

응력이력이 사질토의 CPT-DMT 상관관계에 미치는 영향

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

이문주¹⁾, Moon-Joo Lee, 최성근²⁾, Sung-Kun Choi, 김민태³⁾, Min-Tae Kim,
이주형³⁾, Ju-Hyeong Lee, 이우진⁴⁾, Woojin Lee

¹⁾ 고려대학교 공과대학 건축토목환경공학부 BK 박사후연구원, Research, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea Univ.

²⁾ 나우지오 컨설턴트 이사, Director, Nawoogeo consultant Co., Ltd.

³⁾ 고려대학교 공과대학 건축토목환경공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea Univ.

⁴⁾ 고려대학교 공과대학 건축토목환경공학부 교수, Professor, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea Univ.

SYNOPSIS : Stress history increases in penetration resistance due to the increase in residual horizontal stress of granular soil. This study analyzes the effect of stress history on the results 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 with regard to vertical effective stress is a little affected by stress history. The horizontal stress index(K_D) in DMT more reflects the influence of stress history on granular soil than the dilatometer modulus(E_D) and cone resistance(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) is unique correlated with the state parameter, regardless of stress history.

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

1. 서론

콘관입시험(CPT)과 dilatometer 시험(DMT)은 비교적 경제적으로 각종 토질정수를 간단하고 반복적으로 평가할 수 있는 장점 때문에 가장 널리 이용되는 현장시험법이다. 현재까지 수많은 현장 및 실내시험으로부터 CPT와 DMT로부터 산출되는 각종 측정값들의 상관관계 뿐만 아니라, 측정값들과 토질정수의 상관관계가 평가되었다. Baldi et al.(1986a), Jamiolkowski et al.(1985, 2003)는 연직 또는 평균 유효 응력으로 정규화된 사질토의 콘선단저항과 상대밀도의 관계를 평가되었다. 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 Been et al.(1985)이 제시한 상태정수(state parameter)와 콘선단저항, DMT 수평응력지수의 관계를 평가하였다. Baldi et al.(1986b), Jamiolkowski and Robertson(1988), Campanella and Robertson(1991), Robertson(2009) 등은 CPT와 DMT 결과의 상관관계를 검토하였다.

사질토 지반의 경우, 상대밀도와 현재 응력수준이 관입저항치에 가장 큰 영향을 미치지만, 선행응력과

현재상태 응력의 비로 결정되는 응력이력은 지반의 수평응력을 증가시키기 때문에 관입저항치를 증가시킨다. Marchetti(1980)와 Jamiolkowski et al.(1988)는 DMT의 수평응력지수가 지반의 과압밀비의 분포와 유사함을 보였다. 특히 응력이력은 사질토 지반의 변형계수에 큰 영향을 미치기 때문에, 관입저항치와 변형계수의 비는 과압밀비가 증가할수록 점차 증가하는 경향을 보인다(Baldi et al. 1988; Jamiolkowski et al. 1988). Baldi et al.(1986), Jamiolkowski et al.(1988)는 콘선단저항과 수평응력지수를 비교하여 사질토에 미치는 응력이력의 영향을 평가하였다.

이상과 같은 사질토의 응력이력에 대한 연구 성과에도 불구하고 현장시험으로부터 평가된 지반의 응력이력 상태는 신뢰성이 매우 부족하여 이를 설계에 직접 활용하는 예는 드물다. 따라서 응력이력이 현장시험 결과에 미치는 영향에 대한 좀 더 심도깊은 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 챔버에 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. 부산사의 평균입경은 0.315mm 이고 균등계수와 곡률계수는 각각 2.34, 0.71로써, 통일분류법에 의해 SP로 분류된다. 성분분석(XRF) 결과 SiO₂의 함유량이 큰 석영질 모래로 파악되었다. 그림 2에서는 부산사와 다양한 규산염 모래의 최대, 최소 간극비를 비교하였다. 부산사의 최대, 최소 간극비는 1.063, 0.658로 결정되었으며, 부산사는 Cubrinovski and Ishihara(1999)이 제안한 일반적인 규산염 모래의 최대-최소 간극비 관계를 만족하였다.

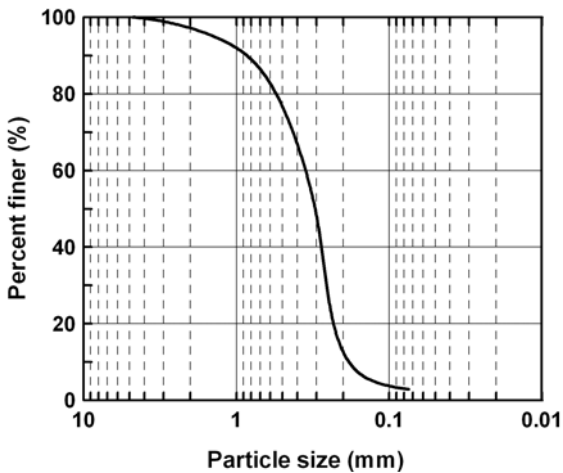


그림 1. 부산사 입도분포

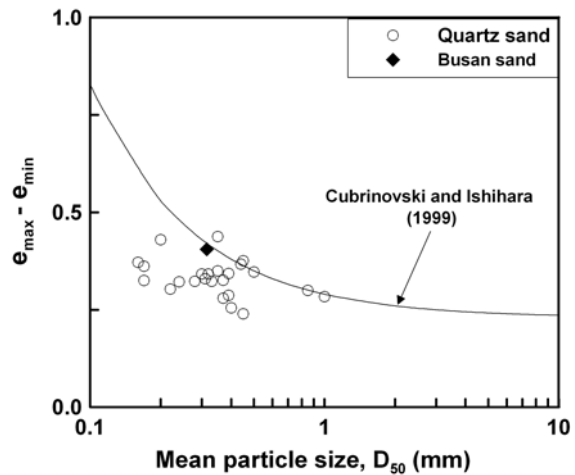


그림 2. 그림 2. 부산사의 최대, 최소 간극비 관계

표 1. 부산사 기본물성

G_s	$D_{10}(\text{mm})$	$D_{50}(\text{mm})$	% fines	C_u	C_c	e_{\max}	e_{\min}	USCS
2.62	0.162	0.315	3.13	2.35	0.71	1.063	0.658	SP

2.2 챔버 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 있도

록 측면의 챔버셀은 이중벽으로 구성되어 있고, 응력은 챔버의 내측셀, 외측셀, 그리고 하부 피스톤과 연결된 제어판에서 조절한다.

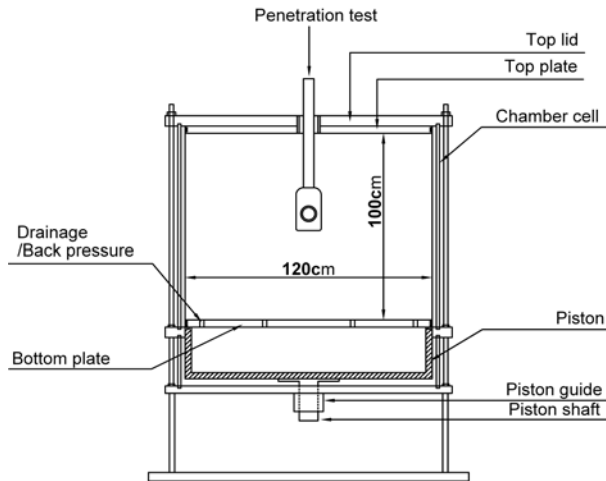


그림 3. 챔버 시스템과 관입시험 모식도

챔버에서는 레이너 시스템을 이용한 건조낙사법으로 다양한 상대밀도의 시료를 균등하게 조성한다. 본 연구에서 사용된 레이너 시스템은 시료저장을 위한 직경 1.2m, 높이 1.0m의 상부 sand storage, 낙사되는 모래시료의 낙하량이 조절되는 개폐판(shutter plate), 그리고 적정 낙하고를 제공하기 위한 extension tube와 효율적인 시료 분산을 위한 분산시스템으로 구성된다. 목표 상대밀도 40, 60, 80%의 시료를 조성하기 위해 적절한 낙하고에서 시료를 낙사시킨 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 과압 밀비(OCR) 2, 4, 8의 과압밀상태 시료에 대한 콘관입시험과 딜라토미터 시험을 수행하였다.

챔버시료에서 측정되는 콘선단저항은 챔버의 직경과 경계조건의 영향을 받으며, 챔버직경과 콘직경의 비가 증가할수록 챔버시험 결과는 현장시험 결과에 근접한다. 느슨한 사질토 시료의 경우, 직경비 20 이상에서 챔버시험과 현장시험 결과가 유사한 것으로 알려지고 있으나, 조밀한 시료의 경우 관입도중 발생하는 시료의 팽창경향이 크기 때문에 직경비 50 이상에서 경계조건의 영향을 무시할 수 있는 것으로 알려지고 있다. 본 연구에서는 직경 3.57cm(단면적 10cm²)인 표준콘을 사용하였기 때문에, 조밀한 시료의 경우 경계조건의 영향을 반영할 수 있는 기준이 필요하다. 따라서 챔버시험에서 측정된 콘선단저항은 Been et al.(1986)이 제안한 기준을 사용하여 보정하였다.

딜라토미터(DMT)는 폭 95mm, 두께 15mm, 길이 230mm인 노 모양의 관입체에 60mm 직경의 강철 멤브레인이 장착되어 있다. DMT 시험은 강철 멤브레인에 소정의 변위가 발생할 때의 압력을 측정하여, 이를 통해 수평방향 응력과 관련된 지반의 역학적 특성들을 추정한다. Marchetti (1980)는 DMT 결과로부터 3개의 딜라토미터 지수를 제안하였다. 딜라토미터 계수 $E_D(=34.7[P_1-P_0])$ 는 흙의 강성과 관계되며, 수평응력지수 $K_D(=[P_0-u_0]/\sigma_{v0}')$ 는 흙의 정지토압계수와 관계되어 과압밀비나 내부마찰각을 구하는데 이용된다. 또한 재료지수 $I_D(=[P_1-P_0]/[P_0-u_0])$ 는 흙의 공학적 분류를 위해 사용되며 흙의 강성지수와도 관계된다. 여기서, P_0 와 P_1 는 각각 딜라토미터 멤브레인의 초기 접촉압력과 1.1mm 팽창압력이며, u_0 는 관입 전 간극수압, σ_{v0}' 은 연직유효응력이다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 콘선단저항에 대한 응력이력 영향

부산사의 콘선단저항과 상대밀도 관계를 나타낸 그림 4(a)에서와 같이, 연직유효응력으로 정규화된 콘

선단저항은 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 증명한 바와 같이, 사질토의 콘선단저항은 연직응력 뿐만 아니라 수평응력의 영향을 크게 받는다. 따라서 그림 4(a)에서 과압밀 상태 부산사의 콘선단저항이 정규압밀 상태의 값보다 더 크게 측정된 것은 과압밀 시료에 가해진 선행하중에 의해 증가된 수평응력이 하중 제하 후에 완전히 소멸되지 않았기 때문이다.

Jamiolkowski et al.(2003)은 평균 유효응력으로 정규화된 콘선단저항과 상대밀도의 관계를 식 (1)과 같이 제시하였다. 여기서, C_1 , C_2 , C_3 는 모래의 특성에 따른 상수이다. 식 (1)에 기초하여 표현된 부산사의 콘선단저항-평균 유효응력-상대밀도의 관계는 그림 4(b)와 같다. 부산사의 경우, 최적의 상관성을 만족시키는 C_1 은 0.54로 결정되었다. 그림 4(b)와 같은 상대밀도와 콘선단저항의 관계에서 콘선단저항을 연직 유효응력이 아닌 평균 유효응력으로 정규화시킬 경우, 응력이력의 영향을 받지 않는 단일화된 관계를 얻을 수 있다(Baldi et al. 1986a).

$$D_R = \frac{1}{C_2} \ln \left(\frac{q_c}{C_0 (\sigma_m')^{C_1}} \right) \quad (1)$$

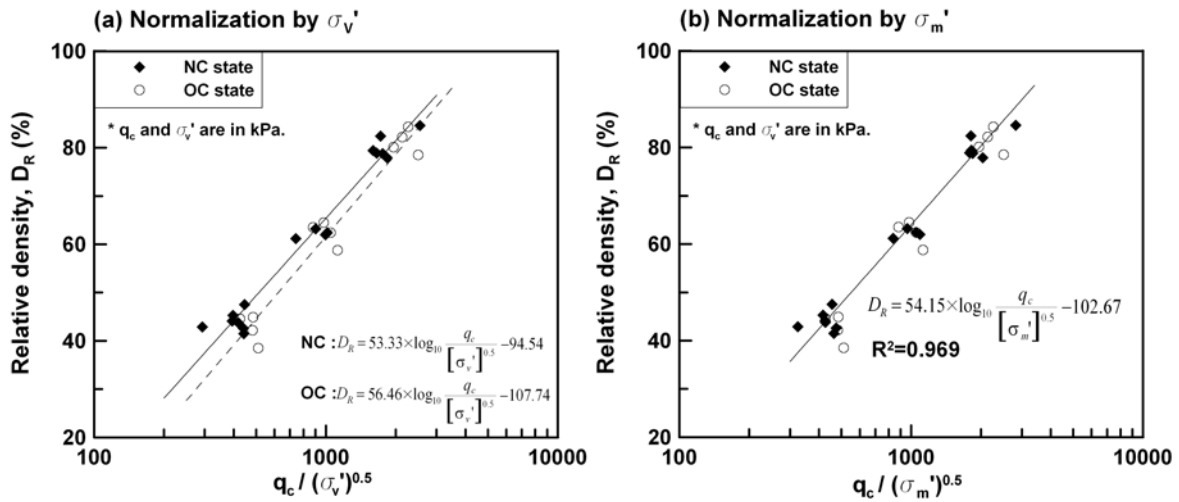


그림 4. 상대밀도 및 응력에 따른 부산사의 콘선단저항 분포

Been and Jefferies(1985)는 동일한 평균 유효응력에서 현재상태 간극비와 한계상태 간극비의 차이인 상태정수(state parameter, ψ)를 정의하였다. 또한 Been et al.(1986, 1987)은 상태정수와 콘선단저항의 관계를 식 2와 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 유효응력으로써, 건조상태 사질토의 경우에 두 값은 동일하다. κ 와 m 은 토질에 따라 결정되는 상수이다. 그림 5는 부산사의 콘선단저항과 상태정수의 관계이다. 각 부산사 챔버시료에 대한 상태정수를 산출하기 위해 기존 연구(Kim et al. 2007)에서 결정된 부산사의 한계상태정수($M=1.39$, $\Gamma=1.07$, $\lambda=0.068$)을 활용하였다. Been et al.(1986, 1987)의 결과와 마찬가지로 부산사의 경우에도 반대수축상에서 콘선단저항과 상태정수는 선형관계를 만족하였다. 또한 시료의 과압밀 여부에 관계없이 부산사의 콘선단저항과 상태정수 관계는 단일 식으로 표현되었다.

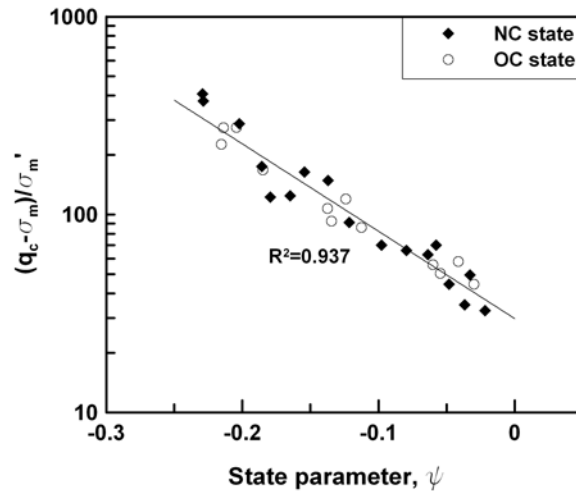


그림 5. 응력이력이 부산사의
콘선단저항-상태정수 관계에 미치는 영향

3.2 응력이력에 따른 E_D , K_D 변화

그림 6은 연직구속압과 상대밀도에 따른 부산사의 dilatometer 계수(E_D)와 수평응력지수(K_D) 분포이다. 그림 6(a)에서 부산사의 dilatometer 계수(E_D)는 연직 유효응력이 증가할수록 점차 증가하였다. 또한 동일 상대밀도와 연직 유효응력 상태에서 과압밀 시료의 dilatometer 계수가 정규압밀 시료보다 8~63% 크게 측정되었으며, 시료의 과압밀비가 증가할수록 그 편차는 더욱 뚜렷하였다. 따라서 dilatometer 계수는 응력이력의 영향을 받는 것으로 나타난다.

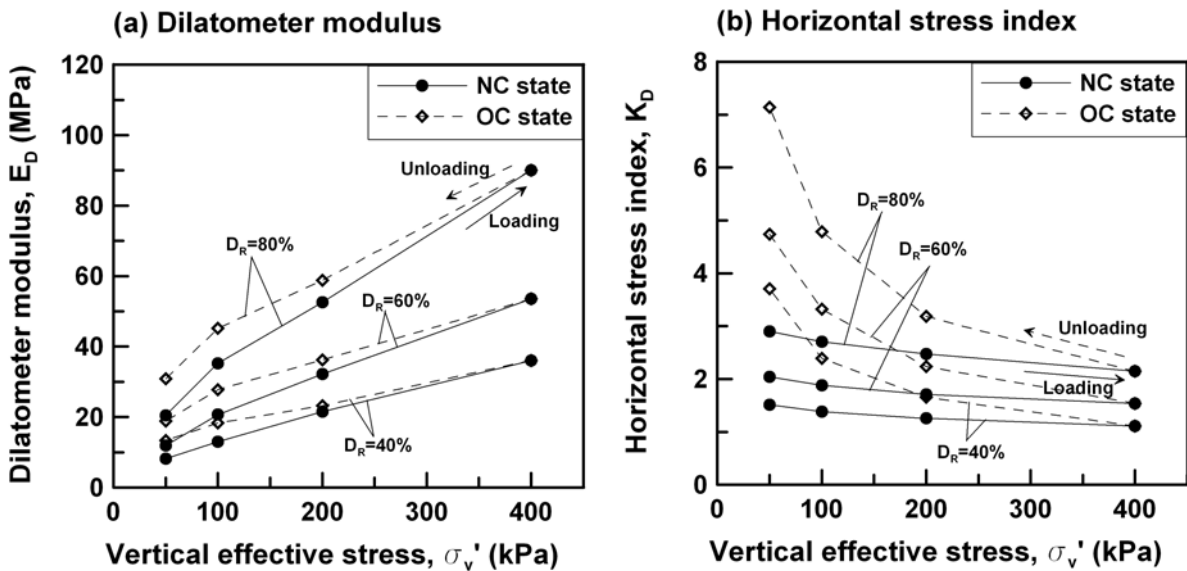


그림 6. 하중 재하 및 제하에 따른 E_D 와 K_D 의 변화

그림 6(b)는 부산사의 수평응력지수(K_D) 변화를 보여준다. dilatometer 지수와는 달리, 정규압밀 상태에서 부산사의 수평응력지수의 변화는 미소하였다. 이와 같은 결과는 정규압밀 상태에서 수평응력지수는 정지토압계수인 K_0 와 상관성이 높으며, 사질토의 정지토압계수는 정규압밀 상태에서 상대밀도 및 연직 구속압의 변화에 크게 민감하지 않기 때문이다. 반면, 400kPa에서 연직 유효응력을 감소시키면서 측정된 과압밀 시료의 수평응력지수는 동일한 상태의 정규압밀 시료의 수평응력지수보다 1.3배~2.5배 크게 측정

되었다. 즉 사질토의 응력이력은 dilatometer 계수보다 수평응력지수에 더 큰 영향을 미치며, 사질토 지반의 응력이력 효과를 평가함에 있어 수평응력지수를 분석하는 것이 효과적이다.

3.3 K_D 의 응력이력 보정

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

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

그림 7(a)은 식 3에 기초하여 표현된 상대밀도에 따른 부산사의 수평응력지수 분포이다. 동일한 상대밀도에서 과압밀 시료의 수평응력지수가 정규압밀 시료의 값보다 상부에 위치하였다. 이와 같은 결과는 사질토의 수평응력지수는 dilatometer 계수나 콘선단저항 보다도 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 흙의 소성변형은 CPT나 DMT와 같은 현장 관입시험은 관입도중 발생하는 흙의 대변형 때문에 대부분 소멸되며, 관입시험에서 나타나는 대부분의 응력이력 효과는 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 7(b)는 사질토의 수평응력지수를 정지토압계수로 정규화시켜 표현된 K_D/K_0 - D_R 관계이다. 그림 7(a)의 K_D - D_R 관계와는 달리 K_D 에 반영된 응력이력 효과가 K_0 로 보정되어, 응력이력이 K_D/K_0 - D_R 관계에 미치는 영향은 매우 미소하게 나타났다.

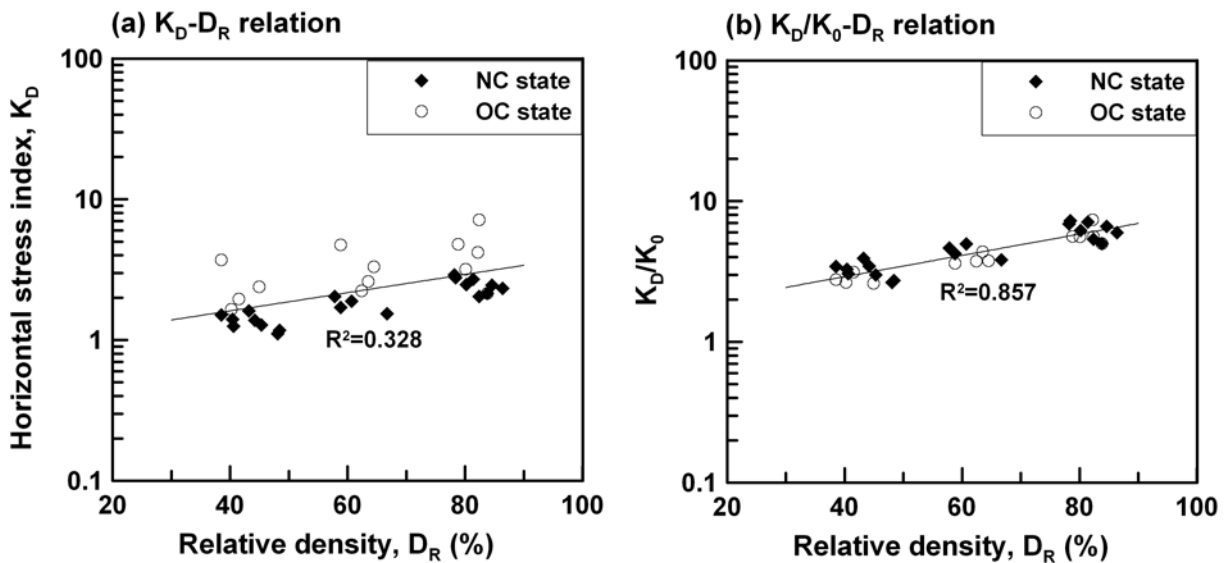


그림 7. K_D - D_R 관계에 미치는 응력이력의 영향 및 보정

3.4 응력이력에 따른 K_D - q_c 관계

Jamiolkowski et al.(2003)은 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 가정한다). χ , δ 는 챔버 시험이나 현장시험으로부터 결정될 수 있는 토질 상수이다.

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

그림 식 (5)에 기초하여 부산사의 콘선단저항과 수평응력지수의 관계를 그림 8(a)에 표현하였다. 콘선단 저항이 평균 유효응력으로 정규화되어 응력이력의 영향이 상쇄되었으나, 수평응력지수에는 여전히 응력이력의 영향이 크게 작용하기 때문에, 정규압밀 시료보다 과압밀 시료의 수평응력지수가 상향 분포하였다. 반면 그림 8(b)와 같이 수평응력지수를 K_0 로 정규화시킨 후, 평균 유효응력으로 정규화시킨 콘선단 저항과 나타낼 경우, 응력이력의 영향이 거의 상쇄되었으며, 시료의 과압밀 여부에 관계없이 동일한 식으로 표현 가능하였다.

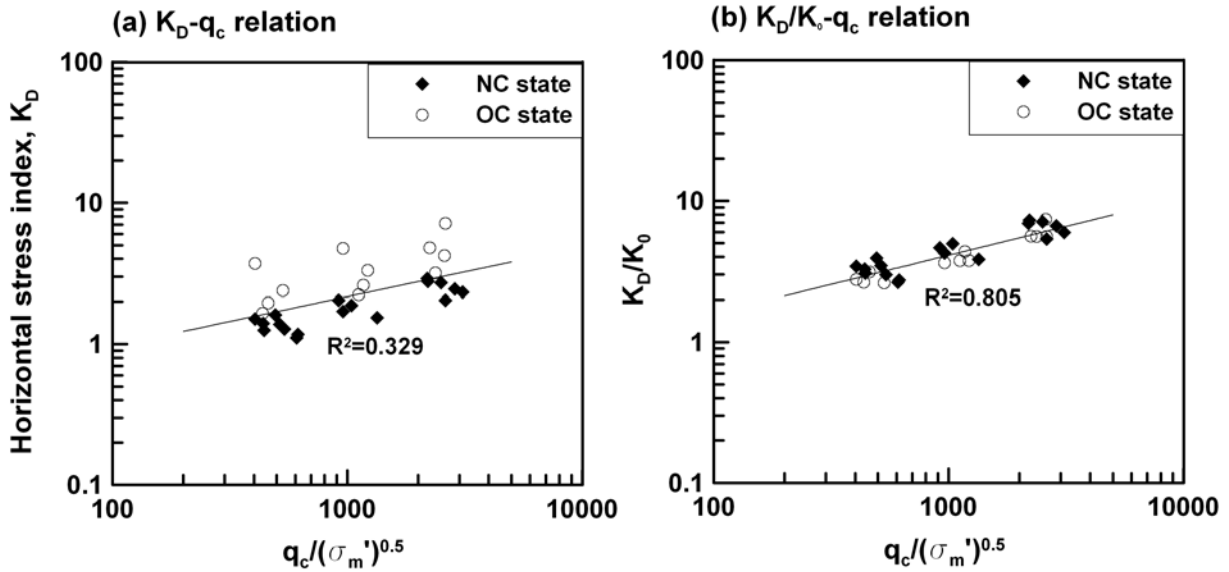


그림 8. K_D - q_c 관계 및 응력이력 영향 보정

3.5 사질토의 상태정수와 DMT 관계

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

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

그림 9(a)는 식 (6)에 기초하여 표현된 부산사의 상태정수와 K_D/K_0 의 관계이다. Jamiolkowski et al.(1988)의 결과와 마찬가지로 부산사의 K_D/K_0 와 상태정수는 반대수축에서 선형관계를 만족하였다. 과압밀 상태의 K_D/K_0 가 정규압밀 상태의 값보다 미소하게 과소평가되었으며, 이는 정지토압계수 K_0 는 순수하게 수평응력의 영향을 나타내는 반면, 수평응력지수 K_D 는 수평응력 뿐만 아니라 연직응력의 영향도 일부 반영되기 때문으로 판단된다. 그러나 응력이력은 K_D/K_0 - ψ 관계에 큰 영향을 주지 못하였다.

Konrad(1988)는 Ottawa sand에 대한 챔버 딜라토미터 시험 결과를 분석하여 딜라토미터 멤브레인의 1.1mm 팽창을 유발시키기 위해 필요한 추가 압력인 $\Delta P (=P_1 - P_0)$ 이 흙의 평균 유효응력과 상태정수와 관계됨을 분석하였다. 또한 Konrad(1988)는 조밀한 상태에서는 $\Delta P/\sigma_m'$ 의 기울기가 상태정수의 작은 변화에도 크게 변화하며, 반면 느슨한 상태에서는 상태정수의 큰 변화에도 $\Delta P/\sigma_m'$ 의 기울기가 작게 변화함을 관찰하였다. 이러한 Konrad(1988)의 관찰 결과는 식 (7)과 같은 관계로 표현될 수 있다. 여기서 x는 상태정수가 0인 경우 평균유효응력으로 정규화된 딜라토미터 계수이며, y는 E_D - σ_m' 관계의 기울기이다.

$$\frac{E_D}{\sigma_m} = \exp(-y\psi) \quad (7)$$

식 (7)에 기초하여 부산사의 상태정수와 평균 유효응력으로 정규화된 딜라토미터 계수(E_D/σ_m') 관계를 그림 9와 같이 표현하였으며, 반대수축 상에서 부산사의 E_D/σ_m' 은 상태정수와 선형관계를 만족하였다. 또한 $E_D/\sigma_m'-\psi$ 관계는 응력이력에 관계없이 동일한 식으로 표현될 수 있으며, 이는 딜라토미터 계수와 평균 유효응력이 수평응력의 변화에 유사하게 반응하기 때문이다.

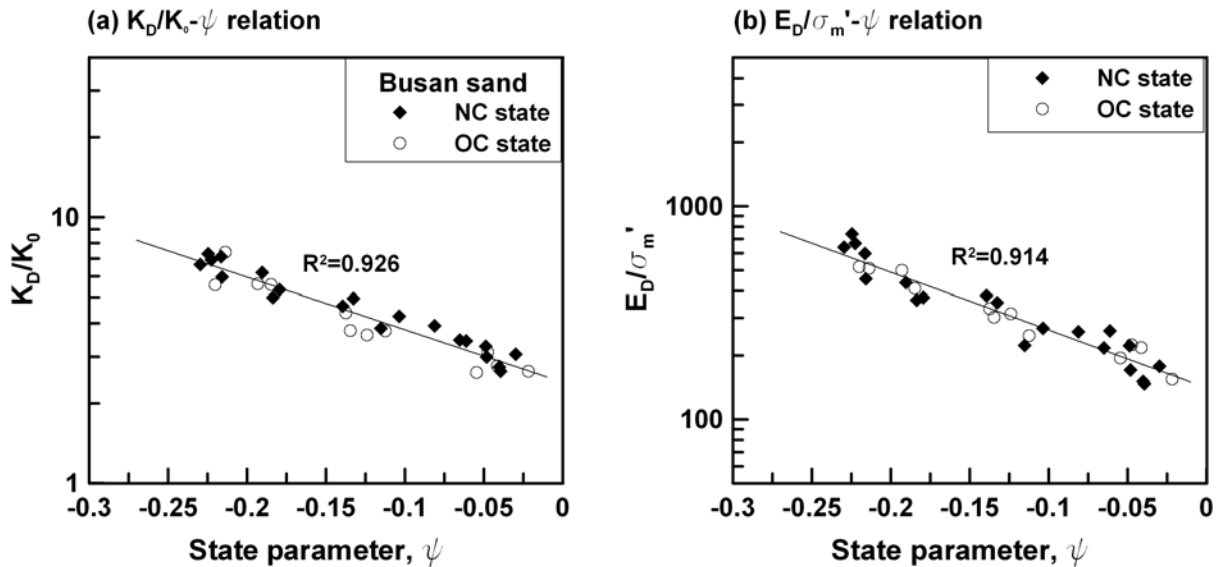


그림 9. 부산사의 상태정수와 K_D , E_D 관계

4. 결론

본 연구에서는 챔버에 조성된 정규압밀, 과압밀 상태의 사질토에서 수행된 콘관입시험과 딜라토미터 시험 결과를 분석하여 응력이력이 시험 결과에 미치는 영향을 분석하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

1. 연직응력으로 정규화된 콘선단저항은 정규압밀과 과압밀 상태에서 각각 상대밀도와 반대수축상의 선형관계를 만족하였다. 반면, 콘선단저항을 평균 유효응력으로 정규화시킬 경우 응력이력의 영향이 없는 단일화된 관계로 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 딜라토미터 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 상부에 위치하였다. 즉 수평응력지수는 콘선단저항 뿐만 아니라 딜라토미터 계수보다 응력이력의 영향을 더 효과적으로 반영한다.
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. 즉, K_D 와 상대밀도의 관계, K_D 와 콘선단저항(q_c)의 관계 뿐만 아니라, K_D 와 평균 유효응력으로 정규화된 콘선단저항의 관계 모두 응력이력의 영향이 크게 나타났다. 그러나, K_D/K_0 는 상대밀도, 상태정수, 평균 유효응력으로 정규화된 콘선단저항과의 관계에서 모두 정규압밀과 과압밀 상태의 구분 없이 유일한 관계로 표현되었다.

4. 사질토의 상태정수와 평균 유효응력으로 정규화된 딜라토미터 계수(E_D/σ'_m)의 관계는 응력이력에 관계없이 동일한 식으로 표현되며, 이는 딜라토미터 계수와 평균 유효응력이 수평응력의 변화에 유사하게 반응하기 때문이다.

감사의 글

본 연구는 고려대학교 특별연구비에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., and Pasqualini, E. (1986a), "Interpretation of CPTs and CPTUs; 2nd part: drained penetration of sands", Proceedings of the Fourth International Geotechnical Seminar, Singapore, pp.143-156.
2. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., Marchetti, S., and Pasqualini, E. (1986b), "Flat dilatometer tests in calibration chamber", Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, GSP 6, ASCE, pp.431-446.
3. 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.
4. Been, K., and Jefferies, M.G. (1985), "A state parameter for sands", Geotechnique, Vol.35, No.2, pp.99-112.
5. 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.
6. 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.
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. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.

14. 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.
15. Houlsby, G.T., and Hitchman, R. (1988), "Calibration chamber tests of a cone penetration in sand", *Geotechnique*, Vol.38, No.1, pp.39-44.
16. 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.
17. 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.
18. Kulhawy, F.H., and Mayne, P.H. (1990), *Manual on estimating soil properties for foundation design*, Electric Power Research Institute, EPRI.
19. Lunne, T., Robertson, P.K., and Powell, J.J.M. (1997), *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, Blackie Academic & Professional, London
20. Marchetti, S. (1980), "In situ tests by flat dilatometer", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.106, No.3, pp.299-321.
21. Robertson, P.K. (2009), "CPT-DMT correlations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.135, No.11, pp.1762-1771.
22. 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.