

## 파 · 수중방파제 · 지반의 비선형 동적응답에 관한 연구

허동수\* · 김창훈\*\* · 염경선\*\*\* · 김도삼\*\*\*\*

\*경상대학교 토목환경공학부 해양산업연구소

\*\*한국해양대학교 대학원 건설환경공학부

\*\*\*경상대학교 대학원 토목환경공학부

\*\*\*\*한국해양대학교 건설환경공학부

### Nonlinear Dynamic Responses among Wave, Submerged Breakwater and Seabed

DONG-SOO HUR\*, CHANG-HOON KIM\*\*, GYEONG-SEON YEOM\*\*\* AND DO-SAM KIM\*\*\*\*

\*Institute of Marine Industry, Division of Civil and Environmental Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

\*\*Division of Construction and Environmental Engineering, Graduate School, Korea Maritime University, Busan, Korea

\*\*\*Division of Civil and Environmental Engineering, Graduate School, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

\*\*\*\*Division of Construction and Environmental Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Direct Numerical Simulation 직접수치해석, Submerged Breakwater 수중방파제, Seabed 해저지반, Pore Water Pressure 간극수압, Flow 흐름

**ABSTRACT:** Recently, various-shaped coastal structures have been studied and developed. Among them, the submerged breakwater became generally known as a more effective structure than other structures, because it not only serves its original function, but also has the ability to preserve the coastal environment. Most previous investigations have been focused on the wave deformation and energy dissipation due to submerged breakwater, but less interest was given to their internal properties and dynamic behavior of the seabed foundation under wave loadings. In this study, a direct numerical simulation (DNS) is newly proposed to study the dynamic interaction between a permeable submerged breakwater over a sand seabed and nonlinear waves, including wave breaking. The accuracy of the model is checked by comparing the numerical solution with the existing experimental data related to wave · permeable submerged breakwater · seabed interaction, and showed fairly nice agreement between them. From the numerical results, based on the newly proposed numerical model, the properties of the wave-induced pore water pressure and the flow in the seabed foundation are studied. In relation to their internal properties, the stability of the permeable submerged breakwater is discussed.

### 1. 서 론

해안구조물의 건설시 소요되는 막대한 공사비와 해수교환의 차단으로 인한 연안역의 수질악화가 문제로 대두되면서 최근에는 방파제의 본래의 목적 이외에 연안역의 수질환경에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 다양한 형태의 파랑제어구조물이 제안되고 있다. 그 중에서 수중방파제는 이안제와 같은 표사제어구조물의 대체로도 그 적용성이 탁월할 뿐만 아니라 시공성이 우수하며, 고파랑의 제어기능, Sea-front개발 및 Amenity공간의 창출 및 생태계를 포함한 해양환경의 개선과 같은 부수적인 효과까지 기대할 수 있는 우수한 장점 때문에 부산 송도해수욕장의 사빈유실방지를 위한 기시공예를 위시하여, 많은 해역에 그의 계획을 볼 수 있다. 그러나 지금까지는 수중방파제에 있어서 파랑변형, 파랑에너지소산 및 사석의 내파안정성 등에 초점을 둔 연구가 대부분이었지만(김도삼과 이광호, 2001; 김도삼 등, 2001a, 2001b; 허동수와

김도삼, 2003; Losada et al., 1996, 1997), 최근 파랑특성에 따른 해저지반의 간극수압의 변화와 같은 동적응답과 그에 따른 수중방파제의 침하, 지반내의 간극수압의 증가에 따른 액상화문제 및 지반의 파괴등 파랑 · 수중방파제 · 지반의 통합된 동역학적인 상호간섭에 대한 연구가 강조되고 있다.

대표적인 연구로서 Mizutani et al.(1998)는 경계요소법(BEM)과 유한요소법(FEM)이 결합된 BEM-FEM모형을 개발하여 비선형형성의 파랑과 지반위에 설치된 수중방파제와의 동적응답관계에 대한 연구를 수행하였다. 하지만 실제 현지에서 많은 문제가 되고 있는 액상화나 세굴 · 토사유출에 큰 영향을 미치는 쇄파에 대한 모델의 적용성에 문제점을 안고 있다. 최근에는 쇄파 이후의 파랑변형 및 지반의 동적응답에 있어서 유체부에 대해서는 Navier-Stokes방정식을 직접 이용하는 NASA-VOF를 채용하고, 지반부에는 Biot(1941)의 압밀이론에 기초한 2상점탄성체(2相粘彈性體)로 가정하여 유한요소법을 적용하는 VOF-FEM이 개발되었다(Jiang et al., 2000). 그러나 이러한 수치해석적인 접근방법들은 해저불투과의 가정으로부터 파동장과 지반부에 대해 서로 다른 지배방정식 및 수치해석기법을 적용하여 해석하는 Hybrid기법에

제1저자 허동수 연락처: 경상남도 통영시 인평동 445번지

055-640-3152 dshur@nongae.gsnu.ac.kr

의존하고 있으므로 파동장과 지반부를 따로 계산하고 이를 결합하여 해석하여야 하는 많은 불편함을 가지고 있을 뿐만 아니라, 지반내 유체흐름에 대부분이 정상류에 대한 Darcy법칙을 적용하고 있기 때문에 지반표면 근방에서 발생하는 비정상적인 간극수의 흐름을 정도 높게 평가할 수 없는 단점이 지적되어 왔다.

최근, 파동장과 지반부에 대한 하나의 지배방정식으로 유한차분법을 적용하여 파동장과 지반부에 동일한 수치알고리즘을 통한 파·구조물·지반의 상호간섭에 대해 Full-nonlinear해석을 수행할 수 있는 직접수치해석기법(direct numerical simulation : DNS)이 개발되었다(허동수 등, 2005).

따라서, 본 연구에서는 허동수 등(2005)이 제안한 직접수치해석기법을 이용하여, 해저지반상의 수중방파제에 대한 모델의 적용성 및 타당성을 검증함과 동시에, 수중방파제에 의한 파동장의 변화 및 수중방파제하의 지반내에서 유체의 흐름과 간극수압의 변동특성 등을 상세히 검토하여, 수중방파제 근방에서 발생하는 세굴의 가능성과 수중방파제의 내파안정성 등을 논의한다.

## 2. 해석이론

### 2.1 기초방정식

파·수중방파제·지반의 비선형 상호간섭을 해석하기 위해 해석영역의 양쪽에 부가감쇠영역을 설치하여 파의 재반사를 방지하고(Hinatsu, 1992) 해석영역내에 조파를 위한 조파소스(Brosen and Larsen, 1987)와 구조물 및 해저지반이 고려된 Fig. 1(그림에서  $h$ 는 수심,  $d$ 는 지반의 두께,  $L_i$ 는 입사파의 파장을 각각 나타낸다)과 같은 2차원수치파동수로를 고려한다.

본 연구의 기초방정식은 비압축성·점성유체의 파동장과 지반 및 투과성구조물을 포함한 해석장 전체에 대해 동일한 수치알고리즘을 적용하여 조파소스를 포함하는 연속방정식(1)과 투과층의 다양한 기하학적인 형태에 따라 모델화된 유체저항을 도입하여 Navier-Stokes운동방정식을 Porous Body Model(PBM)로 확장한 운동방정식(2), (3)으로 구성된다. 그리고 식(4)는 자유수면의 형상을 모의하기 위한 VOF(Volume Of Fluid)함수의 이류방정식을 나타낸다.

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

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

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

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

여기서,  $q^* = q(z, t) \delta(x - x_s)$ 로 조파위치  $x = x_s$ 에서의 조파소스의 밀도,  $\delta$ 는 Dirac delta함수,  $u, w$ 는  $x, z$ 방향의 속도성분,  $t$ 는 시간,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $p$ 는 압력,  $\nu$ 는 유체의 동점성계수 ( $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ),  $g$ 는 중력가속도,  $\beta$ 는 부가감쇠영역의 파랑감쇠계수,  $\epsilon_v$ 는 체적공극률,  $\epsilon_x, \epsilon_z$ 는  $x, z$ 방향에 대한 면적투과율,  $F$ 는  $0 \leq F \leq 1$ 의 값을 갖는 VOF함수,  $\tau_{i,j}$  ( $i = x, z, j = x, z$ )는 검사체적의 표면에 작용하는 점성응력으로  $i$ 는 점성응력이 작용하는 평면을 가리키고,  $j$ 는 그 평면내에서의 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 난류저항으로 다음 식으로 결정된다(Shijie and Jacob, 1999; Ergun, 1952).

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

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

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

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

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

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

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

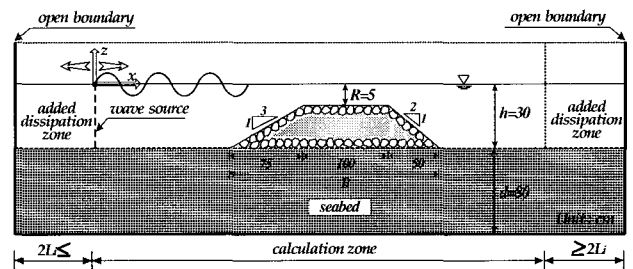


Fig. 1 Definition sketch for the interaction analysis of wave-submerged breakwater-seabed

### 2.2 수치해석방법

본 연구에서는 엇갈린 격자(staggered mesh)를 채용하여 지배방정식을 유한차분법으로 차분근사하여 수치계산을 수행하였다. 또한 다음 시간스텝에서의 속도  $u, w$  및 압력  $p$ 는 SOLA기법(numerical

SOLution Algorithm for transient fluid flow)을 이용하여 계산된다. 이류방정식에 대해서는 VOF함수의 수치확산을 방지하기 위한 Donor-acceptor법을 사용하였다 (Hirt and Nichils, 1981; Kawasaki, 1999; Hur and Mizutani, 2003). 또한 시간항에 대해서는 전진차분을 적용하고 압력항과 응력항에 대해서는 중앙차분을 적용한다. 이류항에 대해서는 1차정도의 상류차분과 2차정도의 중앙차분을 가중평균하여 혼합한 증여(donor)차분근사를, 나머지항에 중앙차분근사시키는 양해법을 도입하였다. 본 연구의 수치계산에 이용된 경계조건 및 세부사항에 대하여는 참고문헌(김도삼과 이광호, 2001; 김도삼 등, 2001b; Hur and Mizutani, 2003)을 참조하기 바란다.

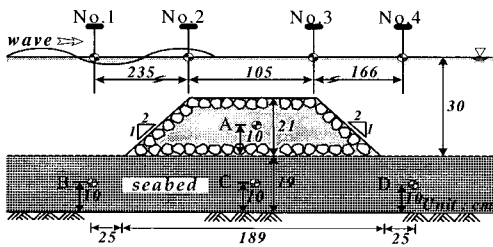


Fig. 2 Definition sketch for the interaction analysis of wave-submerged breakwater-seabed, and measuring points of wave profiles and pore water pressures

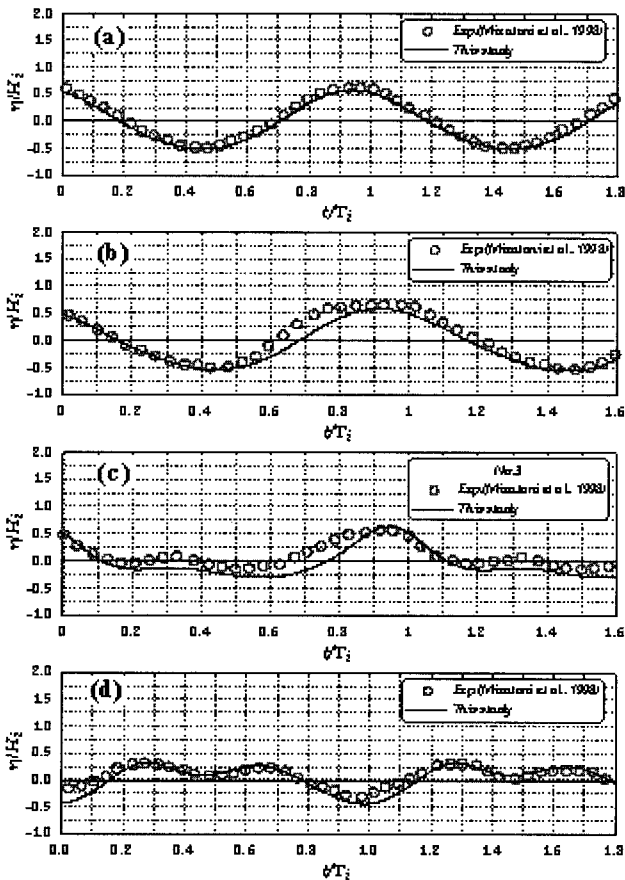


Fig. 3 Comparison of time variations of wave profiles ; (a) No.1. (b) No.2. (c) No.3. (d) No.4.

### 3. 수치해석기법의 검증

본 수치해석의 타당성을 검증하기 위하여 Mizutani et al.(1998)의 2차원실험결과를 이용하였다. Fig. 2는 비교에 사용된 Mizutani et al.(1998)의 실험제원 및 수위변동, 간극수압의 비교 위치를 나타내고 있다. 수중방파제에 대해서는 공극률  $\epsilon_x = \epsilon_z = \epsilon_v = 0.4$ , 평균입경  $D_p = 2.7cm$ , 해저지반의 경우에 대해서는 공극률  $\epsilon_x = \epsilon_z = \epsilon_v = 0.4$ , 평균입경  $D_p = 0.08cm$ 의 모래질지반이 고려되었으며, 입사파랑조건은 입사파고  $H_i = 3cm$ , 입사주기  $T_i = 1.4sec$  이다.

Fig. 3(그림에서  $\eta$ 는 수면변동)은 Fig. 2의 지점 No.1, No.2, No.3 및 No.4에서 수면변동에 대해 본 계산결과를 Mizutani et al.(1998)의 실험치와 비교한 것으로, 수중방파제 천단상의 수심변동에 따른 비선형파의 형성, 발달 및 수중방파제 배후에서의 파봉분열을 포함하여 수중방파제 전후의 전체적인 수면변동을 잘 재현하고 있다.

Fig. 4는 Fig. 2의 각 위치(A, B, C, D점)에서 계산한 간극수압의 시간변동을 Mizutani et al.(1998)의 실험치와 비교한 것이다. A, C점에 있어서 본 간극수압의 피크치가 실험치와는 다소 차이를 보이는 하지만, 전체적으로 수중방파제내부 및 지반내의 간극수압의 시간변동은 실험치와 좋은 일치성을 보이고 있다.

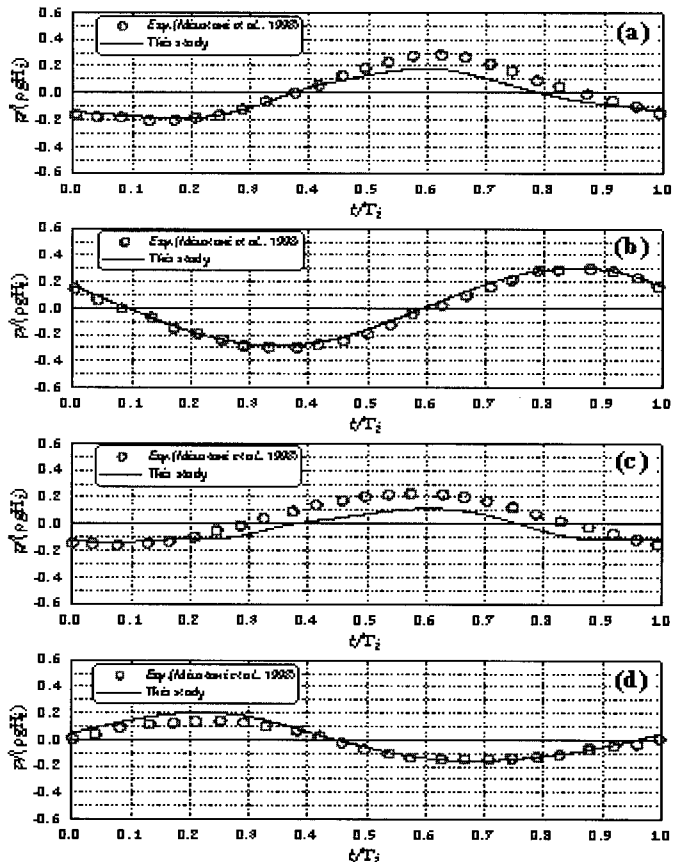


Fig. 4 Comparison of time variations of pore water pressures ; (a) Point A. (b) Point B. (c) Point C. (d) Point D.

이상의 수면형 및 간극수압의 시간변동에 있어서 본 수치해석의 결과와 Mizutani et al.(1998)의 실험결과가 잘 일치하는 것으로 판단되므로 본 수치해석의 타당성이 검증된다.

4. 파 · 수중방파제 · 지반간 상호간섭의 수치해석

Fig. 1의 수치파동수모에 나타내는 바와 같이 평균입경  $D_p = 0.08\text{cm}$ , 공극률  $\epsilon_x = \epsilon_z = \epsilon_v = 0.4$ 의 모래질지반상에 평균입경  $D_p = 2.5\text{cm}$ , 공극률  $\epsilon_x = \epsilon_z = \epsilon_v = 0.4$ 의 사석층을 갖는 천단수심  $R = 5\text{cm}$ 의 수중방파제를 대상으로 하여, Table 1 ( $B$ 는 수중방파제의 저면폭을 나타낸다)의 경우에 대해 수치해석을 실시하였다. 또한 수중방파제 주변 및 지반내의 평균유속과 최대 간극수압분포 등을 살펴봄으로써 수중방파제 주변에서 발생하는 토사유출 · 세굴의 가능성 등을 파악하고, 파 · 수중방파제 · 지반의 상호간섭으로 인하여 수중방파제하단에 작용하는 파압의 변화와 더불어 파동장의 수위변화를 수치적으로 고찰하였다.

4.1 공간파고변화와 평균수위변화

Table 1의 CASE 1 ~ CASE 3, CASE 7 ~ CASE 9에 대한 입사파조건에 대한 수중방파제 주변의 파고  $H$ , 최대수위  $\eta_{\max}$  및 최저수위  $\eta_{\min}$ 의 공간분포를 입사파고  $H_i$ 로 무차원시켜 나타낸 결과가 Fig. 5에 제시되어 있고, Fig. 6은 평균수위  $\bar{\eta}$ 의 공간분포를 입사파고  $H_i$ 로 무차원시켜 나타낸 결과이다.

Fig. 5로부터 파랑이 지반상을 진행함에 따라 수중방파제 진후에서 쇄파 및 지반내 침투 등에 의한 파랑에너지의 손실로 무차원 파고가 감소되는 것을 확인할 수 있고, 이와 같은 경향은 장주기 측으로 될수록 현저히 되는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 6을 살펴보면 무차원평균수위변화  $\bar{\eta}/H_i$ 는 일반적으로 잘 알려져 있는 바와 같이 쇄파점 이후에는 Wave set-up현상을 나타내어 수중방파제배후에서의 평균수위가 상승된다. 평균수위가 급격히 감소되는 지점은 동일한 상대수중방파제폭비  $B/L_i$ 의 경우 파형경사  $H_i/L_i$ 가 증가할수록 수중방파제의 해측단으로 약간 이동되는 현상을 나타낸다. 또한 평균수위의 상승은 동일한 상대수중방파제

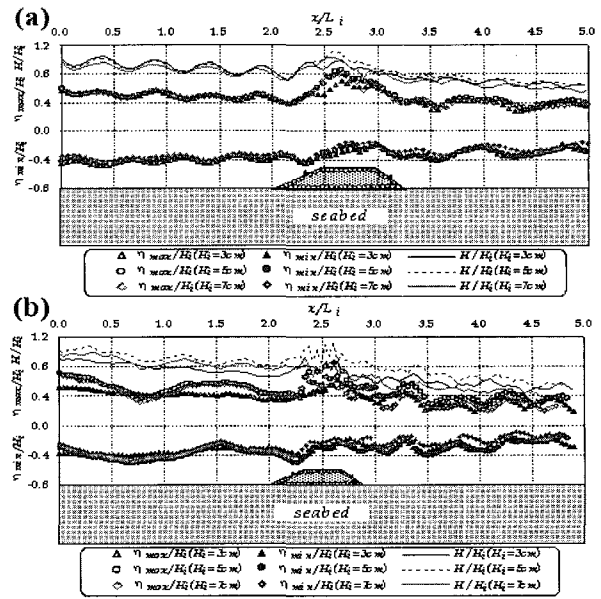


Fig. 5 Spatial distributions of wave levels and wave heights ; (a) CASE 1 ~ CASE 3. (b) CASE 7 ~ CASE 9.

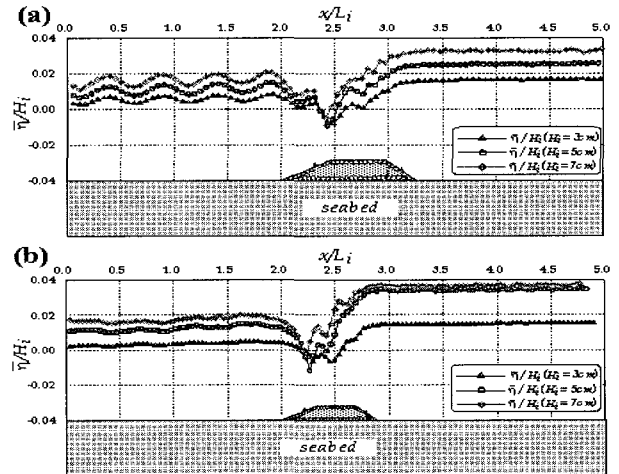


Fig. 6 Spatial distributions of mean water levels ; (a) CASE 1 ~ CASE 3. (b) CASE 7 ~ CASE 9.

Table 1 Conditions of incident waves

$R/h$	$T_i$ (sec)	$B/L_i$	$h/L_i$	$H_i$ (cm)	$H_i/h$	$H_i/L_i$	Ursell수 ( $H_i L_i^2 / h^3$ )	CASE
0.017	1.2	1.28	0.17	3	0.10	0.017	3.48	1
				5	0.17	0.028	5.80	2
				7	0.24	0.040	8.12	3
	1.4	1.04	0.14	3	0.10	0.014	5.14	4
				5	0.17	0.023	8.56	5
				7	0.24	0.032	11.98	6
	1.6	0.89	0.12	3	0.10	0.012	6.94	7
				5	0.17	0.020	11.57	8
				7	0.24	0.028	16.20	9
	1.8	0.78	0.10	3	0.10	0.010	10.00	10
				5	0.17	0.017	16.67	11
				7	0.24	0.024	23.33	12

폭비  $B/L_i$ 에 대해 파형경사  $H_i/L_i$ 가 증가할수록 큰 값을 나타내고 있으나, Fig. 6(a), Fig. 6(b)로부터 평균수위변화는 입사파랑의 특성뿐만 아니라 수중방파제천단상에서 발생하는 쇄파규모와 같은 특성에 의해서도 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

4.2 수중방파제주변 및 지반내의 최대간극수압분포

Fig. 7은 Table 1의 CASE 1, CASE 3, CASE 7, CASE 9에 대한 입사파조건에 대해 수중방파제내부 및 수중방파제하의 지반내에 형성되는 최대간극수압  $p_{max}$ 의 공간분포를  $\rho g H_i$ 로 무차원화한 결과이다. 전체적으로 간극수압분포는 수중방파제의 전면에서 상대적으로 적은 값을 나타내지만 수중방파제천단상에서 급격한 수심의 감소로 수위가 상승하기 때문에 보다 큰 간극수압을 나타내고, 수중방파제배후에서는 전면보다도 작은 간극수압을 나타내는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 파랑의 전파에 따라 수중방파제 및 지반으로 인한 유체저항길이의 증가, 수중방파제천단상에서 쇄파와 파랑의 지반내로의 침투 및 용출로 인한

파랑에너지의 감소 등에 기인한 결과로 판단된다. 그리고 등간극수압선이 촘촘히 분포되는 수중방파제의 사면상에서는 동수경사가 상대적으로 크게 되고, 이로부터 수중방파제전후의 사면상에서 투수유속이 빨라지므로 사석이 이동될 수 있는 가능성이 높아진다. 수중방파제내부와 수중방파제하의 지반내에서 등간극수압선이 복잡하게 나타나는 것은 전술한 바와 같이 수중방파제상의 파동장이 쇄파 등으로 인하여 수중방파제내의 유속장이 복잡하게 형성되기 때문인 것으로 판단된다. 수중방파제하의 지반내에 작용하는 간극수압의 영향범위는 동일한 상대수중방파제폭비  $B/L_i$ 에 대하여 파형경사  $H_i/L_i$ 가 증가할수록 크게 되고, 동일한 상대파고  $H_i/h$ 에 대해서는 상대수중방파제폭비  $B/L_i$ 가 감소할수록 크게 되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향으로부터 동일한 입사파고  $H_i$  및 동일한 입사주기  $T_i$ 에 대한 각각의 경우에  $Ursell$ 수가 커질수록 지반내의 간극수압의 영향으로 지반의 불안정성이 유발될 가능성이 높아질 것으로 판단된다.

4.3 수중방파제주변 및 지반 내의 평균유속장

Fig. 8은 Table 1의 CASE 1, CASE 3, CASE 7, CASE 9에 대한 지반상에 설치된 수중방파제주변의 평균유속장을 나타낸 결과로 평균유속  $\vec{V}$ 는 식(11)에 의해 계산될 수 있다.

$$\vec{V} = \frac{1}{3T_i} \int_{t_i}^{t_i+3T_i} \vec{V} dt \tag{11}$$

여기서,  $t_i$ 는 데이터의 취득시점이고  $T_i$ 는 입사파의 주기,  $\vec{V} = (u, w)$ 이다.

Fig. 8의 모든 그림에서 알 수 있는 바와 같이 빠른 유체입자 속도는 지반과 접하는 수중방파제의 해측 우각부에서 지반내로 향하는 강한 침투유속을 발생시키고, 파동장의 해측 수중방파제천단우각부로 상승하는 강한 흐름을 발생시키고 있다. 또한 Fig. 8(d)의 결과를 제외한 다른 그림을 보면 해측의 수중방파제사면상에서는 하향의 전단유속을 관찰할 수 있다. 수중방파제천단을 통과한 파랑은 육측의 수중방파제사면을 하향하는 전단유속을 발생시킨 후, 지반과 접한 육측의 수중방파제우각부에 지반내로 향하는 강한 침투유속을 발생시키는 것을 확인할 수 있다. 이상과 같은 흐름으로 인하여 수중방파제우각부 및 사면상 사석의 이동과 세굴을 예측할 수 있을 것으로 판단되며, 주기가 길고 파고가 큰 CASE 9의 경우에 수중방파제천단우각부에서 형성되는 와도현상은 구조물의 파괴의 원인으로 작용될 수 있을 것으로 판단된다. 수중방파제전후면의 지반내에서는 방향이 서로 반대되는 규칙적인 와가 형성되며, 이는 동일한 상대파고  $H_i/h$ 에 대하여 수중방파제상대폭  $B/L_i$ 이 감소될수록, 동일한 수중방파제상대폭  $B/L_i$ 에 대해서는 파형경사가  $H_i/L_i$ 가 클수록 규모는 크게 되는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 동일한 입사파고  $H_i$  및 동일한 입사주기  $T_i$ 에 대한 각각의 경우에  $Ursell$ 수가 커

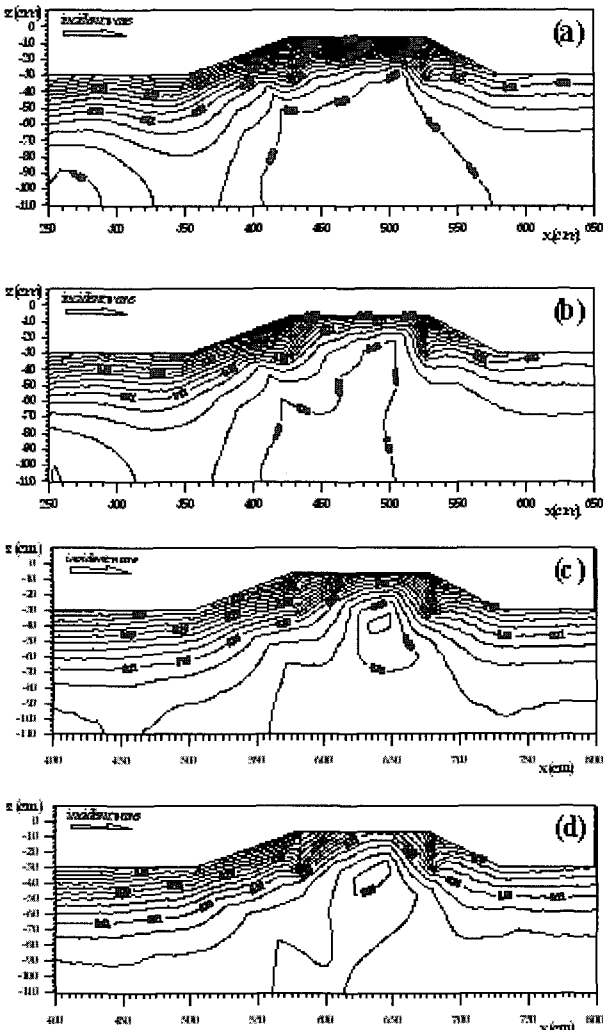


Fig. 7 Spatial distributions of maximum pore water pressures ( $p_{max}/\rho g H_i$ ); (a) CASE 1. (b) CASE 3. (c) CASE 7. (d) CASE 9.

질수록 지반내로 전달되는 파랑에너지가 커지기 때문인 것으로 판단된다. 또한 지반표면근방에서 형성되는 와는 장기적인 관점에서 지반내 흡입자골격을 느슨하게 하여 흡입자의 전단저항을 감소시킬 것으로 판단되며, 그 결과로 세굴과 같은 지반변형의 원인으로 작용될 수 있을 것으로 예상된다. 그리고 지반내부에는 와에서 분리되어 형성되는 순환류가 수중방파제 하부에서 천단을 향하여 흐르는 것을 알 수 있다.

4.4 수중방파제저면에서 간극수압

Fig. 10과 Fig. 11은 Table 1에 제시된 파랑조건에 대해 각각 입사주기 및 입사파고를 파라미터로 하여, Fig. 9에 나타난 것과 같이 지반과 접한 수중방파제저면의 각 위치에서 계산된 간극수압의 최대치에 대한 공간분포를 나타낸 결과이다.

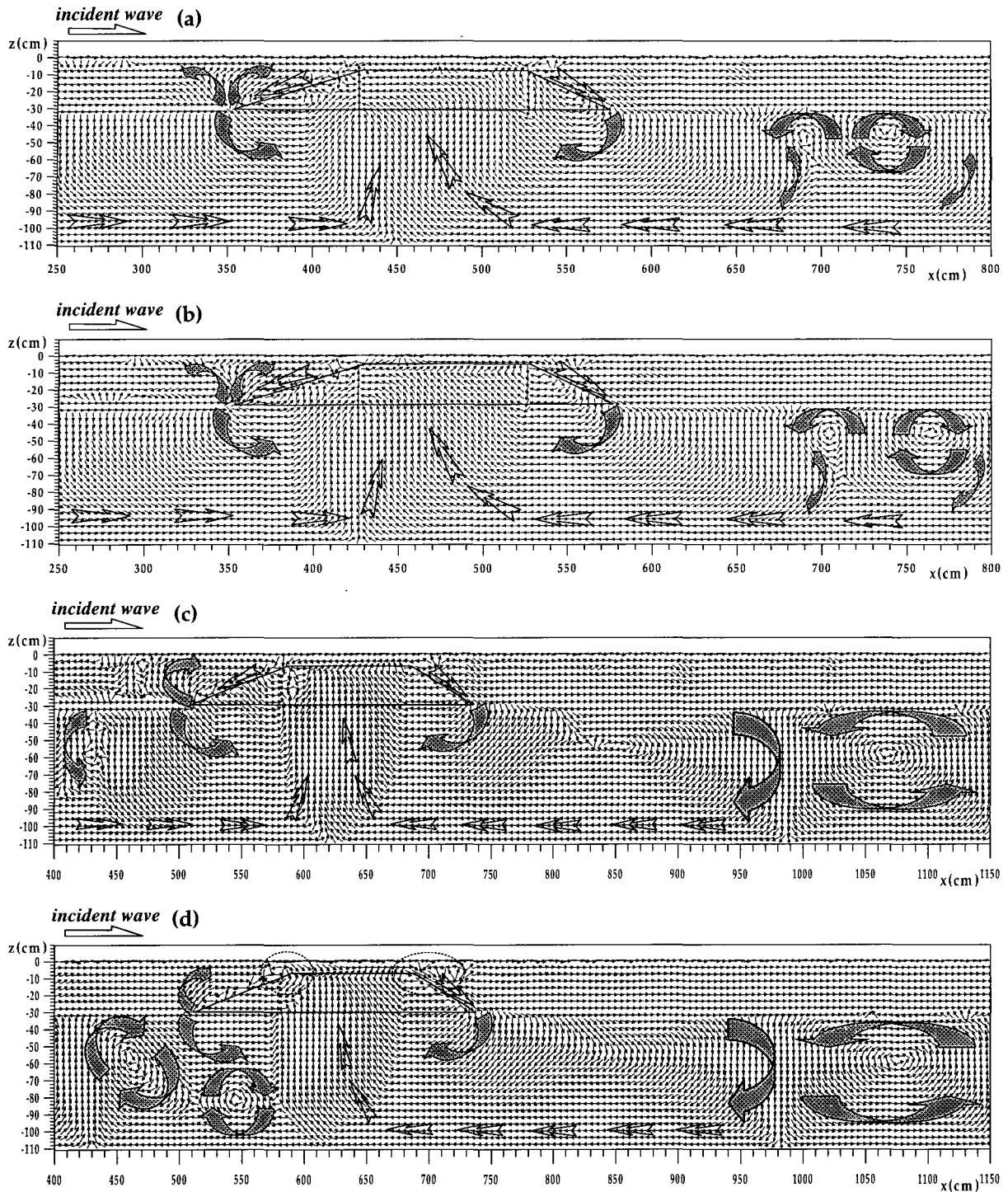


Fig. 8 Mean flow fields ; (a) CASE 1. (b) CASE 2. (c) CASE 7. (d) CASE 9.

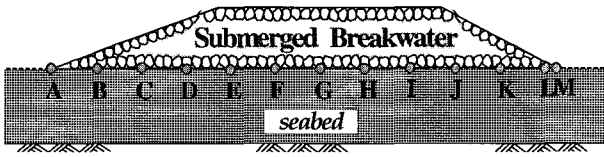


Fig. 9 Calculating points of pore water pressures below submerged breakwater

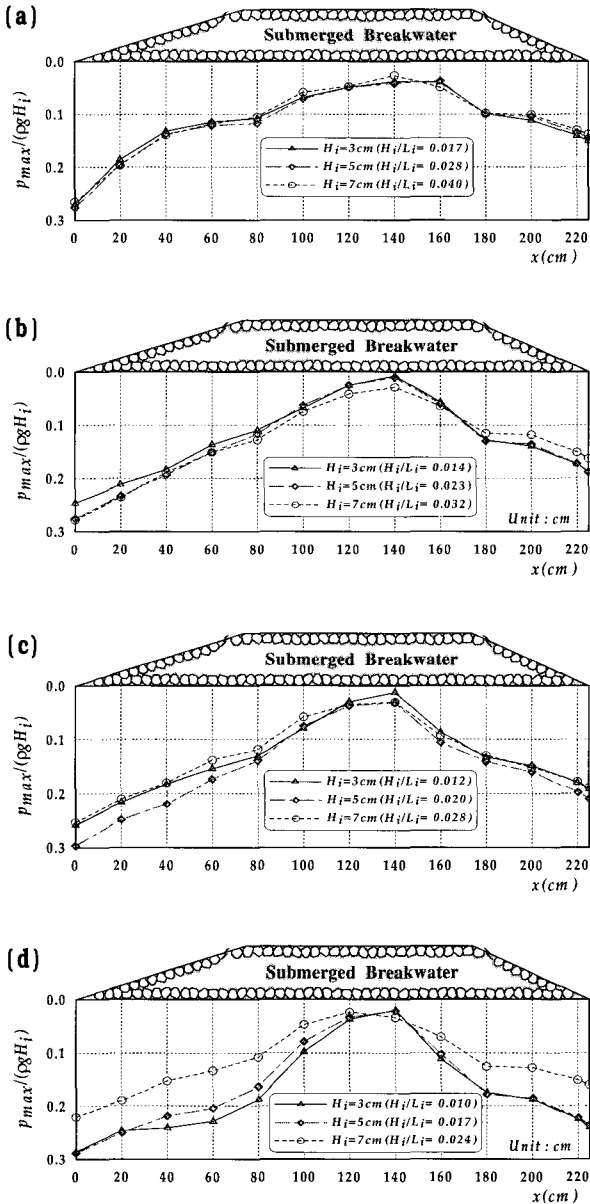


Fig. 10 Spatial distributions of maximum pore water pressures according to the variation of wave period at each point ; (a)  $T_i = 1.2\text{sec}$  (CASE 1 ~ CASE3). (b)  $T_i = 1.4\text{sec}$  (CASE 4 ~ CASE6). (c)  $T_i = 1.6\text{sec}$  (CASE 7 ~ CASE9). (d)  $T_i = 1.8\text{sec}$  (CASE 10 ~ CASE12).

그림으로부터 수중방파제저면에 작용하는 간극수압의 최대치는 해측 수중방파제우각부(A점)에서 나타나고, 파랑의 전파와 더불어 감소하면서 최소치는 수중방파제폭(225cm)에 대해 육측으로 약 54 ~ 73%(120 ~ 160cm)인 점 G ~ H 근방에서 나타나며, 이후에 다시 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 원인은 수중방파제천단에서 발생하는 쇠파로 인한 파랑에너지의 소산 및 해측의 수중방파제천단우각부로 향하는 사석층과 지반내 유체저항길이의 증가로 간극수압이 감소하고, 이후 육측의 수중방파제경사면 및 지반을 통한 빠른 침투유속으로 간극수압이 다시 상승하는 결과로 판단된다.

Fig. 10(c)의 파형경사  $H_i/L_i=0.028$ 과 Fig. 10(d)의 파형경사  $H_i/L_i=0.024$ 의 경우를 제외하면  $0\text{cm} \leq x \leq 100\text{cm}$ 부근에서 계산되는 간극수압의 최대치는 동일한 파고에 대하여 주기가 길어질수록 증가되는 것을 알 수 있고, 쇠파이후 발생하는 육측의 수중방파제경사면 및 지반으로의 침투유속으로  $160\text{cm} \leq x \leq 220\text{cm}$ 부근에서 계산되는 간극수압의 최대치는 Fig. 10(d)의 파형경사  $H_i/L_i=0.024$ 의 경우를 제외하면 동일

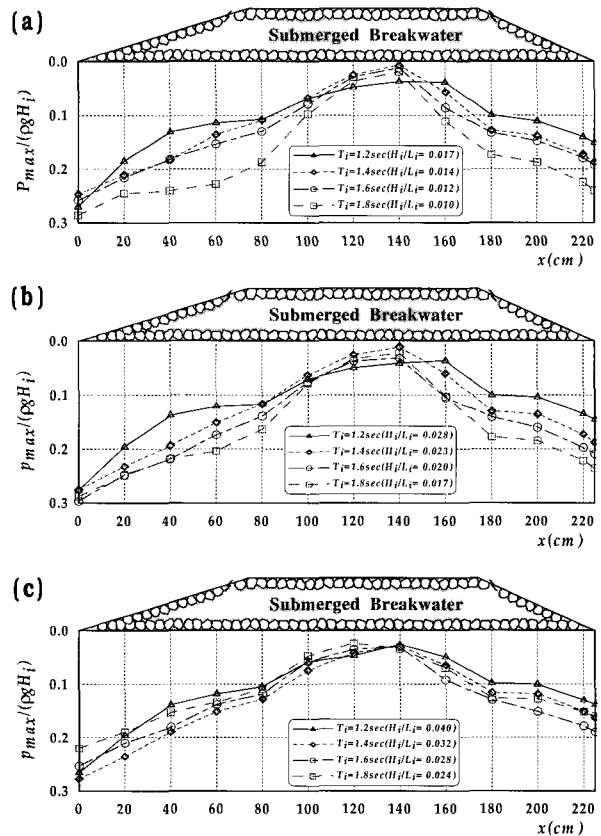


Fig. 11 Spatial distributions of maximum pore water pressures according to the variation of incident wave height at each point ; (a)  $H_i=3\text{cm}$  (CASE 1, 4, 7, 10). (b)  $H_i=5\text{cm}$  (CASE 2, 5, 8, 11). (c)  $H_i=7\text{cm}$  (CASE 3, 6, 9, 12).

한 파고에 대하여 주기가 길어질수록 증가되는 것을 알 수 있다. 또한 전체적으로 주기가 길어질수록 최소치는 빨리 발생하며 수중방파제배후에 형성되는 간극수압은 크게 되는 것을 알 수 있다. 이와 같이, 수중방파제저면에서의 간극수압 변화는 지반내에 형성되는 와의 규모 및 수중방파제상 파동장의 쇄파규모 등으로 인하여 형성되는 복잡한 유속장과 그에 따른 파랑에너지 소산에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

Fig. 11을 살펴보면  $0\text{cm} \leq x \leq 100\text{cm}$  부근에서 계산되는 간극수압의 최대치는  $T_i = 1.2\text{ sec}$ ,  $T_i = 1.4\text{ sec}$ 의 경우 파고변화에 따른 큰 차이는 확인할 수 없으나,  $T_i = 1.6\text{ sec}$ 인 경우는 파고  $H_i = 7\text{cm}$ 에서,  $T_i = 1.8\text{ sec}$ 의 경우에 대해서는 파고가 클수록 간극수압이 감소되는 것을 알 수 있다. 그리고 수중방파제저면의  $160\text{cm} \leq x \leq 220\text{cm}$  부근에서 계산되는 간극수압의 최대치는 파고가 클수록 간극수압이 다소 증가하는 경향을 보이고, 이후에 파고  $H_i = 7\text{cm}$ 에서 다시 간극수압이 감소하는 경향을 나타내며, 가장 큰 간극수압의 감소는  $T_i = 1.8\text{ sec}$ 에서 나타난다. 이러한 원인은 앞서 언급한 바와 같이 지반내 형성되는 와의 규모 및 수중방파제천단상에서 발생하는 쇄파규모에 따른 수중방파제내의 파랑에너지 소산과 연관되어 나타나는 결과로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구는 파·구조물·지반의 Full-nonlinear 간섭현상을 해석할 수 있는 직접수치해석기법에 대하여 그 타당성을 검증하였으며, 이를 해저지반상의 수중방파제에 적용하여 파랑조건에 따른 파·수중방파제·지반의 비선형상호간섭을 고찰하였다. 파동장에서는 파랑변형을 수중방파제를 포함한 지반내에서는 간극수압과 흐름의 해석결과를 기초로 하여 수중방파제근방에서 발생할 수 있는 세굴의 가능성과 해저지반과 수중방파제의 불안정의 가능성을 논의하였다. 이로부터 얻어진 중요한 사항을 본 논문의 결론으로 하여 아래에 기술한다.

(1) 수중방파제상의 쇄파점에서 Wave set-down과 수중방파제배후에서 Wave set-up현상이 발생한다. 이로 인한 평균수위변화는 입사파랑의 특성에 의해서도 큰 영향을 받지만, 수중방파제천단상에서 발생하는 쇄파규모에 의해서도 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

(2) 지반과 접하는 수중방파제의 우각부에서는 강한 침투유속이 발생하고, 수중방파제사면상에서는 하향의 전단흐름을 관찰할 수 있으며, 이러한 흐름으로 인하여 수중방파제우각부 및 사면상에서 사석이 이동될 수 있고, 세굴이 발생할 가능성이 있다. 또한 등간극수압선이 촘촘히 분포되는 수중방파제의 사면상에서는 동수경사가 커질 수 있고, 이로부터 수중방파제전후의 사면상에서 사석이 이동될 수 있는 가능성이 높아진다. 그리고 동일한 입사파고  $H_i$  및 동일한 입사주기  $T_i$ 에 대한 각각의 경우에  $U_{rsell}$ 수가 커질수록 지반내의 간극수압의 영향으로 지반의 불안정성이 유발될 가능성이 높아질 것으로 판단된다.

(3) 지반내에는 방향이 서로 반대되는 규칙적인 와가 형성되고, 이러한 경향은 동일한 입사파고  $H_i$  및 동일한 입사주기  $T_i$ 에 대한 각각의 경우에  $U_{rsell}$ 수가 커질수록 뚜렷하다. 또한 지반 표면근방에서 형성되는 와는 장기적인 관점에서 지반내 흡입자 끌격을 느슨하게 하여 흡입자의 전단저항을 감소시킬 것으로 판단되며, 그 결과로 세굴과 같은 지반변형의 원인으로 작용될 수 있을 것으로 예상된다.

(4) 수중방파제저면에서 간극수압의 공간분포는 전체적으로 주기가 길어질수록 최소치는 빨리 발생하며 수중방파제배후에 형성되는 간극수압은 크게 되는 것을 알 수 있다. 이와 같이, 수중방파제저면에서의 간극수압 변화는 지반내에 형성되는 와의 규모 및 수중방파제상 파동장의 쇄파규모 등으로 인하여 형성되는 복잡한 유속장과 그에 따른 파랑에너지 소산에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 김도삼, 이광호 (2001). "월파를 허용하는 투과성 방파제의 파랑 변형에 관한 수치해석", 한국해양공학회지, 제16권, 제2호, pp 1-5.
- 김도삼, 배은훈, 이봉재 (2001a). "3차원파동장에 있어서 복수열 불투과성잠재에 의한 파랑제어에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제15권, 제3호, pp 107-113.
- 김도삼, 이광호, 허동수, 김정수 (2001b). "VOF법에 기초한 불투과성잠재 주변파동장의 해석", 대한토목학회논문집, 제21권, 제5-B호, pp 551-560.
- 허동수, 김도삼 (2003). "VOF법에 의한 불규칙파동장에 있어서 불투과성잠재에 의한 파랑에너지 변형특성", 한국해양·해양공학학회지, 제15권, 제4호, pp 207-213.
- 허동수, 김창훈, 이광호, 김도삼 (2005). "파·구조물·지반의 비선형 동적응답해석을 위한 직접수치해석기법의 개발", 한국해양·해양공학학회지, 제15권, 제4호, pp 207-213.
- Biot, M.A. (1941). "General Theory of Three Dimensional Consolidation", J. Appl. Phys., Vol 12, pp 155-164.
- Brorsen, M. and Larsen, J. (1987). "Source Generation of Nonlinear Gravity Waves with Boundary Integral Equation Method", Coastal Engrg., Vol 11, pp 93-113.
- Ergun, S. (1952). "Fluid Flow Through Packed Columns", Chem. Engrg. Prog., Vol 48, No 2, pp 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, No 217, pp 1-11.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981). "Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", J. Comp. Phys., Vol 39, pp 201-225.
- Hur, D.S. and Mizutani, N. (2003). "Numerical Estimation of the Wave Forces Acting on a Three-dimensional Body on Submerged Breakwater", Coastal Engrg., Vol 47, pp 329-345.



- Jiang, Q.S., Takahashi Y., Muranishi, M and Isobe. (2000). "A VOF-FEM Model for the Interaction among Wave, Soils and Structure". Proc. Coastal Engrg., JSCE, Vol 47, pp 51-55.
- Kawasaki, K. (1999). "Numerical Simulation of Breaking and Post Breaking Wave Deformation Process around a Submerged Breakwater", Coastal Engrg. in Japan, Vol 41, No 3, pp 201-223.
- Liu, S. and Jacob H.M. (1999). "Non-linear Flows in Porous Media", J. Non-Newtonian Fluid Mech., Vol 86, pp 229-252.
- Losada, I.J., Silva, R. and Losada, M.A. (1996). "3-D Non-breaking Regular Wave Interaction with Submerged Breakwaters", Coastal Engrg., Vol 28, pp 229-248.
- Losada, I.J., Patterson, M.D. and Losada, M.A. (1997). "Harmonic Generation Past a Submerged Porous Step", Coastal Engrg., Vol 31, pp 281-304.
- Mizutani, N., Mostafa, A.M. and Iwata, K. (1998). "Nonlinear Regular Wave, Submerged Breakwater and Seabed Dynamic Interaction", Coastal Engrg., Vol 33, pp 177-202.
- Sakakiyama, T. and Kajima, R. (1992). "Numerical Simulation of Nonlinear Wave Interacting with Permeable Breakwaters", Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Engrg., ASCE, pp 1517-1530.

---

2005년 7월 18일 원고 접수

2005년 12월 5일 최종 수정본 채택