

## CPT와 DMT에 의한 사질토 고결영향 평가

### Evaluation of Cementation Effect of Sand Using CPT and DMT

이 문 주<sup>1</sup> Lee, Moon-Joo

최 성 근<sup>2</sup> Choi, Sung-Kun

홍 성 진<sup>3</sup> Hong, Sung-Jin

이 우 진<sup>4</sup> Lee, Woo-Jin

#### Abstract

In this study, the relations of cone tip resistances ( $q_c$ ) and DMT indices of cemented sand are analyzed from a series of calibration chamber tests. The experimental results show that, with increasing the cementation level, three DMT indices also increase. The CPT and DMT do not appear to properly reflect the cementation effect of sand, since the penetration induces the damage of cementation. Nevertheless, the DMT is more sensitive to deformation characteristics of cemented sand than CPT. It is also observed that the  $E_D/q_c$  ratio of cemented sand is larger than that of uncemented sand. However, the  $K_D-q_c/\sigma_v'$  relation is independant of cementation, unlike the result of previous study. In addition, this study evaluates the constrained modulus and cohesion intercept of cemented sand using the relation between cone resistance and dilatometer constrained modulus ( $M_D$ ).

#### 요 지

본 연구에서는 대형 챔버에 조성된 고결사료에 미니콘 관입시험과 딜라토미터 시험을 수행하고, 각 시험결과에 반영된 고결영향을 평가하였다. 시험결과 딜라토미터 시험이 콘관입시험보다 모래의 고결에 좀 더 민감하였으나, 두 시험 모두 관입주변의 고결결합을 파괴하기 때문에 고결모래의 변형특성을 정확히 평가할 수 없었다. 모래의 고결 정도가 증가할수록 고결모래의 딜라토미터 계수와 콘선단저항의 비( $E_D/q_c$ )가 증가하였으나, 기존 연구와는 달리 고결 모래와 미고결모래의 수평응력지수와 콘선단저항의 관계는 명확히 나타나지 않았다. 콘선단저항과 딜라토미터 횡방향구속 변형계수( $M_D$ )의 관계로부터 고결모래의 점착력과 횡방향구속 변형계수( $M$ )를 평가하였다.

**Keywords :** Cementation, Cohesion intercept, Cone tip resistance, Constrained modulus, DMT indices

#### 1. 서 론

콘관입시험(CPT)과 딜라토미터 시험(DMT)은 빠르고 경제적이며 연속적인 지반데이터를 획득할 수 있기 때문에 지반의 물성치를 추정하기 위해 광범위하게 사용되

고 있는 대표적인 관입형 현장시험이다. 그러나 현장시험 반은 응력상태가 불확실하고 매우 불균질하기 때문에, 현장시험 결과로부터 지반의 공학적 특성을 파악 하는 것은 매우 난이하다. 따라서 지반공학에서는 현장 상태를 실내에서 모사하여 현장의 문제점을 극복하기 위한

1 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정 (Member, PhD Student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정회원, 공학박사, 고려대학교 건축·사회환경공학과 (Member, PhD, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정 (Member, PhD Student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

4 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

방법이 사용되고 있으며, 대형 챔버는 흙의 상대밀도와 응력조건을 정확히 조절하면서 다양한 관입시험을 수행할 수 있는 중요한 시험장비 중 하나이다(Jamiolkowski 등 1988). 현재까지 대형 챔버를 이용한 CPT와 DMT로부터 미고결 사질토의 관입저항치나 변형특성과 지반정수의 관계를 추정하기 위한 다양한 연구가 수행되었다(Douglas and Olsen 1981; Robertson 등 1986; Jamiolkowski 등 1985, 1988; Baldi 등 1981; Been 등 1986; Salgado 등 1998).

지반의 상대밀도나 유효응력과 같은 상태변수(state variable)와 입자의 조성광물(압축성)이나 입자크기와 같은 고유변수(intrinsic variable) 뿐만 아니라, 최근에는 ageing이나 고결(cementation)과 같은 시간이력이 현장 시험에 미치는 영향에 대한 연구가 활발하다. 특히 약한 고결결합이 발생하더라도 현장시험 결과는 미고결 사질토의 시험결과와 매우 상이할 뿐만 아니라, 고결로 인해 증가된 관입저항치는 사질토의 상대밀도나 내부마찰각을 과대평가할 가능성이 크다. 따라서, Akili and Torrance(1981), Joshi 등(1995), Puppala 등(1995), Rad and Tumay(1986) 등에 의해 고결이 콘선단저항에 미치는 영향에 대한 다양한 챔버시험이 수행되었으며, 특히 Puppala 등(1995)은 100~300kPa의 연직구속압에서 CPT를 수행하여 구속압이 고결모래의 콘선단저항에 미치는 영향을 분석하였다. 일반적으로 DMT는 콘의 관입저항치를 측정하는 CPT에 비해 지반의 횡방향 토압계수, 과압밀비, 압축성 등을 비교적 정확하게 추정할 수 있을 뿐만 아니라, CPT보다 지반의 변형특성을 좀 더 효율적으로 평가하는 것으로 알려져 있음에도 불구하고, 현재까지 고결을 평가하기 위한 DMT의 적용에는 미미하다. 뿐만 아니라, 미고결 사질토의 경우 CPT와 DMT의 단점을 보완하기 위해 각 시험결과를 복합적으로 분석한 다양한 연구가 보고되었지만(Baldi 등 1986; Jamiolkowski 등 1985; Marchetti 1985; Campanella and Robertson 1991), 고결모래의 경우에는 Cruz and Fonseca(2006)와 Fonseca 등(2008)에 의한 제한적인 연구결과만 보고되어 있으며, 다양한 고결정도에 대한 검토가 부족하다.

본 연구에서는 다양한 고결정도, 구속압, 상대밀도를 갖도록 조성된 대형 챔버 고결시료에 딜라토미터 시험

과 미니콘 관입시험을 수행하였다. 시험결과로부터 고결모래의 딜라토미터 지수에 반영된 고결영향을 비교하고, 고결모래의 콘선단저항과 딜라토미터 지수의 관계를 분석하였다. 또한 콘선단저항과 딜라토미터 계수로부터 고결모래의 변형계수를 추정하고, 모래의 고결을 평가하기 위한 각 시험법의 적합성을 검토하였다.

## 2. 시험계획

기존 연구(이문주 등 2008b)에서 고결모래의 콘선단저항과 횡방향구속 변형계수가 결정되었으며, 본 연구에서는 동일한 고결시료에 딜라토미터 시험을 추가로 수행하여 각 시험결과를 비교하였다.

### 2.1 시료 기본특성

본 연구에 사용된 K-7 모래는 모암인 규석으로부터 인공적으로 파쇄된 석영질 모래로써, 입도분포와 기본물성은 그림 1, 표 1과 같으며, 평균입경은 0.17mm이고 통일분류법상 SP에 해당된다. 또한 전자주사현미경(SEM)을 통하여 관찰된 모래입자를 분석한 결과, 중간모난(subangular) 정도의 조도를 갖는 것으로 나타났다. 일반적으로 모래의 상대밀도와 콘선단저항은 반대수상에서 선형관계로 표현된다(Jamiolkowski 등 1985, Baldi 등 1986). 선행연구(이문주 등 2008b)로부터 K-7호사의

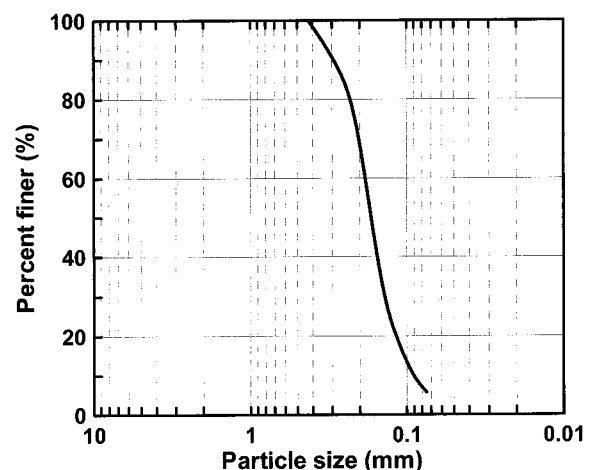


그림 1. 시험모래 입도분포

표 1. 시험모래 기본물성

Gs	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	Cu	Cc	e <sub>max</sub>	e <sub>min</sub>	USCS
2.647	0.09	0.17	2.111	0.988	1.054	0.719	SP

$q_c$ - $D_r$ - $\sigma_m'$  관계는 식 (1)로 표현되었다.

$$D_r = 45 \cdot \ln \left[ \frac{q_c}{75 \cdot (\sigma_m')^{0.66}} \right] \quad (1)$$

여기서,  $D_r$ 은 모래의 상대밀도(%)이고,  $q_c$ 와  $\sigma_m'$ 은 kPa 단위로 표현되는 콘선단저항과 평균유효구속압이다.

모래의 고결을 위해 도자기형재용 석고(GM-10)을 사용하였다. 본 석고는 물-석고비(표준혼수량) 40%로 혼합되어 습윤양생 될 경우 20Mpa의 압축강도를 발현하고 양생시 팽창율은 0.03%이다.

## 2.2 시험장비

본 연구에서 사용된 시험장비는 대형 미고결, 고결시료 조성을 위한 챔버시스템(KUCCS)과 조성된 시료의 변형특성 평가를 위한 딜라토미터이다. 챔버시스템은 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. 챔버의 구성 및 작용원리는 Kim(2005)에 설명되어 있으며, 챔버시스템의 모식도는 그림 2와 같다. 챔버에서는 레이너 시스템을 이용한 건조낙사법으로 다양한 상대밀도의 시료를 균등하게 조성한다. 사용된 레이너 시스템은 모래저장고(sand storage), 개폐판(shutter plate), extension tube, 분산체 등으로 구성되며, Choi(2008)에 자세히 설명되어 있다.

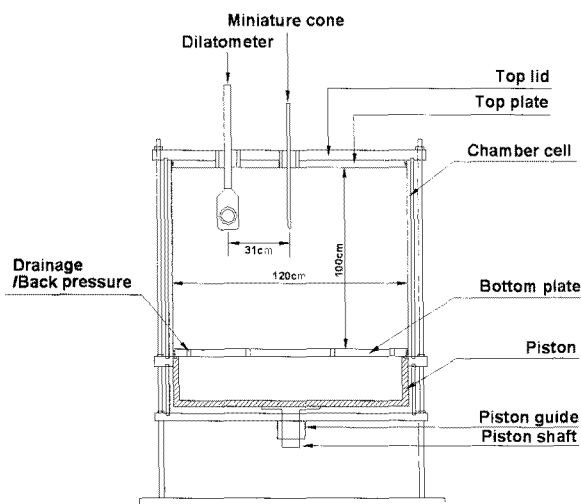


그림 2. 대형 챔버를 이용한 콘관입시험과 딜라토미터 시험

DMT는 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 식 (2)와 같이 제안하였다. 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.

$$E_D = 34.6(P_1 - P_0), \quad K_D = \frac{P_0 - u_0}{\sigma_{v0}'} \quad (2)$$

$$I_D = \frac{P_1 - P_0}{P_0 - u_0}$$

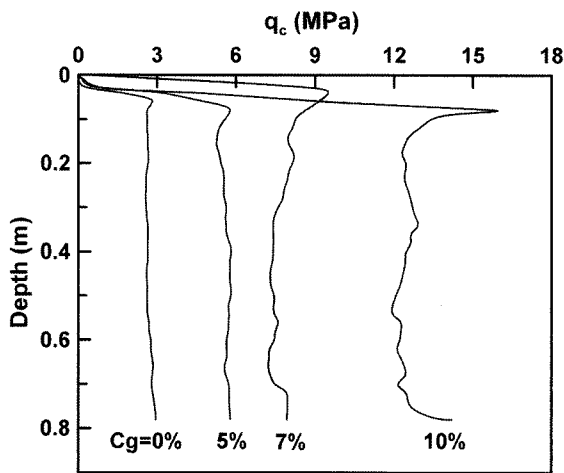
여기서,  $P_0$ 와  $P_1$ 은 각각 딜라토미터 멤브레인의 초기 접촉압력과 1.1mm 팽창압력이며,  $u_0$ 는 관입 전 간극수압,  $\sigma_{v0}'$ 은 연직유효응력이다.

## 2.3 고결시료 조성 및 딜라토미터 시험

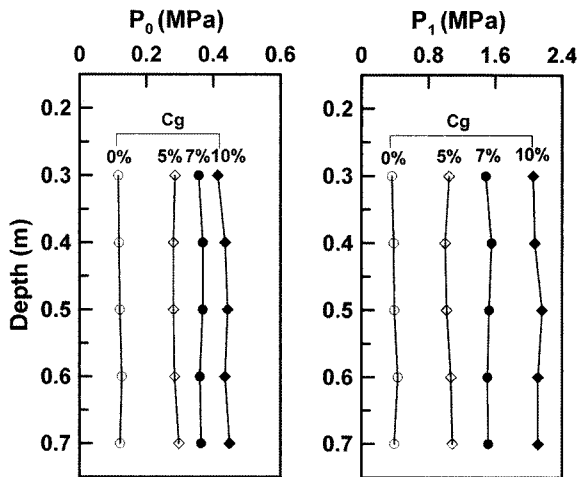
레이너 시스템의 모래 낙하고와 개폐율, 그리고 porous plate의 장착유무를 조절하여 다양한 상대밀도의 미고결, 고결시료를 조성하였다. 균질한 고결시료 조성을 위해 0.5% 함수비로 표면을 습윤시킨 모래시료와 석고를 교반하여 석고입자를 모래표면에 부착시켜 낙사함으로써, 석고와 모래입자의 낙하속도차에 의한 재료분리를 최소화하였다(Rad and Tumay 1986; Puppala 등 1995; 이문주 등 2008a). 낙사가 완료된 시료의 초기 상대밀도를 측정하고, 시료상부에 상부 플레이트 및 챔버셀을 조립한 후, 연직구속압과 시료의  $K_0$  압밀을 위한 수평구속압을 가하였다. 가압에 의한 변위를 보정하여 조성된 시료의 최종 상대밀도를 결정하였다.  $K_0$  상태 압밀을 위해 미고결 시료의 경우 50~400kPa의 연직구속압과  $K_0=0.40$ ~0.51에 해당하는 수평구속압을 가하였으며, 고결시료의 경우 50, 100, 200kPa의 연직구속압과  $K_0=0.29$ ~0.42에 해당하는 수평구속압을 가하였다. 고결시료의 하부에 30kPa의 주입압으로 탈기수를 주입한 후, 24시간 양생하여 시료의 고결을 유발하였다. 시료의 고결정도는 석고함유율을 5, 7, 10%로 달리하여 조절하였다. 조성된 시료조건은 표 2와 같다.

표 2. 조성된 챔버시료 조건

석고함유율 (Cg)	상대밀도 (Dr, %)	연직구속압 ( $\sigma'_v$ , kPa)	시료개수
0% (uncemented)	33 ~ 76	50, 100, 200, 400	28
5 %	36 ~ 41	50, 100, 200	9
	57 ~ 59		
7 %	74 ~ 77	50, 100, 200	9
	36 ~ 38		
10 %	51 ~ 55	50, 100, 200	9
	63 ~ 66		
	21 ~ 26	50, 100, 200	9
	38 ~ 40		
	52 ~ 56		



(a) Cone resistance



(b) DMT readings

그림 3. 챔버 콘관입시험 및 딜라토미터 시험 결과(Dr ≈ 40%,  $\sigma'_v = 100$ kPa)

고결모래의 콘선단저항 측정을 위한 이문주 등 (2008b)의 실험에서는 챔버직경과 경계조건의 영향을 최소화하기 위해 A.P.V.d. Berg사에서 제조한 직경 1.6cm의 미니콘(직경비 75)을 사용하였으며, 시료의 중

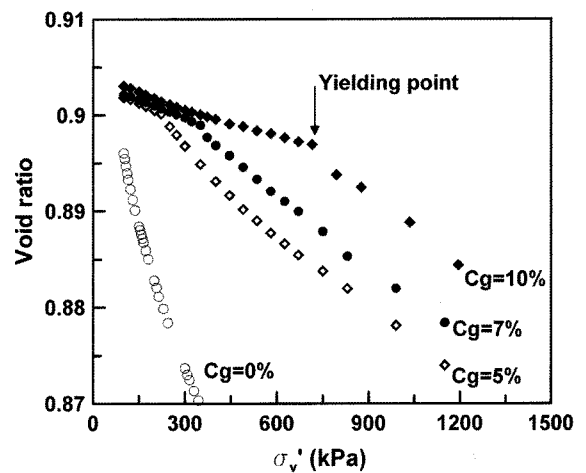


그림 4. 고결, 미고결 모래의 일차원 압축시험 결과(Initial Dr ≈ 40%,  $\sigma'_{sit} = 100$ kPa)

심에서 관입속도 2cm/sec로 수행된 콘관입시험 결과는 그림 3(a)와 같다. 콘관입시험 완료 후 중심으로부터 31cm 위치에서 딜라토미터 시험이 수행되었다. 딜라토미터의 관입속도는 2cm/sec로 일정하게 유지되었으며, 시료깊이 30~70cm에서 10cm 간격으로 수행되었다. 측정된 DMT의  $P_0$ 와  $P_1$ 은 그림 3(b)와 같이 시료 깊이별로 거의 일정하게 측정되었다. 그림 4의 콘관입시험과 딜라토미터 시험 결과는 조성된 고결시료가 비교적 균질하게 조성되었음을 나타낸다.

#### 2.4 일차원 압축시험

콘관입시험과 딜라토미터 시험은 관입체 주변의 고결결합을 파괴하기 때문에, 관입시험이 완료된 챔버시료의 하중-침하량 관계는 고결시료의 합리적인 변형계수를 반영할 수 없다. 따라서 이문주 등(2008b)은 챔버시료와 동일한 조건으로 소형 압밀셀(D=74mm, H=45mm)

에 별도의 고결시료를 조성하여 횡방향구속 변형계수 (M)을 측정하였다. 그림 4는 일차원 압밀시험으로 측정된 미고결, 고결 K-7호사의 하중-간극비 곡선이다. 미고결 모래의 경우, 연직구속압이 증가할수록 시료의 간극비가 지속적으로 감소하였다. 반면 고결모래의 경우, 하중에 의한 고결결합의 파괴로 인해 시료의 간극비가 급격히 감소하는 항복점(yielding point)이 뚜렷이 발생하며, 미고결 모래에 비해 항복이전까지 하중에 대한 강성이 크게 나타난다. 또한 시료의 석고함유율이 증가할수록 시료의 항복이 발생하는 연직구속압이 증가하였다. 고결모래의 횡방향구속 변형계수는 항복점까지의 하중-침하관계로부터 결정하였다.

### 3. 결과분석

#### 3.1 고결이 달라토미터 시험 결과에 미치는 영향

일반적으로 미고결 사질토의  $E_D/p_a$ 는  $(\sigma'_m/p_a)^{0.5}$ 와 선

형비례하는 것으로 알려져 있다(Borden 1991). 여기서,  $p_a$ 와  $\sigma'_m$ '는 각각 대기압(=98.1kPa)과 고결모래에 작용하는 평균유효응력이다. 본 연구의 챔버시험으로 결정된 미고결, 고결된 K-7호사의  $E_D/p_a - (\sigma'_m/p_a)^{0.5}$ 의 관계를 그림 5에 나타내었다. 미고결 K-7호사와 마찬가지로 고결된 K-7호사의 경우에도 유사한 상대밀도에서  $(\sigma'_m/p_a)^{0.5}$ 가 증가할수록  $E_D/p_a$ 는 선형으로 증가하였다. 또한 동일한 유효응력에서 모래의 달라토미터 계수는 상대밀도와 석고함유율이 증가할수록 증가하였다. 그림 5에서 미고결 모래와는 달리 고결모래의 경우에는 입자사이의 고결결합의 영향으로 구속압이 0인 상태에서도 달라토미터 계수가 여전히 존재하는 것으로 관찰된다. 시험 결과, 5% 고결시료의 달라토미터 계수는 미고결 모래의 달라토미터 계수보다 1.8~3.1배 증가하였다. 또한 7%, 10% 고결시료의 경우에는 각각 2.5~4.9, 3.7~7.1배 증가하였다.

모래의 수평응력지수( $K_D$ )는 상대밀도와 관계되며,

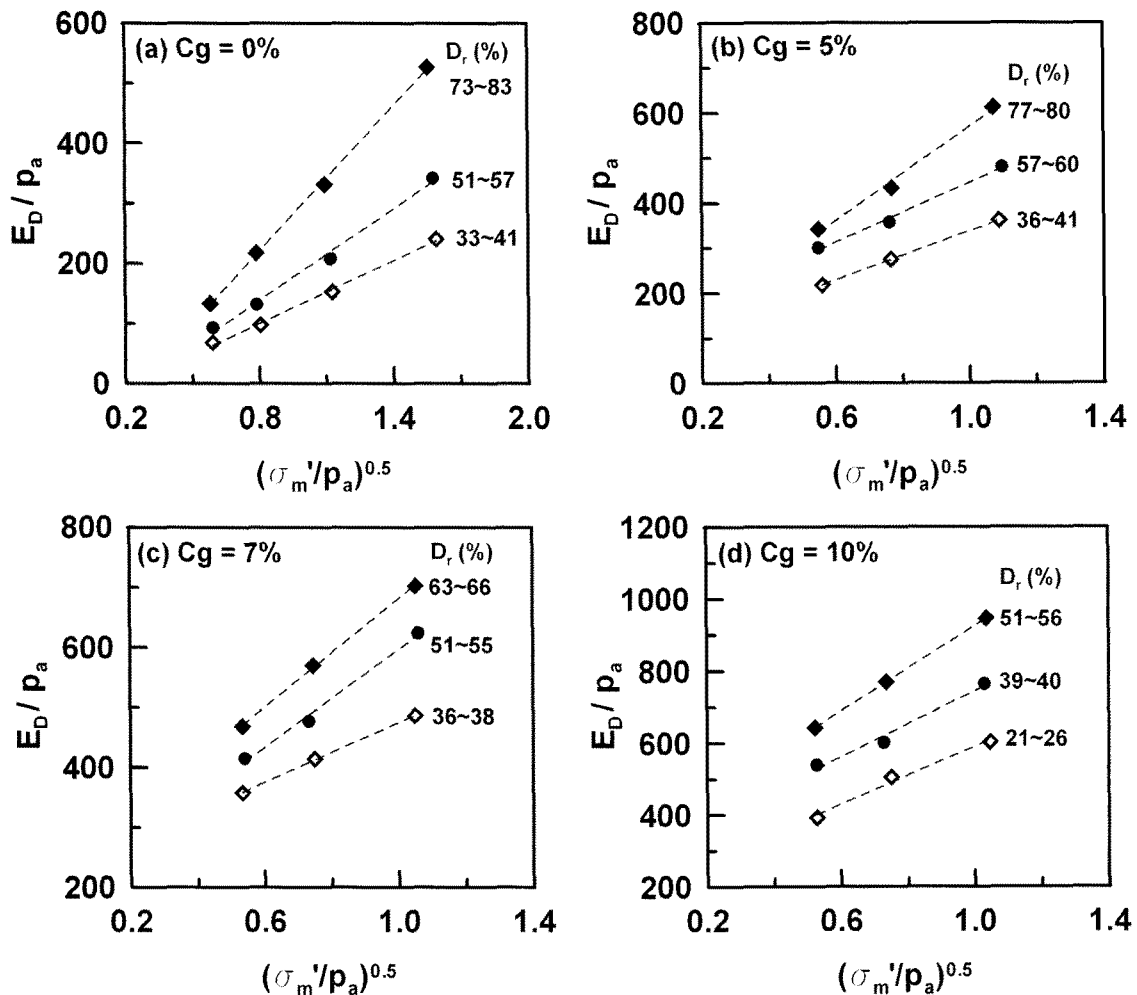


그림 5. 평균유효응력에 따른 미고결, 고결 K-7호사의 달라토미터 계수 변화

표 3. K-7호사의  $K_D$ - $D_r$ - $\sigma_v'$  관계에서의 경험적 상수

$C_g(\%)$	$C_0$	$C_1$	$C_2$
0	0.0072	-0.44	1.54
5	0.022	-0.59	0.94
7	0.028	-0.62	0.95
10	0.034	-0.64	0.95

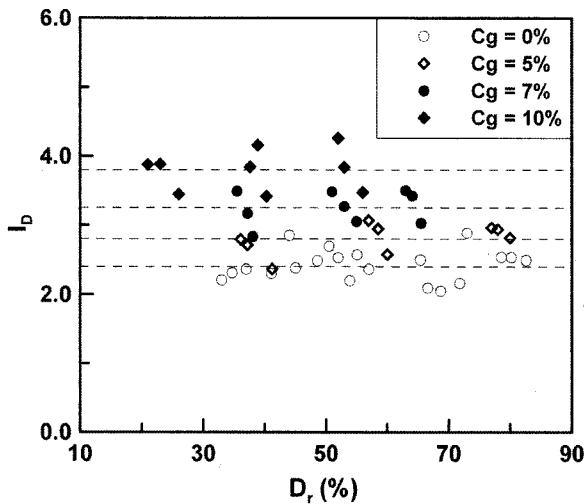


그림 6. 고결, 미고결 K-7호사의 재료지수 변화

Jamiolkowski 등(2003)은 세 종류의 규사에 대한 챔버시험으로부터 미고결 사질토의 수평응력지수, 상대밀도, 연직구속압의 관계를 식 (3)과 같이 나타내었다.

$$K_D = C_0 \left( \frac{\sigma_{v0}'}{p_a} \right)^{C_1} \exp(C_2 D_r) \quad (3)$$

여기서,  $D_r$ 은 모래의 상대밀도(in decimal)이고,  $p_a$ 와  $\sigma_{v0}'$ 은 kPa 단위로 표현되는 대기압과 연직유효응력이다. 또한  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ 는 실험적으로 결정되는 각 모래의 경험 상수이다. 본 챔버시험 결과로부터, 미고결 K-7호사와 각 석고함유율에 따른 고결된 K-7호사의 경험상수를 표 3과 같이 결정하였다. 고결에 의해 고결시료의  $C_0$ 는 미고결 시료에 비해 3.1~4.6배 증가하였다. 반면 고결에 의해  $C_1$ 과  $C_2$ 가 다소 감소하였으나,  $C_0$ 에 비해 고결의 영향을 상대적으로 적게 받았다. 따라서 상대밀도나 연직구속압보다 고결이 모래의  $K_D$ 에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 시험결과, 5% 석고함유율에 의해 모래의 수평응력지수는 1.7~2.7배 증가하였으며, 7%, 10% 석고함유율에 의해 미고결 모래에 비해 각각 2.1~3.5, 2.6~4.3배의 수평응력지수 증가가 발생하였다.

그림 6은 상대밀도에 따른 K-7호사의 재료지수 변화이다. 미고결 K-7호사의 재료지수는 2.2~2.9(평균 2.4)

에 분포하여 Marchetti(1980)에 의한 흙의 분류에 의해 “sand”로 구분된다. 또한 5% 고결모래의 재료지수는 약 2.8정도로 나타났으며, 7%, 10% 고결모래의 경우에는 각각 3.3, 3.8 정도로 나타났다. 즉, 고결모래의 재료지수는 미고결 모래의 재료지수에 비해 약 1.2~1.6배 증가하였다. 그러나 이와 같은 증가경향은 고결이 딜라토미터 계수나 수평응력지수에 미치는 영향보다는 작다.

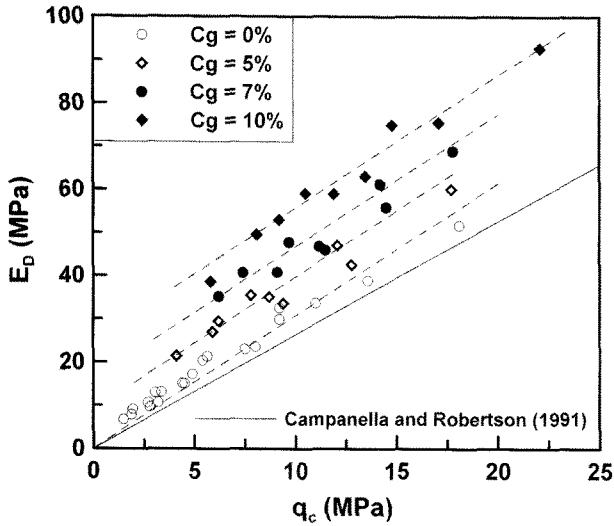
### 3.2 고결모래의 콘선단저항과 DMT 지수 관계

모래의 콘선단저항과 DMT 지수는 모두 상대밀도와 연직구속압과 같은 상태변수의 영향을 받기 때문에, 모래의 콘선단저항과 DMT 지수는 직접적인 관계가 있다 (Campanella and Robertson 1991). Campanella and Robertson (1991)은 모래의 콘선단저항과 DMT의 수평응력지수 ( $K_D$ ), 그리고 콘선단저항과 딜라토미터 계수( $E_D$ )의 선형 관계를 제안하였다. 동일 콘선단저항에서 미고결 K-7호사의 딜라토미터 계수와 수평응력지수는 Campanella and Robertson(1991)의 제안식보다 다소 크게 측정되었으나, 각각 식 (4), (5)의 선형관계로 분석되었다.

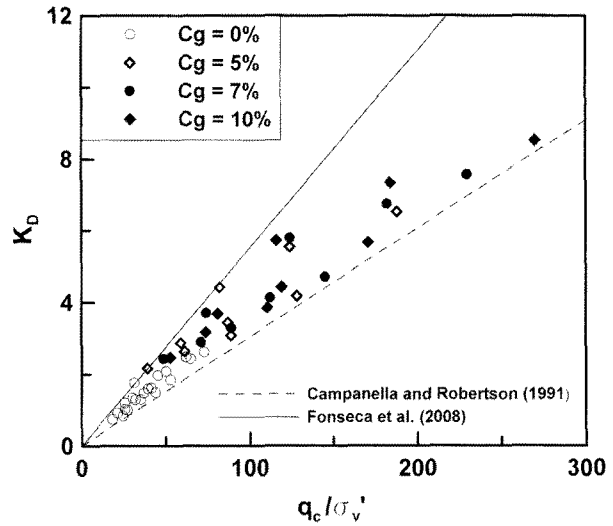
$$E_D = 3.1q_c \quad (4)$$

$$\frac{q_c}{\sigma_v'} = 25.5K_D \quad (5)$$

그림 7은 고결된 K-7호사의 콘선단저항과 DMT 지수의 관계이다. 그림 7(a)에서 미고결 모래와 마찬가지로 고결모래의 딜라토미터 계수도 동일한 석고함유율에서 콘선단저항과 거의 선형의 관계로 나타났다. 그림 7(b)는 고결모래의 콘선단저항과 딜라토미터의 수평응력지수 관계이다. 고결모래의 수평응력지수는 유사한 상대밀도와 연직구속압 상태인 미고결 모래의 수평응력지수보다 크게 측정되었으며, 이와 같은 결과는 고결모래와 유사하게 결합력이 거동에 영향을 미치는 잔류토에 대한 Cruz and Fonseca(2006)의 결과와 유사하다. Fonseca 등 (2008)의 연구에서 잔류토의 수평응력지수는 동일한  $q/\sigma_v'$ 를 나타내는 미고결 모래의 수평응력지수보다 50%



(a)  $q_c$ - $E_D$  관계



(b)  $q_c$ - $K_D$  관계

그림 7. 고결 K-7호사의 콘선단저항과 DMT 지수 관계

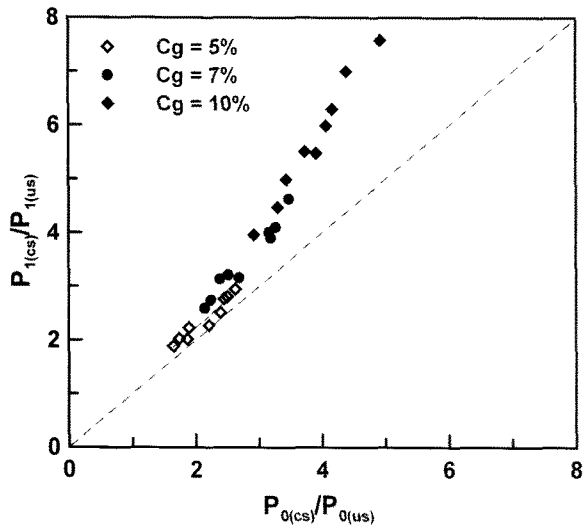


그림 8. 고결모래와 미고결 모래의  $P_0$ ,  $P_1$  비교

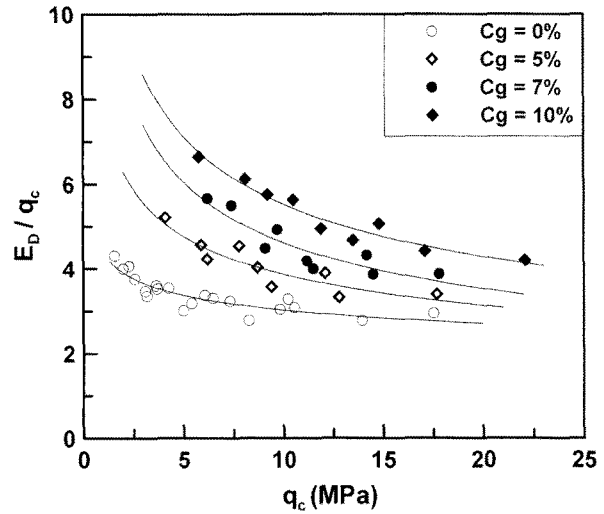


그림 9. 모래의 고결정도에 따른  $E_D/q_c$  변화

정도 크게 결정되었다. 반면 본 연구에서는 고결로 인한  $K_D$ 와  $q_c$ 의 증가정도는 비슷하여, K-7호사의  $K_D$ - $q_c/\sigma'_v$  관계에 고결이 미치는 영향이 적은 것으로 관찰되었다.

모래의 고결효과는 동일한 상대밀도와 구속압에서 미고결 모래에 대한 고결모래 측정값의 증가율로 평가될 수 있다. 미고결 모래의 dilatometer 측정값( $P_{0(us)}$ ,  $P_{1(us)}$ )에 대한 고결모래의 dilatometer 측정값( $P_{0(cs)}$ ,  $P_{1(cs)}$ )의 비가 그림 8과 같이 표현되었다. 5~10% 석고함유율로 인해 고결모래의  $P_0$ 는 미고결 모래에 비해 약 1.7~4.9배 증가하였으며,  $P_1$ 은 약 1.9~7.6배 증가하였다. 즉, 고결이  $P_0$ 보다  $P_1$ 에 더 큰 영향을 미치고, 석고함유율이 높을수록  $P_0$ 보다  $P_1$ 에 미치는 영향정도가 더 크게 증가하였으며, 이로 인해  $K_D$ 보다  $E_D$ 가 고결에 더 민감하다.

고결모래의 dilatometer 계수와 콘선단저항의 비( $E_D/q_c$ )는 고결모래의 석고함유율과 콘선단저항에 따라 그림 9와 같이 변화하였다. 석고함유율이 증가할수록 동일 콘선단저항에 대해 고결모래의  $E_D/q_c$ 는 점차 증가하여 모래의 고결은 콘선단저항보다 dilatometer 계수에 좀 더 민감한 것이 확인된다. 또한 동일한 석고함유율에서 모래의 콘선단저항이 증가할수록 고결모래의  $E_D/q_c$ 는 점차 감소하였다. 이와 같은 결과는 모래의 석고함유율이 동일할 경우, 상대밀도나 구속압의 증가에 의해 고결모래의 콘선단저항의 증가가 dilatometer 계수보다 더 큰 영향을 받는 것을 의미한다. 그림 9에서는 또한 콘선단저항이 증가할수록 각 고결모래의  $E_D/q_c$  차이는 점차 감소하였다. 따라서 높은 구속압과 상대밀도 상태에서

는 시료의 고결정도 평가가 상대적으로 어려울 것으로 판단된다.

### 3.3 고결모래의 변형계수 평가

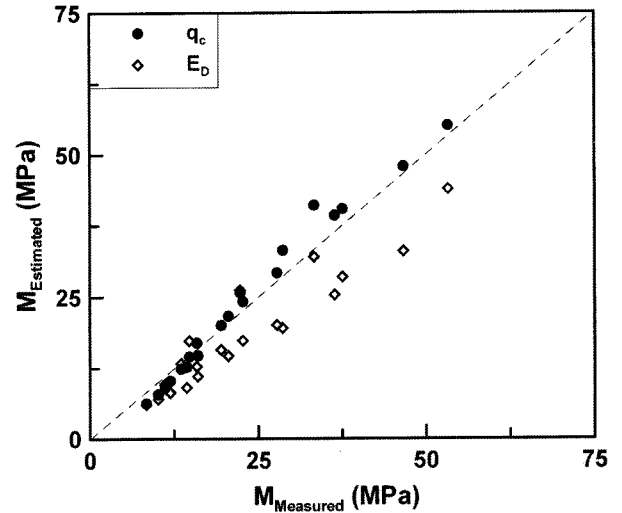
#### 3.3.1 고결모래의 횡방향구속 변형계수 평가

흙의 횡방향구속 변형계수는 dilatometer 계수로부터 Marchetti(1980)의 보정계수  $R_M$ 을 이용하여  $M_D = E_D R_M$ 으로 구해질 수 있다. dilatometer 시험의 재료지수( $I_D$ )와 수평응력지수( $K_D$ )으로 결정되는  $R_M$ 은  $K_D$ 가 증가할수록 점차 증가하여, 대부분 1~3 범위에 분포한다(Marchetti 2001). dilatometer 시험으로부터 결정된  $M_D$ 는 흙의 횡방향구속 변형계수인  $M$ 과 비교적 일치하는 것으로 알려지고 있다(Marchetti 2001). 그림 10(a)에서 미고결 K-7호사의 dilatometer 계수로부터 추정된  $M_D$ 는 압밀셀을 이용한 일차원 압밀시험으로부터 결정된 횡방향구속 변형계수에 비해 약 20% 과소평가되었으며, 이와 같은 결과는 Jamiolkowski 등(1988)과 Bellotti 등(1997)의 챔버시험 결과와 일치한다.

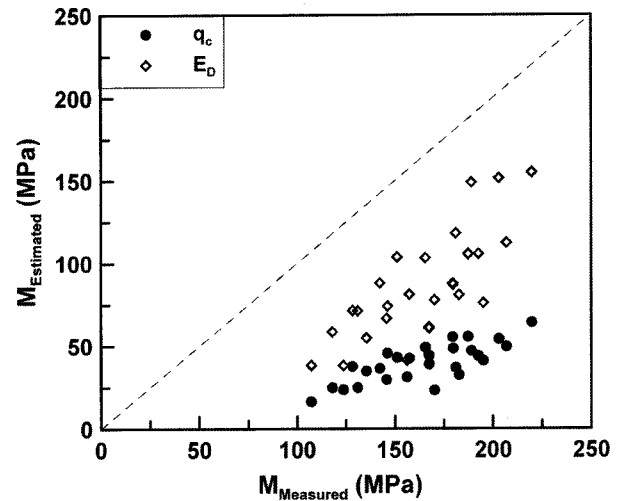
상대밀도와 구속압이 사질토의 콘선단저항과 변형계수에 미치는 영향도가 상이하지만, 콘선단저항으로부터 미고결 사질토의 각종 변형계수를 추정하는 방법이 제시되고 있다(Lunne and Christophersen 1983; Jamiolkowski 등 1988; Baidi 등 1988). Lunne and Christophersen (1983)은 미고결 사질토의 콘선단저항과 횡방향구속 변형계수의 관계를 식 (6)과 같이 제안하였으며, 식 (6)으로부터 추정된 미고결, 고결모래의 횡방향구속 변형계수와 압밀시험으로부터 결정된 변형계수를 그림 10(a)와 같이 비교하였다.

$$\begin{aligned}
 M &= 4q_c && \text{for } q_c < 10\text{MPa} \\
 M &= 2q_c + 20 && \text{for } 10\text{MPa} < q_c < 50\text{MPa} \\
 M &= 120\text{MPa} && \text{for } q_c > 50\text{MPa}
 \end{aligned} \quad (6)$$

Lunne and Christophersen(1983)의 제안식을 바탕으로 추정된 미고결 K-7호사의 횡방향구속 변형계수와 일차원 압밀시험으로 결정된 변형계수를 비교한 결과, 그림 10(a)와 같이 콘선단저항은 횡방향구속 변형계수를 약 6% 과대평가하였다(이문주 등 2008b). 그림 10(a)의 결과는 미고결 모래의 경우 콘관입시험이나 dilatometer 시험으로 비교적 정확한 횡방향구속 변형계수가 추정될 수 있음을 의미한다. 그러나 그림 10(b)에서 일차



(a) 미고결모래



(b) 고결모래

그림 10. CPT와 DMT에 의한 미고결, 고결모래의 횡방향구속 변형계수 측정비교

원 압밀시험으로 측정된 변형계수와 고결모래의 dilatometer 시험으로부터 보정된 변형계수를 비교한 결과, dilatometer는 본 연구에서 조성된 고결모래의 변형계수를 25~70% 과소평가하였다. 따라서, Marchetti(1980)가 제안한 보정계수  $R_M$ 의 고결모래에 대한 적용성은 고결모래의 dilatometer 시험에 대한 좀 더 다양한 시험결과를 바탕으로 검토되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 이문주 등(2008b)의 결과에서 Lunne and Christophersen (1983)의 제안식으로 변형계수를 추정할 경우, 고결된 K-7호사의 변형계수는 70~85% 정도 과소평가되었다. 이상의 결과는 고결이 콘선단저항과 dilatometer 지수를 증가시키면서도 불구하고, 콘관입시험과 dilatometer 시험과 같은 관입시험은 고결모래의 고결결함을 파괴하기



때문에 미고결 모래의 변형계수만큼 정확한 추정이 불가능하기 때문이다. 반면 dilatometer 시험은 관입 후 고결결합이 파괴되지 않은 영역의 변형특성을 평가할 수 있기 때문에, 콘선단저항보다 실제 고결모래의 변형계수에 좀 더 근접한 변형계수를 예측할 수 있다.

### 3.3.2 CPT와 DMT를 이용한 고결모래의 변형계수 추정

콘선단저항이나 dilatometer 지수가 모래의 고결영향을 정확히 평가할 수 없음에도 불구하고, 고결에 의해 증가된 관입저항치나 dilatometer 지수는 모래의 상대 밀도나 마찰각을 과대평가할 수 있다(Puppala 등 1995; Marchetti 등 2001). 따라서 모래의 고결여부와 고결정도를 평가하기 위하여 다양한 시험법을 복합적으로 적용하는 방법이 시도되고 있다. 본 연구의 결과로부터 고결이 콘관입시험과 dilatometer 시험에 미치는 영향 정도가 다른 것으로 관찰되었으며, 본 연구에서는 고결모래의 콘선단저항과 dilatometer 횡방향 변형계수를 비교하여 모래의 고결정도를 평가하였다.

그림 11은 삼축압축시험으로부터 결정된 고결모래의 점착력에 따른 고결모래의 dilatometer 횡방향 변형계수와 콘선단저항의 비( $M_D/q_c$ )를 나타낸다. 고결모래의  $M_D/q_c$ 는 5.0~13.4에 분포하며, 미고결 모래의  $M_D/q_c$ 보다 항상 크게 나타났다. 각각의 시험결과에 상대밀도나 구속압의 영향 정도가 다르게 작용함에도 불구하고, 연직구속압으로 나누어진 점착력( $c'/\sigma_v'$ )이 증가할수록 고결모래의  $M_D/q_c$ 는 점차 증가하였다. 이와 같은 결과는 모래의 고결 정도가 증가할수록 dilatometer 시험에 의해 측정된 변형계수가 콘선단저항보다 고결영향을 좀 더 효율적으로 평가하는 것을 의미한다.

시험결과 미고결 모래의 횡방향구속 변형계수는 dilatometer 계수나 콘선단저항으로부터 기존의 제안식을 이용하여 비교적 정확하게 예측되었다. 반면, 관입시험은 주변의 고결결합을 파괴하기 때문에, 현장 관입시험 결과로부터 기존 제안식을 이용하여 고결모래의 변형계수를 평가할 경우 상당히 과소평가하는 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구에서는 콘선단저항과 dilatometer 시험결과를 조합하여 고결모래의 횡방향구속 변형계수를 추정하였다. 그림 12는 콘선단저항과 연직구속압으로 정규화된  $M/M_D$ 의 관계로써, 미고결 모래와 고결모래의 관계가 확연히 구분되었다. 또한 고결 정도에 상관없이 고결모래의  $M/M_D$ - $q_c$  관계는 동일하게 나타났

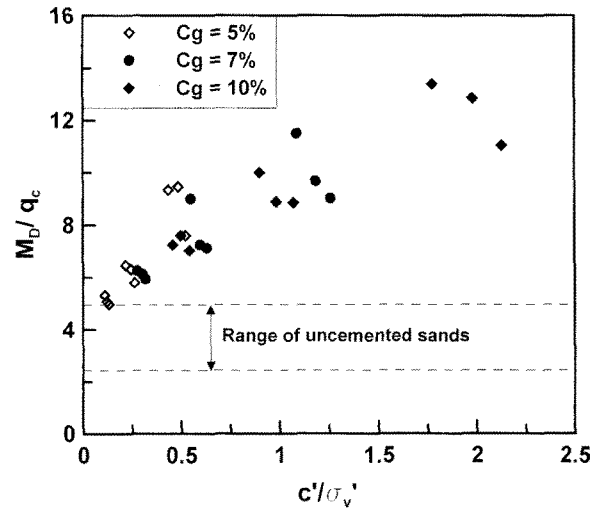


그림 11. 고결모래의 점착력에 따른  $M_D/q_c$  변화

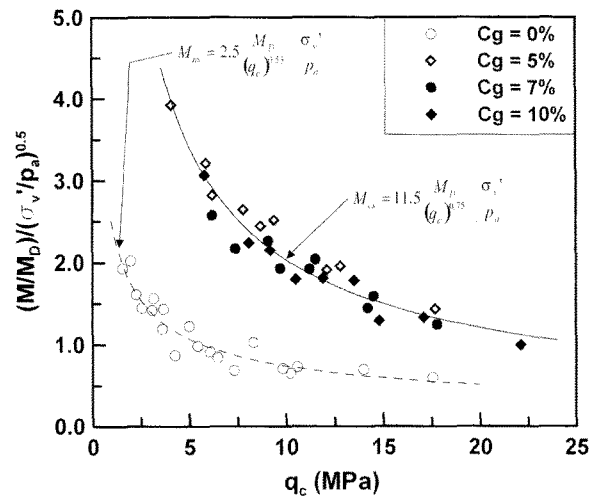


그림 12. 모래의 콘선단저항과  $M/M_D$  비 관계

다. 고결이 모래의 관입저항치보다 변형계수에 미치는 영향이 더 크기 때문에, 동일 콘선단저항에서 고결모래의  $M/M_D$  비가 미고결 모래보다 더 크게 나타났다. 회귀 분석에 의해 결정된 미고결 모래와 고결모래의 횡방향 구속 변형계수는 각각 식 (7), (8)과 같다.

$$M_{us} = 2.5 \frac{M_D}{(q_c)^{0.53}} \sqrt{\frac{\sigma_v'}{p_a}} \quad (7)$$

$$M_{cs} = 11.5 \frac{M_D}{(q_c)^{0.75}} \sqrt{\frac{\sigma_v'}{p_a}} \quad (8)$$

## 4. 결론

본 논문에서는 대형 챔버에 조성된 고결시료에 대한

미니콘 관입시험과 딜라토미터 시험으로 다양한 조건에서의 콘선단저항과 딜라토미터 지수를 측정하고, 고결모래의 콘선단저항과 딜라토미터 지수, 그리고 횡방향구속 변형계수와의 관계를 분석하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 고결은 딜라토미터 시험의 딜라토미터 계수( $E_D$ ), 수평응력지수( $K_D$ ), 재료지수( $I_D$ )를 모두 증가시켰다. 동일한 상대밀도와 구속압 상태의 미고결 모래와 비교하여, 고결은 딜라토미터 계수에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 고결이 재료지수에 미치는 영향이 가장 미미하였다.
- (2) 동일한 석고함유율에서 고결모래의 딜라토미터 계수도 미고결 모래와 마찬가지로 콘선단저항과 선형관계로 나타났으나, 콘관입시험보다 딜라토미터 시험이 고결에 좀 더 민감하기 때문에, 석고함유율이 증가할수록 동일한 콘선단저항에서의 딜라토미터 계수가 더 크게 측정되었다.
- (3) 동일한 상대밀도와 구속압에서 고결은 모래의 수평응력지수를 크게 증가시키지만, 기존 연구와는 달리 시료의 고결정도에 따른  $K_D-q_c/\sigma'_v$  관계는 나타나지 않았다. 따라서 수평응력지수와 콘선단저항 관계는 모래의 고결을 평가할 수 없는 것으로 분석되었다.
- (4) 시험결과, 콘관입시험과 딜라토미터 시험은 고결모래의 변형계수를 70~85%, 25~70% 과소평가하였다. 따라서 기존의 미고결 사질토에 대한 상관관계는 고결모래의 변형계수 추정이 부적절 한 것으로 판단된다.
- (5) 고결모래에 대한 콘관입시험과 딜라토미터 시험을 비교하여 모래의 고결정도를 평가하였다. 연직구속압으로 나누어진 점착력( $c'/\sigma'_v$ )이 증가할수록 딜라토미터로 추정된 횡방향구속 변형계수( $M_D$ )와 콘선단저항의 비( $M_D/q_c$ )가 점차 증가하였다. 또한 동일 콘선단저항에서 연직구속압으로 정규화된 고결모래의 횡방향구속 변형계수( $M$ )와  $M_D$ 의 비가 미고결 모래에 비해 크게 증가하였다. 각각의 회귀분석으로부터 고결모래의 점착력과 횡방향구속 변형계수가 추정되었다.

### 감사의 글

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

### 참고 문헌

1. 이문주, 최성근, 추현욱, 조용순, 이우진 (2008a), “낙사법으로 조성된 대형 석고 고결시료의 균질성”, *한국지반공학회논문집*, Vol.24, No.1, pp.91-99.
2. 이문주, 최성근, 추현욱, 이우진 (2008b), “고결모래의 콘선단저항과 변형계수의 관계”, *한국지반공학회논문집*, Vol.24, No.12, pp.53-63.
3. Akili, W., and Torrance, J.K. (1981), “The development and geotechnical problems of sabkha, with preliminary experiments on the static penetration resistance of cemented sands”, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol.14, No.1, pp.59-73.
4. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., and Pasqualini, E. (1981), “Cone resistance of a dry medium sand”, *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Vol.2, pp.427-432.
5. 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.
6. Been, K., Crooks, J.H, Becker, D.E., and Jefferies, M.G. (1986), “The cone penetration test in sand: part I, state parameter interpretation”, *Geotechnique*, Vol.36, No.2, pp.239-249.
7. 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.
8. Borden (1991), “Boundary displacement induced by DMT penetration”, *Proceedings of the International Symposium on Calibration Chamber Testing*, Postdam, NewYork, pp.101-118.
9. 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.
10. Choi, S.K. (2008), *Estimation of stress history of sands using CPT and DMT*, Ph.D. thesis, Korea University.
11. Cruz, N., and Fonseca, A.V. (2006), “Portuguese experience in residual soil characterization by DMT tests”, *Proceeding of 2nd International Conference on the Flat Dilatometer*, Washington, D.C., pp.359-364.
12. Douglas, B.J., and Olsen, R.S. (1981), “Soil classification using electric cone penetrometer”, *Symposium on cone Penetration Testing and Experience*, ASCE, St. Louis, pp.209-227.
13. Fonseca, A.V., Silva, S.R., and Cruz, N. (2008), “Geotechnical characterization by in situ and lab tests to the back-analysis of a supported excavation in Metro do Porto”, *Geotechnical and Geological Engineering*, Published online.
14. 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.

15. 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.
16. 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.
17. Joshi, R.C., Achari, G., Kaniraj, S.R., and Wijeweera, H. (1995), "Effect of aging on the penetration resistance of sands", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.32, pp.767-782.
18. Kim, T.J. (2005), *Dissipation of porewater pressure due to piezocone penetration in OC clay*, Ph.D. dissertation, Korea University.
19. Marchetti, S. (1980), "In situ tests by flat dilatometer", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.106, No.GT3, pp.299-321.
20. Marchetti, S. (1985), "On the field determination of  $K_0$  in sand", *Proceedings, 11<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, Vol.5, pp.2667-2672.
21. Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G., and Calabrese, M. (2001), "The flat dilatometer test (DMT) in soil investigations", A Report by the ISSMGE Committee TC16, *International Conference on In Situ Measurement of Soil Properties*, Bali, Indonesia.
22. 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.
23. Rad, N.S., and Tumay, M.T. (1986), "Effect of cementation on the cone penetration resistance of sand", *Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, GSP 6, ASCE, New York, pp.926-948.
24. Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D., and Grieg, J. (1986), "Use of piezometer cone data", *Proceedings of In-Situ '86, ASCE, Specialty Conference*, Blacksburg, VA.
25. Salgado, R., Mitchell, J.K., and Jamiolkowski, M. (1998), "Calibration chamber size effects on penetration resistance in sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.124, No.9, pp.878-888.

(접수일자 2008. 11. 5, 심사완료일 2008. 12. 30)