

지반의 침식특성을 이용한 교각세굴 사례 연구

A Case Study of Pier Scour Considering Soil Erodibility

곽 기 석¹ Kwak, Ki-Seok

정 문 경² Chung, Moon-Kyung

이 주 형³ Lee, Ju-Hyung

박 재 현⁴ Park, Jae-Hyeon

Abstract

A case study was performed to verify the applicability of existing formulae for predicting bridge scour in cases where its piers are founded in fine-grained soils. The object of study was the Kanghwa Choji Bridge area where the streambed consists of mainly clayey soil. Site investigation included: direct measurement of scour depths around piers using an ultrasonic probe; and collection of undisturbed soil samples which were later used to determine geotechnical properties and scour rate under different stream velocities. Scour depth prediction was made by employing several conventional methods and compared with the measured value. All methods, not taking soil's intrinsic property against erosion into consideration, overestimated scour depth by a factor of 3.6 to 6.5. On the other hand, the SRICOS method yielded a reasonably acceptable overestimation by a factor of 1.7.

요 지

사례 연구를 통해서 실제 세립토 교량현장에 대해 기존 교량세굴 해석모델들의 적용성을 분석하였다. 하상이 실트 질 점토로 구성된 강화 초지대교를 대상교량으로 선정하여 현장조사를 실시하였다. 초음파 센서장비를 이용하여 교각 주변의 세굴심을 직접 측정하였으며, 불교란시료를 채취하여 지반공학적 특성을 결정하고, 또한 세굴률 실험을 통해 대상 지반의 유속별 세굴률을 분석하였다. 그 결과를 바탕으로 기존에 제안된 대표적인 교량세굴 해석모델들을 이용하여 주요 교각의 세굴심을 예측하여 실측 세굴심과 비교하였다. 지반의 침식특성을 고려하지 않는 기존의 교량세굴 해석모델들은 모두 3.6~6.5의 비율로 세굴심을 과대평가하는 경향을 보였으며, SRICOS 방법은 실측세굴심에 비해 1.7배의 합리적인 결과를 보여주었다.

Keywords : Cohesive soils, Erosion rate, Equivalent time, Pier scour, Shear stress

1. 서 론

세굴 현상은 흐르는 물의 침식유발능력(erosive potential)과 지반의 침식저항능력에 관련되며, 세굴되는 흙의 종류에 따라 조립토 세굴과 세립토 세굴로 대별될 수 있다. 일반적으로 조립토 세굴은 중력과 마찰력의

법칙이 지배하는 반면, 세립토 세굴은 중력과 마찰력 뿐만 아니라 흡입자의 물리 화학적 성질에도 의존한다. 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 세굴해석방

1 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engrg. Research Dept., Korea Institute of Construction Technology, kskwak@kict.re.kr)
2 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원 (Member, Research Fellow, Geotechnical Engrg. Research Dept., Korea Institute of Construction Technology)
3 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원 (Member, Researcher, Geotechnical Engrg. Research Dept., Korea Institute of Construction Technology)
4 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원 (Member, Researcher, Geotechnical Engrg. Research Dept., Korea Institute of Construction Technology)

법은 수리학적 매개변수뿐만 아니라 흙의 침식특성과 그에 따른 시간효과를 고려할 수 있어야 한다(Briaud 등, 2001a, 2001b, Kwak 등, 2002).

세굴과정이 주로 흐르는 물에 의해 하상과 물의 경계면에 발생하는 전단응력에 주로 의존한다는 개념이 포함된 SRICOS(Scour Rate In COhesive Soils) 방법에서는 세굴을 야기시키는 수리학적 매개변수뿐만 아니라 세굴저항능력에 관계되는 대상지반의 침식특성을 세굴 해석에 적용할 수 있다(Richardson and Davis, 2001). 본 연구에서는 사례 연구를 통해 실제 국내의 교량현장에 대한 SRICOS 방법을 포함한 기존 교량세굴 해석모델들의 적용성을 분석하여, 국내 특성에 맞는 교량세굴 해석 시스템을 구축하기 위한 기초자료를 제공하고자 한다. 하상이 실트질 점토로 구성된 강화 초지대교를 대상교량으로 선정하여 세굴심 측정을 포함한 현장조사를 실시하였으며, 불교란시료를 채취하여 세굴률실험을 실시하였다. 그 결과를 바탕으로 기존에 제안된 대표적인 교량세굴 해석모델들을 이용하여 주요 교각의 세굴심을 예측하고, 이를 통해 세립토 지반에 대한 적용성을 분석하였다.

2. 현장 개요

2002년 8월 통행을 개시한 강화 초지대교는 강화군 길상면 초지리와 김포시 대곶면 대명리 일원을 잇는 교량으로 총 연장 1.2km에 교폭 17.6m이며, 12개의 교각으로 이루어져 있다. 초지대교 아래의 지반은 원생대 중기에 형성된 충후군으로서 기반암은 퇴적암인 셰일이 분포하고 있으며 김포 방향으로 사암이 암반 하부층에 분포하고 있다. 지층은 지표로부터 해성 퇴적층, 풍화대(풍화잔류토 및 풍화암), 연암 순으로 분포하고 있다. 퇴적층은 매우 연약한 점성토층이며, 풍화토층은 기반암인 셰일이 완전히 풍화되어 점토화된 상태이다(동일기술공사, 1993).

강화도와 김포 사이를 흐르는 염하강은 한강과 임진강에서 흘러 들어온 민물과 이곳 초지대교에서 서해와 합쳐진다. 염하강의 너비는 그리 넓지 않으나 조수간만의 차이가 9미터에 이르고 물살이 빨라 교량하상 및 교각과 인접한 호안에 세굴이 발생할 가능성이 큰 곳으로 판단된다. 수심은 교각마다 다소 차이가 있으나 평균수심은 12.4m이고 최대접근유속은 4m/s이다.

3. 세굴심 측정

세굴심의 정의는 주어진 흐름조건에 대해서 구조물이 없는 경우의 기준 하상선과 구조물이 있는 경우에 측정된 하상선의 수직거리로 정의된다. 이러한 세굴심은 장기하상변동, 단면축소세굴 및 국부세굴 등으로 구성되어 있으며, 특히 교각 등의 구조물에 치명적인 위협을 끼치는 국부세굴은 일반적으로 구조물 주변의 국부세굴이 발생되지 않은 지역의 평균측정치로 이루어지는 기준면(reference surface)과 구조물 주변의 하상선과의 차로 정의된다(그림 1).

강화초지대교의 12개 교각들 중 비교적 수심이 깊은 교각 P4~P9에 대하여 보트와 초음파 센서장비를 이용하여 세굴심을 측정하였다(그림 2). 정확한 교각세굴심의 측정을 위해 대상교각 우물통 기초의 전면과 후면뿐만 아니라 좌우측을 포함한 네 방향 모두에서 수심을 측정하였으며, 국부세굴심을 결정하기 위해 우물통기초의 폭을 고려하여 기초로부터 15m 정도 떨어진 곳의 수심도 네 방향에서 측정하였다. 또한 교각 사이의 수심도 10m 간격으로 측정하였으며, 자세한 측정위치는 그림 3에 나타내었다. 그림 4에는 각 교각 주위의 수심 측정

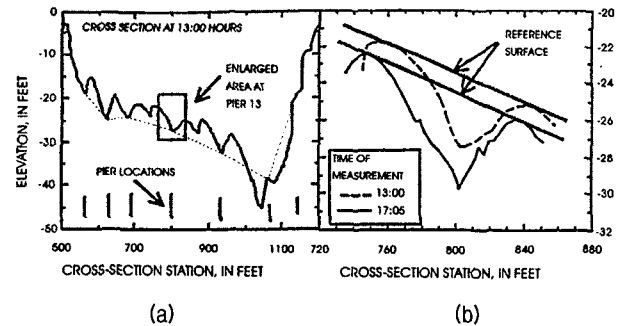


그림 1. 국부세굴심의 정의(After Landers and Muellers, 1996)



그림 2. 현장 세굴심 측정

결과를 나타내었다. 각 교각의 전, 후, 좌, 우 네 방향에 대해 인접하여 나타낸 수치는 각 방향에 대한 교각 인접

지점의 수심을 나타내며, 15m 떨어진 지점에서 측정한 수심은 인접지점의 수심 바로 옆에 나타내었다. 측정된

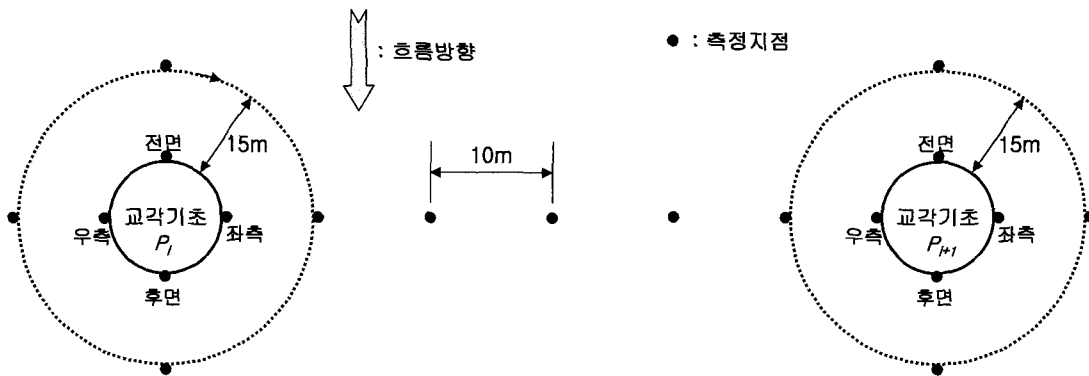


그림 3. 세굴심 측정 방법

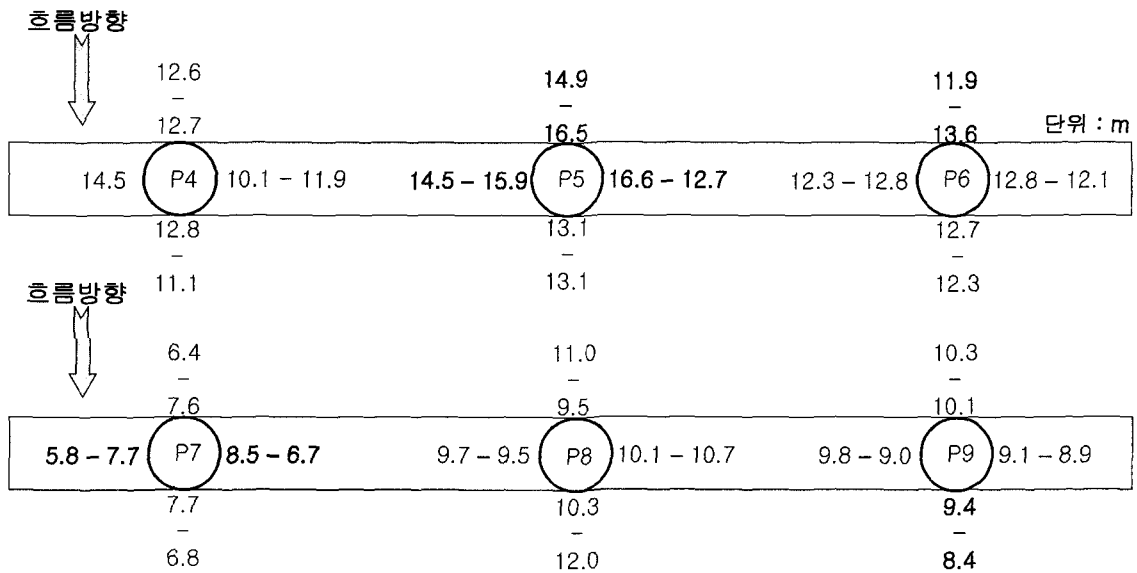


그림 4. 대상교각 주변의 수심 측정결과(P4~P9)

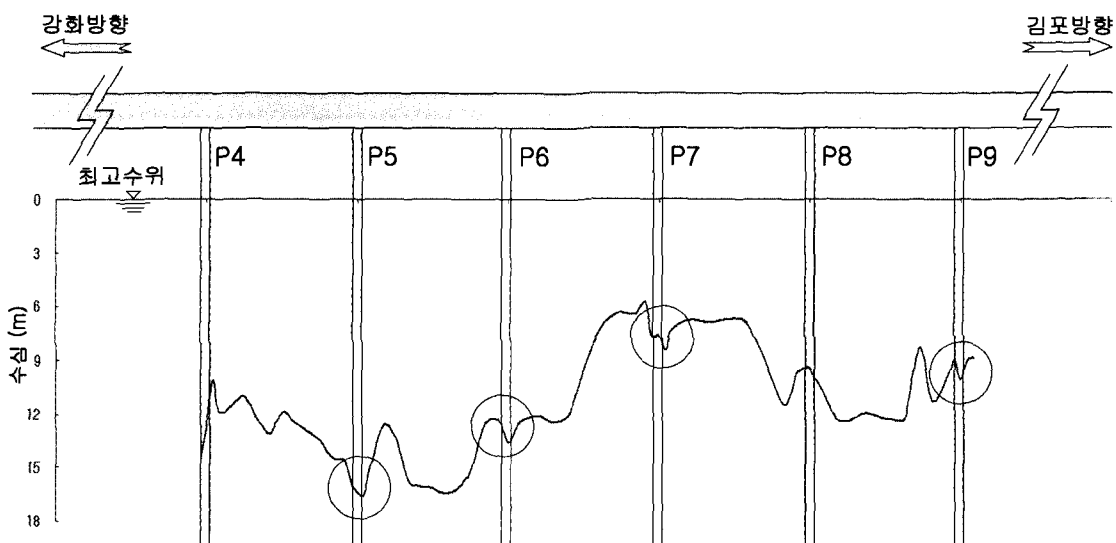


그림 5. P4~P9의 하상단면도

표 1. 최대 세굴심 및 발생위치

교각	P4	P5	P6	P7	P8	P9
발생 위치	후면	좌측	전면	우측	-	좌측
최대 세굴심 (m)	1.7	3.9	1.7	1.9	-	1.0

수심은 조수간만의 영향을 배제하기 위하여 만조시 수심을 기준으로 모두 보정하였다. 그림 5는 측정결과를 토대로 작성한 P4~P9의 하상단면도를 나타낸다.

각 교각들의 국부세굴심을 측정된 결과 P5, P6, P7, P9 등에 세굴이 발생한 흔적이 보이며 P5가 가장 심한 것으로 나타났다. P5의 경우 측정된 네 지점 중 교각 후면을 제외한 세 지점이 모두 1.5m 이상 세굴이 발생하였으며 P6, P7, P9 등도 약 1.0m 이상의 세굴이 발생한 것으로 조사되었다. 그림 5의 하상단면도에서도 이와 같은 경향을 재확인 할 수 있다. 측정된 결과를 바탕으로 각 교각에 대한 기준면을 설정하였으며, 이 기준면과 교각 주변 최저하상면과의 비교를 통해 최대세굴심을 결정하였다(표 1). 최대세굴심은 P5에서 발생한 3.9m이며, 최대세굴심 발생위치는 표 1에 나타난 바와 같이 전면 또는 후면에서 발생하지 않고 예상과는 달리 교각에 따라 각기 다른 다양한 모습을 보여주었다. 이는 단순한 일차원흐름을 가진 하천과는 달리 조석의 영향 등에 따른 것으로 판단된다.

4. 지반 특성

4.1 지반의 물리적 특성

강화초지대교의 지반은 지표로부터 해성 퇴적층, 풍화대(풍화잔류토 및 풍화암), 연암 순으로 분포하고 있

다. 퇴적층과 풍화토층이 각각 1.5~2.4m, 0.0~4.3m 두께로 분포하고 있으며, 퇴적층은 매우 연약한 점성토층이다. 풍화층은 기반암인 세일이 완전히 풍화되어 일부에서는 점토화된 상태를 보여주고 있다.

본 연구에서는 세립토 지반의 침식특성을 세굴해석에 고려하기 위해 강화초지대교 현장에서 외경 76mm, 길이 0.8m의 신월튜브(thin wall tube)를 이용하여 불교란시료를 채취하였다. 시료채취는 P3지점의 상류부 하상바닥을 기준으로 심도 1m~6m까지 연속해서 실시하여 총 5개의 불교란시료를 채취하였다. 비배수전단강도, 함수비 등 기본적인 물성 실험을 실시하였으며, 그 결과를 표 2에 나타내었다. 대부분의 흙은 모래 또는 실트를 함유한 점토로 구성되었으며, 통일분류법에 의해 ML 또는 CL-ML로 분류되었다. 대상지반내의 대표적인 실트질 점토(심도 5.0~5.5m)와 모래질 실트의 입도분포 곡선(심도 2.0~2.5m)을 그림 6에 나타내었다.

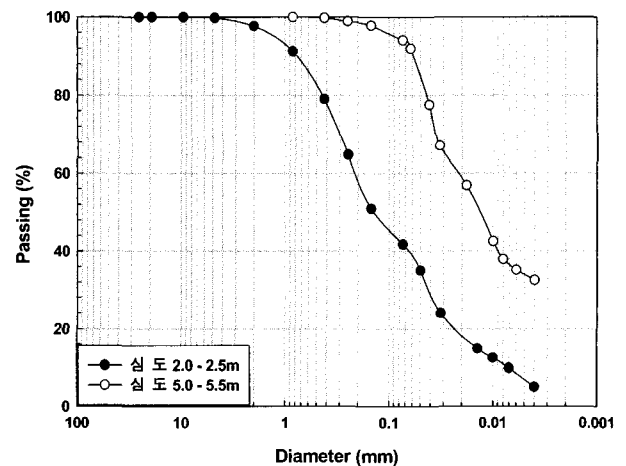


그림 6. 시료의 입도분포곡선

표 2. 시료의 물리적 특성

심도 (m)	비중	액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성지수 (%)	함수비 (%)	건조 단위중량 (kN/m³)	비배수 전단강도 (kN/m²)	#200 통과량 (%)	한계 전단응력* (N/m²)	통일 분류
1.0 ~ 1.5	2.47	25.4	20.9	4.5	49.1	11.0	98.0	54.1	30.7	CL-ML
1.5 ~ 2.0	-	-	-	-	46.6	11.3	132.4	-	12.3	-
2.0 ~ 2.5	2.45	25.4	21.7	3.7	43.1	11.7	215.7	41.8	16.5	ML
2.5 ~ 3.0	-	-	-	-	39.1	12.3	215.7	-	30.7	-
3.0 ~ 3.5	2.50	28.2	22.0	6.2	39.8	12.3	313.8	52.9	19.7	CL-ML
3.5 ~ 4.0	-	-	-	-	37.1	12.7	274.6	-	2.6	-
4.0 ~ 4.5	2.51	25.7	21.7	4.0	34.0	13.2	304.0	82.2	18.9	ML
4.5 ~ 5.0	-	-	-	-	34.7	13.1	289.3	-	20.1	-
5.0 ~ 5.5	2.48	24.7	19.7	5.0	37.3	12.6	245.2	94.1	70.0	CL-ML

[주] * 세굴률 실험결과임

4.2 세굴률 실험

세굴률 실험의 목적은 대상지반 고유의 정량적인 침식함수를 결정하는 것이며, 세굴률은 주어진 유속에 대해 지반이 침식되는 속도(mm/hr)로 정의된다. 이 침식함수는 한계전단응력과 그 이후의 물에 의해 야기되는 전단응력과 지반의 세굴률과의 관계로 구성된다. 한계전단응력은 세굴이 발생하기 시작할 때 지반에 적용되는 전단응력을 의미하며, 본 실험에서는 실험의 정도를 고려하여 세굴률이 1mm/hr가 되기 바로 직전에 흐르는 물에 의해 지반에 작용하는 전단응력을 한계전단응력으로 정의하였다. 세굴률 실험은 다음과 같은 세부절차에 따라 수행된다.

- ① 외경이 76mm인 신월튜브를 이용해 불교란시료를 채취한다.
- ② 시료를 신월튜브와 함께 세굴률 시험기의 구형 관수로 바닥에 장착한 후 구형관을 물로 채워 시료가 완전포화상태가 되도록 한다.
- ③ 시료를 1mm 상승시킨 후 펌프를 구동하여 관수로 내에 일정유속의 흐름을 발생시킨다.
- ④ 상승된 1mm의 시료가 침식되자마자 시료를 1mm씩 상승한다(반복).
- ⑤ 1시간동안 침식된 양(1mm × 상승횟수)을 기록하거나, 또는 1mm의 시료가 침식되는데 걸리는 시간을 기록하여 시간당 세굴률(mm/hr)로 환산한다.
- ⑥ 여러 유속을 적용하여 ①~⑤의 과정을 반복한 후 유속별 세굴률을 산정한다.
- ⑦ 유속별 시료표면에 적용되는 전단응력과 세굴률과

의 관계를 결정한다.

실험결과는 전단응력 τ 에 대한 세굴률 변화곡선으로 구성되며, 관속을 흐르는 물로 인해 흡시료 상부에 야기되는 평균전단응력은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\tau = \frac{1}{8} f \rho V^2 \quad (1)$$

여기서 f 는 Moody 도표(Moody, 1944)로부터 얻어지는 마찰계수, ρ 는 물의 밀도 (1000kg/m^3), V 는 관내의 평균유속(m/s)이다. 마찰계수 f 는 관의 레이놀즈수 $Re (= VD/\nu)$ 와 관의 상대조도 ϵ/D 의 함수이며, ϵ 은 등가조도(mm), D 는 관의 직경(mm), ν 는 물의 동점성계수 ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$, 20°C)이다. 일반적으로 원형단면인 경우 직경 D 는 동수반경의 4배이다. 세굴률 시험기의 단면은 구형이므로 구형에 대한 동수반경을 구한 후 4배를 하여 그 직경으로 한다.

채취된 시료의 상하부의 시료에 대하여 일정한 간격으로 세굴률 실험을 수행하였다. 그림 7은 실험에 사용한 세굴률 실험장치이다(곽기석 등, 2002). 그림 8은 세굴률 실험 후 침식이 발생한 시료의 모습이며, 그림 9에 대상지반 내 대표적인 실트질 점토(심도 5.0~5.5m)와 모래질 점토(심도 2.0~2.5m)의 세굴률-전단응력 관계곡선을 나타내었다. 그림 9에 나타난 바와 같이 점성을 가진 실트질 점토의 경우 모래질 실트에 비해 세굴률은 작고 한계전단응력은 훨씬 큰 것으로 나타나 세굴에 대한 저항이 보다 큰 것으로 판단된다.



그림 7. 세굴률 실험장치

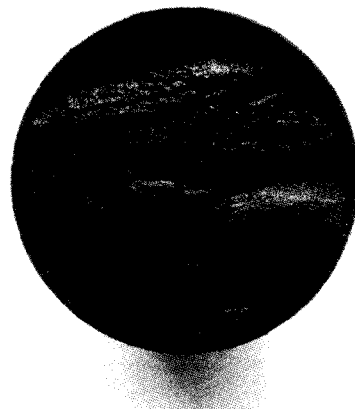
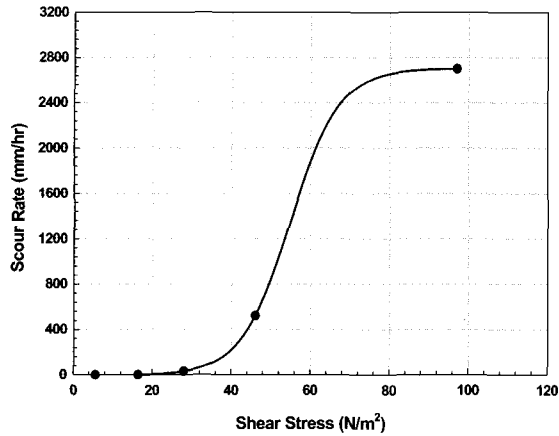
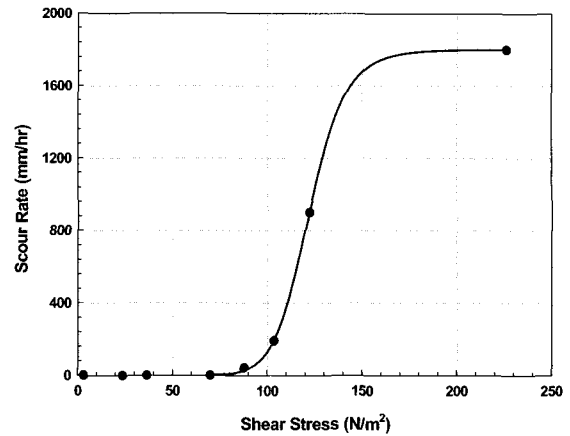


그림 8. 세굴률 실험 후 시료의 모습



(a) 모래질 실트(심도 2.0~2.5m)



(b) 실트질 점토(심도 5.0~5.5m)

그림 9. 세굴률-전단응력 관계곡선

5. 교각세굴 해석

국부 세굴은 교대나 교각 하단부에서의 와류의 형성으로 인해 발생하게 되는데, 국부적으로 상당한 깊이까지 이르기도 하며 때로는 구조물자체의 안정까지 위협하기도 한다. 강화초지대교와 같이 조석의 영향을 받는 교량의 경우에는 먼저 구조물 설치 지점에 대한 조석 영향의 규모, 횡단부의 장기 안정성 및 변화에 대한 수로의 반응을 정성적으로 평가하여야 한다. 이를 바탕으로 수면형과 유량, 유속 등의 수리학적 특성을 산정하게 되며, 세굴량 산정 및 평가절차는 조석의 영향이 없는 경우와 같은 과정을 거친다(Richardson and Davis, 2001). 대상 교각 중 측정세굴심이 가장 큰 P5에 대해 해석을 실시하였으며, 현장의 특징 및 계산에 사용된 설계변수들은 표 3과 같다. 본 현장의 경우 평균 수면이 케이슨 상부에서 1m 아래에 위치하기 때문에 교각 폭 대신에 케이슨 폭을 사용하여 교각 국부 세굴심을 산정하였다.

표 3. 세굴심 산정을 위한 설계변수들

구분	설계변수		
교각	교각 폭	b	5 m
	케이슨 폭	b'	13 m
하상재료	중간입경	d ₅₀	1.8 mm
	최대입경	d ₉₀	15 mm
흐름	수로 형상		직선 수로, 균일 흐름
	흐름 접근각	θ	0
	접근 수심	y ₁	12.4 m
	최대 접근 유속	V ₁	4 m/s

5.1 기존 해석모델(조립토)

기존의 교각세굴 해석모델 중에서 국내 하천설계기준 및 도로설계기준에서 권장하고 있는 CSU공식과 뉴질랜드 방법(Melville and Coleman, 2000), 그리고 Froehlich 공식, Laursen 공식, Neill 공식 등을 적용하였다(하천설계기준, 2002; 도로설계기준 2001).

(1) CSU 공식

CSU(Colorado State University) 공식은 모래를 이용한 실내실험을 통해 개발되었으며, 조립토 지반에 위치한 65개의 실제 교량 현장으로부터 측정된 세굴깊이에 대해 검증되어 그 실효성이 입증된 바 있다. 그 식은 다음과 같다.

$$\frac{y_s}{y} = 2.0 K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{b}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (2)$$

여기서, y_s 는 교각세굴깊이(m), y 는 교각 직상류의 수심(m), K_1 는 교각 형상에 따른 수정계수, K_2 는 흐름 유입각에 따른 수정계수, K_3 는 하상 상태에 따른 수정계수, K_4 는 입자크기에 의한 피복효과에 따른 수정계수, b 는 교각폭(m), Fr 는 교각 직상류의 Froude수(= V/\sqrt{gy}), V 는 교각 직상류의 평균유속(m/s), g 는 중력가속도(9.81m/s²)이다.

(2) 뉴질랜드 방법

국부 세굴심 산정을 위한 뉴질랜드 방법은 조립토를 이용한 많은 실내 실험들로부터 얻어진 연구 결과를 종합, 분석하여 개발되었으며, 그 식은 다음과 같다.

$$y_s = K_{yb} K_s K_\theta K_l K_d K_t \quad (3)$$

여기서, K_{yb} 는 수심-교각폭에 따른 수정계수, K_s 는 기초 형상에 따른 수정계수, K_θ 는 흐름 유입각에 따른 수정계수, K_l 는 흐름 강도에 따른 수정계수, K_d 는 하상 재료의 입자크기에 따른 수정계수, K_t 는 시간지체에 따른 수정 계수이다.

(3) Froehlich 공식

$$\frac{y_s}{b} = 0.32 \phi \left(\frac{b'}{b}\right)^{0.62} \left(\frac{y}{b}\right)^{0.46} Fr^{0.2} \left(\frac{b}{D_{50}}\right)^{0.08} + 1 \quad (4)$$

여기서, ϕ 는 교각의 형상계수(사각형: 1.3, 원형: 1.0, 날카로운 교각: 0.7), b' (= $b \cos \alpha + L \sin \alpha$)는 흐름의 접근각에 대한 직각방향의 투영교각 폭(m), L 은 교각의 길이(m), α 는 흐름 접근각, D_{50} 는 하상입자의 평균 입경(m)이다.

(4) Laursen 공식

$$\frac{b}{y} = 5.5 \frac{y_s}{y} \left[\left(\frac{y_s}{11.5y} + 1 \right)^{1.7} - 1 \right] \quad (5)$$

(5) Neill 공식

$$\frac{y_s}{b} = 1.5 \left(\frac{y}{b}\right)^{0.3} \quad (6)$$

5.2 S-SRICOS 방법 (세립토)

SRICOS 방법에서는 세굴과정이 주로 흐르는 물에 의해 하상과 물의 경계면에 발생하는 전단응력에 주로 의존한다는 개념을 제안하였다. 세굴을 야기시키는 수리학적 매개변수뿐만 아니라 세굴저항능력에 관계되는 대상지반의 침식특성을 세굴해석에 적용할 수 있는 방법이다. S-SRICOS 방법은 계측수문곡선이 없는 경우에 사용할 수 있는 SRICOS방법의 단순화된 형태로써 다음과 같은 단계를 따른다.

① 세굴률 실험을 통해 세굴률-전단응력 변화곡선을 얻

는다.

② 식 (7)과 (8)을 이용하여 설계유속 $V(m/s)$ 에 대해 교각주위에서 발생하는 최대전단응력 $\tau_{max}(N/m^2)$ 과 최대세굴심 z_{max} 을 계산한다.

$$\tau_{max} = 0.094 \rho \cdot V^2 \left(\frac{1}{\log Re_\rho} - \frac{1}{10} \right) \quad (7)$$

$$z_{max} (mm) = 0.18 Re_\rho^{0.635} \quad (8)$$

여기서 $Re_\rho (= Vb/\nu)$ 는 교각레이놀즈수이다.

③ 세굴률-전단응력 변화곡선으로부터, 계산된 τ_{max} 에 상응하는 초기세굴률 \dot{z}_i 를 구한다. 대상지반이 다층지반구조일 경우에는 각 층의 초기세굴률을 두께비에 따라 평균한 값을 사용한다.

④ 식 (9)를 이용하여 등가시간 t_e 를 계산한다. 등가시간 t_e 는 해석기간동안의 수문곡선에 의해 발생한 세굴깊이와 같은 깊이를 생성하기 위해 최대유속이 지속되어야 하는 시간(hours)으로 정의된다.

$$t_e (hrs) = 73 t_{life} (yrs)^{0.126} V (m/s)^{1.706} z_i (mm/hr)^{-0.20} \quad (9)$$

여기서 t_{life} 는 세굴해석기간(years)을 나타낸다.

⑤ 교각세굴깊이를 식 (10)을 이용해서 구한다.

$$y_s (mm) = \frac{t_e (hrs)}{\frac{1}{\dot{z}_i (mm/hr)} + \frac{t_e (hrs)}{z_{max} (mm)}} \quad (10)$$

5.3 계산치와 실측치의 비교

대상현장의 최대유속 4m/s에 대해 교각주위에서 발생하는 최대전단응력은 식 (7)에 의해 44.5N/m²으로 계산되었다. 각 심도별 세굴률-전단응력 관계곡선을 통해 구한 초기세굴률과 해석결과를 표 4에 나타내었다. 지반의 평균 초기세굴률은 139.9mm/hr이며, 이를 이용하여 구한 최대세굴심은 6.7m였다.

표 5에서는 대상구간 중 가장 세굴심이 크게 나타난 P5에 대하여 예측치와 현장에서 조사한 실측치를 비교

표 4. 심도별 초기세굴률(\dot{z}_i), 등가시간 및 세굴심

심도(m)	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0	3.0~3.5	3.5~4.0	4.0~4.5	4.5~5.0	5.0~5.5	평균
\dot{z}_i (mm/hr)	27	94	429	24	14	407	208	56	0	139.9
t_e (hr)	492.3	383.6	283.1	504.0	561.4	286.1	327.3	425.5	-	354.3
z (m)	4.91	6.40	7.32	4.74	3.91	7.30	6.99	5.87	0	6.7

표 5. 교각 P5의 계산 및 실측 최대 세굴심 비교

구 분		계산 최대 세굴심 (m)	실측 최대 세굴심 (m)
SRICOS 방법		6.7	3.9
CSU 공식		16.5	
New Zealand Method		25.3	
하천설계기준	Froehlich 공식	19.7	
	Laursen 공식	13.9	
	Neill 공식	19.2	

하였다. 전반적으로 지반의 침식특성과 시간효과를 고려하지 않는 기존의 교량세굴모델들에 의한 예측치들은 실측치보다 10m 이상 큰 경향을 보였으며, 특히 뉴질랜드 방법은 실측한 세굴심에 비해 무려 6.5배나 과대평가하였으며, 그 차는 21.4m에 달했다. S-SRICOS 방법에 의한 평균 최대세굴심은 6.7m로써 약 2.8m 정도 초과하였으나, 이는 지반 및 수리상황에 대한 다소 부정확한 가정을 고려한다면 타 방법에 비해 합리적인 결과로 보여진다.

6. 결론

본 연구에서는 세립토 지반에 위치한 교량현장에 대해 SRICOS 방법을 포함한 기존 교량세굴 해석모델들의 적용성을 분석하는 사례연구를 수행하였다. 하상이 실트질 점토로 구성된 강화 초지대교를 대상교량으로 선정하여 세굴심 측정을 포함한 현장조사를 실시하였으며, 불교란시료를 채취하여 세굴률실험을 실시하였다. 그 결과를 바탕으로 기존에 제안된 대표적인 교량세굴 해석모델들을 이용하여 주요 교각의 세굴심을 예측하여 실측세굴심과 비교하였다. 국부세굴이 가장 심한 교각은 P5이었으며, 실측 세굴심은 주변 지반의 기준면 해석을 통해 3.9m로 결정되었다. 조립토를 대상으로 개발된 기존의 교량세굴 해석모델들은 전반적으로 실측치를 10m 이상, 최대 21.4m 가량 과대평가한 결과를 보였으나, 지반의 침식특성과 시간효과를 고려하는 SRICOS 방법은 실측세굴심의 1.7배에 해당하는 합리적인 결과를 보여주었다.

사례연구를 통해 세립토 지반에 대한 SRICOS 방법의 국내 적용성이 검증되었으며, 이를 포함한 보다 많은

사례연구를 실시하여 국내의 수리, 수문특성 및 하상특성을 모두 고려할 수 있는 교량세굴 해석시스템 구축의 기초자료로 활용하고자 한다.

참고 문헌

1. 동일기술공사 (1993), 강화 제2대교 가설공사 실시설계 보고서, 동일기술공사.
2. 광기석 (2002), "S-SRICOS 방법: 점성토지반의 교각세굴깊이 예측", 한국지반공학회 논문집, 제18권 2호, pp.1-9.
3. 광기석, 정문경, 정하익, 우제윤, 조삼익 (2002), "세립토의 침식율 측정", 2002 봄학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.337-342.
4. 건설교통부 (2001), 도로설계기준, 건설교통부.
5. 건설교통부 (2002), 하천설계기준, 건설교통부.
6. Briaud, J.L., Ting, F.C.K., Chen, H.C., Cao, Y., Han, S.W. and Kwak, K. (2001a), "Erosion Function Apparatus for Scour Rate Predictions", *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.127, No.2, pp.105-113.
7. Briaud, J.L., Chen, H.C., Kwak, K., Han, S.W. and Ting, F.C.K. (2001b), "Multiflood and Multilayer Method for Scour Rate Prediction at Bridge Piers", *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.127, No.2, pp.114-125.
8. Kwak, K., Briaud, J.L., Cao, Y., Chung, M., Hunt, B. and Davis S. (2002), "Pier Scour at Woodrow Wilson Bridge and SRICOS Method", *Proceedings of the First International Conference on Scour of Foundations*, Vol.1, ISSMGE, College Station, Texas, USA, pp.227-241.
9. Landers M.N. and Mueller, D.S. (1996), "Channel Scour at Bridges in the United States", *Rep. No. FHWA-RD-95-184*, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA.
10. Moody, L.F. (1994), *Friction Factors for Pipe Flow*, Transaction of the American Society of Mechanical Engineers, Vol.66.
11. Melville, B.W. and Coleman, S.E. (2000), *Bridge Scour*, Water Resources Publication, LLC, Highlands Ranch, Colorado, USA.
12. Richardson, E.V. and Davis, S.M. (2001), "Evaluating scour at bridges", *Pub. No. FHWA-NHI-01-001, HEC No.18*, 4th Edition, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, USA.

(접수일자 2003. 9. 17, 심사완료일 2004. 4. 1)