

교각세굴 사석보호공의 기존 설계식 적용성 검토

윤태훈*, 윤성범**, 윤광석***

1. 서론

교각 주위의 국부세굴을 방지하기 위한 사석보호공은 지난 수백년 동안 사용되어 온 공법으로 시공성과 경제성이 다른 공법에 비해 양호하므로 흔히 사용되어 왔다. 그러나 그 사용빈도에 비해서 연구가 활발하지 못한 결과, 몇가지 기존 연구의 결과에 의존하여 대략적인 설계식을 사용하고 있는 실정이다. 그러므로, 기존 설계식을 정량적으로 평가하기 위해 실측된 자료를 이용하여 각 설계식과 실측치와의 관계를 규명하고, 안전율을 결정하며, 설계치와 실측치가 어느 정도 일치하는가를 알아 보는 연구가 필요하다.

본 연구에서는 기존의 사석보호공 설계식을 평가하기 위하여 먼저 사석크기 결정식을 유형별로 분류하고, 각 설계식에 고려된 사석크기 결정 인자를 파악한다. 그리고, 실험에 의하여 결정된 한계사석크기와 동일한 흐름 조건에 대한 기존 경험식의 결과를 비교하므로써 기존 경험식들을 평가하고, 적용성 및 적용 범위 등을 결정하는 연구를 수행한다.

2. 기존 사석보호공 설계식

대부분의 사석보호공 설계 방법은 Isbash(1935)의 연구에 기초를 두고 있다. Isbash는 구조물이 없는 흐름 중에 사석을 떨어뜨려 하류로 쓸려 가지 않는 사석의 크기를 결정하는 경험식을 다음과 같이 제안하였다.

$$u_s = C\sqrt{2gD_p(S_s-1)}\sqrt{\cos\beta - \sin\beta} \quad (1)$$

여기서, u_s 는 구조물이 없는 상태에서의 주어진 입자에 대한 한계유속, C 는 Isbash 계수(최대 0.86, 최소 1.20), g 는 중력가속도, D_p 는 사석의 구체환산직경, S_s 는 사석의 비중, β 는 사석이 부설되는 하상의 경사이다. 식(1)에서 하상이 수평이면 우변의 두번째 자승근항은 생략되며, u_s 대신 수심평균된 한계접근유속 u_0 를 대입하여 정리하면 입자안정수(stability number) N_c 가 정의된다.

$$N_c = \frac{u_0^2}{(S_s-1)gD_p} \quad (2)$$

Carstens(1966)는 교각 주위의 하상이 세굴되기 시작하는 한계유속은 구조물이 없는 하상의 한계유속의 1/2이라고 가정하고 Isbash식에 $\beta=0$, Isbash 계수 $C=0.86$, $u_s=2u_0$ 를 대입하여 다음과 같이 제안하였다.

$$u_0 = \frac{0.86}{2}\sqrt{2gD_p(S_s-1)} \quad , \quad N_c = 0.3698 \quad (3)$$

* 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 조교수

*** 정회원, 한양대학교 토목공학과 대학원

Neill(1975)은 교각에서의 국부유속은 교각사이 개구부(waterway opening)에서의 유속의 1.5배 라고 제안하고 유속은 수심평균된 교각직상류부의 접근유속 대신 개구부의 유속을 사용하였다.

$$u_o = \frac{0.86}{1.5} \sqrt{2gD_p(S_s-1)} \quad , \quad N_c = 0.6574 \quad (4)$$

Breusers 등(1977)은 원형교각주위의 표층사석에 대한 안정조건으로 다음 식을 제안하였다.

$$D_p = 2.83 \frac{u_o^2}{(S_s-1)g} \quad , \quad N_c = 0.3524 \quad (5)$$

Richardson 등(1993)은 HEC-18 보고서에서 다음과 같은 경험식을 추천하였다.

$$D_{50} = \frac{0.692(Ku_o)^2}{(S_s-1)2g} \quad , \quad N_c = 1.285 \quad (6)$$

여기서, D_{50} 은 사석의 중앙입경, K 는 교각형상계수로서 원형교각에 대해서는 유속계수 1.5를 적용 하고, 사각형교각에 대해서는 원형교각의 유속계수에 형상에 대한 안전을 10%를 주어 1.7($\approx 1.5 \times 1.1$)을 적용하였다. 그리고 Isbash계수 C 는 최소값 1.2를 사용하였다.

Quazi & Peterson(1973)은 반원사각형교각 주위에서 세굴방지를 위한 사석직경식을 결정하기 위해 실험을 수행한 후, 교각이 없을 때의 사석의 안정조건에 대한 Neill(1967)의 경험식에서 계수 만을 조정하여 다음과 같이 제안하였다 .

$$N_c = 1.14 \left(\frac{D_p}{y_o} \right)^{-0.20} \quad (7)$$

여기서 y_o 는 비교란수심(m)이다. 식(7)은 사석의 한계직경의 함수로서 유속뿐 아니라 접근하상의 상대조도 즉 y_o/D_p 의 영향이 포함되어 있다.

Parola(1993)는 실험을 실시하여 사석부설면이 하상과 같은 경우 사각형교각에 대해 다음과 같이 교각직경 b 의 영향을 고려한 설계식을 제안하고, 원형교각에 대해서도 같은 식을 적용하였다.

$$N_c = 0.8 \left(20 < \frac{b}{D_p} < 33 \right) \quad , \quad N_c = 1.0 \left(7 < \frac{b}{D_p} < 14 \right) \quad , \quad N_c = 1.2 \left(4 < \frac{b}{D_p} < 7 \right) \quad (8)$$

Chiew(1995)는 수심 및 교각직경이 안정사석의 크기에 미치는 영향을 고려하기 위해 Chiew & Melville(1987)의 국부세굴 경험식에 사용되었던 수심보정계수 K_y 및 교각폭보정계수 K_b 를 도입 하고, 접근유속이 주어진 사석의 한계유속의 0.3을 초과할 때 교각주위의 사석이 움직이기 시작한다는 관측결과를 이용하여 다음과 같은 경험식을 제시하였다. 계산은 식(9)에서 K_y , K_b 를 1이라 하여 구한 가정치 D_p 를 이용하여 식(10),(11)에서 K_y 와 K_b 를 결정한 후, 다시 식(9)에 대입하여 구한 개선치 D_p 와 가정치 D_p 를 비교하여 수렴될 때까지 반복한다.

$$D_p = \frac{1}{5.956\sqrt{y_o}} \left(\frac{u_o K_y K_b}{0.3\sqrt{(S_s-1)g}} \right)^3 \quad (9)$$

$$K_y = \begin{cases} 0.783 \left(\frac{y_o}{b} \right)^{0.322} - 0.106, & 0 < \frac{y_o}{b} < 3 \\ 1 & \frac{y_o}{b} \geq 3 \end{cases} \quad (10)$$

$$K_b = \begin{cases} 0.398 \ln \left(\frac{b}{D_p} \right) - 0.034 \left[\ln \left(\frac{b}{D_p} \right) \right]^2, & 1 \leq \frac{b}{D_p} < 50 \\ 1 & \frac{b}{D_p} \geq 50 \end{cases} \quad (11)$$

Bonassoudas(1973)는 접근유속만의 함수로 타원형교각에 대한 안정사석의 직경을 구하는 공식 을 제안하였다.

$$D_p = 0.01(6 - 3.3u_o + 4u_o^2) \quad (12)$$

3. 수리실험

실험에 사용된 수로는 폭 45cm, 길이 12m, 깊이 60cm의 가변경사개수로이고 여기에 중앙입경 d_{50} 이 0.4mm인 하천모래를 두께 15 cm로 부설하고, 수로의 중앙에 원형 아크릴교각을 설치하였다. 정확한 한계상태의 조건을 제공하기 위하여 교각 주위의 사석을 부설하는 부분을 제외한 나머지 부분에 모르타르를 발라 고정상태를 유지하도록 하였다. 사석은 비중이 2.65인 모난 입자이며, 굵은 모래를 체분석하여 크기에 따라 10가지 (최소 2.13mm~최대 8.46mm)로 분류하였다. 사석은 부설면이 주위 하상고와 일치하도록 교각 주위에 원형으로 부설하고, 사석입자가 이탈하기 시작할 때의 접근유속과 수심을 한계상태로 정하였다. 사석의 부설 범위 B는 교각폭의 1.5배(=1.5b), 부설 두께 T는 사석직경의 3배(=3D_p)로 하였다(그림 1). 또한, 교각폭이 한계사석크기에 미치는 영향을 파악하기 위해 교각의 직경은 2, 3, 4, 5 cm의 4종류를 사용하였다.

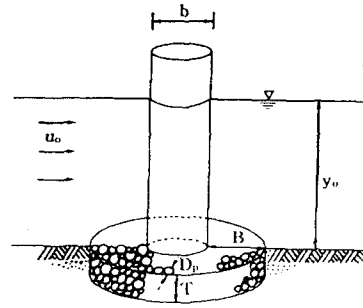


그림 1. 보호공 개념도

4. 실험결과와 기존 경험식의 비교

본 연구에서 수행된 실험결과에 따른 한계상태의 사석직경과 실험에서의 흐름조건을 기존의 사석직경결정식에 대입한 결과를 비교해 보았다. 각종 설계공식들이 포함하고 있는 안전율(SF, Safety Factor)은 다음 식에 의해 산정하였고, 안전율의 평균치를 평균안전율로 정하였다.

$$SF = D_p(\text{calculated}) / D_p(\text{measured}) \quad (13)$$

모든 자료에 대한 결과 분석은 설계식의 유형에 따라 다음과 같이 크게 5가지로 분류되는데, 각 경험식의 유형에 따른 분류 및 실험치에 대한 안전율이 표 1과 그림 2에 나타나 있다.

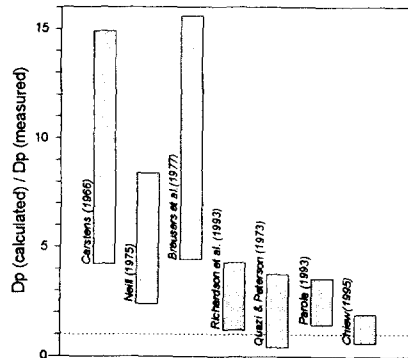


그림 2. 각 경험식의 실험치에 대한 안전율 비교

표 1. 기존 경험식의 유형 및 실험치에 대한 안전율(원형두부 교각)

유형	제안자	연도	공식	고려 변수	평균 안전율	안전율범위 (최소~최대)
$N_c = \text{const}$	Carstens	1966	$N_c = 0.3698$	S_s, u_0	7.38	4.21 ~ 14.93
	Neill	1975	$N_c = 0.6574$		4.15	2.37 ~ 8.40
	Breusers	1977	$N_c = 0.3524$		7.72	4.41 ~ 15.62
	Richardson	1993	$N_c = 1.285$		2.12	1.21 ~ 4.30
$N_c = f_1(D_p/y_0)$	Quazi & Peterson	1973	$N_c = 2.5(D_p/y_0)^{0.20}$	S_s, u_0, y_0	1.32	0.42 ~ 3.75
$N_c = f_2(b/D_p)$	Parola	1993	$N_c = 0.8, 20 < b/D_p < 33$ $N_c = 1.0, 7 < b/D_p < 14$ $N_c = 1.2, 4 < b/D_p < 7$	S_s, u_0, b	2.16	1.45 ~ 3.56
$D_p = f_3(u_0, y_0, b, D_p)$	Chiew	1995	$D_p = \frac{1}{5.956 \sqrt{y_0}} \left(\frac{u_0^2 K_y K_b}{0.3 \sqrt{(S_s - 1)g}} \right)^3$	S_s, u_0, y_0, b	1.16	0.61 ~ 1.90
$D_p = f_4(u_0)$	Bonasoundas	1973	$D_p = 0.01(6 - 3.3u_0 + 4u_0^2)$	u_0	15.42	6.34 ~ 25.59

유형 1은 Isbash식을 교각이 있는 경우에 대해 계수를 조정한 경험식으로, 입자안정수 N_c 가 상수로 표시된 이 유형의 설계식은 교각의 폭 b , 접근수심 y_0 의 영향이 고려되지 않으므로 안전율의 범위가 넓다. 즉, 많은 경우 과대 설계가능성이 있다. 그림 3은 Richardson식의 결과를 나타낸 것인데, 이 유형의 나머지 경험식들도 안전율의 범위와 평균값의 차이가 있을뿐 경향은 유사하게 나타났다. 그림 3에서 보인 바와 같이 폭이 작은 교각과 폭이 큰 교각에 대해 설계사석 직경이 최적직선을 중심으로 확연히 구분되며, 폭이 작은 교각의 경우($b=2\sim 3\text{cm}$)가 큰 경우($b=4\sim 5\text{cm}$)보다 과대설계되는 경향이 있다. 이 유형의 설계식 중 Richardson 공식이 상대적으로 정확한 결과를 주며, 나머지 설계식들은 안전율의 범위가 대체로 크게 나타났다(표 1 참조). Isbash 계열의 설계공식들은 설계사석직경 D_p 가 상수 N_c 값에 역비례하므로, N_c 값이 작아질 수록 평균안전율 및 안전율의 범위가 증대되어 과대설계의 경향을 보인다.

유형 2는 입자안정수 N_c 가 상대조도계수 D_p/y_0 의 함수로 표시되는 Quazi & Peterson식이 있다. 이 식은 수심의 영향이 고려되어 안전율의 범위가 작을 것으로 기대되었으나, 실제 실험치와 비교해 본 결과(그림 4), 수심의 영향을 고려하지 않은 유형 1의 Richardson 공식보다 오히려 자료의 분산이 심하게 나타났다. 이는 설계식(7)에 수심 y_0 의 영향이 잘못 고려되어 있음을 보여 준다. 일반적으로 교각이 없는 경우와는 반대로 교각이 있는 경우에는 수심이 깊을 수록 사석이 불안정해진다. 이러한 경향은 수심이 깊을 수록 교각 전면의 하향류가 강해져 교각 주변의 세굴심이 증가하는 Melville & Sutherland (1988) 및 FHWA 추천 공식인 CSU 공식(Richardson et al., 1993)으로부터도 유추해 볼 수 있다. 교각폭의 영향은 유형 1의 경우와 마찬가지로 교각폭이 작을 수록 과대설계의 경향을 보인다. 평균안전율은 1.3 정도로서 이 식이 한계치 결정식임을 알 수 있다.

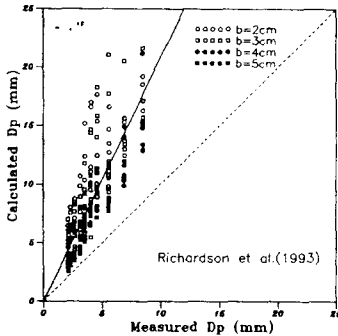


그림 3. 실험치와 Richardson식에 의한 D_p 의 비교

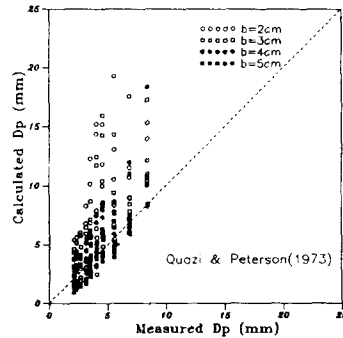


그림 4. 실험치와 Quazi & Peterson식에 의한 D_p 의 비교

유형 3은 교각폭이 사석크기 결정에 미치는 영향을 고려한 Parola(1993)의 경험식을 들 수 있다. 그림 5는 입자안정수 N_c 와 상대교각크기 b/D_p 의 관계를 이용하여 실험치와 Parola식에 의한 설계치를 비교한 것으로, Parola 공식이 b/D_p 의 넓은 범위에 걸쳐 균일한 안전율을 가지고 있음을 보여 준다. Parola의 식(8)은 b/D_p 의 일부 구간에 대해서만 설계치를 주므로, 모든 구간에 대해 확장하기 위해 최적곡선을 추정하여 D_p 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$D_p = \frac{u_c^{1.63} b^{0.18}}{1.56(S_s - 1)^{0.82} g^{0.82}} \quad (14)$$

그림 6은 식(14)에 의해 계산된 사석직경과 실험치를 비교한 것으로 모든 교각폭에 대해 자료의 최적직선으로부터의 분산정도가 균일하게 나타났으며, 평균안전율은 2.2 정도이며 안전율의 범위

가 1.5~3.6으로서 실험치 전반에 걸쳐 고른 안전율을 보여 본 연구에서 고려한 방법들 중 가장 개선된 결과를 보이고, 접근수심 y_0 의 영향이 고려되면 더욱 개선된 결과를 줄 것으로 기대된다.

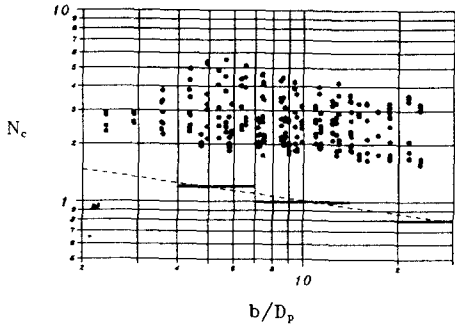


그림 5. 입자안정수 N_c 와 b/D_p 의 관계에 의한 실험결과와 Parola식과의 비교 (— 식(8), Parola ; — 식(14), 추정치)

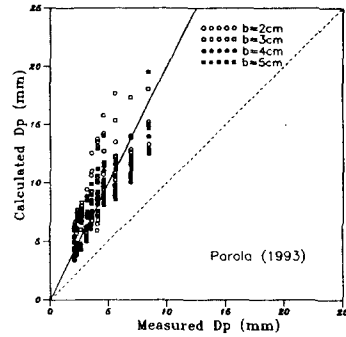


그림 6. 실험치와 Parola식에 의한 D_p 의 비교

유형 4는 수심과 교각폭의 영향을 동시에 고려한 Chiew(1995)의 공식이 있는데, 그림 7에 보인 바와 같이 실험 범위 내에서 상대적으로 정확한 결과를 주나, 작은 사석에 대해서는 실험치보다 다소 크게, 큰 사석에 대해서는 실험치에 비해 과소설계되는 경향이 있다. 이는 사석직경이 다른 대부분의 공식과는 달리 접근유속의 3승에 비례하도록 되어 있고, 또한 경험공식이 사석실험 자료를 토대로 하여 결정되지 않고, 세굴실험에 의해 결정된 수심보정계수 및 교각폭 보정계수를 그대로 사용하여 유도된 때문으로 해석된다. 여기서 국부세굴실험에서 얻은 수심보정계수와 교각폭보정계수는 교각주위의 하상물질이 접근수로에서와 동일한 경우에 대한 것이므로, 보호공사석과 접근수로의 하상물질이 서로 다른 경우 이를 수정·보완하여 사용해야 함을 알 수 있다.

마지막으로 유형 5에는 사석직경이 유속만의 함수로 주어지는 Bonasoundas식이 있다. 사석 크기가 전술한 다른 유형의 설계식에서 대체적으로 유속의 자승에 비례하는 것과는 달리 유속의 2차 다항식에 의존하여 그림 8에 보인 바와 같이 매우 부정확한 결과를 준다. 안전율은 수심 및 교각폭에 따라 6~26으로서 변동폭이 매우 크다.

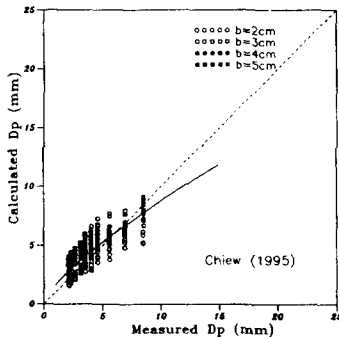


그림 7. 실험치와 Chiew식에 의한 D_p 의 비교

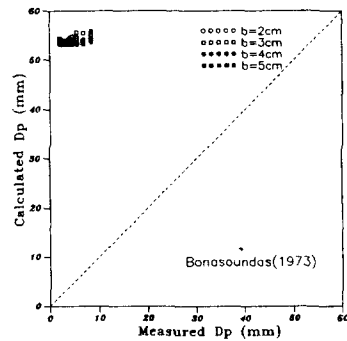


그림 8. 실험치와 Bonasoundas식에 의한 D_p 의 비교

5. 결론

본 연구에서는 교각주위 사석보호공의 적정 사석크기를 결정해 주는 기존의 각종 경험식들의 정확성과 적용범위 등을 밝히기 위해 다양한 종류의 교각폭, 접근수심, 접근유속, 사석크기에 대해 한계사석크기 결정 실험을 실시하고, 실험결과와 경험식에 의한 계산결과를 비교·분석하였다.

Isbash 공식에 근거를 둔 설계공식은 교각폭과 접근수심의 영향이 무시되어 일반적으로 실험치에 비해 과대한 사석크기를 주며, 교각폭이 작을 수록 과대설계의 가능성이 높다. Isbash 계열의 공식중 Richardson 공식이 상대적으로 정확한 설계값을 주며 평균적인 안전율은 2.1 정도이다. Quazi & Peterson 공식은 수심의 영향이 잘못 고려되어 Richardson 공식보다 정밀도가 떨어지는 것으로 나타났으며, Parola 공식은 교각폭의 영향을 적절히 고려하여 본 연구에서 대상으로 한 경험식들 중 가장 정확한 것으로 나타났으나, 수심의 영향을 고려하여 정밀도를 높이는 연구가 요구된다. Chiew 공식은 수심과 교각폭의 영향을 고려하였으나, 유속에 대한 고려가 다른 방법과 달리 u^3 에 비례하도록 되어 있으며, 큰 유속에 대해 과소설계되는 경향이 뚜렷하다. Bonasoundas 공식은 매우 부정확하여 실무에 적용하기에는 적절치 못한 것으로 밝혀졌다. 결론적으로 Richardson 등 (1993)과 Parola(1993)의 경험식이 실험치와 가장 근접한 결과를 주며, 약 2.2 정도의 적당한 안전율을 가지고 있어 실무에 설계식으로 사용해도 별 무리가 없을 것으로 판단되나, 교각폭과 접근수심의 영향을 모두 고려한 좀 더 정확한 설계식 도출에 관한 연구가 요망된다.

참고문헌

- (1) Bonasoundas, M. (1973) Flow structure and problems at circular bridge piers, Report No.28, Oskar V. Miller Inst., Munich Tech. Univ., Munich, West Germany.
- (2) Breusers, H.N.C., Nicollet, G. & Shen, H.W. (1977) Local scour around cylindrical piers. J. Hydr. Res., Vol.15, No.3, pp.211-252.
- (3) Chiew, Y.-M. (1995) Mechanics of riprap failure at bridge piers, J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.121, No.9, pp.635-643.
- (4) Chiew, Y.-M. & Melville, B.W. (1987) Local scour around bridge piers, J. of Hydr. Res., Vol.25, No.1, pp.15-26.
- (5) Melville, B.W. & Sutherland, A.J. (1988) Design method for local scour at bridge piers, J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.114, No.10, pp.1210-1226.
- (6) Neill, C.R. (1967) Mean velocity criterion for scour of coarse uniform bed material, Proc. 12th IAHR Congress, Fort Collins, Colo., C6.1-C6.9.
- (7) Neill, C.R. (ed) (1975) Guide to bridge hydraulics, Roads and Transportation Association of Canada, Univ. of Toronto Press, 2nd ed., 191p.
- (8) Parola, A.C. (1993) Stability of riprap at bridge piers, J. Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.119, No.10, pp.1080-1093.
- (9) Quazi, M.E. & Peterson, A.W. (1973) A method for bridge pier riprap design, Proc. First Canadian Hydraulics Conf., Univ. of Alberta, Edmonton, Canada, pp.96-106.
- (10) Richardson, E.V., Harrison, L.J., Richardson, J.R. & Davis, S.R. (1993) Evaluating scour at bridges, Hydraulic Engineering Circular No.18, FHWA-IP-90-017, FHWA, February, 105p.