

지진과 해진시 개단강관말뚝 주변에 유발된 간극수압의 발생 양상

Porewater Pressure Buildup Mode Induced in Near-field of Open-ended Pipe Pile during Earthquake and Sequake

최 용 규*
Choi, Yong Kyu

국문요약

지진시 지진의 3가지 진동 성분이 나타난다. 즉, 수평 진동 성분, 지반의 연직 진동에 의해 발생된 상부 구조물과의 피드백에 의한 말뚝의 연직 진동, 그리고 연직 지반 진동에 의한 해수의 진동, 즉, 해진이 그것들이다. 이들 진동들은 해양에 설치된 개단 강관 말뚝 주변에 유발된 간극수압의 크기와 관내토 폐색력에 영향을 미칠 수 있다. 지반과 말뚝의 진동은 유사 지진 진동으로서 흙과 말뚝을 진동시켜서 모델링할 수 있지만 연직 지반 거동에 의해 유발된 해진 진동은 해저면에 정현파 형상의 동수압을 가해주어 모델링할 수 있다. 이 연구에서는 유사화된 지진과 해진시 압력토조에 설치된 개단강관말뚝에 유발된 간극수압의 발생양상과 이에 따른 관내토 폐색력의 저감 원인을 관찰하였다. 연직 지진 진동시 관내토 상단에서는 관내토 하단에서와 비슷한 크기의 간극수압이 발생하였으므로 관내토에서는 상향의 침투가 유발되지 않았으며, 수평지진 진동시 관내토에서는 상향의 침투를 유발시켜 관내토 폐색력을 20%정도 저감시켰다. 해진시 수심이 220m 이상의 심해에 설치된 개단 강관 말뚝의 경우, 관내토 하부 지반과 관내토 상단과의 매우 큰 동수경사로 인하여 관내토 내에 상향의 침투가 발생하여 관내토의 폐색을 파괴시켰다.

주요어 : 지진, 해진, 간극수압, 개단 강관 말뚝, 관내토 폐색력, 압력토조, 말뚝 지지력, 심해

ABSTRACT

During an earthquake, there are three components of excitation : horizontal excitation of the ground, vertical excitation of the pile due to superstructure feedback produced by vertical excitation of the ground, and the seawater excitation by the vertical ground shaking, that is, "the sequake." These excitations could have effects on the pore pressure buildup mode induced in the near-field of open-ended pile and the soil plugs in open-ended pipe piles installed at offshore sites. While the ground and pile excitation could be modeled by exciting the soil and pile with simulated motions, seaquake excitation induced by the vertical ground shaking can be modeled by pulsing the water pressure at the seabed. The objectives of this study were to observe buildup trend for the porewater pressures developed in near-field of open-ended pipe pile installed in the calibration chamber during the simulated earthquake and seaquake and, also, to confirm the cause for reduction of soil plugging according to pore pressure buildup. During the simulated horizontal seismic motion, there was no upward flow through soil plug because the similar magnitude of excess porewater pressure were occurred at the top and under the toe of soil plug. During the horizontal seismic motion, relatively higher hydraulic gradients caused upward flow in the soil plug and then the degradation of plugging resistance was about 20%. During seaquake, in the case of the open-ended pile installed in a deep sea with more than 220m of water depth, soil plug failed completely because of high upward hydraulic gradients through soil plug.

Key words : earthquake, seaquake, pore water pressure, open-ended, pipe pile, plugging force, calibration chamber, pile capacity, deep sea

1. 서 론

지진도중, 세 가지 진동성분, 즉, 지반의 수평

진동, 지반의 연직 진동에 의해 발생된 상부구조물과의 피드백(feed back)에 의한 말뚝의 연직 진동, 그리고 지반의 연직 진동에 의해 유발된 해진(seaquake)의 진동이 해상에 설치된

* 정회원 · 경성대학교 간설, 환경공학부 부교수

개단말뚝의 주변에 유발된 간극수압의 발생양상에 영향을 미치게 된다. 이 때, 지반과 말뚝의 진동은 유사화된 수평 및 연직 지진 진동으로써 흙과 말뚝을 진동시킴으로써 모델링할 수 있었으며,^{(1),(2)} 연직 지반 진동에 의해 유발된 해진은 해저면에서 동수압을 변화시킴으로써 유사화할 수 있었다.⁽³⁾

본 연구에서는 유사화된 지진 및 해진 작용시 소형 압력토조에 설치된 개단 강관말뚝의 인접지반에 발생된 간극수압의 양상을 관찰하였다. 또한, 지진이나 해진시 발생된 과잉간극수압만으로는 개단말뚝의 지지력을 크게 저감시킬 수 있는지 그리고 개단말뚝의 지지력 저감은 관내토 폐색의 손상 정도와 크게 관련이 있는지를 확인하였다.

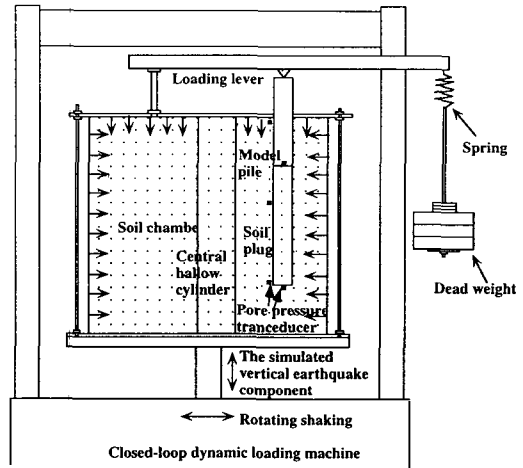
2. 실험

2.1 실험 장치

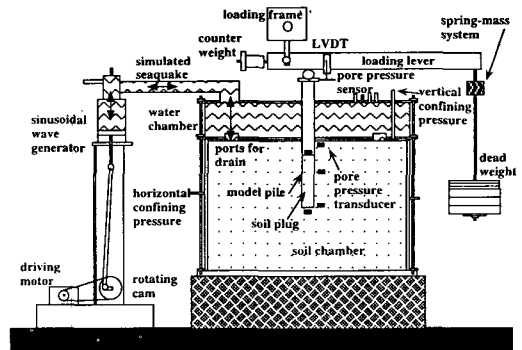
실험장치(그림 1)는 압력토조, 모형말뚝, 스프링-질량 시스템을 가진 정하중 재하장치, 인스트론 동적재하장치, 주기와 발생장치, 상부 수조, 간극수압측정용 센서, 그리고 동적 변형 측정기 등으로 구성되었다. 그림 1(a)에는 유사 지진 시험과 주기 하중 작용 시험의 모습을 나타내었으며, 그림 1(b)에는 유사해진 시험 모습을 나타내었다.

조립된 압력토조는 높이 0.54m, 직경 0.61m 이었으며, 토조 내에 담긴 흙에 수평방향과 연직 방향으로 구속하중을 따로 작용시킬 수 있도록 고무 멤브레인을 압력토조 내부 측면과 상부 두께 아래에 각각 설치하였다. 압력토조 상부 두께에는 간극수의 배수와 모형말뚝의 설치를 위한 배·출입구를 만들어 두었다. 그리고, 유사 해진 시험에서는 압력토조 윗 두께 상부에 높이 50mm의 수조를 고정시켜 주기와 발생장치에서 생성된 동수압이 수조를 통하여 모형지반 지표면에 전달될 수 있도록 하였다. 또한, 수조의 중앙에는 말뚝의 타격관입 설치

를 위한 구멍을 만들어 두었고, 간극수압 측정 센서의 설치와 상부 멤브레인에 구속압력의 작용을 위한 장치를 해두었으며 압력토조내로만 압력이 전달될 수 있도록 밀폐되었다.



(a) Schematic diagram of earthquake excitation test



(b) Schematic diagram of seaqueake shaking testing system

Fig. 1 Earthquake and seaqueake testing equipment

세립질 모래를 사용하였으며, $D_{10}=0.06\text{mm}$, $c_u=1.66$ 으로 통일분류기호는 SM이었다. 지반은 약 50%의 상대밀도로 형성되었고, 투수계수는 $1.21 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 이었고, 벽면마찰각(δ)는 22° 이었다. 시료를 포화시키기 위하여 압력토조 하단에 있는 물 공급장치를 통하여 증류수를 공급하였으며, 유사 해진 시험에서는 시료 상부까지 물이 올라온 후 수조를 조립하여 진공펌프로 시료내의 공기를 제거하였다.

모형말뚝은 그림 2에 나타내었는데, 관내토의 폐색력을 측정하기 위하여 외부튜브와 상부튜브로 구성하였으며, 조립된 모형말뚝은 외경 40.14mm, 내경 28.45mm, 그리고 합성된 말뚝 벽 두께는 5.85mm이었다. 외부튜브에는, 선단부근, 선단으로부터 1.0, 2.0, 4.0, 8.0 D_0 의 위치와 지표면 위치에 스트레인 게이지를 각각 2개씩 대칭되게 튜브내면에 부착하였으며, 여기서, D_0 는 말뚝의 외부직경이다. 내부튜브에는, 선단부근, 말뚝선단으로부터 선단부근 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 D_1 의 위치와 지표면 근처에 스트레인 게이지를 쌍으로 튜브외면에 대칭으로 부착하였으며, 여기서, D_1 는 말뚝의 내경을 나타낸다. 선단에는 폭 5.85mm의 원환을 외부튜브에만 부착하여 내관과 외관이 따로 변형될 수 있게 하였다. 선단에 있는 바닥 원환과 내부튜브 사이의 틈새는 실리콘으로 밀봉되었다. 바닥 원환의 면적은 말뚝의 합성된 벽면의 선단 강재부 면적과 동일하도록 하였다. 말뚝 머리부에서는 내부튜브와 외부튜브가 따로 변형될 수 없도록 일체로 고정시켰다. 따라서, 관내토 저항력은 직접 측정 가능하였다. 스트레인 게이지는 4개이지 결선법

에 의해 연결되었다. 모든 회로의 영점은 말뚝의 토조에 설치하기 전에 조정되었는데, 따라서 본 연구의 측정치는 말뚝의 설치 도중 발생된 잔류응력의 영향을 내포하는 것으로 볼 수 있었다.

말뚝상부에는 압축 정하중을 재하할 수 있도록 하였으며, 말뚝과 상부하중 사이에는 스프링을 설치하여 상부구조물과 피드백(feedback)을 가능하도록 하였다.

유사 해진 시험에서는 주기파 발생 장치를 상부 수조에 직경 150 mm의 파이프로서 수평하게 연결시켰으며, 주기파의 진폭과 주파수를 조절할 수 있게 하였다.

2.2 실험 계획

유사 수직 지진 진동 시험, 수평 지진 진동 시험 그리고 주기 진동 시험에서는 Instron 동적 재하 장치로 진동을 발생시켰으며, 유사 해진 시험에서는 주기파 발생 장치로 해진을 발생시켰다. 토조의 구속 압력과 진동 하중의 종류를 변화시켜 시험을 수행하였으며, 구체적인 시험 계획은 표 1에 나타내었다.

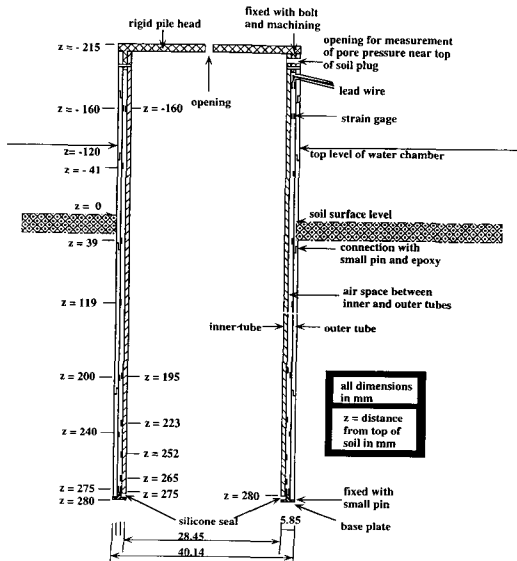


Fig. 2 Schematic drawing of model pile in simulated seaquake tests

Table 1 Test Plan

실험조건	연직지진 진동실험 (EV)	수평지진 진동실험 (EH)	해진실험 (S)	주기진동 실험 (P)
상대밀도(%)	50	50	50	50
구속압력(kPa)	35	25	35	35
Q/Q_{ult} (%)	95	95	95	95
진동 시험 전 정재하시험	×	×	×	×
진동 시험	유사 연직 지진 진동	×		
	유사 수평 지진 진동		×	
	유사 해진 진동			×
주기 진동 하중				×
진동 시험 후 정재하시험	×	×	×	×

1986년 캘리포니아의 Upland에서 발생한 지진 진앙으로부터 74km의 거리에 있는 Long Beach해변에 위치해 있는 SEMS 관측소로부터 측정된 자료를 이용하여 수평과 연직 지진 진동이 유사화되었으며, Richter 지진 진도 8.0으로

확대되었다.⁽²⁾⁽⁴⁾ 그림 3에 나타난 유사화된 지진 진동중 압력토조의 바닥면에 작용된 접선 변위와 연직 변위의 시간에 대한 이력을 그림 3의 (a)와 (b)에 각각 나타내었다. 그리고, 지진의 연직 성분에 의해 유발된 해진은 해저면에 정현파형상의 동수압으로 유사화시킬 수 있었다. 동수압의 진폭은 수심과 밀접한 관계가 있는데 Kobayashi 등⁽⁵⁾과 Williams & Mau⁽⁶⁾에 의해 제시된 관계를 그림 3(c)에 나타내었다.

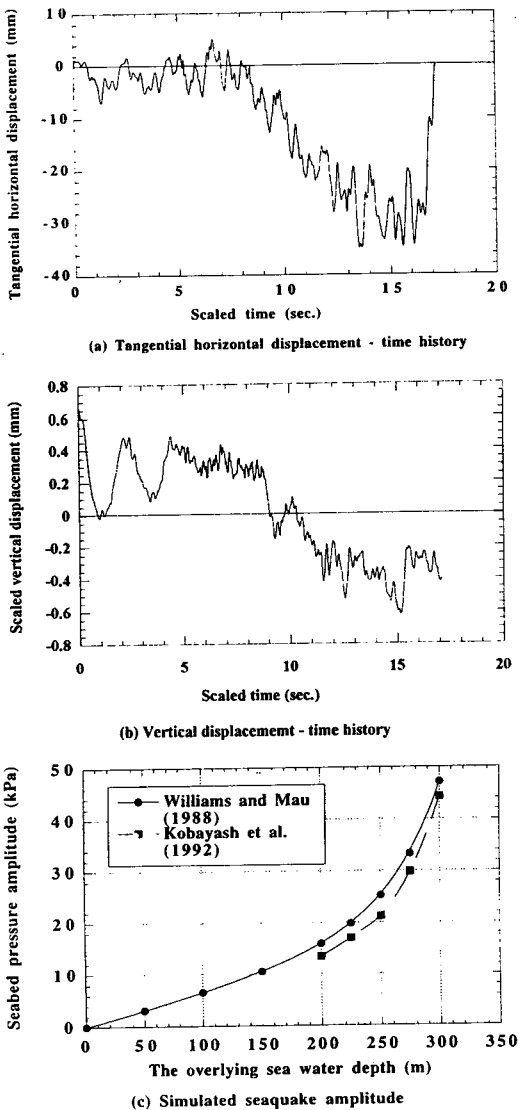


Fig. 3 The earthquake motion and seaquake amplitude simulated from 1986 Oceanside event at 75km from epicenter(M=8.0)

3. 지진과 해진시 간극수압 발생 양상

3.1 지진시 간극수압 발생 양상

그림 4에는 수평 지진 진동시 개단강관말뚝 주위에 설치된 간극수압계에서 측정된 간극수압의 발생양상을 나타내었다. 말뚝의 측면 세 위치 (지표면, 중간 깊이, 말뚝 선단 부근)와 말뚝 선단 하부, 그리고 관내토 상단에서 간극수압을 측정하였다. 관내토 선단과 강재부 아래에서 발생된 간극수압은 말뚝 측면과 관내토 상단에 발생된 간극수압보다 훨씬 작았다. 관내토 상단과 관내토 선단 아래에서의 간극수압 비교로부터 유사 수평지진진동중 동수경사의 방향이 상향으로 되었으며, 따라서 상향의 침투가 발생할 수 있었는데, 이것이 유사 수평지진진동중의 관내토 폐색력과 외주면 마찰력을 감소시키는 원인이 될 수 있었다. 여기서, 관내토 폐색력은 20% 정도 감소된 것으로 확인되었다.⁽²⁾

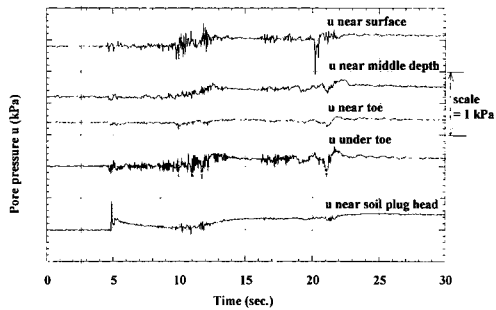


Fig. 4 Pore pressure during the simulated horizontal motion, Test EH (confining pressure=25kPa) (Choi and O'Neill, 1997)⁽²⁾

그림 5에는 유사 연직지진진동 시험에서 측정된 간극수압의 발생양상을 나타내었다. 관내토 선단에서는 말뚝 외주면에서보다 비교적 큰 간극수압이 발생하였다. 관내토 상단의 간극수압은 관내토 선단 아래의 간극수압과 거의 비슷하였으므로 상향의 침투가 유발되지는 않았다. 관내토에서의 간극수압은 다소 크게 발생되었으나 관내토의 파괴를 유발시킬 정도는 아니었다.

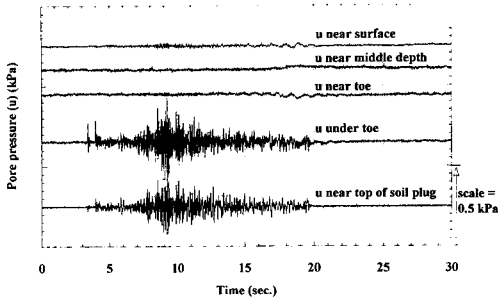


Fig. 5 Pore pressure response during simulated vertical shaking test EV (confining pressure=35kPa) (Choi & O'Neill, 1997)⁽³⁾

3.2 해진시 간극수압의 발생 양상

그림 6에는 지진의 수직성분에 의해 해저면에 유발된 해진이 작용할 때의 간극수압의 발생 양상을 나타내었다. 수심이 약 260m인 해저면 아래 지반에 있는 지중에 발생한 간극수압의 크기이며, 토초의 구속응력이 35 kPa인 것에 비해 지표면 부근의 말뚝 외주면에 작용된 간극수압의 크기는 23kPa이었다. 말뚝 하부로 갈수록 간극수압은 급격히 감소하였다. 따라서, 해진만으로 외주면 마찰력과 선단 지지력을 완전하게 감소시킬 수는 없을 것으로 판단하였다. 그러나, 말뚝 선단 하부에서 12kPa의 간극수압이 발생하였으며, 이로 인해 관내토 내에 4.3 정도의 상향의 동수경사가 유발되었으나 관내토 상단에 있는 물에서는 즉각적인 간극수압의 변화가 나타나지 않았다. 이 동수경사는 관내토의 폐색을 파괴시키기엔 충분하였으며, 이것이 해진 진동중 관내토 폐색력을 파괴시키는 원인이 되었다. 그림 7에는 해진중과 해진후 발생한 관내토 하단과 상부에서의 간극수압의 변화 추이를 나타내었다. 해진에 의해 관내토가 파괴되었을 때, 관내토를 통하여 그리고 압력토초의 상부에 돌출되어 있는 말뚝 속으로 간극수가 밀려 올라왔다. 그 결과 관내토 상부에서의 간극수압이 크게 증가하였으며, 일정시간 경과 후 마침내 관내토의 동수경사는 급격히 줄어들었고 관내토 내의 흙의 이동도 멈추었다. 이 과정에서 말뚝의

타격도중과 정재하 과정에서 관내토 내에 형성된 흙의 아치는 완전히 파괴되었다.

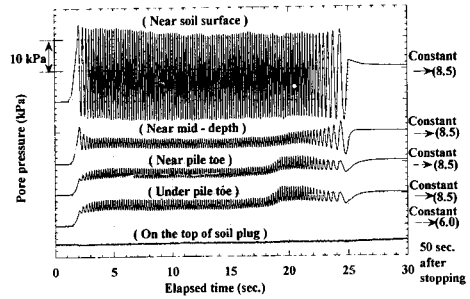


Fig. 6 Pore pressure response during simulated seaquake shaking tests S (confining pressure=35kPa, amplitude of seaquake=26kPa) (Choi et al., 1998)⁽¹⁾

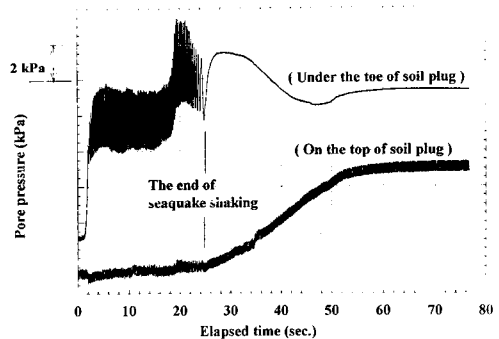


Fig. 7 Pore pressure developed in soil plug during and after simulated seaquake test for open-ended pile driven in deep sea (Test s) (Choi et al., 1998)⁽¹⁾

따라서, 수심이 깊은 해상(약 220m이상의 심해)에 설치된 개단 강관 말뚝의 관내토 폐색은 지진중에 파괴될 수도 있으나 육상에 설치되었거나 수심이 얕은 (약 220m이내) 해상에 설치된 개단 강관 말뚝의 관내토 폐색은 파괴되지 않는 것으로 확인되었다.⁽¹⁾

3.3 주기 진동 하중 작용시 간극수압의 발생 양상

그림 8에는 말뚝에 주기 정현파 진동 하중이 상재되었을 때 개단 말뚝 인접지반에 발생

되는 간극수압의 분포 양상을 나타내었다. 말뚝의 측면에서는 과잉간극수압이 거의 발생하지 않았다. 관내토 하단과 선단 강재부 아래에서는 간극수압이 측면에서 보다는 다소 크게 나타나고 있으며, 관내토 상단에서 발생하는 간극수압과 거의 비슷하였으나 지반에 작용된 유효구속응력에 비해 훨씬 작은 값이었다. 말뚝의 지지력을 감소시키는 데는 거의 기여하지 못하였다. 또한 주기 진동 하중 작용중 관내토 하단과 상단에서의 간극수압의 크기가 동일하여 상향의 침투가 발생하지 않았으므로 관내토 폐색은 파괴되지 않았다. 주기 진동 하중 작용시의 간극수압 발생 양상은 연직 지진 진동시의 간극수압의 발생 양상과 다소 유사하였다.

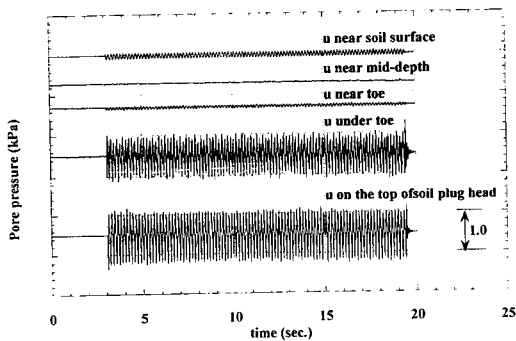


Fig. 8 Pore pressure during sinusoidal shaking test P (confining pressure=35kPa, amplitude=2.54mm, frequency=5Hz, cycle=100)

4. 결론 및 제언

- 1) 각종 동하중 (지진, 해진, 주기 진동 하중)에 의해 개단 강관 말뚝이 설치된 인접 지반에 발생하는 간극수압의 양상은 매우 상이하였다.
- 2) 연직 지진 진동시 말뚝 선단부와 관내토 선단 아래에서는 말뚝 측면에서 보다 큰 간극수압을 발생시켰으나, 관내토 상단에서는 관내토 하단에서와 비슷한 크기의 간극수압이 발생하였으므로 상향의 침투가 유발되지

않았다. 따라서, 관내토 폐색력은 전혀 감소될 수 없었다.

- 3) 수평 지진 진동시에는 말뚝주변에서 다소 큰 간극수압이 발생하였으며, 말뚝 선단 하부 지반에서는 작은 간극수압이 발생하였으나 관내토에서는 상향의 침투를 유발시켜 관내토 폐색력을 20%정도 저감시킬 수 있는 원인이 되었다.
- 4) 지진의 연직 지반 진동에 의해 해저지반에 유발된 해진시, 수심이 220m 이상의 심해에 설치된 개단 강관 말뚝의 경우 해저 지면으로부터 1/3 깊이 이내의 말뚝의 측면에서는 간극수압이 크게 발생하였으며, 말뚝 강재부와 관내토 선단 아래에서는 다소 작은 간극수압이 발생하였다. 관내토 하부 지반과 관내토 상단과의 매우 큰 동수경사 차이로 인하여 관내토 내에 상향의 침투가 발생하여 관내토의 폐색을 파괴시킬 수 있었다.
- 5) 주기 정현파 진동 하중이 말뚝머리에 작용될 때의 간극수압의 발생 양상은 연직 지진 진동시의 그것과 비슷하였다.
- 6) 해진시 개단 강관 말뚝 주변에 유발될 간극수압의 발생양상에 대한 모형실험을 수행하고 있으며, 이 결과들도 전문학회지에 발표할 예정이다.

참고 문헌

1. Choi, Y., O'Neill, M. W., & Nam, M. S., "Response of soil plug to seaquake induced by vertical seismic excitation," *Proceedings of the 8th International Offshore and Polar Engineering Conference, Montreal, Canada, May 24 - 29, 1998*, pp. 390-397.
2. Choi, Y. and O'Neill, M. W., "Soil plugging and relaxation in pipe pile during simulated earthquake motion," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Oct., 1998*,

- pp. 975-982.
3. Choi, Y. and O'Neill, M. W., "Response of soil plug to horizontal and vertical excitation," *Proceedings of the 7th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Honolulu, USA, May 25-30, 1997.
 4. 최용규, "지진 기록의 확대(scaling) 기법과 압력토조 모형 말뚝 시험에의 적용", 한국지반공학회지, 제 12권, 제 2호, 1996, pp. 19-31.
 5. Kobayashi, H., Sakuta, M., Okamoto, O., and Hirakawa, S., "Safety consideration of the TLP on earthquake wave propagated through seawater," *Proceedings of the 20th Annual OTC*, paper 6888, Vol. 2., 1992, pp. 139-145.
 6. Williams, A. N. and Mau, S. T., "Earthquake response of submerged circular arch," *Journal of Waterways, Ports, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 4, 1998, pp. 405-422.