

비탄성 설계 스펙트럼에 의한 이력 모델의 효과

Effect of Hysteretic Models on the Inelastic Design Spectra

한 상 환*, 오 영 훈**, 이 리 형*,
Han, Sang-Whan Oh, Young-Hun Lee, Li-Hyung

ABSTRACT

The design response spectrum has been widely used in seismic design to estimate force and deformation demands of structures imposed by Earthquake Ground Motion (EQGM). Inelastic Design Response Spectra (IDRS) to specify design yielding strength in seismic codes are obtained by reducing the ordinates of Linear Elastic Design Response Spectrum (LEDRS) by strength reduction factor (R). Since a building is designed using reduced design spectrum (IDRS) rather than LEDRS in current seismic design procedures it allows structures behave inelastically during design level EQGM. Inelastic Response Spectra (IRS) depend not only on the characteristics of the expected ground motion at a given site, but also on the dynamic properties and nonlinear characteristics of a structure. However, it has not been explicitly investigated the effect of different hysteretic models on IRS. In this study, the effect of hysteretic models on IRS is investigated.

Keyword: inelastic response spectra, strength reduction factor, hysteretic model, calibration

1. 서론

지진 운동(EQGM)에 의해 요구되는 연성비에 대한 시스템이 보유해야 하는 항복강도와 변형을 결정하기 위해 내진 설계에서 설계 응답 스펙트럼을 널리 사용하고 있다. 현행 내진 설계 기준에 따라 설계된 구조물이 설계 EQGM 수준의 지반운동에 대하여 비탄성적으로 거동을 할 것이라는 가정을 기반으로 발전되어 왔다. 이러한 성능 목표를 달성하기 위해 LEDRS보다는 감소된 설계 응답 스펙트럼(IDRS)이 설계 밀면 전단력을 계산하기 위해 사용되어 왔다.

IRS는 그 지역에서의 예상 지반 운동의 성질, 시스템의 동적 계수, 응답 수준(μ) 그리고 구조 시스템의 비선형 성질에 의존하게 된다. 이 연구의 목적은 IRS에 대한 이력 모델의 효과를 조사하는 것이다. 주어진 목표 연성비와 구조물의 주기를 위해 IRS는 비선형 동적 시간 이력 해석 또는 LERS와 연성 계수, R_{μ} 를 사용함으로써 얻을 수 있다. 연성 계수는 강도 저감 계수의 한 요소이며 IRS에 대한 LERS의 비로 정의한다. 본 연구에서는 elasto perfectly plastic, bilinear, 강도 저하, 강성 저하, 그리고 편칭 모델인 다섯 가지의 다른 이력 모델들이 고려된다.

* 한양대학교 건축공학부 교수

** Post-doc., University of Illinois at Urbana-Champaign

IRS에 대한 각각의 모델의 효과를 통계적으로 조사하기 위해서 단단한 지반(S₁)에서 기록된 40개의 EQGM을 사용하였다.

2. 이력 모델과 본 연구에 사용된 지진 기록

IRS에 대한 예전의 많은 연구들이 elasto perfectly plastic 또는 bilinear 모델을 사용하여 결정하였다. 이러한 모델은 응답계산시 간소하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 다섯 개의 다른 이력 모델이 고려되었는데, 그것들은 다음과 같다. (1) 완전탄소성(elasto perfectly plastic), (2) 이선형(bilinear), (3) 강도 저하 (Strength degradation), (4) 강성 저하 (Stiffness degradation), (5) 핀칭(Pinching) 모델이다. 본 연구에서는 Elasto Perfectly Plastic(EPP) 모델을 기본적인 모델로 사용되었다. 그러므로, IRS에 대한 다른 이력 모델의 효과와 EPP 모델의 효과를 비교한다. 각각의 이력 모델의 유형별 변수들은 Kunnath et al (1990).에 의해 상세하게 설명된다.

40개의 지진동은 1996년 National geographical Data Center (1996)과 1992년 U.S. Geological Survey digital data series, DDS-7 CD-ROM 에 의한 강한 지진동으로부터 얻어진 것들이다. 이들 지진동은 1)자유진동, 2)수평요소 3)단단한 지반(S₁) 조건하에서 얻은 것이다. 단 이 연구에서는 Near field 와 Far field 기록을 분류하지는 않았다. 또한 국제National Geographical Data Center에서 개발한 (1989) SMCAT 프로그램을 지반 조건에 따라 지진의 기록을 분류하기 위하여 사용하였다. 지반의 종류는 UBC Code(UBC-1994년 : ICBO1994)에 따라 S₁, S₂, S₃, S₄의 4가지 종류로 나눌 수 있다.

이 연구에서 종류1(S₁)의 지진동의 기록만이 고려되고 있다. UBC Code(1994년)에서 지반의 종류(S₁)을 다음과 같이 나타내고 있다.

이 흙은 다음 a), b) 둘 중의 하나에 속한 것이다.

- a) 1초에 2000 feet보다 더 빠른 shear wave 속도에 의하거나 다른 적당한 분류의 방법에 의한 바위같은 성질.
- b) 토양의 깊이가 200feet보다 적은 곳의 견고한 흙.

3. 목표연성을 위한 비탄성 응답스펙트럼의 결정

지진동에 관한 SDOF 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m \ddot{u}(t) + c \dot{u}(t) + f(t) = -m \ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

여기서 m, c, F(t)는 각각 질량, 감쇠 계수, 시스템에 저장된 힘이다. 그리고 u(t)= 변위와 관계가 있다. u_g(t)= 지반 변위이다.

식(1)은 다음과 같이 정리된다.

$$\ddot{u}(t) + 2\omega\zeta\dot{u}(t) + \omega^2 \frac{F(t)}{F_y} = -\frac{\omega^2}{\eta} \frac{\ddot{u}_g(t)}{\max|\ddot{u}_g|} \quad (2)$$

여기서 F_y 는 시스템의 강도, ω, ζ, η 는 각각 고유진동수, 감쇠계수, 시스템의 무차원 강도이다.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \zeta = \frac{c}{2m\omega} \quad \eta = \frac{F_y}{m \times \max|\ddot{u}_g|} \quad (3)$$

여기서 k 는 시스템의 초기 강성값이다.

변위연성비는 최대변위를 항복변위로 나눈 절대값으로 정의된다. 이 스펙트럼의 종류는 강도요구 스펙트럼으로서 언급된다. 주어진 연성비에 따라 무차원 강도인 η 을 얻기 위하여 반복계산이 요구된다. 이 연구에서는 허용치는 목표 연성비의 2%로 가정한다.

이미 언급한 바와 같이, 주어진 목표 연성범위를 위한 IRS를 얻기위해 두가지 과정이 있다. 첫째, SODF의 비선형 동적 이력해석을 이용하는 것이고 다른 것은 연성계수 R_μ 와 LERS를 이용하는 것이다.

3.1 비선형 동적 이력해석을 이용한 비탄성 응답스펙트럼

비선형 동적 이력해석을 이용해서 IRS값을 얻기 위해 다음 조합이 이용된다.

- 1) 40 EQGM
- 2) 7개의 다른 목표 연성율(1-6)
- 3) 40개의 다른 주기(0-3초)
- 4) 5개의 서로 다른 모델(EPP, 이선형, 편칭, 강도 저감, 강성 저감 모델)

이 모든 경우에 감쇠비는 5%로 가정한다.

IRS 는 그림 4에서 나타나고 NEHRP 의 LEDRS와 비교되어진다.(BSSC 1994) 스펙트럼은 1-6까지의 변위 연성율을 나타내고 있다. 그림 1에서와 같이 비탄성 스펙트럼의 모양은 NEHRP의 비선형 스펙트럼의 것과는 크게 다르다. 연성이 크게 요구될수록 그 차이는 커진다. 더구나 강도저감을 포함한 이력모델은 비선형 강도에 영향을 미친다. 이것은 완전소성모델 보다 큰 IRS 값을 요구한다. 그림 2에서 보여주는 것은 목표 연성율을 위해 비선형 응답 스펙트럼 중요 이력 성질의 효과를 명백히 나타낸다. 그림에 의하면 비탄성 응답 스펙트럼은 이력모델에 영향을 받는다고 할 수 있다.

3.2 연성계수와 LERS를 이용한 비탄성 응답 스펙트럼

이 연구에서는 IRS는 연성계수 비탄성 동적 이력해석을 이용해서 IRS를 찾기 위한 노력을 경감시키기 위한 R_μ 와 LERS를 이용해서 IRS를 계산하는 것이다. 반복 계산하여 얻을 수 있는 IRS를 통해 중요한 매개변수의 효과를 발견할 수 있는데 이를 위하여 IRS를 계산하는 간단한 방법이 필요하다. 이 연구에서는 LERS와 Lee등 (1999)에 의해 제안된 R_μ 를 사용한다.

Lee등에 의해 제안된 R_μ 계수와 LERS를 사용해서 얻어진 IRS는 정확한 값의 비선형 동적 이력 해석으로부터 얻어진 값들과 비교하여 사용의 타당성을 결정한다.

(1) 연성계수 R_μ

연성계수 R_μ 는 목표연성비를 위해 비탄성항복강도로 요구탄성강도의 비로 정의된다. 이 때 목표탄성비는 다음과 같이 나타난다.

$$R_u = \frac{F_y(\mu=1)}{F_y(\mu=\mu_t)}$$

각각의 이력모델의 R_μ 계수의 기본적인 형태를 만들기 위해 통계적인 연구들은 R_μ 의 값의 이용이 사용되어져왔다. 다음은 Lee등 (1999)에 의해 제안된 강도저감계수이다.

$$R_\mu = R(T, \mu) \times C_{a1} \times C_{a2} \times C_{a4}$$

$$R(T, \mu) = A_0 \times (1 - \exp(-B_0 \times T)), \quad A_0 = 0.99 \times \mu + 0.15, \quad B_0 = 23.69 \times \mu^{-0.83}$$

$$C_{a1} = 1.0 + A_1 \times \alpha_1 + B_1 \times \alpha_1^2, \quad A_1 = 2.07 \times \ln(\mu) - 0.28$$

$$B_1 = -10.55 \times \ln(\mu) + 5.21$$

$$C_{a2} = \frac{1}{A_2 \times \alpha_2 + B_2}, \quad A_2 = 0.2 \times \mu + 0.42, \quad B_2 = 0.005 \times \mu + 0.98$$

$$C_{a3} = \frac{0.85 + B_3 \alpha_3}{1 + C_3 \times \alpha_3 + 0.001 \times \alpha_3^2}, \quad B_3 = 0.03 \times \mu + 1.02, \quad C_3 = 0.03 \times \mu + 0.99$$

$$C_{a4} = \frac{1}{1 + 0.11 \times \exp(-C_4 \times \alpha_4)}$$

여기서 $R(T, \mu)$ 은 EPP 모델을 위한 R_μ 의 기본적인 형태이고 $C_{a1}, C_{a2}, C_{a3}, C_{a4}$ bilinear의 효과, 강도저감, 강성저감과 핀칭 모델의 계수들이다. 중간 값과 긴 주기 지역속에서 R_μ 계수는 μ_t 목표연성비의 값과 거의 같다. 더구나 이력거동의 효과는 주기 전 지역에서 관찰되어진다.

(2) R_μ 와 LERS를 이용한 탄성 응답스펙트럼

건물구조를 위한 현재의 지지하중은 선형 탄성 디자인 스펙트럼의 저감하여 구한다. 앞에서 논의한바와 같이 IRS와 LERS 모양의 차이점은 목표연성비에서 증가와 함께 커진다. 게다가 IRS의 수직좌표는 구조주기와 목표연성비 뿐만아니라 시스템의 이력에 좌우된다.

표2는 IRS에 대한 각각의 이력 모델 효과를 보여준다. 표 3(a)는 이선형 모델로부터 얻어진 IRS의 평균 세로좌표의 비율을 보여준다. 이 표로부터 낮은 IRS 세로좌표값은 더 높은 2차 slope에 대해서 얻어진다. 이 모델의 영향이 2차 slope 정도와 목표 연성비가 높을수록 더 중요하게 된다는 것을 알 수 있다. 이 연구에 의하여 평가된 이선형 모델의 IRS 세로좌표값들 중에서 가장 낮은 IRS 세로좌표값은 EPP model의 IRS 세로좌표값의 73%이다 ($\mu_t = 8, \alpha_1 = 15\%$ 인 경우).

IRS의 세로좌표값은 또한 강도 저하 및 강성 저하의 정도 그리고 핀칭에 의하여 영향을 받는다 (표 3 (b),(c),(d)). IRS의 세로좌표값은 강도 저하, 강성 저하, 핀칭, 그리고 목표 연성과 같은 이력 파라메타의 증가하는 정도를 따라서 증가한다. 그 효과는 더 높은 목표 연성에 대해서 더 분명해진다. 이 연구에 의해 평가되어진 강도 저하, 강성 저하, 핀칭 모델의 IRS 세로좌표값들 가운데 가장 낮은 IRS 세로좌표값은 각각 EPP 모델의 IRS 세로좌표값의 123% ($\mu_t = 8, \alpha_2 = 15\%$), 115% ($\mu_t = 8, \alpha_3 = 0\%$), 108% ($\mu_t = 8, \alpha_4 = 5\%$)이다.

4. 결론

본 연구는 IRS에 대한 이력 모델의 효과를 연구하였다. 주어진 목표 연성비에 대하여 비탄성 응답 스펙트럼은 단자유도 시스템의 비선형 동적 시간 이력 해석을 이용하여 보정 절차로부터 직접 구해지거나 강도저감계수(R)로 나누어진 선형 탄성 응답 스펙트럼으로부터 구하였다. 본 연구에서는 이력 모델이 IRS에 영향을 미치는지를 결정하기 위하여 전자의 절차가 사용되었고, 수치적으로 효과를 계산하기 위하여 후자가 사용되었다. IRS를 계산하기 위하여 강도저감계수(R)를 사용하는 이유는 반복수행 계산의 간소화를 위해서이다. 결론은 다음과 같다.

1. 비탄성 응답 스펙트럼은 목표 연성비에 따라 상당히 좌우된다. 또한 주어진 목표 연성비에 대

- 하여 비탄성 응답 스펙트럼은 주기의 변화, 특히 단주기 범위에서의 더 영향이 크다.
2. 본 연구에서 얻어진 결과에 의하면, 각각의 이력 모델의 효과는 고유 주기와 연성의 효과에 비하여 작은 것으로 나타났다.
 3. 이선형 시스템의 2차 slope의 정도가 높아짐에 따라 비탄성 응답 스펙트럼은 낮아지게 된다.
 4. 본 연구의 결과에 따르면 비탄성 응답 스펙트럼은 강도 저감, 강성 저감 그리고 편칭의 정도에 따라 영향을 받는다. 강성과 강도 저감 그리고 편칭의 정도가 증가함에 따라 더 큰 비탄성 응답 스펙트럼 값들이 요구된다. 그러므로 이러한 이력 특성의 효과들이 비탄성 응답 스펙트럼을 결정하기 위하여 적절히 설명될 필요가 있다.
 5. IRS에 대한 각 이력 모델의 효과는 목표 연성비가 더 커짐에 따라 더 크게 나타났다.
 6. 강도저감계수를 사용한 IRS의 세로좌표값이 실제 IRS와 비슷하기 때문에 IRS가 선형 탄성 응답 스펙트럼으로부터 계산되어질 때 강도저감계수의 함수형태를 사용하는 것은 타당하다고 할 수 있다.
 7. 본 연구의 결과에 의하면 비탄성 응답 스펙트럼은 구조물의 주기, 목표 변위비의 정도, 2차 slope, 강도 저감, 강성 저감, 그리고 편칭에 달려 있다.
 8. 현재의 건물 구조에 대한 지진 하중은 실험적 그리고 주기에 의존하지 않는 감소계수들을 통해서 LEEDS의 저감에 기초하고 있다. 비탄성 강도 응답 스펙트럼의 형태는 탄성 강도 응답 스펙트럼의 형태와는 상당히 다르다. LEERS와 IRS 형태의 차이는 연성의 증가와 함께 증가한다. 즉, 비탄성 요구강도를 얻기 위하여 탄성 스펙트럼의 단일 강도 저감 계수를 사용하여 직접 스케일링하는 것은 합리적이지 못하고 보수적이지도 못하다.
 9. 본 연구에서는 감쇠는 고정된 감쇠계수를 사용하였다. 그러므로 순간강성비례감쇠와 같은 다른 감쇠 특성을 알아보기 위하여 더 많은 연구가 요구된다. 또한 본 연구는 단지 SODF 시스템만을 고려한다. MDOF 시스템에 대한 R_{μ} 계수가 체계적으로 연구되어야 한다. 지진기록은 Far field 와 Near field에 따라 구분하자 않았다. 추후 이에 대한 영향도 연구할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구를 지원한 한양대학교와 초대형 구조연구센터의 지원에 깊이 감사드립니다.

REFERENCES

1. ATC (1995), A Critical Review of Current Approaches to Earthquake-Resistant Design, *Applied Technology Council Report ATC-34*, Redwood City, California.
2. ATC (1995), Structural Response Modification Factors, *Applied Technology Council Report ATC-19*, Redwood City, California.
3. BAP (1992), Basic Strong-Motion Accelerogram Processing Software Version 1.0, *Open File Report 92-296A*, US Geological Survey.
4. Bertero, V. V., Anderson, J. C., Krawinkler, H., and Miranda, E., (1991), Design guidelines for ductility and drift limits, *Report No. EERC/UCB-91/15*, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Calif.
5. Building Seismic Safety Council (1994), NEHRP Recommended Provisions for Seismic

regulations for new Buildings, Washington, D.C..

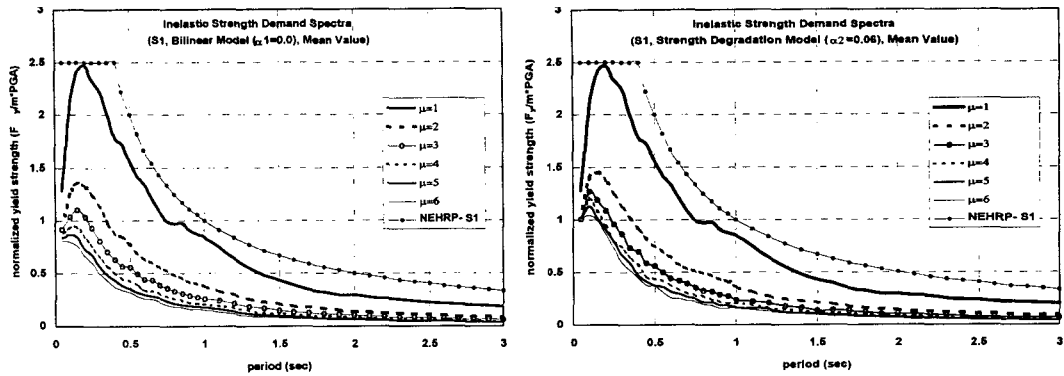
6. Han, S.W. and Wen, Y.K. (1997), Methods of Reliability-Based Seismic Design I : Equivalent Nonlinear System, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 3, ASCE.
7. Han, S.W. and Wen, Y.K. (1997), Methods of Reliability-Based Seismic Design II : Calibration of Design Parameters, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 3, ASCE.
8. Housner, G. W. (1959), Behavior of structures during earthquakes, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 106(1), 69-86.
9. International Conference of Building Officials (1994), Uniform Building Code, Whittier, California.
10. Krawinkler, H. (1995), New Trends in Seismic Design Methodology” , *Proceedings of Tenth European Conference on Earthquake Engineering*, Duma, pp. 821-830.
11. Kunnath, S.K., Reinhorn, A.M., and Park, Y.J. (1990), Analytical Modeling of Inelastic Seismic Response of R/C Structures, *Journal of Structural Engineering*, Vol.116, No.4, ASCE.
12. Lee, Li-Hyung, Han, Sang Whan, Oh, Young-Hun (1999), Determination of Ductility Factor Considering Different Hysteretic Models, *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (in press).

표 1. 이력 모델의 핵심 파라메타와 효과

Hysteretic Model	Parameters	Effect on Hysteresis Loop
Elasto Perfectly Plastic Model	K_0	Initial Stiffness
	U_y	Yield Displacement
Bilinear Model	K_0	Initial Stiffness
	U_y	Yield Displacement
	α_1	Second Slope (0, 2, 5, 7, 10, 15 %)
Strength Degradation Model	K_0	Initial Stiffness
	U_y	Yield Displacement
	α_2	Strength Degradation (0, 3, 6, 9, 12%)
Stiffness Degradation Model	K_0	Initial Stiffness
	U_y	Yield Displacement
	α_3	Stiffness Degradation (15, 4, 2, 1, 0.5, 0)
Pinching Model	K_0	Initial Stiffness
	U_y	Yield Displacement
	α_4	Pinching (100, 40, 30, 20, 10, 5%)

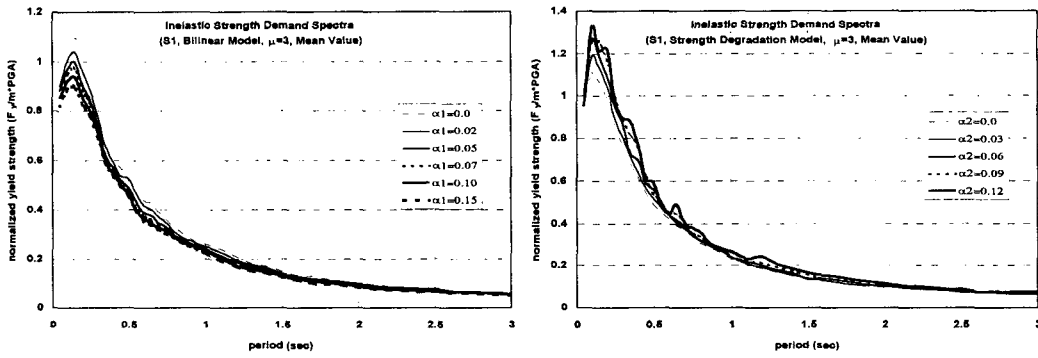
표 3. 상이한 이력 모델로 인한 IRS Ordinates의 평균 증가와 감소

Target Ductility	(a) IRS Ordinate of Bilinear Model to one of EPP Model (percentage)					
	for $\alpha_1=0$	for $\alpha_1=0.02$	for $\alpha_1=0.05$	for $\alpha_1=0.07$	for $\alpha_1=0.1$	for $\alpha_1=0.15$
2	100	97	93	91	88	83
3	100	96	90	87	84	80
4	100	95	88	84	81	78
5	100	94	86	82	78	76
6	100	93	85	81	77	75
8	100	92	83	78	76	73
Target Ductility	(b) IRS Ordinate of Strength Degradation Model to one of EPP Model (percentage)					
	for $\alpha_2=0$	for $\alpha_2=0.03$	for $\alpha_2=0.06$	for $\alpha_2=0.09$	for $\alpha_2=0.12$	for $\alpha_2=0.15$
2	100	102	104	106	109	111
3	100	103	106	108	111	113
4	100	104	107	110	113	116
5	100	105	109	112	115	118
6	100	105	109	113	116	120
8	100	106	111	115	119	123
Target Ductility	(c) IRS Ordinate of Stiffness Degradation Model to one of EPP Model (percentage)					
	for $\alpha_3=15$	For $\alpha_3=4$	for $\alpha_3=2$	for $\alpha_3=1$	for $\alpha_3=0.5$	for $\alpha_3=0$
2	100	101	103	106	109	115
3	100	101	103	106	109	115
4	100	101	103	106	109	115
5	100	101	103	106	109	115
6	100	101	103	106	109	115
8	100	101	103	106	109	115
Target Ductility	(d) IRS Ordinate of Pinching Model to one of EPP Model (percentage)					
	for $\alpha_4=1$	for $\alpha_4=0.4$	for $\alpha_4=0.3$	for $\alpha_4=0.2$	for $\alpha_4=0.1$	for $\alpha_4=0.05$
2	100	101	102	103	106	108
3	100	101	102	104	106	108
4	100	102	103	104	106	108
5	100	102	103	104	107	108
6	100	102	103	105	107	108
8	100	102	104	105	107	108



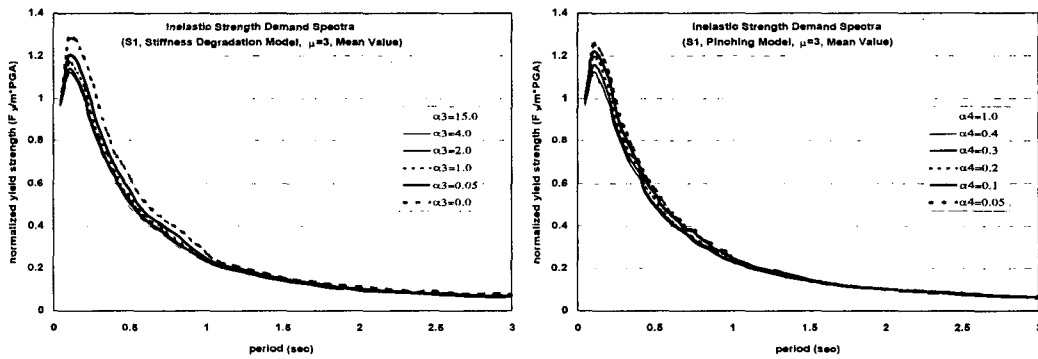
(a) Elasto Perfectly Plastic Model for $\alpha_1=0.0$ (b) Strength Degradation Model for $\alpha_2=0.06$

그림 4. 주어진 목표연성비에 대한 비탄성 응답 스펙트럼



(a) Bilinear Model

(b) Strength Degradation Model



(c) Stiffness Degradation Model

(d) Pinching Model

그림 5. $\mu=3$ 일 경우 비탄성 응답 스펙트럼의 비교