

교각형상에 따른 국부세굴의 실험적 연구

안상진* · 장석윤** · 이재경*** · 김응용****

1. 서 론

현재까지의 세굴예측방법들은 특정 하천부지에 대한 세굴현상을 이해하고 그 현상에 따른 예측 방법을 직접하게 선택하는 일련의 과정을 통해서만 얻어졌다. 정확하지 못한 세굴심도의 예측은 교량이나 교대를 붕괴시키는 원인이 되며, 교량 또는 교대의 붕괴는 복구에 드는 재정적인 손실과 더불어 교통체증, 각종 무형재산의 손실등 심각한 사회적 손실을 일으키게 된다. 특히 1993년 10월 경에 발생한 횡주 2대교의 붕괴와 1995년 8월 25일의 충북 괴산군 도안면 도당리의 충북선 화성철교에서의 교각붕괴사고로 인한 충북선 열차의 탈선사고는 모두 교각주위의 세굴에 의한 것으로 판명된 바 있다.

우리나라의 경우에는 대부분 많은 교각들이 어떤 특정한 형상으로 건설되어 있으나 여러 형상 별로 세굴심에 대한 연구를 한다든지 국부세굴심에 대한 정확한 예측을 한다면 경제적인 교량의 설계는 물론 교량의 안전성 검사에도 유용하게 활용될수 있을 것이다. 특히 교량의 형상에 따른 국부세굴심의 영향을 검토하는 것은 매우 중요하나 이에대한 국내의 연구결과는 출발단계에 있는 실정이라 아직 실제 응용에는 많은 문제점이 있다.

따라서 본 연구의 목적은 교각의 여러 형상에대한 국부세굴심의 영향을 실험을 통하여 분석하는데 있으며, 이를 위하여 실제하천에서 채취한 하상재료를 이용한 모형실험을 실시하고 각각의 교각형상에 대해 하상경사별 최대세굴심을 조사하여 수심 및 유속의 변화를 고려한 Fr수의 변화에 따른 형상별 최대세굴심의 변화를 비교 검토하여, 적절한 국부세굴심을 예측하는 자료를 제공하는데 있다.

2. 국부세굴에 영향을 주는 인자

교각에서 국부세굴을 일으키는 근본적인 원인은 하상에서의 와류의 형성이다. 이 와류현상은 유체 자체의 특성, 하천에서의 흐름의 변화, 하상재료의 성질 및 교각의 크기와 형상등 많은 인자들에 의해 영향을 받는다.^{1,2)} 따라서 교각주위에서의 세굴에 영향을 주는 인자로는 크게 자체의 특성인자, 하천내 흐름인자, 하상재료인자 및 교각의 형태인자로 대별할수 있으며 이들 인자들을 정리하면 Table 1와 같다.

Table 1 Parameters affecting scour around piers

Classification	Factors
Fluid properties	Density of fluid Viscosity of fluid
Flow properties	Depth of flow Velocity of the flow approaching Magnitude of stream discharge Duration of flow
Bed material properties	Grain size distribution Grain diameter Sediment density Cohesive properties
Pier shape characteristics	Pier dimensions Pier shape in plan view Bed roughness Number and spacing of piers Orientation of piers to approach flow direction Opening ratio

* 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수
 ** 충북대학교 산업대학원 석사과정
 *** 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정
 **** 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료

3. 교각형상에 의한 국부세굴












3.1 교각형상계수의 개념

교각의 형상에 따른 영향은 두가지 범주로 구분할 수 있으며 교각의 끝이 무딘 형상(blunt-nosed)에서는 상류쪽 형상이 세굴심에 큰 영향을 주지만 교각이 흐름의 방향과 나란히 되어 있다면 하류쪽 형상과 교각의 길이는 거의 영향이 없다. 반면 교각의 끝이 날카로운 형상(sharp-nosed)에서는 마제형외류계는 매우 약하여 최대세굴심은 하류단에서 일어난다고 알려져 있다.

또한 교각의 형상에 따라 교각주위의 흐름특성도 달라지며 이에 따라 말굽형 와류의 크기도 달라진다^{1,3)}. 따라서 교각의 폭이 일정하더라도 교각의 형상에 따라 교각전면에 발생하는 압력상승과 하강류 및 말굽형와류의 크기가 다르게 나타나며 세굴심도 다르게 나타난다.

교각형상이 세굴심에 미치는 영향에 대하여 Chabert & Engeldinger¹⁾는 6가지 형상에 대하여 형상계수를 도입하였으며, Raukivi³⁾도 교각형상계수를 0.7~1.2를 제안하였다. Melville & Sutherland^{4,5)}는 교각형상계수를 종합적으로 정리한 바 있다. 이들의 실험결과를 종합해보면, 타원형교각은 직사각형교각에 비해 20~30% 정도 세굴이 감소하는 반면 반원형 교각은 10%정도 감소하는 것으로 밝히고 있다. Table 2는 Laursen(1960)이 실험에 의하여 발견한 것으로 직사각형 교각의 형상을 기준으로 각각의 형상에 대한 교각형상계수를 나타내고 있다.

Table 2 Shape factors for piers aligned with the flow

Nose Form	Length - Width	Shape	K
Rectangular			1.00
Semicircular			0.90
Elliptic	2:l		0.80
	3:l		0.75
Lenticular	2:l		0.80
	3:l		0.70
Square			1.0
Round			0.9
Cylinder			0.9
Sharp			0.8
Group of Cylinders			0.9

3.2 기존의 교각형상에 관한 연구

Breusers et. al.(1977)¹⁾은 유사의 초기이동 한계유속(V_c)과 교각상류에서의 접근유속의 비(V/V_c)에 따라 구분 적용되는 세굴심 공식을 식(1)과 같이 제안하였다.

$$\frac{d_s}{b} = f\left(\frac{V}{V_c}\right) \left[2 \tanh\left(\frac{y}{b}\right) \right] K_s K_a \dots\dots\dots (1)$$

여기서, $f\left(\frac{V}{V_c}\right)$ 의 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{V}{V_c} < 0.5 \text{ 일 경우, } & f\left(\frac{V}{V_c}\right) = 0 \\ 0.5 < \frac{V}{V_c} \leq 1.0 \text{ 일 경우, } & f\left(\frac{V}{V_c}\right) = \left[2\left(\frac{V}{V_c}\right) - 1 \right] \\ \frac{V}{V_c} > 1.0 \text{ 일 경우, } & f\left(\frac{V}{V_c}\right) = 1 \end{aligned}$$

Breusers et. al. 은 이 식에서 교각형상계수(K_s)를 원형, 반원형, 유선형교각 및 직사각형 교각을 사용하였으며 접근각도계수는 α 와 L/b 의 함수로 표시하여 정량적으로 표현하였다.

Richardson et. al.(1988)⁵⁾은 교각의 세굴심에 대해 CSU식(Colorado State University's equation)을 다음 식(2)와 같이 발표하면서 교각형상계수(K_s)와 접근각도계수(K_a)에 대해서는 Table 3, Fig. 1 및 Table 4와 같이 제안하였다.

$$\frac{d_s}{y} = 2.0 K_s K_a \left(\frac{b}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43} \dots\dots\dots (2)$$

Table 3 Correction factor K_s
for pier nose shape

Shape of Pier Nose	K_s
(a) Square nose	1.1
(b) Round nose	1.0
(c) Circular cylinder	1.0
(d) Sharp nose	0.9
(e) Group of cylinders	1.0

Table 4 Factors for angle of attack

Angle(°)	L/a = 4	L/a = 8	L/a = 12
0	1.0	1.0	1.0
15	1.5	2.0	2.5
30	2.0	2.75	3.5
45	2.3	3.3	4.3
90	2.5	3.9	5.0

Angle = skew angle of flow
L = length of pier

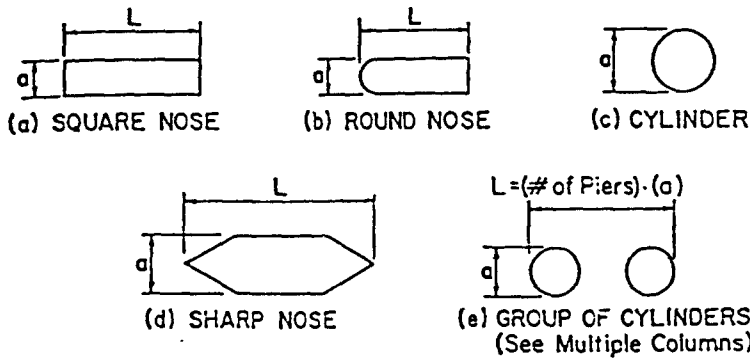


Fig. 1 Common pier shape

Melville(1992)⁶⁾는 교대형상에 의한 세굴심의 예측에 대한 실험적 연구를 통하여 수심과 교대 길이의 비(L/y)를 기준으로 교대 형상계수(K_s)와 교대길이(L)을 변수로 가진 세굴심을 예측하는 식(3 a,b,c)를 제안하였다.

$$d_s = 2K_s L \quad \frac{L}{y} < 1 \dots\dots\dots (2.9a)$$

$$d_s = 2K_s^* K_\theta^* (yL)^{0.5} \quad 1 \leq \frac{L}{y} \leq 25 \dots\dots\dots (2.9b)$$

$$d_s = 10K_\theta y \quad \frac{L}{y} > 25 \dots\dots\dots (2.9c)$$

여기서 K_s 는 교대의 형상계수, K_s^* 는 Melville에 의해서 수정된 형상계수, K_θ 는 접근각도계수, K_θ^* 실험에 의해 수정된 접근각도계수이다.

4. 실험 및 결과 분석

4.1. 실험장치 및 실험방법

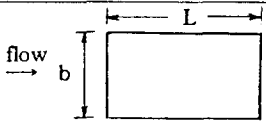

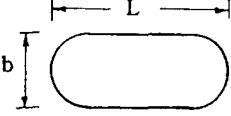
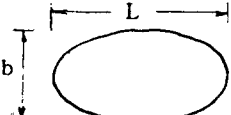
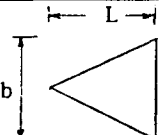
본 연구를 위한 실험장치는 수로길이 1,200cm, 수로폭 40cm, 수로높이 40cm의 개수로를 이용하였다. 설치된 실험수로는 양측 벽면이 유리로 되어 있어 흐름을 관찰할 수 있고, 하상경사를 0.0%~4.0%범위까지 변화시킬수 있도록 되어 있다. 실험수로의 하상재료는 보청천내 산계교 지점에서 채취한 모래를 이용하였다. 채취된 모래의 평균입경(d_{50})은 0.8mm, 기하표준편차(σ_g)는 1.95이며, 불균등 모래를 사용하였으며, 비중은 2.58 이었다. 하상재료는 수로의 바닥에 두께 15cm로 깔고, 길이방향으로 수로의 중간부분에 6.0m를 부설하였다.

실험은 직사각형, 원형, 반원형, 타원형 및 삼각형의 5가지 형상의 교각으로 실험을 실시하였으며, 한 형상의 교각에 대해 각각의 하상경사별로 수심을 증가시키면서 실시하였다. 수심의 증가는 약 1cm를 기준으로 하였으며, 같은 수심에 있어서 1회의 실험시간은 최대세굴심에 도달하여 평형상태가 유지될 때까지 충분한 시간이 되도록 하였으며, 실험이 끝난후 최대세굴심의 측정은 모형교각에 미리 표시한 눈금을 측정하는 방법으로 실시 하였다.

하상경사는 0.01%, 0.03%, 0.05%, 0.1%, 0.2%, 0.4%까지 변경 시키면서 수행하였고, 모형교각은 유수의 방향과 동일하게 설치하였다. 실험결과 분석에 이용된 실험자료는 $V/V_c > 1$ 인 이동상세굴(live-bed scour) 조건의 것이 사용되었다.

모형교각은 시멘트 모르타르를 사용하여 제작하였으며, 교각 단면적이 일정하도록 제작하였으며, 교각의 표면은 조도를 무시할 수 있도록 Film으로 포장하였다. 본 실험에 사용된 모형교각의 재원은 Table 4와 같다.

Table 4 Types of pier shape for experiment

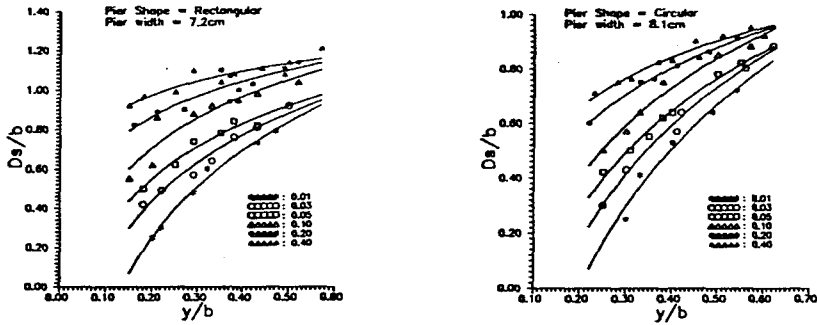
Pier shape		Width b,(cm)	L/b	Opening Ratio (%)	Section Area (cm ²)
Rectangular		7.2	1.5	82.0	57.68
Circular		8.1	1.0	80.0	57.68
Semi-circular		4.7	2.0	88.3	57.68
Elipse		7.2	1.5	82.0	57.68
Triangle		10.0	0.5	75.0	57.68

4.2 실험결과와 분석

4.2.1 동일한 교각형상에서 하상경사에 의한 세굴심의 변화

동일한 교각형상에서 세굴심의 변화를 분석하기 위해 하상경사가 0.01%, 0.03%, 0.05%, 0.1%, 0.2%, 0.4% 일때의 최대세굴심을 측정하여 비교하였다. Fig. 2는 교각형상이 각각 직사각형, 원형 일때의 각각의 수심에서 하상경사에 따른 최대세굴심의 변화를 나타내고 있다.

그림에서 x축의 y/b 는 수심/교각폭, y축의 Ds/b 는 최대세굴심/교각폭으로 표현된 무차원량을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 교각형상에서 하상경사가 급할수록 최대세굴심은 증가하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 그 증가폭은 크지 않고 점차 둔화하는 것으로 나타났다. 이는 이동상세굴의 특성이 기인한 것으로 판단된다.



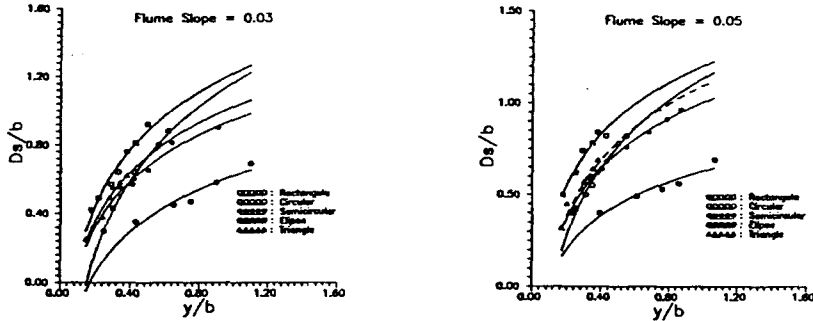
(a) Rectangular pier shape

(b) Circular pier shape

Fig.2 Relationship of maximum scour depth with flume slope

4.2.2 동일한 하상경사에서 교각형상에 의한 세굴심의 변화

Fig.3은 동일한 하상경사에서 교각형상의 변화에 따른 최대세굴심의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 하상경사에서는 직사각형, 원형, 삼각형, 반원형, 타원형의 순서로 최대세굴심이 증가하는 것으로 나타나고 있다. 또한 하상경사가 커질수록 교각형상에 의한 세굴 변화폭은 둔화되고 있으나 각각의 형상별 비교를 통해서도 증가폭이 점차 커지는 현상을 보여주고 있다.



(a) Flume slope 0.03%

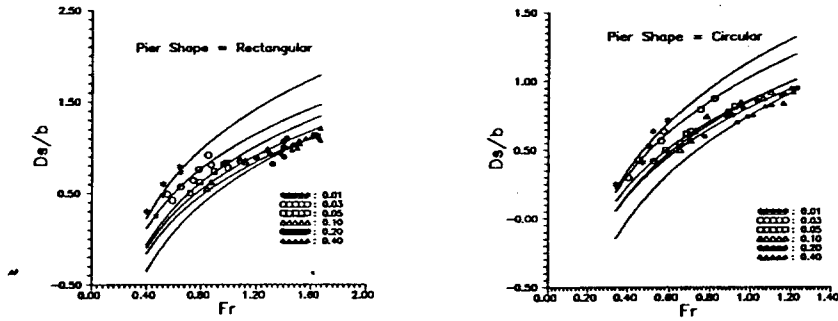
(b) Flume slope 0.05%

Fig.3 Relationship of maximum scour depth with pier shape

4.2.3 동일한 교각형상에서 Froude 수에 의한 세굴심의 변화

Froude(=Fr)수는 무차원수로서 수심과 유속에 대한 영향력을 나타낸다. 따라서 Fr수에 따른 최대세굴심의 변화를 동일한 교각형상에서 각각의 경사별로 실험을 실시하여 비교하였으며, 그 결과는 Fig.4와 같다.

그림에서 알 수 있듯이 하상경사가 급해질수록 Fr 수는 증가하는 반면 세굴심의 증가율은 둔화되는 것으로 나타났으며, 각각의 하상경사별로 Fr 수가 증가할수록 세굴심은 점점 커짐을 알 수 있다.



(a) Rectangular pier shape (b) Circular pier shape
 Fig.4 Relationship of maximum scour depth with Froude number

5. 결 론

본 연구는 서로다른 교각형상에 대한 국부세굴심을 예측하기 위한 실험적 연구로써 교각의 형상변화에 따른 수심 및 하상경사의 변화와 Fr 수의 변화를 고려한 최대세굴심도의 비교 분석을 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 동일한 교각형상에서 수로경사가 급할수록 최대세굴심은 증가하고 있음을 알수 있으나 증가 폭은 그다지 크지 않고 약화되는 경향을 보였다.
2. 동일한 수로경사에서 교각형상에 따른 세굴심의 변화는 직사각형, 원형, 삼각형, 반원형, 및 타원형의 순서로 최대세굴심이 증가하는 것으로 나타났다.
3. 동일한 교각형상에서 Froude수에 의한 변화는 수로경사가 급해질수록 Froude수는 증가하는 반면 세굴심의 증가율은 둔화하는 것으로 나타났다.
4. 이상의 실험에 의한 결과치를 직접 현장에 적용하기 위하여는 현장관측과 수로의 검정을 위하여 사용될수 있도록 앞으로의 과제로 남는다.

참고문헌

1. Breusers, H. N. C., G. Nicollet, H. W. Shen, *Local Scour around Cylindrical Piers*, J. of Hydraulic Research, Vol. 114, No.10, 1977, pp.221~252.
2. Raudkivi, A. J. and Ettema, R., *Scour at Cylindrical Bridge Piers in Armored Beds*, J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol 111, No. 4, 1985.
3. Raudkivi, A. J., *Functional Trends of Scour at Bridge Piers*, J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 112, 1986.
4. Melville, B. W. and Sutherland, A. J., *Design Method for Local Scour at Bridge Piers*, J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 10, 1988.
5. Richardson, E. V., et al, *Scour at Bridges*, FHWA, U. S. Dept. of Transportation, 1988.
6. Melville, B. W., *Local Scour at Bridge Abutments*, J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 4, 1992.
7. 안상진, 최계운, 김종섭, 안창진, 설계 적용을 위한 교각 세굴현상의 예측에 관한 기술적 수준, 대한토목학회, 1992년 학술발표회 개요집(II), 1992, pp.105~108.
8. 안상진, 최계운, 김종섭, 안창진, 교각주위에서 세굴심도 영향인자의 민감도에 대한 실험적 연구, 한국수문학회, 제35회 수공학연구발표논문집, 1993, pp.81~88.
9. 안상진, 최계운, 김종섭, 안창진, 압력변화를 고려한 교각주위에서의 세굴현상연구, 한국수문학회, 한국수문학회지, 제 27권 1호, 1994.
10. 안상진, 김종섭, 이재경, 김용용, 교각의 크기와 접근각도에 따른 국부세굴심의 실험적 연구, 한국수자원학회, '95년 한국수자원학회 학술발표회논문집, 1995, pp.54~58.