한국해안 · 해양공학회논문집/ISSN 1976-8192(Print), ISSN 2288-2227(Online)
Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers 26(3), pp. 174~183, Jun. 2014
http://dx.doi.org/10.9765/KSCOE.2014.26.3.174

불규칙파-해저지반-혼성방파제의 상호작용에 의한 지반과 구조물의 동적응답에 관한 수치시뮬레이션 (II)

Numerical Simulation of Dynamic Response of Seabed and Structure due to the Interaction among Seabed, Composite Breakwater and Irregular Waves (II)

이광호* · 백동진** · 김도삼*** · 김태형**** · 배기성*****
Kwang-Ho Lee*, Dong-Jin Baek**, Do-Sam Kim***, Tae-Hyung Kim**** and Ki-Seong Bae*****

요 지 : 해양 및 해안구조물 하부의 해저지반에 장시간 지속적인 고파랑이 작용하는 경우 진동성분과 잔류성분으로 구성되는 과잉간극수압의 증가에 따른 유효응력의 감소로 인하여 해저지반내에 액상화의 가능성이 나타나고, 일단 액상화가 발생되면 그의 진행에 따라 구조물의 침하 혹은 전도에 의해 종국적으로 구조물이 파괴될 가능성이 높아지게 된다. 본 연구에서는 2차원수치파동수로를 혼상류해석과 불규칙파동장으로 확장한 수치해석법을 적용하여 불규칙파동장하에서 해저지반상 및 혼성방파제의 표면상에서 시간변동의 동파압과 유속에 의한 전단응력을 산정하고, 그 결과를 지반의 동적거동을 정밀하게 재현할 수 있는 유한요소법에 기초한 탄소성해저지반응답용의 수치해석프로그램에 입력치로 적용하여 불규칙파동장에서 해저지반내에서 과잉간극수압 및 유효응력의 시공간적인 변화, 이로 인한 액상화, 그리고 지반의 시간변형과 케이슨의 시간변위 및 변위가속도 등을 정량적으로 평가한다. 이로부터 혼성방파제 전면 및 후면 하부의 해저지반내에서 액상화 가능성을 확인할 수 있었고, 이에 따라 액상화된 토립자는 흐름에 대한 저항력을 상실하므로 액상화된 지반은 세굴가능성이 클 것으로 판단된다. 또한, 액상화된 지반은 강도의 현저한 저하로 구조물의 진동변위가 증폭되고, 더불어 혼성방파제의 안정성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 여기서, 본 연구의 전체 내용을 지면관계상 두 부분으로 나누며, 전반부를 (I)로 하여 구조물의 동적변위와 변위가속도 및 지반변형을 중심으로 다루고, 후반부를 (II)로 하여 지반내에서 간극수압의 시간변동, 액상화 및 유효응력경로 등을 상세히 다루며, 본 연구는 후반부인 (II)에 해당한다.

핵심용어 : 불규칙파랑하중, 해저지반과 구조물의 동적거동, 과잉간극수압, 액상화, 응력경로

Abstract : Seabed beneath and near coastal structures may undergo large excess pore water pressure composed of oscillatory and residual components in the case of long durations of high wave loading. This excess pore water pressure 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, to evaluate the liquefaction potential on the seabed, numerical analysis was conducted using the expanded 2-dimensional numerical wave tank to account for an irregular wave field. In the condition of an irregular wave field, the dynamic wave pressure and water flow velocity acting on the seabed and the surface boundary of the composite breakwater structure were estimated. Simulation results were used as input data in a finite element computer program for elasto-plastic seabed response. Simulations evaluated the time and spatial variations in excess pore water pressure, effective stress, and liquefaction potential in the seabed. Additionally, the deformation of the seabed and the displacement of the structure as a function of time were quantitatively evaluated. From the results of the analysis, the liquefaction potential at the seabed in front and rear of the composite breakwater was identified. Since the liquefied seabed particles have no resistance to force, scour potential could increase on the seabed. In addition, the strength decrease of the seabed due to the liquefaction can increase the structural motion and significantly influence the stability of the composite breakwater. Due to limitations of allowable paper length, the studied results were

*관동대학교 에너지자원플랜트공학과 조교수(Dept. of Energy Resources and Plant Eng., Kwandong Univ., Gangwon 210-701, Korea, Tel:+82-33-649-7598, Fax:+82-33-647-3436, klee@kd.ac.kr)
**한국해양대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정(Dept. of Civil 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, assassin10@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)
*****경상대학교 해양토목공학과 교수(Dept. of Ocean Civil Eng., Gyeongsang Univ., 38 Cheondaegookchigil, Gyeongnam, Korea, Tel:+82-55-772-9126, Fax:+82-55-772-9120, bks7265@hanmail.net)

divided into two portions; (I) focusing on the dynamic response of structure, acceleration, deformation of seabed, and (II) focusing on the time variation in excess pore water pressure, liquefaction, effective stress path in the seabed. This paper corresponds to (II).

Keywords : Irregular wave loading, dynamic behavior of structure and seabed, excess pore water pressure, liquefaction, effective stress path

1. 서론 및 수치해석이론의 개요

본 논문의 전반적인 배경, 목적, 파동부의 해석모델인 2D-NIT모델(Lee et al., 2013)과 지반부의 해석에 적용되는 FLIP 모델(Iai et al., 1992a, 1992b)에 대한 수치해석이론의 개요, 수치해석에서 파동부와 지반부에서 입사파랑조건 및 지반물성치 등은 본 연구의 전반부인 (I)에서 서술되었기 때문에 지면관계상 반복적인 기술은 여기서 생략한다. 전반부 (I)에서는 구조물의 동적변위와 변위가속도 및 지반변형을 논의하였고, 후반부 (II)에서는 지반부에서 과잉간극수압비의 시간변동과 그의 주파수스펙트럼, 액상화 및 유효응력경로를 중심으로 해저표면에서 전단응력의 고려유무에 따른 특성변화 등을 이하에서 기술한다.

2. 수치해석결과

지반내 과잉간극수압 등의 측정위치를 다음의 Fig. 1에 나타낸다. 모래지반내에 총 21개 지점에서 과잉간극수압 등의 변동을 측정하였으며, 각각에 대해 해저표면에서 유속으로 인한 전단응력을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대한 각각의 결과를 제시한다. 이 때 전단응력은 다음의 식으로 추정된다(Yeh and Mason, 2014).

$$\tau_{xz} = \frac{1}{8} f_w \rho u_b |u_b| \tag{1}$$

여기서 τ_{xz}는 전단응력, u_b는 2D-NIT모델로부터 산정되는 해저표면에서 수평유속, f_w는 마찰계수로, 본 연구에서는 다음의 식으로 주어지는 마찰계수를 적용한다(Schlichting, 1979).

$$f_w = 0.23 Re^{-1/5} \tag{2}$$

여기서, Re는 Reynolds수이다.

2.1 과잉간극수압비

2.1.1 전단응력을 고려하지 않은 경우

(1) 유의주기의 변화에 따른 시계열

해저지반표면상에서 유속에 의한 전단응력을 고려하지 않은 경우 Fig. 1의 모래지반내에서 유의파고를 $H_{1/3}$ = 3 m로 일정하게 유지하고 유의주기를 $T_{1/3}$=7, 10, 13s로 변화시켰을 때 과잉간극수압비의 변화에 대한 시계열을 나타낸 것이 Fig. 2이다. 여기서, 과잉간극수압비는 초기유효응력 σ'_0와 과잉간극수압 p와의 비 p/σ'_0로 정의된다. 따라서, 과잉간극수압비의 값이 1에 가까운 경우는 액상화에 근접하였다는 것을 나타내며, 완전히 1로 되면 지반이 액상화된 경우로, 이는 유효상재하중에 대한 저항력을 상실하게 된다는 것을 의미한다. 이하에서는 과잉간극수압비가 0.1 이하의 값을 나타낸 경우는 지면관계상 도시되지 않았다.

먼저, 케이슨 전면의 사석마운드부에서 다소 이격된 위치에 놓인 P. 1의 경우를 검토한다. 결과에서 유의주기에 따라

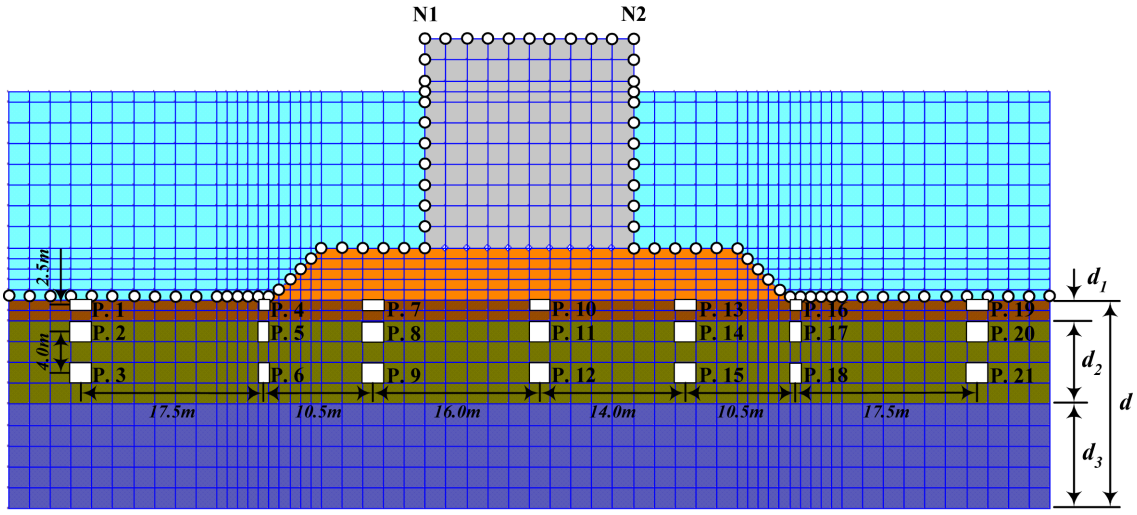


Fig. 1. Schematic diagram of the breakwater and ground formation domain used for this numerical simulation(d = 20 m, d_1(sand 1) = 2 m, d_2(sand 2) = 8 m, d_3(sand 3) = 10 m)(N1 and N2: measuring points of caisson displacements, °¤: input points of wave pressures and shear stresses, P.1~P.21: measuring points of excess pore water pressures).

지반응답속도에서 다소의 차이는 나타내지만(유의주기가 길수록 지반응답속도가 빠르다), 대략 $t<200$s에서는 진동과잉간극수압보다 잔류과잉간극수압(시간평균개념의 과잉간극수압)이 매우 크게 나타나고, 시간의 경과와 더불어 누적되는 현상을 볼 수 있다. 또한, $t>200$s에서는 모든 주기에서 진동성분이 크게 발달하는 반면에 잔류성분의 변화는 크지 않고, 과잉간극수압비가 1에 근접한 값을 나타내므로 액상화된 혹은 그에 근접한 상태를 나타낸다. 여기서, 결과의 제시는 생략되었지만, P. 2와 3에서는 거의 값을 나타내지 않으므로 연직방향으로 과잉간극수압비의 변화가 매우 크다는 것을 알 수 있다.

다음으로, 사석마운드부의 전면 비탈면이 시작되는 위치인 P. 4에서 주어지는 과잉간극수압비의 변동양상은 파작용 초기부터 진동성분이 상대적으로 크다는 점에서 동일한 수평위치에 놓인 P. 1의 경우와 차이가 있고, 전체적으로 과잉간극수압비가 1 이하의 값을 가지므로 액상화가 발생되지 않는 것으로 판명된다. 잔류성분은 유의주기가 길수록 큰 값을 나타내고, 일정시간 이후에는 일정치에 수렴되는 현상은 P. 1과 동일하지만, 값의 크기는 보다 작다. 여기서, $T_{1/3}=7$과 10s의 경우는 진동성분은 시간경과에 따라 지속되지만, $T_{1/3}=13$s의 경우는 $t>170$s의 범위에서 진동성분이 급격히 줄어들고 거의 잔류성분만이 주어지는 것을 볼 수 있다. P. 5는 Fig. 1에 나타내는 바와 같이 P. 4와 동일한 연직면상의 하부에 놓이는 위치로, P. 4와 비교하여 진동성분이 크게 감쇠된 결과를 나타낸다. 이러한 결과는 지반깊이가 깊어짐에 따라 진동성분이 지반내에 흡수되어 감쇠되기 때문이다.

사석마운드부하에서 과잉간극수압비를 나타낸 P. 7의 결과에서는 동일한 수평면인 전술한 P. 1와 4에 비해 진동성분은 거의 나타나지 않고, 대부분이 잔류성분으로 구성된다. 역시, 이러한 결과는 상부의 사석마운드부내에서 진동성분이 크게 감쇠 및 소멸되기 때문이다. 그리고, P. 7에서는 유의주기가 길수록 잔류성분이 일정치에 도달되는 시간이 전술

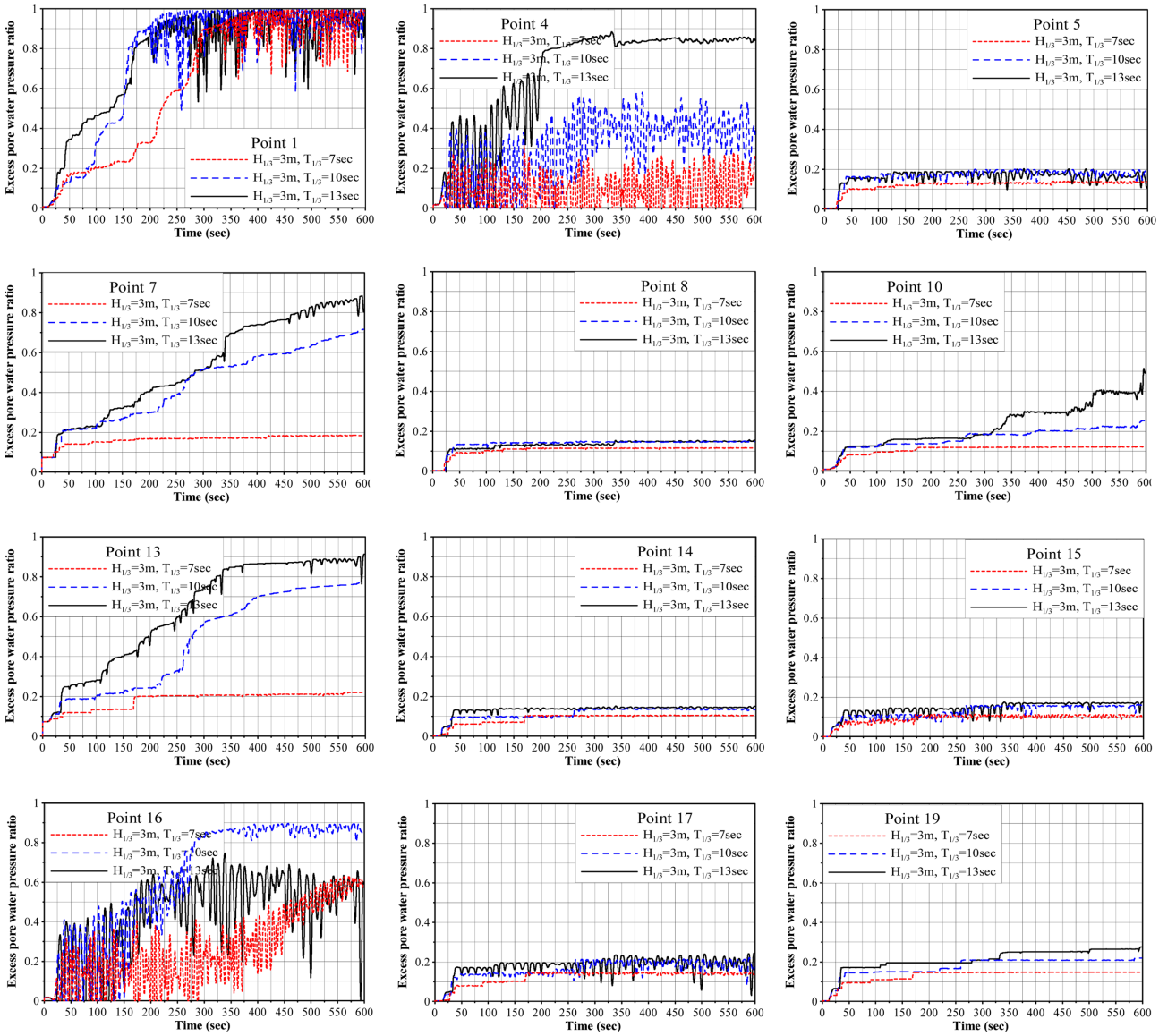


Fig. 2. Excess pore water pressure ratios according to the change of significant wave periods at the points marked in Fig. 1.

한 P. 1과 4보다 상대적으로 늦어진다. P. 8의 경우는 사석마운드부의 부가에 따른 유효상재하중의 증가 및 사석마운드부에서 진동성분의 흡수로 인하여 진동성분이 보다 줄어드는 것을 볼 수 있다.

혼성방파제의 중심부 근방에서 과잉간극수압비를 나타내는 P. 10의 경우는 초기유효응력이 가장 큰 위치이고, 사석마운드부내에서 감쇠가 크게 발생되기 때문에 동일한 수평위치를 갖는 전술한 P. 1, 4 및 7보다 작은 진동성분 및 잔류성분을 나타내며, 특히 잔류성분은 시간경과에 따라 계단상으로 증가되고, 이러한 경향은 유의주기가 길수록 명확하게 나타나므로 불규칙파동장에서 나타나는 특징으로 판단된다.

P. 13, 14 및 15의 결과는 동일한 연직면상에서 연직깊이가 다른 위치에서 나타낸 과잉간극수압비로, 본 계산조건하 동일한 연직면에서 3점 모두 과잉간극수압비가 0.1을 초과하는 유일한 케이스이다. 동일한 수평면이면서 혼성방파제를 중심으로 좌우로 대략 대칭위치에 해당하는 P. 7과 13을 비교하면 진동성분이 거의 나타나지 않고, 시간경과에 따른 잔류성분의 변화과정이 매우 유사하지만, 일정치에 도달하는 시각이 P. 13의 경우가 빠르다. 그리고, 다른 연직면에 비해 연직깊이가 깊어짐에 따른 잔류성분의 감쇠는 상대적으로 작고, P. 14와 15에서는 값의 차이도 그다지 크지 않다.

P. 16의 결과치와 동일한 수평면이면서 혼성방파제를 중심으로 좌우로 대략 대칭적인 위치에 있는 P. 4의 경우를 비교하면 P. 16에서는 $T_{1/3}$ = 10s의 경우가 시간경과에 따라 가장 큰 잔류성분을 나타내는 것이 P. 4의 경우와 크게 상이하고, 또한 각각의 변동과정도 상이하다. 이것은 케이슨의 천단상 N1과 N2 지점에서 나타나는 연직변위의 차이 및 혼성방파제 전후면에서 나타나는 파동장(전면은 중복파동장이고, 후면은 사석마운드부를 통한 작은 투과파만이 존재하는 진행파동장)의 차이에 따른 것으로 판단된다. 한편, 이러한 차이는 연직깊이가 깊은 P. 5와 17에는 크게 영향을 미치지 않으며, P. 17의 경우가 미소하지만, 약간 큰 값을 나타낸다.

혼성방파제의 후면에서 다소 이격된 P. 19에서 나타나는 과잉간극수압비를 검토하면 대략 대칭위치에 있는 P. 1의 경우보다 매우 작은 값을 나타내고, 진동성분이 거의 없는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 혼성방파제의 후면에서는 파로 인한 영향이 거의 없고, 동시에 케이슨의 변위영향도 거리가 이격되어 있기 때문으로 판단된다.

(2) 유의주기의 변화에 따른 주파수스펙트럼

다음으로, 이상의 각 지점에서 과잉간극수압비의 시간변동에 대해 액상화가 발생되어 혹은 액상화에 근접하여 상대적으로 큰 진동성분 및 잔류성분을 나타낸 P. 1, 4 및 16에서 과잉간극수압비의 주파수스펙트럼을 대표적으로 나타낸 일례가 Fig. 3에 도시되어 있다. 그림으로부터 명확하게 나타나는 현상으로 검토된 모든 유의주기에서 잔류과잉간극수압이 진동성분보다 큰 에너지를 갖는다는 것이다. 기본적으로 이러한 결과는 대응하는 Fig. 2의 위치에서 제시된 과잉간극수압비내에 잔류성분이 진동성분보다 큰 부분을 점하기 때문이다.

Fig. 3에 나타내는 3지점에서 스펙트럼의 변화양상은 다소 상이한 과정을 나타낸다. 즉, P. 1에서는 유의주기가 짧을수록, 그리고 P. 4에서는 유의주기가 길수록 더 큰 잔류성분을 나타내지만, P. 16의 경우는 중간인 유의주기 $T_{1/3}$ = 10s에서 더 큰 잔류성분을 나타낸다. 혼성방파제 전면인 중복파동장내에 위치하는 P. 1과 4에서 각각 유의주기에 따라 상이한 변화과정을 나타내는 것은 중복파의 배와 마디의 형성위치 및 전반부인 (I)에서 검토된 케이슨과 사석마운드부의 동적변위와 밀접한 연관을 갖는 것으로 판단된다. 전반부인 (I)의 결과에 의하면 케이슨 및 사석마운드부는 비월파의 경우 유의주기가 길수록 큰 변위를 나타낸다는 점과, 중복파동장에서는 일반적으로 배 근방에서는 연직수위변동이 크기 때문에 이에 해당하는 해저표면상에서 압력변동이 크고, 반면에 마디 근방에서는 연직수위변동이 작기 때문에 해저표면상에서 압력변동이 작게 된다는 점을 각각 고려하면 P. 4에서의 결과는 상대적으로 케이슨과 사석마운드부의 변위로부터 큰 영향을 받고, 케이슨에서 보다 더 이격된 P. 1의 결과는 상대적으로 중복파동장으로부터 더 큰 영향을 받는 것으로 추측된다.

한편, P. 16의 경우는 사석마운드부를 통한 입사파의 유의주기에 따른 전달율의 변화 및 케이슨과 사석마운드부의 동적변위에 의한 영향을 복합적으로 받는 것으로 판단된다. 여기서, 케이슨 하단에서 발생되는 변위의 잔류성분은 케이슨 전면에서는 사석마운드부를 위에서 아래로 미는 방향으로, 반면에 케이슨 후면에서는 위로 당기는 역방향으로 작용되는 점을 고려할 필요가 있을 것이다.

지면관계상 생략한 다른 대부분의 위치에서 과잉간극수압비의 주파수스펙트럼에 관해 유의주기의 변화에 따른 양상은

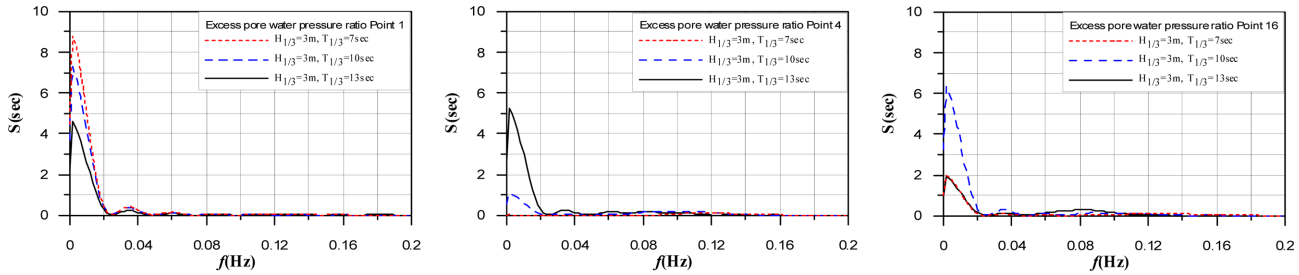


Fig. 3. Spectrum of excess pore water pressure ratios according to the change of significant wave periods at the points P. 1, 4 and 16.

P. 4의 경우와 동일하게 유의주기가 길수록 보다 큰 에너지의 잔류성분을 나타낸다는 것을 부기하여 둔다.

(3) 유의파고의 변화에 따른 시계열

동일한 유의주기 $T_{1/3}$= 10s에 대해 유의파고를 $H_{1/3}$=3, 6 m으로 변화시킨 경우에 과잉간극수압비의 시간변화를 나타낸 결과가 Fig. 4이며, $H_{1/3}$= 6 m인 경우는 케이슨 천단상으로 월파가 발생되는 케이스이다. 여기서는 유의파고의 변화에 따라 큰 차이를 나타내는 해저표층에 가까운 지점에서만의 결과를 나타내며, 전체적으로 P. 19의 결과를 제외하면 유의파고가 2배로 증가됨에 따라 진동성분의 과잉간극수압비가 매우 커지는 경향을 볼 수 있다.

먼저, P. 1에서의 결과를 살펴보면 유의파고의 증가에 따라 진동성분이 급격히 크게 변동되는 사실을 확인할 수 있고, 더불어 잔류성분의 누적도 빠른 시간에 이루어지지만, 후술하는 스펙트럼에서 알 수 있는 바와 같이 잔류성분의 크기는 유의파고가 작은 $H_{1/3}$= 3 m의 경우보다 작게 된다.

다음으로, P. 4에서 과잉간극수압비는 P. 1의 경우와 유사하게 유의파고가 큰 $H_{1/3}$= 6 m의 케이스가 매우 큰 진동성분을 나타내지만, P. 1의 결과에 비해 상대적으로 작은 잔류성분을 나타낸다. 그림에서 t = 270s 이후에 진동성분의 급격한 증폭을 나타내는 것은 불규칙파랑에서 그 시간대 이후에 고파랑이 나타나기 때문이며, 이 때부터 케이슨의 천단상으로 월파가 발생되기 시작한다. 그리고, P. 7과 10의 결과를 살펴보면 $H_{1/3}$= 6 m의 경우가 잔류성분과 진동성분 모두 훨씬 큰 값을 나타내지만, 전술한 P. 1과 4보다는 진동성분이 감쇠된 사실을 알 수 있으며, 이의 이유로 P. 7과 10의 상부에 존재하는 사석마운드부내에서 변동진폭이 흡수된 것으로 판단되고, 특히 P. 10의 경우가 7보다도 더 작은 진동성분을 나타내는 것은 사석마운드부에 케이슨이 부가되어 에너지흡수량이 더 많아지기 때문으로 인 것으로 판단된다.

한편, 혼성방파제를 중심으로 좌우로 P. 4와 1의 대략적인 대칭위치에 해당하는 P. 16과 19의 결과를 고찰한다. P. 16에서 유의파고가 커지면 진동성분이 매우 크게 나타나는 것은 P. 1과 4의 결과와 유사하지만, 대략적으로 대칭위치인 P. 4와는 달리 잔류성분이 다소 크게 나타난다. 이러한 사실은 후

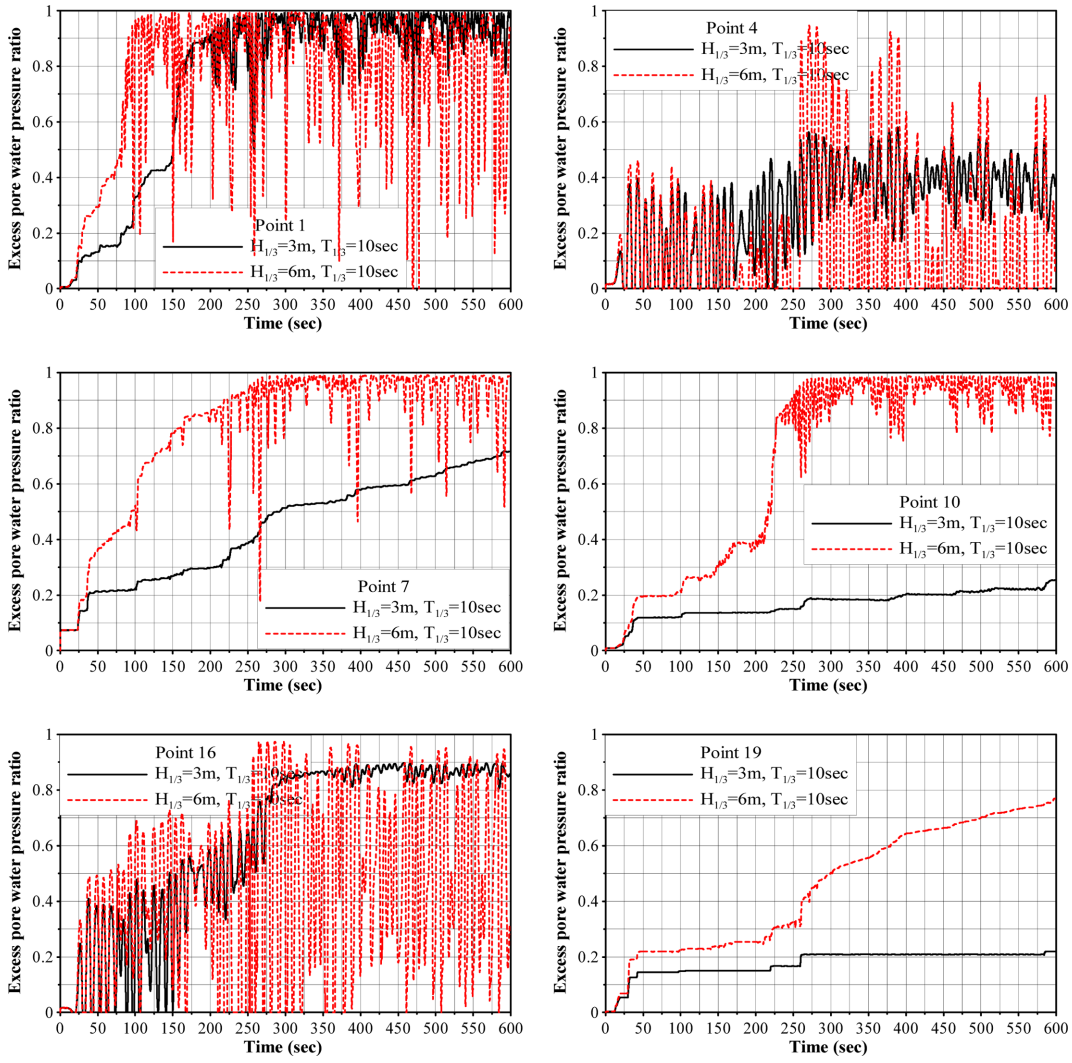


Fig. 4. Excess pore water pressure ratios according to the change of significant wave heights at the points marked in Fig. 1.

술하는 스펙트럼의 결과에서 확인될 수 있다. 마지막으로, P. 19는 제시된 결과 중에 진동성분이 제일 작게 나타나는 경우로, 역시 이러한 결과는 2.1.1(2)에서 기술한 바와 같이 혼성방파제 후면에 위치하기 때문에 파동 영향이 작기 때문이다. 하지만, 잔류성분은 유의파고가 커지면 증대되고, 점차적인 누적현상을 나타낸다.

(4) 유의파고의 변화에 따른 주파수스펙트럼

Fig. 4에 제시된 각 위치에서 과잉간극수압비에 대한 주파수스펙트럼의 결과가 Fig. 5에 제시되어 있다. 전술된 바로 유의파고의 증가에 따른 진동성분의 증가에 의해 유의주파수대에서 스펙트럼의 에너지가 상대적으로 크게 발생하는 것이 전반적인 경향으로 판단되고, 특히 P. 16에서 이러한 경향이 명확하게 주어진다. 그리고, 유의파고가 2배 증가되었지만, 잔류성분의 경우 구조물의 전면 및 후면에서는 오히려 감소되는 반면, 케이슨 및 사석마운드부의 하부에서는 증가하는 결과를 나타낸다. 하지만, 진동성분은 유의주파수대에서 대체적으로 증가하는 특징을 나타낸다.

2.1.2 전단응력을 고려한 경우

(1) 유의주기의 변화에 따른 시계열

식(1)에 제시된 전단응력을 해저표면상에 부가하여 과잉간극수압비의 시간변화를 산정한 결과가 Fig. 6에 도시되어 있다. 그림에서는 대표적으로 P. 1과 4의 결과가 제시되어 있지만, 전단응력의 고려유무에 관계없이 유사한 분포형상과 값을 나타내는 경우를 제외시켜 나타낸 것이다. 하여튼, P. 1과 4의 위치는 구조물의 전면인 중복파동장내에 위치하므로 수평유속이 크게 나타나게 되고, 따라서 전단응력의 영향이 크게 나타날 것이라는 것은 쉽게 예상될 수 있는 부분이다. 이러한 관계가 Fig. 6과 7에서 명확하게 주어지는 것을 알 수 있다. P. 1의 Fig. 6에서 전단응력을 고려한 경우에 진동성분은 유의주기가 길수록 다소 커지지만, 잔류성분은 반대의 경향을 나타낸다. 더욱이, 잔류성분은 유의주기가 짧을수록 일정치에 도달하는 시간대가 느리고, 동일한 입사파랑조건하에서 과잉간극수압비의 응답은 전단응력을 고려한 경우가 빨리 나타나는 특징을 나타낸다. 그리고, 초기시간대에서는 잔류성분이, 그리고 일정시간 이후에는 진동성분이 발달하는 과잉

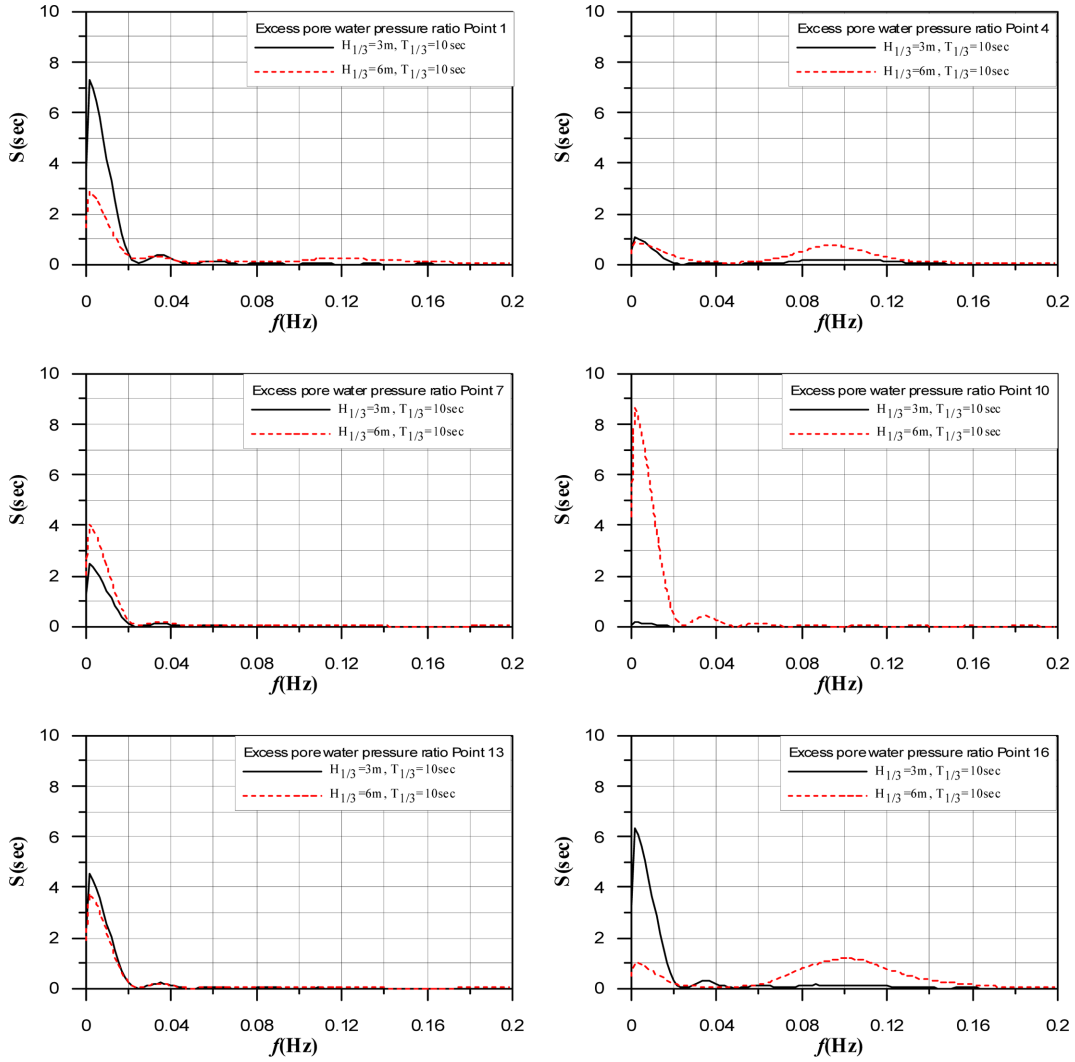


Fig. 5. Spectrum of excess pore water pressure ratios according to the change of significant wave heights at the points marked in Fig. 1.

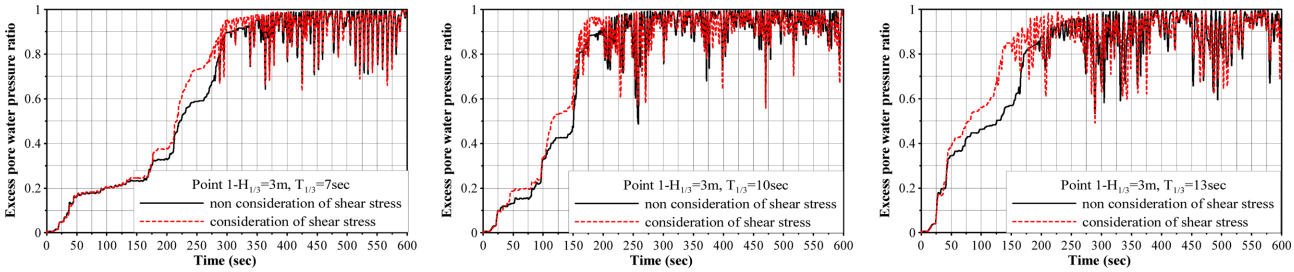


Fig. 6. Comparison of excess pore water pressure ratios due to consideration of shear stress or not at the point P. 1 in Fig. 1.

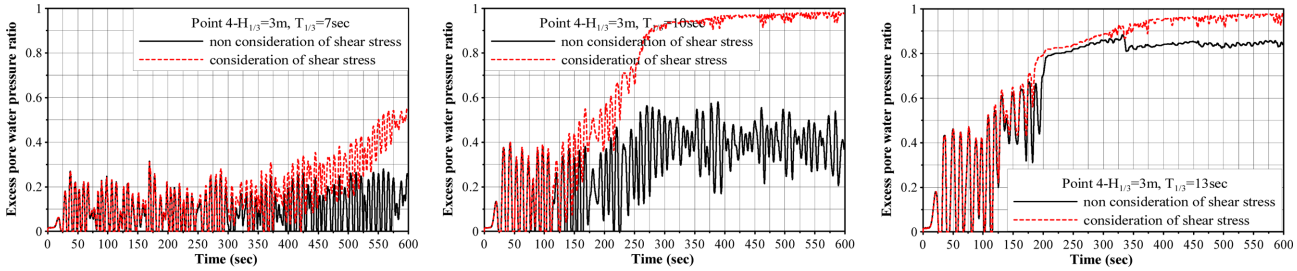


Fig. 7. Comparison of excess pore water pressure ratios by consideration of shear stress or not at the point P. 4 in Fig. 1.

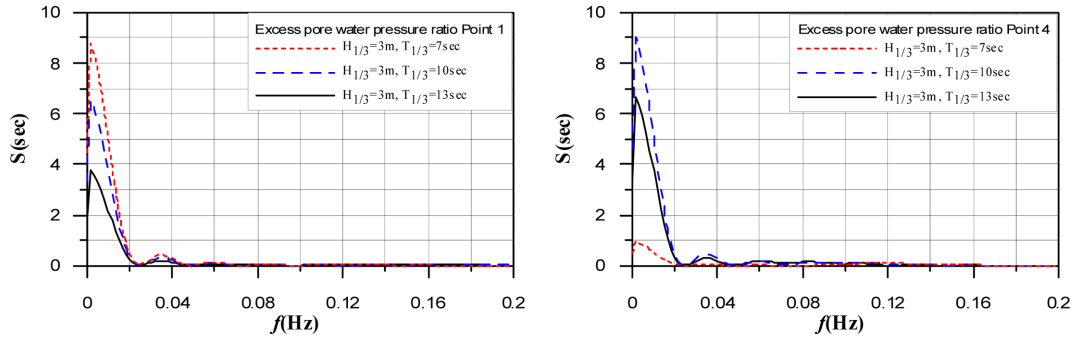


Fig. 8. Spectrum of excess pore water pressure ratios according to the change of significant wave periods at the points P. 1 and 4.

간극수압의 변동과정을 나타낸다.

다음의 Fig. 7에서는 Fig. 6의 경우와는 역으로 초기시간대에 진동성분이 발달하고, 일정시간 이후에 잔류성분이 점차적으로 발달하면서 누적되는 현상을 나타내며, 이러한 경향은 유의주기가 길수록 현저하다. 시간경과에 따른 이러한 차이는 P. 4가 사석마운드부내에서 진동성분이 흡수되는 영향을 P. 1의 경우보다 거리관계상 더 직접적인 영향을 받기 때문으로 판단된다. 하여튼, 전단응력을 고려한 차이는 초기시간대에서는 진동 및 잔류성분 모두에 거의 나타나지 않는 반면, 시간이 다소 경과된 이후 전단응력의 고려가 진동성분을 다소 작게, 그리고 잔류성분을 크게 하는 결과를 초래하는 것으로 된다.

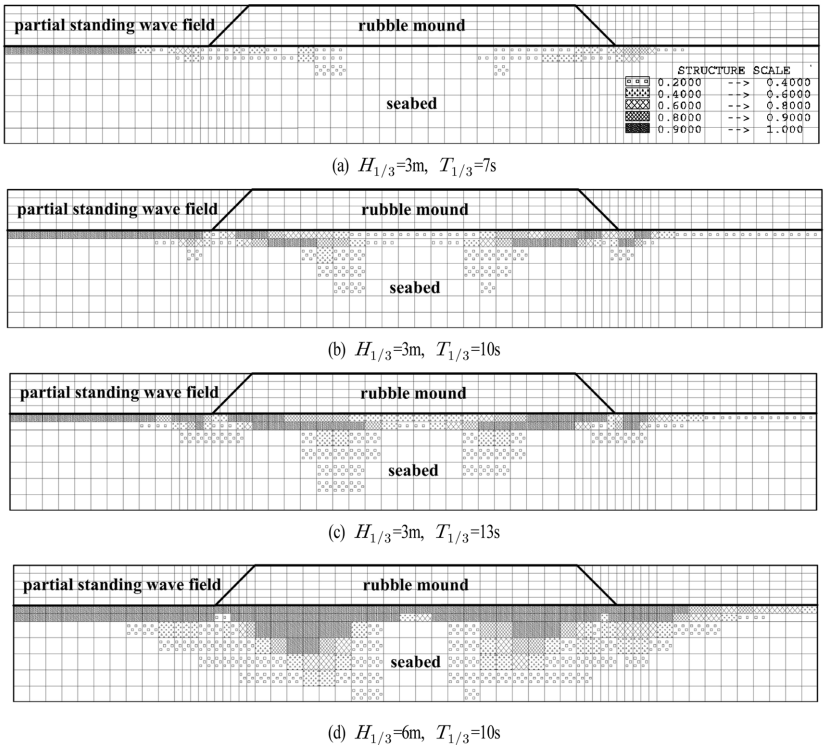
(2) 유의주기의 변화에 따른 주파수스펙트럼

Fig. 8은 Fig. 7에 제시된 과잉간극수압비의 시계열을 주파수스펙트럼으로 나타낸 것으로, P. 1과 4에서의 결과를 대표적으로 도시하고 있다. 그림으로부터 P. 1의 경우 유의주기가 길어질수록 잔류성분의 에너지가 감소하고, P. 4에서는 $T_{1/3}$ = 10, 13, 7s의 순서로 잔류성분의 에너지가 감소하는 결과를 나타내므로 전술한 Fig. 7에서 시간변동에 따른 과잉간극수압비의 변화특성이 충분히 반영되어 있다는 사실을 알 수 있다.

2.2. 과잉간극수압비의 최종공간분포

2.2.1 전단응력을 고려하지 않은 경우

다음의 Fig. 9에 나타내는 결과는 본 수치시뮬레이션의 최종단계에서 얻어진 과잉간극수압비의 공간분포를 나타낸 것으로, 해저표층면상에 전단응력을 적용하지 않았을 때의 결과이다. 액상화 혹은 거의 액상화 상태에 도달한 과잉간극수압비 0.9-1.0의 값을 나타내는 영역을 살펴보면 $T_{1/3}$ = 7s의 경우 사석마운드부 전면의 비탈면에서 조금 이격된 수평위치에서 깊이 1 m의 해저까지 발생하지만, $T_{1/3}$ = 10s의 경우 그의 영역이 수평으로 확대되고, 동시에 사석마운드부하 깊이 2 m의 해저 및 후면의 비탈면 근방에서도 깊이 2 m까지 액상화 영역이 확대 및 심화되는 결과를 나타낸다. $T_{1/3}$ = 13s의 경우는 $T_{1/3}$ = 10s의 경우보다 사석마운드부의 중앙으로 보다 확대되고, 월파가 발생되는 $H_{1/3}$ = 6 m, $T_{1/3}$ = 10s에서는 사석마운



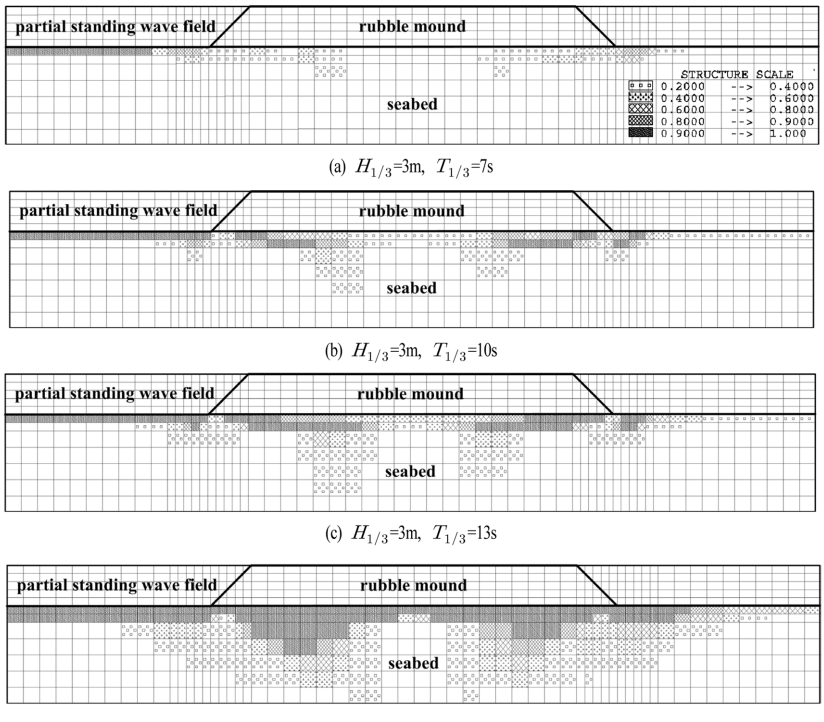
(a) $H_{1/3}$=3m, $T_{1/3}$=7s

(b) $H_{1/3}$=3m, $T_{1/3}$=10s

(c) $H_{1/3}$=3m, $T_{1/3}$=13s

(d) $H_{1/3}$=6m, $T_{1/3}$=10s

Fig. 9. Final spatial distribution of excess pore water pressure ratios for the case of non-consideration of shear stress on seabed.



(a) $H_{1/3}$=3m, $T_{1/3}$=7s

(b) $H_{1/3}$=3m, $T_{1/3}$=10s

(c) $H_{1/3}$=3m, $T_{1/3}$=13s

(d) $H_{1/3}$=6m, $T_{1/3}$=10s

Fig. 10. Final spatial distribution of excess pore water pressure ratios for the case of consideration of shear stress on seabed.

드부하 일부 영역에서는 깊이 6 m까지 액상화의 심도가 깊어지는 결과를 볼 수 있다.

따라서, 유의주기가 길수록, 그리고 유의파고가 클수록 액상화에 가까워지는 영역의 범위가 넓어지고, 또한 심도가 깊어지는 것으로 판명된다. 특히, 케이슨 전면의 사석마운드부하, 다음으로 케이슨 후면의 사석마운드부하의 해저지반내에서 액상화 혹은 액상화에 근접한 영역의 심도가 깊기 때문에 액상화로 인한 파괴가능성이 높아지며, 이의 원인으로 전반부인 (I)에 나타낸 바와 같이 케이슨 전면과 후면하 사석마운드부에서 변형이 매우 크게 발생되는 것과 밀접한 연관을 가지는 것으로 판단된다.

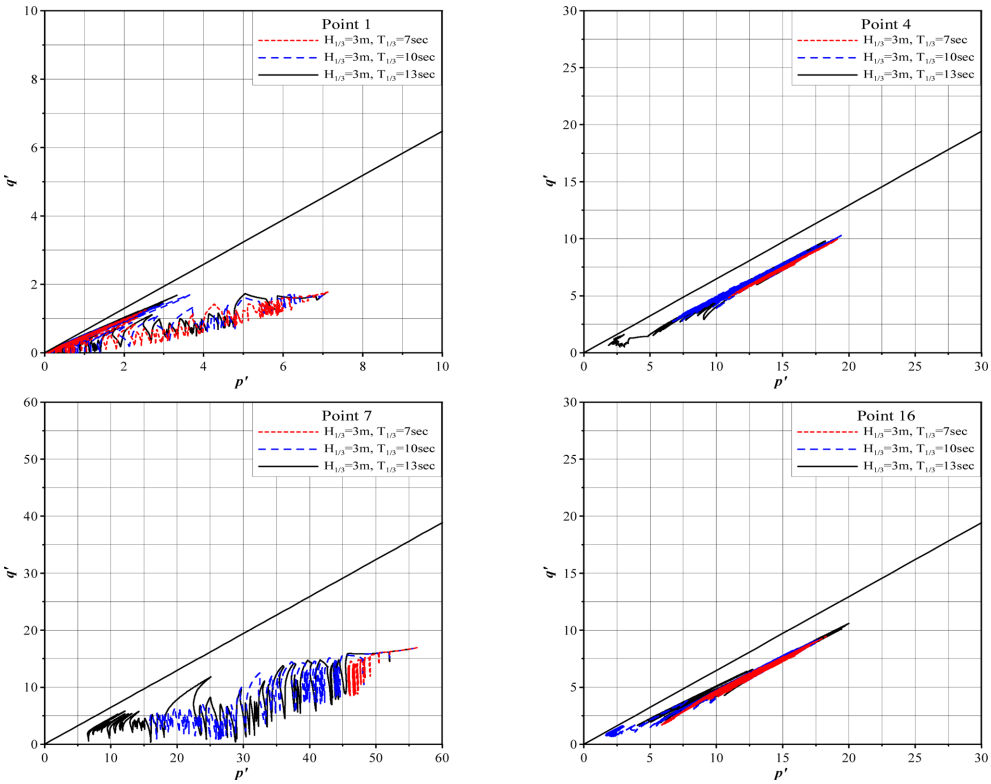


Fig. 11. Effective stress path for the case of non-consideration of shear stress at the points marked in Fig. 1.

2.2.2 전단응력을 고려한 경우

Fig. 10은 Fig. 9의 경우와 동일하지만, 해저표층면상에 전단응력을 적용하였을 때의 결과를 제시하고 있다. 전단응력의 고려유무에 따른 결과의 차이는 미미하게 주어진다. 해저표층에 가까운 지반내에서는 과잉간극수압비가 약간 증가하는 경향을 나타내지만, 해저표층에서 심도가 깊을수록 전단응력의 적용여부에 따른 차이는 거의 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.

2.3 유효응력경로

전단응력을 적용하지 않은 경우에 대해 대표적으로 4위치에서 유효응력의 시간변동을 일례로 나타낸 것이 다음의 Fig. 11이다. 그림에서는 중간주응력 효과를 무시한 평면변형률조건에서 많이 이용하는 $p' = (\sigma'_x + \sigma'_z)/2$ 와 $q' = \sqrt{\tau_{xz}^2 + (\sigma'_z - \sigma'_x)/2}$ 를 사용하여 나타내었으며, 그리고 그림에서 직선은 Mohr-Coulomb의 파괴선을 나타낸다. 따라서, 유효응력이 거의 0까지 감소하고, Mohr-Coulomb의 파괴선에 거의 근접하는 경우는 액상화가 발생된 상태로 판정된다.

그림을 살펴보면 P. 1, 16, 4 및 7의 순으로 Mohr-Coulomb의 파괴선에 가까워지는 결과를 나타내며, P. 1의 경우는 제시된 모든 유의주기에 대해 액상화를 나타내고, P. 4와 7의 경우 $T_{1/3}$ = 13s가 Mohr-Coulomb의 파괴선에 가깝지만, 아직 액상화에는 도달되지 않은 상태를 나타내며, q' 축으로 변화가 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. P. 16의 경우 $T_{1/3}$ = 10s가 Mohr-Coulomb의 파괴선에 가깝지만, 역시 액상화에는 도달되지 않은 상태를 각각 나타낸다. 따라서, 지반내 임의위치에서 액상화의 여부 및 정도를 이러한 유효응력경로로부터 용이하게 판단할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 규칙파랑을 대상으로 혼성방파제의 지반변형과 과잉간극수압변동 등을 포함한 동적해석에서 기수행된 2D-NIT모델 및 FLIP모델의 검증결과를 근거(Lee et al., 2014)로, 불규칙파동장하 해저지반-혼성방파제의 상호작용에 의한 지반과 구조물의 동적응답에 관한 수치시뮬레이션을 수행하였다. 수치계산에서는 규칙파동장에서와 동일하게 2D-NIT모델로부터 일정수심의 불규칙파랑작용하에 해저면상에서 동파압, 그리고 저면유속으로부터 전단응력을 산정하고, 이를 탄소성지반의 다중전단메커니즘에 관한 유효응력해석을 기반으로 유한요소해석법을 적용하는 FLIP모델에 입력치로 적용하였다. 이로부터 후반부 (II)에서는 지반내에서 과잉간극수압비의 시간변동, 그의 주파수스펙트럼, 액상화, 과잉간극수압비의 최종공간분포 및 유효응력경로를 전단응력의 고려유무에 따라 그의 변동특성을 검토하였다. 이로부터 얻어진 중요한 사항을 다음에 요약하여 기술한다.

(1) 혼성방파제 사석마운드부의 주변을 중심으로 해저지반내 선별된 21개 지점에서 지반액상화의 정도를 파악할 수 있는 과잉간극수압비의 시간변동 및 주파수스펙트럼의 분석하

였다. 이로부터 상부 케이슨이나 사석마운드부의 영향을 많이 받는 지반내에서는 진동과잉간극수압이 잔류성분에 비해 매우 작은 반면, 중복파동장 혹은 사석마운드부의 변형으로부터 큰 영향을 받는 지반내에서는 상대적으로 진동성분이 매우 크게 발생한다. 잔류성분은 지반깊이가 깊을수록 작아지는 특징을 보이며, 유의주기가 길수록 잔류성분이 커지는 것이 일반적인 경향이지만, 경우에 따라 역의 경향을 나타내는 경우도 있다. 이것은 파동장의 변화 및 케이슨과 사석마운드부의 변위와 변형과도 밀접한 연관성을 갖는 것으로 판단된다.

(2) (1)에서 유의파고가 증가할수록, 특히 월파가 발생되는 경우는 진동성분의 과잉간극수압비가 크게 발달되지만, 잔류성분은 일정한 경향을 나타내지 않는다. 이 또한 파동장의 변화 및 케이슨과 사석마운드부의 변위와 변형과도 밀접한 연관성을 갖는 것으로 판단된다.

(3) (1)과 (2)에서 전단응력의 고려유무에 따라 초기시간대에서는 진동 및 잔류성분 모두 거의 차이를 나타내지 않지만, 지반내 위치에 따라 전단응력을 고려한 경우가 다소의 시간이 경과 된 후 진동성분이 작아지고, 잔류성분이 크게 되는 결과를 나타내는 경우도 있다.

(4) 과잉간극수압비의 최종공간분포로부터 유의주기가 길수록, 그리고 유의파고가 클수록 액상화 혹은 액상 근접영역이 넓어지고, 동시에 심도가 깊어지는 결과를 나타내며, 케이슨 전후면 사석마운드부하의 지반영역에서 액상화에 의한 파괴가 발생될 가능성이 가장 높다.

이상에서 논의된 2D-NIT모델과 FLIP모델에 의한 본 논문의 타당성은 기존의 수리실험과 해석결과와의 비교 및 규칙파에 대한 선행연구로부터 검증되었지만, 향후 수리모형실험을 수행하여 보다 심층적으로 불규칙파랑에 의한 2D-NIT모델과 FLIP모델에 의한 결과의 타당성을 검토하고자 한다.

감사의 글

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

References

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.

Lee, K.W., Baek, D.J., Kim, D.S., Kim, T.H. and Bae, K.S.(2013). Numerical simulation on seabed-structure dynamic responses due to the interaction between waves, seabed and coastal structure, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 26(1), 49-64.

Lee, K.W., 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 Engineers, 25(3), 128-137.

Yeh, H. and Mason, H.B. (2014). Sediment response to tsunami loading : mechanisms and estimates, Geotechnique, 64(2), 131-143.

Schlichting, H. (1979). Boundary-layer theory, 7th Edition New York, NY, McGraw Hill.

원고접수일: 2014년 4월 14일
수정본채택: 2014년 6월 10일
게재확정일: 2014년 6월 27일