

약진지역에서의 초과강도 및 반응수정계수

Overstrength and Response Modification Factor in Low Seismicity Regions

이동근¹⁾ · 조소훈²⁾ · 고 현³⁾ · 김태진⁴⁾

Lee, Dong-Guen · Cho, So-Hoon · Ko, Hyun · Kim, Tae-Jin

국문 요약 >> 현행 약진지역의 내진설계기준은 주로 강진지역에서의 연구결과에 근거하고 있다. 하지만, 약진지역의 경우 지진하중보다는 중력하중이나 풍하중에 의해 구조설계가 지배되므로 구조물의 초과강도가 강진지역의 경우보다 증가하게 된다. 따라서 약진지역에 적합한 내진설계기준을 마련하기 위해서는 강진지역에 적용되는 반응수정계수를 약진지역에 그대로 적용할 수 있는지에 대한 검증이 필요하다. 본 연구에서는 건축구조물에 대한 소성해석을 통해 그 연성도와 초과강도를 산정하고 이에 근거하여 현행 반응수정계수의 적절성 여부를 검토하였다. 강진, 중진, 약진지역 등에서의 초과강도와 연성요구도를 비교하기 위하여 UBC-97에 근거하여 설계된 예제구조물을 선정하여 해석을 수행하였다. 해석결과에 의하면 약진지역의 초과강도가 강진지역보다 크기 때문에 동일한 반응수정계수에 대한 약진지역의 연성요구도는 강진지역에서보다 적게 된다. 따라서 동일한 반응수정계수를 이용하여 설계된 약진지역 구조물의 경우 접합부에서의 소성회전각 요구량을 강진지역의 경우에 비하여 상대적으로 저감시킬 수 있을 것이다.

주요어 약진지역, 초과강도, 연성요구도, 소성회전각, 반응수정계수

ABSTRACT >> Seismic design codes are mainly based on the research results for the inelastic response of structures in high seismicity regions. Since wind loads and gravity loads may govern the design in low seismicity regions in many cases, structures subjected to design seismic loads will have larger overstrength compared to those of high seismicity regions. Therefore, it is necessary to verify if the response modification factor based on high seismicity would be adequate for the design of structures in low seismicity regions. In this study, the adequacy of the response modification factor was verified based on the ductility and overstrength of building structures estimated from the result of nonlinear static analysis. Framed structures are designed for the seismic zones 1, 2A, 4 in UBC-97 representing the low, moderated and high seismicity regions and the overstrength factors and ductility demands of the example structures are investigated. When the same response modification factor was used in the design, inelastic response of structures in low seismicity regions turned out to be much smaller than that in high seismicity regions because of the larger overstrength of structures in low seismicity regions. Demands of plastic rotation in connections and ductility in members were much lower in the low seismicity regions compared to those of the high seismicity regions when the structures are designed with the same response modification factor.

Key words low seismicity regions, overstrength, ductility demand, plastic rotation angle, response modification factor

1. 서론

UBC-97에서는 구조물의 연성능력에 따라서 모멘트저항 골조를 보통모멘트저항골조(OMRF), 중간모멘트저항골조(IMRF), 그리고 특수모멘트저항골조(SMRF) 등 3개의 구

조시스템으로 분류하고 있다. 상대적으로 큰 비탄성 변형이 요구되는 강진지역의 경우에는 IMRF는 사용이 제한되어 있고, OMRF는 약진지역을 제외한 중진이나 강진지역에서 그 사용이 제한되어 있다.

설계기준에서 제시하고 있는 반응수정계수는 구조물의 초과강도와 연성능력에 의해 주로 결정된다. 구조설계에서 중력하중이나 풍하중이 지배적인 구조물의 경우에는 지진하중이 지배적인 구조물에 비해 더 큰 초과강도를 지니게 된다. Jain⁽¹⁾은 철근콘크리트 골조의 예제구조물에 대한 연구를 통하여 약진지역의 골조 구조물의 초과강도가 강진지역보다 더 크다는 결론을 얻었다. 그리고 Mei⁽²⁾는 지반운동

¹⁾ 정회원·성균관대학교 건축공학과, 교수 (대표저자: dglee@skku.ac.kr)

²⁾ 탄탄스틸(주), 공학박사

³⁾ 학생회원·성균관대학교 건축공학과, 박사과정

⁴⁾ 정회원·성균관대학교 건축공학과, 전임강사

본 논문에 대한 토의를 2006년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 5. 2 / 심사종료일 : 2006. 5. 25)

의 특성과 구조물의 형태에 따라서 구조물의 초과강도가 다양한 분포를 나타내는 것을 보여주었다. 또한 UBC-97에서는 Table 16-N의 주석을 통하여 “Ordinary moment resisting frames in Seismic Zone 1 meeting the requirements of Section 2211.6 may use a R value of 8”라고 기술함으로써 약진지역에서는 더 큰 반응수정계수를 사용할 수 있도록 규정하고 있지만 Section 2211.6은 편집실수로 생략되어 있다.

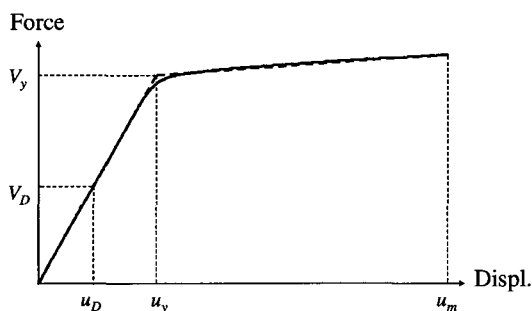
본 연구에서는 UBC-97에 규정된 하중에 의하여 설계된 5층, 10층 그리고 15층 구조물에 대하여 약진, 중진 그리고 강진지역에서 위치한 구조물의 초과강도계수를 평가하여 반응수정계수에 대한 지진크기의 영향을 살펴보았다. 또한 비탄성 정적해석과 동적해석을 수행하여 소성회전과 시스템 연성요구도를 평가하였다.

2. 반응수정계수

구조물의 연성도, 초과강도, 감쇠비 그리고 구조물의 주기 등은 반응수정계수에 영향을 미치는 중요한 변수들이다. 본 연구에서는 반응수정계수에 영향을 미치는 주요한 변수인 구조물의 연성도계수(R_μ)와 초과강도계수(R_Ω)에 근거하여 구조물의 반응수정계수를 살펴보았다. 횡하중이 가해지는 구조물의 힘-변위 관계가 그림 1에 나타나 있다. 구조물은 설계밀면전단력 V_D 에 저항하도록 설계되었고 이에 대응되는 변위 또는 설계변위는 u_D 이다. 횡변위증가에 따른 구조물의 비탄성거동에 의한 힘-변위관계를 굵은 실선으로 표시되고 이를 굵은 점선으로 표시된 2차선형 관계로 근사시킬 수 있다. 이 근사관계로부터 항복밀면전단력(V_y)과 항복변위(u_y)를 용이하게 구할 수 있다.

구조물의 초과강도계수는 다음과 같이 정의된다.

$$R_\Omega = \frac{V_y}{V_D} \quad (1)$$



〈그림 1〉 횡하중을 받는 구조물의 힘-변위 관계

구조물의 초과강도는 설계에 사용되는 하중계수 또는 감소계수 뿐만 아니라 중력하중과 풍하중에 의해서 발생한다. 구조물의 연성능력에 근거한 구조시스템의 연성도계수는 구조물의 항복변위 u_y 에 대한 최대변위 u_m 의 비로써 다음과 같이 정의된다.

$$R_\mu = \frac{u_m}{u_y} \quad (2)$$

대부분의 내진설계기준들은 구조물을 설계할 때 지진하중을 감소시키기 위하여 구조물의 초과강도에 연성도계수를 곱하여 결정되는 반응수정계수를 사용하고 있다.

3. 약진 지역에서의 내진설계

내진설계방법은 지진위험이 큰 지역에 위치한 구조물에 중점을 두고 강한 지진에 대한 구조물의 응답에 근거하여 발전되어 왔다. 구조물의 내진설계에서 가장 중요한 과정 중의 하나는 큰 비탄성 변형을 예상하여 지진하중을 감소시키는 것인데 이를 위하여 기대되는 비탄성 변형에 상응하는 반응수정계수를 사용한다. 연성능력을 크게 발휘할 수 있는 구조물의 경우에는 큰 반응수정계수를 사용하여 지진하중의 크기를 크게 저감시킬 수 있지만, 상응하는 비탄성변형을 달성하기 위해서는 정밀한 구조상세를 적용하여야 한다.

UBC-97에서는 지진위험도가 강진지역에 비해 상대적으로 낮은 약진이나 중진 지역 구조물의 내진설계를 위해서 저감된 지진계수 C_a 또는 C_v 를 적용하고 있지만 구조물의 비탄성 변형 능력과 관련되는 반응수정계수 등은 강진지역의 것을 그대로 사용하고 있는 실정이다.

3.1 약진지역에서 구조물의 초과강도계수

구조물의 설계에서 고정하중이나 활하중 등의 중력하중, 풍하중, 그리고 지진하중 등이 설계하중으로 고려되는데 강진지역의 경우에는 지진하중이 구조설계에 지배적인 영향을 줄 가능성이 크다. 하지만 약진지역에서는 지진하중보다는 중력하중이나 풍하중 등에 의해 구조설계가 결정되는 경우가 많기 때문에 약진지역에서의 지진하중의 영향은 강진지역에 비해 상대적으로 작을 수 있다.

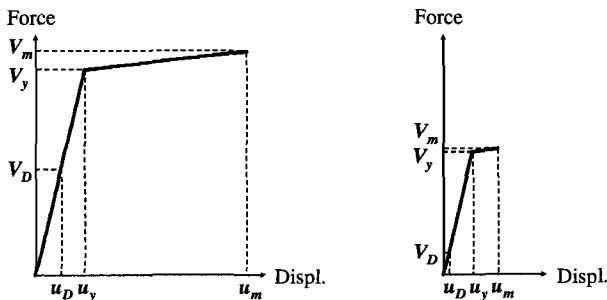
본 연구에서는 UBC-97에서 정의된 지진구역 1, 2B와 4를 약진, 중진 그리고 강진지역으로 사용하였다. 약진과 강진지역에서 동일한 구조시스템을 적용하여 설계된 구조물의 힘-변위 관계가 그림 2에 나타나 있다. 두 지진구역에 대한 지진계수 C_a 가 각각 0.08과 0.4이므로 약진지역의 설계

밀면전단력은 강진지역의 1/5의 값을 가진다. 항복밀면전단력 V_y 는 지진하중뿐만 아니라 중력하중과 풍하중에 의하여 결정되므로 항복밀면전단력 V_y 와 설계밀면전단력 V_D 사이의 차이는 중력하중과 풍하중의 영향을 나타내는 것으로 볼 수 있다. 강진지역에서 초과강도계수를 기준에서 제시하고 있는 값에 근거하여 2라고 한다면 V_y 는 V_D 의 2배가 된다. 두 지역에서의 구조물은 동일한 중력하중과 풍하중의 조건으로 설계가 되었으므로 중력하중과 풍하중의 영향은 두 지역에서 동일하며 V_y 와 V_D 의 차이 또한 두 지역이 같으므로 결국 약진지역에서의 V_y 는 V_D 의 6배가 되어 초과강도계수는 6이 된다. 즉, 약진에 대해서 설계된 구조물의 초과강도계수는 강진에 대해서 설계된 구조물보다 큰 값을 갖는다.

3.2 약진지역의 시스템 연성도와 반응수정계수

반응수정계수가 연성도계수와 초과강도계수의 곱으로 결정될 수 있으므로 동일한 반응수정계수에 대해서는 초과강도가 증가할수록 연성요구도가 감소하게 된다. 그림 2에서 보는 바와 같이 강진지역에서 반응수정계수 8.5를 사용하는 경우에는 초과강도계수가 2일 때 구조물의 연성능력을 4.25 이상 확보해야 하지만 약진지역에서는 초과강도계수가 6이므로 연성도계수가 최소 1.42이상이면 된다. 즉, 동일한 반응수정계수에 대해서 약진지역의 구조물은 강진지역의 구조물보다 작은 연성능력을 보유하여도 내진설계기준에서 요구하는 성능을 만족할 수 있으므로 연성능력이 작은 구조상세를 적용할 수 있는 것이다. 또한 동일한 구조상세를 약진지역과 강진지역 구조물에 모두 적용하는 경우에는 두 지역의 구조물은 같은 연성능력을 확보하고 있기 때문에 초과강도계수가 큰 약진지역에서의 반응수정계수를 증가시킬 수도 있다.

이러한 약진지역에서의 반응수정계수는 강진지역의 반응수정계수를 이용하여 약진, 중진 그리고 강진 지역에 대해



(a) High seismicity region (b) Low seismicity region

〈그림 2〉 횡하중을 받는 구조물의 비탄성응답

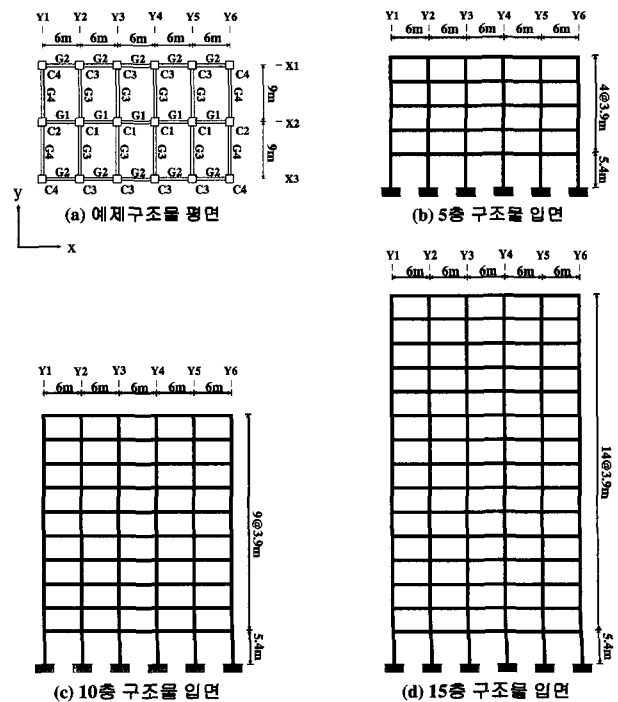
다양한 경우에 대한 해석모델을 구성하여 비탄성 지진해석을 수행하고 그 거동을 분석함으로써 결정할 수 있다.

4. 예제 구조물

구조물의 비탄성응답을 조사하기 위하여 본 연구에서 사용한 예제구조물은 5층과 10층 그리고 15층의 철근 콘크리트 모멘트 골조이다. 예제구조물은 그림 3(a)에서 보는 바와 같은 평면을 가지고 예제구조물의 입면은 그림 3(b)~(d)에 나타나 있다. 구조물의 설계지진하중은 x-방향과 y-방향이 동일하지만 구조물이 직사각형 평면을 가지고 있기 때문에 설계 풍하중의 영향은 y-방향이 더 크다. 반면에 x-방향의 경우에는 지진하중이 더 큰 영향을 준다.

예제구조물은 각각 6.5kN/m²과 2.5kN/m²의 고정하중과 적재하중에 대하여 설계되었다. 풍하중과 지진하중은 UBC-97에 따라서 결정되었다. 풍하중을 산정에서는 70mph의 기본 풍속을 적용하였고 지진하중을 산정에서는 S_B의 지반과 1.0의 중요도계수가 사용되었다. 약진, 중진 그리고 강진 지역에서 구조물의 비탄성응답을 조사하기 위하여 OMRF, IMRF 그리고 SMRF와 같은 3가지의 연성능력을 가지도록 3.5, 5.5, 8.5의 반응수정계수를 사용하여 5, 10, 15층 예제구조물이 지진구역 1, 2B, 4에 대하여 설계되었다.

UBC-97에서는 지진구역 2A, 2B, 3 그리고 4에서는 OMRF의 사용이 제한되어 있고 지진구역 3과 4에서는



(c) 10층 구조물 입면 (d) 15층 구조물 입면

〈그림 3〉 예제구조물의 평면 및 입면

IMRF 시스템이 제한되어 있으므로 5, 10 그리고 15층 구조물은 표 1에서 보는 바와 같이 6개의 서로 다른 지진하중에 대하여 설계가 수행되었다. 실제 국내의 설계 형태를 반영하기 위하여 한국에 있는 3개의 구조엔지니어링 회사들이 예제구조물 설계에 참여하였다.

$$D_{eq} = \frac{\phi_1^T M x}{\phi_1^T M 1} \tag{3}$$

$$V_{eq} = \phi_1^T K \phi_1 D_{eq} \tag{4}$$

여기서, ϕ_1 과 x 는 1차모드형상과 변위벡터이고 M 과 K 는 질량행렬과 강성행렬을 나타낸다.

5. 예제구조물의 초과강도와 시스템연성도 계수

예제구조물에 대한 반응수정계수를 계산하기 위한 목적으로 구조물의 힘-변위 관계로부터 초과강도와 시스템연성도를 평가하였다. 이를 위하여 MIDAS/Gen Ver.6.9.0 프로그램을 이용한 3차원 비탄성정적해석이 수행되었다.

5.2 초과강도계수

재료샘플에 대한 시험으로부터 얻어지는 구조재료의 실제 강도는 재료에 대한 공칭강도와는 상당한 편차를 갖게 되는 것이 일반적이다. 설계에는 최소설계강도를 다시 강도감소계수(ϕ)로 감소시켜 부재의 단면을 결정하게 되지만 시공된 구조물의 실제 기대 강도는 이러한 설계값을 상회하게 되므로 통계적인 자료에 근거한 재료의 평균 강도를 사용하여 계산할 필요가 있다. 이 경우에는 설계식에서 ϕ 계수를 제거하고, 소성힌지의 발생이 예상되는 부분에 대해서 변형률경화 등을 고려하여 재료의 평균 강도를 구하여야 한다. 보강 조적조, 콘크리트 및 강구조에 대한 기준의 요구사항은 설계강도에 대한 평균강도의 비와 변형률경화 효과를 고려하기 위하여 1.25의 계수를 전통적으로 사용하여 왔다. 보통의 강도감소계수가 0.9 수준임을 고려할 때, 이러한 재료로 시공된 시스템의 재료초과강도는 1.25/0.9 즉, 1.4의 수준이 된다.

5.1 구조시스템의 힘-변위 관계 도출

SDOF 구조물에 대해서는 그림 1에서 나타난 힘-변위 관계를 쉽게 구할 수 있지만 MDOF 구조물에 대해서는 이런 힘-변위 관계를 정의하는 것이 용이하지 않다. MDOF 구조물에 대한 힘-변위 관계를 얻기 위하여 ATC-40에서는 지붕 변위와 밑면전단력이 사용되지만 이동근 등⁽⁴⁾에 의하여 제안된 등가하중-등가변위 관계의 방법이 구조물의 변형형상을 고려하여 다자유도 구조물의 거동을 보다 합리적으로 나타낼 수 있으므로 본 연구에서는 이 방법이 사용되었다.

본 연구에서는 3개 회사에서 설계한 예제구조물을 대상으로 3차원 비탄성정적해석을 수행하고 재료의 초과강도를 고려한 경우에 대해서 예제구조물의 초과강도를 평가하였다. 예제구조물의 평균 초과강도가 표 2에 나타나 있다. 반

이 방법은 식 (3)과 (4)에서 보는 바와 같이 등가변위(D_{eq})와 하중(V_{eq})으로 횡방향 하중과 변위의 1차 모드 성분을 계산하는 것이다.

〈표 1〉 예제구조물의 설계지진하중

(단위: kN)

지진위험도	5층 구조물			10층 구조물			15층 구조물		
	OMRF R=3.5	IMRF R=5.5	SMRF R=8.5	OMRF R=3.5	IMRF R=5.5	SMRF R=8.5	OMRF R=3.5	IMRF R=5.5	SMRF R=8.5
강진	-	-	1845.7	-	-	2623.7	-	-	3856.8
중진	-	1188.5	769.0	-	1689.5	1199.6	-	1968.6	1878.2
약진	747.1	475.4	307.6	1062.0	675.8	479.8	1237.4	787.4	751.3

〈표 2〉 예제구조물의 평균 초과강도

방향	지진위험도	5층 구조물			10층 구조물			15층 구조물		
		OMRF R=3.5	IMRF R=5.5	SMRF R=8.5	OMRF R=3.5	IMRF R=5.5	SMRF R=8.5	OMRF R=3.5	IMRF R=5.5	SMRF R=8.5
x	강진	-	-	2.13	-	-	2.10	-	-	2.33
	중진	-	2.61	3.92	-	2.20	2.74	-	2.05	2.37
	약진	3.87	6.19	9.64	3.25	4.92	6.65	3.17	4.51	5.30
y	강진	-	-	2.86	-	-	2.80	-	-	2.89
	중진	-	3.41	4.71	-	3.70	4.29	-	3.41	4.07
	약진	4.59	7.13	11.17	4.93	7.65	9.79	5.17	7.13	10.01

응수정계수 8.5를 사용하여 산정된 약진(LSR), 중진(MSR) 그리고 강진(HSR)지역에서 구조물의 초과강도계수는 그림 4에 나타나 있다. 이 그림에 의하면 약진지역에서 초과강도계수는 강진지역의 초과강도계수보다 더 크다. 또한 초과강도계수의 차이는 지진하중의 영향이 중력하중에 의한 것보다 상대적으로 작은 저층 구조물에서 증가하게 된다. 구조물이 고층화될수록 풍하중의 영향이 커지고 이는 초과강도의 증가로 나타난다. 동일한 높이의 구조물의 경우 풍하중의 영향이 큰 y-방향으로의 초과강도가 더 크다는 것을 알 수 있다. 구조물의 설계가 지진하중에 의하여 주로 결정되는 강진지역의 구조물의 경우에는 초과강도계수가 SMRF에 대해 2.10에서 2.89의 범위에 있지만 약진지역에서는 그 범위가 5.30에서 11.17로 상당히 증가하였다.

그림 5에는 3.5, 5.5 그리고 8.5의 반응수정계수를 사용하여 설계된 약진지역 구조물의 초과강도에 대한 비교가 나타나 있는데 반응수정계수가 증가함에 따라 초과강도계수도 증가하는 경향을 보여주고 있다. 지진의 영향이 큰 x-방향의 경우에는 그림 5(a)에서 보는 것과 같이 반응수정계수가 커짐에 따라 구조물 층수에 따른 초과강도계수의 차이도 증가한다. 하지만 풍하중의 영향이 큰 y-방향의 경우에는 그림5(b)에서 보

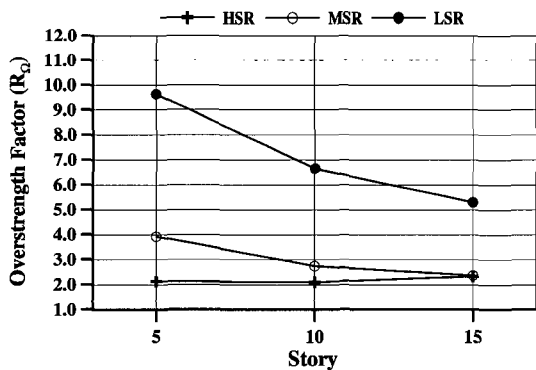
는 바와 같이 초과강도계수의 차이가 상대적으로 크지 않다.

5.3 구조물의 시스템 연성요구도

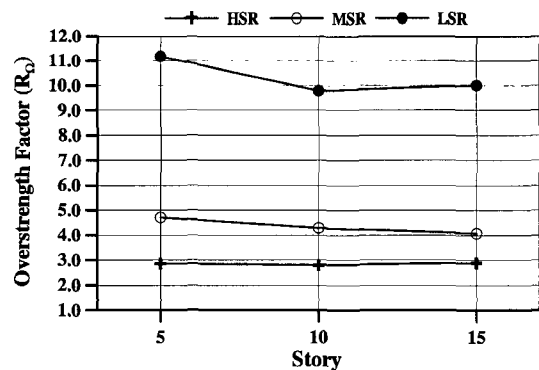
각 구조시스템에 대한 반응수정계수를 재료초과강도를 고려한 각 예제구조물의 초과강도로 나누어서 산정한 시스템 연성요구도가 표 3에 나타나 있다. 그림 6은 약진, 중진 그리고 강진지역에서 8.5의 반응수정계수를 사용하여 설계된 구조물에 대한 연성요구도를 나타낸다. 약진지역에서 구조물의 연성요구도는 강진지역 구조물의 연성요구도보다 훨씬 작은 것으로 나타났다. 그러므로 약진지역에 건설되는 구조물의 경우에는 강진지역의 반응수정계수에 대응되는 연성능력을 확보할 수 있는 정도의 구조상세가 필요하지 않을 수도 있다.

6. 약진지역에서의 반응수정계수

모멘트 골조로 이루어진 구조물의 경우에는 그 연성도가 주로 접합부에서의 소성변형능력에 의해 결정되므로 적용된 반응수정계수에 대응되는 연성능력을 발휘할 수 있도록 보-기둥 접합부의 상세가 이루어져야 한다. 지진하중을 받는

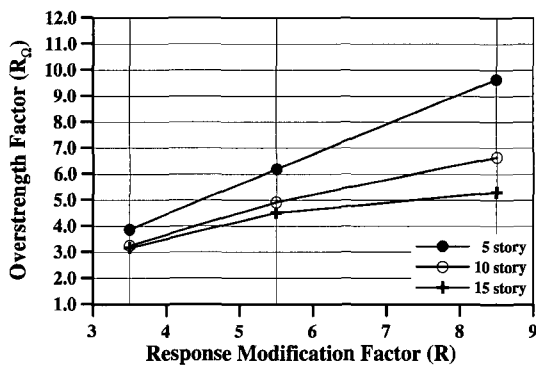


(a) x-방향

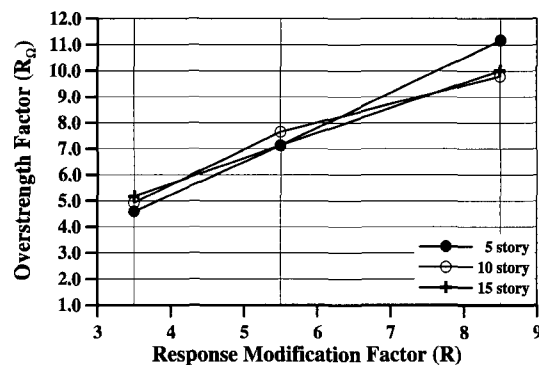


(b) y-방향

〈그림 4〉 지진위험도에 따른 초과강도계수(SMRF, R=8.5)



(a) x-방향

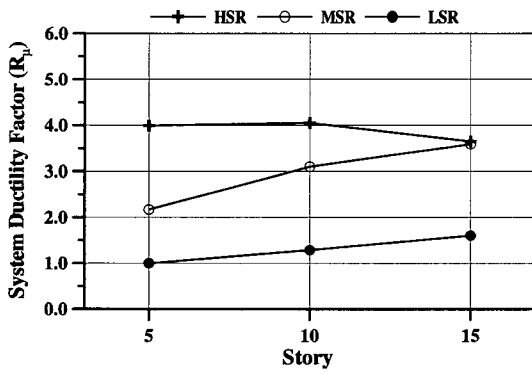


(b) y-방향

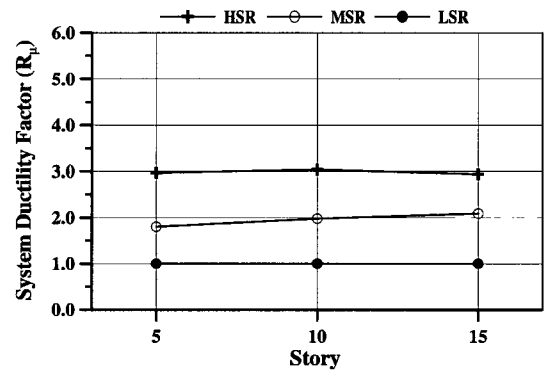
〈그림 5〉 약진지역 구조물에 대한 초과강도계수

〈표 3〉 예제구조물의 시스템 연성요구도

방향	지진위험도	5층 구조물			10층 구조물			15층 구조물		
		OMRF R=3.5	IMRF R=5.5	SMRF R=8.5	OMRF R=3.5	IMRF R=5.5	SMRF R=8.5	OMRF R=3.5	IMRF R=5.5	SMRF R=8.5
x	강진	-	-	3.99	-	-	4.05	-	-	3.65
	중진	-	2.11	2.17	-	2.50	3.10	-	2.68	3.59
	약진	1.00	1.00	1.00	1.08	1.12	1.28	1.10	1.22	1.60
y	강진	-	-	2.97	-	-	3.04	-	-	2.94
	중진	-	1.61	1.80	-	1.49	1.98	-	1.61	2.09
	약진	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

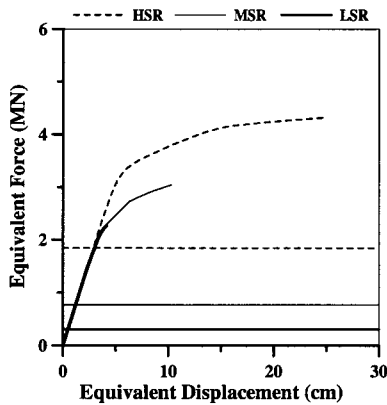


(a) x-방향

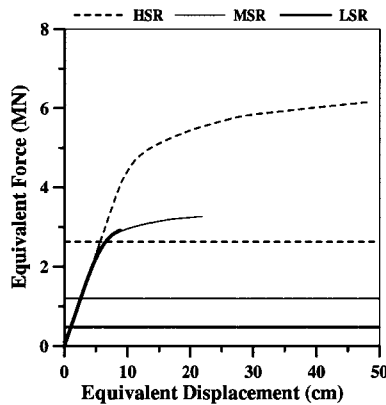


(b) y-방향

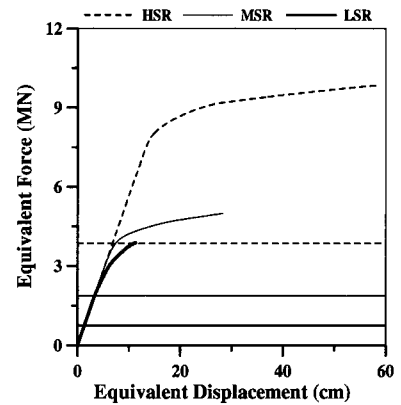
〈그림 6〉 지진위험도에 따른 시스템 연성요구도(SMRF, R=8.5)



(a) 5층 구조물



(b) 10층 구조물



(c) 15층 구조물

〈그림 7〉 예제구조물의 힘-변위관계(SMRF, R=8.5)

구조물 접합부에서의 연성요구도를 산정하기 위하여 예제 구조물의 접합부에서 비탄성 변형을 평가하였다.

3차원 비탄성정적해석에 사용된 MIDAS/Gen Ver.6.9.0 프로그램은 접합부에서의 비탄성 변형에 관한 정보를 제공하지 않기 때문에 DRAIN-2DX 프로그램을 이용하여 예제구조물의 2차원 비탄성정적해석을 수행하였다. 이를 위해 3차원의 예제구조물은 x-방향과 y-방향의 등가 2차원 골조로 치환되었다. 구조물의 초과강도가 반응수정계수를 결정하는 가장 중요한 요소이므로 등가 2차원 골조는 표 3에 나타난 예제구조물의 평균초과강도와 같은 초과강도를 가지도록 설계하였다.

6.1 시스템 연성도와 접합부에서의 비탄성 변형

반응수정계수를 사용하여 설계된 구조물은 설계변위에 반응수정계수를 곱하여 산정한 목표변위에 대응되는 횡하중을 저항할 수 있어야 한다. 그러므로 등가 변위가 목표변위에 도달할 때까지 횡하중을 증가시켜서 등가 2차원 골조의 비탄성 정적해석을 수행한다. 8.5의 반응수정계수를 사용하여 설계된 x-방향 등가골조의 힘-변위관계가 그림 7에 나타나 있다.

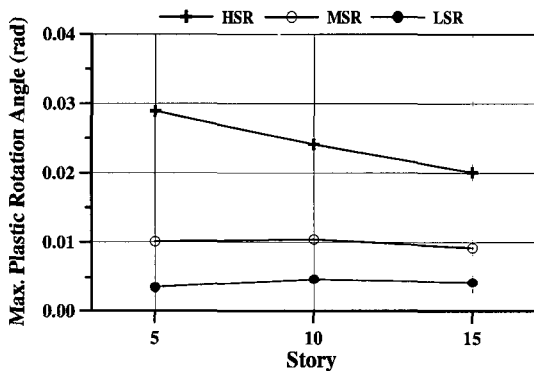
8.5의 반응수정계수를 사용하여 설계된 5, 10, 15층 등가 골조의 접합부에서 최대 소성회전각이 그림 8에 나타나 있다. 그림 6에서 보는 바와 같이 강진지역에서 연성요구도가 더

크므로 강진지역의 구조물이 다른 지역보다 더 큰 소성회전 각을 나타낸다. 그러므로 약진지역에서 구조물들이 8.5의 반응수정계수에 대응되는 구조상세를 가지고 설계된다고 할 지라도 소성회전각은 강진지역 구조물보다 훨씬 적게 될 것이다. 따라서 같은 반응수정계수를 사용할 때 더 작은 소성회전능력을 가진 구조상세가 약진지역에서 사용될 수 있다.

6.2 구조상세와 반응수정계수

약진과 강진지역에서 구조물이 같은 반응수정계수를 사용하여 설계된다면 구조물에 지진하중이 가해질 때 강진지역과 비교하여 약진지역의 구조물의 접합부에는 상당히 작은 소성회전각이 발생할 것이다. 그러므로 약진지역에서 구조물은 추가적인 변위에 저항할 수 있는 연성능력을 확보할 수 있다.

부재단부의 소성회전각을 구하기 위하여 등가변위가 목



<그림 8> 지진위험도에 따른 최대 소성회전각(SMRF, R=8.5)

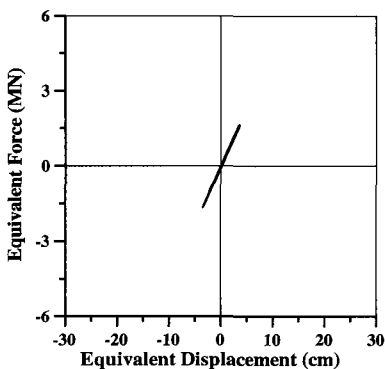
표변위에 도달할 때까지 등가 2차원 골조의 비탄성정적해석을 수행하였다. 동일한 구조시스템에서 같은 구조상세를 적용하는 경우에는 동일한 소성회전능력을 가지게 되므로 약진지역의 등가골조의 비탄성정적해석에서 목표변위는 강진지역의 최대소성회전각과 대상구조물의 최대소성회전각이 같아질 때의 변위를 목표변위로 설정하였다.

시스템 연성도계수는 등가변위를 항복변위로 나누어서 구할 수 있고 표 4에 나타난 반응수정계수를 계산하기 위하여 이러한 시스템 연성도계수를 표 3에 나타난 초과강도계수와 곱하였다. 계산된 반응수정계수는 더 큰 초과강도계수와 더 작은 항복변위 때문에 약진지역에서 훨씬 크게 나타났다. 그러므로 같은 소성회전능력을 가진 구조상세가 사용될 때 강진지역보다 훨씬 더 큰 반응수정계수를 사용함으로써 약진지역에서 구조물을 설계하는 것이 보다 합리적일 수 있을 것이다.

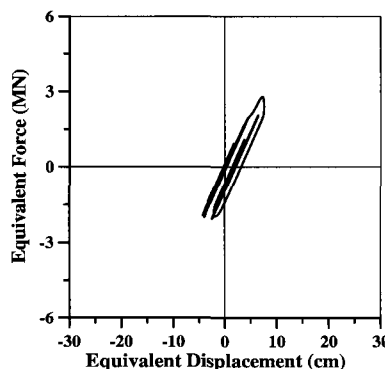
지반운동으로 0.08g, 0.2g 그리고 0.4g의 유효최대가속도(Effective Peak Acceleration, EPA)를 가지도록 조정된 El Centro 지반기록(1940, NS)을 사용하여 예제구조물의 동적해석을 수행하였다. 약진과 강진지역에서 x-방향의 10층 SMRF 골조에 대한 힘-변위 관계는 그림 9에서 보는 바와 같다. 약진지역에서 비탄성 변형은 강진지역보다 상당히 작다. UBC-97에서 정의하고 있는 지진하중의 크기는 재현주기 500년의 지진하중을 말한다. IBC 수준으로 재현주기 2400년의 지진하중을 고려하기 위하여 약진지역의 El Centro 지반기록(1940, NS)의 유효최대가속도를 0.08g보다 큰 0.16g로 2배의 크기를 가지도록 조정하여 동적해석을 수행한 결과는 재

<표 4> 최대 소성회전각에 근거한 반응수정계수(SMRF, R=8.5)

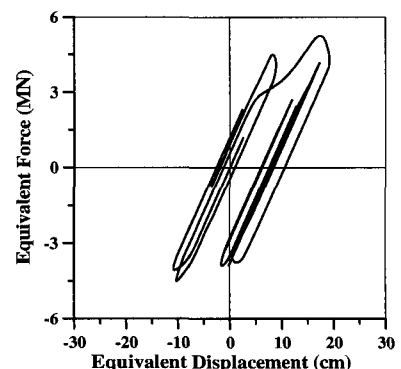
지진위험도	5층 구조물		10층 구조물		15층 구조물	
	x-방향	y-방향	x-방향	y-방향	x-방향	y-방향
강진	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
중진	29.3	34.1	28.1	30.7	26.2	26.9
약진	70.8	61.1	65.4	79.0	55.3	63.7



(a) 약진지역(EPA=0.08g)

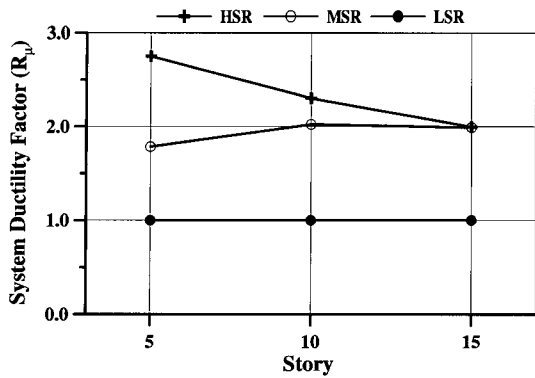


(b) 약진지역(EPA=0.16g)

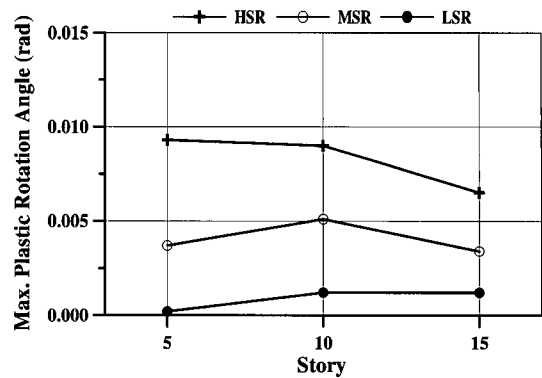


(c) 강진지역(EPA=0.4g)

<그림 9> 10층 예제구조물의 힘-변위 관계; El Centro(1940, NS), SMRF R=8.5



(a) 시스템 연성요구도



(b) 최대 소성회전각

(그림 10) 예제구조물의 시스템 연성요구도 및 최대 소성회전각; El Centro(1940, NS), SMRF R=8.5

현주기 500년의 지진하중과 마찬가지로 비탄성 변형이 강진지역보다 상당히 작음을 알 수 있다.

약진지역에서 5, 10 그리고 15층 SMRF 골조에 대한 시스템 연성요구도와 소성회전 요구도는 그림 10에서 보는 바와 같이 강진지역에 대하여 얻은 값보다 훨씬 작다. 같은 구조상세에 대하여 동일한 연성능력을 가지므로 큰 초과강도 계수에 근거하여 약진지역에서 너무 큰 반응수정계수를 사용하는 것은 바람직하지 않을 수 있다.

7. 결론

본 연구에서는 약진지역에서 반응수정계수와 그에 대응되는 구조상세를 조사하기 위하여 3차원 비탄성해석과 2차원 동적해석으로부터 약진과 강진지역에서 설계된 구조물에 대한 초과강도계수와 소성회전각 요구도를 구할 수 있었다. 이로부터 얻은 주요한 결론은 다음과 같다.

- (1) 같은 반응수정계수를 사용하여 설계된 구조물에 대하여 약진지역에서 초과강도계수는 강진지역보다 더 크다. 그러므로 약진지역에서 연성요구도는 강진지역보다 훨씬 작은 것으로 나타났다.
- (2) SMRF의 같은 구조상세가 사용되었을 때 약진지역에서 구조물의 연성능력과 연성요구도의 차이는 강진지역의 구조물보다 더 크다. 따라서 약진지역에서는 연성요구도가 연성능력보다 훨씬 작기 때문에 약진지역에서 더 큰 반응수정계수를 사용하는 것은 의미가 없으며 약진지역에서 일반적인 구조물은 SMRF 구조상세의 적용 또한 의미가 없을 것이다.
- (3) 약진지역에서 SMRF 구조상세는 설계지진력을 초과하는 아주 큰 지진에도 저항할 필요가 있는 구조물이나 구조시스템이 양호하지 못하고 비정형성을 갖는 구조물

들에 대해서는 사용될 수도 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2005-041-D00849)와 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산C04-01)에 의한 것임을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Sudhir, K.J. and Rahul, N., "Seismic Overstrength in Reinforced Concrete Frames," *Journal of structural engineering*, Vol. 121, No. 3, 1995, pp. 580-585.
2. Meli, R., "Code-prescribed seismic actions and performance of buildings," *Earthquake Engineering*, Tenth World Conference, Rotterdam, 1992, pp. 5783-5788.
3. International Conference of Building Officials, *Uniform Building Code*, UBC-97, ICBO, Whittier, California, 1997.
4. Lee, D.G., Song, J.K. and Yun, C.B., "Estimation of system-level ductility demands for multi-story Structures," *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 12, 1996, pp. 1025-1035.
5. Whittaker, A., Hart, G. and Rojahn, C., "Seismic response modification factor," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 125, No. 4, 1999, pp. 438-444.
6. Kappos, A. J., "Evaluation of behaviour factors on the basis of ductility and overstrength studies," *Engineering Structures*, Vol. 21, No. 9, 1999, pp. 823-835.
7. ATC, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
8. FEMA, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., 2000.