

깊은 해안대에서 설계파도요소를 결정하는 한가지 방법

김형식, 리호영

해양구조물이 파고관측자료가 없는 깊은 해안대에 건설되는 경우에는 얕은 해안대의 파고관측자료로부터 설계파도요소를 결정하여야 한다.

해안대에서 파향선을 따르는 파고의 변화를 계산하는 방법에는 이론적방법[1, 2, 4]과 통계적방법[3]이 있다.

론문에서는 이론적방법으로 얕은 해안대의 파고관측자료로부터 어느 한 해양구조물이 건설되는 깊은 해안대에서의 설계파도요소를 결정하는 한가지 방법을 고찰하였다.

1. 방법의 원리

깊은 바다로부터 해안대로 파도가 파향선을 따라 입사될 때 물깊이감소와 바닥마찰의 영향으로 파고가 변한다. 이때 해안대에서 파고 H 는 다음과 같이 표시된다.

$$H = k_s k_f H_0 \quad (1)$$

여기서 H_0 은 깊은물파고, k_s 는 얕은물변형결수, k_f 는 바닥마찰에 의한 파고감소결수이다.

1) 물깊이에 따르는 얕은물변형결수

파도가 파향선을 따라 깊은물에서 얕은물로 전파될 때 파속과 파장이 작아지고 파도에 에너지가 보다 얕은물에 집중되면서 복잡한 파고변화가 일어난다. 이때 얕은물변형결수 k_s 의 물깊이 h 에 따르는 분포특성과 계산방법은 다음과 같다.[3, 4]

① $h > 0.5L_0$ (L_0 은 깊은물에서의 파장)인 구역에서는 파고변화가 없으며 $k_s = 1$ 로 본다.

② $h = (0.2 \sim 0.5)L_0$ 인 구역에서는 률지쪽으로 오면서 파고가 점차 낮아진다. 이 구역에서 얕은물변형결수는 물깊이 h 와 파장 L 이 주어지면 선형파리론(미소진폭파리론)에 기초하여 다음과 같이 계산한다.

$$k_s = \left[\frac{2ch^2(2\pi h/L)}{4\pi h/L + \text{sh}(4\pi h/L)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

③ $h = (0.1 \sim 0.2)L_0$ 인 구역은 파고가 크게 변하지 않는 파도구역이다. 이 구역에서는 률지쪽으로 오면서 파고가 점차 낮아지다가 다시 서서히 높아진다. 얕은물변형결수를 계산할 때 파고감소구간에서는 선형파리론(미소진폭파리론)에 기초한 식 (2)를 리용하고 파고증가구간에서는 비선형파리론에 기초한 다음의 식을 리용한다.

$$k_s = \left[\frac{2ch^2(2\pi h/L)}{4\pi h/L + \text{sh}(4\pi h/L)} \right]^{1/2} + 0.0015 \left(\frac{h}{L} \right)^{-2.8} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{1.2} \quad (3)$$

여기서 L_0 , H_0 은 깊은물에서의 파장과 파고, L , h 는 얕은물에서의 파장과 물깊이이다.

④ $0.1L_0 > h \geq h_b$ (h_b 는 쇄파깊이)인 구역에서는 률지쪽으로 오면서 파고가 뚜렷하게 높아진다. 얕은물변형결수는 식 (3)에 의하여 계산한다.

깊은물에서의 파장은 파주기 T 가 주어지면 $L_0 = gT^2 / (2\pi)$ 으로부터 계산하며 파고 H_0 은 바람속도에 의하여 결정한다. 그리고 얕은물에서 물깊이 h 에 따르는 파장은 식 $L = L_0 \tanh(2\pi h / L)$ 을 리용하여 계산한다.

2) 바닥마찰에 의한 파고감소결수

파도는 전파과정에 바닥마찰에 의하여 에네르기가 소모되며 파고가 낮아진다. 파향선을 따라 파도가 $(j-1)$ 번째 점에서 j 번째 점까지 전파될 때의 파고감소결수 $k_{f(j-1, j)}$ 와 첫번째 점에서 고찰하는 점까지의 전구간에서 파고감소결수 k_f 는 다음과 같이 계산된다.

$$k_{f(j-1, j)} = \left[1 + \frac{64 \pi^3}{3} \frac{f_w H_{j-1} \Delta x}{g^2 T^4} \frac{k_s^2}{\text{sh}^3(2\pi h / L)} \right]^{-1} \quad (4)$$

$$k_f = \prod_j k_{f(j-1, j)}$$

여기서 Δx 는 $(j-1)$ 번째 점과 j 번째 점사이의 거리, f_w 는 파도바닥마찰결수, H_{j-1} 은 $(j-1)$ 번째 점에서의 파고, h 는 물깊이, L 은 파장, T 는 파주기, k_s 는 얕은물변형결수이다. h, L, k_s 는 $(j-1)$ 번째 점과 j 번째 점에서 관측값들의 평균값을 취한다.

파도바닥마찰결수 f_w 는 존슨의 실험곡선[4]을 1차함수형식으로 모형화하여 얻을수 있다.

$$\lg f_w = -0.56 \lg(a / k_N) - 0.6$$

여기서 a 는 파도바닥수질점의 자리길반경, k_N 은 바닥거칠음도인데 립도 $d(\text{mm})$ 가 주어지면 식 $k_N = 0.016 \cdot 6 d^{1/6}$ 으로부터 구한다.[2]

3) 쇄파의 형태와 쇄파깊이, 쇄파높이

물깊이가 얕은 쇄파대에서 쇄파의 형태와 쇄파깊이, 쇄파높이는 다음과 같이 결정한다. 쇄파의 형태는 쇄파지수

$$\xi_b = i(H_0 / L_0)^{-1/2}$$

에 의하여 구별된다. 여기서 i 는 바닥경사구배, H_0, L_0 은 각각 깊은물에서의 파고와 파장이다.

이때 $\xi_b < 0.4$ 이면 마루쇄파, $0.4 \leq \xi_b < 2$ 이면 말리는 쇄파, $\xi_b \geq 2$ 이면 쳐오르는 쇄파가 일어난다.

쇄파높이는 다음과 같이 계산된다.

$$H_b = 0.76 H_0 i^{1/7} (H_0 / L_0)^{-1/4} \quad (5)$$

쇄파높이가 주어지면 쇄파깊이는 다음식으로 구한다.

$$h_b = \begin{cases} (1.40 - 6.85i) H_b & (i \leq 0.07) \\ 0.92 H_b & (i > 0.07) \end{cases} \quad (6)$$

쇄파된 후에 생기는 파고는 다음과 같이 계산된다.

$$H = 0.8 \left(\frac{h}{h_b} \right) H_b \quad (7)$$

2. 방법의 적용

연구지역의 해안대에서 파향은 남동방향이고 바닥경사구배는 $i=0.04$ 이며 바닥퇴적물의 평균립도는 $d=0.06\text{mm}$ 이다. 남동방향의 기상해일이 일어날 때 최대파주기는 보통 $T=9\text{s}$ 이므로 깊은물에서 최대파장은 $L_0 = gT^2/(2\pi) \approx 126.4$ 이다.

해양구조물의 건설지점은 해안선으로부터 약 500m 떨어져있으며 물깊이는 20m이다. 파도관측지점의 물깊이는 $h=6\text{m}$ 이고 재현기 50년에 해당하는 최대파고는 $H=5\text{m}$ 이다.

이때 물깊이구간별 파도바닥마찰계수와 파고감소계수는 표 1과 같다.

표 1. 물깊이구간별 파도바닥마찰계수와 파고감소계수

| h/m | 50~100 | 40~50 | 30~40 | 25~30 | 20~25 | 15~20 | 10~15 | 7~10 | 6~7 |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| f_w | 0.095 | 0.037 | 0.029 | 0.024 | 0.021 | 0.018 | 0.018 | 0.014 | 0.011 |
| $k_{f(j-1, j)}$ | 0.999 | 0.999 | 0.999 | 0.999 | 0.998 | 0.996 | 0.992 | 0.990 | 0.994 |

물깊이에 따르는 파고감소계수와 얕은물변형계수 및 그 적은 표 2와 같다.

표 2. 물깊이에 따르는 파고감소계수와 얕은물변형계수 및 그 적

| h/m | 100 | 50 | 40 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 | 7 | 6 |
|-----------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| k_f | 1 | 0.998 | 0.997 | 0.996 | 0.995 | 0.993 | 0.989 | 0.981 | 0.971 | 0.965 |
| k_s | 1 | 0.97 | 0.95 | 0.93 | 0.92 | 0.91 | 0.92 | 0.98 | 1.04 | 1.08 |
| $k_s \cdot k_f$ | 1 | 0.97 | 0.95 | 0.93 | 0.92 | 0.90 | 0.91 | 0.95 | 1.01 | 1.04 |

표 1, 2에서 보는바와 같이 f_w , $k_{f(j-1, j)}$, k_f 는 물깊이가 얕아지면서 점차 작아진다. k_f 는 깊은물로부터 물깊이가 6m인 관측지점까지 전파되는 과정에 바닥마찰로 하여 3.5% 작아진다. 그러나 k_s 는 깊은물에서 물깊이가 20m인 건설지점으로 가면서 작아지다가 건설지점에서 관측지점으로 가면서 다시 커진다. 그리고 물깊이에 따르는 얕은물변형계수 k_s 의 변화는 바닥마찰에 의한 파고감소계수 k_f 의 변화에 비하여 크므로 파고계산에 주는 영향도 크다. 표 1, 2의 계수계산결과와 관측지점에서의 파고관측자료를 리용하면 해안대에서 물깊이에 따르는 파고와 파장을 구할수 있다.(표 3)

표 3. 해안대에서 물깊이에 따르는 파고와 파장

| h/m | 100 | 50 | 40 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 | 7 | 6 | 5.1 |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| H/m | 4.8 | 4.7 | 4.6 | 4.5 | 4.4 | 4.3 | 4.4 | 4.6 | 4.9 | 5.0 | 5.8 |
| L/m | 126 | 124 | 122 | 116 | 111 | 105 | 95 | 81 | 70 | 65 | |

표 3에서 보는바와 같이 파고는 해양구조물건설이 예견되는 물깊이가 20m인 건설지점에서 4.3m로서 제일 낮고 이 지점을 중심으로 랑쪽으로 가면서 높아진다. 이로부터 물깊이가 20m인 건설지점에서 보장률이 1%인 설계파도요소는 파고 $H_{1\%}=4.3\text{m}$, 파장 $L_{1\%}=105\text{m}$, 파주기 $T_{1\%}=9\text{s}$ 로 정할수 있다. 식 (5), (6)에 의하여 계산된 쇄파깊이는 5.1m로서 관측지점의 물깊이 6m보다 얕으며 쇄파높이는 5.8m로서 깊은물에서의 파고보다 1m, 관측파고보다 0.8m 더 높다. 쇄파는 쇄파지수가 0.2로서 마루쇄파에 속한다. 이로부터 관측지점에서의 파고는 쇄파되기 전의 높아진 파고라는것을 알수 있다.

맺 는 말

파고를 변화시키는데서 바닥마찰보다 물깊이감소가 더 큰 영향을 미친다.

물깊이가 6m인 관측지점에서 관측된 최대파고가 5m일 때 물깊이가 20m인 해양구조물건설지점에서 보장률이 1%인 설계파도요소는 파고 4.3m, 파장 105m, 파주기 9s이다.

참 고 문 헌

- [1] 박진길; 해안동력학, 김일성종합대학출판사, 190~209, 주체93(2004).
- [2] 김형식; 해안퇴적동력학, 김일성종합대학출판사, 28~56, 주체108(2019).
- [3] 한경남; 항만구조물과 물결계산, 공업출판사, 97~120, 1976.
- [4] 严恺 等; 海岸工程, 海洋出版社, 45~287, 2002.

주체109(2020)년 4월 5일 원고접수

A Method to Decide the Design Wave Elements in the Deep Coast Zone

Kim Hyong Sik, Ri Ho Yong

The decrease of water depth exerted a greater influence on changing the wave height than the bottom friction.

We established a method to decide the design wave elements according to the observed wave height in the deep coast zone where a marine construction would be constructed.

Keywords: design wave elements, marine construction