

지진 시나리오 기반 하천 제방의 거동 변화 분석

김진만¹, 진윤화^{2*}, 한희수²

¹한국건설기술연구원 인프라안전연구본부, ²국립금오공과대학교 토목공학과

Analysis of behavior a River Levee based on the Earthquake Scenario

Jin-Man Kim¹, Yoon-Hwa Jin^{2*}, Heui-Soo Han²

¹Department of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

요약 하천 제방의 경우 내진설계 제외 시설로 지정되어 있다. 하지만 지진으로 인해 하천 제방이 붕괴될 경우 경제적 손실과 인명 피해는 필연적으로 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 지진 시 하천 제방의 거동 변화 분석을 수치해석적으로 검토하였다. 기존 연구들과 달리 실지진파를 이용한 동해석을 수행하였으며, 지진 발생 전/후 하천 제방의 거동을 정량적으로 비교하고 분석하였다. 연구결과, 제방의 활동 안전율은 지진 발생전 대비 약 28.5% 감소되었지만, 최소 기준 안전율은 만족하는 것으로 나타났다. 하지만 지진으로 인해 발생한 과잉간극수압으로 연직유효응력은 81.8% 감소하였고, 기초지반 대부분이 액상화 현상이 발생하는 것으로 나타났다. 지진으로 인한 응력-변위 거동 검토 결과, 제내지 축성토층에서 큰 침하가 발생하는 것으로 나타났으며 기초지반 대부분이 항복하는 것으로 나타나 검토 대상 하천 제방은 지진에 상당히 취약한 것으로 판단된다. 본 연구 결과를 토대로 하천 제방에 대한 내진설계 기준 재정립의 필요성이 확보되었으며, 개략적인 피해영역과 지진취약구간을 예측할 수 있는 기초자료로서의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

Abstract This study examined the behavior change of river levees during an earthquake by numerical analysis. Unlike conventional research using artificial earthquake waves, earthquake analysis was performed using real earthquake waves. The behavior of a river levee before and after an earthquake was compared and analyzed quantitatively. Studies show that the river levee has a safety factor of approximately 28.5% due to an earthquake. On the other hand, the minimum standard safety factor is satisfied. Vertical effective stress has decreased by 81.8% due to excess pore-water pressure generated by the earthquake. In addition, liquefaction occurs in most of the foundation soil. An examination of the stress-displacement behavior due to the earthquake revealed a large amount of settlement in the backfill layer. Most of the foundation soil yielded. Therefore, the target river levee is quite vulnerable to earthquakes. Through the results of this study, the necessity of refreshing the seismic design standards for river levees is required. This study can be used as basic data for estimating the approximate damage level and vulnerable areas.

Keywords : River levee, Seismic analysis, Real earthquake records, Predicted by seismic damage, Liquefaction

본 논문은 2019년도 과학기술정보통신부, 경상북도와 경북연구개발지원단의 과학기술기반 지역수요맞춤형 R&D지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(1711079685)

*Corresponding Author : Yoon-Hwa Jin(KIT)

email: yhjin0503@naver.com

Received February 7, 2020

Revised February 26, 2020

Accepted March 6, 2020

Published March 31, 2020

1. 서론

그동안 대한민국은 유라시안 판 내부에 위치하기 때문에 지진 안전국이라는 인식을 가지고 있었다. 그러나 최근 국내 동해안 지역에서 규모 5.0 이상의 지진이 발생하였다. 그로 인해 토목 및 건축 구조물에 대한 내진 설계가 재정립되었고, 지진에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 하지만 하천 제방의 경우 국토교통부 내진설계기준의 대상시설에서 내진설계 제외 시설로 지정되었다. 하지만 하천 제방과 같은 수변구조물이 붕괴될 경우 제내지의 경제적 손실과 인명 피해가 필연적으로 발생한다. 대표적인 사례로는 Lower San Fernando 제방의 붕괴가 있다. 1917년 발생한 규모 6.5의 San Fernando 지진으로 인해 붕괴가 발생하였다. Lower san Fernando 댐은 중심에 점토 코어가 설치된 필댐 형식으로 축조되었다. 설계 시 검토된 지진 시 활동 안전율은 1.3으로 안정한 것으로 나타났으나, 점토코어에서 액상화 현상이 발생하여 완전히 댐이 붕괴하였다. 이로 인해 8 만명에 가까운 인구가 대피하는 등의 인적·물적피해가 발생하였다[1-3]. 지진으로 인해 하천 제방이 붕괴될 경우 발생하는 심각한 문제들로 인해 지진 시 하천 제방에 대한 연구는 다수 수행되었다[4-5]. 하지만, 지진으로 인해 발생하는 제체 또는 기초 지반의 액상화 현상(Liquefaction)에 대한 연구가 대부분이며, 지진으로 인한 하천 제방의 거동과 취약 구간 분석에 대한 정량적인 사례는 극히 드물다.

또한, KSCE and KBRC(2008)와 MOF(2014)에서는 액상화 평가 시 장주기파인 Hachinohe 파와 단주기파인 Ofunato파를 사용하도록 제시하고 있으며[6-7], 지진 시 하천제방에 대한 국내연구 또한 Hachinohe파와 Ofunato파를 사용하거나 두 지진파를 조합하여 인공지진파를 적용하였다. 그러나 Song(2009)은 액상화 평가 방법에 인공지진파를 사용하는 것에 대해 반론을 제기하였으며, 인공지진파를 통한 내진해석 결과에 대한 신뢰성

검증이 필요함을 주장하였다[8].

따라서 본 연구에서는 국내 하천 제방을 대상으로 실지진파를 이용하여 지진으로 인한 거동변화를 해석적으로 검토하였다. 지진 전/후 하천 제방의 응력상태를 비교하고, 활동 안전율 변화를 검토하였다. 또한 지진 시 발생하는 제방의 변위와 액상화 영역을 검토하였다. 연구결과를 토대로 지진 시 하천 제방의 취약 구간을 예측하고 긴급복구방안에 대한 기초자료로 활용될 것으로 판단된다.

2. 수치해석 조건

2.1 해석방법 및 재료

지진 시 하천 제방의 거동에 대한 해석적 분석은 매우 복잡한 단계로 수행되며, 각 단계별로 분석 및 검토를 명확히 하여야 한다.

본 연구에서는 2차원 지반범용 해석 프로그램인 GeoStudio 2012을 이용하여 다음과 같은 단계로 수치해석을 수행하였다. 먼저, 하천 제방의 거동은 제체 내 침투 흐름에 지배적이므로 불포화 해석을 통해 포관포화대 분포와 간극수압의 변화 등과 같은 응력 상태를 파악한다. 그리고 침투해석과 안정해석을 연계하여 지진 전의 제외지와 제내지의 활동 안전율을 산정하였다. 실지진파를 이용해 지진해석을 수행하여 액상화영역과 같은 취약 구간을 분석하였고, 지진 후의 활동 안전율과 제방의 변형률을 비교·검토하였다.

앞서 언급한 바와 같이 하천 제방의 거동은 제체 내 침투흐름에 지배적이다. 수위 상승 시 침윤면에 의해 포화대가 발달할 경우 제체 비탈면의 활동파괴를 유도하며, 기초지반과 제체에서 포화대가 발달하면 누수로 인한 파이프 현상이 발생할 수 있다. 따라서 하천 제방의 불포화 특성을 고려한 침투해석을 수행하였으며, 제외지 수위는 계획홍수위를 적용한 정상류 해석을 수행하였다.

Table 1. Unsaturated soil properties using seepage analysis [13]

No.	Textural Class	USCS	θ_r	θ_s	α	n	m	k_s (cm/sec)
1	Sand	SM	0.045	0.43	0.145	2.68	0.627	0.0082500
2	Loamy Sand		0.057	0.41	0.124	2.28	0.561	0.0040528
3	Sandy Loam		0.065	0.41	0.075	1.89	0.471	0.0012278
4	Loam	ML-CL	0.078	0.43	0.036	1.56	0.359	0.0002889
5	Silt		0.034	0.46	0.016	1.37	0.270	0.0000694
6	Silty Loam		0.067	0.45	0.02	1.41	0.291	0.0001250
7	Clay Loam	CL	0.095	0.41	0.019	1.31	0.237	0.0000722
8	Silty Clay Loam		0.089	0.43	0.01	1.23	0.187	0.0000194

또한 침투해석의 경우 요소망의 분할크기가 해석결과에 상당한 영향을 미친다. KWRA(2000)에서는 제체에 대한 분할요소의 최대 크기를 제방 높이의 1/10 이하로 적용하도록 제시하고 있으며, Kwon(2007)은 분할요소의 크기에 따라 침투해석 결과가 다르게 산정되며, 분할요소의 크기가 제방높이의 1/10에서 수렴됨을 검증하였다[9-10]. 따라서 본 연구에서는 제방 높이의 1/20인 0.5m로 요소망을 생성하여 침투해석을 수행하였다.

침투해석에 적용한 지반의 불포화특성은 불포화계수 예측방법 중에서 가장 널리 사용되고 있는 Van Genuchten 모델을 적용하였다[11]. Van Genuchten(1980)이 제시한 함수특성곡선(SWCC, Soil Water Characteristic Curve)과 불포화 투수계수 곡선을 적용하였다[12].

Van Genuchten(1980)이 제시한 함수특성곡선은 Eq. (1)과 같다.

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + \{\alpha(u_a - u_w)\}^n} \right]^m \quad (1)$$

Where, θ_s denotes saturated volumetric water content θ_r denotes residual volumetric water content α denotes air-entry value reciprocal n denotes coefficient related SWCC slope m denotes coefficient related to the slope at high levels of capillary absorption usually applied $m = 1 - 1/n$.

불포화 투수계수곡선은 Eq. (2)와 같다.

$$k_r = \frac{[1 - ((\alpha h)^{n-1})((1 + (\alpha h)^n)^{-m})]^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{m/2}} \quad (2)$$

Where, h denotes negative pore water pressure (matric suction) head α , n , m denotes coefficient related unsaturated hydraulic conductivity curve.

함수특성곡선의 각 계수는 실내실험을 통해 산정하여야 하나 현실적 제한조건으로 인해 Carsel and Parrish(1988)에 의해 제시된 데이터베이스를 인용하여 적용하였다(Table 1 참조)[13]. 지반의 포화투수계수와 함수특성곡선 계수는 KICT(2004)와 Kim and Moon(2017)의 자료를 이용하여 적용하였다[14-15].

하천 제방의 안정해석은 불포화침투해석을 통해 산정

한 모관흡수력과 간극수압 분포 등을 통해 지반 내 응력 상태를 파악한 후 이를 연계하여 안정해석을 수행하였다. 안정해석은 한계평형법을 이용하여 활동 안전율을 산정하였고, 지반 강도정수는 지반조사 자료를 이용해 Table 2와 같이 산정하였다.

Table 2. Soil properties using stability analysis

Division	USCS	γ_t (kN/m^3)	c (kPa)	ϕ ($^\circ$)
Backfill	SM	19.0	10.0	25.0
Landfill	CL	18.7	30.0	20.0
Alluvium	GC	19.0	0.0	35.0
	CL	18.7	10.0	20.0

지진으로 인해 발생하는 과잉간극수압과 액상화 영역 등을 검토하기 위해 등가선형해석을 통한 지진해석을 수행하였다.

지진해석을 위한 지진파는 인공지진파가 아닌 1995년 일본에서 발생한 고베 지진파를 적용하였다. 고베 지진파는 FEMA (2009)에서 제시한 대도심 직하에서 발생한 22개 지진 중 하나이며, 일본기상청 기준 규모 7.2이며, 모멘트 규모 6.9에 해당하는 지진으로 지속시간은 40.95초이며, 최대가속도는 8.93초에서 0.49g로 측정되었다(Fig. 1 참조)[16-17].

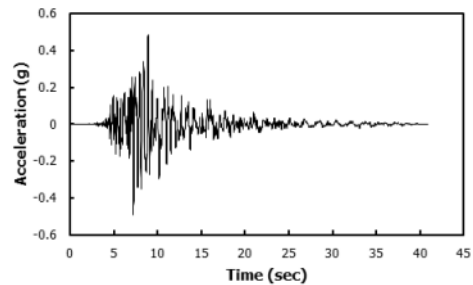


Fig. 1. Kobe Earthquake records

지진해석 시 지반재료는 변형률이 증가함에 따라 변화하는 전단탄성계수와 감쇠비가 매우 중요한 변수가 된다 [18]. Fig. 2는 지반의 동적특성을 나타낸 것이다. 전단강성감쇠곡선과 댐핑곡선은 공진주시험 자료와 기존문헌 등을 토대로 적용하였다[19-23].

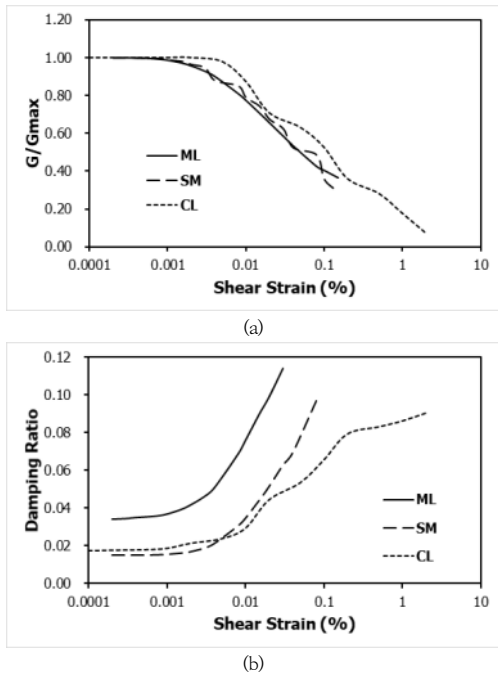


Fig. 2. Dynamic characteristics of soil
(a) G/Gmax curve (b) Damping Ratio curve

2.2 연구 대상 제방

연구대상 하천 제방은 ○○강에 위치하고 있으며, 기하형상 및 지층분포는 Fig. 3과 같다. 기하형상은 측량을 통해 생성하였으며, 지층분포는 지반조사 결과를 통해 결정되었다. 대상 제방의 계획홍수위는 21.3m이며, 여유고는 1.2m이다.

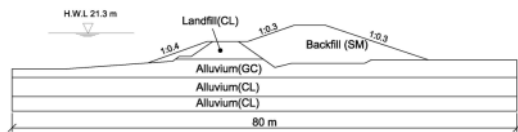


Fig. 3. Geometry of research target levee

3. 수치해석 결과

3.1 지진 전 제방의 거동

연구 대상 제방의 계획홍수위에 따른 불포화침투해석을 수행하였다. Fig. 4는 침투해석 결과 간극수압과 동수경사 분포를 보여준다. 침투흐름은 매립층(CL)에서 상대적으로 투수계수가 큰 층적층(GC)로 발달하였으며, 제방

뒷비탈 기슭으로 집중되었다. 침투해석 결과 제방 뒷비탈 기슭의 동수경사는 0.10으로 산정되었으며, 이는 설계단계에서 누수안정성을 검토하여 축조된 하천 제방이기 때문이다.

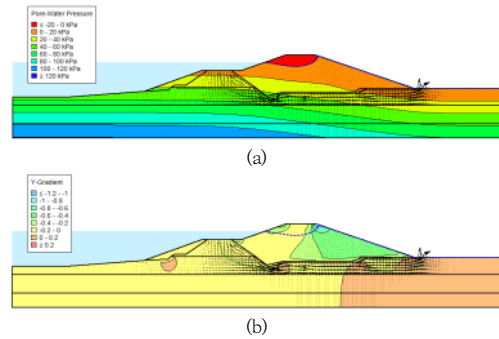


Fig. 4. Result of Seepage analysis
(a) Pore-water pressure (b) Y-gradient

침투해석과 연계하여 지진 전 활동 안전율을 산정하였다. 안정해석 결과, 건기 시 최소 기준 안전율 1.50을 만족하는 것으로 나타났다. 이는 침투해석과 같이 설계단계에서 활동 안정성을 검토하였기 때문이며, 제내지 안전율은 1.871, 제외지 안전율은 4.350으로 산정되었다(Fig. 5 참조).

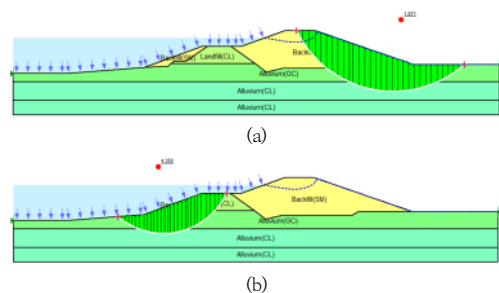


Fig. 5. Pre-earthquake stability of levee
(a) Landside (b) Waterside

Fig. 6은 지진 발생 전 하천 제방의 응력 상태를 보여준다. 지중응력으로 인해 기초저면의 유효연직응력이 가장 크게 산정되었으며, 초기 상태의 q/p' 비율은 대부분 1.0을 초과하지 않는 것으로 나타났다.

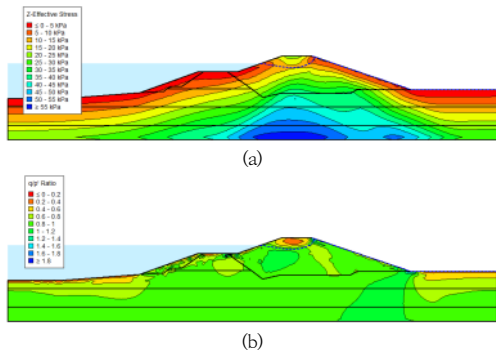


Fig. 6. The stress state of the levee before the earthquake
(a) Vertical effective stress (b) q/p' ratio

3.2 지진 후 제방의 거동

지진과 같은 동하중이 작용할 경우, 지반은 변형률에 따라 특성이 변화하게 된다. 사질토의 경우 체적변화가 유발되고 그로 인해 침하가 발생한다. 포화된 느슨한 모래의 경우 체적변화로 인해 입자가 재배열되며 과잉간극수압이 발생해 q/p' 비율이 높아지게 되어 액상화를 일으키기도 한다[24]. 지진으로 인한 하천 제방의 거동 변화를 분석하기 위해 고베 지진파를 적용하였으며, 주된 분석 항목으로는 과잉간극수압 분포와, q/p' 비율 그리고 활동 안전율과 제방의 변위, 항복영역이다.

Fig. 7은 지진하중 작용 후 하천 제방의 상태를 보여 준다. 지진하중으로 인해 약 20 ~ 80 kPa의 과잉간극수압이 발생하였으며, 발생한 과잉간극수압만큼 유효연직 응력이 감소하며, 따라서 지반의 강도 또한 저하된다 (Fig. 7 (a)). Fig. 7 (b)는 q/p' 비율을 나타낸 것이다. q/p' 비율이 1.8 이상인 경우 해당 영역은 액상화가 발생

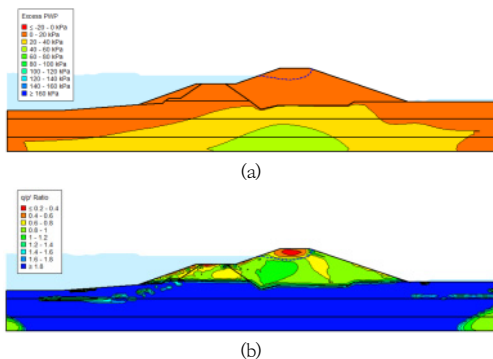


Fig. 7. The state of the levee after the earthquake
(a) Excess pore-water pressure (b) q/p' ratio

했다고 판단할 수 있다[25]. 기초지반 대부분에서 1.8 이상으로 산정되어 액상화가 발생하는 것으로 나타났다.

지진 발생 후 지진으로 인해 약 0.5~1.1 만큼 활동 안전율이 감소하였으며, 제내지는 1.340, 제외지는 3.106으로 나타났다(Fig. 8. 참조). 제내지와 제외지 모두 지진 시 최소 기준 안전율인 1.1을 만족하는 것으로 나타났다. 하지만 기초영역 대부분에서 발생한 액상화로 인해 대상 하천 제방의 안정성에 대한 검토가 반드시 필요하다 판단된다.

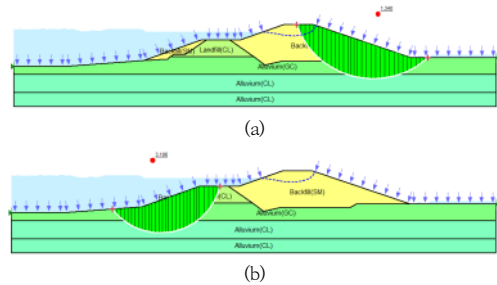


Fig. 8. Post-earthquake stability of levee
(a) Landside (b) Waterside

지진으로 인해 하천 제방의 응력-변위 거동은 Fig. 9와 같다. 기초지반의 액상화로 인해 제내지 측 성토층 (Backfill)에서 변위가 집중되는 것으로 나타났으며, 변위 컨투어는 제내지의 활동 파괴면과 유사하게 나타났다 (Fig. 9 (a)). 지진으로 발생한 액상화 현상으로 인해 지반의 강도가 감소되었고 그로 인해 기초지반 대부분이 항복하는 것으로 나타났다.

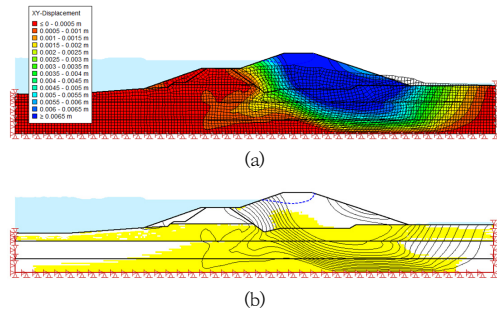


Fig. 9. Deformation of the levee after the earthquake
(a) Displacement (b) Yield area

4. 결론

본 연구에서는 국내 공용 증인 하천제방을 대상으로 고베 지진파를 적용하여 거동 변화를 해석적으로 검토하였다. 본 연구를 통해 도출한 결론은 다음과 같다.

- 1) 지진이 작용한 후 하천 제방의 활동 안전율은 지진 발생 전 대비 약 28.5% 감소되었으며, 최소 기준안전율은 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 기초지반의 액상화 현상 및 항복상태를 반영하지 못하기 때문에 이에 대한 추가적인 검토가 필요하다고 판단된다.
- 2) 지진으로 인해 발생한 과잉간극수압으로 인해 지진 발생 전 대비 유효연직응력이 약 81.8% 감소되었으며, q/p' 비율은 약 2배 이상 증가하였다. q/p' 비율에 따라 제방의 기초지반 대부분에서 액상화 현상이 발생하는 것으로 나타났다.
- 3) 지진하중과 기초지반에서 발생한 액상화 현상으로 인해 기초지반 상당 부분이 항복하는 것으로 나타났고, 제내지 성토층이 붕괴되는 양상을 보였다.
- 4) 활동 안전율은 최소 기준 안전율을 만족하는 것으로 나타났으나, 기초지반 대부분에서 발생한 액상화 현상 등을 고려할 경우, 지진 발생 시 대상 하천 제방은 Lower San Fernando 댐과 유사한 붕괴가 발생할 것으로 판단된다.
- 5) 국내 내진설계구조물에서 제외된 하천 제방이 지진으로 인해 붕괴될 경우 경제적손실과 인명손실이 필연적으로 발생하게 되므로 하천 제방에 대한 내진설계 기준 확립이 필요하다고 판단되며, 본 연구 결과를 통해 개략적인 피해영역 및 지진취약구간을 예측할 수 있는 기초자료로써 활용이 가능할 것으로 판단된다.

References

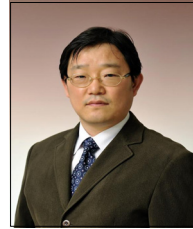
- [1] H. B. Seed, K. L. Lee, I. M. Idriss, F. I. Makadisi, "The Slides in the San Fernando Dams during the Earthquake of February 9, 1971", ASCE, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, GT7, pp.651-688, 1975.
- [2] K. L. Lee, H.B. Seed, I.M. Idriss, F.I. Makadisi, "Properties of Soil in the San Fernando Hydraulic Fill Dams", ASCE, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, GT8, pp.801-821. 1975.
- [3] H. B. Seed, I. M. Idriss, K. L. Lee, F. I. Makadisi, "Dynamic Analysis of the Slide in the Lower San Fernando Dam during the Earthquake of February 9, 1971", ASCE, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, GT9, pp.889-911, 1975.
- [4] I. S. Ha, I. J. Moon, J. W. Yun, J. T. Han, "Examination of Applicability of Liquefaction Potential Index to Seismic Vulnerability Evaluation of the Korean River Levees", *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol.18, No.4, pp.31-40. DOI: <https://doi.org/10.14481/jkges.2017.18.4.31>
- [5] J. M. Hwang, S. E. Cho, "Development of Multi-hazard Fragility Surface for Liquefaction of Levee Considering Earthquake Magnitude and Water Level", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.6, pp.25~36, 2018. DOI: <https://doi.org/10.7843/kgs.2018.34.6.25>
- [6] Korea Society of Civil Engineers (KSCE) and Korea Bridge Design & Engineering Research Center (KBRC), *Road Bridge Design Criteria and Commentary*, Korea, pp.961-967.
- [7] Ministry of Maritime Affairs and Fisheries(MOF), *Design standards for port and fishing port construction*. Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, Korea, pp.92.
- [8] B. W. Song, "The Comparison for Liquefaction Judgement used in Korea and Japan", *International Symposium on Urban Geotechnics*, Korean Geotechnical society, pp.1206-1213, 2009.
- [9] Korea Water Resources Association (KWRA), *River Design Standard*. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea, 2009.
- [10] K. K. Kwon, *An Improved Design Method of Levee Culvert Using 3D Seepage Analysis*, Ph D. dissertation, Univ. of Kyunghee, Korea, pp.5-228, 2007.
- [11] Y. S. Song, "Estimation on Unsaturated Characteristic Curves of Acid Sulfate Soils (ASS)", *Journal of Engineering Geology*. Vol.28, No.1, pp.25-34. 2018. DOI: <https://doi.org/10.9720/kseg.2018.1.025>
- [12] M. T. Van Genuchten, "A Closed-form Equation for Prediction the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soil", *Journal of Soil Science society of America*, Vol.44, No.5, pp.892~898, 1980. DOI : <https://doi.org/10.2136/sssai1980.03615995004400050002x>
- [13] R. F. Carsel, R. S. Parrish, "Developing Joint Probability Distribution of Soil Water retention Characteristics". *Water Resource Research*, Vol.24, No.5, pp.755~769, 1988. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR024i005p00755>
- [14] Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), *The final report of the river embankment related advanced technology development*. Korea Institute of Civil Engineering and

Building Technology, Korea, pp.23-31, pp.68-78.

- [15] J. M. Kim, I. J. Moon, "Evaluation System of River Levee Safety Map for Improving River Levee Maintenance Technology", *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.18, No.12, pp.768-777, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.12.768>
- [16] Federal Emergency Management Agency (FEMA). Quantification of Building Seismic Performance Factors, FEMA P-695, Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington DC, USA.
- [17] H. Inagaki, S. Iai, T. Sugano, H. Yamazaki, T. Inatomi, "Performance of caisson type quay walls at Kobe port", *Journal of the Japanese Geotechnical Society, Soils and Foundations*, Vol.36, pp.119-136, 1996.
DOI: https://doi.org/10.3208/sandf.36.Special_119
- [18] P. B. Schnabel, J. Lysmer, H. B. Seed, SHAKE: A computer program for earthquake response of horizontally layered soils. Report No. EERC/72-12, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, USA, 1972.
- [19] D. S. Kim, Y. W. Choo, "Dynamic Deformation Characteristics of Cohesionless Soils in Korea Using Resonant Column Tests", *Journal of Geotechnical Engineering Society*, Vol.17, No.5, pp.115-128, 2001.
- [20] G. D. Noh, *Effect of Material Non-linearity on Time Domain Site Response Analysis*, Ph.D dissertation, Univ. of Wonkwang, Korea, 2015.
- [21] I .M. Idriss, Assessment of site response analysis procedures. Report No. NIST GCR 95-667. NIST. USA, pp.16-17.
- [22] Y. Iwasaki, "Geological and Geotechnical characteristics of Kobe area and strong ground motion records by 1995 kobe earthquake", *Tsuchi-to-Kiso. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Vol.45, No.6, pp.15-20, 1995.
- [23] Y. S. Song, "Estimation on Unsaturated Characteristic Curves of Acid Sulfate Soils (ASS)", *Journal of Engineering Geology*. Vol.28, No.1, pp.25-34. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.9720/kseg.2018.1.025>
- [24] H. W. Son, *Evaluation of the ground stress reduction factor with varying ground characteristics and earthquake types*. Master thesis, Univ. of Yonsei, Korea, 2000.
- [25] GEO-SLOPE International Ltd. QUAKE/W 2012. GEO-SLOPE International, Calgary, AB, Canada.

김진만(Jin-Man Kim)

[정회원]



- 1989년 2월 : 경희대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 경희대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2002년 8월 : 경희대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)

• 1990년 10월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 연구위원

<관심분야>

토질 및 기초, 하천제방, 보강토옹벽

진윤화(Yoon-hwa Jin)

[정회원]



- 2016년 2월 : 국립금오공과대학교 토목공학과 (공학사)
- 2018년 2월 : 국립금오공과대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 국립금오공과대학교 토목공학과 박사과정

<관심분야>

토질 및 기초, 사면안정, 보강토옹벽

한희수(Heui-Soo Han)

[정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 한국과학기술원 토목공학과 (공학석사)
- 1999년 12월 : South Dakota School of Mines Technology (공학박사)

• 2002년 3월 ~ 현재 : 국립금오공과대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

토질 및 기초, 사면안정, 보강토옹벽