

CPT와 DMT를 이용한 남동해안 정규압밀 점토의 압축성 추정

Evaluation of Compressibility for Normally Consolidated South-east Coast Clay Using CPT and DMT

홍 성 진¹ Hong, Sung-Jin

채 영 호² Chae, Young-Ho

이 문 주³ Lee, Moon-Joo

이 우 진⁴ Lee, Woo-Jin

Abstract

A series of in-situ and laboratory tests were performed for the clayey soils of Busan area in order to develop the methods to evaluate the compressibility using CPT and DMT results. The laboratory tests show that the clayey layers of Busan areas are normally consolidated, and their compression indices are turned out to be 0.5~1.3. From the analysis of test results, correlation factors between the cone resistance and constrained modulus (α_m and α_n) are observed to decrease with increasing plasticity index, and the correlation factor between the dilatometer modulus and constrained modulus (R_M) increases with $1/I_D$. Based on these relationships, the methods evaluating the constrained modulus from CPT and DMT results are suggested. It is shown that the prediction method by CPT underestimates the constrained modulus of improved ground, whereas the prediction method by DMT is suitable for evaluating the constrained modulus of improved and unimproved ground.

요 지

본 연구는 CPT와 DMT를 이용한 부산지역 점토 압축성 추정에 관한 것으로, 이를 위해 부산신항과 녹산점토에 대해 현장시험 및 실내시험을 수행하였다. 압밀시험 결과 부산신항 및 녹산 점토는 정규압밀점토이며, 압축지수는 0.5~1.3로 나타났다. 분석결과에 의하면 콘저항치와 횡방향구속 변형계수의 상관관계수인 α_m 과 α_n 은 소성지수에 따라 감소하였으며, 딜라토미터 계수와 횡방향구속 변형계수의 상관관계수 R_M 은 $1/I_D$ 에 따라 증가하였다. 본 연구에서는 이러한 관계를 이용하여 횡방향구속 변형계수를 추정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법으로 횡방향구속 변형계수를 추정한 결과 CPT 추정방법은 개량 후 지반의 횡방향구속 변형계수를 과소평가한 반면, DMT 추정방법은 개량 전·후 지반 모두 횡방향구속 변형계수를 적절히 추정하였다.

Keywords : Compression index, Consolidation test, Constrained modulus, CPT, DMT

1. 서 론

토목구조물의 경제적인 설계와 안전한 시공을 위해 지반 물성치의 합리적인 결정은 매우 중요하다. 점토

의 압축특성을 나타내는 횡방향구속 변형계수(M)는 구조물 침하산정을 위한 중요한 물성값이다. 횡방향구속 변형계수는 압밀시험 등의 실내시험을 통해 구하거나, 표준관입시험(SPT), 콘관입시험(CPT), 딜라토미터시험

1 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Environ. & Arch. Engrg., Korea Univ.)

2 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environ. & Arch. Engrg., Korea Univ.)

3 정희원, 한화건설 과장 (Member, Manager, Hanwha Engrg. and Construction, Seoul, Korea)

4 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environ. & Arch. Engrg., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

(DMT) 등의 현장시험을 통해 추정할 수 있다. 실내시험으로 횡방향구속 변형계수를 산정할 경우 압축변형을 직접 측정할 수 있는 반면, 시료채취 및 시험에 많은 시간과 비용이 소요되며 시료 교란의 영향을 받는다. CPT와 DMT 결과를 이용한 횡방향구속 변형계수 추정은 빠르고 경제적이며 연속적으로 지반의 데이터를 획득할 수 있으나, 간접적으로 물성치를 추정하므로 지반조건에 맞는 적합한 추정식의 개발이 필요하다.

CPT는 원추형 프로브를 지반에 관입하면서 콘저항력(q_c), 마찰저항(f_s), 간극수압(u)을 측정하는 시험으로 지반조사 및 지반구조물 설계에 널리 사용되고 있다(Lunne et al. 1997, Robertson 2009). Sanglerat(1972)는 횡방향구속 변형계수(M)와 콘저항치(q_c) 간의 관계를 제안하고 지반특성에 따라 상관계수를 제시하였으며, Jones and Rust(1995)는 남아프리카 충적점토에 대한 상관계수를 제시하였다. 또한 Senneet et al.(1989)은 횡방향구속 변형계수(M)와 유효콘저항치(q_e) 간의 관계를 제안하였고, Senneet et al.(1989)과 Kulhawy and Mayne(1990)에 의해 상관계수가 제안되었다. DMT는 1970년대 Marchetti에 의해 개발되어 지반조사에 널리 사용되고 있다(Marchetti 2006, Robertson 2009). DMT는 SPT나 CPT에 비해 관입 시 상대적으로 적은 주변지반 변형이 발생하므로 DMT를 통해 지반의 횡방향구속 변형계수, 응력이력, 횡방향 토압계수 등을 추정하는 연구가 활발히 진행되었다(Marchetti 1980, Marchetti et al. 2001, Mayne 2001, Monaco et al. 2006, Iwasaki et al. 1991, Lutenegger 1988, Cruz et al. 2006).

본 연구에서는 현장시험 결과로부터 점성토의 횡방향구속 변형계수를 추정하는 방법을 제안하기 위해, 부산지역의 점토에 대해 CPT 및 DMT 시험 그리고 압밀시험 및 기본물성시험을 수행하였다. 실내 및 현장시험 결과를 분석하여 횡방향구속 변형계수를 추정하는 방법을 제시하고, 각 방법의 신뢰성을 검증하였다.

2. 시험 내용 및 방법

본 연구에서는 낙동강 하구에 위치한 부산신항 및 녹산산업단지의 점토 층을 대상으로 시험을 실시하였다. 부산신항 현장은 원래 바다였으나 항만조성을 위해 6m 정도의 모래로 매립하고 연직배수재를 타설한 후 13m 두께의 사석하중으로 지반개량을 하였다. 시험현장 경위도는 E128°47'56", N35°04'30"이다. 녹산 현장은 원지반 점토

에 4m 정도 매립을 한 지역으로, 경위도는 E128°53'28", N35°06'17"이다. 각 현장에서 CPT와 DMT를 실시하였으며, 비교를 위해 동일 위치에서 피스톤 샘플러로 채취한 시료에 대해 실내시험을 수행하였다.

2.1 실내시험

본 연구에서는 대상지반의 압축특성을 파악하기 위하여 기본 물성시험과 함께 단계하중(incremental loading; IL) 및 일정변형률(constant rate of strain; CRS) 압밀시험을 실시하였다. IL 압밀시험의 경우 하중증가비 1.0으로 10kPa에서 1280kPa까지 하중을 증가시켰으며, CRS 압밀시험의 경우 액성한계에 따라 0.04%/min ~ 0.004%/min의 속도로 1500kPa까지 시험을 수행하였다. 부산신항 현장은 지반개량 전/후에 시험을 실시하였는데, 개량 전 지반은 GL-8m부터 GL-45m까지 시료를 채취하여 IL 및 CRS 압밀시험을, 개량 후 지반은 GL-22m부터 GL-40m까지 시료를 채취하여 IL 압밀시험을 실시하였다. 녹산 현장은 GL-13m부터 GL-30m까지 시료를 채취하여 IL 압밀시험을 수행하였다.

2.2 현장시험

CPT는 콘단면적 10cm², 마찰슬리브 면적 150cm²인 u₂형식의 피에조콘을 2cm/sec의 속도로 관입하면서 q_c , f_s 그리고 u_2 를 측정하였다. 부산신항의 경우 지반개량 전 GL-6m부터 GL-50m까지, 지반개량 후 GL-20m부터 GL-34m까지 각각 2개 시험 공에서 CPT시험을 실시하였다. 녹산 현장의 경우 GL-12m부터 GL-40m까지 시험을 수행하였다.

DMT는 60mm 직경의 강철 멤브레인이 장착되어 있는 폭 95mm, 두께 14mm 크기의 관입체를 지중에 관입시키며 20cm간격으로 시험을 수행하였다. 강철 멤브레인이 0.05mm와 1.1mm 팽창할 때와 다시 0.05mm로 수축할 때의 압력을 측정한 후 이를 보정하여 p_0 , p_1 , p_2 를 산정하고, 이로부터 재료지수(I_D), 횡방향응력지수(K_D), 딜라토미터계수(E_D)를 산정한다(Marchetti 1980, Marchetti et al. 2001). 부산신항의 경우 지반개량 전에는 GL-6m부터 GL-31m까지, 지반개량 후에는 GL-20m부터 GL-33m까지 각각 2개 시험 공에서 DMT를 수행하였다. 녹산 현장은 GL-6m부터 GL-34m까지 DMT를 수행하였다.

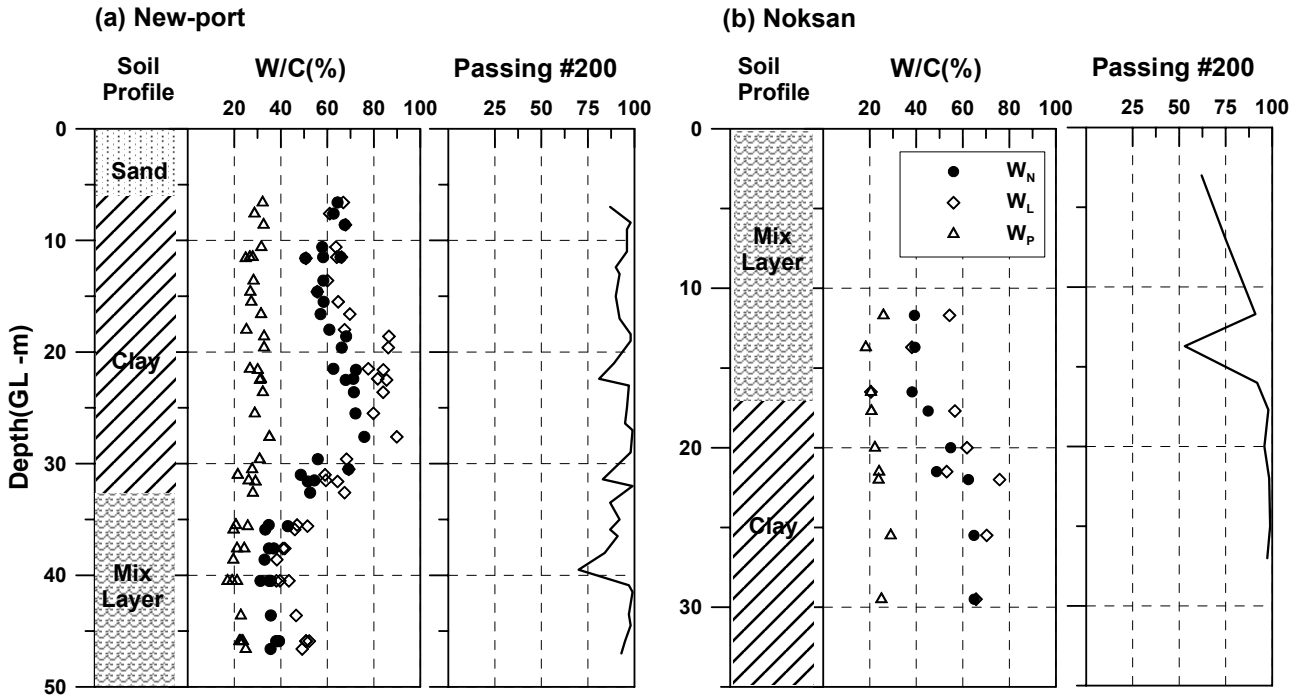


그림 1. 대상현장의 지층 및 기본 물성시험 결과

3. 시험 결과

3.1 지층구성 및 기본 물성치

그림 1은 각 시험현장의 지층 및 기본 물성치를 심도에 따라 나타낸 것으로, 부산신항 현장의 경우 지반개량 전의 물성치를 나타낸 것이다. 부산신항 현장은 GL-6m 까지 매립 모래층, GL-6m~GL-32m 점토층, GL-32m 이상 심도에서는 점토와 모래가 혼재하는 층이 존재한다. 녹산 현장은 GL-17m까지 점토와 모래의 혼재 층이고, 이후 부산신항과 유사한 균질한 점토층이 나타난다. 부산신항과 녹산 현장의 함수비 및 액성한계는 30%~90%, 소성한계는 20%~35% 정도로 분포하며, 함수비와 액성 및 소성한계는 GL-28m까지 증가하다 더 깊은 심도에서 감소한다. 통일분류법에 의하면 점토층은 대부분 CH, 혼재층은 CL로 분류되었다. 두 지역 시료의 200번체 통과량을 보면 균질한 점토층에서는 90% 이상이며, 점토와 모래가 혼재하는 층에서는 50~90% 정도이다. 부산신항과 녹산 지역은 낙동강 하구 퇴적지반으로 점토층의 경우 심도에 따른 물성의 변화가 유사하게 나타났으며, XRD 분석 결과에 의하면 주요 광물질 역시 illite 계열로 동일하게 나타났다(홍성진 등 2009).

3.2 압밀시험 결과

횡방향구속 변형계수는 실내압밀시험 결과인 $\epsilon_v - \sigma'_v$ 그래프의 기울기로부터 구한다. 이 방법은 압밀시험 결과로부터 직접 횡방향구속 변형계수를 구하는 장점이 있는 반면, 시료교란 및 데이터 부족 등으로 정확한 값을 산정하기 어려운 단점이 있다. 그림 2는 정규압밀 점토에 대해 현장과 실내 압밀시험 시 예상되는 $\epsilon_v - \sigma'_v$ 관계를 개념적으로 나타낸 것이다. 실내시험을 위한 시료

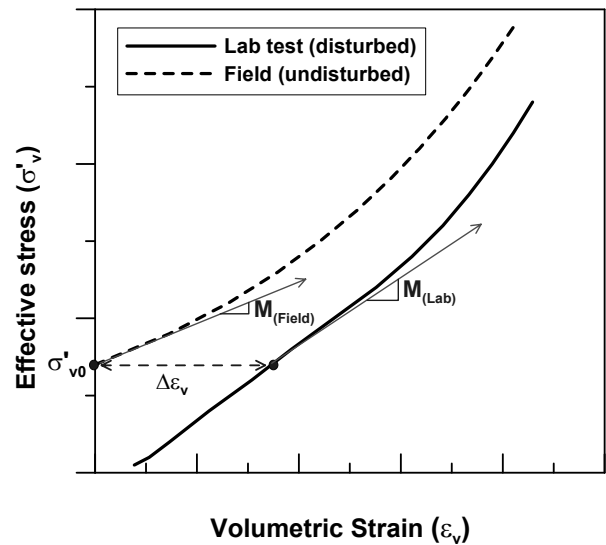


그림 2. 현장 및 실내시험의 $\epsilon_v - \sigma'_v$ 관계

는 교란으로 인해 압축변형($\Delta\varepsilon_v$)이 발생하므로 압밀시험 결과로부터 산정한 횡방향구속 변형계수는 현장 값보다 과대평가된다. 또한, II 압밀시험의 경우 측정데이터 사이를 임의로 연결하여 기울기를 구하므로 횡방향 구속 변형계수를 정확히 산정하기 힘들다.

횡방향구속 변형계수를 추정하는 다른 방법으로는 $e\text{-log } \sigma'_v$ 관계에서 압축지수(C_c)를 산정한 후 식 (1)을 이용하는 것이다. 이 방법은 데이터가 적은 II 압밀시험에서도 횡방향구속 변형계수 산정이 용이하다. 압축지수 역시 시험 시 시료 교란으로 인해 과소평가되므로, 본 연구에서는 교란효과를 보정하는 Schmertmann(1955) 방법으로 압축지수를 구하고 식 (1)을 이용하여 횡방향 구속 변형계수를 산정하였다. Schmertmann(1955) 방법으로 보정한 압축지수는 $e\text{-log } \sigma'_v$ 그래프에서 직접 구한 압축지수에 비하여 약 30% 정도 크게 나타났는데, 지반 개량에 따른 부산신항 침하량을 분석한 결과 보정된 압

축지수가 침하량을 적절히 예측하였다.

$$M = \frac{\Delta\sigma'_v}{\varepsilon_v} = \frac{2.3(1+e_0)\sigma'_{v0}}{C_c} \quad (1)$$

그림 3은 압밀시험에서 구한 과압밀비와 압축지수로, 부산신항의 지반개량 후 결과는 지반개량 전 지표고(GL)로 환산하여 표기하였다. 두 지역의 과압밀비는 0.7~1.5 범위로 대상지반은 정규압밀 점토로 판단되며, 이는 다른 선행연구자들에 결과와도 일치한다(김상규와 김윤태 2006, Chung et al. 2002, Lim et al. 2003). 부산신항과 녹산현장 점토의 압축지수는 0.5~1.3으로 나타났으며, 액성한계와 유사하게 심도에 따라 변화하였다. 지반개량 후 부산신항 압축지수는 개량 전보다 심도 30m 이하에서는 약간 감소하였으며, 심도 30m 이상에서는 변화가 없었다.

그림 4는 압밀시험으로 구한 횡방향구속 변형계수를 도시한 것으로, 본 연구에서 M 은 압축지수와 식 (1)을 이용하여 산정하였다. 부산신항과 녹산 지역의 M 은 500kPa~3500kPa과 1200kPa~2000kPa정도로 분포한다. 부산신항의 경우 GL-35m까지 횡방향구속 변형계수가 심도에 따라 일정하게 증가하다 혼재층이 나타나는 GL-35m 이후에 기울기가 급격히 증가하는 양상이 나타났다. 지반개량에 의한 횡방향구속 변형계수의 증가는 지표면 가까울수록 크게 나타났는데, 이것은 상부층의 지반개량 효과가 큰 것을 의미한다. 녹산 현장의 경우 횡방향 구속 변형계수가 서서히 감소하다가 균질한 점토층이 나타나는 GL-20m 이후에는 구속응력증가로 인해 증가하였다.

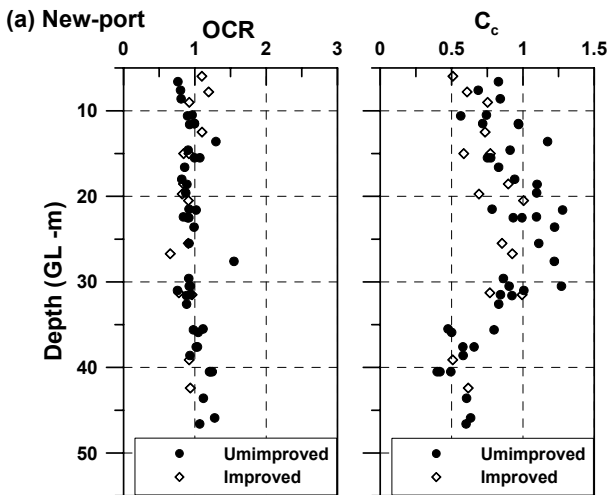


그림 3. 압밀시험으로 구한 OCR과 C_c 의 분포

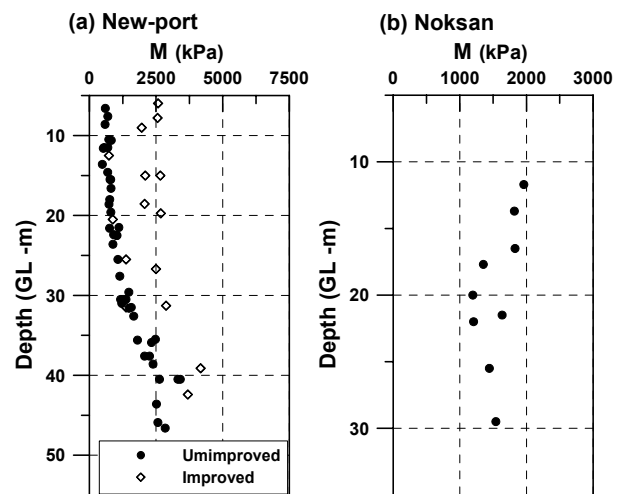


그림 4. 압밀시험으로 구한 횡방향구속 변형계수

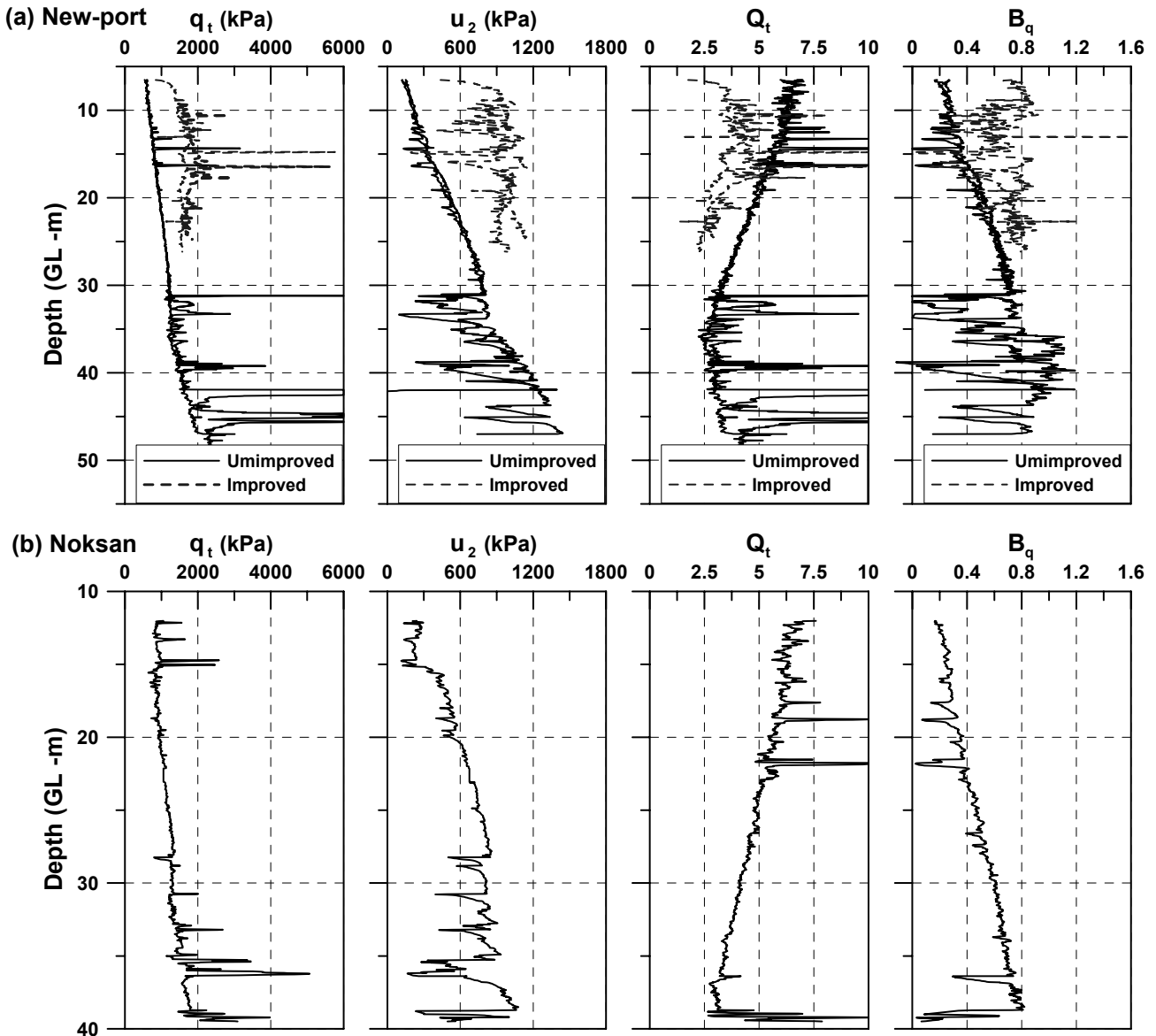


그림 5. CPT 결과

3.3 현장시험 결과

그림 5는 두 현장의 CPT 결과이다. 지반개량 전 부산신항 현장의 q_t 와 u_2 는 GL-30m까지는 심도에 따라 일정하게 증가하며, 이후 협재된 실트/모래층의 영향으로 복잡한 형상을 나타내며 심도에 따라 증가하는 경향을 보인다. 두 시험공의 결과는 협재된 실트/모래층 위치와 두께의 차이에 따라 약간의 차이를 보이지만 전반적으로 비슷한 경향을 보인다. 정규화된 콘저항치 Q_t 는 지반개량 전에는 7에서 3 정도로 GL-30m까지 감소하다 이후 복잡한 양상을 나타내며, 간극수압비 B_q 는 지표면에서 심도 GL-30m까지 0.2에서 0.7로 증가한 후 복잡하게 분포한다. 지반개량 후 부산신항 현장의 q_t 와 u_2 는 각각

1700kPa과 900kPa 정도로 나타났으며, 심도에 따라 비교적 일정한 분포를 보였다. 지반개량 후 Q_t 와 B_q 는 각각 2.5~5.0과 0.5~0.9 정도로 나타났는데, Q_t 는 지반개량 전에 비하여 감소하였으며 B_q 는 증가하였다. 녹산현장의 q_t 는 GL-20m까지 900kPa 정도로 일정하다 이후 심도에 따라 증가하는 것으로 나타났으며, u_2 는 GL-30m까지 증가하다 이후 복잡한 형상을 보였다. 녹산현장의 Q_t 와 B_q 는 각각 3~7과 0.2~0.8로, 심도에 따른 변화양상이 부산신항 결과와 유사하다.

그림 6은 두 현장의 DMT 결과이다. 부산신항 현장에서는 실트/모래 층을 제외하고는 균질한 지반특성이 나타났다. 재료지수(I_D)는 지반개량 전 0.1~0.3 정도로 심도에 따라 약간씩 증가하였으나, 지반개량 후에는 0.3

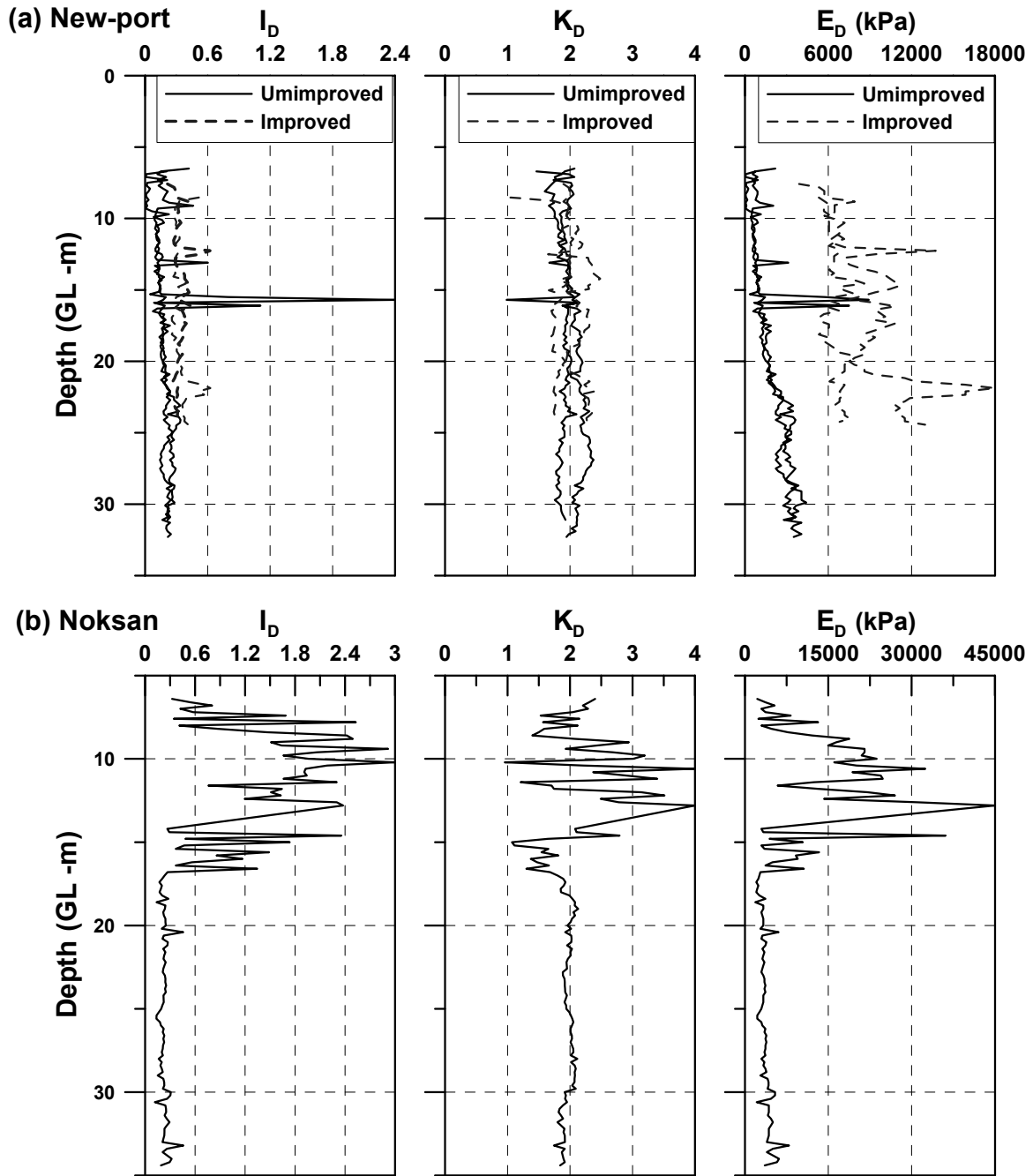


그림 6. DMT 결과

정도로 일정하게 나타났다. 횡방향응력지수(K_D)는 지반 개량 전·후 모두 1.7~2.3 정도로 나타났는데, 이는 정규압밀된 점토층임을 의미한다. 지반개량 전 딜라토미터 계수(E_D)는 500kPa~4000kPa로 심도가 증가함에 따라 증가하였으며, 지반개량 후에는 5000kPa~8000kPa 정도로 분포하였다. 녹산 현장에서는 I_D 와 K_D 는 GL-17m까지의 혼재층에서는 복잡하게 나타났으나, 이후 점토층에서는 각각 0.25와 2.0 정도로 일정하게 나타났다. 혼재층에서 E_D 는 2000kPa~5000kPa에서 불규칙하게

나타났으며, 이후 점토층에서는 2000kPa~4000kPa로 심도에 따라 서서히 증가하였다.

4. 결과 분석

식 (2)는 CPT의 콘저항치와 횡방향구속 변형계수 간의 관계이며, q_t 는 u_2 형 피에조 콘 선단 부등면에 발생하는 간극수압을 보정한 콘저항치이다(Campanella and Robertson 1982). Senneset et al.(1989)은 Janbu(1963)의

변형계수 개념을 이용하여 유효 콘저항치로부터 횡방향 구속 변형계수 추정방법을 식 (3) 및 (4)와 같이 제안하였다. 여기서 σ_{v0} 는 연직방향 전응력이며, α_i 와 α_n 는 과압밀 및 정규압밀 점토에서의 상관계수이다. Sanglerat(1972)는 콘저항치와 토질특성에 따라 상관계수 α_m 값을 제시하였으며, Jones and Rust(1995)는 남아프리카 충적점토의 α_m 을 2.2~3.3으로 제시하였다. Senneset et al.(1989)은 α_i 와 α_n 는 대부분의 점토에서 5~15와 4~8의 범위를 나타낸다고 하였으며, Kulhawy and Mayne(1990)은 α_n 을 8.25로 제안하였다.

$$M = \alpha_m \times q_c = \alpha_m \times q_t \quad (2)$$

$$M_i = \alpha_i \times q_n = \alpha_i \times (q_t - \sigma_{v0}) \quad (\text{OC 영역}) \quad (3)$$

$$M_n = \alpha_n \times q_n = \alpha_n \times (q_t - \sigma_{v0}) \quad (\text{NC 영역}) \quad (4)$$

Marchetti(1980, 2001)는 DMT결과로부터 횡방향 구속 변형계수를 추정하는 식 (5)를 제안하였다. Marchetti et al.(2001)은 상관계수 R_M 이 횡방향응력지수(K_D) 및 재료지수(I_D)의 함수이며, 대부분 1~3정도의 범위를 나타낸다고 하였다.

$$M = R_M \times E_D \quad (5)$$

선행연구자들은 M- q_c 또는 M- E_D 관계를 경험적인 방법으로 제안하였다. 본 연구에서는 압밀시험 결과와 CPT 및 DMT 결과를 이용하여 상관계수들을 산정하고, 소성지수(PI), 정규화 콘저항치(Q_t), 간극수압비(B_q) 그리고 재료지수 등과 비교하여 지반특성이 상관계수에 미치는 영향을 분석하였다. 정규화 콘저항치와 간극수압비는 식 (6) 및 (7)과 같으며, 토질분류에 주로 사용된다 (Robertson 1990, 이선재 1997).

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \quad (6)$$

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (7)$$

4.1 CPT 결과 분석

본 연구에서는 압밀시험결과에 Schmertmann(1955) 방법과 식 (1)을 적용하여 횡방향구속 변형계수를 구하고 이를 CPT 결과와 비교하여 식 (2)와 식 (4)의 상관계

수 α_m 과 α_n 을 산정하였다. 그림 7은 상관계수 α_m 과 소성지수, 정규화 콘저항치 그리고 간극수압비의 관계를 나타낸 것으로, 상관계수 α_m 은 0.7~2.2 범위에 존재하였다. 그림 7에서 점선은 부산신항(지반개량 전) 및 녹산 현장의 결과를 분석한 경향선이다. PI- α_m 관계를 보면 α_m 은 소성지수에 따라 감소하며, PI=35 부근에서 α_m 의 감소 기울기가 줄어드는 것으로 나타나 PI=35를 기준으로 2개의 경향선으로 표현하였고, 경향선의 결정계수(R^2)는 0.67이다. 그림 7의 Q_t - α_m 관계에 의하면 α_m 은

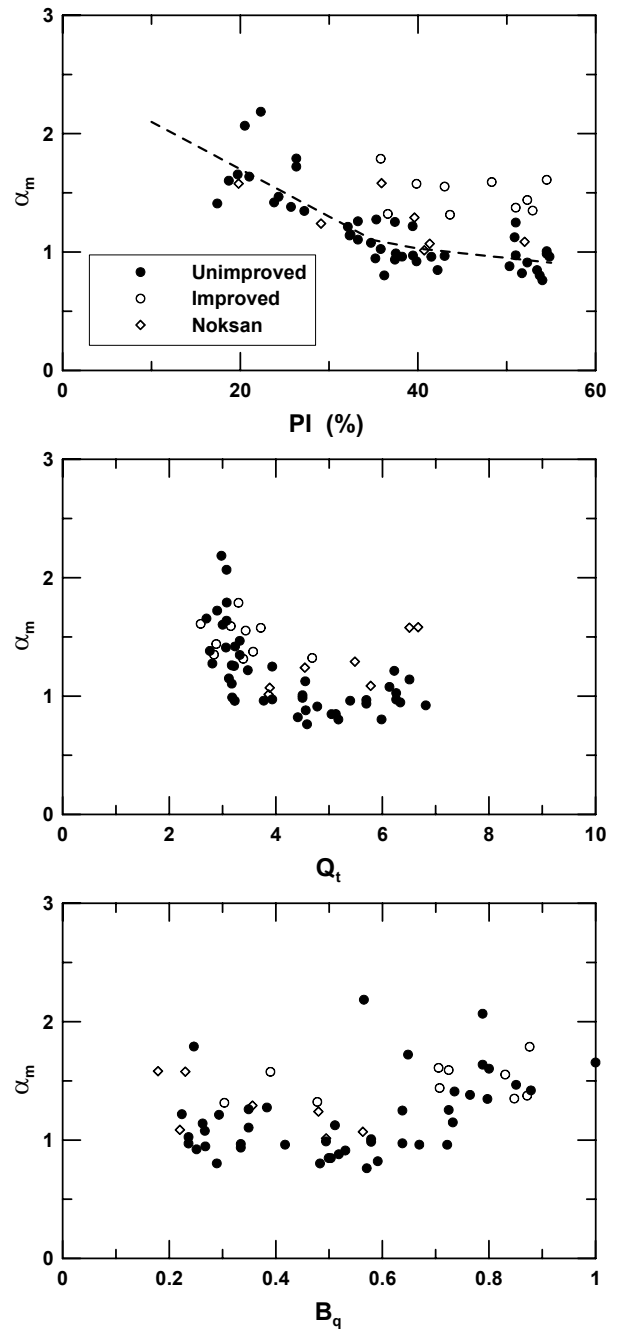


그림 7. 지반특성에 따른 상관계수 α_m

$Q_t < 5$ 에서는 정규화 콘저항치가 증가함에 따라 감소하는 경향이 보이지만, Q_t 가 커질수록 이러한 경향이 불명확해져 경향선을 표시하기 어려웠다. B_q - α_m 관계를 보면 α_m 은 간극수압비가 증가함에 따라 증가하는 경향이 보이지만, 데이터의 분산이 심해 명확한 경향선을 표시하기가 어려웠다. 그림 7에서 지반개량 후 부산신항 결과를 보면 α_m 은 개량 전에 비해 약간 증가하였으며, 이로 인해 지반개량 후 PI - α_m 관계는 지반개량 전의 PI - α_m 경향선과 차이를 보였다. 그림 7의 지반개량 후 Q_t - α_m

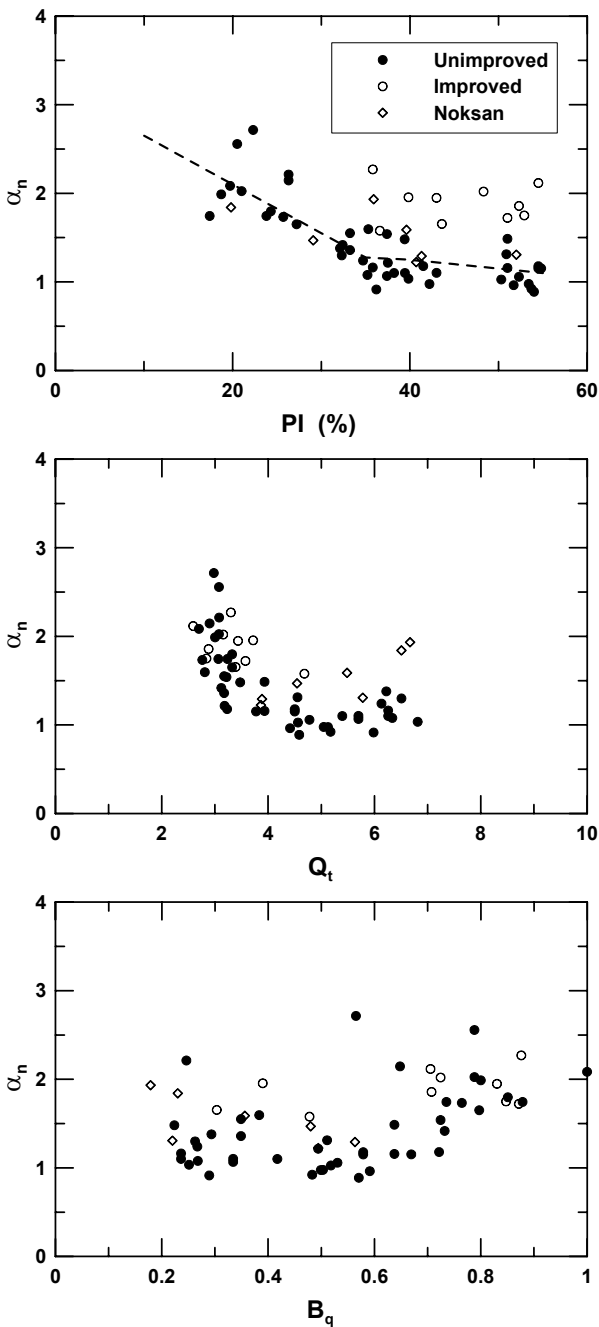


그림 8. 지반특성에 따른 상관계수 α_n

관계는 지반개량 전과 유사하게 나타나는데, 이것은 지반개량으로 인해 α_m 뿐 아니라 Q_t 가 변하였기 때문이다. 지반개량 후의 B_q - α_m 관계는 개량 전과 유사하게 나타나지만, 경향이 명확하지 않았다.

그림 8은 상관계수 α_n 과 소성지수, 정규화 콘저항치 그리고 간극수압비의 관계를 나타낸 것으로, α_n 은 0.8~2.7 정도로 α_m 에 비해 큰 값을 갖는다. 그림 8의 점선은 부산신항(지반개량 전) 및 녹산현장 결과에 대해 분석하여 경향선을 표시한 것으로, α_m 과 마찬가지로 PI - α_n 관계의 경우 $PI=35$ 를 기준으로 구분하여 경향선을 표시하였다. 결정계수는 0.66으로 PI - α_m 추세선에 비해 약간 작게 나타났다. Q_t - α_n 과 B_q - α_n 관계는 Q_t - α_m 과 B_q - α_m 관계와 마찬가지로, 변화경향이 불명확하고 데이터의 분산이 심해 명확한 경향선을 표시하기가 어려웠다. 그림 8의 지반개량 후 부산신항 결과를 보면, 지반개량에 따라 α_n 은 증가하여 개량전 PI - α_n 경향선과 차이가 났다.

4.2 DMT 결과 분석

Marchetti(1980, 2001)는 다양한 지반에 대해 DMT 결과로부터 횡방향구속 변형계수를 추정하는 방법을 제안하였다. 그림 9는 Marchetti 방법으로 추정된 횡방향구속 변형계수(M_{DMT})를 압밀시험에서 산정한 M 과 비교한 것이다. 그림 9에 의하면, M_{DMT} 는 M 에 비해 2.4배 정도 크게 나타났다. M_{DMT} 가 부산점토의 횡방향구속 변형계수를 과대평가하는 이유 중 하나는 Marchetti가 압밀시험 ε_v - σ'_v 그래프에서 구한 횡방향구속 변형계수

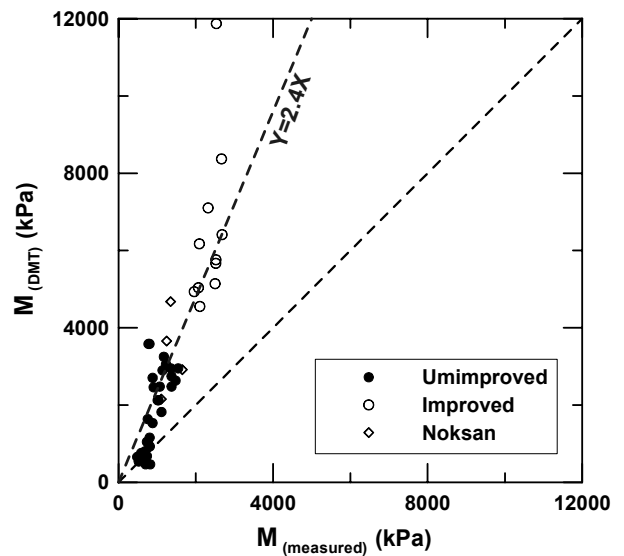


그림 9. M_{DMT} 와 압밀시험으로 산정한 횡방향구속 변형계수

와 DMT 결과를 비교하여 M_{DMT} 추정방법을 제안했기 때문이다. 전술한 바와 같이 $\varepsilon_v-\sigma'_v$ 그래프에서 구한 횡방향구속 변형계수는 교란효과와 시험자에 따라 차이가 발생하는 문제가 있다. 압밀시험 분석결과 $\varepsilon_v-\sigma'_v$ 그래프에서 구한 횡방향구속 변형계수는 식 (1)로 구한 압밀계수에 비해 1.8배 정도 크게 나타났으며 M_{DMT} 보다는 1.4배 정도 작게 나타났다. 즉, Marchetti의 추정방법은 부산점토의 횡방향구속 변형계수를 과대평가 한다. 국내점토에 적합한 추정방법을 구하기 위해, 압밀시험과 DMT 결과를 비교하여 식 (5)의 상관계수 R_M 을 산

정하였다. 그림 10은 상관계수 R_M 과 소성지수 및 재료지수, 그리고 재료지수의 역수($1/I_D$)간의 관계를 그린 것이다. 그림 10에 의하면, R_M 은 0.2~1.6 정도로 α_n 이나 α_m 에 비해 값이 작았다. R_M -PI관계에 의하면 R_M 이 소성지수에 따라 감소하는 듯 하나 현장 별로 차이가 커서 경향성을 파악하기 어려웠다. R_M - I_D 관계를 보면 R_M 은 I_D 에 역으로 비례하는 것으로 관찰되어, R_M 과 $1/I_D$ 를 비교하여 보았다. R_M - $1/I_D$ 의 기울기는 $1/I_D$ 가 증가함에 따라 커지는 것으로 나타나 그림 10에서와 같이 $1/I_D$ 의 2차식으로 경향선을 표시하였다.

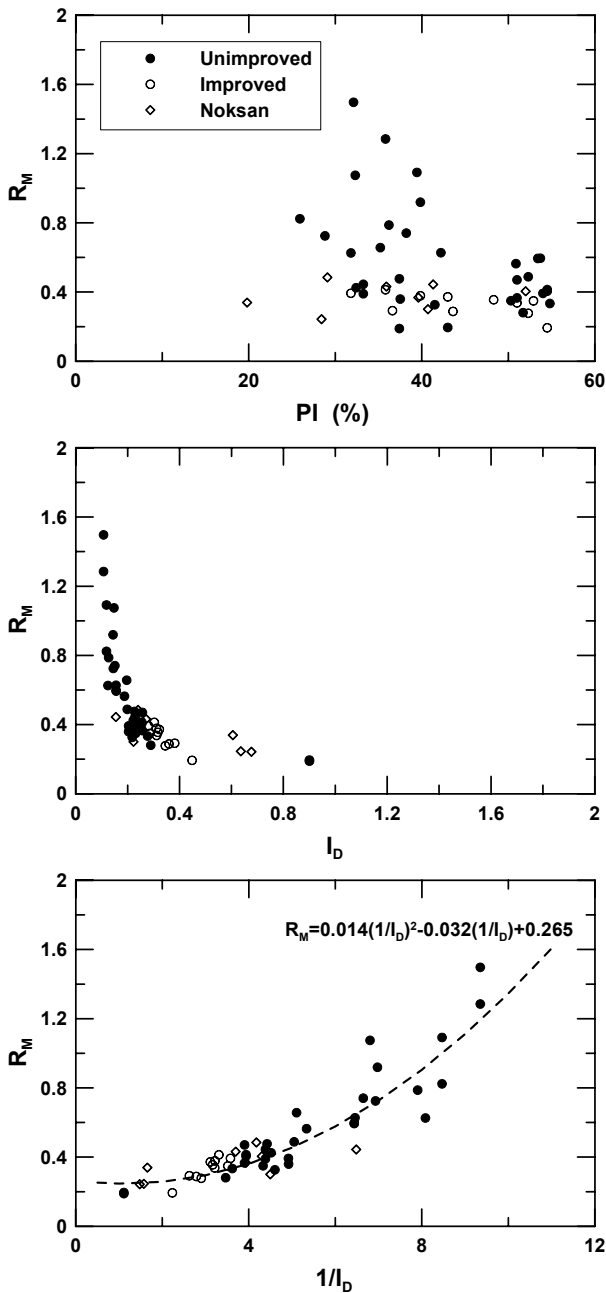


그림 10. 지반특성에 따른 상관계수 R_M

4.3 CPT와 DMT를 이용한 점토의 압축성 추정

위의 분석결과에 의하면 CPT 상관계수 α_m 과 α_n 은 소성지수와, DMT 상관계수 R_M 은 $1/I_D$ 와 높은 상관성을 보인다. 표 1은 본 연구에서 제안된 상관계수와 지반 물성치의 관계를 정리한 것으로, 부산산향의 지반개량 전 데이터와 녹산현장의 데이터를 바탕으로 하였다. α_m 및 α_n 과 소성지수 관계식은 $PI=35$ 를 경계로 각 2개 식으로 정리하였으며, R_M 은 $1/I_D$ 의 2차식으로 관계식을 정리하였다. 그림 11은 CPT와 DMT로 추정된 값과 압밀시험으로부터 구한 횡방향구속 변형계수를 비교한 것이다. 그림 내 점선은 오차율(percentage error) 0%, 20% 그리고 50%를 표시한 것으로, 두 방법 모두 최대 오차율은 50% 미만이다.

본 연구에서는 MPE(Mean Percentage Error)와 MAPE(Mean Absolute Percentage Error)를 이용하여 제안된 추정방법의 정확성을 비교하였다(표 2). MPE는 추정오차의 평균값으로 식 (8)과 같이 산정한다. MPE는 추정식이 추정값을 과대 또는 과소평가하는지 확인하며 추정식이 정확한 추정을 할수록 MPE는 0에 가깝다. MAPE는 추정오차 절대값의 평균으로 식 (9)과 같이 구한다. MAPE 값이 작을수록 추정방법의 정확성이 높음을 의미한다.

표 1. 상관계수 추정식

구분	조건	관계식
$PI-\alpha_m$	$PI(\%) < 35$	$\alpha_m = 2.5 - 0.04PI$
	$PI(\%) \geq 35$	$\alpha_m = 1.35 - 0.008PI$
$PI-\alpha_n$	$PI(\%) < 35$	$\alpha_n = 3.2 - 0.055PI$
	$PI(\%) \geq 35$	$\alpha_n = 1.65 - 0.01PI$
I_D-R_M		$R_M = 0.014(1/I_D)^2 - 0.032(1/I_D) + 0.265$

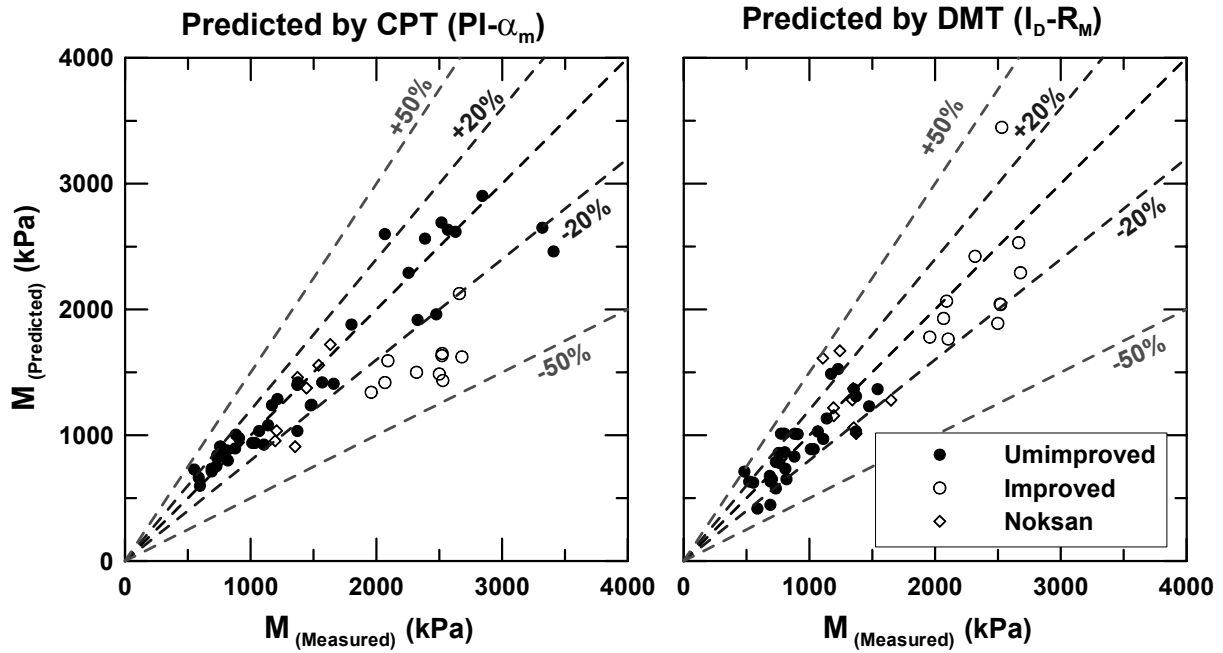


그림 11. 제안식으로 추정된 횡방향구속 변형계수와 측정된 횡방향구속 변형계수 비교

표 2. 추정방법 별 오차분석

추정방법	대상현장	MPE	MAPE
CPT (PI- α_m)	개량 전 부산신항 & 녹산	0.4 (%)	11.1 (%)
	개량 후 부산신항	-33.5 (%)	33.5 (%)
CPT (PI- α_n)	개량 전 부산신항 & 녹산	2.2 (%)	12.9 (%)
	개량 후 부산신항	-36.1 (%)	36.1 (%)
DMT(R_M)	개량 전 부산신항 & 녹산	0.3 (%)	14.8 (%)
	개량 후 부산신항	-5.4 (%)	13.2 (%)

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{f_i - a_i}{a_i} \quad (\%) \quad (8)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{f_i - a_i}{a_i} \right| \quad (\%) \quad (9)$$

여기서, a_i 는 측정값(참 값)이고 f_i 는 추정값이다.

표 2를 보면 CPT 추정방법 중에서는 α_m 을 이용한 방법이 α_n 을 이용한 방법에 비해 MAPE가 작아 α_m 을 이용한 추정방법이 더 적합한 것으로 나타났다. 그림 11과 표 2에 의하면 CPT 추정방법은 지반개량 후 부산신항에 대해서는 횡방향구속 변형계수를 30% 이상 과소평가하였다. 반면, DMT 추정방법은 부산신항(지반개량 전)과 녹산 현장 추정 시 CPT 추정방법보다 MAPE가 약간 컸으나, 지반개량 후 횡방향구속 변형계수를 적절하게 평가하였다. 소성지수의 경우 지반의 고유한 특

성으로 응력조건 등에 영향을 받지 않는 물성치인 반면, I_D 는 지반의 공학적 특성을 나타내는 물성치로 응력조건 등에 영향을 받는다. 이러한 이유로 소성지수를 이용하는 CPT 추정방법은 지반개량 효과를 정확히 반영하지 못하지만, I_D 를 이용한 DMT 추정방법은 지반개량 효과를 반영하는 장점이 있는 것으로 판단된다. 해안 연약지반위에 건설되는 구조물들은 대규모 프리로딩 공법으로 지반개량을 한 후 구조물을 건설하는 경우가 많다. 그러므로 실제 구조물은 원지반이 아닌 개량 후 지반에 건설되므로 개량된 지반의 특성을 파악하여야 한다. 이러한 점에서 원지반과 개량된 지반의 횡방향구속 변형계수를 동시에 적절하게 평가하는 I_D 를 이용한 DMT 방법은 장점을 가지고 있다. 또한 PI- α_m 을 이용한 방법은 시료를 따로 채취하여 소성지수를 따로 구하여야 하는 반면 I_D - R_M 방법은 추가 시료 채취 및 시험 없이 DMT 시험만으로 횡방향구속 변형계수를 추정하는 장점이 있다.

점토의 횡방향구속 변형계수는 구속응력이 증가함에 따라 증가하므로, 일반적으로 횡방향구속 변형계수로부터 직접 침하량을 산정하기 보다는 식 (1)로 압축지수를 구한 후 침하량을 산정하는 것이 적합하다. 식 (1)과 표 1을 이용하면 CPT와 DMT로부터 압축지수를 산정하는 추정식은 표 3과 같다. 표 3의 추정방법들은 압축지수를 구하기 위하여 e_0 를 알아야 하는데, DMT는 Marchetti와

표 3. CPT와 DMT를 이용한 압축지수 추정식

구분	조건	추정식
CPT	PI(%) < 35	$C_c = \frac{2.3(1+e_0)\sigma'_{v0}}{(2.5-0.04PI)q_t}$
	PI(%) ≥ 35	$C_c = \frac{2.3(1+e_0)\sigma'_{v0}}{(1.35-0.008PI)q_t}$
DMT		$C_c = \frac{2.3(1+e_0)\sigma'_{v0}}{(0.014(1/I_D)^2 - 0.032(1/I_D) + 0.265)E_D}$

Crapps(1981)의 도표를 사용할 경우 추가시험 없이 e_0 를 추정할 수 있는 장점이 있다.

5. 결론

본 연구는 CPT 및 DMT를 통한 부산지역 정규압밀점토의 압축성 추정에 관한 것으로, 이를 위해 부산신항 및 녹산 현장에서 CPT와 DMT를 실시하고, 시료를 채취하여 압밀시험을 수행하였다. 압밀시험을 결과로부터 횡방향구속 변형계수를 구한 뒤 CPTu 및 DMT 결과와 비교하여 상관계수 α_m , α_n 그리고 R_M 를 산정하였다. 그리고 소성지수, 간극수압비, 정규화 콘저항치, 재료지수와 상관계수의 관계를 분석하여 CPT와 DMT를 이용한 정규압밀점토 횡방향구속 변형계수 추정방법을 제안하였다.

실내 시험 결과 대상지역 점토층의 함수비 및 액성한계는 30%~90%, 소성한계는 25%~35% 정도로 분포하였으며, 점토의 주요 성분은 illite로 나타났다. 압밀시험 결과 대상지반의 압축지수는 0.5~1.3으로 나타났으며, 이를 이용하여 횡방향구속 변형계수를 추정하였다. 부산신항과 녹산 지역의 횡방향구속 변형계수는 각각 500kPa~3500kPa과 1200kPa~2000kPa 정도로 분포하였다.

콘저항치와 횡방향구속 변형계수간의 상관계수 α_m 과 α_n 은 각각 0.7~2.2와 0.8~2.7으로, α_n 이 α_m 에 비해 약간 크게 나타났다. 분석 결과 α_m 과 α_n 은 소성지수가 증가함에 따라 감소하였으며, 이러한 관계를 이용하여 CPT로 횡방향구속 변형계수를 추정하는 방법을 제안하였다. 딜라토미터 계수와 횡방향구속 변형계수간의 상관계수 R_M 은 0.2~1.6으로 α_n 이나 α_m 에 비해 값이 작았다. 소성지수 및 재료지수와 R_M 의 관계를 분석한 결과 R_M 은 $1/I_D$ 와 비례관계로 나타났으며 소성지수와는 특정한 관계를 찾기 힘들었다. 이를 이용하여 DMT로

횡방향구속 변형계수를 추정하는 방법을 제안하였다.

CPT를 이용한 횡방향구속 변형계수 추정방법 중 $PI-\alpha_m$ 관계를 이용하는 방법이 $PI-\alpha_n$ 관계를 이용하는 방법에 비해 정확성이 높았다. 그러나 CPT 추정방법의 경우 개량지반의 횡방향구속 변형계수를 과소평가하였으며, 추가시험을 통해 소성지수를 구해야 하는 단점이 있다. DMT 추정방법은 원지반 횡방향구속 변형계수 추정뿐 아니라 개량지반의 횡방향구속 변형계수도 적합하게 추정하였으며, 추가시험 없이 DMT 시험만으로 횡방향구속을 추정하는 장점이 있다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산 ‘대심도 해안 연약지반 개량을 위한 이중코어 PBD 성능연구’ 과제의 도움으로 진행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김상규, 김윤태 (2006), “낙동강 하구 델타 퇴적토의 특성과 기초 설계와의 관련”, 낙동강하구 연약 지반에서의 중·저층 빌딩의 최적 기초형식에 관한 Workshop 논문집, ATC-7, Seoul, Korea, pp. 19-101.
2. 이선재 (1997), 피에조콘을 이용한 국내 지반공학의 공학적 특성 연구, 공학박사 학위논문, 서울대학교.
3. 홍성진, 이문주, 김태준, 이우진 (2009), “간극수압비를 이용한 부산점토의 CPTu 콘계수 추정”, 한국지반공학학회논문집, 25권 1호 pp.77-88.
4. Campanella, R.G. and Robertson, P.K. (1982), “State-of-the Art in In-situ Testing of Soils: Development since 1978”, Proc. Engineering Foundation Conf. on Updating Subsurface Sampling of Soils and Rocks and Their In-situ Testing, Santa Barbara, California, pp. 245-267.
5. Chung, S. G., Giao, P.H., Kim, G. J. and Leroueil, S. (2002). Geotechnical properties of Pusan clays, Canadian Geotechnical Journal, Vol.39, No.5:1050-1060.
6. Cruz, N., Devincenzi, M.J. and Fonseca, A.V. (2006), “DMT Experience in Iberian Transported Soils”, Proc. 2nd International Conf. the Flat Dilatometer, Washington, D.C., pp.198-204.
7. Iwasaki, K., Tsuchiya, H., Sakai, Y. and Yamamoto, Y. (1991), “Applicability of the Marchetti Dilatometer Test to Soft Ground in Japan”, GEOCOAST 91, Yokohama, pp.1/6.
8. Janbu, N. (1963), “Soil Compressibility as Determined by Oedometer and Triaxial Tests”, Proc. European Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wiesbaden, Vol.1, pp.19-25.
9. Jones, G.A. and Rust, E. (1995), “Piezometer Settlement Prediction Parameters for Embankments on Alluvium”, Proc. International Symposium on Cone Penetration Testing, Sweden, Vol.2, pp.501-508.
10. Kulhawy, F.H. and Mayne, P.H. (1990), Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design, Electric Power Research Institute,

- Palo Alto, California, Report EL.6800.
11. Lim, H. D, Lee, C. H. and Lee W. J. (2003), Geotechnical Characteristics of Yangsan Clay, Proc. Korea-Japan Joint Workshop: Characterization of Thick Clay Deposit, Reclamation and Port Construction, ATC-7: pp.59-70.
 12. Lunne, T., Robertson, P.K. and Powel, J.J.M. (1997), Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, Blackie Academic & Professional, London.
 13. Lutenegeger, A.J. (1988), "Current Status of the Marchetti Dilatometer Test", Proc. ISOPT-I, Orlando, Florida, Vol.1, pp.137-155.
 14. Marchetti, S. (1980), "In-situ Tests by Flat Dilatometer", J. Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.106, No.3, pp.299-321.
 15. Marchetti, S. and Crapps, D.K. (1981), Flat Dilatometer Manual, Internal Report of G.P.E. Inc.
 16. 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. International Conf. on In-situ Measurement of Soil Properties, Bali, pp.1-41.
 17. Marchetti, S. (2006), "Origin of the Flat Dilatometer", Proc. 2nd International Conf. the Flat Dilatometer, Washington, D.C., pp.2-5.
 18. Mayne, P.W. (2001), "Stress-Strain-Strength-Flow Parameters from Enhanced In-situ Tests", Proc. International Conf. on In-situ Measurement of Soil Properties, Bali, pp.27-47.
 19. Monaco, P., Totani, G. and Calabrese, M. (2006), "DMT-Predicted vs. Observed Settlements: A Review of the Available Experience", Proc. 2nd International Conf. the Flat Dilatometer, Washington, D.C., pp.242-252.
 20. Robertson, P.K. (1990), "Soil Classification using the Cone Penetration Test", Canadian Geotechnical Journal, Vol.27, No.1, pp.151-158.
 21. Robertson, P.K. (2009), "CPT-DMT Correlations", J. Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.135, No.11, pp.1762-1771.
 22. Sanglerat, G. (1972), The Penetrometer and Soil Exploration, Elsevier, Amsterdam, pp.464.
 23. Schmertmann, J.H. (1955), "The Undisturbed Consolidation Behavior of Clay", Trans. ASCE, Vol.120, pp.1201-1233.
 24. Senneset, K., Sandven, R. and Janbu, N. (1989), The Evaluation of Soil Parameters from Piezocone Tests, Transportation Research Record, No.1235, pp.24-37.

(접수일자 2010. 10. 21, 심사완료일 2011. 4. 14)