수직지반운동의 특성과 3층 RC건물의 응답에 미치는 영향

Characteristics of Vertical Ground Motion and Its Effect on the Response of 3-Story RC Building

김명한* · 김승직**

Kim, Myeong-Han · Kim, Sung Jig

Abstract

The paper presents the characteristics of vertical ground motion and its effect on 3-story RC building. The characteristics of vertical ground motion are discussed including frequency content, vertical-to-horizontal peak ground acceleration (V/H) ratio, and time intervals between the arrival of the vertical and horizontal peaks. The vertical ground motion effects on the RC structure are also investigated considering V/H ratio. It is observed that the inclusion of the vertical component of ground motion has an important effect on the response of the selected RC building. It is therefore concluded that vertical motion should be included in analysis for assessment and design in the near fault area where V/H is likely to be high.

Key words : Vertical ground motion, Seismic assessment, RC building, Shear strength

요 지

이 논문은 수직지반운동의 특성과 3층 RC건물의 응답에 수직지반운동이 미치는 영향을 평가한 것이다. 수직지반운동의 주파수 특성, 수평 · 수직지반운동의 최대지반가속도 비율 (V/H), 수평 · 수직지반운동의 최대지반가속도 도달시간차를 분석하고, 다양한 V/H에 따라서 수직지반운동이 건물의 응답에 미치는 영향을 평가하였다. 해석결과 수직지반운동을 포함하는 것이 이 연구에서 선정한 구조물의 응답에 중대한 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 따라서 V/H가 높을 가능성이 있는 단층인접지역에서는 신뢰성 있는 구조해석 및 설계를 위하여 수직지반운동을 포함한 구조해석이 필요하다.

핵심용어 : 수직지반운동, 내진해석, 철근콘크리트 건물, 전단강도

1. 서 론

미국 Loma Prieta 지진(1989), Northridge 지진(1994), 일본 고베지진(1995), 인도네시아 Yogyakarta 지진(2006), 뉴질랜드 Christchurch 지진 (2011) 등과 같은 중 · 대형지진들에 의하여 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 많은 철근콘크리트 구조물들이 상당한 피해를 입었다. 많은 연구자들(Broderick and Elnashai, 1995; Papazoglou and Elnashai, 1996)이 단층인접지역(Near Fault Area)에서 수직지반운동에 의하여 철근콘크리트 기둥의 전단강도가 약화되어 파괴가 유도된 것으로 보고하고 있으며, 특히 최근에 뉴질랜드에서 발생한 Christchurch 지진 (2011)의 경우는 충분히 우리나라에서도 발생이 가능한 규모 6.3이며, Fig. 2에서 보이듯이 수직 · 수평 최대지반가속도 비율이 일반적으로 고려하는 2/3보다 상당히 큰 지진파가 많은 지진파 관측소에서 기록되었다. Fig.

2에서 보이는 지진파의 경우에 그 비율이 약 2.5로서 수직지반운동의 최대가속도가 1.629 g로 기록되었으며, 많은 구조물의 붕괴가 수직지반운동과 연관된 것으로 보고되었다.

위에서 언급한 바와 같이 수직지반운동의 영향으로 인한 구조물의 피해사례가 관찰됨에 따라 수평지진하중만을 고려 하였던 연구경향에서 벗어날 필요가 있음이 지적되었고, 최근 약 20년 동안 미국과 유럽 등의 선진국에서는 지진하중의 수직성분이 구조물의 응답에 미치는 영향에 대한 연구가 진행되고 있으며, 설계기준에서도 이를 적절히 반영하고 있다. Kunnath et al. (2008)은 2경간 교량의 내진해석을 통하여 수직지진하중에 의하여 기둥의 축력과 교량 상판의 모멘트가 상당히 증가한다고 분석하였으며, Mwafy and Elnashai (2006)과 Kim and Elnashai (2009)는 다양한 층수 및 연성비를 고려한 철근콘크리트 건물에 미치는 수직지진하중의 영향평가를 통하여 층간변위가 종종 붕괴방지 제한선까지도 발

*정회원. 대전대학교 건축공학과 부교수(E-mail: mhh314@daejin.ac.kr)

Member. Associate Professor, Department of Architectural Engineering, Daejin University

**교신저자. 정회원. 계명대학교 건축공학과 조교수(Tel: +82-53-580-5273, Fax: +82-53-580-5775, E-mail: sjkim4@kmu.ac.kr)

Corresponding Author. Member. Assistant Professor, Department of Architectural Engineering, Keimyung University

Fig. 1. Damage of RC structure; (a) Yogyakarta earthquake (2006), (b) Christchurch earthquake (2011)

Fig. 2. Strong Motion Record at Pages Road Pumping Station, Christchurch Earthquake (2011)

생하며, 곡률 연성요구도(Curvature Ductility Demand)가 60%까지 증가됨을 보였다. Kim et al. (2011a)은 다양한 수직·수평 최대지반가속도 비율에 따른 수직지반운동의 영향을 평가하여 교량기둥의 전단내력(Shear Capacity)이 수직지반운동을 동시에 고려하였을 경우에 약 25%까지 저감됨을 보였다. 최근 Kim et al. (2011b)는 수직지반운동을 고려한 하이브리드 실험을 통하여 철근콘크리트 기둥에 미치는 영향을 평가하였다. 이 연구에서 수직지반운동을 고려하였을 때 전단균열을 포함하여 상당한 균열이 발생하였고, 전단철근의 변형률이 수평지반운동만을 고려하였을 때와 비교하여 약 200%이상 증가됨을 실험적으로 증명하였다. 현재까지 국내의 연구 (Kim, 1999; Han and Ko, 2009)에서는 제한된 지진지반운동 데이터와 한정된 구조물을 적용하여 일반화하기는 어려움이 있다.

우리나라의 설계기준에서는 이러한 수직지반운동을 고려하지 못하고 있다. 우리나라는 비교적 양호한 지반으로 구성되어 있어 먼 진앙지에서 발생한 대형지진보다는 단층인접지역에서 발생하는 중·약진이 구조물에 피해를 입힐 가능성이 크다. 따라서 가까운 진앙원리에서 영향이 큰 수직지반운동의

영향을 고려한 구조물의 거동특성을 연구할 필요가 있다. 이에 본 논문에서는 지진지반운동의 수직성분에 대한 특성을 분석하고, 3층 철근콘크리트 건물의 응답에 미치는 수직지반운동의 영향을 평가하여 아직 기초단계에 머무르고 있는 국내 수직지반운동에 대한 연구의 필요성을 제시하고자 한다.

2. 수직지반운동의 특성

2.1 주파수 특성

지반운동의 수직성분과 관련이 있는 P파의 파장은 수평성분과 관련되어 있는 S파의 파장보다 짧다. 따라서 Northridge 지진(Sylmar Converter Station)의 지반운동을 분석한 Fig. 3(a)와 (b)에서 볼 수 있듯이 수직지반운동은 수평지반운동에 비하여 고주파수 성분을 가지고 있으므로, 응답스펙트럼의 단주기 영역에서 큰 응답을 나타낸다. 또한 수직지반운동의 전체적인 에너지는 수평성분에 비하여 낮아 보이지만, Fig. 3(c)에서 보이듯이 좁은 구간에 에너지가 집중하는 경향을 보인다. 따라서 이러한 수직성분의 높은 주파수 특성은 철근콘크리트 구조물의 수직진동주기와 종종 일치하여 구조물의 응답을 크게 증폭할 수 있다(Papazoglou and Elnashai, 1996).

2.2 최대 지반가속도의 비율 (V/H Ratio)

수직지반운동의 크기와 중요성은 종종 지반운동의 수직성분과 수평성분의 최대지반가속도 비율(V/H Ratio)을 이용하여 나타낸다. 수직지반운동의 영향을 고려하는 UBC-97 및 NRC Regulatory Guide 등의 기준에서는 Newmark et al. (1973)에 의하여 처음으로 제안된 수평성분에 2/3를 곱하여 고려하는 방법을 사용하는데, 결과적으로 지진하중의 모든 성분이 같은 주파수 특성을 갖는다는 가정을 포함한다. 하지만 위에서 언급한 바와 같이 수직성분과 수평성분은 각기 다른 주파수 특성을 가지고 있다. 또한 452개의 지반운동에 대한 V/H를 단층거리에 따라 표현한 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 2/3법칙은 진원지에서 가까운 거리에 대해서는 과소평가하며,

Fig. 3. Northridge Earthquake; (a) Acceleration, (b) Response spectra, (c) Arias intensity

Fig. 4. Distribution of V/H Ratio with Respect to Distance and Earthquakes(Kim et al., 2011a)

진원지에서 먼 거리에 대해서는 과대평가함을 알 수 있다. 또한 대부분의 V/H 비율은 2.0 이내이고, 몇몇의 지반운동에 대하여서는 2.5를 넘는 경우도 있음을 알 수 있다.

2.3 최대 지반가속도의 시간차

Fig. 5(a)에서와 같이 수직지반운동이 수평지진운동보다 먼저 도달할 경우에 수직지반운동에 의해 약화된 구조물이 수평지반운동에 의하여 추가적으로 피해를 입을 수 있다. 이러한 경우 수직지진운동에 의하여 구조물의 강성이 저하됨으로서 주기가 길어지고, 수평지진하중만을 고려할 때 예상되는 거동과는 다른 결과가 나타나므로, 설계시에 예상하지 못한 피해를 입을 가능성이 있다. 또한 Fig. 5(b)에서와 같이 수평 · 수직 지진하중의 최대지반가속도가 동시에 발생할 경우 수평지반운동만을 고려하였을 때와 비교하여 구조물의 부담이 증가하여 상당한 피해가 발생할 가능성이 있다. 하지만 수직지진하중을 반영하는 현재까지의 내진설계 기준들은 중요한 요소 중의 하나로 V/H의 비율을 고려하고 있으나, 위에서 언급한 수평 · 수직 지진하중의 최대지반가속도가 발생하는 시간적인 차이를 고려하지 못하고 있다.

(a) Non-coincidence, Arleta Fire station, Northridge (1994)

(b) Coincidence, Capitola station, Loma Prieta (1989)

Fig. 5. Time Interval of Horizontal and Vertical Peaks

3. 내진 설계 기준

위에서 언급된 수평지반운동과는 다른 수직지진지반운동의 특성을 인식하여 최근 미국과 유럽을 포함한 여러 나라의 설계기준에서는 지진하중의 수직성분의 특성을 고려하여 설계스펙트럼을 제시하고 있다. Fig 6(a)는 UBC 97과 EC8 (Eurocode 8, 2004)의 수평 · 수직 지진하중의 응답스펙트럼 비교를 나타내고 있다. 위에서 언급한 바와 같이 과거의 UBC 97은 수평지진하중의 응답스펙트럼에 2/3를 곱하여 수직지진하중의 응답스펙트럼을 구하는 반면에, EC8의 경우 실제 수직지진하중의 특성을 고려하여 응답스펙트럼을 제시하고 있다. 따라서 두 내진설계 기준의 수평지진하중 스펙트럼은 거의 같으나 수직지진하중 스펙트럼에서 큰 차이를 보이고 있다. Fig. 6(b)에서 볼 수 있듯이 EC8에서 제공하는 스펙트럼은 실제 지진하중 스펙트럼의 특성을 반영하고 있다. 최근 미국에서는 이러한 수직지반운동에 대한 설계스펙트럼의 문제점을 인식하여 NEHRP(National Earthquake Hazard Reduction Program) 2009에서 Fig. 7과 같이 수직지반운동의 설계스펙트럼을 제안하고 있다.

캘리포니아 교통국 (Caltrans)에서는 최근 지반운동의 수직성분이 교량에 미치는 영향성 평가에 관한 연구프로젝트 (Kunnath et al., 2008)를 수행하였으며, 이를 설계 기준안에 반영하고 있다. Caltrans (2010)에서는 고정하중의 25%를 상 · 하 양방향으로 추가적인 하중을 고려하는 방법을 제시하

(a) Horizontal and vertical spectra in UBC-97 and EC8

(b) Typical vertical response spectra with EC8

Fig. 6. Response Spectra with $\zeta = 2\%$

Fig. 7. Vertical Spectra in NEHRP 2009

고 있으며, 이는 잠정적인 방법이며 계속적으로 연구결과에 따라 업데이트될 것임을 명시하고 있다. ASCE 7-10(2010)에서는 단주기에서의 수평성분에 대한 설계응답스펙트럼의 계수(SDS)에 고정하중(D)과 0.2를 곱하여 수직성분의 영향을 고려하도록 규정하고 있다.

4. RC 구조물의 지진응답

4.1 대상 구조물

본 논문에서는 Fig. 8에서 보이는 3층 철근콘크리트 모멘트 골조를 이용하여 수직지반운동이 구조물의 지진응답에 미치는 영향을 평가하였다. 각 층의 높이는 Fig. 8에서 보이듯이 3.7 m이고 경간은 5.5 m이다. 콘크리트의 압축강도는 33.6 MPa이며 철근의 항복강도는 336 MPa이다. Fig. 7에서 보이는 철근 콘크리트 골조는 비선형 유한요소해석 프로그램

Fig. 8. Elevation of 3-Story RC Building

인 Zeus-NL(Elnashai et al. 2004)을 이용하여 해석을 수행하였다. 기둥과 보의 각각 6개 및 7개의 요소들로 나누었으며 질량은 보·기둥 접합부에 위치해 있는 것으로 가정하였다. 모드해석을 통하여 얻어진 이 구조물의 주기는 각각 0.898, 0.305, 및 0.200 sec이다.

4.2 지반운동의 선정 및 해석방법

본 연구에서는 Table 1에서 보이듯이 단층인접지역에서 기록된 두 개의 지진으로부터의 수평·수직지반운동을 선택하였다. 수평지반운동의 최대지반가속도는 약 0.3 g이며 V/H 비율은 1.79 및 1.22이다. Fig. 9(a)는 선택된 지반운동의 가속도 응답스펙트럼을 나타내는데, 앞에서 언급한 바와 같이 수평지반운동에 비하여 수직지반운동의 응답스펙트럼은 단주기 영역에서 큰 응답을 나타낸다. Fig. 9(b)는 선택된 수직지반운동의 응답스펙트럼과 EC8의 설계 스펙트럼과의 비교를 나타낸다. Fig. 9(b)에서 보이듯이 선택된 수직지반운동은 EC8의 설계 수직지반운동 스펙트럼과 근접함을 알 수 있다.

선택된 지반운동에 대하여 V/H 비율에 따른 수직지반운동이 구조물의 지진응답에 미치는 영향을 평가하였다. 수평지반운동의 최대지반가속도는 고정하고, 수직지반운동의 크기를 조정하여 V/H의 비율을 0.4부터 0.2씩 증가시키면서 2.0까지 설정하였다. 이 V/H 비율은 Fig. 4의 452개의 지반운동에 대한 V/H 비율의 분포도를 고려하여 설정하였다. 따라서 수평지진만을 고려한 경우를 포함하여 선택된 두 개의 지진 관측소로부터의 지반운동에 대하여 각각 10개의 해석 즉, 총 20개의 비선형 시간이력해석을 수행하였다.

수직지반운동의 영향은 구조물의 층간변위비(Interstory Drift Ratio)와 1층 기둥들에 대하여 축력의 변화(Axial Force Variation), 전단요구강도(Shear Demand), 기둥의 공칭전단강도 또는 전단내력(Shear Capacity)을 검토하여 평가하였다. 기둥의 공칭전단강도는 압축력을 받는 부재에 대하여 ACI 318-11 기준에서 제공하는 아래의 식을 이용하여 각 시간증분에서 구하였다.

$$V_n = V_c + V_s \quad (1)$$

여기서 V_n 은 공칭전단강도, V_c 는 콘크리트가 부담하는 전단강도, V_s 는 전단철근이 부담하는 강도이며, V_c 와 V_s 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$V_c = \left(0.16 \sqrt{f_{ck}} + 17 \rho_w \frac{V_u d}{M_m} \right) b_w d \leq 0.29 \sqrt{f_{ck}} b_w d \sqrt{1 + \frac{0.29 N_u}{A_g}} \quad (2)$$

Table 1. Selected Ground Motion

EQ	Station	Fault Dist. (km)	PGA(g)		V/H	Time Interval (sec)	Ref. Name
			H	V			
Northridge (1994, Mw 6.7)	Arleta-Fire	8.7	0.308	0.552	1.79	2.78	NO-ARL
Kobe (1995, Mw 6.9)	Kobe Univ.	0.9	0.310	0.380	1.22	0.53	KB-KBU

(a) Response spectra of selected records

(b) Normalized vertical spectra with EC8

Fig. 9. Response Spectra with of Selected Records

여기서 V_u 는 전단력, N_u 는 압축력, ρ_w 는 주철근비이며, M_m 은 식 (3)으로부터 구할 수 있다.

$$M_m = M_u - N_u \frac{(4h-d)}{8} \quad (3)$$

$$V_s = \frac{A_w f_y d}{s} \quad (4)$$

4.3 해석결과

Fig. 10은 각각의 V/H 비율에 따른 층간변위비(Interstory Drift Ratio)를 나타내고 있다. 다른 과거 연구(Kim et al. 2011a)에서 보고한 내용과 유사하게 수직지반운동의 층간변위비에 대한 영향은 크지 않게 나타난다. NO-ARL 지반운동에 대하여는 V/H 비율이 증가함에 따라 층간변위가 수평지진만을 고려하였을 때와 비교하여 약 5.8%까지 증가되었지만, KB-KBU 지반운동에 대하여는 V/H 비율이 증가함에 따라 반대로 약 9%까지 줄어든다는 사실을 알 수 있다. 따라서 V/H 비율이 증가함에 따라 층간변위는 증가 또는 감소할 수 있지만, 그 영향은 상대적으로 미미한 것으로 나타났다.

Fig. 11은 수평지반운동만을 고려하였을 때와 수직지반운동을 함께 고려하였을 때의 기둥 C3에 대한 축력의 시간이력을 나타낸다. Fig. 11에서 명확하게 나타나 있듯이 수직지반운동을 동시에 고려하였을 때 기둥의 축력이 상당한 범위로 변동하는 것을 알 수 있다. 이러한 기둥의 축력변화(Axial

수직지반운동의 특성과 3층 RC건물의 응답에 미치는 영향

Fig. 10. Interstory Drift Ratio

Fig. 11. Comparison of Axial Force on C3, NO-ARL

Fig. 12. Effect of VGM on Axial Force Variation of RC Columns at the First Story

Force Variation)는 V/H 비율이 증가함에 따라 그 정도가 커지는 경향을 Fig. 12에서 알 수 있다. Fig. 12에서 볼 수

Fig. 13. Effect of VGM on Shear Demand of RC Columns at the First Story

Fig. 14. Effect of VGM on Shear Capacity of RC Columns at the First Story

있듯이 V/H 비율이 증가함에 따라 축력은 거의 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 특히 축력의 변화는 수평지반운동만을 고려했을 때와 비교하여 NO-ARL 지반운동과 KB-KBU 지반운동에 대하여 각각 최대 600%와 550%까지 증가하였다.

이러한 수직지반운동의 기둥축력에 대한 커다란 영향은 기둥의 전단강도에도 영향을 미친다. Fig. 13은 1층 기둥의 전단요구강도 (Shear Demand)에 대한 수직지반운동의 영향을 V/H 비율에 따라 나타내고 있다. 여기서 전단력은 시간이력의 최대값이며, 수평지반운동만을 고려하였을 때를 기준으로 하여 수직지반운동이 포함된 경우의 전단력에 대한 영향을 평가한 것이다. Fig. 13에서 볼 수 있듯이 NO-ARL의 경우에 최대 7.3%까지, KB-KBU의 경우에는 12.8%까지 증가하였다. V/H 비율이 증가함에 따라 기둥의 전단력도 증가하는 경향을 나타내고 있다. Fig. 14는 식(1)을 이용하여 각 시간 증분별로 전단내력을 구한 후에 V/H 비율에 따른 최소값의 변화를 나타내고 있다. Fig. 14에서 명확하게 나타나 있듯이 V/H 비율이 증가함에 따라 수평지반운동만을 고려하였을 때와 비교하여 NO-ARL의 경우에 최대 25%까지, KB-KBU의 경우에 16%까지 전단내력이 감소되었다. 따라서 수직지반운동에 의하여 증가된 축력이 기둥의 전단요구강도를 증가시키는 동시에 기둥의 전단내력을 감소시켜 전단파괴의 확률을 높인다고 판단할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 수직지반운동의 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 3층 철근콘크리트 건물에 대하여 비선형 시간이력해석을 수행하여 수직지반운동이 철근콘크리트 구조물의 응답에 미치는 영향을 평가하였다. 해석결과 구조물의 층간변위비에 미치는 영향은 상대적으로 적었으나, 수직성분과 수평성분의 최대지반가속도 비율(V/H Ratio)이 증가함에 따라 기둥의 축력변화(Axial Force Variation)는 상당히 증가하였다. 수직지반운동에 의해 증가된 축력의 변화는 수평지반운동만을 고려하였을 때와 비교하여 기둥의 전단요구강도를 12.8%까지 증가시키는 반면에 전단내력을 25%까지 감소시켰다. 따라서 기둥의 전단파괴가 유도될 가능성이 커지는 것이며, 수평지반운동과 수직지반운동 모두를 고려할 경우에는 수평성분만을 고려했을 때보다 지진에 대한 구조물의 취약성이 증가할 수 있다. 따라서 수직성분과 수평성분의 최대지반가속도 비율이 높은 가능성이 있는 단층인접지역(Near Fault Area)에서는 신뢰성 있는 구조해석 및 설계를 위하여 수직지반운동을 포함하여 구조물을 해석하는 것이 바람직하다.

References

ACI (2011) Building code requirements for structural concrete (ACI

- 318-11) and commentary (ACI 318M-11), American Concrete Institute.
- ASCE 7-10 (2010) Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE Standard ASCE/SEI 7-10, American Society of Civil Engineers.
- Broderick, B.M. and Elnashai, A.S. (1995) Analysis of the Failure of Interstate 10 Freeway Ramp during the Northridge Earthquake of 17 January 1994, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 24, 189-208.
- CALTRANS (2010) Seismic design criteria, Ver 1.6, California Department of Transportation, Sacramento, California.
- Elnashai, A.S., Papanikolaou, V., and Lee, D. (2004). Zeus NL - A system for inelastic analysis of structures, Mid-America Earthquake Center, University of Illinois at Urbana-Champaign, CD-Release 04-01.
- Eurocode 8. (2004) Design of structures for earthquake resistance-Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, ENV 1998-1, CEN European Committee for Standardisation, Brussels
- Han, D.J. and Ko, H. (2009). Evaluation of seismic responses for building in moderate seismicity regions considered vertical earthquake ground motions, *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, Vol.9, No.1, pp. 66-78.
- Kim, S.J. and Elnashai, A.S. (2009) Characterization of shaking intensity distribution and seismic assessment of RC buildings for the Kashmir (Pakistan) earthquake of October 2005, *Engineering Structures*, Vol.31, No.12, pp. 2998-3015.
- Kim, S.J., Holub, C., and Elnashai, A. (2011a) Analytical assessment of the effect of vertical earthquake motion on RC bridge piers, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol.137, No.2, pp. 252-260.
- Kim, S.J., Holub, C., and Elnashai, A. (2011b) Experimental investigation of the behavior of RC bridge piers subjected to horizontal and vertical earthquake motion, *Engineering Structures*, Vol.33, No.7, pp. 2221-2235.
- Kim, Y.S. (1999) Effects of the soft soil layer on the vertical response of a structure excited with the vertical component of earthquakes, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.3, No.1, pp. 113-122.
- Kunnath, S.K., Erduran, E., Chai, Y.H. and Yashinsky, M. (2008) Effect of Near-Fault Vertical Ground Motions on Seismic Response of Highway Overcrossings, *Journal of Bridge Engineering*, Vol.13, No.3, pp. 282-290.
- Mwafy, A.M. and Elnashai, A.S. (2006) Vulnerability of Code-Compliant RC Buildings under Multi-Axial Earthquake Loading, 4th International Conference on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan, Paper No. 115.
- National Earthquake Hazard Reduction Program (2009) Recommended seismic provisions for new buildings and other structures (FEMA P-750), Federal Emergency Management Agency of the U.S. Department of Homeland Security, Washington, D.C.
- Newmark, N.M., Blume J.A., and Kapur, K.K. (1973) Seismic design spectra for nuclear power plants, *ASCE Journal of the Power Division*, Vol.99, No.2, pp. 287-303.
- Nuclear Regulatory Commission (1973) Regulatory Guide 1.60. Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants. US Nuclear Regulatory Commission.
- Papazoglou, A.J. and Elnashai, A.S. (1996) Analytical and Field Evidence of the Damaging Effect of Vertical Earthquake Ground Motion, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, pp. 1109-1137.
- Uniform Building Code, (UBC) (1997) Vol. 2. International Council of Building Officials (ICBO).

© Received March 28, 2013

© Revised March 28, 2013

© Accepted April 2, 2013