

衝擊碎波力の 작용에 의한 圓形파일의 動的舉動 Dynamic Behavior of Cylindrical Pile Subjected to Impulsive Breaking Wave Forces

전인식* · 심재설**

In-Sik Chun* and Jae-Seol Shim**

要 旨 : 圓形斷面 部材를 갖는 해안 및 해양구조물의 설계에서 波力은 주로 正弦波의 입사를 가정한 모리슨 식을 적용하여 산출하는 것이 상례이나, 구조물에 대하여 강한 卷波性 碎波가 작용할 경우에는 모리슨식에 의한 계산치보다 훨씬 큰 衝擊碎波力이 발생한다. 그러나, 충격쇄파력은 그 작용시간이 매우 짧기 때문에 구조물 설계로의 반영 여부 및 규모를 결정하기 위해서는 충격쇄파력 작용에 대한 구조물 전체의 動的舉動을 검토하여야 한다. 본 연구는 충격쇄파력의 작용에 의한 단일 연직파일의 동적변위를 해석하기 위한 수치해석기법을 수립하였으며, 파일의 제원을 달리하는 여러 예제해석을 통하여 파일의 정적변위와 동적변위를 비교하였다.

핵심용어 : 충격쇄파력, 모리슨식, 동적변위, 정적변위, 원형파일.

Abstract □ The Morison's formula has been commonly used in the determination of wave forces of sinusoidal waves acting on coastal or ocean structures of pile-supported type. In the case that plunging breakers are incident, the structures are subjected to impulsive breaking wave forces which are normally much larger than the Morison's. However, the impulsive breaking wave forces act in a very short time, and hence a dynamic structural analysis should be done to determine whether or not to include the forces in the design force items. In the present study, numerical methods for calculating the dynamic response of a vertically located cylindrical pile are developed. Static and dynamic displacements are then compared through several example analyses varying the structural properties of pile.

Keywords : impulsive breaking wave force, Morison's formula, dynamic displacements, static displacements, cylindrical pile

1. 序 論

해안역 공간이용이 증대됨에 따라 요구되는 해안구조물의 기능 및 형상이 다변화되고 있으며 구조물의 설치가 碎波帶를 포함하여 점차 大水深化되고 있다. 따라서, 구조물의 설계를 위한 外力을 결정하는 방법도 과거의 설계지침에만 의존할 수 없는 경우가 왕왕 발생하여 새로운 이론 및 실험적 연구가 다수 진행되고 있다. 일반적으로 波力은 외력중에서도 가장 큰 비중을 차지하며 구조물의 안전설계 측면에서 사전에 정확히 결정하여야 한다.

대상 구조물이 자켓식 구조물처럼 파일로 지지되는 경우

에는 파일에 작용하는 파력을 결정하기 위하여 모리슨식을 사용하여 왔다. 동 식을 사용하기 위해서는 입사파랑내 水粒子的 속도 및 가속도의 시간적 변화에 대한 정보가 요구되며, 이를 얻기 위하여 기존의 線形 및 非線形 파동이론을 사용하는 것이 일반적이다. 그러나, 비선형 파동이론이라도 파형은 波峰軸에 대하여 좌우 대칭성 형상인 경우에 국한한다. 입사파가 연안역에 전파하면서 겪게 되는 淺水變形과 쇄파과정에서 발생하는 비대칭성 파에 대하여 수립자의 운동학적 성분을 정확히 도출할 수 있는 파동이론은 현재로서는 가용하지 않다. 단지, 全等 (1998)은 경계요소법을 이용하여 쇄파와 같은 強非線形 파내의 수립자

*건국대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Konkuk University, 93-1 Mojin-dong, Kwangjin-ku, Seoul 133-701, Korea)

**한국해양연구소 연안·항만공학연구센터 (Coastal and Harbor Engineering Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

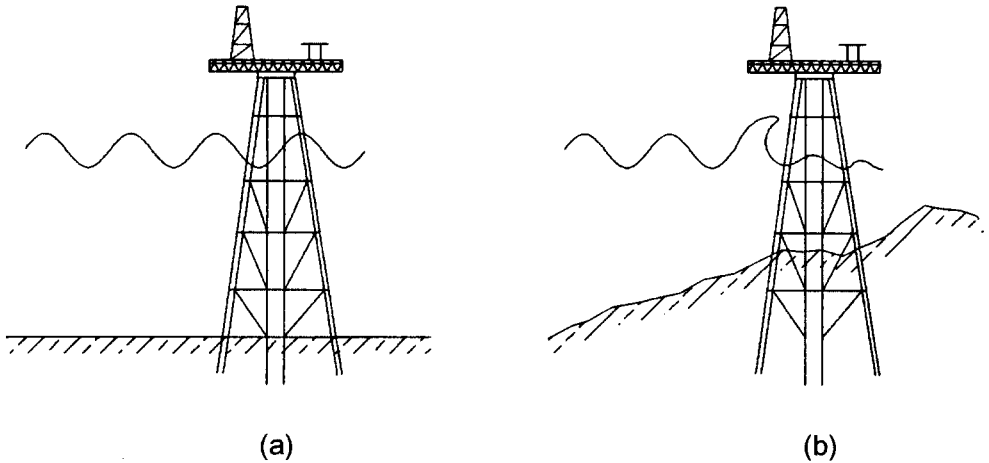


Fig. 1. Type of incident waves; (a) sinusoidal wave, (b) breaking wave.

속도 및 가속도를 계산한 바 있다.

쇄파는 외해쪽으로부터 전파되어 오는 파랑에너지가 소멸되는 현상으로서 쇄파대에 위치한 구조물에 매우 큰 파력을 작용시킨다(Swift, 1989; 後野正雄, 1988; Apelt and Piorewicz, 1987; 谷木 等, 1986; Kjeldsen *et al.*, 1986; Honda and Mitsuyasu, 1974; 合田 等, 1966; Ross, 1959; Hall, 1958). 충격쇄파력은 波前面이 갑자기 구조물에 충돌하여 발생하는 것이며(Fig. 1참조), 正弦波에 대한 모리슨식의 관성력과 항력성분과는 그 작용구조가 근본적으로 다르다. 따라서, 실제 발생하는 충격쇄파력은 쇄파내 수립자의 속도 및 가속도를 이용한 모리슨식의 결과치와도 상당정도 차이를 보이게 된다.

沈 等(1998)은 연직파일에 작용하는 총 충격쇄파력은 모리슨식의 계산치에 비해 약 5배 정도 클 수 있음을 보인 바 있다. 문제는 이 충격쇄파력을 어떻게 구조물의 설계에 반영하는가이다. 正弦波 입사의 경우, 해안구조물의 고유운동주기는 일반적으로 파주기보다 현저히 작기 때문에 파일식 구조물의 설계는 주로 靜的荷重에 기초한 靜的設計를 수행한다. 정적설계는 구조물의 모든 部材에 작용하는 모리슨식의 계산치의 총화, 즉, 시스템 파력이 최대가 되는 시점에서 수행된다(Dawson, 1983, pp. 133-137). 충격쇄파력은 모리슨식의 계산치에 비해 현저히 크기 때문에 충격쇄파력을 그대로 정적설계에 반영할 경우 매우 큰 부재단면이 채택될 가능성이 있다.

한편, 충격쇄파력은 그 작용시간이 정현파에 비하여 매우 짧은 특징이 있기 때문에 충격쇄파력을 직접 받는 局部部材의 설계에는 충격쇄파력을 반영하나 구조물 전체의 거동에는 거의 무관한 것으로 인식되어 왔다. 실제,

DnV(1977)에서도 해양구조물의 설계에 관련하여 국소쇄파력만을 기술하고 있다. 그러나, 合田 等(1966)은 충격쇄파력에 의한 단일파일의 동적거동에 대한 이론적 고찰에서 비록 非減衰條件이지만 충격쇄파력의 종료이후에도 餘振이 존재하며 동적변위가 정적변위보다 크게 나타날 수 있음을 보인 바 있다. 또한, 谷本 等(1986)도 단일 연직파일의 파랑응답실험을 통하여 충격쇄파력에 의한 여진의 존재를 보여준 바 있다. 충격쇄파력의 작용시간이 매우 짧음에도 불구하고 여진을 통하여 구조물 전체의 동적변위가 크게 나타나는 경우에는 설계하중의 사전결정에서 충격쇄파력의 크기를 간과할 수 없으며 충격쇄파력을 포함하는 動的設計를 수행하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 충격쇄파력의 작용에 의한 단일 연직파일의 동적거동에 대한 수치해석기법을 수립하여 파일제원의 변화에 따른 정적변위와 동적변위를 비교, 고찰하고자 한다. 비교 목적상 쇄파와 동일한 파고와 주기를 갖는 正弦波에 대해서도 모리슨식을 적용하여 동적 및 정적해석을 수행하였다.

2. 衝擊碎波力の 연직분포

쇄파가 연직파일에 충돌할 때 발생하는 충격쇄파압의 분포를 설명하기 위하여 合田 等(1966)은 碎波卷入率 λ 를 도입하여 충격쇄파압은 碎波峰高 η_b 로부터 일정거리 이하까지 즉, $\lambda\eta_b \leq z \leq \eta_b$ 의 구간에서 일정한 값을 보인다고 설정하였다(Fig. 2참조).

谷本 等(1986)은 실험을 통하여 연직파일에 작용하는 충격쇄파력의 분포는 일정하지 않으며 삼각형 형태의 분포

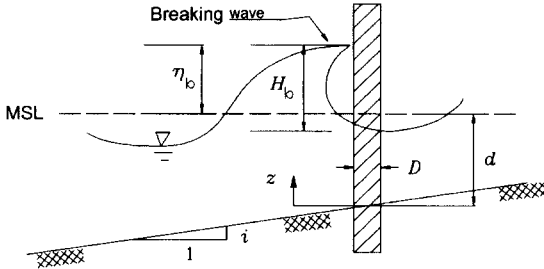


Fig. 2. Scheme of plunging breaker impinging on vertical pile.

를 보인다고 하였다. 또한, 최대파력 f_p 는 碎波峰에서 나타나지 않고 碎波峰에서 일정거리 $\delta/2$ 이하에서 발생한다고 하였다. 이와 같은 삼각형 분포는 Zhou et al.(1991)의 실험적 연구에서 충격쇄파압의 삼각형 분포에 의하여 간접적으로 확인된 바 있다. 谷本 等(1986)은 실험결과를 분석하여 단위길이당 충격쇄파력의 분포에 대한 모델을 다음과 같이 제시하였다.

$$f_z = \left\{ 1 - \frac{|l_p - (z-d)|}{\delta/2} \right\} f_p; \quad l_p - \delta/2 \leq z \leq \eta_b \quad (1)$$

여기서, $f_p = f_{pm}(1-t/\tau)$, τ = 충격쇄파력의 작용시간, t = 시간, $f_{pm} = v f_{km}$, $f_{km} = (\pi/2g)\omega_b C_b^2 D$, ω_b = 물의 단위중량, D = 직경, C_b = 쇄파의 진행속도, $\tau = 0.25D/C_b$, $C_b = \sqrt{g(d+\eta_b)}$, d = 수심, η_b = 波峰高, $l_p = 0.75\eta_b$, $\delta = 0.5\eta_b$, $v = A_1 \tanh [A_2 \log_{10} \{i((H_b/L_o)A_3)\}] + A_4$, H_b = 碎波高, L_o = 深海波長, i = 해저경사, $A_1 = 0.8$, $A_2 = 6.0$ (규칙파), $A_3 = 0.45$ (규칙파), $A_4 = 1.0$ 이다.

f_z 를 δ 에 걸쳐 연직적분하면 연직파일에 작용하는 全 衝擊碎波力은

$$F_l = 0.25 f_p \eta_b \quad (2)$$

와 같으며, 이의 시간 최대치는 다음과 같다.

$$F_{lm} = 0.25 v f_{km} \eta_b \quad (3)$$

충격쇄파력 작용구간 이하에서는 모리슨식에서의 항력과 관성력이 작용한다고 보는 것이 일반적이며(韓國海洋研究所, 1997; 谷本 等, 1986; 畠田 等, 1966), 특히, 畠田 等은 선형파이론을 이용하여 수립자의 속도 및 가속도를 계산할 것을 제안하였다. 그러나, 충격쇄파력 작용구간 이하라 하더라도 수립자 속도 및 가속도는 기존의 선형 및 비선형 파동이론의 계산치와는 현저히 다를 수 있으며, 沈 等(1998)은 경계요소법을 이용하여 이들 운동학적 성분들을 도출하여 파일전체에 작용하는 全波力(충격쇄파력 포함)을 계산한 바 있다.

3. 구조물 動的 應答의 결정

3.1 正弦波의 작용에 의한 동적해석기법의 수립

3.1.1 동력학적 방정식의 구성

연직파일이 고정상태에 있지 않고 變位 $x(t)$ 로 움직일 때 $x(t)$ 에 대한 동력학적 방정식은 식 (4)와 같다(Dawson, 1983, pp. 282-329).

$$(m+m')\ddot{x} + (C+\rho_w C_D D \dot{u})\dot{x} + Kx = \frac{1}{2} \rho_w C_D D u u + \rho_w C_I \frac{\pi D^2}{4} a_x \quad (4)$$

여기서, m = 단위길이 당 파일의 질량, m' = 단위길이 당 附加質量, C = 파일 자체의 내부마찰에 의하여 부여되는 減衰係數, ρ_w = 해수의 밀도, D = 파일 직경, K = 剛性係數, C_D = 항력계수, C_I = 관성력계수, u = 파일위치에서 수립자의 속도, a_x = 파일위치에서 수립자의 가속도이다. 식 (4)에서 a 는

$$a = \frac{8}{3\pi} E \quad (5)$$

이며, u , a_x 와 E 는 線形波 이론을 적용하면 다음과 같다.

$$u = E \cos(\omega t) \quad (6)$$

$$a_x = -\omega E \sin(\omega t) \quad (7)$$

$$E = \frac{\omega H \cosh kz}{2 \sinh kd} \quad (8)$$

여기서, k 와 ω 는 각각 파수와 각주파수를 의미한다. 이들 식을 식 (4)에 대입하면 다음과 같다.

$$(m+m')\ddot{x} + (C+\rho_w C_D D \dot{u})\dot{x} + Kx = f_a \sin(-\omega t + \phi) \quad (9)$$

여기서,

$$f_a = E \left[\left(\frac{1}{2} \rho_w C_D D a \right) + \left(\rho_w C_I \frac{\pi D^2}{4} \omega \right)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{2C_D a}{C_I \pi D \omega} \right] \quad (11)$$

이다.

식 (9)에서 減衰項은 두 개의 항, 즉 構造的 감쇠항과 動水力學的 감쇠항으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 그러나, 구조적 감쇠는 파일재질에 따라 다르며 정량화하기가 힘들다. 따라서, 통상 Rayleigh 감쇠로 간주되며 본 연구에서는 감쇠계수를 다음과 같이 나타낸다.

$$(C+\rho_w C_D D a) = 2\gamma(m+m')\omega_N \quad (12)$$

여기서, ω_N 는 구조물의 고유주기이며 γ 는 보통 0.05-0.1의 값을 취한다.

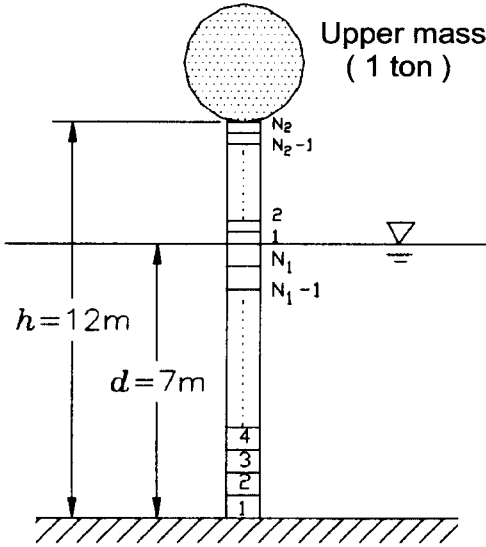


Fig. 3. Model structure for shape function analysis.

3.1.2 形象函數를 이용한 근사 해석

Fig. 3과 같이 상부데크가 적재된 단일 직경 D 를 가진 연직파일에 대해서 수평방향의 운동변위만 발생하는 1 자유도 시스템을 고려한다. 수심은 d 이며 파일의 높이는 h 이다. 평균수면 이하는 파일내부에 물이 차있는 것으로 한다. 데크위치에서의 변위를 U 라 할 때 U 를 결정하기 위한 동력학적 방정식은 파일변위의 형상함수 $g(z)$ 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다(Brebbia and Walker, 1979, pp. 252-263).

$$\bar{M}\ddot{U} + \bar{C}\dot{U} + \bar{K}U = \bar{F} \tag{13}$$

여기서, \bar{M} , \bar{C} , \bar{K} , \bar{F} 는 각각 等價質量係數, 등가감쇠계수, 등가강성계수 그리고 등가과력으로서 다음과 같다.

$$\bar{M} = \int_0^h M_e [g(z)]^2 dz + \int_0^d \rho_w (C_I - 1) \frac{\pi D^2}{4} [g(z)]^2 dz + M_{deck} \tag{14}$$

$$\bar{C} = 2\gamma \bar{M} \omega_N \tag{15}$$

$$\bar{K} = \int_0^h EI \left(\frac{d^2 [g(z)]}{dz^2} \right) dz \tag{16}$$

$$\bar{F} = \left[\frac{1}{2} \rho_w C_D D \left(\frac{8}{3\pi} \right) \int_0^h E^2 [g(z)] dz \right] \cos \omega t - \left[\rho_w C_I \frac{\pi D^2}{4} \int_0^d E [g(z)] dz \right] \sin \omega t \tag{17}$$

여기서, M_e = 평균수면 이하 파일 자체의 질량과 파일 내부(내경 D_i)를 점하고 있는 물의 질량의 합(단위길이 당),

$g(z)$ = 파일변위의 근사적 형상함수, M_{deck} = 상부데크의 질량이다.

근사적 형상함수로서 $g(z) = (z/h)^n$ 를 취할 수 있으며, 形象指數를 $n=2$ 로 하여 식 (14), (16)과 (17)에 대입하면 다음과 같다.

$$\bar{M} = \frac{d^5}{5h^4} [\rho_s A_s + \rho_w A_w + \rho_w (C_I - 1) A_d] + \frac{(h^5 - d^5)}{h^4} \rho_s A_s + M_{deck} \tag{18}$$

$$\bar{K} = \frac{4EI}{h^3} \tag{19}$$

$$\bar{F} = \left[\frac{1}{2} \rho_w C_D D \left(\frac{8}{3\pi} \right) \left(\frac{\omega H}{2h \sinh kd} \right)^2 F_1 \right] \cos \omega t - \left[\rho_w C_I A_d \omega \frac{\omega H}{2h^2 \sinh kd} F_2 \right] \sin \omega t \tag{20}$$

여기서, $A_s = \pi(D^2 - D_i^2)/4$, $A_w = \pi D_i^2/4$, $A_d = \pi D^2/4$, $F_1 = (d^4/k) \sinh 2kd - (d/4k^2) \cosh 2kd + (1/8k^3) \sinh 2kd + (1/6d^3)$, $F_2 = (d^4/k) \sinh kd - (2d/k^2) \cosh kd + (2/k^3) \sinh kd$ 이다.

식 (20)을 다시 쓰면,

$$\bar{F} = \bar{F}_a \cos(\omega t + \bar{\phi}) \tag{21}$$

와 같다. 여기서,

$$\bar{F}_a = \left[\left(\frac{1}{2} \rho_w C_D D \left(\frac{8}{3\pi} \right) \left(\frac{\omega H}{2h \sinh kd} \right)^2 F_1 \right)^2 + \left(\rho_w C_I A_d \omega \frac{\omega H}{2h^2 \sinh kd} F_2 \right)^2 \right]^{1/2} \tag{22}$$

$$\bar{\phi} = \tan^{-1} \left[\frac{8 C_D H F_1}{3 C_I \pi^2 D F_2 \sinh kd} \right] \tag{23}$$

이다. 식 (15)에서의 고유주파수 ω_N (rad/s)은 다음과 같이 결정된다.

$$\omega_N = \sqrt{\frac{\bar{K}}{\bar{M}}} \tag{24}$$

3.1.3 集中質量(lumped mass)을 이용한 방법

集中質量은 임의 구조물의 연속된 부재를 수개의 미소요소로 분할하고 각 미소요소의 질량과 작용외력이 요소의 중앙에 집중되어 있으며, 이 집중질량이 각각의 동력학적 운동을 수행한다고 보는 개념이다(Dawson, 1983, pp. 282-329). 이와 같은 집중개념은 구조해석에 흔히 사용되는 기법이다.

여기에서는 집중개념에 의한 구조물의 동적해석을 위하여 해석대상 구조물을 Fig. 4에서 보이는 것처럼 2개의

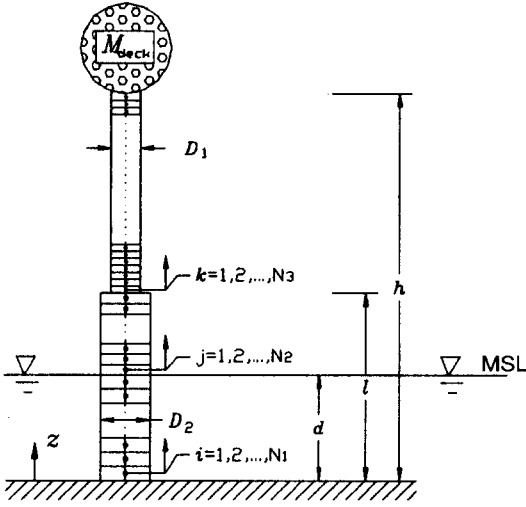


Fig. 4. Model structure of dual cross-sections.

복합단면을 갖는 연직 단일 파일로 설정한다. 이와 같은 구조물로서 단면이 현저하게 다를 경우, 形象函數에 의한 해석은 곤란하며 본 集中質量 해석방법이 유효할 것으로 판단된다. 水深은 d 이며 단면의 변환점의 연직높이를 l ($\geq d$)로 한다.

집중개념을 적용하기 위하여 파일을 구간($0 \leq z \leq d$)에 대해서는 N_1 등분, 구간($d \leq z \leq l$)에 대해서는 N_2 등분, 구간($l \leq z \leq h$)에 대해서는 N_3 등분 한다. 총 요소의 개수는 $N_T = N_1 + N_2 + N_3$ 이다. i 번째 요소의 질량은 水中 부분($1 \leq i \leq N_1$)과 수면의 위 부분($N_1 + 1 \leq i \leq N_T$)을 구분하여 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$M_i = (\rho_s - \rho_w)V_{si} + \rho_w V_{wi}; \quad 1 \leq i \leq N_1 \quad (25)$$

$$M_i = \rho_s V_{si}; \quad N_1 + 1 \leq i \leq N_T \quad (26)$$

여기서 ρ_s 는 파일재료의 밀도이다. 파일의 水面下 부분에서는 파일의 내부가 통상 침수되어 있기 때문에 i 번째 요소에 대하여 파일자체의 부피와 물의 부피를 각각 V_{si} 와 V_{wi} 로 지칭한다.

요소 i ($1 \leq i \leq N_1$)의 집중면적 A_i 와 집중부피 B_i 는 각각

$$A_i = D_1 d / N_1 \quad (27)$$

$$B_i = \pi D^2 d / (4N_1) \quad (28)$$

과 같다.

한편, 구간 $1 \leq i \leq N_1$ 에서 水粒子의 속도 및 가속도 u_i , a_i 는 식 (6), (7)을 참조하면,

$$u_i = E_i \cos(\omega t) \quad (29)$$

$$a_i = -\omega E_i \sin(\omega t) \quad (30)$$

와 같으며, E_i 는

$$E_i = \frac{\omega H \cosh kz_i}{2 \sinh kd} \quad (31)$$

이다. z_i 는 i 번째 요소의 중앙점 좌표이다.

각 요소의 집중질량은 요소에 작용하는 외력에 대하여 각각의 동적거동을 보이게 되나 각 요소들이 상호 독립된 운동을 하는 것은 아니며 서로 연결되어 있다. 식 (9)를 참조하여 각 요소의 동적응답을 지배하는 동력학적 방정식을 다음과 같은 행렬 형태로 구성할 수 있다.

$$[\tilde{M}] \{\ddot{x}\} + [\tilde{C}] \{\dot{x}\} + [\tilde{K}] \{x\} = \{\tilde{f}\} \quad (32)$$

여기서 $[\tilde{M}]$ = 질량 행렬 ($N_T \times N_T$), $[\tilde{C}]$ = 감쇠계수 행렬, $[\tilde{K}]$ = 강성행렬, $\{\tilde{f}\}$ = 파력행렬이며, 각 행렬의 요소는 다음과 같다.

$$\tilde{M}_{ij} = \begin{cases} \delta_{ij} [M_i + \rho_w (C_i - 1) B_i]; & 1 \leq i \leq N_1 \\ \delta_{ij} M_i; & N_1 + 1 \leq i \leq N_T \end{cases} \quad (33)$$

$$\tilde{C}_{ij} = \begin{cases} \delta_{ij} [C_i + \rho_w C_D A_i \hat{u}_i]; & 1 \leq i \leq N_1 \\ \delta_{ij} C_i; & N_1 + 1 \leq i \leq N_T \end{cases} \quad (34)$$

$$\tilde{f}_i = f_{ai} \sin(-\omega t + \phi_i); \quad 1 \leq i \leq N_1 \quad (35)$$

여기서

$$f_{ai} = E_i \left[\left(\frac{1}{2} \rho_w C_D A_i \hat{u}_i \right)^2 + (\rho_w C_I B_i \omega)^2 \right]^{1/2} \quad (36)$$

$$\phi_i = \tan^{-1} \left(\frac{C_D A_i \hat{u}_i}{2 C_I B_i \omega} \right) \quad (37)$$

강성계수 행렬 $[K]$ 의 비대각선 요소들의 값은 일반적으로 0이 아니며 이 행렬이 바로 각 요소들의 상호작용을 나타내는 것이다. 이 행렬은 i 번째 요소의 중앙점에 단위 힘을 작용시키고(타 요소에서의 작용력은 영) 이에 따른 모든 요소의 변위를 구하여 구성된 $N_T \times N_T$ 의 변위 행렬의 역행렬에 해당한다.

식 (34)의 감쇠행렬은 식 (12)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{ij} = 2\gamma M_{ij} \omega_N \quad (37)$$

한편, 식 (36)에서 각 요소들의 靜的變位 $\{x_s\}$ 는 다음 식으로부터 간단히 구할 수 있다.

$$[K] \{x_s\} = \{f\} \quad (39)$$

Fig. 5는 임의의 等分布 荷重을 갖는 cantilever보에 대

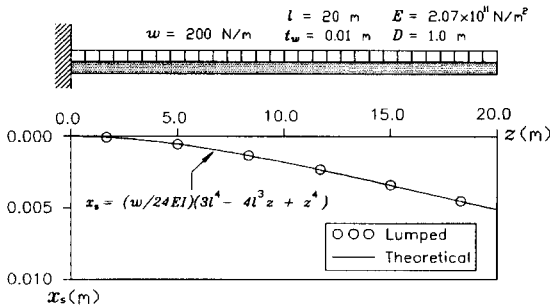


Fig. 5. Comparison of lumped mass analysis and theory for the static displacement of cantilever beam.

하여 이론적 정적변위와 식 (39)로부터 구한 정적변위를 비교한 것이다. 사용한 節點의 개수가 $N_1 = 3, N_2 = 3$ 로 적게 취하였음에도 불구하고 그 차이가 매우 미미함을 알 수 있다.

3.2 衝擊碎波力の 작용에 의한 동적해석

衝擊碎波力은 단순히 식 (32)의 우측 항인 파력을 충격쇄파력으로 대치하면 된다. 충격쇄파력은 평균수면 상 파일의 일부구간에서만 집중적으로 작용하기 때문에 형상합수기법은 사용이 불가할 것으로 판단된다. 왜냐하면, 집중하중을 받는 경우는 예상되는 파일의 변위가 이미 설정한 형상합수 $g(z)=(z/h)^n$ 에서 벗어날 것이기 때문이다. 따라서, 여기에서는 집중질량기법만을 사용하며 충격쇄파력 작용구간에 포함되는 요소들에 대해서만 식 (1)에 의거 충격쇄파력을 계산한다. 단, 충격쇄파력의 작용효과를 부각시키기 위하여 碎波低部에 있는 파력은 포함하지 않기로 한다.

4. 구조물 動的舉動의 계산

4.1 正弦波의 작용

既 수립한 형상합수기법과 집중질량기법의 적용성을 고

Table 1. Input conditions for example analysis.

구분	case	case (a)	case (b)	case (c)
수심, d (m)		7	7	7
파고, H (m)		5	5	5
주기, T (s)		10	10	10
계수, E (N/m ²)		2.07×10^{11}	2.07×10^{11}	2.07×10^8
파일 직경, D (m)		2.0	2.0	2.0
파일 벽두께, t_w (m)		0.05	0.01	0.01
상부데크의 질량, M_{deck} (kg)		1000.0	1000.0	1000.0
고유주기, T_N (s)		0.078	0.110	3.471

찰하기 위하여 정현파 입사에 대한 예제해석을 수행하였다. 대상구조물은 Fig. 3과 같은 단일 연직파일로 하였으며, 입력조건은 Table 1에 제시되어 있다. 모든 조건들의 입사파 제원, 파일직경과 데크 중량은 동일하며, 다만 파일 벽두께 또는 Young 계수를 조절하여 파일의 剛性を 변화시킨 것이다. 형상합수기법상의 형상지수는 $n = 1.4$ 로 하였으며 계산에 사용된 관성력계수와 항력계수는 모든 조건들 공히 $C_I = 2.0, C_D = 1.5$ 로 하였다. 집중질량기법에서 요소의 개수는 $N_1 = 10, N_2 = 20$ 과 같이 하여 총 30개로 하였다. 한편, 표에서 고유주기는 형상합수기법을 적용하여 계산한 것이다(식 (24)참조). 구조물 강성이 작을수록 고유주기가 증가함을 알 수 있다. 집중질량기법에서 식 (38)로 주어지는 감쇠계수행렬의 결정을 위하여 이 고유주기를 그대로 이용하였다.

동적해석의 미지수는 형상합수기법의 경우 상부데크의 동적거동 U , 집중질량기법의 경우 각 요소중심의 거동 x_i 이다. 이들 미지수들의 時系列을 구하기 위하여 본 연구에서는 Wilson- θ 법(Bathe, 1982, pp. 508-511)을 이용한 時間領域 해석기법을 채택하였다. 여기에서는 각 기법들의 적용결과를 효과적으로 고찰하기 위하여 파일연장에서 변

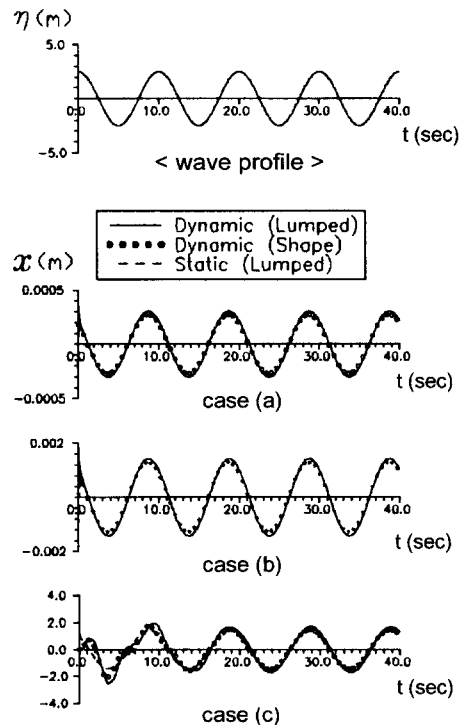


Fig. 6. Comparison of the dynamic and static displacements for sinusoidal wave force.

위가 가장 클 것으로 판단되는 상부데크 또는 상부요소의 변위만을 비교하였다. Fig. 6은 각 기법들의 해석결과를 보여준다. 모든 case에서 형상합수기법과 집중질량기법의 결과가 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

집중질량방법에 의한 動的變位와 靜的變位를 비교하여 보면 剛性이 비교적 강한 case(a)와 case(b)는 별 차이가 없으나 case(c)의 경우에는 前者가 약간 상회함을 알 수 있다. 강성이 비교적 약한 구조물에 대해서는 동적해석을 수행해야 된다는 일반적 기대와 잘 부합되고 있다.

4.2 衝擊碎波力の 작용

계산의 입력조건은 Table 1과 같이 하되 파고 H 를 碎波高 H_b 로 하고 波峰高를 $\eta_b = 0.8H_b$ 와 같이 취하였다(合田等, 1966). 계산시간간격 Δt 는 작용시간 $\tau = 0.048$ 초내에 작용하는 충격쇄파력의 변화를 충분히 반영하기 위하여 $\Delta t = \tau/10$ 으로 취하였다. Fig. 7은 시간진행에 따른 충격쇄파력의 연직분포의 변화를 보여주며 이에 따른 각 case별 계산결과를 Fig. 8에 도시되어 있다. 전반적으로 각 case별 그림을 보면 동적변위의 최대치는 충격쇄파력의 종료시점 부근에서 발생한다. 또한, 충격쇄파력의 작용종료 이후에도 상당정도의 餘振이 존재하며 여진의 운동주기는 Table 1의 고유주기와 잘 일치함을 알 수 있다.

동적변위의 최대값들을 이미 기술한 正弦波의 결과들과 비교하여 보면 case (a)와 case (b)에서는 충격쇄파력이, case (c)에서는 정현파가 현저히 더 큰 값들을 보인다. 이것은 剛性이 상대적으로 클 때는 충격쇄파력에 의한 변위가 정현파의 경우를 훨씬 상회할 수 있으며, 강성이 비교적 작을수록 충격쇄파력의 영향이 감소함을 보여주는 것이다. Table 1에서 채택한 Young 계수는 일반적인 鋼에 대한 것이며, 따라서, 파일의 소재가 鋼일 경우에는 충격쇄파력에 의한 동적변위를 간과해서는 안될 것으로 판단된

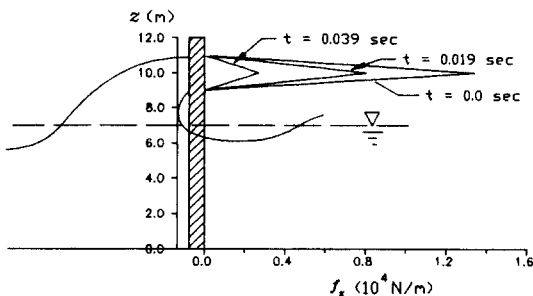


Fig. 7. Time variation of the vertical distribution of breaking wave force.

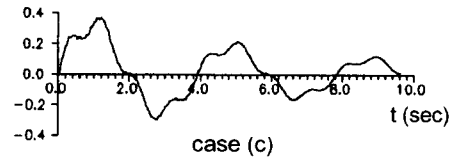
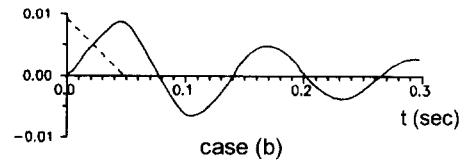
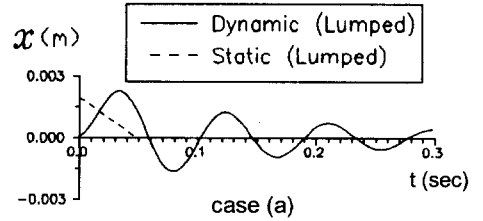
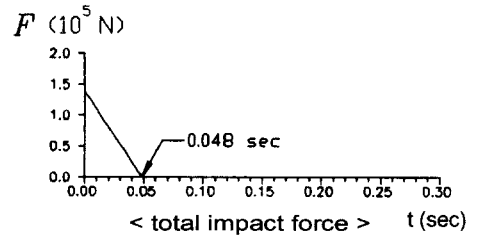


Fig. 8. Comparison of the dynamic and static displacement for breaking wave force.

다. 즉, 쇄파고를 정현파 파고로 간주하여 파일을 정적설계할 경우 파일이 파소설계될 가능성이 있는 것이다.

충격쇄파력에 의한 정적변위의 최대값을 보면 case (a)에서는 동적변위의 최대값보다 작게, case (b)에서는 거의 비슷하며 case (c)에서는 월등 크게(약 9.21 m) 나타났다(case 별 동적변위의 동시 비교를 위하여 도시하지 않았음). 이는 충격쇄파력의 크기만을 채택하여 정적설계할 경우 구조물 剛性의 대소에 따라 파소 또는 과대설계를 초래할 수 있으며 충격쇄파력의 작용시간을 필히 고려하는 동적설계의 중요성을 보여주고 있는 것이다. Case (c)에서의 정적변위의 동적변위에 대한 優位는 정현파의 경우와 일치한다.

5. 結 論

쇄파충격력의 특징은 쇄파제원과 동일한 正弦波를 대상으로 한 모리슨식 계산치보다 그 크기는 월등히 크지만 보통 백분의 수초 이내로 매우 짧은 시간동안 작용한다는

점이다. 따라서, 구조물 전체의 변위에는 별 영향이 없으며 충격쇄파력을 직접 받는 局所部材의 설계에만 반영하면 된다는 관점이 지배적이었다. 그러나, 국소부재의 설계에서도 충격쇄파력의 크기만을 고려한 정적설계는 과도한 부재 단면을 결정할 가능성이 있으며, 반대로 경우에 따라서는 동적변위가 정적변위보다 크게 나타날 수도 있다. 따라서, 충격쇄파력 작용 시 부재단면의 정확한 선정을 위해서는 구조물 전체의 동적거동을 확인하기 위한 동적해석을 수행하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 일차적으로 연직 단일 원형파일을 대상으로 정현파와 쇄파가 각각 작용할 경우에 대하여 동적해석을 수행하였다. 사용기법으로서 구조물 변위의 형상을 가 정하는 形象函數技法과 구조물 연장을 미소 집중질량으로 분할하여 각 요소의 거동을 파악하는 集中質量技法을 수립하여 이들을 병용하였다. 특히, 집중질량기법은 개별요소에 적용되기 때문에 파일연장 중 단면이 크게 변하는 복합단면의 경우에 효과적으로 적용할 수 있다. 해석결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

최대 충격쇄파력과 최대 동적변위사이 에 약간의 時差가 존재한다. 경우에 따라서는 최대동적변위를 포함하는 餘振이 충격쇄파력의 종료이후에도 발생할 수 있다.

파일의 剛性이 클수록 충격쇄파력에 의한 동적변위가 쇄파고와 동일한 파고를 갖는 正弦波에 의한 동적변위보다 커지나, 강성이 현저히 작을 경우에는 오히려 이 반대현상이 발생한다.

정현파의 경우, 파일의 강성이 클수록 정적변위와 동적변위가 잘 일치하나 강성이 현저히 작을 경우에는 동적변위가 정적변위보다 다소 클 수 있다.

쇄파의 경우, 파일의 강성이 클수록 동적변위가 정적변위보다 약간 크나 강성이 현저히 작을 경우에는 정적변위가 동적변위보다 현저히 클 수 있다.

상기 결과들은 단일 연직파일에 대한 일부 예제해석을 통하여 도출된 정성적 결과이며 정적변위와 동적변위에 대하여 보다 포괄적이고 정량적인 비교를 하기 위해서는 파일강성의 변화에 따른 다양한 해석결과가 요구된다고 할 수 있다. 더욱이, 여러 연직 및 사행부재를 갖는 복합부재 구조물의 동적거동을 해석하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

심재설, 전인식, 이홍식, 1998. 연직 원형파일에 작용하는 쇄

파파력의 수치해석, 한국해양 해양공학회지, **10(2)**: 100-108.

全仁植, 沈載高, 李弘植, 1998. 傾斜面 碎波發生에 대한 境界要素法の 적용, 대한토목학회논문집, **18(II-3)**: 277-287.

한국해양연구소, 1997. '97 이어도 종합해양과학기지 구축사업 보고서, 해양수산부, BSPG 97277-00-1024-2.

Apelt, C.J. and Piorewicz, J., 1987. Laboratory studies of breaking wave forces acting on vertical cylinders in shallow water, *Coastal Engrg.*, **11**, pp. 263-282.

Bathe, K., 1982. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice-Hall, 735 pp.

Brebbia, C.A. and Walker, S., 1979. *Dynamic Analysis of Offshore Structures*, Newnes-Butterworths, 323 pp.

Dawson, T.H., 1983. *Offshore Structural Engineering*, Prentice-Hall, 346 pp.

DnV, 1977. *DnV Rules for the Design Construction and Inspection of Offshore Structures*, Appendix B. Loads Reprint with Corrections, Det Norske Veritas.

Hall, M.A., 1958. Laboratory study of breaking wave forces on piles, *TM-106*, U.S. Army Corps of Engrs., Beach Erosion Board, Washington, D.C.

Honda, T. and Mitsuyasu, H., 1974. Experimental study on breaking wave force on a vertical circular cylinder, *Coastal Engrg. in Japan*, **17**, pp. 59-70.

Kjeldsen, S.P., Torum, A. and Dean, R.G., 1986. Wave forces on vertical piles caused by 2- and 3-dimensional breaking waves, *Proc. 20th Coastal Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 1929-1937.

Ross, C.W., 1959. Large-scale tests of wave forces on piling, *TM-111*, U.S. Army Corps of Engrs., Beach Erosion Board, Washington, D.C.

Sarpkaya, T. and Isaacson, M., 1981. *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*, Van Nostrand Reinhold.

Swift, R.H., 1989. Prediction of breaking wave forces on vertical cylinders, *Coastal Engrg.*, **13**, pp. 97-116.

Zhou, D., Chan, E.S. and Melville, M.K., 1991. Wave impact pressures on vertical cylinders, *Applied Ocean Res.*, **13(5)**, pp. 220-234.

谷木勝利, 高橋重雄, 金子忠男, 1986. 圓柱に働く衝擊碎波力に關する實驗的研究, 港灣技術研究所報告, **25(2)**: 29-87.

合田良實, 原中祐人, 北畑正記, 1966. 直柱に働く衝擊碎波力の研究, 港灣技術研究所報告, **5(6)**: 1-30.

後野正雄, 1988. 海岸 港灣構造物に働く衝擊波力に關する基礎的研究, 日本大板大學 博士學位論文.

Received January 12, 1999

Accepted March 26, 1999