

구조물의 성능점 예측을 위한 대안

Alternative Approach to Prediction of Structural Performance Points

김 장 훈*
Kim, Jang Hoon

좌 동 훈**
Jwa, Dong Hoon

ABSTRACT

The AASHTO seismic base isolation design approach has been reviewed and modified to fit the nonlinear static analysis procedure for reinforced concrete structures in a simpler way. Such an adaptation may be possible for the fact that the reinforced concrete under development of damage due to earthquake loading keeps softening to result in period shifting toward longer side. The validity of the proposed approach was verified by applying it to the examples presented in the current state-of-the-practice approach.

1. 서 론

과거로부터 현재까지의 설계기준은 안전하고 경제적인 구조물의 설계를 위하여 강도감소계수에 의하여 평가절하된 보유능력(underestimated capacity)이 하중계수에 의하여 평가절상된 요구량(overestimated demand)을 초과하도록 구조부재의 재료 및 단면을 조정하는 과정을 규정하고 있다. 이렇게 하여 설계된 구조물은 부재별로 적절한 안전계수를 확보할 수 있었지만, 극한하중하에서 구조물의 거동에 대한 언급이 없으므로 이러한 설계기준규정들은 블랙박스와 같은 존재라고 할 수 있다. 그러므로 구조물의 거동예측을 위하여는 설계된 구조물을 예상되는 지진에 대하여 해석하는 별도의 단계가 필요하게 된다.

90년대 초부터 등장한 변위에 기초한 설계법이나 그 이후 소개된 성능에 기초한 설계법은 거동예측을 위한 해석과정을 설계단계에 포함시킨 방법으로 거동요구량을 구조물의 힘-변위 관계 보유능력곡선과 응답스펙트럼을 이용하여 계산한다. 즉 계산되거나 가정된 초기 변위요구량에 따라

* 정회원 · 아주대학교 환경도시공학부 부교수

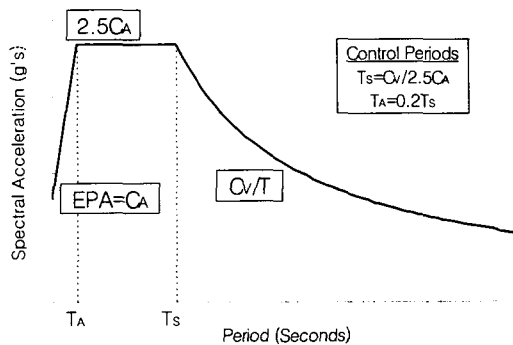
** 아주대학교 건축학과 석사과정

이력거동에 의한 에너지 소산량이 계산되고, 에너지 소산량에 의하여 등가감쇠비가 정하여지며, 이는 응답스펙트럼상의 변위요구량의 값을 변화시킴으로서 각 변수의 영향을 추적하는 반복계산 과정을 통하여 최종적으로 수렴하게 되는 최대 변위요구량을 성능점(performance point)으로 정하게 된다. 이러한 새로운 개념의 설계법은 AASHTO¹⁾, UBC²⁾, NEHRP³⁾등의 면진격리 시스템(seismic base isolation)을 위한 설계법에 소개되었으며, ATC-40⁴⁾의 철근콘크리트 구조물 내진성능평가 및 내진보강에 사용되었다. 여기서 중요한 것은 성능점을 구하는 것 자체가 목적이 아니라 구하여진 성능점에서 구조물의 상태를 파악하여 필요에 따라 적절히 보강조치를 취하여야 하는 것이다.

그러나 ATC-40에서도 언급되었듯이 성능점을 구하는 작업이 상당히 복잡하여 실무엔지니어들이 사용하기에 편안하지 않은 면이 있다. 그러므로 본 논문에서는 AASHTO에 제시된 면진격리 베어링 설계법을 적절히 개선하여 철근콘크리트 구조물의 성능점을 보다 간편하게 구할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 탄성응답스펙트럼

비탄성·비선형거동을 고려하여야 하는 구조물을 등가감쇠비를 사용하여 응답스펙트럼에 의하여 해석하는 방법은 복잡한 해석과정을 거치지 않는 편리한 동적해석 방법으로서 앞서 언급한 여러 문헌에 제시되어 있다. 이 때 사용되는 응답스펙트럼은 ATC-40에 제시된 방법대로 지역특성에 따른 지진계수 C_A 및 C_V 를 이용하여 Fig.1과 같이 구할 수 있다. C_A 는 유효최대가속도(effective



peak acceleration, EPA)로서 $2.5C_A$ 가 가속도 지배구간에서 5% 감쇠비의 단주기 구조시스템의 평균최대응답이 되도록 정하여진다. C_V 는 5% 감쇠비 1초주기 시스템의 평균최대응답이며, Fig. 1에서 보듯이 C_V/T 는 속도지배구간인 중·장기 구조시스템의 가속도 응답이 된다.

Fig 1. 5% damped elastic response spectrum⁴⁾

3. AASHTO 면진격리 베어링 설계법¹⁾

등가정적 지진력은

$$F = C_s W \quad (1)$$

여기서 C_s 는 무차원화된 탄성지진응답계수로서 밀면전단력계수와 같으며, W 는 구조물의 무게이다. C_s 는 다음과 같이 구한다.

$$C_s = \frac{\sum k_{eff} \times d_i}{W} \quad (2)$$

여기서 $\sum k_{eff}$ 는 면진베어링의 유효강성의 합을 의미하고, d_i 는 면진베어링의 최대 수평변위이다. 면진베어링의 유효강성 k_{eff} 는 매번의 반복하중에 의한 이력거동 힘-변위 관계곡선으로부터 다음과 같이 구한다.

$$k_{eff} = \frac{V_{max} - V_{min}}{\Delta_{max} - \Delta_{min}} \quad (3)$$

여기서 V_{max} , V_{min} 은 최대 및 최소 전단력이고, Δ_{max} , Δ_{min} 은 그에 상응하는 최대 및 최소변위이다. 또한 중장기 주기의 면진베어링이 설치된 구조시스템의 지진응답계수는 다음과 같은 근사치로 나타낼 수 있다.

$$C_s = \frac{A S_i}{T} \quad (4)$$

여기서 A 는 지역계수이고, S_i 는 지반계수이다. 등가감쇠비의 영향을 고려하면,

$$C_s = \frac{A S_i}{T B} \quad (5)$$

Table 1. Comparison of damping coefficient

Equivalent damping ratio $\zeta(\%)$	Damping coefficient								
	AASHTO ¹⁾	Newmark and Hall ⁵⁾		ATC-40 ⁴⁾					
		Behavior Type A	Behavior Type B	Behavior Type C		Behavior Type C		Behavior Type C	
B	$B(1/\alpha_A)$	$B(1/\alpha_V)$	B_S	B_L	B_S	B_L	B_S	B_L	B_L
2	0.80	1.35	1.27	-	-	-	-	-	-
5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	1.20	0.73	0.80	1.28	1.20	1.29	1.20	1.28	1.20
20	1.50	0.46	0.60	1.82	1.52	1.78	1.52	1.79	1.49
30	1.70	-	-	2.36	1.80	2.33	1.82	-	-

여기서 B 는 감쇠계수(damping coefficient)로서 감쇠비 $\zeta=0.05$ 일 때 $B=1$ 이 되고, 여러 감쇠비에 대하여 Table 1에 예시된 바와 같다. 이를 Newmark and Hall⁵⁾이 제안한 15.9% 초과 확률의 동적증폭계수(dynamic amplification factor)를 $\zeta=0.05$ 의 것에 대하여 무차원화한 값에 비교하면 $\zeta=0.1$ 까지의 낮은 감쇠비하에서는 서로의 값이 근사함을 알 수 있다. 아울러 ATC-40에 제시된 $B_L(1/S R_V)$ 과는 전 감쇠구간에 걸쳐 유사함을 알 수 있다. AASHTO 면진베어링 설계법¹⁾에서는 속도 지배구간에서의 감쇠계수 B 만을 보여주고 있는데 이는 면진 베어링이 설치된 구조시스템이 중·장주기화 하였기 때문이다. 이는 마치 철근콘크리트 구조물이 지진에 의한 횡방향 반복거동을 하게 되면 콘크리트가 손상되고 철근이 항복하여 구조물의 유효주기가 길어지게 되는 경우와 같다고 할 수 있다. 면진베어링의 등가감쇠비는 다음과 같이 구한다.

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \times \frac{Total Area}{\Sigma k_{eff} \cdot d_i^2} \quad (6)$$

여기서 $Total Area$ 는 모든 면진베어링 이력거동 힘-변위 곡선에 둘러싸인 면적의 합이다. 최대유사속도응답 S_A 와 최대변위응답 S_D 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$S_A = \omega^2 S_D = C_s \cdot g \quad (7)$$

여기서 $\omega = 2\pi/T$. Eq. (5)와 (7)로부터 최대변위응답은 다음과 같이 구한다.

$$S_D = d_i = \frac{250 A S_i T_e}{B} \quad (mm) \quad (8)$$

여기서

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{W}{\Sigma k_{eff} g}} \quad (9)$$

이상의 식들을 이용하여 면진베어링을 설계하려면 우선 적절한 최대변위를 가정한 후, Eq. (3), (6), (9) 그리고 Table 1을 이용하여 힘-변위 관계 보유능력곡선으로부터 가정한 변위에 따른 면진베어링의 유효강성 k_{eff} 와 등가감쇠비 ζ 및 감쇠계수 B 를 구한다. Eq. (8)을 이용하여 최대변위 d_i 를 구한 후 가정한 최대변위와 비교하여 그 차이가 충분히 작으면 구하여진 d_i 가 최종적인 최대변위가 된다. 만일 최대변위를 줄이거나 늘리고자 하면 면진베어링의 고무판 두께나 수를 조절하여 새로운 힘-변위 관계 보유능력곡선을 정한 후, 다시 적절한 최대변위를 가정하여 처음부터 다시 해석과정을 수행한다.

4. 성능점 계산에의 적용

Fig.1의 탄성응답스펙트럼을 이용하여 지진응답계수를 구하면

$$C_s = \frac{C_V}{T} \leq 2.5C_A \quad (10)$$

가 되고, 등가감쇠비의 영향을 고려하면

$$C_s = \frac{C_V}{TB} \quad (11)$$

가 된다. 여기서 B 는 Table 1의 AASHTO 값을 사용한다. 등가감쇠비간 감쇠계수는 직선보간한다.

등가감쇠비는 ATC-40에 따라 Fig. 2와 같이 정의되며 다음과 같이 구한다.

$$\zeta_e = \frac{0.637 k (a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} + 0.05 \quad (12)$$

여기서 k 는 등가감쇠 수정계수로서 철근콘크리트 구조의 불완전한 이력거동을 반영한다. ATC-40에서는 k 를 힘-변위 이력곡선의 면적에 따라 정의하였지만, 지진하중의 반복적 특성을 고려치 못

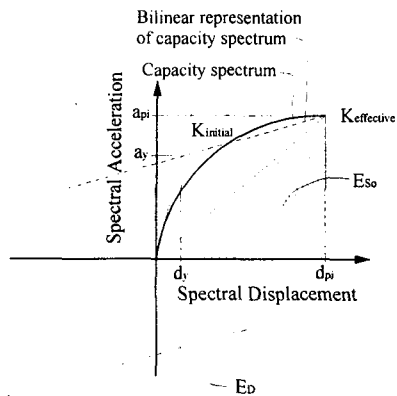


Fig 2. Derivation of damping for spectral reduction

하고 있으므로 에너지 흡수효율에 의한 등가감쇠 수정계수의 사용이 제기된다⁶⁾.

최대 유사가속도 응답과 최대변위응답과의 관계에 Eq. (11)을 고려하면 Eq. (8)은 다음과 같이 된다.

$$d_{pi} = \frac{250 C_V T_e}{B} \quad (13)$$

여기서

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{eff} g}} \quad (14)$$

이상의 식들을 이용하여 성능점을 구하는 순서를 정리하면 다음과 같다. 단 구조물의 힘-변위 관계 보유능력곡선은 이미 정의된 것으로 가정한다.

Step 1 : 요구되는 지진수준을 결정하고 이에 따른 C_A 와 C_V 를 정한다.

Step 2 : 적절한 성능점 d_{pi} 를 가정한다.

Step 3 : Eq. (3)에 따라 k_{eff} 를, Eq. (14)에 따라 T_e 를, Eq. (12)에 따라 등가감쇠비를 계산하고, Table 1로부터 감쇠계수를 구한다.

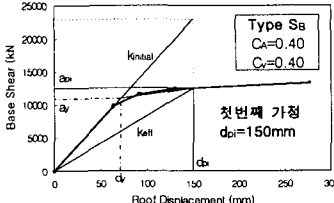
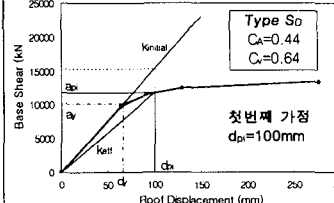
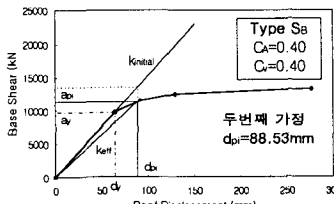
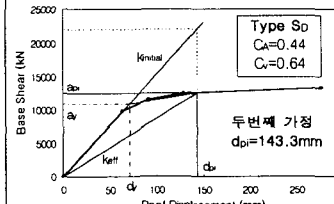
Step 4 : Eq. (13)에 따라 최대변위를 계산한다. 계산된 최대변위와 d_{pi} 간의 차이가 충분히 작으면 d_{pi} 는 성능점이 되고 해석은 종료된다. 그렇지 않으면 계산된 최대변위를 d_{pi} 로 놓은 후 Step 3으로 돌아가고, 계산된 최대변위와 d_{pi} 간의 차이가 충분히 작을 때까지 Step 3~Step 4의 과정을 반복한다.

5. 적용예제

본 논문에서 제안된 성능점 계산과정의 용이함을 보이기 위하여 적용되는 예제 건물은 ATC-40 Chap. 8에 삽입된 예제를 사용하였다. ATC-40에서 주어진 예제 건물은 7층 철근콘크리트 골조건물로서 높이(H)=20,116mm, 자중(W)=46,903kN이다. 여기서 편의상 등가감쇠 수정계수는 $k=1$ 로 가정하였으며, Step 1에 해당되는 지반형태와 C_A , C_V 값은 ATC-40에 주어진 값을 사용하기로 한다. 예제건물의 보유능력곡선 및 성능점 구하는 과정은 Table 2와 같다. Table 2에서 보

뜻이 두가지의 지반형태에 따른 성능점을 구하는 방법을 순서대로 정리한 것이다. 본 논문에서 제시하는 성능점 구하는 순서로 성능점을 구하였을 경우 ATC-40의 값과 거의 일치함을 알 수 있고, ATC-40의 방법보다 더욱 더 간단하게 성능점을 구할 수 있다.

Table 2. Example of performance point calculation procedure

	Type S_B	Type S_D
Step 1	$C_A=0.40, C_V=0.40$	$C_A=0.44, C_V=0.64$
Step 2	$d_{pi}=150\text{mm}$ 가정	$d_{pi}=100\text{mm}$ 가정
Step 3	$k_{eff}=83.33$ $T_e=1.505$ $\zeta_e=31.33\%$ $B \approx 1.7$	$k_{eff}=120$ $T_e=1.254$ $\zeta_e=16.678\%$ $B \approx 1.4$
Step 4	$d_{pi}=88.53\text{mm}$	$d_{pi}=143.3\text{mm}$
No Good	$(d_{pi})_2=88.53\text{mm} \neq$ $(d_{pi})_1=150\text{mm} \Rightarrow N.G$	$(d_{pi})_2=143.3\text{mm} \neq$ $(d_{pi})_1=100\text{mm} \Rightarrow N.G$
		
Return to Step 2	$d_{pi}=88.53\text{mm}$ 재가정	$d_{pi}=143.3\text{mm}$ 재가정
Step 3	$k_{eff}=127.78$ $T_e=1.215$ $\zeta_e=13.23\%$ $B \approx 1.3$	$k_{eff}=88.28$ $T_e=1.462$ $\zeta_e=27.74\%$ $B \approx 1.65$
Step 4	$d_{pi}=93.46\text{mm}$	$d_{pi}=141.8\text{mm}$
O.K.	$(d_{pi})_2=93.46\text{mm} \approx$ $(d_{pi})_1=88.53\text{mm} \Rightarrow O.K.$	$(d_{pi})_2=141.8\text{mm} \approx$ $(d_{pi})_1=143.3\text{mm} \Rightarrow O.K.$
		
ATC-40의 방법에 의한 성능점	$d_i=86.36\text{mm}$	$d_i=149.86\text{mm}$

6. 결론

본 논문에서는 구조물의 거동예측을 위한 최대변위요구량인 성능점을 AASHTO¹⁾에 제시된 면진격리 베어링 설계법을 근거로 보다 간단하면서 편리한 방법을 제시하였으며, 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 주어진 등가감쇠비에 대한 감쇠계수는 속도지배구간인 중·장주기 구간에서 AASHTO와 ATC-40에서 제시한 값 사이에 등가감쇠비 0.3까지 큰 차이가 없었으므로 해석의 편의를 위하여 AASHTO의 값을 사용할 수 있다고 사료된다. 단 ATC-40에서 거동유형간 구분되는 감쇠계수의 차에 의한 영향을 분석하는 후속 연구가 수행되어야 하겠다.
- (2) 적용예제를 통하여 AASHTO 면진베어링 설계법을 개선하여 얻은 성능점 계산방법은 ATC-40에 제시된 방법에 비하여 간단명료한 방법이면서 유사한 성능점을 얻을 수 있음을 보여주었다. 단 실제 철근콘크리트 구조물의 해석을 위하여는 에너지 흡수효율에 근거한 등가감쇠비 감소계수를 사용하여야 함이 지적되었다.

감사의 글

본 연구는 1999년 한국과학재단 특정기초연구비 지원에 의하여 수행되었음을 밝히며, 이에 감사드린다.

참고문헌

1. AASHTO, *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., U.S.A., 1991.
2. UBC, *Uniform Building Code*, International Conference of Building Officials, California, U.S.A., 1994.
3. NEHRP, *Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings:1994 Edition*, FEMA 222A and 223A, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., U.S.A.
4. ATC-40, *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*, Applied Technology Council, 1996.
5. Newmark, N. M. and Hall, W. J., "Earthquake Spectra and Design", Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, Calif., 1982.
6. 김장훈, 좌동훈, "에너지 흡수효율에 의한 철근콘크리트 구조물의 감쇠비 수정계수 결정", 콘크리트학회논문집, 2002년 11월.