

파상형 교각 주위에서의 국부세굴 특성

Local Scour in the Vicinity of Riblet Type Piers

김기현*, 홍창배**, 이성대***

Ki Hyun Kim, Chang Bae Hong, Seong Dae Lee

요 지

하천의 교각주위에는 국부세굴현상과 이에 따른 퇴적현상이 나타난다. 특히 교각주위에서의 국부세굴특성은 교량의 안전성과 관련하여 중요한 문제가 되므로 세굴의 크기를 감소하기 위한 대책이 필요하다. 교각주위에서의 국부세굴현상은 교각부 인근에 형성되는 말발굽형 와류가 중요한 역할을 하고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 교각주위에서의 수류변화를 적절히 제어함으로서 세굴특성을 감소하고자 하는 연구가 행해져 오고 있으며, 교각에 원환(collars)을 설치하거나 조도를 증가시킴으로 세굴감소 대책을 제안하고 있다(Zarrati et al, 2006).

본 연구에서는 교각주위에서의 세굴을 감소하기 위해 원주교각의 표면을 파상형(riblet type)으로 하였으며, 파상형교각의 기본개념은 원주교각 전면에 나타나는 하강류를 파상형 원주내로 흡수하여 세굴작용을 감소시키고자 하는 것이다. 이같은 형식은 원형교각에 원환을 설치하는 방법이 대표적이며 하상과 교각사이 경계부에 수평방향의 단일 과형(single riblet type)을 설치한 Sato et al(1993)의 연구가 있다. 이들의 결과에 의하면 원형교각과 비교하여 초기 세굴감소 효과가 있음을 확인하였으나 시간경과에 따라 세굴이 점차 증가하고 있는 바 그 원인으로서 세굴이 진행되면서 하상면과 단일 과형과의 간격이 확대하여 단일과형내로의 흐름흡수 효과가 감소하기 때문으로 보고되었다. 따라서 여기서는 이같은 문제를 해결하기 위해 다단의 오목 및 불록 파상형(concave/convex riblet type) 원주교각에 대한 국부세굴 특성을 검토하였다. 또한 원주형의 교각에서는 단일원주보다는 원주군으로 설치되는 경우가 대부분이며 이때 교각의 직경(D)에 대한 교각 사이 간격(L_d)의 비(L_d/D)에 따른 전면교각에서의 수류변화의 영향이 후면교각에 작용하여 상호·복합적인 흐름 및 세굴특성을 나타내므로 이와 같은 복렬형 원주군의 세굴특성을 파상형 원주교각에 적용하여 국부세굴의 크기 변화를 해석하였다. 따라서, 교각주위에서의 수류특성 및 세굴의 변동은 원주군 및 교각파상의 크기와 간격 등과 같은 구조물의 배열조건과 Froude 수, 수심 등의 수리학적 조건에 따라 달라지므로 이의 조건을 체계적으로 변화시켜 가면서 교각주위에서의 국부세굴 및 세굴 감소특성을 검토하였다.

실험결과 오목 및 불록 파상형 원주 주위에서의 세굴크기는 원형원주와 비교하여 전체적으로 감소하는 것으로 확인되었으며 특히 오목형 $B/h' = 3$ 에서는 세굴경감효과가 탁월하여 70%이상 감소하는 것으로 확인되었으나 불록형 $B/h' = 5$ 에서는 세굴촉진특성이 나타나고 있는 것으로 나타났다. 따라서, 파상형 원주에서는 하강류나 와류를 파상형의 내부로 유도하여 세굴의 크기를 조절할 수 있는 최적의 파상이 존재하고 있는 것으로 예측되었다.

핵심용어 : 국부세굴특성, 오목 및 불록 파상형 원주교각, 복렬형 원주군

1. 서 론

하천의 교각주위에는 국부세굴현상과 이에 따른 퇴적현상이 나타난다. 특히 교각주위에서의 국부

* 한라대학교 토목공학과 산업대학원

** 정회원 (주)씨테크

*** 정회원 · 한라대학교 토목공학과 교수 · E-mail : sdlee@halla.ac.kr

세굴특성은 교량의 안전성과 관련하여 중요한 문제가 되므로 세굴의 크기를 감소하기 위한 대책이 필요하다. 교량의 안전해석을 위해 국부세굴에 관한 실험적 연구가 활발하며 이를 토대로 실제적인 교각안정설계를 수행하고 있는 실정이며 단일 원주 주위에서의 국부세굴의 기구에 대해서는 많은 실험적 및 이론적 연구를 통해 상당부분 규명이 되어져 있다. 교각주위에서의 국부세굴현상은 교각부 인근에 형성되는 말발굽형 와류가 중요한 역할을 하고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 교각주위에서의 수류변화를 적절히 제어함으로서 세굴특성을 감소하고자 하는 연구가 행해져 오고 있으며, 교각에 원환(circular collars)을 설치하거나 조도를 증가시킴으로 세굴감소 대책을 제안하고 있다(Zarrati et al, 2006).

본 연구에서는 교각주위에서의 세굴을 감소하기 위해 원주교각의 표면을 파상형(riblet type)으로 하여 검토하였다. 파상형교각의 기본개념은 원주교각 전면에 나타나는 하강류를 파상형 원주내로 흡수하여 세굴작용을 감소시키고자 하는 것으로, 이같은 형식은 원주형 교각에 원환을 설치하는 방법이 대표적이며 하상과 교각사이 경계부에 수평방향의 단일 과형(single riblet type)을 설치한 Sato et al(1993)의 연구가 있으며, 원형교각과 비교하여 초기 세굴감소 효과가 있음을 확인하였다. 그러나 시간경과에 따라 세굴이 점차 증가하고 있는 바 그 원인으로서 세굴이 진행되면서 하상면과 단일 과형과의 간격이 확대하여 단일과형내로의 흐름흡수 효과가 감소하기 때문으로 알려져 있다.

따라서 여기서는 이같은 문제를 해결하기 위해 단일 과형원주를 확장한 다단(多段)의 오목 및 볼록 과상형(concave/convex riblet type) 원주교각에 대한 국부세굴 특성을 수리실험을 통해 검토하였다. 또한 원주형의 교각에서는 단일원주보다는 원주군으로 설치되는 경우가 대부분이며 이때 교각의 직경(D)에 대한 교각 사이 간격(L_d)의 비(L_d/D)에 따른 전면교각에서의 수류변화의 영향이 후면 교각에 작용하여 상호·복합적인 흐름 및 세굴특성을 나타내므로 이와 같은 복렬형 원주군의 세굴특성을 파상형 원주교각에 적용하여 국부세굴의 크기 변화를 해석하였다.

그리고 교각주위에서의 수류특성 및 국부세굴의 변동은 원주군 및 파상형 교각의 크기와 간격 등과 같은 구조물의 배열조건과 Froude 수, 수심 등의 수리학적 조건에 따라 달라지므로 이들의 조건을 체계적으로 변화시켜 가면서 교각주위에서의 국부세굴 및 세굴 감소특성을 검토하였다.

2. 실험장치 및 실험조건

2.1 실험 장치

교각의 국부세굴 특성을 파악하기 위해 이동상 및 고정상 실험이 가능한 개수로 실험장치를 제작하였으며 제작된 수로는 폭 1.80m, 길이 10.0m, 깊이 0.5m의 상대적으로 광폭의 수로이다. 광폭수로를 채택한 것은 측벽에 의한 영향을 최소화 하고 유입유량의 안정성 및 정류화 그리고 수위 등을 고려한 것이었다. 그리고 수로의 상류단에는 흐름의 안정을 위한 정류장치를 설치하고 하류측에는 소류사의 유출을 방지하기 위한 팬스를 그리고 하류단에 수위 및 유속 변화가 가능한

수위조절용 가동수문(movable weir)이 부착되어 있다. 실험수로는 정적세굴(clear water scour)실험을 기본개념으로 제작되었고 측면이 강화유리로 되어 있어 세굴 및 흐름의 상황을 측면뿐만 아니라 상부에서 넓은 범위를 조망하며 관측이 가능하도록 계획하였으며 수로경사는 하천의 중류역을 대상으로 1/1000경사로 제작하였으며 필요에 따라 경사조절이 가능하도록 고정하였다. 본 수리실험에서 저수조에서 유입되는 공급유량은 삼각웨어를 통해 공급되며 공급최대유량은 $Q=138.0 \text{ l/s}$ 이 되도록 하였다. 수심(h)는 등류조건으로 실험을 행하기 위해 3cm를 기준으로 하였으며 필요에 따라 4cm 및 5cm에 대해서도 실험을 수행하였다. 그리고 실험에 사용된 모형사는 주문진 표준사를 사용하였으며 수로상에 길이 6.0m, 폭 1.8m, 모래층(깊이) 0.1m로 포설하여 실험을 수행하였으며 본 이동상 모형실험에 사용된 모래는 흙의

분류결과 SP지반으로 분류되며 평균입경

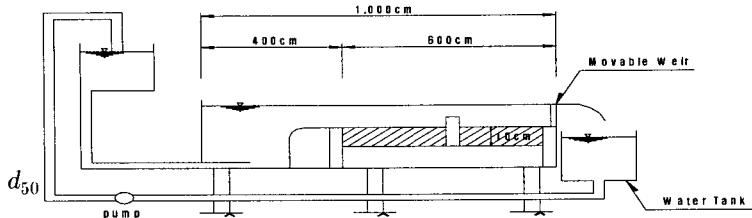


Fig. 1 Open Channel Apparatus for the Experiment
 $=0.54\text{mm}$, 균등계수 $C_u=1.75$, 곡률계수 $C_c=1.08$ 이며 비중 $G_s=2.654$ 이다.

2.2 실험의 조건 및 방법

실험에 사용된 원주교각은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 원형, 오목 파상형(concave riblet type) 및 볼록 파상형(convex riblet type) 교각을 대상으로 하였으며, 원형교각은 직경 $D=4.0\text{cm}$ 의 깨끗한 플라스틱재료를 사용하였으며 파상형 교각은 오목형 및 볼록형 파상의 폭($h'=2\text{mm}$)과 파상간격 ($B=6\text{mm}$, 10mm)을 대상으로 세굴특성을 검토하였다. 그리고 원주형의 교각에서는 단일원주보다는 원주군으로 설치되는 경우가 대부분이므로 이때 교각의 직경(D)에 대한 교각 사이 간격 (L_d)의 비(L_d/D)에 따른 전면교각에서의 수류변화의 영향이 후면교각에 작용하여 상호·복합적인 흐름 및 세굴특성을 나타내므로 이와 같은 복렬형 원주군의 세굴특성을 파상형 원주교각에 적용하여 국부세굴의 크기 변화를 해석하였으며 본 실험에서는 원주교각 사이 간격 L_d 에 대한 직경의 비 $L_d/D=2, 3, 4$ 에 대해 종방향 및 횡방향의 구조물 배열에 대한 세굴특성 실험을 수행하였다. 그리고, 교각주위에서의 수류특성 및 국부세굴의 변동은 원주군 및 교각파상의 크기와 간격 등과 같은 구조물의 배열조건 뿐만 아니라 Froude 수, 수심 등의 수리학적 조건에 따라 달라지므로 이의 조건을 체계적으로 변화시켜 가면서 교각주위에서의 국부세굴 및 세굴 감소특성을 해석하였으며 본 연구에서는 Froude 수 $Fr=0.30$ 에 대해 검토하였다.

실험시간은 세굴심의 변동이 거의 나타나지 않을 때까지 행하였으며 대체로 통수 3시간 정도에 정상상태에 도달하였다. 세굴심의 계측위치는 원주의 전면부, 좌우측면부 및 후면부의 4개소에서 관측하였으며, 세굴형상의 측정 및 계측시간(t)은 20분 간격마다 180분까지 시행하였고 동시에 수심, 유속을 계측하여 시간변동에 따른 세굴형상의 변화를 관찰하였다. 실험종료 후에는 최종 세굴심도와 세굴

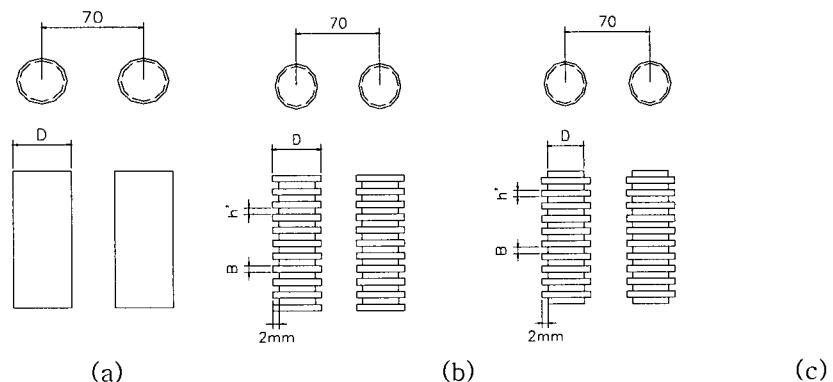


Fig. 2 Model cylinders used in Experiments

(a) circular piers (b) concave riblet piers (c) convex riblet piers with $L_d/D = 2.0$

및 퇴적량을 측정하였다. 본 실험에서는 수로내와 교각 부근에서의 흐름조건에 의해 사린(ripples)이 거의 발생하지 않았으며 세굴된 모래가 교각배후에 퇴적되는 특성을 보이고 있어 이들을 채취하여 퇴적량을 측정하였다. Table 1에는 본 연구에서 수행된 실험안에 대해 나타내었으며 이때 수심(H)은 3.0, 4.0 및 5.0cm, 그리고 Froude 수(Fr)는 0.3에 대한 경우이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 단일 원주의 세굴특성

Fig. 3에 단일원주에 대한 기존의 연구결과를 비교하기 위해 최대세굴심(Z_s)을 검토하였으며 그림에서 ●는 본 연구에서 행한 Froude 수(Fr) 0.3의 실험결과를 나타낸다. 그림에서의 종축은 최대

Table 1 Summary of test conditions

Case	Type	Pier Array	L_d/D	D (mm)	h' (mm)	B (mm)	D' (mm)	Fr.
1	circular pier(s)	single	-	40	-	-	-	0.3
2		T-2	2					
3		T-2	3					
4		T-2	4					
5		R-2	2					
6		R-2	3					
7		R-2	4					
8	concave riblet pier(s)	single	-	40	6	2	36	0.3
9		T-2	2		6	2		
10		T-2	3		6	2		
11		T-2	4		6	2		
12		R-2	2		6	2		
13		R-2	3		6	2		
14		R-2	4		6	2		
15		single	-	40	10	2	44	0.3
16		T-2	2		10	2		
17		T-2	3		10	2		
18		T-2	4		10	2		
19		R-2	2		10	2		
20		R-2	3		10	2		
21		R-2	4		10	2		
22	convex riblet pier(s)	single	-	40	6	2	44	0.3
23		T-2	2		6	2		
24		T-2	3		6	2		
25		T-2	4		6	2		
26		R-2	2		6	2		
27		R-2	3		6	2		
28		R-2	4		6	2		
29		single	-	40	10	2		44
30		T-2	2		10	2		
31		T-2	3		10	2		
32		T-2	4		10	2		
33		R-2	2		10	2		
34		R-2	3		10	2		
35		R-2	4		10	2		

* T-2 : Tandem array of 2 piers

R-2 : Row array of 2 piers

세굴심의 원주직경에 대한 비(Z_s/D)를 그리고 횡축은 수심의 원주직경에 대한 비(H/D)로 하였다. 그림에서 H/D 가 증가함에 따라 최대세굴심의 증가가 완만하게 증가하고 있으며 이같은 경향은 Fr 수가 상대적으로 작기 때문에 유속이 느려져 최대세굴심이 얕아진 원인으로 판단된다.

3.2 세굴심 및 세굴경감효과 검토

Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6에는 단일원형교각에 대한 파상형교각의 세굴심, 세굴감소효과 및 퇴적량의 변화를 무차원으로 각각 나타내었다. 그림에서 보듯이 단일교각인 경우 Case 9(오목형 $B/h' = 3$)의 결과가 세굴감소에 상대적으로 효과적이며 Case29(볼록형, $B/h' = 5$)인 경우는 세굴이 촉진되는 결과를 얻었다.

4. 결론

본 연구에서는 교각주위에서의 세굴특성을 타악하기 위하여 단일원형교각을 포함한 오목 및 볼록 파상형 원주에 대한 구조물의 배열조건과 수리학적 조건을 체계적으로 변화시켜 가면서 교각주위에서의 국부세굴 및 세굴 감소특성을 검토하였으며 그 결과 원형원주와 비교하여 전체적으로 세굴감소효과가 나타나고 있으며 특히 오목파상형 교각($B/h' = 3$)에서는 70%이상 세굴이 감소하는 것으로 확인되었으나 볼록파상형 ($B/h' = 5$)에서는 세굴이 촉진되는 것으로 나타났다. 따라서, 파상형 원주에서는 하강류나 와류를 파상형의 내부로 유도하여 세굴의 크기를 조절할 수 있는 최적의 파상이 존재하고 있는 것으로 판단되었다.

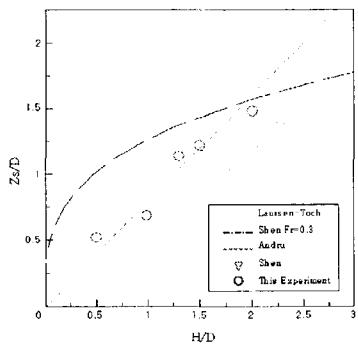


Fig.3 무차원 최대 세굴심

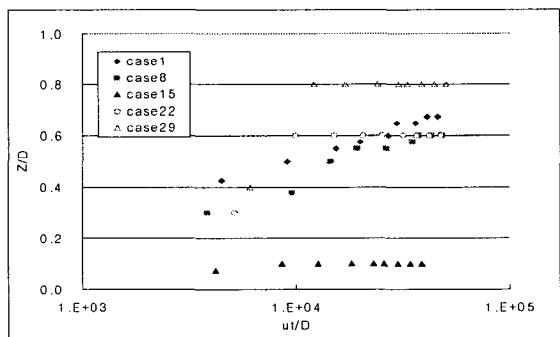


Fig.4 세굴심의 시간변화

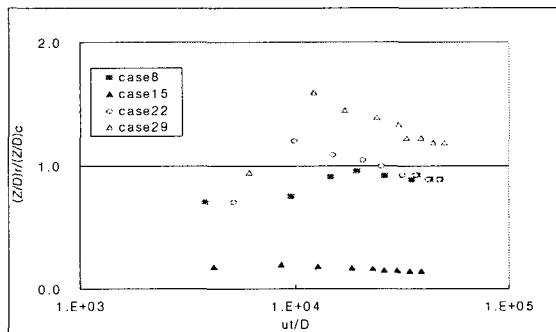


Fig.4 세굴경감효과

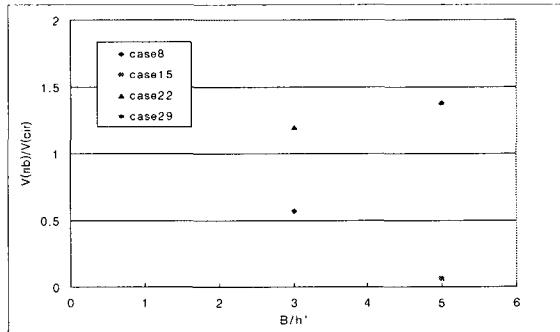


Fig.5 퇴적량의 변화