

딜라토미터 시험을 이용한 사질토의 상태정수 평가

Evaluation of State Parameter of Sands Using Dilatometer Test

최 성 근¹ Choi, Sung-Kun

이 문 주² Lee, Moon-Joo

홍 성 진³ Hong, Sung-Jin

이 우 진⁴ Lee, Woo-Jin

Abstract

In this study, a series of flat dilatometer tests are performed for Busan sand reconstituted in a large calibration chamber to evaluate the state parameter (ψ). Experimental result shows that the horizontal amplification factor (K_D/K_0) is linearly related with state parameter in semi-logarithmic space, but the K_D/K_0 of OC specimen is smaller than that of NC specimen because of the horizontal residual stress by stress history of OC specimen. The relation between the normalized dilatometer modulus (E_D/σ'_m) and the state parameter is also linearly expressed in semi-logarithmic space, and the effect of stress history is relatively insignificant in this relation. However, the variation in E_D/σ'_m - ψ relation of NC state is slightly higher than that of OC state due to the effect of the stress level, and the correlation curve is descending with increase of confining stress. The comparison of test result with previous results of Ticino and Toyoura sands shows that the E_D/σ'_m - ψ relation of Toyoura sand is located on upper side than that of Busan and Ticino sands due to the effect of the higher compressibility, whereas the K_D/K_0 - ψ relation of each sand is irregularly distributed.

요 지

사질토의 상태정수를 현장시험으로부터 추정하기 위해 실내 챔버에 조성된 부산사에 대해 딜라토미터 시험을 수행하였다. 시험결과, 수평증폭계수(K_D/K_0)와 상태정수(ψ)의 관계는 반대수축상에서 선형관계를 보였으나, 응력이력에 의한 잔류수평응력의 영향으로 과압밀 시료가 정규압밀 시료에 비하여 동일한 상태정수에서 수평증폭계수의 값이 작게 평가되었다. 유효응력으로 정규화된 딜라토미터 계수(E_D/σ'_m)와 상태정수의 관계는 반대수축상에서 선형관계를 만족하였으며, 다소의 분산은 있으나 응력이력에 관계없이 하나의 관계식으로 표현 가능하였다. 다만 응력수준의 영향으로 과압밀 상태보다 정규압밀 상태의 분산이 약간 크게 발생되었으며 구속압이 증가할수록 관계곡선이 하향 이동하는 경향이 나타났다. 기존에 연구된 Ticino sand 및 Toyoura sand와 비교한 결과, K_D/K_0 - ψ 관계는 혼재되어 분포하였으나, E_D/σ'_m - ψ 관계는 시료 압축성의 영향으로 Toyoura sand가 Ticino sand 및 부산사의 상부에 위치하였다.

Keywords : Busan sand, Dilatometer modulus, Dilatometer tests, Horizontal stress index, State parameter

1. 서 론

점성토 지반과 달리 사질토 지반은 불교란 시료의 채

취가 어려우므로, 지반의 강도와 변형 특성을 표준관입 시험(SPT), 콘관입시험(CPT) 등과 같은 현장관입시험 및 이와 관련된 경험식들을 활용하여 간접적으로 평가

1 정회원, (주)나우지오컨설턴트 이사 (Member, Director, Nawoogeo Consultant. Co., Ltd.)

2 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사후연구원 (Member, Research Scholar, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

4 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Member, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

하고 있다. 특히 딜라토미터(DMT)는 기존의 관입형 시험방법에 비하여 주변지반의 교란이 상대적으로 적게 발생하고, 강도특성 뿐만 아니라 변형특성에 대한 신뢰성 있는 평가가 가능하다는 장점 때문에 사용이 증가하고 있으며, 지반 정수와 관련된 해석방법 또한 이론적, 실험적 측면에서 다양하게 발전되고 있다.

관입시험의 경우 사질토 지반의 한계상태를 평가하기 위한 연구들이 활발히 진행되어 다양한 사질토에 대한 상태정수와 콘선단저항의 관계가 밝혀졌으며(Been 등 1986, 1987; Sladen 1989), 국내에서는 Kim 등(2007)이 부산사에 대한 일련의 삼축압축시험과 실내 챔버 콘관입시험 결과를 분석하여, 부산사의 각종 지반정수 및 상대밀도와 구속압에 따른 콘선단저항, 그리고 상태정수와 콘선단저항 관계를 제시하였다. 반면, 딜라토미터 시험을 이용한 사질토의 한계상태 평가에 대한 연구는 상대적으로 미진하여 소형챔버 실험결과로부터 Ottawa sand의 딜라토미터 멤브레인 팽창압을 상태정수와 평균 유효응력의 관계로 분석한 Konrad(1988), 각종 사질토에 대해 상태정수와 딜라토미터 수평증폭계수(horizontal amplification factor, K_D/K_0)의 관계를 결정한 Jamiolkowski 등(1988), Lawter and Borden(1990), Borden(1991) 그리고 Bellotti 등(1994)이 있을 뿐이며 국내 사질토의 딜라토미터시험 결과와 한계상태에 대한 관계는 밝혀진 바 없다.

본 논문에서는 응력과 상태정수가 딜라토미터시험 결과에 미치는 영향을 평가하기 위하여 대형 챔버에 조성된 부산사 시료에 대하여 다양한 상대밀도와 응력조건에서의 딜라토미터 시험을 수행하였다. 시험결과와 기존자료를 비교분석하여 응력과 시료특성이 상태정수와 수평증폭계수 관계에 미치는 영향을 확인하였다. 이와 더불어 딜라토미터 변형계수와 구속응력 그리고 상태정수의 시료 특성 및 응력이력에 따른 관계성을 연구하여 부산사의 상태정수와 딜라토미터 지수들 간의 관계를 제안하였다.

2. 사질토의 상태정수 평가

2.1 흙의 한계상태와 상태정수

흙의 한계상태는 일정한 응력과 간극비 상태에서 흙의 변형이 지속적으로 발생하는 극한상태(ultimate state)로써, 전단도중 체적변형이 없는 상태를 의미한다(Poulos

1981). 사질토의 한계상태는 모래의 압축성, 내부마찰각, 입자의 입도분포 및 모양, 광물적 특성, 그리고 최대, 최소 간극비와 같은 다양한 물리적 특성에 의해 영향을 받는다.

흙의 거동은 3차원 공간상에서 간극비(e), 평균유효응력(p' 또는 σ'_m), 그리고 축차응력(q)으로 표현되며, 이를 2차원 평면상에 표현하면 그림 1과 같다. 이때 p' - q 면에서 한계상태선(CSL)의 기울기는 식 (1)과 같이 한계상태마찰각(ϕ_{cs})의 함수로 나타난다. 또한 e - $\log(p')$ 면에 투영된 한계상태선은 $p'=1kPa$ 일 때의 절편(Γ)과 기울기(λ_{ss})로 표현할 수 있다(식 (2)).

$$M = \left(\frac{q}{p'} \right) = \frac{6 \sin \phi_{cs}}{3 - \sin \phi_{cs}} \quad (1)$$

$$e_{cs} = \Gamma - \lambda_{ss} \log \left(\frac{p'}{1kPa} \right) \quad (2)$$

Been and Jefferies(1985)는 모래의 전단거동에 따른 체적변화 경향을 정량적으로 분석하기 위하여 모래의 거동에 영향을 주는 주요 인자인 간극비와 응력을 조합시킨 변수로써 상태정수 (state parameter, ψ)를 정의하

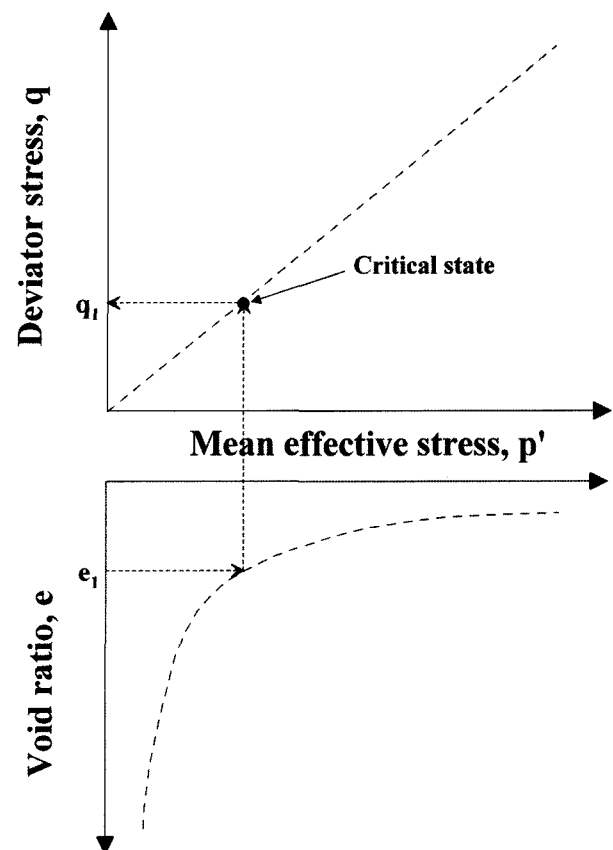


그림 1. 흙의 한계상태선(CSL)

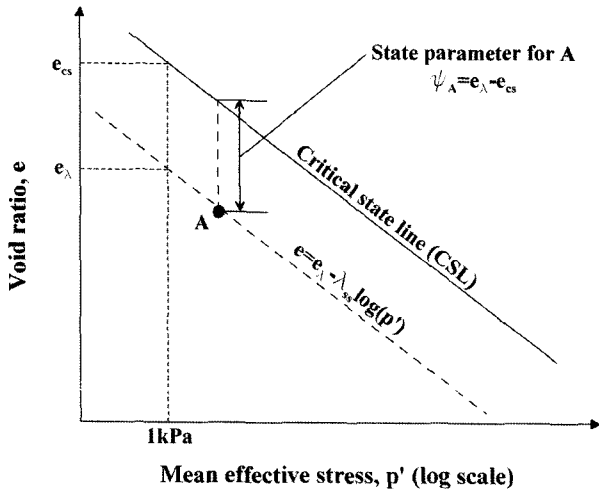


그림 2. 상태정수(ψ)의 정의(Been and Jefferies 1985)

였다. 그림 2와 같이, 상태정수는 동일한 평균유효응력에 대하여 현재의 간극비(e)와 한계상태간극비(e_{cs})의 차이로 정의되며, 양(+)의 상태정수를 가지는 시료는 전단 시 압축거동이, 부(-)의 상태정수를 가지는 시료는 팽창거동이 주로 발생한다.

2.2 현장 관입시험을 이용한 사질토의 상태정수 평가

Been 등(1986)은 다양한 실내 챔버 콘관입시험 결과를 분석하여 상태정수와 콘저항치의 관계를 식 (3)과 같이 제안하였다. 여기서 m 은 정규화된 콘저항치(Q_p)와 상태정수 관계의 기울기를 의미하고, κ 는 $\psi=0$ 인 경우의 정규화된 콘저항치를 의미한다. 또한 Been 등(1987)은 사질토들에 대한 결과를 분석하여 한계상태선의 기울기(λ_{ss})와 상수 m , κ 의 관계를 $m=8.1-\ln(\lambda_{ss})$, $\kappa=8+0.55/(\lambda_{ss}-0.01)$ 로 제안하였다.

$$Q_p = \frac{q_c - \sigma_m}{\sigma_m} = \kappa \exp(-m \times \psi) \quad (3)$$

Jefferies 등(1987)은 수평응력콘을 이용한 챔버시험 결과로부터 관입시 측정된 수평응력(σ_{hc})과 초기 수평응력(σ_{h0})의 비인 증폭계수(σ_{hc}/σ_{h0})와 상태정수의 관계가 반대수축상에서 선형성을 만족한다고 주장하였으며, Jamiolkowski 등(1988)은 상태정수와 수평응력콘 증폭계수의 관계를 dilatometer 시험에 적용하여 수평응력지수(K_D)와 상태정수의 관계를 식 (4)와 같이 표현하였다. 또한 Ticino sand와 Hokksund sand에 대한 챔버시험 결과를 분석하여 그림 3과 같이 dilatometer 수평증폭계수

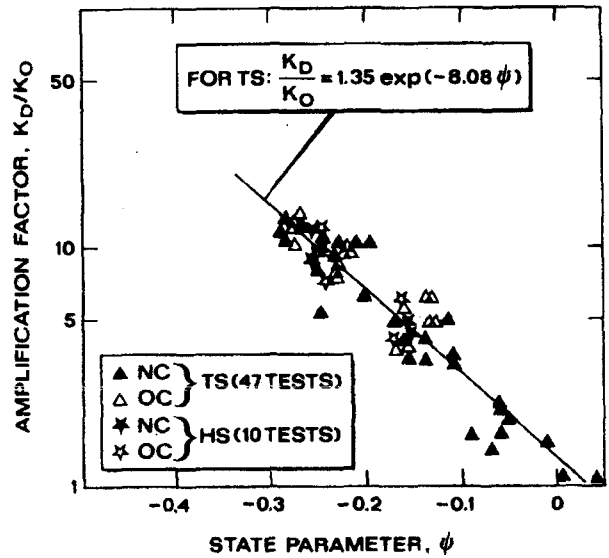


그림 3. Ticino sand와 Hokksund sand의 상태정수와 수평증폭계수 (K_D/K_0)의 관계(Jamiolkowski 등 1988)

(K_D/K_0)와 상태정수 관계가 응력이력 여부에 상관없이 양호한 것을 확인하였다.

$$\frac{K_D}{K_0} = a \exp(b \times \psi) \quad (4)$$

또한, Konrad(1988)은 Ottawa sand에 대한 소형챔버 시험을 수행하여 dilatometer의 멤브레인을 1.1mm 팽창시키기 위해 필요한 압력인 $\Delta P (=P_1 - P_0)$ 에 대한 영향요인은 평균유효응력과 상태정수이며, ΔP 와 평균유효응력은 상태정수에 따라 선형관계를 가진다고 주장하였다. 여기서, P_0 와 P_1 은 각각 dilatometer 멤브레인의 초기 접촉압력과 1.1mm 팽창압력이다. 그러나 시험방법의 특성상 관입을 모델링 할 수 없었으므로 관입 시 dilatometer 주변에 발생하는 교란과 이로 인한 수평응력의 변화를 고려하지 않았으며 소형챔버의 사용으로 경계조건 및 응력조건에 대한 영향 등이 문제점으로 남아있다.

3. 시료특성 및 시험계획

3.1 부산사 기본특성

본 연구에 사용된 부산사는 부산근해 육지도 남단 50km에서 준설된 해사로써, 입도분포는 그림 4와 같고, 표 1의 기본특성과 같이 평균입경 0.31mm, sub-angular~angular의 모난 정도를 가지며, 통일분류법에 의해 SP로 분류된다. 부산사의 X선 형광분석(XRF; X-ray Fluorescence

표 1. 부산사 기본물성

G_s	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	% fines	e_{max}	e_{min}	USCS
2.62	0.162	0.315	3.13	1.063	0.658	SP

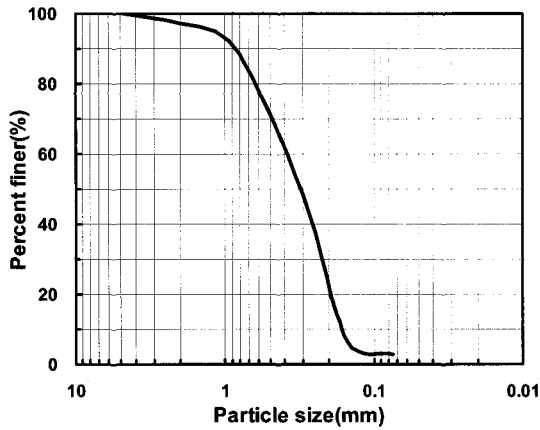


그림 4. 부산사 입도분포

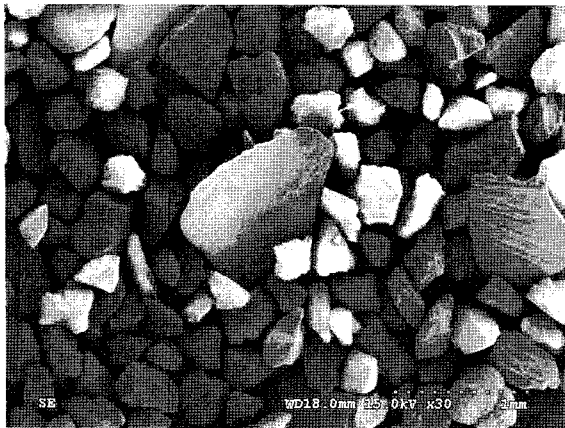


그림 5. 부산사 SEM 사진

Spectrometry) 결과 주성분인 S_iO_2 의 함유량이 76.06%인 석영질 모래로 분석되었으며, Al_2O_3 가 8.28%, K_2O 가 3.06% 함유되어 있다. 또한 3.02% 가량 포함되어 있는 CaO 는 그림 5의 주사전자현미경(SEM; Scanning Electron Microscope) 분석결과에서 확인되는 바와 같이 다량의 패각 때문인 것으로 판단된다.

3.2 시료조성 및 시험

본 연구에 사용된 챔버시스템은 그림 6과 같이 높이 1.0m, 직경 1.2m의 챔버셀(chamber cell)과 하부 피스톤, 그리고 각종 관입시험을 위한 아답터가 연결된 상판(top plate)으로 구성되어 있다. 횡방향 경계조건을 조절할 수 있도록 측면의 챔버셀은 이중벽으로 구성되어 있고, 응력은 챔버의 내측셀, 외측셀 그리고 하부 피스톤과 연결

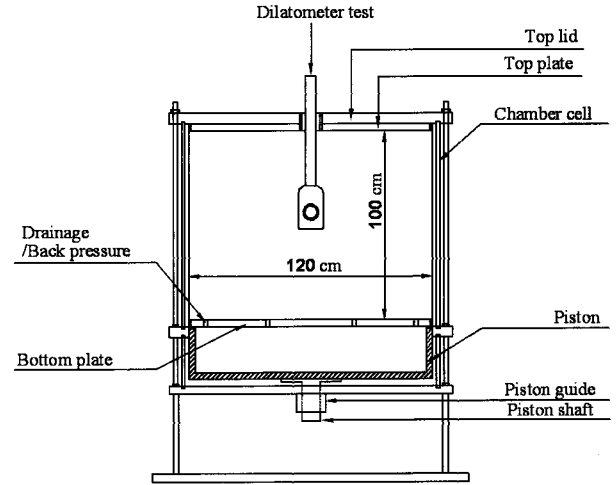


그림 6. 챔버시스템 및 딜라토미터 관입 모식도

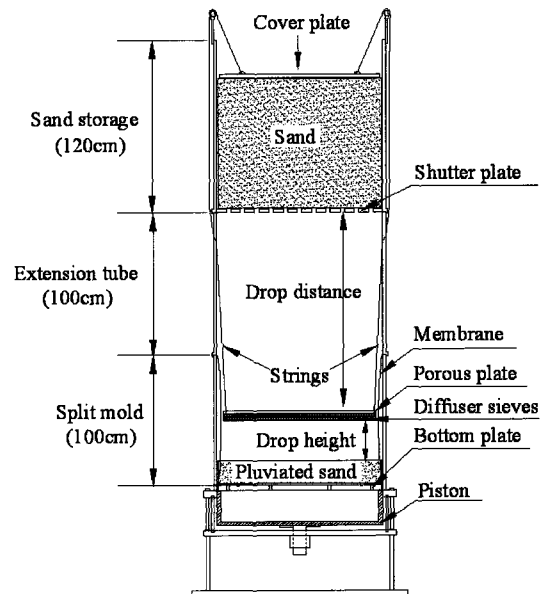


그림 7. 레이너 시스템 모식도(Choi 등 2010)

된 제어판에서 조절한다. 이중벽 구조는 시료의 K_0 (정지토압계수) 응력상태를 구현하기 위한 시스템으로써 data acquisition system을 통하여 하중 재하시 내측셀에 발생하는 시료의 수평응력을 자동적으로 측정하여 외측셀에 작용시킴으로써 측방변형을 최소화하여 시료의 K_0 응력상태 유지가 가능하게 한다. 따라서 시료를 K_0 상태로 암밀시킬 수 있을 뿐만 아니라 임의의 응력경로 구현도 가능하도록 설계되어졌다(Choi 2008).

레이너 시스템을 이용한 건조낙사법은 대형챔버시험 시 다양한 상대밀도의 시료를 균등하게 조성하기 위하여 일반적으로 사용되는 방법으로 본 연구에서는 Sweeney and Clough(1990)와 Puppala 등(1995)이 제안한 시스템을 개량하여 사용하였다. 주요 구성은 그림 7과 같이 시료

저장을 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. 특히 분산시스템은 기존의 분산체에 porous plate를 추가하여 목표 상대밀도의 원활한 조성이 가능하도록 하였다(Choi 등 2010). 목표 상대밀도 40, 60, 80%의 시료를 조성하기 위하여 예비시험을 통하여 결정된 낙하고에서 시료를 낙사시킨 후, 조성된 시료의 중량과 부피를 측정하여 시료의 최종 상대밀도를 결정하였다. 레이너 시스템을 이용하여 조성된 시료에 top plate를 덮고 시료 하부 split mold를 제거하여도 자립이 가능하도록 시료내부에 부압을 작용시킨 후 split mold를 제거한다. 자립된 시료에 챔버셀을 거치하고 top plate와 cell을 12개의 룯드로 고정시켜 조립을 완료한다. 자세한 시료조성 방법은 Kim 등(2007), Choi 등(2010)의 방법과 동일하다.

각각의 목표 상대밀도 40%, 60%, 80%로 조성된 시료

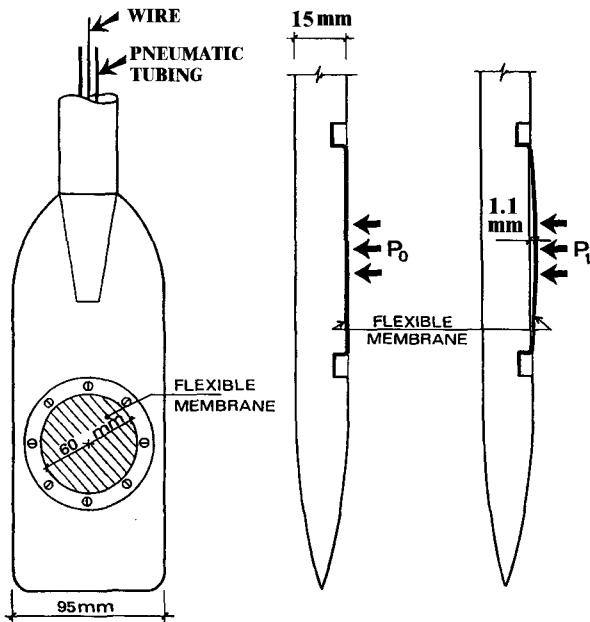


그림 8. dilatometer 형상 및 제원

에 연직구속압 100, 200, 400kPa로 가압한 정규압밀 시료와 연직구속압을 400kPa까지 가한 후, 200, 100, 50kPa까지 제하하여 과압밀비(OCR)가 2, 4, 8인 과압밀상태 시료에 대한 dilatometer 시험을 수행하였다. dilatometer는 그림 8과 같이 폭 95mm, 두께 15mm, 길이 230mm인 노 모양의 관입체에 60mm 직경의 강철 멤브레인이 장착된 구조로 dilatometer 시험은 강철 멤브레인에 소정의 변위가 발생할 때의 압력을 측정하여, 이를 통하여 수평방향 응력과 관련된 지반의 역학적 특성들을 추정한다. Marchetti(1980)는 DMT 결과로부터 흙의 강성과 관계있는 dilatometer 계수 $E_D(=34.7[P_1-P_0])$, K_0 와 관계되어 과압밀비(OCR)나 마찰각 산정에 이용되는 수평응력지수 $K_D(=[P_0-u_0]/\sigma_v')$, 그리고 흙의 공학적 분류 및 강성지수와 연관 있는 재료지수 $I_D(=[P_1-P_0]/[P_0-u_0])$ 를 제안하였다. 여기서, P_0 와 P_1 은 각각 dilatometer 멤브레인의 초기 접촉압력과 1.1mm 팽창압력이며, u_0 는 관입 전 간극수압, σ_v' 은 연직유효응력이다. dilatometer 멤브레인은 중심부 기준으로 시험 초기 약 20cm 깊이에 위치하며, Bellotti 등(1997)의 챔버실험과 같이 10cm 마다 단계적으로 관입시키면서 시료깊이 30~70cm에서 P_0 와 P_1 을 측정하였다. 각 시험결과를 평균하여 상대밀도와 연직구속압에 따른 수평응력지수, dilatometer 계수, 재료지수를 결정하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 사질토의 한계상태 정수

부산사에 대한 Kim 등(2007)의 연구로부터, 부산사의 한계상태 내부마찰각(ϕ_{cs})은 34°, 한계상태선의 기울기(λ_{ss})는 0.068 그리고 한계상태 간극비(Γ)는 1.07로 결정되었다. 표 2는 논문에 적용된 사질토들의 기본 물성과 한계상태 특성을 정리한 것으로 시료의 형상은 sub-angular에서 angular로 유사한 반면, 부산사의 간극비 특성 및 한계상태선의 기울기는 Ticino sand 및 Toyoura sand와 비

표 2. 다양한 모래의 특성 및 한계상태정수

Materials	D_{50} (mm)	e_{max}	e_{min}	Γ	λ_{ss}	ϕ_{cs}	angularity	mineralogy	references
Busan sand	0.315	1.063	0.658	1.070	0.068	34	sub-angular ~ angular	85% quartz with 7% CaCO ₃	Kim 등 (2007)
Ticino sand	0.53	0.89	0.60	0.986	0.056	31	sub-angular ~ angular	30% quartz, 5% mica	Baldi 등 (1986a, 1986b)
Toyouura sand	0.16	0.977	0.605	0.941	0.021	31	sub-angular ~ angular	90% quartz	Bellotti 등 (1994, 1997)

교하여 다소 큰 것으로 평가되었다.

4.2 부산사의 dilatometer 시험결과

그림 9는 각 시험모래의 dilatometer 수평응력지수와 상대밀도의 관계이다. 정규압밀 시료의 수평응력지수는 상대밀도가 증가할수록 증가하는 것으로 분석되었으며, 동일 상대밀도일 경우 연직응력 증가에 관계없이 일정한 값을 가지거나 소폭 감소하는 경향을 나타내었다. 과압밀 시료의 수평응력지수는 응력이력에 의한 잔류수평응력 증가의 영향으로 정규압밀시료에 비하여 증가하였으며 이러한 경향은 OCR이 증가할수록 현저하게 나타났다.

그림 10은 각 시험모래의 dilatometer 계수와 상대밀도의 관계이다. 수평응력지수는 측정된 압력(P_0)을 구속응력(σ_{v0})으로 정규화한 지수로서 응력수준에 의한 영향이 반영되므로 상대밀도와 과압밀비가 주요 영향요인인 반면, dilatometer 계수는 멤브레인 주변지반에

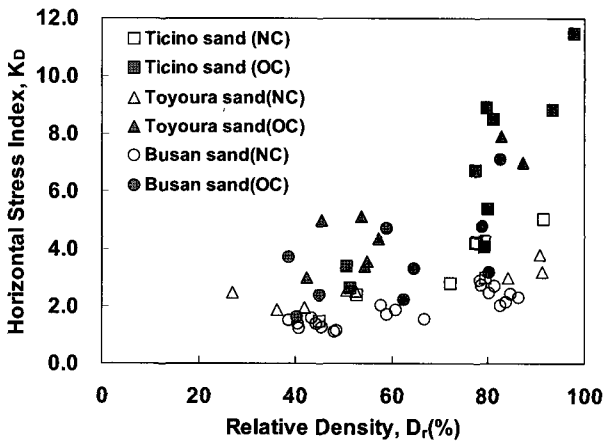


그림 9. 각 시험모래의 상대밀도에 따른 수평응력지수(K_0) 분포

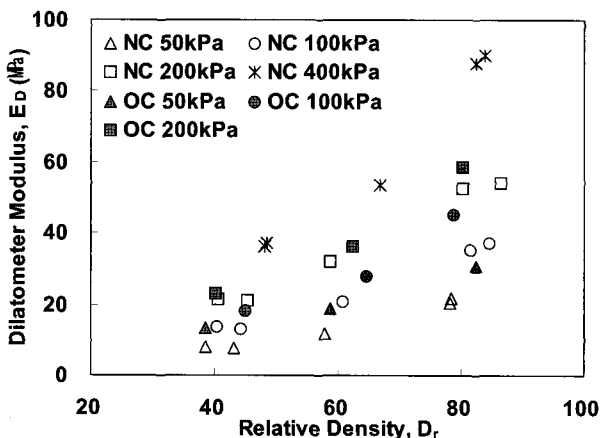


그림 10. 부산사의 상대밀도와 구속압에 따른 dilatometer 계수(E_D)

1.1mm의 변형을 유발하는데 필요한 압력과 관계가 있으므로 상대밀도와 과압밀비 뿐만 아니라 구속압이 주요 영향요인으로 작용한다. 따라서 그림 10의 dilatometer 계수의 분포는 그림 9의 수평응력지수 분포와 비교하여 응력이력에 의한 영향이 상대적으로 작게 반영되는 것으로 관찰되었다.

4.3 부산사의 수평증폭계수(K_D/K_0)와 상태정수(ψ)의 관계

그림 11은 간극비와 평균유효응력에 의해서 결정되는 부산사의 상태정수와 수평증폭계수(K_D/K_0)의 관계를 도시한 것으로, 그림 3의 연구결과와 유사하게 반대수축상에서 선형관계를 만족하였다. 주목할 점은 Jamiolkowski 등(1988)의 Ticino sand 및 Hokksund sand에 대한 챔버 시험 연구결과는 상태정수와 수평증폭계수가 과압밀 여부와 관계없이 선형관계를 만족하였으나, 본 연구에서는 과압밀 상태에서 측정된 부산사의 수평증폭계수가 동일한 상태정수에 대한 정규압밀상태의 수평증폭계수보다 작게 평가되었다는 부분이다. 이와 같은 결과는 시료의 수평응력이 정지토압계수와 수평응력지수에 미치는 상대적 영향 때문으로 정지토압계수는 수평응력과 수직응력의 비로써 과압밀에 따른 수평응력의 변화가 그대로 반영되나, 수평응력지수는 측정값 P_0 와 수직응력의 비이며 P_0 에는 수평응력 뿐만 아니라 수직응력의 영향도 일부분 포함되어 있으므로 과압밀에 따른 P_0 의 증가비가 수평응력 증가비에 비하여 상대적으로 작다. 결과적으로 과압밀에 의한 수평응력지수의 증가비가 정지토압계수의 증가비에 비하여 작기 때문에, OCR이 증가할수록 동일 상태정수에 대한 수평증폭계수가

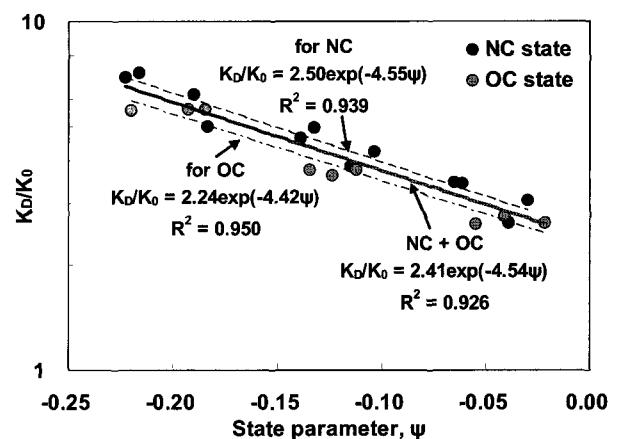


그림 11. 응력이력에 따른 부산사의 상태정수(ψ)와 수평증폭계수(K_D/K_0) 관계

감소하는 경향이 나타나는 것으로 판단된다. 따라서 그림 11과 같이 과압밀영역의 추세선이 정규압밀영역의 추세선에 비하여 하부에 위치하며 상태정수에 따른 수평응축계수의 차이 또한 시험범위 내에서 최대 1.5정도 발생하였다. 그러나 정규압밀과 과압밀 영역의 결과를 동시에 고려하여 표현된 관계식도 높은 상관관계($R^2=0.926$)를 보이므로, 약간 과압밀에서 정규압밀 상태의 경우는 동일한 관계식을 적용하여도 오차범위가 크지 않을 것으로 판단된다.

4.4 딜라토미터 계수(E_D)와 상태정수(ψ)의 관계

Konrad(1988)는 소형 챔버시험 결과를 분석하여 응력으로 정규화한 ΔP 와 상태정수의 관계를 연구하였고, Campanella and Robertson(1991)은 McDonald's Farm의 시험결과를 분석하여 콘저항치와 딜라토미터 계수가 선형관계를 만족시킨다고 주장하였다. 또한, 콘저항치와 관련된 연구결과들(Been 등 1986, 1987; Kim 등 2007)을 통하여 정규화된 콘저항치와 상태정수가 일정한 관계를 가짐을 확인할 수 있었다. 연구 결과를 종합하면 정규화된 콘저항치-상태정수의 관계와 유사하게 응력으로 정규화된 딜라토미터 계수 또한 상태정수 변화에 따른 관계성이 성립할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 12는 부산사의 챔버 딜라토미터 시험 결과를 평균유효응력과 상태정수에 따라 도시한 것으로, 동일 상태정수에 대하여 딜라토미터 계수와 유효응력의 비가 비교적 일정한 값을 가지는 것으로 관찰되었다. 또한 상태정수가 음의 값으로 증가할수록 딜라토미터 계수를 평균유효응력으로 나눈 값(E_D/σ_m')이 증가하는 경향을

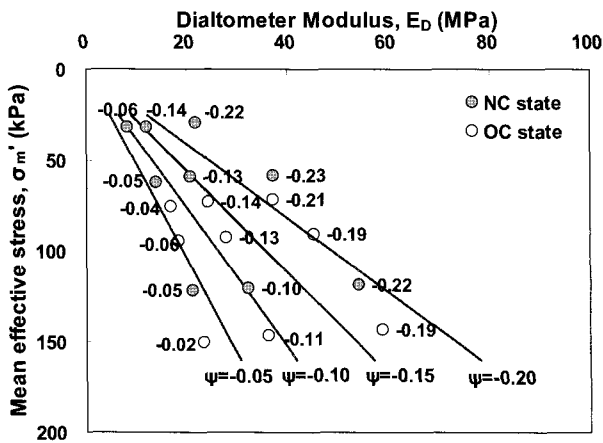


그림 12. 부산사의 평균유효응력과 딜라토미터 계수에 따른 상태정수 분포

나타내었다. 결론적으로 평균유효응력으로 정규화한 딜라토미터 계수와 상태정수 사이에는 일정한 관계가 성립함을 알 수 있다.

그림 13은 앞의 결과를 적용하여 반대수축상에 평균유효응력으로 정규화한 부산사의 딜라토미터 계수와 상태정수를 도시한 것으로, 회귀분석 결과 식 (5)와 같은 관계곡선의 형태로 표현되었다.

$$\frac{E_D}{\sigma_m'} = \alpha \exp(-\beta \times \psi) \quad (5)$$

여기서 α 는 상태정수가 영($\psi=0$)인 경우의 정규화된 딜라토미터 계수 값을, 그리고 β 는 반대수축상에서 관계곡선의 기울기를 의미한다. 부산사에 대한 분석결과 절편 α 는 과압밀 시료가 정규압밀 시료에 비해 다소 큰 반면 기울기 β 는 정규압밀시료가 크게 산정되었다. 또한 과압밀 시료의 결정계수가 0.953인 반면 정규압밀 시료는 0.905로 다소 낮으므로 고려하지 못한 영향요인 있음을 알 수 있었다. 그러나 정규압밀과 과압밀 시료 전체에 대한 분석결과가 상태정수에 따라 일정범위 내에 혼재되어 분포하므로 $R^2=0.914$ 의 양호한 상관성을 가지는 하나의 관계식으로 표현할 수 있다.

4.5 응력수준이 E_D/σ_m' 와 ψ 관계에 미치는 영향

그림 13에 나타난 정규압밀 시료의 분산요인을 확인하기 위하여 응력수준(stress level)에 따른 분석을 실시하였다. 그림 14는 50~400kPa의 연직구속압에 따른 부산사의 정규화된 딜라토미터 계수(E_D/σ_m')와 상태정수의 관계의 변화로써, 연직구속압이 증가함에 따라 동일

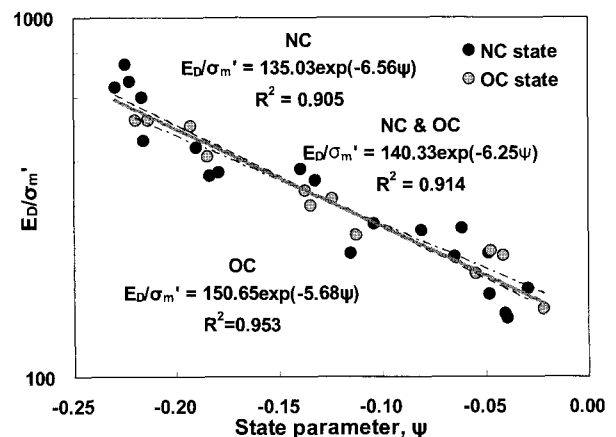


그림 13. 부산사의 정규화된 딜라토미터 계수와 상태정수의 관계

상태정수에 대한 정규화된 딜라토미터 계수 값이 점차 감소하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 상태정수와 평균유효응력으로 정규화된 콘 저항치에 대한 Been 등(1986, 1987)의 연구결과를 응력수준을 고려한 관점에서 재해석한 Sladen(1989)의 연구와 유사한 것으로 응력수준이 증가할수록 평균유효응력으로 정규화된 콘 저항치와 상태정수의 관계곡선이 하향 이동하는 양상과 동일하다.

이와 같은 결과는 응력수준 변화가 상태정수와 정규화된 딜라토미터 계수에 미치는 상대적인 영향 때문이며 다음과 같은 원인에 의해 발생된다. 첫째, 동일한 상대밀도의 시료에 대한 구속압과 딜라토미터 계수의 관계는 선형이 아니라, 구속압이 증가할수록 정규화된 딜라토미터 계수(E_D/σ_m')는 감소하는 경향을 나타낸다. 둘째, 동일한 응력 변화 조건($\Delta\sigma_m'$)에 대하여 상태정수 변화량과 비교하여 대수축상의 정규화된 딜라토미터 계수의 변화량이 상대적으로 크다. 즉, 응력수준 변화에 대한 E_D/σ_m' 의 대수축상 변화량과 상태정수의 자연축상의 변화량이 동일한 경우는 응력수준에 상관없이 하나의 관계식으로 표현할 수 있으나, 그림 12와 같이 응력수준 증가에 대한 정규화된 딜라토미터 계수의 대수축상 감소량이 상태정수의 변화량에 비하여 큰 경우는 응력수준이 증가할수록 관계곡선이 하향 이동하는 경향을 보이게 되는 것이다. 결과적으로 $\psi=0$ 에서의 절편은 연직응력이 50kPa일 때 160.68에서 400kPa인 경우 113.08로 응력수준이 증가할수록 감소하며 관계곡선의 기울기 또한 400kPa인 경우를 제외하고 6.53(50kPa)에서 5.63(200kPa)로 감소하는 것으로 분석되었다.

그러나 정규압밀시료 전체를 대상으로 회귀분석한

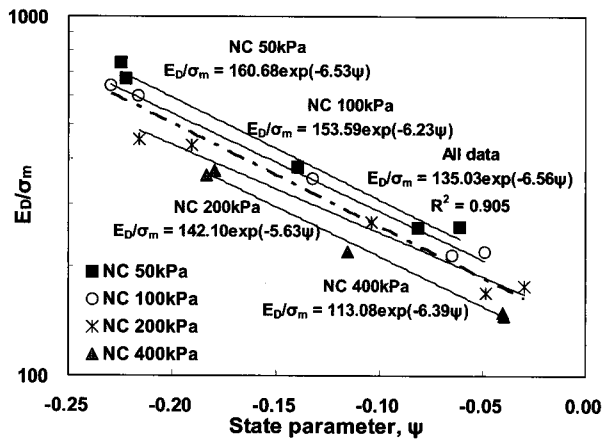


그림 14. 응력수준이 부산사의 정규화된 딜라토미터 계수와 상태정수 관계에 미치는 영향

관계식을 기준으로 상태정수의 오차범위가 약 ± 0.03 정도 발생하며 일반적으로 고려되는 유효연직응력 200kPa 이하(심도 20~25m 이내)를 기준으로 산정할 경우 편차가 상당히 감소하므로 응력수준에 의한 영향을 이해하고 대상지반의 상태정수를 결정한다면 치명적인 오차는 발생하지 않을 것으로 판단된다.

4.6 시료특성에 따른 K_D/K_0 - ψ 관계와 E_D/σ_m' - ψ 관계

사질토의 시료특성이 딜라토미터 지수들과 상태정수 관계에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Ticino sand, Toyoura sand 및 부산사의 결과를 분석하였다. 먼저 상태정수와 딜라토미터 수평증폭계수의 관계는 그림 15와 같이 석영질로 구성되어 압축성이 상대적으로 낮은 Toyoura sand의 K_D/K_0 - ψ 는 대체적으로 부산사의 상부에 위치하였으며, Ticino sand는 상태정수의 절대값이 증가할수록 부산사의 상부에 분포하였다. 상태정수 증감에 대한 수평증폭계수 변화의 경향성은 유사한 것으로 분석되었으나 전체 데이터를 하나의 관계식으로 표현한 결과, 시료특성에 따른 상태정수와 수평증폭계수 관계의 편차가 발생하여 상관성이 다소 낮은 것으로 분석되었다($R^2=0.754$).

시료특성에 따른 상태정수와 정규화된 딜라토미터 계수의 관계는 그림 16과 같이 압축특성의 영향으로 Toyoura sand가 Ticino sand 및 부산사보다 상부에 분포하는 것으로 분석되었으며 부산사와 Ticino sand는 대체적으로 비슷한 범위 내에 위치하는 것으로 나타났다. 그러나 Ticino sand의 시험조건이 대부분 연직구속압 110kPa 내외인 반면 부산사의 시험조건은 50~400kPa이므로 응력수준을 고려하여 재해석하면 Ticino sand가 부산사보다 약간

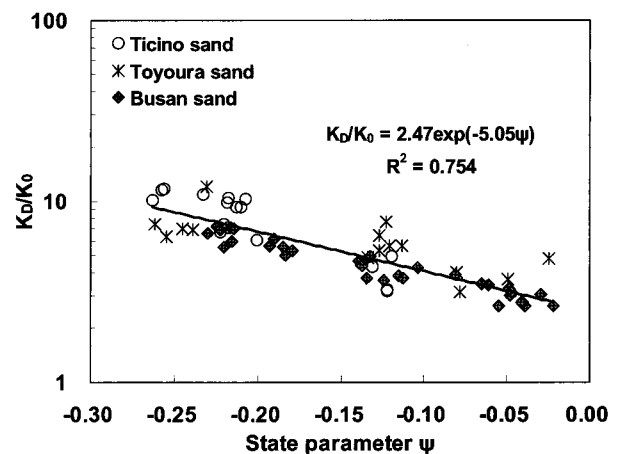


그림 15. 다양한 사질토의 상태정수와 수평증폭계수 관계

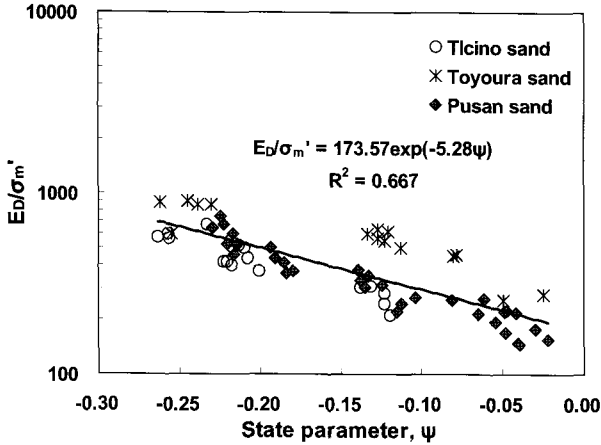


그림 16. 다양한 사질토의 상태정수와 정규화된 딜라토미터 계수(E_D/σ_m') 관계

하부에 위치하는 것으로 판단되며 이는 정규화된 콘저항치와 상태정수의 관계도표(Kim 등 2007)에 수록된 부산사와 Ticino sand 분포와 유사하다. 대상 자료 전체를 하나의 관계식으로 회귀분석한 결과 시료특성에 의한 분산의 영향으로 결정계수가 0.667로 상당히 낮은 것으로 평가되었다.

종합하면, 수평증폭계수와 상태정수의 관계는 본 연구결과만으로는 시료특성에 따른 뚜렷한 경향성을 파악할 수 없으나 정규화된 딜라토미터 계수와 상태정수의 관계는 압축성에 의한 영향이 상당함을 알 수 있었다. 다양한 시료에 대한 시험자료 수집, 분석을 통하여 시료특성 등을 합리적으로 고려한다면 딜라토미터 시험을 이용한 원지반 상태정수 평가의 신뢰성이 향상될 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 사질토 지반의 응력과 상태정수 그리고 딜라토미터 시험결과와의 관계성을 연구하기 위하여 대형 챔버시스템을 이용한 부산사의 딜라토미터 시험을 수행하였으며, 문헌자료인 Ticino sand 및 Toyoura sand 결과와 비교분석하여 시료특성 및 응력수준에 따른 상태정수와 딜라토미터 계수와의 관계를 평가하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 수평응력지수(K_D)는 연직응력으로 정규화한 지수이므로 상대밀도와 응력이력이 주요 영향요인이며 연직응력보다는 수평응력의 영향이 지배적이기 때문에 응력이력에 민감하게 반응하였다. 반면 딜라

토미터 계수(E_D)는 연직응력, 상대밀도 그리고 응력이력의 영향이 모두 포함되어 결정되므로 수평응력 지수에 비하여 응력이력에 의한 영향이 상대적으로 적게 반영되었다.

(2) 부산사의 수평증폭계수(K_D/K_0)와 상태정수(ψ) 관계는 이전 연구결과와 유사하게 반대수축상에서 선형 관계를 만족하였다. 잔류수평응력에 의한 영향으로 정규압밀시료에 비하여 과압밀시료의 수평증폭계수 값이 $K_D/K_0-\psi$ 에서 약간 하부에 위치하였으나, 약간 과압밀부터 정규압밀 지반은 동일한 관계식을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 동일 상태정수에 대하여 딜라토미터 계수와 유효응력의 비는 비교적 일정하게 나타나며 상태정수가 음(-)의 방향으로 증가할수록 딜라토미터 계수를 평균유효응력으로 나눈 값(E_D/σ_m')이 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 정규화한 딜라토미터 계수와 상태정수는 $E_D/\sigma_m' = a \exp(-\beta\psi)$ 형태의 관계식으로 표현되었다.

(4) 부산사의 정규화된 딜라토미터 계수와 상태정수 관계를 도시한 결과 약간의 분산은 있으나 정규압밀과 과압밀 상태를 하나의 관계식으로 표현할 수 있었다. 다만, 응력수준의 영향으로 과압밀 시료보다 정규압밀 시료의 분산이 다소 크게 발생하였다. 이는 정규화된 콘저항치와 상태정수를 응력수준에 대하여 분석한 Sladen(1989)의 결과와 유사한 것으로 구속압이 증가할수록 관계곡선이 하향 이동하는 경향을 보였다.

(5) 부산사, Ticino sand 그리고 Toyoura sand에 대한 정규화된 딜라토미터 계수와 상태정수의 관계를 분석한 결과, 상태정수가 음의 값으로 증가할수록 수평증폭계수가 증가하는 경향은 있으나 상관성은 다소 낮게 결정되었다. 주성분이 석영질인 Toyoura sand가 정규화된 딜라토미터 계수와 상태정수 관계의 최상부에 위치하며, Ticino sand와 부산사는 비슷한 위치에 분포하여 시료특성(압축성)에 의한 영향이 존재하는 것으로 판단된다.

콘관입시험은 다양한 사질토에 대한 챔버시험 결과와 이를 분석하여 대상 사질토의 특성을 고려한 상태정수를 결정할 수 있는 관계식이 제안되어있으나 딜라토미터 시험은 현재까지 챔버에서 시행된 시험결과가 한정적이므로 사질토의 조성광물과 압축성 등의 고유변

수(intrinsic variable)를 고려하여 상태정수를 산정하는 것은 한계가 있다. 그러나 향후 사질토에 대한 시험결과들이 축적되고 이를 활용한 연구가 진행된다면 이러한 문제점들을 극복하고 딜라토미터 시험을 이용한 상태정수 평가방법의 신뢰성이 향상될 것으로 사료된다.

감사의 글

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

참고 문헌

- Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., and Pasqualini, E. (1986a), "Interpretation of CPTs and CPTUs use, 2nd part: drained penetration of sand", *Proceedings of 4th International Geotechnical Seminar*, Singapore, pp.143-156.
- 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.
- Been, K., and Jefferies, M.G. (1985), "A state parameter for sands", *Geotechnique*, Vol.35, No.2, pp.99-112.
- 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.
- Been, K., Jefferies, M.G., Crooks, J.H. A., and Rothenburg, L. (1987), "The cone penetration test in sands: Part II, General inference state", *Geotechnique*, Vol.37, No.3, pp.285-299.
- 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.
- Bellotti, R., Benoit, J., Fretti, C. and Jamiolkowski, M. (1997), "Stiffness of Toyoura sand from dilatometer tests", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.123, No.9, pp.836-846.
- Borden, R.H. (1991), "Boundary displacement induced by DMT penetration", *Proceedings of First International Symposium on Calibration Chamber Testing*, Elsevier, New York, N.Y., pp.101-118.
- Campanella, R.G., and Robertson, P.K. (1991), "Use and interpretation of a research dilatometer", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.28, pp.113-126.
- Choi, S.K. (2008), *Estimation of stress history of sands using CPT and DMT*, Ph.D. thesis, Korea University.
- 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.
- Jamiolkowski, M., Ghionna, V., Lancellotta, R., and Pasqualini, E. (1988), "New correlations of penetration tests for design practice", *Proceedings of the 1st International Symposium on Penetration Testing*, Orlando, Florida, Vol.2, pp.263-296
- 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.
- 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.
- 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.
- Lawter, R.S., and Borden, R.H. (1990), "Determination of Horizontal Stress in Normally Consolidated Sand using the DMT", *Transportation Research Record 1278*, Transportation Research Board, Washington, DC, pp.135-140.
- Marchetti, S. (1980), "In situ tests by flat dilatometer", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.106, No.3, pp.299-321.
- Poulos, S.J. (1981), "The steady state of deformation", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.107, No.GT5, pp.553-562.
- Puppala, A.J., Acar, Y.B., and Tumay, M.T. (1995), "Cone penetration in very weakly cemented sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.121, No.8, pp.589-600.
- Sladen, J.A. (1989), "Problems with interpretation of sand state from cone penetration test", *Geotechnique*, Vol.39, No.2, pp.323-332.
- 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 2009. 5. 20, 심사완료일 2010. 4. 22)