

# 해저면의 수직 지진 진동에 의해 유발된 해진에 대한 해상 개단 강관 말뚝 기초의 거동

## Response of Open-ended Pipe Pile Foundation at Offshore Sites to Seauquake Induced by the Vertical Seismic Excitation of the Seafloor

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

### 국문요약

해상에 설치된 기초말뚝의 경우 지진의 3가지 성분 즉, 지반의 수평운동, 지반의 연직진동에 의해 발생된 상부구조물과의 피드백(feedback)에 의한 말뚝의 연직진동, 그리고 지반의 연직진동에 의해 유발된 해진(seauquake)의 진동이 말뚝 기초의 거동에 영향을 미친다. 본 연구에서는 유발된 해진의 진동을 해저면에서 유사화된 sine정현파 형상의 동수압으로 모델링하였다. 해진(seauquake) 작용중 약 220 m이상의 심해에 설치된 개단말뚝의 지지력은, 지반내에 유발된 과도한 과잉 간극수압으로 인하여, 심각하게 저감되었으며, 관내토 폐색력도 80 %이상 감소되었다. 해진중 관내토 선단 하부에서 발생된 과도한 과잉 간극수압으로 인하여 관내토내에 과도한 상향의 침투력이 유발되어 관내토 폐색이 손상되었다. 약 220 m 이하의 천해에 설치된 개단말뚝의 지지력은 해진에 의해 약 10 % 감소하였으며, 관내토의 폐색력은 5 %이하만큼 감소하였다.

**주요어 :** 해진, 개단강관말뚝기초, 극한 압축 지지력, 관내토 폐색력, 심해, 과잉 간극수압, 침투력

### 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 seauquake." These excitations could have effects on the soil plugs in open-ended pipe piles installed at offshore sites. In this study, seauquake excitation induced by the vertical ground shaking was simulated by pulsing the water pressure at the seabed. During a seauquake, 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 serevely 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 seauquake. 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 %.

**Key words :** induced seauquake, open-ended pile foundation, ultimate compressive pile capacity, soil plugging resistance, deep sea, excess pore water pressure, seepage forces

## 1. 서      론

지진시 기초에는 3가지 진동성분 즉, 지반의

수평진동, 지반의 연직진동에 의해 발생된 상부구조물과의 피드백(feedback)에 의한 말뚝의 연직진동, 그리고, 지반의 연직진동에 의해 유발된 해진(seauquake)의 진동이 발생한다. 이들 진동들은 해상에 설치된 개단 강관말뚝

\* 정회원 · 경상대학교 건설 · 환경공학부 부교수

\*\* 경상대학교 건설 · 환경공학부 석사과정

의 관내토 폐색에 영향을 미칠 수 있다. 이때, 지반과 말뚝의 진동은 유사화된 수평 및 연직 진동으로 흙과 말뚝을 진동시켜 모델링할 수 있지만, 연직지반 진동에 의해 유발된 해진의 진동은 해저면에 유사화된 동수압을 작용시켜 모델링할 수 있다.<sup>(1)(2)</sup> 이전에 수행한 연구<sup>(1)</sup>에서는 수평 및 연직 지진진동에 의한 개단 강관말뚝의 관내토 거동을 연구하였는데, 관내토 폐색력은 수평 지진진동에 의해서는 전혀 감소되지 않았다. 즉, 수평 및 연직 지진진동에 의하여 관내토의 폐색은 파괴되지 않았다. 그러나, 해저면의 연직진동에 의해 해수에 유발된 해진은 관내토내에 순간적인 동수경사를 크게 발생시켜 관내토 폐색력을 크게 저감시킬 수 있을 것으로 예상되었다.

유사화된 지진에 의한 해상 말뚝 기초의 거동에 관한 연구는 주로 소형 압력 토조에서 수행할 수 있는데, Ochoa<sup>(2)</sup>는 유사지진진동시의 폐단 인발 말뚝의 안정성에 관해 연구하였고, Rao<sup>(3)</sup>는 유사지반진동과 해진중 인발 말뚝의 거동에 관한 연구를 수행하였다. Choi & O'Neill<sup>(1)(4)</sup>은 유사 수평 또는 연직 지진진동중 압축력을 지지하는 개단 강관말뚝기초의 지지력 저감 특성과 관내토의 거동에 관한 연구를 수행하였다. 여기서, Choi & O'Neill<sup>(4)</sup>은 유사 수평진동중 지지력의 이완 (relaxation)과 관내토 폐색력의 저감특성을 연구하였으며, Choi & O'Neill<sup>(1)</sup>은 유사 수평 또는 연직 지진진동중 압축 지지력 저감과 관내토의 폐색 거동 특성을 연구하였다. 진앙거리 75 km에서 리터지진규모 M=8로 유사화된 수평 및 연직 지반진동들은 유사화된 얇은 깊이에 타격 관입된 개단 말뚝속에 형성된 관내토 폐색을 전혀 파괴시키지 못하였다. 여기서, 말뚝들은 포화된 세립의 중간 밀도 지반에 설치되었다.

이 연구의 주목적은 유발된 해진이 관내토의 폐색을 파괴시킬 수 있는지를 확인하고, 말뚝의 외주면 마찰력을 크게 저감시킬 수 있는지를 규명하기 위한 것이다. 이 연구는 약 20 m까지의 여러 말뚝 관입 깊이들을 유사화하

기 위하여 구속응력을 변화시켜 압력토조에서 모형실험으로 수행하였다. 주기와 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. 유발된 해진 (seaquake)에 대하여 유사화된 동수압

지진의 연직성분에 의해 수중에 유발된 해진 (seaquake)은 해저면 (seafloor)에 동수압 (hydrodynamic pressure)을 작용시켜 모델링할 수 있는데, 이들은 Willams et al.<sup>(5)</sup>와 Kobayashi et al.<sup>(6)</sup>에 의해 연구되었다. 해저면에 작용되는 동수압은 sine정현파로 모델링하였다.

해저면의 연직 진동중 압축파의 전파에 의해 해저면에 유발된 동수압  $p_d$ 은 다음과 같다.

$$p_d = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1)$$

여기서,  $\rho$ 는 물의 밀도이고  $\phi$ 는 해저면상의 물의 속도 포텐셜이다. 해수는 비점성, 비압축성 그리고 비회전성의 유체라고 가정하고, 구조물에 의한 파의 굴절이나 분산이 없다고 가정하였다.

그림 1에서 해저면의 유사화된 변위 진동 함수  $w$ 와 유체의 속도 포텐셜은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w = W \cdot e^{i\Omega t} \quad (2)$$

$$\phi(z, t) = \Phi(z) e^{i\Omega t} \quad (3)$$

여기서,  $W$ 는 변위진폭이며,  $\Omega$ 는 진동의 주파수이고  $t$ 는 진동 작용시간이다. 그리고,  $\Phi$ 는 유체 속도 포텐셜의 진폭이다.

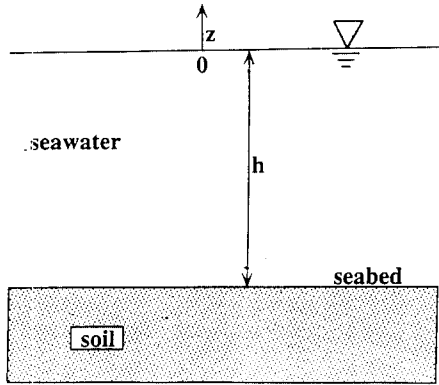


Fig. 1 Definitions for the analytical model

유체의 속도 포텐셜에 대한 일차원 형태의 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \quad (4)$$

여기서,  $c$ 는 수중의 압축파 속도 또는 수중음속이다.

식 (3)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \Phi(z)}{\partial z^2} + \frac{\Omega^2}{c^2} \Phi(z) = 0 \quad (5)$$

경계 조건은 다음과 같다.

$$\Phi = 0, \quad z = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = V_b = \frac{\partial W}{\partial t} = i\Omega W e^{i\Omega t}, \quad z = h \quad (7)$$

여기서,  $V_b$ 는 해저면의 연직진동의 속도진폭 ( $= i\Omega W$ )이다.

경계조건들을 이용하여 Williams and Mau<sup>(5)</sup>는  $\Phi$ 에 대한 해를 다음과 같이 구하였다.

$$\Phi(z) = \frac{i\Omega W}{k} \cdot \tan kh \quad (8)$$

여기서,  $k$ 는  $\Omega/c$ 이다.

그러므로, 해저면에 유발된 동수압  $p_d$ 는 다음과 같다.

$$p_d = \frac{\rho\Omega^2 W}{k} \cdot \tan(kh) e^{i\Omega t} \quad (9)$$

지진의 연직성분에 의해 해저면에 유발된 sine정현파 동수압을 실제지진 (Oceanside 지진 ; 1986)을 지진규모  $M = 8.0$ 으로 확대시킨 유사화된 지진에 대하여 계산하였다. 그림 2에는  $M = 8.0$ 으로 유사화된 Oceanside지진의 변위-시간 이력을 나타내었다. 그림의 표시된 부분에 나타난 불규칙한 연직 변위-시간 이력을 등가시킬 수 있도록 sine정현파와 변위-시간 이력을 계산하였다. 사용된 실제 지진파에는 다음과 같은 2개의 우세한 (predominant) 주파수가 관측되었다.<sup>(2)</sup>

- a) 저주파수, 고진폭의 신호 ;  $\Omega = 0.12$   
Hz = 0.766 rad/sec.,  $W = 18.5$  mm
- b) 고주파수, 저진폭의 신호 ;  $\Omega = 1$   
Hz = 6.28 rad/sec.,  $W = 1.25$  mm

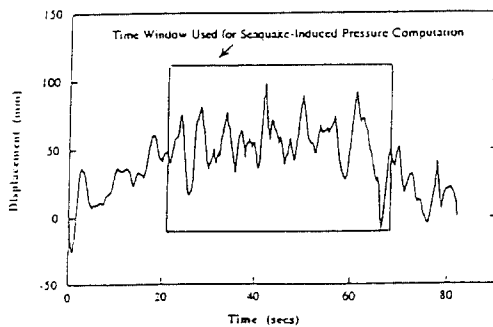


Fig. 2 Displacement-time history of vertical component of scaled  $M=8.0$  Oceanside event

여기서,  $c = 1430$  m/sec. 그리고  $\rho = 1000$   $\text{kg/m}^3$ 으로 하면, 해저면에 유발된 동수압의 진폭은 위의 두 경우에서 계산된 최대 진폭들을 합하여 산정할 수 있으며, 깊이와  $p_d$ 와의

관계를 그림 3에 나타내었다. 또한, Kobayashi et al.<sup>(6)</sup>은 연직진동을 받는 해저면의 일부만을 고려하여 2차원 문제로 유체 속도 포텐셜에 대한 해를 제시하였는데, 그 결과도 함께 도시하였다. 여기서, Williams and Mau<sup>(7)</sup>에 의해 계산된 값이 Kobayashi et al.<sup>(8)</sup>에 의한 값보다 다소 컸다.

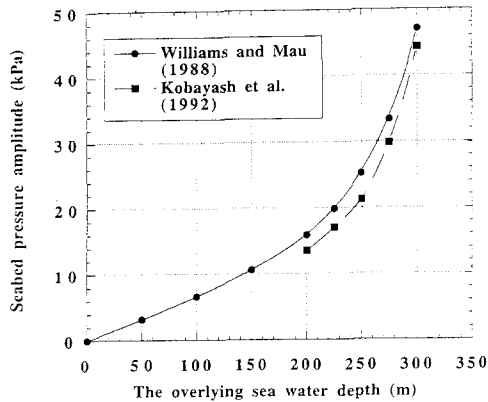


Fig. 3 Simulated seaquake amplitude on the seabed versus water depth (1986 Oceanside event at 75Km from epicenter)

### 3. 실험

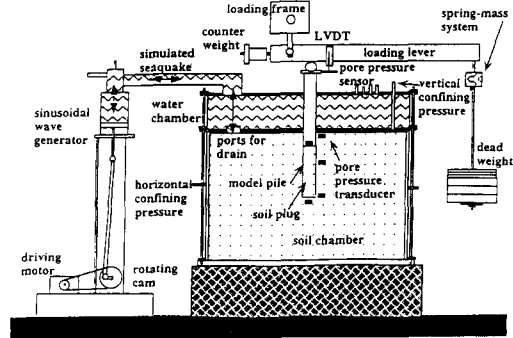
#### 3.1 실험장치

실험장치 (그림 4)는 압력토조, 모형말뚝, 스프링-질량시스템을 가진 정하중 재하장치, 주기와 발생장치, 상부 수조, 간극수압측정용 센서, 그리고 동적 변형 측정기 등으로 구성되었다.



(a) Photos of seaquake testing system

(a) Photos of seaquake testing system



(b) Schematic diagram of seaquake testing system

Fig. 4 The simulated seaquake testing equipment

조립된 압력토조는 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 주기와 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 압력토조내로만 압력이 전달될 수 있도록 밀폐되었다.

간극수의 분산 (Diffusion)에 의한 동적 크기효과<sup>(9)</sup>를 반영할 수 있도록 하기 위해 현장 흙의 입경보다 훨씬 작은 세립질 모래를 사용하였으며,  $D_{10} = 0.06 \text{ mm}$ ,  $C_u = 1.66$ 으로 통일분류기호는 SM이었다. 지반은 약 50 %의 상대밀도로 형성되었으며, 투수계수는  $1.21 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$  이었고, 벽면 마찰각 ( $\delta$ )는  $22^\circ$  이었다. 시료를 포화시키기 위하여 압력토조 하단에 있는 물 공급장치를 통하여 증류수를 공급하였으며, 시료 상부까지 물이 올라온 후 수조를 조립하여 진공펌프로 시료내의 공기를 제거하였다.

모형말뚝은 그림 5에 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 면적과 동일하도록 하였다. 말뚝 머리부에서는 내부튜브와 외부튜브가 따로 변형될 수 없도록 일체로 고정시켰다. 따라서, 관내토 저항력은 직접 측정 가능하였다.

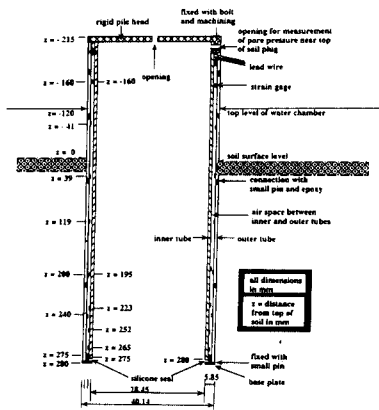


Fig. 5 Schematic drawing of model pile

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

가능하도록 하였다.

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

### 3.2 실험계획 및 절차

유효응력의 상사법칙에 의해 정적 크기계수를 25로 결정할 수 있으며,<sup>(9),(10)</sup> 본 연구에서 사용한 직경 40.14 mm인 모형말뚝은 직경 약 1 m의 현장말뚝의 거동을 나타내는 것으로 볼 수 있다. 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 주파수를 2.5 Hz, 5.0 Hz 그리고 10.0 Hz로 변화시켰다(주파수 크기 계수 = 4). 여기서, 해수와 해저면의 상호작용을 모델링하기 위하여 Froude의 상사법칙과 Mach 상사법칙을 만족시켜야 한다.<sup>(7)</sup> 두 상사법칙에 대해 계산된 주파수 크기 계수들은 차이를 나타내고 있으므로 평균적으로 4를 사용하였다.<sup>(3)</sup> 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 이력도로 정밀하게 측정하였다.

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

Table 1 Test plan

test		s1	s2	s3	s4	s5	s6
relative density	%	50	50	50	50	50	50
confining pressure (kPa)	20	x	x				
	35			x	x		
	60					x	x
Q/Q <sub>ult</sub>	%	95	95	95	95	95	95
static load test before seaquake		x	x	x	x	x	x
seaquake shaking test	amplitude (kPa)	deep sea	26,40		29,39		30
		shallow sea		2.5,3.5		16, 14	10
	frequency	Hz	2.5	2.5	5.0	5.0	10.0
static load test after seaquake		x	x	x	x	x	x

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 seaquake test.

### 3.3 계측 및 해석

모형말뚝의 내관과 외관의 여러 위치에 축하중 계측장치를 부착하였다. 내관에서는 모두 작동되어 관내토 폐색력의 분포를 측정할 수 있었으나, 외관에서는 지표면 부근을 제외하고는 모두 손상되어 외주면 마찰력과 선단 강재부 지지력의 합만을 측정할 수 있었다.

간극수압 측정용 센서를 모형지반의 지표면 근처, 말뚝 주면 근처 (말뚝 중간 부분과 말뚝 하단), 관내토 선단 하부와 관내토 상단의 5개소에 설치하여 해상과 시험중의 간극수압 발생 양상을 측정하였다. 또한, 말뚝머리 상단에는 LVDT를 설치하여 해상과 작용중의 말뚝머리의 침하이력을 측정하였다.

축하중 계측장치, 간극수압계 센서, 그리고 LVDT는 4계이지 결선법에 의해 결선되었

으며, 축하중 계측 장치의 영점은 말뚝이 압력토조에 타입되기전에 조정되었는데, 따라서, 본 연구의 측정치는 말뚝타입도중 발생한 잔류응력의 영향을 포함하는 것으로 볼 수 있었다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 실험결과

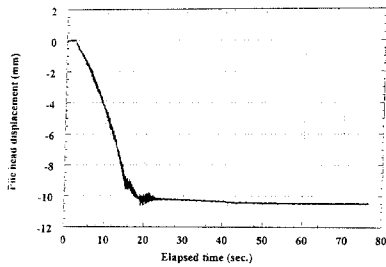
그림 6에는 압력토조의 유효 구속압력이 35 kPa, 동수압의 진폭이 29 kPa 그리고 동수압의 주파수가 5 Hz인 경우의 해상파 진동시험 (s3)의 결과를 나타내었다.

여기서, 개단 강관 말뚝의 극한 지지력은 완전히 감소되었으며, (a)에는 해상파시험중의 말뚝머리 변위를, (b)에는 모형지반의 지표면

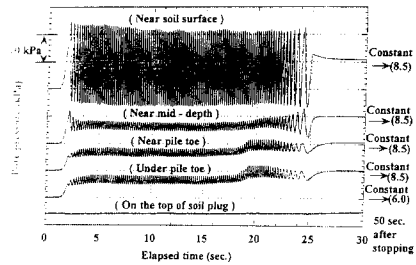
에 유발된 동수압의 크기와 말뚝 주변 지반내에 발생한 간극 수압의 발생양상을, (c)에는 외부튜브에서 저감된 지지력 성분(외주면 마찰력 + 선단 강재부 지지력)을, 그리고 (d)에는 관내토 폐색력의 저감량을 나타내었다.

그림 7에는 압력토조의 유효 구속압력이 35 kPa, 동수압 진폭이 14 kPa 그리고 동수압의 주파수가 5 Hz인 경우의 해상과 진동 실험

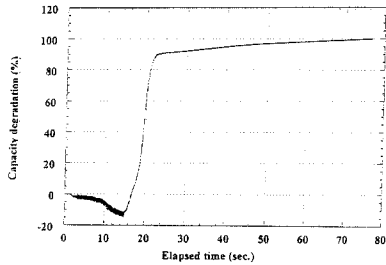
(s4)의 결과를 나타내었는데, 이것은 개단 강관 말뚝의 극한 지지력이 거의 감소되지 않은 경우의 대표적인 예이다. (a)에는 말뚝머리 변위량을 나타내었으며 (b)에는 모형지반의 지표면에 유발된 동수압의 크기와 말뚝 주변 지반내에 발생한 간극수압의 발생양상을 나타내었고 말뚝의 극한 지지력과 관내토 폐색력은 거의 감소되지 않았으므로 도시하지 않았다.



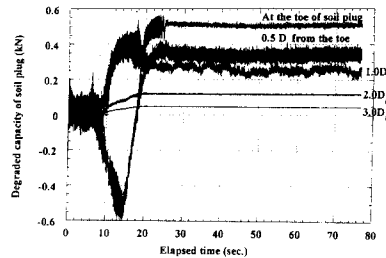
(a) Pile head displacement-time history



(b) Induced pore pressure-time history

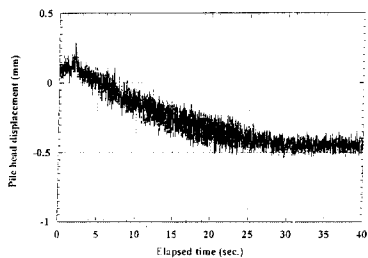


(c) Degradation of summed capacity developed in outer skin and steel toe

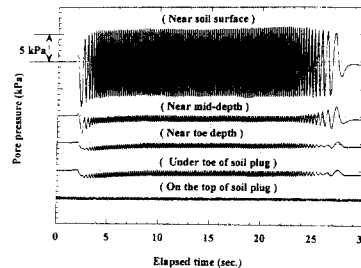


(d) Degraded capacity of soil plug

Fig. 6 Seauquake test results for pile installed in simulated deep sea (Test s3, confining pressure=35kPa, amplitude of seauquake=29kPa, and frequency of simulated seauquake=5Hz)



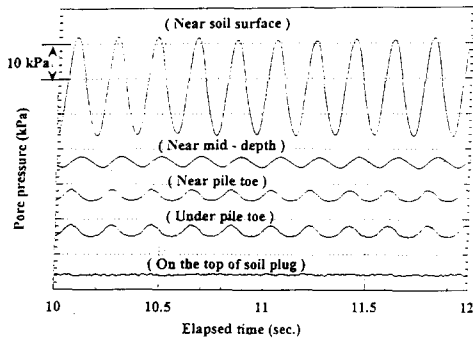
(a) Pile head displacement-time history



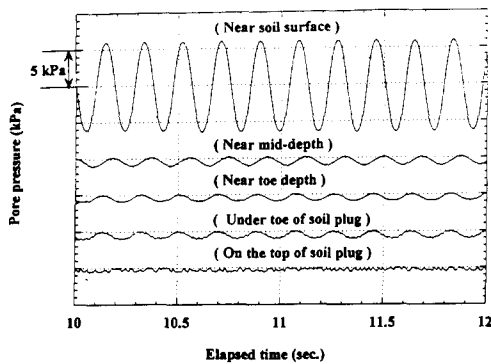
(b) Pore pressure-time history

Fig. 7 Seauquake test results for pile installed in simulated shallow sea (Test s4, confining oressure=35kPa, amplitude of seauquake= 14kPa. and reuqencv of the simulated seauquake=5Hz)

그림 8에는 그림 6과 7의 (b)에 있는 간극수압의 크기를 확대된 시간축에 대하여 나타내었다.



(a) Induced pore pressure-time history for magnified time scale (Test s3)



(b) Pore pressure-time history for magnified time scale in Test s4

Fig. 8 Pore pressure-time history for magnified time scale in the seaquake tests (Test s3 and s4)

#### 4.2 해진중 개단 강관 말뚝의 극한지지력 저감

그림 6(b)에서는 약 260 m의 수심이 유사화되었는데, 토조의 유효 구속 응력이 35 kPa인 것에 비하여 지표면부근의 말뚝 외주면에 작용된 양의 간극수압의 크기는 29 kPa이었다. 말뚝 하부로 갈수록 훨씬 작은 간극수압이 발생하였다.

따라서, 해진만으로는 외주면 마찰력과 선단

지지력을 완전하게 감소시킬 수 없었다. 그러나, 선단하부에서, 약 12 kPa의 양의 간극수압이 발생되었으며, 이로 인하여 관내토내에 4.3 정도의 상향의 동수경사가 유발되었으나 관내토 상단에 있는 물에서는 즉각적인 간극수압의 변화가 나타나지 않았다. 이 동수경사는 관내토 폐색을 파괴시키기에 충분하였으며 주기해진 진동중 관내토 저항력을 크게 저감시켰다. 관내토 위쪽으로 간극수가 이동하는 것을 그림 9에서 관찰할 수 있었다. 그림 9는 심해 시험 (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 정제하 과정에서 관내토내에 형성된 흙의 아치는 완전하게 파괴되었을 것으로 예상되었다.

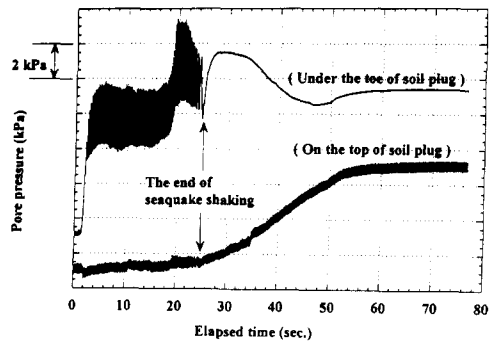


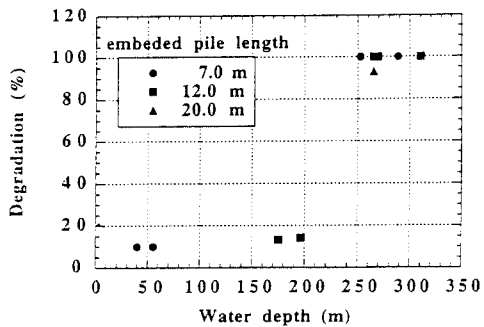
Fig. 9 Pore pressure developed in soil plug during and after simulated seaquake test for open-ended pile driven in deep sea (Test s3)

관내토 폐색의 파괴에 따른 관내토의 상향변위는 말뚝 외부 선단 주변의 유효응력을 감소시켜 외주면 마찰력과 선단 지지력을 완전하게 저감시켰다. 외주면 저항력의 심각한 저감을 그림 6(c)에 나타내었다.

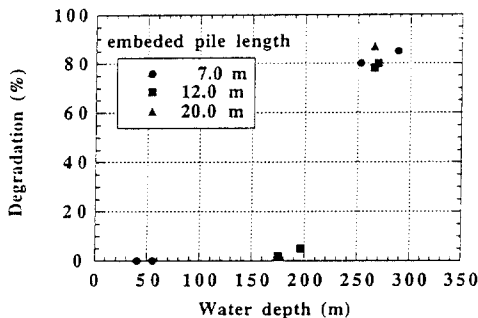


반면, 그림 7(b)에는 약 185 m의 수심이 유사화되었는데, 관내토 선단에서 발생된 간극 수압이 약 2 kPa이었다. 따라서, 관내토에서는 최대 0.7정도의 동수 경사가 유발되어 관내토 폐색을 파괴시킬 수가 없었다. 관내토가 안정 상태를 유지하였으므로 말뚝 하부에서는 흙의 변위가 전혀 나타나지 않았으며 외주면 마찰력도 거의 저감되지 않았다.

그림 10(b)는 관내토 폐색력의 저감은 해저면 위에 있는 물의 깊이에 크게 좌우되는 것을 보여주고 있다. 해진 주파수나 해저지반의 구속응력(말뚝길이를 모델링함)은 관내토 폐색력 저감에 거의 영향을 미치지 못하였다. 수심을 유사화 하는데 사용된 주요한 요소는 작용된 수압의 진폭인데, 그림 3에서 예측된 바와 같이 수심이 깊으면 수압도 크다. 따라서, 그림 10(b)에서 말뚝에 유발된 한계 동수경사는 파괴를 초래하게 된다는 것을 알 수 있었다.



(a) External friction and toe resistance degradation



(b) Soil plug resistance degradation

Fig. 10 Soil plugging force degradation versus simulated water depth during seaquake test

그림 11에는 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. 본 연구에서는 수심을 유사화한 주기와 압력을 변화시켜 수행한 실험결과 (표 1)와 그림 3을 참고하여 심해와 천해의 경계깊이를 결정하였다. 즉, 그림 3에서 수심이 220 m를 초과한 경우 해상과의 압력은 비선형적으로 급격히 증가하는 것을 알 수 있으며, 해상과 시험에서 16-18kPa가 경계 압력이 되는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서, 수심 220 m 이상인 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 200m이하인 천해에서는 유사 해진중 관내토 폐색력은 저감되지 않았으며 해진후에도 그대로 남아 있었다.

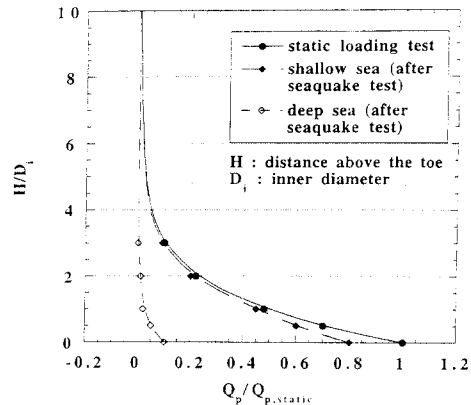


Fig. 11  $Q_p/Q_{p,static}$  versus  $H/D_i$ , where  $Q_p$  is soil plug resistance after seaquake test and  $Q_{p,static}$  is static soil plug capacity before seaquake test

## 5. 결론 및 제언

- 1) 해저면의 수직 지진진동에 의해 유발된 해진 (seaquake)은 압력 토조 표면에 sine형과 형상의 동수압을 작용시켜 유사화하

- 였다. 유사화된 해진 압력의 진폭은 수심에 따라 달라지는데,  $M = 8.0$ 으로 유사화된 캘리포니아의 Oceanside 지진 (1986)에 대한 동수압의 진폭과 수심과의 관계를 그림 3에 나타내었다. 모형 해진 실험에 사용된 주파수는 Oceanside 지진의 주파수에 주파수 크기 계수 (= 4)를 곱하여 계산하였다. 또한, 이 연구는 상대밀도 50 %인 세립 지반에서 수행된 결과만을 토대로 한 것이다.
- 2) 유사 해진중 수심 220 m 이상의 심해에 설치된 압축 개단 말뚝은 완전하게 파괴되었으며, 관내토 폐색력은 80 % 이상 저감되었다.
  - 3) 수심 220 m 이하의 천해에 설치된 개단 말뚝의 압축 극한 지지력은 거의 감소하지 않았으며, 관내토 폐색력은 5 % 이하만큼 저감되었다.
  - 4) 수심 220 m 이상의 심해에 설치된 개단말뚝의 경우 말뚝의 관입 깊이와는 상관없이 해진중 관내토는 파괴되었다. 관내토 폐색력의 파괴는 관내토 하단 3~4  $D_i$  이내에서 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.
  - 6) 실제 해진의 영향에 의해 파괴된 해상 개단 강관말뚝에 대한 사례를 조사하여 검증을 해야 할 필요성이 있을 것으로 사료되며, 이에 대한 연구는 계속 수행되어야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Choi, Y.-K., and O'Neill, M. W., "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.
5. Choi, Y.-K., and O'Neill, M. W., "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. (to be approved)
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.
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. Yamamoto, T., Takahashi, S., and Schuckman, B., "Physical modeling of sea-seabed interactions," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 109, No. 1, 1987, pp. 54-72.
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*, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dec. 1990.

10. 최용규, "소형 압력토조내에 타입된 말뚝의 인발 거동과 극한 지지력 결정에 관한 연구", 한국지반공학회지, 제11권 제2호, 1995. 6., pp. 19-28.