

모래 지반 내에 형성된 공극이 전단강도에 미치는 영향 Effect of Void Formation on Shear Strength of Sand

최현석¹⁾, Hyun-Seok Choi, 박성식²⁾, Sung-Sik Park, 김창우³⁾, Chang-Woo Kim

¹⁾ 원광대학교 공과대학 토목환경·도시공학부 석사과정, Graduate Student, Division of Civil, Environmental & Urban Engrg., Wonkwang Univ.

²⁾ 경북대학교 공과대학 건설공학부 토목공학전공 전임강사, Full-time Lecturer, Department of Civil Engineering, Kyungpook National Univ.

³⁾ 원광대학교 공과대학 토목환경·도시공학부 석사과정, Graduate Student, Division of Civil, Environmental & Urban Engrg., Wonkwang Univ.

SYNOPSIS : In this study, the effect of void formation resulting from gas hydrate dissociation or loss of some particles within soil structure on the strength of soil is examined. Beag-ma river sands with uniform gradation were used to simulate a gas hydrate bearing or washable soil structure. Empty capsules for medicine are used to mimic large voids, which are bigger than soil particle. Beag-ma river sand was miced with 8% cement ratio and 14% water content and compacted into a shear box. The number and direction embedded into a specimen. After 4 hours curing, a series of direct shear test is performed on the capsule embedded cemented sands. Shear strength of cemented sands with capsules depends on the volume and direction. The volume and direction formed by voids are most important factors in strength. A shear strength of a specimen with large voids decreases up to 39% of a specimen without void. The results of this study can be used to predict the strength degradation of gas hydrate bearing sediments after dissociation and loss of fine particles within soil structure.

Keywords : cemented sand, void area ratio, shear stress, alignment

1. 서론

해저지반 내에 매장된 가스하이드레이트가 해리되면 많은 양의 가스와 물이 발생하며 이와 같이 발생한 가스와 물은 장기간에 걸쳐 해저지반을 빠져나가거나 다른 곳으로 이동하게 된다. 결국 고체 형태로 지반 내에 존재하던 가스하이드레이트는 사라지고 기존에 가스하이드레이트가 차지하던 부분은 주변 압력에 의해 축소되지만 크고 작은 공극이 형성될 것이다. 이와 같이 가스하이드레이트가 해리된 후 해저지반 내에 형성된 공극은 지반의 강도 변화를 일으켜 해저사면의 장기 안정성에 영향을 미칠 수 있다. 어떤 지반에서는 자갈과 같이 큰 입자 사이에 모래나 실트와 같이 상대적으로 작은 입자가 섞여 있는 경우가 있으며, 조립질로 구성된 흙 사이에 세립분이 섞여 있는 형태의 땀이나 제방에서 유수작용으로 인하여 조립질 흙 내에 있는 세립분이 유실될 수 있다. 이와 같이 지반 내 입자가 유실될 경우 유실될 가능성이 있는 세립분의 양 또는 유량이나 유속과 같이 유실을 일으키는 외부 원인에 따라 다양한 크기의 공극이 형성 될 수 있다. 또한 조립질 흙 입자 주위에 세립분이 탄산칼슘이나 염화나트륨과 같은 물질로 고결되어 있는 경우(엄용훈 등, 2009), 물의 유입으로 고결물질이 용해되어 세립분이 조립질 흙 입자에서 떨어져 나간다면 흙 골격구조의 형태나 용해 가능한 입자의 정도에 따라 다양한 형태의 공극이

형성될 수 있다. Fam 등(2002)과 쥘광홍 등(2008)은 모래와 소금을 혼합하여 만든 공시체에서 소금의 용해로 인하여 발생하는 공극 증가가 공시체의 역학적 특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 박성식 등(2010)은 고결모래 내에 형성된 공극이 일축압축강도에 미치는 영향에 대하여 연구하였으며, 공극이 증가할수록 일축압축강도는 감소하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 토체 내에 얼음과 같은 가스하이드레이트가 녹으면서 형성되는 공극이나 유수작용으로 지반 내의 세립분이 유실되어 발생하는 공극이 지반의 강도에 미치는 영향을 직접전단시험을 이용하여 평가하였다. 공극에 따른 지반의 강도 특성은 가스하이드레이트 해리로 인해 공극이 형성된 해저사면이나 세립분이 유실된 지반의 안정성을 예측하는데 사용될 수 있다.

2. 직접전단시험

2.1 실험재료

본 연구에서는 백마강모래에 초속경시멘트를 섞은 혼합토를 사용하여 공시체를 제작하였다. 백마강모래는 전라북도 장수에서 군산만까지 이어지는 백마강에서 준설한 것으로 그림 1과 같이 입자가 약간 모난 형태를 가지고 있다. 그림 2는 0.85mm 체를 통과한 백마강모래의 입도분포곡선이며 기본 입도특성은 표 1과 같다. 실내다짐시험에서 구한 최대건조밀도와 최적함수비는 각각 1.61g/cm³와 14%이다. 고결제로 사용한 초속경시멘트는 국내 S사 제품으로 3시간에 7일 강도 발현이 가능하며 비중이 3.14이다.

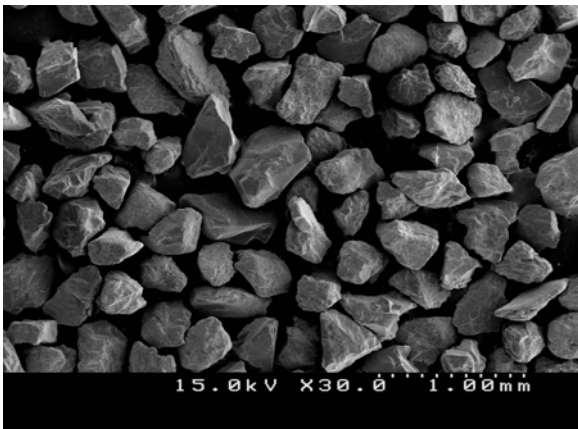


그림 1. 백마강모래의 사진

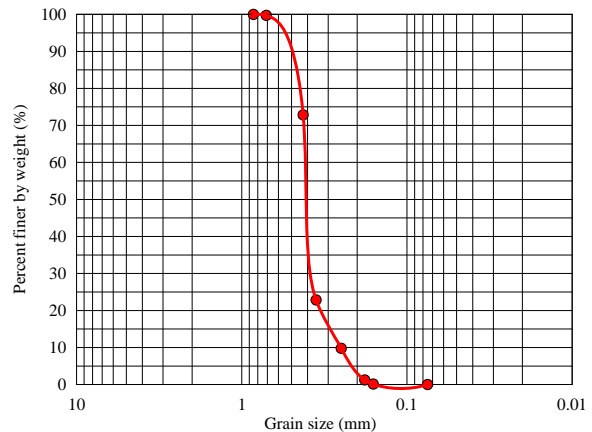


그림 2. 백마강모래의 입도분포곡선

표 1. 백마강모래의 입도특성

Maximum void ratio e_{max}	Minimum void ratio e_{min}	G_s	Effective grain size D_{10} (mm)	Mean grain size D_{50} (mm)	Uniformity coefficient C_u
1.237	0.765	2.64	0.25	0.41	1.64

2.2 공시체 제작방법

공시체 제작은 아래와 위 전단상자를 조립한 다음 그림 3과 같이 전단상자 아래 부분까지 모래를 넣고 다짐한 다음 구멍을 파서 빈 캡슐의 반 정도를 넣은 다음 다시 전단상자 윗부분까지 모래를 넣고 다짐하였다. 공시체내의 빈 캡슐이 손상되지 않도록 나무로 된 원형모양의 틀을 이용하여 약하게 다짐하였다. 점착력이 없는 깨끗한 모래로 공시체를 제작할 경우 캡슐로 형성된 공극이 초기에는 형상을 유지하지만 시료 내에 물이 있어 캡슐이 약하게 되면서 형성된 공극을 실험이 진행되는 동안 유지하는 것이 어렵게 되었다. 형성된 공극을 실험이 진행되는 동안 계속 유지하기 위하여 4~12%의 시멘트를 함유한 혼합토로 공시체를 제작하였다. 시멘트비는 건조모래의 무게에 대한 시멘트의 무게로서 다음과 같이 계

산하였다.

$$\rho_c = \frac{W_c}{W_s} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서 W_c 는 시멘트의 무게, W_s 는 건조된 모래의 무게이다.

양생되는 과정에 있어서 캡슐로 인한 전단강도의 영향을 최소화하기 위하여 30분 이상의 양생시간을 필요로 하였다. 혼합토의 양생시간을 고려하였을 때 시멘트비가 4%인 경우 캡슐로 인한 공극형성에 있어서 다소 많은 양생시간을 필요로 하여 실험 진행에 있어서 원활하지 못하였다. 또한 시멘트비가 12%인 경우에는 양생시간을 많이 필요로 하지 않으나 캡슐의 영향을 최소화하기 위해서 필요한 30분이라는 시간동안에 상당한 강도가 발현되어서 공극으로 인한 영향을 판단하기에 어려움이 있었다. 따라서 본 실험에는 시멘트비를 8%로 정하고 공시체 제작 후, 10kPa의 수직응력을 적용한 시점부터 3시간을 양생하는 것으로 결정하였다. 지반 내에 형성되는 흩 입자보다 큰 공극을 모사하기 위하여 의약품에 일반적으로 사용되는 빈 캡슐을 이용하였으며 캡슐의 크기는 직경 7.3mm, 길이 21.6mm이다. 건조된 모래 150g과 정해진 양의 시멘트를 잘 혼합한 다음 최적함수비로 잘 비빈 후, 직경 6cm, 높이 3.15cm의 전단상자 내에 혼합토가 조밀한 상태가 되도록 잘 다진다. 이렇게 준비한 공시체에 10kPa의 수직응력을 가한 후 3시간 동안 양생한다. 그림 3(a)는 전단방향에 대하여 직각방향으로 캡슐이 삽입된 경우이며 그림 3(b)는 전단방향에 대하여 나란한 방향으로 캡슐이 삽입된 경우를 나타낸 그림이다. 그림 4는 공시체를 만드는데 사용한 전단상자와 직접전단시험 장비이고, 그림 5같이 실험 후 전단된 공시체내의 캡슐의 위치와 방향을 재확인하였으며 수직응력 재하로 인한 캡슐의 손상 여부도 확인하였다.

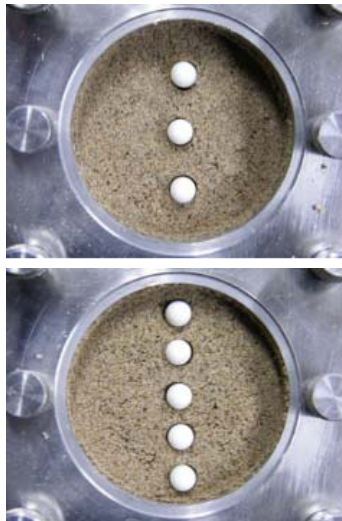


그림 3(a). 공시체 내에 수직으로 삽입된 캡슐의 위치

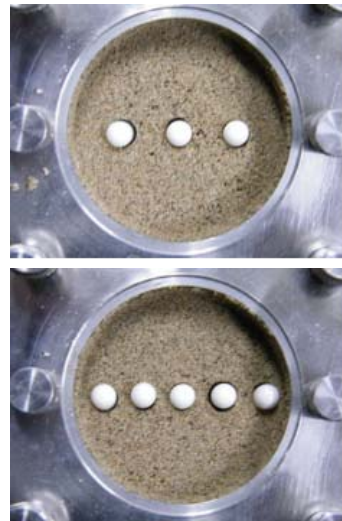


그림 3(b). 공시체 내에 수평으로 삽입된 캡슐의 위치

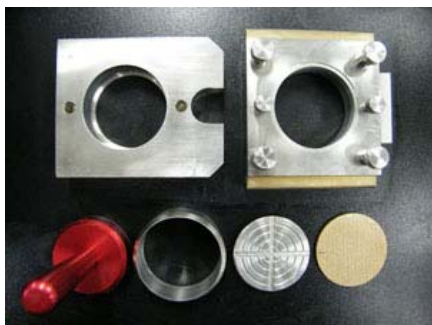


그림 4. 전단상자 및 직접전단시험장비

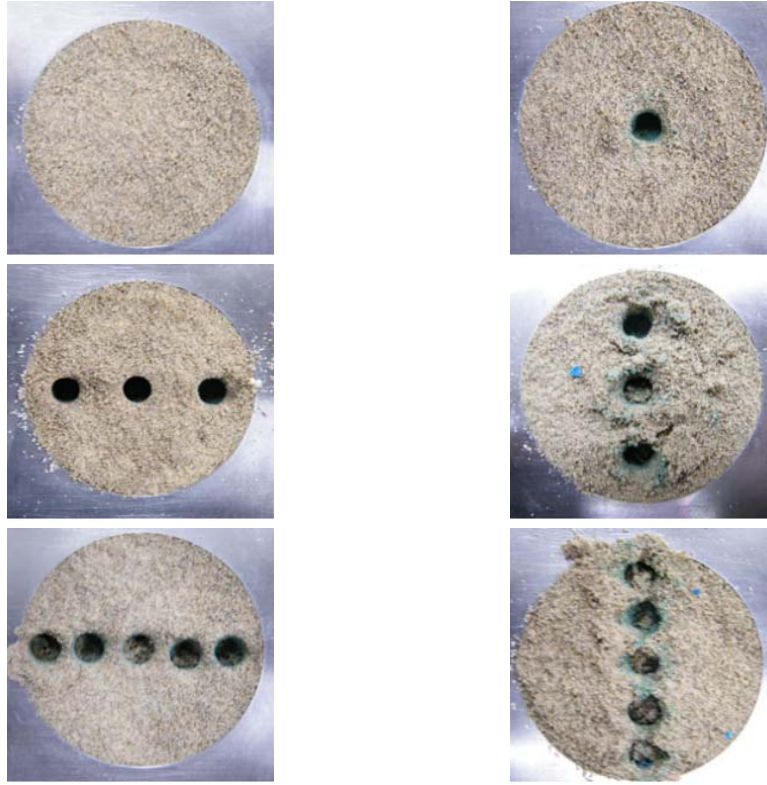


그림 5. 실험 후 캡슐로 형성된 공극의 모습

2.3 직접전단시험

공시체에 고결력이 발생할 때까지 3시간 동안 10kPa의 수직응력을 가한 상태로 양생하였다. 양생이 완료되면 100kPa의 수직응력을 가한 후 0.1mm/min의 속도로 직접전단시험을 실시하였다. 전단변위를 6mm까지 전단하였으며, 전단시험이 완료된 후 공시체의 함수비를 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 공극의 체적에 따른 전단강도의 특성

표 2. 실험종류 및 결과

Test	capsule number	vertical stress (kPa)	Capsule alignment to loading direction	void area ratio (%)	water contents (%)	peak shear stress (kPa)
case1	0	100	-	0	11.4	176.46
case2	1	100	-	1.5	11.1	163.66
case3	3	100	perpendicular	4.5	10.6	110.30
case4	3	100	parallel	4.5	10.7	163.00
case5	5	100	perpendicular	7.5	10.9	107.70
case6	5	100	parallel	7.5	10.9	156.58

표 2에 수직응력 100kPa를 적용하여 실시한 전단시험의 결과를 정리하였다. case 1은 캡슐이 없는 경우, case 2는 캡슐이 공시체 중앙에 1개 들어간 경우, case 3과 case 5는 캡슐 3개, 5개가 전단방향과 직각인 방향으로 들어간 경우, case 4와 case 6은 캡슐 3개, 5개가 전단방향과 나란한 방향으로 들어간 경우이다. 그림 6은 캡슐이 없는 case 1과 중앙에 캡슐이 들어간 case 2, 그리고 전단방향과 직각인 방

향으로 캡슐이 들어간 case 3, case 5의 전단강도를 비교한 결과이고, 그림 7은 case 1과 case 2, 그리고 전단방향에 대하여 캡슐이 나란하게 들어간 case 4와 case 6을 비교한 결과이다. 캡슐의 배열이 직각인 경우 공시체 내에 캡슐의 수가 증가함에 따라 공극 체적의 양이 증가하여 공시체의 전단강도는 감소하였다. 하지만 캡슐의 배열이 전단방향과 나란한 경우에 캡슐의 수가 증가하여도 공시체의 전단강도는 크게 감소하지 않았다.

지반 내에서 형성되는 공극의 증가에 따른 강도 변화를 평가하기 위하여 캡슐이 없는 공시체인 case 1의 전단강도를 캡슐로 인하여 공극이 형성된 공시체의 전단강도로 나눈 값을 식 (2)와 같이 강도감소율(Strength Reduction Ratio, SRR)로 정의하였다. 캡슐 개수에 따른 강도감소율을 그림 8에 나타내었다. 캡슐 개수의 증가에 따른 강도감소율은 캡슐이 전단방향과 직각으로 들어간 경우는 최대 39%, 전단방향과 나란하게 들어간 경우는 최대 11%까지 감소하였다.

$$SRR = \frac{\tau_{f0} - \tau_{f1}}{\tau_{f0}} \times 100(\%) \quad (2)$$

여기서 τ_{f0} 는 캡슐이 없는 공시체의 전단강도
 τ_{f1} 는 캡슐이 들어간 공시체의 전단강도

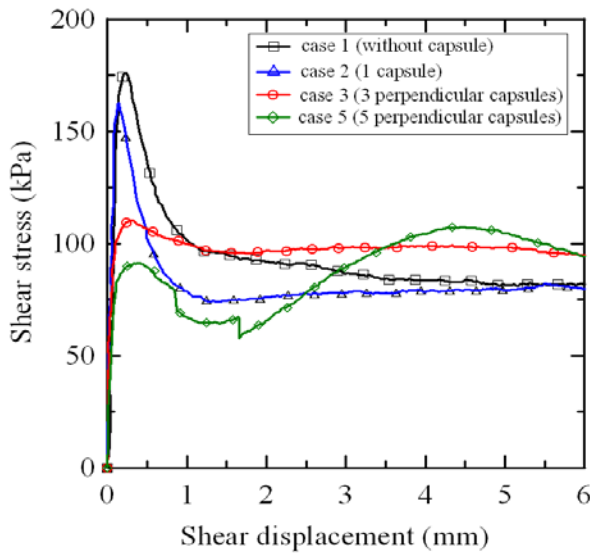


그림 6. Results of case 1, case 2, case 3 and case 5

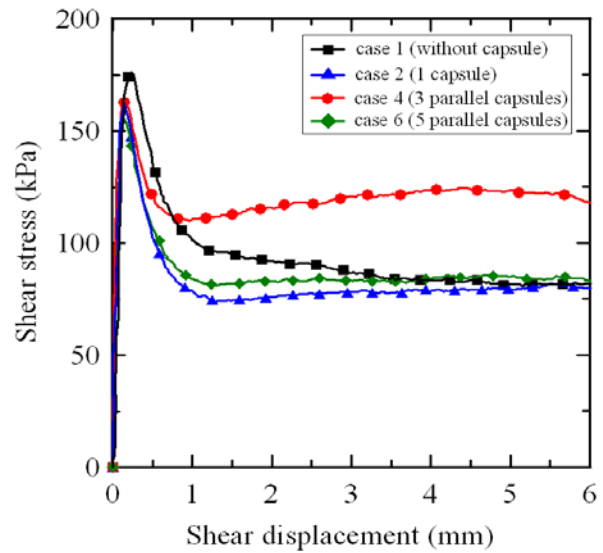


그림 7. Results of case 1, case 2, case 4 and case 6

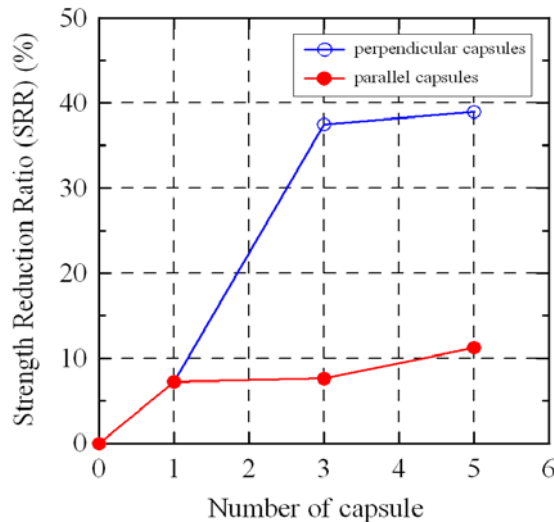


그림 8. Strength reduction ratio (SRR) with capsule

3.2 공극의 배열에 따른 전단강도의 특성

공극의 배열이 전단강도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 그림 9와 그림 10과 같이 삽입된 캡슐의 수가 동일한 case 3과 case 4, 그리고 case 5와 case 6을 각각 비교하였다. 그림 9에서 case 3의 최대전단응력 110.30kPa와 case 4의 최대전단응력 163kPa의 경우 공시체 내에서 캡슐이 차지하는 공극의 양은 동일하지만 전단방향에 대한 캡슐의 배열에 따라 그 값은 큰 차이를 나타내었다. 또한 그림 10에서 case 5의 최대전단응력 107.70kPa와 case 6의 최대전단응력 156.58kPa의 경우에도 캡슐 배열에 따라 전단강도는 큰 차이를 보였다. 반면에 그림 7에서 볼 수 있듯이 캡슐이 1개 삽입된 case 2의 최대전단응력 163.66kPa와 비교하였을 때 캡슐이 나란한 방향으로 배열된 case 4의 최대전단응력 163kPa와 case 6의 최대전단응력 156.58kPa는 캡슐이 직각인 방향으로 배열된 case 3의 최대전단응력 110.30kPa와 case 5의 최대전단응력 107.70kPa에 비해 거의 유사한 값을 나타냈다. 그 이유는 그림 3(b)에서 보이듯이 캡슐의 배열이 전단방향과 나란한 경우, 공극이 배열된 공시체의 전단면을 기준으로 전단력에 저항하는 면의 비가 case 1, case 4, case 6 모두 동일하기 때문이며 case 1에 비해 상대적으로 전단응력의 값이 적은 case 3과 case 5의 경우에는 전단력에 저항하는 면의 비가 작기 때문으로 판단된다.

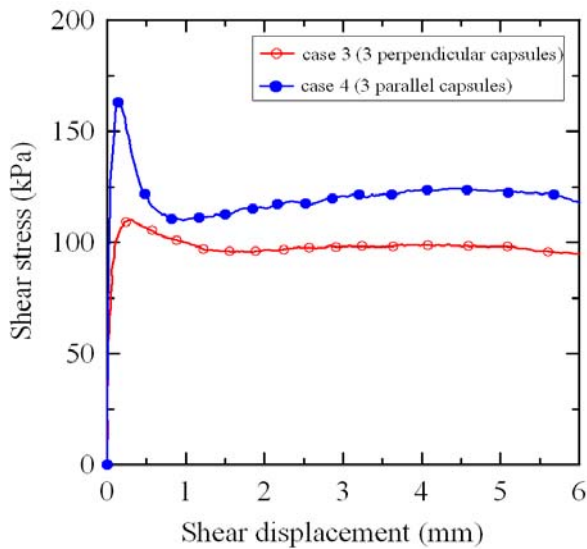


그림 9. case 3과 case 4의 비교

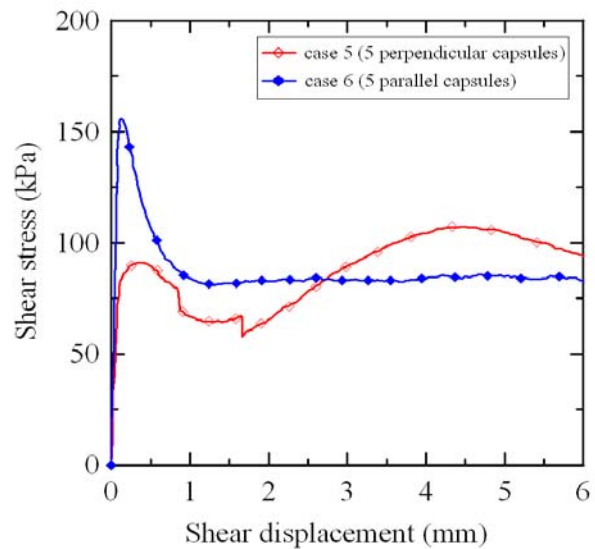


그림 10. case 5와 case 6의 비교

4. 결론

본 논문에서는 해저지반 내에 가스하이드레이트의 해리로 형성되는 공극이나 유수작용으로 인한 지반 유실로 형성되는 공극으로 인한 지반의 강도 변화를 연구하였다. 이렇게 형성되는 공극은 기존의 흙 입자보다는 상대적으로 큰 공극을 의미하며, 시멘트 혼합토 내에 캡슐을 사용하여 큰 공극을 모사하였다. 고결된 공시체 내에 형성된 공극의 분량과 배열에 따른 전단강도를 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었으며, 이와 같은 연구 결과는 지반 내에 형성되는 공극의 분포에 따른 지반의 강도 변화를 예측하는데 사용될 수 있다.

(1) 공시체 내에서 형성된 공극의 분량 또는 체적이 증가함에 따라 전단강도는 감소하였으며, 공극이 차지하는 체적이 전단강도에 가장 큰 영향을 미쳤다. 본 연구에서 제작된 공시체의 최저강도는 전단 방향에 대하여 직각인 방향으로 캡슐이 5개 설치된 경우이며, 이 값은 캡슐이 포함되지 않은 공시체 강도의 39% 정도였다.

(2) 공시체 내에서 형성된 공극의 체적이 동일한 경우 공극의 배열방향에 따라 강도 차이가 나타났으며, 이것은 전단 방향에 대하여 공극(캡슐)이 직각 방향으로 배열된 공시체의 전단면이 전단 방향에

대하여 공극(캡슐)이 나란한 방향으로 배열된 공시체의 전단면보다 상대적으로 작아서 전단강도에 더 큰 영향을 미치지 않으므로 판단된다.

(3) 전단방향으로 캡슐을 나란히 배열한 경우, 캡슐의 수가 증가하더라도 전단강도에는 큰 영향을 미치지 않았다. 이것은 공시체의 전단 방향을 기준으로 전단력에 저항하는 전단면의 크기가 각각 동일하기 때문으로 판단된다.

참고문헌

- 박성식, 최현석, 김창우(2010), 고결 지반 내에 형성된 공극이 강도에 미치는 영향, 대한토목학회논문집, 제30권 2C호.
- 엄용훈, 쫙광홍, 변용훈, 이종섭(2009), 용해된 소금의 고결화에 따른 탄성과 특성, 한국지반공학회는문집, 제25권, 5호, pp. 75-86.
- 쫙광홍, 엄용훈, 윤형구, 이종섭(2008) 지반 소실 혼합재의 압축성 및 강성 특성, 한국지반공학회는문집, 제24권, 12호, pp. 103-111.
- Bell, F.G.(2004), Engineering Geology-2nd edition. Elsevier, Great Britain.
- Fam, M.A., Cascante, G., and Dusseault, M.B.(2002) Large and small strain properties of sands subjected to local void increase. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 128, No. 12, pp. 1018-1025.