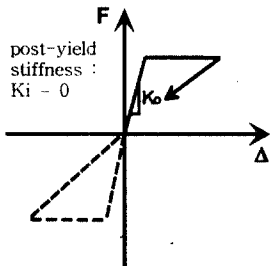


그림3. 원점지향형 모델

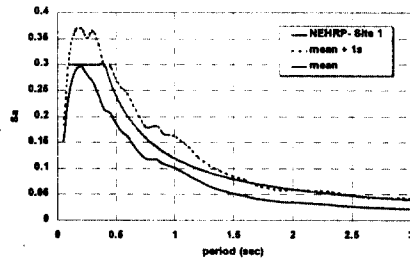


그림4. 사용된 지진기록의 LERS

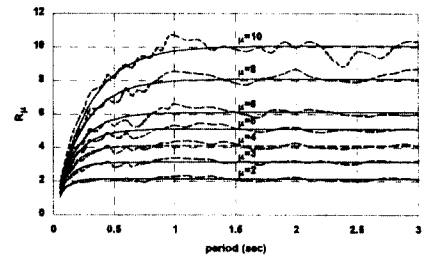


그림 5. 회귀분석으로 구한 R_mu 계수

2.2 완전탄소성 모델로 평가한 연성계수 (R_mu)

구조물의 연성과 고유주기의 함수로서 연성계수를 평가하기 위하여 다음과 같은 변수들에 대한 조합에 의해서 12,800회의 비선형 동적해석을 수행하였다.

- 1) 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 및 10의 목표 연성비 (8)
- 2) 0.05초에서 3.0초까지의 범위에 있는 40개의 고유주기 (40)
- 3) S1지반에서 관측된 40개의 지진기록 (40)

이러한 결과를 바탕으로 2단계 회귀분석을 수행하였다. 1단계에서는 연성계수를 고유주기의 함수로 평가한 다음 2단계에서 연성비에 따른 영향을 고려하도록 수행하므로써 다음과 같은 산정식을 얻었다.

$$R_\mu = a_0 \{1 - \exp(-b_0 \times T_n)\} \quad (4)$$

$$a_0 = 0.9921 \times \mu + 0.1532 \quad (5)$$

$$b_0 = 23.686 \times \mu^{-0.8313} \quad (6)$$

여기에서, T_n 및 μ 는 고유주기와 연성비를 나타낸다.

그림 5에서는 회귀분석으로 결정한 연성계수 산정식의 적합성을 보여주고 있다. 그림에서 실선은 회귀함수에 의한 결과를 나타낸 것이며, 점선은 비선형 동적해석으로부터 얻어진 연성계수의 평균값을

보여주고 있다. 그림 6 및 그림 7에서는 식(5)와 식(6)으로 표현되는 a_0 및 b_0 의 적합성을 보여주고 있다. 한편, 그림 8에서는 Nassar와 Krawinkler(1991)에 의해서 제안된 산정식과 Miranda(1992)의 산정식을 본 연구의 회귀함수와 비교하여 나타낸 것이다. 그 결과 Nassar와 Krawinkler의 산정식은 본 연구의 산정식과 비교적 잘 일치하고 있지만, Miranda는 연성계수를 과소평가하는 것으로 나타났다.

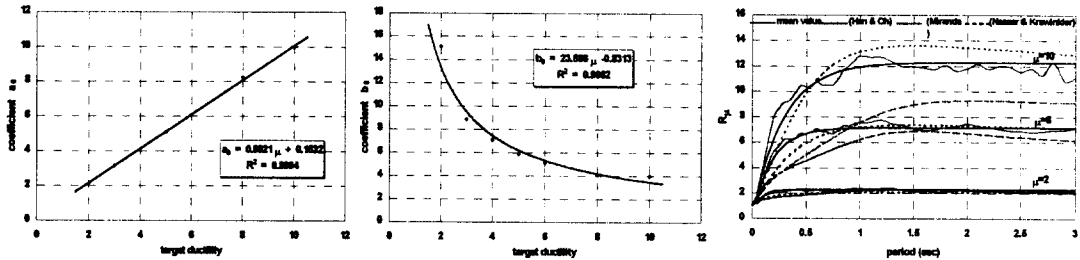


그림 6. 계수 a_0 의 회귀분석 결과

2.3 원점지향형 모델로 평가한 연성계수(R_μ)

원점지향형 모델은 전단력에 의해서 지배적인 이력거동을 나타내는 부재를 모델링하는데 적합한 것으로 알려져 있으며, 제하(unloading)시 심한 강성저하 현상을 나타내게 된다. 따라서, 시스템의 에너지 소산능력이 감소하게 되고, 결과적으로 저하된 내진성능을 보여주게 될 것이다. 그림 9에서는 원점지향형 모델을 사용하여 산정한 연성계수와 완전탄소성 모델의 그것을 비교하여 보여주고 있다. 원점지향형 모델의 연성계수는 모든 주기구간에 걸쳐서 완전탄소성 모델에 비해서 낮은 값으로 평가되고 있으며, 완전탄소성 모델로 산정된 연성계수에 대한 비율로 표시하여 표1에 나타내었다. 그 결과 원점지향형 모델의 연성계수는 완전탄소성 모델의 경우보다 15% 정도 감소된 84~87%의 수준으로 평가되고 있다.

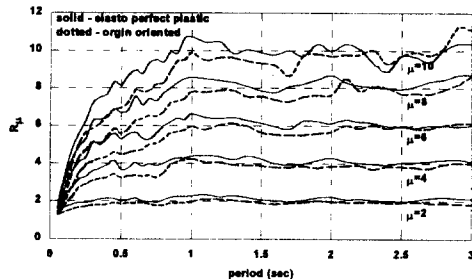


그림 9. 원점지향형 모델의 연성계수

표 1. 원점지향형 모델의 연성계수

목표 연성비	구분	완전탄소성 모델	원점지향형 모델
$\mu=2$	mean	1.0	0.8719
	cov (%)	-	3.3
$\mu=4$	mean	1.0	0.8408
	cov (%)	-	4.74
$\mu=6$	mean	1.0	0.8407
	cov (%)	-	5.16
$\mu=8$	mean	1.0	0.8462
	cov (%)	-	5.58
$\mu=10$	mean	1.0	0.8506
	cov (%)	-	0.0454

3. 보유강도계수(R_s)의 평가

보유강도계수는 구조물의 실제 보유강도를 설계기준에 의해서 요구되는 강도로 나누어준 값으로 산정되며, 지진거동시 피해를 감소시키는데 중요한 역할을 하는 경우가 많다. 보유강도와 설계강도간의 차이를 초과강도(overstrength)라고 정의하고 있으며, 초과강도가 나타나는 이유로서는 재료적인 원인, 설계기준의 최소 요구조건, 비최적화된 부재단면 및 비탄성영역의 응력 재분배 현상등을 들 수 있다.

본 연구에서는 그림 10에 나타나 있는 벽식 구조물의 단변방향 벽체들을 대상으로 보유강도계수를 평가하게 될 것이다. 또한, 층수의 변화에 따른 초과강도의 특성을 조사하기 위하여 대상건물은 5층, 10층 및 20층으로 높이를 변화시켜 설계되었다. 표2에서는 층수에 따른 단변방향의 고유주기를 나타내었다. IDARC 4.0 프로그램은 비선형 정적해석(push-over)으로부터 밀면전단력과 최상부 변위를 구하기 위하여 사용되었으며, 벽체의 모델링은 그림 11에 나타낸 수직삼선요소모델(three vertical line

element model ; TVLEM)을 이용하였다.

표2. 대상 구조물의 고유주기(단변방향)

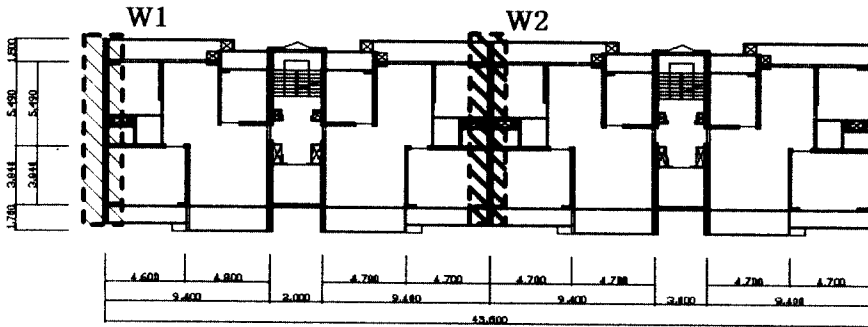
층 수	고유주기 (sec)	
	설계 기준식 ($T=0.09H/\sqrt{B}$)	고유치 해석
5	0.36	0.18
10	0.69	0.42
20	1.36	1.21

표3. 설계 밀면전단력계수

Wall No.	Weight (t)	M (t · m)	V (t)	$\frac{V}{W}$	
5 F	W1	134.1	304.4	42.3	0.316
	W2	177.7	260.4	43.0	0.242
10 F	W1	293.3	793.0	61.9	0.211
	W2	371.2	652.1	68.7	0.185
20 F	W1	726.0	1991.5	95.0	0.131
	W2	802.9	1521.9	117.0	0.146

그림 12에서는 역삼각형의 횡력분포를 가정하여 push-over 해석을 수행하고, 그 결과를 밀면전단력 과 최상부 변위각의 형태로 나타낸 것이다. 아울러 보유강도계수는 표3에 나타나 있는 설계밀면전단력 계수와 1.5%로 설정한 한계상태 변위각에 해당하는 보유강도를 비교하므로써 산정되었다. 이상과 같은 방법으로 층수에 다른 단변방향 벽체들의 보유강도계수를 평가할 수 있으며, 그 결과를 그림13에 나타내었다. 그림13에 의하면 20층 벽체의 R_s 는 대략 1.7 정도로 나타났고, 10층 벽체의 R_s 는 약 3.0 정도로 평가되었다. 즉, 층수가 낮은 건물일수록 더 큰 초과강도를 갖는 것으로 평가할 수 있는데, 이러한 현상은 설계기준에서 요구하는 최소 벽두께 규정에 기인하는 것으로 판단된다.

층수가 낮은 짧은 주기 건물에서 높은 초과강도를 갖는다는 것은 이러한 구조물들이 대부분 적은 연성능력으로 인하여 R_s 계수가 작은 값으로 평가되는 단점을 보완하는데 기여하게 될 것이다. 하지만, 초과강도는 지역적인 설계 및 시공현황, 배근상세 및 안정성(stability) 등과 같이 불확실한 변수들에 의해 많은 영향을 받게 되므로 실무적인 설계과정에 도입되기 위해서는 추가적인 연구를 필요로 한다.



- ① total area of each unit : 84 m²
- ② typical story height : 2.6 m
- ③ planing dimension : 43.6 m × 12.53 m
- ④ reinforcement : $f_y = 4000 \text{ kg/cm}^2$
- ⑤ concrete : $f'_c = 240 \text{ kg/cm}^2$
- ⑥ dead load (typical) : 540 kg/m²

그림 10. 대상 벽식 구조물의 기준층 평면도

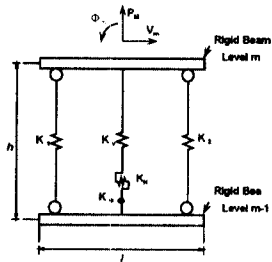


그림 11. 벽체의 모델링

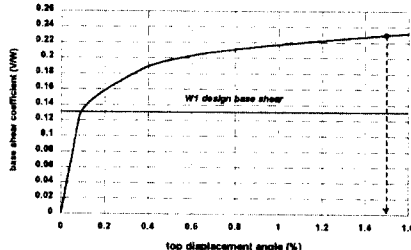


그림 12. 보유강도계수의 평가방법

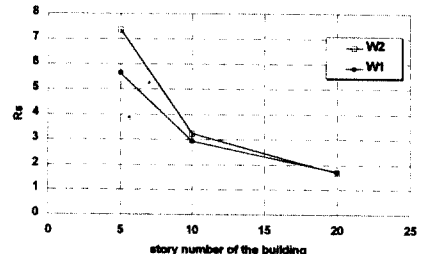


그림 13. 층수에 따른 보유강도계수

4. 벽식 구조물의 반응수정계수 평가

본 연구는 내진설계상의 반응수정계수를 산정하기 위한 한가지 방안을 제시한 것으로서 벽식 구조물을 대상으로 적용되었다. 반응수정계수는 연성계수(R_μ)와 보유강도계수(R_S)의 곱으로 평가할 수 있으며, 표4에는 이러한 방법으로 평가된 반응수정계수를 보여주고 있다. 표4에서 연성계수는 형상비(H_w/L_w)를 감안하여 연성능력을 다르게 적용하면서 산정하였으며, 이력거동의 특징은 완전탄소성 및 원점지향형 모델로 구분하여 평가되었다. 이러한 결과들이 실제 구조물의 설계과정에 적용되기 위해서는 고차모드에 의한 영향과 제반 변수에 따른 초과강도의 특성을 보다 정량적으로 평가하는 과정이 필요하다.

표4. 벽식 구조물의 반응수정계수에 대한 계산 예제

층수	형상비(H_w/L_w)	고유주기 ($T=0.09H/\sqrt{B}$)	시스템 연성비	R_μ		R_S	R	
				완전탄소성	원점지향형		완전탄소성	원점지향형
5	1.08	0.36 초	$\mu = 1$	1.15	0.98	> 5.0	5.75	4.9
			$\mu = 2$	2.12	1.80		10.6	9.0
10	2.08	0.69 초	$\mu = 2$	2.14	1.82	2.94	6.29	5.35
			$\mu = 3$	3.13	2.66		9.20	7.82
20	4.38	1.36 초	$\mu = 2$	2.14	1.82	1.72	3.68	3.13
			$\mu = 3$	3.13	2.66		5.38	4.58
			$\mu = 4$	4.12	3.50		7.09	6.02

6. 결론

본 연구의 목적은 벽식 구조물을 대상으로 반응수정계수를 평가하기 위한 방안을 제시하는데 있다. 연성능력을 고려하기 위한 연성계수는 S_1 지반에서 관측된 40개의 지진기록을 사용하여 단자유도 시스템의 비선형 동적해석으로부터 산정되었다. 보유강도계수는 단변방향의 주요 벽체를 층수를 다르게 하면서 push-over 해석을 수행함으로써 평가되었다. 이상의 결과들로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 완전탄소성 모델을 사용하여 평가한 연성계수(R_μ)는 연성비와 고유주기에 종속적인 함수로 산정되었으며, 비선형 동적해석으로부터 얻어진 결과와 좋은 대응을 보이고 있다. Nassar와 Krawinkler (1991)에 의해서 제안된 R_μ 산정식은 본 연구의 결과와 비교적 잘 일치하고 있지만 Miranda(1992)의 산정식은 과소평가하는 것으로 나타났다.
2. 원점지향형 모델을 사용하여 평가한 연성계수(R_μ)는 완전탄소성 모델에 비해서 13~16% 정도 감소한 값으로 평가되었다.
3. 구조물이 실제적인 보유강도를 설계강도로 나누어준 값으로 산정되는 보유강도계수(R_S)는 층수가 낮은 벽식 구조물일수록 더 큰 값으로 평가되었다.
4. 벽식 구조물에 대한 반응수정계수는 연성계수(R_μ)와 보유강도계수(R_S)의 곱으로서 산정할 수 있으며, 향후 고차모드에 의한 영향과 제반 변수에 따른 초과강도의 특성을 파악하는 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 초대형구조시스템연구센터와 주택연구소의 지원에 의한 것으로서 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Christopher Rojahn (1988), "An Investigation of Structural Response Modification Factors", Proceedings of 9th WCEE, Vol. 5, Tokyo-Kyoto, pp.1087-1092.
2. J. D. Osteraas and H. Krawinkler (1990), "Strength and Ductility Considerations in Seismic Design", John A. Blume Earthquake Engineering Center, Report No. 90, Stanford University, California.