

DMT를 이용한 사질토 정지토압계수 평가방법

A Method Evaluating K_0 of Granular Soil using DMT

최성근* · 이문주** · 배경두*** · 이우진****

Choi, Sung-Kun · Lee, Moon-Joo · Bae, Kyung-Doo · Lee, Woojin

Abstract

This study suggests a method predicting at-rest coefficient of earth pressure (K_0) in order to evaluate the effect of stress history of granular soil. The method is based on the relation $K_D/K_0 = \chi(E_D/\sigma_m')^\delta$, which is developed by combining two previously published relations such as $E_D/\sigma_m' - \psi$ and $K_D/K_0 - \psi$. As K_D and E_D are observed to be sensitive to the pre-stress, both indices are adopted for the estimation of K_0 value of granular soil. It is shown that the proposed $K_D/K_0 - E_D/\sigma_m'$ relation is insignificantly affected by the stress history. It is concluded from the comparative study that the proposed method, which uses only dilatometer test results to predict the K_0 of granular soil, provides more convenient and reliable prediction than other methods which use both CPT and DMT results.

Keywords : stress history, at-rest coefficient of earth pressure, state parameter, dilatometer test

요 지

본 연구에서는 사질토의 응력이력 효과를 평가하기 위해 정지토압계수(K_0)를 추정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 사질토의 상태정수(ψ)를 매개로 하여 $K_D/K_0 - \psi$ 관계와 $E_D/\sigma_m' - \psi$ 관계를 조합한 $K_D/K_0 = \chi(E_D/\sigma_m')^\delta$ 의 형태로 표현된다. 챔버에서 수행된 딜라토미터시험 결과에 의하면 본 연구에서 제안된 관계식은 응력이력에 영향을 받지 않는 것을 알 수 있었다. 제안된 방법은 사질토의 정지토압계수 추정 시 딜라토미터 시험결과만을 이용하는 간편한 방법이며, 콘관입시험과 딜라토미터 시험 결과를 동시에 이용하는 기존의 방법에 비해 간단하고 신뢰성이 높은 장점이 있다.

핵심용어 : 응력이력, 정지토압계수, 상태정수, 딜라토미터

1. 서 론

사질토의 압축성은 입자크기, 입자의 균등성, 간극비, 입자구성요소, 고결 및 흙의 구조와 같은 재료적인 요인 뿐만 아니라, 현재 응력수준, 선행응력 및 응력경로, ageing과 같은 응력요인에 의해서도 영향을 받는다(Lambrechts and Leonards, 1978; Clayton et al., 1985). 현재까지 많은 선행 연구자들에 의해 사질토의 변형계수에 선행응력(응력이력)이 미치는 영향에 대한 연구가 수행되었다. Yoshimi et al.(1975)는 초기 상대밀도가 동일하여도 선행응력을 받은 모래시료의 압축성이 정규압밀 상태 모래시료의 압축성보다 6배 이상 작음을 보였다. Lambrechts and Leonards(1978)은 선행응력에 의한 시료의 변형율이 회복되지 않으며, 그로 인해 재압축지수가 정규압밀상태보다 10배 이상 증가함을 보였다. 또한 Clayton et al.(1985)은 시료의 선행응력이 현재 상태의 응력수준이나 응력경로보다 사질토의 압축성에 대한

더 큰 지배요인이라고 주장하였다.

일반적으로 사질토의 불교란 시료의 채취는 매우 어렵기 때문에, 현장 사질토 지반의 변형계수는 현장 관입시험 결과를 활용하여 다양한 경험식들로부터 추정되고 있다. 사질토의 압축성에 영향을 미치는 요인들은 관입저항치에도 영향을 미치지만, 선행응력은 관입저항보다 변형계수에 더 큰 영향을 미친다. Jamiolkowski et al.(1988)은 과압밀비가 10인 시료의 콘선단저항과 횡방향구속 변형계수의 비(M/q_c)가 정규압밀 시료에 비해 2배 증가함을 보였다. 그러므로 현장 지반의 선행응력, 즉 응력이력을 고려하지 않고 관입저항치로부터 신뢰할만한 지반의 변형특성을 추정하는 것은 불가능하다.

사질토에서 선행응력의 영향은 소성변형(plastic strain)과 수평응력의 증가로 나타난다(Jamiolkowski and Robertson, 1988). 일반적인 관입시험은 관입도중 주변의 흙을 교란시켜 소성변형이 사라지기 때문에, 관입시험에 나타나는 응력이력

*나우지오컨설턴트 이사 · 전 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 박사과정 (E-mail : sungue91@korea.ac.kr)

** (주)한화건설 대리 · 전 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 박사후연구원 (E-mail : moonjoo@hanwha.co.kr)

***정회원 · 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 석사과정 (E-mail : qoruden@korea.ac.kr)

****정회원 · 교신저자 · 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 교수 (E-mail : woojin@korea.ac.kr)

의 영향은 주로 수평응력의 증가 때문에 발생된다(Clayton et al., 1985; Jamiolkowski and Robertson, 1988). 따라서, 관입시험을 통한 지반의 정지토압계수(K_0)의 평가는 지반의 선형응력, 즉 응력이력을 평가하기 위한 방법 중 하나이다. 현재까지 다양한 방법으로 지반의 정지토압계수를 추정하기 위한 시도가 있었으나, 다양한 과압밀 상태를 고려한 신뢰성 있는 방법이 정립되지 못하였다. 본 연구에서는 달라토미터 시험을 이용하여 지반의 정지토압계수인 K_0 를 추정하는 방법을 제안하였다. 대형 챔버에 조성된 시료에 달라토미터 시험과 콘관입시험을 수행하여 제안된 방법을 검증하고, 제안식의 적용성을 기존의 방법과 비교 검토하였다.

2. K_0 추정법의 제안

Jamiolkowski et al.(1988)는 Ticino sand와 Hokksund sand에 대한 챔버시험 결과로부터 달라토미터의 수평응력지수(K_D)와 정지토압계수(K_0)의 비와 상태정수(state parameter, ψ)의 관계를 식 (1)과 같이 제안하였다. K_D/K_0 는 amplification factor라고 정의되며(Jamiolkowski et al., 1988), 상태정수는 동일한 유효응력에서 현재상태 간극비와 한계상태 간극비의 차이로 정의된다(Been and Jefferies, 1985). 여기서, α 와 β 는 사질토의 종류에 따라 결정되는 상수이다.

$$\frac{K_D}{K_0} = \alpha \exp(-\beta \psi) \quad (1)$$

Konrad(1988)는 Ottawa sand에 대한 챔버 달라토미터 시험 결과를 분석하여 달라토미터 멤브레인에 1.1mm 팽창을 유발시키는 추가 압력 $\Delta P(=P_1-P_0)$ 가 흙의 평균유효응력(σ'_m)과 상태정수와 관계됨을 관찰하였다. 즉, 흙의 평균유효응력은 달라토미터 멤브레인을 0.05mm와 1.1mm 팽창시키기 위한 압력인 P_1 과 P_0 의 차이에 선형 비례한다. 또한 Konrad(1988)는 조밀한 상태에서는 $\Delta P/\sigma'_m$ 의 기울기가 상태정수의 작은 변화에도 크게 변화하는 반면 느슨한 상태에서는 상태정수의 큰 변화에도 $\Delta P/\sigma'_m$ 의 기울기가 작게 변화함을 관찰하였다. 이러한 Konrad(1988)의 관찰 결과로부터, 사질토의 상태정수와 평균유효응력, 그리고 달라토미터 계수($E_D=34.7\Delta P$)의 관계를 식 (2)와 같이 표현하였다. 여기서 x 는 상태정수가 0인 경우 평균유효응력으로 정규화된 달라토미터 계수이며, y 는 반대수축에 표현된 $E_D-\sigma'_m$ 관계의 기울기이다.

$$\frac{E_D}{\sigma'_m} = x \exp(-y \psi) \quad (2)$$

식 (1), (2)와 같은 $K_D/K_0-\psi$, $E_D/\sigma'_m-\psi$ 관계가 모두 만족한다면, 두 식의 상태정수를 매개변수로 식 (3)과 같이 표현이 가능하다. 이를 정리하면 식 (4)와 같은 $K_D/K_0-E_D/\sigma'_m$ 관계식이 성립한다. 여기서, χ 와 δ 는 실험적으로 결정되는 상수이다. 본 연구에서는 챔버시험 결과로부터 식 (1)과 (2)

를 먼저 검토한 후, 제안식인 식 (4)의 타당성을 검증할 것이다. 마지막으로 다양한 K_0 추정식과 식 (4)로 표현되는 본 연구의 제안식을 비교 검토할 것이다.

$$-y = \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{K_D}{\alpha K_0}\right) = \frac{1}{y} \ln\left(\frac{E_D}{x \sigma'_m}\right) \quad (3)$$

$$\frac{K_D}{K_0} = \frac{\alpha}{x} \frac{(E_D/\sigma'_m)^{\beta y}}{\sigma'_m} = \chi \left(\frac{E_D}{\sigma'_m}\right)^\delta \quad (4)$$

3. 시험계획

3.1 부산사 기본특성

본 연구를 위해 그림 1과 같은 입도분포를 가지는 부산사를 사용하였다. 부산사는 sub-angular~angular의 조도를 가지며 평균입경이 0.315mm이고 균등계수와 곡률계수는 각각 2.34, 0.71로써, 통일분류법에 의해 SP로 분류된다. 또한 세립분 함유율은 5% 미만인 clean sand에 해당된다. XRF분석 결과 S_iO_2 의 함유량(76.1%)이 큰 석영질 모래로 파악되었다. SEM 분석결과 부산사는 폐각이 일부 포함되어 있는 것으로 분석되었으며, 이로 인해 CaO 성분이 소량 검출되었다. 시료의 최대 간극비는 깔대기법(ASTM D-4254)법으로 결정되었으며, 최소 간극비는 입자과쇄 효과를 고려하여 Miura and Toki(1982)가 제안한 낙사법(pluviation method)으로 결정되었다. 부산사의 최대, 최소 간극비는 1.063, 0.658로 결정되었으며, 그림 2에서는 부산사와 다양한 석영질 모래의 최대, 최소 간극비를 비교하였다. 소량의 폐각이 함유되어 있는 부산사의 경우에도 Cubrinovski and Ishihara(2002)가 제안한 일반적인 석영질 모래의 최대-최소 간극비 관계를 만족하였다.

3.2 시료조성 및 시험

본 연구에서 사용된 챔버시스템은 그림 3과 같이 높이 1.0m, 직경 1.2m의 챔버셀과 하부 피스톤, 그리고 각종 관

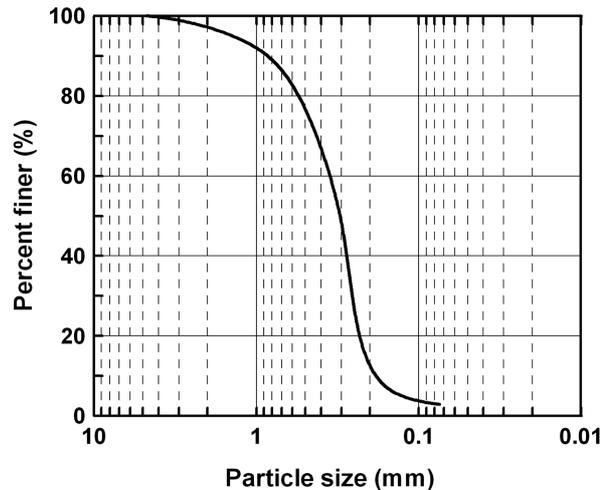


그림 1. 부산사 입도분포

표 1. 부산사 기본물성

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

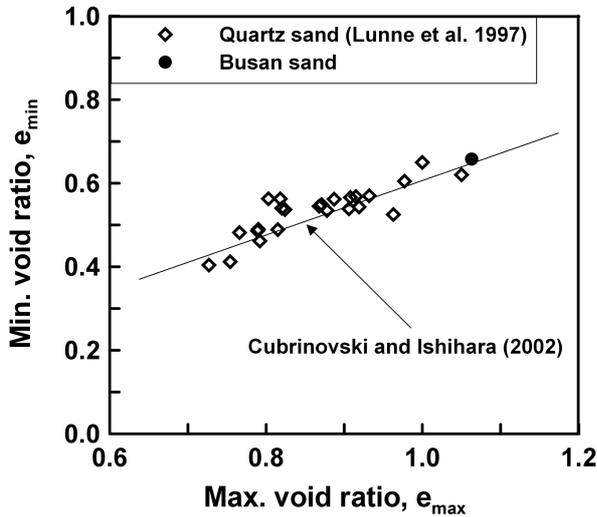


그림 2. 부산사의 최대, 최소 간극비 관계

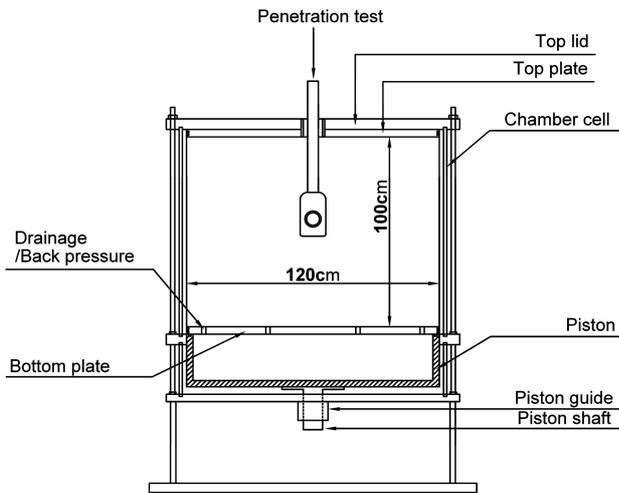


그림 3. 챔버시스템과 관입시험 모식도

입시험을 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.

챔버에서는 레이닝 시스템을 이용한 건조낙사법으로 다양한 상대밀도의 시료를 균등하게 조성한다. 본 연구에서 사용된 레이닝 시스템은 시료저장을 위한 직경 1.2m, 높이 1.0m의 상부 sand storage, 낙사되는 모래시료의 낙하량을 조절하는 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 et al., 2010). 초기 상대밀도 40, 60, 80%의 시료를 조성하기 위해 개폐구멍의 크기(1.2~3.5cm)와 낙하고(15~60cm)를 조절하여 시료를 낙사시킨 후, 시료의 중량과 부피를 측정하여 시료의 최종 상대밀도를 결정하였다. 조성된 시료 위에 상부 플레이트와 챔버셀을 조립한 후 각 방향의 응력을 조절한 후 관입시험을 실시하였다. 자세한 시료조성 방법은 Choi et al.(2010)에 소개되었다.

딜라토미터(DMT)는 폭 95mm, 두께 15mm, 길이 230mm인 노 모양의 관입체에 60mm 직경의 강철 멤브레인이

표 2. 챔버 딜라토미터 시험 개요

초기 상대밀도 (%)	유효연직응력, σ_{vp}' (kPa)	최대 유효연직응력, σ_{vmax}' (kPa)	과압밀비 ($\sigma_{vmax}'/\sigma_{vp}'$)
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

장착되어 있다. DMT 시험은 강철 멤브레인에 소정의 변위를 유발시키기 위한 압력을 측정하여, 이를 통해 수평방향 응력과 관련된 지반의 역학적 특성들을 추정한다. Marchetti (1980)는 DMT시험 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 은 각각 딜라토미터 멤브레인의 초기 접촉압력과 1.1mm 팽창압력이며, u_0 는 관입 전 간극수압, σ_{v0}' 은 연직유효응력이다.

조성된 시료에 연직구속압 50~400kPa의 정규압밀상태 시료와 연직구속압 400kPa 또는 200kPa에서 제하된 과압밀 시료(OCR=2, 4, 8)에 대한 딜라토미터 시험을 수행하였다. 딜라토미터 멤브레인은 초기 약 20cm 깊이에 위치하며, Bellotti 등(1997)의 실험과 같이 10cm 마다 단계적으로 관입시키면서 시료깊이 30~70cm에서 P_0 와 P_1 을 측정하였다. 전체적인 딜라토미터 시험조건은 표 2와 같다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 딜라토미터 시험 결과

그림 4는 연직구속압과 상대밀도에 따른 부산사의 딜라토미터 지수(I_D , E_D , K_D) 분포이다. 그림 4(a)에서 부산사의 재료지수(I_D)는 모든 경우 1.6을 초과하며, Marchetti(1980)의 분류법에 의해 “sand”로 구분된다. 정규압밀 상태에서 부산사의 재료지수는 연직 유효응력이 증가할수록 점차 감소하였으며, 특히 동일 상대밀도에서 선행하중을 받은 경우 급격히 감소하였다. 이와 같은 결과는 선행하중이 P_1 보다 P_0 의 변화에 더 큰 영향을 미치기 때문이다.

그림 4(b)에서 부산사의 딜라토미터 계수(E_D)는 연직 유효응력이 증가할수록 점차 증가하였으며, 이는 Konrad(1988)의 결과와도 일치한다. 또한 동일 상대밀도와 연직 유효응력 상태에서 과압밀 시료의 딜라토미터 계수가 정규압밀 시료보다 8~63% 크게 측정되었으며, 시료의 과압밀비가 증가할수록 그 편차는 더욱 뚜렷하였다. 따라서 딜라토미터 계수도 응력이력의 영향을 받는 것으로 나타난다.

그림 4(c)는 부산사의 수평응력지수(K_D) 변화를 보여준다. 재료지수 및 딜라토미터 지수와는 달리, 정규압밀 상태에서

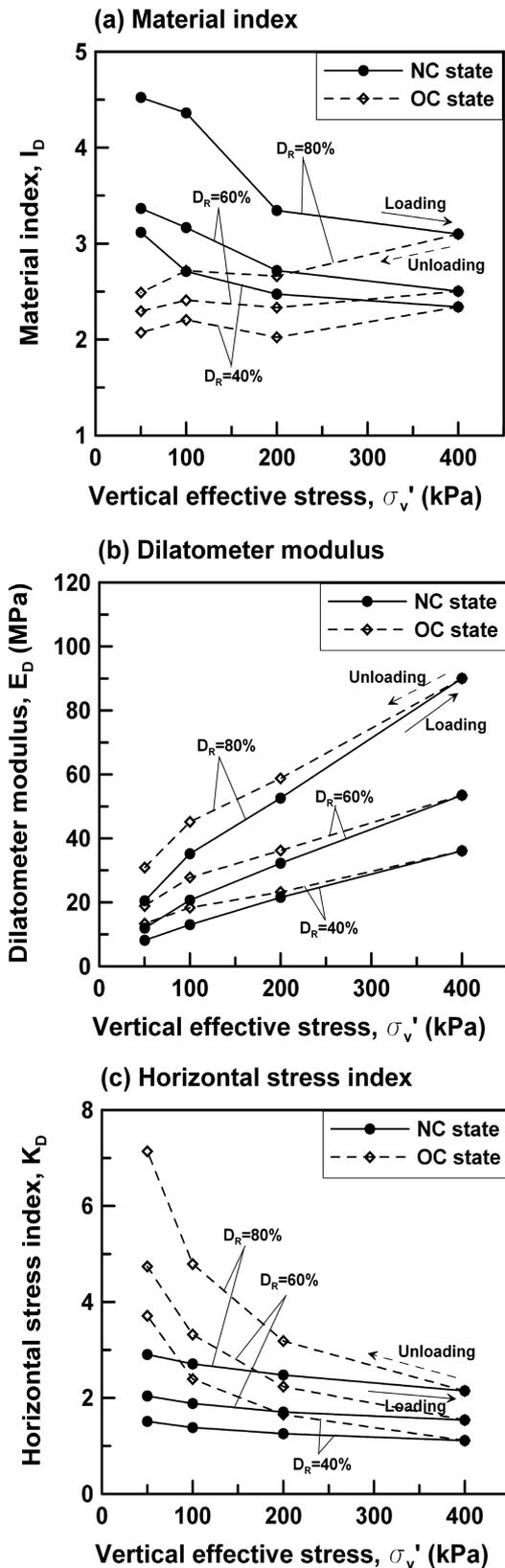


그림 4. 하중 재하 및 제하에 따른 dilatometer 시험 결과

부산사의 수평응력지수의 변화는 미소하였다. 이와 같은 결과는 정규압밀 상태에서 수평응력지수는 정지토압계수인 K_0 와 상관성이 높으며, Mayne and Kulhawy(1982)의 결과에서 보여지는 바와 같이 사질토의 정지토압계수는 마찰각의 함수로 표현되는데 상대밀도와 연직구속압이 마찰각의 변화에 미치는 영향이 미미하기 때문이다. 반면, 400kPa에서 연직 유효응력을 감소시키면서 측정된 과압밀 시료의 수평응

력지수는 정규압밀 시료의 수평응력지수보다 1.3배~2.5배 크게 측정되었다. 즉 사질토의 응력이력은 dilatometer 계수보다 수평응력지수에 더 큰 영향을 미치므로, 응력이력 효과를 평가함에 있어 수평응력지수를 분석하는 것이 효과적이다 (Marchetti, 1980; Jamiolkowski et al., 1988).

4.2 E_D 와 K_D 의 상관관계 검토

4.2.1 부산사의 한계상태선과 상태정수

그림 5는 챔버에 조성된 부산시료의 평균 유효응력과 간극비의 관계를 나타낸다. 본 연구에서는 부산사의 한계상태선(critical state line)을 결정하기 위해 선행연구(Kim et al., 2007)로부터 결정된 부산사의 한계상태정수($\Gamma=1.07$, $\lambda=0.068$)를 활용하였다. 부산사 챔버시료의 상태정수인 ψ 는 그림 5와 같이 현재상태 간극비에서 한계상태 간극비의 차이로 결정되었으며, 조성된 시료의 상태정수는 모두 음(-)의 값을 가진다.

4.2.2 K_D 와 상태정수 관계

전술한 바와 같이, Jamiolkowski et al.(1988)는 사질토의 수평응력지수(K_D)와 정지토압계수(K_0)의 비를 상태정수와 지수적인 관계로 표현하였다. 그림 6은 Jamiolkowski et al.

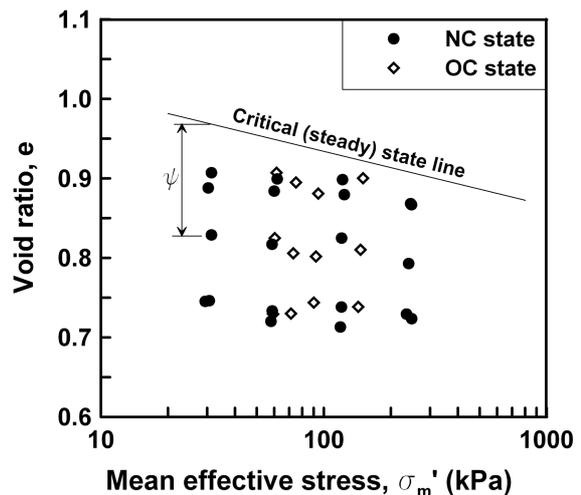


그림 5. 부산사 챔버시료의 상태정수 결정

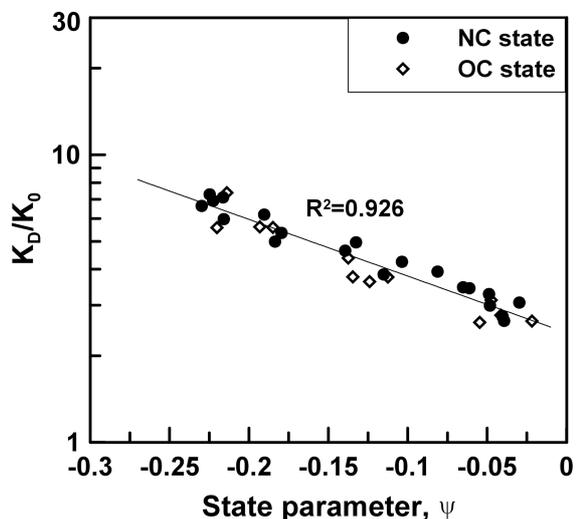


그림 6. 부산사의 K_D/K_0 와 상태정수(ψ) 관계

(1988)의 제안식에 기초하여 표현된 부산사의 상태정수와 K_D/K_0 의 관계이며 부산사의 K_D/K_0 는 반대수축에서 상태정수와 선형관계를 만족하였다. 그림 6에서 과압밀 상태의 K_D/K_0 가 정규압밀 상태의 값보다 약간 과소평가되었으며, 이는 정지토압계수 K_0 는 순수하게 수평응력의 영향을 나타내는 반면, 수평응력지수 K_D 는 수평응력 뿐만 아니라 연직응력의 영향도 일부 반영되기 때문이다. 그러나 응력이력은 K_D/K_0 - ψ 관계에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다.

4.2.3 E_D 와 상태정수 관계

그림 7은 평균 유효응력과 dilatometer 계수에 따른 부산사의 상태정수 분포이다. 전술한 바와 같이, Konrad(1988)은 평균 유효응력과 dilatometer 계수와의 선형성을 언급하였으며, 부산사의 dilatometer 계수도 동일한 상태정수에서 평균 유효응력과 선형적인 관계를 보였다. 즉, 부산사의 dilatometer 계수와 평균 유효응력의 비(E_D/σ_m')는 동일한 상태정수에서 비교적 일정하게 나타날 뿐만 아니라, 상태정수가 음(-)으로 증가할수록 E_D/σ_m' 는 점차 증가하였다. 그림 7은 사질토의 상태정수는 dilatometer 계수와 응력수준과 연관시켜 표현될 수 있음을 의미한다.

그림 7의 결과에 근거하여 부산사의 상태정수와 평균 유효응력으로 정규화된 dilatometer 계수(E_D/σ_m') 관계를 그림 8과 같이 표현하였다. 반대수축 상에서 E_D/σ_m' 는 상태정수와 선형관계를 만족하였다. 또한 E_D/σ_m' - ψ 관계는 응력이력에 관계없이 동일한 식으로 표현될 수 있으며, 이는 dilatometer 계수와 평균 유효응력이 수평응력의 변화에 유사하게 반응하기 때문이다. 그림 8의 결과는 사질토의 dilatometer 계수와 흙의 상태를 대표하는 물성치 중 하나인 상태정수가 식 (2)로 표현될 수 있음을 의미한다.

4.2.4 K_D 와 E_D 관계

그림 6과 8의 결과에서 확인되었듯이, 사질토의 K_D/K_0 및 E_D/σ_m' 는 상태정수와 응력이력에 관계없이 높은 상관성을 가진다. 그림 9는 두 관계를 조합하여 표현된 부산사의 E_D/σ_m' 와 K_D/K_0 의 관계를 보여준다. 그림 6, 8과 마찬가지로

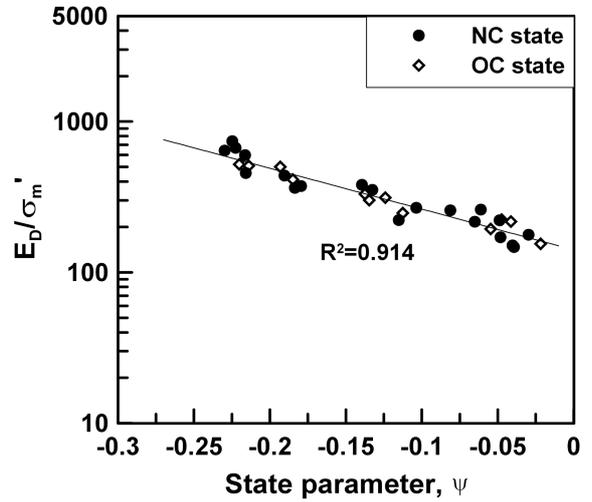


그림 8. 부산사의 상태정수와 정규화된 dilatometer 계수 관계

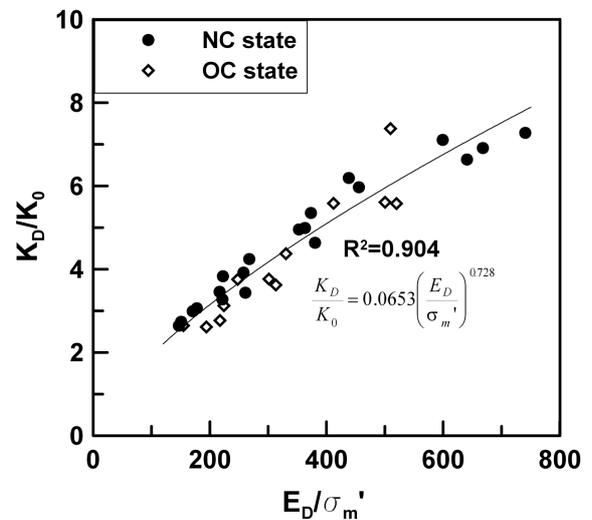


그림 9. 부산사의 K_D/K_0 와 정규화된 dilatometer 계수 관계

그림 9의 K_D/K_0 - E_D/σ_m' 관계는 응력이력에 관계없이 높은 상관성을 보였다. 그림 9의 결과는 본 연구에서 제안된 식 (4)의 관계가 사질토에 대해 타당함을 보여준다.

4.3 K_0 추정법 비교

현장시험으로부터 지반특성을 평가하는 것이 매우 난이하나, K_0 를 예측하기 위한 다양한 경험적인 공식들이 제안되고 있다(표 3).

4.3.1 콘선단저항을 이용한 K_0 추정

Mayne(1995, 2001)은 다양한 모래의 챔버시험 결과를 분석하여 콘선단저항과 상대하중(σ_v'), 그리고 과압밀비(OCR)를 이용하여 K_0 를 추정하는 식 (5)를 제안하였다(표 3). 그림 10(a)는 측정된 부산사의 K_0 와 식 (5)를 이용하여 추정된 K_0 를 비교한 그림이다. 전체적으로 추정값과 측정값은 유사한 경향을 보였으나, 동일한 과압밀비 상태의 시료에서, 식 (5)를 통해 계산된 부산사의 K_0 변화가 측정값보다 더 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 식 (5)에서 상대밀도의 변화에 민감한 콘선단저항이 K_0 추정값에 큰 영향을 미친 반면, 실제로 K_0 는 상대밀도의 변화에는 큰 영향을 받지 않기 때문

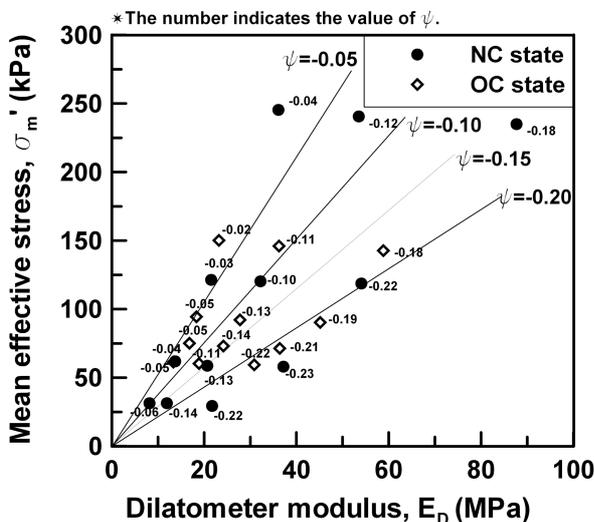


그림 7. 평균 유효응력과 dilatometer 계수에 따른 부산사 상태정수 분포

표 3. 다양한 K_0 추정식

출처	K_0 추정식	비고
Mayne (1995, 2001)	$K_0 = 1.33(q_c)^{0.22}(\sigma_v')^{-0.31}OCR^{0.27}$ (5)	챔버시험, 현장시험
Baldi et al. (1986)	$K_0 = 0.376 + 0.095K_D - 0.0017\frac{q_c}{\sigma_v'}$ (6)	챔버시험 Ticino and Hokksund sands
Jamiolkowski and Robertson (1988)	$\frac{K_D}{K_0} = 0.0578\left(\frac{q_c - \sigma_m'}{\sigma_m'}\right)^{0.92}$ (7)	챔버시험 Ticino and Hokksund sands

이다(Mayne and Kulhawy 1982). 식 (5)가 콘관입시험 결과만으로 지반의 K_0 를 추정할 수 있는 장점이 있으나, 현실적으로 정확한 K_0 를 추정하기 위해 지반의 과압밀비를 미리 파악해야 하는 단점이 있다.

4.3.2 콘선단저항과 K_D 를 이용한 K_0 추정

Baldi et al.(1986)은 챔버에 조성된 Ticino sand와 Hokksund sand에서 수행된 딜라토미터 시험과 콘관입시험 결과에 기초하여 식 (6)과 같은 K_0 - q_c - K_D 관계를 제안하였다. Bellotti et al.(1994)은 Toyoura sand를 이용한 챔버시험 결과로부터 정규압밀상태 시료의 K_0 는 식 (6)을 이용하여 비교적 정확하게 예측될 수 있음을 보였다. 그림 10(b)는 식 (6)을 이

용하여 추정된 부산사의 K_0 와 실제 챔버에서 측정된 K_0 를 비교한 결과이다. 정규압밀 상태에서 부산사의 K_0 는 식 (6)을 이용하여 비교적 정확하게 예측되었다. 그러나 과압밀 상태에서 부산사의 K_0 는 약 30~80% 과소평가되었으며, 시료의 과압밀비가 증가할수록 측정값과 추정값의 오차는 더욱 증가하였다. 이와 같은 결과는 Toyoura sand의 K_0 가 과압밀 상태(OCR=7.0~7.3)에서 약 42~52% 과소평가된 Bellotti et al.(1994)의 결과와도 일치한다. 즉, 콘선단저항과 딜라토미터 수평응력지수로부터 정지토압계수를 추정하기 위해 제안된 식 (6)은 정규압밀 상태의 사질토 지반에는 적용성이 우수하지만, 과압밀 지반의 K_0 는 과소평가하는 경향이 있다. 이와 같은 결과는 콘선단저항보다 딜라토미터의 K_D 가 지반

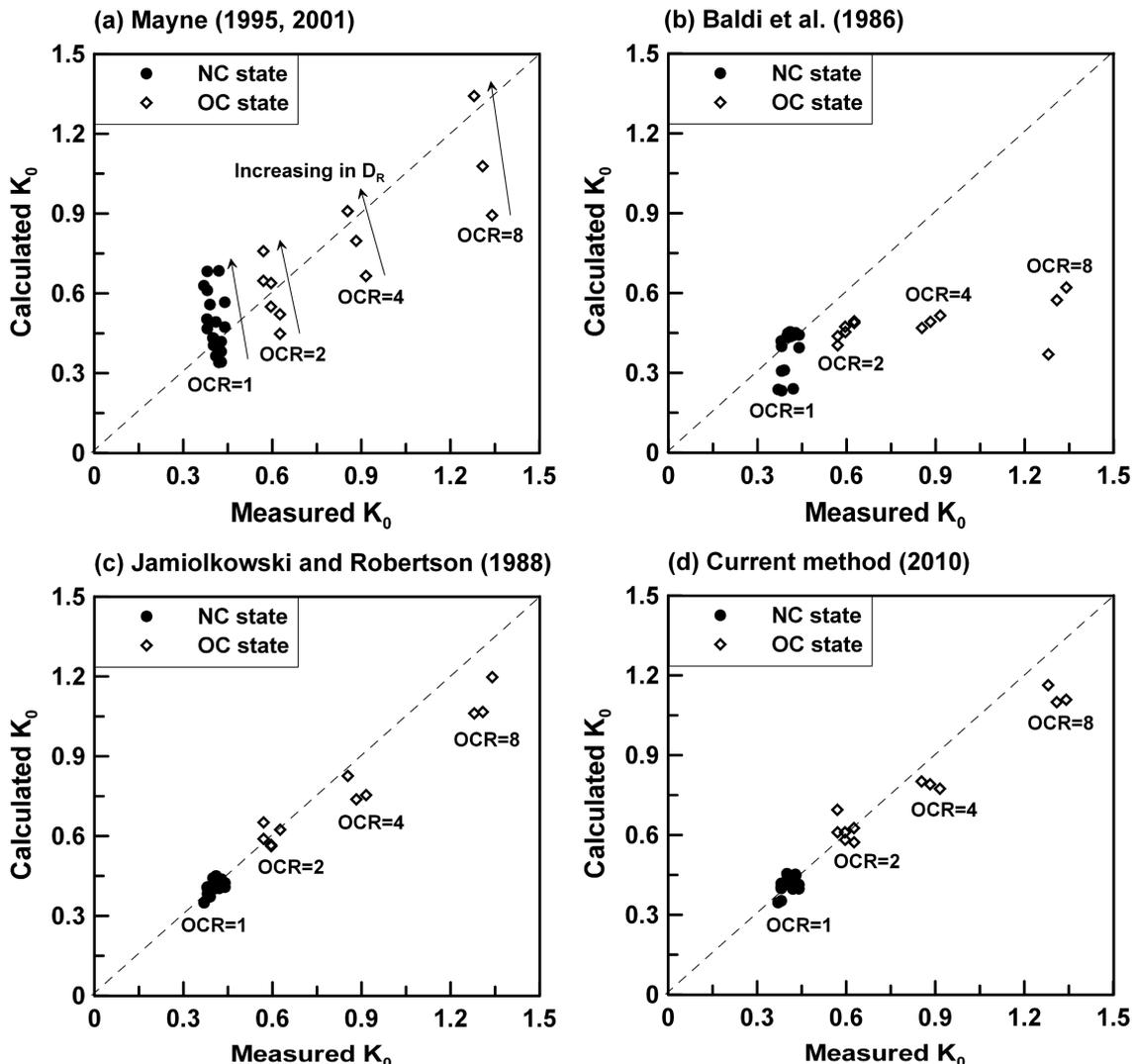


그림 10. 다양한 방법에 의한 K_0 추정 비교

의 응력이력에 좀 더 영향을 받기 때문이다.

사질토에 대해서 Been et al.(1986)은 상태정수와 콘선단저항의 관계를 제시하였으며, 또한 Jamiolkowski et al.(1988)은 상태정수와 K_D/K_0 의 관계를 제안하였다. Jamiolkowski and Robertson(1988)은 상태정수를 매개로 하여 두 식을 조합함으로써 Ticino sand와 Hokksund sands에 대해 K_D/K_0 와 콘선단저항의 관계를 식 (7)과 같이 제안하였다(표 3). 상태정수를 활용한 기존의 $K_D/K_0-\psi$, $q_c-\psi$ 관계는 현장시험 뿐만 아니라 실내시험으로부터 사질토의 상태정수를 평가해야 하기 때문에 적용이 어려운 반면, 식 (7)은 동일 현장에서 수행되는 콘관입시험과 달라토미터 시험으로부터 현장 지반의 K_0 를 추정할 수 있기 때문에 적용성이 높다. Jamiolkowski and Robertson(1988)의 제안식에 기초한 부산사의 K_D/K_0-q_c 관계는 식 (8)과 같다. 여기서, σ_m 과 σ'_m 은 각각 지반의 평균 전응력과 평균 유효응력을 나타낸다.

$$\frac{K_D}{K_0} = 0.602 \left(\frac{q_c - \sigma'_m}{\sigma'_m} \right)^{0.412} \quad (8)$$

그림 10(c)는 식 (8)로부터 추정된 부산사의 K_0 와 챔버에서 측정된 K_0 를 비교한 것이다. 시료의 과압밀비가 증가할수록 측정값과 추정값의 오차가 점차 증가하여, 과압밀비 8인 시료의 경우 식 (8)은 부산사의 K_0 를 약 10~20% 과소평가 하였다. 이는 K_0 와는 달리 K_D 는 수평응력과 연직응력의 영향을 동시에 받기 때문에, K_D 에 응력이력의 영향이 다소 작게 미치는 때문이다. 그러나 식 (8)은 응력이력 효과에 관계없이 시료의 K_0 를 비교적 정확하게 예측할 수 있다.

4.3.3 K_D 와 E_D 를 이용한 K_0 추정

그림 9에서 검증된 바와 같이, 사질토의 K_D/K_0 는 평균 유효응력으로 정규화된 달라토미터 계수(E_D/σ'_m)와 응력이력에 관계없이 높은 상관관계를 보인다. 그림 9에 표현된 부산사의 $K_D/K_0-E_D/\sigma'_m$ 관계는 식 (9)와 같다.

$$\frac{K_D}{K_0} = 0.0653 \left(\frac{E_D}{\sigma'_m} \right)^{0.728} \quad (9)$$

식 (9)를 사용하여 추정된 부산사의 K_0 와 챔버에서 측정된 K_0 는 그림 10(d)에서 비교되었다. 그림 10(c)의 Jamiolkowski and Robertson(1988) 방법과 마찬가지로 식 (9)는 정규압밀 상태의 K_0 보다 과압밀 상태의 K_0 를 다소 과소평가하였으나, 오차는 매우 작게 나타났다. Jamiolkowski and Robertson (1988) 방법에 의한 식 (8)과 본 연구에서 제안된 방법에 의한 식 (9)는 유사한 정확도로 사질토의 K_0 를 추정할 수 있었다. 그럼에도 불구하고, 콘관입시험과 달라토미터 시험을 동시에 적용하여 K_0 를 평가해야만 하는 Jamiolkowski and Robertson(1988)의 방법과 비교하여, 본 연구에서 제안된 방법은 달라토미터 시험만으로 유사한 정확도로 K_0 를 추정할 수 있다.

그림 11은 Ticino sand를 이용한 Baldi et al.(1986)의 챔버 달라토미터 시험 결과를 이용하여 본 연구에서 제안된 K_0 추정법을 검증한 것이다. Ticino sand의 경우에도 비교적 높은 상관성($R^2=0.819$)을 가진 $K_D/K_0-E_D/\sigma'_m$ 관계를 얻을 수 있었으며, 식 (10)과 같이 표현되었다. 특히 Ticino sand

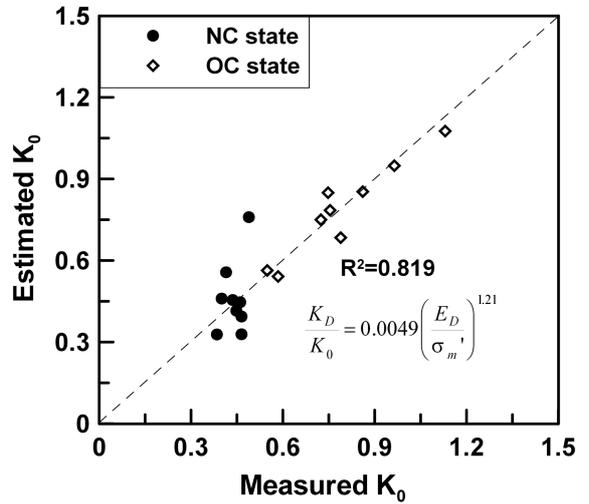


그림 11. Ticino sand를 이용한 제안된 K_0 추정법 검증

의 경우 과압밀비 1.5~8.1인 시료에서 매우 정확한 K_0 추정이 가능하였다.

$$\frac{K_D}{K_0} = 0.0049 \left(\frac{E_D}{\sigma'_m} \right)^{1.21} \quad (10)$$

5. 결 론

응력이력은 흙의 압축성에 영향을 미치는 주 요인 중 하나이며, 지반의 정지토압계수(K_0)는 사질토의 응력이력 효과를 평가하는 방법 중 하나이다. 지반의 정지토압계수는 현장 시험의 결과를 활용한 다양한 경험적 상관관계로부터 추정되어지고 있다. 본 연구에서는 달라토미터 시험으로부터 지반의 정지토압계수를 추정하는 방법을 제안하였으며, 챔버 콘관입시험과 달라토미터 시험을 수행하여 제안된 방법을 검증하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 $K_D/K_0-\psi$ 관계와 $E_D/\sigma'_m-\psi$ 관계를 조합하여 $K_D/K_0=\chi(E_D/\sigma'_m)^\delta$ 의 형태의 새로운 K_0 추정법을 제안하였다. 부산사의 경우 응력이력에 관계없이 $K_D/K_0-\psi$ 관계와 $E_D/\sigma'_m-\psi$ 관계를 모두 만족하였으며, 새롭게 제안된 식도 높은 상관성을 가지고 정규압밀 상태 뿐만 아니라 과압밀 상태인 사질토의 K_0 를 추정할 수 있었다.
2. 콘관입시험의 콘선단저항과 달라토미터 시험의 수평응력 지수를 모두 활용하는 기존의 방법은 콘선단저항과 수평응력지수에 미치는 응력이력의 상대적인 영향정도를 비교함으로써 지반의 K_0 를 효과적으로 예측할 수 있으나, 심각한 불균질성 지반에서는 추정에 오차가 발생할 수 있다.
3. 본 연구에서 제안된 방법은 달라토미터 계수와 달라토미터 계수에 비해 지반의 수평응력 변화에 매우 민감한 수평응력지수를 활용하기 때문에 정규압밀 상태 뿐만 아니라 과압밀 상태인 사질토의 K_0 를 모두 예측할 수 있다. 또한 수평응력지수와 달라토미터 계수가 동시에 측정되기 때문에, 지반의 불균질성이 K_0 추정에 미치는 영향이 최소화된다.
4. 결과적으로 본 연구에서 제안된 K_0 추정법은 기존의 콘관입시험과 달라토미터 시험을 동시에 적용하는 방법이나,

콘관입시험 만으로 K_0 를 평가하는 방법에 비해 더욱 간편하고 신뢰성이 높은 방법으로 판단된다.

5. 기존의 방법들과 마찬가지로 제안된 방법은 입자의 크기 및 강도와 같은 흙의 특성이나 고결과 같은 환경적인 요인에 의해 영향을 받기 때문에, 해당 흙에 대해 별도의 관계식을 정립하기 위해 추후 다양한 모래를 이용한 검토가 필요하다.

감사의 글

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

참고문헌

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.

Been, K. and Jefferies, M.G. (1985) A state parameter for sands, *Geotechnique*, Vol. 35, No. 2, pp. 99-112.

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.

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.

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.

Cubrinovski, M. and Ishihara, K. (2002) Maximum and minimum void ratio characteristics of sands, *Soils and Foundations*, Vol. 42, No. 6, pp. 65-78.

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.

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.

Lunne, T., Robertson, P.K., and Powell, J.J.M. (1997) *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, Blackie Academic & Professional, London

Marchetti, S. (1980) In situ tests by flat dilatometer, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 106, No. GT3, pp. 299-321.

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.

Mayne, P.W. (2001) Stress-strain-strength-flow parameter from enhanced in-situ tests, *Proceedings of International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories*, Bali, Indonesia, pp. 27-48.

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.

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.

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.

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.

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.

(접수일: 2010.2.10/심사일: 2010.5.11/심사완료일: 2010.6.23)