

방조제 물막이구간의 세굴심도 추정

Estimation of Scour Depth at the Seadike Closure Gap

나 정 우 (농어촌진흥공사)

Na, Jeong Woo

Abstract

The phenomena of local scour due to a current from a seadike closure gap which is protected by rock, then on to an erodible bed, have been studied. Based on the data of hydraulic model test, the scour characteristics have been investigated for the variation of maximum scour depth with time until reaching equilibrium stage and the shape of ultimate scour hole. A brief evaluation of DHL formula for the relationship between maximum scouring depth and time and a dimensionless form leading to time-scale introduced.

On the basis of DHL formula, modified DHL formula denoted DHL-RDC formula is extend to the range of estimation of scour depth compared to DHL formula verified by model test.

I. 서론

방조제를 축조하는 경우, 물막이구간은 공사가 진행되어 감에 따라 유수단면적이 축소되어 유속이 증가되며 기초지반에서는 세굴이 발생된다.

세굴을 추정하는 거의 모든 공식들은 대부분은 폭이 1m 이하인 수로에 과도하게 축소된 수리모형시험 결과에 기초를 두고 있으며, 현장실측자료에 따른 검증은 거의 이루어지지 않고 있다. 교량의 교각 부위에 발생하는 세굴은 여러 학자들에 의해 연구가 진행되어 왔지만, 방조제 물막이구간의 세굴에 대한 시험연구 실적은 별로 없는 실정이며, 교각의 세굴시험식을 방조제 현장에 적용하는 경우 무리가 많이 따르게 된다.

방조제는 보통 지반이 매우 연약한 지역에 축조되기 때문에, 바닥보호공은 방조제의 시공과정에 있어서 매우 중요한 구조물로 바닥보호공의 길이 및 두께는 전체적인 공정계획과 매우 밀접한 관계를 유지하게 된다. 그 이유는 시공방법에 따라 내외수위차와 하류수심이 다르게 되므로 이에 따라 물막이구간의 유속도 다르며, 같은 유속에서도 기초지반이 흐름의 영향을 받는 시간이 또한 다르게 되기 때문이다. 그리고 기초지반의 입자크기, 상대밀도 및 연약층의 두께도 세굴에 직접적인 영향을 준다.

이에 따라 본 연구는 방조제 물막이구간에서 바닥보호공 설치에 따른 세굴심도를 추정하고자 시행되었다.

II. 세굴의 진행

세굴의 진행과정을 규명하기 위해 Meulen과 Vinje(1975)는 유속, 수심, 기초지반 재료 및 지형에 따른 수많은 수리시험을 시행하고 이들의 시험결과를 종합하여 세굴과정을 Fig. 1에서 보는 바와 같이 초기단계, 진행단계, 안정단계와 평형단계의 4단계로 구분하였다.

1998년도 한국농공학회 학술발표회 논문집 (1998년 10월 24일)

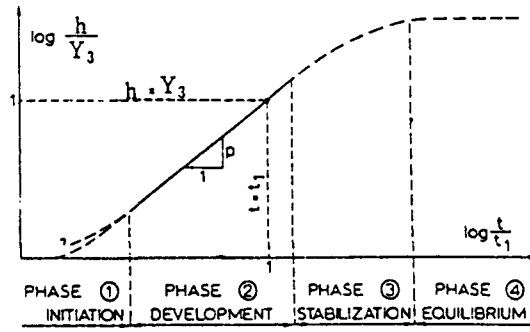


Fig. 1 Phases of Scouring Process

방조제 물막이구간의 세굴은 세굴과정 중 2단계에서 시간이 경과함에 따라 지수함수 증가 변화를 하는 DHL공식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{h}{Y_3} = \left(\frac{t}{t_1} \right)^p \quad (1)$$

여기서, h : 세굴심도 (m), Y_3 : 하류수심 (m), t : 시간 (hr),
 t_1 : $h = Y_3$ 일때의 시간 (hr), p : 지수 (= 0.4)

그리고 식(1)의 t_1 은 유속, 바닥재료 등의 영향을 받아 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_1 = \frac{K \Delta^{1.7} Y_3^2}{(\alpha U - U_c)^{4.3}} \quad (2)$$

여기서, K : 상수 (= 330), Δ : 바닥재료의 상대밀도, $(\rho_s - \rho_w) / \rho_w = 1.65$,
 α : 난류강도의 영향이 포함된 무차원 세굴인자,
 U : 평균유속 (m/sec), U_c : 바닥재료가 움직이는 한계유속 (m/sec)

$$U_c = \frac{U_{cc} * C}{\sqrt{g}} = \frac{U_{cc} * 18 \log_{10} \frac{12Y_3}{D_{50}}}{\sqrt{g}} \quad (3)$$

여기서, $U_{cc} (= 0.2 \sqrt{\Delta g D_{50}} + \frac{\nu}{2D_{50}})$: 한계전단유속 (m/sec), C : Chezy계수,
 ν : 동점성계수 ($1.1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$)

식(1)과 (2)를 합성하여 t 에 대하여 정리하면

$$t = \frac{330 \left(\frac{h}{Y_3} \right)^{1/p} \Delta^{1.7} Y_3^2}{(\alpha U - U_c)^{4.3}} \quad (4)$$

식(2)와 (4)는 무차원의 형태로 시간축척(n_t)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_t = n_\Delta^{1.7} n_h^2 n_{(\alpha U - U_c)^{-4.3}} \quad (5)$$

식(4)의 p 에 0.4를 대입하고 h 에 대해 정리하면 시간에 따른 세굴심도 계산식이 된다.

$$h = \frac{(\alpha U - U_c)^{1.72} Y_3^{0.2}}{10.2 \Delta^{0.68}} t^{0.4} \quad (6)$$

III. 수리모형시험

수리시험은 경기도 안산에 소재한 농어촌진흥공사 농어촌연구원 새만금전용수조에서 시행되었으며, 설치된 모형의 규모는 Fig. 2, 시험에 사용된 시험기기는 Table 1과 같다.

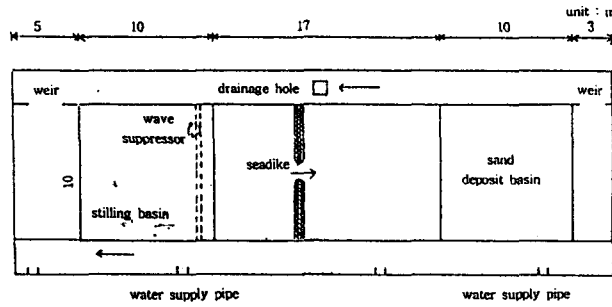


Fig. 2 Scour Model Layout

Table 1 Testing Equipments

Equipment	Qty	Capacity
Profile Indicator	1	1,080mm
Current Meter	1	2m/sec
Level Gauge	2	600mm

이동상시험의 모형재료는 이론적으로 축척에 맞는 입경의 입자를 선정하여야 한다. 시험 대상 지역의 기초지반 재료의 평균입경(D_{50})은 0.1mm로 매우 세립으로 축척에 맞는 모형재료는 입경이 매우 작은 관계로 점착력이 있어 시험의 정확도가 저하된다. 그러나 DHL공식에 의한 시험을 하는 경우 세굴심도의 추정은 식(4)에 의한 시간축척으로 모형재료의 입경에 영향을 받지 않아 대상 해역의 기초지반 재료를 사용하여 세굴 응력의 발달과정과 기초지반 재료의 물리적 성질이 원형과 일치하게 할 수 있었다.

시험조건은 방조제 물막이구간의 세굴에 영향을 주는 여러 인자 중에서 우선 가장 중요하다고 생각되는 유속과 하류부의 수심을 변화시키기 위해 상류부에 유입되는 유량(2가지)과 하류부에 설치된 웨어의 높이(4가지)를 조합한 8개 조건을 기본으로 하고, 여기에 바닥보호공의 길이인 0m, 100m, 140m, 180m의 4개 조건을 조합하여 총 32회의 시험을 시행하였다.

IV. 시험결과 및 분석

방조제 물막이구간의 세굴은 세굴과정인 4가지 단계를 거치는데 DHL공식은 2단계에만 적용할 수 있는 한계점이 있다. 그래서 본 시험에서는 우선 DHL공식을 물막이 구간의 2단계 세굴 예측에 적용가능한지를 분석하고, 이어서 4단계까지 확대 적용가능한지를 검토하고자 한다.

방조제 물막이 구간의 세굴을 DHL공식의 식(1)로 나타낼 수 있는가 알아보기 위해 t/t_1 에 따른 h/Y_3 의 관계를 Fig. 3-6의 log-log 그래프에 도시하였는데, 이를 살펴보면 세굴심도의 진행과정은 2단계에서 직선으로 표시되며 기울기인 p 값은 바닥보호공이 없는 경우 0.4, 바닥보호공이 있는 경우 0.8에 거의 일치하고 있으며, 3단계에서는 0.2에 근접하고, h/Y_3 가 2보다 크면 평형상태인 4단계로 세굴이 진행되지 않음을 알 수 있다.

시간에 따른 세굴심도는 식(4)에 p 값을 대입하고 h 에 대해 정리하면 구할 수 있다.

$$p=0.2, t > t_1 : h = 0.264(aU - U_c)^{0.86} Y_3^{0.6} t^{0.2}, \text{ 단 } h < 2Y_3 \quad (7)$$

$$p=0.4, t < t_1 : h = 0.070(aU - U_c)^{1.72} Y_3^{0.2} t^{0.4} \quad (8)$$

$$p=0.8, t < t_1 : h = 0.005(aU - U_c)^{3.44} Y_3^{-0.6} t^{0.8} \quad (9)$$

그리고 식(7)-식(9)로 세굴심도를 계산하는 경우 난류강도 및 유속분포 등이 포함된 세굴인자인 a 값을 알아야 하기 때문에 이를 계산하기 위해 식(2)를 a 에 대해 정리하였다.

$$a = \frac{U_c + (773.1 Y_3^2 / t_1)^{0.233}}{U} \quad (10)$$

세굴인자인 a 값은 바닥보호공의 길이, 유속, 하류수심 및 세굴시간에 따른 특별한 경향없이 2.16 - 3.93의 비교적 안정된 값을 나타내고 있고 평균값은 3.0으로 시간에 따른 세굴심도를 계산하는 경우 활용이 가능하지만 충분한 검토가 필요할 것으로 생각된다.

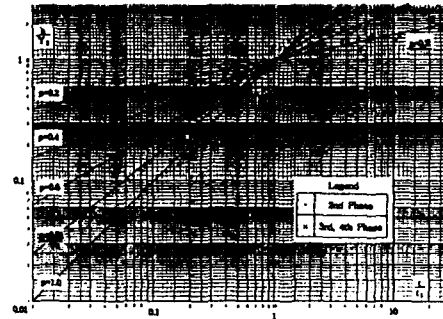
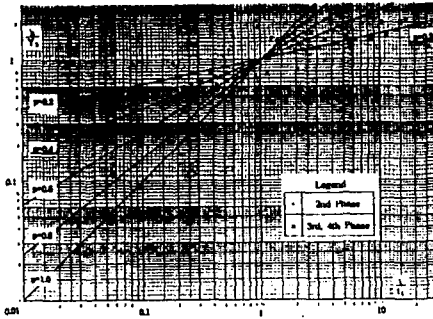


Fig. 3 Relation between h/Y_3 and t/t_1 (T0) Fig. 4 Relation between h/Y_3 and t/t_1 (T100)

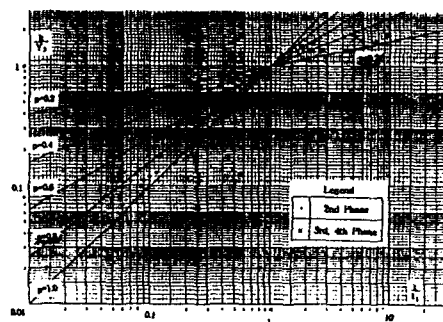
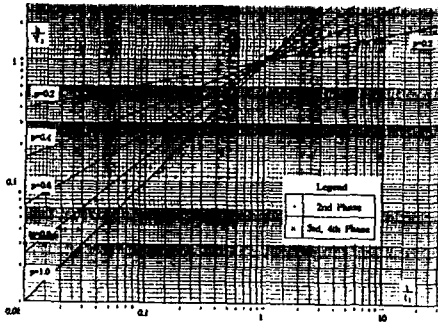


Fig. 5 Relation between h/Y_3 and t/t_1 (T140) Fig. 6 Relation between h/Y_3 and t/t_1 (T180)

V. 세굴추정식의 비교평가

방조제 물막이구간의 기반세굴을 추정할 때, 바닥보호공이 없는 경우에는 제체 말단 하류부에서의 세굴심도를 구하는 Thomas공식이, 바닥보호공이 있는 경우에는 바닥보호공 말단 하류부에서의 세굴심도를 구하는 Spaagaren공식이 사용되어 왔는데, 이들 시험식과 본 시험식 (DHL-RDC공식이라 명함)을 서로 비교 평가하고자 한다.

1. Thomas공식

제체 비탈면 하단으로부터의 세굴심을 구하는 식으로 다음과 같다.

○ 입경범위가 좁은 토사 : $(D_{85}/D_{15})^{1/2} = 1.17 - 1.33$ 인 경우

$$h = Z(0.29 + 0.07 \log \frac{gt}{Z^2}) \left(\frac{a}{ZW} \right)^{1/2} \left(\frac{Z}{Y_3} \right)^{3(a/ZW)^{1/3}} \quad (11)$$

○ 입경범위가 넓은 토사 : $(D_{85}/D_{15})^{1/2} = 1.34 - 2.66$ 인 경우

$$h = Z(0.49 + 0.04 \log \frac{gt}{Z^2}) \left(\frac{a}{ZW} \right)^{2/3} \left(\frac{Z}{Y_3} \right)^{2(a/ZW)^{1/3}} \quad (12)$$

여기서, h : 세굴심도 (m), Z : 제체높이 (m),
 q : 단위 폭당 유량 (m^3/s), W : 세굴된 흙의 평균 침강속도 (= 0.134)

Thomas공식은 제체를 월류하는 흐름이 바닥보호공이 없는 기초지반위를 흐를 때 세굴심을 구하는데 적용되는 식인데, 방조제의 물막이구간에 사용하기 위하여 식(11), 식(12)의 Z 를 0으로 하는 경우 세굴심은 항상 0으로 적용하기 곤란한 식이다.

2. Spaagaren공식

본 식은 제체의 기울기가 5할이내, 바닥보호공의 길이가 제체높이의 7배이상이며 바닥보호공의 조도가 가철은 경우에 바닥보호공 말단 하부에서의 세굴심도를 구할 때 사용하며 우리나라 방조제 설계에 많이 이용된 시험식이다.

$$h = Y_3 \frac{C_p}{7.9} \left[\frac{(U - U_c)^2}{gY_3} \right]^{0.74} [t(g/Y_3)^{0.5}]^{0.37}$$

$$= 0.03565C_p (U - U_c)^{1.48} Y_3^{0.075} t^{0.37} \quad (13)$$

여기서, C_p : Z/Y_3 에 관한 계수 (= 3.0 ~ 3.1), Z : 제체높이 (m)

3. 세굴심도의 추정

Spaagaren공식과 DHL-RDC공식으로 방조제 물막이구간의 세굴심도를 계산하고, 수리모형 시험에 의한 세굴심도를 Table 2에 정리하였다.

Table 2 Scouring Depth Computation

Test Number	U	U _c	Y ₃	t	Spaagaren Eq.			DHL-RDC Eq.				Model Test h
					Z/Y ₃	C _p	h	t ₁	a	Eq.	h	
T0-2	3.68	0.477	12.05	3.5	-	-	-	13.3	2.36	(8)	7.1	6.8
T100-4	5.66	0.474	11.00	10.8	0.09	3.10	3.6	0.5	3.07	(7)	20.4	24.0
T140-6	4.10	0.492	18.60	2.8	0.05	3.05	1.3	3.9	3.38	(9)	14.7	11.0
T180-8	5.44	0.485	15.20	12.5	0.07	3.07	3.7	1.7	2.80	(7)	22.7	24.0

Table 2에서 보는 바와 같이 Spaagaren공식에 의한 세굴심도는 수리모형시험 결과와 큰 차이를 보이고 있지만, DHL-RDC공식에 의한 세굴심도와는 거의 일치하는 결과를 보이고 있어, 방조제 물막이구간의 세굴심도를 추정하는 경우에 DHL-RDC공식이 유용하게 사용될 수 있으리라 생각된다.

세굴과정의 2단계에만 적용가능한 DHL공식을 근간으로 하여 개발된 DHL-RDC공식은 세굴과정의 4단계까지 현장에 적용이 가능할 것으로 생각되며, 더구나 DHL공식이 수리모형시험에 의해 개발되었고 또한 현장에 적용하여 검증까지된 점을 고려할 때, 이를 뒷받침한다.

따라서 DHL-RDC공식을 현장에 적용하는 경우 식(7) - 식(9)를 선택하여 사용하여야 하는데, 식을 선택하는 기준은 하류수심의 깊이만큼 세굴되는데 소요되는 시간인 t_1 값을 우선 식(2)로 계산한 후, t/t_1 값이 1보다 크면 식(7)을, t/t_1 값이 1보다 작으면 바닥보호공이 없는 경우 식(8), 바닥보호공이 있는 경우 식(9)를 사용을 제안한다.

VI. 요약 및 결론

기초지반 세굴특성에 대한 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 세굴심도, 수심 및 시간의 관계식 $h/Y_3 = (t/t_1)^p$ 은 log-log그래프에서 직선변화하며 세굴심도가 하류수심의 정도를 초과하는 경우 지수 p 는 0.2, 세굴심도가 하류수심의 정도를 초과하지 않을 때 바닥보호공이 없으면 p 는 0.4, 바닥보호공이 100m 이상 180m 이하인 경우 p 는 0.8의 값을 나타낸다.

2) 방조제 물막이구간의 a 값은 바닥보호공의 길이, 유속, 하류수심 및 세굴시간에 따른 특별한 경향없이 2.16 - 3.93의 비교적 안정된 값을 나타내고 있고 평균값은 3.0으로 시간에 따른 세굴심도를 계산하는 경우 활용이 가능하지만 충분한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

3) 유속이 4m/s보다 빠른 경우 최대 세굴심도는 하류수심의 2배정도까지 일반적으로 진행되며, 바닥보호공의 길이가 100 - 180m인 경우 세굴심도는 바닥보호공의 길이에 크게 관여하지 않는다.

4) Spaagaren공식에 의한 세굴심도는 수리모형시험 결과와 큰 차이를 보이고 있지만, DHL-RDC공식에 의한 세굴심도와는 거의 일치하는 결과를 보이고 있어, 방조제 물막이구간의 세굴심도를 추정하는 경우에 DHL-RDC공식이 유용하게 사용될 수 있다.

5) 방조제 물막이구간의 시간에 따른 세굴심도는 유속, 하류수심, 바닥지반 재료의 평균입경 3가지만 알면 DHL-RDC공식으로 계산할 수 있는데, 식을 선택하는 기준은 먼저 식(2)로 t_1 값을 계산한 후 t/t_1 값이 1보다 크면 식(7)을, t/t_1 값이 1보다 작으면 바닥보호공이 없는 경우 식(8), 바닥보호공이 있는 경우 식(9)의 사용을 제안한다.

참고문헌

1. 농림수산부, 농어촌진흥공사, 1991, 새만금지구 수리실험 및 파랑관측보고서.
2. 농림부, 농어촌진흥공사, 1997, 새만금지구 수리실험 및 파랑관측보고서.
3. 이정규, 이종인, 강창구, 1997, 하천교각의 세굴심 추정과 교각의 기초설계, 한국수자원학회, 제5회 수공학익습 교재.
4. 임영춘, 이종모, 신동수, 1982, 간척공학, 한국농촌환경개발연구소.
5. Breusers, H. N. C. and A. J. Raudkivi, 1991, Scouring, Hydraulic Structures Design Manual 2, International Association for Hydraulic Research, Chap.4.
6. Franken, 1991, Evaluation and Recommendations of the Flume Test, NEDECO.
7. Graauw, A. F. F. and K. W. Pilarczyk, 1980, Model Prototype Comformity of Local Scour in Non-Cohesive Sediments beneath Overflow Dam, Delft Hydraulics Laboratory
8. Meulen, T. van der and J. J. Vinje, 1975, Three Dimensional Local Scour in Non-Cohesive Sediments, 16th IAHR Congress, Sao Paulo.
9. Pilarczyk, K. W., 1984, The Closure of Tidal Basins, Delft University Press.
10. Saemankeum Comprehensive Tideland Reclamation Project, 1990, Technical Report No.3, Detailed Scale Models, NEDECO.