

Scientific Paper

지반의 지진위험도를 고려한 방재도로의 선정

최재순*

서경대학교 토목건축공학과 부교수

Selection of the disaster prevention road considering earthquake risk

Jae-Soon Choi*

Associate Prof., Dept. of Civil & Architectural Eng., Univ. of Seokyeong

*Corresponding author: Tel. +82-2-940-7771 E-mail. geotech@skuniv.ac.kr

Received: November 18, 2020; Revised: December 7, 2020; Accepted: December 15, 2020

ABSTRACT

In Pohang, several roads has been damaged by liquefaction occurrence and attention has been paid to disaster prevention roads. This study is a case study using GIS mapping for disaster prevention road in Pohang where the biggest earthquake damage occurred in Korea in 2017. To simulate the earthquake risk of road, we predicted liquefaction potential and collapse of old non-seismic buildings against two earthquakes with return period 500 and 1,000 years. For GIS simulation, liquefaction assessment was conducted based on the survey data of the regional area. Based on the results, the liquefaction potential index as a liquefaction risk and dangerous old roadside buildings under earthquake loading were also shown on the map.

Keywords: Liquefaction, Disaster prevention road, Earthquake risk, Liquefaction potential index, Old roadside building

1. 서론

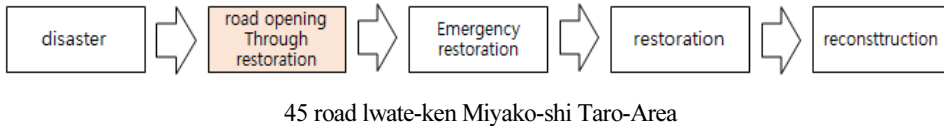
최근, 내진설계의 개념이 구조물의 안전 확보를 넘어서 시설 전체의 성능 확보에 중점을 두는 방향으로 전환되고 있다. 특히, 운송, 이동을 위한 도로의 성능 확보는 재난 대응 및 복구에 있어서 무엇보다도 중요하다. 이러한 점을 반영하여 최근 일본에서는 재난 발생시 이동 및 운송의 역할을 수행하는 도로에 대해 방재도로가 명하고 Fig. 1과 같이 재난 발생 후에도 신속한 복구를 통해 도로를 개통하도록 제도화하여 운영하고 있다.

특히, 지진으로 인해 도심지에 도로가 파괴되거나 그 성능을 유지하지 못하는 경우는 Fig. 2와 같이 지반의 액상화로 인한 도로의 파괴와 도로변 건축물 또는 구조물의 전도 및 붕괴가 도로가 있는 방향으로 피해가 전개된 상



황이 대표적이다.

이와 같이 급작한 재난발생에도 방재도로로 지정된 도로는 그 성능을 발휘해야 하므로 사전 위험도 분석을 통해 방재도로의 성능수준을 검토하고 취약한 방재도로에 대해서는 최우선적으로 보강하는 것이 바람직하다. 이 연구에서는 지반 액상화와 도로변에 위치한 노후 건축물이 지진 발생시 도로의 성능발휘를 저해하는 요소라 판단되어 이에 대한 위험도 분석을 수행하였다.



Road blocking



Road opening through restoration

Fig. 1. Disaster prevention road after disaster in Japan (<http://www.mlit.go.jp>)



(a) liquefaction hazard

(<https://blog.naver.com/huheun05/70127340644>)



(b) Destruction of building wall

(www.civilpost.net)

Fig. 2. Destruction of urban roads during earthquakes

2. 액상화 위험도 지도 작성

2.1 액상화 발생가능성 지수를 이용한 액상화 위험도 지도 작성

다양한 액상화 위험도 지도 작성법이 있으나, 우리나라와 같이 표준관입시험 결과를 통해 액상화 평가를 수행하는 것을 기본으로 하는 국가에서는 Iwasaki (1978)가 제안한 액상화 발생가능성 지수(Liquefaction Potential Index, LPI)를 이용하는 것이 매우 효과적이다. Iwasaki는 액상화 평가법으로 구한 액상화에 대한 안전율을 이용하여 대상 지점을 대표할 수 있는 값을 정량화하였으며 이와 관련된 식은 다음과 같다.

$$P_L = \int_0^{20} F(z) w(z) dz \quad (1)$$

여기서, $F(z)$ 는 액상화 안전율(F_L)에 대한 함수로써 액상화 안전율이 1이상인 경우($F_L \geq 1.0$)에는 $F(z)$ 는 0의 값을 가지고 액상화 안전율이 1미만인 경우($F_L < 1.0$)에는, $F(z) = 1 - F_L$ 의 식을 사용하여 산정하며 그 값의 범위는 0~1.0이다. 또한, $w(z)$ 는 가중치(weighting factor)로서 지반심도가 깊을수록 구속압의 영향으로 액상화의 발생가능성이 작아지는 경향을 $w(z) = 10 - 0.5z$ 의 식으로 표현하고 있으며 이때, 액상화 평가한계심도인 20 m까지 선형감소하게 된다. 최종적으로 식 (1)을 통해 계산되는 P_L 의 값을 액상화 가능성 지수, LPI라고 하며 이 지수의 범위는 0에서 100이다.

Fig. 3은 LPI 값을 도출하는 과정을 도식화하여 나타낸 것으로 이에 대해 요약설명하면 다음과 같다. 우선, 표준관입시험을 통해 얻은 지반자료를 바탕으로 액상화 평가법을 수행하여 대상 Site에서 깊이에 따른 액상화 안전율, F_L 값을 구한다. 만일 이 값이 1보다 크면 그 깊이에서의 LPI값은 0이 되며 1보다 작으면 가중치, $w(z)$ 를 각 깊이 별(0~20 m)로 곱하여 이들을 모두 더한다. 그리고, 최종 합이 대상 지점을 대표하는 액상화 가능성 지수가 된다.

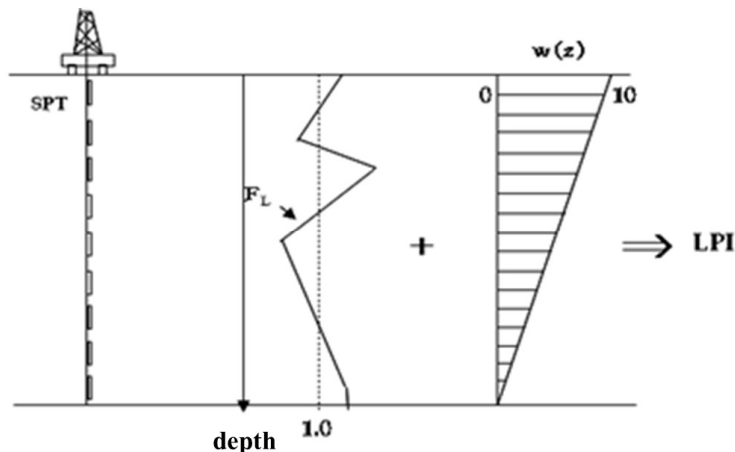


Fig. 3. LPI estimation process (Kwak et al., 2015)

또한, Iwasaki는 63개의 액상화 발생지역과 22개의 액상화 미발생 지역을 대상으로 하여 LPI값에 따른 액상화 피해정도와의 상관관계를 다음 Table 1과 같이 제안한 바 있다.

Table 1. Level of liquefaction damage by LPI (Iwasaki et al., 1982)

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

2.2 광역지역 액상화 위험도 지도 작성

넓은 지역의 액상화 위험도 지도를 작성할 경우에는 많은 데이터를 처리해야 하므로 액상화 평가도 간결할 필요가 있다. 우리나라의 경우, 액상화 평가시 지진응답해석 결과를 이용하도록 되어 있으므로 광역지역의 액상화 위험도 지도를 작성할 경우, 지진응답해석에 너무나도 많은 시간과 노력이 소요될 수 밖에 없다. 이러한 점을 보완하고자 우리나라와 지진특성이 유사한 유럽에서 사용하고 있는 액상화 간편법(Eurocode, 1999)을 적용하여 시각정보의 도출시간을 획기적으로 감축하는 연구(Choi and Ku, 2009)가 발표된 바 있다. 이 내용을 요약정리하여 나타내면 다음의 Fig. 4와 같다.

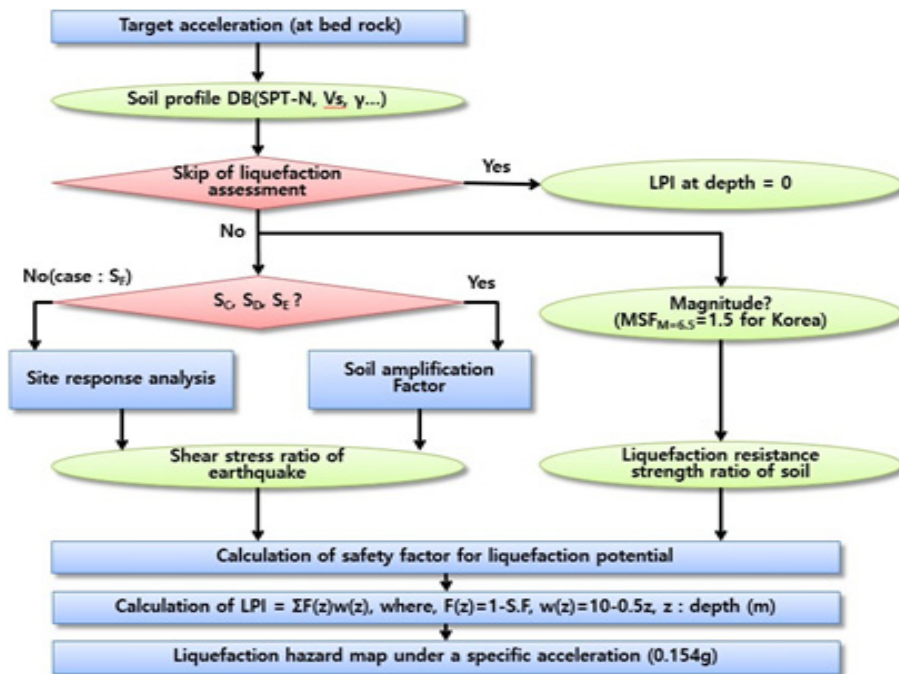


Fig. 4. Macro liquefaction risk mapping algorithm

3. 지진 위험도 분석시 조건

방재도로 선정을 위한 지진 위험도 분석에 있어서는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 액상화 발생가능성과 도로변 건축물의 파괴를 대상으로 하였다. 건축물의 경우, 노후도와 위치를 고려하여 도로변의 30년 이상된 건축물을 위험도가 높은 것으로 간주하였다. 해석대상은 2017년 11월 15일 지진이 발생한 포항지역을 선정하였다. 대상지역으로 포항을 선정하게 된 이유는 우리나라 지진계측이래 가장 큰 지진피해가 발생한 지진인 점과 지진규모 5.4임에도 불구하고 액상화 현상이 발견된 점이 고려되었다. Fig. 5는 포항지진 발생시 도로의 운행에 지장을 준 피해 사례에 대한 사진이다.



(a) destruction of build wall



(b) road

Fig. 5. Pohang earthquake hazards

지진 위험도 분석에 적용된 내진성능수준은 대한민국의 도로에 적용되는 붕괴방지 내진 I 등급과 붕괴방지 내진 II 등급으로 하였다. 이때의 기반암에서의 가속도 수준은 재현주기 1000년 빈도의 0.154 g와 재현주기 500년 수준의 0.11 g이다. 또한, 해석대상 시설물인 도로와 건축물에 대한 정보는 우리나라 행정안전부의 국가공간정보포털의 오픈마켓에서 2018 새주소 도로구간 공간정보와 건축대장의 건축물 정보를 이용하였으며 지반정보는 국가지반정보DB센터의 정보를 이용하였다. 국가지반정보DB센터의 경우, 정부기관 주도로 공사에 이용된 시추공 정보를 수집하여 데이터베이스화하고 있으며 현재 20만 공 이상의 정보를 축적한 상태이다. 이 연구에 이용된 시추공 정보는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 포항지역을 중심으로 한 자료로 대략 4000공 정보의 데이터가 분석에 이용되었다.

이 연구에서는 Fig. 6의 지반정보를 토대로 기반암에서의 가속도 0.11 g와 0.154 g에 대해 Fig. 4의 해석순서에 따라 액상화 평가를 수행하고 이를 통해 액상화 발생가능성 지수를 산정하여 수치지도 상에 나타낸 결과는 다음과 같다.

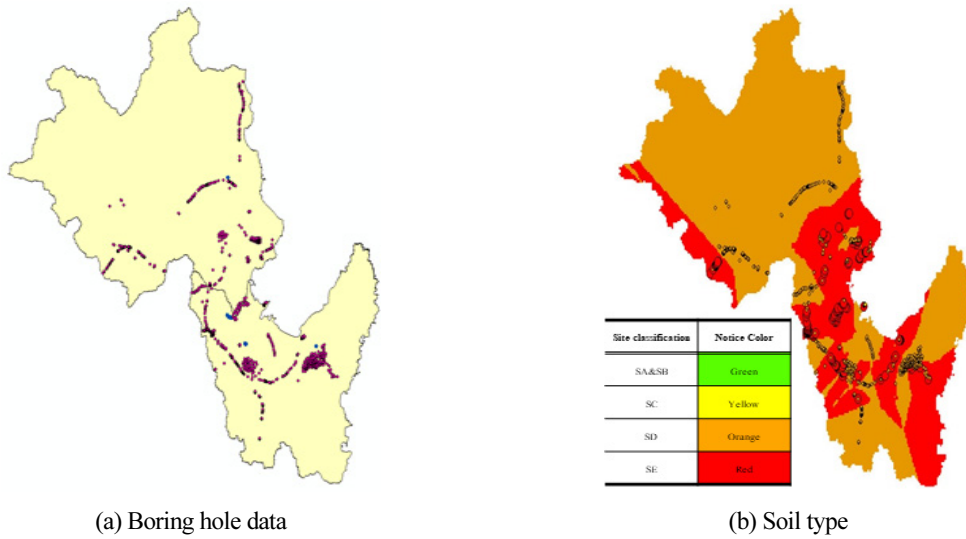


Fig. 6. Used data in the seismic risk analysis (www.geoinfo.or.kr)

Fig. 7을 보면, 지진시 액상화에 따른 영향이 심각하게 발생할 수 있는 적색 부분이 그림의 중앙부인 포항시 중심부에 집중된 것으로 나타났다. 또한, 붕괴방지 1등급의 수준을 고려한 경우는 붕괴방지 2등급과 비교하여 중심부의 피해발생 범위가 넓어진 것으로 나타났으며 해안가 지역이 추가되었다.

실제로 2017년 11월 포항에서 액상화가 발생한 지역은 붕괴방지 1등급에서 추가로 예측한 해안가 지역이다. 이러한 사실로부터 Fig. 7의 액상화 위험도 지도를 통한 예측은 신뢰성이 높은 것으로 판단된다.

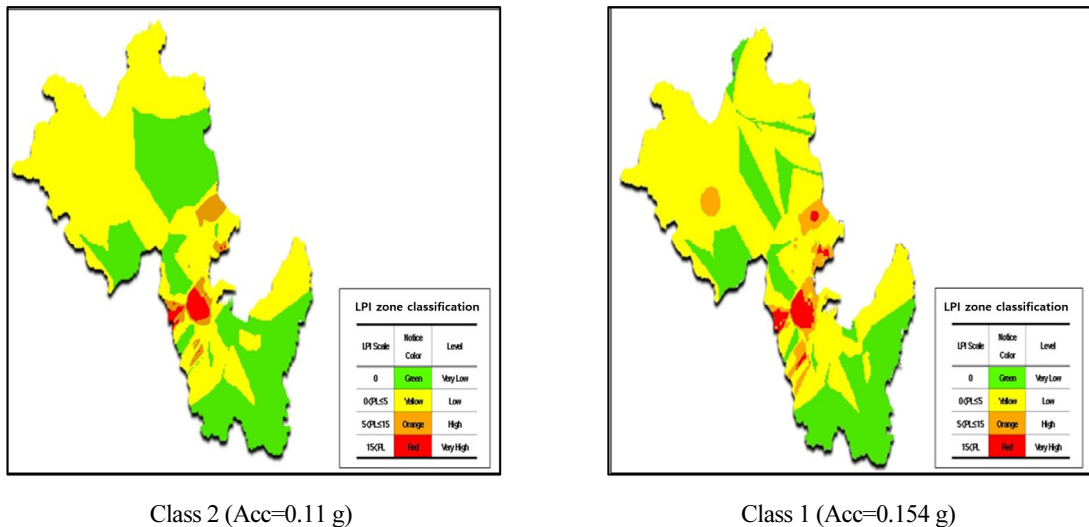


Fig. 7. Liquefaction risk map with LPI

4. 지진위험도를 고려한 피해도로 예측

4.1 붕괴방지 2등급 수준을 고려한 피해도로

Fig. 7의 재현주기 500년 수준의 지진 발생시 액상화 위험도 지도 위에 도로정보와 노후 건축물 정보를 표시하면 다음과 같다. 이때, 선으로 표시된 것이 도로이며 도로변의 점 또는 사각형으로 표시된 것이 30년 이상된 노후 건축물이다.

또한, Fig. 8의 적색표시 부분을 도로와 건축물을 중심으로 나타내면 Fig. 9와 같다.

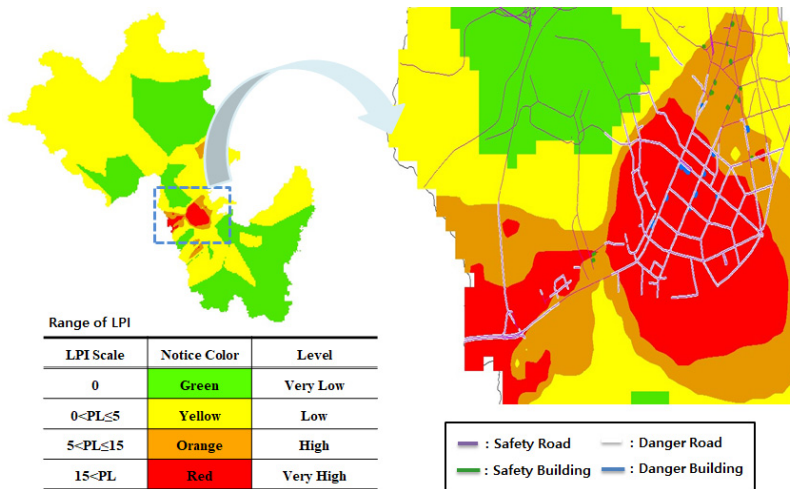


Fig. 8. Results of seismic risk analysis (Class 2, Acc=0.11 g)

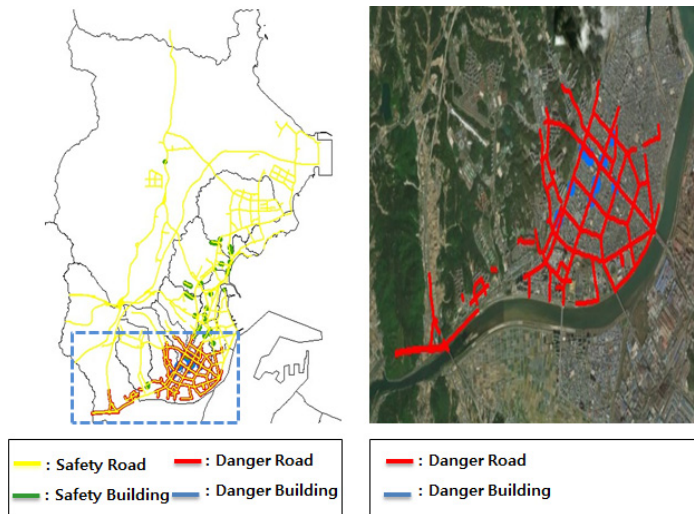


Fig. 9. Detailed analysis on high risk area (Class 2 level)

Fig. 9를 보면, 지진 시 포항 중심부 강변구간의 일반도로와 일부 도로변의 시설물의 피해가 발생할 것으로 예측되었다. 이는 지반조사자료 상의 표준관입시험 N 치가 상대적으로 작은 연약지반 지역으로 상대밀도가 작아 액상화에 대해 취약한 것이 반영된 것을 판단된다. 다만, Fig. 9의 작성에 이용된 자료가 시공 전 시추공 자료로 현재의 지반상태와는 다를 가능성이 높으므로 해당지역에 대한 지반조사를 재수행하고 이를 토대로 지진응답해석 등을 포함한 지진 위험도 분석이 추가될 필요가 있다.

4.2 붕괴방지 1등급 수준을 고려한 피해도로

재현주기 1000년 수준의 지진 발생시 액상화 위험도 지도 위에 도로정보와 노후 건축물 정보를 표시하면 Fig. 10과 같고 이를 도로망과 노후 건축물 중심으로 나타낸 그림은 Fig. 11과 같다. 이때, 우선적으로 액상화 위험도를 나타내는 지도를 작성한 후에 도로와 노후건축물을 표시하였다.

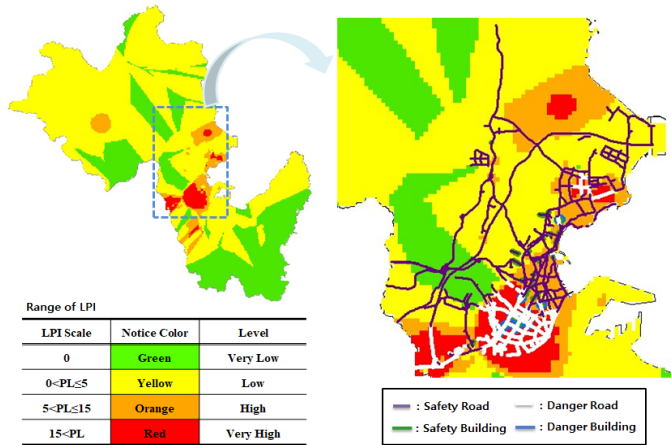


Fig. 10. Results of seismic risk analysis (Class 1, Acc=0.154 g)

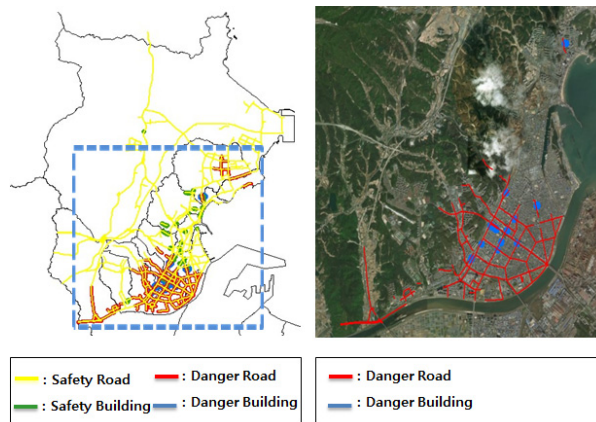


Fig. 11. Detailed analysis on high risk area (Class 1 level)

Fig. 11을 보면, Fig. 9의 피해가 발생한 지역 이외에 일부 지역이 추가되어 나타났으며 추가된 지역에서 실제 포항지진시 액상화가 발생하였다.

5. 결론

이 연구에서는 방재도로 선정을 위해 지진 위험도 분석을 통해 도로와 노후 건축물의 지진시 안전성을 검토하였다. 지진시 지반 안전성 검토는 포항시를 대상으로 도로 내진성능등급인 붕괴방지 II 등급과 I 등급 수준을 고려하여 지진시 지반의 액상화 위험도를 예측하였으며 이 결과를 기존 도로망의 위치와 비교하여 도로의 지진시 위험도를 평가하였다. 이때, 국가지반정보DB센터가 보유한 지반조사자료를 이용하였으며 연구에 이용된 시추공 정보는 약 1200개이다.

지진 위험도 분석결과, 내진 II 등급 수준의 지진이 발생할 경우, 포항시 중심부 도로의 직접적인 액상화 피해가 예측되며 일부 지역의 도로변 철근콘크리트 구조물에서 건축물의 파손 및 붕괴가 발생 할 수 있을 것으로 예측되었다. 또한, 내진 I 등급 수준의 지진이 발생할 경우에는 내진 II 등급 수준에 대한 예측결과의 범위가 확대되어 나타났으며 북동쪽 일부 해안 매립지역의 피해가 추가되어 나타났다. 특히, 내진 I 등급 수준에 대한 예측결과의 경우, 2017년 11월 실제 포항지역의 액상화 피해가 발생한 지역을 포함하고 있어 지진 위험도 예측결과가 신뢰할 수 있음이 검토되었다. 또한, 이 연구결과를 토대로 신규도로 건설과 확포장 및 노선개량 등 도로 확장건설 시 포장설계에 지진위험도(액상화 가능성 지수 등)를 반영하여 노선 결정 및 포장 설계를 수행하는 것도 가능할 것으로 판단된다.

이상으로부터, 방재도로의 선정은 지진 시에도 교통의 흐름이 유지되도록 선정하는 것이 중요하므로 지진 위험도 평가가 이를 위한 기초자료를 제공할 수 있으며 나아가 노후된 시설물에 대한 후속대책의 우선순위를 정하는 데에도 도움이 될 것으로 판단된다.

참고문헌

- Baek, W.H., Choi, J.S. and Ahn, J.K. (2018). “Liquefaction hazard map in pohang based on earthquake scenarios”, *Journal of Earthquake Engineering Society in Korea*, 22(3), pp. 219-224 (in Korean).
- Choi, J.S. and Ku, T.J. (2009). “A study on mapping of liquefaction hazard at a megalopolis in Korea”, 2009 KGS conference, Incheon Univ., Korean Geotechnical Society, pp.1246-1249.
- EESK (1997), *Seismic Design Standard (II)*, Korean Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- European Committee for Standardization (1998). *Eurocode8, Report*, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, pp. 33-35.
- Idriss, I.M. and Sun, J.I. (1997). *User’s Manual for SHAKE91*, Center for Geotechnical Modeling Department of Civil & Environment Engineering University of California, Davis, C.A., pp. 1-11.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, K., Tokida, F. and Yasuda, S. (1978). “A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan”, *Proceedings of 2nd International Conference on*

Microzonation, National Science Foundation UNESCO, San Francisco, C.A., 2, pp. 885-896.

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.

Kramer, S.L. (1997). “Geotechnical earthquake engineering”, Prentice Hall.

Kwak, M.C, Ku, T.J. and Choi, J.S. (2015). “Development of mapping method for liquefaction hazard in moderate seismic region considering the uncertainty of big site investigation data”, J. of the Korean Geo-Environmental Society, 16(1), pp. 17-28 (in Korean).