

수직 지진 진동에 의해 유발된 해진에 대한
관내토의 거동
Response of Soil Plug to Seaqueake Induced by the
Vertical Seismic Excitation

최 용 규 *
Choi, Yongkyu

남 문 석 **
Nam, Moon Seok

ABSTRACT

During an earthquake, there are three main 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 induced by the vertical ground shaking, that is, "the seaquake." These excitations could have effects on the soil plugs in open-ended pipe piles installed at offshore sites. In this study, seaquake excitation induced by the vertical ground shaking was simulated by pulsing the water pressure at the seabed.

During a seaquake, due to the induced excess porewater pressure and pressure gradients in the soil, the capacity of open-ended pipe piles installed in a simulated sea depth of greater than 220 m was reduced severely and the soil plugging resistance was degraded by more than 80 %. The soil plug was failed because of the upward seepage forces that developed in the soil plug due to excess pore water pressure produced in the bottom of the soil plug during the seaquake. The compressive capacity of an open-ended pile in a simulated sea depth of less than 220 m was reduced only by about 10 %, and the soil plug resistance was degraded by less than 5 %.

1. 서 론

지진도중 기초의 3가지 진동성분 즉, 지반의 수평진동, 지반의 연직진동에 의해 발생한 상부구조물과의 피드백 (feedback)에 의한 말뚝의 연직진동, 그리고, 지반의 연직진동에 의해 유발된 해진 (seaquake)의 진동이 발생한다. 이들 진동들은 해상에 설치된 개단 강관말뚝의 관내토 폐색에 영향을 미칠 수 있다. 이때, 지반과 말뚝의 진동은 유사화된 수평 및 연직진동으로 흡과 말뚝을 진동시켜 모델링할 수 있지만, 연직지반 진동에 의해 유발된 해진의 진동은 해저면에 유사화된 동수압을 작용시켜 모델링할 수 있다(Choi & O'Neill, 1997a; Ochoa, 1990). 해저면의 연직진동에 의해 해수에 유발된 해진은 관내토내에 순간적인 동수경사를 크게 발생시켜 관내토 폐색력을 크게 저감시킬 수 있을 것으로 예상되었다.

이 연구의 주목적은 유발된 해진이 관내토의 폐색을 파괴시킬 수 있는지를 확인하고, 말뚝의

* 경성대학교 건설·환경공학부 부교수, 정회원

** 경성대학교 건설·환경공학부 석사과정

외주면 마찰력을 크게 저감시킬 수 있는지를 규명하기 위한 것이다. 이 연구는 약 20 m까지의 여러 말뚝 관입 깊이들을 유사화하기 위하여 구속응력을 변화시켜 압력토조에서 모형실험으로 수행하였다. 주기파 발생장치를 압력토조 상부에 고정된 수조에 연결시켜 동수압을 작용시킴으로써 유사화된 해진을 발생시켰으며, 약 300 m의 수심을 여러 가지로 유사화하기 위하여 주기파의 진폭들을 변화시켰다. 모형 해진 실험에 사용된 주기파의 주파수는 유사화된 Oceanside 지진의 주파수에 Mach와 Froude의 상사법칙을 고려하여 산정된 주파수 크기계수 (= 4)를 곱하여 계산하였다. 모형말뚝은 2중관으로 제작하였으며, 여기서 외주면 마찰력과 관내토의 폐색력을 분리하여 측정할 수 있었다.

2. 실험

2.1 실험장치

실험장치 (그림 1)는 압력토조, 모형말뚝, 스프링-질량시스템을 가진 정하중 재하장치, 주기파 발생장치, 상부 수조, 간극수압측정용 센서, 그리고 동적 변형 측정기 등으로 구성되었다.

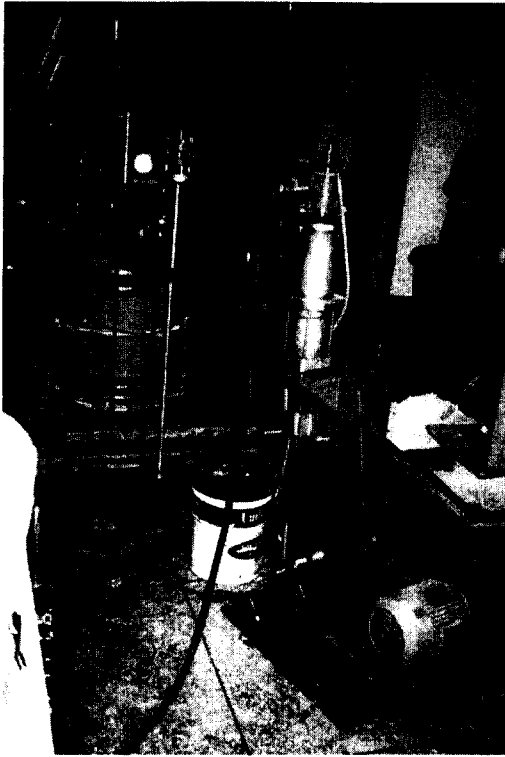
조립된 압력토조(Choi et al., 1997b)는 높이 0.54 m, 직경 0.61 m이었으며, 토조내에 담긴 흙에 수평방향과 연직방향으로 구속압력을 따로 작용시킬 수 있도록 고무 멤브레인을 압력토조 내부 측면과 상부 뚜껑 아래에 각각 설치하였다. 압력토조 상부 뚜껑에는 간극수의 배수와 모형말뚝의 설치를 위한 배·출입구를 만들어 두었다. 그리고, 압력토조 윗 뚜껑 상부에는 높이 50 mm의 수조를 고정시켜 주기파 발생장치에서 생성된 동수압이 수조를 통하여 모형지반 지표면에 전달되게 하였다. 또한, 수조의 중앙에는 말뚝의 타격관입 설치를 위한 구멍을 만들어 두었고, 간극수압 측정센서의 설치와 상부 멤브레인에 구속압력의 작용을 위한 장치를 해두었으며 압력토조 내로만 압력이 전달될 수 있도록 밀폐되었다.

세립질 모래를 사용하였으며, $D_{10} = 0.06$ mm, $C_u = 1.66$ 으로 통일분류기호는 SM이었다. 지반은 약 50 %의 상대밀도로 형성되었으며, 투수계수는 1.21×10^{-3} cm/sec 이었고, 벽면 마찰각 (δ)는 22° 이었다. 시료를 포화시키기 위하여 압력토조 하단에 있는 물 공급장치를 통하여 중류수를 공급하였으며, 시료 상부까지 물이 올라온 후 수조를 조립하여 진공펌프로 시료내의 공기를 제거하였다.

모형말뚝은 그림 2에 나타내었는데, 관내토의 폐색력을 측정하기 위하여 외부튜브와 내부튜브로 구성하였으며, 조립된 모형말뚝은 외경 40.14 mm, 내경 28.45 mm, 그리고 합성된 말뚝 벽 두께는 5.85 mm이었다. 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, 선단 부근, 말뚝선단으로부터 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 D_1 의 위치와 지표면 근처에 스트레인 게이지 쌍을 튜브외면에 대칭으로 부착하였으며, 여기서, D_1 는 말뚝의 내경을 나타낸다. 선단에는 폭 5.85 mm의 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 강제부 면적과 동일하도록 하였다. 말뚝 머리부에서는 내부튜브와 외부튜브가 따로 변형될 수 없도록 일체로 고정시켰다. 따라서, 관내토 저항력은 직접 측정 가능하였다.

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

주기파 발생장치는 상부수조에 직경 150 mm의 파이프를 수평하게 연결시켰으며, 주기파의 진폭과 주파수를 조절할 수 있게 하였다. 수심은 주기파의 진폭으로 유사화되었는데, Oceanside 지



(a) Photo of seaquake testing system

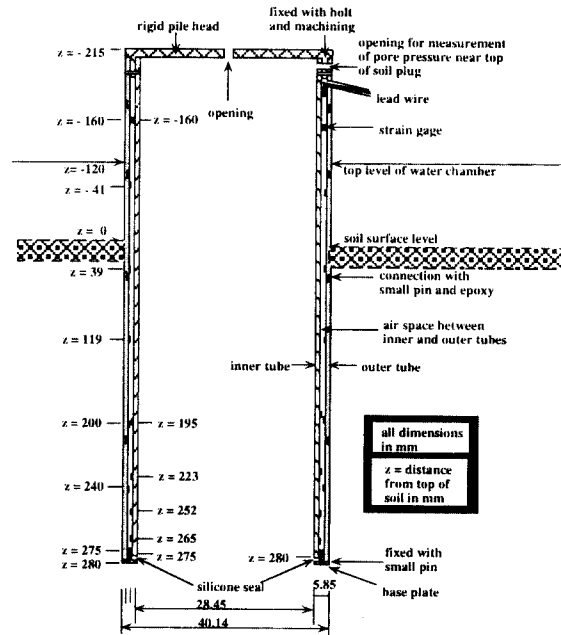
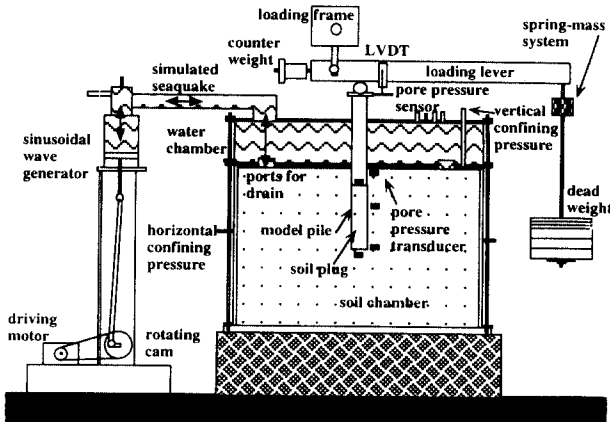


Fig. 2. Schematic drawing of model pile



(b) Schematic diagram of seaquake testing system

Fig. 1. The simulated seaquake testing equipment

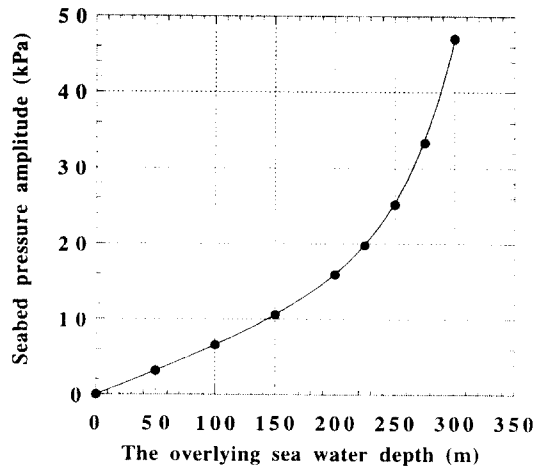


Fig. 3. Simulated seaquake amplitude on the seabed versus water depth (1986 Oceanside event at 75 km from epicenter)

진(1986) 기록(Ochoa, 1990)을 사용하여 유사화된 수심과 주기파 진폭과의 관계를 그림 3에 나타내었다.

2.2 실험계획 및 절차

말뚝의 실제 관입 깊이 7, 12 그리고 21 m를 유사화시키기 위하여 압력토조의 유효구속압력을 20, 35 그리고 60 kPa로 변화시켰으며, 말뚝이 설치된 약 300 m까지의 수심을 유사화시키기 위하여 모형지반의 지표면에 유발된 동수압의 진폭을 48 kPa까지 변화시켰다 (그림 3 참조). 실제 해진의 주파수 0.6 Hz ($M = 8.0$ 으로 확대시킨 지진의 평균 주파수), 1.2 Hz 그리고 2.5 Hz를 유사화시키기 위하여 유발된 동수압의 진폭을 2.5 Hz, 5.0 Hz 그리고 10.0 Hz로 변화시켰다 (주파수 크기계수 = 4). 여기서, 해수와 해저면의 상호작용을 모델링하기 위하여 Froude의 상사법칙과 Mach 상사법칙을 만족시켜야 한다(Kobayashi, et al., 1992). 두 상사법칙에 대해 계산된 주파수 크기 계수들은 차이를 나타내고 있으므로 평균적으로 4를 사용하였다(Rao, 1997). 해진 모형실험에서는 약 20초내외로 동수압을 작용시켜 주었다. 구체적인 실험계획은 표 1에 나타내었다.

포화된 모형 지반에 임의의 구속압력을 작용시킨 후 모형 말뚝을 타입하였다. 말뚝머리에 극한 지지력의 90%이상의 하중을 상재하여 해상과 진동시험을 수행하였다. 이때, 말뚝머리의 연직변위, 지표면에 작용된 동수압의 크기, 지반내의 간극수압 발생량, 그리고 말뚝 축하중의 저감량을 시간에 대한 이력으로 정밀하게 측정하였다. 해상과 진동시험이 끝난 후, 말뚝머리의 정하중을 제거하고 다시 정재하 시험을 수행하여, 해상과 진동시험중의 지지력 저감량을 확인하였다.

3. 실험결과 및 분석

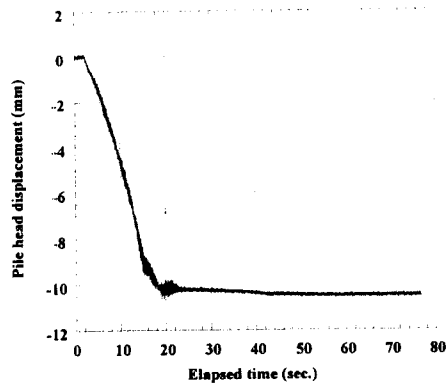
3.1 실험결과

그림 4에는 압력토조의 유효 구속압력이 35 kPa, 동수압의 진폭이 35 kPa 그리고 동수압의 주파수가 5 Hz인 경우의 해상파 진동시험 (s3)의 결과를 나타내었다. 여기서, 개단 강관 말뚝의 극한 지지력은 완전하게 감소되었으며, (a)에는 해상파시험중의 말뚝머리 변위를, (b)에는 모형지반의 지표면에 유발된 동수압의 크기와 말뚝 주변 지반내에 발생된 간극수압의 발생양상을, (c)에는 외부류브에서 저감된 지지력 성분 (외주면 마찰력 + 선단 강재부 지지력)을, 그리고 (d)에는 관내토 폐색력의 저감량을 나타내었다.

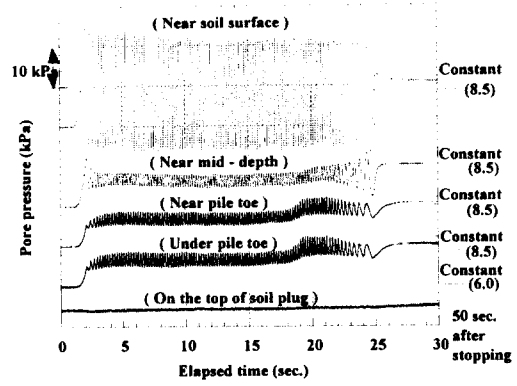
그림 5에는 압력토조의 유효 구속압력이 35 kPa, 동수압 진폭이 16 kPa 그리고 동수압의 주파수가 5 Hz인 경우의 해상파 진동 실험 (s4)의 결과를 나타내었는데, 이것은 개단 강관 말뚝의 극한 지지력이 거의 감소되지 않은 경우의 대표적인 예이다. (a)에는 말뚝머리 변위량을 나타내었으며 (b)에는 모형지반의 지표면에 유발된 동수압의 크기와 말뚝 주변 지반내에 발생된 간극수압의 발생양상을 나타내었고 말뚝의 극한 지지력과 관내토 폐색력은 거의 감소되지 않았으므로 도시하지 않았다.

3.2 해진중 관내토의 거동

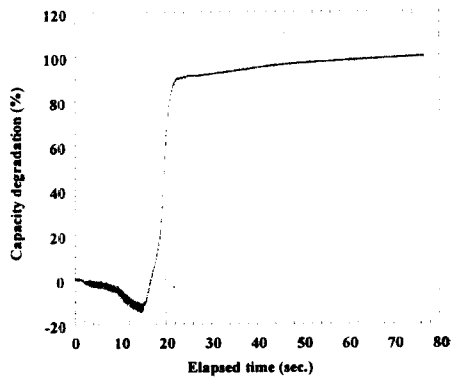
그림 4(b)에서는 약 260 m의 수심이 유사화되었는데, 토조의 유효 구속 응력이 35 kPa인 것에 비하여 지표면부근의 말뚝 외주면에 작용된 양의 간극수압의 크기는 23 kPa이었다. 말뚝 하부로 갈수록 훨씬 작은 간극수압이 발생하였다. 따라서, 해진만으로는 외주면 마찰력과 선단 지지력을



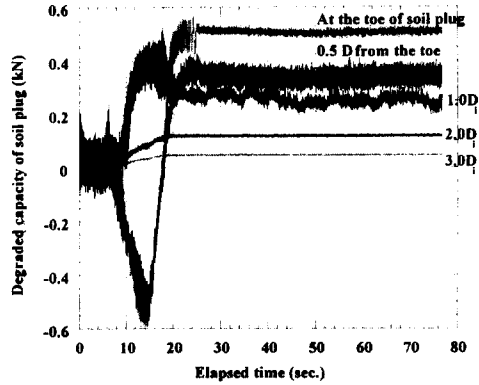
(a) Pile head displacement - time history



(b) Induced pore pressure - time history

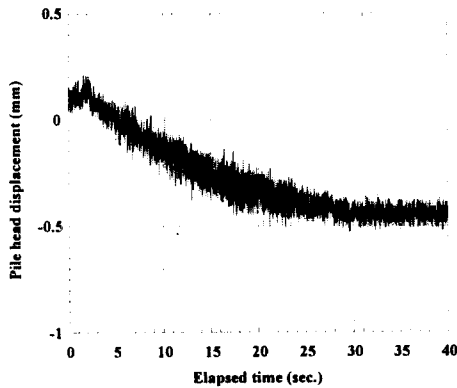


(c) Degradation of summed capacity developed in outer skin and steel toe

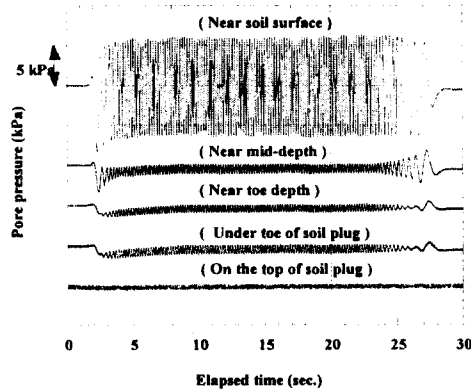


(d) Degraded capacity of soil plug

Fig. 4. Seauquake test result for pile installed in simulated deep sea (test s3, confining pressure = 35 kPa, amplitude of seauquake = 29 kPa, and frequency of simulated seauquake = 5 Hz)



(a) Pile head displacement - time history



(b) pore pressure - time history

Fig. 5. Seauquake test result for pile installed in simulated shallow sea (test s4, confining pressure = 35 kPa, amplitude of seauquake = 14 kPa, and frequency of simulated seauquake = 5 Hz)

완전하게 감소시킬 수 없었다. 그러나, 선단하부에서, 약 12 kPa의 양의 간극수압이 발생되었으며, 이로 인하여 관내토내에 4.3정도의 상향의 동수경사가 유발되었으나 관내토 상단에 있는 물에서는 즉각적인 간극수압의 변화가 나타나지 않았다. 이 동수경사는 관내토 폐색을 파괴시키기에 충분하였으며 주기 해진 진동중 관내토 저항력을 크게 저감시켰다. 관내토 위쪽으로 간극수가 이동하는 것을 그림 6에서 관찰할 수 있었다. 그림 6은 심해시험 (s3)에서 해진중과 해진후 관내토 하단과 상부에서의 발생된 간극수압을 보여주고 있다. 관내토가 파괴되고 나면, 관내토를 통하여 그리고 압력토조의 상부에 돌출되어 말뚝속으로 간극수가 위로 밀려 올라 왔다. 그 결과 관내토 상부에서 간극수압이 크게 증가하였으며, 일정시간이 경과한 후, 마침내 간극수압의 동수경사는 줄어들었고 관내토내의 흙의 이동도 멈추었다. 이 과정에서, 말뚝의 타격도중과 정재하 과정에서 관내토내에 형성된 흙의 아치는 완전하게 파괴되었을 것으로 예상되었다.

관내토 폐색의 파괴에 따른 관내토의 상향 변위는 말뚝 외부 선단 주변의 유효응력을 감소시켜 외주면 마찰력과 선단 지지력을 완전하게 저감시켰다. 외주면 저항력의 심각한 저감을 그림 4(c)에 나타내었다.

반면, 그림 5(b)에는 약 185 m의 수심이 유사화되었는데, 관내토 선단에서 발생된 간극수압이 약 2 kPa이었다. 따라서, 관내토에서는 최대 0.7정도의 동수 경사가 유발되어 관내토 폐색을 파괴시킬 수가 없었다. 관내토가 안정상태를 유지하였으므로 말뚝 하부에서는 흙의 변위가 전혀 나타나지 않았으며 외주면 마찰력도 거의 저감되지 않았다.

그림 7(b)는 관내토 폐색력의 저감은 해저면 위에 있는 물의 깊이에 크게 좌우되는 것을 보여주고 있다. 해진 주파수나 해저지반의 구속응력 (말뚝길이를 모델링함)는 관내토 폐색력 저감에 거의 영향을 미치지 못하였다. 수심을 유사화하는데 사용된 주요한 요소는 작용된 수압의 진폭인데, 그림 3에서 예측된 바와 같이 수심의 증가에 따라 수압은 포물선적으로 증가한다. 따라서, 그림 7(b)에서 말뚝에 유발된 한계 동수경사는 파괴를 초래하게 된다는 것을 알 수 있었다.

그림 8에는 시험 s3과 s4에서 해진시험전 정재하시험에서 측정된 정적 관내토 폐색력 ($Q_{p, static}$)에 대한 해진후 실시된 정적 압축 재하시험에서 측정된 관내토 저항력 (Q_p)의 비를 나타내었다. 수심 220 m이상인 심해에 설치된 개단 말뚝의 관내토 폐색력은 크게 감소하여 10~20 %만이 잔류하였다. 해진중 관내토 폐색은 완전히 파괴되었으며 해진 후 그 지지력을 회복하지 못하였다. 그러나, 수심 200 m이하인 천해에서는 유사 해진중 관내토 폐색력은 저감되지 않았으며 해진후에도 그대로 남아 있었다.

5. 결론 및 제언

- (1) 해저면의 수직 지진진동에 의해 유발된 해진 (seaquake)은 압력 토조 표면에 sine정현파형상의 동수압을 작용시켜 유사화하였다. 유사화된 해진 압력의 진폭은 수심에 따라 달라지는데, $M = 8.0$ 으로 유사화된 캘리포니아의 Oceanside지진 (1986)에 대한 동수압의 진폭과 수심과의 관계를 그림 3에 나타내었다.
- (2) 유사 해진중 수심 220 m이상의 심해에 설치된 압축 개단 말뚝은 완전하게 파괴되었으며, 관내토 폐색력은 80 %이상 저감되었다.
- (3) 수심 220 m이하의 천해에 설치된 개단 말뚝의 압축 극한 지지력은 거의 감소하지 않았으며, 관내토 폐색력은 5 %이하만큼 저감되었다.
- (4) 수심 220 m이상의 심해에 설치된 개단말뚝의 경우 말뚝의 관입 깊이와는 상관없이 해진중

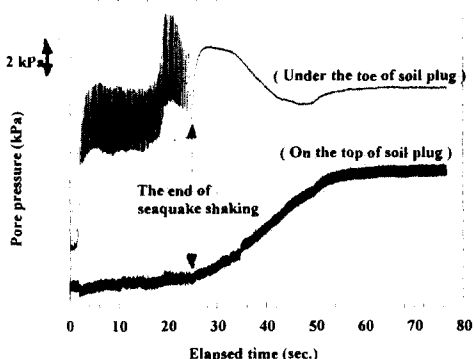
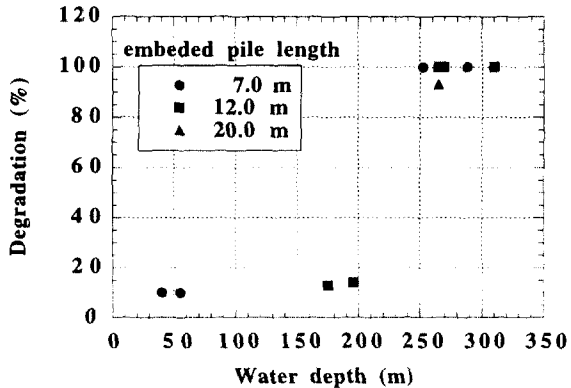
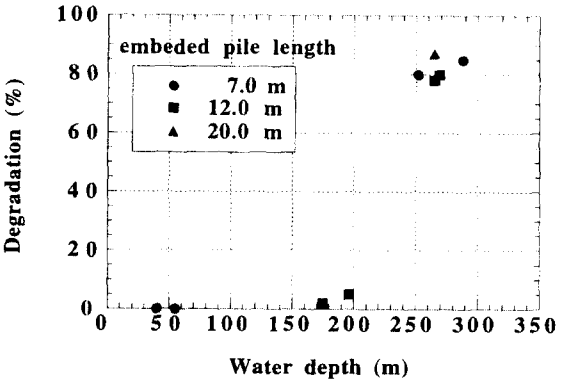


Fig. 6. Pore pressure developed in soil plug during and after simulated seaquake test for open - ended pile driven in deep sea (Test s3).



(a) External friction and toe resistance degradation



(b) Soil plug resistance degradation

Fig. 7. Soil plugging force degradation versus simulated water water depth during seaquake test

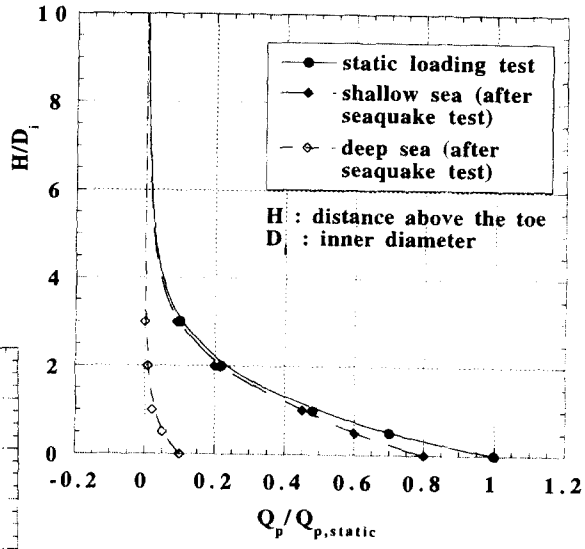


Fig. 8. $Q_p/Q_{p,static}$ versus H/D_i , where Q_p is soil plug resistance after seaquake test and $Q_{p,static}$ is static soil plug capacity before seaquake test.

관내토는 파괴되었다. 관내토 폐색력의 파괴는 관내토 하단 3~4 D_i이내에서 유발된 높은 과잉 간극 수압에 의해 유발된 상향의 침투에 의해 초래되었다.

- (5) 상향의 침투로 인하여 관내토의 변위가 발생하였으며, 그 결과 시험말뚝의 선단 하부와 외주면의 하부 길이에 걸쳐 지지력을 크게 감소시켰다.

참고문헌

1. Choi, Yongkyu & O'Neill, M. W. (1997a), "Response of Soil Plug to Horizontal and Vertical Excitation," Proceedings of the 7th (1997) International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, USA, May 25-30, 1997, pp. 772-777.
2. Choi, Yongkyu & O'Neill, M. W. (1997b), "Soil Plugging and Relaxation in Pipe Pile During Earthquake Motion," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, A.S.C.E. Vol. 123, No. 10, Oct. 1997, pp 975-982.
3. Ochoa, M., (1990), "Response of Tension Piles to Simulated Seismic Motion in Saturated Fine Sand," Ph.D. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Houston.
4. Kobayashi, H., Sakuta, M. Okamoto, O., and Hirakawa, S. (1992), "Safety Consideration of the TLP on Earthquake Wave Propagated through Seawater," Proceedings of the 20th Annual OTC, Paper 6888, Vol. 2., pp. 139-145.
5. Rao, P. M. (1997), "Performance of Tension Piles During Simulated Ground Shaking and Seaquakes," Ph.D. thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Houston.
6. Williams, A. N., and Mau, S-T, (1988), "Earthquake Response of Submerged Circular Arch," Journal of Waterways, Ports, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 4, pp. 405-422.
7. Yamamoto, T., Takahashi, S., and Schuckman, B., (1983), "Physical Modeling of Sea-seabed Interactions," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 109, No. 1, pp. 54-72.