

S-SRICOS 방법 : 점성토지반의 교각세굴깊이 예측

S-SRICOS Method : Prediction of Scour Depth Around Bridge Piers in Cohesive Soils

곽 기석* Kwak, Ki-Seok

Abstract

A new method called S-SRICOS is proposed to predict the local scour depth around bridge piers. The S-SRICOS method is a simplified version of the SRICOS method which was developed to predict the scour depth versus time curve around bridge piers. The SRICOS method which considers the time effect based on the soil properties and the hydraulic parameters can handle a multi-flood hydrograph and multi-layer soil systems with the SRICOS program. An attempt was made to simplify the method to the point where only hand calculations would be required. The concept of the equivalent time was developed for this purpose. The S-SRICOS method requires only 4 parameters such as pier width, design bridge life, design velocity corresponding to the design bridge life, and initial scour rate of the soil. The S-SRICOS method was verified against 55 cases of the scour depth results using the SRICOS method.

요지

본 연구에서는 교각주위에 발생하는 국부세굴깊이를 예측하기 위한 S-SRICOS 방법을 제안하였다. 교각주위의 시간에 따른 세굴깊이 변화곡선을 예측하기 위해 SRICOS 방법이 개발된 바 있다. 이는 흙의 특성에 기초한 시간효과와 수리학적 매개변수를 동시에 고려할 수 있으며, SRICOS 프로그램을 사용하여 실제의 수문곡선과 다층지반구조를 처리할 수 있는 방법이다. S-SRICOS 방법은 이 SRICOS 방법의 단순화된 형태이다. 수계산만으로 세굴깊이를 예측할 수 있도록 SRICOS 방법을 단순화시키는 시도가 이루어졌으며, 그 결과 S-SRICOS 방법에서는 단지 교각폭, 교량 설계빈도, 설계유속, 흙의 초기 세굴속도와 같은 4가지 매개변수만이 요구된다. S-SRICOS 방법은 SRICOS 방법을 사용하여 계산된 55개의 세굴깊이에 적용하여 검증되었다.

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

1. 서론

세굴은 하상 또는 제방의 토사가 흐르는 물의 물리, 화학적 작용에 의해 굴착되어 운반되어지는 현상이다. 흐르는 물의 유속으로 인해 하상에 야기되는 전단응력은 통상 하천유역내에 홍수가 발생하였을 때 급격히 증가하며, 이는 하천경계면의 토사를 침식하여 이동시킨

는 능력을 증가시키는 원인이 된다. 특히, 하천내에 위치한 교각이나 교대와 같은 구조물은 흐름을 가속시키거나 와를 형성시켜 흐름 유형의 변화를 야기함으로써, 그 구조물 주위에 세굴을 발생시킨다.

현재 미국내에는 580,000 개이상의 교량이 건설되어 있으며, 이중 84%의 교량이 하천 또는 해상을 가로지르고 있다. 1950년 이래 파괴된 1,000개의 교량을 대상

* 정희원, 한국건설기술연구원 토목연구부 토질및기초연구그룹 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Civil Engrg. Division, Korea Institute of Construction Technology, kskwak@kict.re.kr)

으로 실시한 조사결과에 의하면 60%의 파괴가 하천 세굴로 인한 하천의 불안정성에 기인하였으며, 이에 비해 지진에 의해 파괴된 교량은 2%에 불과한 것으로 밝혀졌다(Shirhole and Holt, 1991). 특히 교각 세굴이 교량 파괴의 주원인인 것으로 나타났다. 이러한 세굴피해로 인한 고속도로 보수비용은 매년 평균 5천만불 이상에 이르고 있는 실정이며(Lagasse 등, 1995), 이는 정도의 차이만 있을 뿐 국내의 현실과도 무관하지 않을 것으로 판단된다.

현재 국내에서는 교량기초 설계시 세굴깊이를 고려하기 위해 교각주위를 사석을 이용하여 보강하는 방법을 주로 사용하고 있는 실정이다. 하지만 이는 일시적인 방법에 불과하며 영구적인 대책은 될 수 없다. 따라서 사석보호공이 시공된 경우에는 정기적인 조사와 점검이 반드시 필요하다. 또한 보강된 사석이 주변 흙의 세굴로 인한 불안정성에 기인하여, 굴착되어 이동된다면 교량기초에 충격을 주어 교량전체의 피해로 이어질 수도 있다. 미국 등에서는 교량기초 설계 및 시공시 사석보호공은 영구적인 세굴보호공으로 인정하지 않으며, 세굴로 인해 손실될 수 있는 기초의 지지력을 고려하기 위해 기초의 길이를 연장하는 방법을 주로 채택하고 있다.

세굴 현상은 흐르는 물의 침식유발능력(erosive potential)과 흙의 침식저항능력에 관련되며, 세굴되는 흙의 종류에 따라 크게는 점성토 세굴과 비점성토 세굴로 대별될 수 있다. 일반적으로 비점성토 세굴은 중력과 마찰력의 법칙이 지배하는 반면, 점성토 세굴은 중력과 마찰력 뿐만 아니라 흙입자의 물리 화학적 성질에도 의존한다. 교량 주위의 세굴에 대한 연구는 대략 1950년대 후반부터 현재까지 계속되어왔으나, 대부분의 기존 연구들은 비점성토의 세굴현상에 집중되어왔다. 점성토의 세굴은 비점성토의 세굴에 비해 아주 느리고, 또한 흙의 성질에 보다 더 의존한다. 비점성토를 위해 개발된 세굴공식을 점성토에 적용한다면 세굴깊이가 과대하게 평가된다. 따라서 점성토에 대한 세굴해석방법은 수리학적 매개 변수 뿐만 아니라 시간효과와 흙의 성질을 고려할 수 있어야 한다. SRICOS 방법(Briaud 등, 1999, 꽈, 2000)은, 종래의 여러 방법들과는 달리 SRICOS 프로그램을 이용하여 불규칙한 흐름조건과 다층지반구조를 동시에 고려하여 세굴깊이-시간 곡선을 구할 수 있는 방법이다. 이 방법은 실제로 교량주위에 발생한 수문곡선을 반영, 누적된 교각세굴깊이를 시간에 따라 예측할 수 있으며,

현장 세굴 관측치와 비교, 검증되었다.

본 연구는 점성토지반에 위치한 교각 주위의 시간에 따른 세굴깊이 변화곡선을 예측하기 위해 개발된 SRICOS 방법에 기초한다. 이 방법은 시료 채취, 세굴속도 실험, 프로그램을 이용한 해석 등 여러 가지의 단계로 구성되며, 입력자료로 해석기간 동안의 수문곡선을 필요로 한다. 따라서 대상교량 주위의 수문곡선을 구할 수 없다면 적용이 불가능하다는 단점을 가지고 있다. 본 연구는 이러한 SRICOS 방법의 단점을 해소하고자 하는 노력에서 출발하였으며, 보다 간편하고 정확하게 세굴깊이를 예측할 수 있는 모델을 개발하여 교량의 교각기초 설계를 위한 유용한 방법으로 제안하고자 한다.

2. 이론적 배경

SRICOS 방법에서는 세굴과정이 주로 흐르는 물에 의해 하상과 물의 경계면에 발생하는 전단응력에 주로 의존한다는 개념을 제안하였다. 교량현장에서 채취한 불교란토를 침식능 시험기(Erosion Function Apparatus, EFA)를 사용하여 실험하면 전단응력에 따른 세굴속도(scour rate) 변화곡선이 얻어진다. 이 세굴속도-전단응력 곡선이 그 흙의 침식함수(erosion function)이며, 한계 전단응력은 세굴이 시작될 때의 물에 의해 야기되는 전단응력이다. 이 관계와 최대세굴깊이 공식을 이용하면 시간에 따른 세굴깊이의 변화를 나타내는 쌍곡선 함수를 구할 수 있다. SRICOS 방법의 세부 내용은 다음과 같다.

교각주위에서 흐름에 의해 야기되는 최대전단응력 τ_{max} 는 세굴깊이를 예측하는데 있어 아주 중요한 매개 변수중의 하나이다. 실제 하천의 유속은 대략 0.1 m/s에서 3.0 m/s의 범위에 있으며, 이에 따라 교각주위의 하상에 발생하는 최대전단응력은 1 N/m²에서 50 N/m² 정도이다(Briaud 등, 1999). 흐르는 물에 의해 하상에 야기되는 전단응력을 평가하는 데에는 여러 가지 방법들이 제안되어 있다. Munson 등(1990)은 평형방정식에 기초하여 장애물이 없는 개수로와 관수로에 대한 식을 다음과 같이 각각 제안하였다.

$$\tau = r_h S_{EGL} \gamma_w \quad (1)$$

$$\tau = \frac{R}{2} \cdot \frac{\Delta p}{l} \quad (2)$$

여기서 r_h 는 동수반경, S_{EGL} 은 에너지경사, γ_w 는 물의

단위중량, R 은 관의 반경, 그리고 $\Delta p / l$ 은 관길이 l 에 대한 압력강하량이다. 하상에 장애물이 있는 경우, 그 장애물 주위에 발생하는 전단응력은 장애물이 없는 경우보다 아주 크다. Briaud 등(1999)은 수치해석에 기초하여 하상이 평탄한 개수로에서 원통형 교각 주위에 발생하는 최대전단응력에 대한 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\tau_{\max} = 0.094 \rho \cdot v^2 \left(\frac{1}{\log Re} - \frac{1}{10} \right) \quad (3)$$

여기서 τ_{\max} 는 평탄하상에 위치한 교각주위의 최대전 단응력 (N/m^2), ρ 는 물의 밀도 (kg/m^3), v 는 평균유속 (m/s), $Re (= \frac{\nu D}{\nu})$ 는 교각 Reynolds수, D 는 교각폭, 그리고 ν 는 물의 동점성계수 ($10^{-6} m^2/s$, $20^\circ C$ 일 때)이다. 만약 최대전단응력이 흙의 한계전단응력 τ_c 보다 크다면, 세굴이 시작될 것이다. 식 (3)으로부터 구해진 최대전단응력에 상응하는 초기 세굴속도 \dot{z}_i 는 EFA 실험을 통해 얻어진 세굴속도-전단응력 곡선상에서 구해질 수 있다. 이 초기 세굴속도 \dot{z}_i 는 시간에 따른 세굴깊이 변화곡선의 초기 기울기를 나타낸다.

최대세굴깊이 z_{\max} 공식은 일련의 실내모형실험을 통해 개발되었다. 그 실험결과들은 다음의 공식을 산출하였으며, 또한 이 공식은 모래지반에 대해서도 유용하다는 것이 판명되었다 (Briaud 등, 1999).

$$z_{\max} (mm) = 0.18 Re^{0.635} \quad (4)$$

식 (5)의 쌍곡선함수 공식은, 식 (4)를 얻기 위해 수행된 실내모형실험에서 구해진 세굴깊이-시간 변화곡선을 가장 잘 재현해줌으로써 선택되었다.

$$z = \frac{t}{\frac{1}{z_i} + \frac{t}{z_{\max}}} \quad (5)$$

여기서 \dot{z}_i 는 세굴깊이-시간 변화곡선의 초기 기울기이며, z_{\max} 는 시간 $t = \infty$ 일 때의 최대세굴깊이를 나타낸다. 초기 세굴속도 \dot{z}_i 는 식 (1)에 의해 계산된 τ_{\max} 를 이용하여 EFA 실험을 통해 구해진 현장 흙의 세굴속도-전단응력 곡선으로부터 구해진다. 구해진 \dot{z}_i , z_{\max} 와 함께 식 (3)을 이용하면, 시간에 따른 세굴깊이 변화곡선이 구해진다. 따라서 SRICOS 방법을 적용하기 위해서는 교각위치에서의 평균유속, 교각폭, 그리고 흙의 침식함

수 ($\dot{z} vs. t$)에 대한 조사 및 실험이 선행되어야 한다.

SRICOS 방법은 SRICOS 프로그램을 이용함으로써, 불규칙한 유속-시간 이력과 다층지반구조에 대해서도 시간에 따라 변화하는 세굴깊이를 계산해 낼 수 있다. 이 프로그램은 불규칙한 흐름조건과 다층지반구조에 대해 해석할 수 있는 방법론을 포함하고 있을 뿐만 아니라 최대전단응력, 초기 세굴속도, 최대세굴깊이의 계산 등 SRICOS 방법의 모든 계산절차를 자동화시킨다. 이 프로그램에서는 또한 교각 세굴깊이에 영향을 줄 수 있는 교각의 형상, 흐름의 접근각도, 그리고 교각폭에 대한 흐름깊이의 비(장폭교각 효과)도 고려된다. 이러한 효과들은 매시간 단계에서 계산되는 최대세굴깊이에 해당 보정계수를 곱함으로써 반영된다. SRICOS 프로그램의 입력데이터로는 교각의 형상과 폭, 흐름의 접근각도, 흐름깊이, 교각주위의 다층지반구조, 각 지층의 침식함수, 그리고 유속수문곡선이 필요하다. 만일 유속수문곡선을 구할 수 없는 경우에는 유량수문곡선과 더불어 그 교량지점에서의 유속-유량 관계가 별도로 계산되어야 한다. 이 SRICOS 방법을 이용해서 구한 세굴깊이는 10개의 현장 세굴 관측치와 비교해서 검증되었다 (Kwak, 2000).

3. S-SRICOS(Simple-Scour Rate In Cohesive Soils) 방법

전절에서 기술한 바와 같이, SRICOS 방법은 시료 채취, 세굴속도 실험, 프로그램을 이용한 해석 등 여러 가지의 단계로 구성되며, 입력자료로 해석기간 동안의 수문곡선을 필요로 한다. 따라서 대상교량 주위의 수문곡선을 구할 수 없다면 적용이 불가능하다는 단점을 가지고 있다. 본 연구는 SRICOS 프로그램과 해석 전 기간 동안의 수문곡선을 필요로 하는 기존의 SRICOS 방법을 단순화하는 시도에서 출발하였으며, 보다 간편하고 수계 산만으로도 정확하게 세굴깊이를 예측할 수 있는 모델을 개발하여 교량의 교각기초 설계를 위한 유용한 방법으로 제안하고자 한다. 따라서 대상교량 주위에서 발생한 불규칙한 유속-시간 이력인 유속수문곡선을 대체할 수 있는 간단한 수문곡선이 필요하였으며, 이를 위해 수문곡선상의 최대유속 v_{\max} 를 대체 매개변수로 도입하였다. 다시 말해 S-SRICOS 방법은 불규칙한 유속수문곡선을 기 발생한 최대유속을 가진 단순 수문곡선으로 변환시킬 수 있다는 가정에 기초하고 있다. 이를 위해 등가시간 t_e

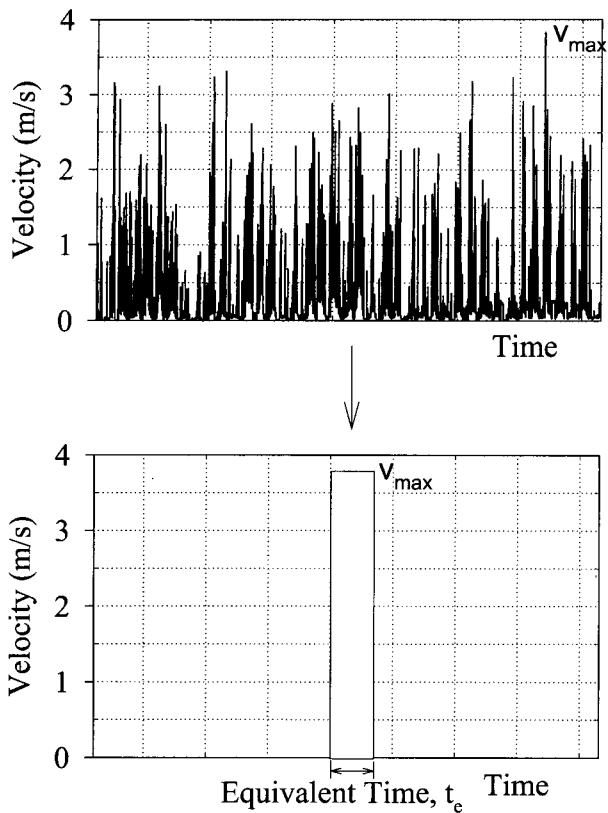


그림 1. S-SRICOS 방법의 기본 가정

의 개념을 도입하였으며, 등가시간의 정의는 해석 전 기간동안의 수문곡선에 의해 발생한 세굴깊이와 같은 깊이를 생성하기 위해 최대유속이 지속되어야 하는 시간이다(그림 1). 등가시간 t_e 는 유속수문곡선상의 흐름특성뿐만 아니라 흙의 성질까지도 반영한다.

등가시간 t_e 의 관계식을 개발하기 위해, 8개의 실제 교량현장으로부터 구한 10개의 교각지점에 대한 각각의 유속수문곡선과 SRICOS 방법으로 계산된 세굴깊이-시간 곡선을 사용하였다. 유속수문곡선과 그에 상응하는 세굴깊이-시간 곡선의 한 예를 그림 2에 나타내었다. 개발될 관계식의 정확도를 높이기 위해 10개의 유속수문곡선을 5년 단위로 분할하여 총 55개의 수문곡선을 만들었으며, 각각의 유속수문곡선에 대한 최대유속과 그 기간동안의 세굴깊이를 구하였다. 대상교량 주위의 흐름특성과 흙의 성질을 반영하기 위해 유속수문곡선의 기간 t_{hydro} , 최대유속 v_{max} 그리고 최대유속에 상응하는 초기세굴속도 \dot{z}_i 를 매개변수로 결정하였으며, \dot{z}_i 의 값은 대상지반이 다층지반구조일 경우에는 각 층의 초기세굴속도값을 두께비에 따라 평균한 값이다. 결정된 매개변수와 식 (5)를 이용하여 등가시간 t_e 를 계산하

였다(표 1).

표 1에 나타난 결과를 이용하여 다중회귀분석을 통해 등가시간 t_e 에 관한 관계식을 다음과 같이 구하였다.

$$t_e (\text{hrs}) = 73 [t_{hydro} (\text{yrs})]^{0.126} [v_{max} (\text{m/s})]^{1.706} \times [\dot{z}_i (\text{mm/hr})]^{-0.20} \quad (6)$$

여기서, t_{hydro} 는 해석기간, v_{max} 는 해석기간동안 발생한 최대유속, \dot{z}_i 는 EFA 시험결과로부터 구한 초기세굴속도이다. 일반적으로 해석기간과 최대유속이 증가하면 최종세굴깊이가 증가하게 되고 이에 따라 등가시간도 증가하게 된다. 반면 초기세굴속도의 증가는 최종세굴깊이를 증가시키는 효과와 더불어 세굴현상을 가속화하여 더욱 빨리 최종세굴깊이에 도달시키게 된다. 따라서 식 (6)은 각각의 매개변수들이 합리적인 경향을 보여주고 있다고 판단된다. 식 (6)을 이용하여 등가시간 t_e 를 재계산하였으며, 재계산된 t_e 와 식 (5)를 이용하여 각각의 경우에 대한 최종세굴깊이를 계산하였으며, 이를 SRICOS 방법을 이용해서 구한 최종세굴깊이와 비교하여 표 2와 그림 3에 나타내었다.

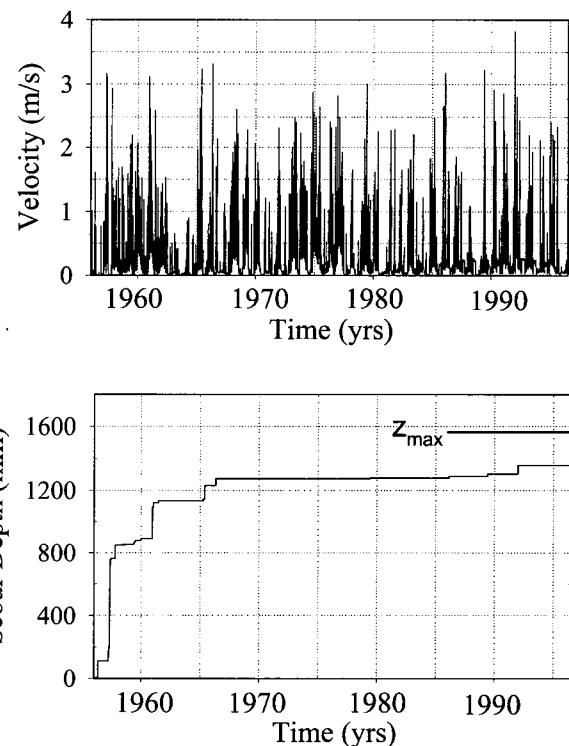


그림 2. 유속수문곡선과 시간에 따른 세굴깊이의 변화(Navasota River Bridge, Bent 5)

표 1. 등가시간 t_e 와 선택된 매개변수

Bridge	t_{hyd} (years)	v_{max} (m/s)	\dot{z}_i (mm/hr)	t_e (hrs)
Navasota, Bent3	5	1.90	8.91	165.40
	10	1.98	8.91	214.08
	15	2.06	8.91	243.60
	20	2.06	8.91	251.02
	25	2.06	8.91	267.66
	30	2.06	8.91	267.93
	35	2.06	8.91	322.35
	41	2.54	8.91	274.05
Navasota, Bent 5	5	3.16	22.39	125.99
	10	3.24	22.39	333.94
	15	3.31	22.39	442.69
	20	3.31	22.39	448.07
	25	3.31	22.39	468.58
	30	3.31	22.39	468.58
	35	3.31	22.39	596.67
	41	3.82	22.39	427.89
Brazos, Bent 3	5	4.20	65.26	540.97
	10	4.20	65.26	543.37
	15	4.20	65.26	595.91
	20	4.20	65.26	595.91
	25	4.20	65.26	595.91
	33	4.20	65.26	812.01
San Jacinto, Bent 43	5	1.73	17.44	271.86
	10	3.07	17.44	196.25
Trinity, Bent 3	5	1.40	50.60	137.74
	10	1.40	50.60	146.29
	15	2.00	50.60	280.21
	17	2.00	50.60	292.96
Trinity, Bent 4	5	3.22	39.82	257.28
	10	3.22	39.82	309.94
	15	4.06	39.82	311.18
	17	4.06	39.82	368.93
San Marcos, Bent 9	5	1.12	61.75	25.42
	10	1.12	61.75	25.78
	15	1.50	61.75	39.97
	20	1.50	61.75	43.47
	25	1.50	61.75	44.84
	30	1.50	61.75	46.55
	35	1.50	61.75	49.85
	40	1.50	61.75	51.66
Sims, Bent 3	3	0.95	2.69	152.84
Bedias 75, Bent 26	5	2.15	127.44	103.53
	10	2.17	127.44	143.49
	15	2.17	127.44	161.32
	20	2.17	127.44	188.14
	25	2.17	127.44	224.44
	30	2.17	127.44	263.28
	35	2.17	127.44	263.28
	40	2.17	127.44	281.80
	45	2.19	127.44	289.03
	50	2.19	127.44	289.03
Bedias 90, Bent 6	5	1.36	44.25	65.36
	10	1.37	44.25	109.04
	15	1.54	44.25	103.68
	18	1.54	44.25	104.26

표 2. SRICOS방법과 S-SRICOS 방법에 의한 세굴깊이의 비교

Bridge	$t_{hyd.}$ (years)	$t_{equiv.}$ (hrs)	Scour Depth z (mm)	
			SRICOS	S-SRICOS
Navasota, Bent3	5	172.56	563.8	572.2
	10	202.04	628.5	615.7
	15	227.44	666.2	651.5
	20	235.84	672.3	659.1
	25	242.56	685.1	664.9
	30	248.20	685.3	669.6
	35	253.06	720.2	673.5
	41	368.88	757.4	823.0
Navasota, Bent 5	5	442.06	871.6	862.5
	10	433.05	1094.0	1045.4
	15	450.00	1148.5	1108.1
	20	465.56	1150.1	1115.3
	25	476.77	1155.9	1122.4
	30	487.85	1155.9	1125.8
	35	488.24	1183.9	1139.5
	41	615.96	1238.8	1289.2
Brazos, Bent 3	5	449.04	2527.9	2489.2
	10	490.01	2528.7	2507.2
	15	515.42	2544.7	2517.6
	20	534.45	2544.7	2524.3
	25	549.69	2544.7	2529.5
	33	568.44	2589.8	2536.7
San Jacinto, Bent 43	5	125.86	1121.7	947.1
	10	373.08	1298.0	1661.4
Trinity, Bent 3	5	73.51	1134.7	972.2
	10	80.22	1145.6	995.8
	15	152.63	1517.9	1394.0
	17	155.08	1525.0	1397.8
Trinity, Bent 4	5	307.84	1878.4	1967.7
	10	337.35	1938.8	1987.3
	15	534.27	2193.2	2372.9
	17	544.57	2255.7	2373.6
San Marcos, Bent 9	5	57.28	672.4	637.3
	10	62.51	676.4	662.7
	15	94.84	899.8	1075.2
	20	98.56	927.0	1082.2
	25	101.55	936.9	1087.6
	30	104.12	948.7	1091.3
	35	106.54	969.9	1092.7
	40	108.54	980.7	1095.1
Sims, Bent 3	3	62.97	286.5	143.7
Bedias 75, Bent 26	5	126.98	1519.3	1540.7
	10	139.79	1578.1	1568.7
	15	146.94	1593.3	1576.6
	20	152.14	1611.1	1582.3
	25	156.27	1628.8	1586.7
	30	159.73	1642.6	1590.2
	35	162.86	1642.6	1592.6
	40	165.56	1647.9	1594.9
Bedias 90, Bent 6	45	170.24	1659.0	1608.4
	50	172.52	1659.0	1610.0
	5	72.46	604.5	602.4
	10	79.96	662.4	617.7
	15	100.44	700.7	697.3
	18	102.78	701.3	699.8

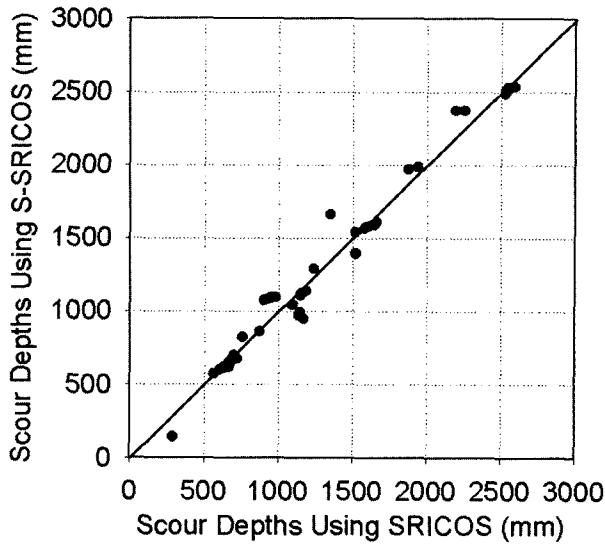


그림 3. SRICOS 방법과 S-SRICOS 방법에 의한 세굴깊이의 비교

그림 3에 나타난 바와 같이, 2가지 방법을 이용해서 구한 세굴깊이는 거의 모든 경우에 매우 가까운 결과를 보여주었으며, 결정계수는 0.98이었다. 따라서 본 연구에서 개발된 S-SRICOS 방법은 세굴깊이를 보다 간편하고 정확하게 산정할 수 있는 새로운 모델임이 검증되었으며, 교량 기초의 설계와 관리를 위한 유용한 한 방법으로 제안될 수 있으리라고 판단된다.

4. S-SRICOS 방법의 적용

전절에서 설명한 바와 같이, S-SRICOS 방법은 기존 교량에 대한 세굴해석을 수행하여 그 세굴깊이를 재현하는 데에 적용될 수 있다. 하지만 이 방법 개발의 주목적은 세굴깊이의 재현보다는 교량기초 설계시 세굴깊이를 미리 예측하여 기초의 길이에 그 영향을 반영하는 데 사용될 수 있는 유용한 예측방법으로 제안하는 데에 있다.

교량기초 설계를 위해 세굴깊이를 예측하는 경우, S-SRICOS 방법을 적용하기 위해서는 해석기간 t_{hydro} 와 최대유속 v_{max} 는 교량의 설계빈도 t_{life} 와 그 설계빈도에 따른 설계유속 v_{design} 의 개념으로 대체되어야 한다. 따라서 식 (6)은 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$t_e (\text{hrs}) = 73 [t_{life} (\text{years})]^{0.126} [v_{design} (\text{m/s})]^{1.706} \times [z_i (\text{mm/hr})]^{-0.20} \quad (7)$$

S-SRICOS 방법의 세부적인 적용순서는 다음과 같다.

- 1) 결정된 교량의 설계빈도 t_{life} 에 따른 설계유속 v_{design} 을 결정한다.
- 2) 식 (3)과 (4)를 이용하여 최대전단응력 τ_{max} 와 최대 세굴깊이 z_{max} 를 계산한다.
- 3) 계산된 τ_{max} 를 이용하여 세굴속도-전단응력 변화곡선 (EFA)으로부터 z_i 를 구한다.
- 4) 식 (7)을 이용하여 등가시간 t_e 를 계산한다.
- 5) 설계세굴깊이 z_{design} 을 다음의 식을 이용해서 구한다.

$$z_{design} (\text{mm}) = \frac{t_e (\text{hrs})}{\frac{1}{z_i (\text{mm/hr})} + \frac{t_e (\text{hrs})}{z_{max} (\text{mm})}} \quad (8)$$

5. 초기세굴속도의 적용

S-SRICOS 방법에서 초기세굴속도 z_i 는 지반의 성질을 반영해주는 아주 중요한 매개변수중의 하나이다. 전절에서 기술한 바와 같이, 초기세굴속도는 EFA 실험을 통해 얻어지는 세굴속도-전단응력 변화곡선으로부터 구해진다.

전형적인 EFA 시험의 결과들을 그림 4, 5, 6에 나타내었으며, 시험에 사용된 흙의 토성치는 표 3에 나타내었다. 대부분의 경우 침식함수의 형상은 그림 4와 같이 포물선 증가형상을 보였다. 하지만 그림 5와 같이 입상토가 많은 부분을 차지하고 있는 흙에 대해서는 거의 직선 형상을, 그리고 미세한 균열이 많은 점토인 경우에는 급격히 증가하는 양상을 보였다(그림 6). 이는 실험 중 확인된 바와 같이 개개의 입자가 침식된 것이 아니라 점토내의 균열에 의해 분리된 작은 둉어리째 침식되는 경향에 기인한다.

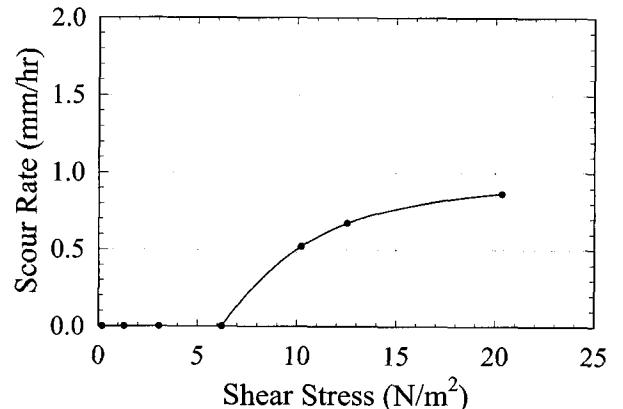


그림 4. 세굴속도-전단응력 변화곡선(Navasota River Bridge, 1.8-2.4m 깊이)

표 3. 시험재료의 토성치

Soil Properties	Bridge	Navasota		Brazos	San Jacinto			Sims
	Layer No.	1	2	1, 2	1, 2	3	4	1
	Depth (m)	1.8–2.4	4.9–5.5	13.0–13.7	5.3–6.1	6.9–7.6	7.68.4	3.0–3.7
Liquid Limit (%)	27.72	26.42	24.49	22.04	—	37.50	84.16	
Plastic Limit (%)	14.29	6.259.41	9.09	—	12.71	16.05	68.11	
Plasticity Index (%)	13.43	20.17	15.08	12.95	—	24.79	25.25	
Water Content (%)	19.80	26.60	17.32	151.57	26.88	27.75	0.0012	
Mean Diameter, D_{50} (mm)	0.125	—	0.265	—	—	—	23.00	
Shear Strength (kPa)	43.10	32.10	45.49	23.94	4.78	21.53	19.60	
Unit Weight (kN/m^3)	19.20	18.80	20.20	19.60	16.70	20.80	99.07	
% Passing #200 Sieve	26.20	57.70	30.09	50.36	60.71	94.50		
Soil Properties	Bridge	Trinity		San-Marcos		Bedias 75		Bedias 90
	Layer No.	1	2	1	2	1	2	1
	Depth (m)	10.7–11.4	13.0–13.7	6.1–6.6	7.0–7.5	6.1–6.9	6.9–7.6	1.5–2.3
Liquid Limit (%)	—	42.24	41.34	40.31	47.86	—	55.08	
Plastic Limit (%)	—	8.70	16.67	19.18	13.56	—	15.79	
Plasticity Index (%)	—	33.54	24.67	21.13	34.30	—	39.29	
Water Content (%)	7.67	22.22	22.00	24.40	18.07	17.50	23.63	
Mean Diameter, D_{50} (mm)	6.00	—	—	—	0.048	0.130	0.040	
Shear Strength (kPa)	9.57	11.48	27.30	29.67	10.00	32.00	62.00	
Unit Weight (kN/m^3)	22.00	22.10	19.60	20.20	20.04	21.30	19.60	
% Passing #200 Sieve	11.52	68.40	78.30	73.40	86.81	35.14	91.31	

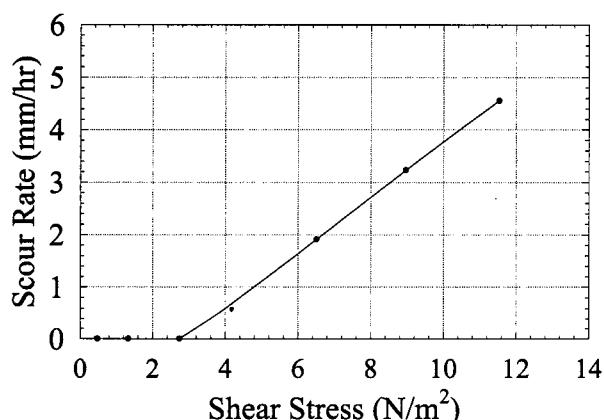


그림 5. 세굴속도-전단응력 변화곡선(Trinity River Bridge, 13.0–13.7m 깊이)

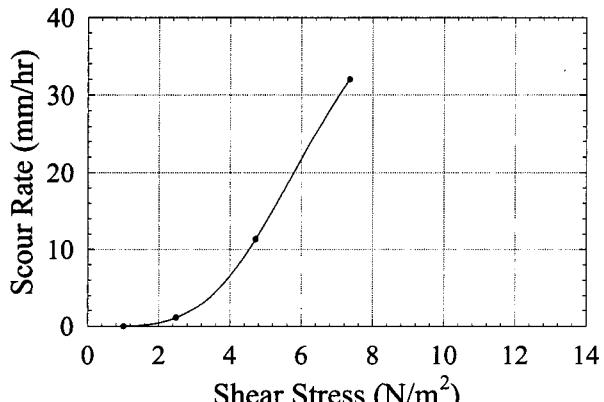


그림 6. 세굴속도-전단응력 변화곡선(Trinity River Bridge, 10.7–11.4m 깊이)

그림 7에는 #200체 통과율이 50%가 넘는 세립토에 대한 EFA 실험결과를 모두 도시하였다. 그림 7에 나타난 바와 같이 침식함수는 평균입경의 크기에 따라서 확연히 2개의 곡선으로 구분되는 경향을 보였다. 또한 같은 세립토라 하더라도 소성지수가 낮거나 모래질 점토인 경우에는 전단응력에 대한 침식속도의 증가가 아주 크게 나타난 반면, 소성지수가 큰 경우에는 상대적으로 작은 증가율을 보였다. 이는 소성지수와 #200체 통과율, 그리고 평균입경 등의 토성치가 침식능에 아주 큰 영향을 미치는 증거로 판단된다. 토성치와 세굴속도와의 관계는 향후 계속되는 실험을 통해 연구해야 할 과제이며,

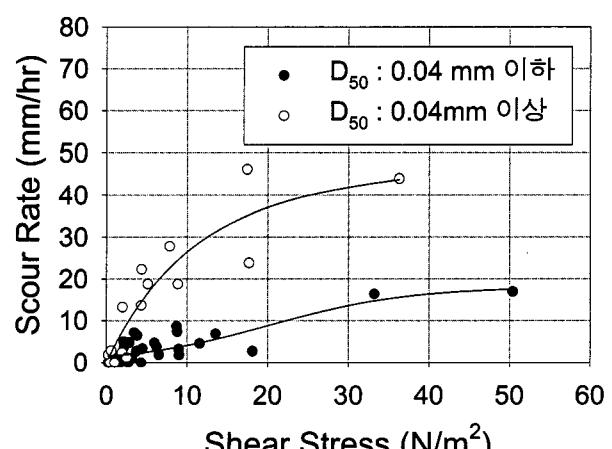


그림 7. 평균입경의 크기에 따른 침식함수의 변화(#200 통과율: 50% 이상)

이를 통해 토성치만으로 세굴속도를 구할 수 있는 관계를 정립하는 바탕이 될 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 점성토지반에 위치한 교각 주위의 시간에 따른 세굴깊이 변화곡선을 예측하기 위해 개발된 SRICOS 방법을 단순화하는 시도에서 출발하여, 보다 간편하고 수계산만으로도 정확하게 세굴깊이를 예측할 수 있는 새로운 모델인 S-SRICOS 방법을 개발하여 교량의 교각기초 설계를 위한 유용한 방법으로 제안하고자 한다. 대상교량 주위에서 발생한 불규칙한 유속-시간 이력인 유속수문곡선을 대체하기 위해 등가시간 t_e 라는 새로운 개념을 도입하였다. 그 결과 S-SRICOS 방법에서는 단지 교각폭, 교량 설계빈도, 설계유속, 흙의 초기세굴속도와 같은 4가지 매개변수만이 요구된다. S-SRICOS 방법은 SRICOS 방법을 사용하여 계산된 55개의 세굴깊이에 적용하여 검증되었다.

참 고 문 헌

1. Briaud, J.-L., Ting, F., Chen, H. C., Gudavalli, S. R., Perugu, S., and Wei, G. (1999), "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. 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.
3. Lagasse, P. F., Schall, J. D., Johnson, F., Richardson, E. V., and Chang, F. (1995), "Stream stability at highway structures", *Report No.FHWA-IP-90-014 (HEC 20)*, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA.
4. Munson, B. R., Yound, D. F., and Okiishi, T. H. (1990), *Fundamentals of fluid mechanics*, Wiley, New York, USA.
5. Shirole, A. M. and Holt, R. C. (1991), "Planning for a comprehensive bridge safety assurance program", *Trans. Res. Rec.* No.1290, Transportation Research Board, Washington, DC, USA, pp.137~142.

(접수일자 2001. 5. 23, 심사완료일 2002. 4. 8)