

액상화 지반에 근입된 말뚝의 파괴거동 분석

Analysis of Failure Behavior of Piles Embedded in Liquefied Soil Deposits

조 종 석¹ Cho, Chong-Suck

한 진 태² Han, Jin-Tae

황 재 익³ Hwang, Jae-Ik

박 영 호⁴ Park, Young-Ho

김 명 모⁵ Kim, Myoung-Mo

Abstract

Liquefaction-induced lateral spreading has been the most extensive damage to pile foundations during earthquakes. Several cases of pile failures were reported despite the fact that a large margin of safety factor was employed in their design. In this study, 1-g shaking table tests were performed in order to analyze the failure behavior of piles embedded in liquefied soil deposits by buckling instability. As a result, it can be concluded that the pile subjected to excessive axial loads (near P_{cr}) can fail easily by buckling instability during liquefaction. When lateral spreading took place in sloping grounds, it was found that lateral loading due to lateral spreading increased lateral deflection of pile and reduced the buckling load. In addition, from the buckling shape of pile, difference between Euler's buckling and pile buckling was observed. In the case of pile buckling, hinge formed at the middle point of the pile, not at the bottom. And in sloping grounds, location of hinge formation got lower compared with level ground because of the soil movements.

요 지

지진 시 액상화에 의한 지반흐름은 말뚝파괴에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 실제로 충분히 큰 정적 안전율을 갖도록 설계된 말뚝이 지진 시 좌굴에 의해 파괴되는 사례가 빈번히 발생하였다. 본 연구에서는 1-g 진동대 실험을 통해 액상화 지반에 근입된 말뚝의 좌굴에 의한 파괴거동을 분석하였다. 실험 결과, 좌굴하중에 근접한 연직하중을 받고 있는 말뚝은 지반의 액상화 발생 시 좌굴에 의해 쉽게 파괴될 수 있으며 액상화에 의한 지반흐름이 발생할 경우, 말뚝의 횡방향 변형이 증가하면서 좌굴파괴하중이 감소함을 알 수 있었다. 또한 파괴된 말뚝을 꺼내어 관찰한 결과, 액상화가 발생한 후라도 지반에 구속압이 존재하여 Euler 좌굴현상과 다르게 말뚝 하부가 아닌 중간위치에서 말뚝 파괴가 발생하였으며 지반경사가 급해질수록 지반흐름에 의한 파괴 위치가 점점 말뚝하부로 낮아짐을 볼 수 있었다.

Keywords : Shaking table test, Liquefaction, Lateral spreading, Buckling instability, Pile failure

1. 서 론

지진 시 말뚝은 큰 피해를 입으며 특히 액상화에 의한

지반흐름은 말뚝파괴에 가장 심각한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Yasuda and Berrill 2002; Abdoun and Dobry 2002). 이에 따라 현재 지진하중에 의한 말뚝의

1 정희원, 서울대학교 공학연구소 보조연구원 (Member, Assistant Researcher, Engrg. Research Institute, Seoul National Univ., jsmania78@naver.com, 교신저자)

2 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사후 연구원 (Member, Post-Doc, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul National Univ.)

3 정희원, 서울대학교 공학연구소 연구원 (Member, Researcher, Engrg. Research Institute, Seoul National Univ.)

4 정희원, 현대건설 기술연구소 수석연구원 (Member, Principal Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology)

5 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

설계는 횡방향력을 고려한 휨 메커니즘에 초점을 맞추고 있다(JRA code 1996; NEHRP 2000; Eurocode 8 1998). 예를 들어 JRA code에서는 그림 1과 같이 액상화가 발생하지 않은 토층에서 수동토압이 발생하고 그 아래 액상화층에서는 상재하중의 30%의 토압이 발생한다고 가정하여 말뚝이 휨 파괴에 저항하도록 설계하고 있다. 하지만 큰 안전율을 갖도록 설계된 Showa Bridge가 지진 시 말뚝 좌굴에 의해 파괴되는 사례가 발생했으며 이는 현재의 설계방법이 문제가 있음을 의미한다. 이에 Bhattacharya 등(2004)은 말뚝의 좌굴파괴에 바탕을 둔 새로운 말뚝파괴 메커니즘을 제안하였다. 이들은 50-g 원심모형 실험을 실시하여 느슨한 포화 사질토에 근입된 축하중만을 받는 말뚝은 지진 시 지반이 액상화되어 횡방향 구속력을 제공하지 못하게 되면 좌굴에 의해 파괴될 수 있음을 밝혔다. 수평지반에서 원심모형 실험을 수행한 결과 모형말뚝은 실제 지진 시 액상화 지반에 근입된 말뚝의 파괴모드와 유사하게 관찰되었다. 만일 지반흐름, 관성력, 말뚝 수직성의 문제 등으로 인해 횡방향 하중이 발생하면 말뚝은 횡방향 변형이 증가하며 좌굴하중이 감소하여 말뚝의 파괴가 가속화될 우려가 있다. 따라서 본 연구에서는 1-g 진동대 실험을 통해 지진 시 말뚝파괴에 가장 심각한 영향을 미치는 지반흐름과 새롭게 제안된 파괴 메커니즘인 좌굴을 고려하여 액상화 지반에 근입된 말뚝의 파괴거동을 분석하였다.

2. 진동대 실험 개요 및 실험 조건

2.1 실험 개요

본 연구에서는 말뚝의 좌굴에 의한 파괴거동을 분석하기 위하여, 말뚝의 상부하중 및 지반경사를 변화시켜 1-g 진동대 실험을 수행하였다. 본 실험을 위하여 2축 진동대가 사용되었으며 그 크기는 2m(가로)×2m(세로)이다. 이축 진동대의 최대 가속도, 최대 진동수는 각각

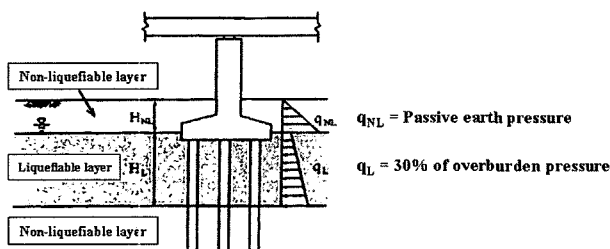


그림 1. 말뚝의 내진설계 시 토압분포(JRA Code, 1996)

1g와 50Hz이다. 실험에 사용된 토조는 크기가 192cm(길이)×60cm(높이)×44cm(폭)이며 투명 아크릴판으로 제작하였다. 본 실험을 위해 말뚝 1본당 스트레인 게이지 8개, LVDT 2개, 그리고 간극수압계 5개가 사용되었다. 스트레인 게이지를 말뚝에 부착하여 말뚝에 발생하는 모멘트를 구하였으며, LVDT를 통해 말뚝두부변위를 계측하였다. 그리고 간극수압계를 지반에 깊이별로 설치하여 지반의 액상화 여부를 알아보았다.

2.2 실험 모델

2.2.1 모형지반

실험에 사용된 모래는 주문진 표준사로서 유효입경 D_{10} 은 0.38mm, 평균입경 D_{50} 은 0.57mm, 균등계수 C_u 는 1.58, 비중은 2.62, 그리고 최대·최소 건조단위중량은 각각 15.99kN/m^3 과 13.05kN/m^3 이었다. 실험에 사용된 주문진 표준사의 입도분포곡선은 그림 2와 같다.

2.2.2 모형말뚝

모형말뚝은 그림 3과 같이 길이 550mm, 외경 14mm, 두께 1mm의 알루미늄 합금으로 제작하였으며 그 재원은 표 1과 같다. 실험에 사용된 모형말뚝의 탄성계수를

표 1. 실험에 사용된 말뚝의 재원

재 원	알루미늄 합금
길 이	550mm
외 경	14mm
두께	1mm
세장비	119.3
탄성계수	67.82GPa
휨강성, EI	58.86N·m ²
Euler 좌굴하중, P _{cr}	48.95kg

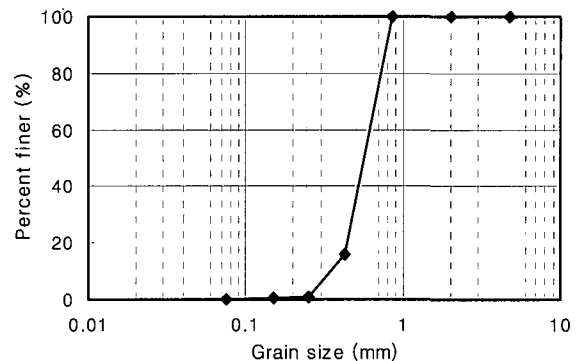


그림 2. 주문진 표준사의 입도분포곡선

구하기 위해 one point loading test를 실시하였으며 탄성 계수는 67.82GPa로 계산되었다. 말뚝에 발생하는 휨모멘트를 측정하기 위해 8개의 스트레인 게이지를 부착하였다. 게이지의 부착 위치는 말뚝두부로부터 각각 10cm, 20cm, 35cm, 50cm이다.

모형말뚝의 좌굴하중(P_{cr})은 지반의 액상화 발생 시 횡방향 구속력을 제공하지 못한다는 가정 하에 Euler의 좌굴하중 공식을 이용하여 계산하였다. 지점 경계조건은 하부는 고정단, 두부는 자유단으로 정하였으며 계산된 좌굴하중은 48.95kg이었다. 하지만 그림 4에서 볼 수 있듯이 실제 말뚝의 좌굴 실험 시에는 편심이 발생하여 이론적인 Euler 좌굴하중에 도달하기 전에 좌굴파괴가 발생하였다. 그러므로 실험 시 기준 좌굴하중은 이론적인 Euler 좌굴하중보다 작은 42.7kg이 적용되었다. 진동

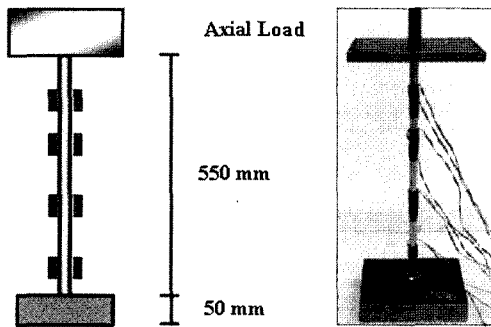


그림 3. 모형말뚝과 상부하중

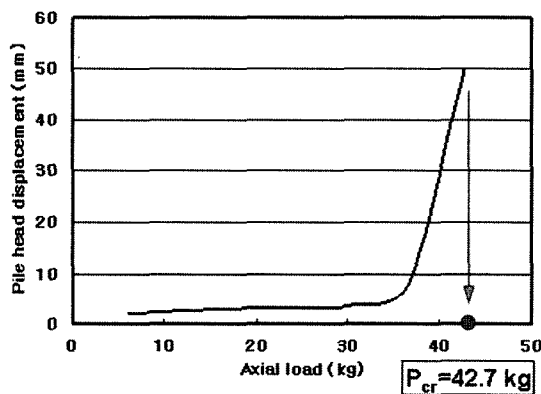


그림 4. 편심에 의한 말뚝두부변위(좌굴하중 결정)

대 실험 시에는 좌굴하중($P_{cr} = 42.7\text{kg}$)의 0.52, 0.71, 0.86, 0.95, 1.0, 1.26배의 하중을 말뚝 상단에 재하하였다.

2.3 실험 조건

표 2와 그림 5는 각각 실험 조건 및 실험 단면을 보여준다. 좌굴을 고려한 말뚝의 파괴거동을 분석하기 위하여 수평지반 건조토(type ①), 수평지반 포화토(type ②), 그리고 경사지반 포화토(type ③)의 3가지 종류에 대해 진동대 실험을 수행하였다. 말뚝의 근입깊이는 37 cm로 모두 동일하게 하였다. Type ①과 ② 실험을 통해 각각 액상화 미발생 시와 발생 시 말뚝의 좌굴 영향을 알아보았으며, Type ③ 실험을 통해 지반흐름 시 말뚝의 좌굴 영향을 알아보았다.

액상화 미발생 시 말뚝의 좌굴영향을 알아보기 위해 Type ① 실험을 실시하였으며 건조토는 느슨한 경우와 조밀한 경우 두가지 조건에 대해 수행하였다. 느슨한 지반은 주문진 표준사를 천천히 부어 조성하였고 조밀한 지반은 0.4g, 5Hz의 정현파를 이용하여 10cm씩 1분간 진동다짐을 하여 매우 조밀하게 조성하였다. 조성된 건조모래지반의 상대밀도는 각각 38%와 80%였다. 그리고 0.52 P_{cr} , 0.71 P_{cr} , 1.0 P_{cr} , 1.26 P_{cr} 의 연직하중을 말뚝두부에 재하하였다.

액상화 발생 시 말뚝의 좌굴영향을 알아보기 위해 Type ② 실험을 실시하였다. 액상화를 발생시키기 위해 토조의 수위를 37cm로 일정하게 유지하고 주문진 표준사를 수중에서 낙하시켜 매우 느슨한 포화지반을 조성하였다. 조성된 포화지반의 상대밀도는 24%였다. Type ①과 같은 방법으로 0.52 P_{cr} , 0.71 P_{cr} , 0.95 P_{cr} , 1.0 P_{cr} 의 연직하중을 말뚝두부에 재하하였다.

액상화 발생 시 지반흐름과 말뚝의 좌굴영향을 알아보기 위해 Type ③ 실험을 실시하였다. 매우 느슨한 포화지반을 조성하였으며 그 방법은 Type ②와 동일하다. 지반흐름의 영향을 고려하기 위해 지반경사를 5°와 10°의 두가지로 변화시켜 실험을 수행하였다. 5° 경사지반

표 2. 실험 조건

실험종류	지반조건	경사각(°)	재하된 연직하중(P/P_{cr})	상대밀도, D_r (%)
Type ①	건조토	0	0.52, 0.71, 1.0, 1.26	느슨 : 38
				조밀 : 80
Type ②	포화토	0	0.52, 0.71, 0.95, 1.0	24
Type ③	포화토	5	0.52, 0.71, 0.86, 0.95	24
		10	0.52, 0.71, 0.86	

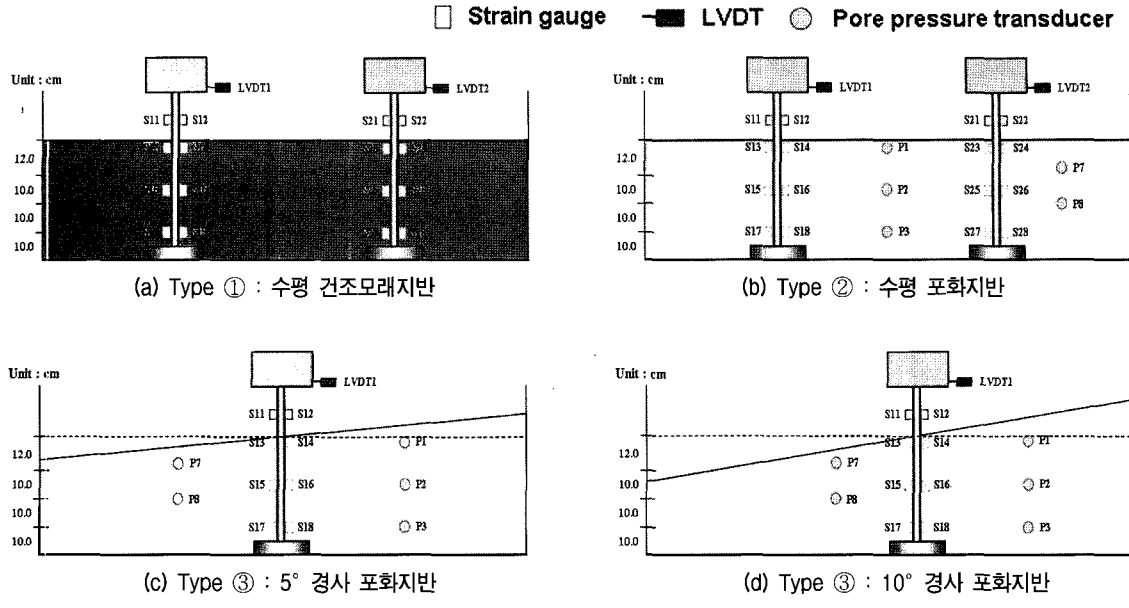


그림 5. 실험 단면 및 계측기 위치

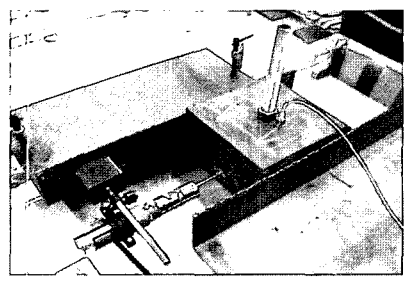


그림 6. L형판 설치 후 실험 단면

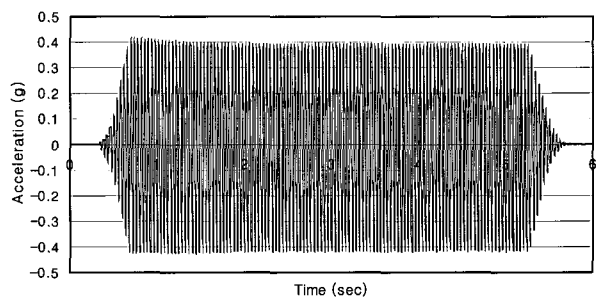


그림 7. 입력지진의 시간이력 곡선

의 경우 $0.52P_{cr}$, $0.71P_{cr}$, $0.86P_{cr}$, $0.95P_{cr}$ 의 연직하중을, 10° 경사지반의 경우 $0.52P_{cr}$, $0.71P_{cr}$, $0.86P_{cr}$ 의 연직하중을 재하하였다.

진동으로 인한 지반흐름의 영향을 배제하기 위해 진동은 토조의 길이방향이 아닌 폭방향으로 적용시켰으며 그림 6과 같이 L형판을 설치하여 상부하중에 의한 관성력을 제거하였다. 진동대 입력 지진파는 액상화 발생을 용이하게 하고, 상부하중에 의한 말뚝두부변위를 최소화하기 위하여 최대진폭 $0.4g$, $25Hz$ 주파수를 갖는 정현파를 사용하였다. 입력지진파의 시간이력은 그림 7과 같다.

3. 진동대 실험 결과

3.1 최대 휨모멘트 결과

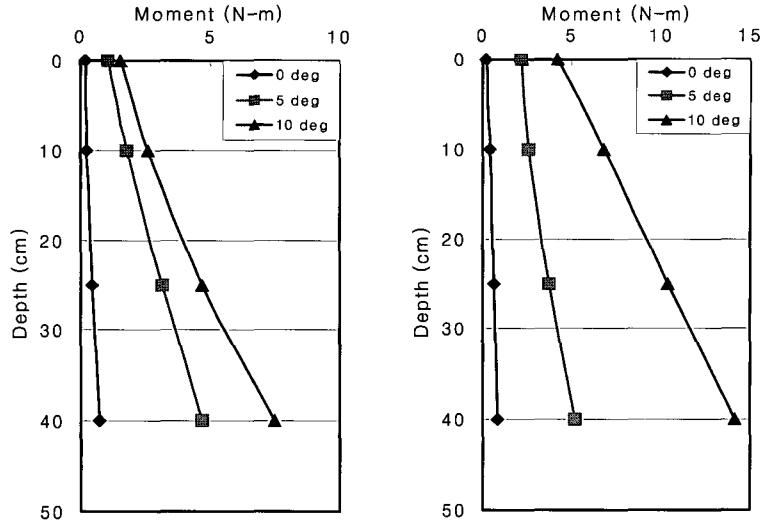
말뚝에 부착된 스트레인 게이지를 통해 말뚝에 발생하는 휨모멘트를 계산하였다. 말뚝의 최대 휨모멘트 결

과는 좌굴 발생 전 다양한 연직하중과 지반경사에 따른 깊이별 최대 휨모멘트와 좌굴 발생 시 최대 휨모멘트 결과를 나누어 분석하였다.

3.1.1 좌굴 발생 전 말뚝의 최대 휨모멘트

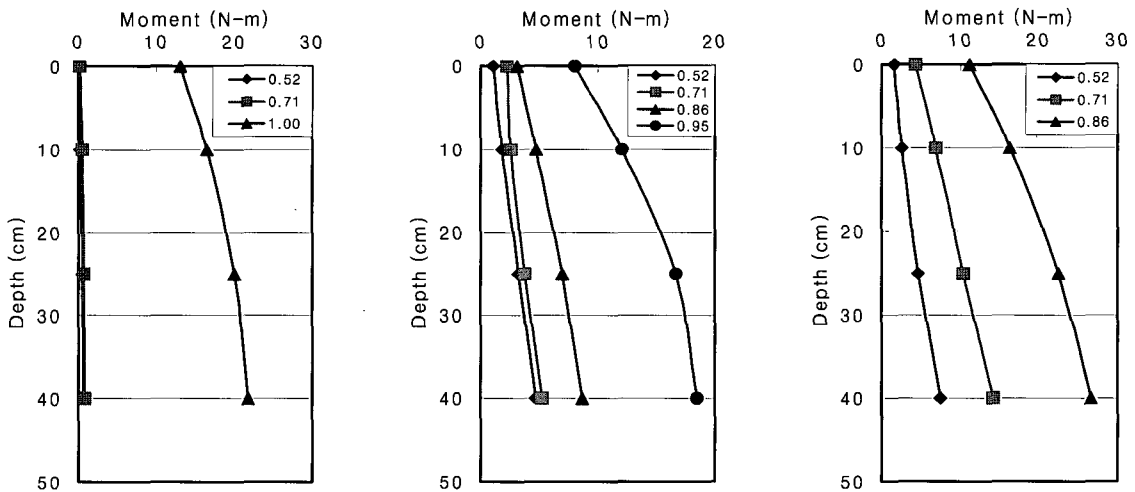
그림 8은 type ②와 type ③ 실험을 통해 얻은 좌굴 발생 전 깊이별 최대 휨모멘트 값을 보여주고 있다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 포화 수평지반의 경우 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트는 연직하중이 증가할수록, 그리고 깊이가 깊어질수록 증가하지만 값의 크기는 매우 작음을 알 수 있다. 이론적으로 수평지반인 경우에는 휨모멘트가 발생하지 않지만 실제적으로는 작은 휨모멘트가 측정되었으며, 이것은 하중 재하 시 발생한 편심에 의한 영향으로 판단된다.

포화 경사지반에서는 연직하중이 $0.52P_{cr}$, $0.71P_{cr}$ 인 경우 지반경사가 5° 에서 10° 로 급해짐에 따라 최대 휨모멘트가 각각 1.5배, 2.5배 증가하였다. 즉, 지반흐름이



(a) $P/P_{cr} = 0.52$ (b) $P/P_{cr} = 0.71$

그림 8. 좌굴 발생 전 깊이별 최대 휨모멘트(N·m)



(a) 수평지반 (b) 5° 경사지반 (c) 10° 경사지반

그림 9. 좌굴 발생 전과 발생 시 깊이별 최대 휨모멘트(N·m)

발생하기 전인 수평지반에서는 최대 휨모멘트가 0에 가까운 값을 나타내지만, 경사지반에서는 액상화에 따른 지반흐름에 의해 말뚝에 발생하는 휨모멘트가 증가하였으며 이를 통해 액상화에 의한 지반흐름은 말뚝기초 설계 시 반드시 고려해야 함을 알 수 있다. 또한, 지반경사가 5°일 때에 비해 10°일 때 최대 휨모멘트 값이 더 컸으며 이는 10° 경사지반인 경우 5° 경사지반일 때 보다 흐름양 및 흐름속도가 증가한다는 것을 나타내고 있다.

3.1.2 좌굴 발생 시 말뚝의 최대 휨모멘트

그림 9는 좌굴 발생 전과 좌굴 발생 시 최대 휨모멘트 값을 보여주고 있다. 포화 수평지반인 경우(그림 9(a))

좌굴 발생 전에는 앞 절에서 논의한 것과 같이 휨모멘트 값이 매우 작았다. 하지만 연직하중이 좌굴하중인 $1.0P_{cr}$ 인 경우 좌굴파괴가 발생하면서 휨모멘트가 급격히 증가하였다.

포화 경사지반인 경우 수평지반과 달리 좌굴파괴가 발생하기 전에 지반흐름에 의해 휨모멘트가 발생하였다. 5° 경사지반인 경우(그림 9(b)) 좌굴하중보다 작은 $0.95P_{cr}$ 에서 좌굴파괴가 발생하였으며, 10° 경사지반인 경우(그림 9(c)) 5° 경사지반에서 좌굴하중보다 작은 $0.86P_{cr}$ 에서 좌굴파괴가 발생하였다. 이는 10° 경사지반에서 지반흐름의 영향이 증가하여 좌굴하중을 감소시킨 것으로 판단된다. 이를 통해 액상화에 의한 지반흐름

은 말뚝의 휨모멘트를 증가시키며 좌굴하중을 감소시켜 말뚝의 파괴를 가속화함을 알 수 있다.

3.2 말뚝두부변위 결과

말뚝두부에 설치한 LVDT를 이용하여 진동 시 말뚝두부변위를 계측하였다. 말뚝두부변위 결과는 최대 말뚝두부변위와 과잉간극수압 변화에 따른 말뚝두부변위 결과로 나누어 분석하였다.

3.2.1 최대 말뚝두부변위

그림 10은 최대 말뚝두부변위 결과를 보여주고 있다. Type ① 실험의 경우 모든 말뚝은 $0.52P_{cr}$, $0.71P_{cr}$, $1.0P_{cr}$, 그리고 $1.26P_{cr}$ 의 모든 연직하중 조건에서 파괴되지 않았다. 이는 건조모래지반이 말뚝에 충분한 횡방향 구속력을 발휘하였기 때문으로 판단된다.

Type ② 실험의 경우 말뚝은 연직하중이 좌굴하중인 $1.0P_{cr}$ 일 때 좌굴파괴가 발생하였다. 즉, 지반의 액상화 발생 시 말뚝 주위의 흙이 횡방향 구속력을 잃고 더 이상 말뚝을 지지할 수 없게 되어 말뚝은 $1.0P_{cr}$ 에서 좌굴파괴가 발생하였다.

Type ③ 실험의 경우 5° 경사지반에서는 $0.95P_{cr}$ 에서, 10° 경사지반에서는 $0.85P_{cr}$ 에서 말뚝이 파괴되었다. 이는 액상화에 의한 지반흐름이 말뚝의 횡방향 변형을 증가시키며 좌굴하중을 감소시켜 말뚝의 파괴를 가속화함을 의미한다. 이 결과는 최대 휨모멘트 결과와 일치한다.

3.2.2 과잉간극수압에 따른 말뚝두부변위

지반의 액상화 여부를 판단하기 위하여 5개의 간극수압계가 사용되었으며 각각 수면으로부터 10.0, 17.5, 25.0, 29.5, 그리고 40.0cm 깊이에 설치하였다. 그림 11은 5° 경사지반에서 좌굴이 발생하기 전인 $0.52P_{cr}$ 의 연직하중이 작용하는 경우 지반의 깊이별 과잉간극수압비 시간이력에 따른 말뚝두부변위 시간이력을 보여주고 있다. 그림 11에서 알 수 있듯이 진동 시작과 동시에 과잉간극수압의 증가로 인해 액상화(과잉간극수압비=1.0)가 발생하였으며, 이와 동시에 말뚝두부변위가 지반의 경사방향으로 발생하고 빠르게 증가하였다. 전 지반에 걸쳐 액상화가 발생할 때 말뚝두부변위는 최대값에 도달하였으며 진동 종료 시 변위는 더 이상 발생하지 않고 일정한 잔류변위에 도달하였다. Type ②, ③ 실험 시에도 좌굴이 발생하지 않은 말뚝은 이와 같은 결과를 보여주었다.

그림 12는 5° 경사지반에서 좌굴이 발생한 $0.95P_{cr}$ 의 연직하중이 작용하는 경우 지반의 깊이별 과잉간극수압비 시간이력에 따른 말뚝두부변위의 시간이력을 보여주고 있다. 이 말뚝은 진동 시 지반의 액상화에 의해 좌굴파괴가 발생하였다. 좌굴이 발생한 말뚝두부변위 시간이력은 좌굴이 발생하지 않은 말뚝두부변위 시간이력과 확연히 차이를 알 수 있다. 진동 시작과 동시에 액상화가 발생하였으며 말뚝두부변위는 좌굴이 발생할 때까지 지반의 경사방향으로 계속 증가하였다. Type ②, ③ 실험 시에도 좌굴이 발생한 말뚝은 이와 같은 결과가 나타났다.

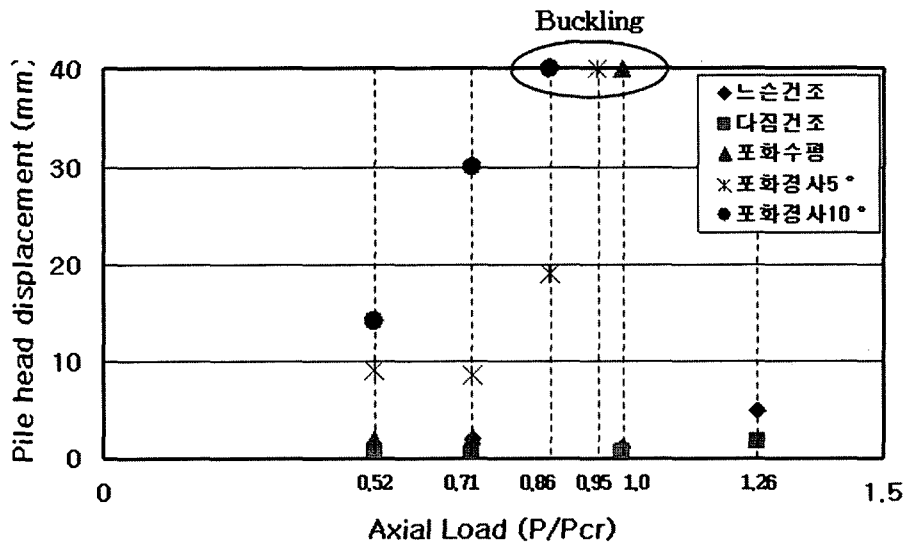


그림 10. 연직하중에 따른 최대 말뚝두부변위(mm)

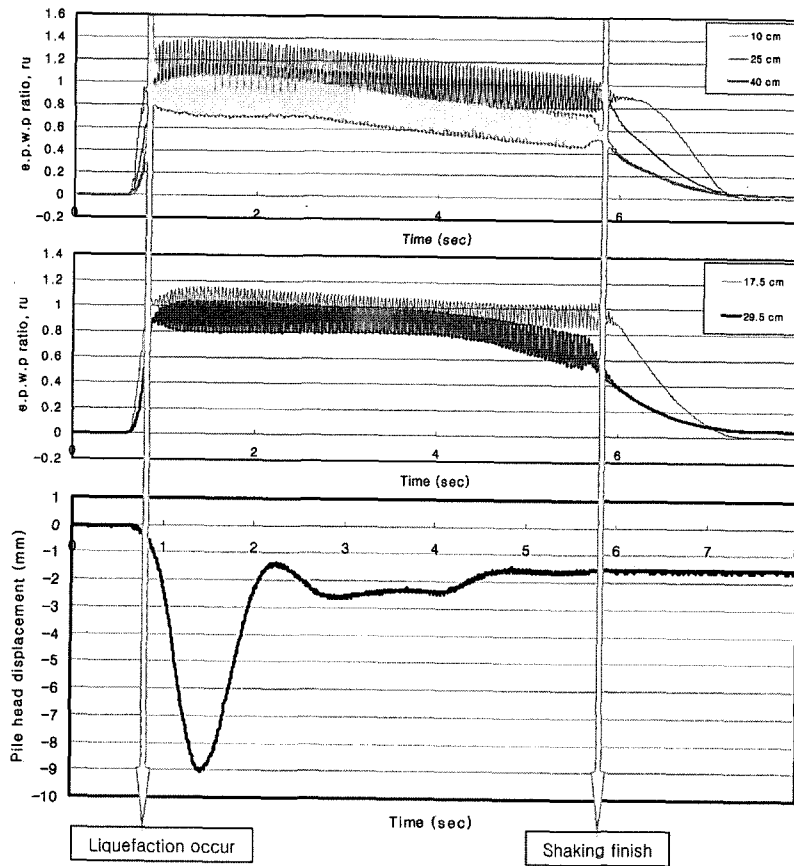


그림 11. 간극수압비 시간이력과 말뚝두부변위 시간이력 비교(5° 경사지반, 0.52 P_{cr} - 좌굴파괴 미발생)

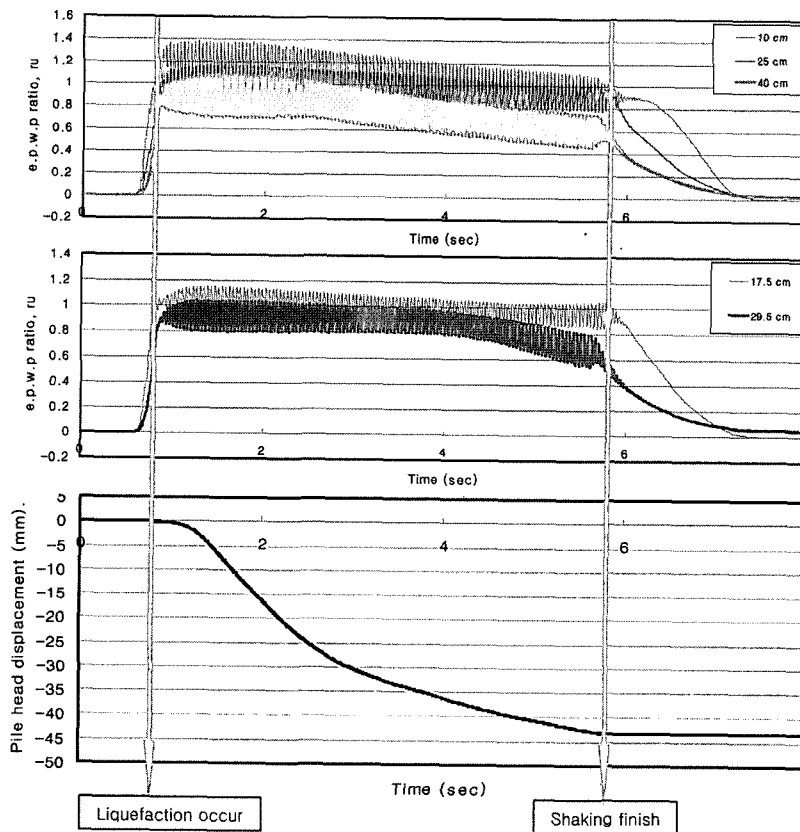


그림 12. 간극수압비 시간이력과 말뚝두부변위 시간이력 비교(5° 경사지반, 0.95 P_{cr} - 좌굴파괴 발생)

3.3 말뚝의 좌굴파괴 형상 결과

실험 후 좌굴파괴가 발생한 말뚝을 관찰한 결과 일반적인 Euler 좌굴과 액상화 지반에 근입된 말뚝의 좌굴에 차이점이 있음을 알 수 있었다. 그림 13은 포화 수평지반, $1.0P_{cr}$ 에서 좌굴이 발생한 말뚝의 좌굴파괴 형상이다. Euler 좌굴은 곡률이 최대인 지점, 즉, 최대 휨모멘트가 발생하는 기둥 하부에서 좌굴이 발생하지만 액상화 지반에 근입된 말뚝의 경우 말뚝 하부가 아닌 말뚝의 중간위치에서 좌굴이 발생하였다. 이는 액상화된 지반이 말뚝에 어느 정도의 횡방향 구속력을 발휘하여 말뚝 전체 길이에서의 좌굴을 억제한 것으로 판단된다.

그림 14에서 볼 수 있듯이 수평지반과 경사지반에서 말뚝의 좌굴파괴 형상을 비교한 결과 경사지반에서는 좌굴파괴 위치가 수평지반에 비해 낮아졌는데, 이는 액상화에 의한 지반흐름의 영향 때문으로 판단된다. 또한, 지반경사가 5° 에서 10° 로 급해질수록 좌굴파괴 위치는 더 낮아졌으며 이 결과로부터 10° 경사지반인 경우 5° 경사지반에 비해 흐름의 양과 흐름 깊이가 증가하였음을 알 수 있다.

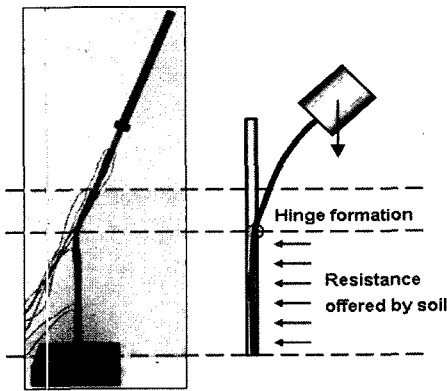


그림 13. 수평지반에서 말뚝의 좌굴파괴 형상

4. 결론

본 연구에서는 진동대 실험을 이용하여 액상화 지반에 근입된 말뚝의 좌굴파괴거동을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 건조모래지반에 놓인 말뚝의 경우 상대밀도에 상관 없이 Euler 좌굴하중의 126%까지 재하하여도 모두 견재하였다. 이는 지반이 말뚝에 충분한 횡방향 구속력을 발휘하였기 때문으로 판단된다.
- (2) 액상화가 발생한 지반에 말뚝이 위치할 경우 수평지반에서는 연직하중이 Euler 좌굴파괴하중과 같을 때, 5° 경사지반에서는 연직하중이 Euler 좌굴하중의 95%일 때, 그리고 10° 경사지반에서는 연직하중이 Euler 좌굴하중의 86%일 때 말뚝의 좌굴파괴가 발생하였다. 이 결과를 통해 지반이 액상화되어 횡방향 구속력을 잃으면 말뚝은 좌굴에 의한 파괴가 발생할 수 있으며, 특히 액상화에 의한 지반흐름 발생 시 횡방향 하중의 증가로 인하여 좌굴하중이 감소함을 확인하였다.
- (3) 액상화에 따른 말뚝두부변위의 시간이력을 분석한 결과 좌굴이 발생하기 전에는 과잉간극수압이 증가함에 따라 말뚝두부변위도 빠르게 증가하였으며 전지반에 걸쳐 액상화가 발생할 때 말뚝두부변위는 최대값에 도달한 후 점차 감소하여 잔류변위에 도달하였다. 좌굴이 발생한 경우에는 말뚝두부변위는 좌굴파괴가 발생할 때까지 계속적으로 증가하였다.
- (4) 액상화 지반에 근입된 말뚝의 좌굴파괴 위치는 일반적인 Euler 좌굴의 경우와 달리, 휨모멘트가 가장 큰 말뚝 하부가 아닌 말뚝의 중간위치에서 발생하였다. 이는 액상화된 지반이 말뚝에 어느 정도의 횡방

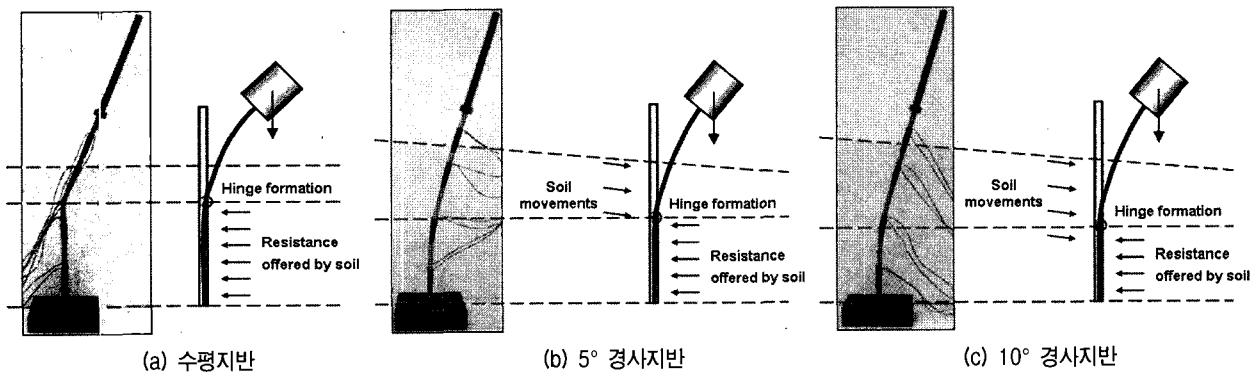


그림 14. 수평지반과 경사지반에서 말뚝의 좌굴파괴 형상 비교

향 구속력을 발휘하여 말뚝 전체 길이에서의 좌굴을 억제한 것으로 판단된다. 또한 지반경사가 증가할수록 지반흐름의 양과 흐름 깊이도 증가하여 점차 말뚝하부 쪽에서 말뚝의 파괴가 발생하였다.

감사의 글

본 연구는 현대건설 기술연구소의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Abdoun, T. and Dobry, R. (2002), "Evaluation of pile foundation response to lateral spreading", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, No.22, pp.1051-1058.
2. Bhattacharya, S. and Bolton, M. D. (2004), "An alternative mechanism of pile failure in liquefiable deposits during earthquake", *Geotechnique*, Vol.54, No.3, pp.203-213.
3. Eurocode 8 (1998), *Design provisions for earthquake resistance of structures. Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects*. Brussels: European Committee for Standardization.
4. JRA (1996), *Specification for highway bridges. Part V: Seismic design*. Japanese Road Association.
5. National Earthquake Hazards Reduction Program (2000), *Commentary (Federal Emergency Management Agency, USA, 369) for seismic regulations for new buildings and other structures*.
6. Yasuda, S. and Berrill, J. B. (2002), "Liquefaction and piled foundations: some issues", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol.6, Special Issue 1, pp.1-41.

(접수일자 2006. 8. 11, 심사완료일 2006. 10. 31)