

교각주위의 세굴방지를 위한 희생파일의 적용

Application of Sacrificial Piles for Scour Countermeasures around Bridge Pier

김응용 · 최기봉*

한국과학기술원 응용공학부 토목공학과 · 충청대학 품질안전공학부 산업안전전공*

1. 서 론

교량의 교각 및 교대에 대한 세굴의 영향은 많은 학자들의 관심이 되어왔다. 연구의 주된 관심은 세굴에 영향을 미치는 인자들의 역학적인 거동에 대한 것으로서 세굴인자들의 최대 영향 및 최대세굴심을 예측하는 적절한 방법들이 연구되었다. 특히, 교각에서 일어나는 세굴은 이동하는 유체의 역학적인 상호작용과 불균등하게 분포된 하상입자들을 포함하는 3차원적인 문제로서, 그 현상이 대단히 복잡하여 하천흐름과 하상재료의 특성 및 교각의 형상과 같은 여러 요소에 의해 지배를 받기 때문에 세굴에 대한 정확한 예측은 매우 어렵다. 따라서, 복잡한 세굴인자들로 인해 세굴에 관한 연구는 주로 실험에 의하여 이루어지고 있는 실정이다.

교각 또는 기초를 세굴로부터 보호하는 방법에는 세굴에 대한 하상물질의 저항력을 증가시키는 방법과 하상물질을 세굴하는 하강류와 마제형외류와 같은 세굴유발 요인의 능력을 감소시키는 방법의 두가지 접근방법(Posey, 1974)이 있다. 첫번째 접근방법은 교각주위 하상에 큰 입경의 재료나 사석, 테트라포드(tetrapod), 케이블 블록등과 같은 보호층을 부설하는 방법이며, 두번째 접근방법은 교각 상류에 교각보호장치를 설치하거나, 교각 전면에 부착되는 방지판이나 푸팅의 상판을 상류로 연장하거나 원환을 바다 또는 바다부근에서 교각에 부착시키는 방법이다(안산진 등, 1998 ; 1999).

Ettema(1980)는 교각 주위에 원환(collar)을 설치함으로써 교각의 세굴심이 감소한다는 것을 밝혔다. 일반적으로 방지판의 설치는 세굴방지에 효과적인 것으로 알려져 있다. Chiew(1984, 1992)는 평균 하상고 아래에 교각의 직경보다 큰 방지판을 설치하고 모형실험을 수행하였다.

국내의 경우 통상 홍수기에는 단기간에 많은 집중호우로 인해 수위가 급상승하고 수량이 증가하고 비홍수기에는 수위가 저하되고 수량이 적어지는 특성을 가지고 있으나 현재까지 대부분의 세굴공식은 이와 같은 흐름 특성이 아닌 상태의 수로나 하천에서 개발된 것으로, 국내 하천에 적용할 경우 세심한 주의가 필요하다. 그러나 국내에서는 아직 교각세굴에 대한 예측공식은 물론 방지공법에 대한 연구도 거의 미미한 상태이며 그 기준도 정해져 있지 않은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 국부세굴을 방지시키는 방법의 하나로 교각주위에서 발생하는 와류를 감소시키는 방법을 선택하고, 교각주위의 세굴방지 시설물인 희생파일(sacrificial pile)을 모형교각 주변에 설치한 후 최대평형 세굴심(Hadfield, 1997)에 대하여 실험을 통하여 살펴보고, 수심별, 수로경사별 희생파일의 설치각도별로 실험을 실시하여 방지시설이 부착되지 않은 교각에 대한 실험결과와 비교하여 이것으로 인한 세굴방지 효과와 세굴감소 범위를 밝혀 교량설치 및 기존 교량의 보수에 따른 구조물의 안전성을 평가하는 기본자료로써 활용하는데 그 목적이 있다.

2. 세굴방지 실험

2.1 실험수로 및 하상재료

실험장치는 수로길이 12m, 수로폭 0.4m, 수로높이 0.4m의 개수로를 이용하였다. 설치된 실험

수로는 양측 벽면이 유리로 되어 있어 흐름을 관찰할 수 있고, 수로경사를 0.0~4.0% 범위까지 변화시킬 수 있도록 되어 있다. 유량은 벨브에 의해서 조절이 가능하고, 수로의 상류단에 설치된 고수조에는 삼각위어가 설치되어있어 유량을 측정할수 있다. 유속계는 실험수로 벽면 위에 설치된 레일을 따라 상·하류부로 움직여 전 구간에서 유속의 측정이 가능하고 프로펠러형으로서 회전수를 측정하여 이를 유속환산공식에 대입하여 유속을 계산하도록 되어 있다. 접근유속의 측정은 유속계를 이용하여 모형으로부터 상류 약 1m 지점에서 1점법으로 유속을 측정하고, 1점 유속을 3회 측정하여 평균하여 사용하였다. 수심의 측정장치는 vernier형의 point gage를 이용하였으며 유속계와 마찬가지로 수로의 전구간을 이동시켜 수심의 측정이 가능하다. 실험수로의 하상재료는 증압입경(d_{50})은 0.8mm, 기하학적 표준편차(σ_g)는 1.95이며, 비중은 2.58 인 모래를 이용하였다. 하상재료는 수로의 바닥에 두께 10cm로 깔고, 길이방향으로 수로의 중간부분에 6.0m를 부설하였다. 실험장치의 개략도는

Fig. 1과 같다.

2.2 희생파일 및 모형교각 설치

희생파일은 교각주위에서의 국부세굴을 보호할 목적으로 교각의 상류부에 설치하는 파일을 말한다. 희생파일을 설치하여 얻을 수 있는 교각의 세굴방지 인자는 파일의 개수, 크기 및 교각과의 향점각도, 왜곡각도, 희생파일의 정렬상태 등이며, 일반적으로 향점각도를 상류부로 하는 삼각형 배열이 세굴방지에 가장 효과가 있는 것으로 알려져 있다(B.W., Melville 와 A.C. Hadfield; 1999).

실험에 사용된 모형교각은 직경이 각각 2.5cm, 3.2cm, 및 4.0cm인 크기가 다른 원형교각을 사용하였으며, 또한 직경 0.5cm인 모형 희생파일(Bruce 등, 1998) 5개를 설치하였다. 최상류에 위치한 희생파일로부터의 각도를 다르게하여 설치한 후 실험을 실시하였다. 모형교각 및 희생파일의 표면은 조도의 영향을 무시할 수 있도록 알루미늄으로 제작하여 설치하였다. 세굴방지 실험에 사용된 교각과 희생파일 모형은 Fig. 2와 같으며, 교각 및 희생파일의 제원은 Table 1과 같다.

2.3 실험 및 측정방법

실험은 희생파일을 설치하지 않은 모형교각만으로 세굴심의 영향을 살폈으며, 다음 실험은 모형교각과 희생파일을 설치한 후 세굴심의 영향을 알아보고 앞의 실험과 비교·분석하였다. 실험은 시간경과에 민감하므로 유속 및 세굴심의 측정은 실험보조원을 각각 배치하여 동시에 측정을 시도하였다. 실험장치를 이용하여 실시한 실험은 다음과 같다. (1)수심변화에 따른 세굴심의 변화, (2)교각크기에 따른 세굴심의 변화, (3)희생파일과 모형 교각간의 거리에 따른 세굴심의 변화, (4)희생파일 설치각도별 세굴심의 변화, (5)교각주위의 지점별 세굴심의 변화, (6)희생파일의 향점각도(apex angle; α)에 따른 세굴심의 변화, (7) 희생파일의 왜곡각도(skew angle; β)에 따른 세굴심의 변화

3. 실험결과 분석

3.1 수심변화에 따른 세굴심의 변화

수로경사가 0.03% 및 0.05%이고 직경 2.5cm와 3.2cm인 원형교각에 대하여 희생파일을 설치하지 않았을 경우와 희생파일을 설치한 후 최상류에 위치한 희생파일로부터 최하류에 위치한 희생파일 사이의 각도인 향점각도를 30°, 45° 및 60°로 주어 설치한 경우에 대하여 수심변화에 따른

세굴심의 영향을 실험하였다. 수평축을 수심, 수직축을 세굴심 축으로하여 수심변화에 따른 최대 세굴심을 나타낸 것이 Fig. 3의 (a), (b), (c), (d)와 같다.

그림에서 보는 바와 같이 동일한 교각에서는 수심이 증가함에 따라 무차원세굴심(d_s/D)도 증가하는 것을 알 수 있다. 회생파일의 향점각도별 비교에서는 회생파일을 설치하지 않았을 때, 향점각도 60°, 45° 및 30°의 순으로 나타나 향점각도가 세굴심 감소에 영향을 미치고 있음을 알 수 있으며, 수심이 증가할수록 향점각도별 세굴심의 증가폭은 점차 커지는 것을 알 수 있다.

3.2 회생파일의 거리에 따른 세굴심의 영향

회생파일의 거리에 따른 영향을 알아보기 위하여 교각 상류에 일정한 향점각도($\alpha=30^\circ$ 및 60°)를 둔 회생파일 5개를 설치하고 교각과 최상류에 위치한 거리를 L을 각각 다르게 하여 최대세굴심의 영향을 실험한 결과는 Table 2와 같다. Table 2에서 나타난 바와 같이 최대세굴심은 회생파일을 설치하지 않았을 때, L=3.5D, L=3.0D, L=2.0D, L=2.5D순으로 나타났다. 따라서 회생파일과 교각과의 거리의 영향은 L=2.5D인 경우가 세굴심 감소효과가 최대가 됨을 알 수 있다.

3.3 향점각도에 따른 교각주위의 세굴심의 변화

실험수로 상류측 기준에서 교각의 정면(dsU), 후면(dsB), 좌측(dsL), 우측(dsR)의 4가지 값과 그중 제일 큰 값을 최대평형세굴심(d_{sm})으로 정의하였다(Fig.5).

실험수로에 직경 2.5cm, 3.2cm, 4.0cm인 교각과 향점각도15°, 30°, 45°인 회생파일을 각각 설치하고, 일정 흐름조건하에 교각주위의 4지점에 대한 최대세굴심을 실험을 실시하여 교각 크기별로 분석한 결과는 Fig. 6과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 세굴심의 크기는 교각 정면, 교각 좌·우측면 교각 후면의 순으로 나타났으며, 교각 좌·우측의 세굴심은 거의 유사한 결과를 나타내고 있다. 또한 향점각도에 따른 최대세굴심은 회생파일을 설치하지 않았을 때, 회생파일을 설치하고 향점각도가 45°, 15°, 30°의 순으로 나타났다. 이는 향점각도가 최대세굴심에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

3.4 회생파일의 왜곡각도(β)에 따른 세굴심 감소

교각 상류에 5개의 회생파일을 설치하고 최상류에 위치한 회생파일로부터 최하류에 위치한 회생파일 사이의 각도인 향점각도(α)가 30°일 때, 흐름방향과 비틀린 왜곡각도(β)를 각각 0°, 10°, 15°, 20° 및 30°로 하여, 흐름강도(V/Vc)에 따른 세굴심의 감소영향을 알아보았다. 흐름방향과 비틀린 각도 및 흐름강도에 따라 세굴심의 감소율을 나타낸 결과는 Fig.7과 같으며, Fig.7에서 알 수 있듯이 흐름강도가 크고 비틀린 각도가 크게됨에 따라 최대세굴심이 교각 정면에서 발생되지 않고 교각 측면부에서 나타났으며 회생파일을 설치하지 않았을 때보다 더 큰 세굴심이 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 교각 주위에서의 발생하는 세굴을 방지하기 위한 실험적인 연구로서 모형교각 상류에 5개의 회생파일을 설치하고 각종 세굴을 유발시키는 인자들에 대하여 실험을 실시하고 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 희생파일의 향점각도에 대한 세굴심의 영향은 희생파일을 설치하지 않았을 때, 향점각도 60°, 45° 및 30°의 순으로 나타났다. 따라서 향점각도가 세굴심에 영향을 미치고 있으며, 수심이 증가 할수록 향점각도에 따른 세굴심 방지효과는 점차 커지는 것을 알 수 있다. 또한 희생파일의 향점각도 30° 이내에서 세굴방지효과가 최대로 됨을 알 수 있었다.
- (2) 모형교각과 희생파일간의 거리에 따른 최대세굴심감소 효과는 L=2.5D로 나타났다.
- (3) 교각주위의 지점별 최대세굴심은 모형교각 전면, 측면, 후면의 순으로 나타났으며. 교각 좌우측면에서의 최대세굴심의 차이는 거의 보이지 않았다.
- (4) 희생파일의 왜곡각도가 커질수록 세굴방지효과는 작게 나타났으며, 흐름강도가 크고 왜곡각도가 크게됨에 따라 희생파일을 설치하지 않았을 때보다 세굴이 더 많이 되었다. 따라서 희생파일의 설치시 흐름방향으로 설치하여야 세굴방지효과를 최대로 할수 있다고 사료된다.
- (5) 희생파일에 의한 세굴방지 실험에서 향점각도 30°이고 왜곡각도 0°일 때 최대 31%의 방지효과를 나타내었다. 그러나 세굴방지 효과를 최대로 하기 위해서는 교각의 크기에 따른 희생파일의 적정 개수, 희생파일의 직경 및 정렬상태에 대한 연구가 향후과제라 하겠다.

참고문헌

1. 안상진, 김응용, 김종섭, 김진극, (1998). "세굴방지 시설물에 의한 교각의 국부세굴 방지실험", '98년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp.461~465.
2. 안상진, 김응용, 이재경, (1999). "하강류 차단에의한 교각세굴 방지실험" 대한토목학회논문집, Vol.19, No. II-1, pp.45~57.
3. Bruce W. Melville, A.C. Hadfield(1999). "Use of Sacrificial Piles as Pier Scour Countermeasures", J. of Hydraulic Engineering, Vol.125, No.11, pp.1221~1224.
4. Bruce W. Melville, Anna C. Hadfield, and Christine S. Lauchlan, (1998). "Sacrificial Piles and Iowa Vanes as Pier Scour Countermeasures", Tennessee, ASCE, 1998 International Water Res. Eng. Conference, Vol.1, pp.39~44.
5. Hadfield, A.C., (1997). "Sacrificial piles as a bridge pier scour countermeasure," M.E. thesis, Civil and Resource Engineering Dept., The University of Auckland, Auckland, New Zealand.
6. Wang, T.W., (1994). "A study of pier scouring and scour reduction," Proc., 9th. Congress, Asia Pacific Div., IAHR, Singapore, pp.18~28.

Table 1. The pier and sacrificial pile factors used for experiment

pier		sacrificial piles			
diameter $D(\text{cm})$	opening ratio $R_0(\%)$	diameter $d(\text{cm})$	sacrif. pile $n(\text{number})$	apex angle $\alpha(^{\circ})$	skew angle $\beta(^{\circ})$
2.5	93.8	0.5	5	15, 30, 45, 60	10, 15, 20, 30
3.2	92.0				
4.0	90.0				

Table 2. The maximum scour depth according to distance between sacrificial pile and pier(flow depth=10.2cm) (unit : cm)

distance (L)	pier diameter (D)	D=2.5cm		D=3.2cm		D=4.0cm	
		$\alpha=30^\circ$	$\alpha=60^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=60^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=60^\circ$
2.0D		3.2	3.6	3.6	4.0	4.0	4.4
2.5D		3.1	3.4	3.5	3.8	3.8	4.2
3.0D		3.2	3.5	3.7	3.9	4.2	4.3
3.5D		3.4	3.9	4.1	4.3	4.4	4.9
no sacrificial piles		3.5	4.3	4.4	4.7	4.8	5.4

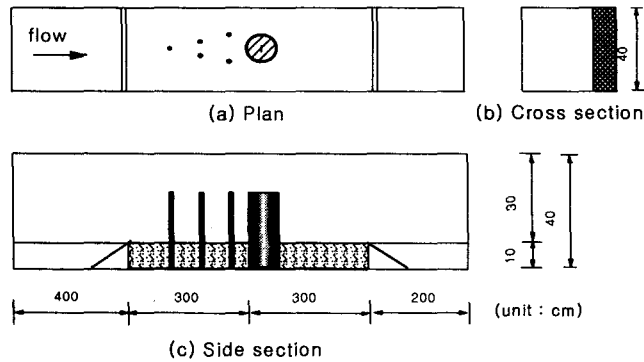


Fig. 1. Open Channel Apparatus for the Experiments

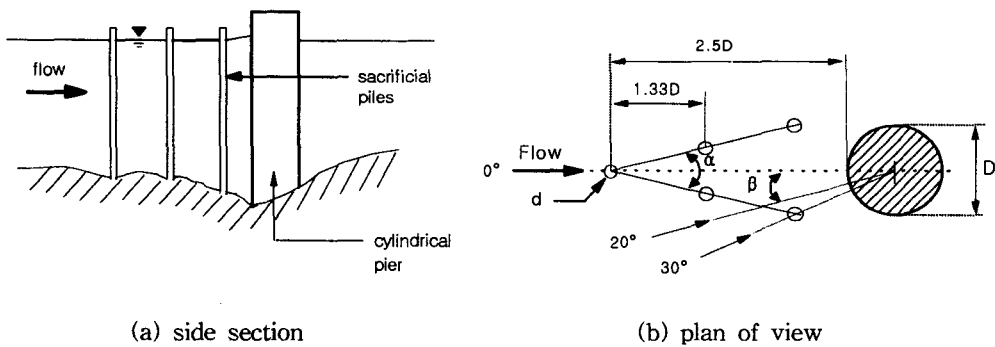
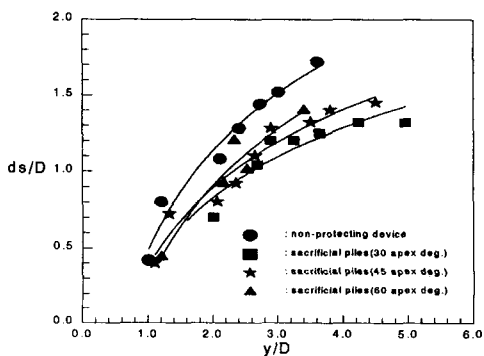
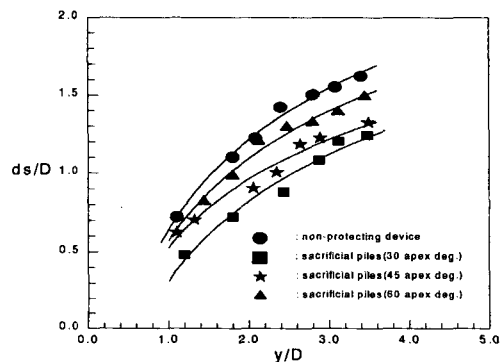


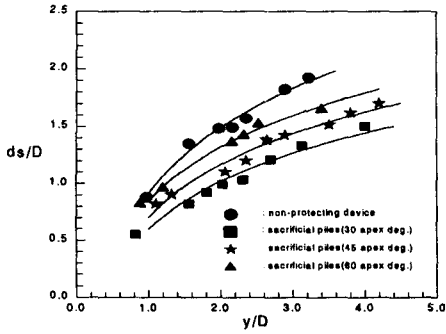
Fig. 2. Pier Model and Sacrificial Piles used for Experiments



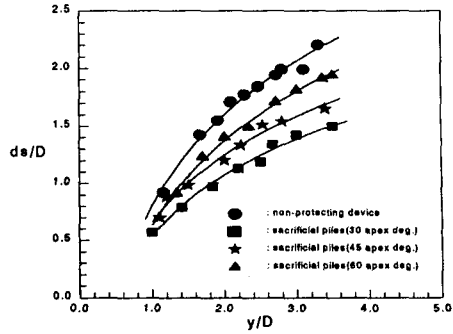
(a) channel slope 0.03%(D=2.5cm)



(b) channel slope 0.05%(D=2.5cm)



(c) channel slope 0.03% (D=3.2cm)



(d) channel slope 0.05% (D=3.2cm)

Fig. 3. Maximum scour depth with flow depth

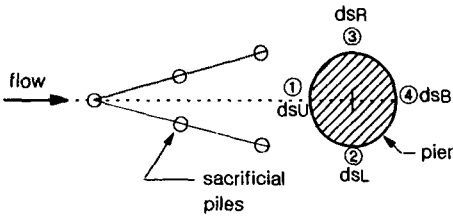
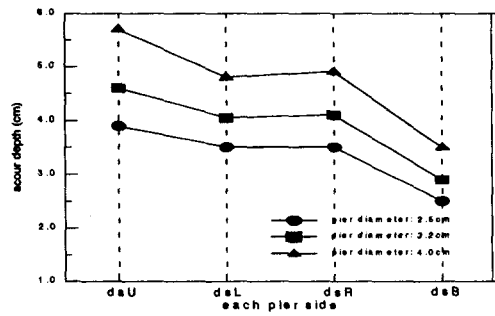
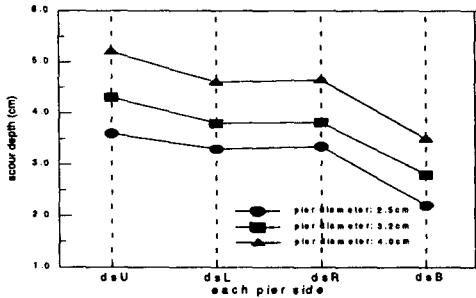


Fig. 5. The location of each pier side

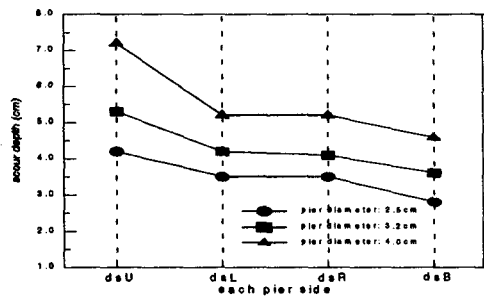


(a) $\alpha = 15$ degree

Fig. 6. Scour depth of each pier side by apex angle



(b) $\alpha = 30$ degree



(c) $\alpha = 45$ degree

Fig. 6. (Continue)

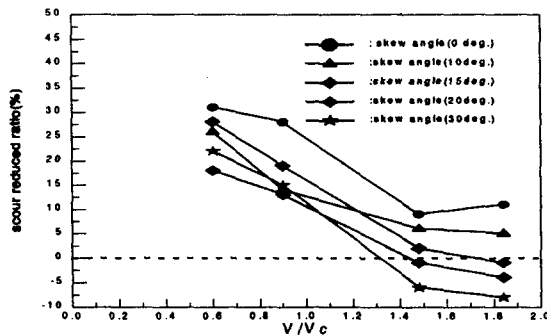


Fig. 7. Scour reduced ratio according to flow intensity increase by skew angle