

고립파 작용하 직립호안 주변에서 지반의 동적응답에 관한 수치시뮬레이션 Simulation of Solitary Wave-Induced Dynamic Responses of Soil Foundation Around Vertical Revetment

이광호* · 육승민** · 김도삼*** · 김태형**** · 이윤두*****

Kwang-Ho Lee*, Seung-Min Yuk**, Do-Sam Kim***, Tae-Hyeong Kim**** and Yoon-Doo Lee*****

요 지 : 지진해일파(tsunami)에 의한 피해로 소중한 인명손실뿐만 아니라 침수·범람에 의한 가옥과 같은 건물의 유실 및 방파제, 교량 및 항만과 같은 사회간접자본의 심각한 파괴 등을 들 수 있다. 본 연구의 대상인 연안구조물에서 피해원인으로 먼저 큰 지진해일파력을 고려할 수 있지만, 더불어 기초지반에서 세굴과 액상화와 같은 지반파괴를 고려할 수 있다. 진동성분과 잔류성분으로 구성되는 과잉간극수압의 증가에 따른 유효응력의 감소로 해저지반내에 액상화의 가능성이 나타나고, 액상화가 발생되면 그의 진행에 따라 구조물의 침하 혹은 전도에 의해 종국적으로 구조물이 파괴될 가능성이 높아지게 된다. 본 연구에서는 2D-NIT(Two-Dimensional Numerical Irregular wave Tank)모델로부터 고립파를 조파시켜 직립호안 및 해저지반상에서 시간변동의 동파압을 산정하고, 그 결과를 지반의 동적응답과 구조물의 동적거동을 정밀하게 재현할 수 있는 유한요소법에 기초한 탄·소성해저지반응답의 수치해석프로그램인 FLIP(Finite element analysis Liquefaction Program)모델에 입력치로 적용하여 해저지반 및 직립호안의 주변에서 과잉간극수압 및 유효응력의 시·공간변화, 지반변형, 구조물의 변위 및 지반액상화 등을 정량적으로 평가하여 직립호안의 안정성을 평가한다.

핵심용어 : 고립파, 해저지반, 직립호안, 동적응답과 거동, 유효응력, 과잉간극수압, 액상화

Abstract : Tsunami take away life, wash houses away and bring devastation to social infrastructures such as breakwaters, bridges and ports. The targeted coastal structure object in this study can be damaged mainly by the tsunami force together with foundation ground failure due to scouring and liquefaction. The increase of excess pore water pressure composed of oscillatory and residual components may reduce effective stress and, consequently, the seabed may liquefy. If liquefaction occurs in the seabed, the structure may sink, overturn, and eventually increase the failure potential. In this study, the solitary wave was generated using 2D-NIT(Two-Dimensional Numerical Irregular wave Tank) model, and the dynamic wave pressure acting on the seabed and the estimated surface boundary of the vertical revetment. Simulation results were used as an input data in a finite element computer program(FLIP) for elasto-plastic seabed response. The time and spatial variations in excess pore water pressure, effective stress, seabed deformation, structure displacement and liquefaction potential in the seabed were estimated. From the results of the analysis, the stability of the vertical revetment was evaluated.

Keywords : solitary wave, seabed, vertical revetment, dynamic response and behavior, effective stress, excess pore water pressure, liquefaction

1. 서 론

2011년 3월 11일에 발생한 동일본대지진 (M9.0)에 의한 지진해일파 (tsunami)로 인하여 일본에서는 사망자 13,392명, 실종자 15,133명 및 부상자 4,896명의 엄청난 인적피해

와 도로, 항만, 공항, 원자력발전소 등 인프라시설의 파괴 및 침수범람에 따른 가옥유실과 같은 막대한 물적피해를 입었으며, 최근 일본중앙방재회의 (The Japanese Central Disaster Prevention Council, 2012)에서는 M9.2의 크기를 갖는 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진의 발생가능성

*가톨릭관동대학교 에너지자원플랜트공학과 조교수 (Dept. of Energy Resources and Plant Eng., Catholic Kwandong Univ., Gangwon 210-701, Korea, Tel:+82-33-649-7598, Fax:+82-33-647-3436, klee@kd.ac.kr)

**한국해양대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정 (Dept. of Civil and Environmental Eng., Korea Maritime and Ocean Univ., 727 Taejong-ro, Yeongdo-ku, Busan 606-791, Korea, Tel:+82-51-410-4941, Fax:+82-51-403-0656, korean2038@naver.com)

***한국해양대학교 건설공학과 교수 (Corresponding author; Dept. of Civil Eng., Korea Maritime and Ocean Univ., 727 Taejong-ro, Yeongdo-ku, Busan 606-791, Korea, Tel:+82-51-410-4463, Fax:+82-51-403-0656, kimds@kmou.ac.kr)

****한국해양대학교 건설공학과 교수 (Dept. of Civil Eng., Korea Maritime and Ocean Univ., 727 Taejong-ro, Yeongdo-ku, Busan 606-791, Korea, Tel:+82-51-410-4465, Fax:+82-51-410-4460, kth67399@kmou.ac.kr)

*****한국해양대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정 (Dept. of Civil and Environmental Eng., Korea Maritime and Ocean Univ., 727 Taejong-ro, Yeongdo-ku, Busan 606-791, Korea, Tel:+82-51-410-4941, Fax:+82-51-403-0656, ydlee@korea.kr)

을 제기하고 있고, 이로 인한 지진해일파의 위험성을 예고하고 있다.

한편, 국내에서도 동해연안에 위치한 원자력발전소를 중심으로 연안지역에서 지진해일파에 대한 대책을 국가차원에서 수립하고, 지진해일파의 처오름에 대한 대책으로 호안의 마루높이를 높게 계획하고 있다. 일반적으로 호안과 같은 연안 구조물의 피해원인으로는 먼저 큰 지진해일파력 및 월류를 고려할 수 있지만, 또한 기초지반에서 세굴과 액상화에 의해 지반파괴를 고려할 수 있다. 이러한 피해원인은 동시에 수반되는 경우가 많고, 따라서 연안방재구조물의 설계에서는 피해를 최소화하기 위해서는 지진해일파-연안구조물-지반의 동적 거동을 포함한 상호작용해석으로부터 구조물의 안정성을 종합적으로 검토할 필요가 있다.

지진해일파-연안구조물-지반의 동적거동에서 지반액상화와 지반내 과잉간극수압변동은 일반적으로 실험적 혹은 수치적으로 검토되며, 수치해석에 대한 연구로는 Miyamoto, et al. (2004), Sassa and Sekiguchi (1999, 2001), Sassa et al. (2001), Mase et al. (1994), Ulker et al. (2010), Li and Jeng (2008), Ye et al. (2014), Kang et al. (2013), Lee et al. (2014a, 2014b, 2014c) 등을 예로 들 수 있다. 이러한 연구의 모두는 주기성 파동을 대상으로 하고 있기 때문에 비주기성의 지진해일파 작용시에는 적용될 수 없다. 지진해일파를 대상으로 한 연구로는 원주 주변에서 지진해일파에 의한 세굴을 유효응력의 관점에서 접근한 Tonkin et al. (2003), 지진해일파를 고립파로 근사하고 Boussinesq방정식을 적용하여 얻어진 수치해석결과를 실험으로부터 검증한 Young et al. (2009), 지진해일파를 단파로 근사하여 원심모형시험기에서 혼성방파제에 작용하는 단파파력과 지반을 포함한 구조물의 안정을 검토하고, SPH법에 의한 수치결과와 실험결과를 비교하고 있는 Miyake et al. (2009) 및 Imase et al. (2012), 지진해일파를 장파로 근사하여 기초지반의 간극수압과 세굴 가능성 등을 평가한 Yeh and Mason (2014)의 연구 등을 들 수 있다.

본 연구에서는 지진해일파를 고립파로 근사하여 2차원수치 파동수로인 2D-NIT (Two-Dimensional Numerical Irregular wave Tank; Lee et al., 2013)모델을 적용하여 고립파를 수치 조파하고, 이로 인한 지반내에서 간극수압과 액상화와 같은

지반거동을 정밀하게 재현할 수 있는 유한요소해석 프로그램인 FLIP (Finite element analysis Liquefaction Program; Iai et al., 1992a, 1992b)을 적용한다. 이 2D-NIT and FLIP 모델로부터 산정되는 수치해석결과와 전술한 Young et al. (2009)에 의한 실험값을 비교·검토하여 본 해석법의 타당성을 검증한다.

이로부터 고립파로 근사될 수 있는 지진해일파의 작용하 직립호안에서 구조물의 동적거동 및 주변지반내 간극수압, 유효응력 및 액상화 등의 지반응답을 명확히 검토한다. 여기서, 수치파동수로로부터 파고 5m와 2.5m의 고립파를 조파하고, 이로부터 산정되는 지반 및 구조물 표면에서 시간변동과압을 FLIP에 시간이력하중으로 작용시켜 50 sec간 수치해석을 실시한다. 이 때, 입사고립파가 직립호안을 월류하는 경우와 월류하지 않는 경우로 나누어 검토한다.

2. 수치해석이론

2.1 2D-NIT모델에 의한 파동장해석

본 연구의 2D-NIT모델의 적용을 위한 수치파동수조를 Fig. 1에 나타내며, 그림에서는 조파를 위한 조파소스 및 무반사를 위한 감쇠영역 등이 주어져 있고, 감쇠영역의 폭 L_a 는 충분한 무반사조건을 실현하기 위하여 입사파의 파장 L 의 2배보다 클 필요가 있다. 2D-NIT모델 (Lee et al., 2013)은 기존의 2차원수치파동수로모델을 불규칙파동장으로 확장한 모델로, 자유표면의 해석모델에 VOF법을, 난류모델에는 $k-\epsilon$ 모델을 각각 적용하고 있다. 기초방정식은 2차원비압축성의 점성유체를 대상으로 한 연속식 및 PBM (Porous Body Model; Sakakiyama and Kajima, 1992)으로 확장한 Navier-Stokes방정식으로 주어지며, 보다 상세한 정보는 Lee et al. (2013)을 참조하기 바란다.

2.2 고립파의 수치조파

본 연구에서는 Fig. 1의 해석영역내에서 Bronsen and Larsen (1987)에 의한 조파방법을 적용하여 고립파를 수치조파하며, 조파소스강도로 Grimshaw (1971)에 의해 유도된 고립파의 3차근사수평방향유속을 적용한다 (Fenton, 1972). 보다 상세한 정보는 Lee et al. (2008)을 참조바란다.

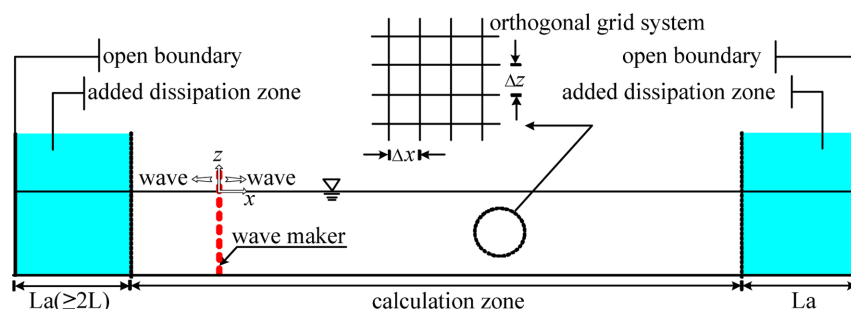


Fig. 1. Schematic sketch of the numerical wave tank used in 2D-NIT model.

2.3 FLIP모델에 의한 해저지반거동해석

FLIP모델 (Iai et al., 1992a, 1992b)은 다중전단메커니즘을 이용한 2차원유효응력의 유한요소해석모델로, 원형고정경계를 Fig. 2와 같은 전단변형영역과 무한개의 가상스프링경계의 연결로 정의되는 이동절점으로 나타낸다. 여기서, 각 스프링은 다양한 방향을 가지는 단순전단메커니즘이라고 할 수 있으며, 이는 지반에서 흙의 탄소성에 관한 응력-변형율의 관계를 잘 모사할 수 있는 것으로 알려져 있고, 또한 지진시 구조물의 손상에 대한 예측결과와의 비교·검토로부터 충분히 검증된 모델로 평가되고 있다 (Sawada et al., 2000; Ozutsumi et al., 2002; Iai et al., 1992a, 1992b). 보다 상세한 사항에 대해서는 Iai et al. (1992a, 1992b)을 참조바란다.

3. 수치해석

3.1 수치해석결과의 검증

본 연구의 2D-NIT and FLIP모델을 검증하기 위하여 고립파의 전파에 따른 지반거동에 대해 실험을 수행한 Fig. 3에 제시하는 Young et al. (2009)의 실험결과와 비교한다. 그림에서는 실험수조 (48.8×2.16×2.1 m)의 규모와 파고계 (WG) 및 간극수압계 (PPS)의 설치위치를 나타내며, 정수심은 $h = 1.0$ m, 해저경사는 1:15, 입사고립파의 파고는 $H_i = 60$ cm이며, 수치해석에서 파동부의 절점간격은 0.02 m, 지반부는 0.1 m로 각각 수평과 연직방향 동일하게 구성하였다. 해저지반은 모래로 구성되고, 그의 물성치는 Table 1에 제시된 바와 같다.

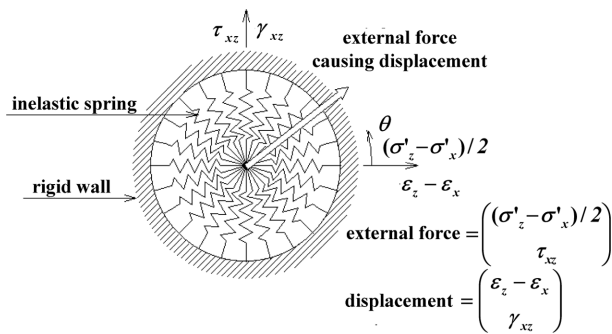


Fig. 2. Schematic diagram of multi-spring model (Towata and Ishihara, 1985).

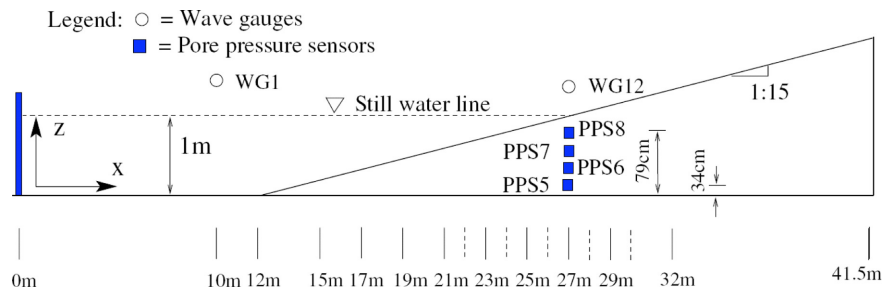


Fig. 3. Elevation view of the experimental setup. The triangular area between 12 and 41.5 m is the mobile sand bed, which sits on the concrete bottom of the flume (Young et al., 2009).

Fig. 4는 $H_i = 60$ cm의 고립파에 대해 $x = 27$ m에서 측정된 수위변동의 시간변화를 나타낸다. 여기서, $x = 27$ m 위치에서 최대수위가 입사파고보다 작은 50 cm 정도로 나타나는 것은 $x \approx 22$ m 위치에서 $t \approx 7.5$ s시에 쇄파되기 때문이며, 그리고 $x \approx 38.5$ m까지 최대치오름이 발생된다. Fig. 4로부터 $x = 27$ m에서 $t < 30$ s까지는 실험결과와 본 수치해석결과가 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있지만, $t > 30$ s에서는 run-up된 수위가 run-down되는 반사파의 영향으로 두 결과에서 약간의 차이를 확인할 수 있다.

다음으로, $x = 27$ m인 지반내 $z = -0.21, -0.36, -0.51, -0.66$ m의 연직깊이에서 측정된 과잉간극수압과 2D-NIT and Flip모델에 의한 수치해석결과를 Fig. 5에 각각 제시한다. 전체적으로 입사파 성분과 반사파 성분에 의해 두 개의 피크치가 존재하는 것을 볼 수 있다. 그리고, 실험치에서는 연직깊이가 깊을수록 과잉간극수압의 변동이 작아지고, 더불어 시간의 진행에 따라 그의 분포가 확산되며, run-down되는 수위변동에 의한 영향으로 $t > 12.5$ s의 범위에 있는 두 번째 피크치가 연직깊이가 깊을수록 첫 번째보다 상대적으로 크지는 결과를 나타내고, 또한 위상지연을 나타내는 것을 알 수 있다.

Table 1. Parameters used in the experiment and 2D-NIT and FLIP models

Permeability	1.5×10^{-5} m/sec
Porosity	0.39
Poisson ratio	0.4
Friction angle	35°
Dilatancy angle	20°
Pore fluid bulk modulus	4.0MPa

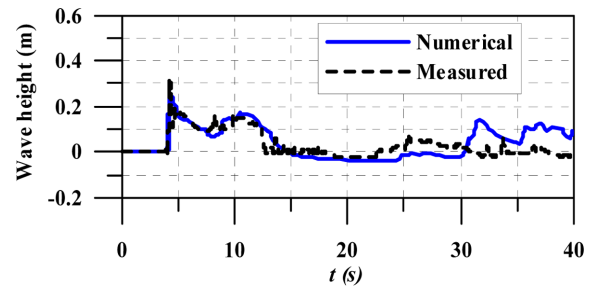


Fig. 4. Comparison of the predicted and measured wave elevation time history at $x = 27$ m.

실험치와 수치해석치의 대응성은 $z = -0.21$ m의 경우를 제외 하면 연직깊이가 깊을수록 초기수위변동에서 다소 좋지 않은 결과를 나타낸다. 이러한 결과는 FLIP모델에서 지반내 간극수의 흐름이 적절히 모델화되지 않은 것에 그 주된 원인이 있고, 또한 FLIP모델에서 요구되는 모래의 물성치가 충분히 제시되지 않아 Table 1에 제시된 이외의 물성치는 적절히 가정되었기 때문이다. 따라서, 실험에서 사용된 해저지반의 여러 물성치에 대한 타당한 값들이 제시되고, 또한 수치해석에서 고려된다면 실험치에 보다 근접하는 합리적인 FLIP의 결과가 도출될 수 있을 것으로 판단된다.

이상에서 호안과 같은 구조물이 존재하지 않는 제한된 조건하에 수행된 기존의 실험결과와 2D-NIT and FLIP모델의 수치결과를 검토한 결과, 여러 요인에 의해 지반내 간극수압 변동에 약간의 차이가 나타나지만, 본 모델의 타당성은 어느 정도 확인되는 것으로 판단된다. 따라서, 이하에서는 본 연구의 대상인 고립파-직립호안-지반의 상호작용에 의한 구조물의 동적거동과 지반의 동적응답을 논의한다.

3.2 해저지반의 동적응답과 구조물의 동적거동해석

고립파로 근사된 지진해일파가 직립호안과 주변의 지반에 미치는 영향을 검토하기 위하여 Fig. 6과 같은 일정수심의 수치파동수조를 고려하며, 수조 양 끝단에서 무반사를 위하여 고립파 유효파장의 2배보다 긴 좌우감쇠영역을 적용하여 2D-

NIT모델로부터 고립파동장을 계산하였다. 이 때, $h = 15$ m의 수심에서 각각 $H_i = 2.5$ 와 5 m의 파고를 갖는 고립파를 조사시켰으며, 직립호안의 전면과 상단, 해저지반표면 및 뒷채움재 상단에 2D-NIT모델에 의한 시간변동과압을 적용하여 FLIP모델로부터 구조물의 동적거동과 지반의 동적응답에 관한 수치계산을 수행하였다. 이 때, 좌·우경계와 하부경계에서 수평변위는 구속되었고, 좌·우경계의 수직변위는 허용되었으며, 하부경계에서 수직변위는 구속되었다. 수치해석에서 절점간격은 파동부 및 지반부 모두 수평과 연직방향 동일하게 1 m로 구성되었다. 여기서, 직립호안의 높이는 20 m, 폭은 10 m, 사석마운드의 높이는 3 m, 해저지반의 깊이는 10 m, 뒷채움재의 깊이는 20 m로 각각 적용되었으며, 각 지반재료의 물성치는 Table 2와 같다.

Fig. 7에서는 직립호안의 변위와 가속도 산정위치 N1, N2, 및 N3와 모래지반내 과잉간극수압, 평균유효응력 및 과잉간극수압비의 산정위치 points 1~26을 각각 나타낸다.

3.2.1 구조물의 동적응답해석

Fig. 8은 $H_i = 5$ m의 고립파에 대해 직립호안 상단 가장자리 N1과 N2 지점에서 변위의 시간변동을 나타낸 것이다. 여기서, $H_i = 2.5$ m의 고립파 경우는 미소한 동적변위를 나타내므로 제시하지 않는다. Fig. 8(a)는 7의 N1지점과 N2지점에서 연직변위 (침하)를 나타낸 것이고, Fig. 8(b)는 수평변위 (활동)

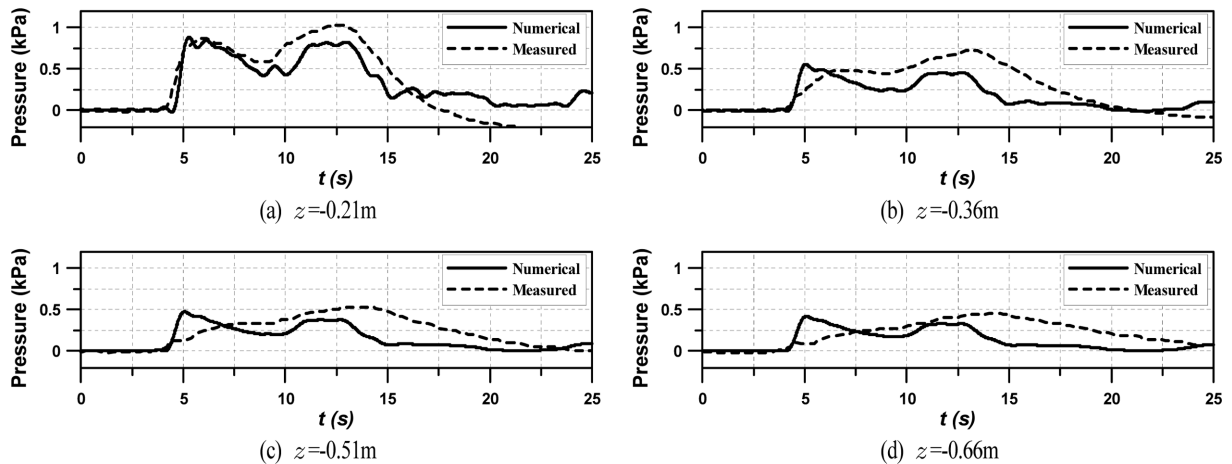


Fig. 5. Comparison of the predicted and measured pore water pressures at $x = 27$ m. The z -values are measured from the bed surface at $x = 27$ m.

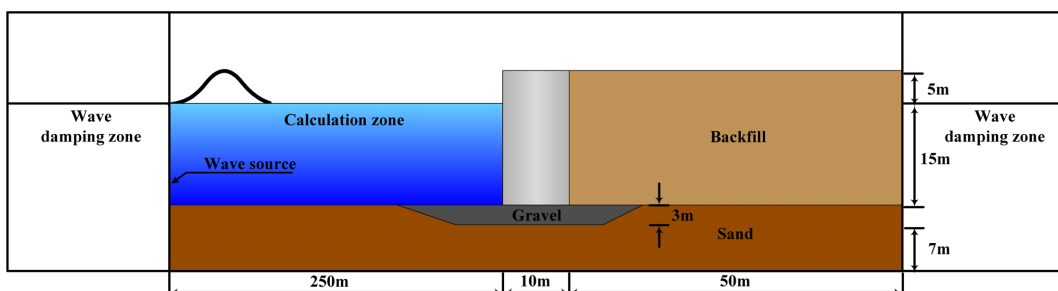
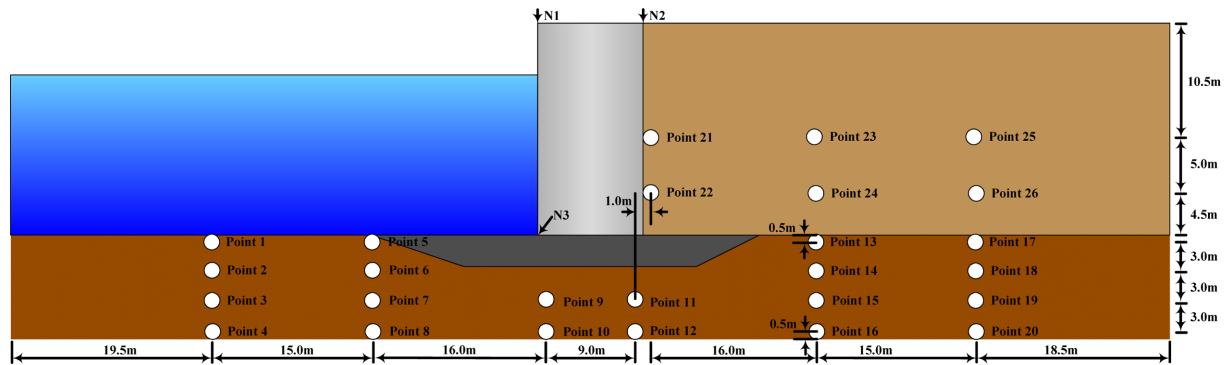
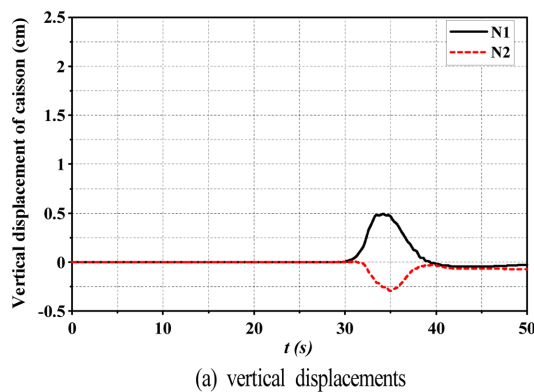


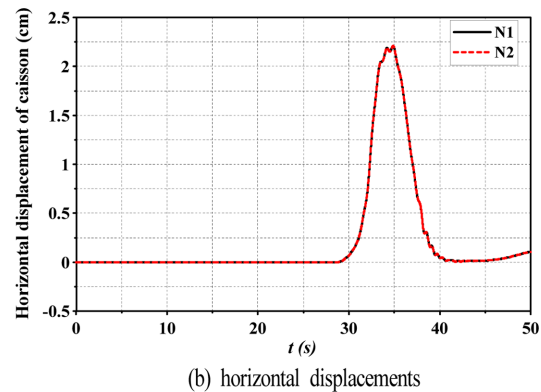
Fig. 6. Schematic diagram of the numerical wave tank domain used for this numerical simulation.

Table 2. Soil properties used for this numerical simulation

Soil types	Saturated unit weight(kN/m ³)	Shear modulus (kPa)	Bulk modulus (kPa)	Initial effective stress(kPa)	Internal friction angle(°)	Cohesion (kPa)	Porosity	Poisson's ratio
Sand		7.053×10^4	1.839×10^5	98	36	-	0.46	0.33
Backfill	20	8.500×10^4	2.126×10^5	98	37	-	0.43	0.33
Gravel		1.801×10^6	4.800×10^6	98	50	-	0.46	0.25

**Fig. 7.** Measuring points(N1, N2 and N3: measuring points of dynamic displacement and accelerations of revetment, and points 1~26: measuring points of excess pore water pressure, mean effective stress and excess pore water pressure ratio.

(a) vertical displacements



(b) horizontal displacements

Fig. 8. Time history of dynamic displacements at N1 and N2.

직립호안의 전면에서 작용하기 시작하는 대략 $t \approx 30$ s 이후에 변위가 발생하기 시작하며, N1지점에서는 모든 작용시간에 (+)의 변위로 최대치는 (+)0.5 cm, N2에서는 모든 작용시간에 (-)의 변위로 최소치는 (-)0.3 cm의 변위량이 산정되며, 이로부터 직립호안이 배후로 전도된다는 것을 추정할 수 있다. 또한, 수평변위에서는 N1과 N2지점에서 모두 (+)의 동일한 변위를 나타내며, 그의 최대치가 각각 2.2 cm의 값을 가지므로 직립호안이 배후로 활동된다는 것을 역시 추정할 수 있다. 그러나, $t > 40$ s에서는 거의 원위치로 복원되지만, 미소한 잔류성분을 확인할 수 있다.

다음의 Fig. 9(a)는 N1과 N3지점에서 연직변위를, Fig. 9(b)는 수평변위를 각각 나타낸 결과이다. 수직변위의 경우 N1과 N3지점에서 대략 최대치 (+)0.5 cm의 동일한 변위량을, 수평변위의 경우 최대치에서 N1지점이 N3보다 약 (+)1.5 cm 더 큰 변위량을 나타내므로 직립호안이 후방으로 전도 및 활동되고, 고립파가 반사된 이후에 다시 복원되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 직립호안과 해저지반의 각 절점에서 얻어지는 최대변형단면을 100배로 확대하여 나타낸 것이다. 그림에서 점선은 초기상태를, 실선은 최대변형단면을 각각 나타낸다. 그림으로부터 직립호안이 후방으로 전도 및 활동되는 현상을 도시적으로 확인할 수 있고, 구조물과 뒷채움재의 접면부에서는 용기되는 현상을 볼 수 있다. 그리고, 구조물 전면하의 해저지반은 침하되며, 이는 해저지반상에서 가장 큰 값을 나타내고 지반내로 깊어질수록 작아지는 일반적인 특징과 부합되는 현상을 볼 수 있다. 여기서, 고립파의 파고가 클수록 보다 큰 변형을 나타내며, $H_r = 2.5$ m의 경우는 매우 미소한 변형을 나타내는 것을 알 수 있다.

3.2.2 과잉간극수압비

Figs. 11~20은 7에서 제시된 각 지점에서 과잉간극수압비, 과잉간극수압 및 평균유효응력을 함께 나타낸다. 여기서, 과잉간극수압비는 초기유효응력 σ'_0 와 과잉간극수압 p 와의 비

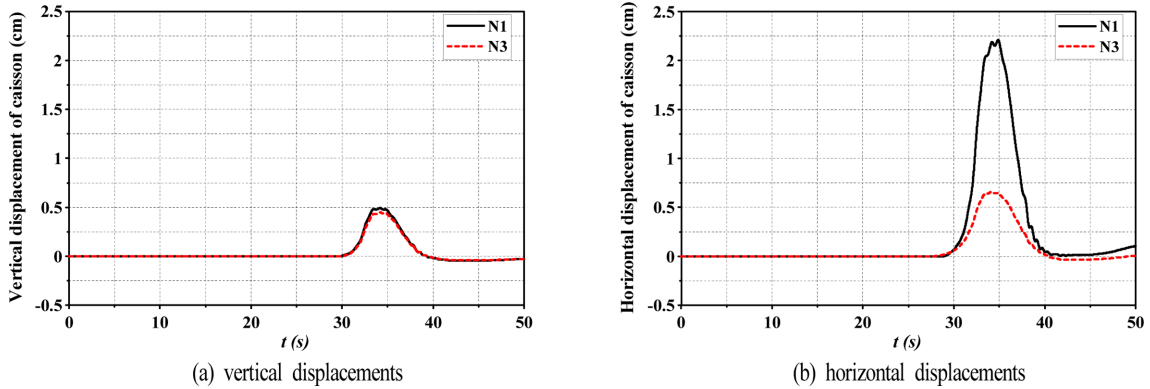


Fig. 9. Time history of dynamic displacements at N1 and N3.

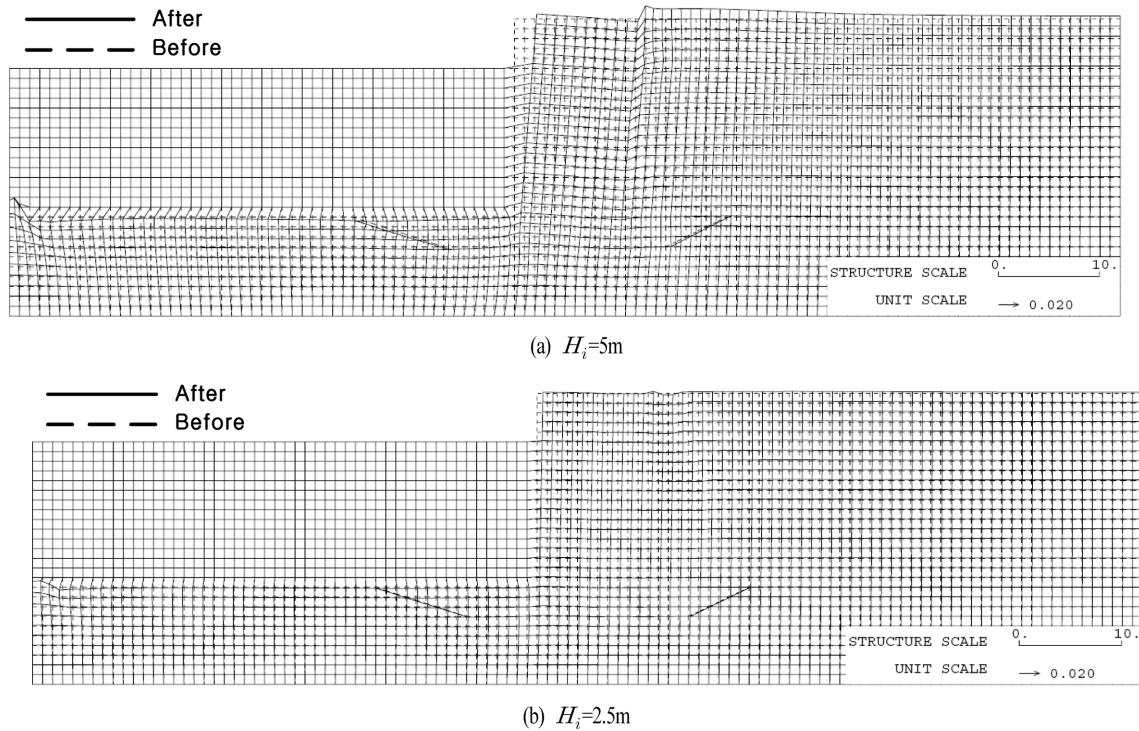


Fig. 10. Maximum deformation of revetment and seabed($\times 100$ magnitude).

p/σ'_0 로 정의된다. 따라서, 과잉간극수압비가 1에 가까운 값을 나타내는 경우는 액상화에 근접하였다는 것을 나타내며, 액상화에 근접되면 지반이 지지력을 상실한다는 것을 의미한다.

Fig. 11은 $H_i = 5, 2.5$ m의 고립파에 대해 지반내 평균유효응력 σ' 과잉간극수압 p 및 과잉간극수압비 p/σ'_0 를 각각 나타낸다. 먼저, 직립호안 전면에 있는 해저지반내의 지점 points 1~4에서 평균유효응력을 살펴보면 평균유효응력은 상재하중에 상당하므로 연직깊이가 깊을수록 point 1보다 4가 더 큰 값을 나타내는 일반적인 결과를 그림으로부터 확인할 수 있다.

Fig. 11(a)의 평균유효응력에서 $t < 30$ s에서는 고립파의 파고에 관계없이 동일한 값을 나타내지만, Fig. 11(b)에서 알 수 있는 바와 같이 고립파의 파봉이 도달하는 대략 $t \approx 35$ s의 전후에서 평균유효응력이 약간 감소하며, 이러한 경향은 입사파고가 클수록 커지는 것을 알 수 있다. 입사파고가 클수록

진동성분이 급격히 크게 변동되며, 더불어 잔류성분의 누적도 빠른 시간에 이루어지므로 과잉간극수압이 증가하여 평균 유효응력이 작아지는 것으로 추정된다.

과잉간극수압을 나타내는 Fig. 11(b)를 보면 $H_i = 5$ m의 경우 약 $t \approx 33$ s에 고립파의 입사파봉이, $t \approx 36.5$ s에 반사파봉이 각각 도달하며, $H_i = 2.5$ m의 경우 약 $t \approx 35.5$ s에 고립파의 입사파봉이, $t \approx 38$ s에 반사파봉이 각각 도달하는 것을 알 수 있다. 여기서 $H_i = 5$ m의 경우가 파속이 빠른 것은 고립파의 전달속도가 정수심과 파고의 합인 수위의 함수로 주어지기 때문이다. 전체적으로 파고가 클수록 큰 과잉간극수압을 나타내고, 또한 동일한 파고에 대해서도 연직깊이가 깊을수록 큰 과잉간극수압의 발생을 나타낸다.

다음으로, $1 - \Delta\sigma'/\sigma'_0$ 와 같이도 정의될 수 있는 과잉간극수압비 p/σ' 를 나타내는 Fig. 11(c)의 결과는 과잉간극수압과 초기평균유효응력의 비로 주어지기 때문에 기본적으로 두

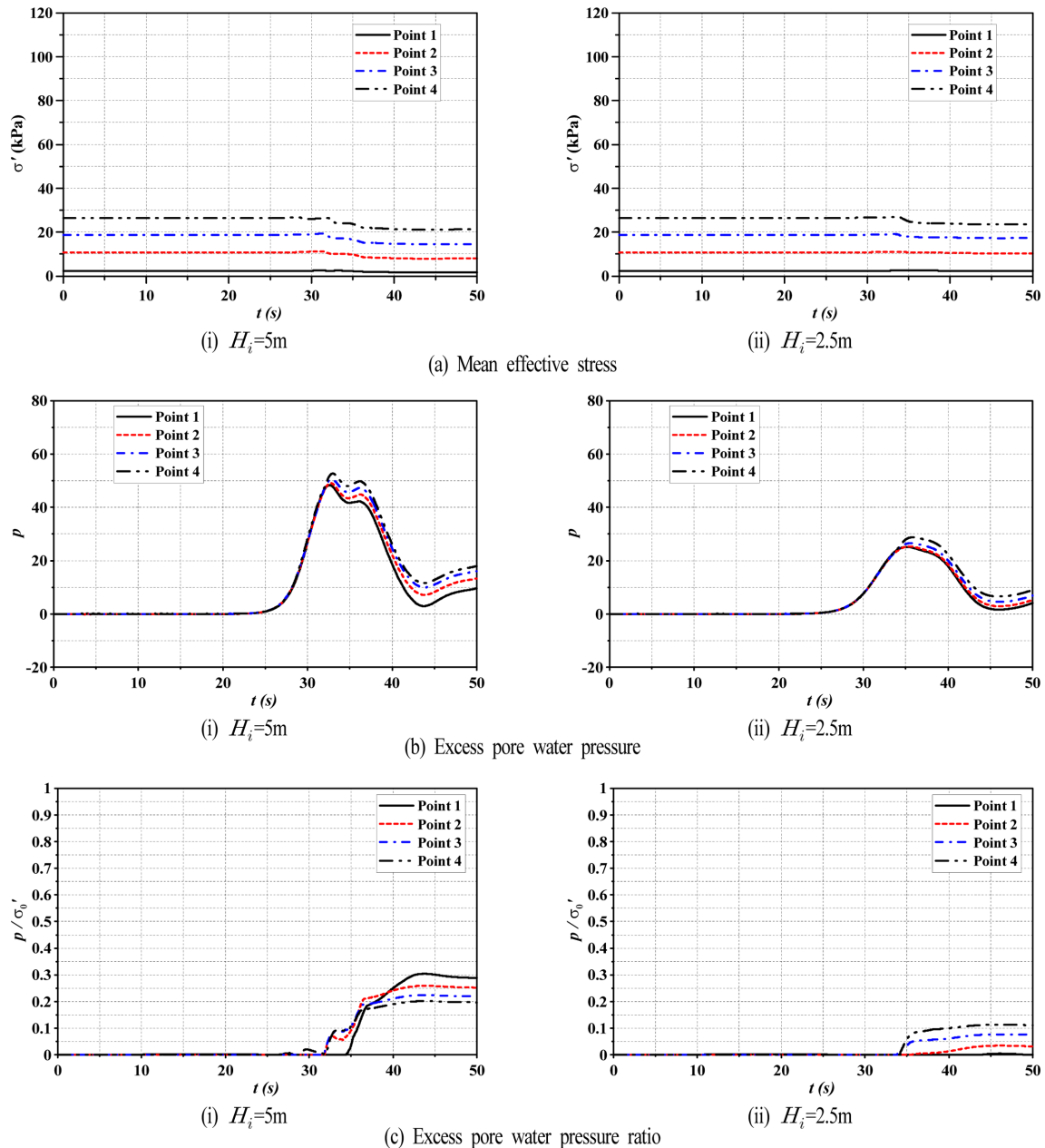


Fig. 11. Excess pore water pressure, mean effective stress and excess pore water pressure ratio at the points 1~4.

물리량의 변동특성을 포함하고 있다. 따라서, $t > 30\text{ s}$ 의 범위에서 값의 변화가 나타나고, 파고가 큰 경우가 큰 과잉간극수압비를 나타내지만, 연직깊이에 따라서는 일률적인 경향을 나타내는 것은 아니다. points 1~4의 경우 $H_i = 5\text{ m}$ 에서는 해저면상에 가까울수록, $H_i = 2.5\text{ m}$ 에서는 해저면상에서 깊을수록 큰 값을 나타내지만, 현 지점은 액상화에 대해 충분한 내구력을 갖는 것으로 평가된다.

다음의 Fig. 12에 도시하는 결과는 Fig. 7의 사석마운드부 끝단인 연직위치 points 5~8에서 지반내 평균유효응력, 과잉간극수압 및 과잉간극수압비와 같은 지반내 동적응답을 나타낸 것이다.

Fig. 12(a)의 평균유효응력은 전술한 Fig. 11(a)와 유사한 시간변동을 나타내지만, 전체적으로 큰 값을 가지며, 이는 사

석마운드의 사석중량이 영향을 미친 결과로 판단된다. $t > 30\text{ s}$ 의 영역에서 각 지점별 평균유효응력의 시간응답이 Fig. 11(a)와 약간 상이한 거동을 나타내는 것은 역시 사석마운드의 사석거동에 의한 영향으로 추정되며, 이러한 경향은 사석마운드부에 가까운 point 5에서 보다 강하게 표현된다. 그리고, $t > 30\text{ s}$ 의 영역에서 $H_i = 5\text{ m}$ 의 경우가 약간 크게 감소하는 것을 볼 수 있다.

과잉간극수압을 나타내는 Fig. 12(b)를 살펴보면 고립과의 입사파 성분과 반사파 성분이 내재되어 있는 것을 확인할 수 있지만, 파고가 작은 $H_i = 2.5\text{ m}$ 의 point 5에서는 하나의 성분만이 나타난다. 또한, $H_i = 5, 2.5\text{ m}$ 모두 point 5에서는 전술한 Fig. 11(b)보다 큰 값을 나타내는 것은 역시 사석마운드부에서 사석의 거동에 의한 것으로 판단된다. 전체적으로

는 전술한 Fig. 11(b)와 달리 연직깊이에 따른 계통적인 경향을 보이지 않으며, 이 또한 사석마운드부와 모래지반부와의 거동의 차이에 기인하는 것으로 추정되지만, 연직깊이가 깊은 points 7, 8에서는 계통적인 경향을 다소 나타낸다. Fig. 11(b)에서도 주어진 것으로 point 6에서 연직깊이가 깊어지는 point 9로 갈수록 입사와 성분파 반사와 성분에 의한 피크치가 시간적으로 가까워지는 현상을 볼 수 있으며, 이는 과량과 구조물과의 상호작용에 의해 해저지반에 발생하는 전단응력의 변화 (Lee and Focht, 1975; Rahman et al., 1977)와 과압이 지반내부로 전달되면서 발생하는 침투류 (seepage force)의 변동에 따른 전단응력의 변화 (Ishihara and Yamazaki, 1984)로 인하여 잔류과잉간극수압이 발생되기 때문으로 판단된다.

과잉간극수압비의 Fig. 12(c)에서는 과잉간극수압의 영향으로 point 5의 경우 액상화에는 도달되지 않지만 상당히 큰 값을 나타내며, 입사파고가 클수록 큰 값을 나타내는 것도 확인된다. 또한, Fig. 12(b)에서 언급된 바와 같이 연직깊이에 따른 계통적인 경향은 명확히 나타나지 않는다.

다음의 Fig. 13의 결과는 직립호안 바로 전면하 points 9와 10에서 지반응답을 도시한 것이다. 먼저, Fig. 13(a)의 평균유효응력을 검토하면 $H_i = 5$ m의 경우 하나의 위치 $t \approx 34.5$ s에서, $H_i = 2.5$ m의 경우 하나의 위치 $t \approx 36.5$ s에서 그 최소치를 나타내는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 대상위치가 직립호안의 바로 전면이기 때문에 고립파의 입사파봉과 반사파봉의 동시 중첩에 의해 최대수위가 형성되고, 이러한 수위상승으로 인한 부력의 작용으로 직립호안의 중량이

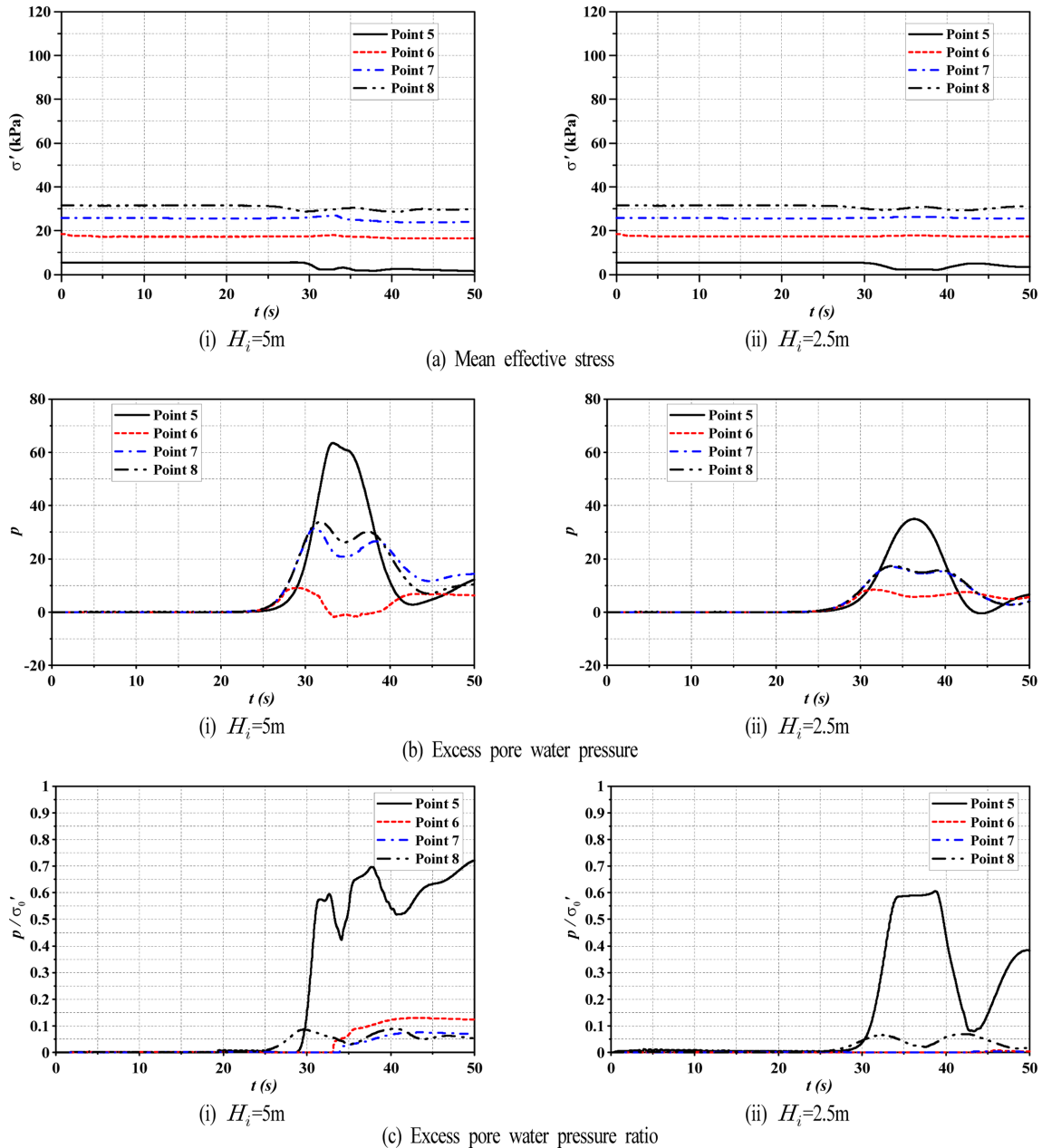


Fig. 12. Excess pore water pressure, mean effective stress and excess pore water pressure ratio at the points 5~8.

가벼워지기 때문에 평균유효응력이 줄어든 것으로 추정된다. 또한, $H_i=2.5$ m의 경우가 최소평균유효응력의 발생시간이 보다 지연되는 것은 전파속도가 느리기 때문이다. 여기서, 더 큰 수위변동을 나타내는 $H_i=5$ m의 경우와 2.5 m의 경우가 거의 동일한 최소평균유효응력을 나타내는 것은 $H_i=5$ m의 경우는 파가 직립호안을 월류하기 때문이다.

Fig. 13(b)의 과잉간극수압은 전술한 Figs. 11(b)와 12(b)의 경우와는 달리 하나의 피크치를 나타내며, 연직깊이가 깊을수록 보다 큰 값을 나타낸다. 또한, 입사파고가 클수록 더 큰 최대치를 나타내며, 동시에 최대치의 발생시간이 더 빠르다는 것을 확인할 수 있다.

다음으로, 과잉간극수압비를 나타낸 Fig. 13(c)에서는 전반적으로 1보다 작은 0.35 이하의 값을 나타내므로 액상화는 발

생되지 않는다는 것을 확인할 수 있고, 역시 고립과의 파봉이 통과하는 시간에 최대과잉간극수압비를 나타내는 것을 알 수 있다.

다음의 Fig. 14는 직립호안 바로 후면 하단 points 11과 12에서 지반응답을 나타낸 것이다. Fig. 14(a)의 평균유효응력을 살펴보면 전술한 Fig. 13(a)보다 작은 초기평균유효응력을 나타내지만, 월류가 발생되는 $H_i=5$ m의 경우 월류에 의한 하중증가와 부력에 의한 하중감소가 대략 상쇄되어 $t>33$ s의 범위에서 약간의 평균유효응력의 감소만을 나타낸다. 그러나, 월류가 발생되지 않는 $H_i=2.5$ m의 경우 평균유효응력의 변화는 거의 나타나지 않는다.

Fig. 14(b)의 과잉간극수압은 전술한 Fig. 13(b)의 경우와 유사한 변화과정을 나타내지만, 크기는 Fig. 14(b)의 경우가

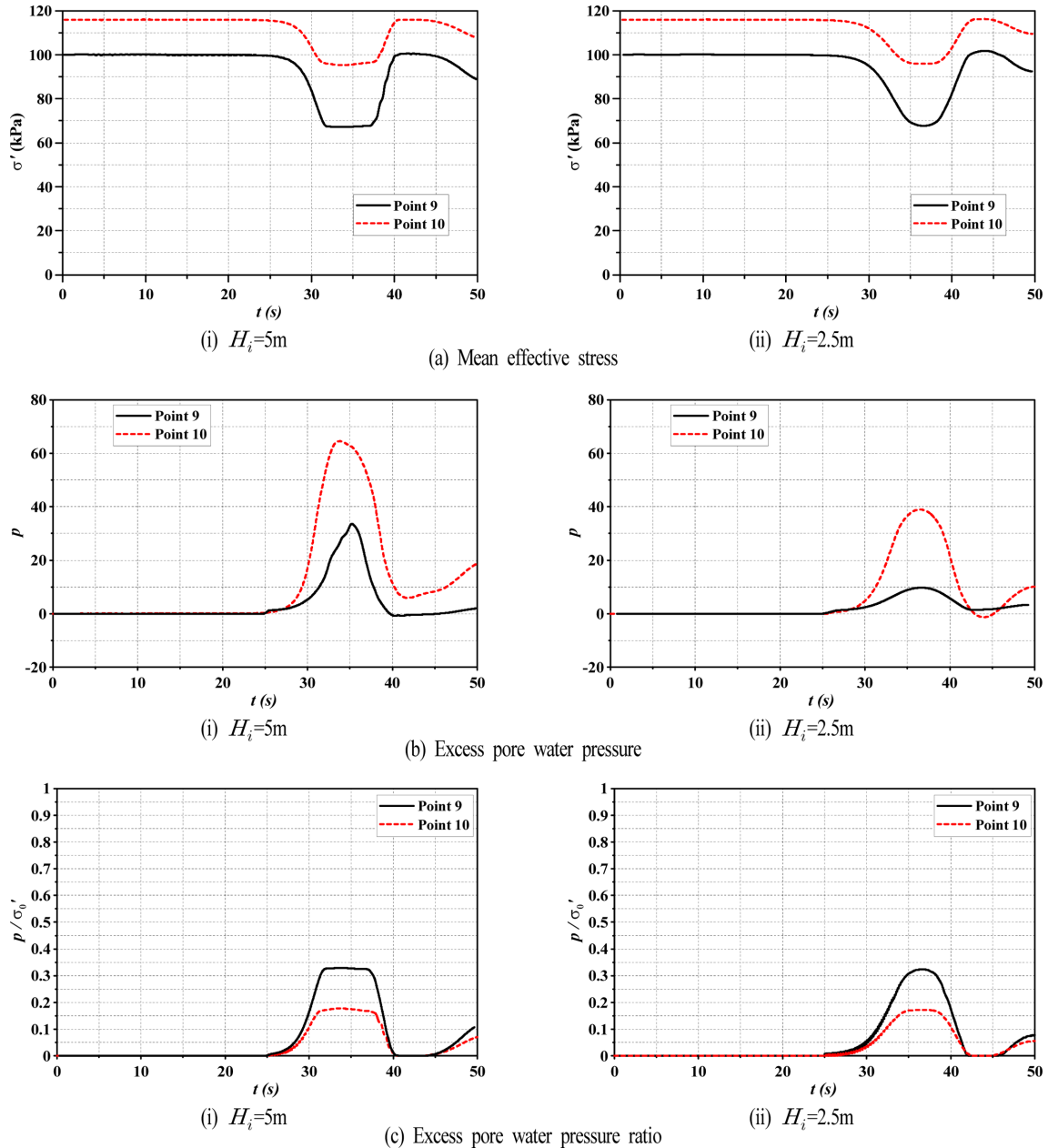


Fig. 13. Excess pore water pressure, mean effective stress and excess pore water pressure ratio at the points 9 and 10.

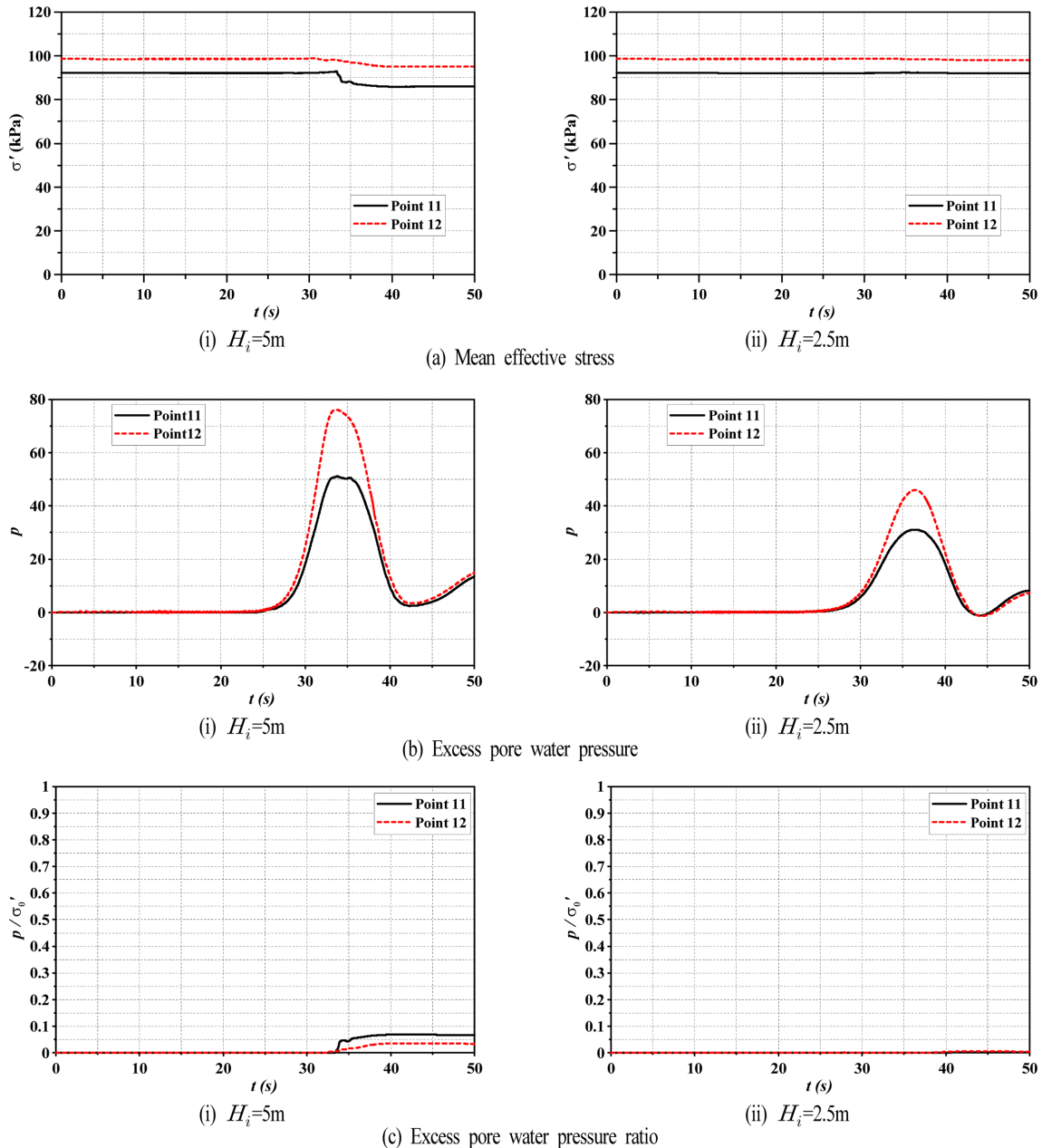


Fig. 14. Excess pore water pressure, mean effective stress and excess pore water pressure ratio at the points 11 and 12.

보다 큰 값을 나타낸다. 이러한 결과는 Figs. 8과 9에서 지적인 바와 같이 고립파 작용에 의해 직립호안이 배후로 전도 및 활동되고, 동시에 이로 인하여 구조물의 후면 toe에 압축력이 작용되기 때문이다 (Groot and Meijers, 2004).

과잉간극수압비는 Fig. 14(c)로부터 알 수 있는 바와 같이 Fig. 13(c)보다 작은 값을 나타내며, 특히 월류가 발생되지 않는 $H_i=2.5\text{ m}$ 에서는 0에 가까운 값을 나타낸다. 이러한 결과는 $H_i=5\text{ m}$ 의 월류되는 경우보다 월류되지 않는 2.5 m 에서 직립호안의 거동이 미소하고, 또한 Fig. 14(a)와 같이 유효응력의 변화가 없기 때문에 과잉간극수압비가 나타나지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 15는 7에 제시된 points 13~16에서 평균유효응력, 과잉간극수압 및 과잉간극수압비를 나타내고 있다. 이 지점

은 직립호안의 하부에서 옆으로 벗어난 지점으로, 상부 뒷채움재의 영향을 직접적으로 받기 때문에 전술한 Figs. 13과 14보다는 다소 작은 평균유효응력이 작용된다는 것을 알 수 있다. 과잉간극수압의 경우 직립호안의 거동에 의해 작은 값을 나타내지만, 위치가 구조물로부터 떨어져 있기 때문에 points 9~12에서보다는 작은 값을 나타낸다. 그리고, 과잉간극수압비는 예상되는 바와 같이 매우 작은 값을 나타낸다. 여기서, points 17~20에서 지반응답은 points 13~16에 대한 Fig. 15의 결과와 유사하게 나타나므로 지면관계상 제시하지 않는다.

다음은 본 연구에서 가장 큰 지반응답을 나타낸 직립호안의 바로 배면인 points 21과 22에서 결과를 도시한 것이 Fig. 16이다. 여기서, point 21의 연직위치는 $z=-10.5\text{ m}$ 이고, point

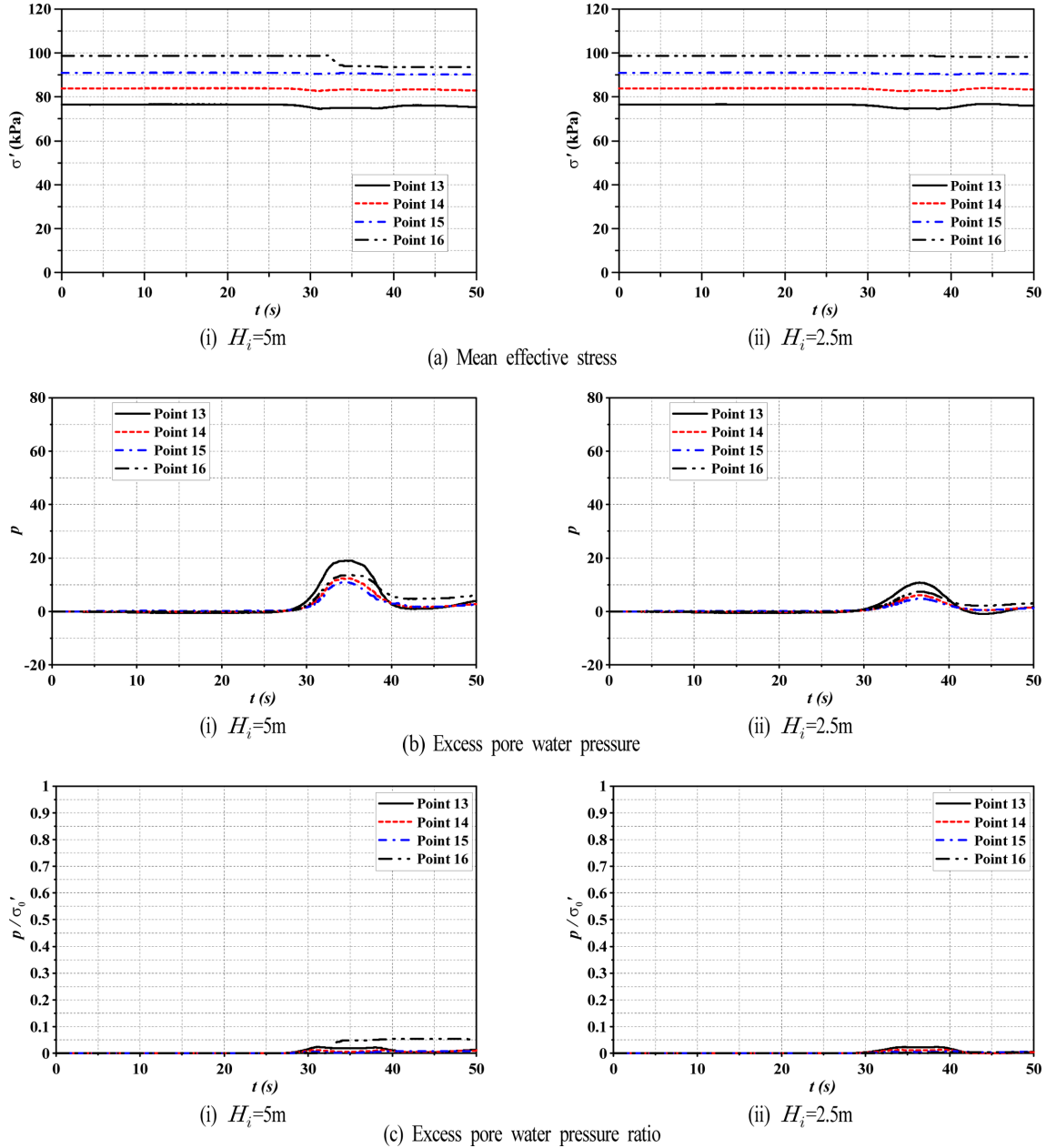


Fig. 15. Excess pore water pressure, mean effective stress and excess pore water pressure ratio at the points 13~16.

22는 $z=-15.5\text{ m}$ 이다. 두 지점에서 평균유효응력, 과잉간극수압 및 과잉간극수압비가 유사한 시간변동을 나타내고, 값의 차이도 그다지 크지 않다.

평균유효응력은 $30 < t < 40\text{ s}$ 에서 발생하는 Figs. 8과 9의 직립호안 동적거동의 영향으로 감소하는 것을 알 수 있고, 동일하게 과잉간극수압은 증가하는 결과를 나타낸다. 여기서, 최소평균유효응력과 최대과잉간극수압의 발생시간은 동일하며, 월류가 발생하는 $H_i=5\text{ m}$ 의 경우가 과잉간극수압에서는 보다 큰 값을 나타내지만, 평균유효응력에서는 거의 유사한 값과 그의 변화를 나타내는 것을 알 수 있고, 또한 연직깊이에 따른 과잉간극수압의 차이는 크지 않다는 사실을 확인할 수 있다. 과잉간극수압비의 경우는 point 21에서 전술한 경우에 비해 가장 큰 0.9 ($H_i=5\text{ m}$)와 0.78 ($H_i=2.5\text{ m}$)의 값을 나

타내므로 지금까지의 결과에 기초하면 직립호안 바로 배면이 액상화될 가능성이 가장 크다는 사실을 확인할 수 있고, 이것은 구조물의 동적거동으로부터 직접적인 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

마지막으로, Fig. 17에 나타내는 결과는 최대과잉간극수압비의 공간분포이다. 전체적으로 $H_i=5\text{ m}$ 의 결과가 2.5 m의 결과보다 큰 값의 분포를 나타내며, 전술한 바와 같이 직립호안의 바로 배면에서 가장 큰 최대과잉간극수압비를 나타내고, 수평으로 멀어질수록 줄어드는 경향을 나타낸다. 다음으로는 구조물 전면 사석마운드부위의 비탈면과 모래지반이 접하는 해저지반에서 큰 값을 나타낸다. 또한, 구조물에서 후면보다 전면에 놓이는 사석마운드부하에서 다소 큰 최대과잉간극수압비를 볼 수 있고, $H_i=5\text{ m}$ 의 경우에는 구조물 전면의 해

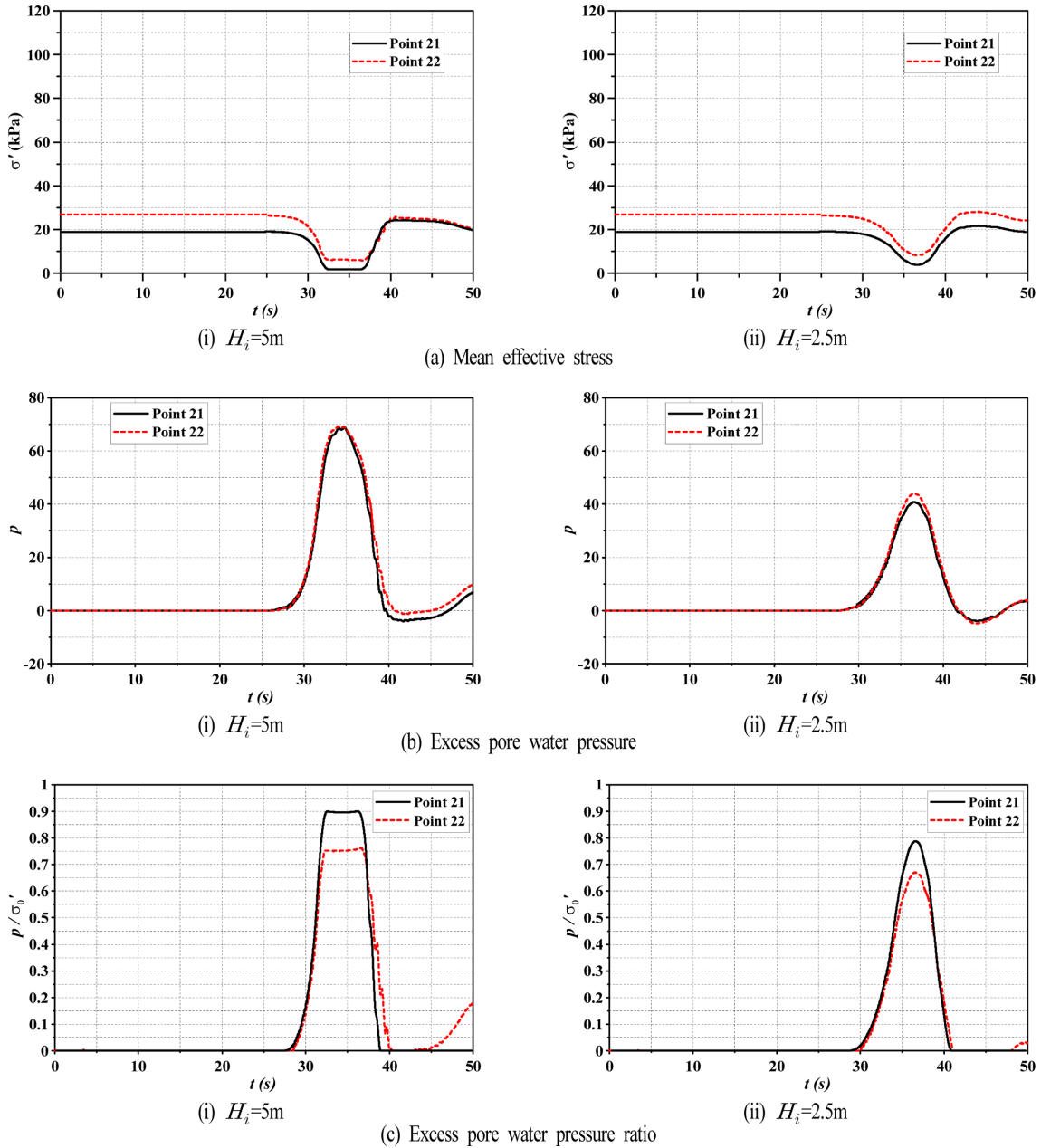


Fig. 16. Excess pore water pressure, mean effective stress and excess pore water pressure ratio at the points 21 and 22.

저지반내에서도 값의 분포를 알 수 있으며, 연직깊이가 깊어 질수록 작아지는 경향을 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 2차원수치과동수로인 2D-NIT모델을 적용하여 고립파를 수치조파하여 동과압을 산정하고, 탄·소성지반의 다중전단메커니즘에 기초한 FLIP모델을 적용하여 직립호안의 동적거동과 지반내 누적침하량, 과잉간극수압, 평균유효응력 및 과잉간극수압비 등을 수치모델링하였다. 또한, 수치해석의 해석치와 실험결과와의 비교·검토를 통하여 수치해석결과의 타당성을 검증하였다. 이상으로부터 도출된 중요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 고립파의 작용으로 직립호안이 배후로 각각 전도 및 활동되고, 고립파가 반사된 이후에 다시 복원되지만, 완전히 복원되지 않는 잔류성분이 존재한다.

(2) 과잉간극수압비는 구조물 전면 사석마운드부의 비탈면과 모래지반이 접하는 해저지반에서 큰 값을 나타내고, 또한 구조물 후면보다 전면에 놓이는 사석마운드부하에서 큰 값을 나타낸다. 이는 입사파고가 높을수록 크게 되는 경향을 보인다.

(3) 과잉간극수압은 연직깊이가 깊을수록, 또한 입사파고가 클수록 더 큰 최대치를 나타내며, 동시에 최대치의 발생시간이 더 빠르다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 지반내 연직깊이가 깊을수록 진동과잉간극수압이 감소하나 잔류과잉간극수압은 증가한다.

(4) 평균유효응력은 수위상승으로 인한 부력의 작용과 직

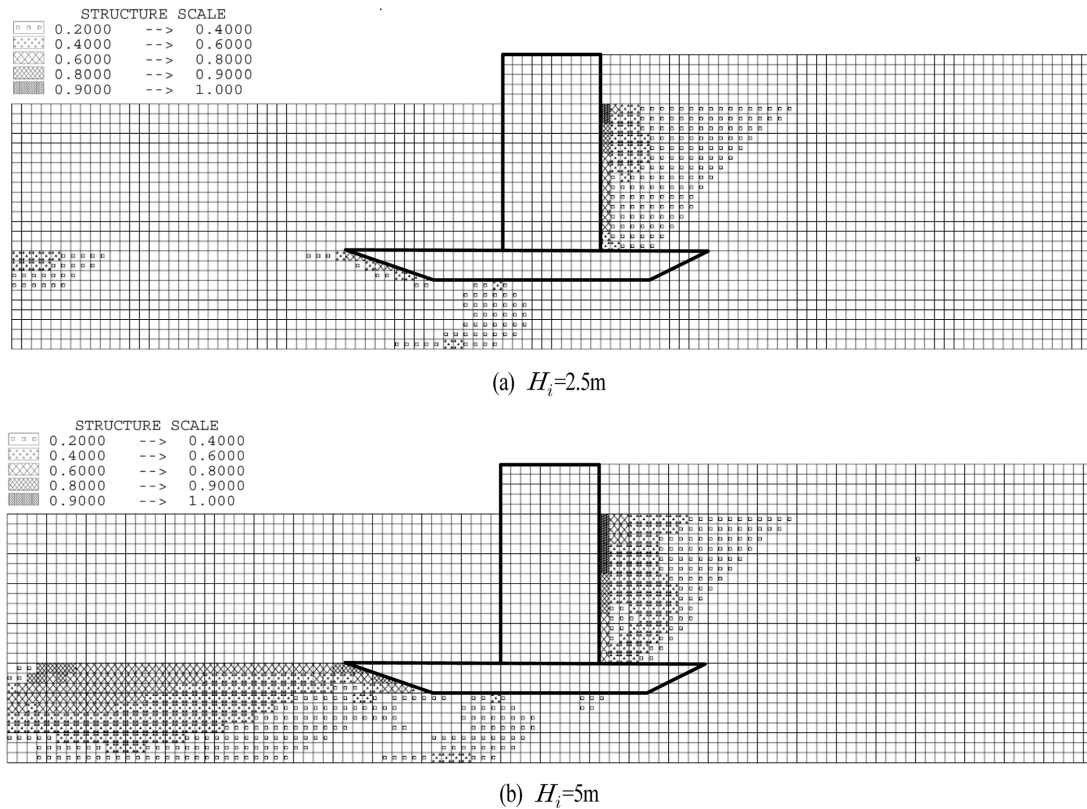


Fig. 17. Final distributions of maximum excess pore water pressure ratio.

립호안의 동적거동에 대한 영향으로 감소 및 증가하는 경향을 보인다.

이상에서 논의된 2D-NIT모델과 FLIP모델에 의한 본 논문의 타당성은 기존의 수리실험와의 비교로부터 검증되었지만, 향후 수리모형실험을 수행하여 보다 심층적으로 결과의 타당성을 검토하고자 한다.

감사의 글

이 연구는 해양수산부/한국해양과학기술진흥원의 연구과제(PJT200538)로 수행된 연구임.

References

- Brorsen, M. and Larsen, J. (1987). Source generation of nonlinear gravity waves with boundary integral equation method, *Coastal Eng.*, 11, 93-113.
- De Groot, M.B. and Meijers, P. (2004). Wave induced liquefaction underneath gravity structures, *Intl. Conference on Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena*, 399-406.
- Fenton, J. (1972). A ninth-order solution for the solitary wave, *J. of Fluid Mech.*, 53(2), 257-271.
- Grimshaw, R. (1971). The solitary wave in water of variable depth: Part 2, *J. of Fluid Mech.*, 46, 611-622.
- 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., 32(2), 1-15.
- Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1992b). Analysis of undrained cyclic behavior of sand under anisotropic consolidation, *Soils and Foundation*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Eng., 32(2), 16-20.
- Ishihara, K. and Yamazaki, A. (1984). Analysis of wave-induced liquefaction in seabed deposits of sand, *Soils and Foundations*, 24(3), 85-10.
- Imase, T., Maeda, K. and Miyake, M. (2012). Destabilization of a caisson-type breakwater by scouring and seepage failure of the seabed due to a tsunami, *ICSE6-128*, 807-814.
- Kang, G.C., Yun, S.K., Kim, T.H. and Kim, D.S. (2013). Numerical analysis on settlement behavior of seabed sand-coastal structure subjected to wave loads, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 25(1), 20-27.
- Li, J. and Jeng, D.S. (2008). Response of a porous seabed around breakwater heads, *Ocean Eng.*, 35, 864-886.
- Lee, K.L. and Focht, J.A. (1975). Liquefaction potential of Ekofisk Tank in North Sea, *J. of the Geotechnical Eng. Division*, ASCE, 100, 1-18.
- 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, *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 25(3), 128-137.
- Lee, K.H., Baek, D.J., Kim, D.S., Kim, T.H. and Bae, K.S. (2014a).

- Numerical simulation on seabed-structure dynamic responses due to the interaction between waves, seabed and coastal structure, J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 26(1), 49-64.
- Lee, K.H., Baek, D.J., Kim, D.S., Kim, T.H. and Bae, K.S. (2014b). Numerical simulation of dynamic response of seabed and structure due to the interaction among seabed, composite breakwater and irregular waves(1), J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 26(3), 160-173.
- Lee, K.H., Baek, D.J., Kim, D.S., Kim, T.H. and Bae, K.S. (2014c). Numerical simulation of dynamic response of seabed and structure due to the interaction among seabed, composite breakwater and irregular waves(2), J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 26(3), 174-183.
- Lee, K.H., Lee, S.K., Shin, D.H. and Kim, D.S. (2008). 3-Dimensional analysis for nonlinear wave forces acting on dual vertical columns and their nonlinear wave transformations, J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 20(1), 1-13.
- Mase, H., Sakai, T. and Sakamoto, M. (1994). Wave-induced pore-water pressures and effective stresses around breakwater, Ocean Eng., 21(4), 361-379.
- Miyake, T., Sumida, H., Maeda, K., Sakai, H., and Imase, T. (2009). Development of centrifuge modelling for tsunami and its application to stability of a caisson-type breakwater, J. of Civil Eng. in the Ocean, 25, 87-92.
- Miyamoto, J., Sassa, S. and Sekiguchi, H. (2004). Progressive solidification of a liquefied sand layer during continued wave loading, Geotechnique, 54(10), 617-629.
- Ozutsumi, 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., 22, 1075-1082.
- Rahman, M. S., Seed, H. B. and Booker, J. R. (1977). Pore pressure development under offshore gravity structures, J. of the Geotechnical Eng. Division, ASCE, 103, 1419-1436.
- Sassa, S. and Sekiguchi, H. (1999). Analysis of wave-induced liquefaction of beds of sand in centrifuge, Geotechnique, 49(5), 621-638.
- Sassa, S. and Sekiguchi, H. (2001). Analysis of wave-induced liquefaction of sand beds, Geotechnique, 51(12), 115-126.
- Sassa, S., Sekiguchi, H. and Miyamoto, J. (2001). Analysis of progressive liquefaction as a moving-boundary problem, Geotechnique, 51(10), 847-857.
- Sakakiyama, T. and Kajima, R. (1992). Numerical simulation of nonlinear wave interaction with permeable breakwater, Proceedings of the 22nd ICCE, ASCE, 1517-1530.
- Sawada, S., Ozutsumi, O. and Iai, S. (2000). Analysis of liquefaction induced residual deformation for two types of quay wall: analysis by "FLIP", Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Eng., 2486.
- The Japanese Central Disaster Prevention Council (2012). Investigative commission of giant earthquake model of Nankai trough, The 16th, About proceedings summary, <http://www.bou-sai.go.jp/jishin/chubou/nankai/16/>.
- Tonkin, S., H. Yeh, F. Kato, and S. Sato (2003). Tsunami scour around a cylinder, J. of Fluid Mech., 496, 165-192.
- Ulker, M.B.C, Rahman, M.S. and Guddati, M.N. (2010). Wave-induced dynamic response and instability of seabed around caisson breakwater, Ocean Eng., 37, 1522-1545.
- Ye, J., Jeng, D., Liu, P. L.-F., Chan, A.H.C, Ren, W. and Changqi, Z. (2014). Breaking wave-induced response of composite breakwater and liquefaction in seabed foundation, Coastal Eng., 85, 72-86.
- Yeh, H. and Mason, H.B. (2014). Sediment response to tsunami loading : mechanisms and estimates, Geotechnique, 64(2), 131-143.
- Young, Y.L., White, J.A., Xiao, H., Borja, R.I. (2009). Liquefaction potential of coastal slopes induced by solitary waves. Acta Geotechnica, 4 (1), 17-34.

Received 16 November, 2014

Revised 15 December, 2014

Accepted 24 December, 2014