

해진에 대한, 심해에 설치된 군말뚝의 안정성에 관한 연구

A Study on the Stability of Group Piles Installed in the Deep Sea to the Seauquake

최 용 규*¹ Choi, Yong-Kyu
남 문 석*² Nam, Moon-Seok
정 두 환*³ Jeong, Doo-Hwan

Abstract

In this study, the stability of group piles installed in deep sea to the seaquake was studied by performing the calibration chamber model tests for open-ended pipe piles, grouted piles under soil plug and close-ended piles installed in the simulated deep sea. For each case (a single pile, 2-pile and 4-pile groups), series of seaquake tests were performed.

While, during the simulated seaquake, the compressive capacity of the single open-ended pile depended on pile penetration depth beneath seabed, open-ended pile groups except for very shorter penetration depth (= 7 m) were stable after the seaquake motion. A single closed-ended pile and closed-ended pile groups, except for shorter penetration depth (= 7 m), were found to be stable. But, a single grouted pile with penetration depth of 13 m kept "mobility" state, the one with penetration depth of 20 m was stable and grouted pile groups with penetration depth of 7 m were stable regardless of pile penetration depth.

By grouting soil plug of open-ended piles and soil under the pile toe of open-ended pipe piles installed in the deep sea, failure of soil plugging was prevented. Thus, close-ended piles were more stable than open-ended pile against the seaquake motion.

요 지

본 연구에서는 심해(<220 m)에 설치된 개단말뚝, 폐단말뚝, 관내토 선단 하부지반 그라우팅말뚝에 대한 압력토조 모형 실험을 수행하여 해진에 대한 안정성을 연구하였으며, 각각의 경우 단일말뚝, 2개 및 4개 군말뚝에 대하여 실험을 수행하였다.

해진시 단일개단말뚝의 지지력은 말뚝의 지중관입 깊이에 의해 영향을 받았으나, 개단 군말뚝에서는 극히 짧은(7 m) 관입깊이를 모델링한 경우를 제외하면 안정하였다. 또한, 단일폐단말뚝과 폐단군말뚝에서는 극히 짧은(7 m) 관입깊이를 모델링한 경우만을 제외하면 안정을 유지하였다. 그러나, 13 m의 지중관입깊이를 모델링한 단일 그라우팅 말뚝의 지지력은 가변상태를 유지하였고, 20 m의 관입깊이를 모델링한 그라우팅 군말뚝은 안정하였다.

심해에 설치된 개단강관말뚝의 관내토와 선단 하부지반을 그라우팅함으로서 해진에 의한 관내토 폐색의 파괴를 막을 수 있다는 것을 확인하였으며, 폐단 말뚝은 개단 강관 말뚝보다 해진에 대해 안정하다는 것을 확인하였다.

Keywords : Seauquake, Open-ended pile group, Grouted pile group, Close-ended pile group, Static load test, Bearing capacity, Soil plug, Stability to seaquake

*1 정희원, 경성대학교 공학대학 건설·환경공학부 부교수

*2 정희원, 경성대학교 대학원 토목공학과 석사과정

*3 정희원, 경동기술공사 토질부

1. 서론

지진도중 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 개단강관말뚝의 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 (Choi와 O'Neill, 1997a; Rao, 1997). 지진의 연직성분에 의해 유발된 해진시 단일개단말뚝의 거동에 관한 이전의 연구(최용규 등, 1998; Choi 등, 1998)에서 단일개단말뚝의 지지력은 완전히 감소되었으며 관내토의 폐색도 완전히 파괴된 것으로 밝혀졌다. 그러나, 개단말뚝이더라도 말뚝의 관입 깊이가 긴 경우 해진에 대하여 말뚝이 안정성을 유지할 수 있었고 개단강관군말뚝일 경우에는 비교적 관입 깊이가 짧은 경우에도 해진에 대하여 안정성을 유지할 수 있었다 (남문석 등, 1999). 그리고, 관내토의 파괴를 방지할 수 있도록 그라우팅한 단일말뚝과 폐단말뚝의 경우에도 해진에 대하여 말뚝이 안정성을 유지할 수 있었으며 (정두환 등, 1999), 그라우팅말뚝과 폐단말뚝으로 구성된 군말뚝일 경우에도 해진에 대하여 안정성을 유지할 수 있을 것으로 예상되었다.

유사화된 지진에 의한 해상 말뚝 기초의 거동에 관한 연구는 주로 소형압력토조에서 수행되었는데, Ochoa (1990)는 유사지진진동시의 폐단인발말뚝의 안정성에 관해 연구하였고, Rao (1997)는 유사지진진동과 해진 중 인발말뚝의 거동에 관한 연구를 수행하였다. Choi와 O'Neill (1997b)은 유사 수평진동중 지지력의 이완 (relaxation)과 관내토 폐색력의 저감특성을 연구하였다. Choi와 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 지진 규모 $M=8$ 로 유사화된 수평 및 연직 지진진동을 적용시켰다. 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 등(1998)는 포화된 세립의 중간 밀도 지반에 이중 개단강관말뚝을 타입하여 지진의 수직성분에 의해 해수 중에 유발된 해진이 관내토의 폐색을 파괴시키는 지를 연구하였으며, 말뚝의 외주면 마찰력을 크게 저감시킬 수 있는 지도 연구하였다. 실험결과 유사해진 중 수심 220 m 이상의 심해에 설치된 단일개단 말뚝은 완전하게 파괴되었으며, 관내토 폐색력은 80% 이상 저감되었다. 그러나 수심이 220 m 이하의 천해에 설치된 단일개단말뚝의 압축 극한 지지력은 거의 감소하지 않았으며, 관내토의 폐색력은 5% 이하 만큼만 저감되었다. 남문석 등(1999)은 해진에 대한 말뚝거동을 연구하였는데, 27 m보다 깊은 관입깊이에서 단일개단말뚝의 압축지 지력은 감소되지 않은 채 안정성을 유지하였고 관내토의 폐색도 파괴되지 않았다. 그리고 2개 말뚝군에서는 관입 깊이, 해수깊이 그리고 해진의 주기와 관계없이 압축지 지력과 관내토 폐색력의 감소는 없었으나, 단지 7 m의 관입 깊이에서 심해에 설치된 2개 말뚝군에서의 압축지 지력이 완전히 감소하였다. 또한, 4개 말뚝군에서는 관입 깊이, 해수깊이 그리고 해진의 주기와 관계없이 압축지 지력과 관내토 폐색력의 감소는 없었으나, 7 m의 관입 깊이에서 심해에 설치된 4개 말뚝군에서의 압축지 지력은 약 15% 감소된 가변상태 (mobility condition)가 되었다.

본 연구의 목적은 심해에 설치된 개단강관무리말뚝, 그라우팅무리말뚝과 폐단무리말뚝 등의 무리말뚝들이 심해에서 유발된 해진작용시 안정성을 유지하는 지를 확인하는 것이고 이를 확인하기 위해서 상대밀도 50%인 초세립질 포화모래지반을 담고 있는 소형압력토조에 설치된 2개 또는 4개의 개단강관무리말뚝의 관입 깊이를 7~40 m로 모델링할 수 있도록 하였으며, 각각의 무리말뚝에 대하여 압축정재하시험을 실시한 후, 극한지 지력의 약 95%의 압축하중을 재하시킨 상태에서 유사화된 sine정현파로 모델링된 해진 (seaquake)의 진동을 작용시켰다. 그리고, 해진시험 후, 다시 압축정재하시험을 실시하여 해진에 의한 무리 말뚝의 지지력 저감양상을 참고하였다. 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-질량 시스템을 가진 정하중 재하장치, 주기파 발생장치, 상부 수조, 간극수압측정용 센서, 그리고 동적 변형 측정기 등으로 구성되었다.

조립된 압력토조 (Choi 등, 1998)는 높이 0.54 m, 직경 0.61 m이었으며, 토조내에 담긴 흙에 수평방향과 연직방향으로 구속압력을 따로 작용시킬 수 있도록 고무 멤브레

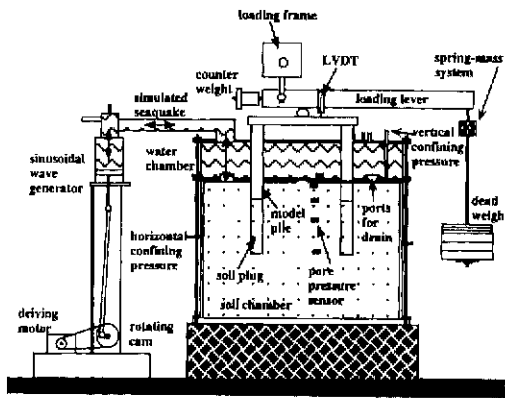


그림 1. Schematic diagram of seaquake testing for 2-pile or 4-pile group.

인을 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. 간극수압측정센서의 설치와 상부 멤브레인에 구속압력의 작용을 위한 장치를 해두었으며 압력토조내로만 압력이 전달될 수 있도록 밀폐되었다.

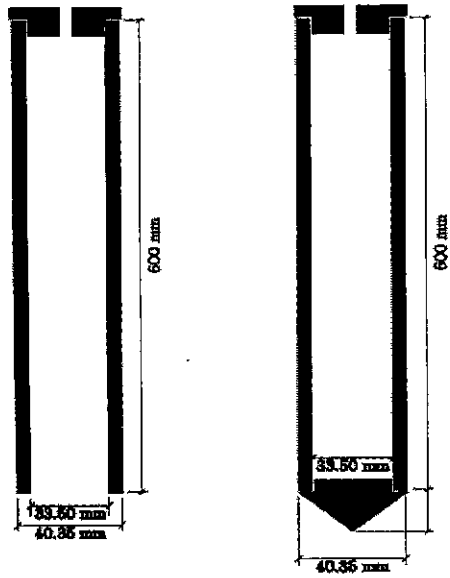
시료는 간극수의 분산(diffusion)에 의한 동적 크기 효과를 반영할 수 있도록 하기 위해 현장 흙의 입경보다 훨씬 작은 세립질 모래 (micro-fine sand)를 사용하였으며, $D_{10}=0.107$ mm, $C_u=1.87$, $C_c=0.99$ 이었으며 통일분류법상 SM이었다. 지반은 약 50%의 상대밀도로 형성되었으며, 투수계수는 1.21×10^{-3} cm/sec이었고, 벽면 마찰각 (δ)은 22° 이었다 (Choi 등, 1997b). 시료를 포화시키기 위하여 압력토조 하단에 있는 물 공급장치를 통하여 증류수를 공급하였으며, 시료상부까지 물이 올라온 후 수조를 조립하여 진공펌프로 시료내의 공기를 제거하였다.

모형말뚝은 그림 2에 나타내었는데, 개단말뚝과 그라우팅말뚝에 사용된 조립된 모형말뚝 (그림 2a)은 외경 40.35 mm, 내경 33.50 mm, 그리고 말뚝 벽 두께는 3.43 mm

표 1. Test plan for open-ended pile groups

Test		O-1 (D)	O-1 (S)	O'-1 (D)	O'-1 (S)	O-2 (D)	O'-2 (D)	O-3 (D)	O-3 (S)	O'-3 (D)	O-4 (D)	O'-4 (D)	O-5 (D)	O-5 (S)	
Number of piles		2	2	4	4	2	4	2	2	4	2	4	2	2	
Relative density		%													
		20	x	x	x	x									
Confining pressure (kPa)		35				x	x								
		60						x	x	x					
		80									x	x			
		120											x	x	
Q/Q _{ult}		%													
Static load test before seaquake		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
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		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	

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.



(a) Open-ended pile (b) Closed-ended pile

그림 2. Model pile

인 단일관으로 제작되었다. 축하중 계측장치는 부착시키지 못하였으며, 폐단말쪽에 사용된 조립된 모형말뚝(그림 2b)의 제원은 개단말뚝과 그라우팅말뚝에 사용된 조립된 모형말뚝의 제원과 동일하고 선단부분에 슈를 부착하였다.

그라우팅재로는 시멘트, 물유리 그리고 물을 혼합하여 사용했다. 시멘트 : 물유리 : 물을 중량비 1 : 0.5 : 2의 배합비로 하였다. 경화시간(Geltime)을 조절하기 위해서 시멘트는 초조강 시멘트를 사용하였으며 경화재로 물유리를 사용하였다. 초조강시멘트와 물유리의 특성은 참고문헌(정두환, 1999)에 나타나 있다.

그라우팅 장비로는 내경이 33.5 mm인 개단강관말뚝의 관내토를 굴착하기 위해서 충분한 길이의 핸드 오거 장비를 제작하였다. 선단부를 뾰족하게 해서 관입시 마찰을 줄이게 하였고 붕의 주변에는 원환 모양의 얇은 판을 연속적으로 둘러감아 고정시켰다. 손으로 오거를 돌리면 관내토는 판을 따라 밀려 올라오게 되었다. 회전굴착 후 그라우팅재를 넣고 시료와 혼합시키기 위해서 그라우팅 혼합기를 사용하였다. 혼합기는 말뚝의 선단 하부까지 충분히 교반시킬 수 있도록 선단부를 말뚝내경에 맞게 철판조각으로 고정시켰다.

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

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

2.2 실험계획

유효응력의 상사법칙에 의해 정적크기계수를 30으로 결정할 수 있었으며(O'Neill과 Vipulanandan, 1990; 최용규, 1995), 본 연구에 사용된 외경 40.35 mm인 모형말뚝은 직경이 약 1.2 m인 현장말뚝의 거동을 나타내는 것으로 볼 수 있었다. 말뚝의 실제 관입 길이 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 kPa까

표 2. Test plan for close-ended pile groups

Test		C-1 (D)	C-1 (S)	C'-1 (D)	C'-1 (S)	C-2 (D)	C-2 (S)	C'-2 (D)	C'-2 (S)
Number of piles		2	2	4	4	2	2	4	4
Relative density		%							
Confining pressure (kPa)		%							
Q/Q _{ult}		%							
Static load test before seaquake		%							
Seaquake Shaking test	Amplitude (kPa)	Deep Sea	37, 21		38		23		24
		Shallow Sea		13, 8		14		11	12
	Frequency	Hz	2.5	2.5	2.5	2.5	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

표 3. Test plan for grouted pile groups

Test			G-1 (D)	G-1 (S)	G'-1 (D)	G'-1 (S)	G-2 (D)	G-2 (S)	G'-2 (D)	G'-2 (S)	G-3 (D)	G-3 (S)	G'-3 (S)	
Number of piles			2	2	4	4	2	2	4	4	2	2	4	
Relative density	%		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
Confining pressure (kPa)	20		x	x	x	x								
	35						x	x	x	x				
	60										x	x	x	
	80													
	120													
Q/Q _{ult}			95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	
Static load test before seaquake			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Seaquake Shaking test	Amplitude (kPa)	Deep Sea	22, 25		24, 21		20, 23, 21		21, 23		22			
		Shallow Sea		9, 14		9, 9		11, 11		8, 12		12	9	
	Frequency	Hz		2.5	2.5	2.5	2.5	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
Static load test after seaquake			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	

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

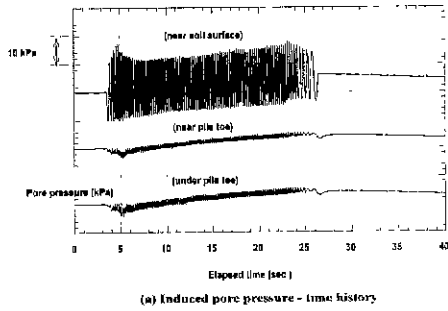
지 변화시켰다(Choi 등, 1997a). 실제 해진의 주파수 0.6 Hz (M=8.0으로 확대시킨 지진의 평균 주파수), 1.2 Hz 그리고 2.5 Hz를 유사화시키기 위하여 유발된 동수압의 주파수를 2.5 Hz, 5.0 Hz 그리고 10.0 Hz로 변화시켰다(주파수 크기 계수 = 4). 실제 실험에서는 구속압력이 60 kPa 이상인 경우에는 동수압의 주파수를 10 Hz 이상으로 하여야 하지만, 동수압의 작용주파수를 10 Hz 이상으로 증가시킬 경우에는 해진발생장치에 고정되어 있는 모터의 진동이 너무 심하게 발생하여 압력토조에 전달되었으므로 실험에 큰 영향을 미쳤다. 따라서, 해진주파수를 최대 5 Hz로 조정하여 실험을 수행하였다. 여기서, 해수와 해저면의 상호작용을 모델링하기 위하여 Froude의 상사법칙과 Mach 상사법칙을 만족시켜야 하였던 데(Kobayashi 등, 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 1~3에 나타내었다.

2.3. 실험 절차

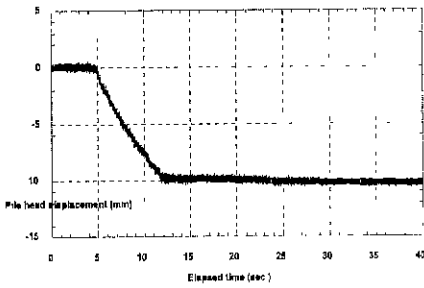
먼저 필터 종이(filter paper)를 모형 토조 밑바닥에 깔고, 모형지반은 레이닝법(raining method)에 의해 형성하였다. 모형지반 형성 시 간극수압 센서(pore pressure sensor)는 말뚝 선단하부와 지표면 근처에 매설하였다. 모형지반 상부 층에 필터 종이(filter paper)를 깔고, 그 위

에 200번 철망(mesh)을 이중으로 깔아 포화시 진공펌프의 배압(back pressure)에 의해 시료가 빠져 나오지 않도록 하였다. 모형지반 상부에는 잔자갈을 약 1 cm 두께로 깔아 해진 실험시 주기파가 모형지반에 잘 전달될 수 있게 하였다. 토조 상부 뚜껑과 밀폐된 수조를 조립하여 진공펌프로써 시료 내에 내재된 공기를 배출시켰다. 44.1 N의 래머(rammer)를 380 mm의 높이에서 자유 낙하시켜 말뚝을 타격 관입하였다. 타입시 50 mm당 타격횟수를 측정하였고, 380 mm까지 관입시킨 후, 정재하실험을 수행하였다. 정재하실험은 과잉간극수압이 완전히 소산된 후 말뚝 두부에 대칭되게 다이얼 게이지(dial gage)와 LVDT를 설치하여 제하 실험시 말뚝두부의 침하량을 측정하여 극한지지를 결정하였다. 극한하중의 95%을 말뚝머리에 상제한 후, 천해와 심해에서 유사화된 sine 정현파의 진폭(amplitude)을 결정하기 위해 캠(cam)의 회전길이를 조절하였으며, 수조를 통하여 주기파를 모형지반에 전달시켰다. 이때, 모형말뚝의 주변에 설치된 간극수압센서를 통해서 해진 실험 중 간극수압의 발생 양상과 말뚝머리 침하량을 동적 변형 측정기로 측정하였다. 해진 실험 완료 후 정재하실험을 수행하여 해진에 의한 압축지저력 저감양상을 관찰하였다.

그라우팅말뚝은 개단말뚝을 향타 관입한 후 관내토를 오거(auger)로 굴착하여 그라우팅을 하였다. 그러나, 관내토를 제거해 낼 때 가해진 구속압력으로 인한 동수경사의 차이로 인해 말뚝 선단으로부터 흙이 계속 밀려 올라와 말



(a) Induced pore pressure - time history



(b) Pile head displacement - time history

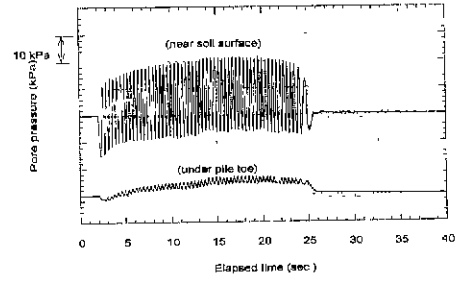
그림 3. Seaquake test results for a single open-ended pile installed in simulated deep sea (confining pressure = 60 kPa, amplitude of seaquake = 20 kPa and frequency of simulated seaquake = 5 Hz)

특 선단 하부지반을 이완시켰다. 따라서, 구속압을 제거한 후 선단으로부터 약 2D_i (D_i: 말뚝의 내경) 부분까지의 관내토만 남기고 굴착해낸 후 경화재와 시멘트를 주입하여 그라우팅 교반기(mixer)로써 관내토 선단까지 쏘일 시멘트(soil-cement) 형태로 혼합하였다. 약 1시간 이후에 정해진 구속압을 가하고, 1일 동안 경화시킨 후 마찰력 회복을 위해서 몇 회 항타후 정재하실험을 실시하였다.

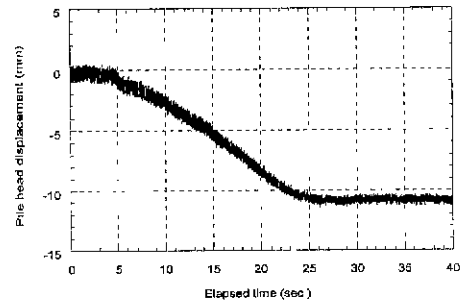
3. 실험결과 및 분석

3.1 개단강관말뚝의 실험결과 및 분석

그림 3에는 압력토조의 유효 구속압력이 60 kPa (관입 깊이 20 m를 모델링하였습), 동수압의 진폭이 20 kPa 그리고 동수압의 주파수가 5 Hz인 경우의 단일 개단강관말뚝에 대한 해진 진동시험의 결과를 나타내었다. 여기서, 동수압의 진폭이 20 kPa로 유사화된 심해에 설치된 단일 개단강관말뚝의 침하가 약 10 mm 정도 발생하였으며 지지력은 완전하게 감소되었다. 그림 3의 (a)에는 모형지반의 지표면에 유발된 동수압의 크기와 말뚝 주변 지반내에 발생된 간극수압의 발생양상을, (b)에는 해진시험중의 말뚝



(a) Induced pore pressure - time history



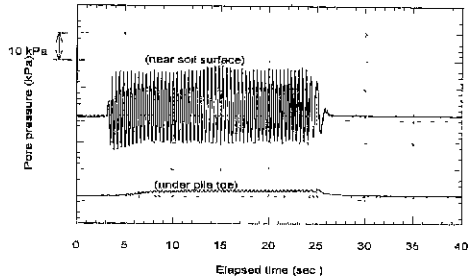
(b) Pile head displacement - time history

그림 4. Seaquake test results for open-ended 2-pile groups installed in simulated deep sea (confining pressure = 20 kPa, amplitude of seaquake = 28 kPa and frequency of simulated seaquake = 2.5 Hz)

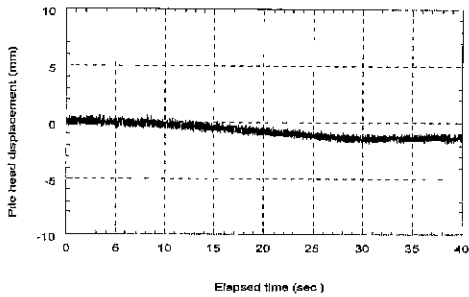
머리 변위를 나타내었다. 그러나, 지면관계상 수록하지는 못하였지만, 토조의 유효구속압력 80 kPa 이상인 경우(27 m 이상 관입된 경우를 모델링하였습)에는 단일개단말뚝은 해진에 대하여 수심과 관계없이 안정하였다.

그림 4에는 압력토조의 유효 구속압력이 20 kPa (관입 깊이가 7 m를 모델링하였습), 동수압 진폭이 28 kPa 그리고 동수압의 주파수가 2.5 Hz인 경우의 2개의 개단말뚝군에 대한 해진 진동 실험의 결과를 나타내었다. 여기서, 동수압의 진폭이 28 kPa으로 유사화된 심해에 설치된 2개 개단말뚝군의 침하가 약 11 mm 정도 발생하였고 지지력은 완전하게 감소되었다. 그림 4의 (a)에는 모형지반의 지표면에 유발된 동수압의 크기와 말뚝 주변 지반내에 발생된 간극수압의 발생양상을, (b)에는 해진시험중의 말뚝머리 변위를 나타내었다. 그러나, 지면관계상 수록하지는 못하였지만, 12 m 이상 관입된 2개의 개단말뚝군은 해진에 대하여 수심과 관계없이 안정하였다.

그림 5에는 압력토조의 유효 구속압력이 20 kPa (관입 깊이가 7 m를 모델링 하였습), 동수압 진폭이 26 kPa 그리고 동수압의 주파수가 2.5 Hz인 경우의 4개의 개단말뚝군에 대한 해진 진동 실험의 결과를 나타내었다. 여기서, 동수압의 진폭이 26 kPa으로 유사화된 심해에 설치된 4개 개단말



(a) Induced pore pressure - time history



(b) Pile head displacement - time history

그림 5. Seaqueake test results for open-ended 4-pile groups installed in simulated deep sea (confining pressure = 20 kPa, amplitude of seaquake = 26 kPa and frequency of simulated seaquake = 2.5 Hz)

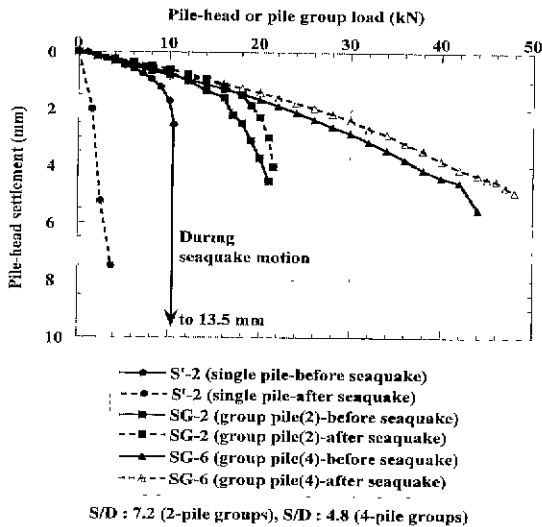
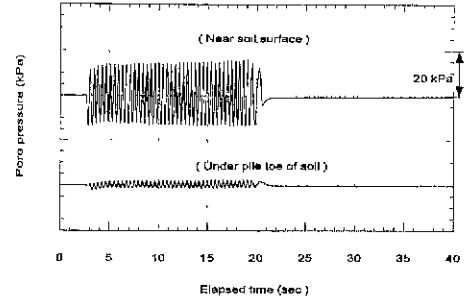
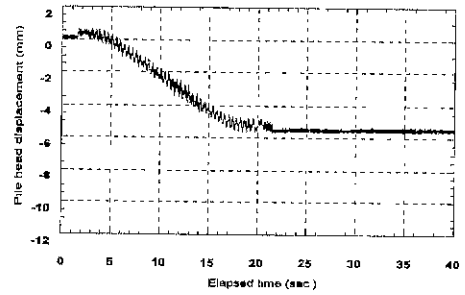


그림 6. Representative seaquake tests results of open-ended piles (a single pile, 2-pile and 4-pile group) for the simulated depth of 20 m (confining pressure = 60 kPa)

뚝군의 헤진진동 중 침하가 약 1.5 mm 발생하였는데, 가변 상태 (mobility state)를 유지하였다. 그림 5의 (a)에는 모형 지반의 지표면에 유발된 동수압의 크기와 팔뚝 주변 지반 내에 발생된 간극 수압의 발생양상을, (b)에는 헤진 시험 중의 팔뚝머리 변위를 나타내었다. 그러나, 지면관계상 수 록하지는 못하였지만, 심해에 설치된 12 m의 관입깊이를

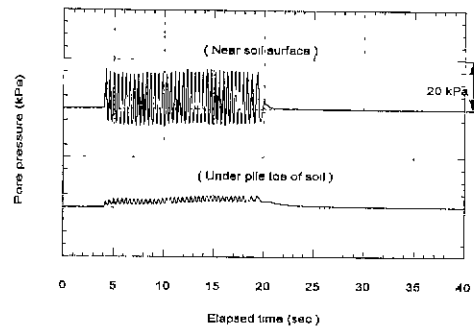


(a) Induced pore pressure - time history

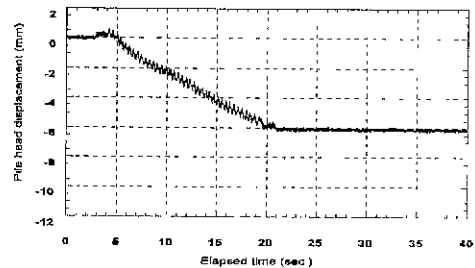


(b) Pile head displacement - time history

그림 7. Seaqueake test results for a close-ended single pile installed in simulated deep sea (confining pressure = 20 kPa, amplitude of seaquake = 29 kPa and frequency of simulated seaquake = 2.5 Hz)



(a) Induced pore pressure - time history



(b) Pile head displacement - time history

그림 8. Seaqueake test results for close-ended 2-pile groups installed in simulated deep sea (confining pressure = 20 kPa, amplitude of seaquake = 21 kPa and frequency of simulated seaquake = 2.5 Hz)

모델링한 4개의 개단말뚝군은 해진에 대하여 수심과 관계

없이 안정하였다.

그림 6에는 압력토조의 구속압력 = 60 kPa인 경우(관입 깊이가 20 m인 경우를 모델링 하였습)에 대한 개단말뚝들(단일, 2개 또는 4개의 말뚝군)에 대한 재하시험결과를 도시하였다. 여기에서는 해진실험전의 정재하시험, 해진진동시 그리고 해진진동실험 후의 말뚝머리하중과 침하량의 관계를 연속적으로 도시하였다. 단일개단말뚝의 경우에는 해진후의 지지력은 완전하게 저감되었으나, 2개 또는 4개의 개단말뚝군의 경우에는 해진작용 전의 지지력과 해진 후의 지지력의 차이는 거의 없었다. 따라서, 유사화된 심해에 약 20m관입되어 설치된 경우를 가정하여 모델링한 경우에는 개단말뚝을 무리말뚝으로만 사용하더라도 해진에 대한 저항력은 충분하였다.

3.2 폐단말뚝의 실험결과 및 분석

그림 7에는 압력토조의 유효 구속압력이 20 kPa (관입 깊이가 7 m인 경우를 모델링 하였습), 동수압의 진폭이 29 kPa 그리고 동수압의 주파수가 2.5 Hz인 경우의 단일폐단말뚝에 대한 해진 진동시험의 결과를 나타내었다. 여기서, 동수압의 진폭이 29 kPa로 유사화된 심해에 설치된 단일

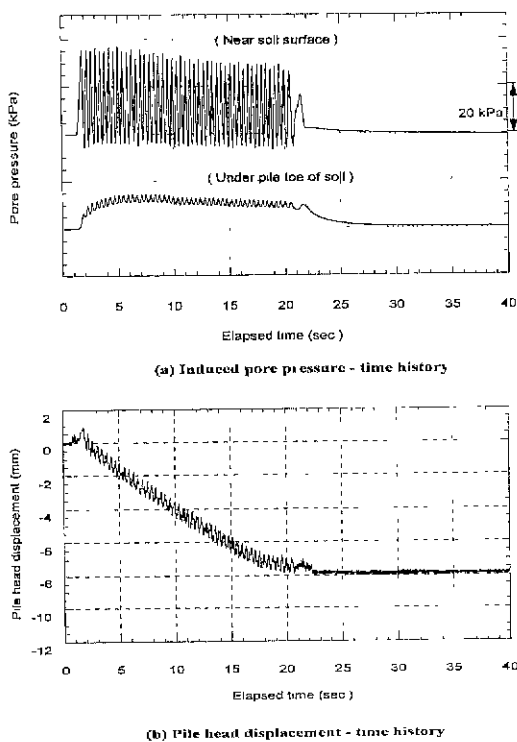


그림 9. Seaqueake test results for close-ended 4-pile groups installed in simulated deep sea (confining pressure = 20 kPa, amplitude of seaquake = 38 kPa and frequency of simulated seaquake = 2.5 Hz)

폐단말뚝의 침하가 약 5.5 mm 정도 발생하였고, 지지력은 완전하게 감소되었다. 그림 7의 (a)에는 모형지반의 지표면에 유발된 동수압의 크기와 말뚝 주변 지반내에 발생된 간극수압의 발생양상을, (b)에는 해진시험중의 말뚝머리 변위를 나타내었다. 그러나, 지면관계상 수록하지는 못하였지만, 토조의 구속압력이 35kPa 이상인 경우 (12 m 이상 관입된 경우를 모델링 하였습)에는 단일폐단말뚝만으로도 해진에 대하여 안정하였다.

그림 8에는 압력토조의 유효 구속압력이 20 kPa (관입 깊이가 7 m인 경우를 모델링 하였습), 동수압 진폭이 21 kPa 그리고 동수압의 주파수가 2.5 Hz인 경우의 2개의 폐단말뚝군에 대한 해진 진동 실험의 결과를 나타내었다. 여기서, 동수압의 진폭이 21 kPa로 유사화된 심해에 설치된 2개 개단말뚝군의 침하량은 약 6.0 mm 정도 발생하였고 지지력은 완전하게 감소되었다. 그림 8의 (a)에는 모형지반의 지표면에 유발된 동수압의 크기와 말뚝 주변 지반내에 발생된 간극수압의 발생양상을, (b)에는 해진시험중의 말뚝머리 변위를 나타내었다. 그러나, 지면관계상 수록하지는 못하였지만, 토조의 구속압력이 35 kPa 이상인 경우에는 (즉, 12 m보다 깊게 관입된 경우를 모델링 하였습) 2개의 개별말뚝만 사용한 폐단말뚝군에서도 해진에 대하여 수심에 관계없이 안정하였다.

그림 9에는 압력토조의 유효 구속압력이 20 kPa (관입 깊이가 7 m인 경우를 모델링 하였습), 동수압 진폭이 38 kPa

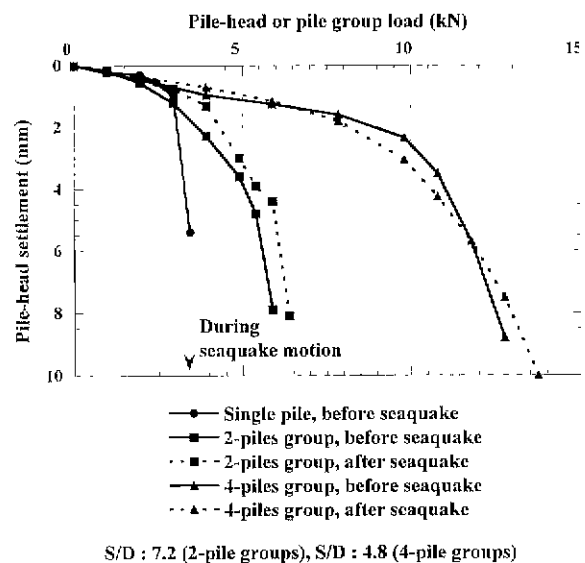
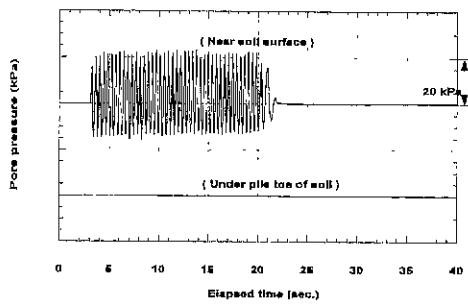


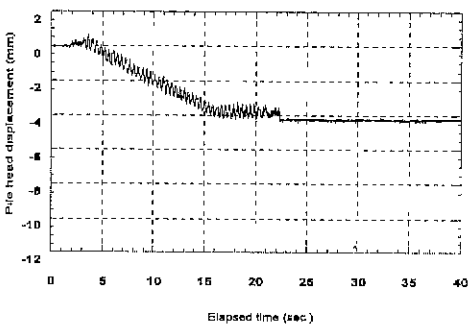
그림 10. Representative seaquake tests results of close-ended piles (a single pile, 2-pile and 4-pile group) for the simulated depth of 7 m (confining pressure = 20 kPa)

그리고 동수압의 주파수가 2.5 Hz인 경우의 4개의 폐단말뚝군에 대한 해진 진동 실험의 결과를 나타내었다. 여기서, 동수압의 진폭이 38 kPa로 심해에 설치된 2개 개단말뚝군의 침하량은 약 8.0 mm 정도 발생하였고 지지력은 완전하게 감소되었다. 그림 9의 (a)에는 모형지반의 지표면에 유발된 동수압의 크기와 말뚝 주변 지반내에 발생된 간극수압의 발생양상을, (b)에는 해상파시험중의 말뚝머리 변위를 나타내었다. 그러나, 지면관계상 수록하지는 못하였지만, 토조의 구속압력을 35 kPa인 경우 (13 m의 관입깊이로 모델링 하였음)에는 4개의 폐단말뚝군은 해진에 대하여 수심에 관계없이 안정하였다.

그림 10에는 압력토조의 구속압력을 20 kPa (관입깊이 7 m를 모델링 하였음)로 하여 수행된 폐단말뚝들 (단일, 2개 또는 4개의 말뚝군)에 대한 재하시험결과를 도시하였다. 여기에서는 해진실험전의 정재하시험, 해진진동시 그리고 해진진동실험 후의 말뚝머리하중과 침하량의 관계를 연속적으로 도시하였다. 단일폐단말뚝의 경우에는 해진진동시 중 지지력은 완전하게 감소하였으나, 2개 또는 4개의 폐단말뚝군의 경우에는 해진 작용 전의 지지력과 해진 후의 지지력의 차이는 거의 없었다. 따라서, 폐단말뚝의 해진에 대한 저하효과는 개단말뚝에 비하여



(a) Induced pore pressure - time history



(b) Pile head displacement - time history

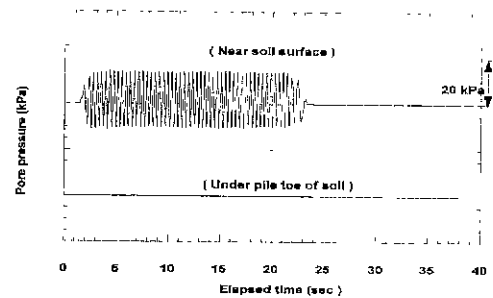
그림 11. Seaqueake test results for a single grouted pile installed in simulated deep sea (confining pressure = 20 kPa, amplitude of seaquake = 34 kPa and frequency of simulated seaquake = 2.5 Hz)

매우 큰 것을 알 수 있었다.

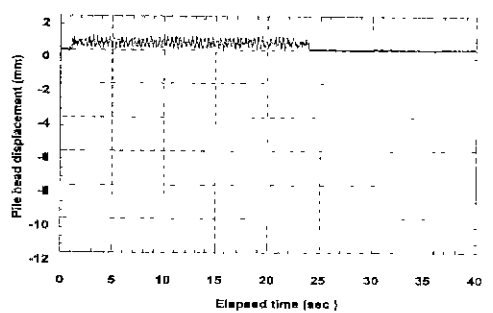
3.3 그라우팅말뚝의 실험결과 및 분석

그림 11에는 압력토조의 유효 구속압력이 20 kPa (관입깊이 7 m인 경우를 모델링 하였음), 동수압의 진폭이 34 kPa 그리고 동수압의 주파수가 2.5 Hz인 경우의 단일그라우팅말뚝에 대한 해진 진동시험의 결과를 나타내었다. 여기서, 동수압의 진폭이 20 kPa로 유사화된 심해에 설치된 단일그라우팅말뚝의 침하가 약 4 mm 정도 발생하였고 지지력은 완전하게 감소되었다. 그림 11의 (a)에는 모형지반의 지표면에 유발된 동수압의 크기와 말뚝 주변 지반내에 발생된 간극수압의 발생양상을, (b)에는 해진시험중의 말뚝머리 변위를 나타내었다. 그러나, 지면관계상 그림은 생략하였지만, 13 m의 관입깊이를 모델링한 경우의 단일그라우팅된 말뚝의 지지력은 약 15 % 감소된 가변상태 (mobility state)를 보였고 20 m의 관입깊이를 모델링한 단일 그라우팅 말뚝은 해진에 대하여 안정하였다.

그림 12에는 압력토조의 유효 구속압력이 20 kPa (관입깊이 7 m를 모델링 하였음), 동수압 진폭이 25 kPa 그리고 동수압의 주파수가 2.5 Hz인 경우의 2개의 개단그라우팅

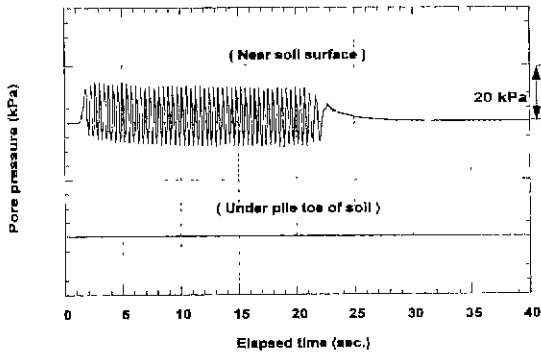


(a) Induced pore pressure - time history

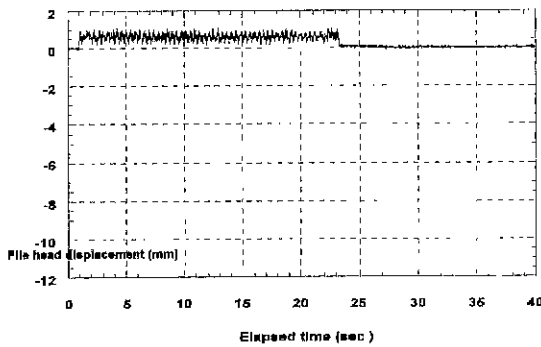


(b) Pile head displacement - time history

그림 12. Seaqueake test results for grouted 2-pile groups installed in simulated deep sea (confining pressure = 20 kPa, amplitude of seaquake = 25 kPa and frequency of simulated seaquake = 2.5 Hz)



(a) Induced pore pressure - time history



(b) Pile head displacement - time history

그림 13. Seaquake test results for grouted 4-pile groups installed in simulated deep sea (confining pressure = 20 kPa, amplitude of seaquake = 21 kPa and frequency of simulated seaquake = 2.5 Hz)

말뚝군에 대한 해진 진동 실험의 결과를 나타내었다. 여기서, 동수압의 진폭이 25 kPa로 심해에 설치된 2개 개단 말뚝군에서는 침하가 거의 발생하지 않았으며 안정성을 유지하였다. 그림 12의 (a)에는 모형지반의 지표면에 유발된 동수압의 크기와 말뚝 주변 지반내에 발생된 간극수압의 발생양상을, (b)에는 해진시험중의 말뚝머리 변위를 나타내었다. 2개의 그라우팅말뚝군은 해진에 대하여 수심과 관입깊이에 관계없이 안정하였다.

그림 13에는 압력토조의 유효 구속압력이 20 kPa(관입 깊이 7m를 모델링 하였음), 동수압 진폭이 21 kPa 그리고 동수압의 주파수가 2.5 Hz인 경우의 4개의 개단그라우팅 말뚝군에 대한 해진 진동 실험의 결과를 나타내었다. 여기서, 동수압의 진폭이 21 kPa로 심해에 설치된 4개 개단 말뚝군에서는 침하가 거의 발생하지 않았으며 안정성을 유지하였다. 그림 13의 (a)에는 모형지반의 지표면에 유발된 동수압의 크기와 말뚝 주변 지반내에 발생된 간극수압의 발생양상을, (b)에는 해진시험중의 말뚝머리 변위를 나타내었다. 4개의 개단그라우팅말뚝군은 해진에 대하여 수심과 관입깊이에 관계없이 안정하였다.

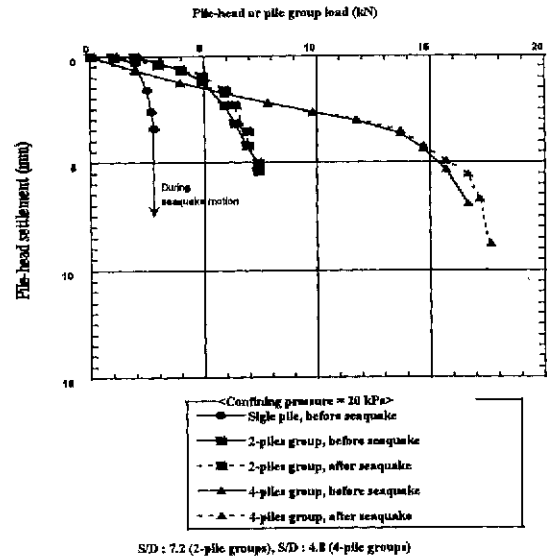
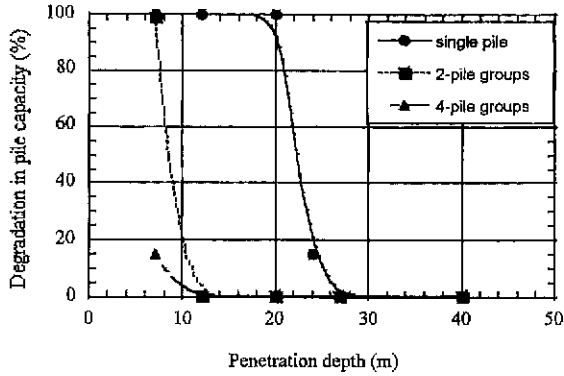


그림 14. Representative seaquake tests results of grouted piles (a single pile, 2-pile and 4-pile groups) for the simulated depth of 7 m (confining pressure = 20 kPa)

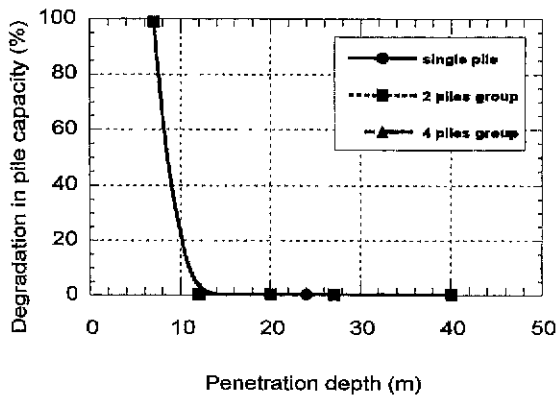
그림 14에는 압력토조의 구속압력을 20 kPa로 하여 7m의 관입깊이를 모델링한 그라우팅말뚝들 (단일, 2개 또는 4개의 말뚝군)에 대한 재하시험결과를 도시하였다. 여기에서는 해진실험전의 정재하시험, 해진진동 시 그리고 해진진동실험 후의 말뚝머리하중과 침하량의 관계를 연속적으로 도시하였다. 단일그라우팅말뚝의 경우에서는 해진진동실험중 지지력은 완전하게 감소하였으나, 나머지 2개 또는 4개의 그라우팅말뚝군의 경우에서는 해진 작용전의 지지력과 해진후의 지지력의 차이는 거의 없었다.

3.4 군말뚝의 해진에 대한 안정성 도표

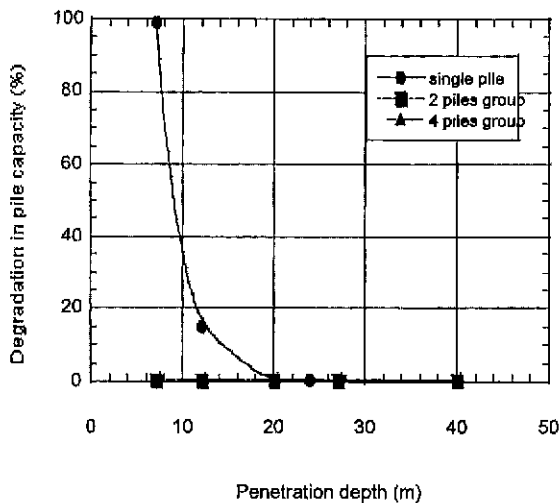
그림 15(a)에는 해진시 개단말뚝의 안정성을 도시하였다. 27m보다 적은 관입깊이를 모델링한 단일개단말뚝에서 압축지지력은 해수의 깊이에 좌우되었다. 220 m이상의 심해를 유사화한 실험조건을 가진 단일개단말뚝의 압축지지력은 완전히 저감되었으나 23m의 관입깊이를 모델링한 말뚝의 압축지지력은 가변상태를 유지하였으나, 27m의 관입깊이를 모델링한 개단말뚝의 압축지지력은 감소되지 않고 안정성을 유지하였다. 대체로, 12m의 관입깊이를 모델링한 2개 또는 4개 개단말뚝군에서는 해수 깊이 그리고 해진의 주파수에 관계없이 압축지지력과 관내토 폐색력의 감소는 없었다. 단지, 7m의 관입깊이를 모델링하고 심해를 유사화한 실험조건을 가진 2개 개단말뚝



(a) Open-ended pipe piles



(b) Close-ended piles



(c) Grouted piles

그림 15. Stability of open, grouting and close-ended piles installed in deep sea during seaquake motion.

군에서의 압축지지력은 완전히 감소하였고, 4개 개단말뚝군에서의 압축지지력은 약 15%만큼 감소된 가변상태 (mobility state)가 되었을 뿐이었다.

그림 15(b)에는 해진시 폐단말뚝의 안정성을 도시하였

다. 7 m 관입깊이를 모델링한 단일폐단 및 군말뚝에서 압축지지력은 해수의 깊이에 좌우되었다. 7 m의 관입깊이와 심해의 실험조건을 가진 단일 그라우팅말뚝의 압축지지력은 완전히 저감되었다. 그러나, 12 m의 관입깊이를 모델링한 단일 및 폐단 말뚝의 압축지지력은 감소되지 않았으며 안정성을 유지하였다.

그림 15(c)에서는 해진시 그라우팅말뚝의 안정성을 도시하였다. 7 m의 관입깊이와 심해의 실험조건을 가진 단일개단말뚝의 압축지지력은 완전히 저감되었고 13 m의 관입깊이와 심해의 실험조건을 가진 단일그라우팅말뚝군에서의 압축지지력은 약 15%만큼 감소된 가변상태 (mobility state)가 되었다. 그러나, 7 m의 깊은 관입깊이를 모델링한 그라우팅말뚝의 압축지지력은 감소되지 않았으며 안정성을 유지하였다. 2개 또는 4개 말뚝군에서 관입깊이, 해수깊이 그리고 해진의 주기에 관계없이 압축지지력과 관내토 폐색력의 감소는 없었다.

4. 결론 및 제언

- (1) 해진시 단일 개단강관말뚝의 지지력은 말뚝의 지중관입깊이에 좌우되었다. 27 m 이상 관입깊이를 모델링한 말뚝의 지지력은 안정하였다. 그러나, 20 m 이하의 관입깊이를 모델링한 말뚝의 지지력은 완전하게 저감되었고 관내토폐색도 파괴되었다.
- (2) 해진시 개단군말뚝의 경우 관입깊이가 극히 짧은 경우를 제외하면 안정을 유지하였다. 즉, 13 m 이상의 지중관입깊이를 모델링한 군말뚝은 안정을 유지하였으나, 7 m의 관입깊이를 모델링한 2개의 개단군말뚝은 파괴되었고, 4개의 개단군말뚝은 가변상태를 유지하였다. 그러나, 13 m의 관입깊이를 모델링한 2개와 4개의 개단군말뚝은 가변상태를 유지하였다.
- (3) 해진시 단일폐단말뚝과 폐단군말뚝의 지지력은 해진에 대하여 매우 안정하였다. 7 m의 관입깊이를 모델링한 말뚝의 지지력은 완전하게 저감되었으나, 12 m의 관입깊이를 모델링한 경우에는 안정하였다.
- (4) 12 m의 관입깊이를 모델링한 단일 그라우팅 말뚝의 지지력은 가변상태를 유지하였으나 20 m의 관입깊이를 모델링한 단일그라우팅 말뚝은 안정하였다. 그러나 7 m의 관입깊이를 모델링한 2개 또는 4개의 그라우팅 군말뚝은 안정하였다.
- (5) 개단강관말뚝의 관내토와 선단 하부지반을 그라우팅함으로써 해진에 의한 관내토 폐색의 파괴를 막을 수

있다는 것을 확인하였고, 폐단 말뚝은 개단강관말뚝보다 해진에 대하여 매우 안정함을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 1999학년도 경성대학교 학술지원연구비에 의하여 연구되었음

참고 문헌

1. 남문석, 최용규, 김재현 (1999). "해진시 개단무리말뚝의 거동에 관한 모형실험 연구." 1999년 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp 447~454.
2. 정두환 (1999). "관내토 선단 하부지반 그라우팅 강관말뚝의 연직지력에 관한 연구." 동아 대학교 대학원 석사학위 논문, 1999. 2
3. 정두환, 최용규, 정성교 (1999). "선단하부지반 그라우팅된 개단강관말뚝의 연직지력에 관한 연구." 한국지반공학회 논문집, 제15권 제2호, 한국지반공학회, pp. 165~180
4. 최용규 (1995). "소형 압력토조내에 타입된 말뚝의 인발 거동과 극한 지지력 결정에 관한 연구." 한국지반공학회지, 제 11권 제 2호, 1995. 6., pp. 19~28 4
5. 최용규, 남문석 (1998) "해저면의 수직 지진 진동에 의해 유발된 해진에 대한 해상 개단 강관말뚝 기초의 거동." 한국지진공학회 논문집, 제2권 제1호, 한국지진공학회, pp. 11~21.

6. Choi, Y. and 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, pp. 772-777.
7. Choi, Y. and 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. pp. 975-982.
8. Choi, Y., O'Neill, M. W. and Nam, M S. (1998). "Response of Soil Plug to Seauake Induced by Vertical Seismic Excitation." Proceedings of the 8th (1998) International Offshore and Polar Engineering Conference, Montreal, Canada. May 24 - 29, pp. 390-397
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Rao, P. M. (1997) "Performance of Tension Piles During Simulate Ground Shaking and Scaquakes." Ph.D. thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Houston.

(접수일자 1999. 8. 30)