

입자 파쇄가 사질토의 DMT 결과에 미치는 영향

Effect of Particle Crushing on the Results on DMT in Sand

이문주¹⁾, Moon-Joo Lee, 최영민²⁾, Young-Min Choi, 김민태²⁾, Min-Tae Kim
배경두²⁾, Kyung-Doo Bae, 이우진³⁾, Woojin Lee

¹⁾ 고려대학교 공과대학 건축토목환경공학부 BK 박사후연구원, Research, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea Univ.

²⁾ 고려대학교 공과대학 건축토목환경공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea Univ.

³⁾ 고려대학교 공과대학 건축토목환경공학부 교수, Professor, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea Univ.

SYNOPSIS : Most important characteristics of calcareous sand are the particle angularity and hollow structure. These characteristics lead to the different behavior of calcareous sand compared to siliceous sand. This study performs a series of dilatometer test using calibration chamber, in order to analyze the effect of particle characteristic of calcareous sand on DMT indices. From experimental test, it is observed that the horizontal stress index(K_D) and dilatometer modulus(E_D) of calcareous Jeju sand is underestimated compared to siliceous sand. This is because the particle crushing during penetration induces the less contraction of the dilatometer membrane. A slightly smaller influence of particle crushing is reflected in E_D rather than K_D , because P_1 pressure reflects the deformation characteristics of un-crushed particle relatively well. It is also observed that K_D of Jeju sand is differently influenced by the vertical effective stress compared with that of siliceous sand.

Keywords : Calcareous sand, Dilatometer modulus, Horizontal stress index, Particle crushing

1. 서론

딜라토미터시험(DMT)은 비교적 경제적으로 각종 토질정수를 간단하고 반복적으로 평가할 수 있는 장점 때문에 콘관입시험(CPT)과 더불어 널리 이용되는 현장시험법이다. 현재까지 수많은 현장 및 실내 시험으로부터 DMT 측정값들의 상관관계 뿐만 아니라, 측정값들과 토질정수의 상관관계가 평가되었다. 사질토의 각종 토질물성치와 현장시험 결과와의 상관관계는 대형 챔버를 이용하여 정립되고 현장시험을 통해 검증되었다. 사질토 지반에서 현장 관입시험의 결과는 지반의 상대밀도나 주변 응력과 같은 상태 변수(state variables)와 입자 자체의 강도와 같은 고유변수(intrinsic variables)의 영향을 받는다. Bellotti et al.(1994), Jemolkowski et al.(2003) 등은 Ticino sand, Toyoura sand, Hokksund sand와 같은 규산염 모래(siliceous sand)를 이용한 실내 챔버시험으로부터 사질토의 상대변수 및 고유변수가 딜라토미터 시험에 미치는 영향을 분석하였다. 현재까지 입자 자체의 강도가 크고 비교적 입자 형상이 둥근 규산염 모래에 대해 많은 연구 성과가 보고되었으나, 입자 자체의 강도가 매우 약한 탄산염 모래(calcareous sand)에 대해서는 일차원 압축시험이나 삼축압축시험 등을 이용하여 기본적인 특성만이 분석되고 있다.

탄산염 모래(calcareous sand)는 연체동물과 녹조류의 껍데기나 산호와 같은 해안 유기물이 침전하여 생성된 모래로써, 입자가 각진 형상이므로 규산염 모래(siliceous sand)보다 높은 마찰각을 갖지만, 입자

내부와 표면에 발달된 기공에 의해 느슨한 상태로 조성된다. 남정만 등(2007)은 제주 해안지역에 분포하는 26종류의 모래를 분석하여 제주 해안 모래층은 화산암류가 풍화되어 형성된 육상기원의 규산염 모래와 조개 등의 어패류가 풍화되어 형성된 해양기원의 탄산염 모래가 혼재되어 분포하는 것을 확인하였다. 또한 이문주 등(2009)은 제주도 서귀포시 강정항 인근 해역에서 채취된 제주해사에서 40% 이상의 탄산염 성분을 확인하였으며, 이들 시료의 특성이 일반적인 탄산염 모래의 특성과 일치함을 보였다. 또한 대형 챔버시험을 통해 미고결 제주해사의 콘선단저항은 높은 압축성을 지닌 규산염 모래의 콘선단저항 특성을 지니는 것을 관찰하였다. 본 연구에서는 탄산염 모래의 입자특성이 델라토미터 시험 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 제주 해안에서 탄산염 모래로 구분되는 제주해사를 채취하여 기본 특성을 분석한 후, 이를 이용하여 챔버에 시료를 조성하고 델라토미터 시험을 수행하였다.

2. 시험계획

2.1 제주시 기본특성

본 연구에 사용된 제주해사는 제주특별자치도 서귀포시 강정항 일원의 해안 모래층에서 채취되었으며, 그림 1의 SEM(scanning electron mictograph) 분석결과, 모래입자는 매우 불규칙하고 각진 형상이며, 입자표면에 기공이 발달되어 있는 것으로 확인되었다. 시료의 입도분포는 그림 2와 같으며, 평균입경은 0.41mm이고, 균등계수(C_u)와 곡률계수(C_c)는 각각 1.61, 0.92로써, 본 제주해사는 통일분류법상 SP에 해당된다. 시료의 기본물성은 표 1에 정리되었다. 표 2에 표시된 시료의 성분분석(XRF) 결과, 제주해사는 규산염 모래의 주성분인 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 가 약 49.3%이며, 탄산염 성분의 주성분인 $CaO+LOI(loss\ of\ ignition)$ 이 약 42.6%로 나타났다. 즉 본 시료는 외형적으로 전형적인 탄산염 모래의 특성을 보이지만, 육상기원의 규산염 모래와 해양기원의 탄산염 모래가 혼재하는 것으로 분석되었다.

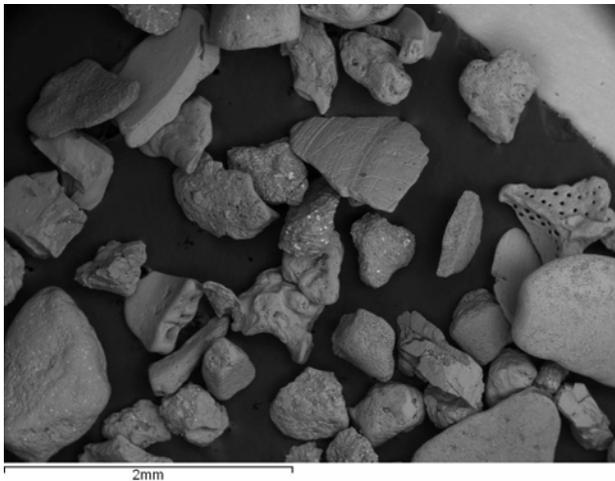


그림 1. 제주해사 SEM 분석

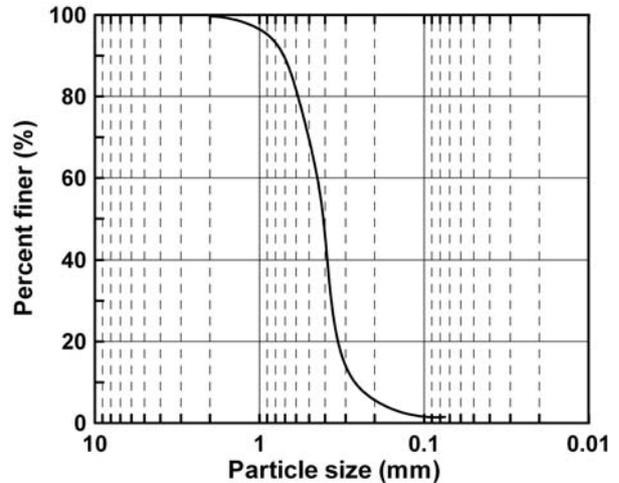


그림 2. 제주해사 입도분포곡선

표 1. 제주해사 XRF 분석결과

성분	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	MnO	Na_2O	P_2O_5	SiO_2	TiO_2	LOI
함유율(%)	11.09	24.24	6.12	1.10	3.43	0.08	2.07	0.36	31.96	1.21	18.31

표 2. 제주해사 기본물성

G_s	$D_{10}(\text{mm})$	$D_{50}(\text{mm})$	C_u	C_c	e_{\max}	e_{\min}	USCS
2.79	0.28	0.41	1.61	0.92	1.439	1.026	SP

2.2 챔버 딜라토미터 시험

본 연구에서 사용된 챔버시스템은 그림 3과 같이 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.

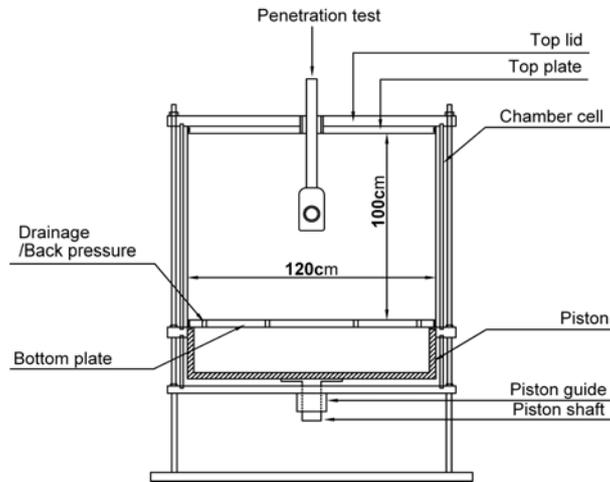


그림 3. 챔버 시스템과 딜라토미터 시험 모식도

챔버에서는 레이너 시스템을 이용한 건조낙사법으로 다양한 상대밀도의 시료를 균등하게 조성한다. 본 연구에서 사용된 레이너 시스템은 시료저장을 위한 직경 1.2m, 높이 1.0m의 상부 sand storage, 낙사되는 모래시료의 낙하량이 조절되는 개폐판(shutter plate), 그리고 적정 낙하고를 제공하기 위한 extension tube와 효율적인 시료 분산을 위한 분산시스템으로 구성된다. 목표 상대밀도 40, 60, 80%의 시료를 조성하기 위해 적절한 낙하고에서 시료를 낙하시킨 후, 상부 플레이트와 챔버셀을 12개의 룯드로 고정시켜 시료를 조성하였다. 조성된 시료의 중량과 부피를 측정하여 시료의 최종 상대밀도를 결정하였다. 연직구속압 50~400kPa와 K_0 상태의 수평구속압을 가한 후, 딜라토미터 시험을 수행하였다.

딜라토미터(DMT)는 폭 95mm, 두께 15mm, 길이 230mm인 노 모양의 관입체에 60mm 직경의 강철 멤브레인이 장착되어 있다. DMT 시험은 강철 멤브레인에 소정의 변위가 발생할 때의 압력(P_0 , P_1)을 측정하여, 이를 통해 수평방향 응력과 관련된 지반의 역학적 특성들을 추정한다. Marchetti(1980)는 DMT 시험 결과로부터 3개의 딜라토미터 지수를 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.

3. 시험결과 및 분석

3.1 수평응력지수 K_D

일반적으로 사질토의 상대밀도가 증가할수록 딜라토미터의 수평응력지수(K_D)가 증가하기 때문에, 상

대밀도와 K_D 의 경험적 관계식이 제시되었다(Robertson and Campanella 1986; Jamiolkowski et al. 2003). 그림 4는 제주해사와 Ticino sand의 상대밀도와 K_D 관계이다. 제주해사는 본 시험의 결과이며, Ticino sand는 Baldi et al.(1986)의 결과로부터 수집되었다. 그림 4에서 Ticino sand의 K_D 는 Jamiolkowski et al.(2003)이 제안식과 거의 일치하였다. 제주해사의 경우에는 Jamiolkowski et al.(2003)의 제안보다 약 65~85% 과소평가되었다. 사질토의 K_D 는 dilatometer 멤브레인을 관입 전 상태로 회복시키기 위해 필요한 “lift-off” 압력과 관계되기 때문에, 흙의 수평응력과 깊게 연관된다. 제주해사의 경우 규산염 모래와 비교하여 입자의 강도가 매우 약하기 때문에, dilatometer 관입 시 관입체 주변의 입자는 대부분 파쇄될 것이다. 이러한 입자 파쇄로 인해 규산염 모래보다 제주해사에 관입될 경우 dilatometer 멤브레인의 수축은 적게 발생되고, 따라서 더 작은 수평응력지수가 측정되었을 것이다. 그림 4는 또한 제주해사의 K_D 는 상대밀도와 구속압이 작은 경우에는 일반적인 경향보다 더욱 과소평가된 것을 보여준다. 이와 같은 결과는 관입도중 관입체 주변에서 추가로 발생하는 응력이 dilatometer 멤브레인의 강성을 초과할 수 없을 정도로 약하기 때문으로 판단된다.

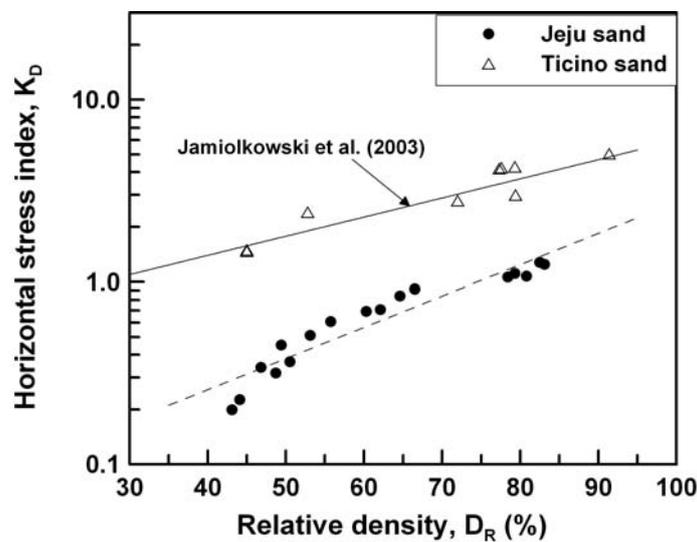


그림 4. 제주해사 수평응력지수(K_D)와 상대밀도(D_R) 관계

3.2 dilatometer 계수 E_D

dilatometer 계수(E_D)는 흙의 강성 뿐만 아니라 주변의 응력과 관계된다. Borden(1991)은 사질토의 dilatometer 계수가 평균유효응력과 선형관계를 만족함을 보였다. Konrad(1988)는 동일한 상태정수(state parameter)에서 평균유효응력으로 나누어진 dilatometer 계수(E_D/σ'_m)가 거의 일정함을 보였다. 그림 5는 상대밀도에 따른 제주해사의 정규화된 dilatometer 계수($E_D/(\sigma'_m)^{0.5}$)를 나타낸다. Ticino sand 뿐만 아니라, 제주해사의 경우에도 정규화된 dilatometer 계수와 상대밀도의 관계는 반대수축에서 선형적으로 증가하였다. 그러나 Ticino sand와 비교하여 제주해사의 경우 동일 상대밀도에서 dilatometer 계수가 과소평가되었다.

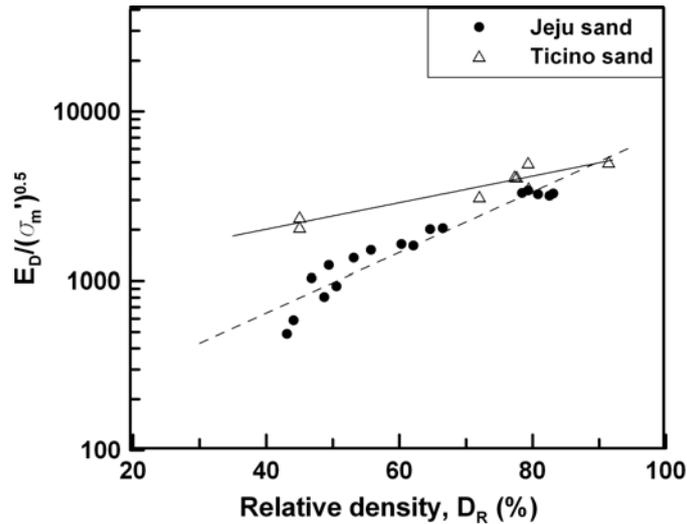


그림 5. 제주해사 dilatometer 계수(E_D)와 상대밀도(D_R) 관계

그림 6은 제주해사와 Ticino sand의 K_D 와 정규화된 E_D 의 관계이다. 동일한 정규화 E_D 에서 제주해사의 K_D 는 Ticino sand보다 작게 나타났다. 즉, 그림 4, 5와 같이 제주해사의 K_D 와 E_D 는 모두 Ticino sand와 같은 규산염 모래보다 작게 평가됨에도 불구하고, K_D 가 E_D 보다 입자파쇄와 같은 입자특성에 더 큰 영향을 받는 것을 의미한다. dilatometer 멤브레인을 1.1mm 확장시킬 경우 영향범위는 관입체 주변의 파쇄영역을 초과할 것이기 때문에, E_D 에 관계되는 P_1 이 K_D 와 관계되는 P_0 보다 파쇄되지 않은 입자 특성을 더 잘 반영할 수 있을 것이다. 즉, K_D 보다 E_D 가 입자파쇄의 영향을 더 적게 받는다.

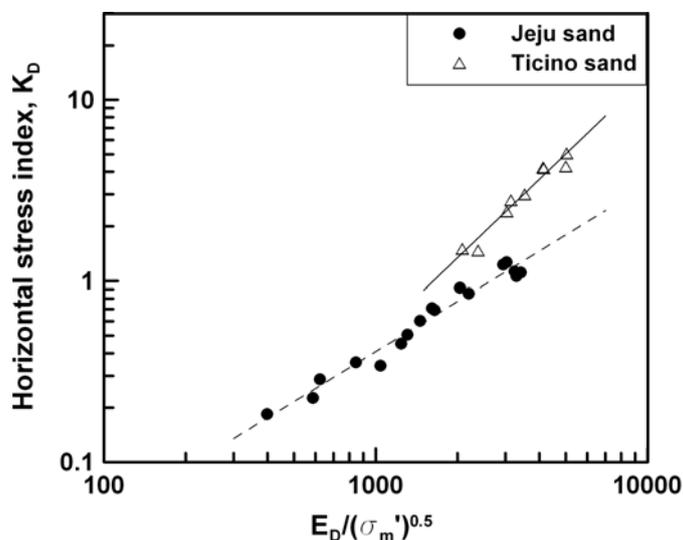


그림 6. 제주해사 dilatometer 계수(E_D)와 수평응력지수(K_D) 관계

3.4 상대밀도와 응력에 따른 K_D 변화

Jamiolkowski et al.(2003)은 Ticino sand, Toyoura sand, Hokksund sand를 이용한 챔버시험 결과로부터, 연직구속압 및 상대밀도에 따른 사질토의 K_D 를 식 1과 같이 제안하였다.

$$K_D = 6.6 \times 10^{-3} (\sigma_v')^{-0.25} (p_a)^{1.25} \exp(0.0229 D_R) \quad (1)$$

식 1은 연직구속압이 증가할수록 규산염 사질토의 K_D 는 점차 감소하고, 반면 상대밀도가 증가하면 K_D 도 증가함을 보여준다. 그림 7은 연직구속압 및 상대밀도에 따른 제주해사의 K_D 변화를 보여준다. 동일한 연직구속압에서 제주사의 K_D 는 상대밀도가 증가할수록 점차 증가하였으며, 이와 같은 결과는 일반적인 규산염 모래의 경향과 동일하다. 반면, 제주사의 K_D 는 연직구속압이 증가할수록 점차 증가하였으며, 이는 규산염 모래의 경향과 반대이다. 이와 같은 결과는 규산염 모래와는 다르게 제주해사의 경우 딜라토미터의 P_0 값의 증가가 연직구속압의 증가보다 더 뚜렷하기 때문이다. 전술한 바와 같이, 탄산염 모래의 압축성과 파쇄성은 규산염 모래보다 매우 크기 때문에, “lift-off” 압력 또한 작게 측정된다. 그러나 탄산염 모래의 입자 파쇄는 구속압이 클수록 더욱 뚜렷하며, 이는 딜라토미터 관입시 주변의 상대밀도를 점차 증가시킨다. 제주해사의 경우, 낮은 상대밀도(43.1~49.4%) 구간에서는 연직구속압이 50kPa에서 300kPa로 증가함에 따라 K_D 는 약 3.4배 증가하였다. 반면, 높은 상대밀도 구간(78.4~83.1%)에서는 약 1.3배의 K_D 증가가 나타났다. 즉, 상대밀도가 높아질수록 구속압의 증가가 제주해사의 K_D 증가에 미치는 영향이 점차 감소하였다. 입자파쇄에 의한 상대밀도의 변화는 시료의 초기 상대밀도가 증가할수록 점차 감소한다.

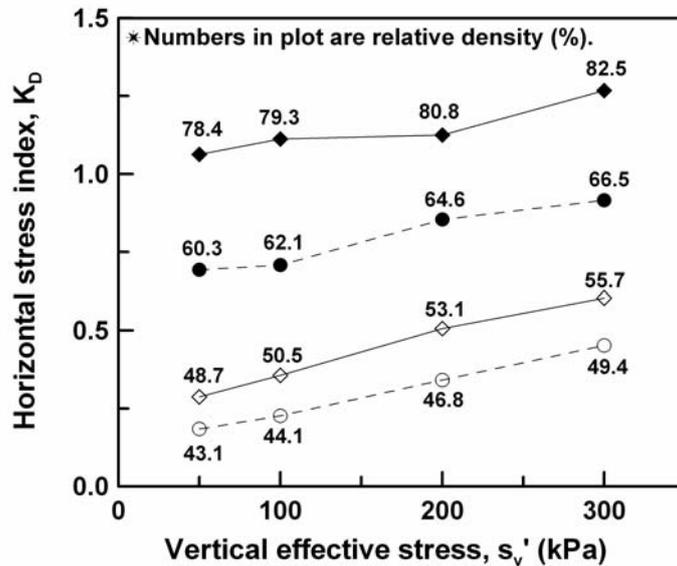


그림 7. 상대밀도와 응력이 제주사의 수평응력지수에 미치는 영향

4. 결론

본 연구에서는 탄산염 모래의 입자특성이 딜라토미터 시험 결과에 미치는 영향을 분석하기 위한 챔버 딜라토미터 시험을 수행하였다.

1. 제주해사의 딜라토미터 수평응력지수(K_D)는 일반적인 규산염 모래보다 과소평가되었다. 이는 입자강도가 약한 제주해사가 딜라토미터 관입에 의해 파쇄되고, 이로 인해 딜라토미터 멤브레인의 수축이 적게 발생되었기 때문이다.
2. 제주해사의 경우, 정규화된 딜라토미터 계수와 상대밀도의 관계는 반대수축에서 선형적으로 증가하였다. 그러나 Ticino sand와 비교하여 제주해사의 경우 동일 상대밀도에서 딜라토미터 계수가 과소평가되었다. 딜라토미터 계수(E_D)는 관입체 주변의 파쇄영역 이상의 입자특성을 반영하기 때문에, K_D 보다

E_D 가 입자 파쇄의 영향을 더 적게 받는다.

3. 일반적인 규산염 모래는 연직구속압이 증가할수록 K_D 는 점차 감소하고, 상대밀도가 증가하면 K_D 도 증가한다. 그러나 동일한 연직구속압에서 제주사의 K_D 는 상대밀도가 증가할수록 점차 증가하였으며, 이와 같은 결과는 일반적인 규산염 모래의 경향과 동일하다. 반면, 제주사의 K_D 는 연직구속압이 증가할수록 점차 증가하였다. 이와 같은 결과는 구속압이 증가할수록 관입체 주변의 입자파쇄로 인해 상대밀도가 점차 증가하기 때문으로 판단된다.

참고문헌

1. 남정만, 조성환, 김태형 (2007), "제주 해안지역 모래의 압축특성", 한국지반공학회논문집, 제 23권, 6호, pp.103-114.
2. 이문주, 김재정, 심재범, 임채근, 이우진 (2009), "제주연안 퇴적층의 고결평가", 한국지반공학회논문집, 제 25권, 11호, pp.105-115.
3. 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.
4. 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.
5. Borden, R.H. (1991), "Boundary Displacement induced by DMT Penetration", Proceedings of the 1st International Symposium on Calibration Chamber Testing, Potsdam, Elsevier, New York, NY, pp. 101-118.
6. 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.
7. 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.
8. Marchetti, S. (1980), "In situ tests by flat dilatometer", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.106, No.3, pp.299-321.
9. Robertson, P.K., and Campanella, R.G. (1986), "Estimating liquefaction potential of sands using the flat dilatometer", Geotechnical Testing Journal, 9(1), 38-40.