

파랑으로 인한 불포화된 다층 해저지반의 거동; 준해석적 방법

Wave-Induced Response of Unsaturated and Multi-layered Seabed; A Semi-analytical Method

박 종 관^{*1}
Park, Jong-Kwan

Rahman, M. S.^{*2}
Rahman, M. S.

Abstract

Wave-induced response, liquefaction and stability of unsaturated seabed are studied. The unsaturated seabed is modeled as a fluid-filled poro-elastic medium. The coupled process of fluid flow and the deformation of soil skeleton is formulated in the framework of Biot's theory. The resulting governing equations are solved using a semi-analytical method to evaluate the stresses and pore water pressure of unsaturated and multi-layered seabed. The semi-analytical method can be applied to calculate a pore pressure and the stresses of in anisotropic inhomogeneous seabed. The results indicate that the degree of saturation influences mostly on the magnitudes of a pore pressure and the stresses of unsaturated and multi-layered seabed. Based on the pore pressure and stresses in seabed, the analysis on the possibilities of liquefaction and shear failure was performed. The results show that the maximum depth of shear failure occurrence is deeper than the maximum liquefaction depth.

요 지

파랑에 의한 불포화된 해저지반의 거동, 액상화와 전단파괴에 대한 연구이다. 불포화된 지반은 유체가 채워진 다공성 탄성체로 모델화 하였다. 유체의 흐름과 토립자의 변형은 Biot의 이론에 따른 지배방정식으로 나타내었다. 이 방정식은 준해석적 방법으로 풀어 불포화된 다층의 지반에 대하여 응력과 간극수압을 평가하였다. 준해석적 방법은 기존의 해석방법과 달리 다층의 이방성 지반을 연속적으로 해석할 수 있다. 해석결과에 의하면, 지반의 포화도는 불포화된 다층의 지반에서 응력과 간극수압의 크기에 가장 큰 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다. 또한, 해석결과를 토대로 지반의 액상화 발생과 전단파괴에 대한 검토를 실시하였으며, 그 결과 최대 전단파괴가 발생된 깊이가 최대 액상화 발생지역 보다 깊은 것으로 나타났다.

*1 정희원, 서울산업대학교 토목공학과 교수

*2 North Carolina State University, 교수

1. 서론

최근 국내에는 인천 신공항 및 서해대교를 비롯한 많은 대형구조물이 해저지반에 설치되고 있다. 해저구조물은 파랑에 의하여 서서히 구조물의 기초가 침식되어 구조물의 상태가 불안정하게 된다. 그래서 결국에는 파랑으로 인해 해안구조물의 기초가 파괴되어 구조물의 전체 안정이 위협받게 된다. 파랑에 의한 지반의 거동은 대단히 복잡하게 나타나고 있다. 파랑이 진행되는 동안 해저지반은 물과 지반의 경계면에서 반복적으로 파랑에 의해 파괴가 발생한다. 특히 국내의 남해안과 서해안같이 수위가 얇은 연안에 높은 파랑이 발생할 경우, 해저지반에 과잉간극수압으로 인하여 침식 또는 액상화 현상이 발생하여 지반이 불안정하게 되어 해안구조물 기초의 안정에 중대한 영향을 미치게 된다.

국내 불포화된 해저지반에 대한 자료는 아직 연구 발표된 사례는 없지만, 불포화된 해저지반은 세계 여러 곳에서 찾아볼 수 있다. 즉, 미국남부의 멕시코 만과 미시시피 삼각주, 캐나다 동부의 Grand banks와 Scotia Shelf, North Sea, 서부 Irish Sea, Adriatic Sea, Arabian Sea 그리고 남중국해(South China Sea)등에서 완전히 가스가 완전히 용해되지 않은 불포화 층이 비교적 얇은 깊이의 해저에서 발견되었다(Wheeler, 1990). Hovland와 Gundmestad(1984)는 북해의 불포화된 해저지반이 기포의 이동으로 인하여 침식되고 있다고 보고하였다.

파랑에 의하여 다공질 지반에 발생하는 응력과 간극수압에 대한 연구는 많은 연구가 진행되고 있

다. 초기에는 토립자와 물은 비압축성이며, 흐름은 Darcy의 법칙에 의하여 지배된다는 가정하였다. Maden(1978)는 최초로 해저지반을 Biot(1941) 이론을 통하여 해석하였다. Yamamoto et al. (1981)와 Okusa(1985)는 불포화된 해저지반에 대한 해석을 실시하였다. Zen과 Yamazaki (1990)는 실내시험과 유한차분법을 이용하여 파랑에 의한 반복적인 액상화와 다짐현상에 대하여 연구하였고, 그 결과에 의하면 파랑하중은 지진하중과는 달리 해저지반을 주기적으로 반복하여 액상화와 다짐현상을 발생시키며, 파랑에 의해 발생하는 지반의 액상화 깊이는 지진에 의한 액상화 깊이보다 훨씬 얇은 것으로 발표하였다.

최근에 Rahman et al. (1994)은 포화된 지반을 다공성 탄성체로 모델화한 지배방정식을 준해석적 방법으로 풀어 포화 해저 지반의 응력과 간극수압을 평가하였다. 본 연구에서는 준해석적 방법을 다층의 불포화된 지반에 적용하여 해저지반의 응력과 변형에 대한 거동을 해석하고자 한다. 기존의 Yamamoto et al.(1981)와 Okusa (1985)의 해석방법이 지반정수가 다른 다층으로 구성된 퇴적층을 연속적으로 다루기 어려운 반면에 비하여 준해석적 방법은 이방성 및 다층의 퇴적층에 적용이 가능하다. 해석 사례에서는 불포화된 균질한 지반과 그리고 불포화 층을 포함하여 토질정수가 서로 다른 두 층으로 구성된 지반을 대상으로, 응력과 간극수압의 크기와 분포를 구하고자 한다. 또한 해석결과를 토대로, 지반의 포화도와 토질정수가 지반의 거동에 미치는 영향을 분석하고, 파랑으로 인한 해저지반의 액상화 현상과 전단파괴 발생의 가능성을 비교 검토한다.

2. 파랑에 의한 해저지반의 이론적 거동

2.1 이차원 평면파에 대한 준해석적 방법

실제로 파랑에 의한 지반의 거동은 대단히 복잡하나, 공극탄성이론(Biot, 1941)을 통하여 해석할 수 있다. 공극탄성이론은 완전 포화된 지반뿐만 아니라, 부분적으로 포화된 지반에도 적용이 가능하다. 이 이론에서는 공기와 물이 압축성이며, 공기는 물을 통하여 분산된다고 가정한다. 이러한 가정은 포화도가 85%에서 99.9%의 높은 포화상태를 가지고 있는 해저지반에 적용할 수 있다.

균일한 지반에 그림 1과 같은 평면파가 진행할 경우, 파랑에 의하여 해저지반에 작용하는 수압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_o = P_o \cos(\alpha x - \omega t) \quad (1)$$

여기서, α 는 파수($=2\pi/L$), ω 는 파 빈도수($=2\pi/T$), L 은 파장, T 는 파 주기, x 는 파 진행 방향의 좌표, t 는 시간, 그리고 P_o 는 동수압의 진폭이다. 이 동수압의 진폭은 식 (2)와 같다.

$$P_o = \frac{\rho_w g H}{2 \cosh(\alpha d_w)} \quad (2)$$

여기서, ρ_w 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, H 는 파고 그리고 d_w 는 수심이다.

만일 간극수가 압축성이고, 간극수의 흐름이 Darcy의 법칙에 따른다면, 파랑에 의해 지반에 발생하는 변위와 간극수압은 탄성체의 파동방정식 (3)과 다공질 탄성체에 흐르는 유체의 유동방정식 (4)를 통하여 나타낼 수 있다.

$$G \nabla^2 u_x + (\lambda + G) \frac{\partial \epsilon_v}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$G \nabla^2 u_y + (\lambda + G) \frac{\partial \epsilon_v}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

$$G \nabla^2 u_z + (\lambda + G) \frac{\partial \epsilon_v}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial z}$$

$$(\lambda + 2G) \nabla^2 u_z = \nabla^2 p,$$

$$C_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + C_y \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + C_z \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = (\lambda + 2G) \left(\frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} + \eta \beta \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) \quad (4)$$

$$\text{여기서 } \lambda = 2G \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \right),$$

$$\nabla^2(\cdot) = \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial z^2}$$

G 는 전단계수, ν 는 포아송 비, u_x, u_y, u_z 는 변위, ϵ_v 는 체적변형률, x, y 와 z 는 방향을 나타내는 좌표 값, p 는 간극수압, $C_{x,y,z}$ 는 $k_{x,y,z} / (\rho_w g)$ 이고, k_x, k_y 와 k_z 는 각각 x, y 와 z 방향의 투수계수, η 는 간극률 그리고 β 는 간극수의 압축지수이다. 간극수의 압축지수는 아래 식 (5)와 같다.

$$\beta = \frac{1}{K'} = \frac{1}{K_w} + \frac{1 - S_r}{P_{wo}} \quad (5)$$

여기서, K' 는 간극수의 체적탄성계수, K_w 는 간극수의 실제 체적탄성계수, S_r 는 지반의 포화도 그리고 P_{wo} 는 대기압을 포함한 절대 간극수압이다.

파랑에 의하여 해저지반에 발생하는 응력과 변위는 위 식 (3)과 (4)로부터 구할 수 있다. Rahman et al.(1994)은 준해석적 방법을 통하여 위 방정식을 직접 푸는 대신, 응력과 변위의 진폭(amplitude)에 대하여 해석함으로써 동적해석방법을 정적해석방법으로 바꾸어 해석하였다. 준해석적 방법에 대한 대략적인 개념은 다음과 같다

이차원 평면파가 그림 1에서 보는 바와 같이 한 방향인 x 방향으로 진행한다고 가정하면 해저지반

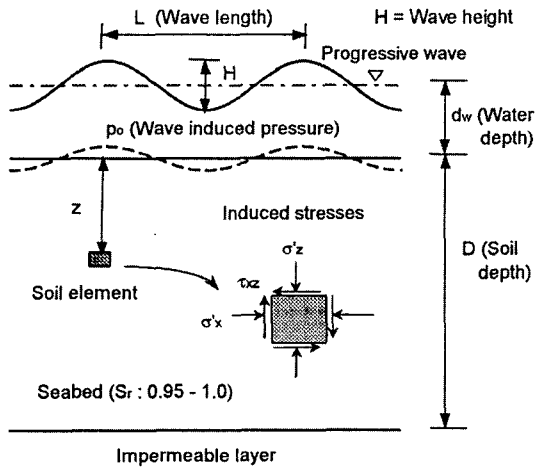


Fig. 1. Wave induced stresses in seabed

에 발생하는 응력과 변형의 장기적 안정해(long-term steady-state solution)는 다음과 같다.

$$(u_x, u_z, p, \epsilon_v, \sigma'_x, \sigma'_z, \tau_{xz}) = (U_x, U_z, P, E_v, S_x, S_z, S_{xz}) \exp i(ax - \omega t). \quad (6)$$

여기서, p , σ'_x , σ'_z 와 τ_{xz} 는 지반에 발생하는 간극수압, 유효수직응력, 유효수평응력과 전단응력이며, $(U_x, U_z, P, E_v, S_x, S_z, S_{xz})$ 는 각 변수의 진폭을 나타낸다. 준해석적 방법에 필요한 거동식은 식(6)을 식(3)과 (4)에 직접 대입하여 미분함으로써 아래 식(7)과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} G \left(\frac{d^2 U_x}{dz^2} - \alpha^2 U_x \right) + i\alpha(\lambda + G)E_v &= i\alpha P \\ G \left(\frac{d^2 U_z}{dz^2} - \alpha^2 U_z \right) + (\lambda + G) \frac{dE_v}{dz} &= \frac{dP}{dz} \quad (7) \\ (\lambda + 2G) \left(\frac{d^2 E_v}{dz^2} - \alpha^2 E_v \right) &= \frac{d^2 P}{dz^2} - \alpha^2 P \\ \frac{C_x}{s} \frac{d^2 P}{dz^2} - \frac{C_h}{s} \alpha^2 P &= (\lambda + 2G)(E_v + \eta\beta P) \end{aligned}$$

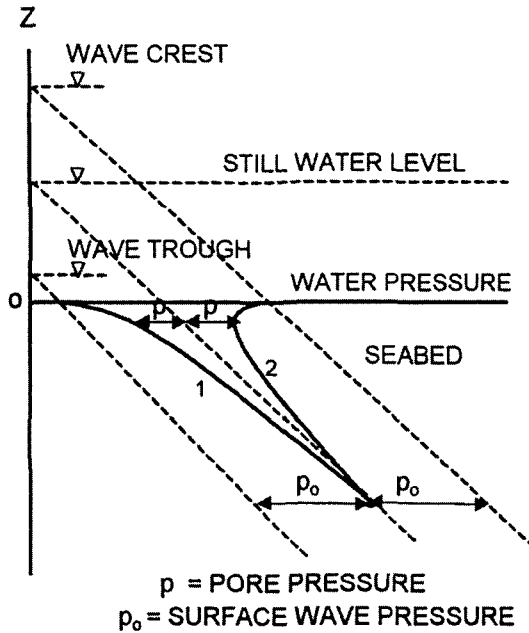
여기서, $s = -i\omega$ 와 $C_h = C_x = k_x(\lambda + 2G) / \rho_w g$ 이다.

- 파랑에 의한 해저지반에 발생하는 변위, 간극수압과 유효응력에 대한 진폭 $(U_x, U_z, P, E_v, S_x, S_z, S_{xz})$ 은 위 식(7)의 미분방정식을 풀고, 지층에 대한 경계조건을 적용하여 구한다. 식 (7)은 지반의 특성치가 서로 다른 이방성 지반과 여러 층의 비균질한 지반에 적용할 수 있다. 일정한 두께를 가진 여러 해저퇴적층이 불투수 암반 층위에 존재한다면, 경계조건으로는 다음과 같다. 즉,
- (1) 해저지반 표면에는 연직응력과 전단응력이 발생하지 않는다.
 - (2) 불투수층에서는 변위가 발생하지 않으며, 수직방향으로는 흐름이 발생하지 않는다.
 - (3) 상부와 하부의 두 퇴적층 경계에서는 응력과 변형량은 같다.

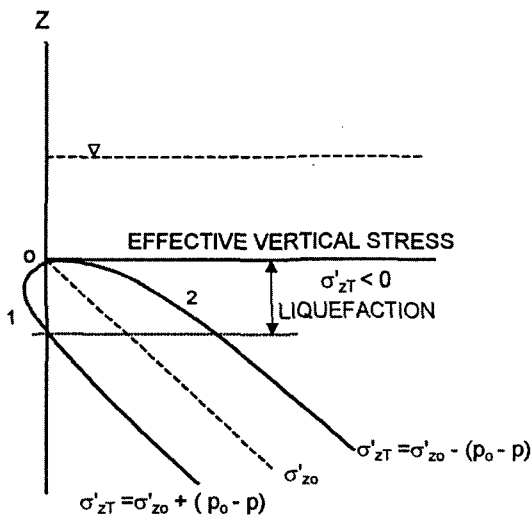
2.2 해저지반의 액상화와 전단파괴의 가능성에 대한 발생기준

파랑에 의한 해저지반에 발생하는 액상화 현상과 전단파괴의 가능성에 대한 응력상태의 조건에 대해서는 아직 명확하지 않다. 일반적으로 액상화 현상은 비배수상태에서 반복하중으로 지반 내에 발생된 과잉간극수압으로 인하여 유효응력이 영이 되는 상태를 나타내며, 전단파괴는 지반내의 응력상태가 전단파괴기준의 응력상태에 도달되는 경우에 발생한다. 최근에 Zen과 Yamazaki (1990)는 실내시험과 현장시험을 통하여 파랑에 의한 액상화 발생기준을 제시하였으며, Zen et al.(1998)은 Mohr-Coulomb의 파괴 기준을 기초로 하여 파랑에 의한 해저 지반의 전단파괴 기준을 제시하였다. 본 연구에서는 파랑에 의한 해저지반의 액상화와 전단파괴의 가능성을 위 두 기준을 바탕으로 검토 하고자 한다.

반복적인 파랑하중에 의한 해저지반에 발생하는 간극수압과 유효수직응력의 상태은 그림 2와 같다. 파랑에 의하여 발생하는 간극수압 $p(z, t)(=p)$ 는



(a) Pore water pressure



(b) Effective vertical stress

Fig. 2. Liquefaction criteria
(After Zen and Yamazaki, 1990)

파랑이 진행되는 동안 파의 위치에 따라 그림 2(a)의 1과 2처럼 파랑이 없을 때의 정수압 $u(z, 0)$ 을 기준으로 반복적인 증감을 계속한다. 이때 발생된 간

극수압은 깊이가 깊어짐에 따라 감소한다. 따라서 유효수직응력 $\sigma'_{zT}(z, t)$ 은 간극수압에 따라 아래 식(8)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma'_{zT}(z, t) &= \sigma_{zT}(z, t) - u(z, t) \\ &= \sigma'_z(z, 0) + (p(0, t) - p(z, t)) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $\sigma_{zT}(z, t)$ 는 전체수직응력(= $\sigma_z(z, 0) + p(0, t)$), $u(z, t)$ 는 전체간극수압(= $u(z, 0) + p(z, t)$)이며, $\sigma'_z(z, 0)$ 는 초기 유효수직응력 그리고 $p(0, t)(= p_0)$ 는 지표면에서 작용한 압력이다.

액상화 발생조건은 그림 2(b)에서 보는바와 같이 수직유효응력이 영이 되는 상태($\sigma'_{zT}(z, t) \leq 0$)로 정의됨으로 식(9)와 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma'_z(z, 0) \leq -(p(0, t) - p(z, t)) \quad (9)$$

여기서, $\sigma'_z(z, 0)$ 는 $\gamma'z$ 이고, γ' 은 지반의 수중 단위중량이다. 액상화 발생기준 식(9)을 평균 유효응력 σ_{mo} 개념으로 다시 쓰면 아래 식(10)과 같다.

$$(\text{액상화 발생기준}) \quad \sigma_{mo} \leq -(p_0 - p) \quad (10)$$

여기서, σ_{mo} 는 $(1+2K_0)\gamma'z/3$ 이고, K_0 는 정지 토압계수이다.

전단파괴의 기준은 Mohr-Coulomb의 파괴 기준을 적용하여 응력각(stress angle)의 개념으로 나타낼 수 있다. 응력각은 그림 3에서 보는 바와 같이 파랑에 의해서 지반에 발생하는 전체유효응력에 대한 Mohr의 원으로부터 구하며, 전체유효응력은 초기 상태의 유효응력과 파랑에 의한 발생하는 유효응력의 합을 나타낸다. 만일 지반내의 어느곳에서 파랑에 의한 전체유효응력의 응력각(ϕ')이 지반의 내부마찰각(ϕ'_f)보다 클 경우($\phi' \geq \phi'_f$), 그 곳에는 전단파괴가 발생된다고 간

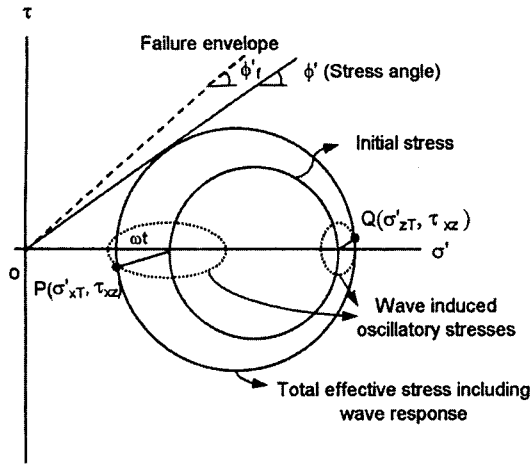


Fig. 3. Mechanism of wave-induced shear failure

주할 수 있다. 이러한 상태를 식으로 나타내면 아래와 같으며 이를 전단파괴기준이라 정의한다.

(전단파괴 발생기준)

$$\phi' = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(\sigma_{zT} - \sigma_{xT})^2 + 4\tau_{xz}^2}}{\sigma_{zT} + \sigma_{xT}} \right) \geq \phi_f \quad (11)$$

여기서, σ_{zT} 는 전체유효수직응력(= $\gamma'z + \sigma'_z$), σ_{xT} 는 전체유효수평응력(= $K_o\gamma'z + \sigma'_x$)이고 τ_{xz} 는 전단응력이다.

3. 해저지반의 거동 및 안정 해석결과

본 해석에서는 불포화된 균질한 지반과 그리고 불포화 층을 포함하여 토질정수가 서로 다른 다층으로 구성된 지반을 준해석적 방법으로 해석하고, 그 결과를 통하여 지반의 포화도와 토질정수의 영향, 액상화 현상 그리고 전단파괴 발생의 가능성을 검토한다. 해석에 필요한 입력파랑은 새만금 지역에 적용했던 한국 서해안의 설계파랑(장등, 1993)을 적용하고자 한다. 표 1은 입력파랑 그리고 표 2는 해석지반의 대한 토질 조건을 나타낸 것이다. 표 1에서 보는바와 같이 한국 서해안의 설계 파랑

Table 1. The conditions of the input wave

수심, d_w (m)	7
파고, H (m)	5.2
파주기, T (sec.)	7.45
파장, L (m)	60
파랑경사, H/L	0.087
한계파랑경사, $(H/L)_{cr}$	0.089

Table 2. The material properties coarse, medium, fine sand and silt.

지 층	Coarse sand	Medium fine sand	Fine sand	Silt
투수계수, k (m/sec.)	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-7}
전단계수, G (kPa)	15000	10000	10000	7500
포아송 비, ν	0.33	0.33	0.33	0.33
간극률, η	0.3	0.3	0.3	0.3

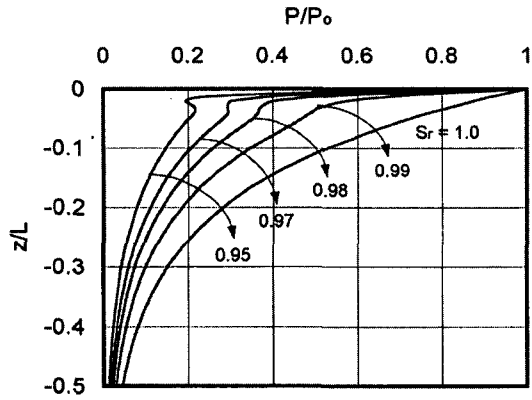
* 불투수층까지의 퇴적층 전체 깊이 D 는 파장 L (=60 m)로 가정

경사(H/L)는 한계 파랑경사와 거의 같다. 한계 파랑경사는 얕은 바다에서 파가 부서지는 한계를 나타내는 파랑의 경사로 Wiegel(1964)은 아래 식 (12)와 같이 정의하였다.

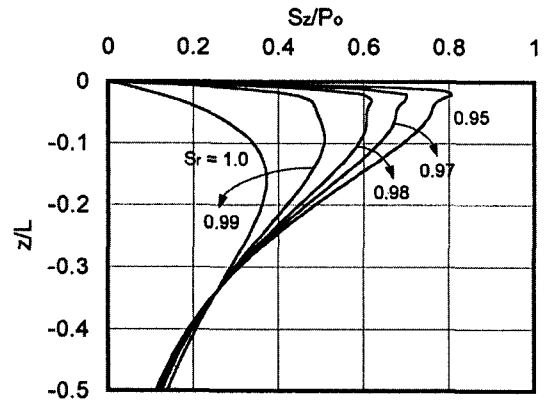
$$\left(\frac{H}{L} \right)_{cr} = \frac{1}{7} \tanh \left(\frac{2\pi d_w}{L} \right). \quad (12)$$

3.1. 불포화된 한 층의 균질한 지반

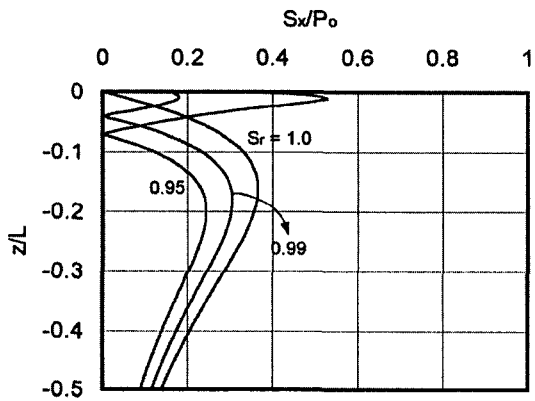
한 층의 균질한 지반에 대하여 포화도와 토질정수에 따른 영향을 검토하기 위하여 해석을 실시하였다. 해저지반은 포화도가 95%에서 100% 사이의 fine sand 그리고 퇴적층의 두께는 파장의 길이인 60m로 가정하였다. 해석결과에 따른 간극수압과 유효응력에 대한 진폭은 파랑으로 인해 해저표면에 작용한 최대수압으로 나누어 정규화하고, 정규화된 간극수압(P/P_o), 유효수직응력(S_z/P_o), 유효수평응력(S_x/P_o)과 전단응력(S_{xz}/P_o)은 지반



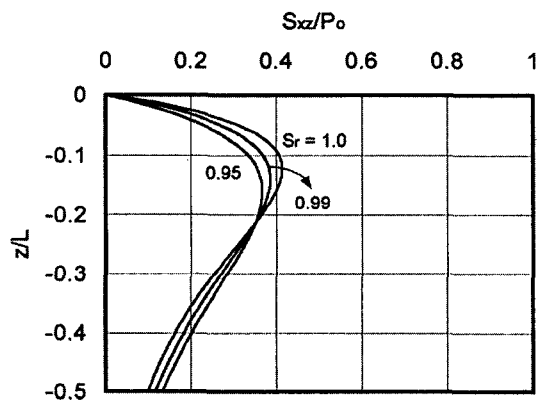
(a) The normalized pore water pressure



(b) The normalized effective vertical stress

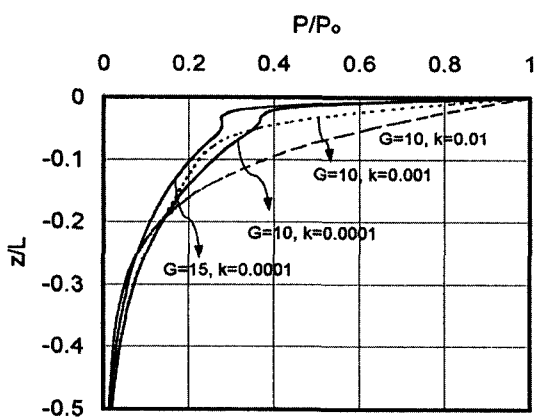


(c) The normalized effective horizontal stress

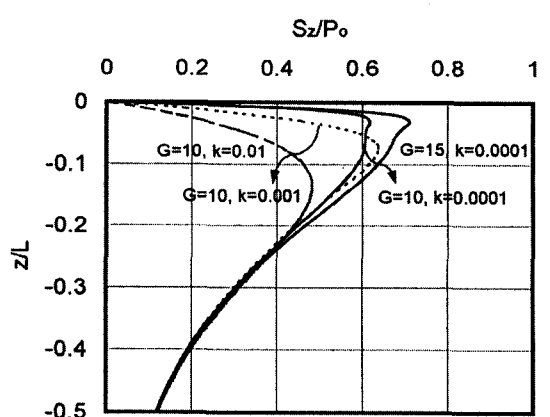


(d) The normalized shear stress

Fig. 4. The normalized stress in a homogeneous seabed with the various degrees of saturation



(a) The normalized pore water pressure



(b) The normalized effective vertical stress

Fig. 5. The normalized stress in a homogeneous seabed with the various coefficients of permeability and shear modulus ($S_r=0.98$, Units: G =GPa. and k =m/sec)

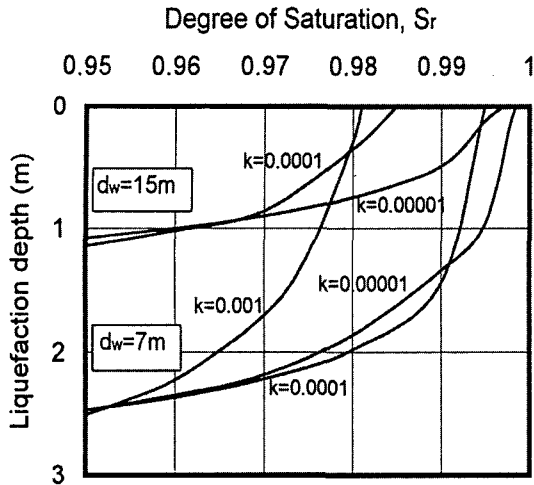


Fig. 6 Maximum depth of liquefaction in a homogeneous seabed (Unit: k =m/sec.)

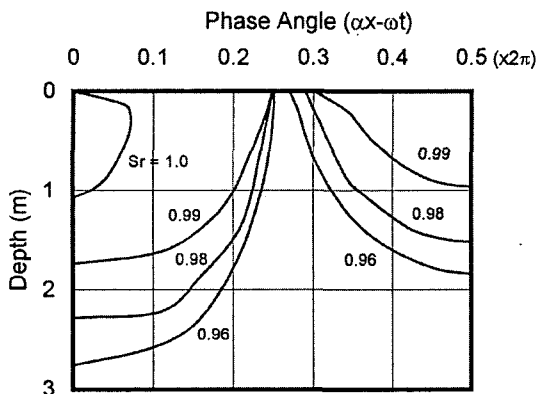


Fig. 7 The possible shear failure zone in a homogeneous seabed ($d_w=7m$, $k=0.0001$ m/sec)

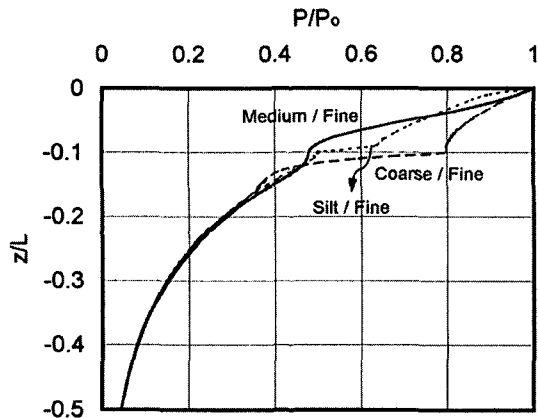
의 깊이에 따라 나타내었다.

그림 4는 지반의 포화도에 따른 정규화된 간극수압과 유효응력을 나타낸 것이다. 포화도가 100%인 완전 포화된 지반에 발생된 응력을 기준으로 지반의 포화도가 적을수록 불포화 지반에 발생된 간극수압은 지반의 깊이에 따라 급격히 감소되며, 유효수직응력은 급격히 증가되는 경향을 보이고 있다. 반면, 수평응력의 거동은 포화도에 따라 복잡하게 나타나고 있으며 전단응력은 큰 영향을 받지 않고

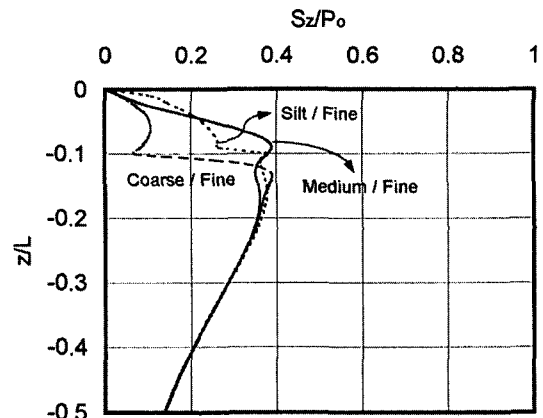
있다. 그림 5는 포화도가 98%로 가정된 지반에 대하여 서로 다른 투수계수와 전단계수를 적용한 간극수압과 유효수직응력을 나타내고 내고 있다. 투수계수와 전단계수는 불포화된 지반의 간극수압, 유효응력에 영향을 미치고 있다. 지반의 투수계수가 적을수록 간극수압은 감소하며, 유효수직응력은 증가한다. 또한 지반의 전단계수가 클수록 간극수압은 감소하며 유효수직응력은 증가하는 경향을 나타내고 있다. 지반의 투수계수가 0.01m/sec보다 큰 지반의 경우 포화도가 응력발생에 거의 영향을 미치지 않았다.

그림 6은 포화도와 투수계수에 따른 균질한 지반에 대하여 최대 액상화깊이를 식(10)에 의하여 구한 결과를 나타낸 것이다. 파랑하부의 최저점이 지반을 지날 때 지반에 작용하는 과압 p_o 는 (-)의 최대 값을 갖는다. 한편 불포화 지반에서 포화도가 적을수록 과압에 의해 발생된 (-)값의 간극수압이 적어져서 식(10)의 $-(p_o - p)$ 값이 평균유효응력보다 큰 지역이 발생하게 된다. 이 지역의 최대 깊이를 최대 액상화 깊이로 정의하였다. 최대 액상화 깊이는 포화도가 적을수록 깊어지며 완전 포화된 지반은 액상화가 발생하지 않았다. 한편 지반에 파랑의 상부가 지날 때는 액상화가 발생하지 않으므로 액상화는 파랑이 이동함에 따라 반복적 발생된다. 수심 d_w 가 7m인 경우 지반의 투수계수가 0.01m/sec보다 크면 지반에 액상화 현상이 발생되지 않았으며, 투수계수가 0.0001m/sec보다 작은 지반의 경우 최대 액상화 깊이는 투수계수가 0.0001m/sec의 지반과 같은 경향을 나타내었다. 수심 d_w 가 15m일 경우 투수계수가 0.001m/sec보다 크면 액상화가 발생하지 않는다. 액상화 깊이는 수심, 지반의 포화도와 투수계수에 큰 영향을 받는다.

그림 7은 수심이 7m, 투수계수가 0.0001m/sec 그리고 내부마찰각이 35도인 모래지반에 대하여 식(11)로부터 응력각을 구하고 전단파괴가 발생한 지

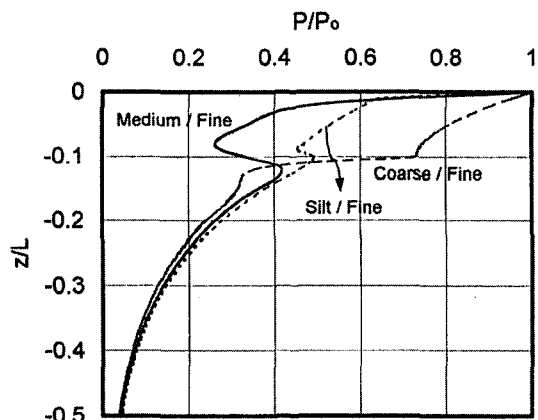


(a) The normalized pore water pressure

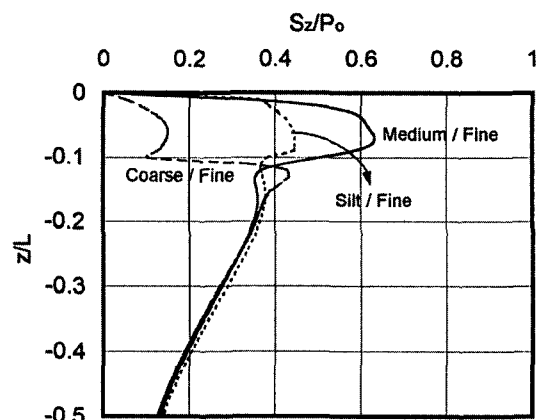


(b) The normalized effective vertical stress

Fig. 8. The normalized stress in two fully saturated layered seabed



(a) The normalized pore water pressure



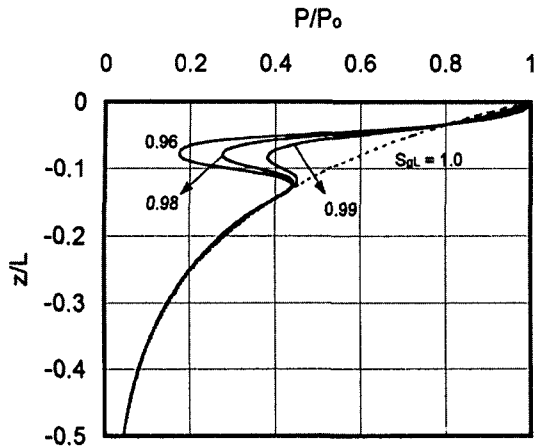
(b) The normalized effective vertical stress

Fig. 9. The normalized stress in two layered seabed (the top layer: $S_r=0.99$, the bottom layer: $S_r=1.0$)

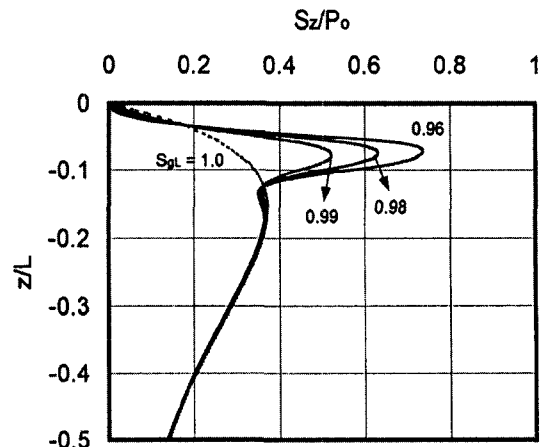
반의 깊이를 파랑의 위상각(phase angle)에 따라 나타낸 것이다. 위상각 $0.5(\times 2\pi)$ 와 $1(\times 2\pi)$ 사이의 결과는 그림 7의 $0.5(\times 2\pi)$ 축을 중심으로 대칭을 이루고 있다. 전단파괴 깊이는 지반의 포화도가 작을수록 깊어지며 최대 전단파괴 깊이는 위상각이 0일 때 나타났다. 같은 포화도를 가진 지반의 경우 최대 전단파괴 깊이는 그림 6의 최대 액상화 발생 깊이에 비하여 깊게 나타나고 있다.

3.2. 다층지반에 대한 포화도, 전단계수 그리고 투수계수의 영향

다층지반에 대한 영향을 검토하기 위하여 두 층과 세 층으로 구성된 지반에 대하여 해석을 실시하였다. 첫째로 두 층 지반에 대해서는 각 층의 전단계수와 투수계수를 다른 세 가지 경우를 나누어 해석하였다. 이때 위층은 두께가 $6\text{m}(=0.1 \times \text{파장})$ 인 굵은 모래 층(coarse sand), 중간 굵기의 모래 층(medium fine sand) 및 실트 층(silt)로 그리고 아래층은 세사 층(fine sand)으로 가정하였고, 각 층에 대한 지반의 특성치는 표 2와 같다. 둘째로 세 층 지반에 대해서는 전체지반을 fine sand로 가정하고, 중간에 일부 불포화 층이 존재



(a) The normalized pore water pressure



(b) The normalized effective vertical stress

Fig. 10. The normalized stress in three layered seabed (the top and bottom layers: $S_r=1.00$, the middle layer(location: $0.05L$, thickness: $0.05L$, $S_r=0.96, 0.98, 0.99$)

하는 경우로 포화 층과 포화 층 사이에 불포화된 중간층을 두어 해석을 실시하였다. 이때 중간층의 위치는 깊이 $3m (=0.05 \times \text{과장})$, 두께는 $3m$ 그리고 포화도는 96% , 98% 와 99% 로 하였다.

우선 완전 포화된 두 층에 대하여 해석하고 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 두 층의 경계에서 간극수압과 유효수직응력의 차이가 나타나고 있다. 위층의 투수계수가 큰 coarse sand/fine sand 지반은 다른 지반에 비해 가장 큰 차이를 보이고 있다. 이는 과랑에 의해 지반에 발생하는 간극수압과 유효수직응력은 지반의 전단계수보다 투수계수에 더 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 그림 9는 위층의 포화도가 99% 이고, 아래층의 포화도가 100% 인 두 층에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. 그림 8과 비교하면 두 층간에 응력의 차이가 뚜렷이 나타나고 있으며, 이는 불포화된 상부 층이 지반의 간극수압과 유효수직응력의 발생에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다. 그림 10은 불포화 층의 영향을 검토하기 위하여 중간에 불포화 층을 두어 해석한 결과이다. 불포화된 중간층이 지반의 간극수압과 유효수직응력의 발생에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

과랑으로 인해 불포화된 해저지반에 발생하는 간극수압과 유효응력을 준해석적 방법으로 해석하고, 이를 통하여 해저지반의 액상화 발생 및 전단파괴의 가능성을 평가하였다. 해석결과 나타난 결론은 다음과 같다.

- 1) 완전 포화된 지반에 비하여 불포화 지반에서는 과랑으로 인하여 발생하는 간극수압은 적으며, 유효수직응력은 큰 경향을 보이고 있다. 포화도가 작아짐에 따라 응력의 차이는 커지고 있으며, 전단응력은 포화도에 큰 영향을 받지 않고 있다.
- 2) 불포화 지반의 투수계수가 작을수록 그리고 전단계수가 클수록 간극수압은 감소하며, 유효수직응력은 증가한다.
- 3) 본 해석에 적용된 액상화 발생기준에 의하면 최대 액상화 발생깊이는 포화도가 작을수록 깊으며, 완전 포화된 지반은 액상화가 발생하지 않았다.
- 4) 전단파괴 깊이는 지반의 포화도에 영향을 받

- 으며, 같은 포화도를 가진 지반의 경우 전단과
괴가 발생하는 최대 깊이는 최대 액상화 발생
깊이 보다 깊게 나타났다.
- 5) 두 층으로 구성된 지반에 대한 해석결과, 지
반의 간극수압과 유효수직응력은 각 층의 포화
도, 전단계수와 투수계수에 큰 영향을 받고 있
으며, 상부 층의 포화도가 가장 큰 영향을 미
치고 있다.
- 6) 중간에 불포화 층이 존재하는 세 층으로 구성
된 지반에 대한 해석결과, 불포화 층의 포화도
가 지반의 간극수압과 유효수직응력 분포에 큰
영향을 미치고 있다.

감사의 글

본 연구는 1997년도 서울산업대학교 기성회
해외파견연구에 의하여 수행되었으며, 이에 감사
드립니다.

참 고 문 헌

1. Biot, M. A., 1941, "General Theory of Three Dimensional Consolidation," *Journal of Appl. Phys.*, 12, pp. 155-164.
2. Wiegel, R. H., 1964, *Oceanographical Engineering*, Englewood Cliffs, NJ: PrenticeHall, pp. 1205-1207.
3. Esrig, M. I. and Kirby, R. C., 1977, "Implications of Gas Content for Predicting the Stability of Submarine Slopes," *Marine Geotechnology*, Vol. 2, No. 2, pp. 81-100.
4. Madsen, O. S., 1978, "Wave-induced Pore Pressure and Effective Stress in Porous Bed," *Geotechnique*, 28(4), pp. 377-393.
5. Yamamoto, T., Koning, H. L., Sellmeijer, H., and Hijum, E. P., 1981, "On the Response of a Poroelastic Bed to Water Wave," *Journal of Fluid Mech.*, 87(1), pp. 193-206.
6. Hovland, M and Gundmestad, O. T., 1984, "Potential Influence of Gas-induced Erosion on Seabed Installations," *Proc. IUTAM Symp., Seabed Mechanics*, London: Graham and Trotman, pp. 255-263.
7. Okusa, S., 1985, "Wave-induced Stresses in Unsaturated Submarine Sediments," *Geotechnique*, 35(4), pp. 571-532.
8. Wheeler, S. J., 1990, "Movement of Large Gas Bubbles in Unsaturated Fine-grained Sediments," *Marine Geotechnology*, Vol. 9, pp. 113-129.
9. Zen, K. and Yamazaki, H., 1990, "Mechanism of Wave-induced Liquefaction and Densification in Seabeds," *Soils and Foundations*, Vol. 30, No. 4, pp. 90-104.
10. Rahman, M. S. El-Zahaby, K. and Booker, J., 1994, "A semi-analytical method for the wave-induced seabed response," *Int. Journal for Num. and Analy. Meth. in Geomechanics*, 18, pp. 213-236.
11. Zen, K., Jeng, D. S., Hsu, J. R. C. and Ohyama, T., 1998, "Wave-induced Seabed Instability: Difference between Liquefaction and Shear Failure," *Soils and Foundations*, Vol. 38, No. 2, pp. 37-47.
12. 장병욱, 도덕현, 송창섭, 1993, "파랑하중에 의한 해저지반의 액상화 평가," *한국지반공학회지*, 제9권, 제4호, pp.17-26.

(접수일자 1999. 6. 5)