

요구스펙트럼의 비탄성이력특성 - 완전탄소성모델을 중심으로 -

Inelastic Hysteretic Characteristics of Demand Spectrum - Focused on Elasto Perfectly Plastic Model -

이 현 호*
Lee, Hyun-Ho

한 상 환**
Han, Sang-Whan

이 리 형**
Lee, Li-Hyung

ABSTRACT

This study investigates the effect of hysteretic characteristics to the Inelastic Demand Spectrum (IDS), which was expressed by an acceleration (S_a) and a displacement response spectrum (S_d). Elasto Perfectly Plastic (EPP) model is used in this study, and inelastic demand spectrum (S_a vs. S_d) are obtained from a given target ductility ratio. For a given target ductility ratio IDS can be obtained by using nonlinear time history analysis of single degree of system with forty five recorded earthquake ground motions for stiff soil site.

The effect of EPP model under demand spectrum is investigated by ductility factor and natural frequency. According to the results obtained in this study, IDS has dependency on ductility factor and natural frequency.

1. 서론

설계지진하중을 응답가속도(S_a)와 응답변위(S_d)로 같이 표현하는 요구스펙트럼(demand spectrum)은 Mahaney 등(1993)¹이 기존의 방법을 정리하여 능력스펙트럼법(capacity spectrum method, CSM)에 소개한 이후, ATC 40(1996)²과 FEMA 273(1997)³에 도입되어 앞으로 그 사용 빈도가 늘어날 추세에 있다. 왜냐하면 요구스펙트럼은 지진하중에 의한 강도수준 및 변형수준을 동시에 나타낼 수 있기 때문이다. 그러나 비탄성요구스펙트럼(inelastic demand spectrum, IDS)을 만드는 방법 및 이력모델에 관한 연구는 극히 제한되어 있다. 또한 내진기준에서는 변위연성비(μ)로 표현되는 연성계수(R_μ)로 구조물의 비탄성변형능력을 고려한다. 즉 탄성응답을 변위연성비로 저감하여 비탄성응답을 산정하는 것이다. 그러나 ATC 40에서는 감쇠비(ξ)를 사용하여 비탄성응답을 산정한다. 따라서 비

* 동양대학교 건축공학과 전임강사, 정희원
** 한양대학교 건축공학부 교수, 정희원

탄성응답 또는 IDS를 산정하기 위해서는 변위연성비와 감쇠비중 어느 것이 적합한지 평가할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 요구스펙트럼으로 산정된 완전탄소성모델의 비탄성이력특성을 평가하는데 있다. 이를 위하여 변위연성비(μ)와 감쇠비(ξ)의 적합성을 평가하며, 완전탄소성모델의 비탄성응답을 요구스펙트럼으로 표현한다.

2. 비탄성지진요구 산정방법

지진하중을 받는 구조물의 비탄성변형수준은 식 (1)과 같이 시스템의 항복변위(u_y)에 대한 최대 변위(u_{max}) 비로 표현되는 변위연성비(μ)로 산정할 수 있다.

$$\mu = \frac{u_{max}}{u_y} \quad (1)$$

또한 구조물의 비탄성거동을 고려하여 탄성요구강도를 저감시키는 항복강도감소계수(yield strength reduction factor, R_y)는 식 (2)와 같이 비탄성요구강도에 대한 탄성요구강도 비로 구할 수 있다.

$$R_y = \frac{\text{Elastic Demand}}{\text{Inelastic Demand}} = \frac{F_y(\mu=1)}{F_y(\mu=\mu_i)} \quad (2)$$

식(2)로부터, 비탄성지진요구는 목표연성비에 따른 비탄성수평항복강도의 산정으로 구할 수 있는 것이다. 따라서 주어진 지진운동에 대한 수평항복강도요구 $F_y(\mu=\mu_i)$ 는 계산된 변위연성비(μ_i)가 목표연성비(μ)의 허용오차 범위내로 수렴할 때까지 반복적으로 계산함으로써 구할 수 있다. 본 연구에서는 0.05초에서 3초사이에 분포하는 총 40개의 고유주기를 고려하며, 각각의 고유주기에 대한 변위연성비를 구한다. 사용된 지진기록은 S_i 지반조건의 기록으로 내진기준의 선형탄성응답스펙트럼과 유사하게 선정된 총 45개의 S_i 지진기록을 사용하였다. 지진기록은 개정예정인 내진기준⁴에 의거 최대지반가속도(PGA)를 0.11g로 크기를 조정하여 사용하였다.

3. 감쇠비와 변위연성비의 적합성 평가

ATC 40의 능력스펙트럼법(CSM)에 있어 지진요구는 요구스펙트럼(demand spectrum)으로 표현되며, 지진요구는 유효감쇠계수(β_{eff})로 저감된다. 즉 β_{eff} 로 구조물의 비탄성능력을 고려하는 것이다. 그러나 대부분의 내진기준에서는 변위연성비(μ)로 표현되는 정량화된 연성계수(R_μ)로 구조물의 비탄성능력을 고려한다. 즉 CSM의 비탄성 지진요구 산정방법이 기존기준과는 다른 것이다. 물론 CSM의 내진성능 평가방법이 기존기준보다 진일보된 구조물의 성능수준을 근거로 한 방법이지만, 구조물의 비탄성능력(또는 지진에 의한 비탄성요구) 산정시 변위연성비(μ)와 감쇠비(ξ)중 어느 것이 적합한지 평가해 볼 필요가 있다. 왜냐하면 변위연성비(μ)와 감쇠비(ξ)는 지진요구를 저감시키는 유용한 방법이지만, 비탄성요구에 미치는 응답특성은 다를 수 있기 때문이다. 따라서 본

절에서는 변위연성비와 감쇠비가 지진응답에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

변위연성비와 감쇠비에 의한 영향을 평가하기 위해 사용한 지진기록은 일반적으로 널리 사용되고 있는 El Centro(1940, NS component)기록이며, 해석변수로는 3단계의 변위연성비($\mu=1, 4, 8$) 각각에 대한 3단계의 감쇠비($\xi=0.02, 0.05, 0.10$)이다. 즉 9개의 변수에 대한 해석을 수행하며, 0.05초부터 6초까지의 60개의 고유주기(T)에 대한 응답을 산정한다. 또한 요구스펙트럼에서 사용하고 있는 응답가속도(S_a) 및 응답변위(S_d)를 고려한다. 여기서 $\mu=1$ 인 경우는 탄성응답이며, $\xi=0.05$ 인 경우는 내진기준에서 정한 설계스펙트럼의 감쇠비이다. 그림 1에 해석결과를 나타내었으며, (a)에는 응답가속도(S_a)를 (b), (c), (d)에는 변위연성비 $\mu=1, 4, 8$ 에 대한 응답변위(S_d)를 나타내었다. 여기서 응답변위를 변위연성비로 구분한 이유는 탄성변위응답과 비탄성변위응답은 거의 유사하여 같이 나타내면 구분하기가 곤란하기 때문이다.

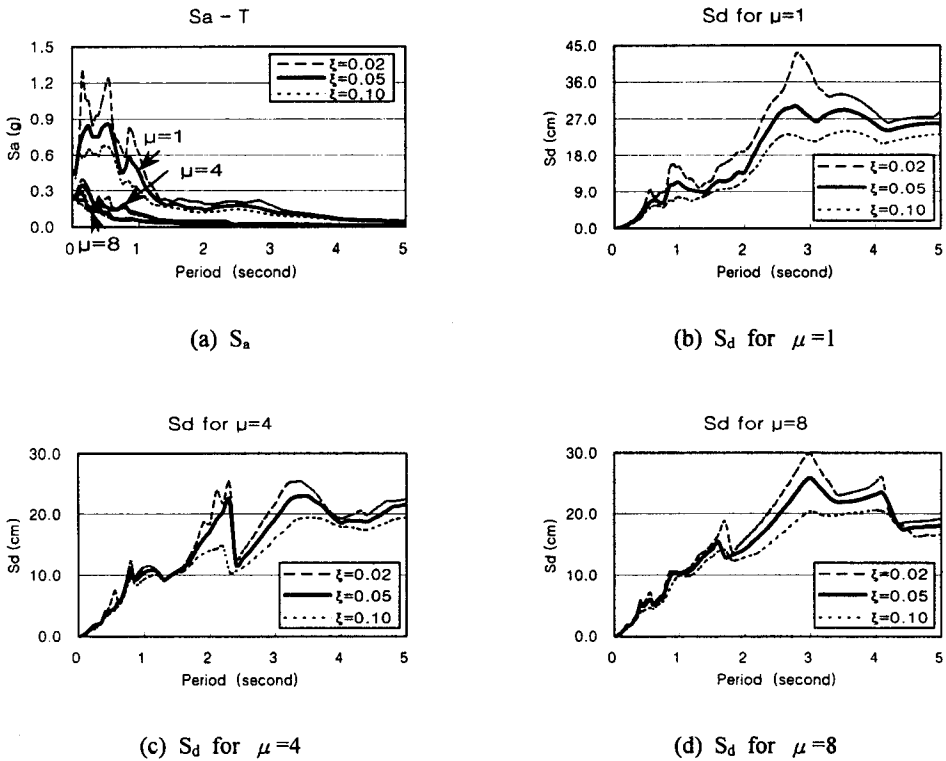


그림 1. 변위연성비와 감쇠비에 대한 응답

그림 1 (a)의 가속도응답의 경우, 변위연성비 $\mu=1$ 일 때의 탄성응답에 대하여 감쇠비 ξ 는 영향을 미치는 것으로 판단되나, $\mu=4, 8$ 일 때의 비탄성응답에 대한 ξ 의 영향은 미미한 것으로 판단된다. 또한 $\mu=8$ 일 때의 비탄성응답에 미치는 ξ 의 영향은 $\mu=4$ 일 때의 ξ 의 영향보다 미미한 것으로 판단된다. 그림 1 (b), (c), (d)의 변위응답의 경우, 변위연성비 $\mu=1, 4, 8$ 에 따른 감쇠비

$\xi=0.02, 0.05, 0.1$ 의 영향은 거의 유사한 것으로 판단된다. 그리고 변위연성비 $\mu=1, 4, 8$ 에 대한 변위응답도 유사한 것으로 판단된다. 따라서 변위응답의 경우 감쇠비와 변위연성비가 IDS에 미치는 영향은 거의 유사한 것으로 평가할 수 있다.

이상의 검토결과로부터 가속도응답의 경우 변위연성비가 IDS에 영향을 미치는 것으로 평가할 수 있으며, 변위응답의 경우 변위연성비와 감쇠비가 IDS에 미치는 영향은 유사한 것으로 평가할 수 있다. 따라서 지진하중에 의한 비탄성요구는 가속도응답의 영향을 많이 받는 것으로 평가할 수 있으므로 IDS는 변위연성비 μ 로 산정하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

4. 완전탄소성모델의 비탄성지진요구 평가

지진하중을 받는 구조물의 휨변형이 이력거동을 지배하여 그림 2와 같은 안정된 이력곡선을 나타내는 경우, 완전탄소성(EPP)모델을 사용하여 구조물의 이력특성을 평가할 수 있다. 여기서 완전탄소성모델은 이상화된 이력모델이다.

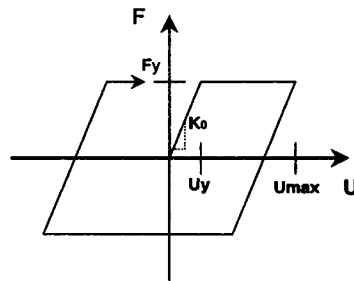


그림 2. 완전탄소성모델의 이력특성

완전탄소성모델의 비탄성지진응답은 변위연성비, 고유주기, 지진기록 등을 사용한 비선형동적해석의 결과로 구하여진다. 본 연구에 사용한 해석변수는 다음과 같으며, 총 7,200회(= $4 \times 40 \times 45$)의 해석을 수행한다.

- ① 변위연성비(μ) : 1(탄성), 2, 4, 6
- ② 고유주기 : 0.05초에서 3초사이의 40개의 고유주기
- ③ 지진기록 : 지반기록 S_1 의 45개 지진기록

4.1 연성계수(R_μ) 및 변동계수(COV)를 이용한 비탄성가속도응답(S_a)의 적합성 평가

완전탄소성모델의 비탄성요구는 항복강도(F_y)를 점차로 줄여가면서 비탄성변위연성비(μ)가 목표연성비(μ_t)에 수렴하게 되면 산정할 수 있다. 즉 목표연성비는 항복강도로 표현할 수 있는 것이며, 그림 3에 목표연성비 및 각 주기에 대한 45개 지진기록의 평균 연성계수(R_μ)를 나타내었다. 여기서 비탄성가속도응답의 적합성을 평가하기 위하여 연성계수를 사용한 이유는 탄성가속도응답을 연성계수로 나누면 비탄성가속도응답을 산정할 수 있기 때문이다. 그림 3에 의하면 전반적으로

연성계수 R_μ 는 목표연성비에 근접하는 것으로 평가할 수 있으며, 목표연성비 $\mu_i=6$ 일 때 2초 주기 이후의 R_μ 가 목표연성비보다 다소 크게 산정되는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에 사용한 해석프로그램의 적합성을 평가하기 위하여 R_μ 산정식을 제안한 Newmark과 Hall(1982)⁵, Krawinkler와 Nassar(1992)⁶, Mirand와 Vertero(1994)⁷ 및 Lee 등(1999)⁸의 연구결과와 비교하여 볼 필요가 있다. 여기서 각 연구자들이 제안한 R_μ 산정식은 참고문헌을 참고하기 바란다. 이상의 기존연구결과를 본 연구결과를 비교하여 그림 4에 나타내었다. 여기서 대상으로 한 변위연성비는 6이며, 지반 조건은 암반(S_1)이다. 이에 의하면 본 연구결과는 전 주기영역에 대한 기존연구결과와 유사한 것으로 판단되어, 사용 해석프로그램의 적합성을 검증할 수 있었다. 또한 Lee 등⁸의 연구결과와 본 연구결과가 전 주기에 대하여 유사함을 확인할 수 있었다.

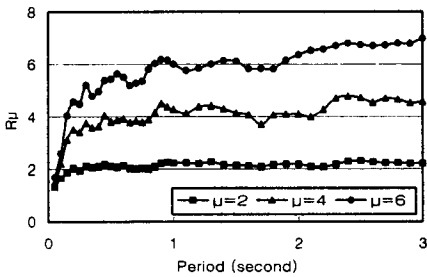


그림 3. 완전탄소성모델의 R_μ 대 μ

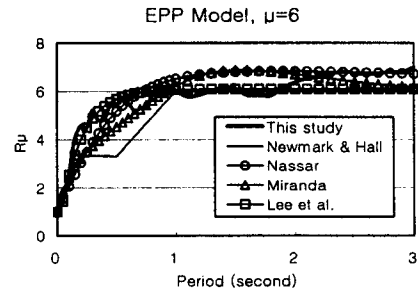


그림 4. 완전탄소성모델의 적합성 평가

본 연구에서 선정된 완전탄소성모델의 변위연성비별 분산정도를 검토하기 위하여 각 변위연성비별 R_μ 의 평균을 Lee 등(1999)⁸ 및 Miranda(1991)⁹의 연구결과와 비교하여 보았다. 이를 위하여 결과의 분산정도를 평가하기에 적합한 변동계수(coefficient of variation, COV)를 각 변위연성비에 대한 항복강도에 대하여 산정한 후, 그 결과를 도표 1에 나타내었다. 여기서 변동계수는 응답평균(mean)을 표준편차(σ)를 나누어서 산정한 것이다.

도표 1. 완전탄소성모델의 R_μ 에 대한 COV 비교

연구자	연성비		
	$\mu = 2$	$\mu = 4$	$\mu = 6$
본 연구	0.23	0.35	0.40
Lee et al.	0.23	0.33	0.39
Miranda	0.25	0.35	0.40

여기서 Miranda의 변동계수는 그림자료를 수치로 추정한 것이다. 도표 1에 의하면 변위연성비가 커짐에 따라 변동계수는 커지는 것으로 나타났으며, 본 연구 및 기존연구결과는 거의 유사함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 산정된 연성계수 R_μ 는 적합한 것임을 재차 확인할 수 있었다.

4.2 비탄성변위응답(S_d)의 적합성 평가

완전탄소성모델의 비탄성 변위응답의 적합성을 평가하기 위하여 비탄성 S_d 에 대한 탄성 S_d 의 비로 나타낸 본 연구결과와 Miranda(1991)⁹의 연구결과를 그림 5에 나타내었다. 또한 Krawinkler의 연구결과를 μ/R_μ 의 비로 정리한 결과를 그림 5에 같이 나타내었다. 여기서 μ/R_μ 비는 고정된 μ 값에 R_μ 가 주기(T)에 따라 변하는 일반화 변수로, 비탄성응답에 대한 탄성응답의 비와 같은 의미를 지닌다. 그림 7의 결과로부터 본 연구결과가 Miranda 및 Krawinkler의 연구결과와 유사함을 알 수 있었다. 특히 변위연성비는 1초 전의 주기에 많은 영향을 받는 경향이 본 연구, Miranda 및 Krawinkler의 연구결과에 거의 유사하게 나타났다. 따라서 본 연구에서 산정된 비탄성변위응답은 적합한 것으로 평가할 수 있다.

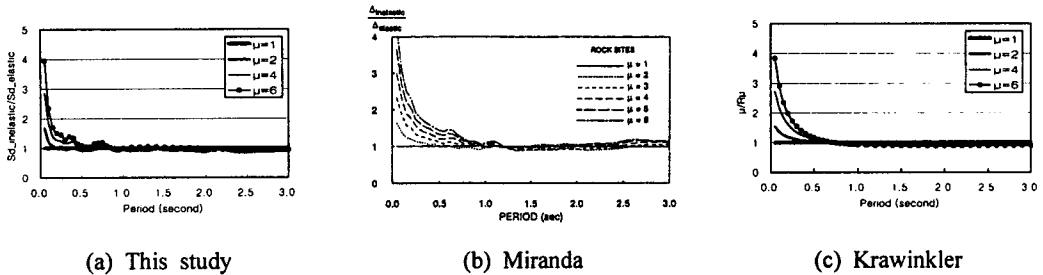


그림 5. 비탄성변위응답 적합성 평가

4.3 비선형동적해석 결과

완전탄소성모델의 비탄성요구는 각 고유주기에 대한 응답가속도(S_a) 및 응답변위(S_d)로 표현되는 요구스펙트럼(demand spectrum)으로 나타낼 수 있다. 주기에 대한 응답가속도 관계, 주기에 대한 응답변위 관계 및 요구스펙트럼으로 표현되는 응답가속도 및 응답변위 관계를 그림 6에 나타내었다. 그림 6 (a)의 S_a 는 탄성응답에 비해 비탄성응답이 현저히 저감되었으며, 변위연성비(μ) 증가에 따라 S_a 가 저감되는 것을 알 수 있었다. 또한 고유주기(T)에 의한 응답특성도 영향을 받는 것으로 나타났다.

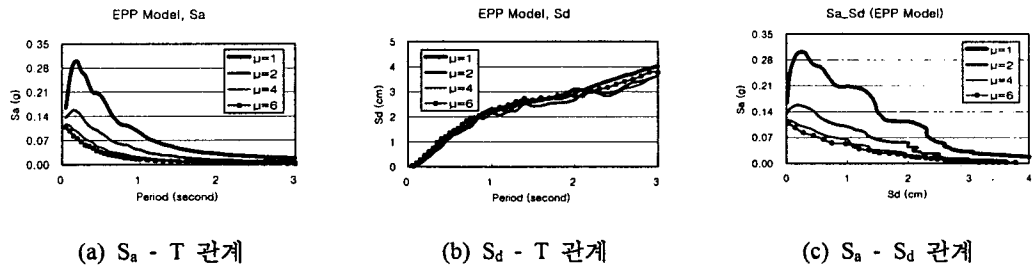


그림 6. 완전탄소성모델의 요구스펙트럼

그림 6 (b)의 S_d 는 μ 에 대하여 약 2초 이후의 S_d 응답이 다소 영향을 받는 것으로 나타났으나, 전체적으로는 μ 에 대한 영향이 미미함을 알 수 있었다. 또한 S_a 는 T에 대한 영향을 받는 것으로 나타났다. 그림 6 (c)에 나타낸 요구스펙트럼은 S_a 의 영향으로 μ 와 T가 비탄성요구스펙트럼(IDS)에 미치는 영향이 크음을 알 수 있었다.

4.4 고유주기(T)가 변위연성비(μ)에 미치는 영향 평가

이상의 연구결과로부터 비탄성 S_a 및 S_d 는 변위연성비(μ) 및 주기(T)에 영향을 받는 것으로 나타나, 요구스펙트럼을 구성하는 2개의 응답특성(S_a 및 S_d)에 대한 μ 및 T에 대한 관계를 검토하여 볼 필요가 있다. Newmark과 Hall(1982)⁵, Krawinkler(1992)⁶ 등의 기존연구에 의하면 구조물의 비탄성응답은 주기와 밀접한 관계에 있기 때문이다. 따라서 Newmark과 Hall의 연구결과에 의거, 주기구간을 단주기구간($0.0 < T \leq 0.5$), 중주기구간($0.5 < T < 1.0$), 장주기구간($1.0 \leq T$)의 3구간으로 구분하였다. 주기구간은 평가자에 따라 조금씩 다르게 구분될 수 있지만, 본 연구에 사용한 주기구분은 일반적인 것이므로 별 문제가 되지 않으리라 판단된다. 변위연성비 $\mu=1$ 일 때의 탄성요구에 대한 $\mu=2, 4, 6$ 의 비탄성요구(S_a, S_d)비를 도표 2에 나타내었다. 도표 2의 S_a 및 S_d 는 사용된 총 45개의 지진기록에 대한 각 주기구간별 평균이다.

도표 2. 주기구간별 S_a, S_d 비 비교

변위연성비	S_a			S_d		
	단주기 구간	중주기 구간	장주기 구간	단주기 구간	중주기 구간	장주기 구간
$\mu=1$	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
$\mu=2$	0.534	0.478	0.475	0.977	0.957	0.905
$\mu=4$	0.344	0.249	0.236	1.136	0.986	0.922
$\mu=6$	0.277	0.179	0.166	1.289	1.065	0.972

S_a 의 경우 도표 2에 의하면, μ 가 커질수록 비탄성응답이 탄성응답에 비하여 저감되는 것으로 판단된다. 또한 주기가 단주기에서 장주기로 갈수록 비탄성응답에 대한 μ 의 영향이 조금씩 저감됨을 알 수 있다. 이는 Newmark과 Hall(1982), Miranda(1991), Krawinkler(1992) 및 Lee 등(1999)의 연구결과와도 일치한다. 즉 1초 주기까지는 μ 가 비탄성응답에 많은 영향을 미치며, 1초 이후의 주기에 있어서는 μ 가 비탄성응답에 미치는 영향은 적어지는 것이다. 이는 기존의 μ 에 대한 T의 제안식들이 선형함수가 아닌 지수함수로 표현한 것으로도 확인할 수 있다(그림 4 참조).

S_d 의 경우는 μ 가 비탄성응답에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단되며, 이는 그림 6 (b)의 결과와도 일치한다. 이상의 결과로부터 변위연성비는 고유주기와 밀접한 상관이 있는 것으로 판단된다. 그리고 변위연성비는 비탄성응답가속도에 많은 영향을 미치며, 비탄성응답변위에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다. 따라서 변위연성비가 IDS에 미치는 영향은 단주기에서는 크며, 장주기에서는 단주기에 비하여 작은 것으로 평가할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 요구스펙트럼으로 산정된 완전탄소성모델의 비탄성이력특성을 평가하였으며, 주요한 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 감쇠비(ξ)와 변위연성비(μ)가 IDS에 미치는 영향을 평가한 결과, 비탄성가속도응답(S_a)의 경우 비탄성응답에 감쇠비가 미치는 영향은 미미한 것으로 평가되었다. 또한 비탄성변위응답(S_d)의 경우 감쇠비와 변위연성비가 비탄성응답에 미치는 영향은 유사한 것으로 평가되었다. 이로부터 지진하중에 의한 비탄성응답은 가속도응답에 많은 영향을 받는 것으로 평가할 수 있다.

므로, 변위연성비로 IDS를 산정하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

- (2) 완전탄소성모델의 비탄성응답(S_a 와 S_d)을 Newmark과 Hall, Miranda, Krawinkler, Lee 등의 기존 연구와 비교한 결과, 본 연구에서 산정된 비탄성응답의 적합성이 검증되었다. 완전탄소성모델의 비탄성가속도응답은 변위연성비의 증가에 비례하여 감소하였으며, 비탄성변위응답에 변위연성비가 미치는 영향은 미미한 것으로 평가되었다.
- (3) 변위연성비는 고유주기와 밀접한 상관이 있는 것으로 판단된다. 그리고 변위연성비는 비탄성응답가속도에 많은 영향을 미치며, 비탄성응답변위에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다. 또한 변위연성비가 IDS에 미치는 영향은 단주기에서는 크며, 장주기에서는 단주기에 비하여 작은 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터와 현대건설 기술연구소의 지원에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Mahaney, J.A., Paret, T.F., Kehoe, B.E., and Freeman, S.A.(1993), "The Capacity Spectrum Method for Evaluating Structural Response During the Loma Prieta Earthquake," National Earthquake Conference, Memphis, Tennessee.
2. Applied Technology Council(1996), "ATC 40: Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Vol. 1 & Vol. 2," California Seismic Safety Commission No. SSC 96-01.
3. BSSC(1997), "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings," Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management, Report No. FEMA 273.
4. 한국지진공학회, 한국건설기술연구원(1997), "내진설계기준연구(Ⅱ)," 건설교통부.
5. Newmark N.M., and Hall, W.J.(1982), "Earthquake Spectra and Design," Earthquake Engineering Research Institute Monograph Series, EERI, Berkeley.
6. Krawinkler, H., and Nassar, A.A.(1992), "Seismic Design Based on Ductility and Cumulative Damage Demands and Capacities," Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings," Fajfar, Krawinkler, edd, Elsevier Applied Science.
7. Miranda, E., and Bertero, V.V.(1994), "Evaluation of Strength Reduction Factors for Earthquake-Resistance Design," Earthquake Spectra, EERI, 10(2), pp.357-379.
8. Lee, L.H., Han, S.W., and Oh, Y.H.(1999), "Determination of Ductility Factor Considering Different Hysteretic Models," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 28, No. 9, pp.957-977.
9. Miranda, E.(1991), "Seismic Evaluation and Upgrading of Existing Buildings," Dissertation Paper for Ph.D., University of California at Berkeley.