

弱震地域에 있어서의 時間履歷 解析과 UBC 規準 解析의 比較

A Comparison of Time History Analysis to UBC-88 Requirements in a Low Seismic Zone

○ 金 熙 哲 *
Kim, Heecheul

ABSTRACT

The Uniform Building Code (UBC) is the most widely used requirements for earthquake resistant design in the United States. In this paper, a mid-rise steel building is analyzed by applying 12 sets of actual strong-motion earthquake data that have been scaled to zone 2B levels. The simply extrapolated ground motion displacements are used for the dynamic loads. The results of dynamic analyses for a 10-story steel building are compared with the static and dynamic analysis requirements of UBC-88. It was found that computed lateral forces using UBC-88 static procedure differed by about 60 percent depending on whether the natural period was computed using the UBC empirical method or the UBC recommended Rayleigh's method. The lateral forces computed from the UBC response spectra were more than 10 times greater than those computed by UBC static procedures. The lateral forces obtained from both linear and nonlinear analyses using 1989 Loma Prieta ground motions compared very well with UBC response spectra results.

1. 序 論

構造物の 設計시 고려해야 할 荷重의 형태는 그 작용 방향에 따라 두 종류로 분류된다. 대부분의 경우 垂直荷重은 각 地域別 規準이 제시한 바 구조물의 用途, 使用 材料 및 地域에 따라 적절히 그 정도를 예측할 수 있으나, 地震荷重이나 風荷重 같은 水平荷重의 영향은 그 정도를 豫測하기가 매우 힘들다. 地震의 豫測은 아직도 研究 段階에 있다. 비록 다음에 발생할 지진의 정확한 時間과 場所를 豫測할 수 없다 하여도, 構造設計者는 예상되는 지진의 강도에 대비한 안전한 구조물을 設計하여야

* 정회원 삼성종합건설 기술연구소, 공학박사

한다.

本 研究는 UBC 지역 2에 해당하는, 弱震이 발생 하는 지역에서의 요구조건과 실제 지진의 strong-motion 反應의 比較에 그 目的이 있다. 既存에 사용되고 있는 대부분의 내진구조 規準들은 기본적으로 미 서부 해안 지역의 과학자와 엔지니어에 의해서 作成되고 發展되었으므로 대부분의 規準 係數는 强震地域에 적합한 安全係數를 부여하고 있다. 그러나 弱震地域에 있어서는 弱震地域에 적합한 係數에 대한 研究가 이루어져야 할 것이다. UBC-88에 의거한 지진하중 계산결과를 실제 지진의 strong-motion 데이터를 적용한 10층 철골 구조물의 時間履歷 解析 (Time history analysis) 결과와 비교하였다.

本 研究에서 行하여진 構造解析은:

- 1) UBC-88의 靜的解析
- 2) UBC-88의 動的解析
- 3) 실제 지진 데이터를 이용한 時間履歴解析 들이다.

2. UBC 解析

2.1 靜的解析

건물의 靜的解析에 있어서 UBC-88은 두 가지의 基本周期 계산식을 提案하고 있다. 方法 A는 經驗에 의한 周期 계산식이며 方法 B는 Rayleigh의 周期 계산식을 導入한 方法이다. UBC-88에 주어진 건물 전체에 미치는 地震에 의한 水平荷重 계산식은 식 (2.1)과 같으며,

$$V = \frac{ZICW}{R_w} \quad (2.1)$$

본 연구에서 쓰여진 계수들은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} Z &= 0.2 \text{ (地域 2B)} \\ I &= 1.0 \text{ (標準 居住)} \\ R_w &= 12 \text{ (鐵骨 모멘트 抵抗 空間골조)} \\ C &= \frac{1.25 S}{T^{2/3}} = \frac{1.5}{T^{2/3}} \text{ (地質 형태 S는 } S_z \text{로써} \\ &\quad \text{密度높은 딱딱한 지질 이 200ft 이상)} \end{aligned}$$

2.1.1 方法 A (經驗的 方法)

UBC-88에 주어진 方法 A의 周期계산식은

$$T = Ct(Hn)^{3/4} \quad (2.2)$$

과 같다. 식 (2.2)에 본 研究에서 쓰여진 解析 모델의 常數를 代入하여 基本周期을 구하면,

$$\begin{aligned} Ct &= 0.035 \text{ (모멘트 抵抗 鐵骨造)} \\ Hn &= 120 \text{ ft} \\ T &= (0.035)(120)^{3/4} = 1.2690 \text{ 초} \end{aligned}$$

가 된다. 구해진 振動周期에 따라 하나의 중앙 스펙트럼 端部에 작용하는 전체 水平力을 식 (2.1)에 의해서 구하면 $V=46.96\text{kips}$ 가 된다. 구해진 全體 水平力을 각 층에 작용하는 水平荷重으로 分配한 결과는 表 1과 같다.

2.1.2 方法 B (Rayleigh의 方法)

UBC-88에 주어진 다른 하나의 建物 基本周期 계

산식은 에너지 保存의 法則을 이용한 Rayleigh의 周期 계산식을 導入한 것으로서 대부분의 建築規準에서도 代案으로 사용하고 있는데, 그 基本式은 다음과 같다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n W_i \delta_i}{g \sum_{i=1}^n F_i \delta_i}} \quad (2.3)$$

식 (2.3)에서 W_i 는 i 층에서의 무게를 나타내며, g 는 重力加速度, F_i 는 i 층에서의 側荷重, δ_i 는 i 층에서의 수평변위를 나타낸다. 식 (2.3)은 假定된 水平荷重을 적용시켜 基本 周期 값이 收斂할 때까지 反復的으로(iteration) 修行하여야 하는데, Rayleigh의 周期 계산식은 다른 식에 비하여 상당히 빨리 收斂하는 장점이 있다. 그러나 UBC는 어떤 형태의 모델에 이 식을 적용하여야 하는지의 여부를 명시하지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 두 가지의 모델: 1)보와 기둥이 있는 一般的인 라멘 골조 모델, 2)剪斷建物 모델(Shear Building Model), 에 대해서 그 基本 周期을 조사하였다. 본 연구에서는 方法 A에서 얻은 결과치를 그 첫 번째 하중으로 적용시킨 결과 라멘 구조모델의 경우 두 번의 反復 후에 收斂한 基本周期 $T=2.48$ 초를 얻었으며, 剪斷建物 모델에서도 두 번의 반복 후에 振動周期 $T=1.16$ 초를 구할 수 있었다. 建物 端部에 작용하는 全體 水平力 및 各層에 作用하는 分配된 水平力의 크기는 表 1과 같다.

2.2 動的解析

건물에 작용하는 지진 하중의 動的解析法으로 UBC-88은 네 가지의 다른 地盤 舉動(Ground Motion)의 사용을 許容하고 있다. 주어진 네 가지 방법중 應答 스펙트럼 方法은 가장 보편적이고 편리한 해석법으로써, 단자유도계(single degree of freedom)에서의 最大應答(maximum response)과 特定 荷重 作用과의 關係를 圖式化한 것이다. 본 연구에서는 UBC-88에 주어진 應答 스펙트럼을 이용한 동적해석만 다루었다. 가정한 모델의 重量 및 強度에 따른 10개의 모우드별 比減衰 고유진동수(undamped natural frequency)에 따라 도식화한 스펙트럼에서 값을 구하고, 그 값을 UBC의 지진지역 2B에 알맞게 조절하였다.

動的解析의 最大 應答계산에 있어서 UBC-88은 90% 이상의 모우드를 고려하도록 명시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 10개의 모우드 전체를 考慮한 후, SRSS(Square Root Sum of Square)방법을 이용하여 最大變位를 구하였으며, 이와 같은 방법으

로 구해진 각 층별 가능 최대변위는 表 2와 같다. 또한 각 층에 작용하는 분배된 수평력은 靜的解析의 결과와 함께 表 1에 보여주고 있다.

표 1. UBC 解析 結果

층	靜的解析			動的解析
	방법 A	방법 B-1	방법 B-2	
10	9.77	8.81	10.04	81.57
9	7.44	4.84	7.95	87.87
8	6.61	4.30	7.07	57.53
7	5.79	3.77	6.19	47.70
6	4.96	3.23	5.30	38.94
5	4.13	2.69	4.42	36.60
4	3.31	2.15	3.53	32.06
3	2.48	1.61	2.65	28.83
2	1.65	1.08	1.77	21.26
1	0.83	0.54	0.88	13.09
총 계	46.96	33.03	49.79	445.44

<단위 : kips>

3. 時間 履歷 解析(Time History Analysis)

본 연구에서는 12세트의 實際 地震 記錄이 10층 건물의 動的解析을 위한 時間 履歷으로 이용되었는데, 사용된 자료는 1989년 10월 18일 California의 Loma Prieta에서 발생한 震度 7.1의 지진 데이터이다. 그러나 이 자료들은 각각 다른 地域 및 方向에서 측정된 것이므로 자료의 修正이 필요하였다. 또한 이 자료들은 強震지역에서 측정된 strong motion이기 때문에 본 연구의 목적에 부합되게 자료를 수정하였다.

따라서 본 연구에서는 美 國內에서 廣範圍하게 사용되고 있는 몇몇의 地形圖(Contour Map)를 바탕으로 간단한 보간법을 이용하여 지역 2B에서의 strong motion을 예측하는 방법을 사용하였다. 지형도들을 바탕으로 본 연구에서 사용된 減少係數는 다음과 같다.

$$\text{減少係數} = \frac{0.2g}{|\text{最大加速度}|} \quad (3.1)$$

時間 履歷 解析을 진행하는데 있어서 가장 效率的인 소프트웨어를 選擇하는 것은 매우 중요한 일 중의 하나이다. 본 연구에서는 선형 및 비선형 재료의 동적해석이 가능하고 계산 속도가 빠르며 프

표 2. SRSS방법에 의한 各 層別 最大變位

層	最大變位
10	0.3241
9	0.6731
8	0.5521
7	0.6680
6	0.5425
5	0.6059
4	0.4795
3	0.5157
2	0.3865
1	0.3981

<단위 : inch>

로그래밍이 단순한 CSMP-III를 사용하였다. CSMP-III는 常微分方程式을 푸는데 있어서 매우 효율적인 프로그램으로써 연속체계 묘사 언어(Continuous System Simulation Language:CSSL)를 사용하는 적분회로(Integration Routine)를 內包하고 있다.

일반적인 동적하중에 의한 單自由度係의 運動方程式은 二次의 微分方程式인데 이를 상태변위(State Variable)를 도입한 일차 운동방정식의 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$m\ddot{Y}_2 + c\dot{Y}_2 + kY_1 = f(t) \quad (3.2)$$

윗 식에서 상태변위 Y_1 , Y_2 및 \dot{Y}_2 는 각각 변위, 속도 및 가속도를 나타낸다. 식 (3.2)를 Y_2 에 대해서 다시 쓰면 다음과 같이 된다.

$$\ddot{Y}_2 = \frac{f(t) - c\dot{Y}_2 - kY_1}{m} \quad (3.3)$$

식 (3.3)은 상태변위의 형태로 표시된 加速度式이며, 같은 방법으로 속도와 변위는 각각 \dot{Y}_2 와 Y_2 를 적분함으로써 아래와 같은 방법으로 쉽게 구할 수 있다.

$$Y_2 = \int_{i.c.}^t \dot{Y}_2 dt \quad (3.4)$$

$$Y_1 = \int_{i.c.}^t Y_2 dt$$

積分의 時間 증분은 0.01초 또는 0.015초로써 원래의 기록을 그대로 사용하였는데, 이 時間 증분들은 表 2에서 얻은 振動周期值에 根據하여 그 구조적 응답(Structural Response)을 적절히 묘사할 수

있는 것으로 간주되었다. 본 연구에서 사용된 10층의 구조물은 각 층에 집중질량(Lumped mass)을 가진 剪斷建物 모델(shear building model)로 解析을 하였으므로 전부 10개의 自由度를 가진다. 10개의 운동 聯立方程式을 CSSL로 變換하는데 있어 質量행렬(Mass matrix), 剛性행렬(Stiffness matrix) 및 減衰행렬(Damping matrix) 등은 미리 계산된 常數로 入力되었다. 본 연구에서는 地반변위 함수(ground displacement function)를 이용한 積分을 行하였다. 地반변위 함수는 地반가속도 함수(ground acceleration function)보다 더 원할한 곡선을 그리므로 같은 시간증분을 사용할 경우 더 자세한 값을 얻을 수 있다. 또한 비슷한 정확도를 얻기 위한 컴퓨터의 사용시간은 변위함수의 사용이 더 큰 시간증분을 사용할 수 있으므로 경제적으로도 더 유리한 點이 있다.

CSMP-III에는 많은 積分方法들이 內在되어 있는데, 본 연구에서는 4차의 Runge-Kutta 방법이 사용되었다. 4차의 Runge-Kutta 방법은 聯立 微分方程式의 解를 구하는데 있어서 다른 數值解析 方法들에 비해서 비교적 안정되고 정확한 값을 가진다는 點이 있다. 그러나 CSMP-III는 프로그램 밖에 있는 시간변위 자료 화일을 읽을 수 있는 능력이 없으므로, 모든 자료 화일은 프로그램 내에 포함되었다. 每 시간증분별 各 層에서의 全體 변위 및 층간 변위는 CSMP-III의 출력으로 부터 간단한 FORTRAN 프로그램을 이용하여 구해졌다. 기둥별 최대 모멘트는 兩端固定 각주의 부재이론에 따라 $6EI/L$ 를 층간변위치에 곱해서 얻었다.

4. 解析結果의 比較

4.1 UBC-88 解析結果

표 3에 보인 바와 같이 靜的解析에 있어서 方法 A의 結果는 方法 B를 이용한 剪斷建物の 모델결과와 매우 비슷한 값을 가지고 있다. 건물의 固有周期에 있어서 8%의 차이가 있었으며, 固有周期值에 起因한 全體剪斷力에는 단지 6%의 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 같은 방법을 이용한 계산에 있어서도 그 假定모델의 形態에 따라 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 표 4에 나타났듯이 一般的인 골조체계를 가진 건물의 고유주기는 전단건물의 고유주기보다 90%이상 큰 값을 가지며 전체전단력에 있어서는 34% 적은 값을 가짐을 볼 수 있다.

UBC 靜的解析의 고유주기와 축하중 계산식은 地震荷重 作用時 건물의 變形狀態를 假定하여 얻어진 것이므로 일반적인 골조체계를 가진 건물모델의 固有周期가 전단건물 모델의 고유주기보다 큰 값을 가질 것이라는 것은 쉽게 예상할 수 있다. 세 가지의 靜的解析 方法중 일반적인 골조체계를 가진 건물의 모델이 가장 現實的인 舉動의 표현이므로

표3. UBC-88에 의한 周期 및 水平荷重 比較

適用方法	周 期	全體水平荷重	
方法 A	1.269초	47.0 k	
方法 B	剪斷建物	1.162초	49.8 k
	一般建物	2.480초	33.0 k
動的解析	1.339초	445.4 k	

가장 정확한 값을 가진다고 볼 수 있다.

위에서 보았듯이 靜的解析의 결과는 건물의 모델 선정 方法에 따라 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 표 3의 結果에서 보듯이 方法 A와 剪斷建物 모델로 해석된 方法 B의 결과치는 일반적인 골조체계를 가진 건물모델의 결과치보다 최상층을 제외한 전 층에서 약 60%정도 큰 값을 가진다. UBC-88에 주어진 應答스펙트럼을 사용하여 얻은 動的解析은 10개의 固有周期應答를 SRSS 方法으로 구한 결과, 정적 해석에서 얻은 側荷重보다 9배에서 13.5배 정도까지 큰 값을 가지고 있다.

4.2 時間履歷解析 結果

(Time History Analysis Results)

構造設計者들에게 가장 큰 관심거리는 건물 全體의 變形보다 기둥에서 발생하는 전단력과 모멘트이다. 따라서 본 연구에서는 각 층의 기둥에서 발생하는 最大剪斷力과 그에 따른 모멘트가 비교되었다. 기둥에서 발생하는 전단력과 모멘트는 계수 $2/L$ 로써 直接的인 關係를 가진다. 12세트의 Loma Prieta 地震記錄을 代入하여 얻은 解析結果에 따라 各 層에서 발생한 最大剪斷力을 구하였다.

다음 단계로써 구하여진 剪斷力에 의거 12세트의 결과에 대한 各 層에서의 平均值 및 標準偏差를 구하였다. 그 결과는 UBC-88 동적해석의 결과와 같이 표 4에 보여주었다.

표 4에서 보듯이 Loma Prieta 地震에 의한 時間履歷解析 結果는 UBC-88에 주어진 應答스펙트럼을 이용한 動的解析의 결과와 매우 비슷하다. 그러나 標準偏差 效果를 考慮할 경우 그 차이는 커짐을 알 수 있다.

4. 結論

본 연구에서는 1988년에 간행된 UBC의 耐震規準과, 地震地域 2B에 알맞게 조절된 12세트의 實際地震 strong-motion에 대한 舉動을 중층의 철골조

표4. 各層에 作用하는 側荷重의 動的解析結果 比較

層	時間履歷解析		UBC-88
	剪斷力	標準偏差	動的解析
1	3.58	6.16	13.09
2	24.95	19.46	21.26
3	33.81	26.36	28.83
4	24.48	19.31	32.06
5	24.62	20.41	36.60
6	29.07	25.40	38.94
7	54.11	42.18	47.70
8	69.20	53.26	57.53
9	109.92	83.41	87.87
10	97.07	73.26	81.57
總計	470.81		445.45

<單位 : kips>

建物에 대해서 조사하였다. 假定된 建物 모델 및 地質學的 條件下에서 4개의 다른 UBC 耐震規準에 의한 側荷重 解析이 이행되었다. 12세트의 실제 지반거동변위는 UBC의 지진지역 2B에 알맞게 조절되어서 기초부에서의 하중으로 작용하여 CSMP-III를 이용한 해석결과와 비교되었다.

UBC의 靜的解析과 動的解析 結果에는 많은 차이가 있었다. 동적해석 결과는 정적해석 결과와 무려 10배의 차이가 나고있다. 미시간대학에 있는 Glen V. Berg博士와 남가주대학에 있는 James Anderson博士는 各各 地域 4에 있는 5층과 4층의 철근콘크리트조 건물에 대한 정적해석과 동적해석을 비교한 결과 3.5배와 4.5배의 차이가 있음을 발견했다. 이러한 차이점에 대해서 Berg박사는 다음과 같이 말하고 있다. “이와같은 차이점은 놀라운 것이 아니며 이 한 가지 차이점을 보고 UBC의 適合性 與否를 말할 수는 없다. 모든 耐震建物 設計規準에 明示된 側荷重의 靜的解析 結果는 地震에 의해 建物에 미치는 最大動的荷重과 전혀 같을 수가 없다. 축하중의 정적해석 결과는 構造物에 과도한 應力 發生 部位가 없이 약한 지진하에서는 피해가 없으며, 보통의 지진하에서는 많은 구조적 피해가 발생하지 않고, 강한 지진하에서는 건물의 崩壞를 막아주기 위한 것이다. 물론 이런 상황하에서의 구조물은 應力の 轉換에 綿密하게 對應할 수 있고 部材에 적절한 軟性이 附與되고 連結部에 충분한 剛性 및 彈性이 附與된 구조물을 말한다.” 같은 정적해석 방법에 있어서도 그 해석모델의 변형모양

(deformed shape)의 假定에 따라 수평력에 60%의 차이가 나타났다.

時間履歷解析과 UBC-88 스펙트럼 解析 結果는 상당한 일치를 보였다. 이 결과를 보면 UBC의 應答 스펙트라는 전형적인 地盤舉動을 중층 철골조에 적용시켜서 얻은 결과를 매우 적절하게 묘사한 것을 알 수 있다.

參考文獻

1. Uniform Building Code, 1988 Edition, International Conference of Building Officials, Whittier, CA. 1988.
2. Continuous Sysytem Modeling Program III (CSMP-III) Program Reference Manual, Fourth Ed., International Business Machine Corporation, December 1975.
3. Manual of Steel Construction; Allowable Stress Design, 9th Edition, American Institute of Steel Construction Inc., Chicago, Illinois, 1989.
4. Paz, Mario, Microcomputer - Aided Engineering; Structural Dynamics, Van Nostrand Reinhold, New York, 1986.
5. S.T. Algermisson, D.M. Perkins, P.C. Thenhaus, S.L. Hanson, B.L. Blender, "Probabilistic estimates of maximum acceleration and velocity in rock in the contiguous United States," Open-File Report 82-1033, United States Department of the Interior Geological Survey, 1982.
6. ANSYS Engineering Analysis System User's Manual, Revision 4.4, Swanson Analysis Systems Inc., Pensylvania, 1989.
7. STAAD-III, ISDS, Program User's Manual, Revision 2.1, Research Engineers Inc. New Jersey, May 1988.
8. Stephenson E. Robert, Computer simulation for engineers, Harcourt Brace Jovanovich Inc., New York, 1971.
9. Berg, Glen V., Elements of Structural Dynamics, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1989.
10. Naeim, Farzard, Ed., Seismic design

handbook, Van Nostrand Reinhold, New York
1989.

11. Luft, Rene W., "Comparison among
earthquake codes," Earthquake Spectra, The
Professional Journal of the EERI, Vol. 5,
No. 4, November 1989.
12. A.G. Brady and P.N. Mork, "Loma Prieta,
California, earthquake October 18(GMT)
1989, Processed Strong-motion records,"
Volume I, United States Department of
the Interior Geological Survey, Feb. 1990.
13. R. Becker, F. Naeim, E.J. Teal, Seismic
design practice for steel buildings,
California Field Iron Workers Administrative
Trust, California, Aug. 1988.
14. Spekhart, H. Frank and Green, L. Walter, A
guide to using CSMP-The Continuous System
Modeling Program, Prentice-Hall Inc., New
Jersey, 1976.
15. Kim, Heecheul, "Earthquake analysis of a
steel building in a low seismic zone," Ph.D.
Dissertation, New Mexico State University,
May 1991.