

직접변위설계법을 이용한 건축물의 지진응답 산정 Seismic performance evaluation of a building structure using direct displacement-based design method

김진구* 방성혁**
Kim, Jinkoo Bang, Sunghyuk

ABSTRACT

In this study a procedure for evaluation of performance point using direct displacement-based design method was developed to enhance the applicability of the method. Parametric study has been performed for the natural period of the structure, yield strength, and the stiffness after the first yield. The proposed method was also applied to a 10-story steel frame. To verify the accuracy of the result, the results from capacity spectrum analysis and time history analysis were compared. The results of the proposed method turned out to match well with the results of capacity spectrum method and the time history analysis.

1. 서 론

성능에 기초한 내진설계(performance based seismic design)는 건물의 사용 연한 동안 발생할 수 있는 지진 하중에 대하여 목표로 하는 성능수준을 만족하도록 설계하는 것을 기본 개념으로 한다. 이러한 내진설계 개념에서 변위는 구조부재와 비구조부재의 손상정도를 직접적으로 판단할 수 있는 지표로 사용될 수 있기 때문에 최근 주어진 목표변위 이내로 응답이 제어되도록 설계하는 직접변위설계법(direct displacement-based design, 이하 DBD)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 기존의 강도에 근거한 설계법에 수반되는 부정확한 고유주기와 반응수정계수의 가정 과정을 거치지 않으므로 보다 합리적인 설계 방안으로 간주되고 있다. 이러한 DBD는 Shibata and Sozen⁽¹⁾의 *Substitute structure method*와 Jennings⁽³⁾, Iwan and Gate⁽²⁾의 *secant stiffness method*에 근거하여 비탄성 거동을 탄성거동으로 치환하며, 이러한 이론을 바탕으로 Priestley⁽⁴⁾ 등이 체계화하였다. 또한 최근 Chopra and Goel⁽¹⁰⁾은 비탄성 스펙트럼을 사용하여 탄성스펙트럼을 사용함으로써 발생하는 응답오차에 대하여 고찰하였으며, Medhekar and Kennedy⁽⁵⁾는 다자유도계 구조물에 대한 적용방법에 관하여 연구하였다. 한편 ATC-40⁽⁶⁾, FEMA-273⁽⁸⁾, 1999 SEAOC Blue Book⁽⁹⁾등에서는 성능에 기초한 내진설계 방법론의 하나로써 DBD를 소개하고 있다. 특히 SEAOC Blue Book에서는 성능에 기초한 내진설계방법으로 추천하고 있으며, 정적 비탄성 해석을 이용하여 설계된 건물의 내진성능을 평가하도록 권고하고 있다. 즉 DBD는 신축건물의 설계방법으로 개발되었다고 할 수 있다. 비록 DBD는 대표적인 정적 비탄성 해석법인 능력스펙트럼법(capacity spectrum method, 이하 CSM)과 근본적으로는 같은 방법이라 할 수 있지만, DBD는 변위응답 스펙트럼을 이용하는 설계방법인 반면, CSM은 가속도-변위 스펙트럼을 이용하는 해석방법이다. 따라서 설계 및 응답 평가단계에서 각각 다른 방법을 적용하는 것은 번거롭고 혼란스러울 수 있다. 따라서 본 연구에서는 DBD의 기본 개념을 이용하여 주어진 지진하중에 대한 구조물의 응답

* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 조교수

** 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 석사과정

을 구할 수 있는 해석방법을 개발하였으며, CSM 및 시간이력 해석결과와 비교하였다.

2. DBD(직접변위설계법)의 개요

그림 1(a)와 같은 비탄성 SDF시스템의 거동을 그림 1(b)와 같이 이선형 이력모델로 가정할 때, 기존의 연구나 보고서등에서 제시하고 있는 DBD의 일반적인 절차는 다음과 같다.^(9,10)

1. 구조물의 항복변위 u_y 및 변형능력을 고려한 최대변위 u_m 를 가정하고 설계 연성도 μ 를 구한다.

$$\mu = u_m / u_y \quad (1)$$

2. 설계 연성도로부터 등가 감쇠비 (equivalent damping) ζ_{eq} 를 구한다. 등가 감쇠비는 구조물의 이력거동에 의해 소산되는 에너지로부터 다음과 같이 구할 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$\zeta_{eq} = \frac{2(\mu-1)(1-\alpha)}{\pi\mu(1+\alpha\mu-\alpha)} \quad (2)$$

여기서 α 는 항복 후 강성비이다. 또한 등가의 선형모델의 유효감쇠비 (effective damping)는 다음과 같다.

$$\zeta_{eff} = \zeta + \alpha\zeta_{eq} \quad (3)$$

여기서 ζ 는 구조물 자체의 감쇠비로 일반적으로 5%를 적용한다. 또한 실제 구조물의 이력거동은 강도저하, 강성저하, 핀칭 효과 등으로 인해 이상적인 이력거동을 나타내지 못하므로, 감쇠조정계수(damping modification factor, α)를 사용하여 유효감쇠비를 조정할 수 있다. 본 연구에서는 완전한 이선형 모델을 가정하였으므로 $\alpha=1$ 로 설정하였다.

3. 유효감쇠비를 이용하여 주어진 지반진동 수준에 해당하는 변위 응답스펙트럼을 작성하고, 최대 변위 u_m 에 해당하는 유효주기 T_{eff} 를 읽는다.
4. 유효주기를 이용하여 다음 식으로부터 강성 (secant stiffness) K_{sec} 를 구한다.

$$K_{sec} = \frac{4\pi^2}{T_{eff}^2} m \quad (4)$$

여기서 m 은 구조물의 질량이다.

5. 요구되는 유효탄성강성 (effective elastic stiffness) K_e 를 다음 식으로부터 구한다.⁽⁹⁾

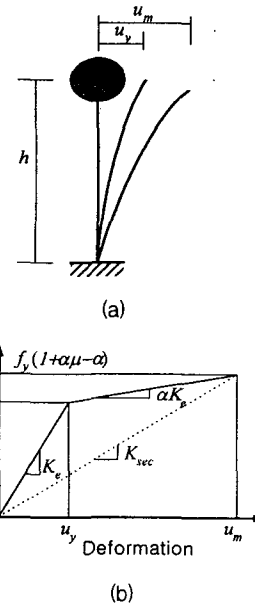


그림 1. SDF system과 이선형 이력곡선

$$K_e = \frac{\mu}{\alpha\mu - \alpha + 1} K_{sec} \quad (5)$$

6. 요구되는 항복강도 f_y 를 다음 식으로부터 구한다.

$$f_y = u_y K_e = \frac{u_y u_m}{(1 + \alpha\mu - \alpha)} K_{sec} \quad (6)$$

7. 요구되는 항복강도를 갖도록 부재를 선택하고, 유효탄성강성 K_e 와 항복변위를 구한다.

$$u_y = \frac{f_y}{K_e} \quad (7)$$

8. 초기에 가정한 항복변위와 비교하고, 수립된 결과를 얻을 때까지 이와 같은 과정을 반복한다.

3. DBD를 이용한 변위응답 산정

본 연구에서는 제안된 해석방법은 기존의 DBD 방법의 절차인 목표 변위와 변위 스펙트럼을 이용하여 구한 변위와의 오차를 줄이기 위한 반복과정을 따르면서, 그 절차를 조정함으로써 기존 건물의 지진응답을 구할 수 있도록 한 것이다.

3.1 응답산정 절차

본 논문에서 제안한 해석방법은 2절에서 기술한 DBD의 과정을 역으로 진행하며 다음과 같은 절차를 따른다.

1. 응답을 구하고자하는 구조물의 능력곡선 (그림 1(b))으로부터 유효탄성강성 K_e , 탄성 고유주기 T_e , 항복 하중 f_y , 항복변위 u_y , 항복후 강성비 α 등을 결정한다.
2. 구하고자 하는 변위응답 u_m 을 임의로 가정하고 식 (1)로부터 연성도를 구한다. 본 논문에서는 성능목표에 해당하는 값을 초기 값으로 사용하였다.
3. 그림 1(b) 또는 식 (5)으로부터 최대 변위에서의 유효강성 K_{sec} 를 구하고, 유효 주기 T_{eff} 를 식 (4)에서 구한다.
4. 2단계에서 구한 연성도 및 식 (2)와 (3)을 이용하여 유효감쇠비 ζ_{eff} 를 결정한다.
5. 유효감쇠비를 이용하여 주어진 지진하중의 변위 스펙트럼을 작성하고, 유효주기 T_{eff} 에 해당하는 변위 응답을 구한다.
6. 산정된 변위와 초기에 가정한 변위의 차가 허용오차를 초과할 때, 새로 산정된 변위응답을 이용하여 2단계에서부터 다시 진행한다.

이러한 절차는 기존의 변위설계법이 목표 변위에 해당하는 유효주기 T_{eff} 를 변위 스펙트럼에서 구하는 것과 달리, 초기에 가정된 최대 변위에 해당하는 유효주기를 구조물의 힘과 변위 관계에서 구하고, 변위 스펙트럼에서 역으로 최대 변위 응답을 구한다는 점에서 차이가 있다.

이와같이 DBD를 이용한 내진성능 평가 방법은 모든 과정이 능력곡선과 변위 스펙트럼을 이용하여 진행되므로, 요구스펙트럼과 능력곡선을 ADRS (acceleration-displacement response spectrum) 형식으로 변환할 필요가 없다는 점에서 CSM 보다 더욱 간단하다는 장점이 있다.

3.2 예제 해석

위에서 기술한 해석방법의 타당성을 검증하기 위하여 그림 1(a)와 같은 단자구조물의 특성을 다음과 같이 가정하고 해석을 수행하였다.

항복응력(σ_y)=2289.7 kgf/cm², 높이(h)=400 cm,
 단면2차모멘트(I)=9008 cm⁴, 단면계수(Z)=1201.6 cm³,
 탄성계수(E)=2.04×10⁶ kgf/cm²

1. 다음 식으로부터 $K_e=860.9$ kgf/cm, $f_y=343$ 9.16 kgf를 구한다. 이때 $u_y=3.995$ cm를 얻는다.

$$K_e = \frac{3EI}{h^3}, f_y = \frac{2Z\sigma_y}{h} \quad (8)$$

- 붕괴방지수준의 층간변위 한계값인 2.5%를 적용하여 목표 변위 10 cm 및 연성도 $\mu=2.503$ 을 얻는다.
- 식 (4)와 (5)로부터 $K_{sec}=369.76$ kgf/cm, $T_{eq}=0.763$ 초를 얻는다.
- 식 (2)와 (3)으로부터 $\zeta_{eff}=0.3878$ 을 구한다
- 내진설계연구II⁽¹²⁾에서 재현주기 2400년 지진의 S_E 지반에서 붕괴방지수준을 검토하기 위한 지진 ($C_a=0.44g$, $C_v=0.77g$)을 결정하고, 감쇠비 38.78%에 해당되는 변위 스펙트럼을 그림 2와 같이 작성한다. 스펙트럼으로부터 등가의 주기에 해당하는 변위 5.45 cm를 읽는다.
- 최대 변위 $u_m=5.45$ cm를 이용하여 2단계부터 반복한다.

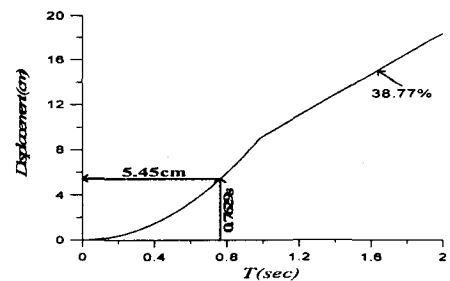


그림 2 변위 스펙트럼 (Ca=0.4, Cv =0.74)

표 1 예제구조물의 성능점 산정 과정

No	u_m	μ	ζ_{eff}	K_{sec}	T_{eq}	u_m
1	10	2.50	0.39	369.77	0.76	5.45
2	5.45	1.36	0.21	642.53	0.58	4.90
3	4.9	1.22	0.16	709.82	0.55	5.16
4	5.16	1.29	0.18	676.59	0.56	5.06
5	5.06	1.26	0.18	688.74	0.56	5.08
6	5.08	1.27	0.18	688.74	0.56	5.08

결국 이 구조물은 6번의 반복과정을 거쳐 최종변위 $u_m=5.08$, $\mu=1.272$ 에 도달하며, 이러한 과정은 표 1에 나타나 있다.

4. 변수분석

4.1 예제구조물

본 논문에서 사용한 예제 구조물은 1층의 횡방향 자유도만 가진 단자유도계이며, 그림1(b)와 같이 이선형 이력특성을 가진다. 각 구조물은 다음과 같이 분류된다.

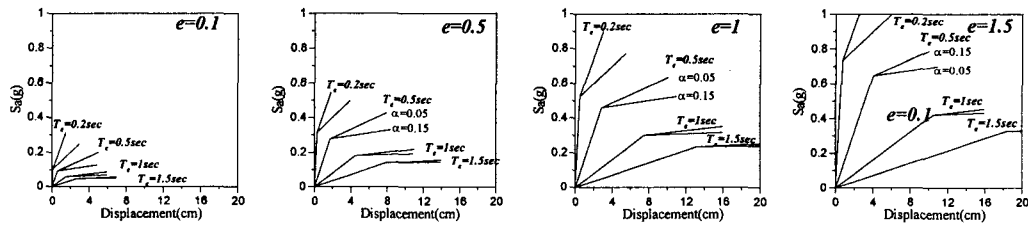


그림3.예제구조물의 성능곡선

- (1) 구조물의 탄성주기(T_e) : 0.2초, 0.5초, 1.0초, 1.7초
- (2) 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도비(e) : 각 주기의 구조물에 대하여 0.1, 0.3, 0.5, 0.7
- (3) 항복 후 강성비(α) : 각 구조물에 대하여 0.05, 0.15

4.2 지진하중

본 논문에서는 해석을 위하여 10개 지반 가속도 기록을 사용하였다. 사용된 지진 하중은 ATC-40에서 제시하고 있으며 S_D 지반(단단한 토사지반)에서 계측된 지진기록으로서 규모 6.5이상, 최대지반가속도가 0.2g 이상이다. 그림 4는 사용된 지진성분의 10% 감쇠비에 대한 응답스펙트럼을 나타낸 것이다.

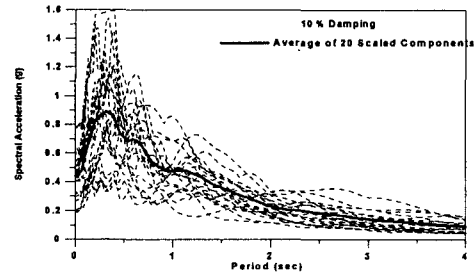


그림 4. 사용된 지진가속도의 응답스펙트럼

4.3 CSM에 의한 성능점 산정

본 논문에서는 제안된 해석방법의 타당성을 검증하기 위하여 CSM으로 구한 결과와 비교하였다. CSM은 능력곡선과 작용하는 지진에 대한 요구스펙트럼의 교차점에서 구조물의 비탄성 응답을 구한다. 구조물의 능력은 비선형 정적 해석에 의한 최상층의 횡변위(Δ_R)와 밀면전단력(V)으로 표현되는데 능력곡선을 요구스펙트럼과 직접 비교하기 위하여 식 (9)에 의하여 Δ_R 과 V 의 능력곡선을 응답가속도(S_a)와 응답변위(S_d)의 능력스펙트럼으로 변환하게 된다.

$$S_a = \frac{V}{M^*} \quad S_d = \frac{\Delta_R}{\Gamma \phi_R} \quad (9)$$

본 논문에서는 유효모드질량(M^*)을 식 (10)의 모드 참여계수 및 고차모드의 영향을 고려한 식 (11)의 등가 고유모드 형상계수($\bar{\phi}_i$)를 이용하여 식 (12)와 같이 구하였다. 유효주기(T_{eff})는 식(13)과 같이 구할 수 있다.

$$\Gamma_j = \frac{[\sum_{i=1}^N m_i \phi_{ij}]}{[\sum_{i=1}^N m_i \phi_{ij}^2]} \quad (10)$$

$$\bar{\phi}_i = \sqrt{\sum_{j=1}^N (\phi_{ij} \Gamma_j)^2} \quad (11)$$

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^N m_i \bar{\phi}_i)^2}{\sum_{i=1}^N m_i \bar{\phi}_i^2} \quad (12)$$

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{S_d}{S_a g}} \quad (13)$$

등가 점성감쇠비는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S} = \frac{2(A_y D - D_y A)}{\pi A D} \quad (14)$$

여기서 E_D 는 이력거동에 의하여 소산되는 에너지며, E_S 는 구조물의 최대변형에너지이다. 또한 A_y, D_y, A, D 는 각각 능력곡선의 항복점에서의 가속도와 항복변위 그리고 능력곡선과 요구곡선의 교차점에서의 가속도와 변위를 나타낸다. 여기서 E_D 는 이력거동에 의하여 소산되는 에너지며, E_S 는 구조물의 최대변형에너지이며 ζ 는 구조물의 고유감쇠비를 나타낸다. 또한 A_y, D_y, A, D 는 각각 능력곡선의 항복점에서의 가속도와 항복변위 그리고 능력곡선과 요구곡선의 교차점에서의 가속도와 변위를 나타낸다.

4.4 결과 분석

본 연구에서 제안하는 DBD에 의한 성능점산정 값과 기존의 CSM에 의한 성능점 산정값을 표 2 - 표 5에 나타내었다. u_m 은 DBD에 의한 변위이고 $u_{(csm)}$ 은 CSM에 의한 변위, $u_{(time)}$ 은 20개 지진에 대한 평균응답의 결과이다. CSM과 DBD에 의한 방법은 연성도를 등가 점성감쇠비로 치환한다는 점과, 동일한 스펙트럼의 사용으로 결과 또한 거의 일치함을 알 수 있다. 한편 시간이력해석결과와는 다소 차이가 발생하는데 이는 비선형 정적 해석법의 한계라 사료된다. 특히 음영이 짙은 부분을 보면 시간이력과의 오차가 10%를 상회하거나 하회하는 것을 볼 수 있는데 이러한 부분은 변위 스펙트럼상에서 스파이크에 의한 변위의 과소 또는 과대값으로 해석할 수 있다. 결국 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서 제안한 DBD에 의한 내진성능 평가방법이 타당하다 사료된다.

표 3 Te = 0.2인 구조물의 응답(cm)

e	α	u_y	μ	u_m	u (csm)	u (time)
0.1	0.05	0.104	58.8	6.13	6.18	4.51
	0.15		35.1	3.66	3.68	3.20
0.3	0.05	0.313	5.89	1.84	1.83	2.00
	0.15		4.86	1.52	1.53	1.51
0.5	0.05	0.521	1.77	0.92	0.91	1.05
	0.15		1.75	0.91	0.98	1.03
0.7	0.05	0.729	1.15	0.84	0.85	1.07
	0.15		1.17	0.85	0.85	1.00

표 4 Te = 0.5인 구조물의 응답(cm)

e	α	u_y	μ	u_m	u (csm)	u (time)
0.1	0.05	0.57	19.3	11.00	11.00	10.76
	0.15		19.4	11.10	11.10	10.28
0.3	0.05	1.71	2.53	4.34	4.34	6.48
	0.15		2.65	4.54	4.54	5.94
0.5	0.05	2.85	1.45	4.14	4.14	4.29
	0.15		1.46	4.23	4.24	4.50
0.7	0.05	3.99	1.13	4.51	4.52	4.75
	0.15		1.14	4.55	4.56	4.81

표 5 Te = 1.0인 구조물의 응답(cm)

e	α	u_y	μ	u_m	u (csm)	u (time)
0.1	0.05	1.49	9.98	14.9	14.90	17.65
	0.15		10.80	16.1	16.10	16.93
0.3	0.05	4.47	2.21	9.89	9.88	10.56
	0.15		2.36	10.6	10.60	10.57
0.5	0.05	7.45	1.40	10.4	10.50	11.37
	0.15		1.44	10.8	10.80	11.05
0.7	0.05	10.40	1.17	12.2	12.20	13.58
	0.15		1.18	12.3	12.30	13.50

표 6 Te = 1.5인 구조물의 응답(cm)

e	α	u_y	μ	u_m	u (csm)	u (time)
0.1	0.05	2.61	0.45	17.6	17.6	18.77
	0.15		0.28	20.3	20.3	21.76
0.3	0.05	7.82	0.30	13.9	13.9	20.61
	0.15		0.27	14.5	15.5	19.30
0.5	0.05	13.11	0.18	16.6	16.6	17.30
	0.15		0.17	17.0	17.0	18.79
0.7	0.05	18.23	0.11	20.3	20.2	22.35
	0.15		0.11	20.4	20.4	22.13

6. 결과

본 연구에서는 변위설계법을 이용한 구조물의 성능점 산정방법에 대하여 연구하였다. 제안된 해석 절차는 근본적으로 CSM과 같은 개념 (즉 비탄성 거동의 등가 감쇠 탄성거동으로의 치환, 동일한 탄성 응답 스펙트럼의 사용 등)에 근거하므로, 응답도 같은 것을 확인하였으며, 시간이력 해석결과와도 비교적 잘 일치하였다. CSM의 경우 하중-변위관계를 가속도-변위관계로, 가속도 응답스펙트럼을 가속도-변위 스펙트럼으로 치환해야 하는 것을 고려할 때 더욱 간편하다고 할 수 있다. 특히 DBD에 의해 설계된 구조물의 내진 성능을 확인하기 위한 비탄성 정적해석 단계에서, CSM을 적용하기 위하여 가속도 스펙트럼을 새로 작성하고 ADRS 형식으로 변화시키지 않고, 설계단계에서 이용한 변위스펙트럼을 그대로 사용할 수 있어 해석과정을 단순화할 수 있다. 본 연구는 현재 설계방법에 국한되어 있는 DBD의 적용범위를 해석 방법까지 확대할 수 있을 것으로 기대되며, 변위 외에 연성에 기초한 연구에도 쉽게 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. Shibata, A. and Sozen, M.A., "Substitute structure method for seismic design in R/C," Journal of the Structural Division, ASCE, 102 (ST1), 1976, pp.1-18.
2. Iwan, W.D. and Gate, N.C., "The effective period and damping of a class of hysteretic structures," Earthquake Eng. and Struct. Dyn., Vol.7, 1979, pp.199-212.
3. Jennings, P.C., "Equivalent viscous damping for yielding structure," Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 95(EMI), 1968, pp.138-163.
4. Priestley, M.J.N. and Calvi, G.M., "Concepts and procedures for direct displacement-based design," *Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes*, Fajfar and Kra-

- winkler(eds.),Balkema,Rotterdam,1996, pp.171-181.
5. M.S,Medhekar and D.J.L.Kennedy, "Displacement-based seismic design of buildings theory ," Engineering Structures, 22. 2000, pp.201-209.
 6. ATC, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," ATC-40, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
 7. FEMA, "1994NEHRPRecommended Provisions for Seismic Regulations for NewBuildings", FEMA-222A,Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.,1995.
 8. FEMA, "NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings" , FEMA-273, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1997.
 9. SEAOC,"Tentative Guidelines for Performance -Based Seismic Engineering," SEAOC Blue Book,Structural Engineers Association of California, 1999.
 10. Anil K.Chopra and Rakesh K.Goel, "Diract Displacement-Based Design:Use of Inelastic vs.Elastic Design Spectra,"Earthquake Spetra,Vol17, No.1,2001.
 11. 김진구, 최현훈, "능력스펙트럼법 이용한 점성 감쇠기의 적정 감쇠비 산정,"지진공학회지, 5 권 1호, 2001.
 12. 한국지진공학회,"내진설계기준연구(Ⅱ),"건설교통부, 1997