

## 낙동강유역 시멘트혼합토의 강도특성

### Strength Characteristics of Cemented Sand of Nak-dong River

김영수\* · 정우섭† · 석태용\*\* · 임안식\*\*\*

Kim, Youngsu\* · Jeong, Wooseob† · Seok, Taeryong\*\* · Im, Ansik\*\*\*

#### Abstract

There were huge damages of human beings and their properties in many areas of the basin of the Nak-Dong river by the unusual weather and the localized downpour recently. In this research against disasters, we want to know strength of the cemented sand that is mixed with cement and poor-graded sand, to estimate CSG(Cemented Sand and Gravel) method used coffer dam in Japan, which is the materials of riverbed in the basin of the Nak-Dong river for levee's construction. For that, we want to provide the fundamental data which need in the examination of adaptation of levee's material, design and analysis by investigating compressive strength by curing period and cement content, elastic modulus and stress by transformation from compaction test, CBR test, unconfined compression test and triaxial compression test as changing cement content from 2% to 8% at two sites in the basin of the Nak-Dong river.

**Keywords** : Levee, Cemented Sand, CSG(Cemented Sand and Gravel), Unconfined compression test, Triaxial compression test

#### 요 지

최근 이상기후 및 집중호우로 인해 낙동강유역의 많은 지역이 재산 및 인명손실을 크게 입고 있다. 이러한 재해 대책의 일환으로 본 연구에서는 일본에서 본댐공사시 가물막이댐으로서 많이 활용하고 있는 CSG공법의 제방축조재료로서 적용성을 평가하기 위해 낙동강 유역의 하상재료인 빈입도의 모래를 시멘트와 혼합한 시멘트혼합토의 강도특성을 파악하고자 한다. 이를 위하여 낙동강유역 2지점의 모래와 시멘트의 혼합율을 2~8% 까지 변화시키면서 다짐 및 CBR시험, 일축압축시험 그리고 중형삼축시험을 실시하여 시멘트혼합율과 재령에 따른 압축강도, 탄성계수, 그리고 변형에 따른 응력의 특성등을 검토함으로써 제체재료의 적합성 검토, 설계 및 해석에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

**주요어** : 하천제방, 시멘트혼합토, CSG공법, 일축압축시험, 중형삼축압축시험

\* 정회원, 경북대학교 토목공학과 교수

† 비회원, 경북대학교 토목공학과, 박사과정 (E-mail: jws2713@hanmail.net)

\*\* 비회원, 경북구미시공무원, 과장, 박사과정

\*\*\* 비회원, 경북개발공사, 사업1부장, 박사과정

## 1. 서론

낙동강 유역의 경우 지구의 온난화에 의한 이산화탄소와 제방의 노후화에 따른 홍수시 제방의 붕괴로 해마다 인명 및 재산의 피해가 급증하고 있는 실정이다. 이로 인한 치수대책의 일환으로 하천제방의 축조 및 보수보강공법의 개발이 절실히 요구되고 있으나 하천제방재료의 경우 하상골재의 사용금지 및 가용재료의 고갈로 인해 원거리에서 골재를 운반에 따른 운반비의 증가로 공사비가 상승하고 있다.

따라서 대부분 입도가 균등한 모래로 구성되어 있는 하상모래를 이용한 시멘트혼합토를 제체로 활용할 경우 공사비의 절감뿐만 아니라 골재생산을 위한 토취장의 개발의 최소화로 환경파괴의 예방 및 소중한 자연의 보존효과도 기대할 수 있을 것이다.

역학적관점에서 시멘트혼합토는 시멘트의 접착효과로 인해 일반적인 토질역학과 암석역학재료들의 중간정도에 위치하는 지반재료라 할 수 있다. 때로는 이러한 재료의 특성을 설명할 수 있는 물리적 및 수학적모델의 부재로 인해 비교과서적인 재료로 간주되기도 한다(Gen and Nova, 1993).

국내의 경우 시멘트혼합토에 대한 연구실적은 미미하지만 해외의 경우 시멘트의 작용에 대한 많은 연구성과가 발표되고 있다.

Gens and Nova(1993)는 시멘트혼합토의 거동은 지질학적 및 응력-변형이력, 변형속도, 온도 및 주응력의 방향에 영향을 받는다고 발표하였다. 그리고 Ingles and Metcalf(1972)는 인위적인 시멘트혼합토의 경우 재령이 반드시 고려되어야 된다고 하였다. 그 외에 재하율(Cloughh et al. 1979), 응력경로(Bressani and Vaughan 1989; Reddy and Saxena 1992; Bressani et al, 1994), 미소구조 및 입자간 접촉력(Chang and Woods, 1992)을 시멘트혼합토의 거동을 결정하

는 요소로 고려하고 있다.

본 연구에서는 하천제방의 축조재료로서 현지 발생골재를 최소한의 분류를 통해 시멘트 및 물과 혼합한수 로올러의 다짐에 의해 구조물을 축조하는 공법인 CSG공법의 적용성을 평가하기 위해 낙동강유역의 두 지역의 모래를 시멘트와 혼합하여 강도특성을 평가하였다.

## 2. 실내시험

### 2.1 시료채취 및 선별

실내시험에 사용할 하상재료의 채취를 위하여 낙동강 유역의 성주대교 및 경남 창녕의 장천제지역을 선정하였다. 낙동강 유역의 하상재료는 육안상으로 대부분 입도가 균등한 모래로 구성되어 있으나 선별되지 않은 하상재료를 모재료로 하는 CSG공법의 특성의 반영을 위해 실내시험 및 현장시공시 최소한의 혼합 및 선별을 통한 모재료의 확보가 가능한 지역을 선정하였다. 그림 1과 같이 대상지역의 표토를 대략 1m 정도 제거하고 잡초 및 기타 불순물을 장비와 인력을 동원하여 제거하였다. 실내시험에서 사용되는 재료의 최대입경은 시험장비의 규모에 따라 달라지나 다짐시험 및 강도시험시에 사용되는 최대입경은 약 40mm이하로 제한하고 있다. 낙



그림 1. 실내시험을 위한 시료채취장면

동강유역의 두지점에서 채취한 시료의 경우 입자의 크기가 충분히 작으므로 선별과정을 거치지 않았다.

### 2.2 기본물성시험

성주대교 및 장천제에서 채취한 하상재료의 기본적인 물리특성 및 입도분포 결과는 그림 2 및 표 1과 같다. 균등계수는 1.5-2.1, 곡률계수는 0.8-1.1의 범위로 입도분포가 균등하며 통일분류 법상 SP에 해당한다. 낙동강 본류에 위치한 두 지역은 입도분포의 편차가 크게 나타나지는 않았지만 낙동강유역의 하상재료의 대표적 특성을 나타내므로 두지역의 입도를 기준으로 실내시험을 실시하였다.

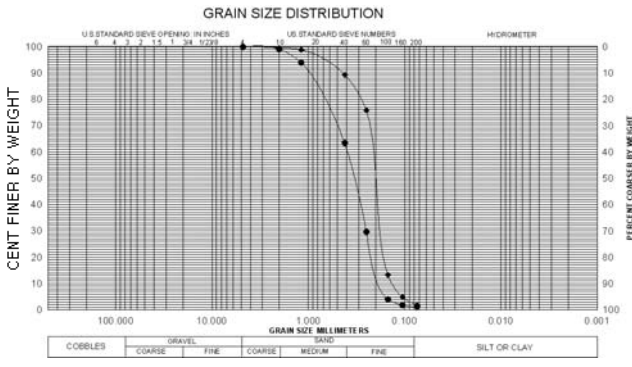


그림 2. 입도분포곡선

표 1. 낙동강유역시료의 물리적 특성

항목	위치	성주대교	장천제
비중( $G_s$ )		2.67	2.68
유효입경( $D_{10}$ , mm)		0.19	0.14
균등계수( $C_u$ )		2.1	1.5
곡률계수( $C_g$ )		0.8	1.1
시멘트 비중( $G_s$ )		3.15	3.15
USCS		SP	SP

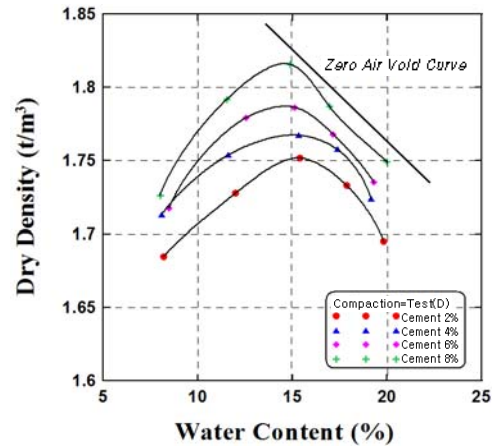
### 2.3 다짐 및 CBR시험

강도시험을 위한 재료의 성형을 위해 시멘트 혼합물을 2%, 4%, 6% 및 8%로 달리하여 수정 다짐[KSF 2319]에 의한 다짐시험을 실시하고 각 단위시멘트량에 따른 최대건조단위중량 및 최적 함수비를 도출하였다. 아래 그림 3은 시멘트혼합

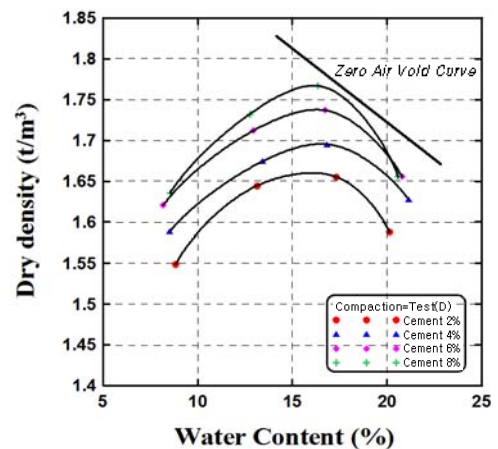
율을 변화시켜 실시한 다짐시험결과를 도시한 것으로 시험결과 표 2와 같이 최적함수비는 대략 13.9 ~ 15.7% 정도이며, 최대건조단위중량은 1.65 ~ 1.81 $\text{ton/m}^3$ 로 시멘트혼합율의 증가에 따라 약간 증가하였으나 거의 비슷한 범위의 값을

표 2. 다짐 및 CBR시험 결과

구분	시멘트 혼합율	최적 함수비 (%)	최대건조 단위중량 ( $\text{t/m}^3$ )	CBR (%)
성주대교	2%	14.2	1.74	86
	4%	14.0	1.77	107
	6%	15.1	1.78	89
	8%	13.9	1.81	209
장천제	2%	15.1	1.65	79
	4%	15.7	1.70	123
	6%	15.3	1.73	120
	8%	15.1	1.76	107.7



(a) 성주대교 (D 다짐)

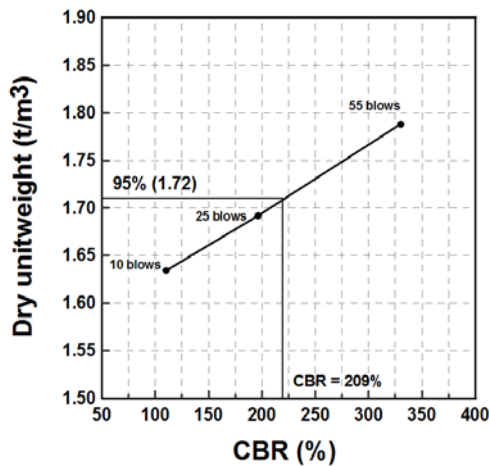


(b) 장천제 (D 다짐)

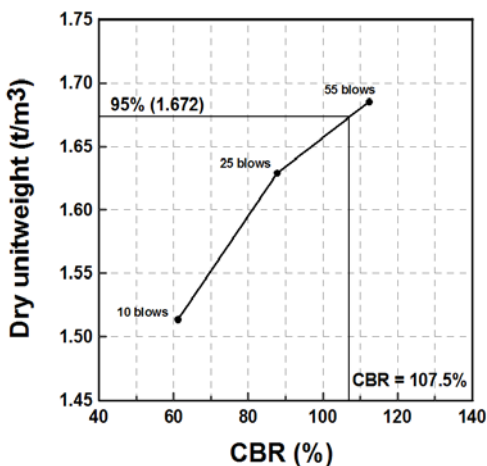
그림 3. 시멘트혼합율에 따른 다짐시험결과

가지는 것으로 나타났다. 시멘트혼합율이 증가함에 따라 시멘트의 접착효과로 인해 단위중량이 다소 증가하는 것으로 판단된다.

하천제방설계기준(2002)에서 제시하는 지지력비를 평가하기 위해 CBR시험을 실시하였으며 시멘트혼합율의 증가에 따라 뚜렷한 경향은 없지만 증가양상이 나타났다. 상대적으로 입자의 크기가 크며 양입도인 성주대교지점이 지지력비의 편차가 심한 것으로 나타났다. 그림 4는 각각 성주대교지점과 장천제지점시료에 대한 시멘트혼합율이 8%일 때 CBR시험의 결과를 나타내고 있다.



(a) 성주대교 8%



(b) 장천제 8%

그림 4. 시멘트혼합율에 따른 CBR시험결과

## 2.4 강도시험

강도시험은 다짐시험에서 구해진 최적함수비와 최대건조단위중량을 기준으로 규격화된 몰드(직경 15cm × 높이 30cm)를 이용하여 공시체를 성형한 후 재령별로 일축압축시험 및 삼축압축시험등을 실시하였다. 아래의 표 3은 국내외 다짐기준을 설명하고 있으며 본 연구에서는 **Hilti or Kango vibrating method (ASTM C 1435)**로 각층당 진동수 40Hz, 다짐시간 1분씩 3층다짐을 실시하여 강도시험에 필요한 공시체를 제작하였으며 D다짐시 최대건조단위중량의 93 ~ 95%수준에 도달하므로써 하천설계기준(2002)에서 제시하는 다짐기준을 만족하는 것으로 나타났다.

표 3. 국내외 다짐방법

<input type="checkbox"/>	<b>Proctor test(ASTM D 1557)</b>
	· 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"/>	<b>Hilti or Kango vibrating method(ASTM C 1435)</b>
	· 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"/>	<b>Pneumatic tamper method</b>
	· ASTM 기준에 명시되어 있지 않음.
	· 습윤범위내의 Workability에 사용.
	· 실내시험자가 쉽게 사용하기 어려움.
	· 시험강도와 진동횟수가 일반적인 현장다짐 시험 장비와 상이하여 현장조건을 재현하기 쉽지 않음
<input type="checkbox"/>	<b>Vebe table method(ASTM C 1176)</b>
	· 일반적으로 30-35초 정도의 진동으로 현장다짐 재현이 가능
	· Hilti or Kango vibrating 및 Pneumatic tamper 방법에 비하여 혼합 Workability의 범위가 좁음





그림 5. 시료성형 및 양생

강도시험은 대상 구조물의 허용설계기준을 만족하는 가장 합리적인 시멘트혼합율을 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. 일축압축시험의 경우 시멘트혼합율의 변화에 대한 강도특성을 파악하기 위하여 시멘트혼합율을 2%, 4%, 6% 및 8%로 나누어 시험을 수행하였으며, 각 시멘트혼합율에 대한 재령을 3일, 7일 그리고 28일로 달리하여 강도특성을 평가하였다. 그리고

표 4. 강도시험 종류

시멘트 혼합율	일축압축시험			삼축압축시험		
	재령			재령	구속압 (t/m <sup>2</sup> )	압밀 및 배수조건
2%	3일 (No.1-3)	7일 (No.13-15)	28일 (No.25-27)	7일	5 10 20	등방, 배수 (CD)
4%	3일 (No.4-6)	7일 (No.16-18)	28일 (No.28-30)	7일	5 10 20	등방, 배수 (CD)
6%	3일 (No.7-9)	7일 (No.19-21)	28일 (No.31-33)	7일	5 10 20	등방, 배수 (CD)
8%	3일 (No.10-12)	7일 (No.22-24)	28일 (No.34-36)	7일	5 10 20	등방, 배수 (CD)



그림 6. 중형삼축압축시험(15cm×30cm)

시험 24시간전부터 수침시키므로서 포화도 및 현장조건과 일치시켰다. 각 재령별로 3개의 공시체를 제작하여 시험시 오차를 줄였으며 삼축압축시험 역시 일축압축시험과 동일한 시멘트혼합율을 적용하고 재령은 7일 강도만을 고려하여 실시하였다. 표 4는 본 연구에서 수행한 강도시험의 종류를 요약한 것이며 그림 6은 중형삼축시험장면 및 파괴후의 모습이다.

## 2.5 기타시험

이밖에 시멘트혼합토의 제체재료로서의 적용성을 평가하기위해 제체의 투수성과약을 위한 실내투수시험, 유속에 의한 유수저항시험, 온도변화에 따른 내구성을 판단하는 급속동결융해시험 그리고 내화학성시험 등이 있다. 그리고 수질 및 주변환경에 미칠수 있는 영향의 평가를 위한 폐놀시험등이 필요할 것으로 판단된다.

## 3. 실내시험의 결과 및 고찰

### 3.1 일축압축시험

#### 3.1.1 재령-시멘트혼합율-일축압축강도관계

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  $80\text{kg}/\text{m}^3$ 을 기준으로 재령 28일 강도는 7일강도의 약 2배 증가하는 것으로 나타났다.

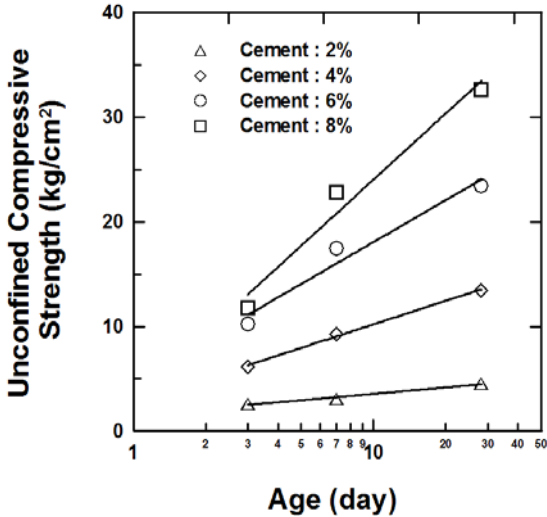


그림 7. 일축압축강도-재령의 상관성

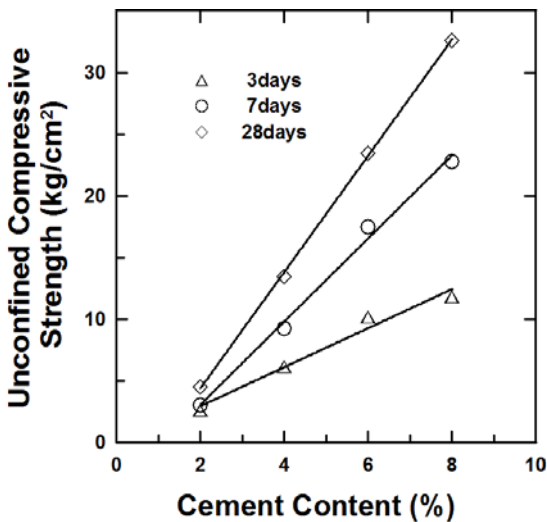


그림 8. 일축압축강도-시멘트비의 상관성

표 5는 재령에 따른 일축압축강도와와의 관계에 대해 상관식을 수립하였다. 성주대교 및 장천제 지점의 상관계수는 0.95이상으로 상관성이 매우 높은 것으로 나타났다.

표 5. 재령(X)-일축압축강도(Y) 상관관계

위치	시멘트 혼합율	상관식(일축압축강도)	$R^2$
성주대교 (재령 : 3~28일)	2%	$Y = 0.88 * \ln(X) + 1.53$	0.97
	4%	$Y = 3.24 * \ln(X) + 2.73$	0.99
	6%	$Y = 5.76 * \ln(X) + 4.79$	0.96
	8%	$Y = 9.10 * \ln(X) + 3.06$	0.97
장천제 (재령 : 3~28일)	2%	$Y = 0.96 * \ln(X) + 0.83$	0.99
	4%	$Y = 1.86 * \ln(X) + 2.62$	0.95
	6%	$Y = 3.51 * \ln(X) + 4.26$	0.99
	8%	$Y = 6.91 * \ln(X) + 2.92$	0.97

일본 토목기술(2000.7) 자료에 의하면 단위시멘트량을  $20\text{--}100\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 변화시켜 고찰한 일축압축강도의 경우 시멘트량이 증가함에 따라 일축압축강도는 증가하지만 단위시멘트량이 커질수록 강도의 오차범위가 크게 나타나는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구결과에서는 시멘트 혼합율의 증가에 따라 강도증가는 비례하여 증가하지만 강도편차의 범위는 크게 나타나지 않았다. 표 6은 재령에 따른 일축압축강도와 시멘트혼합율의 상관 관계식을 나타낸 것으로 각 인자별 상관성은 0.97-0.99로 매우 높게 나타났다. 균등한 입도분포 및 작은 입자의 크기가 상관성을 증가시킨 것으로 판단된다.

표 6. 시멘트혼합율(X)-일축강도(Y) 상관관계

위치	재령	상관식	$R^2$
성주대교 (시멘트혼합율 : 2~8%)	3일	$Y = 1.58 * X - 0.22$	0.97
	7일	$Y = 3.37 * X - 3.68$	0.99
	28일	$Y = 4.71 * X - 5.05$	0.99
장천제 (시멘트혼합율 : 2~8%)	3일	$Y = 1.34 * X - 0.795$	0.98
	7일	$Y = 2.50 * X - 2.775$	0.98
	28일	$Y = 3.57 * X - 4.395$	0.97

### 3.1.2 재령-시멘트혼합율-탄성계수관계

본 연구에서 도출된 탄성계수는 초기 변형률

에서 나타나는 곡선부를 제외하고 선형구간의 기울기만을 고려하여 도출하였으며 그 상관성이 모든 시멘트혼합율에 대하여 0.88 - 0.94로 만족할만한 수준을 나타내었다. 그림 9, 그림 10 그리고 표 7, 표 8은 성주대교지점모래의 시멘트혼합율과 재령에 따른 탄성계수의 변화를 나타낸 것으로 시멘트혼합율에 따라 탄성계수는 지수적으로 서로 비례하고 있음을 확인할 수 있다.

재령과 탄성관계의 상관계수는 0.84 - 0.99로 시멘트혼합율와 탄성계수의 상관계수인 0.93 - 0.99보다 낮게 나타나 상관성이 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

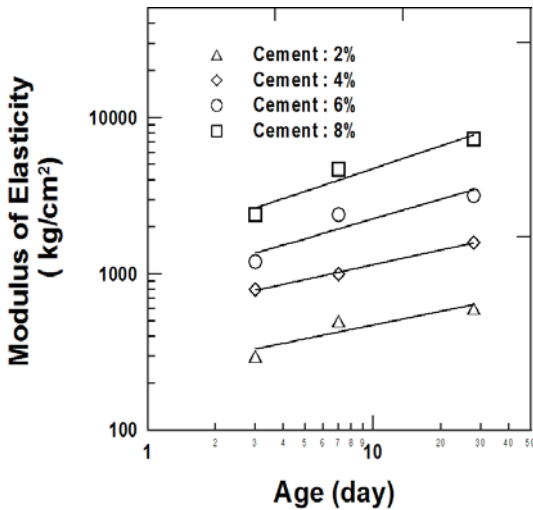


그림 9. 재령에 따른 탄성계수

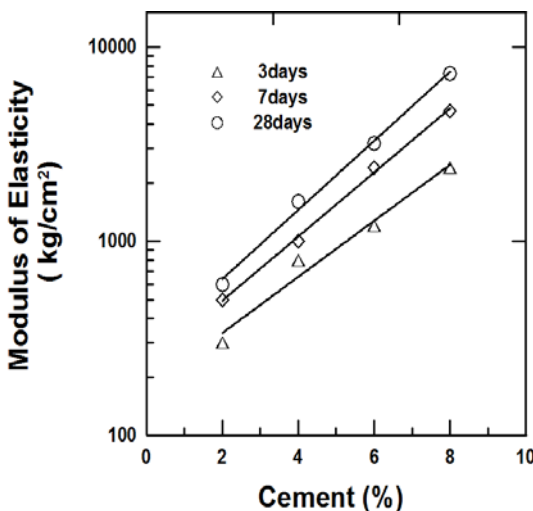


그림 10. 시멘트혼합율에 따른 탄성계수

표 7. 재령(t)-탄성계수(E)(kg/cm²) 상관관계

위치	시멘트 혼합율	상관식	R <sup>2</sup>
성주대교 (재령 : 3~28일)	2%	$\ln(E) = 0.29 * \ln(t) + 5.48$	0.84
	4%	$\ln(E) = 0.31 * \ln(t) + 6.32$	0.99
	6%	$\ln(E) = 0.42 * \ln(t) + 6.76$	0.87
	8%	$\ln(E) = 0.48 * \ln(t) + 7.36$	0.93
장천제 (재령 : 3~28일)	2%	$\ln(E) = 0.14 * \ln(t) + 5.51$	0.86
	4%	$\ln(E) = 0.06 * \ln(t) + 6.61$	0.86
	6%	$\ln(E) = 0.31 * \ln(t) + 6.60$	0.99
	8%	$\ln(E) = 0.42 * \ln(t) + 7.06$	0.95

표 8. 시멘트혼합율(c)-탄성계수(E)(kg/cm²) 상관관계

위치	재령	상관식(탄성계수)	R <sup>2</sup>
성주대교 (시멘트 혼합율 : 2~8%)	3일	$\ln(E) = 0.33 * c + 5.15$	0.97
	7일	$\ln(E) = 0.38 * c + 5.44$	0.99
	28일	$\ln(E) = 0.41 * c + 5.64$	0.99
장천제 (시멘트 혼합율 : 2~8%)	3일	$\ln(E) = 0.27 * c + 5.33$	0.93
	7일	$\ln(E) = 0.37 * c + 5.04$	0.98
	28일	$\ln(E) = 0.40 * c + 5.19$	0.99

### 3.2 삼축압축시험

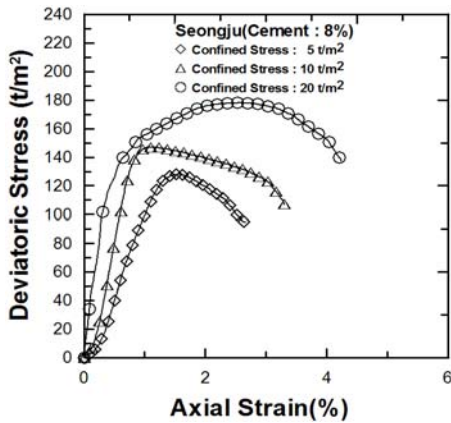
#### 3.2.1 축차응력-축변형률-체적변형률 관계

그림 11과 그림 12는 각각 축차응력-축변형률 및 체적변형률-축변형률의 관계를 도시한 것이다. 구속응력의 증가에 따라 축차응력의 증가양상이 뚜렷하며 변형초기에 거의 선형적인 강도의 증가를 보인후 소성상태에 가까운 거동을 나타낸다. 전반적인 거동양상은 시멘트혼합율이 적을 때 최대강도가 뚜렷하지 않은 소성거동을 보였으나 그림 11에서와 같이 시멘트혼합율이 8% 일때는 최대강도이후 연화현상을 보이고 있다.

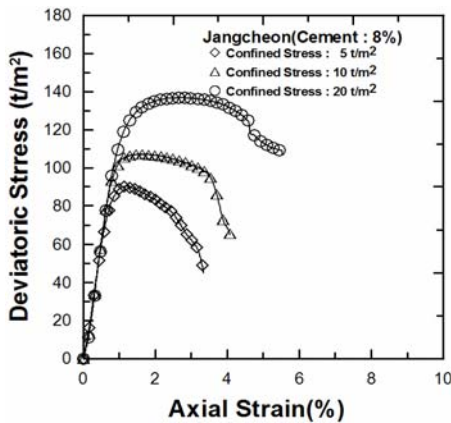
성주대교지점의 시료와 시멘트의 혼합도가 장천제지점보다 구속응력에 대한 축차응력의 증가가 더 크게 나타났으며 입도에 의한 마찰저항의 증가에 의한 것으로 추정된다.

시멘트혼합율에 따라 조금씩의 차이는 있으나

대부분 축변형률이 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 접착강도에 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 발현되고 이후 급격한 파괴가 발생된다고 발표한 바 있어 본 연구결과와 매우 비슷한 경향을 보였다.

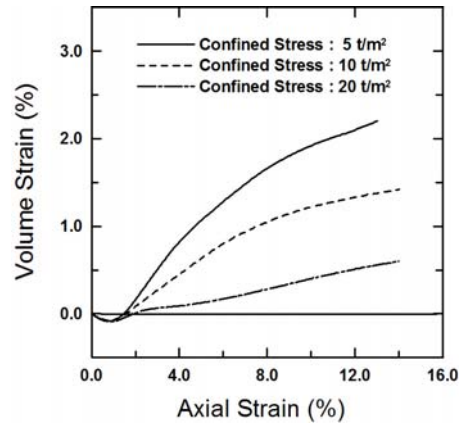


(a) 성주대교

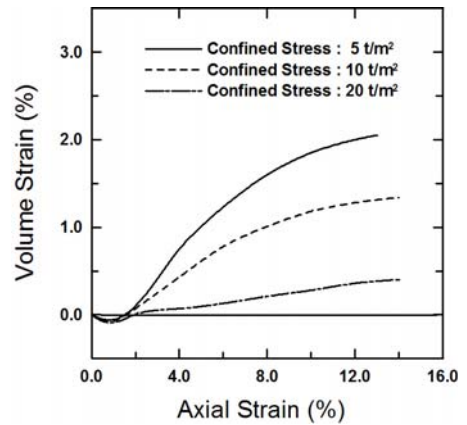


(b) 장천제

그림 11. 축차응력-축변형률 관계



(a) 성주대교



(b) 장천제

그림 12. 체적변형-축변형률 관계

### 3.2.2 강도정수

표 9는 각 시멘트혼합율에 따른 강도정수를 요약한 것으로 시멘트혼합율이 증가할수록 유효 내부마찰각은 약 35-40°의 범위로 명확하지 않으나 점착력은 시멘트혼합율의 증가에 따라 증가양상이 뚜렷하게 나타났다. 그림 13과 같은 응력경로를 이용한 강도정수의 평가에서 성주대교지점의 경우 점착력 1.49 - 27.3 t/m<sup>2</sup>, 유효마찰각은 38.9 - 40.9°로 장천제지점의 점착력 2.97 - 19.07 t/m<sup>2</sup> 유효마찰각 35.9 - 37.9° 보다 큰 값을 나타내었으며 이는 성주대교지점의 시료가 장천제지점의 시료보다 상대적으로 입자의 크기가 크며 입도분포도 양호한 결과인 것으로 판단된다. Omae et al.(2003)은 CSG 재료의 대형 삼

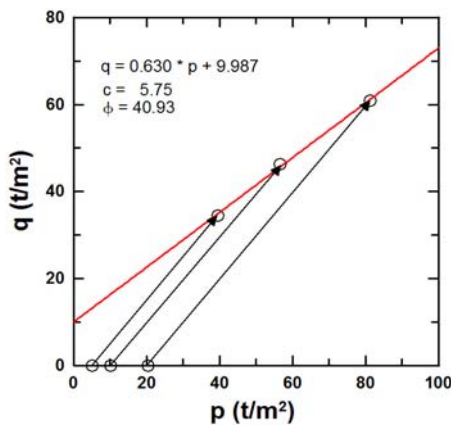


축압축시험에서 단위 시멘트량  $60\text{kg/m}^3$ 인 경우 재령 7일에서의 유효 마찰각이 대략  $52.7^\circ$ , 점착력은  $5.6\text{kg/cm}^2$  정도의 값을 가진다고 발표함으로써 본 연구 결과보다 상대적으로 작은 단위시멘트에서 유효마찰각은 크게 나타났으나 점착력은 시멘트혼합율 4%일때만 거의 유사하며 시멘

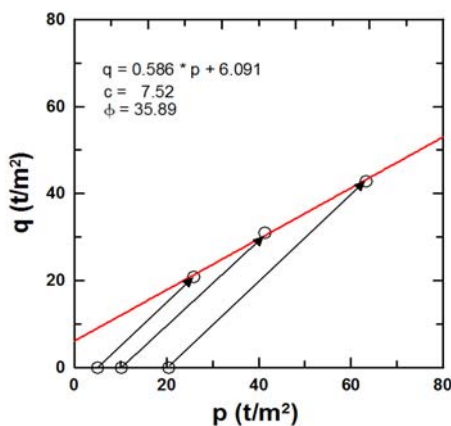
트혼합율이 증가함으로써 점착력은 더 큰 값을 나타내었다. 이러한 차이는 재료별 입도분포의 차이로 분석할 수 있는데 위 실험의 경우  $4.76\text{mm}$ 이하의 세립분이 약 25% 이하인 반면 본 연구에 사용된 CSG 재료의 전반적인 입도분포는 세립분이 95% 이상을 차지하는 것으로 나타나 세립분이 강도특성에 영향을 미치는 주요 인자임을 알 수 있었다. 또한 Fernando et al.(2001)은 일련의 연구에서 시멘트의 양을 1, 3, 5%로 변화시켜 고찰한 Cemented Sand 재료의 강도특성 연구에서 시멘트량과 점착력은 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.

표 9. 혼합토에 대한 강도정수

시멘트	성주(성주대교)		장천(장천제)	
	C(t/m <sup>2</sup> )	Φ(°)	C(t/m <sup>2</sup> )	Φ(°)
2%	1.49	38.9	2.97	36.3
4%	5.75	40.9	6.18	37.9
6%	12.9	39.0	7.52	35.9
8%	27.3	38.2	19.07	36.8



(a) 성주대교



(b) 장천제

그림 13. 응력경로 및  $K_f$  Line

#### 4. 결론

- (1) 시멘트를 혼합한 입도가 균등한 하상모래에 대해서도 다짐시 시멘트의 효과에 인한 건조단위중량이 증가하였다.
- (2) 시멘트혼합율의 증가에 따라 수침 CBR값의 증가가 뚜렷하며 약 50 ~ 100%정도의 값을 나타내며 하천제방설계기준에서 제시하는 값을 초과하는 것으로 나타났다.
- (3) 일축압축시험 결과 최대강도를 발현한 후 급격한 취성과파괴를 나타내는 탄성체적 거동이 지배적인 것으로 나타났으며 이러한 현상은 시멘트혼합율과 재령이 증가할수록 증가 하였다.
- (4) 일축압축시험 결과 시멘트혼합율의 경우 탄성계수와 상관성이 0.93이상으로 관계식을 수립하여 재료의 배합설계에 적용가능한 것으로 판단된다.

(5) 중형삼축시험 결과 응력에 따른 거동 특성은 시멘트혼합율, 재령, 구속압조건에 영향을 받았으며 변형초기 선형적인 강도증가와 함께 축변형율 1.5%이내에서 최대강도를 발현하였다.

급격한 팽창을 나타내었다.

(7) 시멘트혼합율의 증가에 따라 점착력은 비례하여 증가하였으나 유효마찰각은 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다.

(6) 체적변형은 최대강도 발현이전에는 약간의 압축거동을 나타낸후 최대강도발현이후에는

(접수일 : 2006. 3. 9 심사일 : 2006. 3. 13 심사완료일 : 2006. 6. 2)

### 참고문헌

1. Acar, Y. B. and el-Tahir, A. E.(1986), Low Strain Dynamic Properties of Artificially Cemented Sand, *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol. 112, No. 11, pp. 1001~1015.
2. Bressani, L. A. and Vaughan, P. R.(1989), Damage to Soil During Triaxial Testing. *Proc., 12th Int. Conf.on Soil Mech. and Found. Engrg.*, Vol. 1, Rotterdam, The Netherlands, pp. 17~20
3. Chand, T. and Woods, R. D.(1992), Effect of Particle Contact Bond on Shear Modulus, *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol. 188, No. 8, pp. 1216~1233.
4. Clough, G. W., Iwabuchi, J., Rad, N. S. and Kippusamy, T.(1989), Influence of Cementation on Liquefaction of Sands, *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol. 115, No. 8, pp. 1102~1117.
5. Clough, G. W., Sitar, N., Bachus, R. C. and Rad, N. S.(1981), Cemented Sands under Static Loading, *J. Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, Vol. 107, No. 6., pp. 799~817.
6. Clough, W. G., Kuck, W. M. and Kasali G.(1979), Silicate-Stabilized Sands, *J. Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, Vol. 105, No. 1, pp. 65~82
7. Coop, M. R. and Atkinson, J. H. (1993), The Mechanics of Cemented Carbonate Sands, *Geotechnique*, London, Vol. 43, No. 1, pp. 53~67.
8. Dupas, J. and Pecker, A.(1979), Static and Dynamic Properties of Sand-Cement, *J. Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, Vol. 105, No. 3, pp. 419~436.
9. Fernando Schnaid, Pedro D. M. Prietto and Nilo, C.(2001), Characterization of Cemented Sand in Triaxial Compression, *J. Geotech and Geoenvir, Eugrg*, ASCE, Vol. 172, No. 10, pp. 875~867
10. Gens, A. and Nova, R.(1993), Conceptual Bases for a Constitutive Model for Bonded Soils and Weak Rocks, *Proc., Int. Sym.. on Geotech.. Engrg. of Hard Soils-Soft Rocks*, Vol. 1, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 485~494.
11. Rad, N. S. and Tumay, M. T.(1986), Effect of Cementation on the Cone Penetration Resistance of Sand: A Model Study, *Geotech. Testing J.*, Vol. 9, No. 3, pp. 117~125.
12. Reddy, K. R. and Saxena, S. K.(1992), Constitutive Modelling of Cemented Sand, *Mech. of Mat.*, Vol. 14, No. 2, pp. 155~178