

剪斷壁式 高層建物の 耐震解析改善에 관한 研究

A Study on the Improved Seismic Analysis of Multistory Shear Wall Buildings

李 準 教* 朴 根 弘** 李 守 坤***
 Lee, Jun Gyo Park, Geun Hong Lee, Soo Gon

Currently about 60 countries in the world require earthquake resistant structural design in case of multistory building constructions. In these cases the equivalent lateral force procedure is commonly adopted because of its simplicity and convenience.

This procedure, however, is developed based mainly on the first vibration mode response of building structure. The dynamic analysis of tall building shows that the effect of higher modes of vibration on the response of the building can not be neglected.

In this paper, the effect of higher modes of vibration on seismic response is evaluated through modal analysis of tall building structures. On the basis of evaluation results, an improved procedure is to be proposed for the extended application of the equivalent lateral force procedure.

1. 序 論

1987년 12월 건설부의 의뢰로 대한건축학회가 작성한 '耐震設計 指針書 作成에 관한 研究'라는 보고서를 바탕으로 하여 우리나라에서도 1988년 9월부터 일정규모 이상의 建築構造物에 대해서는 耐震設計를 하도록 규정하고 있다. 여기서 國內外 耐震設計基準을 살펴보면 建築構造物의 解析方法으로 크게 等價靜的解析法과 動的解析法을 택하고 있다.

여기에서는 高層建物の 耐震解析法으로 等價靜的解析法을 채택할 경우, 고차진동모드들이 動的 舉動에 미치는 영향을 보다 정확히 고려할 수 있는 하나의 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해서 우선 等價靜的解析法으로 산정한 層地震荷重과 모드해석법으로 고차진동모드들이 建築構造物의 動的 舉動에 미치는 영향을 모두 고려하여 산정한 層地震荷重間의 差異를 파악할 필요가 있다. 이와 같이 두가지 방법에 의하여 산정한 層地震荷重間의 差異를 現行 等價靜的解析法에 추가하면 고차진동모드의 영향이 고려된 層地震荷重을 산정할 수 있게 된다. 建物の 構造形式에 따라 層地震荷重 산정방법이 각각 틀리므로 여기에서는 剪斷壁方式 構造物을 대상으로 하여 알아보기로 한다.

2. 現行 等價靜的解析法上的 層地震荷重 및 層剪斷力 算定方法 考察

우선 國內外 等價靜的解析法中 대표적인 ATC3-06 및 UBC에 대해서 살펴보기로 한다.

2-1. Applied Technology Council(ATC3-06)
 1978년 Applied Technology Council(ATC3-06)가 제안한 층지진하중 산정방법을 살펴보면 다음과 같다.

$$F_x = \frac{W_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n W_i h_i^k} V \quad (2-1)$$

T ≤ 0.5 초이면 k = 1.0
 T ≥ 2.5 초이면 k = 2.0
 0.5 < T < 2.5 초이면 k = 0.75 + 0.5T

F_x : x층에서의 층지진하중
 W_x, W_i : x층과 i층에서의 중량
 h_x, h_i : 밑면으로부터 x층과 i층까지의 높이
 T : 기본진동주기
 V : 밑면전단력

* 全南大 建築工學科 大學院
 ** 西南大 建築工學科 專任講士
 *** 全南大 建築工學科 教授

2-2. Uniform Building Code(UBC88)

1988년에 개정된 Uniform Building Code (UBC88)에서는 다음과 같이 층지진하중을 산정하도록 제안하고 있다.

$$F_t = 0.07TV \quad (2-2)$$

$F_t \leq 0.25V$ 이고, $T \leq 0.7$ 이면 $F_t = 0.0$

$$F_x = \frac{(V - F_t)W_x h_x}{\sum_{i=1}^n W_i h_i} \quad (2-3)$$

F_x : x층에서의 층지진하중

W_x, W_i : x층과 i층에서의 중량

h_x, h_i : 밑면으로부터 x층과 i층까지의 높이

T : 기본진동주기

V : 밑면전단력

윗식들을 살펴보면 層地震荷重을 산정할 때 建築構造物의 기본진동주기가 0.7초보다 긴 경우 建築構造物의 動的 舉動에 미치는 고차진동모드의 영향을 고려하기 위하여 밑면전단력의 일부를 최상층에 추가하고 있다. 이때의 層地震荷重은 최상층을 제외한 나머지 층에서 直線分布하게 된다.

2-3. 우리나라의 耐震設計基準

우리나라의 耐震設計基準에서는 층지진하중을 다음과 같이 산정하도록 규정하고 있다.

$$F_x = \left\{ \frac{W_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n W_i h_i^k} \right\} V \quad (2-4)$$

$T \leq 1.0$ 초이면 $k = 1.0$

$1.0 < T \leq 2.0$ 초이면 $k = 1.5$

$T > 2.0$ 초이면 $k = 2.0$

F_x : x층에서의 층지진하중

W_x, W_i : x층과 i층에서의 중량

h_x, h_i : 밑면으로부터 x층과 i층까지의 높이

k : 고차진동모드의 영향을 고려하기 위한 지수

T : 기본진동주기

V : 밑면전단력

식(2-4)에서 밑면전단력 V는 다음과 같이 구

한다.

$$V = \frac{AICS}{R} W \quad (2-5)$$

A : 지역계수

I : 중요도 계수

C : 동적계수

S : 지반계수

R : 반응수정계수

W : 구조물의 총중량

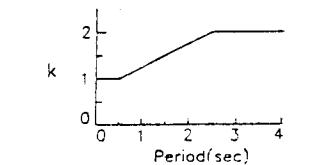
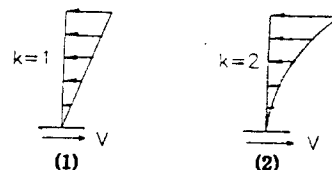
위의 식들에서 알 수 있듯이 기본진동주기가 1.0초보다 긴 경우에는 고차진동모드의 영향을 고려하기 위하여 기본진동주기에 따라 지수 k로 보정하고 있다. 이는 ATC3-06에서 제안된 식과 유사하다. 層地震荷重의 分布는 기본진동주기가 길어질수록 포물선에 가까운 분포를 하게 된다.

3. 새로운 層地震荷重 算定方法

3-1. 現行 等價靜的解析法에 의한 層地震荷重 算定方法

ATC3-06에서 제안하고 있는 식(2-1)로부터 層地震荷重을 산정하는데 이때에는 기본진동주기에 따라 指數 k로 보정되기 때문에 그림 1에서와 같이 기본진동주기에 따라 분포모양이 달라지게 된다.

$$F_x = V \frac{w_x h_x^k}{\sum w_i h_i^k}$$



(3) 상수 k와 기본진동주기와의 관계

그림 1. 진동주기에 따른 層地震荷重의 분포

여기에서는 等價靜的解析法과 모드해석법에 의해 산정한 層地震荷重들간의 差異(以下 修正力이라 부르기로 한다)를 보다 효율적으로 파악하기 위하여 建築構造物의 기본진동주기에 관계

없이 指數 k 를 1.0으로 고정시켜 層地震荷重을 산정하기로 한다. 따라서 식(2-1)은 식(3-1)로 된다.

$$F_x = \frac{W_x h_x}{\sum_{i=1}^n W_i h_i} V \quad (3-1)$$

실제 이와 같은 層地震荷重의 分布式은 중국, 쿠바, 엘살바도르, 이란, 이태리, 멕시코, 뉴질랜드 등 여러나라에서 채택하고 있다.

3-2. 모드解析法에 의한 層地震荷重 算定方法

ATC3-06의 설계스펙트럼을 이용하여 모드 해석법으로 고차진동모드의 영향이 모두 고려된 層地震荷重을 산정하는 방법은 별도의 참고 문헌을 참고하기로 하고 여기서는 생략한다.⁽¹⁾ 이와 같이 모드해석법으로 層地震荷重을 산정하면 SRSS하는 과정에서 각 모드별 層地震荷重이 가지고 있는 符號가 무시된 채 組合되므로 고차진동모드의 영향이 적절히 고려되었다고 볼 수 없다. 따라서 본 논문에서는 각 모드별 層地震荷重이 가지고 있는 符號를 반영하기 위하여 다음과 같은 방법을 이용하기로 한다(그림 2 참조).

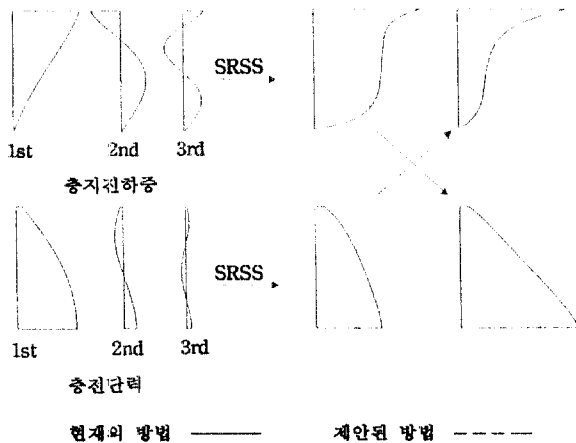


그림 2. 모드해석법에서의 SRSS하는 방법

각 모드별 層地震荷重을 이용하여 식(3-2)과 같이 각모드별 層剪斷力을 구한다.

$$V_{xm} = \sum_{i=x}^n F_{im} \quad (3-2)$$

V_{xm} : m번째 모드의 최상층으로부터

x번째 층에서의 층전단력
 F_{im} : m번째 모드의 최상층으로부터
 i번째 층에서의 층지진하중

이와 같이 산정한 각 모드별 層剪斷力을 식(3-3)과 같이 SRSS하여 각층에서의 層剪斷力을 구한다.

$$V_x = \sqrt{\sum_{m=1}^n V_{xm}^2} \quad (3-3)$$

V_x : x번째 층에서의 층전단력

각층의 層地震荷重은 식(3-3)로부터 산정된 層剪斷力의 層間 差異를 이용하여 구한다.

$$F_x = V_x - V_{x+1} \quad (3-4)$$

이와 같은 방법을 이용하면 각 모드별 層地震荷重이 가지고 있는 符號를 충분히 고려할 수 있게 된다.

3-3. 고차진동모드의 영향을 고려한 層地震荷重 算定方法

3-1절과 3-2절에서와 같이 수정, 제안된 식들을 이용하여 等價靜的解析法과 모드해석법에 의한 層地震荷重을 산정한 후 식(3-5)과 같이 修正力(ΔF)를 구한다. 그런데 대체적으로 모드해석법으로 산정한 밀면전단력은 等價靜的解析法으로 산정한 밀면전단력보다 작은 값을 갖게 된다. 따라서 모드해석법에 의해 계산한 밀면전단력이 等價靜的解析法에서의 값과 同一하도록 수정한다.

$$\Delta F_x = [V_x - V_{x+1}] - \frac{W_x h_x}{\sum_{i=1}^n W_i h_i} V \quad (3-5)$$

이와 같이 산정한 層地震荷重間의 差異 즉, 修正力(ΔF)가 對象構造物의 기본진동주기, 층수, 전단벽의 길이 등 여러가지 조건에 따라 어떠한 영향을 받고 있는 지를 파악한다. 파악된 결과를 가지고 만족시키는 ΔF 의 分布式을 유도한다. 이때 모드해석법 및 等價靜的解析法에서 산정된 밀면전단력이 동일하게 수정되었으므로 ΔF 의 합($\sum \Delta F$)은 '0'이 된다는 점에 유의하여야 한다. 유도된 ΔF 의 分布式을 한 식(3-1)에 더하

면 다음과 같이 된다.

$$F_x = \frac{W_x h_x}{\sum_{i=1}^n W_i h_i} V + \Delta F_x \quad (3-6)$$

식(3-6)이 여기에서 제안하고자 하는 層地震荷重의 산정식이다.

4. 對象構造物의 새로운 層地震荷重算定方法

剪斷壁方式 構造物을 대상으로 하여 等價靜的解析法과 모드해석법으로 산정한 層地震荷重 및 層剪斷力을 비교하기 위하여 그림 3에서와 같이 10층에서 30층까지 2개 층씩 증가시킨 剪斷壁方式 構造物을 택하였다. 대상구조물의 基本振動週期는 층수에 0.1을 곱한 값을 기준으로 하여 기준 값의 2/3배, 1.0배, 3/2배가 되도록 하였다. 예를 들면 24층인 構造物의 경우, 층수 24에 0.1을 곱한 2.4초가 기준이 되고 이것의 2/3배, 1.0배, 3/2배인 1.6초, 2.4초, 3.6초가 對象構造物의 層地震荷重 산정을 위한 基本振動週期이다.

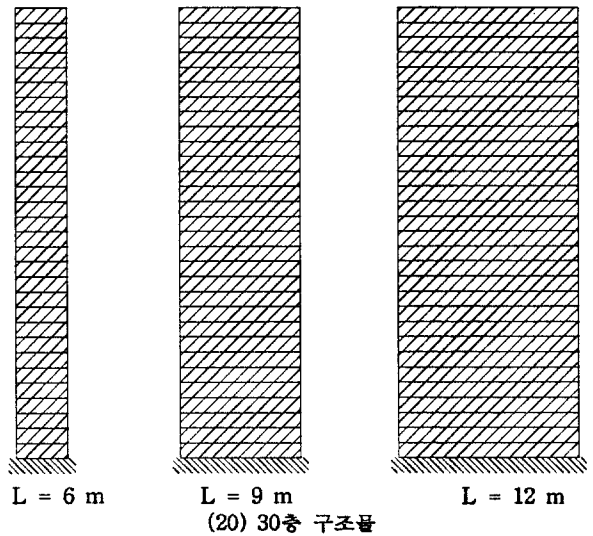


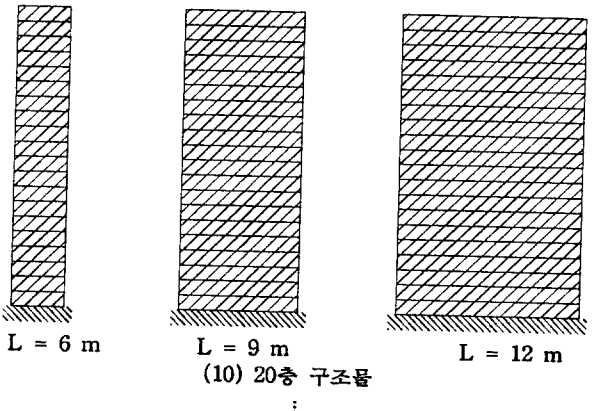
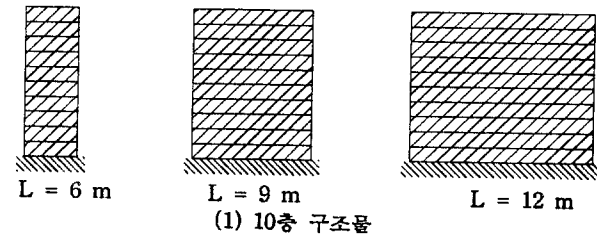
그림 3. 대상구조물

이와 같이 가정한 기본진동주기는 대체적으로 실제의 建築構造物이 갖는 기본진동주기의 범주에서 크게 벗어나지 않는다. 剪斷壁方式 構造物의 경우, 同一層에서는 가정한 층고와 剪斷壁의 두께가 거의 일정하게 되므로 動的 舉動은 주로 剪斷壁 길이의 세제곱에 지배된다. 따라서 剪斷壁의 길이가 建築構造物의 動的 舉動에 미치는 영향을 파악하기 위하여 대상구조물에서 전단벽의 길이를 각각 6M, 9M, 12M로 변화시켰다. 이러한 대상구조물들에 대하여 修正力의 특성을 살펴보기로 한다.

첫째, 상층부와 중층부에서 ΔF 가 'D'이 되는데 대상구조물의 전체높이를 1.0으로 하였을 때 밑면으로부터 이 점들의 위치를 각각 a_1 과 a_2 라 명명하고 對象構造物의 층수, 剪斷壁의 길이, 기본진동주기 등에 따른 이 점들의 위치변화를 살펴보면 다음과 같다

(1) 층수와 기본진동주기가 같을 때 a_1 의 위치는 剪斷壁 길이변화에 거의 영향을 받지 않는다. 층수와 전단벽의 길이가 같을 때 a_1 의 위치는 기본진동주기가 길어질수록 아주 조금씩 위로 올라간다. 또한, a_1 의 위치는 대상구조물의 층수에도 관계없이 거의 유사한 변화 경향을 보인다.

(2) 층수와 기본진동주기가 같을 때 a_2 의 위치는 a_1 과 剪斷壁 길이변화에 거의



영향을 받지 않는다. 층수와 전단벽의 길이가 같을 때 a_2 의 위치는 기본진동주기가 길어질수록 증가하나 층수가 많아질수록 그 위치가 올라갔다 내려오는 경향이 있다. 층수가 증가할수록 a_2 의 위치는 대체적으로 위로 올라가는 경향이 있다.

둘째, 대상구조물의 층수, 전단벽의 길이, 기본진동주기 등에 따른 修正力의 변화를 살펴보면 다음과 같다. 층수와 기본진동주기가 같을 때 剪斷壁의 길이가 길어지면 修正力은 극히 미소하게 감소한다. 그러나 층수가 많아질수록 修正力에 미치는 剪斷壁의 영향은 剪斷壁의 길이에 관계없이 거의 일정해진다. 층수가 같을 때에는 剪斷壁의 길이에 관계없이 기본진동주기가 길어지면 修正力도 증가한다. 기본진동주기가 같을 때에는 층수가 증가하면 修正力은 감소한다. 밀면에서 상층부로 올라갈수록 修正力은 증가하나 층수가 많아질수록 그리고 기본진동주기가 길어질수록 그 경향은 감소한다. 이러한 경향은 剪斷壁의 길이에 크게 영향을 받지 않는다.

앞에서 살펴본 결과에 의하면 修正力 주로 기본진동주기, 층수등에 지배되며 剪斷壁의 길이 변화에 의한 영향은 아주 미소함을 알 수 있다. 따라서 修正力의 分布式은 다음과 같이 유도된다.

$$X_i(X_i - 0.89)(X_i - a) \quad (4-1)$$

X_i : 구조물의 전체 높이에 대한 i 번째 층까지의 높이 비

a : 중간층에서 ΔF 가 '0'이 되는 위치

여기서 修正力은 밀면에서 상층부로 올라갈수록 단조증가하므로 이를 반영하기 위하여 식(4-1)에 단조증가식 $(X_i+0.30)$ 를 곱하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$X_i(X_i - 0.89)(X_i - a)(X_i + 0.30) \quad (4-2)$$

식(4-2)를 이용하여 산정된 결과에서 修正力의 분포를 보다 정확히 나타내기 위해서는 식(4-2)에 밀면전단력과 기본진동주기(T)의 4제곱근을 곱하고 대상구조물의 층수에 0.1배를 한 값(N_{10})의 4제곱근으로 나누어야함을 알 수 있다. 따라서 식(4-2)에 이를 적용하여 정리하면 修正力의 分布式은 다음과 같이 된다.

$$\Delta F_i = 1.00V \frac{T^{0.25}}{N_{10}^{0.25}} X_i(X_i - 0.89) \times (X_i - a)(X_i + 0.30) \quad (4-3)$$

V : 밀면 전단력

T : 기본진동주기

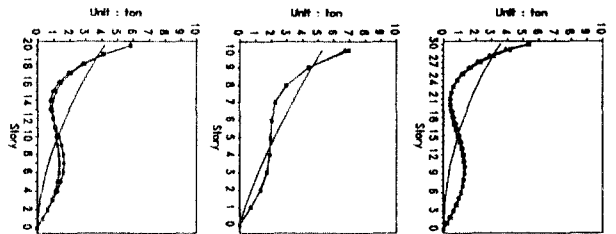
N_{10} : 층수 N의 0.1배

X_i : 전체 높이에 대한 i 번째 층의 높이 비

a : 중층부에서 ΔF 가 '0'이 되는 위치

$$a = 0.38 + 0.02 N_{10}$$

전단벽의 길이가 9M인 건축구조물에 대해서 제안된 방법에 의해 산정된 層地震荷重을 비교해 보면 그림 4와 같이 等價靜的解析法에 의해 산정된 결과보다 제안된 方法에 의해 산정된 결과가 모드해석법에 의해 산정된 層地震荷重에 보다 근사한 값을 알 수 있다.



(1) 10층 구조물 (2) 20층 구조물 (3) 30층 구조물

— ATC3-06 ○ Modal Analysis ■ Proposed

그림 4. 層地震荷重 비교

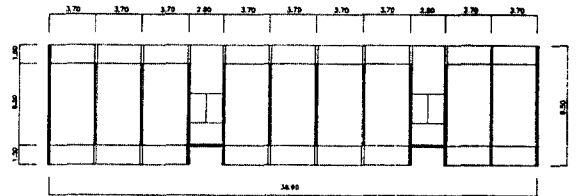


그림 5. 예시 구조물

앞에서 제안된 식들을 실제의 건축물에 적용해 보기 위하여 그림 5에서와 같이 우리 주변에서 흔히 볼 수 있는 아파트 建築物을 예제로 택하였다. 이때 예시된 建築構造物의 층수는 25층이며 기본진동주기는 2.5초로 하였다.

그림 6은 等價靜的解析法, 모드해석법, 제안된 방법(이하 세가지 방법이라 한다)에 의한 層

剪斷力을 비교한 것이다.

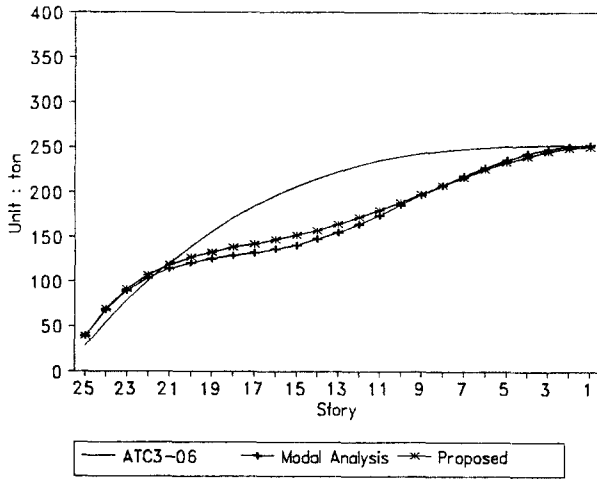


그림 6. 예시구조물의 층전단력

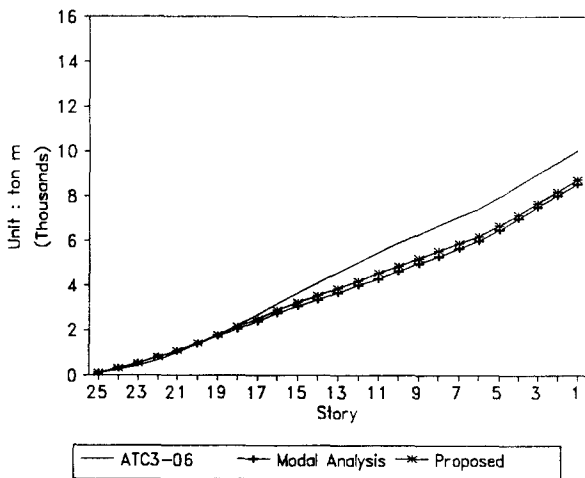


그림 7. 예시 구조물의 전도모멘트

제안된 방법에 의한 결과가 現行 等價靜的解析法에 의한 결과에 비해 고차진동모드의 영향을 보다 정확히 고려하고 있음을 알 수 있다. 그림 7은 전도모멘트의 비교인데 역시 제안된 방법에 의한 결과가 모드해석법에 의한 결과에 보다 근사함을 보여주고 있다. 이와 같이 제안된 방법을 이용하면 보다 균일한 安全率을 가진 경제적인 부재설계에 보다 접근할 수 있게 된다.

5. 結 論

1) 제안된 새로운 層地震荷重 산정방법은 現行 等價靜的解析法으로 산정한 層地震荷重과 모드해석법으로 산정한 層地震荷重間의 差異 즉, 修正力(ΔF)을 이용한 것이다. 그러므로 現在의 等價靜的解析法으로 산정한 層地震荷重보다 제안된 방법에 의하여 산정한 層地震荷重이 모드해석법으로 산정한 層地震荷重에 더욱 근사함을 알 수 있다. 이는 層地震荷重을 산정할 때 建築構造物의 動的 舉動에 미치는 고차진동모드의 영향을 고려할 수 있음을 의미한다.

2) 建築構造物의 地震被害狀況을 살펴보면 상층부에서보다 하층부에서의 부재가 더 큰 피해를 입은 경우가 많다. 이는 豫測되었던 것보다 더 큰 地震荷重이 작용하였을 때 等價靜的解析法에 의하여 산정된 값들이 상층부나 중층부에서보다는 하층부에서 더욱 과소 산정되었기 때문이다. 그런데 제안된 방법으로 산정한 層剪斷力은 고차진동모드의 영향을 고려하여 산정된 層剪斷力과 상당히 근사한 결과를 가지게 된다. 따라서 더욱 균일한 安全率을 가지는 部材設計가 가능해진다.

3) 제안된 層地震荷重 산정방법에서는 建築構造物의 動的 舉動에 영향을 미치는 고차진동모드의 영향을 고려하였다. 따라서 이 방법을 이용하면 等價靜的解析만으로도 動的解析을 하는 효과를 얻을 수 있다.

4) 建築構造物의 動的 舉動에 대한 고차진동모드의 영향을 고려하기 위한 제안식은 비교적 복잡하다. 따라서 제안된 식을 이용한 等價靜的解析法이 實用化되기 위하여는 지속적 연구를 통한 단순화가 요구된다.

參 考 文 獻

1. Applied Technology Council, Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for buildings, ATC3-06, June, 1978.
2. International Conference of Building Officials, Uniform Building Code, 1988.
3. Mario Paz, Structural Dynamics (Third Edition), Van Nostrand Reinhold Co., 1991.
4. 構造物의 耐震設計 技法, 韓國電算構造工學會, 1990.