

CSG 재료의 강도특성에 관한 연구 Strength Characteristics of CSG material

박한규¹⁾, Park Han-Gyu 김기영²⁾, Kim Ki-Young, 조성은³⁾, Cho Sung-Eun, 전제성⁴⁾, Jeon Je-Sung

¹⁾ 수자원연구원 댐안전연구소 소장, Director in Dam Safety Research Center KIWE

²⁾ 수자원연구원 댐안전연구소 선임연구원, Senior Researcher in Dam Safety Research Center KIWE

³⁾ 수자원연구원 댐안전연구소 선임연구원, Senior Researcher in Dam Safety Research Center KIWE

⁴⁾ 수자원연구원 댐안전연구소 책임연구원, Principal Researcher in Dam Safety Research Center KIWE

SYNOPSIS : This work aims at studying the stress-strain-strength behavior of an CSG(cemented sand and gravel) materials. An analysis of the mechanical behavior of the CSG is performed from the interpretation of results by unconfined compression test, large triaxial compression test in which the influence of both the degree of cementation and age. For CSG, It was concluded that the characteristics of compression are direct measurement of the degree of cementation and age. In addition, hyperbolic model is adopted to express the relation between elastic moduli and cementation, age, confined stress in small strain. The results of the test show that clear correlation with each other

Key words : CSG, Large triaxial compression test, Unconfined compression test, Hyperbolic model

1. 서론

최근 선진 외국에서는 댐 및 저수지의 퇴사량 저감대책의 일환으로 CSG(Cemented Sand and Gravel)재료를 이용한 저사댐 설치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 일본의 경우 실제로 상류 가물막이 공사 및 본댐 축조에 이를 이용한 시공사례가 보고 된 바 있다. CSG 재료를 이용한 댐 및 저수지 축조공법은 하상사력제 및 터널 발파암등의 현지 발생골재를 최소한의 분류를 통해 시멘트, 물과 혼합한 후 혼합재료를 진동로울러 다짐에 의해 축조하는 공법으로 경제성, 시공성 및 환경적인 측면에서 기존의 콘크리트 중력식 보다 유리한 측면이 있다. 시공성의 경우 콘크리트 중력식의 블록간 사이클 타임이 약 1주 정도 소요되는 반면 CSG 재료는 1일에도 수 사이클의 연속적인 시공이 가능하므로 공기단축을 통한 시공의 효율성을 증대시킬 수 있으며 현지 발생 원재료를 최대한 활용함으로써 댐 건설의 재료원부재에 대한 문제 및 환경적인 훼손을 완화할 수 있는 장점이 있다. 이러한 공법적 장점에도 불구하고 국내에서는 CSG 재료에 대한 기초적인 연구 및 시공사례가 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 향후 CSG 공법의 도입에 따른 재료의 공학적 특성 연구의 일환으로 CSG 재료에 대한 단위시멘트량 및 재령별 강도특성을 파악하고자 일축압축 및 대형 삼축압축시험을 실시하였다. 이를 바탕으로 전단시 응력-변형특성과 여기서 얻어진 탄성계수와 각 인자별 상관성을 검토하고 쌍곡선 모델에 필요한 제반상수를 도출함으로써 안정해석 및 현장시공에 필요한 기초적 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험

CSG 재료에 대한 실내시험 방법은 일본에서 일부 문헌을 통해 제시되고 있을 뿐 현재까지 표준화된 실내

방법이 제시되고 못하고 있는 상황이다. 따라서 본 연구에 적용된 실내시험 방법 역시 국외 문헌자료와 기존의 토질시험방법에 기초하여 실시하였다.

2.1 실내시험

2.1.1 시료채취

먼저 실내시험에 사용할 CSG 재료의 채취를 위하여 oo담 수몰지내 4지점을 선정 입도 및 부존량에 대한 육안 관찰조사를 실시하였다. 시험에 사용된 골재는 표토를 대략 1m 정도 제거하고 잡초 및 기타 불순물을 현장에서 장비와 인력을 동원하여 충분히 제거한 후 최대 직경이 80mm 정도 되도록 1차 선별하였다. 80mm 이상의 직경을 가진 호박돌은 대략적인 육안 확인결과 10% 미만의 비율을 차지하고 있었으며, 실내 시험상의 어려움을 고려하여 배제하였다. 일본의 경우에도 CSG의 품질, 시공성을 확보하기 위하여 재료의 최대치수는 80mm이하를 채택하고 있다.

2.1.2 시료특성

현장에서 채취한 CSG 재료에 대한 기본적인 물리적 특성 및 입도분포곡선은 아래와 같다.

표 1. 시료의 물리적특성

항목	물리적 특성치
비중(Gs)	굵은골재(2.66), 잔골재(2.64)
유효입경(D ₁₀)	0.2 - 0.9 mm
균등계수(C _u)	27.8 - 40
곡률계수(C _g)	0.189 - 0.54
흡수량(%)	굵은골재(2.81%), 잔골재(3.73%)
시멘트 비중	3.15

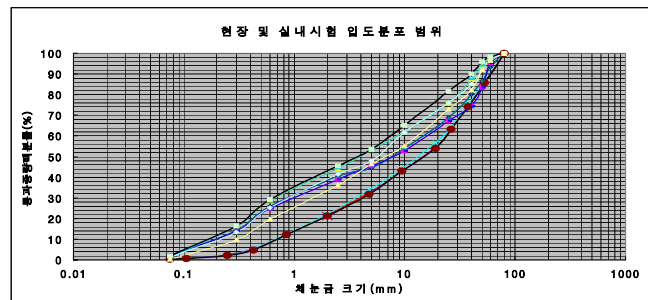


그림 1. 입도분포 곡선

2.1.3 시료성형 및 시험방법

CSG 재료의 강도특성을 파악하기 위한 일축 및 삼축압축시험의 시료성형방법은 다음과 같다. 먼저 시멘트량을 80, 100, 120kg/m³ 으로 달리하여 수정다짐[KSF 2319]에 의한 다짐시험을 실시하고 최대건조단위 중량 및 최적함수비를 도출한다. 이를 바탕으로 삼상관계를 적용하여 포화도, 간극비, 간극율을 계산하고 공기량을 결정한 다음 물량과 골재량을 산정함으로써 일축 및 삼축시험에 필요한 시멘트량을 산출할 수 있다. 각 재료에 대한 최적 배합비가 결정되면 다짐시험과 동일한 방법으로 시료를 성형한다. 일축압축강도시험에 사용된 몰드는 직경 15cm 높이 30cm의 일반적인 콘크리트 몰드이며, 다짐몰드의 크기를 고려하여 동일한 다짐에너지가 가해질 수 있도록 다짐횟수와 층수를 계산하였다. 다짐 시험관계상 시료의 최대직경은 40mm로 제한하였다. 다짐 후 3일 7일 그리고 28일간의 양생 기간을 거쳐 해당 재령별로 성형 틀을 제거하고 황을 이용하여 공기체가 편심을 받지 않도록 시료 상하부의 캡핑작업을 실시하였다. 일축압축에 사용된 하중재하속도는 분당 1톤으로 결정하였다. 삼축압축시험에 사용된 시료의 크기는 직경 30cm, 높이 60cm로 대형 자동다짐기를 사용하여 일축압축시험과 동일한 방법으로 다짐횟수와 층수를 결정하여 시료성형을 실시하였다. 시료배합시 총 배합량은 대략 100kg 전후이며, 시료의 최대직경은 80mm로 현장입도를 최대한 고려하였다.

2.1.4 시험장치 및 시험종류

사진 1은 본 연구에 사용된 일축 및 대형 삼축압축시험기는 정적 및 동적시험이 가능하며 응력 및 변형제어를 자동적으로 조절할 수 있는 다기능 재하 장치이다. 현재 수자원 연구원에서 보유하고 있으며 본 연구의 삼축시험에 사용된 시료크기는 직경 30cm, 높이 60cm이다. 최대 재하 축하중은 75ton 이며 수직응력만을 가할 경우 일축압축시험이 가능하다. 사진 2는 대형 다짐시험기로 본 연구의 삼축시료 제작에 사용되었다. 일축압축시험의 경우 단위 시멘트량에 대한 강도특성을 파악하기 위하여 시멘트량을 각각 80, 100, 120 kg/m³

으로 나누어 시험을 수행하였으며, 각 단위 시멘트량에 대한 재령을 3일, 7일 그리고 28일로 분리하여 강도 특성을 살펴보았다. 각 단위 시멘트당 3개의 시료를 제작하여 실험적 오차를 줄였으며 삼축압축시험 역시 일축압축시험과 동일한 단위 시멘트량을 적용하고 재령은 7일 강도만을 고려하여 실시하였다. 구속압은 1, 2, kg/cm² 이며 전단시 배수를 허용하였다. 표 2 는 본 연구에서 수행한 실험 종류를 요약한 것이다.



사진 1. 대형 일축압축시험장치



사진 2. 대형 다짐시험장치

표 2. 시험종류

단위시멘트량	일축압축시험			삼축압축시험		
	재령			재령	구속압(kg/cm ²)	압밀 및 배수조건
80 kg/m ³	3일(No.1-3)	7일(No.10-12)	28일(No.19-21)	7일	1, 2	등방, 배수(CD)
100 kg/m ³	3일(No.4-6)	7일(No.13-15)	28일(No.22-24)	7일	1, 2	등방, 배수(CD)
120 kg/m ³	3일(No.7-9)	7일(No.16-18)	28일(No.25-27)	7일	1, 3	등방, 배수(CD)

3. 시험결과

3.1 일축압축시험

3.1.1 재령-일축압축강도

표 3은 일축압축강도 시험결과를 요약한 것이며 그림 2는 재령에 따른 일축압축강도 시험결과를 단위 시멘트량에 따라 도시한 결과이다. 각 단위 시멘트량을 기준으로 재령이 커질수록 일축압축강도도 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다. 그림에서 괄호안의 수치는 28일 강도에 대한 각 재령별 강도비를 도시한 것으로 단위 시멘트량이 80인 경우 재령 28일 강도에 대한 재령 3일 대비 강도비는 대략 0.41로 나타났으며, 7일 강도는 0.61로 나타났다. 전반적으로 시멘트량에 상관없이 재령 7일때의 강도는 재령 28일 강도의 약 60% 수준으로 나타나고 있으며, 이러한 강도발현 증가율은 일반적인 콘크리트보다 상대적으로 작다. 참고적으로 콘크리트의 경우 7일 강도는 28일 강도에 약 70%정도의 값을 나타낸다고 알려져 있다.

표 3. 일축압축강도 시험결과

시멘트 재령	시멘트 함유량(kg/m ³)								
	80			100			120		
3일	No.1	-	평균 16.09	No.10	26.76	평균 27.96	No.19	30.72	평균 32.21
	No.2	18.17		No.11	29.96		No.20	31.78	
	No.3	14.02		No.12	27.17		No.21	34.15	
7일	No.4	23.49	평균 23.88	No.13	36.72	평균 35.72	No.22	37.19	평균 36.99
	No.5	23.12		No.14	-		No.23	36.88	
	No.6	25.03		No.15	34.72		No.24	36.92	
28일	No.7	40.83	평균 38.98	No.16	42.81	평균 44.83	No.25	50.50	평균 50.66
	No.8	39.39		No.17	46.85		No.26	52.00	
	No.9	36.74		No.18	-		No.27	49.5	

3.1.2 단위시멘트량-일축압축강도

CSG 재료에서 단위 시멘트량은 강도특성과 밀접한 관계가 있다. 일반적으로 시멘트량이 많을수록 강도는 비례하여 증가하지만 그럴 경우 경제적인 측면에서 바람직하지 못하다. 따라서 목표 설계기준강도를 만족할 수 있는 최적의 단위시멘트량 산정이 무엇보다 중요하다. 연구결과 시멘트량이 증가할수록 동일 재령을 기준으로 일축압축강도는 시멘트량에 비례하여 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 모든 재령에서 단위시멘트량이 80에서 100으로 증가한 경우의 강도 증가폭이 100에서 120으로 증가했을 때 보다 상대적으로 더 큰 것을 감안한다면 시멘트량을 단순히 증가시키는 것보다 목표 설계기준강도를 중심으로 최대한의 강도 발현을 유도할 수 있는 시멘트량 산정이 무엇보다 중요할 것으로 판단된다. 표 4는 재령-일축압축강도-시멘트량의 상관관계식을 나타낸 것으로 각 인자별 상관성은 0.85-0.99로 높게 나타났다.

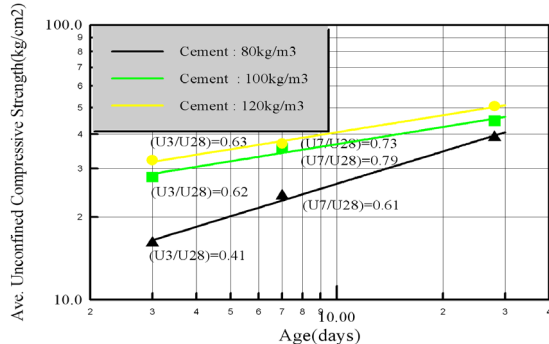


그림 2. 재령 - 일축압축강도

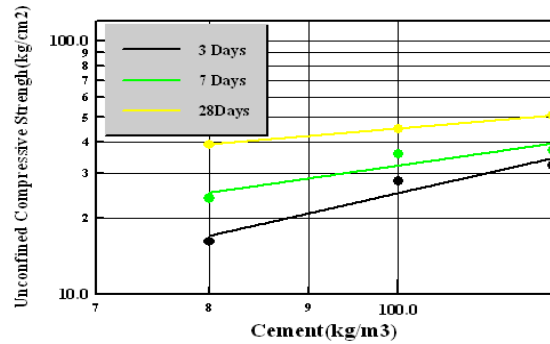


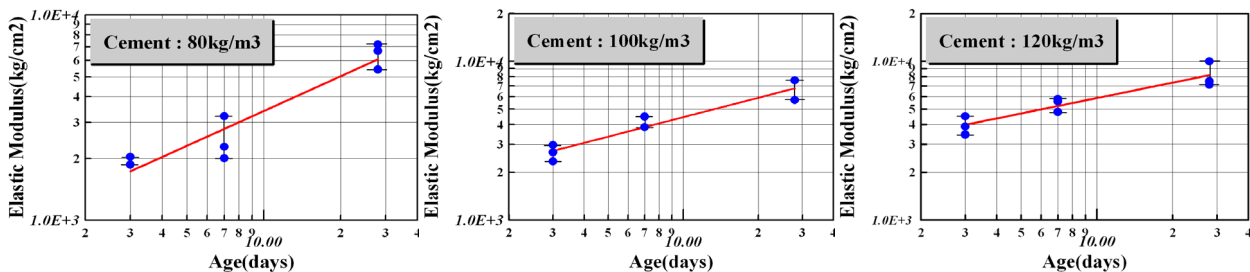
그림 3. 단위시멘트량 - 일축압축강도

표 4. 재령-일축압축강도-시멘트량의 상관식

재령 - 일축압축강도의 상관식	R ²	단위시멘트량 - 일축압축강도의 상관식	R ²
80 kg/m ³ : Ln(Y) = 0.391 * Ln(X) + 2.37	0.94	재령 3일 : Ln(Y) = 1.739 * Ln(X) - 4.79	0.92
100kg/m ³ : Ln(Y) = 0.206 * Ln(X) + 3.13	0.97	재령 7일 : Ln(Y) = 1.105 * Ln(X) - 1.62	0.85
120kg/m ³ : Ln(Y) = 0.205 * Ln(X) + 3.23	0.99	재령 28일 : Ln(Y) = 0.645 * Ln(X) + 0.83	0.99
[*(X) Range : 3 ~ 28일]		[*(X) Range : 80 ~ 120 kg/m ³]	

3.1.3 탄성계수

일본의 경우 CSG 재료의 설계 및 안정성 분석은 탄성해석을 위주로 설계되고 있으며 본 연구에서도 응력-변형에 대한 거동양상이 일반적인 토사에서 나타나는 비선형거동보다는 탄성체적 거동이 우세하게 나타나고 있다. 즉 시멘트가 전체적인 응력 거동특성을 지배하는 중요 인자임을 알 수 있다. 그림 4(a),(b),(c)는 각 단위 시멘트량에 대한 재령과 탄성계수와의 상관관계를 도시한 것으로 재령이 증가할수록 탄성계수는 비례하여 증가하는 것을 알 수 있으며, 탄성계수와 재령과의 상관식은 아래 표 5와 같다. 상관정도는 모든 단위 시멘트량에 대하여 0.86-0.91로 만족할만한 상관도를 나타내었다.



(a) Cement 80kg/m³

(b) Cement 100kg/m³

(c) Cement 120kg/m³

그림 4. 재령-탄성계수

아래 그림 5는 재령과 평균 탄성계수와와의 관계를 종합한 결과이며, 그림 6은 시멘트량과 평균 탄성계수와의 관계를 도시한 것으로 동일 재령을 기준으로 시멘트량과 탄성계수는 서로 비례하고 있음을 확인할 수 있다. 표 5에서처럼 두 가지 항목에 대한 상관성 역시 0.96-0.99로 상당히 높게 나타났다.

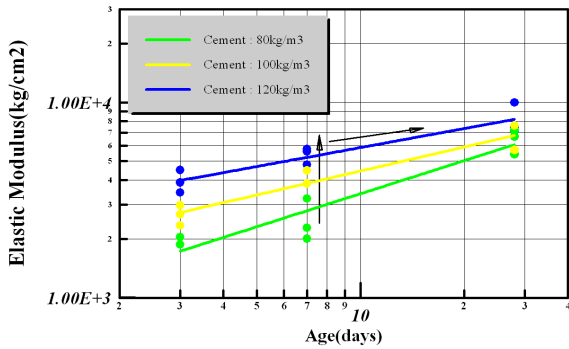


그림 5. 재령-탄성계수

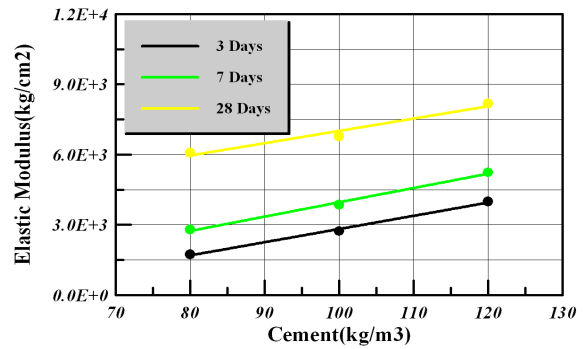


그림 6. 시멘트량-탄성계수

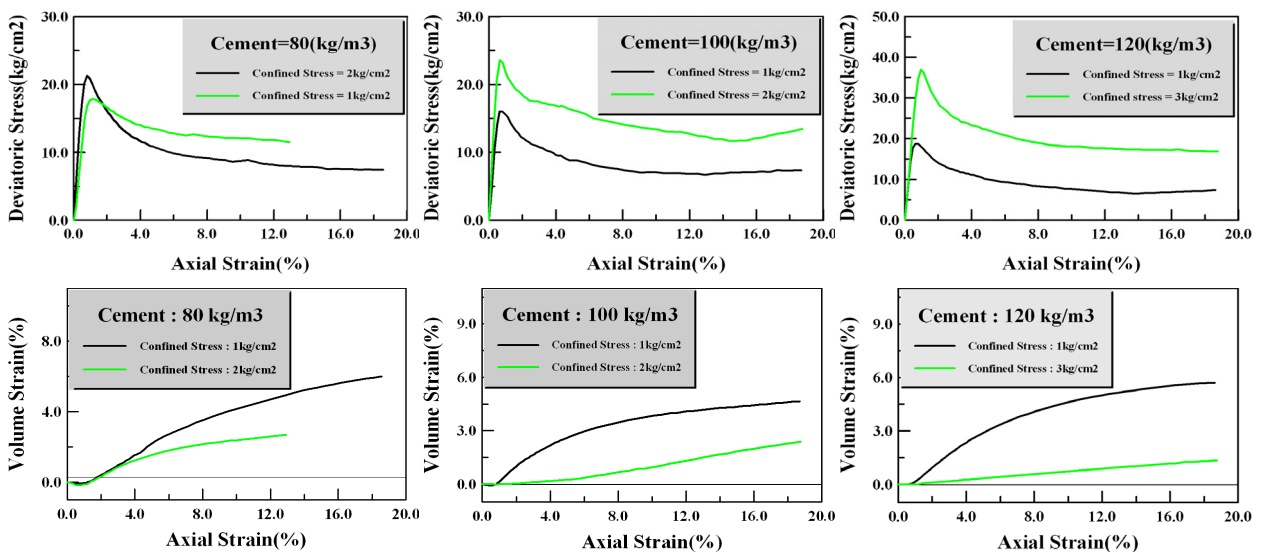
표 5. 재령-탄성계수-시멘트량의 상관관계식

항목	상관식	R ²
탄성계수(Y) & 재령(X) [(X) Range : 3 ~ 28일]	Cement 80kg/m ³ : Ln(Y) = 0.562*Ln(X)+ 6.838	0.88
	Cement 100kg/m ³ : Ln(Y) = 0.407*Ln(X)+ 7.464	0.99
	Cement 120kg/m ³ : Ln(Y) = 0.321*Ln(X)+ 7.936	0.86
탄성계수(Y) & 시멘트량(X) [(X) Range : 80 ~ 120kg/m ³]	재령 3일 : Y = 56.39*(X) - 2824.84	0.99
	재령 7일 : Y = 61.21*(X) - 2163.00	0.99
	재령 28일 : Y = 52.57*(X) + 1751.50	0.96

3.2 삼축압축시험

3.2.1 응력-축변형률-체적변형률

아래 그림 7(a),(b),(c)는 축차응력-축변형률-체적변형률의 관계를 도시한 것이다. 먼저 축차응력과 축변형률의 관계를 살펴보면 전반적인 거동양상이 변형초기 거의 선형적인 강도증가를 보인 직후 급격



(a) Cement 80kg/m³

(b) Cement 100kg/m³

(c) Cement 120kg/m³

그림 7. 응력-축변형-체적변형률

한 연화현상을 보이고 있다. 시멘트량에 따라 조금씩의 차이는 있으나 대부분 축변형률이 1%-1.5% 범위에서 최대강도가 발생되고 있음을 알 수 있다. Coop & Atkinson(1993)은 시멘트가 첨가된 흙의 거동양상을 크게 세 가지로 구분하여 구분하고 있는데 그 중 하나의 양상으로 시멘트의 본드 강도에 비하여 낮은 구속압에서 전단될 경우 응력-변형곡선의 최대축차응력은 매우 작은 변형률에서 발생한다고 발표한 바 있다. 이러한 경향은 Fernando Schnaid et. al(2001)의 삼축시험을 이용한 시멘트 함유 모래의 강도특성 연구에서 찾아볼 수 있으며 시멘트량을 1, 3, 5%로 변화하여 실시한 배수시험결과 시멘트의 양이 증가할수록 최대강도는 크게 나타나며, 시멘트량에 상관없이 축변형률이 2% 내에서 최대강도가 발생되고 이후 급격한 파괴가 발생된다고 발표한 바 있어 본 연구결과와 매우 비슷한 경향을 보였다.

3.2.2 강도정수

전절의 결과를 바탕으로 도시한 Mohr 원은 아래 그림 8과 같다. 표 6은 단위시멘트량에 따른 강도정수를 요약한 것으로 시멘트량이 증가할수록 유효내부마찰각은 약 45-59°의 범위로 증가하나 점착력에 대한 상관성은 명확치 않았다. S. Omae, N. Sato & Oomoto(2003)은 CSG 재료의 대형 삼축압축시험에서 단위 시멘트량 60kg/m³인 경우 재령 7일에서의 유효 마찰각이 대략 52.7°, 점착력은 0.553MN/m² 정도의 값을 가진다고 발표함으로써 본 연구 결과보다 상대적으로 작은 단위시멘트에서 유효마찰각과 점착력이 크게 나타났다. 이러한 차이는 재료별 입도분포의 차이로 분석할 수 있는데 위 실험의 경우 4.76mm이하의 세립분이 약 250% 이하인 반면 본 연구에 사용된 CSG 재료의 전반적인 입도분포는 세립분이 45-50% 이상을 차지하는 것으로 나타나 세립분이 강도특성에 영향을 미치는 주요 인자임을 알 수 있었다. 일본의 여러 문헌에서도 CSG 재료의 강도특성은 잔골재율과 상호연관이 있으며 잔골재율이 많을수록 강도는 감소하는 것으로 보고 되고 있는바 향후 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 Fernando Schnaid(2001) et. al은 일련의 연구에서 시멘트의 양을 1, 3, 5%로 변화시켜 고찰한 Cemented Sand 재료의 강도특성 연구에서 시멘트량과 점착력은 비례하지만 유효마찰각과 시멘트량과의 상관관계는 일정하게 명확치 않다고 발표한 바 있으며, 이러한 경향은 Clough et al.(1979, 1981, 1989), Dupas & Pecker(1979), Acar & EL-Tahir(1986), Rad & Tumay(1986)의 연구결과에서도 찾아 볼 수 있어 본 연구 결과와 비슷한 경향을 나타내었다. 그러나 위 실험의 대부분이 시멘트 sand를 대상으로 이루어진 만큼 재료적 특성에 따른 추가적인 연구가 실시되어야 할 것으로 판단된다.

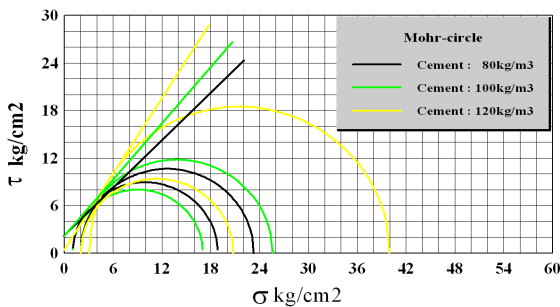


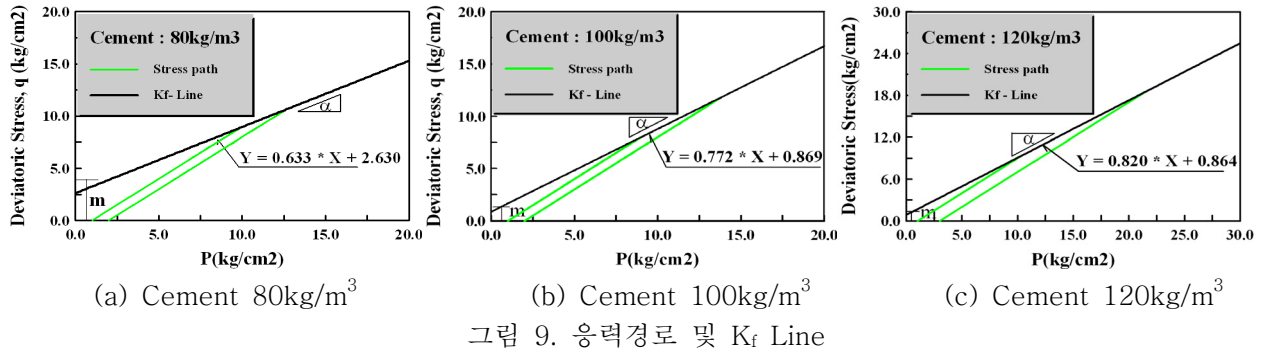
그림 8. Mohr-circle

표 6. Mohr-coulomb 상수

시멘트량 (kg/m ³)	Mohr-Coulomb	
	C(kg/cm ²)	Φ(°)
80	1.8(3.39)*	45(39.0)*
100	1.9(1.75)*	52(50.5)*
120	0.5(1.51)*	59(55.1)*

* 수정파괴포락선

아래 그림 9는 p-q 평면을 이용한 CSG 재료의 응력경로를 도시한 그림이며, 수정 파괴포락선으로부터 도출된 유효마찰각과 점착력은 표 6과 같다. 각 단위시멘트별 수정파괴포락선의 기울기는 0.633, 0.772, 0.82로 시멘트량에 비례하여 증가하고 있으며 절편값은 2.63, 0.86, 0.86으로 감소하는 경향을 나타내었다. 이들 상수로부터 얻어진 점착력은 3.39-1.51kg/cm², 유효마찰각은 39-55.1°로 Mohr 원으로 도출된 값들보다 다소 작게 나타났다.

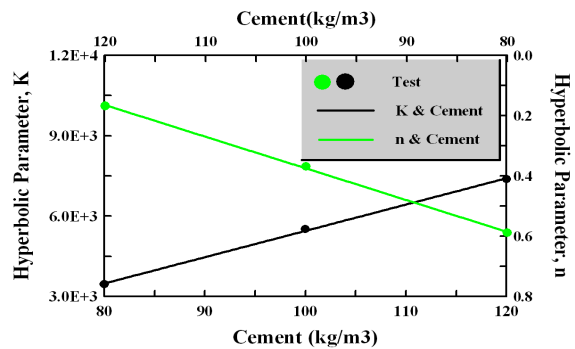
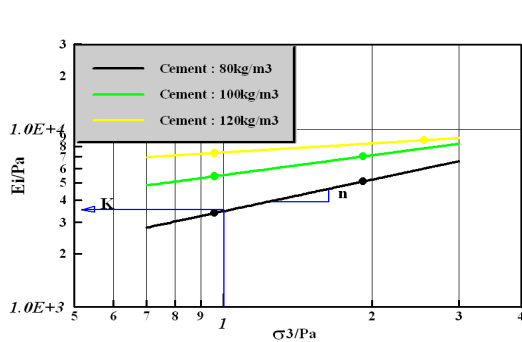


3.2.3 탄성계수

쌍곡선 모델은 Kondor(1963)에 의해 제안되어 Duncan and Chang(1970)에 의해 그 이론적 발전이 있어왔다. 이 이론은 전응력 해석과 유효응력해석이 가능하며 기본적인 삼축시험으로부터 응력-변형해석에 필요한 상수를 간단히 구할 수 있어 편리하게 사용되고 있다. 본 절에서는 이 모델을 이용하여 단위시멘트별 제반상수(K, n, R_f)를 도출하고 구속압과 시멘트량 그리고 탄성계수와와의 관계를 고찰해 보았다. 단, 대부분의 최대축차응력이 변형률 1.5%이내에서 발생한 후 급격한 연화현상을 보이는 만큼 비선형 탄성영역의 축변형률 범위를 이 범위내로 제한한다. 그림 10 과 표 7은 단위시멘트별 쌍곡선 모델 상수를 요약한 것이며, 그림 11은 시멘트량에 따른 K와 n 값의 변화를 상관관계로 도시한 결과이다. 시멘트량이 증가할수록 K값은 3453~7380으로 증가하지만 n 값은 0.589~0.168로 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 시멘트량과 K 그리고 n 과의 상관식은 표 7과 같으며 매우 높은 상관성을 나타내고 있다.

표 7. 쌍곡선 모델상수

단위시멘트량	Hyperbolic Model Parameters			상관식
	K	n	R _f	
80kg/m ³	3453.0	0.589	0.335(σ ₃ =1kg/cm ²) 0.470(σ ₃ =2kg/cm ²)	K & Cement : Y=98.26X-4375.97 (R ² =0.99) n & Cement : Y=-0.0105X+ 1.427 (R ² =0.99) [Cement(X) Range : 80-120kg/m ³]
100kg/m ³	5513.7	0.369	0.607(σ ₃ =1kg/cm ²) 0.485(σ ₃ =2kg/cm ²)	
120kg/m ³	7383.0	0.168	0.551(σ ₃ =1kg/cm ²) 0.510(σ ₃ =3kg/cm ²)	



아래 그림 12는 일축압축시험으로부터 얻어진 평균탄성계수와 삼축시험으로부터 도출된 초기탄성계수(E_i)를 구속압에 따라 도시한 것으로 일축보다는 삼축시험의 탄성계수 값이 크게 나타났으며, 삼축시험의 경우 구속압이 증가할수록 그리고 시멘트량이 증가할수록 초기 탄성계수는 증가하는 것을 알 수 있다. Duncan and Chang(1970)은 쌍곡선 모델상수와 Mohr-coulomb의 강도정수를 이용하여 각 응력단계에서의 접선탄성계수(E_t)를 구할 수 있는 식을 제안하고 있으며, 그림 13은 이 식으로 구해진 각 단위시멘트별로 접선탄성계수를 도시한 결과이다.

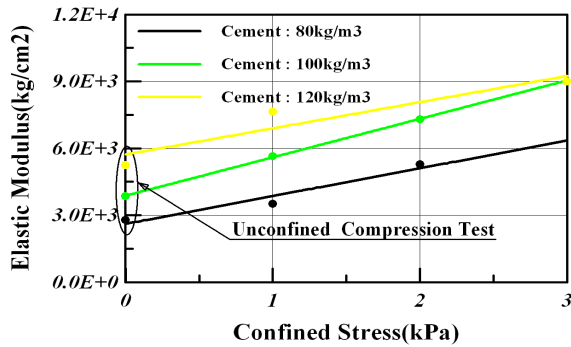


그림 12. 구속압-탄성계수

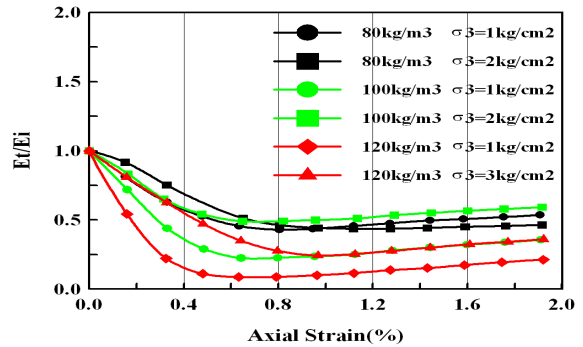


그림 13. 탄성계수-변형률

4. 결론

- 1) CSG 재료의 일축압축강도는 동일한 단위시멘트량을 기준으로 재령이 커질수록 비례하여 증가하였으며 시멘트량이 증가할수록 강도증가 효과를 확인할 수 있었다. 그러나 같은 양의 시멘트 증가라 할 지라도 강도 증가율이 다른 만큼 경제적인 측면을 고려하여 목표 설계기준강도를 중심으로 최대한의 강도발현을 유도할 수 있는 최적의 단위 시멘트량 산정이 필요하다. 또한 각 요소에 대한 상관성을 분석한 결과 상호 밀접한 관계를 가지고 있었으며 이에 대한 관계식을 제안하였다.
- 2) 일축시험 결과 CSG 재료의 전반적인 응력-변형특성은 짧은 변형률에서 최대강도를 발현한 후 급격한 파괴를 나타내는 탄성체적 거동이 지배적인 것으로 나타났으며 이러한 현상은 시멘트량과 재령이 증가할수록 더욱 뚜렷하게 나타난다.
- 3) 일축압축시험결과 재령과 탄성계수, 시멘트량과 탄성계수는 서로 밀접한 상관관계가 있었으며 각 요소별 상관도는 최소 0.86 이상으로 나타났다. 삼축시험으로 도출된 탄성계수는 동일재령에서 일축압축시험보다 크며 구속압이 증가할수록 그리고 시멘트량이 증가할수록 비례하여 커지는 경향을 보였다.
- 4) 삼축압축시험결과 응력거동은 모든 단위 시멘트량에서 축변형률 1.5% 범위에서 최대강도가 발생하였으며 구속압 및 시멘트량이 증가할수록 최대 유효축차응력은 크게 나타났다. 또한 유효마찰각은 시멘트량에 비례하여 증가하였으나 점착력은 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다.
- 5) 쌍곡선 모델을 이용해 도출된 제반상수는 단위 시멘트량에 따라 각기 다른 값을 나타내었으며 시멘트량이 증가함에 따라 K값은 증가하고 n값은 반대로 감소하는 경향을 보였다. 또한 상호 밀접한 연관성이 있음을 확인할 수 있었으며 이에 관한 상관관계식을 제안하였다.

참고문헌

1. Acar, Y. B., and El-Tahir, A. E.(1986), "Low strain dynamic properties of artificially Cemented Sand", ASCE Vol. 112, No. 11, pp.1001-1015.
2. Coop, M. R., and Atkinson, J. H.(1993), "The mechanics of cemented carbonate sands" *Geotechnique*, Vol. 43, No.1, pp 53-67.
3. Clough, G. W., Kuck, W. M., and Kasali, G.(1979), "Silicate-stabilized sand" ASCE, vol 107, No.6, pp.799-817.
4. Duncan, J. M., and Chang C. Y., (1970), "Nonlinear analysis of stress and strain in soils", ASCE, Vol 96, No. SM5, pp.1629-1653.
5. Fernando Schnaid., Pedro D. M. Prietto. and Nilo C. Consoli(2001), "Characterization of cemented sand in triaxial compression", ASCE, Vol. 127, No. 10, pp.857-868.
6. S. Omae, N. Sato and I. Oomoto(2003), "Dynamic properties of CSG", Proc of 4th Inter. Conf. on Roller compacted concrete dam, Spain pp. 511-518.
7. Rad, N. S., and Tumay, M. T(1986), "Effect of cementation on the cone penetration resistance of sand : A model study", *Geotec. Testing J.*, Vol. 9, No.3, pp117-125.