

파랑하중에 의한 해저지반의 응력변화에 대한 연구

A Study of Variation of Wave-induced Stresses in a Seabed

장 병 욱* · 박 영 권** · 우 철 웅***
Chang, Pyoung Wuck · Park Young Gon · Woo, Chul Woong

Summary

It is expected that the soil behaviours in the seabed subjected to cyclic wave loads are much different from that on the ground. Cyclic shear stresses developed below the ocean bed as a result of a passing wave train may progressively build up pore pressure in certain soils. Such build-up pore pressure may be developed dynamic behaviour such as liquefaction and significant deformation of the seabed.

Currently available analytical and testing methods for the seabed subjected to cyclic wave loads are not general. The purpose of the study are to provide a test method in laboratory and to analyze the mechanism of wave-induced stresses and liquefactions potentials of the unsaturated silty marine sand.

It is showed that the test set-up made especially for this study delivers exactly oscillatory wave pressures of the form of sine function. Laboratory test results defining the cyclic shear strength of the unsaturated porous medium that is homogenously sedimented. It is understood that the pore water pressure due to induced-waves is not accumulated as the wave number increases but reveals periodical change on the still water surface. The magnitude of the pore water pressure tends to be attenuated radically with a certain time lag under the action of both high and low waves as depth increases.

I. 서 론

해안 구조물을 설치할 때 지반의 안정성 해석에 있어서 가장 중요한 문제점으로 파랑의

존재를 들 수 있다. 해저지반은 파랑에 의한 반복외력을 받는 특성을 가지므로 육상에서의 지반거동과는 상당히 다른 특징을 갖는다. 수면을 따라 진행되는 파랑은 그 에너지의 일부

* 서울대학교 농업생명과학대학

키워드 : 파랑하중, 불포화토, 공극수압, 유효응력, 액상화포텐셜, 조밀화

가 물속으로 변환되며 이에 따라 해저면에서는 동적하중을 받게 된다^{1, 4)}. 그러나 종래의 토질역학에서의 유효응력 개념으로 설명할 때 정수면이 변화해도 지반중의 유효응력은 불변한다. 이러한 가정이 정수면의 변화가 비교적 빠른 파랑하중하에서는 성립이 되지 않고, 지반중의 유효응력은 파랑의 진행과 함께 변동한다고 설명할 수 있다^{4, 5, 6)}.

외해에 건설되는 해양구조물이나 간척사업에서 파랑에 의한 해저지반의 과압 변동, 지반내의 응력변화 및 침하, 과압변동에 따른 지반내의 공극수압의 증가, 액상화 문제 등 여러 가지 기술적인 문제들에 대해 관심이 증대되고 있으나 이에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 여러 종류의 파가 서로 합성되어 복잡한 모양을 하고 있는 파랑을 파고와 주기가 일정한 정상파로 가정하고, 수위변화에 따른 정압력만이 주기적으로 변동하여 해저면으로 과압이 전달되는 것으로 가정하고 지반내의 공극수압과 응력 변화를 계측하여 그 관계를 정립하는데 목적을 두었다.

II. 해저지반의 응력

1. 불포화 해저지반

해저지반은 오랜 시간 동안 퇴적에 의해 형성되며 지반내에서는 석유류 및 유기물의 분해 등에 의해 가스를 함유한 상태로 존재한다. 가스를 함유한 지반이란 흙의 삼상-토립자, 물, 공기-에서 공기 대신 가스로 그 구성을 재편성하여 해석하는 문제로 정의되며, 지반내에 메탄 등과 같은 가스는 파랑에 의해 지반 내에 발생하는 공극수압의 영향을 받게 된다.

지금까지의 연구에서 해저 지반내의 응력변화는 균질하고 포화된 무한사면에 대한 근사해를 적용시켜 왔으나, 실제의 해저지반은 균

질하지도 않으며 퇴적층의 상태에 따라 수리적으로 이방성을 가지는 경우가 많다. 또한 해저 퇴적층은 포화상태로 존재하는 경우가 거의 없고 0.85~1.0의 포화도를 보이고 있다.

2. 파랑의 진행에 의한 해저면에서의 과압

Fig. 1과 같이 수심 h인 해저면에서 진행성 파랑에 의해 발생하는 과압은 Airy의 선형 파동이론에 의하여 구할 수 있다.

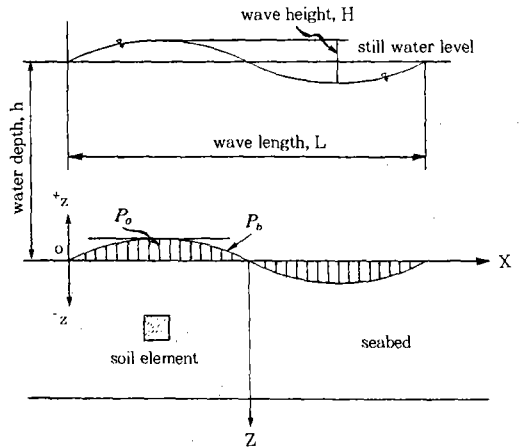


Fig. 1. Oscillatory water pressures in the seabed

이때 파를 단순 sine파형 또는 cosine파형으로 가정하여 파동방정식을 구하면 식 (1)과 같으며 해저면을 불투수층이라고 가정하면 해저면의 과압은 식 (2)와 같다.

$$\phi = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) = \frac{H}{2} \cos(ax - \omega t) \dots \dots \dots (1)$$

$$P_b = \rho g \frac{\cosh(2\pi(h+z)/L)}{\cosh(2\pi h/L)} \cdot \frac{H}{2} \cos(ax - \omega t) - \sigma gz + P_a$$

$$= P_0 \exp(-az) \cdot \cos(ax - \omega t) - \sigma gz + P_a \dots \dots (2)$$

여기서, P_0 는 해저면에서의 정수시의 과압

이며, 대기압과 정수압을 제외하면 과압은 다음과 같다.

$$P_b = P_0 \exp(-\alpha z) \cdot \cos(\alpha x - \omega t) \quad \dots\dots (3)$$

여기서,

$$P_0 = \frac{\sigma_g H / 2}{\cosh(2\pi h / L)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

위 식은 Sleath의 연구 결과 모래지반인 경우에도 적용될 수 있음이 실험을 통해서 증명되었다. 또한 지반의 수리적 이방성을 고려하여 다음과 같은 관계를 구했다³⁾.

$$P_b = P_0 \frac{\cosh \alpha(k_x/k_z)^{1/2}(h+z)}{\cosh \alpha h(k_x/k_z)^{1/2}} \cdot \cos(\alpha x - \omega t) \quad \dots\dots\dots (5)$$

3. 과랑하중에 의한 해저지반에서 유효연직응력의 변화

과랑과 해저지반 사이의 역학관계를 구명할 때 수압의 주기성과 수압의 작용속도가 일반적인 정적 외력에 비해서 빠르다는 사실이 고려되어야 한다. 또한 수위변화에 따른 수압이 그대로 해저지반 표면에 전달되지 않을 수 있다. Fig. 2에서 과수(N)에 대하여 지진시의 과잉 공극수압은 증가하지만 과랑에 의한 공극수압은 정수면을 중심으로 주기적인 변동함을 나타내고 있다.

Fig. 3 수위변화속도에 따른 지반층의 유효연직응력의 발생 상태를 나타낸 것이다. 우선 깊이 z에서의 유효응력(σ'_{vo})은 전응력(σ_{vo})과 초기과잉공극수압(u_0)의 차이이다. 초기 상태에서 같은 크기의 수위저하가 발생할 때 수위저하가 느린 경우 깊이 z에서의 유효연직응력을 구해 보면 다음 식과 같다. 수위저하량을 h_d , 물의 단위 중량을 γ_w 라 하면 유효연

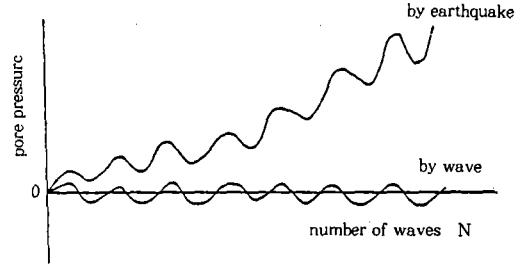


Fig. 2. Relation of between number of waves and porewater pressures

직응력 (σ'_{vo})은

$$\sigma'_{vo} = (\sigma_{vo} - \gamma_w \cdot h_d) - (u_0 - \gamma_w \cdot h_d) = \sigma'_{v'o} \quad \dots\dots\dots (6)$$

한편, 과랑 하중과 같이 수위저하속도가 빠른 경우 유효연직응력(σ'_{vo})는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma'_{v'a} &= (\sigma_{vo} - \gamma_w \cdot h_d) - \{u_0 - \gamma_w(h_d - \Delta h_d)\} \\ &= \sigma'_{v'o} - \gamma_w \cdot \Delta h_d \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

여기서, 식 (6)과 식 (7)을 비교해 보면 $\gamma_w \cdot \Delta h_d$ 는 전달되는 수압의 지연량을 알 수 있고 다음 관계를 얻을 수 있다.

$$\sigma'_{v'a} < \sigma'_{v's} = \sigma'_{v'o} \quad \dots\dots\dots (8)$$

즉, 최종 수위저하량이 동등하더라도 수위저하속도가 커지면 명백히 지반층의 유효연직응력은 초기 유효연직응력보다 작아진다. 또 식 (7)에서 전달되는 수압의 지연량($\gamma_w \cdot \Delta h_d$)이 초기 유효연직응력($\sigma'_{v'o}$)보다 큰 경우에는 그 위치에서 이론상 $\sigma'_{v'a} \leq 0$ 로 된다. 그러나 실제로 $\sigma'_{v'a} < 0$ 이 될 수는 없으므로, $\sigma'_{v'a} = 0$ 일 때 액상화 현상이 발생하게 된다.

과랑의 진행에 따라 해저지반 표면에는 수압이 주기적으로 변한다. 해저면의 수압을 P_b ,

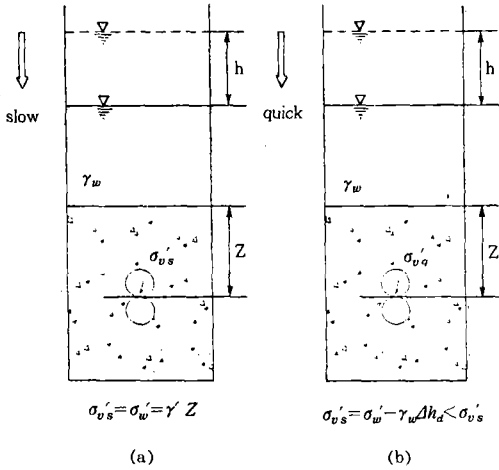


Fig. 3. Effective vertical stress due to effect of slow and quick changes of water level

정수압을 P_b , 지반중의 수압의 정수위 상태에서의 변화량을 P_m 이라 하면, 유효응력 이론에 의해 수면하 지반중의 유효응력은 수위의 변동에 무관하게 항상 일정한 값을 가진다. 그러나, 파랑이 작용하는 경우에는 이와 달리 유효응력이 변한다.

깊이 z 에서 $-(P_b - P_m)$ 의 과잉공극수압이 발생하면 유효연직응력(σ_v')은 다음과 같다.

$$\sigma_v' = \sigma_{v'o}' + (P_b - P_m) \dots\dots\dots (9)$$

여기서, 지반중의 유효연직응력(σ_v')과 유효연직응력의 변화량($\Delta\sigma_v'$)은 다음과 같다.

$$\sigma_{v'o}' = \gamma' \cdot z \dots\dots\dots (10)$$

$$\Delta\sigma_v' = \sigma_v' - \sigma_{v'o}' = P_b - P_m \dots\dots\dots (11)$$

Fig. 4(a)는 파곡 및 파봉과 해저면에 대응하는 지반중의 수압변화를 나타낸 것이다. $P_b - P_m$ 은 해저 표면의 수압변화에 대한 지반속으로의 수압 전달의 시간적인 지연을 나타내

며 식 (7)의 $\gamma_w \cdot \Delta h_d$ 에 해당한다. 수압이 순간적으로 전달되면 지반중의 수압 변화량은 어느 깊이에서나 같으며 $P_b = P_m$ 으로 되고 지반중의 응력변화는 없다.

한편, 수압이 순간적으로 지반의 모든 부분에 전달되지 않을 경우 $P_m \leq P_b$ 로 되어 지반중에는 $P_b - P_m$ 만큼의 수압차가 발생하게 된다. 이 수압차 $P_b - P_m$ 는 외전상 과잉공극수압과 같은 효과를 갖게 되고, 그 때문에 지반중의 응력은 감소하게 된다. 이때 지반중의 유효연직응력(σ_v')을 구하면 다음과 같다.

$$\sigma_v' = \sigma_{v'o}' - (P_b - P_m) \dots\dots\dots (12)$$

마찬가지로 파봉의 경우, 지반중의 유효연직응력(σ_v')은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_v' = \sigma_{v'o}' + (P_b - P_m) \dots\dots\dots (13)$$

즉, 유효연직응력(σ_v')은 파곡에서 감소하고, 파봉에서 증가하는 경향을 보이게 된다. 그러나 σ_v' 의 증감량은 P_m 의 분포에 따라 달라진다.

점성토인 경우 평균유효응력으로 계산되지만, 사질토의 경우 임의의 시간 t 에서 식 (9)의 유효연직응력이 $\sigma_v' \leq 0$ 이면 액상화가 일어날 가능성이 있게 된다. 따라서, 사질토의 경우 액상화의 조건은 다음과 같다.

$$\sigma_{v'o}' \leq -(P_b - P_m) \dots\dots\dots (14)$$

반면 고밀도화의 조건은 $\Delta\sigma_v' > 0$ 이므로 다음과 같다.

$$P_b - P_m > 0 \dots\dots\dots (15)$$

따라서, 식 (14)와 (15)로부터 해저 지반의 액상화는 일정한 수면일 경우 연직 유효응력

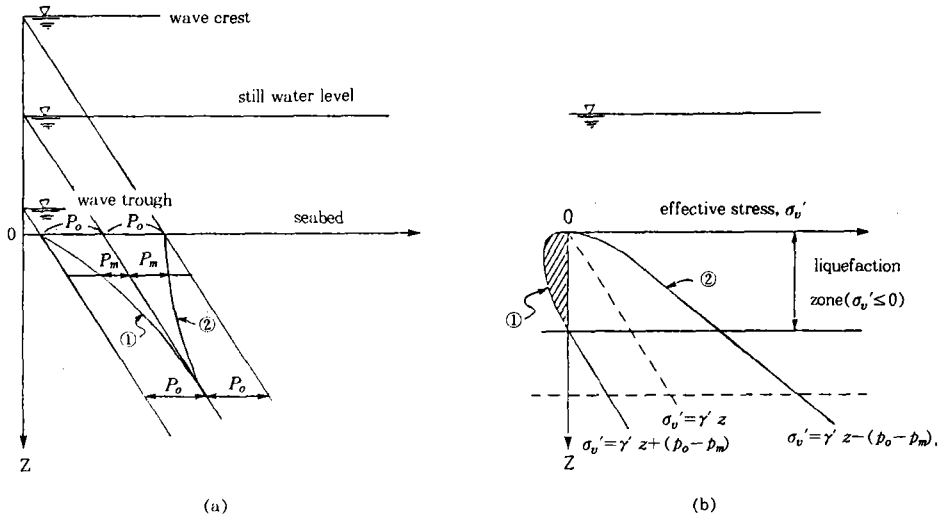


Fig. 4. Concept of wave-induced liquefaction and densification

($\sigma_{v'o}$), 해저 표면의 수압(P_o), 지반내의 과잉 공극수압(P_m)의 3요인에 의하여 지배를 받으며, 반면 고밀도화는 P_m 및 P_o 의 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4(b)는 지반중의 수압이 Fig. 4(a)에 표시한 ①과 ②의 분포로 될 때 유효연직응력(σ_v')의 개념도이다. 그림에서 ①의 분포에 대응하는 σ_v' 은 어느 깊이까지든 음의 값으로 되는데, 이것은 그 깊이 이내의 지반에서 액상화가 발생함을 의미한다. 한편 ②에 대응하는 σ_v' 은 정수면에 대응하는 $\sigma_{v'o}$ 보다 항상 커지며 그 차이만큼 유효응력의 증가를 초래하여 지반은 고밀도화 하게 된다. 이러한 현상은 하나의 파랑이 진행함에 따라 주기적으로 액상화와 고밀도화가 발생한다.

III. 시료 및 시험방법

1. 시료

본 연구에서 사용된 시료는 새만금지구에서 채취한 실트질 모래이며 비소성인 재료이다. 시료의 물리적 특성은 Table-1과 같고 시료의 자연 상태 입도분포는 Fig. 5와 같다.

Table-1. Physical properties of samples used in the test

specific gravity	water content (%)	wet density (t/m ³)	plastic index	U.S.C.S.
2.65	30.6	1.93	NP	SM

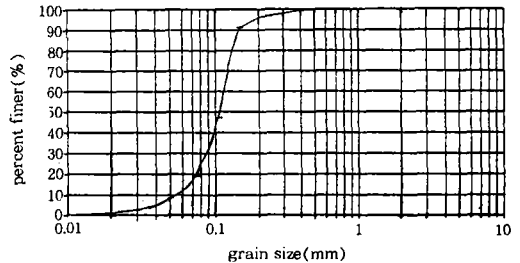


Fig. 5 Grain size distribution curve

2. 설정파랑 및 지반조건

본 연구에서는 최근 간척 사업이 시행되고 있는 서해안의 새만금지구의 파랑 조건을 Table-2와 같이 설정하여 적용했으며, 시료를 채취한 지역의 해저 지반 특성은 Table-3과 같다⁷⁾.

Table-2. Wave properties of the sample area

sample wave	wave properties			
	depth(m)	height(m)	length(m)	period(sec)
type 1	12.0	4	60.6	6.77
type 2	7.0	5.2	56.5	7.45

Table-3. Seabed properties at the sample site

compressibility coefficient (m ² /kg)	permeability coefficient (m/s)	poisson's ration(ν)	porosity (n)	unit weight (t/m ³)
2.67×10^{-4}	4.0×10^{-6}	0.3	0.45	1.93

3. 실험방법

본 연구에서는 파랑 조건에 관한 인자인 파고(H), 파의 주기(T), 파장(L), 파수(N) 및 지반의 기하학적인 인자인 정수심(h)을 대상으로 하며 그들을 변화시켰을 때 해저 지표면

에서의 깊이 z의 각 지점에서의 공극수압을 측정하였다. 본 연구에 사용한 실험장치의 모식도는 Fig. 6과 같다.

실험에 사용된 불포화 시료는 孫(1995)이 고안한, 기포제를 이용한 불포화 시료 성형법⁸⁾으로 포화도 85%로 재성형한 시료를 사용했으며, 자중에 의하여 3일간, 파압 발생장치를 이용해서 0.6kg/cm²의 압력으로 2일간 압밀시킨 후 실험을 행했다.

이 때 시험용 토조안에 압밀을 위한 바닥판(높이 15cm)을 넣고 그 위에 토압계를 설치하고 포화도 85%인 불포화 시료를 0.65m 깊이로 넣고, 그 위에 1.2m 깊이의 정수위를 두었으며, Table-4와 같이 sine파형의 수압을 연속적으로 재하시켰으며 시료 깊이의 20cm 및 40cm 지점에서의 공극수압과 전응력의 변화를 측정하였다.

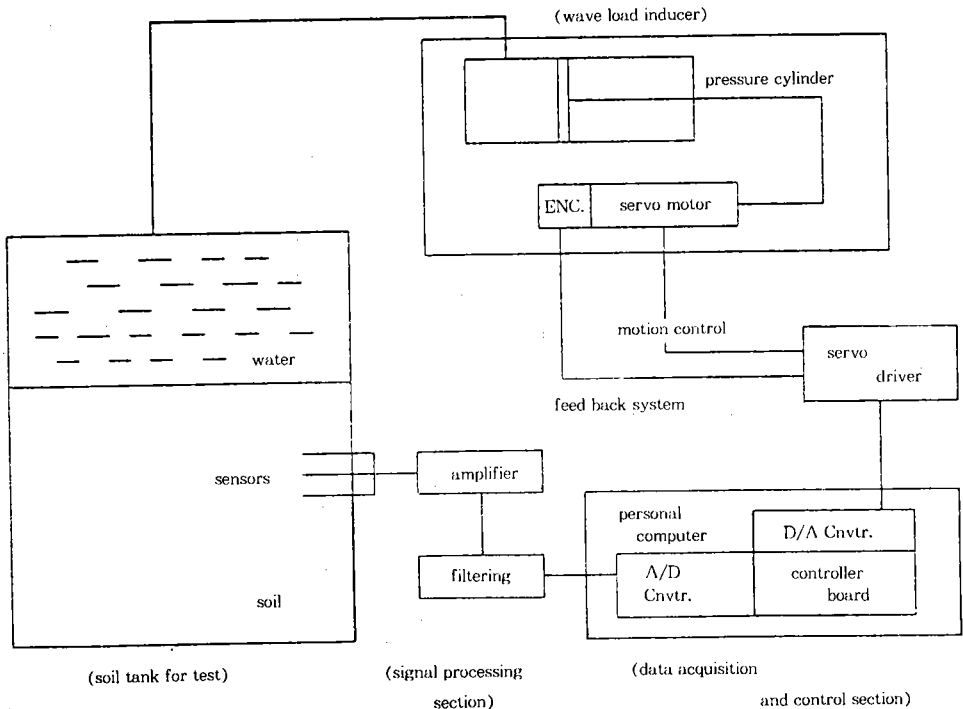


Fig. 6. Overall schematic diagram of the test set-up

Table-4. Test conditions for each wave type

sample wave	specimen height (m)	water depth (m)	wave period (sec)	initial water pressure (kg/cm ²)	pressure range (kg/cm ²)	wave type
type 1	0.55	1.3	6.77	0.73	+0.04 ~ -0.04	sine 파
type 2	0.55	1.3	7.45	0.6	+0.014 ~ -0.014	sine 파

IV. 결과 및 고찰

1. 파압발생장치의 검증

해저지반은 과랑에 의해 과압을 받게 된다. 이러한 상황을 실험실내에서 모사하기 위하여 파압 발생장치를 제작하고 이를 이용해서 과랑 하중을 재하했을 때 실제 상황을 모의할 수 있는지, 또 하중 전달이 정확한지를 검증할 필요가 있다.

즉 파압 발생장치가 주기(T) 동안에 정확하게 sine 파형으로 압력을 가할 수 있는지를 검증하는 것이다. 준비실험 과정에서 설정 과랑 type 1과 type 2를 적용하였을 때 각각 Fig. 7과 Fig. 8에 나타난 것과 같이 주기(T) 동안에 정확하게 파압을 발생시킨다는 것을 확인할 수 있었다.

여기서, 횡축은 설정 과랑 type 1과 type 2의 시간을 나타낸 것이고, 종축은 가압 실린더에서 발생하는 압력을 나타낸다.

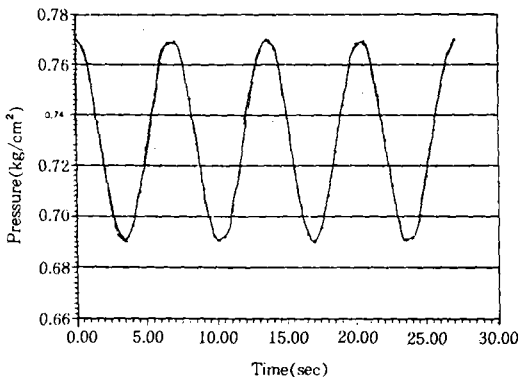


Fig. 7. Induced pressure vs. time for type 1 (T=6.77sec)

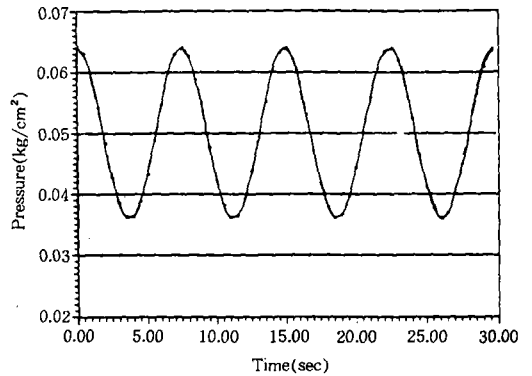


Fig. 8. Induced pressure vs. time for type 2 (T=7.45sec)

2. 깊이에 따른 공극수압의 변화 상태

Fig. 9는 설정 과랑 type 1의 경우, 0.73 kg/cm²의 정수압을 가한 후, 그 상태에서 -0.04kg/cm²→+0.04kg/cm²→-0.04kg/cm²의 순으로 sine 파형의 수압을 연속적으로 재하시켰을 때, 시험용 토조 내의 시료의 깊이 20cm와 40cm 지점에서의 공극수압의 변화상태를 나타낸 것이다.

파압이 0.69~0.77kg/cm²의 sine 파형으로 작용할 때 시료 깊이 20cm 지점에서는 같은 sine 파형으로 공극수압이 변하나 그 크기는 약 0.72~0.755kg/cm²으로 진폭이 감소되어 변동하며 40cm 지점에서는 0.67~0.69kg/cm²로 진폭이 감소되어 변동한다.

파압 발생장치에서 발생시킨 과랑 하중이 변화함에 따라 토조 내의 시료 속에서 발생하는 공극수압도 주기적으로 변화하며 깊이에 따라 공극수압이 감소하고 있음을 알 수 있다.

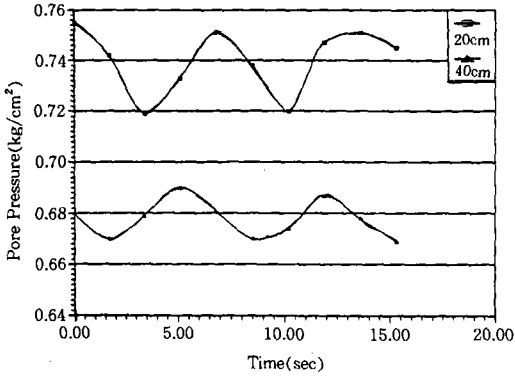


Fig. 9. Pore pressure vs. time for type 1

Fig. 10은 설정 파랑 type 2의 경우, 0.05kg/cm²의 정수압을 가한 후, 그 상태에서 -0.014kg/cm² → +0.014kg/cm² → -0.014kg/cm²의 순으로 sine 파형의 수압을 연속적으로 재하시켰을 때, 시험용 토조 내의 시료 깊이 20cm와 40cm 지점에서의 공극수압의 변화 상태를 도시한 것이다.

파압이 0.036~0.064kg/cm²로 작용할 때 공극수압의 변화는 20cm 깊이에서 0.039~0.052kg/cm², 40cm 깊이에서 0.019~0.027kg/cm²로 진폭이 감소하는 것으로 나타났다.

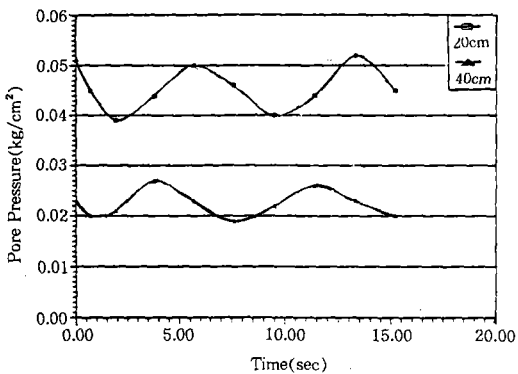


Fig. 10. Pore pressure vs. time for type 2

이와 같이, 파압 발생장치로써 실제 파랑에 의해 해저로 파압이 전달되는 현상을 모사할 수 있으며, 또한 파랑 하중에 의해 해저면에

발생하는 공극수압이 연속적으로 주기적 변동함을 알 수 있고, 반복적으로 재하되는 파랑 하중이 지반에 감쇠되어 가며 지중응력이 전달되었다. 주기는 변동이 없으나 깊이가 증가할수록 공극수압의 진폭 즉, 절대적인 크기는 급격히 감소하며 깊이가 작을수록 그 위상이 앞서간다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 파랑에 의해서 해저로 전달되는 파압으로 인해 해저지반에서 발생하는 수압의 주기성과 수압의 작용속도가 일반적인 정적 외력에 비해서 빠르다는 사실과 해면의 수위변화에 따라 수압이 그대로 해저지반 표면에 전달되지 않을 수 있다는 사실을 보여주고 있다. 식 (8)은 파압 발생장치에 의한 수압 변화가 순간적으로 시험용 토조의 시료로 전달되지 않으므로 시료의 깊이가 증가함에 따라 $\gamma_w \cdot \Delta h_d$ 만큼의 수압의 지연량이 발생하며 깊이가 작을수록 지반으로 전달되는 공극수압의 위상이 앞서가는 위상차가 생기는 것으로 사료된다.

또한 Fig. 9와 10에서 본 바와 같이 파랑에 의한 공극수압은 파랑의 반복에 따라 주기적으로 반복할 뿐 지진시에 볼 수 있는 것과 같은 잔류량이 증가는 보이지 않고 있다.

Table-5는 각 설정 파랑에 대해서 파압의 변동에 따른 각 지점에서의 공극수압의 변동 상황을 도표로 나타낸 것이다.

Table-5. Pore pressure variations for each wave type

sample wave	initial water pressure (kg/cm ²)	wave load $\Delta\sigma$ (kg/cm ²)	pore water pressure Δu (kg/cm ²)	
			depth	
			20cm	40cm
type 1	0.73	± 0.04	± 0.0175 (43.8%)	± 0.01 (25%)
type 2	0.05	± 0.014	± 0.006 (42.9%)	± 0.004 (28.6%)

Note : + : at wave crest
- : at wave trough

3. 공극수압의 감소형태

Fig. 11에서 횡축은 해저 표면으로 전달된 과압 ($\Delta\sigma$)에 대한 시료중에서 발생한 공극수압 (Δu)과의 비를, 종축은 시료의 전 깊이 (d)에 대한 지표에서의 시료 깊이 (d')와의 비를 무차원으로 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 깊이에 따른 공극수압의 감소 형태는 시료 깊이가 증가함에 따라 급격히 감소되며, 감소 형태는 Fig. 11에서 본 바와 같으며 계측된 값은 $P_0 - P_m$ 과 같은 값이 된다. 또한 공극수압은 지층 두께의 약 80% 지점에서 과랑하중으로 인해 해저지반으로 과압의 28% 정도가 전달되는 것으로 나타나 과랑 하중으로 인한 공극수압의 증가에 따른 지층의 영향은 어느 정도 적을 것으로 판단된다.

4. 액상화 가능성과 고밀도화

식 (11)과 식 (13)로부터 지반의 깊이 z 에서 지반중의 토립자에 의한 유효연직응력 ($\sigma_{v'0}$)과 과랑이 진행함에 따라 발생하는 과잉공극수압 $-(P_0 - P_m)$ 의 관계에서 식 (14)의 조건, 즉 토립자에 의한 유효연직응력 ($\sigma_{v'0}$)보다 과랑의 진행에 의해 지반중에서의 공극수압변동 (Δu)이 클 경우 액상화 현상이 일어나게

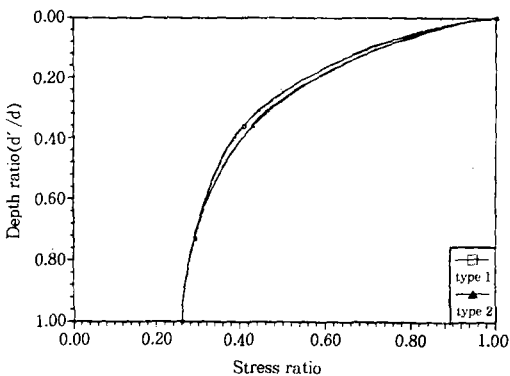


Fig. 11. Pore pressure changes vs. depth

된다.

Table-6은 토조내 시료 깊이 20cm, 40cm에서의 유효연직응력 ($\sigma_{v'0}$)과 공극수압변동 (Δu)의 대소관계 및 그 비를 나타낸 것이다.

Fig. 12는 Table-6에서 나타낸 깊이(d)에 대한 공극수압 변화량 (Δu)과 초기 유효응력 ($\sigma_{v'0}$) 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 공극수압 변화량 (Δu)이 초기유효응력 ($\sigma_{v'0}$) 보다 큰 지점, 즉 초기유효응력을 나타내는 곡선보다 위쪽에 있는 부분에서 액상화가 일어나며, type 1의 경우 약 20cm 지점에서, type 2의 경우 약 15cm 지점에서 액상화가 일어나는 것을 알 수 있다. 또한 공극수압 변화량 (Δu)이 과랑하중으로 인한 유효응력 (σ_v) 보다 큰 지점은, type 1의 경우 약 17cm, type 2의 경우 약 18.5cm 부분으로 나타났다.

과랑이 진행함에 따라서 과봉(wave crest)에서는 고밀도화 현상, 과곡(wave trough)에서는 액상화 현상이 과랑의 진행과 함께 주기적으로 일어나며, 초기압이 큰 경우 즉, 해저 표면에서의 수압 (P_0)이 큰 type 1이 type 2

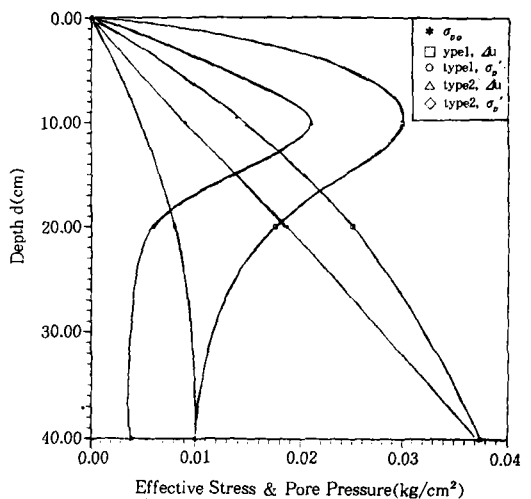


Fig. 12. Liquefaction depth for type 1 and type 2

Table-6. Results of tested for liquefaction probability evaluation

wave type depth	type 1			type 2		
	$\sigma_{v'0}$ (kg/cm ²)	σ_v (kg/cm ²)	Δu (kg/cm ²)	$\sigma_{v'0}$ (kg/cm ²)	σ_v (kg/cm ²)	Δu (kg/cm ²)
10cm	0.009	-	< 0.03	0.009	-	< 0.021
20cm	0.019	0.025	> 0.0175	0.019	0.008	> 0.006
40cm	0.037	0.0375	> 0.01	0.037	0.010	> 0.004

보다 액상화가 일어나는 깊이가 큰 것으로 나타났다.

5. 유효응력의 변화

Fig. 13과 Fig. 14는 설정 파랑 type 1과 type 2의 경우 각각의 전응력의 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 type 1의 경우 전응력의 크기는 0.79~0.875kg/cm²로 진폭이 감소되어 변동하며, type 2의 경우는 0.062~0.09kg/cm²으로 변동한다.

Fig. 15와 Fig. 16은 설정 파랑 type 1과 type 2의 경우의 각 지점에서 유효응력의 변화이다.

type 1의 경우는 시료의 깊이 20cm 지점에서 유효응력이 0.04~0.135kg/cm²으로 변동하며, 깊이 40cm에서는 0.1~0.205kg/cm²으로 변동한다. 또한 type 2의 경우는 시료의 깊이 20cm 지점에서 유효응력이 0.017~0.

045kg/cm²로, 깊이 40cm에서는 0.036~0.07kg/cm²으로 변동한다.

과압 발생장치에서 발생시킨 파랑 하중이 변화함에 따라 토조 내의 시료 속에서 발생하는 유효응력도 주기적으로 변화하며 깊이에 따라 유효응력은 증가하고 있음을 알 수 있다.

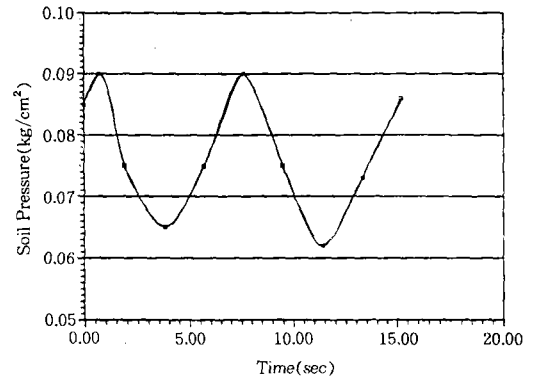


Fig. 14. Total pressure vs. time for type 2

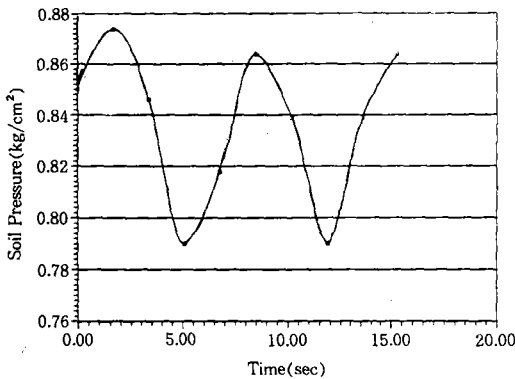


Fig. 13. Total pressure vs. time for type 1

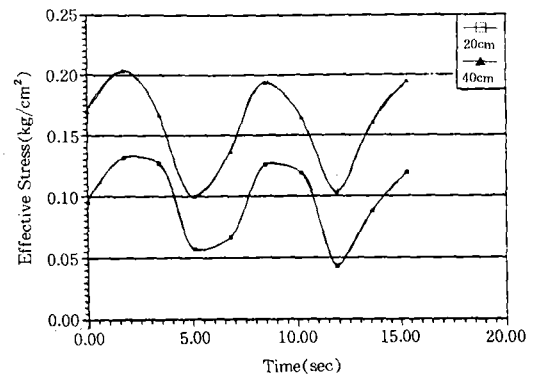


Fig. 15. Effective pressure vs. time for type 1

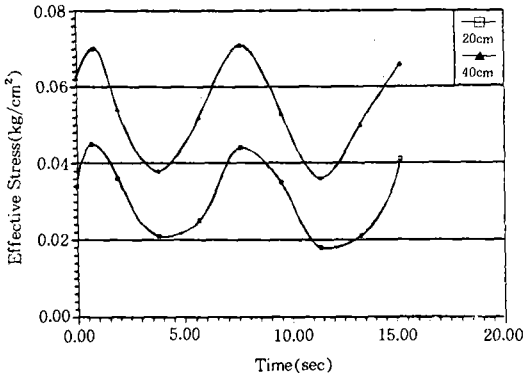


Fig. 16. Effective pressure vs. time for type 2

V. 결 론

해안 구조물을 설치할 때 지반의 안정성 해석에 있어서 가장 중요한 문제점으로 파랑의 존재를 들 수 있다. 해저지반은 파랑에 의한 반복하중을 받는 특성을 가지므로 육상에서의 지반 거동과는 상당히 다른 특징을 가질 것으로 예상된다. 파랑으로 인해 해저지반 아래 발생하는 반복전단응력은 지반의 임의 지점에서 공극수압을 발생시킬 수 있으며, 그와같이 발생된 공극수압은 해저지반의 액상화와 같은 동적거동과 지반의 현저한 변형을 가져올 수 있다.

본 연구에서는 실트질 해사를 대상으로 일련의 실험장치를 제작하고 계측기를 설치한 후 파랑을 모의 발생시켰을 때, 해저지반내의 공극수압 변화를 계측할 수 있는 실내 실험방법을 제안하고, 실험을 통하여 발생하는 모의 발생된 응력과 액상화 가능성을 분석하였다.

- ① 균질하게 퇴적된 불포화 다공질 매질의 반복전단강도를 얻을 수 있었다.
- ② 파압에 의해 발생하는 공극수압은 시료 깊이가 작을수록 크고 수압의 지연량 만큼 위상이 앞서 나타났으며, 정수면을 중심으로 주기적으로 변동하며 발생할뿐 잔류량이 누적되거나 증가하지 않는다.
- ③ 잔류량의 절대값은 깊이가 증가함에 따

라 급격히 감소함을 알 수 있었으며 파압으로 인한 공극수압의 증가가 지중에 미치는 영향은 적을 것으로 판단된다.

- ④ 파압에 의해 흙에 전달된 응력은 과잉공극수압이 감소하기 때문에 깊이에 따라 절대값이 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구는 1993년도 한국과학재단의 핵심전문 연구지원 계획에 의하여 수행되었으며 재단에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Madsen, O. S., 1978. Wave-Induced Pore Pressures and Effective Stresses in a Porous Bed. *Geotechnique* 28, No.4, pp.377-393.
2. Nageswaran, S., 1983. Effect of gas Bubbles on the Seabed Behaviour. D. Phil. Thesis, Oxford University
3. Sleeth, J. F. A., 1970. Wave Induced Pressures in Beds of Sand. *Proc. ASCE., J. of Hydraul. Div.*, Vol.96(HY2), pp.367-378.
4. Zen, K. and H. Yamazaki, 1989. Wave-Induced Pore Pressures and Liquefaction in Seabed. *土と基礎*, Vol.37, No.6, pp.63-68.
5. 善 功企, 山崎浩之, 渡邊 篤, 1986. 海底地盤의波浪의液狀化および變形機構. *海洋構造物の基礎に関する Symposium*, 第2篇 Symposium 論文集, 土質工學會, pp.241-248.
6. 善 功企, 山崎浩之, 渡邊 篤, 1987. 海底地盤의波浪의液狀化および高密度化. *港灣技研報告*, 第26卷, 第4號, pp.125-180.
7. 농림수산부, 농어촌진흥공사, 1990. 새만금 지구 방조제 단면 및 기초 처리에 관한 설계 검토
8. 손영환, 1995, 불포화토의 재성형과 압밀특성, 서울대학교 석사학위 논문