

벽식 APT의 반응수정계수 추정에 관한 연구

Evaluation of Response Modification Factors for Shear Wall Apartment Building

송 정 원*
Song, Jung Won

송 진 규**
Song, Jin Gyu

이 수 곤***
Lee, Soo Gon

ABSTRACT

For earthquake resistance design, a response modification factor is used to reduce the design strength and it reflects ductility, reserve strength, redundancy and damping effect. But this factor has not theoretical basis. In this study, two response modification factors are compared and analyzed for shear wall apartment building; the one is introduced by ATC-19 procedures, the other is suggested FEMA-273 and ATC-40 through nonlinear static analysis. For the results, ATC-19 procedure gives a reasonable estimation to R factor. But R_{μ} by using FEAM-273 and ATC-40 methods is estimated so small in case of a minor or moderate earthquake region. Due to this fact, response modification factor is smaller than suggested load criterion 3.0. So, it needs to decrease wall volume and reduce the global strength and system stiffness for proper ductile behavior matching to domestic load criterion.

1. 서론

현행 내진설계의 규준은 설계된 구조물이 지진에 대하여 비탄성 거동을 보일 것이라는 가정을 전제로 하여 작성된 것이다. 이러한 전제 조건을 근거로 하여 내진설계규준에서는 설계의 대상이 되는 지진에 대하여 지진의 재현 주기를 기준으로 한 지진 위험도를 설정하고, 그 지진에 대하여 일정 수준의 안전도를 만족 시키도록 하여 내진 설계시 안전과 경제성을 만족 시킬수 있도록 하고 있다. 이를 위해 설계지진력을 산정할 때 구조물이 탄성적으로 거동할 경우에 필요한 강도보다 더 낮은 값을 설정하도록 반응수정계수 R을 사용하는 것이다. 반응수정계수는 구조물이 가진 연성능력과 초과강도, 잉여도 및 감쇠를 반영하기 위한 것이지만 현행 규준에서 제시하고 있는 값은 일반적인 구조 시스템을 대상으로 한 경험적인 수치로서, 이론적인 근거가 미흡한 실정이다. ATC-19 보고서에서도 반응수정계수에 대하여 여러 가지 문제점들을 지적하고 있는데, 그 중 중요한 사항을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 반응수정계수를 산정하는 이론 및 실험적 근거가 불충분하다.
- (2) 구조체 별로 한가지 값만을 사용한다.
- (3) 지역적인 특성을 고려할 수 있는 형태로 되어 있지 않다.

따라서, 구조물 고유의 연성능력, 초과강도 및 지역성 등에 대한 합리적인 평가를 위한 연구가 필요할

* 정회원, 전남대학교 건축학과, 석사과정

** 정회원, 전남대학교 건축학과, 조교수

*** 정회원, 전남대학교 건축학과, 교수

것이다. 본 연구에서는 국내 아파트 건물의 일반적인 구조시스템으로 자리잡은 판상형 벽식 구조물을 대상으로 반응수정계수를 추정하고자 한다. 반응 수정계수에 영향을 미치는 구조물의 성능 중 초과강도와 연성능력에 대한 평가를 위해 pushover해석을 통하여 구조물의 능력곡선을 얻어낸 후 ATC-19와 FEMA-273과 ATC-40을 참고로 하여 3차원 판상형 APT 시스템의 연성능력과 초과강도를 고려하였다. FEMA-273과 ATC-40에서 제시된 비선형 정적 해석법들은 모두 지역적인 특성을 고려할 수 있는 형태로 된 것들로, 이를 통해 추정된 반응 수정계수와 ATC-19 보고서에 의한 반응 수정계수를 비교함으로써 지역계수의 영향을 분석하였다. 추정된 반응 수정계수는 연성계수 R_μ 와 강도계수 R_s 의 곱으로 산정된다.

2. 반응수정계수 추정 방법

2.1 해석 모델

해석 모델은 기존의 아파트 평면을 참고로 하여 해석에 적합하도록 단순화하였다. 구조물의 성능에 있어서 주기가 미치는 영향을 고려하기 위하여 대상 구조물의 층수를 달리하여 10층, 15층, 20층인 경우를 고려 하였고, 기존 아파트의 경우 평균적으로 5-10%의 벽량을 갖도록 설계되고 있으므로 이를 참고로 하여 벽량을 6%와 9%로 조정하였다. 그림 1은 해석 모델의 평면도 및 입체도이다.

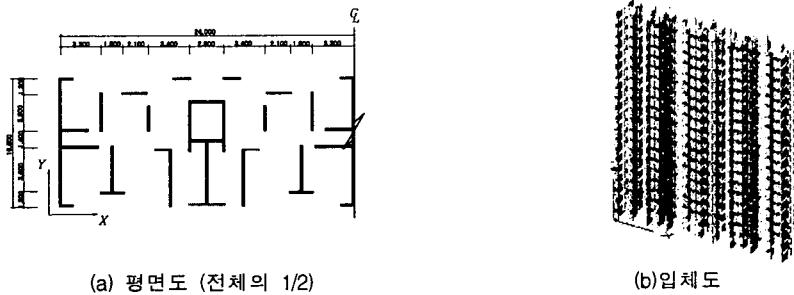


그림 1 해석 모델(벽량-9%, 20층)

Pushover 해석을 위해 neoMax-3D 범용해석 프로그램을 사용하였는데, 이 프로그램은 재료의 비선형 곡선을 bilinear 혹은 multilinear로 표현하여 3차원 해석이 가능하고, 고유치 해석이 가능하므로 모드 기여계수(modal participation factor)와 모드질량계수(modal mass coefficient)를 산정할 수 있다. 재료는 콘크리트 $f_{ck}=210\text{kg/cm}^2$, 벽두께는 20cm로 하였다.

2.2 ATC-19 보고서에 의한 반응 수정계수 추정 방법

ATC-19 보고서에서 정의한 강도계수는 구조물이 한계상태에 도달했을 때의 지붕층 변위에 해당하는 밀면 전단력 V_0 와 설계 지진력 V_d 의 차이로 설명할 수 있으며, 아래의 식 (1)를 통해 산정한다.

$$R_s = \frac{V_0}{V_d} \quad (1)$$

연성계수는 구조물이 비탄성 거동에 의해 탄성한계를 넘어서도 에너지를 흡수하면서 외력에 저항할 수 있는 능력을 의미한다. ATC-19 보고서에서는 구조물의 능력곡선을 bilinear화 하는 과정

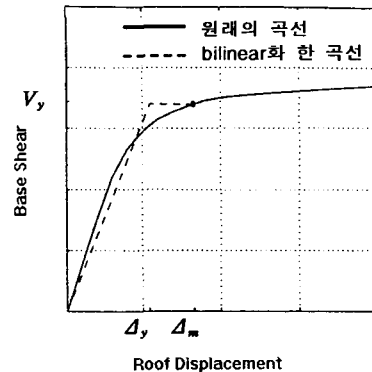


그림 2 연성계수의 산정

을 통해 R_μ 를 산정하는 방법을 소개하고 있다. 그림2에서와 같이 구조물의 연성거동으로 인한 비탄성 변위의 한계를 Δ_m 이라 하고, Δ_m 과 항복점의 변위 의 비를 Δ_y 이용하여 연성계수를 산정하게 되는데, 아래의 식 (2)는 그 중 압반지역인 경우의 것이다.

$$R_\mu = \frac{\mu - 1}{\phi} + 1, \quad \phi = 1 + \frac{1}{10T - \mu T} - \frac{1}{2T} e^{-1.5(\ln T - 0.6)^2} \quad (2)$$

$$\mu = \Delta_m / \Delta_y$$

2.3 지역계수를 고려한 반응수정계수 추정 방법

2.3.1 Capacity Spectrum Method (ATC-40)

2.3.1.1 능력(Capacity) 스펙트럼과 요구(Demand) 응답 스펙트럼

지진하중에 저항하는 구조물의 저항능력은 pushover 해석을 통해 구할 수 있다. 구조물의 저항능력은 각각의 구조부재의 강도나 변형능력에 의해 좌우되므로 콘크리트의 강도와 변형률의 관계로 표현하였다. 지진하중의 분배는 “건축물 하중기준”에 따라 식 (3)과 같이 하였다.

$$F_x = \left(\frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \right) \quad \begin{array}{l} F_x : x\text{층의 층지진하중} \\ w_x, w_i : x, i\text{의 건축물 중량} \\ h_x, h_i : \text{밀면에서부터의 높이} \end{array} \quad \begin{array}{l} T \leq 1.0\text{초} : k=1.0 \\ 1.0\text{초} < T \leq 2.0\text{초} : k=1.5 \\ T > 2.0\text{초} : k=2.0 \end{array} \quad (3)$$

구조물의 해석 결과는 그림 3과 같다. 해석결과, 모든 경우의 결과는 각각 장변방향과 단변방향에 대하여 유사하였다. 따라서 그림 3은 지면의 제약상 대표적인 한 결과(벽량-9%, 20층)만을 보인 것이다.

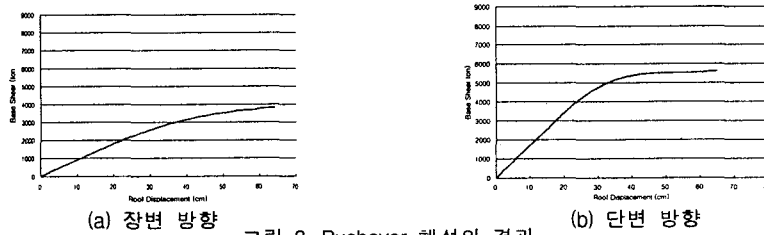


그림 3. Pushover 해석의 결과

그림 4는 요구 응답 스펙트럼이다. 본 연구에서는 지진의 지역성을 고려하기 위하여 강진인 경우로 UBC97에 따라 압반지역, 지진계수 C_A, C_V 0.4인 것과 약진인 경우로 “건축물 하중기준”의 압반지역, 중요도계수 1.5, 지역계수 0.11인 것의 두 가지의 요구 응답 스펙트럼을 사용하였다.

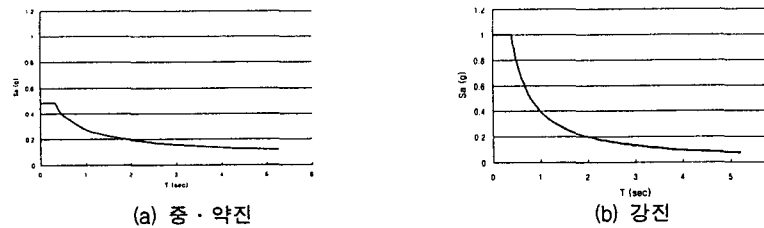


그림 4. 감쇠율 5%의 탄성 응답 스펙트럼

2.3.1.2 성능점(Performance point)

능력곡선과 요구곡선을 그림 5와 같이 하나의 그래프(ADRS : Acceleration-Displacement Response Spectra)로 나타내기 위해 구조물의 고유치 해석 결과와 아래의 식(4)를 이용하면 하중-변위 관계의

그래프를 응답 가속도 S_a 와 응답 변위 S_d 의 그래프로 바꿀 수 있다.

$$PF_1 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (w_i \psi_{i1}) / g \right]}{\left[\sum_{i=1}^N (w_i \psi_{i1}^2) / g \right]}, \quad \alpha_1 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (w_i \psi_{i1}) / g \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^N w_i / g \right] \left[\sum_{i=1}^N (w_i \psi_{i1}^2) / g \right]}, \quad S_a = \frac{V/W}{\alpha_1}, \quad S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \psi_{roof,1}} \quad (4)$$

요구 곡선의 경우 변위와 가속도의 관계가 $S_a = 4\pi^2/T^2 \cdot S_d$ 임을 이용하여 주기와 지진 가속도 관계의 그래프를 S_a 와 S_d 의 그래프로 바꾸어 한 좌표계에 표시할 수 있고, 이 때의 교점이 구조물이 지진시 경험하게 되는 비탄성 변위를 나타낸다.

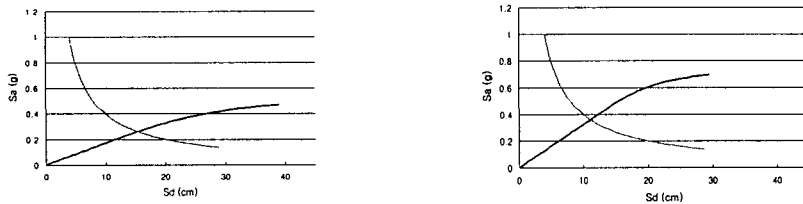


그림 5. ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectra)

그림 5는 벽량이 9%이고, 층수가 20층일 때에 UBC97의 요구 곡선을 적용시킨 것으로, 이 때의 성능점(performance point)은 장변 방향의 경우 스펙트럼의 변위는 15.59cm이고, 실제 변위는 23.48cm이며, 단변 방향의 경우 스펙트럼의 변위는 11.13cm이고, 실제 변위는 16.76cm 이다.

2.3.2 Displacement Coefficient Method (FEMA273)

기존의 연구에서 구조물의 비선형 곡선을 bilinear화 하는데 사용되어온 방법중 하나인 DCM(Displacement Coefficient Method)는 앞 절의 CSM(Capacity Spectrum Method)과는 달리 하중-변위 관계의 그래프를 ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectra)로 전환할 필요가 없지만 기술자의 주관적인 판단이 요구되는 부분이 있다.

그림 6의 K_s 를 산정하는 과정이 그것인데, 여기서 K_s 는 구조물이 항복하기 시작한다고 판단되는 시점에서부터 구조물이 항복하는 동안의 평균 기울기를 나타낸다. K_s 를 결정하면 K_s 에서 원점에 직선을 연결하여 이 직선이 원래의 능력곡선과 만나는 교점이 $0.6 V_y$ 가 되면 이 직선의 기울기가 K_e (유효 횡방향 강성)가 되는 것이다. 본 연구에서 해석의 대상이 된 전단벽 구조물의 경우에는 구조물의 초기 강성이 매우 커서 이와 같은 교점을 찾기 어려우므로 K_i (구조물의 초기 횡방향 강성)와 K_e (유효 횡방향 강성)가 거의 같게 된다. DCM(Displacement Coefficient Method)에서 정의하고 있는 target displacement는 CSM(Capacity Spectrum Method)에서의 성능점(performance point)에 해당하는 것으로 FEMA 273에서 식(5)으로 정의하고 있다. (식(5)의 계수들은 참고문헌 3을 참조하기 바란다.)

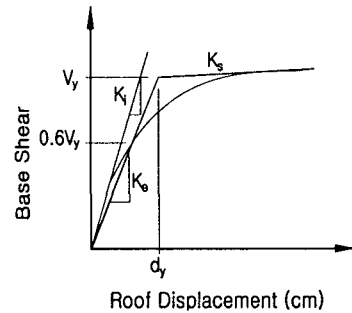


그림 6. Displacement Coefficient Method

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g, \quad T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (5)$$

아래의 표 1은 벽량이 9%이고 20층인 구조물에서 DCM(Displacement Coefficient Method)으로 산정

한 계수 및 target displacement δ_t 이다.

표 1 Target displacement δ_t

	T_i	K_i	K_e	T_e	C_0	C_1	C_2	C_3	S_a	δ_t
20-X	1.58	90.0	88.93	1.60	1.5	1	1.2	1	0.25	28.60cm
20-Y	1.05	170	170	1.05	1.5	1	1.2	1	0.38	18.72cm

3. 결과 분석

3.1 성능점과 Target Displacement

CSM(Capacity Spectrum Method)을 통해 산정한 성능점(performance point)과 DCM(Displacement Coefficient Method)을 통해 산정한 target displacement δ_t 는 모두 해당 지진에 대한 구조물의 비탄성 변위를 나타낸다. 표 2에서는 대상 구조물에 대해서 두 가지 방법을 적용하여 얻은 성능점(performance point)과 target displacement δ_t 를 나타내었다.

표 2 성능점(performance point)과 target displacement δ_t (cm)

		6%						9%					
		10-X	10-Y	15-X	15-Y	20-X	20-Y	10-X	10-Y	15-X	15-Y	20-X	20-Y
중·약진	δ_t	13.74	6.27	17.48	9.68	24.81	13.30	11.29	6.21	17.57	9.68	25.17	13.30
	성능점	7.14	3.19	15.80	7.67	28.86	18.66	2.87	1.9	8.85	5.15	19.42	12.09
강진	δ_t	21.10	11.28	22.57	15.17	28.19	18.72	17.34	11.17	22.69	15.17	28.60	18.72
	성능점	12.30	7.09	18.85	12.81	31.20	21.80	6.50	1.95	13.30	9.39	23.48	16.76

두 경우를 비교한 결과 CSM(Capacity Spectrum Method)의 경우 층수에 따른 변동폭이 매우 심하였고, DCM(Displacement Coefficient Method)의 경우 구조물의 층수가 낮은 경우 일수록 구조물의 성능을 과대평가하고, 구조물의 층수가 높은 경우 일수록 구조물의 성능을 과소평가하는 경향을 보였다.

3.2 반응 수정계수 추정

본 연구에서는 ATC-19 보고서에 소개된 연성계수 산정식을 통해 산정한 반응수정계수를 R 로, FEMA-273과 ATC-40에서 제시된 두 가지 정적 비선형 해석법에 의해 지역적 특성을 고려하여 추정된 반응수정계수를 R' 으로 표기하여 두 가지를 비교 분석하였다. 앞의 2.3 절에서 구조물의 성능을 평가하기 위해 사용된 CSM(Capacity Spectrum Method)과 DCM(Displacement Coefficient Method)은 모두 지역적인 특성을 고려할 수 있는 방법이다. 그 중에서도 CSM(Capacity Spectrum Method)을 사용하는 것이 여러 가지 변수에 따른 차이를 보다 명확하게 보여줄 수 있고, 객관적인 방법이라 생각되지만, 본 연구에서는 R' 과 R 을 비교하기 위한 것이 목적이므로 DCM(Displacement Coefficient Method)에 의한 δ_t 를 기준으로 하여 추정된 R' 만을 기록하였다. 다음의 표 3은 추정된 R' 과 R 을 비교한 표이다.

표 3 반응 수정계수의 추정치
(a) ATC-19 보고서에 의한 반응 수정계수

	6%						9%					
	10-X	10-Y	15-X	15-Y	20-X	20-Y	10-X	10-Y	15-X	15-Y	20-X	20-Y
R_c	3.10	2.61	2.22	2.54	1.59	2.19	2.22	2.21	1.81	1.94	1.58	1.60
R_μ	1.88	1.53	1.40	1.35	1.33	1.53	1.42	1.47	1.72	1.44	1.59	1.48
R	5.82	4.00	3.11	3.44	2.12	3.34	3.15	3.26	3.12	2.81	2.51	2.38

(b) 지역계수를 고려한 반응 수정계수

		6%						9%					
		10-X	10-Y	15-X	15-Y	20-X	20-Y	10-X	10-Y	15-X	15-Y	20-X	20-Y
중·약진	R_s	3.10	2.61	2.22	2.54	1.59	2.19	2.22	2.21	1.81	1.94	1.58	1.60
	R_{μ}'	0.89	0.73	0.37	0.50	0.34	0.28	0.98	0.71	0.66	0.50	0.56	0.30
	R'	2.75	1.92	0.83	1.27	0.54	0.61	2.17	1.56	1.20	0.98	0.88	0.49
강진	R_s	3.10	2.61	2.22	2.54	1.59	2.19	2.22	2.21	1.81	1.94	1.58	1.60
	R_{μ}'	1.46	1.30	0.57	0.86	0.42	0.50	1.60	1.25	0.95	0.87	0.68	0.53
	R'	4.53	3.39	1.27	2.19	0.68	1.08	3.55	2.77	1.72	1.68	1.07	0.85

FEMA-273과 ATC-40에서 제시된 두 가지 정적 비선형 해석법에 의해 지역적 특성을 고려하여 전단벽 구조물의 반응 수정계수를 산정한 결과 국내에서와 같은 중·약진 지역의 경우, 구조물의 연성능력에 관련된 R_{μ} 가 작게 평가되어 반응 수정계수가 현행 하중 기준에서 제시된 값인 3.0보다 작은 값을 나타냈다. 이것은 반응 수정계수가 강진지역에서 구조물이 연성거동을 하는 것을 기본 개념으로 하여 도출된 값으로 지역계수에 대한 고려가 없었으며, 특히 판상형 벽식 아파트 구조의 경우 단변방향의 벽량이 과다하여 시스템의 강성과 항복강도가 매우 큰 값을 보이므로 이에 대한 반응 수정계수 3.0에 부합되는 적절한 연성거동이 발휘되지 않기 때문으로 보인다. 따라서 하중 기준에 부합되는 반응 수정계수 값을 보이기 위해서는 기존 시스템의 벽량을 줄여 전체 시스템의 강성과 강도를 저감시켜야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 반응 수정계수에 대한 지역계수의 영향을 평가하기 위하여 지역적인 특성을 반영할 수 있는 두 가지 방법(DCM과 CSM)에 대하여 중·약진을 적용시켰을 때와 강진을 적용시켰을 때로 나누어 비교하고, 이를 통해 추정된 반응 수정계수와 기존의 방법(ATC-19)을 통해 추정된 반응 수정계수를 비교 분석하였다. 분석 결과, 중·약진 지역의 경우에는 지역계수를 고려하지 않은 경우에 비하여 구조물의 연성능력에 관련된 R_{μ} 가 약 40%정도 작게 산정됨을 알 수 있었다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) FEMA-273과 ATC-40에서 제시된 두 가지 정적 비선형 해석법 모두 지역계수의 영향을 반영하고 있지만 이들 중 CSM을 사용하는 것이 지역계수에 의한 차이를 보다 명확하게 보여주었다.
- (2) 위 실험 결과로 보아 지진에 대한 벽식 구조물의 저항 능력이 상당히 크다고 할 수 있다.
- (3) 본 연구 결과 반응 수정계수는 지역계수의 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있다. 따라서, 우리나라와 같은 중·약진 지역의 경우, 하중 기준에 부합되는 반응 수정계수 값을 보이기 위해서는 기존 시스템의 벽량을 줄여 전체 시스템의 강성과 강도를 저감시켜야 할 것으로 보이며, 이에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

1. ATC(1995), "Structural Response Modification Factors", ATC-19 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California.
2. ATC (1996), "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings", ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California.
3. FEMA (1997), "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings", FEMA 273, October, Washington, D.C.:Federal Emergency Management Agency.
4. 대한건축학회, "건축물 하중기준 및 해설", 대한건축학회, 2000.