

콘크리트매트 피복을 이용한 잠제하 해저지반에서의 액상화 대책공법에 관한 수치해석 (불규칙파 조건)

Numerical Analysis on Liquefaction Countermeasure of Seabed under Submerged Breakwater Using Concrete Mat Cover (for Irregular Waves)

이광호* · 류흥원** · 김동욱** · 김도삼*** · 김태형***

Kwang-Ho Lee*, Heung-Won Ryu**, Dong-Wook Kim**, Do-Sam Kim*** and Tae-Hyung Kim***

요 지 : 잠제와 같은 중력식구조물 하부 해저지반에 고파랑이 장시간 작용하는 경우 토립자내 간극의 체적변화를 일으키는 과정에서 과잉간극수압이 크게 발생될 수 있고, 이에 따른 유효응력의 감소에 의하여 구조물 근방 및 하부의 해저지반에 액상화가 발생될 수 있으며, 중국에는 구조물이 침하 파괴될 가능성이 있다. 또한, 액상화를 방지하기 위한 대책공법으로 규칙파의 경우 콘크리트매트를 해저지반상에 포설하여 구조물의 동적변위 및 지반내 간극수압 및 간극수압비가 감소하는 것을 규명하였다. 본 연구에서는 실험을 모사한 불규칙파랑을 대상으로 규칙파 해석에서 적용된 동일한 수치해석법을 적용하여 잠제의 동적변위 및 해저지반내 간극수압, 간극수압비 등과 같은 지반거동의 시-공간변화를 규칙파의 경우와 대비하면서 액상화 가능성을 검토하였다. 이로부터 불규칙파동장하에서도 콘크리트매트하의 해저지반내에서 액상화 가능성을 크게 줄일 수 있고, 한정된 본 결과이지만 콘크리트매트가 포설된 경우에도 액상화 평가시 불규칙파의 유의파에 해당하는 파랑조건을 적용한 규칙파 해석이 더욱 안정적인 설계로 된다는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 잠제, 해저지반, 불규칙파, 콘크리트매트, 액상화, 간극수압, 동적변위

Abstract : In the case of the seabed around and under gravity structures such as submerged breakwater is exposed to a large wave action long period, the excess pore pressure will be significantly generated due to pore volume change associated with rearrangement soil grains. This effect will lead a seabed liquefaction around and under structures as a result of the decrease in the effective stress, and eventually the possibility of structure failure will be increased. The study of liquefaction potential for regular waves had already done, and this study considered for irregular waves with the same numerical analysis method used for regular waves. Under the condition of the irregular wave field, the time and spatial series of the deformation of submerged breakwater, the pore water pressure (oscillatory and residual components) and pore water pressure ratio in the seabed were estimated and their results were compared with those of the regular wave field to evaluate the liquefaction potential on the seabed quantitatively. Although present results are based on a limited number of numerical simulations, one of the study's most important findings is that a safer design can be obtained when analyzing case with a regular wave condition corresponding to a significant wave of the irregular wave.

Keywords : submerged breakwater, seabed, liquefaction, concrete mat, pore water pressure ratio, dynamic response, irregular waves

1. 서 론

규칙파랑과 불규칙파랑의 입사조건하 잠제 주변지반내에서 진동 및 잔류간극수압의 변동특성을 검토한 선행연구, 즉 잠제-규칙파-지반(Lee et al., 2016a), 잠제-불규칙파-지반(Lee et al., 2016b)의 상호작용 해석에 의하면 실트질 혹은 실트

질모래지반에서는 잔류간극수압의 누적에 따라 간극수압이 유효응력을 초과하여 해저지반내에서 액상화가 발생될 가능성이 충분히 있고, 특히 지반지반력이 작은 경우, 즉 지반의 표준관입시험으로부터 산정되는 N 값이 작은 경우는 액상화 가능성이 훨씬 높아지는 것으로 판정되었다. 따라서, 규칙파동장하 액상화 대책공법으로 하천에서 세굴방지용으로 사용되

*가톨릭관동대학교 에너지자원플랜트공학과(Dept. of Energy Resources and Plant Eng., Catholic Kwandong University)

**한국해양대학교 대학원 토목환경공학과(Dept. of Civil and Environmental Eng., Graduate School, Korea Maritime and Ocean University)

***한국해양대학교 건설공학과(Corresponding author; Do-Sam Kim, Dept. of Civil Eng., Korea Maritime and Ocean Univ., 727 Taejong-ro, Yeongdo-ku, Busan 49112, Korea, Tel:+82-51-410-4463, Fax:+82-51-403-0656, kimds@kmou.ac.kr)

는 콘크리트매트(Godbold et al., 2014)를 잠제 전면부에 포설하는 방법을 제시하여 검토한 선행연구인 잠제-규칙파-콘크리트매트-지반의 상호작용 해석(Lee et al., 2016c)에 의하면 콘크리트매트를 포설한 경우 매트의 추가적인 중량으로 지반의 상대밀도가 증가되고, 매트길이를 길게 하면 상대밀도가 증가되는 범위가 넓어져 잠제 전면에 액상화 가능성이 상당히 줄어드는 결과를 확인하였다.

본 연구에서는 전술한 바와 같이 잠제-규칙파-콘크리트매트-지반의 상호작용 해석에서 콘크리트매트의 유용성을 확인한 선행연구(Lee et al., 2016c)에서와 동일한 잠제, 파동조건 및 지반조건을 적용하여 실험역에서 잠제-불규칙파-콘크리트매트-지반의 상호작용 해석으로부터 잠제의 동적변위, 해저지반내에서 간극수압과 간극수압비의 시·공간변화 및 각각에 대한 주파수스펙트럼의 특성변화를 면밀히 검토·논의하며, 도출된 결과를 잠제-규칙파-콘크리트매트-지반의 경우(Lee et al., 2016c) 및 잠제-불규칙파-지반의 경우(Lee et al., 2016b)와 대비하여 불규칙파동장하에서 액상화 대책공법으로 콘크리트매트의 유용성을 충분히 논의하고자 한다.

2. 2D-NIT모델과 FLIP모델의 개요

본 연구의 불규칙파동장에서 특정치의 해석모델인 2D-NIT 모델(Lee et al., 2013)은 기존의 2차원수치파동수로모델(CDIT, 2001)을 불규칙파동장으로 확장한 모델로, 자유표면의 해석모델에 VOF법(Hirt and Nichols, 1981)을, 난류모델에는 $k-\epsilon$ 모델을 각각 적용하고 있다. 기초방정식은 2차원 비압축성의 점성유체를 대상으로 한 연속식 및 PBM(Porous Body Model; Sakakiyama and Kajima, 1992)으로 확장한 Navier-Stokes 방정식에 기초한다. 그리고, 지반응답해석모델인 FLIP모델(Iai et al., 1992a, 1992b)은 다중전단메커니즘을 이용한 2차원유효응력의 유한요소해석모델이며, 이 모델에서는 원형고정경계를 전단변형영역과 무한개의 가상스프링경계의 연결로 정의되는 이동절점으로 나타낸다. 여기서, 각 스프링은 여러 방향을 갖는 실제 단순전단메커니즘이라고 할 수 있고, 이는 지반에서 흙의 탄소성에 관한 응력-변형률관계를 잘 묘사할 수 있다. 과잉간극수압은 반복전단작용에 의해 발생하는 흙의 체적변형과 간극률 및 간극수의 체적탄성계수와의 관계로부터 산정되고, (+)다일러턴시의 영향은 Iai et

al.(1992a, 1992b)에 의해 제안된 액상화프론트를 이용하여 반복전단작용에 의한 흙의 유효응력감소에 의해 유발되는 반복변동 및 액상화거동을 재현할 수 있다. 보다 구체적인 이론적인 배경은 Lee et al.(2016a)에서 기술되었기 때문에 지면관계상 반복기술은 생략한다.

3. 수치해석

3.1 계산조건

Fig. 1과 같은 일정수심 h 의 불규칙파동장에 설치된 투과성잠제를 대상으로 2D-NIT모델(Lee et al., 2013)로부터 잠제의 표면과 해저면에서 파동으로 인한 동압을 산정하였다. 수치해석에 적용된 불규칙파는 유의파고 $H_{1/3} = 0.5$ m, 3.0 m 이고, 유의주기 $T_{1/3} = 10$ s, 15 s이며, 총 계산시간은 600 s이다. 잠제의 제원은 Fig. 1에서 제시된 바와 같이 선행연구(Lee et al., 2016a, b, c)에서 검토한 규칙파랑 및 불규칙파랑에서와 동일하다. 격자는 파동장에서 $\Delta x = 1.5$ m, $\Delta z = 1.0$ m로, 지반부에서 $\Delta x = 1.5$ m, $\Delta z = 0.3$ m로 각각 설정되었다. 그리고, Fig. 1에는 FLIP(Iai et al., 1992a, b)에 적용되는 동압의 산정위치, 잠제에서 침하량(변위)의 산정위치 E1, E2 및 해저지반내 간극수압비의 산정위치 P1~P27 등을 함께 나타낸다. 잠제하의 해저지반은 실트질모래로 구성된 것으로 가정되었고, 따라서 액상화 발생이 상대적으로 쉬운 것으로 판단되는 매우 느슨한 경우의 $N=3$ 과 느슨한 경우의 $N=5$ 를 임의로 선정하였다. Table 1은 N 값에 대한 실트질모래의 물성치로, 선행연구(Lee et al., 2016a, b, c)에서 적용된 값과 동일한 값이 적용되었다. 콘크리트매트는 현장에서 적용되는 두께 0.3 m, 길이 6 m를 기준으로, 수치해석에서는 길이에 따른 액상화 정도를 비교하기 위하여 6 m, 9 m, 12 m로 각각 변화시켰다. Table 1에서 N 값은 지반의 표준관입시험으로부터 산출되며, 이에 따른 내부마찰각은 FLIP모델의 적용에서 권장되는 간이설정법(Morita et al., 1997)으로부터 추정된 값이다.

해저면상 및 잠제표면에 설정되는 유한요소의 절점위치에서 동압을 산정하기 위하여 2D-NIT모델과 FLIP모델의 격자구성체계를 동일하게 구성하였으며, 절점위치는 Fig. 1에서 흰 원으로 표기되어 있다. 각 절점위치에서 압력데이터는 정수압성분을 제외한 동수압성분만으로 주어지며, 해저면상 및 잠

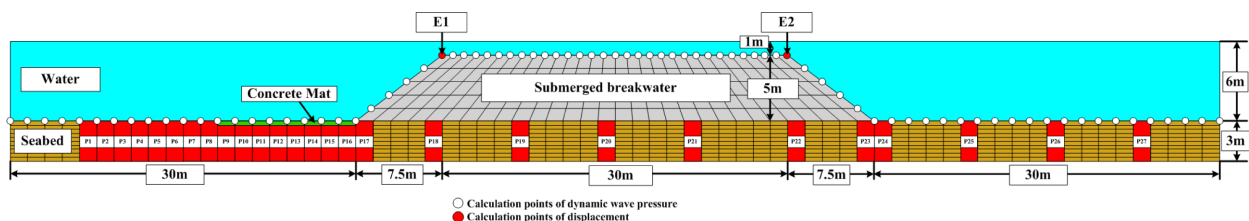


Fig. 1. Schematic sketch of the numerical regular wave-submerged breakwater-soil tank used in 2D-NIT & FLIP models. (P1~P27: Calculation points of pore water pressure ratio, E1, E2: Calculation points of submerged breakwater displacement)

Table 1. Properties for silty-sand, submerged breakwater and concrete mat in this numerical analysis.

		Shear modulus (kPa)	Bulk modulus(kPa)	Poisson's ratio	Porosity	Internal friction angle(°)	Parameters for liquefaction characteristic					
							$\phi_p(^{\circ})$	S_l	w_l	p_1	p_2	c_1
Seabed	$N=3$	3.554×10^4	9.270×10^4	0.33	0.45	37	28.00	0.005	4.070	0.5	1.073	1.161
	$N=5$	4.840×10^4	1.262×10^5	0.33	0.45	38	28.00	0.005	4.634	0.5	1.037	1.548
Submerged breakwater		2.477×10^5	6.461×10^5	0.33	0.45	45	-	-	-	-	-	-
Concrete mat		3.040×10^7	-	0.20	-	-	-	-	-	-	-	-

Here, $(^{\circ})$: Phase transformation angle

S_l : Ultimate limit of dilatancy

w_l : Overall cumulative dilatancy

p_1 : Initial phase of cumulative dilatancy

p_2 : Final phase of cumulative dilatancy

c_1 : Threshold limit for dilatancy

제표면에서 이러한 동압의 시-공간데이터는 FLIP모델에 의한 해저지반내의 동적거동해석에서 절점 사이에 등분포로 입력된다.

3.2 불규칙파랑의 조파 검증 및 지반내 간극수압의 타당성 검토

본 연구에서의 불규칙파랑의 조파는 콘크리트매트가 포설되지 않은 경우에 잠제-불규칙파랑-지반의 상호작용을 해석한 선행연구(Lee et al., 2016b)와 동일한 방법으로 수행된다. 즉, 2D-NIT모델을 이용하여 불규칙파를 검토하는 경우에 문제로 지적되어 있는 평균수위상승을 억제하면서 안정적으로 불규칙파가 조파될 수 있는 시스템을 적용하였다(Lee et al., 2012). 불규칙파를 조파하기 위한 주파수의 선택방법으로는 Goda(2010)가 제안한 주파수스펙트럼을 등에너지로 분할하는 방법을, 주파수스펙트럼으로는 Bretschneider-Mitsuyasu스펙트럼(Mitsuyasu, 1970)을 각각 적용하였으며, 실제계산에서는 성분파를 150개로, 조파시간은 600 s로 실행하였다. 이로부터 얻어진 결과의 타당성은 선행연구인 잠제-불규칙파-지반의 상호작용 해석(Lee et al., 2016b)에서 상세히 검토되었다. 또한, 2D-NIT모델로부터 해저지반 및 잠제의 표면에서 산정되는 동압을 FLIP모델에 경계조건으로 입력하여 도출되는 지반내 간극수압의 타당성은 잠제-규칙파랑-지반의 상호작용을 해석한 선행연구(Lee et al., 2016a)에서 또한 충분히 검증되었다. 검증에서는 모래지반상의 진행파동으로 인한 지반내 과잉간극수압과 수위변동을 수리모형실험으로부터 측정된 Mizutani et al.(1998)에 의한 결과와 파동장과 지반거동의 해석에 각각 VARANS방정식(Hsu and Liu, 2002)과 Biot방정식(Biot, 1941)을 적용한 PORO-WSSI II에 의한 Jeng et al.(2013)의 수치해석결과와 비교·검토되었다.

3.3 잠제의 동적거동

3.3.1 동적변위의 시간변동

Fig. 2는 해저지반 $N=3$ 의 경우 잠제 천단상의 좌측 가장

자리 E1에서 유의파고와 유의주기의 변화 및 콘크리트매트의 유무에 따른 수평변위의 시계열을 나타내며, Fig. 5는 동일한 조건하에 연직변위(침하)를 나타낸다. 각 그림에서 (a)는 $H_{1/3}=0.5$ m, $T_{1/3}=10$ s, (b)는 $H_{1/3}=0.5$ m, $T_{1/3}=15$ s, (c)는 $H_{1/3}=3.0$ m, $T_{1/3}=10$ s, (d)는 $H_{1/3}=3.0$ m, $T_{1/3}=15$ s의 경우이며, 검은색 실선은 콘크리트매트가 설치되지 않은 경우, 녹색 실선은 길이 6m의 콘크리트매트가 설치된 경우, 파란색 실선은 9m의 경우, 적색 실선은 12m의 경우에 대한 변위를 각각 나타낸다. 여기서, 잠제 천단상의 우측 가장자리 E2에서는 콘크리트매트의 유무에 따른 변위차이가 발생하지 않으므로 그 결과는 제시하지 않는다. 먼저, 콘크리트매트의 유무에 따른 차이를 살펴보면 포설된 경우가 포설되지 않은 경우보다 수평변위가 감소하며, 콘크리트매트 길이에 따른 수평변위는 길이가 길어질수록 감소하는 경향을 나타낸다. 원지반에 콘크리트매트를 설치한 경우에 수평 및 연직변위가 저감되는 것은 해저지반상에서 보호사석의 유용성을 지정한 Sumer et al.(2010)와 Sekiguchi et al.(2000)의 파동수조 및 원심모형수조의 실험에서와 같이 콘크리트매트의 포설로 초기유효응력이 증가되고, 이에 따라 해저지반의 상대밀도가 증가되기 때문이다. 그리고, 콘크리트매트의 길이가 길어질수록 일반적으로 수평 및 연직변위가 보다 저감되는 현상은 해저지반내 상대밀도가 증가되는 수평범위가 넓어지기 때문인 것으로 판단된다. 이는 잠제-규칙파-콘크리트매트-지반의 상호작용을 해석한 Lee et al.(2016c)의 결과와 동일하다.

Fig. 3에 제시한 연직변위의 경우는 잠제 천단에서 전체적으로 (-)값을 나타내므로 잠제가 침하되는 것을 알 수 있고, 콘크리트매트의 유무에 따라서는 포설된 경우가 더 적은 연직변위가 나타나며, 또한 길이가 길어질수록 더 적은 연직변위가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 여기서, 동일한 유의주기에 대해 유의파고가 증가하면 진동성분과 잔류성분 모두 증가하며, 동일한 유의파고에 대해 유의주기가 길어지면 진동성분은 큰 차이가 없지만 수평 및 연직변위에서 잔류성분이 감소되는 경향을 공통적으로 볼 수 있다(연직축의 크기가 경

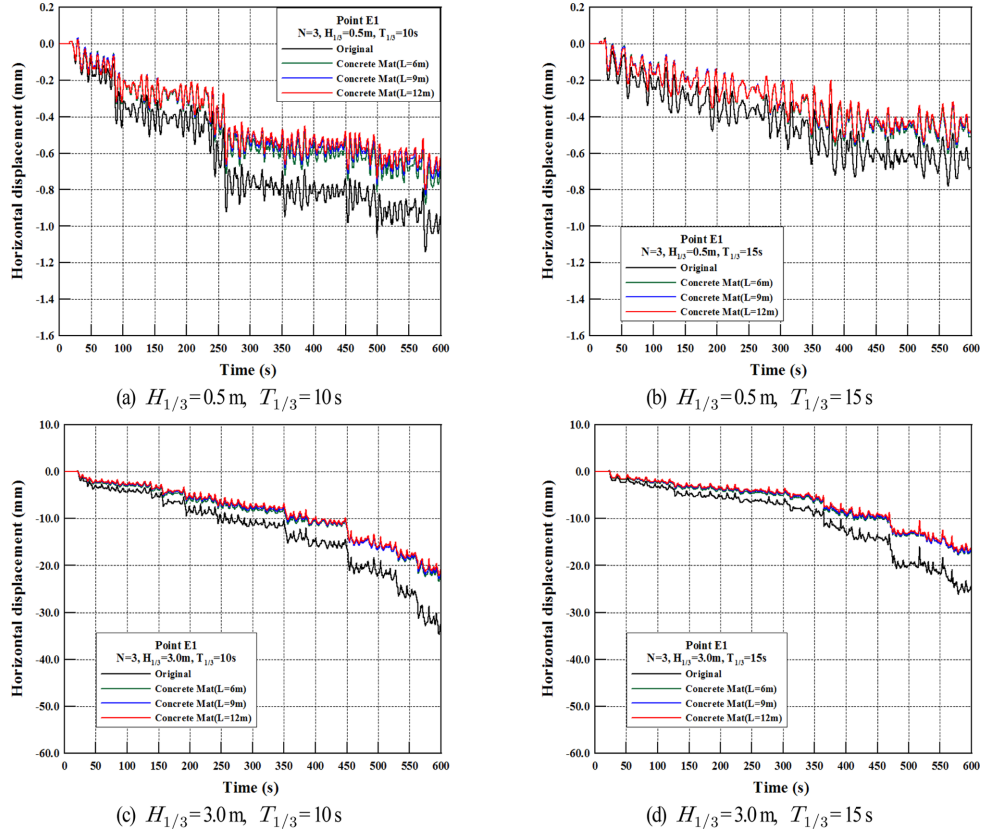


Fig. 2. Time history of horizontal displacements according to variations of significant wave height, period and the length of concrete mat for $N=3$.

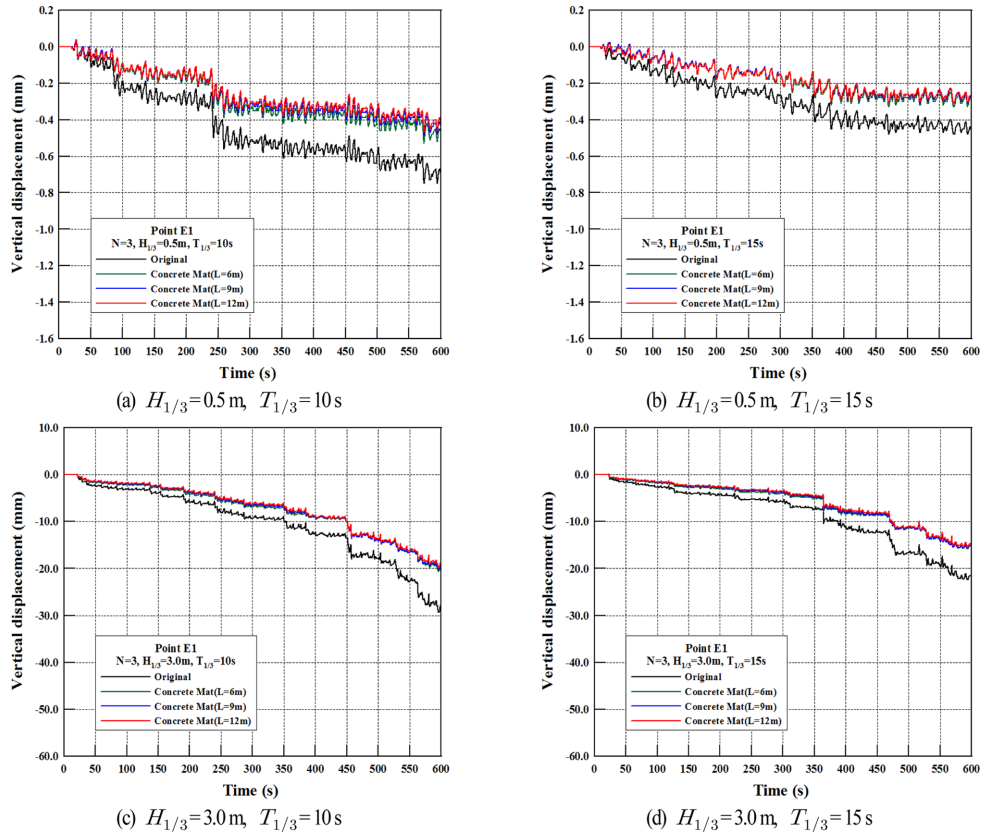
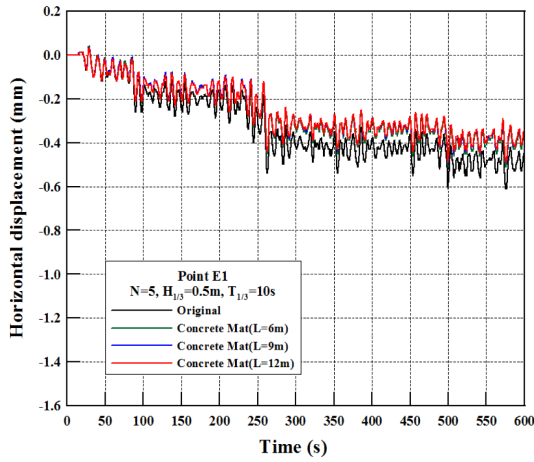
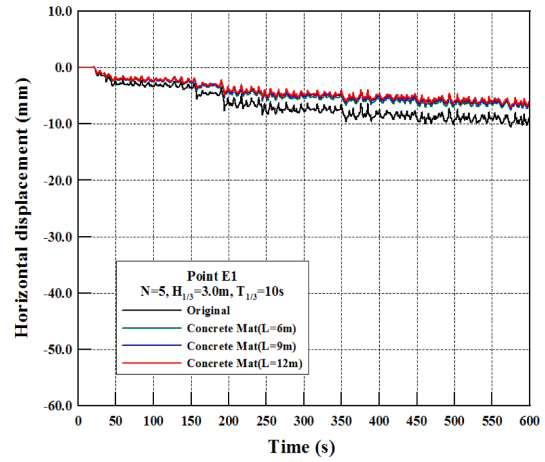
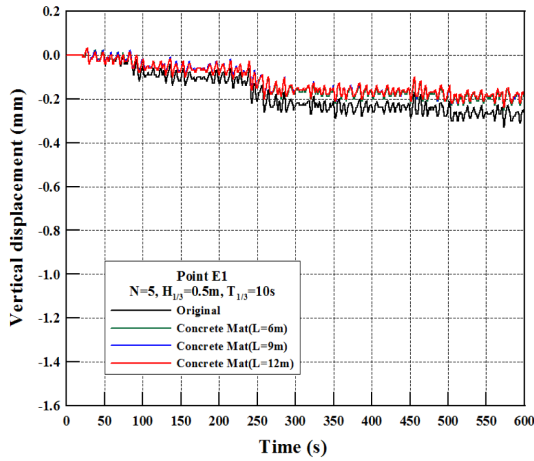
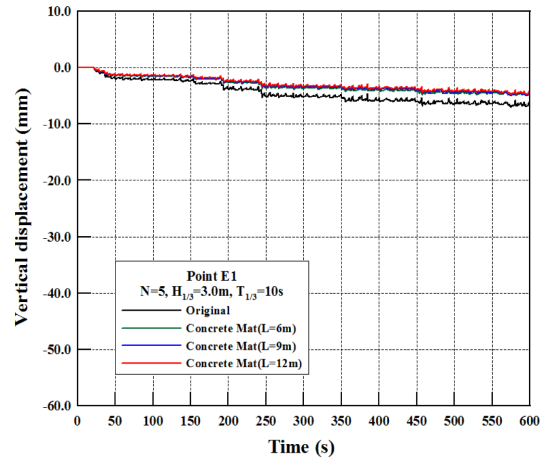


Fig. 3. Time history of vertical displacements according to variations of significant wave height, period and the length of concrete mat for $N=3$.

Table 2. Reduction ratio of displacement according to the wave conditions and the length of concrete mat for $N = 3$.

Wave Conditions		Concrete mat($L = 6$ m)		Concrete mat($L = 9$ m)		Concrete mat($L = 12$ m)	
$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	Horizontal (%)	Vertical (%)	Horizontal (%)	Vertical (%)	Horizontal (%)	Vertical (%)
0.5	10	22.81	29.33	27.19	34.67	29.82	37.33
	15	23.08	31.25	25.64	35.42	26.92	35.42
3.0	10	32.57	29.49	34.19	30.69	35.98	32.42
	15	31.79	29.27	32.63	29.67	34.51	31.41

(a) $H_{1/3} = 0.5$ m, $T_{1/3} = 10$ s(b) $H_{1/3} = 3.0$ m, $T_{1/3} = 10$ s**Fig. 4.** Time history of horizontal displacements according to variations of significant wave height and the length of concrete mat for $N = 5$.(a) $H_{1/3} = 0.5$ m, $T_{1/3} = 10$ s(b) $H_{1/3} = 3.0$ m, $T_{1/3} = 10$ s**Fig. 5.** Time history of vertical displacements according to variations of significant wave height and the length of concrete mat for $N = 5$.

우에 따라 다르게 표기되어 있는 것에 유의바란다). 이상에서 언급된 콘크리트매트의 유무에 따른 수평 및 연직변위의 저감율을 종합적으로 나타낸 것이 Table 2에 요약되어 있다.

전술한 결과 및 후술하는 일부 결과 중에서 정상상태에 이르지 못한 해석결과가 일부 제시된 경우가 있다. 이는 해석시간이 매우 장시간 소요되는 관계로 정상상태의 해를 제시하기 어려웠다는 점을 부기하여 두며, 이하의 모두는 600 s까지의 계산시간으로부터 얻어진 결과를 분석한 것이다.

다음으로, $N = 5$ 를 갖는 해저지반에서 전술한 바와 동일하게 E1지점에서 수평변위를 나타낸 Fig. 4와 연직변위를 나타낸 Fig. 5를 검토한다. 그림으로부터 $N = 5$ 의 경우는 콘크리트매트의 유무에 상관없이 전술한 $N = 3$ 일 때보다 해저지반이 더욱 고결화되기 때문에 수평 및 연직변위가 상대적으로 작게 발생되고, 정상상태에 더욱 빨리 도달한다는 것은 규칙파 및 불규칙파에 대한 선행연구(Lee et al., 2016a, 2016b)에서 도출된 결과와 동일하며, 전반적으로 유의하고

Table 3. Reduction ratio of displacement according to the wave conditions and the length of concrete mat for $N = 5$.

Wave Conditions		Concrete mat($L = 6$ m)		Concrete mat($L = 9$ m)		Concrete mat($L = 12$ m)	
$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	Horizontal (%)	Vertical (%)	Horizontal (%)	Vertical (%)	Horizontal (%)	Vertical (%)
0.5	10	16.39	24.24	18.03	27.27	19.67	27.27
	15	15.38	21.05	15.38	21.05	15.38	21.05
3.0	10	28.84	28.37	31.76	30.21	33.84	32.06
	15	29.62	30.29	33.87	34.98	35.94	37.39

가 작을수록, 유의주기가 길수록, N 값이 클수록 변위가 정상상태에 빨리 도달하는 것을 알 수 있다. 여기서, N 값이 증가하여도 콘크리트매트의 포설 유무에 따른 변위의 감소효과와는 동일하게 나타나고, 콘크리트매트의 길이가 길어질수록 각 변위의 저감율이 증가하는 것이 일반적인 현상으로 판단된다. 또한, 수평 및 연직변위에서 파고가 증가하면 진동성분과 잔류성분이 증가하는 경향을 나타내는 것은 $N = 3$ 의 경우와 동일한 현상이다. $N = 5$ 일 때 콘크리트매트 유무에 따른 수평 및 연직변위의 저감율을 종합적으로 Table 3에 요약하여 나타낸다.

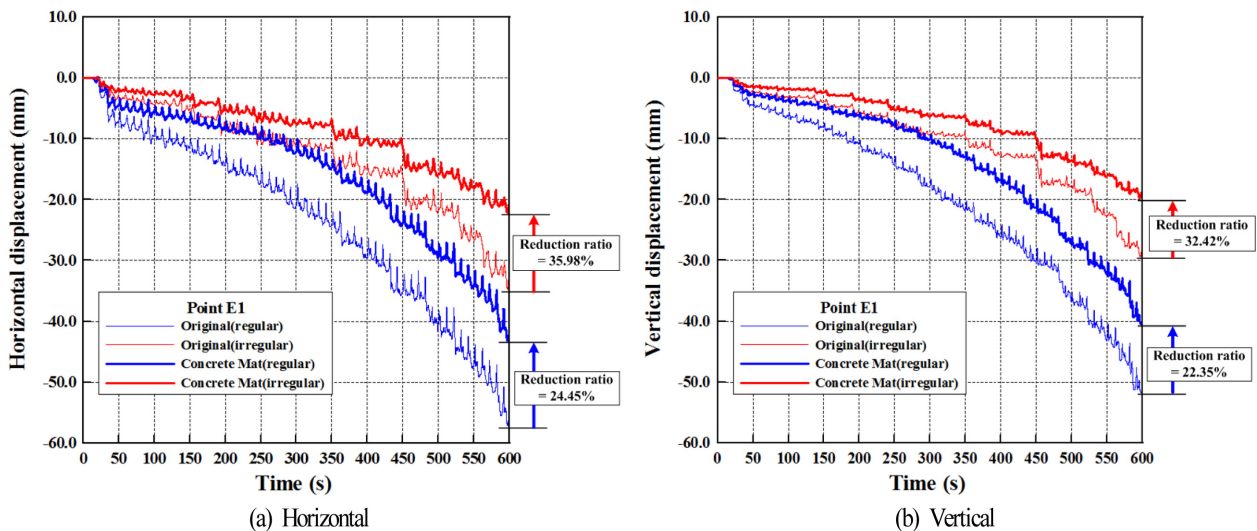
Fig. 6은 콘크리트매트 유무에 따른 잠재-규칙파-지반의 상호작용에 관한 선행해석결과(Lee et al., 2016c)와 본 연구의 잠재-불규칙파-지반의 상호작용 해석으로부터 얻어진 결과를 비교한 일례로, 여기서는 잠재 천단상의 좌측 가장자리 E1에서 수평 및 연직변위를 대비하고 있다. 지반조건은 $N = 3$ 으로 동일하고, 파랑조건은 규칙파의 경우가 파고 $H = 3.0$ m, 주기 $T = 10$ s이고, 불규칙파의 경우가 유의파고 $H_{1/3} = 3.0$ m, 유의주기 $T_{1/3} = 10$ s이다. 각 그림에서 파란색 실선은 규칙파를, 적색 실선은 불규칙파를, 얇은 실선은 콘크리트매트가 포설되지 않은 경우를, 두꺼운 실선은 12 m의 콘크리트매트가 포설된 경우를 각각 의미한다.

변위를 살펴보면 규칙파의 경우는 불규칙파의 경우보다 더 큰 변위를 나타내고, 잔류변위에서는 불규칙파의 경우가 규

칙파보다 정상상태에 빨리 도달하는 경향을 나타내며, 계단적인 변동양상이 나타나고, 또한 콘크리트매트 포설에 따른 변위의 명확한 저감효과를 확인할 수 있다.

3.3.2 동적변위에 대한 주파수스펙트럼

Fig. 1의 잠재 천단상 E1지점에서 산정된 수평 및 연직변위로부터 얻어진 동적변위스펙트럼을 도시하면 다음의 Figs. 7~10과 같다. $N = 3$, $H_{1/3} = 0.5$ m, $T_{1/3} = 10$ s, 15 s에 대한 동적변위스펙트럼을 나타낸 Figs. 7(수평변위)과 8(연직변위)을 살펴보면 $f < 0.02$ Hz의 범위에 나타나는 변위는 잔류성분에 해당하며, 여기서 전반적으로 진동성분이 매우 작은 값을 나타내는 것은 잠재의 구성재료가 큰 관성저항을 가지고 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 콘크리트매트를 포설한 경우는 원지반의 경우보다 변위의 피크치에서 50% 정도의 감소를 나타내며, 콘크리트매트가 포설된 경우에도 길이가 길어질수록 변위의 피크치가 감소하는 경향을 나타내는 것을 명확히 확인할 수 있다. 이러한 결과는 변위의 시계열을 나타낸 Figs. 2와 3로부터도 추정될 수 있다. $N = 3$, $H_{1/3} = 3.0$ m, $T_{1/3} = 10$ s, 15 s에 대한 동적변위스펙트럼을 나타낸 Figs. 9와 10을 살펴본다(연직축의 값이 Figs. 7과 8의 경우와 다르게 도시된 점을 유의바란다.). Figs. 7과 8의 경우보다 유의파고가 6배로 증가되었기 때문에 동적변위스펙트럼의 값이 보다 크게 나타나지만 콘크리트매트를 포설한 경우 원지반의 경우보다 변위

**Fig. 6.** Comparison of time histories of displacement between regular and irregular waves according to concrete mat($L = 12$ m) for $N = 3$.

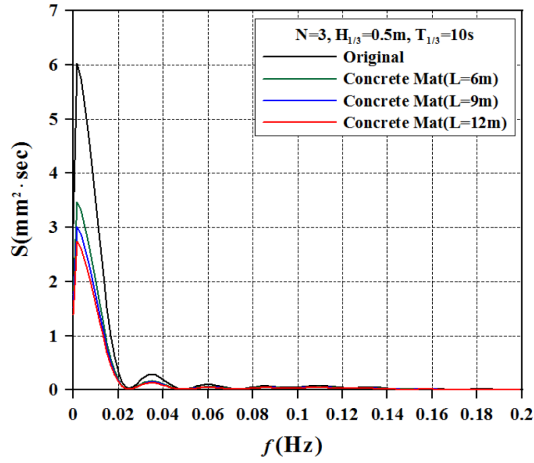
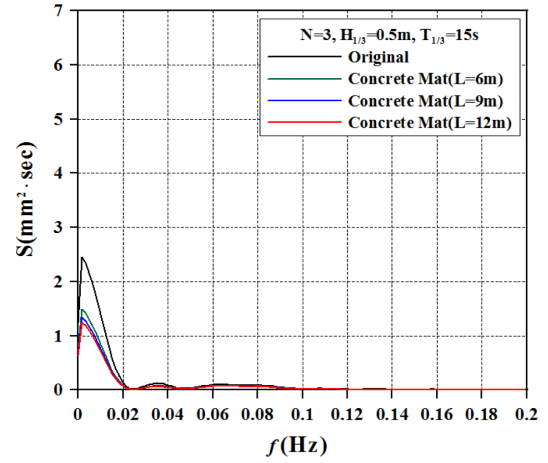
(a) $H_{1/3}=0.5\text{ m}$, $T_{1/3}=10\text{ s}$ (b) $H_{1/3}=0.5\text{ m}$, $T_{1/3}=15\text{ s}$

Fig. 7. Horizontal displacement spectrum at point E1 according to variations of significant wave height, period and the length of concrete mat for $N=3$.

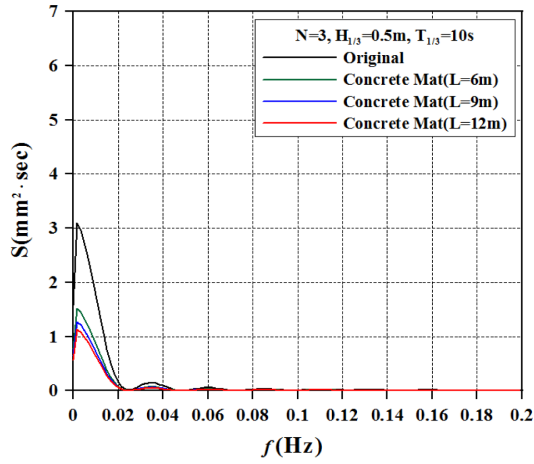
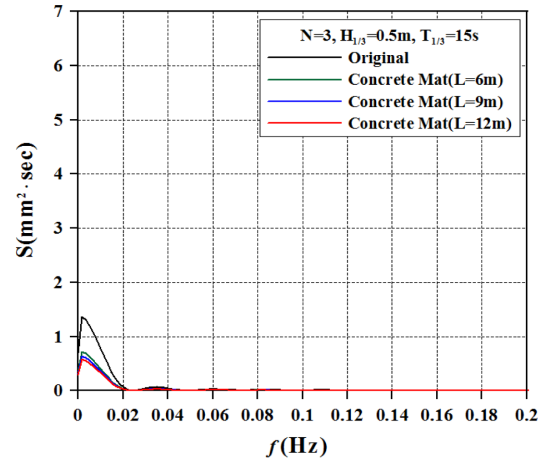
(a) $H_{1/3}=0.5\text{ m}$, $T_{1/3}=10\text{ s}$ (b) $H_{1/3}=0.5\text{ m}$, $T_{1/3}=15\text{ s}$

Fig. 8. Vertical displacement spectrum at point E1 according to variations of significant wave height, period and the length of concrete mat for $N=3$.

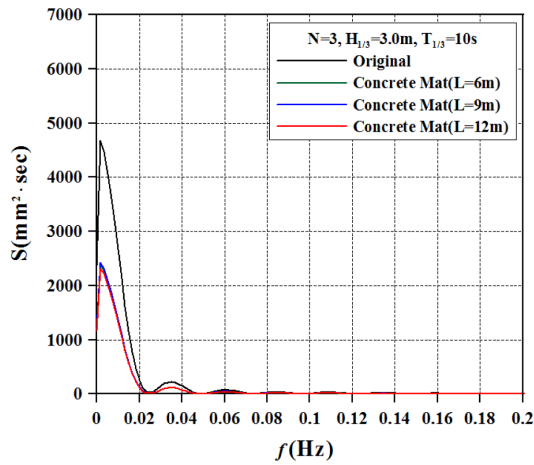
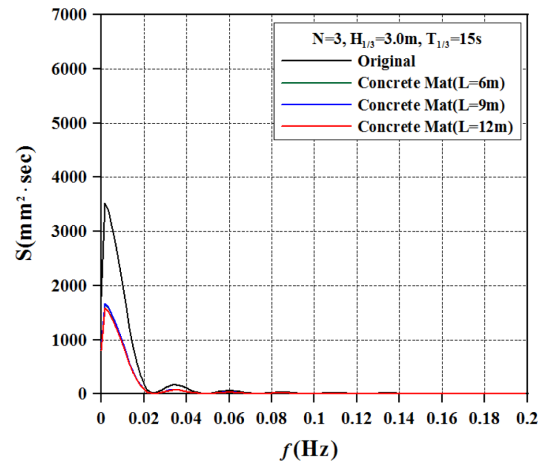
(a) $H_{1/3}=3.0\text{ m}$, $T_{1/3}=10\text{ s}$ (b) $H_{1/3}=3.0\text{ m}$, $T_{1/3}=15\text{ s}$

Fig. 9. Horizontal displacement spectrum at point E1 according to variations of significant wave height, period and the length of concrete mat for $N=3$.

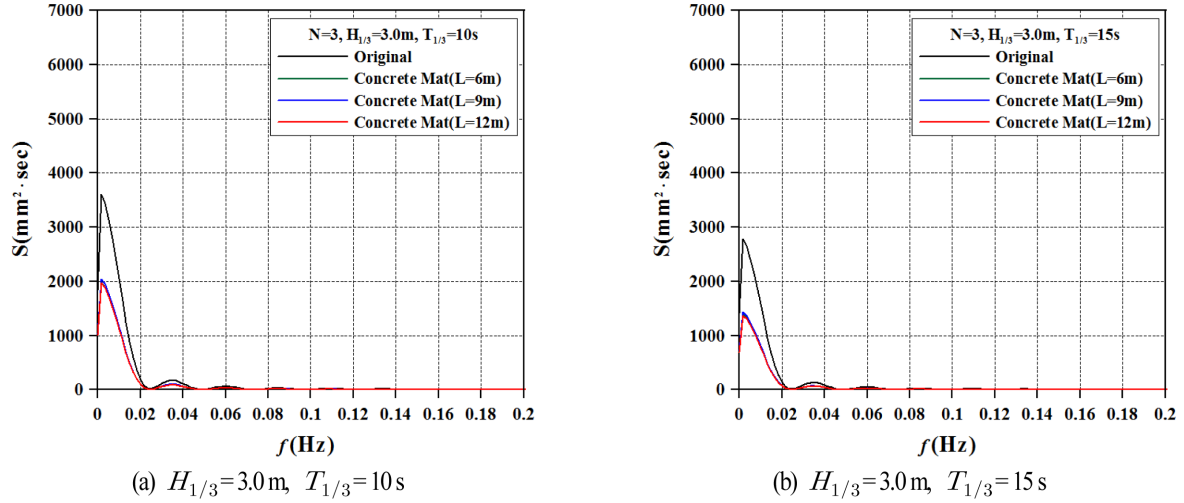


Fig. 10. Vertical displacement spectrum at point E1 according to variations of significant wave height, period and the length of concrete mat for $N=3$.

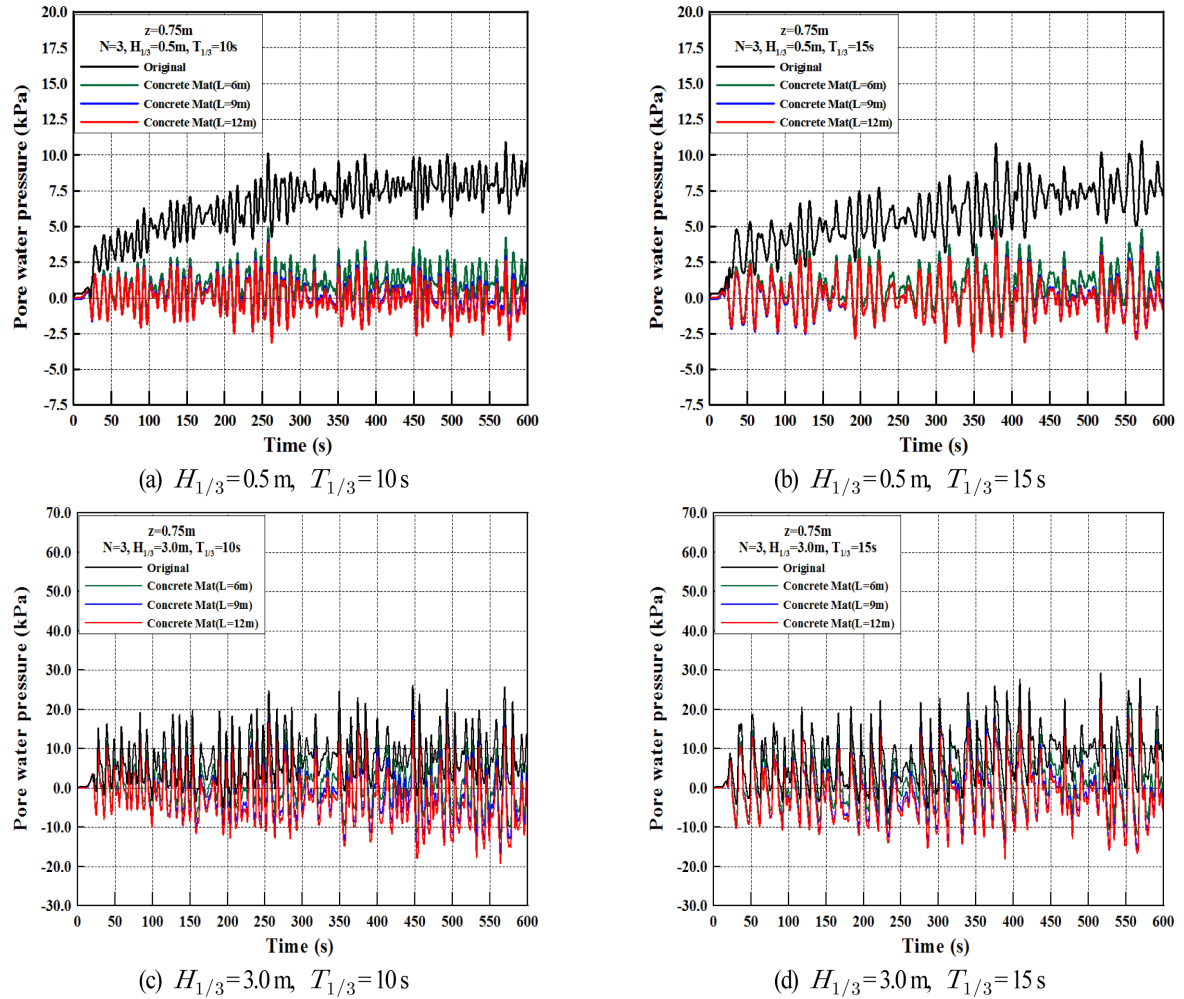


Fig. 11. Time history of pore water pressures according to variations of significant wave height, period and the length of concrete mat for $z=0.75\text{ m}$, $N=3$.

의 피크치가 감소하며, 매트의 길이가 길어질수록 변위의 피크치가 감소하는 경향은 전술한 Figs. 7과 8의 경향과 유사하다는 것을 확인할 수 있다.

3.3.3 해저지반내 간극수압

해저지반내 간극수압은 지반내에서 전단응력의 변화에 따른 간극체적의 감소로부터 발생하는 주기평균의 잔류간극수

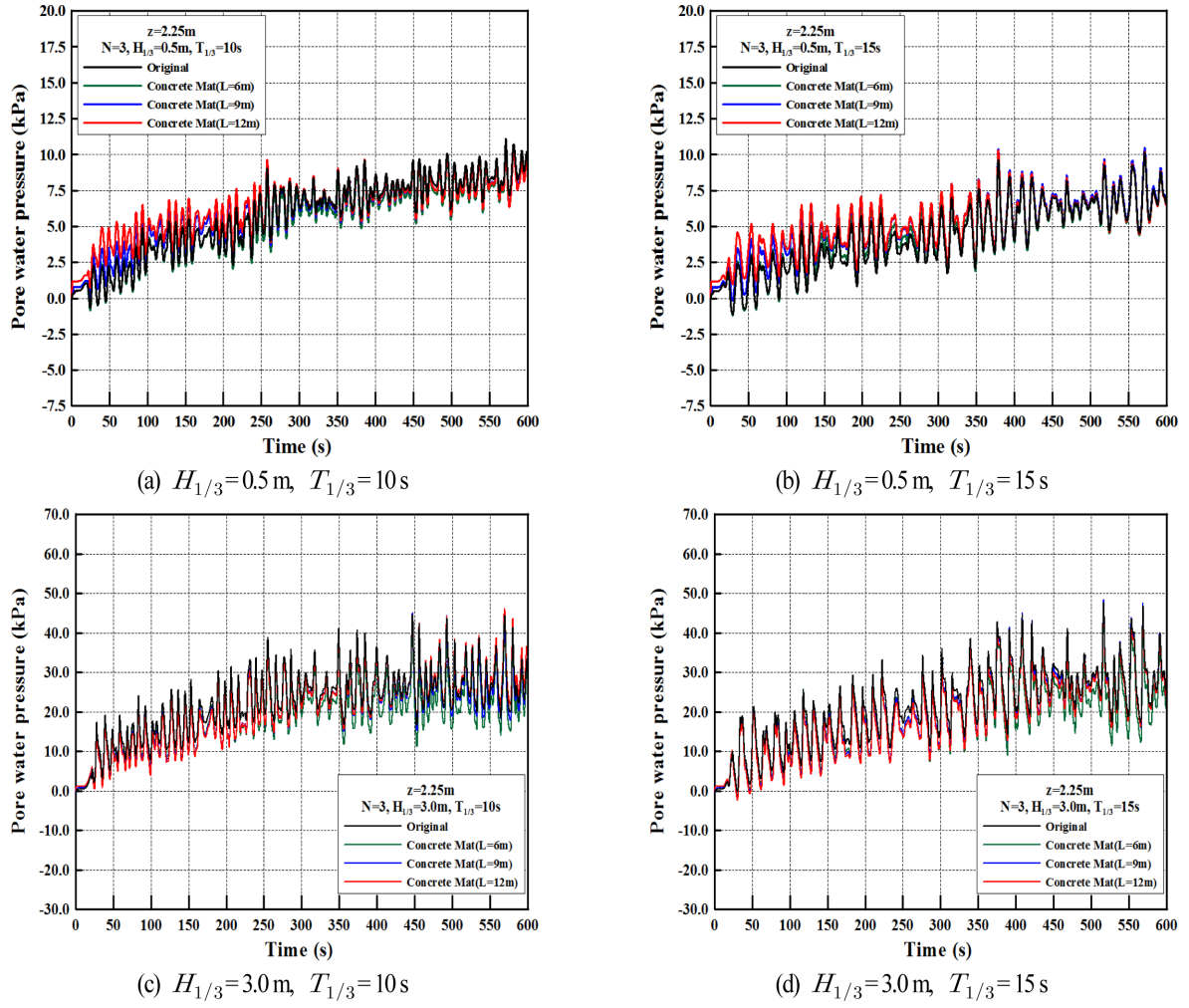


Fig. 12. Time history of pore water pressures according to variations of significant wave height, period and the length of concrete mat for $z = 2.25$ m, $N = 3$.

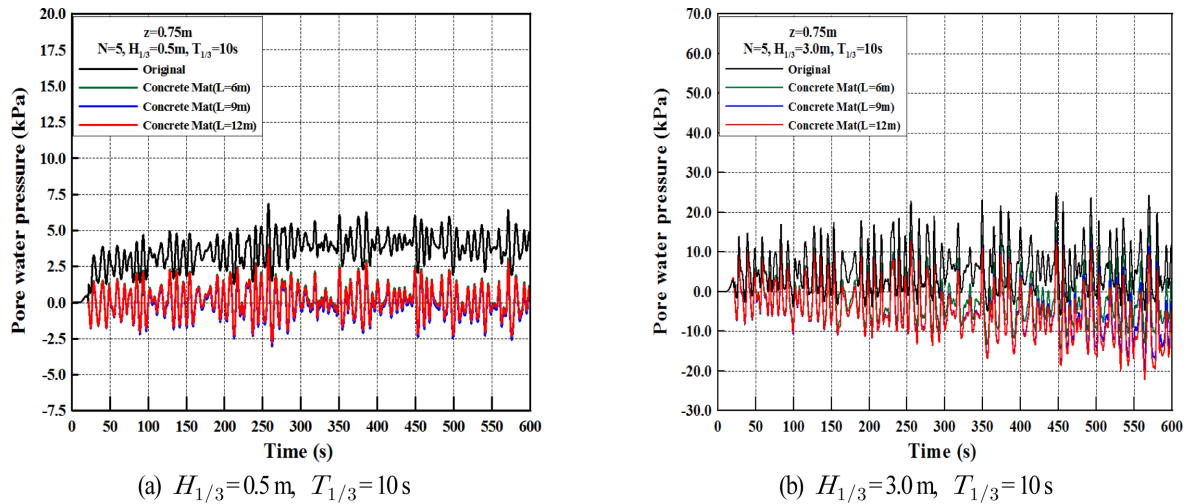


Fig. 13. Time history of pore water pressures according to variations of significant wave height and the length of concrete mat for $z = 0.75$ m, $N = 5$.

압과 동압의 변동에 대응하는 진동간극수압의 합으로 나타난다. Fig. 1에 나타난 잠제 전면부에 해당하는 P16에서 $z = 0.75$ m, 2.25 m (여기서, z 축은 해저면상을 기점으로 하향)

의 두 경우에 지반정수 N , 유의파고 $H_{1/3}$, 유의주기 $T_{1/3}$ 및 콘크리트매트 길이 L 의 변화에 따른 간극수압의 시간변동을 Figs. 11~14에 제시한다.

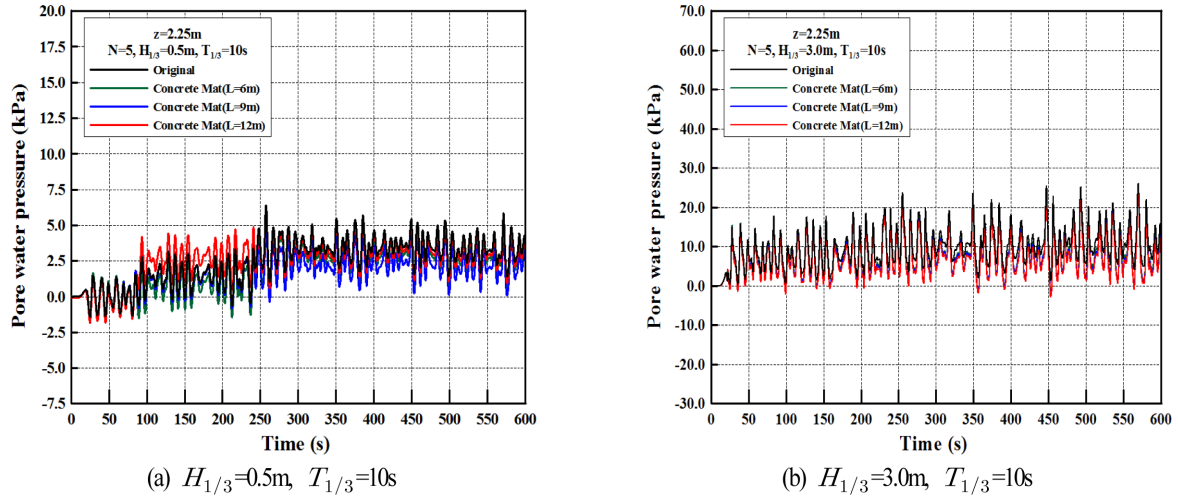


Fig. 14. Time history of pore water pressures according to variations of significant wave height and the length of concrete mat for $z = 2.25\text{ m}$, $N = 5$.

먼저, $z = 0.75\text{ m}$, $N = 3$ 의 Fig. 11로부터 콘크리트매트의 길이가 길어질수록 진동간극수압의 크기는 비슷하지만 잔류간극수압의 크기는 모두 감소되며, Figs. 11(c)와 11(d)의 경우 콘크리트매트의 포설에 따라 잔류간극수압은 감소하지만 매트길이에 따른 감소효과가 초기시간에서는 명확히 나타나지 않는다. 그리고, 동일한 N 값에 대해 깊이가 다른 Figs. 12와 11을 비교하면 깊이가 깊을수록 전체적으로 잔류간극수압이 증가하는 것을 알 수 있고, Figs. 12(a)와 12(b)에서는 Figs. 11(a)와 11(b)의 경우와 상이하게 콘크리트매트가 포설된 초기시간에 간극수압이 원지반보다 상승하는 현상을 볼 수 있다. 이러한 결과는 상대적으로 얕은 $z = 0.75\text{ m}$ 에서는 진동간극수압의 영향을 크게 받고, 반면에 보다 깊은 $z = 2.25\text{ m}$ 에서는 깊이가 깊을수록 급격히 증가하는 잔류간극수압의 영향이 커지기 때문이다.

또한, 동일한 $z = 0.75\text{ m}$ 에서 $N = 5$ 의 Fig. 13과 $N = 3$ 의 Fig. 11의 결과를 비교하면 콘크리트매트의 유무에 따라 진동간극수압은 비슷한 크기를 나타내지만 잔류간극수압은 $N = 5$

의 경우가 감소하는 경향을 나타내고, $z = 2.25\text{ m}$ 에서 $N = 5$ 인 Fig. 14의 경우에도 $N = 3$ 인 Fig. 12의 경우에 비해 잔류간극수압이 감소되는 경향이 나타난다.

이상에서 기술한 간극수압의 시간변동에서는 지반의 연직깊이가 깊을수록, 유의파고가 클수록, 유의주기가 짧을수록, N 값이 클수록 정상상태에 빨리 도달하는 경향을 볼 수 있다.

3.3.4 해저지반내 간극수압에 대한 주파수스펙트럼

전술한 Figs. 11과 12의 각 (a), (b)에서 제시한 간극수압의 시간변동으로부터 스펙트럼을 분석한 결과가 다음의 Figs. 15~16에 주어지고 있다. 그림에서는 Fig. 1의 P16지점에서 $N = 3$, $H_{1/3} = 0.5\text{ m}$, $T_{1/3} = 10\text{ s}$, 15 s 의 경우만 간극수압스펙트럼을 나타낸다. 그림으로부터 $z = 0.75\text{ m}$ 에서 콘크리트매트가 포설된 경우를 제외한 모든 경우에 $f < 0.02\text{ Hz}$ 근방의 잔류간극수압이 $f = 0.072\text{ Hz}$ 와 0.105 Hz 근방의 진동간극수압보다 큰 값을 나타내며, 지반이 깊을수록 잔류성분이 증가하

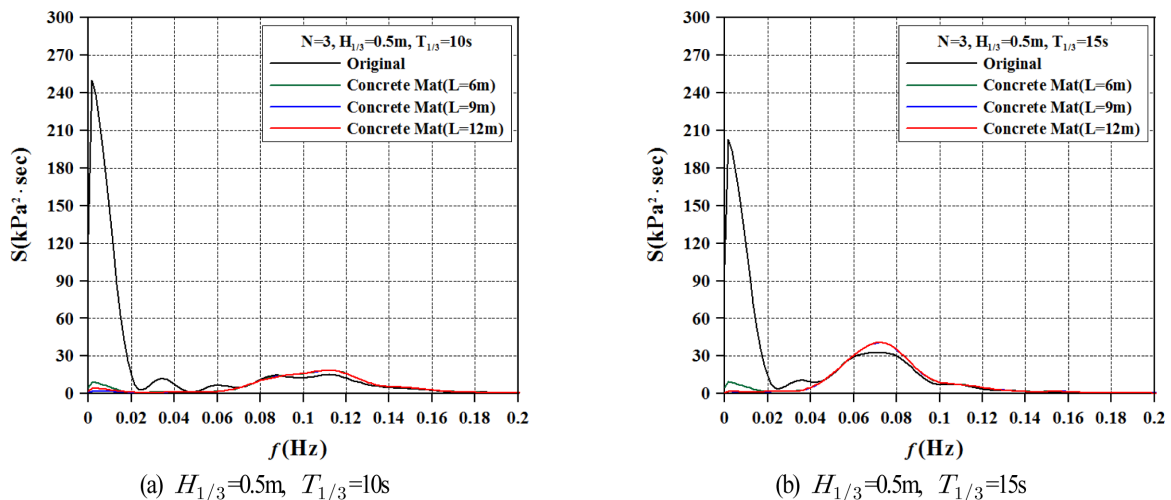


Fig. 15. Pore water pressure spectrum according to variations of significant wave period and the length of concrete mat for $z = 0.75\text{ m}$, $N = 3$.

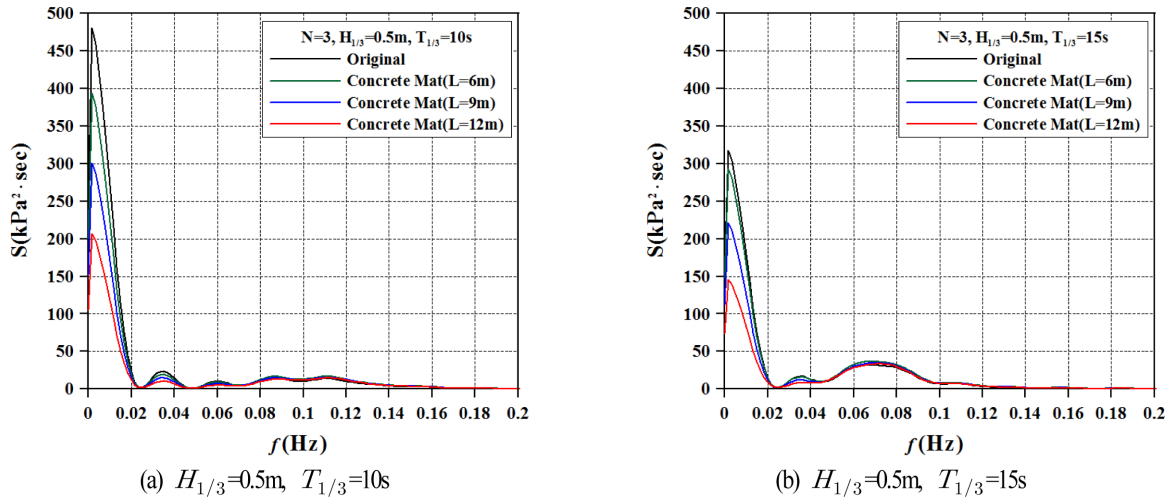


Fig. 16. Pore water pressure spectrum according to variations of significant wave period and the length of concrete mat for $z = 2.25\text{ m}$, $N = 3$.

고, 또한 콘크리트매트가 포설되고 매트길이가 길어질수록 잔류간극수압이 감소하는 경향이 나타났다. 상대적으로 얇은 $z = 0.75\text{ m}$ 의 경우 콘크리트매트가 포설되면 잔류간극수압은 대폭적으로 감소되고, $L = 12\text{ m}$ 인 경우는 잔류간극수압이 거의 나타나지 않는다. 반면에, 진동간극수압의 경우는 콘크리트매트가 포설되면 오히려 증가하는 것으로 나타난다. 이는 콘크리트매트를 포설함에 따라 $z > 0.75\text{ m}$ 의 지반두께가 줄어들어 간극수압의 감쇠가 크게 발생되지 않고 $z = 0.75\text{ m}$ 에 전달되고, 동시에 콘크리트매트의 진동성분도 지반에 큰 감쇠 없이 전달되기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 깊이가 상대적으로 깊은 $z = 2.25\text{ m}$ 의 경우 콘크리트매트의 포설 유무 및 길이의 차이에 따른 진동성분의 변화가 거의 나타나지 않은 것을 알 수 있다.

3.3.5 해저지반내 간극수압비

Figs. 17~21은 Fig. 1의 P1~P27에 대해 깊이 $z = 0.75\text{ m}$ 와 2.25 m 에서 N 값이 각각 3과 5일 때 유의파고, 유의주기 및 콘크리트매트 길이의 변화에 따른 간극수압비의 공간변화

를 제시한 것이다. 여기서, 간극수압비는 $1 - \sigma_m' / \sigma_{mst}'$ 로 정의되고, σ_m' 은 평균유효응력을, σ_{mst}' 은 초기유효응력을 나타낸다. 한편, 간극수압 p 와 초기유효응력 σ_{mst}' 의 비 p / σ_{mst}' 로 정의되는 또 다른 간극수압비의 경우는 $p / \sigma_{mst}' \geq 1$ 이면 액상화로 판정되지만 본 연구에서는 $1 - \sigma_m' / \sigma_{mst}' \geq 0.95$ 이면 지반액상화로 판정된다(Yasuda, 1988). 각 그림에서 검은 십자 기호는 원지반의 경우, 녹색 삼각기호는 길이 6m의 콘크리트매트, 파란색 원형기호는 길이 9m의 콘크리트매트, 적색 마름모기호는 길이 12m의 콘크리트매트가 각각 포설된 경우에 대한 결과이다.

먼저, $z = 0.75\text{ m}$, $N = 3$, $H_{1/3} = 0.5\text{ m}$, $T_{1/3} = 10\text{ s}$ 의 Fig. 17을 살펴보면 콘크리트매트를 포설하지 않는 원지반의 경우 간극수압비는 최대 0.38로 나타나며, 콘크리트매트가 포설되어 그의 길이가 길어지면 간극수압비가 줄어들어 최대 0.26까지 저감된다. 또한, 원지반의 $x = 30\text{ m}$ 에서 나타난 피크간극수압비가 콘크리트매트의 길이가 길어질수록 잠재 전면부의 비탈면에서부터 해측으로 이동되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 콘크리트매트의 중량에 의해 해저지반의 상대밀도가 증가

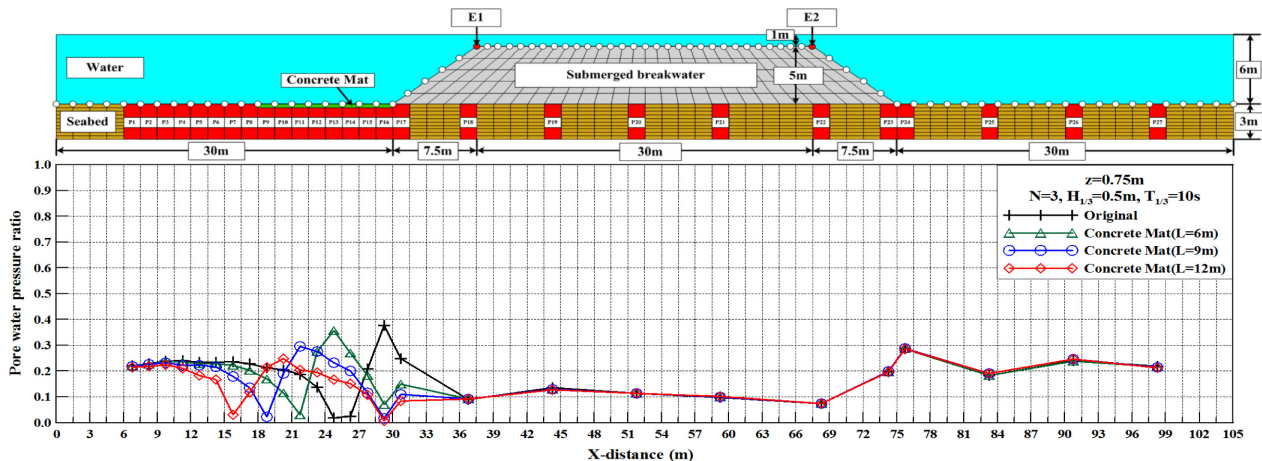


Fig. 17. Spatial distribution of pore water pressure ratio according to the length of concrete mat in case of $z = 0.75\text{ m}$, $N = 3$, $H_{1/3} = 0.5\text{ m}$, $T_{1/3} = 10\text{ s}$.

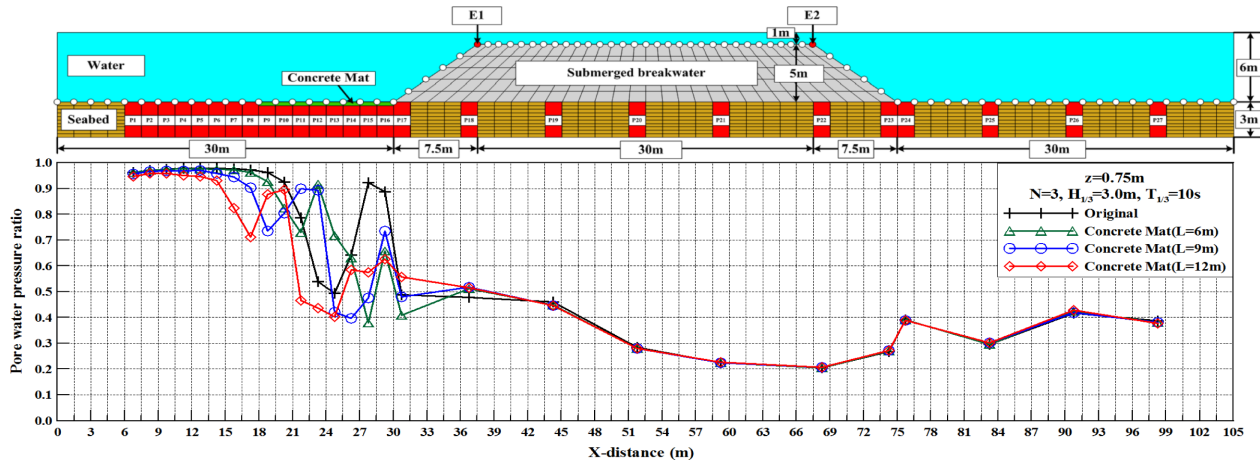


Fig. 18. Spatial distribution of pore water pressure ratio according to the length of concrete mat in case of $z=0.75$ m, $N=3$, $H_{1/3}=3.0$ m, $T_{1/3}=10$ s.

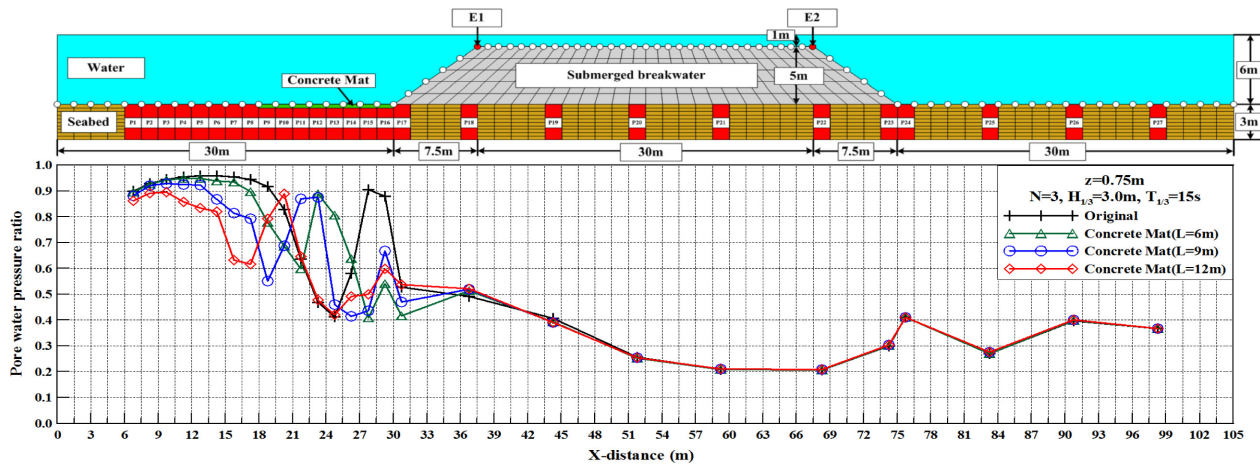


Fig. 19. Spatial distribution of pore water pressure ratio according to the length of concrete mat in case of $z=0.75$ m, $N=3$, $H_{1/3}=3.0$ m, $T_{1/3}=15$ s.

되고, 매트 길이가 해측으로 길어질수록 상대밀도가 증가되는 수평범위가 해측으로 넓어지기 때문이다. 따라서, 콘크리트매트를 적절한 길이로 포설하는 경우 잠제의 전면부하 해저지반내에서 액상화 가능성이 상대적으로 저하되어 잠제의 안정성이 증대되는 것을 기대할 수 있다. 또한, 잠제의 중앙부하 및 배면하의 해저지반에서는 콘크리트매트의 포설에 따른 효과가 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 이는 잠제의 자중에 의해 초기에 이미 지반의 상대밀도가 증가된 상태에서 잠제로부터 이격되어 포설되는 콘크리트매트의 추가적인 중량에 의한 상대밀도의 변화가 미치는 영향이 크지 않기 때문이며, 동일한 의미로 잠제 배면하의 해저지반에서도 콘크리트매트가 상대적으로 더욱 많이 이격되어 포설되기 때문에 간극수압비가 미치는 영향 또한 매우 미미할 것으로 판단된다.

Fig. 18은 $z=0.75$ m, $N=3$, $H_{1/3}=3.0$ m, $T_{1/3}=10$ s의 경우로, 원지반에서 전술한 Fig. 17보다 잠제 전면하 해저지반에서 간극수압비가 0.90 이상으로 나타나므로 액상화 가능성이 매우 높은 경우이다. 따라서, 유의파고의 증가는 액상화 가능성을 높이는 중요한 요소인 것으로 판단된다. 이에 콘크리

트매트를 포설한 경우에는 전체적으로 간극수압비가 0.4까지 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 여기서, 매트길이를 길게 할수록 간극수압비가 감소되는 수평영역이 넓어지지만 콘크리트매트를 포설한 경우 잠제 이탈면 바로 앞에서는 원지반보다는 작지만 간극수압비가 재상승하는 현상이 나타난다. 따라서, 이를 방지하기 위해서는 잠제 전면의 제각부 근방에서는 콘크리트매트의 중량을 더 무겁게 하거나 2층으로 포설하는 것도 하나의 방법인 것으로 판단된다. 여기서, 콘크리트매트하의 해저지반내에서는 액상화 가능성이 매우 줄어들고, 그 외의 해측에서는 액상화 가능성이 그대로 유지되지만 액상화 가능영역은 제체로부터 많이 이격되어 나타나기 때문에 제체의 안정성에 미치는 직접적인 영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

Fig. 19는 전술한 Fig. 18과 동일한 조건하에 유의주기를 $T_{1/3}=10$ s에서 $T_{1/3}=15$ s로 길게 한 경우의 결과이다. 콘크리트매트의 포설에 따라 간극수압비가 0.4까지 감소하는 것은 Fig. 18의 경우와 유사하지만 매트하의 최대치가 보다 감소하며, 간극수압비가 재상승하는 현상에서 그 값도 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 결과는 유의주기의 변화에 따른 반사율

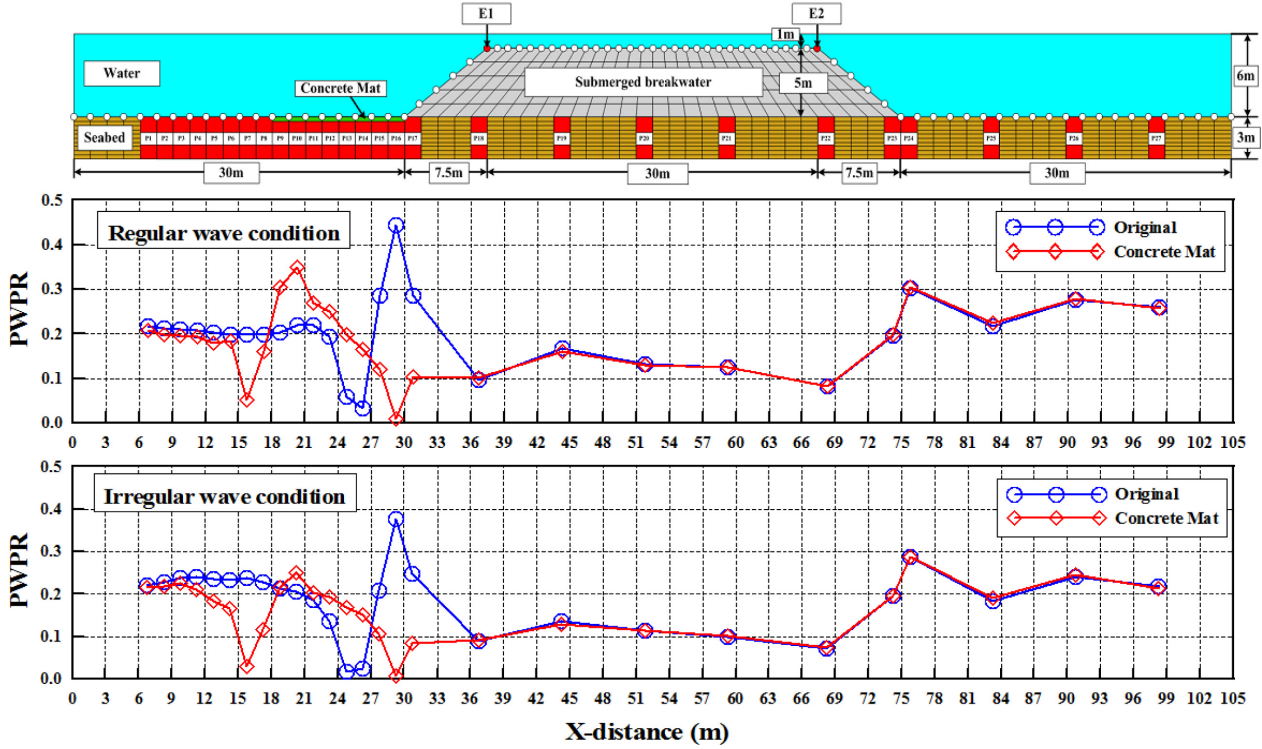


Fig. 20. Comparison of spatial distribution of pore water pressure ratio between regular and irregular waves according to concrete mat($L = 12$ m) in case of $z = 0.75$ m, $N = 3$.

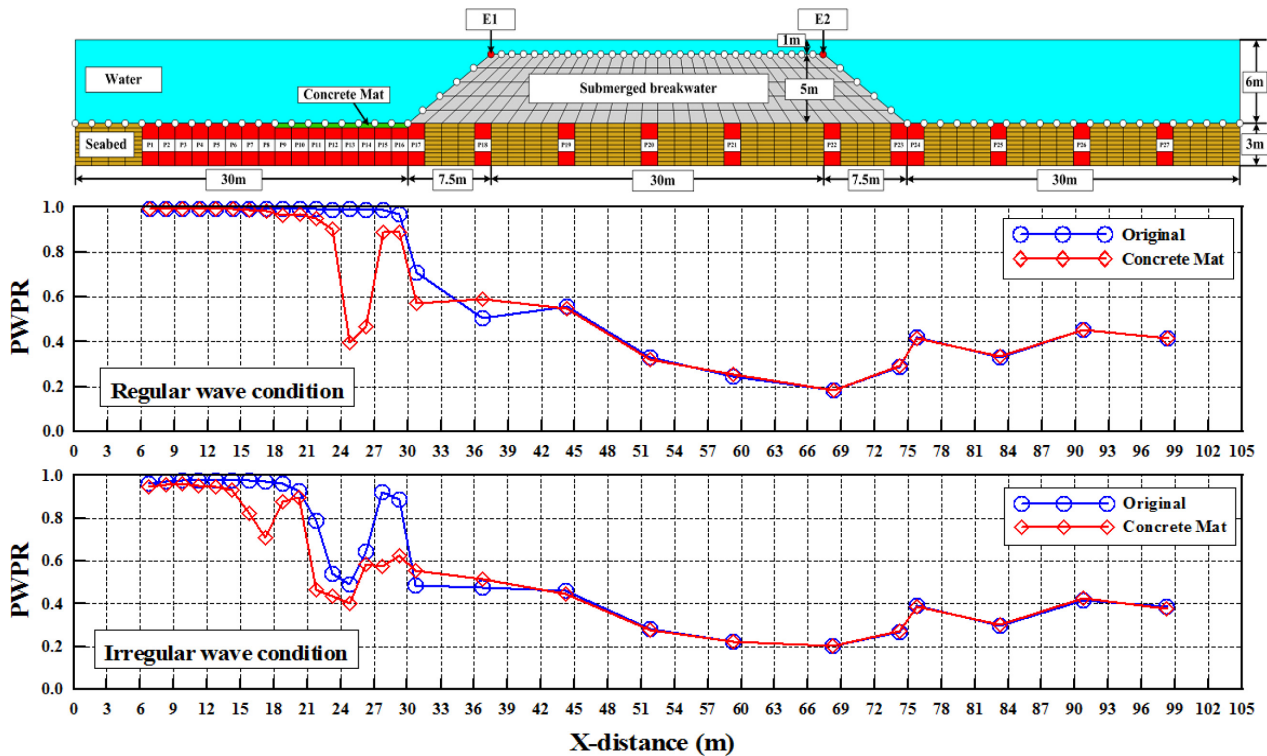


Fig. 21. Comparison of spatial distribution of pore water pressure ratio between regular and irregular waves according to concrete mat($L = 12$ m) in case of $z = 0.75$ m, $N = 3$.

(Losada et al., 1996)의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

Figs. 20~21은 Fig.1의 P1~P27에 대해 깊이 $z = 0.75$ m에서 $N = 3$ 의 경우에 콘크리트매트 유무에 따른 규칙파와

불규칙파의 간극수압비를 대비하고 있다. Fig. 20에서 규칙파는 $H = 0.5$ m, $T = 10$ s이고, 불규칙파는 $H_{1/3} = 0.5$ m, $T_{1/3} = 10$ s이며, Fig. 21에서 규칙파는 $H = 3.0$ m, $T = 10$ s

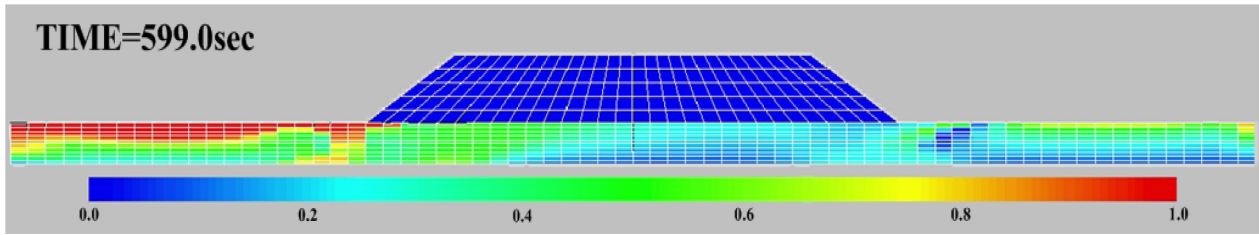


Fig. 22. Spatial distribution of pore water pressure ratio under irregular wave loading at $t = 599.0$ s for $N = 3$, $H_{1/3} = 3.0$ m, $T_{1/3} = 10$ s when the concrete mat is not.

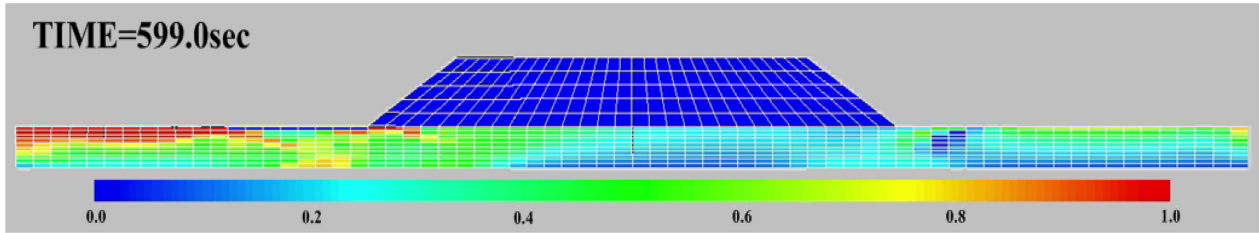


Fig. 23. Spatial distribution of pore water pressure ratio under irregular wave loading at $t = 599.0$ s for $N = 3$, $H_{1/3} = 3.0$ m, $T_{1/3} = 10$ s when the length of concrete mat is 12 m.

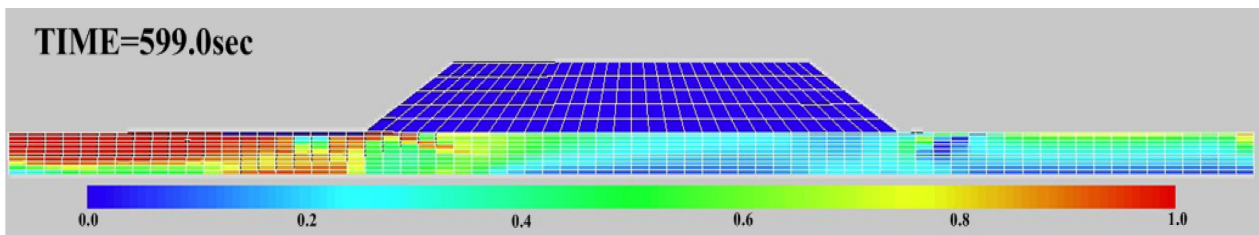


Fig. 24. Spatial distribution of pore water pressure ratio under regular wave loading at $t = 599.0$ s for $N = 3$, $H = 3.0$ m, $T = 10$ s when the length of concrete mat is 12 m.

이고, 불규칙파는 $H_{1/3} = 3.0$ m, $T_{1/3} = 10$ s이다. 각 그림에서 파란색 원형기호는 콘크리트매트가 포설되지 않은 경우를, 적색 마름모기호는 12 m의 콘크리트매트가 포설된 경우를 의미한다. 그림으로부터 규칙파의 경우가 불규칙파보다 큰 간극수압비를 나타내고, 파랑조건에 상관없이 콘크리트매트 포설에 따라 간극수압비의 저감효과가 나타난다. 또한, 불규칙파보다 규칙파에서 더욱 높은 간극수압비가 나타나고, 콘크리트매트가 포설된 경우도 동일하게 나타난다. 따라서, 한정된 결과이지만 잠재하의 해저지반내에서 액상화 평가시 불규칙파의 유의파고에 해당하는 파고를 가지는 규칙파로 해석하는 것이 더욱 안정적인 설계가 되는 것으로 판단된다.

Figs 22~23은 $N = 3$, $H_{1/3} = 3.0$ m, $T_{1/3} = 10$ s에 대해 콘크리트매트의 유무에 따른 간극수압비의 공간분포이고, Fig. 24는 규칙파 $H = 3.0$ m, $T = 10$ s의 경우에 $L = 12$ m의 콘크리트매트가 포설된 경우의 간극수압비의 공간분포를 나타낸 것이다. 그림에서 빨간색에 가까울수록 액상화 가능성이 높고, 파란색에 가까울수록 액상화 가능성이 낮다는 것을 의미한다. Figs 22~23은 동일한 파랑조건이기 때문에 잠재하의 배면해역보다는 전면해역에서 액상화에 가까운 영역의 범위가 넓게 발생되지만 콘크리트매트가 포설됨에 따라 파란색

계열로 바뀌어 액상화 가능성이 현저히 줄어드는 것을 시각적으로 확인할 수 있다. 또한, Figs. 23~24는 $L = 12$ m의 콘크리트매트가 포설된 경우에 규칙파와 불규칙파를 대비한 것으로, 규칙파의 경우 동일한 시간에 잠재 전면에서 액상화에 가까운 영역의 범위가 더욱 깊게 나타나는 것을 시각적으로 볼 수 있다.

4. 맺음말

본 연구에서는 잠재 전면부하 해저지반의 액상화 대책공법으로 하천에서 세굴방지용으로 사용되는 콘크리트매트를 포설하여 해저지반내에서 액상화 가능성을 규칙파 시뮬레이션으로부터 규명한 선행연구에 기초하여, 실험역을 모사한 불규칙파동장에서 동일한 해석수법(2D-NIT모델 & FLIP 모델)을 적용하여 콘크리트매트의 유무 및 매트길이의 변화에 따른 잠재의 동적변위, 해저지반내 간극수압과 액상화에 대한 척도로 사용되는 간극수압비와 같은 동적응답을 수치해석하였고, 규칙파와 불규칙파의 동적변위 및 간극수압비를 비교·검토하였다. 이로부터 얻어진 중요한 사항을 다음에 요약·기술한다.

(1) 콘크리트매트를 포설한 경우가 수평변위 및 연직변위가 작게 나타나고, 또한 매트길이가 길어질수록 두 변위가 감소하는 것으로 나타난다. 이러한 결과는 콘크리트매트의 포설에 따른 해저지반의 상대밀도가 증가되는 것과 관련이 있다. 선행연구(규칙파)에서 지반의 비선형적인 거동으로 예외적인 거동이 발생하는 경우도 있었지만 불규칙파에서는 나타나지 않았다. 이는 불규칙파의 경우가 규칙파의 경우보다 반사율이 일반적으로 크고, 또한 중복파의 마디와 배의 위치가 고정되지 않기 때문인 것으로 판단된다.

(2) 콘크리트매트를 포설한 경우 진동간극수압 성분은 크게 변화되지 않지만 잔류간극수압이 감소되고, 따라서 전체적으로 간극수압이 감소되는 결과를 나타낸다.

(3) 콘크리트매트를 포설하는 경우 매트의 추가적인 중량으로 지반의 상대밀도가 증가되며, 매트길이를 증가시킨 경우 지반의 상대밀도가 증가되는 영역의 범위가 넓어지므로 지반액상화의 가능성을 보다 줄일 수 있다. 한편, 매트길이에 따라 규칙파의 경우보다 작지만 잠제 전면 제각부하에서 간극수압비가 채상승하는 경우가 있으며, 이의 경우는 콘크리트매트의 중량을 높이거나 2층으로 포설할 필요가 있다.

(4) 콘크리트매트가 포설된 지반내 간극수압 및 간극수압비의 변동에서 유의파고는 큰 영향을 미치는 중요한 요소이고, 한정된 본 결과이지만 액상화 평가시 불규칙파의 유의파에 해당하는 파랑조건을 규칙파로 적용하는 것이 더욱 안정적인 설계로 된다.

(5) 지반정수 N 과 파랑조건에 상관없이 액상화 대책공법으로 콘크리트매트의 유용성을 충분히 확인할 수 있었다.

이상에서 논의된 2D-NIT모델과 FLIP모델에 의한 본 논문의 타당성은 기존의 수리실험과의 비교로부터 검증되었지만 콘크리트매트가 포설된 경우에 대해서도 향후 수리모형실험을 수행하여 보다 심층적으로 수치해석결과의 타당성을 검토하고자 한다.

References

- Biot, M.A. (1941). General theory of three-dimensional consolidation, *J. of Applied Physics*, 12, 155-165.
- CDIT(2001). Research and development of numerical wave channel(CADMAS-SURF), CDIT library, 12.
- Goda, Y. (2010). Random seas and design of maritime structures, World Scientific.
- Godbold, J., Sackmann, N. and Cheng, L. (2014). Stability design for concrete mattresses, *Proceedings of 24th International Ocean and Polar Engineering Conference, ISOPE*, 302-308.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981). Volume of fluid(VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. of Computational Physics*, 39, 201-225.
- Hsu, T.J., Sakakiyama, T., and Liu, P.L.F. (2002). A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater. *Coastal Engineering*, 46(1), 25-50.
- 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.
- Jeng, D.S., Ye, J.H., Zhang, J.S., and Liu, P.F. (2013). An integrated model for the wave-induced seabed response around marine structures : Model verifications and applications. *Coastal Engineering*, 72, 1-19.
- Lee, K.H., Park, J.H., and Kim, D.S. (2012). Numerical simulation of irregular airflow within wave power converter using OWC by action of 3-dimensional irregular waves, *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 24(3), 189-202 (in Korean).
- Lee, K.H., Park, J.H., Cho, S. and Kim, D.S. (2013). Numerical simulation of irregular airflow in OWC generation system considering sea water exchange, *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 25(3), 128-137 (in Korean).
- Lee, K.H., Ryu, H.W., Kim, D.W., Kim, D.S. and Kim, T.H. (2016a). Regular waves-induced seabed dynamic responses around submerged breakwater, *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(3), 132-145 (in Korean).
- Lee, K.H., Ryu, H.W., Kim, D.W., Kim, D.S. and Kim, T.H. (2016b). Irregular waves-induced seabed dynamic responses around submerged breakwater, *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(4), 177-190 (in Korean).
- Lee, K.H., Ryu, H.W., Kim, D.W., Kim, D.S. and Kim, T.H. (2016c). Numerical analysis on liquefaction countermeasure of seabed under submerged breakwater using concrete mat cover (for regular waves), *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(6), 361-374 (in Korean).
- Losada, I.J., Silva, R. and Losada, M.A. (1996). 3-D non-breaking regular wave interaction with submerged breakwaters, *Coastal Engineering*, 28, 229-248.
- Mitsuyasu, H. (1970). On the growth of spectrum of wind-generated waves (2)-spectral shape of wind waves at finite fetch, *Proc. 17th Japanese Conf. Coastal Eng.*, 1-7 (in Japanese).
- Mizutani, N., Mostafa, A.M. and Iwata, K. (1998). Nonlinear regular wave, submerged breakwater and seabed dynamic interaction. *Coastal Engineering*, 33, 177-202.
- Morita, T., Iai, S., Hanlong, L., Ichii, Y. and Satou, T. (1997). Simplified set-up method of various parameters necessary to predict liquefaction damage of structures by FLIP program, *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute Ministry of Transport, PARI, Japan*, 869, 1-36.
- Sakakiyama, T. and Kajima, R. (1992). Numerical simulation of

- nonlinear wave interaction with permeable breakwater, Proceedings of the 22nd ICCE, ASCE, 1517-1530.
- Sekiguchi, H., Sassa, S., Miyamoto, J. and Sugioka, K. I. (2000). Wave-induced liquefaction, flow deformation and particle transport in sand beds, ISRM International Symposium, International Society for Rock Mechanics.
- Sumer, B. M., Diken, F. H. and Fredsøe, J. (2010). Cover stones on liquefiable soil bed under waves. Coastal Engineering, 57(9), 864-873.
- Yasuda, S. (1988). From investigation to countermeasure for liquefaction, Kajima Press, 256p (in japanese).
-
- Received 12 January, 2017
Revised 12 February, 2017
Accepted 20 February, 2017