

응력이력이 사질토의 CPT-DMT 상관관계에 미치는 영향

Effect of Stress History on CPT-DMT Correlations in Granular Soil

이 문 주¹ Lee, Moon-Joo

최 성 근² Choi, Sung-Kun

김 민 태³ Kim, Min-Tae

이 주 형³ Lee, Ju-Hyeong

이 우 진⁴ Lee, Woo-Jin

Abstract

Stress history increases the residual horizontal stress of granular soil and, consequently, the penetration resistance. This study analyzes the effect of stress history on the cone resistance (q_c), horizontal stress index (K_D) and dilatometer modulus (E_D) of CPT and DMT from calibration chamber specimen in OC as well as NC state. Test results show that the normalized cone resistance by mean effective stress correlates well with the relative density and the state parameter, whereas the normalized cone resistance by vertical effective stress is a little affected by stress history. The influence of stress history is more reflected on K_D than E_D and q_c . The K_D/K_0 , in which the effect of stress history on K_D is compensated by the at-rest coefficient of earth pressure, K_0 , is related to relative density, state parameter and the normalized cone resistance by mean effective stress. It is also observed that the normalized dilatometer modulus by mean effective stress (E_D/σ'_m) shows a unique correlation with the state parameter, regardless of stress history.

요 지

응력이력은 사질토 지반의 잔류 수평응력을 증가시켜 현장시험의 관입저항을 증가시킨다. 본 연구에서는 챔버에 조성된 정규 및 과압밀 시료에 대한 콘관입시험과 딜라토미터 시험을 수행하고 응력이력이 시험결과와 측정값의 상관관계에 미치는 영향을 분석하였다. 시험결과, 평균 유효응력으로 정규화된 콘선단저항은 상대밀도 및 상태정수와 높은 상관성을 보였다. 딜라토미터의 수평응력지수(K_D)는 콘선단저항(q_c) 뿐만 아니라, 딜라토미터 계수(E_D) 보다도 응력이력 영향을 효과적으로 반영하였다. 수평응력지수에 반영된 응력이력의 영향을 정지토압계수인 K_0 로 보정한 K_D/K_0 는 상대밀도 뿐만 아니라, 상태정수, 평균 유효응력으로 정규화된 콘선단저항과 응력이력에 관계없는 높은 상관성을 보였다. 또한 평균 유효응력으로 정규화된 딜라토미터 계수(E_D/σ'_m)와 상태정수의 관계도 응력이력에 관계없이 유일한 식으로 표현되었다.

Keywords : Cone resistance, Dilatometer modulus, Horizontal stress index, K_D/K_0 , Stress history

1. 서 론

콘관입시험(CPT)과 딜라토미터 시험(DMT)은 각종 지

반공학적 물성값을 간단하고 반복적으로 평가할 수 있는 장점 때문에 널리 사용되는 현장시험법이다. 현재까지 CPT와 DMT로부터 산출되는 각종 측정값들과 토질

1 정희원, (주)한화건설 대리, 전 고려대학교 건축사회환경공학과 박사후연구원 (Member, Associate Manager, Hanwha Construction and Engrg.; Formerly, Researcher, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정희원, 나우지오 컨설턴트 이사 (Member, Director, Nawoogeo Consultant Co., Ltd.)

3 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

4 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학과 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

물성값 또는 강도정수 간의 많은 상관관계가 제안되었다. Schmertmann(1976), Baldi et al.(1986), Jamiolkowski et al.(1985, 2003)는 유효응력으로 정규화된 콘선단저항과 상대밀도의 관계를 제안하였다. Robertson and Campanella (1983)와 Kulhawy and Mayne(1990)은 사질토의 내부마찰각을 평가하는 방법을 제안하였으며, Been et al.(1986, 1987)과 Jamiolkowski and Robertson(1988)은 상태정수 (state parameter), 콘선단저항, DMT 수평응력지수의 관계를 평가하였다. 또한 관입저항치로부터 흙의 변형특성을 평가하고자 하는 연구가 수행되었으며(Lunne and Christophersen 1983; Jamiolkowski et al. 1988), Baldi et al.(1986), Jamiolkowski and Robertson(1988), Campanella and Robertson(1991), Robertson(2009) 등은 CPT와 DMT 결과의 상관관계를 검토하였다.

사질토 지반의 경우, 상대밀도와 응력수준이 관입저항치에 가장 큰 영향을 미치지만, 현재의 응력수준보다 과거에 더 큰 선행응력 상태에 노출되었을 경우, 즉 지반에 응력이력 효과가 발현되었을 경우 잔류 수평응력이 증가하여 관입저항치가 증가한다(Clayton et al. 1985; Jamiolkowski et al. 1988; Jamiolkowski et al. 2003). Marchetti(1980)와 Jamiolkowski et al.(1988)는 DMT의 수평응력지수가 지반의 과압밀비의 분포와 유사함을 관찰하였다. Baldi et al.(1988), Jamiolkowski et al.(1988)는 사질토의 횡방향구속 변형계수와 관입저항치의 비율은 현재 응력수준(σ_{v0}')과 선행응력(σ_{vp}')의 비인 과압밀비($=\sigma_{vp}'/\sigma_{v0}'$)가 증가할수록 점차 증가하는 경향을 확인하였다. Baldi et al.(1986), Jamiolkowski et al.(1988), Mayne(1995)은 콘선단저항과 수평응력지수를 비교하여 사질토에 미치는 응력이력의 영향을 평가하였다. 특히 Yoshimi et al.(1975), Lambrechts and Leonards(1978)의 연구 결과에서 확인되는 바와 같이, 응력이력은 사질토 지반의 변형특성에 큰 영향을 미치기 때문에, 현장시험으로부터 지반의 응력이력을 평가한다면 좀 더 합리적인 설계가 가능하다.

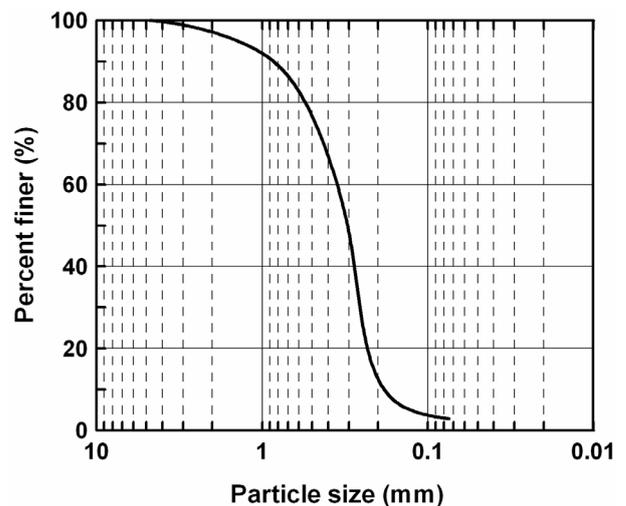
이상과 같은 사질토의 응력이력에 대한 선행 연구 성과에도 불구하고 현장시험으로부터 지반의 응력이력을 평가하는 방법들의 신뢰성이 매우 낮아 실제 설계단계에서 응력이력 효과가 전혀 고려되지 못하고 있다. 따라

서, 응력이력이 현장시험 결과에 미치는 영향에 대한 심도 깊은 연구가 지속적으로 수행되어야 한다. 본 연구에서는 챔버(모형토조)에 정규 및 과압밀 상태의 모래시료를 조성한 후 콘관입시험과 딜라토미터 시험을 수행하였으며, 시험결과를 분석하여 콘관입시험의 콘선단저항, 딜라토미터 시험의 딜라토미터 계수와 수평응력지수에 미치는 응력이력의 영향을 분석하였다.

2. 시험계획

2.1 부산사 기본특성

본 연구를 위해 그림 1과 같은 입도분포를 가지는 부산사를 사용하였다. 부산사는 sub-angular~angular의 입자형상을 가지며 평균입径이 0.315mm이고 균등계수와 곡률계수는 각각 2.34, 0.71로써, 통일분류법에 의해 SP로 분류된다. 또한 세립분 함유율은 5% 미만인 clean sand에 해당된다. 성분분석(XRF) 결과 SiO_2 의 함유량(76.1%)이 큰 석영질 모래로 파악되었다. SEM 분석결과 부산사는 패각이 일부 포함되어 있는 것으로 분석되었으며, 이로 인해 CaO 성분이 약 3% 검출되었다. 시료의 최대 간극비는 깔대기법(ASTM D-4254)법으로 결정되었으며, 최소 간극비는 입자파쇄 효과를 고려하여 Miura and Toki(1982)가 제안한 낙사법(pluviation method)으



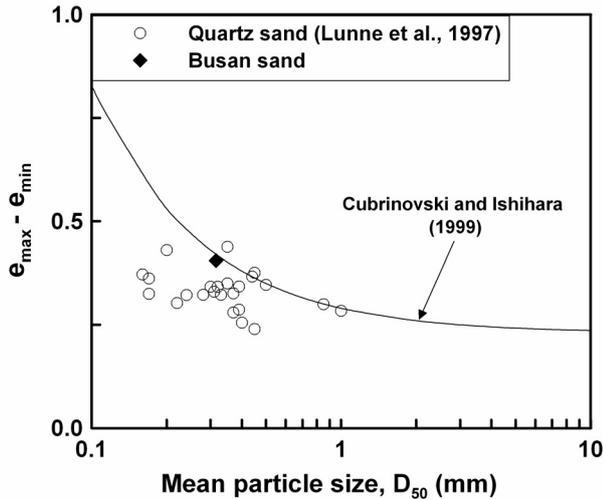


그림 2. 부산사의 최대, 최소 간극비 관계

로 결정되었다. 부산사의 최대, 최소 간극비는 1.063, 0.658로 결정되었다. 그림 2에서는 부산사의 최대, 최소 간극비를 다양한 규산염 모래와 비교하였다. 소량의 패각이 함유되어 있는 부산사의 경우에도 Cubrinovski and Ishihara(1999)가 제안한 일반적인 규산염 모래의 최대-최소 간극비 관계를 만족하였다.

2.2 챔버(모형토조) 시료조성 및 시험

본 연구에서 사용된 챔버시스템은 그림 3과 같이 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.

본 연구에서는 건조낙사법으로 다양한 상대밀도의 시료를 균등하게 조성하였다. 사용된 낙사장치는 시료 저장을 위한 직경 1.2m, 높이 1.0m의 모래저장고(sand

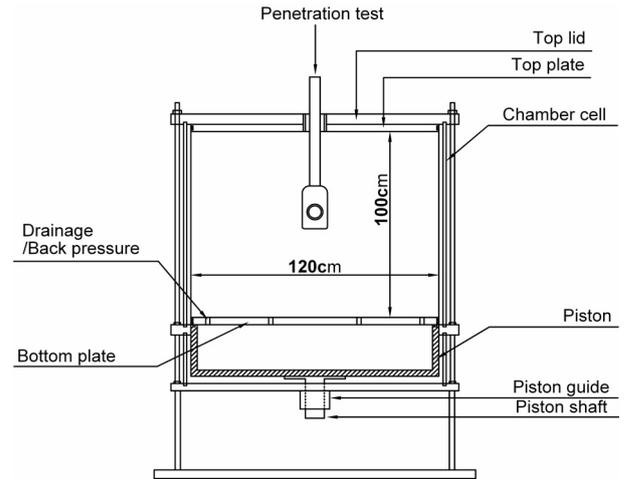


그림 3. 챔버 시스템과 관입시험 모식도

storage), 낙사되는 모래시료의 낙하량을 조절하는 개폐판(shutter plate), 적정 낙하고를 제공하기 위한 extension tube와 효율적인 시료 분산을 위한 분산시스템으로 구성된다. 특히 분산시스템은 기존의 분산체에 porous plate를 추가하여 목표 상대밀도의 원활한 조성이 가능하도록 하였다(Choi et al. 2010). 목표 상대밀도 40, 60, 80%의 시료를 조성하기 위해 개폐구멍의 크기(1.2~3.5cm)와 낙하고(15~60cm)를 조절하여 시료를 낙하시킨 후, 상부 플레이트와 챔버셀을 12개의 룯드로 고정시켜 시료를 조성하였다. 조성된 시료의 중량과 부피를 측정하여 시료의 최종 상대밀도를 결정하였다. 연직구속압 50~400kPa의 정규압밀상태 시료와 연직구속압을 400kPa까지 가한 후, 200, 100, 50kPa까지 제하하여 과압밀비(OCR) 2, 4, 8을 갖도록 조성한 과압밀상태 시료에 대해 콘관입시험과 딜라토미터 시험을 수행하였다. 표 2는 이와 같이 조성한 시료의 시험조건을 요약한 것이다.

챔버시료에서 측정되는 콘선단저항은 챔버의 직경과 경계조건에 영향을 받으며(Been et al. 1986; Jamiolkowski

표 2. 챔버시험 개요

목표 상대밀도 (%)	관입시험 시 유효 연직응력, σ_{v0}' (kPa)	최대 선행 연직 유효응력, σ_{vd}' (kPa)	과압밀비, OCR ($\sigma_{vd}'/\sigma_{v0}'$)
40, 60, 80	50	50	1
	100	100	1
	200	200	1
	400	400	1
	200	400	2
	100	400	4
	50	400	8
	100	200	2

et al. 2003; Lunne and Christophersen 1983; Parkin and Lunne 1982), 챔버직경과 콘직경의 비가 증가할수록 챔버시험 결과는 현장시험 결과에 근접한다. 느슨한 사질토 시료의 경우, 직경비 20 이상에서 챔버시험과 현장시험 결과가 유사한 것으로 알려져 있으나, 조밀한 시료의 경우 관입 도중 발생하는 팽창경향이 크기 때문에 직경비 50 이상에서 경계조건의 영향을 무시할 수 있다(Been et al. 1986). 본 연구에서는 직경 3.57cm(단면적 10cm²)인 표준콘을 사용하였기 때문에, 조밀한 시료의 경우 경계조건의 영향을 반영할 수 있는 기준이 필요하다. Been et al.(1986)은 사질토의 상태정수(state parameter)에 따른 콘선단저항의 보정계수를 그림 4와 같이 제안하였다. 본 연구에서는 챔버시험에서 측정된 콘선단저항을 Been et al.(1986)이 제안한 기준을 사용하여 보정하였다.

딜라토미터는 폭 95mm, 두께 15mm, 길이 230mm인 노 모양의 관입체에 60mm 직경의 강철 멤브레인이 장

착되어 있다. 본 연구에서는 딜라토미터 멤브레인을 초기 약 20cm 깊이에 위치시키고 10cm 마다 단계적으로 관입시키면서 시료깊이 30~70cm에서 강철 멤브레인의 초기 접촉압력과 1.1mm 변위가 발생할 때의 압력인 A, B를 측정하고, 이를 보정한 압력 P₀와 P₁을 구하였다. Marchetti(1980)는 3개의 딜라토미터 지수를 제안하였는데, 딜라토미터 계수 E_D(=34.7[P₁-P₀])는 흙의 강성과 관계되며, 수평응력지수 K_D(=[P₀-u₀]/σ_{v0}')는 흙의 정지토압계수와 관계되어 과압밀비나 내부마찰각을 구하는데 이용된다. 또한 재료지수 I_D(=[P₁-P₀]/[P₀-u₀])는 흙의 공학적 분류를 위해 사용되며 흙의 강성지수와도 관계된다. 여기서, u₀는 정수압, σ_{v0}'은 연직유효응력이다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 응력이력에 따른 콘선단저항

Jamiolkowski et al.(1985)은 반대수축상에서 연직유효응력으로 정규화된 콘선단저항과 상대밀도(D_R)의 선형 관계를 제시하였다. 챔버시험으로 결정된 부산사의 콘선단저항과 상대밀도 관계를 나타낸 그림 5(a)와 같이, 연직유효응력으로 정규화된 콘선단저항은 정규압밀 상태와 과압밀 상태에서 각각 상대밀도와 선형관계를 만족하였다. 그러나 동일 상대밀도에서 과압밀 상태의 정규화된 콘선단저항이 정규압밀 상태의 값보다 다소 크게 나타난다. Jefferies et al.(1987), Houlsby and Hitchman(1988)이 주장한 바와 같이, 사질토의 콘선단저항은 연직응력 뿐만 아니라 수평응력의 영향을 크게 받는다. 따라서 그림 5(a)에서 과압밀 상태 부산사의 콘선단저항이 정규압밀

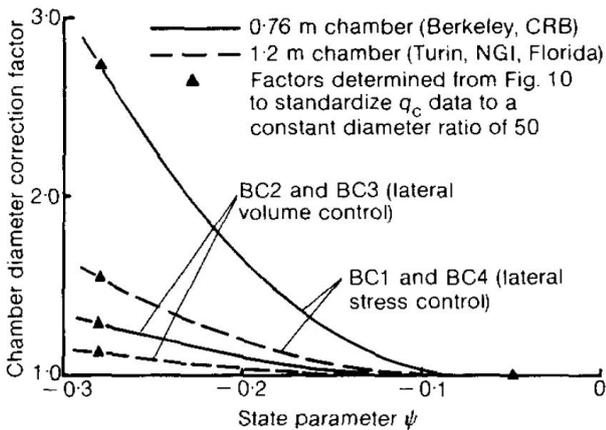


그림 4. 챔버 콘선단저항의 보정(From Been et al. 1986)

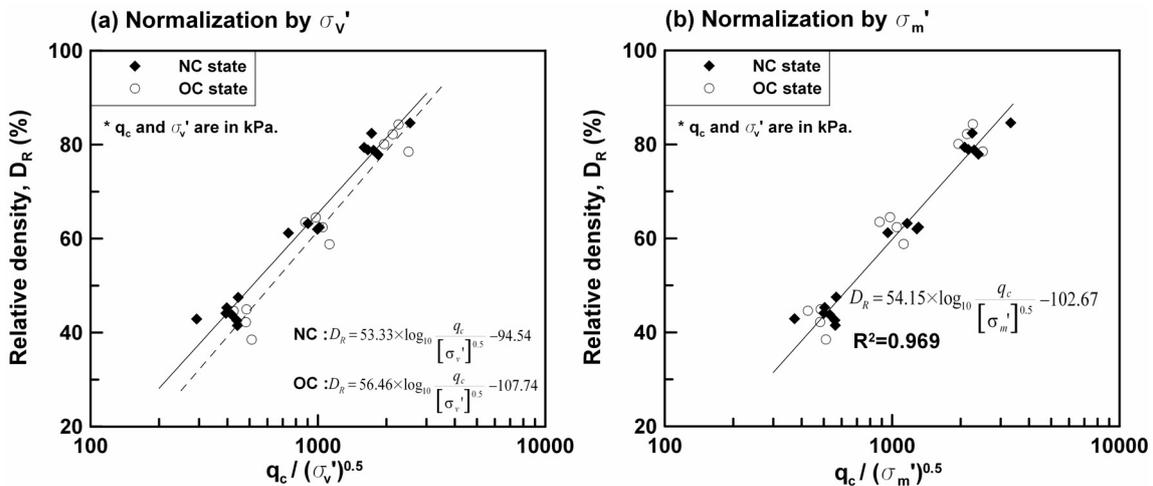


그림 5. 상대밀도 및 응력에 따른 부산사의 콘선단저항 분포

상태의 값보다 더 크게 측정된 것은 과압밀 시료에 가해진 선행하중에 의해 증가된 수평응력이 하중 제하 후에 완전히 소멸되지 않았기 때문이다(Clayton et al. 1985; Jamiolkowski et al. 1988). 그러나 동일한 콘선단저항에서 과압밀 시료와 정규압밀 시료의 상대밀도 차이는 약 5% 미만 발생되며, 이로부터 응력이력이 콘선단저항에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있다.

Jamiolkowski et al.(2003)는 평균 유효응력으로 정규화된 콘선단저항과 상대밀도의 관계를 식 (1)과 같이 제시하였다. 여기서, C_0 , C_1 , C_2 는 모래의 특성에 따른 상수이다. 식 (1)에 기초하여 표현된 부산사의 콘선단저항-평균 유효응력-상대밀도의 관계는 그림 5(b)와 같다. 부산사의 경우, 최적의 상관성을 만족시키는 C_1 은 0.54로 결정되었으며, 이는 Baldi et al.(1986)가 Ticino sand에 대해 제안한 0.55와 유사한 값이다. 그림 5(b)에서 관찰된 바와 같이 콘선단저항을 연직 유효응력이 아닌 평균 유효응력으로 정규화시킬 경우, 응력이력의 영향을 받지 않는 단일화된 관계를 얻을 수 있으며, 이는 Baldi et al.(1986)의 결과와 일치한다.

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

Been and Jefferies(1985)는 상태정수(ψ)를 동일한 평균 유효응력에서 현재 상태 간극비와 한계상태 간극비의 차이로 정의하였다. 또한 Been et al.(1986, 1987)은 상태정수와 콘선단저항의 관계를 식 (2)와 같이 제안하였다.

$$Q_p = \frac{q_c - \sigma'_m}{\sigma'_m} = \kappa \exp(-m\psi) \quad (2)$$

여기서, Q_p 는 정규화된 콘선단저항이고, σ_m 과 σ'_m 은 각각 평균 전응력과 평균 유효응력이다. κ 와 m 은 토질에 따라 결정되는 상수이다. Been et al.(1987)은 사질토의 κ 와 m 은 한계상태선의 기울기(λ)와 관계됨을 보였다. 그림 6은 부산사의 콘선단저항과 상태정수의 관계이다. Kim et al.(2007)에 의하면 부산사의 한계상태정수는 $M=1.39$, $\Gamma=1.07$, $\lambda=0.068$ 로 밝혀졌으며 본 연구에서는 이 결과를 이용하였다. Been et al.(1986, 1987)의 결과와 마찬가지로, 부산사의 경우에도 반대수축상에서 콘선단저항과 상태정수는 선형관계를 만족하였다. 또한 시료의 과압밀 여부에 관계없이 부산사의 콘선단저항과 상태정수 관계는 단일식으로 표현되었다. 이는 콘선단저

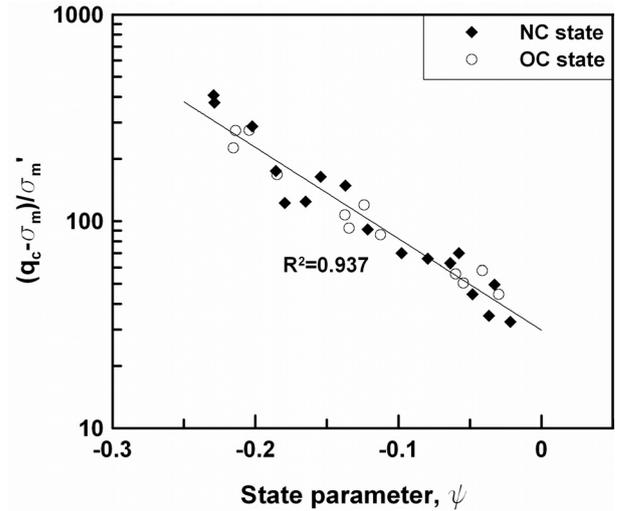


그림 6. 응력이력이 부산사의 콘선단저항-상태정수 관계에 미치는 영향

항이 평균 유효응력으로 정규화되어 응력이력의 영향이 상쇄되었을 뿐만 아니라, 상태정수가 동일한 평균 유효응력에서 응력이력의 영향이 없는 한계상태와 현재 상태의 간극비 차이로 정의되기 때문이다.

3.2 응력이력에 따른 E_D 와 K_D 변화

그림 7은 연직구속압과 상대밀도에 따른 부산사의 딜라토미터 계수(E_D)와 수평응력지수(K_D)의 변화를 보인다. 그림 7(a)에서 부산사의 딜라토미터 계수(E_D)는 연직 유효응력이 증가할수록 점차 증가하였으며, 이는 Konrad (1988)와도 일치한다. 또한 동일 상대밀도와 응력상태에서 과압밀 시료의 딜라토미터 계수가 정규압밀 시료보다 8~63% 크게 측정되었으며, 시료의 과압밀비가 증가할수록 그 차이는 증가하였다. 따라서 딜라토미터 계수도 응력이력의 영향을 받는 것으로 나타난다.

그림 7(b)는 부산사의 수평응력지수(K_D) 변화를 보여 준다. 정규압밀 상태에서 유효응력이 증가할 때 부산사의 수평응력지수는 아주 미소하게 감소하였다. 이와 같은 결과는 정규압밀 상태에서 수평응력지수는 정지토압 계수인 K_0 와 상관성이 높으며, 사질토의 정지토압계수는 정규압밀 상태에서 상대밀도 및 연직구속압의 변화에 크게 민감하지 않기 때문이다(Mayne and Kulhawy 1982). 반면, 과압밀 시료의 수평응력지수는 동일한 상태의 정규압밀 시료의 수평응력지수보다 1.3배~2.5배 크게 측정되었다. 즉 사질토의 응력이력은 딜라토미터 계수보다 수평응력지수에 더 큰 영향을 미치며, 사질토 지반의 응력이력 효과를 평가함에 있어 수평응력지수를 분석하

는 것이 효과적임을 알 수 있다. 이는 Marchetti(1980)와 Jamiolkowski et al.(1988)와도 일치하는 결과이다.

Campanella and Robertson(1991)과 Robertson(2009)은 dilatometer 수평응력지수와 연직응력으로 정규화된 콘선단저항(q_c/σ_v'), 그리고 dilatometer 계수와 콘선단저항의 선형성을 제시하였다. 그림 8은 부산사의 q_c - E_D 와 q_c/σ_v' - K_D 관계를 보여준다. 그림 8(a)에서 부산사의 dilatometer 계수는 콘선단저항이 증가함에 따라 비교적 선형 증가하였으며, 정규압밀 시료와 과압밀 시료 사이의 차이는 없는 것으로 관찰되었다. 그림 8(b)에서 부산사의 수평응력지수는 과압밀 상태와 정규압밀 상태에서 각각 정규화된 콘선단저항과 선형관계를 만족하였으며, 동일

한 q_c/σ_v' 에서 과압밀 시료의 수평응력지수가 정규압밀 시료보다 큰 것으로 관찰되었다. 이는 과압밀 시료에 가해진 선행하중에 의한 수평응력의 증가가 콘선단저항이나 dilatometer 계수보다 수평응력지수에 더 큰 영향을 주는 것을 의미한다. 따라서 사질토의 응력이력 효과를 해석함에 있어 수평응력지수인 K_D 를 평가하는 것이 효과적이다(Marchetti 1980; Jamiolkowski et al. 1988).

3.3 K_D 의 응력이력 보정

Jamiolkowski et al.(2003)는 사질토의 수평응력지수와 상대밀도의 관계를 식 (3)과 같이 제시하였다.

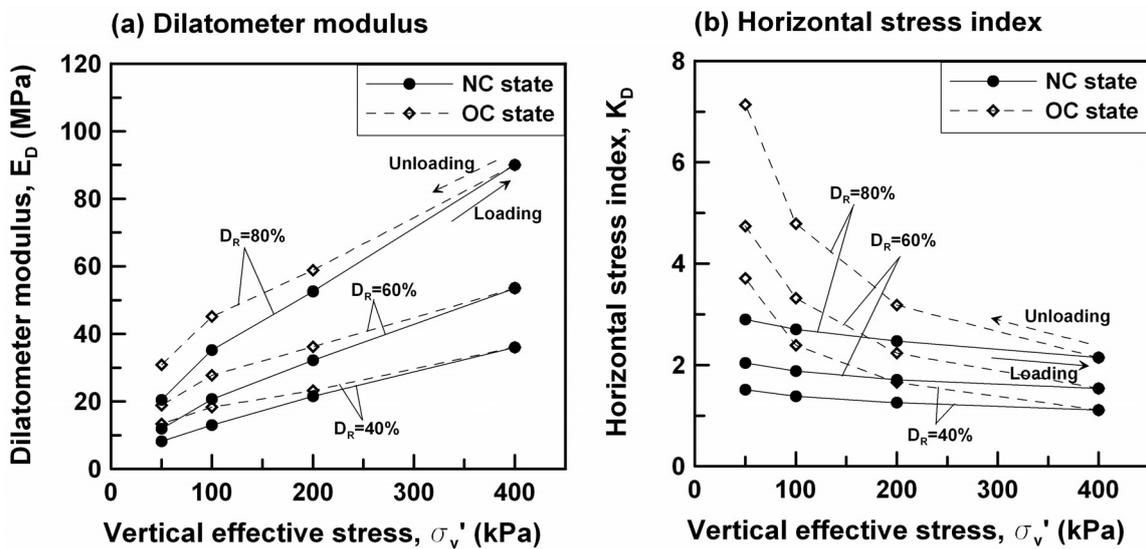


그림 7. 하중 재하 및 제하에 따른 E_D 와 K_D 의 변화

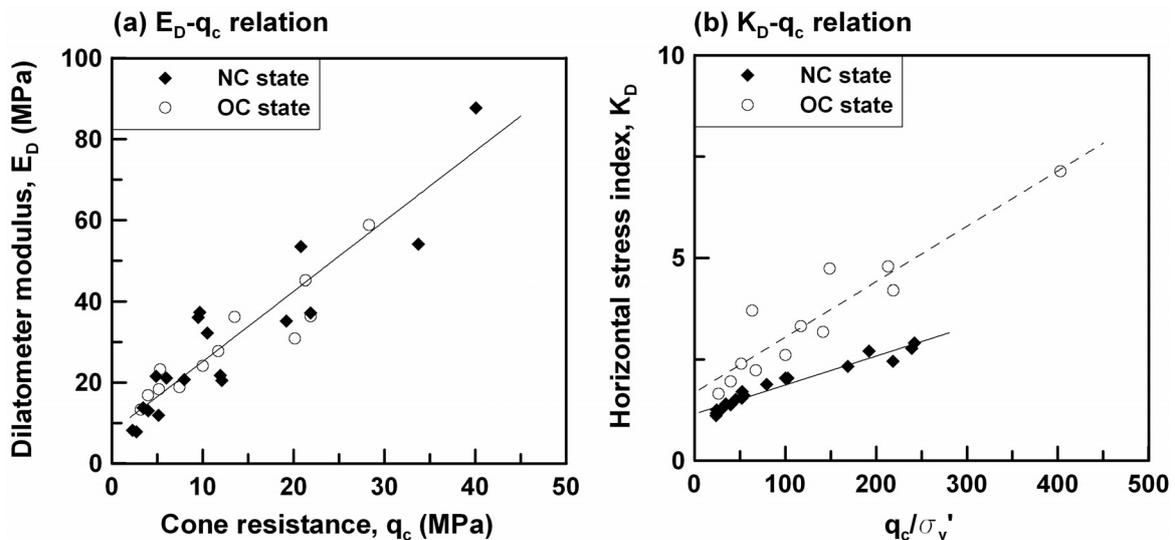


그림 8. 응력이력이 E_D - q_c , K_D - q_c 관계에 미치는 영향 비교

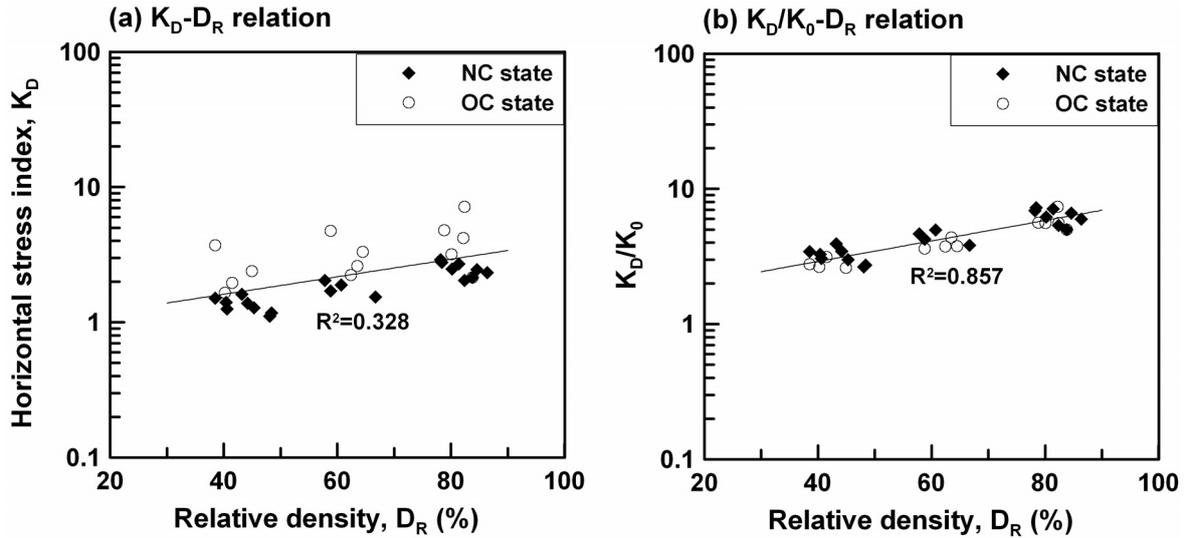


그림 9. K_0 - D_R 관계에 미치는 응력이력의 영향 및 보정

$$K_D = A \exp(BD_R) \quad (3)$$

그림 9(a)는 식 (3)에 기초하여 표현된 상대밀도에 따른 부산사의 수평응력지수 분포이다. 동일한 상대밀도에서 과압밀 시료의 수평응력지수가 정규압밀 시료의 값보다 상부에 위치하였으며, 시료의 응력이력에 관계없이 동일한 식으로 표현할 경우, 상관관계가 매우 낮게 평가되었다. 이는 사질토의 수평응력지수가 딜라토미터 계수나 콘선단저항 보다는 응력이력의 영향을 더 크게 받지만, 응력의 변화는 사질토의 상대밀도 변화에 큰 영향을 미치지 못하기 때문이다.

사질토에서 응력이력의 효과는 크게 흙의 소성변형 (plastic strain)과 수평응력의 증가로 나타난다(Jamiolkowski et al. 1988). 그러나 CPT나 DMT의 현장 관입 도중 발생하는 주변지반의 대변형 때문에 응력이력으로 인한 소성변형은 대부분 소멸되며, 관입시험 결과에 반영되는 응력이력 효과는 대부분 수평응력의 증가 때문에 나타난다(Clayton et al. 1985; Jamiolkowski et al. 1988). 따라서 지반의 응력이력 효과는 수평응력과 연직응력의 비로 표현되는 정지토압계수(K_0)에 잘 반영된다. 그림 9(b)는 사질토의 수평응력지수를 정지토압계수로 정규화한 K_D/K_0 - D_R 관계이다. 여기서, K_D/K_0 는 amplification factor라고 정의되기도 한다(Jamiolkowski and Robertson 1988). 그림 8(b)에 의하면 K_D 에 반영된 응력이력 효과가 K_0 로 보정되어, 응력이력이 K_D/K_0 - D_R 관계에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

3.4 응력이력에 따른 K_D - q_c 관계

Ticino sand와 Hokksund sand에 대한 챔버시험 결과로부터, Baldi et al.(1986)은 사질토의 콘선단저항과 수평응력지수의 관계를 식 (4)와 같이 제시하였다.

$$K_0 = 0.376 + 0.095K_D - 0.0017 \frac{q_c}{\sigma_v'} \quad (4)$$

Bellotti et al.(1994)는 Toyoura sand에 대한 챔버시험 으로부터 식 (4)로 추정되는 정규압밀 상태 시료의 K_0 와 챔버시료에서 결정되는 K_0 가 유사함을 확인하였다. 그림 10에서는 챔버시료에서 결정된 부산사의 K_0 와 현장시험

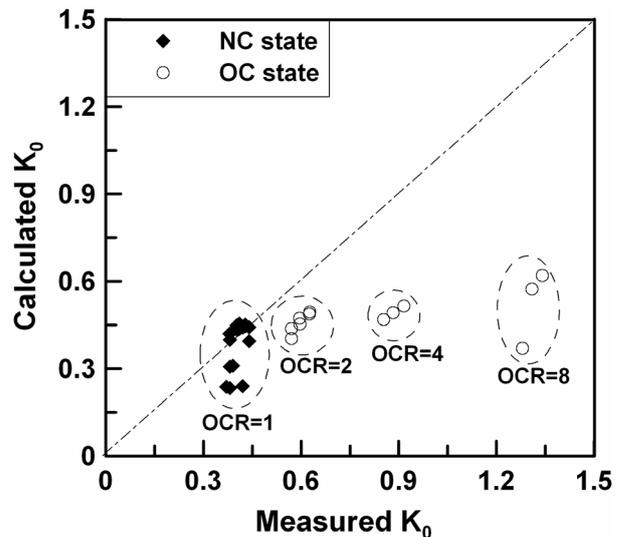


그림 10. 응력이력이 K_0 - q_c 관계에 미치는 영향

으로 결정된 K_D , q_c 를 이용하여 추정된 K_0 를 비교하였다. Bellotti et al.(1994)의 결과와 유사하게 정규압밀 상태에서 부산사 K_0 는 측정값과 추정값이 비교적 일치하였다. 그러나 시료의 과압밀비가 증가할수록 측정값과 추정값의 오차가 점차 증가하며, 과압밀비 8인 시료의 경우에는 약 80% 과소평가 되었다. 이와 같은 결과는 콘선단저항보다 수평응력지수가 지반의 응력이력에 더 민감하게 반응하는 특성이 식 (4)에 반영되지 않았기 때문이다.

Jamiolkowski et al.(2003)는 사질토의 콘선단저항과 상대밀도, 수평응력지수와 상대밀도의 관계를 식 (1)과 (3)으로 표현하였다. 상대밀도를 매개로 하여 두 식을 조합할 경우, 식 (5)와 같은 콘선단저항과 수평응력지수의 관계를 얻을 수 있다. 이 때, 평균 유효응력 항의 지수 $C_1=0.5$ 로 가정하였으며, χ 와 δ 는 회귀분석으로 얻어지는 상수이다.

$$K_D = \chi \left(\frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_m}} \right)^\delta \quad (5)$$

식 (5)에 기초하여 부산사의 콘선단저항과 수평응력지수의 관계를 그림 11(a)에 표현하였다. 콘선단저항이 평균 유효응력으로 정규화되어 응력이력의 영향이 상쇄되었으나, 수평응력지수에는 여전히 응력이력의 영향이 크게 작용하기 때문에, 정규압밀 시료보다 과압밀 시료의 수평응력지수가 상향 분포하였다. 반면 그림 11(b)와 같이 수평응력지수를 K_0 로 정규화시킨 후, 평균 유효응력으로 정규화시킨 콘선단저항과 나타낼 경우, 응력이력의 영향이 거의 상쇄되었으며, 시료의 과압밀 여부에 관계없이 동일한 식으로 표현 가능하였다.

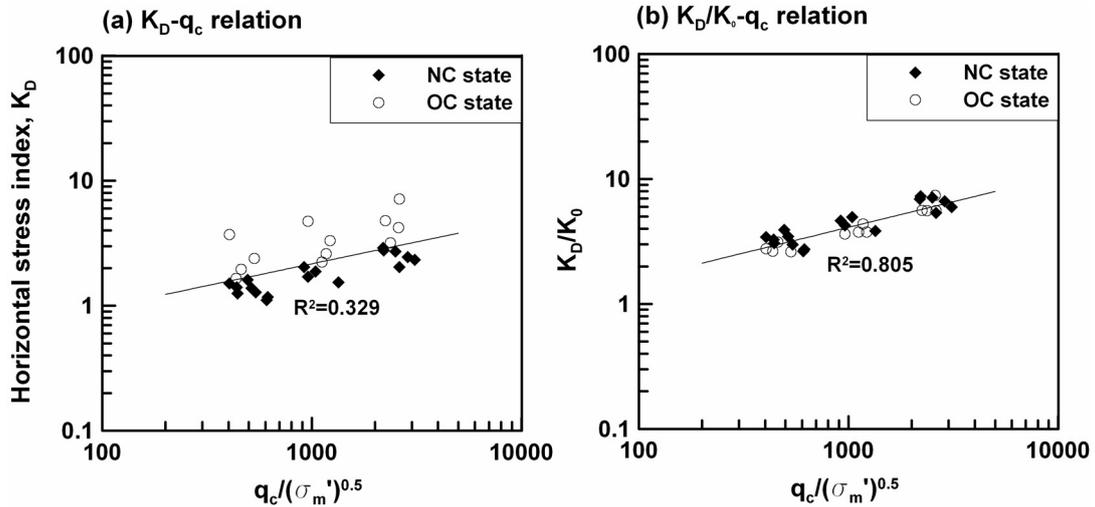


그림 11. K_D - q_c 관계 및 응력이력 영향 보정

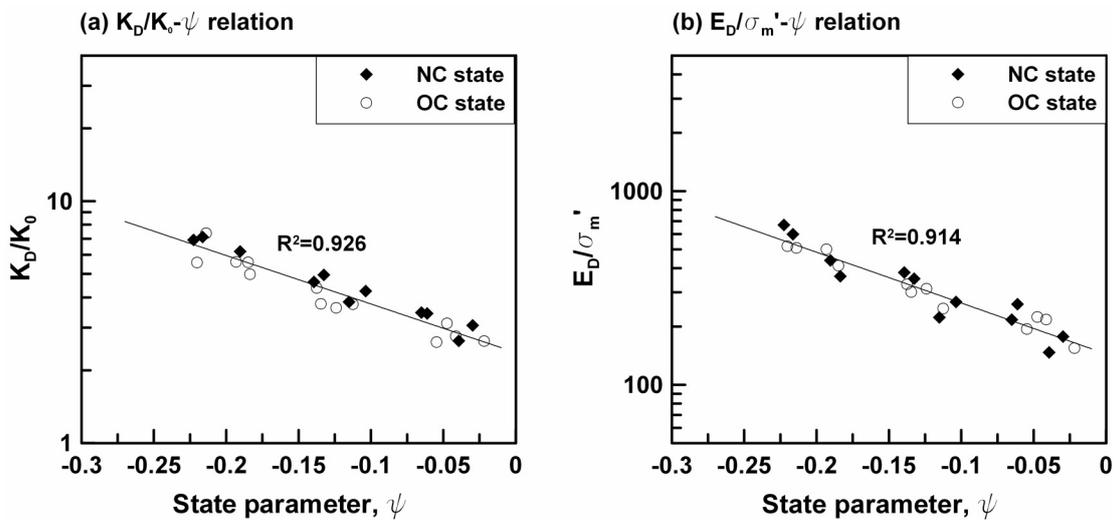


그림 12. 부산사의 상태정수와 K_D , E_D 관계

3.5 사질토의 상태정수와 DMT 관계

Jamiolkowski et al.(1988)는 Ticino sand와 Hokksund sand에 대한 챔버시험 결과로부터 상태정수와 K_D/K_0 의 관계를 식 (6)과 같이 표현하였다.

$$\frac{K_D}{K_0} = \alpha \exp(-\beta\psi) \quad (6)$$

그림 12(a)는 부산사의 상태정수와 K_D/K_0 의 관계를 도시한 것이다. Jamiolkowski et al.(1988)의 결과와 마찬가지로 부산사의 K_D/K_0 와 상태정수는 반대수축에서 선형관계를 만족하였으며 응력이력은 $K_D/K_0-\psi$ 관계에 큰 영향을 주지 못하였다. 그림 12(b)는 평균 유효응력으로 정규화된 부산사의 딜라토미터 계수(E_D/σ'_m)와 상태정수의 관계이다. 사질토의 $E_D/\sigma'_m-\psi$ 관계는 반대수축에서 선형관계를 만족하였으며, 응력이력에 관계없이 동일한 식으로 표현되는 것으로 관찰되었다.

4. 결론

사질토의 거동에 큰 영향을 미치는 상대밀도와 현재 상태 응력수준과 더불어, 응력이력(stress history)은 지반의 소성변형을 유발하고 수평응력을 증가시키기 때문에 변형특성 뿐만 아니라 현장시험의 관입저항치를 증가시키는 것으로 알려지고 있다. 본 연구에서는 챔버(모형토조)에 조성된 정규압밀, 과압밀 상태의 사질토에서 콘관입시험과 딜라토미터 시험을 수행하였으며, 이로부터 지반의 응력이력 상태가 원위치 시험에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 연직응력으로 정규화된 정규압밀과 과압밀 상태의 콘선단저항은 반대수축상에서 각각 상대밀도와 선형관계를 만족하였다. 응력이력으로 증가된 수평응력의 영향으로 인하여 과압밀 시료의 콘선단저항이 정규압밀 시료의 값보다 다소 크게 평가되었으나, 콘선단저항을 평균 유효응력으로 정규화시킬 경우 응력이력에 관계없이 단일화된 식으로 표현되었다. 평균 유효응력으로 정규화시킨 콘선단저항은 평균 유효응력에서 현재의 간극비와 한계상태 간극비의 차이를 나타내는 상태정수와도 응력이력에 관계없이 높은 상관성을 보였다.
- (2) 동일 상대밀도와 연직 유효응력 상태에서 딜라토미

터 시험의 딜라토미터 계수(E_D)와 수평응력지수(K_D)는 응력이력의 영향으로 증가하였다. 또한 콘선단저항과 딜라토미터 계수의 관계는 응력이력의 영향을 받지 않았으나, 동일 콘선단저항에서 과압밀 시료의 수평응력지수는 정규압밀 상태보다 크게 측정되었다. 즉 수평응력지수는 콘선단저항 뿐만 아니라 딜라토미터 계수보다 응력이력에 훨씬 더 민감한 것으로 밝혀졌다.

- (3) 딜라토미터 시험의 K_D 는 응력이력의 영향을 크게 받지만, 응력이력 효과가 잘 반영되는 정지토압계수 K_0 로 보정된 K_D/K_0 는 응력이력의 영향을 받지 않았다. 또한 $E_D/\sigma'_m-\psi$ 관계도 응력이력에 관계없이 동일한 식으로 표현되며, 이는 수평응력의 변화에 대한 딜라토미터 계수와 평균 유효응력의 민감도가 유사하기 때문이다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., Marchetti, S., and Pasqualini, E. (1986), "Flat dilatometer tests in calibration chamber", *Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, GSP 6, ASCE, pp.431-446.
2. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V.N., Jamiolkowski, M. and Lo Presti, D.F.C. (1988), "Modulus of sands from CPTs and DMTs", *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, Vol.1, pp.165-170.
3. Been, K., and Jefferies, M.G. (1985), "A state parameter for sands", *Geotechnique*, Vol.35, No.2, pp.99-112.
4. Been, K., Crooks, J.H.A., Becker, D.E., and Jefferies, M.G. (1986), "The cone penetration test in sands: Part I. State parameter interpretation", *Geotechnique*, Vol.36, No.2, pp.239-249.
5. Been, K., Jefferies, M.G., Crooks, J.H.A., and Rothenburg, L. (1987), "The cone penetration test in sands: Part II. General inference of state", *Geotechnique*, Vol.37, No.3, pp.285-299.
6. Bellotti, R., Fretti, C., Jamiolkowski, M., and Tanizawa, F. (1994), "Flat dilatometer tests in Toyoura sand", *Proceedings of 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, India, Vol.4, pp.1779-1782.
7. Campanella, R.G. and Robertson, P.K. (1991), "Use and interpretation of a research dilatometer", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.28, No.1, pp.113-126.

8. Choi, S.K., Lee, M.J., Choo, H.W., Tumay, M.T. and Lee, W.J. (2010), "Preparation of a large size granular specimen using a rainer system with a porous plate", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.33, No.1, pp.1-10.
9. Clayton, C.R.I., Hababa, M.B., and Simons, N.E. (1985), "Dynamic penetration resistance and the prediction of the compressibility of a fine-grained sand - a laboratory study", *Geotechnique*, Vol.35, No.1, pp.19-31.
10. Cubrinovski, M., and Ishihara, K. (1999), "Empirical correlation between SPT N-value and relative density of sandy soils", *Soils and Foundations*, Vol.39, No.5, pp.61-71.
11. 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.
12. 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.
13. Jamiolkowski, M., Ghionna, V. N., Lancellotta, R., and Pasqualini, E. (1988), "New correlation of penetration tests for design practice", *Proceedings of the 1st International Symposium on Penetration Testing*, Orlando, Florida, Vol.2, pp.263-296.
14. Jamiolkowski, M., and Robertson, P.K. (1988), "Closing address. Future trends for penetration testing", *Geotechnology Conference: Penetration Testing in the UK*, Birmingham, pp.321-342, Thomas Telford, London.
15. Jefferies, M.G., Jonsson, L., and Been, K. (1987), "Experience with measurement of horizontal geostatic stress in sand during cone penetration test profiling", *Geotechnique*, Vol.37, No.4, pp.483-498.
16. Houlby, G.T., and Hitchman, R. (1988), "Calibration chamber tests of a cone penetration in sand", *Geotechnique*, Vol.38, No.1, pp.39-44.
17. Kim, S.H., Lee, M.J., Choi, S.K., Hong, S.J., and Lee, W.J. (2007), "Relationship between the State Parameter and Cone Resistance of Busan Sand", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.3, pp.123-131.
18. Konrad, J.M. (1988), "Interpretation of flat plate dilatometer tests in sands in terms of the state parameter", *Geotechnique*, Vol.38, No.2, pp.263-227.
19. Kulhawy, F.H., and Mayne, P.H. (1990), *Manual on estimating soil properties for foundation design*, Electric Power Research Institute, EPRI.
20. Lambrechts, J.R., and Leonard, G.A. (1978), "Effect of stress history on deformation of sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.104, No.GT11, pp.1371-1387.
21. 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.
22. Marchetti, S. (1980), "In situ tests by flat dilatometer", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.106, No.3, pp.299-321.
23. Mayne, P.W. (1995), "CPT determination of OCR and K_0 in clean quartz sands", *Proceedings, CPT '95*, Swedish Geotech Society, Linkoping, Vol.2, pp.215-220.
24. Mayne, P.W., and Kulhawy, F.H. (1982), " K_0 -OCR relationships in soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.108, No.GT6, pp.851-872.
25. Miura, S., and Toki, S. (1982), "A Sample Preparation Method and Its Effect on Static and Cyclic Deformation-Strength Properties of Sand", *Soils and Foundations*, Vol.22, No.1, pp.61-77.
26. 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.
27. Robertson, P.K. (2009), "CPT-DMT correlations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.135, No.11, pp.1762-1771.
28. 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.
29. Schmertmann, J.H. (1976), "An updated correlation between relative density DR and Fugro-Type electric cone bearing, q_c ", *Contract report, DACW 38-76M 6646*, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
30. Yoshimi, Y., Kuwabara, F., and Tokimatsu, K. (1975), "One-dimensional volume change characteristics of sands under very low confining stresses", *Soils and Foundation*, Vol.15, No.3, pp.51-60.

(접수일자 2010. 4. 15, 심사완료일 2010. 6. 22)