

지하수위 변화에 따른 호안 주변 지반내의 흐름특성 Pore Flow Characteristics in Seabed around Dike Due to Variation of Ground Water Level

김창훈* · 허동수** · 김도삼*

Chang Hoon Kim*, Dong Soo Hur** and Do Sam Kim*

요 지 : 최근, 해수욕장으로서의 기능 창출 뿐만 아니라 해안공간의 이용 및 개발에 따른 자연해변의 소실을 대체할 수 있는 인공해변이 건설되고 있다. 그리고, 파랑작용에 의한 매립토사의 유출로부터 인공해변을 보호하기 위한 구조물이 필요하며, 일반적으로 호안이 주로 건설된다. 해저지반 상부에 건설되는 호안의 안정성을 위하여 필히 검토되어야 할 사항 중의 하나가 호안 배후의 지하수위 거동이다. 그러나, 비선형파랑과 지하수위의 거동특성이 인공해변의 토사유출 및 구조물의 안정성에 중요한 요소로 작용함에도 불구하고 이에 대한 연구는 거의 수행되지 않았다. 본 연구에서는 비선형파랑과 호안 및 지하수위로 인한 흐름간의 동적 상호작용을 살펴보기 위하여 정수위와 지하수위와의 차이를 고려할 수 있는 수치파동수로를 개발하였다. 개발된 수치파동수로를 이용하여, 지하수위 변화가 호안 주변 지반내의 수리학적 특성에 미치는 영향을 살펴보고, 지하수위의 변화에 따른 파동장 및 간극수 흐름, 간극수압 및 와도를 수치적으로 재현하였다. 결과로부터 지하수위의 변화에 따른 호안 주변 지반내의 수리학적 특성들이 어떻게 영향을 받는지 알 수 있었다.

핵심용어 : 파랑흐름간 상호작용, 호안, 지하수위 변화, 수치파동수로, 수리학적 특성

Abstract : Recently, an artificial beach has been constructed compensating for loss of the natural one caused by the development of coastal area, as well as serving as a location for recreational activities such as sea bathing. It is well known that some structure should be constructed to protect an artificial beach from the outflow due to wave action of the reclaimed sand. In general, dike is utilized as the structure to protect an artificial beach. And, one of the factors which may need to be taken into consideration for stability of dike on seabed foundation is the ground water behavior behind dike. However, the interrelated phenomena of nonlinear wave and ground water response have relatively little attention although these interactions are important for stability of structure and sand suction to the artificial beach. In this paper, the numerical wave tank was developed to clarify nonlinear wave, dike and ground water dynamic interaction, which can simulate the difference of ground water and mean water level. Using the developed numerical wave tank, the present study investigates how variation of ground water level influences hydrodynamic characteristics in seabed around dike and numerically simulates the wave fields, pore flow patterns, pore water pressures and vorticities according to variation of ground water level. Numerical results explain well how hydrodynamic characteristics in seabed around dike is affected by the variation of ground water level.

Keywords : wave-current interaction, dike, variation of ground water level, numerical wave tank, hydrodynamic characteristics

*한국해양대학교 건설환경공학부(Division of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University)

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

1. 서 론

최근, 일본을 비롯한 선진국에서는 해수욕장으로서의 기능 창출 뿐만 아니라 해안공간의 이용 및 개발에 따른 자연해변의 소실을 대체할 수 있고 생태계를 포함한 해안환경의 개선과 같은 부수적인 효과까지 기대할 수 있는 인공해변의 건설이 주목을 받고 있다. 인공해변의 건설 시에는 파랑의 작용으로부터 매립토사의 유출을 방지하기 위한 해안구조물이 요구되며, 일반적으로 호안이 주로 건설된다. 그러나, 인공해변이 건설된 외국의 일부 지역에서는 Photo 1에 보이는 바와 같이 호안 배후의 매립토사가 함몰 및 유출되는 경우가 종종 발생하고 있고, 호안의 안정성 및 해변공간의 이용은 심각한 영향을 받고 있다. 한편, 국내의 피해사례로 준설토 투기장의 가호안 축조공사시 배면토의 함몰, 유출 및 붕괴사례가 보고된 바 있다(대우건설, 2002).

인공해변의 건설에 따른 호안 배후 매립토사의 함몰 및 유출의 메커니즘을 파악하기 위하여 여러 연구자들에 의해 수리 및 수치모형실험의 양 방면에서 다각도의 연구가 수행되었으나 대부분이 파랑 및 조석의 영향만을 고려하고 있다(예를 들면, 高橋 등, 1996; 前野·藤田, 2001; 酒井 등, 2004; Hur et al., 2007). 해저지반 상부에 건설되는 호안의 안정성 및 인공해변의 함몰 및 유출과 관련하여 필히 검토되어야 할 사항 중의 하나가 집중호우 등으로 인한 호안 배후면 지하수위의 상승이다. 최근, 해변내의 지하수위의 영향이 해변상의 파동장에 미치는 영향을 검토한 연구가 다소 수행되었으나(예를 들면, Lee et al., 2007) 인공해변의 설치에 따른 호안 저면을 통한 토사유출 및 구조물의 안정성에 미치는 지하수위의 거동특성을 검토한 연구는 거의 없는 것으로 판단된다. 따라서, 파, 호안 및 호안 배후 지하수위의 상승에 따른 동적 상호작용에 대한 연

구는 시급히 수행되어야 할 과제이다.

한편, 최근 허 등(2005)에 의해 해저지반 상에 설치된 구조물과 파랑 및 지반의 종합적인 상호작용에 대해 full-nonlinear 해석을 수행할 수 있는 해석수법이 제안됨으로써 구조물 주변의 흐름특성을 포함하여 간극수압의 변동특성을 살펴볼 수 있게 되었으며, 본 연구에서는 허 등(2005)의 해석수법에 기초하여 비선형파랑과 호안 및 지하수위의 동적 상호작용을 검토할 수 있는 수치파동수로를 개발하였다.

따라서, 본 연구에서는 개발된 수치파동수로를 이용하여 지하수위의 증가로 인해 발생하는 호안 저면을 통한 흐름과 파랑과의 상호작용에 따른 파동장 및 간극수 흐름, 간극수압 및 와도를 수치적으로 재현함으로써 지하수위의 변화에 따른 호안 주변 지반내의 수리학적 특성에 대해 검토하고자 한다.

2. 수치해석이론

2.1 기초방정식

비압축성의 점성유체에 대한 복잡한 자유수면을 효과적으로 수치모의할 수 있는 VOF법이 제안된 이후, 자유수면을 취급하는 많은 학문분야에서 이를 활용한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히, VOF법은 해안공학분야에서 수리실험에 의존하였던 쇄파과정 및 쇄파후의 파랑변형특성을 수치적으로 재현할 수 있어 최근 들어서 VOF법을 활용한 수치모델의 개발이 다양하게 시도되고 있다. 단, VOF법은 자유수면을 모의하는 기법이므로 해안공학분야에 적용시 파랑의 전달과 반사를 정확하게 모의할 수 있는 효과적인 경계조건과 주기적인 파동장의 형성을 위한 조파방법이 필요하며, 이러한 경계조건과 조파방법을 VOF법과 결부시켜 Sakakiyama and Kajima(1992)는 투과성구조물과 파랑과의 상호간섭을 관성력과 항력으로 취급한 Navier-Stokes 방정식 형태의 PBM(Porous Body Model)을 제안하였다. 이를 바탕으로 해안·항만구조물에 의한 쇄파시의 파랑거동특성 등을 검토하기 위한 수치파동수로의 연구개발이 최근 활발하게 이루어지고 있으며, 그 중에 항만구조물의 내파설계를 목적으로 일본 연안개발기술연구센터(沿岸開發技術研究センタ, 2001)에서 개발한 수치파동수로 CADMAS-SURF(SUPER Roller Flume for Computer Aided Design of MARITIME Structure)는 사용자가 직접 입·출력을 제어할 수 있는 효과적인 2차원파동장의 해석 프로그램으로 실무분야에서 활발히 활용되고 있다(Fujima,



Photo 1. Sand suction observed at the an artificial beach (Okura beach, Japan).

2002). 상술의 PBM을 도입하고 있는 CADMAS-SURF는 투과성매체내의 유체운동이 난류저항에 지배된다는 가정 하에 층류저항의 영향은 고려되지 않은 해석수법으로, 모래질과 같은 투과성매체내의 흐름은 층류저항에 의해 지배된다는 보고(Van Gent, 1995)에 비추어 보면, 투과성매체내부의 유체운동에 대해 층류저항이 고려되지 않은 기존의 PBM을 도입하고 있는 수치해석수법을 입점이 작은 해저지반에 대해 직접적으로 적용하는 것에는 무리가 있을 수 있다. 본 연구에서는 해저지반과 구조물 및 파동장을 포함한 해석장 전체에 대한 하나의 비압축성·점성유체의 운동방정식을 구성하고, 이에 대한 투과성매체의 다양한 기하학적인 형태에 따라 층류저항의 영향까지 고려함으로써 파·구조물·지반의 상호간섭문제에 대한 다양한 검토로부터 모델의 타당성을 검증한 허 등(2005)의 모델을 도입한다. 그리고, 파랑의 작용과 더불어 인공해변에 건설되는 호안의 배후 지하수위의 변화에 따른 주변 파동장과 지반내의 흐름특성을 살펴보기 위하여 Fig. 1(그림에서 h 는 수심, d 는 지반깊이, L 는 입사파의 파장)과 같은 2차원 수치파동수로를 고려한다. 수치파동수로의 좌측에는 부가감쇠영역이 설치되어 개경계(open boundary)에서 파랑이 재반사되어 해석영역의 파동장이 교란되는 것을 방지하고, 해석영역내에는 수치적으로 파랑을 발생시키기 위한 조파소스와 해저지반상에 설치된 호안 및 수두차 Δh 를 가지는 호안 배후면의 지반이 고려된다.

기초방정식은 조파소스를 포함하는 연속방정식 (1)과 투과층의 다양한 기하학적인 형태에 따라 모델화된 유체저항을 도입하여 Navier-Stokes 운동방정식을 확장한 식 (2), (3)으로 구성된다. 그리고, 식 (4)는 자유수면의 형상을 모의하기 위한 VOF함수의 이류방정식을 나타낸다.

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

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \lambda_x u \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda_z w \frac{\partial u}{\partial z} = -\varepsilon_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \varepsilon_x \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_z \tau_{xz}}{\partial z} \right) - \frac{2\nu \partial q^*}{3 \partial x} - D_x - F_x \quad (2)$$

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

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

$$q^* = \begin{cases} q(z, t) / \Delta x_s & x = x_s \\ 0 & x \neq x_s \end{cases} \quad (5)$$

여기서, u, w 는 x, z 방향의 속도성분, q^* 는 조파소스의 유량밀도로 조파소스가 위치하는 $x = x_s$ 이외의 영역에서는 0으로 주어진다. Δx_s 는 $x = x_s$ 를 포함하는 방향의 격자폭, t 는 시간, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, ν 는 유체의 동점성계수, g 는 중력가속도, β 는 부가감쇠영역의 파랑감쇠계수, ε_x 는 체적공극률, $\varepsilon_x, \varepsilon_z$ 는 x, z 방향에 대한 면적공극률, F 는 $0 \leq F \leq 1$ 의 값을 갖는 VOF함수, τ_{ij} ($i=x, z, j=x, z$)는 유체의 점성응력 tensor로 i 는 점성응력이 작용하는 평면을 가리키고, j 는 그 평면내에서의 방향을 나타낸다.

$\lambda_v, \lambda_x, \lambda_z$ 는 C_M 을 관성력계수로 하면 다음식과 같이 나타낼 수 있고, 식 (6)의 우변 2항은 구조물로부터 받는 관성력의 효과를 나타낸다(Sakakiyama and Kajima, 1992).

$$\begin{cases} \lambda_v = \varepsilon_v + (1 - \varepsilon_v) C_M \\ \lambda_x = \varepsilon_x + (1 - \varepsilon_x) C_M \\ \lambda_z = \varepsilon_z + (1 - \varepsilon_z) C_M \end{cases} \quad (6)$$

또한, 식 (2), (3)에서 D_x, D_z 는 층류저항, F_x, F_z 는 난류저항으로 다음 식으로 결정된다(Shijie and Jacob, 1999;

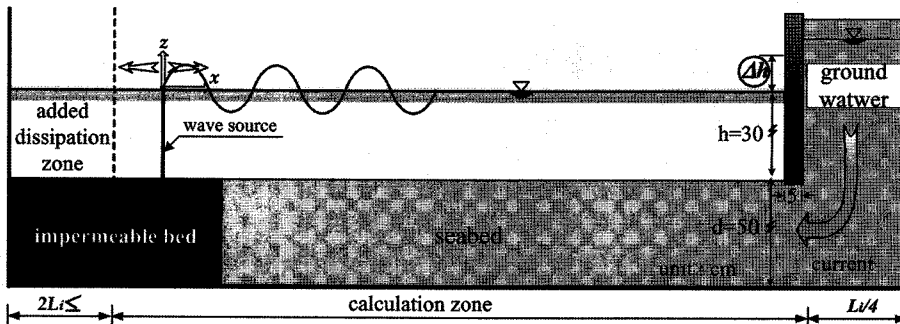


Fig. 1. Schematic sketch of numerical wave tank considering variation of ground water level.

Ergun, 1952).

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

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

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

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

여기서, C_D 는 층류저항계수, F_D 는 난류저항계수, D_p 는 투과체의 평균입경을 각각 나타낸다.

식 (5)에서 조파소스의 강도 q 는 자유수면의 거동이 불안정해지는 것을 방지하기 위해 조파개시로부터 3주기까지는 서서히 조파시키는 식 (11)의 방법을 적용한다(Ohyama and Nadaoka, 1991).

$$q = \begin{cases} 1 - \exp(-2t/T_i) \cdot 2U_o(\eta_s+h)/(\eta_s+h) & : t/T_i \leq 3 \\ 2U_o(\eta_o+h)/(\eta_s+h) & : t/T_i > 3 \end{cases} \quad (11)$$

여기서, T_i 는 입사파의 주기, η_s 는 조파위치에서의 수위 변동, U_o 와 η_o 는 각각 유속의 시간변화 및 Stokes 3차 파에 기초한 조파소스에 의해 기대되는 수위변동이다.

2.2 수치해석방법

본 수치해석은 유한차분법에 기초를 두고 있으므로 계산영역을 크기가 일정한 직사각형의 격자로 분할하고, 셀 전체에 유체가 있는 경우를 유체셀, 셀 전체에 기체가 있는 경우를 기체셀, 셀내에 유체와 기체가 혼합되어 있는 경우를 표면셀, 셀 전체에 구조물이 있는 경우를 구조물셀로 각각 정의한다. 또한, 격자 주위에는 직접 계산에 이용되

지는 않지만 경계처리시에 필요한 가상셀을 둔다. 격자를 설정한 후에는 각 셀에서의 유속 u, w 를 각각 셀 경계인 오른쪽과 위쪽에 위치시키고, 압력 p , 조파소스의 유량밀도 q^* 및 VOF함수 F 를 각각 셀 중심에 위치하도록 하여 변수들이 엇갈리게 격자를 구성하는 Fig. 2와 같은 엇갈린 격자(staggered mesh)를 채용하였다.

본 수치해석에서는 식 (2), (3)의 운동방정식에 시간항에 대한 전진차분근사를, 이류항에는 1차정도의 상류차분과 2차정도의 중앙차분을 기중평균하여 혼합한 중여(donor) 차분 근사를, 나머지항에 중앙차분근사를 적용시키는 양해법을 도입하였다(Hur and Mizutani, 2003; Hur, 2004). 또한, 다음 시간스텝에서의 속도 u, w 및 압력 p 는 SOLA 기법(numerical SOLution Algorithm for transient fluid flow)을 이용하여 계산하였고, VOF함수의 수치확산을 방지하기 위한 donor-acceptor법을 채용하였다(Hirt and Nichols, 1981; Hur and Mizutani, 2003).

2.3 경계조건

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

자유수면에서 유속경계조건은 셀 내의 자유수면에 수평한 유속성분과 연직한 유속성분에 대한 경계조건을 별도로 적용한다. 즉, 수면에 수평한 유속은 유체가 존재하는 인접한 셀의 유속을 취하고, 연직한 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 적용

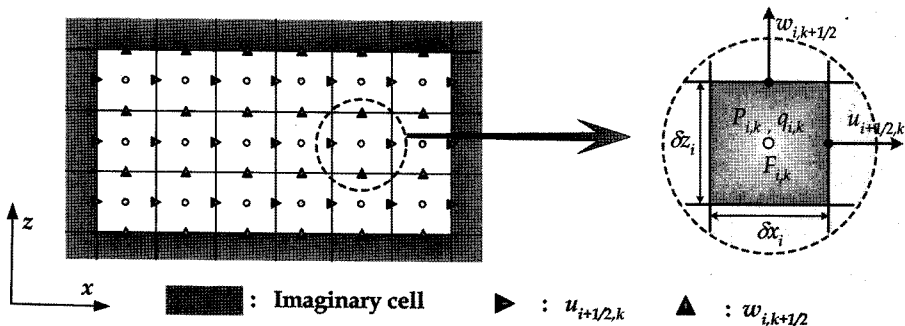


Fig. 2. Location of variables in a staggered mesh.

하였으며(Hinatsu, 1992), 부가감쇠영역의 길이는 입사파 파장의 2배 이상으로 하였다. 또한, 구조물표면 및 바닥에서는 법선방향으로 불투과 조건을 접선방향으로는 slip조건을 적용하는 것으로 한다.

2.4 안정조건

본 연구에서는 계산의 수치안정을 위하여 식 (12)의 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy)조건과 식 (13)의 Diffusion (Diffusive time limit condition)조건을 이용하였다.

$$\alpha t < \kappa \cdot \min \left\{ \frac{\delta x}{|u|_{\max}}, \frac{\delta z}{|w|_{\max}} \right\} \tag{12}$$

$$\alpha t < k \cdot \min \left\{ \frac{\delta x}{|u|_{\max}}, \frac{\delta z}{|w|_{\max}} \right\} \tag{13}$$

여기서, $|u|_{\max}$, $|w|_{\max}$ 는 x, z방향에 있어서 최대유속, δx , δz 는 계산격자간격을 각각 나타내며, k 는 가중계수로서 본 연구에서는 0.4를 적용하였다. 또한, 초기의 시간스텝은 $\alpha t = T/1000$ 로 하고, 그 이후는 CFL조건 및 Diffusion조건이 만족되도록 시간스텝의 간격 δt 를 매 시간스텝마다 자동 조정되도록 하였다.

3. 해석결과

본 연구의 해저지반상에 설치된 호안을 대상으로 파랑 및 호안 배후의 지하수위로 인한 흐름이 공존하는 경우 주변 파동장의 변화 및 지반내의 흐름특성을 검토한 기존의 연구 및 수리모형실험결과가 거의 없어, 본 연구에서는 구조물과 파랑 및 지반의 상호작용에 대한 다각도의 검토로부터 모델의 타당성을 검증한 허 등(2005)의 해석수법을 본 연구에 도입하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 적용한 입사파랑(H_i 는 입사파고) 및 지하수위의 조건을 Table 1에 제시한다. 이때 해저지반에 대해서는 공극률 0.35, 평

Table 1. Incident wave condition and ground water level

T_i (sec)	H_i (cm)	Δh (cm)
		0
1.5	4.5	+5
		+10

균입경 0.02 cm, 호안 배후면의 지반의 경우에는 공극률 0.35, 평균입경 0.05 cm이 고려되었다. Table 1에서 Δh 는 초기의 지하수위를 나타내며, Δh 가 0인 경우는 호안 배후의 지하수위가 호안 전면의 정수면과 동일한 경우이다.

3.1 파동장 및 지하수위의 시간변동

Fig. 3은 파동장의 수위와 수두차 $\Delta h = 10$ cm를 갖는 지하수위로 인하여 발생하는 흐름에 대하여 호안 전면 $1L_i$ 의 위치와 호안 배후면 $L_i/8$ 의 위치에서 측정되는 수위의 시간변동을 나타낸 결과이다. 그림으로부터 호안 배후면의 지하수위는 평형수위에 도달할 때까지 지수 함수적으로 감소하는 것을 알 수 있고, 지하수위 하강이 호안 전면 파동장의 수위변화에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

3.2 평균지하수위의 공간변화

본 연구에서는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 지하수위의 파동장내로의 유입이 평형수위에 도달하기 전의 범위인 조파개시 후 무차원시간 2주기를 선택하여($t/T_i = 10 \sim t/T_i = 12$) 지하수위 변화에 따른 호안 주변 파동장 및 지반내의 흐름특성을 살펴보았다.

Fig. 4는 파랑, 흐름, 파랑과 흐름이 공존하는 경우를 대상으로 호안 배후에서 평균지하수위 $\bar{\eta}$ 의 공간변화를 나타낸 결과이며, 평균지하수위 $\bar{\eta}$ 는 식 (14)로 계산될 수 있다.

$$\bar{\eta} = \frac{1}{2T_i} \int_{t_i}^{t_i+2T_i} \eta_g dt \tag{14}$$

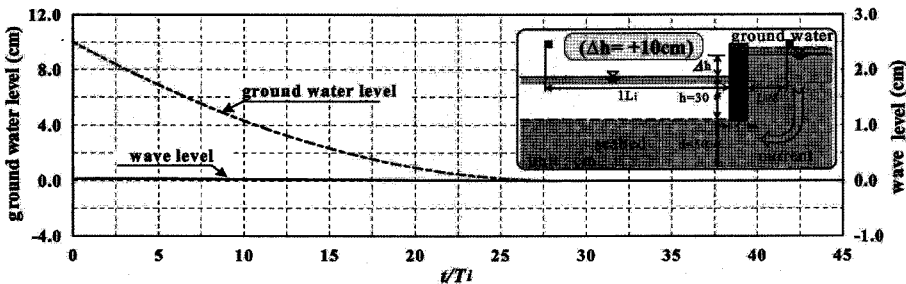


Fig. 3. Time variations of wave and ground water level in case of $\Delta h = +10$ cm.

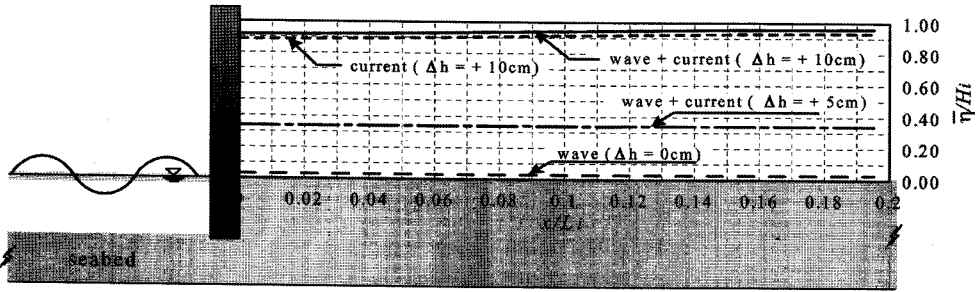


Fig. 4. Spatial distributions of mean ground water level at the back of dike.

여기서, t_g 는 호안배후에서의 지하수위 η_g 의 취득시점이다.

Fig. 4로부터 파랑작용은 호안 배후에서의 수위를 증가시키는 것을 알 수 있고($\Delta h = 0$ cm), 파랑과 흐름이 공존하는 $\Delta h = +10$ cm의 경우 흐름만이 존재하는 경우와 비교하여 지하수위는 더 높아지는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 호안 배후 지하수위의 변화는 호안 저면을 통해 전달되는 파랑에너지에 의한 영향을 받는 것을 알 수 있다. 그리고, 수두차 $\Delta h = +10$ cm와 $\Delta h = +5$ cm에 대한 지하수위의 공간변화를 살펴보면 호안과 인접한 곳에서 지하수위의 하강은 수두차가 큰 $\Delta h = +10$ cm의 경우에서 크게 되는 것을 알 수 있다. 결과적으로 지하수위가 높은 경우에

는 지하수위의 하강에 따라 파동장내로 유입되는 호안 배후면의 유속이 빨라짐으로서 토사유출의 발생가능성은 클 것으로 판단되며, 호안 기초부의 안정성에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

3.3 파동장의 변화에 따른 호안 주변 지반내의 흐름특성

Fig. 5-Fig. 7은 파동장의 변화에 따른 호안 주변 지반내의 흐름특성을 지하수위 변화와 연관하여 살펴본 것이다. Fig. 5는 호안 배후의 지하수위가 호안 전면의 정수면과 동일한 $\Delta h = 0$ cm의 경우이며, Fig. 6과 Fig. 7은 수두차 $\Delta h = +5$ cm와 $\Delta h = +10$ cm를 갖는 경우이다. Fig. 5는

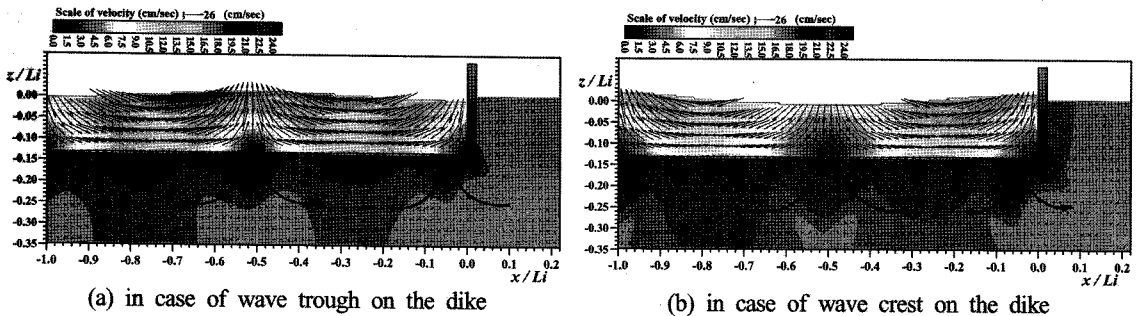


Fig. 5. Velocity fields around dike for $\Delta h = 0$ cm.

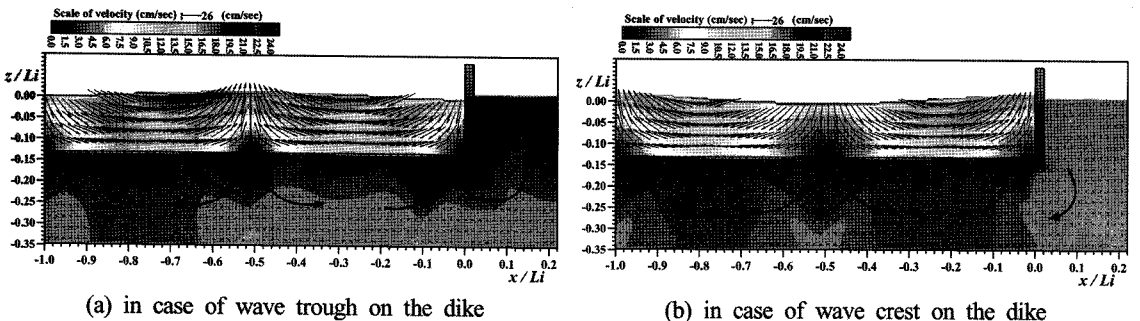


Fig. 6. Velocity fields around dike for $\Delta h = +5$ cm.

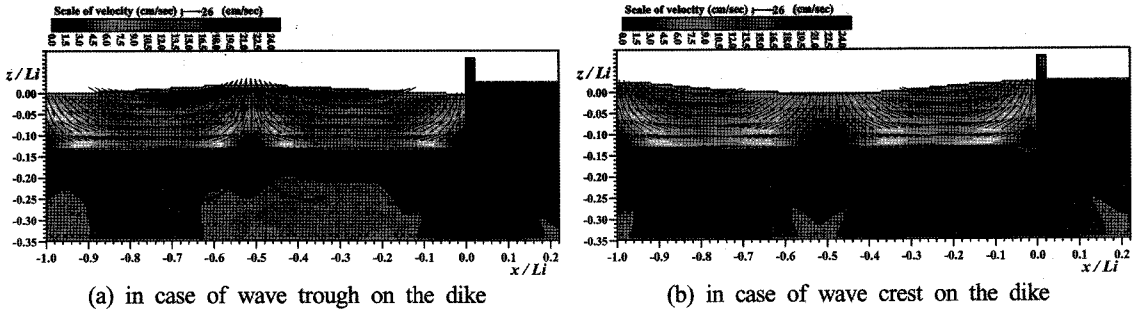


Fig. 7. Velocity fields around dike for $\Delta h = +10$ cm.

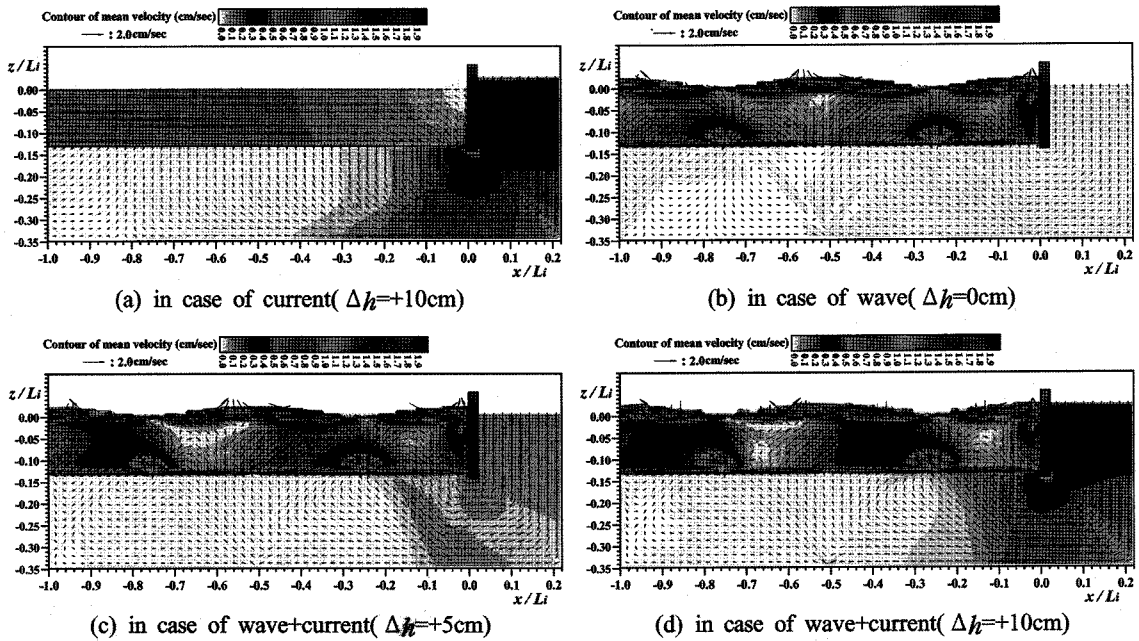


Fig. 8. Mean flows around dike.

지반 내 간극수의 흐름이 파봉근방에서 하향으로 주어지고, 파곡근방에서는 상향으로 주어지는 일반적인 흐름양상을 나타낸다(Putnam, 1949). 한편, 지하수위로 흐름이 존재하는 Fig. 6(a)와 Fig. 7(a)의 경우 호안 주변 지반내의 흐름은 호안 전면의 파곡하에서 주어지는 상향의 흐름과 지하수위의 하강에 따른 파동장으로 유입되는 흐름이 결합되는 것을 알 수 있다. Fig. 6(b)로부터 Fig. 5(b)의 호안 전면 파봉하에서 호안 배후를 향하는 지반 내 간극수는 지하수위로 인해 흐름에 영향을 받고 전체적으로 해측을 향하는 것을 확인할 수 있다. 수두차 $\Delta h = +10$ cm를 갖는 Fig. 7(b)의 경우에는 호안 전면 파봉하에서 하향으로 주어지는 지반 내 간극수의 흐름양상이 상당부분 관찰되지 않는 것으로부터 지하수위의 하강에 따라 파동장으

로 유입되는 유속이 호안 주변 흐름에 미치는 영향은 큰 것을 알 수 있다.

3.4 호안 주변 및 지반내의 평균유속장

Fig. 8는 지하수위의 변화에 따른 호안 주변의 평균유속장을 나타낸 결과로 평균유속 \bar{v} 는 식 (15)에 의해 계산될 수 있다.

$$\bar{v} = \frac{1}{2T_i} \int_{t_i}^{t_i+2T_i} v dt \tag{15}$$

여기서, $\vec{v} = (u, w)$ 이다.

파랑만이 존재하는 Fig. 8(b)를 제외하면 지하수위가 존재하는 모든 경우의 그림에서 호안 저면에서는 파동장으

로 유입되는 간극수 흐름이 관찰된다. 그리고, 호안 아래 지반 근방에는 유속이 집중되는 것을 확인할 수 있고, 유속의 크기는 파랑의 영향을 받지 않는 Fig. 8(a)에서 가장 크게 나타나지만 파랑과 흐름이 공존하는 Fig. 8(c)와 Fig. 8(d)를 비교하면, Fig. 8(c)에 비해 지하수위가 높은 Fig. 8(d)의 경우가 호안 전면으로 향하는 유속이 보다 크게 주어지는 것을 알 수 있다.

또한, Fig. 8(b), Fig. 8(c) 및 Fig. 8(d)로부터 파랑의 영향으로 호안 전면 파동장에서는 부분중복파가 형성되고, 부분중복파의 파곡근방($x/L_i \approx -0.25$)에서는 지하수위가 높을수록 파동장으로 용출하는 지반내의 강한 흐름과 이에 따른 해측을 향하는 파동장의 강한 유속이 보다 명확히 관찰된다. 그리고, 파랑과 흐름이 공존하는 Fig. 8(c)와 Fig. 8(d)를 흐름만 고려한 Fig. 8(a)와 비교하면 파동장으로 유입되는 간극수 흐름은 파랑의 영향으로 전반적으로 호안에 근접한 부분중복파의 파곡근방을 향하고, 이러한 경향은 지하수위가 높은 경우에 보다 명확히 나타나는 것을 알 수 있다.

3.5 호안 주변 지반내의 최대간극수압

Fig. 9는 호안 주변의 지반내에 형성되는 최대간극수압 p_{max} 의 공간분포를 $\rho g H$ 로 무차원화한 결과이다. 파랑과 흐름이 공존하는 Fig. 9(c), Fig. 9(d)의 경우 파랑만을 고려하는 Fig. 9(b)에 비해 흐름의 영향으로 호안 기초부 근방의 지반내에서는 간극수압이 크게 되는 것을 알 수 있다. 그리고, Fig. 9(c)에 비해 지하수위가 상대적으로 높은 Fig. 9(d)에서는 보다 큰 값의 간극수압이 나타나며, 그 분포범위는

호안 전면 지반내의 일정거리 이상까지 확장되므로 지반의 유효응력 감소로 흩은 느슨해질 수 있고 지반의 강도는 저하될 가능성이 있다. 또한, Fig. 9(a)와 Fig. 9(d)로부터 최대간극수압분포에 미치는 흐름에 대한 파랑의 영향을 검토하면 흐름만이 존재하는 경우에 비해 파랑과 흐름이 공존하는 경우 호안 배후면에서는 파랑에너지의 전달에 의해 큰 값의 간극수압이 관찰된다.

3.6 호안 주변 지반내의 평균와도분포

Fig. 10은 호안 주변 지반내에서의 평균와도의 공간분포를 나타낸 결과로 평균와도 $\bar{\omega}$ 는 식 (16)을 이용하여 계산될 수 있다.

$$\bar{\omega} = \frac{1}{2T_i} \int_{t_i}^{t_i+2T_i} \omega dt \quad (16)$$

여기서, ω 는 식 (17)로 표현되는 와도성분으로 본 연구에서는 반시계방향을 양(+)의 값으로 하였다.

$$\omega = \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (17)$$

그림으로부터 지하수위로 인한 흐름이 존재하는 경우에는 호안 주변 지반내에 대칭형의 와도분포가 형성되고, 와도는 간극수의 흐름방향이 급격히 바뀌는 호안 기초부 양 측면에 집중되어 있는 것을 알 수 있다. 그리고, 파랑과 흐름이 공존하는 Fig. 10(c) 및 Fig. 10(d)와 파랑의 영향을 받지 않는 Fig. 10(a)를 비교하면, 지하수위의 하강속도에

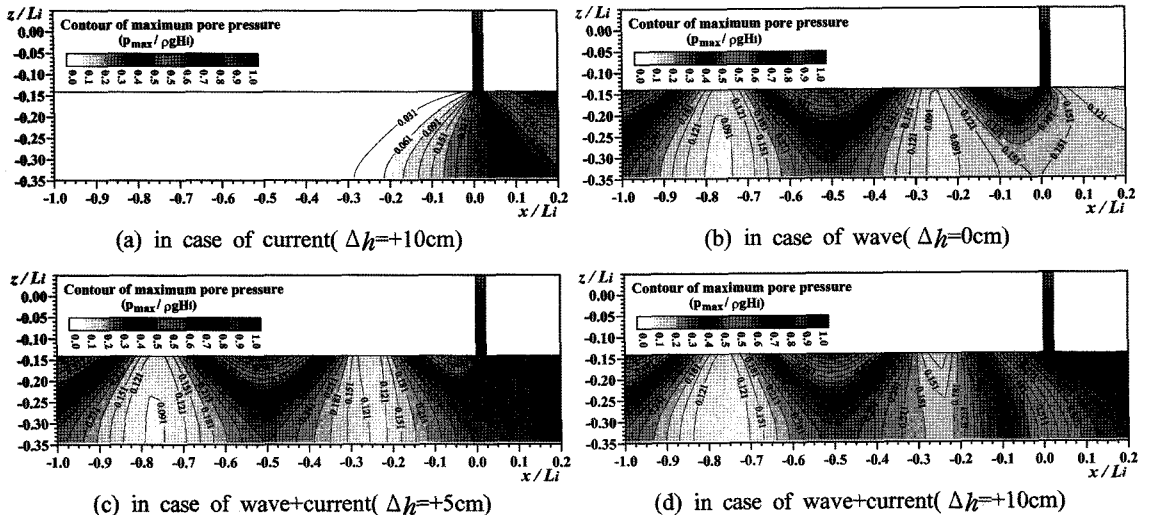


Fig. 9. Spatial distributions of maximum pore water pressures in seabed around dike.

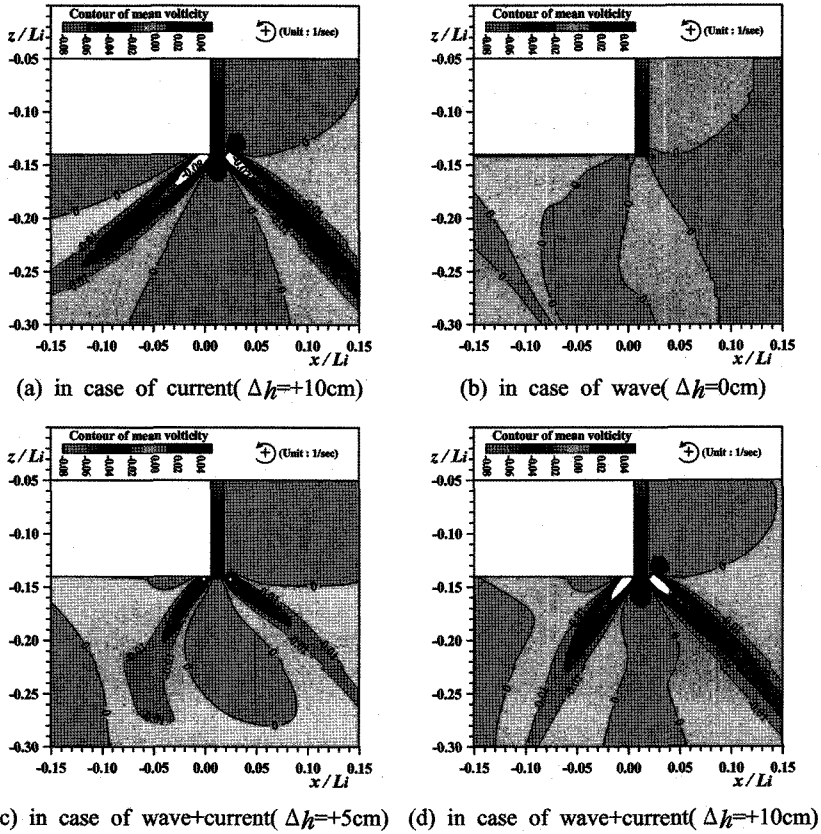


Fig. 10. Mean vorticity fields in seabed around dike.

미치는 파랑에너지의 영향을 받지 않는 Fig. 10(a)의 경우에 크고 넓은 범위의 와도가 관찰되며, 파랑과 흐름이 공존하는 경우에 대해서는 Fig. 11(c)에 비해 지하수위가 높은 Fig. 11(d)에서 보다 큰 와도와 분포범위가 형성되는 것을 알 수 있다. 결과적으로, 지하수위가 높을수록 보다 명확히 나타나는 호안 주변 지반내의 와도현상은 호안 아래에 집중되는 유속과 연관하여 흡입자 골격을 느슨하게 할 수 있고, 이로부터 흡입자의 전단저항은 감소하여 세굴과 같은 지반변형 및 지반의 토사유출, 지반저지력 저하와 같은 지반의 불안정한 요소가 증가될 것으로 판단된다. 따라서, 호안의 안정성과 관련하여 호안 배후 지하수위로 인한 주변의 수리학적 특성들에 대한 종합적인 이해 뿐만 아니라 지하수위를 향상시킬 수 있는 대책공법이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 집중호우 등으로 인한 호안 배후면 지하수위의 증가로 인해 호안 저면을 통한 흐름과 비선형파랑

과의 동적 상호작용을 검토할 수 있는 수치파동수로를 개발하여 파동장 및 간극수 흐름, 간극수압 및 와도를 수치적으로 재현함으로써 지하수위의 변화에 따른 호안 주변 지반내의 수리학적 특성을 검토하였다. 이로부터 얻어진 중요한 사항을 본 논문의 결론으로 하여 아래에 기술한다.

- (1) 비선형파랑과 호안 및 지하수위의 동적 상호작용을 검토할 수 있는 수치파동수로를 개발하였다.
- (2) 흐름만이 존재하는 경우에 비해 파랑과 흐름이 공존하는 경우, 호안 배후의 지하수위는 더 높아지는 것을 알 수 있었고, 지하수위가 높을수록 호안과 인접한 곳에서의 지하수위 하강은 크게 되는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 파랑과 흐름이 공존하는 경우, 호안 아래 지반 근방에 집중되는 유속은 지하수위가 높을수록 보다 크고 명확하게 나타난다.
- (4) 호안 전면 파동장에 형성되는 부분중복파의 파곡근방에는 호안 배후의 지하수위가 높을수록 파동장으로 용출하는 지반내의 흐름과 이에 따른 해측을 향하는 파동장의 유속이 강해지는 현상을 명확히 확인할 수 있었다.

(5) 호안 기초부 근방 지반내에서의 최대간극수압은 파랑만을 고려하는 경우에 비해 파랑과 흐름이 공존하는 경우 크게 나타나고, 그 분포범위는 호안 배후의 지하수위가 높을수록 호안 전면 지반내의 일정거리 이상까지 확장되는 것을 알 수 있었다.

(6) 지하수위로 인한 흐름이 존재하는 경우에는 호안 주변 지반내에 대칭형의 와도분포가 형성되고, 와도는 간극수의 흐름이 바뀌는 호안 기초부 양측면에 집중되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 파랑과 흐름이 공존하는 경우 지하수위가 높을수록 보다 큰 와도와 분포범위가 형성되는 것을 알 수 있었다.

(7) 본 연구는 파랑과 호안 배후의 지하수위로 인한 흐름이 공존하는 경우 주변 파동장의 변화 및 지반내의 흐름특성을 수치해석적인 방법을 통하여 우선적으로 검토하였으며, 향후 수리모형실험을 병행한 보다 정도 높은 검토가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 허동수, 김창훈, 이광호, 김도삼 (2005). 파·구조물·지반의 비선형 동적응답해석을 위한 직접수치해석 기법의 개발. 한국해양·해양공학학회지, 17(2), 86-97.
- 대우건설 (2002). 00항 3단계 준설토 투기장 가호안 축조 공사 - 기본설계보고서. 98p.
- Ergun, S. (1952). Fluid flow through packed columns. Chem Eng., 48(2), 89-94.
- Fujima, K. (2002) : Review; Development of Numerical wave flume CADMAS-SURF(SUPER Roller Flume for computer Aided Design of MARitime Structure), Proc. Coastal and Ocean Eng., Korea, pp. 1-13.
- 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., Nakamura, T. and Mizutani, N. (2007). Sand suction mechanism in artificial beach composed of rubble mound breakwater and reclaimed sand area. Ocean Eng., 34, 1104-1119.
- Lee, K.H., Mizutani, N., Hur, D.S. and Kamiya, A. (2007). The effect of groundwater on topographic changes in a gravel beach. Ocean Eng., 34, 605-615.
- Ohyama, T. and Nadaoka, K. (1991). Development of a numerical wave tank for analysis of non-linear and irregular wave field. Fluid Dyn. Res., 8, 231-251.
- Putnam, J.A. (1949). Loss of wave energy due to percolation in a permeable seabed bottom. Trans. of American Geophysical Union, 30(3), 349-356.
- 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.
- Shijie Liu and Jacob H. Masliyah. (1999). Non-linear flows in porous media. J. Non-Newtonian Fluid Mech., 86, 229-252.
- Van Gent, M.R.A. (1995). Porous flow through rubble-mound material. J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng., 121, 176-181.
- 高橋重雄, 鈴木高二朗, 徳淵克正, 下迫健一郎, 善功企(1996). 防波護岸の吸い出し災害のメカニズムに関する水理 模型実験. 海岸工学論文集, 第43巻, 666-670.
- 海岸開発技術研究センター (2001). CADMAS-SURF 数値波動水路の開発・研究. 社団法人 海岸開発技術研究センター, 日本.
- 前野詩朗, 藤田修司(2001). VOF-FEM モデルによる波動場における護岸周地盤の動的挙動の検討. 海岸工学 論文集, 第48巻, 971-975.
- 酒井哲郎, 後藤仁志, 原田英治, 許伶宅, 岩本晃幸(2004). 人工海浜砂層内空洞の形成過程に及ぼす埋設物の影響. 海岸工学論文集, 第51巻, 806-810.

Received May 10, 2007

Accepted August 17, 2007