

CPT와 DMT를 이용한 고결모래의 변형계수 추정 Estimation of Deformation Modulus of Cemented Sand using CPT and DMT

이문주¹⁾, Moon-Joo Lee, 최성근²⁾, Sung-Kun Choi, 홍성진¹⁾, Sung-Jin Hong, 이우진³⁾, Woojin Lee

- 1) 고려대학교 건축·사회환경시스템공학과 박사과정, PhD Student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.
- 2) 공학박사, 고려대학교 건축·사회환경시스템공학과, PhD, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.
- 3) 고려대학교 건축·사회환경시스템공학과 부교수, Associate professor, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.

SYNOPSIS : The purpose of this study is to compare the cementation effect on cone resistance and DMT indices and to evaluate the deformation characteristic of cemented sand using cone resistance and dilatometer modulus. Specimens of various relative densities with three different cementation levels are prepared in a large calibration chamber under different vertical stress levels. Test result shows that the cone resistance and dilatometer modulus underestimate the deformation modulus of cemented sand, since in situ penetration tests such as CPT and DMT damage the cementation bonds during penetration. By regression analysis, the constrained modulus of cemented sand is related with the cone resistance and the dilatometer modulus.

Key words : cementation, cone resistance, dilatometer modulus, constrained modulus

1. 서 론

고결은 사질토의 정적, 동적거동 뿐만 아니라, 미소변형 특성에도 큰 영향을 미치기 때문에 실내 삼축 압축시험이나 일축압축시험, 또는 공진주시험이나 전단파 측정시험 등과 같은 실내시험이나 고결지반에서의 콘관입시험과 같은 현장시험을 바탕으로 고결에 대한 연구가 다각적으로 수행되고 있다. 사질토는 약한 고결결함으로도 미고결 사질토와 매우 상이한 거동을 보이기 때문에, 지반의 고결이 무시될 경우, 지반의 액상화 저항력을 과대평가하거나, 고결된 퇴적지반의 강도와 사면의 안전도를 과소평가 할 수 있다 (Rad and Clough 1982; Poulos 1980; Frydman 등 1980). 그러나, 기존의 clean sand에 적용되는 각종 제안식으로부터 고결지반의 공학적 정수를 추정할 경우, 상대밀도나 내부마찰각과 같은 사질토의 토질물성치를 과대평가하기 때문에, Rad and Tumay (1986)와 Puppala 등 (1995)은 고결모래에 대한 실내 콘관입시험 결과로부터 사질토의 콘선단저항에 미치는 영향 요인과 고결모래의 토질정수를 평가하고자 하는 연구를 수행하기도 하였다. 그러나 현재까지도 고결지반의 설계정수를 제대로 평가하지 못하고 있으며, 정량적인 고결 평가방법이 부족하기 때문에 대부분의 지반설계에서 사질토의 고결 영향은 무시되고 있다. 일반적으로 현장 원위치시험 결과에 반영된 고결의 영향을 상대밀도나 구속압의 영향과 구분하는 것은 매우 난이하다. 따라서 고결이 각 원위치시험에 미치는 영향정도를 비교하여 현장 지반의 고결여부와 고결정도를 평가하는 방법이 시도되고 있다 (Fonseca and Coutinho 2008).

본 연구에서는 사질토의 고결이 콘선단저항과 딜라토미터 지수에 미치는 영향을 비교하고, 각 시험결과와의 고결에 대한 민감도의 차이를 이용하여 고결모래의 변형특성을 분석하였다. 시험을 위해 다양한

원위치시험의 실내구현이 가능한 대형 챔버시스템을 이용하였으며, 시험모래의 고결정도 뿐만 아니라 상대밀도와 연직구속압을 달리하여 다양한 시료를 조성하였다.

2. 시료조성 및 시험

2.1 시료 기본물성

본 연구에 사용된 모래의 기본물성과 입도분포는 표 1, 그림 1과 같으며, 평균입경은 0.17mm이고 통일분류법(USCS)상 SP에 해당된다. 또한 전자주사현미경을 통하여 관찰한 결과, subangular의 조도를 갖는 것으로 나타났고, 성분분석(XRF)결과 SiO₂ 함유량이 98% 이상의 석영질 모래인 것으로 나타났다. 고결유발제로 사용된 석고는 습윤양생시 20MPa의 압축강도를 발현하고, 양생시 팽창율은 0.03%이다.

표 1. 모래 기본물성

Gs	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	Cu	Cc	e _{max}	e _{min}	USCS
2.647	0.09	0.170	2.111	0.988	1.054	0.719	SP

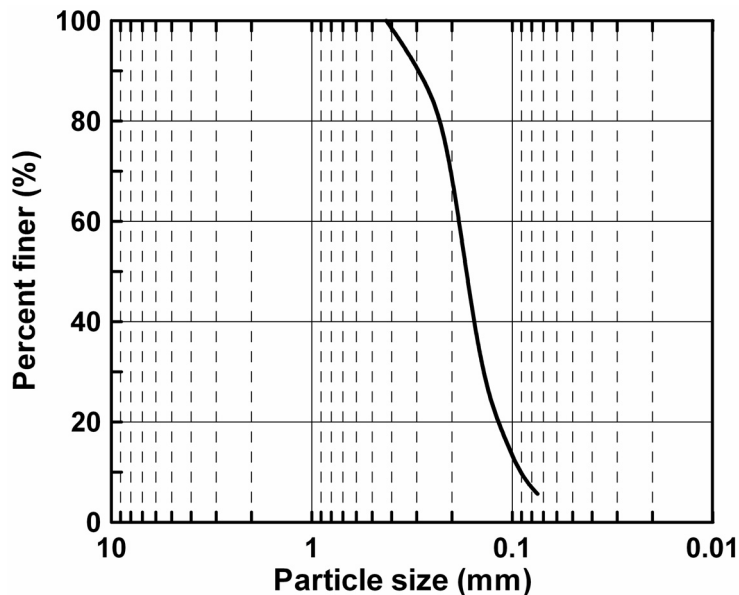


그림 1. 시험모래 입도분포

2.2 대형 시료조성 및 관입시험

2.2.1 시험장비

본 연구에서 사용된 챔버시스템은 높이 1.0m 직경 1.2m의 챔버셀과 하부 피스톤, 그리고 각종 관입시험을 위한 아답터가 연결된 상판으로 구성되어 있다. 횡방향 응력을 조절할 수 있도록 측면의 챔버셀은 이중벽으로 구성되어 있고, 응력은 챔버의 내측셀, 외측셀, 그리고 하부 피스톤과 연결된 제어판에서 조절한다. 챔버시스템과 콘관입시험 모식도는 그림 2와 같다. 대형 챔버에서는 자연의 퇴적상태에서 나타나는 흙의 조직과 유사할 뿐만 아니라, 다양한 상대밀도의 범위에서 전체적으로 균등하게 시료가 조성되도록 하기 위해 대부분 건조낙사법으로 시료를 조성하고 있다. 본 연구의 레이저 시스템은 Sweeney and

Clough(1990), Puppala 등(1995)에 의한 시스템을 기본으로 개량되었다(최성근 등 2007).

챔버시스템에서 측정된 모래의 콘선단저항은 상대밀도, 수평응력, 챔버와 콘의 직경비, 그리고 경계조건 등의 영향을 받으며, 시료의 상대밀도가 높고 구속압이 낮을수록 직경비와 경계조건의 영향은 증가한다(Salgado 등 1998). 낮은 상대밀도($D_r < 30\%$)에서 직경비 20 이상, 높은 상대밀도($D_r > 90\%$)의 경우 직경비 50 이상에서 경계조건이 콘시험 결과에 영향을 미치지 않는 것으로 알려지고 있다(Bean 등 1986). 본 챔버시스템에 직경 3.57cm의 레퍼런스콘을 적용할 경우, 시료 중심에서의 직경비는 33.6로써 높은 상대밀도의 시료에서 측정된 콘시험 결과가 경계조건의 영향을 받을 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 AP Vanderberg사에서 제조한 직경 1.6cm의 미니콘(직경비 75)을 사용하였다.

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 지수 (E_D , K_D , I_D)를 제안하였다. 딜라토미터 계수 E_D 는 흙의 강성과 관계되며, 수평응력 지수 K_D 는 흙의 정지토압계수와 관계되어 과압밀비나 내부마찰각을 구하는데 이용된다. 또한 재료지수 I_D 는 흙의 유형을 결정하기 위해 사용되며 흙의 강성지수와도 관계된다.

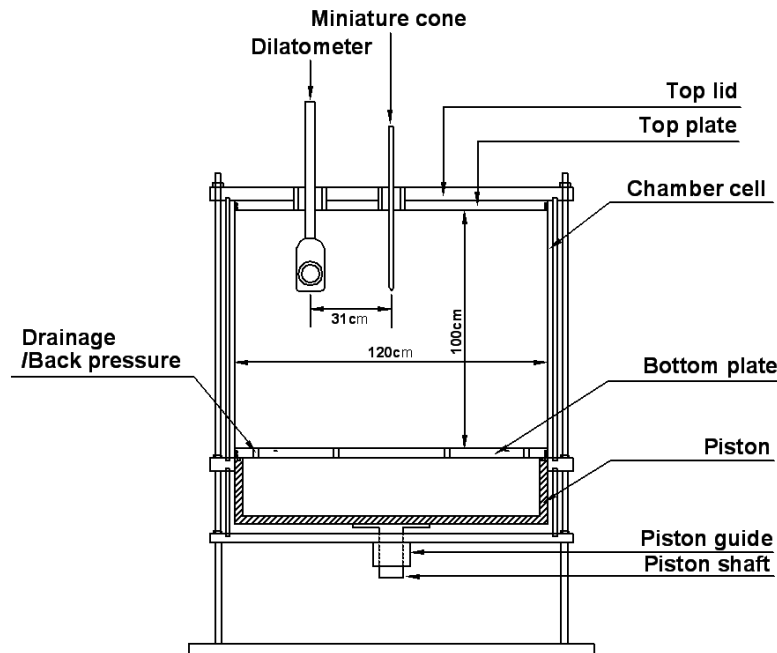


그림 2. 챔버시스템 모식도

2.2.2 시료조성 및 시험

레이너 시스템의 모래 낙하고와 개폐율, 그리고 porous plate의 장착유무를 조절하여 다양한 상대밀도의 미고결, 고결시료를 조성하였다(최성근 등 2007). 균질한 고결시료 조성을 위해 0.5% 함수비로 표면을 습윤시킨 모래시료와 석고를 교반하여 석고입자를 모래표면에 부착시켜 낙사함으로써 재료분리를 최소화하였다(Rad and Tumay 1986; Puppala 등 1995). 낙사가 완료된 시료의 초기 상대밀도를 측정하고, 시료상부에 상부 플레이트 및 챔버셀을 조립하고 연직구속압 50~400kPa의 다양한 구속압을 가한 후, 가압에 의한 변위를 보정하여 조성된 시료의 최종 상대밀도를 결정하였다. 고결시료의 경우 시료 하부에 30kPa의 주입압으로 탈기수를 주입한 후, 24시간 양생시켰다. 시료의 석고함유율은 5, 7, 10%, 상대밀도는 30~75%로 다양하게 조성되었다. 시료양생 후, 2cm/sec의 관입속도로 미니콘을

시료의 중심에 관입시키면서 콘선단저항을 측정하였다. 콘관입시험 완료 후 시료중심으로부터 31cm 위치에서 딜라토미터 시험이 수행되었다. 딜라토미터의 관입속도는 2cm/sec로 일정하게 유지되었으며, 시료깊이 30~70cm에서 10cm 간격으로 수행되었다.

2.3 소형 압축시험

흙의 횡방향구속 변형계수 (M)은 흙의 변형특성 평가를 위한 가장 간단하고 효율적인 지방정수 중 하나이다. 그러나 챔버에 조성된 후 콘관입시험이 수행된 고결시료의 경우, 콘 관입시 고결결합이 파괴되기 때문에 고결결합 파괴전 비교란상태의 변형계수는 측정할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 직경 74mm, 높이 45mm의 소형 오이도미터 셀에 시료를 조성한 후 고결, 미고결 시료의 횡방향구속 변형계수를 결정하였다. 미고결 시료의 경우, 낙사법으로 다양한 상대밀도의 시료를 조성한 후, 연직하중을 500kPa까지 증가시키면서 각각의 상대밀도와 구속압에 따른 변형계수를 측정하였다. 또한 모래-석고 혼합시료를 셀에 낙사시킨 후, 챔버에 조성된 시료와 동일하게 목표 연직하중 (50, 100, 200kPa)을 가한 후, 시료 하부에 증류수를 주입하고 24시간 양생하여 고결시료를 조성하였다. 조성된 고결시료에 25kPa 단계의 연직하중을 가하면서 시료의 하중-침하관계를 결정하고 고결결합 파괴전의 변형계수를 구하였다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 고결에 대한 민감도 비교

사질토의 거동은 다양한 요인에 의해 영향을 받으며, 각각의 요인이 현장 원위치시험과 실내시험 결과에 미치는 영향은 상이하게 나타난다. 예를 들어, Jamiolkowski 등 (1988)의 연구에서 미고결 모래의 변형계수는 상대밀도에 비례하여 증가하지만, 모래의 콘선단저항은 지수적으로 증가하였다. 또한 응력이 사질토의 변형계수에 미치는 영향이 관입저항치에 미치는 영향보다 더 크기 때문에, 사질토의 변형계수와 콘선단저항의 비율 (M/q_c , E/q_c)은 정규압밀상태보다 과압밀상태에서 더 크게 결정되었다. 그림 3은 5~10% 석고함유율에 의해 고결된 모래의 콘선단저항과 딜라토미터 지수의 증가율을 나타낸다. 즉, 5~10% 석고함유율에 의해 고결모래의 횡방향구속 변형계수는 미고결 모래에 비해 9.9~15.3배까지 증가하였다. 반면 DMT에 의한 딜라토미터 계수와 수평응력지수는 각각 2.9~6.3배, 2.5~3.8배 증가하였으며, 콘선단저항은 2.0~4.4배 증가하였다. 따라서 동일한 석고함유율일지라도 고결모래의 횡방향구속 변형계수 (M)가 콘선단저항이나 딜라토미터 지수에 비해 고결에 의해 더 크게 증가하였으며, 고결은 사질토의 변형계수에 매우 큰 영향을 미치는 것이 확인되었다.

CPT나 DMT와 같은 관입시험 결과로부터 사질토 지반의 변형계수를 추정하기 위한 다양한 방법이 제시되고 있다. 일반적으로 딜라토미터 계수로부터 흙의 횡방향구속 변형계수는 Marchetti (1980)이 제안한 보정계수인 R_M 을 이용하여 $M_D = E_D R_M$ 으로 결정되며, M_D 는 M 과 비교적 잘 일치하는 것으로 알려져 있다. 또한 Lunne and Christophersen (1983)은 콘선단저항으로부터 횡방향구속 변형계수를 추정하는 식을 제안하였다. 그림 4는 Marchetti (1980)와 Lunne and Christophersen (1983) 방법을 이용하여 추정된 미고결, 고결모래의 횡방향구속 변형계수를 나타낸다. 실험결과, 딜라토미터 시험은 미고결된 K-7의 횡방향구속 변형계수를 약 20% 과소평가하였으며, 반면 콘선단저항은 횡방향구속 변형계수를 약 6% 과대평가하였다. 고결모래의 횡방향구속 변형계수는 딜라토미터 계수로부터 약 25~70% 과소평가되었으며, 콘선단저항으로부터 70~85% 과소평가되었다. 이와 같은 결과는 원위치 관입시험으로부터 지반의 변형계수를 추정할 경우, 지반의 응력이력 뿐만 아니라 고결의 영향을 고려하지 않을 경우, 지반의 변형계수를 매우 과소평가할 수 있음을 의미한다. 따라서 고결이 콘선단저항과 딜라토미터 지수를 증가시킴에도 불구하고, 콘관입시험과 딜라토미터 시험과 같은 관입시험은 고결모래의 고결결합을 파괴하기 때문에 미고결 모래의 변형계수만큼 정확한 추정이 불가능한 것으로 분석된다. 그러나 딜라토

미터 시험은 콘관입시험에 비해 관입시 주변의 교란을 적게 발생시키기 때문에 (Baligh and Scott 1975; Davidson and Boghrat 1983), 콘선단저항보다 딜라토미터 계수에 고결이 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

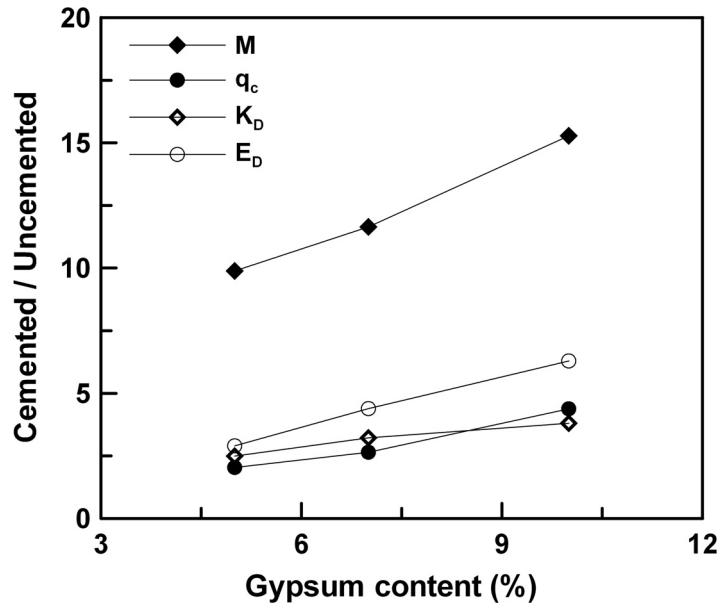


그림 3. 석고함유율이 따른 각 시험결과에 미치는 영향 비교

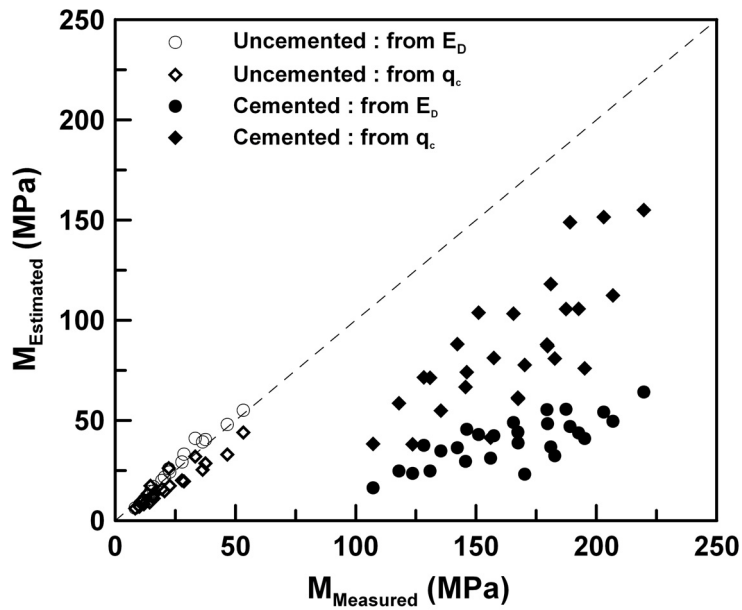


그림 4. CPT와 DMT에 추정된 횡방향구속 변형계수 비교

3.2 고결모래의 콘선단저항과 dilatometer 계수 관계

그림 5는 고결된 K-7호사의 콘선단저항과 dilatometer 계수의 관계이다. Campanella and Robertson (1991)의 제안식과 유사하게 K-7호사의 콘선단저항과 DMT의 dilatometer 계수는 선형관계로 나타났다. 고결모래의 경우, 미고결 모래와 마찬가지로 동일 석고함율에서는 q_c - E_D 관계가 비교적 선형으로 나타났으나, dilatometer 계수가 콘선단저항에 비해 고결효과에 더 민감하기 때문에 석고함유율이 증가할수록 동일한 콘선단저항에서 dilatometer 계수가 증가하였다. 그림 5에서 나타난 q_c - E_D 관계에서 고결모래의 기울기는 미고결 모래의 기울기와 거의 동일하고, 고결모래와 미고결 모래의 dilatometer 계수의 차이 (ΔE_D)는 석고함유율과 관계된다. 실험결과를 이용한 회귀분석으로부터 ΔE_D 는 점착력과 식 1의 관계임이 확인되었다. 따라서 고결모래의 dilatometer 계수는 식 2와 같이 콘선단저항과 점착력의 관계로 표현될 수 있다.

$$\Delta E_D = 0.24 \times c' \quad (1)$$

$$E_D = \alpha q_c + 0.24c' \quad (2)$$

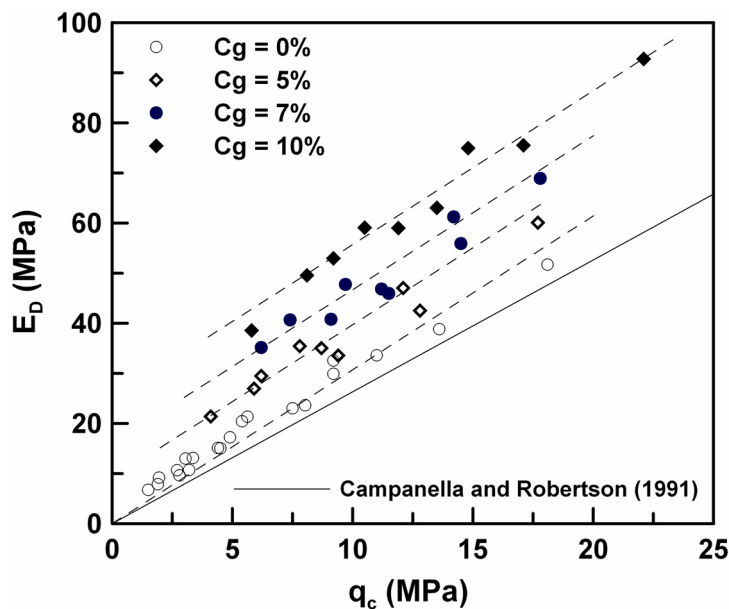


그림 5. 모래의 콘선단저항과 dilatometer 계수 관계

3.3 고결모래의 변형계수 추정

미고결 사질토의 횡방향구속 변형계수는 dilatometer 계수나 콘선단저항을 이용한 기존의 다양한 제안식으로부터 비교적 정확하게 예측될 수 있다. 그러나, 본 연구의 결과에서 확인된 바와 같이, 고결모래의 변형계수는 원위치시험에 의해 상당히 과소평가될 뿐만 아니라, 모래의 고결정도와 상대밀도, 그리고 구속압 등 다양한 영향요인에 의해 지배되기 때문에, 추정이 매우 난이하다. 본 연구에서는 모래의 고결이 콘선단저항과 dilatometer 계수에 미치는 상대적인 영향정도로부터 고결모래의 변형계수를 추정하였다. 그림 6은 고결모래와 미고결 모래의 q_c/p_a - M/E_D 관계이다. 여기서, p_a 는 대기압으로서 98.1kPa이다. 예측된 바와 같이, dilatometer 계수에 비해 횡방향구속 변형계수에 미치는 고결의 영향이 더 크기 때문에, 고결모래의 M/E_D 는 동일 콘선단저항의 미고결 모래에 비해 크게 나타난다. 고결모래의 M/E_D 는 콘선단저항에 관계없이 거의 일정하였으며 식 3과 같이 표현되었다. 반면 고결모래의 M/E_D 는 콘선단저항이 증가할수록 점차 감소하였다. 이와 같은 결과는 횡방향구속 변형계수에 비해 dilatometer 계수가

상대밀도나 구속압의 변화에 좀 더 민감하기 때문이다. 회귀분석 결과, 고결모래의 $q_c/p_a-M/E_D$ 관계는 석고함유율에 관계없이 식 4로 표현되었다.

$$M = 1.52E_D \left(\frac{q_c}{p_a} \right)^{-0.064} \approx 1.2E_D \quad : \text{Uncemented sand} \quad (3)$$

$$M = 24.4E_D \left(\frac{q_c}{p_a} \right)^{-0.42} \quad : \text{Cemented sand} \quad (4)$$

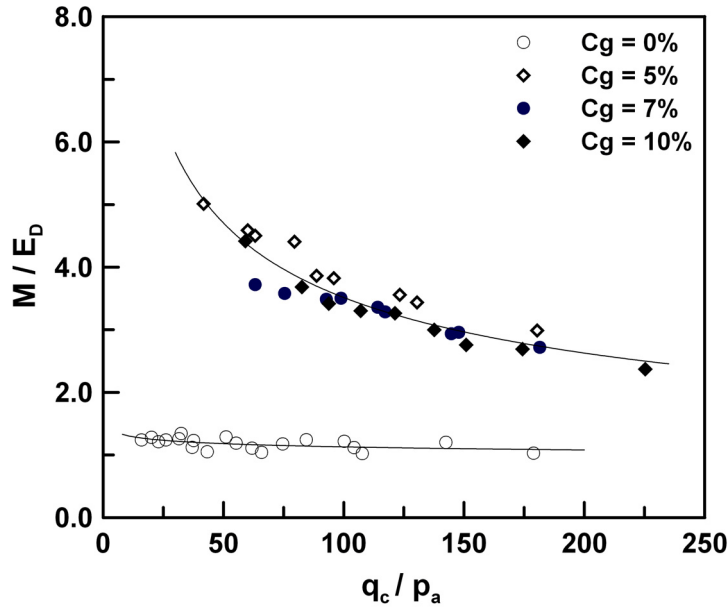


그림 6. 콘선단저항에 따른 M/E_D 변화

5. 결론

본 논문에서는 실내 챔버시험으로부터 사질토의 고결이 콘선단저항과 딜라토미터 지수에 미치는 영향을 분석하고, 각 시험결과를 조합하여 고결모래의 횡방향구속 변형계수를 추정하였다. 시험결과, 고결은 사질토의 횡방향구속 변형계수 뿐만 아니라, 콘선단저항과 딜라토미터 지수를 증가시켰다. 딜라토미터 시험은 콘관입시험보다 관입시 주변의 교란을 적게 발생시키기 때문에, 고결모래의 변형계수는 콘선단저항보다 딜라토미터 계수에 의해 좀 더 크게 추정되었으나, 두 시험 모두 관입시 주변의 고결결합을 파괴시키기 때문에 고결모래의 변형계수를 매우 과소평가하였다. 본 연구에서는 고결이 딜라토미터 계수와 콘선단저항에 미치는 상대적인 영향정도를 비교함으로써 고결모래의 횡방향구속 변형계수를 추정하였으며, 회귀분석결과, 고결모래의 고결정도에 관계없이 횡방향구속 변형계수의 추정이 가능하였다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 최성근, 이문주, 추현욱, 홍성진, 이우진 (2007), “Porous plate를 이용한 개선된 레이닝 시스템”, *한국지반공학회논문집*, Vol.23, No.6, pp.67-76.
2. Baligh, M.M. and Scott, R.F. (1975), “Quasi static deep penetration in clays”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.101, No.GT11, pp.1119-1133.
3. 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.
4. Davidson, J. and Boghrat, A. (1983), “Displacements and strains around probes in sand”, *Proceeding of ASCE Specical Conference on “Geotechnical Practice in Offshore Engineering”*, Austin, TX, pp.181-203.
5. Fonseca, A.V. and Coutinho, R.Q. (2008), "Characterization of residual soils", *Proceedings, 3rd International Conference on Site Characterization*, Taipei, Taiwan, pp.195-248
6. Frydman, S., Hendron, N.D., Horn, H., Steinbach, J., Baker, R. and Shaal, B. (1980), “Liquefaction study of cemented sands”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.16, No.3, pp.275-297
7. 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*, Vol.2, Orlando, Florida, pp.263-296.
8. Marchetti, S. (1980), “In situ tests by flat dilatometer”, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.106, No.GT3, pp.299-321.
9. Luune, T., and Christophersen, H.P. (1983), “Interpretation of cone penetrometer data for offshore sands.” *Proceedings of the Offshore Technology Conference, Richardson, Texas*, Paper No.4464.
10. Poulos, H.G. (1980), *A review of the behavior and engineering properties of carbonate soils*, Research Report No. R381, The University of Sydney.
11. 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.
12. Rad, N.S. and Clough, G.W. (1982), *The influence of cementation on the static and dynamic behavior of sands*, Report No.59, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, Calif..
13. 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*, GSP6, ASCE, New York, pp.926-948.
14. 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.
15. 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.