

탄소성 응답스펙트럼의 일반적인 성질에 대하여 The General Characteristic of Elastic-Plastic Spectra

전규식* 정성찬**
Jeon,Gyoo-Shick Chung,Sung-Chan

ABSTRACT

Seven kinds of hysteric model were used and classified three groups considering the absorbing capacities of strain energy for each model. Four kinds of strong motion earthquake record (two of them were recorded in Japan and the others in U.S.A) are used. The yield strength of building was set in the ratio to the maximum input acceleration (Yield Strength / Maximum Acceleration = 0.5~3.0). Natural periods of structures were varied 0.1~3.0 second with an interval of 0.1 second.

First group : Elastic-Plastic model, Ramberg-Osgood model
Second group : Degrading Tri-linear model, Takeda model
Third group : Slip model, Origin model, Max-D model

Elastic-plastic response spectra were calculated for response velocities, displacement, energy input, ductility factors, accumulated ductility factors. The equivalent response values of M.D.O.F systems against S.D.O.F systems were calculated to compare the relationship of two systems.

1. 서론

본 논문은 여러 종류의 복원력특성(Hysteric Loop)을 갖는 1질점계와 5질점계에 대하여 각종 응답스펙트럼을 계산하고, 이들을 서로 비교함으로써 強地震動이 토목/건축 구조물에 미치는 파괴력의 기본적인 성질을 파악한 것이다. 구조물의 복원력특성은 구조물의 종류, 구조형식, 하중상태, 가력방법 등에 따라 서로 상이하나, 지금까지 여러 실증실험을 통하여 특징이 파악된 복원력모델 중에서 7종류(그림-1 참조)를 선정하고 塑性에너지의 흡수능력이라는 관점에서 다음과 같이 3개의 그룹으로 나누어 각종 복원력특성에 따라 지진응답이 달라지는 영향을 검토하였다.

Group I (소성면적이 가장 큼) : 완전탄소성(Elastic-Plastic)모델, Ramberg-Osgood모델
Group II (소성면적이 중간 정도) : Degrading Tri-linear모델, Takeda모델
Group III (소성면적이 가장 적음) : Slip모델, 원점지향형(Origin)모델, 최대점지향형(Max-D)모델

* 유니슨건설(주) 이사, 공학박사, 정회원
* 유니슨건설(주) 부장, 정회원

본 해석에 사용된 입력지진파로서는 지진파의 주기특성에 따른 차이점을 파악하기 위하여 세계적으로 지진다발국인 일본의 대표적인 지진이라 할 수 있는 八戸(Hachinohe)지진 및 東北大地震, 그리고 미국의 대표적인 지진인 Elcentro지진 및 Taft지진을 사용했다. 탄소성응답을 지배하는 중요한 변수로서는 복원력특성모델의 항복강도(구조물에서의 降伏耐力)를 최대지진가속도와 비(본 논문에서는 “항복전단력계수”라고 표현함)로 취하여 0.5, 1.0, 2.0, 3.0의 4종류로 변화하였다. 그리고 탄성계의 감쇠정수는 1, 5, 10, 20%의 4종류로 변화하였으며, 탄소성계의 지진응답은 주로 소성에너지에 의해 지배되며 감쇠에너지에 의한 영향은 상대적으로 미미함으로 탄소성계는 1%의 감쇠정수에 대해서만 해석하였다.

2. 入力에너지의 概念

진동방정식의 양변에 $dy = \dot{y}dt$ 를 곱하여 지진계속시간 t_0 에 걸쳐 적분하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$M \int_0^{t_0} \ddot{y} \dot{y} dt + C \int_0^{t_0} \dot{y}^2 dt + \int_0^{t_0} F(y) \dot{y} dt = M \int_0^{t_0} \ddot{z}_0 \dot{y} dt \quad \text{----- (1)}$$

여기서, 우변은 지진에 의해 구조물에 입력된 입력에너지의 총합인 E를 나타내고 있으며, 좌변의 제1항은 지진 종료시에 질점계가 갖는 운동에너지를, 제2항은 감쇠기구에 의해 소비된 에너지 W_h 를, 그리고 제3항은 스프링에 의해 축적된 소성에너지 W_s 와 지진종료시의 탄성에너지를 나타낸다. 그러므로 지진 종료시의 운동에너지 및 탄성에너지를 탄성진동에너지 W_e 로 취급하고 식(1)에 대하여 에너지의 개념으로 합산하면 (2)식과 같이 표현할 수 있다.

$$W_s + W_e + W_h = E \quad \text{----- (2)}$$

여기서 소성에너지 W_s 는 대지진시 구조물이 소성변형을 통하여 구조물에 흡수된 일의 총합을 의미하며, 지진동에 의해 구조물이 받는 손상의 정도로 취급될 수 있다.

2.1 無減衰 진동계의 입력에너지

일질점계의 최대속도응답치를 각 주파수에 대하여 표현한 속도응답스펙트럼과 지진파의 주파수 성분에 대한 에너지를 의미하는 Fourier스펙트럼과의 관계를 규명하기 위하여, 지진가속도 $\ddot{z}_0(t)$ 을 받는 감쇠가 없는 진동계를 산정하면 (3)식과 같은 진동방정식으로 표현된다.

$$\ddot{y} + \omega_0^2 y = -\ddot{z}_0(t) \quad \text{----- (3)}$$

Duhamel 적분을 이용하여 (3)식의 해를 구하면, 지진시작 후 t초 경과한 시점에서의 속도응답치는 (4)식과 같이 구해진다.

$$\dot{y}(t) = -\int_0^t \ddot{z}_0(\tau) \cos \omega_0(t-\tau) d\tau \quad \text{----- (4)}$$

(4)식은 無減衰 진동계가 지진종료시의 탄성에너지로 무한히 자유진동하는 해를 의미한다. 그러므로 지진종료시의 진동에너지는 지진파가 구조물에 작용한 총입력에너지와 동일함으로, 자유진동에서의 최대속도를 V_{max} 라 하면 총입력에너지 E는 (5)식으로 표현될 수 있다.

$$E = \frac{MV_{max}^2}{2} \quad \text{----- (5)}$$

여기서, $V_{max} = \sqrt{a^2 + b^2}$, $a = \int_0^{t_0} \ddot{z}_0(\tau) \cos \omega_0 \tau d\tau$, $b = \int_0^{t_0} \ddot{z}_0(\tau) \sin \omega_0 \tau d\tau$

그러므로, V_{max} 은 (5)식에서 $t = t_0$ 시에 $\dot{y}(t_0)$ 의 최대값이며 가속도파형에 포함되어 있는 진동수

ω_0 을 갖는 성분파의 진폭을 나타내는 Fourier Spectrum과 같다. 즉, 무감쇠 탄성계의 총에너지입력은 극히 선택적인 진동수 ω_0 을 갖는 하나의 성분파에 의해 결정된다고 할 수 있다. 또한 이를 달리 표현하면, 무감쇠 일질점계의 진동은 지진파 중에서 질점계의 고유진동수와 동일한 진동수 성분만을 에너지원으로 취하여 운동하는 주파수성분에 대하여 매우 선택적인 특성을 갖고 있다고 말할 수 있다.

2.2 감쇠계 및 소성계의 입력에너지

(5)식에서 정의된 것처럼 탄성계의 총입력에너지를 결정하는 기본요소로서는 진동계가 갖는 고유주기 및 질량이다. 무감쇠 탄성계는 선택적인 한 개의 고유주기만을 갖고 있으나, 점성감쇠를 갖는 탄성계의 고유주기를 감쇠력과 탄성력을 합산한 이력곡선($c\dot{y} + ky$)에서 근사적으로 평가하면 무감쇠탄성계의 고유주기 (T_0), 그리고 이보다 짧은 주기성분(T_1) 및 긴 주기성분(T_2)으로 표현되며, 이러한 세개 고유주기의 크기는 $T_1 < T_0 < T_2$ 의 관계가 있다. 그러므로 감쇠계의 총입력에너지는 $T_1 \sim T_2$ 사이에서의 평균적인 에너지로 결정되며, 감쇠정수가 크면 클수록 $T_1 \sim T_2$ 사이의 간격이 점점 넓어져 평균화되는 주기의 폭이 넓어진다.

소성계의 입력에너지를 결정하는 주기는 복원력모델이 복잡하면 복잡할 수록 일정한 값으로 결정하기는 어려우나, 초기강성에 의해 결정되는 주기와 소성화의 정도에 따라 결정되는 割線剛性의 대한 주기로 결정된다. 즉 복원력모델의 특성 및 항복강도의 크기에 따라 주기가 늘어나는 정도는 서로 상이하나, 탄성계의 고유주기 (T_0)와 소성이 진행됨에 따라 늘어나는 等價의 소성주기(T_1) 사이의 평균적인 입력에너지로 특징지어 질 수 있다.

3. 일질점계의 응답스펙트럼에 대하여

3.1 입력지진파를 기준화하는 방법에 따른 차이

먼저, 사용된 입력지진파의 가속도 크기에 따라 응답의 차이가 발생하는 현상을 없애기 위하여, 각 입력지진파를 동일한 최대가속도의 크기로 基準化하는 방법과 Housner에 의해 정의된 스펙트럼強度로 기준화하는 두가지의 방법을 사용하여 입력지진파의 진폭을 조절하였다. 그림-2의 왼쪽 그림은 Elcentro지진파의 스펙트럼강도(Spectrum Intensity=53cm)로 기준화한 것이며, 오른쪽 그림은 최대가속도(0.2G)로 기준화한 것이다. 최대가속도로 기준화한 경우에는 단주기영역에서는 모든 지진파에 의한 응답의 변동이 적게 나타나고 있으나, 장주기영역에서는 일본의 지진파와 미국 지진파와의 응답의 차이가 확실히 나타나고 있다. 이에 반하여 스펙트럼강도로 기준화한 경우에는 장주기영역에서는 모든 지진파에 대한 변동이 적으나, 단주기영역에서는 양국의 지진파에 의한 응답의 차이가 확실히 발생하고 있다. 이러한 이유로서는 최대가속도는 일반적으로 단주기영역에서 발생함으로 최대가속도로 기준화한 경우에는 단주기영역에서의 응답의 차이가 적게 발생하며, 스펙트럼강도는 장주기영역에서의 가중치가 크므로 장주기영역에서의 변동이 적은 것으로 판단된다. 이러한 사실은 지진파의 주기특성은 지진파가 기록된 지역에서의 표층의 지반특성이 강하게 반영되어 있음을 의미한다.

3.2 속도응답 및 입력에너지의 비교

전절에서 설명한 것처럼 감쇠가 없는 탄성계의 에너지입력은 지진종료시의 잔류진폭이 갖는 운동에너지와 동등함으로, 속도응답스펙트럼은 입력에너지를 (5)식과 같이 속도차원으로 표현한 스

펙트럼의 상한값이 된다. 속도응답스펙트럼과 입력에너지스펙트럼의 유사점으로서의 단주기영역에서는 고유주기와 더불어 응답치가 증가하고 장주기영역에서는 평탄한 형태를 띠고 있다는 점이다. 그리고 상이점으로서의 감쇠정수의 증가와 더불어 속도응답스펙트럼은 소주기영역에 걸쳐서 응답의 크기가 감소하면서 요철이 적어지나, 입력에너지스펙트럼은 무감쇠 입력에너지 스펙트럼의 평균적인 값으로 수렴한다는 점이다. 또한 탄소성계의 단주기영역에서는 항복강도가 낮으면 낮을수록 입력에너지가 증가하나, 장주기영역에서는 평균적인 값을 갖는다.

그림-3, 4는 양자의 상관관계를 비교하기 위하여 4종류의 지진파에 대하여 X축에는 속도응답치를 Y축에는 입력에너지의 속도환산치를 표시한 것이다. 계산된 고유주기로서는 0.1초~3.0초까지 0.1초의 간격으로 합계 120개의 응답치를 표시하였으며, 그림 가운데의 실선은 양자의 1대1 상관관계를 나타낸다. 그림-3에서 알 수 있는 것처럼 감쇠가 없는 탄성계의 속도응답치는 입력에너지에 대한 속도환산치의 상한값으로 나타나고, 감쇠정수가 1%의 경우에는 양자의 상관관계가 강하며, 감쇠정수가 크게 되면 될수록 속도응답은 감쇠에너지가 증가함으로 속도응답이 속도환산치보다 적어진다. 또한 그림-4와 같이 탄소성계에서 항복전단력계수가 적을 경우, 단주기영역에서의 속도응답 및 입력에너지 모두가 탄성속도응답보다 크나 입력에너지의 증가율이 크게 나타나며, 장주기영역에서는 소성계의 속도응답이 탄성계의 속도응답 보다는 적으나 입력에너지는 평균적인 값을 취함으로 입력에너지가 속도응답보다 크게 나타난다. 그리고 각 복원력특성모델에 따른 상관관계의 정도는 다음과 같다. Group III > Group I > Group II

3.3 靛性에너지

지진동에 의해 구조물에 투입되는 에너지입력이 구조물의 탄성에너지와 감쇠작용에 의해 흡수되는 감쇠에너지의 합보다 큰 경우에는 소성에너지의 형태로 구조물에 축적되며, 소성변형이 진행하여 구조물의 소성변형능력을 초과하는 경우에는 붕괴에 이르게 된다. 항복전단력비를 점점 줄여가면서 응답을 추적한 결과, 항복전단력비가 상당히 적은 경우($\alpha_y=0.5$)에는 단주기영역에서는 대부분의 입력에너지가 소성에너지로 흡수됨으로 소성에너지와 입력에너지는 거의 비례관계에 있으며, 그림-5에서 알 수 있는 것처럼 단주기영역에서의 소성에너지 크기는 복원력모델의 소성에너지 흡수능력의 측면에서 구분한 양상과는 달리 Group II > Group III > Group I의 순서로 나타났다. 그 이유로서는 Group II, III는 소성변형의 증대와 더불어 점차로 강성이 떨어지는 복원력특성을 갖고 있으므로 할선강성에 의한 주기가 길게 되며, 그 결과 단주기영역에서의 입력에너지의 증가가 Group I 보다 크게 나타나는 것으로 판단된다. 또한 Group II는 각 주기에 대하여 응답치가 안정되어 있으나 Group III는 변동이 심하게 나타났다. 복원력특성모델의 결보기상 소성에너지를 많이 흡수할 것 같은 Group I 보다 Group II의 소성에너지가 더 크다는 사실은, 부재의 복원력특성을 모델화하는 과정에서 履歷특성을 보다 간단히 하기 위해 靛性劣化가 발생하지 않는 이력특성으로 모델화하면 실제의 지진동에 있어서 소성화 정도를 과소평가하는 경향을 가질 수 있음을 의미한다.

4. 多질점계의 탄소성응답스펙트럼에 대하여

일질점계와는 달리 多질점계의 진동을 규정하는 중요한 변수로서는 각 질점간의 중량비, 항복전단력비, 스프링상수비 등을 들 수 있다. 본 논문에서는 일질점계와 다질점계의 물리량을 비교하기 위하여 다질점계의 기본고유주기가 일질점계의 고유주기와 동일하며, 각 질점에서의 강성을 일정하게 한 다질점모델과 일차모드의 형상이 역삼각형이 되도록 강성분포를 조절한 다질점모델을 선정하여 검토하였으나, 양모델의 고차모드에서의 고유주기가 근소한 관계로 강성분포의 형상에 따른 응답의 차이는 거의 나타나지 않았다. 秋山¹⁾에 의하면 탄성계에 흡수하는 총에너지입력은 質點數에 관계되는 물리량이 아니라 총질량과 일차고유주기에 따라 결정되는 알려져 있으나, 이를 확

장한 탄소성계애의 적용성을 검토하기 위하여 일질점계와 총질량이 동일한 5질점계의 응답을 일질점계와 等價한 응답량으로 환산하여 양자를 검토하였다.

4.1 변위응답 및 속도응답

5질점계의 변위응답과 일질점계의 변위응답을 비교하기 위하여 5질점계의 변위응답은 일차 等價높이에서의 응답으로 계산하였다. 탄성계의 경우, 다질점계의 변위 및 속도응답이 일질점계의 변위 및 속도응답보다 조금 큰 경향을 갖고 있으며, 소성계의 경우에는 항복내력이 적을수록 주기에 따른 변동이 크게 나타나고 있다. 그리고 복원력특성에 따른 경향은 Group I, II의 경우가 Group III보다 변동의 크기가 적게 나타났다 (그림-6).

4.2 입력에너지

5질점계의 응답 및 일질점계의 응답을 동일한 크기로 비교하기 위하여 5질점계에 대해서는 각 질점 응답의 합산치를 취했다. 탄성계의 경우 응답치가 크게되면 고차모드의 영향으로 일질점계의 응답이 조금 크게되는 경향이 있다. 그리고 복원력모델의 특성에 따른 영향을 검토하면 Group III의 입력에너지는 Group I, II보다 고유주기에 따른 변동이 크게 나타나며, 또한 다질점계의 입력에너지는 항복내력이 적으면 적을수록 고차모드의 영향이 강하게 됨으로 일질점계와의 상관관계가 나빠게 되는 경향을 갖는다 (그림-7).

4.3 입력에너지의 높이방향의 분포

우리나라 건축기준법에 의하면 지진하중의 높이에 따른 분포는 (6)식과 같이 정의되어 있다.

$$F_x = \left[\frac{W_x h_x}{\sum_{i=0}^n W_i h_i^k} \right] V \quad \text{----- (6)}$$

이 식의 의미를 분석하면 그림-8과 같이 고유주기가 짧은 저층건물에 작용하는 하중분포는 역삼각형의 형태를 띠고, 고층건물로 갈수록 상부에서의 하중은 크고 하부에서의 하중은 줄어드는 분포형태를 띤다. 즉 고유주기가 긴 고층건물 일수록 2차모드와 같은 고차모드의 영향을 건축시방서 규정에서 반영하고 있다고 할 수 있으며, 구조물이 소성변형을 일으킬 때 각 층의 소성변형율을 일정하게 유지할 수 있도록 구조물의 층별 강성을 조정하고자 하는 의미로도 해석된다. 그러므로 높이 방향으로 이러한 강성특성을 반영한 5질점계 모델에 대하여 소성변형배율(Ductility Factor)을 계산한 그림-8에 의하면, 단주기영역에서 하층의 소성변형배율이 상층의 것보다 크게 나타나는 경향은 있으나, 장주기영역에서는 각층의 소성변형배율이 거의 일정한 값으로 되는 경향이 있다.

5. 결론

- (1) 구조물에 작용되는 입력에너지의 크기는 복원력특성에서 초기강성에 해당하는 고유주기와 소성변형에 따른 활선강성으로 표현되는 주기에 따라 결정된다. 또한 활선강성으로 평가되는 주기의 신장율은 항복내력의 크기 및 복원력모델의 특성에 크게 의존한다.
- (2) 소성에너지의 흡수능력이 부족한 복원력모델에 대해서는 다질점계에서의 입력에너지를 일질점계의 입력에너지로부터 추측하기는 어렵다.
- (3) 건축기준법에서의 하중분포도를 적용하면 주기가 짧은 저층구조물로서 항복전단력비가 적은 경우에는 하층에서의 소성변형배율이 크게 나타나고 있으므로 하층부에서의 피해가 클 것으로 예상된다.

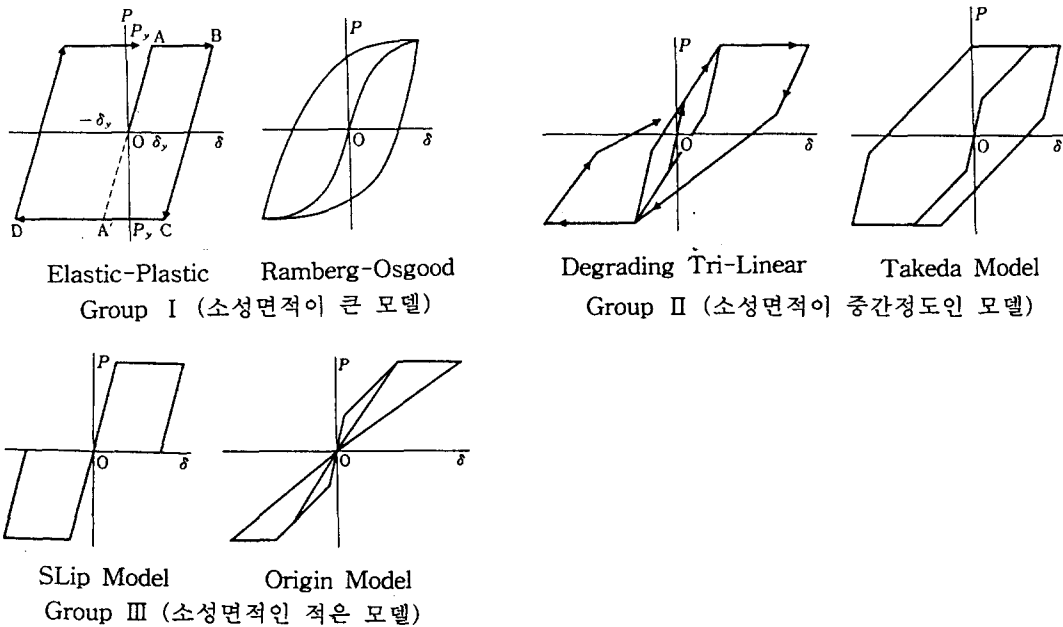


그림-1 소성에너지 흡수능력으로 분류한 각종 복원력특성

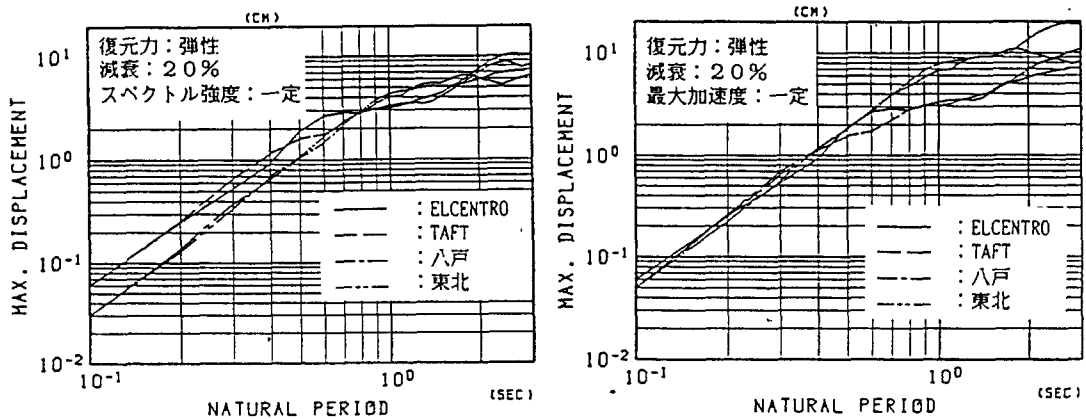


그림-2 입력지진파를 기준화한 방법차이에 의한 응답비교

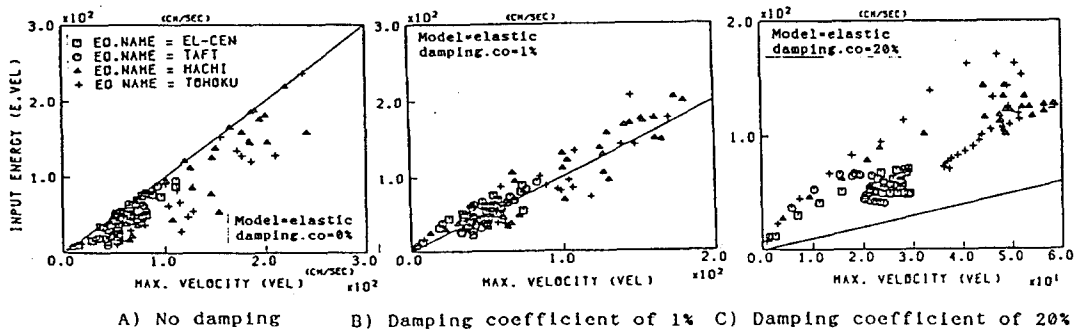


그림-3 탄성계에서의 속도응답치와 입력에너지 속도환산치와의 상관관계

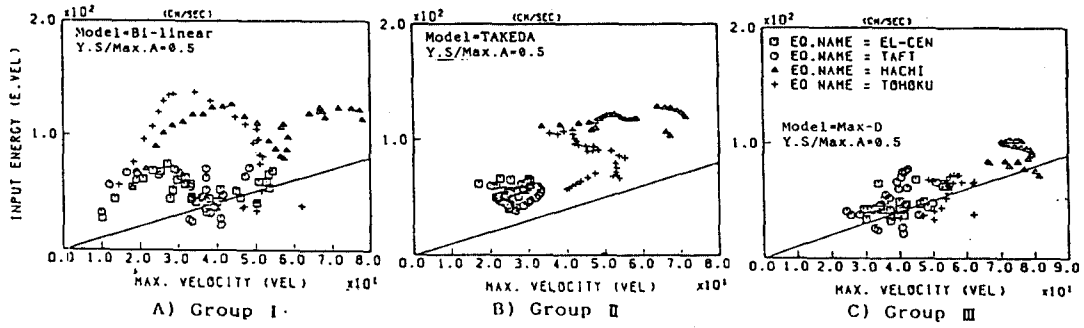


그림-4 탄소성계에서의 속도응답치와 입력에너지의 속도환산치와의 상관관계

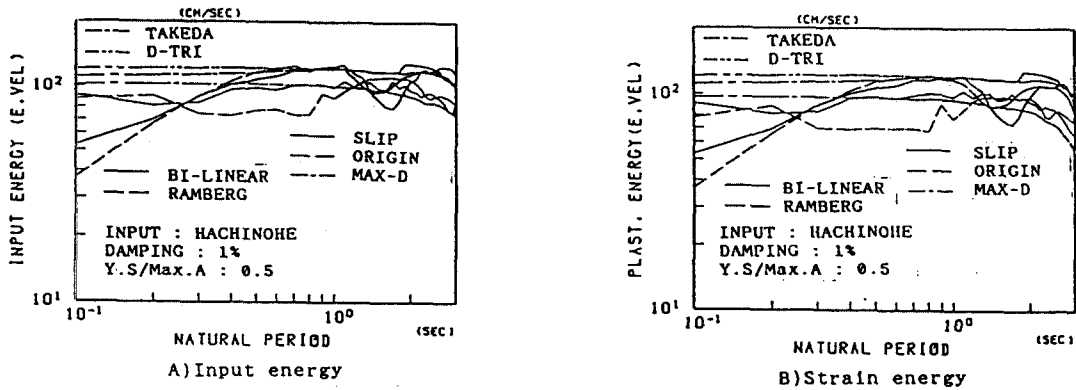


그림-5 복원력특성에 따른 탄소성계 응답의 비교

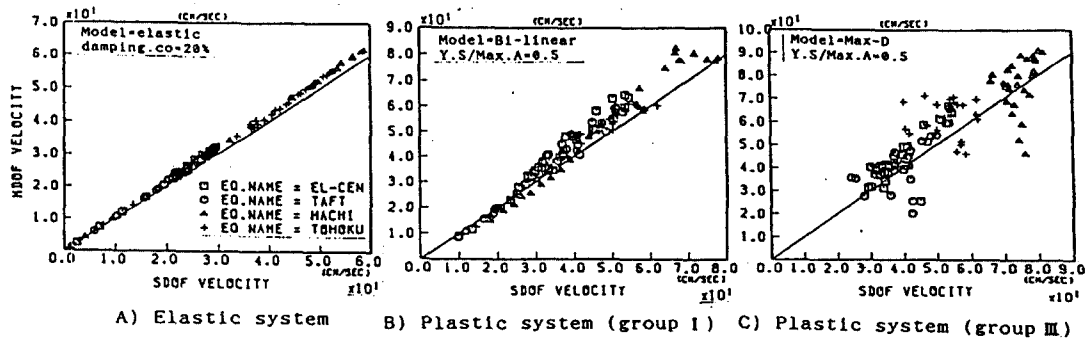


그림-6 일질점계와 다질점계에 있어서 속도응답의 상관관계

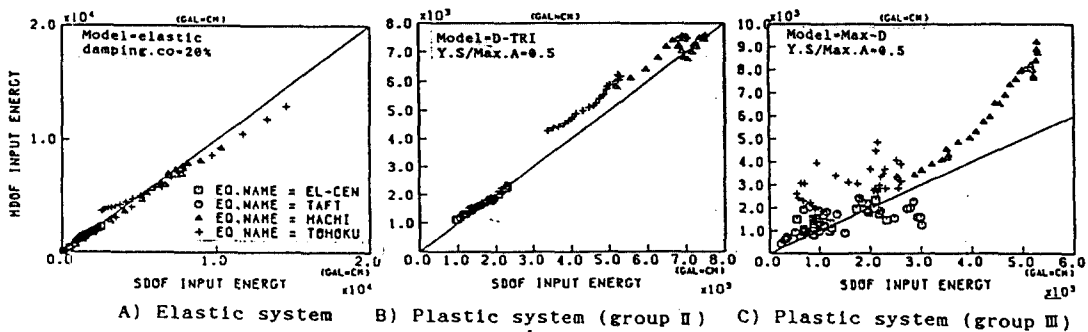


그림-7 일질점계와 다질점계에 있어서 입력에너지의 상관관계

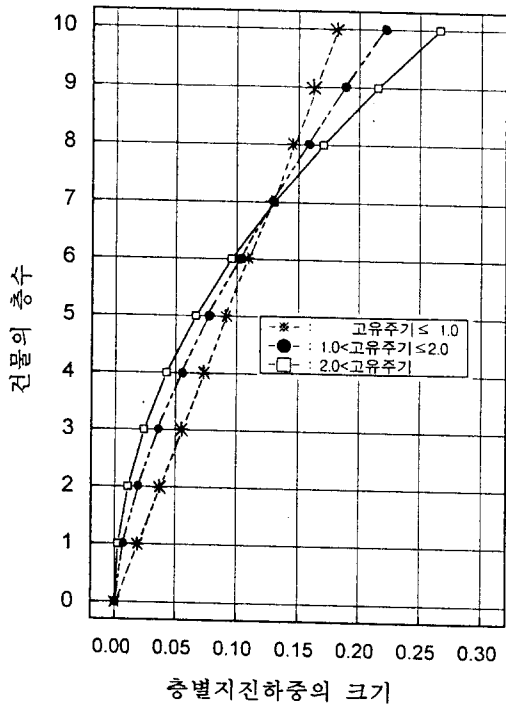


그림-8 건축시방서에 따른 높이별 지진하중의 분포도

층 지진하중의 산정

$$F_x = \left(\frac{W_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n W_i h_i^k} \right) V$$

W_i, W_x : 건물 각층의 유효무게
 h_i, h_x : 건물 밑면에서 각층의 무게중심까지의 높이
 n : 건물의 층수
 x : 건물의 임의 층
 k : 건물의 기본고유주기로 부터 결정되는 상수

$T_a \leq 1.0$: $k=1.0$
 $1.0 < T_a \leq 2.0$: $k=1.5$
 $2.0 < T_a$: $k=2.0$

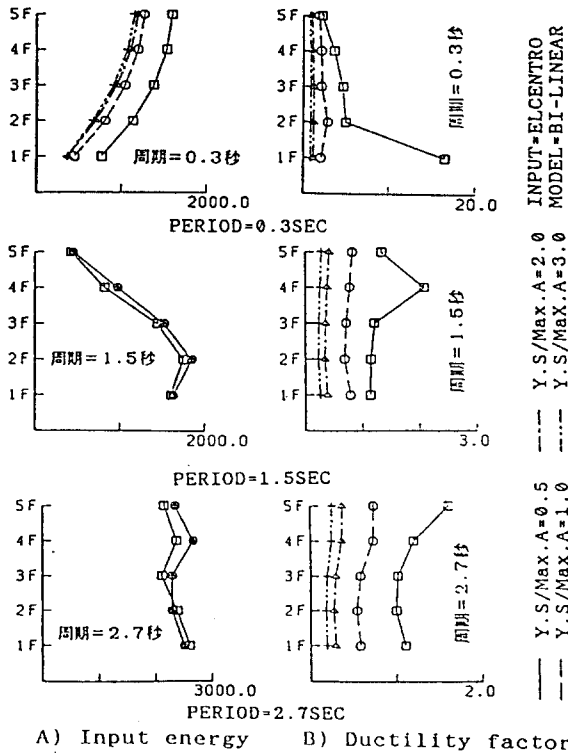


그림-9 다질점계에 있어서 질점의 위치에 따른 최대응답의 추이

【참고문헌】

1. 秋山 宏著(1980), “建築物の耐震極限設計 第2版”, 東京大學出版會
2. MINAMI Tadao(1988), “Elastic-Plastic Response Spectra for Different Hysteric Rules”, EEST., Vol. 16, pp.555-568
3. 田圭植(1988), 弾塑性應答スペクト럼의 一般的인 性質과 震害豫測에의 適用”, 석사학위논문, 동경대학교