

파랑-지반 상호작용에 의한 해저지반의 동적응답 수치해석법 검증

Verification of Numerical Analysis Technique of Dynamic Response of Seabed Induced by the Interaction between Seabed and Wave

강 기 천¹ Kang, Gi-Chun 김 성 웅² Kim, Sung-Woung
김 태 형³ Kim, Tae-Hyung 김 도 삼⁴ Kim, Do-Sam
김 재 홍⁵ Kim, Jae-Hong

Abstract

Seabed may undergo large excess pore water pressure in the case of long duration of high wave loading. This excess pore water pressure may reduce effective stress and, consequently, the seabed may liquefy. Thus, it is necessary to develop a numerical technique which can precisely evaluate the dynamic response of seabed due to wave action. In this study, a new numerical technique named mixed model (2D NIT & FLIP models) was proposed. The dynamic wave pressure and water flow velocity acting on the boundary between seabed and the wave field was estimated using 2D-NIT model. This result was used as input data in FLIP program for investigation of dynamic response of seabed. To secure the reliability of the mixed model, the numerical analysis results of the mixed model were compared with Yamamoto's solution and Chang's experiment results. The comparison results indicated that there were some differences between them, but the general trend of the effective stress increment and the excess pore water pressure along the depth of seabed was similar to each other. Thus, this study clearly supports the plausibility of the numerical analysis of the mixed model.

요 지

해저지반에 고파랑이 장시간 지속적으로 작용하는 경우 과잉간극수압이 크게 발생할 수 있고, 이로 인한 유효응력의 감소로 최악의 경우는 액상화를 유발할 수 있다. 따라서, 파작용에 의한 발생하는 해저지반의 동적응답을 정확히 예측할 수 있는 수치해석방법이 필요하다. 본 연구에서는 복합모델(2D-NIT 모델 & FLIP 모델)을 사용한 새로운 수치해석법을 제안하였다. 해저지반과 파동장이 접하는 경계면상에서 작용하는 파압과 유속을 2D-NIT모델로부터 산정하고, 이를 해저지반상의 외력으로 입력하여 FLIP으로부터 해저지반의 동적응답 거동을 조사하는 것이다. 복합모델의 신뢰성 확보를 위해 본 연구에서는 2D-NIT & FLIP 모델에 의한 수치해석결과를 기존의 Yamamoto 이론해 및 Chang 실험결과와 비교하였다. 그 결과 2D-NIT & FLIP 해석값과 차이는 있지만, 전체적으로 깊이에 따라 지반내의 유효응력

1 정회원, 한국수자원공사 댐·유역관리처 선임위원 (Member, Senior Researcher, Dam & Watershed Maintenance Dept., K-water)
2 비회원, 한국해양대학교 토목환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Maritime and Ocean Univ.)
3 정회원, 한국해양대학교 건설공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Korea Maritime and Ocean Univ., Tel: +82-51-410-4465, Fax: +82-51-410-4460, kth67399@kmou.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)
4 비회원, 한국해양대학교 건설공학과 교수 (Prof., Dept. of Civil Engrg., Korea Maritime and Ocean Univ.)
5 정회원, 한국수자원공사연구소 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Infrastructure Research Center KWIE, K-water)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

증분과 과잉간극수압증분의 변화양상이 상당히 잘 일치하고 있기 때문에 본 연구에서 제안된 2D-NIT & FLIP모델이 상당한 타당성을 가지고 있음을 확인 할 수 있었다.

Keywords : Seabed, Wave action, Mixed model, Dynamic response, Excess pore water pressure increment, Effective stress increment

1. 서 론

파랑에 대한 해저지반 동적응답과 액상화라는 주제는 1970년대 이후부터 많은 관심을 받아왔다. 해양에서 파랑에 의한 반복하중이 해저지반의 액상화를 유발시킴은 여러 연구자에 의해 확인되었고 그 메커니즘이 이론적으로 확립되었다(Lee and Focht, 1975; Nataraja and Gill, 1983; Okusa, 1985; Zen and Yanmazaki, 1990).

해저지반의 액상화와 직접적으로 관련되는 파랑에 의한 해저지반내 과잉간극수압의 변동은 다음의 두 형태의 메커니즘의 조합으로 발생된다(Jeng et al., 2006). 첫 번째가 대표적으로 Madsen모델(Madsen, 1978)과 Yamamoto 모델(Yamamoto et al., 1978)에서 논의된 진동과잉간극수압(oscillatory excess pore water pressure)으로, 이는 파랑 운동에 따라 발생하는 지반내의 과잉간극수압의 변화로 깊이에 따라 진폭의 감쇠와 위상지연이 수반된다. 두 번째 메커니즘으로 잔류과잉간극수압(residual excess pore water pressure)을 들 수 있으며, 이는 반복하중하에서 흙의 수축에 의해 야기되는 과잉간극수압의 누적이다(Seed and Rahman, 1978; Sumer and Fredsøe, 2002). 이러한 잔류과잉간극수압은 파랑의 작용시간에 비례하여 축적되는 경향을 나타내므로 파랑조건과 해저지반의 특성에 따라 전술한 진동과잉간극수압보다 훨씬 큰 값을 나타내는 경우도 있다.

진동과잉간극수압과 잔류과잉간극수압의 합으로 표현되는 과잉간극수압은 특히 장시간의 파동작용하에서 커지고, 이에 따라 흙의 유효응력이 감소하여 궁극적으로 지반액상화가 발생하게 된다. 특히, 액상화는 주로 해저지반과 구조물이 접하는 영역에서 크게 발생 및 발달하고, 액상화된 토립자는 저항력이 소실되어 파랑의 흐름에 해저지반이 세굴되어, 결국에 구조물이 침하되거나 전도되는 등의 기초 파괴로 연결될 수 있다(Zen et al., 1991; Sakai, 1999; Gomyo, 1995). 따라서, 구조물과 지반부가 접하는 해저지반에서 파동작용에 의한 지반액상화의 발생여부를 정확히 예측할 필요가 있다. 이 목

적을 이루기 위해 많은 연구가 수치해석 측면에서 지난 수십 년간에 걸쳐 이루어졌다.

진동과잉간극수압에 의한 해저지반의 일시적인 액상화 연구의 초기에 해저지반을 무한두께의 다공질탄성지반(porous elastic seabed)과 압축성유체로 구성된 2상매체로 고려하였다(Yamamoto et al., 1978; Madsen, 1978). Mei and Foda(1981)는 파동으로 인한 진동과잉간극수압에 대해 간략화된 정식화를 도출하기 위하여 경계층근사를 제시하였다. 하지만 이것은 굽은 모래에 대해서만 적용성을 갖는 것으로 보고되었다(Hsu and Jeng, 1994). Okusa(1985)는 과잉간극수압에 미치는 해저지반내 흙의 포화도에 대한 중요성을 입증하고, 이에 따른 액상화 기준을 제시하였다. Jeng(1997)은 해저질내에서 진동과잉간극수압에 관한 일련의 해석해를 유도하였으며, Kianto and Mase(1999) 및 Yuhi and Ishida(2002)는 교차비등방해저지반(cross-anisotropic seabed)에서 파동으로 인한 과잉간극수압에 대해 간략화된 새로운 정식화를 제안하였다.

과잉간극수압의 누적에 대한 메커니즘의 규명에는 지진시 지반내에서 발생하는 과잉간극수압과 유효응력과의 관계(Seed et al., 1975)를 준용하였다. 이에 대한 대표적인 연구로, Seed and Rahman(1978)은 반복전단응력의 분포와 과잉간극수압소산을 고려한 간단한 1차원유한요소모델 개발이다. Sekiguchi et al.(1995)는 Laplace 변환을 사용하여 중첩파동으로 인한 액상화에 탄소성모델을 제안하였다. 이후, 해저지반에서 액상화 후, 진행중인 액상화 및 고밀화에 대한 여러 수치해석모델들이 개발되었다(Miyamoto et al., 2004; Sassa and Sekiguchi, 1999; Sassa and Sekiguchi, 2001; Sassa et al., 2001). 수치모델링에 부가하여, McDougal et al.(1989)은 비압축성토질의 가정하에 균질지반층에서 파동으로 인한 과잉간극수압의 누적에 대한 해석해를 제시하였다. 그들은 수정된 Biot압밀방정식(Biot, 1941)에서 소스항을 과잉간극수압비와 반복비 사이의 선형관계를 적용하여 해석해를 유도하였다. 이러한 해석해는 복잡한 파동-지반-

구조물의 상호간섭 문제에서 도출된 결과의 정성적 검토 및 수치해석결과의 타당성 검증에 유용하게 사용될 수 있다. 이와 유사한 접근법을 사용하여 Cheng et al.(2001), Chen et al.(2005), Jeng et al.(2007, 2010), Jeng and Seymour(2007) 등은 McDougal et al.(1989)의 해석해를 재검토하였다.

본 연구는 기존의 수치해석 연구의 한 부분으로 파동에 기인한 지반내 과잉간극수압의 변동을 산정하기 위한 새로운 수치해석법을 제시하고 그 방법을 기존 해석해 및 실험결과와 비교를 통해 검증하고자 한다. 새로운 방법은 두 개의 모델(2D-NIT & FLIP모델)을 결합한 모델이다. 기존 수치해석이 주로 규칙파동장 조건에서 지반을 다공질 강체 또는 탄성지반으로 가정하여 해석이 이루어져 실제 불규칙 파력에 따른 해저지반의 응답을 검토할 수 없기 때문에 결합모델을 적용하였다. 2D-NIT (Two-Dimensional Numerical Irregular wave Tank)모델은 2차원수치파동수로를 불규칙파동장으로 확장한 수치해석법(Lee et al., 2013)으로 이 모델을 통해 해저지반상에서 시간에 따른 파압과 유속에 의한 전단응력을 산정한다. 그 결과를 지반의 동적거동을 정밀하게 재현할 수 있는 FLIP(Finite element analysis LIquefaction Program) 모델의 외력으로 적용하여 해저지반내에서 과잉간극수압 및 유효응력의 시간에 따른 변화를 정량적으로 평가한다. FLIP모델(Iai et al., 1992a, 1992b)은 원래 지진과 같은 동적인 하중이 지반에 작용할 때 구조물과 지반의 상호작용 문제와 액상화 등을 검토하기 위하여 개발된 유한요소프로그램이다. 파랑하중하 지반내 진동과잉간극수압과 잔류과잉간극수압의 발생메커니즘은 지진의 경우와 동일하므로(Seed et al., 1975) 파동으로 인한 지반액상화의 문제해결에 FLIP모델을 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 2D-NIT & FLIP 복합모델에 의한 수치해석법의 타당성 검증은 Yamamoto(1978)

의 이론해와 Chang et al.(2007)의 실험결과와 비교를 통해 이루어졌다.

2. 복합모델 이론

2.1 2D-NIT모델

Fig. 1은 2D-NIT모델의 적용을 위한 수치파동수조로 조파를 위한 조파소스 및 무반사를 위한 감쇠영역 등으로 구성된다. 여기서 감쇠영역의 폭 La 는 충분한 무반사 조건을 실현하기 위하여 입사파의 파장 L 의 2배보다 크게 할 필요가 있다. 2D-NIT모델은 기존의 2차원수치파동수로모델을 불규칙파동장으로 확장한 모델로 이미 개발과정에서 충분히 검증되었다(Lee et al., 2013).

2D-NIT모델에서 자유표면의 해석모델에 VOF법(Hirt and Nichols, 1981)을, 난류모델에는 $\kappa-\epsilon$ 모델을 각각 적용하였다. 기초방정식은 2차원비압축성의 점성유체를 대상으로 한 연속식 및 Navier-Stokes방정식을 PBM (Porous Body Model; Sakakiyama and Kajima, 1992)에 근거하여 확장한 다음의 식 (1)~(3)으로 주어진다.

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = \gamma_v S_p \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} \\ &= -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} \\ & \quad - D_x u - R_x + S_u \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} \\ &= -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \\ & \quad - D_z w - R_z + S_z - \gamma_v g \end{aligned} \quad (3)$$

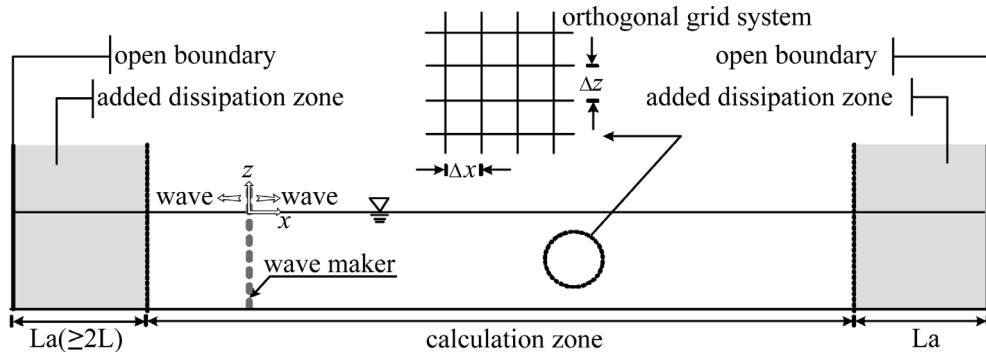


Fig. 1. Schematic sketch of the numerical wave tank used in 2D-NIT model (Lee et al., 2013)

여기서 t 는 시간, x, z 는 수평 및 연직좌표, u, w 는 x, z 방향의 유속성분, ρ 는 유체밀도, p 는 압력, v_e 는 분자동점성계수와 와점성계수의 합, g 는 중력가속도, λ_v 는 체적공극율, λ_x, λ_z 는 x, z 방향의 면적공극율, D_x, D_z 는 경계에서 반사파의 제어를 위해 설치한 스폰지층에서의 에너지감쇠계수, S_ρ, S_u, S_w 는 해석영역내의 조파를 위한 소스항이다. 한편, $\lambda_v, \lambda_x, \lambda_z$ 는 투과층 내에 관성력계수를 도입하여 구조물로부터 받는 관성력효과를 나타낸 파라미터로 식 (4)와 같이 표현되고, R_x, R_z 는 투과층에서의 저항력으로 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned}\lambda_v &= \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M \\ \lambda_x &= \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \\ \lambda_z &= \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M\end{aligned}\quad (4)$$

$$\begin{aligned}R_x &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \\ R_z &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) u \sqrt{u^2 + w^2}\end{aligned}\quad (5)$$

여기서 C_M 은 관성력계수, C_D 는 항력계수, $\Delta x, \Delta z$ 는 x, z 방향의 격자크기이다.

VOF함수 F 는 유체의 체적율로 $0 \leq F \leq 1$ 의 범위를 가지며, $F = 1$ 의 경우는 유체셀, $F = 0$ 의 경우는 기체셀, $0 < F < 1$ 의 경우는 표면셀로 판정하여 자유수면을 추적하며, 다음의 이류방정식에 의해 VOF함수가 이루어진다.

$$\gamma_V \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = S_f \quad (6)$$

여기서 S_f 는 해석영역내의 조파소스에 의해 추가되는 항이다. 2D-NIT모델과 관련된 기초식 및 경계조건 등의 기술은 지면관계상 생략하며, 보다 상세한 정보는 Lee et al.(2013)을 참조하기 바란다.

2.2 FLIP모델

파랑-지반 상호작용거동을 해석하기 위해 FLIP모델 (Iai et al., 1992a, 1992b)을 이용하였다. FLIP에서는 Multi-spring shear mechanism(Towhata and Ishihara, 1985)을 이용한 2차원 유효응력의 유한요소해석모델로 지반내 간극수를 비압축성으로, 흙골격을 탄소성체로 가정하

며, 액상화에 따른 지반과 구조물의 안정성을 검토하는 모델로, 원래 지진과 같은 동적인 하중이 작용할 때 액상화 등에 의한 지반-구조물 상호작용 문제를 검토하기 위하여 개발된 유한요소프로그램이다.

Multi-spring shear mechanism에서 원형고정경계는 Fig. 2와 같이 전단변형영역과 무한개의 가상스프링경계의 연결로 정의되는 이동절점으로 나타낸다. 각 스프링은 다양한 방향을 가지는 실제 단순전단메커니즘이라고 할 수 있고, 이는 지반에서 흙의 탄소성에 관한 응력-변형률 관계를 잘 모사할 수 있다.

각 스프링에서 힘과 변위관계는 쌍곡선형태의 하중-변위관계를 따른다. 원의 중심에서 이동점의 변위는 외력에 의해 발생한 전단변형을 나타내며, 절점에 작용외력의 결과로 흙에서 발생하는 전단응력이 나타낸다. 평면변형상태에서 유효응력과 변형벡터를 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\sigma'\}^T = \{\sigma'_x \quad \sigma'_y \quad \tau_{xy}\} \quad (7)$$

$$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \gamma_{xy}\} \quad (8)$$

구성방정식은 기본적으로 식 (9)와 같이 주어진다.

$$\{d\sigma'\} = [D] (\{d\varepsilon\} - \{d\varepsilon_p\}) \quad (9)$$

여기서 $\{\sigma'\}$ 는 유효응력, $\{\varepsilon\}$ 은 변형률, $\{d\sigma'\}$ 는 유효응력증분, $\{d\varepsilon\}$ 는 변형률증분, $[D]$ 는 다음의 식 (10)으로 정의되고, $\{d\varepsilon_p\}$ 는 다음의 식 (11)로 주어지는 다일러턴시에 따른 체적변형률증분을 각각 나타낸다.

$$[D] = K \{n^{(0)}\} \{n^{(0)}\}^T + \sum_{i=1}^I R_{L/U}^{(i)} \{n^{(i)}\} \{n^{(i)}\}^T \quad (10)$$

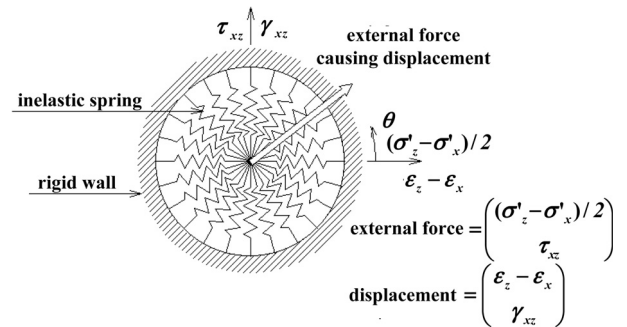


Fig. 2. Schematic diagram of multi-spring shear mechanism model (Towhata and Ishihara, 1985)

$$\{d\varepsilon_p\}^T = \{d\varepsilon_p/2 \quad d\varepsilon_p/2 \quad 0\} \quad (11)$$

여기서 K 는 반력계수, $R_{L/U}^{(i)}$ 은 접선전단계수, $\sum_{i=1}^I R_{L/U}^{(i)}$ $\{n^{(i)}\}\{n^{(i)}\}^T$ 는 multi-spring shear mechanism으로, 각 메커니즘 $i=1,2,3,\dots, I$ 는 각각 단순전단메커니즘으로 나타나며, 각각의 단순전단평면의 각도는 $\theta/2$ 이다. x 축에 관련된 접선전단계수는 복원력특성과 쌍곡선의 응력-변형관계를 나타낸다. 식 (10)의 우변에서 $\{n^{(0)}\}$ 은 방향벡터, $\{n^{(i)}\}^T$ 는 방향벡터로 각각 다음의 식으로 정의된다.

$$\{n^{(0)}\}^T = \{1 \quad 1 \quad 0\} \quad (12)$$

$$\{n^{(i)}\}^T = \{\cos \theta_i \quad -\cos \theta_i \quad \sin \theta_i\} \quad (\text{for } i=1, \dots, I) \quad (13)$$

여기서,

$$\theta_i = (i-1)\Delta\theta \quad (\text{for } i=1, \dots, I) \quad (14)$$

$$\Delta\theta = \pi/I \quad (\text{for } i=1, \dots, I) \quad (15)$$

과잉간극수압은 반복전단작용에 의해 발생하는 흙의 체적변형과 간극률 및 간극수의 체적탄성계수와의 관계로부터 산정되고, (+)다일러턴시의 영향은 Iai et al.(1992a, 1992b)에 의해 제안된 Fig. 3의 액상화경계(liquefaction front)를 이용하여 반복전단작용에 의한 흙의 유효응력 감소에 의해 유발되는 반복변동(cyclic mobility) 및 액상화거동을 재현할 수 있으며, 그것의 정식화는 다음과 같다.

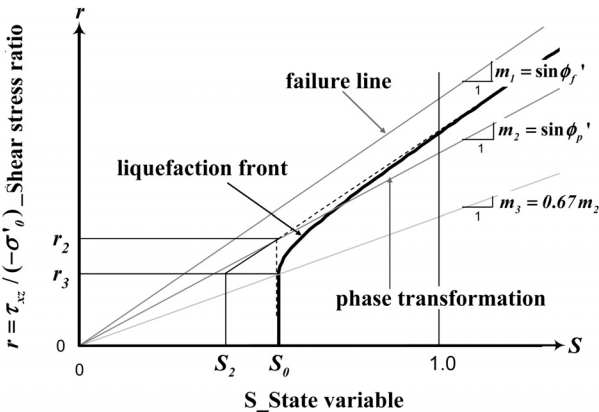


Fig. 3. Schematic diagram of liquefaction front, state variable S and shear stress ratio (Iai et al., 1992a, 1992b)

$$S = S_0 \quad (\text{if } r < r_3)$$

$$S = S_2 + \sqrt{(S_0 - S_2)^2 + [(r - r_3)/m_1]^2} \quad (\text{if } r > r_3) \quad (16)$$

여기서,

$$r_2 = m_2 S_0 \quad (17)$$

$$r_3 = m_3 S_0 \quad (18)$$

$$S_2 = S_0 - (r_2 - r_3)/m_1 \quad (19)$$

S_0 는 전단작용에 의한 하나의 기능으로 정의되며, m_1 은 파괴선의 기울기, 전단저항각 ϕ'_f 는 $m_1 = \sin \phi'_f$ 에 의해 정의된다. m_2 는 상태변형(phase transformation)각도 ϕ'_p 로부터 $m_1 = \sin \phi'_p$ 로 정의되고, m_3 는 $m_3 = 0.67 m_2$ 로 정의되는 상태변형선의 기울기로, 하나의 영역에서 다른 영역으로 자연스럽게 변형되기 위한 것이며, 실제 응력경로 형태와의 조화에 의해 결정된다. Fig. 4에서는 S 비배수상태에 대한 일정 구속압에서 유효응력 변화를 의미하고, r 은 전단응력비이며, 초기유효응력은 $\sigma'_0 = (\sigma'_{x0} + \sigma'_{y0})/2$ 로 정의된다.

이상에서는 지반거동해석 프로그램인 FLIP의 이론적인 배경의 개요를 기술하였으며, FLIP 자체에 대한 검증은 지진시 구조물의 손상에 대한 예측결과와 비교 및 검토로부터 이루어졌다(Ozutsmi et al., 2002; Kang et al., 2014).

3. 복합모델의 검증

본 연구에서 제안된 복합모델은 해저지반과 상부과동장이 접하는 경계면상에서 시간에 따른 압력과 유속에 의해 발생하는 전단응력을 2D-NIT모델로부터 산정하고, 이를 해저지반상의 외력치로 입력하여 FLIP으로

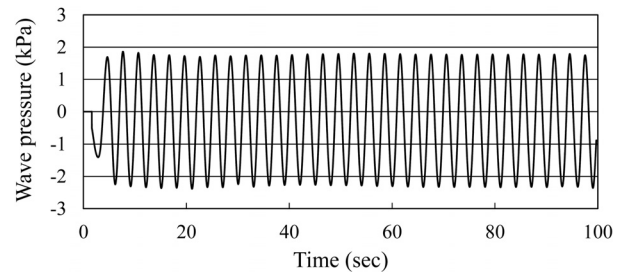


Fig. 4. Wave pressure history produced in 2D-NIT

부터 해저지반 내의 과잉간극수압과 유효응력의 변화를 산출하는 방법을 사용한다. 앞에서 언급한 바와 같이 이미 2D-NIT모델과 FLIP모델 각각에 대한 검증은 이루어졌지만 두 모델의 결합에 의한 수치해석결과에 대한 검증은 이루어지지 않은 상태이다. 2D-NIT & FLIP 수치해석결과와 타당성을 검증하기 위하여 기존의 이론해(Yamamoto et al., 1978) 및 실험결과(Chang et al., 2007)와 비교 분석을 실시하였다.

3.1 Yamamoto 이론해와 비교

Yamamoto et al.(1978)은 진행성과 하중조건에서 Biot의 압밀이론에 기초하여 해저지반을 반무한 다공성탄성체로, 간극수는 비압축성이고, 간극수의 흐름이 등방이고 Darcy법칙에 지배된다고 가정하였다.

완전포화된 반무한깊이의 수평지반을 대상으로 하는 Yamamoto모델에 의한 무차원수평 및 연직유효응력 $|\Delta\sigma'_x/p_0|$, $|\Delta\sigma'_z/p_0|$, 무차원과잉간극수압증분 $|\Delta p/p_0|$ 은 다음의 식으로 주어진다.

$$\left| \frac{\Delta\sigma'_x}{p_0} \right| = \left| \frac{\Delta\sigma'_z}{p_0} \right| = kze^{-kz} e^{i(kx + \omega t)} \quad (20)$$

$$\left| \frac{\Delta p}{p_0} \right| = e^{-kz} e^{i(kx + \omega t)} \quad (21)$$

여기서 $\Delta\sigma'_z$ 는 연직유효응력증분, p_0 는 해저면상에서 파의 최대동압을 각각 나타내며, k 는 파수, $i = \sqrt{-1}$, w 는 각주파수이다.

식 (20) 및 식 (21)에서 알 수 있는 사실은 무차원수평 및 연직유효응력 $|\Delta\sigma'_x/p_0|$, $|\Delta\sigma'_z/p_0|$ 과 무차원과잉간극수압증분 $|\Delta p/p_0|$ 는 흙의 물성치와는 관계가 없고, 오직 파수, 즉 주기와 수심만의 함수인 것을 알 수 있다. 이것은 매우 중요한 사실로 Yamamoto 해가 가진 한계성을 나타낸다.

Table 1. Physical properties of soil

Shear modulus (kPa)	4.8×10^5
Bulk modulus (kPa)	1.252×10^6
Bulk modulus of pore water (kPa)	2.2×10^6
Saturated unit weight (kN/m ³)	20.50
Poisson's ratio	0.33
Porosity	0.487
Internal friction angle (°)	34

2D-NIT & FLIP에 의해 수행된 수치해석에서는 비선형 규칙파(T = 3 sec, H = 1m)를 사용하였고, 지반물성치는 Yamamoto et al.(1978)에서 사용된 전단계수와 간극수체적계수를 사용하였으며, 그 외 수치해석에 필요한 물성치는 조밀한 흙에 대한 Das(2006)가 제안한 일반적인 값으로 Table 1과 같다(Das, 2006).

2D-NIT 수행시에 경계조건은 중복파의 영향을 최소화 하기 위해 양쪽 경계면에 적용된 파장의 두 배인 50.764m의 감쇠영역을 고려하였다. Fig. 4는 2D-NIT에 의해 산정된 해저지반 표면에서의 파압으로 최대파압은 1.86kPa를 나타내고 있다. 여기서 “+(양)”의 파압은 해저지반에 압축력으로 작용하며, “-(음)”의 파압은 인장력으로 작용하게 된다.

Fig. 5는 FLIP에 의한 지반수치해석 조건을 나타낸다. 경계조건으로 하부지반은 고정, 양쪽 경계는 수직방향의 변위만 허용하였다. 2D-NIT에서 산출된 파압은 Fig. 5에서처럼 양쪽 4m를 제외한 중앙부분에 0.2m 간격으로 총 16개 지점에 입력하였다. 또한, 결과산정을 위한 지점은 깊이 방향으로 총 50개를 지정하였다.

Fig. 6은 무차원수평 및 연직유효응력증분에 대한 Yamamoto의 이론해와 2D-NIT & FLIP모델에 의한 수치해석결과를 비교한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 Yamamoto에 의한 이론해와 수치해석결과가 비슷한 경향을 나타내고 있다. 두 경우, 지반에서 깊어질수록 작용파압의 영향이 감소하기 때문에 $|\Delta\sigma'_x/p_0|$, $|\Delta\sigma'_z/p_0|$ 가 감소하는 경향을 보이고 있다.

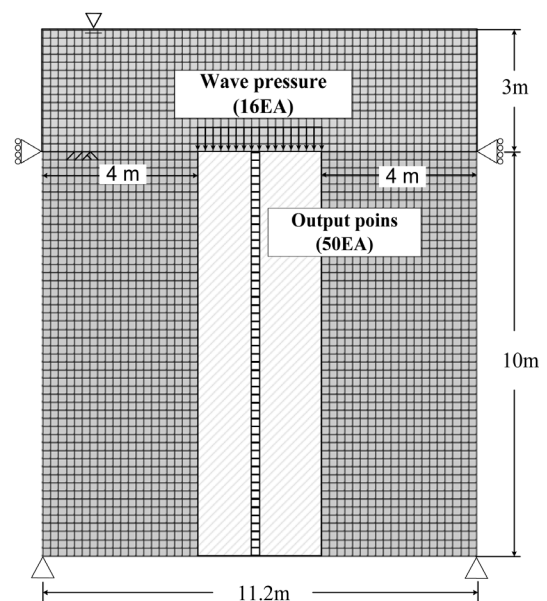


Fig. 5. Finite element mesh for numerical modeling in FLIP

Yamamoto 결과를 보면 지반 깊이에 따른 무차원수평 및 연직유효응력증분의 최대치가 kz 가 1인 연직위치에서 발생된다는 것을 알 수 있다. 즉, 수평 및 연직유효응력증분의 값은 $z/L = 1/2\pi$ 일 때 최대치가 되며, 이는 파장에 따라 연직유효응력증분 최대치의 발생위치가 달라짐을 확인할 수 있다. $kz=1$ 일 때 무차원유효응력증분은 0.368로 산정된다. 한편, 2D-NIT&FLIP의 경우는 kz 가 0.4일 때 무차원수평 및 연직유효응력증분의 최대치는 0.181이 발생하였다. 2D-NIT & FLIP의 경우는 작용한 파압에 대해서 kz 가 2정도까지만 영향이 있지만, Yamamoto의 이론해는 kz 가 4까지 영향이 있는 것을 알 수 있다. 전체적으로 2D-NIT & FLIP모델이 Yamamoto 모델의 경우보다 약간 작은 값을 나타낸다.

Fig. 7은 무차원과잉간극수압증분에 대한 Yamamoto

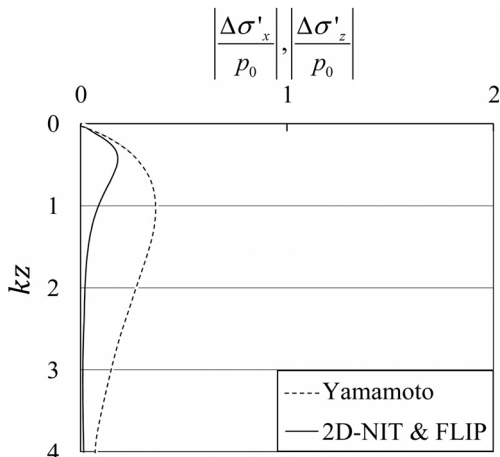


Fig. 6. Comparison of non-dimensional horizontal and vertical effective stress increments between Yamamoto and 2D-NIT & FLIP results

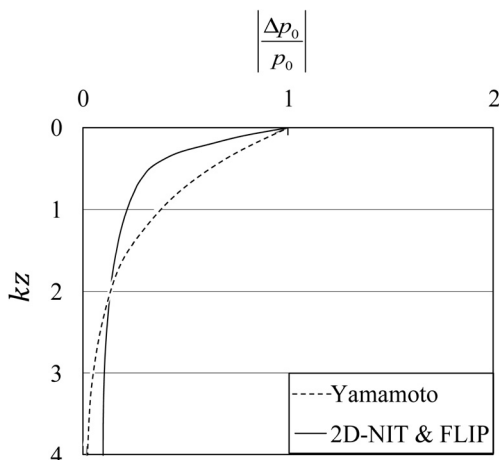


Fig. 7. Comparison of non-dimensional excess pore water pressure increment between Yamamoto and 2D-NIT & FLIP results

et al.(1978)에 의한 이론치와 2D-NIT & FLIP모델에 의한 수치해석결과를 비교한 것이다. 그림으로부터 무차원과잉간극수압증분은 지반표층에서 가장 큰 $|\Delta p/p_0|=1$ 의 값을 나타내고, 깊이가 깊어질수록 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 변화과정에서 Yamamoto 해와 2D-NIT & FLIP모델의 수치해석치가 매우 잘 일치한다. 특히, $kz=1$ 의 상하에서 나타나는 두 모델의 결과에서 차이는 전술한 Fig. 6에서 논의된 원인이 동일하게 무차원과잉간극수압증분에도 영향을 미친 것으로 판단된다.

이상으로부터 Yamamoto모델과 2D-NIT & FLIP모델에 의한 결과값을 비교하면 두 모델에서 발생된 차이는 다음과 같은 이유 때문으로 판단된다. 먼저 기본적으로 지반에 대한 거동이론의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, Yamamoto모델은 지반을 다공성탄성체로 가정함으로써 무차원유효응력증분이 흙의 물성치와 관계 없는 결과를 나타내지만, 실질적으로 지반은 다공성탄성체라기보다 FLIP모델에서 고려하는 탄소성체에 가까운 거동을 나타낸다. 즉 지반의 물성치가 결과에 영향을 미친 것으로 판단된다. 또 다른 원인으로 파동장에 적용된 파이론을 고려할 수 있다. Yamamoto모델에서는 선형파이론을 적용하고 있는 반면, 2D-NIT & FLIP모델에서는 강비선형 파랑해석법을 적용하고 있기 때문에 파의 비선형이론이 2D-NIT & FLIP모델의 수치해석에 영향을 미친 것으로도 판단된다. 하지만 이 영향은 작은 것으로 판단된다.

결론적으로 두 결과값에 차이는 보이지만, 두 모델에 적용된 조건에 의해 이론상 필연적으로 나타날 수 있는 차이로 볼 수 있다. 깊이에 따른 지반내의 유효응력증분과 과잉간극수압증분의 변화양상이 두 모델의 결과에서 상당히 잘 일치하고 있기 때문에 본 연구에 적용된 2D-NIT & FLIP모델이 상당한 타당성을 가지고 있음을 알 수 있다.

3.2 Chang 실험결과와 비교

Chang et al.(2007)은 사질지반상에서 진행파동으로 인한 지반내 과잉간극수압증분 및 유효응력증분을 실내수조실험으로부터 측정하였다. Chang et al.(2007)의 실험에서 길이 100m, 폭 1.5m, 높이 2m의 수조를 사용하였으며, 해저지반은 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 Fixed seabed와 Sandy seabed(길이 5.5m, 폭 1.5m, 높이 6m)로 나누었으며, 해저지반의 재료는 균일한 재료를 사용하

였다.

Sandy seabed에서 계측기를 설치하여 과잉간극수압과 유효응력을 측정하였다. 계측기 각각의 위치는 Fig. 8에서 확인할 수 있으며, 그 간격은 수직으로 0.1m, 수평으로 0.2m 이다. 실험에 적용된 파의 물리량 및 해저지반의 물성치는 다음의 Table 2에 나타난 바와 같다.

한편, FLIP모델에서는 Table 2에서 제시된 물성치 이외의 값이 요구되는데, 이들의 값은 Table 3과 같다.

사질지반상에서 진동과동으로 인한 지반내 과잉간극수압증분 및 연직 및 수평유효응력증분을 수조실험으로부터 측정한 Chang et al.(2007)의 실험결과와 2D-NIT

Table 2. Physical properties of the wave and seabed soil (Chang et al., 2007)

Wave	Wave height (m)	0.3
	Wave period (sec)	2
Seabed soil	Specific gravity	2.654
	Minimum dry density (g/cm ³)	1.286
	Coefficient of uniform	2.415
	Soil type (Unified Soil Classification System)	SP
	Wave period (sec)	2
	Maximum dry density (g/cm ³)	1.607
	Mean diameter (mm)	0.220
	Coefficient of curvature	0.932

Table 3. Physical properties of the seabed soil

Internal friction angle (°)	33
Shear modulus (kPa)	1.0×10 ³
Bulk modulus of pore water (kPa)	2.2×10 ⁶
Saturated unit weight (kN/m ³)	18.62
Porosity	0.5
Bulk modulus (kPa)	2.607×10 ³
Poisson's ratio	0.33

& FLIP모델에 의한 해석값을 비교한 것은 Fig. 9와 같다. Chang et al.(2007)의 실험결과는 점으로 2D-NIT & FLIP모델에 의한 해석값은 실선으로 각각 나타낸다.

Fig. 9(a)는 무차원 과잉간극수압증분을 나타낸 것으로 무차원과잉간극수압증분이 실험치의 비해, 해석치가 조금의 작은 값을 나타내고 약간의 차이는 있지만 대체적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 두 결과 모두 파랑하중의 영향이 지반이 깊어짐에 따라 감소하여 과잉간극수압증분 값이 감소하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 9(b)의 무차원수평유효응력증분의 경우 지반상부에서는 실험치와 해석치가 잘 일치하나하부에서는 해석치가 실험치에 비해 작은 것을 알 수 있다. Fig. 9(c)은 무차원연직유효응력증분의 경우 실험치가 해석치에 비해 작은 값을 보인다. 전체적으로 연직유효응력증분은 해석치가 크고 수평유효응력증분은 실험치가 큰 것으로 나타났으며 경향은 서로가 대체적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 깊이에 따른 수평유효응력증분 값(Fig. 9(b))과 연직유효응력증분 값(Fig. 9(c))을 비교해보면 서로 다른데 이것은 Yamamoto 해와 다르게 흙의 가지고 있는 비등방성을 실험치와 해석치가 잘 표현하고 있는 것을 보여준다. 또한 실험치와 해석치 모두 수평유효응력증분 값이 연직유효응력증분에 비해 큰 것은 파랑에 의해 발생된 과잉간극수압이 상대적으로 유효응력이 작은 수평방향유효응력에 크게 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

실험과 해석 사이에 차이를 발생시킨 원인은 실험에서 파장에 비해 토층이 얇은 유한두께의 지반을 구성입자에 대한 축소문제에 따른 것으로 판단된다. 다른 원인으로 파동장에 적용된 파로 실험에서 조파판(wave paddle)을 사용하여 발생된 파는 cnoidal파로 이것은 선형파와 고립파사이에 존재하는 파인 반면, 2D-NIT & FLIP모델에

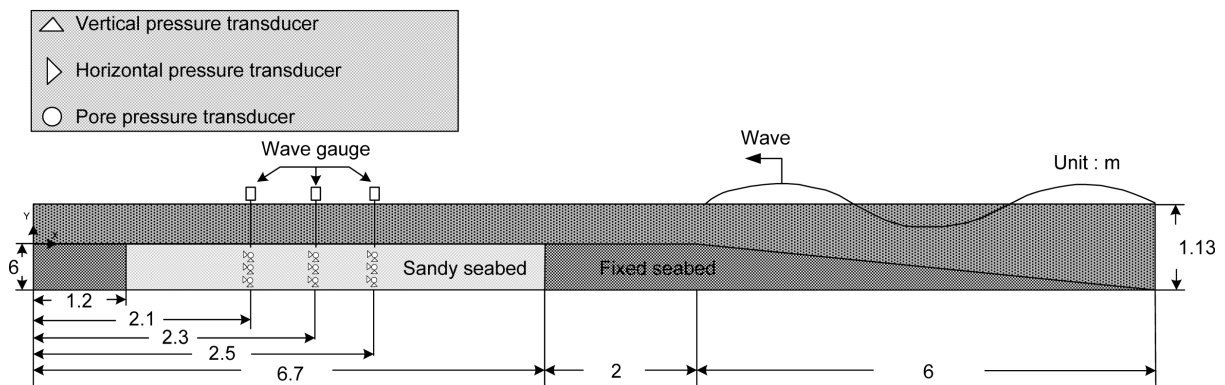
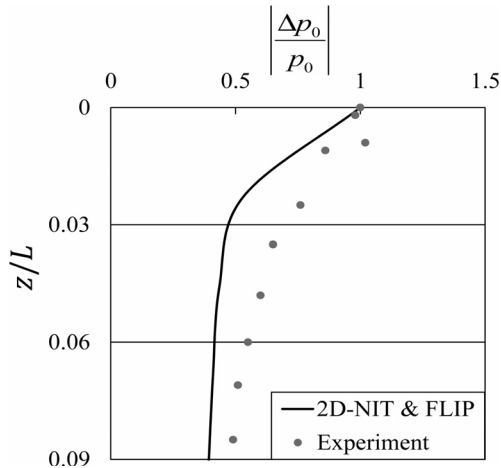
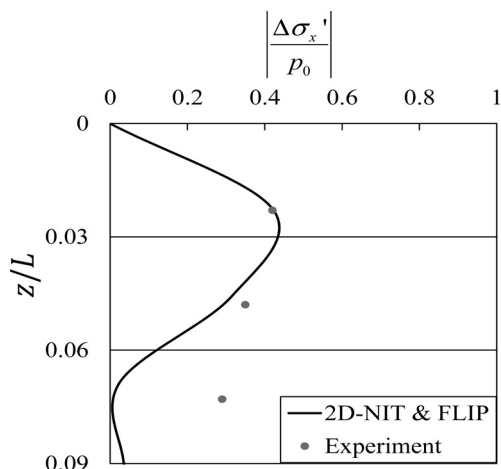


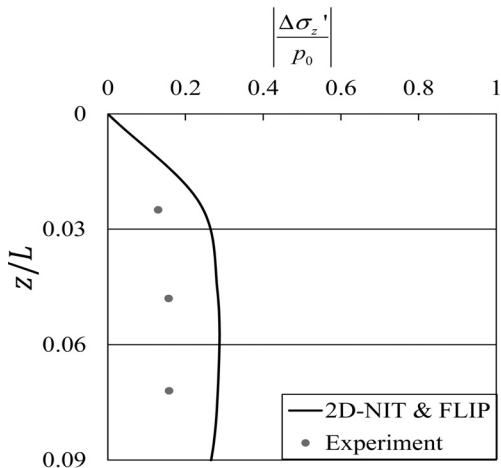
Fig. 8. Model set-up (Chang et al., 2007)



(a) Non-dimensional excess pore water pressure increment



(b) Non-dimensional horizontal effective stress increment



(c) Non-dimensional vertical effective stress increment

Fig. 9. Comparisons of non-dimensional excess pore pressure and effective stress increments between Chang and 2D-NIT & FLIP results

서는 강비선형 파랑해석법을 적용한 파가 사용 되었기 때문으로 판단된다.

결론적으로 두 결과값에 차이는 보이지만, 그 원인은

해석조건과 실험조건의 차이에 따라 발생하는 것으로 볼 수 있다. 전체적으로 깊이에 따른 지반내의 유효응력 증분과 과잉간극수압증분의 변화양상이 실험값과 해석값이 상당히 잘 일치하고 있기 때문에 본 연구에 적용된 2D-NIT & FLIP모델이 상당한 타당성을 가지고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 파동에 기인한 지반내 과잉간극수압의 변동을 산정하기 위한 새로운 수치해석기법을 제시하고 그 방법을 기존 해석해 및 실험결과와 비교를 통해 검증하였다. 새로운 방법은 두 개의 모델(2D-NIT & FLIP 모델)을 사용한 복합모델로, 2D-NIT모델을 사용하여 해저지반상에 작용하는 파력을 산정하고 그 결과를 FLIP 프로그램에 외력으로 적용하여 해저지반내에서 과잉간극수압 및 유효응력의 시간에 따른 변화를 정량적으로 평가하는 구조로 되어있다. 2D-NIT & FLIP 복합모델에 의한 수치해석법의 타당성 검증은 Yamamoto의 이론해와 Chang의 실험결과와 비교를 통해 이루어졌다.

Yamamoto 이론해와 비교 결과, 결과값에 차이는 두 모델에 적용된 조건에 의해 이론상 필연적으로 나타날 수 있는 범위에 속하는 것으로 볼 수 있다. 즉, Yamamoto 모델은 지반을 다공성탄성체로 가정함으로써 무차원유효응력증분이 흙의 물성치와 관계없는 결과를 나타내지만, 실질적으로 지반은 다공성탄성체라기보다 FLIP 모델에서 고려하는 탄소성체에 가까운 거동을 나타낸다. 다른 원인으로 Yamamoto모델에서는 선형파이론을 적용하고 있는 반면, 2D-NIT & FLIP모델에서는 강비선형 파랑해석법을 적용하고 있기 때문에 파의 비선형이론이 2D-NIT & FLIP모델의 수치해석에 영향을 미친 것으로도 판단된다. Chang 실험해와 비교 결과, 역시 결과값에 차이가 발생하고 있는데 이것은 실험에서 파장에 비해 토층이 얇은 유한두께의 지반을 구성하는 입자에 대한 축소문제와 조파판(wave paddle)에 발생된 파의 문제에 기인된 것으로 판단된다.

전체적으로 2D-NIT & FLIP 해석값과 Yamamoto의 이론해와 Chang의 실험결과와 비교 결과 서로 차이는 보이지만, 그 원인은 해석조건과 실험조건의 차이에 따라 발생하는 것으로 볼 수 있다. 전체적으로 깊이에 따른 지반내의 유효응력증분과 과잉간극수압증분의 변화양상이 서로 잘 일치하고 있기 때문에 본 연구에 적용된

2D-NIT & FLIP모델이 상당한 타당성을 가지고 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 한국해양대학교 해외파견 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

- Kang, G. C., Tobita, T., and Iai, S. (2014), "Seismic Simulation of Liquefaction-induced Uplift Behavior of a Hollow Cylinder Structure Buried in Shallow Ground", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.64, pp.85-94.
- Biot, M. A. (1941), "General Theory of Three-dimensional Consolidation", *J. of Applied Physics*, Vol.12, pp.155-165.
- Chang, S. C., Chien, L. K., Lin, J. G., and Chiu, Y. F. (2007), "An Experimental Study on Progressive Wave-induced Stresses Duration in Seabed Soil", *J. of Marine Science and Technology*, Vol.15, No.2, pp.129-140.
- Cheng, L., Sumer, B. M., and Fredsøe, J. (2001), "Solutions of Pore Pressure Build up due to Progressive Waves", *Intl. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.25, pp.885-907.
- Das, B. M. (2006), *Principles of Geotechnical Engineering* (6th Edition), Thomson.
- Hirt, C. W. and Nichols, B. D. (1981), "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", *J. of Computational Physics*, Vol.39, pp.201-225.
- Hsu, J. R. C. and Jeng, D. S. (1994), "Wave-induced Soil Response in an Unsaturated Anisotropic Seabed of Finite Thickness", *Intl. J. for Numerical Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.18, No.11, pp.785-807.
- Iai, S., Matsunaga, Y., and Kameoka, T. (1992a), "Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility", *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Eng., Vol.32, No.2, pp.1-15.
- Iai, S., Matsunaga, Y., and Kameoka, T. (1992b), "Analysis of Undrained Cyclic Behavior of Sand under Anisotropic Consolidation", *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Eng., Vol.32, No.2, pp.16-20.
- Jeng, D. S. (1997), *Wave-induced Seabed Response in Front of a Breakwater*, PhD thesis, Univ. of Western Australia.
- Jeng, D. S., Seymour, B., and Li, J. (2006), *A New Approximation for Pore Pressure Accumulation in Marine Sediment due to Water Waves*, Research Report No.R868, The Univ. of Sydney, Australia, 28pp.
- Jeng, D. S. and Hsu, J. R. C. (1996), "Wave-induced Soil Response in a Nearly Saturated Seabed of Finite Thickness", *Geotechnique*, Vol.46, No.3, pp.427-440.
- Kianoto, T. and Mase, H. (1999), "Boundary-layer Theory for Anisotropic Seabed Response to Sea Waves", *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, ASCE, Vol.125, No.4, pp.187-194.
- Lee, K. H., Park, J. H., Cho, S., and Kim, D. S. (2013), "Numerical Simulation of Irregular Airflow in OWC Wave Generation System considering Sea Water Exchange", *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, Vol.25, No.3, pp.128-137.
- Li, J. and Jeng, D. S. (2008), "Response of a Porous Seabed around Breakwater Heads", *Ocean Eng.*, Vol.35, pp.864-886.
- Madsen, O. S. (1978), "Wave-induced Pore Pressure and Effective Stresses in a Porous Bed", *Geotechnique*, Vol.28, pp.377-393.
- McDougal, W. G., Tsai, Y. T., Liu, P. L. -F., and Clukey, E. C. (1989), "Wave-induced Pore Water Pressure Accumulation in Marine Soils", *J. of Offshore Mechanics and Arctic Eng.*, ASME, Vol.111, No.1, pp.1-11.
- Mei, C. C. and Foda, M. A. (1981), "Wave-induced Response in a Fluid-filled Poroelastic Solid with a Free Surface - A Boundary Layer Theory", *Geophysical J. of the Royal Astronomical Society*, Vol.66, pp.597-631.
- Miyamoto, J., Sassa, S., and Sekiguchi, H. (2004), "Progressive Solidification of a Liquefied Sand Layer during Continued Wave Loading", *Geotechnique*, Vol.54, No.10, pp.617-629.
- Okusa, S. (1985), "Wave-induced Stresses in Unsaturated Submarine Sediments", *Geotechnique*, Vol.32, No.3, pp.235-247.
- Ozutsmi, O., Sawada, S., Iai, S., Takeshima, Y., Sugiyama, W., and Shimasu, T. (2002), "Effective Stress Analysis of Liquefaction-induced Deformation in River Dikes", *J. of Soil Dynamics and Earthquake Eng.*, Vol.22, pp.1075-1082.
- Sakakiyama, T. and Kajima, R. (1992), "Numerical Simulation of Nonlinear Wave Interaction with Permeable Breakwater", *Proceedings of the 22nd ICCE*, ASCE, pp.1517-1530.
- Sassa, S. and Sekiguchi, H. (1999), "Analysis of Wave-induced Liquefaction of Beds of Sand in Centrifuge", *Geotechnique*, Vol.49, No.5, pp.621-638.
- Sassa, S. and Sekiguchi, H. (2001), "Analysis of Wave-induced Liquefaction of Sand Beds", *Geotechnique*, Vol.51, No.12, pp.115-126.
- Sassa, S., Sekiguchi, H., and Miyamoto, J. (2001), "Analysis of Progressive Liquefaction as a Moving-boundary Problem", *Geotechnique*, Vol.51, No.10, pp.847-857.
- Seed, H. B. and Rahman, M. S. (1978), "Wave-induced Pore Pressure in Relation to Ocean Floor Stability of Cohesionless Soil", *Marine Geotechnology*, Vol.3, No.2, pp.123-150.
- Seed, H. B., Martin, P. O., and Lysmer, J. (1975), *The Generation and Dissipation of Pore Water Pressure during Soil Liquefaction*, Report EERC 75-26, Univ. of California, Berkeley, California.
- Sekiguchi, H., Kita, K., and Okamoto, O. (1995), "Response of Poro-elastoplastic Beds to Standing Waves", *Soils and Foundations*, Vol.35, No.3, pp.31-42.
- Sumer, B. M. and Fredsøe, J. (2002), *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*, World Scientific, 536pp.
- Towhata, I. and Ishihara, K. (1985), "Modeling Soil Behaviour under Principal Stress Axes Rotation", *Proceeding of the 5th Intl. Conference on Numerical Method in Geomechanics*, Vol.1, pp.523-530.
- Yamamoto, T., Koning, H., Sillmeijer, H., and Van Hijum, E. (1978), "On the Response of a Poroelastic Bed to Water Waves", *J. of Fluid Mechanics*, Vol.87, pp.193-206.
- Yuhi, M. and Ishida, H. (2002), "Simplified Solution of Wave-induced Seabed Response in Anisotropic Seabed, J. of Waterway, Port", *Coastal and Ocean Eng.*, ASCE, Vol.128, No.1, pp.46-50.

Received : September 22nd, 2014

Revised : December 29th, 2014

Accepted : January 8th, 2015