

# 액상화 가능 지수의 국내 하천제방 지진취약도 평가 적용성 검토

## Examination of Applicability of Liquefaction Potential Index to Seismic Vulnerability Evaluation of the Korean River Levees

하 익 수<sup>1)</sup> · 문 인 종<sup>2)</sup> · 윤 정 원<sup>3)</sup> · 한 진 태<sup>†</sup>

Iksoo Ha · Injong Moon · Jungwon Yun · Jintae Han

Received: February 20<sup>th</sup>, 2017; Revised: February 23<sup>rd</sup>, 2017; Accepted: March 21<sup>st</sup>, 2017

**ABSTRACT :** In this study, a simple method to evaluate the seismic vulnerability of river levees was examined considering the structural characteristic of river levee, that is long, and the functional characteristic of river levee that performs temporary function against flood but is a permanent structure in the ordinary way. Considering the fact that one of the main failure modes of the levee during the earthquake are the settlement due to the strength reduction of the ground caused by the increase of the excess pore pressure in the levee body and foundation and the settlement due to liquefaction, the 2-dimensional section of the levee was regarded as the 1-dimensional section and the liquefaction potential index (LPI) for the regarded section was estimated. The estimated LPI was correlated with the seismic vulnerability of river levees. The relationship between the displacement of the levee crest caused by the earthquake and the seismic vulnerability of the levees was obtained from the results of previous researches and the correlation between the displacements of the levee crest computed by 2-dimensional dynamic coupled analyses and LPIs based on the results of 1-dimensional seismic response analyses was investigated. In connection with this correlation, as a result of examination of the correlation between LPI and the seismic vulnerability of the levee, it was concluded that the method for evaluation of the seismic vulnerability of the Korean river levee using LPI is applicable.

**Keywords :** River levee, Seismic vulnerability, Liquefaction potential index, Dynamic analysis, Earthquake

**요 지 :** 본 연구에서는 하천제방이 홍수 때를 대비한 임시적인 기능이 크나 영구구조물이라는 기능적 특성과 길이가 매우 길다는 구조적 특성을 감안하여, 제방의 지진취약도를 간편하게 평가할 수 있는 방안을 검토하였다. 제방의 지진 시 주된 파괴모드가 제체 및 기초지반의 과잉간극수압 증가로 야기되는 지반의 강도감소 및 액상화로 인한 제체 침하인 점에 착안하여, 2차원 형태의 제방 단면을 1차원으로 간주하고 액상화 가능 지수를 산정한 후, 그 결과를 지진 시 하천제방의 취약도와 연관시키는 방안을 검토하였다. 지진으로 야기된 제방 정상부의 변위와 제방의 지진취약도와의 관계를 기존 연구결과로부터 획득하였고, 2차원 동적 유효응력해석을 수행하여 산정한 제방 정상부 변위와 1차원 지진응답해석 결과를 기초로 산정한 액상화 가능 지수와와의 상관관계를 검토하였다. 이러한 상관관계와 연계하여, 궁극적으로 액상화 가능 지수와 제방 지진취약도와의 연관성을 검토한 결과, 액상화 가능 지수를 이용한 국내 하천제방의 지진취약도를 평가하는 방법이 적용성이 있는 것으로 판단되었다.

**주요어 :** 하천제방, 지진취약도, 액상화 가능 지수, 동적해석, 지진

## 1. 서 론

하천제방의 취약도는 하천제방의 파이핑 및 활동 등과 같은 구조적 안정성에 영향을 미치는 모든 영향요소 및 그 정도 등으로 정의될 수 있으나, 구체적으로 정량화하여 제시된 사례가 드물다. 이에 최근 국토교통부의 “다중시나리오 기반 재난대응 의사결정 지원체계 기술 개발” 연구과제에서는 국내 하천관리자를 위한 하천제방의 취약도 지표 등을 제시할 목적으로 수위파형, 파이핑/활동, 제체 및 기초지반의 재료특성, 제체 세굴, 육안점검, 액상화 등 총 6개 취약 지표를 제시하고,

각 인자별로 3~4 등급의 평가 지표화를 추진 중에 있다.

이들 중 액상화 지표는 제방의 내진설계와 관련되어 있는데, 국내의 경우 현재 사회·경제적 중요성을 고려한 국토교통부 내진설계기준의 대상시설에서 제방 및 하천시설물은 내진설계 제외 시설로 되어있는 실정이다(대통령령 제 27792호, 2017). 그러나 최근 발생한 규모 M 5.8의 경주지진은 국민들에게 우리나라가 더 이상 지진의 안전지대가 아니라는 경각심을 높여 주었고, 경주지진의 진원지로 알려진 양산 단층 부근 하천제방의 지진 시 액상화에 대한 안정성 여부 또한 불확실한 상황이다.

1) Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Kyungnam University

2) Post-doctoral Researcher, Korea Institute of Civil Engineering & Building Technology

3) Graduate Student, Department of Geospace Engrg., University of Science & Technology

† Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering & Building Technology (Corresponding Author : jimmyhan@kict.re.kr)

일반적으로 지반의 액상화 가능성은 지하수위와 최대지반가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)를 이용하여 1m 내외로 나누어진 지층별로 안전율(FS, Factor of Safety)이 1.0 보다 클 경우 ‘안전’, 1.0보다 작을 경우 ‘액상화 가능’으로 평가한다. 그러나, 각 지층의 안전율에 의한 평가방법만으로는 대상으로 하는 지반 전체의 액상화 피해 정도를 예측하기 힘들고, 광역 지역의 액상화 평가 시 측정 이외의 피해를 예측하는데 어려움이 있다(Holzer, 2008). 이에 최근에는 Iwasaki et al.(1978)이 제안한 액상화 가능 지수(LPI, Liquefaction Potential Index)를 적용하여 액상화 피해 정도를 평가하고 있으며, LPI를 GIS(Geographic Information System)와 융합하여 광역 액상화 재해도 제작에 활용하고 있다(Lee et al., 2003; Seo et al., 2009; Chung & Rogers, 2011; Mauer et al., 2014; Kim & Chung, 2016).

하천제방은 하천 수위가 높은 시기에 하천의 흐름이 원활히 유지되도록 축조된 길이가 긴 영구구조물이다. 댐처럼 장기간의 하천수 유지 및 침투방지를 목적으로 설계되었거나, 극한의 하중을 받도록 잘 설계되지는 않지만, 지진과 같은 짧은 시간 동안의 불리한 하중조건에 처하여 붕괴되는 경우, 댐 붕괴와 마찬가지로 인적·재산적 피해가 발생할 수 있으므로, 이에 대한 대비가 필요하다.

본 연구에서는 이러한 하천제방이 홍수 때를 대비한 임시적인 기능이 크나 영구구조물이라는 기능적 특성과 길이가 매우 길다는 구조적 특성을 감안하여, 제방의 지진취약도를 간편하게 평가할 수 있는 방안을 찾고자 하였다. 제방의 지진 시 주된 파괴모드가 제체 및 기초지반의 과잉간극수압 증가로 야기되는 지반의 강도감소 및 액상화로 인한 제체 침하인 점에 착안하여, 2차원 형태의 제방 단면을 1차원으로 간주하고 LPI를 산정한 후, 그 결과를 지진 시 하천제방의 취약도와 연관시키는 방안을 검토하였다. 지진으로 야기된 제방 정상부의 변위와 제방의 지진취약도와의 관계를 기존 연구결과로부터 획득하였고, 2차원 동적 유효응력해석을 수행하여 산정한 제방 정상부 변위와 1차원 지진응답해석 결과를 기초로 산정한 LPI와의 상관관계를 검토하였다. 본 연구의 목적은 이러한 상관관계와 연계하여, 궁극적으로 LPI와 제방 지진취약도와의 연관성을 검토하여, LPI를 이용한 국내 하천제방의 지진취약도 평가방법의 적용성을 검토해 보는 것이다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 액상화 가능 지수(LPI, Liquefaction Potential Index)

LPI는 Iwasaki et al.(1978)이 액상화로 인한 피해 정도를

판단하기 위하여 최초로 제시한 지수로, 액상화의 발생 깊이와 발생 가능 지층 두께가 액상화 정도에 미치는 영향을 고려할 수 있다(Iwasaki et al., 1978). LPI는 액상화가 발생할 경우 지표에 영향을 미치는 깊이로 판단되는 지하 20m까지의 액상화에 대한 취약성을 누적한 값이므로, 액상화로 인한 지표면 피해 정도와 큰 상관관계를 보인다.

LPI는 지표면부터 심도 20m까지 각 깊이에서 액상화에 대한 안전율(FS, Factor of Safety),  $F(z)$ 와 액상화 발생 깊이를 고려하기 위한 가중치 함수,  $W(z)$ 를 곱한 값을 누적하는 적분 형태의 계산 값으로 Eq. (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$LPI = \int_0^{20} F(z) W(z) dz \quad (1)$$

여기서,  $z$ 는 지표면에서의 깊이이며,  $F(z)$ 는  $FS \leq 1.0$  이면,  $F(z) = 1 - FS$  이고,  $FS > 1.0$  이면,  $F(z) = 0$  이고,  $W(z)$ 는  $z \leq 20m$  이면,  $W(z) = 10 - 0.5z$  이고,  $z > 20m$  이면,  $W(z) = 0$  이다.

액상화에 대한 안전율은 현재 국내에서 액상화 간편예측법으로 가장 많이 사용되고 있는 Seed와 Idriss가 제안한 방법(Seed & Idriss, 1971) 등으로 산정될 수 있다. 본 연구에서도 LPI 산정을 위한 액상화 안전율 산정은 이와 동일한 방법이 적용되었는데, 지진 시 발생하는 최대전단응력비는 설계지진 가속도 및 동적물성을 바탕으로 한 지진응답해석을 통해 산정하였고, 지반의 액상화 전단저항비는 표준관입시험치,  $N_{(60)}$ 을 이용하여 산정하였다. 지진응답해석은 보편적으로 사용되고 있는 반무한 수평지반의 1차원 지진응답 현상을 분석할 수 있는 프로그램인 SHAKE(Schnabel et al., 1972)가 이용된다. SHAKE는 1차원 등가선형(equivalent-linear) 해석 프로그램으로서, 선형탄성해석을 이용하여 전단변형률에 따른 동적물성치(전단탄성계수, 감쇠비)의 비선형성을 등가적으로 고려할 수 있다. 최종적으로 지진 시 최대전단응력비와 액상화 전단저항비를 깊이에 따라 비교하여 깊이별 액상화에 대한 안전율이 산정된다.

Iwasaki et al.(1978)은 LPI에 따른 액상화로 인한 피해 정도를 ‘매우 낮음’, ‘낮음’, ‘높음’, ‘매우 높음’으로 정의하였다(Iwasaki et al., 1978). LPI가 5보다 작은 경우 액상화로 인한 피해가 미미하지만, 15보다 큰 경우에는 큰 피해가 예상된다고 예시하였으며, 이 기준은 현재까지 LPI를 이용한 액상화 평가 피해 산정 시의 기준으로 널리 적용되고 있다(Table 1). 그리고 Table 1은 일본지역에서 발생된 85개 지진에 대한 액상화 피해 정보를 바탕으로 도출된 결과이다. LPI는 제한적 단일 부지만만 아니라 넓은 구역의 액상화 발생 가능 정도를 예측하는 분포도 작성에도 널리 활용되고 있으며, 특히 지진 최대 가속도에 따른 액상화 피해

Table 1. Assessment of soil liquefaction and damage severity risk based on LPI (Iwasaki et al., 1978)

LPI range	Damage severity due to liquefaction
0	Very low
$LPI \leq 5$	Low
$5 < LPI \leq 15$	High
$LPI > 15$	Very high

지역범위의 예비적 확인에 도입되어 효율적으로 적용되고 있다.

## 2.2 하천제방의 지진취약도

지진에 의한 하천제방의 주된 파괴모드는 기초지반의 단층활동에 의한 파괴, 침하에 의한 여유고 손실, 지반운동에 의한 사면파괴, 연약한 기초지반 상 제방의 미끌림 파괴이다(Millet et al., 2014). 이 중 단층활동에 의한 파괴를 제외한 나머지 파괴모드는 지진 시 제방의 변위 거동과 직접 관련된다고 할 수 있다.

과거 사례에 의하면 지진 시에 액상화가 발생하지 않은 필댐들은 지진동에 의한 댐 정상부의 변위가 댐 높이의 1%로 제한되었다(Swaisgood, 2003). 하천제방은 일반 필댐에 비하여 다짐도가 많이 낮아 지진동에 의한 댐 정상부의 변위가 필댐보다는 클 것이라고 예측되지만, 그 크기는 마찬가지로 제한적이기 때문에 지진으로 인해 제방이 파괴될 수 있을 만한 과도한 변위 발생은 하천 제방의 제체 및 기초지반의 액상화와 직접 관련이 있다고 볼 수 있다.

Atukorala et al.(2014)은 지진으로 인한 하천제방 정상부의 최대 허용변위(최대 허용수직변위와 최대 허용수평변위)와 지진취약 등급(seismic vulnerability categories)과의 관계를 Table

2와 같이 제시하였는데, Table 2에서 취약도 범주(vulnerability category) A는 제방 제체에 중요한 피해는 전혀 없으며 지진 후에도 홍수 방어능력에 위태로움이 없는 상태, 취약도 범주 B는 제방 제체에 약간의 보수가 필요한 정도의 피해는 있으나 지진 후 홍수 방어능력에 위태로움이 없는 상태, 취약도 범주 C는 제방 제체에 중대한 피해가 있으며 지진 후 홍수 방어능력이 위협을 받을 가능성이 있는 상태로 정의하였다(Atukorala et al., 2014). 그리고 Table 2에서 각 취약도 범주의 지진 후 제방 정상부의 최대 변위를 정의함에 있어, 취약도 범주 A에 대응하는 최대허용변위는 재현주기 100년 지진에 대한 응답최대변위, 취약도 범주 B와 C는 각각 재현주기 475년과 2,475년 지진에 대한 최대응답허용변위로 정의하였다.

## 3. 액상화 가능 지수 산정

### 3.1 대상 하천제방 및 해석 개요

해석대상 하천제방은 낙동강 하천제방으로 대구광역시 달성군에 위치한 길이 764m, 둑마루폭 12.5m의 성서제(Seongseo levee)이다. Fig. 1은 성서제 해석대상 단면 및 댐 마루에서 수행된 시추조사에 의한 시추주상도를 나타낸 것이다. Fig. 1의 단면이 해석단면으로 선정된 이유는 제방 전체길이에 대한 취약도 조사 시에 파이핑에 대한 안전율이 기준안전율 이하로 평가되는 등 여러 측면에서 가장 취약한 단면으로 평가되었기 때문이다(한국건설기술연구원, 2015).

대상단면에 대한 LPI를 2.1절에 제시된 방법과 절차에 따라 산정하였다. 우선 지진 시 발생하는 최대전단응력비를 산정하기 위하여 Fig. 1의 단면을 1차원으로 가정한 지진응

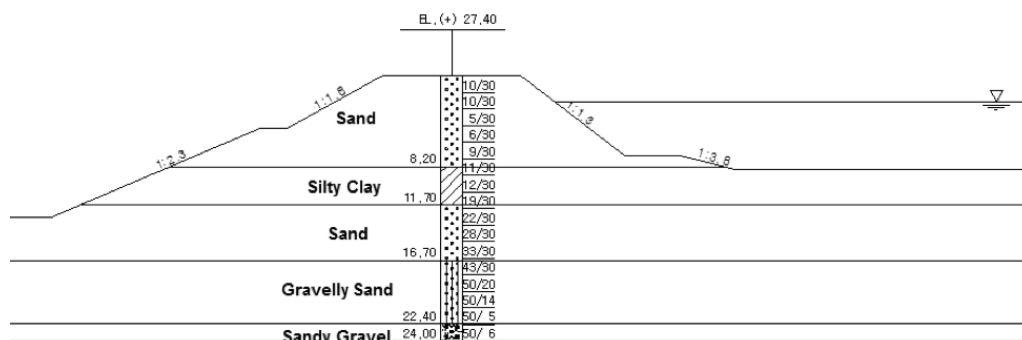


Fig. 1. Cross-section and drilling log of the Seongseo levee

Table 2. Summary of maximum allowable dike crest displacement corresponding to seismic vulnerability categories (Atukorala et al., 2014)

Vulnerability category	Maximum allowable vertical displacement	Maximum allowable horizontal displacement
A	Small (<0.03 m)	Small (<0.03 m)
B	0.15 m	0.3 m
C	0.5 m	0.9 m

답해석을 수행하였다. Table 3은 SHAKE 프로그램을 이용한 지진응답해석 시 지층구분 및 각 지층의 입력물성을 나타낸 것이다. 액상화 평가 대상층은 Fig. 1에서 알 수 있듯이 하천수위 하부의 제체 모래층이며, 기초지반 모래층은 표준관입시험값이 그림에 나타난 바와 같이 '22'를 초과하여 대상층에서 제외하였다.

동일 해석단면(Fig. 1)에 대하여 입력가속도의 최대크기가 0.11g와 0.154g의 2가지 수준이 되도록 최대진폭을 조정 한 장주기 성분이 탁월한 계측지진파인 Hachinohe 지진파, 단주기 성분이 탁월한 계측지진파인 Ofunato 지진파와 각각의 입력가속도 최대크기를 가지며 설계응답스펙트럼에 부합하도록 인공적으로 만들어진 인공지진파, 즉, 3개의 지진

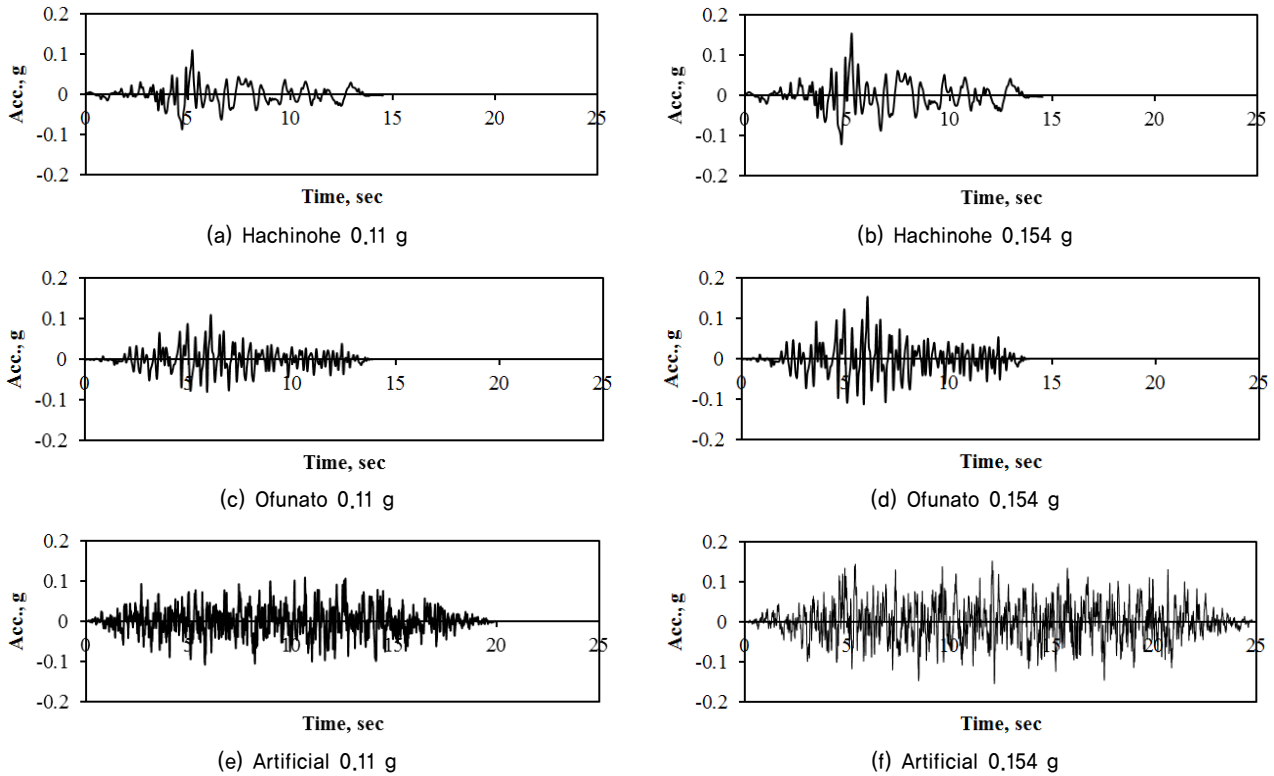


Fig. 2. Input acceleration time histories for 1-D SHAKE analyses and 2-D dynamic numerical analyses

Table 3. Layer division and input material properties for 1-D seismic response analysis using SHAKE program

Layer No.	Layer thick. (m)	Depth (m)	Soil type	N (SPT)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	G <sub>max</sub> (Mpa)	V <sub>S</sub> (m/s)	G/G <sub>max</sub> - $\gamma$ curve	D- $\gamma$ curve
1	1.5	1.5	Sand	10	18.0	51.6	167.6	Sand (Seed & Idriss-Average, 1971)	
2	1.3	2.8		10	18.0	51.6	167.6		
3	1.7	4.5	Sand (saturated)	5	20.0	32.6	126.4	Sand (Seed & Idriss-Average, 1971)	
4	1.5	6.0		6	20.0	32.6	136.1		
5	1.5	7.5		9	20.0	37.8	160.5		
6	0.7	8.2		11	20.0	52.5	174.2		
7	0.8	9.0	Silty clay	12	19.0	58.8	174.2	Clay (Idriss, 1990)	
8	1.5	10.5		19	19.0	63.1	180.5		
9	1.2	11.7		22	19.0	91.7	217.6		
10	1.8	13.5	Sand	28	20.0	108.8	231.0	Sand (Seed & Idriss-Average, 1971)	
11	1.5	15.0		33	20.0	132.4	254.8		
12	1.7	16.7		43	20.0	151.3	272.4		
13	1.3	18.0	Gravelly sand	-	21.0	191.7	303.4	Sand (Seed & Idriss-Average, 1971)	
14	1.5	19.5		-	21.0	262.3	350.0		
15	1.5	21.0		-	21.0	342.6	400.0		
16	1.4	22.4		-	21.0	433.6	450.0		
17	1.6	24.0	Sandy gravel	-	21.0	535.3	500.0	Gravel (Seed et al., 1986)	
18	-	-	Bedrock	-	22.0	2,243.3	1,000.0	Rock	

파를 입력지진으로 하는 총 6개의 지진파(Fig. 2)에 대한 1차원 지진응답해석을 수행하였다. Fig. 2에서 최대가속도 크기 0.11g와 0.154g의 각각의 인공지진파의 지속시간은 지진기록을 회귀분석하여 얻어진, Kim et al.(2015)이 제시한 지진규모(본 연구에서 가속도 0.11g 수준은 지진규모 6.0~6.5로, 가속도 0.154g 수준은 6.5~7.0으로 가정)와 지속시간과의 관계를 보여주는 연구결과(Kim et al., 2015)를 적용하여 각각 20초, 25초로 정하였다.

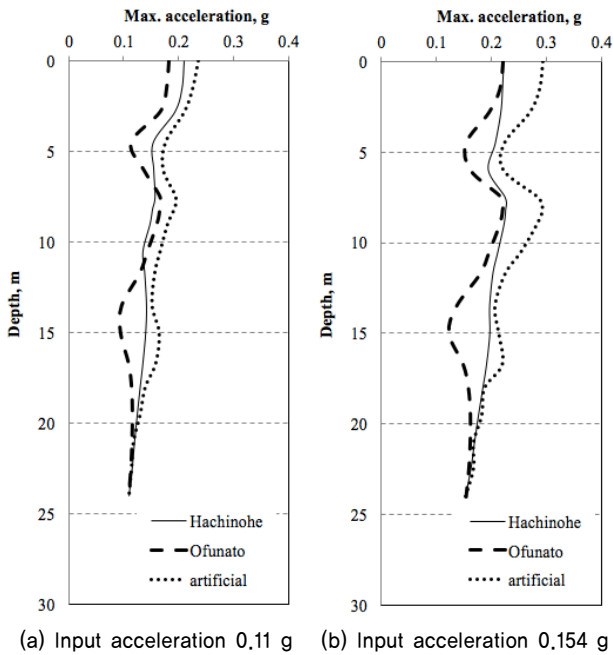


Fig. 3. Max. response acceleration profiles for different acceleration level

### 3.2 1차원 지진응답해석 및 LPI 산정 결과

Fig. 3은 각기 다른 입력 가속도 수준과 지진파에 대하여 수행된 SHAKE 해석결과로 얻어진 깊이별 응답최대가속도를 나타낸 것이다. Fig. 3으로부터 얻어진 특정 깊이에서의 최대가속도,  $a_{max}$ 는 Seed와 Idriss(Seed & Idriss, 1971)가 제안한 식에 기초한 국내 액상화 평가식(해양수산부, 1999)인 Eq. (2)에 대입하여 발생 최대전단응력비,  $(\tau_d)_{max}/\sigma'_v$ 를 산정할 수 있다.

$$\frac{(\tau_d)_{max}}{\sigma'_v} = 0.65 \times \frac{a_{max}}{g} \times \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \quad (2)$$

여기서,  $g$ 는 중력가속도로서  $9.81m/sec^2$ ,  $\sigma_v$ 과  $\sigma'_v$ 은 각각 액상화를 평가하고자 하는 지점에서의 총 상재압과 유효 상재압이다.

액상화 전단저항비는 표준관입시험치,  $N$ 을 상재압과 해머효율 60%로 보정한  $(N_f)_{60}$ 을 구하고, 이 값을 Youd et al.(2001)이 제안한 아래의 Eq. (3)(Youd et al., 2001)에 대입하고, 산정된 값에 지진규모 6.5에 해당되는 보정계수를 곱하여 산정한다.

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_f)_{60}} + \frac{(N_f)_{60}}{135} + \frac{50}{[10(N_f)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (3)$$

Fig. 4와 Fig. 5는 위의 절차로 산정한 지진가속도 크기별

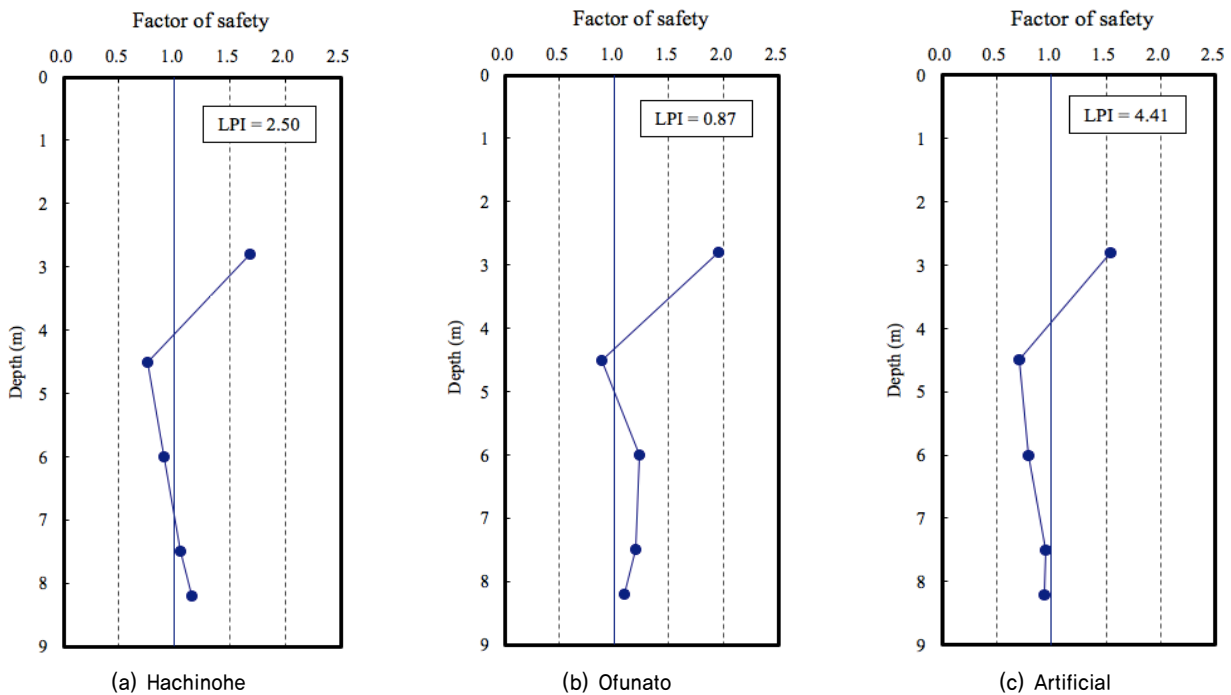


Fig. 4. Liquefaction safety factors and LPI calculated for each earthquake wave (PGA=0.11 g)

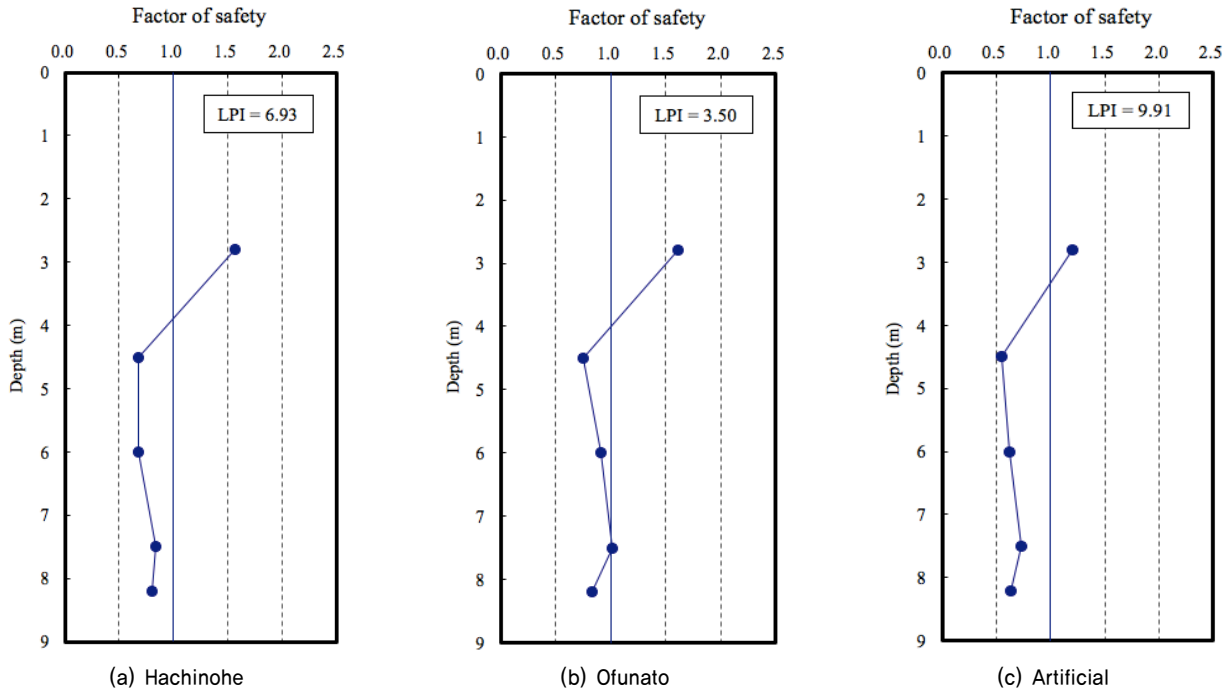


Fig. 5. Liquefaction safety factors and LPI calculated for each earthquake wave (PGA=0.154 g)

(0.11g, 0.154g)로 액상화 안전율을 2.1절에서 제시한 절차로 산정한 LPI와 함께 각각 나타낸 것이다. Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 바와 같이 입력 지진가속도의 크기와 종류에 상관없이 액상화 안전율의 깊이별 분포는 유사하였으나, LPI 산정값은 두 가속도 수준 모두 입력지진파가 인공지진파 (artificial wave), Hachinohe 파, Ofunato 파인 경우의 순서로 더 크게 나타났다.

## 4. 2차원 동적 유효응력해석

### 4.1 해석 개요

본 장에서는 Fig. 1에 제시된 성서제 제방단면에 대한 2차원 동적 유효응력해석을 수행하여 얻어진 결과들을 3장에서 구한 LPI와 비교하여 그 연관성을 검토하였다. 그리고 2.2절에 기술했던 바와 같이 하천제방의 내진취약 등급은 지진으로 인해 유발될 수 있는 제방 정상부의 응답변위(수직변위, 수평변위)와 연관될 수 있기 때문에 2차원 동적 유효응력해석을 수행하여 얻어진 제방 정상부에서의 변위를 Table 2에서 제시하고 있는 내진취약 등급을 결정짓는 경계 변위값들(수직변위의 경우, 0.03m, 0.15m, 0.5m, 수평변위의 경우, 0.03m, 0.3m, 0.9m)과 비교하여, 내진취약 등급과의 연관성도 함께 검토하였다.

본 연구에서 2차원 동적 유효응력해석은 댐 및 제방의 동적해석에 국내외에서 가장 널리 사용되고 있는 지반해석

프로그램인 FLAC2D(Version 7.0)(Itasca Consulting Group, 2011)를 사용하였다. 해석경계면에서의 경계조건(boundary condition)은 해석영역의 측면경계가 흡수경계를 모사할 수 있는 자유장 해석절점들과 점성댐퍼(viscous dashpot)로 연결된 자유장경계조건(free-field boundary condition)을 적용하였다(Itasca Consulting Group, 2011). 해석을 위한 입력지진파는 LPI 산정해석 시에 적용된 지진파와 동일한 Fig. 2에 나타난 6가지 지진파를 사용하였다.

Fig. 6은 동적응답해석에 사용된 해석요소망과 물성구분도이다. 지반해석 모델은 Fig. 6에서 액상화 가능성이 있는 제방 제체를 이루는 모래층(Fig. 6에서 silty clay 층 상부 모래층) 중 하천수위 하부의 모래층에 대해서만 Finn-Byrne model(Byrne, 1991; Itasca Consulting Group, 2011)(이하 F-B 모델)을 적용하였고, 나머지 층들은 모두 Mohr-Coulomb 모델(이하 M-C 모델)을 적용하였다.

Finn-Byrne model은 해석 요소(element) 내 지진하중으로 유발되는 전단변형률을 체적감소 증분(increment)과 연관시키고, 이러한 체적감소 증분을 요소 내 과잉간극수압 증분으로 연관시키는 모래층에 대해 제안된 유효응력해석 모델로 FLAC2D(Ver. 7.0)에서 제공하는 모델이다. F-B model은 M-C 모델과 연계하여 표준관입시험치, N을 상재압과 해머효율 60%로 보정한  $(N_f)_{60}$ 만이 추가 입력값으로 요구되는 단순하지만 실용적이고 실효성 있는 모델이다.

F-B 모델과 M-C 모델의 입력값으로 필요한 대상층의 강도정수(내부마찰각과 점착력)를 포함한 정적해석에 공통으



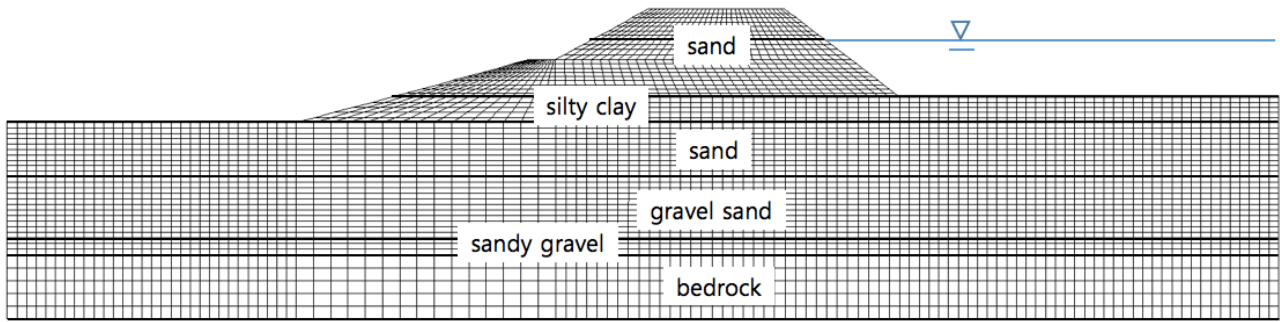


Fig. 6. Soil layers and mesh for dynamic numerical analysis

로 사용되는 물성값은, 지진을 제외한 제방취약도 평가 시 적용되었던 표준관입시험 및 실내시험 결과 등으로 산정된 값(건설교통부, 2003)이 적용되었다.

동적해석에 필요한 전단탄성계수는 기반암(bedrock)의 경우에는 SHAKE 해석에 사용된 Table 3에 제시된 값과 동일한 값을 적용되었다. 기반암을 제외한 지층의 경우에는, Table 3에서 제시하는 저변형률 하의 전단탄성계수인 최대전단탄성계수,  $G_{max}$ 를 그대로 적용할 수 없다. 3장의 SHAKE 해석결과로부터 각 지층에 지진으로 인해 유발된 전단변형률이 산정될 수 있는데, 동적해석에서는 SHAKE 해석으로 산정된 각 지층의 전단변형률을 전단변형률에 따른 전단탄성계수를 정의한 전단탄성계수의 감소곡선(Table 3의 맨 오른쪽 열)에 대응시켜 얻은 전단탄성계수(1차원 지진응답해석에서는 이를 유효전단탄성계수라고도 칭함)를 각 지층에서의 전단탄성계수로 적용하여, 지진 시 전단변형률 증가에 따른 전단탄성계수의 강도감소 효과를 고려하였다. 본 해석에서 감쇠는 Rayleigh Damping(Chopra, 1995; Itasca Consulting Group, 2011)을 적용하였다. Rayleigh Damping에 적용되는 상수 중 감쇠비는 5%를 가정하여 일률적으로 적용하였다.

#### 4.2 동적 유효응력해석 결과

Fig. 7은 동적 유효응력해석 결과로 얻어진 지진하중 작용 시 제방 모래층 내에서 발생한 액상화 발생 영역을 입력 가속도 0.154g 작용 시, 지진파별 특정시간(Hachinoe 16초, Ofunato 16초, 인공지진 25초)에 산정된 결과를 예로써 나타낸 것이다. Fig. 7의 등고선 중 액상화 발생영역으로 표시된 부분은, 해석결과 간극수압비(=과잉간극수압/평균유효구속응력)가 0.9 이상인 영역을 액상화된 영역으로 가정하여 나타낸 것이다. 액상화 발생 영역은 동적해석을 수행하는 동안 시간에 따라 변화하며, 이러한 변화는 Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 수직뿐만 아니라 수평적으로도 발생하는 2차원적인 변화를 보인다. 단면 내에서 시간에 따른 차이는 있지만 액상화가 집중되는 범위는 뚜렷이 나타난다고 할지

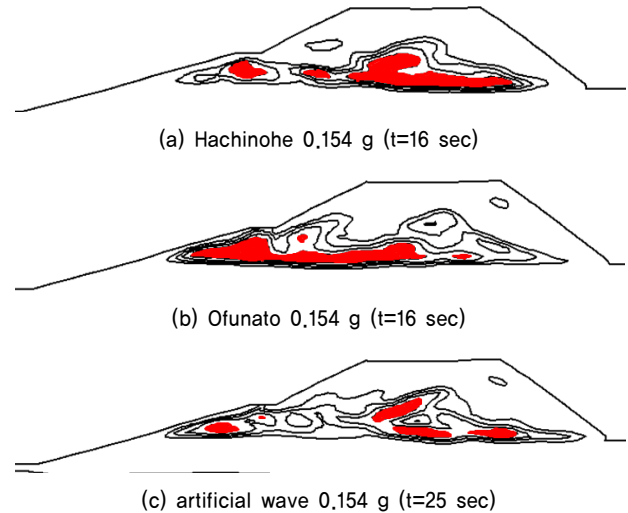


Fig. 7. Liquefied regions computed by dynamic coupled analyses at a specific analysis time

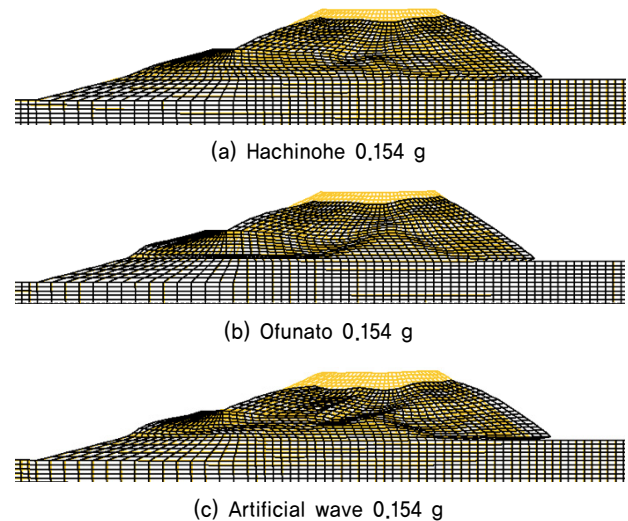


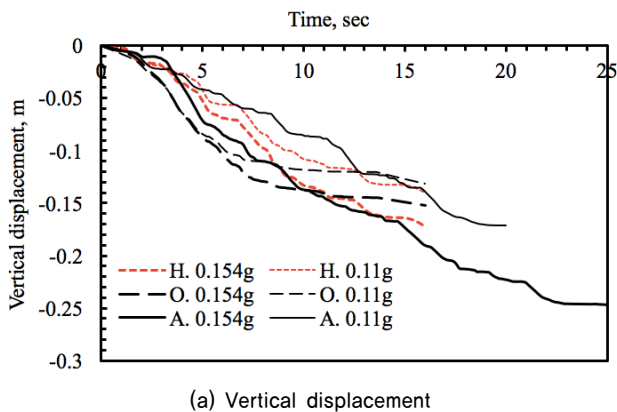
Fig. 8. Permanent deformation shapes computed by dynamic analyses using the various earthquakes

라도, Fig. 5에서의 결과와 같이 깊이에 따른 액상화 발생 범위와 직접적으로 연관시키는 것은 어렵다.

Fig. 8은 0.154g를 입력 가속도로 적용하여 수행한 동적 해석으로 얻어진 지진하중 작용 후 제방 단면의 영구변형을

지진파별로 나타낸 것이다. Fig. 8에서 보이는 변형 양상은 그 양상을 뚜렷이 보기 위하여 실제 변형보다 5배 정도 비약하여 나타낸 것이다. Fig. 8에서 제방 정상부 변위가 상류부, 하류부, 중앙부에 차이가 나 보이기는 하나, 이것은 비약에 의한 것이며 그 차는 크지 않고, 실제 월류 방지라는 차원에서 보면 제방에서는 상류부에서의 변형이 더 중요하다 할 수 있다. Fig. 7의 결과와는 다르게 해석 단면 내 액상화의 영역 변화 등 모든 변화를 겪은 이후에 최종적으로 나타나는 Fig. 8과 같은 제방의 지진파별 영구변형의 크기가 Fig. 5에서 제시된 LPI의 지진파별 크기 순위와 유사하게 나타나는 등 어느 정도의 연관 가능성을 보였다.

이러한 연관 가능성은 Fig. 9에 더 뚜렷이 나타나는데, Fig. 9는 동적 유효응력해석 결과로 얻어진 제방 정상부(상류부 정상)의 수직 및 수평변위를 나타낸 것이다. Fig. 9에서 볼 수 있는 바와 같이 지진파별 정상부의 수직 및 수평 영구변위 크기는 그 순서가 Fig. 5에 제시되는 LPI의 크기 순서와 유사하게 인공지진파, Hachinohe 파, Ofunato 파 작용 시 결과 순서로 나타났다.



## 5. 액상화 가능 지수를 이용한 하천제방의 지진취약도 평가

Fig. 10은 Fig. 5에서 제시된 LPI 값들에 대하여 해당 LPI가 산정된 가속도 수준과 입력지진파 조건에서 수행된 동적 해석 결과로 Fig. 9에 나타난 지진 시 정상부 영구변위(수직 변위와 수평변위)들을 나타낸 것이다. Fig. 10으로부터 LPI가 클수록 정상부의 영구변위도 커지는 선형 상관성을 확인할 수 있다. 이러한 상관성은 수직 영구변위의 경우가 수평 영구변위의 경우보다 더 뚜렷하였다.

Fig. 10에서 가로축 경계값들(0, 5, 15)은 Table 1에 제시된 LPI를 이용한 액상화 피해 정도를 구분하는 LPI 구간 기준값이며, 세로축 경계값들((a)의 경우 0.03m, 0.15m, 0.5m, (b)의 경우 0.03m, 0.3m, 0.9m)은 Table 2에 제시된 정상부 변위를 이용한 제방의 취약도를 구분하는 변위((a)의 경우 수직방향 변위, (b)의 경우 수평방향 변위) 구간 기준값이다. Fig. 10에서 빗금으로 표시한 부분은 Iwasaki et al.(1978)이 LPI로 정의하는 피해 정도의 등급(Table 1)을 정의하는 범

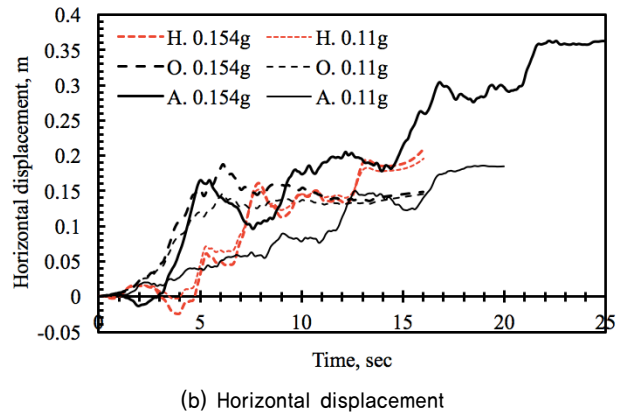


Fig. 9. Displacements time histories of the levee crest computed by dynamic analyses

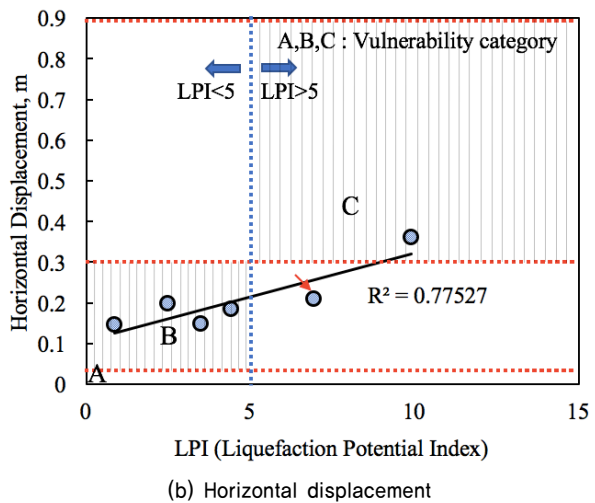
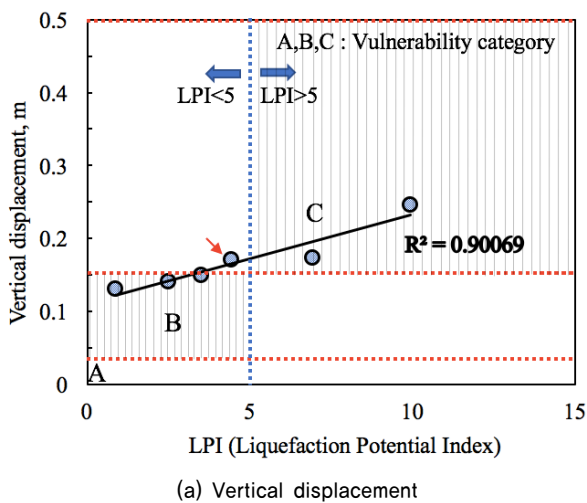


Fig. 10. Correlation between LPI and earthquake induced crest displacement and correlation between liquefaction severity and seismic vulnerability of levees



Table 4. Seismic vulnerability of river levees evaluated by liquefaction potential index (LPI)

Liquefaction potential index (LPI)	Seismic vulnerability of river levees
0	No significant damage to the levee body, post-seismic flood protection ability is not compromised
$LPI \leq 5$	Some repairable damage to the levee body, post-seismic flood protection is not compromised
$5 < LPI \leq 15$	Significant damage to the levee body, post-seismic flood protection ability is possibly compromised
$LPI > 15$	Significant damage to the levee body, post-seismic flood protection ability is compromised

위와 Atukorala et al.(2014)이 지진 시 제방 정상부의 영구 변위로 정의하는 취약도 등급(Table 2)의 범위 중, 각 범위에 대한 피해 정도에 대한 정의와 취약도에 대한 정의가 유사한 구간을 대응시켜 함께 표시한 것이다. Fig. 10에 표시된 점들과 같이 LPI에 대응하는 제방 정상부의 영구변위를 나타내는 점들이 이러한 빗금친 영역에만 위치하거나, 상관 추세선이 이 빗금친 블록 내만을 지나도록 표시가 된다면, LPI를 이용한 피해 정도와 지진 시 제방 정상부의 영구변위를 이용한 취약등급은 직접 연관된다는 것을 의미한다. Fig. 10(a)에서 화살표로 표시한 특이점을 제외하는 경우, 위의 조건을 따름을 확인할 수 있고, Fig. 10(b)에서도 화살표로 표시한 특이점을 제외하는 경우, 마찬가지로 이러한 조건이 만족되는 것으로 판단될 수 있다. 그러므로 LPI와 취약등급을 연관시킬 수 있는 상관성은 충분한 가능성이 있으며, 정상부의 연직변위를 기준으로 하는 경우의 가능성은 더 크다고 할 수 있다. 이러한 상관성은 향후 더 많은 제방 단면에 대한 추가 해석을 통해 보완될 필요가 있다.

4장에 제시된 동적 유효응력해석을 수행하여 얻어진 하천제방의 영구변위를 Table 2와 비교하여 제방의 지진취약도를 평가하는 것이 가장 직접적이고 정확한 방법이다. 그러나 서두에 기술한 바와 같이 하천제방은 그 길이가 매우 길어 취약 단면의 선정도 어렵지만, 선정된 많은 단면에 대해 동적 유효응력해석을 수행하여 제방의 취약도를 평가한다는 것은 거의 불가능하다고 할 수 있다. 이에 비해 LPI를 산정하는 것은 동적 유효응력해석을 수행하는 것과는 비교가 되지 않을 만큼 간단한 작업이다. 그러므로 본 연구에서는 향후 추가적인 해석을 통해 보완이 필요하나, LPI와 취약도와의 연관관계의 가능성을 확인한 바 Table 4와 같은 액상화 가능 지수, 즉 LPI를 이용한 하천제방의 지진취약도 평가표를 제시하였다.

## 6. 결 론

지진취약도 평가 대상으로서 하천제방은 그 길이가 매우 길어 취약 단면의 선정도 어렵지만, 선정된 많은 단면에 대해 복잡한 동적 유효응력해석 등을 수행하여 제방의 지진취

약도를 평가한다는 것은 거의 불가능하다. 이에 본 연구에서는 간편하게 하천제방의 지진취약도를 평가하기 위한 방법으로 액상화 가능 지수를 활용하는 방안을 제시하였는데, 이 방안의 적용성 검토를 위해 운영 중인 하천제방에 대해 1차원 지진응답해석과 2차원 동적 유효응력해석을 수행하고 그 결과 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 2차원 동적 유효응력해석 결과 액상화 발생 영역은 지진 시 시간에 따라 변화하며, 수직뿐만 아니라 수평적으로도 분포가 일정하지 않고 변화하므로, 액상화 안전율의 깊이별 분포와는 직접적인 연관성이 없으며, 지진 동안에 제방 내 복잡한 거동 변화가 종료된 이후 외부로 표출되는 제방의 영구변형 크기는 LPI의 크기와는 연관성을 보였다.
- (2) LPI가 크면 동적 유효응력해석으로 산정되는 지진 후 제방 정상부의 영구변위도 커지는 선형 상관관계를 확인하였다. 이러한 상관성은 수평 영구변위에 비해 상대적으로 수직 영구변위에서 더 뚜렷하였다.
- (3) LPI와 지진 시 제방 정상부의 영구변위와의 상관관계를 이용하여, Iwasaki et al.(1978)에 의해 LPI로 정의되는 액상화 피해 정도와 Atukorala et al.(2014)에 의해 지진 시 제방 정상부의 영구변위로 정의되는 취약도를 연관시켜 결과적으로, LPI와 지진 시 제방 취약도와의 관계를 도출하였다. 즉, LPI를 이용하여 지진 시 하천제방의 취약도를 간편하게 평가할 수 있는 방안을 도출·제시하였다.

본 연구결과는 성서제 제방 하나의 단면만을 대상으로 입력지진가속도 수준 2가지, 각 가속도 수준에 해당하는 3가지 다른 지진파, 총 6가지 입력지진파를 적용한 해석결과를 분석하여 도출된 결과로 향후 보다 다양한 제방 단면에 대한 추가적인 해석을 통해 연구결과를 수정·보완할 필요가 있다고 여겨진다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연

구사업의 연구비지원(16SCIP-B065985-04)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## References

1. 건설교통부 (2003), 금호강 금호지구외 1개지구 하천개수공사, 부산지방국토관리청, pp. 44~111.
2. 대통령령 제27792호 (2017), 지진·화산재해대책법 시행령 제 10조 제1항.
3. 한국건설기술연구원 (2015), 다중시나리오 기반 재난대응 의사결정지원 체계(DRiMSS) 기술 개발 2차년도 별책보고서, pp. 244~263.
4. 해양수산부 (1999), 항만 및 어항시설의 내진설계표준서, 해양수산부, pp. 92.
5. Atukorala, U., Hawson, H., Mylleville, B. and Williams, R. (2014), Seismic design guidelines for dikes, 2<sup>nd</sup> Edition, Ministry of Forests, Lands and Natural Resources Operations Flood Safety Section, Golder Associates, June, pp. 11~12.
6. Byrne, P. M. (1991), A cyclic shear-volume coupling and pore-pressure model for sand, Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, Paper No. 1.24, pp. 47~55.
7. Chopra, A. K. (1995), Dynamics of structures : Theory and Application of Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Inc., pp. 416~421.
8. Chung, J. W. and Rogers, J. D. (2011), Simplified method for spatial evaluation of liquefaction potential in the St. Louis area, J. of Geotech. Geoenviron. Eng., Vol. 137, No. 5, pp. 505~515.
9. Holzer, T. L. (2008), Probabilistic liquefaction hazard mapping, Proc. of 4<sup>th</sup> Conference on Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE, Sacramento, CA., pp. 1~32.
10. Idriss, I. M. (1990), Response of soft soil sites during earthquakes, Proc. H. Bolton Seed Memorial Symposium, J.M. Duncan (editor), Vol. 2, pp. 273~290.
11. Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K. and Yasuda, S. (1978), A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan, Proc. of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Microzonation, San Francisco, pp. 885~896.
12. Itasca Consulting Group (2011), FLAC-Fast Lagrangian analysis of continua, Version 7.0, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minnesota. USA.
13. Kim, H. and Chung, C. (2016), Integrated system for sit-specific earthquake hazard assessment with geotechnical spatial grid information based on Gis, Natural Hazard, Vol. 82, pp. 981~1007.
14. Kim, J. H., Lee, J. H., Lee, Y. J. and Kim, J. K. (2015), Piecewise linear envelope function for synthetic ground acceleration due to intra-plate earthquakes, Proceedings of EESK Conference 2015, Earthquake Engineering Society of Korean, pp. 187~188 (in Korean).
15. Lee, D. H., Ku, C. S. and Yuan, H. (2003), A study of the liquefaction risk potential at Yuanlin, Taiwan, Eng. Geol., Vol. 71, pp. 97~117.
16. Mauer, B. W., Green, R. A., Cubrinovski, M. and Bradley, B. A. (2014), Evaluation of the liquefaction potential index for assessing liquefaction hazard in Christchurch, New Zealand, J. of Geotech. Geoenviron. Eng., Vol. 140, No. 7, pp. 1~11.
17. Millet, R., Chowdhury, K., Julian, E., Green, R., Seed, R., Balakrishnan, A. and Perlea, V. (2014), Seismic vulnerability evaluation of levees in California's Central Valley, Annual Conference Proceedings-Association of State Dam Safety Officials, San Diego, CA, pp. 482~502.
18. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971), Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol. 97, pp. 1249~1273.
19. Seed, H., Wong, R., Idriss, I. and Tokimatsu, K. (1986), Moduli and damping factors for dynamic analysis of cohesionless soils, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 11, pp. 1016~1103.
20. Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. (1972), SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No. EERC 71-12, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California Berkeley, California.
21. Seo, M. W., Sun, C. G. and Oh, M. H. (2009), LPI-based assessment of liquefaction potential on the West Coastal Region of Korea, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, EESK, Vol. 13, No. 4, pp. 1~13 (in Korean).
22. Swaisgood, J. R. (2003), Embankment dam deformations caused by earthquakes, Proc. 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering, Seattle, Washington, pp. 1~8.
23. Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder Jr. L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson III, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B. and Stokoe II, K. H. (2001), Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1988 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 1271, pp. 816~833.