

파·구조물·지반의 비선형 동적응답해석을 위한 직접수치해석기법의 개발 Direct Numerical Simulation on the Nonlinear Dynamic Responses among Wave, Structure and Seabed

허동수* · 김창훈** · 이광호*** · 김도삼**

Dong Soo Hur*, Chang Hoon Kim**, Kwang Ho Lee*** and Do Sam Kim**

요 지 : 파랑하중하의 지반내 간극수압의 정확한 평가는 연안구조물에서 지반의 안정성을 검토하는데 중요한 요소이다. 파·구조물·지반의 상호간섭에 대한 대부분의 기존 수치모델은 파동장과 지반부를 분리하여 해석하는 Hybrid기법을 적용하고 있기 때문에, 보다 고정도로 이들의 상호간섭을 모의하기 위해서는 파랑하중하에서 파·구조물·지반을 일체화한 수치모델의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 투과층의 다양한 기하학적인 형태에 따라 층류저항까지 고려한 모델화된 유체저항을 도입하여 파·구조물·지반의 비선형동적응답을 해석하기 위한 직접수치해석기법을 새롭게 제안하였다. 직접수치해석기법은 Hybrid기법과는 달리 유체와 다공질매체의 접합면에서 특별한 경계조건을 필요로 하지 않는다. 파·구조물·지반의 상호간섭에 대해 기존의 수리실험결과와 본 연구의 계산결과를 비교함으로써 좋은 일치성을 확인할 수 있었다. 따라서 새롭게 제안된 본 수치기법은 파·구조물·지반의 비선형동적응답을 평가하는 유용한 기법으로 판단된다.

핵심용어 : 직접수치해석기법, 파·구조물·지반의 상호간섭, 간극수압, 파랑하중

Abstract : Accurate estimation of the wave-induced pore water pressure in the seabed is key factor in studying the stability of the seabed in the vicinity of coastal structure. Most of the existing numerical models for wave·structure·seabed interaction have been linked through applying hybrid numerical technique which is analysis method separating the wave field and seabed regime. Therefore, it is necessary to develop a numerical model for simulating accurately wave·structure·seabed interaction under wave loadings by the single domain approach for wave field and seabed regime together. In this study, direct numerical simulation is newly proposed. In this model, modeled fluid drag has been used to detect the hydraulic properties according to the varied geometrical shape inside the porous media by considering the turbulence resistance as well as laminar resistance. Contrary to hybrid numerical technique, direct numerical simulation avoids the explicit formulation of the boundary conditions at the fluid/porous media interface. A good agreement has been obtained by the comparison between existed experimental results by hydraulic model test and direct numerical simulation results for wave·structure·seabed interaction. Therefore, the newly proposed numerical model is a powerful tool for estimating the nonlinear dynamic responses among a structure, its seabed foundation and water waves.

Keywords : direct numerical simulation, wave·structure·seabed interaction, pore water pressure, wave loading

1. 서 론

최근 해안·해양이 갖는 공간, 에너지자원 및 광물자원 등에 대한 사회적 관심이 고조됨에 따라 연근해역의 이

용·개발·보전을 위한 계획·조사가 활발히 수행되고, 그의 근간을 구성하는 해양·해안·항만구조물의 건설이 날로 증가하고 있는 추세이다. 이와 더불어 고파랑 혹은 지반상의 문제 등으로 기시공된 각종의 연안구조물

*경상대학교 토목환경공학부 해양산업연구소(Corresponding author, Institute of marine industry, Division 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)

***나고야대학교 대학원 공학연구과(Department of Civil Engineering, Nagoya University)

의 피해사례도 증가하는 경향이 있고, 그 원인구명이 다각도로 검토되어 왔다. 이 중에 지금까지의 설계 및 시공에서 크게 문제시하지 않았던 파랑하중에 의한 지반 거동으로 피해를 입은 많은 예가 보고되어 있다. 따라서, 각종 연안구조물을 계획하는 경우, 설계 및 시공 단계에서 해저지반의 거동에 따른 여러 가지 문제점을 충분히 파악하고, 특히 구조물의 기초설계에는 파랑의 영향으로 발생할 수 있는 지반의 안정성을 충분히 확보할 필요가 있다.

지금까지 연안구조물의 안정성 평가 및 내파설계에는 주로 파와 구조물의 상호간섭을 중심으로 지반의 지지력과 해저전단응력에 의한 세굴정도만을 검토하여 왔다. 그러나 정도 높은 연안구조물의 안정성평가를 위해서는 파랑특성에 따른 해저지반의 과잉간극수압과 같은 동적응답변화도 고려된 파 · 구조물 · 지반의 동적거동에 의한 종합적인 안정성의 검토가 최근 중요한 문제로 대두되고 있다. 따라서 파랑에 의한 해저지반의 파압변동과 그에 따른 연안구조물의 침하 및 지반내의 간극수압의 증가에 따른 액상화문제 등이 연안구조물 건설이나 대규모 간척사업 등에서 중요한 설계요인이라는 것이 인식되고 있다.

파랑에 의한 해저지반의 간극수압에 대한 연구로 Putnam (1949), Reid and Kajiura(1957), Sleath(1970), Liu and O'Donnel(1979), Moshagen and Tourm(1975), Yamamoto et al.(1978) 및 Madsen(1978) 등을 들 수 있지만, 이들은 지반내의 유체흐름에 정상류에 대한 Darcy법칙을 적용하고 있으며, 대부분이 수심이 변하는 다양한 해저지반 및 해저지반상에 구조물이 놓인 경우에는 적용하기 어려우며, 특히 선형파이론에 기초한 연구이다.

파 · 구조물 · 해저지반의 상호간섭을 연구한 예로써는 Mynett and Mei(1982), McDougal et al.(1986), Mase et al.(1994)을 들 수 있으며, 이들은 Biot의 압밀방정식에 Darcy법칙에 따른 지반내의 유체흐름을 가정하여 유한요소법과 구조물 주변의 간극수압변동을 해석하고 있는 선형해석법이다.

비선형해석법으로 파동장에 경계요소법을, 지반에 유한요소법을 결합하여 비선형파랑과 구조물 및 지반의 동적응답을 해석하고 있는 Mizutani et al.(1998)의 연구와 파동장에 NASA-VOF법을 적용하고 지반부를 Biot의 압밀이론에 기초한 2상점탄성체로 가정하여 유한요소법을 적용하고 있는 蔣 勤 등(2000)의 연구를 들 수 있다.

이러한 파 · 구조물 · 해저지반과의 비선형상호간섭에 대

한 수치해석인 접근방법은 파동장과 지반부에 대해 서로 다른 지배방정식 및 수치해석기법을 적용하여 해석하는 Hybrid기법에 의존하고 있는 실정이다. 또한 기존의 Hybrid 기법은 파동장과 지반부를 따로 계산하고 이를 결합하여 해석하여야하는 많은 불편함을 가지고 있을 뿐만 아니라, 지반내 유체흐름에 정상류에 대한 Darcy법칙을 적용하고 있기 때문에 고정도의 비선형해석을 수행할 수 없는 단점이 지적되어 왔다.

따라서 본 연구에서는 이를 해결하기 위하여 파동장과 지반부에 대한 하나의 지배방정식을 구성하고, 유한차분법을 적용하여 파동장과 지반부에 동일한 수치알고리즘을 통한 파 · 구조물 · 지반의 Full-nonlinear 간섭현상을 수치파동수로 통하여 해석할 수 있는 고정도의 직접수치해석기법(direct numerical simulation)을 제안하여 그 타당성을 검증함과 동시에 적용성을 검토한다.

2. 수치파동수로의 개요

2.1 기초방정식

파 · 구조물 · 지반의 상호간섭을 해석하기 위한 수치파동수로의 개념도는 Fig. 1(그림에서 h 는 수심, d 는 지반의 두께, L_f 는 입사파의 파장을 각각 나타낸다)에 나타내고 있는 바와 같이 부가감쇠영역과 해석영역으로 이루어져 있으며, 부가감쇠영역은 개경계에서 파랑이 재반사되어 해석영역의 파동장이 교란되는 것을 방지하기 위하여 해석영역의 양단에 설치되어 있다(Hinatsu, 1992). 해석영역내에는 수치적으로 파랑을 발생시키기 위한 조파소스(Brosen and Larsen, 1987)와 구조물 및 해저지반이 고려된다.

쇄파 및 투과성구조물에 의한 파랑변형에도 적용이 가능하도록 투수성의 영향을 고려할 수 있는 Porous Body Model(이하; PBM)을 조합한 Hur and Mizutani(2003)의 모델은 투과층내 유체운동은 난류저항이 지배적이라는 가정에 층류저항이 고려되지 않은 수치해석수법으로 모래질과 같은 투과성매체내의 흐름은 층류저항에 의해 지배된다는 보고(Van Gent, 1995)에 비추어 보면, Hur and Mizutani(2003)의 모델에 의한 수치해석수법을 임경이 작은 해저지반에 대해 직접적으로 적용함에는 무리가 있을 수 있다. 따라서 본 수치해석수법은 Hur and Mizutani(2003)의 수치해석수법에 기초하여 해저지반과 투과성구조물에 있어서 간극의 형태를 불변형의 견고한 투과체로 가정하면 파동장을 포함하여 해석장전체를 하나의 비압축성 · 점

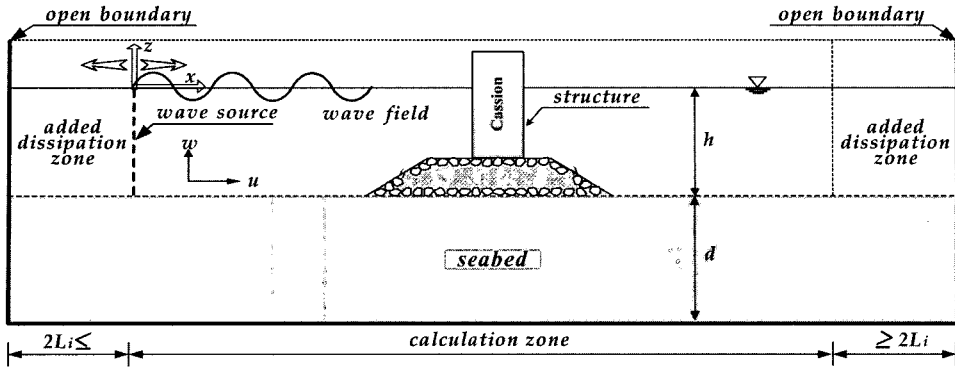


Fig. 1. Definition sketch of numerical wave channel for the analysis of dynamic full-nonlinear interaction among waves · structure · seabed.

성유체의 운동방정식을 구성할 수 있고, 이에 대한 투과층의 다양한 기하학적인 형태에 따라 층류저항까지 고려한 모델화된 유체저항을 도입할 수 있다.

본 연구에서는 파동장과 투과성구조물 및 해저지반에 대해 동일한 수치알고리즘을 적용하여 조파소스를 포함하는 연속방정식(1)과 Navier-Stokes운동방정식을 PBM으로 확장한 운동방정식(2), (3)을 얻을 수 있다.

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

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

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

여기서, $q^* = q(z, t) \delta(x-x_s)$ 로 조파위치 $x=x_s$ 에서의 조파소스의 밀도, δ 는 Dirac delta함수 u, w 는 x, z 방향의 속도 성분, t 는 시간, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, v 는 유체의 동점성계수, ($v=0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$), g 는 중력가속도, β 는 부가감쇠영역의 파랑감쇠계수, ε_v 는 체적공극률, $\varepsilon_x, \varepsilon_z$ 는 x, z 방향에 대한 면적투과율, τ_{ij} ($i=x, z, j=x, z$)는 점성체적의 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).

$$M_x = (1 - \varepsilon_v) C_M \frac{Du}{Dt} = (1 - \varepsilon_v) C_M \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \quad (4)$$

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

$$D_x = C_D \frac{v}{D_p^2} \frac{(1 - \varepsilon_x)^2}{\varepsilon_x^2} u \quad (6)$$

$$D_z = C_D \frac{v}{D_p^2} \frac{(1 - \varepsilon_z)^2}{\varepsilon_z^2} w \quad (7)$$

$$F_x = F_D \frac{(1 - \varepsilon_x)}{D_p \varepsilon_x^2} u \sqrt{(\varepsilon_x u)^2 + (\varepsilon_z w)^2} \quad (8)$$

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

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

다음으로, 자유표면의 형상을 모의하기 위해 Hirt와 Nichols(1981)가 제안한 이래 국내에서는 최초로 김도삼 등(2001, 2002)에 의해 소개된바가 있는 VOF(Volume Of Fluid)함수 F 를 도입한다. VOF함수 F 는 일정 물리량인 유체의 체적율이므로 유체영역뿐만 아니라 기체상태의 영역까지 포함하는 전 영역으로의 적용이 가능하고, F 의 값으로써 $0 \leq F \leq 1$ 을 취할 수 있으며, 또한 $F=1$ 일 경우는 유체셀, $F=0$ 일 경우는 기체셀로, $0 < F < 1$ 일 경우는 표면셀로 각각 판단할 수 있다. 유체의 체적율을 나타내는 VOF함수 F 는 다음의 이류방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial(\varepsilon_v F)}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon_x F u)}{\partial x} + \frac{\partial(\varepsilon_z F w)}{\partial z} = F q^* \quad (10)$$

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 - acceptor 방법을 사용하였다(Hirt and Nichols, 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(김도삼 등, 2001, 2002; Hur and Mizutani, 2003)을 참조하기 바란다.

3. 수치해석기법의 검증

해저지반내의 유체운동에 대해 본 연구에서 제안하는 수치해석기법의 계산결과와 투과층내 유체운동은 난류저항이 지배적이라는 가정에 층류저항이 고려되지 않은 PBM에 기초한 Hur and Mizutani(2003)의 수치해석결과에 대해 지반깊이의 증가에 따른 유속, 간극수압의 위상 지연 및 최대값을 상호 비교 · 검토 함으로써 지반내 유체운동에 대해 층류저항의 필요성을 논의하고, 파 · 구조물 · 지반의 상호간섭에 대한 기존의 연구결과 및 실험치와 본 연구의 수치해석결과를 각각 비교 · 검토 함으로써 본 수치해석기법의 타당성을 검증한다.

3.1 해저지반내 층류저항의 영향

3.1.1 간극수의 흐름

해저지반상을 진행하는 파랑은 변동압력으로 인해 해저지반으로의 침투유속을 발생시키고, 역으로 해저지반내의 간극수는 파동장으로 용출된다. 일반적으로 이러한 지반내 흐름은 Fig. 2에 나타내는 바와 같이 파봉에서 하향의 흐름을 나타내고 파곡에서는 상향의 흐름을 나타내는 것으로 알려져 있다(Putnam, 1949).

해저지반내의 유체운동에 대해 본 연구에서 제안하는 수치해석기법의 계산결과와 Hur and Mizutani(2003)의 모델에 의한 수치해석결과를 비교 · 검토함으로써 지반내

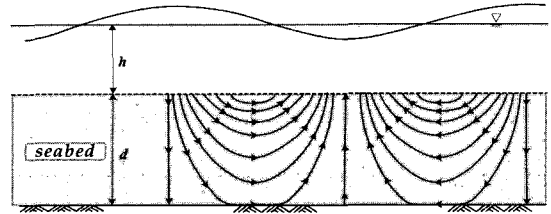


Fig. 2. Systematical fluid flow in seabed under wave action.

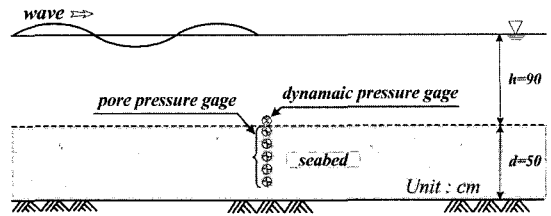


Fig. 3. Definition sketch of wave-seabed channel.

유체운동의 흐름양상 및 깊이에 따른 간극수압의 위상지연을 논의한다. 비교에 사용된 수치파동수로의 제원은 Fig. 3에 나타내는 바와 같다. 평균입경 $D_p=0.12$ cm, 공극률 $\epsilon_x=\epsilon_z=\epsilon_v=0.4$ 의 모래질 해저지반을 대상으로 입사파고 $H_x=10$ cm에 대해 입사파주기 $T_i=1.0, 1.5, 2.0, 2.6$ sec로 각각 변화시키면서 해저지반내 5, 10, 15, 20, 25 cm의 위치에서 측정된 유속 및 압력에 대해 본 수치해석기법의 계산결과와 Hur and Mizutani(2003)의 모델에 의한 수치해석결과와 각각 비교 · 검토하였다.

Fig. 4는 Fig. 3의 수치파동수로에서 동일시간에 측정된 유속장의 공간변화에 대한 본 연구의 계산결과와 Hur and Mizutani(2003)의 수치모델에 의한 결과를 비교한 그림이다. 그림으로부터 Hur and Mizutani(2003)의 계산결과에서는 파동장과 지반내의 유체운동 사이에 위상차이가 거의 나타나지 않은 반면, 본 연구의 계산결과는 지반내 유체흐름이 파봉에서 하향의 흐름을 나타내고 파곡에서 상향의 흐름을 나타냄으로써 Fig. 2에 제시된 파랑에 의한 해저지반내의 일반적인 흐름양상과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

3.1.2 지반내의 유속과 압력

Fig. 4에서 보인 바와 같이 본 연구의 계산결과와 Hur and Mizutani(2003)의 수치모델에 의한 계산결과 사이에 지반내 간극수의 흐름양상에 대한 차이를 보다 상세히 알아보기 위해 지반깊이에 따른 각 지점에서 측정된 유속과 압력의 위상지연 및 그의 최대값을 이하에서 논의한다.

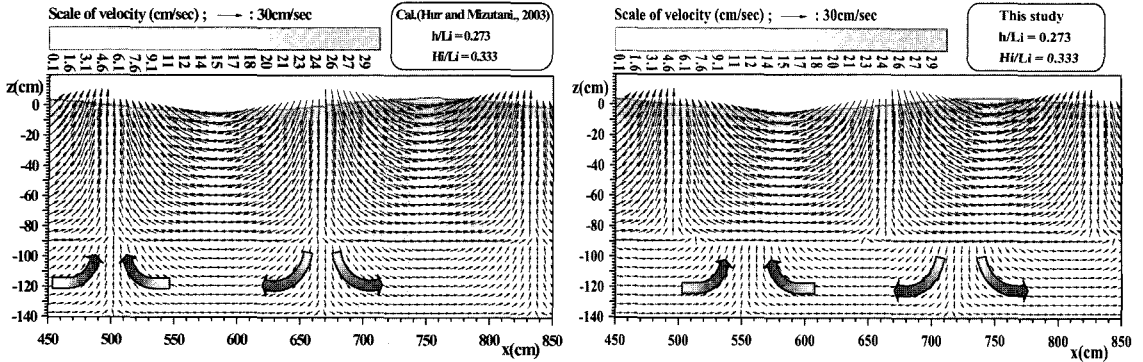


Fig. 4. Comparison of computed water particle velocities.

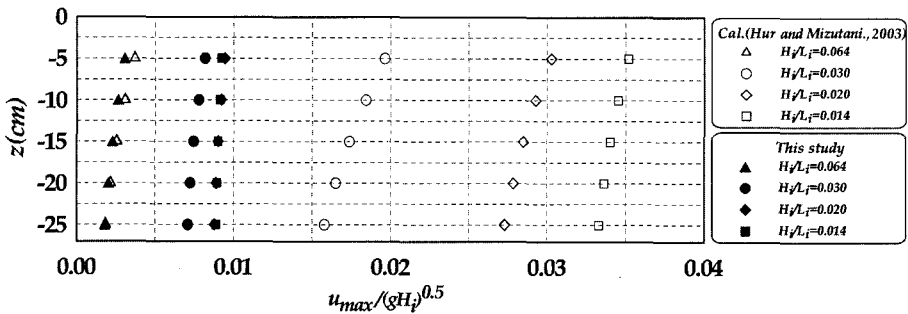


Fig. 5. Comparison of non-dimensional maximum horizontal water particle velocities at each point.

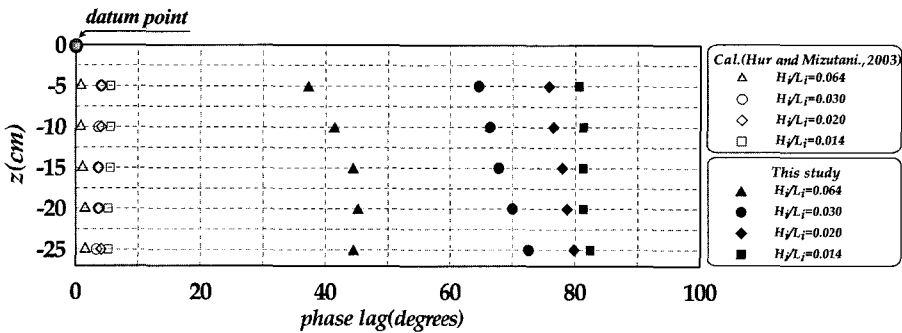


Fig. 6. Comparison of phase lags of the horizontal water particle velocities in seabed.

Fig. 5는 본 연구의 계산결과와 층류저항이 고려되지 않은 PBM에 기초한 Hur and Mizutani(2003)의 계산결과에서 지반깊이에 따른 각 지점에서 측정된 수평유속의 최대값을 나타낸 것이다. 그림으로부터 주기가 길어질수록 지반내 수평유속의 최대값은 크게 되는 것을 알 수 있다. 또한 Hur and Mizutani(2003)에 의한 계산결과가 본 연구의 계산결과 보다 큰 수평유속값을 나타내고 있고, 파장이 길수록 두 결과의 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 투과층내 유체운동은 난류저항이 지배적이라는

가정에 층류저항이 고려되지 않은 Hur and Mizutani(2003)의 경우보다 층류저항까지 고려된 본 연구의 경우가 더 큰 유체저항을 도입하고 있기 때문으로 판단된다.

Fig. 6은 지반상의 수평유속을 기준으로 지반깊이에 따른 수평유속의 위상차를 비교한 그림이다. 그림으로부터 지반깊이에 따른 수평유속의 위상차가 지반상의 수평유속과 비교하여 Hur and Mizutani(2003)에 의한 계산결과에서는 큰 변화를 확인할 수 없었으나 본 연구의 계산결과와 비교하여 주기가 길어질수록, 지반깊이가 증가할수록 위상은 더

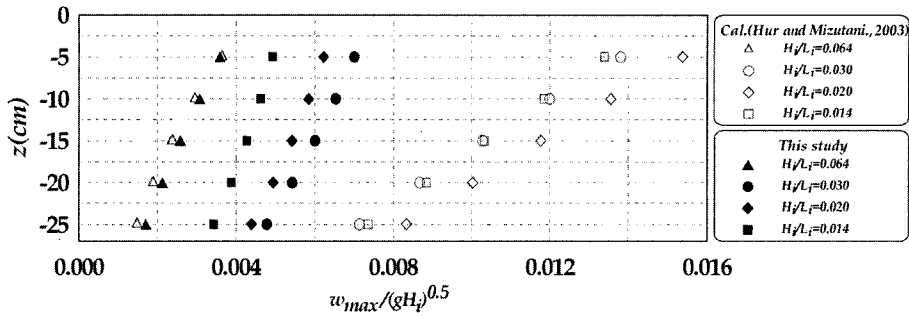


Fig. 7. Comparison of non-dimensional maximum vertical water particle velocities at each point.

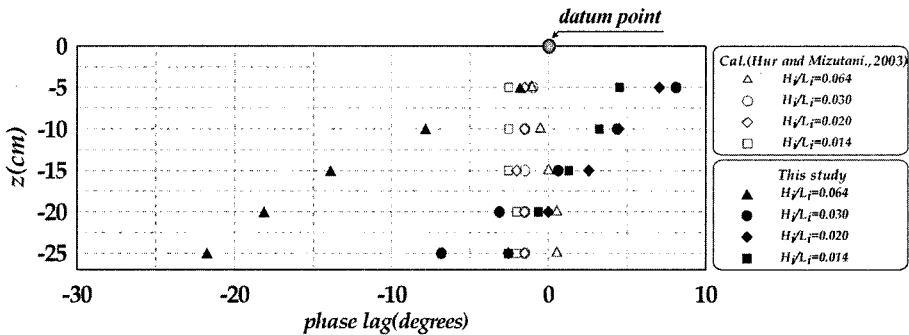


Fig. 8. Comparison of phase lags of the vertical water particle velocities in seabed.

빨라지는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 지반깊이를 파라미터로 하여 본 연구의 계산 결과와 Hur and Mizutani(2003)에 의한 계산결과에서 지반깊이에 따른 각 지점에서 측정된 연직유속의 최대값을 나타낸 것이다. 그림으로부터 지반깊이가 증가할수록 연직유속의 최대값은 감소하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 계산된 연직유속의 최대값의 경우에 대해서는 $H_i/L_i=0.064$ 의 경우를 제외하면 주기가 길어질수록 지반내에 미치는 연직유속의 최대값이 작아지는 경향을 나타낸다. 그리고 지반내의 연직유속 최대값은 $H_i/L_i=0.064$ 의 경우에 본 연구의 계산결과와 Hur and Mizutani(2003)에 의한 계산결과 사이에 큰 차이가 없지만 전체적으로 Hur and Mizutani(2003)에 의한 계산결과가 본 연구의 계산결과보다 더 큰 연직유속값을 나타내고 있다. 이러한 결과는 앞서 언급한 바와 같이 Hur and Mizutani(2003)에 의한 계산결과가 지반내의 유체운동에 있어서 증류저항까지 고려된 본 연구의 계산결과에 비해 상대적으로 적은 유체저항을 받은 결과로 판단된다.

Fig. 8은 지반상의 연직유속의 시간변동을 기준으로 지반깊이에 따른 연직유속의 위상차를 비교한 그림이다. 그림으로부터 지반깊이의 증가에 따른 연직유속의 위상차를

지반상의 연직유속과 비교하면 Hur and Mizutani(2003)에 의한 계산결과는 큰 변화를 나타내지 않은 반면 본 연구에 의한 계산결과는 위상이 느려지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 본 연구의 계산결과와 Hur and Mizutani(2003)에 의한 계산결과에서 지반깊이에 따른 최대간극수압 p_{max} 를 $\rho g H_i$ 로 무차원화한 결과이다. 그림으로부터 본 연구의 계산결과와 Hur and Mizutani(2003)에 의한 계산결과 사이에 간극수압의 최대값에 큰 차이는 없으나 파형경사 $H_i/L_i=0.030$ 에 대해 Hur and Mizutani(2003)의 계산결과에 비해 본 연구의 계산결과에서 다소 큰 간극수압을 나타내고 있는 경우를 제외하면 전체적으로 Hur and Mizutani(2003)에 의한 계산결과가 본 연구의 계산결과보다 다소 큰 간극수압값을 나타내고 있다. 이러한 경향은 파형경사 $H_i/L_i=0.020$, $H_i/L_i=0.014$ 에서 더욱 뚜렷해지며 지반이 깊어질수록 그 차이값은 커지는 것을 알 수 있다. 두 수치 해석결과 모두 지반깊이가 증가될수록 전달되는 간극수압값은 감소되는 것을 확인할 수 있고, 주기가 길어질수록 지반내 미치는 간극수압값은 더 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 긴 주기의 파랑통과에 의해 지반표면근방에서 액상화의 가능성이 높아진다는 것을 나타낸다. 그리고 Fig. 5

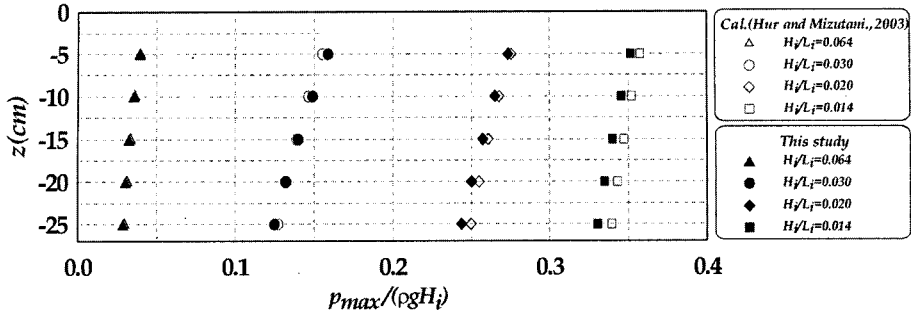


Fig. 9. Comparison of non-dimensional maximum pore water pressures at each point.

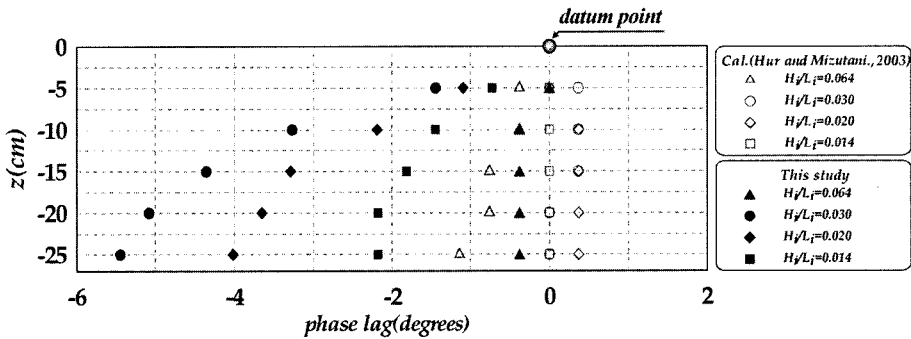


Fig. 10. Comparison of phase lags of the pore water pressures in seabed.

및 Fig. 7에 나타난 주기의 변화에 따른 지반내 수평, 연직유속의 최대값으로부터 지반내 간극수압값은 수평유속값에 더 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 지반상의 동압력의 시간변동을 기준으로 지반깊이에 따른 간극수압의 위상차를 나타낸 그림이다. 그림으로부터 Hur and Mizutani(2003)에 의한 계산결과는 지반이 깊어짐에 따른 간극수압의 위상차에 큰 변화를 확인할 수 없으나 본 연구의 계산결과는 지반깊이가 증가될수록 전달되는 간극수압의 위상은 느려지는 것을 알 수 있고, $H_i/L_i=0.064$ 의 경우를 제외하면 주기가 길어질수록 지반상에서의 동압력과 지반내의 간극수압의 위상차는 좁혀지는 것을 확인할 수 있다.

3.1.3 지반내의 유속이 파동장에 미치는 영향

앞에서 살펴본 바와 같이 본 수치해석기법으로부터 얻어진 지반내 유속값과 층류저항이 고려되지 않은 PBM에 기초한 Hur and Mizutani(2003)에 의한 지반내 유속값이 파동장에 미치는 각각의 영향을 검토하기 위하여 지반상에 설치된 잠제 주변의 수면파형을 비교·검토하며, 이로부터 지반내의 유체저항으로 층류저항의 도입의 필요성을 논의한다.

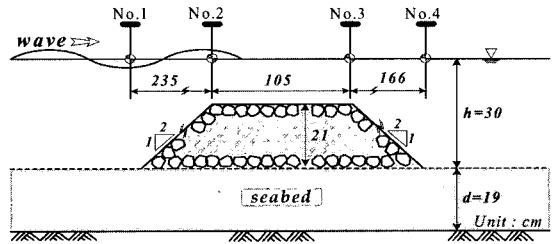


Fig. 11. Measuring points of wave profile.

Fig. 11은 적용된 잠제의 제원 및 수위변동의 비교위치를 나타내고 있다. Fig. 11의 지점 No.1, No.2, No.3 및 No.4에서의 수면변동에 대해 본 계산결과와 Hur and Mizutani(2003)에 의한 계산결과 및 Mizutani et al.(1998)의 실험치를 각각 나타낸 것이 Fig. 12에 제시되어 있다. 잠제에 대해서는 공극률 $\epsilon_x = \epsilon_z = \epsilon_v = 0.4$, 평균입경 $D_p = 2.7$ cm, 해저지반의 경우에는 대해서는 공극률 $\epsilon_x = \epsilon_z = \epsilon_v = 0.4$, 평균입경 $D_p = 0.08$ cm의 모래질지반이 고려되었다. 이 때 입사파랑 조건은 입사파고 $H_i = 3$ cm, 입사주기 $T_i = 1.4$ sec이다.

Fig. 12로부터 알 수 있는 바와 같이 본 수치해석결과는 잠제 천단상의 수심변동에 따른 비선형파의 형성, 발달 및 잠제 배후에서의 파봉분열을 포함하여 잠제 전후

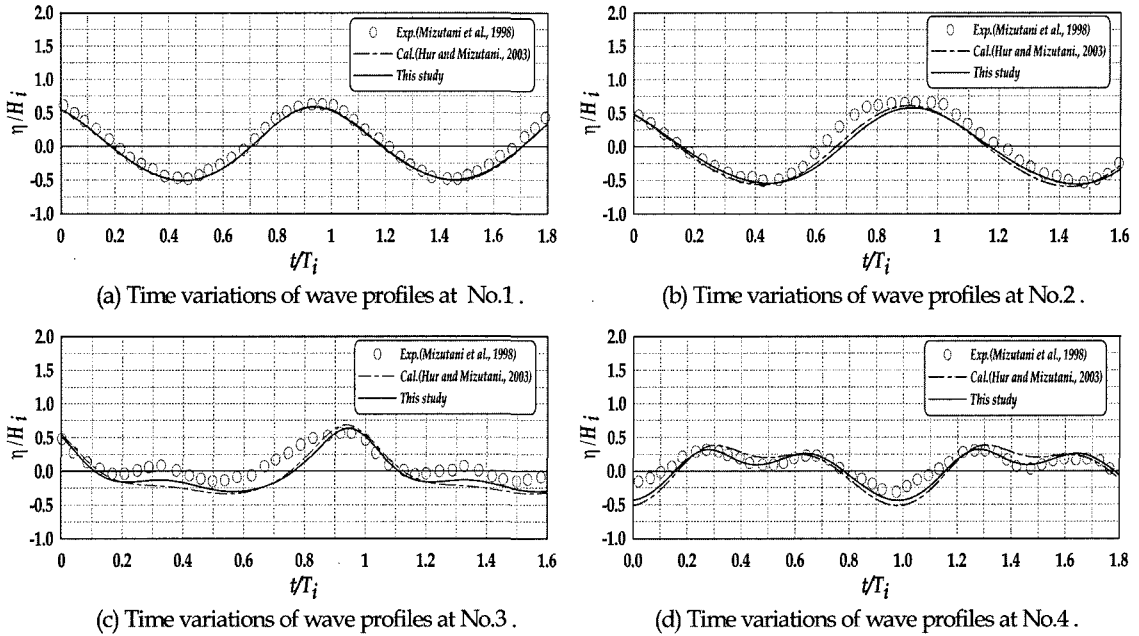


Fig. 12. Comparison of numerical and experimental results.

의 전체적인 수면변동을 잘 재현하고 있다. 또한 본 연구의 계산결과와 Hur and Mizutani(2003)의 계산결과와의 비교로부터 그다지 큰 차이는 보이고 있지 않지만, 본 연구의 계산결과는 잠제 천단(No.3) 및 잠제 배후(No.4)에서 측정되는 수면형의 비교 그림 Fig. 12(c), Fig. 12(d)에서 확인할 수 있는 바와 같이 Hur and Mizutani(2003)에 의한 계산결과에 비해 비선형성이 강한 경우 즉, 수심변동에 따른 비선형파의 형성, 발달로 나타나는 파의 분열 현상을 실험치와 비교하여 보다 잘 재현하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 파 · 구조물 · 지반의 상호간섭에 대해 본 연구의 해석법과 Hur and Mizutani(2003)에 의한 해석법에 있어 투과층내 운동방정식에 포함된 저항항의 도입에 따른 차이로 나타나는 결과로 판단된다. 이로부터 투과층내 유체운동에 있어서 층류저항의 고려가 정도 향상을 위해 필요하며, 또한 Fig. 4에서 설명한 바와 같이 지반내의 유속의 위상차에 비추어 보면 지반내의 유체저항에 층류에 의한 성분을 고려하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

3.2 파 · 해저지반의 상호간섭

지반의 깊이에 따른 간극수압변화에 대하여 Yamamoto et al.(1978)의 실험치와 본 수치해석결과를 비교 · 검토하였다. 비교에 사용된 파동장의 제원 및 설치된 간극수압

계의 위치는 Fig. 3에 제시된 수치파동수로와 동일하다.

Fig. 13은 간극수압에 대해 Yamamoto et al.(1978)의 실험치와 본 수치해석결과와의 비교를 나타낸 것이다. Fig. 13에서 p_0 는 해저지반상에서 측정된 유체압력의 최대진폭을 나타내고, p_s 는 해저지반내의 간극수압의 최대진폭을 각각 나타낸다. 계산결과는 Yamamoto et al.(1978)의 실험치와 비교하여 해저지반의 깊이에 따른 간극수압변동을 잘 재현하고 있고, 특히 주기가 길수록 이러한 경향은 보다 명확하게 주어진다. 그럼으로부터 파형경사 H_i/L_i 가 클수록 해저지반의 깊이에 따른 압력전달은 더 크게 감소하고, 파형경사 H_i/L_i 가 작을수록 해저지반의 전체에 미치는 압력전달은 크게 되는 것을 알 수 있다.

3.3 파 · 구조물 · 해저지반의 상호간섭

파 · 구조물 · 해저지반과의 비선형상호간섭의 문제에 대해서는 잠제와 혼성방파제의 경우에 본 해석치와 기존의 실험치와의 비교로부터 본 해석법의 타당성을 논의한다. 잠제의 경우에 대한 실험치는 입사파고 $H_i=3$ cm, 입사주기 $T_i=1.4$ sec에 대한 Mizutani et al.(1998)의 결과를, 혼성방파제의 경우에 대해서는 입사파고 $H_i=5$ cm, 입사주기 $T_i=2.2$ sec에 대한 Mostafa et al.(1999)의 실험치를 사용하여 계산결과의 타당성을 검증한다.

Fig. 14는 사용된 잠제의 제원 및 간극수압의 비교위치

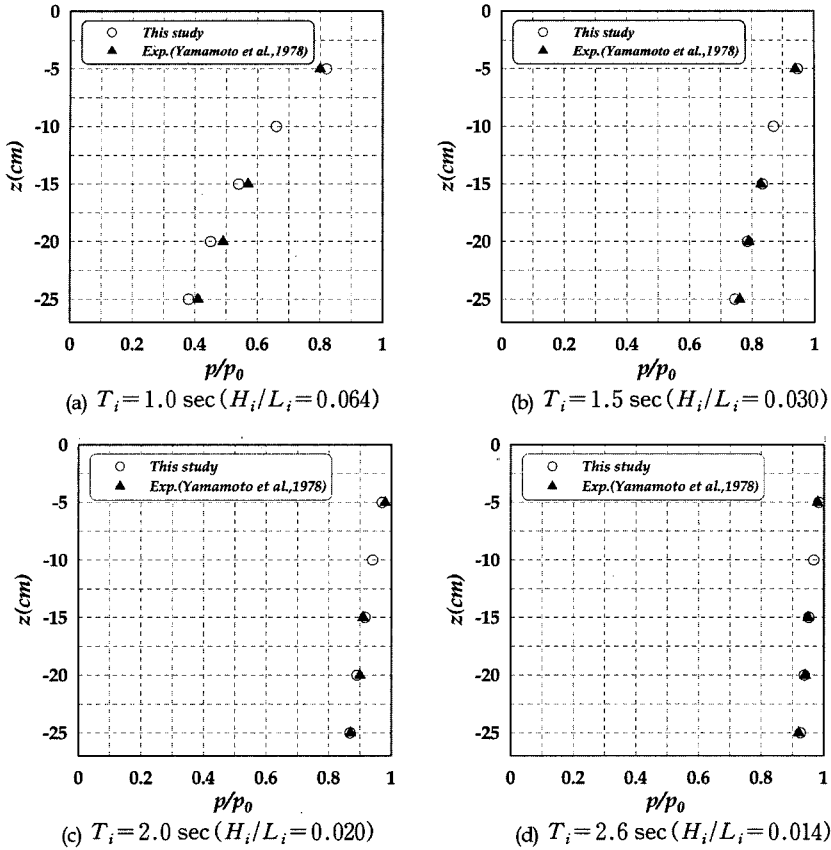


Fig. 13. Comparison of wave-induced pore water pressures (p/p_0) in seabed.

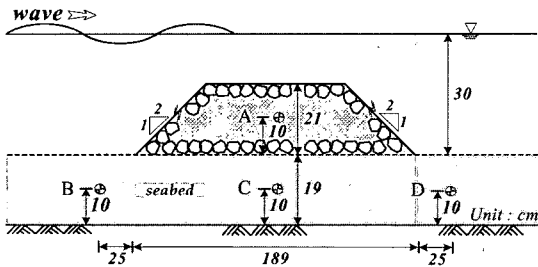


Fig. 14. Definition sketch for the interaction analysis of wave-submerged breakwater-seabed.

를 나타내며, Fig. 15는 혼성방파제의 제원, 수위변동 및 간극수압변동의 비교위치를 나타내고 있다. 잠제 및 혼성 방파제의 사석마운드는 공극률 $\epsilon_x = \epsilon_z = \epsilon_v = 0.4$, 평균입경 $D_p = 2.7 \text{ cm}$ 의 사석층으로 구성되고, 지반은 공극률 $\epsilon_x = \epsilon_z = \epsilon_v = 0.4$, 평균입경 $D_p = 0.08 \text{ cm}$ 의 모래질지반으로 구성된다.

Fig. 16은 Fig. 14의 각 위치(A, B, C, D점)에서 계산한 간극수압의 시간변동을 Mizutani et al.(1998)의 실험

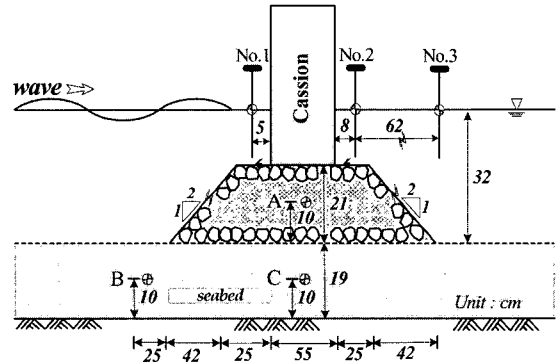


Fig. 15. Definition sketch for the interaction analysis of wave-composite breakwater-seabed.

치와 비교한 것이다. A, C점에 있어서 본 간극수압의 피크치가 실험치와는 다소 차이를 보이는 하지만, 전체적으로 잠제내부 및 지반내의 간극수압의 시간변동은 실험치와 좋은 일치성을 보이고 있다.

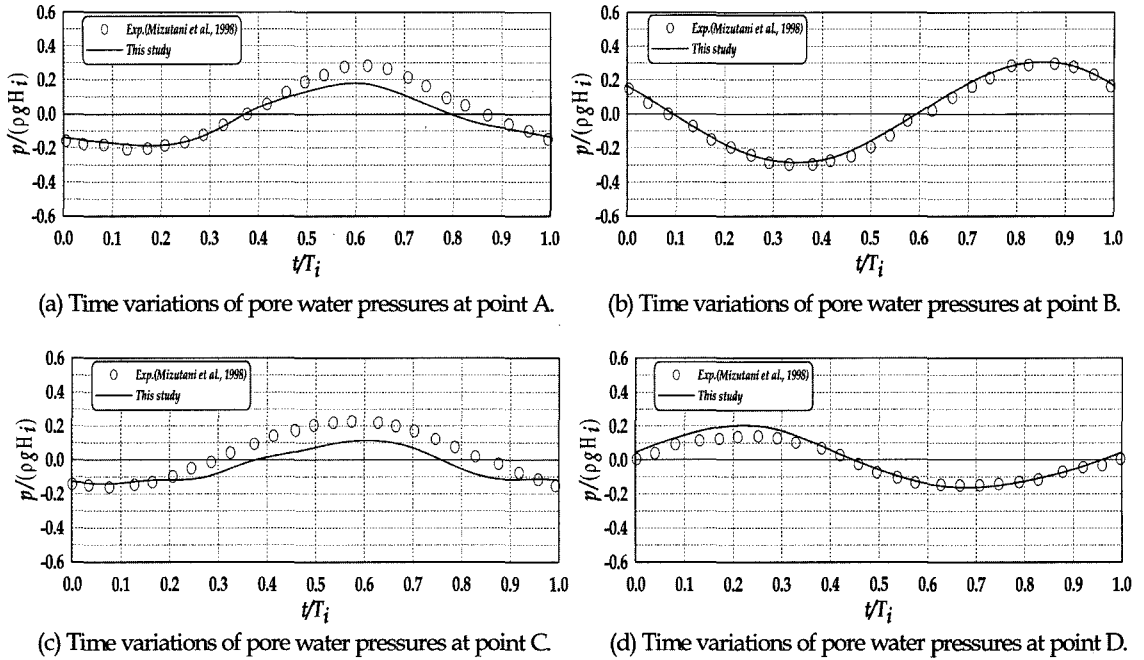


Fig. 16. Comparison of time variations of pore water pressures in case of wave-submerged breakwater-seabed.

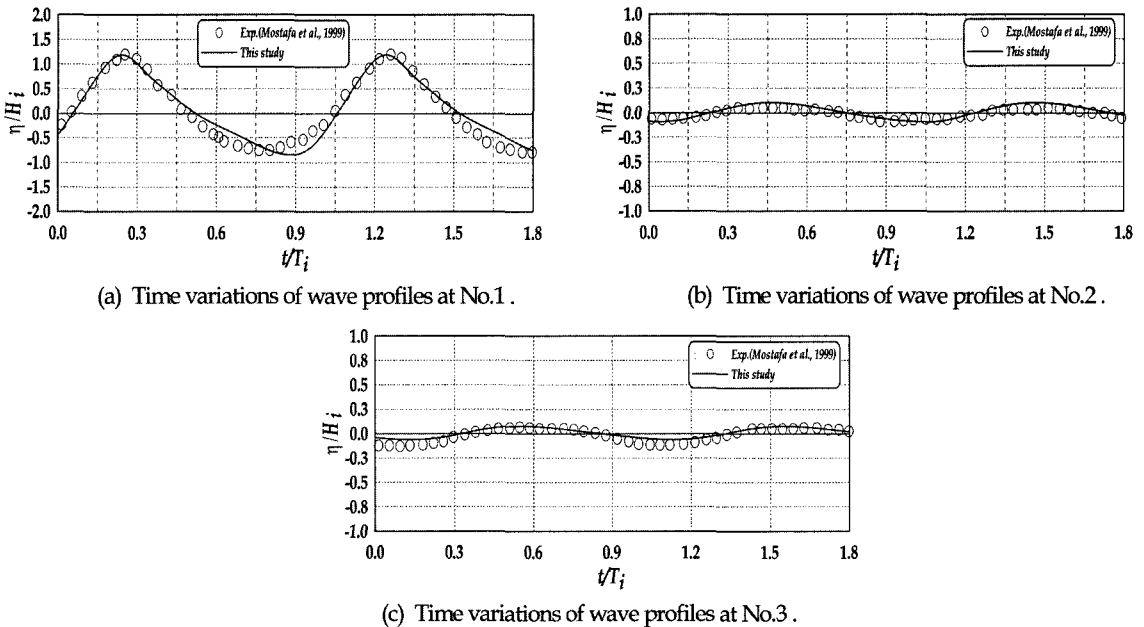
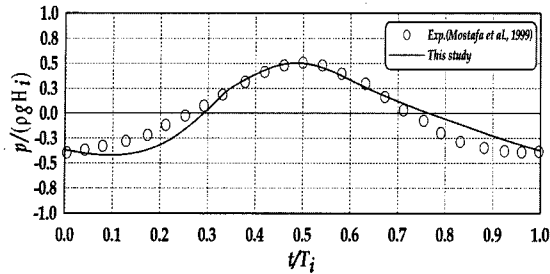


Fig. 17. Comparison of time variations of wave profiles in case of wave-composite breakwater-seabed.

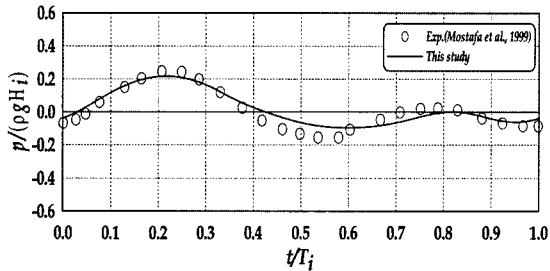
Fig. 17은 Fig. 15의 지점 No.1, No.2 및 No.3에서 측정된 수위변동에 대해 본 계산결과를 Mostafa et al.(1999)의 실험치와 비교한 것이다. Fig. 17로부터 본 연구의 계산 결과는 전체적으로 케이슨전면에서의 수위의 시간변동 및

사석마운드와 지반을 통한 파랑의 전달로 케이스 배후에서 발생하는 수위의 시간변동을 각각 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

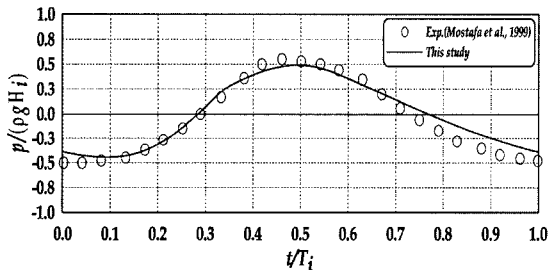
Fig. 18은 Fig. 15의 각 위치(A, B, C점)에서 계산한



(a) Time variations of pore water pressures at point A.



(b) Time variations of pore water pressures at point B.



(c) Time variations of pore water pressures at point C.

Fig. 18. Comparison of time variations of pore water pressures in case of wave-composite breakwater-seabed.

간극수압의 시간변동을 Mostafa et al.(1999)의 실험치와 비교한 것이다. 본 연구의 계산결과는 간극수압의 비선형적인 시간변동을 포함하여 전체적으로 실험치와 좋은 일치성을 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 파 · 구조물 · 지반의 비선형 상호간섭을 해석하기 위하여 파동장과 지반부에 대한 하나의 지배방정식을 구성하고, 동일한 수치알고리즘을 통한 파 · 구조물 · 지반의 Full-nonlinear 간섭현상을 해석할 수 있는 고정도의 직접수치해석기법을 제안하여 그 타당성을 검증함과 동시에 적용성을 검토하였다. 이로부터 얻어진 중요한

사항을 아래에 기술한다.

(1) 파랑장 및 지반내 동적거동을 해석할 수 있는 고정도의 비선형수치해석기법을 개발하였다.

(2) 기존의 연구결과와 실험치 및 본 수치해석결과를 각각 비교 · 검토함으로써 지반내의 유체운동에 층류저항이 고려될 필요가 있는 것으로 판단된다.

(3) 해저지반깊이의 증가에 따른 유속 및 압력의 위상차는 수평유속에 대해서는 파형경사가 작아질수록 위상속도가 빨라지고, 수직유속은 위상속도가 느려지는 것을 알 수 있었다. 그리고 해저지반의 깊이가 증가할수록 간극수압의 위상차는 느려지는 것을 알 수 있었고, 해저지반내의 전달되는 간극수압의 진폭은 주기가 길어질수록 크게 되는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

김도삼, 이광호, 김정수 (2002). 수중투과성구조물에 의한 쇄파를 수반한 파랑변형 및 유속장 해석. 한국해양?해양공학회지, 14(2), 171-181.

김도삼, 이광호, 허동수, 김정수 (2001). VOF법에 기초한 불투과잠재 주변파동장의 해석. 대한토목학회논문집, 21(5-B), 551-560.

Brorsen, M. and Larsen, J. (1987). Source generation of non-linear gravity waves with boundary integral equation method. Coastal Engrg., 11, 93-113.

Ergun, S. (1952). Fluid flow through packed columns. Chem. Engrg. Prog., 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. and Mizutani, N. (2003). Numerical estimation of the wave forces acting on a three-dimensional body on submerged breakwater. Coastal Engrg., 47, 329-345.

Kawasaki, K. (1999). Numerical simulation of breaking and post breaking wave deformation process around a submerged breakwater. Coastal Engrg. in Japan, 41, 201-223.

Liu, P.L.-F. and O'Donnell. (1979). Wave induced forces on buried pipeline in permeable seabed. Proceedings of 4th Intl. Conf. Civil Eng. in Ocean, ASCE, 111-121.

Madsen, O.S. (1978). Wave-induced pore pressures and effective stresses in a porous bed. Geotechnique, 28(4), 377-393.

Mase, H., Sakai, T. and Sakamoto, M. (1994). Wave-induced

- pore water pressures and effective stresses around breakwater. *Ocean. Engrg.*, 21, 361-379.
- McDougal, W.G., Tsai, Y.T. and Sollitt, C.K. (1986). Verification of the analytical model for ocean wave-soil-caisson interaction. *Proceedings of 4th Intl. Conf. on Coastal Engrg.*, ASCE, Taipei, Taiwan, 2089-2103.
- Mizutani, N., Mostafa, A.M. and Iwata, K. (1998). Nonlinear regular wave, submerged breakwater and seabed dynamic interaction. *Coastal Engrg.*, 43, 177-202.
- Moshagen, N.H. and Torum, A. (1975). Wave induced pressure in permeable seabeds. *J. Waterw. Harbor. and Coastal Eng.*, ASCE, 101, 49-58.
- Mostafa, A.M., Mizutani, N. and Iwata, K. (1999). Nonlinear wave, composite breakwater and seabed dynamic interaction. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Engrg.*, ASCE, 125, 88-97.
- Mynett, A.M. and Mei, C.C. (1982). Wave-induced stresses in a saturated poro-elastic sea bed beneath a rectangular caisson. *Geotechnique*, 32(3), 235-247.
- 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.
- Reid, R.O. and Kajjura, K. (1957). On the damping of gravity waves over a permeable sea bed. *Trans. American Geophysical Union*, 38(5), 662-666.
- Sakakiyama, T. and Kajjima, R. (1992). Numerical simulation of nonlinear wave interacting with permeable breakwaters. *Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Engrg.*, ASCE, 1517-1530.
- Shijie Liu and Jacob H. Masliyah. (1999). Non-linear flows in porous media. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 86, 229-252.
- Sleath, J.F.A. (1970). Wave induced pressures in bed of sand. *J. Hydr. Div.*, ASCE, 96(HY2), 367-379.
- Van Gent, M.R.A. (1995). Porous flow through rubble-mound material. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.*, 121, 176-181.
- Yamamoto, T., Koning, H.L., Sellmeier, H. and van Hijum, E.V. (1978). On the response of a poro-elastic bed to water waves. *J. Fluid Mech.*, 87, 193-206.
- 蔣 勤, 高橋重雄, 村西佳美, 磯部雅彦. (2000). 波 · 地盤 · 構造物の相互作用に関するVOF-FEM豫測モデルの開発. *日本海岸工学論文集*, 47, 51-55.

Received March 4, 2005

Accepted May 11, 2005