

전답용 유기질 세립토의 슬레이킹 내구성 및 분쇄 특성

조 성 민¹⁾

¹⁾ 한국도로공사 연구개발실 책임연구원

Slaking and Particle-Separation Characteristics of the Organic Fine Soil in Paddy Fields

Cho Sung-Min¹⁾

¹⁾ Geotechnical Research Group, Korea Highway Corporation

ABSTRACT

Clayey paddy soils should be mixed with other good coarse soils to be used as a material for the lining, or, embankment. However, it has been difficult to separate soil particles from each other because of the internal cohesion in the soil. Degradation(separation) characteristics of the fine soil were investigated by various laboratory tests including the slaking durability test. Degradation rate of the soil were dependent upon the clay content and the initial water content before the submergence. The amount of degradations decreased as initial water content increased with exponential functions. The dried specimens separated into the particles after 24 hours of the submergence and specimens which water contents were less than 10% also separated into the particles after 2, or 3 days of the submergence. Compaction curves and the unconfined strength were not varied before and after the submergence. However, unconfined strength decreased as water content increased.

Key words : *slaking, fine soil, paddy soil*

I. 서 론

오염물 차단, 녹지 조성 등을 위한 복토 및 성토 작업시 인근 경작지의 표토, 또는 굴착토를 활용해야 하는 경우가 있는데, 이 흙들은 다소의 유기질을 포함한 실트 및 점토로 이루어진 세립점성토인 경우가 많다. 또한 굴토시에 도 대부분 덩어리 상태를 유지하기 때문에, 다른 종류의 흙과 쉽게 섞이지 않으므로 성토재료

재활용하기 위해서는 먼저 적절한 방법으로 분쇄해야 한다. 덩어리 상태일 때와는 달리 미세하게 분리된 점성토는 다른 종류의 흙과 쉽게 섞이며, 공학적 성질을 많이 개선할 수 있다.

이 글에서는 굴토된 덩어리 형태의 세립토를 복토 및 성토재료로 유용하기 위한 방안 모색의 기초 단계로서, 경기도 중서부 지역에서 채취한 시료를 대상으로 물성치 시험, 침수붕괴도 시험, 다짐 및 강도시험 등을 실시하여 여러

가지 공학적 특성들을 평가한 결과를 분석하여 정리하였다.

II. 슬레이킹과 세립토 입자의 분해

함수비가 큰 점성토는 간극 속의 수막(water film)과 모관수(capillary water)에 의한 흡착으로 흙 입자 간의 결합력이 커서 굴토를 하더라도 덩어리 상태를 유지하게 되어 다른 흙과의 혼합이 어려우며, 충분한 다짐 효과를 기대하기 힘들다. 그림 1은 흙 입자 사이에 형성된 수막으로 인해 입자끼리 흡착되어 있는 모식도로서, r_m 은 모세관 현상에 의한 메니스커스의 반경이며, σ' 은 입자 간의 접촉응력(contact pressure)이다. 이러한 입자 간의 모관 인장력은 흙의 결합력을 높여 강도에도 영향을 주는데, 극단적인 경우로, 포화 점성토를 지중에서 채취하는 순간 시료 외벽에 형성된 메니스커스로 인한 시료 내 모관 인장력에 따라 1기압 이상의 유효응력이 유발되기도 하며, 결과적으로 겉보기 점착력(apparent cohesion)의 발생으로 강도가 증가한다. 사질토의 경우에는 상대적으로 간극이 크기 때문에 모관 인장(capillary tension)으로 인한 영향을 무시할 수 있다.

따라서, 덩어리 상태의 점성토를 분해하기 위해서는 흙 입자 간의 결합력을 제거하는 것이 관건이 되는데, 본 연구에서는 이를 위하여 슬레이킹(slaking, 비화작용) 현상을 이용하였다.

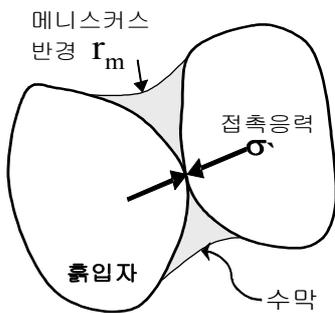


그림 1. 수막에 의해 결합된 흙 입자의 모식도

슬레이킹은 건조한 암석이나 흙에서 건습이 반복되면서 내구성이 급격히 떨어져 입자로 분해되는 것으로서, 주된 원리는 모세관 현상으로 설명할 수 있다. 건조한 암석이나 흙 시료를 물 속에 넣으면 모세관 현상에 의해서 간극 속으로 외부의 물이 유입되어 간극 속의 압력이 높아지면서 팽창이 일어나 시료의 입자가 분리되는 것이다. 이 현상은 건조시킨 흙 덩어리를 물이 담긴 비이커에 넣어보면 곧 확인할 수 있다. 그림 2는 Terzaghi(1943)가 제시한 슬레이킹의 개념도로서 자유 물체도에서 흙 입자와 간극 사이의 경계에 인장력(T)이 작용하고 있음을 알 수 있다. 만일 흙 입자 간의 인장 강도가 모관압에 의한 간극 내의 인장력 보다 작을 경우 입자가 떨어져 나가게 된다.

암석의 경우는 흙에 비해 입자 간의 인장 강도가 매우 크므로 물 속에서도 쉽게 분해되지 않으나, 자연 상태로는 상당히 고결된 암석이라도 지하수위 변동, 굴착에 의한 응력 해방, 흡수 팽창, 풍화 등에 의하여 고결력이 저하되는 경우가 있다. 특히, 연한 암석에서는 이러한 환경 변화에 따라 건조와 습윤이 반복되어 조직이 급격히 파괴되는 현상이 현저하게 나타난다. Holtz와 Kovacs(1981)는 건조한 상태에서 물 속에 넣었을 때 즉시 슬레이킹 현상이 나타나는 지의 여부로 암석과 흙을 구분할 수 있다고 하였다.

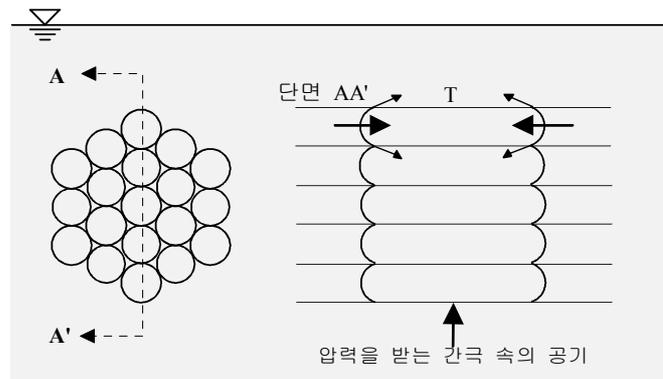


그림 2. 슬레이킹에 대한 모관 유추 개념(Terzaghi, 1943)

III. 시험 대상 재료

전답토 시료는 경기도 평택시 소재의 경작지 표층에서 채취하였으며, 점토 함량에 기인한 소성지수 차이에 따라 두 종류(편의상 A, B로 구분)로 구분하였다. 두 시료의 기본 물성은 표 1과 같다. 그림 3은 두 시료를 소성도(plastic chart)에 나타낸 것으로, 시료 A는 통일분류법상 실트(ML)와 저압축성 점토(CL)의 중간 정도에 해당하며, 시료 B는 저압축성 점토(CL)로 분류된다. 강열감량법으로 측정된 유기질 함량은 3% 정도이다.

표 1의 수축한계는 수은을 다루어야 하는 수축한계시험 대신 소성지수와 함수비 관계를 이용하여 간접적으로 구한 값이다. 그림 4는 비중계 시험으로 얻은 시료의 입도분포곡선으로, 시료 A의 30% 정도와 시료 B의 전부가 200번 체를 통과하였다.

표 1. 시료의 기본 물성값
(복수시험으로 구한 평균값임)

구분	시료 A	시료 B	비고
자연함수비(w_n), %	42.4	40.0	
비중(G_s)	2.56	2.70	
액성한계(w_L), %	43.1	28.6	시료 B : $w_n > w_L$
소성한계(w_p), %	25.4	25.6	
소성지수(PI), %	17.7	3	시료 B : 비소성 흙(NP)
액성지수(LI), %	0.96	4.8	
수축한계(w_s), %	19.2	27.8	소성도표 이용
유기물 함량, %	3.1	2.2	중량비로 산정 (550℃ 건조로 이용)

대상 시료의 무기질 광물의 성분 조성을 파악하기 위하여 채취 시료의 일부를 건조시킨 뒤 200번 체를 통과하는 분말로 만들어 현미경 관찰과 함께 x-선 회절 분석을 실시하였다. 분석 결과, 시료 A에서는 석영과 장석(정장석 및 사장석)이 주된 구성 광물이며 백운모도 일부 관찰되었다. 또한 점토 광물로서 카올리나이트(kaolinite)와 몬모릴로나이트(montmorillonite)가 소량 발견되었다. 따라서, 이 시료는 주된 구성 광물이 석영과 장석이며, 부수적인 구성 광물이 백운모 및 점토 광물(kaolinite, montmorillonite)로 판단된다. 시료 B 역시 전체적인 구성 성분은 시료 A와 유사하다. 주된 구성 광물은 석영과 정장석, 사장석이며 부수 광물로 점토 광물(kaolinite, montmorillonite)과 백운모가 확인되었다. 흙은 암석이 풍화되어 생성된 것이기에 흙에 가장 흔한 무기질 성분은 암석을 구성하는 광물인 물리적, 화학적 풍화에 저항이 큰 광물이다. 석영은 실리카 구조를 가지며 산소 대 규소의 비가 2 : 1로 아주 낮아 풍화에 대한 저항성이 아주 큰 광물 중의 하나이다. 장석은 산소 대 규소의 비율이 2.7~4.0으로 좀 더 큰 편이며, 점토 광물로 풍화되는 과정에서 변화될 수 있다. 석영이나 장석은 암석을 구성하는 아주 흔한 광물이므로 보통 흙에서 쉽게 관찰된다. 이들은 보통 실트 입자 이상의 크기로 존재하지만 때로는 점토 입자 정도의 크기로 관찰되는 경우도 있으며, 구조적 특성 때문에 등방 치수의 형태를 갖는다(Lambe and Whitman,

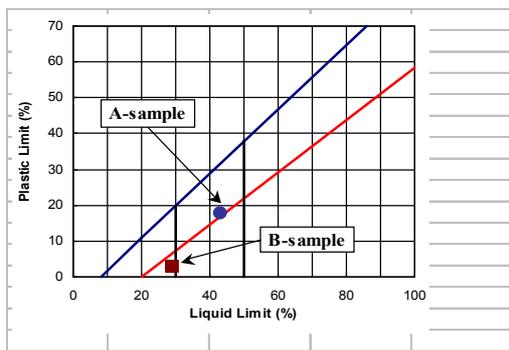


그림 3. 소성도표

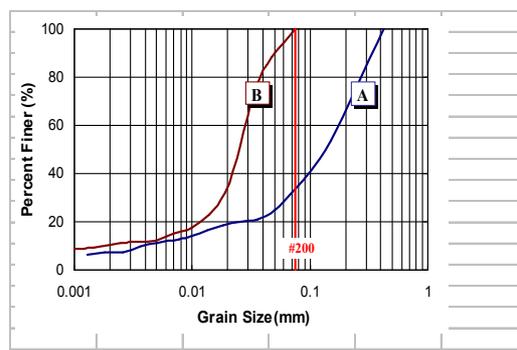


그림 4. 채취한 시료의 입도분포곡선

1979). 일반적으로 점토 광물의 주 성분이 카올리나이트나 일라이트(illite) 등일 경우 점성토의 물리적 성질에 좋은 영향을 미치고, 몬모릴나이트가 많을 경우에는 나쁜 영향을 미친다고 볼 수 있다.

IV. 시험 결과 분석 및 평가

원래 슬레이킹 내구성 시험은 암석이 건조와 습윤 상태를 반복함에 따라 강도를 상실하는 정도를 알아보기 위해 실시하는데, 본 연구에서는 이를 약간 변형시켜 점성토의 함수비별 분쇄 특성을 규명하는데 이용하였다. 일반적인 슬레이킹 내구성 시험법은 국제암반역학회(ISRM) 제안법(Brown, 1981), 일본도로공단 시험법, 일본토목학회 시험법(간이 침수 붕괴도 시험법) 등이 있는데, 널리 사용되는 ISRM 시험법은 통상적으로 암석을 대상으로 하므로 본 연구에서는 일본토목학회의 간이법(土木學會, 1980)을 응용하여, 해당 시료의 함수비를 달리해서 일정 시간 동안 물 속에 침수시킨 뒤 덩어리체로 남아 있는 흙의 건조 중량을 측정하여 침수 전후의 건조 중량 감소율을 산정해서 시료의 분해 특성을 평가하였다.

1. 시험 방법

채취한 시료를 일정한 규격(3×3×3cm, 또는 5×5×5cm)의 육면체로 성형하여 건조 방법과 시간을 달리하여 함수비를 조절(A-시료 : ①0%, ②3.2%, ③7.6%, ④21.8%, ⑤26.8%, ⑥41%, ⑦42%, ⑧45% / B-시료 : ①0%, ②12.2%, ③

23.5%, ④28.3%, ⑤30.1%, ⑥30.6%, ⑦36.2%)한 다음 물을 채운 수조에 넣어 경과 시간에 따라 분해되는 상황을 관찰하였다. 함수비가 0%인 완전건조시료는 육면체로 성형 후 오븐 속에서 약 60℃ 온도로 천천히 건조시킨 것이다.

수침 후 일정 시간(24시간)이 지나면 시료를 꺼내어 수침 전후의 건조 중량 차이를 측정하였다. 물에 넣기 전의 건조 중량은 그 때의 함수비를 근거로 계산하였으며, 수침 후 건조 중량은 수침시키고 24시간 경과한 후에 건져낸 시료 중에서 덩어리 상태를 유지하고 있는 부분만을 오븐에 건조시켜 측정하였다. 그림 5는 시험과정을 간단히 도시한 것이다.

2. 분해 특성

그림 6은 함수비를 달리하는 공시체를 24시간 수침시킨 후 피상(덩어리)을 유지하는 잔류시료를 다시 오븐에 넣어 건조시킨 후 중량을 채취하여 수침 전의 건조중량에 대하여 감소율을 각 공시체의 초기함수비별로 나타낸 것이다. 그림 6의 (a)는 측정결과를 지수함수로 회귀분석한 것이며, (b)는 반대수 좌표로 다시 그려 선형회귀분석한 것이다.

그림에서 수침 전 함수비가 낮을수록 중량 감소율이 높은 것을 뚜렷하게 알 수 있다. 특히 함수비가 0%인 완전건조 공시체는 A, B 모두 24시간 수침 후 완전하게 분해되었음을 보여준다. 실제 시험시 관찰 결과에 따르면, 완전건조 시료는 물 속에 넣은 직후에는 원래 상태를 유지하지만 차츰 부서지기 시작하여 1시간 정도 경과 후에는 심한 균열과 함께 표면 입자가 분

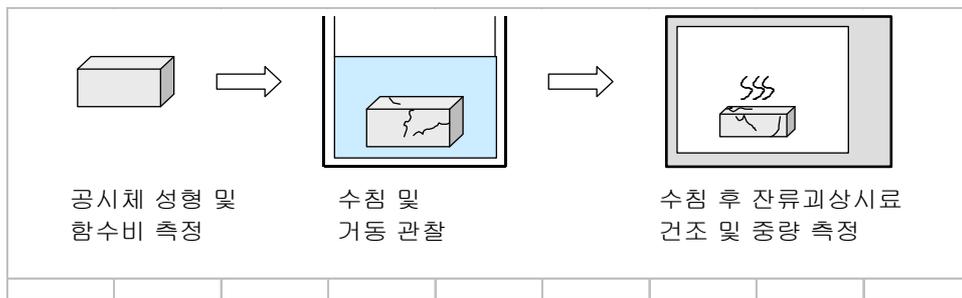
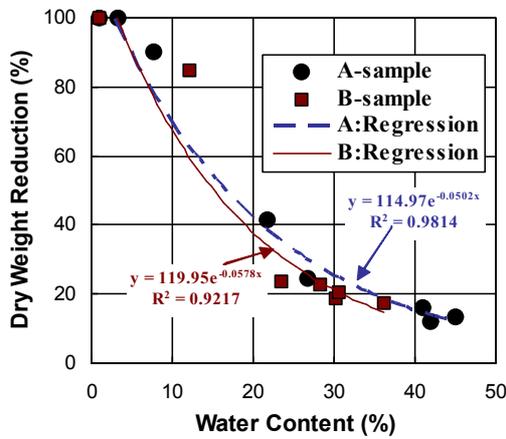
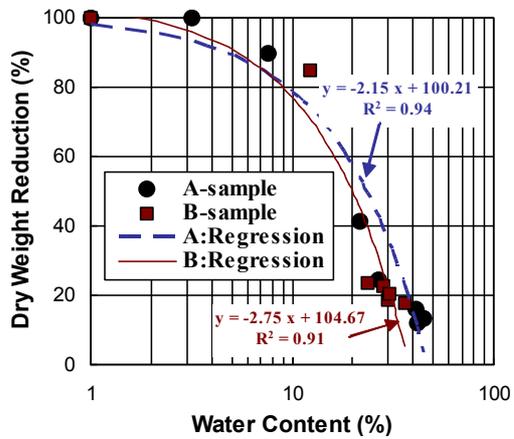


그림 5. 침수붕괴도 시험 과정



(a) 지수함수 회귀의 경우



(b) 반대수(semi-logarithmic) 좌표 : 선형회귀

그림 6. 24시간 수침 후 시료의 초기함수비별 건조중량 감소율

리되며, 24시간 경과 후에는 완전히 분해되었다. 이 때, 세립분 함량이 높은 B-시료는 A-시료에 비해 분해 속도가 다소 느린 것으로 관찰되었다. 부분 건조 시료가 물 속에서 입자 분해(분쇄)되는 양상은 초기함수비와 세립분 함량에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. A-시료는 함수비가 10% 미만일 경우 수침 후 24시간이 경과하면 거의 분해되었으나, B-시료는 초기함수비가 10% 미만일 경우에도 분해가 더디어 이틀 이상이 경과해야 대부분 분해되는 양상을 보였다. 또한 B 시료의 경우 10% 미만으로 건조시켜 수침시킨 공시체에서 수침 도중 상당한 거품이 발생하여 수조 표면에까지 거품막을 형성하였는데, 이는 흙 속에 존재하는 특별한 유기물 때문으로 추정된다.

한편, 시료 A, B 모두 함수비가 10% 이상일 경우에는 완전하게 분해되는 데 상당한 시간이 소요되었다. 역시 B-시료의 분해속도가 훨씬 느리게 나타났는데, B-시료 중 함수비가 25%인 공시체는 수침 후 1주일 이상이 지나도 원래 중량 기준으로 약 1/3 정도만이 분해되었다. 특히, 함수비가 20%를 초과할 경우에는 수침 후 24시간까지는 비교적 빠르게 분해되지만, 그 이후에는 같은 양이 분해되는 데에도 훨씬 많은 시간이 소요되는 사실을 확인하였다. 그림 7은 A-시료의 수침 시험시 관찰한 수침 시간별

분해 형태를 도시한 것이다. 분해 형태의 기준은 표 2와 같다.

표 2. 수침시 시료의 형태 변화 구분

구분	0	1	2	3	4
공시체의 형태					
변화	변화 없음	균열 발생	작은 조각으로 분리됨	부분적으로 가루화	완전히 가루화 됨

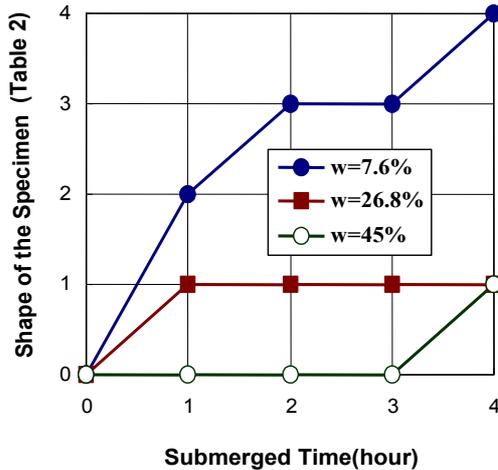


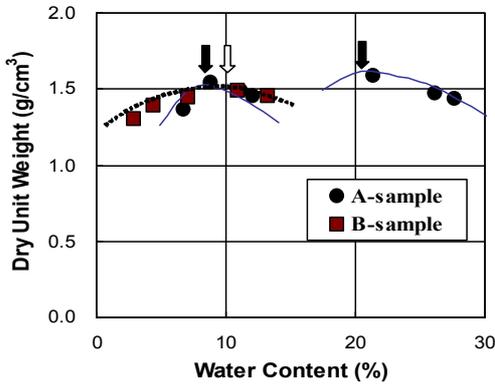
그림 7. 수침 후 경과시간 및 초기함수비별 공시체 분해 형태(시료 A)

이러한 실내시험 결과에 따르면, 전답용 세립토 덩어리들을 적당한 방법으로 건조시켜 함수비를 10% 미만으로 낮출 경우 수침을 통해 비교적 짧은 시간 내에 효과적으로 입자 분해를 촉진할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 다만, 제한된 크기의 육면체 형태로 공시체를 성형하여 실시한 실내시험과 달리, 현장에서는 불규칙한 형태의 큰 덩어리 흙들을 다루어야 하므로 실제 현장에서 보다 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 현장시험이 수반되어야 할 것이다. 이런 방법으로 물 속에서 점성토를 입자 상태로 분해한 후에는 수조 내에서 사질토 등 양질의 토사와 혼합하여 공학적인 성질을 개선하여 성토재료 등 여러 가지 용도로 재활용할 수 있을 것이다.

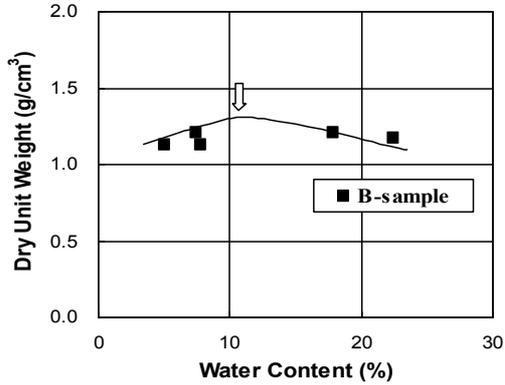
3. 다짐 및 강도 특성

A, B 시료를 건조시켜 분쇄한 후 함수비를 달리하여 표준다짐시험(standard compaction test)과 Wilson(1970)의 하바드다짐 시험(Harvard compaction test)을 실시하였다. 유기질이 다소 함유된 흙이라도 다짐을 통해 그 성질을 개선할 수 있는데, Franklin 등(1973)은 유기물 함량이 8~10%를 초과할 경우에 최대건조단위중량이 크게 감소한다고 하였다. 일반적으로, 동일한 다짐 에너지에 대해서 유기물 함량에 따라 최적함수비도 증가하는데, 유기질 함량이 10% 보다 클 경우에는 다짐에 적합하지 않다.

다짐시험으로 얻은 다짐곡선은 그림 8과 같다. 표준다짐시험을 통해 A-시료는 다짐곡선의 정점이 2개로 나타났으며, B-시료는 함수비



(a) 표준다짐시험(시료 A, B)



(b) 하바드 다짐시험(시료 B)

그림 8. 시료의 다짐곡선

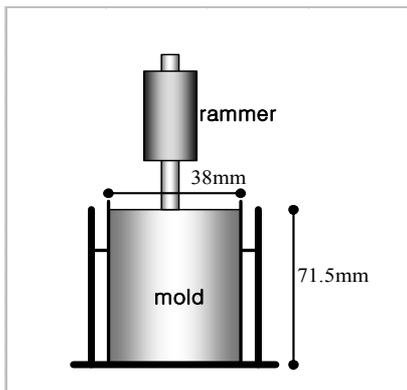


그림 9. 하바드 다짐 몰드

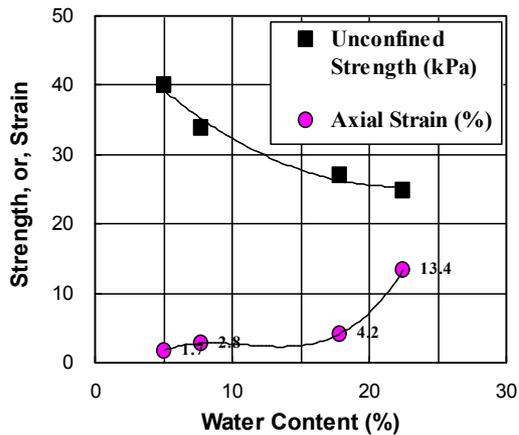


그림 10. 함수비별 일축압축강도와 축변형률(시료 B)

10%에서 한개의 정점을 나타내었다(그림 8 (a)). B-시료의 경우는 소량의 세립토 시료를 대상으로 실시하는 하바드 다짐시험(ASTM STP 479)을 병행하였다(그림 8 (b)). 하바드 다짐시험시에는 표준다짐시험과 달리 몰드가 소형이며, 충격에너지 대신 스프링 내장 탬퍼를 손으로 누르는 방식(압축력은 약 178N)으로 거의 정적인 하중을 사용한다(그림 9). 일반적으로 하바드 다짐시험의 결과와 표준다짐시험의 결과를 직접 비교하기는 어려운 것으로 알려져 있는데, 본 시험에서는 두 방법 모두 최적함수비는 10% 안팎으로 유사하나, 최대건조단위중량의 크기와 다짐곡선의 모양에 다소 차이가 나타났다.

한편, B-시료를 대상으로 일정 시간 수침시켜 분해된 시료를 다시 성형하여 함수비를 7.5%로 맞추어 수회의 하바드다짐시험을 실시하였는데, 이 때의 평균 건조단위중량은 $1.2g/cm^3$ 으로, 이미 구한 다짐곡선의 궤적과 일치하였다. 이는 해당 흙이 수침 후에도 수침 전과 동일한 다짐 특성을 유지한다는 것을 말해준다.

강도 특성을 평가하기 위하여 B-시료를 함수비를 달리하여 하바드 다짐시험을 거쳐 직경 38mm, 높이 71.5mm의 원통형 공시체로 형성하여 일축압축강도시험을 실시하였다. 시료의 함수비는 5%에서 23%까지 변화시켰는데, 강도는 40kPa에서 25kPa로 감소하였다. 그림 10에서 시료의 함수비가 증가할수록 일축압축강도가 감소하며, 반면에 축방향 변형률은 증가하는 것을 알 수 있다. 수침에 따른 강도변화를 알아보기 위하여 완전히 건조시켜 침수붕괴도 시험을 통해 완전 분해된 시료를 대상으로 압축강도시험을 실시하였는데, 본 시료들의 경우에는 수침 전후 강도 차이는 나타나지 않았다. 따라서, 분해 및 혼합을 위하여 장기간 수침시킨다 하더라도 강도의 손실은 없을 것으로 판단된다.

V. 결 론

표토정리, 또는 굴토 등으로 발생한 전담용 세립토의 복토 및 성토재료 활용 방안을 모색

하기 위한 기초 연구단계로, 해당 세립토 시료를 대상으로 기본 물성 시험, 침수붕괴도 시험, 다짐 및 강도시험을 통해 슬레이킹 내구성 및 분쇄 특성을 분석하였다.

덩어리 흙이 입자화되는데 소요되는 시간은 세립분 함량과 초기함수비의 영향을 크게 받는데, 건조중량비를 기준으로 할 때, 수침 후 분해되는 양은 초기함수비에 따라 지수함수 형태로 감소하였다. 200번체 통과량이 30% 이상인 시료를 완전히 건조하여 수침시킨 경우에는 24 시간 이내에 완전히 분해되었으며, 시료의 함수비가 10% 미만일 경우에는 수침 후 2~3일 정도가 지나면 거의 분해되었다. 함수비가 10~20%일 경우 수침 후 1주일이 경과하면 원래 중량의 60~80% 정도가 분해되었으나, 수침 전 함수비가 20% 이상일 수침에 의한 현저한 입자 분해 효과를 관찰할 수 없었다. 따라서, 전담용 세립토 덩어리를 건조시켜 함수비를 10% 미만으로 낮출 경우 수침을 통해 비교적 짧은 시간 내에 효과적으로 입자 분해를 촉진할 수 있을 것으로 판단된다.

시험에 사용한 시료는 수침 전후에 다짐 및 강도 특성이 달라지지 않았으며, 함수비가 증가할수록 일축압축강도가 감소하고, 최대 축변형률은 증가하였다.

인 용 문 헌

- Brown, E. T. 1981. Rock characterization testing & monitoring(ISRM suggested method). Pergamon Press
- Franklin, A.F., L.F. Orozco and R. Semrau. 1973. Compaction of slightly organic soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. American Society of Civil Engineers. 99(7) : 541-557
- Holtz, R.D. and W.D. Kovacs. 1981. An introduction to geotechnical engineering. Prentice-Hall Inc. pp. 185
- Terzaghi, K. 1943. Theoretical soil mechanics. John Wiley & Sons Inc. pp. 510

Wilson, S.D. 1970. Suggested method of test for moisture-density relations of soils using Harvard compaction apparatus. Special procedures for testing soil and rock for engineer-

ing purposes. ASTM STP 479.

土木學會. 1980. 軟岩の調査・試験の指針, 岩の力学 79. 岩盤力学委員會 第4分科會. pp. 223-226

接受 2002年 3月 4日