

교각에 의한 하상세굴에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Local Bed Scour Due to Bridge Pier

이정규* · 정동원** · 이창해*** · 육운수****

Lee, Jong Kyu · Jeong, Dong Won · Lee, Chang Hae · Yook, Woon Soo

Abstract

The results of laboratory experiments on the clear-water scour of cohesionless bed sediment for three types of pier shape were presented. According to the experimental data, the local scouring around the pier was initiated at $V/V_c=0.4\sim 0.5$ and $Fr_p \approx 0.2$, and the relative local scour depths linearly increased with respect to the velocity ratio and the pier Froude number. The relative scour depth had the linear relationship with τ_r for $\tau_r < 10^{-4}$, but it tends to become constant for $\tau_r > 10^{-4}$, irrespective of τ_r . And also the relative scour depths showed the close relationship with both the geometric standard deviation and the pier shape.

요 지

본 연구에서는 3가지 교각형상에 대하여 국부적 정지상세굴에 대한 실험결과를 분석하였다. 실험 결과에 의하면 교각의 세굴은 $V/V_c=0.4\sim 0.5$, $Fr_p \approx 0.2$ 일 때 시작되었고 상대세굴심은 유속비와 교각푸르드수와의 관계에서 선형적으로 증가하였다. 또한 상대세굴심은 $\tau_r < 10^{-4}$ 일 때는 선형적으로 증가하지만 $\tau_r > 10^{-4}$ 이 되면 일정해지는 경향을 가지며 모래의 기하표준편차(σ_g)와 교각형상과도 깊은 관계가 있었다.

1. 서 론

하천에서 하상의 변화는 土砂移動量의 변화로 인하여 일어나며, 이것은 하천의 흐름場의 변화 때문에 생긴다. 하상의 변화는 구체적으로 洗掘과 堆積으로 나타난다.

자연상태의 하천은 장기적으로 토사의 유입량과 유출량이 거의 같은 평형상태를 유지한다. 그러나 하천에 교각이 설치되면, 이로 인해 水理現象이 변하여 교각주변의 하상에 국부적인 세굴이 발생한다. 河床洗掘은 물과 하상입자간의 二相流 문제로 그 현상이 물리적으로 매우 복잡하여 간단하게 해석하기 어렵기 때문에 아직은 세굴에 관한 완전한 理論樹立이 되어 있지 않은 상태이다. Baker⁽¹⁾는 국부적 세굴에 대한 이론적 접근을 시도하기도 했으나 아직은 해석적인 方法으로 정확한 세굴심을 예측하기는 어려우며 대부분의 연구가 실험적인 方法에

* 정희원 · 한양대학교 토목공학과 교수

** 한양대학교 대학원(현재 현대엔지니어링 토건사업본부)

*** 정희원 · 한양대학교 대학원 박사과정

**** 정희원 · 관동대학교 토목공학과 부교수

의존하고 있다.⁽⁷⁾

교각주변의 세굴에 관한 연구는 1873년 Durand-Claye가 처음으로 실험을 한 이후^(2,19) 많은 실험적 연구와 이론이 발표되었다. 이들 연구에서는 공통적으로 교각전면의 下降流와 교각의 일부분에서 발생하는 말굽형渦(horse-shoe vortex)로 특징지워지는 局部流가 교각세굴에 중요한 역할을 한다는 것이 알려져 있으나 이와 같은 국부류의 機構에 대한 명확한 규명은 되어 있지 않다.

교각세굴에 관한 연구는 주로 실험을 통하여 이루어졌다. 중요한 연구결과를 살펴보면 Shen 등⁽¹⁴⁾은 레이놀즈수를 세굴과정의 주요 변수로 보았고 교각 주위의 세굴형태를 무세굴(no scour), 정지상세굴(clear-water scour), 이동상세굴(live-bed scour)의 세가지로 구분하였으며 Utami^(17,18)는 충류와 난류실험을 통하여 교각주변의 말굽형渦 발생의 특징과 원형교각 전면의 3차원적인 유속분포식을 세웠다.

Breusers 등⁽²⁾은 원형교각의 국부적 세굴에 대한 연구결과를 종합적으로 분석하였으며, Suzuki⁽¹⁶⁾는 원형교각 주위의 흐름형태에 대한 이론 전개와 실험을 행하였다.

한편 Jain과 Fischer⁽⁶⁾는 세굴심은 하상유사이동이 시작된 직후에는 약간 감소하지만 유속이 더욱 증가하면 세굴심도 증가한다고 하였다.

Suzuki⁽¹⁵⁾는 원형교각 주위의 정지상세굴에 대한 공간적·시간적 변화특성에 관한 상세한 실험과 아울러 이론적 검토를 한 바 있다.

Jain⁽⁷⁾은 정지상 최대세굴심에 관한 여러 공식들을 비교 분석하였다.

Raudkivi와 Ettema⁽¹³⁾는 원형교각 실험을 통하여 정지상 세굴심은 하상재료의 분급(grading)과 관계가 있으며 최대세굴심은 상대수심(=수심/교각의 직경)과 상대입경(교각의 직경/중양직경)의 함수라고 보고하였다. Melville⁽⁸⁾은 최대세굴심이 사린(ripple)의 형성여부에 따라 차이가 있음을 밝혔다.

Elliot와 Baker⁽⁴⁾는 교각간격의 영향을 검토하였고 Raudkivi와 Ettema⁽¹³⁾는 보호층이 있는 경우의 세굴실험을 실시하였다.

Wang과 Triewko⁽²⁰⁾는 최대세굴심을 푸르드수의 함수와 레이놀즈수의 함수로 된 두가지 식으로 나타내었다.

Raudkivi⁽¹¹⁾는 기존의 세굴실험자료를 분석한 결

과 세굴에 관계되는 중요한 요소는 교각의 폭 또는 직경, 하상재료의 입도분포, 상대수심, 상대입경, 교각의 선형(alignment)이라고 하였다.

Ettema와 Melville⁽⁶⁾은 복미주에서 추천된 설계 공식들이 최대세굴심을 과소하게 추정하며, 또한 동일한 조건 아래서도 설계공식의 추정값들이 차이가 커서 적절한 값을 주지 못한다고 지적하였다.

교각의 세굴에 관한 국내의 연구로는 이원환 등⁽²⁴⁾이 세굴심을 교각레이놀즈수와 난류강도로 나타낸 식을 제안했으며, 김진홍⁽²¹⁾과 김희중 등⁽²²⁾은 다변량상관식을 유도하였고, 정신탉⁽²⁸⁾은 세굴심에 대한 Laursen의 식에 대하여 검토하였으며, 안상진 등⁽²³⁾은 기존의 세굴공식들을 한국의 특정하천에 적용성을 검토한 바 있다.

본 연구는 하상세굴방지대책에 대한 연구의 일부로 정지상세굴실험을 통하여 교각형상과 하상재료의 특성이 교각의 세굴심에 미치는 영향을 분석 검토하고 차원해석으로 얻어진 관련변수들이 상대세굴심에 미치는 영향을 알아보는 것이다.

2. 세굴발생기구 및 차원해석

2.1 세굴발생기구

교각주위에 흐름이 발생하면 大形渦(large-scale eddy)가 형성된다. 즉, 교각주위에는 渦體系(vortex system)가 발달되며 이것은 교각의 국부세굴을 일으키는 기본적 기구(basic mechanism)이다.^(2,14)

교각주위에서 발생하는渦는 말굽형渦(horse-shoe vortex), 후류渦(wake-vortex), 추종渦(trailing-vortex)의 3종류가 있는데, 실제 발생하는 渦構造는 교각의 형상과 흐름의 조건에 따라 달라진다. 교각의 세굴과 밀접한 관계가 있는渦는 말굽형渦이며 후류渦는 원형교각의 직하류부의 세굴을 일으킨다.

말굽형渦는 교각전면이 둔탁할 때 흐름방향에 횡방향으로 渦필라멘트(vortex filament)가 집중되기 때문에 형성된다. 다시 말하면 그림 1과 같이 교각 전면에서 흐름이 정체되며 정수압의 상승으로 나타난다. 정수압의 상승은 교각의 전면에 하강류를 일으키며 압력장이 충분히 강하게 되면 교각의 밑부분에서 경계층의 3차원적 박리를 일으키게 되고 교각의 앞에서 말아 올려져 말굽형渦를 형성하게 된다.

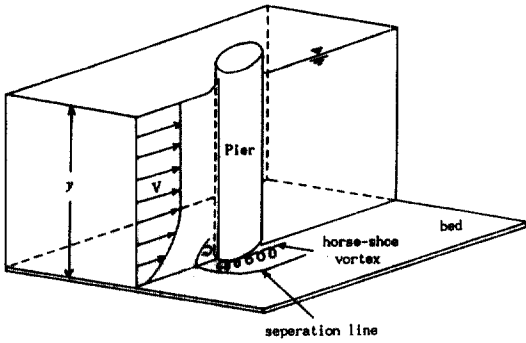
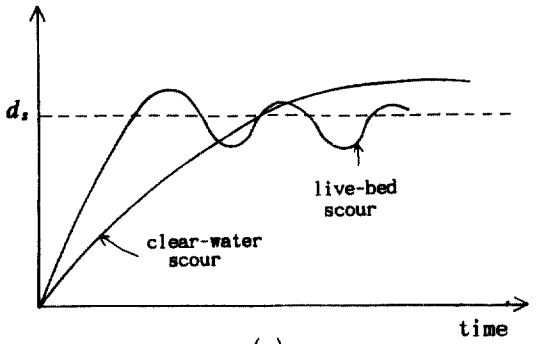
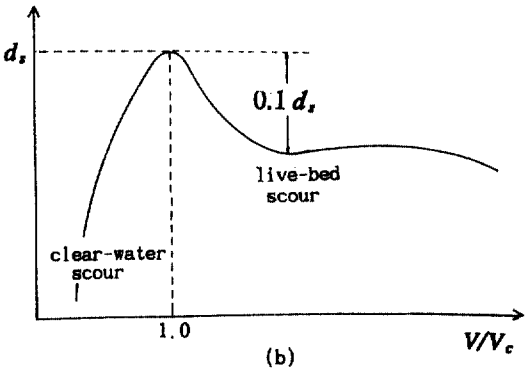


그림 1. 교각주변의 흐름양상



(a)



(b)

그림 2. (a) 교각의 세굴심과 시간과의 관계
(b) 교각의 세굴심과 유속비의 관계

말굽형渦는 교각전면의 세굴을 일으키는 주요 원인이 된다. 후류와체계에 밀집된 渦度(vorticity)는 교각자체에 의해서 발생된다. 후류와체계는 교각의 표면에 생성된 불안정한 전단층(shear layer)을 말아 올림으로써 형성된다. 이런 渦度는 교각레이놀즈수가 작을 때($3 \sim 5 < R < 40 \sim 50$)는 안정적이며 교각의 바로 하류에 상존하지만 교각레이놀즈수가 큰 경우에는 불안정하고 교각의 좌우 교대로 발생되며 하류로 이송된다.^(2,14)

후류와는 상향류(upflow)와 관계가 있으며 말굽형渦가 형성되지 않거나 적절히 통제될 때 이 渦流의 영향으로 교각하류에 큰 세굴이 일어날 수 있다.

교각주위에서 일어나는 세굴심은 시간과 유속에 따라 그림 2와 같이 변화하며, 세굴형태는 3가지 유형으로 분류될 수 있다.⁽¹³⁾

- 1) 無洗掘(no scour) : 소류력이 너무 작아서 교각의 주위 하상과 上流로부터 유사이송이 전혀 없는 상태
- 2) 靜止床洗掘(clear-water scour) : 上流에서는 유사이송이 일어나지 않고 교각주위의 국부적 세굴만 일어나는 상태
- 3) 移動床洗掘(live-bed scour) : 上流에서 유사이송이 일어나는 동시에 교각주위의 국부적 세굴이 일어나서 洗掘孔에 유사의 流出入이 일어나는 상태

세굴이 일어나기 시작하면 초기에는 빠르게 진행되며, 세굴심이 변하지 않는 평형상태에 도달하는 데는 상당한 시간이 걸린다.

평형상태는 정지상세굴일 때는 소류력이 세굴공내의 토사를 움직이는데 필요한 한계소류력과 일치

할 때 발생하며 이동상세굴일 때는 유사가 상류로부터 세굴공으로 유입되는 양과 유출되는 양이 평형을 이룰 때 발생한다.⁽¹⁰⁾

이 중에서 세굴심이 최대로 되는 상태는 일반적으로 정지상세굴로 알려져 있으며 유속이 증가하여 한계이동유속을 넘게 되면 상류로부터 유사가 세굴공으로 유입되기 때문에 세굴심은 오히려 감소하는 경향이 있다.^(13,14)

그러나 균일입자로 행한 실험에서 사런(ripple)이 형성될 때는 이동상세굴심이 정지상세굴심보다 더 크다는 연구결과도 있다.^(8,9)

2.2 차원해석

교각의 국부적 세굴에 영향을 주는 요소를 살펴 보면 유체의 성질, 하상재료의 특성, 흐름의 특성, 교각의 형상 등으로 구분할 수 있으나 이들 변수를 모두 정량화하기는 어려운 점이 많다.⁽²⁾ 교각의 국부세굴에 영향을 주는 변수들이 정상동류상태에서 선정되었으며 차원해석을 통하여 다음과 같은 무차

원 함수식을 얻었다.^(25,27)

$$\frac{d_s}{D} = f(\Phi, \alpha, \sigma_g, \frac{V}{V_c}, \frac{DV}{v}, \frac{V}{\sqrt{gD}}, \frac{\tau_o}{\rho gy}, \frac{y}{D}, \frac{L}{D}) \quad (2-1)$$

- 여기서 d_s : 교각의 평형세굴심
- D : 교각의 직경 또는 폭
- Φ : 교각의 형상계수
- σ_g : 모래입경의 기하표준편차
- V : 접근유속
- V_c : 하상모래의 한계이동유속
- g : 중력가속도
- ρ : 물의 밀도
- y : 접근수로의 수심
- v : 물의 동점성계수
- τ_o : 하상전단응력
- α : 교각의 설치방향
- L : 교각의 길이

식 (2-1)의 무차원변수중에서 일부는 실험방법과 조건에 따라 제외되거나 기존의 연구결과에 따라 그 영향이 아주 작을 때는 무시될 수 있다.

Φ 는 교각의 형상에 따라 일정하다고 가정할 수 있으며, α 는 교각의 설치방향에 따라 정해지는 값이다. σ_g 도 하상재료의 입도분포의 특성을 나타내므로 동일한 하상재료를 사용하면 교각 주위의 일

정한 값을 가진다.

한편 세굴과정에서 점성의 영향은 비교적 적고⁽⁶⁾, 난류가 발달하면 교각레이놀즈수($R=DV/v$)의 영향은 무시할 수 있다.⁽⁹⁾ 그리고 L/D 는 세굴심에 별로 영향이 없는 것으로 나타났다. 이동상세굴일 때 수심이 상대세굴심에 미치는 영향은 없으며,⁽³⁾ 정지상 세굴에서도 y/D 가 1~2 또는 3 이상이면 수심의 영향은 거의 무시될 수 있으므로,^(8,12) 상대수심의 항을 제외하면 식 (2-1)은 다음과 같이 간단한 함수식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{d_s}{D} = f(\frac{V}{V_c}, \frac{V}{\sqrt{gD}}, \frac{\tau_o}{\rho gy}) \quad (2-2)$$

① ② ③

위의 식에서 ①항은 접근유속과 하상재료의 한계이동유속과의 비를 나타내는 유속비이다.

②항은 교각푸르드수(Fr_p)를 나타낸다.

③항은 하상전단응력과 정수압의 비를 나타내며 "소류력비 τ_s "로 부르기로 한다.

3. 세굴실험

3.1 실험장치

교각의 세굴실험에 사용한 실험장치는 그림 3과 같이 수로의 길이가 11.46 m, 폭이 0.45 m, 깊이는

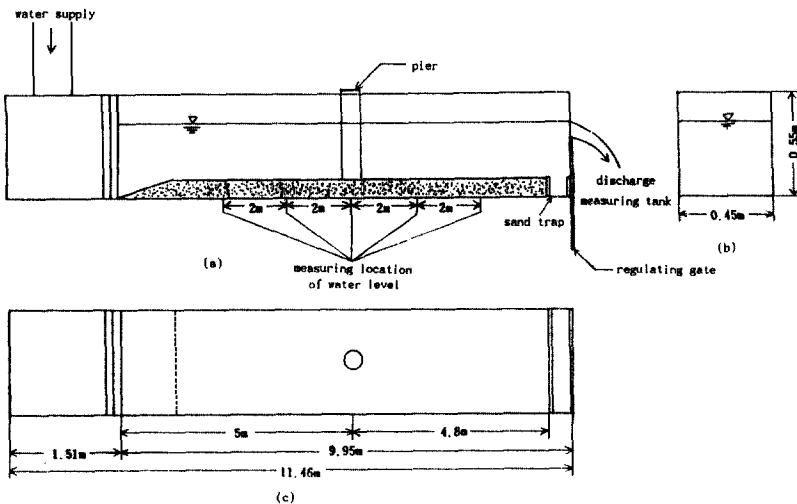


그림 3. 실험 장치도

0.55 m이고, 수로위에 모래를 깔아 놓은 길이는 9.85 m이다. 교각은 수로의 중앙부에 흐름방향에 평행하도록 설치하였다. 유량은 수로의 끝부근에 연결된 유량측정 수조에 矩形 weir를 사용하여 측정하였다. 수로 하류단 바로 앞에는 모래받이(sand trap)를 두었고 하류단에는 수위를 조절할 수 있는 수문을 설치하였다. 수로경사는 수평이고 수위와 세굴심을 수면측정기(point gauge)로 측정하였다.

3.2 실험방법

세굴실험은 수로바닥에 15 cm 정도의 두께로 모래를 깔고 교각을 설치한후 수심은 5~15 cm의 범위에서 유량을 조절하면서 실험하였다. 실험용 모래는 자연사에서 4번체를 통과한 모래 I($d_{max}=2.0$ mm; $d_{50}=0.4$ mm; $\sigma_g=2.01$)과 12번체를 통과한 모래 II($d_{max}=0.85$ mm; $d_{50}=0.35$ mm; $\sigma_g=1.51$)의 두 종류로 나누어 사용하였다. d_{max} 는 최대모래입경, d_{50} 은 중앙입경, σ_g 는 모래입경의 기하표준편차, $\sigma_g=(d_{84}/d_{16})^{1/2}$ 이며, d_{84} 와 d_{16} 는 각각 모래의 84%와 16%가 이보다 작은 입자의 크기를 말한다.

실험은 입자의 이동이 생기지 않도록 서서히 수로에 물을 채운후 실시하였으며, 평형세굴심은 세굴심이 더 이상 진행되지 않는 상태로서 장시간의 관측으로 판단하였고, 본 실험에서는 실험시작후 4 시간 정도 경과한 후에 세굴심을 측정하는 것으로 하였다.

실험교각의 종류는 그림 4와 같이 원형, 반원사각형, 사각형의 3가지이며 교각의 설치방향은 수로와

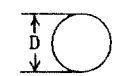


| Shape of pier | | Width of Pier | L/D |
|---------------|---|---------------|-----|
| Circular |  | D=2 cm | |
| | | 4 cm | |
| Rectangular |  | 2 cm | 2 |
| | | | 3 |
| | | 4 cm | 2 |
| | | | 3 |
| Round-Nosed |  | 2 cm | 3 |
| | | | 4 |
| | | 4 cm | 3 |
| | | | 4 |

그림 4. 실험에 사용한 교각

평행하게 하였다.

4. 실험결과와 고찰

4.1 유속비(V/V_c)의 영향

일반적으로 교각의 세굴은 유속비, $V/V_c > 0.5$ 이면 시작된다고 한다.^(2,3,11)

V_c 는 한계이동유속으로 하상입자가 불균일한 경우에 V_c 를 정확하게 정의하기는 어렵다. 왜냐하면 d_{50} 보다 작은 입자들은 d_{50} 에 대한 한계이동유속 이하에서도 움직이기 때문이다. 본 논문에서 V_c 는 Shields도표를 이용하여 구하였으며 이 값은 균일 입자에 대한 것이지만 V_c 에 대한 지표로 d_{50} 에 대한 값을 사용하였다.⁽¹¹⁾ V_c 는 수심 y일 때 Shields도표에서 한계마찰속도 U_{*c} 를 구하고 식 $V_c=5.75U_{*c} \log(5.53 y/d_{50})$ 으로부터 구하였다.⁽⁹⁾

본 연구의 세굴실험결과를 $d_s/D \sim V/V_c$ 의 관계로 도시한 그림 5를 검토해 보면 교각의 형상에 따라 약간의 차이를 보인다. 원형교각에서는 $V/V_c > 0.4$ 이면 세굴이 시작되었으나 반원사각형교각과 사각형교각에서는 $V/V_c > 0.5$ 에서 세굴이 시작되었다. Nicolet[문헌 (2)에서 인용]는 유속비가 원형교각일 때

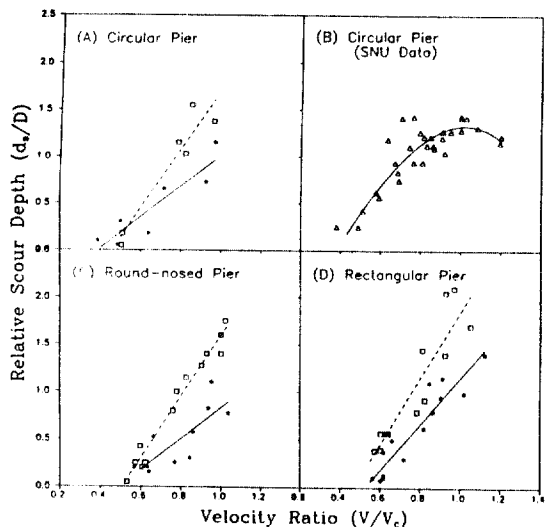


그림 5. 상대세굴심과 유속비의 관계

- (---): $d_{50}=0.35$ mm, $\sigma_g=1.51$
- * (—): $d_{50}=0.40$ mm, $\sigma_g=2.01$
- △(—): $d_{50}=0.25 \sim 0.72$ mm

0.42~0.53, 반원사각형교각일 때 0.5~0.65에서 세굴이 시작된다고 하였고 김진홍과 정신택의 실험결과(SNU Data)^(21,28)도 그림 5(B)와 같이 본 연구와 비슷한 결과를 나타내고 있다.

교각에서 세굴이 일단 시작되면 상대세굴심은 유속비가 커짐에 따라 V/V_c 는 1.0이 될 때까지 선형적으로 증가하였으며 다른 연구와도 일치하는 경향을 보여주었다.^(23,11) 상대세굴심의 크기는 반원사각형교각에서 가장 작았고, 원형, 사각형교각의 순으로 크게 나타났다.

모래 I과 II의 최대세굴심을 비교해 볼 때 모래 I은 $d_s/D=1.2\sim1.5$, 모래 II는 $d_s/D=1.6\sim2.1$ 로 기하표준편차가 클 때 최대세굴심이 작은 것으로 나타났다. 이 값은 문헌 (9)와 (13)에서 제안한 설계값 2.3~2.4보다 작은 값을 나타내고 있으나, 이것은 최대세굴심에 대한 설계값을 구하려는 것이 아니고 세굴심과 매개변수들과의 관계를 알아보기 위하여 회귀직선으로부터 구한 값이기 때문이다.

최대세굴심이 모래 I보다 II가 더 크게 나타난 것은 모래의 기하표준편차, σ_g 가 크면 큰 모래입자에 의한 차폐효과(sheltering effect) 때문에 작은 입자의 세굴이 억제되는 보호층효과가 나타나기 때문이

다[이에 대하여는 문헌 (26)에서 자세히 검토하였다]. 상대세굴심이 입도분포의 영향을 받는 것은 Raudkivi와 Ettema^(12,13)의 연구와도 대략 일치하고 있다.

4.2 교각푸르드수(Fr_p)의 영향

상대세굴심과 교각푸르드수와의 어떠한 함수관계가 있는 가를 알아보기 위하여 실험결과를 그림 6에서 $d_s/D \sim Fr_p$ 의 관계로 도시하였다.

위의 그림을 보면 세굴이 시작되는 시기는 Fr_p 는 0.2로 볼 수 있으며 Fr_p 가 커지면 세굴심은 선형적으로 증가하는 경향을 가지며 이러한 경향은 $Fr_p < 0.6$ 에서는 교각형상에 관계 없이 거의 비슷하게 나타났다.

세굴심은 모래 I보다 II에서 상당히 크게 나타났으며 이것도 유속비의 영향에서 고찰한 바와 같이 모래 I의 기하표준편차가 모래 II보다 크기 때문에 작은 입자로 인한 보호층효과 때문이라고 생각된다.

SNU^(21,28)의 실험결과는 그림 6(B)와 같이 본 연구와는 달리 Fr_p 는 0.1에서 세굴이 시작되었으며 $Fr_p \geq 0.25$ 이 되면 d_s/D 는 일정하게 되는 경향이 있었다.

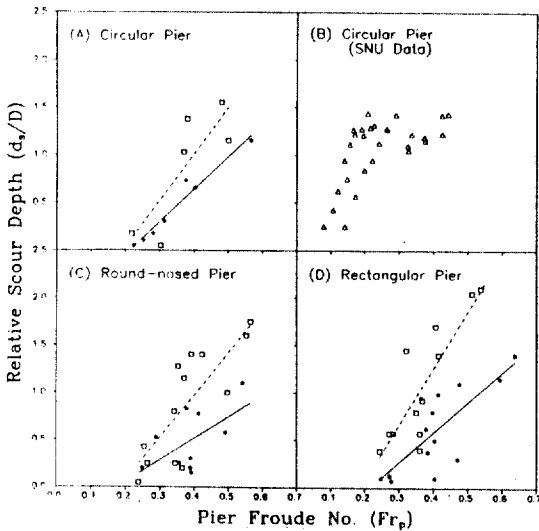


그림 6. 상대세굴심과 교각푸르드수의 관계

- (---): $d_{50}=0.35$ mm, $\sigma_g=1.51$
- * (—): $d_{50}=0.40$ mm, $\sigma_g=2.01$
- △(—): $d_{50}=0.25\sim0.72$ mm

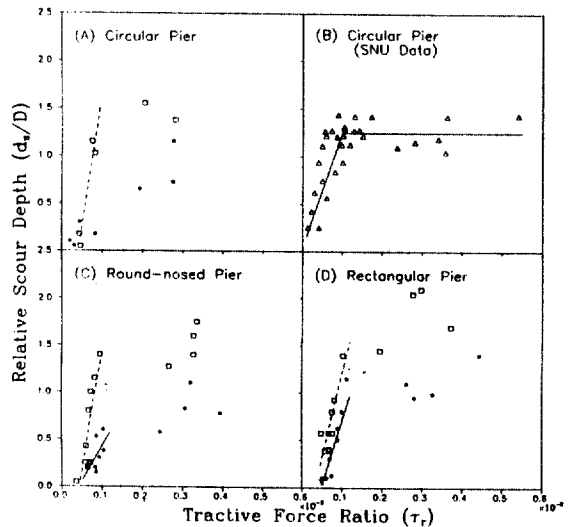


그림 7. 상대세굴심과 소류력비의 관계

- (---): $d_{50}=0.35$ mm, $\sigma_g=1.51$
- * (—): $d_{50}=0.40$ mm, $\sigma_g=2.01$
- △(—): $d_{50}=0.25\sim0.72$ mm

또한 교각형상에 따른 세굴심의 크기는 사각형일 때 가장 크고 원형, 반원사각형의 순으로 작게 나타났다.

4.3 소류력비(τ_r)의 영향

소류력비($\tau_r (= \tau_o / \rho g y)$)는 소류력과 정수압의 비를 나타내는 무차원매개변수로 실험결과를 검토한 바 교각세굴심과 소류력은 밀접한 관계가 있는 것으로 생각된다.

소류력비는 $\tau_r = \tau_o / \rho g y = V^2 / C^2 y$ 로부터 구하였다. C는 Chezy의 유속계수로 경험식 $C = 18 \log(12R_h / d_{50}) [m^{1/2}/sec]$ 을 이용하였으며 R_h 는 동수반경이다.

그림 7은 실험결과를 상대세굴심과 소류력비의 관계로 도시한 것이다.

$\tau_r < 10^{-4}$ 일 때 세굴심은 τ_r 이 증가함에 따라 선형적으로 증가하지만 $\tau_r > 10^{-4}$ 이 되면 세굴심은 τ_r 에 관계없이 일정해지는 경향을 보여 준다. 본 실험결과에서는 실험자료가 충분하지 않아서 이를 단정하기는 어렵지만 원형교각의 경우에 그림 7(B)의 SNU자료를 비교해 보면 이를 분명히 입증해 주고 있다고 생각된다.

d_s/D 와 τ_r 의 관계에서도 전체적으로 모래 I보다 모래 II의 상대세굴심이 훨씬 크게 나타났다. 이것 역시 유속비나 교각푸르드수의 고찰에서와 마찬가지로 σ_g 가 크기 때문에 나타나는 보호층효과 때문이라고 생각된다.

5. 결 론

교각으로 인한 국부적 세굴현상을 알아보기 위하여 3가지 교각형상에 대하여 σ_g 가 다른 두 종류의 모래를 가지고 정지상세굴실험을 해본 결과는 다음과 같이 요약된다.

교각의 세굴은 대체로 $V/V_c \approx 0.4 \sim 0.5$, $Fr_p \approx 0.2$ 일 때 시작되며 세굴이 일단 시작되면 상대세굴심은 유속비의 증가와 교각푸르드수의 증가($Fr_p < 0.6$)에 선형적으로 커진다.

상대세굴심과 소류력비와의 관계는 $\tau_r < 10^{-4}$ 일 때는 세굴심이 선형적으로 증가하지만 $\tau_r > 10^{-4}$ 일 때는 세굴심은 일정해지는 경향을 가진다고 추정된다. 또한 상대세굴심은 모래의 입도분포와 밀접한 관계를 가지며 σ_g 가 클 때 세굴심이 작았다. 이것은 d_{50} 이

비슷하더라도 σ_g 가 크면 보호층효과가 크게 나타나기 때문이다.

교각형상으로 인한 상대세굴심은 반원사각형교각에서 제일 작았고 원형과 사각형교각의 순으로 크게 나타났다.

감사의 글

본 연구는 1990년도 한국과학재단의 일반기초연구비(과제번호 KOSEF 901-1302-005-2)로 이루어진 연구결과의 일부이며 연구비 지원기관에 감사드린다.

참고문헌

1. Baker, C.J., "Theoretical Approach to Prediction of Local Scour around Bridge Piers", *J. of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 18, No. 1, 1980, pp. 1-12.
2. Breusers, H.N.C. et al., "Local Scour around Cylindrical Piers", *J. of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 15, No. 3, 1977, pp. 211-252.
3. Chiew, Y.M. and Melville, B.W., "Local Scour around Bridge Piers", *J. of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 25, No. 1, 1987, pp. 15-26.
4. Elliott, K.R. and Baker, C.J., "Effect of Pier Spacing around Bridge Piers", *J. of Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 111, No. 7, July, 1985, pp. 1105-1109.
5. Ettema, R. and Melville, B.W., "Design for Local Scour at Bridge Piers: A Commentary", *J. of Hydr. Eng.*, ASCE, 1989, pp. 1-12.
6. Jain, S.C., and Fischer, E.E., "Scour around Bridge Piers at High Flow Velocities", *J. of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol. 106, No. HY11, Nov., 1980, pp. 1827-1842.
7. Jain, S.C., "Maximum Clear-Water Scour around Circular Piers", *J. of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol. 107, No. HY5, May, 1981, pp. 611-626.
8. Melville, B.W., "Live-Bed Scour at Bridge Piers", *J. of Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 110, No. 9, Sept, 1984, pp. 1234-1247.
9. Melville, B.W. and Sutherland, A.J., "Design Method for Local Scour at Bridge Piers", *J. of Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 114, No. 10, Oct., 1988, pp. 1234-1247.
10. Posey, C.J., "Tests of Scour Protection for Bridge Piers", *J. of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol. 100, No.

HY12, Dec., 1974, pp. 1773-1783.

11. Raudkivi, A.J., "Functional Trends of Scour at Bridge Piers", *J. of Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 112, No. 1, Jan., 1986, pp. 1-13.
12. Raudkivi, A.J. and Ettema, R., "Clear-Water Scour at Cylindrical Piers", *J. of Hydraulics Eng.*, ASCE, Vol. 109, No. 3, March, 1983, pp. 338-350.
13. Raudkivi, A.J. and Ettema, R., "Scour at Cylindrical Bridge Piers in Armored Beds", *J. of Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 111, No. 4, April, 1985, pp. 713-731.
14. Shen, H.W., Schneider, V.R. and Karaki, S., "Local Scour around Bridge Piers", *J. of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol. 95, No. HY6, Nov., 1969, pp. 1919-1940.
15. Suzuki, K., "Study on the Flow and Bed Shear Force around a Bridge Pier", *Proc. of JSCE*, Vol. 272, April, 1978, pp. 65-78.
16. Suzuki, K., "Study on the Clear Water Scour around a Cylindrical Bridge Pier", *Proc. of JSCE*, Vol. 313, Sept., 1981, pp. 47-54.
17. Utami T., "Local Flow at the Upstream of Bridge Piers in Laminar Condition", *Proc. of JSCE*, Vol. 228, Aug., 1974, pp. 65-76.
18. Utami T., "Local Flow Just Upstream of Bridge Piers", *Proc. of JSCE*, Vol. 247, March, 1976, pp. 61-69.
19. Cornelis A. von der Gugten, "Discussion of Scour around Bridge Piers at High Flow Velocities", *Proc. of ASCE*, HY2, 1982, pp. 292-298.
20. Wang, T.W. and Triweko, R.W., "Maximum Depth of Scour around Bridge Piers", *Proc. of 5th Congress, APD-IAHR*, Seoul, Korea, Aug., 1986, pp. 333-345.
21. 김진홍, "원형교각 주위에서의 최대세굴심도에 관한 연구", 석사학위논문, 서울대학교, 1985.
22. 김희중, 신동수, 이승우, "교각주위의 정적세굴에 관한 연구", *한국수문학회지*, 제 20권 제 1호, 1987, pp. 41-48.
23. 안상진, 최계운, 김종섭, 안창진, "보청천내 교각설치에 따른 국부세굴심도의 산정", *대한토목학회 논문집*, 제 13권 제 3호, 1993, pp. 93-105.
24. 이원환, 이정식, 이홍래, "교각주변 하상의 국부세굴에 관한 실험적 연구", *대한토목학회 논문집*, 제 5권 제 1호, 1985, pp. 65-74.
25. 이정규, 육운수, "하천교각의 세굴방지 대책에 대한 실험적 연구", 한국과학재단 보고서, 1992.
26. 이정규, "교각의 세굴에 미치는 Armouring효과", *한국수문학회지*, 제 26권 제 4호, 1993, pp. 107-115.
27. 정동원, "교각주변의 국부적 세굴특성과 방지를 위한 실험적 연구", 석사학위논문, 한양대학교, 1991.
28. 정신태, "圓形橋脚에서의 국소洗掘에 관한 實驗的 研究", 석사학위논문, 서울대학교, 1986.

(接受 : 1994. 4. 16)