

대형 오이도미터 시험을 통한 Rockfill 재료의 압축성 평가 Evaluation of Compressibility of Rock Fill Materials by Large-Scale Oedometer Tests

김범주¹⁾, Bum-Joo Kim, 신동훈²⁾, Dong-Hoon Shin, 전제성³⁾, Je-Sung Jeon, 임정열⁴⁾, Jeong-Yeul Lim

¹⁾ 수자원연구원 댐안전연구소 선임연구원, Senior Researcher in Dam Safety Research Center KIWE

²⁾ 수자원연구원 댐안전연구소 책임연구원, Principal Researcher in Dam Safety Research Center KIWE

³⁾ 수자원연구원 댐안전연구소 책임연구원, Principal Researcher in Dam Safety Research Center KIWE

⁴⁾ 수자원연구원 댐안전연구소 선임연구원, Senior Researcher in Dam Safety Research Center KIWE

SYNOPSIS : In this study, a series of large-scale oedometer tests was performed to investigate the compressibility of rock fill materials. The testing samples were prepared to have three different grain size distributions and for each distribution, exist in two different states(dried and saturated). The test results indicated that particle breakages occurred mainly for the particles larger than 4.75mm in size and increased with increasing grain sizes. Also, it was found that, for a dry sample as it became well-graded, its compressibility decreased and accordingly, its tangent constrained modulus increased. A comparison between the samples in dry and saturated states revealed that compressibility of the materials increases with increasing water content. The values of tangent constrained modulus calculated for the tested dry samples were larger by about 10 to 20%, on average, than those for the saturated samples.

Key words : large-scale oedometer tests, particle breakage, compressibility, tangent constrained modulus

1. 서 론

국내 다목적댐의 대부분을 차지하는 필댐의 경우 그 형식은 주로 주축조재료로서 암석재 및 사력재를 사용하는 중심코아형 석괴댐이며 신규 댐에 대해서도 최근 국내를 포함한 세계적인 추세는 경제성 등의 이유로 암석재를 사용하여 축조하는 콘크리트표면차수벽형 석괴댐(CFRD)의 건설이다. 이러한 댐들의 경우 댐 단면의 대부분을 차지하는 암석존에 의하여 그 안정성이 좌우되므로 암석 축조재의 역학적 특성에 대한 정확한 파악은 매우 중요하다고 할 수 있다. 그러나 국내의 경우 암석재를 포함한 입경이 큰 조립재에 대한 연구가 미비한 편으로 필요시 외국의 자료를 그대로 사용하는 경우가 많아 국내 기존 댐의 안정성 검토와 신규 댐의 설계 및 시공시 보다 합리적인 적용을 위해서는 실제 국내 댐 현장에서 사용되는 축조재에 대한 특성 파악이 필요하다. 이에 본 연구에서는 실제 국내 댐 현장으로부터 반입된 암석재에 대하여 대형 오이도미터 시험을 실시하고 이를 통해 재료의 압축특성을 조사하였다.

2 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

본 연구를 위해 사용된 실험재료는 원석이 화강편마암인 0.074~100mm의 입경 범위를 갖는 조립재로서 대체적으로 모난 입자가 많고 담회색 및 담청색을 띠었다(그림 1).

실험재료의 기본물성을 파악하기 위하여 비중시험과 흡수율 및 점재하시험(ASTM D5731)을 실시하였으며 재료의 평균 비중과 흡수율 및 추정된 일축압축강도는 표 1에 나타난 바와 같다.



그림 1. 실험에 사용된 재료

표 1. 재료의 기본물성

종류	값
겉보기비중	2.71
흡수율	0.59
일축압축강도	152 Mpa

2.2 대형 압축시험

본 연구에서는 암석 축조재의 압축성을 조사하기 위하여 그림 1의 시료를 가지고 직경 1m의 대형 오이도미터 셀에 소정의 단위중량으로 실험지반을 조성한 후 압축시험을 실시하였다. 실험기기는 아주대학교 지반공학연구실에서 자체 개발한 대형 오이도미터 시험기를 사용하였으며 이는 횡방향 변위가 구속된 상태에서 축방향 압축력이 작용하도록 하고 유압 실린더를 이용하여 200ton까지의 하중 재하가 가능하도록 제작된 것이다.

일정 단위중량의 재료에 대하여 입도분포가 압축성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 그림 2에 보는 바와 같은 세 가지의 다른 입도분포를 갖는 시료에 대하여 실험을 실시하였으며 또한, 각 시료에 대하여 기건상태와 포화상태에 대하여 실험을 수행하여 두 경우에 대하여 압축성의 차이를 평가하고자 하였다.

실험이 수행된 조건은 표 2에 나타난 바와 같다.

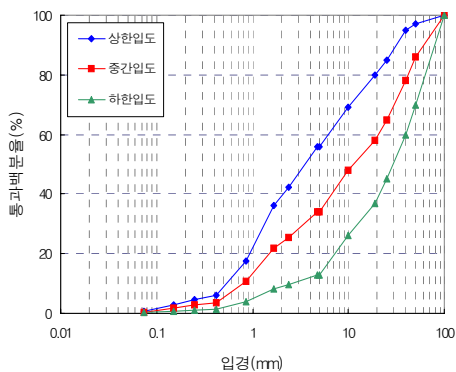


그림 2. 시료의 입도분포

표 2. 실험조건

시료상태	입도분포	단위중량 (kN/m ³)	하중재하
기건상태	상한	22.2	25, 50, 75, 100, 150 ton에서 재하 및 재하 반복
	중간	22.2	
	하한	22.2	
포화상태	상한	23.2	
	중간	22.9	
	하한	22.7	

3 실험결과

3.1 파쇄율 평가

본 연구에서는 압축에 의한 입자의 파쇄율을 산정하기위해 압축실험 후 각 시료에 대하여 입도분포시험을 실시하였으며 그림 3은 실험전과 실험후의 시료에 대한 입도분포곡선을 나타낸다.

입상재료에 있어서 입자파쇄의 정도는 1)파쇄 전 최소입경 이하의 세립분의 파쇄후의 증가량, 2)파쇄 전후의 입도조성 변화량, 3)파쇄 전후의 비표면적 변화량 등으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 시험 전후의 각 체에 남는 시료의 양을 산정하고, 각 입도분포곡선 아래에 있는 면적의 차이와 시험 전 입도곡선 면적의 비를 파쇄율로 정의하였다. 그림 4는 각 입도별 잔류율 분포를 나타낸 것으로서 주로 입도의 변화는 4.75mm 이상의 입자들에서 발생했음을 알 수 있으며 그림 5는 입도별 파쇄율을 계산하여 나타낸 것으로 결과는 상한입도-중간입도-하한입도의 순으로, 즉 입도분포가 조립질일수록, 파쇄율이 다소 증가하는 것으로 나타났다.

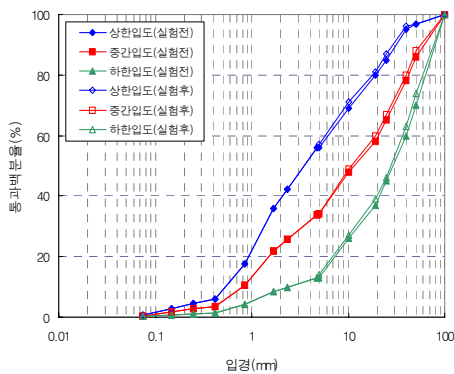


그림 3. 압축실험 전과 후의 시료의 입도분포

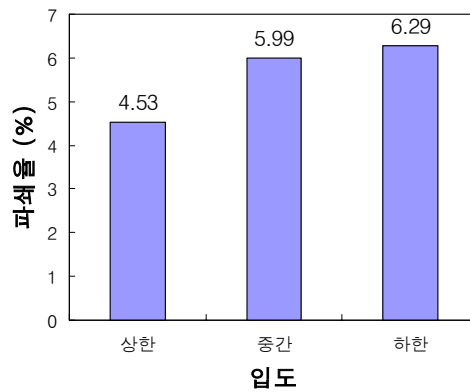
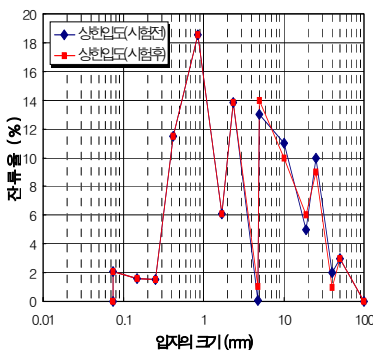
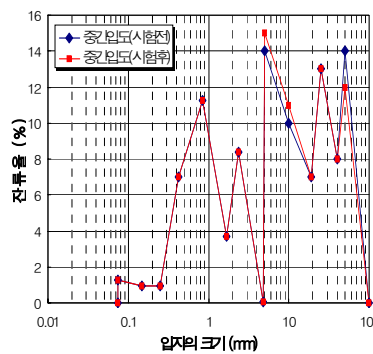


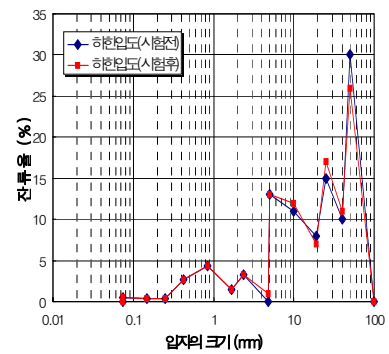
그림 5. 입도종류별 파쇄율



(a) 상한입도



(b) 중간입도



(c) 하한입도

그림 4. 실험 전과 후의 입도별 잔류율

3.2 수직응력-변형을 특성

그림 6은 기건 및 포화상태로 각 상태에 대해 세 종류의 입도분포로 조성된 실험지반에 대한 압축시험

결과를 나타낸다. 하중 증가에 따른 재료의 수직 변형량을 수직응력과 수직변형율로써 나타내었으며 최대 150ton(약 2Mpa 압력)의 하중에 대해 최대 발생한 시료의 변형율은 전체 실험시료에 대해 약 3%에서 6%이내의 범위를 나타내었다.

조립재료의 하중재하에 따른 압축변형의 메카니즘은 크게 두 가지로 구분하여 개개 입자의 비틀림과 부서짐, 그리고 입자간 미끄러짐과 구름에 의한 상대변형으로 설명할 수 있다(Lambe and Whitman, 1979). 입자의 파쇄는 3.1절의 파쇄율 결과에서 보듯이 상대적으로 작은 압력수준에서도 다소간 발생하나 전반적인 입자들의 급격한 파쇄와 이로 인한 변형속도의 증가는 일반적으로 한계압력(critical stress)으로 정의되는 매우 큰 압력수준에서 발생하며 그러한 한계압력의 크기는 일반적으로 재료의 입도분포와 입자의 형상과 거칠기 및 강도 등 다양한 요소에 의존하는 것으로 알려져 있다(Lee and Farhoomand, 1967); Roberts and DeSouza, 1958; Schultze and Moussa, 1961).

본 실험으로부터 얻어진 응력-변형율 곡선은 하중재하와 함께 위에 언급한 압축 메카니즘에 의해 발생한 변형증가의 양상을 나타낸다. 그러나 본 연구에서는 한계압력을 응력과 변형율을 양대수 눈금 축에 표시했을 때 변형곡선이 급하게 변하는 점에서의 압력으로 정의하고 이를 산정하고자 하였으나 실험에 적용한 최대 압력 이하에서 변형곡선의 형태가 선형으로 나타나 실제 한계압력은 그 이상이 되는 것으로 판단하였다.

실험조건(즉, 입도분포와 함수상태 변화)에 따른 압축성의 변화를 살펴보면, 우선 입도분포의 변화에 대하여 기건상태시 중간입도의 시료 변형율이 같은 상태의 상한 및 하한입도 시료와 비교해 상대적으로 적은 것으로 나타나 일반적으로 같은 재료에 대하여 입도분포가 양호할수록 압축성이 적은 조립재의 압축특성을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 또한, 포화상태의 시료에서 발생한 변형율이 기건상태 시료에서 발생한 변형율보다 다소간 큰 것으로 나타났으며 이는 물이 입자간 이동에 윤활작용을 하여 상대변형을 증가시키는 역할을 할 뿐 아니라 입자자체의 강도를 저하시키는데 기인한 것으로 판단된다.

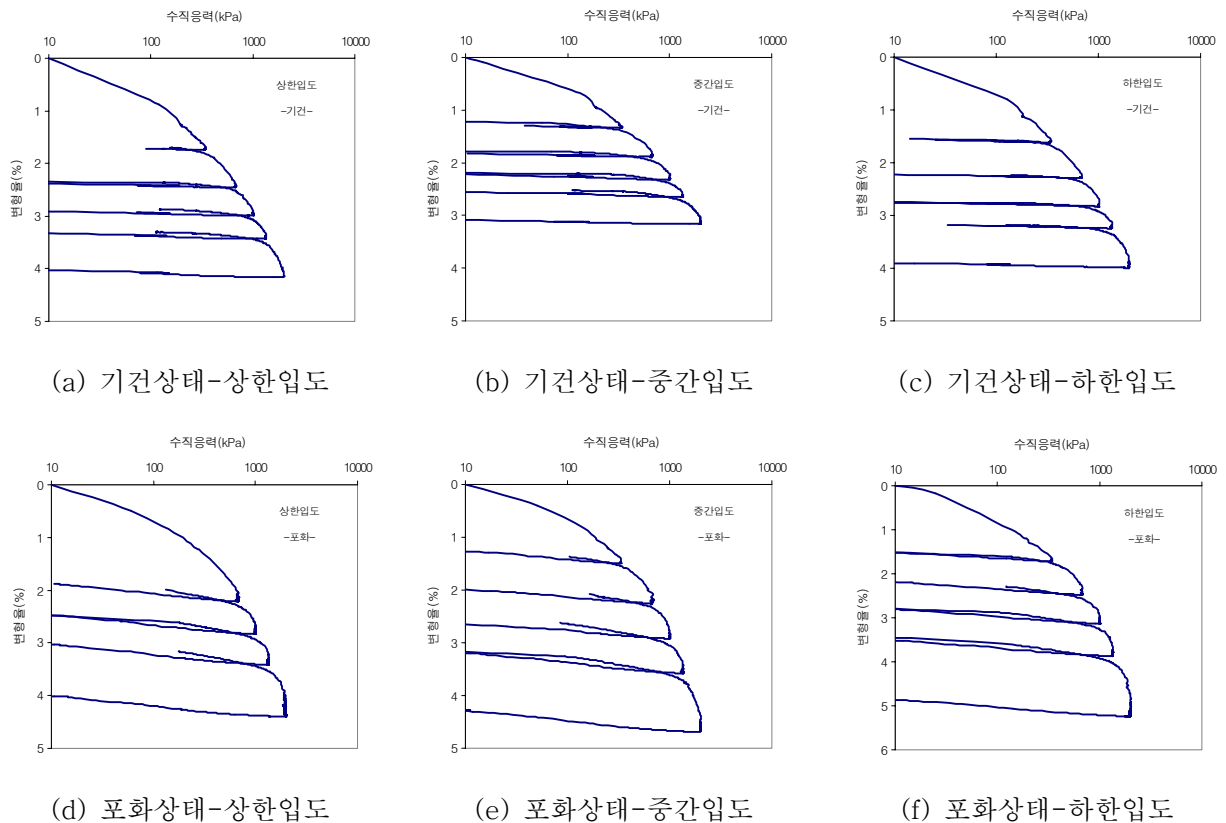


그림 6. 수직응력 vs. 수직변형율 관계

3.3 접선구속계수(tangent constrained modulus) 산정

오이도미터(구속압축) 시험으로부터 얻어진 응력-변형을 관계로부터 탄성이론에 근거하여 다음 식(1)과 같이 정의되는 재료의 구속계수(constrained modulus)를 산정할 수 있으며 이는 조립체에 매우 넓은 폭에 걸쳐 하중이 작용하는 경우 재료의 대략적인 침하량을 추정하는 데 사용될 수 있다.

$$M = \frac{\Delta\sigma_v}{\Delta\epsilon_v} \quad (1)$$

여기서, M은 구속계수, 그리고 σ_v 와 ϵ_v 는 각각 수직응력과 수직변형율을 나타낸다. 본 연구에서는 그림 6의 응력-변형을 관계로부터 임의의 응력상태에서의 구속계수의 크기를 구하기 위하여 접선구속계수(tangent constrained modulus)를 산정하였으며 이를 위해 응력-변형 곡선을 파워함수(power function)로 회귀분석($R^2 \geq 0.99$)하고 이를 식 (1)과 같이 미분하였다. 그림 7은 임의 응력에 대해 산정된 접선구속계수를 나타낸다.

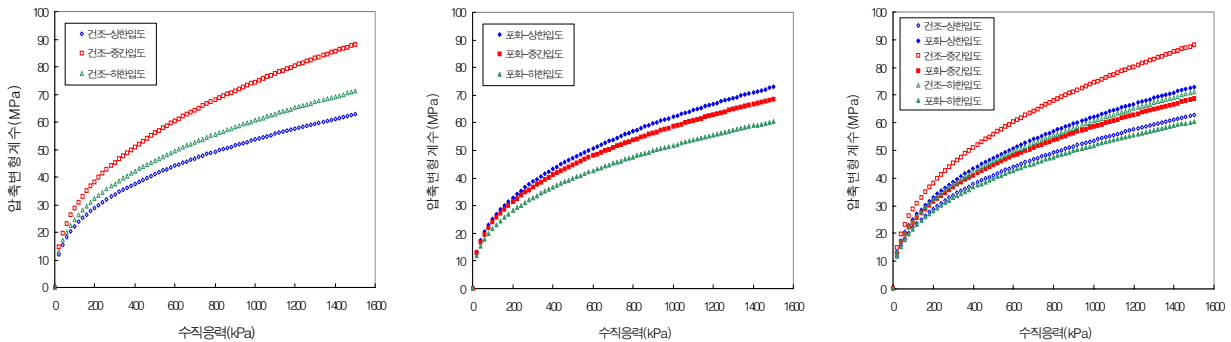


그림 7. 접선구속계수(tangent constrained modulus)

수직응력의 증가와 함께 구속계수의 크기가 점차적으로 증가하며 실험조건에 따른 구속계수의 차이는 3.2절의 결과로부터 알 수 있듯이 기건상태의 경우 중간입도 시료의 접선구속계수의 크기가 상한 및 하한입도 시료와 비교해 다소간 큼(약 20~30%)을 나타내며 기건상태와 포화상태 시료의 경우에도 기건상태 시료가 포화상태 시료보다 다소 큰 값(약 10~20%)의 구속계수를 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 암석 축조제의 압축성을 평가하기 위하여 세 종류의 서로 다른 입도분포를 가진 시료를 소정의 단위중량을 갖도록 다진 후 기건상태와 포화상태에 대하여 각각 대형 오이도미터 시험을 실시하였으며 이를 통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 압축에 의한 입자의 파쇄는 주로 4.75mm이상의 입자들에서 발생한 것으로 나타났으며 입도종류별 파쇄율을 계산한 결과, 상한입도-중간입도-하한입도의 순으로 입도분포가 조립질일수록 파쇄율이 다소 증가한 것으로 나타났다.
2. 수직응력-수직변형율의 관계로부터 기건상태시 중간입도의 시료 변형율이 같은 상태의 상한 및 하한입도 시료와 비교해 상대적으로 적은 것으로 나타나 일반적으로 입도분포가 양호할수록 압축성이 적은 조립제의 압축특성을 잘 반영하는 것으로 나타났으며 또한, 포화상태의 시료에서 발생한 변형율이 기건상태 시료에서 발생한 변형율보다 다소간 큰 것으로 나타났다.

3. 응력-변형을 관계로부터 접선구속계수(tangent constrained modulus)를 산정한 결과, 기건상태의 경우 중간입도 시료의 접선구속계수의 크기가 상한 및 하한입도 시료와 비교해 대략 20~30% 큰 것으로 나타났으며 기건상태와 포화상태 시료의 경우에도 기건상태 시료에 대한 구속계수의 크기가 포화상태 시료보다 약 10~20% 큰 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1979), *Soil Mechanics, SI Version*, Wiley Eastern Limited, New Delhi, pp.553
2. Lee, K. L. and Farhoomand, I. (1967), "Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. IV, No. 1, pp.68-99.
3. Roberts, J. E. and DeSouza, J. M. (1958), "The compressibility of sands," *Proceedings of the American Society for Testing and Materials*, Vol. 58, pp.1269-1277.
4. Schultze, E. and Moussa, A. (1961), "Factors affecting the compressibility of sand," *Proceedings of the Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, pp.335-340.

감사의 글

본 연구를 위해 대형 오이도미터 시험을 수행한 아주대학교 지반공학연구실에 깊은 감사를 드립니다.