

고결된 하상모래의 압축강도 추정

Estimation of Compressive Strength for Cemented River Sand

정 우 섭¹ Jeong, Woo-Seob
윤 길 림² Yoon, Gil-Lim
김 병 탁³ Kim, Byung-Tak

Abstract

In this study, artificial cemented sand made of a few portland cement and Nak-Dong river sand was researched closely to investigate cementing effect quantitatively through unconfined tests and triaxial tests. The peak strength and elastic modulus increased and dilation of cemented sand was restricted by the cementation, but after breakage of the cementation, dilation and negative excess pore water pressure increased. In stress-strain curve, strain-softening behavior appeared in drained condition but strain-hardening behavior was appeared in undrained condition as a result of the increase of effective stress. The test was quantitatively analyzed by multiple regression models, correlating each response variable with input variable. The equations are valid only over the range investigated. Its adjusted coefficient of determination was 0.81~0.91, and dry density is important factor for estimating strength of cemented sand.

요 지

본 연구에서는 시멘트의 고결효과를 정량적으로 파악하기 위하여 낙동강하상모래와 소량의 포틀랜드시멘트를 혼합하여 고결된 모래에 대하여 일축압축시험 및 배수조건과 비배수 조건의 삼축압축시험을 수행하였다. 시멘트혼합율의 증가에 따라 침투강도 및 탄성계수는 증가하였고 시멘트의 결합력에 의하여 다일레이션 및 과잉간극수압이 억제되었으나 시멘트 결합력의 파괴 후 증가된 모래입자크기에 의하여 증가하였다. 그리고 배수조건의 응력-변형률 곡선은 연화거동이 나타났지만 비배수조건에서는 증가된 부(-)의 과잉간극수압에 의한 유효응력의 증가로 경화거동을 나타냈다. 각 조건에 대한 강도증가량의 예측을 위하여 선형을 가정한 다중회귀분석을 실시한 결과 제시된 경험식의 결정계수는 0.81~0.91로 나타나 신뢰성이 높은 것으로 평가되었으며 건조밀도의 경우 고결된 모래의 입도조건을 동시에 고려할 수 있어 고결된 모래의 강도를 결정하는데 중요한 변수로 분석되었다.

Keywords : Cemented sand, Dilation, Multiple regression analysis, River sand, Strain-hardening, Strain-softening

1. 서 론

낙동강유역의 경우 지구 온난화에 의한 이상홍수와

제방의 노후화에 따른 홍수시 제방의 붕괴로 해마다 인명 및 재산의 손실이 급증하고 있다. 이러한 피해의 방지를 위하여 제방 신설 및 기존제방의 유지보수에 다

1 정회원, 한국해양연구원 연수연구원 (Member, Post-Doctoral Researcher, KORDI, jws2713@hanmail.net, 교신저자)

2 정회원, 한국해양연구원 책임연구원 (Member, Senior-Researcher, KORDI)

3 정회원, GS건설, 과장 (Member, Manager, GS Engrg. & Construction)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

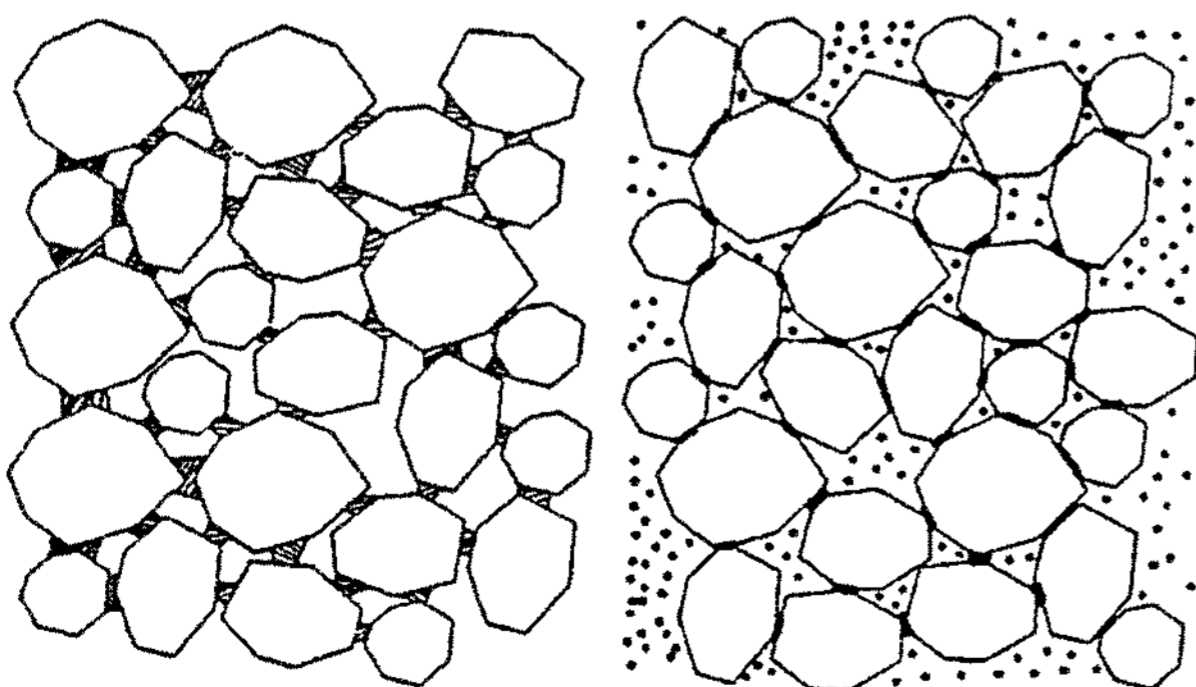
량의 제방축조재료가 요구되고 있는 실정이므로 하상 모래의 공학적 성질을 개선하여 재료수급의 문제를 해결할 수 있는 기술이 필요하다.

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 등 2002).

국내의 경우 최근 이우진(2006) 등이 해사에 고결재료 석고를 사용하여 고결정도 및 상대밀도에 따른 거동양상을 분석한 바 있으며 김기영(2006)은 화북댐 및 탐진댐에서 가물막이댐의 설계를 위한 시멘트혼합토의 적용성을 평가하여 고결효과에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

Sowers(1979)는 시멘트와 모래의 결합구조에 따른 거동을 설명하기 위하여 그림 1처럼 접촉점결합구조(contact bound structure)와 간극을 포함한 결합구조(void bound structure)로 구분하였다. 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.

Avramidis and Saxena(1985)은 시멘트에 의하여 고결된 모래의 거동에 대하여 일반적으로 그림 2와 같이 초기재하시 시멘트의 결합력이 입자간 이동을 방해하므로 거의 침투강도에 도달할 때 까지 선형탄성거동이 발생하며 시멘트의 결합작용이 항복하는 시점은 침투강도(A) 이전에 발생하고 팽창에 저항하는 구속압에 의하여 비선형적 연화가 발생한다(AB). 시멘트의 결합작용이 완전히 붕괴되었을 때(B), 급속한 비선형 연화가 발



(a) 접촉점결합구조 (b) 간극결합구조

그림 1. 고결된 모래의 구조

생한다. 잔류상태(C)이후에 강도는 일정하게 되고 모래의 마찰저항에 의존하게 된다. 그리고 낮은 구속압하에서는 팽창에 대한 저항력의 부족으로 인하여 비선형적 연화(AB)는 나타나지 않는다.

본 연구에서는 낙동강유역의 세 지점에서 채취한 하상모래와 소량의 보통 포틀랜드시멘트를 이용한 인위적 고결을 위하여 하천설계기준(2002)에서 제시하는 방법에 따라 시료를 성형하였고 제방축조재료로서 강도 특성을 평가하기 위하여 배수 및 비배수조건에서 삼축 압축시험을 실시하였다. 그리고 실험의 결과를 바탕으로 시멘트에 의하여 고결된 하상모래의 강도를 추정하기 위하여 강도의 영향인자로 판단되는 여러 가지 변수를 바탕으로 경험식을 제안하였으며 각각의 변수들이 강도에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 시험방법

2.1 하상모래의 특성

본 연구에서는 낙동강 유역의 성주(SJ), 창녕(CN) 및

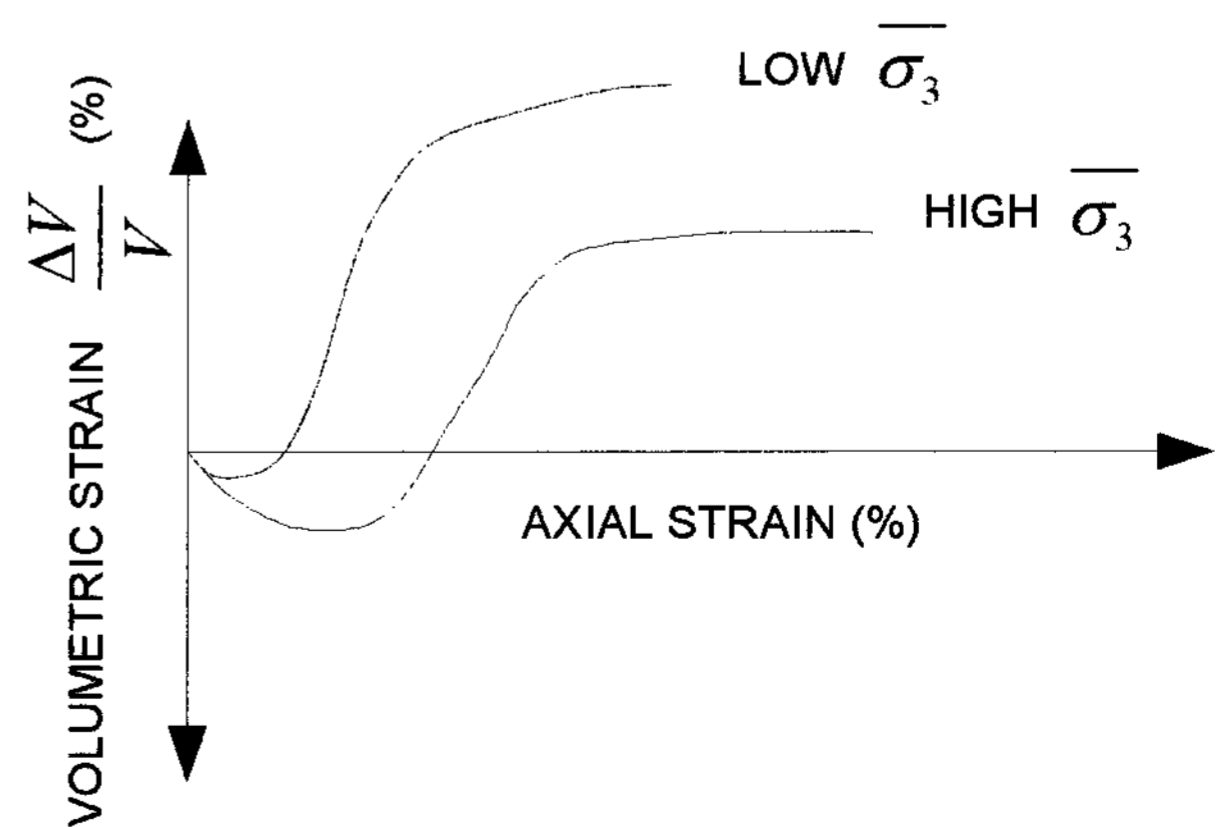
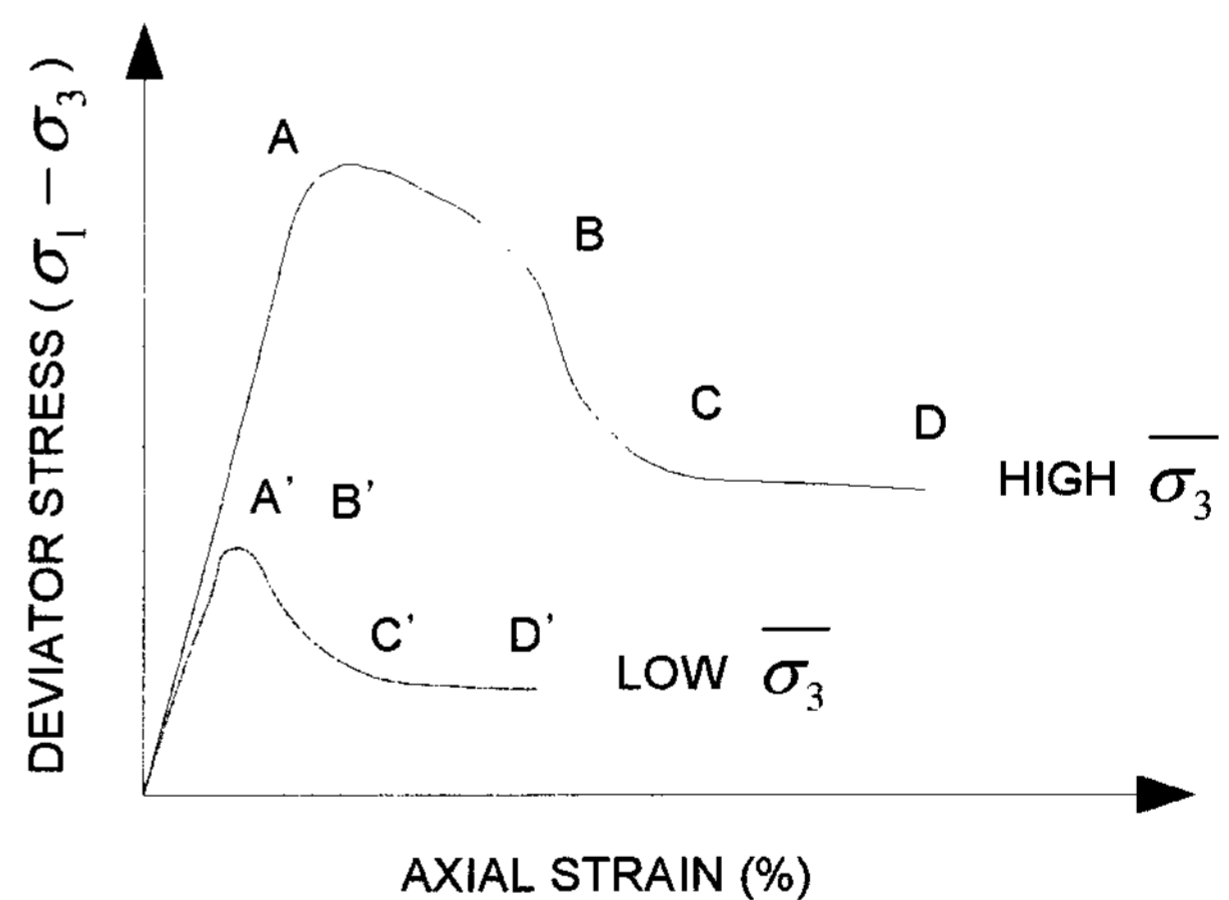


그림 2. 고결된 모래의 전단거동

2.2 시료의 성형 및 포화

설계기준에 적합한 시료제작을 위하여 선행시험으로 하상모래(0%)와 일반 보통 포틀랜드시멘트의 혼합율을 전체중량에 대하여 각각 2%, 4%, 6% 및 8%로 달리한 고결된 모래에 대하여 다짐시험(D-type)을 실시하고 시멘트혼합율에 따른 최대건조밀도 및 최적함수비를 구하였다.

그림 4는 시멘트혼합율에 따른 다짐시험결과를 나타내고 있으며 최적함수비는 13.9~15.1%정도로 유사하였으나 최대건조밀도는 시멘트혼합율의 증가에 따라 15.2~18.4kN/m³로 증가함으로써 물과 결합한 시멘트가 모래입자의 이동을 방지하고 시멘트 비중의 영향으로 증가하였다.

시멘트혼합율이 8%인 고결된 모래의 경우 다짐으로 인하여 포화도는 61.7~89.7%로 증가하였으나 모래입자 사이 간극을 완전히 충전하지는 못하는 것으로 나타나 강도가 비교적 적으며 상대적으로 큰 변형률에서 파괴가 발생하는 접촉점체결구조(Sowers, 1979)로 나타났다.

하천설계기준(2002)에서 하천제방의 다짐도를 수정 다짐(KSF 2312)에서 구한 최대건조밀도의 90% 이상을 요구하고 있으며 본 연구에서는 설계기준에 적합한 일축 및 삼축압축시험용 시료를 제작하기 위하여 직경 70mm×높이140mm의 양쪽으로 분리되는 그림 5와 같은 다짐장비를 제작하였다.

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

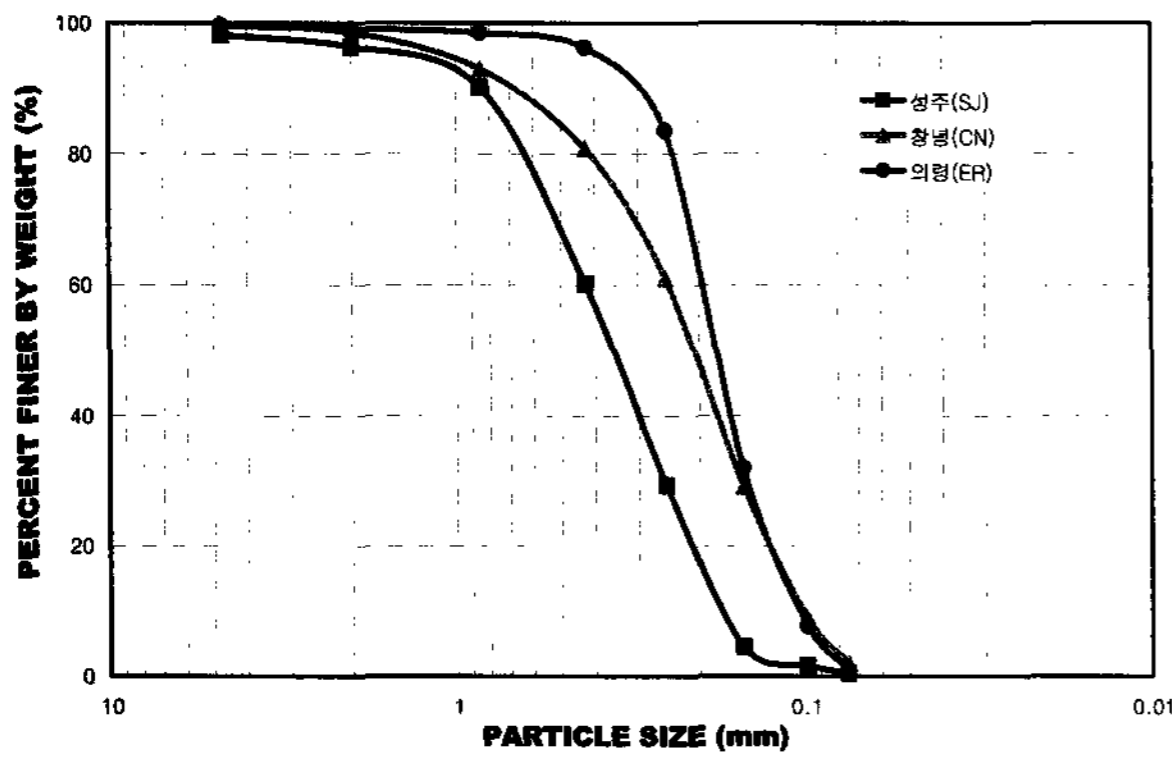
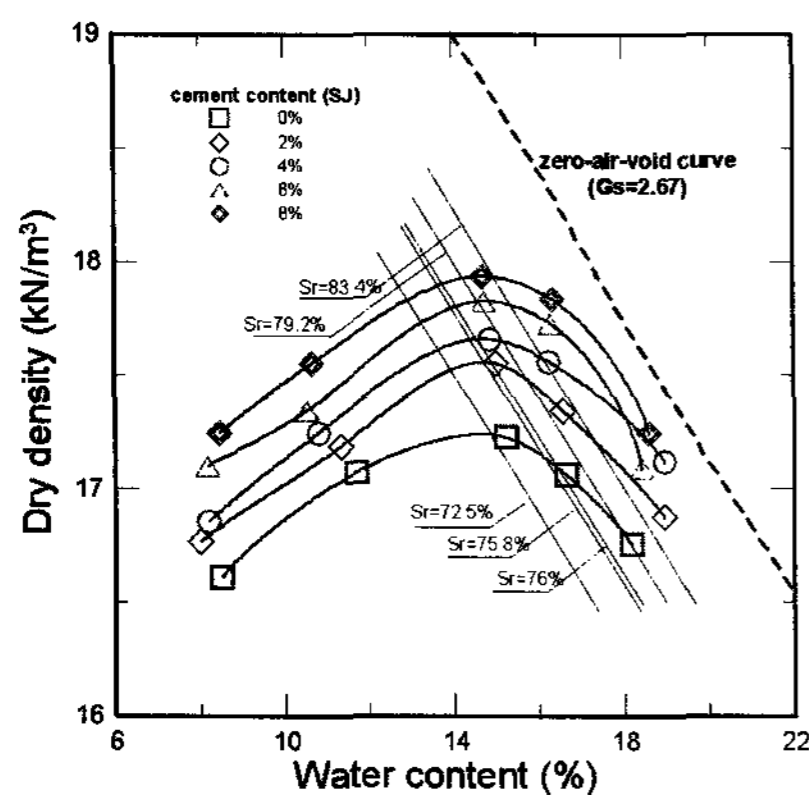


그림 3. 대상지역 하상모래의 입도분포

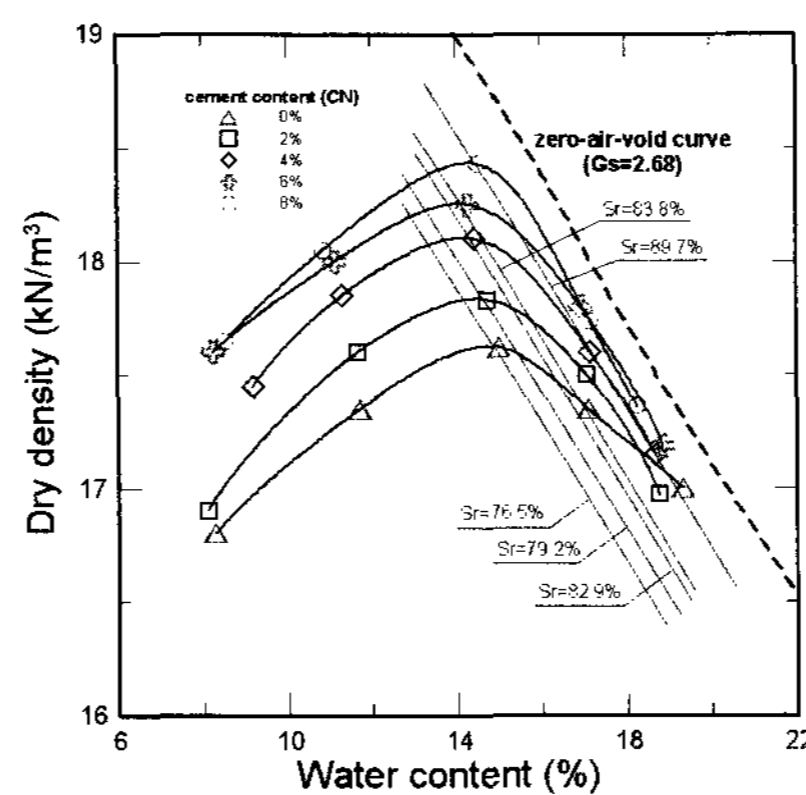
표 1. 하상모래의 물리적 특성

분류		성주(SJ)	창녕(CN)	의령(ER)
통일분류법		SP	SP	SP
비중(G_s)	하상모래	2.67	2.68	2.67
	시멘트	3.15		
체분석	D_{10} (mm)	0.19	0.12	0.11
	D_{30} (mm)	0.26	0.17	0.16
	D_{60} (mm)	0.39	0.26	0.19
	균등계수(C_u)	2.05	2.16	1.73
	곡률계수(C_g)	0.91	0.93	1.22

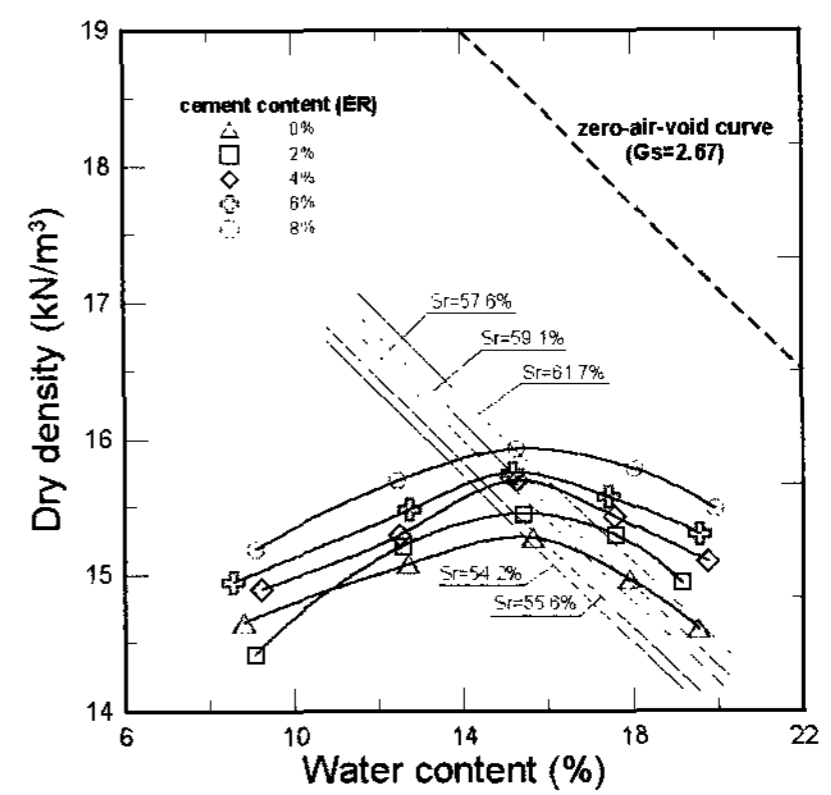
의령(ER) 3개소의 하상모래를 약 1m정도의 심도에서 채취한 후 노건조를 실시하였으며 대부분 육안상 균질한 모래로 #4체를 이용하여 최소한의 선별과정만을 거쳤다. 시료의 물리적 특성 및 입도분포곡선은 표 1 및 그림 3과 같으며 통일분류법상 입도가 균등한 모래 SP로 분류되었다.



(a) 성주



(b) 창녕



(c) 의령

그림 4. 다짐시험결과(D-type)

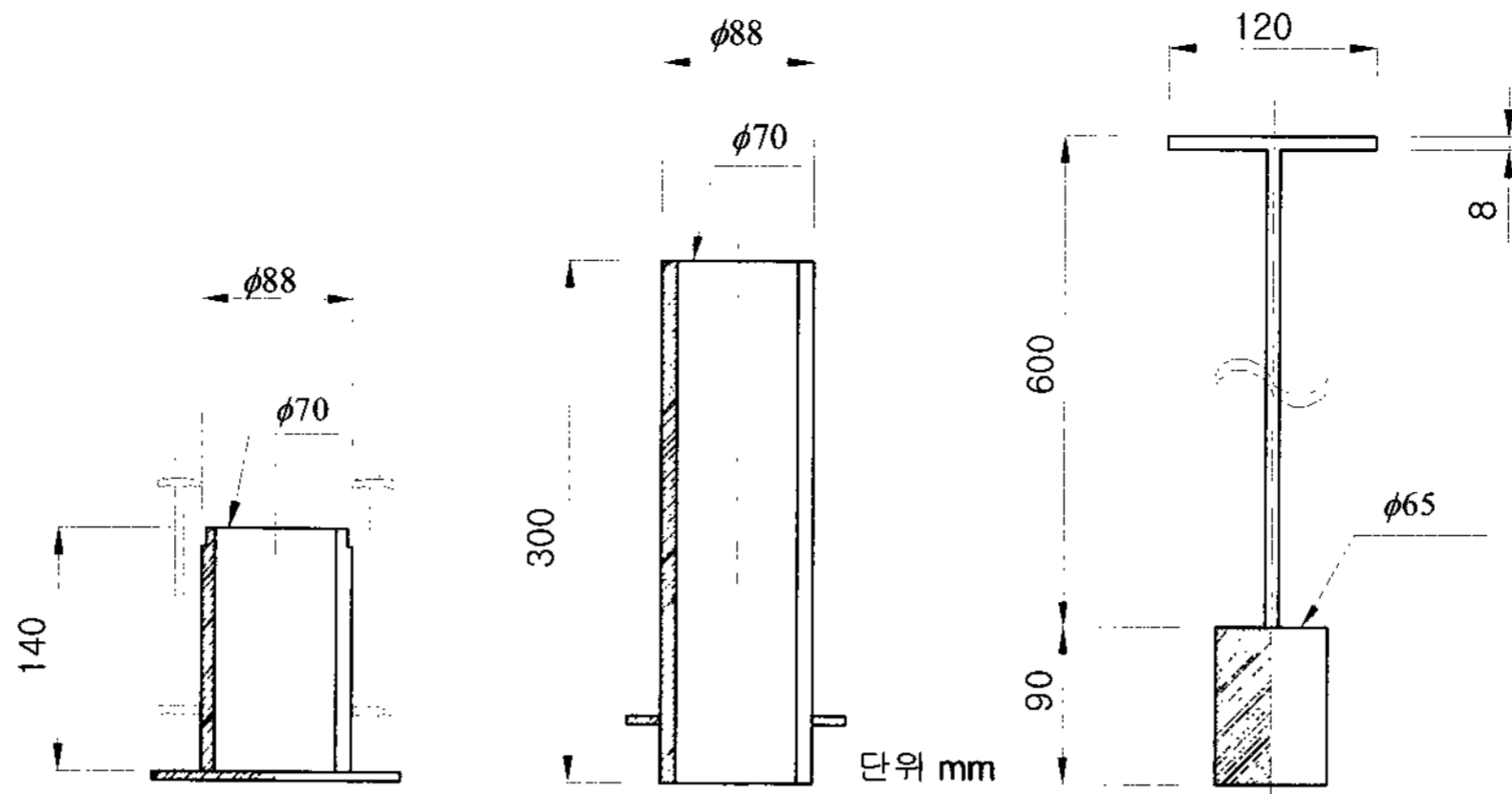
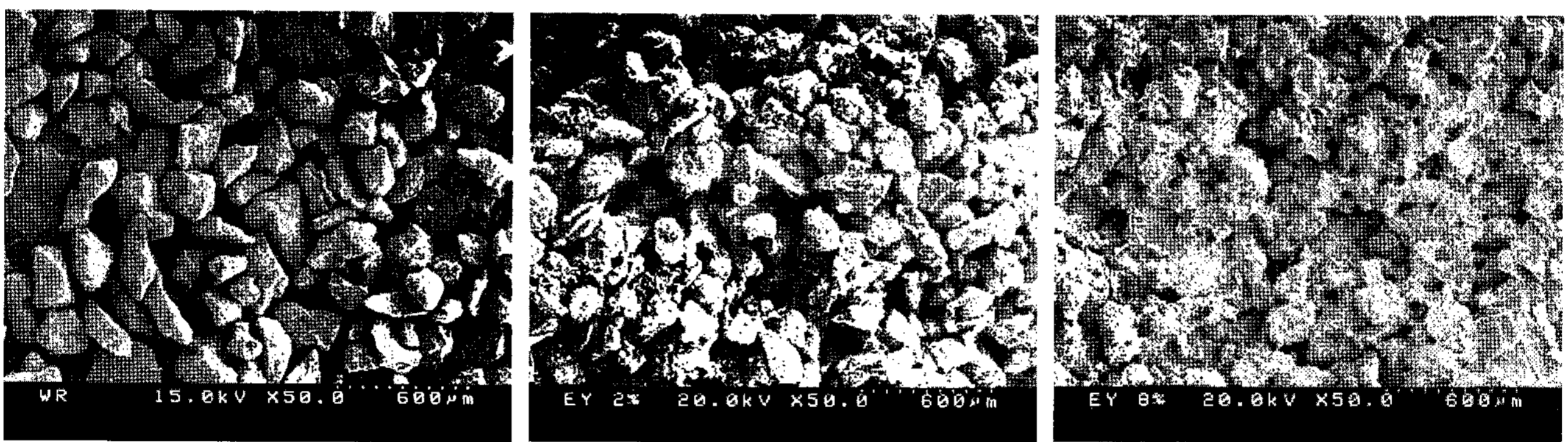


그림 5. 시료제작을 위한 다짐장비



(a) 하상모래

(b) 2% 시멘트혼합

(c) 8% 시멘트혼합

그림 6. 하상모래 및 고결된 모래의 SEM

하였다.

동일한 다짐에너지로 제작된 시료는 다짐시험(D-type)에서 구한 최대건조밀도의 약 92~96%로 양생시 항온항습상태를 유지하였다.

조성된 시료는 실험 하루전까지 양생을 실시한 후 포화도의 증가 및 현장조건과 일치시키기 위하여 약 24시간 동안 수침시켰으며 10kPa의 구속압에서 증류수를 7kPa의 압력으로 통과시킨 후 배압을 약 650kPa까지 증가시켜 B-value(Skempton, 1954)가 하상모래 0.95, 고결된 모래는 0.9이상이 되도록 하였다(Black and Lee, 1973).

그림 6은 하상모래와 고결된 모래의 SEM를 나타내고 있으며 모래입자의 표면과 접촉점에 시멘트가 수화되어 고결이 유발되었고 시멘트혼합율의 증가에 따라 간극의 충전효과가 증가되는 것으로 나타났다.

2.3 시험종류 및 방법

압축시험은 하상모래(0%)와 시멘트혼합율을 달리한 고결된 모래에 대하여 일축 및 삼축압축시험을 실시하

였다.

표 2는 본 연구에서 수행한 압축시험 방법을 요약한 것이며 일축압축시험의 경우 동일한 조건에서 3회씩 시험을 실시하여 편차량이 큰 것을 제외한 나머지에 대하여 산술평균값을 구하여 시험시 오차를 줄였다.

그림 7는 본 연구에서 사용한 다기능 삼축시험장치(Geocomp Inc.)로서 재하장치와 압력조절장치로 구성되어 있어 구속압 및 축차응력을 자동제어할 수 있다.

표 2. 압축시험의 요약

시험조건	시험방법	
	일축압축	삼축압축
시료직경(mm)	70	70
구속압(kPa)	-	50, 100, 200
시멘트혼합율(%)	2, 4, 6, 8	0, 2, 4, 6, 8
재령(일)	3, 7, 28	7, 28
배수조건	-	배수, 비배수
축변형율(%/min)	0.1	0.05(배수) 0.1(비배수)

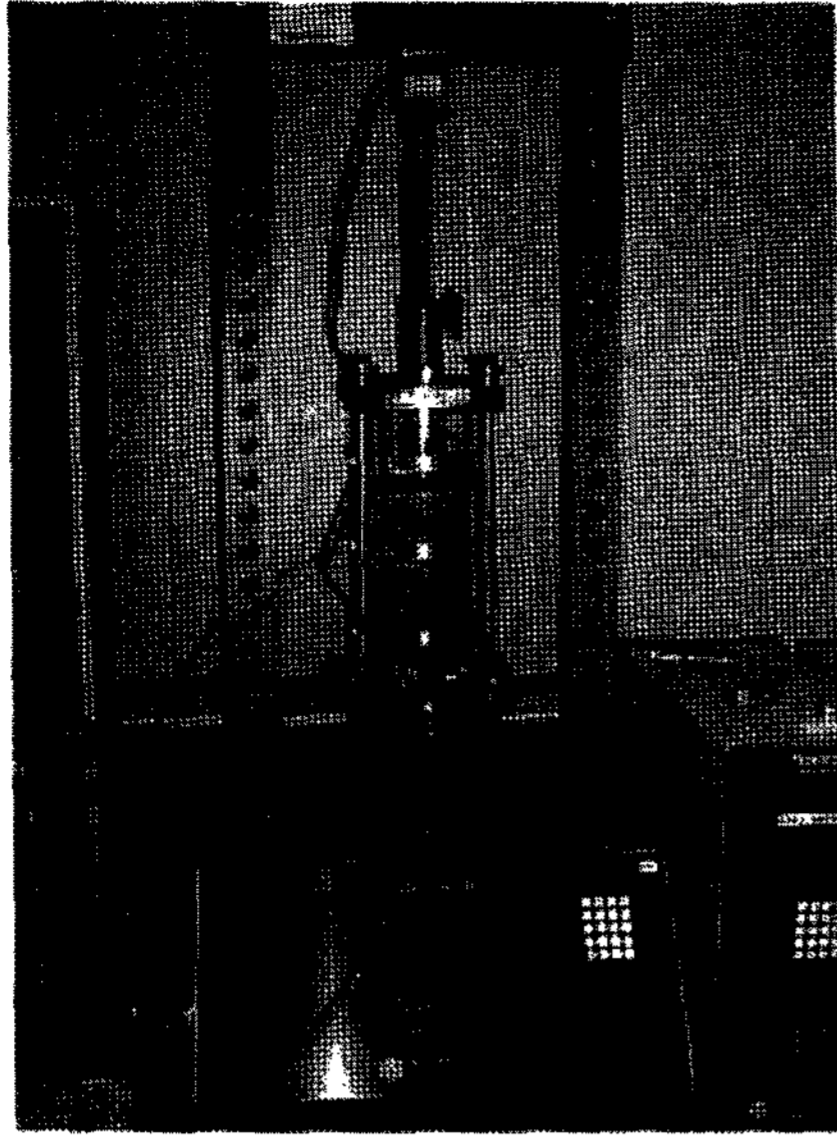


그림 7. 다기능 삼축압축시험기(Geocomp Inc.)

3. 압축강도 시험결과

3.1 일축압축시험

고결된 모래에서 시멘트혼합물은 강도특성과 밀접한 관계가 있다. 입도가 양호한 자갈질흙(GW)와 모래질흙(SW)에 중량비 5~9%의 시멘트를 혼합한 후 공시체를 제작하여 6일간의 습윤양생과 1일 수침 후 얻어진 일축압축강도는 2,100~4,200kPa로 알려져 있다(Mitchell, 1986).

그림 8은 본 연구에서 수행한 일축압축강도 시험결과를 나타낸다. 시멘트 혼합율 및 재령의 증가에 따라 일축압축강도가 증가하였으며 시멘트혼합율 6~8%에서 7일간 양생한 공시체에 대한 압축강도는 500.7~867.4kPa로서 입도가 양호한 흙에 비하여 작았다. 의령(ER)의 경우 다른 지역에 비하여 하상모래의 입자가 상대적으로 세립 및 균등하게 구성되어 시멘트혼합율 및 재령에 따

른 일축압축강도의 증가가 작았다.

일본의 건설성 토목연구소(1996)에 따르면 시멘트량을 0.2~1kN/m³으로 변화시켜 고찰한 일축압축강도의 경우 시멘트량이 증가함에 따라 일축압축강도는 증가하며 강도의 편차범위도 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 일축압축시험의 결과 균등입도, 소량의 시멘트의 영향으로 인하여 강도의 편차는 작으며 인자별 상관성은 0.94~0.99로 매우 높게 나타났다.

3.2 삼축압축시험

3.2.1 배수조건외 삼축압축시험

그림 9는 연구대상지역에 대한 100kPa의 구속압에서 시멘트혼합물에 따른 고결된 모래의 응력-변형률의 관계를 나타내고 있으며 시멘트혼합율의 증가에 따라 초기직선구간의 기울기인 탄성계수의 값은 증가하고 하상모래의 경우 압밀단계에서 압밀압에 의해 표층부의 입자간격이 조밀해짐으로서 시멘트를 2%혼합한 경우보다 탄성계수의 값이 더 크게 나타나고 있지만 시멘트를 2%혼합하여 고결된 모래는 시멘트의 효과에 의해 침투강도 및 침투강도 발생시의 변형률이 더 크게 나타났다.

시멘트혼합율의 증가에 따라 시멘트의 결합작용으로 인하여 침투강도는 증가하며 침투강도 발생시의 변형률은 비슷하거나 다소 감소하였으며 성주지역의 경우 시멘트를 6%혼합한 경우가 8%혼합한 경우의 최대축차응력의 56~66%, 창녕의 경우 53~55% 그리고 의령의 경우 65~67%로서 각 지역에서 시멘트를 8%혼합한 경우 강도의 증가폭이 매우 큰 것으로 나타났다. 그리고 창녕지역의 경우 조밀한 밀도의 영향으로 인하여 다른 지역보다 시멘트에 의한 결합효과 더 크게 나타난 것으로

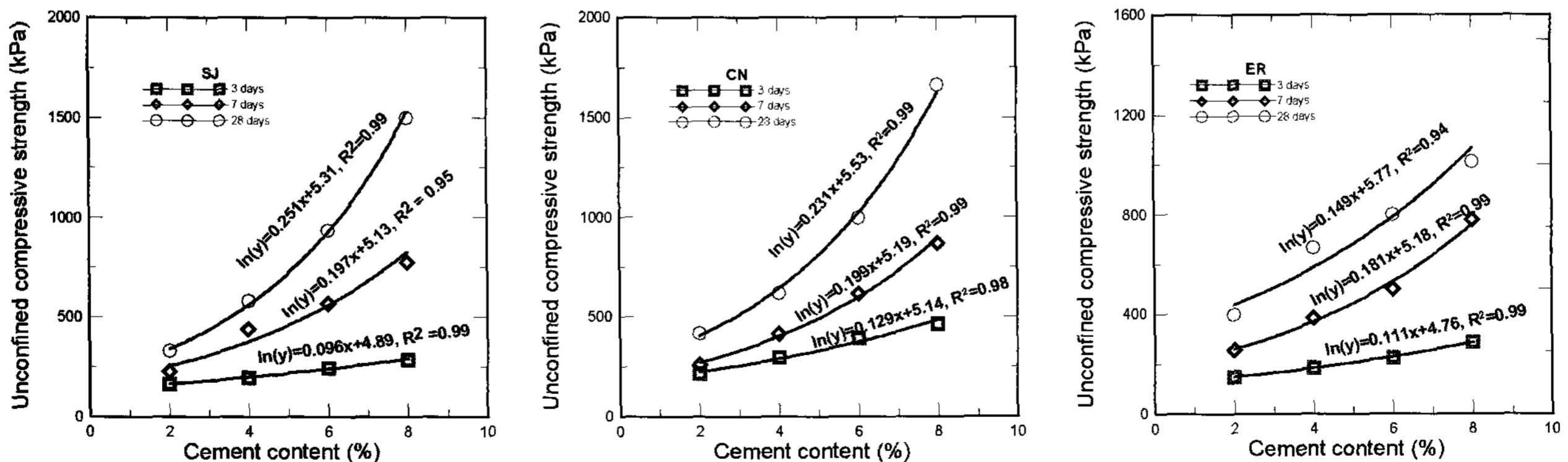


그림 8. 일축압축시험 결과

판단된다.

고결된 모래의 거동은 변형에 따른 연화현상을 나타내고 있다. 응력-변형률 곡선에서 시멘트혼합율 및 구속압의 조건에 따라서 침투강도이후의 거동은 결정되어진다고 볼 수 있다. 침투강도 이후 연화거동을 보인후 취성파괴를 일으키며 잔류상태에 도달하는 형태의 응력-변형거동은 Avarmidis and Saxena(1985)의 고결된 모래에 대한 삼축시험결과와 유사하다.

시멘트혼합율이 증가할수록 고결작용의 효과가 크게 나타나 연화구간의 길이는 짧아지며 연화구간의 기울기인 연화율은 증가하는 것으로 나타났다.

창녕(CN)이 성주(SJ) 및 의령(ER)에 비하여 입도에 의한 다짐특성으로 두 지점보다 건조밀도가 크므로 침투강도가 크게 나타났으며 의령지역의 경우 다른 지역과 동일한 시멘트혼합율에서 세립의 영향에 의한 비표면적의 증가로 시멘트의 고결효과는 가장 낮은 것으로 나타났다.

그림 10은 하상모래와 시멘트혼합률에 따른 고결된

모래의 전단시 체적변화를 비교한 것이다. 시멘트혼합율이 증가함에 따라 시멘트의 고결작용이 입자들의 이동을 구속하여 수축량은 감소하지만 항복 후 팽창량은 증가하는 것으로 나타났다.

하상모래의 경우 수축량은 0.2%미만, 팽창량은 약 2.5%에 도달하였으며 고결된 모래의 경우 구속압의 수준에 따라 수축량은 약 0.2~1%, 팽창량은 약 3~5%정도로 나타났다.

하상모래의 경우 압밀단계에서 시멘트의 결합력이 작용하지 않아 구속압의 크기에 따라 체적변형이 이루어졌으나 고결된 모래의 경우 시멘트에 의한 입자간 고결력에 의하여 구속압에 의한 체적변형은 하상모래에 비하여 작은 것으로 판단된다.

전단변형에 따른 팽창의 경우 하상모래는 시멘트의 고결력이 존재하지 않아 시료전체가 소성파괴에 도달할 때 팽창량은 하상모래의 입도에 영향을 받지만 고결된 모래의 경우 모래입자표면에 시멘트가 결합하여 증가된 입자 크기로 인하여 팽창량은 하상모래에 비하여

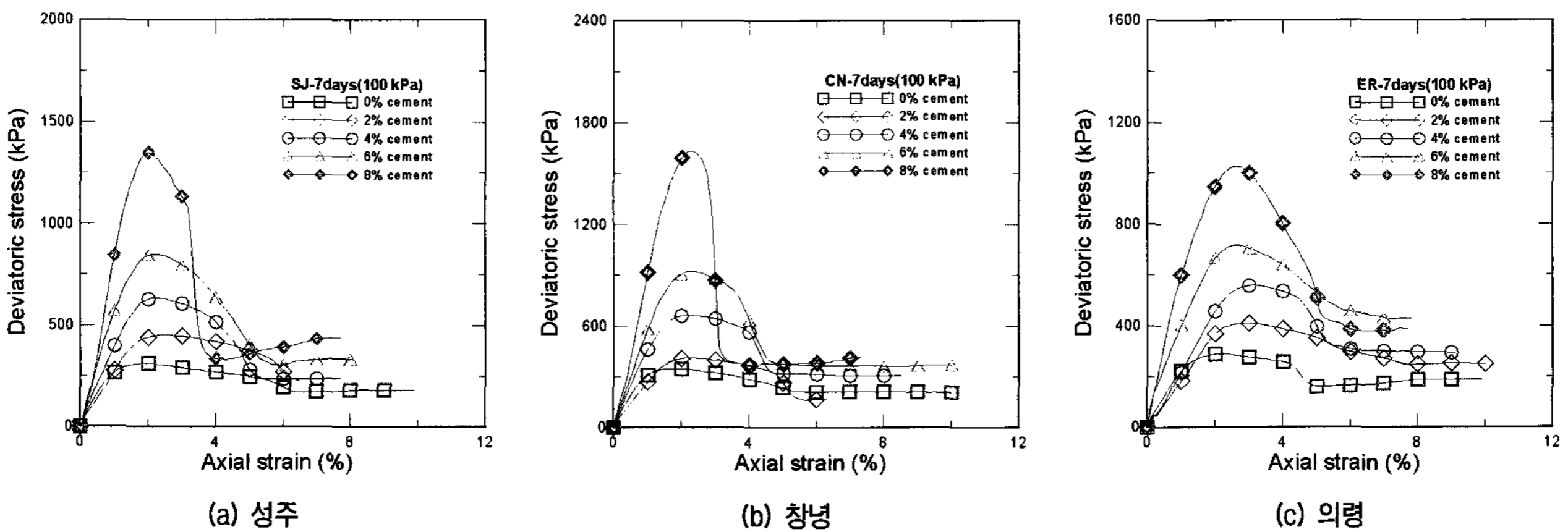


그림 9. 하상모래 및 고결된 모래의 응력-변형률(CID)

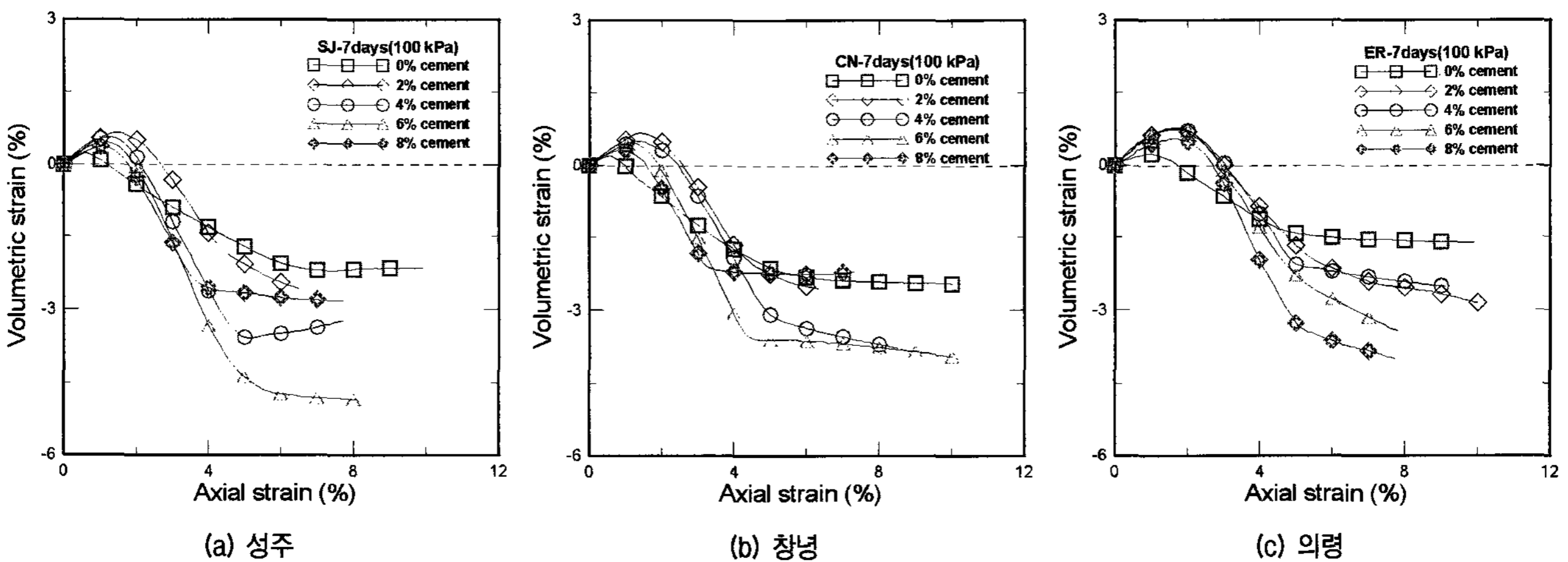


그림 10. 하상모래 및 고결된 모래의 체적변형률-축변형률

크게 나타난 것으로 판단된다.

3.2.2 비배수조건에서의 삼축압축시험

그림 11은 100kPa의 구속압에서 고결된 모래의 시멘트혼합물에 따른 비배수상태 응력-변형률 관계를 나타내고 있다. 시멘트혼합물의 증가에 따라 배수조건과 동일하게 초기직선구간의 기울기인 탄성계수는 증가하고 하상모래의 경우 입자간 결합력의 부재로 인하여 압밀 단계에서 입자의 배열상태가 더욱 조밀해진 것으로 판단된다.

시멘트혼합물의 증가에 따라 시멘트의 결합작용으로 침투강도는 증가하며 침투강도 발생시의 변형률은 비슷하거나 약간 감소하였으며 성주지역은 시멘트혼합물 6%의 최대축차응력은 8%의 약 81~89%, 창녕은 약 73~90% 그리고 의령은 약 79~81%로서 각 지역의 시멘트 8%를 혼합한 경우 강도의 증가가 배수시험에 비하여 작은 것으로 나타났다.

그림 12는 100kPa의 구속압에서 시멘트혼합물의 증

가에 따른 과잉간극수압의 변화양상을 나타내고 있다. 시멘트 혼합물의 증가에 따라 시멘트의 결합작용으로 인하여 체적 수축의 경향이 감소하므로 양(+)의 간극수압은 감소하지만 항복이후 발생하는 부(-)의 과잉간극수압은 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 배수 시험에서의 체적변형과 동일한 개념으로서 시멘트혼합물의 증가에 따라 시멘트의 결합작용에 의한 입자간 결합력은 증가하지만 붕괴이후 모래표면에 고결된 시멘트입자의 부착으로 인해 입자의 크기가 증가되어 나타나는 현상이라 판단된다.

비배수조건에서의 고결된 모래의 전단거동은 시멘트혼합물, 부의 과잉간극수압에 의한 평균유효응력 및 구속압의 조건에 영향을 받으며 초기항복이후 잔류상태로 도달하기 전 부의 과잉간극수압에 의하여 증가된 평균유효응력으로 인하여 배수조건에서의 연화구간은 나타나지 않고 침투강도까지 증가양상을 나타내어 변형에 따른 경화거동을 나타낸다.

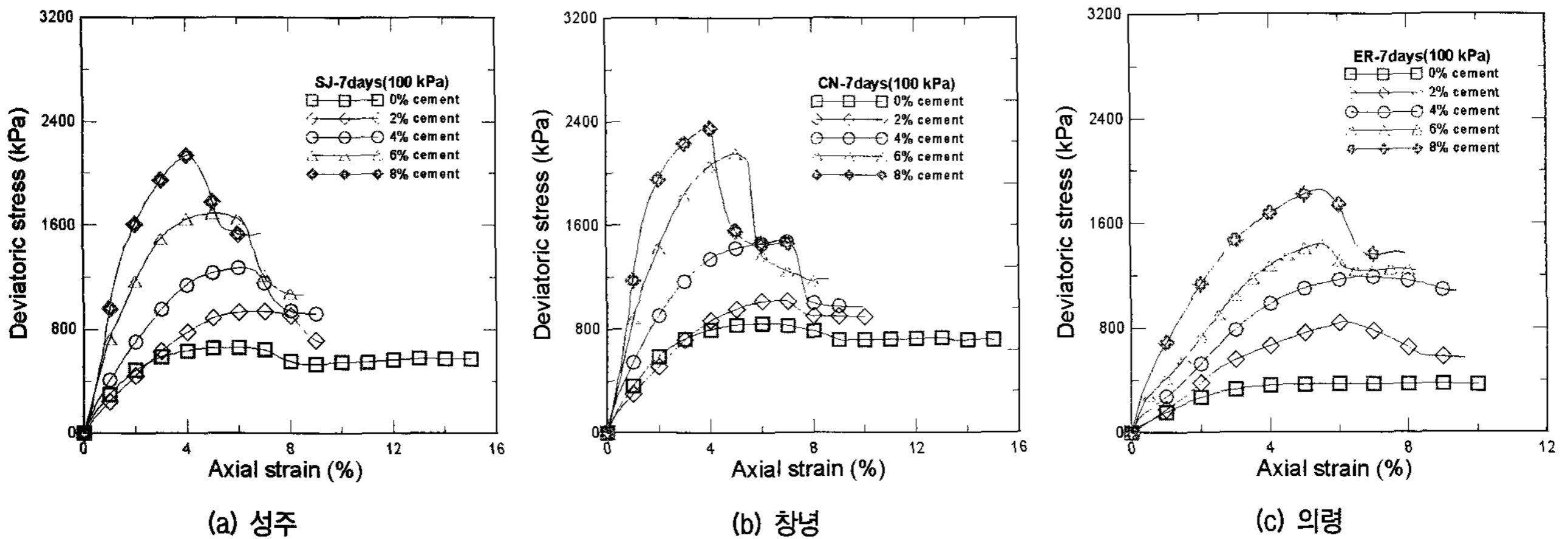


그림 11. 하상모래 및 고결된 모래의 응력-변형률(CIU)

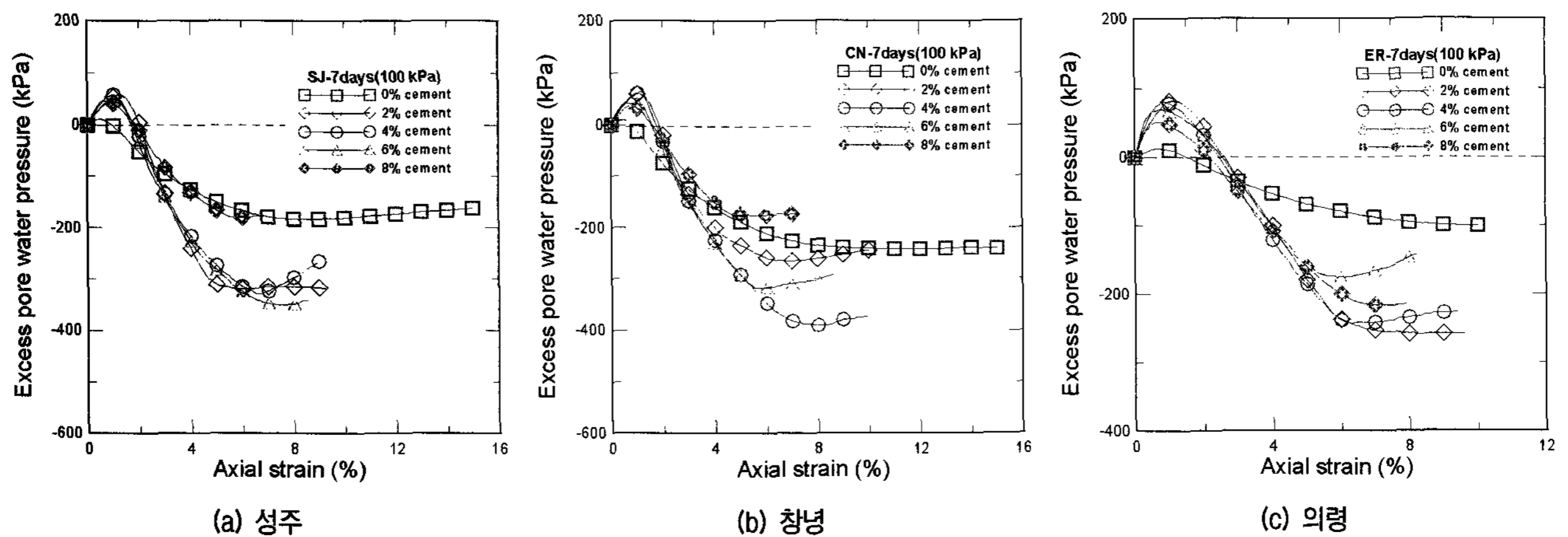


그림 12. 하상모래 및 고결된 모래의 간극수압-축변형률

4. 고결된 모래의 압축강도 추정

4.1 강도증가의 요인분석

본 연구에서는 일축압축시험 및 삼축압축시험의 결과에 영향을 미치는 요인들에 대한 분석과 이를 이용한 경험식의 수립을 위하여 다중회귀분석을 수행하였다. 고결된 모래의 압축강도에 영향을 미치는 요인을 분석하기 위하여 표 3과 같은 입력변수를 사용하였다.

일축압축강도를 설명할 수 있는 요인들을 분석하고 변수들 상호간의 상관성을 파악하기 위하여 요인분석을 실시하였으며 입력변수로서 재령, 시멘트혼합율, 건조밀도 및 입도조건(D10, D30, D60)을 사용하였으며 변수들간의 상관행렬은 아래의 표 4와 같다.

입도조건들의 상관성은 매우 크게 나타나 0.977이상의 상관계수값을 나타내었으며 이는 입도조건들 상호간 다중공선성이 존재한다는 것을 의미하며 회귀계수를 결정할 수 없는 문제가 발생한다. 주성분분석에 의한 공통성의 추출결과 건조밀도의 경우 D10, D30 및 D60의 입도조건과 상관성이 존재하는 것으로 나타나 다중

회귀분석시 건조밀도를 고려할 경우 입도조건도 동시에 고려할 수 있었다.

고유치는 요인이 설명하는 분산의 양을 나타내므로 값이 클 경우 중요한 요인으로 분류된다. 표 5는 요인분석의 결과를 나타내고 있으며 분석시 세 가지의 요인이 각각 3.2, 1.2 및 1.0의 고유치를 나타내어 고유치가 1이상으로 유의한 변수로 분류되었다.

세 가지의 요인은 전체요인을 설명하는데 각각 53.3%, 20.4% 및 16.7%로서 세 가지 요인을 누적하면 약 90.4%를 설명하며 추출된 세 개의 요인을 새로운 입력변수로 일축압축강도에 대한 다중회귀분석을 실시한 결과와 시멘트혼합율, 재령 및 건조밀도를 이용한 다중회귀분석 결과의 조정결정계수(R^2_{adj})값이 거의 유사하여 세 요인이 시멘트혼합율, 재령 및 건조밀도를 중심으로 분류된 것으로 나타났다.

다중회귀분석에서 입력변수의 양이 증가할 경우 결정계수는 증가하는 경향이 있으므로 불필요한 변수가 추가되었을 경우 감소하는 조정결정계수를 사용하는 것이 적합하며 조정결정계수는 식 (1)을 이용하여 구하였다.

표 3. 강도의 추정을 위한 입력변수

입력변수	재령(일)	시멘트혼합율(%)	건조밀도(kN/m ³)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)
기호	CT	CC	DD	D10	D30	D60
범위	3~28	2~8	14.41~17.96	0.11~0.19	0.16~0.26	0.19~0.39

표 4. 입력변수의 상관행렬

	CT	CC	DD	D10	D30	D60
상관성	CT	0	0.044	0	0	0
CC	0	1	0.327	0	0	0
DD	0.044	0.327	1	0.303	0.483	0.417
D10	0	0	0.303	1	0.977	0.991
D30	0	0	0.483	0.977	1	0.997
D60	0	0	0.417	0.991	0.997	1

표 5. 요인분석의 결과

	초기고유치			추출제곱합의 적재값		
	전체	변량의 %	누적 %	전체	변량의 %	누적 %
1	3.21	53.36	53.36	3.20	53.36	53.36
2	1.23	20.41	73.77	1.23	20.41	73.77
3	1.00	16.67	90.44	1.00	16.67	90.44
4	0.57	9.55	99.99	-	-	-
5	0.01	0.01	100	-	-	-
6	2.348E-16	3.914E-15	100	-	-	-

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-p-1}(1-R^2) \quad (1)$$

여기서, n : 표본의 크기 p : 입력변수의 양 R^2 : 결정계수

4.2 고결된 모래의 다중회귀분석

고결된 모래의 강도특성을 설명하는데 있어 시멘트 혼합율, 재령 및 건조밀도가 중요한 인자로 분석되었으므로 일축압축강도 및 삼축압축시험에서 산출한 강도의 추정에 적용하였다.

표 6은 강도의 추정에 적용한 입력변수 및 범위를 나타내고 있으며 삼축압축시험의 경우 일축압축시험의 경우와 달리 구속압 및 배수조건에 따라 강도특성이 달라지므로 추가적으로 입력변수로 고려하였다. 일반적인 재령 및 시멘트혼합율을 사용할 경우 스케일이펙트가 고려되어 적절한 회귀식의 산출이 곤란할 수 있으므로 정규화 시킨 괄호안의 수치를 입력 값으로 하였다.

각 변수들의 범위 내에서 가장 작은 값을 -1, 중간 값을 0 그리고 최대값을 1로 설정하였으며 나머지에 대한

표 6. 다중회귀분석의 입력변수 및 범위

입력변수(x_n)	범위	
	일축압축시험	삼축압축시험
시멘트혼합율(%) CC	2(-1) 4(-0.33) 6(0.33) 8(1)	0(-1) 2(-0.5) 4(0) 6(0.5) 8(1)
구속압(kPa) CP	-	50(-1) 100(-0.33) 200(1)
재령(day) CT	3(-1) 7(-0.68) 28(1)	0(-1) 7(-0.5) 28(1)
건조밀도(kN/m ³) DD	14.01(-1) ~ 17.96(1)	14.11(-1) ~ 18.2(1)
배수조건 DC	-	배수(0) 비배수(1)

표 7. 다중회귀분석을 이용한 강도추정에 대한 경험식

시험결과	단위	다중회귀분석의 편회귀계수 ($\alpha=0.05$)									R_{adj}^2	RMSE
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_{11}	a_{12}	a_{13}		
q_u	kPa	757.6	75.5	-54.1	80.9	-	-	-	531.7	-	0.869	129.9
q_f	kPa	1303	489	3.2	241.1	232.6	287.8	-	297	-	0.912	170.8
q_r	kPa	675.8	238.5	13.8	6.9	205.6	290.7	-	-	-	0.805	177.6
E_s	MPa	83.5	-58.9	-6.4	10.1	6.5	4.5	27.3	39.1	51.3	0.872	9.81

여 선형적으로 비례하는 값을 설정하였다.

본 연구에서는 고결된 하상모래에 대하여 배수 및 비배수조건의 삼축압축시험을 수행하였고 비배수조건에서 부의 과잉간극수압으로 인한 평균유효응력의 증가로 침투강도가 배수시험에 비하여 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러므로 질적변수로서 배수조건을 고려하였으며 배수시험의 경우 0 그리고 비배수조건의 경우 1을 설정하였다.

본 연구에서 수행한 고결된 모래의 강도시험결과를 바탕으로 표 6에서 주어진 입력변수와 시험 결과를 출력변수로 사용하여 다중회귀분석을 실시하였으며 기본적인 회귀식은 선형을 가정하여 식 (2)와 같은 회귀모델을 이용하였다.

$$y = a_0 + a_1 \cdot CC + a_2 \cdot CT + a_3 \cdot DD + a_4 \cdot CP + a_5 \cdot DC + a_{11} \cdot CC^2 + a_{12} \cdot CC \cdot CT + a_{13} \cdot CC \cdot DD \quad (2)$$

여기서, a_n 은 n 번째 입력변수에 대한 편회귀계수를 나타내며 a_0 는 상수를 나타낸다. 위의 회귀모델을 이용하여 구한 회귀방정식의 편회귀계수는 표 7에 제시되어 있으며 통계적으로 신뢰도 95%이상의 매우 유의한 것으로 평가된다.

각각의 회귀방정식은 입력변수의 범위에서 유효한 것으로 평가되며 모델의 정확성을 평가하기 위하여 조정결정계수를 이용하였다. 각 방정식의 조정결정계수는 0.805에서 0.912로 나타났으며 삼축압축시험에서 표준오차의 경우 탄성계수는 9.81MPa, 침투강도는 170.8kPa의 값을 나타내었다.

표 6에 나타난 입력변수들은 차원이 다르므로 편회귀계수를 이용하여 시멘트혼합율, 재령 및 건조밀도 등의 입력변수가 출력변수에 대한 기여도를 평가하는 것은 적합하지 않아 편회귀계수를 계수의 표준편차로 나눈 값을 사용하여 출력변수를 예측하는데 있어서 입력변수의 기여도를 평가하였다.

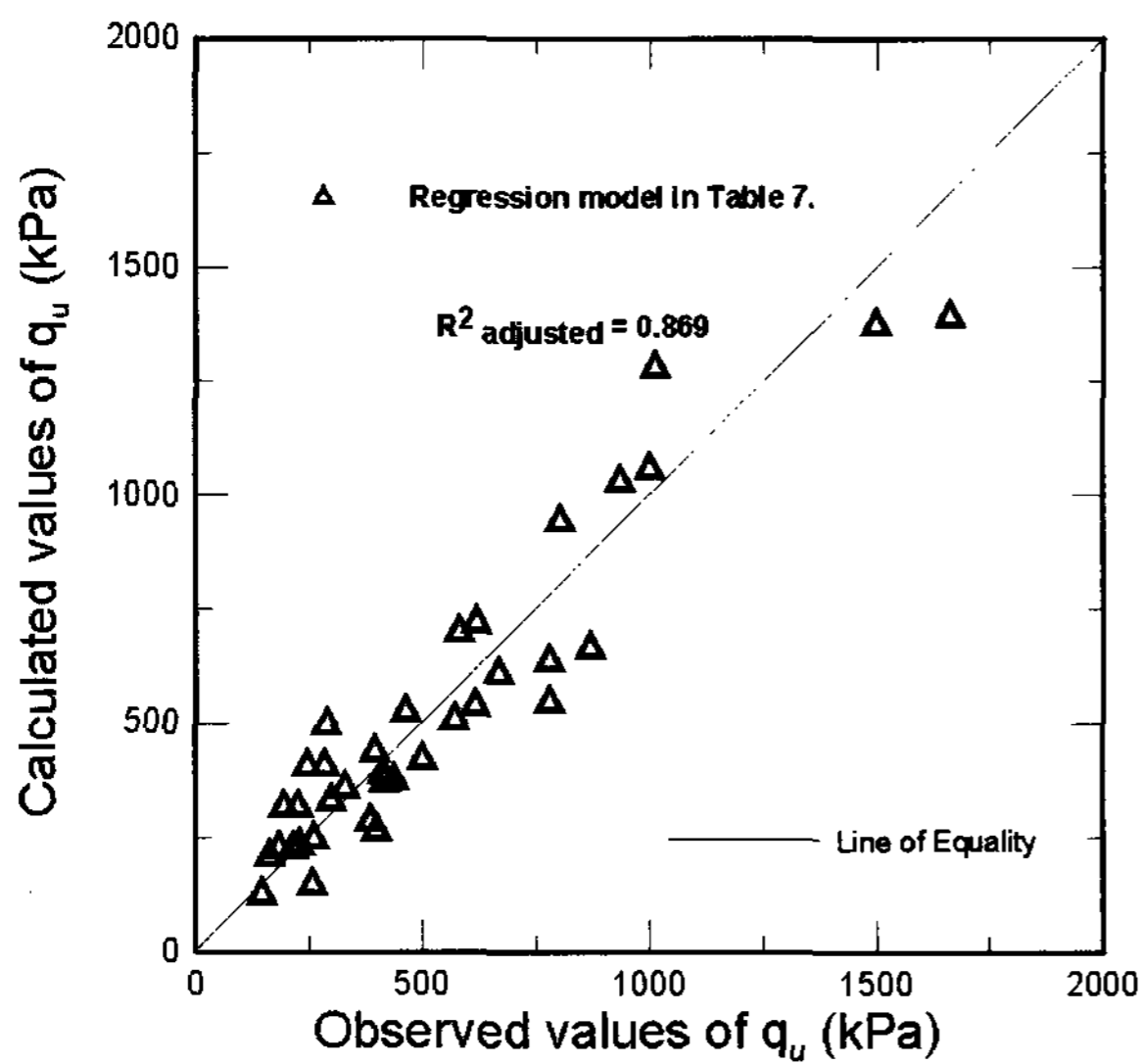
표 8은 다중회귀식에 대한 입력변수들의 기여도를 나타내고 있으며 일축압축강도의 경우 단일변수로서 건조밀도에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며 삼축압축시험에서 침두강도는 시멘트혼합율, 구속압 및 배수조건의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

잔류강도는 파괴후의 구속압 및 전단면의 상태에 영향을 받는 것으로 판단되며 건조밀도의 영향은 적은 것으로 나타났으며 탄성계수는 입력변수 모두에 대하여 영향을 받는 것으로 나타났다.

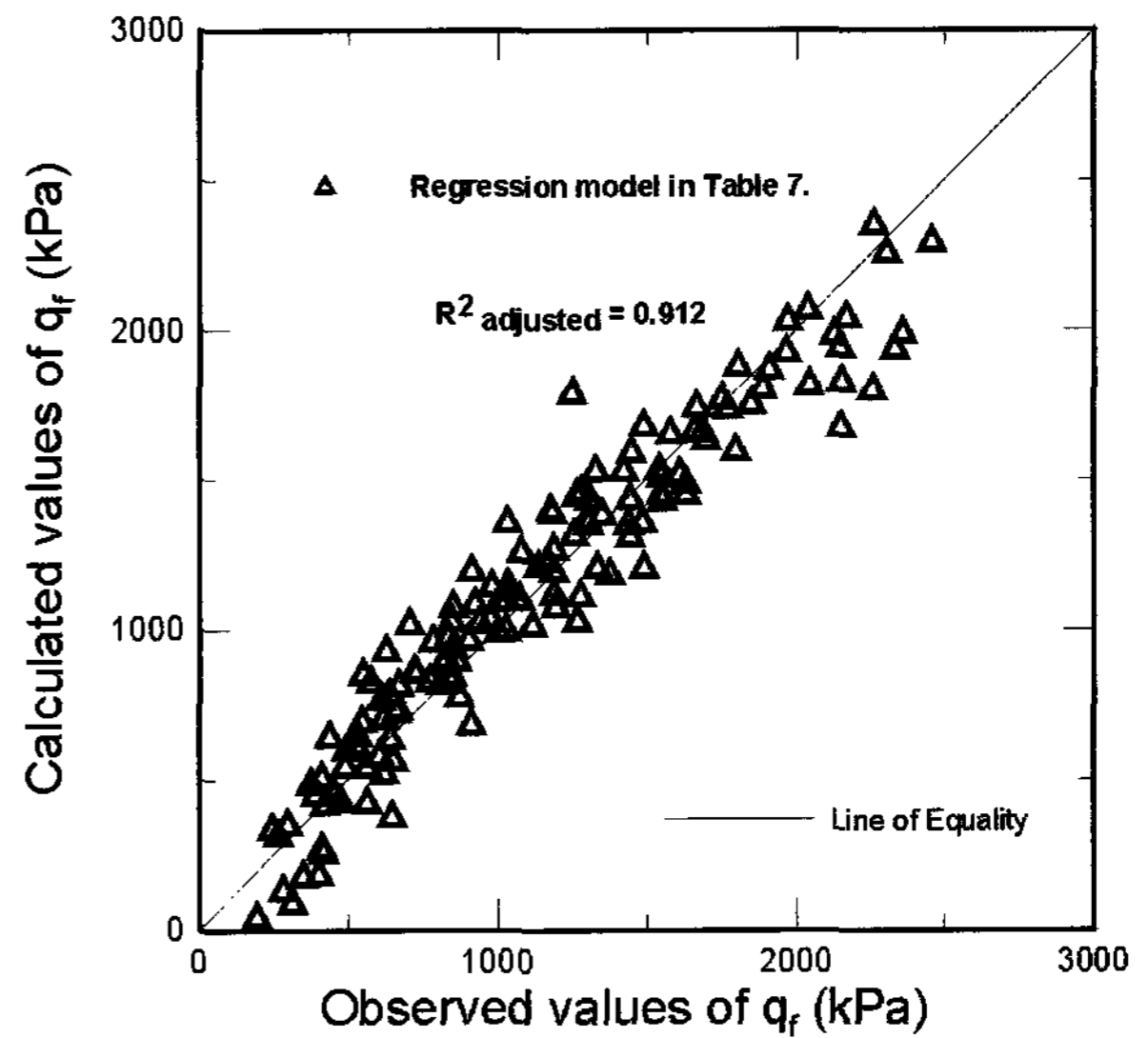
삼축압축시험에서 구한 강도는 구속압 및 배수조건

표 8. 다중회귀식에 대한 입력변수들의 기여도

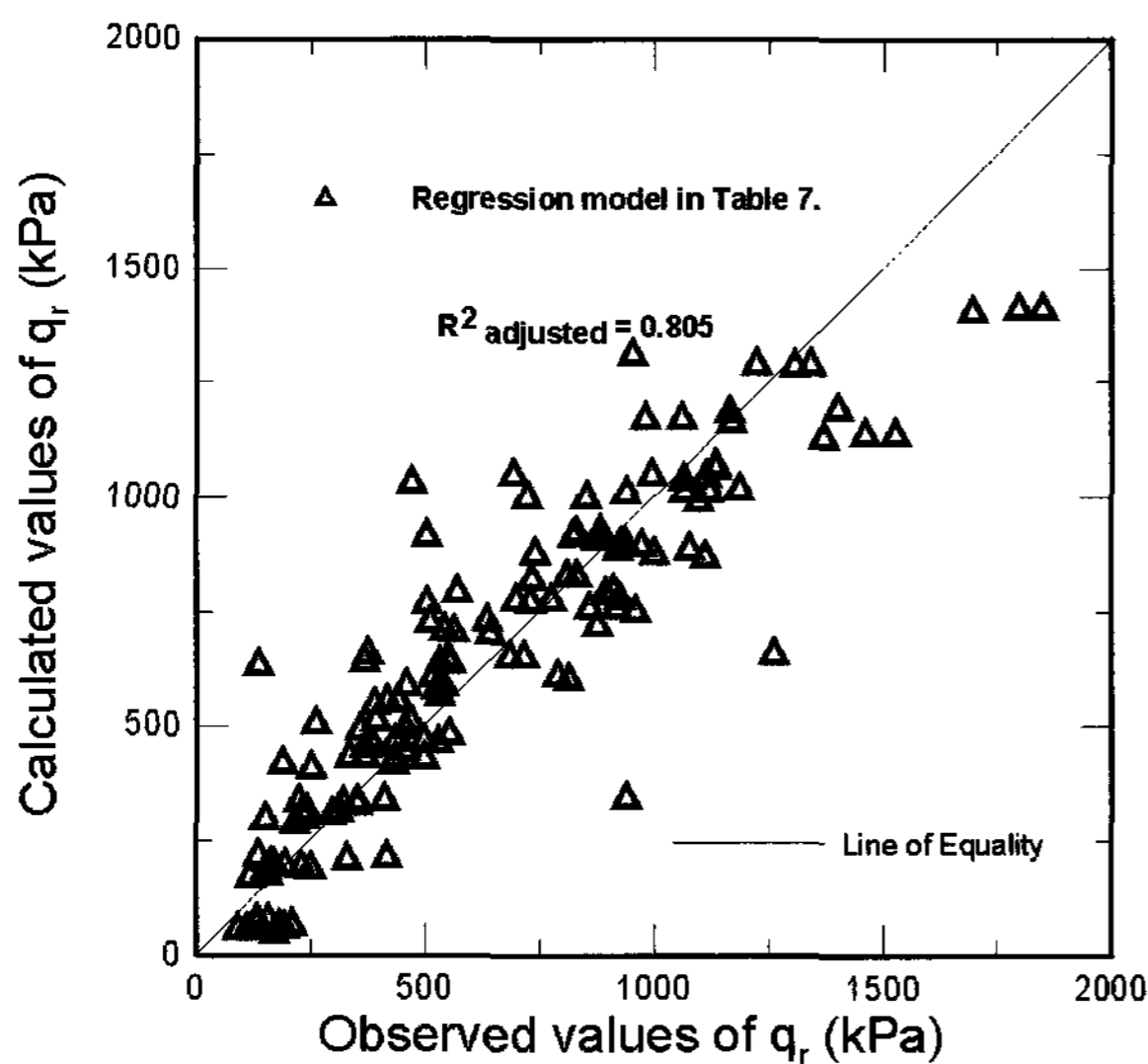
출력변수	입력변수들의 기여도 : t							
	CC	CT	DD	CP	DC	CC2	CC·CT	CC·DD
q_u	1.64	0.89	2.23	-	-	-	5.51	-
q_r	15.03	0.91	8.11	13.08	19.71	-	4.35	-
q_r	9.61	0.71	0.23	11.12	19.16	-	-	-
E_s	2.85	2.67	3.07	6.38	5.39	5.23	9.36	2.19



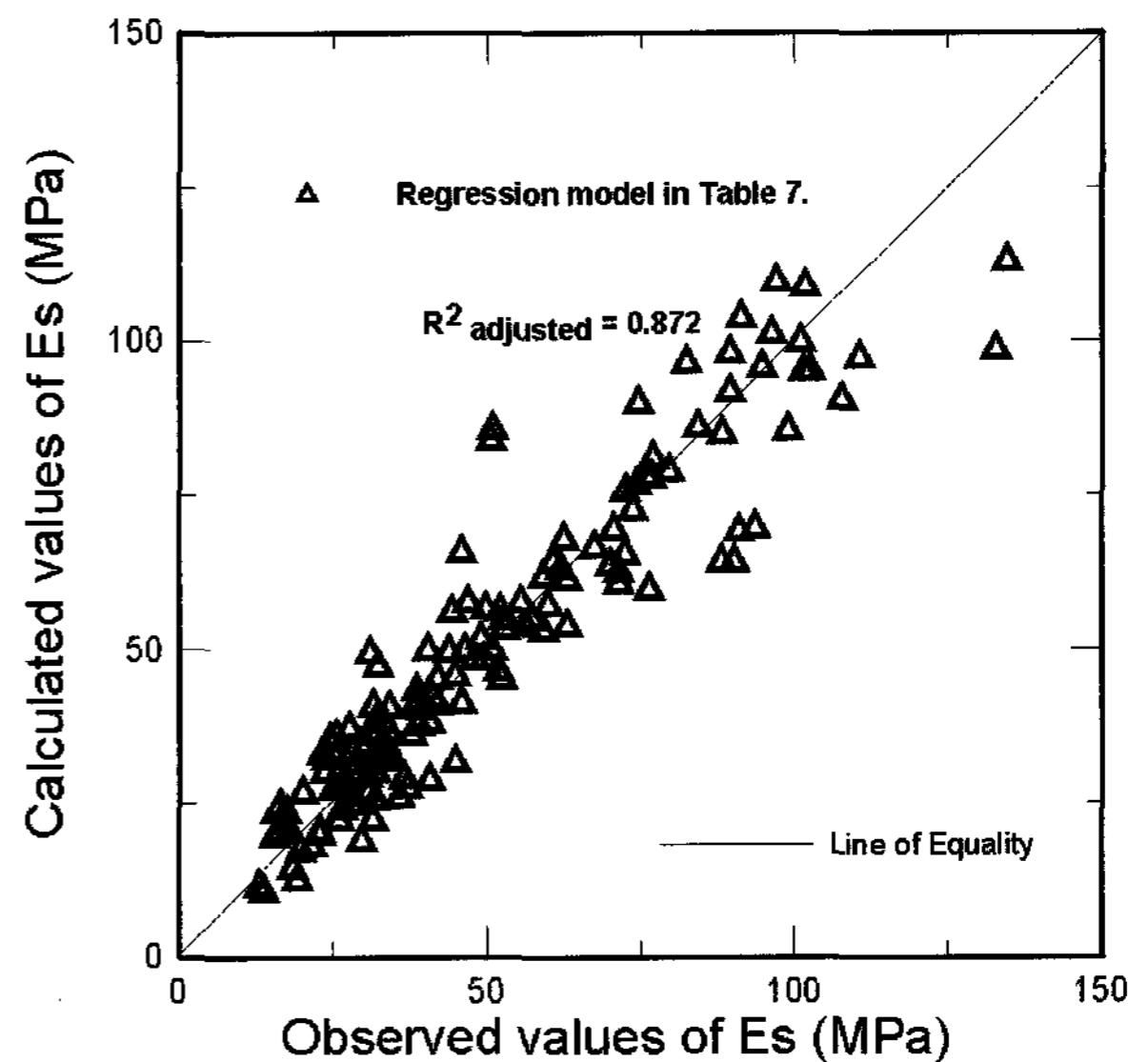
(a) 일축압축강도



(b) 침두강도



(c) 잔류강도



(d) 탄성계수

그림 13. 경험식에 의한 예측치와 실측치의 관계

에 크게 가장 영향을 많이 받는 것으로 나타났는데 평균 유효응력에 따른 강도증가가 원인인 것으로 판단된다.

그림 13은 다중회귀분석에 의한 경험식으로 구한 강도의 예측치와 시험치를 비교한 것이다. 침투강도의 경우 예측치와 시험치의 편차가 크게 나타나지 않는 반면 잔류강도의 경우 예측치와 시험치의 편차가 크게 나타나고 있으며 시멘트의 결합력이 붕괴된 후의 전단면의 거칠기의 불확실성으로 인하여 예측의 정도가 낮은 것으로 판단된다.

일반적으로 고결된 모래의 경우 시멘트혼합물의 관점에서 연구가 진행되어 왔으나 시멘트혼합물이 강도 특성 즉, 고결의 정도를 설명하기에는 부족하며 이외에 밀도, 하상모래입자의 형태, 광물입자 및 시멘트의 특성 등의 여러 가지 요인들과 관련(Airey 1993, Gens and Nova 1993)이 있는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 삼축시험의 침투강도를 추정하기 위한 새로운 변수로 여러 가지 요인을 포함하고 간단한 실험을 통하여 결정할 수 있는 변수로서 일축압축강도의 적용성을 평가하였다.

삼축압축시험에서 구한 강도를 추정하기 위하여 일

축압축강도, 구속압 및 배수조건을 입력변수로 사용하여 다중회귀분석을 수행한 결과는 표 9와 같다. 즉, 일축압축강도를 이용한 삼축압축시험의 침투강도는 식 (3)과 같다.

$$q_f = 768.537 \cdot q_u + 233.78 \cdot CP + 284.828 \cdot DC + 1184.602 \quad (3)$$

입력변수 가운데 일축압축강도의 기여도가 가장 크게 나타났으며 각각의 독립변수들은 매우 유의한 것으로 나타났다.

삼축압축시험에서 구속압이 크게 증가할 경우 소량의 시멘트에 의한 입자간 고결의 붕괴로 인하여 시멘트의 고결효과는 감소하므로 본 연구에서 제시된 경험식은 시험조건의 범위내에서 강도의 추정이 가능하다(Malandraki and Toll 2000).

그림 14는 표 7에서 제시한 경험식과 표 9에서 제시한 일축압축강도를 이용한 경험식을 비교한 것으로 일축압축강도를 입력변수로 사용한 경험식의 조정결정계수값이 약 0.88로 나타났다.

5. 결론 및 요약

본 연구에서는 시멘트의 고결효과를 정량적으로 파악하기 위하여 낙동강하상모래에 소량의 포트랜드시멘트를 혼합한 고결된 모래에 대하여 일축압축시험 및 배수조건과 비배수 조건의 삼축압축시험을 수행하였다. 일축압축시험의 결과 시멘트혼합물 및 재령의 증가에 따라 일축압축강도가 증가하였으며 시멘트혼합물 6~8%에서 7일간 양생한 공시체에 대한 압축강도는 500.7~867.4kPa로서 균등입도의 영향으로 양입도 흙에 비하여 작았다.

삼축압축시험의 결과 배수조건의 경우 고결된 모래의 거동은 침투강도 이후 연화거동을 보인 후 취성파괴를 일으키며 시멘트혼합물이 증가할수록 고결작용의 효과가 크게 나타나 연화구간의 길이는 짧아지며 연화구간의 기울기인 연화율은 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 체적의 변화는 시멘트혼합물이 증가함에 따라 시멘트의 고결작용이 입자들의 이동을 구속하여 수축량은 감소하지만 항복 후 팽창량은 증가하는 것으로 나타났다.

전단변형에 따른 팽창의 경우 하상모래는 시멘트의 고결력이 존재하지 않아 시료전체가 소성파괴에 도달할 때 팽창량은 하상모래의 입도에 영향을 받지만 고결

표 9. 일축강도를 이용한 삼축강도 추정의 경험식

입력 변수	비표준화계수		표준화계수	t	유의 확률
	계수	표준오차	Beta		
(Constant)	1184.602	17.467		67.818	.000
QU	768.537	30.739	.751	25.002	.000
CP	233.780	20.963	.335	11.152	.000
DC	284.858	17.226	.497	16.537	.000

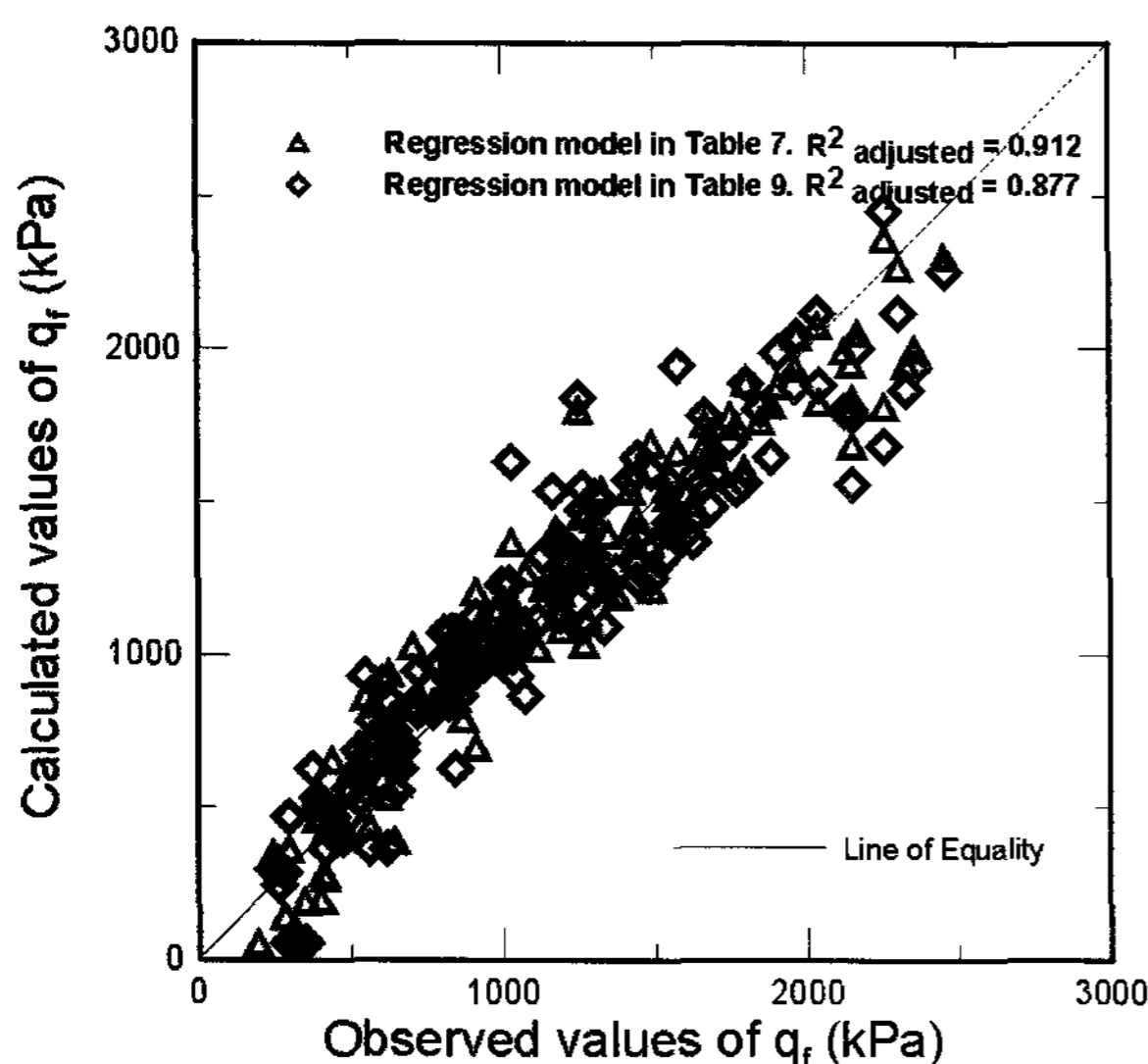


그림 14. 일축강도를 이용한 삼축강도의 예측

된 모래의 경우 모래입자표면에 시멘트가 결합하여 증가된 입자 크기로 인하여 팽창량은 하상모래에 비하여 크게 나타난 것으로 판단된다.

비배수조건에서 고결된 모래의 전단거동은 초기항복 이후 잔류상태로 도달하기 전 부(-)의 과잉간극수압에 의하여 증가된 평균유효응력으로 인하여 배수조건에 연화구간은 나타나지 않고 침투강도까지 증가양상을 나타내어 변형에 따른 경화거동을 나타내었다.

강도시험의 결과를 바탕으로 고결된 모래의 압축강도에 영향을 미치는 요인들에 대한 분석과 경험식의 수립을 위하여 다중회귀분석을 실시하였다. 입도조건들의 상관성은 매우 크게 나타나 0.977이상의 상관계수값을 나타내었으며 건조밀도를 고려할 경우 입도조건도 동시에 고려할 수 있었다. 시멘트혼합율, 재령 및 건조밀도를 변수로 하여 일축압축강도, 삼축압축시험의 침투강도, 잔류강도 및 탄성계수에 대하여 다중회귀분석의 결과 조정결정계수가 0.81~0.91로 나타났다.

고결된 모래에서 시멘트혼합율에 따른 건조밀도의 증가로 건조밀도가 시멘트혼합율보다 일축압축강도에 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났으며 잔류강도의 경우 예측치와 시험치의 편차가 크게 나타난 것은 시멘트의 고결력이 붕괴된 후의 전단면 거칠기의 불확실성에 의해 예측의 정도가 낮은 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김기영 (2006), "CSG공법의 실내 배합설계", *한국지반공학회는 논문집*, 제 22권 5호, pp.27-37.
2. 이우진, 이문주 (2006), "고결에 따른 모래의 비배수 전단거동 변화", *한국지반공학회는논문집*, 제 22권 4호, pp.85-94.
3. 한국수자원학회 (2002), 하천설계기준해설.
4. Airey, D. W. (1993), "Triaxial Testing of Naturally Cemented Carbonate Soil", *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol.119, No.11, pp.1379-1398.
5. 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.*
6. Black, D. K., Lee, K. L. (1973), "Saturating laboratory samples by back pressure", *J. Soil Mechanics & Foundation Division ASCE*, Vol.99, No.SM1, Paper9484, pp.75-93
7. Clough, G. W., Iwabuchi, J., Rad, N. S., Kuppusamy, T. (1989), "Influence of cementation on liquefaction of sands", *ASCE*, Vol.115, No.8, pp.1102-1117.
8. Gens, A., and Nova, R. (1993), Conceptual bases for a constitutive model for bonded soils and weak rocks. *In Geotechnical engineering of hard soils-soft rocks*, pp.485-494.
9. Huang, J. T., Airey, D. W. (1998), "Properties of Artificially Cemented Carbonate Sand", *ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.124, No.6, pp.482-499.
10. Ismail, M. A., Joer, H. A., Randolph, M. F., Meritt, A. (2002), "Cementation of porous materials using calcite", *Geotechnique*, Vol.52, No.5, pp.313-324
11. Ladd, R. S. (1978), "Preparing Test Specimens Using Undercompaction", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.1, No.1, pp.16-23.
12. Malandraki, V., Toll, D. G. (2000), "Drained probing triaxial tests on a weakly bonded artificial soil", *Geotechnique*, London, 50(2), 141-151.
13. Mitchell (1986), Lectures notes on soil and site improvement, *Department of Civil Engineering, University of California.*
14. Skempton, A. W. (1954), "The pore pressure coefficients A and B", *Geotechnique*, London, Vol.4, pp.143-147.
15. Sowers (1979), *Introductory Soil Mechanics and Foundation, Geotechnical Engineering*, 4th Edition, Macmillan Company, New York, N.Y.
16. 建設省土木研究所 (1996), 淀川堤防破壊實驗, 建設省直轄工事 第14會技術研究報告.

(접수일자 2007. 12. 6, 심사완료일 2008. 4. 10)