

고차진동모드의 영향을 고려한 층지진하중

The Effect of Higher Vibration Modes on the Design Seismic Load

이 동 근* 이 석 용** 신 용 우***
Lee, Dong Guen Lee, Seok Yong Shin, Yong Woo

ABSTRACT

In current practice of earthquake resistant design the equivalent lateral force procedure is widely used for its simplicity and convenience. But the equivalent lateral force procedure is derived based on the assumption that the dynamic behavior of the structure is governed primarily by the fundamental vibration mode. Therefore proper prediction of dynamic responses of the structure is unreliable using the equivalent lateral force procedure when the effect of higher vibration modes on the dynamic behavior is negligible.

In this study design seismic load which can reflect the effect of higher vibration modes is proposed from the point of view of proper assessment of story shears which have the major influence on the design moment of beams and columns. To evaluate the effect of higher modes, differences between the story force based on the equivalent lateral force procedure specified in current earthquake resistance building code and the one based on modal analysis using design spectrum are examined. From these results improved design seismic load for the equivalent lateral force procedure which can reflect the effect of higher vibration modes is proposed.

1. 서 론

일반적으로 구조물의 내진설계에 있어서는 계산상의 간편성과 소모되는 시간과 비용의 절감을 위해 등가정적해석법을 주로 사용한다. 등가정적해석법에서는 건물의 동적 특성과 총 중량에 비례하는 밀면전단력을 구하고, 이 밀면전단력으로부터 건물의 각층에 작용하는 층지진하중을 구한다. 등가정적해석법은 건물의 거동이 주로 기본진동모드에 의하여 지배적인 영향을 받는다는 가정하에서 유도되었으므로 그에 따른 층지진하중의 분포모양도 주로 기본진동모드의 형상으로 표현된다. 그러므로 고차진동모드의 영향이 큰 구조물에 대해서는 고차모드의 영향을 고려하기 위하여 Uniform Building Code(UBC88)에서는 주기가 0.7초 이상인 경우에는 밀면전단력의 일부를 건물의 최상층에 작용시키고 ATC3-06에서는 k계수를 이용하여 보정한다. 이러한 방법들에서는 등가정적해석법으로는 예측할 수 없

는 고차진동모드의 영향을 고려하기 위하여 건물의 상부층 또는 최상층에 작용되는 층지진하중을 증가시켜서 각 층의 전단력을 증가시키고 있다. 따라서 고차진동모드의 영향을 적절히 고려했다기 보다는 각층의 전단력을 일률적으로 증가시켜서 전체적으로 안전측인 설계가 되도록하고있다. 그러므로 본 연구에서는 건물의 동적거동에 미치는 고차모드의 영향이 적절히 고려된 층지진하중의 분포에 대해서 알아본다. 층지진하중의 분포를 개선하기 위하여 현행 내진설계 기준의 등가정적 해석법에 쓰이는 층지진하중과 모드해석을 이용하여 얻은 층지진하중의 차이를 파악하고, 이로부터 고차모드의 영향이 고려된 층지진하중의 분포를 제안한다. 이 층지진하중으로부터 구한 층전단력은 등가정적해석법에 의한 층전단력분포보다는 모든 모드의 영향이 고려된 모드해석의 결과에 더 가까운 모양을 보일 것이다. 그리고 이 결과를 응답스펙트럼 해석법(response spectrum analysis)과 시간력 해석법(time history analysis)의 결과와 비교 분석하여 본 연구에서 제안한 층지진하중의 분포를 사용하면 등가정적해석법으로도 고차진동모드의 영향을 충분히 고려할 수 있음을 보여준다.

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 조교수
** 학생회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
*** 학생회원, 한국과학기술원 토목공학과 석사과정

2. 층지진하중을 구하기 위한 개선된 방법

일반적으로 건물에 수평력이 가해지면 각 부재의 휨모멘트는 층전단력에 의하여 주로 결정되고 기둥의 축력은 전도모멘트에 의하여 결정된다. 그러나 현재 내진설계에서 널리 사용되는 등가정적해석법에 의하여 얻어진 층전단력과 전도모멘트의 분포를 구조물의 동적 특성이 충분히 고려된 모드해석법이나 시각력 해석법에 의한 결과와 비교해보면 상당히 큰 차이를 보이는데 이는 건물의 동적거동에 미치는 고차모드의 영향이 충분히 고려되지 못한 결과라고 할 수 있다.

본 연구에서는 설계에 직접적으로 영향을 미치게 되는 층전단력을 적절히 산정하는 것을 주요 관점으로 하여 새로운 층지진하중과 층전단력을 얻고자 한다. 현행 내진설계 기준의 등가정적해석법에 쓰인 층지진하중과 모드해석을 이용하여 얻은 층지진하중의 차이를 파악하고 이로부터 고차모드의 영향이 고려된 층지진하중의 분포를 제안한다. 모드해석법에 의하여 층전단력을 구할 때, 일반적으로 각 모드에서의 층지진하중을 구하여 그 값들을 the square root of sum of squares(SRSS)로써 조합하여 층지진하중을 구한다. 그리고 각 층의 전단력은 SRSS로 구한 층지진하중을 합하여 구할 수 있다. 이러한 방법에 따라 층지진하중을 구하면 SRSS 과정에서 층지진하중의 부호가 무시된 채 조합되므로 고차모드의 값이 과장되게 되므로 고차모드의 영향을 적절히 반영할 수 없게 된다. 그러므로 본 연구에서는 층지진하중을 구할 때 고차진동모드의 영향을 정확히 고려하기 위하여 다음과 같이 층지진하중을 구하였다. 먼저 각 모드에서의 층전단력을 SRSS하여 층전단력을 구하고 이 층전단력의 차이로부터 층지진하중을 얻는다(그림 1). 이러한 방법으로 층지진하중을 구하면 각 모드에서의 층전단력을 구할때 그 모드에서의 층지진하중의 부호를 고려할 수 있기 때문에 고차진동모드의 영향을 충분히 고려할 수 있다. 그러므로 이렇게 구한 층지진하중은 모든 진동모드의 영향이 고려되었고, 층지진하중을 건물의 주요 설계 관점인 층전단력으로부터 유도하였으므로, 현재 사용되고 있는 내진설계 기준에서 제시되는 등가정적해석법의 층지진하중보다 실제 건물의 거동을 정확히 예측할 수 있는 방법이다.

3. 등가정적해석법과 모드해석법의 층지진하중과 층전단력의 비교

본 연구에서는 등가정적해석법과 모드해석법으로 구한 층지진하중의 차이를 바탕으로 고차진동모드의

영향이 고려된 층지진하중을 구하였다. 두 방법으로 구한 층지진하중과 층전단력의 차이를 구하기 위하여 각각 층수와 기본진동주기가 다른 대상구조물을 선택하여 등가정적해석법과 모드해석법으로 결과를 구해 비교하였다.

대상구조물은 기본진동주기가 각각 1.0초, 2.0초와 3.0초인 10층, 20층, 30층의 1경간 모멘트 저항 뼈대 구조물을 선택하였다(그림 2).

등가정적해석법으로 구한 층지진하중, 층전단력과 모드해석법으로 구한 층지진하중, 층전단력을 비교하기 위해 먼저 등가정적해석법에 의한 결과는 ATC3-06의 방법에 따라 구하였다. 모드해석법에 의한 결과는 역시 ATC3-06에서 규정한 설계스펙트럼을 이용하여 구하였다. 일반적으로 모드해석법을 이용하여 구한 밀면전단력은 등가정적해석법으로 구한 값보다 작은 값을 나타낸다[8]. 그런데 본 연구에서는 층지진하중과 층전단력의 분포양상을 비교하기 위해 모드해석법으로 구한 밀면전단력을 ATC3-06의 결과와 동일하게 조정하여 분포양상을 비교한다(그림 3(a), (b), (c)).

현재 쓰이는 등가정적해석법에서는 기본진동모드만을 고려하고 고차진동모드의 영향을 고려하기 위해 각층에 작용되는 층지진하중을 다음과 같이 조정한다. ATC3-06의 방법에 따르면 기본진동주기가 긴 경우에는 k계수를 사용하여 분포모양이 포물선에 가까운 층지진하중을 구한다. 그리고 UBC88에서는 밀면전단력의 일부를 최상층에 더하여 준다. 이에 비하여 모드해석법에서는 모든 진동모드의 영향을 고려하여 층지진하중을 구한다. 모드해석법으로 구한 층지진하중과 ATC나 UBC방법으로 구한 층지진하중을 비교하면 다음과 같은 차이를 보인다. 먼저 ATC의 결과와 비교해보면 모드해석법에 의한 층지진하중은 상부층과 하부층에서는 더 큰값을 나타내고 중간층에서는 작은 값을 나타낸다. UBC의 결과와 비교해보면 ATC와 비슷한 양상을 보이는데 최상층에 더해주는 F_v 의 영향으로 최상층에서 만든 모드해석법에 의한 층지진하중이 주기가 길수록 더 작은 값을 보인다. 그러므로 현행 등가정적해석법에서는 고차진동모드의 영향을 고려하기 위해 건물의 상부층의 층지진하중을 증가시켜 주는데 실제로는 상부층뿐만 아니라 하부층에도 층지진하중을 증가시켜주어야함을 알 수 있다.

층전단력을 비교해보면, ATC경우는 중간층의 층지진하중이 모드해석법의 결과보다 크게 산정되기 때문에 층전단력도 중간층의 값이 크게 산정되었다. UBC경우는 주기가 길수록 집중하중 F_v 가 커져 전체적으로 전단력이 과다하게 산정된다는 것을 알 수 있다.

4. 새로운 층진하중의 유도

앞절에서 등가정적해석법으로 구한 층진하중과 층전단력을 모드해석법으로 구한 것들과 비교해 보았다. 일반적으로 층수와 주기가 증가하면 고차모드의 영향이 커지게되므로 등가정적해석법의 결과와 모드해석법의 결과가 차이가 많아진다는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서는 ATC3-06의 k 계수가 1.0인 경우의 층진하중을 기준으로하여 모드해석법의 결과와의 차이를 구하여 고차모드의 영향이 고려되고 또한 층전단력으로부터 유도된 층진하중의 분포를 얻고자 한다.

먼저, ATC3-06에서 기본진동주기가 긴 구조물의 고차모드의 영향을 고려하기 위한 k계수를 1.0으로 하여 층진하중을 구한다. 그리고 설계스펙트럼을 이용한 모드해석법의 층진하중을 구한다. 여기서 실제 모드해석법의 밀면전단력이 등가정적해석법의 밀면전단력보다 작게 나오므로 밀면전단력의 값이 같도록 조정하여 층진하중을 얻는다. 위의 두 층진하중의 차이를 알아보기 위해 k계수를 1.0으로 한 ATC3-06의 결과를 세로축으로하여 모드해석법과의 차(ΔF)를 그림 4와 같은 순서로 구한다. 여기서 ΔF를 +, - 면적으로 나타내면 그림 5와 같은데, 주기와 층수에 따라 분포 양상이 일정한 규칙을 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

그림 6에서 ΔF의 분포 양상을 자세히 살펴보면 다음과 같다.

ΔF값이 0 이되는 세 점은 구조물의 밀면, 그리고 A, B 점이 된다. 여기서 A 점의 위치는 구조물의 주기와 층수에 관계없이 구조물 전체 높이(H)의 0.38 배 정도이다. B 점의 위치는 주기에 따라 조금씩 다른데 주기가 0.1NS(구조물의 층수)와 같으면 0.87 H 이고, 주기가 0.1NS 보다 작으면 아래로 내려가며 0.1NS보다 크면 위로 올라가는 경향을 보인다. 또한, ΔF의 폭은 같은 층수일 경우에 주기가 커짐에 따라 작아지는 경향을 보이고, 주기가 같을 경우에 층수가 클수록 커짐을 알 수 있다. 그러나 ΔF의 폭은 밀면전단력에도 관계가 있으므로 주기나 층수에 직접적으로 비례하지는 않는다. 이때 밀면전단력을 같게 놓았으므로 + 면적과 - 면적의 합은 항상 0 이 되어야 한다. 본 연구에서는 구조물의 주기와 층수, 밀면전단력, 그리고 밀면으로부터의 높이를 변환요소로 하여 ΔF의 분포식을 유도한다. 본 연구에서는 A 점, B 점의 위치를 각각 0.38H, 0.87H로 하고 이 세점(밀면, A, B점)을 근으로 가지는 삼차방정식으로써 ΔF의 분포식을 유도하였다. ΔF에 대한 식은 다음과 같다.

$$\Delta F(i) = -0.35V \frac{\sqrt{T}}{F10} \frac{1}{H^3} C_1 C_2$$

$$C_1 = h_i (h_i - 0.38H) (h_i - 0.87H)$$

$$C_2 = \left(\frac{h_i}{H} + 0.65 \right)$$

여기서, V: 밀면전단력(Base Shear)
T: 구조물의 기본 주기(sec)
F10: (NS/10)^{0.48}
NS: 구조물의 층수
h_i: 밀면으로부터의 i 층의 높이
H: 밀면으로부터의 최상층의 높이

따라서 개선된 층진하중은 다음과 같이 구할 수 있다. ATC3-06의 k 계수가 1.0인 직선분포의 층진하중에 ΔF를 각 층별로 더해주면 모드해석법을 이용한 결과와 근사적으로 같은 층진하중을 얻을 수 있다(그림 7). 즉, 상층부와 하층부에서는 + ΔF 값의 작용으로 증가하고 중간층에서는 -ΔF 값의 작용으로 감소한다. 그러므로, 위의 식을 이용하여 다음과 같이 고차모드의 영향이 고려된 층진하중을 구할 수 있다.

$$F(i) = \frac{w_i h_i}{\sum w_x h_x} V + \Delta F(i)$$

각 층의 전단력은 다음의 식으로 구한다.

$$V_j = \sum_{i=1}^j F_i$$

V_j: j 층에서 j번째 층의 전단력
F_i: i 층에서 i번째 층의 층진하중

5. 개선된 층진하중과 층전단력의 검증

제안된 층진하중과 층전단력은 설계 스펙트럼을 이용한 모드해석법의 결과로부터 개선된 것이므로 설계 스펙트럼을 이용한 모드해석법의 결과와는 거의 일치함을 알 수 있었다(그림 7).

제안된 방법의 검증을 위해 다음의 두가지 실제 지진에 대한 구조물의 거동을 모드해석법과 시가력 해석법으로 구하여 제안된 방법과 비교해 보았다. 비교 방법으로는 구조물 설계시 직접적으로 영향을

미치는 충전단력을 기준으로하여 모드해석법과 시각력해석법의 결과를 비교했다. 여기서 모드해석법의 결과는 충전단력을 SRSS기법으로 먼저 구한 후 층지진하중을 구하였고 시각력해석법의 결과는 각 층의 최대전단력을 구해 층지진하중을 얻었다. 각 방법으로 구한 밀면전단력은 ATC3-06의 값에 일치하도록 조정하였다. 해석에 사용된 지반기록은 EI Centro(1940, S00E)과 Taft(1952, N21E)이며, 사용된 지반 기록은 지진에 대한 가속도 스펙트럼이 ATC3-06의 설계 스펙트럼과 비슷한 값을 갖도록 하기 위해 최대지반가속도(peak ground acceleration, PGA)를 0.4g로 조정하여 사용하였다.

층지진하중과 전단력의 분포를 그림 8-9에 나타내었다. 제안된 층지진하중과 충전단력은 여러가지 지진의 특성을 조합한 설계스펙트럼을 이용한 모드해석법으로부터 구한 것이므로 해석에 사용된 두 지진에 대한 결과와 정확히 맞지는 않다. 모드해석법의 결과를 보면, EI Centro 지진의 경우에는 개선된 층지진하중과 전단력의 분포에 비해 별로 차이가 없지만 Taft 지진의 경우에는 상층부와 하층부에서 개선된 값보다 크게 나타나고 중간층에서는 더 작게 나타난다. 또한 층수가 커지고, 기본진동주기가 길어질수록 차이가 크게 나타남을 알 수 있다. 그 이유는 다음과 같다. 일반적으로 본 연구에서 선택한 대상구조물과 같은 정형구조물은 기본진동주기를 1이라 할 때 2차진동모드의 주기는 기본진동주기의 1/3을 가지고, 3차진동모드의 주기는 기본진동주기의 1/5을 가진다. 그런데 Taft지진의 경우에 가속도 스펙트럼(그림 10. (b))을 보면 각각의 기본진동주기에 대하여 2차, 3차 진동주기를 가지는 부분에서 가속도 스펙트럼값이 설계스펙트럼 값보다 상대적으로 크게 나타나고 있다. 또한 2차, 3차 진동모드는 나머지 고차모드보다 모드참여계수가 상대적으로 크므로 Taft지진 기록을 사용했을 때는 고차모드의 영향이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 그러나 EI Centro지진의 경우에는 모드참여계수는 구조물의 특성이므로 Taft지진의 경우와 같지만 Taft지진과는 달리 2차, 3차 진동주기를 가지는 부분에서의 가속도 스펙트럼(그림 10. (a)) 값이 그리 크지 못하므로 고차모드의 영향이 크게 나타나지 않고 있다. 시각력해석법의 결과와 제안된 방법의 결과와의 차이는 모드해석법의 경우보다 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 특히 Taft(N21E) 지진에 대한 결과가 고차모드의 영향을 뚜렷하게 나타내고 있다.

위의 결과에서 보는 바와 같이 제안된 방법의 결과가 모드해석법이나 시각력해석법의 결과에 현행 등가정적해석법의 결과보다 근접하는 결과를 보인다.

6. 결론

본 연구에서는 구조물 설계시 주로 쓰이게되는 등가정적해석법에 구조물의 동적 특성을 조금 더 정확하게 나타낼수 있는 개선된 층지진하중의 분포를 제안했다. 특히 구조물에 횡력이 작용할 때 각 부재의 휨모멘트는 전단력에 의해 결정되고 기둥의 축력은 전도모멘트에 의해 결정되므로 부재 단면을 결정하는데 직접적인 영향을 미치는 충전단력을 정확히 예측하기 위한 관점으로부터 층지진하중을 유도하였다.

본 연구 결과들을 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- ①. 개선된 층지진하중과 전단력의 분포는 현행 등가정적해석법의 결과보다 동적 특성을 잘 나타내고 있다.
- ②. 고차모드의 영향이 충분히 고려된 개선된 층지진하중과 전단력은 응답스펙트럼을 이용한 모드해석법의 결과와 근접한 결과를 보이며, 시각력해석법 결과에 대해서는 기존의 등가정적해석법의 결과보다는 향상된 결과를 보인다.
- ③. 제안된 층지진하중의 분포식이 다소 복잡하지만 등가정적해석법의 수행으로 구조물의 동적 특성을 고려할 수 있다는 잇점이 있다.
- ④. 앞으로의 과제는 제안된 식을 좀더 단순화시켜 실제 설계에 쉽게 적용할 수 있도록 해야한다.

참고 문헌

1. Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings, ATC, April, 1980, 2nd printing.
2. Uniform Building Code, 1988.
3. Dong-Guen Lee, "Accurate and Simplified Models for Seismic Response Prediction of Steel Frame Structures", February, 1984.
4. N.M. Newmark and W.J. Hall, "Earthquake Spectra and Design", Earthquake Engineering Research Institute, 1982.
5. Anil K. CHOPRA, "Dynamics of Structures a Primer", Earthquake Engineering Research Institute, 1980.
6. G.W. HOUSNER and P.C. Jennings, "Earthquake Design Criteria", Earthquake Engineering Research Institute, 1982.
7. R.W. Wiegel, "Earthquake Engineering", Prentice Hall, 1970

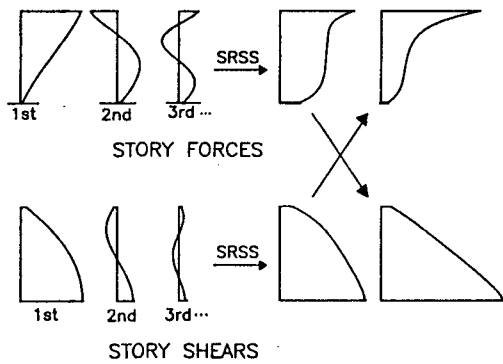


그림 1. 모드해석법에서 층전단력과 층지진하중을 구하는 과정(화살표는 하중을 구하는 방향)

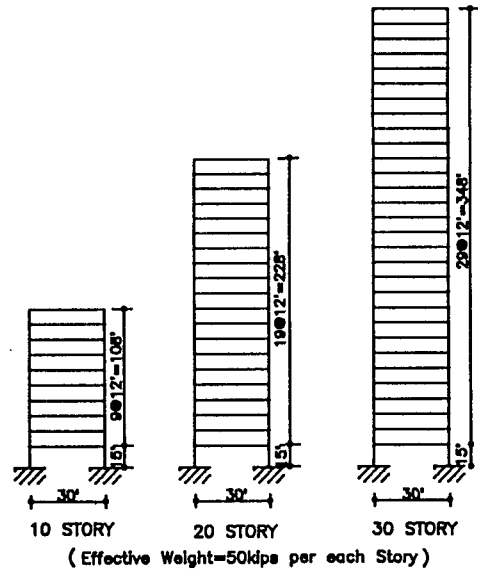
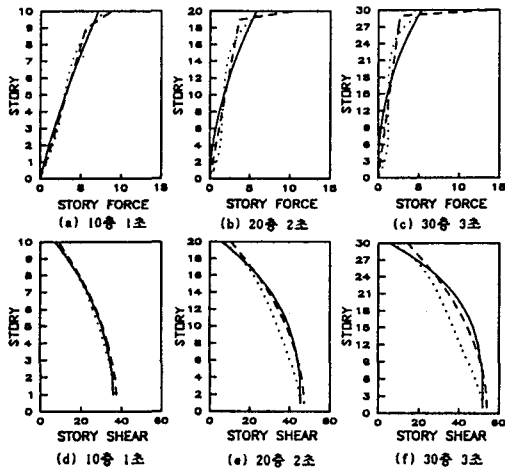


그림 2. 대상구조물



— ATC3-06 - - - UBC88 MODAL ANALYSIS

그림 3. 동가정적해석법과 모드해석법의 층지진하중과 층전단력의 분포

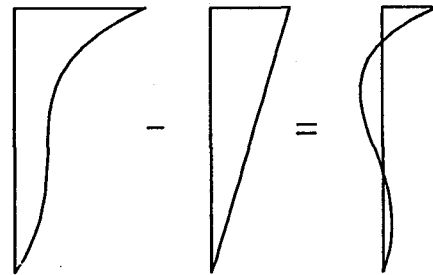


그림 4. 모드해석법과 ATC(k=1.0)의 층지진하중으로부터 ΔF의 유도 과정

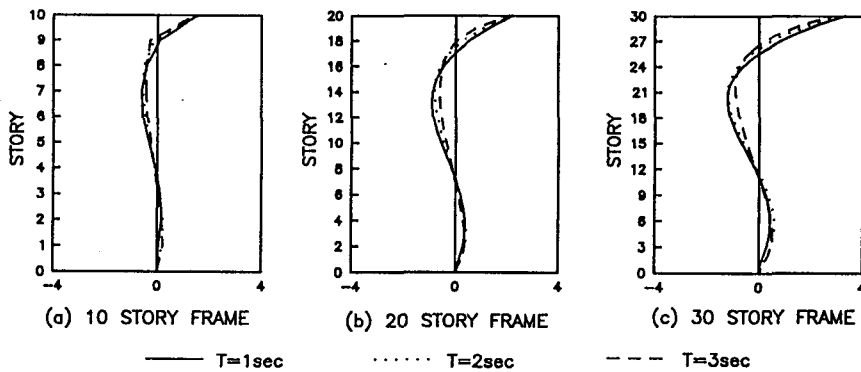


그림 5. 층수 및 주기에 따른 ΔF의 분포

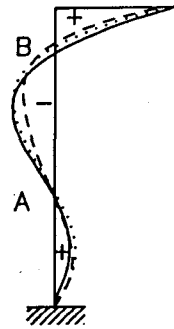


그림 6. 삼차함수식을 이용한 AF의 유도

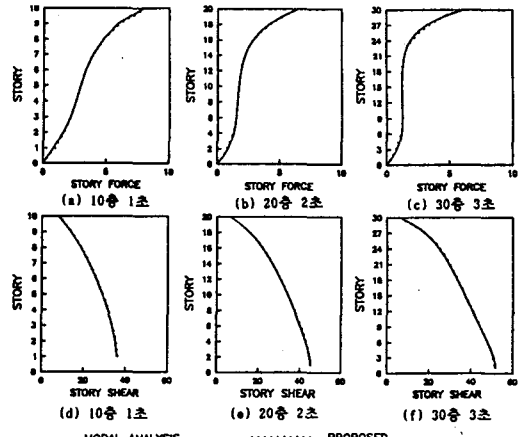


그림 7. 모드해석법과 제안된 방법의 층지진하중과 층전단력 비교

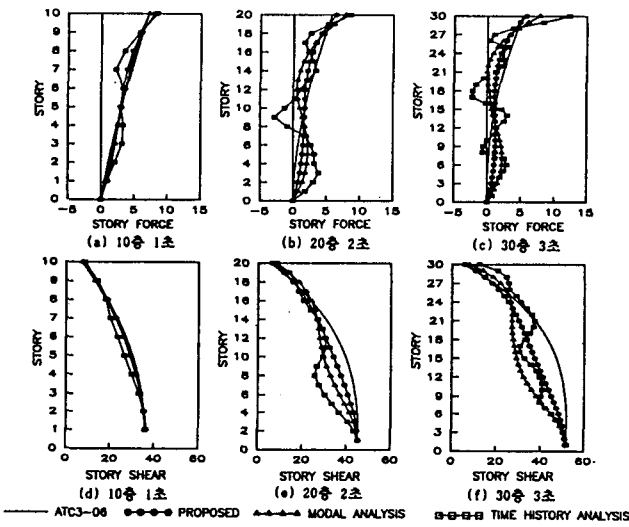


그림 8. 제안된 방법과 모드해석법 및 시각력해석법의 결과 비교 (El Centro(1940, S00E))

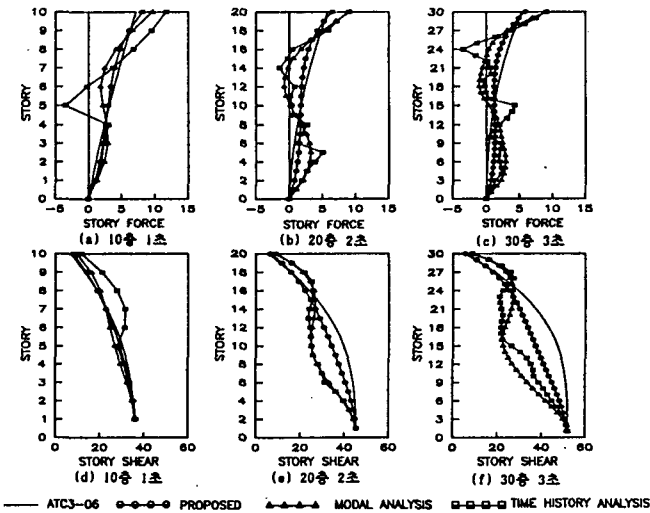
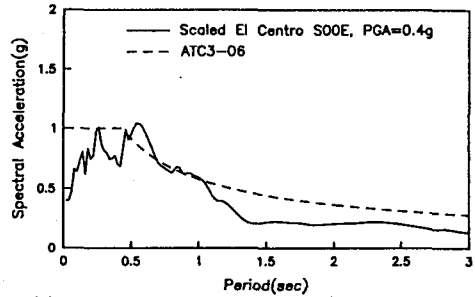
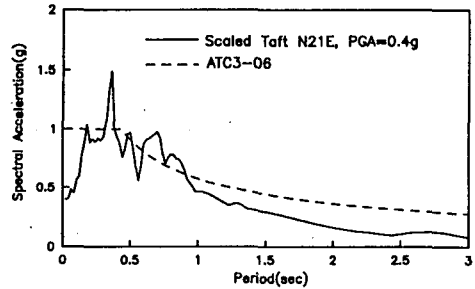


그림 9. 제안된 방법과 모드해석법 및 시각력해석법의 결과 비교 (Taft(1952, N21E))



(a) Scaled Acceleration Spectrum (El Centro, S00E)



(b) Scaled Acceleration Spectrum (Taft, N21E)

그림 10. ATC 규정의 설계 스펙트럼 및 El Centro(S00E), Taft(N21E)의 가속도 스펙트럼