

# Flat DMT를 이용한 국내 연약지반의 비배수 전단강도 추정 시 영향을 미치는 요소들

## Influencing Factors for the Estimation of Undrained Shear Strength by Flat DMT

변 위 용<sup>1</sup> Byeon, Wi-Yong  
김 영 상<sup>2</sup> Kim, Young-Sang  
이 승 래<sup>3</sup> Lee, Seung-Rae

### Abstract

The flat dilatometer test(DMT) is a useful geotechnical tool for estimating in-situ properties of various types of ground materials and the application of flat DMT is increasing. The existing relationships which are used to estimate the design parameters of soft deposit depend on the regional geotechnical characteristics and then it is necessary to investigate the applicability of the flat dilatometer in Korea. In this paper, the flat DMT has been conducted in soft marine deposits. The results estimated by existing relationships and those obtained from laboratory tests were compared. Based on the results, some factors influencing the relationships were examined and adjustment of empirical expression was performed.

### 요 지

연약지반의 공학적 특성을 파악하기 위해 현장 시험방법으로 개발되어 널리 사용되고 있는 flat DMT는 국내 다양한 연약지반에서도 날로 그 적용이 증대되고 있다. 그러나 DMT 자료 분석을 통한 연약지반의 설계변수 추정 시 사용되는 기존의 상관관계식들은 주로 국외의 자료를 바탕으로 제안된 경험적 상관관계로 이에 대한 적용성 검토가 필수적이다. 본 논문에서는 국내 서해안 및 남해안에 위치한 연약지반을 대상으로 flat DMT 시험을 수행하고 기존의 상관관계식을 이용하여 얻어진 결과를 실내 시험으로부터 구한 설계변수들과 비교함으로써 기존에 제안된 상관관계식에 영향을 주는 요소들을 규명하고 이를 바탕으로 보정을 수행하였다.

**Keywords :** Flat dilatometer test(DMT), Overconsolidation ratio(OCR), Soft clay, Unit weight, Undrained shear strength

### 1. 서 론

Marchetti(1980)에 의해 최초로 고안된 flat DMT는 지반공학적 성질을 파악하기 위한 현장시험방법 중의 하나로서 flat DMT 자료 분석은 Marchetti에 의해 제안

된 3가지 지수에 의해 주로 이루어지고 있다. 그리고 이들 지수를 이용하여 지반 설계변수들을 예측하는 다양한 상관관계식들이 여러 연구자들에 의해 제안되어 왔다(Lacasse & Lunne, 1988; Powell & Uglow, 1988; Roque 등, 1988; Chang, 1991). 또한 다양한 지역에서

1 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, KAIST, dyuran@kaist.ac.kr)  
2 정회원, 국립여수대학교 해양시스템학부 전임강사 (Member, Professor, Division of Ocean System, Yosu National University)  
3 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, KAIST)

DMT 시험 방법의 적용성 검토가 이루어져 왔으며 국내 지반의 경우에도 몇몇 검토가 이루어져 왔다(Mello Vieira, 1997; Cruz 등, 1997; Coutinho & Oliveria, 1997; 김주형 등, 2000; 김종국 등, 2001; 이승래 등, 2001).

이와 같이 국내 및 국외의 다양한 지반에서 DMT 시험 방법의 적용성 검토가 이루어졌으나 특히 국내 지반의 경우 단순히 기존에 제안된 상관관계식들의 적용성만이 검토되었다. 그러나 DMT 시험 방법으로부터 추정되는 지반 설계 정수들은 실내 시험 결과에 비하여 과소 및 과대평가되는 부분들을 내포하고 있으며 국내 지반과 다른 공학적 특성을 가지는 국외 지반의 시험 자료를 토대로 하고 있기 때문에 보다 엄밀한 검토가 필요하다.

본 논문에서는 국내 서해안 및 남해안에 위치한 연약 지반을 대상으로 flat DMT 시험을 수행하였다. 실험 결과를 바탕으로 기존에 제안된 경험적인 상관관계식들에서 사용하고 있는 중요한 지반 설계 정수들에 대한 요소별 검토를 수행하였다. 그리고 비교된 결과를 토대로 기존 상관관계식을 합리적으로 보정하였다.

## 2. 대상 지반

본 연구에서는 국내 서해안 및 남해안에 위치한 5개 지역의 연약지반을 대상으로 flat DMT 시험을 수행하였으며 기본적인 실내 시험으로부터 대상 지반의 특성을 파악하였다. 표 1에 정리된 바와 같이 총 5개의 대상 지역에서 시험이 수행되었으며 DMT 시험이 이루어진 인근 지역에서 채취된 비교란 및 교란 시료로부터 각 시험 지역의 기본적인 지반 특성들을 획득하였다.

Flat DMT로부터 얻어지는 3가지 지수 중 하나인 재료 지수( $I_D$ )를 활용하면 깊이에 따른 흙의 종류를 추정할 수 있으며 이로부터 얻어진 대상 연약지반의 층상 구조는 그림 1과 같다. 그림 1에는 flat DMT 시험이 수행된 5개 지역의 전형적인 통일분류법에 의한 간략한 주상도를 함께 도시하여 비교하였다.

Site-1의 경우 상부는 실트와 모래로 이루어진 단단한 지반이며 하부 지반은 대체적으로 균질한 점토로 구성되어 있다. Site-2는 상부층에는 실트 또는 모래층으로 구성되어 있으며 전 지반에 걸쳐서 점토와 실트가 교대로 존재하고 있다. Site-3의 경우에는 최대 30m까지 연약지반 심도가 존재하며 비교적 균질한 점토로 구성되어 있으며 심도 18m 인 층에서 실트질 점토 또는 점토질 실트가 발견된다. Site-4는 대부분 균질한 점토층으

로 구성되어 있으나 Site-4-1의 경우에는 점토층 중간에 단단한 모래층이 존재한다. 순수 연약지반은 8m에서 최대 16m까지 이루어져 있다. Site-5-1의 경우에는 연약지반 심도가 약 5m이며 이 연약점토층에도 실트와 점토가 번갈아 존재하는 경향을 보이고 있다. Site-5-2는 최대 16m까지 점토층을 이루며 점토층 중간에 몇몇 모래층이 존재하고 있다.

## 3. DMT 시험 결과 분석

Flat DMT 결과는 Marchetti에 의해 제안된 3가지 지수[식 (1)]에 의해 해석이 이루어지며 이를 바탕으로 많은 연구자들에 의하여 여러 상관관계식들이 제안되어 왔다(Mayne & Martin, 1998). 이들 상관관계식들을 이용하면 flat DMT 결과로부터 배수 상태의 연직 구속변형계수( $M$ ), 비배수 전단강도( $s_u$ ), 현장 수평 정지토압계수( $K_0$ ), 과압밀비(OCR), 수평압밀계수( $c_h$ ), 단위중량 및 흙의 종류 등 여러 지반 설계변수들을 추정할 수 있다. 특히 이들 중 구속 변형계수( $M$ )와 비배수 전단강도( $s_u$ )는 flat DMT 시험에 의해 가장 신뢰성 있고 유용하게 추정될 수 있는 지반 설계 변수로 알려져 있다(Marchetti 등, 2001).

$$I_D = \frac{p_1 - p_0}{p_0 - u_0} \quad (1.a)$$

$$K_D = \frac{p_0 - u_0}{\sigma'_{vo}} \quad (1.b)$$

$$E_D = 34.7(p_1 - p_0) \quad (1.c)$$

여기서  $I_D$ 는 재료지수,  $K_D$ 는 수평응력지수,  $E_D$ 는 dilatometer modulus,  $u_0$ 는 관입전 현장지반의 간극수압,  $p_0$ 는 초기 접촉압력,  $p_1$ 은 1.1mm 팽창 압력,  $\sigma'_{vo}$ 는 연직유효응력이다.

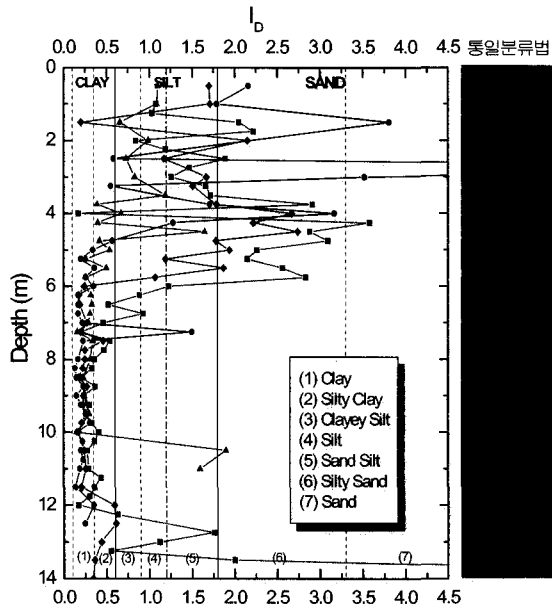
본 논문에서는 국내 서해안 및 남해안에 위치한 연약 지반에서 수행된 flat DMT 시험 자료와 실내 및 현장 시험 결과를 토대로 단위중량, 과압밀비(OCR),  $(s_u/\sigma'_{vo})_{NC}$  관계 그리고 비배수 전단강도( $s_u$ ) 추정에 대한 flat DMT 예측의 정도(accuracy)를 각 요소별로 검토하였다.

### 3.1 단위중량

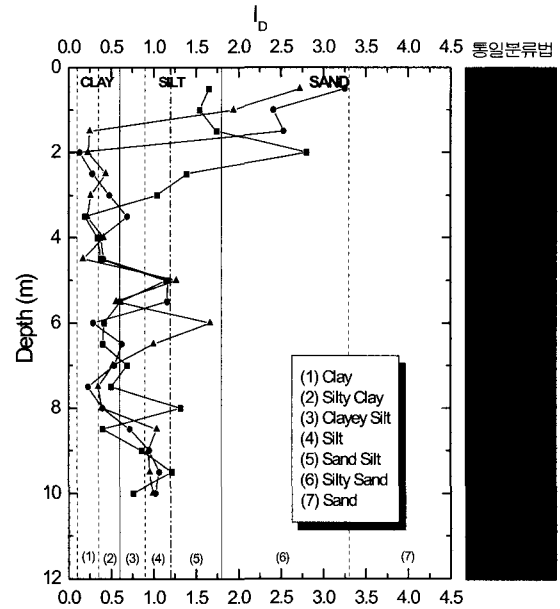
그림 2에 나타난 바와 같이 Marchetti & Crapps(1981)가 제안한  $I_D$ - $E_D$  도표를 이용하면 flat DMT 시험으로부

표 1. 시험 대상 지반 특성

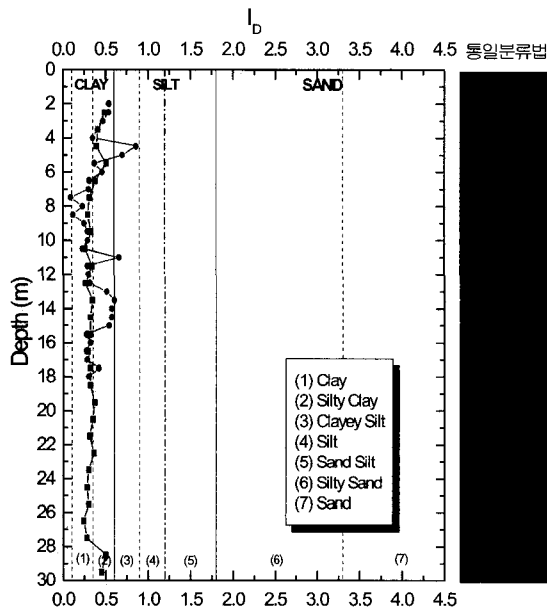
시험 지역	대상심도(m)(min~max)	시험 횟수	통일분류법에 의한 흙의 분류	함수비( $\omega$ )(%)	PI	OCR
SITE-1	11~16	4	CL or ML	31.9~50.7	4.9~18.3	1.04~1.38
SITE-2	10	3	CL, ML or CL-ML	22.8~44.2	2.6~12.2	1.3~2.7
SITE-3	18~30	2	CH	43.2~78.2	28.8~54.8	1.0 이하
SITE-4	8~18	10	CL, CH or SM	15.4~61.9	3.1~48.2	1.36~3.0
SITE-5	4~16.5	8	CL or CH	48~63.3	26~57.6	1.07~2.25



(a) SITE-1

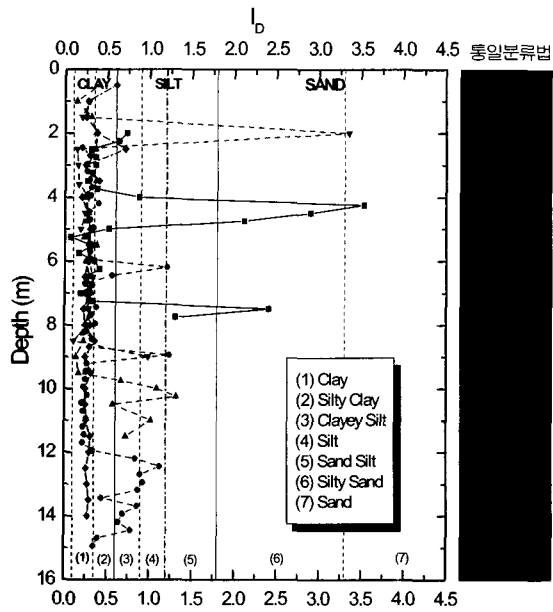


(b) SITE-2

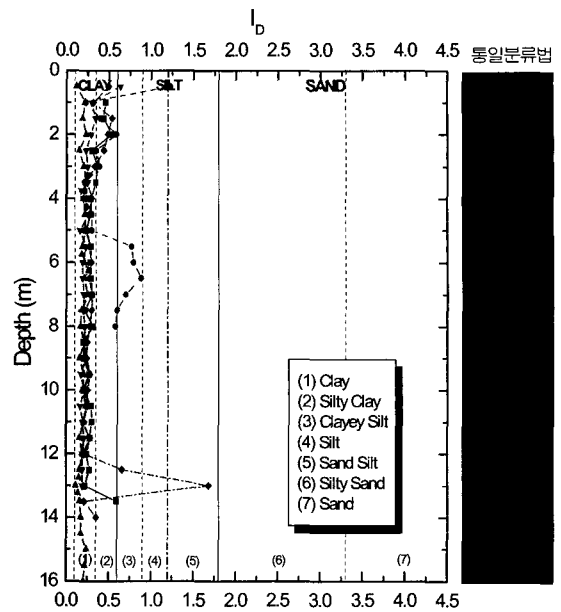


(c) SITE-3

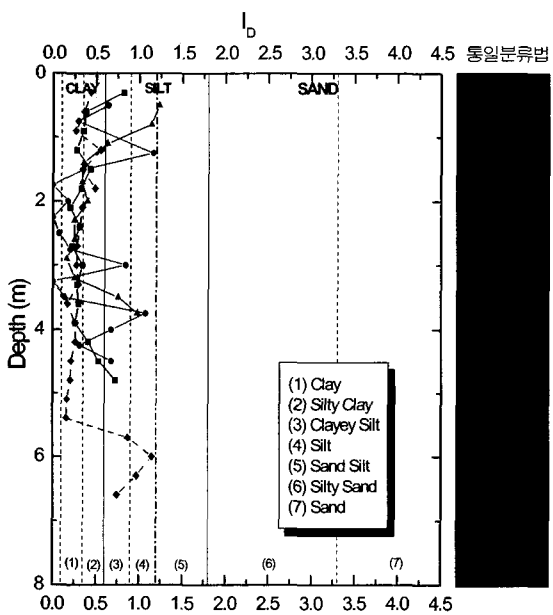
그림 1. 시험 대상 지역의 지반 특성



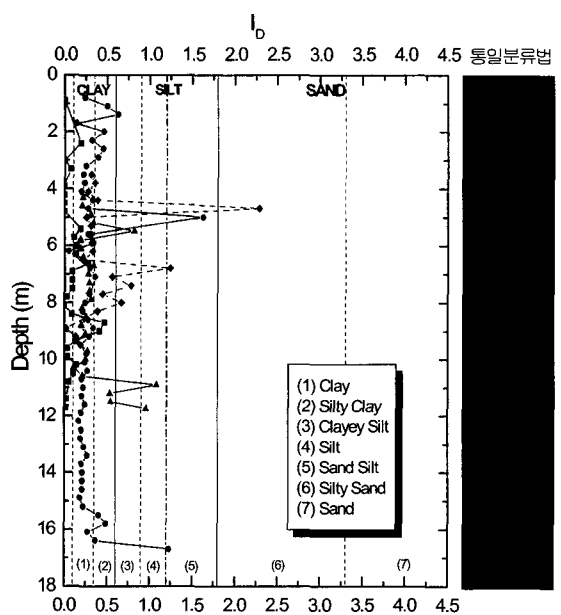
(d) SITE - 4 - 1



(e) SITE - 4 - 2



(f) SITE - 5 - 1



(g) SITE - 5 - 2

그림 1. 시험 대상 지역의 지반 특성(계속)

터 대상 지반의 단위중량을 각 깊이에서 추정할 수 있으며 이를 이용하여 깊이에 따른 단위중량 변화를 고려한 상재하중 변화를 계산할 수 있어 이를 이용한 설계 변수 추정이 이루어져 왔다. 특히 식 (1.b)에 나타난 바와 같이 flat DMT 시험으로부터 추정된 상재하중은 수평응력지수인  $K_D$ 에 영향을 미치며 이는 OCR, 비배수 전단강도 등에 영향을 주게 되므로 중요한 인자이다.

U.K. 흙에 대하여 단위중량을 비교한 Powell & Uglow(1988)의 연구 결과와 Norwegian 지역의 점토에 대하여 시험을 수행한 Lacasse & Lunne(1988)의 논문에서는 flat DMT 시험으로부터 예측된 단위중량 결과는 과소평가된다는 것을 지적하였다. 또한 Roque 등(1988)도 Marchetti & Crapps(1981)가 제안한 상관관계를 이용하여 예측된 단위중량이 상대적으로 작게 예측된다는

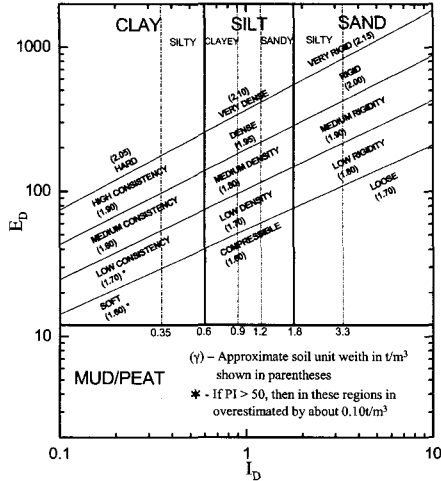


그림 2. Marchetti & Crapps(1981)의  $I_D$ - $E_D$  도표

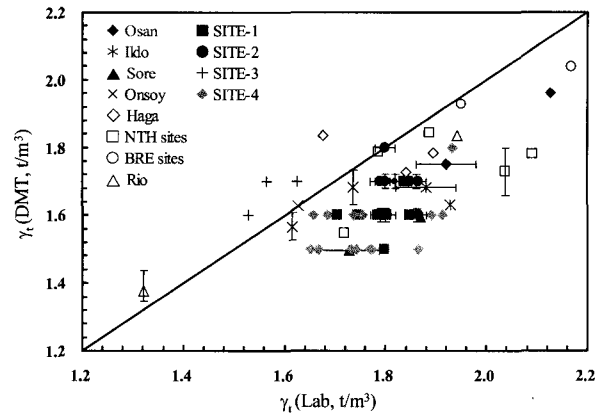
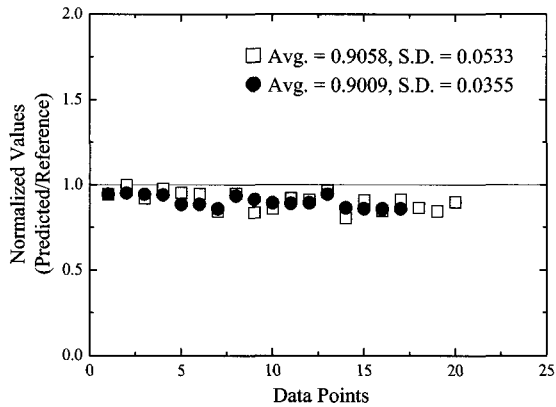
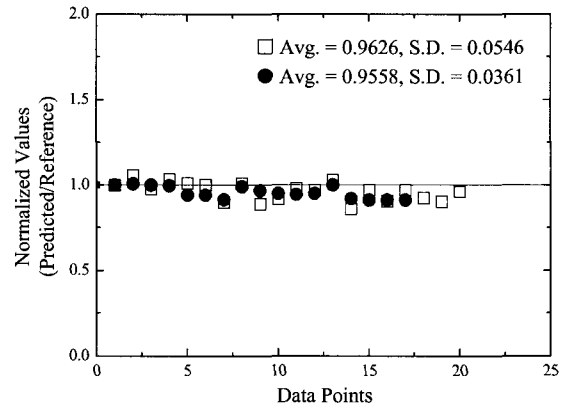


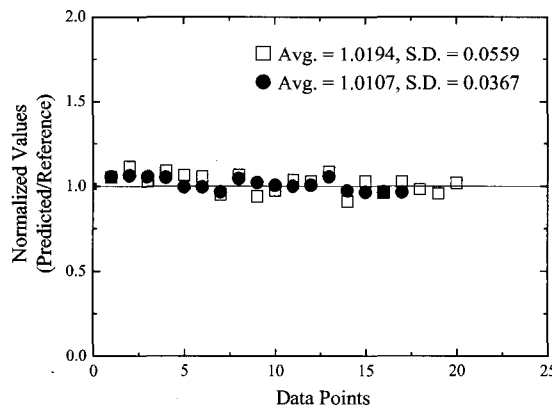
그림 3. 다양한 지역에서 추정된 단위중량 비교 결과



(a) 보정하지 않은 경우



(b) +0.1t/m³을 보정하여 추정된 경우



(c) +0.2t/m³을 보정하여 추정된 경우

그림 4. flat DMT로부터 추정된 단위중량과 실험결과의 비교 (□ : CLAY 영역, ● : SILT 영역)

것을 언급하였다. 국내에서는 김윤택(1991)가 서해안 3개 지역에서 얻어진 결과를 바탕으로 이러한 경향이 있음을 언급하였다. 그동안 다양한 지반 조건하에서 수행된 연구결과는 flat DMT 시험으로부터 구한 단위중량이 실내 시험 결과에 비하여 과소평가하는 경향을 확인

할 수 있었다.

본 연구에서도 대상 연약지반에서 flat DMT 시험으로부터 예측된 단위중량과 실내 시험 결과로부터 구한 단위중량을 비교하였으며 그림 3에 기준에 발표된 연구결과와 함께 도시하였다. 그림 3에서 알 수 있듯이 4개

표 2. 기존에 제안된 OCR-K<sub>D</sub> 상관관계식 (Mayne & Martin, 1998)

RELATIONSHIPS	NOTES	REFERENCES
$OCR=(0.5K_D)^{1.56}$	Cohesive soils, $I_p < 1.2$	Marchetti (1979, 1980)
$OCR=0.24(K_D)^{1.32}$	Modification for young clays from U.K.	Powell & Uglow (1988)
$OCR=0.225(K_D)^m$	For $I_p < 1.2$ and $OCR > 1.25$ : $1.35 < m < 1.67$	Lacasse & Lunne (1988)
$OCR=(0.5K_D)^{\lambda}$	Singapore marine clay : $\lambda \approx 0.84$	Chang (1991)
$OCR=0.34K_D^{1.43}$	Calibration for several soft clay sites in Japan	Kamei & Iwasaki (1995)

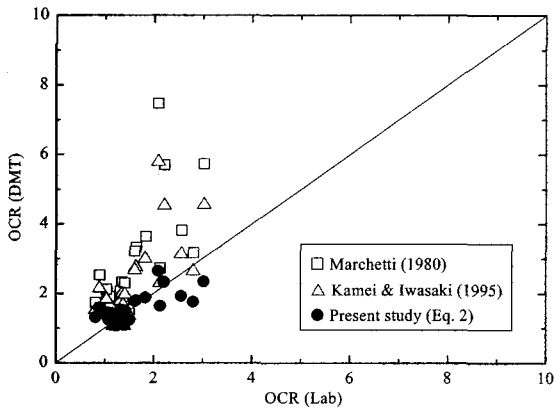


그림 5. 실내 시험과 flat DMT 시험으로부터 구한 OCR 비교

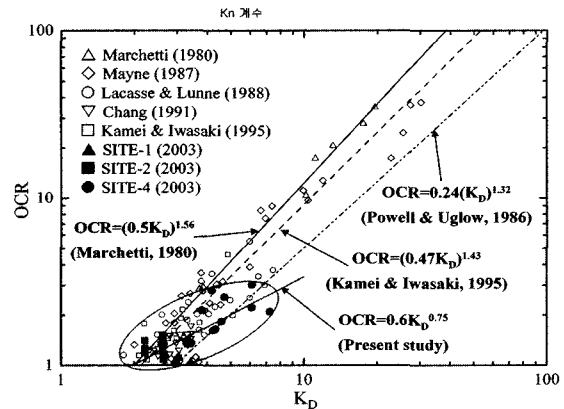


그림 6. OCR-K<sub>D</sub> 간의 관계

대상 지역의 연약지반에서 예측된 단위중량이 실제 단위중량에 비해 상대적으로 작게 예측됨을 확인할 수 있다.

다만 Site-3의 경우는 flat DMT로부터 구해지는 단위중량이 실내 시험보다 높게 평가되고 있는데 Marchetti & Crapps(1981)에 의하면 소성지수가 50 이상인 경우에는  $0.1t/m^3$  이상 단위중량을 과대평가한다고 하였다. 표 1에서 언급하였듯이 Site-3의 경우에는 소성지수가 29~55 범위로 국내 연약지반 중 상대적으로 높은 소성을 갖는 지반임을 알 수 있다.

그림 4에 의하면 SILT 영역, CLAY의 soft 영역 및 MUD/PEAT 영역에 포함된 지반의 단위중량은 토질 구역별로 Marchetti & Crapps의  $I_p$ - $E_D$  도표에서 제안된  $1.6t/m^3$ 보다는  $+0.1 \sim 0.2t/m^3$  이상 높게 수정한 경우 실제 단위중량과 유사한 것을 나타내고 있다. 그림 4로부터 볼 때 소성이 크지 않은 경우  $+0.2t/m^3$  정도 보정하면 실제 실험값에 근접하는 것으로 나타났으나 국내 연약지반을 대상으로 좀 더 많은 시험 자료를 토대로 하여 확인하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

### 3.2 OCR-K<sub>D</sub> 간의 상관 관계

OCR은 흙의 공학적 거동 특성 파악을 위해 매우 중

요한 인자이며 특히 점성토의 강도, 압축성 그리고 응력-변형률 거동 등에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 연약지반의 이러한 응력이력 특성을 파악하는 것이 지반 공학과 관련된 대상 문제 설계 시 합리적인 설계 변수를 선택하는데 있어서 매우 중요한 문제이다(Chang, 1991).

OCR은 비교란 시료를 이용하여 실내 시험으로부터 구하거나 현장 시험방법을 이용하여 구할 수 있다. 그 중 flat DMT 시험 방법으로부터 OCR을 예측할 수 있는 많은 경험적인 상관관계식이 표 2에 정리되어 있다. Powell & Uglow(1988)은 U.K. 지역에서 수행된 시험 자료로부터 Marchetti (1980)가 제안한 상관관계식이 U.K. 지역의 과압밀비를 적절히 추정할 수 없음을 확인하였고 지역적인 특성을 고려한 새로운 상관관계식을 제안하였다. Chang(1991)은 Singapore에서 수행한 시험 자료로부터 기존의 Marchetti(1981)식이 과대평가된 결과를 나타낸다고 하였으며 이로부터 새로운 상관관계식을 제안하였다. Brazil에서 flat DMT 시험을 수행한 자료에서도 Marchetti(1980) 식으로부터 추정된 OCR값은 실내 시험 결과보다 큰 결과를 나타내고 있다(Mello Vieira 등, 1997).

본 연구에서는 flat DMT로부터 예측된 OCR과 실내 시험으로부터 구한 OCR을 그림 5에 서로 비교하였다.

그림에 의하면 기존의 상관관계들은 국내 연약지반의 과압밀비를 과대평가하며 Marchetti (1980) 식이 더욱 심하게 나타났다. 이러한 경향은 그림 6에 나타난 OCR-K<sub>D</sub> 간의 관계에서와 같이 기존의 상관관계들이 대부분 낮은 범위(1~5)의 과압밀비를 갖는 국내 지반과 달리 매우 넓은 범위(1~40)의 과압밀비를 갖는 지반으로부터 도출되었기 때문으로 판단된다. 따라서 국내 지반의 자료만을 토대로 OCR-K<sub>D</sub> 상관관계식을 표현하면 식 (2)와 같으며 이를 다른 국외 자료들과 함께 도시하였다.

$$OCR = 0.6K_D^{0.75} \quad (2)$$

### 3.3 (s<sub>u</sub>/σ<sub>v0</sub>')<sub>NC</sub> 관계

Marchetti(1980)와 Kamei & Iwasaki(1995)는 Ladd 등 (1977)이 제안한 상관관계식 (3)을 이용하여 비배수 전단강도를 산정하는 식을 제안하였다. 그러나 이를 이용하기 위해서는 정규압밀점토에서의 비배수 전단강도와 선행압밀응력간의 관계를 우선적으로 파악하여야 한다.

$$(s_u/\sigma_{v0}')_{OC} = (s_u/\sigma_{v0}')_{NC} (OCR)^{0.8} \quad (3)$$

표 3에서 알 수 있듯이 Marchetti(1980)는 Mesri(1975)가 현장 베인시험 결과로부터 제안한 (s<sub>u</sub>/σ<sub>v0</sub>')<sub>NC</sub> = 0.22를 이용한 반면에 Kamei & Iwasaki(1995)는 총 19개의 일본 지역에서 수행된 일축압축시험으로부터 구한 비배수 전단강도와 선행압밀응력간의 관계로부터 추정된 0.35를 사용하였다.

본 연구에서는 그림 7과 같이 국내 연약지반의 경우 3개 지역에서 삼축 시험으로부터 구한 비배수 전단강도와 선행압밀응력간의 관계를 도시하여 다른 상관관계식들과 비교하였다. 그림 7에서 알 수 있듯이 Marchetti (1980)의 상관관계식에서 사용한 상관계수보다는 일본 지역에서 수행된 시험 자료로부터 구한 상관계수와 유사한 결과를 얻었다. 이러한 비배수 전단강도와 선행압밀응력간의 관계에는 선행압밀응력값에 의해서도 크게 좌우되며 국내 연약지반에서 수행된 많은 실험 결과를 토대로 확인하는 것이 필요하다. 특히 선행압밀응력이 과소평가되는 경우 계수값이 커지므로 이에 대한 보다 엄밀한 비교가 요구된다.

### 3.4 비배수 전단강도 추정 결과 비교

Marchetti(1980)는 수평응력지수(K<sub>D</sub>)를 이용하여 비

표 3. (s<sub>u</sub>/σ<sub>v0</sub>')<sub>NC</sub> 관계

RELATIONSHIPS	REFERENCE
s <sub>u</sub> = 0.22p <sub>c</sub> (현장 베인시험)	Marchetti (1980)
s <sub>u</sub> = 0.35p <sub>c</sub> (일축 시험)	Kamei & Iwasaki (1995)
s <sub>u</sub> = 0.38p <sub>c</sub> (삼축 시험)	Present study

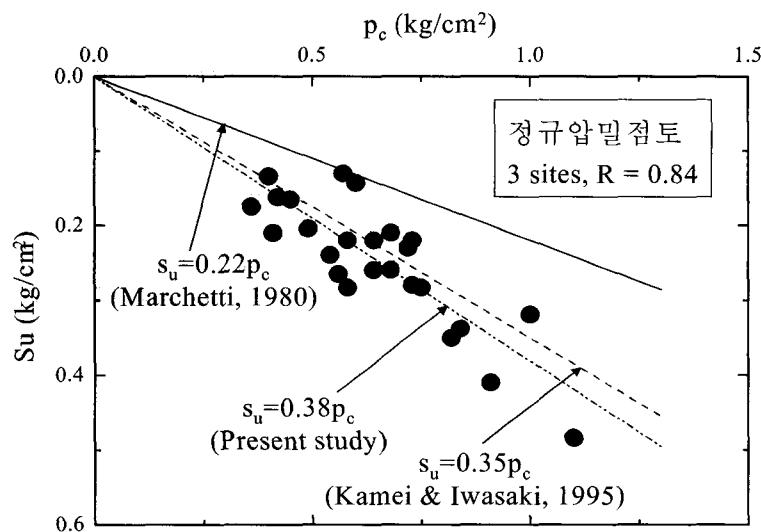


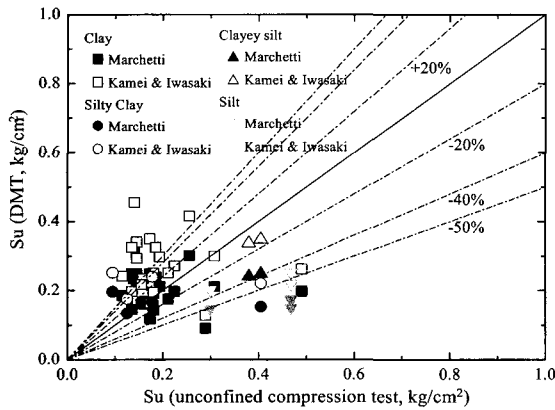
그림 7. 국내 몇몇 정규압밀점토에 대한 삼축 시험(UU) 결과와 선행압밀응력 관계

배수 전단강도를 산정하는 식을 제안하였다. 먼저 Oedometer 시험으로부터 구한 OCR과 flat DMT으로부터 구한  $K_D$ 간의 경험적인 상관관계식을 나타내었으며 Ladd 등(1977)이 제안한 상관관계식 (3)과 Mesri(1975)가 현장 배인시험 결과로부터 제안한  $(s_u/\sigma'_{v0})_{NC} = 0.22$ 를 이용하여 비배수 전단강도식 (4)를 제안하였다.

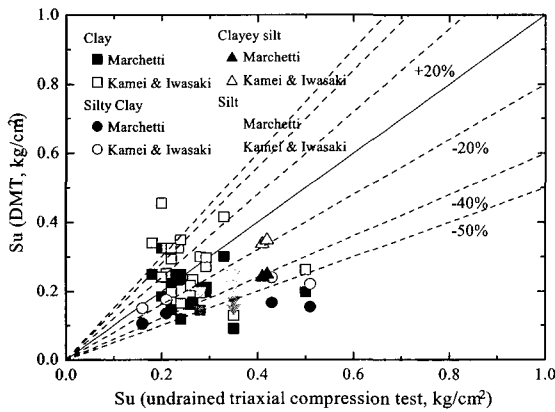
$$s_u = (s_u/\sigma'_{v0})_{NC} \sigma'_{v0} (0.5K_D)^{1.25} \quad (4)$$

$$= 0.22 \sigma'_{v0} (0.5K_D)^{1.25}$$

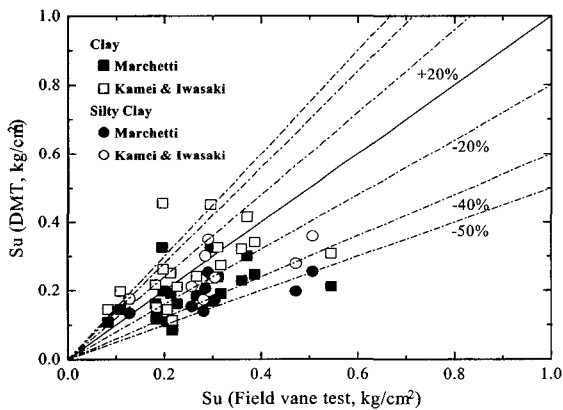
따라서 식 (4)를 바탕으로 flat DMT로부터 대상 지반의 비배수 전단강도를 예측할 수 있으며 여러 연구자들에 의하여 각기 다른 대상 지반에 대한 식 (4)의 적용성



(a) 일축 압축시험과 DMT 시험 결과 비교

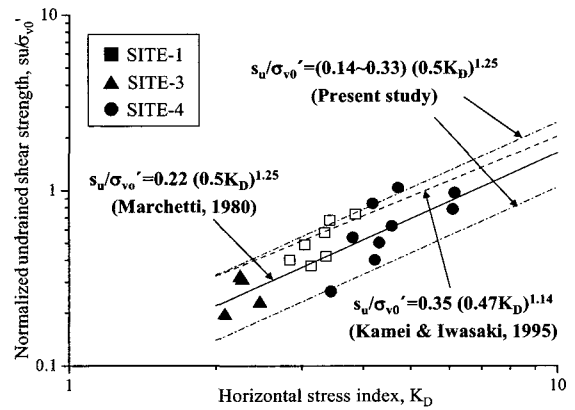


(b) 삼축 시험(UU)과 DMT 시험 결과 비교

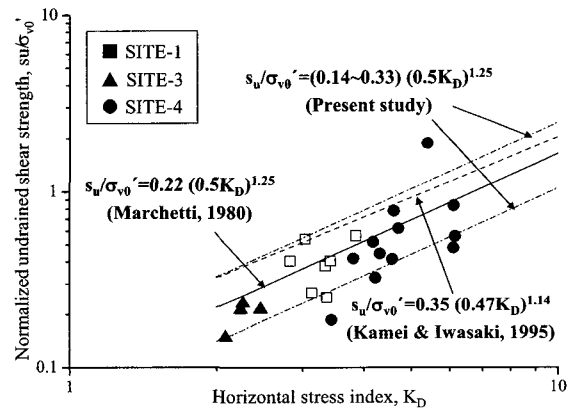


(c) 현장 배인시험과 DMT 시험 결과 비교

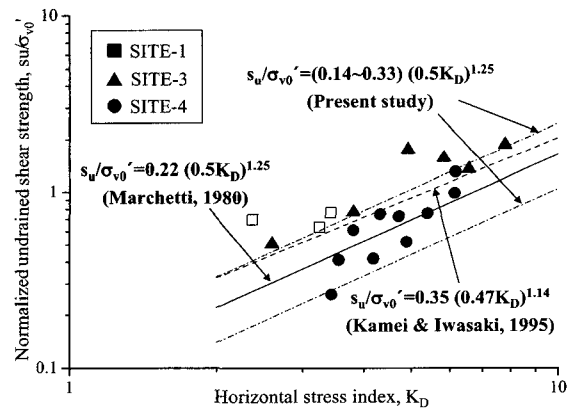
그림 8. 일축, UU 또는 현장 배인시험으로부터 구한 비배수 전단강도와 DMT 시험 결과 비교



(a) 삼축 시험(UU)



(b) 일축 시험



(c) 현장 배인시험

그림 9. 수평응력지수( $K_D$ )와 일축, UU 및 현장 배인시험으로부터 구한 비배수 전단강도와의 관계



검토가 이루어졌다.

한편 Roque 등(1988)은 Norwegian 지역의 흙에 대하여 고전적인 지지력 산정식을 이용하여 비배수 전단강도를 구하는 상관관계식을 제안하였다. 그리고 Lacasse & Lunne(1988)는 점토지반의 경우 기존 상관관계식이 타당한 결과를 주지만 실트와 모래 지반의 경우는 보정이 필요하다고 하였다. 따라서 현장 베인시험, 일축 시험, 삼축 시험 결과에 대한 각각의 경우 적용 가능한 비배수 전단강도식을 제안하였다. 또한 Kamei & Iwasaki (1995)는 일본 지역에서 수행한 시험 자료를 활용하여 일본 지반에 적합한 OCR-K<sub>D</sub>간의 상관관계를 제안하였으며 일본의 다양한 지역에서 수행된 일축압축시험으로부터 구한 비배수 전단강도와 선행압밀응력 간의 관계를 이용하여 0.22 대신에  $(s_u/\sigma_w')_{NC} = 0.35$ 를 이용하여 수정된 비배수 전단강도식 (5)를 제안하였다.

$$\begin{aligned} s_u &= (s_u/\sigma_w')_{NC} \sigma_w' (0.47K_D)^{1.14} \\ &= 0.35 \sigma_w' (0.47K_D)^{1.14} \end{aligned} \quad (5)$$

그 외 다른 많은 연구자들도 대상 지역의 지역적 특성을 고려하기 위하여 기존의 Marchetti(1980)가 제안한 비배수 전단강도식을 수정, 보완하였다(Mayne & Martin, 1998).

본 논문에서는 여러 경험적인 상관관계식들 중 Marchetti (1980)와 Kamei & Iwasaki (1995) 식을 이용하여 구한 값과 국내 지반에서 일축, 삼축(UU) 그리고 현장 베인 시험을 수행하여 구한 비배수 전단강도를 비교하여 기존에 제안된 상관관계식들의 적용성을 검토하였다(그림 8).

이때 Lacasse & Lunne(1988)의 경우와 마찬가지로 각각의 기준되는 시험(reference tests)에 따라 비배수 전단강도가 서로 유사한 경향을 제공하지만 전단 모드(shear mode)가 다르기 때문에 각각의 경우에 대해서 비교하였다.

그림 8의 비배수 전단강도 비교 결과를 살펴보면 점토 지반의 경우 Marchetti(1980)와 Kamei & Iwasaki(1995) 방법들이 실내 시험결과와 평균적으로는 일치하나 분산이 크고 실트질이 포함될수록 차이를 보이며 분산이 커지는 것은 Lacasse & Lunne(1988)가 지적한 바와 일치되는 결과이다. 이는 실트질이 포함될수록 DMT 실험 도중에 부분적인 배수로 인한 영향을 받기 때문으로 생각된다.

또한 대상 점토 지반에 대하여 상재하중으로 정규화된 비배수 전단강도와 K<sub>D</sub>간의 관계를 각각의 기준이 되는 시험방법에 따라 도시하였다(그림 9). 그림에 의하면 (0.14~0.33)의 범위를 갖는 경우 수정된 상관관계식 (6)이 이러한 분산된 경향을 나타내는 것을 볼 수 있다. 또한 일축시험과 삼축시험의 경우 평균적으로는 Marchetti (1980)가 제안한 식이 타당한 결과를 주는 반면에 현장 베인시험의 경우에는 Kamei & Iwasaki(1995)식이 더욱 근사화된 평균적인 값을 제공하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 Marchetti(1980) 식의 경우 OCR-K<sub>D</sub> 관계를 과대평가하고 유효상재하중  $\sigma_w'$ 을 과소평가하므로 서로 보상되어 평균적으로 일치하는 결과를 주는 것으로 판단된다.

이러한 기존의 상관관계식들은 국내 지반과는 다른 공학적 특성이 존재하는 대상 지반에 대한 경험적인 상관관계식으로서 이를 국내 지반에 그대로 적용하기에는 무리가 있다. 따라서 변위용 등(2004)은 인공신경망 기법을 이용하여 flat DMT 결과로부터 비배수 전단강도를 추정하는 방법을 제안하였다.

$$s_u/\sigma_w' = (0.14 \sim 0.33)(0.5K_D)^{1.25} \quad (6)$$

#### 4. 결론

본 연구에서는 현장 시험 방법 중에 하나인 flat DMT를 이용하여 국내 연약지반의 비배수 전단강도 추정시 이에 영향을 주는 요소들과 기존의 상관관계식의 적용성을 검토하였다. 이를 위해 국내 서해안 및 남해안에 위치한 몇몇 연약지반을 대상으로 flat DMT 시험을 수행하였다. 그리고 그 결과로부터 설계 변수들을 추정하여 이를 기준이 되는 시험(reference tests)들에 의해 얻어진 결과들과 비교하였고 이로부터 기존의 상관관계식의 국내 연약지반에의 적용성을 검토하였으며 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- (1) Marchetti & Crapps(1981)가 제안한 I<sub>D</sub>-E<sub>D</sub> 상관관계로부터 대상 지반의 단위중량을 예측할 수 있는 상관관계는 국내 지반에서 수행한 실내 시험으로부터 구한 단위중량과 비교한 결과 flat DMT 시험으로부터 구한 단위중량이 기존의 연구 결과와 마찬가지로 과소평가하는 것을 알 수 있으며 국내 지반 자료를 토대로 할 때 CLAY의 soft 영역과 MUD/PEAT

의 경우에는  $1.6t/m^3$ 보다 약  $+0.1\sim 0.2t/m^3$  이상 높게 추정하는 것이 더욱 타당하다고 판단된다.

- (2) 흙의 이력 현상을 파악하기 위하여 매우 중요한 인자 중에 하나인 OCR를 flat DMT 결과로부터 추정하였다. 기존에 제안된 Marchetti(1980)와 Kamei & Iwasaki(1995) 방법의 경우 OCR을 과대평가하는 것을 알 수 있었으며 특히 국내 지반의 경우처럼 OCR이 크지 않은 지반의 경우에는 큰 차이를 보이고 있다. 반면 국내 연약지반에서 수행된 자료로부터 새로이 제안된 OCR- $K_D$  관계는 기존 상관관계식에 비해 보다 신뢰성있는 결과를 제공한다.
- (3) 비배수 전단강도와 선행압밀응력간의 관계에서 Marchetti(1980)는 현장 배인시험으로부터 구한 0.22를 사용하였으며 Kamei & Iwasaki(1995)는 일축 시험으로부터 산정한 0.35를 이용하여 비배수 전단강도를 추정하는데 적용하였다. 반면 국내 연약지반의 경우에는 3개 대상 지역에서 얻어진 삼축 시험(UU) 결과로부터 0.38의 계수값을 구하였다. 제한된 실험 자료로부터 판단할 때 일본 지역의 경우와 큰 차이를 보이지는 않으며 앞으로 많은 국내 연약지반에서 수행된 시험 자료로부터 이에 대한 확인이 필요하다.
- (4) 기존에 제안된 Marchetti(1980) 방법과 Kamei & Iwasaki(1995) 방법을 적용하여 실내 시험인 일축, UU 및 현장 배인시험을 통해서 구한 비배수 전단강도를 비교하였다. 전반적으로 Marchetti(1980)와 Kamei & Iwasaki(1995) 방법이 모두 분산이 크고 일관성이 결여된 경향을 보인다. 여러 요인들이 존재하지만 비배수 전단강도를 구하는데 사용되는 상재하중의 과소평가와 OCR의 과대평가로 인한 영향들이 포함될 수 있다. 그리고 국내 지반에서 수행된 삼축 시험 결과를 토대로 기존에 제안한 상관관계식을 비교한 결과 Marchetti(1980)가 제안한 상관관계식에서 사용된 0.22 계수값은 0.14~0.33의 범위를 갖는 분산된 경향을 볼 수 있었으며 일축 및 현장 배인시험 결과에서도 유사한 경향을 살펴볼 수 있었다. 또한 일축 및 삼축 시험 결과에서는 Marchetti(1980)가 제안한 상관관계식이 평균적인 결과를 제공한 반면에 현장 배인시험 결과에서는 Kamei & Iwasaki(1995)의 상관관계식이 평균값을 제공하고 있다.

지금까지 국내 서해안 및 남해안에 위치한 몇몇 연약지반을 대상으로 flat DMT 시험을 수행한 결과로부터 국내 연약지반에서의 flat DMT의 적용성을 검토하였다. 추후에 좀 더 많은 자료들을 토대로 하면 국내 연약지반에 적합한 보다 합리적인 상관관계식이 제안될 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 선정한 스마트 사회기반시설연구센터(SISTEC:생산기반 분야/ERC)의 연구비 지원으로 수행된 것으로 이에 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. 김영상, 변위용, 이승래 (2003), "DMT를 활용한 국내 연약지반의 구속압축계수와 비배수 전단강도의 평가", 한국지반공학회 연약지반기술위원회 2003 학술세미나, pp.33-45.
2. 김운태 (1991), Flat Dilatometer 현장시험을 통한 점토지반의 공학적 성질 추정에 관한 연구, 석사학위논문, KAIST, pp.19-20.
3. 김주형, 김영용, 조성민, 김명모 (2000), "인천국제공항 부지 해상 세립토에 대한 CPTU와 DMT 결과 비교", 한국지반공학회는 문집, 제16권, 제6호, pp.23-33.
4. 김종국, 김영용, 최인걸, 박영목 (2001), "CPTu와 DMT를 이용한 인천국제공항 해상점토의 공학적 특성연구", 한국지반공학회 논문집, 제17권, 제2호, pp.41-49.
5. 변위용, 이승래, 김영상, 정은택 (2004), "국내 연약지반의 신뢰성있는 비배수 전단강도 추정을 위한 flat DMT와 인공신경망 이론의 적용", 한국지반공학회 봄학술발표회, pp.154-161.
6. 이승래, 김영상, 성주현 (2001), "딜라토미터를 이용한 수평압밀 계수 추정법의 국내 지반 적용성 평가", 한국지반공학회 논문집, 제17권, 4호, pp.153-160.
7. Chang, M.F. (1991), "Interpretation of Overconsolidation Ratio from In-Situ Tests in Recent Clay Deposits in Singapore and Malaysia", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.28, No.2, pp.210-225.
8. Coutinho, R.Q. and Oliverira, J. (1997), "Geotechnical Characterization of a Recife Soft Clay", *Proceedings, 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, New Delhi, published by Oxford-IBH, India, pp.69-72.
9. Cruz, N., Viana de Fonseca, A., Coelho, P., and Lemos, J.L. (1997), "Evaluation of Geotechnical Parameters by DMT in Portuguese Soils", *Proceedings, 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, New Delhi, published by Oxford-IBH, India, pp.77-80.
10. 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, June, 111-116.
11. Lacasse, S. and Lunne, T. (1988), "Calibration of Dilatometer Correlations", *Penetration Testing 1988, (Proceedings, ISOPT-1, Orlando)*, Vol.1, Balkema, Rotterdam, pp.539-548.
12. Ladd, C.C., Foot, R., Ishihara, K., Poulos, H.G. and Schlosser, F. (1977), "Stress-Deformation and Strength Characteristics", *Proc.*

- 9th ICSMFE, Vol.2, State-of-the-Art-Paper, pp.421-494.
13. Marchetti, S. (1979), "The In-Situ Determination of an Extended Overconsolidation Ratio", *Proceedings, 7<sup>th</sup> European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.2, Brighton, U.K., pp.239-244.
  14. Marchetti, S. (1980), "In Situ Tests by Flat Dilatometer", *ASCE Jnl GED*, Vol.106, No.GT3, Mar., pp.299-321.
  15. Marchetti, S. and Crapps, D. K. (1981), "Flat Dilatometer Manual", GPE Inc., Gainesville, FL.
  16. Marchetti S., Monaco P., Totani G. and Calabrese M. (2001), "The Flat Dilatometer Test (DMT) in Soil Investigations", *A Report by the ISSMGE Committee TC 16. Proc. IN SITU 2001, Intl. Conf. On In Situ Measurement of Soil Properties*, Bali, Indonesia, pp.1-41.
  17. Mayne, P.W. and Martin, G.K. (1998), "Commentary on Marchetti Flat Dilatometer Correlations in Soils", *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol.21, No.3, September 1998, pp.222-239.
  18. Mello Vieira, M.V.C., Danziger, F., Almeida, M., and Lopes, P. (1997), "Dilatometer Tests at Sarapiu Soft Clay Site", *Proceedings, 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, New Delhi, published by Oxford- IBH, India, pp.161-162.
  19. Mesri, G. (1975): Discussion of "New Design Procedure for Stability of Soft Clays", by Ladd, C.C. and Foott, R., *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.101, No.GT4, pp.409-412.
  20. Powell, J.J.M. and Uglow, I.M. (1988), "The Interpretation of the Marchetti Dilatometer Tests in U.K. Clays", *Penetration Testing in the U.K.*, Thomas Telford, London, pp.121-125.
  21. Roque, R., Janbu, N., and Senneset, K. (1988), "Basic Interpretation Procedures of Flat Dilatometer Tests", *Penetration Testing 1988, (Proceedings, ISOPT-1, Orlando)*, Vol.1, Balkema, Rotterdam, pp.577-587.
  22. Schmertmann and Crapps, inc. (1988), "Guideline Summary for Using the CPT, CPTU and Marchetti DMT for Geotechnical Design", Rept. No. FHWA-PA-87-014+84-24 Submitted to PennDot, Office of Research and Special Studies, Harrisburg, PA.

(접수일자 2004. 4. 8, 심사완료일 2004. 5. 19)