

## 세립토의 침식능에 대한 토질정수의 영향

### Influence of Soil Properties on Erodibility of Fine-grained Soils

곽 기 석<sup>1</sup> Kwak, Ki-Seok

이 주 형<sup>2</sup> Lee, Ju-Hyung

박 재 현<sup>2</sup> Park, Jae-Hyun

정 문 경<sup>3</sup> Chung, Moon-Kyung

배 규 진<sup>4</sup> Bae, Gyu-Jin

#### Abstract

Many researches have been devoted to developing a model for bridge scour analysis which can consider both of the erosive potential of flowing water and the relative ability of the soil to resist erosion. The scour rate apparatus that can quantify the erosion rate of the soil has been developed by virtue of the extensive efforts. The scour rate tests were performed on 3 types of the remolding clay samples using the scour rate apparatus. The erosion characteristics of the fine-grained soil samples according to the variation of the remolding loads are examined and the correlation between the soil properties and erosion rates is also analyzed. The results of the tests and analyses show that the soil properties, especially the dry unit weight and the shear strength of the soil have great influence on the erosion characteristics.

#### 요 지

흐르는 물의 침식유발능력과 지반의 침식저항능력을 동시에 고려할 수 있는 새로운 교량세굴해석 모델을 개발하기 위한 많은 연구가 진행되었으며, 이러한 노력의 일환으로 지반의 침식율을 정량화할 수 있는 세굴률 시험기가 개발되었다. 본 연구에서는 세굴률 시험기를 이용하여 3종의 재성형 점토에 대해 세굴률 실험을 실시하였다. 재성형 점토의 세굴률 실험을 통해 성형하중의 변화에 따른 세립토의 침식특성을 분석하였으며, 또한 토성치와 침식율의 상관관계 분석을 시도하였다. 실험과 해석을 통해, 토질정수 중 특히 단위중량과 전단강도는 지반의 침식특성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

**Keywords :** Erodibility, Erosion rate, Fine-grained soils, Scour, Shear stress

#### 1. 서 론

세굴현상은 흐르는 물에 의한 침식유발능력과 지반의 침식저항능력과 상호작용에 의하여 발생하는 자연현상이며, 하상물질의 종류에 따라 다르게 나타나는

침식저항능력으로 인해 상이한 양상을 띠게 된다. 일반적으로 조립토의 침식저항능력은 중력과 마찰력이 지배하여 비교적 단순한 반면, 세립토의 침식저항능력은 중력과 마찰력 뿐만 아니라 흙입자의 물리·화학적 성질 및 전기적 성질에도 의존하여 매우 복잡한 양상

1 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engr. Research Dept., Korea Institute of Construction Technology, kskwak@kict.re.kr)

2 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원 (Member, Researcher, Geotechnical Engr. Research Dept., KICT)

3 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원 (Member, Research Fellow, Geotechnical Engr. Research Dept., KICT)

4 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 연구위원 (Member, Senior Research Fellow, Geotechnical Engr. Research Dept., KICT)

을 보인다. 따라서 조립토에서는 하상에 작용하는 유체의 침식유발능력이 급격히 상승하는 경우, 단시간 내에 세굴이 발생하여 최대세굴심에 도달하는 반면, 세립토는 침식저항능력이 조립토에 비해 크고 저항메커니즘이 달라 상대적으로 느리게 침식이 진행된다.

교량 주위의 세굴에 대한 연구는 대략 1950년대 후반부터 현재까지 계속되어왔으나, 대부분의 기존 연구들은 수리학자들에 의해 주도되어 흐르는 물에 의한 침식유발능력에 집중되었으며, 이로 인해 기존의 세굴해석 모델들은 지반의 침식저항능력을 고려하지 못하는 것이 대부분이다. 현재 교량세굴의 해석 및 설계를 위해서는 미 연방도로국에서 발간한 교량세굴 기술매뉴얼인 HEC-18(Hydraulic Engineering Circular-18)을 주로 참고하고 있으며, HEC-18에서도 주로 조립토에 대해 수행한 실내실험에 기초한 침식유발능력 위주의 해석모델들을 소개하고 있다. 다만 최근의 개정판에서는 침식저항능력에 관한 활발한 연구로 인해 세립토 지반과 풍화암 지반의 침식저항능력을 이용한 세굴심 산정모델들도 함께 소개하고 있다(Richardson과 Davis, 2001).

본 연구는 세립토 지반에 위치한 교각 주위의 시간에 따른 세굴깊이 변화곡선을 예측하기 위해 개발된 SRICOS 방법(Briaud 등, 1999)에 기초한다. SRICOS 방법은 세굴과정이 흐르는 물에 의해 하상과 물의 경계면에 발생하는 전단응력에 주로 의존한다는 개념에 기초하고 있으며, 지반의 침식저항능력과 흐름의 침식유발능력을 모두 고려하고 있다. 이 모델의 일부로서, 세굴률 시험기가 세립토의 침식능을 정량화하기 위해 개발되었다(Briaud 등, 2001). 세굴률 실험의 목적은 지표에 야기되는 전단응력과 지반의 침식율과의 관계를 보여주는 곡선을 얻는 것이며, 이는 세굴이 시작될 때의 전단응력인 한계전단응력과 그 이후의 침식율을 전단응력의 증가에 따라 나타내준다.

본 연구에서는 세립토의 세굴예측방법을 발전시키기 위하여 세립토 종류별 세굴특성을 실험적으로 연구하였다. 세굴률 실험을 실시하여 흐름에 대한 침식특성을 정량화하고, 세립토의 침식특성과 토성치의 상관관계를 분석하여 국내 지반의 종류 및 특성에 맞는 세굴 평가시스템의 정립에 기여하고자 한다. 세굴률 시험기를 이용하여 카올리나이트, 불클레이, 벤토나이트 등 3종의 재성형 시료들에 대하여 세굴률 실험을 실시하고 침식특성을 분석하였다.

## 2. 세굴에 따른 전단응력 변화특성

세립토의 세굴과정은 흐르는 물에 의해 하상과 물의 경계면에 발생하는 전단응력에 주로 의존한다. 따라서 교각주위에서 발생하는 최대전단응력  $\tau_{max}$ 는 세굴심을 예측하는데 있어 가장 중요한 매개변수이다. 실제 하천의 유속은 대략 0.1m/s에서 3.0m/s의 범위에 있으며, 이에 따라 하상에 발생하는 최대전단응력은 1N/m<sup>2</sup>에서 50N/m<sup>2</sup> 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,  $\gamma_w$ 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 개발하였다.

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

여기서,  $Re$ 는 교각 Reynolds수이며  $VD/\nu$ 로 표현된다.  $V$ 는 평균유속,  $D$ 는 교각직경,  $\nu$ 는 동점성계수 ( $10^{-6} m^2/s$ , 20°C인 경우), 그리고  $\rho$ 는 물의 밀도이다. 이 최대전단응력이 흙이 저항할 수 있는 한계전단응력보다 클 때 세굴이 시작된다.

세굴이 진행됨에 따라 교각주위의 세굴심은 증가하게 되고, 세굴공 바닥의 전단응력  $\tau_b$ 는 식 (3)에 의해 구해지는 세굴이 발생하기 이전의 최대전단응력에서 점점 감소하게 된다. 따라서  $\tau_b$ 는 세굴심의 함수이며, 세굴심은 시간에 따라 증가하므로 시간에 따른 세굴심 변화곡선의 도함수와 세굴률 실험에 의해 구해지는 침식율-전단응력 변화곡선을 통해 나타낼 수 있다. SRICOS 방법에서는 세굴심-시간 변화곡선을 실내모형실험을 통해 다음과 같은 쌍곡선 함수로 표현하고 있다.

$$z = \frac{t}{\frac{1}{z_i} + \frac{t}{z_{max}}} \quad (4)$$

여기서  $z_i$ 는 세굴심-시간 변화곡선의 초기 기울기로서 침식율로 정의되며 본 연구에서 수행하는 세굴 실험을 통해 정량화될 수 있다. 또한  $z_{max}$ 는 시간  $t = \infty$  일 때의 최대세굴깊이를 나타낸다(그림 1). 그림 1에서 나타낸 바와 같이 세굴깊이  $z$ 의 시간  $t$ 에 대한 도함수는 침식율  $\dot{z}$ 와 같으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dz}{dt} = \dot{z} = \frac{\frac{1}{z_i}}{\left(\frac{1}{z_i} + \frac{t}{z_{max}}\right)^2} \quad (5)$$

식 (5)를 이용하면 임의의 시간  $t$ 에서의 침식율  $\dot{z}$ 를 구할 수 있으며, 이는 또한 침식율-전단응력 변화곡선에서 다음과 같은 전단응력의 함수로도 나타낼 수 있다.

$$\dot{z} = f(\tau, \tau_c) \quad (6)$$

또한 시간  $t$ 는 다음과 같이 식 (4)의 쌍곡선 함수로부터 세굴심  $z$ 의 함수로 표현할 수 있다.

$$t = \frac{\frac{z}{z_i}}{1 - \frac{z}{z_{max}}} \quad (7)$$

따라서 식 (7)을 식 (5)에 대입하여 침식율  $\dot{z}$ 를 구하고, 이 값을 식 (6)에 대입하면, 결국 세굴공 바닥의 전단응력  $\tau_b$ 는 세굴심  $z$ 의 함수로 표현할 수 있다.

$$\tau_b = f(z) \quad (8)$$

그림 2는 폭이 1.0m인 교각이 3.0m/s의 설계유속을 경험했을 때의 시간에 대한 교각세굴심의 변화를 보여

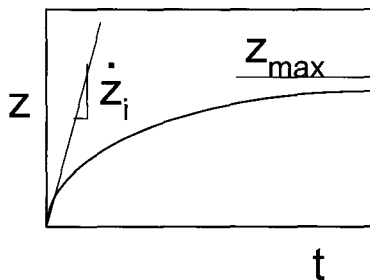


그림 1. 세립토지반의 시간에 따른 세굴심의 변화

준다.  $z_i$ 는 그림 2에 나타난 바와 같이 세굴깊이-시간 변화곡선의 초기 기울기이며, 침식율  $\dot{z}$ 는 임의의 시간  $t$ 에서의 그 곡선의 기울기이다(점 A). 이 경우에 대한 세굴공 바닥에서의 전단응력  $\tau_b$ 는 세굴심의 함수로써 그림 3에 나타나 있다. 세굴이 시작될 때( $z = 0$ )  $\tau_b$ 는 최대전단응력이 되며, 세굴심이 증가함에 따라 급격히 감소하는 경향을 보인다. 세굴심이 최대세굴심  $z_{max}$ 에 도달하게 되면  $\tau_b$ 는 더 이상 감소하지 않고 흙의 한계 전단응력  $\tau_c$ 와 같아지게 된다. 이 때 침식을 유발하는 전단응력과 흙의 한계전단응력이 평형을 이루게 되어 세굴은 더 이상 진행되지 않는다.

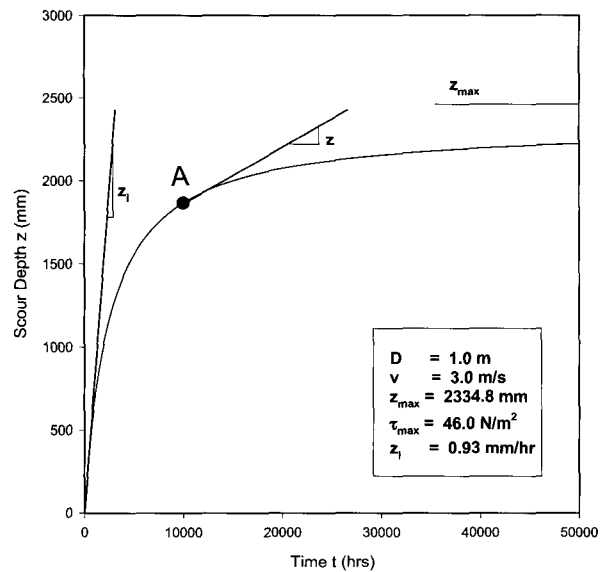


그림 2. 세굴심-시간 변화곡선의 예

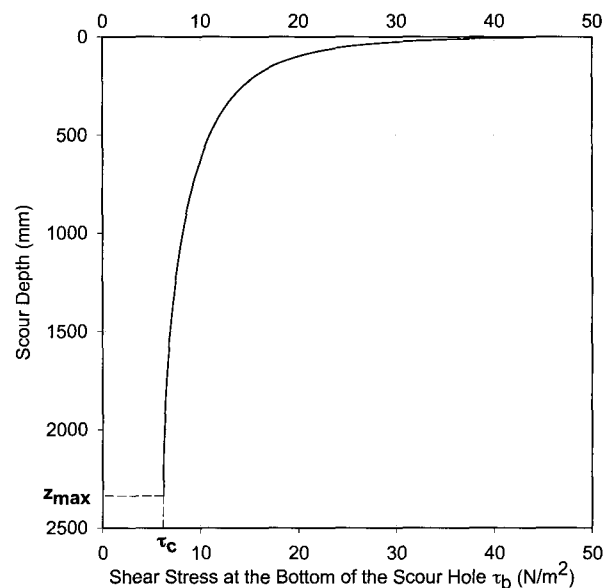


그림 3. 세굴심의 변화에 따른 세굴공 바닥의 전단응력의 변화

### 3. 세굴률 실험

#### 3.1 세굴률 시험기

지반의 침식률을 정량화하기 위해 세굴률 실험에 사용되는 흙시료는 외경이 76mm인 표준 박관튜브(thin wall tube)를 이용하여 현장에서 불교란상태로 시추하거나 실험실에서 균질하게 재성형한다. 박관튜브의 한쪽 끝을 관수로 역할을 하는 구형관의 바닥에 연결하여 시험기에 장착한다. 튜브 내의 흙은 피스톤으로 한번에 1mm씩 관수로내로 압출되며, 돌출된 1mm의 흙이 관속을 흐르는 물에 의해 침식된다(그림 4). 유속을 달리 하여 침식되는 흙의 양과 시간을 측정하고, 적용된 유속에 의해 흙의 표면에 발생하는 전단응력을 계산함으로써 지반의 침식률을 하상에서 발생하는 전단응력에 대해 정량화한다. 관속을 흐르는 물의 유속은 최소 0.1m/s에서 최대 6m/s까지 재현할 수 있다. 세굴률 실험의 세부절차는 다음과 같다.

- ① 외경이 76mm인 박관튜브를 이용해 불교란시료를 채취하거나 실험실에서 재성형한다.
- ② 시료를 박관튜브와 함께 세굴률 시험기의 구형 관수로 바닥에 장착한 후 구형관을 물로 채워 시료가 완전포화상태가 되도록 한다.
- ③ 시료를 1mm 상승시킨 후 펌프를 구동하여 관수로

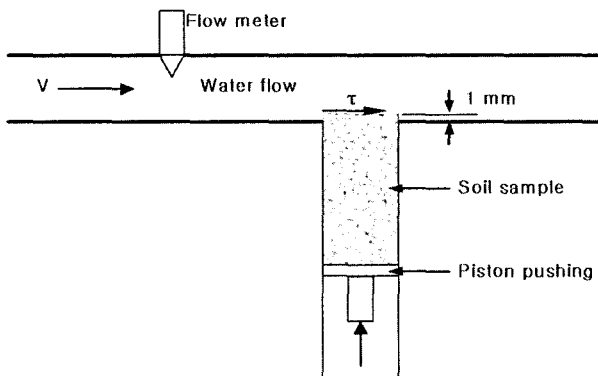


그림 4. 세굴률 시험기의 모식도

표 1. 시료의 물리적 특성

구분	비중	액성 한계	소성 한계	소성 지수	통일 분류	D <sub>50</sub> (μm)	비고
카올리나이트	2.53	49	26	23	CL	11.2	고령토
볼클레이	2.49	58	28	30	CH	2.9	유기물을 함유한 카올리나이트계 충적점토
벤토나이트	2.47	91	40	51	CH	33.2	칼슘계 벤토나이트

내에 일정유속의 흐름을 발생시킨다.

- ④ 1시간동안 세굴된 양(1mm×상승횟수)을 기록하거나, 1mm의 시료가 세굴되는데 걸리는 시간을 기록하여 시간당 침식률(mm/hr)로 환산한다.
- ⑤ 유속을 다양하게 변경하여 ①~④의 과정을 반복한 후 유속별 침식률을 산정한다.
- ⑥ 각 유속별로 시료바닥에 적용되는 전단응력과 침식률과의 관계를 결정한다.

실험결과를 전단응력  $\tau$ 에 대한 침식률 변화곡선으로 구성되며, 관속을 흐르는 물로 인해 흙시료 상부에 야기되는 평균전단응력은 Moody 도표(Moody, 1944)를 이용하여 구하며 식 (9)와 같이 표현될 수 있다.

$$\tau = \frac{1}{8} f \rho V^2 \quad (9)$$

여기서  $f$ 는 Moody 도표로부터 얻어지는 마찰계수,  $\rho$ 는 물의 밀도 ( $1000\text{kg/m}^3$ ),  $V$ 는 관내의 평균유속(m/s)이다. 마찰계수  $f$ 는 관의 레이놀즈수  $Re (= VD/\nu)$ 와 관의 상대조도  $\epsilon/D$ 의 함수이며, 여기서  $D$ 는 관의 직경(m),  $\nu$ 는 물의 동점성계수 ( $10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ),  $\epsilon$ 은 조도이다. 일반적으로 원형단면인 경우 직경  $D$ 는 동수반경의 4배이다. 관수로의 단면은 구형이므로 구형에 대한 동수반경을 구한 후 4배를 하여 그 직경으로 한다.

#### 3.2 실험재료

본 연구에서는 이물질을 포함하지 않은 비교적 균질한 세 종류의 세립토에 대하여 비중시험, 입도분석시험, 액·소성한계시험을 실시하여 각각의 토질특성을 분석하였다. 실험에 사용된 점토들의 물리적 특성은 표 1과 같다. 입도분석시험결과 세 가지 세립토 모두 #200체를 100% 통과하여 비중계 분석에 의하여 입도분석을 실시하였으며, 결과를 그림 5에 도시하였다.

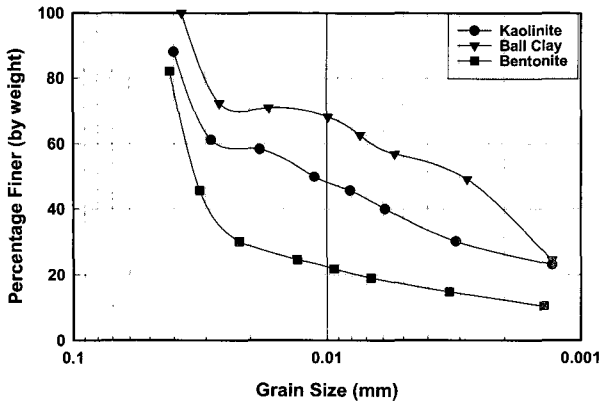


그림 5. 입도분포곡선

### 3.3 실험방법

균질하게 재성형된 시료를 만들기 위하여 우선 세 종류의 세립토를 각각 종류수와 1:1의 무게비율로 골고루 교반하여 슬러리 상태를 만들었다. 이후 슬러리를 시료 성형 몰드에 주입하고 공기배출 및 슬러리 안정화를 위하여 1일간 방치하였다. 안정화된 슬러리에 하중재하장치를 사용하여 압밀을 진행시켰다. 각각의 점토에 대하여 하중은 5~6단계로 나누어 각각의 단계에 대해 24시간동안 재하하였다. 최종 성형하중은 세 가지 점토에 대해 각각 110, 160, 240kPa의 세 종류로 성형하였으며, 카올리나이트의 경우 보다 자세한 분석을 위하여 60kPa와 360kPa 두 가지를 추가 성형하였다. 성형된 시료에 대하여 초기함수비와 비배수전단강도를 측정하였다. 세굴률 시험기에 시료를 장착하기에 앞서 시료성형기 몰드의 윗부분과 시료표면이 일치하도록 매끄럽게 닦아 초기 흐름의 안정성을 꾀하였다.

균질하게 성형된 시료를 세굴률 시험기에 장착하여

피스톤을 통해 시료를 1mm씩 돌출시키면서 관속을 흐르는 물에 의해 침식되는 흙의 양을 측정하였다. 시료상승장치의 정도와 육안관측의 현실을 고려하여 1mm를 침식의 최소단위로 규정하였으며, 각 시료에 대하여 1시간동안 약 1mm의 침식을 발생시키기 바로 직전의 물의 유속을 세굴이 발생하기 시작하는 한계유속으로 정의하고 이때 시료 표면에 발생하는 전단응력을 한계전단응력으로 정의하였다.

### 3.4 결과 및 고찰

카올리나이트, 볼클레이, 벤토나이트로 재성형한 시료들에 대한 토성치와 세굴률 실험결과를 표 2에 나타내었다. 모든 토성치는 KS F(Korean Industrial Standards F)의 규정에 의해 2회 실험하여 그 평균값을 취하였으며, 비배수전단강도는 베인시험기를 이용하였다. 토성치의 경우 세 가지 점토 모두 성형하중이 증가할수록 함수비는 감소하고, 건조단위중량과 비배수전단강도 등은 증가하는 일반적인 경향을 보였다. 벤토나이트의 경우에는 그 차이가 보다 뚜렷한 경향을 보였으며, 동일 성형하중에 대해서 다른 두 종류의 점토에 비해 건조단위중량은 가장 작은 반면, 함수비와 비배수 전단강도는 가장 큰 값을 보였다.

세굴률 실험의 결과는 흐르는 물에 의해 시료표면에 야기되는 전단응력과 그에 상응해서 발생하는 침식율의 관계곡선으로 정의되며, 그림 6, 그림 7, 그림 8은 각각 카올리나이트, 볼클레이 그리고 벤토나이트의 침식율-전단응력 관계곡선이다. 그림에서 사선으로 표시한 부분은 홍수시 유속을 3~4m/s라 가정하였을 때 전단응

표 2. 시료의 토성치와 침식특성

구 분	성형하중 (kN/m <sup>2</sup> )	함수비 (%)	건조단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	비배수 전단강도 (kN/m <sup>2</sup> )	한계유속 (m/sec)	한계전단응력 (N/m <sup>2</sup> )
Kaolinite-1	60	49.3	11.1	68.6	0.35	3.89
Kaolinite-2	110	47.7	11.1	107.9	0.68	12.25
Kaolinite-3	160	46.4	11.4	117.7	1.07	27.11
Kaolinite-4	240	46.2	11.5	137.3	1.20	33.36
Kaolinite-5	360	44.4	11.7	294.2	1.52	50.75
Ball Clay-1	110	54.0	10.4	98.1	2.28	105.00
Ball Clay-2	160	46.5	11.3	117.7	2.59	132.73
Ball Clay-3	240	44.7	11.6	156.9	3.02	174.91
Bentonite-1	110	67.9	9.1	117.7	0.30	2.88
Bentonite-2	160	67.7	9.1	127.5	0.21	1.60
Bentonite-3	240	59.6	9.8	166.7	1.15	25.93

력의 범위를 나타낸 것이다.

성형하중이 증가할수록 즉, 단위중량과 전단강도가

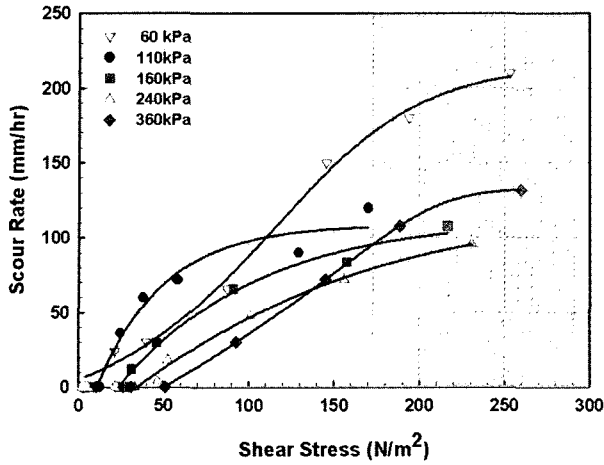


그림 6. 카올리나이트 시료의 침식율-전단응력 관계곡선(사선부분 : 홍수시 유속범위)

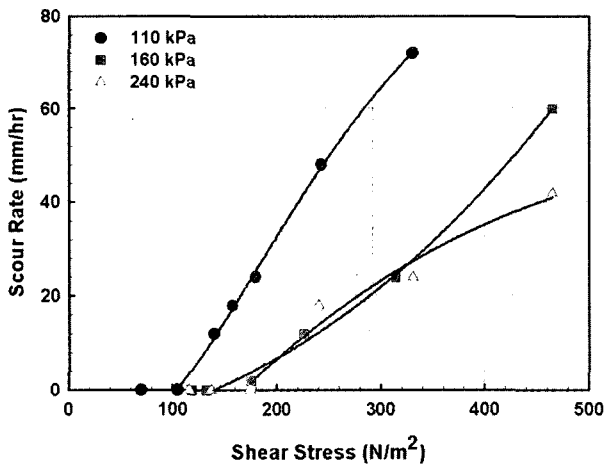


그림 7. 볼클레이의 침식율-전단응력 관계곡선(사선부분 : 홍수시 유속범위)

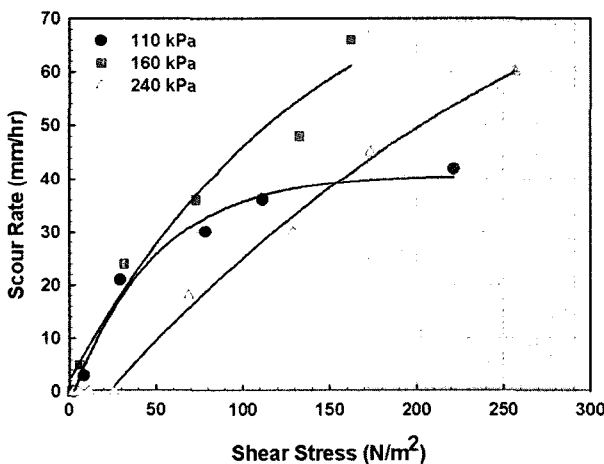


그림 8. 벤토나이트의 침식율-전단응력 관계곡선(사선부분 : 홍수시 유속범위)

증가함에 따라 한계전단응력은 뚜렷하게 증가하는 양상을 보였다. 따라서 단위중량과 전단강도가 큰 지반일수록 세굴에 대한 저항력이 크며, 동일한 유속과 그로 인한 전단응력에 대해 더 작은 세굴이 발생함을 알 수 있었다. 다만 벤토나이트의 경우 2번 시료의 한계전단응력이 전단강도가 작은 1번 시료의 한계전단응력보다 작은 결과를 보이고 있으나, 그 차이가 미미하며 실험의 정도를 고려해볼 때 무시할 수 있는 것으로 판단된다.

카올리나이트와 볼클레이의 경우에는 전단강도가 증가함에 따라 한계전단응력이 완만하게 증가하고 있으나, 벤토나이트의 경우에는 어느 시점 이후에 아주 급격하게 증가함을 알 수 있었다. 또한 침식율-전단응력 관계곡선의 형상에서도 다른 2종의 시료에 비해 불규칙한 형상을 보여주었다. 벤토나이트는 다른 2종의 시료에 비해 액소성한계와 소성지수가 아주 큰 고소성 점토이며, 성형하중의 증가에 따라 토성치의 변화가 상대적으로 뚜렷한 경향을 보였다. 고소성 점토에 대한 보다 많은 정도 높은 실험을 통해 보다 자세히 분석되어야 할 것으로 판단된다.

카올리나이트의 세굴을 실험결과는 전단응력이 증가함에 따라 특정한 침식률에 수렴하는 경향을 보였다. 특히 성형하중이 110, 160, 240kPa인 경우는 홍수시 유속 범위에서 100mm/hr 전후의 침식률에 수렴하는 경향을 보였다. 따라서 카올리나이트의 침식특성은 특정유속 이상에서는 유속이 증가하더라도 침식률이 동반증가하지 않으며 특정한 한계침식률을 가지는 것으로 판단된다. 이는 홍수시 발생할 수 있는 세굴심 예측에 유용한 자료로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

그림 9는 비배수 전단강도가 동일한 세 가지 시료의

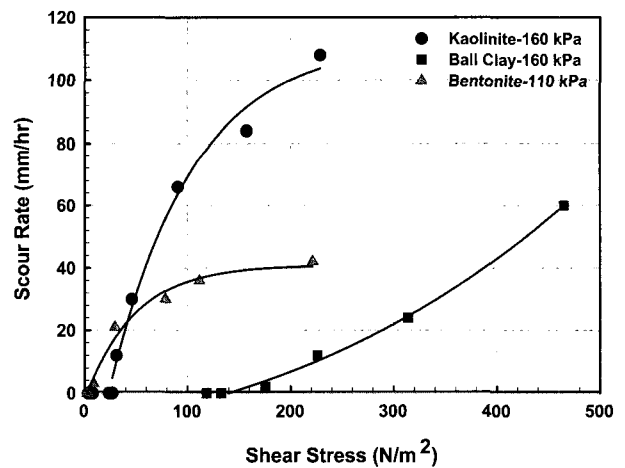


그림 9. 침식율-전단응력 관계곡선(비배수 전단강도 = 117.7kPa)

침식율-전단응력 관계곡선이다. 실험에 사용된 세 종류의 점토 중 불클레이의 세굴에 대한 저항력이 가장 큰 것으로 나타났다. 표 2에 나타난 바와 같이 불클레이의 토성치는 다른 시료와 비슷한 값을 보여주고 있는데 비해 지반의 침식특성을 나타내는 한계전단응력과 침식률은 아주 큰 차이를 보이고 있다. 이는 지반의 침식특성에 영향을 주는 인자에는 본 연구에서 분석된 토성치 이외의 또 다른 인자들이 존재한다는 반증이며, 계속되는 연구의 숙제로 남겨진다.

그림 10, 그림 11, 그림 12는 각각 실험에 사용된 세 가지 점토들의 한계전단응력과 비배수 전단강도 및 건조단위중량의 관계를 보여준다. 세 가지 점토 모두 비배수 전단강도와 건조단위중량이 클수록 시료의 한계전단응력은 증가하는 경향을 보였으며, 이들의 상관관계는 상당히 높게 나타났다. 카올리나이트와 벤토나이트의 경우 건조단위중량에 대한 상관성이 더 크게 나타났으며, 불클레이의 경우 비배수 전단강도에 대한 상관성이 더 크게 나타났다. 향후 많은 추가실험을 통해 보다 정밀한 분석이 요구되지만 전단응력과 토성치의 상관관계를 통한 국내 지반의 세굴특성 예측의 가능성을 시사하는 중요한 결과라 할 수 있다.

그림 13에서는 실험에 사용된 세 가지 점토들의 한계

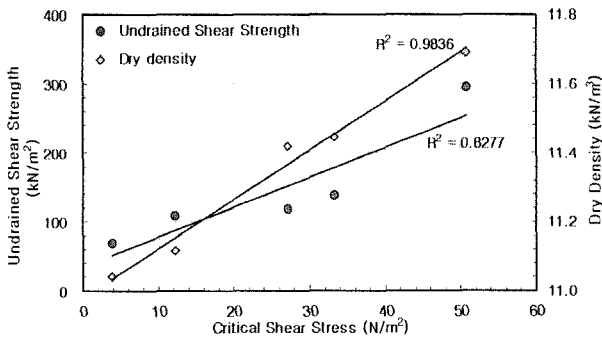


그림 10. 토성치와 한계전단응력과의 관계(카올리나이트)

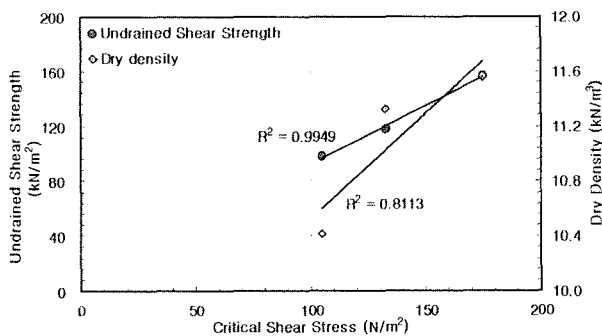


그림 11. 토성치와 한계전단응력과의 관계(불클레이)

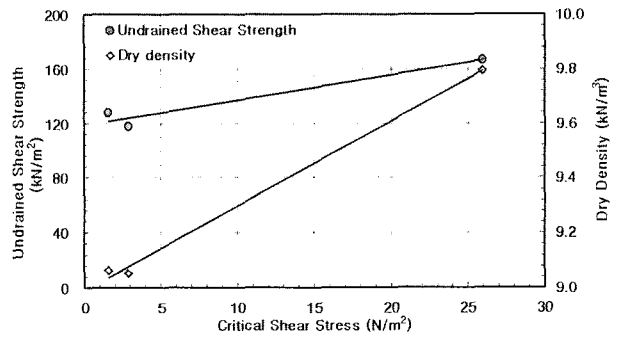


그림 12. 토성치와 한계전단응력과의 관계(벤토나이트)

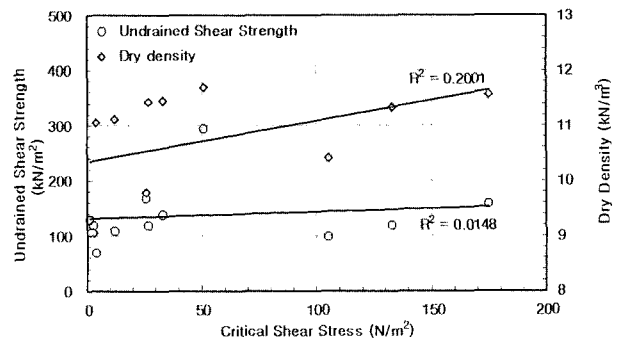


그림 13. 전단강도와 건조단위중량 vs. 한계전단응력(종합)

전단응력과 비배수 전단강도 및 건조단위중량의 관계를 모두 도시하였다. 비배수 전단강도 및 건조단위중량과 시료의 한계전단응력이 비례하는 경향성은 볼 수 있으나 점토의 종류별로 나타낸 결과와는 달리 이들의 상관관계는 아주 낮았다. 특히 비배수 전단강도의 결과는 한계전단응력과 거의 상관성이 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과들은 흙의 침식특성이 한두 가지의 토성치로 설명되어지기 보다는 여러 토성치의 복합적인 상호작용에 의해 지배되기 때문으로 판단되며, 이를 밝히기 위해서 보다 많은 양의 정도 높은 세굴를 실험 및 분석이 요구된다.

#### 4. 결론

흐르는 물의 침식유발능력과 지반의 침식저항능력을 동시에 고려할 수 있는 새로운 교량세굴해석 모델을 개발하기 위한 많은 연구가 진행되었으며, 이러한 노력의 일환으로 지반의 침식율을 정량화할 수 있는 세굴를 시험기가 개발되었다. 본 연구에서는 세굴를 시험기를 이용하여 3종의 재성형 점토에 대해 세굴를 실험을 실시하였다. 재성형 점토의 세굴를 실험을 통해 비배수전단강도 및 단위중량의 변화에 따른 세립토의 침식특성을

분석하였으며, 또한 토성치와 침식율의 상관관계 분석을 시도하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 단위중량과 비배수전단강도가 증가함에 따라 한계 전단응력은 뚜렷하게 증가하는 양상을 보였다. 따라서 단위중량과 전단강도가 큰 지반일수록 세굴에 대한 저항력이 크며, 동일한 유속과 그로 인한 전단응력에 대해 더 작은 세굴이 발생함을 알 수 있었다.
- (2) 액소성한계와 소성지수가 큰 고소성 점토의 경우에는 전단강도 증가에 따른 한계전단응력이 아주 급격하게 증가하였으며, 침식율-전단응력 관계곡선의 형상도 불규칙하게 나타났다. 소성이 아주 큰 점토에 대한 보다 많은 정도 높은 실험을 통해 보다 자세히 분석되어야 할 것으로 판단된다.
- (3) 카올리나이트의 경우에는 전단응력이 증가함에 따라 특정한 침식률에 수렴하는 경향을 보였다. 카올리나이트의 침식특성은 특정유속 이상에서는 유속이 증가하더라도 침식률이 동반증가 하지 않으며, 특정한 한계침식률을 가지는 것으로 판단된다.
- (4) 세립토 종류별 분석에서는 세 가지 점토 모두 비배수 전단강도와 건조단위중량이 클수록 시료의 한계 전단응력이 증가하는 경향을 보였으며, 이들의 상

관관계는 상당히 높게 나타났다. 하지만 종합적으로는 토성치만으로 한계전단응력의 특성을 설명할 수 없었다. 이는 흙의 침식특성이 한두 가지의 토성치로 설명되어지기 보다는 여러 토성치의 복합적인 상호작용에 의해 지배되기 때문으로 판단되며, 이를 밝히기 위해서 보다 많은 양의 정도 높은 세굴 실험 및 분석이 요구된다.

## 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. Briaud, J.-L., Ting, F., Chen, H. C., Cao, Y., Han, S. W. and Kwak, K. (2001), "Erosion Function Apparatus for Scour Rate Predictions", *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.127, No.2, pp.105-113.
3. Moody, L. F. (1944), "Friction Factors for Pipe Flow", *Transaction of the American Society of Mechanical Engineers*, Vol.66.
4. Munson, B. R., Young, D. F., and Okiishi, T. H. (1990), *Fundamentals of fluid mechanics*, Wiley, New York, USA.
5. Richardson, E. V. and Davis, S. M. (2001), "Evaluating scour at bridges", *Pub. No. FWHA-NHI-01-001, HEC No.18*, 4th Edition, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, USA.

(접수일자 2004. 6. 3, 심사완료일 2004. 10. 21)