

## 하천제방축조재료로서 시멘트혼합토의 특성 Characterization of Cemented Sand for Building of Levee

정 우 섭\* / 김 영 수\*\*

Jeong, Woo-Seob / Kim, Yung-Su

### Abstract

There are loss of lives and properties in many areas of the basin of the Nak-Dong river by the unusual weather and the localized heavy rain recently, and many difficulties of levee construction for prevention of disasters by acquisition of material and expensive transportation. In this research, The factors and causes which affect the strength through laboratory tests about the cemented sand that is mixed a few portland cement and sand of Nak-Dong river bed was researched closely. For providing the fundamental data which is needed in design and analysis of levee material, the compaction test and the standard triaxial compression test etc was conducted., analyzed compression strength and characteristic of stress-strain behavior in which the influence of cement content.

**key words** : Levee, Cemented Sand, Nak-Dong river, Compaction test, Triaxial compression test

### 요 지

최근 이상기후 및 집중호우로 인해 낙동강유역의 많은 지역이 재산 및 인명손실을 크게 입고 있으며 제방축조 재료의 획득 및 운송비등의 증가로 인해 재해방지차원의 제방축조에 여러 가지 어려움을 겪고 있는 실정이다. 본 연구에서는 낙동강 하상의 모래를 이용하여 소량의 시멘트를 혼합한 시멘트혼합토에 대해 삼축압축시험을 통해 시멘트혼합율에 따른 특성을 규명하고자 한다. 이를 위하여 낙동강유역 하상 모래와 시멘트의 혼합율을 변화시키면서 실내시험을 실시하였다. 제체재료의 적합성 검토, 설계 및 해석에 필요한 기초자료를 제공하기위해 다짐시험 및 표준삼축압축시험을 실시하여 시멘트혼합율에 따른 강도, 변형에 따른 응력 및 거동특성 등을 분석하였다.

**핵심용어** : 하천제방, 시멘트혼합토, 낙동강, 다짐시험, 표준삼축압축시험

### 1. 서 론

낙동강 유역의 경우 지구의 온난화에 의한 이상홍수와 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 하천

제방재료의 경우 하상골재의 사용금지과 가용재료의 고갈로 인해 원거리에서 골재를 운반해야 함에 따라 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.

\* 경북대학교 토목공학과, 박사과정 (e-mail: jws2713@hanmail.net)

\*\* 정회원 · 경북대학교 토목공학과 교수

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

Gens and Nova(1993)는 시멘트혼합토의 거동은 지질학적 및 응력-변형이력, 변형속도, 온도 및 주응력의 방향에 영향을 받는다고 발표하였으며 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 결정하는 요소로 고려하고 있다.

본 연구에서는 하천제방의 축조재료로서 하상모래를 시멘트 및 물과 혼합하여 하천설계기준(2002)에서 제시하는 방법에 따라 시료를 성형하였으며, 시멘트혼합토의 제방축조재료로서 적용성을 평가하기 위해 낙동강유역의 세 지역의 모래를 시멘트와 혼합하여 전단거동을 평가하였다.

## 2. 실내시험

### 2.1 시료채취 및 선별

실내시험에 사용할 하상재료의 채취를 위하여 낙동강 유역의 성주대교(SJ), 경남 창녕의 장천제(CN) 및 경남의령의 여의리(ER)를 선정하였다. 낙동강 유역의 하상재료는 육안상으로 대부분 입도가 균등한 모래로 구성되어 있으나 선별되지 않은 하상재료를 모재료로 사용하기 위해 실내시험 및 현장시공시 최소한의 혼합 및 선별을 통한 모재료의 확보가 가능한 지역을 선정하였다. Fig. 1과 같이 대상지역은 낙동강수계의 중하류지역에 속하며 수해발생시 상당한 피해가 예상된다. 시료의 채취를 위하여 대상지역의 표도를 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. 대상지역시료의 경우 입자의 크기가 충분히 작으므로 선별 과정을 거치지 않았다.

### 2.2 기본물성시험

연구대상지역에서 채취한 하상재료의 기본적인 물리특성 및 입도분포 결과는 Fig. 2 및 Table 1과 같

다. 균등계수는 1.20~2.05, 곡률계수는 0.91~1.15로 통일분류법(USCS)상 입도가 균등한 모래 즉, SP에 해당한다. 세 지점의 입도분포의 편차가 크게 나타나지는 않았지만 낙동강유역 중하류지역 하상재료를 대표하므로 세지역의 입도를 기준으로 실내시험을 실시하였다.



Fig. 1. 실내시험을 위한 하상모래의 채취장소

Table. 1. 실내시험재료의 물리적 특성

Classification		SJ	CN	ER
USCS		SP	SP	SP
Specific Gravity ( $G_s$ )	Sand	2.67	2.68	2.67
	Cement		3.15	
Sieve analysis (%)	Passing No.10	98	100	100
	Passing No.40	61	88	97
	Passing No.200	2	3	1
$D_{10}$ (mm)		0.19	0.15	0.15
$D_{30}$ (mm)		0.26	0.19	0.17
$D_{60}$ (mm)		0.39	0.21	0.18
$C_u$		2.05	1.40	1.20
$C_g$		0.91	1.15	1.07

전자주사현미경(SEM)으로 세지역의 모래를 관찰한 결과 Fig. 3과 같이 경북성주(SJ)지역의 낙동강 하상모래는 비교적 모가 난형상을 하고 있지만 경남 창녕(CN)지역 낙동강하상모래의 경우에는 비교적 형상이 둥근 것으로 나타났으며 경남의령(ER)지역의 하상모래는 입자의 크기가 상대적으로 작으므로 나타났다.

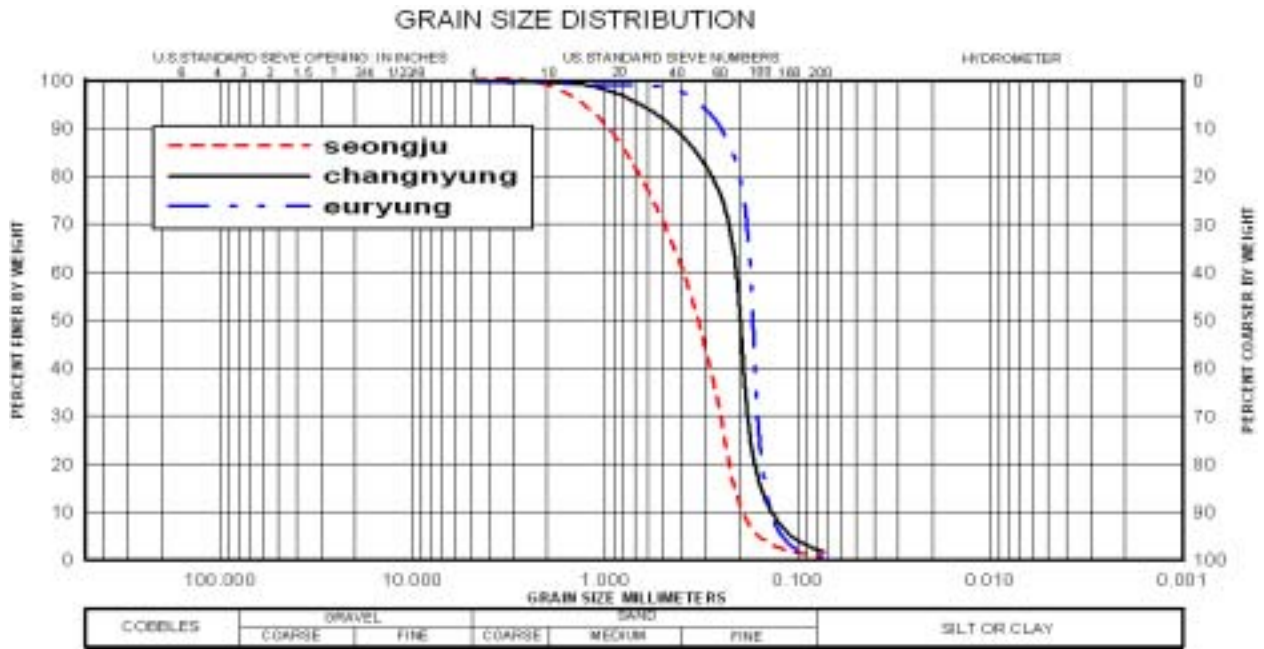


Fig. 2. 시료의 입도분포곡선

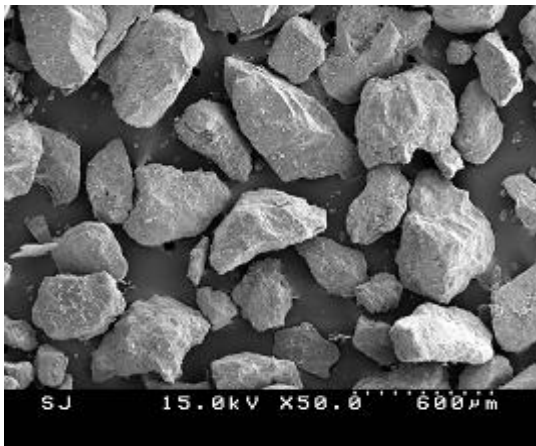


Fig. 3. 경북성주(SJ) 하상모래의 SEM

### 2.3 다짐 및 시료의 성형

강도시험을 위한 재료의 성형을 위해 하상토 및 시멘트혼합물을 2%, 4%, 6% 및 8%로 달리하여 수정 다짐[KSF 2319]에 의한 다짐시험을 실시하고 시멘트혼합물에 따른 최대건조단위중량 및 최적함수비를 도출하였다. Fig. 4은 시멘트혼합물을 변화시켜 실시한 다짐시험결과를 도시한 것으로 시험결과 Table 2와 같이 최적함수비는 13.9~15.1% 정도로 장소에 따라 약간차이는 있으나 시멘트의 혼합율과는 관련성은 낮은 것으로 나타났다.

최대건조단위중량은  $15.1\text{kN/m}^3 \sim 18.1\text{kN/m}^3$ 로 시멘트혼합율의 증가에 따라 다소 증가하였으며 이것은 시멘트혼합율이 증가함에 따라 시멘트 접착효과의 증

대 및 시멘트의 비중이 3.15로서 크기 때문에 혼합토의 단위중량을 다소 증가시킨 것으로 판단된다.

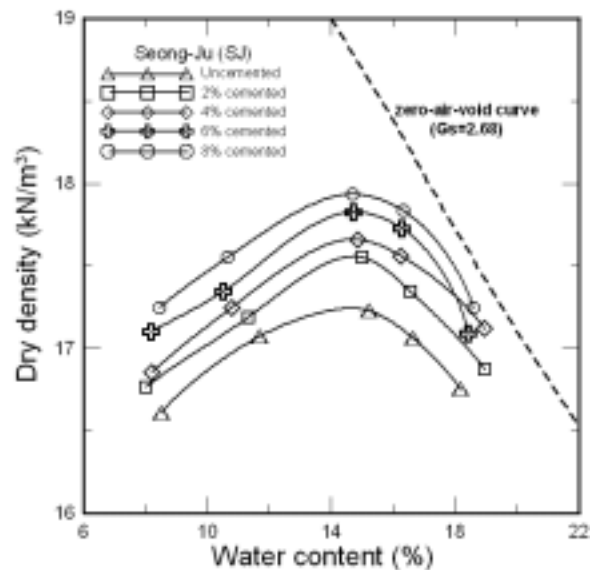


Fig. 4. 다짐시험결과 (D-type)

하천설계기준(2002)에서는 하천제방의 다짐도를 수정다짐[KSF 2312]에서 구한 최대건조단위중량의 90%이상을 요구하고 있다.

기존의 다짐물드를 이용할 경우 시료의 성형 및 추출이 곤란하므로 직경70mm×높이140mm의 시료를 성형하고 설계기준에 적합한 시료를 만들기 위하여 몰드가 양쪽으로 분리되는 Fig. 5와 같은 다짐장비를

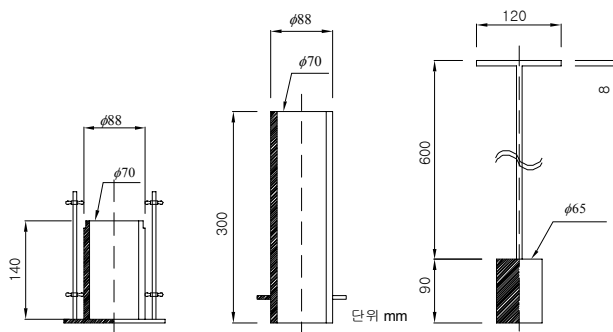
제작하였다.

추의 무게, 낙하고 및 다짐층수를 달리하여 시행착오적으로 설계기준에서 제시하는 건조단위중량을 만족하는 다짐에너지를 구하였다.

동일한 다짐에너지로 성형된시료는 다짐시험에서 구한 최대건조단위중량의 약 92~96%의 범위에 속하였으며 항온항습상태의 양생후 재령별로 삼축압축시험을 실시하였다.

**Table 2. 대상지역시료의 다짐시험 결과**

Site	Cement Content (%)	Optimal Moisture Content (%)	Maximum Dry Density (kN/m <sup>3</sup> )
SJ	Uncemented	14.3	17.2
	2% cemented	14.2	17.5
	4% cemented	14.0	17.6
	6% cemented	15.1	17.7
	8% cemented	13.9	17.9
CN	Uncemented	14.1	17.6
	2% cemented	14.1	17.8
	4% cemented	14.0	18.1
	6% cemented	13.9	18.2
	8% cemented	14.1	18.5
ER	Uncemented	14.7	15.1
	2% cemented	14.9	15.3
	4% cemented	14.5	15.7
	6% cemented	14.4	15.9
	8% cemented	14.8	16.0



**Fig. 5. 시료제작을 위한 다짐장비**

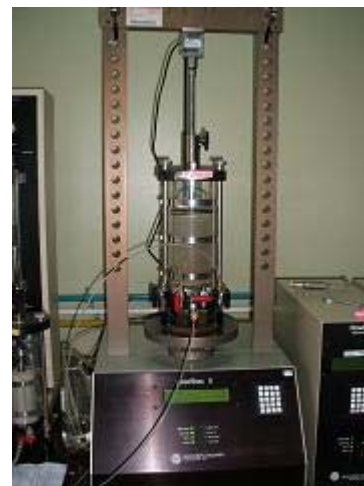
## 2.4 삼축압축시험

삼축압축시험은 하상모래와 시멘트혼합율이 2%, 4%, 6% 및 8%인 시멘트혼합도에 대하여 재령은 7일 강도만을 고려하여 실시하였다. 그리고 포화도의 증가 및 현장조건과 일치시키기 위하여 실험 24시간 전부터 수침하였다.

Table 3은 본 연구에서 수행한 삼축압축시험의 종류를 요약한 것이며 Fig. 6는 본 연구에서 사용한 삼축시험장치(Geocomp Inc.)이다.

**Table 3. 삼축압축시험의 시료 및 조건**

Curing Drainage Sample type	7 days
	Drained
Uncemented	Sites : SeongJu(SJ) ChangNyung(CN) EuRyung(ER)
2 % Cemented	
4 % Cemented	
6 % Cemented	Confining pressure : 50kPa 100kPa
8 % Cemented	200kPa



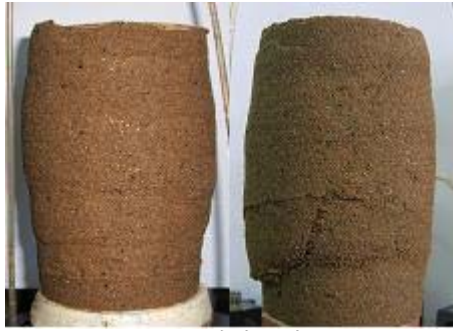
**Fig. 6. 삼축압축시험장치**

## 3. 삼축압축시험의 결과

### 3.1 파괴형태

Fig. 7(a)와 같이 시멘트를 혼합하지 않은 하상모래시료의 경우 전단 및 압축거동시 마치 배럴통모양으로 배가 불룩해지는 형태로 변화하였다. 이러한 시료들은 전단대 및 뚜렷한 최고전단응력이 나타나지 않는다는 특징을 가지고 있다.

그러나 Fig. 7(b)와 같은 시멘트를 혼합한 모래의 경우에는 낮은 구속압에서는 전단대가 분명히 나타나면서 취성파괴거동을 하지만 구속압이 높아짐에 따라 배럴통모양으로 파괴의 형태가 변화하였다. 시멘트혼합율의 증가 및 구속압의 감소함에 따라 분명한 전단대가 발생하며 취성거동을 나타내었다.



(a) 하상모래



(b) 시멘트혼합토

Fig. 7. 시료의 파괴형태

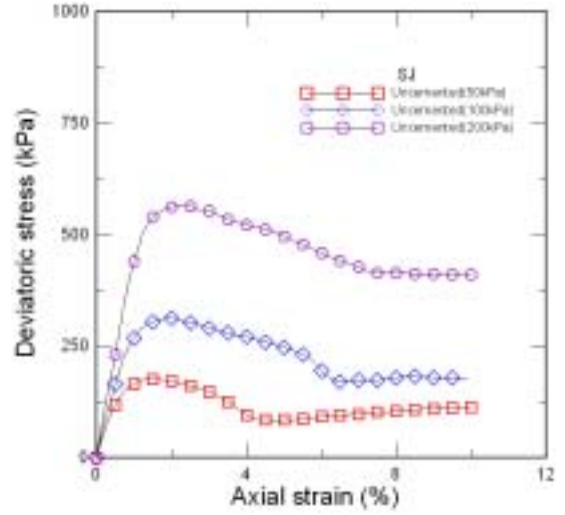
### 3.2 축차응력

Fig. 8은 하상모래 및 시멘트혼합토의 축차응력과 축변형관계를 도시한 것이다. 구속응력의 증가에 따라 축차응력의 증가양상이 뚜렷하며 변형초기에 거의 선형적인 강도의 증가를 보인후 소성상태에 가까운 거동을 나타낸다.

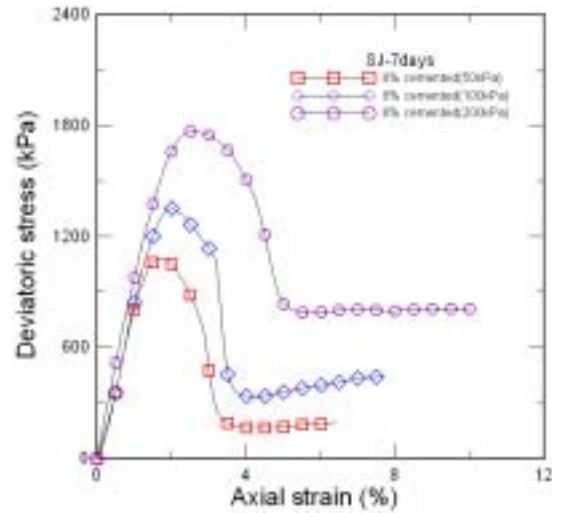
전반적으로 시멘트를 혼합하지 않은 하상모래의 경우 최대강도가 뚜렷하지 않은 소성거동을 보였으나 시멘트혼합토의 경우 Fig. 9와 같이 시멘트혼합율이 증가함에 따라 강도가 증가하며 연화율이 크게 나타났으며 시멘트혼합율에 따라 축변형률이 약 2%에서 최대강도가 발생되고 있음을 알 수 있다.

Coop & Atkinson(1993)은 시멘트가 첨가된 흙의 거동양상을 크게 세 가지로 구분하고 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 발생되고 이후 급격한 파괴가 발생된다고 발표한 바 있어 본 연구결과와 매우 비슷한 경향을 보였다.



(a) 하상모래(SJ)



(b) 8% 시멘트혼합토(SJ)

Fig. 8. 구속압에 따른 축차응력

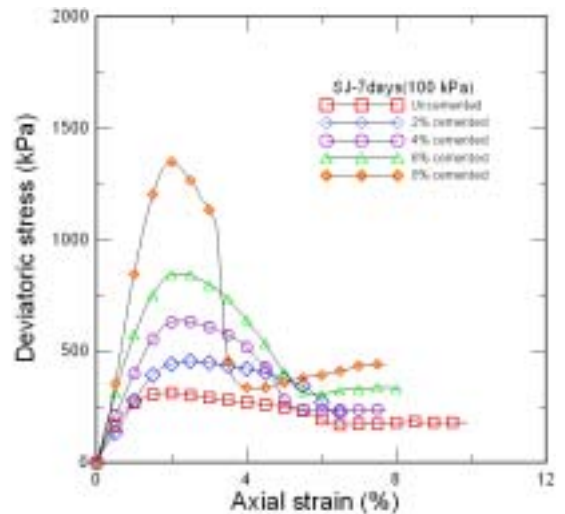


Fig. 9. 시멘트혼합률에 따른 축차응력

### 3.3 체적변형률

Fig. 10은 시멘트를 혼합하지 않은 하상모래와 시멘트를 8%혼합한 시멘트혼합토에 대한 축변형에 대한 체적변형의 관계를 나타내고 있다. 시멘트를 혼합하지 않은 모래의 경우 압밀과정에서 입자간 이동으로 인해 수축이 거의 완료된 상태이므로 초기수축이 거의 발생하지 않았다. 그리고 팽창량이 구속압에 관계없이 대략 일정한 값으로 수렴하였다. 시멘트를 혼합한 경우에는 구속압의 증가에 따라 수축량이 증가하며 수축에서 팽창으로 변화하는 축방향 변형율이 접촉효과로 인해 시멘트를 혼합하지 않은 모래에 비해 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 11은 동일구속압에서의 시멘트혼합율의 변화에 따른 체적변화를 나타내며 시멘트혼합율이 증가할수록 수축량은 감소하며 팽창량은 증가하는 것으로 나타났다.

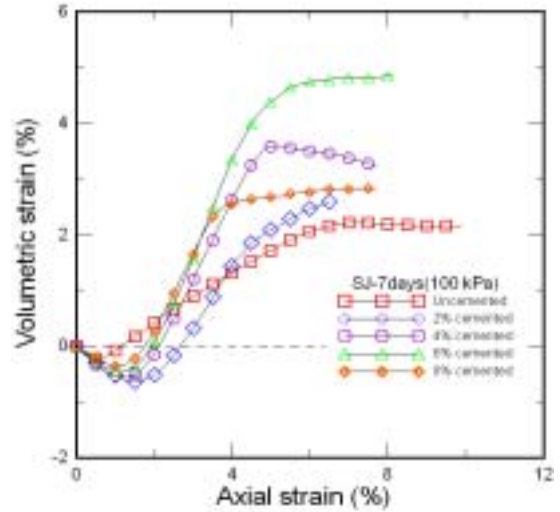


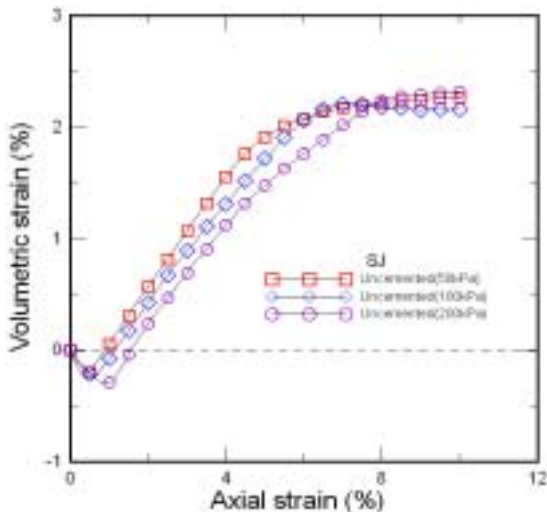
Fig. 11. 시멘트혼합률에 따른 체적변형

### 3.4 강도정수

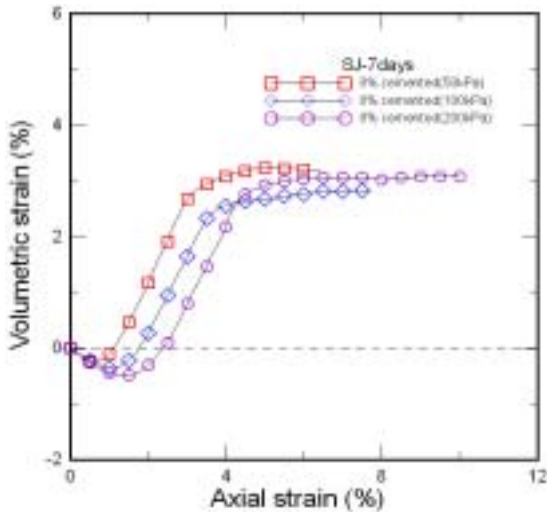
Table 4는 각 시멘트혼합율에 따른 강도정수를 요약한 것으로 시멘트를 혼합하지 않은 하상모래의 경우보다 시멘트를 혼합한 경우 유효내부마찰각은 약 3~5° 정도 증가하였으나 시멘트혼합율과의 상관성은 명확하지 않았으며 점착력의 증가는 시멘트혼합율에 따라 크게 증가하는 것으로 나타났다.

Table 4. 대상지역의 강도정수

Site	cement content (%)	cohesion intercept (kPa)	friction angle (degrees)
SJ	Uncemented	12	34.4
	2	20.5	39
	4	71	39.5
	6	100.5	40.4
	8	158.2	40.6
CN	Uncemented	13	35.8
	2	20.8	41.6
	4	69	40.3
	6	115	41.1
	8	170	41.7
ER	Uncemented	7.3	29.7
	2	45	32.9
	4	91.3	30.2
	6	112.7	33.4
	8	190	35.9



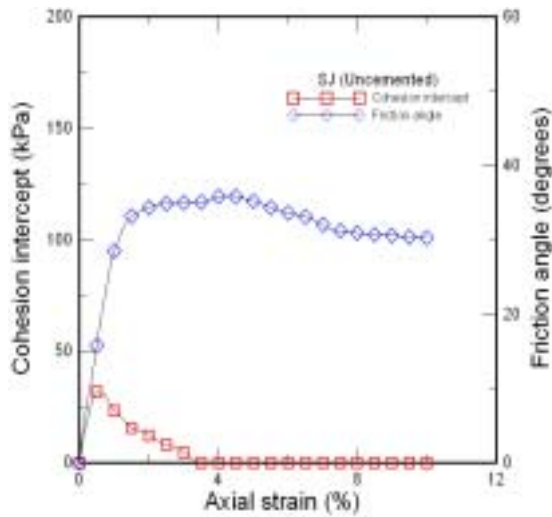
(a) 하상모래(SJ)



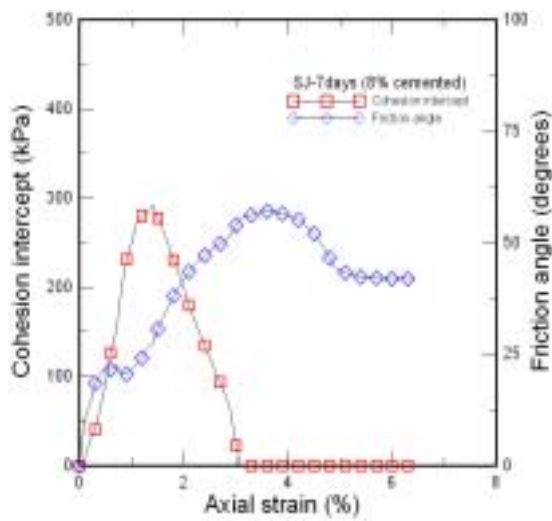
(b) 8% 시멘트혼합토(SJ)

Fig. 10. 구속응력에 따른 체적변형

Fig. 12는 하상모래 및 시멘트혼합토의 전단변형에 따른 점착력과 내부마찰각의 변화를 나타내기 위하여 전단시 동일한 변형률에서 각 구속압의 응력경로를 이용한 포락선을 정의하고 각각의 포락선의 기울기와 절편을 이용하여 점착력과 내부마찰각을 구하였다.



(a) 하상모래



(b) 8% 시멘트혼합토(SJ)

Fig. 12. 변형에 따른 강도의 변화

하상모래의 경우 매우 낮은 변형률에서 점착력은 거의 소멸되지만 시멘트혼합토의 경우 약 2% 정도의 변형률에서 최대값을 나타낸후 시멘트의 고결작용의 붕괴로 인해 소멸되는 것으로 판단된다. 마찰각의 경우 고결작용의 붕괴이후 최대치를 나타내며 큰 변형률에서 잔류마찰각으로 수렴되는 것으로 나타났다.

강도정수의 평가에서 창녕지점이 성주 및 의령지점에 비해 점착력 및 유효마찰각이 크게 나타났으며 창녕지점의 시료가 다른지점의 시료보다 상대적으로 입자의 크기가 크며 입도분포가 양호한 결과 때문으로 판단된다. Omae et al.(2003)은 시멘트를 혼합한 흙재료의 대형 삼축압축시험에서 단위 시멘트량 0.6 kN/m<sup>3</sup>인 경우 재령 7일에서의 유효 마찰각이 대략 52.7°, 점착력은 560kPa 정도의 값을 가진다고 발표함으로써 본 연구 결과보다 상대적으로 작은 시멘트

량에서 유효마찰각은 크게 나타났으나 점착력은 시멘트혼합율 4%일때만 거의 유사하며 시멘트혼합율이 증가함으로써 점착력은 더 큰 값을 나타내었다. 이러한 차이는 재료별 입도분포의 차이로 분석할 수 있는데 위 실험의 경우 4.76mm이하의 모래입자가 약 25% 이하인 반면 본 연구에 사용된 하상재료의 전반적인 입도분포는 대부분이 모래입자로 구성된 것으로 나타나 모래를 포함한 세립분이 강도특성에 영향을 미치는 주요 인자임을 알 수 있었다.

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 발표.한 바 있으며, 이러한 경향은 Fig. 13에 나타난 본 연구결과와 유사하며 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.

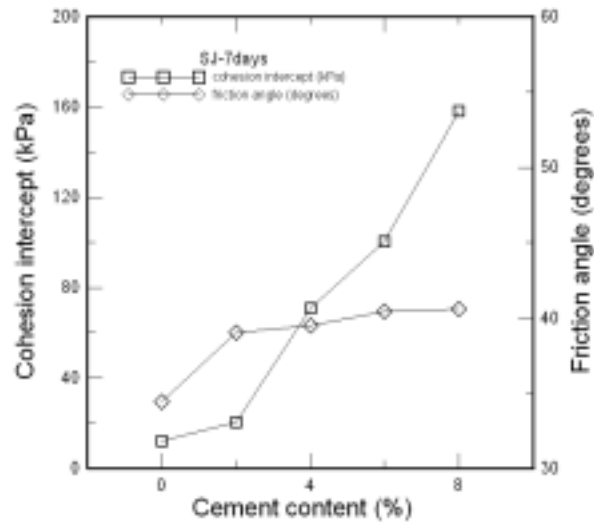


Fig. 13. 시멘트혼합율에 따른 강도정수

#### 4. 결 론

1. 시멘트를 혼합한 입도가 균등한 하상모래의 경우 다짐시 시멘트의 점착효과 및 시멘트비중의 영향으로 인해 최대건조단위중량이 증가하였으나 시멘트혼합율과 최적함수비는 상관성이 낮은 것으로 나타났다.
2. 시멘트를 혼합하지 않은 하상모래의 경우 전단에 따른 파괴형상이 타원형으로 발생하는 배열

- 링이 발생하였지만 시멘트혼합토의 경우 전단대가 뚜렷하게 나타나는 취성파괴거동을 하였다.
3. 표준삼축시험 결과 변형초기 선형적인 축차응력의 증가와 함께 약 1~2%에서 항복 및 최대강도에 도달한후 연화거동을 보였으며 시멘트혼합율의 증가에 따라 항복 변형률이 감소하였다.
  4. 시멘트혼합율의 증가에 따라 압축강도는 크게 증가하였으나 파괴시 축변형률이 콘크리트와 같은 고결체에 비해 매우 크게 나타났다.
  5. 축변형에 따른 체적변형의 형태는 하상모래의 경우 팽창거동을 나타내었으며 시멘트혼합토는 시멘트의 혼합율이 증가할수록 시멘트의 접촉작용에 의해 압축량이 감소하였으나 팽창량은 증가하였다.
  6. 시멘트혼합율의 증가에 따라 점착력은 시멘트의 접촉효과로 인하여 비례하여 증가하였으나 유효마찰각은 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다.

## 참 고 문 헌

- Acar, Y.B., and El-Tahir, A.E. (1986). "Low strain dynamic properties of artificially cemented sand." J. Geotech,Engrg., ASCE, 112(11) ,1001~1015.
- Bressani, L. A., and Vaughan, P.R (1989). "Damage to soil during triaxial testing," Pro.,12th Int. Conf. on soil Mech. and found, Engrg.,Vol. 1, Rotterdam,The Netherlands, 17~20
- Bressani, L. A., Martins, F.B., and Vica.A.V. D. (1994). "Mechanical behavior a residual soil from Botucatu sandstone." Proc., Int. Congr. of Int. Assn. of Engrg., Geol., Vol. 1, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 315~322.
- Chand, T., and Woods, R.D. (1992). "Effect of particle contact bond on shear modulus." J. Geotech, Engrg., ASCE. 188(8), 1216~1233.
- Clough, G. W., Iwabuchi, J., Rad, N.S., and Kippusamy, T. (1989). "Influence of cementation on liquefaction of sands." J. Geotech. Engrg., ASCE 115(8), 1102~1117.
- Clough, G. W., Sitar, N., Bachus, R.C., and Rad, N. S. (1981). "Cemented sands under static loading." J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 107 (6), 799~817.
- Clough, W. G., Kuck, W. M., and Kasali G. (1979). "silicate~stabilized sands." J. Geotech. Engtg. Div., ASCE, 105(1), 65~82
- Coop, M, R., and Atkinson, J. H (1993). "The mechanics of cemented carbonate sands." Geo- technique, London, 43(1), 53~67.
- Dupas, J., and Pecker, A. (1979). "Static and dynamic properties of sand-cement." J. Geotech, Engrg. Div., ASCE, 105(3), 419~436.
- Fenando S., Pedro D. M., Prietto., and Nilo C. C. (2001). "Characterization of cemented sand in triaxial compression", ASCE, Vol.127, No.10, pp. 857~868.
- Gens, A. and nova, R. (1993). Conceptual bases for a constitutive model for bonded soils and weak rocks, Proc., Int. Symp. on Geotech. Engerg. of Hard Soils- Soft Rocks, Vol. 1, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 485~494.
- Ingles, O. G., and Metcalf, J. B. (1972). Soil stabilization principles and practice, Butterworth, Sydney, Australia.
- 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
- Rad, K. R., and Saxena, S. K. (1992). "Constitutive modelling of cemented sand." J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 104(12), 1449~1465.
- Rad, N. S., and Tumay, M. T. (1986). "Effect of cementation on the cone penetration resistance of sand: A model study." Geotech. Testing J.,9(3), 117~125.

© 논문접수일 : 2006년 09월 15일

© 심사의뢰일 : 2006년 09월 20일

© 심사완료일 : 2006년 11월 03일