

DMT를 이용한 부산신항 점토의 비배수 전단강도 추정

Evaluation of Undrained Shear Strength of Busan New-port Clay by DMT

홍 성 진¹ Hong, Sung-Jin

신 동 현² Shin, Dong-Hyun

김 동 휘³ Kim, Dong-Hee

정 상 진⁴ Jung, Sang-Jin

이 우 진⁵ Lee, Woo-Jin

Abstract

A series of dilatometer test, field vane test, and CK₀U triaxial test were performed for clayey soils of Busan new port site to develop the relationships between undrained shear strength and the DMT results. Normalized undrained shear strength is turned out to be $s_{u(CKU)}/\sigma'_v=0.30\sim 0.35$ for CK₀U triaxial test and $\mu_{s_u(VST)}/\sigma'_v=0.20\sim 0.22$ for vane shear test. By comparing the undrained shear strength estimated from DMT indices with the results measured by in-situ vane test or CK₀U triaxial test, two methods to predict the undrained shear strength from DMT results are suggested. One is based on the relationship between s_u/σ'_v and horizontal stress index (K_D) while another method comes from N_c-I_D and N_c-E_D correlation. It was observed that the method based on N_c-I_D or N_c-E_D relation shows slightly better accuracy than the one based on K_D although all of the methods suggested in this study provided comparable values of predicted undrained shear strength. Since the definitions of I_D and E_D contain p_1-p_0 , in which soil condition is reflected, it is believed that the prediction method using N_c is capable of taking a material type into consideration.

요 지

본 연구에서는 DMT를 이용한 비배수 전단강도를 파악하기 위하여 부산신항 점토층에 DMT 시험, 베인전단시험, CK₀U 삼축압축시험을 실시하였다. 시험결과 정규화한 비배수 전단강도비는 삼축시험의 경우 $s_{u(CKU)}/\sigma'_v=0.30\sim 0.35$, 베인전단시험의 경우 $\mu_{s_u(VST)}/\sigma'_v=0.20\sim 0.22$ 로 나타났다. 본 연구에서는 현장 베인전단시험 및 삼축압축시험 결과와의 비교를 통해, DMT를 이용하여 비배수 전단강도를 추정하는 두 가지 방법을 제안하였다. 첫 번째는 s_u/σ'_v 와 횡방향 응력지수의 관계를 이용하는 방법이고, 두 번째는 N_c-I_D 또는 N_c-E_D 관계로부터 비배수 전단강도를 추정하는 방법이다. 베인전단시험 및 삼축시험 결과와 두 가지 추정방법을 비교한 결과, N_c-I_D 또는 N_c-E_D 관계를 이용한 방법이 K_D 이용하는 방법보다 비배수 전단강도를 정확하게 추정하는 것으로 나타났다. 이것은 I_D와 E_D가 토질상태를 반영하는 p_1-p_0 항을 포함하고 있어, N_c를 이용하는 방법이 토질을 고려한 비배수 전단강도 추정을 할 수 있기 때문으로 판단된다.

Keywords : Dilatometer (DMT), Triaxial test, Undrained shear stress, Vane Shear Test (VST)

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

2 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

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

4 삼성물산 건설부문 북컨 2-1단계 축조 현장 대리 (Assistant Manager, Busan New Port North Container Terminal Phase 2-1, Engrg. & Construction, Samsung.)

5 정희원, 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 2008년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

연약지반에 건설되는 토목 구조물을 효율적으로 설계하기 위해서는 지반조사를 통한 대상 지반의 공학적 특성 파악이 매우 중요하며, 지반의 공학적 특성은 현장 및 실내시험을 통하여 산정할 수 있다. 실내시험은 응력 및 배수조건을 조절하므로 지반의 공학적 특성을 산정하기 용이하지만, 현장 조건을 반영하기 어려울 뿐만 아니라 시료채취에 따른 교란 등의 문제가 발생할 수 있다. 반면, 현장시험의 경우 시험결과에 현장조건이 반영된 결과를 얻을 수 있으나, 결과 값을 공학적 특성으로 변환하는데 어려움이 있다. 최근 들어 빠르고 경제적이면서 연속적인 지반 데이터를 획득할 수 있다는 장점에 관입시험(CPT)과 딜라토미터 시험(DMT) 등의 관입형 현장시험이 많이 수행되고 있다. 관입형 현장시험의 결과는 복합적 지반 특성에 영향을 받으므로, 이를 통해 지반의 공학적 특성을 파악하기 위해서는 이론적 또는 경험적 추정식을 이용하여야 한다. 따라서 관입형 현장시험을 통해 지반의 공학적 특성을 파악하기 위해서는 적절한 데이터베이스로부터 신뢰성 있는 추정식을 개발하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 연약지반 특성 파악을 위해 최근 많이 사용되고 있는 DMT 시험을 부산신항 점토 지반에 실시하였다. DMT는 Marchetti에 의해 1974년 처음 개발되었으며, 폭 95mm, 두께 15mm 크기의 관입체에 60mm 직경의 강철 멤브레인이 장착되어 있다. DMT 시험은 강철 멤브레인에 소정의 변위가 발생할 때의 압력을 측정하고, 이들로부터 재료지수(I_D), 횡방향 응력지수(K_D), 그리고 딜라토미터 계수(E_D)로부터 지반의 물성치를 추정한다. DMT시험은 콘의 관입 저항치를 측정하는 CPT에 비하여 지반의 횡방향 토압계수, 과압밀비, 압축성 등을 비교적 정확하게 추정할 수 있다고 알려져 있다. 또한, 재료지수를 이용하여 지반을 분류하고, 추정식을 이용하여 비배수 전단강도, 단위중량, 내부마찰각 등을 산정하는 등 많은 경험적인 데이터베이스가 확보되고 있고 그 활용도가 증가하고 있다(Marchetti 등, 2001).

세립질 지반의 비배수 전단강도는 지반특성, 응력조건, 전단모드 등에 따라 크기가 달라진다. 본 연구에서는 DMT를 이용한 비배수 전단강도 추정 방법을 분석하기 위하여, 부산 신항만 시험 부지 2개소에서 DMT 및 베인전단시험을 실시하였으며 74mm 피스톤 샘플러로 채취한 시료에 대해 CK₀U 삼축압축시험을 실시하였다.

DMT시험 결과를 이용하여 비배수 전단강도 추정 방법 중 $s_u/c' = S_u(OCR)^m$ 을 이용한 방법(Marchetti, 1980)과 지지력공식을 이용한 방법(Roque 등, 1988)을 바탕으로 비배수 전단강도의 추정방법을 제안하였으며, 이 결과를 CK₀U 삼축압축시험과 베인전단시험에서 얻은 비배수 전단강도와 비교하여 보았다.

2. 시험 부지 특성

2.1 시험 부지 지층 특성

본 연구를 위해 부산 신항 북컨테이너터미널 현장에 120m×40m 크기의 시험 부지를 조성하였으며, 이를 3개 구간으로 나누어 DMT 및 베인전단시험을 실시하였다. 시험 부지는 수심 3m 정도의 바다였으나 현재는 컨테이너 부두 시공을 위해 6m 정도의 모래매립을 실시한 상태이며, 지반개량을 위한 연직배수재 타설 전 시험을 실시하였다. 시추조사 등의 사전조사 결과 전 구간에서 유사한 지층특성이 관찰되었다. 따라서 3개 구간 중 구간 2, 3의 점토층에 대하여 심도 32m 까지 DMT 시험을 수행하였으며, 실내시험을 위해 41m까지 연속적으로 불교란 시료 채취하였다. 그림 1은 시험 부지의 위치를 나타낸 것이다. 그림 2에 요약되어 있는 실내물성시험 결과에서 볼 수 있듯이, 심도 6m까지는 매립모래층, 심도 6~27m에는 연약점토층, 27~35m에는 중간균기 점토층, 35m 이상의 심도에는 점토와 모래의 혼합층이 분포하고 있는 것으로 나타났다. 채취한 시료를 이용하여 함수비 및 액·소성 등의 기본 토성시험을 실시한 결과, 함수비 및 액·소성한계 모두 심도 30m까지 증가하지만 30m 이상에서는 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 액

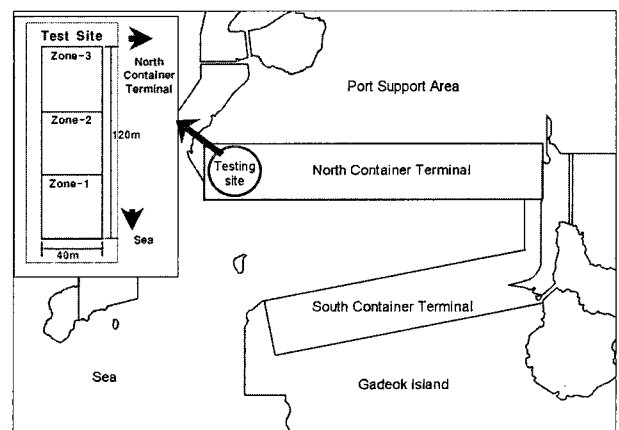


그림 1. 시험 부지 위치

성지수의 경우 심도 15~20m까지는 감소하다 심도 20m 이상에서는 1 정도로 나타났다. 심도 6~45m까지 분포하고 있는 점토층은 그림 3에서 볼 수 있듯이 심도 6~30m까지는 CH, 30~45m까지는 CL이 분포하고 있으며, 이는 김상규 등(2006)의 연구결과와 일치한다.

DMT 시험은 식 (1)과 같은 지수들을 이용하여 지반의 특성을 파악한다. 강철 멤브레인이 0.05mm와 1.1mm 팽

창할 때의 압력과 0.05mm 수축할 때의 압력을 측정하고 이를 보정하여 p_0 , p_1 , p_2 를 산정하고, 이로부터 재료지수, 횡방향응력지수, 딜라토미터 계수를 산정한다(Marchetti, 1980).

$$I_D = \frac{p_1 - p_0}{p_0 - u_0} \quad K_D = \frac{p_0 - u_0}{\sigma'_v} \quad E_D = 34.7(p_1 - p_0) \quad (1)$$

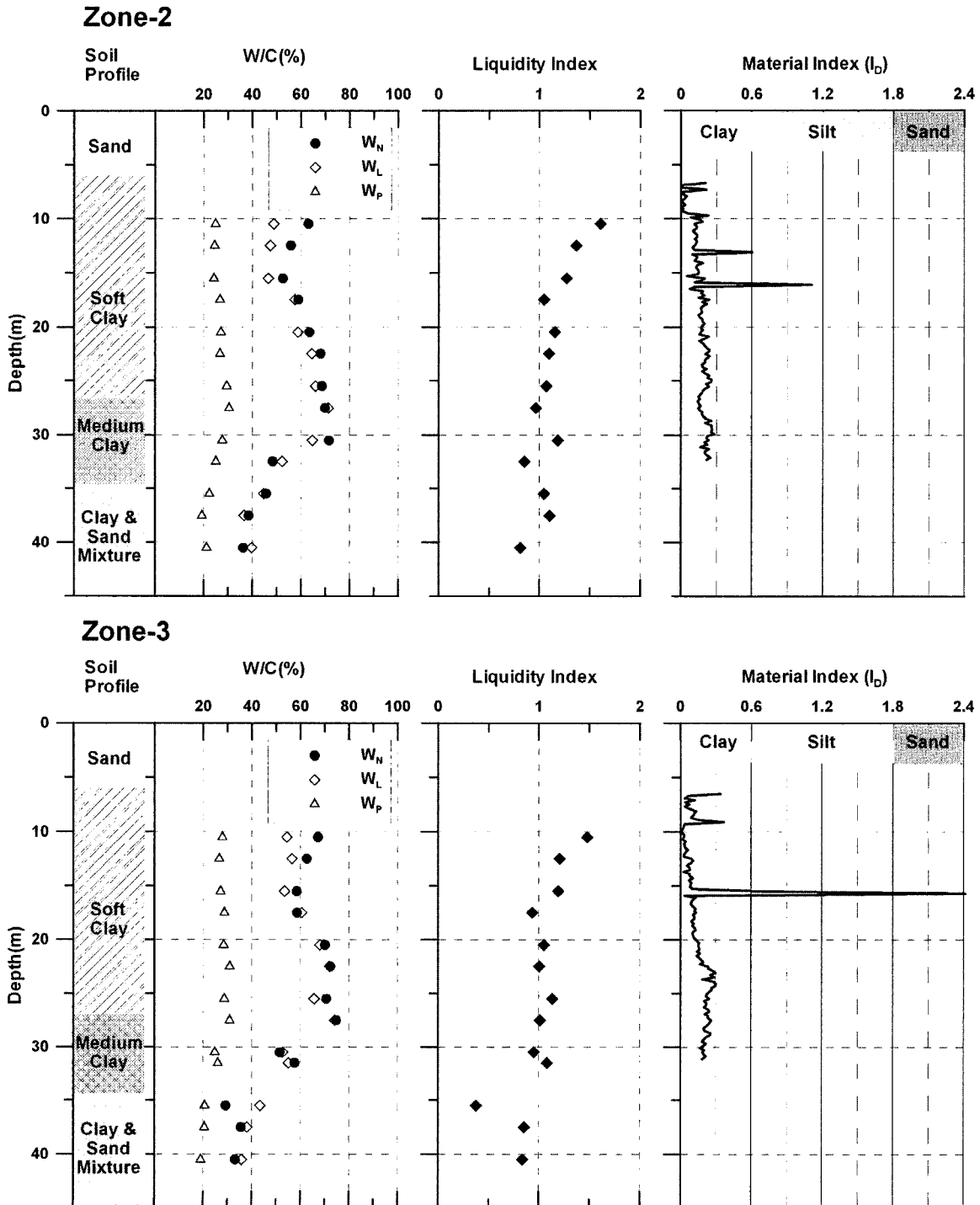


그림 2. 심도에 따른 지반 특성의 변화

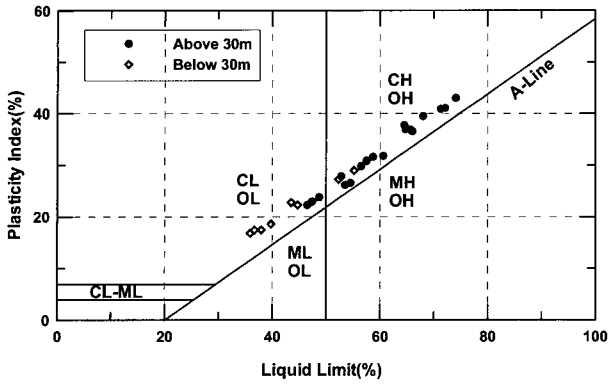


그림 3. 소성도표

지반을 분류하는 지표인 재로지수를 이용하여 DMT 관입 심도인 32m까지 지반을 분류하였다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 재로지수에 의한 지반의 분류는 실내시험의 결과와 일치하는 것으로 나타났으며, 심도 16m 정도에 얇은 실트 또는 모래층이 분포하는 것으로 추정하였다.

2.2 시험부지 응력상태

현장시험을 통하여 지반정수를 추정하기 위해서는 현장 지반의 응력상태를 파악하여야 한다. 일반적으로 지반의 전응력 상태는 추정된 단위중량을 이용하거나 불교란 시료채취를 통하여 비교적 정확하게 추정할 수 있다. 그림 4(a)는 본 시험 현장의 시료 단위중량을 이용

하여 추정된 매립 전·후의 연직 전응력 분포이다. 유효응력을 추정하기 위해서는 정확한 수압분포를 알아야 하지만, 본 현장과 같이 매립으로 인한 압밀이 진행 중일 경우에는 간극수압이 시간에 따라 변하므로 유효응력 추정이 어렵다. 그림 4(b)는 간극수압을 정수압으로 가정하여 추정한 연직유효응력과 압밀시험을 실시하여 산정한 선행압밀하중(σ'_{pc})을 나타낸 것이다. 그림 4(b)에서 볼 수 있듯이 선행압밀하중은 매립 후 추정 유효응력보다 작고, 매립 전 추정 유효응력 보다는 큰 것으로 추정되었다. 이것은 본 시험 부지의 매립하중에 의한 압밀이 진행 중이기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 압밀시험 결과를 고려하여 DMT 시험 및 시료채취 당시의 연직 유효응력과 수압을 그림 4(c)와 같이 추정하였으며, 이를 이용하여 현장시험결과를 해석하였다. 심도 31m 이상은 실트 또는 모래가 함유된 점토로서 시료채취 시 교란으로 인해 31m 지점의 선행압밀하중이 상대적으로 작게 산정된 것으로 판단된다.

DMT시험을 통한 지반의 과압밀비 추정방법은 많은 선행 연구자들에 의해 제안되었다(Marchetti, 1980; Powell 등, 1988; Kamei와 Iwasaki, 1995; 변위용 등, 2004). 표 1은 선행연구자들이 제안한 식으로, 응력이력이 반영되는 횡방향 토압계수에 상응하도록 정의된 횡방향 응력지수(K_D)의 함수로 과압밀비를 표현하고 있다. 본 시험 부지는 $OCR \leq 1$ 인 상태이기 때문에 다양한 OCR 범위

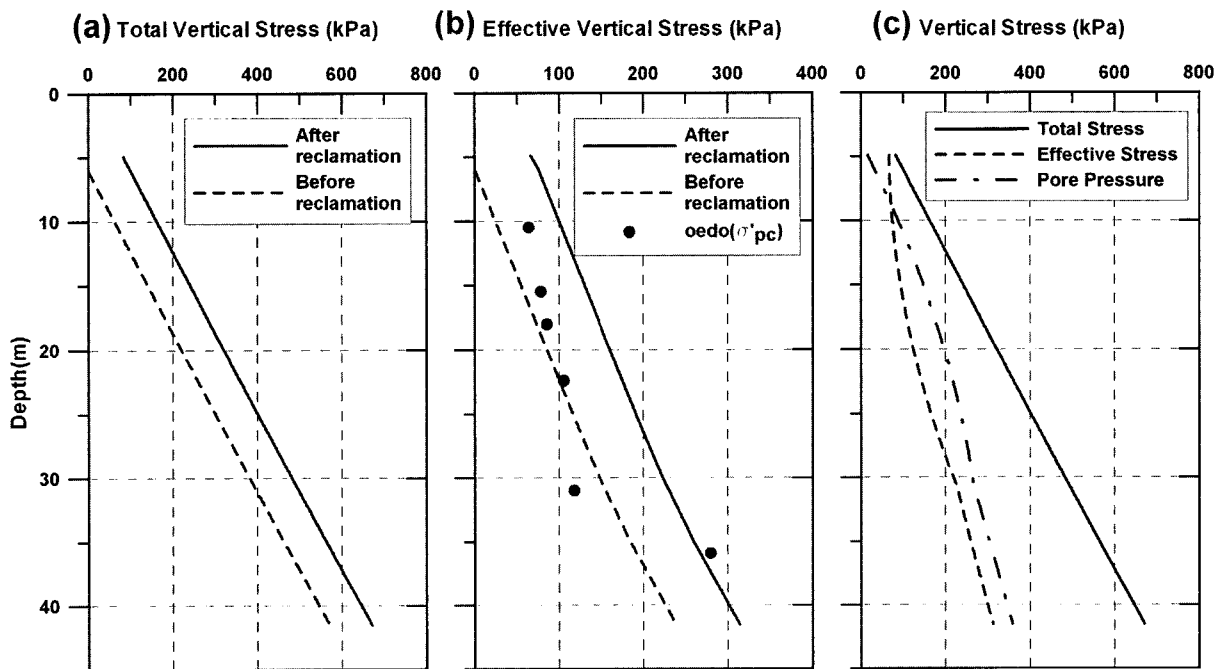


그림 4. 현장 응력상태: (a) 전응력; (b) 유효응력; (c)추정응력

표 1. DMT를 이용한 OCR 추정 제안식

Researcher	OCR correlation	Note
Marchetti (1980)	$OCR = (0.5K_D)^{1.56}$	$I_D < 1.2$
Powell & Uglow (1988)	$OCR = 0.24(K_D)^{1.32}$	Young Clay (U.K)
Kamei & Iwasaki (1995)	$OCR = 0.34(K_D)^{1.43}$	Soft Clay (Japan)
변위용 등 (2004)	$OCR = 0.6(K_D)^{0.75}$	남해/서해 연약지반 OCR < 5 (Korea)

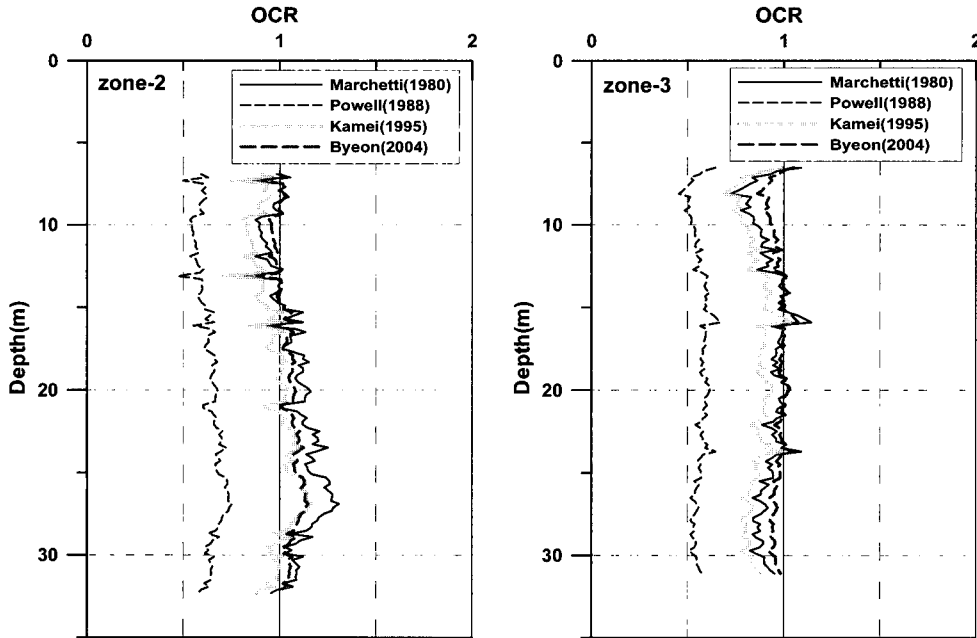


그림 5. DMT를 이용한 OCR값 추정

의 검증은 어렵다. 본 연구에서는 표 1의 제안 식들로부터 심도에 따른 OCR값을 추정하여 그림 5에 도시한 결과, Powell 등(1988)의 방법은 OCR을 과소평가하는 반면 다른 3가지 제안식은 현장의 응력상태를 비교적 정확히 예측하고 있는 것으로 나타났다.

3. 비배수 전단강도

비배수 전단강도(s_u)는 전응력 개념의 강도 특성으로 유효응력 개념의 강도정수인 c' , ϕ' 에 비하여 실무적용이 용이하다는 장점이 있다. 그러나 비배수 전단강도는 전단모드, 구속조건, 변형속도 등의 인자에 영향을 받므로 사용 목적에 따라 적절한 시험조건을 선택해야 한다. 비배수 전단강도는 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 추정할 수 있으며, 직접적인 추정방법으로는 직접전단, 삼축압축, 일축압축 및 현장배인 시험 등이 있으며, 간접적인 방법으로는 CPT 또는 DMT 등의 현장시험 있다. CPT와 DMT 등의 간접적인 방법을 사용할 경

우, 어떤 전단모드의 비배수 전단강도가 추정되는지 명확하게 구분하여 사용해야 한다. 본 연구에서는 DMT 시험결과와 비교하기 위하여 CK_0U 삼축압축 및 배인전단시험을 실시하였다.

3.1 삼축압축시험

CK_0U 시험은 현장지반의 응력상태를 실험실에서 재현하여 비배수 전단강도를 추정하는 시험으로, 본 연구에서는 C. K. Chan이 개발한 자동화 삼축시험기를 이용하여 시험을 실시하였다. 시료에 대한 포화가 완료되면 그림 4(c)에서 추정한 시료채취 당시의 연직유효응력까지 서서히 응력을 증가시키면서 K_0 압밀을 실시한 후 0.05%/min의 변형률 속도로 비배수 전단을 실시하였다. 시험결과를 정리한 그림 6에 의하면 구역 2와 구역 3에서의 비배수 전단강도의 분포는 비슷한 것으로 나타났으며, 비배수 전단강도가 깊이에 따라 증가하지만 깊이에 따른 강도증가율이 점점 커지는 현상이 관찰되었다. 이는 그

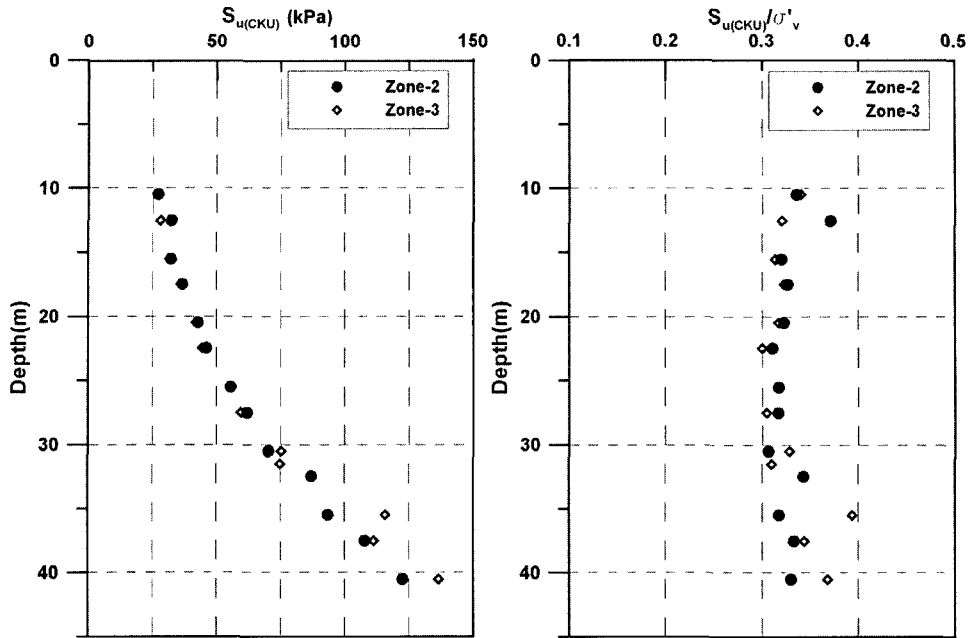


그림 6. CK₀U 시험결과

림 4(c)에 보이는 바와 같이 시험 당시의 유효응력의 분포가 선형적인 증가를 보이지 않기 때문이다. 그러나, 시험결과를 그림 4(c)의 연직유효응력으로 정규화한 비배수 전단강도비($s_{u(CKU)}/\sigma'_v$)는 0.30~0.35로 깊이에 상관없이 비교적 일정한 값으로 나타났다. 이는 Jamiolkowski 등(1985)이 주장한 $s_{u(CKU)}/\sigma'_v \approx 0.32$ 와 비슷하다. 또한, 기존 국내 부산지역 점토의 시험결과와 비교해 보면, 양산지역에 대하여 김길수 등(2001)이 제시한 $s_{u(CKU)}/\sigma'_v \approx 0.30$ 및 화전 및 신호지역에 대하여 이영철 등(2006)이 제시한 $s_{u(CKU)}/\sigma'_v \approx 0.36$ 과 유사하다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 구간 3의 심도 35m 이상에서는 $s_{u(CKU)}/\sigma'_v > 0.33$ 으로 나타났는데, 이것은 구간 3의 심도 30m 이상의 점토층에 혼재되어 있는 실트 또는 모래의 영향으로 비배수 전단강도가 크게 산정되었기 때문으로 추정된다.

3.2 베인전단시험

베인전단시험은 현장에서 점토의 비배수 전단강도를 직접적으로 측정하는 가장 대표적인 시험방법이다. 본 연구에서는 자동베인시험 장비를 이용하여 심도 35m 까지 시험을 실시하였다. 베인전단시험에서 측정된 회전 모멘트를 이용하여 비배수 전단강도를 산정하는 방법은 베인 주변의 전단응력분포에 따라 다르며, 본 연구에서는 식 (2)를 이용하여 비배수 전단강도를 산정하였다.

$$s_{u(vST)} = \frac{M_{\max}}{\pi D^2(H/2 + D/6)} = \frac{6M_{\max}}{7\pi D^3} \quad (2)$$

여기서, H는 베인 날의 높이 그리고 D는 베인 날의 직경이다.

베인전단시험의 표준회전속도는 6°/min으로 삼축압축시험이나 현장에서 발생하는 전단변형 속도에 비해 매우 빠른 변형속도로 전단을 유발한다. 일반적으로 베인전단시험에 의한 비배수 전단강도는 변형속도가 빠를수록 크게 나타나므로(Torstensson, 1977; Weisel, 1973), 실제의 비배수 전단강도를 추정하려면 현장에서 베인전단시험으로 측정된 비배수 전단강도를 보정하여야 한다. 본 연구에서는 비배수 전단강도를 보정하기 위해 식 (3)과 같은 Bjerrum(1972)의 수정계수(μ)를 사용하였다. 그림 7은 보정된 비배수 전단강도의 분포를 나타낸 것으로, 심도 30m까지는 $\mu s_{u(vST)}/\sigma'_v \approx 0.2$ 정도로 나타났으나 심도 30m 이상에서는 $\mu s_{u(vST)}/\sigma'_v$ 가 크게 산정되었다. 이것은 삼축압축시험의 결과와 마찬가지로 30m 이상의 점토층에 혼재되어 있는 실트 또는 모래의 영향인 것으로 추정된다.

$$\mu = 1.7 - 0.54 \log(PI) \quad (3)$$

Skempton(1957)은 $s_{u(vST)}/\sigma'_v$ 가 소성지수에 따라 식 (4)와 같이 비례하여 증가한다고 주장하였으며, 소성지수에 따라 보정한 $\mu s_{u(vST)}/\sigma'_v$ 의 경우 소성지수의 영향을

받지 않는 것으로 알려져 있다. Mesri(1975)와 Azzouz 등(1983)은 $\mu_{s_u(vST)}/\sigma'_v$ 의 크기를 각각 0.22와 0.20을 제시하였으며, 국내의 경우 Chung 등(2006)이 부산 신히 방파제 지역에 대하여 $\mu_{s_u(vST)}/\sigma'_v \approx 0.22$, 김민석 등(2006)은 부산지역 4개소에 대하여 $\mu_{s_u(vST)}/\sigma'_v \approx 0.22 \sim 0.30$ 의 값을 제시하였다. 그림 8(a)는 본 연구에서 실시한 배인 전단시험에서 얻은 비배수전단강도를 그림 4(c)의 연직 유효응력으로 정규화한 결과를 도시한 것으로, 소성지수가 증가함에 따라 $s_u(vST)/\sigma'_v$ 가 증가하며 식 (4)와 유사한 경향을 보이고 있다. 그림 8(b)는 $\mu_{s_u(vST)}/\sigma'_v$ 와 소성지수의 관계를 나타낸 것으로 소성지수와 관계없이 0.20~0.22의 일정한 값을 보이고 있다. 이러한 값의 범위는 Mesri(1975), Azzouz 등(1983), Chung 등(2006)의

결과와 유사하며, 김민석 등(2006)의 결과보다는 작은 것으로 나타났다.

$$s_u/\sigma'_v = 0.11 + 0.0037 PI \quad (4)$$

4. DMT를 이용한 비배수 전단강도 추정

4.1 비배수 전단강도 추정 방법

Marchetti(1980)는 $s_u(vST)/\sigma'_v$ 와 OCR간의 관계 그리고 OCR과 횡방향 응력지수간의 관계를 이용하여 비배수 전단강도의 추정방법을 식 (5)와 같이 제안하였다. 또한 Kamei 등(1995)은 일축압축시험과 UU시험 결과에 대해 $s_u/\sigma'_v = S_1(OCR)^m$ 관계에서 S_1 의 크기와 OCR- K_D 의

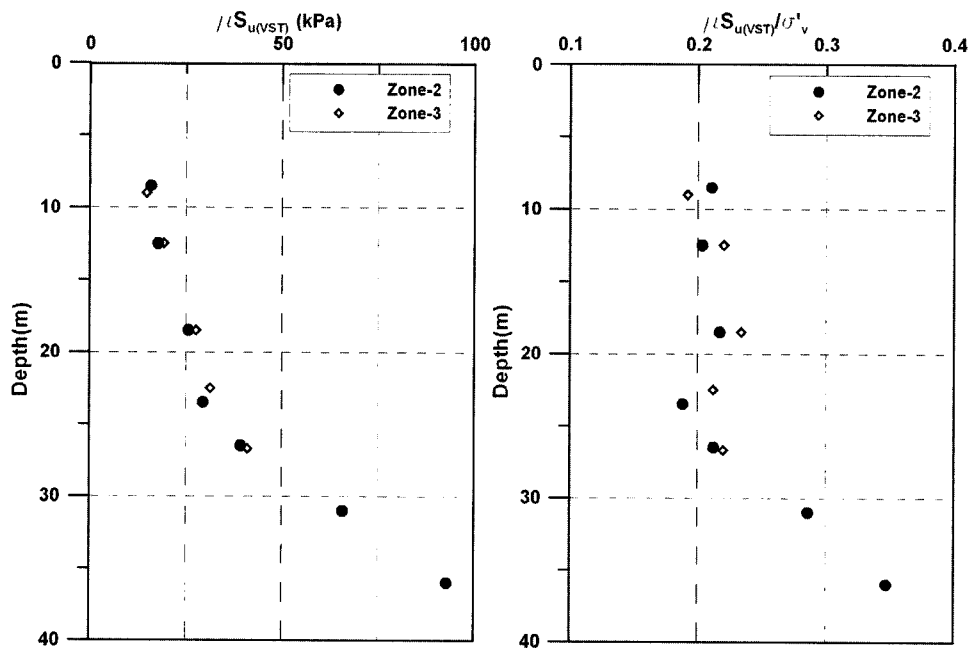


그림 7. 배인전단시험 결과

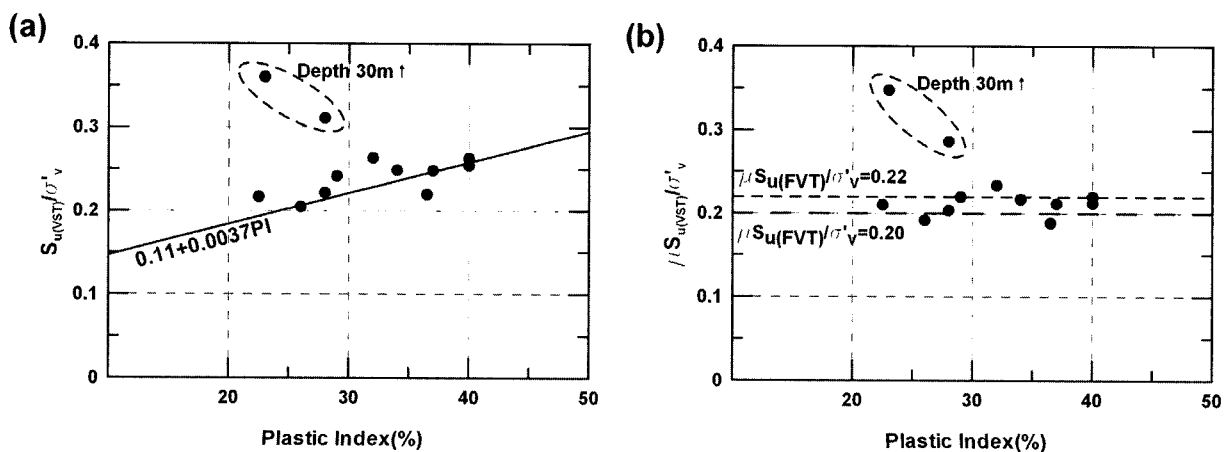


그림 8. 소성지수와 s_u/σ'_v 의 관계: (a) $s_u/\sigma'_v(vST)$ vs PI; (b) $\mu_{s_u}/\sigma'_v(vST)$ vs PI

관계를 조정하여 식 (6)과 같은 추정식을 제안하였다. 국내에서는 변위용 등(2004)이 인공신경망 기법을 이용하여 식 (7)과 같이 제안하였다.

$$s_u = 0.22\sigma'_v(0.5K_D)^{1.25} \quad (5)$$

$$s_u = 0.35\sigma'_v(0.47K_D)^{1.14} \quad (6)$$

$$s_u = (0.14 \sim 0.33)\sigma'_v(0.5K_D)^{1.25} \quad (7)$$

Roque 등(1988)은 기초의 지지력 이론을 이용하여 식 (8)과 같은 비배수 전단강도 추정방법을 제안하였으며, 이 방법은 CPT를 이용한 비배수 전단강도 추정방법과 유사하다. 이 방법을 사용할 경우, 계수 N_c 에 따라 추정된 비배수전단강도에 차이가 나타난다. Roque 등(1988)은 소성이 높고 예민한 점토일 경우 $N_c=9$, 실트일 경우 $N_c=5$ 를 제안하였다. 국내의 경우 김종국 등(2001)은 $N_c=6.35$ 를 사용할 경우 삼축압축시험 결과와 DMT 결과가 유사하다고 주장하였으며, 김주형 등(2000)은 $N_c=5$ 를 사용할 경우 배인전단시험의 결과보다 전단강도가 크게 추정된다고 하였다. Marchetti(1980)가 제안한 방법은 DMT 시험결과 중 p_0 를 이용하는 반면, Roque 등(1988)이 제안한 방법은 p_1 을 이용하여 비배수 전단강도를 추정하는 차이점이 있다.

$$s_u = \frac{(p_1 - \sigma_{h0})}{N_c} \quad (8)$$

4.2 DMT vs CK₀U 시험

K_D 를 이용하여 비배수 전단강도를 추정할 경우 $s_u/\sigma'_v = S_1(\text{OCR})^m$ 에서 S_1 과 OCR^m - K_D 의 관계를 결정하여야 한다. 그림 5에서 관찰한 바와 같이 Marchetti(1980)가 제안한 OCR 추정방법이 본 현장에 유효하므로, 지수 m 은 0.8로 가정하고 $\text{OCR}^m=(0.5K_D)^{1.25}$ 의 식을 적용하였다. S_1 을 결정하기 위하여 CK₀U 삼축시험에서 측정된 비배수 전단강도와 DMT시험의 K_D 를 이용하여 S_1 값을 산정한 결과 S_1 의 평균값은 0.32 정도로 나타났으며, 이러한 결과를 이용하면 부산 신항 점토의 비배수 전단강도 추정을 위한 경험식은 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$s_{u(\text{CKU})} = 0.32\sigma'_v(0.5K_D)^{1.25} \quad (9)$$

식 (5) 및 식 (9)는 추정된 비배수 전단강도의 크기가 연직유효응력에 상당한 영향을 받는 것으로 표현되었으나, K_D 자체에 $1/\sigma'_v$ 항이 포함되어 있어 전단강도 산정 시 연직유효응력의 영향은 감소한다. 그림 9는 연직유효응력의 크기를 30% 증감하면서 식 (9)로 비배수 전단강도를 추정한 결과를 비교한 것이다. 그림 9에 의하면 유효응력의 크기를 30% 정도 다르게 가정했음에도 불구하고 비배수 전단강도는 10% 내외의 차이만이 발생하였다. 따라서 식 (9)를 이용하여 비배수 전단강도를 추정할 경우 σ'_v 의 오차로 인한 영향은 그리 크지 않음

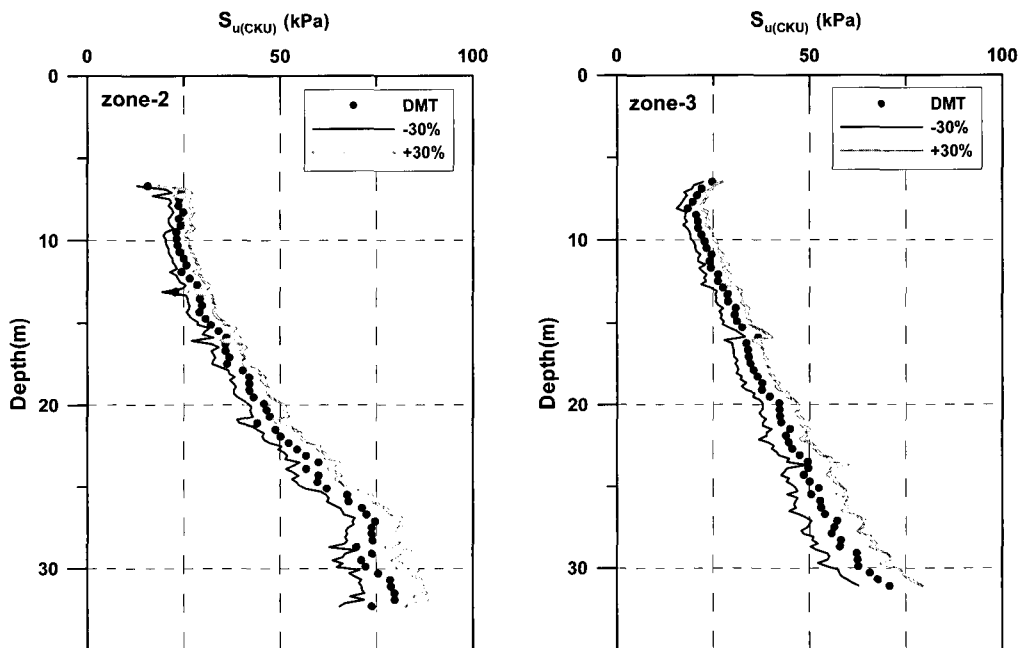


그림 9. 비배수 전단강도 추정 시 σ'_v 의 영향

을 알 수 있다.

Ladd 등(1977)은 단순전단시험 결과 $m \approx 0.8$ 이라고 주장하였으며, Jamiolkowski 등(1985)은 유기질지반이나 고결화지반 등 특수한 경우를 제외하면 $m \approx 0.97$ 이라고 하였다. 또한 OCR이 크지 않으면 OCR^m의 값 차이는 크지 않는다는 점에서, m의 결정은 비배수 전단강도의 추정에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 반면 S₁의 경우는 m에 비해 직접적으로 비배수 전단강도 산정에 영향을 미치며, 식 (5), (7), (9)처럼 S₁을 변화시켜 식을 적용한다면, 다양한 전단모드에 대하여 비배수 전단강도를 추정할 수 있다.

Roque 등(1988)이 제안한 식 (8)은 계수 N_c가 비배수 전단강도 추정에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 N_c값

의 합리적인 결정을 위해 N_c와 DMT 지수들과의 상관관계를 분석하여 보았다. 재료지수(I_D)는 DMT 지수들 중 지반의 특성을 나타내는 값으로, I_D가 크면 조립질 지반 I_D가 작으면 세립질 지반으로 분류된다. 또한 I_D는 강성을 강도로 나눈다는 점에서 강성지수와 유사한 의미를 갖는다. 식 (8)은 기본적으로 CPT를 이용한 비배수 전단강도 추정식과 동일한 형태를 가지고 있으며, CPT 추정 방법에서는 강성지수가 증가함에 따라 콘계수가 증가하는 경향을 보인다(Vesic 1975). 따라서, 본 연구에서는 유사한 개념으로 N_c와 I_D의 관계를 분석하였다.

CK₀U 시험에서 구한 비배수 전단강도와 DMT에서 얻은 p₁을 이용하여 역산된 N_c와 I_D 또는 E_D간의 관계를 분석하였다. N_c-I_D 및 N_c-E_D간에는 그림 10과 같이 선형

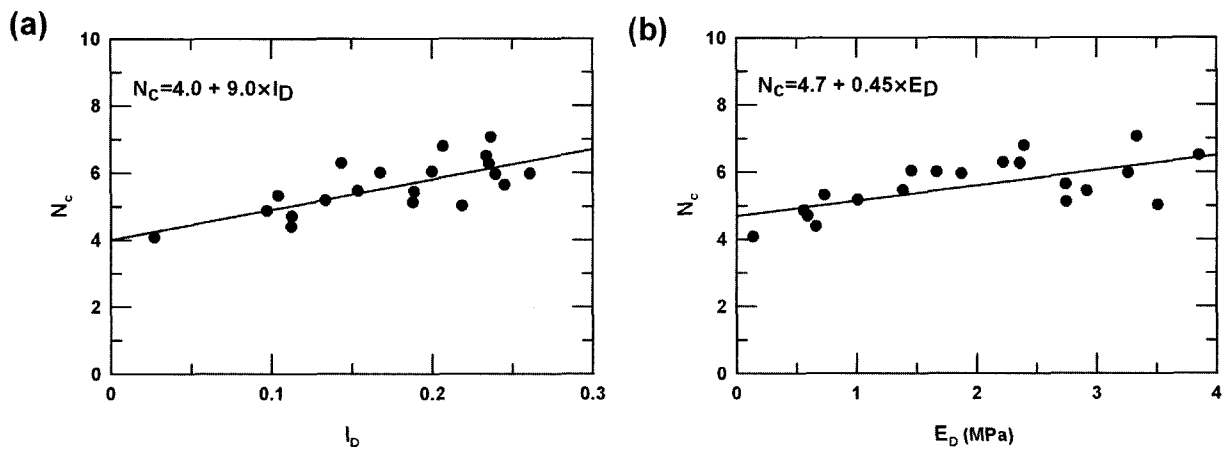


그림 10. S_{u(CKU)} 추정을 위한 N_c와 I_D 또는 E_D 관계

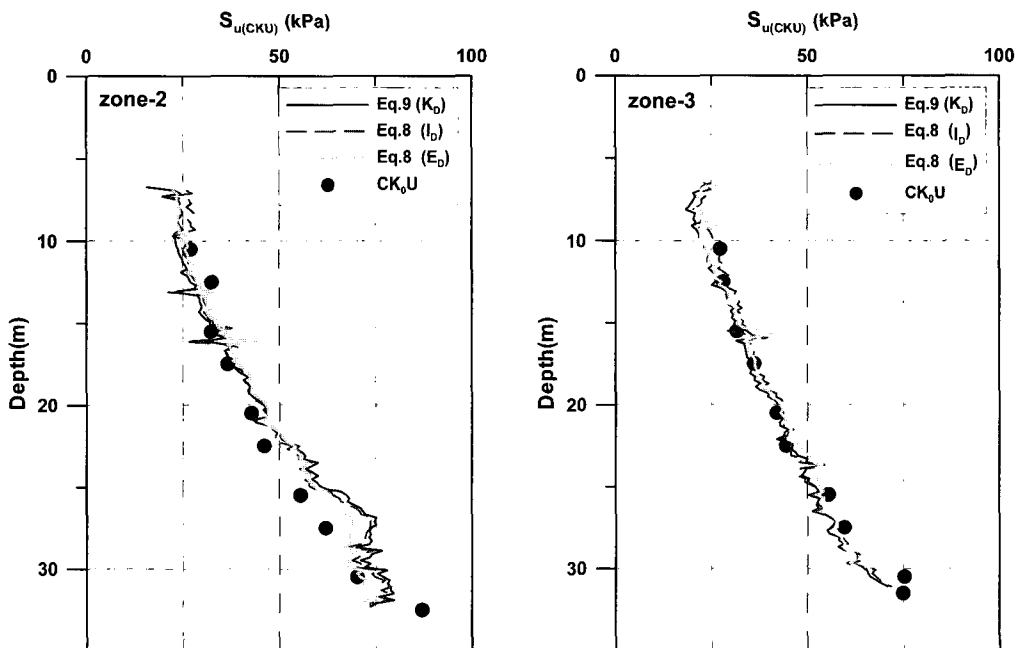


그림 11. DMT로 추정된 비배수 전단강도와 CK₀U시험 결과 비교

적인 비례관계가 있는 것으로 나타났으며, 관계식은 식 (10)과 같이 표현된다. 일반적으로 지반의 종류는 DMT의 p_1-p_0 값에 반영되며 그 크기는 점성토에서 작고 입자 크기가 증가할수록 커지는 것으로 알려져 있다. 따라서 식 (10)과 같이 p_1-p_0 항을 포함하는 I_D 또는 E_D 로부터 N_c 값을 결정하는 경우, 식 (9)와 같이 p_0 만을 포함한 K_D 로부터 추정된 비배수 전단강도보다 지반특성이 잘 반영된다는 장점이 있다. 그림 11은 본 연구에서 제안한 방법들로 추정된 비배수 전단강도를 CK_0U 시험결과와 비교한 것으로, 추정된 값과 시험결과가 상당히 잘 일치하는 것으로 나타났다.

$$\begin{aligned} N_c &= 4.0 + 9.0 \times I_D \\ N_c &= 4.7 + 0.45 \times E_D \quad (I_D \leq 0.33) \end{aligned} \quad (10)$$

4.3 DMT vs 베인시험

DMT 결과로부터 베인전단시험의 비배수 전단강도 추정방법 역시 4.2절과 같은 과정으로 제안되었다. 베인전단시험은 삼축시험이나 실제 현장의 파괴에 비해 변형속도가 크기 때문에 이러한 효과를 보정한 비배수 전단강도를 기준으로 DMT 시험결과와 비교하였다. K_D 를 이용하여 비배수 전단강도를 추정하기 위해서 4.2절과 같은 방법으로 S_1 을 결정하였다. 베인전단시험과 DMT 결과로부터 산정한 S_1 의 평균값은 0.22 정도로 나타났다. 식 (11)은 $S_1=0.22$ 로 하고 K_D 를 이용한 비배수 전단강도 추정식이며, 이는 Marchetti(1980)가 제시한 식 (5)와 동일하다.

$$\mu s_{u(VST)} = 0.22 \sigma'_v (0.5 K_D)^{1.25} \quad (11)$$

식 (8)로 $\mu s_{u(VST)}$ 를 추정하기 위해, DMT 시험과 베인전단시험 결과를 비교하여 N_c 값을 산정하였다. 그림 12에 의하면 N_c 는 I_D 또는 E_D 와 선형적인 비례 관계를 나타내지만 CK_0U 시험 결과(그림 10)에 비해 약간 큰 분산을 보이고 있다. $\mu s_{u(VST)}$ 를 추정하기 위한 N_c 는 6~11의 범위로 $s_{u(CKU)}$ 를 추정하기 위한 N_c 보다 1.5배정도 크게 나타났는데, 이것은 $s_{u(CKU)}/\mu s_{u(VST)} \approx 1.5$ 이기 때문이다. 식 (12)는 부산 신항 점토의 $\mu s_{u(VST)}$ 를 추정하기 위한 N_c-I_D 및 N_c-E_D 간의 관계를 나타낸 식이다. 그림 13은 제안된 식을 이용하여 산정한 비배수 전단강도를 베인전단시험 결과와 비교한 것이며, 제안된 방법에 의한 전단강도의 추정이 비교적 정확한 값을 제시하는 것으로 나타났지만 그림 11의 $s_{u(CKU)}$ 추정방법에 비해 상대적으로 정확도가 떨어지는 것이 관찰되었다.

$$\begin{aligned} N_c &= 6.5 + 11.3 \times I_D \\ N_c &= 7.3 + 0.61 \times E_D \quad (I_D \leq 0.33) \end{aligned} \quad (12)$$

그림 14는 본 연구에서 제안된 방법들을 이용하여 DMT 결과로부터 추정된 비배수 전단강도와 CK_0U 및 베인전단시험 결과를 비교한 것으로, 그림에 표시된 S_D 는 시험결과와 추정치의 차이를 시험결과로 나눈 후 이것의 표준편차를 산정한 것이다. 그림에 의하면 제안된 3가지 추정 방법 모두 시험결과와 유사한 결과를 보이고 있으나, 표준편차를 비교하면 I_D 나 E_D 를 이용하여 N_c 를 추정하는 방법이 K_D 를 이용하는 방법보다 상대적으로 정확한 것으로 나타났다.

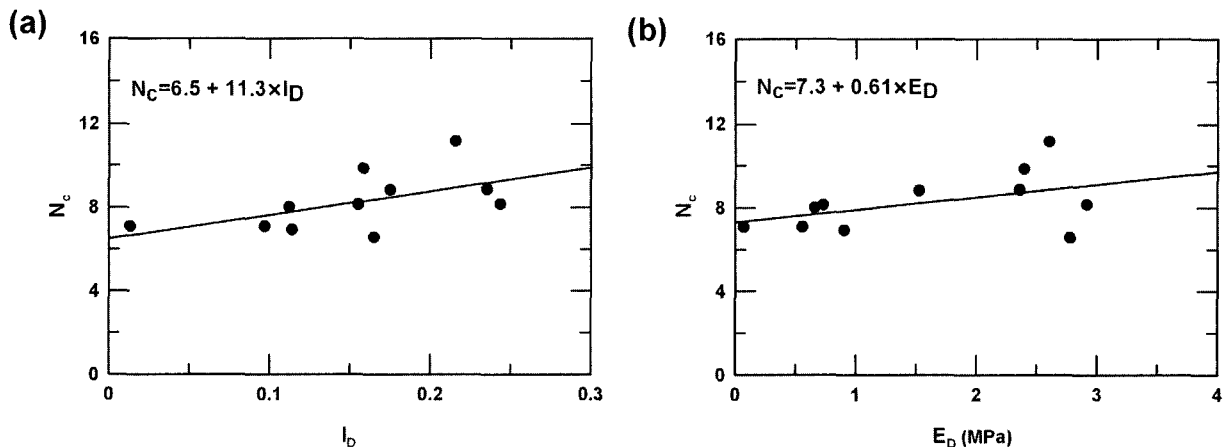


그림 12. $\mu s_{u(VST)}$ 추정을 위한 N_c 와 I_D 또는 E_D 관계

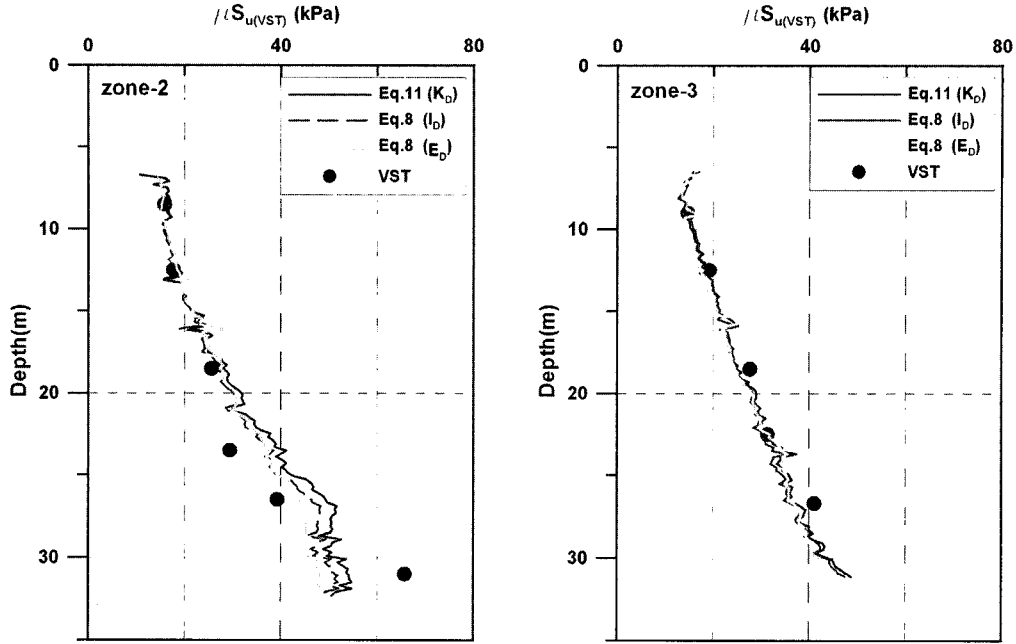


그림 13. DMT로 추정된 비배수 전단강도와 베인전단시험 결과 비교

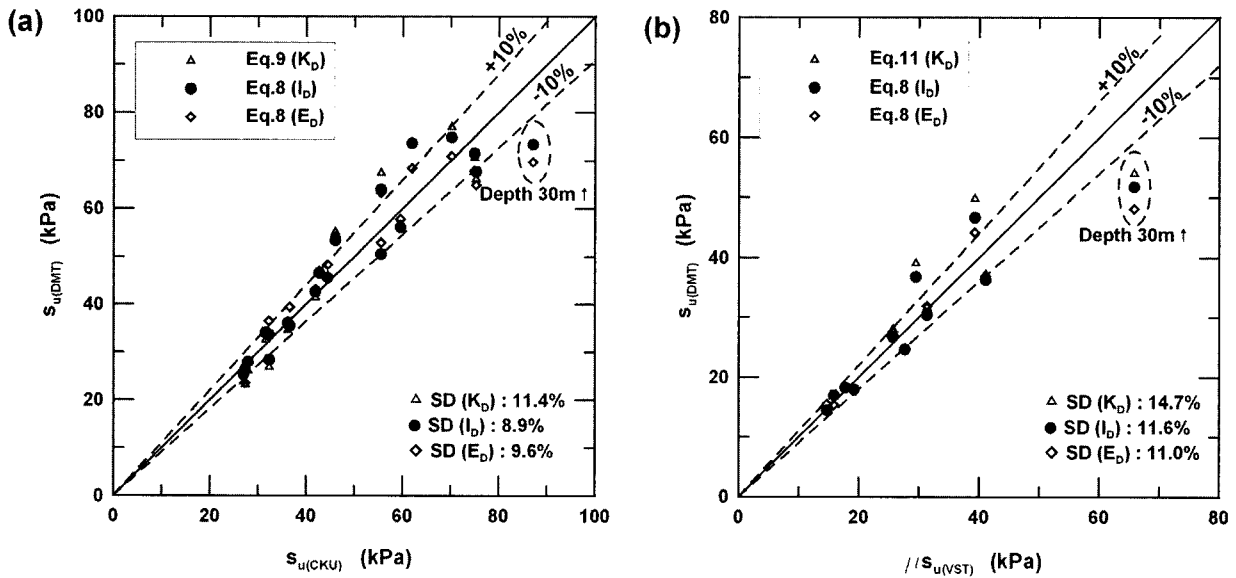


그림 14. 시험결과와 추정값의 비교

5. 결론

본 연구에서는 DMT 이용한 비배수 전단강도를 추정하는 방법을 연구하였으며, 이를 위해 부산신항 점토에 대하여 DMT, 베인전단, CK₀U 삼축압축 시험을 실시하였다. 기존에 제안된 방법들과 베인 및 삼축시험결과를 분석하고, 이를 바탕으로 비배수 전단강도 추정방법들을 제안하였다. 본 연구에서는 DMT를 이용한 비배수 전단강도 추정방법에 대하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) K_D를 이용하는 방법은 $s_u/\sigma'_v = S_1(\text{OCR})^m$ 관계에서 S₁ 및 OCR-K_D의 관계를 조정하여 다양한 전단형태에 따른 비배수 전단강도를 추정할 수 있으며, OCR의 영향을 고려하기 때문에 σ'_v 의 추정 오차를 보정할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 Marchetti(1980)가 제안한 $\text{OCR}^m = (0.5K_D)^{1.25}$ 의 식을 사용하였으며, S₁은 CK₀U시험과 베인전단시험 결과와 비교하여 각각 0.32와 0.22를 적용하였다.
- (2) 계수 N_c를 이용한 비배수 전단강도 추정방법의 경우, CK₀U시험과 베인전단시험 결과를 이용하여 분

석한 결과 N_c 는 I_D 또는 E_D 와 선형적인 비례관계를 보였다. 제안된 N_c - I_D 및 N_c - E_D 간의 상관관계를 이용하면 지반특성이 반영된 N_c 로부터 비배수 전단강도를 산정할 수 있으며, K_D 만을 이용하는 방법에 비해 다양한 DMT 시험결과를 사용하는 장점이 있다.

- (3) 본 연구에서는 $S_u(CKU)$ 와 $\mu S_u(VST)$ 에 대하여 각각 K_D 를 이용한 추정식 1가지와, N_c 를 이용한 추정식 2가지를 제시하였다. 비교결과에 의하면 제안된 추정식 모두 CKU 시험과 베인전단시험 결과를 비교적 정확히 추정을 할 수 있었으며, N_c 를 이용한 방법이 K_D 를 이용한 방법에 비해 상대적으로 더 정확한 추정값을 제시하였다.
- (4) 본 연구를 실시한 부산신항 현장은 정규압밀된 $I_D \leq 0.33$ 이하의 연약한 점토지역이다. 앞으로 OCR에 의한 영향과 N_c - I_D 및 N_c - E_D 간의 상관관계에 대해서는 보다 다양한 조건에서 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산 '대심도 해안 연약 지반 개량을 위한 이중코어 PBD 성능 연구' 과제와 관련 북컨테이너 2-1 단계 축조현장의 도움으로 진행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 김길수, 임형덕, 김대규, 이우진 (2001), "양산점토의 비배수 전단강도 특성", *한국지반공학회 논문집*, 제 17권 4호, pp.259-267.
- 김민석, 이남기, 조영기, 정성교 (2006), "현장베인시험에 의한 부산점토의 비배수 전단강도", *한국지반공학회 2006 가을학술발표회 논문집*, pp.1016-1023.
- 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.
- 김종국, 김영웅, 최인걸, 박영목 (2001), "CPTu와 DMT를 이용한 인천국제공항 해상점토의 공학적 특성연구", *한국지반공학회 논문집*, 제 17권 2호, pp.41-49.
- 김주형, 김영웅, 조성민, 김명모 (2000), "인천국제공항 부지 해상 세립토에 대한 CPTU와 DMT 결과 비교", *한국지반공학회 논문집*, 제 16권 6호, pp.23-33.
- 변위용, 김영상, 이승래 (2004), "Flat DMT를 이용한 국내 연약 지반의 비배수 전단강도 추정 시 영향을 미치는 요소들", *한국지반공학회 논문집*, 제 20권 4호, pp.103-113.
- 이영철, 김규중, 장우영, 정성교 (2006), "실내시험에 의한 부산 점토의 비배수 전단강도 특성에 관한 연구", *한국지반공학회 2006 가을학술발표회 논문집*, pp.1085-1096.
- Azzouz, A. S., Baligh, M. M. and Ladd, C. C. (1983), "Corrected Field Vane Strength for Embankment Design", *J. Geotechnical Engineering*, Vol.109, No.5, pp.730-734.
- Bjerrum, L. (1972), "Embankments on Soft Ground", *Proc. ASCE Specialty Conference on Earth and Earth-Supported Structures*, Purdue University, Vol.2, pp.1-54.
- Chung, S. G., Back, S. H., Ryu, C. K. and Kim, S. W. (2003), "Geotechnical Characterization of Pusan Clays", *Proc. Korea-Japan Joint Workshop on Characterization of Thick Clay Deposits*, ATC-7, Busan, pp.3-44.
- Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T., and Lancellotta, R. (1985), "New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils", *Proc. 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, Vol.1, pp.57-153.
- Ladd, C. C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F., and Poulos, H. G. (1977), "Stress-Deformation and Strength Characteristics", *Proc. 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Vol.2, pp.421-494.
- Marchetti, S. (1980), "In Situ Tests by Flat Dilatometer", *J. Geotechnical Engineering*, Vol. 106, No.3, pp.299-321.
- 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 Conference on In Situ Measurement of Soil Properties*, Bali, pp.1-41.
- Mesri, G. (1975), Discussion to "New Design Procedure for Stability of Soft Clays", *J. Geotechnical Engineering*, Vol.101, No.4, pp.409-412.
- Powell, J. J. M. and Uglow, I. M. (1988), "The Interpretation of the Marchetti Dilatometer Test in UK Clays", *Proc. Penetration Testing*, ICE, Birmingham, pp.269-273.
- Roque, R., Jambu, N. and Senneset, K. (1988), "Basic Interpretation Procedures of Flat Dilatometer Tests", *Proc. 1st International Symposium on Penetration Testing*, Orlando, Vol.1, pp.577-587.
- Skempton, A. W. (1957), Discussion of "Planning and Design of New Hong Kong Airport", *Proc. Institution of Civil Engineers*, Vol.7, pp.305-307.
- Kamei, T. and Iwasaki, K. (1995), "Evaluation of Undrained Shear Strength of Cohesive Soils using a Flat Dilatometer", *Soils and Foundations*, Vol. 35, No.2, pp.111-116.
- Torstensson, B. A. (1977), "Time-Dependent Effects in the Field Vane Test", *International Symposium on Soft Clay*, Bangkok, pp.387-397.
- Vesic, A. S (1972), "Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass", *J. Soil Mech. Found.*, Vol.98, No.3 pp.265-290.
- Weisel, C. E. (1973), "Some Factors Influencing In Situ Vane Test Results", *Proc. 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, Vol.1, pp.111-159.

(접수일자 2007. 5. 21, 심사완료일 2007. 7. 20)