Scientific Paper

매립부지의 시설위치 선정을 위한 지진시 지반재해 영향평가 사례연구

최재순¹ㆍ백우현²*ㆍ김장태³ ¹서경대학교 토목건축공학과 교수, ²서울과학기술대학교 토목공학과 박사과정 대학원생, ³상지대학교 토목공학과 박사과정 대학원생

A case study on the impact seismic assessment of geotechnical disaster for the selection of facility location in reclamation lands

Jae-Soon Choi¹, Woo-Hyun Baek^{2*} and Jang-Tae Kim³

¹Professor, Department of Civil&Architectural Engineering Seokyeong University ²Ph.D Course, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science&Technology ³Ph.D Course, Department of Civil Engineering, Sangji University

*Corresponding author: Tel. +82-10-4525-7970, E-mail. geoback85@gmail.com

Received: December 3, 2023; Revised: December 26, 2023; Accepted: December 26, 2023

ABSTRACT

Since 1980s, due to the rise in domestic real estate prices, it has become difficult to secure land for the construction of social overhead capital. Instead, the necessary land has been secured through reclamation of domestic coastal areas, and such attempts have continued in recent years. Meanwhile, due to the 1995 southern Hyogoken-Nambu earthquake that struck Kobe, most of Kobe Port, built on reclaimed land, lost its port logistics distribution function due to soil liquefaction. The Korean peninsula, previously considered a safe zone against earthquake, experienced soil liquefaction in 2017. In this study, a method for evaluating the impact of ground disasters during earthquakes was presented in selecting the locations of roads and major facilities when making construction plans on reclaimed lands, and the assessment for seismic geotechnical disaster was performed in actual reclaimed lands.

Keywords: Reclaimed lands, Soil liquefaction, Assessment for seismic geotechnical disaster



© 2023 by Korean Asphalt Institute. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

1995년 일본 고베를 강타한 효고현 남부지진은 직하형 지진이라고 불리울 만큼 수직방향 가속도가 크게 발생 하였으며 이로 인해 연안의 항만 매립지반에 액상화가 발생하여 고베항이 항만물류의 기능을 거의 상실하게 되 었다. 매립지반이나 포화 사질토 지반 등에서 발생가능한 지반 액상화 현상은 발생 정도에 따라 지반 위에 건설된 시설의 균열, 틸팅, 파괴 등을 야기시킬 수 있다. Fig. 1은 액상화 현상으로 발현된 지반현상을 나타내고 있으며 Fig. 1a가 효고현남부지진의 피해사례이다. 국내에서도 2017년 11월 포항지진 발생시 액상화가 발생한 바 있다 (Fig. 1b).

연안의 매립지반은 조성시 입경이 유사한 재료를 이용하는 경우가 많아 지진시 지반재해의 발생가능성이 높 다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 1980년대 이후 서해안과 남해안 일대에 매립을 통해 대규모 시설부지를 확보한 사



(a) Hyogoken-Nanbu earthquake (1995)



(b) Pohang earthquake (2017)

Fig. 1. Seismic geotechnical disaster in the reclaimed lands



Fig. 2. Reclaimed land in Korea (Oh et al., 2009)

례가 많기 때문에 이에 대한 대책이 필요하다.

이 연구에서는 매립지반에서 발생가능한 지진시 지반재해의 영향평가를 하는 것이 대책마련의 수립은 물론, 기본계획 수립시에 시설물의 위치 등을 결정하는데 도움을 줄 수 있다고 판단하고 매립시 획득된 지반조사를 토 대로 지진시 지반재해를 평가하는 방법을 제시하고 실제 최근 조성된 매립지반을 대상으로 지진시 지반재해 영 향평가를 수행하였다.

2. 지진시 지반재해 영향평가법

지진시 지반재해는 크게 경사가 완만한 지반에서 발생하는 지반 액상화와 경사지반에서 발생가능한 지진시 산 사태로 구분할 수 있으며 이러한 재해의 크기를 변하게 하는 지반의 동적특성으로 지반 내 지진증폭현상을 들수 있다. 이 중에서 연안의 매립지반은 대부분 경사가 완만한 지반에서 발생하는 지반 액상화를 주로 발생한다. 액상 화의 경우, 내진설계시에는 주로 시추를 통해 획득된 깊이별 지반조사자료를 토대로 액상화 발생가능성 여부를 평가하게 되는 반면, 넓은 지역의 액상화 영향평가시에는 각 깊이별 액상화 평가결과를 이용하거나 각 깊이별 액 상화로 발생가능한 체적변형률을 이용하게 된다. 여기서, 깊이별 액상화 평가결과를 이용하는 경우는 최종적으 로 액상화 발생가능성 지수(liquefaction potential index)라는 영향평가지수를 산정하여 이를 지도 상에 나타내 게 되며 깊이별 액상화로 발생되는 체적변형률을 이용하는 경우는 최종적으로 액상화 취약성 지수(liquefaction severity number)라는 영향평가지수를 산정하여 이를 지도 상에 나타내게 된다. 이 연구에서는 이 2가지 방법 모 두를 이용하여 지진발생시 지반재해 영향을 평가하였으며 그 내용을 요약해서 나타내면 다음과 같다.

2.1 액상화 발생가능성 지수

액상화 발생가능성 지수는 일본의 Iwasaki et al.(1982)가 제안한 지수로 산정식은 다음의 식 (1)과 같다.

$$P_{L} = \int_{0}^{20} F(z) w(z) dz$$
(1)

여기서, z는 지반심도이고 w(z)는 지반심도를 고려한 가중치로 산정식은 w(z)=10-0.5z이다. 또한 식에서 F(z)는 1에서 액상화 안전율을 뺀 값으로 안전율이 1미만인 경우에만 값을 갖게 되며 이상인 경우에는 0으로 처리한다.

일본에서 제안된 LPI지수 이용방법을 Choi et al.(2016)은 국내 광역지역을 대상으로 Fig. 4와 같이 제안한 바 있다.

Fig. 3에서 왼쪽에 표시된 지진에 의한 반복전단응력비, CSR(Cyclic Stress Ratio or Shear stress ratio)에 관 한 산정내용을 요약하면 다음과 같다.



Fig. 3. Procedure of macro liquefaction assessment and LPI calculation (Choi et al., 2016)

Table 1	. Comparison	of CSR	evaluation
---------	--------------	--------	------------

	Micro	Macro	
Consideration of seismic amaplification in soils	Site response analysis (ex. Shake91, Deepsoil, etc)	Soil amplification factor according the the soil classification (S ₂ , S ₃ , S ₄ , S ₅)	
CSP equation	$\text{CSR} = 0.65 \left(\frac{a_{\text{max}, depth}}{g}\right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_v'}\right)$	$\mathbf{CSR} = 0.65 \left(\frac{a_{at bedrock}}{s}\right) S\left(\frac{\sigma_v}{s}\right)$	
CSK equation	$\text{CSR} = 0.65 \frac{ au_{\max, depth}}{\sigma_v'}$	$g = \frac{1}{2} \sigma_v$	
Analysis time	moderate or long (based on the number of site investigation data)	very short	

Table 2는 행정안전부가 주관이 되어 발표한 내진설계 공통기준(MOIS, 2017)에 내용에 준하여 CSR을 산정 하는 방법을 나타낸 것으로 Micro적 해석인 경우(지반조사자료가 많지 않은 경우, 시설물 대상 등)에는 지반응답 해석을 통해 액상화 평가 대상지층의 가속도 또는 전단응력 결과를 이용하여 산정한다. 또한, Macro적 해석인 경 우에는 시추공 정보 모두를 이용해서 우선적으로 시추공지점의 지반종별을 우선적으로 평가한 후, 이에 해당하 는 지반증폭계수를 곱하는 것으로 증폭현상을 반영하게 된다. CSR이 산정된 이후, Fig. 4의 CRR(Cyclic resistance strength ratio) 산정곡선을 이용하여 액상화 평가안전율을 산정한다. 이때, Fig. 4는 지진규모 7.5를 기 준으로 한 것이므로 국내 지진규모 6.5를 고려하기 위해 1.5의 값을 곱하여 최종 CRRM=6.5를 산정한다.

이상과 같은 방법을 시추공의 액상화 평가대상지층 모두에 적용하여 각 층에서의 액상화 평가안전율이 산정되면 각 지반심도별로 산정된 LPI값을 합산하여 최종 LPI값이 산정된다. 또한, Iwasaki et al.(1982)는 여러 액상화



Fig. 4. Curve for evaluation of CRR_{M=7.5} (Boulanger and Idriss, 2014)

Table 2. Level of liquefaction damage by LPI (Iwasaki et al., 1982)

Range of LPI	Level of liquefaction damage
0	No damage
$0 < LPI \leq 5$	Minor damage
$5 < LPI \le 15$	Medium damage
15 < LPI < 100 Extensive damage	

발생피해에 대한 분석을 통해 LPI의 범위는 0부터 100까지로 구분하고 그 값에 따라 Table 1과 같이 액상화 위험 도를 구분한 바 있다.

2.2 액상화 취약성 지수, LSN

LSN 지수를 산정하는 식(Zhang et al., 2002)은 다음과 같다.

$$LSN = 1000 \int \frac{\epsilon_v}{z} dz \tag{2}$$

여기서, z는 지진에 의한 전단응력이 작용하는 층의 깊이(m)이며 ϵ_v 는 체적변형이고 무차원의 체적변형률을 해당 층의 두께에 대해 1000을 곱하는 것은 최종적으로 체적변형률을 mm 단위로 표현하는 것과 같은 의미를 갖 게 된다. 식 (2)에서 체적변형률은 지진으로 야기되는 값인데, 이를 산정하는 방법은 Tokimatsu and Seed(1987) 가 지진규모 7.5를 기준으로 작성한 연구성과에 대해 국내 항만 및 어항시설 내진설계(MOF, 2018)에서 제시하 고 있는 액상화 평가시 설계지진규모 6.5를 적용하여 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다.

LSN 산정방법을 요약해서 나타내면 Fig. 6과 같다.

LSN지수는 Table 2를 이용하여 산정한 CSR과 Fig. 5를 통해 체적변형 ε_ν값을 산정하고 이를 식 (2)에 대입 하여 최종 LSN값을 산정하게 된다. LSN의 경우에도 영향평가의 정도를 파악하기 위해 Table 1과 같은 구분이



Fig. 5. Volumetric strain calculation chart for LSN evaluation in Korea (M=6.5)



Fig. 6. A LSN calculation procedure using SPT-N value for Korea

Range	Predominant Performance
0 - 10	Little to no expression of liquefaction, minor effect
10 - 20	Minor expression of liquefaction, some sand boils
20 - 30	Moderate expression of liquefaction, with sand boils and some structural damage
30 - 40	Moderate to severe expression of liquefaction, settlement can cause structural damage
40 - 50	Major expression of liquefaction, undulations and damage to ground surface, severe total and differential settlement of structures
> 50	Severe damage, extensive evidence of liquefaction at surface, severe total and differential settlements affecting structures, damage to services.

Table 3. Level of liquefaction damage by LSN (EQC, 2015)

필요한데, 최근 2011년-2012년 액상화 피해가 크게 발생한 뉴질랜드 크라이트처치지진을 대상으로 이에 대한 연구(EQC, 2015)가 진행되어 Table 3과 같은 연구성과가 발표된 바 있다.

3. 매립지반의 지진시 지반피해 영향평가 사례

이 연구에서는 실제 국내 매립지반의 지진시 지반피해 영향평가를 위해 국내 대규모 매립이 시행된 A지역을 대상으로 지반조사자료를 수집하였으며 그 내용을 지도에 표시하면 Fig. 7과 같다. 또한, 이 연구에서는 지진시 지반피해 영향평가시 입력 지진가속도는 지진 재현주기 2400년 수준의 가속도 0.22 g를 대상으로 하였다. 이때, 재현주기 2400년를 적용한 점은 이 단지 내에 매우 중요한 시설이 들어갈 수 있다는 가정 아래, 이 재현주기를 적 용하였다.

Fig. 7에 표시된 시추공은 총 246공이며 이 중에서 LPI 및 LSN지수가 액상화 발생가능성이 낮게 평가된 경우 는 전체의 2/3 수준인 것으로 나타났으며 나머지 1/3에서 액상화가 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 최종적으로 Fig. 6의 매립지반을 대상으로 산정된 LPI와 LSN의 값을 GIS 지도에 표시하였으며 그 내용을 보면 Fig. 8과 Fig. 9와 같다. 이때, 액상화 발생가능성이 높은 경우에는 적색으로 표시하였다.

Fig. 8과 Fig. 9를 보면, 등급의 분류가 다른 점이 있어 비교하는 것이 쉽지는 않지만, Table 1과 Table 2에 나타 난 바와 같이 일정부분 액상화 발생가능성이 높은 적색 부근을 비교해 보면, 매우 유사하게 지도에 표출된 점을 볼 수 있다.

이상과 같은 지진시 지반재해 영향평가를 통한 재해지도를 통해 향후 이 곳에 시설물 건설계획을 수립하는 경 우, 이러한 지역에는 가급적 중요도가 낮은 시설물을 계획하거나 다른 한편으로는 지반보강이후 중요 시설물을 설치하는 방법을 계획할 수 있다. 특히, Fig. 7에 표시된 지반조사자료는 일반적으로 매립 계획 수립시 및 매립 조 성 후의 자료획득이 가능하기 때문에 본 연구에서 제안한 지진시 지반재해 영향평가가 수행가능할 것으로 판단 된다.



Fig. 7. Aseessment area in this study



(a) Display with contour lines

(b) Display with color

Fig. 8. A map drawn by LPI



(a) Display with contour lines



(b) Display with color

Fig. 9. A map drawn by LSN

4. 결 론

이 연구에서는 80년대 이후 연약지반을 매립하여 시설물 부지로 사용한 점이 많은 국내의 여건과 포항지진에 서 액상화가 발생한 점 및 일본 등 강진국가의 매립지반에서 액상화 피해가 크게 발생한 점을 고려하여 매립조성 시 획득가능한 지반조사자료를 토대로 지진시 지반재해 영향평가를 수행하는 방법을 제시하고 실제 국내 A지역 매립지반을 대상으로 지진시 지반재해 영향평가를 수행하였다. 이를 통해 획득된 결론은 다음과 같다.

- 매립지반에서 발생가능한 지진시 지반재해는 액상화인 것으로 가정하고 영향평가를 위한 평가지표로 액상 화 발생가능성 지수, LPI와 액상화 취약성 지수, LSN을 이용한 방법을 추천하였으며 이를 국내 지진특성 에 맞도록 보완하여 국내 적합한 지진시 지반재해 영향평가 방법을 제시하고 이에 대한 예제를 수행하였다.
- 제시된 방법으로 실제 국내 A지역 매립지반에 대한 지진시 지반재해 영향평가 결과, 액상화 발생가능성 지 수와 액상화 취약성 지수가 각각의 평가지표에 대한 피해범위가 다름에도 불구하고 액상화 발생가능성이 높은 경우가 유사하게 도출되었으며 이를 GIS 수치지도 상에 표현한 지역도 매우 유사한 것으로 나타났다.
- 이러한 지진시 지반재해 영향평가 결과를 이용하여 매립지역에 도로 및 시설물을 계획할 경우, 이들의 위치 등을 결정하는데 이용가능할 것으로 판단되며 부득이하게 지진시 지반재해 발생가능성이 높은 지역에 도 로 및 시설물을 건설할 경우에는 사전에 지반보강 등의 방법을 강구함으로써 향후 발생가능한 지진시의 피 해를 경감시키는 데 일조할 수 있을 것으로 판단된다.
- 최근 전세계가 지각변동의 불확실성으로 인해 예기치 않은 지진발생이 증가하고 있고 국내에서도 지진규 모 4이상의 지진이 빈번하게 발생되고 있는 점을 고려하여 이러한 지진시 지반재해 영향평가가 도로 및 시 설물 건설계획 단계에 필수검토사항으로 포함되어 시설물 및 시설물 내의 이용자 및 거주자들의 안전증진 에 일조하기를 기대한다.

감사의 글

본 논문은 행정안전부의 재원으로 국립재난안전연구원의 개발사업에 대한 빅데이터 기반 재해영향 평가기술 개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2021-ND629011).

참고문헌

- Boulanger, R.W. and Idriss, I.M. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering procedures, Report No. UCD/CMG-14/01, Dept. of Civil & Environmental Engineering, University of California at Davis.
- Choi, J. S., Hwang, C. H. and Park, J. P. (2016). "Liquefaction hazard map in Korea disaster monitoring system", 6th Japan-Korea Geotechnical Workshop, JGS & KGS, Okayama Univ. Sep.12.2016, Paper-No.k12.
- EQC (Earthquake Commission) (2015). Canterbury Earthquake Sequence : Increased Liquefaction Vulnerability

Assessment Methodology, Tonkin+Taylor. Newzealand.

- Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S. and Sato, H. (1982). "Microzonation for Soil Liquefaction Potential Using Simplified Methods", Proceedings of 3rd International Conference on Microzonation, Seattle, pp. 1319-1330.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries) (2018). Seismic Design of Port and Harbor (KDS 64 17 00).
- MOIS (Ministry of the Interior and Safety) (2017). Common Applicable Regulation for Korean Seismic Design.
- Oh, S. H., Ha, T. G. and Chung, C. K. (2009). "Geotechnical Characteristics of Soft Clayey Soil in South Korea", 2009 KGS Spring National Conference, pp. 923-927.
- Tokimatsu, K. and Seed, H. B. (1987). "Evaluation of Settlements in Sands Due to Earthquake Shaking", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 113(8), pp. 861-878.
- Zhang, G., Robertson, P.K. and Brachman, R.W.I. (2002). "Estimating Liquefaction-Induced Ground Settlements from CPT for Level Ground", Canadian Geotechnical Journal, 39, pp. 1168-1180.