

군말댁 주변의 국부세굴에 관한 연구

서정필*, 윤병만**, 여운광***

1. 서론

교각 주변의 국부세굴에 관해서는 국내외적으로 수많은 연구가 수행되어왔다(FHWA, 1995; Jones, 1989; Raudkivi, 1986; 박성식, 송재우, 1997; 최계운 등, 1996). 그러나 이들 연구들의 대부분은 균일 단면을 갖는 교각에서의 세굴에 관한 것들로 최근 관심이 되고 있는 서해대교와 같이 군말댁 기초 말뚝을 사용하는 교량에 대한 연구는 그다지 많이 수행되지 않았다. 이에 군말댁 기초를 교량의 교각으로 사용하는 경우의 세굴현상에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다. 군말댁 주변의 세굴에 대한 연구로는 Salim and Jones(1996)가 수행한 연구가 대표적이다. 이에 본 연구에서는 수리실험을 실시하여 군말댁 주변의 세굴특성을 파악하는데 그 목적이 있다.

2. 실험장치

본 실험에서 사용한 실험장치는 크게 개수로 실험장치와 유량공급장치로 구분할 수 있다. 개수로 는 길이 25m(수조포함), 높이 0.8m, 폭 0.8m의 제원을 가지고 있으며 하상경사는 최대 0.0077까지 줄 수 있다. 그리고 개수로 상류단에는 고수조에 유입된 물을 받아 유량을 조절할 수 있는 위어가 설치되어 있으며 수로 끝에는 수위를 조절할 수 있는 수문이 설치되어 있다(그림 1). 유량공급장치는 고수조(3.8m×3.3m×1.7mH), 저수조(5.5m×5.5m×4.2mH), 순환수로(0.72mW×0.26mH), 펌프(10, 30, 50 마력, 최대공급유량 360 l/s)로 구성되어 있다. 또한 실험시에 등류상태를 확인하기 위하여 오차범위가 1~2mm정도인 초음파 수위계를 실험대상구간의 상하류에 각각 한 개씩 배치하였다.

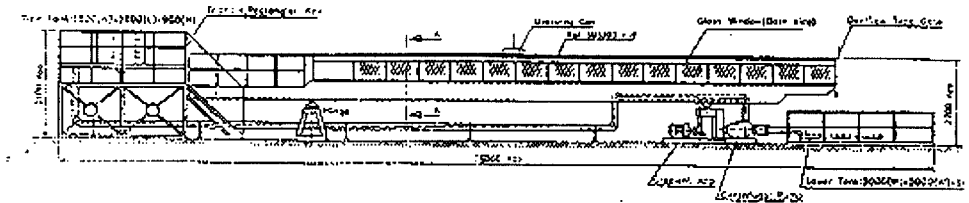


그림 1 개수로 실험장치

3. 기초실험

군말댁 모형실험에 앞서 기초실험을 실시하기 위해 단일교각, 이중교각, 말뚝 수가 4, 9, 15, 35개로 이루어진 군말댁 교각을 선정하였다. 기초실험에서 축적의 효과를 고려한 정량적인 분석보다는 군말댁에 대한 전반적인 세굴특성을 파악하는데 그 목적이 있다.

교각은 기초실험 및 모형실험 모두에서 직경 2.5cm, 길이 30cm인 것을 사용하였으며 표면조도를 최소화하기 위해 아크릴로 제작하였다.

실험순서에 대해 간략히 정리하면 그림 2와 같다.

* 명지대학교 토목공학과 석사

** 명지대학교 토목·환경공학과 부교수

*** 명지대학교 토목·환경공학과 교수

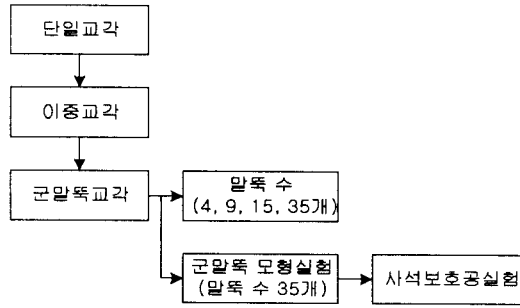


그림 2 실험 순서도

3.1 한계이동유속(V_c)의 측정

군말뚝의 기초실험 및 모형실험에 앞서 유속비에 따른 세굴심의 변화를 나타내기 위해서 하상재료의 한계이동유속을 측정하였다. 기초실험에서 한계이동유속을 측정하기 위해 수로경사 0.00077인 수로의 중앙 5m구간에 비중 2.65, 평균입경(d_{50}) 0.4mm인 모래를 두께 20cm로 포설한 후 수로에 물을 서서히 공급하면서 포설구간 전체에 걸쳐 하상재료가 움질일 때를 한계이동유속을 보고 몇 차례 측정하여 평균한 28.8cm/s를 한계이동유속으로 결정하였다. 또한 모형실험에 사용한 비중 1.47, 평균입경 1.85mm인 안트라사이트의 한계이동유속은 19.6cm/s로 결정하였다.

3.2 단일교각에 대한 실험

단일교각에 대한 실험은 이중교각 및 군말뚝 교각의 실험결과를 단일교각과 비교·분석하기 위한 실험자료로서 직경이 2.5cm인 원형교각을 수로에 설치하고 표 1의 조건하에서 실험을 수행하였다. 실험결과는 표 2에 정리하였으며 최대세굴심은 3회 평균하여 얻은 결과치이다.

표 1 유속비 및 수위의 변화

구분	유속비(V/V_c)	수위(cm)
1	0.57	7.6
2	0.74	12.3
3	0.89	18.1

표 2 단일교각에서의 세굴심 변화

유속비(V/V_c)	수위(cm)	상대세굴심(h_{s1}/D)
0.57	7.6	7.6
0.74	12.3	12.3
0.89	18.1	18.1

3.3 이중교각에 대한 실험

말뚝 간격에 따른 세굴특성을 비교·분석하기 위해서 이중교각의 간격에 따른 실험을 실시하였다. 이중교각에 대한 제원은 표 3에 수록하였으며 그림 3에서와 같이 모형교각을 흐름방향(S)과 폭방향(B)으로 각각 배치하여 실험을 수행하였다. 유속비와 수위는 단일교각 실험조건과 동일한 조건을 적용하였다.

3.3.1 흐름방향간격의 영향(교각간격 1D~6D)

이중교각을 흐름방향으로 배치하여 얻은 결과는 그림 4 및 그림 5와 같다. 그림 4와 그림 5는 각각 상류측 교각(제 1교각)과 하류측 교각(제 2교각)에 대해 무차원 세굴깊이(h_s/h_{s1})를 하류방향 무차원 거리(S/D)로 표시한 것이다. 여기서 h_{s1} 은 단일교각일 때의 세굴심이고, S는 상하류 교각사이의 거리를 나타낸다(그림 3참조).

표 3 이중교각의 제원

	말뚝 수	흐름방향간격(S, cm)	폭방향간격(B, cm)
case 1	2	2.5(1D)	2.5(1D)
case 2	"	5.0(2D)	5.0(2D)
case 3	"	7.5(3D)	7.5(3D)
case 4	"	10.0(4D)	10.0(4D)
case 5	"	12.5(5D)	12.5(5D)
case 6	"	15.0(6D)	15.0(6D)

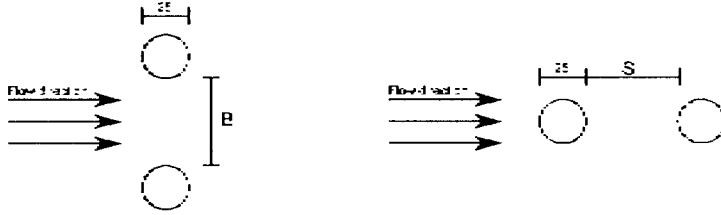


그림 3 이중교각 배치도(단위:mm)

상류측 교각의 경우(그림 4), 최대세굴심이 발생하는 교각간격은 유속비에 따라 다소 차이는 있지만 교각간격이 약 1배~3배 사이에서 최대세굴심이 단일교각에 비해 약 1.2배 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 교각의 간격이 약 6배에서는 단일교각의 세굴 형상과 흡사하게 나타났다. 한편 Hannah(1978)의 연구에 따르면 완전한 단일교각의 세굴형상은 약 16배 이상에서 발생한다고 발표하였다.

하류측 교각의 경우(그림 5), 상류측에서와는 달리 단일교각인 경우에 비해 세굴심이 작아지는 것을 알 수 있다. 또한 유속비에 따라 세굴심의 편차가 큼을 알 수 있고 유속비와 상관없이 교각간격이 지름의 4배일 때 h_s/h_{s1} 이 최소가 되며 교각 직경이 지름의 4배보다 커짐에 따라 h_s/h_{s1} 서서히 증가하여 단일교각 최대세굴심에 접근하고 있음을 알 수 있다. h_s/h_{s1} 의 최소치는 유속비가 작을수록 작게 나타나 유속비가 0.89, 0.74, 0.57일 때 h_s/h_{s1} 이 각각 약 0.76, 0.52, 0.4를 나타내고 있다. 즉, 유속비가 클수록 단일교각 최대세굴심에 빨리 접근하고 있음을 알 수 있다.

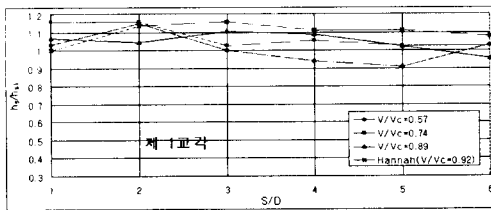


그림 4 상류측 교각의 흐름방향간격에 따른 세굴심 변화

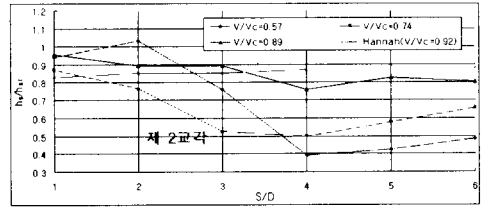


그림 5 하류측 교각의 흐름방향간격에 따른 세굴심 변화

3.3.2 폭방향간격의 영향(교각간격 1D~6D)

이중교각을 폭방향으로 나란히 놓았을 경우 두 교각의 세굴심은 같게 나타났다($\pm 2\text{mm}$). 그림 6의 각 점들은 두 개의 교각에서 발생한 최대세굴심을 평균하여 나타낸 것이다.

그림에서 보듯이 유속비가 0.57과 0.74의 비교적 작은 유속비에 대해서는 교각간격이 지름의 6배가 될 때까지는 h_s/h_{s1} 이 특별한 변화를 나타내지 않고 있다. 유속비가 0.57인 경우는 h_s/h_{s1} 이 1.2~1.3 범위에서 유속비가 0.74인 경우는 h_s/h_{s1} 이 1.25~1.35 범위에서 거의 일정한 값을 보이고 있다. 반면에 유속비가 비교적 큰 0.89인 경우는 h_s/h_{s1} 교각간격이 1배에서는 약 1.32의 값을 보이나 교각간격이

커짐에 따라 급격히 줄어 교각간격이 지름의 3배 정도되면 거의 1에 접근함을 알 수 있다. 즉, 유속비가 0.89인 경우에는 교각간격이 지름의 3배가 되면 최대세굴심이 단일교각일 경우와 거의 같게 된다.

그림 6에서 Hannah의 결과를 보면 교각간격이 1배에서 h_s/h_{s1} 이 1.9이상으로 나타나 있는데 이는 본 실험결과와 비교해 볼 때 잘못된 실험이거나 인쇄과정에서 오류가 발생한 것으로 판단된다.

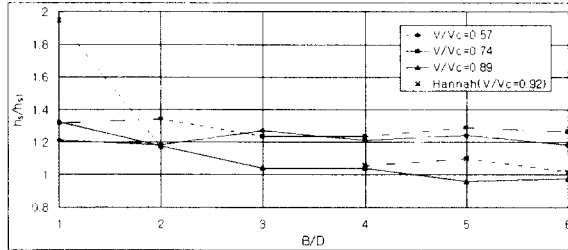


그림 6 폭방향간격에 따른 세굴심 변화

3.4 균말뚝에 대한 실험(말뚝 수 4, 9, 15, 35개)

균말뚝에 대한 세굴특성을 파악하기 위하여 이미 언급한 바와 같이 말뚝의 개수를 4, 9, 15, 35개 인 균말뚝을 제작하여 모형실험을 수행하였다. 실험은 그림 7에서와 같이 균말뚝을 각각 배치하였으며 흐름의 균말뚝에 대한 접근각은 직각으로 고정하여 실험을 수행하였다.

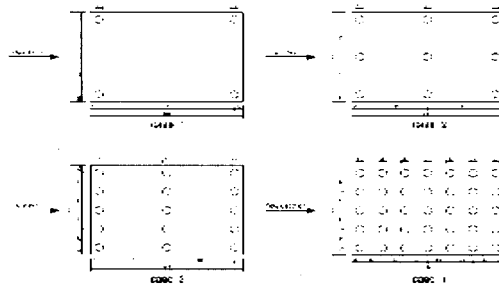


그림 7 균말뚝 교각의 배치도

유속비에 따른 최대세굴심의 변화는 그림 8과 같으며 case 1, 2의 경우, 유속비를 변화시켰을 때 최대세굴심의 변화폭이 그다지 크게 나타나지 않았으며 이것은 인접교각사이가 넓어 말뚝간의 간섭이 적어서 각각의 말뚝에 대한 유속과 흐름형상이 거의 독립적으로 작용하기 때문이라 판단된다.

case 3, 4에서는 유속비가 0.57에서 0.74로 증가함에 따라 세굴심이 단일교각의 경우에 비해 급격히 증가하나 유속비가 0.74에서 0.89로 증가할 때는 최대세굴심이 증가하기는 하나 유속비 증가에 따른 단일교각의 세굴심에 못미치는 것으로 나타났다.

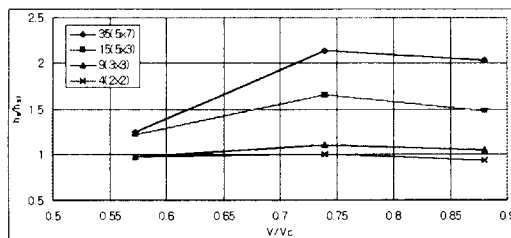


그림 8 유속비 변화에 따른 최대세굴심의 변화

4. 모형실험

모형실험은 서해대교 교각부에 대하여 국부세굴 실험을 수행하였다. 서해대교는 조류의 영향이 큰 해상에 위치하고 있고 또한 흐름단면적의 감소로 인하여 조류속이 급격하게 증가하여 최근의 관측 결과에 의하면 2.6m/s까지 유속이 계측되었다. 본 연구에서는 이러한 조건하에 있는 서해대교 군말뚝 부근의 세굴특성을 파악하기 위하여 군말뚝 교각을 모형교각으로 선정하여 이동상 수리모형실험을 수행하였다.

4.1 상사법칙

본 연구와 같은 이동상 모형실험에서 만족시켜야 할 상사법칙은 Froude 상사, 유사이동의 상사중에서도 한계이동상사, 유사량상사, 유사시간상사 모두를 만족하여야 한다. 그러나 본 연구의 실험대상 구간인 서해대교가 양방향 흐름이 존재하는 구간인 반면 실험실에서는 1방향으로만 흐름의 존재한다고 가정하고 실험을 수행하였기에 유사량 상사와 유사시간상사는 의미가 없다고 판단하여 Froude 상사와 한계이동상사만을 적용하였다.

4.2 실험조건

본 실험에서 사용될 군말뚝 교각은 1:100축척을 사용하여 제작하였으며 그림 7의 case 4와 같다. 세굴실험은 설계당시의 하상으로부터 실시하였으며 유속은 안전측으로 관측 최대유속(2.6m/s)을 사용하였다. 상사법칙을 적용하여 수심은 10cm를 유지하고 유속은 Froude상사에 따라 26cm/s가 발생하도록 유량과 하류부 수위조절장치를 조절하였다. 그리고 본 실험에 사용한 모형사는 앞에서 언급한 바와같이 비중 1.47, 평균입경 1.87mm인 안트라사이트를 선정하여 이동상모형이론에서 얻은 상사법칙을 만족하도록 하였다.

4.3 접근각에 따른 최대세굴심의 변화

본 실험에서는 접근각의 변화에 따른 세굴양상을 검토하기 위해 흐름방향과 군말뚝이 이루는 접근각이 0°, 10°, 20°, 30°, 35°, 45° 인 총 6가지 경우에 대하여 실험을 실시하였다. 접근각에 따른 최대세굴심의 변화는 그림 9와 같으며 세굴형상은 그림 10(서해대교의 경우 흐름접근각이 약 35°를 이루고 있음)과 같다.

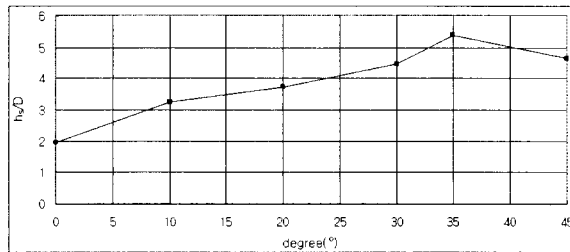


그림 9 접근각에 따른 최대세굴심 변화

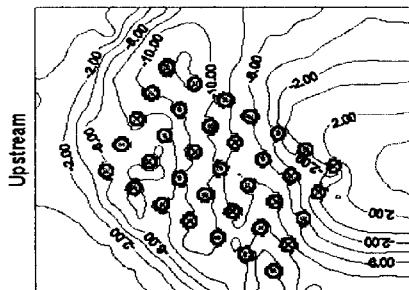


그림 10 세굴등고선도(흐름접근각 35°)

5. 결론

이중교각이 흐름방향으로 배열된 경우 상류측 교각에서의 최대세굴심은 교각간격이 약 1~3배에서 단일교각 최대세굴심의 약 1.16배 증가함을 알 수 있었으며 교각간격이 약 6배에서 단일교각의 세굴형상과 흡사함을 알 수 있었다. 그리고 하류측 교각에서의 최대세굴심은 유속비에 따라 그 편차가 있지만 교각간격이 약 1~2배에서 발생하였으며 교각간격이 4배 이상으로 커짐에 따라 단일교각 최대세굴심에 접근하고 있음을 알 수 있었다. 교각이 폭방향으로 배열된 경우 유속비가 0.57, 0.74일 때는 최대세굴심은 교각간격이 1배에서 단일교각 최대세굴심의 약 1.2, 1.3배 증가하였으며 유속비가 비교적 큰 0.89일 때는 최대세굴심은 교각간격이 1배에서 약 1.32배가 되는 것으로 나타났으나 교각간격이 커짐에 따라 급격히 감소하여 교각간격이 지름의 3배정도가 되면 거의 1에 접근함을 알 수 있었다.

군말뚝의 경우 말뚝 간격이 조밀해질수록 원형의 세굴공이 중첩되어 직사각형의 세굴공을 이루는 것을 알 수 있었으며 세굴심은 교각수가 4, 9개로 구성된 군말뚝의 경우, 유속비와 상관없이 단일교각 최대세굴심과 흡사하였고 교각수가 15, 35개로 구성된 군말뚝의 경우, 유속비가 증가함에 따라 세굴심도 급격히 증가하여 유속비가 0.89일 때 단일교각 세굴심의 약 2.2배 증가함을 알 수 있었다.

모형실험의 경우는 흐름접근각이 증가함에 따라 최대세굴심도 점점 증가하여 접근각이 약 35° 일 때 세굴심이 최대가 되어 교각직경이 약 5.4배가 되었고 35° ~ 45° 범위에서는 약간 감소하고 있음을 알 수 있었다. 또한 최대세굴심의 위치는 상류측을 기준으로 교각의 전면부 중앙에서 우측 대각선 방향 가장자리에서 발생하였고 교각간격의 영향으로 인해 대각선 방향으로 직사각형 형태의 세굴공을 형성하였으리라 판단된다.

군말뚝 세굴에 있어서 가장 큰 영향인자라 할 수 있는 군말뚝 내부에서의 와류의 형태와 크기는 실험의 제한성 때문에 측정할 수 없어 교각간격이 세굴에 미치는 영향을 정확히 정의하기란 어려웠다. 또한 군말뚝 세굴은 그 형태에 따라 교각간격과 접근각에 따른 영향이 각기 다르리라 판단되므로 각기 다른 형태의 군말뚝에 대한 교각간격과 접근각에 대한 영향을 파악하는 것이 요구된다.

6. 참고문헌

1. FHWA, 1995, Evaluating Scour at Bridges, Publication No. FHWA-IP-90-011, U.S. Department of Transportation
2. Jones, J.S., 1989, Laboratory Studies of the Effect of Footing and Pile Groups on Bridge Pier Scour, U.S. Interagency Sedimentation Committee Bridge Scour Symposium, U.S. Dept. of Transportation, Washington, D.C.
3. Raudkivi, A.J., 1986, Functional Trends of Scour at Bridge Piers, J. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol. 112, No. 1, pp 1-13
4. Salim and Jones, 1996, Scour Around Exposed Pile Foundations
5. 박성식, 송재우, 1997, 만곡수로에서의 연속교각 세굴특성에 관한 연구, 1998년 한국수자원학회 학술 발표회 논문집, pp431-436
6. 최계운, 김기형, 서병하, 1996, 하천내 연속교량 설치에 따른 세굴심도의 변화, 1996년도 학술 발표회 논문집(II), 대한토목학회, pp107-110