

고결모래의 콘선단저항에 대한 영향요인 분석

Analysis of Influencing Factors on the cone resistance in Cemented Sand

이문주¹⁾, Moon-Joo Lee, 최성근¹⁾, Sung-Kun Choi, 조용순²⁾, Yong-Soon Cho,
이우진³⁾, Woojin Lee, 김태준⁴⁾, Tai-Jun Kim

1) 고려대학교 건축·사회환경시스템공학과 박사과정, PhD Student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.

2) 고려대학교 건축·사회환경시스템공학과 석사과정, Graduate Student, 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.

4) 쌍용건설 과장, Manager, Ssangyong Engineering & Construction Co., Ltd

SYNOPSIS : A series of cone penetration tests in large calibration chamber were performed to investigate the effect of cementation level, relative density and vertical confining stress on cone resistance. From the experimental results, it was observed that the cone resistance is increased with increasing gypsum content, relative density, and confining stress. The increasing ratio on cone resistance of cemented sand compared with that of uncemented sand, that is $IR(q_c)$, was increased with increasing gypsum content and relative density, whereas it was decreased as the vertical confining stress increases. It was also observed that the cementation of granular soil influences the behavior of ground at low level of confining stress and its effect is diminished with depth.

Key words : cementation, cone resistance, gypsum content, relative density, vertical stress

1. 서 론

일반적인 비교란된 사질토 채취방법인 동결공법은 기술적인 제약과 높은 기회비용으로 인해 연구목적 이외로는 적용이 매우 난이하여, 사질토 지반의 특성은 재성형 실내시료를 이용한 시험이나 현장 시험에 의해 분석되고 있다. 특히 콘관입시험은 시험방법이 간단하고, 비교적 저렴한 비용으로 연속적인 지반특성을 파악할 수 있기 때문에 가장 일반적으로 수행되는 현장시험법 중 하나이다. 사질토 지반에서의 콘관입시험 결과는 상대밀도나 마찰각 등과 같은 흙의 지반정수를 평가하거나 Douglas and Olsen (1981) 이나 Robertson 등 (1986) 이 제시한 도표로부터 흙을 분류하기 위해 사용되어진다.

최근들어 지반의 ageing 이나 고결(cementation) 효과에 대한 관심이 집중되어, 현장시험을 통해 이러한 효과를 평가하는 연구가 시도되고 있다. 일반적으로 사질토는 약한 고결결함으로도 지반공학적 특성이 크게 변하기 때문에, 기존의 clean sand에 적용되는 각종 제안식으로부터 고결된 사질토의 지반정수를 추정하는 것은 타당하지 않다(Puppala 등 1995). 그럼에도 불구하고, 현재까지 고결모래의 거동은 주로 소형 실내시험을 이용하여 고결에 영향을 미치는 각종 영향인자에 대한 매개변수 분석 위주로 진행되었으며, Rad and Tumay(1986)와 Puppala 등(1995)에 의해 고결 사질토의 콘선단저항에 대한 제한적인 연구만이 수행되어 왔기 때문에, 고결이 사질토의 콘관입시험에 미치는 영향에 대한 심도깊은 연구가 필수적이다.

본 연구에서는 대형 챔버에 석고를 고결유발제로 하는 고결시료를 조성한 후 실내 콘관입시험을 수행하였으며, 석고함유율, 상대밀도, 그리고 구속압에 의한 고결시료의 콘선단저항 변화를 분석하였다.

2. 고결이 콘관입시험에 미치는 영향

고결은 사질토의 콘선단저항과 콘주면마찰을 증가시킨다(Rad and Tumay 1986; Akili and Al-Joulani 1988; Puppala 등 1995). Puppala 등(1993, 1995)의 연구에서는 고결유발제로 사용된 포틀랜드 시멘트의 함유율이 높을수록 고결시료의 콘선단저항이 증가하였으며, 특히 포틀랜드 시멘트 1~2%로 고결된 시료는 미고결 시료보다 연직하중 100kPa 상태에서 1~2배 정도 큰 콘선단저항을 나타내었다. 또한 Puppala 등(1993)은 고결시료에서는 팽창이 억제되기 때문에 콘주면의 구속압이 증가하여, 흙의 정지토압계수보다 수동토압계수를 사용하면 고결시료의 콘주면마찰력을 더 잘 예측할 수 있음을 관찰하였으며, 상대밀도가 높은수록 고결시료의 콘선단저항과 콘주면마찰력이 증가하였다. 반면, 고결시료의 경우 콘선단저항 증가율이 콘주면마찰 증가율보다 크기 때문에 고결시료의 마찰비는 미고결 시료의 마찰비보다 작게 측정된다(Rad and Tumay 1986). 또한, Puppala 등(1995)의 연구에서는 고결정도가 클수록 고결모래의 마찰비는 다소 감소하는 경향을 보이나, 상대밀도에 의한 고결모래의 마찰비 변화는 미미하게 나타났다.

3. 시료조성 및 시험

3.1 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

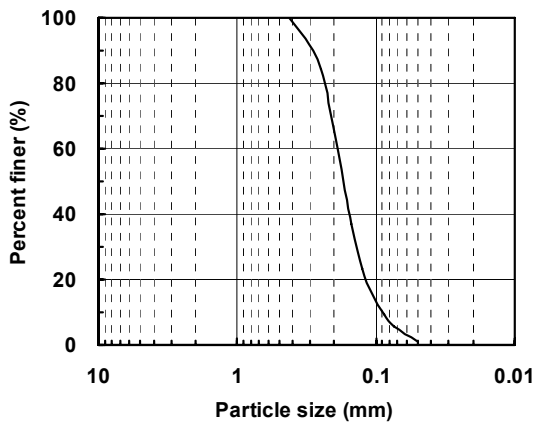


그림 1. 시험모래 입도분포

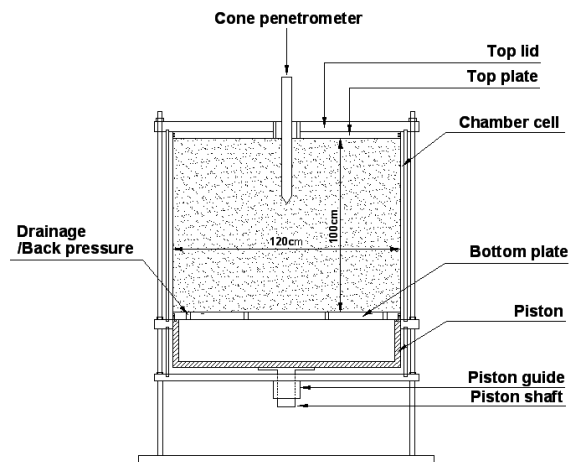


그림 2. 챔버시스템 모식도

3.2 시험장비 및 시험방법

3.2.1 대형 챔버시스템

본 연구에서 사용된 챔버시스템은 높이 1.0m 직경 1.2m의 챔버셀과 하부 피스톤, 그리고 각종 관입 시험을 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.

3.2.2 레이너시스템

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

3.2.3 Miniature cone

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). 일반적으로 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 알려져 있다(Beau 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.

3.2.4 시료조성 및 시험

레이너 시스템의 모래 낙하고와 개폐율, 그리고 porous plate의 장착유무를 조절하여 다양한 상대밀도의 미고결, 고결시료를 조성하였다(최성근 등 2007). 낙사도중 모래와 고결유발제로 사용된 석고의 낙하속도차에 의한 재료분리를 방지하기 위해, 0.5% 함수비로 표면을 습윤시킨 모래시료와 석고를 교반하여 석고입자를 모래표면에 부착시킨 후 시료를 낙사하였다(Rad and Tumay 1986; Puppala 등 1995). 낙사가 완료된 시료의 상부에 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 석고 함유율은 5, 7, 10%, 상대밀도는 30~75%로 다양하게 조성되었다. 일반적으로 챔버에서 수행되는 사질토의 콘관입시험은 시료의 포화여부에 관계없이 동일한 결과를 나타내는 것으로 알려져 있다(Schmertmann 1976; Baldi 등 1981). 따라서 본 연구에서는 미고결 시료의 경우 건조상태에서 시험을 수행하였으며, 고결시료의 경우 양생완료 후 포화상태에서 시험을 수행하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 고결에 따른 콘선단저항 영향

미고결 모래의 콘선단저항에 대한 고결모래의 콘선단저항의 증가율을 식 1과 같이 정의하였다. 여기서, $q_{c(cs)}$ 는 고결모래의 콘선단저항이고, $q_{c(us)}$ 는 미고결 모래의 콘선단저항이다.

$$IR(q_c) = \frac{q_{c(cs)}}{q_{c(us)}} \quad (1)$$

그림 3에서 석고함유율과 상대밀도가 증가할수록 고결모래의 $IR(q_c)$ 는 증가하였으며, 반면 연직구속압이 증가할수록 $IR(q_c)$ 는 감소하였다. 5% 석고함유율로 고결된 모래의 콘선단저항은 미고결 모래의 경우보다 1.4~2.9배 증가하였고, 7%, 10% 석고함유율로 고결된 모래의 경우에는 각각 2.3~3.9배, 3.2~5.9배 증가하였다. 본 연구에서는 100kPa의 연직구속압에서 5% 석고함유율로 고결된 모래의 콘선단저항이 미고결 모래의 콘선단저항보다 2.0~2.3배 크게 나타났으나, 유사한 고결정도인 Puppala 등(1995)의 고결모래는 동일한 연직구속압에서 미고결 모래보다 1.1~2.0배 콘선단저항이 크게 나타났다. 이 같은 결과는, Puppala 등(1995)의 연구에서는 구속압이 가해지지 않은 상태에서 고결된 후, 100kPa까지 연직구속압을 가한 후 시험을 수행하였으므로, 가압에 의한 고결결합의 파괴정도를 고려하지 못했기 때문인 것으로 판단된다.

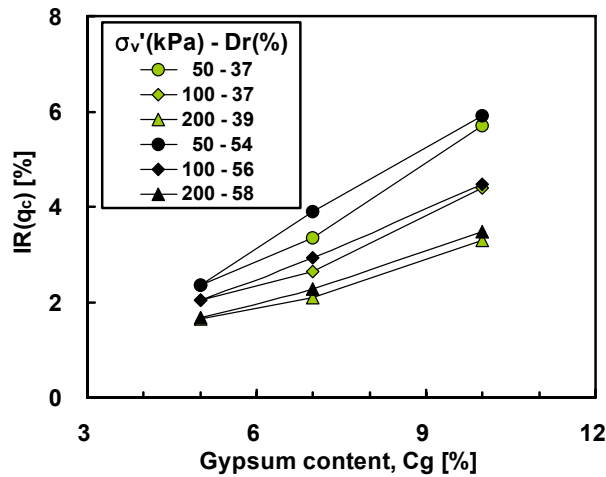


그림 3. 석고함유율에 따른 고결모래의 콘선단저항 증가율

그림 4에서, 상대밀도가 증가할수록 고결모래의 콘선단저항 증가율이 다소 증가하였으며, 석고함유율이 높을수록 증가비율이 크게 나타났다. 즉, 그림 5과 같이 낮은 상대밀도(36~41%)로 조성된 고결모래의 콘선단저항을 기준으로, 상대밀도 증가에 따른 고결모래의 콘선단저항 증가비를 표시한 결과, 구속압에 관계없이 상대밀도 증가에 따른 미고결, 고결모래의 콘선단저항 증가경향이 매우 유사하여, 상대밀도에 의한 $IR(q_c)$ 의 증감경향은 매우 미미하게 나타났다. 그러나, 동일한 상대밀도의 증가에 의해 고결모래와 미고결 모래의 콘선단저항 차이는 오히려 증가하였으며, 결론적으로 상대밀도의 증가는 고결모래와 미고결 모래의 콘선단저항 증가에 상대적으로 유사한 영향을 미치나, 동일 상대밀도 증가에 대해 고

결모래의 콘선단저항 증가량이 더 크게 나타난다.

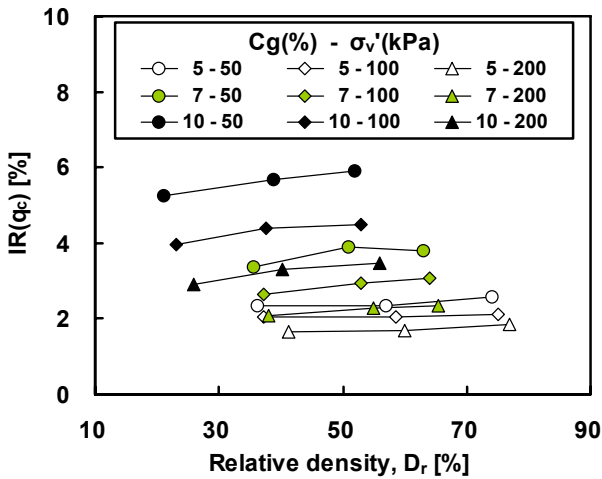


그림 4. 상대밀도에 따른 고결모래의 콘선단저항 증가율

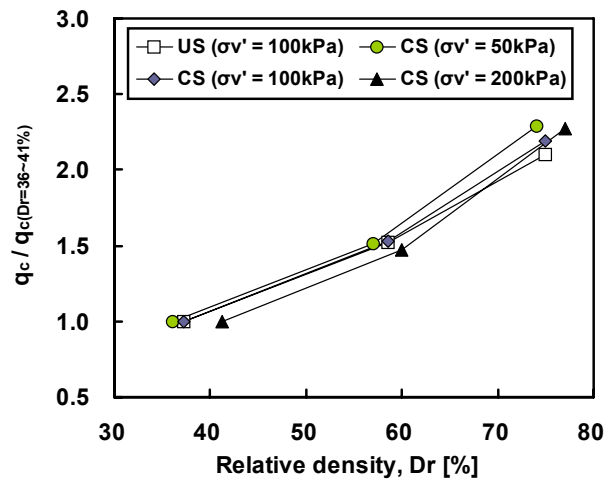


그림 5. 상대밀도에 따른 고결, 미고결 모래의 콘선단저항 증가경향 (Cg=5%)

그림 6은 연직구속압에 따른 고결모래의 콘선단저항 증가율로써, 동일한 석고함유율과 상대밀도에서 연직구속압이 증가할수록 고결모래의 IR(qc)는 감소하였다. 즉, 이와 같은 경향은 연직구속압이 고결모래의 콘선단저항 증가보다 미고결 모래의 콘선단저항 증가에 더 큰 영향을 미치기 때문이다.

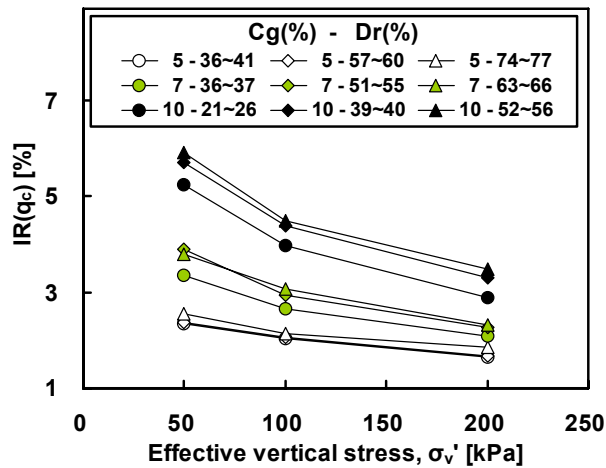


그림 6. 연직구속압에 따른 고결모래의 콘선단저항 증가율

4.2 고결모래의 점착력과 콘선단저항 관계

고결모래의 콘선단저항 증가율, 즉 IR(qc)에 미치는 영향요인을 분석한 결과, 석고함유율이 증가할수록 IR(qc)가 증가한 반면, 연직구속압 증가에 의해서는 IR(qc)가 오히려 감소하였으며, 상대밀도 증가에 의한 IR(qc)의 증가경향은 매우 미미하였다. 따라서 본 논문에서는 상대적으로 고결모래의 콘선단저항에 영향이 적은 상대밀도의 항은 제외하고, 고결모래의 IR(qc)를 점착력과 연직구속압의 관계로 간편하게 나타내었다. 그림 7과 같이 Puppala 등(1995)의 실험결과와 본 연구의 결과를 동시에 분석함으로써,

IR(q_c)와 점착력, 그리고 연직구속압의 관계를 식 2와 같이 표현하였다. 또한 챔버시험으로부터 측정된 고결모래의 IR(q_c)와 식 2로부터 추정된 IR(q_c)을 비교한 결과, 결정계수(R^2) 0.94 이상의 높은 상관관계가 나타났다.

$$IR(q_c) = \frac{3.24c}{100(\sigma'_v/p_a)^{0.57}} + 1 \quad (2)$$

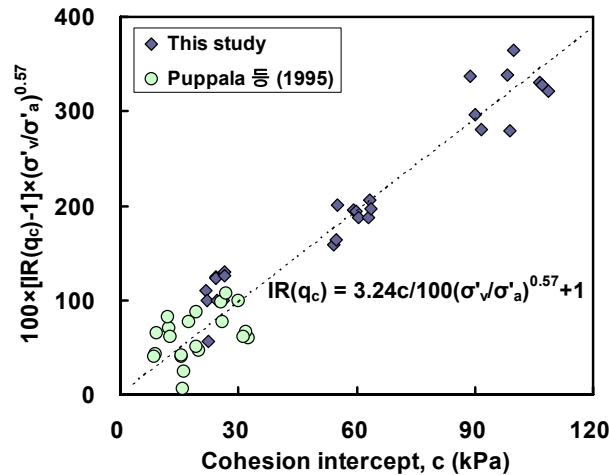


그림 7. 고결모래의 점착력과 콘선단저항 증가율 관계

4.2 고결모래의 콘선단저항 증가비 예측

Ismael (1996)의 연구에서는 고결결합에 의한 점착성분이 기초 지지력의 90% 이상을 담당하는 것으로 나타났다. 즉 고결모래의 거동에서는 고결결합에 의한 점착력의 영향이 내부마찰각의 영향을 초과하여, 동일한 점착력을 지닌 모래의 콘선단저항 증가율은 모래 종류에 관계없이 유사하게 결정될 가능성이 있다. Puppala 등(1995)의 고결모래는 p_a (=98.1kPa)로 정규화된 고결모래의 점착력이 $c/p_a = 0.10 \sim 0.33$ 의 범위에서 나타났으며, 본 연구에서는 $c/p_a = 0.22 \sim 1.11$ 의 범위의 고결시료가 조성되었다. 두 실험결과에서 $c/p_a = 0.20 \sim 0.27$ 범위인 고결모래의 IR(q_c)와 정규화된 연직응력(σ'_v/p_a)의 관계를 그림 8과 같이 나타낸 결과, 유사한 점착력을 지닌 고결모래는 동일한 연직구속압 상태에서 비교적 유사한 IR(q_c)이 나타났다.

두 연구결과를 조합하여 그림 9와 같이 $c/p_a = 0.10 \sim 1.01$ 범위에서 연직구속압에 따른 고결모래의 콘선단저항 증가율을 표시하였다. 연직구속압의 증가는 고결모래의 콘선단저항보다 미고결 모래의 콘선단저항 증가에 더 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 즉 사질토의 고결은 연직구속압이 상대적으로 작은 얇은기초의 거동에 큰 영향을 미치며, 깊이에 따른 구속압의 증가는 약한 고결의 영향을 상쇄시키는 것으로 분석된다(Puppala 등 1995). 본 연구결과는 추후 좀 더 다양한 모래시료를 이용한 연구를 통해 보완되어야 할 것으로 판단된다.

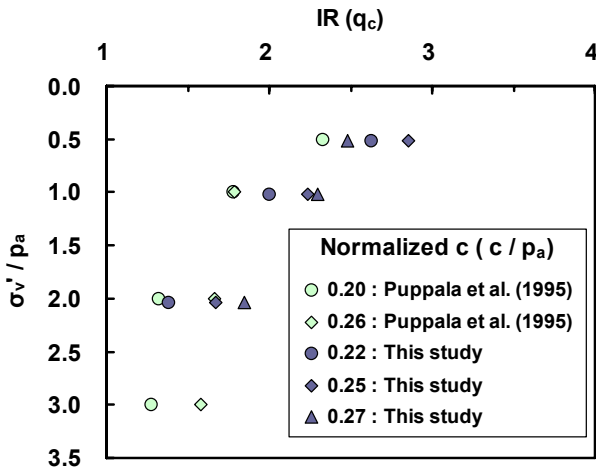


그림 8. 점착력과 연직구속압에 따른 콘선단저항 증가율 비교

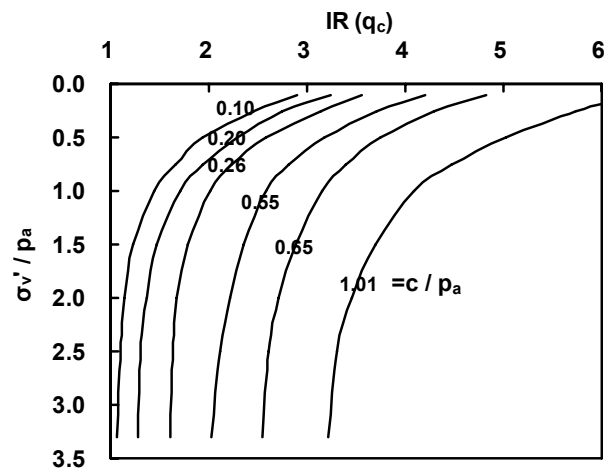


그림 9. 점착력과 연직구속압에 따른 고결모래의 콘선단저항 증가율 예측도

5. 결론

본 연구에서는 모래중량비 5, 7, 10%의 석고를 혼합하여 고결이 유발된 시료에 대한 콘관입시험을 수행하였으며, 시험결과로부터 석고함유율, 상대밀도, 그리고 구속압이 콘관입시험 결과인 콘선단저항에 미치는 영향을 분석하였다.

미고결 모래의 콘선단저항에 대한 고결모래의 콘선단저항 증가율인 $IR(q_c)$ 를 분석한 결과, 석고함유율이 증가할수록 고결모래의 $IR(q_c)$ 는 증가하였으나, 반면 연직구속압이 증가할수록 $IR(q_c)$ 는 감소하였다. 또한 상대밀도가 증가할수록 고결모래의 콘선단저항 증가율이 다소 증가하였으며, 석고함유율이 높을수록 상대밀도의 영향이 크게 나타났다. 따라서 고결모래의 콘선단저항 증가에는 석고함유율, 즉 고결정도의 영향이 가장 크며, 상대밀도의 영향은 상대적으로 미미한 것으로 판단되며, 연직구속압은 고결모래보다 미고결 모래의 콘선단저항의 증가에 큰 영향을 미치는 것으로 분석된다.

미고결 모래의 콘선단저항에 대한 고결모래의 콘선단저항 증가율, 즉 $IR(q_c)$ 는 상대밀도보다는 점착력과 연직구속압의 영향이 더 큰것으로 분석되어, 점착력과 연직구속압의 향으로 표현된 $IR(q_c)$ 추정식을 제안하였다. 또한 대기압 p_a 로 정규화된 고결모래의 점착력, 즉 c/p_a 와 정규화된 연직응력(σ'_v/p_a)에 따른 $IR(q_c)$ 를 도시함으로써, $c/p_a=0.10 \sim 1.01$ 범위에서 연직구속압에 따른 고결모래의 콘선단저항 증가율을 예측하였다. 이로부터 사질토의 고결은 연직구속압이 상대적으로 작은 얇은기초의 거동에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 최성근, 이문주, 추현욱, 홍성진, 이우진 (2007), "Porous plate를 이용한 개선된 레이닝 시스템", 한국지반공학회논문집, Vol.23, No.6, pp.67-76

2. Akili, W., and Al-Joulani, N. M. (1988), "Cone penetration tests on artificially cemented sands", *Proceedings of the 1st International Symposium on Penetration Testing*, Vol.2, Orlando, Florida, pp.607-614.
3. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., and Pasqualini. (1981), "Cone resistance of a dry medium sand", *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Vol.2, 427-432.
4. 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.
5. Douglas, B. J. and Olsen, R. S. (1981), "Soil classification using electric cone penetrometer", *Symposium on cone Penetration Testing and Experience*, Geotechnical Engineering Division, ASCE, St. Louis, October 1981, pp.209-227.
6. Ismael, N.F. (1996), "Loading tests on circular and ring plates in very dense cemented sands", *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.122, No.4, pp.281-287.
7. Puppala, A. J., Acar, Y. B., and Senneset, K. (1993), "Cone penetration in cemented sands : bearing capacity interpretation", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.119, No.12, pp.1990-2001.
8. 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.
9. 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.
10. Robertson, P. K. and Campanella, R. G. (1983), "Interpretation of cone penetration tests", *Canadian Geotechnical Journal*, NRC, Vol.20, pp.718-733.
11. 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.
12. Schmertmann, J. H. (1976), *An updated correlation between relative density and Fugro type electric cone bearing*, Contract Report DACW 9-76-M 6646, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
13. 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.