

해저지반 상부에 설치된 침매터널에 작용하는 동수압에 관한 수치실험 Numerical Experiments of Dynamic Wave Pressure Acting on the Immersed Tunnel on Seabed Foundation

허동수* · 김창훈** · 염경선*** · 김도삼**

Dong Soo Hur*, Chang Hoon Kim**, Gyeong Seon Yeom*** and Do Sam Kim**

요 지 : 지금까지 침매터널에 대한 대부분의 연구들은 건설기술자의 경험에 바탕을 둔 연구들이었다. 공학적인 관점에서 파랑하중에 의한 침매터널의 안정성은 지반기초의 거동에 큰 영향을 받으므로 파·지반·침매터널의 상호작용에 대한 이해는 매우 중요하다. 본 연구에서는 파·지반·침매터널의 상호작용의 메커니즘에 대한 이해를 위하여 부산-거제간 연결도로 민간투자사업 구간 중 침매터널 구간에 직접수치해석기법을 적용하여 침매터널 주변의 지반 및 피복층 내에서 파랑하중에 의한 간극수압, 와도 및 흐름의 특성을 종합적으로 살펴보았다. 또한 다양한 파랑조건 및 피복층의 평균입경변화에 따른 비선형성의 파랑과 침매터널 및 지반의 상호작용이 침매터널의 안정성과 관련하여 논의되었다.

핵심용어 : 직접수치해석기법, 파·지반·침매터널의 상호작용, 파랑하중, 간극수압, 와도, 흐름

Abstract : Most immersed tunnels investigated have been investigated based on the engineer's experience with design and construction. From engineering point of view, it is very important to understand the wave interaction with the seabed and immersed tunnel, since the stability of an immersed tunnel depends largely on the behavior of the seabed foundation. In this study, for the first stage research to find out the mechanism of the wave interaction with the seabed and immersed tunnel, the benchmarking method called as direct numerical simulation (DNS) was employed to analyze comprehensively the wave-induced pore water pressures, vorticity and flows in seabed or inside rubble stone around the immersed tunnel. The immersed tunnel is modeled based on Busan-Geoje fixed link project in Korea, which is now on the stage of planning. Moreover, the nonlinear water wave interaction with an immersed tunnel/its seabed foundation was thoroughly examined with regard to the stabilities of the immersed tunnel subjected to various water wave conditions, median grain size and so forth.

Keywords : direct numerical simulation, waveseabedimmersed tunnel interaction, wave load, pore water pressure, vorticity, flow

1. 서 론

일반적으로 침매터널은 segment로 구성되는 침매함을 제작장으로부터 제작하여 부력을 이용해 침설위치까지 예인한 다음 해저지반에 미리 굴착된 트렌치 내에 거치되어 이를 연결한 후 측면을 되메우고 상부를 피복하는 Fast

Track(설계, 시공 병행 추진) 추진방식으로 시공된다. 또한 트렌치 바닥면과 터널의 밀면사이의 공간은 미리 포설된 자갈층이나 펄프 등으로 주입되는 모래로 채워지며, 때로는 파일로 이루어진 기초가 사용되기도 한다. 이와 같이 침매터널 구간은 흔히 해저하의 지반 내에 건설되지만, 육상부의 연결도로와 접속문제 때문에 부분적으로 성

*경상대학교 토목환경공학부 해양산업연구소(Corresponding author: Institute of marine industry, Department of Civil and Environmental Engineering, Gyeongsang National University, Tongyoung 650-160, Korea. dshur@nongae.gsnu.ac.kr)

**한국해양대학교 건설환경공학부(Department of Construction and Environmental Engineering, Korea Maritime University)

***경상대학교 토목환경공학부(Department of Civil and Environmental Engineering, Gyeongsang National University)

토된 해저지반 상부에 거치되는 경우가 있고, 이의 경우는 파랑하중 및 선박충돌하중 등의 외적하중에 대한 안전을 도모하기 위하여 침매함을 사석 등의 재료로 피복하게 된다.

Fig. 1에 나타나고 있는 바와 같은 침매터널이 고파랑의 대수심역에 계획되고, 특히 해저지반 상부에 거치되는 경우에는 지반내의 침매함에 작용하는 동수압을 정확히 예측하는 것은 설계상 매우 중요하다. 그러나 이미 건설된 외국의 사례를 살펴보면 건설기술자의 경험에 바탕을 둔 설계(예를들어, Rasmussen, 1997)가 대부분이고, 파·지반·침매터널의 종합적인 상호작용에 대한 접근은 수행되지 않은 것으로 판단된다. 그리고 비압축성의 점성유체에 대한 복잡한 자유수면을 효과적으로 수치 모의할 수 있는 VOF법(Volume of Fluid Method; 이하 VOF법, Hirt and Nichols, 1981)이 제안된 이후 왜곡을 포함한 자유수면을 추적할 수 있는 VOF법을 활용한 수치파동수로의 연구개발이 최근 활발하게 이루어지고 있으며(許, 2000; 海岸開發技術研究センター, 2001; 김 등, 2001, 2004), 3차원구조물에 작용하는 파력특성의 해석(Hur and Mizutani, 2003; Hur et al., 2004)과 3차원 불규칙 파동장에서의 파랑변형(Hur, 2004) 등에 까지 적용되고 있다. 그러나 상술한 연구들은 해저 불투과외의 가정으로부터 해저지반의 동적거동에 대해서는 고려되지 않았다. 따라서 본 연구의 대상구조물인 침매터널을 건설하는 경우, 큰 동적 파랑하중을 받는 구조물의 기초설계에서 파랑의 영향으로 발생될 수 있는 지반의 불안정성을 고려해야 할 필요성에 대해서 심도 있는 연구가 수행되어 오고 있다. 최근 허 등(2005)은 파·구조물·지반의 상호작용에 대해 Full-nonlinear해석을 수행 할 수 있는 2차원의 직접수치해석기법(2-D Direct Numerical Simulation; 이하 2-D DNS)을 제안한 후 해저 지반상에

설치된 잠제 및 혼성방파제에 대해 실험치와의 비교·검토로부터 모델의 타당성을 검증하였다.

따라서 본 연구에서는 파·지반·침매터널의 종합적인 상호작용에 대해 허 등(2005)에 의해 제안된 직접수치해석기법을 적용하여 침매터널 주변의 간극수압, 와도, 흐름의 특성 및 침매터널에 작용하는 동수압 등을 파랑조건 및 피복층의 평균입경변화와 관련하여 논의한다.

2. 수치해석의 이론

2.1 기초방정식

본 연구에서는 파·지반·침매터널의 비선형 상호작용을 해석하기 위하여 Fig. 1(그림에서 h 는 수심, d 는 지반의 깊이, L_i 는 입사파의 파장을 각각 나타낸다)과 같은 2차원수치파동수로를 고려한다. 수치파동수로는 해석영역의 양쪽에 부가감쇠영역을 설치하여 파의 재반사를 방지하고 해석영역 내에 조파를 위한 조파소스와 해저지반 상부에 사석으로 피복된 침매터널로 구성된다.

파·지반·침매터널의 비선형 상호작용을 해석하기 위한 기초방정식은 비압축성·점성유체의 파동장과 지반 및 투과성구조물을 포함한 해석장 전체에 대해 동일한 수치알고리즘을 적용하는 조파소스를 포함하는 연속방정식 (1)과 투과층의 다양한 기하학적인 형태에 따라 모델화된 유체저항을 도입하여 Navier-Stokes운동방정식을 확장한 운동방정식 (2), (3)으로 구성된다. 그리고 식 (4)는 자유수면의 형상을 모의하기 위한 VOF함수의 이류방정식을 나타낸다.

$$\frac{\partial(\epsilon_x u)}{\partial x} + \frac{\partial(\epsilon_z w)}{\partial z} - q^* = 0 \tag{1}$$

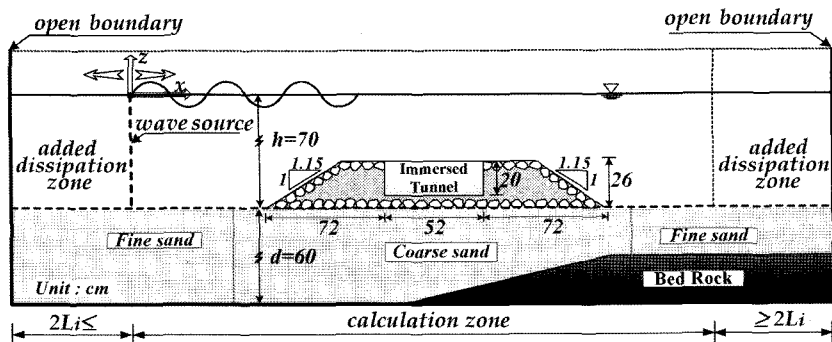


Fig. 1. Concept of numerical wave tank.

$$\begin{aligned} \varepsilon_v \frac{\partial u}{\partial t} + \varepsilon_x u \frac{\partial u}{\partial x} + \varepsilon_z w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = -\varepsilon_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \varepsilon_x \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_z \tau_{zx}}{\partial z} \right) - M_x - D_x - F_x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_v \frac{\partial w}{\partial t} + \varepsilon_x u \frac{\partial w}{\partial x} + \varepsilon_z w \frac{\partial w}{\partial z} \\ = -\varepsilon_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \varepsilon_x \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_z \tau_{zz}}{\partial z} \right) - \frac{2\nu \partial q^*}{3 \partial z} - \varepsilon_v g - \beta w \\ - M_z - D_z - F_z \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon_x F)}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon_x F u)}{\partial x} + \frac{\partial(\varepsilon_z F w)}{\partial z} = F q^* \quad (4)$$

여기서, $q^*=q(z, t)\delta(x-x_s)$ 로 조파위치 $x=x_s$ 에서의 조파 소스의 밀도, δ 는 Dirac delta 함수, u, w 는 x, z 방향의 속도성분, t 는 시간, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, ν 는 유체의 동점성계수($\nu=0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$), g 는 중력가속도, β 는 부가감쇠영역의 파랑감쇠계수, $\varepsilon_x, \varepsilon_z$ 는 x, z 방향에 대한 면적투과율, F 는 $0 \leq F \leq 1$ 의 값을 갖는 VOF 함수, $\tau_{ij}(i=x, z, j=x, z)$ 는 검사체적의 표면에 작용하는 점성응력으로 i 는 점성응력이 작용하는 평면을 가리키고, j 는 그 평면 내에서의 방향을 나타낸다. 식 (2), (3)에서 M_x, M_z 는 관성저항을 나타내며(Sakakiyama and Kajima, 1992), D_x, D_z 는 층류저항, F_x, F_z 는 난류저항으로서 다음 식으로 결정된다(Shijie and Jacob, 1999; Ergun, 1952).

$$M_x = (1 - \varepsilon_v) C_M \frac{Du}{Dt} = (1 - \varepsilon_v) C_M \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \quad (5)$$

$$M_z = (1 - \varepsilon_z) C_M \frac{Dw}{Dt} = (1 - \varepsilon_v) C_M \left\{ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \quad (6)$$

$$D_x = C_D \frac{\nu (1 - \varepsilon_x)^2}{D_p^2 \varepsilon_x^2} u \quad (7)$$

$$D_z = C_D \frac{\nu (1 - \varepsilon_z)^2}{D_p^2 \varepsilon_z^2} w \quad (8)$$

$$F_x = F_D \frac{(1 - \varepsilon_x)}{D_p \varepsilon_x^2} u \sqrt{(\varepsilon_x u)^2 + (\varepsilon_z w)^2} \quad (9)$$

$$F_z = F_D \frac{(1 - \varepsilon_z)}{D_p \varepsilon_z^2} w \sqrt{(\varepsilon_x u)^2 + (\varepsilon_z w)^2} \quad (10)$$

여기서, C_M 은 관성력계수, C_D 는 층류저항계수, F_D 는 난류저항계수, D_p 는 투과체의 평균입경이다.

2.2 경계조건

본 연구에서 적용되는 경계조건으로는 자유수면에서의 유속조건과 압력조건, 구조물표면에서의 경계조건, 해석영역측면에서의 개경계조건이 있다.

자유수면에서 유속경계조건은 셀 내의 자유수면에 수평한 유속성분과 연직인 유속성분에 대한 경계조건을 별도로 적용한다. 즉, 수면에 수평한 유속은 유체가 존재하는 인접한 셀의 유속을 취하고, 연직인 유속에 대해서는 VOF함수 F 의 이류를 계산할 때 표면셀에서의 연속방정식이 만족되도록 값을 결정한다. 자유수면의 압력에 대해서는 표면셀의 형태에 따라 인접한 유체셀의 압력과 선형 내삽하여 산정한다. 파의 재반사를 방지하기 위한 측면에서의 경계조건은 앞서 기술한 바와 같이 계산영역의 양 끝단에 부가감쇠영역을 접속시켜 파를 흡수하는 개경계조건을 적용하였으며(Hinatsu, 1992), 부가감쇠영역의 길이는 입사파 파장의 2배 이상으로 하였다. 또한 구조물 표면 및 바닥에서는 법선방향으로 불투과 조건을 접선방향으로는 slip조건을 적용하는 것으로 한다.

2.3 안정조건

본 연구에서는 계산의 수치안정을 위하여 식 (11)의 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy조건과 식 (12)의 Diffusion(Diffusive time limit condition)조건을 이용하였다.

$$\delta t < k \cdot \min \left\{ \frac{\delta x}{|u|_{\max}}, \frac{\delta z}{|w|_{\max}} \right\} \quad (11)$$

$$\delta t < k \cdot \min \left\{ \frac{\delta x}{|u|_{\max}}, \frac{\delta z}{|w|_{\max}} \right\} \quad (12)$$

여기서, $|u|_{\max}, |w|_{\max}$ 는 x, z 방향에 있어서 최대유속, $\delta x, \delta z$ 는 계산격자간격을 각각 나타내며, k 는 가중계수로써 본 연구에서는 0.4를 적용하였다. 또한 초기의 시간스텝은 $\delta t = T_i/1000$ (T_i 는 입사파의 주기)로 하고, 그 이후는 CFL조건 및 Diffusion조건이 만족되도록 시간스텝의 간격 δt 를 매 시간스텝마다 자동 조정되도록 하였다.

3. 파 · 지반 · 침매터널간 상호작용의 수치해석

파 · 지반 · 침매터널의 종합적인 비선형 상호작용을 고찰하기 위하여 부산-거제간 연결도로 구간중 침매터널 구간을 대상으로 수치해석을 수행한다(축척율; 1:50). 이 때 본 연구의 수치파동수루에 적용되는 침매터널의 제원은

Table 1. Conditions of incident waves

T_i (sec)	h/L_i	H_i (cm)	H_i/h	H_i/L_i	Ursell수 ($H_i/L_i^2/h^3$)	D_p	CASE
1.6	0.203	12	0.17	0.035	4.103	2.5	1-1
						3.5	1-2
		16	0.23	0.047	5.470	2.5	2-1
						3.5	2-2
1.8	0.173	12	0.17	0.030	5.681	2.5	3-1
						3.5	3-2
		16	0.23	0.040	7.575	2.5	4-1
						3.5	4-2
2.12	0.138	12	0.17	0.024	8.640	2.5	5-1
						3.5	5-2
		16	0.23	0.031	11.520	2.5	6-1
						3.5	6-2

Fig. 1에 나타내는 바와 같고, 평균입경 $D_p=0.02$ cm, $D_p=0.05$ cm의 Fine sand와 Coarse sand로 이루어진 모래질 지반상에 침매터널이 사석으로 피복되어 설치된 경우를 고려하였다. 지반부에 대한 공극률은 Fine sand의 경우에 $\epsilon_x=\epsilon_z=\epsilon_v=0.2$, Coarse sand의 경우에는 $\epsilon_x=\epsilon_z=\epsilon_v=0.35$ 로 각각 주어진다. 지반상의 피복층은 공극률 $\epsilon_x=\epsilon_z=\epsilon_v=0.4$ 의 사석으로 구성되고 평균입경의 변화에 따른 침매터널에 작용하는 간극수압의 변화를 살펴보기 위해 사석의 평균입경을 $D_p=2.5$ cm, $D_p=3.5$ cm로 각각 변화시켜 수치해석을 수행하였다. 이때 계산격자는 $\delta_x, \delta_z=2$ cm로 하였다. 또한 지반부와 사석층의 C_M, C_D 및 F_D 의 계수값으로 각각 1.5, 0.32 및 25와 1.5, 0.25 및 60을 이용하였으며, 수치파동수로에 적용한 입사파의 조건은 다음의 Table 1에 제시되어 있다.

3.1 수면의 공간파형

평균입경 $D_p=2.5$ cm의 사석으로 피복된 침매터널을 대상으로 Table 1에 제시된 CASE 6-1의 입사파조건에 대

하여 수면의 공간파형을 한 주기 동안 무차원한 결과가 Fig. 2에 제시되었다(그림에서는 수면변동). 그림으로부터, 깊은 잠수심으로 인하여 침매터널의 전면과 배후에 각각 약한 부분중복파와 약간의 파봉분열 현상을 관찰할 수 있으나, 수중방파제를 설치한 경우에 예상되는 뚜렷한 파봉분열 현상이나 강한 비선형성분파의 발달 및 수면변동의 큰 감쇠는 관찰되지 않는다. Fig. 2의 결과로부터 해저지반 상부에 거치되는 침매터널은 천단상에서 입사파랑을 강제 쇄파시켜 구조물 배후에서의 정온한 해역을 조성하는 수중방파제의 파랑제거기능과는 구별되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 원인은 침매터널이 상대적으로 대수심역에 설치되기 때문에 입사파랑의 수면변동이 침매터널의 설치에 따른 수심변동에 큰 영향을 받지 않은 결과이다.

3.2 침매터널 주변의 평균유속장 및 평균와도의 공간분포

본 연구에서 침매터널 주변의 평균유속장 및 평균와도의 공간분포에 작용하는 사석 평균입경의 영향은 거의 나타

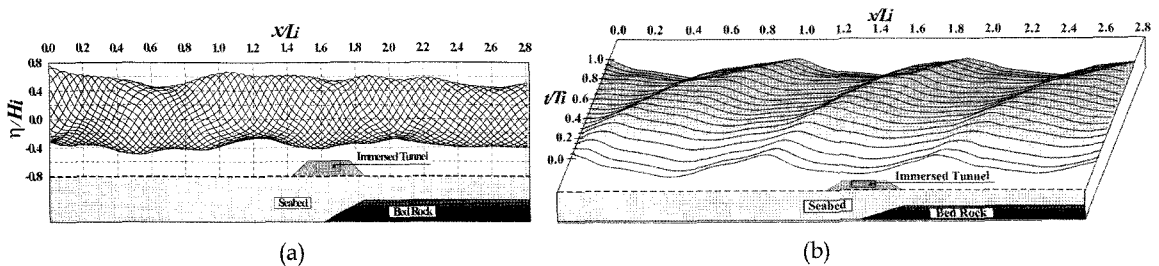


Fig. 2. Spatial distribution of water level due to immersed tunnel on seabed (CASE 6-1).

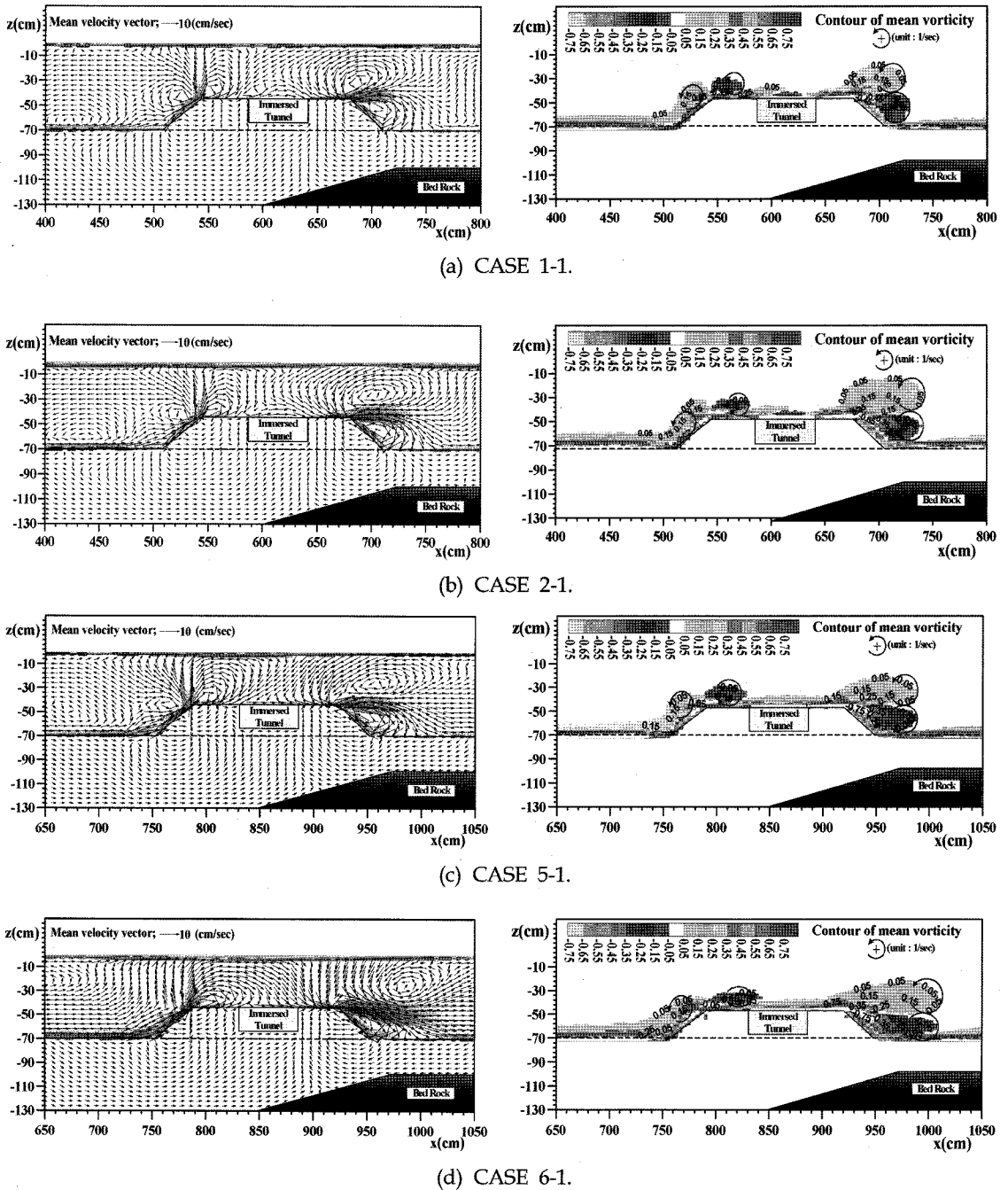


Fig. 3. Mean velocity vector (left) and vorticity fields (right) around immersed tunnel.

나지 않았다. 따라서 여기에서는 사석의 평균입경 $D_p=2.5$ cm의 경우에 대해서만 논의하기로 한다.

Fig. 3은 사석의 평균입경 $D_p=2.5$ cm의 경우, Table 1의 CASE 1-1, CASE 2-1, CASE 5-1, CASE 6-1에 대한

지반상에 설치된 침매터널 주변 및 지반내의 평균유속장과 침매터널 주변에서의 평균와도의 공간분포를 나타낸 결과로 평균유속 \bar{v} 및 평균와도 $\bar{\omega}$ 는 식 (13)과 식 (14)를 이용하여 각각 계산되었다.

$$\vec{V} = \frac{1}{3T_i} \int_{t_i}^{t_i+3T_i} \vec{V} dt \quad (13)$$

$$\vec{\omega} = \frac{1}{3T_i} \int_{t_i}^{t_i+3T_i} \vec{\omega} dt \quad (14)$$

여기서, t_i 는 데이터의 취득시점이고 T_i 는 입사파의 주기, $\vec{V}=(u, w)$, $\vec{\omega}$ 는 식 (15)로 표현되는 와도(Vorticity) 성분으로 본 연구에서는 반시계방향을 양의 값으로 하였다.

$$\vec{\omega} = \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (15)$$

Fig. 3의 모든 그림에서 알 수 있는 바와 같이 빠른 유체입자속도는 지반과 접하는 침매터널의 피복층우각부에서 지반내로 향하는 강한 침투유속을 발생시키고, 피복층의 사면상에서는 피복층천단을 향하는 강한 전단흐름이 발생한다. 이러한 빠른 유체입자속도는 Ursell수가 증가할수록 더욱 크게 되는 것을 확인할 수 있고, 침매터널의 상단부는 Ursell수가 증가할수록 침매터널로 향하는 파동장의 빠른 유속에 직접적인 영향을 받는 것을 관찰할 수 있다. 또한 해측 및 육측의 피복층 천단 우각부 근방에는 각

각 반시계방향과 시계방향의 와도가 발생되고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 와도현상은 동일한 상대수심 h/L_i 에 대해서는 파형경사 H/L_i 가 증가할수록 명확히 나타나며, 육측의 피복층 천단 우각부 근방에서 발생하는 와도현상은 Ursell수가 증가할수록 육측으로 이동되는 것을 알 수 있다.

이와 같이 파·지반·침매터널과의 상호작용과 연관되어 나타나는 침매터널 주변 및 지반 내의 평균유속, 와도현상으로부터 설계시 침매터널의 피복층 사면상 및 피복층의 천단 우각부 근방에서는 피복석의 이탈로 이어지는 구조물 파괴의 위험성에 대한 검토가 필요할 것이다. 또한 지반과 접하는 육측 및 해측의 피복층 우각부 근방에서 발생하는 지반내로 향하는 강한 침투유속은 흙입자 골격을 느슨하게 하여 흙입자의 전단저항을 감소시킬 것으로 판단되며, 그 결과 세굴과 같은 지반변형 및 지반의 토사유출, 지반지력 저하, 액상화의 발생가능성이 예상된다. 이로부터 지반침식 및 퇴매립에 의한 지반의 제압밀 등으로 인하여 피복석 및 침매터널의 침하에 대한 장기 예측, 지반지력의 불균형으로 발생할 수 있는 지반의 부등침하에 대한 침매터널의 안정성 등을 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

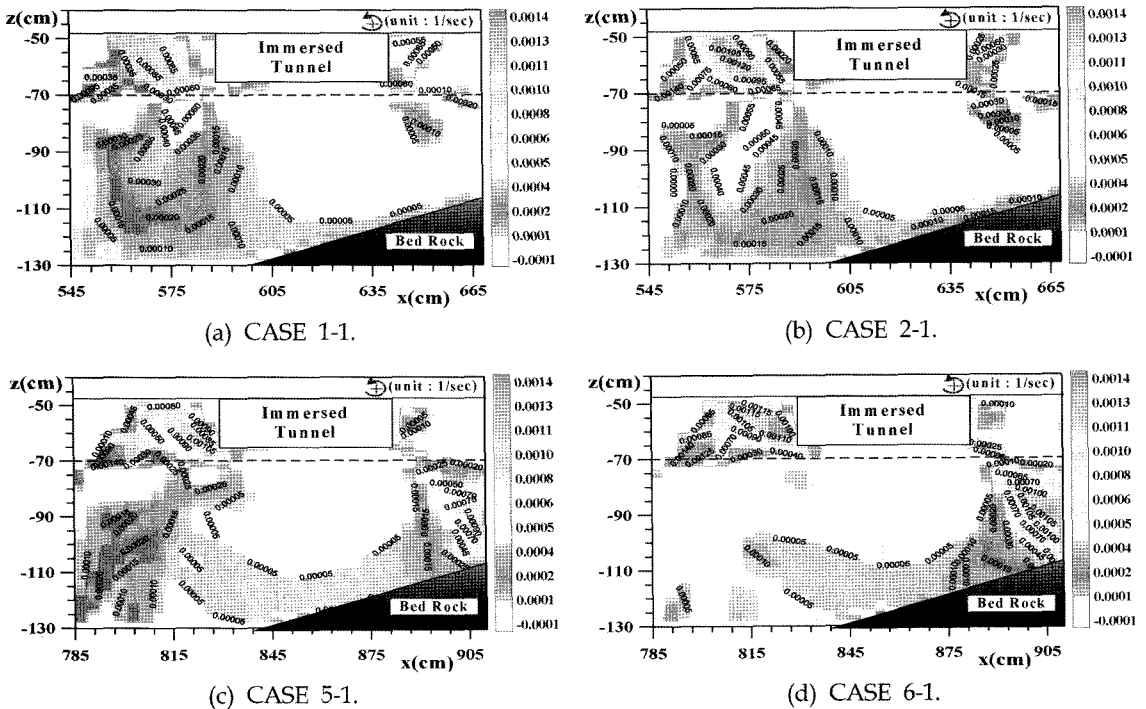


Fig. 4. Spatial distribution of mean vorticity ($D_p=2.5$ cm).

3.3 피복층 및 지반내 평균와도의 공간분포

Table 1의 CASE 1, CASE 2, CASE 5, CASE 6에 대한 입사파조건에 대해 침매터널 주변의 피복층 및 지반내 형성되는 와도현상을 보다 상세히 알아보기 위해 사석의 평균입경 $D_p=2.5\text{ cm}$, $D_p=3.5\text{ cm}$ 에 대한 와도분포의 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타낸다. 그림에서 보다 명확한 와도의 분포범위를 살펴보기 위하여 반시계방향의 와도를 중심으로 언급하기로 한다.

그림으로부터 피복층내 와도분포는 육측에 비해 침매터널의 해측 전면에서 보다 복잡하게 형성되는 것을 알 수 있다. 피복층내 형성되는 와도의 크기는 동일한 상대수심 h/L_i 에 대해서는 파형경사 H/L_i 가 증가할수록 침매터널 전면에서는 더욱 크게 되며, 배후에서는 와도의 분포범위가 좁아지는 것을 확인할 수 있다. 또한 침매터널 하부의 지반내에서는 침매터널 하부에 비해 침매터널의 육측 및 해측의 우각부 근방에서 보다 큰 와도현상이 관찰된다. 이러한 지반내 와도현상은 상대수심 h/L_i 이 큰 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)의 경우 파형경사 H/L_i 가 증가할수록 해측의 침매터널 하부의 우각부 근방에서, 상대수심 h/L_i 이 작은 Fig. 4(c)와 Fig. 4(d)의 경우는 침매터

널 하부의 육측 우각부 근방에서 파형경사 H/L_i 가 증가할수록 보다 명확히 나타난다. 이로부터 침매터널 하부의 지반내에 형성되는 와도의 크기는 상대수심 h/L_i 이 작을수록 육측으로 이동되어 크게 나타나고 이러한 경향은 Ursell수가 증가할수록 보다 뚜렷해지는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 사석의 평균입경이 $D_p=3.5\text{ cm}$ 로 증가된 경우로 Fig. 4의 모든 경우와 동일한 경향을 나타내고 있으나, 사석의 평균입경이 증가됨에 따라 피복층의 투수계수는 크게 되어 그 결과 침투유속은 증가하고 유체저항력은 감소하므로 피복층내에서는 보다 큰 와도현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 사석의 평균입경의 증가로 인해 지반내 전달되는 파랑에너지는 크게 되므로 지반내에는 보다 뚜렷한 와도가 발생한다.

결과적으로 지반 상부에 거치되는 침매터널의 설계시, 사석의 평균입경변화 뿐만 아니라 Ursell수에 따른 와도의 크기 등, 침매터널 주변의 피복층 및 지반내 형성되는 복잡한 흐름에 대한 종합적인 이해가 필요할 것으로 판단된다.

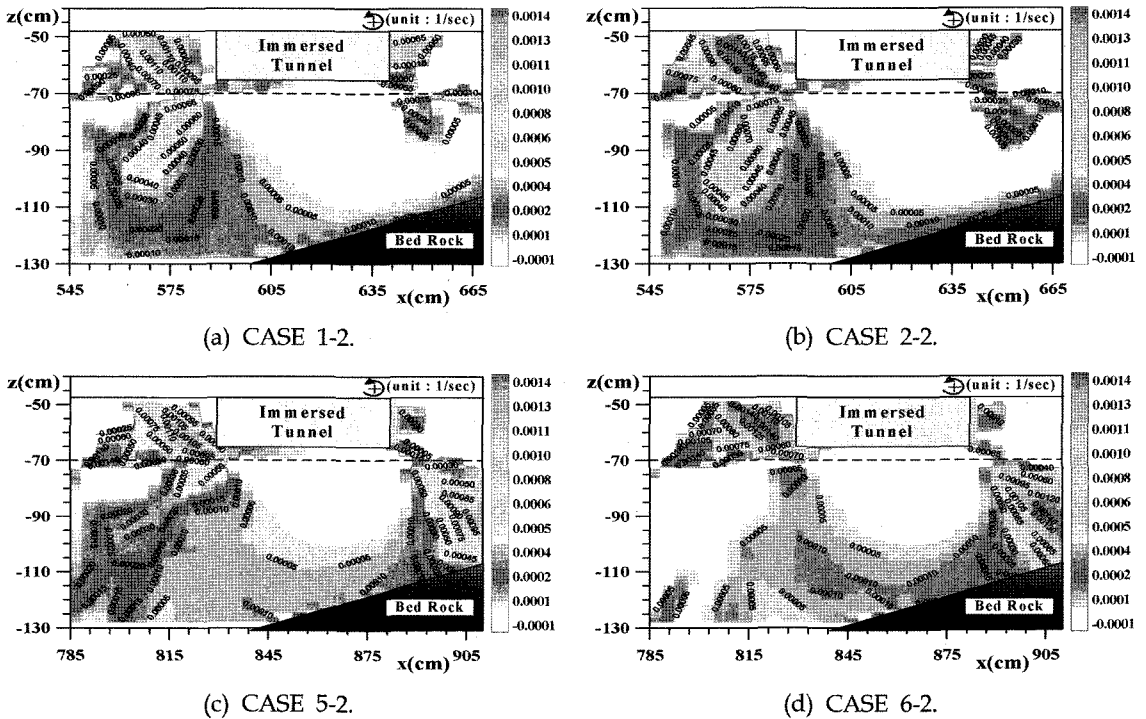
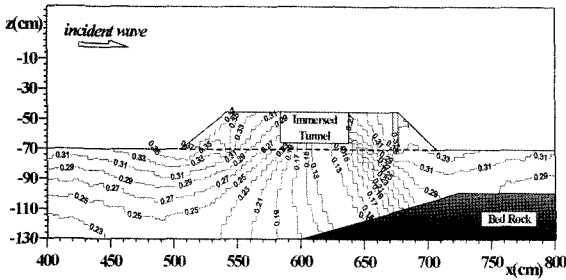
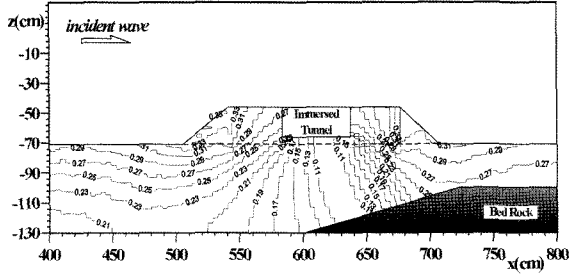


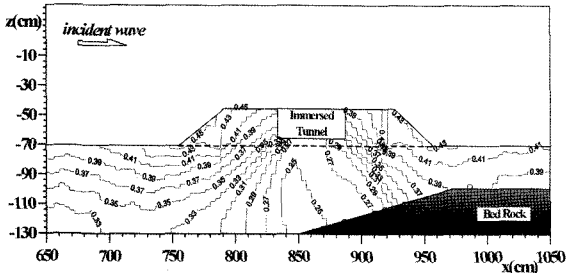
Fig. 5. Spatial distribution of mean vorticity ($D_p=3.5\text{ cm}$).



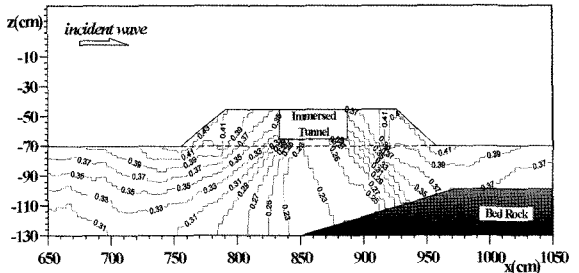
(a) CASE 1-1.



(b) CASE 2-1.



(c) CASE 5-1.



(d) CASE 6-1.

Fig. 6. Spatial distributions of maximum pore water pressure ($p_{max}/\rho g H_i$).

3.4 침매터널 주변 및 지반내의 최대간극수압

Fig. 6은 평균입경 $D_p=2.5$ cm의 사석으로 피복된 침매터널을 대상으로 Table 1의 CASE 1-1, CASE 2-1, CASE 5-1, CASE 6-1에 대한 입사파조건에 대해 침매터널 하부의 기초지반을 포함한 침매터널 주변에 형성되는 무차원 최대간극수압 $p_{max}/\rho g H_i$ 을 나타낸 결과이다. 침매터널 주변에서 측정되는 간극수압은 동일한 상대수심 h/L 에 대하여 파형경사 H_i/L_i 가 증가할수록 다소 작은 값을 나타내고 동일한 상대파고 H_i/h 에 대해서는 파형경사 H_i/L_i 가 감소할수록 크게 되는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 3.2절 및 3.3절에서 살펴본 바와 같이 피복층상면상에서의 전단흐름 뿐만 아니라 파동장을 포함한 침매터널 주변 및 지반 내에서 와도의 크기에 상당하는 파랑에너지소산과 연관되어 나타나는 결과로 판단된다. 전체적으로 피복층 및 지반내 간극수압은 상대파고 H_i/h 에 비해 상대수심 h/L_i 의 변화에 보다 민감하게 반응하며, 장주기의 파랑 통과시 피복층을 포함한 지반내의 불안정성은 높아질 것이다. 또한 침매터널 주변의 간극수압 분포는 침매터널 하부에 비해 측면에서 발생하는 간극수압의 영향이 상대적으로 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

3.5 침매터널 표면 간극수압의 시간변동

Fig. 8은 침매터널 표면의 각 위치(Fig. 7참조)에서 CASE 6-1의 파랑조건에 대한 간극수압의 시간변동을 $\rho g H_i$ 로 무차원화한 그림이다. 또한 Fig. 8(a), (b), (c) 및 (d)는, Fig. 7에 나타내는 바와 같이, 침매터널의 하면, 상면, 좌측면 및 우측면에서 측정된 값을 각각 나타내고 있다. 또한 본 연구의 범위에서는 사석의 평균입경변화에 따른 피복층내 간극수압 및 동수압의 시간변동은 큰 차이를 나타내지 않았으므로 $D_p=2.5$ cm의 경우에 대해서만 논의하기로 한다.

그림으로부터 침매터널 상부면의 동수압과 그 외의 표면에서 측정되는 간극수압(이하부터는 편의상 모두 간극수압으로 정의)은 피복층의 영향을 크게 받지 않는 침매터널의 상부면(No. 4-No. 6)에서 최대치가 발생하고, 최

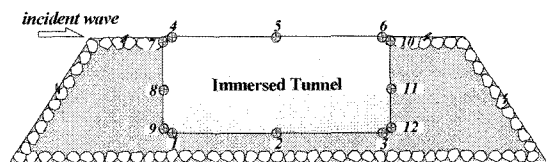


Fig. 7. Calculating points of pore water pressure around immersed tunnel.

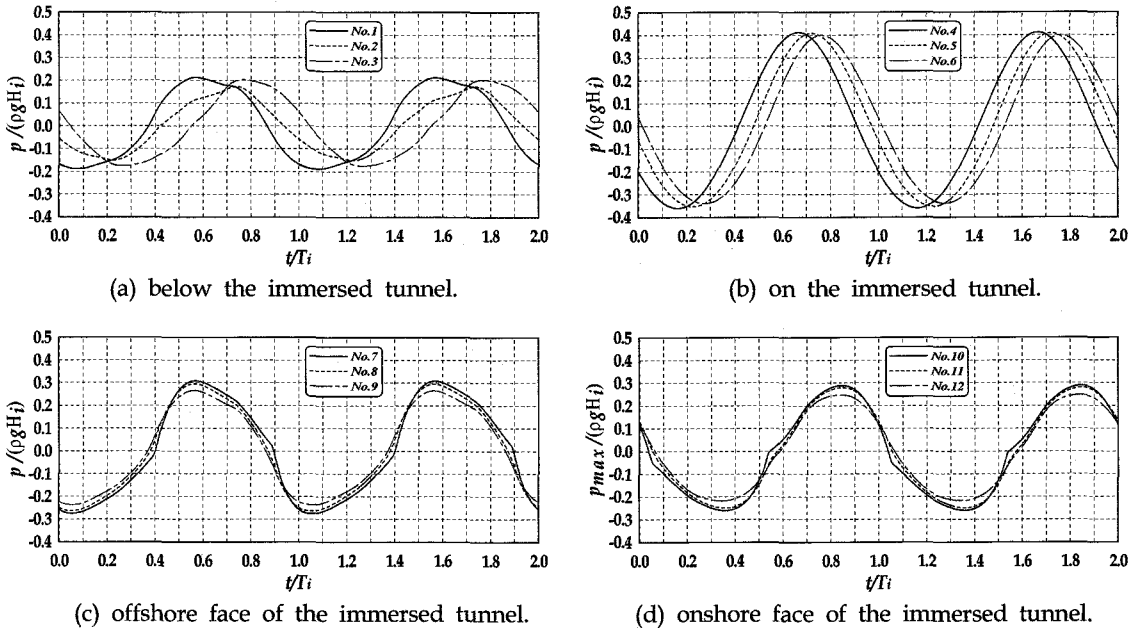


Fig. 8. Time variation of pore water pressure ($p/\rho g H_i$) at each point.

소치는 침매터널의 하부면(No. 1~No. 3)에서 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 8(b)에 제시된 침매터널 상부에서 측정되는 간극수압의 시간변동은 거의 일정한 경향을 보이는 반면, Fig. 8(c), Fig. 8(d)에서 보는 바와 같이 피복층 내에서 측정되는 간극수압의 시간변동은 피복층상(No. 7, No. 10)에서 비선형성분이 크게 발달하고 피복층의 깊이가 깊어질수록 절대값이 줄어드는 경향을 보이고 있다. 이것은 피복층내의 유체저항길이의 증가 및 복잡한 와도현상으로 인한 파랑에너지의 소산이 크게 기여한 결과이다. 또한 육측 및 해측의 침매터널 표면에서 측정되는 간극수압은 Fig. 8(c)와 Fig. 8(d)에서 알 수 있는 바와 같이 경향이 반대되는 시간변동을 나타내고 있다. 이러한 결과로부터 침매터널의 해측면에서 측정되는 간극수압은 피복층을 통한 입사파랑에너지 뿐만 아니라 지반내 간극수의 직접적인 영향으로 최대치가 빨리 발생하고 있고, 침매터널의 육측에서 측정되는 간극수압의 경우에는 파동장의 파랑에너지전달을 포함하여 해측에서 육측으로 흐르는 간극수의 시간지연으로 최대치는 서서히 발생하는 것으로 판단된다. 그리고 Fig. 8(a)에 나타난 침매터널 하부에서 측정되는 간극수압의 시간변동을 살펴보면 간극수압의 최대치는 해측 침매터널 하부의 우각부에서 나타나고 이후 감소하다가 육측 침매터널 하부의 우각부에서 다시 상승하

는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 간극수압의 시간과형에 대한 최대치의 발생위치를 살펴볼 때 피복층 및 지반내 유체저항길이의 증가로 간극수압이 감소하고 이후 육측의 지반을 통한 침투유출의 영향으로 간극수압이 다시 상승하게 된 결과로 볼 수 있다. 또한 침매터널 하부의 간극수압(Fig. 8(a))은 전체적으로 쌍봉형의 비선형적인 시간변동을 나타내고 있으며, 상부의 경우(Fig. 8(b))와 비교하면, 하부면에서는 해측에서 육측으로 진행함에 따른 피복층의 저항으로 간극수압 퍼크치의 위상차가 큰 것을 알 수 있다.

3.6 침매터널 표면에서의 최대간극수압

Table 1에 제시된 파랑조건에 대해 Fig. 9에 나타내는 바와 같이 사석의 평균입경변화에 따른 침매터널 표면의 각 위치에서 계산되는 무차원 최대간극수압에 대한 공간

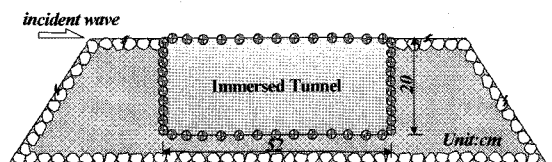
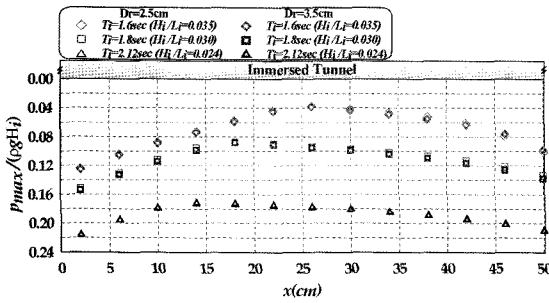
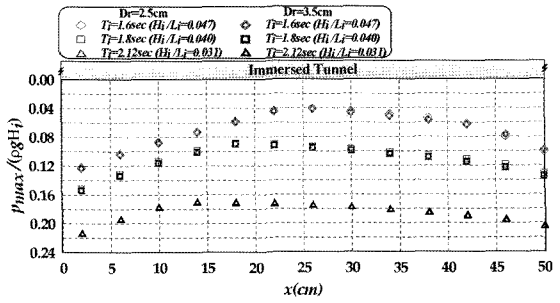


Fig. 9. Calculating points of pore water pressure around immersed tunnel.

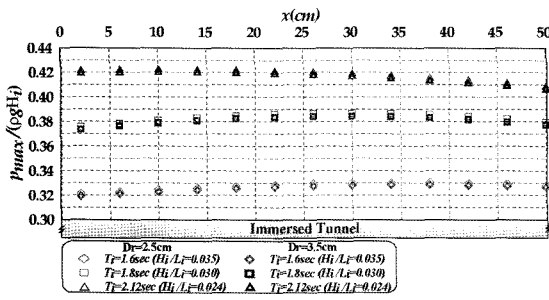


(a) $H_i = 12\text{cm}$.

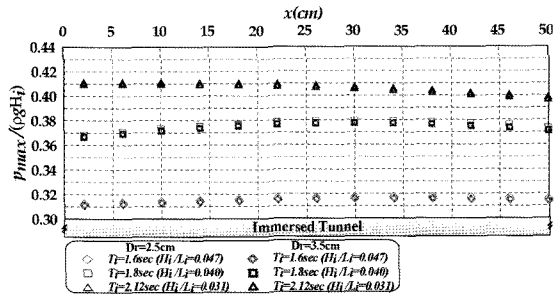


(b) $H_i = 16\text{cm}$.

Fig. 10. Maximum pore water pressure at the bottom face.

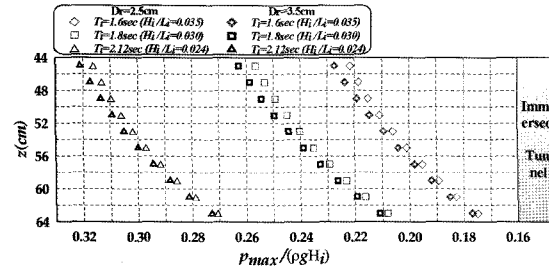


(a) $H_i = 12\text{cm}$.

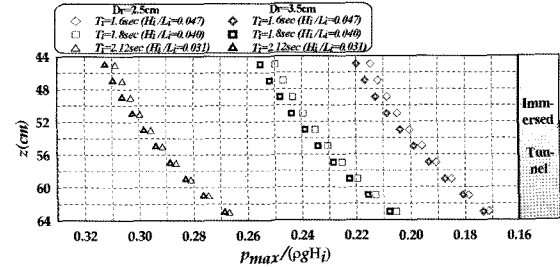


(b) $H_i = 16\text{cm}$.

Fig. 11. Maximum pore water pressure at the top face.



(a) $H_i = 12\text{cm}$.



(b) $H_i = 16\text{cm}$.

Fig. 12. Maximum pore water pressure at the offshore face.

분포를 그림 Fig. 10~Fig. 13에 제시한다. 침매터널 표면의 간극수압계는 침매터널의 육측과 해측면에 4 cm, 상부면과 하부면에 2 cm 간격으로 각각 설치하였다.

Fig. 10은 침매터널 하부에서 측정된 무차원 최대간극수압의 공간분포이다. 그림에서 침매터널 하부에서의 간극수압은 상대파고 H_i/h 의 영향에 대해 큰 변화는 관찰되지 않으나, 상대수심 h/L_f 의 변화에 따른 최대간극수압의 변화는 크게 나타나고 있다. 또한 최대치는 Fig. 8(a)에서 살펴본 바와 같이 해측의 침매터널 하부의 우각부에서 나

타고, 파랑의 전파와 더불어 감소하다가 이후에 다시 증가하는 경향을 나타낸다. 침매터널 하부에서 측정되는 간극수압의 최대치와 최소치와의 차이는 동일한 상대파고 H_i/h 에 대하여 파형경사 H/L_f 가 감소할수록 그 차이값은 작아지는 것을 확인할 수 있으므로 침매터널 하부에서 측정되는 간극수압은 주기가 짧을수록 빨리 소산된다는 것을 알 수 있다. 해측 침매터널 하부의 우각부로부터 간극수압의 최소치가 나타나는 위치는 Fig. 10(a), (b) 모두 거의 동일한 위치를 나타내고 있으며, 그 위치를 x_p 라고

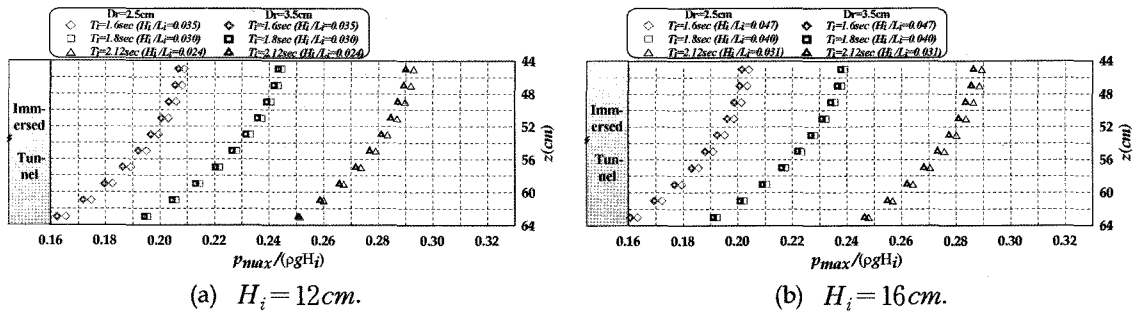


Fig. 13. Maximum pore water pressure at the onshore face.

하면 $T_i=1.6$ sec, $T_i=1.8$ sec, $T_i=2.12$ sec의 경우에 대하여 각각 $x_p=26$ cm, $x_p=18$ cm, $x_p=14$ cm의 근방에서 최소치가 나타나고, 그의 최소치는 L_i 와의 비(x_p/L_i)가 약 0.076, 0.045, 0.028인 위치로 주어지므로 동일한 상대파고 H_i/h 에 대하여 파형경사 H_i/L_i 가 감소할수록 침매터널 하부에서 측정되는 간극수압의 최소치는 해측으로 이동되어 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 최소치의 발생위치는 파고에 비해 주기의 영향을 상대적으로 많이 받는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 침매터널 하부에서 측정되는 간극수압 최소치의 발생위치로부터, 설계시 설계파랑 조건에 따라 침매터널 하부에는 비대칭의 전도모멘트가 발생될 것이다. 또한 침매터널의 하부에 작용하는 간극수압은 무시될 만큼의 작은 값이 아니므로 부력 및 양압력에 대한 고려도 필요하나 여기서는 차후의 연구과제로 남겨 놓기로 한다.

Fig. 11은 침매터널 상부에서 측정된 무차원간극수압의 공간분포를 나타낸 그림이다. 그림으로부터 동일한 상대파고 H_i/h 에 대하여 파형경사 H_i/L_i 가 감소할수록 간극수압은 크게 나타난다. 그리고 동일한 상대수심 h/L_i 에 대한 상대파고 H_i/h 의 변화를 살펴보면, Fig. 11(a)보다 상대파고 H_i/h 가 큰 Fig. 11(b)의 경우가 침매터널 상부에서 측정되는 간극수압은 작게 되는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 상대파고 H_i/h 가 클수록 보다 명확히 나타나는 침매터널 근방의 파동장의 와도현상으로 인해 파랑에너지가 소산된 결과이다.

침매터널 상부의 간극수압은 주기가 가장 긴 $T_i=2.12$ sec의 경우 육측으로 갈수록 다소 감소하는 경향을 보이나 Fig. 10과 비교하여 피복층의 영향을 거의 받지 않으므로 전체적으로 거의 일정한 간극수압분포가 나타나고 있다. 또한 Fig. 10과 Fig. 11에서 확인할 수 있는 바와 같이 침매터널 상부면과 하부면에서 측정되는 간극수압은 사석의 평

균입경변화에 큰 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 12와 Fig. 13은 침매터널의 해측과 육측에서 측정된 무차원간극수압의 공간분포를 나타낸 그림이다. 그림으로부터 침매터널의 해측에서 측정된 간극수압이 육측에서 측정된 간극수압에 비해 다소 큰 값을 나타내고 있다. 전체적으로 피복층의 깊이가 깊을수록 간극수압은 작아지고, 상대파고 H_i/h 가 큰 Fig. 12(b)와 Fig. 13(b)의 경우에 간극수압은 다소 작은 값을 나타내고 있다. 그리고 동일한 상대파고 H_i/h 에 대해서 파형경사 H_i/L_i 가 감소할수록 침매터널의 육측 및 해측에서의 최대간극수압은 크게 된다.

피복층 사석의 평균입경변화는, 평균입경이 증가될수록 침매터널의 해측(Fig. 12)에서는 큰 간극수압을 나타내고, 육측(Fig. 13)에서는 간극수압이 작아지는 것을 관찰할 수 있다. 또한 해측(Fig. 12)의 경우, 깊이가 깊어질수록 평균입경변화에 따른 간극수압의 차는 줄어드는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 파 · 지반 · 침매터널의 종합적인 비선형상호작용을 파악하기 위해, 해저지반 상부에 거치되는 침매터널을 대상으로 2차원의 직접수치해석기법(2D-DNS)을 적용하여 입경의 변화 및 다양한 파랑조건에 대한 파 · 지반 · 침매터널의 비선형동적상호작용을 검토하였다. 또한 이와 관련하여 지반기초 및 침매터널 주변의 간극수압과 와도 및 흐름의 특성을 고찰함으로써 세굴의 가능성 및 침매터널의 안정성에 관하여 논의하였다. 이로부터 얻어진 사항을 본 논문의 결론으로 하여 아래에 기술한다.

(1) Ursell수가 증가할수록 침매터널 주변에는 빠른 유속이 관찰되며, 해측 및 육측의 피복층 천단 우각부 근방에서는 고파랑의 작용하에 더욱 명확히 나타나는 반시계

방향과 시계방향의 와도를 확인할 수 있었다. 그리고 육측의 피복층 천단 우각부 근방에서 발생하는 와도현상은 Ursell수가 증가할수록 육측으로 이동되는 것을 알 수 있었다.

(2) 침매터널 하부의 지반내에 형성되는 와도의 크기는 상대수심이 작을수록 육측으로 이동되어 크게 나타나고, 이러한 경향은 Ursell수가 증가할수록 보다 뚜렷하게 나타났다. 또한 사석의 평균입경이 증가됨에 따라 피복층 및 지반내에서는 보다 뚜렷하게 발생하는 와도를 관찰할 수 있었다.

(3) 피복층 및 지반내 간극수압은 전체적으로 파고에 비해 주기의 영향에 보다 큰 영향을 받았으며, 침매터널 주변의 간극수압 분포는 침매터널 하부에 비해 측면에서 발생하는 간극수압의 영향이 상대적으로 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

(4) 침매터널의 상부에서 측정되는 간극수압은 거의 일정한 시간변동을 보인 반면, 침매터널의 측면에서 측정되는 간극수압은 피복층내에서 비선형성분이 크게 발달하고 피복층의 깊이가 깊어질수록 절대값이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 또한 침매터널의 측면에서 측정되는 간극수압은 서로 경향이 반대되는 시간변동을 나타내었으며 해측면에서의 간극수압은 육측면에서 측정되는 간극수압에 비해 최대치가 빨리 발생되었다. 한편 침매터널 하부에서의 간극수압은 전체적으로 쌍봉형의 비선형적인 시간변동과 더불어 해측에서 육측으로 진행함에 따라 상부면에서 측정되는 간극수압의 최대치와 비교하여 위상차가 크게 되는 것을 알 수 있었다.

(5) 피복층 사석의 평균입경변화에 따른 침매터널 주변의 최대간극수압을 살펴보면 침매터널의 상부면과 하부면에서 측정되는 간극수압은 사석의 평균입경에 큰 영향을 받지 않은 반면 평균입경이 증가될수록 침매터널의 해측면에서는 큰 간극수압을 나타내고, 육측면에서는 간극수압이 작아지는 것을 알 수 있었다. 그리고 침매터널의 해측에서 측정되는 간극수압은 피복층의 깊이가 깊어질수록 평균입경에 따른 간극수압의 차는 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

(6) 침매터널 표면에서 측정되는 최대간극수압의 결과로부터 설계시 설계파랑 조건에 따라 침매터널 주변에는 비대칭의 모멘트가 발생될 수 있고, 이와 연관하여 침매터널의 안정성은 문제가 될 수 있다. 또한 침매터널의 설계시 침매터널 하부에 작용하는 간극수압은 무시될 만큼의 작은 값이 아니므로 침매터널의 입출갱부 근처의 천

해지역에서 발생될 수 있는 쇄파로 인한 과도한 동수압 및 부력에 대한 침매함의 이탈문제 등에 대해서도 고려할 필요가 있다. 그리고 파-지반-침매터널의 상호작용과 관련하여 침매터널 주변에서 발생될 수 있는 피복석의 이탈 및 세굴에 대한 안정성 검토를 포함하여 지반침식 및 퇴매립에 의한 지반의 재압밀 및 부등침하 등으로 인한 침매터널의 침하에 대한 장기예측에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구는 규칙파를 대상으로 사석의 평균입경변화에 따른 파지반침매터널의 상호작용을 살펴보았다. 실제 해상에서 파랑의 불규칙성 뿐만 아니라 피복석의 공극률변화가 침매터널에 미치는 영향에 대해서도 향후 연구검토하고자 하며, 이로부터 얻어진 연구결과를 지면을 통해 보고할 계획이다.

참고문헌

- 김도삼, 이광호, 유현상, 김창훈, 손병규 (2004). 불규칙파동장에 있어서 VOF법에 의한 투과성잡계의 파랑제어 특성에 관한 연구. 한국해양·해양공학회지, 16(3), 121-129.
- 김도삼, 이광호, 허동수, 김정수 (2001). VOF법에 기초한 불투과 잡제 주변 파동장의 해석. 대한토목학회논문집, 21(1), 31-35.
- 허동수, 김창훈, 이광호, 김도삼 (2005). 파구조물지반의 비선형 동적응답해석을 위한 직접수치해석기법의 개발. 한국해양·해양공학회지, 17(2), 86-97.
- Ergun, S. (1952). Fluid flow through packed columns. Chem Eng., 48(2), 89-94.
- Hinatsu, M. (1992). Numerical simulation of unsteady viscous nonlinear waves using moving grid system fitted on a free surface. J. Kansai Soc. Nav. Archit. Japan, 217, 1-11.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. J. Comp. Phys., 39, 201-225.
- Hur, D.S. (2004). Deformation of multi-directional random waves passing over an impermeable submerged breakwater installed on a sloping bed. Ocean Eng., 31, 1295-1311.
- Hur, D.S. and Mizutani, N. (2003). Numerical estimation of the wave forces acting on a three-dimensional body on submerged breakwater. Coastal Eng., 47, 329-345.
- Hur, D.S., Mizutani, N. and Kim, D.S. (2004). Direct 3-D numerical simulation of wave force on asymmetric structures. Coastal Eng., 51, 407-420.
- Rasmussen, N. S. (1997). Concrete immersed tunnels-forty years of experience. Tunnelling and Underground Space

- Technology., 12(1), 33-46.
- Sakakiyama, T. and Kajima, R. (1992). Numerical simulation of nonlinear wave interacting with permeable breakwaters. Proceedings of 23rd Intl. Conf. of Coastal Eng., ASCE, 1517-1530.
- Liu, S.J. and Masliyah, J.H. (1999). Non-linear flows in porous media. J. Non-Newtonian Fluid Mech., 86, 229-252.
- 許東秀 (2000). 潛堤による多方向不規則波の碎波特性と潛堤上の構造物に作用する波力特性に関する基礎的研究. 工學博士學位論文, 日本名古屋大學大學院.
- 海岸開發技術研究センタ (2001). CADMAS-SURF數值波動水路の開発・研究・社團法人 海岸開發技術研究センタ, 日本.

Received August 25, 2005

Accepted December 7, 2005