

## 사질토의 변형특성 평가를 위한 딜라토미터 시험의 활용 Dilatometer test for evaluating deformation characteristics in sand

이문주<sup>1)</sup>, Moon-Joo Lee, 홍성진<sup>2)</sup>, Sung-Jin Hong, 이우진<sup>3)</sup>, Woojin Lee

<sup>1)</sup> (주)한화건설 토목환경사업본부 토목기술팀 대리,

Associate Manager, Civil Engineering Team, Hanwha Engineering and Construction

<sup>2)</sup> 고려대학교 공과대학 건축토목환경공학부 박사과정,

Ph.D. Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea Univ.

<sup>3)</sup> 고려대학교 공과대학 건축토목환경공학부 교수,

Professor, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea Univ.

**SYNOPSIS** : This study investigates the application of dilatometer test for evaluating the deformation characteristics of granular soil.  $K_D$  is the most sensitive to the stress history among CPT and DMT measurements, and  $E_D$  and  $q_c$  are observed to be similarly affected by the stress history. The coefficient of at-rest earth pressure( $K_0$ ) is an indirect measure evaluating the stress history of granular soil. A relation using only DMT indices provides appropriate prediction of  $K_0$  values. Although penetration of dilatometer inevitably induces the failure of cementation bonds,  $E_D$  reflects the deformation characteristics of undamaged cementation relatively well. Therefore, a slightly better prediction of  $M$  value for cemented sand is achieved by using  $E_D$  rather than  $q_c$ . Because of the weaker particle strength of calcareous sand compared than quartz sand, the majority of sand particles adjacent to dilatometer probe will be crushed during penetration. The particle crushing will induce the less contraction of the dilatometer membrane during penetration, consequently, the smaller  $K_D$  and  $E_D$  of calcareous sand.

**Keywords** : Dilatometer test, Deformation characteristics, Stress history, Cementation, Calcareous sand

### 1. 서론

딜라토미터 시험(Dilatometer test, DMT)은 비교적 경제적으로 각종 토질정수를 간단하고 반복적으로 평가할 수 있는 장점 때문에 콘관입시험과 더불어 널리 이용되는 현장시험법이다. 딜라토미터 시험은 표준관입시험이나 콘관입시험과 같은 여타의 현장관입시험과 비교하여 지반의 교란을 적게 발생시킬 뿐만 아니라, 비교적 작은 변형에서 시험이 수행된다. 따라서 딜라토미터 시험은 지반의 응력이력이나 변형특성 평가에 효과적인 것으로 알려지고 있다(표 1).

현재까지 국내외의 수많은 현장 및 실내시험으로부터 점성토 지반의 딜라토미터 시험 측정값들의 상관관계와 측정값들과 토질정수의 상관관계가 평가되었다. Iwasaki et al.(1991)은 딜라토미터 시험으로부터 추정된 횡방향구속 변형계수인  $M_{DMT}$ 가 일본 연약지반의 횡방향구속 변형계수를 잘 예측한다고 하였으며, Schmertmann(1986)은 구조물의 침하량을 역해석한 결과  $M_{DMT}$ 가 다양한 지반구조물의 침하량을 잘 예측한다고 하였다. Hong et al.(2008)은 부산점토의 압밀시험과 딜라토미터 결과를 비교하여 Marchetti(1980, 2001)의 제안은 부산점토의 횡방향구속 변형계수를 과대평가하며, 상관계수  $R_M$ 은  $1/I_D$ 와

비례한다고 하였다.

사질토 지반에서의 딜라토미터 시험이 국외를 중심으로 활발히 수행되고 있다. Reyna and Chameau(1991)은 딜라토미터 시험의 수평응력지수인  $K_D$ 와 상대밀도의 관계를 평가하였고, Been et al.(1986, 1987)과 Jamiolkowski and Robertson(1988)은 상태정수(state parameter)와 콘선단저항, 그리고 DMT 수평응력지수의 관계를 평가하였다. Baldi et al.(1986), Jamiolkowski and Robertson(1988), Campanella and Robertson(1991) 등은 CPT와 DMT 결과의 상관관계를 검토하였다. 그러나 대부분의 선행연구에서 미고결 정규압밀상태인 규산염 모래에 대한 결과가 주로 검토되었으며, 최근에는 고결(cementation), 응력이력(stress history), 그리고 규산염 모래보다 입자의 강도가 약한 탄산염 모래(calcareous sand)의 파쇄성이 딜라토미터 시험에 미치는 영향에 대한 연구가 수행되었다. 따라서 본 논문에서는 이에 대해 검토하고자 한다.

표 1. 대표적 현장시험법 및 적용범위 (from Robertson 1986)

Test method		CPTU	DMT	Field vane test	SPT	Screw plate test	Self-boring pressure-meter	Seismic test	Plate load test
Geotechnical information	Soil type	A	B	C	A	C	B	C	C
	Profile	A	A	C	B	C	B	C	C
	Piezometric pressure	A	C	-	-	-	A	-	-
	Friction angle	B	B	-	B	B	A	-	C
	Undrained shear strength	B	B	A	C	B	B	-	B
	Density	B	C	-	B	B	B	-	B
	Compressibility	C	B	-	-	C	B	-	B
	Rate of consolidation	A	-	-	-	C	A	-	C
	Permeability	B	-	-	-	C	B	-	C
	Modulus	B	B	-	B	A	A	A	A
	In situ stress	C	B	C	-	C	A	-	C
	Stress history	B	B	B	C	B	A	-	B
Ground conditions	Hard rock	-	-	-	-	-	-	A	B
	Soft rock	C	C	-	C	-	C	A	A
	Gravel	-	-	-	B	-	-	A	B
	Sand	A	A	-	A	A	B	A	B
	Silt	A	A	B	B	A	A	A	A
	Clay	A	A	A	C	A	A	A	A
	Pear-organics	A	A	B	C	A	A	A	A

Note : A=high applicability, B=moderate applicability, C=limited applicability, -=not applicable.

## 2. 딜라토미터 시험

Marchetti에 의해 개발된 딜라토미터(DMT)는 폭 95mm, 두께 15mm, 길이 230mm인 노 모양의 관입

체에 60mm 직경의 강철 멤브레인이 장착되어 있다(그림 1). 딜라토미터 시험은 강철 멤브레인에 소정의 변위가 발생할 때의 압력을 측정하여, 이를 통해 수평방향 응력과 관련된 지반의 역학적 특성들을 추정한다. Marchetti(1980)는 DMT 결과로부터 아래와 같은 3개의 딜라토미터 지수를 제안하였다.

$$E_D = 34.7(P_1 - P_0) \quad (1)$$

$$K_D = \frac{P_0 - u_0}{\sigma_{v0}'} \quad (2)$$

$$I_D = \frac{P_1 - P_0}{P_0 - u_0} \quad (3)$$

딜라토미터 계수  $E_D$ 는 흙의 강성과 관계되며, 수평응력지수  $K_D$ 는 흙의 정지토압계수와 관계되어 과압밀비나 내부마찰각을 구하는데 이용된다. 또한 재료지수  $I_D$ 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,  $\sigma_{v0}'$ 은 연직유효응력이다.

딜라토미터 시험에서는 지반의 변형특성을 나타내는 대표적인 물성치인 횡방향구속 변형계수(M)를 식 (4)와 같이 딜라토미터 계수인  $E_D$ 로부터 추정된 딜라토미터 횡방향구속 변형계수( $M_{DMT}$ )로 평가한다. 여기서, 상관계수  $R_M$ 은  $I_D$ 와  $K_D$ 의 함수이지만  $K_D$ 의 영향이 더 크며, 대부분 1~3 범위에 분포한다.

$$M_{DMT} = R_M E_D \quad (4)$$

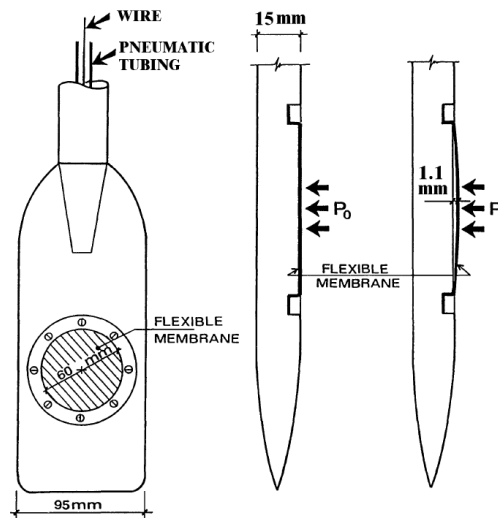


그림 1. 딜라토미터 형상 및 제원

### 3. 딜라토미터를 이용한 사질토 변형특성 평가

#### 3.1 과압밀 사질토의 평가

##### 3.1.1 응력이력이 DMT 결과에 미치는 영향

사질토 지반의 경우 응력이력은 지반의 수평응력을 증가시키기 때문에 관입저항치를 증가시킨다. Lee et al.(2010)은 부산사로 조성된 챔버시료를 이용하여 연직구속압 400kPa까지의 정규압밀상태와 과압밀비=2~8인 과압밀 상태에서 콘선단저항과 딜라토미터 지수 변화를 측정하였다(그림 2). 정규압밀 상태의

$K_D$ 는 연직구속압에 관계없이 비교적 일정한 반면, 과압밀상태의  $K_D$ 는 과압밀비가 증가함에 따라 급격히 증가하였다. 과압밀비 2~8인 시료의  $K_D$ 는 동일 상대밀도와 연직구속압 상태의 정규압밀시료의  $K_D$ 보다 1.3~2.5배 크게 나타났다. 그림 2(b)에서 정규압밀시료의  $E_D$ 는 연직구속압과 동일한 경향으로 증가 또는 감소하였으며, 과압밀시료의  $E_D$ 가 정규압밀시료보다 약 1.1~1.6배 크게 나타났다. 그림 2(c)에서 모든 상대밀도에서 과압밀상태 부산사의  $M_D$ 는 정규압밀상태보다 1.3~3.0배 증가하였으며, 그림 2(d)에서 구속압과 과압밀비에 따른 콘선단저항의 변화는  $E_D$ 의 경향과 매우 유사하였다. 결과적으로 dilatometer의  $K_D$ 가 콘선단저항이나  $E_D$ 에 비해 응력이력에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

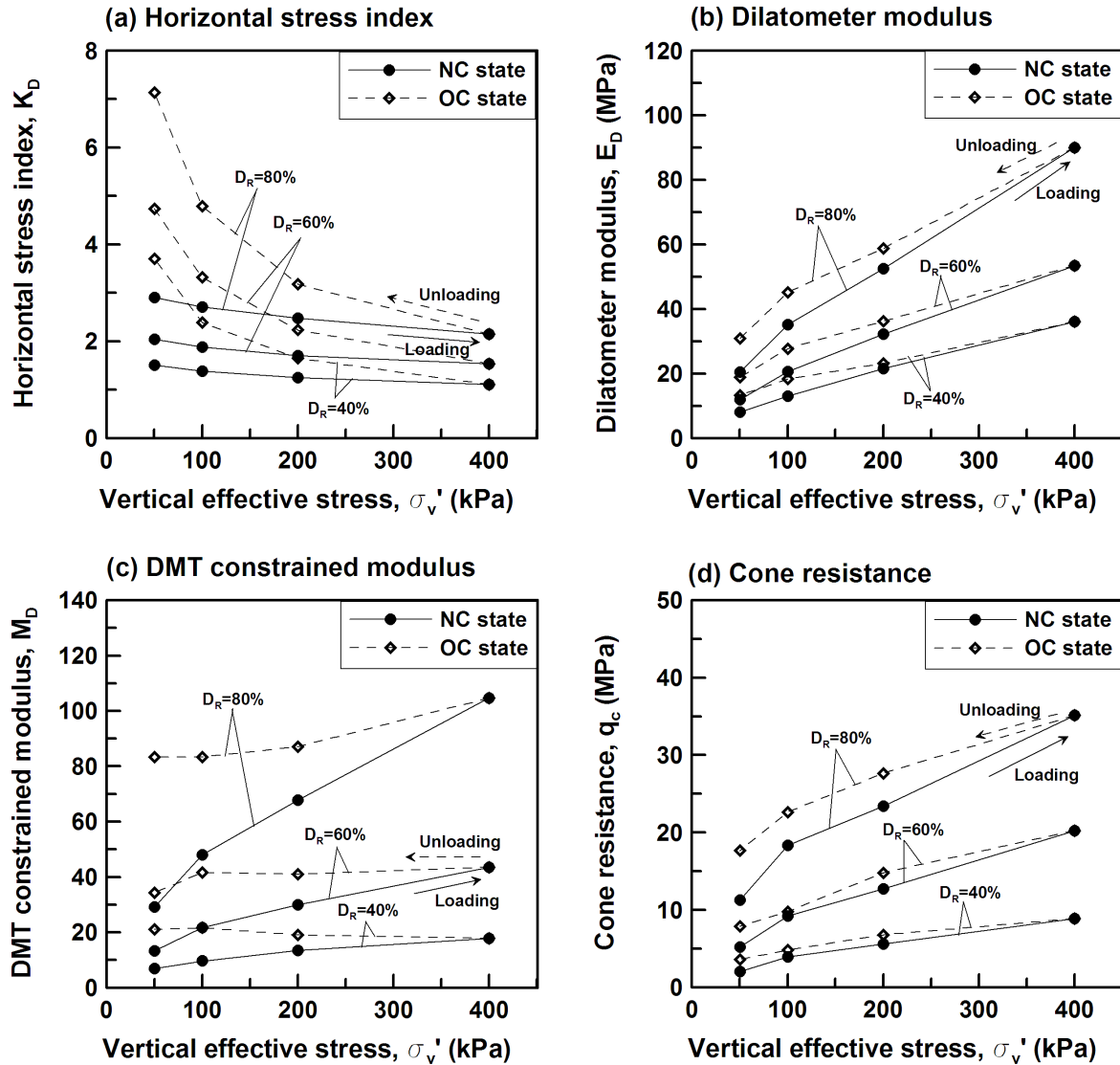


그림 2. 응력이력이 CPT, DMT에 미치는 영향 (Lee et al. 2010)

### 3.1.2 과압밀 사질토의 변형특성 평가

응력이력은 사질토 지반의 변형계수에 큰 영향을 미친다. Yoshimi et al. (1975)는 초기 상대밀도가 동일하여도 선행응력을 받은 모래시료의 압축성이 정규압밀 상태 모래시료의 압축성보다 6배 이상 작음을 보였다. 또한 Clayton et al.(1985)은 시료의 선행응력이 현재상태의 응력수준이나 응력경로보다 사질토의 압축성에 대한 더 큰 지배요인이라고 주장하였다.

사질토의 변형계수는 콘관입시험과 dilatometer 시험 결과로부터 추정되기도 하며, Lunne and

Christophersen(1983)은 사질토의 콘선단저항과 횡방향구속 변형계수의 관계를 식 (5)와 같이 제안하였다. 그림 3(a)는 Baldi et al.(1986)의 챔버시험으로부터 결정된 Ticino sand의 콘선단저항으로부터 식 (5)를 이용하여 추정된 횡방향구속 변형계수( $M_{qc}$ )와 측정된 횡방향구속 변형계수( $M$ )를 비교한 것이다. 정규압밀 상태의 경우에는 실측값에 비해 약 30% 과소평가된 반면, 과압밀시료는 콘선단저항으로부터 약 70% 횡방향구속 변형계수가 과소평가되었다. 이와 같은 결과는 시료의 과압밀비가 증가할수록 관입 저항치와 변형계수의 비가 점차 증가하는 경향을 보인 이전 연구결과와 일치한다(Baldi et al. 1988; Jamiolkowski et al. 1988).

$$\begin{aligned}
 M &= 4q_c && : \text{for } q_c < 10\text{MPa} \\
 M &= 2q_c + 20 && : \text{for } 10\text{MPa} < q_c < 50\text{MPa} \\
 M &= 120\text{MPa} && : \text{for } q_c > 50\text{MPa}
 \end{aligned} \tag{5}$$

전술한 바와 같이, 델라토미터 시험에서는  $E_D$ 로부터 식 (4)와 같이 횡방향구속 변형계수( $M_{DMT}$ )를 추정한다. 그림 3(b)는 Ticino sand의  $E_D$ 로부터 추정된  $M_{DMT}$ 와 측정된  $M$ 의 비교 결과이다. 정규압밀시료의 경우  $M_{DMT}$ 는  $M$ 보다 약 25% 과소평가되었으며, 과압밀시료는 약 60% 과소평가되었다. 그림 3의 결과로부터 기존의 정규압밀 상태에서 추정된 관계식을 이용하여 관입저항치로부터 과압밀시료의 변형특성을 평가할 경우 매우 과소평가할 수 있음이 확인되었다. 또한 그림 3의 결과는 현장 지반의 선행응력, 즉 응력이력을 고려하지 않고 관입저항치로부터 신뢰할만한 지반의 변형특성을 추정하는 것은 불가능함을 보여준다.

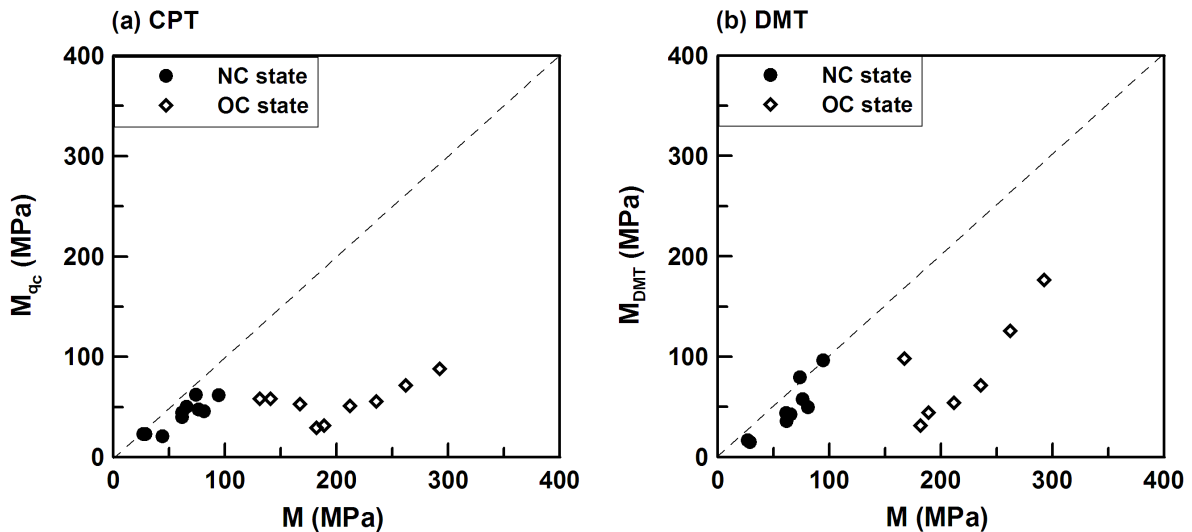


그림 3. Ticino sand의 횡방향구속 변형계수 비교 - 실측값( $M$ )과 추정값( $M_{qc}$ ,  $M_{DMT}$ ) ; data from Baldi et al.(1986)

### 3.1.3 사질토 지반의 응력이력 추정

응력이력은 사질토 지반의 소성변형을 유발시키고 수평응력을 증가시키지만, 일반적인 관입시험은 관입도중 주변의 흙을 교란시키기 때문에, 관입시험에 나타나는 응력이력의 영향은 주로 수평응력의 증가 때문에 발생된다(Clayton et al. 1985; Jamiolkowski and Robertson 1988). 따라서, 지반의 정지토압계수 ( $K_0$ )의 평가는 지반의 선행응력, 즉 응력이력을 평가하기 위한 방법 중 하나이다. Baldi et al.(1986)은 Ticino sand와 Hokksund sand에 대한 챔버시험 결과에 기초하여 식 (6)과 같이 CPT의 콘선단저항과

DMT의 수평응력지수로부터  $K_0$ 를 추정하였다.

$$K_0 = 0.376 + 0.095K_D - 0.0017\frac{q_c}{\sigma_v} \quad (6)$$

최성근 등(2010)은 식 (6)을 이용하여 추정된 부산사의  $K_0$ 와 실제 챔버에서 측정된  $K_0$ 를 그림 4(a)와 같이 비교하였다. Bellotti et al.(1994)의 결과와 유사하게 정규압밀 상태에서 부산사의  $K_0$ 는 식 (6)을 이용하여 비교적 정확하게 예측되었다. 반면, 과압밀 상태에서 부산사의  $K_0$ 는 약 30~80% 과소평가되었으며, 시료의 과압밀비가 증가할수록 측정값과 추정값의 오차는 더욱 증가하였다. 따라서 식 (6)은 응력이력 효과를 제대로 반영하지 못하는 것으로 나타났다.

최성근 등(2010)은 Jamiolkowski and Robertson(1988)이 제안한  $K_D/K_0$ 와 콘선단저항의 관계에 근거하여 부산사에 적합한  $K_D/K_0$ - $q_c$  관계를 식 (7)과 같이 나타내었으며, 식 (7)로 부산사의  $K_0$ 를 추정하여 측정값과 그림 4(b)와 같이 비교하였다. 시료의 과압밀비가 증가할수록 측정값과 추정값의 오차가 점차 증가하였으나, Baldi et al. (1986)의 제안식보다 과압밀된 사질토 지반의  $K_0$ 를 더 정확하게 추정할 수 있다.

$$\frac{K_D}{K_0} = 0.602 \left( \frac{q_c - \sigma_m}{\sigma_m'} \right)^{0.412} \quad (7)$$

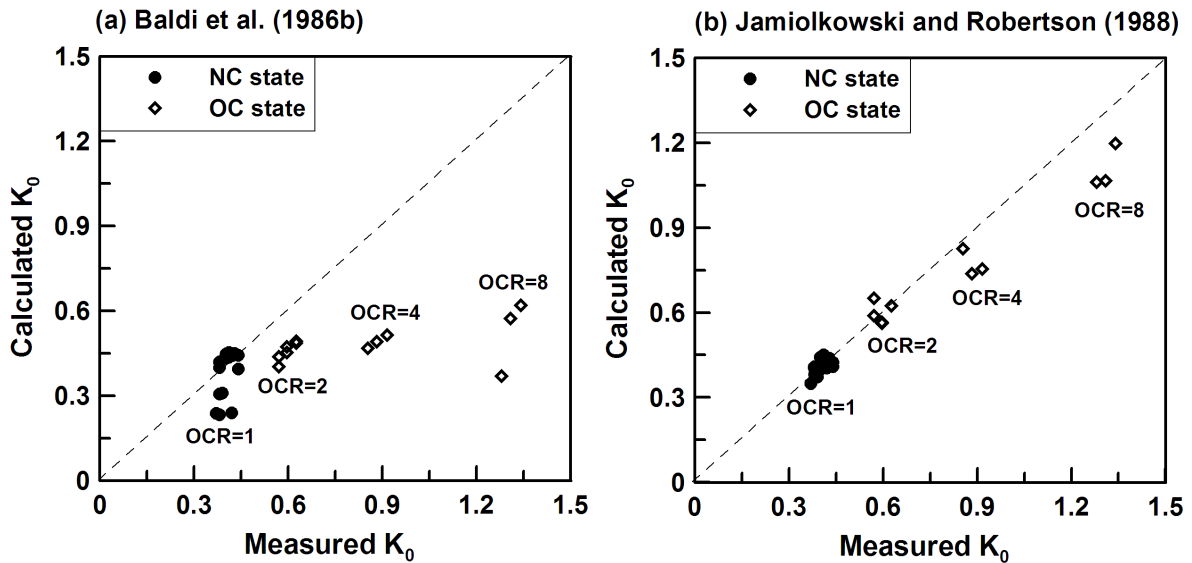


그림 4. 기존  $K_0$  추정법의 비교 (최성근 등 2010)

최성근 등(2010)은 Jamiolkowski et al.(1988)와 Konrad(1988)의 관찰결과에 근거하여 dilatometer 시험만으로 지반의  $K_0$ 를 추정하는 식 (8)을 제안하고 검증하였다. 그림 5는 식 (8)을 사용하여 추정된 부산사의  $K_0$ 와 챔버에서 측정된  $K_0$ 를 비교한 것으로써, 그림 4(b)의 Jamiolkowski and Robertson(1988) 방법과 유사한 정확도로  $K_0$  추정이 가능하였다. 그림에도 불구하고, 콘관입시험과 dilatometer 시험을 동시에 적용하여  $K_0$ 를 평가해야만 하는 Jamiolkowski and Robertson(1988)의 방법과 달리 최성근 등(2010)의 방법은 dilatometer 시험만으로  $K_0$ 를 추정할 수 있는 장점이 있다.

$$\frac{K_D}{K_0} = \chi \left( \frac{E_D}{\sigma_m'} \right)^\delta \quad (8)$$

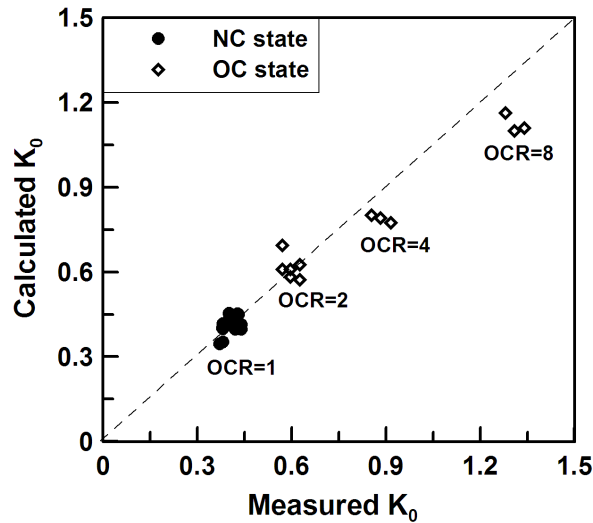


그림 5. DMT 지수( $K_D$ ,  $E_D$ ) 만을 이용한 사질토  $K_0$  추정법 검증 (최성근 등 2010)

### 3.2 고결된 사질토의 평가

고결(cementation)은 입자사이에 입자간 결합을 형성시키는 물질이 침전하여 접촉결합을 형성하는 화학적 ageing 과정이며, 자연상태에서는 열대나 아열대 지역에 퇴적된 탄산염 퇴적지반에서 발생빈도가 매우 높다. 남정만 등(2007)은 제주 인근해역 퇴적층에서 높은 구성비의 탄산염 성분을 확인하였고, 이문주 등(2009a)은 현장시험 결과를 분석하여 제주 서귀포 인근해역의 고결 가능성을 제시하였다.

현재까지 지반의 고결특성은 대표적인 현장시험법인 콘관입시험에 의해 주로 평가되고 있다. Akili and Al-Joulani(1988), Joshi et al.(1995), Puppala et al.(1995), Rad and Tumay(1986) 등에 의해 고결이 콘선단저항에 미치는 영향에 대한 다양한 챔버시험이 수행되었으며, 이문주 등(2008)은 다양한 상대밀도, 구속압 및 고결강도 조건에 대한 챔버시험으로부터 고결모래의 콘선단저항과 변형계수, 일축압축강도, 전단강도의 관계를 분석하였다. 최근들어 딜라토미터 시험을 통해 지반의 고결특성을 평가하고자 하는 시도가 있었다. Cruz and Fonseca(2006)는 현장시험을 통해 고결토의 점착력은  $K_D$ 와  $M_D/q_c$ 의 비를 증가시킴을 확인하였으나, 지표 3m 이내의 제한적인 연구결과만을 포함하고 있어 구속압에 따른 다양한 영향을 평가하지 못하였다. 이문주 등(2009b)은 고결된 챔버시료에서 딜라토미터 시험을 수행하여 모래의 딜라토미터 계수는 상대밀도와 고결강도가 증가할수록 증가하였을 뿐만 아니라, 미고결 모래와는 달리 고결모래의 경우에는 입자사이의 고결결합의 영향으로 구속압이 0인 상태에서도 딜라토미터 계수가 여전히 존재하는 것을 관찰하였다. 또한 상대밀도나 구속압보다 고결이 모래의  $K_D$ 에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

그림 6(a)에서와 같이, 이문주 등(2009b)은 콘선단저항 및 딜라토미터 계수로부터 추정된 미고결 사질토의 횡방향구속 변형계수는 측정된 변형계수와 상당히 일치함을 확인하였다. 반면, 그림 6(b)와 같이 콘관입시험은 고결모래의 변형계수를 70~85% 과소평가하며, 딜라토미터 시험은 25~70% 과소평가하였다. 이상의 결과는 고결이 콘선단저항과 딜라토미터 지수를 증가시킴에도 불구하고, 콘관입시험과 딜라토미터 시험과 같은 관입시험은 고결모래의 고결결합을 파괴하기 때문에 미고결 모래의 변형계수만큼 정확한 추정이 불가능하기 때문이다. 반면 딜라토미터 시험은 관입 후 고결결합이 파괴되지 않은 영역의 변형특성을 평가할 수 있기 때문에, 콘선단저항보다 실제 고결모래의 변형계수에 좀 더 근접한 변형계수를 예측할 수 있다.

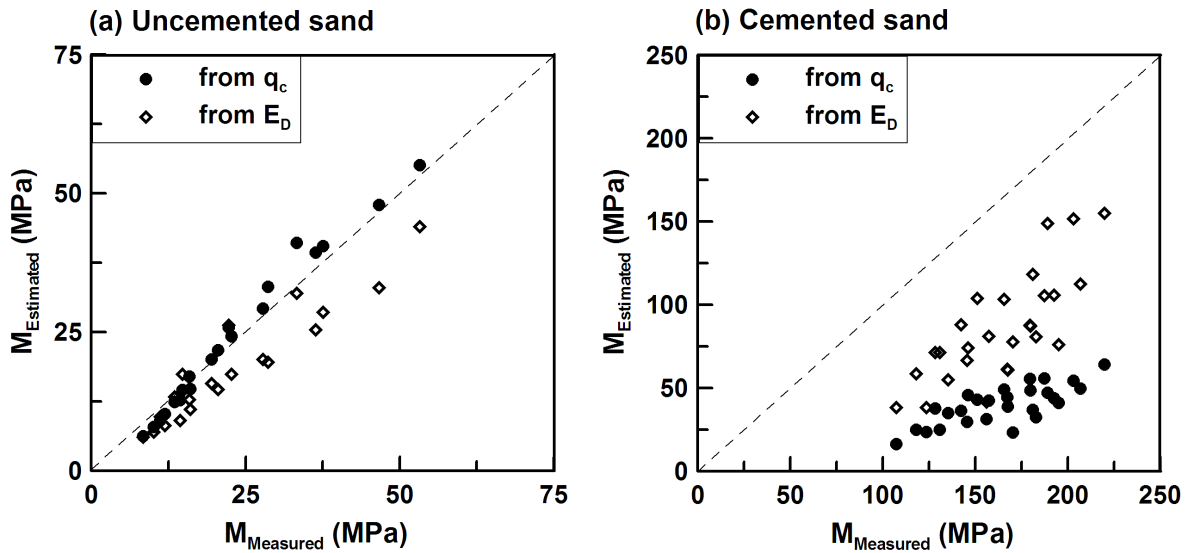


그림 6. 고결모래와 미고결 모래의 변형계수 추정 비교 (이문주 등 2009b)

그림 7은 미고결 및 고결된 사질토의  $M/E_D - q_c/p_a$  관계를 보여준다(Lee et al. 2010). 미고결 모래의  $M/E_D$  값은 콘선단저항에 관계없이 1.0~1.3의 범위에서 거의 일정하게 나타났다. 반면 고결모래의  $M/E_D$ 는 미고결 모래보다 매우 크게 나타났으며, 또한 콘선단저항이 증가할수록 점차 감소하였다. 고결모래의  $M/E_D$ 가 미고결 모래보다 큰 것은 고결효과가 딜라토미터 계수인  $E_D$ 보다 변형계수인  $M$ 에 더 크게 발현되었기 때문이다. 고결이 변형계수의 증가에 큰 영향을 미침에도 불구하고 콘선단저항의 증가에 영향을 미치는 상대밀도나 구속압은 고결모래의 변형계수보다 딜라토미터 계수에 더 큰 영향을 미친다. 따라서 콘선단저항이 증가함에 따라 고결모래의  $M/E_D$ 가 급격히 감소한다. 또한 고결모래의 경우에는 석고함유율, 즉 고결강도에 관계없이 일정한 관계가 성립하였다.

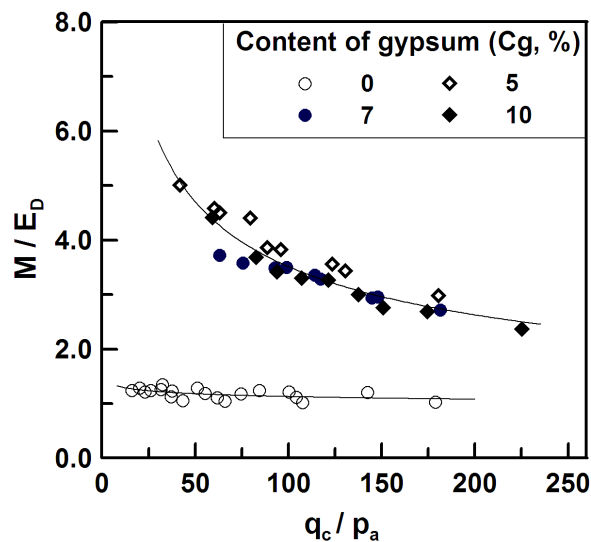


그림 8.  $q_c$ 와  $E_D$ 를 이용한 고결모래의 변형계수 평가 (Lee et al. 2010)

### 3.3 파쇄성 모래의 평가

탄산염 모래(calcareous sand)는 연체동물과 녹조류의 껍데기나 산호와 같은 해안 유기물이 침전하여



생성된 모래로써, 주 구성성분은 탄산칼슘(calcium carbonate,  $\text{CaCO}_3$ )이다. 그림 9는 국내 제주연안 퇴적층에서 채취한 제주해사의 SEM분석 결과이며, 전형적인 탄산염 모래와 마찬가지로 입자가 각진 형상이고, 입자 내부와 표면에 기공구조가 발달되어 있다. 이문주 등(2010)은 제주도 서귀포시 강정항 인근 해역에서 채취된 제주해사에서 40% 이상의 탄산염 성분을 확인하였으며, 제주해사의 기공구조에 의한 큰 압축성과 파쇄특성을 확인하였다.

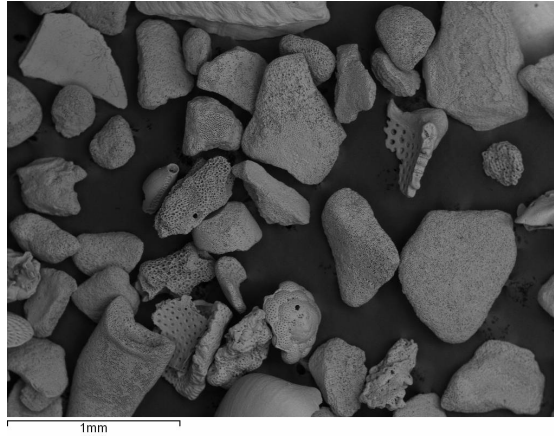


그림 9. 제주해사 입자특성

일반적으로 사질토의 상대밀도가 증가할수록 딜라토미터의 수평응력지수가 증가하기 때문에, 상대밀도와 수평응력지수의 경험적 관계식이 제시되었다(Jamiolkowski et al. 2003). 그림 10(a)는 탄산염 모래인 제주해사와 규산염 모래인 부산사의 상대밀도와 수평응력지수의 관계이다. 상대밀도에 따른 부산사의 수평응력지수 변화는 Jamiolkowski et al.(2003)의 Ticino sand의 경향과 거의 일치하였으나, 제주해사의 경우에는 Jamiolkowski et al.(2003)의 제안보다 약 65~85% 과소평가되었다.

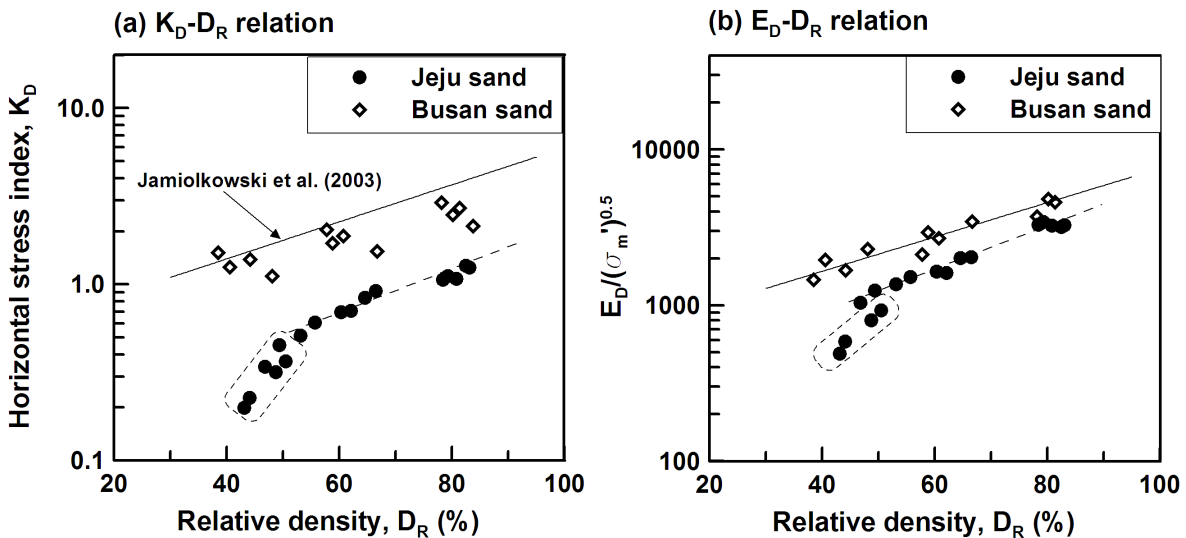


그림 10. 탄산염 제주해사의  $K_D$ ,  $E_D$

Borden(1991), Konrad(1988)의 결과에서 딜라토미터 계수는 주변 흙의 응력과 관계된다. 그림 10(b)는 상대밀도에 따른 제주해사의 정규화된 딜라토미터 계수( $E_D/(\sigma'_m)^{0.5}$ )를 나타낸다. 여기서,  $\sigma'_m$ 은 시료에 작용하는 평균유효응력이다. 부산사 뿐만 아니라, 제주해사의 경우에도 정규화된 딜라토미터 계수와 상대밀도의 관계는 반대수축에서 선형적으로 증가하였다. 그러나 제주해사의  $E_D/(\sigma'_m)^{0.5}$ 는 동일 상대밀도

의 부산사와 비교하여 과소평가되었다.

사질토의 수평응력지수는 딜라토미터 멤브레인을 관입 전 상태로 회복시키기 위해 필요한 “lift-off” 압력과 관계되기 때문에, 흙의 수평응력과 깊게 연관된다. 즉, 지중에 관입된 딜라토미터는 필연적으로 관입전 수평응력 이상으로 수평응력을 증가시키며, 증가된 수평응력은 딜라토미터 멤브레인을 수축시키는 응력으로 작용한다. 제주해사의 경우 규산염 모래와 비교하여 입자의 강도가 매우 약하기 때문에, 딜라토미터 관입 시 관입체 주변의 입자는 대부분 파쇄될 것이다. 이러한 입자 파쇄로 인해 규산염 모래보다 제주해사에 관입될 경우 딜라토미터 멤브레인의 수축은 적게 발생되고, 따라서 더 작은 수평응력 지수와 딜라토미터 계수가 측정되었을 것이다.

그림 11은 딜라토미터 계수로부터 추정된 제주사의 횡방향구속 변형계수( $M_{DMT}$ )와 측정된 변형계수의 비교이다. 제주해사의 경우 입자의 압축성이 매우 크기 때문에 일반적인 규산염 모래보다 변형계수가 작게 결정됨에도 불구하고, 딜라토미터로 추정된 변형계수는 더욱 과소평가됨이 확인되었다.

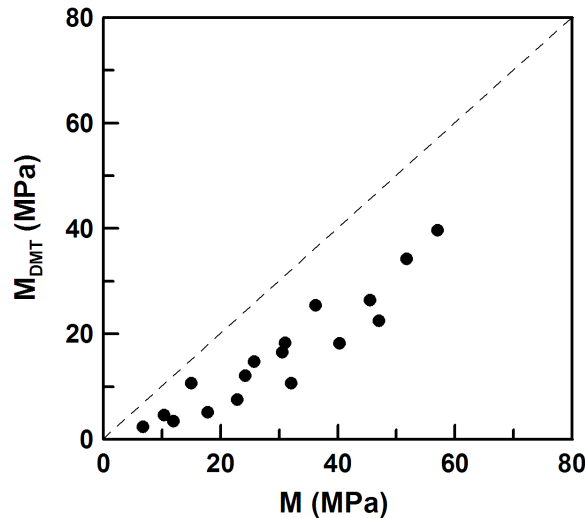


그림 11. 제주해사의 변형계수 비교

#### 4. 결론

본 논문에서는 다양한 사질토의 변형특성을 평가하기 위한 딜라토미터 시험의 활용성에 대해 논의하였으며, 주요 내용은 다음과 같다.

1. 사질토 지반의 경우 응력이력은 지반의 수평응력을 증가시키기 때문에 관입저항치를 증가시킨다. 딜라토미터의 수평응력지수는 콘선단저항이나 딜라토미터 계수보다도 응력이력에 민감하게 반응하기 때문에, 수평응력지수를 활용한 응력이력의 평가가 효과적일 것이다. 사질토 지반의 변형계수 평가를 위해 딜라토미터 계수로부터 추정된 횡방향구속 변형계수가 사용되어지고 있으나, 추정된 횡방향구속 변형계수는 측정값보다 매우 과소평가된다. 따라서 지반의 응력이력에 대한 평가없이 현장 관입시험 결과로부터 신뢰할만한 지반의 변형특성을 추정하는 것은 불가능하다. 지반의 응력이력을 평가하기 위해 현장시험으로부터 지반의 정지토압계수를 평가하는 방법이 제시되고 있다. 콘선단저항과 딜라토미터 시험 결과를 동시에 활용하여  $K_0$ 를 추정하는 방법이 널리 활용되고 있으며, 최근에는 딜라토미터 지수인  $E_D$ 와  $K_D$  만을 사용하여 높은 정확도로 지반의  $K_0$ 를 추정하는 방법도 제시되고 있다.
2. 고결은 입자사이에 입자간 결합을 형성시키는 물질이 침전하여 접촉결합을 형성함으로써 지반의 강도와 강성을 증가시킨다. 그러나 콘관입시험이나 딜라토미터 시험은 관입도중 주변지반의 고결결합력을 파괴하기 때문에, 관입시험 결과로 추정된 고결지반의 변형계수는 매우 과소평가된다. 그러나 딜라토미터 시험은 관입 후 멤브레인 팽창에 의해 고결결합이 파괴되지 않은 영역의 변형특성도 평가

할 수 있기 때문에, 콘선단저항보다 실제 고결모래의 변형계수에 좀 더 근접한 변형계수를 예측할 수 있다. 고결에 대한 민감도가 상이한 콘선단저항과 딜라토미터 계수를 비교함으로써 고결지반의 변형 특성을 평가하는 방법도 제시되었다.

3. 탄산염 모래의 경우 규산염 모래와 비교하여 입자의 강도가 매우 약하기 때문에, 딜라토미터 관입 시 관입체 주변의 입자는 대부분 파쇄된다. 이러한 입자 파쇄로 인해 규산염 모래보다 탄산염 모래와 같이 파쇄성이 큰 모래에서 딜라토미터 멤브레인의 수축은 적게 발생되고, 따라서 더 작은 수평응력지수와 딜라토미터 계수가 측정된다.

## 참고문헌

1. 남정만, 조성환, 김태형 (2007), “제주 해안지역 모래의 압축특성”, **한국지반공학회논문집**, 제 23권, 6호, pp.103-114.
2. 이문주, 최성근, 추현욱, 이우진 (2008) “고결모래의 콘선단저항과 변형계수 관계”, **한국지반공학회논문집**, 제 24권, 12호, pp.53-63.
3. 이문주, 김재정, 심재범, 임채근, 이우진 (2009a), “제주연안 퇴적층의 고결평가”, **한국지반공학회논문집**, 제 25권, 11호, pp.105-115.
4. 이문주, 최성근, 홍성진, 이우진 (2009b), “CPT와 DMT에 의한 사질토 고결영향 평가”, **한국지반공학회논문집**, 제 25권, 2호, pp.67-77.
5. 이문주, 배경두, 안성모, 이우진 (2010a), “파쇄성이 큰 제주해사의 한계상태 특성”, **대한토목학회논문집**, 제 30권, 제 2C호, pp.133-140.
6. 최성근, 이문주, 배경두, 이우진 (2010), “DMT를 이용한 사질토 정지토압계수 평가방법”, **대한토목학회논문집**, 제 30권, 제 4C호, pp.193-200.
7. Akili, W., and Al-Joulani, N.M.A. (1988), “Cone penetration tests on artificially cemented sands”, *Proc. of 1st ISOPT*, Balkema Pub., Rotterdam, pp.607-614.
8. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., Marchetti, S., and Pasqualini, E. (1986), “Flat dilatometer tests in calibration chamber”, *Proc., Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, GSP 6, ASCE, pp.431-446.
9. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V.N., Jamiolkowski, M., and Lo Presti, D.F.C. (1988), “Modulus of sands from CPTs and DMTs”, *Proc. 12th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, Rio de Janeiro, Vol.1, pp.165-170.
10. 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.
11. 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.
12. Bellotti, R., Fretti, C., Jamiolkowski, M., and Tanizawa, F. (1994), “Flat dilatometer tests in Toyoura sand”, *Proc. of the 13th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, New Delhi, India, Vol.4, pp.779-1782.
13. Borden, R.H. (1991), “Boundary displacement induced by DMT penetration”, *Proc. of the 1st Int. Sym. Calibration Chamber Testing*, Potsdam, NewYork, pp.101-118.
14. Campanella, R.G., and Robertson, P.K. (1991), “Use and interpretation of a research dilatometer”, *Can. Geotech. J.*, Vol.28, No.1, pp.113-126.
15. 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.
16. Cruz, N., and Fonseca, A.V. (2006), “Portuguese experience in residual soil characterization by

- DMT tests", *Proc. of 2nd Int. Conf. on Flat Dilatometer*, Washington, D.C., pp.359-364.
17. Hong, S.J., Lee, M.J., Kim, H.S., and Lee, W.J. (2008), "Evaluation of compressibility for Busan clay by DMT", *Int. Sym. on Lowland Technology*, Busan, Korea, pp.473-478.
  18. Iwasaki, K., Tsuchiya, H., Sakai, Y., and Yamamoto, Y. (1991), "Applicability of the Marchetti dilatometer test to soft ground in Japan", *Proc., GEOCOAST 91*, Yokohama, 1/6.
  19. 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.
  20. Jamiolkowski, M., Ghionna, V.N., Lancellotta, R., and Pasqualini, E. (1988), "New correlation of penetration tests for design practice", *Proc. of the 1st Int. Sym. on Penetration Testing*, Orlando, Florida, Vol.2, pp.263-296.
  21. Jamiolkowski, M., and Robertson, P.K. (1988), "Closing address. Future trends for penetration testing", *Geotech. Conf., Penetration Testing in the UK*, Birmingham, pp.321-342, Thomas Telford, London.
  22. Joshi, R.C., Achari, G., Kaniraj, S.R., and Wijeweera, H. (1995), "Effect of aging on the penetration resistance of sands", *Can. Geotech. J.* Vol.32, No.5, pp.767-782.
  23. 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.
  24. Lee, M.J., Choi, S.K., Kim, M.T., and Lee, W. (2010), "Effect of stress history on CPT and DMT results in sand", *Engre. Geol.*, Submitted.
  25. Lee, M.J., Hong, S.J., Choi, Y.M., and Lee, W. (2010), "Evaluation of deformation modulus of cemented sand using CPT and DMT", *Engrg. Geol.*, Accepted.
  26. Luune, T., and Christophersen, H.P. (1983), "Interpretation of cone penetrometer data for offshore sands", *Proc. of Offshore Technol. Conf.*, Richardson, Texas, Paper No.4464, pp.1-12.
  27. Marchetti, S. (1980), "In situ tests by flat dilatometer", *J. of Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.106, No.3, pp.299-321.
  28. Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G., and Calabrese, M. (2001), "The flat dilatometer test in soil investigations", A report by the ISSMGe Committee TC 16, *Proc. Int. Conf. on In-situ Measurement of Soil Properties*, Bali, Vol.1, pp.1-41.
  29. Puppala, A.J., Acar, Y.B., and Tumay, M.T. (1995), "Cone penetration in very weakly cemented sand", *J. Geotech. Engrg.*, Vol.121, No.8, pp.589-600.
  30. Rad, N.S., and Tumay, M.T. (1986), "Effect of cementation on the cone penetration resistance of sand", *Proc., Use of In Situ Tests in Geotech. Engrg.*, ASCE GSP 6, pp.926-948.
  31. Reyna, F., and Chameau, J.L. (1991), "Dilatometer based liquefaction potential of sites in the Imperial Vally", *Proc. 2nd Int. Conf. on Recent Advance in Geotech. Earthquake Engrg. Soil Dyn.*, St. Louis, Missouri, pp.385-392.
  32. Robertson, P.K. (1986), "In situ testing and its application to foundation engineering", *Can. Geotech. J.* Vol.23, pp.573-594.
  33. Schmertmann, J.H. (1986), "Dilatometer to compute foundation settlement", *Proc., Use of In Situ Tests in Geotech. Engrg.*, GSP 6, ASCE, pp. 303-321.
  34. Yoshimi, Y., Kuwabara, F., and Tokimatsu, K. (1975), "One-dimensional volume change characteristics of sands under very low confining stresses", *Soils and Found.*, Vol.15, No.3, pp. 51-60.