

Cemented Sand and Gravel 재료의 강도특성

Strength Characteristics of Cemented Sand and Gravel

김 기 영¹ Kim, Ki-Young
박 한 규² Park, Han-Gyu
전 제 성³ Jeon, Je-Sung

Abstract

Cemented Sand and Gravel (CSG) is a material made by simple mixing of rock-based raw materials such as excavated soil and riverbed gravel together with cement and water. The use of CSG material for cofferdam and large dam is gradually increasing in Japan because a quarry and aggregate plants can be diminished. Also, the CSG method can reduce dam construction cost, construction duration and destruction of environment. In this paper, the basic strength characteristics of CSG, such as compressive strength, modulus of elasticity and stress-strain curve were investigated by unconfined compression test and large triaxial compression test. From the results of the experimental study, the correlation equations between elastic modulus and unit cement, age are proposed.

요 지

Cemented Sand and Gravel(CSG)재료는 댐 수몰지로부터 쉽게 얻을 수 있는 하상자갈과 굴착토를 물, 시멘트와 함께 혼합한 재료를 총칭하는 것이다. 최근 일본에서는 가물막이댐과 본 댐 축조공사에 CSG 재료를 활용함으로써 댐 축조에 필요한 채석장 개발과 플랜트 건설에 투입되는 제반경비와 시공 공기를 줄일 수 있게 되었으며, 석산개발에 따른 환경훼손을 완화할 수 있게 됨으로써 경제성과 환경적 측면에서 그 활용성이 주목받고 있다. 본 연구에서는 CSG 재료의 기초적인 강도특성을 파악하기 위하여 단위시멘트량을 변화시켜 다짐시험, 일축압축시험 그리고 대형 삼축압축시험을 실시하고 단위 시멘트량과 재령에 따른 압축강도, 탄성계수 그리고 응력-변형특성 등을 검토하였으며 각 인자별 상관식을 제시함으로써 CSG 공법설계 및 해석에 필요한 기초적인 자료를 제공하고자 한다.

Keywords : Compaction test, CSG (Cemented Sand and Gravel), Elastic modulus, Large triaxial compression test, Unconfined compression test

1. 서 론

최근 선진 외국에서는 댐 및 저수지의 퇴사량 저감대책의 일환으로 Cemented Sand and Gravel(이하 CSG로 표기)재료를 이용한 성토공법 연구가 활발히 진행되고

있다. 일본의 경우 1992년 나가지마댐 상류 가물막이공사에 CSG 공법이 처음으로 도입된 이후 담수지내의 사면보호공, 하천 가물막이공 및 제체진입로, 옹벽 등의 시공에 자주 사용되어왔을 뿐 아니라 최근에는 댐 본체에 적용하는 수준에 이르렀다. CSG 재료를 이용한

1 정희원, 한국수자원공사 댐안전연구소 선임연구원 (Member, Senior Researcher, DSRC/KIWE, kky0606@kowaco.or.kr)

2 정희원, 한국수자원공사 댐안전연구소 소장 (Member, Director, DSRC/KIWE)

3 정희원, 한국수자원공사 댐안전연구소 책임연구원 (Member, Principal Researcher, DSRC/KIWE)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

땀 및 저수지 축조공법은 하상사력제 및 터널 발파압등의 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 땀 건설시 재료원 부재에 대한 문제 및 환경적인 훼손을 완화할 수 있는 장점이 있다. 국내에서는 화북땀 축조시 처음으로 Gravel 재료를 이용한 CFGD 공법이 채택되어 공사가 진행되고 있으나 아직 CSG 재료를 이용한 땀 축조 사례가 없고 이에 대한 기초적인 연구가 미비한 상태에 있다. 본 연구에서는 CSG 재료의 공학적 특성 연구의 일환으로 공법설계에 필요한 실내시험 종류 및 기준을 언급하고 이 기준에 기초하여 단위시멘트량 및 재령에 따른 CSG 재료의 강도특성을 파악코자 탐진땀 수몰지내의 하상재료를 이용하여 일축압축 및 대형 삼축압축시험을 실시하였다. 그 결과를 바탕으로 일축압축강도, 탄성계수 그리고 응력-변형특성을 검토하였으며, 각 인자별 상관성을 검토하고 상관식을 제안함으로써 CSG 공법설계 및 해석에 필요한 기초적 자료를 제공하고자 한다.

2. CSG 공법설계를 위한 실내시험

CSG 재료를 이용한 공법설계에 필수적인 실내시험 항목은 크게 다짐시험과 강도시험이며 이 두시험은 실내배합설계의 기초가 된다는 점에서 매우 중요한 시험항목이다. 이 밖에 제체내의 투수성을 검증하는 투수시험과, 급속동결융해시험 및 기타시험 등으로 나눌 수 있다. 특히 강도시험에 필요한 표준 공시체의 제작은 다짐시험으로부터 얻어진 결과를 토대로 이루어지는 만큼 다짐시험은 강도시험과 밀접한 관계에 있으며 이는 곧 공법의 경제

성 및 시공성과 직결된다는 점에서 매우 중요하다. 본 절에서는 CSG 재료의 공법설계에 필요한 기본적인 실내시험 종류와 그 기준에 대하여 언급하고자 한다.

2.1 재료선별

CSG 공법에 사용되는 재료는 현장에서 얻어지는 하상 재료를 그대로 사용하는 것을 대 전제로 하며 이것이 불가할 경우 최소한의 선별작업과 입도조정을 통해 시멘트와 혼합하고 축조하는 공법으로 그 재료적 특성이 다양하고 입도분포의 범위가 상당히 넓다. 일본의 경우 땀 축조에 사용되는 최대골재치수는 대략 150mm 이하이며 Skelton 버킷을 탑재한 백호우를 이용하여 현장에서 1차 스크린 작업을 한 후 현장에서 시멘트와 혼합한다. 실내시험에 사용되는 재료의 최대입경은 시험장비의 규모에 따라 달라질 수 있으나 통상적으로 다짐시험 및 강도시험시에 사용하는 최대입경은 대략 40mm 이하로 제한하고 있다.

2.2 다짐시험

다짐시험은 후절에서 언급할 강도시험의 표준공시체 제작에 필요한 단위재료량을 결정하기 위한 선행시험으로 먼저 단위시멘트량을 몇 가지로 변화시켜 각 단위시멘트별 최적함수비와 최대진조단위중량을 도출하고 삼상관계로부터 간극비, 간극률, 공기량, 수량 및 골재량을 산정함으로써 각 단위시멘트량에 대한 기본적인 단위재료량을 확정하게 된다. 현재 CSG 공법에 대한 연구가 진행되고 있는 만큼 정확한 다짐시험방법은 제시되고 있지 않지만 국내의 문헌을 통해 살펴본 시험방법은 아래와 같다.

2.2.1 국내 및 일본

국내의 경우 CSG 재료에 대한 특별한 다짐시험기준이 없으므로 아래 표와 같이 최대허용입경을 37.5mm로 규정함으로써 현장입도를 최대한 반영할 수 있을 것으

표 1. 국내 및 일본의 실내 다짐시험 기준

다짐방법	래머		몰드내경 (mm)	다짐		허용최대입경 (mm)	
	무게 (kg)	낙하고(cm)		층수	낙하횟수		
표준	A	2.5	25	100	3	25	19.0
	B	4.5	45	150	3	55	37.5
수정	C	2.5	25	100	5	25	19.0
	D	4.5	45	150	5	55	19.0
	E	4.5	45	150	3	92	37.5

로 판단되는 [KSF 2319] 수정다짐(E다짐)과 표준다짐(B다짐)방법이 적절할 것으로 판단된다. 일본의 경우 문헌상에 나타난 CSG 재료의 배합설계에 적용되는 다짐 시험 방법은 아래와와 같은 [JSF T 711-1990]기준이며, 이 기준은 국내 다짐시험기준과 동일하다.

2.2.2 미국

미국 역시 CSG 재료에 대한 다짐기준이 제시되어 있지 않지만 본 공법과 유사한 RCC(Roller Compacted Concrete)공법의 경우 배합설계에 사용되는 다짐기준을 표준다짐(ASTM D 698)과 수정다짐(ASTM D 1557)으로 규정하고 있다.

2.2.3 영국

영국의 경우 본 연구와 관련된 특별한 기준은 제시되어 있지 않지만 표준 및 수정다짐 이외에 조립질 흙에 대한 동적다짐 시험기준(BS 1377:1975, Test 14:Vibrating hammer method)을 표 3과 같이 제안하고 있다.

2.3 강도시험

강도시험은 다짐시험에서 구해진 최적함수비와 최대 건조단위중량을 기준으로 삼상관계를 이용하여 단위시멘트량(kg/m³)에 대한 각각의 재료량을 산정하고 규격화된 몰드(직경 15cm* 높이 30cm)를 이용하여 공시체를 성형한 후 재령별로 일축압축시험, 인장시험 그리고

표 2. ASTM 실내 다짐시험 기준

다짐방법	램머		몰드내경 (mm)	다짐		허용최대입경 (mm)	
	무게(lbf)	낙하고(mm)		층수	낙하횟수		
표준	A	5.5	305	101.6	3	25	4.75
	B	5.5	305	101.6	3	25	9.50
	C	5.5	305	152.4	3	56	19.0
수정	A	10	457	101.6	5	25	4.75
	B	10	457	101.6	5	25	9.50
	C	10	457	152.4	5	56	19.0

표 3. 영국의 실내 진동다짐 시험기준

다짐방식	몰드규격(CBR)	램머무게	다짐층수	다짐시간	비고
진동해머	직경:152mm 높이:127mm	32-41kg	3	1 min	· 600-700w · Frequency : 25-45Hz

표 4. 강도시험시 CSG 재료의 표준공시체 제작방법

일본	미국
<input type="checkbox"/> 재료준비 · CSG재료는 목표한 시험입도가 되도록 입경별로 계량. · 스크린 작업을 통해 최대입경은 40mm로 제한. <input type="checkbox"/> 혼합 · 혼합믹싱 : 포트믹서(용량 90-165l)[사진 1참조] · 혼합온도 : 20°C · 혼합방법 : 1회 혼합량은 시험에 필요한 양보다 5l 이상, 믹서 공칭용량의 1/2이상을 넘지 않도록 혼합. · 하상재료와 시멘트를 첨가후 1분간 혼합하고 물 투입 이후 3분간 재혼합. <input type="checkbox"/> 다짐기계 · 충격식 진동템퍼 : 무게 11kg · 가진력 : 140-150kg (50-60Hz) · 회전수 : 3000-3600회/분 <input type="checkbox"/> 공시체제작 · 공시체 치수 : 지름 150mm, 높이 300mm · 재료분리가 생기지 않게 3층으로 나누어 다짐 · 각층을 다짐봉으로 15회 다진후 진동템퍼로 약 1분간 다짐 <input type="checkbox"/> 양생 · 20°C 항온실에서 양생 · 3일, 7일 28일, 91일 양생후 강도시험	<input type="checkbox"/> Proctor test(ASTM D 1557) · 다른 방법에 비하여 비교적 넓은 범위의 혼합 Workability에 사용. · 시간과 노동력이 많이 요구됨. · 시멘트 Hydration과 수분손실로 인하여 혼합 Workability의 성질이 변화될 수 있음. <input type="checkbox"/> Hilti or Kango vibrating method(ASTM C 1435) · 습윤범위내의 Workability에 적합 · 일반적으로 진동회수와 강도를 조절할 수 있어 현장다짐 시험장비와 유사한 조건을 재현할 수 있음. · 일반적으로 3층 다짐으로 실시하나 조건에 따라 4-5층으로 분할하여 다짐 할 수 있음. <input type="checkbox"/> Pneumatic tamper method [사진 2참조] · ASTM 기준에 명시되어 있지 않음. · 습윤범위내의 Workability에 사용. · 실내시험자가 쉽게 사용하기 어려움. · 시험강도와 진동횟수가 일반적인 현장다짐 시험장비와 상이하여 현장조건을 재현하기 쉽지 않음. <input type="checkbox"/> Vebe table method(ASTM C 1176) · 일반적으로 30-35초 정도의 진동으로 현장다짐 재현이 가능 · Hilti or Kango vibrating 및 Pneumatic tamper 방법에 비하여 혼합 Workability의 범위가 좁음

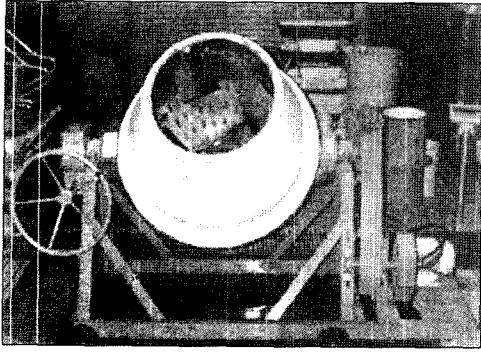


사진 1. 포터식 혼합믹서



사진 2. Pneumatic tamper

삼축압축시험등을 실시하게 된다. 이러한 강도시험은 대상 구조물의 허용설계기준을 만족하는 가장 합리적인 시멘트량을 결정하기 위한 것으로 경제성과 시공성에 직접적인 영향을 미치게 되는 점에서 중요한 실내시험 항목이다. 특히 CSG 공법설계가 주로 탄성해석으로 이루어지는 만큼 강도시험을 통한 재료의 탄성계수 측정에 신중을 기해야 한다. CSG 공법에 대한 강도시험시 표준공시체의 제작방법은 국내외적으로 연구가 진행 중인 만큼 확정된 방법은 없다. 다만 표 4는 일본의 연구동향을 기준으로 살펴본 공시체 제작방법과 CSG 공법과 유사한 미국 RCC(Roller Compacted Concrete)공법의 배합설계에서 추천하고 있는 표준공시체 제작방법을 요약한 것이다.

2.4 기타시험

이 밖에 CSG 재료와 관련된 실내시험 항목을 문헌으로 통해 살펴보면 제체내의 투수성을 파악하기 위한 실내투수시험, 댐 저수시 발생할 수 있는 유속에 대한 유수저항시험, 온도변화에 따른 내구성을 판단하는 급속동결 융해시험 그리고 내화화성시험 등이 있다.

3. 실내시험

본 절에서는 CSG 재료의 강도특성을 파악하기 위하여 탐진탐 수물지역의 하상골재를 대상으로 전절에서 언급한 방법에 기초하여 실내시험을 실시하고 그 결과에 대하여 논하고자 한다.

3.1 시료채취 및 선별

먼저 실내시험에 사용할 하상재료의 채취를 위하여 탐진탐 수물지내 4지점을 선정 입도 및 부존량에 대한 육안 관찰조사를 실시하였다. 이중 모래층과 자갈층이 명확히 분리 분포되어 있고 실험 및 현장시공시 최소한의 혼합 및 선별을 통한 모재료의 확보가 가능한 지역을 선정하였다. 먼저 사진 3과 같이 대상지역의 표토를 대략 1m 정도 제거하고 잡초 및 기타 불순물을 장비와 인력을 동원하여 제거한 후 Skelton 버킷을 이용하여 최대 직경이 80mm 정도 되도록 1차 선별하였다. 80mm 이상의 직경을 가진 호박들은 대략적인 육안 확인결과 10% 미만의 비율을 차지하고 있었으며, 실내시험시 어려움을 고려하여 배제하였다.

표토제거	시료채취	현장선별재료

사진 3. 시료채취전경

3.2 기본물성시험

현장에서 채취한 하상재료의 기본적인 물리특성 및 입도분포 결과는 표 5 및 그림 1과 같다. 80mm 이하 현장입도의 균등계수는 27.8-40, 곡률계수는 0.19-0.54의 범위로 입도분포가 양호하며 통일분류법상 GW에 해당한다. 동일한 지역에서 채취한 시료이지만 입도분포의 편차가 비교적 넓게 나타나고 있음을 알 수 있으며 실내시험에 사용된 시험입도는 시험상의 제약으로 40mm 통과시료를 대상으로 실시하였으며 통일분류법상 SW에 해당한다.

표 5. 탐진덩 시료의 물리적 특성

항목	80mm이하 현장입도	40mm이하 시험입도
G_s	2.66-2.64	2.65
D_{10}	0.2 - 0.9 mm	0.1
C_u	27.8 - 40	30
C_g	0.19 - 0.54	0.3
흡수량(%)	2.81-3.73	-
시멘트 비중	3.15	-
USCS	GW	SW

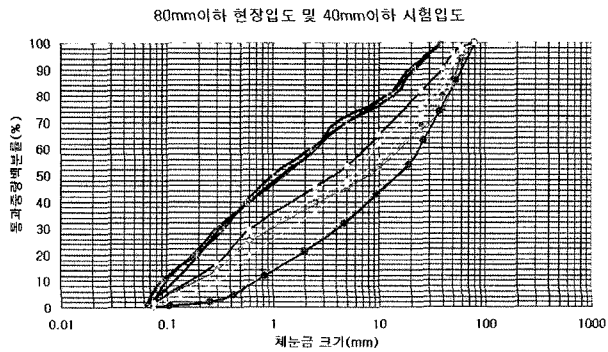


그림 1. 입도분포 곡선

표 6. 다짐시험결과

단위시멘트량(kg/m^3)	최적함수비(%)	습윤단위중량(g/cm^3)	최대건조단위중량(g/cm^3)
80	7.8	2.3	2.14
100	7.8	2.26	2.10
120	7.7	2.28	2.12

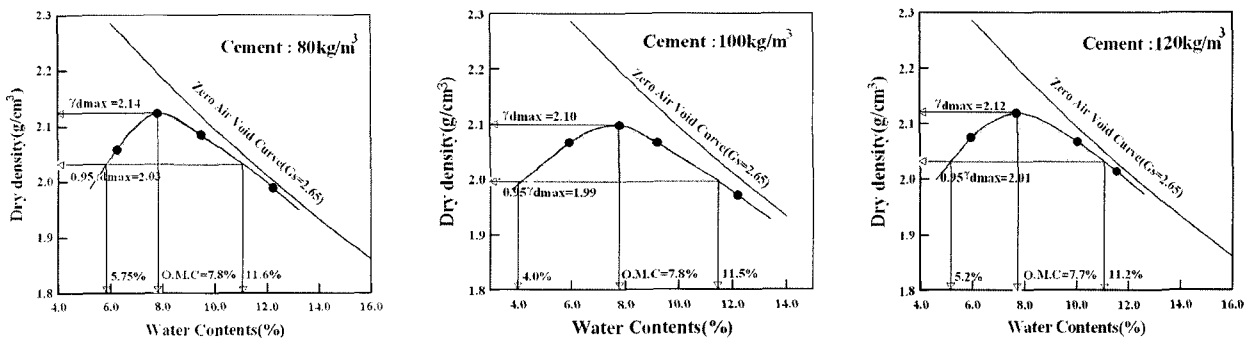


그림 2. 단위시멘트별 다짐시험결과

3.3 다짐시험

2장에서 언급한대로 강도시험을 위한 첫 단계로 시멘트량을 80, 100, 120 kg/m^3 으로 달리하여 수정다짐(KSF 2319)에 의한 다짐시험을 실시하고 각 단위시멘트량에 따른 최대건조단위중량 및 최적함수비를 도출하였다. 아래 그림은 단위시멘트량을 변화시켜 실시한 다짐시험결과를 도시한 것으로 단위시멘트량은 전체중량 대비 약 3%-4.2% 내외이며, 시험결과 시멘트량이 다짐특성에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다. 표 6과 같이 최적함수비는 대략 7.8%정도 내외이며, 최대건조단위중량은 2.10-2.14 g/cm^3 로 단위시멘트량에 따라 약간의 차이는 있으나 거의 비슷한 범위의 값을 가지는 것으로 나타났다. Watanabe & Tateyama(2003)은 2.5%의 시멘트를 혼합한 지바 및 큐슈지역의 CSG 재료를 대상으로 실시한 연구에서 지바지역 CSG 재료의 최적함수비는 A, B 다짐방법에 따라 차이가 있으나 대략 5%-8.7%, 최대건조단위중량은 2.15-2.2 g/cm^3 정도인 것으로 발표한 바 있으며, 큐슈지역 CSG 재료의 경우 B 다짐으로 실시한 다짐시험결과 최적함수비는 약 5.5%, 최대건조단위중량은 약 2.65 g/cm^3 정도로 전자에 비하여 최적함수비는 작고 최대건조단위중량은 상당히 크게 나타났다. 2가지 시료 모두 본 연구에 비하여 다짐에너지가 작으면서도 최대건조단위중량이 비슷하거나 크게 나타나는 것은 이 지역 모재료의 비중이 각각 2.71, 3.03으로 본 연구에 사용된 하상재료의 비중 2.64-2.66보다 크기 때문으로 판단된다.

3.4 강도시험

3.4.1 재하장치 및 실험방법

사진 4는 본 연구에 사용된 재하장치로써 정적 및 동적재하시험이 가능하며 응력 및 변형제어를 자동적으로 조절할 수 있는 다기능 재하시험 장치이다. 현재 수자원 연구원에서 보유하고 있으며 최대 재하 축 하중은 75ton으로 일축압축 및 삼축압축시험이 가능하다. 사진 5는 대형 자동 다짐시험기로 본 연구의 삼축 시험로 성형에 사용되었다. 일축압축시험의 경우 단위 시멘트량에 대한 강도특성을 파악하기 위하여 시멘트량을 각각 80, 100, 120kg/m³으로 나누어 시험을 수행하였으며, 각 단위시멘트량에 대한 재령을 3일, 7일 그리고 28일로 달리하여 강도특성을 살펴보았다. 각 재령별로 3개의 공시체를 제작하여 실험시 오차를 줄였으며 삼축압축시험 역시 일축압축시험과 동일한 단위 시멘트량을 적용하고 재령은 7일 강도만을 고려하여 실시하였다. 표 7은 본 연구에서 수행한 강도시험의 종류를 요약한 것이다.

3.4.2 시료성형

먼저 기 수행된 다짐시험 결과를 토대로 포화도, 간

극비, 간극율을 계산하고 공기량을 결정한 다음 수량과 골재량을 산정함으로써 일축 및 삼축시험에 필요한 단위재료량을 산출하였다. 전절에서 언급한대로 CSG 재료의 강도시험용 표준공시체 제작방법은 여러가지가 있지만 본 연구에서는 이 중 Proctor 방법에 기초하여 표준공시체를 제작하였다. 일축압축강도시험에 사용된 몰드는 직경 15cm, 높이 30cm의 일반적인 콘크리트용 몰드이며, 다짐시험 방법 중 수정 E 다짐과 동일한 다짐에너지를 가할 수 있도록 다짐횟수와 충수를 계산하여 시료를 제작하였다. 시료의 최대직경은 37.5mm로 제한하였으며, 하중재하속도는 분당 1ton으로 실시하였다. 대형 삼축압축시험의 경우 사진 1과 같은 포트식 믹서기를 이용하여 CSG 재료를 투입하고 1분간 혼합한 후 물과 함께 3분간의 추가 믹싱을 실시하였다. 이 시료를 직경 30cm, 높이 60cm의 몰드에 투입하고 대형자동화 다짐기를 이용하여 다짐시험과 동일한 수준의 다짐에너지를 가해지도록 공시체를 성형하였다. 시료의 최대 허용직경은 37.5mm로 일축압축시험과 동일하며, 시료 배합시 총 배합량은 대략 95±1kg 전후로 최대건조단위중량에 약 95%를 상회하는 수준이다.

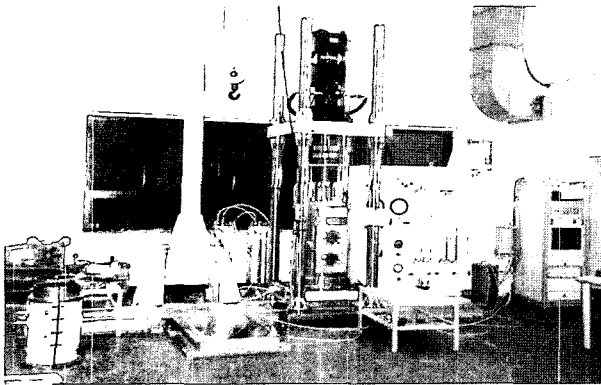


사진 4. 대형 삼축압축시험장치



사진 5. 대형 다짐시험장치

표 7. 강도시험 종류

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

4. 시험결과 및 고찰

4.1 일축압축시험

4.1.1 재령-일축압축강도

표 8은 일축압축강도 시험결과를 요약한 것이며 그림 3은 재령에 따른 일축압축강도 시험결과를 단위 시멘트 량에 따라 도시한 결과이다. 각 단위 시멘트량을 기준으로 재령이 커질수록 일축압축강도는 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 7일 강도는 재령 28일 강도의 약 60% 이상 수준으로 나타나고 있으며, 이러한 경향은 일본 토목기술(2000.7) 자료의 CSG 강도특성에 관한 연구결과와 유사하다. 이 연구에서 재령과 강도증가는 서로 비례하며 단위시멘트량 80kg/m³을 기준으로 재령 28일 강도는 7일강도의 약 2

배 92일 강도는 약 3배 가량 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 강도발현 증가율은 일반적인 콘크리트보다 상대적으로 작은 수치이며 콘크리트의 경우 7일 강도는 28일 강도에 약 70% 정도 수준인 것으로 알려져 있다.

4.1.2 단위시멘트량-일축압축강도

CSG 재료에서 단위시멘트량은 강도특성과 밀접한 관계가 있다. 일반적으로 시멘트량이 많을수록 강도는 비례하여 증가하지만 그럴 경우 경제성이 떨어지게 된다. 따라서 목표 설계기준강도를 만족할 수 있는 최적의 단위시멘트량 산정이 무엇보다 중요하다. 연구결과 그림 4와 같이 시멘트량이 증가할수록 동일재령을 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 8. 일축압축강도 시험결과

[단위 : kg/cm²]

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

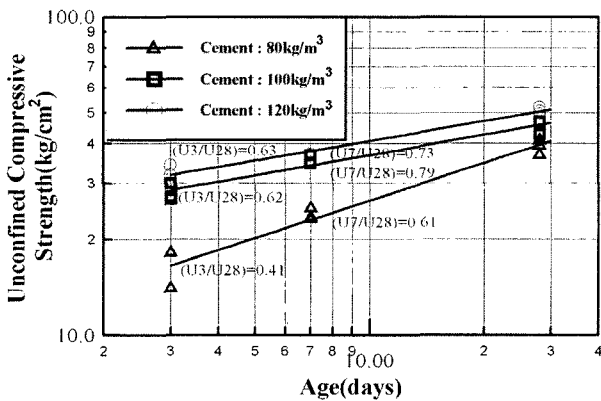


그림 3. 재령 - 일축압축강도

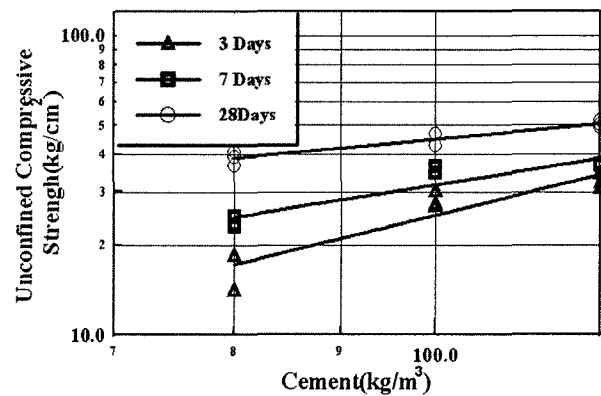


그림 4. 단위시멘트량 - 일축압축강도

표 9. 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	0.95	재령 3일 : Ln(Y) = 1.696 * Ln(X) - 4.59	0.84
100kg/m ³ : Ln(Y) = 0.210 * Ln(X) + 3.13	0.93	재령 7일 : Ln(Y) = 1.105 * Ln(X) - 1.62	0.87
120kg/m ³ : Ln(Y) = 0.205 * Ln(X) + 3.23	0.97	재령 28일 : Ln(Y) = 0.645 * Ln(X) + 0.83	0.90
[X] Range : 3 ~ 28일]		[X] Range : 80 ~ 120 kg/m ³]	

일본 토목기술(2000.7) 자료에 의하면 단위시멘트량을 20-100kg/cm³으로 변화시켜 고찰한 일축압축강도의 경우 시멘트량이 증가함에 따라 일축압축강도는 증가하지만 단위시멘트량이 커질수록 강도의 오차범위가 크게 나타나는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구결과에서는 단위시멘트량이 증가함에 따라 강도증가는 비례하여 증가하지만 강도편차의 범위는 크게 나타나지 않았다. 표 9는 재령-일축압축강도-시멘트량의 상관 관계식을 나타낸 것

으로 각 인자별 상관성은 0.84-0.97로 높게 나타났다.

4.1.3 탄성계수

일반적으로 CSG 공법의 설계 및 안정성 분석은 탄성 해석을 위주로 이루어지고 있다. 즉 응력-변형의 거동양상이 일반적인 토사에서 나타나는 비선형 거동보다는 탄성체적 거동이 우세하게 나타나기 때문이다. 아래 그림 5는 일축압축시험의 단위시멘트량 변화에 따른 재령

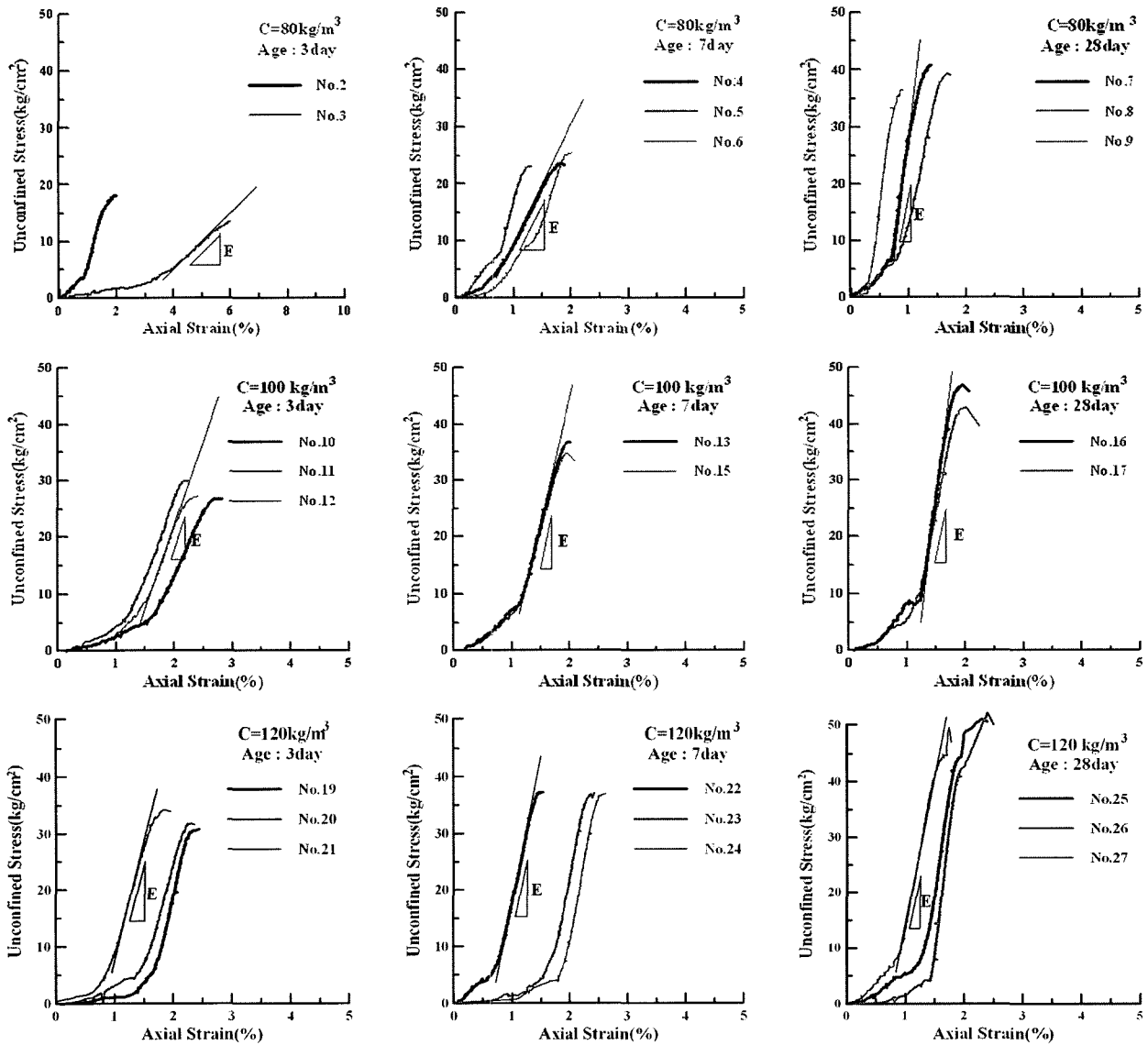


그림 5. 일축압축시험의 응력-변형률 관계

별 응력-변형곡선을 도시한 것으로 전반적인 거동양상은 변형초기 일시적인 곡선부분이 나타나며, 이후 급격한 응력증가와 함께 최대강도를 발현한 후 취성파괴에 이르는 양상을 나타내었다. 특히 시멘트량이 증가함에 따라 최대강도에 이르는 축 변형률이 점차 줄어들며 재령이 증가할수록 탄성범위가 확연히 들어나는 것을 알 수 있다. 일반적인 콘크리트 공시체의 경우 파괴시의 변형률이 대략 0.002-0.008% 미만임을 가만 할 때 CSG 재료의 최대강도는 상대적으로 큰 변형률에서 일어나는 것을 알 수 있다. 즉 CSG 재료의 압축거동은 시멘트량에 의해 좌우되며 토사와 콘크리트의 중간적인 거동양상을 나타내는 것으로 판단된다. 그림 6은 각 단위시멘트량에 대한 재령과 탄성계수와의 상관관계를 도시한 것으로 재령이 증가할수록 탄성계수는 비례하여 증가하는 것을 알 수 있으며, 탄성계수와 재령과의 상관식은 아래 표 10과 같다. 본 연구에서 도출된 탄성계수는 초기 변형률에서 나타나는 곡선부를 제외하고 선형구간의 기울기만을 고려하여 도출하였으며 그 상관성이 모든 단위 시멘트량에 대하여 0.88-0.94로 만족할만한 수준을 나타내었다. 그림 7은 시멘트량과 탄성계수와의 관계를 재령별로 도시한 것으로 시멘트량과 탄성계수는 서로 비례하고 있음을 확인할 수 있다. 다만 시멘트량이 증가할수록 그 분산정도가 다소 크게 나타나며 상관성도 상대적으로 낮게 나타나는 것을 알 수 있다.

4.2 삼축압축시험

4.2.1 응력-축변형률-체적변형률

아래 그림 8(a),(b),(c)는 축차응력-축변형률-체적변형률의 관계를 도시한 것이다. 먼저 축차응력과 축변형률의 관계를 살펴보면 전반적인 거동양상이 변형초기 거의 선형적인 강도증가를 보인 직후 급격한 연화현상을 보이고 있다.

시멘트량에 따라 조금씩의 차이는 있으나 대부분 축 변형률이 1%-1.5% 범위에서 최대강도가 발현되고 있음을 알 수 있다. Coop & Atkinson(1993)은 시멘트가 첨가된 흙의 거동양상을 크게 세 가지로 대분하고 있는데 그 중 하나의 양상으로 시멘트의 정착강도에 비하여 낮은 구속압에서 전단될 경우 응력-변형곡선의 최대축차응력은 매우 작은 변형률에서 발생한다고 발표한바 있다. 이러한 경향은 Fernando Schnaid et. al(2001)의 삼축 시험을 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 발현되고 이후 급격한 파괴가 발생된다고 발표한 바 있어 본 연구결과와 매우 비슷한 경향을 보였다.

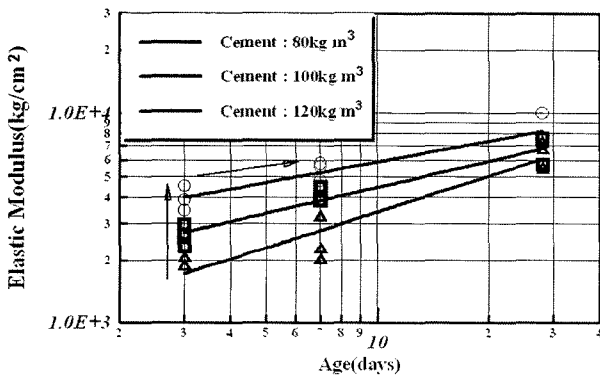


그림 6. 재령-탄성계수

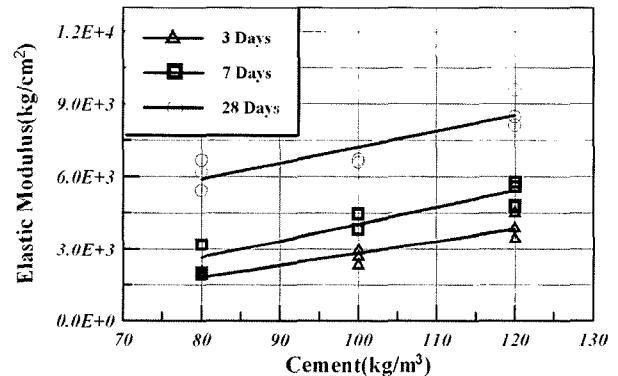


그림 7. 시멘트량-탄성계수

표 10. 재령-탄성계수-시멘트량의 상관식

항목	상관식	R ²
탄성계수(Y) & 재령(X) [(X) Range : 3~28일]	Cement 80kg/m ³ : Ln(Y) = 0.537*Ln(X) + 6.87	0.88
	Cement 100kg/m ³ : Ln(Y) = 0.411*Ln(X) + 7.45	0.94
	Cement 120kg/m ³ : Ln(Y) = 0.362*Ln(X) + 7.89	0.92
탄성계수(Y) & 시멘트량(X) [(X) Range : 80~120kg/m ³]	재령 3일 : Y = 50.91*(X) - 2253.31	0.84
	재령 7일 : Y = 69.10*(X) - 2860.0	0.86
	재령 28일 : Y = 65.80*(X) + 641.67	0.78

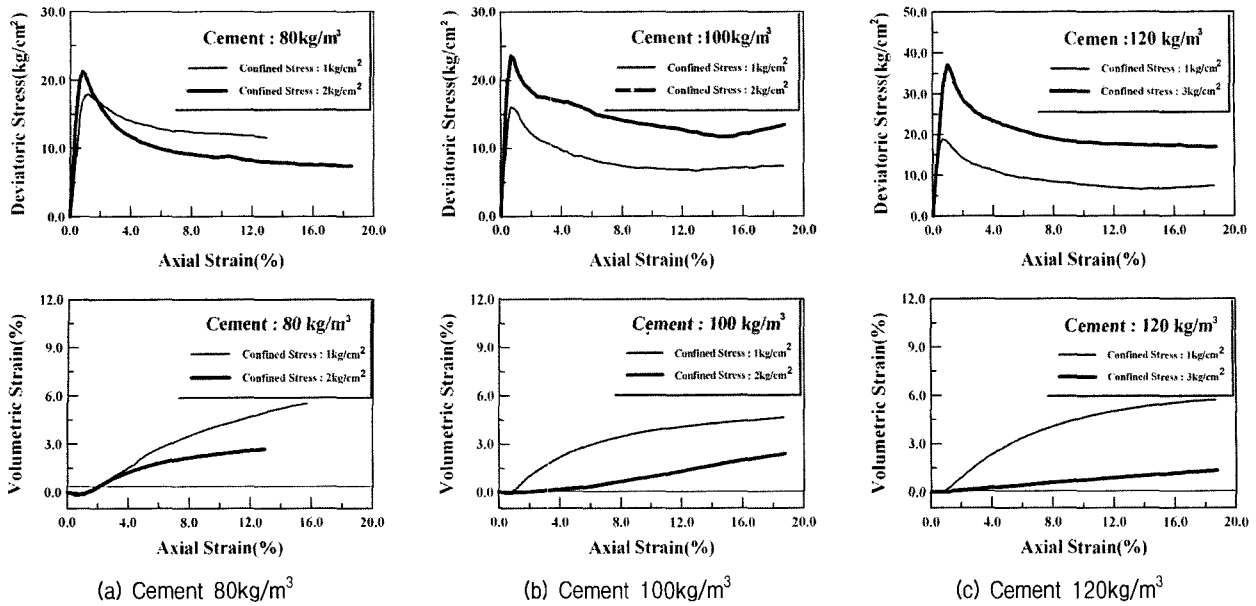


그림 8. 응력-축변형-체적변형률

4.2.2 강도정수

전절의 결과를 바탕으로 도시한 Mohr 원은 아래 그림 9과 같다. 표 11은 단위시멘트량에 따른 강도정수를 요약한 것으로 시멘트량이 증가할수록 유효내부마찰각은 약 45-59°의 범위로 증가하나 점착력에 대한 상관성은 명확치 않았다. Omae et al.(2003)은 CSG 재료의 대형 삼축압축시험에서 단위 시멘트량 60kg/m³인 경우 재령 7일에서의 유효 마찰각이 대략 52.7°, 점착력은 5.6kg/cm² 정도의 값을 가진다고 발표함으로써 본 연구 결과보다 상대

표 11. 강도정수

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*

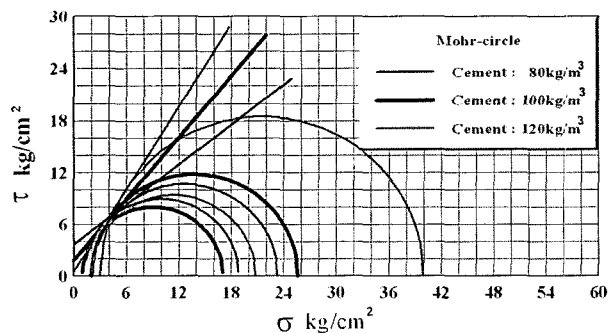


그림 9. 모아원

적으로 작은 단위시멘트에서 유효마찰각과 점착력이 크게 나타났다. 이러한 차이는 재료별 입도분포의 차이로 분석할 수 있는데 위 실험의 경우 4.76mm이하의 세립분이 약 25% 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 예를 들면 CSG 재료의 강도특성은 잔골재율과 상호연관이 있으며, 잔골재율이 많을수록 강도는 감소하는 것으로 보고되고 있는바 향후 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 Fernando et al.(2001)은 일련의 연구에서 시멘트의 양을 1, 3, 5%로 변화시켜 고찰한 Cemented Sand 재료의 강도특성 연구에서 시멘트량과 점착력은 비례하지만 유효마찰각과 시멘트량과의 상관관계는 일정하게 명확치 않다고 발표한바 있으며, 이러한 경향은 Clough et al.(1979), Clough et al.(1981), Clough et al.(1989), Dupas and Pecker(1979), Acar and EL-Tahir (1986) 그리고 Rad and Tumay(1986)의 연구결과에서도 찾아 볼 수 있다. 이러한 결과는 본 연구 결과와 조금 상이한 경향이지만 위 실험의 대부분이 시멘트가 혼합된 모래를 대상으로 이루어진 만큼 재료적 특성에 따른 추가적인 연구가 실시되어야 할 것으로 판단된다.

그림 10은 p-q 평면을 이용한 CSG 재료의 응력경로를 도시한 그림이며, 수정 파괴포락선으로부터 도출된 유효마찰각과 점착력은 표 11과 같다. 각 단위시멘트별 수정파괴포락선의 기울기는 0.633, 0.772, 0.82로 시멘

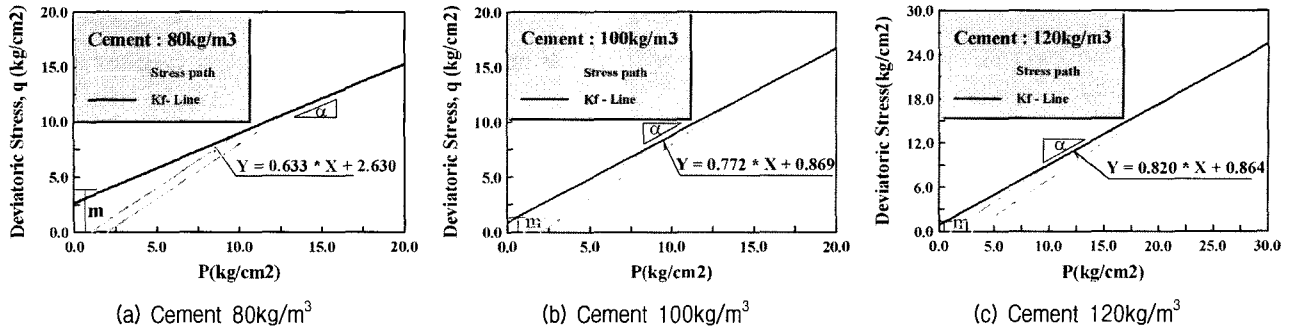


그림 10. 응력경로 및 Kf Line

트량에 비례하여 증가하고 있으며 절편값은 2.63, 0.86, 0.86으로 감소하는 경향을 나타내었다. 이들 상수로부터 얻어진 점착력은 $3.39-1.51\text{kg/cm}^2$, 유효마찰각은 $39-55.1^\circ$ 로 Mohr 원으로 도출된 값들보다 다소 작게 나타났다.

연화현상을 나타내었으며, 최대축차응력은 모든 단위 시멘트량에 대하여 축변형률 1.5% 범위내에서 발생하였다. 단위 시멘트량의 증가에 따라 유효마찰각은 비례하여 증가하였으나 점착력은 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다.

5. 결론

- (1) CSG 재료의 일축압축강도는 동일한 단위시멘트량을 기준으로 재령이 커질수록 비례하여 증가하였으며 시멘트량이 증가할수록 강도증가 효과를 확인할 수 있었다. 그러나 같은 양의 시멘트 증가라 할지라도 강도 증가율이 다른 만큼 경제적인 측면을 고려하여 목표 설계기준강도를 중심으로 최대한의 강도 발현을 유도할 수 있는 최적의 단위시멘트량 산정이 필요하다.
- (2) 다짐시험결과 단위시멘트량에 따른 최적함수비와 최대건조단위중량은 거의 비슷한 범위의 값을 나타냄으로써 시멘트가 다짐특성에 미치는 영향은 미비한 것으로 판단된다.
- (3) 일축압축시험 결과 CSG 재료의 전반적인 응력-변형특성은 짧은 변형률에서 최대강도를 발현한 후 급격한 취성과파괴를 나타내는 탄성체적 거동이 지배적인 것으로 나타났으며 이러한 현상은 시멘트량과 재령이 증가할수록 더욱 뚜렷하게 나타났다.
- (4) 일축압축시험 결과 재령과 탄성계수, 시멘트량과 탄성계수는 서로 밀접한 관계가 있으며 각 요소 별 상관관계는 최소 0.78 이상으로 나타났다. 또한 실험결과를 바탕으로 각 인자와의 상관관계식을 제안하였다.
- (5) 대형삼축시험 결과 응력거동 특성은 변형초기 선형적인 강도증가와 함께 최대강도를 발현하고 급격한

참고 문헌

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. Clough, G. W., Kuck, W. M., and Kasali, G. (1979), "Silicate-stabilized sand", ASCE, Vol.105, No.GT1, pp.65-81.
3. Clough, G. W., Sitar, N., Bachus, R. C., and Rad, N. S. (1981), "Cemented sands under static loading", ASCE, Vol.107, No.GT6, pp.799-817.
4. Clough, G. W., Iwabuchi, J., Rad, N. S., and Kuppasamy, T. (1989), "Influence of cementation on liquefaction of sands", ASCE, Vol.115, No.8, pp.1102-1117.
5. Coop, M. R. and Atkinson, J. H. (1993), "The mechanics of cemented carbonate sands", *Geotechnique*, Vol.43, No.1, pp.53-67.
6. Dupas, J. and Pecker, A. (1979), "Static and dynamic properties of sand cemented", *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, Vol.105, No.GT3, pp.419-436.
7. Fernando S., Pedro D. M., Prieto., and Nilo C. C. (2001), "Characterization of cemented sand in triaxial compression", *ASCE*, Vol.127, No.10, pp.857-868.
8. Omae, S., Sato, N., and Oomoto, I. (2003), "Dynamic properties of CSG", *Proc of 4th Inter. Conf. on Roller compacted concrete dam*, Spain pp.511-518.
9. 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, pp.117-125.
10. Watanabe, K., Tateyama, M., Jiang, G., Tatsuoka, F., and Lohani, T. N. (2003), "Strength Characteristics of cement mixed gravel evaluated by large triaxial compression test", *Proc. 3rd Int. Symp. on Deformation Characteristics of Geomaterials*. Di, B. ed., Lyon, pp.683-693.

(접수일자 2005. 7. 15, 심사완료일 2005. 12. 15)