

파랑하중에 의한 해저지반의 액상화 평가

Evaluation Wave-Induced Liquefaction in Seabed

장 병 옥*¹
Chang, Pyoung - Wuck
도 덕 현*²
Doh, Duk - Hyun
송 창 섭*³
Song, Chang - Seob

Abstract

The mechanism of wave-induced stresses and liquefactions in a seabed is studied theoretically and experimentally. A constitutive equation which is governing wave-induced effective stresses and porepressures in an unsaturated seabed under the hydraulically anisotropic conditions is developed. It is learned that the effective stresses and excessive porewater pressures are governed by the conditions of waves and sedimentary layers. Especially the magnitude of effective stresses and the depth of disturbed zone induced by waves is controlled by the degree of saturation of the unsaturated seabeds.

요 지

다공성 지반 위를 파랑이 진행함에 따라 물과 지반의 경계면에서는 파압이 발생하게 된다. 이러한 파압은 파랑의 조건과 해저 퇴적층의 조건에 따라 해저면 내에 유효응력 및 공극수압의 변화를 유발하며 이런 변화에 의해서 해저면의 안정에 여러문제가 발생하게 된다.

본 연구에서는 다공성 탄성지반에 발생하는 공극수압과 유효응력의 문제를 해석하기 위하여 지배방정식을 유도하고 이에 적당한 경계조건을 도입하여 파랑에 의하여 지반 내에 발생하는 과잉 공극수압과 유효응력 및 파랑에 의한 액상화를 검토하는 것을 목적으로 한다.

1. 서 론

다공성 지반 위를 파랑이 진행함에 따라 물

과 지반의 경계면에서는 파랑에 의한 파압이 발생한다. 다공성 지반 표면에서 발생하는 이러한 압력파는 지반 내에 물의 흐름을 발생시키는데 이 흐름은 여러가지 이유에서 관심의

*1 정희원, 서울대학교 농업생명과학대학 부교수

*2 정희원, 건국대학교 농과대학 농공학과 교수

*3 서울대학교 대학원 농공학과 박사과정

대상이 되고 있다. 특히 동적 파랑하중을 받는 해저면에 축조되는 해안구조물의 기초설계에 있어 진동이나 과잉공극수압의 발생으로 인한 액상화는 구조물의 안전에 중대한 영향을 미친다. 또, 파랑하중과 같은 표면수 파랑은 수면을 따라 진행하며 파랑에 의한 에너지의 일부는 물 속으로 변환되며, 이에 따라 해저면은 동적하중을 느끼게 된다. 해저면에 도달하는 파랑에너지의 비는 파장과 수심에 따라 달라진다.^[1, 5, 7, 10, 11]

또한, 해저지반 내에서도 기체(공기)가 존재하는데^[9], 북해지역 해저지반이나 미시시피 삼각주 지역이 그 대표적인 예이다. 특히, 북해지역의 침식 특징은 기체와 가벼운 유체의 이동에 의한 것이다(Hovland, 1982; Hovland & Gundmestad, 1984). 연구 결과에 의하면 미시시피 지역에서는 지반 내에 메탄이 존재하며 이로 인해 파랑에 의해 지반에 발생하는 공극수압에 영향을 미친다고 보고되고 있다(Bennett, 1977; Dunlap, Bryant, Bennett & Richards, 1978; Bennett & Faris, 1979; Hulbert & Bennett, 1982). 이러한 지역의 퇴적층은 포화도가 75~95% 사이에서 대기압과 평형을 이루고 있다고 한다^[9].

이와같이 기체를 포함하고 있는 지층에서는 폭풍과 같은 파도에 의한 공극수압과 유효응력을 해석하는 것은 해저지반의 사면안정 문제를 해결하는데 아주 중요하다.

본 연구에서는 다공성 탄성지반에 발생하는 공극수압과 유효응력의 문제를 해석하기 위하여 지배방정식을 유도하고 이에 적당한 경계조건을 도입하여 파랑에 의하여 지반 내에 발생하는 과잉공극수압과 유효응력 및 파랑에 의한 액상화를 검토하는 것을 목적으로 한다.

2. 지배방정식의 유도

그림 1에 나타난 것처럼 다공성 탄성지반 위에 수심(h)이 일정한 상태에서 주기적인 평면파가 진행하고 있다고 하자. 이러한 문제는 평면변형 문제로 취급할 수 있다.

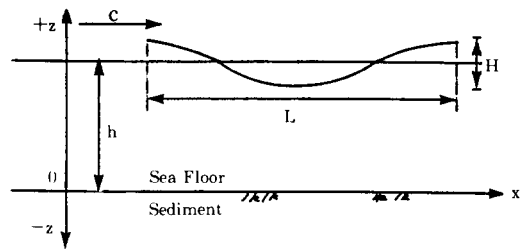


Fig. 1 Diagram of definitions

압축성의 다공성 지반 내를 통과하는 흐름에 대한 평면변형 문제에 있어, 유체의 질량보존 법칙은 다음과 같다^[3].

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = \rho \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right\} - n\rho \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, ρ 는 공극유체의 밀도, v_x 및 v_z 는 x방향과 z방향의 유체의 소멸속도, u 및 w 는 x와 z방향의 지반의 변위(압축을 (+)로 정의), t 는 시간, n 은 공극률을 의미하며, θ_w 는 공극유체의 체적 변형률로 다음과 같이 공극수압(u)의 항으로 표시할 수 있다.

$$\theta_w = \beta u \quad (2)$$

식(1)에서 등방성 Darcy의 법칙, 탄성평형 방정식(Harr, 1966) 및 평면변형 상태에서 유효응력과 공극수압의 적합성의 조건을 적용하여 정리하면 다음과 같은 4차의 선형 미분 방정식 형태의 지배방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial^4 u}{\partial z^4} + \frac{K_x}{K_z} \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + (1 + \frac{K_x}{K_z}) \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial z^2} = \frac{1}{C_v} \frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 u \quad (3)$$

여기서, C_v 불포화도의 압밀계수로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$C_v = \frac{K_z B'}{\rho g m_v} \quad (4)$$

이것은 현장 포화도와 공극률을 가지는 시료에

대한 실내 압밀시험에 의하여 구할 수 있다. m_v 는 현장 공극률 상태에서 기존의 1차원 압밀시험에서 구해지는 일축 체적압축계수이며 다음과 같이 정의된다.

$$m_v = \frac{\alpha(1+\nu)}{3(1-\nu)} = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{(1-\nu)E} \quad (5)$$

또, 일축압축에 대한 공극수압계수 B' 를 다음과 같이 가정하자.

$$\frac{1}{B'} = 1 + \frac{n\beta}{m_v} \quad (6)$$

그런데, Skempton의 공극수압계수 B 는 식(7)과 같이 정의되므로

$$\frac{1}{B} = 1 + \frac{n\beta}{\alpha} \quad (7)$$

식(6)과 식(7)로부터 B 와 B' 의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{1}{B'} = \frac{1}{B} + \frac{2(1-2\nu)(1-B)}{(1+\nu)B} \quad (8)$$

3. 단조화 파동에 대한 해법

3.1 단조화 파동에 대한 해

그림 1과 같이 수심 h 인 해저면에서 진행성 파랑에 의해 발생하는 파압은 Airy의 선형 파동이론에 의하여 구할 수 있다. 그는 파형을 단순한 Sine 파형 또는 Cosine 파형으로 가정한 파동방정식을 구하였는데, 이를 이용하여 파랑에 의한 해저지반 표면에서의 압력은 다음과 같은 형태로 표시할 수 있으며 해는 실수부만 취한다.

$$P = P_0 \exp[i(ax - \omega t)] \quad (9)$$

여기서, P_0 는 해저면에서 정수시의 파압으로 다음과 같다.

$$P_0 = \frac{\rho g H / 2}{\cosh(2\pi h / L)} \quad (10)$$

여기서, H 는 파고, L 은 파장, T 는 주기, a

($=2\pi/L$)는 파수, ω ($=2\pi/T$)는 각속도를 나타낸다.

식(9)로부터 방정식이 선형이라고 하면 모든 미지수는 a 와 ω 에 따라 주기성을 가진다. 따라서, 파랑에 의한 과잉공극수압 u 는 다음 식으로 유도된다.

$$u = [C \exp(az) + F \exp(pz)] \exp[i(ax - \omega t)] \quad (11)$$

여기서, C 및 F 는 경계조건에 따라 달라지는 상수이다. 이 해에서 첫번째 항은 파랑에 의한 공극수에 대한 영향(hydraulic term)을 의미하고 단지 파수(wave number)에만 의존한다. 반면, 두번째 항은 퇴적층의 토립자에 대한 영향을 의미하며 파동 및 퇴적층의 특성에 따라 달라진다.

3.2 경계조건과 무한지반에 대한 특별해

3.2.1 경계조건 및 무한지반에 대한 특별해

상수 C , F 는 적당한 경계조건을 정의해 줌으로써 구할 수 있다. 해저면에서 파랑에 의한 교란으로 부과되는 경계조건 중의 하나가 식(9)에 주어져 있다. 해저면에서의 또 다른 경계조건은 수직 유효 수직응력 σ'_z 가 0이고 전단응력은 무시할 수 있는 것이다.^(3, 8) 따라서, 해저면($z=0$)에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u &= u_0 \exp[i(ax - \omega t)] \\ \sigma'_z &= 0 \\ \tau_{zx} &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

탄성평형방정식에 식(11)을 대입하여 정리한 후, 응력성분을 u_0 로 정규화(normalized)하여, 식(12)의 경계조건을 대입하면, 무한지반에 대한 해는 다음과 같으며, 이 해에서 실수부만 취하면 된다.

$$u = \left[-\frac{q_1}{q_2} \exp(az) + \left(1 + \frac{q_1}{q_2}\right) \exp(pz) \right] \exp[i(ax - \omega t)] \quad (13)$$

$$\sigma_x' = \left[\left(-\frac{1}{q_1^2} \left(q_1^2 - \frac{1}{1-\nu} \right) \left(q_1^2 - \frac{1}{2} q_2^2 \right) - \frac{q_1^2}{q_2^2} \left(\frac{1-2\nu}{1-\nu} + q_1^2 \right) \frac{az}{2} \right) \exp(az) + \frac{k_3^2}{p_1^2} \left(1 + \frac{q_1^2}{q_2^2} \right) \exp(pz) \right] \exp[i(ax - \omega t)] \quad (14)$$

$$\sigma_z' = \left[\left(-\frac{q_1^2}{q_2^2} \left(q_1^2 - \frac{1}{1-\nu} \right) + \frac{1}{q_2^2} \left(q_1^2 - \frac{1}{1-\nu} \right) \left(q_1^2 - \frac{1}{2} q_2^2 \right) + \frac{q_1^2}{q_2^2} \left(\frac{1-2\nu}{1-\nu} + q_1^2 \right) \frac{az}{2} \right) \exp(az) + q_2^2 \left(\frac{1+q_1^2}{q_2^2} \right) \exp(pz) \right] \exp[i(ax - \omega t)] \quad (15)$$

$$\tau_{xz} = i \left[\left(-\frac{q_1^2}{2q_2^2} \left(q_1^2 - \frac{1}{1-\nu} \right) + \frac{1}{q_2^2} \left(q_1^2 - \frac{1}{1-\nu} \right) \left(q_1^2 - \frac{1}{2} q_2^2 \right) + \frac{q_1^2}{q_2^2} \left(\frac{1-2\nu}{1-\nu} + q_1^2 \right) \frac{az}{2} \right) \exp(az) + \frac{p}{a} (q_2^2 + 1) \left(1 + \frac{q_1^2}{q_2^2} \right) \exp(pz) \right] \exp[i(ax - \omega t)] \quad (16)$$

여기서, $p = p_1 - ip_2 = a \sqrt{\frac{K_x}{K_z} + \frac{k^2}{a^2}}$,

$$k = -\left(\frac{\omega}{C_v}\right)i$$

$$q_1^2 = \frac{1}{(1-\nu)B} \frac{C_v}{\omega} (p^2 - a^2)i$$

$$p_1^2 = p^2 - a^2$$

$$k_3^2 = a^2 - (\nu / (1-\nu)) p^2$$

$$q_2^2 = -\left\{ \frac{1}{1-\nu} + \frac{k_3^2}{p_1^2} \right\}$$

$$q_3^2 = \frac{q_1^2}{2} - \frac{1}{2(1-\nu)} - q_1^2$$

$$q_4^2 = q_2^2 + \frac{1-2\nu}{1-\nu} \frac{ap}{p_1}$$

3.2.2 수리적 등방성인 경우

이 경우는 수평 및 수직방향의 투수계수가

같다. 즉, $k_x/k_z = 1.0$ 이므로 이 관계를 앞에서 구한 공극수압과 유효응력식에 대입하면 다음과 같다.

$$u = [B_1' \exp(az) + (1 - B_1') \exp(pz)] \exp[i(ax - \omega t)] \quad (17)$$

$$\sigma_x' = \left[(1 - B_1' + az) \exp(az) - \frac{\nu}{1-\nu} (1 - B_1') \exp(pz) \right] \exp[i(ax - \omega t)] \quad (18)$$

$$\sigma_z' = \left[(1 - B_1' + az) \exp(az) - (1 - B_1') \exp(pz) \right] \exp[i(ax - \omega t)] \quad (19)$$

$$\tau_{xz} = i[-az \exp(az)] \exp[i(ax - \omega t)] \quad (20)$$

여기서, $1/B_1' = 1 + (1 - B') / (2(1 - \nu)B')$ 이다.

3.2.3 퇴적층이 포화된 경우

퇴적층이 완전히 포화된 경우에는 $B = 1.0$ 이므로 $B_1' = 1.0$ 이 된다. 따라서, 구하는 과잉공극수압과 유효응력은 다음과 같다.

$$U = \exp(az) \exp[i(ax - \omega t)] \quad (21)$$

$$\sigma_x' = az \exp(az) \exp[i(ax - \omega t)] \quad (22)$$

$$\sigma_z' = -az \exp(az) \exp[i(ax - \omega t)] \quad (23)$$

$$\tau_{xz}' = -iaz \exp(az) \exp[i(ax - \omega t)] \quad (24)$$

이것은 Damping을 갖는 위상차가 사라진다. 따라서, 이 때에는 파랑에 의한 공극수압과 유효응력은 퇴적층의 포화도에는 상관없이 단지 파장에만 의존하며 파동의 위상과 같게 된다.

4. 퇴적층의 특성에 따른 지반 내의 응력 변화

4.1 파랑조건 및 해저지반의 특성

본 연구에서는 서해안 새만금지구의 방조제 축조지반에 대하여 적용했으며, 해저지반의 특성은 새만금지구 방조제 단면 및 기초처리에 관한 설계검토⁽¹²⁾에서 조사된 자료를 인용하여 정리하면 표 1과 같다.

표1 새만금 5호 방조제 구간의 파랑 및 지반특성

수심(m)	파랑 조건			지반 특성				
	파고 (m)	파장 (m)	주기 (sec)	압축성 (m^2/kg)	투수계수 (m/sec)	포아슨비	공극률	단위중량 (t/m^3)
7	5.19	56.5	7.45	2.67×10^{-4}	4.0×10^{-6}	0.3	0.45	1.906

4.2 포화지반에서의 응력 변화

해저지반이 등방이며 포화된 상태에서, 파랑에 의하여 지반 내에 발생하는 응력의 변화를 깊이에 따라 도시하면 그림 2 및 그림 3과 같다.

그림 2는 파랑에 의한 과잉공극수압의 분포를 한 주기동안 위상이 변함에 따라 깊이별로 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 과잉공극수압은 깊이에 따라 급격하게 감소하며 파장의 약 1/2 정도의 깊이에서는 거의 무시할 정도로 감소하게 된다. 또한 위상에 따라 해저면

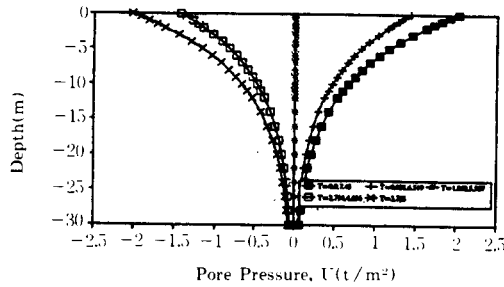


Fig. 2 Distribution of pore pressures for the depth

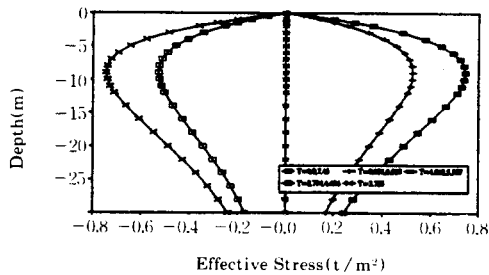


Fig. 3 Distribution of effective stresses for the depth

에 발생하는 과잉공극수압이 주기적으로 반복함을 알 수 있다.

그림 3은 σ'_z 의 변화상태를 도시한 것이다. σ'_x 및 τ_{zx} 는 식(22)와 식(24)에 나타난 것처럼 응력의 크기는 σ'_z 와 동일하나 그 위상이 달라지게 된다. 즉, σ'_z 는 σ'_x 와는 180° , τ_{zx} 와는 90° 의 위상차가 있다. 또한, 이 때의 응력의 변화는 지반의 특성과는 무관하며 단지 파랑조건에만 의존하게 됨을 알 수 있으며, 깊이 약 9m 정도에서 각각의 응력이 최대치를 나타내고 있다.

또, 파랑이 한 주기 진행하는 동안 시간에 따른 과잉공극수압 및 응력의 변화를 해저 표면, 깊이 2m, 깊이 5m, 깊이 10m 지점에서 도시한 것이 그림 4 및 그림 5에 나타나 있다.

그림 4는 한 주기동안 과잉공극수압의 변화를 깊이별로 나타낸 것으로 파랑의 위상과 동일하며 깊어짐에 따라 절대크기가 적어짐을 알 수 있다.

그림 5는 한 주기동안 수직방향의 유효응력의 변화를 깊이별로 나타낸 것으로 파랑의 위

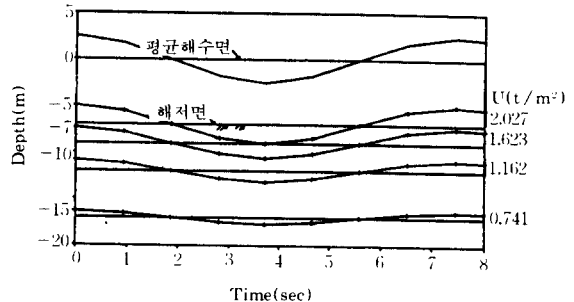
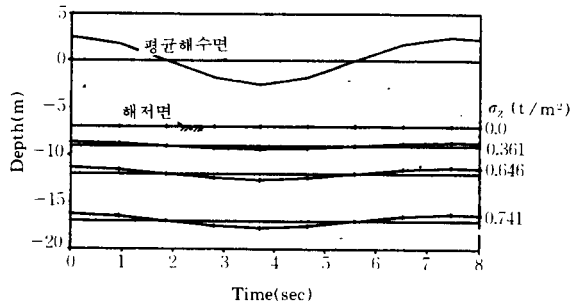


Fig. 4 Distribution of pore pressures for 1 cycle



* (---) denotes max. effective vertical stresses at depth z

Fig. 5 Distribution of the vertical effective stresses for 1 cycle

상과 동일하며 깊이에 따라 절대치는 증가하는데 이는 공극수압의 감소에 기인한 것임을 알 수 있다.

4.3 지반의 포화도에 따른 응력의 변화

일반적으로 해저에 퇴적된 지층에서는 기체(공기)를 내포하여, 포화도의 범위는 0.85-1.0 정도이다. 이와같이 지반 내에 기체가 존재할 경우 파랑으로 인하여 지반 내에 발생하는 공극수압 및 응력은 기체의 영향을 받는다고 보고되고 있다. 본 연구에서는 포화도 대신 Skempton의 공극수압계수(B)를 사용하여 포화도에 따른 응력의 변화를 조사하였다. 이러한 연구는 기체를 포함한 여러 지층에서 폭풍에 의해 발생하는 공극수압과 유효응력을 해석함으로써 해저지반의 사면안정 문제를 해결하는데 아주 유익하기 때문이다.

4.3.1 포화도에 따른 공극수압의 분포

수평 및 수직 방향의 투수계수가 같은 경우, 파고가 최대인 시점에서 지반의 공극수압계수(B)의 변화에 따른 과잉공극수압의 변화를 도시하면 그림 6과 같다. 공극수압계수에 따라 해저면 근처에서 급격한 변화를 보이고 있는데, 이는 파랑에 의해 발생된 파압이 지반을 압축할 때 일부는 지반의 골격을 변화시키고 일부는 내포된 기체를 압축시키는데 소모되는 것

을 의미한다. 다시말해 포화도가 낮을수록 즉, B가 적을수록 많은 양의 파압이 기체를 압축하는데 소모되므로 과잉공극수압은 적은 값으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 깊이가 2m인 경우에는 B가 1.0에서 B가 0.5로 변함에 따라 공극수압은 약 46%의 감소를 보이고 있다.

따라서, 수면하에 있는 지층의 과잉공극수압의 산정에 있어 포화도나 공극수압계수의 선정에 신중을 기해야 할 것으로 사료된다.

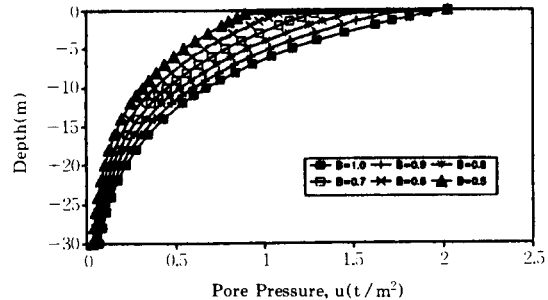


Fig. 6 Distribution of the pore pressures for different values of B

4.3.2 포화도에 따른 유효응력의 분포

수리적 등방성인 경우에 있어, 파고가 최대일 때 포화도에 따른 응력 σ'_z 및 τ_{zx} 의 분포를 조사하기 위하여 B에 따라 도시한 것이 각각 그림 7 및 그림 8에 나타나 있다.

유효수직응력 σ'_z 는 B가 감소할수록 최대응력을 나타내는 깊이가 점점 얕아지며 최대응력도 증가함을 알 수 있다. 이는 과잉공극수압의 감소에 따른 유효응력의 증가로 나타난 것으로 생각된다.

전단응력 τ_{zx} 의 변화는 퇴적층의 포화도에는 무관하게 나타난다. 즉, 전단응력은 단지 파랑 조건에 의하여만 변화함을 알 수 있다.

유효수평응력 σ'_x 는 σ'_z 와 편향된 대칭형태이며, 포화도가 감소함에 따라 해저면의 근처에서 급격한 응력의 변화를 보이는데, 이는 지반중에 내포된 기체의 영향으로 사료된다. 또한, 응력의 감소를 보이는 최대깊이는 포화도가 감소할수록 점점 깊어짐을 알 수 있다.

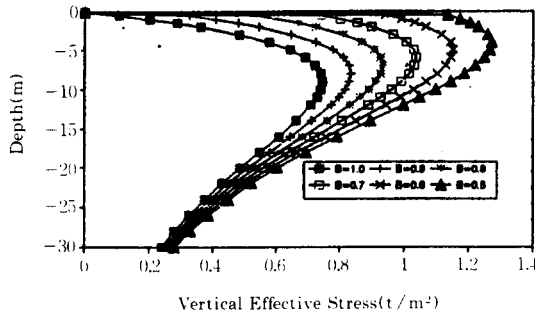


Fig. 7 Distribution of the vertical effective stresses for different values of B

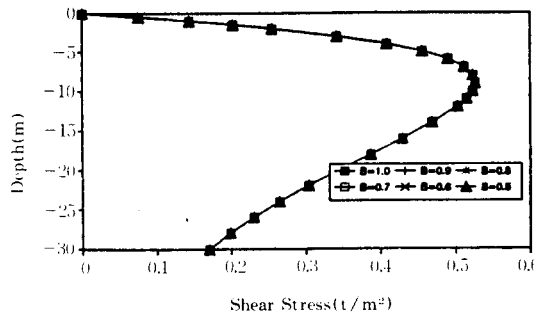


Fig. 8 Distribution of the shear effective stresses for different values of B

또, 유효응력은 과랑이 진행함에 따라 나타나는 응력의 크기는 달라져도 응력의 최대치를 나타내는 깊이는 일정하게 나타난다. 표 2는 포화도의 감소에 따른 각 응력의 최대치를 나타내는 깊이를 보여주고 있다.

4.4 수리적 이방성에 따른 응력의 변화

일반적으로 해저지반이나 지하수면 아래에 있

는 지층의 수평 및 수직의 투수계수는 동일하다고 가정한다. 본 연구에서는 이 가정에 대한 검토를 하기 위하여 포화도가 일정한 상태에서 수평 및 수직방향 투수계수의 비를 달리하여 즉, $k_x/k_z = 1.0, 5.0, 10.0$ 인 경우에 과잉공극수압 및 유효응력의 변화를 조사하였다. 검토한 결과, 과잉공극수압, 수평방향의 유효응력, 수직방향의 유효응력 및 전단응력은 수리적 이방성에 따른 응력 및 공극수압의 변화는 아주 미소하여 거의 영향을 미치지 않았다.

따라서, 과랑에 의한 공극수압이나 유효응력을 계산할 경우에는 수평 및 수직방향의 투수계수를 같은 것으로 보고 계산을 해도 무방할 것으로 사료된다.

5. 해저지반의 액상화 평가

5.1 액상화의 조건

앞 절에서 구한 解를 사용하여, 주어진 퇴적층에서 주어진 과랑 특성에 대한 매우 완만한 해저면의 정밀한 사면안정 해석을 할 수 있다. 그러나, 여기서는 기체를 포함하는 퇴적층에서 단조화 파동의 효과에 대하여 간단한 방법의 의해서 조사하였다. 퇴적층의 액상화가 되는 조건의 하나는 유효수직응력(effective vertical stress)이 0이 되는 것이다.¹³⁾ 즉, 과랑에 의한 응력상태가 다음과 같은 경우이다.

$$-(\rho_s - \rho)gz + U_0 \sigma_z' = 0 \quad (25)$$

여기서, ρ_s 는 퇴적층의 겉보기 밀도(Bulk density), ρ 는 공극유체의 밀도, U_0 는 해저면에서

표2 포화도에 따른 최대응력을 나타내는 해저지반의 깊이

유효응력	최대응력을 나타내는 깊이(m)						비 고
	B=1.0	B=0.9	B=0.8	B=0.7	B=0.6	B=0.5	
σ_x'	-9.0	-10.0	-11.0	-12.0	-13.0	-14.0	
σ_z'	-9.0	-8.0	-7.0	-6.0	-5.0	-4.0	
τ_{zx}	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	

의 과압의 크기, σ_v 는 해저면에서 단위크기의 과압에 의한 유효응력 성분이다.

또 다른 액상화 상태의 조건은 유효 평균수직응력(effective mean normal stress)이 0이 되는 것이다. 이는 점성질 퇴적층에서는 식(25)의 조건이 의미가 없으므로 유효 평균수직응력을 이용하여 나타낸다.

본 연구에서는 실크질 해사지역의 액상화에 대한 문제를 취급하고 있으므로 식(25)의 조건을 적용하여 액상화된 구간을 조사한다.

5.2 지반의 포화도가 액상화에 미치는 영향

파랑이 진행함에 따라 파동이 과정에서 파골로 변하는 시점에 해저면에는 부(-)의 과압이 발생하게 된다. 이는 4.2 절에서 상세하게 언급되어 있다.

액상화는 지반 내의 잔류공극수압의 영향에 의하여 지반의 교란형태로 발생하며, 그 교란의 크기에 따라 액상화의 깊이도 달라지게 된다. 따라서, 최대의 부압(-)이 발생하는 파골에서 최대의 교란이 일어나며 이 때의 깊이가 액상화의 깊이가 되는 것이다.

포화도에 따른 액상화의 깊이를 조사하기 위하여 B를 0.5에서 1.0 사이로 변화할 때, 파골에서의 공극수압과 수직유효응력을 도시하면 그림 9 및 그림 10과 같으며, 식(25)를 이용하여 B에 따라 액상화의 깊이를 요약하면 표 3과 같다. 포화도가 낮을수록 해저지반에 발생하는 액상화되는 깊이는 깊어지게 된다.

그림 11은 한 주기 동안 파랑이 진행함에 따라 B에 따른 해저지반의 액상화 깊이를 도시한 것이다. 지반이 완전히 포화된 경우에는 1000년 빈도의 파랑조건에서 액상화는 발생하지 않으나, 포화도가 낮아지면 발생하게 되는데 B=0.9에서는 약 0.3m 정도, B=0.8이면 약 0.6m, B=0.7이면 0.9m, B=0.6이면 1.15m, B=0.5에서는 1.35m 정도의 깊이까지 액상화가 되는 것으로 나타났다. 그러나, 본 지역에서는 방조제나 기타 해저 구조물을 건설할 경우 구조물에 의한 강제치환 등이 발생하게 되

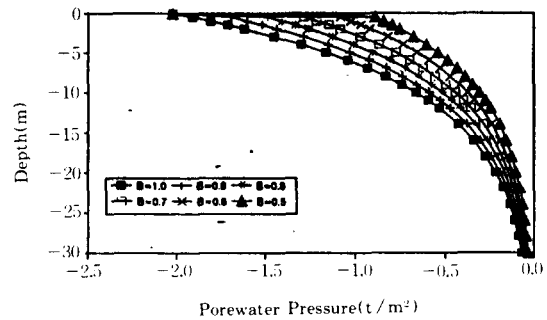


Fig. 9 Distribution of the pore pressures for different values of B

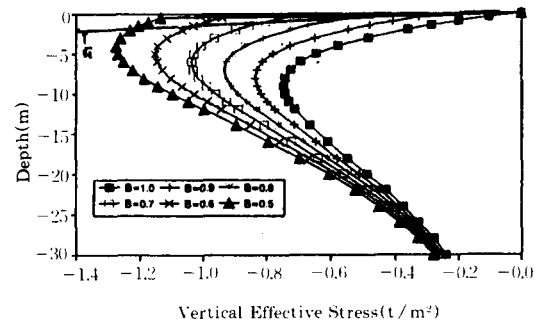


Fig. 10 Distribution of the vertical effective stresses for different values of B

므로 액상화가 발생할 가능성이 아주 적은 것으로 판단된다.

5.3 지반의 수리적 이방성이 액상화에 미치는 영향

수리적 이방성에 따른 액상화의 영향을 조사하기 위하여 포화도를 일정(B=0.5)하게 한 상태에서 k_x/k_z 의 비를 1.0, 5.0, 10.0으로 변화시켜 검토한 결과가 그림 10에 나타나 있다. 그림에서 알 수 있듯이 이방성에 대한 효과는 전 응력의 크기에 비해 미소하므로 거의 차이가 없다.

따라서 파랑에 의한 지반의 액상화를 검토함에 있어서, 퇴적 지반의 수리적 이방성에 대한 영향은 아주 미약하므로 이를 무시해도 좋을 것으로 사료된다.

표3 포화도에 따른 액상화 깊이

시간(sec)	조위(m)	액상화 깊이(m)					
		B=1.0	B=0.9	B=0.8	B=0.7	B=0.6	B=0.5
0.000	2.595	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.466	2.397	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.931	1.835	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.397	0.933	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.862	0.000	0.00	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
2.328	-0.933	0.00	-0.10	-0.20	-0.30	-0.40	-0.50
2.794	-1.835	0.00	-0.20	-0.40	-0.60	-0.75	-0.95
3.259	-2.395	0.00	-0.30	-0.55	-0.80	-1.05	-1.35
3.725	-2.595	0.00	-0.30	-0.60	-0.90	-1.15	-1.35
4.191	-2.397	0.00	-0.30	-0.55	-0.80	-1.05	1.25
4.656	-1.835	0.00	-0.20	-0.40	-0.60	-0.75	-0.50
5.122	-0.933	0.00	0.00	-0.20	-0.30	-0.40	-0.45
5.587	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.053	0.933	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.519	1.835	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.984	2.397	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.450	2.595	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

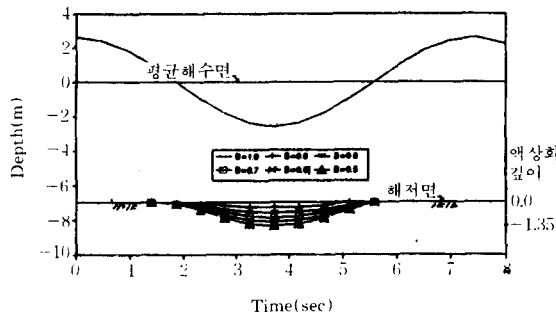


Fig.11 Wave-Induced disturbed zones for B(Hydraulic isotropy)

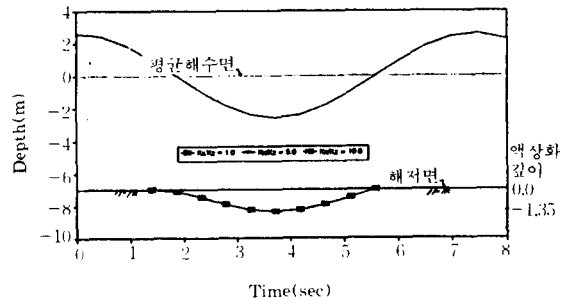


Fig.12 Wave-Induced disturbed zones for k_x/k_z (Hydraulic anisotropy)

6. 결 론

파랑에 의해서 해저지반에 발생하는 액상화를 평가하기 위하여, 수리적 이방성을 고려한 불포화지반의 공극수압과 유효응력을 계산할

수 있는 지배방정식을 유도하였으며 새만금지구의 제5방조제 축조구간에 대하여 적용성을 검토하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 해저지반의 응력과 공극수압의 변화는 파

랑조건 및 퇴적층의 상태에 따라서 달라지게 되며, 특히 포화도의 상태에 따라 큰 영향을 받게 된다.

2. 액상화는 과정에서 파곡으로 변하는 시점부터 해저면에 발생하며, 그 깊이는 포화도가 낮을수록 깊게 나타난다.

3. 지반이 완전히 포화된 경우에는 1000년 빈도의 파랑조건에서 액상화는 발생하지 않으나, 포화도가 낮아지면 발생하게 되는데 $B=0.9$ 에서는 약 0.3m 정도, $B=0.8$ 이면 약 0.6m, $B=0.7$ 이면 0.9m, $B=0.6$ 이면 1.15m, $B=0.5$ 에서는 1.35m 정도의 깊이까지 액상화가 되는 것으로 나타났다.

4. 해저지반 내의 수평 및 수직방향의 투수계수는 달리 나타나지만, 그 비의 영향은 다른 인자에 비하여 영향이 아주 미약하므로 지반의 응력이나 공극수압, 액상화의 깊이 등을 고려할 경우에는 무시하여 수평 및 수직의 투수계수가 일정하다고 가정해도 무방할 것으로 생각된다.

5. 유효수직응력, 유효수평응력, 전단응력은 본 지구에서 B 값에 따라 다소 차이는 있지만 5m-10m 정도까지 급격히 증가하고 그 후는 급격히 감소하는 경향을 보인다.

6. 해저면에서 과잉공극수압은 공극 내에 존재하는 기체의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

본 연구는 91~93년도 한국과학재단의 연구비 지원(과제번호 911-1501-025-2)에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

1. Biot, M.A.(1965). "General theory of three-

dimensional consolidation." J.Appl.Phys.Vol. 12, pp.155-164.

2. Esrig, M.I. & Kirby, R.C.(1977). "Implications of gas content for predicting the stability of submarine slopes." Marine Geotechnology, Vol.2, pp.81-100.
3. Madsen, O.S.(1978). "Wave-induced pore pressures and effective stresses in a porous beds." Geotechnique, Vol.28, No.4, pp.377-393.
4. Moshagen, H. & Torum, A.(1975). "Wave induced pressures in permeable seabeds." Proc. A.S.C.E., J. Waterways, Harbours Coastal, Engng, Vol.102, No. WW2, pp.49-57.
5. Nakamura, M. et al.(1973). "On the seepage in the seabed due to waves." Proc. 20th Japan Soc. Civil Engrs. Coastal Engng. Conf., pp. 421-428.
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.349-356.
8. Yamamoto, T., Koning, H.L., Sellmeijer, H. & Hijum, E.V.(1978). "On the response of a poro-elastic bed to water waves." J. of Fluid Mech. Vol.87, No.1, pp.193-206.
9. Wheeler, S.J.(1988). "A conceptual model for soils containing gas bubbles." Geotechnique, Vol.38, No.3, pp.389-397.
10. Sleath, J.F.A.(1970). "Wave induced pressures in beds of sand." Proc. A.S.C.E., J. of Hydraul. Div. Vol.96, (HY2), pp.367-378.
11. Spierenburg, S.E.J.(1987). "Seabed response to water waves." Ph.D. Thesis, Faculty of Civil engineering, University of Delft.
12. 농림수산부, 농어촌진흥공사(1990). "새만금지구 방조제 단면 및 기초처리에 관한 설계검토."
13. 都德鉉, 張秉郁, 高在晚(1993). 防潮堤 築造 豫定 地盤의 地震에 의한 液狀化 舉動評價, 한국농공학회지, VOL.35, NO.2, pp.43-56

(접수일자 1993. 6. 29)