파랑하중에 의한 해저지반의 공극수압 변화에 대한 연구

An Experimental Study on the Variation of Pore Water Pressures in the Seabed Subjected to Waves

장 병 욱* · 강 준 영**
Chang, Pyoung Wuck · Kang, Jun Young

Summary

For the geotechnical analysis in the construction and design of the coastal structures, one of the most important factors is the existence of waves. The dynamic behavior and deformation of the seabed subjected to wave load must be considered.

It is expected that the soil behavior in the seabed subjected to cyclic wave load is much different from that on the ground subjected to dynamic forces such as earthquake.

The purposes of this study are as follows ; Firstly, to provide a testing method to generate wave loads in the laboratory and measuring oscillatory pore water pressures in the unsaturated marine silty sand specimen. Secondly, to analyze the mechanism of wave induced pore water pressures and liquefaction potentials under the conditions in the testing.

It is shown that the test set-up manufactured especially for the test is good to generate oscillatory wave pressures to the specimen with sine wave type.

From the results of this study, it is understood that the pore water pressure due to induced waves is not accumulated as the wave number increases but is periodically varied with wave passage on still water surface. The magnitude of pore water pressures measured tends to be diminished 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 지반 거동과는 상당히 다른 특징을 갖는다. 수면을 따라 진행하는 파랑은 해저지반 위를

* 서울대학교 농업생명과학대학
** (주)대우

키워드 : 파랑하중, 간극수압, 불포화토, 해저지반, 액상화, 밀도화

진행하게 되며, 이 때 파랑에 의한 에너지의 일부는 물 속으로 변환되므로 이에 따라 해저면에서 동적 하중을 느끼게 된다.[3,10] 그러나, 육상 구조물의 기초 지반의 안정성 해석을 위한 종래의 토질역학에서는 유효응력의 개념으로 설명할 때, 정수면이 변화해도 지반중의 유효응력은 불변한다. 하지만 이러한 가정은 정수면의 변화가 비교적 빠른 파랑하중하에서는 성립이 되지 않고, 지반중의 유효응력은 파랑의 진행과 함께 변동한다고 설명할 수 있다.[10,11,12]

파랑에 의한 해저지반의 파압 변동과 지반내의 응력변화, 그에 따른 침하, 파압의 변동에 따른 지반내의 공극수압의 증가와 그에 따른 액상화 문제 등 기술적인 문제들에 관심이 해양구조물 건설이나 간척 사업이 대규모화됨에 따라 증대되고 있으나 이에 대한 연구가 부족한 실정이다.

파랑은 여러 종류의 파가 서로 합성되어 대단히 복잡한 모양을 하고 있지만, 본 연구에서는 파고와 주기가 일정한 정상파로 가정하고, 수위 변화에 따른 정압력만이 주기적으로 변동하여 해저면으로 파압이 전달되는 것으로 가정하였다. 실트질 해사로 토조를 제작하고 정상파를 모의 발생시켰을 때, 해저지반내의 공극수압을 계측할 수 있는 실내 실험방법을 개발하고, 실험을 통하여 그 관계를 정립하는 데 목적을 두었다.

II. 해저지반의 응력

해저지반은 석유류 및 유기물의 분해 등에 의해 가스를 함유한 상태로 존재하는 불포화토인 경우가 많다. 가스를 함유하는 해저지반이란 토립자, 물, 공기에서 공기 대신 가스로 그 구성을 재편성하여 해석하여야 하며, 메탄 등 가스가 존재할 경우에는 파랑에 의해 지반내에 발생하는 공극수압이 가스의 영향을 받는다고 보고되어 있다.

가스는 서로 연결되지 않고 분리된 방울 상태로 존재하거나 뭉쳐서 가스공극을 형성한 상태로 존재하며 포화도 범위는 0.85~1.0 정도임을 보이고 있다[5].

지금까지 해저 지반내의 응력변화에 대한 연구는 균질하고 포화된 무한지반으로 가정하고 근사해를 적용시켜 왔으나, 실제의 해저지반은 균질하지 않으며, 퇴적층의 상태에 따라 수리적으로 이방성을 가지고 있다.

1. 파랑의 진행에 의한 해저면에서의 파압

Fig. 1과 같이 수심 h인 해저지반에서 진행성 파랑에 의해 발생하는 파압은 Airy에 의하여 단순 sine 파형 또는 cosine 파형으로 표현되며 해저면을 불투수층이라고 가정하면 해저면의 파압 P_b는 다음과 같다.

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

$$=P_o\exp(-az)\cdot\cos(ax-\omega t)-\rho gz+P_a \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서, P_o는 해저면에서의 정수시의 파압이며, 대기압 P_a와 정수압 ρgz를 제외하면 파압은 다음과 같다.

$$P_b=P_o\exp(-az)\cdot\cos(ax-\omega t)\cdots\cdots (2)$$

여기서,

$$P_o=\frac{\rho gH/2}{\cosh(2\pi h/L)} \quad \cdots\cdots (3)$$

Sleath(1970)는 모래 지반에서도 적용될 수 있음을 실험적으로 증명하였으며, 지반의 수리적 이방성을 고려하여 다음과 같은 관계를 구했다[8].

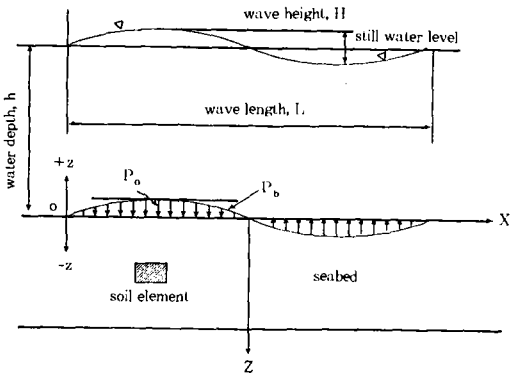

Fig. 1. Owcillatory water pressures in the seabed

$$P_b = P_o \frac{\cosh a(k_x/k_z)^{1/2}(h+z)}{\cosh ah(k_x/k_z)^{1/2}} \cdot \cos(ax-\omega t) \quad \cdots\cdots (4)$$

2. 파랑하중에 의한 해저지반에서 유효연직응력의 변화

파랑과 해저지반사이의 역학관계를 규명할 때 수압의 주기성과 수압의 작용속도가 일반적인 정적 외력에 비해서 빠르다는 사실이 고려되어야 한다(파랑의 주기는 대략 10초 전후). 또한 해면의 수위변화에 따른 수압이 그대로 해저지반 표면에 전달되지 않을 수 있음도 유의할 점이다. 이러한 특징은 지반에 동적 하중을 일으키는 지진과 비교할 때, 반복회수가 대단히 많고, 외력이 지반 표면에 종적으로 작용하는 점 등을 들 수 있다.

Fig. 2는 지진의 경우와 해저지반에서 통과파랑의 파수(N)에 대한 공극수압 변화에 대한 모식도이다. 지진시의 과잉공극수압은 잔류, 증가하나 파랑에 의한 공극수압은 정수면을 중심으로 주기적인 변동 특성을 가짐을 보이고 있다.

수위변화속도에 따른 지반중의 유효연직응력의 발생 상태를 보면 깊이 z에서의 유효응

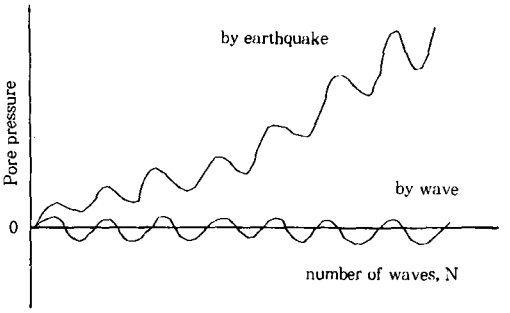

Fig. 2. Relation of between number of waves and porewater pressures

력(σ'_{vo})은 전응력(σ_{vo})과 초기과잉공극수압(u_o)의 차이다. 초기 상태에서 같은 크기의 수위저하가 발생했을 경우 깊이 z에서의 유효연직응력은 수위저하가 느린 경우, 수위저하에 따른 수압 변화가 순간적으로 전달되므로 유효연직응력 (σ'_{vs})는 수위저하량을 h_d, 물의 단위 중량을 γ_w라 하면 다음 식과 같다.

$$\sigma'_{vs} = (\sigma_{vo} - \gamma_w \cdot h_d) - (u_o - \gamma_w \cdot h_d) = \sigma'_{vo} \quad \cdots\cdots (5)$$

그러나, 파랑하중과 같이 수위저하속도가 빠른 경우, 수압 변화가 순간적으로 전달되지 않으므로 유효연직응력(σ'_{vq})은 다음 식과 같다.

$$\sigma'_{vq} = (\sigma_{vo} - \gamma_w \cdot h_d) - \{u_o - \gamma_w(h_d - \Delta h_d)\} = \sigma'_{vo} - \gamma_w \cdot \Delta h_d \quad \cdots\cdots (6)$$

여기서, 식 (5)과 식 (6)을 비교해 보면 $\gamma_w \cdot \Delta h_d$는 전달되는 수압의 지연량이며 다음 관계를 얻을 수 있다.

$$\sigma'_{vq} < \sigma'_{vs} = \sigma'_{vo} \quad \cdots\cdots (7)$$

즉, 최종 수위저하량이 동등하더라도 수위저하속도가 커지면 명백히 지반중의 유효연직

응력은 초기 유효연직응력보다 작아진다. 또 식 (6)에서 전달되는 수압의 지연량($\gamma_w \cdot \Delta h_d$)이 초기 유효연직응력($\sigma'_{vo}$)보다 큰 경우에는 그 위치에서 이론상 $\sigma'_{vq} \leq 0$로 된다. 그러나 실제로 $\sigma'_{vq} < 0$이 될 수는 없으므로, $\sigma'_{vq} = 0$일 때 액상화 현상이 발생하게 된다.

파랑의 진행에 따라 해저지반 표면에는 수압이 주기적으로 변한다. 해저면의 수압을 P_b, 해저면의 최대수압을 P_o, 지반중의 수압의 정수위 상태에서의 변화량을 P_m이라 하고, 유효응력 이론에 의하면 수면하 지반중의 유효응력은 수위의 변동에 따라 무관하게 항상 일정한 값을 가진다. 그러나, 파랑이 작용하는 경우에는 기존의 개념과는 달리 유효응력이 변한다.

지반의 깊이 z에서는 $-(P_b - P_m)$의 과잉공극수압이 발생한다. 따라서 지반의 연직 유효응력(σ'_v)은 다음과 같다.

$$\sigma'_v = \sigma'_{vo} + (P_b - P_m) \quad \cdots\cdots (8)$$

여기서, 지반중의 토립자에 의한 연직 유효응력(σ'_{vo})과 연직 유효응력의 변화량($\Delta\sigma'_v$)은 다음과 같다.

$$\sigma'_{vo} = \gamma' \cdot z \quad \cdots\cdots (9)$$

$$\Delta\sigma'_v = \sigma'_v - \sigma'_{vo} = P_b - P_m \quad \cdots\cdots (10)$$

Fig. 3(a)는 파곡 및 파봉과 해저면에 대응하는 지반중의 수압변화를 나타낸 것이다. $P_o - P_m$은 해저 표면의 수압변화에 대한 지반속으로의 수압 전달의 시간적인 지연을 나타내며, 식 (6)의 $\gamma_w \cdot \Delta h_d$에 해당한다. 수압이 순간적으로 전달되면 지반중의 수압 변화량은 어느 깊이에서나 같으며, $P_o = P_m$으로 되고 지반중의 응력변화는 없다.

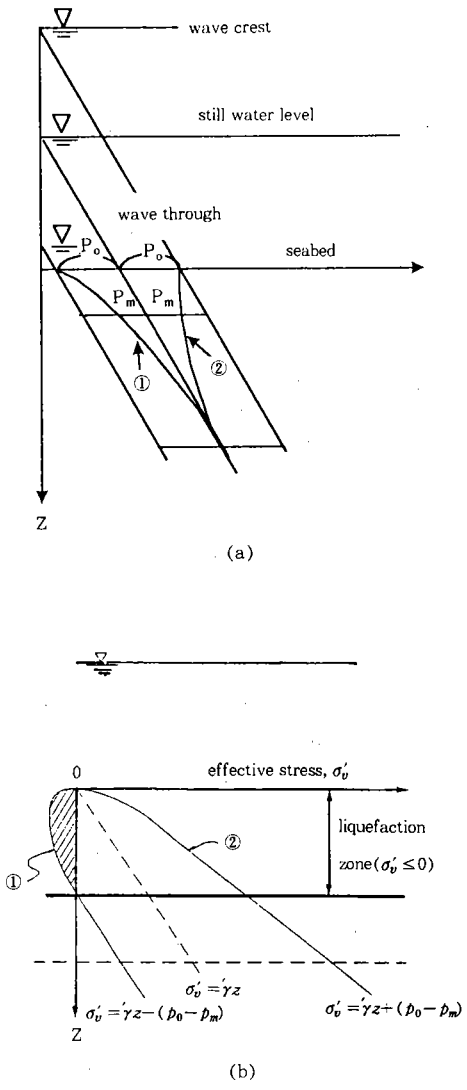

Fig. 3. Concept of wave-induced liquefaction and densification

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

$$\sigma'_v = \sigma'_{vo} - (P_o - P_m) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (11)$$

마찬가지 방법으로 파봉의 경우를 살펴보면, 지반중의 유효연직응력(σ'_v)은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma'_v = \sigma'_{vo} + (P_o - P_m) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (12)$$

즉, 유효연직응력(σ'_v)은 파곡의 경우에는 감소하고, 파봉의 경우에는 증가하는 경향을 보이게 된다. 그러나 σ'_v의 증감량은 P_m의 분포에 따라 달라진다.

점성토인 경우 평균유효응력으로 계산되지만, 사질토의 경우 임의의 시간 t에서 식 (8)의 유효연직응력이 $\sigma'_v \leq 0$이면 액상화가 일어날 가능성이 있게 된다. 따라서, 사질토의 경우 액상화의 조건은 다음과 같다.

$$\sigma'_{vo} \leq -(P_o - P_m) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (13)$$

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

$$P_b - P_m > 0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (14)$$

따라서, 식 (13)와 식 (14)로 부터 해저 지반의 액상화는 일정한 수면일 경우의 연직 유효응력(σ'_{vo}), 해저 표면의 수압(P_b), 지반내의 과잉공극수압(P_m)의 3요인에 의하여 지배를 받으며, 반면 고밀도화는 P_m 및 P_b의 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3(b)는 지반중의 수압이 Fig. 3(a)에 표시한 ①과 ②의 분포로 될 때 유효연직응력(σ'_v)의 개념도이다. 그림에서 ①의 분포에 대응하는 σ'_v은 어느 깊이까지는 음의 값으로 되는데, 이것은 그 깊이 이내의 지반에서 액상화가 발생함을 의미한다. 한편 ②에 대응하는 σ'_v은 정수면에 대응하는 σ'_{vo}보다 항상 커지며 그 차이만큼 유효응력의 증가를 초래하여 지반은 고밀도화 하게 된다. 이러한 현상은 하나의 파랑이 진행함에 따라 주기적으로 액상화와 고밀도화가 발생한다.

Ⅲ. 실험방법

1. 시료, 지반조건 및 설정파랑

본 연구에서 사용된 시료는 새만금지구에서 채취한 실트질 모래이며 비소성인 재료이다. 물리적 특성은 Table-1과 같고 시료의 자연상태 입도분포는 Fig. 4와 같다.

최근 간척 사업이 시행되고 있는 새만금지구의 파랑 조건을 Table-2와 같이 설정하여 모델화해서 적용했으며, 시료를 채취한 지역의 해저 지반 특성은 Table-3과 같다[13].

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

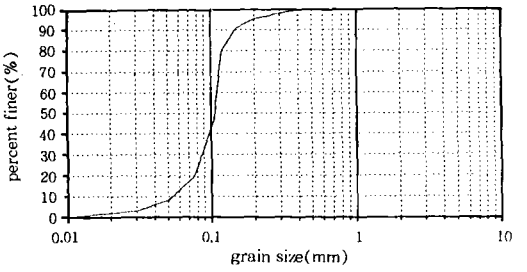

Fig. 1. Grain size distribution curve

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

2. 실험장치

본 연구에서는 파랑에 의해 파압이 해저로 전달되는 과정을 가압실린더를 이용해서 현장 조건을 모사할 수 있도록 실험장치를 고안하고, 이를 이용해서 토조에 장치한 공극수압계로 공극수압을 계측함으로써 불포화 상태의 수중 시료에서 발생하는 공극수압의 변화를 실험적으로 구명했다.

설정된 파랑 조건으로 변화시켜 지반의 상태를 측정할 수 있도록 만든 실험장치는 Fig. 5와 같다. 가로 1m, 세로 0.5m, 높이 2m의 직사각형 기둥형의 시험용 토조와, 파압발생부는 직류 서보모터(DC servo-motor)를 정·역회전시키면, 가압 실린더는 왕복운동을 하게되어 실제 파랑이 수면을 따라 진행할 때 파랑 에너지가 물 속으로 전달될 때와 같이 시료에 동적 하중을 전달하는 장치이며, 데이터 수집 및 제어부는 공극수압계(HVS-5,일본 Showa社)와 토압계로 이루어진 계측기(sensors)에 의하여 파압으로 발생하는 공극수압의 변동을 측정하며, 파형의 발생, 계측 및 데이터 수집 등 시험의 전 과정은 C 언어를 사용한 프로그램을 통해서 컴퓨터(PC)로 제어를 행한다. 컨트롤러 보드(motion controller board, 미국 MEI社)가 사용되었고 신호처리부는 증폭장치(amplifier)와 정류장치(filtering)로 구성되어 있다.

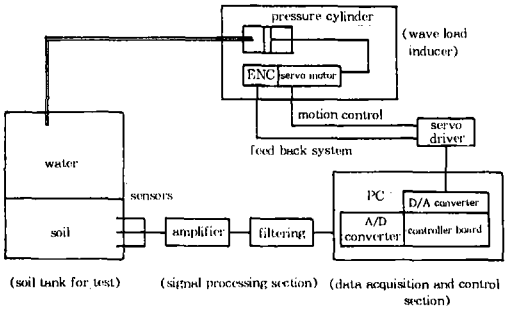

Fig. 5. Overall schematic diagram of the test set-up

3. 실험방법

실험에 사용된 불포화 시료는 孫(1995)이 고안한, 기포제를 이용한 불포화 시료 성형법[14]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)과 포화도 85%인 불포화 시료를 0.65m 깊이로 넣고, 그 위에 1.2m 깊이의 정수위를 두었으며, Table-4와 같이 sine 파형의 수압을 연속적으로 재하시켰으며, 시료 깊이의 10cm, 30cm 및 50cm 지점에서 공극수압의 변화를 측정하였다.

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	0.65	1.2	6.77	1.1	+0.2~ −0.2	sine wave
type 2	〃	〃	7.45	0.6	+0.26~ −0.26	〃

IV. 결과 및 고찰

1. 깊이별 공극수압의 변화

Fig. 6은 설정 파랑 type 1의 경우, 1.1kg/cm²의 정수압을 가한 후, 그 상태에서 −0.2kg/cm²→+0.2kg/cm²→+0.2kg/cm²→−0.2kg/cm²의 순으로 sine 파형의 수압을 연속

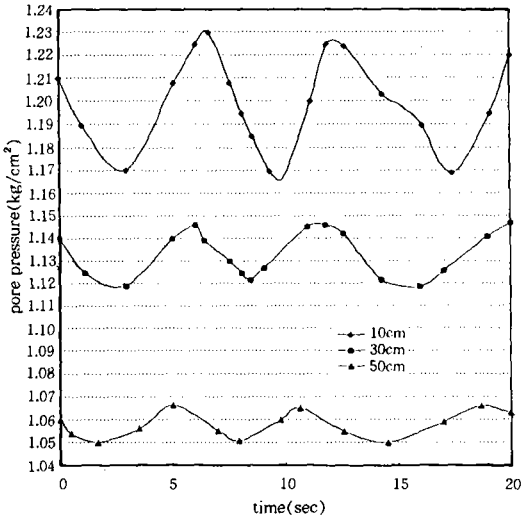

Fig. 6. Pore pressure vs. time for type 1

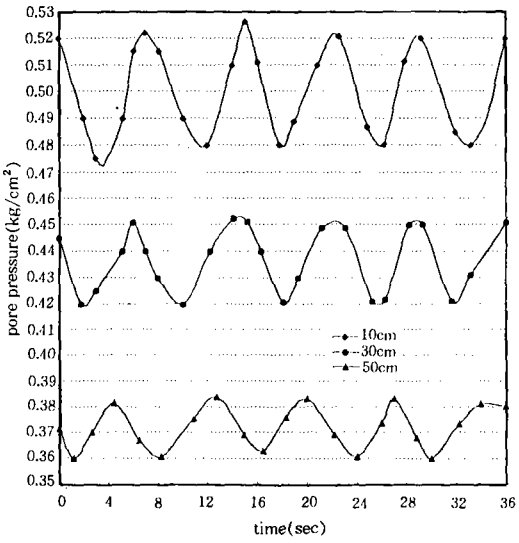

Fig. 7. Pore pressure vs. time for type 2

적으로 재하시켰을 때, 시험용 토조 내의 시료의 깊이 10cm, 30cm와 50cm 지점에서의 공극수압의 변화 상태를 나타낸 것이다.

파압이 0.90～1.30kg/cm²의 sine 파형으로 작용할 때 시료 깊이 10cm 지점에서는 같은 sine 파형으로 공극수압이 변하나 그 크기는 약 1.17～1.23kg/cm²으로 진폭이 감소되어 변동하며 30cm 지점에서는 1.118～1.146kg/cm², 50cm 지점에서는 1.05～1.065kg/cm²으로 진폭이 감소되어 변동한다.

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

Fig. 7은 설정 파랑 type 2의 경우, 0.6kg/cm²의 정수압을 가한 후, 그 상태에서 −0.26kg/cm² → + 0.26kg / cm² → + 0.26kg / cm² → −0.26kg/cm²의 순으로 sine 파형의 수압을 연속적으로 재하시켰을 때, 시험용 토조 내의 시료 깊이 10cm, 30cm 과 50cm 지점에서의 공극수압의 변화 상태를 도시한 것이다.

파압이 0.35～0.85kg/cm²으로 작용할 때 공극수압의 변화는 10cm 깊이에서 0.47～0.52kg/cm², 30cm 깊이에서 0.42～0.45kg/cm², 50cm 깊이에서 0.36～0.382kg/cm²으로 진폭이 감쇠하는 것으로 나타났다.

파압 발생장치로써 실제 파랑에 의해 해저로 파압이 전달되는 현상을 모사함을 알 수 있으며, 또한 파랑 하중에 의해 해저면에 발생하는 공극수압이 연속적으로 주기적 변동을 한다는 것을 알 수 있고, 반복적으로 재하되는 파랑 하중이 지반에 감쇠되어 가며 지중응력이 전달되는 것을 알 수 있다.

또한, Fig. 2에서 본 바와 같이 파랑에 의한 공극수압은 파랑의 반복에 따라 주기적으로 변동할 뿐 지진시에 볼 수 있는 것과 같은 현상, 즉 잔류량이 증가하지 않음을 보여주고 있다.

측정한 공극수압의 변화 상태를 보면 주기는 변동이 없으나 깊이가 증가할수록 공극수압의 진폭 즉, 절대적 크기는 급격히 감소하는 것을 알 수 있고, 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 따른 수압이 그대로 해저지반 표면에 전달되지 않을 수 있음도 유의하면, 파압 발생장치에 의한 수압 변화가 순간적으로 시험용 토조의 시료로 전달되지 않으므로 식 (6)에서 보는 바와 같이 시료의 깊이가 증가함에 따라 $\gamma_w \cdot \Delta h_d$ 만큼의 수압의 지연량에 의해 깊이가 작을수록 지반으로 전달되는 공극수압의 위상이 앞서가는 위상차가 생기는 것으로 판단된다.

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		
			10cm	30cm	50cm
type 1	1.1	±0.2	±0.03 (15%)	±0.014 (7%)	±0.0075 (3.8%)
type 2	0.6	±0.26	±0.021 (8.1%)	±0.016 (6.2%)	±0.011 (4.2%)

Note : + =at wave crest
− =at wave trough

2. 공극수압의 감쇠형태

Fig. 8의 횡축은 해저 표면으로 전달된 파압 ($\Delta\sigma$)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 감소되어짐을 알 수 있으며, 감소형태는 Fig. 3·4에서 본 바와 같으며 계측된

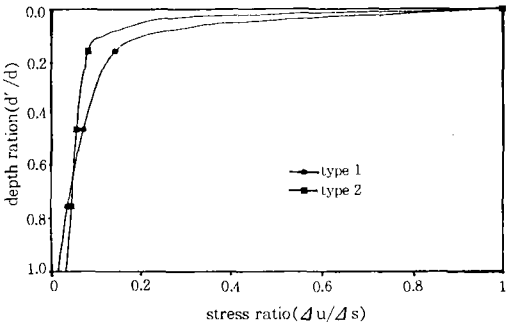

Fig. 8. Pore pressure changes vs. depth

값은 $P_o - P_m$과 같은 값이 된다. 또한 공극수압은 지층 두께의 약 80% 지점에서 파랑하중으로 인해 해저지반으로 파압의 4% 정도가 전달되는 것으로 나타나 파랑 하중으로 인한 공극수압의 증가에 따른 지중의 영향은 적을 것으로 판단된다.

3. 액상화 가능성과 고밀도화

식 (8)와 식 (9)으로 부터 지반의 깊이 z에서 지반중의 토립자에 의한 연직유효응력(σ'_{vo})과 파랑이 진행함에 따라 발생하는 과잉공극수압 $-(P_b - P_m)$의 관계에서 식 (13)의 조건, 즉 토립자에 의한 유효연직응력(σ'_{vo})보다 파랑의 진행에 의해 지반중에서의 공극수압변동(Δu)이 클 경우 액상화 현상이 일어나게 된다.

Fig. 9는 깊이(d)에 대한 공극수압 변화량(Δu)과 초기 유효응력(σ'_{vo}) 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 공극수압 변화량(Δu)이 초기유효응력(σ'_{vo}) 보다 큰 지점, 즉 그림에서 공극수압을 나타내는 곡선이 초기유효응력을 나타내는 곡선보다 위쪽에 있는 부분에서 액상화가 일어나며, type 1의 경우 약 23cm 지점에서, type 2의 경우 약 21cm 지점에서 액상화가 일어나는 것을 알 수 있다.

파랑이 진행함에 따라서 파봉(wave crest)

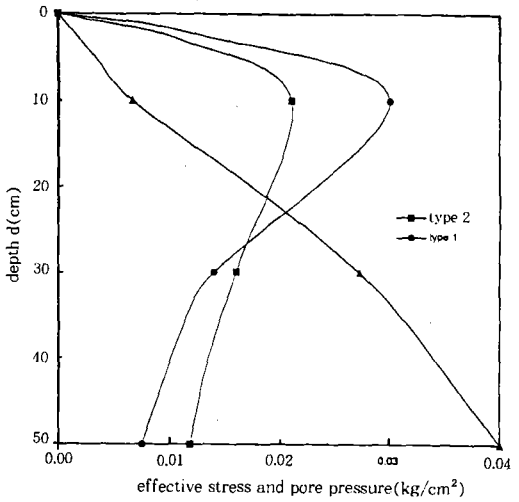

Fig. 9. Pore Pressure changes vs. depth

에서는 고밀도화 현상, 파곡(wave trough)에서는 액상화 현상이 파랑의 진행과 함께 주기적으로 일어난다는 것을 알 수 있으며, 초기압이 큰 경우 즉, 해저 표면에서의 수압(P_b)이 큰 type 1이 type 2 보다 액상화가 일어나는 깊이가 큰 것으로 나타났다.

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 파랑에 의해 해저로 전달되는 파압에 의한 불포화 해저 지반의 공극수압 변화를 확인하기 위해서 파압발생, 데이터 수집, 신호처리 등의 일련의 과정을 자동적으로 제어할 수 있는 실험장치를 제작하여, 서해안의 새만금지구에서 채취한 실트질 해사를 포화도 85%의 불포화 상태로 재성형한 시료를 이용해서 실제 파랑 현상을 모델화 한 실내 실험을 행하였으며, 지반중에서 발생하는 공극수압 분포의 변화를 계측을 통하여 측정하였다.

본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 파랑에 의해 해저로 전달되는 파압에 의해 수중 시료에서 발생하는 공극수압은 정수면을 중심으로 정(+)과 부(−)의 연속적인 변화를 보이며 주기적으로 변동하면서 발생할 뿐 잔류량이 누적되거나 증가하지 않았다.

2 지반중의 공극수압는 시료 깊이(z)가 증가함에 따라 급격히 감소하며, 시료 두께의 약 80% 지점에서 파압의 4% 정도가 전달되는 것으로 나타나 파압으로 인한 공극수압의 증가에 따른 지중의 영향은 적을 것으로 판단된다.

3. 파압에 의한 수압 변화가 순간적으로 시료로 전달되지 않으므로 시료깊이가 작을수록 지반으로 전달되는 공극수압의 위상이 수압의 지연량($\gamma_w \cdot \Delta h_d$) 만큼의 위상차를 나타내며 발생하는 것으로 사료된다.

4. 파랑이 진행함에 따라서 파봉(wave crest)에서는 고밀도화 현상, 파곡(wave trough)에서는 액상화 현상이 주기적으로 일어났으며, 초기압(initial pressure)이 큰 경우, 즉 해저면에서의 수압(P_b)이 큰 경우 액상화 깊이가 큰 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Lee, K. L. and J. A. Focht, 1967, Liquefaction Potential at Ekofisk Tank in North Sea, J. of the Geotechnical Engineering Div., ASCE, Vol. 93, No.SM1, pp. 47-70.
2. Lloret, A. and E. E. Alonso, 1980, Consolidation of Unsaturated Soils Including Swelling and Collapse Behaviour, Geotchnique, Vol. 30(4), pp. 449-447
3. Madsen, O. S., 1978, Wave-Induced Pore Pressures and Effective Stresses in a Porous Bed, Geotechnique, Vol. 28, No. 4, pp. 377-393.
4. Maenoi, Y. and T. Hasegawa, 1985, Eval-

uation of Wave-induced Pore Pressure in Sand layer by Wave Steepness, Coastal Engineering in Japan, Vol. 28, pp. 31-44.

5. Nageswaran, S., 1983, Effect of gas Bubbles on the Seabed Behaviour, D. Phil. Thesis, Oxford University
6. Okusa, S., 1985, Wave Induced Stresses in Unsaturated Submarine Sediments. Geotechnique, Vol. 35, No. 4, pp. 517-532.
7. Putnam, J. A., 1949, Loss of Wave Energy Due to Percolation in a Permeable Sea Bottom, Trans. Am. Geoghy. Un., Vol. 30, pp. 662-666.
8. Sleeth, J. F. A., 1970, Wave Induced Pressures in Beds of Sand, J. of Hydraul. Div., ASCE., Vol. 96(HY2), pp. 367-378.
9. Yamamoto, T., et al., 1978, On the Response of a Poro-Elastic Bed to Water Waves, J. of Fluid Mech., ASCE, Vol. 87, No. 1, pp. 193-206.
10. Zen, K. and H. Yamazaki, 1989, Wave-Induced Pore Pressures and Liquefaction in Seabed, Toshitokiso, Vol. 37, No. 6, pp. 63-68.
11. 善 功企, 山崎浩之, 渡邊 篤, 1986, 海底地盤の波浪の液狀化および變形機構. 海洋構 造物の基礎に關する Symposium, 第2篇 Symposium 論文集, 土質工學會, pp. 241-248.
12. 善 功企, 山崎浩之, 渡邊 篤, 1987, 海底地盤の波浪の液狀化および高密度化. 港灣技 硏報告, 第26卷, 第4號, pp. 125-180.
13. 농림수산부, 농어촌진흥공사, 1990, 새만금지구 방조제 단면 및 기초 처리에 관한 설계 검토
14. 손영환, 1995, 불포화토의 재성형과 압밀특성, 서울대학교 석사학위논문
15. 송창섭, 1994, 불포화토의 거동 예측을 위한 구성식의 개발, 서울대학교 박사학위논문

〈접수일자 : 1996년 7월 3일〉