

1g 진동대 실험을 이용한 액상화 지반에 근입된 말뚝에 작용하는 동적 토압 분석

Analysis of Dynamic Earth Pressure on Piles in Liquefiable Soils by 1g Shaking Table Tests

한 진 태¹ Han, Jin-Tae

최 정 인² Choi, Jung-In

김 성 환³ Kim, Sung-Hwan

유 민 택⁴ Yoo, Min-Tack

김 명 모⁵ Kim, Myoung-Mo

Abstract

In this study, the magnitude and phase variation of dynamic earth pressure acting on a pile in liquefiable soils were analyzed using a series of 1g shaking table tests. In the case of a pile in dry sand, the value of the dynamic earth pressure was the highest near the surface due to the inertia force of the upper load on the pile and it decreased as the depth of the pile got lower. On the other hand, for a pile in liquefiable sand, the magnitude and shape of the dynamic earth pressure were similar to those of the excess pore pressure and was largely affected by the deformation of soils. Furthermore, the inertia force of the upper load and the dynamic earth pressure acted in opposite directions in cases of dry sand and saturated sand where low excess pore pressure had developed. However, after liquefaction, those force components near surface acted unfavorably in the same direction. Finally, the Westergaard's solution was modified and proposed as a method to evaluate the magnitude of dynamic earth pressure acting on a pile during liquefaction.

요 지

본 연구에서는 1g 진동대 실험을 통해 지진시 액상화 지반에 근입된 말뚝에 작용하는 동적 토압의 크기 및 위상 변화를 분석하였다. 건조 사질토 지반에 설치된 말뚝의 경우 말뚝 상부 하중 관성력의 영향으로 지표면 가까이에서 동적 토압이 크게 작용하고 깊이가 깊어질수록 동적 토압이 감소하는 데 비해, 액상화 지반에 설치된 말뚝의 경우 동적 토압의 크기 및 발생 양상은 지반 내에 발생한 과잉간극수압의 크기 및 발생 양상과 유사하였으며, 관성력의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 또한, 건조 사질토 및 포화 사질토에서 액상화가 발생하지 않는 경우 말뚝에 작용하는 동적 토압과 상부 하중의 관성력은 서로 반대 방향으로 작용하다가, 액상화 발생시에는 지표면 가까이에서 동일한 방향으로 작용하는 것으로 나타났으며, 액상화 후에는 관성력 영향이 소멸되어 동적 토압 크기가 크게 감소하였다. 끝으로 액상화 발생시 말뚝에 작용하는 동적 토압의 진동 성분의 크기는 안벽 구조물의 동적 수압을 산정하는 Westergaard 식으로 산정한 값의 약 50% 정도였다.

Keywords : 1g Shaking table tests, Dynamic earth pressure, Liquefaction, Pile, Soil-pile interaction

1 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 BK 계약교수 (BK Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Seoul National Univ.)

2 정희원, UCLA 박사후연구원 (Post-doctoral Researcher, Dept. of Civil & Environmental Engineering, UCLA)

3 정희원, 행정안전부 시설사무관시보 (Deputy Director, Ministry of Public Administration and Security)

4 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Ph.D. Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Seoul National Univ.)

5 정희원, 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Seoul National Univ., geotech@snu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

액상화 가능성이 있는 지반에 근입된 말뚝은 지진시 과잉간극수압의 영향으로 복잡한 거동을 보인다. 액상화로 인한 흙의 강도와 강성의 감소는 액상화 지반에 근입된 말뚝에 큰 모멘트와 전단력을 발생시킴으로써 말뚝의 파괴가 일어나게 하는 것으로 알려져 있으며, 과거 1964년 Niigata, 1964년 Alaska, 그리고 1995년 Kobe 지진 등에서 이와 같은 액상화로 인한 말뚝 피해 사례가 많이 보고되었다.

액상화 지반에서의 말뚝-지반 상호작용에 관한 연구는 진동대 실험(Ohtomo, 1996; Tamura et al., 2000; Yasuda et al., 2000; Mizuno et al., 2000; Nakamura, 2000) 및 원심모형실험(Dobry et al., 1995; Abdoun et al., 1997; Horikoshi et al., 1998; Wilson et al., 2000)을 이용하여, 여러 연구자들이 수행한 바 있다. 지진시 말뚝 기초의 피해는 지반-말뚝 상호 작용에 의한 지반 운동학적 작용력과 상부 구조물의 관성력에 의해 일어나는 것으로 알려져 있다(Tokimatsu, 2005). 그러나, 액상화 발생시 이러한 운동학적 효과와 관성 효과가 말뚝 기초에 미치는 영향에 대한 정량적 분석은 아직까지 미흡하다. 또한, 안벽 구조물의 경우에 대해서는 지진시 안벽 구조물의 관성력과 배면 지반 동적 작용력의 크기 및 위상 변화에 대한 연구(Kim et al., 2004)가 이루어졌으나, 안벽 구조물과 마찬가지로 상부 하중의 관성력과 지반의 동적 작용력의 영향을 동시에 받는 말뚝 기초의 경우에는 이와 같은 연구가 아직 보고된 바 없다.

이에 본 연구에서는 1g 진동대 실험을 통해 액상화시 말뚝-지반 구조물에서 지반 변형에 의한 운동학적 작용력 및 말뚝 상부 하중에 의한 관성력이 각각 말뚝 기초에 미치는 영향을 분석하고자 하였으며, 이와 더불어 말뚝에 작용하는 관성력과 동적 토압 사이의 위상 관계를 평가하고자 하였다. 또한, 액상화 지반에 근입된 말뚝의 내진 설계시 적용 가능한 동적 토압의 크기를 산정하기 위해, 안벽 구조물의 동적 수압을 계산하는 데 사용되는 Westergaard 식(Westergaard, 1933)을 이용하여 액상화시 말뚝에 작용하는 동적 토압의 크기를 산정하고자 하였다.

2. 진동대 실험 프로그램

본 연구에서는 입력지진파의 가속도 크기와 진동수,

그리고 말뚝 상부 하중의 크기 등을 달리하면서 총 30번의 1g 진동대 실험을 수행하였다. 길이 194cm, 폭 44cm, 높이 60cm의 토조를 이용하여 실험을 수행하였으며, 모형 말뚝을 물, 건조 사질토, 포화 사질토의 세 가지 지반에 설치하여 말뚝에 작용하는 토압의 크기 및 위상 관계를 평가하였다. 물에 말뚝을 설치한 경우의 실험은 액상화 지반에서 말뚝에 작용하는 동적 토압과 유체 내에서 말뚝에 작용하는 동적 수압을 비교하기 위해 수행하였고, 건조 사질토에 말뚝을 설치한 경우의 실험은 과잉간극수압이 발생하지 않는 지반의 말뚝에 작용하는 동적 토압을 측정하기 위하여 수행하였으며, 지진시 발생하는 과잉간극수압이 말뚝에 미치는 영향을 평가하기 위하여 포화 사질토 지반에 말뚝을 설치하여 실험을 수행하였다.

표 1에는 본 연구에서 수행한 1g 진동대 실험 내용이 요약되어 있다. 입력 가속도는 우리 나라를 포함한 중약진 지진대의 설계 지진가속도 크기와 유사한 0.1g와 0.2g의 정현파를 이용하였다. 기본 입력 하중 주파수는 10Hz로 하였는데, 몇 가지 실험에서는 입력 하중 주파수의 영향을 알아보기 위해 2, 3, 5Hz의 주파수에 대해서도 실험을 수행하였다. 또한, 말뚝 상부 하중에 의한 관성력이 말뚝 거동에 미치는 영향을 알아보기 위해 경우에 따라 상부 하중의 질량을 0, 3.8, 7.6kg 등으로 하여 실험을 수행하였다. 입력 가속도의 진동지속시간은 물과 건조토의 경우에는 5초로 하였고, 포화토의 경우에는 과잉간극수압의 발생을 위해 8초간 진동을 가하였다. 그리고 표 1의 case 3i의 경우에는 입력 가속도 크기가 서서히 증가될 때 과잉간극수압과 말뚝에 작용하는 동적 토압의 변화를 살펴보기 위하여, 입력 가속도 크기를 0.2g까지 5초간 서서히 증가시킨 후, 그 상태에서 5초간 입력 가속도 크기를 유지하였다.

그림 1에는 각 지반 조건별 실험 모형의 단면 및 계측기의 설치 위치 등이 나타나 있다. 본 연구에서 사용한 2개의 모형 말뚝은 직경 14mm, 두께 1mm, 길이 550mm의 알루미늄 관으로 제작하였으며, 제원은 표 2에 보인 것과 같다. 말뚝 하부는 토조에 고정시켜 암반에 근입된 말뚝을 모사하고자 하였으며, 모형 지반 내 말뚝의 근입 깊이는 50cm이다. 본 실험에서는 진동대 실험에 일반적으로 사용되는 스트레인 게이지, 변위계, 간극수압계, 가속도계 이외에 그림 2와 같은 직경 4mm의 초소형 토압계 4개를 말뚝에 깊이별로 부착하여 말뚝에 작용하는 동적 토압을 직접 측정하였다. 그림 3은 실험에 사용된

표 1. 실험 조건

No.	지반조건	입력가속도 크기(g)	하중재하 시간(sec)	하중 주파수(Hz)	상대밀도(%)	상부하중(kg)
1a	물	0.1	5	10, 2, 5	-	0
1b		0.2	5	10	-	0
1c		0.1	5	10, 2, 5, 3	-	3.8
2a	건조 사질토	0.1	5	10	38	0
2b		0.1	5	10	38	3.8
2c		0.1	5	10, 2, 5	80	0
2d		0.1	5	10, 2, 5	80	3.8
2e		0.2	5	10	80	3.8
2f		0.1	5	10, 2, 5	80	7.6
3a	포화 사질토	0.2	8	2	54	0
3b		0.2	8	2	54	3.8
3c		0.2	8	5	54	3.8
3d		0.2	8	10	54	3.8
3e		0.2	8	10	25	0
3f		0.2	8	5	25	3.8
3g		0.2	8	10	25	3.8
3h		0.1	8	10	25	3.8
3i		0~0.2 + 0.2*	5 + 5*	10	25	3.8
3j		0.2	8	10	25	7.6

* 초기 5초간 입력 가속도를 0에서 0.2g까지 선형적으로 증가시켰으며, 이후 5초간 0.2g의 크기로 유지

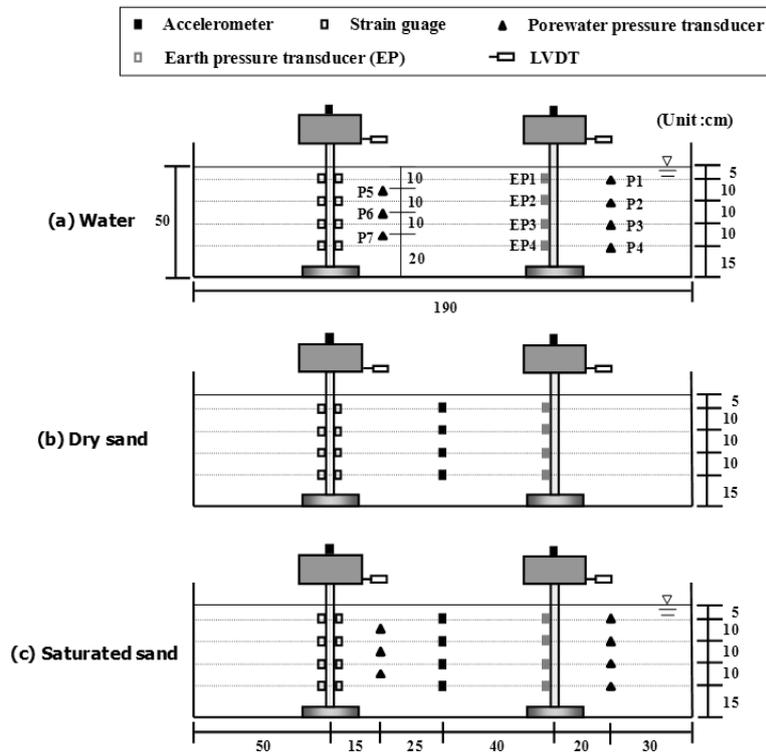


그림 1. 실험 단면 및 계측기 위치

입력 가속도 시간이력을 실험 조건 별로 보여주고 있다.

진동대 실험에 사용된 흙은 주문진 표준사이며, 이 흙의 물성값은 표 3에 요약되어 있다. 조밀한 건조토 지반

($Dr \approx 80\%$)은 진동대 위에서 진동을 가하여 조성하였으며, 느슨한 건조토 지반($Dr \approx 38\%$)은 강사장치를 이용하여 조성하였다. 느슨한 포화토 지반($Dr \approx 25\%$)은 수

표 2. 모형 말뚝 제원

말뚝 제원	알루미늄 관
탄성계수, E	67.82GPa
길이	550mm
외경	14mm
두께	1mm
휨강성, EI	58.86 Nm ²

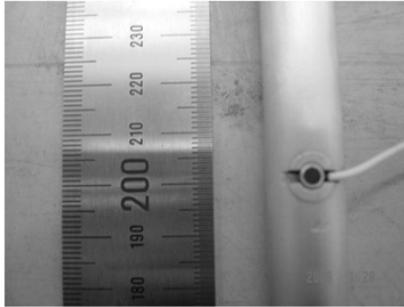
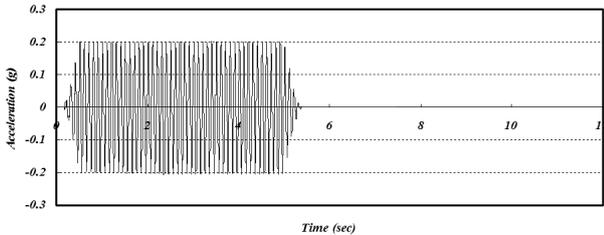
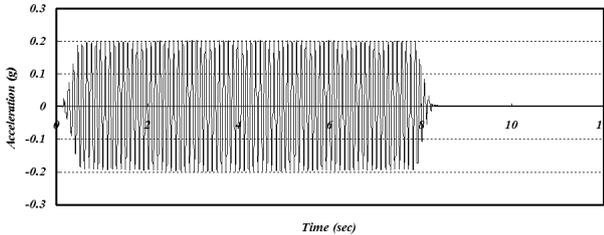


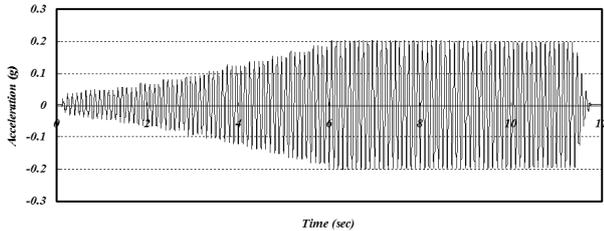
그림 2. 실험에 사용된 초소형 토압계



(a) 물 및 건조 사질토 조건(5초)



(b) 포화 사질토 조건(8초)



(c) 포화 사질토 조건, case 3i(0→0.2g: 5초, 0.2g: 5초)

그림 3. 입력 가속도

중에서 1mm의 체를 통과시켜서 조성하였으며, 중간 조밀한 포화토 지반(Dr≈54%)은 지반 위 5cm의 수위를 유지하면서 일정한 높이에서 젖은 흙을 떨어뜨리는 방법으로 조성하였다.

표 3. 주문진 표준사 지반정수

D_{10}	D_{50}	C_u	Gs	최대 건조밀도	최소 건조밀도
0.38mm	0.57mm	1.58	2.65	1.63t/m ³	1.33t/m ³

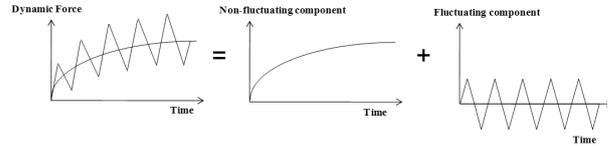


그림 4. 진동 성분과 비진동 성분의 분리(Kim et al., 2004)

3. 진동대 실험 결과 및 토의

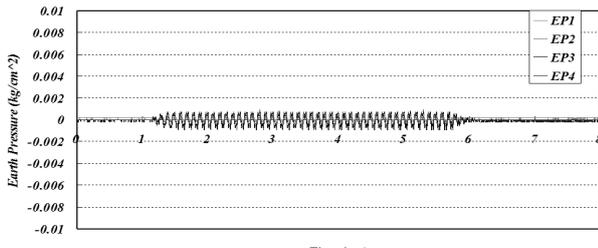
3.1 지반 조건에 따른 동적 토압

Kim et al.(2004)의 안벽 구조물에 작용하는 하중 분석 연구에 의하면, 안벽 구조물에 작용하는 동적 토압은 그림 4와 같이 진동 성분과 비진동 성분으로 분리할 수 있는데, 이 경우 비진동 성분은 배면 지반에서의 과잉간극수압의 크기에 따라 변화한다. 본 연구에서도 말뚝에 작용하는 동적 토압을 주파수 필터링 방법을 이용하여 진동하는 성분(동적 성분)과 비진동 성분(정적 성분)으로 분리하고 과잉간극수압에 따른 비진동 성분의 변화를 분석하였다. 결과 그래프 상의 F는 fluctuating component (진동 성분)을 의미하고 NF는 non-fluctuating component (비진동 성분)을 의미한다.

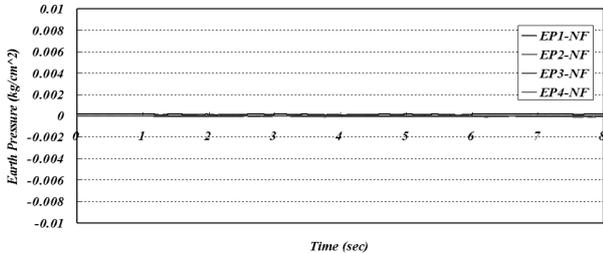
그림 5~7은 각각 물, 건조 사질토 지반, 포화 사질토 지반에 설치된 말뚝에서 측정된 동적 토압을 보여주고 있다. 그림 5의 물에 설치된 말뚝의 경우, 과잉간극수압이 발생하지 않으므로 측정된 동적 수압은 모두 진동 성분임을 알 수 있다.

그림 6과 같이 건조 사질토 지반에 설치된 말뚝의 경우, 말뚝 상부 하중 관성력의 영향을 가장 크게 받는 지표면 가까이 부착된 토압계 위치에서 동적 토압이 가장 크게 발생하였으며, 동적 토압의 진동 성분이 말뚝에 작용하는 정적 수동 토압인 비진동 성분보다 2배 이상 큰 값을 나타내고 있다.

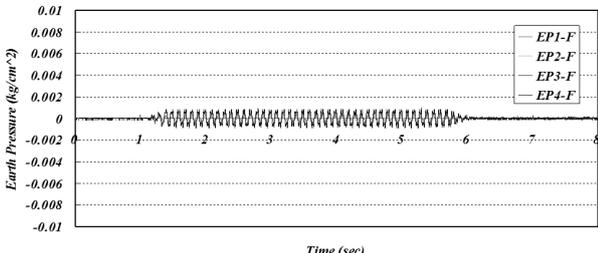
그림 7은 느슨한 포화 사질토 지반에 액상화가 발생하였을 경우, 말뚝에 작용하는 동적 토압을 말뚝 주변 지반에서 발생한 과잉간극수압과 나란히 비교한 그림이다. 그림 7(a)에서 보면 동적 토압과 과잉간극수압은 전체적인 발생 양상뿐 아니라 크기 면에서도 거의 일치함을 알 수 있다. 그리고, 그림 7(a)와 그림 7(b)를 비교



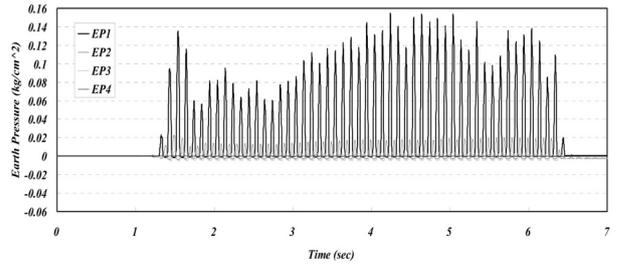
(a) 전 동적 수압



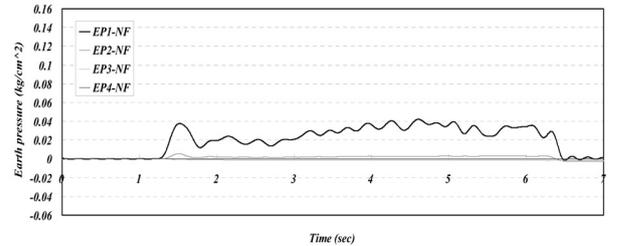
(b) 동적 수압의 비진동 성분



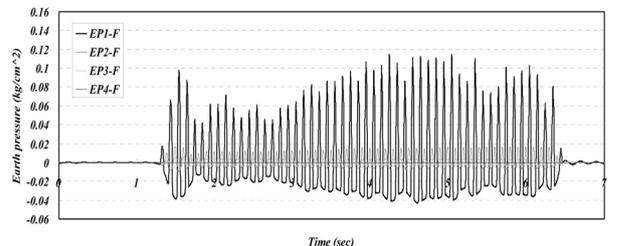
(c) 동적 수압의 진동 성분



(a) 전 동적 토압



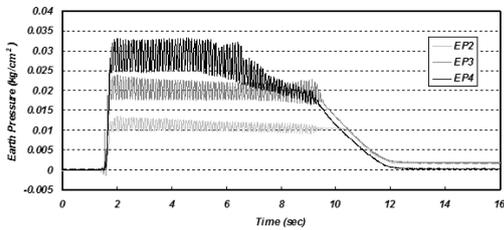
(b) 동적 토압의 비진동 성분



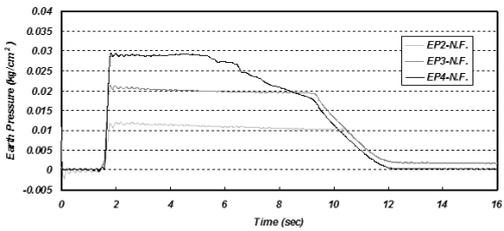
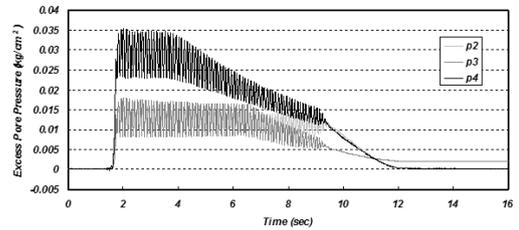
(c) 동적 토압의 진동 성분

그림 5. 물에 설치된 말뚝의 동적 수압(case 1c: 0.1g, 5sec, 10Hz, 3.8kg)

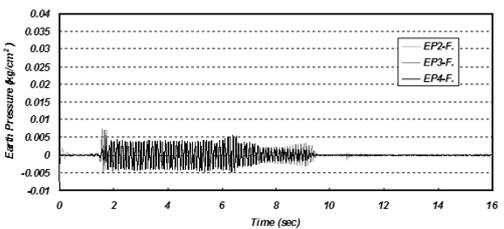
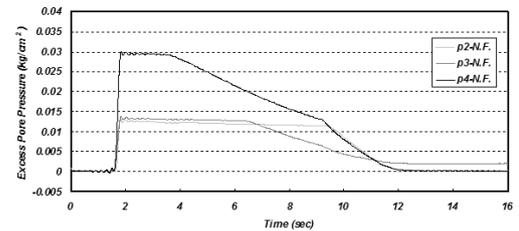
그림 6. 건조 사질토에 설치된 말뚝의 동적 토압(case 2d: 0.1g, 5sec, 10Hz, 80%, 3.8kg)



(a) 전 동적 토압 및 전 과잉간극수압



(b) 동적 토압 및 과잉간극수압의 비진동 성분



(c) 동적 토압 및 과잉간극수압의 진동 성분

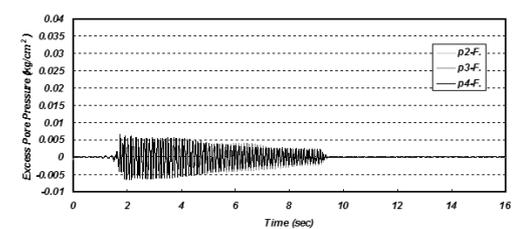


그림 7. 포화 사질토에 설치된 말뚝의 동적 토압과 과잉간극수압 비교 (case 3g: 0.2g, 8sec, 10Hz, 25%, 3.8kg)

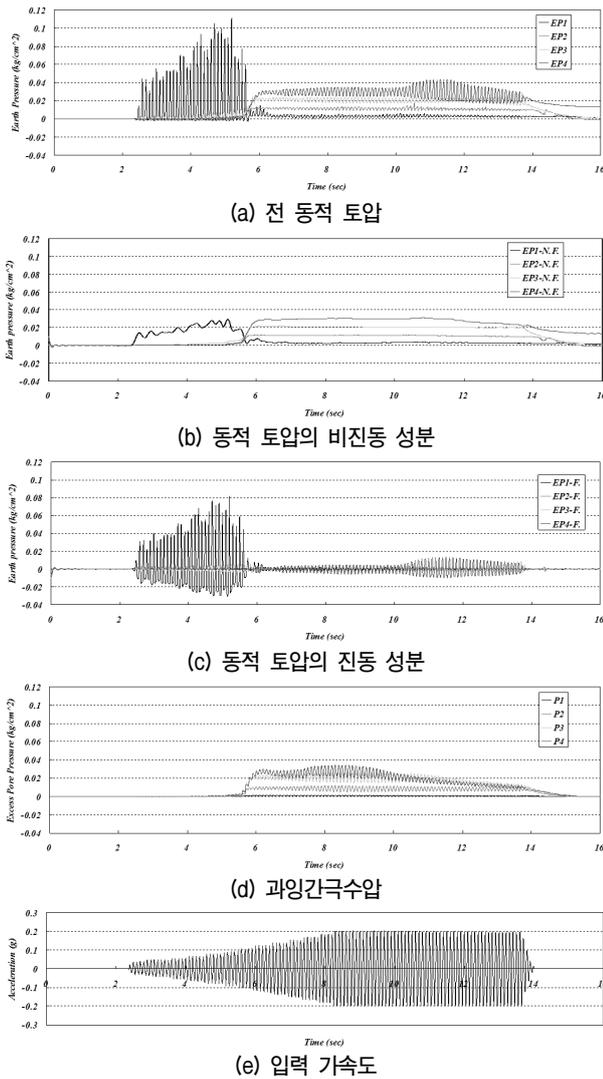
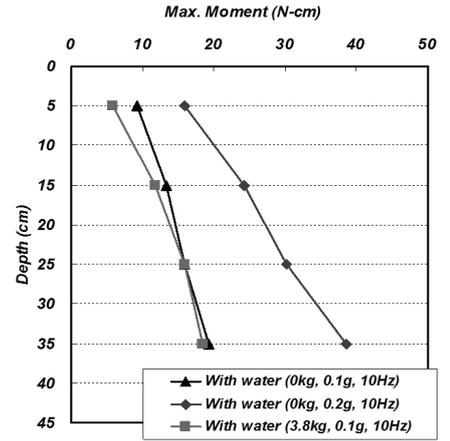


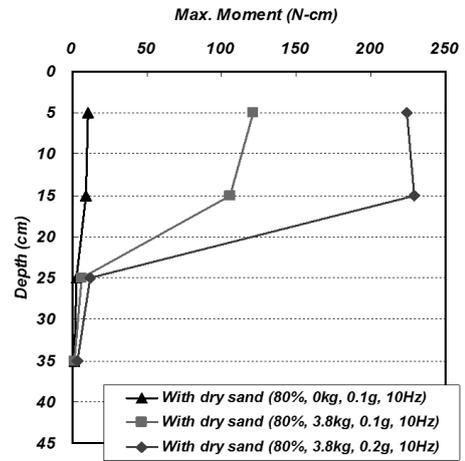
그림 8. 포화 사질토에 설치된 말뚝의 동적 토압과 과잉간극수압 및 입력 가속도와와의 비교(case 3i: 0~0.2g+0.2g, 5+5sec, 10Hz, 25%, 3.8kg)

하여 보면 전체 동적 토압의 대부분이 비진동 성분임을 알 수 있는데, 이 결과는 Kim et al.(2004)의 안벽 구조물 연구에서와 같이 액상화 시에는 동적 토압의 비진동 성분이 진동 중에 발생하는 과잉간극수압과 밀접한 관계가 있음을 나타낸다.

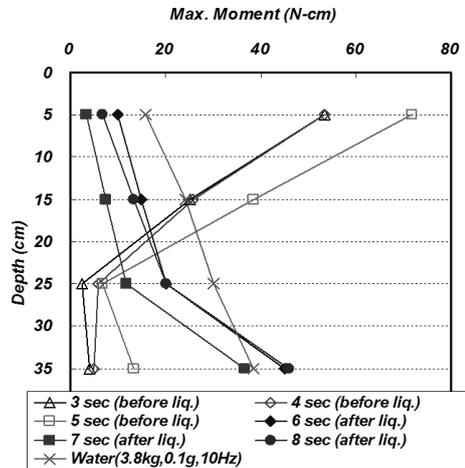
그림 8은 그림 6과 그림 7의 결과를 동시에 보여주는 데, 이 그림은 포화 사질토 지반에서 입력 가속도 크기를 5초 동안 서서히 증가시켜 0.2g에 도달한 후, 그 상태에서 5초간 입력 가속도 크기를 유지한 실험(표 1의 case 3i) 결과이다. 과잉간극수압이 크게 발생하기 전인 약 5초 이전 구간에서는 말뚝에 작용하는 동적 토압이 그림 6의 건조 사질토에서의 실험 결과와 같이 말뚝 상부 하중 관성력의 영향으로 진동 성분이 우세하게 나타나고, 액상화가 발생한 5초 이후 구간에서는 그림 7에서



(a) 물에 설치한 경우



(b) 건조 사질토에 설치한 경우



(c) 느슨한 포화 사질토에 설치한 경우(case 3i: 0~0.2g + 0.2g, 5+5sec, 10Hz, 25%, 3.8kg)

그림 9. 깊이에 따른 말뚝의 최대 모멘트

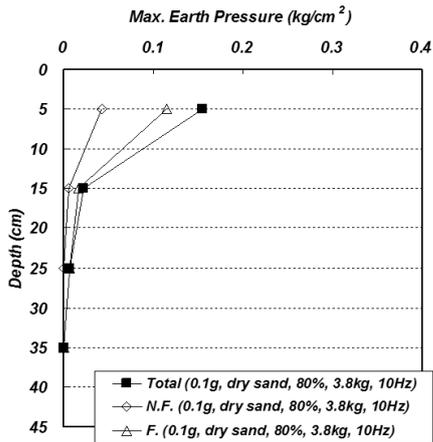
와 같이 동적 토압의 대부분이 비진동 성분인면서 그 크기가 과잉간극수압과 거의 동일한 결과를 나타낸다.

그림 9에 보인 말뚝에 발생한 최대 모멘트는 스트레인 게이지 계측 결과로부터 산정하였는데 이 결과 역시 동적 토압과 마찬가지로 건조 사질토(그림9(b))에서는

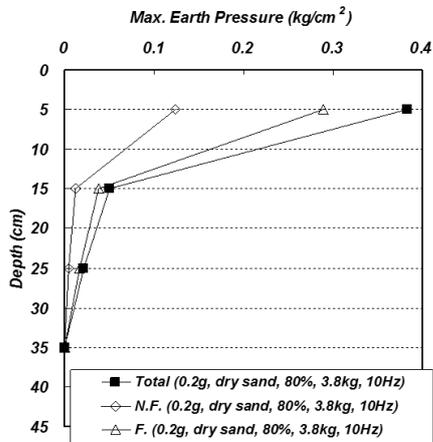
상부에서 큰 모멘트가 발생하였으며, 포화 사질토(그림 9(c))에서는 액상화가 발생하기 전(진동 후 5초 이내)에는 건조 사질토와 유사한 결과를, 그리고 액상화가 발생한 6초 이후 구간에서는 물에 설치한 말뚝(그림 9(a))과 유사한 모멘트 분포를 나타낸다. 직접 비교를 위하여 물속에 설치한 말뚝(표 1의 case 1c)에 발생한 깊이별 최대 모멘트를 그림 9(c)에 포화 사질토에 설치한 말뚝에 발생한 최대 모멘트와 함께 나타내었다. 그러나, 건조 사질토 및 과잉간극수압이 발생하지 않은 포화 사질토의 경우에 비해 액상화 시 말뚝 상부에 발생한 최대 모멘트가 크게 감소하였는데, 그 이유는 액상화 발생 후 액상화 지반의 강도 감도로 인하여, 상부 하중의 관성력에 의한 동적 토압이 말뚝에 작용하지 않기 때문이다.

3.2 입력 가속도 크기에 따른 동적 토압

그림 10과 그림 11은 각각 건조 사질토 및 포화 사질



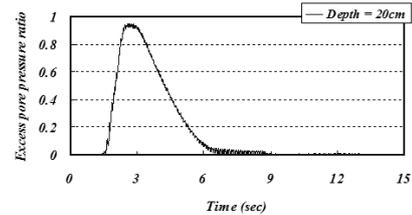
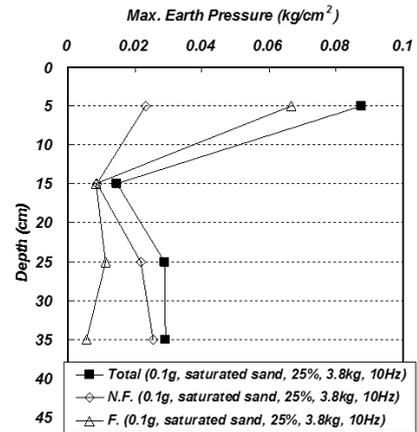
(a) 입력 가속도 0.1g



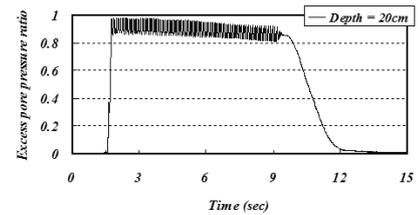
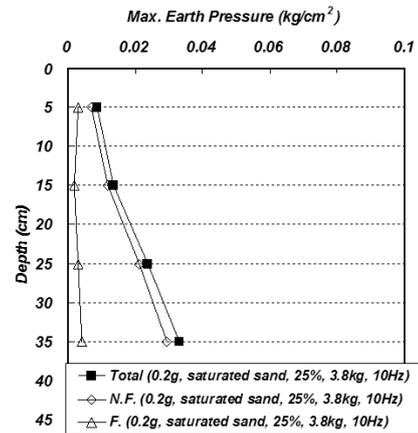
(b) 입력 가속도 0.2g

그림 10. 건조 사질토에서 입력 가속도 크기에 따른 말뚝의 최대 동적 토압(case 2d & 2e)

토의 경우 입력 진동 하중의 크기에 따라 말뚝에 작용하는 깊이별 최대 동적 토압을 진동 성분과 비진동 성분으로 나누어 보여주고 있다. 그림 10의 건조 사질토의 경우 입력 가속도의 진폭이 0.1g에서 0.2g로 증가함에 따라 말뚝에 작용하는 동적 토압의 최대값은 2.5배 정도 증가하였으며, 깊이가 증가함에 따라 동적 토압의 크기가 감소하였다.



(a) 0.1g



(b) 0.2g

그림 11. 포화 사질토에서 입력 가속도 크기에 따른 말뚝의 최대 동적 토압 및 과잉간극수압비(case 3g & 3h)

그러나, 포화 사질토의 경우(그림 11)에는 입력 가속도의 진폭이 0.1g에서 0.2g로 증가함에 따라 말뚝 상부에 발생한 최대 동적 토압이 오히려 감소하였는데, 그 이유는 0.1g에서는 일시적으로 과잉간극수압비가 1에 도달하였다가 곧 소산되어 건조 사질토에서와 같이 상부 하중 관성력에 의한 영향을 크게 받은 반면, 0.2g에서는 액상화 상태가 유지되면서 상부 하중 관성력(관성 효과)의 영향이 소멸되었기 때문이다. 그림 11(b)의 깊이 따른 최대 토압 분포를 보면 진동 성분은 전 깊이에 걸쳐서 거의 0에 가깝고 비진동 성분은 액상화 시 발생한 과잉간극수압(그림 7(a))과 유사하게 깊이가 증가함에 따라 그 크기가 단조 증가하였다.

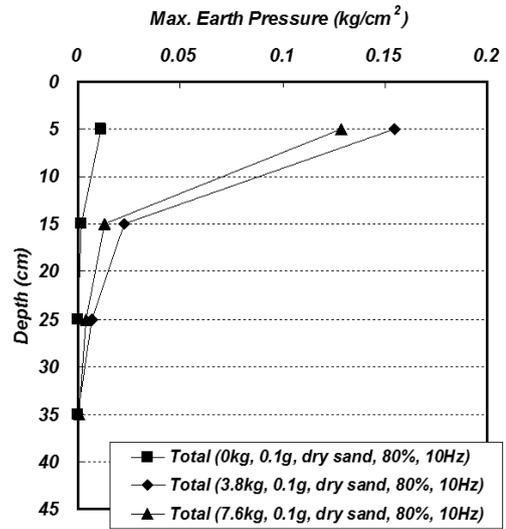
3.3 상부 하중 크기에 따른 동적 토압

그림 12와 그림 13은 건조 사질토 및 포화 사질토에서 각각 상부 하중의 크기에 따라 말뚝에 작용하는 깊이별 최대 동적 토압 및 말뚝과 지반의 깊이별 최대 변위를 보여주고 있다. 말뚝 변위는 스트레인게이지를 부착한 말뚝으로부터 구한 깊이별 모멘트 값에 대하여 cubic spline 방법을 이용해 깊이별 모멘트 분포 곡선을 구한 후, 이를 두 번 적분 하는 방법으로 말뚝 변위를 산정하였다. 지반 변위는 지반에 설치한 가속도 계측값에 대하여 말뚝 변위 계산시와 마찬가지로 cubic spline 방법을 이용해 깊이별 가속도 분포 곡선을 구한 후, 이를 두 번 적분하는 방법으로 계산하였다.

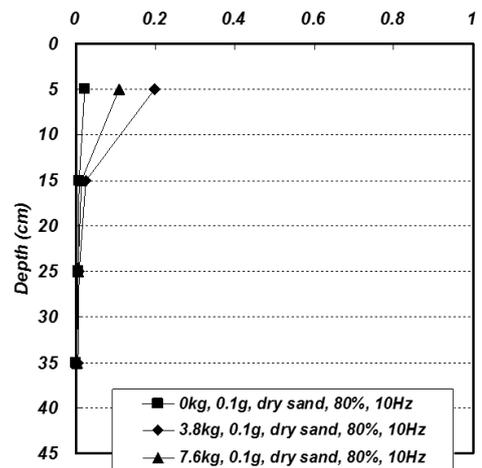
그림 12(a)에서 보면, 건조 사질토의 경우 상부 하중이 없을 경우 말뚝에 작용하는 동적 토압은 상부 하중이 있는 경우에 비해 매우 작게 발생하였는데, 그 이유는 상부 하중이 없는 경우의 동적 토압은 말뚝과 지반의 상대 변위에 따른 운동학적 힘에 의해서만 발생하였기 때문이다. 반면, 상부 하중이 있는 경우에는 말뚝 상부 하중 관성력에 의해 말뚝 작용 토압이 상대적으로 크게 발생하였다. 그러나, 깊이가 깊어짐에 따라 말뚝 변위(그림 12(b))가 감소하면서 동적 토압 또한 감소하였다. 같은 그림에서 보면 상부 하중 크기가 2배로 증가하더라도 말뚝에 작용하는 동적 토압의 크기는 예상과는 달리 큰 차이를 보이지 않는데, 이는 10Hz인 입력주파수가 상부 하중 크기가 3.8kg일 경우에 상부 하중 7.6kg일 때보다 지반-말뚝-상부구조물 시스템의 공진주파수가 가까워 응답이 상대적으로 크게 발생한 것으로 판단된다. 그리고 본 실험의 경우 깊이별 지반 변위(그림

12(c))의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

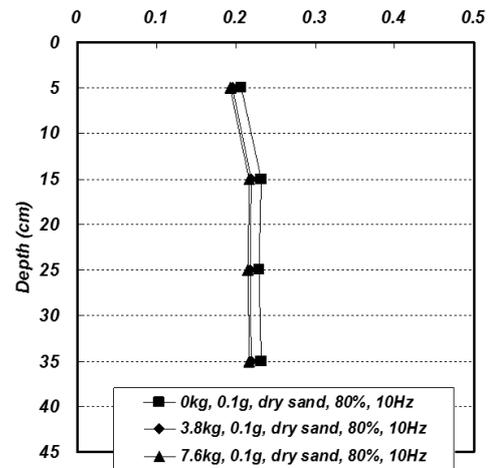
액상화가 발생한 느슨한 포화 사질토의 경우에는 그



(a) 상부 하중에 따른 말뚝의 깊이별 최대 동적 토압



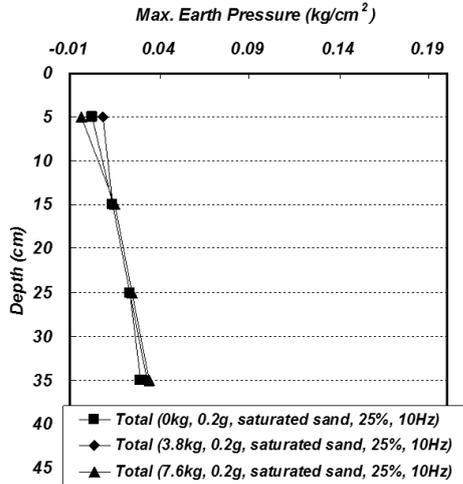
(b) 깊이별 말뚝 최대 변위



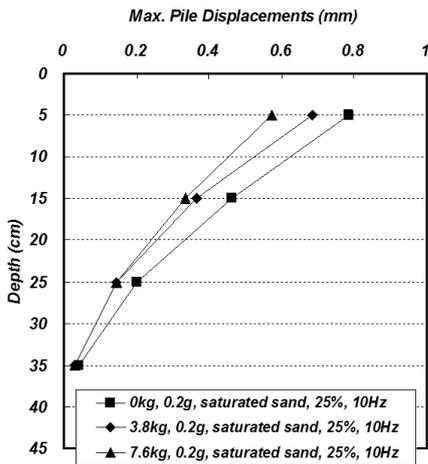
(c) 깊이별 지반 최대 변위

그림 12. 건조 사질토에서 상부 하중 크기에 따른 말뚝의 최대 동적 토압 및 말뚝, 지반 최대 변위(case 2c, 2d, 2f)

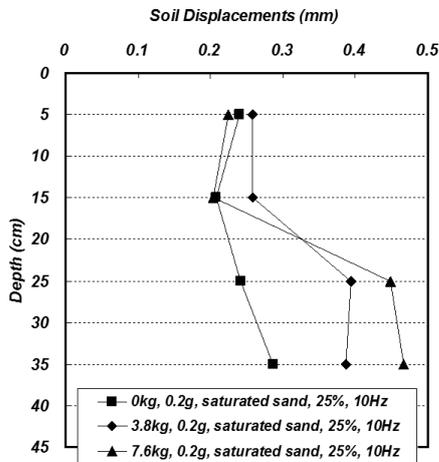
림 13(a)에서 보는 바와 같이(진동 하중에 의한 지반 침하로 인해 동적 토압이 정확히 측정되지 않은 5cm 위치에서의 측정 결과 제외), 말뚝에 작용하는 동적 토압의 크기가 상부 하중의 크기에 상관없이 유사하게 나타났



(a) 상부 하중에 따른 말뚝의 깊이별 최대 동적 토압



(b) 깊이별 말뚝 최대 변위



(c) 깊이별 지반 최대 변위

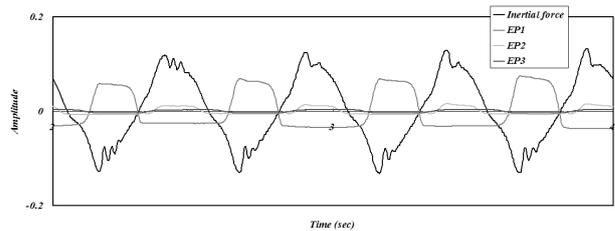
그림 13. 포화 사질토에서 상부 하중 크기에 따른 말뚝의 최대 동적 토압 및 말뚝, 지반 최대 변위(case 3e, 3g, 3j)

다. 이 동적 토압 분포 형태는 말뚝 상부 하중 관성력을 좌우하는 말뚝 변위 곡선(그림 13(b))보다 지반 변위 곡선(그림 13(c))과 유사하다. 이는 액상화가 발생한 포화 사질토에서는 말뚝에 작용하는 동적 토압이 말뚝 상부 하중 관성력보다는 말뚝 주변 지반 운동에 의해 크게 영향을 받고 있음을 보여준다.

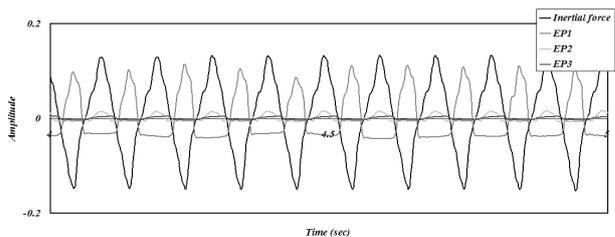
3.4 말뚝에 작용하는 동적 작용력들의 위상 관계

항만 안벽 구조물의 관성력과 안벽에 작용하는 뒤퇴 흙 흠의 동적 토압의 진동 성분 위상차는 뒤퇴 흘에서 발생하는 과잉간극수압의 크기에 따라 달라진다고 알려져 있다(Kohama, 2000; Sato et al., 2000; Kim et al., 2004). 이와 마찬가지로 본 연구에서는 말뚝 주변 지반의 과잉간극수압 크기에 따라 말뚝에 작용하는 동적 작용력들의 위상 관계 변화를 알아보기 위해, Kim et al.(2004)의 안벽구조물의 동적 토압 연구 방법과 같이 상부 하중 가속도 방향의 반대 방향에 토압계를 말뚝에 부착하여 실험을 수행하고 결과를 분석하였다.

그림 14와 그림 15는 건조 사질토 및 포화 사질토에 근입된 말뚝에 작용하는 동적 토압의 진동 성분과 상부 하중에 의한 관성력 사이의 위상 관계를 보여주고 있다. 건조 사질토에서는 그림 14와 같이 가장 상부에 설치한 EP1 토압계에서의 측정 토압이 상부 하중 관성력과 180도의 위상 차이를 보이고 있으나, 다른 깊이에서는 관성력과 동적 토압 사이에 위상 차이가 발생하지 않았다. 이러한 현상은 입력 하중의 진동수 2Hz(그림 14(a))와



(a) 입력 가속도 진동수 : 2Hz



(b) 입력 가속도 진동수 : 10Hz

그림 14. 건조 사질토 조건에서 상부하중 관성력과 동적 토압의 위상 차이(case 2d: 0.1g, 5sec, 80%, 3.8kg)

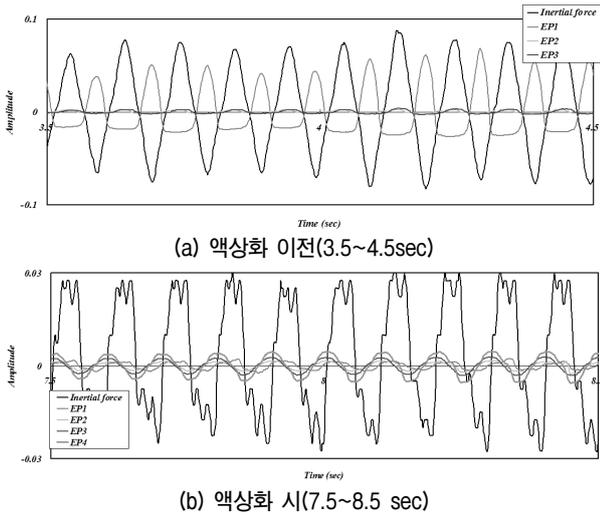


그림 15. 포화 사질토 조건에서 상부하중 관성력과 동적 토압의 위상 차이(case 3i: 0~0.2g+0.2g, 5+5sec, 10Hz, 25%, 3.8kg)

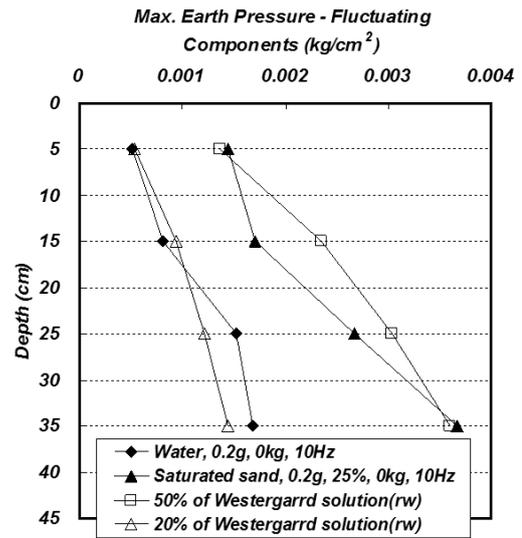


그림 16. Westergaard 해와 물 및 포화 사질토 조건에서의 동적 토압의 진동 성분 비교

10Hz(그림 14(b))에서 동일하게 발생하여, 입력 하중의 진동수와는 무관한 것으로 나타났는데, 말뚝 근입 깊이에 따른 위상 관계의 변화는 지반에 근입된 말뚝의 변위 방향과 관계가 있을 것으로 판단된다.

포화 사질토의 경우에는 액상화가 발생하기 이전(그림 15(a))에는 말뚝 상부 하중의 관성력과 동적 토압 사이의 위상 관계가 그림 14의 건조 사질토의 경우와 유사하나, 액상화가 발생한 이후(그림 15(b))에는 흙의 유동성이 증가하면서 EP1 토압계 깊이에서의 동적 토압이 관성력과 동일한 위상, 즉 같은 방향으로 작용하며, 그 이하의 깊이에서는 관성력과 동적 토압이 90도 정도의 위상 차이를 보인다. 그러나, 액상화가 발생하면 관성력 효과가 소멸하면서 그림 8(a)에서 보는 것처럼 동적 토압의 크기가 크게 감소하게 되는데 이로 인하여 액상화 층과 비액상화층 경계에서 전단력이 크게 발생하여 말뚝을 파괴에 이르게 한다. 이는 액상화 층과 비액상화층의 경계에서 큰 모멘트가 발생하게 된다는 기존의 연구(Finn et al., 2002)를 확인하는 결과이다.

3.5 액상화 시 말뚝에 작용하는 동적 토압 계산

Westergaard 식(식 1)은 일반적으로 댐 및 항만 안벽 구조물에 작용하는 동적 수압을 계산하는 데 사용된다(Westergaard, 1933). Westergaard 식을 이용하여 안벽 구조물에서 액상화 시 점성 유체처럼 거동하는 뒤채움 흙에 의한 동적 토압의 진동 성분을 계산할 수 있는데, 이 경우에는 식 (1)의 γ_w 를 γ_{sat} 로 치환하여 사용한다

(Kohama, 2000; Sato et al., 2000; Fujiwara et al., 2000; Kim et al., 2004).

$$q(z) = \frac{7}{8} k_h \gamma_w \sqrt{H_w z} \quad (1)$$

$$F_{FWD} = \int q(z) = \frac{7}{12} k_h \gamma_w H_w^2$$

여기서, $q(z)$: 깊이 z 에 따른 동적 수압

F_{FWD} : 벽체 전면에 작용하는 동적 수력의 진동 성분

γ_w : 물의 단위중량

k_h : 수평지진계수

H_w : 물의 깊이

그림 16에는 물과 액상화 지반에서 측정한 말뚝에 작용하는 동적 토압의 진동 성분과 함께 식 (1)을 이용하여 산정한 결과를 도시하였다. 이 그림에서 보면, 물에 설치된 말뚝에 작용하는 동적 토압의 진동 성분이 Westergaard 해의 약 20% 정도이며, 액상화 지반에 설치된 말뚝에 작용하는 동적 토압의 진동 성분은 Westergaard 해의 약 50% 정도인 것으로 나타났는데, 그 이유는 원형인 말뚝의 형상 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 액상화 발생 시 말뚝에 작용하는 동적 토압의 진동 성분은 Westergaard 해의 50% 값을 이용하여 산정할 수 있을 것으로 판단되며, 이를 액상화 지반에 근입된 말뚝의 내진 설계시 고

려하여 설계하는 것이 합리적인 것으로 생각된다. 그러나, 이 결과는 지반 구속압이 아주 작은 1g 진동대 실험을 통해 얻은 것이므로, 추후 현장 구속압을 재현할 수 있는 원심모형실험을 이용하여 검증할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 1g 진동대 실험을 수행하여 지반의 액상화 여부에 따라 말뚝에 작용하는 동적 토압의 크기 및 위상변화를 분석하였다.

- (1) 건조 사질토의 경우, 말뚝 상부 하중 관성력이 지반 변형에 의한 힘보다 말뚝에 작용하는 동적 토압에 큰 영향을 주었으며, 포화 사질토의 경우, 액상화 발생시 말뚝에 작용하는 동적 토압은 상부 하중의 크기에 영향을 받지 않고, 말뚝 주변 지반의 과잉간극수압 및 지반 변형에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.
- (2) 건조 사질토의 경우, 지표면에서 가장 가까이에서는 말뚝 상부 하중의 관성력과 말뚝에 작용하는 동적 토압 사이에 180도의 위상차가 발생하였으며, 깊이가 깊어짐에 따라 위상차가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 그러나, 포화 사질토의 경우에는 액상화가 발생하기 이전에는 동적 작용력 사이의 위상 관계가 건조 사질토의 경우와 유사한 양상을 보였으나, 액상화가 발생한 이후에는 흙의 유동성이 증가하면서 지표면 가까이에서의 동적 토압이 관성력과 동일한 방향으로 작용하며, 깊이가 깊어지면서 말뚝 상부 하중의 관성력과 동적 토압은 90도 정도의 위상 차이를 보인다. 또한 액상화 발생 후에는 관성력 효과가 소멸되면서 동적 토압이 크게 감소하는데 이에 따라 액상화 층과 비액상화층 경계에서 말뚝에 큰 전단력과 모멘트가 발생한다.
- (3) 액상화가 발생한 지반에 근입된 말뚝의 동적 토압을 계산하기 위하여, 안벽 구조물에 작용하는 동적 수압을 산정하는 Westergaard 식의 적용 가능성을 검토하였다. 그 결과 액상화 지반에 근입된 말뚝에 작용하는 동적 토압의 진동 성분은 Westergaard 식에 의한 계산값의 약 50% 정도인 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 서울대학교 SIR BK21(안전하고 지속가능

한 사회기반건설)사업단의 지원으로 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Abdoun, T., Dobry, R., and O'Rourke, T.D. (1997), "Centrifuge and numerical modelling of soil-pile interaction during earthquake induced soil liquefaction and lateral spreading", *Observation and Modelling in Numerical Analysis and Model Tests in Dynamic Soil-Structure Interaction Problems—Proc., Sessions held in Conjunction with Geo-Logan '97*, Logan, Utah, pp.76-90.
2. Dobry, R., Taboada, V., and Liu, L. (1995), "Centrifuge modelling of liquefaction effects during earthquakes", *Proc., First Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering*, Tokyo, pp.1291-1324.
3. Finn, W.D.L., and Fujita, N. (2002), "Piles in liquefiable soils: seismic analysis and design issues", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(9), pp.731-742.
4. Fujiwara, T., Horikoshi, K., Higuchi, Y., and Sueoka, T. (2000), "Estimation of Dynamic Displacement of Gravity Type Quay Walls based on Centrifuge Modeling", *Proc. Of 12th World Conf. on Earthquake Engrg.*, The New Zealand Society for Earthquake Engrg., Upper Hutt, New Zealand, Paper No.2429.
5. Horikoshi, K., Tateishi, A., and Fujiwara, T. (1998), "Centrifuge modelling of a single pile subjected to liquefaction-induced lateral spreading", *Soils Found., (Special Issue No.2)*, pp. 193-208.
6. Kim, S. R. Kwon, O. S. and Kim, M. M. (2004), "Evaluation of force components acting on gravity type quay walls during earthquakes", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(11), pp.853-866.
7. Kohama, E. (2000), "A Study on the Stability of Gravity Type Quay Wall during Earthquake", Ph. D. Dissertation, Hokkaido University, Japan.
8. Mizuno, H., Sugimoto, M., Mori, T., Iiba, M., and Hirade, T. (2000), "Dynamic behaviour of pile foundation in liquefaction process—Shaking table tests utilising big shear box", *Proc., 12th World Conf. on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, Paper No.1883.
9. Nakamura, T., Sugano, T., Oikawa, K., and Mito, M. (2000), "An experimental study on the pier damaged by 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake", *Proc., 12th World Conf. on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, Paper No.1038.
10. Ohtomo, K. (1996), "Effects of liquefaction induced lateral flow on a conduit with supporting piles", *Proc., 11th World Conf. on Earthquake Engineering*, Paper No.386.
11. Sato, M., Watanabe, H., Takeda, T., and Shimada, M. (2000), "Simplified Method to Evaluate Caisson Type Quay Wall Movement", *Proc. Of 12th World Conf. on Earthquake Engrg.*, The New Zealand Society for Earthquake Engrg., Upper Hutt, New Zealand, Paper No.1440.
12. Tamura, S., Suzuki, Y., Tsuchiya, T., Fujii, S., and Kagawa, T. (2000), "Dynamic response and failure mechanisms of a pile foundation during soil liquefaction by shaking table test with a large scale laminar shear box", *Proc., 12th World Conf. on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, Paper No.0903.
13. Tokimatsu, K., Suzuki, H., and Sato, M. (2005), "Effects of inertial and kinematic interaction on seismic behavior of pile with

- embedded foundation”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(7-10), pp.753-762.
14. Westergaard, H.M. (1933), “Water Pressures on Dams during Earthquakes”, *Trans. of ASCE*, Vol.98, pp.418-432.
15. Wilson, D. W., Boulanger, R. W., and Kutter, B. L. (2000), “Observed seismic lateral resistance of liquefying sand”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 126(10), pp.898-906.
16. Yasuda, S., Ishihara, K., Morimoto, I., Orense, R., Ikeda, M., and Tamura, S. (2000), “Large-scale shaking table tests on pile foundations in liquefied ground”, *Proc., 12th World Conf. on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, Paper No.1474.

(접수일자 2011. 7. 25, 심사완료일 2011. 9. 19)