지표지형효과에 따른 지진지반운동 증폭에 대한 실용적 고찰

A State-of-the-Practice Review on Amplification of Earthquake Ground Motion Resulting from Surface Topographic Effects

선창국* · 방기호** · 조완제***

Sun, Chang-Guk · Bang, Kiho · Cho, Wanjei

Abstract

Site effects associated with the spatial distribution of geologic and soil conditions have a significant influence on the amplification of ground motions during an earthquake. Exactly, the stratification structure and physical properties of near-surface soils and geology, as well as the surface topography and basin geometry, affect the site effects. Among these several influence factors on the site effects, only the amplification capabilities depending on the near-surface geologic conditions have been incorporated into current Korean seismic design guidelines, which is based on the codes in the western United States. Nonetheless, extensive severe damages caused by the irregularities in surface topography have been observed from the past and recent earthquake events over the world, and their detailed phenomena were investigated in this study. Several important seismic design codes were also reviewed to examine the methodologies for quantifying the topographic effects. Consequently, the methodology to determine the topographic effect in seismic design of Korea was discussed preliminarily and suggested as the quantitative comparisons between one- and two-dimensional numerical models, together with the introduction and modification of current other codes.

Key words : Topographic effect, Site effects, Earthquake ground motion, Site amplification, Seismic design

요 지

지진지반 조건의 공간적 분포와 관련된 부지효과는 지진 시 지반운동의 증폭에 지대한 영향을 미친다. 즉, 지표부근 지진지반의 층상구조와 물성뿐만 아니라 지표면 지형 및 분지 형상이 부지효과의 영향 요인이다. 이러한 부지효과 관련 영향 요소들 중에서 단지 지표부근 지진지반 조건에 따른 증폭 정도만이 미국 서부지역 기준을 근간으로 하는 국내 현행 내진설계 지침에 반영되어 있다. 그럼에도 불구하고, 최근까지의 전 세계 지진 발생 사례들로부터 지표지형 변화에 따른 광범위하고 심각한 피해들을 확인해 볼 수 있다. 이러한 사례들의 구체적인 현상들을 이 연구에서 고찰 제시하였다. 또한, 지형효과의 정량화 기법을 파악하기 위하여 주요 내진설계 기준들을 검토하였다. 이러한 고찰 검토 내용들을 토대로, 국내 내진설계를 위한 지형효과 결정 기법에 대해 예비적 토의를 진행하고 일차원과 이차원 수치 모델 해석 결과 비교를 통해 각각의 변수가 지형효과에 미치는 영향을 파악하는 것을 기존 기준들의 도입 개선과 함께 그 방안으로 제시하였다.

핵심용어 : 지형효과, 부지효과, 지진지반운동, 부지증폭, 내진설계

1. 서 론

최근 해외의 빈번한 대규모 지진 발생과 그로 인해 야기된 막대한 인명 및 재산 피해는 주요 강진 지역 국가들뿐만 아니라 우리나라와 같은 중약진 지역 국가들에서도 새삼 지대한 경각심을 불러일으키는 계기가 되고 있다(Green 등, 2011; 김익현, 2011). 특히, 지진의 시공간적 불확실성은 우리나라를 포함한 최근 대규모 지진이 발생하지 않고 있는 지역 국가들에 대해서도 기본적인 대비 방안 수립에 관한 본질적

근거라고 할 수 있다. 지진에 대한 대비로서는 지진경보, 지진대응복구, 내진설계 등과 같은 다양한 접근이 가능하며(선창국 등, 2010), 우선 고려 방안으로서 적극적 개념의 내진설계는 경제성이 반영된 공학적 접근이라고 할 수 있다. 내진설계는 신규 시설물에 대한 적용을 고려하기 위함인데, 넓은 의미에서는 기존 시설물의 내진성능 평가 및 그에 따른 내진보강의 개념도 포함할 수 있다.

내진설계에서는 대상 시설물의 중요도에 따라 경제적 관점의 차별적인 성능 수준을 고려하게 되며(건설교통부, 1997),

*정회원 · 한국지질자원연구원 지진연구센터 책임연구원(E-mail : pungsun@kigam.re.kr)

**단국대학교 토목환경공학과 석사과정

***정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 조교수(교신저자)

지역고유의 지진발생 환경이나 지반 특성을 고려하여 설계를 위한 지진지반운동(earthquake ground motions)을 결정하게 된다(선창국, 2010). 현재 국내에서는 관리 기관이나 유관 주체에서 주요 시설물별 내진설계 기준들을 작성하여 적용하고 있는데, 이 기준들 대부분의 보편적 상위 개념은 1997년에 발표된 내진설계 관련 연구결과(건설교통부, 1997)이다. 이 상위 개념의 기준에서는 지반운동에 대해 결정 방법을 제시하고 있으며, 그 방법에서 기준운동에 해당되는 지진재해도(최근 지진위험지도로 변경 통용)를 제외하고는 당시 미국 기준인 1997년 Uniform Building Code(UBC; ICBO, 1997)를 직접 준용하였다.

외국의 내진 기준 준용은 지반특성의 지역적 차이가 반영되지 않음에 따라 실질적 지반운동의 그릇된 결정을 야기할 수 있다(Kim 등, 2002). 최근 주요 연구결과들(Sun 등, 2005; Kim과 Yoon, 2006; Lee 등, 2012)에서도 지역적 지질 지반 조건 차이로 인한 지진응답 특성 차이가 제시되어 왔다. 특히, UBC 및 그 이후의 International Building Code(IBC; ICC, 2000; 2006)는 미국 서부 지역을 주 대상으로 하는 경험적 지진계측 및 피해 자료와 보완적 수치해석 결과를 토대로 도출되었으며(Dobry 등, 2000), 이 지역의 지반은 우리나라에 비해 기반암이 매우 깊고 토사 강성은 상대적으로 크다(Sun 등, 2005). 이러한 지반 특성은 지형 및 지질 조건과도 상당히 연관한다(Wills 등, 2000; Wald와 Allen, 2007), 미국서부 지역은 지형적으로 주요 부지들이 넓은 평야지로 구성되어 있고 이런 부지의 지질 조건은 비교적 단순하다.

반면, 우리나라는 지형적으로 평야지 보다 구릉지나 산지가 발달해 있고, 좁은 국토의 효율적 활용을 위해 성토나 절토를 통한 단지나 부지 조성이 활발하게 이루어져 왔다. 지표면이나 지하 지형의 변화는 이미 잘 알려진 지표부근 지반지질 조건에 따른 지진동 증폭(amplification of ground motion) 외의 추가적인 증폭 요인으로 여겨지고 있으며(Sun, 2004), 주요 지진피해 사례들로부터도 이러한 추가 증폭 현상들이 보고되어 왔다(Green 등, 2011). 특히, 지표면 형상의 공간 변화에 따른 증폭 현상을 의미하는 지형효과(topographic effect)는, 우리나라 자연 지형의 다양한 분포 및 인위적 조성의 절성토(切盛土) 지반의 광범위한 분포 현황을 반영해 볼 때, 국내 설계 지반운동 결정 과정에서 반드시 고려해야 할 요소라고 할 수 있다. 이 연구에서는 그동안 방재공학이나 지진공학 실무 측면에서는 등한시해 왔던 지형효과에 대한 체계적 고찰을 수행하고 향후 국내 내진설계 과정에서의 지형효과 고려 방안에 대한 예비적 접근을 수행하였다.

2. 국내 내진설계기준의 문제점

일반적으로 단층운동에 의하여 지진이 발생하였을 경우 지진파는 지반이라는 매질을 통해 공간 상으로 전파된다. 이 과정에서 암반에 도달한 지진파는 그 상부에 존재하는 토사 지반층을 통과하면서 지반의 물성에 따라 암반 도달 지진파에 비해 진동수와 진폭이 바뀌게 되며, 대개 크게 증폭된 형태의 지진동으로 상부 구조물에 하중을 가하게 된다. 지진

발생 시 구조물은 암반노두와 토사지반 지표면에 위치하는 경우에 따라 그림 1과 같이 상이한 응답특성을 보인다. 특히, 토사지반은 그 지반 동적물성에 따라 지반증폭 정도가 매우 달라질 수 있으며, 이러한 국지적 지반 부지 효과는 내진설계에 있어 매우 중요한 요소이므로 대상 지역에서의 합리적 설계를 위해서는 부지고유 특성을 고려한 지반증폭 현상을 우선 평가해야 한다.

내진설계 시 가장 중요한 항목은 지표면 최대 지반가속도 및 구조물의 주기에 따른 설계응답스펙트럼 가속도 등 설계 지진력을 결정하는 것이다. 설계 지진력을 결정할 경우 가장 중요한 요소는 국지적인 지반조건이며 내진설계기준에서는 이를 반영하기 위하여 지반을 분류하고, 각 지반종류에 따라 설계응답스펙트럼을 달리 적용하여 구조물의 하중산정에 반영하고 있다.

설계 지진력을 결정할 때 가장 먼저 고려해야 할 요소는 국지적인 지반조건인데, 설계 지진력 결정을 위하여 국내 현업에서 사용하고 있는 내진설계기준은 여러 기관에서 제정한 기준서 및 시방서 등에 명시되어 있다. 하지만, 각각의 기준은 제정한 기관 및 제정된 시기가 상이하기 때문에 설계 지진력을 산정하는 과정에서 약간의 차이점이 존재한다. 이는 각 내진기준을 제정할 당시 참고하였던 미국의 내진설계기준이 수차례 개정되어 왔기 때문이다. 국내 토목분야와 건축분야에서 주로 쓰이고 있는 내진설계기준은 내진설계기준연구(II)(건설교통부, 1997), 도로교 표준시방서(건설교통부, 2005), 건축구조 설계기준(건설교통부, 2005) 등이 있는데, 그림 2에 나타나 있듯이 이들 모두 미국 내진설계기준을 그대로 차용하고 있다.

미국 내진설계 기준의 경우 기반암이 대체로 지하 100 m ~300 m 정도에 존재하는 미국 서부해안지역에서의 여러 경험

그림 1. 내진설계기준에서 설계 지진력 산정 시 지반증폭현상 반영.

그림 2. 미국과 우리나라의 내진설계 비교.

적 자료를 기반으로 제정된 기준으로써, 일반적으로 기반암 깊이까지 지반조사를 할 수 없기 때문에 지진 시 지반운동과 상관성이 큰 상부 토층 30m(약 100 ft)의 평균 물성치를 이용하여 내진설계를 수행하는 개념이다. 미국서부 지역과 우리나라의 지반조건이 상이하기 때문에 미국 기준을 기반암이 대부분 30 m 이내에 존재하는 국내 지반에 그대로 적용할 경우 지반의 공진주기 영역이 다르고 구조물에 영향을 미치는 주파수 대역이 달라질 수 있다.

현재 국내 기준의 경우 국내 지역고유 지반포괄 특성에 적합하지 않은 부분이 존재하며(Sun, 2004; 선창국 등, 2005), 이에 따라 국내 지반특성에 적합하도록 내진설계기준을 개정하려는 노력이 계속되고 있다(선창국, 2010). 특히, 넓은 평야지가 발달한 미국서부 지역과는 달리 우리나라는 자연 상태 지표면 지형 변화가 매우 심할 뿐만 아니라 좁은 국토의 개발에 따른 인위적 지형 변화 역시 보편적인 상황에서, 기존 미국 기준이나 현행 국내 기준에서는 전혀 고려하고 있지 않은 지반지층(geotechnical layers)의 공간 변화에 따른 추가적 지진동 증폭에 대해서도 재고해 봐야 한다. 그럼에도 불구하고 아직까지는 미국의 최신 기준을 대상 구조물에 따라 다시금 차용하여 내용을 갱신 하는 정도로 그치고 있는 실정이다.

3. 지형효과에 따른 지반운동 증폭 현상

지형 및 지질 조건과 같은 지반포괄 특성이 지역적으로 고유하므로 다른 지역 지반 조건에 기반한 내진설계 지반운동 결정 방법의 단순 도입은 상황에 따라서는 그릇된 설계를 초래할 수도 있다. 그렇다 할지라도, 우리나라와 같이 역사문화 이외의 실제적인 지진피해 사례가 거의 전무한 지역에 대한 독자적 설계 지반운동 결정 방법 수립 역시 검증 비교 부재라는 근원적 한계를 가질 수 있다. 이러한 관점들에서 국내 설계 지진력 결정의 합리적이고 효율적 결정을 위해서는 다양한 해외 지역들에서의 지진 발생에 따른 현상들을 면밀히 고찰하고 여러 체계적인 내진설계 기준들을 종합함과 동시에 국내 지반특성을 충분히 파악하여 지역 특성에 적합한 방법으로 변환 차용하는 방법이 적합하다. 이러한 과정 중에서는 수치 해석을 통한 추가적 비교 검증도 병행되어야 할 것이다.

최근 국내 지반지진공학 분야에서 집중적으로 다루어 왔던 지표지형효과를 고려하지 않은 일차원 지반조건에서 지질 조건의 차이에 따른 부지 지반운동 증폭 현상과는 달리, 국내 지형적 조건의 다양한 분포에도 불구하고 추가적 지반운동 증폭을 야기할 수 있는 지표 지형효과(surface topographic effect)의 경우 일부 도입 연구(Sun, 2004)를 제외하고는 거의 이루어지지 않았다. 이러한 이유는 국내 현행 내진설계 기준들이 대부분 지형효과에 고려 필요성이 적은 미국 기준들을 차용함에 따라 발생한 것이며, 미국의 최신 설계기준 중의 하나인 IBC 2009(ICC, 2009)에서도 지형효과는 고려되지 않고 있다. 지역적 지형 조건을 감안해 볼 때, 미국과는 달리 우리나라는 지형효과를 설계 시 중요한 요소로 고려해 봐야 한다. 현상적으로 살펴보면, 지형효과는 지진 발생

그림 3. Spain Lorca 지역의 지형효과에 따른 증폭계수 분포 (Rodriguez-Peces 등, 2011).

시에 사면이나 산마루와 같이 평탄하지 않은 지표면에서 발생하는 국지적인 지형 조건 변화에 의한 지진동 증폭 현상을 의미하는데, 넓은 의미로 보면 토사와 같이 동일 지층의 지하에서의 공간분포 변화도 지하 지형변화로 보고 이에 따른 지반운동 증폭특성 변화를 지하 지형효과(subsurface topographic effect)나 분지효과(basin effect)로 파악하여 포함하기도 한다.

내진설계를 수행함에 있어서 지형효과에 중요성을 말해주는 증거들은 대부분 수치 해석을 통한 예측에 의한 것이거나 실제 지진 관측 자료를 통해 건물의 피해 분포를 관찰한 결과이다. 이 효과와 관련하여 현재도 지진 운동의 관측은 계속해서 이루어지고 있고 또한 일부 해외 문헌들에서는 지표면과 지표면 하부의 이러한 지형적 조건이 지반운동에 미치는 영향을 예측하는 이론적 연구들을 다수 포함하고 있다(Athanasopoulos 등, 1999; Hough 등, 2010). 이러한 해외의 연구 사례들은 현장 관측과 이론적 연구 모두가 암반으로 이루어진 산마루에서 최대 가속도가 증폭될 수 있다는 것을 보여준다. 또한 산등성이나 계곡 지표면의 불규칙 형상에 대한 수치적 2차원 모델을 이용해 그 효과들이 사면 경사, 전단파 종류, 전단파 투사각, 지역 조건 고유의 차원, 지형의 위치, 전단파의 주파수를 포함한 많은 요소들에 의해 결정된다는 것을 증명하였다. 또한, 가시적인 정보 제시 형태로서, Rodriguez-Peces 등(2011)은 그림 3과 같이 Spain의 Lorca 분지 지역에서 발생한 지진에 대하여 지형 효과에 의한 증폭을 분석하여 그 증폭계수를 지형도 상에 표출 제시하였다.

Faccioli (1991)는 삼각형의 췌기 구조를 사용하여 그림 4와 같이 산마루 및 계곡 지형을 대략적으로 모형화 하였다. 이러한 단순한 모형은 산지 저부 대비 산지 마루에서의 지반운동 증폭(amplification) 정도 예측할 수 있게 한다. 산마루에서의 증폭과 계곡이나 협곡 저부 위치에서의 감폭(deamplification)을 대략적으로 수식화하여 그 정도를 파악하

는데 적용할 수 있다.

지형효과에 의하여 산마루나 가파른 경사 지형에서 지반 운동이 증폭되는 현상들은 수치적 모델링 결과나 실제 계측 결과들로부터 확인되어 왔다(Sun, 2004). 특히, 단일 지진이 아닌 동일 위치에서의 여러 발생 지진 기록의 축적을 통한 지형효과 확인은 그 가치적 중요성이 클 수 있다. 대표적으로 일본 Matsuzaki 지역의 계측 결과를 그림 5와 같이 확인해 볼 수 있는데, 대상 위치 인근 발생의 5회 지진들에 대한 수평 가속도 기록의 변화를 정규화하여 산등성이의 고도에 따른 변화를 파악해 보았다(Jibson, 1987).

그림 5에서 정규화 된 최대 가속도는 산마루에서의 지반운동 크기를 나타내며, 평균값과 함께 편차 폭을 함께 제시하였다. 이러한 표고 변화에 따른 가속도 변화 관계로부터 산마루에서의 증폭이 하부에 비해 평균적으로 2.5배 정도이고, 표고가 높아질수록 증폭 정도가 증가하는 경향을 보임을 확인할 수 있다. 또한, 편차 폭을 고려해 볼 때, 최대 5.5배 정도까지도 증폭 가능할 것으로 파악되었다. 이와 마찬가지로

그림 4. 간단한 뿔기모양 지형구조를 이용한 지형효과 설명 (Faccioli, 1991).

그림 5. Matsuzaki 지역에서 관측된 지형효과에 의한 지반운동 증폭 경향(Jibson, 1987).

피해 형태로는 1985년 칠레 지진을 비롯하여 미국, 일본, 그리스, 이탈리아 등 세계 각지에서 경사와 산마루를 따라 피해 정도가 점점 증가하는 사례들(Celebi, 1987; Sepulveda 등, 2005; Jibson, 1987; Athanasopoulos 등, 1999)이 보고되어 왔다. 특히, 최근 발생한 Haiti 지진에서도 여러 지역 지진피해의 주요 요인으로 지형효과가 강조되고 있다(Green 등, 2011).

우리나라 설계 기준의 근간인 미국 서부해안 지역의 도시들은 대부분 평야 지역에 위치하여 이러한 국지적인 지형효과에 의한 피해는 상대적으로 크게 나타나지 않고 있다. 그러나 세계적으로 많은 도시들이 퇴적분지 지형에 위치하고 주요 위치들에서 지표 및 지하 지형적 변화가 크게 분포하고 있으며, 우리나라의 주요 도시들 역시 다양한 지형 조건 변화를 보인다. 또한, 지형효과에 의한 지반운동 증폭현상은 기반암 심도가 얕거나 기반암이 노출된 부지들에서도 크게 나타날 수 있는데, 우리나라의 평균적 기반암 심도가 얕게 위치하고 있기 때문에 국내에서 피해 유발 지진이 발생할 경우 그 피해 정도가 더욱 커질 수도 있다. 뿐만 아니라, 지형효과에 의한 증폭현상은 절토사면, 성토지반, 댐 등에도 발생하게 되므로, 이러한 구조물의 내진 설계 과정에서의 지형효과 반영 필요성은 더욱 강조될 수 있다.

4. 지형효과에 의한 주요 피해사례 고찰

4.1 1980년 이탈리아 Irpinia 지진

1980년 이탈리아의 Irpinia 지역에서 일어난 지진은 계단식 지형의 산마루 및 그 부근에서 지형효과에 따른 추가적 증폭 발생으로 인해 지진 피해가 크게 증가한 형태의 대표적인 예로 볼 수 있다(Castellani 등, 1982). 이 지진이 발생했을 당시 언덕 위에 위치한 마을의 피해는 급격한 경사면의 주변 경계에 가까운 위치들에서 집중적으로 일어났다(그림 6). 반면, 산마루와 경사면 경계부에서 먼 위치들에서는 피해가 크지 않았다.

이 지역에서 관측된 증폭은 스펙트럼 영역에서 2배부터 최대 20배에 이르렀으며, 시간 영역에서는 2~5배까지 나타났다. 이와 같은 사례는 지형효과에 의하여 증폭된 지표면 지반운동이 평탄한 지형 조건의 지반운동에 비해 훨씬 크게 나타날 수 있다는 정량적 결과 중의 하나이다.

그림 6. 이탈리아 Irpinia 지역의 지형 효과 관측 사례(Castellani 등, 1982).

4.2 1994년 미국 Northridge 지진

1994년 1월 17일, 모멘트 규모(M_W) 6.7의 지진이 Los Angeles 지역을 강타했다. 그 진원지는 Pacoima Dam의 남서쪽 20 km에 위치한 Northridge였다. 진원과의 거리는 약 27 km로, 최대 지표면 가속도는 다양하게 나타났지만, 일반적으로 토양에서 0.90 g 정도 나타났으며 암반에서는 0.83 g 정도였다. 그러나 진원지의 남쪽 6 km 지점에 위치한 Tarzana hill과 Pacoima dam에서는 다른 지역과 달리 높은 가속도가 기록되었다. Tarzana hill에서 기록된 1.78 g의 가속도는 지형적 영향과 토양의 종류에 의한 증폭의 영향이 결합되어 나타난 것이었다. 특히, Pacoima Dam에서 관측된 1.58 g의 가속도는 지형적 증폭 때문이었는데, 이는 1971년 발생한 지진의 형태와 유사하였다.

Northridge 지진 시 본진(main shock)이 발생하는 동안, 좌측 댐 접합부에 설치된 계측기에서 1.58g의 최대 수평가속도(peak horizontal acceleration)와 1.00g 이상의 수직 가속도가 기록되었다. 또한 이 지점에서 본진의 전체 지속 시간은 13초로 기록되었다. 지반가속도가 크게 계측된 원인이 지형효과에 의한 증폭 때문이라는 사실은 그 댐으로부터 멀리 떨어진 하류의 협곡 바닥에 위치한 관측 지점(PAC)에서 계측된 기록에서 더욱 명확히 나타난다. 그림 7에서 알 수 있듯이, 이 계측 지점과 최대 가속도가 계측된 좌측 댐 접합부와의 수평 거리는 약 200 m이고 고도(elevation) 차이는 약 100 m로 매우 가까운 거리이다. 그러나 지점 PAC에서는 댐의 좌측 접합부보다 매우 작은 수치인 0.43 g의 최대 지반가속도가 기록되었다. 이 지반운동은 다른 근처의 지점들에서 기록된 것과 유사한 수치로 나타났고, 이는 그 지역의 자유장 운동의 감쇠(attenuation) 경향과 일치하였다.

뿐만 아니라 댐의 동쪽 2 km반경 내의 범위에서 협곡 바

그림 7. Pacoima 댐 주변의 지형도와 지진 운동 계측 지점 (Sepulveda 등, 2005).

그림 8. Pacoima 댐 근처의 지질 구성(Sepulveda 등, 2005).

깎의 가장 가까운 관측 지점인 Kagel Mountain에서는 0.44 g의 최대 지반 가속도가 기록되었다. 그러므로 협곡의 바닥부분에서 종종 관찰 가능한 감폭 효과는 크지 않았다고 추정되며, PAC 위치의 기록은 증폭이나 감폭에 의해 영향 받지 않는 지진동(ground shaking)을 대표하는 것으로 볼 수 있다.

Northridge지진은 또한 10,000 km²가 넘는 지역에 11,000건 이상의 산사태를 일으켰다. 그 산사태들은 주로 San Gabriel Mountains의 서부인 Santa Susana Mountains에 집중되었다. 비교적 연약한 상태의 경화 정도를 보이는 쇄설성의 퇴적물 속에서, 수천 개의 1~5 m의 얇은 심도 범위의 매우 산발적인 산사태가 유발되었다. 또한 산사태의 집중이 Santa Susana Mountains 만큼이나 높았던 Pacoima Canyon을 제외한 나머지 지역에서는 Gabriel Mountains의 단단한 암반 지반에서 훨씬 더 드물게 발생하는 경향을 보였다.

Harp와 Jibson(2002)은 기존의 암반질 분류 시스템(rock mass quality classification system)을 수정하여 지진 발생 당시 큰 산사태가 집중되었던 Pacoima Canyon의 암반과 훨씬 적은 산사태를 경험했던 Pacoima Canyon주위 지역의 암반에 적용하여 암반붕괴 민감도(susceptibility to failure of rock masses)에 관한 비교 연구를 수행하였다. 산사태가 집중되었던 Pacoima Canyon 경사면의 암반질이 유사한 경사도를 가진 4 개소 인근 지역 경사면의 암반질과 유사하다는 것을 그림 8에 제시한 바와 같이 확인하였다. 이로부터 발생한 산사태가 단순히 지반조건에 의한 것이 아니며, 이 지역은 매우 건조한 상태로서 지하수 상승에 대한 결과로 볼 수도 없으므로, Pacoima Canyon에서의 높은 산사태 집중 현상은 지형 효과에 의해 야기되었을 가능성이 가장 크다고 결론지었다.

4.3 1995년 그리스 Egion 지진

1995년 6월 15일 중부 그리스의 코린트만 서쪽 끝 부근에

그림 9. 그리스 Egeion 지진 진앙 위치 및 도시 분포(Athanasopoulos 등, 1999).

서 발생한 강력한 지진인 Egeion 지진의 진원지는 해안 도시 Egeion과 Eratini 사이의 해저였다(그림 9). 지진 발생에 의한 피해는 넓은 지역에 걸쳐 일어났으나 가장 큰 피해를 입은 지역은 Egeion 이었으며, 이로 인해 이 지진을 특별히 Egeion 지진이라고 명명하는 계기가 되었다. Egeion 지진은 일반적인 지진들이 가지는 거의 모든 현상들(지반 운동의 증폭과 감쇠, 지표면의 지형 영향, 지반의 파괴, 산사태, 액상화 등)을 그대로 보여주었다. 지진의 본진 뿐만 아니라 대부분의 여진 활동이 도시 중앙에 설치된 가속도계에 기록되었고, 진앙의 주변 도시와 마을에 설치된 많은 가속도계에도 주요 발생 지진들이 기록되었다. 이 지진에 의한 피해 형태는 빌딩의 파괴와 인명 피해를 수반한 일반적인 지진의 피해와 유사하게 보였다.

그러나 Egeion 지역의 피해를 주의 깊게 관찰한 몇몇 연구자들은 그 마을을 가로지르는 단층 급경사면 때문에 그 마을의 중앙부에서의 지반 운동이 증폭되었다는 가능성을 제기하였다. 이 후 여러 학자들이 이 지진의 증폭 현상에 대해 연구하였으며, 곧 증폭에 의한 피해 집중 현상이 일어난 도시의 중심부가 다른 지역보다 높은 고도에 위치해 있다는 사실을 알게 되었다. 이러한 확인은 고도 관련 지형효과에 의한 증폭 현상의 대표적인 사례로 알려지게 되었다(Athanasopoulos 등, 1999).

4.4 2010년 Haiti 지진

2010년 1월 12일 진도 7.0의 Haiti 지진은 수도인 Port-au-Prince시의 중심부와 서부지역에 엄청난 피해를 입혔다. 공식적으로 발표된 사망자 수만 230,000명을 넘는 등 그 피해의 정도는 실로 엄청났다. 특히, Port-au-Prince에 지진이 근접했다는 점, 많은 구조물들이 내진 대책 수립이 미미한 낮은 안정성을 가지고 있었다는 점, 그리고 지진동이 도시 대부분의 기저가 되는 미고결 퇴적지반에 의해 증폭될 것이라는 예상을 고려한다 하더라도 매우 큰 것이었다(Hough 등, 2010; Green 등, 2011).

역사적으로 보았을 때, 퇴적물에 의한 지진 운동의 증폭은 피해 분포에 영향을 미치는 주요 요소였다. 일반적으로 퇴적

그림 10. 산마루 위에 있는 호텔 Montana의 붕괴.

그림 11. Port-au-Prince 평지의 구조물 피해 정도.

물에 의해 유도된 증폭은 지표면 부근 지층들의 강성(stiffness)과 관련된 임피던스(impedance)와 기반암과 같은 기저까지의 깊이에 의해 결정되는데, 상대적으로 연약한 지반에서 더 큰 증폭이 발생할 수 있다. 도시의 북쪽과 도미니카 공화국을 향해 동쪽으로 뻗어있는 대형 협곡인 Cul de Sac 계곡은 Port-au-Prince시 안에 위치하고 있다. 이 계곡의 기저부는 대부분 생성된 지 오래되지 않은 퇴적물에 의해 형성되어 있다.

Port-au-Prince시 대부분은 이 계곡의 남서쪽 코너 안에 위치하여 있는데, 이 지역의 기저에는 삼각지가 형성되어 있으며 작은 언덕에 이회토, 사암, 실트암과 이판암을 포함한 제3기층 퇴적물이 깔려있다. 제3기층 퇴적물은 생긴 지 오래되지 않아서 덜 고결된 제4기층 퇴적물에 비해 상대적으로 조밀하다. 그러나 그들은 더 강한 강도를 가지는 석회암, 역암, 화산 쇄설암으로 구성되어 있는 인근의 북쪽 언덕보다 더 낮은 임피던스 값을 가질 것이다. 따라서 Port-au-Prince 지역의 지반을 이루고 있는 퇴적물에 의해 유발되는 증폭은 이미 예측된 것이었다.

그러나 Haiti 지진에 의하여 발생한 피해의 분포를 살펴보면, 곧 특이한 점을 알 수 있다. 이 지진에 의해 발생한 피해는 Port-au-Prince시의 중심부에서 약간 남쪽에 위치한 Petionville 지역의 작은 언덕 산등성이를 따라 뚜렷하게 집중되었다. 이 구역 내의 파괴되고 붕괴된 구조물들로는 그림 10에 파괴된 형상이 나타나 있는 Montana 호텔, 두개의 UN

빌딩, Christophe호텔, 프랑스 대사관저 그리고 많은 수의 크고 견고한 개인 주택들이 있다. 이러한 피해의 분포는 퇴적물로 이루어진 평지에 지어진 구조물(그림 11)보다 훨씬 견고한 이 건물들의 파괴가 단순히 연약한 지반에 의한 증폭을 넘어서, 산동성이의 지형과 큰 상관관계가 있다는 것을 보여준다.

5. 내진설계 기준의 지형효과 반영

5.1 Eurocode 8 고찰

현재 유럽 각국에서 현업의 내진설계에 적용하고 있는 Eurocode 8(IBC, 2006)은 대상 지반의 지형 효과에 대하여 차별적인 조항을 만들어 제시하고 있다. 기존 지형효과에 관한 경험적 피해들을 근거로 사면 부근에서의 구조물 설계 시 고려해야 하는 증폭계수 S_T 를 다양한 조건별로 묘사하고 구분 열거한다. Eurocode 8에 나열된 지형효과에 관한 내용들은 다음과 같다.

- (1) 증폭계수는 일반적으로 장축을 가지는 산마루나 30 m 높이 이상의 절벽에 적용한다.
- (2) 사면의 평균 경사가 15도 이하일 때 지형 효과는 무시할 수 있다.
- (3) 고립된 절벽과 사면. 정상 모서리부근 지역에서는 1.2 이상의 S_T 값을 사용해야 한다.
- (4) 하부의 폭보다 훨씬 작은 폭을 가지는 산마루의 경우, 사면의 평균 경사가 30도 이상이라면 1.4 이상의 S_T 값을 사용해야 하며, 그 이하의 경사를 가지는 지형에서는 1.2 이상의 S_T 값을 사용하면 된다.
- (5) 조밀하지 않은 표층이 존재하는 경우, 표층의 두께가 5 m 이상이라면 S_T 값을 최소한 20% 증가시켜 사용한다.
- (6) 증폭계수 S_T 값은 절벽이나 산마루의 높이에 대한 선형 함수로 감소하며, 그 높이가 0이 되는 지점에서 증폭은 없다고 가정할 수 있다.

Eurocode 8의 지형효과에 관한 토대가 된 기준은 French Code인 AFPS-1990로서(Whitman, 1992; Pitilakis, 2004), 다양한 지형변화 조건에 대해 묘사하고 정량적 지형계수(topography factor)를 정리한 바 있다.

5.2 일본 내진설계 기준 고찰

기하학적으로 일차원 이상의 부지효과 평가에서 주의해야 할 사항은, 지반운동은 직관적인 형상으로 파악 가능한 지표면뿐만 아니라 그 아래의 지층들의 변화인 지하지형 변화 조건에 의해서도 큰 영향을 받는다는 것이다. 주로 계곡의 하부에 퇴적층이 쌓여있는 형태의 지반과 분지 지형에서 지진 피해가 크게 발생할 수 있는데, 위치에 따라서 일차원 조건에 비해 지반운동을 증폭 또는 지속시키는 현상을 야기한다. 이러한 현상은 지진에 따른 발생 표면파가 암반으로 둘러싸인 토사지층 내에서 갇히거나 지형적 변화에 따라 다중으로 반사된 지진파가 중첩되기 때문이다(Sun, 2004; Sun과 Chung, 2008).

일본은 주요 시설물들의 관리 조직에 따라 여러 형태의 내

진설계 기준들을 구분 적용하고 있다. 특히, 철도구조물(railway structures)의 경우 지질학적 불규칙성(geological irregularity) 혹은 불규칙한 지표면(irregularity of surface ground)에 대한 고려를 제시하고 있다(JSCE, 2000). 불규칙한 형상 조건을 고려하기 위한 시도로 수치해석을 수행하였으며, 모델 하부 기반암에 횡방향 전단파인 0.8초 지배주기의 SH Ricker wavelet을 입력한 이차원 모델과 일차원 모델의 해석 결과 차이를 정량화하였다. 이러한 방법은 우리나라와 같이 실제 계측된 피해 토대의 경험적 자료가 부족한 지역에 대해 유용한 접근일 수 있다.

정형적 수치해석을 통해 이차원 지하 지형 변화조건에 대한 지반운동을 푸리에 스펙트럼(Fourier spectra), $G(\omega, x)$ 를 도출하여 식 (1)과 같이 제시하였다.

$$G(\omega, x) = F(\omega) + \alpha F(\omega)e^{-i\omega \Delta t} \quad (1)$$

여기서, x 는 정의된 지하지형 수평 기준점(토사층 두께 변화가 없는 시점)으로부터의 수평 거리, $F(\omega)$ 는 SH파인 $f(t)$ 의 푸리에 스펙트럼, α 는 수평방향으로 전달되는 파인 $f'(t)$ 와 수직방향으로 전달되는 SH파인 $f(t)$ 간의 진폭 비율, 그리고 t 는 $f'(t)$ 과 $f(t)$ 간의 도달시간 차이이다. 주요 변수들의 기준 위치나 결정 방법을 추가적으로 자세히 제시하고 있으며, 해석 결과와 제안 식의 비교를 통해 실무적 이해 증진 및 활용 편의성을 도모하였다.

5.3 국내 내진설계의 지형효과 반영 토의

국내 내진설계 기준은 물론이고 그 근간이 되는 미국 설계 기준에서도 설계 지반운동 결정 과정에서 지형효과를 고려하고 있지 않다. 이러한 현황은 미국과 같이 대부분의 주요 부지들이 지형적으로 큰 변화가 없는 평지에 위치한 조건임을 감안할 때, 일부 특수한 부지들을 제외하고는 오히려 경제적 불리함을 감수해야 될 추가 요소를 반영하지 않는 것이 합리적일 수도 있다. 반면, 우리나라는 근본적으로 산지가 평야지에 비해 대부분의 영역을 차지하고 있을 뿐만 아니라, 제한된 범위의 국토 여건 하에서 빈번한 절토 및 성토가 이루어지고 이러한 부지들에서 주거 및 산업 활동이 진행된다. 따라서 지반운동의 지배적인 영향 요인 중의 하나가 지형효과일 수 있고, 이로 인해 지진 발생에 따른 구조물 피해가 매우 커질 수 있다. 이와 같은 취지에서 국내 내진설계 지반운동 결정 시 고려 요소 중의 하나로서 지형효과가 향후 관련 전문가들의 여러 관점에 걸친 고찰과 연구를 통해 고려될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 이러한 전문가 관점의 기본적 고찰을 수행하였으며, 기존 지진피해 사례들로부터 지형효과에 관한 실질적 현상을 종합하고 제시하였다. 또한, 해외 내진설계 기준의 지형적 요인 고려 방안에 대해 살펴보았다. 고찰 대상이 된 해외 기준들은 주로 중대규모의 실제 지진피해 발생 및 계측 기록들을 그 근간으로 하지만, 국내의 경우 그러한 기록들이 거의 전무한 상황이다. 이와 같은 이유로 그동안 우리나라의 내진설계 기준들은 주로 해외 기준들을 도입해 왔으며, 필요

그림 12. 지형효과 정량화를 위한 이차원 단면.

에 따라서는 다소의 개선도 병행해 왔다. 지형효과의 설계 지반운동 영향 요소로서의 고려는 기존 해외 기준의 도입 개선 및 국내 지반특성을 고려한 수치해석적 보완이 합리적일 것으로 판단된다. 이러한 보완적 접근은 이미 확인해 본 바와 같이, 일본과 같은 강진 다발 지역에서도 적용되고 있는 방법이다.

지형효과는 일반적인 지반운동 증폭 특성처럼 그 지역 고유의 지반물성 분포에 따라서 정량적인 차이를 보일 수 있다. 그렇다 할지라도 근본적으로는 지형효과는 Eurocode 8에서와 같이 다차원 지반 조건에서의 기하학적 변수에 따른 정량화를 통해 설계 요소로서의 고려가 가능하다. 기하학적 변수의 정량화를 위해서는 기존 해외의 실제 경험적 자료 및 수치해석 결과의 수집 분석과 더불어 국내 고유 지반특성과 일반적 절성토 현황을 고려한 다양한 조건의 수치해석 시도가 필요하다. 그림 12는 지형효과의 정량화를 위한 성토 지반의 이차원 수치해석 단면을 개요적으로 묘사한 것이다. 사면 경사각(Angle), 사면 경계부로부터의 거리(Distance), 그리고 성토층의 두께(Thickness)와 같은 변수들에 대한 지형효과의 정량적 도출은 일차원 해석과의 비교를 통해 가능하며, 다양한 국내 조건에 대한 수치해석적 보완 연구의 수행 및 결과의 체계적 분석 정리를 통해 지형효과의 반영을 위한 토대 자료들이 제시될 수 있다.

6. 요약 및 정리

지형적 변화가 심하고 절성토를 통한 영역 조성이 빈번한 국내 부지 여건에서의 내진설계 지반운동 결정의 합리화를 위한 중장기적 시도로서, 본 연구에서는 지형효과에 따른 추가적 지진동 증폭 현상의 국내 설계 기준에서의 반영에 대해 기초적 조사와 토의를 수행하였다. 특히, 우리나라는 미국서부와 같이 대부분의 중요 부지들이 지형적으로 변화가 거의 없는 평지에 존재하는 지역의 내진설계 기준을 준용함에 따라 지형효과에 대한 설계 고려 요소가 간과되어 왔다. 그럼에도 불구하고, 주요 해외 지진피해 사례들로부터 지형효과로 인해 야기된 광범위한 현상들을 살펴볼 수 있었으며, 이를 근거로 지형효과에 대한 내진설계에서의 당위성을 확인하였다. 더불어 실제 내진설계 기준들에서의 지형효과의 정량적 고려 방안들을 고찰하고, 향후 국내 내진설계의 지형효과 반영에 대한 토의를 수행하여 기존 해외 기준의 도입 개선과 더불어 다각적 수치해석이 병행되어야 함을 중장기적 기본 방향으로 제시하였다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원 주요 사업인 한반도 동부지역 잠재적 위험 지진원 평가과제의 지원으로 실시되었고, 한국연구재단의 연구비 지원(2011-0013147)으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 건설교통부 (1997) 내진설계기준연구(II).
- 건설교통부 (2005) 건축구조 설계기준, 건설교통부 고시 제 2005-81호.
- 건설교통부 (2005) 도로교 표준시방서, 한국도로교통협회.
- 김익현 (2011) 국내 토목시설물의 내진설계, 일본 대지진과 우리나라 내진설계의 방향, 한국지진공학회, 2011년5월31일, 건설공제조합, pp. 45-72.
- 선창국 (2010) 지역고유 지진응답 특성 정량화를 통한 국내 부지 분류 기준의 추가 반영 제안, 지구물리와 물리탐사, 제13권, 제3호, pp. 203-218.
- 선창국, 정병선, 김준호, 홍성경, 김기석 (2010) 해안 천연가스 인수기지에 대한 가속도 예측 기반의 지진정보 시스템 구축, 지질공학, 제20권, 제3호, pp. 339-348.
- Athanasopoulos, A.G., Pelekis, P.C. and Leonidou, E.A. (1999) Effects of surface topography on seismic ground response in the Egeon(Greece) 15 June 1995 earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 18, pp. 135-149.
- BSI (2003) Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures ñ Part 5: foundations, retaining structures and geotechnical aspects, British Standard Institution.
- Castellani, A., Chesi, C., Peano, A. and Sardella, L. (1982) Seismic response of topographic irregularities, *Proceedings of the Soil Dynamics and Earthquake Engineering Conference*, Southampton, Vol. 1, pp. 251-268.
- Celebi, M. (1987). Topographic and geological amplification determined from strong-motion and aftershock records of the 3 March 1985 Chile earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 77, pp. 1147-1167.
- Dobry, R., Borcherdt, R.D., Crouse, C.B., Idriss, I.M., Joyner, W.B., Martin, G.R., Power, M.S., Rinne, E.E. and Seed, R.B. (2000) New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions, *Earthquake Spectra*, Vol. 16, No. 1, pp. 41-67.
- Dobry, R., Ramos, R. and Power, M.S. (1999) Site factor and site categories in seismic codes, Technical Report MCEER-99-0010, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo..
- Faccioli, E. (1991) Seismic amplification in the presence of geological and topographic irregularities, *Proceedings of the 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Rolla, Missouri, Vol. II, pp. 1779-1797.
- Green, R.A., Olson, S.M., Cox, B.R., Rix, G.J., Rathje, E., Bachhuber, J., French, J., Lasley, S. and Martin, N. (2011) Geotechnical aspects of failures at Port-au-Prince seaport during the 12 January 2010 Haiti earthquake, *Earthquake Spectra*, Vol. 27, No. S1, pp. S43-S65.
- Harp, E.L. and Jibson, R.W. (2002) Anomalous concentrations of seismically triggered rock falls in Pacoima Canyon: are they caused by highly susceptible slopes or local amplification of seismic shaking?, *Bulletin of the Seismological Society of Amer-*

- ica, Vol. 92, pp. 3180ñ 3189.
- Hough, S.E., Altidor, J.R., Anglade, D., Given, D., Janvier, M.G., Maharrey, J.G., Meremonte, M., Mildor, B.S.L., Prepetit, C. and Yong, A. (2010) Localized damage caused by topographic amplification during the 2010 M7.0 Haiti earthquake, *Journal of the Nature Geoscience*, Vol. 3, pp. 778-782
- ICBO (1997) *1997 Uniform building code, Volume 2-Structural engineering design provisions*, International Conference of Building Officials.
- ICC (2000) *2000 International Building Code*, International Code Council.
- ICC (2006) *2006 International Building Code*, International Code Council.
- ICC (2009) *2009 International Building Code*, International Code Council.
- Jibson, R. (1987) *Summary of research on the effects of topographic amplification of earthquake shaking on slope stability*, US Geological Survey, Open-file Report 87-268, Menlo Park, California.
- JSCE (2000) *Earthquake Resistant Design Codes in Japan*, Japan Society of Civil Engineers.
- Kim, D.S., Chung, C.K., Sun, C.G. and Bang, E.S. (2002) Site assessment and evaluation of spatial earthquake ground motion of Kyeongju, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 22, No. 5, pp. 371-387.
- Kim, D.S. and Yoon, J.K. (2006) Development of new site classification system for the regions of shallow bedrock in Korea, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 331-358.
- Lee, S.H., Sun, C.G., Yoon, J.K. and Kim, D.S. (2012) Development and verification of a new site classification system and site coefficients for regions of shallow bedrock in Korea, *Journal of Earthquake Engineering*, In press.
- Pitilakis, K. (2004) Site Effects, *Recent Advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation*, A. Ansal, Ed., Kluwer Academic Publishers.
- Rodriguez-Peces, M.J., Garcia-Mayordomo, J., Azanon, J.M. and Jabaloy, A. (2011) Regional hazard assessment of earthquake-triggered slope instabilities considering site effects and seismic scenarios in Lorca basin, *Environmental and Engineering Geoscience*, Vol. 17, No. 2, pp. 183-196.
- Sepulveda, S.A., Murphy, W., Jibson, R.W. and Petley, D.N. (2005) Seismically induced rock slope failures resulting from topographic amplification of strong ground motions: The case of Pacoima Canyon, California, *Engineering Geology*, Vol. 80, pp. 336-348.
- Sun, C.G. (2004) Geotechnical Information System and Site Amplification Characteristics for Earthquake Ground Motions at Inland of the Korean Peninsula, Ph. D. Dissertation, Seoul Nation University.
- Sun, C.G. and Chung, C.K. (2008) Assessment of site effects of a shallow and wide basin using geotechnical information-based spatial characterization, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 28, No. 12, pp. 1028-1044.
- Sun, C.G., Kim, D.S. and Chung, C.K. (2005) Geologic site conditions and site coefficients for estimating earthquake ground motions in the inland areas of Korea, *Engineering Geology*, Vol. 81, No. 4, pp. 446-469.
- Wald, D.J. and Allen, T.I. (2007) Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No. 5, pp. 1379-1395.
- Whitman, R.V. (1992) *Proceedings from the Site Effects Workshop, October 24-25, 1991*. Technical Report NCEER-92-0006, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo.
- Wills, C.J., Petersen, M., Bryant, W.A., Reichle, M., Saucedo, G.J., Tan, S., Taylor, G. and Treiman, J. (2000) A site-conditions map for California based on geology and shear-wave velocity, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 90, No. 6B, pp. 187-208.

© 논문접수일 : 2012년 03월 31일
 © 심사외뢰일 : 2012년 04월 02일
 © 심사완료일 : 2012년 05월 11일