뒷채움재의 N치 및 가속도 크기에 따른 안벽구조물의 동적거동

Dynamic Behavior of Quay Walls According to N-values of Backfill and Amplitude of Seismic Accelerations

윤성규* · 김승종** · 김지성*** · 강기천****

Yun, Seong-Kyu*, Kim, Seungjong**, Kim, Jiseong***, and Kang, Gichun****

Abstract

Sand soil discharge, which seemed to be the liquefaction damage, was observed in the backfill of a quay wall structure during the Pohang earthquake in 2017. This discharge occurred because the bearing capacity decreased owing to the loss of effective stress, which was caused by the increase in the excess pore-water pressure with the dynamic loads from the earthquake. In this study, the effects of the variations in the N-value of the backfill of the quay structure and the seismic acceleration coefficient were investigated for increasing excess pore-water pressure and decreasing effective stress, owing to the dynamic load from earthquakes.

Key words : Earthquake, Excess Porewater Pressure, Liquefaction, Effective Stress, Seismic Acceleration Coefficient

요 지

2017년 포항 지진으로 안벽구조물의 뒷채움재에서 액상화의 피해로 보이는 토사 배출 현상이 관측되었다. 이는 지진에 의한 동적하중으로 인한 과잉간극수압의 증가에 따른 유효응력의 소실에 의해 지지력이 감소하였기 때문이다. 본 논문에서는 지진에 대한 동적하중으로 과잉간극수압증가와 유효응력감소에 대해 안벽구조물의 뒷채움재의 N치의 변화, 지진 가속도의 변화에 따른 영향에 대해 알아보았다. 이를 위해 2차원 유효응력해석을 통해 안벽 구조물의 동적인 거동에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 N치와 지진가속도가 증가할수록 뒷채움재의 국부적인 과잉간극수압 증가에 따른 유효응력이 감소하는 경향이 증가하여 액상화 현상에 근접하는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 지진, 액상화, 유효응력, 과잉간극수압, 지진가속도계수

1. 서 론

세계적으로 해양시대를 맞이하여 항만 및 해운의 물류 중심항 선점을 위해 해양·항만시설 확충 및 개발을 위한 투자가 늘어나고 있다. 더욱이 최근 세계적으로 자원개발 및 에너지개발을 위한 해상풍력과 해양플랜트 사업에 대한

관심이 커지고 있으며 현재도 관련 사업이 다양하게 진행되고 있다. 이에 따라 해양구조물의 안정성 문제 또한 대두되고 있다. 특히 지진 또는 지진해일로 여러 나라에서 막대한 피해가 발생하고 있고 대표적인 예로 2004년 12월 26일 인도네시아에서 발생한 수마트라 지진(규모 9.0)으로 약 30만 명이 사망 또는 실종 되었고(Cho, 2010), 2009년 9월

*정회원, 경상대학교 공학연구원 선임연구원(E-mail: tjdrb330@gnu.ac.kr)

Member, Senior Researcher, Engineering Research Institute, Gyeongsang National University

**경상대학교 토목공학과 석사과정

Master's Course, Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University

***정회원, 전주비전대학교 지적토목학과 조교수(E-mail: kimjs@jvision.ac.kr)

Member, Assistant Professor, Department of Cadastre & Civil Engineering, Vision College of Jeonju

****교신저자, 정회원, 경상대학교 토목공학과 부교수(Tel: +82-55-772-1792, Fax: +82-55-772-1799, E-mail: gkang@gnu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University

30일 남태평양 사모아제도에서의 지진(규모 8.1), 2010년 1월 12일 발생한 아이티 지진(규모 7.0), 2010년 2월 27일의 칠레 지진(규모 8.8), 2011년 3월 11일 일본의 동일본 대지진(규모 9.0)으로 2만 명 이상의 인명피해와 10만 채의 가옥과 저유탱크 및 원자력발전소의 폭발을 야기하는 등 지속적으로 지진에 대한 피해가 보고되고 있다(Kim et al., 2019).

국내의 경우 지진에 의한 피해는 1978년 10월 홍성 지진과 2016년 9월 경주 지진으로 건물 피해 사례가 있으며, 경상북도 포항시에서 2017년 11월에 발생한 규모 5.4의 지진은 공원, 도로 또는 논밭 등지에서 모래와 물이 동시에 지표면으로 분출되는 액상화 현상이 처음으로 국내에서 발생하였다(Fig. 1).

액상화 현상은 1964년 일본 니가타 지진시 최초로 세계에서 주목받는 계기가 되었다. 그 이후로도 1976년唐山 지진(중국)에서도 액상화로 인해 약 24만 명이 사망하였으며, 2011년 뉴질랜드의 크라이스 처치의 지진으로 광범위한 액상화가 발생하여 지반 침하가 발생하기도 하였다(Park et al., 2018). 일반적으로 지진 같은 반복하중으로 지반의 전단변형이 발생하고, 배수가 허용되지 않은 비배수 상태에서 급격한 전단변형은 과잉간극수압이 증가하여 유효상재하중보다 커지게 되면 토립자가 서로 떨어져 물에 부유하는 상태가 되어 액상화 현상이 발생하게 된다. 즉, 액상화로 인해 지반은 전단강도를 거의 상실하게 되어 상부구조의 손상이나 간극수의 배출로 인한 지반의 침하가 발생하게 된다(Yi et al., 2006).

지진시 지반 액상화에 대한 연구는 한계간극비 이론을 연구한 Casagrande (1936)가 최초이다. 일본에서는 1964년 규모 7.5의 Niigata 지진시 액상화에 의한 피해가 심각하여 이때부터 많은 연구자가 관심을 갖기 시작하였다. Niigata 지진 피해조사 결과 액상화는 주로 사질토 지반에서 발생한다는 사실을 알게 되었다. Seed and Idriss (1967)는 포화된 지반에서 반복하중에 의한 액상화 현상을 비배수 상태에서 발생한다고 가정하여 반복삼축시험을 통해 액상화의 발생 여부에 대한 간편법을 제안하였다(Seed and Idriss, 1971). 그리고 Seed et al. (1975)은 불규칙한 지진파를 정현파로 가정하여 액상화를 모사하는 연구를 수행하였다. Tokimatsu and Yoshimi (1983)는 N치를 활용하여 액상화 발생 여부에 대한 평가를 수행하였고, Stark and Olson (1995)은 다양한 지역에 대해 CPT를 이용하여 액상화 평가를 수행하였다. 최근에는 Youd et al. (2001)을 포함한 수많은 지반공학자들이 액상화에 대한 연구를 수행하였다.

국내에서도 액상화 관련 유효응력해석 연구가 다양하게 수행되었다. Park (2008)은 국내 매립지반을 대상으로 유효응력해석과 등가선형해석을 이용하여 액상화 평가 연구를 수행하였다. Park and Kwak (2009)은 액상화 발생가능성의 초기 예측에 사용될 수 있는 간편예측법을 통한 액상화 예측 연구를 수행하였다. Kim et al. (2019)은 포항시에서 발생한 지진에 의한 케이슨식 안벽의 안정성 평가를 위해

2차원 유효응력 해석을 통해 케이슨 안벽의 안정성 평가를 수행하였다.

본 연구에서는 2017년 11월 15일 경상북도 포항시에서 발생한 지진에 의한 해안안벽의 피해 규명에 있어서 뒷채움재의 N치와, 지진가속도가 케이슨식 안벽의 안정성에 미치는 영향을 검토하는 것이 목적이다.

(a) The Hankook Ilbo (2017) (b) Yonhap News (2017)

Fig. 1. Damage of Liquefaction

2. 연구대상지역

2.1 연구대상 항만

Fig. 2의 항은 경상북도 포항시 흥해읍에 위치하며 총 2조 8,000억 원 사업비로 건설된 동해권의 국제물류 거점항만이다. 포항지진으로 대상 항만에서 액상화로 인한 피해로 의심되는 흔적(분사 등)과 배후지의 침하 그리고 안벽의 수평변위 등과 같은 피해가 발생하였다. Fig. 3(a)와 같이 액상화로 추정되는 현상이 케이슨식 안벽 배후지에서 발생하였으며, Figs. 3(a), (b)와 같이 시설물에 국부적인 손상이 발생하였으나 명확한 원인 등 메커니즘은 불명확한 상태이다. 지진 직후 긴급 정밀안전진단 결과, 케이슨의 뒷채움에서 약 10 cm~20 cm의 침하가 발생하였고, 케이슨 상단에서 약 5 cm~15 cm의 수평변위를 야기하였다. 또한 케이슨의 수직변위(침하)는 국부적으로 약 10 cm 이하로 발생한 것이 관찰되었다. 그리고 배후지에서 분사된 것으로 예상되는 토질은 액상화 발생 가능성이 큰 조립질 사질토로 조사되었다.

Fig. 2. Target Port (Kim et al., 2019)

(a) Observed liquefaction phenomenon

(b) Settlement of caisson

(c) Horizontally displaced caisson

Fig. 3. Damages to Target Harbor During Earthquake (Modified from Kim et al., 2019)

2.2 지진 관측현황

2017년 11월 15일 14시 30분경 국내에서 2번째로 큰 규모 5.4의 지진이 경상북도 포항에서 발생하였다. Fig. 4는 진앙지 주변의 관측소를 나타내고 있고 4개의 관측소로 포항구항, 포항(PHA2), 청송(CHS), 학계리(HAK)가 있다. 각 관측소는 진앙지에서 약 7 km, 9 km, 23 km, 25 km 떨어져 있다.

Fig. 4. Locations of Accelerometers (Kim et al., 2019)

각각의 관측소에서 계측된 가속도는 관측소와 가장 가까운 7 km의 포항항에서 최대 가속도 3.25 m/s^2 로 가장 크게 나타났으며, 거리가 진앙지로부터 멀어질수록 관측 가속도는 PHA2에서 2.66 m/s^2 , HAK에서 0.366 m/s^2 , CHS는 0.2726 m/s^2 로 관측 가속도는 작아지는 경향이 나타났다. 입력 지진동으로 사용된 가속도는 포항항의 기반암으로부터 측정된 데이터이며, 진앙지로부터 포항항까지의 직선거리는 7 km로 진앙지로부터 대상 항만까지의 직선거리 6 m와 비슷하여 이를 입력 지진동으로 채택하였다. 상대적으로 큰 지진이 발생하여 항만 부두시설에 피해를 입혔지만, 해외의 사례와 비교시, 지진의 지속시간이 5초 내외로 상대적으로 짧은 편이다.

3. 수치해석

3.1 유효응력해석

본 논문에서는 지진에 의한 지반 거동의 모사를 위해 FLIP (Iai et al., 1992a, 1992b)을 사용하였다. FLIP은 일본항만항공연구소에서 해안·항만 시설물에 대한 액상화 피해 예측을 위해 개발된 수치해석 프로그램이며, 현재 일본에서는 설계 및 피해의 원인을 규명하기 위해 가장 빈번하게 사용되는 수치해석 Tool이다. 동적인 외력이 작용할 때 흙의 응력·변형에 대한 비선형 거동의 예측을 위해 Towhata and Ishihara (1985)에 의해 제안된 Multi-spring shear mechanism을 이용하였고, 2차원 유효응력의 유효요소해석모델로 지반을 탄소성체, 간극수는 비압축성으로 가정하였다.

그리고 지진과 같은 반복하중으로 발생하는 과잉간극수압은 액상화 프론트 모델을 적용하였다(Iai et al., 1992b). 이 모델은 반복되는 전단으로 지반 내의 유효응력이 감소하고 이로 인한 cyclic mobility (반복변동) 및 지반액상화 현상을 모사할 수 있다. 본 연구에서 사용된 수치해석 기법은 지진시 지반·구조물의 상호작용과 피해에 대한 다양한 수치해석으로 검증되었다(Kang et al., 2013; Kang et al., 2014; Kim et al., 2019).

3.2 수치해석조건

Fig. 5는 수치해석 단면을 나타내고 있고, 대상 항만의 실제 대표단면을 토대로 작성되었다. D1 ~ D4는 케이슨과 뒤채움 지반의 응답가속도와 수평 및 수직(침하)변위의 산정을 위한 출력절점이며, E1 ~ E7은 케이슨 하부와 뒤채움의 과잉간극수압, 흙의 응력·변형 거동의 분석을 위한 출력요소이다. 단면의 양단을 무한으로 확장하여 자유지반경계해석을 수행하였으며, 양단의 경계조건을 점소성으로 설정하여 경계면에서의 응력집중이나 파의 반사를 최소화하였다.

Fig. 6은 Mun (2018)에 의해 조사된 대상 항만 인근 지역의 입도분포곡선을 나타내고 있다. 통일분류법상 SP로 입도가

Fig. 5. Analysis Mesh (Modified from Kim et al., 2019)

Table 1. Soil Parameters (Kim et al., 2019)

Type	Unit Weight, $\gamma_t (kN/m^3)$	Poisson's Ratio, ν	Shear Modulus, $G (kN/m^2)$	Bulk Modulus, $K (kN/m^2)$	Cohesion, $c (kN/m^2)$	Internal Friction Angle, $\phi (^\circ)$	Remarks
Backfill	19.0	0.35	1.154E + 04	2.5E + 04	-	30	Liquefiable
Silty sand	19.0	0.35	1.154E + 04	2.5E + 04	-	30	Liquefiable
Riprap	18.0	0.25	3.846E + 04	8.333E + 04	-	40	Non-Liquefiable
Concrete	23.0	0.25	2.3E + 06*	-	-	-	*Young's modulus E

Fig. 6. Grain-size Distribution (Mun, 2018)

분량한 모래로 균등계수 $C_u = 1.29$, 곡률계수 $C_c = 0.965$ 인 액상화가 발생하기 쉬운 입도분포인 것으로 나타났다. Table 1은 액상화 해석에 사용된 지반 물리적·역학적 성질을 나타내고 있으며 이는 설계시 수행한 지반조사와 포항지진과 관련되어 수행된 연구결과(Mun, 2018; Park et al., 2018)로부터 결정하였다.

4. 뒤펀재의 N치의 영향

4.1 해석 조건

표준관입시험의 타격횟수인 N치, 유효상재압, 세립분율을 이용한 간편법을 통해 N치에 따른 각각의 액상화 파라미터를 산정하였다(Morita et al., 1997; Shin, 2003). Table 2는 산정된 N치에 따른 액상화 파라미터에 대한 내용이다. 산정된 액상화 파라미터를 이용하여 뒤펀 지반의 N치가 5인 경우부터 10, 15, 20, 25 순으로 연구대상 항만에 대한 수치해석을 수행하여 케이슨 상단 및 뒤펀 지반의 지표면에서의 가속도, 각각이 요소에서의 과잉간극수압비, 케이슨 및 뒤펀 지반의 수평변위 및 침하량을 도출하였다.

4.2 해석 결과

4.2.1 응답가속도

Fig. 7은 N치의 변화에 따른 액상화 파라미터를 적용한 수치해석 결과 중 케이슨 상단(D1, D2) 및 뒤펀 지반의

Table 2. Liquefaction Parameters for Build-up of Excess Porewater Pressure

Type	S_1	w_1	p_1	p_2	C_1	Remarks
Backfill	0.005	2.582	0.5	0.771	1.742	N = 5
	0.005	4.667	0.5	0.938	2.012	N = 10
	0.005	5.867	0.5	0.887	2.47	N = 15
	0.005	6.182	0.5	0.723	3.325	N = 20
	0.005	5.613	0.5	0.488	5.241	N = 25
Silty sand	0.005	7.637	0.5	0.468	8.77	N = 20

지표면(D3, D4)에서 응답한 가속도를 나타내고 있다. Fig. 7(e)는 포항구항의 기반암에서 계측된 입력가속도로써, 최대 3.25 m/s^2 의 가속도를 나타내며 지속시간은 약 5초 내외이다. N치가 5, 10, 15, 20, 25인 경우, D1에서는 입력된 지진파의 최대가속도가 나타나는 2.8초보다 약간 지연된 3.0초에 최대가속도가 나타났다. 이때 최대가속도는 각각 1.96, 1.99, 2.00, 2.01, 2.01의 가속도로 응답하였으며, 큰 진동은 발생하지 않았다. 최대가속도는 케이슨 배후지의 뒤채움 지반(D3)에서 진동후 3.1초에서 각각 4.73, 4.96, 5.08, 5.10, 5.15의 가속도로 응답했으며 이는 입력지진동과 비교하여 약 1.46배, 1.53배, 1.56배, 1.57배, 1.58배 정도 증폭된 것으로 나타났다.

Fig. 7. Respected Accelerations

4.2.2 과잉간극수압비

Figs 8과 9는 N치의 변화에 따른 지진 전·후의 과잉간극수압비 분포와 E1 ~ E7에 대한 과잉간극수압비를 나타내고

있다. 초기유효응력과 과잉간극수압의 비로 표현한 과잉간극수압비는 1인 경우 과잉간극수압과 초기유효응력이 동일하게 되기 때문에 유효응력이 “0”이 된 것으로 이는 지반이 액상화 된 것을 의미한다.

케이슨의 해측인 E1의 경우는 대상 지진에 대하여 과잉간극수압비가 0.68 정도까지 도달함을 확인할 수 있었다. 그러나 케이슨 구조물과 상대적으로 그 거리가 이격되어 있기에 직접적인 피해와는 관련이 없는 것으로 판단된다. 케이슨 하부와 케이슨 뒤채움 지역에서 과잉간극수압비가 증가함을 볼 수 있고 N치가 증가할수록 과잉간극수압비는 감소하는 경향을 보였으며, 최대 과잉간극수압비가 나타난 지점은 E3으로 최대 0.814로 N치가 5일 때 나타났다. 또한 N치가 작을수록 지반이 연약함으로 작은 하중에서도 과잉간극수압의 증가가 시작되기 때문에 N치가 5일 경우가 다른 경우보다 과잉간극수압의 증가 시점이 빠른 것으로 나타났다.

Fig. 8. Distributions of Excess Porewater Pressure Ratio

Fig. 9. Excess Porewater Pressure Ratio

4.2.3 수평변위 및 연직 침하량

Fig. 10은 N치의 변화에 따른 액상화 파라미터를 적용한 수치해석 결과 중 케이슨 상단 및 뒤채움 지반에서의 수평 변위와 침하량을 나타낸다. 최대 수평변위는 N치가 5일 때 케이슨 상부에서의 D1, D2 요소에서 약 20.8 cm 정도로

나타났으며, 침하량은 각각 4.9 cm, 1.1 cm이었다. 이 침하량의 차이는 케이슨 하부 및 뒤채움 지반의 유효응력 감소로 인해 변형시 발생하는 케이슨의 각도의 차이에서 기인된 것으로 판단된다. D3, D4의 뒤채움 지반의 경우, 각각 11.3 cm, 10.4 cm 정도 침하하였다. N치의 변화에 따른 수평변위와 침하량은 N치가 증가함에 따라 감소하는 경향이 나타났다.

Fig. 10. Displacements and Settlements of the Caisson and Backfill Ground

4.2.4 유효응력 경로 및 전단 변형

Fig. 11은 뒷채움재의 N치의 변화에 따른 케이스 해측 E1과 케이스 배후지 뒤채움 지반 중 과잉간극수압비가 크게 나타난 E3에서의 유효응력경로 및 응력-변형률곡선을 나타낸 것이다. 유효응력경로는 평면변형률 조건에서 많이 사용하는 p' , q' 좌표를 이용하였다. E1에서는 N치의 변화에 따른 해석결과의 차이가 거의 없다. 이는 N치의 변화는 뒷채움재의 N치의 변화이기 때문에 상대적으로 뒷채움재와 상대적으로 떨어진 E1에 미치는 영향이 작았기 때문인 것으로 판단할 수 있다. E3의 경우 N치가 5인 경우 파괴선에 가장 근접하였으며, N치가 증가할수록 멀어지는 경향이 나타났다. 최대전단변형률과 전단응력은 과잉간극수압비가 가장 크게 증가한 E3에서 각각 0.0037, 7.43으로 나타났다.

Fig. 11. Shear Stress-strain for E1, E3

4.3 뒷채움재의 N치 변화에 따른 해석 결과

케이스 상부와 케이스 배후지 뒤채움 지역의 대표 절점 (D1, D3) 및 지점(E3)에서의 N치의 증가에 따른 과잉간극수압비, 수평변위, 침하량의 변화는 Fig. 12와 같다. N치가

증가함에 따라 E3의 과잉간극수압비는 0.814, 0.558, 0.450, 0.385, 0.368 순으로 감소하였다. 이를 통해 N치가 증가함에 따라 유효응력이 증가하여 과잉간극수압이 감소함을 확인할 수 있었다. N치의 증가에 따른 N1의 수평변위는 20.8 cm, 12.5 cm, 11.8 cm, 11.5 cm, 11.5 cm 순으로 감소하였다. D1, D3의 침하량도 N치의 증가에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 수치 해석 결과는 N치가 상승함에 따라 과잉간극수압이 감소하여 유효응력이 증가하고 이로 인해 케이스 상부 선단의 수평변위와 침하량이 감소함을 보여준다. 또한, $N \geq 15$ 일 경우부터, 과잉간극수압비의 값의 변화폭이 줄어들었으며, 수평변위와 침하량의 변화폭은 거의 없는 것을 알 수 있었다.

Fig. 12. Results According to N Value of Backfill

5. 입력지진가속도에 따른 영향

5.1 해석 조건

포항지진에 의해 포항항에 계측된 가속도의 최대값 3.25 m/s^2 로 국내에서는 상대적으로 큰 값이 계측되었으나 지진의 지속시간이 5초 정도로 상대적으로 짧은 특징을 보인다. 만일 더 큰 지진하중이나 지속시간이 긴 지진이 일어난다면 그 피해가 더 커질 수 있다고 판단된다. 그렇기에 지진파계수를 이용하여 지진하중을 계측값의 1배(Case 1), 1.5배(Case 2), 2배(Case 3) 상승시켜 해석을 수행하여 비교하였고 뒤채움 지반은 N치를 15로 가정하였다. 이는 뒤채움 흙의 영향에 대한 해석 결과에서 $N \geq 15$ 일 경우, 과잉간극수압비, 수평변위 및 침하, 전단변형률 등의 변화폭이 별다른 양상을 보이지 않았기 때문에 N을 15로 결정하였다.

5.2 해석결과

5.2.1 응답가속도

Fig. 13은 케이슨 상부와 케이슨 배후지 뒤편 지반의 각 지점에서 N치가 15일 때, Case 1 ($Accfa = 1.0$), Case 2 ($Accfa = 1.5$), Case 3 ($Accfa = 2.0$)인 경우의 응답가속도를 나타내었다. Case 1과 비교하여 Case 2의 해석의 경우, 입력 가속도가 최대 3.25 m/s^2 에서 4.88 m/s^2 로 1.5배로 증가함에 따라 각각의 지점 D1, D2, D3, D4에서 응답가속도가 최대 0.42 m/s^2 , 0.42 m/s^2 , 0.38 m/s^2 , 0.37 m/s^2 증가하였다. 또한, Case 1과 비교하여 Case 3의 해석의 경우는 입력가속도가 최대 3.25 m/s^2 에서 6.50 m/s^2 로 2.0배로 증가함에 따라 각각의 지점 D1, D2, D3, D4에서 응답가속도가 최대 0.64 m/s^2 , 0.64 m/s^2 , 0.74 m/s^2 , 0.59 m/s^2 증가하였다.

Fig. 13. Comparisons Among Case 1, Case 2 and Case 3 on Accelerations

5.2.2 과잉간극수압

Fig. 14는 케이슨 해측(E1), 케이슨 구조물 하부(E2), 케이슨 배후지 뒤편 지반(E5)의 각 요소에서 N치가 15일 때, Case 1 ($Accfa = 1.0$), Case 2 ($Accfa = 1.5$), Case 3 ($Accfa = 2.0$)인 경우의 과잉간극수압비를 나타낸다. Case 1과 비교하여 Case 2의 경우, 입력가속도가 최대 3.25 m/s^2 에서 4.88 m/s^2 로 1.5배로 증가함에 따라 각각의 요소 E1, E2, E5에서 과잉간극수압비가 최대 0.087, 0.044, 0.158 증가하였다. 또한, Case 1과 비교하여 Case 3의 경우는 입력가속도가 최대 3.25 m/s^2 에서 6.50 m/s^2 로 2.0배로 증가함에 따라 각각의 요소 E1, E2, E5에서 과잉간극수압비가 최대 0.130, 0.076, 0.327 증가하였다.

Fig. 14. Comparison Case 1, Case 2 and Case 3 on Excess Pore Water Pressure Ratio

5.2.3 수평변위 및 연직 침하량

Fig. 15는 케이슨 상부와 케이슨 배후지 뒤편 지반의 각 지점에서 N치가 15일 때, Case 1 ($Accfa = 1.0$), Case 2 ($Accfa = 1.5$), Case 3 ($Accfa = 2.0$)인 경우의 수평변위 및 침하량을 비교한 결과이다. Case 1과 비교하여 Case 2의 경우, 입력가속도가 최대 1.5배로 증가함에 따라 케이슨 상부의 D1, D2 지점에서는 7.6 cm의 수평변위 증가가 발생하였고 침하량은 1.8 cm, 0.3 cm 증가하였다. 또한, 케이슨 배후지 뒤편의 D3, D4 지점에서는 침하량이 4.5 cm, 3.2 cm 증가하였다. Case 1과 비교하여 Case 3의 경우,

입력가속도가 최대 2.0배 증가함에 따라 케이스 상부의 D1, D2 지점에서는 22.9 cm의 수평변위 증가가 발생하였고 침하량은 5.4 cm, 0.9 cm 증가하였다. 또한, 케이스 배후지 뒤채움의 D3, D4 지점에서는 침하량이 12.8 cm, 10.1 cm 증가하였다.

Fig. 15. Comparison Case 1, Case 2 and Case 3 on Displacement and Settlement of Caisson and Backfill Ground

5.2.4 유효응력 경로 및 전단 변형

Fig. 16은 케이스 해측 E1과 케이스 배후지 뒤채움 지반 중 과잉간극수압비가 크게 나타난 E3에서 N치가 15인 경우, Case 1 ($Accfa = 1.0$), Case 2 ($Accfa = 1.5$), Case 3 ($Accfa = 2.0$) 해석을 수행하여 각 요소의 유효응력경로와 응력변형률곡선을 나타내었다. E1과 E3 모두 지진하중이 1.5배, 2.0배 증가함에 따라 Case 1에 비해 Case 2, Case 3의 유효응력경로는 유효응력이 감소하여 파괴선에 점차적으로 더욱 더 근접해감을 볼 수 있었으며, E1의 전단변형은 최대 0.012, 0.015 증가하였고 E3은 최대 0.0026, 0.0092 증가하였다.

Fig. 16. Comparison Case 1, Case 2 and Case 3 on Shear Stress-strain

5.3 입력지진가속도 변화에 따른 해석 결과

가속도의 증가가 과잉간극수압비, 수평변위, 침하량의 변화에 어떤 영향을 미치는 지를 확인하기 위해 케이스

상부와 케이슨 배후지 뒤편 지역의 대표 절점(D1, D3) 및 지점(E3)의 결과를 Fig. 17로 나타내었다.

가속도의 증가에 따른 케이슨 배후지 뒤편 지역의 E3 요소에서 가속도가 1.0, 1.5, 2.0 순으로 증가함에 따라 나타나는 과잉간극수압비 변화는 Fig. 17(a)와 같다. 가속도가 증가함에 따라 지진파 크기가 3.25 m/s^2 , 4.88 m/s^2 , 6.50 m/s^2 순으로 상승하였고 E3 요소의 과잉간극수압비는 0.450, 0.614, 0.774 순으로 증가하였다. 이를 통해 지진파가 증가함에 따라 과잉간극수압이 증가함을 확인할 수 있었다. 가속도의 증가에 따른 D1 요소의 수평변위의 변화는 Fig. 17(b)와 같다. 수평변위는 11.8 cm, 19.4 cm, 34.7 cm 순으로 상승하였다. 가속도의 증가에 따른 D1, D3 절점의 침하량 변화는 Fig. 17(c)와 같다. 침하량도 가속도의 증가에 따라 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 수치 해석 결과는 가속도수가 상승함에 따라 과잉간극수압이 감소하여 유효응력이 증가하고 이로 인해 케이슨 상부 선단의 수평변위와 침하량이 증가함을 보여준다.

Fig. 17. Results According to Accelerations

6. 결 론

2017년 11월 15일에 발생한 포항 지진으로 인해 포항지역에 액상화 현상이 국내 처음으로 발생하였으며, 연구대상 항만에 액상화로 의심되는 흔적, 수평변위 및 침하가 발생하였다. 국내에서 발생한 첫번째 사례이기에 액상화로 인한

피해 메커니즘을 규명하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 포항 지진을 대상으로 2차원 유효응력해석을 통해 연구대상 항만의 피해 메커니즘을 규명함에 있어서 N치에 따른 뒤편 흙의 영향과 지진가속도 변화의 영향에 대한 수치해석을 수행하였다. 결론은 다음과 같다.

- (1) 케이슨 배후지 뒤편 흙의 N치의 증가에 따른 과잉간극수압비의 감소로 인해 유효응력이 증가하였고 그 결과 케이슨과 배후지 지반의 수평변위 및 침하가 감소하였다. 하지만 N치가 15 이상일 경우부터는 과잉간극수압비의 값의 변화폭이 줄어들었으며, 수평변위와 침하량의 변화폭은 거의 없었으므로 N치가 15 이상 이 되었을 때부터는 피해 규모에 더 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.
- (2) 지진하중의 크기가 증가함에 따른 과잉간극수압비 상승, 전단 변형 증가 등으로 인하여 유효응력이 감소하였고 이로 인해 유효응력경로에서 파괴포락선에 점차 접근함을 확인하였다. 한편, 본 연구의 해석조건에서는 유효응력이 “0”이 되어 완전히 소실되는 액상화는 발생하지 않았다. 이는 뒤편부의 사석과 케이슨 직하부에 조립토 지반이 아닌 암반층의 존재에 의한 영향으로 인해 기인된 것으로 판단된다.

따라서 연구대상 항만에서 발생한 지진에 의한 피해원인은 현장조사와 수치해석 결과로부터 배후지 뒤편 지반의 국부적인 과잉간극수압 증가에 따른 유효응력의 감소로 인해 기인된 것으로 판단되며, 향후 포항지진보다 다소 큰 지진이 발생하더라도 현재 보다 현저한 피해가 발생할 가능성은 크지 않을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2020R111A3067248).

References

- Casagrande, A. (1936). Characteristics of cohesionless soil affecting the stability of slopes and earth fills. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, Vol. 23, pp. 257-276.
- Cho, Y.S. (2010). Lessons from Indonesia's repetitive tsunami. *Disaster Prevention Journal*, Korea Disaster Prevention Association, No. 44, pp. 32-36.
- Iai, S., Matsunaga, Y., and Kameoka, T. (1992a). Strain space plasticity model for cyclic mobility. *Soils and Foundations*, Vol. 32, No. 2, pp. 1-15.

- Iai, S., Matsunaga, Y., and Kameoka, T. (1992b). Analysis of undrained cyclic behavior of sand under anisotropic consolidation. *Soils and Foundations*, Vol. 32, No. 2, pp. 16-20.
- Kang, G.C., Tobita, T., and Iai, S. (2014). Seismic simulation of liquefaction-induced uplift behavior of a hollow cylinder structure buried in shallow ground. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 64, pp. 85-94.
- Kang, G.C., Yun, S.K., Kim, T.H., and Kim, D. (2013). Numerical analysis on settlement behavior of seabed sand-coastal structure subjected to wave loads. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 25, No. 1, pp. 20-27.
- Kim, S., Hwang, W.K., Kim, T.H., and Kang, G.C. (2019). A case study for earthquake-induced deformation of quay wall and backfill in Pohang by 2d-effective stress analysis. *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 35, No. 7, pp. 15-27.
- Morita, T., Iai, S., Liu, H., Ichii, K., and Sato, Y. (1997). Simplified method to determine parameter of FLIP. *Technical Note of the Port and Harbor Research Institute*, No. 869, pp. 1-36.
- Mun, G.Y. (2018). *A study on the effect of relative density and particle size distribution on the liquefaction resistance strength of sand in Pohang liquefaction region*. Master's thesis, Pusan National University.
- Park, D., and Kwak, D.Y. (2009). Evaluation of liquefaction potential with simplified method and effective-stress site response analysis. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 25, No. 3, pp. 75-82.
- Park, S.S. (2008). Liquefaction evaluation of reclaimed sites using and effective stress analysis and an equivalent linear analysis. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 2C, pp. 83-94.
- Park, S.S., Nong, Z., Choi, S.G., and Moon, H.D. (2018). Liquefaction resistance of Pohang sand. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 34, No. 9, pp. 5-17.
- Seed, H.B., and Idriss, I.M. (1967). Analysis of soil liquefaction: Niigata earthquake. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 93, No. SM3, pp. 83-108.
- Seed, H.B., and Idriss, I.M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 97, No. SM9, pp. 1249-1273.
- Seed, H.B., Lee, K.L., Idriss, I.M., and Makdisi, F.I. (1975). The slides in the San Fernando dams during the earthquake of February 9, 1971. *Journal of the Geotechnical Engineering*, Vol. 101, No. GT7, pp. 651-688.
- Shin, W. (2003). *Estimation of dynamic lateral displacement of caisson quay walls with effective stress analyses for moderate earthquake loading*. Master's thesis, Yeonsei University.
- Stark, T.D., and Olson, S.M. (1995). Liquefaction resistance using CPT and field case histories. *J. of Geotech. Eng.*, Vol. 121, No. 12, pp. 856-869.
- The Hankook Ilbo. (2017). *Muddy water springs up all over Pohang, attacking "the fear of liquefaction"*. (November 19, 2017). Retrieved from <https://www.hankookilbo.com/News/Read/201711191691896414>
- Tokimatsu, K., and Yoshimi, Y. (1983). Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content. *Soils and Foundations*, Vol. 23, No. 4, pp. 56-74.
- Towhata, I., and Ishihara, K. (1985). Modeling soil behavior under principal axes rotation. *Fifth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Nagoya, Japan, Vol. 1, pp. 523-530.
- Yi, J., Kwon, O., and Park, W. (2006). Evaluation of liquefaction potential for soil using probabilistic approaches. *Korea Society of Civil Engineering*, Vol. 26, No. 5C, pp. 313-322.
- Yonhap News. (2017). *Liquefaction traces all over Pohang... Secondary damage possibility is?* (November 21, 2017). Retrieved from <https://www.yna.co.kr/view/MYH20171121013600038>
- Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., et al. (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, No. 10, pp. 817-833.

Received	November 2, 2020
Revised	November 3, 2020
Accepted	November 6, 2020