

SEM 해석을 이용한 시멘트 안정처리 카올린의 공학적 특성 Mechanical characteristics of cement-stabilized kaolin by SEM analysis

이규환¹⁾, Kyu-Hwan Lee, 정대석²⁾, Dae-Suck Jung

¹⁾ 건양대학교 토목공학과 조교수, Assistant Prof. Dept. of Civil Engineering, Konyang University

²⁾ 중부대학교 토목공학과 부교수, Associate Prof. Dept. of Civil Engineering, Joongbu University

SYNOPSIS : Cement-stabilized clay has widespread applications in Deep Mixing projects, whereby soft deep clay deposits are improved through the addition of cement. While much research on this subject has taken place over the past decade, the strength and deformation behaviour of cement-stabilized clay is still not well understood. An extensive laboratory program was conducted on kaolin stabilized with up to 10% cement. Water curing was employed for durations up to 112 days. To study the microstructure of raw and stabilized soil, use is made of SEM. Micrographs of selected raw and stabilized soil were obtained. These micrographs were closely analyzed for any change in the microstructure of the soil as a result of stabilization.

Key words : Cement-stabilized clay, Deep mixing, Microstructure, SEM

1. 서 론

대심도의 연약지반 개량에 있어 시멘트 안정처리 공법은 여러 가지 단점에도 불구하고 단기간에 지반을 개량할 수 있는 공법으로 널리 알려져 있다. 특히, 항만 구조물의 하부기초 처리를 위한 공법으로 심층 혼합처리 공법이 종종 사용되고 있다. 심층혼합처리 공법(DM)은 석회나 시멘트를 이용하여 교반 혼합 처리에 의해 지반을 개량하는 공법으로 이 공법은 1970년대 말부터 일본에서 사용하기 시작하여 지금까지 널리 사용되어 오고 있다. 지금까지 다양한 심층혼합 처리공법들이 개발되어 왔으며 스테빌라이저나 장비의 종류는 지반의 특성이나 기술자의 경험에 의존하여 선정되고 있다.

DM공법은 연약지반 개량의 주목적인 지반의 압축성 감소 및 지반강도특성의 개선뿐만 아니라, 액상화 및 침식 방지, 환경 보존 그리고 쓰레기 매립처리 등 다양한 목적으로 활용할 수가 있다. 흙의 공학적인 특성은 주로 모양, 흙 입자들의 크기와 표면 특성에 의해 좌우된다. 특히, 입자들 특성의 영향을 받는 흙 구조는 흙의 거동에 주요한 영향인자이다. 이러한 흙의 거동에 영향을 미치는 입자특성을 파악하기 위한 방법으로 SEM 기법이 가장 일반적으로 사용되고 있다. 시멘트 안정처리 카올린의 특성을 파악하기 위해 시멘트 함유량 10%, 양생기간 112일 등 여러 가지 조건을 가지고 강도실험, 압밀실험, SEM 촬영을 하였다. SEM 해석결과를 이용하여 점토-시멘트 안정처리 혼합재료의 구조가 강도나 변형특성에 어떤 영향을 미치는 가를 분석하고자 하였다. 이를 위해 재령, 함수비, 시멘트 함유율 등이 고려되었다. 본 연구에서는 SEM 해석결과를 이용하여 시멘트 안정처리 카올린의 공학적 특성을 분석하고자 한다.

2. SEM 시료의 준비

SEM(Scanning Electron Microscope) 촬영에서 가장 중요한 것은 시료의 준비이다. SEM 촬영사진은 흥

콩 시립대학 연구실의 장비를 이용하였다. SEM 촬영을 위한 시료준비에 앞서 시료내부의 간극속의 물은 제거되거나 치환되거나 동결시켜야 한다. 그러나 시료의 구조를 변형시키지 않으면서 이러한 과정을 진행한다는 것은 매우 어려운 일이다. 아직도 흙의 종류에 따라 가장 적합한 시험법이 무엇인지에 대한 논의가 진행되고 있다. Mitchell(1993)은 단단한 흙이나 수축이 크지 않은 경우, 공기건조법이 가장 적합한 방법이라고 제안한바 있다. 그러나 공기 건조 방법은 시간이 필요하기 때문에, 입자 구조의 변화가 발생할 수도 있다 따라서 고함수비의 연약점토의 경우, 오븐-건조법은 시료준비를 위한 적합한 방법일 수도 있다. Shi(1999)등은 함수비가 매우 큰 경우 두 가지 방법 모두 수축이 크게 발생하여 흙의 구조변화를 크게 일으킨다는 연구 결과를 발표하였다. 따라서 흙 구조를 최소화하기 위한 동결 절단 건조(freeze-cut-drying)법을 제안하였다. 이 방법은 자연 상태의 시료를 액체 프레온에 담근 후 액체 질소를 이용 시료를 동결시키는 방법으로 급랭은 결정체를 형성하지 않기 때문에 흙 구조의 교란을 발생시키지 않는다. 본 연구에서는 흙-시멘트 혼합 시료의 경우 시간의 경과에 따라서 구조가 변화하기 때문에 이를 최소화하기 위해 노 건조법과 전통적의 시료준비 방법을 이용하여 SEM 분석을 수행하였다.

SEM 촬영을 위한 시료는 건조된 시료를 작은 조각으로 조각낸 후 비교적 매끄러운 표면 상태를 유지한 시료를 촬영표면이 훼손되지 않게 유지한 채 원형의 금속판에 고정시킨 후 은 페인트(silver paint)를 시료표면을 뿌렸다. 시료 표면에는 많은 공극이 있기 때문에 은 페인트는 시료표면의 공극을 메워주는 역할을 해준다. 은을 사용하는 이유는 시료의 열 전달율을 높여 전자 현미경으로 좋은 이미지를 얻을 수 있다. 부가적인 일련의 과정을 거친 후 은 페인트가 건조된 후 저압에서 금이 시료표면에 부착되도록 낮은 압력에서 아르곤 가스를 이용 일명 스퍼터(sputter)방법으로 표면을 코팅한다. 그 후 한번에 6개의 시료를 장비에 올려놓고 1,000~10,000배의 배율로 촬영 하였다.

3. 카올린 - 시멘트의 기본 특성

3.1 카올린의 기본특성

실내시험에 사용될 카올린은 인도네시아로부터 고품토를 사용하였다. 카올린의 액성한계, 입도분포, 비중, pH값등은 실험실에서 결정하였으며 입도분포의 경우 제조사에서 제공된 값을 참조하였다. 실내실험결과 액성한계와 소성한계는 평균 77%와 40% 였다. 입도분포 해석결과 통일분류법을 이용하여 분석한 결과 고소성의 실트질(MH)로 분류되었으며 비중은 약 2.57로 나타났다.

3.2 시멘트의 기본특성

실험에 사용된 시멘트는 시중에서 흔히 구할 수 있는 보통 포틀랜드 시멘트 사용하였으며 제조원에 표기된 시멘트의 화학적 구성은 다음과 같다.

표 1. 카올린과 시멘트와 화학성분

카올린		시멘트	
Aluminium	34.54 %	Silicon dioxide	20.2 %
Silica	49.70 %	Iron (III) oxide	3.2 %
Iron	0.55 %	Aluminium oxide	6.2 %
Calcium	0.03 %	Calcium oxide	65.2 %
Magnesium	0.02 %	Magnesium oxide	0.5 %
Kalium	0.60 %	Sulphuric anhydride as SO ₃	2.5 %
Natrium	0.04 %	Acid soluble Alkali: Na ₂ O	0.1 %
Titanium	0.21 %	Acid soluble Alkali: K ₂ O	0.4 %
Ignition Loss	14.19 %	Ignition Loss	1.6 %
기타		기타	

4. 카올린 - 시멘트의 구조특성

4.1 카올린의 구조특성

카올린은 그림 1과 같이 실리카와 알루미늄이 1 : 1 로 구성되어 있다. 즉, 실리카 4면체들과 산화알루미늄 8면체 시트(sheets)들이 교대로 구성되어 있다. 이들 시트는 수소 접합과 약간의 약한 판데르 발스(van der Waals)의 힘에 의해 단단히 결합되어 있다. 카올린 입자의 표면은 산소 또는 수산기의 층으로 만들어지는데 물 분자의 양전하와 수산기의 음전하가 결합되어 강한 접착력을 발생시킨다. Mitchell(1993)에 의하면 그림 2와 같이 카올린 입자는 잘 결정화된 육면 판구조를 하고 있으며 실리카와 알루미늄 광물들 더미로 이루어져 있다고 하였다.

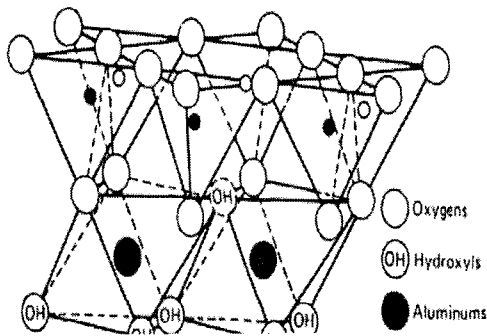


그림 1. 카올린의 구조

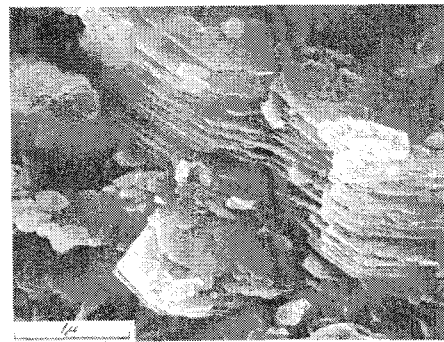


그림 2. 카올린 SEM 사진(5,000배율)

그림 3과 4는 건조전의 함수비가 각각 40%, 70%인 카올린을 노건조한 후 샘플채취 과정을 거쳐 7,500배율에서 SEM 촬영 영상을 보여 주고 있다. Mitchell의 연구에서와 같이 여러 개의 더미들로 구성되어 있음을 알 수가 있다.

그림에서 알 수 있듯이 40%와 70% 함수비 시료간 건조전 공극비의 차이는 크지만 노 건조후 SEM 해석 결과에 의하면 함수비에 의한 구조적인 차이는 크지 않다는 점을 알 수 있었다. 이는 노 건조의 영향으로 간극비의 변화를 확인할 수 없을 만큼 수축이 크게 일어났기 때문으로 판단된다.

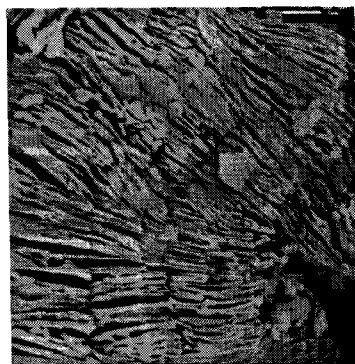


그림 3. w=40%시의 SEM

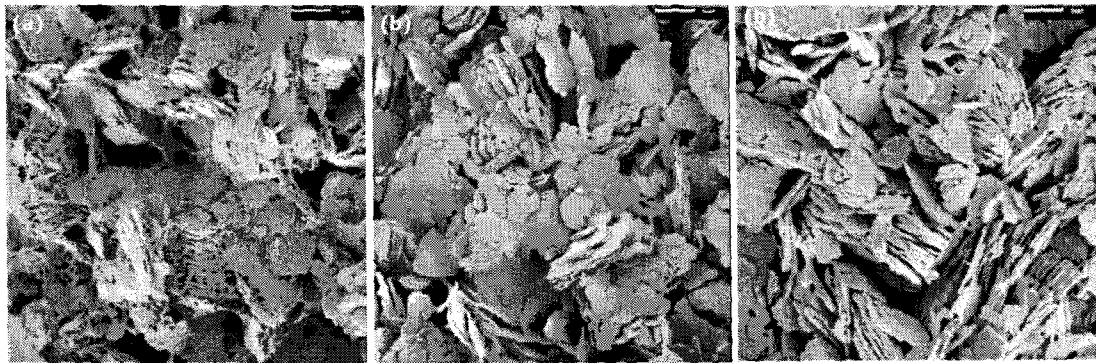


그림 4. 함수비 70%시의 SEM

4.2 시멘트 입자의 구조특성

그림 5는 양생기간 28일, 배율 7,500, 함수비 100%와 70% 조건에서의 시멘트 비율을 달리하여 촬영한 SEM 영상이다. 시멘트는 SEM 영상으로 볼 때 카울린 입자의 가장자리와 면에 바늘 또는 거미줄처럼 부착되어 있는 것처럼 나타난다. 이러한 현상은 시멘트의 함유율이 10%이상에서 명백하게 나타났으나 시멘트 비율이 5%인 경우에는 시멘트 입자의 존재를 명확히 구분하기 어려웠으며 2%인 경우에는 거의 확인되지 않았다.

Porbaha (2000)등은 시멘트와 점토가 완전히 섞일 때 시멘트에 의해서 둘러싸인 점토 입자들의 덩어리들이 존재하기 때문에 모든 점토입자가 고화되지는 않는다고 하였다.



(a) M⁻7500X, A_c=10%

(b) M⁻7500X, A_c=5%

(c) M⁻7500X, A_c=2%

그림 5. 시멘트 비율에 대한 SEM 영상

5. 시멘트 - 카올린 혼합물의 특성

5.1 점토-시멘트 강도증가의 영향요소

Bergado등(1996)은 시멘트 고화처리 점토의 경화특성에 영향을 주는 대표적인 요구에 대해 연구하였는데 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 시멘트의 종류 : Portland III 타입의 시멘트가 부드러운 점토 퇴적물들을 안정시키는 것에 더 효과전인 것으로 판명되었으나 일반적으로 Portland I 타입의 시멘트 다른 타입에 비해 값이 싸고 쉽게 얻을 수 있기 때문에 주로 사용되고 있다.
- 2) 시멘트 함유율 : 시멘트 함유율이 증가함에 따라 안정 처리 흙의 강도는 증가된다.
- 3) 양생시간 : 콘크리트와 유사하게 양생시간이 증가함에 따라 시멘트 고화처리 점토의 강도도 증가하며 강도의 증가비율은 양생초기에 빠르게 나타난다.
- 4) 흙의 종류 : 흙의 함수비가 증가하면 강도 증진 효과는 감소한다. 소성지수가 큰 점토의 강도는 감소하며 유기물의 존재도 강도증가에 부정적인 영향을 준다. 응집구조형식을 가지고 있는 해성점토의 경우 시멘트 첨가로 인한 응집현상에 의한 강도증가는 다른 흙에 비해 감소하는 것으로 나타났다.
- 5) 양생온도 : 양생온도가 증가하면 강도증가의 원인이 되는 화학적 반응속도도 촉진된다. 양생온도의 증가로 인해 규산염과 알루미늄산염의 용해도도 증가한다.
- 6) 흙 광물 : 광물의 존재 유무에 따라 흙은 낮거나 높은 포졸란 반응을 한다. 만약 반응이 낮은 경우에는 고화된 토립자의 강도특성이 흙의 강도특성을 지배하지만 반응이 큰 흙의 경우에는 고화된 시멘트에 의해 강도 특성이 지배된다.

7) 흙의 pH : pH값이 큰 경우 점토입자의 규산염과 알루미늄산염의 용해도가 증가하여 오랫동안 포졸란 반응이 지속된다. Kawasaki(1984)등의 연구에 의하면 pH가 6.0~4.5이하로 떨어질 때 안정화 효과가 나타나는 것으로 나타났다.

5.2 카올린 - 시멘트 고화구조의 특징

Mitchell(1993)의 연구결과에 의하면 높은 pH 상태에서는 카올린 입자들은 음전하를 띠며 낮은 pH상태인 산성 상태에서는 양전하를 갖는 것으로 나타나고 있다. 카올린만 존재하는 경우, 일반적으로 pH값은 3.6에서 4.0사이에 존재하므로 입자의 가장자리는 양전하를 갖는다. 그러나 최소 2% 정도의 시멘트가 카올린에 첨가되는 경우에도, 1일간 양생 후 측정된 pH값은 13이상으로 증가한다. 이는 100%시멘트의 pH값인 14에 근접하는 값이다.

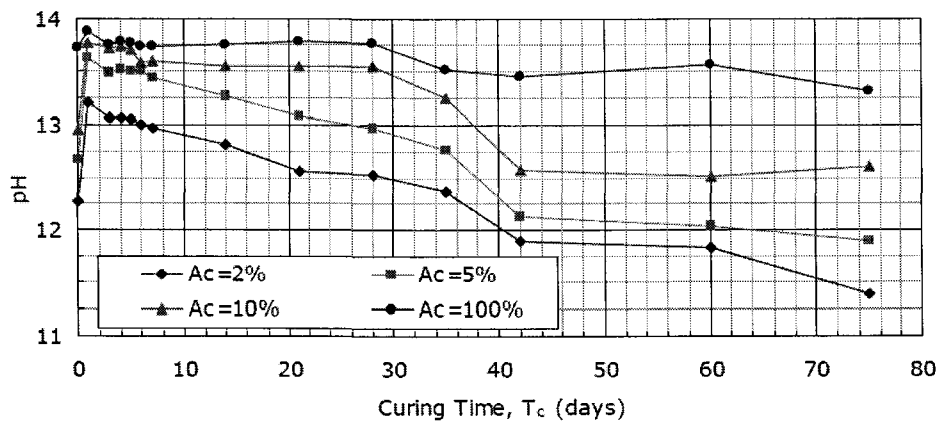


그림 6. pH 와 카올린-시멘트의 양생기간

pH값의 증가원인은 간극수의 전기분해 농도의 증가 때문인데 이는 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)의 분해로 인한 결과이다. 그러므로 칼슘 양이온이 음전기를 띠고 있는 점토 입자들에 끌리어 응집하게 된다.

그림 6과 같이 시멘트-카올린 혼합재료의 양생이 진행됨에 따라 pH값은 감소하여 초기값으로 낮아지게 되는데 감소율은 시멘트 함유량이 작을수록 증가한다. 카올린-시멘트 혼합 처리된 점토 입자들이 양생이 진행됨에 따라 응집되는데 이는 양생이 진행됨에 따라 간극비 약간 상승하는 것으로 설명될 수 있다. 시멘트의 첨가로 인한 마찰각과 응집력(degree of flocculation)은 서로 상관관계가 있는 것으로 나타나고 있다. 즉 응집력이 증가하면 마찰각도 증가한다. 또한, 양생시간이 증가함에 따라 마찰각이 약간 감소하는 경향을 보이는데 이는 응집력의 감소로 인한 결과로 양생에 따른 pH값의 감소 때문인 것으로 판단된다. 그러나 Uddin(1995)은 양생시간의 증가에 따라 마찰각도 증가한다는 일반적인 결론과 다른 결과를 제안하였다. 그러나 이것은 함수비의 감소가 동반되는 습식양생(humid curing)의 결과로 판단된다. 일반적으로 수중양생인 경우, 함수비의 변화가 없기 때문에 양생시간의 증가에 따라 응집력은 증가하지 않을 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 10%이하의 상대적으로 소량으로 안정화된 카올린의 거동에 관해 SEM 분석을 통해 그 구조적인 특성을 파악하고자 하였다. 주사 전자 현미경(SEM) 분석은 시멘트의 미세 구조와 시멘트 안정처리 카올린의 미세구조와 공학적인 거동을 정확히 이해하기 위해 SEM 분석을 수행하였다.

일반적인 카올린의 구조는 면대모(edge-to-face) 와 모대모(edge-to-edge)의 응집구조를 가지고 있는

때 시멘트의 첨가로 인하여 응집력이 증가됨을 알 수 있었다.

시멘트 첨가량이 2%인 경우에는 SEM 사진을 통해 시멘트의 존재여부를 확인 할 수는 없었지만 입자구조나 강도는 시멘트의 영향으로 증가함을 알 수 있었다.

시멘트 비율이 5%인 경우는 약간씩 시멘트의 존재를 확인할 수 있었으나 모든 카울린 입자가 시멘트의 영향으로 고화되지는 않는 것으로 나타났다. 그러나 10%이상의 시멘트 비율에서는 시멘트의 존재와 강도증가 현상이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다.

본 연구 결과는 실내 시험 결과에 국한된 것이지만 시멘트 비율이 5%미만인 경우에는 공학적인 강도증가 현상 등이 미미하고 또한 양생시간의 증가도 강도에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

양생시간에 따른 pH값이 감소가 응집력이 감소하는 원인으로 작용하는 것으로 판단되는데 이는 마찰력의 감소 원인과도 관련이 있는 것으로 판단된다.

Uddin(1995)은 양생시간에 따라서 마찰력이 증가한다는 상반된 결과를 제시하였는데 이는 습식양생에 따른 함수비의 감소로 응집현상이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

향후 보다 많은 카울린-시멘트나 고화처리 재료에 대한 SEM 이미지 관찰이 필요하다고 본다. 또한, 삼축 시험중 시험을 중단한 후 샘플을 채취하여 SEM 시험을 하면 변형에 따른 입자의 재배열에 관한 고찰도 가능하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. Bergado, D.T., Anderson, L.R., Miura, N. and Balasubramaniam, A.S.(1996), "Soft ground improvement in lowland and other environments", ASCE, New York.
2. Kamon, M.(1997), "Effect of grouting and DMM on bigconstruction projects in Japan and the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake", Proceedings of 2ndInternational Conference on Ground Improvement Geosystems. Tokyo, Vol. 2, pp.807-823.
3. Kawasaki, T., Saitoh, S., Suzuki, Y. and Babasaki, R.(1984), "Deep Mixing Method using cement slurry as hardening agent. Seminar on soil improvement and construction techniques in soft ground", January 10-11, 1984, pp.17-38.
4. Mitchell, J.K.(1993), "Fundamentals of soil behavior", 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.
5. Porbaha, A., Shibuya, S. and Kishida, T.(2000)' "State of the art in deep mixing technology". Part III: geomaterial characterization. Ground Improvement, 3, pp.91-110.
6. SHI, B., Wu, Z, Inyang, H., Chen, J. and Wang, B.(1999), "Preparation of soil specimens for SEM analysis using freeze-cut-drying", Bull. Eng. Geol. Env., 58, pp.1-7.
7. TERZAGHI, K., Peck, R.B. and Mesri G.(1996), "Soil mechanics in engineering practice", 3rdEd., John Wiley & Sons, Inc., New York.
8. Uddin, M.K.(1995),"Strength and Deformation Characteristics of Cement Treated Bangkok Clay", D. Eng. Dissertation No. GT-94-1, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
9. VAN OLPHEN, H.(1963),"Clay colloid chemistry for clay technologists, geologists, and soil scientists", John Wiley & Sons, New York.