

# CPT와 DMT를 이용한 부산점토의 최대전단탄성계수 추정방법에 관한 연구

## The Prediction Method of the Small Strain Shear Modulus for Busan Clay Using CPT and DMT

홍 성 진<sup>1</sup> Hong, Sung-Jin

윤 형 구<sup>2</sup> Yoon, Hyung-Koo

이 중 섭<sup>3</sup> Lee, Jong-Sub

이 우 진<sup>4</sup> Lee, Woo-Jin

### Abstract

This study is to evaluate the small strain shear modulus ( $G_{max}$ ) of Busan clay using in-situ penetration tests. A series of dilatometer tests (DMT) and piezocone penetration tests (CPTu) are performed at Busan newport and Noksan sites, and hybrid oedometer tests are also carried out on the specimens obtained from both sites. The  $G_{max}$  is evaluated from the shear wave velocity ( $V_s$ ) measured by the bender elements installed at the boundary of oedometer cell. By analyzing these data, the relationship of  $G_{max}$  and state variables, such as confined stress and void ratio, is developed. The analysis of lab and in-situ test results reveals that the ratio of  $G_{max}$  to  $q_t$  is inversely proportional to the plasticity index while the ratio of  $G_{max}$  to  $E_D$  has a linear relationship with  $(1/I_D)(p_a/\sigma'_v)^{0.5}$ . Two correlations suggested in this study, based on CPT and DMT results, appear to provide reasonable predictions of the small strain shear modulus.

### 요 지

본 연구는 콘 관입시험(CPT)과 딜라토미터시험(DMT)을 이용한 부산지역 점토의 최대전단탄성계수 추정( $G_{max}$ )에 관한 것이다. 이를 위해 부산신항 지역과 녹산지역에서 피에조콘 관입시험(CPT) 및 딜라토미터시험(DMT)을 수행하였으며, 비교란 시료를 채취하여 hybrid oedometer 시험을 실시하였다. Oedometer 내벽에 장착된 벤더엘리먼트로 전단파 속도를 측정하여 최대전단탄성계수를 산정하였으며, 이를 바탕으로 부산점토의 최대전단탄성계수와 구속응력, 간극비, 응력이력간의 관계를 파악하였다. 현장시험 및 실내시험을 분석한 결과,  $q_t$ 와  $G_{max}$ 의 상관계수  $\alpha_G$ 는 소성지수에 반비례하는 것으로 나타났으며,  $E_D$ 와  $G_{max}$ 의 상관계수  $R_G$ 는  $(1/I_D)(p_a/\sigma'_v)^{0.5}$ 와 비례관계를 나타냈다. 이러한 관계를 바탕으로 본 연구에서는 CPT와 DMT 시험으로부터  $G_{max}$ 를 추정하는 방법을 개발하였으며, 제안된 방법은 부산점토의 최대전단탄성계수를 적절하게 예측하는 것으로 관찰되었다.

**Keywords** : CPT, DMT, Shear wave velocity, Small strain modulus

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

2 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ.)

3 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ.)

4 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

정확한 지반 물성치의 추정은 지반구조물의 경제성 설계와 안전한 시공을 위해 매우 중요한 일이다. 본 연구는 지반의 동적특성을 나타내는 물성치인 최대전단탄성계수 추정에 관한 것으로, 최대전단탄성계수는 항타, 내진해석 등 지반의 동적해석에 반드시 필요한 지반 물성치이다. 최대전단탄성계수는 응력-변형률 관계가 선형으로 나타나는 초기 변형률에서의 값으로, 지반의 종류와 응력이력 등에 따라 차이가 나타나 일반적으로 변형률 10<sup>-3</sup>% 이하에서의 전단탄성계수이다(Santagata 2008, Myne 2001). 최대전단탄성계수는 미소변형에서의 지반특성으로 일반적인 장비로 측정이 어려우며 공진주시험 같은 특수한 실내시험에 의하여 측정하거나 다운홀, 크로스홀 시험 등의 현장 탄성과 시험으로부터 산정할 수 있다. 그러나 이러한 시험들은 특수한 시험장비나 기술을 필요로 하는 단점이 있어 연구자들은 최대전단탄성계수를 보다 간단하게 추정하는 방법을 연구하였다. 선형 연구자들은 점성토의 최대전단탄성계수가 간극비( $e_0$ ), 구속응력, 응력이력에 영향을 받으며, 이를 이용하여 아래 식 (1)과 같이 최대전단탄성계수를 추정할 수 있다고 하였다(Hardin 1978, Vucetic & Dobry 1991).

$$G_{max} = AF_e (p_a \sigma'_0)^{0.5} OCR^k \quad (1)$$

여기서, A는 상수로 지반에 따라 다르며,  $F_e$ 는 간극비에 관련된 함수로 제안자에 따라 다르다.  $p_a$ 는 대기압,  $\sigma'_0$ 는 평균주응력이고, k는 응력이력의 영향계수로 소성지수와 관계가 있으며 0.5를 넘지 않는다고 하였다.

콘 관입시험(CPT)과 델라토미터시험(DMT)은 지반에 콘 또는 블레이드를 관입하여 지반 물성치를 추정하는 시험으로, 빠르고 경제적이며 지반 데이터를 연속적으로 측정할 수 있어 근래에 활발히 사용되고 있다. 이러한 장점 때문에 CPT와 DMT로 최대전단탄성계수를 추정하려는 연구가 지속적으로 진행되었다(Jamiolkowski 등 1988, Baldi 등 1989, Hryciw 1990, Rix & Stokoe 1991, Mayne & Rix 1993, Lee 등 2007, Hong 등 2008). 그 중 몇몇 연구에서는 아래 식 (2), (3)과 같이 상관계수를 이용하여 CPT와 DMT 결과에서 최대전단탄성계수를 추정하였다(Jamiolkowski 등 1988, Baldi 등 1986).

$$G_{max} = \alpha G_c \quad (2)$$

$$G_{max} = R_G E_D \quad (3)$$

여기서,  $\alpha_G$ 와  $R_G$ 는 상관계수이며  $q_c$ 는 콘 저항치,  $E_D$ 는 델라토미터계수이다.

본 연구에서는  $\alpha_G$  및  $R_G$ 와 지반특성과의 관계를 분석하고, 이를 바탕으로 CPT 및 DMT를 이용한 부산점토의 최대전단변형계수 추정방법에 대하여 연구하였다. 이를 위하여 부산신항과 녹산지역에서 CPT 및 DMT 시험을 수행하였으며, 압밀셀 벽면에 설치한 벤더엘리먼트로 전단파 속도를 측정하여 최대전단탄성계수를 산정하였다.

## 2. 시험 내용 및 방법

본 연구는 부산신항 북 컨테이너 현장 및 녹산산업단지 조성현장 지역의 점토를 대상으로 실시하였다(그림 1). 시험현장은 낙동강 하구지역으로 신항건설 및 산업단지 조성을 위해 2m~6m를 매립한 지역으로, 부산신항 및 녹산지역의 경위도는 각각 E128°47'56", N35°04'30"와 E128°53'28", N35°06'17"이다. CPT, DMT 및 시료 채취는 원지반 점성토를 대상으로 3m 정도의 간격을 두고 실시하였으며, 시료는 내경 74mm의 piston sampler를 이용하여 채취하였다. 채취한 시료를 이용하여 기본 물성시험과 hybrid oedometer 시험을 수행하였다.

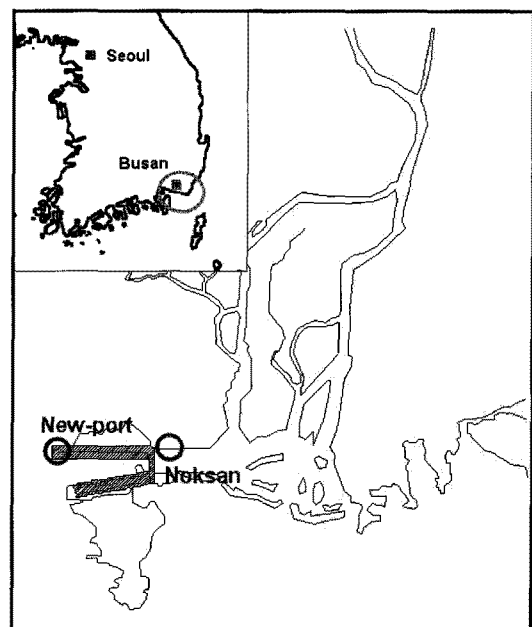


그림 1. 시험부지

## 2.1 실내시험

본 연구에서 사용한 hybrid oedometer 시험장비는 압밀셀 상·하부와 측면에 벤더엘리먼트를 장착해 구속하중에 따른 시료의 전단파 속도를 측정하도록 개발한 장비이다(이창호 등 2008). 그림 2는 시험장비 모식도로, 시료의 직경과 높이는 각각 74mm 및 37mm이며, 사용된 벤더엘리먼트는 두께 11mm 너비 4mm이고 시료에 접촉되는 길이는 4mm이다. 압밀셀 상하좌우에 설치된 벤더엘리먼트로  $V_{(VH)}$ 와  $V_{(HH)}$ 를 측정할 수 있으며, 식 (4)를 이용하여  $G_{max}$ 를 산정할 수 있다.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (4)$$

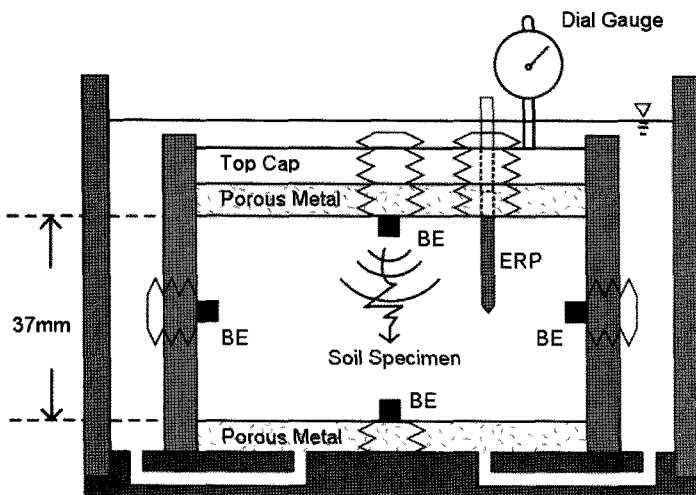
여기서,  $\rho$ 는 단위질량으로 김동수 등(2005)에 따르면 특성주파수가 시험주파수보다 10배 이상 클 경우 간극수도 매질역할을 하기 때문에 간극수를 포함한 단위질량을 사용하여야 한다. 점토의 경우 투수계수가 작아 특성주파수가 시험주파수에 비해 10배 이상 큰 값을 나타내므로, 총 단위질량을 이용하여 최대전단탄성계수를 산정하여야 한다. 본 연구에서는 채취한 샘플을 이용하여 부산신항의 경우 심도 10m에서 31m 까지 8회, 녹산지역의 경우 심도 16m부터 29m까지 4회 시험을 실시하였다. 압밀시험의 하중은 5kPa부터 640kPa까지 하중증가비 1로 시험을 실시하였으며, 하중제하 역시 동일한 하중단계로 실시하였다. 시료의 두께가 표준압밀시험보다 크기 때문에 압밀시간을 하중 재하 시에는 48시간으로,

제하 시에는 12시간으로 하였으며, 압밀 완료 후 다이얼 게이지를 이용하여 변위를 측정하였다. 압밀 완료 후 측면 벤더엘리먼트를 이용하여  $V_{(HH)}$ 를 측정하고, 식 (4)를 이용하여 각 응력상태에서의 최대전단변형계수를 산정하였다.

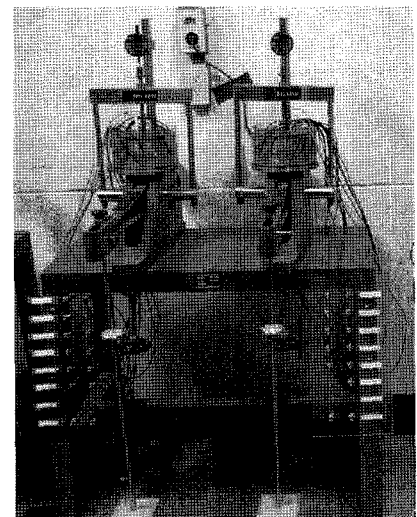
## 2.2 현장시험

콘 관입시험은 원추형 프로브를 지반에 관입하면서 발생하는 지반반력을 측정하는 시험으로 1930년대 네덜란드에서 처음 소개되어 지반의 지지력 산정에 이용되어 왔다. 이후 마찰력을 측정하는 콘이 개발되었으며, 데이터를 저장하는 전기식 콘과 간극수압을 측정하는 피에조콘 등이 개발되어 다양한 지반 정수를 획득할 수 있게 되었다(Lunne et al. 1997). 본 연구에서 사용한 CPT 장비는 선단각도가 60°, 콘단면적 10cm<sup>2</sup>, 마찰면적이 150cm<sup>2</sup>인 Geotech사의 U<sub>2</sub> 형식의 전기식 피에조콘으로, 시험은 콘 프로브를 지반에 2cm/sec의 속도로 관입시키며 발생하는 콘 저항력( $q_c$ )과 간극수압( $u_2$ ) 그리고 마찰력( $f_s$ )을 측정하였다. 부산신항지역의 경우 심도 7m~50m까지 수행하였으며, 녹산지역의 경우 심도 6m~12m와 심도 18m~30m 구간에서 시험을 수행하였다.

DMT는 Marchetti에 의해 1974년 처음 개발되었으며, 폭 95mm, 두께 14mm 크기의 관입체에 60mm 직경의 강철 멤브레인이 장착되어 있다. DMT 시험은 강철 멤브레인이 0.05mm와 1.1mm 팽창할 때의 압력과 0.05mm 수축할 때의 압력을 측정 후 이를 보정하여  $p_0$ ,  $p_1$ ,  $p_2$



(a) 모식도



(b) 시험전경

그림 2. Hybrid oedometer 시험기

를 산정하고, 이로부터 재료지수( $I_p$ ), 횡방향응력지수( $K_D$ ), 딜라토미터계수( $E_D$ )를 산정하여 지반의 물성치를 추정한다(Marchetti, 1980). DMT시험은 콘의 관입 저항치를 측정하는 CPT에 비하여 지반의 횡방향 토압계수, 과압 밀비, 압축성 등을 비교적 정확하게 추정하며, 재료지수를 이용하여 지반을 분류하고, 추정식을 이용하여 비배수 전단강도, 단위중량, 내부마찰각 등을 산정할 수 있다(Marchetti 등, 2001). 본 연구에서는 부산신항지역의 경우 심도 7m~31m까지, 녹산지역의 경우 6m~32m까지 20cm간격으로 시험을 수행하였다.

### 3. 시험 결과

#### 3.1 물성치 시험

그림 3은 시험지역의 지층 및 기본 물성치를 나타낸 것이다. 부산신항은 심도 6m 까지 매립 모래층, 심도 6m~27m에 연약 점토층, 27m~35m에 중간굳기 점토층이 분포한다. 채취한 시료의 함수비 및 액·소성한계는 심도 28m까지 증가하다 그 이상 심도에서는 감소하는 경향이 있으며, 함수비가 액성한계에 비하여 약간 크거나 비슷하다. 통일분류법으로 지반을 분류하면 점토

층은 심도 15m까지 CL, 심도 15m 이상에서는 CH로 나타났다. 녹산지역의 경우, 심도 3m까지는 모래/자갈 매립층, 심도 3m~16m는 모래와 점토가 혼재되어 있는 층이며, 심도 16m~23m는 연약 점토층, 이후에는 중간 굳기 점토층이 나타났다. 점토지반은 CH로 분류되었으며, 부산신항지역과 유사하게 함수비 및 액·소성이 심도 28m까지 증가하다 감소하였으나, 자연함수비는 액성한계 보다 약간 작게 나타났다.

#### 3.2 Hybrid oedometer 시험 결과

그림 4는 hybrid oedometer 시험 결과를 나타낸 것이다. 전단파의 속도( $V_s$ )는 압밀셀 측면에 부착된 벤더엘리먼트를 이용하여 측정하였으며, 최대전단탄성계수는 식 (4)를 이용하여 산정하였다. 그림 4(a)에 의하면, 전단파 속도의 응력에 따른 변화경향은 모든 시험에서 유사하게 나타났다. 구속하중이 선행압밀하중보다 작을 때에는 응력에 따라 완만하게 증가하다 선행압밀하중 이후에는 급격히 증가하는 형상을 보인다. 반면 하중 제거 시에는 로그축에 대하여 선형적으로 감소하는 경향이 나타났는데, 이러한 경향은 압밀시험에서 응력-침하량 곡선과 유사한 형태이다. 전단파 속도는 초기응력에

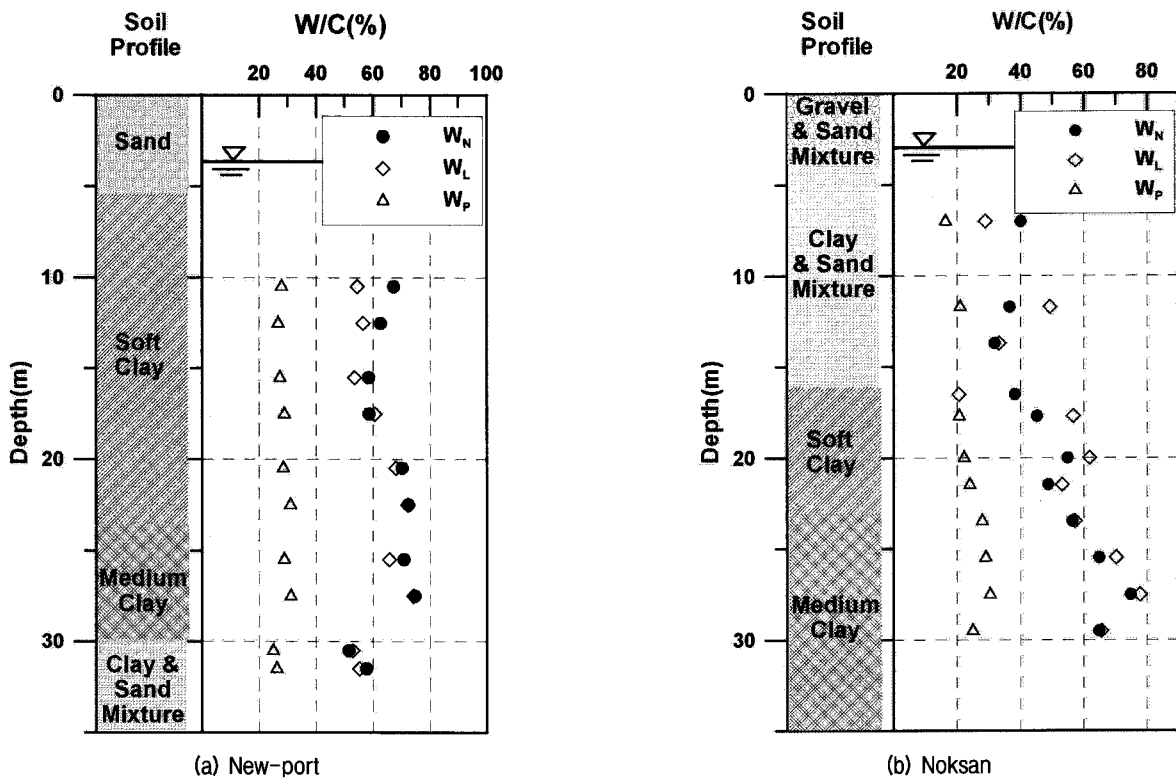


그림 3. 현장지반 물성치

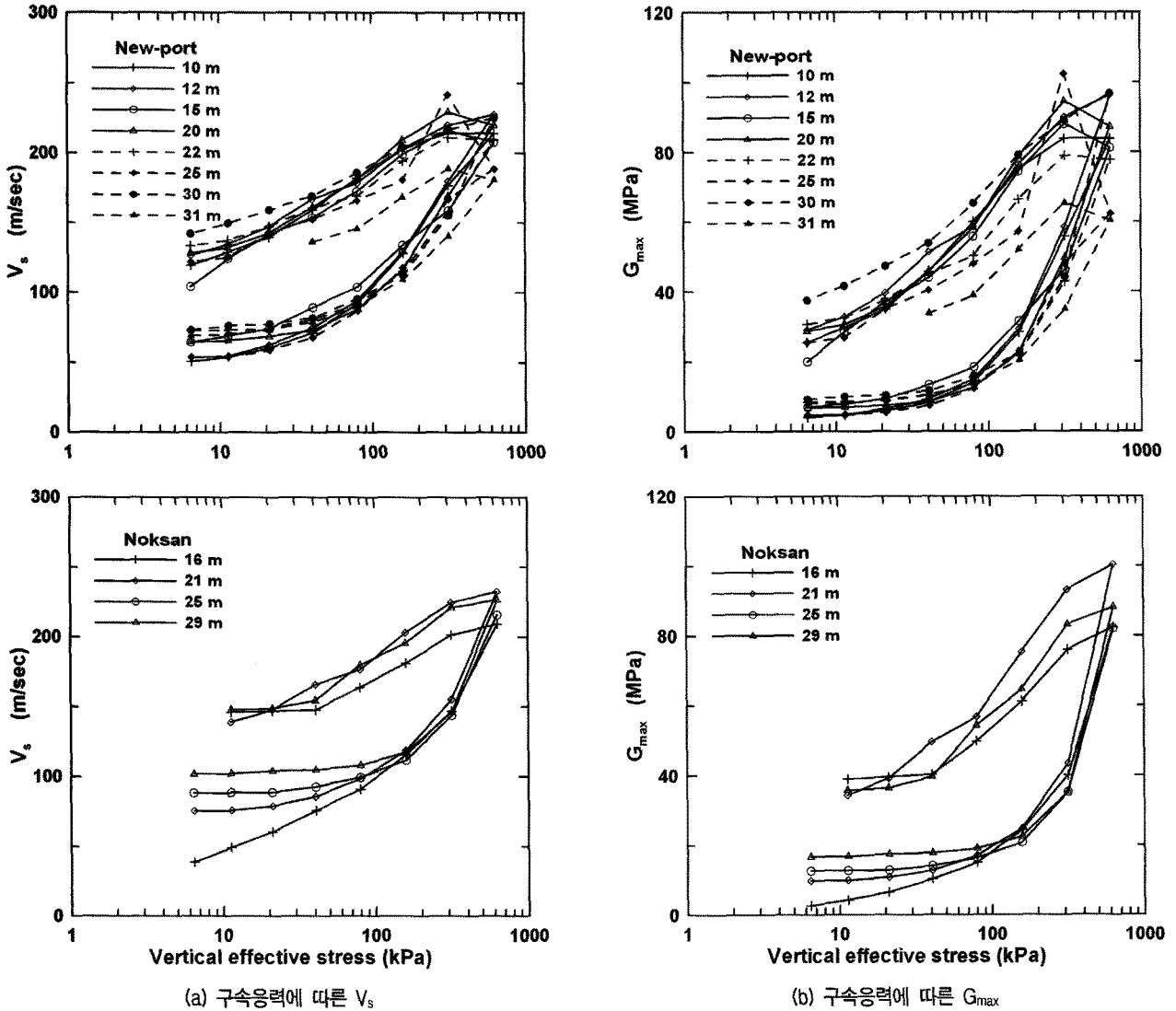


그림 4. Hybrid oedometer 시험 결과

서는 심도가 깊을수록 크게 나타났으며, 선형압밀하중 이후에는 전단파 속도가 유사해지는 것으로 나타났는데, 이것은 깊은 심도의 시료일수록 잔류강도가 크기 때문으로 판단된다. 녹산지역의 16m 심도 시료의 초기 전단파 속도가 다른 시험에 비하여 특히 작게 측정되었는데, 이것은 점토에 모래가 혼재되어 있어 다른 시료에 비하여 시료 교란도가 크기 때문으로 판단된다. 그림 4(b)에 나타난 구속응력과 최대전단파탄성계수의 관계는 구속응력과 전단파 속도의 관계와 유사하게 나타났다.

### 3.3 CPTu 결과

그림 5는 시험지역의 CPTu 결과로, 콘저항치의 경우 콘 어깨부분의 간극수압( $u_2$ ) 영향을 고려한 수정 콘저항치( $q_c$ )를 사용하였다. 부산신항의 경우 심도 15m와 32m에 얇은

모래층이 존재하나 이를 제외하고는  $q_c$ 와  $u_2$ 가 심도에 따라 일정하게 증가하는 균일한 점토층이 나타났다. 정규화 콘 저항치( $Q_c$ )는 심도에 따라 7에서 3정도로 감소하였으며, 간극수압비( $B_q$ )는 0.2에서 1 사이에 분포하였다.

녹산지역의 경우 심도 6m~12m의 점토와 모래가 혼재된 층이 나타났으며, 심도 12m~17m에서는 조밀한 모래층이 나타났으나, 관입이 어려워 시험을 수행하지 못하였다. 이후 심도 18m~30m에서는 심도 24m와 29m의 얇은 모래층을 제외하고는 균질한 점토층이 나타났다. 상부 혼재층에서는  $q_c$ 와  $u_2$ 가 심하게 변하였으며, 하부 점토층의 경우  $q_c$ 는 심도 25m 까지 일정하다 이후 증가하는 것으로 나타났고  $u_2$ 는 심도에 따라 증가하였다. 하부 점토층에서  $Q_c$ 의 경우 4정도로 심도에 따라 비교적 일정하였으며,  $B_q$ 는 심도에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

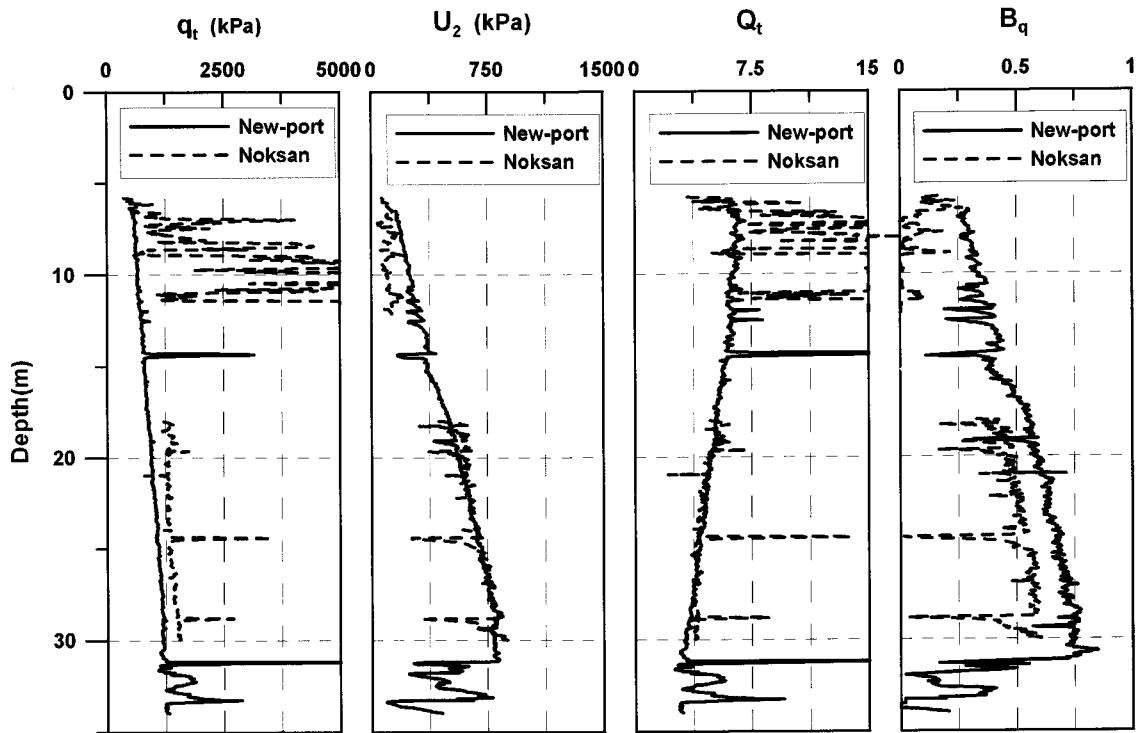


그림 5. CPTu 결과

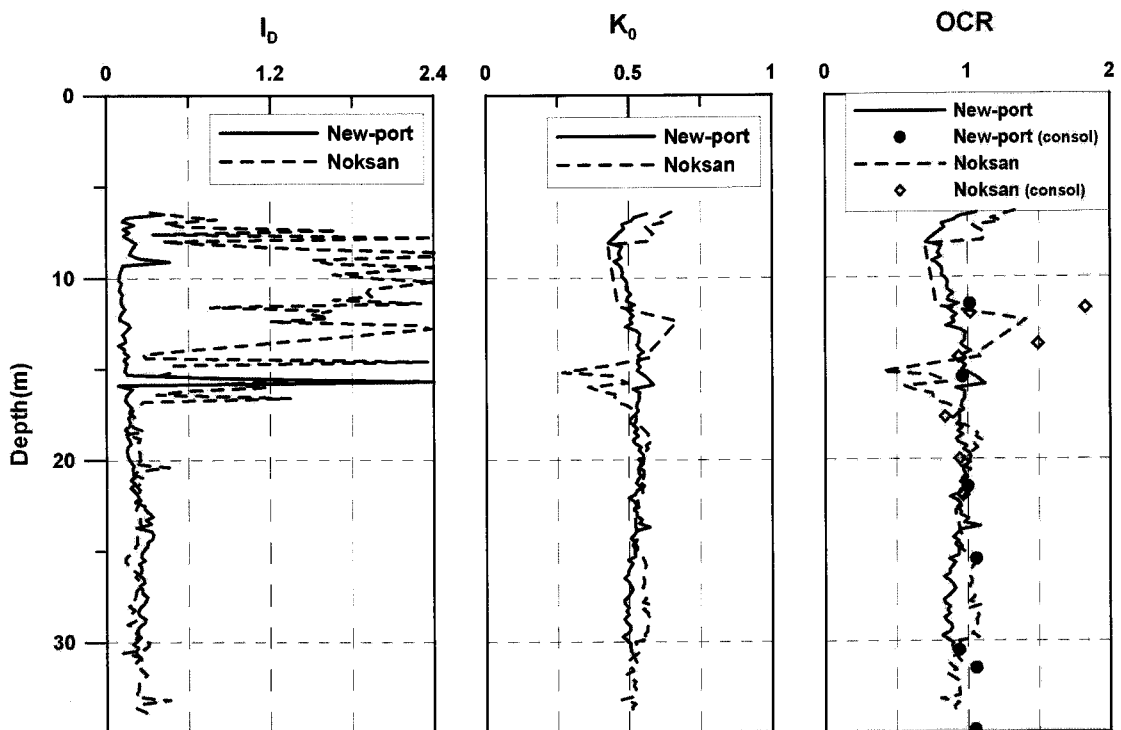


그림 6. DMT 시험결과

### 3.4 DMT 결과

그림 6은 시험지역의 DMT 결과이다. 재료지수는 DMT를 이용하여 지반을 분류하는 기준으로  $I_b$ 가 0.6보다 작으면 점토, 1.8보다 크면 모래로 분류된다(Marchetti 1980).

그림 6에서 산정한 정지토압계수( $K_0$ ) 및 과압밀비(OCR)는 Marchetti(1980)가 제안한 방법을 이용하여 산정하였는데, Marchetti 방법은 부산점토의  $K_0$  및 OCR을 비교적 정확하게 예측한다(홍성진 등 2007, Hong 등 2008). 부산신항 지역 결과를 보면, 시험지반은 16m 지역의 모

래층을 제외하고는  $I_D$ 가 0.3 이하의 연약한 점토로 구성되어 있는데, 이것은 CPTu 결과와도 일치한다.  $K_0$ 는 0.5~0.6, OCR은 0.9~1.1로 정규압밀된 지반으로 나타났으며, 압밀시험에서도 정규압밀된 지반으로 나타났다.

녹산지역의 경우 심도 6m에서 17m까지는  $I_D$ 가 0.4~4.2로 넓게 분포되어있는 모래/실트/점토가 혼재된 지반이, 그리고 심도 18m 이상에서는  $I_D$ 가 0.2~0.3인 점토 지반이 나타났다. CPTu 결과에서 발견된 심도 24m와 29m의 얇은 모래층은 DMT 시험결과에서는 나타나지 않았는데, 이것은 협재된 모래층이 두께가 너무 얇아서 20cm 간격으로 시험을 수행하는 DMT 시험결과에는 나타나지 않은 것으로 판단된다. 심도 10m 내외에서 OCR  $\approx$  1.5 정도인 약간 과압밀된 지반이 나타났으나 전체적으로 OCR  $\approx$  1인 정규압밀된 지반이었으며, 점토층의  $K_0$ 는 0.5~0.6 정도 범위로 나타났다.

#### 4. 시험 결과 분석

##### 4.1 구속응력과 간극비를 이용한 최대전단탄성계수 추정

부산점토에 대하여 최대전단탄성계수 추정방법을 제안하기 위하여 hybrid oedometer 시험결과를 분석하였다. 식 (1)에서  $AF_c$  값을 산정하기 위하여 정규압밀 상태의  $G_{max}$ 를  $(\sigma'_{op})^{0.5}$ 로 정규화하고 그 값을 간극비와 비교하였다. 여기서  $\sigma'_0$ 는 평균주응력  $(\sigma'_v + 2K_0\sigma'_v)/3$ 으로  $K_0$ 는 동일한 심도에서 실시한 DMT 결과를 사용하였으

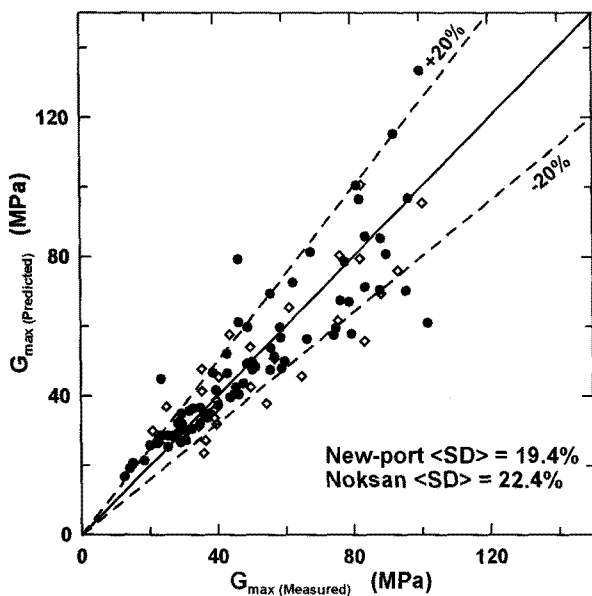


그림 7.  $G_{max}$  추정값과 측정값 비교

며, 잔류응력의 영향을 배제하기 위하여 선형압밀하중보다 큰 응력에서의  $G_{max}$ 를 사용하였다. 분석결과 A는 460,  $F_c=1/e^{1.2}$ 로 나타났다. 앞에서 분석한 A와  $F_c$ 를 이용하여 제하 시 데이터를 분석한 결과, 식 (1)에서 OCR의 영향을 나타내는 k값은 0.1로 나타났다. Hardin(1978)은 k값이 소성지수와 관계가 있다고 하였으나, 본 연구에서는 k값과 소성지수간의 명확한 관계가 나타나지 않았다. 앞의 결과를 종합하면 부산점토의 최대전단탄성계수는 식 (5)와 같이 구속응력과 간극비의 함수로 표현된다.

$$G_{max} = \frac{460(p_a \sigma'_0)^{0.5}}{e^{1.2}} (OCR)^{0.1} \quad (5)$$

그림 7은 식 (5)로 추정된 최대전단탄성계수와 시험으로 측정된 값을 비교한 것이다. 그림에서 SD는 추정값에서 측정값을 뺀 후 측정값으로 나눈 값이 표준편차를 나타내는 것으로, SD가 작을수록 정확하게 예측하는 것을 뜻한다. 추정값의 오차는 대부분 20%미만이며, 부산신항과 녹산 지역의 SD는 19.4%와 22.4%로 녹산지역의 오차가 조금 크게 나타났다.

##### 4.2 CPT를 이용한 최대전단탄성계수 추정

CPT는 원추형 콘이 지반을 파괴시키면서 발생하는 반응을 측정하는 시험으로, 지반의 미소변형에서의 변형계수인 최대전단탄성계수와 직접적으로 비교하는 것은 무리가 있다. 그러나 Mayne과 Rix(1993)는 최대전단탄성계수가 식 (1)과 같이 간극비와 응력상태에 영향을 받는다는 것을 이용하여 CPT 시험으로부터 최대전단탄성계수를 추정하는 방법을 식 (6)과 같이 제안하였다.

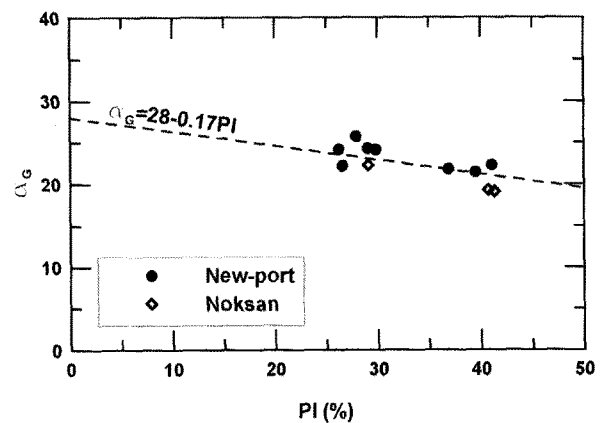


그림 8.  $\alpha_G$ 와 PI의 관계

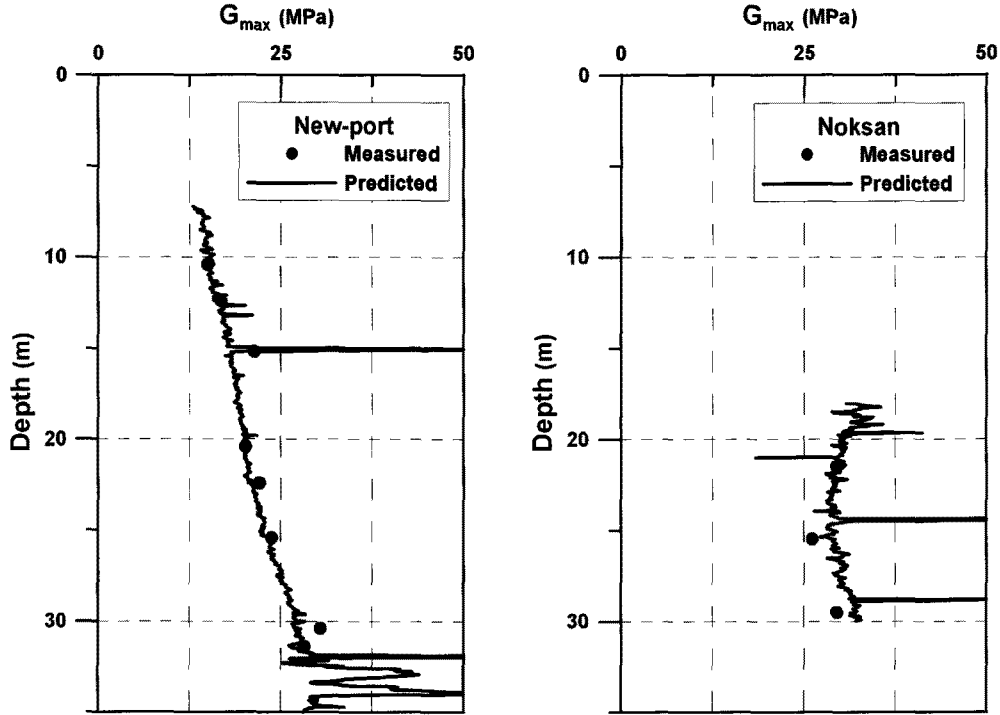


그림 9. 식 (7)을 사용한  $G_{max}$  추정치와 측정치의 심도에 따른 비교

그러나 이 방법은 복잡하고 현장 간극비( $e_0$ )를 따로 측정해야하는 문제점이 있다.

$$G_{max} = 99.5(p_a)^{0.305} (q_c)^{0.695} / e_0^{1.130} \quad (6)$$

본 연구에서는  $q_t$ 와  $G_{max}$ 의 상관계수인  $\alpha_G$ 를 이용하여 간단하게 최대전단탄성계수를 추정하는 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 hybrid oedometer 시험으로 측정된 최대전단탄성계수와 CPT 결과를 비교하여  $\alpha_G$ 를 역산하고, 이를 점토의 특성을 나타내는 대표적인 물성치인 소성지수(PI)와 비교하여 보았다. 그림 8은 산정한  $\alpha_G$ 와 PI의 관계를 나타낸 그래프로,  $\alpha_G$ 는 PI에 따라 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이를 이용하면 CPTu로부터 최대전단탄성계수를 추정하는 방법은 식 (7)과 같이 간단하게 표현될 수 있다. 그림 9는 식 (7)을 이용하여 추정한 부산신항 및 녹산지역의 최대전단 탄성계수를 나타낸 것으로, 식 (7)은 심도에 관계없이 최대전단탄성계수를 비교적 정확하게 예측하였다.

$$G_{max} = \alpha_G q_t = (28 - 0.17PI) q_t \quad (7)$$

#### 4.3 DMT를 이용한 최대전단탄성계수 추정

DMT 역시 블레이드가 지반을 파괴시키며 관입되며,

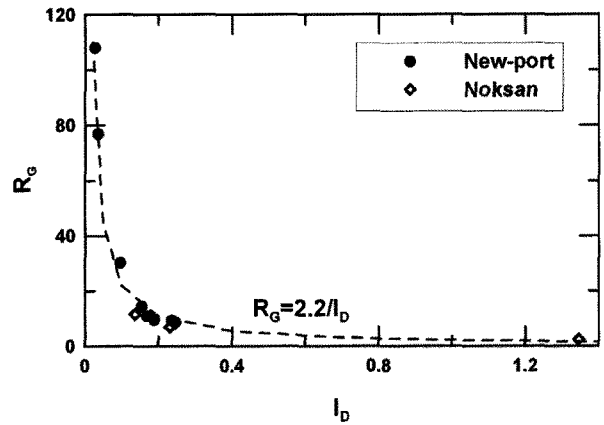


그림 10.  $R_G$ 와  $I_D$ 의 관계

멤브레인 팽창 시에도 변형이 발생하므로, 미소변형에서의 변형계수인 최대전단탄성계수와는 직접적으로 비교하는 것은 무리가 있다. 그러나 Hryciw(1990)는 식 (8)과 같은 최대전단탄성계수 추정방법을 제안하였으며,  $\gamma_d$ 와  $K_0$ 를 DMT로부터 산정할 수 있다고 하였다.

$$G_{max} = \frac{530}{(\sigma'_v/p_a)^{0.25}} \frac{(\gamma_d/\gamma_w) - 1}{2.7 - (\gamma_d/\gamma_w)} K_0^{0.25} (\sigma'_v/p_a)^{0.5} \quad (8)$$

여기서,  $\gamma_d$ 는 건조단위중량,  $\gamma_w$ 는 물의 단위중량, 그리고  $p_a$ 는 대기압을 나타낸다. 식 (8)은 복잡하게 보이지만, 최대전단탄성계수를 단위중량과 응력상태의 함수로



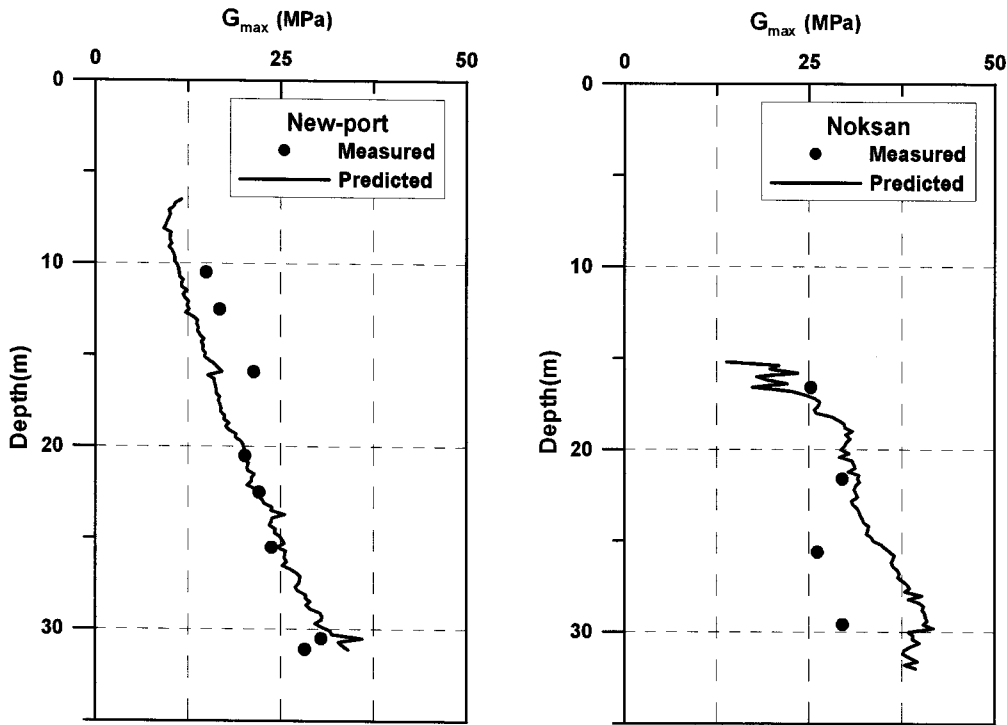


그림 11. 식 (9)를 사용한  $G_{max}$  추정치와 측정치의 심도에 따른 비교

표시한 것이다.

본 연구에서는 식 (3)을 이용하여 보다 간단한 개념으로 DMT를 이용한 최대전단탄성계수 추정방법을 제안하고자 한다. 식 (3)의  $R_G$ 는 중간변형율의 변형계수인  $E_D$ 와 미소변형율의 변형계수인  $G_{max}$ 의 비율이다. 이러한 비율은 지반의 특성에 따라 영향을 받을 것이므로, DMT시험 중 지반특성을 나타내는  $I_D$ 를  $R_G$ 와 비교하여 보았다. 그림 10은  $I_D$ 와  $R_G$ 의 관계를 나타내는 그래프로, 두 값은 반비례관계를 나타냈다.  $I_D$ 는 지반의 상대적 강성을 나타내는 값으로, 지반의 강성이 커질수록 지반의 중간변형율 변형계수와 미소변형율 변형계수의 차이가 작아짐을 의미한다. 식 (9)는 그림 10의 관계를 이용하여 최대전단탄성계수 추정방법을 제안한 것이며, 그림 11은 이 식을 이용하여 추정된 최대전단탄성계수와 측정값을 심도에 따라 비교한 것이다.

$$G_{max} = R_G E_D = \frac{2.2}{I_D} E_D \quad (9)$$

그림 11에 의하면 심도 20m를 기준으로 얕은 심도에서는 최대전단탄성계수를 과소 추정하며, 깊은 심도에서는 과대 추정하는 경향이 나타났다. 이것은  $R_G$ 가  $I_D$ 뿐 아니라 구속응력에도 영향을 받음을 의미하며, 이러한 오차를 없애기 위해 구속응력의 효과를 고려한  $R_G$ 와  $I_D$

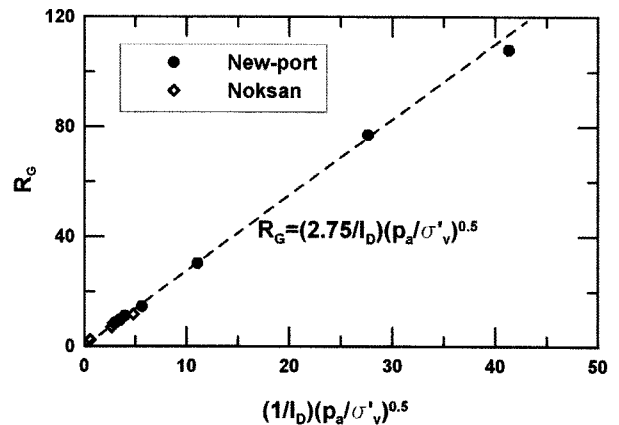


그림 12.  $R_G$ 와  $(1/I_D)(p_a/\sigma'_v)^{0.5}$ 의 관계

관계를 분석하였다. 그림 12는  $R_G$ 와  $(1/I_D)(p_a/\sigma'_v)^{0.5}$ 의 관계를 나타낸 것으로, 두 값은 선형적인 관계를 나타낸다. 이를 이용하면, 식 (10)과 같이 DMT 결과로부터 최대전단탄성계수를 추정할 수 있다. 그림 13은 식 (10)을 이용하여 추정된 최대전단탄성계수와 측정값을 비교한 것으로, 식 (9)의 추정과 달리 심도에 따라 오차가 발생하지 않고 정확하게 최대전단탄성계수를 추정하였다.

$$G_{max} = R_g E_D = \frac{2.7}{I_D} \left( \frac{p_a}{\sigma'_v} \right)^{0.5} E_D \quad (10)$$

식 (10)에서  $I_D$ 와  $E_D$ 의 관계를 이용하면, 최대전단탄

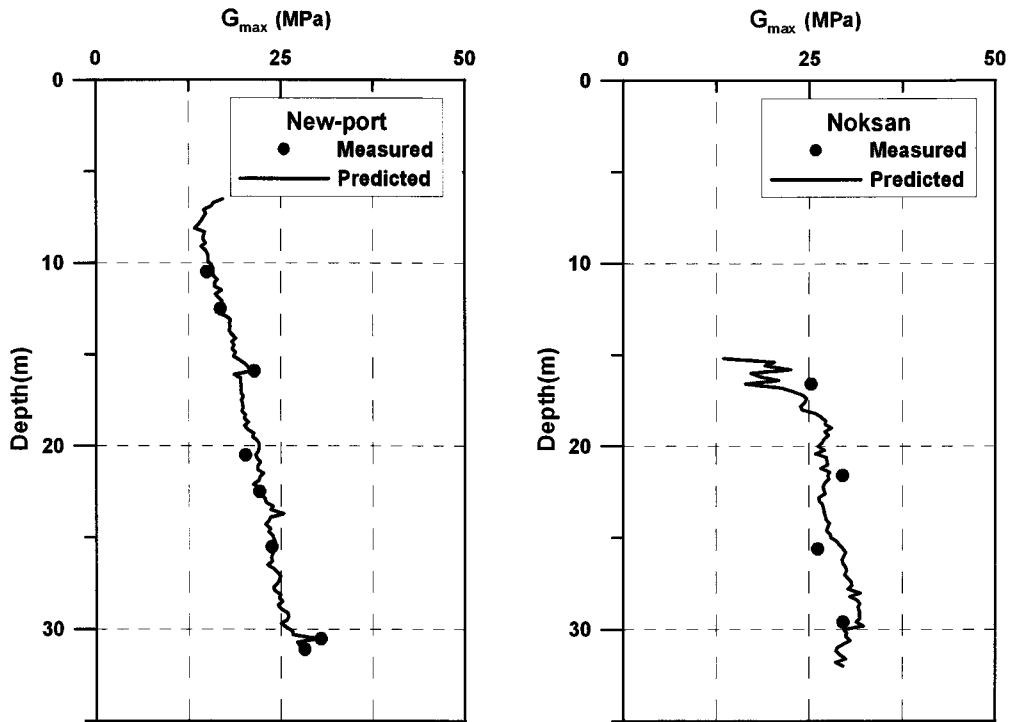


그림 13. 식 (10)을 사용한  $G_{max}$  추정치와 측정치의 심도에 따른 비교

성계수는 식 (11)과 같이 구속응력과 응력상태를 나타내는  $\sigma'_v$  및  $K_D$ 의 함수로 표현된다. 점토의 경우 간극비 역시 구속응력과 응력이력에 의해 좌우되므로, 이것은 Hardin & Black(1968)이나 Hryciw(1990)의 주장과 유사하다.

$$G_{max} = 95.4 K_D (p_a \sigma'_v)^{0.5} \quad (11)$$

#### 4.4 CPT와 DMT를 이용한 추정방법 비교

그림 14는 hybrid odometer 시험으로 측정한 최대전단탄성계수와 식 (7) 및 (10)으로 추정된 값을 비교한 것이다. 측정 및 추정의 최대 오차는 10% 미만으로, 본 연구에서 제안한 CPT 및 DMT 추정방법들은 최대전단탄성계수를 잘 예측하는 것으로 나타났다. CPT 및 DMT로 예측한 값들의 SD는 각각 6.5%와 4.3%로 DMT를 이용한 방법이 더 정확한 것으로 나타났다.

식 (7)과 (10)을 비교하여 보면, 제안된 CPT 추정방법은 지반의 소성지수를 파악하기 위해 시료를 채취하여야 하지만 DMT 추정방법은 추가시험 없이 최대전단탄성계수를 추정할 수 있는 장점이 있다. CPT 추정방법은 소성지수를 이용하여  $\alpha_G$ 를 산정하므로 소성이 없는 지반에서는 사용이 불가능한 반면,  $I_D$ 를 이용한 DMT 추정방법은 토질에 따른 제약이 적다. 이러한 내용은 그림

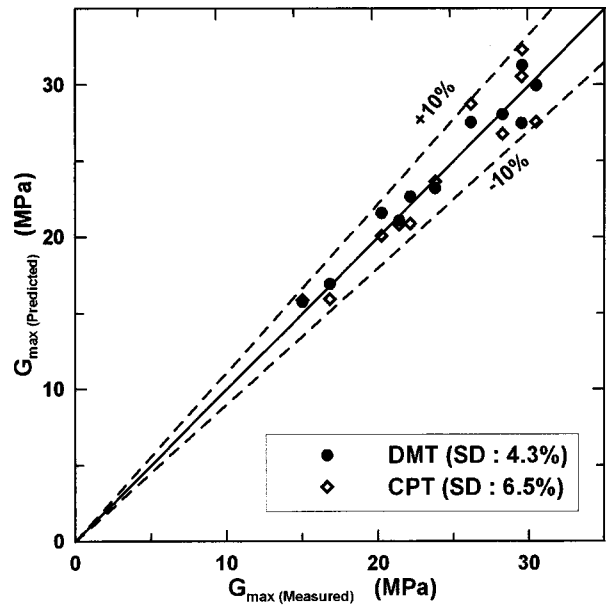


그림 14. CPT와 DMT를 이용하여 추정된  $G_{max}$ 와 측정값 비교

9와 13을 통해서도 확인이 가능한데, CPT 추정방법의 경우 모래층이 포함된 지역에서 최대전단탄성계수를 지나치게 과대평가하는 반면 DMT 추정방법은 모래층이 포함된 지역도 적절한 값을 예측하였다. 이상의 결과를 종합하여 보면, DMT를 이용한 최대전단탄성계수 추정이 사용성과 정확성 모두 CPT를 이용한 방법에 비해 우수한 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 논문은 CPT와 DMT를 이용한 부산점토의 최대전단탄성계수 추정에 관한 것으로, 부산신항과 녹산 지역 점토에 대하여 CPT, DMT 그리고 hybrid oedometer 시험을 수행하였다. Hybrid oedometer 시험으로부터 최대전단탄성계수를 산정하였으며, CPT 및 DMT 시험 결과를 분석하여 지반특성을 고려한 최대전단탄성계수 추정방법을 제안하였다.

- (1) Hybrid oedometer은 압밀셀에 장착되어 있는 벤더 엘리먼트를 이용하여 전단파 속도를 측정하였으며, 이를 이용하여 구속응력에 따른 최대전단탄성계수를 산정하였다. 분석결과 최대전단탄성계수는 구속응력과 과압밀비에 비례하였으며, 간극비에 반비례하는 것으로 나타났다.
- (2) CPT와 측정한 최대전단탄성계수를 비교한 결과, 상관계수  $\alpha_G$ 는 소성지수에 따라 감소하는 경향이 나타났다. 이를 바탕으로 CPT를 이용한 최대전단탄성계수 추정방법을 식 (7)과 같이 제안하였다. 식 (7)을 이용하여 측정한 최대전단탄성계수와 측정값의 오차는 최대 10% 미만으로 비교적 정확하게 예측하였다. 그러나 소성지수를 이용하여 추정하였기 때문에, 시료채취를 통한 소성지수 시험이 필요하며 소성이 없는 지반에서는 사용이 힘든 문제점이 있다.
- (3) DMT와 측정한 최대전단탄성계수를 분석한 결과, 상관계수  $R_G$ 는  $(1/I_D)(p_a/\sigma'_v)^{0.5}$ 과 비례관계를 가지며, 이를 바탕으로 DMT를 이용하여 제안된 최대전단탄성계수 추정방법은 식 (10)과 같다. 식 (10)을 이용하여 측정한 최대전단탄성계수와 측정값의 오차는 최대 7% 미만으로 CPT를 이용한 추정방법보다 정확하게 예측하였다. 그리고  $I_D$ 를 이용하여 예측하므로 추가적인 시험이 필요가 없으며, CPT를 이용한 추정과 달리 모래층에서 최대전단탄성계수를 과대평가하지 않았다.

본 연구를 통해 제안된 CPT 및 DMT를 이용한 추정방법은 부산점토의 최대전단탄성계수를 정확하게 예측할 수 있었다. 특히, DMT를 이용한 방법은 추가시험 없이 간편하게 최대전단탄성계수를 추정할 수 있었다. 본 연구의 현장은 정규압밀된 점토지반으로, 과압밀되거나, 실트, 모래지반에서는 적용이 어렵다. 응력이력과

지반종류가 현장시험과 최대전단탄성계수에 어떠한 영향을 미치는지 파악하기 위해서는 다양한 응력이력과 지질특성을 가진 지반에서 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

1. 김동수, 윤준용, 이세현, 추연옥 (2005), “공진주/비틀전단 시험 및 벤더엘리먼트 시험을 이용한 사질토 지반의 최대전단탄성계수 평가”, *한국지반공학회 논문집*, 제 21권, 10호, pp.17-25.
2. 이창호, 윤형구, 김준한, 이종섭 (2008), “전단파와 전자기파를 이용한 연약 지반의 실내 압밀 특성 평가”, *한국지반공학회 논문집*, 제 24권, 8호, pp.25-34.
3. 홍성진, 신동현, 김형섭, 정상진, 이우진 (2007), “DMT를 이용한 부산신항 점토의 공학적 특성 연구”, *한국지반공학회 학술술발표 논문집*, pp.1338-1343.
4. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V. N., Jamiolkowski, M. and Pasqualini, E. (1986), “Interpretation of CPTs and CPTUs; 2nd part: Drained Penetration of Sands”, *Proc. 4th IGS*, Singapore, pp. 143-156.
5. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V. N., Jamiolkowski, M. and Lo Presti, D. F. C. (1989), “Modulus of Sands from CPTs and DMTs”, *Proc. 12th ICSMFE*, Rio de Janeiro, Brazil, Vol.1, pp.165-170.
6. Hardin, B. O. and Black, W. L. (1968), “Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay”, *Journal of Soil Mechanics and Foundations*, ASCE, Vol.94, No.2, pp.353-379.
7. Hardin, B. O. (1978), “The Nature of Stress Strain Behavior for Soils”, *Proc. Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Newyork, Vol.1, pp.3-90.
8. Hong, S. J., Shin, D.H., Yoon, H.K., Lee, C. & Lee, W. (2008), “Strength and Modulus of Busan clay Evaluated by DMT”, *Proc. 3rd ISC*, Taipei, pp.377-382.
9. Hryciw, R. D. (1990), “Small-Strain-Shear Modulus of Soil by Dilatometer”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.116, No.11, pp.1700-1716.
10. Jamiolkowski, M., Ghionna, V. N., Lnacellota, R. and Pasqualini, E. (1988), “New Correlations of Penetration Tests for Design Practice”, *Proc. 1st ISOPT*, Orlando, Vol.1, pp.263-296.
11. Lee, J., Eun, J., Kim, J., Park, Y. and Kim, M. (2007), “Effect of Silt Content for CPT-Based Estimation of the Small-Strain Shear Modulus”, *Proc. 13th ARC*, Kolkata, Vol.1, pp.109-112.
12. Lunne, T., Robertson, P. K. and Powell, J. J. M. (1997), “*Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*”, Blackie Academic & Professional.
13. Marchetti, S. (1980), “In-situ Tests by Flat Dilatometer”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.106, No.3, pp.299-321.

14. 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. IN SITU 2001, Inter. Conf. On In-situ Measurement of soil properties*, Bali;1-41.
15. Mayne, P. W. and Rix, G. J. (1993), " $G_{max}$ - $q_c$  Relationships for Clays", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.16, No.1, pp.54-60.
16. Mayne, P. W. (2001), "Stress-Strain-Strength-Flow Parameters from Enhanced In-situ Tests", *Inter. Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories*, Bali, pp.27-47.
17. Rix, G. J. and Stokoe, K. H. (1991), "Correlation of Initial Tangent Modulus and Cone Penetration resistance", *Proc. 1th ISOCCT*, New York, pp.351-362.
18. Santagata, M. (2008), "Effects of Stress History on the Stiffness of a Soft Clay", *Conf. Deformational Characteristics of Geomaterials*, Atlanta, pp.95-123.
19. Viggiani, G. and Atkinson, J. H. (1995), "Interpretation of Bender Element Tests", *Geotechnique*, Vol.45, No.1, pp.149-154.
20. Vucetic, M. and Dobry R. (1991), "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.117, No.1, pp.89-107.

(접수일자 2008. 11. 28, 심사완료일 2009. 2. 13)