N2 Method를 이용한 RC 중간모멘트 연성골조의 반응수정계수 및 내진성능 평가

Estimation of R-factor and Seismic Performance for RC IMRFs using N2 Method

윤 정 배* 이 철 호** 최 정 욱*** 송 진 규****
Yoon, Jeong Bae Lee, Chul Ho Choi, Jung Wook Song, Jin Gyu

국문요약

반응수정계수는 구조물의 비탄성 거동을 설계에 반영하고 설계지진력 산정시 설계강도를 탄성범위 이내로 저감시키기 위한 목적으로 사용하고 있다. 그러나 설계코드에서 채택하고 있는 반응수정계수는 과거의 지진피해로부터 관찰된 보편적 구조성능에 기인한 경험치이므로, 주기에 따른 동적성능과 구조 시스템의 구성에 따른 내진성능을 정확히 대변하지 못하고 있다. 본 연구에서는 중간모멘트 연성골조를 대상으로 N2 Method를 이용하여 반응수정계수와 내진성능을 평가하였으며, 그 결과를 미국의 IBC 2000 코드와 비교하여 이론적 타당성을 검증하였다. 해석결과 코드에 제시된 반응수정계수와 잘 부합되는 것으로 나타났으나, 동일한 구조시스템의 경우에도 주기에 따라 비교적 큰 차이를 보였다. 성능목표에 따른 사용성 기준을 설정하여 IDI를 평가한 결과, 설계지진에 대한 성능목표가 건물에 대한 내진성능을 대변하기는 어려우며 PBD(Performance Based Design)에 의거한 합리적인 접근이 필요한 것으로 판단된다.

주요어 : 반응수정계수, 중간모멘트 연성골조, N2 method, IBC 2000, PBD, 층간변위비

ABSTRACT

Response Modification Factor(R-factor) approach is currently implemented to reflect inelastic ductile behavior of the structures and to reduce elastic spectral demands from earthquakes to the design level. However R factors were set empirically and simply based on the professional committee consensus on observed performance of building structures during past earthquakes. Consequently some major shortcomings linked to the current R factor approach have been pointed out. Using reinforced concrete intermediate moment-resisting frames(RC IMRFs), an analytical procedure is presented in this paper to establish R factor rationally. To this end, analytical R values were evaluated based on N2 Method and compared with the values recommended by IBC 2000. Overall, the analytical results correlated well with the code values. However the results also revealed that R factor might strongly depend on the system fundamental period. As evidenced by the interstory drift index(IDI) analysis results of this study, current R-factor based(or, Life Safety based) design tends to fail in fulfilling other implicit and hopeful performance objectives such as Immediate Occupancy and Collapse Prevention. Performance based design(PBD) appears to be a promising approach to meet the multi level seismic performance objectives assigned to the building structures of nowadays.

Key words : response modification factor, intermediate moment resisting frame, N2 method, IBC 2000, performance based design(PBD), interstory drift index(IDI)

1. 서 론

지진은 급격한 지각변동으로 인명 및 재산에 피해를 주는 자연 현상이다. 대부분의 강진은 지진다발 지역인 지진대에 집중되어 있으나 중·약진은 규모와 빈도에 차이가 있을 뿐 지구표면 어디에서나 발생할 수 있다. 그러므로 지진의 활동이 적은 나라일지라도 지진활동의 불규칙성과 피해의 심각성 때문에 자국의 실정에 맞는 내진 설계 기준을 제정하고 있으며, 현행 내진 설계는 건물이 위치한 지역에서 50년 동안 유효 최대지반가속도(EPA)를 초과할 확률이 10%인 설계지진을 대상으로 한다. 이 경우, 하중에 기초한 설계 개념에서 구조물의 비탄성 거동을 해석 및 설계에 적절히 반영하고, 설계 지진력 산정 시 요구 설계강도를 탄성범위 이내로 저감시키기 위하여 반응수정계수를 사용한다.[1] 즉, 반응수정계수는 설계지역에서 특정한 구조시스템이 지니고 있는 보유강도와 연성 발휘능력을 고려하기 위한 것이며, 단일 구조시스템에 대하여 하나의 값으로 정의하고 있다.

반응수정계수의 값이 코드에 반영되어 쓰이기 시작한 이후 최근까지 Berkeley대학 연구팀(Bertero, 1986)[2], ATC-19[3] 그리고 ATC-34[4] 연구팀은 연구결과를 통해 반응수정계수의 문제점들을 지적했다. 이들 중 주요한 쟁점들을 인용하면 아래와 같다.

① 반응수정계수는 구조형식에 따라 연성능력을 고려하기 위하여 제시된 수치이다. 그러나, 탄성 설계강도 스펙트럼을 비탄성 설계강도 스펙트럼으로 균등하게 감소시킬 수 없다는 사실을 감안할 때 반응수정계수는 주기에 대하여 종속적으로 표현되어야 한다.

③ 일부 구조형식에서 사용되는 반응수정계수 값은 설계지진이 작용했을 때 설계단계에서 목표로 하는 내진성능을 보여주지 못할 수 있다.

* 정회원·경상대학교 건축공학과, 교수
** 정회원·경남대학교 건축공학과, 교수
*** 정회원·전남대학교 건축학부, 박사과정
**** 정회원·전남대학교 건축학부, 조교수(대표저자 : jgsong@chonnam.ac.kr)
본 논문에 대한 토의를 2002년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2002. 9. 30 / 심사종료일 : 2002. 11. 9)

현행 내진설계에 적용하고 있는 반응수정계수는 성능수행단계 중 인명안전단계(Life Safety)에서의 설계지진에 해당하는 값으로 볼 수 있으며, 비록 설계코드가 철학적인 설계개념(작은 지진에 대해서는 즉시거주, 설계지진에 대해서는 인명안전, 최대지진에 대해서는 붕괴방지)을 지니고 있으나 이를 구현하기 위한 논리가 없고 오로지 설계지진만을 고려하도록 되어있어 기능수행 또는 붕괴방지 수준에 대한 안전도를 확신하기 어려운 점이 있다. 국내 내진설계 규정은 UBC 규준과 ATC 3-06 보고서를 참고로 하여 작성되었으므로, 앞에서 열거한 일반적인 문제점들은 국내 내진설계의 문제점이라 할 수 있을 것이다.

본 연구는 반응수정계수가 제시되어 있는 중간모멘트 연성골조를 대상으로 하여 코드에 제시되어 있는 반응수정계수의 이론적 산정을 위한 접근방법의 타당성 검증과 사용성 기준에 의거한 내진성능의 평가에 목적을 두었다. 이러한 목적을 달성하기 위하여, 성능에 기초한 설계법을 제시하고 있는 ATC-40[5], FEMA 273[6] 등 최근의 연구결과들을 바탕으로 Fajfar[7]에 의하여 제안된 N2 Method를 이용하였으며, FEMA 302[8]와 303[9]에 제시된 강도계수의 개념을 적용하였다. 사용성 기준에 대한 성능목표(POs)는 표 1에서와 같이 즉시거주, 인명안전, 붕괴방지 수준으로 구분하고, 각각의 성능수준에 따라 Bertero[10]가 제안한 층간변위비(IDI)를 지표로 하였다.

표 1 성능목표(POs)

수행단계	재현주기 (년)	EPA* (g)	사용성 기준 (Local)
즉시거주 (Immediate Occupancy)	72	0.23	0.6% IDI**
인명안전 (Life Safety)	475	0.40	1.5% IDI
붕괴방지 (Collapse Prevention)	970	0.56	2.0% IDI

* : Effective Peak Acceleration, ** : Interstory Drift Index

2. 반응수정계수의 평가방법

2.1 기본개념

NEHRP 규정(BSSC, 1988)[11]에 의하면, 반응수정계수(R)은 강도계수(R_s), 연성계수(R_μ), 감쇠계수(R_ξ), 그리고 잉여도계수(R_R)의 네 가지 구성요소로 표현할 수 있다. 여기에서 감쇠계수는 면진장치나 에너지 흡수장치가 달린 건물의 감쇠능력에 관한 것으로 외부 제진 장치가 없는 경우에는 큰 의미가 없다. 또한, 잉여도 계수는 부정정 차수가 높은 건물의 경우 대부분 1이 되므로 반응수정계수에 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서, 본 연구에서는 구조물의 반응수정계수를 산정하는데 있어서 강도계수(R_s), 연성계수(R_μ)만을 고려하였다.

이러한 개념에 의거하여 그림 1과 같이 강도계수(R_s), 연성계수(R_μ)를 정의하면 $V_Y = R_S V_D$, $V_E = R_\mu V_Y$(V_D : 설계강도, V_Y : 최대보유강도, V_E : 탄성강도)이 되고, 이들의 관계($V_E = R_S \cdot R_\mu V_D = RV_D$)로부터 반응수정계수는 강도계수와 연성계수의 곱($R = R_S \cdot R_\mu$)으로 설명할 수 있다.

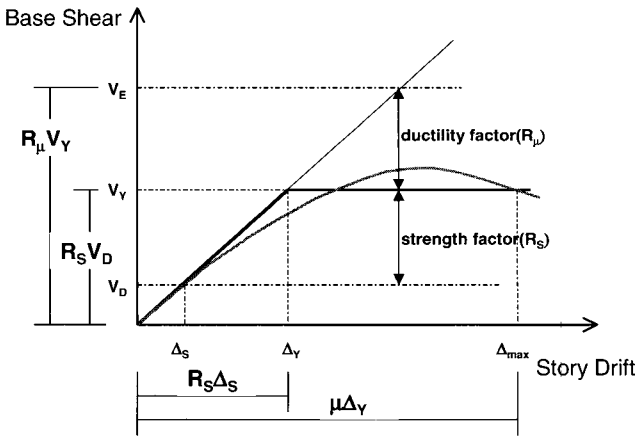

그림 1 반응수정계수의 정의

2.2 강도계수(Strength Factor, R_S)

건물은 최대보유강도(maximum reserve strength)가 설계강도(design base shear)를 초과하도록 설계한다. 강도계수는 설계 대상건물에서 기대되는 최대 보유강도와 설계강도의 비로 정의되어진다.

FEMA 302[8](Provisions), FEMA 303[9](Commentary)에서는 건물의 초과강도를 연속적인 소성힌지 메카니즘의 관점에서 접근하였다. 즉, 건물이 충분한 잉여력을 보유하고 있고 내력의 재분배가 발생하도록 적절히 설계되었을 경우에, 잉여력을 상실하기 직전의 밑면 전단강도(V_Y)와 건물에 초기항복(first plastic hinge)이 발생하였을 때의 밑면 전단강도(V_S) 비를 강도계수로 정의하였다.

$$R_s = \frac{V_Y(fully\ yielded\ strength)}{V_S(first\ yielded\ strength)} \left(\cong \frac{V_Y}{V_D},\ \text{그림 1}\right) \quad (1)$$

2.3 연성계수(Ductility Factor, R_μ)

연성계수(R_μ)는 구조물이 비탄성 거동에 의해 탄성한계를 넘어서도 에너지를 흡수할 수 있는 능력을 의미한다. Miranda와 Bertero[12]는 선형계(elastic system)에서 최대 탄성변형으로부터 등가의 요구 비탄성 변형을 얻어내기 위하여 연성계수(R_μ)를 다음과 같은 식으로 제안하였다.

$$R_\mu = \frac{\mu - 1}{\Phi} + 1 \quad (2)$$

여기에서, Φ는 지반조건에 따른 계수이며, 요구연성비(μ)는 $\mu = \frac{\Delta_m}{\Delta_y}$로 산정된다.

Fajfar[7]는 위의 식을 단순화하고 구조물의 주기에 따라 아래의 새로운 식을 사용하였다.

$$R_\mu = (\mu - 1)\frac{T^*}{T_C} + 1 \qquad T^* < T_C$$
$$R_\mu = \mu \qquad T^* \geq T_C \tag{3}$$

T_C는 요구스펙트럼에서의 특성주기(장주기와 단주기의 경계주기)에 해당되며 T^*는 구조물을 단자유도계로 치환했을때의 유효주기이다.

3. N2 Method에 의한 연성계수 R_μ의 추정

N2 Method의 N은 비선형해석(nonlinear analysis)을 2는 두 가지 수학적 모델(two mathematical models)을 각각 상징하는 말로서, 성능에 기초한 새로운 내진 설계 절차에 대한 방법론을 제시하고 있다. 연성계수 R_μ를 추정하기 위한 절차는 아래와 같다.

a) 모드형상(Φ) 및 횡력분포의 결정

$$\{P\} = [M]\{\Phi\},\ P_i = m_i \Phi_i \tag{4}$$

m_i , Φ_i는 i층의 질량과 모드형상, $\Phi_{Roof} = 1.0$

b) 유효 질량(m^*)

$$m^* = \sum m_i \Phi_i \tag{5}$$

c) 비선형 정적 해석(밑면 전단력(V)과 최상층 변위(D_t) 관계, 그림 2)

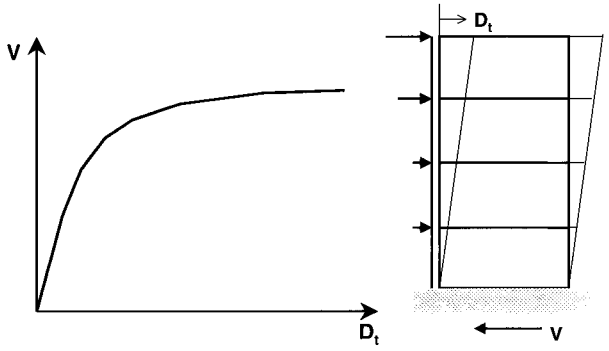

그림 2 밑면 전단력(V)과 최상층 변위(D_t) 관계

d) 단자유도 값으로의 전환

$$D^* = \frac{D_t}{\Gamma},\ F^* = \frac{V}{\Gamma},\ \Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \Phi_i^2} \tag{6}$$

Γ는 모드 참여 계수(modal participation factor)이며, ATC 40의 능력스펙트럼법에서 PF_1이나 FEMA 273의 DCM(변위계수법)의 C_0와 의미상으로 동일.

e) 비탄성 능력곡선(가속도-변위 관계)

$$S_a = \frac{F^*}{m^*},\ T^* = 2\pi\sqrt{\frac{m^* D_y^*}{F_y^*}} \tag{7}$$

S_a : 단자유도계로 치환된 능력곡선의 가속도 응답
T^* : 구조물의 단자유도계 유효주기

f) 탄성 요구스펙트럼(가속도-변위 관계)

$$S_{de} = \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae}(T) \tag{8}$$

S_{de} : 요구스펙트럼의 변위응답
S_{ae} : 요구스펙트럼의 가속도 응답

g) 연성 계수 R_μ

$$R_\mu = \frac{S_{ae}(T^*)}{S_{ay}} \tag{9}$$

h) $\mu - R_u$ 관계

$$\mu = (R_\mu - 1)\frac{T_C}{T^*} + 1 \qquad T^* < T_C$$
$$\mu = R_\mu \qquad T^* \geq T_C \tag{10}$$

μ : 성능수준에 따른 요구 연성도

i) 비탄성 요구스펙트럼(그림 3)

$$S_a = \frac{S_{ae}}{R_\mu} \tag{11}$$
$$S_d = \frac{\mu}{R_\mu} S_{de} = \frac{\mu}{R_\mu} T^2 er\, 4\pi^2 S_{ae} = \mu\, T^2 er\, 4\pi^2 S_a$$

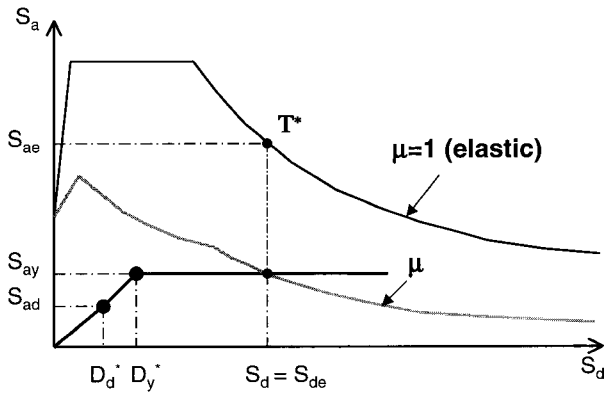

그림 3 탄성 · 비탄성 요구 스펙트럼과 성능곡

j) 층간 변위비(IDI)

비탄성 스펙트럼과 능력 곡선의 교점 변위에 해당하는 밑면 전단력을 구하고, 이에 대한 층간변위비(IDI)를 얻는다.

4. 중간모멘트 연성골조(IMRF)에 대한 내진성능 평가

ACI 코드[13]에서는 횡보강근, 철근의 겹침이음, 전단보강근 상세 등에 따라 모멘트 저항골조를 3가지(특별, 중간, 보통) 형태로 구분하고 있으며, 본 연구에서는 지진지역에서 가장 보편적으로 사용되는 철근콘크리트 중간모멘트 연성골조를 대상으로 하였다.

예제 건물에 대한 해석은 한과박소프트(주)에서 개발한 neoMAX-3D[14]를 이용하였으며 재료적 비선형 모델은 von Mises criterion에 의한 이선형 모델(bilinear model)을 적용하였다.

4.1 건물개요

본 예제의 건물은 중간모멘트 연성골조(IMRF)로 설계된 사무소 건물을 택하였다. 건물의 높이는 단주기 건물은 1층으로 3.2m이고, 장주기 건물은 5층으로 16m(층고 3.2m)이다. 골조의 평면도는 층에 관계없이 아래 그림 4와 같으며, 각 부재에 대한 설계정보는 표 2에 요약하여 나타내었다.

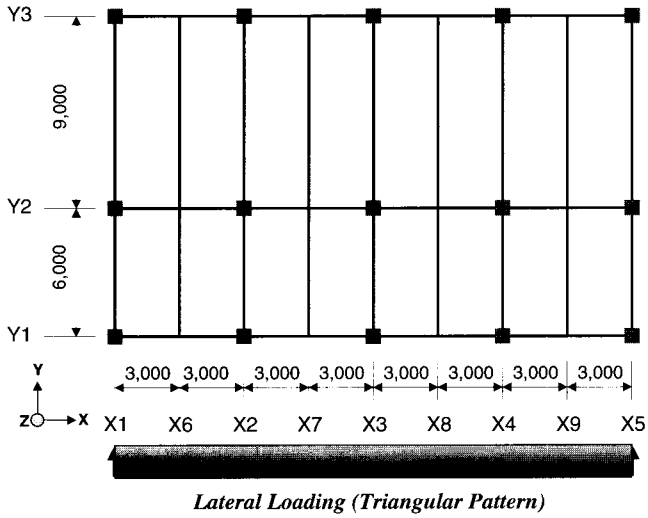

그림 4 평면도

표 2 설계정보

건물 타입	부 재	배 근		$(M_u/\Psi M_n)_{max}$	고유주기 (sec)
1층	보 (35×60)	4-D25(T&B)* 4-D19(T&B)	(D10@200) (D10@200)	0.236	0.257
	기둥(45×45)	5-D32	(D13@200)	0.233	
5층	보 (40×70)	8-D25(T&B)	(D13@200)	0.736	0.799
	기둥(65×65)	5-D32	(D13@200)	0.699	

* : Top and Bottom

4.2 지진구역

지진구역은 미국의 캘리포니아 지역과 같은 강진 지역으로 하였다. 지역계수는 Z=0.4g로 가정하였으며 여기에 해당되는 지진계수는 각각 $C_a = 0.4g$, $C_v = 0.64g$ 이다. 그림 5의 설계 응답스펙트럼에서 가속도가 일정한 구간 중 가장 큰 값을 갖는 특성주기는 위 두 지진계수를 적용하면 0.64sec

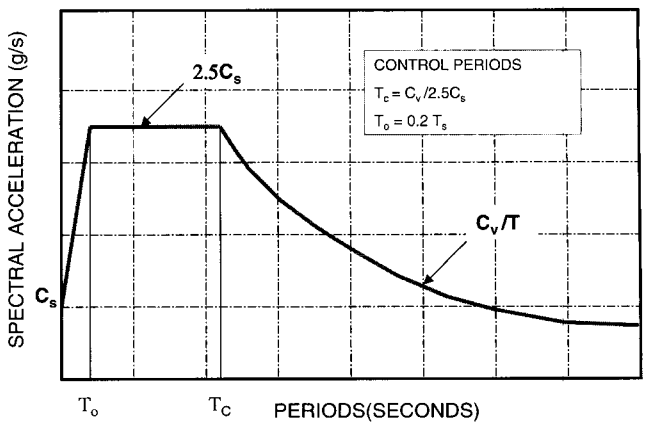

그림 5 설계 응답스펙트럼

가 된다.

$$T_c = C_v / 2.5C_a = 0.64/(2.5\times 0.4) = 0.64 \text{ sec}$$

4.3 반응수정계수의 산정

4.3.1 연성계수(R_μ)

① 층별 질량분포의 변화가 크지 않으므로 모드 형상을 선형으로 가정하고, 표 2 및 식 (4), (5)를 이용하여 유효질량(m^*), 모드 참여계수(Γ)를 구하면 아래와 같다.

$$m^* = \sum m_i \phi_i = 113.83$$

$$\Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \phi_i^2} = \frac{113.83}{84.51} = 1.35$$

표 3 모드치(modal values)

층	w	m_i	ϕ_i	$m_i\phi_i$	$m_i\phi_i^2$
roof	400.13	40.83	1.00	40.83	40.83
z5	353.39	36.06	0.80	28.85	23.08
z4	360.54	36.79	0.60	22.07	13.24
z3	360.54	36.79	0.40	14.72	5.89
z2	360.54	36.79	0.20	7.36	1.47
z1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
sum	1835.15	187.26	3.00	113.83	84.51

② 능력곡선은 최상층의 변위와 밑면전단력에 대한 관계를 나타내는 곡선으로(그림 6), 이를 완전-탄소성 모델(elasto-perfectly plastic model)로 이선형화 하기 위하여 능력곡선의 최대변위를 26cm로 가정(접선강성이 0인 좌표)하고 등가 면적법(equal area method)을 적용.

③ 식 (6)을 이용하여 다자유도(MDOF)계를 단자유도(SDOF)계로 전환하고, 항복강도 (F_y^*)와 항복변위(D_y^*)를 얻어낸다(그림 7).

$$D_y^* = \frac{D_y}{\Gamma} = \frac{8.92}{1.35} = 6.61\text{cm}$$

$$F_y^* = \frac{V_y}{\Gamma} = \frac{903.54}{1.35} = 669.29\text{tonf}$$

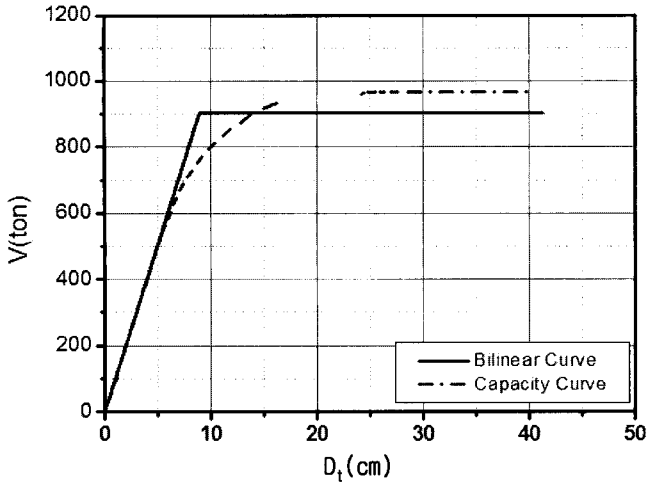

그림 6 능력곡선의 이선형화(다자유도계)

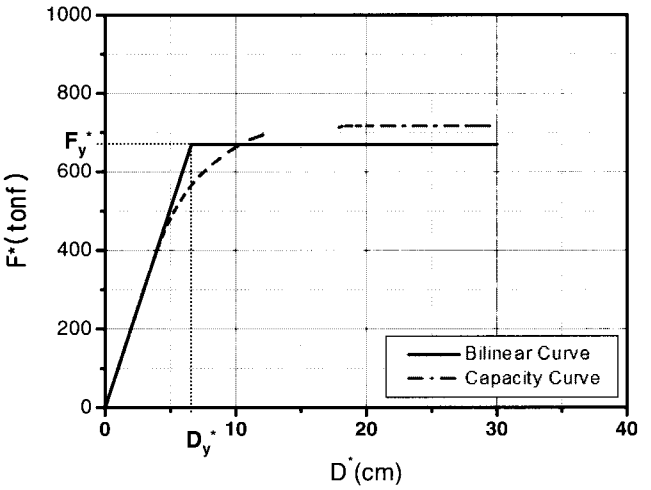

그림 7 능력곡선 및 이선형곡선(단자유도계)

④ 위 ③에서 구한 항복강도와 항복변위를 식 (7)에 적용하여 유효주기(T^*)를 구한다.

$$T^* = 2\pi\sqrt{\frac{m^* \times D_y^*}{F_y^*}} = 2\pi\sqrt{\frac{113.83 \times 6.61}{669.29}} = 0.67 \text{ sec}$$

⑤ 식 (7)과 식 (8)을 이용하여 그림 7의 그래프를 스펙트럼 가속도와 스펙트럼 변위 관계로 전환하고, 식 (9)에 대입하여 연성계수 R_μ를 얻는다.

$$\therefore \quad R_\mu = \frac{S_{ae}(T^*)}{S_{ay}} = \frac{0.93}{0.6} = 1.55$$

$T_C(=0.64) < T^*$이므로, 연성계수 R_μ는 식 (3)에 의해 요구연성도 μ와 같으며, μ=1.55인 비탄성 요구곡선과 능력곡선이 교차하는 점과 유효주기 $T^*(=0.67)$인 점에서의 탄성 요구곡선의 S_d가 일치하게 된다(그림 8).

4.3.2 강도계수(R_S)

강도계수 R_S는 다자유도(MDOF)계에서 식 (1)을 이용하여

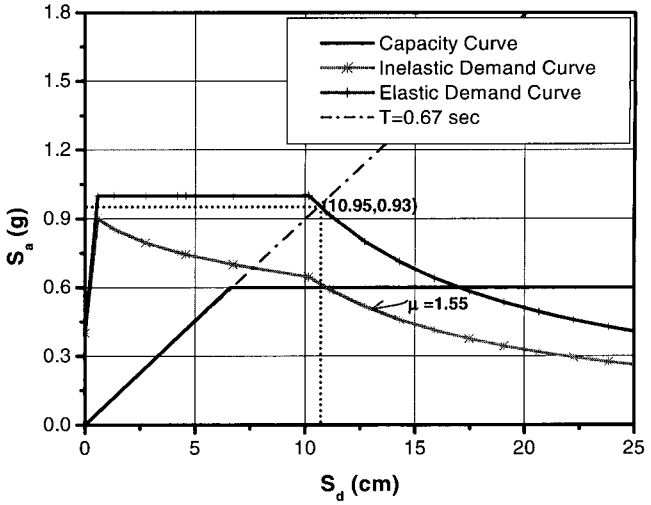

그림 8 탄성, 비탄성 요구스펙트럼과 능력곡선

구한다. 그림 8과 같은 단자유도 그래프의 값을 다자유도 값으로 바꾸기 위해서는 식 (6)과 식 (7)를 이용하여 얻은 아래의 식 (12)를 사용한다.

$$V_Y = S_a \times m^* \times \Gamma \times 9.8 = 0.6 \times 113.83 \times 1.35 \times 9.8 \text{tonf} \quad (12)$$

V_S(*first yielded strength*)은 294.22tonf이므로 아래와 같이 구한다.

$$\therefore \ R_s = \frac{0.6 \times 113.83 \times 1.35 \times 9.8}{294.22} = 3.07$$

4.4 IBC(International Building Code)[15]와의 비교분석

위의 예제에서는 미국 강진지역의 설계지진(500년 재현주기에 대한 EPA가 0.4g)에 대하여, 중간모멘트 연성골조의 반응수정계수를 N2 Method를 이용하여 구하였다. 해석 결과를 요약하면(표 4), 장주기의 경우 미국의 IBC 코드에 제시된 반응수정계수 값과 유사한 것으로 나타났으나, 단주기에서는 다소 차이를 보였다. 이러한 차이는 가속도의 증폭비가 지배하는 영역인 단주기로 갈수록 건물의 초과강도가 커지기 때문이며 주기에 따른 연성계수의 차이는 나타나지 않고 있다. 유럽코드의 경우 동일한 구조 시스템인 경우에도 주기에 따라 다른 값의 반응수정계수를 사용하도록 하고 있으나, 현행 미국 코드와 국내 코드의 경우에는 동일한 구조 시스템에 대하여 주기에 따른 반응수정계수의 차이를 고려하지 못하고 있어 향후 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

표 4 IBC 코드와 해석결과의 비교

골조 유형		R	R_s	R_μ	μ
IBC 코드 (중간모멘트 연성골조)		5	3	-	-
해석결과	장주기(5층)	4.76	3.07	1.55	1.55
	단주기(1층)	5.86	3.88	1.51	2.21

4.5 성능목표에 따른 층간변위비(IDI)

층간 변위비는 성능목표에 따른 비선형 요구스펙트럼과 능력곡선이 만나는 교점의 x 좌표를 건물에 발생하는 최대 변위로 보고, 이 때 작용한 하중을 다자유도계의 밑면 전단력으로 치환하여 이에 해당하는 층별 비탄성 횡변위로부터 구하였다. 그림 9, 그림 10은 능력곡선과 각각의 성능목표에 대한 비탄성 요구스펙트럼을 단주기 건물(1층, $T^* = 0.27 < T_C$)과 장주기 건물(5층, $T^* = 0.67 > T_C$)에 대하여 나타낸 것이며, 즉시거주 단계에서는 단주기와 장주기 건물 모두 요구연성도가 1로서 비탄성 거동이 요구되지 않았으나 인명안전 단계와 붕괴방지 단계에서는 단주기와 장주기 건물의 요구연성도가 1을 초과하여 초과강도와 적절한 연성거동을 통해 지진에너지를 흡수해야 하는 것으로 나타났다.

그림 11은 요구스펙트럼과 성능곡선이 교차하는 스펙트럼 변위(S_d)를 다자유도계의 변위로 치환하고, 이 때의 밑면전단력에 대응하는 층간변위비를 표시한 것이며, 표 5와 그림 12는 성능목표에 대한 최대 층간변위비를 주기에 따라 나타낸 것이다. 그림 11과 12에서 나타난 바와 같이 단주기 건물은 잉여력의 부족으로 붕괴방지 수준(CP Level)에서 급격히 층간 변위비 한계를 초과하였으며, 장주기 건물은 즉시거주 수준(IO Level)에서 층간 변위비 한계를 초과하였으나 인명안전 단계와 붕괴방지 단계에서는 연속적인 소성힌지 메카니즘으로 인해 각 성능단계에 대한 사용성 기준을 초과하는 과다한 변형이 발생하지 않았다. 상기 고찰을 통하여, 비록 건물이 코드에서 규정하고 있는 설계지진(LS Level)에 대한 최대 층간변위비 1.5%를 만족하도록 설계되었더라도 즉시거주(IO Level)나 붕괴방지(CP Level) 수준에 대한 성능을 확신하기 어려운 점이 있다는 것을 알 수 있다. 특히, 장주기 건물의 경우 골조 자체로 내진성능을 구현하기 어렵기 때문에 전단벽이나 코아배치 등의 방법으로 횡강성을 증진시키기 위한 구조 시스템의 보완이 필요하다.

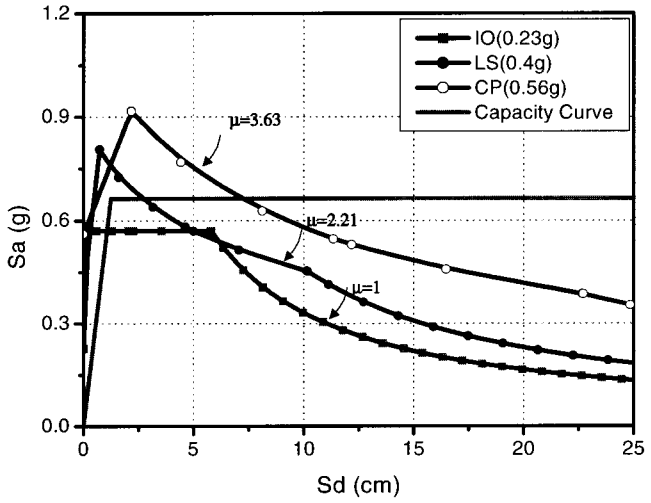

그림 9 단주기 건물(1층, T*=0.27 sec)의 요구스펙트럼

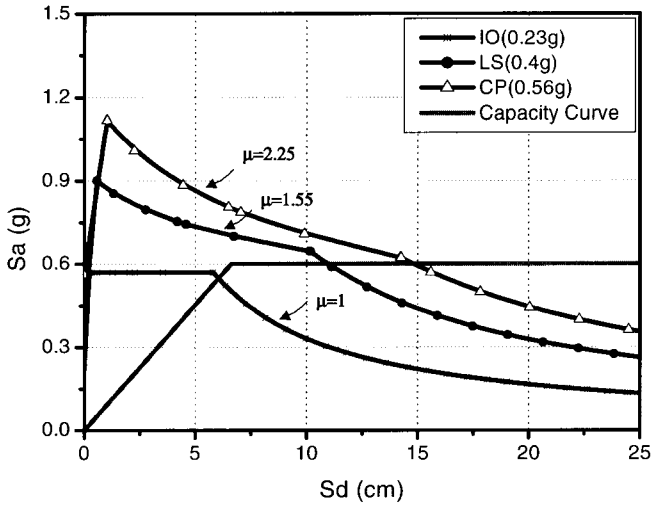

그림 10 장주기 건물(5층, T*=0.67sec)의 요구스펙트럼 및 성능곡선

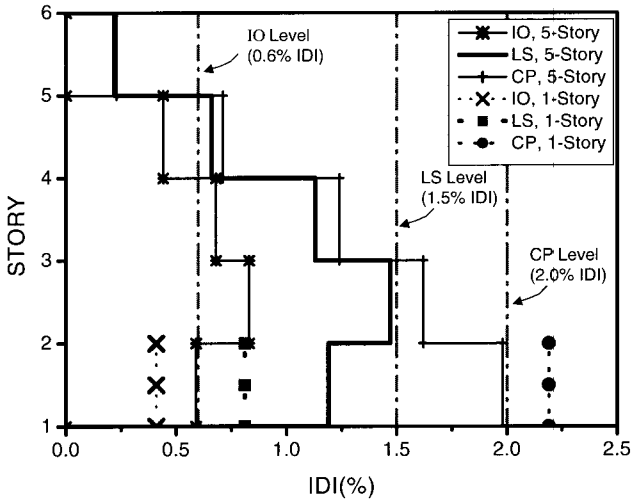

그림 11 성능목표에 따른 층간변위비(IDI)(단주기, 장주기)

표 5 최대 층간변위비(IDI)

성능목표	즉시거주(IO)	인명안전(LS)	붕괴방지
Drift Limit(%)	0.6	1.5	2.0
IDI(%)[단주기]	0.41	0.81	2.19
IDI(%)[장주기]	0.83	1.47	1.98

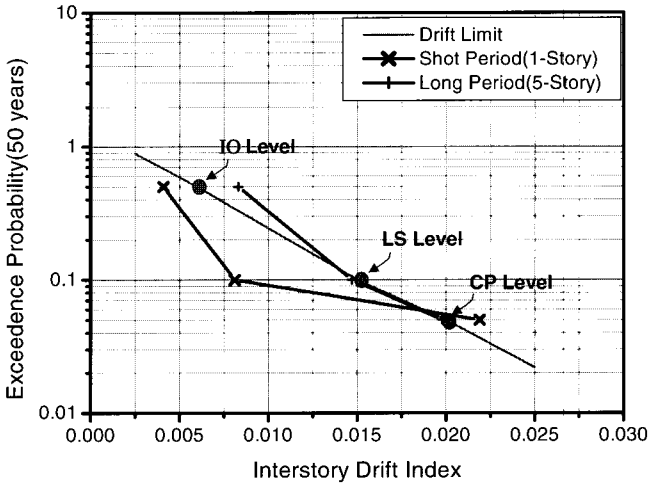

그림 12 성능목표에 따른 최대 층간변위비

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 RC 중간모멘트 연성골조의 반응수정계수를 해석적인 접근을 통하여 얻어내었으며, 사용성 기준을 설정하여 성능에 기초한 내진성능의 평가를 수행하였다. 연구의 결과로서 얻어낸 결론과 고찰 내용은 다음과 같다.

(1) N2 Method를 이용하여 장주기와 단주기를 갖는 중간모멘트 연성골조 형식의 1층과 5층 예제 건물을 해석한 결과, 장주기 건물의 경우 IBC 코드에 제시된 반응수정계수와 잘 일치하였으나 단주기 건물의 경우 코드 값보다 다소 큰 값을 나타내었다. 이러한 차이는 가속도의 증폭비가 지배하는 단주기 영역에서 건물의 초과강도에 대한 영향이 장주기 구간에 비해 상대적으로 크게 나타났기 때문인 것으로 판단되며, 주기특성이 구조물의 응답특성에 미치는 영향은 향후 코드에 적절히 반영되어야 할 것으로 사료된다.

(2) 각 성능목표에 따른 사용성 기준을 설정하고, 이에 대한 층간변위비를 단주기와 장주기 건물에 대하여 평가한 결과 이들이 설계지진에 해당하는 인명안전단계(LS Level)의 성능목표(1.5% IDI Limit)를 모두 만족하였으나, 단주기의 경우에는 붕괴방지단계(CP Level)에서 그리고 장주기의 경우에는 즉시거주 단계(IO Level)에서 각각 목표성능을 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 현행 코드에서 언급하고 있는 철학적 설계개념들은 PBD(Performance Based Design)에 의거한 합리적인 접근을 통하여 정확히 설계에 반영되어야 할 것이다.

(3) N2 Method에 대한 고찰 : 기존의 CSM(Capacity Spectrum Method)이 탄성 요구스펙트럼을 사용하고 비탄성 효과를 반영하기 위하여 유효감쇠의 개념을 도입하고 있는 반면에 N2 Method의 경우에는 비탄성 요구스펙트럼을 이용하여 내진성능을 평가한다는 점에서, CSM에 비해 합리적인 방법이라고 할 수 있다. 그러나 N2 Method는 감쇠에 의하여 지진력이 저감되는 효과를 반영하기가 어려우며 특히, 감쇠의 특성을 시스템 응답에 고려하고자 할 경우에 적용이 곤란한 한계를 지니고 있다. 따라서 감쇠효과를 비탄성 요구스펙트럼에 적절히 반영하기 위해서는 방법론의 개선을 위한 지속적인 연구가 이루어져야 한다.

(4) 타 구조시스템의 적용에 대한 고찰 : 본 연구는 현재 코드에 반응수정계수가 제시되어 있는 중간모멘트 연성골조를 대상으로 하여 이론적 접근방법의 타당성 검증과 내진성능의 분석에 목적을 두었으며 향후, 무량판이나 혼합구조 등 이제까지 반응수정계수가 제시되어 있지 않은 구조 형식에 대해서도 합리적인 반응수정계수의 산정과 내진성능의 평가가 가능한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 과제는 한국 학술진흥재단에서 지원한 <97 대학부설 연구소 지원사업>에 의한 성과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. ATC, "Response modification factors," ATC 3-06, Applied Technology Council, 1978.
2. Bertero, V. V., "Evaluation of response reduction factors recommended by ATC and SEAOC," *Proceedings of the Third U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Charleston, North Carolina, 1986.
3. ATC, "Structural response modification factors," ATC 19, Applied Technology Council, 1995.
4. ATC, "A critical review of current approaches to earthquake-resistant design," ATC 34, Applied Technology Council, Redwood City, 1996.
5. ATC, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," Applied Technology Council, ATC 40, Applied Technology Council, 1996.
6. FEMA, "NEHRP guicelines for the seismic rehabilitation of buildings," FEMA 273, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C, 1997.
7. Fajfar, Peter, "A nonlinear analysis method for performance-based seismic design," M.EERI, 2000, pp. 573-592.
8. FEMA, "NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (Part 1 Provision)," FEMA 302, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C, 1997.
9. FEMA, "NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (Part 2 Commentary)," FEMA 303, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C, 1997.
10. Betero, Raul and Bertero, D. V. V., "Performance-based seismic engineering : the need for a reliable conceptual comprehensive approach," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2002, pp. 627-650.
11. BSSC, "NEHRP recommended provisions for the development of seismic regulations for new buildings," Building Seismic Safety Council, Washington, D.C., 1988.
12. Miranda, E. V. V. Bertero, "Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design," *Earthquake Spectra*, EERI, Vol. 10, No. 2, 1994, pp. 357-379.
13. ACI Commite 318, "Building Code Requirements for Structure Concrete(ACI 318-99)," Portlane Cement Association, 1999.
14. 한과박소프트(주), neoMAX-3D ver.2.0, 2001
15. IBC 2000, "International Building Code," International code council, INC. 2000.