

경사식 방파제의 간극수압 결정을 위한 수치해석 Numerical Analysis on the Determination of Pore Pressures inside Rubble Mound Breakwater

전인식* · 박현주** · 이달수***
Insik Chun*, Hyunjoo Park**, and Dalsoo Lee***

要 旨 : 경사식 방파제의 파동장 및 간극수압을 결정하기 위한 기존의 수치모델(박 등, 2002)을 개선하여 간극수압의 예측성을 제고하기 위한 수치해석기법을 수립하였다. 내부 간극수압이 수치적 재현이 매우 어려운 전사면(前斜面) 비선형 파동장에 크게 의존함을 고려하여 본 수치해석에서는 수리실험을 통하여 前斜面 파압정보(진폭과 위상)를 도출, 수치해석에 입력하였다. 경계요소법을 이용하여 내부 파동장을 해석한 다음, 내부의 간극수압을 결정하였다. 기존의 계측결과와 비교한 결과, 계산치와 계측치의 일치 정도가 현저히 개선된 것으로 나타났다.

핵심용어 : 경사식 방파제, 파압, 간극수압, 전사면 파동장, 경계요소법

Abstract □ An existing numerical model for determining the wave field and pore pressures inside rubble mound breakwater was reformulated here especially to enhance the predictability of interior pore pressures. The pore pressures strongly depend on the nonlinear wave field occurring along frontal slope which is very difficult to be numerically reproduced. In the present study, hence, the amplitude and phase informations of wave pressures along the frontal slope are obtained directly through a hydraulic model test and are incorporated into the numerical model. The interior wave field is analyzed by a boundary element method, and thereby the pore pressures are determined. It was found that the calculated pore pressures agreed quite well with experimental values.

Keywords : rubble mound breakwater, wave pressure, waves on frontal slope, pore pressure, boundary element method

1. 서 론

경사식 방파제의 설계요소는 제체 내·외의 파동장에 의한 피복석의 안정성, 반사율, 전달율, 처오름 등의 수리역학적 요소와 그리고 제체의 활동 및 지반 지지력에 관련된 토질역학적 요소로 구성되며, 이들은 상호 밀접한 관련이 있으므로 경사식 방파제의 정확한 설계를 위해서는 수리역학적 측면과 토질역학적 측면이 상호 유기적인 관점에서 잘 파악되어야 한다.

기존의 경사식 방파제 관련 연구들을 보면, 수리역학적

요소는 실험과 이론적 연구에 의하여 그 예측기법이 꾸준히 발전되어 온 반면, 토질역학적 요소는 아직도 합리적 예측기법이 매우 미흡한 실정이다. 이에 대한 원인은 경사식 방파제의 파동장에 대한 연구가 주로 외부에 치우쳐 있었으며 내부 파동장에 대한 체계적 연구가 결여되었기 때문이다. 경사식 방파제 내 외부 파동장을 연계하여 방파제의 성능 및 안정성을 예측하고자 했던 시도는 Madsen and White(1976)의 연구가 최초이며 Hannoura and McCorquodale(1986), Hölischer and Barends(1990), Wurjanto and Kobayashi(1994), 그리고 van Gent(1995) 등이 그

*건국대학교 토목공학과(Department of Civil Engineering, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Kwangjin-ku, Seoul 143-701, Korea. ischun@konkuk.ac.kr)

**신구대학교 토목과(Department of Civil Engineering, Shingu College)

***한국해양연구원 연안·항만공학연구본부(Coastal and Harbor Engineering Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute)

뒤를 잇고 있다. 그러나, 이들 연구들은 입사파 조건 및 경사면에서의 쇄파발생 여부에 따른 일부 제한된 조건에서 사용이 가능하며 더욱이 사용된 수치해석적 기법들이 복잡하여 실무에 적용하기는 매우 어려운 실정이다.

박 등(2002)은 실무에서의 간편한 적용을 목적으로 방파제 내·외부 파동장을 해석하기 위한 수치모델을 수립한 다음, 수리학적 요소와 간극수압을 계산하여 수리모형 실험 결과와의 비교를 통한 검증은 시도하였다. 수리학적 요소의 예측성은 비교적 양호하나 간극수압은 계산치와 실험치의 차이가 상당 정도 발생하였다. 이는 방파제 前斜面에서의 비선형 파압분포를 효과적으로 재현하지 못하는 선형파 수치모델의 한계로 인한 것이다. 그러나, 전사면에서는 쇄파를 비롯한 비선형성이 매우 강한 파동장이 형성되며 현재로서는 전사면 파동장을 정확히 해석할 수 있는 이론적인 해석기법이 확립되어 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 수리모형실험에서 전사면 파압을 계측하여 제체내부의 파동장 해석에 입력하는 방법을 시도하였다. 이와 같은 방법은 이미 Hannoura and McCorquodale(1986)이 시도한 바 있으며, 그 이후 Barends, *et al.*(1996)의 수치해석기법에 사용되기도 하였다.

2. 제체 내부의 파동장 해석

방파제 제체 내부의 파동장을 해석하기 위하여 경계요소법을 적용하기로 한다. 박 등(2002)에서는 방파제 내부뿐만 아니라 방파제의 전후에도 영역을 설정하여 경계요소법을 적용하였으며 영역간 경계조건의 접속을 통하여 반사파와 투과파를 해석하였으나 여기에서는 제체내부의 간극수압의 결정을 위하여 제체내부에만 경계요소법을 적용한다. 전사면 경계조건은 수리모형실험에 의하여 제공되는 파압정보를 이용하여 설정한다.

2.1 유체영역의 설정

Fig. 1에서와 같이 유체영역은 경사식 방파제 제체 내부(ABB'A')에 설정된다. 여기에서, 경계면 AB는 전사면 피복석의 두께를 제외한 내부 쇄석면으로 한다. 각 영역

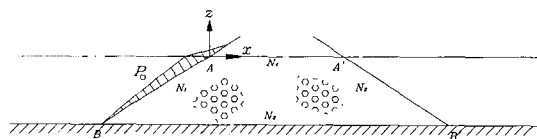


Fig. 1. Fluid domain.

의 경계들에서 기호 N_i 는 i 번째 경계의 절점 수를 나타낸다. 절점의 번호부여는 반시계방향으로 취한다. 본 경계요소법의 영역에서 좌표계 (x, z) 의 원점은 전사면과 정지수면의 교점, 즉 A점에 설정한다. 그림에서 P_0 는 전사면에서의 파압분포를 의미한다.

2.2 경사제 외부파동장

유체흐름이 비압축성, 비점성, 비회전성이라고 가정하면 경사제 외부에서의 속도포텐셜 ϕ_0 는 다음의 Laplace 방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial^2 \phi_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_0}{\partial z^2} = 0 \tag{1}$$

속도포텐셜 $\phi_0(x, z, t)$ 를 간략화된 포텐셜 (reduced potential), $\phi_0(x, z)$ 를 이용하여

$$\Phi_0(x, z, t) = -\frac{ig\zeta_0}{\sigma} \phi_0(x, z) e^{-i\sigma t} \tag{2}$$

와 같이 나타내면, 동수압 P_0 는 다음과 같다.

$$P_0 = -\rho \frac{\partial \Phi_0}{\partial t} = \rho g \zeta_0 \phi_0(x, z) e^{-i\sigma t} \tag{3}$$

여기서, g =중력가속도, ζ_0 =입사파의 진폭, σ =입사파의 각주파수, $i = \sqrt{-1}$ 이다.

2.3 경사제 내부파동장

영역내의 흐름을 비압축, 비점성, 비회전성이라고 가정하면 제체 내부에서의 속도포텐셜 Φ 를 간략화된 포텐셜 (reduced potential) ϕ 를 이용하여

$$\Phi = -\frac{ig\zeta_0}{\sigma} \phi e^{-i\sigma t} \tag{4}$$

와 같이 나타내면 다음과 같은 ϕ 에 대한 Laplace 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \tag{5}$$

제체 내부에 형성되는 동수압 P_0 는

$$\frac{P_0}{\rho} = g C_2 \zeta_0 \phi e^{-i\sigma t} \tag{6}$$

와 같다. 여기서, $C_1 = C_m + iC_f/\sigma$, $C_2 = C_1/n$, C_m =관성력

계수, n =공극률이다. C_f =선형화된 마찰계수이다.

C_f 는 난류역에서의 비선형 마찰력에 대한 Forchheimer 식(McWhorter and Sunada, 1977)을 이용하여 나타내면

$$C_f \mu = n(\alpha u + \beta |u|u) \quad (7)$$

와 같다. 여기서, α , β 는 공극내 흐름특성을 반영하는 실험상수이다. 식 (7)에서 C_f 는 Lorentz 적분(Sollitt and Cross, 1972; Sulisz, 1985)을 통한 u 의 반복계산을 통하여 구할 수 있으며 그 세부절차는 한국해양연구원(2001)에 제시되어 있다.

한편, 체제 내부의 자유수면 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = C_1 \frac{\sigma^2}{g} \phi \quad (8)$$

2.4 경계조건

경계 AB 에서의 경계조건을 정하기 위하여 수리모형실험에서 계측한 전사면 파압정보를 이용한다. 먼저, 전사면에 위치한 각 계측점에서의 계측시그널들을 분석하여 이들 시그널들의 진폭과 위상을 결정한다. 이들 값들을 경계요소법에서 설정한 전사면 절점의 각 위치에서의 값들로 전환하면 j 번째 절점에서의 복소압력 p_j^o 를 다음과 같이 조합할 수 있다.

$$p_j^o = A_j e^{i\beta_j} \quad (9)$$

여기서, A_j 와 β_j 는 각각 절점 j 에서의 파압의 진폭과 위상을 의미한다. 전사면 파압의 실 계측시그널은

$$p_j^o = (p_j^o e^{-i\sigma t}) \quad (10)$$

의 실수부분이 된다. 식 (6)과 식 (10)을 비교하면, p_j^o 에 상응하는 속도포텐셜 ϕ_j^o 는

$$\phi_j^o = \frac{p_j^o}{\rho g \zeta_o} \quad (11)$$

이 됨을 알 수 있다.

내부파동장 전사면에서 압력의 연속성을 고려하면 식 (3)과 식 (10)에서

$$\phi_j = \frac{\phi_j^o}{C_2} \quad (12)$$

임을 알 수 있다.

박 등(2002)의 실험결과에서 방파제 내부의 간극수압은 후사면 ($B'A$)에 근접할수록 감소하였으며 후사면에서는 거

의 동수압이 계측되지 않았다. 따라서, 후사면에서의 절점 j 에서의 압력조건을 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$\phi_j = 0 \quad (13)$$

자유수면($A'A$) 경계조건과 바닥(BB') 경계조건은 각각 다음과 같다.

$$\bar{\phi}_j = C_1 \frac{\sigma^2}{g} \phi_j; A'A \quad (14)$$

$$\bar{\phi}_j = 0; BB' \quad (15)$$

여기서, $\bar{\phi}_j$ 는 ϕ_j 의 외향 법선 미분치이다.

2.5 경계적분방정식의 구성

식 (5)에 대하여 Green의 2차공식을 적용하면 식 (16)과 같다.

$$\frac{1}{2\pi} \alpha_j \phi_j = \sum_{j=1}^{N_T} G_{ij} \bar{\phi}_j - \sum_{j=1}^{N_T} H_{ij} \phi_j \quad (16)$$

여기서, i =고정점, j =유동점, $\alpha_j = j$ 절점에서의 내각(일정요소 경계요소에서는 π 와 같다), G_{ij} =Green 함수, H_{ij} =Green 함수의 외향법선미분치, N_T =영역 경계면에서의 총 절점수이다. 식 (16)에 제 2.4의 경계조건들을 적용하여 풀면 모든 경계에서의 ϕ 또는 $\bar{\phi}$ 를 구할 수 있다.

2.6 간극수압의 결정

방파제 내부 임의점 q 에서의 간극수압을 결정하기 위해서는 먼저 q 점에서의 속도포텐셜 ϕ_q 를 구해야 하며 이는 영역 경계면에 위치한 경계요소 절점에서의 ϕ 와 $\bar{\phi}$ 를 이용하여 다음과 같이 결정된다.

$$\phi_q = \sum_{j=1}^{N_T} G_{qj} \bar{\phi}_j - \sum_{j=1}^{N_T} H_{qj} \phi_j \quad (17)$$

복소간극수압은 식 (6)에 근거하여

$$P_q = \rho g C_2 \zeta_o \phi_q e^{-i\sigma t} \quad (18)$$

과 같이 구할 수 있으며 발생간극수압은 이의 실수부분에 해당된다.

3. 수리실험

수치해석기법의 적용성을 검증하기 위하여 수리실험을 수행하였다. 실험은 방파제 전사면에서의 파압을 계측하

4. 결과분석 및 토의

4.1 실험결과

정수면으로 부터의 사면 거리 X_s (Fig. 2)에 따른 파압의 진폭과 위상의 변화를 Fig. 3~Fig. 6에 도시하였다. 여기서, 위상은 방파제 전지부(toe)에서의 파압시그널을 기준으로 한 것이다. 그림들을 볼 때, 전사면을 따라 파압의 진폭과 위상이 공히 크게 변함을 알 수 있다. 특히, 전사면 파랑의 비선형 변형에 의하여 진폭이 반드시 정수면에서 가장 크게 나타나는 것이 아님을 알 수 있다.

4.2 수치해석결과의 검증

수치해석은 수리실험과 동일한 조건에 대하여 수행하였으며, Fig. 3~Fig. 6의 전사면 파압자료를 입력하여 수행하였다. Table 2는 수치해석에 이용된 파라미터들의 값을 보여준다. 파라미터 값들은 일반적인 값들로서 본 연구에서는 수치해석 결과와 수리실험 결과의 정량적 일치 를 기도하기 위한 파라미터 값들의 조정은 일체 시도되지 않았다. 공극내 흐름특성을 반영하는 식 (7)에서의 계

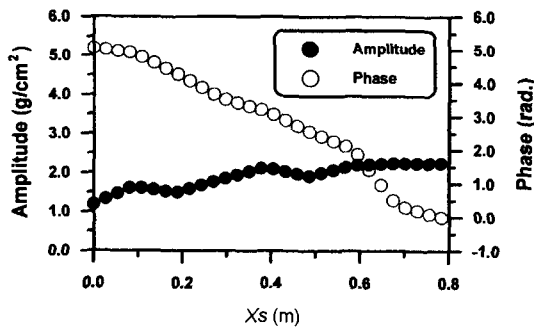


Fig. 3. Variations of the amplitude and phase of wave pressure along the frontal slope (Test 1).

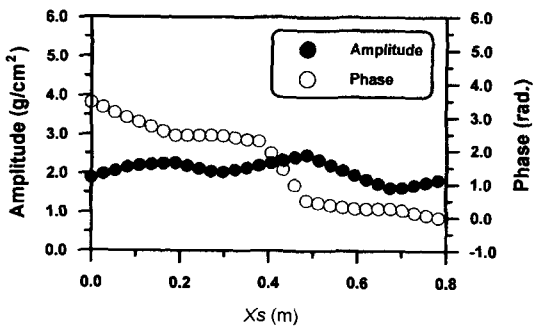


Fig. 4. Variations of the amplitude and phase of wave pressure along the frontal slope (Test 2).

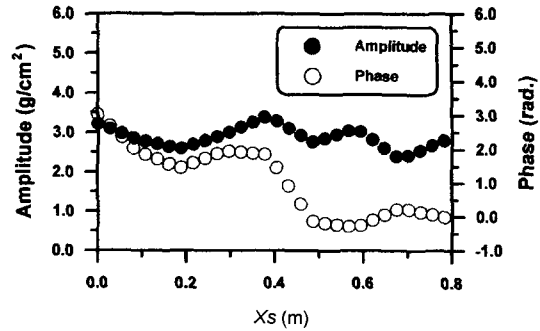


Fig. 5. Variations of the amplitude and phase of wave pressure along the frontal slope (Test 3).

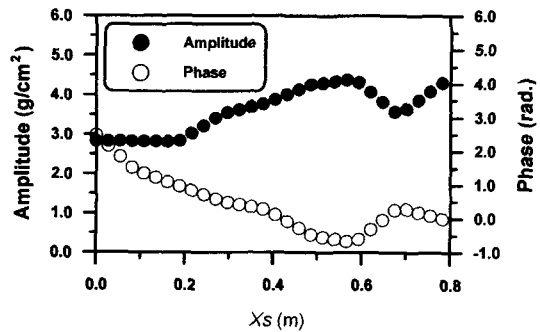


Fig. 6. Variations of the amplitude and phase of wave pressure along the frontal slope (Test 4).

Table 2. Input parameters of numerical analysis

사 양	기 호	제 원
경계면에서의 요소 수	N_1-N_4	각 20개
영역내 공극률	n	0.498
공극매체의 부가질량계수	C_a	0
Engelund (1953)의 파라미터	α	1000
	β	2.5
Lorentz 적분을 위한 제체의 분할수		50 개

수 α, β 는 Engelund(1953)의 식을 이용하였다.

수치해석에 의하여 간극수압고 P_H (수압변화 진폭의 2 배)를 계산하여 2000년도 실험에서 획득한 실험결과와 함께 Fig. 7~Fig. 9에 도시하였다(한국해양연구원, 2001). 전반적으로 계산치와 실험치의 일치정도가 2000년도의 결과보다 월등 향상되었다. 그러나, 정수면 근방에 위치한 Level 1에서는 모든 실험조건에서 계산치가 실험치를 크게 상회함을 알 수 있다. 이는 수면의 위치를 정수면으로 대 치하는 선형파 이론의 한계로 인하여 정수면 부근에서의 이론치가 다소 과장되어 나타났기 때문인 것으로 판단된다.

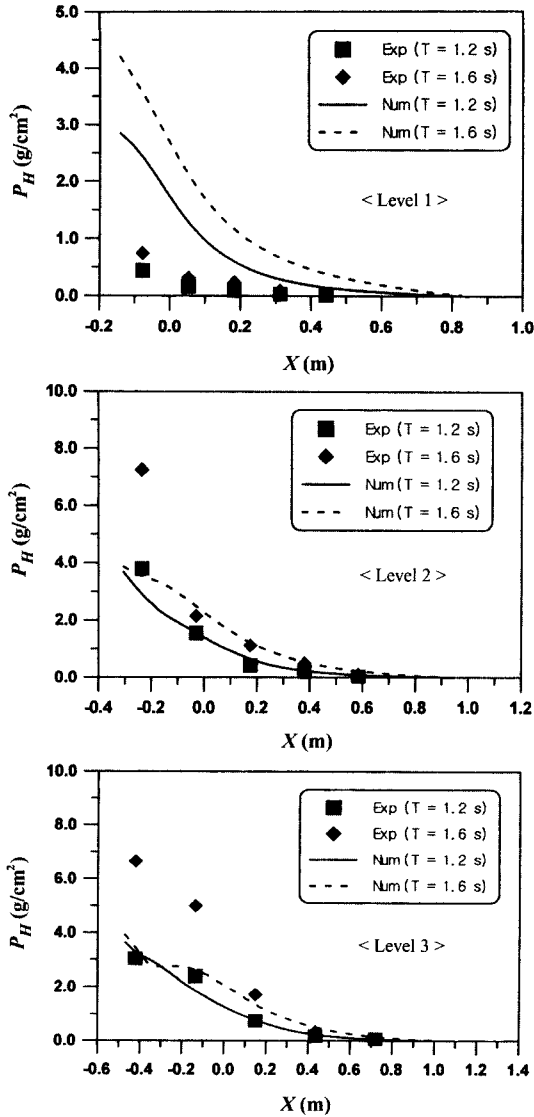


Fig. 7. Variation of wave pressure height along the level 1, 2 and 3 ($H=0.08$ m, $T=1.2$ s, 1.6 s).

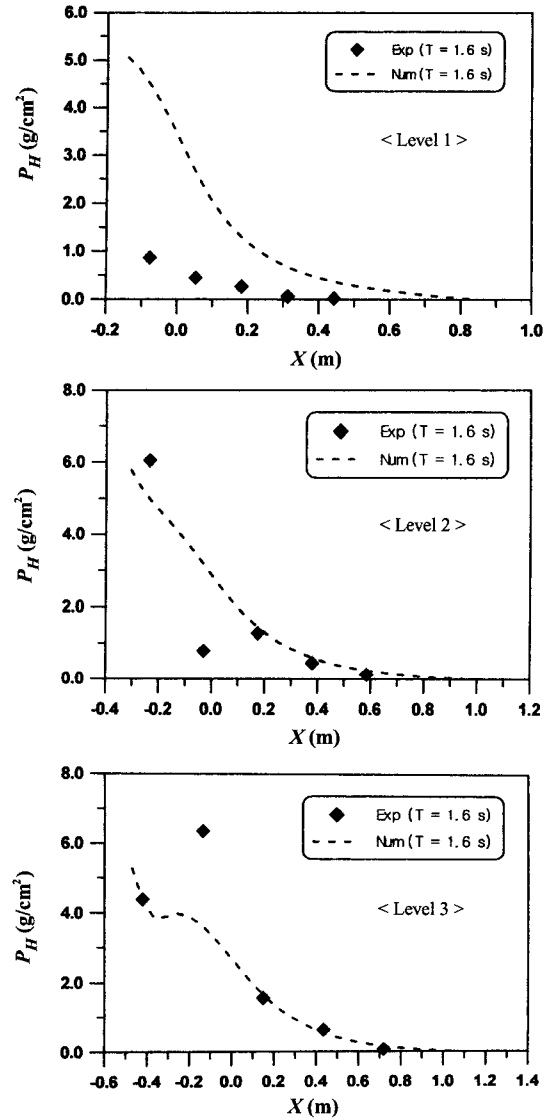


Fig. 8. Variation of wave pressure height along the level 1, 2 and 3 ($H=0.12$ m, $T=1.6$ s).

상기 그림들에서 파압고가 정수면 부근보다는 정수면과 바닥의 중간부위에서 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 Oumeraci and Partenscky(1990)의 실험결과에서도 나타난 바 있다. Test 2에 대하여 정수면하 체체 내부에서의 간극수압고에 대한 등압선도를 Fig. 10에 제시하였다.

5. 결론 및 제언

경사식 방파제의 활동안정성 및 지지력 등의 검토에 필

요한 방파제 체체내부에서의 간극수압과 파력을 결정하기 위한 수치모델을 수립하고 수리모형실험 자료를 이용하여 그 적용성을 검증하였다. 수치모델은 기본적으로 2002년도에 수립한 모델을 보완, 발전시킨 것으로서 본 개선 모델은 방파제의 외해측 사면에서의 파압변화를 수리실험을 통하여 직접 계측하여 수치모델에 입력하는 것을 주요 특징으로 하고 있다. 수치해석기법은 경계요소법을 이용하였으며 그 출력은 체체 경계면 및 내부에서의 속도포텐셜과 이의 공간미분치(유속성분)이다. 비선형 마찰항을 선

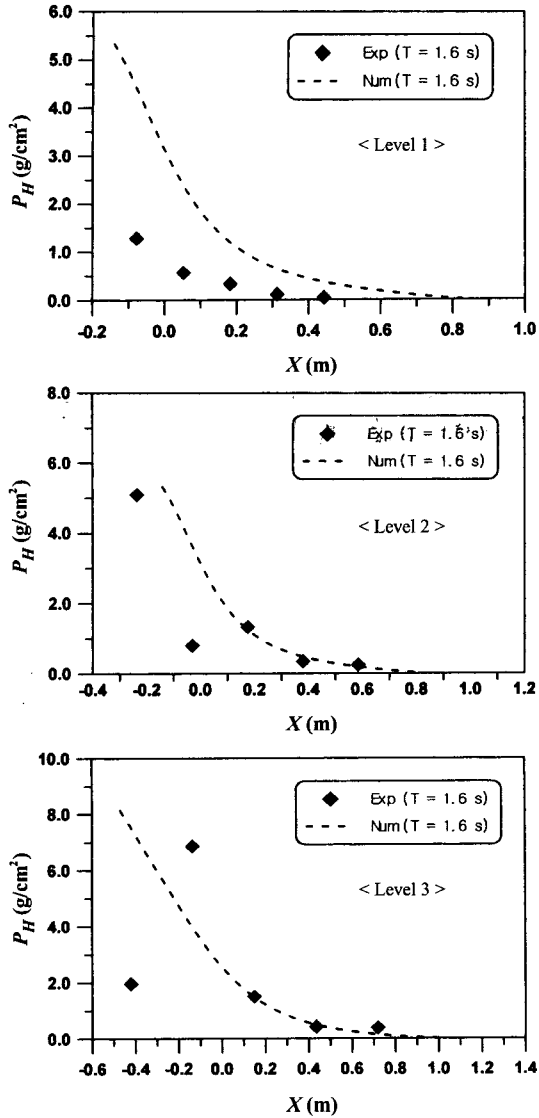


Fig. 9. Variation of wave pressure height along the level 1, 2 and 3 ($H=0.16$ m, $T=1.6$ s).

형화하기 위하여 여기에서는 내부 마찰계수를 반복계산을 통하여 결정하였다. 간극수압 및 파력은 결정된 포텐셜 및 유속성분들을 이용하여 계산하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 세부결론은 다음과 같다.

- 전사면 계측파압시그널을 분석하여 경사면에 따른 파압의 진폭과 위상변화를 도출하였다. 진폭과 위상은 상당정도로 변화하였으며 실험조건에 따라서는 정수면 보다는 그 이하에서 최대 파압고가 형성되었다. 이는 전사면에서 쇄파를 비롯하여 매우 복잡한 비선형

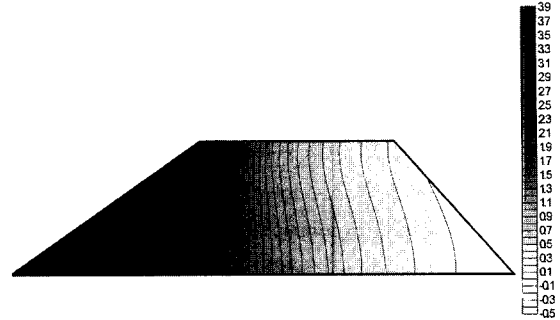


Fig. 10. Contour of pore pressure height (Test 2).

파랑변형이 발생하기 때문이다. 위상변화도 파 진행 방향으로 볼 때 축점간 위상이 전도되는 경우가 발생하였다.

- 수치모델의 적용에 의하여 계산된 간극수압고를 수리모형실험의 결과와 비교한 결과, 이들간의 정량적 일치정도는 비교적 양호하였다. 따라서, 전반적으로 볼 때, 본 수치모델에 의하여 계산된 내부파동장이 유효한 것으로 판단된다. 모든 실험조건에서 정수면 부근에서의 계산치가 실험치를 다소 상회하는 점이 발견되나 전반적으로 그 값들이 체제 중반부에서의 값들에 비하여 크지 않으며 더욱이 방파제의 보수적인 설계관점에서 볼 때 본 계산치의 상회는 무방한 것으로 판단된다.

본 연구에서 수립한 수치모델의 유효성은 입력자료로 활용된 전사면 파압정보(외부 피복층 하)와 그리고 계산된 내부파동장의 정확성 여하에 달려 있다. 본 연구에서는 내부파동장의 정확성 제고에 역점을 두었기 때문에 전사면 파압정보는 수리모형실험에 의하여 계측된 실험치를 이용하였다. 그러나, 실험을 배제하고 수치해석으로만 내부파동장 및 파력(특히, 전사면 파력)을 결정하기 위해서는 전사면 파압에 대한 체계적인 사전 정보가 확보되어 있어야 한다. 이를 위하여 다양한 입사파 및 방파제 단면조건에 대한 수리실험연구가 수행되어야 될 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서는 수치모델의 계산영역을 전사면 피복층을 제외한 내부쇄석부로부터 정하였다. 그러나, 보다 정확한 내부파동장 및 체제파력을 구하기 위해서는 계산영역을 피복층과 내부쇄석부로 구분, 설정하여 경계요소법을 적용하여야 한다. 이 경우에는 전사면 파압정보로서 피복층 외측면에서의 계측파압을 사용하여야 한다.

감사의 글

본 논문은 2001년도에 한국해양연구원의 위탁과제로 건국대학교에서 수행한 “경사식 방파제의 파력결정을 위한 수치해석”의 연구결과 중 일부를 발췌하여 수록한 것이며 연구비의 지원에 감사드립니다. 그리고, 수리실험을 수행하고 결과분석에 협조한 대학원생 황연호 군과 이성현 군에게 감사를 표합니다.

참고문헌

- 박현주, 전인식, 이달수, 2002. 경사식 방파제의 수리특성 결정을 위한 수치해석, *한국해양학회지*, **14**(1): 19-33.
- 한국해양연구원, 2001. *경사식 방파제의 최적설계기술개발(I)*.
- Barends, F.B.J., De Groot, M.B., and Hölscher, P., 1996. Hydro-geotechnical stability of breakwater, *Advances in Coastal Structures and Breakwaters*, J.E. Clifford, ed., Thomas Telford, pp. 322-335.
- Engelund, F., 1953. On the laminar and turbulent flows of ground water through homogeneous sand, *Transactions of the Danish Academy of Technical Sciences*, **3**(4).
- Hannoura, A.A. and McCorquodale, 1986. Rubble mounds: numerical modeling of wave motion, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, **111**(5), pp. 800-816.
- Hölscher, P. and Barends, B.J., 1990. Finite difference scheme for wave transmission in a rubble mound breakwater. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **30**, pp. 1129-1145.
- Madsen, O.S. and White, S.M., 1976. *Reflection and Transmission Characteristics of Porous Rubble-mound Breakwater*, CERC MR 76-5, US Army engineer waterways experiment station, Vicksburg, MS.
- McWhorter, D.B. and Sunada, D.K., 1977. *Ground-water Hydrology and Hydraulics*, Water resources publications, pp. 65-82.
- Oumeraci, H. and Partenscky, H.W., 1990. Wave-induced pore pressure in rubble Mound breakwaters, *Proc. 22nd. International Conference of Coastal Engineering*, ASCE, pp. 1334-1347.
- Sollitt, C.K. and Cross, R.H., 1972. Wave transmission through permeable breakwaters, *Proc. 13th Coastal Eng. Conf.*, Vancouver, pp. 1827-1846.
- Sulisz, W., 1985. Wave reflection and transmission at permeable breakwaters of arbitrary cross-section, *Coastal Engineering*, **9**, pp. 371-386.
- van Gent, M.R.A., 1995. *Wave interaction with permeable coastal structures*, Delft University Press.-III, p. 175.
- Wurjanto, A. and Kobayashi, N., 1994. Irregular wave reflection and runup on permeable slopes, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, **119**(5), pp. 537-557.

Received May 7, 2002

Accepted May 20, 2002