한국지반공학회논문집 제24권 12호 2008년 12월 pp. 53 ~ 63

고결모래의 콘선단저항과 변형계수의 관계

Relation between Cone Tip Resistance and Deformation Modulus of Cemented Sand

이 문 주[1] Lee, Moon-Joo　　최 성 근[2] Choi, Sung-Kun
추 현 욱[3] Choo, Hyun-Wook　　이 우 진[4] Lee, Woo-Jin

Abstract

In this study, the cone tip resistances of cemented sand are measured by performing a series of miniature cone penetration tests in large calibration chamber, and the relations with constrained modulus, unconfined compressive strength, and shear strength of cemented sand are suggested. Experimental results show that both the cone tip resistance and constrained modulus of sand increase with increasing cementation effect as well as relative density and confining stress. However, it is observed that the relative density and confining stress have more significant influence on cone tip resistance than constrained modulus of cemented sand. Since the cone penetration into the ground induces the damage of cementation, the cone tip resistance can't properly reflect the cementation effect of sand. An analysis based on the constrained modulus shows that the measured cone tip resistance underestimates the deformation modulus of cemented sand by about 70~85%. In addition, this study establishes various relationships among the above soil properties from the regression analysis.

요 지

본 연구에서는 대형 챔버시험을 통해 결정된 고결모래의 콘선단저항과 고결모래의 횡방향구속 변형계수, 일축압축강도, 전단강도와의 관계를 검토하였다. 시험결과 모래의 상대밀도나 연직구속압 뿐만 아니라 고결효과가 커질수록 콘선단저항과 횡방향구속 변형계수가 증가하였다. 모래의 횡방향구속 변형계수는 상대밀도나 연직구속압보다 고결의 영향이 더 크게 작용하며, 반면 콘선단저항은 변형계수보다 상대밀도나 연직구속압의 영향이 더 크게 나타났다. 고결결합 미파괴 상태로 간주될 수 있는 일축압축강도, 전단강도, 횡방향구속 변형계수와는 달리 콘선단저항은 고결결합을 파괴하며 측정되기 때문에, 고결모래의 변형계수를 70~85% 정도 과소평가하였다. 또한 본 연구에서는 회귀분석을 통해 고결모래의 콘선단저항과 전단강도의 관계, 콘선단저항과 일축압축강도의 관계, 그리고 횡방향구속 변형계수와 콘선단저항, 일축압축강도의 관계가 표현되었다.

Keywords : Cementation, Cone tip resistance, Constrained modulus, Shear strength, Unconfined compressive strength

1 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정 (Member, Ph.D Student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)
2 정회원, 공학박사, 전 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정 (Member, Formerly Ph.D Student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)
3 전 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정 (Formerly Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)
4 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서 론

사질토 지반에서의 콘관입시험은 콘선단저항(q_c)과 콘주면마찰(f_s)을 측정하여, 사질토의 상대밀도, 마찰각, 그리고 탄성계수나 전단탄성계수 등과 같은 각종 토질물성치를 추정하기 위해 시행되고 있다. 현재 사용되고 있는 콘선단저항이나 콘주면마찰과 토질물성치의 상관관계는 대부분 챔버시험(calibration chamber test)으로 확립되고 현장시험을 통해 검증된 것으로써, 입자가 단단하고, 입도분포가 균등하며, fine~medium의 입경을 가지는 정규압밀된 미고결 모래에 적용성이 뛰어나다. 일반적으로 사질토의 콘관입시험은 지반의 상대밀도와 구속응력의 영향이 지배적이며, 입도나 조성광물, 그리고 ageing이나 고결(cementation)과 같은 시간이력의 영향도 받는다. 따라서, Jamiolkowski 등(1985)은 상대밀도-유효응력으로 정규화한 콘선단저항의 관계가 반대수축 상에서 선형성을 나타내는 것을 이용하여 상대밀도와 압축성에 따른 정규화된 콘저항치를 제시하였으며, Kulhawy and Mayne(1990)는 압축성과 더불어 OCR과 ageing을 고려할 수 있는 관계식을 제안하였다.

최근 들어 입자사이에 고결유발물질이 침전하여 지반의 공학적 특성이 향상되는 고결효과에 대한 관심이 증가하면서, 고결이 사질토의 콘관입시험 결과에 미치는 영향에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다(Akili and Torrance 1981; Akili and Al-Joulani 1988; Akili 2006; Joshi 등 1995; Puppala 등 1995; Rad and Tumay 1986). 고결시료의 콘관입시험을 위한 대형 불교란 고결시료의 채취는 기술적, 경제적으로 어려울 뿐만 아니라, 다양한 매개변수 분석을 위한 균질한 시료를 다량으로 확보하는 것 또한 불가능하기 때문에, 고결모래의 콘관입시험에 대한 연구는 대부분 실내 챔버에 조성된 인위적인 고결시료에서 수행되었다. 그러나 모래의 고결결합은 미소변형에서 파괴되기 때문에, 콘관입 시 발생되는 고결결합의 파괴가 콘선단저항과 콘주면마찰에 미치는 영향에 대한 평가가 매우 어렵다. 또한 대부분의 선행연구에서는 다양한 고결 영향요인에 대한 검토과정이 다루어지지 않았으며, 고결이 모래의 콘선단저항에 미치는 영향을 대부분 정성적으로 평가하고 있다.

본 연구에서는 다양한 고결정도, 연직구속압, 상대밀도를 갖도록 대형 챔버에 조성된 고결시료에서 미니콘관입시험을 수행하여 고결시료의 콘선단저항을 측정하였다. 또한, 일차원 압밀시험을 통해 고결시료의 횡방향구속 변형계수를 결정하고, 별도로 조성한 고결시료에 대해 간단한 일축압축시험을 실시하여 고결시료의 전단강도를 추정하였다. 시험결과로부터 콘선단저항에 의한 고결모래의 변형계수 평가 가능성을 검토하고, 고결모래의 콘선단저항과 변형계수의 관계를 분석하였다. 또한 일축압축강도로부터 예측된 고결모래의 전단강도와 콘선단저항 및 변형계수의 관계를 평가하였다.

2. 고결모래의 콘관입시험에 대한 선행연구

자연상태 고결지반에서의 콘관입시험은 다양한 고결 영향요인에 대한 분석이 불가능하다. 따라서 고결모래의 콘관입시험에 대한 대부분의 연구는 실내 챔버에 인위적으로 고결시료를 조성하여 수행되었으며, 일반적으로 고결은 사질토의 콘선단저항과 콘주면마찰을 증가시키는 것으로 알려지고 있다(Akili and Torrance 1981; Akili and Al-Joulani 1988; Akili 2006; Joshi 등 1995; Puppala 등 1995; Rad and Tumay 1986). 그러나 Puppala 등(1993, 1995)의 연구를 제외한 대부분의 연구에서는 구속압 조절없이 콘관입시험을 수행하였기 때문에, 구속압이 고결모래의 콘관입시험에 미치는 영향은 평가되지 못하였다. Puppala 등(1993, 1995)은 비구속 상태에서 포틀랜드 시멘트로 시료를 고결시킨 후, 추가로 가해진 100~300kPa의 연직구속압에서 콘관입시험을 수행하여 연직구속압이 고결모래의 콘선단저항에 미치는 영향을 분석하였다. 시험결과로부터 연직구속압이 낮을수록 시료의 마찰보다 고결에 의한 점착력이 고결시료의 강도에 미치는 영향이 더 크기 때문에, 낮은 연직구속압에서 고결이 콘선단저항에 미치는 영향이 더 중요하다고 주장하였다.

3. 시험계획

본 연구의 시험은 크게 고결시료의 콘선단저항을 측정하기 위한 대형 챔버시험과 고결시료의 변형특성 분석을 위한 일차원 압밀시험, 그리고 모래의 전단강도 예측을 위한 일축압축시험으로 구성된다.

3.1 시료 기본특성

본 연구에 사용된 모래는 모암인 규석으로부터 인공적으로 파쇄된 석영질 모래로써, 입도분포와 기본물성

은 그림 1, 표 1과 같으며, 평균입경은 0.17mm이고 통일 분류법상 SP에 해당된다. 또한 전자주사현미경(SEM)을 통하여 관찰된 모래입자를 분석한 결과, 중간 모난(subangular) 정도의 조도를 갖는 것으로 나타났다. 모래의 고결을 위해 도자기형재용 석고(GM-10)을 사용하였으며, 물-석고비(표준혼수량) 40%로 혼합되어 습윤양생될 경우 20Mpa의 압축강도를 발현하고 양생시 팽창율은 0.03%이다.

3.2 대형 고결시료 조성 및 콘관입시험

3.2.1 시험장비

본 연구에서 사용된 챔버시스템(KUCCS)은 높이 1.0m, 직경 1.2m의 챔버셀과 하부 피스톤, 그리고 각종 관입시험을 위한 아답터가 연결된 상판으로 구성되어 있다. 횡방향 경계조건을 조절할 수 있도록 측면의 챔버셀은 이중벽으로 구성되어 있고, 응력은 챔버의 내측셀, 외측셀, 그리고 하부 피스톤과 연결된 제어판에서 조절한다. 챔버의 구성 및 작용원리는 Kim(2005)에 설명되어 있으며, 챔버시스템과 콘관입시험 모식도는 그림 2와 같다. 챔버시험에서는 자연의 퇴적상태에서 나타나는 흙의 조직과 유사한 시료를 다양한 상대밀도의 범위에서 전체적으로 균등하게 조성하기 위해 대부분 건조낙사법을 사용하고 있다. 이를 위해 본 연구에서는 Sweeney and Clough(1990), Puppala 등(1995)의 레이너 시스템을 KUCCS에 적합하게 개량하였다. 본 레이너 시스템은 모래시료 저장을 위한 직경 1.2m, 높이 1.0m의 상부 모래저장고(sand storage), 모래시료의 낙하율을 조절하기 위한 모래저장고 하부의 개폐판(shutter plate), 적정 낙하고를 제공하기 위한 extension tube, 시료의 균일한 낙하를 위한 분산체로 구성된다. 본 연구에 사용된 레이너 시스템은 최성근 등(2007)에 자세히 설명되어 있다.

챔버시스템에서 측정된 모래의 콘선단저항은 상대밀도, 수평응력, 챔버직경, 그리고 경계조건 등의 영향을 받으며, 챔버직경과 경계조건의 영향은 챔버와 콘의 직경비에 의해 평가된다. 현재까지 챔버-콘 직경비가 콘관입시험 결과에 미치는 영향에 대해 많은 연구가 수행되었다(Been 등 1986; Jamiolkowski 등 1985, 2003; Lunne and Christophersen 1983; Parkin and Lunne 1982). 일반적으로 시료의 상대밀도가 높고 구속압이 낮을수록 직경비와 경계조건의 영향은 증가하며(Salgado 등 1998), 낮은 상대밀도(Dr<30%)에서 직경비 20 이상, 높은 상대밀도(Dr>90%)의 경우 직경비 50 이상에서 경계조건이 콘관입시험 결과에 영향을 미치지 않는 것으로 알려지고 있다(Been 등 1986). KUCCS에 조성된 높은 상대밀도의 시료에 직경 3.57cm의 표준콘(직경비 33.6)을 적용할 경우, 콘관입시험이 경계조건의 영향을 받을 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 A.P.V.d. Berg사에서 제조한 직경 1.6cm의 미니콘(직경비 75)을 사용하였다.

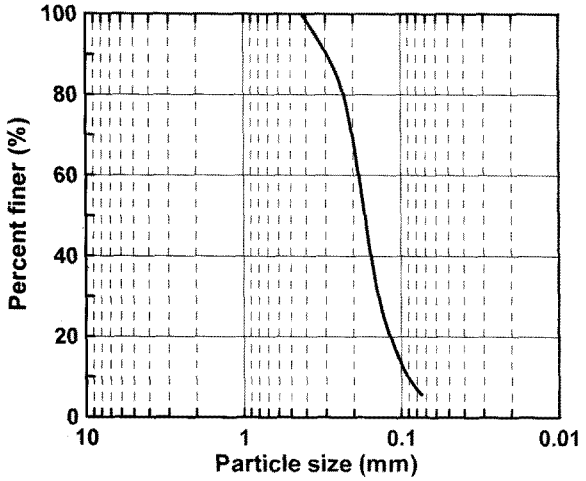

그림 1. 시험모래 입도분포

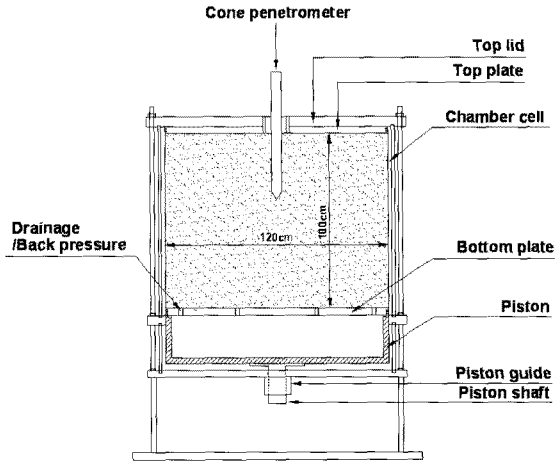

그림 2. 챔버시스템 (KUCCS)과 콘관입시험

표 1. 시험모래 기본물성

Gs	D_{10}(mm)	D_{50}(mm)	C_u	C_c	% fines	e_{max}	e_{min}	USCS
2.647	0.09	0.17	2.111	0.988	5.7	1.054	0.719	SP

3.2.2 시료조성 및 시험

레이너 시스템의 모래 낙하고와 개폐율, 그리고 porous plate의 장착유무를 조절하여 다양한 상대밀도의 미고결, 고결시료를 조성하였다. 균질한 고결시료 조성을 위해 0.5% 함수비로 표면을 습윤시킨 모래시료와 석고를 교반하여 석고입자를 모래표면에 부착시켜 낙사함으로써, 석고와 모래입자의 낙하속도차에 의한 재료분리를 최소화하였다(Rad and Tumay 1986; Puppala 등 1995; 이문주 등 2008b). 일반적인 세립분 포함 모래시료나, 건조상태 모래와 석고 혼합시료와는 달리, 습윤상태 모래와 석고의 혼합시료는 모래 표면에 흡착된 석고입자로 인해 표면의 거칠기가 증가하여 최대/최소 간극비가 증가하였다(이문주 등 2008b). 시험결과, 동일한 낙하고와 개폐율을 적용할 경우, 모래-석고 혼합시료는 일반 모래보다 낮은 상대밀도로 조성되는 것이 확인되었다.

낙사가 완료된 시료의 초기 상대밀도를 측정하고, 시료 상부에 상부 플레이트 및 챔버셀을 조립한 후, 50~400kPa의 다양한 연직구속압을 가하였다. 가압에 의한 변위를 보정하여 조성된 시료의 최종 상대밀도를 결정하였다. 고결시료의 경우 시료 하부에 30kPa의 주입압으로 탈기수를 주입한 후, 24시간 양생시켰다. 이러한 방법으로 조성된 시료의 균질성은 이문주 등(2008b)에서 확인되었다. 전체적인 시료조성 및 콘관입시험 조건은 표 2와 같다. 고결시료의 고결정도는 모래와 혼합되는 석고함유율(Cg)을 5, 7, 10%로 달리하여 조절하였다. 또한 각 석고함유율마다 3가지 상대밀도로 시료를 조성하고, 시료조성 후 50, 100, 200kPa의 다양한 연직구속압 가함으로써, 모래의 콘선단저항에 미칠 수 있는 다양한 영향요인을 고려하였다.

일반적으로 챔버에서 수행되는 사질토의 콘관입시험 결과는 시료의 포화여부에 의한 영향이 미미한 것으로 알려져 있다(Schmertmann 1976, Baldi 등 1981). 따라서 본 연구에서는 미고결 시료의 경우 건조상태에서 시험을 수행하였으며, 고결시료의 경우 양생완료 후 포화상태에서 시험을 수행하였다. 콘 관입속도는 2cm/sec로 일정하게 유지되었다.

표 2. 조성된 챔버시료 조건

시험 시료	석고함유율 Cg (%)	상대밀도 Dr (%)	연직구속압 σ_v' (kPa)	시료 개수
미고결	0	33 ~ 82	50, 100, 200, 400	28
고결	5	36 ~ 41	50, 100, 200	9
		57 ~ 59		
		74 ~ 77		
	7	36 ~ 38	50, 100, 200	9
		51 ~ 55		
		63 ~ 66		
	10	21 ~ 26	50, 100, 200	9
		38 ~ 40		
		52 ~ 56		

3.3 일축압축강도와 변형계수 측정

3.3.1 일축압축시험

흙의 상대밀도나 입자특성 등을 포함하여 모래의 고결정도에 영향을 미치는 요인은 매우 다양하기 때문에, 모래에 포함된 고결유발제 함유율은 고결정도를 적절히 반영할 수 없다. 따라서, Rad and Clough(1982), Schnaid 등(2001), Ismail 등(2002), 그리고 Consoli 등(2007)은 일축압축강도로부터 고결정도를 결정하였다. 국내의 경우, 이문주 등(2007), 김기영 등(2005)이 각각 석고 및 포틀랜트 시멘트로 고결된 시료의 강도특성을 일축압축강도로 평가하였다. 본 연구에서도 조성된 시료의 고결정도를 일축압축강도로부터 결정하였다. 모래-석고 혼합시료를 직경 70mm의 몰드에 높이 150mm로 조성하고 200kPa의 상재구속압을 가한 뒤, 시료의 하부로부터 증류수를 주입하여 일축압축강도 평가를 위한 시료를 조성하였다. 24시간동안 시료를 양생한 후, 0.5%/min의 변형율 속도로 일축압축시험을 수행하였다. 자연상태에서는 선행 상재하중이 가해진 지반에 고결이 발생하지만, 일반적인 삼축압축시험에서는 압밀단계에서 고결결합력보다 큰 구속압이 가해질 경우 고결결합이 파괴되기 때문에 다양한 구속압에 따른 고결모래의 전단강도를 평가할 수 없다. 따라서 Schnaid 등(2001)과 이문주 등(2008a)은 이론적인 검토와 실험적인 검증을 통해 등방구속압이 가해졌으나 고결결합력이 파괴되지 않은 상태의 전단강도를 식 1과 같이 예측하였다. 여기서, $q_{f(cs)}$는 등방구속압 p_i' 상태에서 고결모래의 배수전단강도, $q_{f(us)}$는 등방구속압 p_i' 상태에서 미고결 모래의 배수전단강도이며, q_{ucs}는 고결모래의 일축압축강도이다. 또한, Φ'는 모래의 내부마찰각으로써 고결은 모래의 마찰각에 영향을 미치지 않는 것으로 알려지고 있다(Dupas and Pecker 1979; Clough 등 1981; Consoli 등 2000; Schnaid 등 2001; 이문주 등 2007). 본 연구에서도 고결모래의 전단강도를 식 1로 예측하여 고결모래의 콘선단저항이나 변형계수와 비교하였다.

$$q_{f(cs)} = q_{f(us)} + q_{ucs} = \frac{2\sin\phi'}{1-\sin\phi'} p_i' + q_{ucs} \quad (1)$$

3.3.2 일차원 압밀시험

횡방향구속 변형계수(M)은 지반의 변형특성을 나타내는 간단하면서도 효과적인 지반정수이다. 따라서 Baldi 등(1986), Robertson and Campanella(1983), Lunne and Christophersen(1983)은 콘선단저항과 횡방향구속 변형계수의 관계를 평가하였고, Marchetti(1980), Baldi 등(1988)은 딜라토미터 계수(E_D)로부터 흙의 횡방향구속 변형계수를 추정하였다. 본 연구에서도 고결모래의 횡방향구속 변형계수를 측정하여 콘선단저항과의 관계를 평가하였다.

콘관입시험은 관입되는 콘주변의 고결결합을 파괴하기 때문에, 콘관입시험이 완료된 챔버시료의 하중-침하량 관계는 고결시료의 합리적인 변형계수를 반영할 수 없다. 따라서 챔버시료와 동일한 조건으로 소형 압밀셀(D=74mm, H=45mm)에 별도의 고결시료를 조성하여 횡방향구속 변형계수(M)을 측정하였다. 압밀셀에 모래-석고 혼합시료를 낙사시키고 목표 연직구속압까지 재하한 후, 시료의 하부로 증류수를 유입하여 시료를 고결시켰다. 24시간 양생 후, 연직구속압을 25kPa씩 증가시키며 하중-침하관계를 측정하고, 각 고결시료의 횡방향구속 변형계수를 결정하였다. 미고결 시료의 경우, 각 상대밀도별도 시료를 조성한 후, 500kPa까지 연직하중을 가하여 측정된 하중-침하관계로부터 횡방향구속 변형계수를 평가하였다.

4. 시험결과

4.1 고결모래의 콘선단저항에 미치는 영향요인

그림 3은 챔버에서 측정된 미고결 또는 고결된 K-7호사의 콘관입시험 결과이다. Puppala 등(1995)의 결과와 마찬가지로 상하부 강성판의 영향으로 시료 상하부의 콘선단저항이 시료중앙보다 크게 측정되었다. 또한 동일 상대밀도일지라도 시료의 고결정도가 높을수록 상부 강성판의 영향이 크게 나타났으며, 이는 고결정도가 커질수록 콘관입시 시료의 팽창경향이 증가하기 때문으로 판단된다. 본 연구에서는 30~60cm 깊이의 결과로부터 각 시료의 콘선단저항을 결정하였다.

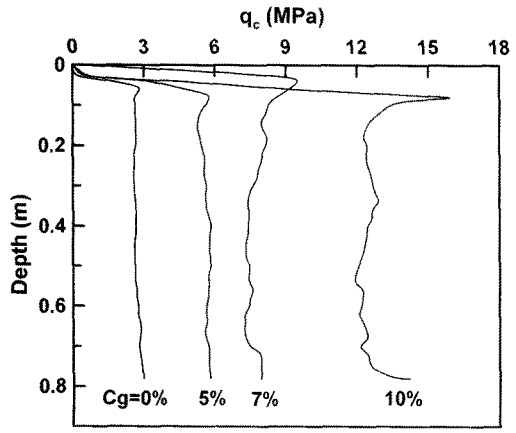

그림 3. 시료 깊이에 따른 콘선단저항 분포(Dr≈40%, σ_v'=100kPa)

그림 4는 일련의 콘관입시험으로부터 결정된 상대밀도와 연직구속압에 따른 각 고결모래의 콘선단저항이다. 미고결 모래와 마찬가지로, 고결모래에서도 상대밀도와 연직구속압이 증가할수록 고결모래의 콘선단저항이 증가하였다. 일반적으로 모래의 상대밀도와 콘선단저항은 반대수상에서 선형관계로 식 2와 같이 표현된다(Jamiolkowski 등 1985, Baldi 등 1986). 여기서, D_r(%)은 모래의 상대밀도이고, q_c와 σ_{v0}'은 kPa 단위로 표현되는 콘선단저항과 유효연직구속압이다. 또한 C_0, C_1, C_2는 경험적으로 결정되는 상수이다.

$$D_r = \frac{1}{C_2} ln\left[\frac{q_c}{C_0(\sigma_{v0}')^{C_1}}\right] \quad (2)$$

콘관입시험 결과로부터 석고함유율에 따른 K-7호사의 경험상수 C_0, C_1, C_2를 표 3과 같이 결정하였다. 시료의 석고함유율이 증가할수록 상수 C_0는 급격히 증가한 반면, C_1은 점차 감소하였다. 또한 모든 시료에서 상수 C_2는 지반의 고결여부 및 고결정도에 관계없이 거의 유사하게 결정되었다. 고결에 의해 상수 C_0가 급격히 증가

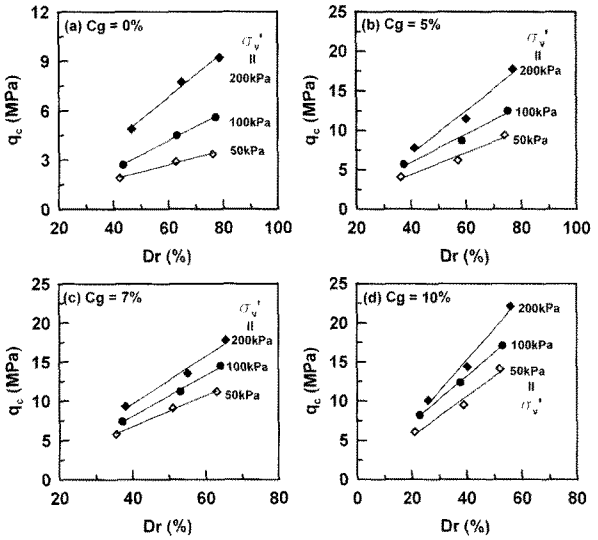

그림 4. 미고결, 고결모래의 콘선단저항

표 3. K-7호사의 콘선단저항-상대밀도 관계에서의 경험적 상수

석고함유율 Cg (%)	C_0	C_1	C_2	R_2
0	61.6	0.65	0.0212	0.88
5	390.9	0.40	0.0218	0.99
7	852.9	0.29	0.0233	0.99
10	1280.5	0.26	0.0262	0.99

표 4. 각 고결시료의 일축압축강도와 고결정도

석고함유율 Cg (%)	5			7			10		
상대밀도 Dr (%)	40	60	80	40	60	80	25	40	60
일축압축강도 q_{ucs} (kPa)	86	132	160	231	278	325	334	431	517
고결정도	Very weak ~ Weak			Weak			Moderate		

하는 것은 동일 상대밀도인 미고결 모래에 비해 고결모래의 콘선단저항이 크게 결정됨을 의미한다. 반면, 고결정도가 증가할수록 C_1이 감소하는 것은 연직구속압이 고결모래의 콘선단저항 증가에 미치는 영향은 미고결 모래에 비해 적음을 의미한다.

고결모래의 경우, 고결결합에 의한 점착력의 증가효과로 인해 강도 및 변형특성이 향상되기 때문에 동일한 상대밀도와 구속압에서 고결시료와 미고결 시료의 강도 비로써 고결정도를 간접적으로 표현하기도 한다 (Puppala 등 1995). 따라서 고결모래의 콘선단저항에 영향을 미치는 영향요인인 석고함유율, 상대밀도, 연직구속압의 영향을 분석하기 위해 그림 5와 같이 동일한 상대밀도와 연직구속압 상태의 미고결 모래의 콘선단저항($q_{c(us)}$)과 고결모래의 콘선단저항($q_{c(cs)}$)을 비교하였다. 5% 석고함유율은 미고결 모래의 콘선단저항에 비해 고결모래의 콘선단저항을 1.7~2.5배 증가시켰으며, 7%, 10% 석고함유율은 각각 2.2~4.0, 3.2~6.8배 증가시켰다. 연직구속압이 증가할수록 미고결 모래의 콘선단저항에 대한 고결모래의 콘선단저항은 점차 감소하였다. 이와 같은 결과는 고결모래보다 미고결 모래의 콘선단저항이 연직구속압에 의해 더 큰 영향을 받음을 의미하고, Puppala 등(1995)의 결과와 일치한다. 따라서 사질토의 고결은 얕은 기초와 같이 낮은 연직구속압 상태의 구조물 거동에 큰 영향을 미치며, 깊이에 따른 구속압의 증가는 고결의 영향을 상쇄시키는 것으로 분석된다. 동일 석고함유율에서 상대밀도가 증가할수록 고결모래의 콘선단저항이 다소 증가하였으며, 석고함유율이 증가할수록 경향이 뚜렷하였다. 그러나 상대밀도의 증가가 고결모래의 콘선단저항 증가에 미치는 영향은 석고함유율이나 연직구속압의 영향보다 미미하였다.

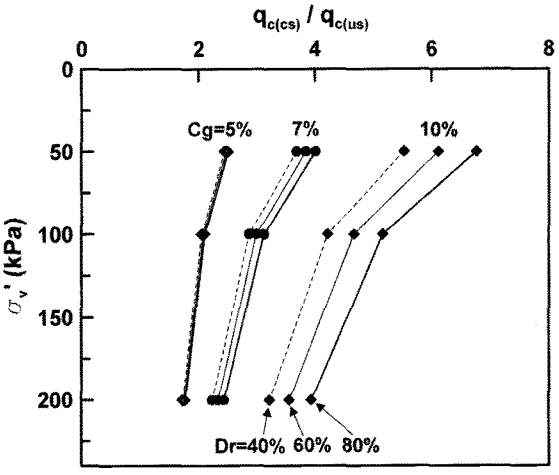

그림 5. 고결모래의 콘선단저항에 미치는 석고함유율, 상대밀도, 연직구속압의 영향

4.2 고결모래의 일축압축강도와 변형계수

표 4는 고결정도와 상대밀도에 따른 각 고결시료의 일축압축강도로써, 상대밀도와 석고함유율이 증가할수록 고결모래의 일축압축강도 또한 증가하였다. 일축압축강도로 고결정도를 평가한 Rad and Clough(1982)의 기준을 적용할 경우, 5% 고결모래의 고결정도는 매우 약한 고결 ~ 약한 고결이며, 7% 고결모래와 10% 고결모래는 각각 약한 고결과 중간 고결정도로 구분된다.

그림 6은 일차원 압밀시험으로 측정된 미고결 K-7호사와 고결된 K-7호사의 하중-간극비 곡선이다. 미고결 모래의 경우, 연직구속압이 증가할수록 시료의 간극비가 지속적으로 감소하였다. 반면 고결모래의 경우, 하중에 의한 고결결합의 파괴로 인해 시료의 간극비가 급격히 감소하는 항복점(yielding point)이 뚜렷이 발생하며, 미고결 모래에 비해 항복이전까지 하중에 대한 강성이 크게 나타난다. 본 연구에서는 항복점까지의 하중-침하

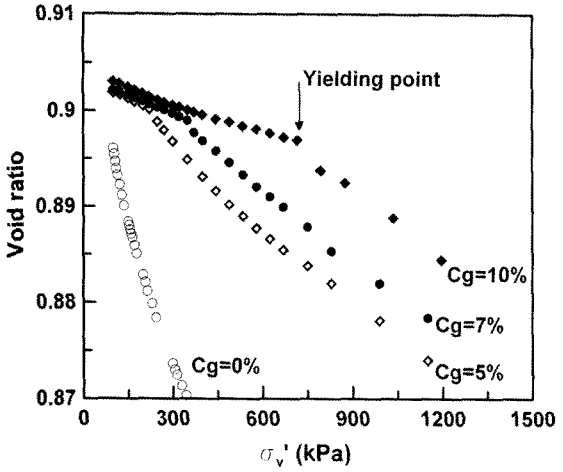

그림 6. 고결, 미고결 모래의 일차원 압밀시험 결과(Dr ≈ 40%)

관계로부터 고결모래의 횡방향구속 변형계수를 결정하였다. 시험에 의해 결정된 K-7호사의 횡방향구속 변형계수는 그림 7과 같다. 상대밀도, 연직구속압 및 고결정도가 증가할수록 K-7호사의 변형계수가 증가하였으며, 각 시료의 변형계수는 상대밀도의 증가에 의해 비교적 선형으로 증가하였다. 고결된 K-7호사의 횡방향 변형계수는 동일 상대밀도와 연직구속압 조건의 미고결 상태 시료보다 5.4~26.3배 크게 나타났다.

5. 결과분석 및 토론

5.1 고결모래의 콘선단저항, 변형계수와 전단강도의 관계

각 고결시료의 일축압축강도로부터 고결모래의 전단강도를 예측하여 고결모래의 콘선단저항과 비교하였다. 고결된 K-7호사의 실험결과로부터, 미고결 모래의 콘선단저항($q_{c(us)}$)과 전단강도($q_{f(us)}$)에 대한 고결모래의 콘선단저항($q_{c(cs)}$)과 전단강도($q_{f(cs)}$)의 비가 그림 8과 같이 표현되었다. 시료의 고결정도가 증가할수록 전단강도비와 콘선단저항비가 모두 증가하였으나, 콘선단저항비보다 전단강도비의 증가율이 크게 나타난다. 이는 고결모래의 전단강도는 구속압에 의해 고결결합이 파괴되지 않은 상태에서 측정되므로 고결의 효과가 전단강도의 증가에 반영된 결과이다. 그러나, 연직구속압이 고결모래의 콘선단저항에 미치는 영향은 전단강도에 비해 적을 뿐만 아니라 콘관입으로 인해 고결결합이 손상되어 고결의 영향이 콘선단저항에 명확히 반영되지 않았기 때문이다. 그림 8로부터 전단강도와 콘선단저항 증가비에 대해 식 3과 같은 회귀분석식이 결정되었다.

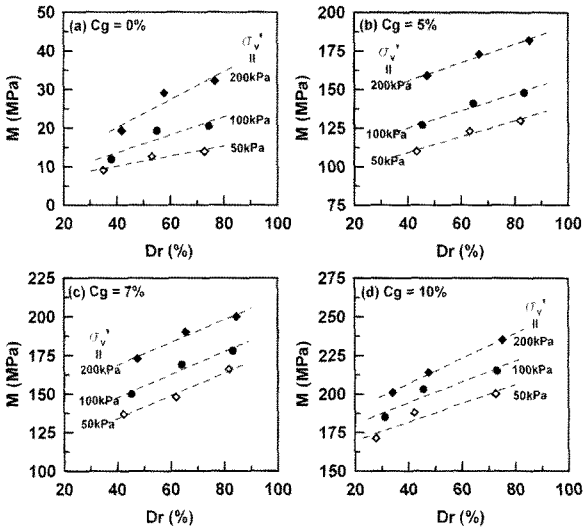

그림 7. 미고결, 고결모래의 횡방향구속 변형계수

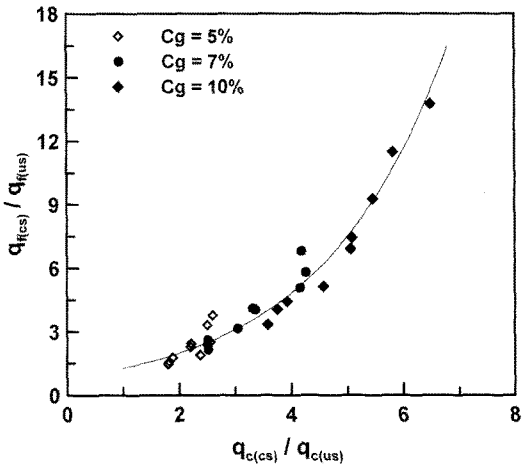

그림 8. 고결모래의 콘선단저항비와 전단강도비 관계

$$\frac{q_{f(cs)}}{q_{f(us)}} = 0.83 \times \exp\left[0.44 \ \frac{q_{c(cs)}}{q_{c(us)}}\right] \qquad (3)$$

그림 9는 고결모래의 일축압축강도(q_{ucs})와 고결모래와 미고결 모래의 콘선단저항비의 관계이다. 콘선단저항은 고결과 연직구속압의 영향을 동시에 받는 반면, 일축압축강도는 고결에 의한 점착력의 영향만이 반영된 결과임에도 불구하고, 콘선단저항비($q_{c(cs)}/q_{c(us)}$)가 증가할수록 고결모래의 콘선단저항-일축압축강도비($q_{c(cs)}/q_{ucs}$)는 지속적으로 감소하였다. 즉, 고결정도가 커질수록 미고결 모래와 비교한 고결모래의 콘선단저항보다 일축압축강도가 더 큰 폭으로 증가됨을 의미한다. 이와 같은 결과는, 전술한 바와 같이, 콘선단저항은 고결결합의 손상상태에서 측정되기 때문에 고결효과를 정확히 평가할 수 없기 때문이다. 그림 7의 회귀분석 결과를 바탕으로 고결모래의 일축압축강도는 고결모래와 미고결 모

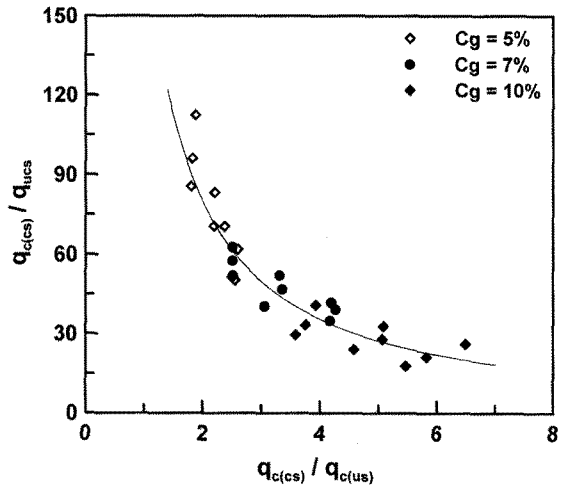

그림 9. 고결모래의 콘선단저항비와 일축압축강도 관계

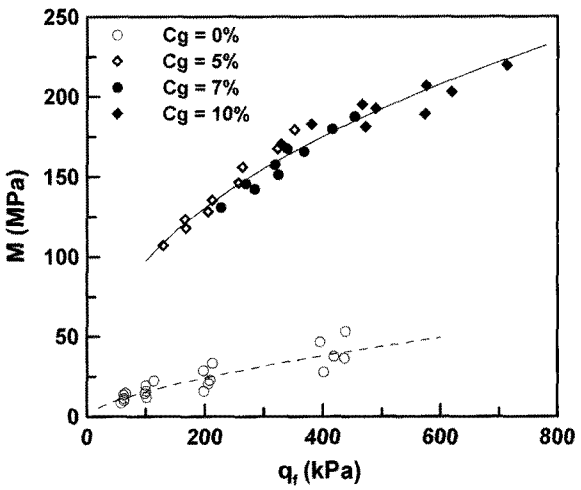

그림 10. 고결모래의 횡방향구속 변형계수와 전단강도 관계

래의 콘선단저항을 이용하여 식 4와 같이 표현되었다.

$$q_{ucs} = 0.0055 \frac{(q_{c(cs)})^{2.18}}{(q_{c(us)})^{1.18}} \quad (4)$$

그림 10은 고결, 미고결 K-7호사의 전단강도와 횡방향구속 변형계수의 관계이다. 전단강도가 큰 모래는 높은 변형계수를 나타내지만, 전단강도의 증가에 비해 변형계수의 증가폭이 작게 발생하였다. 이와 같은 경향은 연직구속압이 전단강도에 미치는 영향이 변형계수에 미치는 영향보다 더 크기 때문으로 판단된다. 전술한 바와 같이, 고결모래의 전단강도는 구속압을 고려하여 일축압축강도로부터 추정되었기 때문에, 고결결합 미파괴 상태의 전단강도로 간주된다. 또한 횡방향구속 변형계수도 고결결합이 파괴되기 전까지의 하중-침하관계로부터 결정되었기 때문에 모래의 고결결합을 비교적 정확히 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 석고함유율에 관계없이 고결모래의 전단강도와 횡방향구속 변형계수는 높은 상관성을 보였으며, 식 5와 같이 표현되었다.

$$M = 14.0 \cdot (q_{f(cs)})^{0.42} \quad (5)$$

5.2 고결모래의 콘선단저항과 변형계수

5.2.1 콘선단저항과 변형계수에 반영된 고결영향 평가

상대밀도와 연직구속압이 사질토의 콘선단저항과 변형계수에 미치는 영향정도가 상이함에도 불구하고 콘선단저항으로부터 미고결 사질토의 각종 변형계수를 추정하는 방법이 제시되고 있다(Lunne and Christophersen

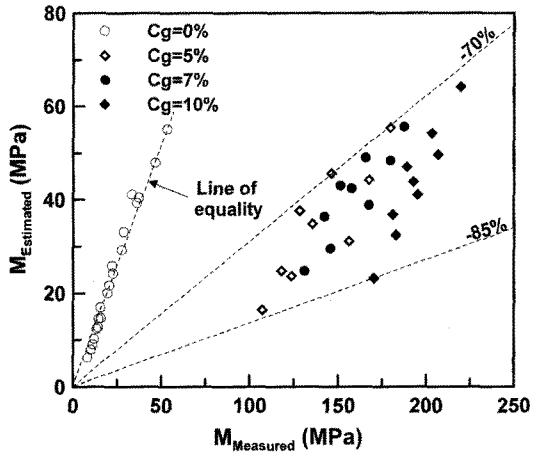

그림 11. 미고결, 고결 K-7호사의 횡방향구속 변형계수 비교(측정값 vs. 추정값)

1983; Jamiolkowski 등 1988; Baidi 등 1988). Lunne and Christophersen(1983)은 미고결 사질토의 콘선단저항과 횡방향구속 변형계수의 관계를 식 6과 같이 제안하였으며, 본 연구에서는 식 6으로부터 추정된 미고결, 고결모래의 횡방향구속 변형계수와 압밀시험으로부터 결정된 변형계수를 그림 11과 같이 비교하였다.

$$\begin{aligned} M &= 4q_c && : \text{for } q_c < 10\text{MPa} \\ M &= 2q_c + 20 && : \text{for } 10\text{MPa} < q_c < 50\text{MPa} \\ M &= 120MPa && : \text{for } q_c > 50\text{MPa} \end{aligned} \quad (6)$$

미고결 모래의 경우, 제안식으로부터 추정된 변형계수가 실험에 의해 결정된 변형계수보다 약 6% 정도 과대평가 되었다. 그러나 고결된 K-7호사의 경우, 주어진 제안식은 고결모래의 변형계수를 70~85% 정도 과소평가하였다. 이는 고결이 사질토의 변형특성에 매우 큰 영향요인으로 작용함에도 불구하고, 콘관입시험은 고결로

인한 변형특성의 변화를 명확히 평가할 수 없음을 의미한다.

5.2.2 고결이 변형계수과 콘선단저항에 미치는 영향

그림 12는 고결모래의 콘선단저항과 횡방향구속 변형계수의 관계로써, 동일 석고함유율에서 고결모래의 콘선단저항보다 횡방향구속 변형계수의 상대적 변화폭이 작으며, 석고함유율이 증가할수록 횡방향구속 변형계수의 변화폭이 감소한다. 즉, 콘선단저항이 5MPa에서 20MPa로 4배 증가하는 동안, 5%, 10% 고결모래의 횡방향구속 변형계수는 각각 1.6, 1.3배 정도 증가하였다. 이와 같은 결과는 고결시료의 횡방향구속 변형계수는 콘선단저항보다 상대밀도나 연직구속압에 의한 변화폭이 작을 뿐만 아니라, 고결정도가 높아질수록 상대밀도나 연직구속압이 고결시료의 변형계수에 미치는 영향이 감소하는 것을 의미한다.

그림 13은 고결, 미고결 K-7호사의 횡방향구속 변형

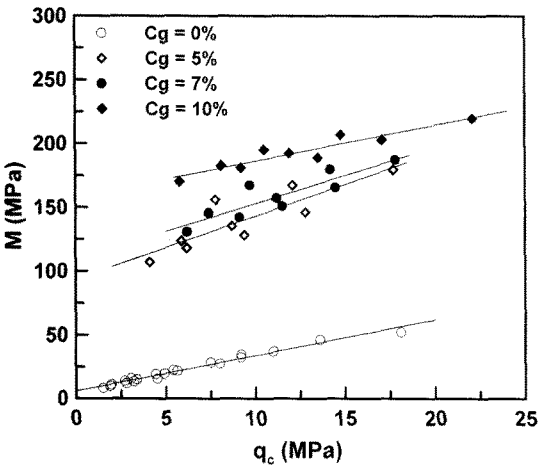

그림 12. 고결모래의 콘선단저항과 횡방향구속 변형계수 관계

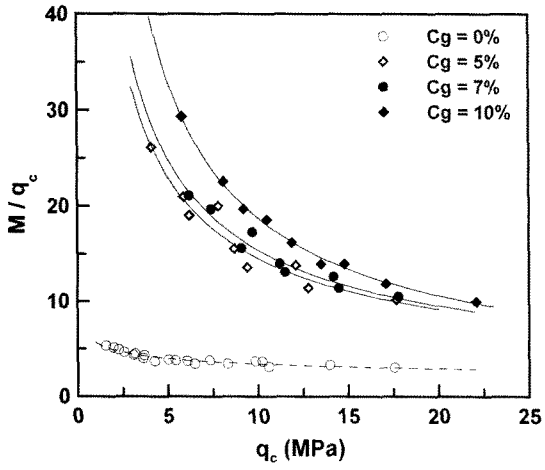

그림 13. 횡방향구속 변형계수와 콘선단저항 비(M/q_c) 변화

계수인 M과 콘선단저항의 비(M/q_c)로써, 동일 콘선단저항에서 고결모래가 미고결 모래보다 M/q_c이 더 크게 나타난다. Jamiolkowski 등(1988)과 Baldi 등(1988)의 연구결과에 의하면, 미고결 사질토의 M/q_c는 상대밀도와 연직구속압이 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 즉, 상대밀도와 연직구속압이 사질토의 변형특성보다 콘선단저항과 같은 강도특성에 더 큰 영향을 미치는 것을 의미한다. 본 시험의 결과에서도 미고결 K-7호사의 M/q_c 비율이 상대밀도 및 연직구속압이 증가할수록 감소하였으며, 이와 같은 경향은 그림 13에서도 확인된다. 미고결 K-7호사의 M/q_c 비율은 3.0~5.4 정도에서 분포하여 Jamiolkowski 등(1988)과 Baidi 등(1988)의 경향과 비교적 일치하였다. 고결모래의 경우, 미고결 모래보다 큰 M/q_c 이 나타나지만, 콘선단저항 증가에 따른 감소율은 더욱 뚜렷하다. 이와 같은 결과는, 그림 12에서 확인된 바와 같이 고결모래의 변형특성은 상대밀도와 연직구속압의 증가에 둔감하지만, 상대적으로 콘선단저항은 상대밀도와 연직구속압의 영향이 크게 작용하기 때문이다. 그림 13에서는 또한 고결시료의 경우 석고함유율이 클수록 M/q_c 비율이 다소 크게 나타났으나, 콘선단저항이 증가할수록 석고함유율의 영향은 점차 감소하며 수렴하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 대형 챔버에 조성된 고결시료에 대한 미니콘 관입시험으로부터 다양한 조건에서의 콘선단저항을 측정하고, 고결모래의 콘선단저항과 변형계수, 일축압축강도, 전단강도와의 관계를 분석하였다. 본 연구에서 나타난 결론은 다음과 같다.

(1) 연직구속압의 증가는 고결모래보다 미고결 모래의 콘선단저항에 더 큰 영향을 미쳤으나, 동일 석고함유율에서 상대밀도의 증가가 고결모래의 콘선단저항에 미치는 영향은 연직구속압이나 석고함유율의 영향보다 미미하였다.

(2) 고결은 모래의 횡방향구속 변형계수를 증가시켰으며, 상대밀도와 연직구속압의 변화보다 고결이 횡방향구속 변형계수에 미치는 영향이 더 지배적인 것으로 분석되었다.

(3) 고결결합 미파괴 상태로 간주될 수 있는 일축압축강도, 전단강도, 횡방향구속 변형계수와는 달리, 콘선단저항은 관입시 고결결합을 파괴하며 측정되기

때문에 고결효과의 명확한 평가는 불가능하였다. 본 연구에서의 콘선단저항은 고결모래의 변형계수를 70~85% 정도 과소평가하였다.

(4) 고결모래의 일축압축강도와 콘선단저항의 관계, 전단강도와 콘선단저항의 관계, 전단강도와 횡방향구속 변형계수의 관계가 분석되었다. 모래의 변형특성은 상대밀도나 연직구속압보다 고결의 영향이 지배적으며, 상대밀도나 연직구속압은 전단강도나 변형계수보다 콘선단저항에 더 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업 (C104A1000009-06A0200-00800)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김기영, 박한규, 전제성 (2005), "Cemented sand and gravel 재료의 강도특성", *한국지반공학회논문집*, Vol.21, No.10, pp.61-71.
2. 이문주, 최성근, 조용순, 이우진 (2008a), "고결모래의 강도정수와 일축압축강도 관계", 2008 *한국지반공학회 봄학술발표회 논문집*, pp.14-21.
3. 이문주, 최성근, 추현욱, 이우진 (2007), "응력조건에 따른 고결모래의 강도특성 평가", *한국지반공학회논문집*, Vol.23, No.5, pp.143-151.
4. 이문주, 최성근, 추현욱, 조용순, 이우진 (2008b), "낙사법으로 조성된 대형 석고 고결시료의 균질성", *한국지반공학회논문집*, Vol.24, No.1, pp.91-99.
5. 최성근, 이문주, 추현욱, 홍성진, 이우진 (2007), "Porous plate를 이용한 개선된 레이닝 시스템", *한국지반공학회논문집*, Vol.23, No.6, pp.67-76.
6. Akili, W., and Al-Joulani, N. M. (1988), "Cone penetration tests on artificially cemented sands", *Proceedings of the 1st International Symposium on Penetration Testing*, Vol.2, Orlando, Florida, pp. 607-614.
7. Akili, W. (2006), "Static cone penetration resistance of cemented sands: A laboratory investigation", Proceedings, GeoCongress 2006, Atlanta, GA, pp.1-6.
8. Akili, W., and Torrance, J. K. (1981), "Thedevelopment and geotechnical problems of sabkha, with preliminary experiments on the static penetration resistance of cemented sands", *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol.14, No.1, pp.59-73.
9. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., and Jamiolkowski, M. (1988), "Stiffness of sands from CPT, SPT and DMT", *Proceeding, Penetration Testing in the UK*, Birmingham, pp.299-305, Thomas Telford, London.
10. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., and Pasqualini, E. (1981), "Cone resistance of a dry medium sand", *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Vol.2, 427-432.
11. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., and Pasqualini, E. (1986), "Interpretation of CPTs and CPTUs; second part: drained penetration of sands", *Proceedings of the Fourth International Geotechnical Seminar*. Singapore, pp.143-156.
12. Been, K., Crooks, J. H, Becker, D. E., and Jefferies, M. G. (1986), "The cone penetration test in sand: part I, state parameter interpretation", *Geotechnique*, Vol.36, No.2, pp.239-249.
13. Clough, W. G., Sitar N., and Bachus R. (1981), "Cemented sands under static loading", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.107, No.6, pp.799-817
14. Consoli, N. C., Foppa, D, Festugato, L., and Heineck, K. S. (2007), "Key parameters for strength control of artificially cemented soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.133, No.2, pp.197-205.
15. Consoli, N. C., Rotta, G. V., and Prietto, P. D. M. (2000), "Influence of curing under stress on the triaxial response of cemented soils", *Geotechnique*, Vol.50, No.1, pp.99-105.
16. Dupas, J., and Pecker, A. (1979), "Static and dynamic properties of sand-cement", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.105, No.3, pp.419-436
17. Ismail, M. A., Joer, H. A., Sim, W. H., and Randolph, M. F. (2002), "Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.128, No.6, pp.520-529.
18. Jamiolkowski, M., Lo Presti, D. C. F., and Manassero, M. (2003), "Evaluation of relative density and shear strength of sands from CPT and DMT", *Soil Behavior and Soft Ground Construction*, ASCE GSP 119, pp.201-238.
19. Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T., and Lancellotta, R. (1985), "New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils", *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, pp. 57-153, Balkema, Rotterdam.
20. Joshi, R. C., Achari, G., Kaniraj, S. R., and Wijeweera, H. (1995), "Effect of aging on the penetration resistance of sands", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.32, pp.767-782.
21. Kim, T. J. (2005), *Dissipation of porewater pressure due to piezocone penetration in OC clay*, Ph.D dissertation, Korea University.
22. Kulhawy, F. H., and Mayne, P. H. (1990), *Manual on estimating soil properties for foundation design*, Electric Power Research Institute, EPRI.
23. Luune, T., and Christophersen, H. P. (1983), "Interpretation of cone penetrometer data for offshore sands", *Proceedings of the Offshore Technology Conference*, Richardson, Texas, Paper No.4464.
24. Parkin, A. K., and Lunne, T. (1982), "Boundary effects in the laboratory calibration of a cone penetrometer in sand", *Proceeding of 2nd European Symposium on Penetration Testing*, Orlando, Vol.1, pp.221-243, Balkema, Rotterdam.
25. Puppala, A. J., Acar, Y. B., and Senneset, K. (1993), "Cone penetration in cemented sands : bearing capacity interpretation", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.119, No.12, pp.1990-2001.
26. Puppala, A. J., Acar, Y. B., and Tumay, M. T. (1995), "Cone penetration in very weakely cemented sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.121, No.8, pp.589-600.

27. Rad, N. S., and Clough, G. W. (1982), *The influence of cementation on the static and dynamic behavior of sands*, Report No.59, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, Calif..
28. Rad, N. S., and Tumay, M. T. (1986), "Effect of cementation on the cone penetration resistance of sand", *Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, GSP 6, ASCE, New York, pp.926-948.
29. Robertson, P. K., and Campanella, R. G. (1983), "Interpretation of cone penetrometer test: Part I: Sand", Canadian Geotechnical Journal, Vol.20, No.4, pp.718-733.
30. Salgado, R., Mitchell, J. K., and Jamiolkowski, M. (1998), "Calibration chamber size effects on penetration resistance in sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.124, No.9, pp.878-888.
31. Schmertmann, J. H. (1976), *An updated correlation between relative density and Fugro type electric cone bearing*, Contract Report DACW 9-76-M 6646, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
32. Schnaid, F. Prietto, P. D. M., and Consoli, N. C. (2001), "Characterization of cemented sand in triaxial compression", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.127, No.10, pp.857-868.
33. Sweeney, B. P., and Clough, G. W. (1990), "Design of a large calibration chamber", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.13, No.1, pp.36-44.

(접수일자 2008. 8. 4, 심사완료일 2008. 10. 28)