

## 해진시 개단무리말뚝의 거동에 관한 모형실험 연구

### An Experimental Study on the Behavior of Open-ended Pipe Piles Ggroup to the Simulated Seaquake

남문석<sup>1)</sup>, Moon S. Nam, 최용규<sup>2)</sup>, Yongkyu Choi, 김재현<sup>1)</sup>, Jae-Hyun Kim

<sup>1)</sup> 경성대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyung Sung Univ.

<sup>2)</sup> 경성대학교 건설·환경공학부 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kyung Sung Univ.

**SYNOPSIS** : The compressive capacity and the soil plugging resistance of single open-ended pipe pile were completely decreased in the previous study on the behavior of shorter single pile during simulated seaquake induced by the vertical component of earthquake. But, the capacity of single open-ended pipe pile with greater penetration and the capacity of piles group with shorter penetration were expected to be stable after seaquake motion.

In this study, first, 2-piles or 4-piles are driven into the calibration chamber included in saturated fine medium sand with several simulated penetrations, and the compressive load test for each piles group was performed. Then, about 95 % compressive load of the ultimate capacity was applied on the pile head during the simulated seaquake motion. Finally, to confirm the reduction of pile capacity during the simulated seaquake motion, the compressive load test for each single pile or piles group after seaquake motion was performed.

During the simulated seaquake, the compressive capacity of open-ended pipe piles with greater penetration ( > about 27 m) was not degraded even in deep sea deeper than 220 m and soil plug within open-ended pipe pile installed in deep sea was stable after seaquake motion. Also, in the case of 2-piles or 4-pile groups, the compressive capacity after seaquake motion was not degraded at all regardless of pile penetration depth beneath seabed, sea water depth and seaquake frequency.

Key words : compressive capacity, soil plug, seaquake, open-ended pipe pile, piles group

## 1. 서 론

지진도중 기초의 3가지 진동성분, 즉, 지반의 수평진동, 지반의 연직진동에 의해 발생된 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 흙과 말뚝을 진동시켜 모델링할 수 있지만, 연직지반 진동에 의해 유발된 해진의 진동은 해저면에 유사화된 동수압을 작용시켜 모델링할 수 있다 (Choi & O'Neill, 1997a; Rao, 1997). 지진의 연직성분에 의해 유발된 해진시 단일 개단 말

뚝의 거동에 관한 이전의 연구 (최용규 등, 1998; Choi et al., 1998)에서 단일 개단 말뚝의 지지력은 완전히 감소되었으며 관내토의 폐색도 완전히 파괴된 것으로 밝혀졌다. 그러나, 단일말뚝이더라도 말뚝의 관입 깊이가 길 경우에는 해진에 대하여 말뚝이 안정성을 유지할 수도 있을 것으로 예상되었으며 군말뚝일 경우에는 비교적 관입 깊이가 짧을 경우에도 해진에 대하여 안정성을 유지할 수 있을 것으로 예상되었다.

유사화된 지진에 의한 해상 말뚝 기초의 거동에 관한 연구는 주로 소형 압력토조에서 수행되었는데, Ochoa (1990)는 유사지진진동시의 폐단 인발 말뚝의 안정성에 관해 연구하였고, Rao (1997)는 유사지진진동과 해진중 인발 말뚝의 거동에 관한 연구를 수행하였다. Choi & O'Neill (1997b)은 유사 수평진동중 지지력의 이완 (Relaxation)과 관내토 폐색력의 저감특성을 연구하였다. Choi & O'Neill (1997a)은 유사 수평 또는 연직 지진진동 중 압축력을 지지하는 개단 강관말뚝기초의 지지력 저감 특성과 관내토 거동에 관한 연구를 수행하였으며, 또한, 유사 수평 또는 연직 지진 진동중 압축 지지력 저감과 관내토의 폐색거동 특성을 연구하였다. 여기서, 진앙거리 75 km에서 리터 지진규모  $M = 8$ 으로 유사화된 수평 및 연직 지진진동을 작용시켰다. 이때, 연직 지진 진동시에는 관내토 폐색력이 감소되지 않았으며, 수평지진 진동시에는 관내토 폐색력의 약 20 %가 감소되었으나 관내토 폐색이 완전히 파괴되지는 않았다. 또한, 최용규 등 (1998)과 Choi et al. (1998)는 포화된 세립의 중간 밀도 지반에 이중개단강관말뚝을 타입하여 지진의 수직성분에 의해 해수 중에 유발된 해진이 관내토의 폐색을 파괴시키는 지를 연구하였으며, 말뚝의 외주면 마찰력을 크게 저감시킬 수 있는 지를 연구하였다. 실험결과 유사해진중 수심 220 m 이상의 심해에 설치된 압축 개단 말뚝은 완전하게 파괴되었으며, 관내토 폐색력은 80 %이상 저감되었다. 그러나 수심이 220 m 이하의 천해에 설치된 개단 말뚝의 압축 극한 지지력은 거의 감소하지 않았으며, 관내토의 폐색력은 5 %이하 만큼만 저감되었다.

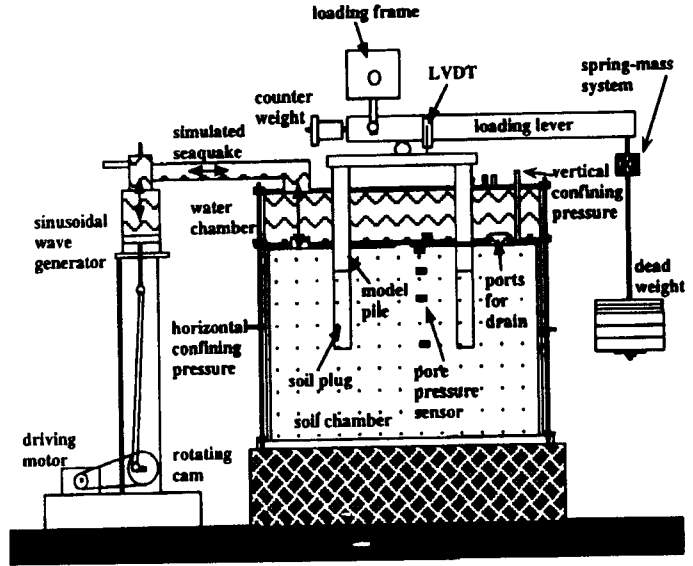
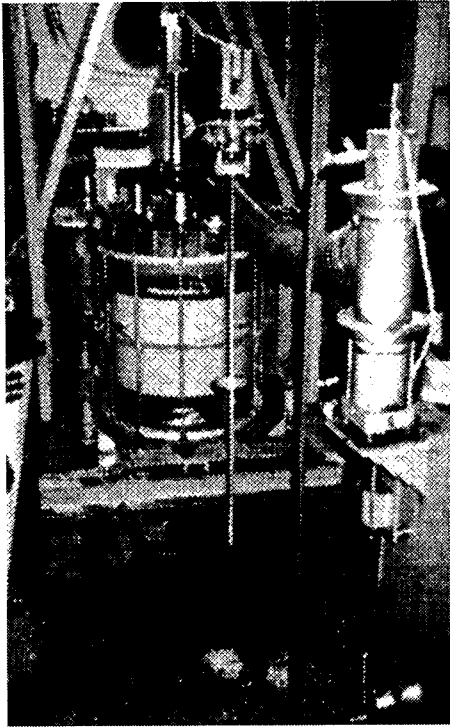
이 연구의 목적은 보다 깊게 관입된 말뚝과 2개 또는 4개의 군말뚝이 심해에서 유발된 해진작용시 안정성을 유지하는 지를 확인하는 것이고 이를 확인하기 위해서 상대밀도 50 %인 초세립질 포화모래지반을 담고 있는 소형압력토조에 2개 또는 4개의 개단 강관 무리 말뚝의 관입 깊이를 7~40 m로 모델링할 수 있도록 하였으며, 각각의 무리말뚝에 대하여 압축정재하시험을 실시한 후, 극한지지력의 약 95 %의 압축하중을 재하시킨 상태에서 유사화된 sine정현파로 모델링된 해진 (seaquake)의 진동을 작용시켰다. 그리고, 해진시험 후, 다시 압축정재하시험을 실시하여 개단 강관 무리 말뚝의 거동을 연구하였다. 약 300 m까지의 수심을 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.

## 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., 1998)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 가장자리와 중앙부에는 말뚝의 타격관입 설치를 위한 구멍을 만들어 두어 4개의 군말뚝 실험시 중앙부로 동수압이 전달될 수 있게 비워 두었다. 간극수압 측정센서의 설치와 상부 멤브레인에 구속압력의 작용을 위한 장치를 해두었으며 압력토조내로만 압력이 전달될 수 있도록 밀폐되었다.



(a) Photo of seauquake testing system

(b) Schematic diagram of seauquake testing system

Fig. 1 The simulated seauquake testing equipment

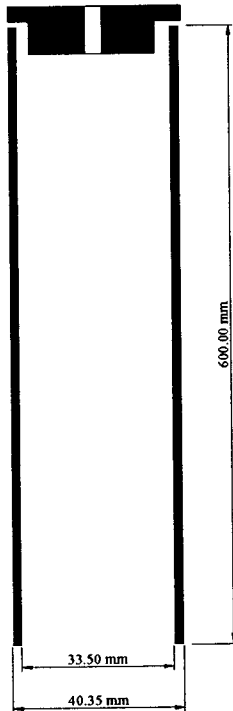


Fig. 2 Schematic drawing of model pile

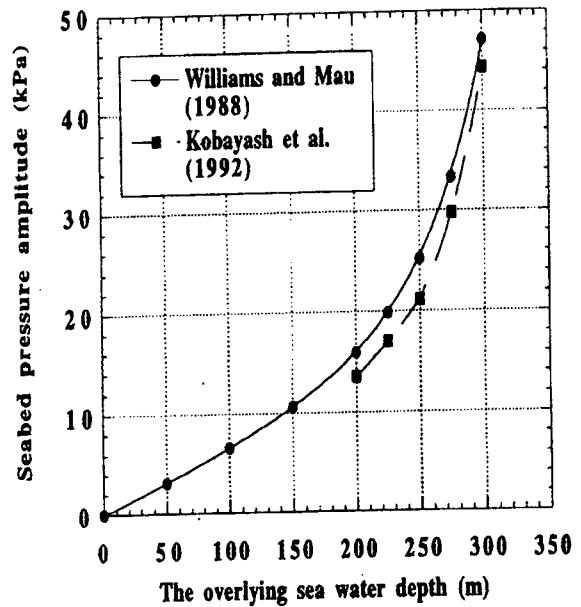


Fig. 3 Simulated seauquake amplitude on the seabed versus water depth (1986 Oceanside event at 75 km from epicenter)

시료는 간극수의 분산 (Diffusion)에 의한 동적 크기효과를 반영할 수 있도록 하기 위해 현장 흙의 입경보다 훨씬 작은 세립질 모래 (Micro-fine sand)를 사용하였으며,  $D_{10} = 0.107 \text{ mm}$ ,  $C_u = 1.87$ ,  $C_c = 0.99$ 이었으며 통일분류법상 SM이었다. 지반은 약 50 %의 상대밀도로 형성되었으며, 투수계수는  $1.21 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 이었고, 벽면 마찰각( $\delta$ )은  $22^\circ$ 이었다 (Choi et al., 1997b). 시료를 포화시키기 위하여 압력토조 하단에 있는 물 공급장치를 통하여 증류수를 공급하였으며, 시료 상부까지 물이 올라온 후 수조를 조립하여 진공펌프로 시료내의 공기를 제거하였다.

모형말뚝은 그림 2에 나타내었는데, 조립된 모형말뚝은 외경 40.35 mm, 내경 33.50 mm, 그리고 말뚝 벽 두께는 3.43 mm인 단일관으로 제작되었으며, 축하중 계측장치는 부착시키지 못하였다.

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

주기와 발생장치는 상부수조에 직경 150 mm의 파이프프로세 수평하게 연결시켰으며, 주기파의 진폭과 주파수를 조절할 수 있게 하였다.

지진의 연직성분에 의해 수중에 유발된 해진 (seaquake)은 해저면 (seafloor)에 동수압 (hydrodynamic pressure)을 작용시켜 모델링할 수 있는데, 이들은 Williams et al. (1988)와 Kobayashi et al. (1992)에 의해 연구되었다. 해저면에 작용하는 동수압은 sine정현파로 모델링하였다. Oceanside지진을 이용하여 유사화된 해진의 압력크기와 수심과의 관계를 그림 3에 나타내었는데, 여기서, Williams 등에 의해 계산된 해진의 진폭이 Kobayashi 등에 의해 계산된 값보다 다소 컸다. 이에 대한 자세한 내용은 참고문헌 (Choi et al., 1998)을 참고할 수 있을 것이다.

## 2.2 실험계획 및 절차

유효응력의 상사법칙에 의해 정적크기계수를 30으로 결정할 수 있었으며 (O'Neill & Vipulanandan, 1990; 최용규, 1995), 본 연구에 사용된 외경 40.35 mm인 모형말뚝은 직경이 약 1.2 m의 현장말뚝의 거동을 나타내는 것으로 볼 수 있었다. 말뚝의 실제 관입 깊이 7, 12, 21, 24, 27, 그리고 40 m를 유사화시키기 위하여 압력토조의 유효구속압력을 20, 35, 60, 70, 80 그리고 120 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 하였는데 (Kobayashi, et al., 1992), 두 상사법칙에 대해 계산된 주파수 크기 계수들은 차이를 나타내고 있었으므로 평균적으로 4를 사용하였다 (Rao, 1997). 해진 모형실험에서는 약 20초 내외로 동수압을 작용시켜 주었다.

구체적인 실험계획은 표 1에 나타내었다. 포화된 모형 지반에 임의의 구속압력을 작용시킨 후 모형 말뚝을 2개 또는 4개를 타입하였다. 말뚝머리에 극한 지지력의 95 %이상의 하중을 상재하여 해상과 진동시험을 수행하였다. 이때, 말뚝머리의 연직변위, 지표면에 작용된 동수압의 크기, 그리고 지반내의 간극수압 발생량을 시간에 대한 이력으로 정밀하게 측정하였다.

해상과 진동시험이 끝난 후, 말뚝머리의 정하중을 제거하고 다시 정재하 시험을 수행하여, 해상과 진동시험중의 지지력 저감량을 확인하였다.

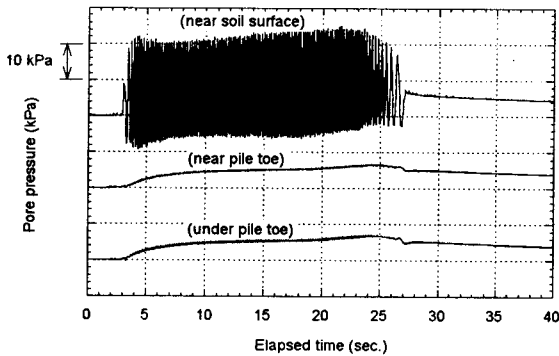
## 3. 실험결과 및 분석

그림 4에는 2개로 구성된 말뚝군에서 압력토조의 유효 구속압력이 60 kPa, 동수압의 진폭이 28 kPa 그리고 동수압의 주파수가 5 Hz인 경우의 해상과 진동시험 [G-3(D1)]의 결과를 나타내었다. 여기서, 2개

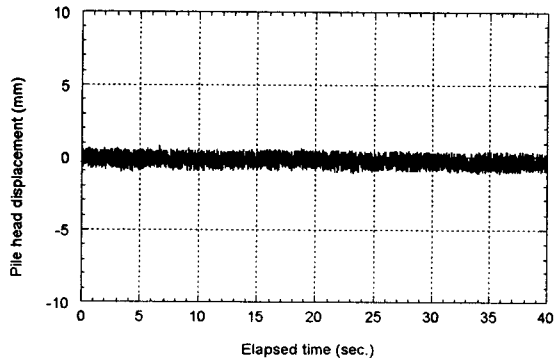
Table 1 Test plan

Test		G-1 (D)	G-1 (S)	G-1 (D)	G-1 (S)	G-2 (D)	G-2 (D)	G-3 (D)	G-3 (S)	G-3 (D)	G-4 (D)	G-4 (D)	G-5 (D)	G-5 (S)
Number of piles		2	2	4	4	2	4	2	2	4	2	4	2	2
Relative density		%												
Confining pressure (kPa)		%												
		20	×	×	×	×								
		35					×	×						
		60							×	×	×			
		80										×	×	
		120											×	×
Q/Q <sub>ult</sub>		%												
Static load test before seauquake		×												
Seauquake Shaking test	Amplitude (kPa)	Deep Sea	34, 28		26		34, 25, 22	30, 24	28, 17		30, 17	54, 39	44, 30	20
		Shallow Sea		16, 14		14				9, 9				15
	Frequency	Hz	2.5	2.5	2.5	2.5	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Static load test after seauquake		×												

where, Q is compressive load on the pile head and Q<sub>ult</sub> is ultimate pile capacity determined from static pile load test before seauquake test.

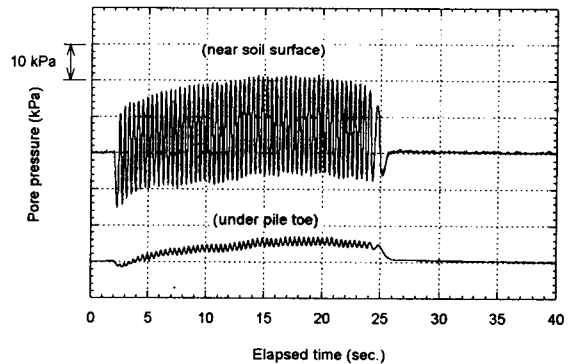


(a) Induced pore pressure-time history

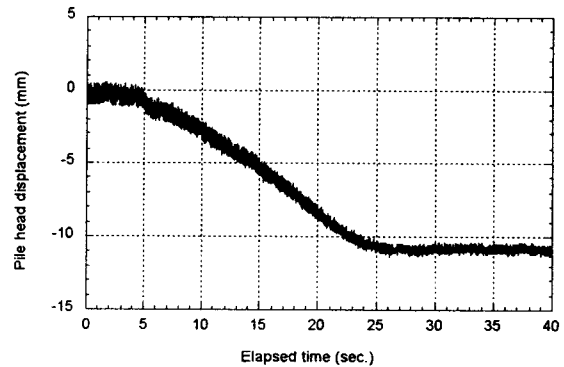


(b) Pile head displacement-time history

Fig. 4 Seauquake test for 4-piles group in simulated deep sea (Test G-3'(D1), confining pressure =60 kPa, amplitude of seauquake = 30 kPa, and frequency of seauquake = 5 Hz)



(a) Induced pore pressure-time history



(b) Pile head displacement-time history

Fig. 5 Seauquake test for 2-piles group in simulated deep sea (Test G-1(D2), confining pressure =20 kPa, amplitude of seauquake = 28 kPa, and frequency of seauquake = 2.5 Hz)

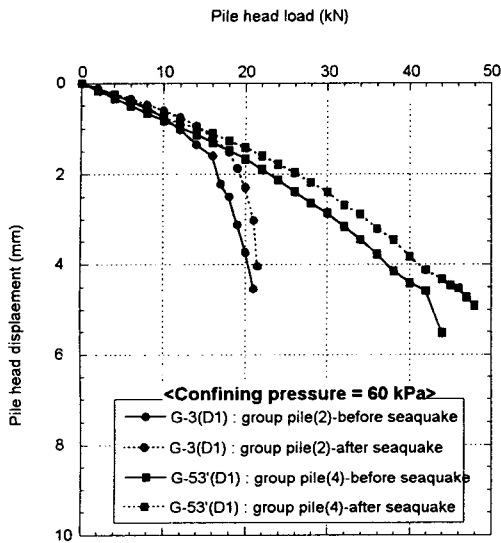


Fig. 6 The result of pile load test

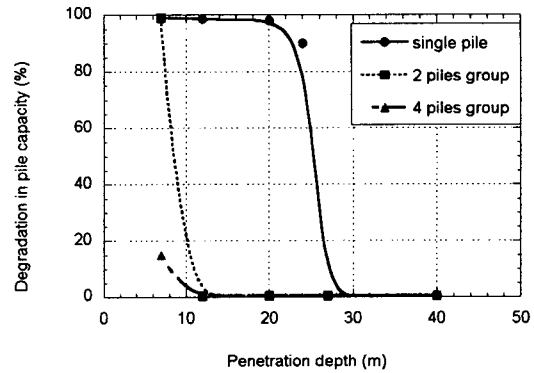


Fig. 7 Stability of open-ended pipe piles installed in deep sea during seaquake motion.

로 구성된 말뚝군에서 지지력은 감소되지 않았고 침하도 발생되지 않았으며, (a)에는 모형지반의 지표면에 유발된 동수압의 크기와 말뚝 주변 지반내에 발생된 간극 수압의 발생양상을, (b)에는 해상파시험중의 말뚝머리 변위를 나타내었다. 4개로 구성된 말뚝군의 경우에는 모든 관입깊이에서 지지력의 손실은 없으므로 도시하지 않았다.

그림 5에는 2개 말뚝군에서 압력토조의 유효 구속압력이 20 kPa, 동수압 진폭이 28 kPa 그리고 동수압의 주파수가 2.5 Hz인 경우의 해상파 진동 실험 [G-1(D2)]의 결과를 나타내었는데, 2개의 군말뚝이라도 관입깊이가 7 m이하로 모델링된 경우의 군말뚝에서의 지지력은 완전히 감소되었다. (a)에는 모형지반의 지표면에 유발된 동수압의 크기와 말뚝 주변 지반내에 발생된 간극 수압의 발생양상을, (b)에는 해상파 시험중의 말뚝머리 변위를 나타내었다.

그림 6에서는 관입깊이가 27 m (구속압력 = 60 kPa)로 모델링된 군말뚝에서의 압축정재하시험결과를 나타내었다. 해진 발생 전의 압축지지력과 발생 후의 지지력의 차이는 거의 없었다.

그림 7에서는 해진시 단일개단말뚝의 안정성을 도시하였다. 27 m보다 적은 관입깊이의 단일개단말뚝에서 압축지지력은 해수면의 깊이에 좌우되었다. 220 m 이상의 심해에 설치된 단일개단말뚝의 압축지지력은 완전히 손실되었으나 27 m보다 깊은 관입깊이의 말뚝 압축지지력은 감소되지 않았으며 안정성을 유지하였다. 2개 또는 4개 말뚝군에서 관입깊이, 해수깊이 그리고 해진의 주기에 관계없이 압축지지력과 관내토 폐색력의 감소는 없었다. 단지 7 m의 관입깊이에서 심해에 설치된 2개 말뚝군에서의 압축지지력은 완전히 감소하였고, 7 m의 관입깊이에서 심해에 설치된 4개 말뚝군에서의 압축지지력은 약 15 % 감소된 가변상태 (mobility condition)가 되었다.

#### 4. 결론 및 제언

- (1) 해저면의 수직 지진진동에 의해 유발된 해진 (seaquake)은 압력 토조 표면에 sine정현파 형상의 동수압을 작용시켜 유사화하였다. 유사화된 해진 압력의 진폭은 수심에 따라 달라지는데,  $M =$

8.0으로 유사화된 캘리포니아의 Oceanside지진 (1986)에 대한 동수압의 진폭과 수심과의 관계를 그림 3에 나타내었다. 모형 해진 실험에 사용된 주파수는 Oceanside지진의 주파수에 주파수 크기 계수 ( = 4)를 곱하여 계산하였다.

- (2) 27 m보다 깊은 관입깊이에서 단일개단말뚝의 압축지지력은 감소되지 않고 안정성을 유지하였고 관내토의 폐색도 파괴되지 않았다.
- (3) 2개 말뚝군에서는 관입깊이, 해수깊이 그리고 해진의 주기와 관계없이 압축지지력과 관내토 폐색력의 감소는 없었으나, 단지 7 m의 관입깊이에서 심해에 설치된 2개 말뚝군에서의 압축지지력이 완전히 감소하였다.
- (4) 4개 말뚝군에서는 관입깊이, 해수깊이 그리고 해진의 주기와 관계없이 압축지지력과 관내토 폐색력의 감소는 없었으나, 7 m의 관입깊이에서 심해에 설치된 4개 말뚝군에서의 압축지지력은 약 15 % 감소된 가변상태 (mobility condition)가 되었다.

## 참고문헌

1. 백규호, 이승래 (1996), "말뚝직경이 개단말뚝의 폐색정도와 지지력에 미치는 영향," 한국지반공학회, pp.85~94.
2. 최용규, "소형 압력토조내에 타입된 말뚝의 인발 거동과 극한 지지력 결정에 관한 연구," 한국지반공학회지, 제 11권 제 2호, 1995. 6., PP. 19-28.
3. 최용규, 남문석(1998), "해저면의 수직 지진 진동에 의해 유발된 해진에 대한 해상 개단 강관말뚝 기초의 거동," 한국지진공학회 논문집, 제2권 제1호, 한국지진공학회, pp. 11~21.
4. 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.
5. Choi, Y. & O'Neill, M. W. (1997b), "Soil Plugging and Relaxation in Pipe Pile During Earthquake Motion," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. Vol. 123, No. 10, Oct. 1997, pp. 975-982.
6. Choi, Yongkyu, O'Neill, M. W. & Nam, Moon S. (1998), "Response of Soil Plug to Sequake Induced by Vertical Seismic Excitation," Proceedings of the 8th (1998) International Offshore and Polar Engineering Conference, Montreal, Canada, May 24 - 29, 1998, pp. 390-397.
7. 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.
8. 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.
9. O'Neill, M. W., Vipulanandan, C., and Ochoa, M. (1990), "Response of Tension Piles to Simulated Seismic Motion in Saturated Fine Sand," Report No. UHCEE 90-09, Univ. of Houston, 1990.

10. 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.
11. 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.
12. 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.