

FEM 해석에 의한 지반배수조건에 따른 지진 시 영일만항의 케이슨식 안벽 및 배후지의 거동 분석 Behavior Analysis on Earthquake-Induced Deformation of Quay Wall and Apron in Ground at Youngilman Port Considering Drainage Condition Using FEM Analysis

이학주* · 강기천** · 황용기*** · 이민선**** · 김태형*****

Hak-Ju Lee*, Gi-Chun Kang**, Woong-Ki Hwang***, Min-Sun Lee**** and Tae-Hyung Kim*****

요지 : 본 연구에서는 2017년 11월 15일에 포항에서 발생한 규모 5.4의 지진으로 인하여 영일만항의 케이슨식 안벽 및 배후지에서 지반내에 발생된 과잉간극수압으로 유발된 침하와 수평변위를 지반배수조건(즉 비배수조건과 배수조건)에 따라 해석하였다. 일반적으로 비배수조건에서 지진응답해석을 실시하는데 본 연구에서는 배수조건 해석을 실시하여 지진 시 생기는 변위와 지진 이후에 과잉간극수압이 소산하면서 발생하는 추가적인 변위의 결과를 산정하였다. 지진 이후의 결과는 비배수조건 해석에서는 알 수 없는 부분이다. 두 결과에 대한 비교 분석을 통해 지반배수조건에 따라 구조물과 지반의 거동 차이를 분명하게 확인하였다. 특히 배수조건 해석 결과에서 지진이후 과잉간극수압 소산에 따른 추가적인 변위가 분명하게 발생하는 것으로 나타났다. 이것은 지진응답해석에서 지반배수조건에 따른 두 해석결과의 차이가 존재하는 것을 보여주는 것으로 지반과 구조물의 거동을 더 명확하게 해석하기 위해서는 배수조건에 대한 해석도 필요하다는 것을 나타내는 것이다.

핵심용어 : 지진, 배수조건, 지진응답해석, 소산, 침하

Abstract : In this study, according to drainage condition (undrained and drained) in ground, the settlement and horizontal displacement of caisson quay wall and apron in Yeongilman port due to excess pore water pressure in ground induced by the magnitude 5.4 earthquake in Pohang on November 15, 2017. In general, seismic response analysis was carried out under undrained drainage condition, but in this study, drain drainage analysis was conducted to estimate displacement during earthquake as well as an additional displacement due to dissipation of excess pore water pressure after earthquake. The result of after earthquake can not be known under undrained drainage condition. Results clearly showed that the behavior of structure and ground was dependent on drainage condition in ground. Especially, based on the drained drainage condition, the additional displacement was clearly detected due to dissipation of excess pore water pressure after earthquake. Which indicates that both results are different to drainage condition in ground, and therefore, drainage condition analysis is necessary to accurately estimate the behavior of ground and structure in seismic response analysis.

Keywords : earthquake, drained drainage condition, seismic response analysis, dissipation, settlement

1. 서 론

전 세계적으로 지진에 의해 막대한 피해가 발생하고 있다. 2009년 9월 30일 남태평양의 사모아제도 부근에서 규모 8.1의 지진, 2010년 1월 12일에 발생한 규모 7.0의 아이티 지진, 2010년 2월 27일에 발생한 규모 8.8의 칠레 지진 등에 의해

지진에 대한 피해가 발생하고 있다. 또한, 2011년 3월 11일 일본에서 발생한 규모 9.0의 동일본 대지진은 2만 명 이상의 인명피해가 발생하였고, 10만 채의 가옥의 피해 및 저유탱크 및 원자력발전소의 폭발, 항만/해상구조물, 교량, 항공등 막대한 피해를 가져왔다(Lee and Kim, 2011).

지진 시에 액상화가 발생하여 피해를 입은 첫 사례는 일본

*한국해양대학교 토목환경공학과(Dept. of Civil and Environmental Eng., Korea Maritime and Ocean University)

**경상대학교 토목공학과(Dept. of Civil Engrg, Gyeongsang National University)

***지오알앤디(Geo R&D)

****(주)HTI코리아 기업부설연구소(HTI Korea Co., Ltd.)

*****한국해양대학교 건설공학과(Corresponding author: Tae-Hyung Kim, Dept. of Civil Eng., Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, Tel: +82-51-410-4465, Fax: +82-51-410-4460, kth67399@kmo.ac.kr)

니가타에서 발생하였다. 규모 7.5의 지진으로 액상화로 인해 아파트와 건물이 무너지는 피해가 발생하였다. 뉴질랜드의 캔터베리에서도 2010년에 규모 7.1, 2011년에 규모 6.2, 규모 6.0, 규모 5.9로 연속적인 지진이 발생하여 광범위하게 액상화 피해가 발생하였다. 약 400만 톤의 모래와 실트 분사, 지반 침하, 측방유동 등으로 2010년 지진 이후로 지속적인 여진으로 반복적인 액상화가 발생하였다. 이와 같이 전 세계에서 액상화로 인해 구조물이 파괴되고 이로 인해 인명 혹은 재산에 피해가 발생하고 있다. 국내에서도 1978년 홍성이나 2016년 경주에 지진이 발생하였으나 액상화는 발생하지 않았다. 하지만 2017년 11월 15일에 포항에 규모 5.4의 지진이 발생하면서 도로, 공원 및 논밭에서 액상화로 인한 분사현상이 국내에 처음 발생하였으며 영일만항에서도 액상화가 의심되는 분사현상과 케이슨식 안벽의 변위, 배후지에서 침하가 발생하였다. 포항지진 이후 영일만항에 대한 긴급정밀안전진단에서 일부 영역에서 배후지의 침하가 약 10 cm~20 cm 정도, 케이슨의 수평변위가 약 15 cm 이하, 케이슨의 침하가 약 10 cm 정도 발생된 것을 관찰하였다. 분사된 토질은 사질토로 액상화를 발생시킬 수 있는 토질로 확인 되었고, 배후지 매립토의 경우 실트질 사질토로 조사되어 액상화 발생 가능성이 있는 것으로 알려졌다(Kim et al., 2019).

동적해석은 전응력해석법과 유효응력해석법이 있는데 전응력해석법은 계산이 용이하고 유효응력해석법보다 안전 측의 결과를 보여주어 이용이 많이 되지만 과잉간극수압이 계산되지 않아 유효응력을 알 수 없어 지진응답으로 인한 지반의 변형을 알 수 없다(Ministry of Oceans and Fisheries, 2018). 유효응력해석은 과잉간극수압을 계산할 수 있어 응력상태 변화가 나타나기 때문에 감쇠특성이나 복원력특성이 변화하고 지반의 응답 특성도 변화하는 것을 알 수 있다. 또한 지반해석에서는 해석 대상의 지반 영역에 따라 1~3차원으로 해석법이 나누어진다. 우선 평면적으로 넓으며 수평으로 퇴적된 지층을 가진 영역은 일반적으로 1차원 해석을 진행하며 등가선형해석법인 1차원 부지응답해석 프로그램 SHAKE가 많이 사용된다. 안벽에서 배후지까지 길이방향으로 같다고 간주하는 영역은 2차원 해석이 주로 이루어지며, 일반적으로 FLIP이라는 유효응력해석 프로그램을 사용한다. 그 외 중요구조

물 같은 경우에는 3차원 해석이 이루어진다.

지진 응답해석이 주로 비배수조건으로 해석이 이루어지는 경우가 많은데 이 경우에는 지진 이후에 과잉간극수압이 소산하면서 발생하는 추가적인 변위를 결과로 알 수 없고 이를 알기 위해서는 배수조건으로 해석이 필요하다.

포항에서 발생한 지진으로 인해 영일만항의 안벽 및 배후지의 거동을 지반배수조건(비배수 및 배수)에 따라 2차원 해석을 통해 해석 결과를 비교해 보았다. 특히 지진 시 과잉간극수압의 소산시간이 매우 짧기 때문에 비배수조건 해석이 성립된다는 비배수조건 해석이론은 지진후의 간극수의 소산에 따른 침하현상을 고려할 수 없기 때문에 배수조건을 고려한 해석이론이 구축되었다(Iai et al., 2011). 따라서 포항에서 발생한 지진으로 인해 영일만항의 안벽 및 배후지의 거동을 지반배수조건(비배수조건 및 배수조건)에 따라 2차원 해석을 통해 해석 결과를 비교해 보았다. 특히 배수조건 해석에서 과잉간극수압의 소산에 따른 변위의 거동 경향을 상세히 검토하였다.

2. 연구대상지역

2.1 영일만항

영일만항은 포항에 위치한 항이며 2017년 11월 15일 발생



Fig. 1. Liquefaction location at Youngilman port during Pohang earthquake.



Fig. 2. Damages at Youngilman port during earthquake (Kim et al., 2019).

한 지진으로 인해 케이슨식 안벽구조물과 배후지에서 피해가 발생하였다. Fig. 1은 영일만항을 나타내며 액상화 현상이 발생한 것으로 추정되는 위치를 나타내고 있다. Fig. 2는 Fig. 1에서 제시한 액상화 현상이라고 추정되는 위치의 실제 피해 사진이다. (a)는 배후지에서 분사현상, (b)는 케이슨식 안벽에서 발생한 침하이며, (c)는 케이슨식 안벽에서 발생한 수평변위이다. 안벽이 설치된 지층은 기반암위에 풍화암, 실트질 사질토인 퇴적토가 있으며 사석제 위에 케이슨식 안벽이 놓여 있고 뒤채움재로 자갈이 사용되었다. 배후지의 경우 실트질 사질토로 이루어져 있어 토질상태로 볼 때 액상화가 발생할 가능성을 가지고 있다.

2.2 포항 지진

포항 지진은 2016년 9월 11일에 경주에서 발생한 규모 5.8의 지진보다 진원 깊이가 상대적으로 얇아 피해도 경주보다 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 특히 포항에서는 국내 최초로 액상화 현상이 발생하였다. Fig. 3은 해석에 사용한 지진 가속도를 관측한 관측소, 진앙 그리고 영일만항을 나타낸 것이다. 영일만 주변 관측소는 총 4개로 포항구항(Pohang harbor station), 포항관측소(PHA2 station), 학계리관측소(HAK station), 청송관측소(CHS station)가 있고 각각 7 km, 9 km, 23 km, 25 km 떨어져 있다. Fig. 4는 각 관측소에서 관측된 가속도를 나타내며 최대가속도는 각각 3.25 m/s², 2.66 m/s², 0.366 m/s², 0.2726 m/s²으로 나타났다(Kim et al., 2019). 가속도는 기반암 상부에서 측정되었으며, 진앙에서 멀어질수록 작게 나타나는 것으로 확인되었다. 영일만항에서 관측된 가속도가 없기 때문에 비슷한 거리인 포항항의 가속도를 입력가속도로 설정하였다. 실제로 영일만항은 포항항과 8 km 거리 차이가 나지만 진앙에서 거리가 영일만은 6 km, 포항항은 7 km로 비슷하다.



Fig. 3. Acceleration measured stations during Pohang earthquake.

3. 수치 해석 모델

3.1 수치 해석 단면

Fig. 5는 2차원 해석을 하기 위한 유한요소 격자이다. 모델은 액상화현상이 발생한 것이라고 추정되는 지역의 단면도를 이용하여 만들었다. 지진이 기반암 상부에서 관측되었기 때문에 기반암 상부부터 격자를 작성하였고, 격자의 길이는 진동수 성분이 잘 전달될 수 있도록 진동수 과장 모사의 적절성을 확인 후 결정하였다. 또한 대상구조물의 주변에서 응력이 집중할 가능성이 큰 경우나 상세한 검토가 필요한 경우 격자의 크기를 작게 하여 검토하였으며 반대로 대상구조물에 영향이 없는 곳은 격자를 크게 하였다. ‘FLIP’에서 입력가속도를 단면 바닥(풍화암 하부 기반암)에 직접 입력하였다. 그림에서 나타난 N1은 케이슨식 안벽의 수평변위 및 침하를 분석하기 위한 출력 절점이며, N2는 배후지의 침하를 분석하기 위한 출력절점이며, N3, N4는 배후지의 실트질 사질토에

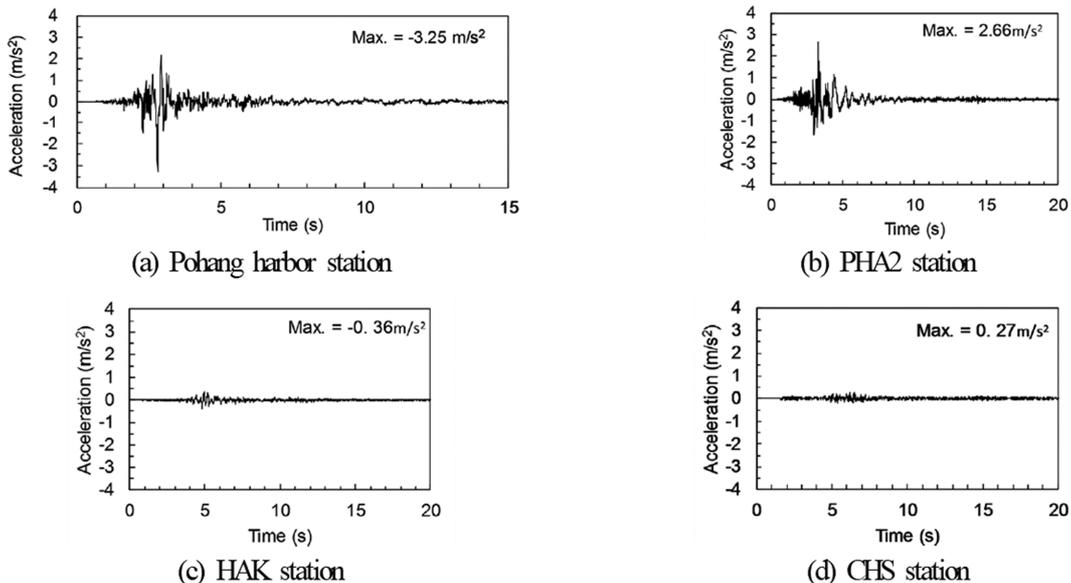


Fig. 4. Measured accelerations at four stations during Pohang earthquake (Kim et al., 2019).

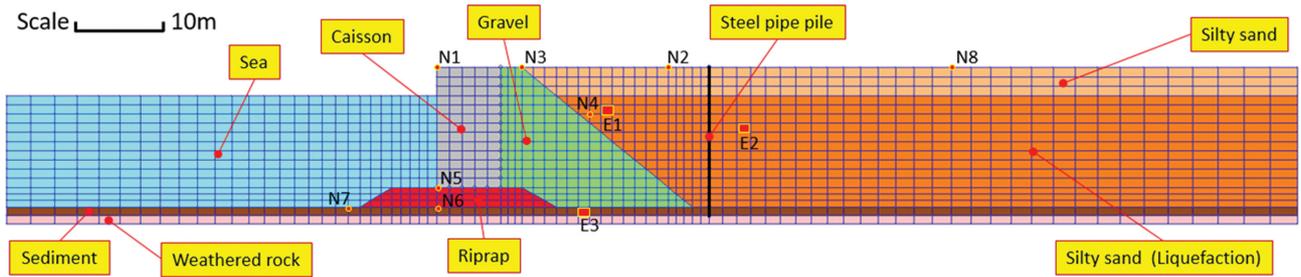


Fig. 5. Mesh for dynamic analysis.

서 과잉간극수압이 증가하고 소산되며 변하는 수평관성력이 케이슨식 안벽의 수평변위에 영향을 미치는지 확인하기 위한 출력절점이다. N5, N6은 사석체와 퇴적토의 실트질 사질토 중에 케이슨식 안벽의 침하에 미치는 영향이 더 지배적인지 확인하기 위한 출력절점이며, N7은 케이슨 해측에 위치한 해저지반이 케이슨에 영향을 미치는지 확인하기 위한 출력절점이며 그리고 N8은 구조물과 멀리 이격된 위치에서의 침하를 확인하기 위한 출력절점이다. E1, E2, E3는 액상화 지반의 과잉간극수압을 분석하기 위한 출력요소를 나타낸다.

3.2 FLIP 해석모델 및 액상화 해석단계

FLIP은 지반의 액상화 현상을 2차원 유효응력해석을 통해 지반과 구조물의 거동을 모사하기 위해 일본항만항공연구소에서 개발되었다. 해석모델은 비배수조건 해석에서 Multi-spring model을 적용하고 배수조건 해석에서는 Multi-spring model을 기반으로 한 Cocktail-glass model을 적용한다. 각 해석 모델은 Iai et al.(1992a,1992b) 그리고 Iai et al.(2011)

와 Iai et al.(2013)에 자세히 명시되어 있다.

해석은 비배수조건과 배수조건을 비교하기 위해 비배수조건 해석과 배수조건 해석을 모두 진행하였으며 과정은 세 단계로 이루어지며 자중압밀해석, 자유지반경계해석, 지진응답 해석 순으로 실시하였다. 자중압밀해석은 모델의 안정성, 자유지반경계해석은 Fig. 6의 그림과 같이 양단이 무한으로 확장된다고 가정했을 때 그 경계에 대한 안전성을 검토하며 마지막으로 지진응답해석은 유효응력해석으로 과잉간극수압 및 변위의 결과를 도출해낼 수 있다. 각 해석에서 사용된 경계 조건은 비배수조건 해석과 배수조건 해석 전부 자중압밀해석에서 양단 수직롤러, 하단은 고정으로 하였고 자유지반경계 해석 및 지진응답해석에서는 양단, 하단 모두 점성으로 설정하였다. 경계조건에 대한 내용은 Fig. 7에 제시되어 있다. 배수조건 해석의 경우 비배수조건 해석과는 다르게 지진 종료 이후 소산과정에 추가적인 침하와 수평변위를 검토하기 위해 소산해석을 실시하였고 과잉간극수압이 충분히 소산될 수 있도록 시간을 7일(604800 sec)로 설정하였다.

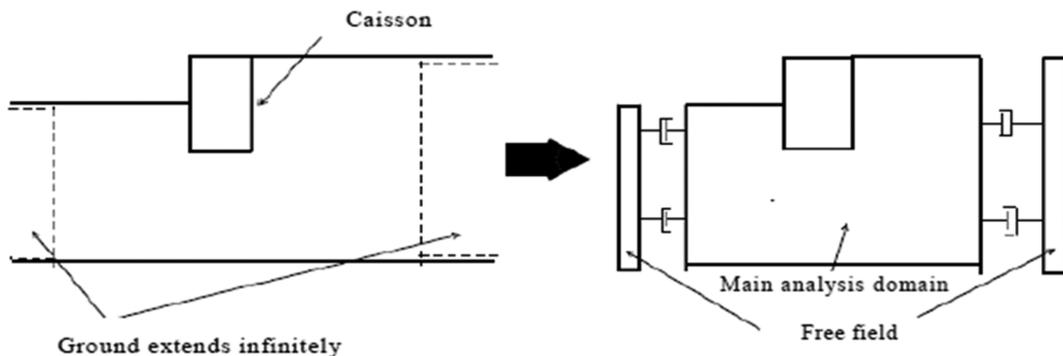


Fig. 6. Schematic diagram of free field boundary analysis (FLIP consortium, 2017).

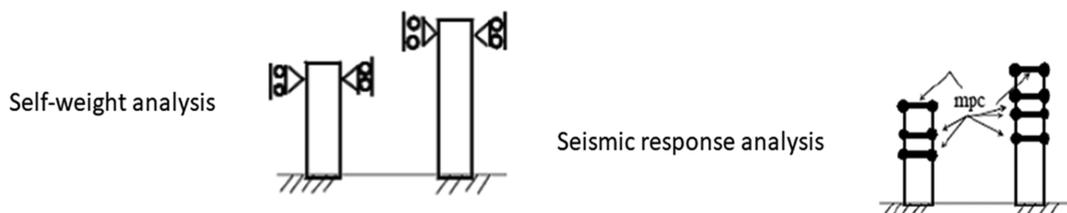


Fig. 7. Schematic diagram of self-weight analysis and seismic response analysis (FLIP consortium, 2017).

Table 1. Soil parameters for the 2-D effective stress analysis

Soil	Unit weight γ (kN/m ³)	N value	Fines content rate (%)	Effective vertical stress σ'_v (kN/m ²)	Internal friction angle ϕ (°)	Shear modulus G (kPa)	Bulk modulus K (kPa)	Poisson's ratio ν
*Silty sand ₁	19.00	15.00	5.76	31.35	30.00	117,800.04	307,204.02	0.33
*Silty sand ₂	19.00	15.00	5.76	121.65	30.00	117,800.04	307,204.02	0.33
Sediment	19.00	20.00	32.40	185.10	30.00	142,704.58	372,151.17	0.33
Weathered rock	20.60	50.00	-	194.90	33.00	285,000.01	743,235.33	0.33
Riprap	18.00	50.00	-	180.00	40.00	249,029.14	649,428.93	0.33
Caisson	23.00	-	-	-	-	-	-	0.25
Back fill	20.00	50.00	-	121.65	40.00	721,587.70	721,587.70	0.33

*Silty sand₁: 매립토 상부에 있는 실트질 사질토 지반.

*Silty sand₂: 매립토 하부에 있는 실트질 사질토 지반(액상화 지반).

3.3 연구대상지역의 지반정수

Table 1은 본 수치해석에 적용한 지반정수이다. 지반정수는 영일만항 설계 시 수행한 지반조사 자료와 최근 포항지진과 관련되어 수행된 Mun(2018), Park et al.(2018)와 Shin (2003) 등을 참조하여 결정하였으며, N치의 경우 Kim et al. (2019)이 일본 항만기술연구소에서 실험을 통해 N치에 대응하는 파라미터를 제안한 값을 이용하여 가정한 값을 사용하였다(Morita et al., 1997; Iai et al., 2000; Shin, 2003). Silty sand₂는 배후지의 매립토인데 N치는 15, 세립분율은 5.76%로 액상화가 발생할 확률이 높은 것으로 판단되며, Sediment는 원지반의 퇴적토이며 N치는 20, 세립분율은 32.40%로 퇴적토 또한 액상화가 발생할 수 있다고 판단되었다.

3.4 액상화 파라미터

‘FLIP’ 해석프로그램에서 2차원 유효응력 해석을 위해서는 액상화 파라미터가 필요하다. 각 파라미터는 과잉간극수압의 증가에 의한 유효응력의 소실을 모사하는 액상화 관련 입력 변수를 나타내고 있다(Iai et al., 1992b). 액상화 파라미터는 지반 정수와 동적실험(반복삼축압축실험)에 의해 결정되는데 연구대상지역에 동적실험결과가 없어 ‘FLIPSIM’이라는 요소 시뮬레이션 프로그램에서 N치, 세립분율, 유효응력을 이용한 간편법(Easy set parameter)으로 비배수조건에서의 액상화 파라미터를 결정하였다. 결정된 비배수조건에서의 액상화 파라미터는 Table 2에 제시되어 있다. 동적실험결과가 없기 때문에 배수조건에서의 액상화 파라미터를 구하기 위해서 비배수조건에서 구한 액상화 파라미터를 이용하여 동적곡선을 추정하였으며 ‘FLIPCSIM’ 요소 시뮬레이션 프로그램에서 요소 시뮬레이션을 실시하여 추정한 동적곡선에 피팅하여 배수조건에서의 액상화 파라미터를 결정하였다. Fig. 6은 추정한 동적곡선을

Table 2. Liquefaction parameters of undrained condition

Layer	S ₁	W ₁	P ₁	P ₂	C ₁
Silty sand	0.005	5.592	0.5	0.918	2.301

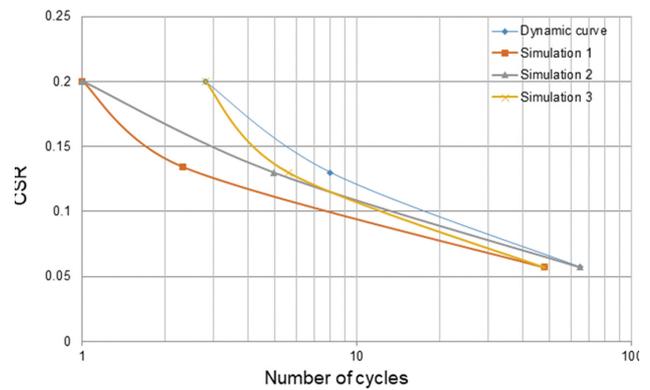


Fig. 8. Result of element simulation (CSR-N).

‘FLIPCSIM’에서 얻은 곡선들을 피팅한 결과이며 추정한 동적곡선에 가장 근접하게 피팅된 ‘Simulation 3’의 시뮬레이션 결과를 이용하여 배수조건에서의 액상화 파라미터를 결정하였다. 결정된 배수조건에서의 액상화 파라미터는 Table 3에 제시되어 있다.

4. 해석 결과

4.1 과잉간극수압

Figs. 9(a), (d)는 비배수조건일 때 E3, E1 요소에서 지진 시에 시간에 따른 과잉간극수압비(EPWPR, Excess Pore Water Pressure Ratio)를 나타낸다. Figs. 9(b), (c), (e), (f)는 배수조건일 때 시간에 따른 과잉간극수압비로 (b), (e)는 지

Table 3. Liquefaction parameters of drained condition

Layer	PHIp	EPSCM	repsdc	repsd	rk	rkpp	plk
Silty sand	28	0.07	0.34	0.15	0.5	0.1	2
Layer	q ₁	q ₂	q ₄	s ₁	c ₁	HmaxL	NSPR ₄
Siltsand	8	0.5	0.5	0.005	2.4	0.24	6

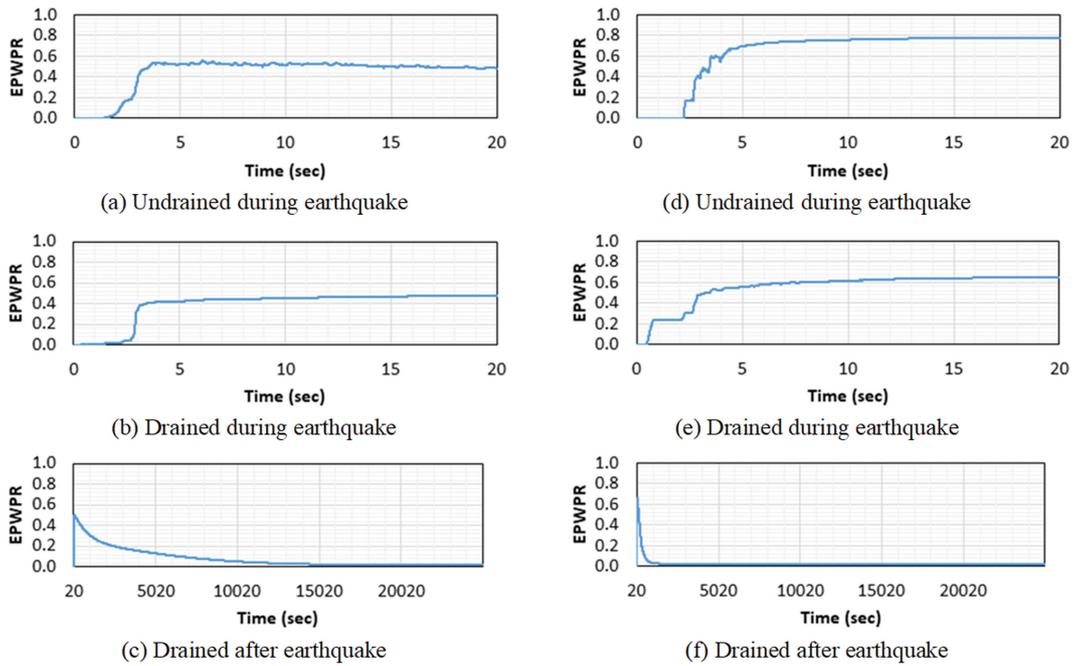


Fig. 9. Excess pore water pressure ratio at E1 in apron (left) and E3 in sediment (right).

진 시, (c), (f)는 지진이후 결과이다. 지진 시 과잉간극수압비는 배수조건에서 약 0.5, 비배수조건에서는 약 0.55로 배수조건이 비배수조건보다 과잉간극수압비가 더 작게 나타나는데 지진 시에도 약간의 소산이 발생하여 생기는 경향으로 보인다. 지진이후 약 7시간 후(25200 sec) 과잉간극수압이 전부 소산되는 것을 확인하였다. 과잉간극수압비가 1에 도달하지

는 않았지만 흙의 불균일성을 생각하면 상대적으로 N치가 낮거나 유효응력이 낮은 지반은 부분적으로 액상화가 발생된 것으로 판단된다.

4.2 변위

Fig. 10(a)는 비배수조건일 때 N1 절점에서 지진 시에 시

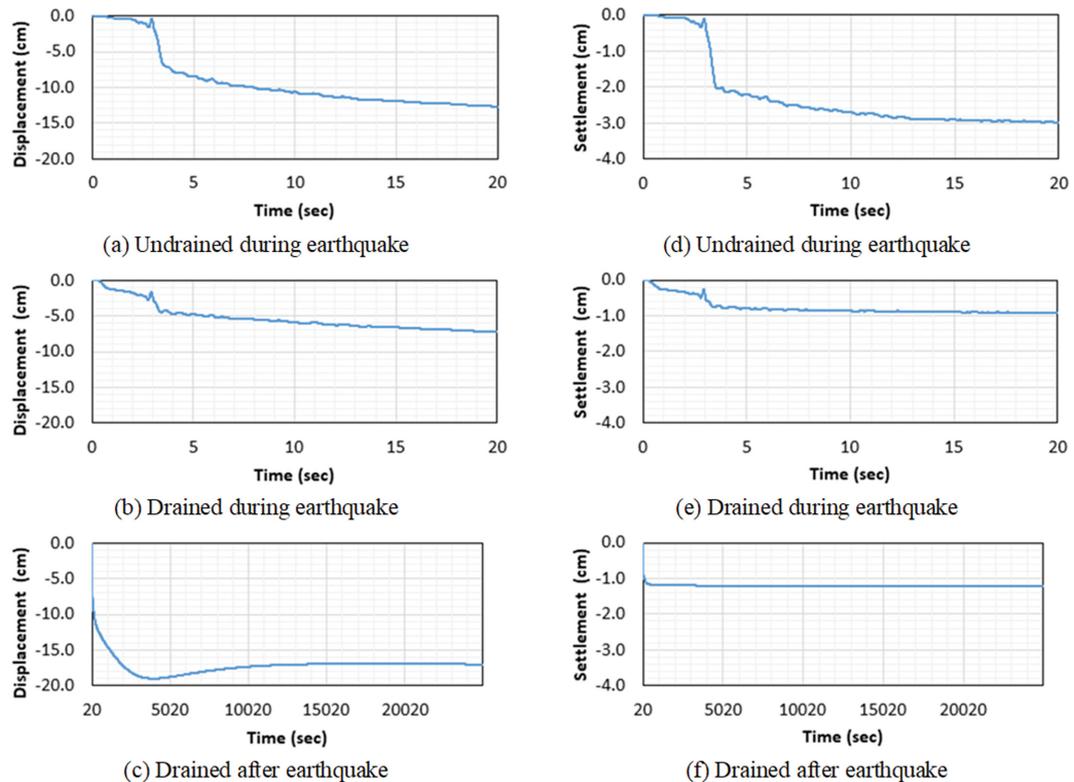


Fig. 10. Horizontal displacement (left) and settlement (right) at N1 in caisson.

간에 따른 케이슨식 안벽의 수평변위를 나타낸다. Figs. 10(b)와 10(c)는 배수조건일 때 시간에 따른 수평변위를 나타내는데 (b)는 지진 시, (c)는 지진 이후의 결과이다. 지진 시에 수평변위는 비배수조건에서 약 13 cm가 나타났으며, 배수조건에서 약 7 cm 정도, 지진 이후 약 10 cm 더 발생하여 최종적으로 17 cm 정도 수평변위가 나타났으며 현장조사와 비슷한 결과이다. 지진 시에 변위가 비슷한 경로로 발생하지만 비배수조건일 때보다 배수조건일 때 변위가 작게 나온다. 지진 시에는 지진으로 인해 발생한 수평관성력으로 인해 수평변위가 발생하였으며, N3, N4, N7의 절점에서 결과는 각각 14 cm, 12 cm, 2.5 cm 정도로 나타났기 때문에 지진이후에는 과잉간극수압이 소산됨에 따라 유효응력이 감소하여 침하한 배후지에서 수평력이 발생하여 케이슨식 안벽의 수평변위에 영향을 미친 것으로 판단된다.

Fig. 10(d)는 비배수조건일 때 N1 절점에서 지진 시에 시간에 따른 케이슨식 안벽의 침하량을 나타낸다. Fig. 10(e)는 배수조건일 때 지진 시에 시간에 따른 안벽의 침하량을 나타내며, Fig. 10(f)는 지진이후 결과이다. 지진 시에 비배수조건에서 약 3 cm 정도 침하가 나타났고 배수조건에서 약 0.9 cm 정도 침하가 나타났으며 지진이후에 약간의 침하가 더 발생하여 1.1 cm의 침하가 나타났다. 지진 시 침하량 역시 비배수조건일 때보다 배수조건에서 더 적은 변위가 나타났으며, 지진이후에 케이슨식 안벽아래 퇴적토층이 얇아 소산이 되어

도 많은 침하가 발생하지 않아 케이슨식 안벽도 많은 침하가 더 발생하지 않는 경향이 있다. N5와 N6 절점에서 결과는 사석제와 퇴적토에서 각각 1.2 cm, 0.5 cm 침하가 발생하는 것으로 나타났기 때문에 사석제와 퇴적토 모두 케이슨의 침하에 영향을 미치며 특히 사석제의 경우 케이슨의 침하를 발생시키는 영향에 퇴적토보다 지배적인 것을 알 수 있다. 현장조사 결과에 비해 작은 값이 도출되었는데 이는 케이슨 아래 퇴적토의 N치가 더 낮거나 층이 단면도보다 두꺼워 현장에서 침하가 더 발생한 것으로 판단된다.

Figs. 11(a), (d)는 비배수조건일 때 N2, N8 절점에서 지진 시에 시간에 따른 배후지의 침하량을 나타낸다. Figs. 11(b), (e)는 배수조건일 때 지진 시에 시간에 따른 배후지의 침하량을 나타내며, Figs. 11(c), (f)는 지진이후 결과이다. 지진 시에 침하량은 N2에서 비배수조건에서 약 7.5 cm, 배수조건에서 약 7.5 cm 정도로 나타났으며 지진이후에 약 0.5 cm 정도 추가적으로 침하가 발생하는 것으로 나타났으며 이는 현장조사보다 작은 값이 나타나는데 배후지의 실트질 사질토의 N치가 달라서 상이한 결과가 나타나는 것으로 판단된다. 구조물에서 이격된 거리에 있는 N8에서 비배수조건에서 약 1 cm, 배수조건에서 약 1.5 cm 정도로 나타났으며 지진이후에 약 2.5 cm 정도 추가적으로 침하가 발생하는 것으로 나타났다. 배후지에서는 지진 시에 비배수조건일 때보다 배수조건에서 더 많은 침하량이 발생하였다. 이는 지진 시에 소산이 같이

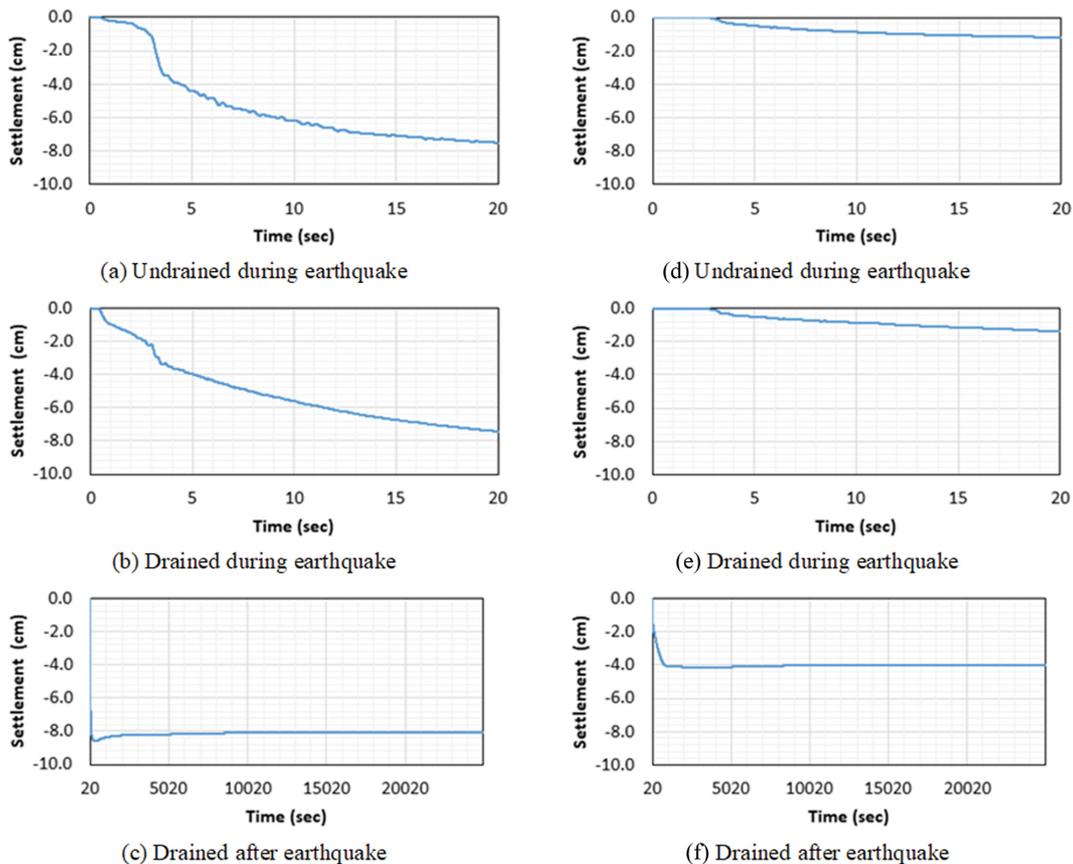


Fig. 11. Settlement at N2 (left) and N8 (right) in apron.

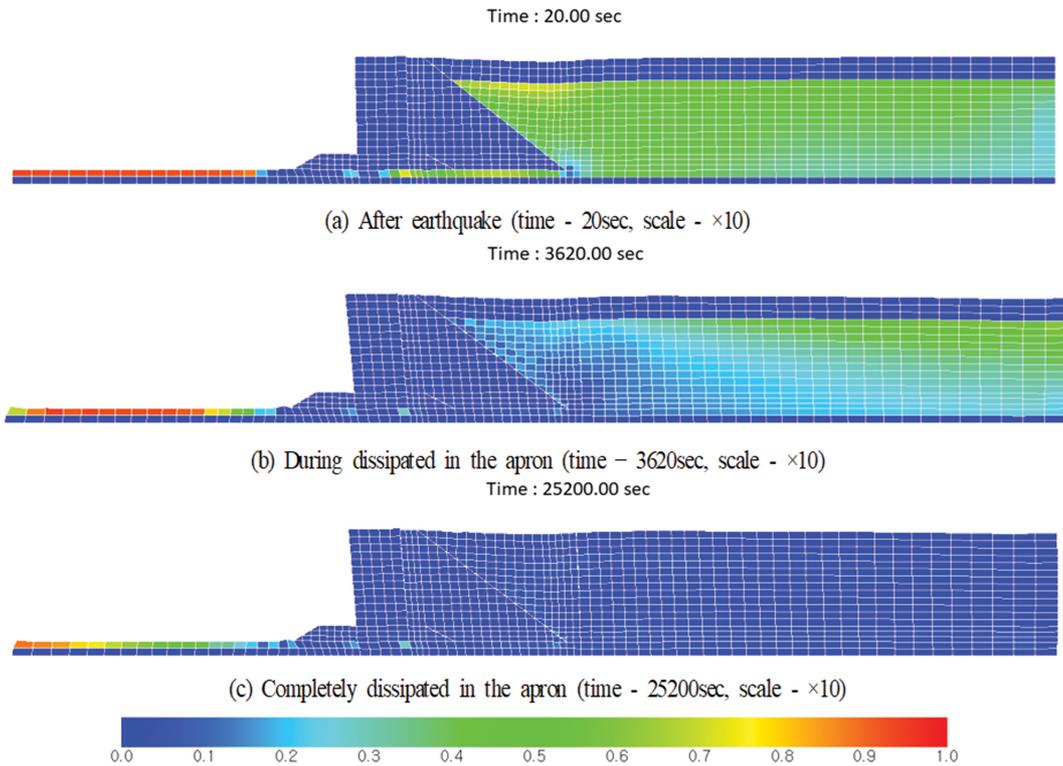


Fig. 12. Distribution of excess pore water pressure ratio and displacement.

Table 4. Compare safety inspection report with analysis results

Type	Horizontal displacement in caisson (cm)		Settlement in caisson (cm)		Settlement in apron (cm)	
	After earthquake	After EPWP dissipation	After earthquake	After EPWP dissipation	After earthquake	After EPWP dissipation
Safety inspection report		15	≤ 10		10~20	
Analysis result	Undrain	13	3		7.5	
	Drain	7	0.9	1.1	7.5	8

EPWP: Excess Pore Water Pressure.

이루어지면서 침하량이 더 발생한 것으로 보이며, 지진이후 소산과정에서 약간의 추가침하가 발생하는 경향을 보이고 있다. Fig. 12는 소산과정에서 과잉간극수압비 분포와 변위 (Scale: x 10)를 나타낸다. Fig. 12에서 나타나는 것처럼 배후지 전체에 과잉간극수압이 발생하였으므로 구조물이 인접한 지반의 경우(N2)가 구조물과 상대적으로 거리가 이격된 지반의 경우(N8)보다 더 많은 침하가 발생 된 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 토대로 액상화가 일어난 지반 주변에 구조물이 있을 경우 더 큰 피해가 있다고 판단된다.

Table 4에서는 현장조사와 본 연구의 연구결과를 정리한 비교표로 케이슨식 안벽의 변위와 배후지의 변위가 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

5. 결 론

2차원 유효응력해석 결과, 매립토 및 퇴적토에서 과잉간극

수압비가 증가하여 유효응력의 감소가 확인되며 흙의 불균일성을 고려한다면 상대적으로 느슨한 사질토가 있는 부분은 액상화가 발생할 수 있음을 확인하였다.

비배수조건 해석 결과와 배수조건 해석 결과와 차이도 확인했으며 배수조건에서 과잉간극수압 소산에 따른 해석 결과를 확인하였다. 케이슨식 안벽구조물의 경우 지진 시에 배수조건이 비배수조건에 비하여 더 작은 수평변위가 발생하지만 지진이후 과잉간극수압이 소산됨에 따라 더 큰 수평변위가 발생하는 것으로 나타났고 침하량의 경우에는 배수조건보다 비배수조건일 때 더 많은 침하가 발생하는 것으로 나타났다. 배후지의 경우 배수조건일 때 더 많은 침하량이 발생하였고 지진이후 소산과정에서 약간의 침하량이 더 추가적으로 발생하는 경향이 있다.

본 연구로 지진 시 지반배수조건에 따라 구조물과 지반에서의 거동의 차이가 있음을 확인하였으며 지진응답해석을 할 때 비배수조건으로 해석을 하는 경우가 많은데 배수조건으로

해석을 하여 조금 더 정확한 지반 및 구조물의 거동을 알아야 할 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

이 성과는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017R1C1B5017461).

References

- Ahn, J.K., Baek, W.H., Choi, J.S. and Kwak, D.Y. (2018). Investigation of pohang earthquake liquefaction using 1D effective stress site response analysis. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 34(8), 37-49.
- FLIP consortium (2017). FLIP ROSE Manual-ver. 7.2.3_6.
- Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1992a). Strain space plasticity model for cyclic mobility. *Soils and Foundations*, 32(2), 1-15.
- Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1992b). Analysis of undrained cyclic behavior of sand under anisotropic consolidation. *Soils and Foundations*, 32(2), 16-20.
- Iai, S. (2000). *Seismic design guidelines for port structures*. A.A. Balkema Publishers.
- Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O. and Ueda, K. (2011). Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 35(3), 360-392.
- Iai, S., Ueda, K., Tobita, T. and Ozutsumi, O. (2013). Finite strain formulation of a strain space multiple mechanism model for granular materials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37(9), 1189-1212.
- Lee, J.S. and Noh, G.D. (2016). Evaluation of caisson quay wall behavior during the 1995 kobe earthquake by nonlinear effective stress analysis. *Journal of Earthquake Engineering Society of Korea*, 20(6), 401-412.
- Lee, H. and Kim, E. (2011). Damage recovery in Japan after the East Japan earthquake. *World Economy Update*, 11(22), 1-14.
- Kim, S.J., Hwang, W.K., Kim, T.H. and Kang, K.C. (2019). A case study on earthquake-induced deformation of quay wall and backfill in Pohang by 2D-effective stress analysis. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 35(7), 12-27 (in Korean).
- Ministry of Oceans and Fisheries (2018). *Port and Fishing Port Design Standards-earthquake* (in Korean).
- 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, 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 thesis, Pusan National University* (in Korean).
- Park, S.S. (2008). Liquefaction evaluation of reclaimed sites using and effective stress analysis and an equivalent linear analysis. *Journal of Korea Society of Civil Engineering*, 28(2), 83-94.
- 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*, 25(3), 75-82.
- Park, S.S., Nong, Z., Choi, S.G. and Moon, H.D. (2018). Resistance of Pohang Sand. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 34(9), 5-17 (in Korean).
- Shin, W.K. (2003). Estimation of dynamic lateral displacement of caisson quay walls with effective stress analyses for moderate earthquake loading. *Master Thesis, Yeonsei University* (in Korean).

Received 22 October, 2019

1st Revised 14 November, 2019

2nd Revised 9 December, 2019

3rd Revised 12 December, 2019

Accepted 18 December, 2019