# 실트함량에 따른 카올리나이트의 침식특성 평가

# Erosion Characteristics of Kaolinite with respect to Contents of Silt

이주형\*·박재현\*\*·정문경\*\*\*·.곽기석\*\*\*\* Lee, Juhyung·Park, Jaehyun·Chung, Munkyung·Kwak, Kiseok

#### Abstract

The scour phenomenon involves the erosive potential of flowing water and the relative ability of the soil to resist erosion. The scour phenomenon in cohesive soils is much different from that in non-cohesive soils. Granular soils resist erosion by their buoyant weight and the friction between the particles. The soil particles are dislodged individually from the bed under the action of the eroding fluid. Scour in cohesive soils is much slower and more dependent on soil properties than that in non-cohesive soils. Therefore the analysis models for estimating erosion characteristics of cohesive soils should consider not only flowing water but also the relative ability of the soil to resist erosion.

In this study, erosion characteristics for the clay-silt mixed soil will be analyzed as a fundamental study for development of bridge scour analysis and design system considering scour resistance capacity of a soil. For this analysis, the relationship between scour characteristics and soil properties was evaluated through scour rate test with Kaolinite samples remolded using various loading and contents of silt.

key words: bridge scour, scour rate test, erosion characteristics, kaolinite

## 1. 서 론

국토의 균형발전이나 도서 지역의 관광자원화와 같은 새로운 패러다임에 발맞추어 제4차 국토종합개발계획(2000년~2020년)이 도입되면서 우리나라에서도 본격적인 해상교량 건설기반 확충의 계기가 마련되고 있다. 해상교량과 같은 초대형 교량의 안정성 확보를 위하여 홍수 및 조석 등에 대한 기초의 세굴 안전성 확보가 무엇보다 중요하며, 이를 위해서는 수리조건 및 지반특성을 고려한 정확한 세굴 해석 및 설계가 선결되어야 한다. 세굴현상은 흐르는 물에 의한 침식유발능력과 지반의 침식저항능력과의 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 마찰력은 중력과 마찰력뿐만 아니라 흙입자의 물리·화학적 성질 및 전기적 성질에도 의존하여 매우 복잡한양상을 보인다. 느슨한 조립토는 하상에 작용하는 유체의 침식유발능력에 의해 단시간 내에 세굴이 발생하여최대세굴심에 도달하는 반면, 세립토는 침식저항능력이 조립토에 비해 크고 저항메커니즘이 달라 상대적으로 느리게 침식이 진행된다(곽기석 등, 2001; 곽기석 등, 2004). 따라서 세립토 지반의 세굴해석모델은 침식유발인자와 저항인자를 모두 고려할 수 있는 메커니즘을 포함하고 있어야 하며, 그에 따라 해석에 사용되는 매개변수들을 결정하여야 한다.

현재 해상교량 건설이 활발히 수행되고 있는 서해안 및 남해안 지역의 지반은 해성점토와 같은 세립토로 대부분 구성되어 있으며, 심도가 낮은 표층의 경우 해성점토에 모래나 실트와 같은 조립토가 부분적으로 혼

<sup>\*</sup> 정회원·한국건설기술연구원 지반연구부 연구원·공학석사·E-mail: leejh73@kict.re.kr - 발표자

<sup>\*\*</sup> 정회원·한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원·공학석사·E-mail: jaehyeon@kict.re.kr \*\*\* 한국건설기술연구원 지반연구부 책임연구원·공학박사·E-mail: mkchung@kict.re.kr

<sup>\*\*\*\*</sup> 정회원·한국건설기술연구원 지반연구부 책임연구원·공학박사·E-mail: kskwak@kict.re.kr

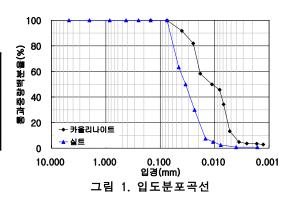
재되어 있는 지반도 종종 나타나고 있다. 하지만 기존의 세굴해석모델들은 주로 비점착성 흙(모래)을 사용한 실내모형실험에 기초하여 흐르는 물에 의한 침식유발능력에 그 초점을 두고 있어 하상재료가 점착성을 띄는 세립토에서의 세굴을 예측하는데 적절하지 않다. 따라서 본 연구에서는 지반의 침식저항능력을 고려한 교량세굴 해석 및 설계 시스템 개발을 위한 기초연구로 대표적인 점성토인 카올리나이트에 실트를 다양한 무게비로 혼합한 혼합지반의 침식특성을 세굴률 실험을 통해 정량화하고 지반의 침식특성과 토성치의 상관관계를 분석하였다. 이러한 혼합지반의 침식특성 결과는 국내 해안지역의 지반이 대부분 실트질 점토로 구성되어 있다는 사실을 감안할 때 국내 해상 세립토의 침식특성 예측에 유용한 자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 2. 실험방법

본 연구에서는 점성토에 함유된 실트가 침식특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 카올리나이트에 실트를 혼합, 성형하여 혼합지반에 대한 세굴률 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 카올리나이트와 실트의 물리적 특성은 표 1과 같고 각 시료의 입도분포곡선을 그림 1에 도시하였다.

표 1. 시료의 물리적 특성

구 분	비중	액성	소성	소성	D <sub>50</sub>	통일
		한계	한계	지수	(μm)	분류
카올리	2.53	49	26	23	11.2	CL
나이트	나이트		20	2.5	11.2	CL
실 트	2.60	28	22	6	34.3	ML



실험에 사용한 시료는 표 2와 같이 카올리나이트에 실트의 부피비를 달리하여 총 7가지 case로 혼합하여 제작하였다. 균질하게 재성형된 시료를 만들기 위하여 각각의 case에 대하여 증류수와 카올리나이트의 무게비율을 1:1로 골고루 교반하고 계획된 양의 실트를 혼합하여 슬러리 상태를 만든 후 시료성형 몰드에 주입하고 공기배출 및 슬러리 안정화를 위하여 1일간 방치하였다. 안정화된 슬러리를 시료성형기에 적당량 주입하고 하중은 5~6단계로 나누어 각각의 단계에 대해 24시간동안 재하하였다. 최종 성형하중은 모든 case에 대해 각각 60, 110, 160, 240, 360kPa의 5종류로 성형하였다. 성형된 시료에 대하여 초기함수비를 측정하고 전동식 비배수 전단강도 시험기를 사용하여 전단강도를 측정하였다. 세굴률 시험기에 시료를 장착하기에 앞서 시료성형기 몰드의 윗부분과 시료표면이 일치하도록 매끄럽게 다듬어 초기 흐름의 안정성을 꾀하였다.

표 2. 재성형시료의 종류

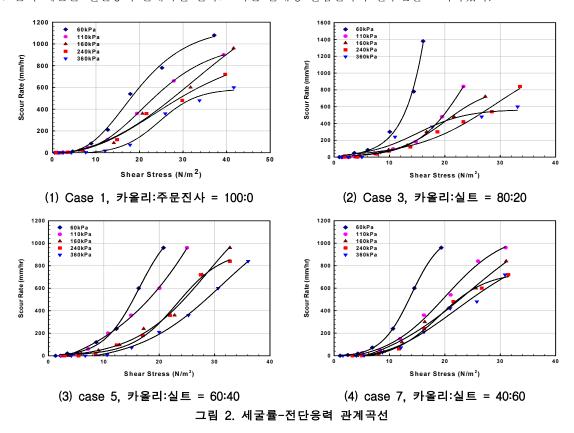
구 분	부피비		무게비(%)		성형하중	
	카올리나이트	실 트	카올리나이트	실 트	(kPa)	
Case 1	100	0	100.0	0.0		
Case 2	90	10	89.8	10.2		
Case 3	80	20	79.6	20.4		
Case 4	70	30	69.4	30.6	60, 110, 160, 240, 360	
Case 5	60	40	59.3	40.7		
Case 6	50	50	49.3	50.7		
Case 7	40	60	39.3	60.7		

[주] 비중 : 카올리나이트=2.53, 실트=2.60

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 한계유속(critical velocity)으로 정의하고 이때 흙이 받는 전단응력을 한계전단응력(critical shear stress)으로 정의하였다(한국건설기술연구원, 2006).

### 3. 실험결과

세굴률 실험의 결과는 흐르는 물에 의해 시료표면에 야기되는 전단응력과 그에 상응해서 발생하는 세굴량의 관계곡선으로 정의된다. 그림 2는 순수 카올리나이트와 카올리나이트에 실트를 20%, 40%, 60% 혼합한 시료들의 세굴률-전단응력 관계곡선 결과로 지면 관계상 실험결과의 일부만을 도시하였다.



## 4. 결과분석 및 결론

세굴률 실험결과 및 기본 물성치 실험결과를 바탕으로 실트의 함유량에 따른 카올리나이트의 침식특성 및 토성치와 세굴률의 상관관계를 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 대부분 시료의 경우 성형하중이 증가할수록 즉, 건조단위중량과 비배수전단강도가 증가함에 따라 세 굴률-전단응력 곡선의 기울기가 감소하였다(그림 2). 이는 단위중량과 전단강도가 큰 지반의 경우 유 속의 증가에 대해 침식이 완만하게 진행된다는 사실을 보여주고 있으며, 반면 단위중량과 전단강도가 작은 지반에서는 동일한 조건에 대해 상대적으로 침식이 급격히 진행되어 교량기초 붕괴 가능성이 더 크다는 사실을 나타내고 있다. 또한 대부분의 시료들은 동일한 case에 대해서 성형하중이 증가할수 록 한계전단응력이 뚜렷하게 증가하는 양상을 보였다(그림 3). 따라서 단위중량과 전단강도가 큰 지반 일수록 세굴에 대한 저항력이 크며, 동일한 유속과 그로 인한 전단응력에 대해 더 작은 세굴이 발생 함을 알 수 있었다.

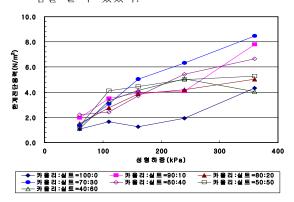


그림 3. 성형하중에 따른 한계전단응력의 변화

그림 4. 실트 합량에 따른 한계전단응력의 변화

- (2) 그림 4는 실트 혼합량에 따른 한계전단응력의 변화를 보여준다. 그림에서 순수 카올리나이트에 비해 실트가 혼합된 시료들이 대부분의 성형하중에 대하여 더 큰 한계전단응력을 보였다. 실트의 각 혼합 비율별 한계전단응력의 변화를 살펴보면 대부분의 시료에서 실트함량이 증가함에 따라 한계전단응력이 증가하다 감소하는 경향을 보였다. 이는 카올리나이트에 혼합된 실트 입자들이 성형과정 중 물의 배수를 촉진함과 동시에 기존에 수분이 차지하던 공간을 메움으로써 건조단위중량을 증가시킴과 동시에 흙의 침식에 대한 저항력을 증가시키는 것으로 판단된다. 그러나 실트 혼합량이 30% 이상이 되면 다량의 실트 입자들에 의해 카올리나이트 입자들의 점착효과가 대부분 소실되고 실트입자의 침식거동이 우세하여 한계전단응력이 점차 감소하기 시작하는 것으로 판단된다. 그리고 성형하중이 가장 작은 60kPa의 경우 실트 혼합량에 따른 한계전단응력의 변화가 거의 나타나지 않았는데 이는 카올리나이트에 포함된 실트 입자들이 성형과정 중 배수를 촉진시키거나 수분의 공간을 차지하기 위해서는 60kPa 이상의 압력으로 압밀되어야 함을 시사하는 것으로 하상의 경우 상부 표층에 혼합된 조립토의 경우 세립토의 세굴에 대한 저항력을 향상 시키는데 크게 기여를 하지 못할 것으로 판단된다. 이상에서 다룬 실트입자의 침식저항력 증가효과에 대해서는 향후 다양한 추가실험 및 실트입자와 점토입자사이의 상호작용에 대한 실험적・실증적 연구를 통해 명확하게 규명되어야 할 것이다.
- (3) 그림 5는 비배수 전단강도와 한계전단응력의 관계를 나타낸다. 그림에서 보듯이 비배수 전단강도가 증가함 에 따라 한계전단응력이 비례하여 증가하는 경향을 보였으며, 이를 통해 점토와 실트가 혼합된 지반의 한 계전단응력 즉, 침식에 대한 저항력은 그 지반이 가지 는 비배수 전단강도 즉, 점착력에 비례하는 경향을 알 수 있다. 따라서 지반의 한계전단응력과 비배수 전단 강도와의 관계는 향후 많은 정도 높은 실험을 통한 심도 깊은 분석이 필요하며, 이를 통해 지반의 침식저 항력의 정량적인 예측이 가능할 것으로 판단된다.

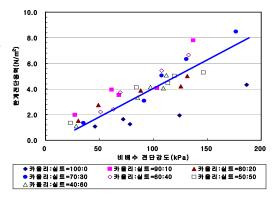


그림 5. 비배수 전단강도와 한계전단응력의 관계

#### 참고문헌

- 1. 곽기석, Briaud, J-L. (2001), "축적 효과를 고려한 교각세굴 해석 프로그램 개발", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol.17, No.3, pp.5-13.
- 2. 곽기석, 이주형, 박재현, 정문경, 배규진 (2004), "세립토의 침식능에 대한 토질정수의 영향", 한국지반공학 회 논문집, 제20권, 8호, pp.89-96.
- 3. 한국건설기술연구원 (2006), 교량기초 장수명화 기술 개발 (최종), 연구보고서, 건기연 2006-085.