

해상철다리의 말뚝기초에 작용하는 파도힘의 계산방법

김경일, 량은별, 박정화

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《설계작성에서 경제적타산을 과학적으로 하는데 특별한 주의를 돌려야 합니다. 설계 일꾼들이 점 하나를 잘못 찍고 선 하나를 잘못 그으면 나라의 소중한 자재와 자금, 로력이 낭비되게 됩니다.》

선행연구[1-3]에서는 말뚝기초에 작용하는 파도힘의 계산원리는 밝혔지만 계산방법은 구체적으로 제기하지 못하였다.

우리는 해상철다리의 말뚝기초에 작용하는 파도힘계산방법을 제기하고 사만 해상철다리의 설계단계에서 제기된 초재말뚝묶음기초와 큰직경말뚝기초에 작용하는 파도힘을 계산하고 비교하였다.

1. 연구지역의 해양환경과 철다리기초형식

연구지역은 만안으로 깊이 들어와있으므로 파도세기가 약하다. 연구지역의 30년간 최대바람속도와 주행거리로부터 추정 한 대상구역의 설계파고, 설계파장, 설계파주기는 각각 $H=1.4\text{m}$, $L=16\text{m}$, $T=3.2\text{s}$ 이고 설계조차는 0.4m 이다.

연구지역에 건설하려는 해상철다리의 기초형식으로 두가지가 제기되였다. 하나는 직경이 $D=1.3\text{m}$ 이고 20개의 말뚝들(5×4 개)을 초재로 묶어준 초재말뚝묶음기초이고 다른 하나는 직경이 $D=10\text{m}$ 인 큰직경말뚝기초이다.(그림 1)

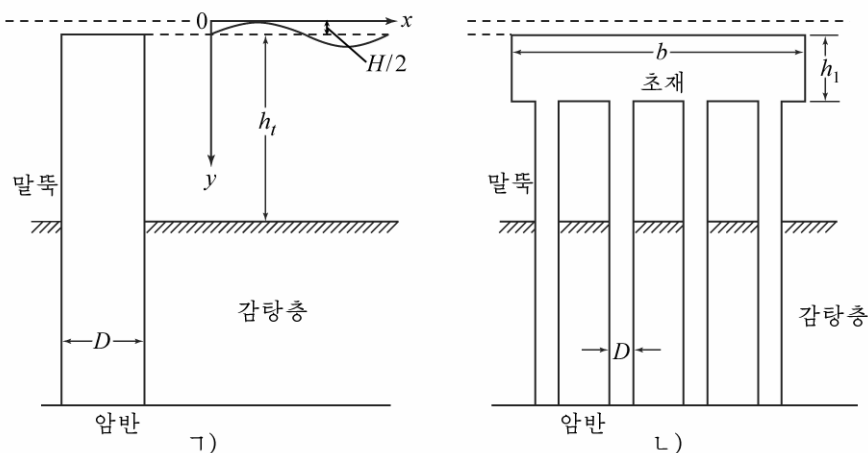


그림 1. 큰직경말뚝기초(1))와 초재말뚝묶음기초(2))의 구조형식

기초의 웃면은 사리만조수준면과 일치하게 설정하였다.

초재말뚝묶음기초는 초재의 길이(파향에 수직), 너비, 두께가 각각 $a=18.6\text{m}$, $b=14.6\text{m}$, $h_1=4.5\text{m}$ 인 직6면체이지만 가상직경이 $D=\sqrt{4ab/\pi}\approx 18.6\text{m}$ 인 큰직경말뚝기초로 볼수 있다.

2. 단일수직말뚝에 작용하는 파도힘의 계산방법

수직축 y 의 령점을 사리만조시기의 파도마루선에 정하고 초재와 말뚝의 수직미소길이 Δy 에 작용하는 파도힘을 계산하자.

수직으로 박힌 개별적말뚝의 단위길이에 작용하는 파도의 흐름힘분력 $P_D(t)$ 와 관성힘분력 $P_I(t)$, 파압 $P(t)$ 는 다음과 같이 표시된다.[1-3]

$$P_D(t) = \frac{\rho C_D D u^2(t)}{2g}, \quad P_I(t) = \frac{\rho C_M \pi D^2}{4g} \cdot \frac{\partial u(t)}{\partial t}, \quad P(t) = P_D(t) + P_I(t)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, C_D 와 C_M 은 각각 흐름저항계수와 관성저항계수이다. 그리고 파도수질점의 속도 $u(t)$ 와 가속도 $\partial u(t)/\partial t$ 는 각각 다음과 같이 표시된다.

$$u(t) = \frac{\pi H}{T} \frac{\text{chk}(h_t - y)}{\text{shkh}_t} \sin(kx - \omega t), \quad \frac{\partial u(t)}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\text{chk}(h_t - y)}{\text{shkh}_t} \cos(kx - \omega t)$$

여기서 각속도 $\omega = 2\pi/T$, 파수 $k = 2\pi/L$ 이고 h_t 는 사리만조때의 물깊이이다.

말뚝의 미소길이 Δy 에 작용하는 파도힘은 다음식으로 계산할수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta F = \Delta F_D + \Delta F_I = & \frac{\rho C_D D \pi^2 H^2}{2gT^2} \frac{\text{ch}^2 k(h_t - y)}{\text{sh}^2 kh_s} \sin(kx + \omega t) \Delta y + \\ & + \frac{\rho C_M \pi D^2 2\pi^2 H}{4gT^2} \frac{\text{chk}(h_t - y)}{\text{shkh}_t} \cos^2(kx - \omega t) \Delta y \end{aligned}$$

초재말뚝묶음기초인 경우에는 위의 식을 초재가 놓인 구간 $[H/2, h_1]$ 과 말뚝무리가 놓인 구간 $[h_1, h_t + H/2]$ 에서, 큰직경말뚝기초인 경우에는 구간 $[H/2, h_t + H/2]$ 에서 적분하여 파도힘을 계산한다.

수직원형말뚝인 경우 흐름저항계수 $C_D=1.2$ 이고 관성저항계수 C_M 은 D/L 에 따르는 실험도표[3]에서 결정한다. 초재말뚝묶음기초의 말뚝부분에서는 $D/L \approx 0.1$ 이고 초재부분에서는 $D/L \approx 1.2$ 이므로 C_M 은 각각 2.0, 0.3이다. 큰직경말뚝기초에서 $D/L=0.63$ 이므로 C_M 은 0.55이다.

3. 말뚝무리와 부착생물의 영향을 고려한 파도힘계산방법

말뚝무리의 영향 초재말뚝묶음기초인 경우 등간격($l=4\text{m}$)으로 배치된 말뚝무리에서 매 말뚝마다 파마루나 파굴이 놓이는 위상이 서로 다르다. 실례로 $t=0$ 인 순간에 1, 2, 3, 4 말뚝렬들의 x 자리표는 각각 0, l , $2l$, $3l$ 이므로 매 말뚝에 파마루가 놓이는 위상이 차이난다. 말뚝무리와 초재에 작용하는 최대파도힘을 구하기 위하여 파도한주기안에서 매 순간마다 개개의 말뚝들과 초재에 작용하는 파도힘을 동시에 구하고 모두 합한다.

말뚝무리에 파도가 작용하면 개별적말뚝들에서 일어난 파도의 굴절과 반사의 영향으로 전렬의 말뚝에 작용하는 파도힘은 단일말뚝때보다 커지고 후렬에 작용하는 파도힘은 약

해진다. 이 영향을 각각 간섭결수와 가림결수로 나타내는데 이 결수들을 곱하여 말뚝무리결수 μ_1 을 결정한다.

연구지역에서 $l/D \approx 3$ 이므로 간섭결수는 1.25, 가림결수는 0.8로 정할수 있다. 말뚝무리에서 파도입사쪽 1렬말뚝들은 간섭효과만을 받고 그뒤의 2, 3렬말뚝들은 간섭효과와 가림효과를 다 받으며 마지막 4렬말뚝들은 가림효과만을 받는다. 이것을 고려하여 결정한 말뚝무리결수 μ_1 은 1, 2, 3, 4렬말뚝들에서 각각 1.25, 1, 0.8, 0.51이다.

부착생물의 영향 말뚝기초들에 섭조개, 굴 등과 같은 생물이 붙으면 직경이 커지고 결면이 거칠어지므로 말뚝기초에 작용하는 파도힘이 커진다. 이 영향은 부착생물결수 μ_2 로 나타낸다. 연구지역은 섭조개, 굴 등이 많이 번식하는 구역이므로 부착생물두께(ε)를 5cm로 보면 초재말뚝묶음기초의 말뚝에서 $\varepsilon/D \approx 0.04$ 이므로 $\mu_2 = 1.4$ 이며 초재에서 $\varepsilon/D \approx 0.003$ 이므로 $\mu_2 = 1.15$ 이다. 큰직경말뚝기초인 경우 $\varepsilon/D \approx 0.005$ 이므로 $\mu_2 = 1.15$ 이다.[2]

이와 같이 결정한 말뚝무리결수와 부착생물결수를 위에서 계산한 파도힘에 각각 곱하는 방법으로 철다리의 기초에 작용하는 파도힘을 계산한다.

4. 두가지 기초형식에 작용하는 파도힘의 비교

연구지역에서 주어진 설계파도와 설계조차에 기초하여 두가지 기초형식들에 작용하는 파도힘을 계산하기 위하여 먼저 물깊이에 따르는 파압분포를 결정하였다.(그림 2)

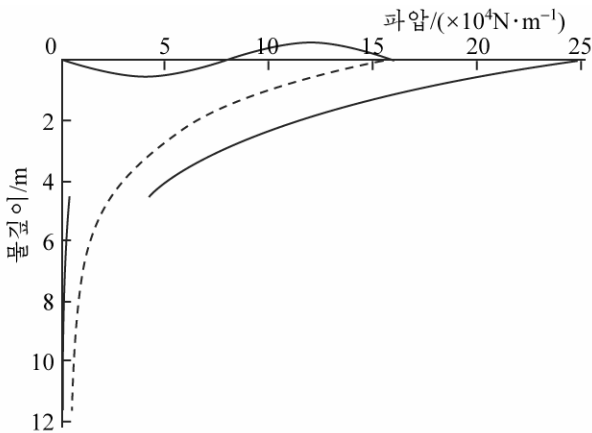


그림 2. 물깊이에 따르는 파압분포
실선 - 초재말뚝묶음기초, 점선 - 큰직경말뚝기초

그림 2에서 보는바와 같이 물깊이가 깊어질수록 파압은 급격히 감소된다. 큰직경말뚝기초인 경우 파압은 물깊이에 따라 연속적으로 감소되지만 초재말뚝묶음기초에 작용하는 파압은 초재구간으로부터 말뚝구간으로 가면서 불연속적으로 변하는데 이것은 말뚝구간에서 대부분의 파도에너리가 말뚝들사이로 새나가기때문이다.

다음으로 물깊이에 따르는 파압분포를 적분하여 교각들에 작용하는 파도힘을 계산하였다.

표. 교각들에 작용하는 파도힘($\times 10^5 \text{N}$)

교각번호	2	3	4	5	6	7	8	9	10
물깊이/m	11.3	4.3	5.2	7.7	6.0	6.0	7.2	6.4	5.8
초재말뚝묶음기초	5.1	6.8	6.1	5.2	5.7	5.7	5.5	5.6	5.8
큰직경말뚝기초	3.8	4.1	4.0	3.9	4.0	4.0	3.9	4.0	4.0

표에서 보는바와 같이 물깊이가 가장 깊은 2호교각에 작용하는 파도힘이 가장 작고 물깊이가 가장 얇은 3호교각에서 파도힘이 가장 크다. 이로부터 물깊이가 깊을수록 교각들에 작용하는 파도힘이 작아진다는것을 알수 있다.

초재말뚝묶음기초가 받는 파도힘은 $(5.1 \sim 6.8) \times 10^5 \text{N}$ 이고 큰직경말뚝기초가 받는 파도힘은 $(3.8 \sim 4.1) \times 10^5 \text{N}$ 로서 초재말뚝묶음기초가 받는 파도힘의 60~74%이다.

초재말뚝묶음기초인 경우 전체 파도힘의 97%가 초재에, 나머지 3%가 말뚝무리에 작용한다.

맺 는 말

1) 두가지 형식의 철다리기초에 작용하는 파도힘은 물깊이가 깊을수록 작아지는 경향이 있다.

2) 큰직경말뚝기초가 받는 파도힘은 초재말뚝묶음기초가 받는 파도힘의 60~74%정도이다.

참 고 문 헌

- [1] 고정식 등; 유전산물과 처리기술, 김일성종합대학출판사, 287~312, 주체104(2015).
- [2] 주재선; 해양구조물세기, 김책공업종합대학출판사, 3~156, 주체92(2003).
- [3] 严恺 等; 海岸工程, 海洋出版社, 273~292, 2012.

주체105(2016)년 9월 5일 원고접수

The Calculating Method of Wave Power exerting on the Post Foundation of Marin Iron Bridge

Kim Kyong Il, Ryang Un Byol and Pak Jong Hak

The wave power exerting on the post foundation of the marin iron bridge is in tendency to decrease at the pier where the water is deep.

The wave power exerting on the post foundation with large diameter is 60~74% of that exerting on the grillage post-group foundation.

Key words: wave power, post foundation