

교량기초와 세굴

Bridge Foundation and Scour

1. 서론
2. 국내의 현황
3. 세굴 예측기법
4. 세굴 방지공법
5. 교량세굴 설계예
6. 결론

곽기석

Kwak, Kiseok

한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원

Member, Senior Researcher, Civil Engrg. Division, Korea Institute of
Construction Technology

교량기초와 세굴

Bridge Foundation and Scour

곽 기 석¹⁾ Kwak, Kiseok

¹⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원

Member, Senior Researcher, Civil Engrg. Division, Korea Institute of Construction Technology

개요(SYNOPSIS)

Scour is the physical or chemical attack of flowing water which excavates and carries away material from stream beds and banks. Especially, hydraulic structures such as bridge piers and abutments placed in the channel causes the changes of the flow pattern like acceleration, the formation of vortices, and scour around the structures. Channel scour, especially bridge pier scour is the leading cause of bridge failures. It is very important to apply appropriate methods for both of scour analysis and protection. In this paper, several methods world-widely used for bridge scour analysis and protection are introduced and compared.

Key Words : Scour, Bridge foundation, Shear stress, Pier protection, Pier scour

1. 서론

세굴은 하상 또는 제방의 토사가 흐르는 물의 물리, 화학적 작용에 의해 굴착되어 운반되어지는 현상이다. 유속과 그로 인해 하상에 야기되는 전단응력은 통상 하천유역 내에 홍수가 발생하였을 때 급격히 증가하며, 이는 하천 경계면의 토사를 침식하여 이동시키는 능력을 증가시키는 원인이 된다. 특히, 하천 내에 위치한 교각이나 교대와 같은 수리학적 구조물은 흐름을 가속시키거나 와를 형성시켜 흐름 유형의 변화를 야기함으로써, 그 구조물 주위에 세굴을 발생시킨다. 또한 최근의 이상 기상현상에 의한 집중호우는 단기간에 설계홍수량을 상회하여 급격한 교량 기초의 세굴을 유발할 수 있고, 이로 인해 하상 지반의 지지력 감소를 초래할 수 있으므로 교량의 세굴대책에 대한 필요성을 더욱 높이고 있다.

교량세굴은 기초 뿐만 아니라 교량 전체의 파괴에 영향을 미치는 첫 번째 요소로써, 이러한 교량세굴 피해의 특징은 교량 상부구조물에서 주로 발생하는 손상 정도가 국부적이거나 복구가능한 정도의 수준에 머물지 않고 교량 기초의 파손 및 교량의 유실로 이어지는 교량의 완전파괴로까지 연결된다는 점이다. 손상된 교량의 교체나 보수, 우회도로의 건설 및 유지관리 등에는 상당한 비용이 소요될 뿐 아니라, 우회로 인한 교통시간의 증가, 불편 및 경제활동의 피해 등으로 인하여 국가 및 지역사회에 미치는 영향은 대단히 크다. 따라서 교량의 붕괴위험을 사전에 예측하여 적절한 조치를 취하는 것은 대단히 중요하며, 특히 신설교량의 경우에는 체계적인 세굴해석과 방지대책을 통하여 설계, 시공되어야 할 것이다.

2. 국내외 현황

미국의 경우 총 교량수가 약 600,000개이며 이중 500,000개 가량의 교량이 바다와 강에 설치되어 있다. 교량 파괴의 첫 번째 원인은 기초 세굴로서, 1970년 이후 파괴된 1000개 이상의 교량 중 60%가 세굴에 의한 파괴인 반면, 지진에 의한 파괴는 2%에 불과하였다. 그리고 미국의 고속도로에 대한 홍수피해복구를 위한 연방지원체계의 소요예산은 연평균 5천만 달러이고 이 중 상당부분이 세굴에 의한 피해복구에 할당되는 실정이다. 미국에서 교량세굴에 대한 관심은 1987년 4월 5일 뉴욕주의 Schoharie creek의 32년된 교량이 교대 세굴로 인해 확대기초가 침식되어 붕괴되면서 촉진되었다. 미국 연방도로국(FHWA)이 이후 10년간 세굴과 관련한 교량기초 상태를 점검한 결과 조사된 교량의 62.4%가 세굴파괴에 대해 잠재 위험성이 있으며, 13.5%는 위험하며, 20.0%는 기초의 형식 및 상태가 파악되지 않았고, 0.6%는 조사에서 제외되었고, 3.5% 혹은 약 17,000개의 교량은 100년 빈도의 홍수 발생시 세굴로 인해 붕괴할 것으로 조사되었다. 미국에서도 현재 기초 세굴로 인한 교량의 문제가 매우 중요함을 알 수 있다.

세굴에 의한 교량의 피해는 국내에서도 이미 심각한 문제이다. 세굴에 의한 교량의 피해는 홍수기에 집중되며, 교각과 교대 기초의 손상 혹은 파괴로 인한 교량 전체의 파괴로 이어지므로 적절한 예방책이 수립되어야 한다. 국내의 교량 중 세굴에 의한 피해사례는 1981년 이후 조사에 의하면 연평균 100건에 육박하며, 1987년에는 7월 중순의 태풍 셀마와 연이은 중부지역 집중호우 및 8월의 집중호우로 인해 255개의 교량기초가 세굴에 의한 피해를 입었다. 대하천의 경우에 교량 장수명화를 이루기 위해서는 세굴보호공의 설치뿐만 아니라 시설물의 중요도를 고려할 때 세굴 모니터링 시스템의 운영을 통한 상시 안전점검이 매우 필요하다.

표 1 국내 교량의 세굴에 의한 피해 수

년도	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	평균
교량수	141	47	4	177	53	37	255	51	112	89	162	89	90	28	140	98.3

국내 교량세굴은 2등급 이하의 중소규모 교량에 그 피해가 집중되고 있으며, 이는 중소규모 교량의 경우에 기초 선단이 암반층에 지지되지 못하고 있고, 또한 적절한 보호공의 설치 및 관리가 결여되어 있기 때문이다. 최근 교량의 장대화와의 이에 따른 기초 설계 및 시공의 견고화로 인해 기초의 위험도는 감소하는 추세이나, 설계기준이 강화되기 이전에 건설된 교량들은 대규모 홍수 발생시 피해 가능성이 상존하고 있다. 특히 최근 들어 이상 홍수가 잦아지고, 댐, 하천개수, 골재채취 등으로 하천이 불안정해져서 기존 교량의 세굴 가능성은 높아지고 있다.

최근 이상 기상현상에 의한 집중호우로 인해 하천의 설계홍수량을 단기간에 상회하는 일이 빈번히 발생하고 있는 실정이며, 특히 2002년 8월과 9월의 집중호우와 태풍 루사의 영향으로 많은 국가기반시설이 피해를 입은 바 있다. 2002년 8월과 9월에 각각 75개소, 151개소가 교량주위의 하상세굴로 인해 붕괴 또는 유실되었으며, 그 중 국도 교량 및 철도교의 피해현황은 표 2와 같다.

표 2 2002년 태풍 루사에 의한 도로교(국도)/철도교 피해

피해 원인	피해현황	교량수 (총 21개소)
교각 및 교대 세굴	완파	11
	반파	8
	교각 침하	2

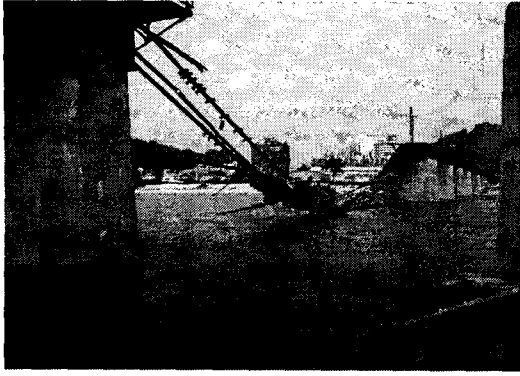


그림 1 경부선 감천철교 세굴파괴(2002. 8)

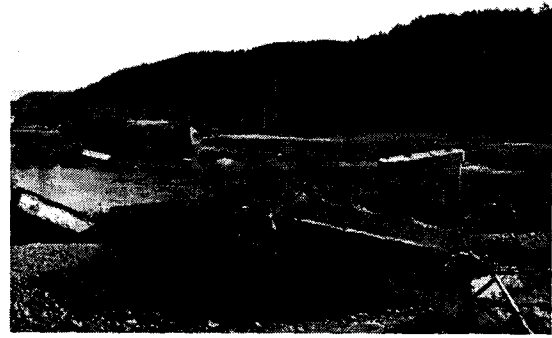


그림 117 강원 용수교 세굴파괴(2002. 8)

3. 세굴 예측 기법

세굴은 시간에 따라 장기적인 변화와 단기적인 변화로 구분할 수 있으며, 장기변화는 하상의 상승이나 저하로 인해 하천과 유역에 있어서의 수리특성과 하천 단면의 변화와 관련이 있고, 단기변화는 단면축소세굴과 국부세굴로 나눌 수가 있다. 단면축소세굴은 교량 등 인공구조물 또는 자연적인 요인에 의해 하천내의 통수단면적이 축소되어 발생하는 세굴이다. 국부세굴은 다시 교대와 교각에서의 국부세굴로 나눌 수가 있으며, 흐름속에 설치된 구조물에 의한 흐름의 간섭 때문에 발생하게 된다. 따라서 총세굴깊이는 하상의 장기 변화, 단면축소세굴, 그리고 국부세굴의 세가지 요소의 합으로 구하게 된다.

단면축소세굴과 국부세굴은 다음과 같은 두가지 상태에 대하여 고려를 한다. 첫째는 이동상세굴 (Live-bed scour)로 교량 상류부로부터 토사의 이송이 있는 경우이며, 상류부로부터 이송되는 토사의 양과 세굴되는 토사의 양이 같아질 때 평형을 이루게 된다. 둘째는 정지상세굴 (Clear-water scour)로 상류부로부터 토사의 이송이 없는 경우이며, 평균 하상전단응력이 하상재료의 한계전단응력보다 작을 때 평형을 이루게 된다.

이동상세굴과 정지상세굴을 구분하기 위해서는 먼저 하상재료의 이동을 초기화하는 한계유속 V_c 를 계산한다. 이 한계유속 V_c 를 수로의 평균유속 V 와 비교하여 하상재료의 한계유속 V_c 가 수로의 평균유속 V 보다 크다면 정지상세굴이 발생할 것이며, 이와 반대로 V_c 가 V 보다 작다면 이동상세굴이 발생할 것이다. 하상재료의 한계유속 V_c 는 다음과 같은 식으로 구한다.

$$V_c = 6.19 y^{1/6} D_{50}^{1/3} \quad (1)$$

일반적으로 한계유속이 큰 조립토지반에서는 홍수사상의 강도에 따라 세굴의 형태가 결정되지만 점성토지반에서는 세굴되는 흙이 부유사의 형태로 이동하게 되므로 정지상세굴만이 발생하게 된다. 정지상세굴은 이동상세굴에 비해 평형상태에 도달하는 시간이 더 길며, 그 깊이 또한 교각세굴의 경우에는 10% 정도 더 크다.

3.1 장기 하상 변화

장기 하상 변화는 하천의 단면에서 자연 및 인간활동에 의한 장기적인 하상고의 변화를 말하며 하상의 상승은 다른 지점에서 침식된 하상재료의 퇴적에 의해서 발생하며 하상의 하강은 침식으로 인한 하상고의 감소를 말한다. 장기 하상 변화는 하도나 유역의 현재의 상태와 수계내에서 장래에 예상되는 변화를 함께 평가하고 이러한 평가를 근거로 하여 산정되어야 한다. 이러한 장기적인 하상고 변화의 요인들은 교량 상류 및 하류의 댐과 저수지, 유역의 토지 이용, 하천의 개수, 하류부 하상고의 변화, 하천의 만곡 등을 꼽을 수가 있다. 장기적인 하상변동의 예측에

는 BRI-STAR나 HEC-6와 같은 1차원 모형, 현재의 변동 추세를 사용하는 선형외삽 (Linear Extrapolation), 그리고 기술자의 공학적인 판단 등을 이용하여 예측이 가능하다. 또한 여러 학자들에 의해 2차원, 3차원 수치모형 등 여러 가지 방법들이 제안되고 있으나 아직 비교적 정확한 예측을 하지 못하고 있는 실정이다.

3.2 단면축소 세굴

단면축소세굴은 홍수시 하천의 통수단면이 자연적인 원인 또는 교량으로 인해 감소될 때 발생한다. 통수단면의 축소로 수축부를 통과하는 평균유속과 하상전단응력이 증가하게 되고, 또한 침식력이 증가하여 운송되어 오는 양보다 더 많은 하상물질이 수축부로부터 제거된다. 이러한 하상재료 이송의 증가로 하상고가 낮아지고 통수단면이 증가하며 평형상태에 이를 때까지 유속 및 전단응력이 감소하게 된다.

조석 영향을 받는 해안 하천에서는 횡단면적이 증가함에 따라 해안으로부터 유량이 증가하게 되어 유속과 전단응력은 감소하지 않는다. 따라서 상대적인 평형에 도달하지 않고 하상의 연속적인 저하가 발생된다.

3.2.1 이동상 세굴

이동상세굴심을 계산하는 Laursen (1960)의 공식은 다음과 같다.

$$\frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{6/7} \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^{k_1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^{k_2} \quad (2)$$

$y_s = y_2 - y_0$: 평균세굴심 (m)

여기서 y_1 : 상류 주수로의 평균수심 (m)

y_2 : 단면 축소부의 평균수심 (m)

y_0 : 세굴 발생전 단면 축소부의 수심 (m)

Q_1 : 상류 주수로의 유량 (m^3/s)

Q_2 : 단면 축소부의 유량 (m^3/s)

W_1 : 상류 주수로의 하상폭 (m)

W_2 : 단면 축소부의 하상폭 (m)

n_1 : 상류 주수로의 Manning 조도계수

n_2 : 단면 축소부의 Manning 조도계수

k_1, k_2 : 하상물질의 이동양상에 따른 지수 (표 3)

표 3 하상물질의 이동양상에 따른 지수 k_1, k_2

V_* / ω	k_1	k_2	하상재료 이동양상
< 0.5	0.59	0.066	대부분 하상점착이동
0.5 - 2.0	0.64	0.21	부분적인 부유사 이동
> 2.0	0.69	0.37	대부분 부유사 이동

여기서 $V_* = \sqrt{gy_1 S_i}$ 상류단면의 전단속도 (m/s)

ω : 하상재료의 D_{50} 에 대한 침강속도 (m/s, 그림 3)

g : 중력가속도 (9.81 m/s^2)

S_1 : 주수로의 에너지경사

D_{50} : 입도분포곡선에서 흙의 중량통과백분율이 50%에 해당하는 입자의 크기

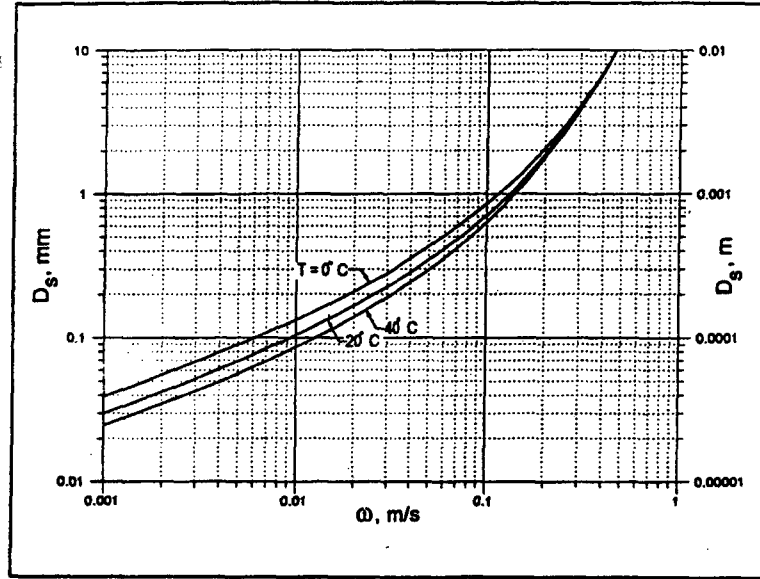


그림 118 모래크기 입자의 침강속도

3.2.2 정지상세굴

정지상세굴을 계산하는 Laursen의 공식은 다음과 같다.

$$y_2 = \left(\frac{0.025 Q^2}{D_m^{2/3} W^2} \right)^{3/7} \quad (3)$$

$y_s = y_2 - y_0$: 평균세굴심 (m)

여기서 y_2 : 단면 축소부의 평균수심 (m)

y_0 : 세굴 발생전 단면 축소부의 수심 (m)

Q : 단면 축소부의 유량 (m^3/s)

D_m : 단면 축소부 하상재료의 평균직경 ($1.25 D_{50}$ m)

W : 단면 축소부의 하상폭 (m)

3.3 국부세굴

교대나 교각 주위에서 발생하는 국부세굴의 메카니즘은 장기 하상변화나 단면축소세굴의 메카니즘과는 많은 차이가 있다. 국부세굴은 교대 또는 교각 하단부에서의 와류의 형성으로 인하여 발생하게 된다. 이러한 와류는 교각 주변의 하상물질을 제거하게 되고, 제거되는 유사량이 유입되는 유사량보다 큰 경우 세굴공이 발생하게 된다. 세굴깊이가 증가함에 따라 와류의 강도는 감소하게 되며 하상물질의 제거도 감소하여 결국 평형상태가 되어 세굴이 중단된다. 그림 4에 원형기초에 있어서의 국부세굴 현상이 나타나 있다.

국부세굴에 직접적인 영향을 미치는 인자들은 (1) 접근유속 (2) 수심 (3) 교각폭 (4) 교대 돌출길이 (5) 교각길이 (흐름방향과 경사를 이루는 경우) (6) 하상재료의 크기와 입도분포 (7) 흐름의 접근각도 (8) 교각이나 교대의 형상 (9) 하상의 형태 등이다.

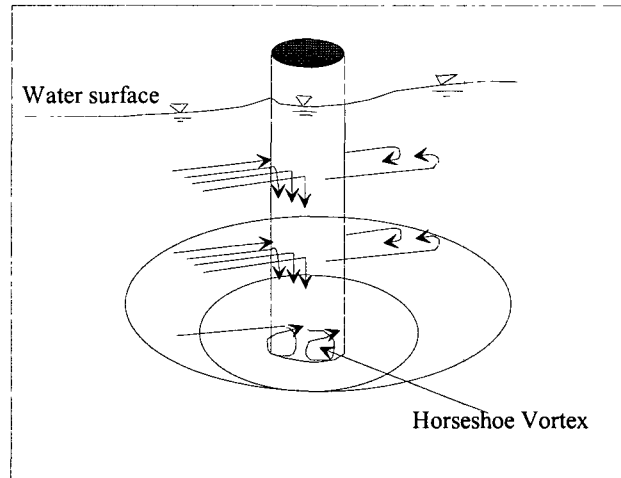


그림 119 원형기초에 있어서의 국부세굴

3.3.1 교각세굴

교각 주위의 세굴깊이를 예측하기 위해 많은 공식들이 제안되어 있다. 하지만 대부분의 공식들은 제한된 조건하의 실내실험과 그 매개변수만을 사용한 것들이 대부분이며, 이로 인해 실제 하천에서 발생하는 국부세굴현상을 규명하기 위해 사용하기에는 부적합한 것이 대부분이다. CSU (Colorado State University) 공식은 조립토 지반에 위치한 65개의 실제 교량현장으로부터 측정된 세굴깊이에 대해 검증되어 그 실효성이 입증된 바 있으며, 그 식은 다음과 같다.

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0 K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{a}{y_1} \right)^{0.65} Fr_1^{0.43} \quad (4)$$

여기서 y_s : 교각세굴깊이 (m)

y_1 : 교각 직상류의 수심 (m)

K_1 : 교각 형상에 따른 수정계수 (그림 5, 표 4)

K_2 : 흐름 유입각에 따른 수정계수 (표 5)

K_3 : 하상 상태에 따른 수정계수 (표 6)

K_4 : 입자크기에 의한 피복효과에 따른 수정계수 (표 7)

a : 교각폭 (m)

Fr_1 : 교각 직상류의 Froude수 = $V_1/\sqrt{g y_1}$

V_1 : 교각 직상류의 평균유속 (m/s)

g : 중력가속도 (9.81 m/s²)

표 4 교각 형상에 따른 수정계수, K_1

교각 형상	K_1
(a) 사각형 선단	1.1
(b) 둥근 선단	1.0
(c) 원형 선단	1.0
(d) 원형 그룹	1.0
(e) 뾰족한 선단	0.9

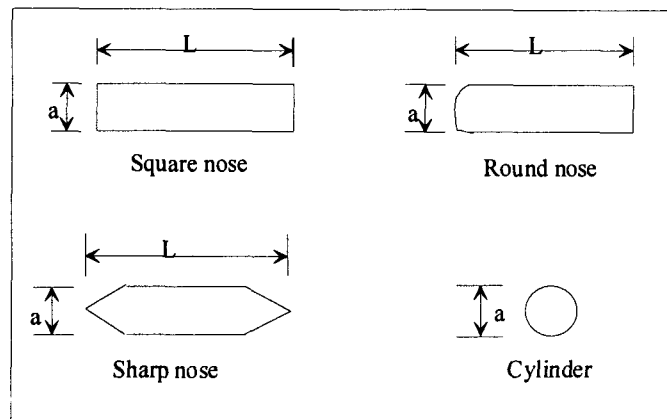


그림 120 일반적인 교각의 형상

표 5 흐름 유입각에 따른 수정계수, K_2

유입각도	교각폭에 대한 길이의 비 (L/a)		
	4	8	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

표 5에 주어진 흐름 유입각에 따른 수정계수 K_2 는 다음의 식으로도 구할 수 있다. L/a 가 12보다 큰 경우에는 최대값으로 12를 사용한다.

$$K_2 = (\cos \theta + L/a \sin \theta)^{0.65} \quad (5)$$

표 6 하상 상태에 따른 수정계수, K_3

하상 상태	사구높이, H (m)	K_3
정지상세굴	.	1.1
평면하상 및 역사구	.	1.1
작은 사구	$0.6 \leq H < 3$	1.1
중간 사구	$3 \leq H < 9$	1.1 - 1.2
큰 사구	$H \geq 9$	1.3

수정계수 K_4 는 하상재료의 D_{50} 가 0.06m 이상일 경우에만 적용되며, 결국 큰 하상입자의 피복효과로 인해 세굴 깊이를 줄이는 효과를 반영한다. K_4 를 구하는 식은 다음과 같으며, 그 적용한계는 표 7에 나타나 있다.

$$K_4 = [1 - 0.89(1 - V_R)^2]^{0.5} \quad (6)$$

여기서, V_R : 속도비 $\left(= \frac{V_1 - V_i}{V_{c90} - V_i} \right)$

V_i : 하상입자가 움직이기 시작할 때의 접근유속 $\left(= 0.645 \left(\frac{D_{50}}{a} \right)^{0.053} V_{c50} \right)$

V_1 : 접근유속

V_{c90} : D_{90} 에 대한 한계유속

V_{c50} : D_{50} 에 대한 한계유속

표 7 피복효과에 따른 수정계수 K_4 의 적용한계

수정계수	적용한계	최소치	최대치 ($V_R > 1.0$)
K_4	$D_{50} \geq 0.06m$	0.7	1.0

3.3.2 교대세굴

교대 주위에서 발생하는 국부세굴깊이의 예측에는 다음과 같은 Froehlich (1989)가 제안한 실험식이 주로 사용된다.

$$\frac{y_s}{y_0} = 2.27 K_1 K_2 \left(\frac{a'}{y_0} \right)^{0.43} Fr^{0.61} + 1 \quad (7)$$

여기서 y_s : 교대세굴깊이 (m)

y_0 : 홍수터 흐름의 평균수심 (m)

K_1 : 교대 형상에 따른 수정계수 (표 8)

K_2 : 흐름 유입각에 따른 수정계수 (= $\left(\frac{\theta}{90}\right)^{0.13}$)

θ : 교대와 하천방향이 이루는 각도

교대가 하류쪽으로 경사진 경우 - $\theta < 90^\circ$

교대가 상류쪽으로 경사진 경우 - $\theta > 90^\circ$

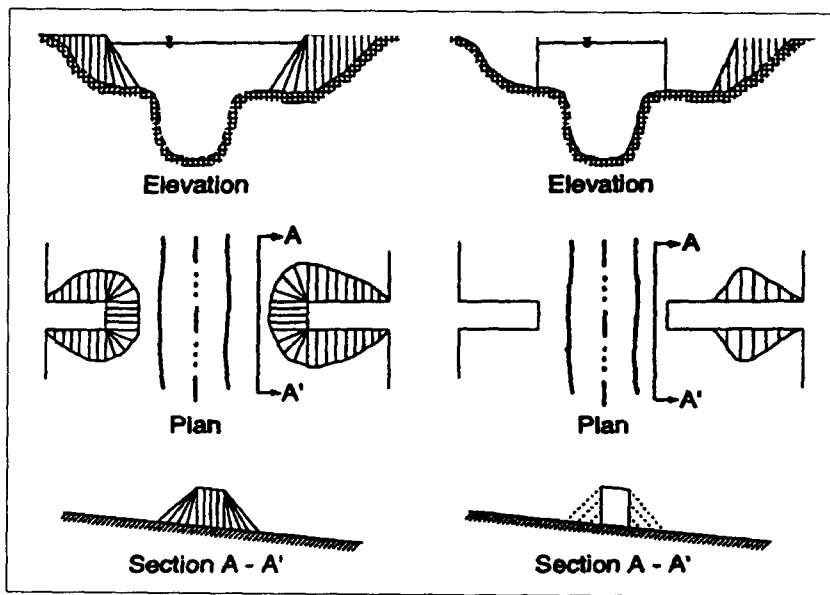
a' : 흐름에 직각방향으로 투영된 교대의 길이 (m)

Fr : 교대 직상류의 Froude수 = $V_e/\sqrt{g y_0}$

$$V_e = \frac{Q_e}{A_e} \text{ (m/s)}$$

A_e : 교대에 의해 차단되는 교량 직상류의 흐름 단면적 (m^2)

Q_e : 교대에 의해 차단되는 유량 (m^3/s)



a) 경사벽 교대

(b) 연직벽 교대

그림 121 일반적인 교대의 형태

일반적으로 교대는 그림 6에 나타난 바와 같이 연직벽(vertical wall) 교대와 경사벽(spill through) 교대로 나누어지며, 이에 따른 형상계수는 표 8에 주어진다.

표 8 교대의 형태에 따른 형상계수

교대의 형태	형상계수 K_1
연직벽 교대	1.0
측벽을 포함하는 연직벽 교대	0.82
경사벽 교대	0.55

3.3.3 세립토 지반의 교각세굴

세굴 현상은 흐르는 물의 침식유발능력(Erosive Potential)과 흙의 침식저항능력에 관련되며, 세굴되는 흙의 종류에 따라 크기는 조립토 세굴과 세립토 세굴로 대별될 수 있다. 일반적으로 조립토 세굴은 중력과 마찰력의 법칙이 지배하는 반면, 세립토 세굴은 중력과 마찰력 뿐만 아니라 흙입자의 물리 화학적 성질에도 의존한다. 또한 세립토의 세굴은 조립토의 세굴에 비해 아주 느리고, 또한 흙의 성질에 보다 더 의존하여 조립토를 위해 개발된 세굴공식을 세립토에 적용한다면 세굴깊이가 과대하게 평가된다. 따라서 세립토에 대한 세굴해석방법은 수리학적 매개변수 뿐만 아니라 시간효과와 흙의 성질을 고려할 수 있어야 한다.

SRICOS (Scour Rate In COhesive Soils) 방법에서는 세굴과정이 주로 흐르는 물에 의해 하상과 물의 경계면에 발생하는 전단응력에 주로 의존한다는 개념을 제안하였으며, 점성토 지반의 시간에 따른 교각국부세굴 깊이를 예측하기 위해 개발되었다. 이 방법은 흙의 세굴률과 전단응력과의 관계(그림 7)를 실험을 통해 구한 후 이를 반영하여 누적된 교각세굴깊이를 시간에 따라 예측할 수 있으며, 현장 세굴 관측치와 비교, 검증되었다. 실제로 교량주위에 발생한 수문곡선기록이 있는 경우에는 프로그램을 통하여 직접 수문곡선을 반영할 수 있으나 수문곡선기록이 없는 대부분의 경우에는 다음과 같은 단계를 따른다.

- ① 세굴률 실험을 통해 세굴률-전단응력 변화곡선을 얻는다.
- ② 식 (8)과 (9)를 이용하여 교각주위에서 발생하는 최대전단응력 τ_{max} 와 최대세굴깊이 z_{max} 를 계산한다.

$$\tau_{max} = 0.094 \rho \cdot V^2 \left(\frac{1}{\log Re} - \frac{1}{10} \right) \quad (8)$$

$$z_{max} (mm) = 0.18 Re^{0.635} \quad (9)$$

여기서 τ_{max} : 평탄하상에 위치한 교각주위의 최대전단응력 (N/m^2)

ρ : 물의 밀도 (kg/m^3)

V : 평균유속 (m/s)

$Re (= \frac{vD}{\nu})$: 교각 Reynolds수

D : 교각폭

ν : 물의 동점성계수 ($10^{-6}m^2/s, 20^\circ C$ 일 때)

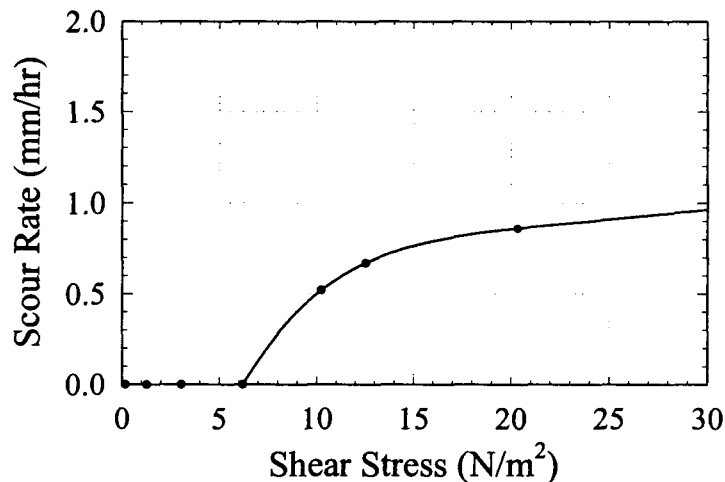


그림 122 세굴률-전단응력 변화곡선

- ③ 세굴률-전단응력 변화곡선으로부터 계산된 τ_{max} 에 상응하는 초기세굴률 \dot{z}_i 를 구한다 (그림 7 참조).
- ④ 식(10)을 이용하여 등가시간 t_e 를 계산한다.

$$t_e = 73 t_{life}^{0.126} V^{1.706} \dot{z}_i^{-0.20} \quad (10)$$

여기서 t_e : 해석기간동안의 수문곡선에 의해 발생한 세굴깊이와 같은 깊이를 생성하기 위해 최대유속이 지속되어야 하는 시간 (hrs)
 t_{life} : 세굴해석기간 (years)

- ⑤ 교각세굴깊이를 다음의 식을 이용해서 구한다.

$$y_s = \frac{t_e}{\frac{1}{z_i} + \frac{t_e}{z_{max}}} \quad (11)$$

4. 세굴 방지공법

교각 주변에서 발생하는 세굴로 인해 기초의 일부 또는 전부가 흐름에 노출되면 지지력 감소로 인하여 하부구조의 침하가 발생한다. 이러한 침하로 인하여 기초는 그 본래의 기능을 상실하고 교량 전체의 파괴로 이어지는 원인을 제공하게 된다. 기초가 암반층에 고정되어 선단지지에 의해 지지력을 확보하고 있는 경우라 하더라도 홍수시 노출된 기초에 작용하는 횡력 등으로 인해 변위가 발생한다면 교각 뿐만 아니라 교량 전체에 심각한 위협을 줄 수 있다. 따라서 교량의 안전을 위협할 정도의 세굴이 예상되는 경우에는 교각 주변에 세굴방지공이 필요하다.

세굴방지공의 규모와 형식은 세굴깊이 예측에서와 같이 하천의 흐름특성, 교량 주변 지반, 교각 및 기초의 구조적인 특징 등에 따라 달라질 수 있으며, 시공성, 내구성 및 유지관리면에서 유리한 공법을 선정해야 한다. 교각을 세굴로부터 보호하는 방안은 크게 세굴 유발인자를 약화시키는 방안과 하상물질의 저항력을 증가시키는 방안 등 두 가지로 나뉘어진다. 세굴 유발인자를 약화시키는 방법은 교각 및 교대 하부에서 발생하여 하상물질을 세굴하는 와류를 감소시키는 것으로서, 이는 교각 전면에 부착되는 바닥판 또는 푸팅의 상판을 상류로 연장하거나 원판을 바닥 또는 바닥 부근에서 교각에 부착시키는 방법 등이 있다. 또한 교각에 구멍을 뚫어 교각 직하류에서 발생하는 와류를 감소시키는 방법, 회생말뚝을 교각 상류에 설치하여 세굴을 감소시키는 방법 등을 사용하기도 한다.

하상물질의 저항력을 증가시키는 방안에는 많은 연구가 수행되어 왔으며, 대표적인 방법으로는 사석보호공, 돌망태 보호공, 콘크리트블럭 보호공, 토목섬유 보호공 등이 있다.

4.1 사석 보호공

사석보호공은 시공성과 경제성이 다른 공법에 비해 뛰어나므로 가장 많이 사용되는 공법중 하나이다. 하지만 시공된 사석 주변의 하상이 세굴되어 사석이 이동하거나 무너질 가능성을 배제할 수 없어 영구적인 보호공이 되지 못하며, 지속적인 관리가 필요하다. 사석보호공 설계식의 대부분은 구조물이 없는 하상에서의 사석크기를 결정하는 Isbash (1935)의 경험식을 변형한 형태로서 실내실험에 기초하여 그 적용이 제한적이다. Isbash는 구조물이 없는 흐름 중에 사석을 떨어뜨려 하류로 쓸려가지 않는 사석의 크기를 결정하는 경험식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{u_c^2}{(G_s - 1)gD_p} = 2C^2 \quad (12)$$

여기서, u_c 는 주어진 입자에 대한 한계유속 (m/s), C 는 Isbash 계수 (0.86 - 1.20), g 는 중력가속도 (9.81 m/s^2), D_p 는 사석의 구체환산직경(m), G_s 는 사석의 비중이다.

미 연방도로국 (FHWA)은 Isbash 공식에 기초하여 실내실험을 통해 교대와 교각 각각에 대한 사석의 크기를 결정하는 공식을 다음과 같이 제안하였다.

1) 교대주변의 사석크기 결정

$$\frac{D_{50}}{y} = \frac{K}{(G_s - 1)} \left(\frac{V^2}{gy} \right) \quad Fr \leq 0.80 \quad (13)$$

$$\frac{D_{50}}{y} = \frac{K}{(G_s - 1)} \left(\frac{V^2}{gy} \right)^{0.14} \quad Fr > 0.80 \quad (14)$$

여기서, D_{50} 는 사석의 평균직경 (m), y 는 수심 (m), V 는 평균유속 (m/s), K 는 국부적인 흐름의 가속도를 나타 내주는 상수로서 경사벽 교대인 경우 0.89, 연직벽 교대인 경우에는 1.02를 적용한다.

2) 교각주변의 사석크기 결정

$$D_{50} = \frac{0.692(KV)^2}{(G_s - 1)2g} \quad (15)$$

여기서, K 는 교각의 선단형상이 둥글 경우 1.5, 사각형일 경우에는 1.7을 적용한다.

4.2 돌망태 보호공

돌망태 보호공은 적정 중량 및 크기의 사석 확보가 어렵거나 이동이 발생할 수 있는 사석보호공의 단점을 보완 한 방법이다. 돌망태 보호공은 아연도철선 또는 PVC용착철선을 사용해 그물형 망태를 제작하여, 그 철망안에 돌 을 넣어 시공하는 것을 말한다. 작은 입자의 돌들을 망을 이용하여 한꺼번에 거동하도록 만들어 큰 입자의 효과를 얻도록 한 것으로써 입자의 이탈을 막을 수 있어 사석개체가 아닌 집단으로 작용하므로 안정성이 증가하고 내구성이 뛰어나다.

4.3 기타 세굴방지공법

사석 보호공과 돌망태 보호공의 단점을 보완하고 내구성과 시공성 뿐만 아니라 특히 환경친화적이고 미학적인 시공을 가능하게 해주는 여러 방법들이 연구 개발되고 있다. 그 중 콘크리트블럭과 토목섬유를 이용한 보호공이 현재 국내.외에서 활발히 연구되고 있으며, 현장 적용성에 대한 검토도 이루어지고 있는 상황이다.

콘크리트블럭 보호공은 교각 주위에 콘크리트블럭을 설치하고 이를 서로 연결하여 일체 거동하도록 하는 방법으 로써 유수력과 저항력을 비교하여 블록의 한계중량을 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$W_c = \frac{\gamma_w C_D A_p V^2}{\mu g \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_c} \right)} \quad (16)$$

여기서, W_c 는 블록의 한계중량 (t), γ_w 는 물의 단위중량 ($= 1 \text{ t/m}^3$), γ_c 는 콘크리트의 단위중량 (t/m^3), C_D

는 저항계수, A_p 는 블록의 표면적 (m^2), μ 는 블록저면과 하상과의 마찰계수이다. 위에서 구한 한계중량에 적절한 안전율을 고려하여 블록이 안정적으로 유지될 수 있는 소요중량을 결정할 수 있다.

토목섬유를 이용한 세굴방지공은 고강도의 토목섬유로 제작된 거푸집을 재단하여 교각에 설치한 다음 유동상태의 굳지 않은 콘크리트나 모르타르 또는 현장의 모래, 토사 등을 주입하여 교각기초 및 교대기초 주변의 하상저항력을 증가시키는 공법이다. 토목섬유 보호공은 수중 콘크리트 타설에 의해 시공성이 뛰어나고 교각 및 교대 기초의 형상에 따라 자유자재로 부설 형태를 조절할 수 있다는 장점을 가진다.

세굴 방지공의 설계는 공학적인 요소 뿐만 아니라 교량의 위치, 규모 및 중요도 등 여러 가지 사회, 경제적인 요소도 고려하여 결정되어야 한다. 세굴 방지공의 시공시에는 다음과 같은 점에 주의하여 시공하여야 한다.

- ① 세굴 방지공의 폭은 국부세굴의 영향폭을 고려하여 최소한 교각폭의 2배 이상이 되어야 한다.
- ② 세굴 방지공으로 인한 추가적인 세굴을 막고 향후 조사의 정확성을 높이기 위해 그 높이는 하상의 높이와 같도록 시공되어야 한다.

5. 교량세굴 설계 예

교량세굴 해석은 다음과 같은 절차에 의해 수행된다.

- ① 세굴해석에 필요한 매개변수를 결정한다.
- ② 장기 하상 변화를 예측한다.
- ③ 단면축소 세굴을 계산한다.
- ④ 교각 또는 교대 주변에서 발생하는 국부세굴을 계산한다.
- ⑤ 총 세굴깊이를 결정한다.

5.1 매개변수 결정

세굴해석에 필요한 구조, 수리, 지반 조건에 대한 매개변수들을 결정하는 단계이다. 현장조사를 통해 하천의 형상, 하상경사 등 수리학적 특성과 하상지반의 종류와 물리적 성질을 파악한 후 해석에 사용될 방법을 결정한다. 그리고 빈도해석을 통해 재현기간에 따른 최대홍수량을 산정하고, HEC-RAS, WSPRO 등을 이용한 홍수해석을 수행하여 그에 상응하는 최대유속, 수위 등의 수리학적 매개변수를 구한다. 또한 교각과 기초의 형상 및 크기 등 구조적인 매개변수와 입도분석 등을 통해 지반의 매개변수를 구한다. 지반이 세립토 또는 풍화암으로 구성되어 있다면 불교란시료를 채취하여 세굴 실험을 통해 지반의 세굴특성 등도 조사해야 한다.

계산 예에 사용될 교량 및 하천 단면이 그림 8에 나타나 있다. 교량의 총 연장이 83m인 소규모 교량으로서 지름이 1m인 원형 교각에 의해 지지되고 있다. 지반은 대부분 조립토로 구성되어 있으며, 중량통과 백분율 50%에 해당하는 평균입경 D_{50} 는 2mm였다. 본 예제에서는 HEC-RAS를 통해 재현기간 100년의 홍수량에 대한 홍수해석을 실시하였으며, 그 결과를 계산순서에 따라 각 절에 나타내었다.

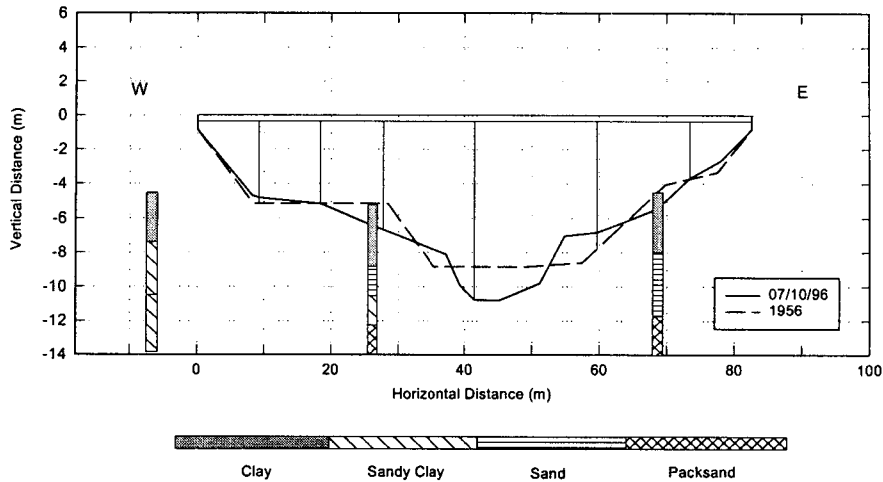


그림 123 교량 및 하천 단면

5.2 장기 하상 변화 예측

장기 하상 변화는 전 절에서 설명한 바와 같이 하도나 유역의 현재의 상태와 수계내에서 장래에 예상되는 변화를 함께 평가하고 이러한 평가를 근거로 하여 산정되어야 한다. 특히 정기적인 관측이 매우 중요하며, 이를 토대로 장기 하상 변화를 예측해야 한다. 관측치가 없는 경우에는 전 절에서 소개된 여러 가지 방법을 사용하여 결정한다.

본 예제에서는 그림 9에 나타난 바와 같이 하상이 이미 안정화되어 점진적인 변화가 없는 것으로 가정한다. 이런 경우에는 총세굴깊이는 단면축소 세굴과 국부세굴의 합으로 결정된다.

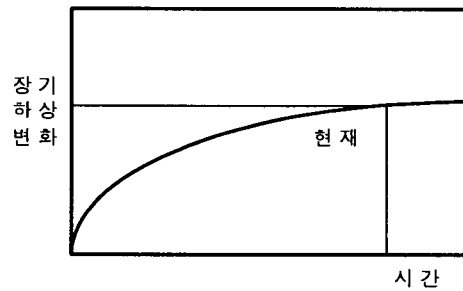


그림 9 장기하상변화 관측

5.3 단면축소 세굴 계산

현장조사와 홍수해석을 통해 구해진 매개변수들은 표 9에 나타내었으며, 각각에 대한 자세한 설명은 3장에 나타나 있다. 단면축소 세굴은 다음과 같은 절차로 계산한다.

표 9 단면축소 세굴 해석에 필요한 매개변수

Q_{design} : 100년 빈도 설계 홍수량 (m^3/s)	1200
Q_1 : 상류 주수로의 유량 (m^3/s)	650
Q_2 : 단면 축소부의 유량 (m^3/s)	490
W_1 : 상류 주수로의 하상폭 (m)	42
W_2 : 단면 축소부의 하상폭 (m)	34
A_1 : 상류 주수로의 단면적 (m^2)	320
A_2 : 단면 축소부의 단면적 (m^2)	260
D_{50} : 평균 입경 (m)	0.002
S_1 : 하천 에너지경사 (m/m)	0.002

① 상류 주수로의 평균유속 V_1 , $V_1 = \frac{Q_1}{A_1} = \frac{650}{320} = 2.03 \text{ m/s}$

② 상류 주수로의 평균수심 y_1 , $y_1 = \frac{A_1}{W_1} = \frac{320}{42} = 7.62 \text{ m}$

③ 한계유속 V_c , $V_c = 6.19 y_1^{1/6} D_{50}^{1/3} = 6.19 \cdot 7.62^{1/6} \cdot 0.002^{1/3} = 1.09 \text{ m/s}$
 상류 주수로의 평균유속 V_1 이 한계유속 V_c 보다 크므로 이동상 세굴이 발생한다.

④ 상류단면의 전단속도 V_* , $V_* = \sqrt{g y_1 S_1} = \sqrt{9.81 \cdot 7.62 \cdot 0.002} = 0.39 \text{ m/s}$

⑤ 그림 3으로부터 침강속도 $\omega = 0.21 \text{ m/s}$ ($\because D_{50} = 0.002 \text{ m}$)

$$\frac{V_*}{\omega} = \frac{0.39}{0.21} = 1.86 \text{ 이므로 표 9.2.1로부터 } k_1 = 0.64$$

⑥ 단면축소 세굴깊이

상류부와 단면축소부의 조도계수가 일정하다면 식 2는 다음과 같다.

$$\frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{6/7} \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^{k_1}$$

$$\frac{y_2}{7.62} = \left(\frac{490}{650} \right)^{6/7} \left(\frac{42}{38} \right)^{0.64}$$

$$y_2 = 6.38 \text{ m}$$

$$y_0 = \frac{A_2}{W_1} = \frac{260}{42} = 6.19 \text{ m}$$

따라서 단면축소 세굴깊이는 다음과 같다.

$$y_s = y_2 - y_0 = 6.38 - 6.19 = 0.19 \text{ m}$$

5.4 교각세굴 계산

단면축소 세굴 계산에는 일반적으로 단면 전체 또는 일부의 평균유속이 사용되는 반면, 교각세굴 계산시에는 대 상 교각 직전의 국부 평균유속이 사용되어야 한다. 또한 하상이 횡방향으로 이동할 가능성이 있기 때문에 일반적으로 가장 큰 유속이 발생하는 부분에 위치한 교각에 대해 계산을 하여 각각의 교각에 적용하게 되며, 본 예제에서는 단면의 중앙에 위치한 5번째 교각에 대해 해석을 수행한다. 필요한 매개변수들은 표 10에 나타내었다.

표 10 교각세굴 계산에 필요한 매개변수

K_1 : 교각 형상에 따른 수정계수 (원형)	$K_1 = 1.0$
K_2 : 흐름 유입각에 따른 수정계수 (0°)	$K_2 = 1.0$
K_3 : 하상 상태에 따른 수정계수 (평면)	$K_3 = 1.1$
K_4 : 피복효과에 따른 수정계수 ($D_{50} < 0.06 m$)	$K_4 = 1.0$
y_1 : 교각 직상류의 수심 (m)	7.8
a : 교각폭 (m)	1.0
V_1 : 교각 직상류의 평균유속 (m/s)	2.3

산정된 매개변수들을 이용하여 교각세굴은 다음과 같이 계산한다.

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0 K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{a}{y_1}\right)^{0.65} Fr_1^{0.43} = 0.49$$

$$\frac{y_s}{7.8} = 2.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.1 \cdot 1.0 \left(\frac{1.0}{7.8}\right)^{0.65} \left(\frac{2.3}{\sqrt{9.81 \cdot 7.8}}\right)^{0.43}$$

따라서 $y_s = 2.54 m$ 이다. 단면축소 세굴과 교각세굴 깊이를 더한 총 세굴깊이는 다음과 같다.

$$y_s = y_s(\text{단면축소}) + y_s(\text{교각}) = 0.19 + 2.54 = 2.73 m$$

본 예제의 경우에는 단면축소 세굴은 심각하지 않으나 교각세굴 깊이가 전체 세굴량의 90% 이상을 차지할 정도로 심각한 경우이다. 이러한 경우에는 주수로의 각 교각에 대해 적절한 세굴보호공이 필요하다.

5.5 세굴보호공 설계

사석 보호공을 제외한 돌망태 보호공, 콘크리트블럭 보호공, 토목섬유 보호공 등은 각각의 적용공법에 따라 설계 기준이 상이하므로 본 예제에서는 사석보호공의 사석크기만을 결정한다. 교각의 형상이 원형이므로 형상계수 $K = 1.5$ 이고, 시공될 사석의 비중은 2.65이다. 따라서 사석의 평균직경은 다음과 같이 계산된다.

$$D_{50} = \frac{0.692(KV)^2}{(G_s - 1)2g} = \frac{0.692(1.5 \cdot 2.3)^2}{(2.65 - 1)2 \cdot 9.81} = 0.25 m$$

교각폭이 1m 이므로 사석을 교각주위에 2m 이상의 폭으로 고르게 분포하도록 시공하며, 특히 사석의 높이가 주변 하상의 높이와 동일하도록 주의하여 시공한다.

5.6 세립토 지반의 교각세굴 설계

세립토 지반상에 위치한 교각 주위에서 발생하는 세굴을 해석하기 위해서는 수리학적 특성 뿐만이 아니라 지반의 세굴특성을 충분히 고려하여 계산해야 한다. 이를 위해 불교란시료를 채취하여 세굴률 실험을 통해 지반 고유의 침식함수 (세굴률-전단응력 관계)를 구하여 이를 반영한다.

본 절에서는 앞의 예제에서 모든 조건을 동일하게 두고 지반만을 세립토라고 가정했을 때 교각세굴 해석이 어떻게 달라지는지를 검토해 보기로 한다. 지반 고유의 침식함수는 그림 7의 예를 사용하며, 해석은 다음과 같은 단계로 진행된다.

- ① 세굴률 실험을 통해 세굴률-전단응력 변화곡선 결정 (그림 7)
- ② 교각주위에서 발생하는 최대전단응력 τ_{\max} 와 최대세굴깊이 z_{\max} 계산

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= 0.094 \rho \cdot V^2 \left(\frac{1}{\log Re} - \frac{1}{10} \right) \\ \tau_{\max} &= 0.094 \cdot 1000 \cdot 2.3^2 \left(\frac{1}{\log \frac{2.3 \cdot 1.0}{10^{-6}}} - \frac{1}{10} \right) = 28.4 \text{ N/m}^2 \\ z_{\max} \text{ (mm)} &= 0.18 Re^{0.635} = 0.18 \cdot \left(\frac{2.3 \cdot 1.0}{10^{-6}} \right)^{0.635} = 1972 \text{ mm}\end{aligned}$$

- ③ τ_{\max} 에 상응하는 초기세굴률 $z_i = 0.92 \text{ mm/hr}$ (그림 7)

- ④ 등가시간 t_e 계산

$$\begin{aligned}t_e &= 73 t_{life}^{0.126} V^{1.706} z_i^{-0.20} \\ t_e &= 73 \cdot 100^{0.126} 2.3^{1.706} 0.92^{-0.20} = 549.1 \text{ hrs}\end{aligned}$$

- ⑤ 교각세굴깊이 y_s

$$\begin{aligned}y_s &= \frac{t_e}{\frac{1}{z_i} + \frac{t_e}{z_{\max}}} \\ y_s &= \frac{549.1}{\frac{1}{0.92} + \frac{549.1}{1972}} = 402 \text{ mm} = 0.4 \text{ m}\end{aligned}$$

교각세굴 깊이는 0.4m로서 이전 예제의 조립토 경우의 2.54m에 비해 아주 작은 수치이다. 이상에서 살펴본 바와 같이 세립토 지반에 CSU 공식과 같은 조립토에 대해 개발된 모델을 적용한다면 세굴깊이를 과대평가할 수 있다. 따라서 지반의 종류와 특성에 따라 그에 알맞는 모델을 선정하여 해석, 설계하여야 할 것이다.

6. 결론

교량은 도로를 구성하는 대표적인 구조물로서 인간생활과 밀접한 연관성을 가지고 있는 사회기반시설이다. 산업화와 더불어 급격히 증가하는 교통량으로 인해 그 중요성은 더욱 커지고 있는 실정이며, 이에 따라 교량구조의 안정성과 내구성의 확보가 강조되고 있다. 교량기초는 교량의 상부하중을 지반으로 전달하여 교량구조 전체의 안전성을 확보해주는 가장 핵심적인 부분으로서, 교량의 안정성과 내구성의 확보를 위해서는 가장 중요한 지반구조물이다. 교량세굴은 이러한 교량기초의 안전성을 위협하는 첫 번째 원인으로써, 기존 교량의 안전성 검토 뿐만 아니라 신설교량의 경우에도 체계적인 세굴해석과 방지대책을 통하여 설계, 시공되어야 한다.

교량의 세굴은 수리학과 지반공학의 접목이 필요한 다학문적 분야이다. 교량 기초지반의 세굴을 유발시키는 힘인 물의 흐름에 대해서는 전통적으로 수리학의 영역이다. 한편 제방, 호안, 사면의 침식과 방지책의 설계 및 시공과 교량의 기초는 지반공학의 전통적인 영역이다. 최근 미국과 국제토질및지반공학회인 ISSMGE의 경우와 마찬가지로 국내에서도 세계적인 추세에 발맞추어 세굴로 인한 교량기초의 보호, 지지력 산정 등의 문제에 수리학과 지반공학을 포함한 다학제간의 접근시도가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. Briaud, J.-L., Ting, F., Chen, H. C., Gudavalli, S. R., Perugu, S., and Wei, G. (1999 a). "SRICOS: Prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 4, ASCE, Reston, Virginia, USA, pp.237-246.
2. Briaud, J.-L., Ting, F., Chen, H.C., Gudavalli, R., Kwak, K., Philogene, B., Han, S.-W., Perugu, S., Wei, G., Nurtjahyo, P., Cao, Y., Li, Y. (1999 b), "SRICOS: Prediction of scour rate at bridge piers", *Report No. 2937-1*, to the Texas Department of Transportation, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, College Station, Texas, USA.
3. Briaud, J.-L., Ting, F., Chen, H.-C., Cao, Y., Han, S.-W., Kwak, K. (2001a), "Erosion Function Apparatus for Scour Rate Predictions", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, No. 2, ASCE, Reston, Virginia, USA, pp.105-113.
4. Briaud, J.-L., Chen, H.-C., Kwak, K., Han, S.-W., Ting, F. (2001b), "Multiflood and Multilayer Method for Scour Rate Prediction at Bridge Piers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, No. 2, ASCE, Reston, Virginia, USA, pp. 114-125.
5. Froehlich, D.C. (1989), "Abutment Scour Prediction", *Presentation*, Transportation Research Board, Washington, DC, USA.
6. *HEC-RAS River Analysis System (1997). Users manual, Version 2.0*, Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California, USA.
7. Jones, J. S. (2000), "Hydraulic testing of Wilson Bridge designs", *Public Roads, March/April*, U.S. Department of Transportation, FHWA, Washington, DC, USA, pp.40-44.
8. Kwak, K. (2000), "Prediction of scour depth versus time for bridge piers in cohesive soils in the case of multi-flood and multi-layer soil systems", Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, College Station, Texas, USA.
9. Kwak, K., Briaud J.-L., Chen H.-C. (2001), "SRICOS: Computer Program for Bridge Pier Scour", *Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, held in Istanbul, Turkey on August 27-31, 2001, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, the Netherlands.
10. Laursen, E.M. (1960), "Scour at Bridge Crossings", *Journal of Hydraulic Division*, Vol.86, No.HY2, ASCE,

Reston, Virginia, USA.

11. Melville, B. W. and Coleman, S. E. (1999), Bridge scour, Water Resource Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado, USA, pp.196-199.
12. Richardson, E. V. and Davis, S. M. (1995), "Evaluating scour at bridges", *Pub. No. FWHA-IP-90-017, HEC No.18*, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, USA.