

고결된 하상모래의 전단거동

Shear Behaviour of Cemented River Sand

정 우 섭¹ Jeong, Woo-Seob
김 영 수² Kim, Yung-Su

Abstract

In this research, artificially cemented sand which is made of a few portland cement and Nak-Dong river sand was researched closely. For providing the fundamental data which is needed in design and analysis of levee material, the shear behavior of cemented sands was investigated by drained triaxial test, and analyzed in accordance with the increase of cement content. The peak strength and elastic modulus increased and dilation of cemented sand was restricted by the cementation, but after breakage of the cementation, dilation increased, cohesion intercept and friction angle increased with the increase of cement content and strain softening behavior appeared in stress-strain curve.

요 지

본 연구에서는 낙동강하상모래에 소량의 포틀랜드시멘트를 고결작용제로 사용한 시멘트혼합토의 제체재료의 적합성검토, 설계 및 해석에 필요한 기초자료를 제공하고자 배수조건인 삼축압축시험을 수행하여 시멘트혼합율의 증가에 따른 전단거동을 분석하였다. 시멘트혼합율의 증가에 따라 침투강도 및 탄성계수는 증가하였고 시멘트의 결합력에 의하여 다일레이션이 억제되었으나 시멘트 결합력의 파괴후 다일레이션은 증가하였다. 그리고 응력-변형을 곡선에서 연화거동이 나타났으며 시멘트혼합율의 증가에 따라 점착력 및 내부마찰각이 증가하였다.

Keywords : Cementation, Levee, Cemented sand, Dilation, Nak-Dong river, Strain-softening

1. 서 론

낙동강 유역은 지구의 온난화에 의한 이상홍수와 제방의 노후화에 따른 홍수시 제방의 붕괴로 해마다 인명 및 재산의 피해가 급증하고 있는 실정이다. 이로 인하여 하천제방의 축조 및 보수보강공법의 개발이 절실히 요구되고 있으나 제방축조재료의 경우 하상골재의 사용제한 및 가용재료의 고갈로 인하여 많은 제약이 따르고 있는 실정이다.

따라서 대부분 입도가 균등한 하상모래에 공학적성질의 개선을 위한 고결작용제로 시멘트를 사용한 시멘트

트혼합토의 거동을 정량화하여 제체로 활용할 경우 제방의 안정성증가, 공사비용의 감소 및 토취장 개발을 최소화 할 수 있을 것이다.

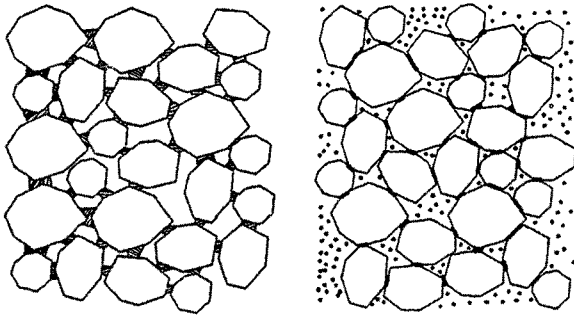
고결(cementation)은 탄산칼슘(CaCO_3), 수산화칼슘(Ca(OH)_2)등이 입자사이나 입자의 표면에 침전하여 입자간의 결합력을 증진시키는 현상을 말하며 인위적으로 고결된 모래의 공학적 거동은 고결작용제의 혼합율, 상대밀도 및 구속압에 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있다(Clough 1989, Huang and Airey 1998, Ismail 2002b).

Sowers(1979)는 시멘트와 모래의 결합구조에 따른 거동을 설명하기 위하여 그림 1처럼 접촉점결합구조

1 정희원, 한국해양연구원, 연수연구원 (Member, Post-Doctoral Researcher, Korea Ocean Research & Development Institute, jws2713@kordi.re.kr, 교신저자)

2 정희원, 경북대학교 토목공학과, 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engg., Kyungpook National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.



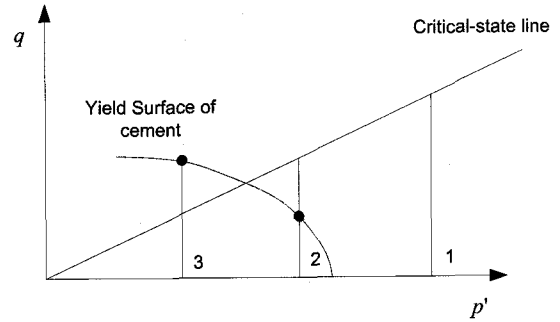
(a) 접촉점결합구조 (b) 간극결합구조
그림 1. 시멘트혼합토의 구조

(contact bound structure)와 간극을 포함한 결합구조(void bound structure)로 나누었다.

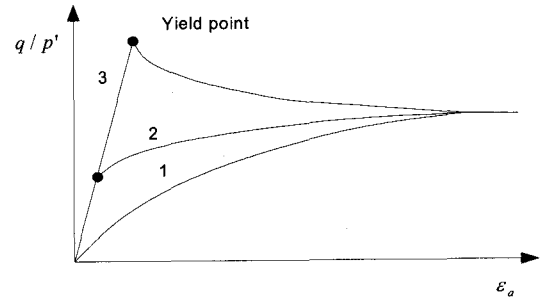
간극결합구조의 경우 접촉점결합구조에 비하여 시멘트량이 많고 모래의 입도분포가 양호하여 시멘트의 결합력에 의하여 큰 강도를 나타낸다. 접촉점결합구조의 경우 균등한 입도의 모래 등에서 나타나며 낮은 결합력에 의하여 비교적 큰 변형률에서 낮은 강도를 나타내며 파괴된다.

Coop and Atkinson(1993)은 그림 2와 같이 항복궤적에 대한 흙 상태의 초기위치에 따라서 시멘트혼합토의 거동을 제안하였다. 첫 번째 경우(그림 2(a)(b)의 1)에는 등방압밀시 평균유효응력에 의하여 시멘트의 항복궤적을 벗어난 경우로 전단시 항복점이 불명확하며 시멘트를 혼합하지 않은 시료와 비슷하게 거동한다. 두 번째의 경우(그림 2(a)(b)의 2)는 한계상태선이 시멘트의 항복궤적 외측에 존재하여 초기상태에는 시멘트의 결합력이 작용하지만 전단시 항복하는 중간적 크기의 구속압 상태에서 발생한다. 이 경우 잔류상태는 시멘트를 혼합하지 않은 모래의 마찰거동에 의존하며 실험에서 이러한 응력-변형률거동은 초기탄성범위를 지난 후 항복점을 나타낸다. 세 번째의 경우(그림 2(a)(b)의 3)는 시멘트의 항복궤적이 한계상태선 외부에 위치하여 시멘트의 강도보다 상대적으로 낮은 구속압조건에서 전단될 경우이다.

본 연구에서는 낙동강유역 성주대교부근의 하상모래의 시멘트를 이용한 인위적 고결을 위하여 하천설계기준(2002)에서 제시하는 방법에 따라 시료를 성형하였고 제방축조재료로서 적용성을 평가하기 위한 배수삼축압축시험(CID)를 실시하여 시멘트혼합율에 따른 강도 및 거동양상을 분석하였다.



(a) 응력경로



(b) 응력비-변형률

그림 2. 시멘트혼합토의 거동

2. 시험방법

2.1 하상모래의 특성

본 연구에서는 낙동강 유역의 성주대교일대의 하상모래를 표토에서 약 1m정도 채취하였으며 노건조후 대부분 육안상 균질한 모래로 #4체를 이용하여 최소한의 선별과정만을 거쳤다. 시료의 물리적특성 및 입도분포 곡선은 표 1 및 그림 3과 같으며 통일분류법상 입도가

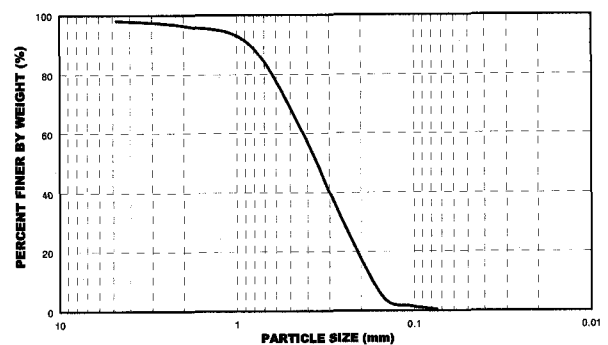


그림 3. 하상모래의 입도분포

표 1. 하상모래의 물리적 특성

G_s	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_g	USCS
2.68	0.17	0.25	0.43	2.53	0.85	SP

유사하였으나 최대건조밀도는 시멘트혼합율의 증가에 따라 17.2~17.9kN/m³로 증가함으로써 물과 결합한 시멘트가 모래입자의 이동을 방지하고 시멘트 비중의 영향으로 증가하였다.

시멘트혼합율의 증가와 다짐으로 인하여 포화도가 72.5~83.4%로 증가하였으나 모래입자사이 간극을 완전히 충전하지는 못하는 것으로 나타나 강도가 비교적 적으며 상대적으로 큰 변형률에서 파괴가 발생하는 접촉점결구조(Sowers 1979)로 나타났다.

하천설계기준(2002)에서 하천제방의 다짐도를 수정 다짐[KSF 2312]에서 구한 최대건조밀도의 90%이상을 요구하고 있으며 본 연구에서는 설계기준에 적합한 삼축압축시험용 시료를 제작하기 위하여 직경70mm×높이140mm의 양쪽으로 분리되는 그림 7과 같은 다짐장비를 제작하였다.

균질한 시료의 제작을 위하여 Ladd(1978)의 Under compaction method를 이용하여 충다짐을 실시하였으며 실내다짐(D-type)의 약 85%인 21.33kg·cm/cm³의 에너지를 이용하여 설계기준에 적합한 균질한 시료를 제작하였다.

동일한 다짐에너지로 제작된 시료는 다짐시험(D-type)

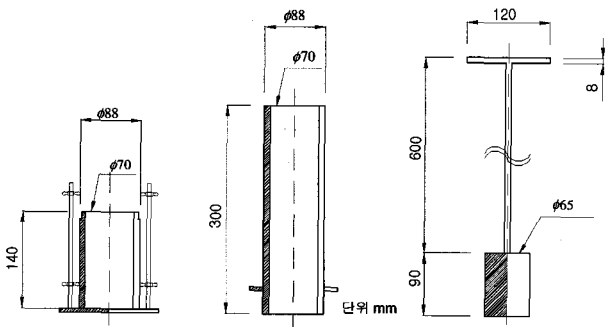


그림 7. 시료제작을 위한 다짐장비

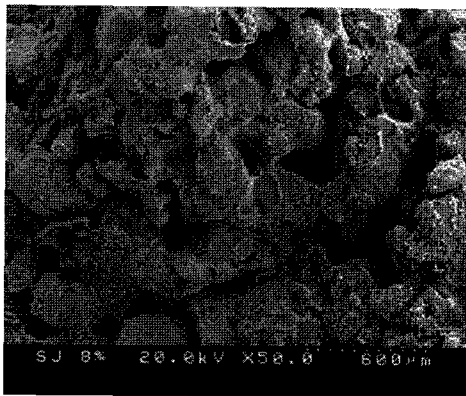


그림 8. 8%시멘트혼합토의 SEM

에서 구한 최대건조밀도의 약 92~96%로 양생시 항온 항습상태를 유지하였다.

조성된 시료는 6일간 양생 후 포화도의 증가 및 현장조건과 일치시키기 위하여 실험 24시간 전부터 수침하였으며 10kPa의 구속압에서 증류수를 7kPa의 압력으로 통과시킨 후 배압을 약 650kPa까지 증가시켜 B-value(Skempton, 1954)가 하상모래 0.95, 시멘트혼합토 0.9이상 되도록 하였다. 이 값은 시멘트와 같은 고결제에 의하여 고결작용을 받은 시료에서 완전히 포화된 것을 의미한다(Black and Lee, 1973).

그림 8은 8%시멘트혼합토의 SEM를 나타내고 있으며 모래입자의 표면과 접촉점에 시멘트가 수화되어 고결이 유발되었고 시멘트혼합율의 증가에 따라 간극의 충전효과가 증가되는 것으로 나타났다.

2.4 시험종류 및 종류

삼축압축시험은 하상모래와 시멘트혼합율이 2%, 4%, 6% 및 8%인 시멘트혼합토에 대하여 재령은 7일 강도만을 고려하여 실시하였다.

표 4는 본 연구에서 수행한 삼축압축시험의 방법을 요약한 것이며 그림 9는 본 연구에서 사용한 다기능 삼

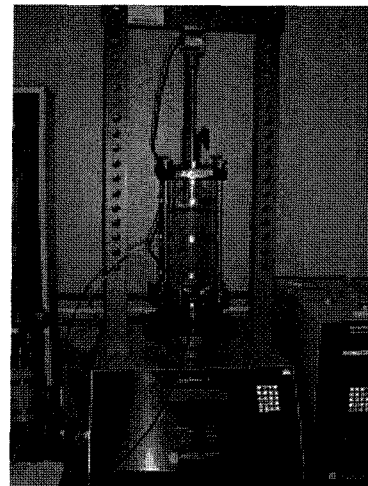


그림 9. 삼축압축시험장치

표 4. 삼축압축시험의 요약

Variable	Triaxial test
Confining pressure	50, 100, and 200kPa
Cement content	0, 2, 4, 6, and 8%
Curing period	7 days
Drainage condition	Drained
Rate of strain	0.1%/min

측시험장치(Geocomp Inc.)로서 재하장치와 압력조절장치로 구성되어 있어 구속압 및 축차응력을 자동제어할 수 있다.

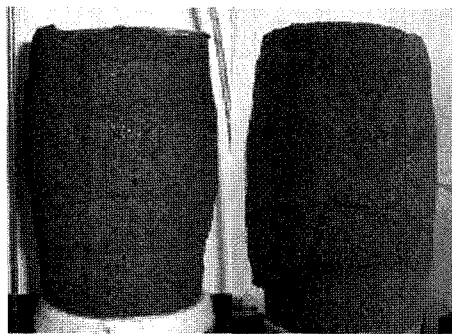
시료포화 후 하상모래 및 시멘트혼합토는 각 구속압에서 등방압밀후 0.1%/min의 변형속도로 배수조건에서 전단시험을 실시하였다.

3. 삼축압축시험

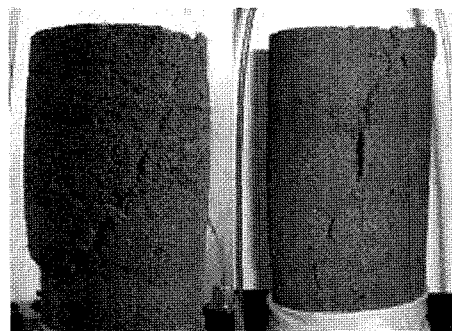
3.1 파괴형태

그림 10(a)와 같이 하상모래시료의 경우 대부분 전단시 압축거동을 의미하는 배럴링(barreling)이 발생하여 연성파괴가 나타났으나 일부 시료의 경우 밀도의 영향으로 50kPa의 구속압에서 배럴링과 함께 약한 전단대가 형성되었다.

그림 10(b)와 같은 시멘트혼합토의 경우 낮은 구속압에서는 전단대가 분명히 나타나면서 취성파괴거동을 하지만 일부 2% 시멘트혼합토시료의 경우 낮은 입자간 결합력으로 인하여 200kPa의 구속압에서 배럴링모양으로 파괴 형태가 변하였다. 즉, 시멘트혼합율의 증가 및 구속압의 감소함에 따라 분명한 전단대가 발생하며



(a) 하상모래



(b) 시멘트혼합토

그림 10. 시료의 파괴형태

취성거동을 나타내었다.

전단대의 두께는 시멘트혼합율에 따라 약 7~10mm로 나타났으며 E.Asghari et al.(2003)이 테헤란 근교의 45%자갈, 49%모래 및 6%의 세립질로 구성된 자갈질 모래의 전단대 두께 약 2~5cm보다 작은 것으로 나타났다. 전단대는 시멘트혼합율이 낮을 경우 입자간 결합력이 낮아 변형의 증가에 따라 전단대의 폭은 더 크게 증가하는 것으로 나타났다.

하상모래 및 시멘트혼합토에 대한 파괴형태의 관찰로부터 입도분포, 밀도, 시멘트혼합율 및 구속압이 파괴형태에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3.2 응력-변형률 관계

그림 11은 하상모래 및 시멘트혼합토의 배수조건에서의 응력-변형률 관계를 나타내고 있으며 초기 선형구간, 첨두강도이후 연화구간 및 취성파괴거동이 뚜렷하게 나타나 Avramidis and Saxena(1985)가 제안한 강하게 결합된 시멘트혼합토의 거동과 유사하였다.

표 5는 시멘트혼합율에 따른 강도특성을 나타내고 있으며 항복점은 초기선형의 기울기가 감소하는 점, 탄성계수는 0.1%의 변형률에서의 직선의 기울기로 정의하였다.

시멘트혼합율의 증가에 따라 탄성계수, 항복시축차응력 및 첨두강도의 증가양상이 뚜렷하게 나타났다. 그리고 첨두강도 이후 입자의 이동에 의한 연화현상 발생구간은 감소하였으나 변형에 따라 연화현상의 크기를 나타내는 연화율은 증가하는 것으로 나타났다.

하상모래의 경우 등방압밀에 의한 체적변화로 2%시멘트혼합토에 비하여 초기선형구간의 기울기는 크게 나타났다. 그러나 시멘트의 결합작용에 의하여 첨두응력 및 첨두시변형률은 2%시멘트혼합토가 큰 것으로 나타났다.

구속압의 증가에 따라 탄성계수는 거의 유사하였으

표 5. 시멘트혼합토의 강도특성($\sigma_3' = 100kPa$)

Cement content (%)	Deviatoric stress in yielding (kPa)	Axial strain in yielding (%)	Secant elastic modulus (MPa)
0	194.58	0.61	31.90
2	391.72	1.48	26.47
4	505.41	1.32	38.29
6	661.73	1.23	53.80
8	979.24	1.17	83.70

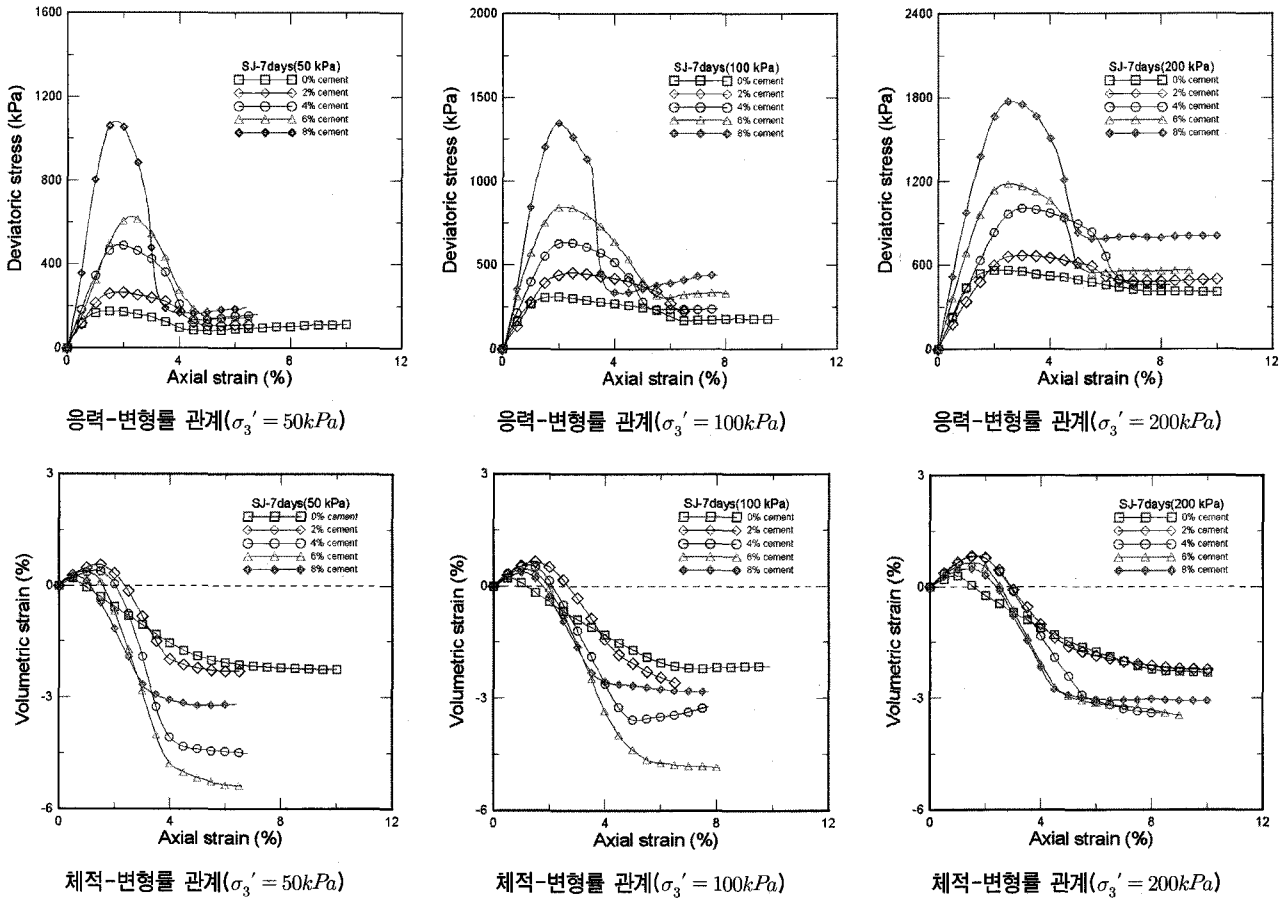


그림 11. 시멘트혼합물에 따른 고결된 모래의 거동

나 침두강도는 증가하였다. 그리고 구속압에 의한 입자 이동의 억제로 연화현상 발생구간의 길이는 증가하였으나 연화율은 감소하였다.

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 12는 100kPa의 구속압에서 하상모래와 시멘트 혼합토의 축방향 변형률에 대한 유효응력비(q/p')를 나타낸 것으로서 배수로 인한 체적변화와 시멘트에 의한 고결에 의하여 시멘트혼합물의 증가에 따라 침두응력비(q/p')_{max}는 증가하였다. 그리고 시멘트의 고결효과가 완전히 파괴된 이후에 나타나는 잔류상태의 응력비는 시멘트혼합물의 증가에 따라 모래입자에 시멘트가 강하게 결합하여 발생한 입도의 변화로 인하여 증가하였다.

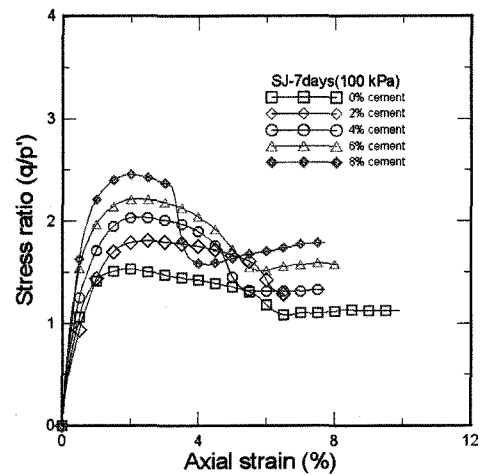


그림 12. 응력비-변형률 관계

그림 13은 시멘트혼합토의 침두강도를 하상모래의 침두강도로 정규화시킨 강도비를 나타내고 있으며 시멘트혼합물의 증가에 따라 강도비는 증가하였으며 특히 8%의 시멘트혼합토의 경우 증가의 폭이 큰 것으로 나타났다. 그리고 구속압의 증가에 따라 시멘트혼합토의 입자간에 작용하고 있는 시멘트의 결합작용이 항복

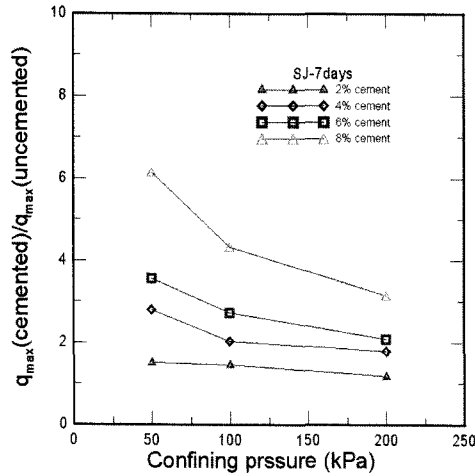


그림 13. 구속압에 따른 강도비

점으로 근접하여 강도비는 감소하였다.

시멘트혼합토는 입자 사이에 작용하고 있는 시멘트의 결합작용으로 낮은 구속압에서 시멘트의 고결효과는 크지만 구속압이 증가함에 따라 시멘트에 의한 고결의 영향은 감소한다(Malandraki and Toll 2000).

시험 결과로부터 시멘트혼합율이 2%인 시멘트혼합토의 경우 구속압이 약 300~350kPa, 8% 시멘트혼합토의 경우 약 1000~1200kPa에서 강도비가 1에 도달하여 하상모래의 강도와 시멘트혼합토의 강도가 동일하여 시멘트의 고결효과는 사라질 것으로 판단된다.

Coop and Atkinson(1993)이 제안한 등방압밀후 초기 상태에 따른 시멘트혼합토의 거동에서 초기평균유효응력에 의하여 시멘트의 결합작용이 항복하지 않은 2번 클래스 혹은 3번의 클래스의 상태에서 초기평균유효응력에 의하여 시멘트의 결합작용이 항복된 1번 클래스의 상태로 이동한다는 것을 나타낸다.

Consoli et al(1998)는 시멘트혼합토의 취성의 정도를 나타내는 지표로서 침투강도와 잔류강도의 비로 정의할 수 있는 아래의 식 (1)과 같은 취성지수 값을 사용하였으며 취성지수가 클 경우 강성이 큰 재료로 판단할 수 있다.

$$I_B = \frac{q_f}{q_r} - 1 \quad (1)$$

여기서, q_f : 침투강도

q_r : 잔류강도

침투강도는 시멘트혼합율 및 구속압에 따라 증가하지만 잔류강도는 시멘트의 결합작용이 붕괴 후 구속압

표 6. 시멘트혼합토의 취성지수(I_B)

Confining pressure (kPa)	Cement content(%)			
	2	4	6	8
50	1.37	2.16	3.23	4.79
100	0.79	1.11	1.56	2.05
200	0.34	0.82	1.09	1.19

을 및 파괴면의 상태에 따라 달라질 수 있다.

Malandraki and Toll(2001)은 취성의 정도는 배수조건에 따른 응력경로, 흙의 종류, 고결작용제의 종류 및 혼합율에 따라 달라질 수 있다고 발표하였다.

표 6은 구속압 및 시멘트혼합율에 따른 취성지수를 나타내고 있으며 시멘트혼합율의 증가에 따라 증가하였으나 구속압의 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

3.3 체적변형률

그림 11(d), (e), (f)는 동일구속압에서의 시멘트혼합율의 변화에 따른 체적변화를 나타내며 시멘트혼합율이 증가할수록 수축량은 감소하며 팽창량은 증가하는 것으로 나타났다.

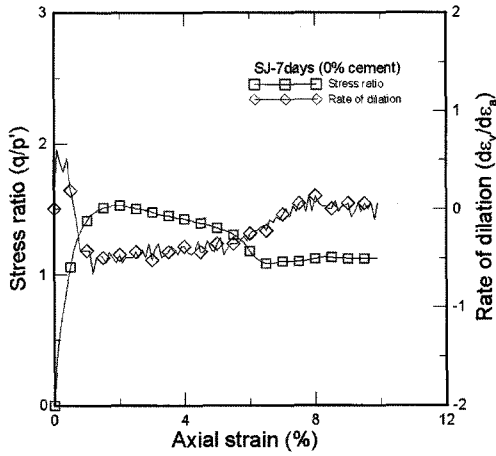
테헤란근교 충적층 시료에 대하여 실험한 S. M.Hacri (2002)는 낮은 구속압에서는 팽창거동이 나타나지만 1000kPa이상의 구속압에서는 전단시 수축거동을 나타내는 것으로 발표하였다.

하상모래의 경우 압밀과정에서 체적변형으로 인하여 초기수축이 매우 작은 것으로 나타났으나 팽창량의 경우 입도의 영향으로 인하여 대략 일정한 값으로 수렴하였다.

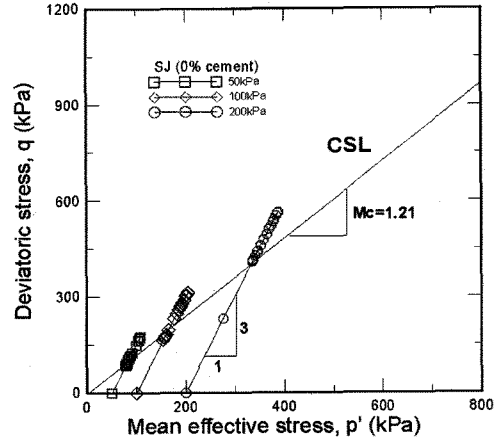
시멘트혼합토의 경우 시멘트의 결합작용으로 전단초기 하중에 저항하여 수축량은 감소하였으나 파괴후 모래입자에 시멘트가 결합되어 발생한 입자크기의 변화로 인하여 팽창량은 증가하는 것으로 판단된다.

그림 14는 하상모래 및 시멘트혼합토의 유효응력비와 팽창율의 관계를 나타내며 시멘트혼합토에서 최대 팽창율(de_v/de_a)_{max}은 최대유효응력비 (q/p')_{max}가 나타나는 변형률 이후에 발생하지만 시멘트를 혼합하지 않은 하상모래에서는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

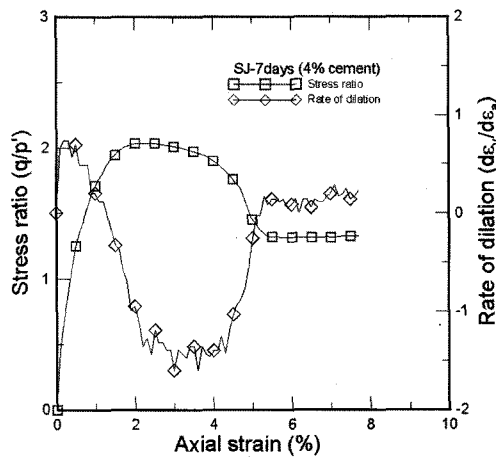
Leroueil and Vaughan(1990)은 밀도에 영향을 받을 때 두 점들은 일치하지만 침투강도가 밀도보다 시멘트의 고결작용에 더 큰 영향을 받게 될 때 최대팽창율은 고결효과의 붕괴 후에 발생한다고 하였다.



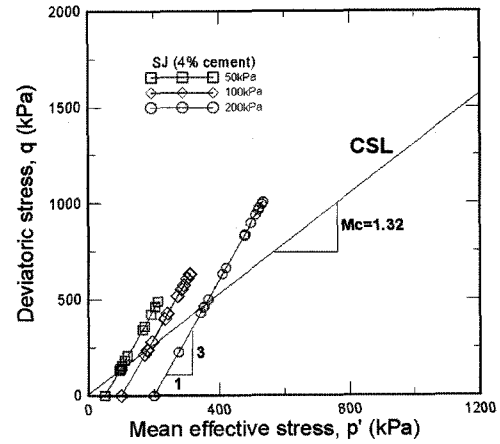
(a) 하상모래



(a) 하상모래



(b) 4% 시멘트혼합토



(b) 4% 시멘트혼합토

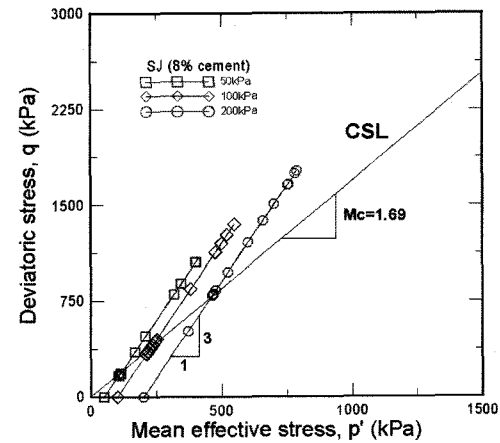
그림 14. 유효응력비와 팽창률의 관계

시멘트혼합토의 경우 시멘트의 결합력이 완전히 붕괴될 때 급격한 팽창의 증가로 인하여 최대팽창율을 나타내며 하상모래의 경우 결합력이 존재하지 않으므로 최대유효응력비가 나타나는 변형률과 최대팽창률이 나타나는 변형률이 잘 일치하는 것으로 판단된다.

3.4 응력경로

배수시험에서 응력경로는 배수로 인하여 과잉간극수압이 발생하지 않으므로 전응력경로와 유효응력경로가 일치하고 $q-p'$ 평면상의 1:3의 일정한 기울기를 갖는 직선으로 각각의 조건에 대한 실험결과에서 응력경로상의 최고점은 첨두강도를 나타낸다. 그리고 잔류강도에 도달할 때 까지 변형연화가 발생하여 동일한 응력경로상에서 축차응력 및 평균유효응력이 감소한다.

한계상태선은 구속압, 과압밀비, 및 배수상태등의 외적요인에 관계없이 존재하는 흙의 고유특성으로 변형



(c) 8% 시멘트혼합토

그림 15. 유효응력경로

률이 크게 증가하였을 경우 축차응력 및 체적변형율이 일정한상태를 나타내는 선으로 잔류상태의 응력경로를 이용하여 정의 하였다.

그림 15에서 하상모래 1.21, 4%시멘트혼합토 1.32, 8% 시멘트혼합토 1.69로 시멘트혼합토의 증가에 따라 한계상태선의 기울기는 증가하였으며 이는 시멘트혼합

을에 따라 하상모래의 고유특성이 변한다는 것을 나타낸다.

시멘트는 칼슘이온을 소듐이나 하이드로겐이온으로 치환후 조립질이며 부스러지기쉬운 실트나 모래속으로 침투하여 덩어리형태로 입자크기를 증가시킨 후 흡수의 실리카와 알루미나성분들과 화학적으로 반응하여 고결되는 것이다. 시멘트혼합토가 파쇄되었을 때는 증가된 입자크기의 효과는 남아 있지만 고결의 효과는 사라지게 된다(Boynton 1996).

3.5 강도정수

시멘트혼합토의 강도정수에 대한 연구에서 Wissa and Ladd(1965), Dupas and Pecker(1979)는 흙의 전단강도를 점착력과 내부마찰각으로 표현하는 Mohr-Coulomb의 강도기준을 적용하였으며 Avramidis and Saxena(1985)는 시멘트혼합토의 전단강도는 시멘트의 입자간 결합 효과로 인하여 시멘트의 혼합율과 재령에 영향을 받는다고 하였다.

본 연구에서는 삼축압축시험결과를 이용하여 응력경로상의 첨두강도를 연결한 파괴포락선의 기울기와 절

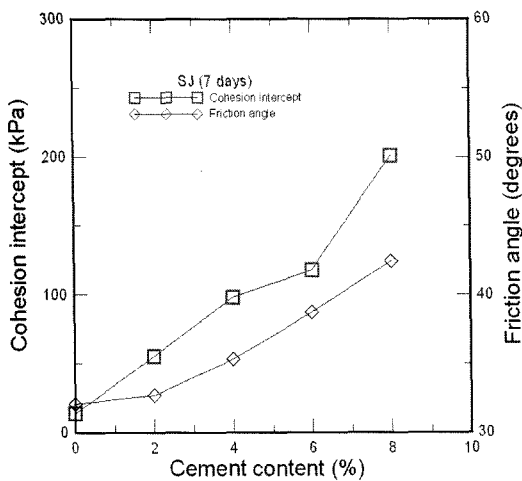


그림 16. 시멘트혼합율에 따른 강도정수

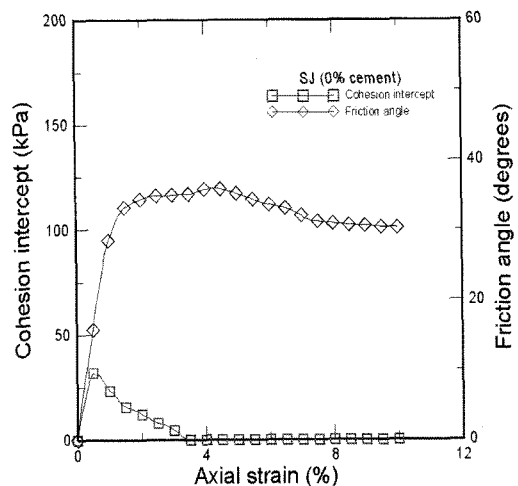
표 7. 하상모래 및 시멘트혼합토의 강도정수

Cement Content (%)	Friction Angle (Drained)	Cohesion Intercept (Drained)
0	34.1	6.5
2	34.7	40.3
4	39.4	72.3
6	40.3	106.2
8	44	184.5

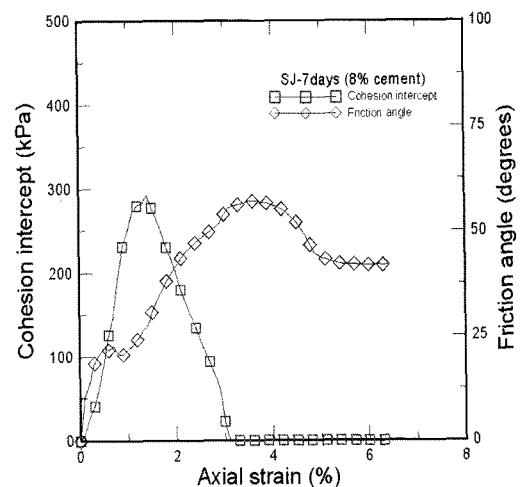
편을 이용하여 강도정수를 구하였으며 표 7 및 그림 16은 하상모래 및 시멘트혼합토의 강도정수를 요약한 것으로 8%시멘트혼합토의 경우 하상모래에 비하여 유효 내부마찰각은 약 10°정도 증가하였고 점착력은 시멘트 혼합율에 따라 크게 증가하는 것으로 나타났다.

Saxena and Lastrico(1978)는 비배수삼축압축시험을 실시하고 대부분의 시멘트혼합토의 응력-변형곡선에서 개략 1%정도의 변형률까지는 선형적으로 증가하지만 그 이상에서는 시멘트의 고결작용이 붕괴되기 시작하고 마찰의 영향이 나타나기 시작한다고 하였다. 또한 과도한 압밀압이 작용할 경우 시멘트 결합력의 붕괴로 인하여 점착력은 소멸되고 마찰각만이 존재하는 것으로 발표하였다.

그림 17은 하상모래 및 8%시멘트혼합토의 전단변형에 따른 점착력과 내부마찰각의 변화를 나타내기 위하



(a) 하상모래



(b) 8% 시멘트혼합토

그림 17. 전단변형에 따른 강도정수

여 전단시 동일한 변형률에서 각 구속압의 응력경로를 이용한 포락선을 정의하고 각각의 포락선의 기울기와 절편을 이용하여 점착력과 내부마찰각을 구하였다.

하상모래는 적은 값의 점착력이 변형초기 즉, 1%미만에서 첨두값을 나타낸 후 소멸하지만 8%시멘트혼합토의 경우 첨두응력비가 나타나는 변형률 즉 1~2%사이의 항복변형률까지 증가한 후 점차 소멸된다. 내부마찰각은 하상모래의 경우 전단초기에 나타나지만 시멘트혼합토의 경우 점착력이 거의 소멸되고 난후 일정한 값에 도달하는 것으로 나타나 시멘트혼합토의 고결효과과는 시멘트에 의한 점착력에 의한 것으로 나타났다.

Omae et al.(2003)은 시멘트를 혼합한 흙재료의 대형 삼축압축시험에서 단위 시멘트량 0.6kN/m^3 인 경우 재령 7일에서의 유효 마찰각이 대략 52.7° , 점착력은 560kPa 정도의 값을 가진다고 발표하여 본 연구 결과보다 상대적으로 작은 시멘트량에서 유효마찰각은 크게 나타났으나 점착력은 시멘트혼합율 4%일 때만 거의 유사하며 시멘트혼합율의 증가에 따라 더 큰 값을 나타내었다. 이러한 차이는 재료별 입도분포의 차이로 분석할 수 있는데 위 실험의 경우 4.76mm 이하의 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.

4. 결론

본 연구에서는 낙동강하상모래에 고결유발제로서 보통포틀랜드시멘트를 사용한 시멘트혼합토의 강도특성을 파악하기 위하여 시멘트혼합율을 달리하여 양생후 배수전단시험을 실시하였다. 하상모래의 경우 연성파괴에 의한 배럴링(barreling)이 발생하였으나 시멘트혼합토의 경우 전단대가 형성되는 취성파괴가 나타났다. 일반적으로 시멘트혼합율이 증가할수록 항복강도 및 강성이 증가하고 취성파괴 거동이 뚜렷하였으나 낮은 시멘트혼합율에서는 시멘트의 고결효과가 작아 높은 구속압에서 연성파괴에 의한 배럴링이 나타났다.

시멘트혼합율의 증가에 따라 첨두강도, 연화율 및 취성지수는 증가하였지만 연화현상발생구간은 감소하였다. 그리고 구속압의 증가에 따라 첨두강도 및 연화현상 발생구간은 증가하였지만 연화율과 취성지수는 감소하였다.

고결은 입자간 접촉점에서 입자의 결합력을 증가시켜 항복이전 시멘트혼합토의 시멘트혼합율의 증가에 따라 수축거동은 감소하지만 항복이후 모래입자에 결합된 시멘트의 영향으로 인하여 팽창거동이 증가하였다.

시멘트혼합토에서 최대팽창률($d\epsilon_v/d\epsilon_a$)_{max}이 최대유효응력비(q/p')_{max}가 나타나는 변형률 이후에 발생하고 하상모래의 경우 잘 일치하여 밀도보다 시멘트에 의한 고결에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 그리고 시멘트혼합율의 증가에 따라 한계상태선의 기울기가 증가하여 하상모래의 특성이 변하는 것으로 나타났으며 시멘트의 점착력에 의하여 시멘트혼합토의 고결효과가 나타나고 모래입자의 접촉점이나 표면에 부착된 시멘트로 인하여 점착력 및 내부마찰각이 증가하였다.

참 고 문 헌

1. Asghari, E., Toll, D. G. and Haeri, S. M. (2003), "Triaxial Behavior of a cemented Gravely Sand. Tehran Alluvium", *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.21, No.1, pp.1-28.
2. Avramidis and Saxena, S. K. (1985), "Behavior of cemented-stabilized sands under static and dynamic loads", Report No.IIT-CE85-01, Department of Civil Engineering, Illinois Institute of Technology, Chicago.
3. Black, D. K. and Lee, K. L. (1973), "Saturating laboratory samples by back pressure", *J. Soil Mechanics & Foundation Division ASCE*, Vol.99, No.SM1, Paper9484, pp.75-93.
4. Boyenton, R. S. (1996), "Chemistry and technology of lime and limestone", John Wiley and Sons.
5. Clough, G. W., Iwabuchi, J., Rad, N. S., and Kuppusamy, T. (1989), "Influence of cementation on liquefaction of sands", *ASCE*, Vol.115, No.8, pp.1102-1117.
6. Consoli, N. C., Prietto, D. M. and Ulbrich, L. A. (1998), "Influence of Fiber and Cement Addition on Behavior of Sandy Soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 124, No.12, pp.1211-1214.
7. Coop, M. R., and Atkinson, J. H. (1993), "The mechanics of cemented carbonate sands", *Geotechnique*, Vol.43, No.1, pp.53-67.
8. Dupas, J-M. and pecker, A. (1979), Static and dynamic properties of sand-cement. *Jouranal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 105(GT3): 419-436.
9. Fernando 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.
10. Haeri, S. M., Yasrobi, S., and Asghari, E. (2002), "Effects of Cementation on the Shear Strength Parameters of Tehran Alluvium Using the Large Direct Shear Test", 9th IAEG Contress, Durban, South Africal pp.519-525.
11. Huang, J. T.and Airey, D. W. (1998), "Properties of Artificially Cemented Carbonate Sand", *ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.124, No.6, pp.482-499.
12. Ismail (2002b), "Cementation of porous materials using calcite":

- Geotechnique*, Vol.52, No.5, pp.313-324.
13. Leroueil, S. and Vaughan, P. R. (1990), The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Geotechnique*, 40(3): 467-488.
 14. Malandraki, V. and Toll, D. G. (2000), "Drained probing triaxial tests on a weakly bonded artificial soil", *Geotechnique*, London, 50(2), 141-151.
 15. 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.
 16. Saxena, S. K and Lastrico, R. M. (1978), "Static Properties of Lightly Cemented Sand", *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.104, No.12, pp.1449-1465.
 17. Skempton, A. W. (1954), The pore pressure coefficients A and B, *Geotechnique*, London, 4, 143-147.
 18. Sowers (1979), *Introductory Soil Mechanics and Foundation: Geotechnical Engineering*, 4th Edition, Macmillan Company, New York, N.Y.
 19. Wissa and Ladd (1965), "Effective stress strength parameters of stabilized soils" : Proc., Sixth Int. Conference of Soil Mechanics, International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1, 412-416.

(접수일자 2006. 8. 7, 심사완료일 2007. 2. 14)