

# 해저지반에서 측정한 잔류과잉간극수압에 대한 비교 연구

† 양순보

† 제주대학교 토목공학과

## Comparison Study on the Residual Excess Pore Water Pressure Observed in seabed

† Soonbo Yang

† Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

**요 약** : 파랑과 해저지반 그리고 해안·해양 구조물과의 상호작용은 지반공학뿐만 아니라 해안공학 분야에서도 중요한 이슈중의 하나이며, 파랑에 의해 해저지반 내부에 발생하는 응력 및 간극수압 거동의 파악은 다양한 해안·해양 구조물의 기초 설계 및 해저·연안 지반의 불안정성 검토에 있어서 중요한 과제이다. 해저지반의 불안정에 대한 문제 중, 파랑에 의한 해저지반의 액상화는 기존의 연구를 통하여, 두개의 메커니즘이 존재한다는 것이 밝혀졌으며, 이는 각각 파랑에 의해 해저지반 내부에 발생하는 과잉간극수압의 변동 특성 및 잔류 특성에 따른 것이다. 본 연구에서는 일본 시코쿠 코치(高知)현에 위치하고 있는 코치항에서 채취한 토사에 대한 동적 특성을 고려하여, 파랑에 의해 해저지반 내부에 발생하는 침투류에 의한 잔류과잉간극수압에 대하여 해석을 하였으며, 더 나아가, 코치항에서 측정한 값과 비교·분석을 하였다.

**핵심용어** : 해저지반, 해저지반의 불안정, 파랑에 의한 액상화, 침투류, 잔류과잉간극수압

**Abstract** : The interaction among wave, seabed and marine structure is an important issue in coastal engineering as well as geotechnical engineering. Understanding variations of stresses and pore water pressures generated in seabed induced by waves is important for civil engineers who have to design the foundation for various marine structures and verify the instability of seabed. In the matters on seabed instability, particularly, in the case of wave-induced liquefaction of seabed, it is turned out there are two different mechanisms through previous studies. These are caused by the transient or oscillatory nature and the residual or progressive nature of excess pore water pressure generated in seabed, respectively. In this study, it is analyzed dynamic characteristics of soils sampled in seabed around the port of Kochi, Japan, through the dynamic triaxial tests and the residual excess pore water pressure in the seabed induced by seepage force of wave. In addition, the calculated residual excess pore water pressures were compared with the field data observed in the port of Kochi.

**Key words** : seabed, instability of seabed, wave-induced liquefaction, seepage force, residual excess pore water pressure

### 1. 서 론

파랑과 해저지반 그리고 해안·해양 구조물과의 상호 작용은 지반공학 뿐만 아니라 해안공학 분야에서도 중요한 이슈 중의 하나이며, 파랑 또는 파랑과 구조물과의 상호작용에 의해 해저지반 내부에 발생하는 응력의 변화 및 간극수압 거동의 파악은 다양한 해안·해양 구조물의 기초 설계 및 해저·연안 지반의 불안정성 검토에 있어서 중요한 과제이다.

해저면 위를 진행하는 파랑은 해저면에 동적인 과압의 변동을 발생시키며, 이러한 과압의 변동은 해저지반의 액상화 또는 전단파괴와 같은 지반의 불안정을 유발할 수 있다. 이로 인해 해저지반의 침하, 해저 파이프 라인의 부상, 소파구조물 및 사석 마운드의 침하 등과 같은 심각한 공학적 문제를 야기할 수 있다.

해저면에 작용하는 파랑에 의한 수압변동을 고려한 해저지반의 불안정에 대한 문제는 Henkel(1970)에 의해 처음으로

다루어졌으며, 미시시피 하구의 미압밀 점토로 이루어진 해저 사면의 파괴가 반드시 중력과 미압밀 점토의 전단강도에 기인한다는 기존의 설명만으로는 부족하다는 점으로부터, 미소진폭과 이론에 의해 얻어진 해저면에 작용하는 수압 변동을 이용하여, 전응력법에 의한 해저사면의 원형파괴에 대하여 해석하였다.

해저지반의 불안정에 대한 문제 중, 파랑에 의한 해저지반의 액상화는 기존의 연구를 통하여 두개의 메커니즘이 존재한다는 것이 밝혀졌다. 첫 번째는 과잉간극수압의 순간적인 변동 특성에 의한 것으로, 해저지반 내부로 전달되면서 간극수압의 진폭의 감소와 위상의 처짐에 의해 동반된다(Madsen, 1978; Okusa, 1985; Yamamoto et al., 1978; Zen and Yamazaki, 1990). 두 번째는 과잉간극수압의 점진적인 잔류 특성에 의한 것으로, 이는 반복적인 파랑의 작용에 의해 발생하며, 잔류과잉간극수압의 발생 원인은 과압이 지반 내부로 전달되면서 발생하는 지반 내부의 침투류(seepage

† 교신저자 : 연희원, sbyang@jejunu.ac.kr 064)754-3450

(주) 이 논문은 "중복파에 의해 발생하는 해저지반 내부의 잔류과잉간극수압의 발생 특성"란 제목으로 "2012 공동학술대회 한국항해항만학회 논문집(경주교육문화회관, 2012.6.21.-23, pp. 15-17)"에 발표되었음.

force)의 변동에 따른 전단응력의 변화(Ishihara and Yamazaki, 1984)와 방과제와 같은 구조물이 존재할 경우, 파랑과 구조물과의 상호작용에 의해 구조물 저면에 발생하는 전단응력의 변화(Lee and Focht, 1975; Rahman et al., 1977; Zen et al., 1986)에 의해 발생한다. 그리고 파랑에 의해 해저지반 내부에 발생하는 침투류에 의한 과잉간극수압의 변동 특성과 잔류 특성을 동시에 고려한 연구(Yang and Zen, 2006) 및 파랑과 구조물과의 상호작용에 의한 해저지반 내부의 간극수압에 대한 비교연구(Yang and Zen, 2007)도 이루어지고 있다.

파랑에 의한 해저지반의 액상화에 기인한 기반시설의 피해에 대해서 몇몇의 기존의 연구에서 보고되고 있으며(Christian et al., 1974; Dunlap et al., 1979; Zen et al., 1986), 최근에 들어서, 2012년 제7호 태풍 카눈(7월 16일~19일)의 내습 시, 제주특별자치도 강정해군기지에 거치 예정인 케이슨에서 세굴 및 파랑에 의한 해저지반의 액상화가 그 원인으로 여겨지는 침하가 발생하였다.

본 연구에서는 일본 코치항에서 채취한 토사에 대한 동적 특성을 고려하여, 파랑에 의해 해저지반 내부에 발생하는 침투류에 의한 잔류과잉간극수압에 대한 수치해석 및 코치항에서 예측된 값과 비교·분석을 하였다. 그리고 발생하는 과잉간극수압(변동성분+잔류성분)에 의해 방과제 전면의 해저지반에서 파랑에 의한 액상화가 발생할 수 있음을 보였다.

## 2. 잔류과잉간극수압에 대한 지배방정식

### 2.1 지배방정식

파랑에 의한 해저지반 내부의 간극수압의 거동을 지배하는 기본 방정식을 구하기 위해서, 물의 흐름은 Darcy의 법칙을 따르며, 흐름의 연속성을 고려함으로써, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{k_x}{r_w} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{k_z}{r_w} \frac{\partial u}{\partial z^2} = \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} + n C'_w \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

여기서,  $k_x$ 와  $k_z$ 는 각각  $x$ 와  $z$ 방향의 해저지반을 구성하는 토사의 투수계수;  $r_w$ 는 간극수의 단위중량;  $u$ 는 잔류과잉간극수압;  $t$ 는 시간;  $n$ 은 간극률;  $\epsilon_v$ 는 체적 변형률;  $C'_w$ 는 공기를 포함한 간극수의 압축률을 나타내며, 다음 식과 같이 정의된다.

$$C'_w = S_r C_w + \frac{(1 - S_r)}{P_{wo}} \quad (2)$$

여기서,  $C_w$ 는 물의 압축률( $4.9 \times 10^{-10} m^2/N$ );  $S_r$ 은 포화도;  $P_{wo}$ 는 절대압력을 나타낸다(Verruijt, 1969).

파랑은 지진에 비해 주기가 길기 때문에, 잔류과잉간극수압의 발생을 다루는데 있어서, 지반의 배수성은 고려하여야 할 중요한 요인 중 하나이며, 투수계수가 큰 모래지반에서는 발생한 과잉간극수압이 비교적 쉽게 소산이 일어나 과잉간극수압이 잔류하지 않을 가능성도 생각되어진다. 본 연구에서는 배수의 영향을 고려한 부분배수조건에서의 과잉간극수압의 발생에 대하여, Rahman et al.(1977)에 의해 제안된 이론을 적용하여 해석을 하였다.

간극수압의 소산을 고려하기 위하여,  $\Delta t$ 의 시간 동안 임의의 지반 요소에서의 순수 간극수압의 변화를  $\Delta u$ 라 정의하고, 비배수 상태에서 반복적인 전단응력의 작용에 의한 간극수압의 발생률을 나타내는 방정식을  $\Psi$ 라 정의하면,  $\Delta t$ 의 시간 동안의 비배수 상태에서의 간극수압의 상승은  $\Psi \Delta t$ 라 할 수 있으며, 소산되는 간극수압의 양은  $\Psi \Delta t - \Delta u$ 라 할 수 있다.

비배수 상태에서 반복적인 전단응력의 작용에 의한 간극수압의 증가는 흙 요소 내부로의 간극수의 유입에 기인하기보다 임의 요소 내부의 흙 알갱이의 재배열에 의한 것이다. 따라서 지반 내부의 임의 요소에 대한 체적의 변화는 유효응력의 변화,  $\Delta \sigma'_v$ , 에 기인한다고 가정할 수 있으며, 이러한 유효응력의 변화는 간극수압의 소산과 일치하며, 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta \sigma'_v = -(\Psi \Delta t - \Delta u); \Delta \sigma'_v = \Delta u - \Psi \Delta t \quad (3)$$

따라서  $\Delta t$ 의 시간 동안, 지반 내부의 임의 요소의 응력-변형률 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta \epsilon_v = m_v (\Delta u - \Psi \Delta t) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} = m_v \left( \frac{\partial u}{\partial t} - \Psi \right) \quad (5)$$

여기서,  $m_v (= \Delta \epsilon_v / \Delta \sigma'_v)$ 는 체적압축계수를 의미한다.

식 (1)과 (5)를 결합하면, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{k_x}{r_w m_v} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{k_z}{r_w m_v} \frac{\partial u}{\partial z^2} = \left( 1 + n \frac{C'_w}{m_v} \right) \frac{\partial u}{\partial t} - \Psi \quad (6)$$

식 (6)을 이용하여, 잔류과잉간극수압을 평가하기 위해서는, 파랑에 의한 해저지반 내부의 반복적인 전단응력에 의한 비배수 상태에서의 간극수압의 발생률  $\Psi$ 를 나타내는 방정식이 수립되어야 한다. 본 연구에서는 비배수 상태에서의 과잉간극수압의 증가를 엔도크로닉(Endochronic) 기법에 기반을 둔 다음의 식으로 평가하였다(Finn and Bhatia, 1980).

$$\Psi = \frac{\sigma'_{mo} (C_A / C_B) (2\gamma C_B e^{\lambda\gamma})}{1 + \kappa C_B} \frac{\partial N}{\partial t} \quad (7)$$

여기서,  $\sigma'_{mo}$ 는 초기평균유효응력;  $N$ 은 진동수;  $C_A, C_B, \lambda$ 는 실험 정수;  $\gamma$ 는 전단 변형율의 진폭;  $\kappa$ 는 다음의 식으로 나타낸다.

$$\kappa = 2N\gamma \exp(\lambda\gamma) \quad (9)$$

### 2.2 경계조건

파랑에 의해 해저지반에 발생하는 잔류과잉간극수압에 대한 경계 조건은 다음의 식 (10)과 (11)과 같다.

$$\text{해저면}(z=0); u(t)=0 \quad (10)$$

$$\text{불투수 고정층}(z=-d); \frac{\partial u}{\partial x} n_x + \frac{\partial u}{\partial z} n_z = 0 \quad (11)$$

여기서,  $n_x$ 와  $n_z$ 는 각각 경계에 연직인 단위 벡터를 의미한다.

### 3. 일본 코치(高知)항에서 채취된 토사의 특성

Fig. 1은 일본 시코쿠, 코치현에 위치하고 있는 코치항을 나타내고 있다. 코치항은 천연항으로 태평양의 거친 환경에 면해 있으며, 태풍의 내습 후, 세굴 또는 소파 블록의 침하 등과 같은 다양한 피해가 관측되고 있다.

Fig. 2는 코치항의 동 방파제(East Breakwater)의 단면을 나타내고 있으며, 방파제의 저면 및 전면의 해저지반에 계측용 간극수압계가 설치되어 있다. 그리고 P1·P2·P3·P4는 각각 간극수압계의 설치 지점을 나타내고 있다.

Fig. 3은 2004년 제23호 태풍 도카게(10월 13일~22일)의 일본 열도 내습 시, 관측된 유의파고( $H_{1/3}$ )와 주기( $T_{1/3}$ )를 나타내고 있으며, 미소진폭과 이론에 기초한 해저면에 작용하는 수압 변동식 식 (12)에 대입함으로써, 시간당 구조물 전면의 해저면(절점)에 작용하는 파압을 계산하였다. 그리고 구조물 배후의 절점에는 수심에 의한 정수압( $=\rho_w gh$ )을 적용하였다.

$$p = \frac{H}{2} \rho_w g \frac{1}{\cosh kh} + \rho_w gh \quad (12)$$

여기서,  $H$ 는 파고;  $\rho_w$ 는 해수의 밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $k$ 는 파수,  $h$ 는 수심을 나타낸다(Horikawa, 2004).

Fig.4는 코치항 동 방파제(East Breakwater) 주변의 해저에서 채취된 토사의 입도분포곡선, 물리적 성질 그리고 액상

화가 일어나기 쉬운 입도분포의 범위(Ishihara, 1998)를 나타내고 있다. 채취된 시료는 20~30%의 세립토를 함유하고 있으며, 입도 분포는 액상화가 일어나기 쉬운 입도분포의 범위 안에 포함되어 있다. 그리고 Lee and Fitton(1969)에 의하면  $D_{50}$ 이 0.1mm부근의 세립토에서 액상화가 발생하기 쉬우며, 이보다 작거나 클 때 액상화에 대한 저항이 커진다고 한다.

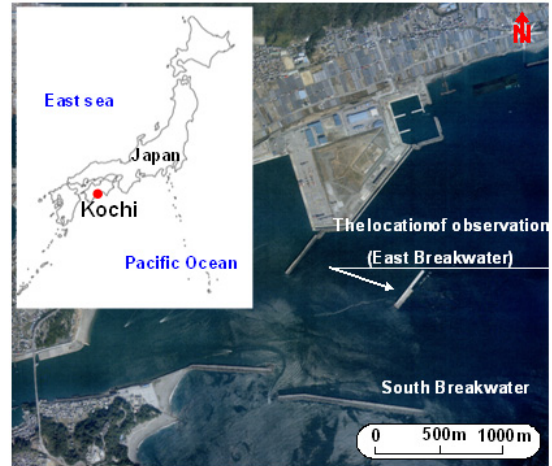


Fig. 1 The Port of Kochi

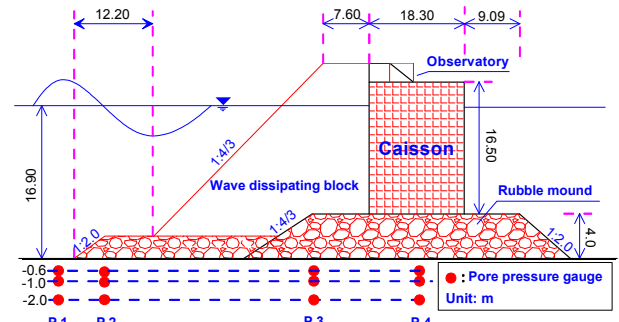


Fig. 2 The cross section of East Breakwater

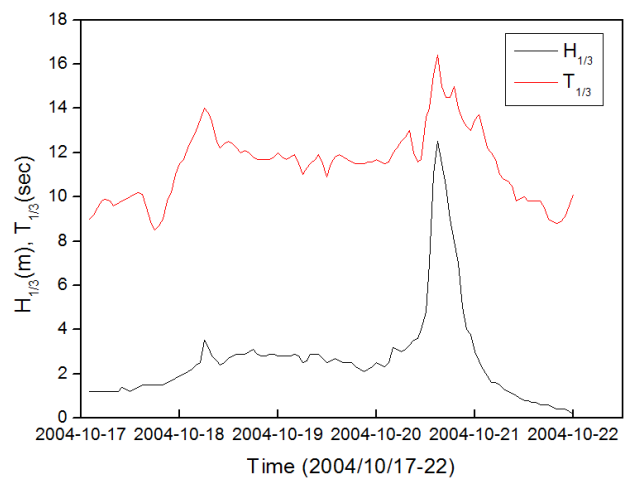


Fig. 3 The variation of significant wave height( $H_{1/3}$ ) and period( $T_{1/3}$ ) during the 23rd typhoon in 2004

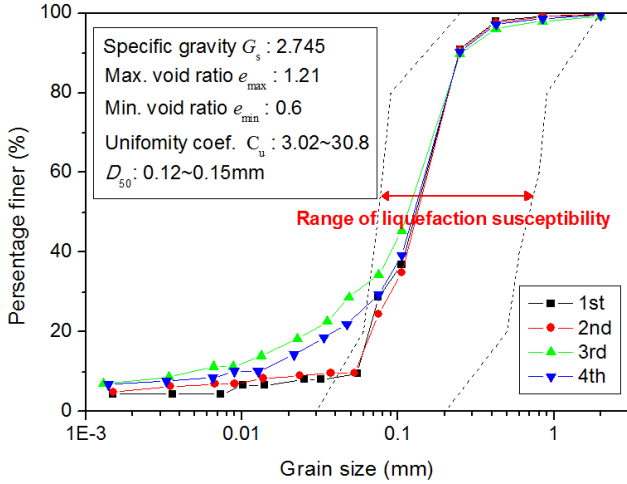


Fig. 4 Grain size accumulation curve of soils sampled in port of Kochi

Fig. 5는 상대밀도( $D_r$ )에 따른 온도  $15^\circ C$ 에 대한 채취된 시료의 투수계수를 나타내고 있으며, 상대밀도( $D_r$ )가 증가함에 따라 투수계수는 선형으로 감소하는 것을 알 수 있다.

채취된 시료에 대한 액상화 특성을 파악하기 위하여, 비배수 조건에서 진동삼축시험(JGS 0541-2000)을 실시하였다. 시험은 직경  $50mm$ , 높이  $100mm$ 의 공시체에 대하여 이루어졌으며, 유효구속압력( $\sigma'_{mo}$ )과, 배압(Back pressure)은 각각  $50kPa$ ,  $200kPa$ 을 가하였다. 그리고 압밀 후, 주파수가  $0.1Hz$ 인 정현파 형태의 하중( $\tau = \sigma_d/2$ )을 반복적으로 가하였다.

Fig. 6은 비배수 상태에서의 진동삼축시험에 의해 얻어진, 상대밀도( $D_r$ )와 전단응력비( $\tau/\sigma'_{mo}$ )의 변화에 따른 진동수( $N$ )에 대한 과잉간극수압비( $u/\sigma'_{mo}$ )를 나타내고 있다. 과잉간극수압비( $u/\sigma'_{mo}$ )가 증가한다는 것은 발생한 과잉간극수압만큼 지반의 유효응력이 감소한다는 것을 의미하며, 과잉간극수압비( $u/\sigma'_{mo}$ )가 1.0 가까이 도달했을 때, 지반의 유효응력은 없어지며, 물과 같은 상태(액상화)가 됨을 의미한다. Fig. 6을 통하여 상대밀도( $D_r$ )가 작을수록 그리고 전단응력비( $\tau/\sigma'_{mo}$ )가 커질수록 진동수( $N$ )가 늘어남에 따라 과잉간극수압비( $u/\sigma'_{mo}$ )가 빠르게 상승하는 것을 알 수 있으며, 이는 액상화가 빠르게 발생할 가능성이 크다는 것을 의미한다.

Fig. 6에 나타낸 진동수( $N$ )에 대한 과잉간극수압비( $u/\sigma'_{mo}$ )를 이용하여, 상대밀도( $D_r$ )에 따른 식 (8)의 비배수 상태에서의 과잉간극수압의 증가( $\psi$ )를 표현하기 위한 각각의 실험정수  $C_A$ ,  $C_B$ ,  $\lambda$ 을 파악하기 위해, Fig. 7에 과잉간극수압비( $u/\sigma'_{mo}$ )와  $\kappa$ 의 관계를 나타내었다.  $\kappa$ 는 소위 손상계수라고 불리며, 예측된 비배수 상태에서의 과잉간극수압의 발생을 정규화하기 위해 제안되어진 변수이다. 그리고 비선형 자승곡선 피팅법(Non-linear least curve fitting method)

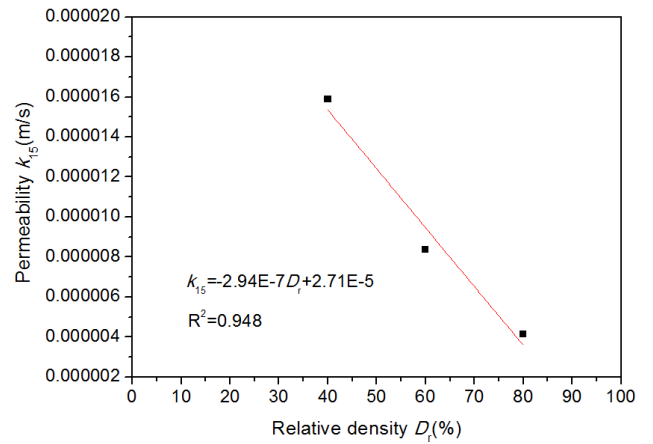


Fig. 5 Permeability to the temperature  $15^\circ C$  against relative density( $D_r$ )

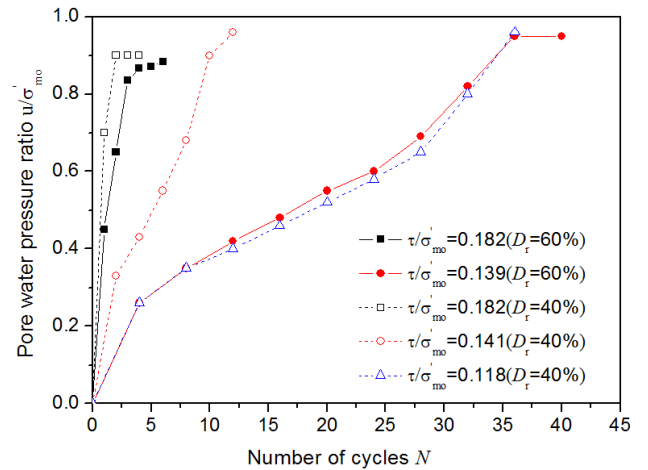


Fig. 6 Pore water pressure ratio( $u/\sigma'_{mo}$ ) against the number of cycles( $N$ )

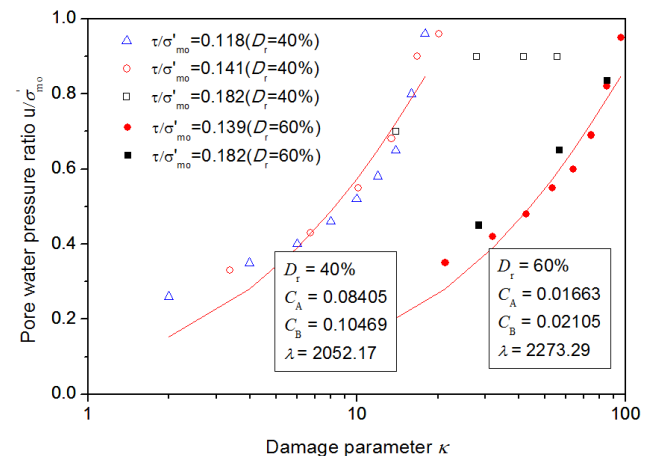


Fig. 7 Pore water pressure ratio( $u/\sigma'_{mo}$ ) against damage parameter( $\kappa$ )

를 이용하여, 각각의 상대밀도( $D_r$ )에 대한 손상계수( $\kappa$ )와 과

잉간극수압비( $u/\sigma'_{mo}$ )의 관계를 근사곡선으로 나타내었으며, 이에 대한 실험정수  $C_A$ ,  $C_B$ ,  $\lambda$ 를 나타내었다.

#### 4. 수치해석 결과와 계측 값과의 비교 및 고찰

Fig. 8과 Table 1에 수치해석에서 사용된 유한요소 메시와 입력 값을 각각 나타내었다. 그리고 수치해석상, 해저지반은 깊이  $-8.6m$ 에서 모래층과 실트질 모래층으로 나누었다고 가정하였으며, 입력 값은 삼축압축시험(JGS 0523), 진동삼축 시험, 투수시험(JIS A1218)을 통해 얻어진 결과를 사용하였다. 해저지반은 Biot(1941)의 압밀방정식에 기초한 선형탄성체로서 해석을 하였으며, 과랑에 의한 해저지반 내부의 변위 및 간극수압의 변동성분을 계산하였다. 그리고 계산된 전단 응력의 변동성분을 이용하여, 잔류과잉간극수압을 계산하였다.

과랑에 의해 해저지반 내부에 발생하는 침투류에 의한 잔류과잉간극수압비에 대한 수치해석 결과와 일본 코치항 동방파제(East Breakwater)의 각각의 설치 지점 P2, P3, P4의 상재하중에 대한 설치된 간극수압계에서 계측된 잔류과잉간극수압의 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

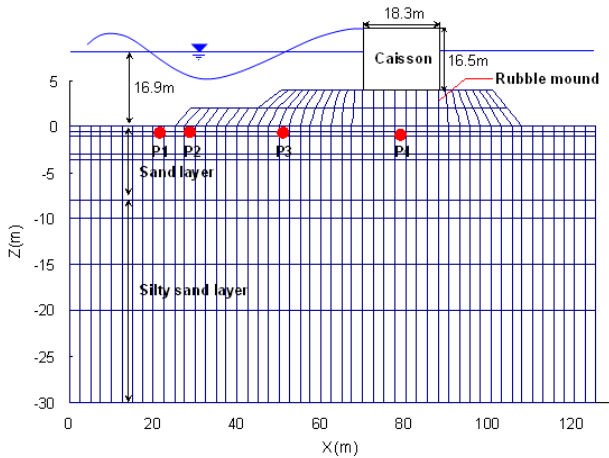


Fig. 8 Finite element mesh

Table 1 Input parameters

	Rubble mound	Sand layer	Silty sand layer
$k_x = k_z$ (m/s)	$1 \times 10^{-1}$	$9 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$
$m_v$ ( $m^2/MN$ )	$0.1 \times 10^{-3}$	$84 \times 10^{-5}$	0.2
$C_A$	-	0.01663	-
$C_B$	-	0.02105	-
$\lambda$	-	2273.29	-
$E$ (kPa)	$2 \times 10^8$	29400	35280
$\nu$	0.3	0.4	0.4
$n$	0.45	0.375	0.375
$S_r$	1.0	1.0	1.0

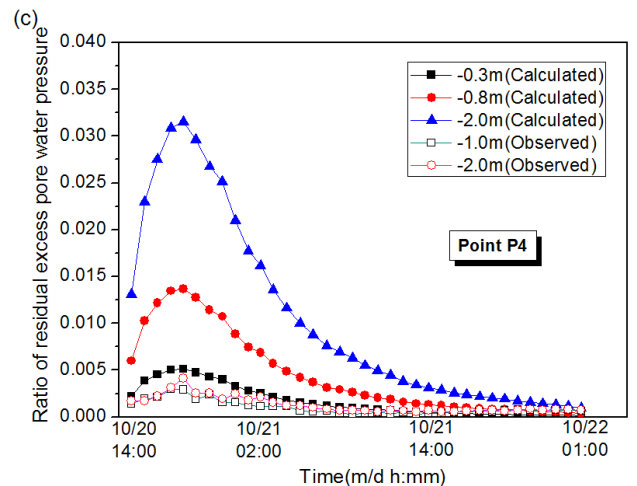
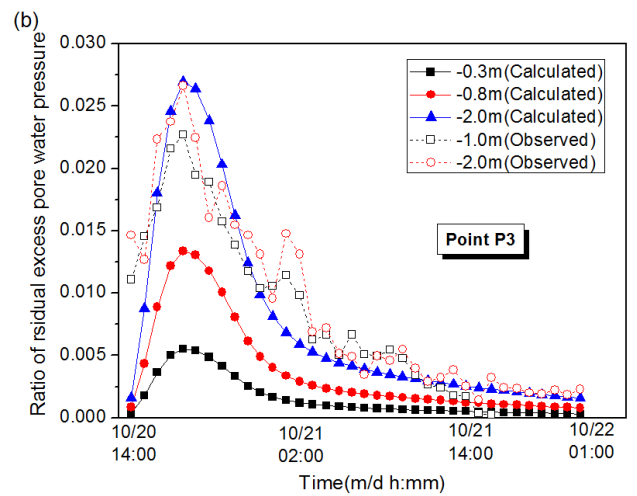
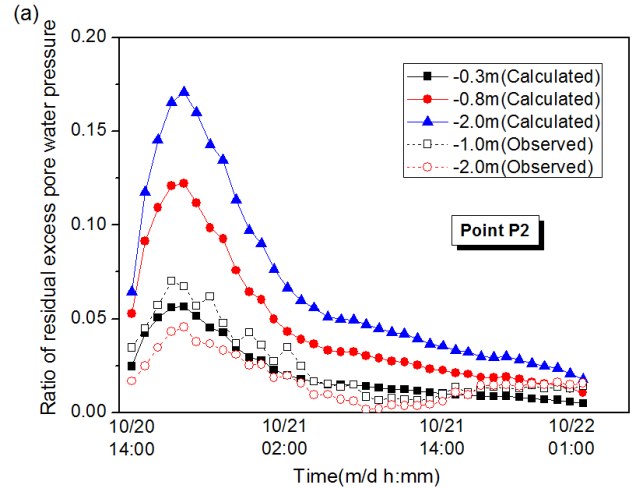


Fig. 9 Comparison of analytical results with observed data for residual excess pore water pressure: (a) Point P2; (b) Point P3; (c) Point P4

참고로, 설치 지점 P1에서 계측된 값은 태풍의 내습 시 간극수압계의 유실로 인해 얻을 수 없었다. Fig. 9를 통해, 각각의 설치 지점에서 계측된 값과 해석결과의 증-감이 유사함을 알

수 있다. 그리고 해석 결과의 경우, 해저면의 경계조건에 의해 지반이 깊어질수록 잔류과잉간극수압이 증가함을 알 수 있다. 그러나 수치해석상 케이슨 전면의 소파구조물에 의한 파의 감쇠를 고려하고 있지 않으며, 각 지점에서의 상재하중을 고려한 실험정수를 입력 값으로 사용하지 않음으로서, 대체로 계측 값에 비해 큰 해석결과를 얻을 수 있었다. 설치 지점 P1의 계측 값의 경우, -2m지점 보다 -1m지점의 과잉간극수압이 크다는 것을 알 수 있으며, 이는 -2m지점의 지반 특성이 -1m지점보다 과잉간극수압이 잔류하기 어려운 지반이라고 생각되며, 지반 내부의 특성을 자세히 고려함으로써 해결할 수 있다고 판단된다.

Fig. 10은 코치항 동 방파제(East Breakwater) 주위의 해저지반에 대한 수치해석 결과인 과잉간극수압(잔류 성분+변동 성분)비의 분포를 나타내고 있다. Fig. 10을 통하여, 동 방파제(East Breakwater)의 바다 쪽에 설치된 사석 마운드의 끝 부분에서 과잉간극수압비가 1.0에 가까운 것을 알 수 있다. 이를 통해, 해저지반의 액상화가 발생할 가능성이 있으며, 이에 따른 설치 지점 P1에 설치된 간극수압계의 유실 및 사석 마운드의 침하를 설명할 수 있다. 그리고 장기적으로 케이슨 전면부의 소파구조물의 붕괴 및 케이슨에 구조적 문제점을 야기할 수 있다고 판단된다.

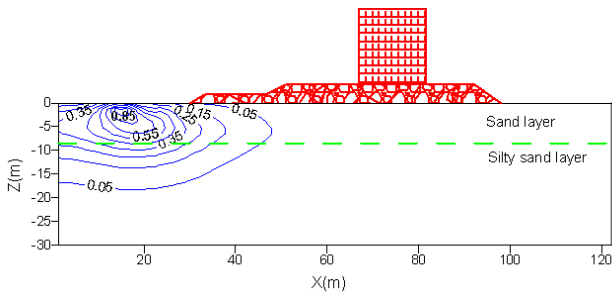


Fig. 10 Distribution of total excess pore water pressure ratio at the peak of wave height

## 5. 결 론

본 연구에서는 일본 시코쿠 코치현에 위치하고 있는 코치항 동 방파제(East breakwater) 주변의 해저지반에서 채취한 토사에 대한 물리시험(비중시험, 입도분포시험, 투수시험)과 진동삼축시험을 통해서, 물성 특성 및 동적 거동 특성을 파악하였으며, 얻어진 시험결과를 이용하여, 수치해석을 하였다. 더 나아가, 2004년 제23호 태풍 도카게(10월 13일~22일)의 일본 열도 내습 시, 동 방파제(East breakwater) 주변의 해저지반에 설치된 간극수압계로부터 계측된 값을 수치해석 결과와 비교·분석을 하였다. 그리고 파랑에 의해 방파제 주위의 해저지반에서 발생하는 과잉간극수압(변동성분+잔류성분)의 분포를 나타내었다. 본 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 동 방파제(East breakwater) 주변의 해저지반에서 채취

한 토사는 액상화가 일어나기 쉬운 입도분포의 범위 안에 포함되어 있으며,  $D_{50}$ 이 0.1mm 부근에 있었다. 이러한 결과로 고(高)파랑의 내습 시, 파랑에 의한 해저지반의 액상화가 쉽게 일어날 수 있다고 판단된다.

- (2) 잔류과잉간극수압비에 대한 수치해석 결과와 계측 값의 비교를 통해서, 각각의 설치 지점에서 계측된 값과 해석 결과의 증·감이 유사함을 알 수 있었으며, 파랑의 내습 조건 및 해저지반의 특성을 자세히 고려함으로써, 해석 결과의 정도를 높일 수 있다고 판단된다.
- (3) 케이슨 주변의 지반에 있어서, 과잉간극수압(잔류 성분+변동 성분)에 대한 수치해석 결과를 통해, 케이슨의 바다 쪽에 설치된 사석 마운드 근처에서 파랑에 의한 해저지반의 액상화가 발생할 가능성이 컸으며, 이에 따른 여러 공학적 문제가 예상되어진다.

## 참 고 문 헌

- [1] Biot, M. A.(1941), "General theory of three dimensional consolidation, Journal of applied physics", Vol. 12, No. 2, pp. 155-164.
- [2] Christian, J. T., Taylor, P. K., Yen, J. K. C. and Erali, D. R.(1974), "Large diameter underwater pipeline for nuclear plant designed against soil liquefaction", Offshore Technology Conference, Vol. 2, pp. 597-602.
- [3] Dunlap, W., Bryant, W. R., Williams, G. N. and Suheyda, J. N.(1979), "Storm wave effects on deltaic sediments-Results of SEASWAB I and II. Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions", Norwegian Institute of Technology, Vol. 2, pp. 899-920.
- [4] Finn, W. D. L. and Bhatia, S. K. (1980), "Prediction of seismic pore water pressure", Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 201-206.
- [5] Henkel, D. J.(1970), "The role of waves in causing submarine landslides", Geotechnique, Vol. 20, No. 1, pp. 75-80.
- [6] Horikawa, K.(2004), "Coastal Engineering", Univ. of Tokyo Press(in Japanese).
- [7] Ishihara, K.(1998), "Soil Dynamics", Kajima Institute Publishing Co.(in Japanese).
- [8] Ishihara, K. and Yamazaki, A.(1984), "Analysis of wave-induced liquefaction in seabed deposits of sand", Soils and Foundations, Vol. 24, No. 3, pp. 85-100.
- [9] Lee, K. L. and Fitton, J. A.(1969), "Factors affecting



the cyclic loading strength of soil”, *Vibration Effects of Earthquake on Soils and Foundations*, ASTM STP 450, pp. 71-95.

- [10] Lee, K. L. and Focht, J. A.(1975), “Liquefaction potential of Ekofisk Tank in North Sea”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 100, No. GT1, pp. 1-18.
- [11] Madsen, O. S.(1978), “Wave-induced pore pressures and effective stresses in a porous bed”, *Geotechnique*, Vol. 28, No. 4, pp. 377-393.
- [12] Okusa, S.(1985), “Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments”, *Geotechnique*, Vol. 35, No. 4, pp. 517-532.
- [13] Rahman, M. S., Seed, H. B. and Booker, J. R.(1977), “Pore pressure development under offshore gravity structures”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 103, No. GT12, pp. 1419-1436.
- [14] Verruijt, A.(1969), “Elastic storage of aquifers”, Chap. 8 of *Flow Through Porous Media*, De Wiest, R. J. M., Academic Press Publishers.
- [15] Yamamoto, T., Koning, H. L., Sellmeijer, H. and Hijum, E. V.(1978), “On the response of poro-elastic bed to water waves”, *Journal of Fluid mechanics*, Vol. 87, No. 1, pp. 193-206.
- [16] Yang, S. and Zen, K.(2006), “Combined analysis of wave-induced pore pressure in the seabed beneath a breakwater”, *Proceedings of the 4<sup>th</sup> Asian Joint Symposium on Geotechnical and Geo-Environmental Engineering*, pp. 407-410.
- [17] Yang, S. and Zen, K.(2007), “Analysis of the wave-induced pore pressure observed in the seabed beneath a breakwater”, *Proceedings of the 13<sup>th</sup> Asian Regional Conference of Soil Mechanics & Geotechnical Engineering*, Vol. I, Part II, pp. 1035-1038.
- [18] Zen, K., Umehara, Y. and Finn, W. D. L.(1986), “A case study of the wave-induced liquefaction of sand layers under the damaged breakwater”, *3rd Canadian Conference on Marine Geotechnical Engineering*, pp. 505-520.
- [19] Zen, K. and Yamazaki, H.(1990), “Oscillatory pore pressures and liquefaction in seabed induced by ocean waves”, *Soils and Foundations*, Vol. 30, No. 4, pp. 147-161.

---

원고접수일 : 2012년 11월 06일

심사완료일 : 2013년 02월 06일

원고채택일 : 2013년 03월 05일