

강·연성 혼합 철근콘크리트 건축물의 근사지진해석을 위한 유사일질점계 모델에 관한 연구

권 기 혁

(서울시립대학교 건축·도시·조경학부, 건축공학전공)

Study on the Pseudo-Single Degree of Freedom Model for Seismic Response Analysis Flexible-Stiff Mixed Reinforced Concrete Buildings

Kwon, Ki Hyuk

ABSTRACT

For designing Reinforced Concrete(RC) buildings that resist seismic load with the Flexible-Stiff Mixed building System(FSMS), structural engineers must have many preparatory calculations to determine the P- Δ effect, the amount of prestressing strand braces and the residual deformation, etc. Therefore, it is necessary to make a pseudo single degree of freedom model used in the seismic response analysis of multistory RC buildings with FSMS.

In this study, the following conclusions can be drawn.

- (1) A revised equivalent spring constant(X_v)

$$X_v = U_e U_{st} K_r + 1$$

X_v : The equivalent spring constant used for transforming the multi-degree of freedom model into a single degree of freedom model.

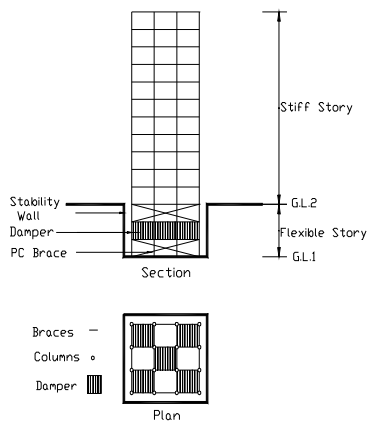
U_e : The modified effective coefficient in accordance with the upper stories(0.2 ~ 0.5).

- (2) The proposed model can be used with the mathematical model for the multistory building with 50kine as an earthquake. But with 25kine, carefully examine whether the proposed model enters into the plastic range or remains elastic.

Key Words : Flexible-Stiff Mixed building System(FSMS), Pseudo single degree of freedom model, Seismic response analysis

1. 서론

이 연구에서 연성층은 건축물의 고유주기를 연장시키기 위해서 인위적으로 그 층의 강성과 강도를 저하시키고, 이로 인한 층의 대변형을 제어하기 위해 프리스트레스된 강재 가새와 댐퍼를 가지고 있는 층을 의미하여, 대개의 경우 건축물의 최하부에 설치되는 층이다. 연성층의 개념은 면진시스템 중 유연성에 의해 건물의 고유주기를 연장시키는 고유주기 연장형 면진시스템의 일종으로 간주될 수 있으나, 기존의 면진시스템이 고가의 감쇠기구와 에너지 흡수 기구를 사용하여야 할 뿐 아니라 적용 가능한 구조물의 규모가 제한되어 있는 단점을 가지고 있는데 비하여 횡구속된 프리스트레스 철근콘크리트 기둥의 고연성능력과 프리스트레스된 강재 가새는 고복원력을 이용한 연성층으로 면진기구의 기능을 대체할 수 있어 보다 경제적이며 기존 면진 방식보다 다양한 적용성을 가지고 있는 구조시스템이다.



*GL.2 : When the S.F.S is placed underground

<그림 1> 강연성층 혼합 건축물의 개념

강·연성 혼합 구조물에 대한 연구는 1929년 Martel이 그 기본개념을⁽¹⁾ 제안한 이 후에 1968년에 Mark Fintel이 에너지 흡수 연약층 (Shock-Absorbing Soft-Story)이론으로 전개

발전시켰다.⁽²⁾

1970년대에는 Clough 등이 상부구조물을 보호하기 위한 연성층의 항복조건 등에 대해 연구⁽³⁾하였고, 최근에는 Ruiz가 연성층 구조물의 비선형 해석에⁽⁴⁾ 대해서, Esteva가 연성층 건축물의 역학적 특성에 관한 연구가 있었다. 또한 일본에서는 Akiyama(秋山)가 강·연성 혼합 철골 구조에 대한 연구⁽⁵⁾⁽⁶⁾, Suzuki(鈴木)가 강·연성 혼합 철근콘크리트구조에 대한 연구⁽⁷⁾를 진행하고 있다.

구조기술자가 복잡한 재료의 특성, 하중, 경계조건 등을 포함한 구조물의 진동문제를 풀기 위해서는 복잡한 요소들을 단순화, 정형화하기 위한 가정과 이상화를 거치게 된다. 일반적으로 지진해석에 채용되는 단순화된 모델은 다자유도를 갖는 다질점계 전단형 모델(multimass shear model)이라 할 수 있다. 구조물의 진동특성이 자유도를 감소시킬 수 있는 특수한 형태의 진동만을 나타낸다면 다질점계 모델의 자유도가 상당히 감소되어 지진응답문제를 푸는데 있어서 손쉬운 해결책을 제시할 수 있을 것이다. 기존의 강·연성 혼합 구조물에 대한 연구의 결과로부터 연성층을 갖고 있는 구조물의 지진응답특성은 연성층의 특성에 따라서 에너지 집중정도나 변형집중정도가 변화될 뿐 아니라 연성층의 강성저하가 일정한 정도에 이르면 일질점계 모델의 지진응답특성과 유사한 형태를 나타낼 수 있다.⁽⁸⁾ 이러한 응답특성을 고려하여 다질점계 모델을 사용한 해석결과와 유사한 해석결과를 만들어 낼 수 있는 일질점계 모델을 제안하여 사용한다면 강·연성 혼합 구조물의 지진해석과정에서 고려되어야 할 연성층의 최대변형, 강재 가새의 양, P- Δ 의 안정성한계 등의 많은 문제점들을 해결하는데 경제적이고 효과적인 대안책으로 적용될 수 있다고 판단된다. 따라서, 본 연구의 목적은 강·연성 혼합 구조물의 다질점계 모델의 지진응답특성을 고찰하여

그 결과를 토대로 유사일질점계 모델을 제안하고, 제안된 모델을 사용한 해석결과의 근사성을 검토하여 제안된 유사일질점계 모델의 유효성을 입증하는데 있다.

II. 해석방법 및 조건

2.1 해석방법

다질점계 모델을 유효한 유사일질점계 모델로 변환시키기 위해서 우선 결정되어야 할 것은 유사일질점계 모델의 유사강성이며, 이 강성은 질점모델의 높이와 항복전단력 등의 유사일질점계 모델을 결정하는데 기초가 될 것이다. 질량은 유사일질점계로 변환하는 과정에서 변화없이 일정하게 유지되어진다. 이 모델의 유사강성을 결정하기 위한 방법으로 본 연구에서 선택한 방법은 기존의 행해진 연구결과와 연성층 구조개념상 고유주기 연장형 면진기구와 유사하다는 것을 기초로 하여 다질점계 해석을 통해 얻어지는 구조물 고유주기와 근사한 고유주기를 만들어내는 일질점계 모델의 유사강성을 찾는 것이다. 구조물의 고유주기는 그 구조물이 가지고 있는 지진응답특성을 표현하는 가장 중요한 요소일 뿐 아니라 강·연성 혼합 구조물의 에너지 집중도나 변형집중도를 평가할 수 있는 요소이며 연성층이 지진저항기구로서의 유효성을 갖는지를 판단하는 근거가 된다. 강·연성 혼합 구조물의 고유주기는 다질점계 모델해석을 통한 고유치 해석방법의 하나인 Jacobi법을 사용하여 구한다. 제안된 유사일질점계 모델의 지진해석에서의 유효성을 검토하기 위해 고유주기를 산정하기 위하여 산정된 구조물의 다질점계 해석결과와 유사일질점계 해석결과 중 구조물의 최대 변위 및 잔류 변형에 대하여 비교하였고, 고유주기를 얻는 과정에서 사용되지 않은 실제 구조물의 지진응답해석을 통해서도 그 유사성을

검토하였다. 연성층의 복원력 특성모델은 연성층에 사용되어지는 주요부재인 PRC (Prestressed Reinforced Concrete) 횡구속 콘크리트 기둥의 복원력 특성과 연성층의 항복 이후의 변형의 조절 및 P- Δ 효과를 억제하기 위해 사용되는 강재 가새의 복원력 특성을 Wakabayashi(若林實)이 제안한 중합의 법칙⁽⁹⁾을 사용하여 얻은 것을 사용한다. 횡구속 프리스트레스 철근콘크리트기둥의 복원력 특성은 프리스트레스량과 횡구속 정도에 영향을 받는 Bi-linear모델을 사용⁽¹⁰⁾하고, 가새는 완전탄성으로 가정한 복원력모델을 적용한다.

2.2 해석조건

본 연구에서 고유치 해석을 위해 사용된 건축물은 최하층부에 강재 가새와 PRC 횡구속 콘크리트 기둥으로 구성된 연성층을 가지고 있으며, 상층부는 일반적인, 특별한 내진저항요소를 갖지 않는, 철근콘크리트층으로 이루어진다.

건축물의 고유주기를 구하는 과정에서 체계적으로 영향요소들에 대한 충분한 검토를 행하기 위해 다음과 같은 가정과 조건을 선정하여 해석을 진행한다.

(1) 건축물의 층수(N_s)는 5층, 10층, 15층, 20층의 4종류로 한다.

(2) 연성층을 제외한 상층부의 기본형은, 각 층의 층고는 3m, 질량은 450tf로 가정하고, 항복 변위는 층고의 1/150인 2cm 이내로 한정하였다. 콘크리트의 영계수는 $2.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$, 기둥의 철근비는 2%를 초과하지 않으며, 콘크리트 강도는 450 kgf/cm^2 이하로 하였다.

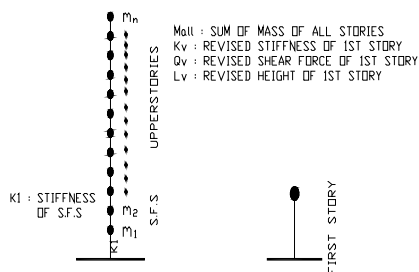
(3) 건축물 전체의 강성분포는 秋山가 제안한 층전단력 분포계수⁽⁵⁾를 기초로 하여 구하였으며, 이 강성분포는 일본에서 일반적으로 사용되

34 권기력

는 Ai분포식⁽¹¹⁾을 사용하여 구한 강성분포에 비해 상층부들의 강성이 적게 나타나는 특성이 있는 식이지만 1층부의 강성은 동일하다. 秋山の 제안식은 에너지 이론에 근거하여 각 층의 손상도가 일정하도록 하는 합리적인 분포식이다. 연성층의 강성은 연성층 강도저감계수(K_r)에 의해 秋山식으로 구한 값을 수정하여 사용한다.

(4) 각 층의 질량변화가 고유주기에 미치는 영향을 고찰하기 위해 각 층의 질량은 300tf에서 600tf까지 변화시켜 해석을 수행하였고, 항복 전단력계수⁽⁵⁾의 경우에는 0.1 ~ 0.6까지 변화시켜 해석을 수행하였다.

본 연구에서 제안한 유사일질점계 모델의 유효성을 검토하기 위해 사용되어지는 실제 건축물은 일본 大阪에 건축된 8층 건축물과 20층 건축물을 선택하였다. 이 건축물은 일본 규준이 제안한 Ai강성분포식에 따라 설계된 철근콘크리트 건축물이다. 20층 건축물의 고유치 해석에 의한 고유주기는 1.08초이고, 이 값은 일본건축학회의 설계규준에서 규정한 약산식($T=0.002H$, H 는 건축물의 높이)으로 계산한 값인 1.19초보다 작은 값이다. 8층 건축물의 고유치 해석에 의한 고유주기는 0.84초로 약산식에 의한 값 0.57초보다 높은 값을 나타내고 있는 건물이다. 모든 건축물의 지진응답특성을 검토하기 위한 지진해석은 다질점계 모델과 유사일질점계 모델을 사용하여 행하였다.(그림 2 참조)



<그림2> 해석모델

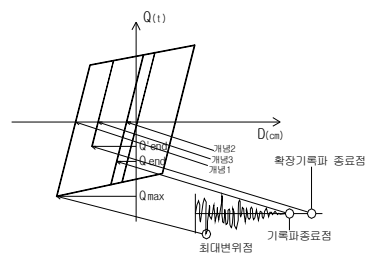
지진해석에 사용된 지진파는 El Centro 1940NS, Taft 1952NS, 그리고 Hachinohe 1968NS이다. 이들 지진파들은 Spectrum Intensity에 의해 표준화되고, 해석결과는 시간각(Δt)을 0.005초로 한 Newmark β 법($\beta=1/4$)을 사용하여 정리한다. 표준화계수는 El Centro를 1로 하였을 때, Taft는 1.98, Hachinohe는 1.24가 되고, 감쇠계수는 탄성영역에서는 3%, 소성영역에서는 5%로 한다. 지진입력파의 크기는 일본건축학회의 규정에 따라 東京지역의 중규모 지진(25kine)과 대규모 지진(50kine)으로 설정한다.

본 연구에서 적용되는 잔류변위는 현재까지 진행된 연구⁽¹²⁾를 토대로 하여 그림3과 같은 3가지 개념을 사용한다.

(1) 최대잔류변위 : 지진응답 해석과정에서 나타나는 최대변위의 위치에서 제하강성에 평행하게 그어서 하중-변위관계도상의 변위축과 만나는 점의 변위량.(개념1)

(2) 종료잔류변위 : 지진응답 해석과정에서 사용되는 기록지진파의 종료시점까지 동적 지진 해석을 수행해서 지진파 종료시점의 변위를 제하강성에 평행하게 그어서 변위축과 만나는 점의 변위량.(개념2)

(3) 확장잔류변위 : 지진응답 해석과정에서 사용된 기록지진파형의 종료시점의 값이 영이 아닌 경우, 이 종료점 값으로부터 단순 감소 코사인 함수를 이용하여 종료값을 영으로 만든 확장기록파형을 입력지진파로 사용한 종료잔류변위량.(개념3)

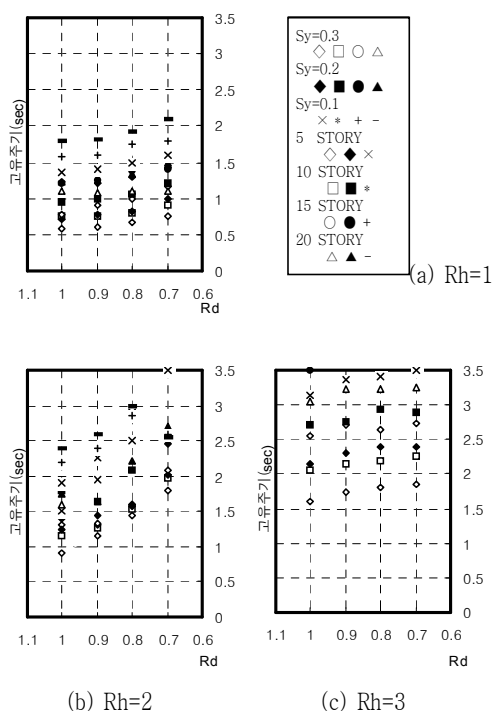


<그림 3> 잔류변위의 개념

Ⅲ. 다질점계 해석결과

3.1 다질점계의 고유치 해석

연성층의 조건을 변화시키며 고유치 해석을 행한 결과, 고유주기에 영향을 미치는 요소 중 그 영향도가 가장 높은 요소는 연성층의 층고(Rh)와 기둥 직경비(Rd)의 상호관계에 의한 것으로 나타났다.(그림4 참조) 항복전단력계수(S_y) 등의 요소들은 고유주기에 영향을 미치는 것은 아니지만 그 영향도가 크지 않으며 각 층의 중량증가나 상층부의 강성분포 변화는 고유주기가 증가됨에 따라 그 영향도가 급속히 상실됨을 알 수 있다. 또한 일반 건축물에서 고유주기를 지배하는 요소인 층수의 영향도 역시 고유주기의 증가에 따라 그 영향력이 크게 감소된다.

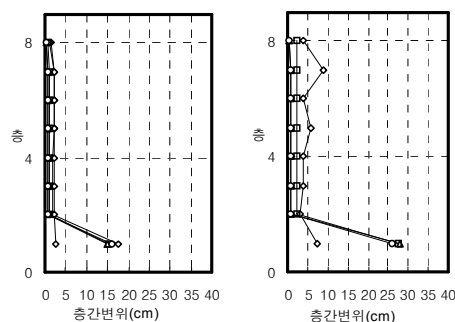


<그림 4> 영향요소에 따른 고유주기 변화

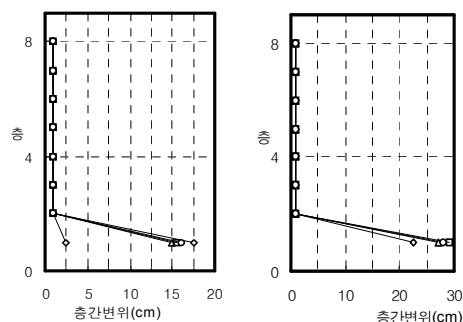
3.2 다질점계 지진해석 결과

그림 5와 6은 실제 8층과 20층 건축물의 최하층을 연성층으로 변환시켜서 고유주기를 연장

시킨 연성층 구조물의 각 지진파에 대한 지진 응답해석결과 중 층간변위를 평균하여 그 값을 나타낸 것이다. 이들 그림으로부터 연성층이 고유주기를 충분히 연장시킬 수 있는 경우에는 지진에 대한 구조물의 변형이 대부분 연성층에 집중되고 상층부의 층간변위는 거의 없는 것을 알 수 있으며, 이런 경향은 다른 층수의 지진 응답해석에서도 동일하게 나타난다.



<그림 5> 8층 건축물의 지진응답해석



<그림 6> 20층 건축물의 지진응답해석

Ⅳ. 유사일질점계모델에 의한 지진 응답해석

4.1 유사일질점계모델

일본건축학회규준은 다질점계 모델의 고유주기에 유사한 고유주기를 만들어내는 일질점계의 등가 스프링 계수(Equivalent Spring Constant, X_o)를 $X_o=0.48+0.52N_s$ 로 규정하고 있다. 그러나 이 등가스프링 계수는 연성층을 갖고 있

36 권기혁

지 않은 건축물. 즉 건축물의 층수가 고유주기를 지배하는 건축물에 적용되어지는 계수이기 때문에 연성층이 있는 건축물에는 그대로 적용될 수 없는 계수이다. 따라서, 이 계수는 연성층의 강성 저감계수(K_r)를 고려하여 다음과 같이 수정된다.

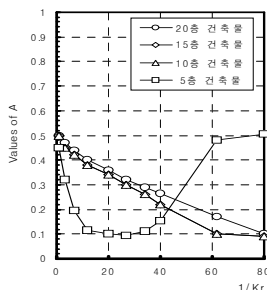
$$X_v = U_e \cdot U_{st} \cdot k_r + 1$$

여기서, X_v 는 수정등가 스프링계수, U_e 는 상층부 영향도 계수, U_{st} 는 상층부의 층수(N_s-1)이다.

위 식의 상수 1은 건축물이 일층인 경우 X_v 는 1이 되어야 함으로 더해진다. 위 식에서 상층부 영향도 계수인 U_e 는 다질점계모델과 일질점계 모델의 고유주기 해석과정으로부터 유도된 다음식으로 구할 수 있다.

$$U_e = \frac{(T_m^2 \cdot K_1 - 4 \pi^2 \cdot m)}{(4 \pi^2 \cdot m \cdot U_{st} \cdot k_r)}$$

여기서 T_m 은 다질점계의 고유주기, m 은 건축물 전체의 질량, K_1 은 연성층부의 기준강도(秋山식에 의해 구해진 값)이다. 그러나 위 식은 실제적으로 적용하여 사용하기에는 그 형태가 복잡할 뿐 아니라 계산과정상에 많은 문제점이 있으므로 이를 해결하기 위해 U_e 의 특성을 파악하여 가장 오차를 적게 발생시키는 상수



<그림 7> U_e 의 계산값

값으로 결정하여야만 실제로 적용될 수 있는 수정등가 스프링계수를 제안할 수 있다. 위 식을 사용하여 계산한 U_e 값을 그림7에 나타내었다. 그림7로부터 U_e 값은 층수에 관계없이 0.2에서 0.5사이에 분포됨을 알 수 있다.

4.2 유사일질점계모델에 의한 지진응답 해석의 근사성검토

유사일질점계 모델의 연성층 구조물의 지진 응답해석에서의 근사성을 검토하기 위해 유사일점계 모델을 제안하는 데에 사용된 구조물에 대한 지진응답 해석을 수행하였다. 이 지진응답해석에 적용된 해석모델은 4가지 종류로 하였다.

- (1) 다질점계 모델
- (2) 연성층 강성을 수정없이 그대로 사용한 단순 일질점계모델(Simple)
- (3) 秋山가 철골계 강연성 건축물의 유사성을 결정하는데 사용한 수정계수(X_s)를 사용한 일질점계 모델
- (4) 본 연구에서 제안한 제안식을 적용하여 연성층 강성을 수정한 일질점계 모델(X_v) 상층부 영향도 계수(U_e)는 0.2로 함

그림8은 5층, 10층, 15층 및 20층인 연성층 구조물의 중규모 지진에 대한 지진응답해석 결과중 다질점계 모델의 최대변형에 대한 각 일질점계의 최대변형의 차를 다질점계 모델의 최대변형으로 나눈 오차율과 잔류변형에 대한 오차율을 나타내고 있으며 잔류변형 X_v 를 사용한 일질점계 모델의 결과에서 최대잔류변형에 대한 오차율만을 그림에 나타내었다. 그림9는 대규모 지진에 대한 해석결과를 나타내고 있다. 그림8에서 최대변형에 대한 오차율은 5층 건축물에서는 10% 미만의 값을 나타내고 있으나 층수가

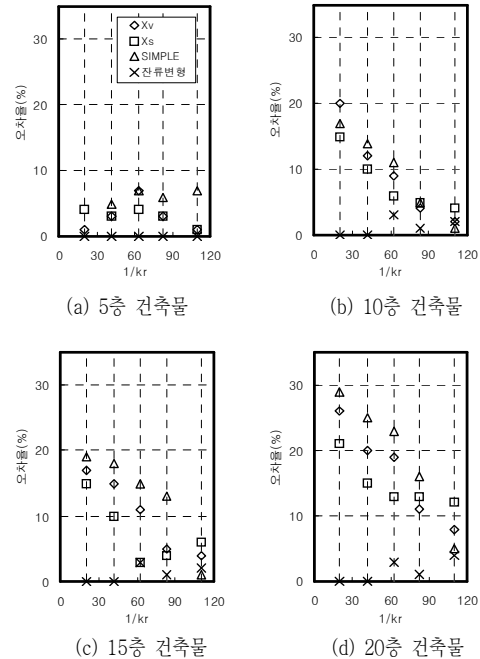
증가함에 따라 그 오차가 증가함을 알 수 있다. 될 수 있다.

잔류변형에 대한 오차는 거의 없다. 이는 중규모의 지진에서 대부분의 경우가 탄성영역 안에서 저항하기 때문에 잔류변형(Kr)이 큰 영역 안에서만 발생하며 이 영역에서의 최대 변형에 대한 오차가 적으므로 잔류변형의 오차는 더욱 적어지게 된다.

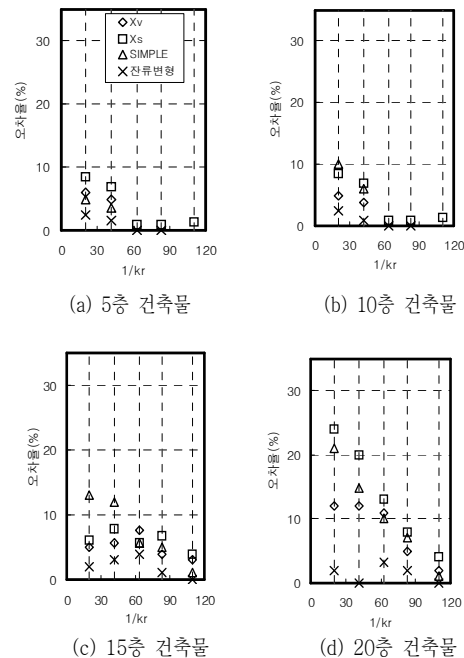
그림9는 대규모지진에 대한 해석결과로서 중규모지진 해석결과와 유사하지만 전체적으로 그 오차율이 낮아진다. 층수증가에 따라 오차율이 증가됨을 나타내고 있으며, 20층의 경우에는 그 오차율이 상당히 큰 것으로 나타나고 있다.

이는 상층부가 고유주기에 미치는 영향력보다 변형에 미치는 영향력이 크기 때문으로 판단되므로 상층부 영향력 계수를 증가시켜야 할 필요가 있다. 잔류변형에 있어서는 대규모 지진에서 약간의 오차율을 보이고는 있으나 그다지 크지 않다. 20층의 경우에도 이러한 현상이 나타나므로 잔류변형에는 상층부가 탄성범위 안에서 저항하므로 영향력이 없음을 알 수 있다.

그림 10과 그림 11은 8층과 20층의 실제 건축물에 대한 지진 응답해석을 행한 결과를 나타낸 것이다. 가정의 해석결과를 참조로 하여 사용된 상층부 영향력계수(Ue)는 20층의 경우 0.5로 결정하여 사용하였다. 이들 그림으로부터 8층 건축물보다는 20층 건축물이 전반적으로 안정된 결과를 나타냄을 보여주고 있으며, 8층 건축물의 경우 강성감소계수가 13인 경우에 급격한 오차율의 증가를 나타냄을 보여주고 있다. 이것은 다질점계 모델과 일질점계 모델들의 항복차에 의한 것이며, 유사일질점계 모델의 적용에 있어서 이런 경향에 대한 주의가 필요하다. 이러한 항복차는 잔류 변형의 검토에서 무한대의 값이 나오므로 판단할 수 있으며, 이 경우의 일질점계 해석결과는 근사값으로 사용될 수 없다. 따라서 일질점계 근사해석에서 잔류변형의 검토는 근사값의 사용여부를 결정하는 기준이

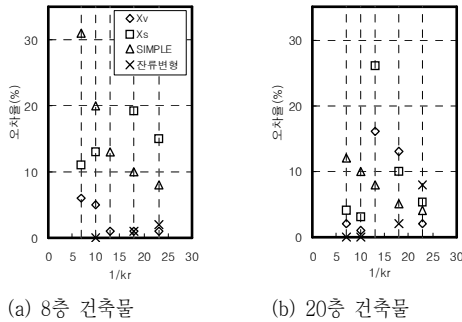


<그림 8> 중규모 지진에 대한 지진응답해석결과의 오차율

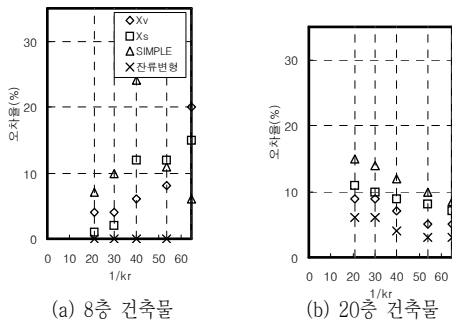


<그림 9> 대규모 지진에 대한 지진응답해석결과의 오차율

38 권기혁



<그림 10> 중규모 지진에 대한 지진응답해석결과 오차율



<그림 11> 대규모 지진에 대한 지진응답해석결과 오차율

V. 결론

본 연구를 통해서 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

1) 연성층 건축물의 지진응답해석에 적용하기 위한 유사일질점계 모델의 유사강성을 구하기 위한 수정강성계수는 다음 식으로부터 구해진다.

유사일질점계의 수정강성계수:

$$X_v = U_e \cdot U_{st} \cdot k_r + 1$$

2) 유사일질점계의 수정강성을 구하기 위해 사용되어지는 상층부 영향력계수(U_e)는 0.2~0.5 사이에 분포되어지며, 유사일질점계 모델을 지진응답해석에 적용할 경우에는 건축물의 층수증

가에 따라 그 값을 증가시키는 것이 바람직하다.

3) 유사일질점계 모델을 적용시, 간류변형에 대한 검토는 근사값의 적용여부를 판단하는 기준이 될 수 있다.

4) 유사일질점계 모델에 의한 해석결과의 근사성은 대규모지진에 대한 경우가 중규모지진에 대한 경우보다 훨씬 높으며 안정되어있다.

본 연구에서 제안한 유사일점계의 모델은 연성층 건축물의 지진응답해석에 적용하였을 경우, 다질점 모델해석결과에 근사한 결과를 만듦으로써 연성층 건축물의 기본설계를 위한 예비계산에 적용되어질 수 있다.

감사의 글

본 연구는 서울시립대학교 1998년 교내학술연구비의 지원에 의하여 수행되었음.

<참 고 문 헌>

1. Martel.R.R., The Effects of Earthquakes on Buildings with a Flexible First Story, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.19, No.3. 1929.
2. Fintel.M. and F.R.Khan, Shock-Absorbing Soft Story Concept for Multistory Earthquake Structures, Journal of ACI., May, 1969, pp.381-390.
3. Clough.D.P. and R.W.Clough, Earthquake resistance of Buildings with a Soft First Story, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.1, 1973, pp.347-355.
4. Ruiz.S.E. and R.Diederich, The Mexico Earthquake of September 19,1985 - The Seismic Performance of Buildings with

- Weak First Story, Earthquake Spectra, Vol.5, No.1, 1989, pp.89-102.
5. Akiyama,H., Prediction for Seismic Responses of Flexible-Stiff Mixed Structures with Energy Concentration in the First Story, AIJ., Vol.400, June 1989, pp.77-84(in Japanese)
6. Akiyama,H., D's Values for Structures Designed by Energy Concentration Concept, AIJ., Vol.341, July, 1984. pp.145-485(in Japanese)
7. Kwon,K.H., K.Suzuki, and S.Wen, Extending the Natural Period of Concrete Buildings with Soft-First-Story Mechanism, Technology reports of Osaka University, Vol.44, No.2178, April, 1944, pp.143-149
8. Kwon,K.H, K.Suzuki, and S.Wen, Behavior of Earthquake-Response of Concrete Buildings Having the Natural Period Extended by Soft-First-Story, CAJ Review, Vol.16, No.2, 1944, Yokohama, pp.1295-1300.
9. Wakabayashi,M., Hysteresis Model for Structural Members, Technology Reports of Kyoto Univ., April, 1984, pp.199-213(in Japanese)
10. Suzuki,K., Nakatsuka,T, and Cai,J., Ductile Behavior and Hysteresis Characteristics of Partially Prestressed Concrete Column with Circular Spiral Reinforcement, CAJ Review, 1985, pp.318-321
11. 日本建築學會, 鐵筋コン크리트構造計算基準·同解説, 1982.
12. Wen,S., K.Suzuki and Kwon,K.H., Prediction of Response in Ultimate Stage for Multistory Concrete Frames with Soft-First-Story Subjected to Ground Motions, Vol.15, No.2, 1993, Kobe, pp.321-1326.