

좌굴을 고려한 액상화 지반에 근입된 말뚝의 파괴거동 분석

Analysis of Failure Behavior of Pile Embedded in Liquefiable Soil Deposits considering Buckling Instability

한진태*
Han, Jin Tae

조종석**
Cho, Chong Suck

황재익***
Hwang, Jae Ik

김명모****
Kim, Myoung Mo

ABSTRACT

Liquefaction-induced lateral spreading has been the most extensive damage to pile foundations during earthquakes. However, a case of pile failure was reported despite the fact that a large margin of safety factor was employed in their design. This means that the current seismic design method of pile is not agreeable with the actual failure mechanism of pile. Newly proposed failure mechanism of pile is a pile failure based on buckling instability. In this study, failure behavior of pile embedded in liquefied soil deposits was analyzed considering lateral spreading and buckling instability performing 1g shaking table test.

As a result, it can be concluded that the pile subjected to excessive axial loads (near P_{cr}) can fail by buckling instability during liquefaction. When lateral spreading took place in sloping grounds, lateral spreading increased lateral deflection of pile and reduced the buckling load, promoting more rapid collapse. In addition, buckling shape of pile was observed. In the case of pile buckling, hinge formed at the middle of the pile, not at the bottom. And in sloping grounds, location of hinge got lower compared with level ground because of the effects of lateral spreading.

1. 서론

현재 지진하중에 의한 말뚝의 설계는 지반흐름과 관성력에 의한 횡방향력을 고려한 휨 메커니즘에 초점을 맞추고 있다(JRA code 1996, NEHRP 2000). 예를 들어 JRA code에서는 그림 1과

* 학생회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정

** 정회원 · 서울대학교 공학연구소 연구원

*** 정회원 · UC 버클리대학교 박사 후 연구원

**** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

같이 액상화가 발생하지 않은 토층에서 수동토압이 발생하고 그 아래 액상화층에서는 상재하중의 30%의 토압이 발생한다고 가정하여 말뚝이 휨 파괴(bending failure)에 저항하도록 설계하고 있다. 하지만 내진설계 시 큰 안전율을 가진 Showa Bridge가 지진 시 말뚝 좌굴에 의해 파괴되는 사례가 발생했으며 이는 현재의 설계방법이 문제가 있음을 의미한다(Bhattacharya 등, 2004). 본 연구에서는 1-g 진동대 실험을 통해 지반 흐름과 좌굴을 고려하여 지진 시 액상화 지반에 근입된 말뚝의 파괴 거동을 분석하였다.

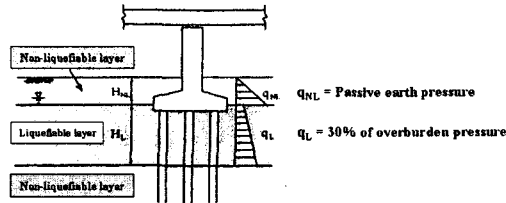


그림 1. JRA design specification에서 말뚝의 내진설계 시 고려하는 토압분포

2. 진동대 실험 개요 및 실험 조건

2.1 실험 개요

본 연구에서는 말뚝의 좌굴 및 지반의 흐름에 의한 파괴 거동을 분석하기 위하여, 말뚝의 상부 하중 및 지반 경사를 변화시켜 1-g 진동대 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 토조는 크기가 192cm(길이)×60cm(높이)×44cm(폭)이며 투명 아크릴판으로 제작하였다. 사용된 계측기는 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.

실험에 사용된 모래는 주문진 표준사로서 유효입자크기 D_{10} 은 0.38mm, 평균입자크기 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.

모형말뚝은 그림 2와 같이 길이 550mm, 외경 14mm, 두께 1mm의 알루미늄으로 제작하였다. 실험에 사용된 모형말뚝의 탄성계수를 구하기 위해 one point loading test를 실시하였으며 탄성계수는 67.82GPa로 계산되었다. 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 2에서 볼 수 있듯이 실제 말뚝의 좌굴 실험 시 편심이 발생하여 이론적인 Euler 좌굴하중에 도달하기 전에 좌굴파괴가 발생하였으며, 진동대 실험 시 적용된 좌굴하중은 이론적인 Euler 좌굴하중보다 작은 42.7kg이 적용되었다. 진동대 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.

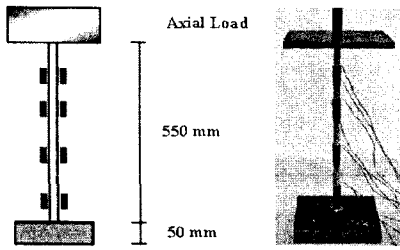


그림 2. 모형말뚝 단면

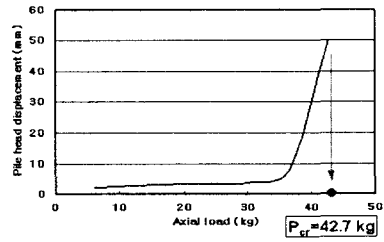


그림 3. 편심에 의한 말뚝두부변위

2.2 실험 조건

표 1과 그림 4는 각각 실험 조건 및 실험 단면을 보여준다. 지반흐름과 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 37cm로 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.

표 1. 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, 1.0 | 24 |
| Type ③ | 포화토 | 5 | 0.52, 0.71, 0.86, 0.95 | 24 |
| | | 10 | 0.52, 0.71, 0.86 | |

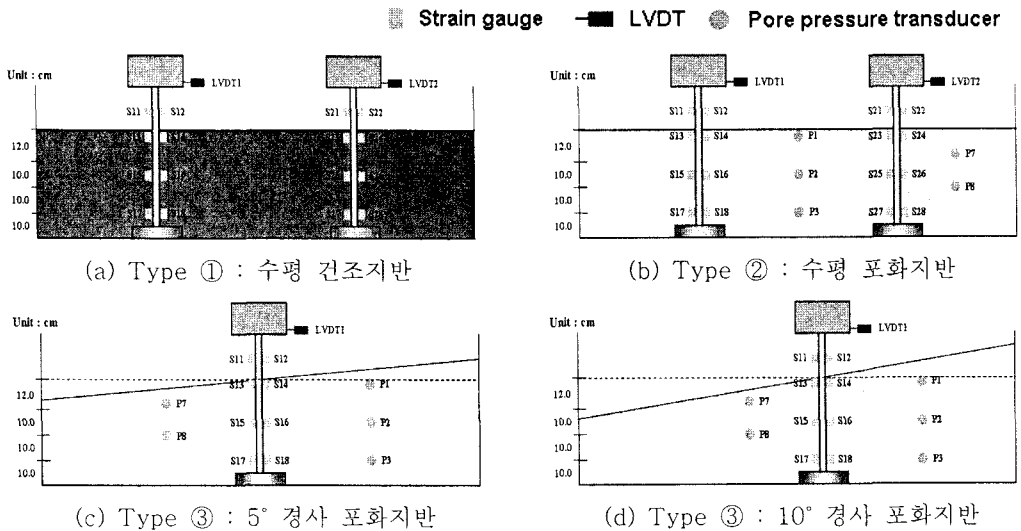


그림 4. 실험 단면 및 계측기 위치

진동으로 인한 지반흐름의 영향을 배제하기 위해 진동방향은 토조의 폭 방향으로 하였으며 그림 5와 같이 L형판을 설치하여 상부하중에 의한 관성력을 제거하였다. 진동대 입력 지진파는 액상화 발생을 용이하게 하고, 상부하중에 의한 말뚝두부변위를 최소화하기 위해 최대진폭 0.4g, 25Hz 주파수를 갖는 정현파를 사용하였다. 입력지진파의 시간이력은 그림 6과 같다.

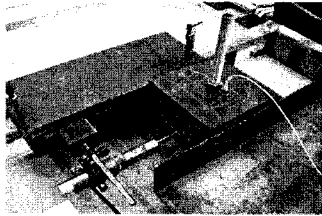


그림 5. L형판 설치 후의 실험 단면

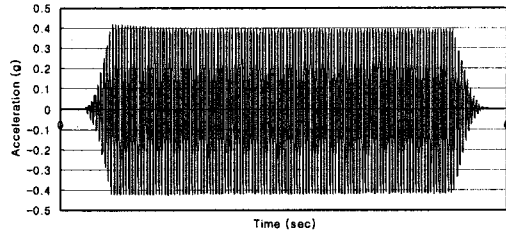


그림 6. 입력지진파 시간이력

3. 진동대 실험 결과

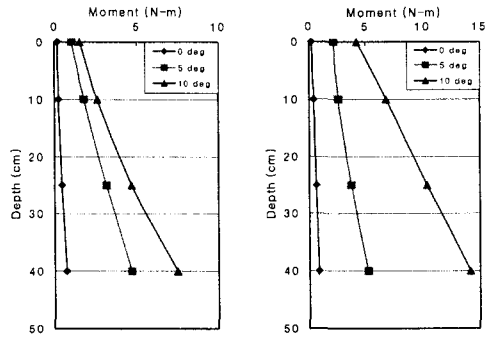
3.1 최대 휨모멘트 결과

말뚝에 부착된 스트레인 게이지를 통해 말뚝에 발생하는 휨모멘트를 계산하였다. 말뚝의 최대 휨모멘트 결과는 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 7은 좌굴 발생 전 깊이별 최대 휨모멘트 값을 보여주고 있다. 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 하중 재하 시 발생한 편심에 의해 약간의 휨모멘트가 발생했다고 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 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 휨모멘트가 값이 증가하였으며 이는 10° 경사지반인 경우 5° 경사지반일 때 보다 흐름양이 더 크고 흐름속도도 더 빠르다는 것을 나타내고 있다.



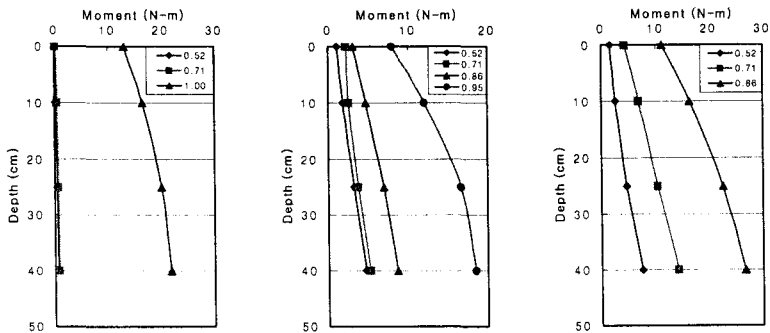
(a) $P/P_{cr} = 0.52$ (b) $P/P_{cr} = 0.71$

그림 7. 좌굴 발생 전 깊이별 최대 휨모멘트 (N·m)

3.1.2 좌굴 발생 시 말뚝의 최대 휨모멘트

그림 8은 좌굴 발생 전과 좌굴 발생 시 최대 휨모멘트 값을 보여주고 있다. 포화 수평지반인 경우(그림 8(a)) 좌굴 발생 전에는 앞 절과 마찬가지로 편심에 의해 발생한 휨모멘트 값은 매우 작았다. 하지만 연직하중이 좌굴하중인 $1.0P_{cr}$ 인 경우 좌굴파괴가 발생하면서 휨모멘트가 급격히 증가하였다.

포화 경사지반인 경우 수평지반과 달리 좌굴파괴가 발생하기 전에 지반흐름에 의한 휨모멘트가 발생하였다. 5° 경사지반인 경우(그림 8(b)) 좌굴하중보다 작은 $0.95P_{cr}$ 에서 좌굴파괴가 발생하였으며 10° 경사지반인 경우(그림 8(c)) 5° 경사지반에서의 좌굴하중보다 작은 $0.86P_{cr}$ 에서 좌굴파괴가 발생하였다. 이는 10° 경사지반에서 지반흐름의 영향이 증가하여 좌굴하중을 감소시킨 것으로 판단된다. 이를 통해 액상화에 의한 지반흐름은 말뚝의 휨모멘트를 증가시키며 좌굴하중을 감소시켜 말뚝의 파괴를 가속화함을 알 수 있다.



(a) 수평지반 (b) 5° 경사지반 (c) 10° 경사지반

그림 8. 좌굴 발생 전과 발생 시 깊이별 최대 휨모멘트 (N·m)

3.2 말뚝두부변위 결과

말뚝두부에 설치한 LVDT를 이용하여 진동 시 말뚝두부변위를 계측하였다. 말뚝두부변위 결과는 모든 종류의 실험에 대해 최대 말뚝두부변위와 과잉간극수압에 따른 말뚝두부변위 결과로 나누어 분석하였다.

3.2.1 최대 말뚝두부변위

그림 9는 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 연직하중이 좌굴하중인 P_{cr} 보다 크어도 불구하고 지반이 충분한 횡방향 구속력을 발현하였기 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. 이는 최대 휨모멘트 결과와 일치한다.

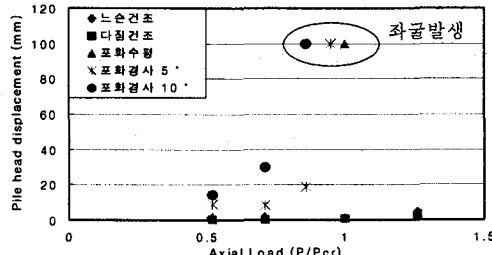


그림 9. 연직하중에 따른 최대 말뚝두부변위 (mm)

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 10은 좌굴이 발생하기 전인 5° 경사지반에서 $0.52P_{cr}$ 의 연직하중을 받는 말뚝에 대한 지반의 깊이별 과잉간극수압비 시간이력에 따른 말뚝두부변위 시간이력을 보여주고 있다. 그림 10에서 알 수 있듯이 진동 시작과 동시에 과잉간극수압의 증가로 인해 액상화(과잉간극수압비=1.0)가 발생하였으며, 이와 동시에 말뚝두부변위가 발생하고 빠르게 증가하였다. 전 지반에 걸쳐 액상화가 발생할 때 말뚝두부변위는 최대값에 도달하였으며 진동 종료 시 변위는 더 이상 발생하지 않고 일정한 잔류 변위에 도달하였다. Type ②, ③ 실험 시에도 좌굴이 발생하지 않은 말뚝에 대해서 이와 같은 결과가 발생하였다.

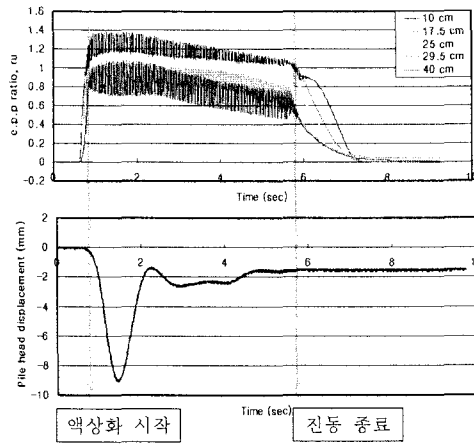
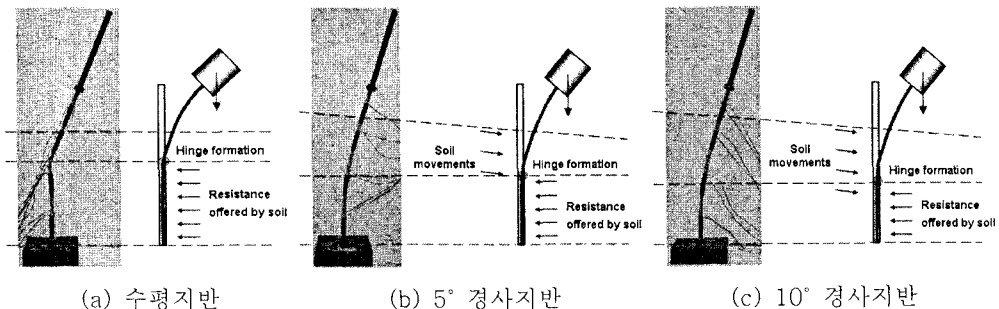


그림 10. 과잉간극수압비 시간이력과 말뚝두부변위 시간이력의 비교
(좌굴파괴 발생 전 - $0.52P_{cr}$, 5° 경사지반)

3.3 말뚝의 좌굴파괴 형상 결과

실험 후 좌굴파괴가 발생한 말뚝을 관찰한 결과 Euler의 좌굴과 액상화 지반에 근입된 말뚝의 좌굴에 차이점이 있음을 알 수 있었다. 그림 11(a)는 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 11(b)와 11(c)에서 보면 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 또한 10° 경사지반인 경우 5° 경사지반에 비해 흐름양 및 흐름속도도 증가하였음을 알 수 있다.



(a) 수평지반

(b) 5° 경사지반

(c) 10° 경사지반

그림 11. 수평지반과 경사지반에서 말뚝의 좌굴파괴 형상 비교

4. 결 론

본 연구에서는 진동대 실험을 이용하여 액상화 지반에 근입된 말뚝의 파괴거동을 분석하였다. 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 건조지반의 경우(Type ①, 상대밀도 = 느슨한 모래 : 38%, 조밀한 모래 : 80%) 모든 말뚝은 Euler 좌굴하중의 52%에서 126%까지 재하하였을 경우($0.52P_{cr}$, $0.71P_{cr}$, $1.0P_{cr}$, $1.26P_{cr}$) 모두 파괴되지 않았다. 이는 연직하중이 Euler 좌굴하중인 P_{cr} 보다 증가하였음에도 불구하고 지반이 말뚝에 충분한 횡방향 구속력을 발현하였기 때문으로 판단된다.
2. 느슨한 포화지반의 경우(Type ②, ③, 상대밀도 = 24%) 지반의 액상화 발생 시 말뚝은 수평 지반에서는 연직하중이 Euler 좌굴하중과 같은 경우($1.0P_{cr}$)에서, 5° 경사지반에서는 연직하중이 Euler 좌굴하중의 95%인 경우($0.95P_{cr}$)에서, 그리고 10° 경사지반에서는 연직하중이 Euler 좌굴하중의 86%인 경우($0.86P_{cr}$)에서 좌굴파괴가 발생하였다. 이 결과를 통해 지반이 액상화되어 횡방향 구속력을 잃으면 말뚝은 좌굴에 의한 파괴가 발생할 수 있으며, 특히 액상화에 의한 지반흐름 발생 시 횡방향 하중이 증가하게 되고 좌굴하중을 감소시켜 말뚝의 파괴를 가속화함을 확인하였다.
3. 액상화에 따른 말뚝두부변위의 시간이력을 분석한 결과 좌굴이 발생하기 전에는 과잉간극수압이 증가함에 따라 말뚝두부변위도 빠르게 증가하였으며 전 지반에 걸쳐 액상화가 발생할 때 말뚝두부변위는 최대값에 도달한 후 점차 감소하여 잔류변위에 도달하였다.
4. 액상화 지반에 근입된 말뚝의 좌굴파괴 위치는 Euler 좌굴의 경우와 달리, 휨모멘트가 가장 큰 말뚝 하부가 아닌 말뚝의 중간위치에서 발생하였다. 이는 액상화된 지반이 말뚝에 어느 정도의 횡방향 구속력을 발현하여 말뚝 전체 길이에서의 좌굴을 억제한 것으로 판단된다. 또한 지반경사가 증가할수록 지반흐름양 및 흐름 깊이도 증가하여 말뚝하부 쪽에서 말뚝의 파괴가 발생하였다.

참고문헌

1. Bhattacharya, S. and Bolton, M. D., "An alternative mechanism of pile failure in liquefiable deposits during earthquake.", *Geotechnique*, Vol. 54, No. 3, 2004, pp. 203~213.
2. JRA, Specification for highway bridges. Part V: Seismic design. Japanese Road Association, 1996.
3. National Earthquake Hazards Reduction Program, Commentary for seismic regulations for new buildings and other structures, 2000.