

불균일단면교각 주위의 사석보호공에 관한 연구

윤 태 훈* ○ 박 기 두** 김 창 환**

1. 서론

국부세굴이 하천을 횡단하는 교량의 안전에 큰 위협이 되고 있음이 널리 알려지고 이에 따라 국내 하천 교량의 안전관리를 위해 교량의 수중 하부구조의 안정성이 검토되고, 그 결과에 따라 국부세굴이 심한 교량에 대한 세굴방지대책이 수립되고 있다. 기존 교량의 국부세굴방지공법으로는 세굴공에 사석, 돌망태, 콘크리트 블럭 등이 사용되고 있으며, 이 중에서 사석을 교각주위에 부설하는 세굴방지공법이 시공성과 경제성이 비교적 양호하여 널리 사용되어 왔는데, 그 사용 횟수에 비해서 정확한 설계식을 제안한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 실험을 통하여 흐름 조건의 변화에 따라 사석이 교각 주위로부터 이탈하기 시작하는 한계흐름상태에서 사석보호공에 영향을 미치는 변수들을 파악하여, 각 변수들의 관계를 규명하였고, 윤 등(1996)이 제안한 바 있는 단일단면교각에서의 사석보호공 설계식을 불균일단면교각에 적용하여 푸팅 직경, 교각직경 그리고 하단에서 푸팅 상단까지의 높이 등의 변수들을 추가 고려하였다. 이에 따라 교각을 따라 흐르는 하강류가 푸팅에 의해 차단되는 효과와 하상에서 푸팅상단의 높이가 높아짐에 따라 다시 푸팅에서 발생하는 하강류와의 상관관계를 이용하여 사석보호공 설계식을 보완하였다.

2. 기존의 사석보호공 결정식

기존의 사석보호공의 설계 방법은 Isbash(1935)의 연구에 기초하여 구조물이 없는 하상에서 안정한 사석의 크기를 결정하는 경험식을 도출해냈다.

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

u_s 는 구조물이 없는 상태에서의 한계유속, C 는 Isbash 계수, g 는 중력가속도, D_p 는 사석의 구체 환산직경, γ_s 는 사석의 단위중량, γ 는 물의 단위중량, β 는 사석이 부설된 하상의 경사이다.

주어진 흐름조건하에서 하상의 사석이 안정을 유지할 수 있는 조건은 Isbash(1935)의 연구에 기초하여 다음의 입자안정수(stability number) N_c 의 함수로 주어진다.

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

u_o 는 수심 평균된 비교란유속(m/sec), S_s 는 사석의 비중이다.

* 정희원, 한양대학교 토목공학과 교수

** 한양대학교 토목공학과 석사과정

** 한양대학교 토목공학과 석사과정

Carstins(1966), Neill(1975), Breusers(1977), Richardson등(1993)이 다음 식을 제안하였다.

$$N_c = 1.285 \quad (3)$$

$$D_p = \frac{0.692(Ku_o)^2}{(S_s - 1)2g} = \frac{u_o^2}{(S_s - 1)gN_c} \quad (4)$$

K는 형상계수로서 원형교각에 대해 1.5이다. 접근수심 y_o 와 교각폭 b 의 영향이 고려되지 않았다.

Neill(1967)은 교각이 없을 때 하상에서의 사석안정조건에 대한 경험식을 다음과 같다.

$$N_c = 2.5 \left(\frac{D_p}{y_o} \right)^{-0.20} \quad (5)$$

Quazi와 Peterson(1973)은 반원사각형교각에 수심 y_o 의 함수로 표현한 경험식을 제안하였다.

$$N_c = 1.14 \left(\frac{D_p}{y_o} \right)^{-0.20} \quad (6)$$

Parola(1993)는 정사각형교각에 대한 설계식을 제안하였으며, 원형교각에 대해서도 같은 식을 실무에 적용하였다. d 가 0에 가까운 사각형교각에 대해 다음과 같은 설계 기준을 제시하였다.

$$\begin{aligned} N_c = 0.8 & \quad 20 < \frac{b}{D_p} < 33 \\ N_c = 1.0 & \quad 7 < \frac{b}{D_p} < 14 \\ N_c = 1.2 & \quad 4 < \frac{b}{D_p} < 7 \end{aligned} \quad (7)$$

3. 수리실험

사용된 수로의 재원은 길이 20m, 폭 0.9m 및 깊이 0.4m이고 15마력 펌프 2대로 공급되는 순환식 가변경사 개수로이다. 수로의 중앙에는 2m의 뒀부를 설치하여 평균입경 0.4mm의 하천모래를 두께 15cm로 채웠다.

보호공에 사용된 사석은 굵은 모래를 체분석하여 표 1에 보인 바와 같이 크기별로 분류하여 사용하였고, 원형교각의 주위에 원형으로 부설하였다. 부설 두께 T 는 사석직경의 3배로 하였다. 정확한 한계상태의 조건을 제공하기 위하여 수로의 중앙부에 직경 20cm의 사석부설면을 제외한 나머지 부분에 모르타를 발라 정지상세균상태를 유지하도록 하였다. 직경 5cm인 푸팅위에 직경이 1.5, 2, 3cm인 교각을 설치하였으며, 본 실험에서 사용된 교각직경과 기초직경의 비는 한강에 건설된 교량의 교각과 우물통기초의 직경비를 포함하도록 했다.

표 1. 실험에 사용된 사석의 재원

사석번호	입경 D_p (mm)			비고
	최소	최대	평균	
1	2.00	2.25	2.13	비중 2.65 모난입자
2	2.38	2.95	2.67	
3	3.35	3.70	3.53	

표 2. 불균일단면교각의 재원

교각직경 b_p (cm)	기초직경 b_f (cm)	b_p/b_f
1.5	5.0	0.3
2.0	5.0	0.4
3.0	5.0	0.6

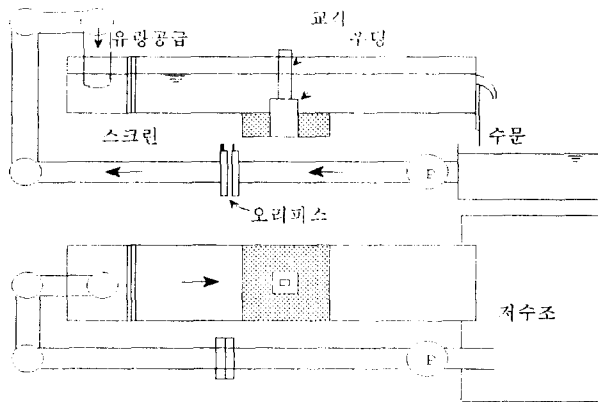


그림 1. 모형수로의 개략도

일반적으로 세굴시에는 하강류의 영향으로 교각 전면부에서 하상입자가 이탈되기 시작하여 말굽형와(horseshoe vortex)에 의해 교각 측면의 하상입자가 이탈하고, 일부는 부유상태로 하류로 흐르지만 대부분은 교각 후면부에 퇴적되게 된다. 사석보호공에서 사석입자는 일반적인 세굴과는 달리 말굽형와에 의해 교각 측면에서부터 이탈하기 시작하여 이탈이 계속될수록 교각 전면부와 후면부의 입자까지 이탈한다. 이 때 사석 상호간의 엇물림 효과에 의해 전단세굴(shear failure)이 일어날 수 있는 상태보다 더 큰 유속에서 이탈이 일어난다. 실험의 한계상태를 정의할 때, 유량을 고정시킨 후 수문을 조절하여 유속을 증가시키에 따라 교각 측면부에서 사석입자가 3~4개 한꺼번에 이탈하는 순간이라 정하고, 이 한계상태는 바로 이 엇물림 효과가 약화되는 시점에 발생한다고 할 수 있겠다. 본 실험에서는 일관적인 실험을 위해 하강류와 하강류의 강도에 따른 말굽형와의 강도에 의한 교각 측면부에서의 이탈만을 한계상태로 정하여 실험을 수행하였다.

4. 실험결과

4.1 불균일단면교각에서 우물통기초의 영향

모든 교각은 케이슨기초, 말뚝기초, 우물통기초와 같은 기초위에 건설된다. 이러한 기초의 상단 표고가 하상과 같게 되는 경우도 있으나 하상보다 높게 되는 경우가 대부분이다. 이러한 경우 교각기초의 높이에 따라 기초주위의 세굴 및 보호공의 거동은 판이하게 다르게 된다. 기초상단이 하상과 같거나(그림 2 (b)) 하상보다 약간 높은 경우(그림 2 (c))에는 기초가 하강류를 차단하고 하상을 보호하여 한계유속 u_c 는 증가하여 하상은 안정하게 되고 기초는 보호공 역할을 한다.

그림 2 (c)에서 $u_c=0.41$ 의 의미는 그림 2 (a)의 $u_c=0.35$ 에서 이동하는 사석이 (c)에서는 $u_c=0.41$ 에서 이동하고, $u_c=0.35$ 에서는 이동하지 않는다. 이는 기초의 존재로 하상이 더 안정해진다. 즉 (c)에 부설된 사석을 움직이는데 $u_c=0.41$ 이 필요하므로 $u_c=0.35$ 에서 움직이는 사석은 더 작아지게 된다. 따라서 동일한 흐름조건(한계유속)에서 높이가 작은 기초가 존재하면 기초가 없는 경우보다 보호공사석의 크기를 감소시킬 수 있다.

한편 기초 상류면 그림 2 (c)에서 발생하는 하강류와 기초로 인한 단면증대는 하상물질의 이동을 증대시키나 이의 영향은 교각하강류의 차단효과에 비하여 무시된다. 그러나 기초높이가 증가하면 교각에 의한 하강류는 차단되나 기초에 의하여 발생한 하강류와 기초로 인한 단면증대의 효과는 증가되어 하상물질의 이동가능성은 증가한다.

우물통기초의 높이 z 가 보다 더욱 증가하면 교각하강류 차단효과 보다 기초 상류면에서 발행한 하강류와 단면증대의 영향이 크게 되어 하상물질은 쉽게 이동하게 되어 u_c 는 감소한다.

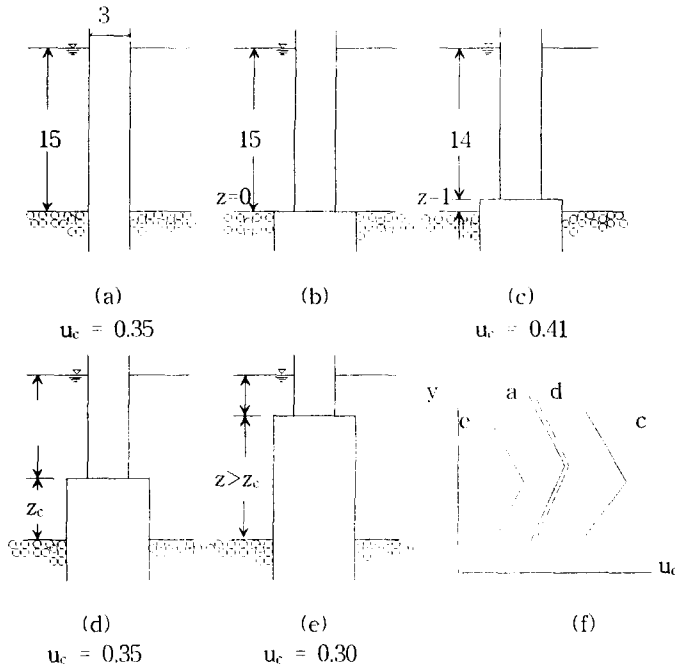


그림 2 불균일단면교각의 사설보호공의 거동

기초의 하강류 차단 효과와 기초에 의한 하강류 및 단면증대 효과의 두 상반되는 효과가 같게 되는 기초높이를 생각할 수 있고 이 높이를 한계기초 높이라 하면 이는 그림 a의 경우와 같게 되어 구조물(기초)의 영향이 배제된다. z 가 한계기초높이 z_c 에 이르면 그림 2 (d) 양자의 효과는 상쇄되어 그림 2 (f)에서 그림 d는 a와 일치하게 된다. $z > z_c$ 가 되면 그림 2 (e) u_c 는 더욱 감소하여 $u_c = 0.35$ 보다 작은 유속에서도 하상물질이 이동하게 되어 세굴에 취약하게 된다. 즉 불균일단면의 교각하부구조는 세굴에 대하여 기초만으로 거동을 하게 되어 기초에 의한 하강류와 단면 증대의 두 영향이 같이 작용하게 되어 하상물질은 낮은 한계유속에서도 이동하게 된다.

위에 기술한 내용은 그림 2의 실험결과에서 입증된다.

4.2 하상에서 푸팅까지의 높이와 한계유속, 수심의 관계

그림 3은 한계상태일 때의 한계유속 u_c 와 수심 y_0 의 관계를 하상에서 푸팅까지의 높이 z 에 대하여 도시한 것이다. 여기서, 한계유속은 하상에서 푸팅까지의 거리가 작을수록 커지고 따라서 안정해짐을 알 수 있다. 그리고, 푸팅의 상단이 하상과 일치할 때 불균일단면의 교각에서의 한계유속이 가장 커지므로, 교각에서 발생하는 하강류가 푸팅에 의해 차단되는 효과보다는 푸팅에서 발생하는 하강류의 영향의 증가로 한계유속은 작아지게 된다. 푸팅의 높이가 0에서 1, 2, 4, 6, 10cm으로 증가함에 따라 한계유속이 작아지며, 사설보호공이 점점 취약해짐을 알 수 있다.

4.3 교각-기초폭비에 대한 한계유속

그림 4에서 교각-기초폭비 또는 교각폭이 증가함에 따라 한계유속이 감소하고 사설은 세굴에 대하여 취약해짐을 알 수 있다. 이는 푸팅폭에 대하여 교각의 폭이 상대적으로 증가함으로써 푸팅에 의한 하강류의 차단면적이 줄어들어 교각의 크기가 증가하는 것으로 나타난다.

4.4 사설크기, 한계유속, 수심 그리고 교각폭의 상관관계

그림 5에서 다른 조건이 일정한 경우 보호공의 크기가 증가함에 따라 한계유속은 증가하여 안정해짐을 알 수 있다. 또한 동일 조건에서 수심이 감소하면 u_c 는 증가한다. 그러나 수심이 어느 상태에 이르면 수심이 감소할수록 오히려 한계유속이 감소한다. 이는 교각에 의한 하강류는 차단하나 기초에 의한 하강류와 기초의 존재로 단면증대의 영향이 보호공의 이동을 용이하게 한다. 모든 실험결과에서 주목되는 사실은 불균일단면교각의 경우에도 균일단면교각에서와 같이 한계세굴 수심이 존재하는 사실이다.

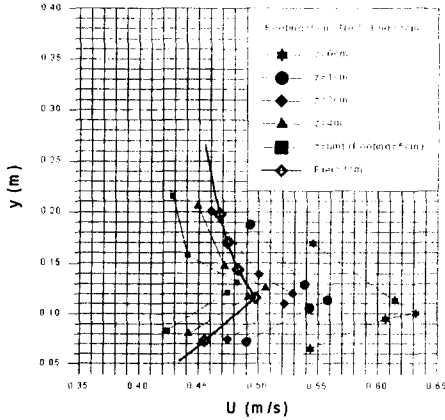


그림 3. 기초의 높이에 대한 한계유속의 변화

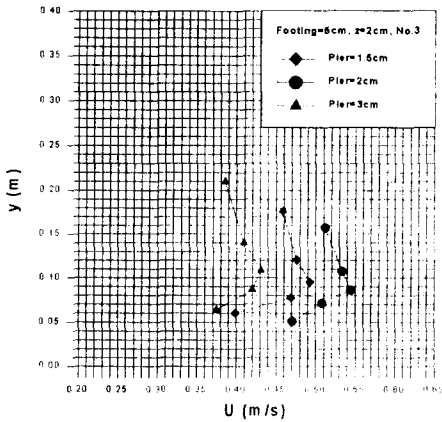
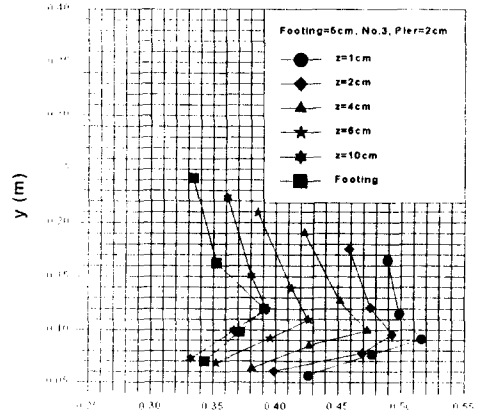


그림 4 교각-기초폭비에 대한 한계유속

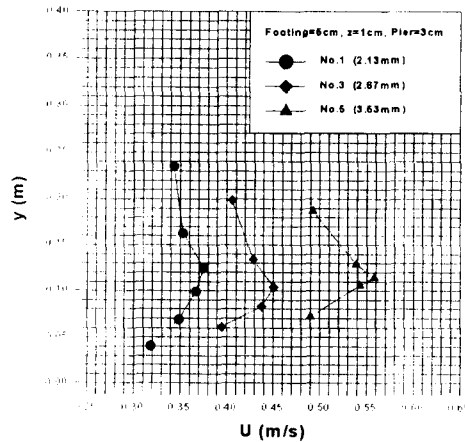


그림 5. 입경과 수심에 대한 한계유속

5. 사석보호공의 실험결과

기초 없이 교각만 있는 경우에 비하여 기초가 있는 경우 u_c 가 증가한다. 이는 동일한 흐름조건에서 기초의 존재는 작은 사석보호공의 사용을 가능하게 한다. 그러나 한계기초높이 z_c 보다 크게 되면 하강류 차단효과보다 기초자체에 의한 하강류와 단면증대의 효과가 우세하여 세굴에 취약하게 된다. 따라서 $z > z_c$ 의 경우에는 동일한 흐름조건에서 보다 큰 사석보호공이 필요하다. 이를 설계에 반영하기 위하여 기초높이 z 에 따른 한계유속 u_c 의 변화를 사석크기의 증가로 환산하여 기초가 없이 교각만 있는 경우와 기초가 있는 경우에 대한 사석보호공의 크기 $D_{p,footing}/D_{p, pier}$ 는 z/y_o 의 항과 z/b_f 의 항으로 나타난 것이 그림 6 (a), 그림 6 (b)이고, 최적합선의 회귀식이 그림에 주어진다. 이에 대한 계산절차는 주어진 흐름, 하부구조에 대한 사석크기를 식(8)과 식(9)로 계산한다.

z/y_0 와 z/b_f 에 대한 $(D_{p_footing})/(D_{p_pier})$ 값은 그림 또는 식으로부터 구하고 이는 계산된 사석크기에 곱하여 최종사석크기를 결정한다. 그림 6 (a)와 그림 6 (b)의 두 식을 통해 구한 불균일 단면 교각의 사석크기 중 과소설계의 영향을 방지하기 위해 사석크기 중 큰 값을 사석크기로 결정한다.

$$D_p = 0.123 \frac{u_c^{1.32} b^{0.24} B^{0.45}}{(S_s - 1)^{0.66} g^{0.66} y_0^{0.36}} \quad (8)$$

$$D_p = 0.330 \frac{u_c^{1.68} b^{0.20} y_0^{0.36}}{(S_s - 1)^{0.84} g^{0.84} B^{0.40}} \quad (9)$$

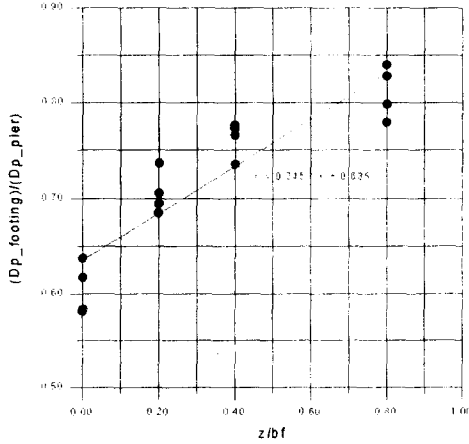


그림 6 (a) 사석크기에 대한 무차원수($D_{p_footing}/D_{p_pier}$)와 수심에 대한 푸팅높이(z/y_0)에 관한 무차원수의 관계

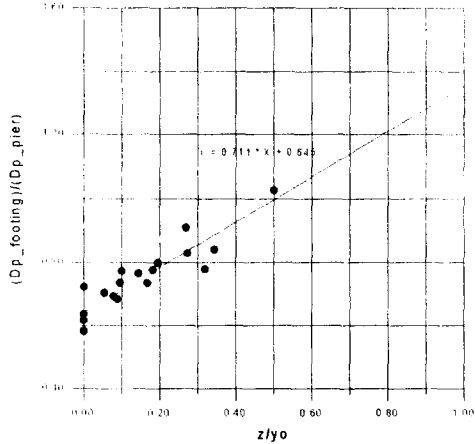


그림 6 (b) 사석크기에 대한 무차원수($D_{p_footing}/D_{p_pier}$)와 푸팅폭에 대한 푸팅높이(z/b_f)에 관한 무차원수의 관계

5. 결론

본 연구는 윤 등(1996)에 제안되었던 단일교각에 대한 사석보호공식을 불균일단면 교각에 적용하여 교각직경뿐만 아니라 푸팅직경과 하상에서 푸팅 상단까지의 높이 등의 변수들을 통해 교각을 따라 흐르는 하강류가 푸팅에 의해 차단되는 효과와 하상에서 푸팅상단의 높이가 높아짐에 따라 다시 푸팅에서 발생하는 하강류와의 상관관계를 이용하여 최적합선의 회귀식을 얻었으며 사석보호공식을 수정하였다. 결론적으로 본 연구를 통해 교각폭, 푸팅폭, 수심, 사석직경, 하단에서 푸팅 상단까지의 높이의 영향까지 고려된 수정식을 제안할 수 있게 되었다.

6. 참고문헌

- (1) 윤태훈, 윤성범, 오철승 제갈선동, 1996, 교각 사석보호공의 안정사석크기에 미치는 제반 수리 변수의 영향, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp.131-136.
- (2) 윤태훈, 윤성범, 윤광석, 1996, 교각 세굴사석보호공의 기존 설계식의 비교해석, 대한토목학회 논문집, 16권 II-5호, pp411-420.
- (3) Ishba, S.V., 1935, Construction of dams by dumping stones in flowing water, W.S. Army Engrg. District, Eastport, Marine.
- (4) Richardson, E.V., Harrison, L.J., Richardson, J.R., and Davis, S.R., 1993, Evaluating scour at bridges, Hydraulic Engineering Circular No.18, FHWA-IP-90-107, February, 105p.