

해진시 심해에 설치된 개단말뚝의 안정성에 관한 모형실험 연구

An Experimental Study on the Stability of Open-ended Pipe Piles Installed in Deep Sea during the Simulated Sequake

남 문 석* 최 용 규**
Nam, Moon Seok Choi, Yong Kyu

국문요약

지진의 연직성분에 의해 유발된 해진시 단일개단말뚝의 거동에 관한 이전의 연구들에서 단일개단말뚝의 지지력은 완전히 감소되었으며 관내토의 폐색도 완전히 파괴된 것으로 밝혀졌다. 그러나, 개단말뚝이더라도 말뚝의 관입 깊이가 깊 경우 해진에 대하여 말뚝이 안정성을 유지할 수 있고 개단강관군말뚝일 경우에는 비교적 관입 깊이가 얇을 경우에도 해진에 대하여 안정성을 유지할 수 있을 것으로 예상되었다.

본 연구에서는 초세립질 포화모래지반을 담고 있는 소형압력토조에 단일개단말뚝, 2개 또는 4개의 개단무리말뚝을 관입 길이 7~40m로 모델링하여 관입시켰으며, 각각의 말뚝에 대하여 압축정재하시험을 실시한 후, 극한지지력의 약 95%의 압축하중을 재하시킨 상태에서 해진의 진동을 작용시키면서 지지력의 감소를 확인하였고, 해진 작용후의 각각의 말뚝에 대하여 압축정재하시험을 실시하였다.

해진시, 천해에 설치된 단일개단말뚝과 군말뚝의 지지력은 감소되지 않았다. 그러나, 심해에 설치된 말뚝의 안정성은 말뚝의 지중관입 깊이에 좌우되었다. 즉, 27m이상 관입된 단일개단말뚝의 지지력은 안정하였으며, 13m이상 관입된 2개 및 4개 군말뚝은 안정하였다. 그러나, 7m 관입된 2개 군말뚝은 파괴되었으며, 7m 관입된 4개 군말뚝의 지지력은 15%만큼 저감되었다.

주요어 : 압축지지력, 관내토, 해진, 단일개단말뚝, 2개 또는 4개의 말뚝군

ABSTRACT

It is known from the previous study on the behavior of shorter single pile during simulated sequake induced by the vertical component of earthquake that the compressive capacity and the soil plugging resistance of single open-ended pipe pile were completely degraded. 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 sequake motion.

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

During the simulated sequake, compressive capacities of single open-ended pipe pile and piles group installed in shallow sea were not decreased. But, the stability of open-ended pile installed in deep sea was depended on the pile penetration depth. So, single open-ended pile with greater penetration of 27m was stable, and 2-pile and 4-pile groups with penetration more than 13m were stable. But, 2-pile groups with penetration of 7m was failed, and the compressive capacity of 4-pile groups with penetration of 7m was degraded about 15%.

Key words : compressive pile capacity, soil plug, sequake, single open-ended pipe pile, 2-pile or 4-pile groups

1. 서 론

지진도중 지반의 3가지 진동성분, 즉, 지반

의 수평진동, 지반의 연직진동에 의해 발생한 상부구조물과의 피드백 (feedback)에 의한 말뚝의 연직진동, 그리고, 지반의 연직진동에 의해 유발된 해진 (sequake)의 진동이 발생한다. 이들 진동들은 해상에 설치된 개단 강관말뚝의 관내토 폐색에 영향을 미칠 수 있다. 이

* 경성대학교 대학원 토목공학과 석사과정

** 정희원 · 경성대학교 건설 · 환경공학부 부교수

본 논문에 대한 토의를 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

때, 지반과 말뚝의 진동은 유사화된 수평 및 연직진동으로 흉과 말뚝을 진동시켜 모델링할 수 있지만, 연직지반 진동에 의해 유발된 해진의 진동은 해저면에 유사화된 동수압을 작용시켜 모델링할 수 있다.^{(4),(10)} 지진의 연직성분에 의해 유발된 해진시 단일 개단 말뚝의 거동에 관한 이전의 연구^{(3),(6)}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 균말뚝일 경우에는 비교적 관입 깊이가 짧은 경우에도 해진에 대하여 안정성을 유지할 수 있을 것으로 예상되었다.

유사화된 지진에 의한 해상 말뚝 기초의 거동에 관한 연구는 주로 소형 압력토조에서 수행되었는데, Ochoa⁽⁶⁾는 유사지진진동시의 폐단 인발 말뚝의 안정성에 관해 연구하였고, Rao⁽¹⁰⁾는 유사지진진동과 해진중 인발 말뚝의 거동에 관한 연구를 수행하였다. Choi & O'Neill⁽⁵⁾은 유사 수평진동중 지지력의 이완 (relaxation) 과 관내토 폐색력의 저감특성을 연구하였다. Choi & O'Neill⁽⁴⁾은 유사 수평 또는 연직 지진진동 중 압축력을 지지하는 개단 강관말뚝 기초의 지지력 저감 특성과 관내토 거동에 관한 연구를 수행하였으며, 또한, 유사 수평 또는 연직 지진 진동중 압축 지지력 저감과 관내토의 폐색거동 특성을 연구하였다. 여기서, 진앙거리 75km에서 리터 지진규모 M=8으로 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⁽³⁾과 Choi et al.⁽⁶⁾는 포화된 세립의 중간 밀도 지반에 이중개단강관말뚝을 타입하여 지진의 수직성분에 의해 해수 중에 유발된 해진이 관내토의 폐색을 파괴시키는 지를 연구하였으며, 말뚝의 외주면 마찰력을 크게 저

감시킬 수 있는 지를 연구하였다. 실험결과 유사해진중 수심 220m 이상의 심해에 설치된 압축 개단 말뚝은 완전하게 파괴되었으며, 관내토 폐색력은 80%이상 저감되었다. 그러나 수심이 220m 이하의 천해에 설치된 개단 말뚝의 압축 극한 지지력은 거의 감소하지 않았으며, 관내토의 폐색력은 5%이하 만큼만 저감되었다.

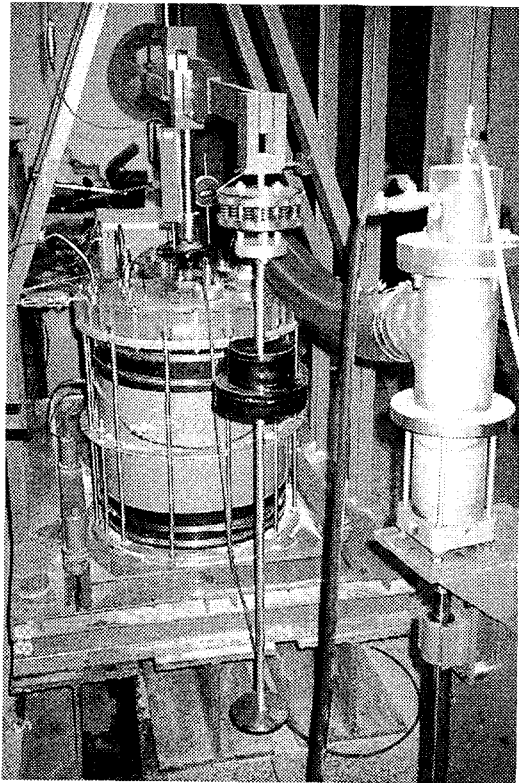
이 연구의 목적은 보다 깊게 관입된 단일개단말뚝과 2개 또는 4개의 개단군말뚝이 심해에서 유발된 해진작용시 안정성을 유지하는 지를 확인하는 것이고 이를 확인하기 위해서 상대밀도 50%인 초세립질 포화모래지반을 담고 있는 소형압력토조에 단일개단말뚝, 2개 또는 4개의 개단 강관 무리 말뚝의 관입 깊이를 7~40m로 모델링할 수 있도록 하였으며, 각각의 무리말뚝에 대하여 압축정재하시험을 실시한 후, 극한지지력의 약 95%의 압축하중을 재하시킨 상태에서 유사화된 sine정현파로 모델링된 해진 (seaquake)의 진동을 작용시켰다. 그리고,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

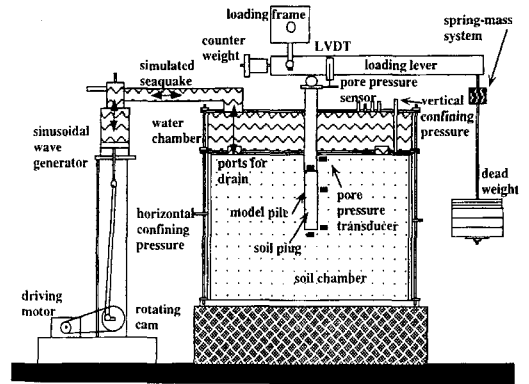
2.1 실험장치

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

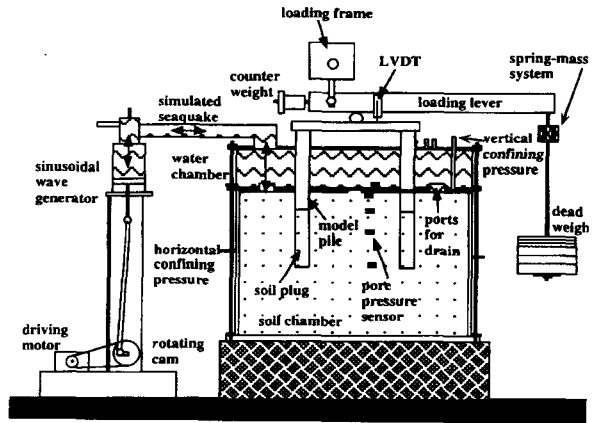
조립된 압력토조⁽⁶⁾는 높이 0.54m, 직경 0.61m 이었으며, 토조내에 담긴 흉에 수평방향과 연직방향으로 구속압력을 따로 작용시킬 수 있도록 고무 멤브레인을 압력토조 내부 측면과



(a) Photo of seauquake testing system



(b) Schematic diagram of seauquake testing system for single pile



(c) Schematic diagram of seauquake testing system for 2-pile or 4-pile groups

Fig. 1 The simulated seauquake testing equipment

상부 뚜껑 아래에 각각 설치하였다. 압력토조 상부 뚜껑에는 간극수의 배수와 모형말뚝의 설치를 위한 배·출입구를 만들어 두었다. 그리고, 압력토조 윗 뚜껑 상부에는 높이 50mm의 수조를 고정시켜 주기와 발생장치에서 생성된 동수압이 수조를 통하여 모형지반 지표면에 전달되게 하였다. 또한, 수조의 가장자리와 중앙부에는 말뚝의 타격관입 설치를 위한 구멍을 만들어 두어 4개의 군말뚝 시험시 중앙부로 동수압이 전달될 수 있게 비워 두었다. 간극수압 측정센서의 설치와 상부 멤버라인에 구속압력의 작용을 위한 장치를 해두었으며 압력토조내로만 압력이 전달될 수 있도록 밀폐되었다.

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(δ)은 22° 이었다.⁽⁵⁾ 시료를 포화시키기 위하여 압력토조 하단에 있는 물 공급장치를 통하여 증류수를 공급하였으며, 시료 상부까지 물이 올라온 후 수조를 조립하여 진공펌프로 시료내의 공기를 제거하였다.

모형말뚝은 Fig. 2에 나타내었는데, 조립된 모형말뚝은 외경 40.35mm, 내경 33.50mm, 그

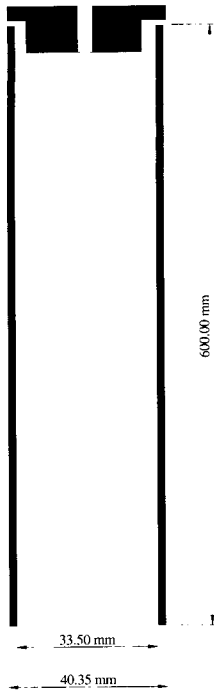


Fig. 2 Schematic drawing of model pile

리고 말뚝 벽 두께는 3.43mm인 단일관으로 제작되었으며, 축하중 계측장치는 부착시키지 못하였다. 모형말뚝상부에는 압축 정하중을 재하할 수 있도록 하였으며, 말뚝과 상부하중 사이에는 스프링을 설치하여 상부구조물과 피드백 (feedback)을 가능하도록 하였다.

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

본 연구에서는 지진규모 M=5.6의 Oceanside 지진기록을 M=8.0으로 확대하였는데, 지진의 확대 (scaling) 기법은 참고문헌⁽²⁾을 참고할 수 있을 것이다. M=8.0의 지진은 유례를 찾아보기 쉽지 않은 강진이기는 하지만, 모든 규모의 지진을 유사화하기 곤란하여 다소 안전측으로 유사화하였다. M=8.0으로 유사화된 지진의 연직성분에 의해 수중에 유발된 해진 (seaquake)은 해저면 (seafloor)에 동수압 (hydrodynamic pressure)을 작용시켜 모델링할 수 있는데, 이들은 Willams et al⁽¹¹⁾와 Kobayashi et al.⁽⁷⁾에

의해 연구되었다. 해저면에 작용하는 동수압은 sine정현파로 모델링하였다. Oceanside지진을 이용하여 유사화된 해진의 압력크기와 수심과의 관계를 Fig. 3에 나타내었는데, 여기서, Williams 등에 의해 계산된 해진의 진폭이 Kobayashi 등에 의해 계산된 값보다 다소 컸다. 이에 대한 자세한 내용은 참고문헌⁽⁶⁾을 참고할 수 있을 것이다.

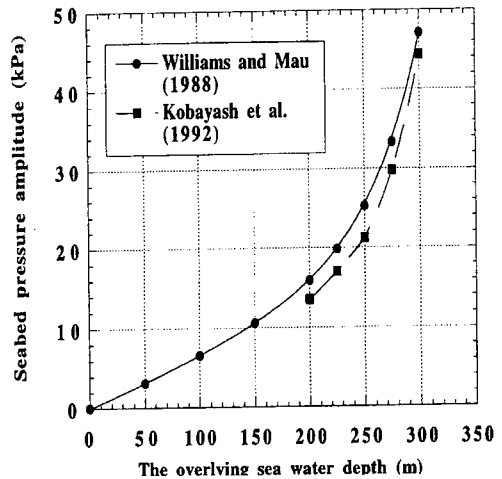


Fig. 3 Simulated seaquake amplitude on the seabed versus water depth (1986 Oceanside event at 75 km from epicenter)

2.2 실험계획 및 절차

유효응력의 상사법칙에 의해 정적크기계수를 30으로 결정할 수 있었으며^{(1),(9)}, 본 연구에 사용된 외경 40.35mm인 모형말뚝은 직경이 약 1.2m의 현장말뚝의 거동을 나타내는 것으로 볼 수 있었다. 말뚝의 실제 관입 깊이 7, 12, 21, 24, 27, 그리고 40m를 유사화시키기 위하여 압력토조의 유효구속압력을 20, 35, 60, 70, 80 그리고 120kPa로 변화시켰으며, 말뚝이 설치된 약 300m까지의 수심을 유사화시키기 위하여 모형지반의 지표면에 유발된 동수압의 진폭을 48kPa까지 변화시켰다. (Fig. 3 참조) 실제 해진의 주파수 0.6Hz (M=8.0으로 확대시킨 지진의 평균 주파수), 1.2Hz 그리고 2.5Hz를

유사화시키기 위하여 유발된 동수압의 주파수를 2.5Hz, 5.0Hz 그리고 10.0Hz로 변화시켰다 (주파수 크기계수=4). 여기서, 해수와 해저면의 상호작용을 모델링하기 위하여 Froude의 상사법칙과 Mach 상사법칙을 만족시켜야 하였는데⁽⁷⁾, 두 상사법칙에 대해 계산된 주파수 크기계수들은 차이를 나타내고 있었으므로 평균적으로 4를 사용하였다.⁽¹⁰⁾ 두 가지 방법으로 주

파수 크기계수를 결정하는 구체적인 과정은 참고문헌(10)을 참조할 수 있을 것이다. 해진 모형실험에서는 약 20초 내외로 동수압을 작용시켜 주었다.

구체적인 실험계획은 Table 1과 Table 2에 나타내었는데, Table 1은 단일말뚝에 대한 실험계획을 나타내었고 Table 2는 무리말뚝에 대한 실험계획을 나타내었다. 포화된 모형 지

Table 1 Test plan for single pile

Test			S1 (S)	S2 (D)	S3 (D)	S3 (S)	S4 (D)	S5 (D)	S6 (D)
Relative density	%		50	50	50	50	50	50	50
Confining pressure (kPa)	20		×						
	35			×					
	60				×	×			
	70						×		
	80							×	
120								×	
Q/Q _{ult}	%		95	95	95	95	95	95	95
Static load test before seaquake			×	×	×	×	×	×	×
Seaquake Shaking test	Amplitude (kPa)	Deep Sea		25	20		23	34, 28	22, 18
		Shallow Sea	15			10			
	Frequency	Hz	2.5	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Static load test after seaquake			×	×	×	×	×	×	×

where, Q is compressive load on the pile head and Q_{ult} is ultimate pile capacity determined from static pile load test before seaquake test

Table 2 Test plan for 2-pile and 4-pile groups

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	%		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Confining pressure (kPa)	20		×	×	×	×									
	35					×	×								
	60							×	×	×					
	80											×	×		
	120													×	×
Q/Q _{ult}	%		95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
Static load test before seaquake			×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Seaquake 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	5.0
Static load test after seaquake			×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

where, Q is compressive load on the pile head and Q_{ult} is ultimate pile capacity determined from static pile load test before seaquake test

반에 임의의 구속압력을 작용시킨 후 모형 말뚝을 2개 또는 4개를 타입하였다. 말뚝머리에 극한 지지력의 95 % 이상의 하중을 상재하여 해진 진동시험을 수행하였다. 이때, 말뚝머리의 연직변위, 지표면에 작용된 동수압의 크기, 그리고 지반내의 간극수압 발생량을 시간에 대한 이력으로 정밀하게 측정하였다.

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

3. 실험결과 및 분석

Fig. 4에는 단일개단강관말뚝에 대한 해진실험결과인데, 관입깊이가 20m (압력토조의 유효 구속압력이 60kPa), 약 230m의 심해 (동수압의 진폭이 20kPa)에서 발생한 해진의 실제 주파수 1.2Hz (동수압의 주파수가 5Hz)인 경우에 대한 해진 진동시험의 결과를 나타내었다. 여기서, 약 230M의 심해에 설치된 단일개단강관말뚝의 침하가 약 10mm정도 발생하여 지지력은 완전하게 감소되었으며, (a)에는 모형지반의 지표면에 유발된 동수압의 크기와 말뚝 주변 지반내에 발생된 간극 수압의 발생양상을, (b)에는 해진 시험중의 말뚝머리 변위를 나타내었다. 그러나, Table 1에 나타난 바와 같이 수심, 관입깊이 그리고 해진 주파수를 변화시켜 수행된 일련의 해진실험의 결과를 Fig. 8에 요약하였는데, 여기서, 27m이상 관입된 단일개단말뚝은 해진에 대하여 수심과 관계없이 안정한 것을 알 수 있었다.

Fig. 5에는 2개의 개단말뚝군에 대한 실험결과인데, 말뚝의 관입깊이가 7m (유효 구속압력이 20kPa), 약 260m의 심해 (동수압 진폭이 28kPa)에서 발생한 해진의 실제 주파수가 0.6Hz (동수압의 주파수가 2.5Hz)인 경우에 대한 해진 진동 실험의 결과를 나타내었다. 여기서, 약 230m의 심해에 설치된 2개 개단말뚝군의 침하가 약 11mm정도 발생하여 지지력은 완전하게 감소되었으며, (a)에는 모형지반의

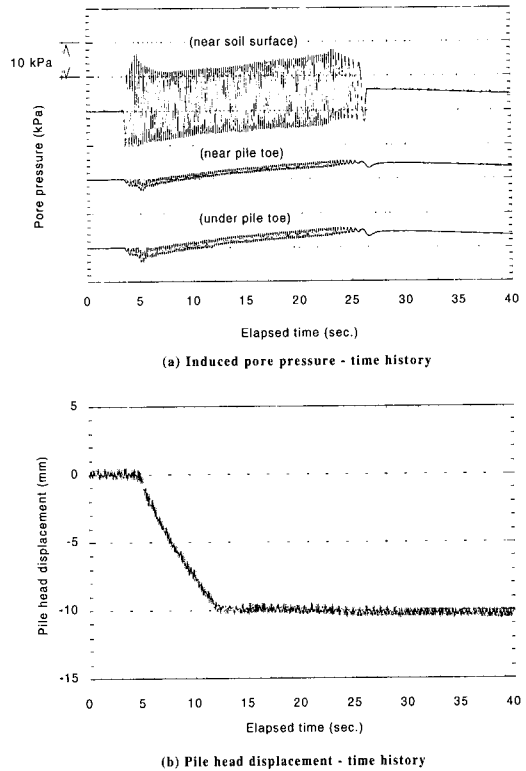


Fig. 4 Seaquake test results for a open-ended single pile installed in simulated deep sea (confining pressure=60kPa, amplitude of seaquake=20kPa and frequency of simulated seaquake=5Hz)

지표면에 유발된 동수압의 크기와 말뚝 주변 지반내에 발생된 간극 수압의 발생양상을, (b)에는 해진 시험중의 말뚝머리 변위를 나타내었다. 그러나, Table 2에 수록된 일련의 해진실험들에 대한 결과를 정리한 Fig. 8로부터 13m이상 관입된 2개의 개단말뚝군은 해진에 대하여 수심과 관계없이 안정한 것을 알 수 있었다.

Fig. 6에는 4개의 개단말뚝군에 대한 실험결과인데, 말뚝의 지중관입깊이가 7m (압력토조의 유효 구속압력이 20kPa), 약 250m의 심해 (동수압 진폭이 26kPa)에서 발생한 해진의 실제 주파수가 0.6Hz (동수압의 주파수가 2.5Hz)인 경우에 대한 해진 진동 실험의 결과를 나타내었다. 여기서, 약 250m의 심해에 설치된 4개 개단말뚝군의 침하가 약 1.5mm 발생하여

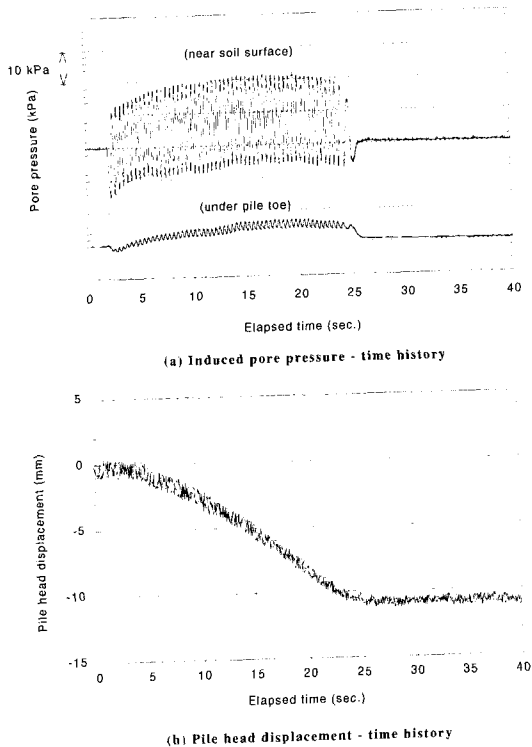


Fig. 5 Seismic test results for open-ended 2-pile groups installed in simulated deep sea (confining pressure=20kPa, amplitude of seaquake =28kPa and frequency of simulated seaquake =2.5Hz)

가변상태 (mobility state)를 유지하였으며, (a)에는 모형지반의 지표면에 유발된 동수압의 크기와 말뚝 주변 지반내에 발생한 간극 수압의 발생양상을, (b)에는 해진 시험중의 말뚝머리 변위를 나타내었다. 그러나, Table 2에 나타낸 일련의 해진 실험 결과들을 정리한 Fig. 8로부터 심해에 7m 보다 깊게 설치된 4개의 개단말뚝군은 해진에 대하여 수심과 관계없이 안정한 것을 알 수 있었다.

Fig. 4~6의 (a)에서 간극수압 발생 특성을 살펴보면, 말뚝 하부로 갈수록 간극수압은 급격히 감소하였다. 그러므로, Fig. 4와 Fig. 5의 (a)의 경우 심해에서 발생한 해진에 의해 지층에 유발된 간극수압만으로는 외주면 마찰력과 선단 지지력을 완전하게 감소시킬 수는 없을 것으로 판단하였다. 심해에 설치된 관입깊이 20m인 단일개단말뚝의 경우 (Fig. 4(a)),

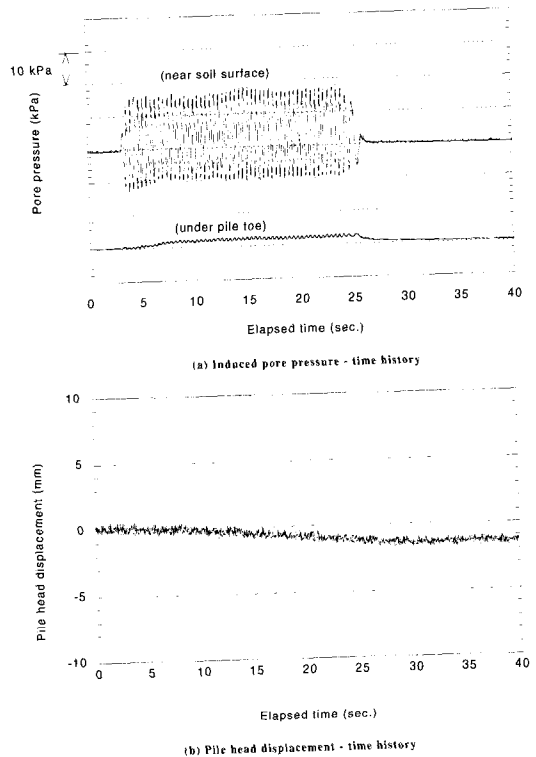


Fig. 6 Seismic test results for open-ended 4-pile groups installed in simulated deep sea (confining pressure=20kPa, amplitude of seaquake =26kPa and frequency of simulated seaquake =2.5Hz)

개단말뚝 관내토 선단에서 유발된 간극수압으로 인해 관내토내에 약 2.5 정도의 동수경사가 발생하였으며, 이 동수경사는 관내토의 폐색을 파괴시키기에 충분하였으며, 이것이 해진 진동중 관내토 폐색력을 파괴시키는 원인이 되었다.

Fig. 7에는 관입깊이가 20m (압력토조의 구속압력=60kPa)로 모델링된 단일개단말뚝에 대한 말뚝재하시험결과를 도시하였다. 단일말뚝의 경우에는 해진후의 지지력은 완전하게 감소되었으나, 나머지 2개 또는 4개의 개단말뚝군의 경우에는 해진작용 전의 지지력과 해진 후의 지지력의 차이는 거의 없었다. 이와 같은 지지력의 감소는 Fig. 4~6에 나타난 말뚝머리 변위의 시간에 대한 이력에서도 유추해 볼 수 있었으며, 말뚝머리 변위는 지지력의 크기를 반영하는 것으로 볼 수 있었다.

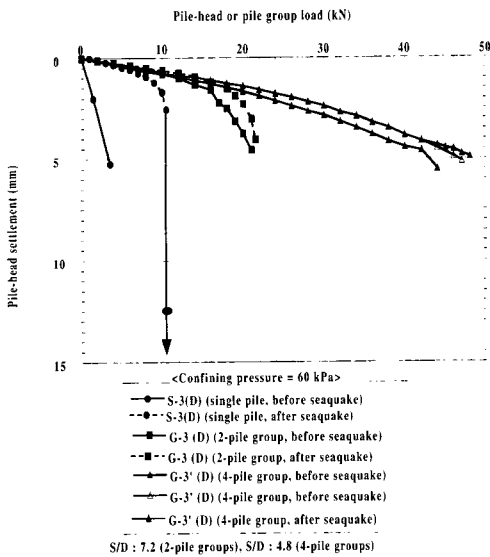


Fig. 7 Representative seaquake test results of open-ended piles (a single pile, 2-pile and 4-pile groups) for the simulated depth of 20m (confining pressure=60kPa)

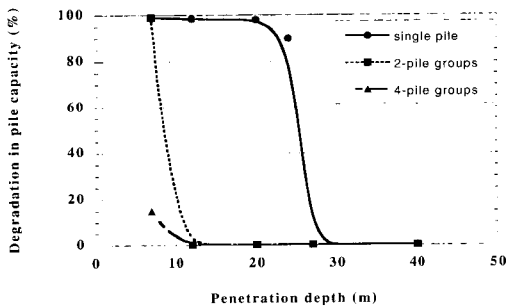


Fig. 8 Stability of open-ended piles installed in deep sea during seaquake motion

Fig. 8에는 해진시 단일개단말뚝, 2개 및 4개 개단 군말뚝의 안정성을 도시하였는데, Table 1과 2에 기술된 바와 같이 해저면까지의 수심, 말뚝의 지중관입깊이 그리고 해진주파수를 변화시켜 수행한 일련의 실험결과들로부터 해진후의 연직지지력 저감량을 측정하여 Fig. 8에 나타내었다. 여기서, 천해에 설치된 단일개단말뚝과 군말뚝의 지지력은 감소되지 않았다. 그러나, 심해에 설치된 말뚝의 안정성은 말뚝의 지중관입깊이에 좌우되었다. 즉, 27m이상 관입된 단일개단말뚝의 지지력은 안

정하였으며, 13m이상 관입된 2개 및 4개 군말뚝은 안정하였다. 그러나, 7m 관입된 2개 군말뚝은 파괴되었으며, 7m 관입된 4개 군말뚝의 지지력은 15%만큼 저감되었다.

4. 결론 및 제언

- (1) 해진시, 천해에 설치된 단일 개단말뚝의 지지력은 저감되지 않았다. 그러나, 심해 (> 220m)에 설치된 단일개단강관말뚝의 지지력은 말뚝의 지중관입깊이와 수심에 좌우되었다. 즉, 27m이상 관입된 단일개단말뚝의 지지력은 수심과 관계없이 안정하였고, 27m 이하 관입된 단일개단말뚝의 지지력은 95% 이상 저감되었으며 관내토포색도 파괴되었다.
- (2) 해진시 심해에 설치된 개단군말뚝의 경우 관입깊이가 극히 짧은 경우를 제외하면 안정을 유지하였다. 즉, 7m이상 지중에 관입된 2개 말뚝군은 관입깊이나 해진의 주파수에 관계없이 압축지지력과 관내토포색력은 안정하였으나, 7m보다 짧게 관입된 2개 말뚝군의 압축지지력이 완전히 감소하였다. 또한, 7m이상 지중에 관입된 4개 말뚝군은 관입깊이나 해진의 주파수에 관계없이 압축지지력과 관내토포색력은 저감되지 않았으나, 7m의 관입깊이에서 심해에 설치된 4개 말뚝군의 압축지지력은 약 15% 감소된 가변상태 (mobility condition)가 되었다.

감사의 글

이 연구는 1999년도 경성대학교 학술지원연구비에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 최용규, "소형 압력토조내에 타입된 말뚝의 인발 거동과 극한 지지력 결정에 관한 연구", 한국지반공학회지, 제11권 제2호, 1995,

- pp. 19-28.
2. 최용규, "지진기록의 확대 (scaling) 기법과 압력토조 말뚝모형실험에의 적용", 한국지반공학회지, 제12권 제2호, 1996, pp. 19-31.
 3. 최용규, 남문석, "해저면의 수직 지진 진동에 의해 유발된 해진에 대한 해상 개단 강관말뚝 기초의 거동", 한국지진공학회 논문집, 제2권 제1호, 한국지진공학회, 1998, pp. 11-21.
 4. Choi, Y. K. and O'Neill, M. W., "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. K. and O'Neill, M. W., "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, Y. K., O'Neill, M. W., and Nam, M. S., "Response of soil plug to seaquake 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., "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.
 8. Ochoa, M., "Response of Tension Piles to Simulated Seismic Motion in Saturated Fine Sand," Ph.D. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Houston, 1990.
 9. O'Neill, M. W., Vipulanandan, C., and Ochoa, M., "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., "Performance of Tension Piles During Simulated Ground Shaking and Seaquakes," Ph.D. thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Houston, 1997.
 11. 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.