

## 해수교환 방파제에 미치는 충격파압적 예측 Prediction of Pressure Impulse on Seawater Exchange Breakwater

이창훈<sup>1</sup>, 김건우<sup>2</sup>, 서경덕<sup>3</sup>

Changhoon Lee<sup>1</sup>, Gunwoo Kim<sup>2</sup> and Kyung-Duck Suh<sup>3</sup>

### 1. 서 론

방파제는 항의로부터 입사해 오는 파랑 및 해일로 부터 항내 시설물 및 인명을 보호하는 중요한 시설이다. 우리나라의 방파제는 소형의 경우 경사저가, 대형의 경우 혼성체가 주로 건설되어 왔다. 항내와 항외의 해수 유통을 차단하는 방파제는 항내에 오염원이 있는 경우에 자연정화기능을 약화시켜서 심각한 환경 문제를 야기하게 된다. 이와 같은 문제의 해결책으로서 해수교환 방파제가 고안되었다. 해수교환 방파제는 항외의 깨끗한 물이 항내로 유입되는 원리로서 항내의 수질을 개선하는 효과를 기대하는 형식이며, 항내·외 양 방향 흐름을 유도하는 경우보다 일 방향 흐름을 유도할 때 더 해수교환 효과가 크다고 알려져 있다. 최근에, Lee 등(1994)과 Lee와 Lee(2003)가 각각 원호형 수로와 L자형 수로가 있는 케이슨식 해수교환 방파제를 제안하였다. 케이슨식 해수교환 방파제는 케이슨 앞면에 구멍이 뚫려 있어서, 파도가 밀려오면 이 수로를 통하여 깨끗한 물이 올라와 항내로 연결된 수로로 들어가서 항내의 물이 정화되는 효과가 있다. Fig.1은 해수교환방파제 가운데 수로가 L자형이고 수로의 뒤에 유수지가 있는 방파제의 단면도를 보여준다. 방파제로 입사하는 파의 주기가 수로의 고유 주기와 같을 때 수로 내의 수면이 증폭하는 소위 공진 현상이 발생한다. 공진이 발생한 경우 항내로 유입되는 수량이 증폭될 뿐만 아니라 방파제 전면에서 파랑의 반사율도 감소한다는 것이 밝혀졌다(Lee와 Lee, 2003). 따라서 방파제가 설치되는 해역에서 입사파의 정상시 주기가 수로의 공진주기와 같게 되도록 수로

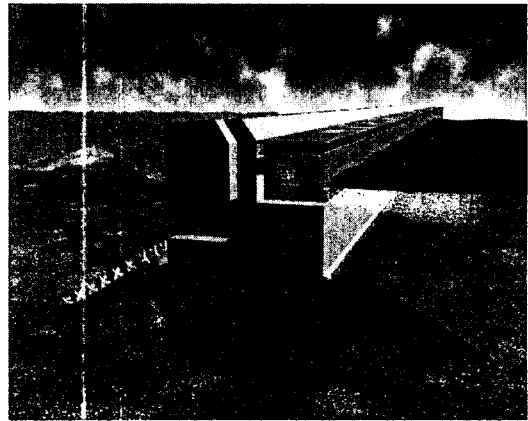


Fig. 1. Sectional view of seawater exchange breakwater.

의 길이를 정하면 수로 내의 수면이 증폭되고 항내로 많은 양의 깨끗한 물이 들어가게 된다. 또한, 해수교환방파제는 혼성체에 비해서 수평파력과 양압력이 작게 작용하여 더 안전하다는 사실이 밝혀졌다(이달수 등, 1999).

혼성체는 케이슨의 직립 벽에 충격쇄파가 부딪쳐 케이슨이 활동이나 전도의 양상으로 파괴되는 경우가 많다. 충격파압은 정상시 동수압에 비해 10배 이상인 경우도 많으며, 아주 짧은 순간에 발생한다. 동일한 파랑조건에 대해서도 최대파압은 큰 변동을 보이는데, 충격파압이 작용하는 시간 동안 파압을 적분한 값은 일정한 것으로 알려져 있다(Peregrine, 2003). Cooker와 Peregrine (1995)은 Euler 방정식을 사용하여 충격파압적(pressure impulse, 즉 충격파압을 작용시

1 세종대학교 토목환경공학과 부교수

2 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

3 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

간동안 적분한 양)을 종속변수로 하는 Laplace 방정식을 유도하였다. 그리고 수평의 바다 위에 설치된 직립체에 작용하는 충격파압적의 해를 해석적으로 구하였다. 최근에 이창훈 등(2003)과 Kirkgöz와 Mamak(2004)는 각각 유한요소법과 경계요소법을 사용하여 혼성제와 같은 복잡한 기하학적 경계가 있는 경우에 충격파압적을 계산하였다. 그리고 김장호 등(2003)은 혼성제에 충격쇄파가 왔을 때 케이슨, 마운드, 지반의 거동을 예측하고, 파피에 대한 취약부를 예측하였다. 그 결과 사석 경사면, 케이슨의 후면과 사석의 접합부, 사석과 지반의 접합부이 충격파압에 취약하다는 것을 알 수 있었다.

해수교환방파제는 항내 오염물을 정화시키는 데 도움이 되고 평상시 입사파에 대해서 혼성제보다 더 안전하다고 알려져 있으나 충격쇄파와 같은 악조건에서는 과연 어떠한 지 알 필요가 있다. 본 연구에서는 케이슨식 해수교환 방파제에 작용하는 충격파압적을 혼성제와 함께 비교하였다. 파동장의 해석은 VOF기법을 사용한 CADMAS-SURF 프로그램(沿岸開發技術研究センター, 2001)을 사용하였으며, 유한요소법을 사용하여 충격파압적을 구하였다.

## 2. 이 론

### 2.1 충격파압적 이론

Cooker와 Peregrine(1995)은 충격파압적의 정의로부터 충격파압적(pressure impulse) 이론을 고안하였다. 충격파압적  $P$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$P(x) = \int_{t_a}^{t_b} p(x, t) dt \quad (1)$$

여기서,  $t_b$ 와  $t_a$ 는 각각 충격이 일어나기 직전과 직후의 시간이며,  $p(x, t)$ 는 압력이다. 운동방정식으로부터 충격이 일어나는 짧은 시간 동안 파의 속도변화를 무시할 수 있다는 가정 하에서 충격파압적은 Laplace 방정식을 따른다.

$$\nabla^2 P = 0 \quad (2)$$

경계조건은 해수면과 먼 바다에서는  $P=0$  이고, 수면 아래 구조물과의 경계면에서는  $\partial P/\partial n=0$  이다. 여기서,  $n$ 은 구조물 벽면에서 바깥쪽 직각방향의 미한다. 그리고, 충격이 일어나는 구간에서는  $\partial P/\partial n = -\rho U_0$ 이며, 여기서  $\rho$ 는 물의 밀도,  $U_0$ 는 충격 직전에 구조물에 직각 방향의 충격구간에서의

물의 속도이다.

본 연구에서는 해수교환 방파제와 같은 복잡한 기하학적 구조에 적용하기 쉬우며, 타원형식에 일반적으로 쓰이는 Galerkin 근사법에 근거한 유한요소법을 사용하여 수치계산 하였다. Laplace 방정식  $\nabla^2 P=0$ 에 형상함수  $\phi(x, z)$ 를 곱하여 계산영역에서 적분을 수행하여 구한 적분방정식은 다음과 같다.

$$-\int_{\Omega} \nabla \phi \cdot \nabla P d\Omega + \int_{\partial\Omega} \phi \frac{\partial P}{\partial n} d(\partial\Omega) = 0 \quad (3)$$

여기서, 형상함수  $\phi(x, z)$ 는 부분별 선형함수(piecewise linear function)이다. 수치해  $P$ 는  $P = \sum_i P_i \phi_i$ 로 나타내어지며,  $\phi_i$ 는  $i$ 번째 꼭지점에서만 1의 값을 갖고 그 이외의 다른 꼭지점들에서는 0의 값을 갖는 함수이다. 수치해  $P$ 를 적분방정식에 대입하여 정리하면 다음의 식을 얻는다.

$$\sum_i P_i \int_{\Omega} \nabla \phi_i \cdot \nabla \phi_j d\Omega = \int_{\partial\Omega} \phi_i \frac{\partial P}{\partial n} d(\partial\Omega) \quad (4)$$

이 식은 행렬  $A = \left( \int_{\Omega} \nabla \phi_i \cdot \nabla \phi_j \right)_{i,j}$ 에 대한 선형방정식  $Ax = b$ 의 꼴을 이룬다. 선형방정식의 해법으로는 LU-분해법을 사용하였다.

### 2.2. VOF(Volume of Fluid) 모형

2.1절의 충격파압적 모형을 계산하기 위해서는 파랑이 방파제에 도달할 때 충격쇄파의 발생여부가 우선적으로 결정되어야 한다. 충격쇄파가 발생할 경우에는 계산영역의 기하학적 형상, 충격구간, 충격직전에 충격구간의 유속이 기본 정보로서 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 CADMAS-SURF 프로그램을 사용하였다.

CADMAS-SURF는 지배방정식으로 다음과 같은 2차원 비압축성 점성유체의 연속방정식과 운동방정식을 쓴다.

$$\frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z w)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \lambda_\nu \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(\lambda_x u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\lambda_z w u)}{\partial z} = \\ - \frac{\gamma_\nu}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} [\gamma_x \nu_e (2 \frac{\partial u}{\partial x})] \\ + \frac{\partial}{\partial x} [\gamma_z \nu_e (\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x})] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $\nu_e$ 는 분자동점성계수와 와동점성계수의 합,  $\gamma_\nu$ 는 공극률,  $\gamma_x, \gamma_z$ 는 수평, 연직방향의 면적투과율이다.  $\lambda_\nu, \lambda_x, \lambda_z$ 는  $C_M$ 을 관성력계수로 한다면 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \lambda_\nu &= \gamma_\nu + (1 - \gamma_\nu)C_M \\ \lambda_x &= \gamma_x + (1 - \gamma_x)C_M \\ \lambda_z &= \gamma_z + (1 - \gamma_z)C_M \end{aligned} \quad (7)$$

유체의 자유표면은 VOF(Volume of Fluid) 기법을 사용하여 결정한다. VOF 기법은 유체와 공기의 경계를 명확하게 정의할 뿐만 아니라, 쇄파의 경우 유체격자로 둘러싸인 기체격자와 그 반대의 경우가 모두 재현이 가능한 장점이 있다. Porous 모형에 기초한 VOF 함수  $F$ 의 이송방정식은 다음과 같다.

$$\gamma_\nu \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x u F)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z w F)}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

$F$ 는 유체로 가득 찬 격자에서는 1, 기체로 가득 찬 격자에서는 0이며, 수면이 존재하는 격자에서는 0과 1 사이의 값을 가진다. 그리고, 난류모형로  $k-\epsilon$  2방정식 모형을 사용한다.

### 3. 수치 실험

본 연구에서는 케이슨식 혼성제와 케이슨식 해수교환 방파제에 대해서 충격파를 수치적으로 모의하고 방파제에 작용하는 파압적을 예측하였다. Fig. 2는 본 연구에서 수치 실험한 해수교환 방파제의 단면도이다. 마운드의 전전 폭과 경사는 각각 10m와 1:3(V:H)이다. 수로가 없는 일반 케이슨식 혼성제의 경우에 주기가 7초이고 입사파고가 3m인 경우에 충격쇄파가 발생하므로 이 조건을 사용하였다. 해수교환방파제의 케이슨 내 수로의 입구부터 정지수면까지의 길이는  $l=7.24\text{m}$ 이다. 이 조건에서 수로의 공진 주기는  $T_r = 2\pi\sqrt{l/g} = 5.7\text{초}$ 로서 입사파의 주기와 비슷하다. 즉, 7초 주기의 입사파 내습 시 수로내의 수면이 증폭할 것이다.

#### 3.1 충격파 모의

구조물 전면부에서 쇄파가 발생하는 경우에 쇄파로 인해서 파동장에 교란이 발생하므로, 파형과 파압이 매 주기마다 일정하지 않기 때문에, 본 연구에서는 방파제에 도달하는 첫 번째 파에 대해서 충격파 발생 여부를 결정하고 충격파가 발생하는

경우의 충격 구간, 충격 시 유속을 CADMAS-SURF로 계산하였다. 계산된 충격 시의 수면변위와 등압선을 Fig. 3에 도시하였다. 케이슨 전면에 도달한 수면이 거의 수직으로 서 있으며, 충격 시 케이슨에 뺨 때리듯이 부딪치면서 충격파압이 발생하여, 구조물 바로 앞의 수위 부근에서 파압이 아주 크게 나타남을 볼 수 있다. 그러나, 충격파압이 한 시간 단계에서만 나타나서 충격시의 파압이 정량적으로 유의미한 것으로 볼 수는 없다.

충격 직전의 유속  $U_0$ 는 이창훈 등(2003)의 연구에서  $U_0 = \sqrt{gh}$  (여기서,  $h$ 는 마운드 밑바닥의 수심)로 단순히 천해 선형파의 전파속도를 사용하였는데 이 경우 구조물을 타고 오르는 천수와 파랑간의 비선형 현상이 고려되어 있지 않다. 본 연구에서는 복잡한 구조물과 지형에서도 CADMAS-SURF로 계산된 유속을 사용하여 구조물의 영향을 충분히 고려할 수 있었다. 이창훈 등에서  $U_0$ 는 8.9m/s로 예측되나, 수치 결과는 혼성제의 경우 11.0m/s, 해수교환 방파제의 경우 4.5m/s로 각각 계산되었다. 즉, 해수교환 방파제의 경우 일반 방파제에 비해서 유속이 41%로 작게 예측되었다. 이는 쇄파 에너지의 많은 부분이 수로를 통해 빠져 나감으로써 구조물에 직접 전달되는 에너지가 일반 방파제에 비해서 감소된 것으로 보인다. 충격구간은 일반 방파제의 경우 -0.9m에서 1.3m이고, 해수교환 방파제의 경우에는 0.0m에서 1.0m이다. 일반적으로, 에너지는 유속의 제곱과 충격구간에 비례하므로 해수교환 방파제에 전달되는 에너지는 일반 방파제에 비해 8%로 감소할 것으로 예측되며, 케이슨 전면에서의 최대파압적은 충격구간보다는 유속의 제곱에 크게 영향을

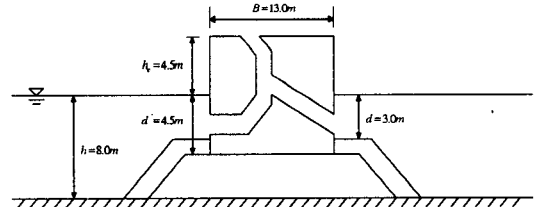


Fig. 2. Schematic diagram of seawater exchange breakwater.

받을 것이므로 17%로 감소할 것으로 예측된다.

#### 3.2 충격파압적 예측

해수교환 방파제의 충격파압적을 구하기 위한 경계 조건은 Fig. 4와 같다. 마운드와 케이슨에서는

time=1.5081E+01  
 Cmax=1.8010E+05  
 Cmin=-4.9996E+04

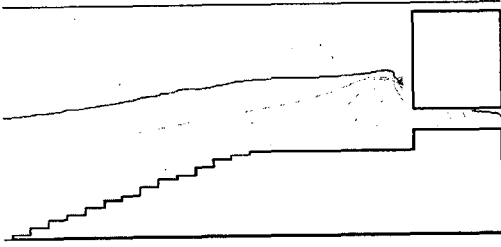


Fig. 3. Surface elevation and contour of pressures computed by CADMAS-SURF just before breaking waves impact the wall.

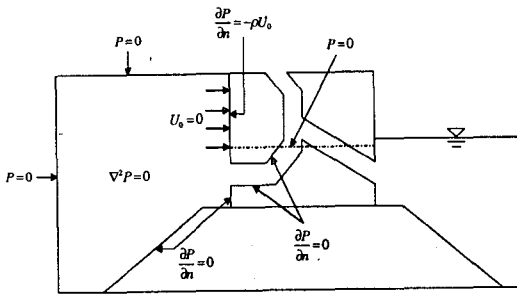
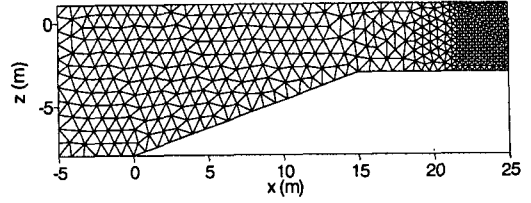


Fig. 4. Governing equation and boundary conditions for computing pressure impulses.

$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ , 자유수면과 먼 바다에서는  $P = 0$ 의 경계조건을 두었다.

Fig. 3에서 보이는 바와 같이 실제의 수면변위는 공간적으로 일정하지 않지만, 격자망 구성의 편의를 위해서 전 영역의 수면변위가 일정하다는 가정을 하여 계산영역을 구성하였다. 또한, 해수교환 방파제의 경우 복잡한 수로 형상에도 불구하고, 충격 시 Fig. 3에서와 같이 직선수로 우측 끝에 수면변위가 존재하므로, 직선수로 우측 끝에서  $P = 0$ 의 경계조건을 두고, 직선수로 구간까지만 계산영역으로 하였다. 유한요소법을 적용하기 위한 삼각형 격자는 Fig. 5와 같이 혼성 방파제에 557개의 절점과 987개의 삼각형 요소로 격자망을 구성하였으며, 수로로 인해서 좀 더 복잡한 형상을 가지는 해수교환 방파제에는 1114개의 절점과 2006개의 삼각형 요소로 격자망을 구성하였다. 격자망 구성 방법으로 공개 소프트웨어인 GEOMPACK을 사용하였다.

(a)



(b)

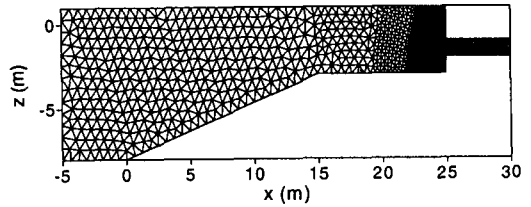
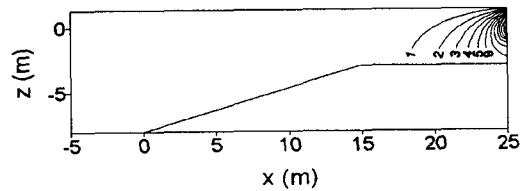


Fig. 5. Meshes for FEM analysis: (a) composite breakwater, (b) seawater exchange breakwater.

(a)



(b)

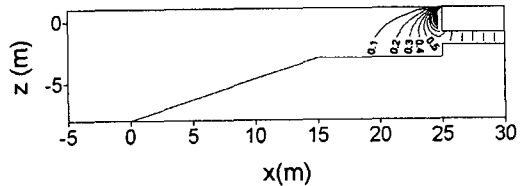


Fig. 6. Contours of pressure impulse: (a) composite breakwater, (b) seawater exchange breakwater (unit:  $\text{kN s/m}^2$ ).

유한요소법으로 구한 충격 시의 충격과압적의 분포를 Fig. 6에 도시하였다. 두 경우 모두 충격과압적이 충격구간에 집중되어 있고, 충격구간에서 멀어질수록 그 양이 급격히 감소하였다. Fig. 7은 케이슨 직립 벽에 작용하는 충격과압적을 도시한 것이다. 충격과압적의 최대값이 해수교환 방파제에서  $2.47 \text{ kN s/m}^2$  이었고, 일반 방파제( $14.28 \text{ kN s/m}^2$ )에 비해 약 17%로 작게 발생하였다. 해수교환 방파제에 부딪히는 쇄파의 유속이 일반방파제에 비해서 41%로 작게 나와서, 에너지가 17%로 감소될 것이라는 예측이 적

중합을 알 수 있다. 그리고, 계산영역 전체에서 충격파압적은 해수교환 방파제에서  $9.0\text{kN s}$ 로 계산됐으며, 일반 방파제( $90.7\text{kN s}$ ) 보다 약 10%로 감소하여 예측된 8% 보다는 조금 크게 발생하였다.

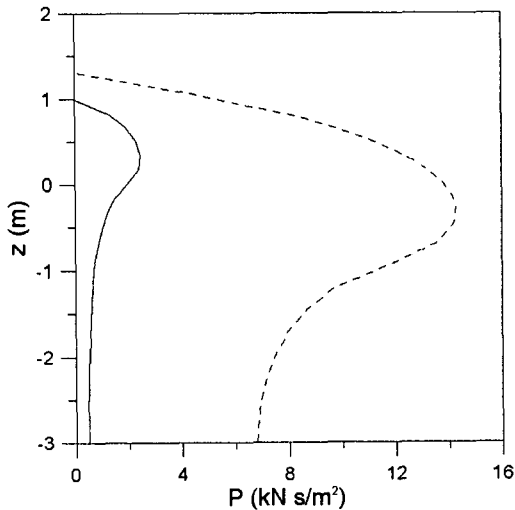


Fig. 7. Pressure impulse at the caisson wall; dashed line = composite breakwater, solid line = seawater exchange breakwater.

#### 4. 맺음말

Cooker와 Peregrine(1995)의 충격파압적 이론을 사용하여 케이슨식 혼성제와 L자형 수로가 있는 해수교환 방파제에 작용하는 충격파압적을 유한요소법을 사용하여 계산하였다. 그리고 VOF법이 기초한 CADMAS-SURF 프로그램을 사용하여 충격파 발생 유무의 확인과 충격 직전의 유속과 충격구간에 대한 정보를 구하였다.

동일한 파랑조건에 대한 수치실험에서 케이슨식 혼성제에 비해서 해수교환 방파제에 작용하는 최대 충격파압적은 약 83% 정도 감소하였다. 이는 해수교환을 위해 설치한 수로로 인한 것이며, 해수교환방파제는 혼성제보다 충격파에 대해서 훨씬 더 안전한 구조로 판단된다.

케이슨식 혼성제는 충격쇄파가 발생할 위험성이 있지만, 케이슨 전면에 수로를 설치할 경우 충격량을 상당량 줄일 수 있었다. 그러나, 본 연구에서는 단 한가지의 파랑조건에 대해서만 분석했기 때문에 충격파의 경감 여부와 경감 정도를 모든 파랑 조건과 기하학적 조건에 일반화하기는 어렵다. 향후 다양한 파랑 조건과 케이슨 형상에 대해서 충격파압적 분석이 이루어져야 할 것이다. 그리고, 본 연구에서는 교란이 없는 상황에서 도달한 첫 번째 파에 대해서만 분석을 했으나, 장시간의 계측을 통해서 충격파의 발생 확률을 예측하는 연구도 이루어져야 할 것이다.

#### 참고문헌

- 김장호, 이창훈, 김종민 (2004). 충격파압에 의한 방파제의 정적 파괴 거동 예측. 대한토목학회논문집, 24(2A), 233-238.
- 이달수, 오영민, 이창훈 (1999). 해수교환방파제에 작용하는 파력특성. 대한토목학회논문집, 19(II-6), 711-715.
- 이창훈, 최화정, 정형채 (2003). 방파제에 미치는 충격파압적의 예측. 대한토목학회논문집, 23(1B), 17-22.
- 沿岸開發技術研究センター (2001). 數値波動水路の研究・開發 (CADMAS-SURF).
- Cooker, M.J. and Peregrine, D.H. (1995). Pressure-impulse theory for liquid impact problems. *J. Fluid Mech.*, 297, 193-214.
- Kirkgöz, M.S. and Mamak, M. (2004). Impulse modelling of wave impact pressures on vertical wall. *Ocean Eng.*, 31, 343-352.
- Lee, C. and Lee, D.S. (2003). Water surface resonance in the L-shaped channel of seawater exchange breakwater. *Ocean Eng.*, 30(18), 2423-2436.
- Lee, D.S., Park, W.S., and Kobayashi, N. (1994). Circular channel breakwater to reduce wave overtopping and allow water exchange. *Proc. 24th Int. Conf. Coastal Eng., Kobe*, 1373-1387.
- Peregrine, D.H. (2003). Water wave impact on walls. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 35, 23-43.