

地盤舉動의 持續時間이 建物에 미치는 影響

Duration Effect of the Ground Motion on Structures

金 熙 哲*
Kim, Hee Cheul

요 지

耐震構造는 建築規準에 의하여 強制性を 띤 이후 많은 발전을 하였으나 아직도 완전하게 이해되지는 않고 있다. 본 논문은 실제로 발생하였던 두 地震의 地盤運動을 10층의 鐵骨造에 적용시켜 얻은 결과를 비교하였다. 1989년 California의 Loma Prieta에서 발생한 規模 7.1의 地震記錄 12세트와 1985년 Chile의 Valparaiso에서 발생한 規模 7.8의 地震記錄 9세트를 UBC의 지진지역 2B에 알맞게 조절하였다. 비슷한 規模를 가진 두 지진의 地盤變位를 건물에 직접 적용시켜서 비교한 결과 그 持續時間이 긴 Chile 지진이 相對的으로 持續時間이 짧은 California 지진보다 약 2배 정도 큰 影響을 건물에 미치는 것이 발견되었다. 耐震構造의 設計에 있어서 最大地盤運動과 더불어 地盤運動의 持續時間도 매우 중요하게 考慮되어야 할 事項이다.

Abstract

Earthquake resistant design is evolutionary, and, although great progress has been made since seismic design was made mandatory by building codes, it is still not completely understood. In this paper, a 10 story steel building is analyzed and its results are compared by applying two different actual ground motions to the structure. 12 sets of Loma Prieta, California, earthquake data which occurred in 1989, and recorded 7.1 on the Richter scale and 9 sets of Valparaiso, Chile, earthquake data which occurred in 1985, and recorded 7.8 on the Richter scale were scaled to zone 2B level of UBC-88. By applying earthquake ground motions which had similar Richter scale magnitude, it was found that the Chile earthquake which had long duration of ground motion affected about twice bigger than that of California earthquake which had relatively short duration of ground motion. In addition to the peak ground motion, the duration of the ground motion is a very important factor in structural design.

1. 序論

地震의 發生으로 인한 建築物 및 人命의 피해를 줄이기 위해 많은 과학자와 엔지니어들이 계속적인 노력을 해왔다. 그들의 노력에 의해 耐震構造

分野는 많은 발전이 있었으며 그에 따른 建築規準 또한 계속적인 발전을 거듭해왔다. 현재 國內外에서 사용되고 있는 耐震構造에 관한 規準의 대부분은 각 地域別 地震記錄, 地震의 再發確率 및 地形

* 정희원, 삼성종합건설 기술연구소, 공학박사

이 논문에 대한 토론을 1992년 6월 30일까지 본 학회에 보내 주시면 1992년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

의 調査에 起因한 것으로 美國 西部海岸 地域의 科學者와 構造專門家들이 주축으로 되어 作成, 補完된 것을 應用하여 사용하고 있는 실정이다.

그러나 기존의 모든 건축규준들은 각 지역에서 발생할 수 있는 지진의 最大地盤運動(peak ground motion)만을 고려하여 작성된 것이므로 그 持續時間이 긴 지진이 발생할 경우 構造物의 安定에 問題點을 발생시킬 수 있다. Richter 地震計로 같은 震度を 기록한 지진이라 할지라도 그 지속시간이 긴 지진의 경우 건물에 傳達되는 全體 운동 에너지의 量에는 상당한 차이가 있다.

따라서 본 연구에서는 持續時間이 다른 두 地震이 建物에 미치는 影響의 比較에 그 目的을 두었다. Richter 지진계로 비슷한 규모를 기록한 두 지진의 地盤變位記錄을 10층의 鐵骨造 건물에 작용시켜 얻은 결과를 비교하였다. 또한 본 연구는 우리나라와 같이 弱震이 발생할 수 있는 지역을 위하여 실제 強震地域에서 발생한 지진을 단순한 보간법을 이용하여 그 強度를 調節하여 사용하였다.

본 연구에서 假定된 10층의 鐵骨造 모델은 그림 1에서 보인 바와 같이 각각 3개와 4개의 스패ンを 가진 24ft(7.3m)×30ft(9.1m)의 건물로서 전 層의 層高는 12ft(3.6m)로 정하였다. 따라서 각 층에서의 質量은 최상층을 제외한 전 층이 같은 크기를 가진다. 기둥의 크기는 건물의 施工性 및 그에 따른 經濟性을 고려하여 매 2층마다 그 크기를 같게 하였으므로 剛性의 크기는 매 2층이 같게 계산되었다. 각 층에 集中質量을 가진 가정된 모델에 따른 10개의 固有振動數는 표1과 같다.

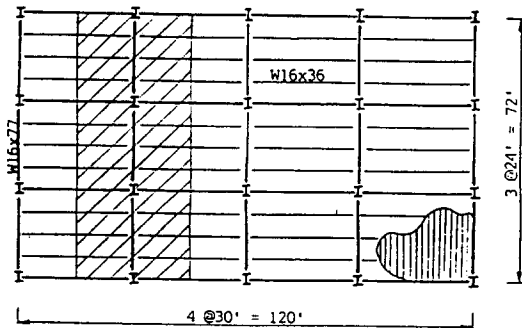


그림 1. 모델평면도

표1. 모드별 고유진동수

(단위 : rps)

모우드	고유진동수
1	5.3969
2	13.6982
3	21.8319
4	29.9476
5	36.1748
6	41.6009
7	47.1199
8	54.8983
9	63.9704
10	76.1214

2. 實 地震의 地盤運動記錄

본 연구에서는 實際로 미국과 칠레에서 발생하였던 두 종류의 地震 記錄이 時間資料로서 이용되었다. 본 연구에서 사용된 記錄은 미 상업성 國立海洋 및 大氣管理部(NOAA) 부설 國立地質資料所(NGDC)로 부터 제공되었으며 사용된 21세트의 기록은 다음과 같다.

- (1) 1989년 10월 18일 California주 Loma Prieta에서 발생한 진도 7.1의 지진데이터 12세트
- (2) 1985년 3월 3일 Chile의 Valparaiso에서 발생한 진도 7.8의 지진데이터 9세트

그러나 위에서 기술한 21세트의 자료들은 각각 다른 地域 및 方向에서 측정된 것으로서 그 크기가 서로 다르므로 一貫性있는 資料의 利用을 위해서는 자료의 수정이 필요하였다. 또한 본 연구의 목적은 弱震地域에서 발생하는 건물의 應答를 조사하는데 있으므로, 美 國內에서 광범위하게 사용되고 있는 몇몇의 地形圖(Contour Map)를 바탕으로 간단한 보간법을 이용하여 UBC의 지진 지역 2B에 적합하게 주어진 자료들을 수정하였다. 본 연구에서 고려한 지형도는 다음과 같다.

- (1) 國立 地震 危險 節減 計劃(National Earthquake Hazard Reduction Program)에서 발간된 “설계 가속도 상수를 위한 지형도”
- (2) 美 國內 地形 測量部(United States Department of Interior Geological Survey)에서

발행한 “50년 내에 90% 確率을 넘지않는 水平加速度의 임시계획도”²⁾

(3) UBC-88에 명시된 “지진 지역계수 Z”와 “지진 지형도”³⁾

모든 지형도들은 歷史的인 地震記錄, 再發確率 및 地形의 調査에 기인한 것이다. 위에 명시된 지형도들을 바탕으로 본 연구에서 사용한 減少係數는 다음과 같다.

$$\text{減少係數} = \frac{0.2g}{\text{最大加速度}} \quad (1)$$

3. 時間 履歷 解析

時間 履歷 解析을 진행하는데 있어서 效率의인 컴퓨터 프로그램의 選擇은 매우 중요한 일 중의 하나이다. 위에서 記述한 21세트의 지진기록들은 각 세트별로 2000개 내지 4000개 정도의 데이터로 구성되어 있으므로 이런 방대한 量의 時間履歷 데이터를 처리하는 速度가 빨라야 하는 것이 그 첫번째 요구사항이다. 또한 서로 연관성이 있는 (coupled) 10개의 聯立 微分方程式을 처리할 수 있는 能力이 있어야 하므로 본 연구에서는 IBM에서 제작한 Continuous System Modeling Program-III(이하 CSMP-III로 칭함)¹⁰⁾를 사용하였다.

CSMP-III는 常微分方程式을 푸는데 매우 효율적인 프로그램으로서 사용법이 간단하고 서로 연관성이 있는 聯立方程式을 並列(parallel)로 처리할 수 있는 能力이 있다. 또한 많은 종류의 積分 回路(integration routine), Adam의 방법, Milne의 방법, Rectangular 적분법, Central 적분법, 2차 및 4차의 Runge-Kutta 방법, Simpson의 방법, Trapezoidal 적분법 등이 내장되어 있어 식의 특징에 따라 적절한 積分法을 선택하여 사용할 수 있다. 본 연구에서는 비교적 安定性이 있고 正確한 값을 가질 수 있는 4차의 Runge-Kutta 方法을 이용하여 方程式의 解를 구하였다.

시간이력해석을 이용한 적분법에 있어서 또 다른 중요한 요소의 하나는 적분의 增分 간격이다. 時間 增분이 작을수록 正確한 값을 가진다는

것은 누구나 알고 있는 사실이나, 효율적인 시간 증분의 결정은 컴퓨터의 이용시간에 많은 영향을 미치므로 적절한 증분의 선택은 매우 중요하게 고려되어야 할 사항이다. 본 연구에서는 제공된 자료에서 쓰여진 시간증분인 0.01초, 0.015초, 0.02초 또는 0.03초 등이 쓰여졌는데, 이 증분들은 假定된 모델에서 얻어진 10개의 固有振動數에 根據하여 그 구조적응답을 충분히 묘사할 수 있는 것으로 나타났다.

彈性構造物의 지진응답 계산은 運動方程式의 해법에 의해서 이루어지는데, 본 연구에서는 10층의 철골 구조물을 각 층에 集中質量(lumped mass)을 가진 剪斷建物(shear building)로 해석하였으므로 각 층별로 水平方向으로의 自由度만 許容하였다. 따라서 각 자유도별로 하나의 2차 미분방정식이 형성되므로, 10개의 식을 지반변위 $X_g(t)$ 에 대하여 서로 연관된 행렬식의 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X} - \dot{X}_g\} + [K]\{X - X_g\} = \{0\} \quad (2)$$

식 (2)에서 $[M]$ 은 質量行列, $[C]$ 는 減衰行列, $[K]$ 는 剛性行列을 나타내며, $\{\ddot{X}\}$, $\{\dot{X}\}$, $\{X\}$ 는 각각 絶對加速度, 速度, 變位 벡터를 표시한다. 본 연구에서는 모드 감쇠비를 5%로 가정하였으므로 감쇠행렬 $[C]$ 는 모드별형상(modal shape)의 질량행렬에 대한 직교성(orthogonality)을 이용한 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$[C] = [\Phi]^{-T} [D] [\Phi]^{-1} \quad (3)$$

식 (3)에서 $[\Phi]$ 는 표준 모드행렬(normalized modal matrix)로서 각 모드별 형상의 조합이며, $[D]$ 는 모드별 감쇠행렬(modal damping matrix)로서 대각선으로 $2\xi_n \omega_n$ 의 값을 가진다. ξ_n 은 n 번째 모드에서의 감쇠비를 나타내며 ω_n 은 n 번째 모드에서의 고유진동수를 나타낸다.

식 (2)의 해법에 있어서 대부분의 경우 지반변위 벡터 $\{X_g\}$ 에 대한 相對的 層別 變位 벡터를 媒介體로 이용한 加速度資料를 이용하고 있으나, 본 연구에서는 時間從屬 變位資料를 직접 식 (2)에 대입하여 각 층의 변위를 구하였다. 變位函數는 加速度函數보다 더 圓滑한 曲線을 이루므로

변위자료의 이용은 같은 시간증분을 사용할 경우 가속도자료보다 더 정확한 값을 얻을 수 있는 長點이 있다.

CSMP-III를 이용한 시간이력해석은 Continuous System Simulation Language(CSSL)를 사용하는 적분회로를 내포하고 있으며 FORTRAN 언어를 프로그램의 일부분으로 포함할 수 있는 融通性도 있다. 각 층에서 얻어진 10개의 2차 연립 미분방정식은 상태변위(state variable)를 이용하여 20개의 1차 연립 미분방정식으로 置換되었는데 그 과정은 다음과 같다.

상태변위 $Y1$ 과 $Y2$ 를 각각 식 (2)에서 쓰여진 X 와 \dot{X} 에 해당하는 變位 및 速度라고 하면, \ddot{X} 는 $\ddot{Y}2$ 로 표시될 수 있다. 따라서 식 (2)를 상태변위를 도입한 1차의 미분방정식 형태로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{Y}2\} + [C]\{\dot{Y}2\} + [K]\{Y1\} = [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} \quad (4)$$

식 (4)를 가속도 벡터인 $\{\ddot{Y}2\}$ 에 대해서 解를 구하면, 速度와 變位는 각각 加速度와 速度를 積分함으로써 쉽게 그 解를 구할 수 있다. 이 관계를 식으로 표시하면 아래와 같이 표현된다.

$$\{Y2\} = \frac{[C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} - [C]\{\dot{Y}2\} - [K]\{Y1\}}{[M]} \quad (5)$$

$$\{Y2\} = \int_{t_0}^t \dot{Y}2 dt$$

$$\{Y1\} = \int_{t_0}^t Y2 dt$$

4. 解析結果의 比較

실제적으로 構造設計를 하는 엔지니어들에게 가장 중요한 문제는 기둥에 작용하는 모멘트와 전단력이다. 전단건물의 기둥에서 발생하는 모멘트와 전단력은 양단고정 각주의 이론에 의거 係數 $L/2$ 로써 직접적인 關係를 가진다. 따라서 본 연구에서는 각 층의 기둥에 작용하는 最大水平力의 크기를 비교하였다.

12세트의 Loma Prieta 지진 및 Chile 지진 해석 결과는 각 층별 수평력의 平均 및 標準偏差를 구하였다. 본 연구에서는 線形解析의 결과만을 비교하였으며 참고로 같은 모델에 있어서의

UBC-88 動的解析 결과도 표 2에 같이 보여 주었다. 표 2에 보인 UBC 동적해석 결과는 UBC에 주어진 응답스펙트럼을 이용하여 얻어진 것이다.

표 2에서 보듯이 Loma Prieta 地震 解析結果는 UBC-88의 스펙트럼을 이용한 결과와 매우 흡사하다. 그러나 Chile 지진의 해석결과는 다른 두 해석결과들에 비해 全體 水平力에 1.7배 이상의 힘이 작용한다는 것을 알 수 있다.

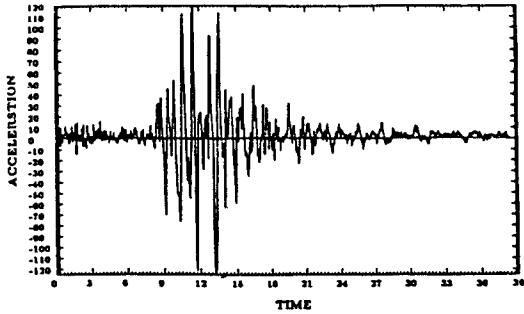
두 地震記錄들은 같은 概念에 의해 調節係數로 修訂되었음을 注目해야 한다. 그러나 원래의 地盤 運動資料를 觀察해 보면 이와같은 差異의 根本的인 理由는 最大地盤運動이 아니라 지반운동의 持續時間이라는 것을 알 수 있다. 그림 2와 같이 조절계수를 사용하지 않은 원래의 기록을 보면 그 이유는 더욱 확실해진다.

그림 2는 Loma Prieta와 Chile의 지진 기록들 중에서 최대가속도의 크기가 거의 비슷한 하나의 가속도 기록을 도식화한 것이다. 그림에서 보듯이 Loma Prieta 지진의 경우 지진 발생후 약 9초경부터 加速度가 增加하기 시작하여 13초경에 最大 加速度를 記錄한 후 圓滑하게 그 값을 줄여갔다. 반면에 Chile 지진의 경우는 지진발생후 약 6~7초 사이에 加速度가 增加하기 시작하여 18초경에 最大 加速度를 記錄하였다. 이와 같은 관찰에서 보면 前者의 경우 그 持續時間이 약 6초(9초~15초) 정도이나 後者の 경우는 그 持續時間이 약

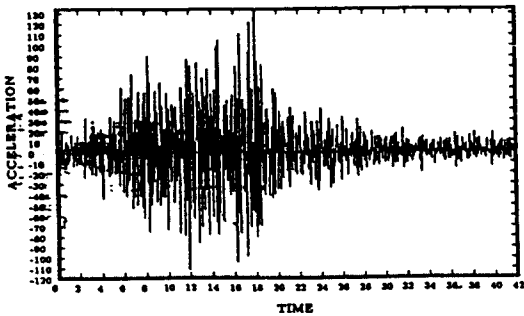
표2. 時間履歷解析 結果 比較

(단위: kips)

층	Loma Prieta		Chile		UBC
	평균수평력	표준편차	평균수평력	표준편차	평균수평력
1	3.58	6.16	48.77	35.95	13.09
2	24.95	19.46	43.95	29.79	21.26
3	33.81	26.36	62.97	42.55	28.83
4	24.48	19.31	47.73	32.47	32.06
5	24.62	20.41	30.26	21.73	36.60
6	29.07	25.40	37.87	26.22	38.94
7	54.11	42.18	56.79	38.83	47.70
8	69.20	53.26	101.91	68.34	57.53
9	109.92	83.41	190.04	124.65	87.87
10	97.07	73.26	186.33	121.66	81.57
총계	470.81		806.51		445.45



(a) Loma Prieta, California



(b) Valparaiso, Chile

그림2. 實地震의 地盤加速度 記錄

14초(6초~20초) 정도로서 前者의 경우보다 약 2.3배나 더 오래 머무른 것이 그 주된 原因이라는 것을 알 수 있다.

5. 結論

本 研究에서는 實際 地震의 地盤變位 記錄을 荷重으로 사용하여 10층의 鐵骨造 構造物에 대한 弱震地域에서의 應答을 조사하였다. 假定된 10층의 建물은 각 층에 集中質量을 가진 剪斷建物로 解析하였으며 사용된 21세트의 實際 地盤運動의 變位資料는 UBC의 2B 지역에 알맞게 조절되어서 基礎部에서의 荷重으로 作用시켰다. 時間履歷解析은 2차의 運動方程式을 狀態변위를 도입한 1차의 미분방정식으로 변환시켜 CSMP-Ⅲ를 사용하여 修行되었다.

本 研究의 結果를 보면 最大地盤運動(peak ground motion)과 더불어 地盤運動의 持續時間이 建物の 應答에 큰 影響을 미치는 것을 명확하게

알 수 있다. 이러한 결론은 Chile 지진과 같이 거동시간이 긴 지진과 相對的으로 그 거동시간이 짧은 Loma Prieta 지진의 比較에서 잘 나타나고 있다. Chile 지진의 持續時間이 Loma Prieta 지진의 持續時間보다 약 2.3배 오래 머무름으로 인하여 全體 水平力에서는 약 1.7배의 差異가 나타났음을 알 수 있다. 이러한 한 가지의 解析 結果로써 持續時間의 差異에 따른 構造物의 影響을 한마디로 表現할 수는 없으나, 本 研究의 結果만을 考慮해 보면 持續時間이 약 2배 증가할 때 全體 建물이 받는 수평력은 약 1.5배가 增加함을 알 수 있다.

또한 既存에 使用되고 있는 地震荷重의 算定規準은 地震의 持續時間을 考慮하지않고 작성되었음을 알 수 있다. 따라서 현재 사용되고 있는 耐震規準은 지진의 지속시간을 고려한 係數의 調整이 檢討되어야 할 것으로 思料된다. 또한 각각의 地盤運動資料에 의거한 운동에너지의 비교는 운동에너지 값이 實際 設計의 目的으로 利用될 경우 좋은 決定條件이 될 것이다.

參 考 文 獻

1. Paz, Mario, Microcomputer-Aided Engineering : Structural Dynamics, Van Nostrand Reinhold, New York, 1986.
2. S.T. Algermission, 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 72-1033, United States Department of the Interior Geological Survey, 1982.
3. Stephenson E. Robert, Computer simulation for engineers, Harcourt Brace Jovanovich Inc., New York, 1971.
4. Berg, Glen V., Elements of Structural Dynamics, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1989.
5. Naeim, Farzard, Ed. Seismic design handbook, Van Nostrand Reinhold, New York, 1989.
6. 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.
7. R. Becker, F. Naeim, E.J. Teal, Seismic design practice for steel buildings, California Field Iron Workers Administrative Trust, California, Aug, 1988.
 8. Spekhart, H. Frank and Green, L. Walter, A guide to using CSMP-The Continuous System Modeling Program, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1976.
 9. Uniform Building Code, 1988 Ed., International Conference of Building Officials, Whittier, CA. 1988.
 10. Continuous System Modeling Program III (CSMP - III) Program Reference Manual, Fourth Ed., International Business Machine Corporation, December 1975.
 11. Manual of Steel Construction : Allowable Stress Design, 9th Edition, American Institute of Steel Construction Inc., Chicago, Illinois, 1989.
 12. Lawson, Michael. "Man of the year, Vitelmo V. Bertero," ENR, McGraw-Hill Construction Weekly, February 22, 1990.
 13. Kim, Heecheul, "Earthquake analysis of a steel building in a low seismic zone," Ph.D. Dissertation, New Mexico State University, May 1991.

(접수일자 : 1991. 9. 16)