

Flat Dilatometer 현장시험을 통한 점토 지반의 공학적 성질 추정

Evaluation of Engineering Properties of Clays Through Flat Dilatometer Tests

이 승 래*¹
Lee, Seung-Rae
김 윤 태*²
Kim, Yun-Tae
김 준 석*³
Kim, Joon-Suk

Abstract

The flat dilatometer(DMT) has been practically used as an in-situ test equipment. It is a simple, rapid and cost-effective tool to characterize the in-situ stress-strain-strength properties of various types of ground materials. However, the results of flat DMT should be validated with considerable data with respect to the known reference values for a specific site.

In this study, the applicability of existing relationships which were established for other local deposits is verified by performing the tests in several clay deposits. To compare with the DMT results, field vane tests and cone penetration tests were also carried out in the same field as reference tests, and unconsolidated undrained tests, oedometer tests, and other fundamental material properties tests were conducted on the thin-walled tube samples in the laboratory.

The results of the flat DMT combined with empirical correlations are used to estimate soil types, unit weights, coefficients of lateral earth pressure at rest, overconsolidation ratios, constrained moduli and undrained shear strengths of three clay local deposits. It was found that various geotechnical properties estimated from the flat DMT generally well agree with those from the reference tests.

요 지

Flat DMT는 널리 사용되어지고 있는 현장시험기구로서 간단하고, 경제적이면서도 다양한 지반의 응력-변형-강도특성을 추정할 수 있으나, 이들 현장시험의 결과들은 지역적 특성에 의존

*¹ 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 조교수

*² 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

*³ 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정, (주)대우 건설기술연구소 연구원

하는 경향이 있기 때문에 기준값과 비교하여 많은 연구와 검증을 필요로 한다.

본 연구에서는 기존의 제안된 상관관계식의 우리나라 점토지반에 대한 적용성을 검토하기 위하여 FV 및 CPT의 현장시험을 실시하고, thin-walled tube sampler로 채취된 시료에 대한 비압밀비배수(UU) 실험, oedometer 실험 및 다른 기본적인 물성실험을 수행하여 DMT의 결과들과 비교하였다. 세 장소의 점토지반에서 구한 DMT 결과들로부터 흙의 종류, 단위중량, 정지토 압계수, 과압밀비, 비배수 전단강도 및 변형계수를 추정하였으며 다른 시험결과들과 비교분석하여 우리나라 점토 지반에 대한 적용성을 검토하였다.

1. 서 론

지반과 관련된 모든 구조물을 안전하고 경제적으로 설계하여 시공하기 위해서는, 구조물의 안정성 및 침하등과 관련된 지반자체의 공학적 성질을 나타내는 여러 지반정수 값들을 정확히 파악하는 것이 가장 중요한 문제라 할 수 있다. 뿐만아니라, 컴퓨터의 눈부신 발달로 인하여 지반과 관련된 공학적 문제를 해결하기 위한 방안으로 여러가지 수치해석 모델을 사용하여 지반의 거동을 비교적 정확히 예측하는 것이 가능해졌으며, 실제 설계문제에도 많이 적용되고 있는 추세이다. 그러나 지반과 관련된 구조물의 거동을 비교적 정확히 예측하기 위해서는 현장지반의 초기응력상태 및 공학적 성질 규명이 선결과제이다.

이와 같은 현장지반의 공학적 특성을 규명하는 방법은 다음과 같이 분류될 수 있다.

- ① 경험에 의한 추정방법
- ② 현장상태와 동일한 조건의 시료에 대한 실내실험으로부터 얻은 자료를 이용한 추정방법
- ③ 현장시험을 통해서 얻은 자료를 이용한 추정방법

이들 중 비교적 중요한 구조물의 설계를 위한 현장지반의 강도 및 응력상태를 추정하기 위해서는 단순히 경험에 의존하는 경우는 매우 드물며 신뢰성이 결여된 이유로, 비교적 흐트러지지 않은 시료를 채취하여 현장상태와 동일

한 조건으로 실내실험을 행하여 얻은 결과를 분석하여 추정하는 방법과, 직접 현장시험을 통하여 추정하는 방법이 바람직하다.

그러나 실내실험을 이용하는 경우에도 다음과 같은 문제가 대두된다.

- ① 시료를 채취할 때 흙의 교란 및 현장응력 상태의 교란이 유발될 수 있고, 지하수위 아래의 시료인 경우에는 지하수 유실등의 문제가 있다.
- ② 비교란 시료의 채취가 매우 어렵고 많은 경비가 소요된다.
- ③ 특정지역의 시료가 그 지역 전체의 성질을 대표할 수 있는지에 대한 의문이 제기된다.

따라서, 현장상태 그대로의 공학적 특성을 비교적 잘 추정할 수 있는 방법인 현장시험을 통한 방법이 점차 그 중요성을 더해 가고 있다.

현재 많이 사용되고 있는 현장시험방법으로는 Standard Penetration Test(SPT), Cone Penetration Test(CPT), Pressuremeter Test(PMT), Field Vane Test(FV) 및 Dilatometer Test(DMT) 등이 있으며 장비의 발달과 함께 점차 그 신뢰성이 증대되고 있다. 이러한 방법들 중에서 초기 응력상태나 현장상태의 응력-변형률 관계를 비교적 적절히 추정할 수 있는 방법으로는 PMT 및 DMT가 있다. 이중 Flat DMT는 점토 또는 모래지반등 자갈을 제외한 거의 모든 지반에 쉽게 적용할 수 있으며 장비자체의 경제성뿐만 아니라 사용하기 간편하고 신뢰성 있는 결과들을 얻을 수 있

는 장점이 있다.

그러나, 이러한 현장시험방법에 의해 구해지는 자료로부터 여러 지반정수값들을 추정하기 위하여 제안된 여러 상관관계들은 그 지반자체의 지역적 특성에 의존하는 경향이 있다. 이런 연유로 현장지반자체 그대로의 공학적 성질을 나타내는 여러 지반정수값들을 잘 추정하기 위해서는, 그 지반에 대한 지반정수값들에 대한 세심한 연구와 많은 현장시험 자료들이 요구되며 이를 통한 기존의 상관관계들의 검증이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 Flat DMT를 이용하여 오산, 일도 및 소래의 점토지반에 대한 현장상태의 여러가지 지반정수 값들을 기존의 상관관계식을 이용하여 구하고 CPT, FV 및 실내실험등으로부터 구한 결과와 비교하여 기존의 상관관계들의 경인지역의 점토지반에 대한 적용성을 검토하고자 한다.

2. Flat DMT의 개요

Flat Dilatometer Test(DMT)는 70년대 초에 Marchetti¹¹⁾가 처음 고안하여 주로 점토지반에서의 흙의 종류, 비배수 전단강도, 정지 토압계수(수평응력), 변형계수, 선행압밀하중, 간극수압등을 구하는 경험식을 제안하였다. 또한 Schmertmann¹⁷⁾은 Flat DMT를 이용하여 사질토지반에서의 마찰각을 구하는 방법을 제안하였고 여러 지반공학자에 의해서 신뢰성 높은 관계식이 많이 제안되어 왔다.

Flat DMT는 그림 1과 같은 장비들을 이용하고, blade의 관입은 CPT시험의 경우에 사용되는 drill 장비에 부착하여 사용가능하며, blade는 한쪽면에 지름 6cm인 steel membrane이 부착되어 있어 외부로부터 압축공기를 주입하면 membrane이 팽창되고, 그 압력으로 인하여 지반내에 변형을 유발시키게 된다. 이러한 방법으로 연속적인 4단계에 의해 A, B 및 C 값을 측정한다. 이때 A 값은 관입에 의하여 membrane이 수축된 상태에서 대기 중의 평형상태로 회복될 때의 압력을 나타내

며, B 값은 membrane 중심부가 1.1mm 팽창했을 때의 압력을 나타낸다. 또한 C 값은 membrane이 다시 원래의 위치로 되돌아 왔을 때의 압력이다.

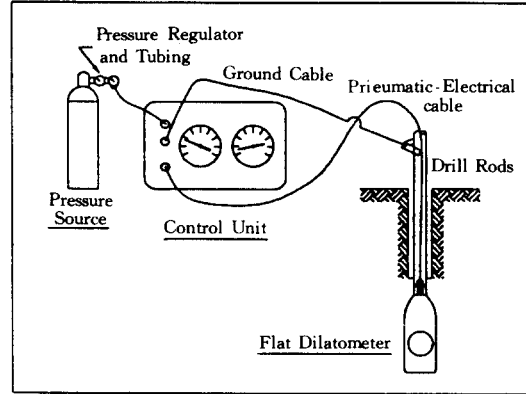


그림 1 Flat DMT 실험장치

여기서 측정된 A, B 및 C 값들로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있으며,

$$P_0 = 1.05(A + \Delta A) - 0.05(B - \Delta B) \quad (1)$$

$$P_1 = B - \Delta B \quad (2)$$

$$P_2 = C + \Delta A \quad (3)$$

위의 관계식을 이용하여 Flat DMT에 의해 구해지는 다음과 같은 중요한 지수(index)값들을 구할 수 있다.

$$\text{Material index : } I_D = \frac{P_1 - P_0}{P_0 - U_0} \quad (4)$$

$$\text{Horizontal stress index : } K_D = \frac{P_0 - u_0}{\sigma'_v} \quad (5)$$

$$\text{Dilatometer modulus : } E_D = 34.7(P_1 - P_0) \quad (6)$$

$$\text{Pore pressure index : } U_D = \frac{P_2 - u_0}{\sigma'_v} = \frac{u_v}{\sigma'_v} \quad (7)$$

여기서, u_0 : dilatometer 관입전의 간극수압
 σ'_v : dilatometer 관입전의 유효상재하중

ΔA : 대기중의 membrane 강도에
대한 A 값의 보정

ΔB : 대기중의 membrane 강도에
대한 B 값의 보정

위에서 구해진 I_D , K_D , E_D 및 U_D 값들을 사용
하면 현장시험 결과들로부터 제안된 상관관계
를 통하여 다음의 절에서 설명되는 현장지반의
여러 공학적 성질들을 추정할 수 있게 된다.

3. 실험결과 및 비교고찰

본 연구에서는 오산과 인천부근 일도 및 소
래지방의 점토지반에서 수행된 현장시험 및 실
내시험 결과들을 비교하여 보았다. 현장시험으
로는 CPT, FV 및 DMT를 수행하였고, thin-
walled tube sampler를 사용하여 채취한 비교
적 교란되지 않은 시료를 이용하여 UU 실험
및 압밀실험등과 함께 여러 기본물성치 실험들
을 수행하였다. 그림 2, 3 및 4는 각각의 장소
에 대한 기본물성치 실험결과들과 Flat DMT
의 결과들을 나타내고 있다.

다음에 열거한 것은 현장 및 실내실험 결과
들로부터 기존에 제안된 여러 상관관계들을 이
용하여 추정할 수 있는 지반정수 및 지반특성
들이다.

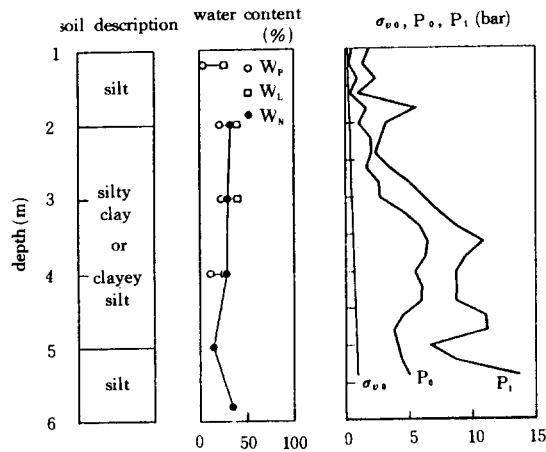


그림 2 오산지방의 흙의 특성과 DMT의 결과

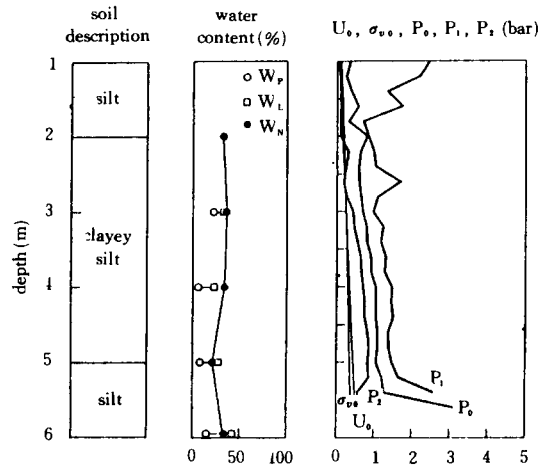


그림 3 일도지방의 흙의 특성과 DMT의 결과

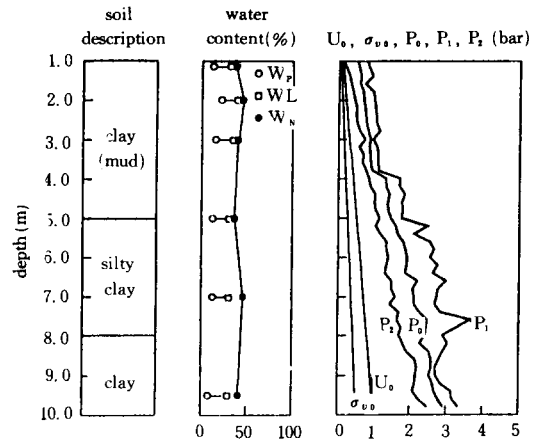


그림 4 소래지방의 흙의 특성과 DMT의 결과

3.1 흙의 종류 및 단위중량

흙의 종류를 분류하고 단위 중량을 산정하기
위하여 Marchetti와 Crapps이 제안한 상관관
계 그림을 이용하여 세 지역의 연약지반에 대
한 깊이에 따른 흙의 분류와 실내실험 및 CPT
의 결과들을 비교하였다(표 1).

오산의 경우는 OC 상태의 점토를 포함한
silt 지반이고, 일도의 경우는 거의 NC 상태의

표 1 DMT, USCS 및 CPT의 결과에 의해 추정된 흙의 분류

Depth (m)	Osan			Ildo			Sore		
	DMT	USCS	CPT	DMT	USCS	CPT	DMT	USCS	CPT
1		SM							
2	silt	ML	sand			silt			
3	clayey silt or silty clay	MP-ML	silty clay	clayey silt (mud)	ML	clayey silt	clay (mud)	CL (with some silt)	soft clay (sensitive)
4		CL							
5	silt		clayey silt	silt		silt			
6					CL (with some silt)		silty clay		silty clay
7									
8									
9							clay		
10									

연약한 점토를 포함한 silt 지반이다. 그리고 소래는 약간 OC 상태의 silt 를 포함한 점토지반으로서 실내실험 및 CPT의 결과와 비교하여 볼 때 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

DMT로부터 추정된 단위중량과 실내실험으로부터 구한 단위중량을 비교하여 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 보듯이 DMT로부터 산정된 단위중량은 실내실험의 결과와 비교하여 볼 때 연약한 점토지반에서 다소 과소 평가하는 경향이 있다. 과소 평가된 단위중량은 σ_v' 를 과소평가하고, 식(5)에 따라 K_D 값에 영향을 미치고 결국 지반의 비배수 전단강도를 과소평가할 것으로 판단된다. 이것은 DMT에 의해 추정된 비배수 전단강도가 CPT, FV 및 실내실험의 결과와 비교할 때 비교적 작게 산정되는 이유중의 하나가 될 것이다. 따라서 실내 및 현장시험의 자료로부터 단위중량에 대한 새로운 상관관계식의 산출이 필요하리라고 사료되며, 이를 통한 상관관계식들의 검증이 요구된다.

3.2 정지토압계수(K_0)

현장상태의 유효수직응력은 지반의 단위중량과 지하수위의 위치를 알 수 있다면 비교적 쉽게 예측할 수 있으나, 수평응력은 지반의 응

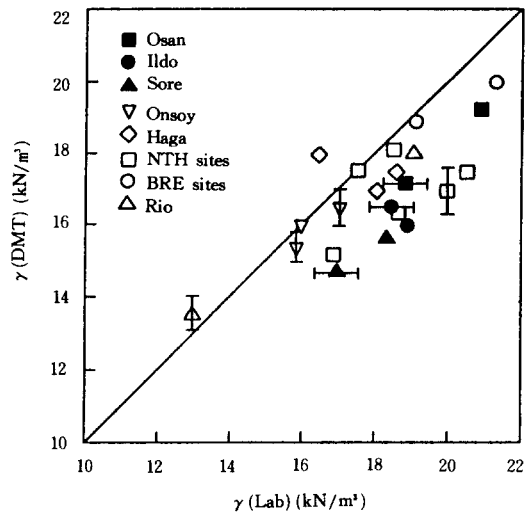


그림 5 DMT와 실내실험으로부터 구한 단위중량의 비교

력이력(geological history)에 크게 의존하기 때문에 정확한 산정이 매우 어렵다고 할 수 있다. 현장시험을 통한 직접적인 수평응력의 산정을 측정 기구의 관입에 의한 초기응력상태가 교란되기 때문에 여러가지 불확실성을 많이 포함하게 된다. 따라서 직접적인 산정은 거의 불가능한 상태에 있으며 경험식을 통한 간접적인 산정방법이 제안되어 왔다.

경화되지 않은 지반(uncemented soil)에 대

하여 Marchetti¹¹⁾는 K_0 값(식 5)으로부터 정지토압계수 K_0 를 구하기 위해서 아래의 경험식을 제안하였고,

$$K_0 = \left(\frac{K_D}{1.5}\right)^{0.17} - 0.6 \quad (8)$$

Lacasse와 Lunne⁷⁾는 K_D 가 4보다 작은 점토지반에 대하여 다음과 같은 수정식을 제안하였다.

$$K_0 = 0.34 K_D^m \quad (9)$$

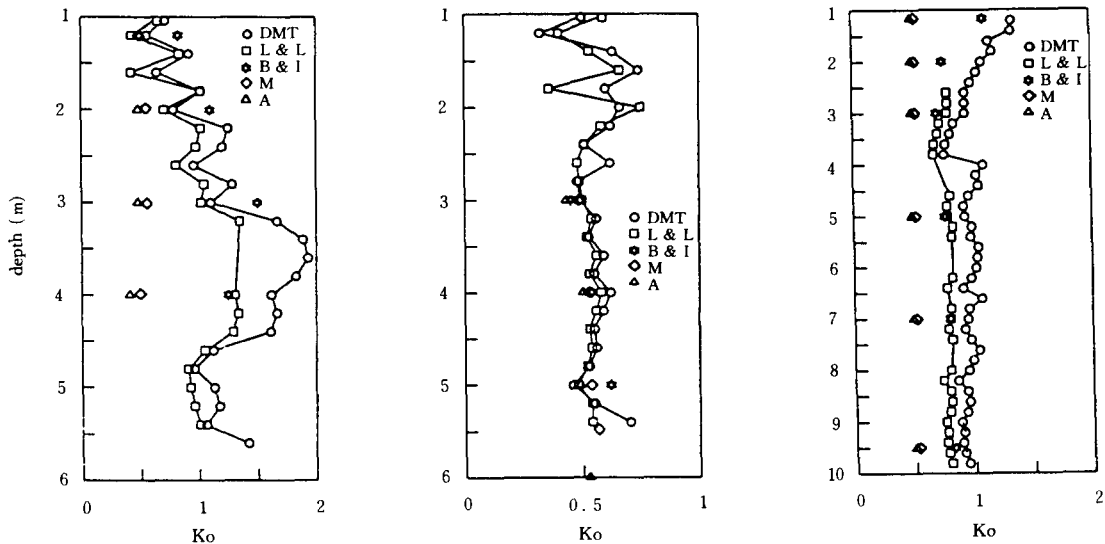
여기서 높은 소성지수를 갖는 점토(highly plastic clay)에 대해서는 $m=0.44$, 낮은 소성지수를 갖는 점토(low plastic clay)에 대해서는 $m=0.64$ 를 제안하였다.

현장지반의 정지토압계수를 산정하기 위하여 Flat DMT의 K_D 값을 이용하여 Marchetti가 제안한 식 (8)과 Lacasse와 Lunne이 제안한 식 (9)를 이용하여 세 장소에 대한 K_0 를 구하여 각각 그림 6의 (a), (b) 및 (c)에

나타내었다. 그 외에도 Brooker와 Ireland⁴⁾, Alpan¹⁾ 및 Massarsch¹⁴⁾가 제안한 공식을 사용하여 K_0 를 구하여 DMT에서 산정한 값과 비교하였다.

Marchetti가 제안한 K_0 의 관계식은 일도지방(그림 6 (b))에서와 같이 NC상태의 점토지반에서는 다른 결과들과 잘 일치하는 경향을 보이나, OC상태의 오산과 소래지반(그림 6 (a), (c))에서는 다소 과대 평가하는 경향이 있다.

Alpan과 Massarsch의 제안식은 NC상태의 지반에서는 K_0 를 잘 예측하나 OC상태의 지반에서는 과소 평가하는 경향이 있다. OC상태의 지반에서는 OCR에 의해서 K_0 가 증가하기 때문에 OCR의 영향을 고려해서 K_0 를 산정해야 하며, Brooker와 Ireland 및 Lacasse와 Lunne이 제안한 식으로부터 구한 K_0 는 서로 잘 일치하는 결과를 나타내고 있다.



(a) 오 산

(b) 일 도

(c) 소 래

- DMT(Marchetti)
- Lacasse와Lunne
- Brooker와Ireland
- ◇ Massarsch
- ▲ Alpan

그림 6 세 장소에 대한 정지토압계수 (K_0)의 비교

3.3 과압밀비(OCR)

지반의 응력이력은 주로 과압밀비(OCR)로 나타내고 과압밀비는 지반의 강도, 응력-변형 특성 및 압축특성에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 일반적으로 OCR 값은 교란되지 않은 시료를 채취하여 oedometer 실험에서 선형압밀하중을 구하여 산정하나, 이와 같이 결정되는 선형압밀하중은 시료채취시 필연적인 시료 교란에 매우 민감하다. 그러므로 oedometer 실험에서 구한 OCR 값은 다소 과소 평가되는 경향이 있다.

Marchetti¹¹⁾는 oedometer 실험으로부터 구한 OCR 값과 K_D 값을 서로 비교함으로써 OCR 값을 추정하는 식을 아래와 같이 제안하였고,

$$OCR = (0.5K_D)^{1.5} \quad (10)$$

Lacasse와 Lunne⁷⁾은 OCR 값이 1.25보다 크고 I_D 가 1.2보다 작은 점토지반에 대하여 다음과 같은 수정 제안식을 추천하였다.

$$OCR = 0.225K_D^m \quad (11)$$

여기서, m 값은 1.35에서 1.65 사이의 범위에 있으며, 소성점토(plastic clay)인 경우 낮은 m 값을 사용하고 소성지수가 낮은 점토(low plastic clay)인 경우 높은 m 값을 사용하도록 제안하였다.

세 점토지반에 대한 OCR 값의 산정은 Marchetti¹¹⁾ 및 Lacasse와 Lunne⁷⁾이 제안한 식(10)과 (11)를 이용하여 각각 구하였으며, oedometer 실험, Mayne와 Mitchell¹⁵⁾ 및 Chandler⁵⁾가 제안한 식을 이용하여 구한 값과 비교하여 각각 그림 7 및 8에 나타내었다.

Marchetti 및 Lacasse와 Lunne의 결과는 oedometer 실험 및 Chandler의 결과와 잘 일치하는 경향을 보인다. Oedometer 실험에서 구한 OCR 값은 시료채취시 발생하는 교란의 영향 때문에 다소 과소 평가하는 경향이 있다. 제한된 실험자료에 의존하지만 Mayne와 Mitchell의 결과는 OCR 값을 다소 과대 평가하는 경향이 있다.

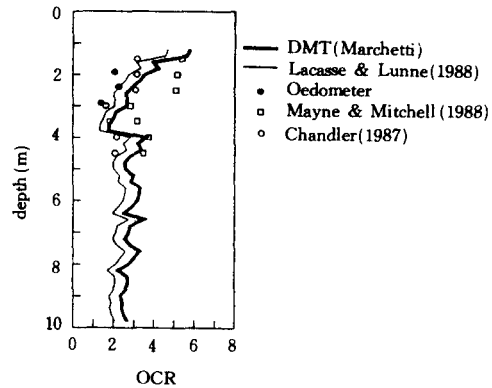


그림 7 깊이의 변화에 따른 OCR의 비교(소래)

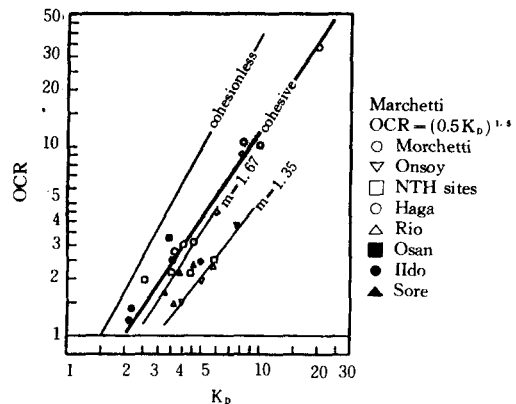


그림 8 K_D 와 OCR의 관계그림

3.4 비배수 전단강도

Marchetti¹¹⁾는 경험적인 방법으로 점토지반에서 DMT를 이용하여 비배수 전단강도를 추정하는 방법을 제안했고 Schmertmann¹⁷⁾은 DMT의 관입저항치 P 와 P_0 를 사용해서 사질토지반에서 마찰저항 ϕ_{ps} 을 추정하는 방법을 제안하였다. 그리고 Marchetti¹³⁾는 DMT의 관입저항치 대신에 CPT의 관입저항치(q_c)를 이용해서 배수상태의 마찰각을 추정하는 방법을 제안했다.

Marchetti는 Ladd 등이 제안한 식을 기초로 해서 S_u 값을 산정하는 아래의 경험적인 방법을 제안하였고, 이 관계식은 I_D 가 1.2보다 작은 점토지반에 대하여 비교적 잘 적용된다.

$$S_u = 0.22\sigma_v (0.5K_D)^{1.25} \quad (12)$$

그림 9 및 10은 세 장소에 대한 Flat DMT 및 CPT의 결과로부터 기존의 상관관계들을 이용하여 추정된 비배수 전단강도값들을 보여 주고 있다.

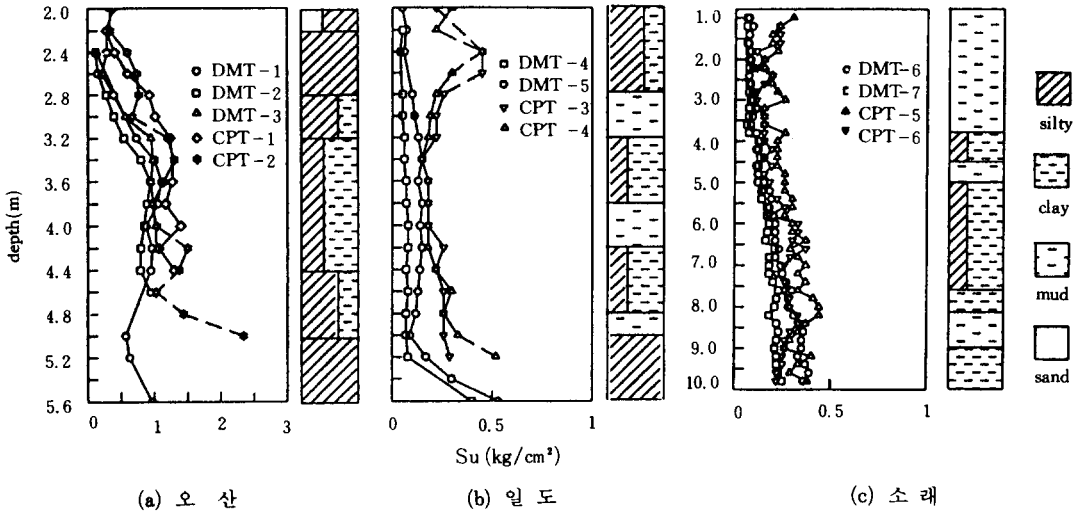


그림 9 세 장소의 DMT와 CPT의 q_c 에서 구한 비배수 전단강도와 주상도

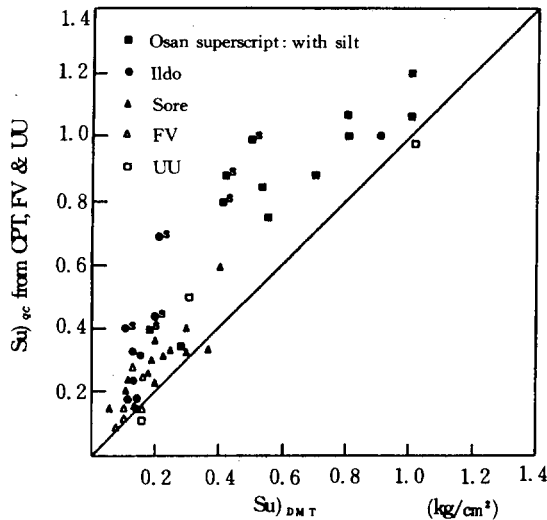


그림 10 DMT, q_c , FV 및 UU 실험결과에서 구한 비배수 전단강도의 비교

CPT의 관입저항치(q_c)를 이용하여 점토지반의 비배수 전단강도를 추정하기 위해서는 콘계수(cone factor) N_k 의 정확한 산정이 매우 중요하다. 콘계수 N_k 는 상수값이 아니라 비배수 전단강도의 측정방법과 신뢰성, cone tip의 형상, 관입속도, OCR, 강도의 비등방성(str-strength anisotropy), 지반의 macrofabric, 소성지수, 과잉간극수압등의 영향을 받는다. NC 상태의 점토지반에서는 mantle cone을 사용하였을 때 일반적으로 15에서 21사이의 값(평균값 17.5)을 갖는다. OC 상태의 지반에서의 N_k 는 NC상태의 값보다 큰 값을 갖는다.¹⁶⁾ 특히 과잉간극수압의 영향을 고려한 많은 실제 자료들을 기준으로 N_k 의 값이 정해져야 하지만, 여기서는 OC상태의 오산지반에 대하여 20.0, NC상태의 일도 및 약간 OC상태의 소래지반에 대

하여 18.0을 사용하였다. 그러나, N_k 가 반드시 위의 범위에 포함되어야 하는 것은 아니며 지역적 특성에 크게 의존하기 때문에 N_k 값의 설정에 상당한 주의가 필요하고 특정지역의 비배수 전단강도를 산정하기 위하여 FV이나 실내 실험등의 결과로부터 검증을 하여 사용하는 것이 좋다.

DMT 및 CPT로부터 추정한 비배수 전단강도는 그림 9의 (a), (b), (c)에 표시하였다. OC 상태의 오산 및 소래지반에서는 깊이에 따라 비배수 전단강도가 증가하는 경향을 보이나, NC 상태의 일도지반에서는 비배수 전단강도의 증가가 OC 상태의 지반에 비해 크지 않다.

그림 10은 점토지반에서 DMT로부터 추정한 비배수 전단강도와 cone의 관입저항치, FV 및 UU 실험결과들로부터 구한 비배수 전단강도를 비교하였다. 순수한 점토지반에서는 Flat DMT로부터 산정한 비배수 전단강도가 다른 실험의 결과와 매우 잘 일치하는 경향을 보이나, silt 성분이 포함된 지반에서는 CPT의 결

과가 최대 4배까지 크게 산정되었다.

그림 11 및 12는 CPT의 f_s 와 DMT의 결과들을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 점토지반에서 f_s 값이 q_c 에서 콘계수 N_k 를 추정하여 구한 비배수 전단강도값보다 더 잘 일치하는 경향을 보이고 있기 때문에 점토지반의 비배수 전단강도는 f_s 값으로 추정하는 것이 보다 정확하다고 사료된다. 그러나 silt 성분을 포함하는 지반에서는 f_s 값이 DMT의 값보다 2배에서 최대 3배까지 크게 산정한다.

DMT의 실험결과는 동일한 장소에서 실험을 수행하였을때 CPT보다 더 반복적인 결과를 얻을 수 있었으며 silt 성분이 포함된 깊이에서는 CPT 결과가 다소 과대 평가하는 결과를 보였다. 위의 결과들을 정리하여 표 2에 수록하였다.

표 2에서 알 수 있듯이 CPT 및 FV의 결과로부터 추정한 비배수 전단강도가 DMT에 의한 비배수 전단강도보다 비교적 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과가 나타난 이유로는 다음과 같은 이유를 생각할 수 있다.

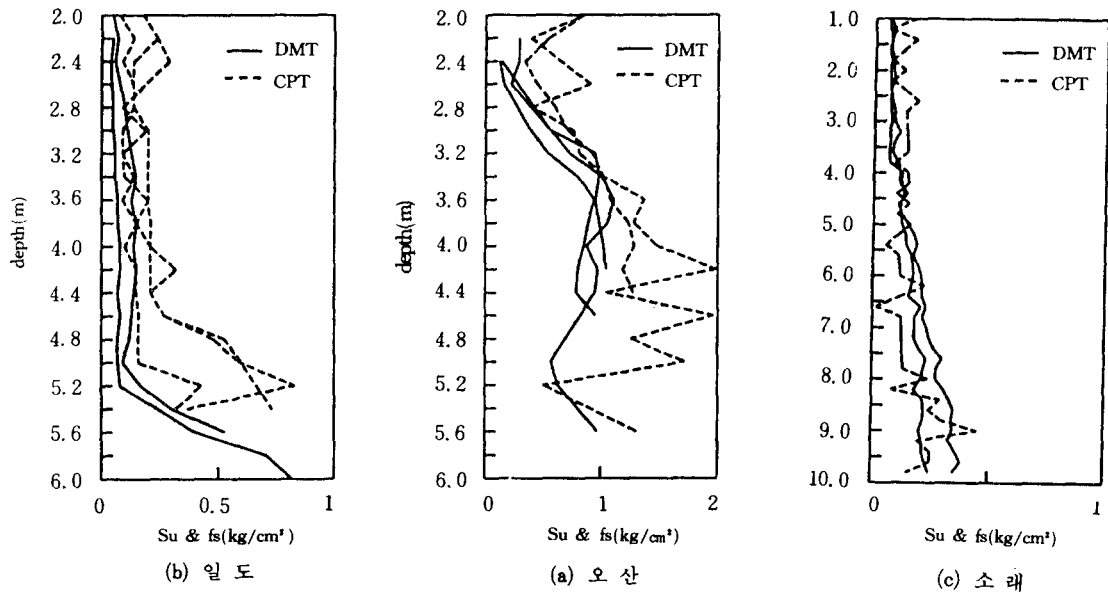


그림 11 DMT 및 f_s 에서 구한 비배수 전단강도

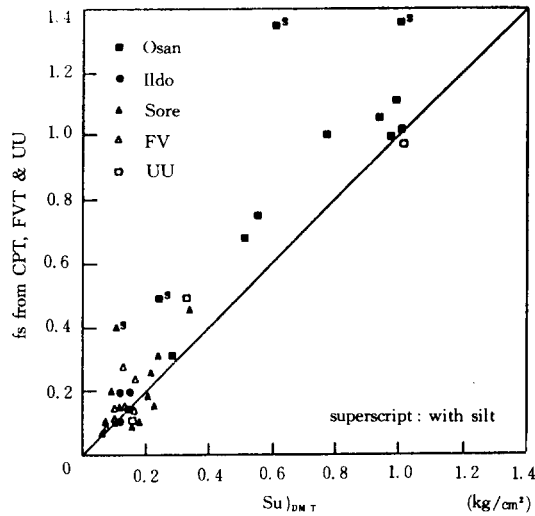


그림 12 DMT, f_s , FV 및 UU 실험결과에서 구한 비배수 전단강도의 비교

표 2 $S_u)_{DMT}$, $S_u)_{q_c}$, f_c 및 $S_u)_{FV}$ 의 비교

	N_k	PI	비 교
CPI q_c	18-20		$S_u)_{q_c} = \alpha_1 S_u)_{DMT}$ clay $\alpha_1 = 1.2-2$ silt $\alpha_1 = 2-4$
CPI f_c		15-25	$f_c = \alpha_2 S_u)_{DMT}$ clay $\alpha_2 = 0.8-1.2$ silt $\alpha_2 = 2-3$
FV			$S_u)_{FV} = \alpha_3 S_u)_{DMT}$ $\alpha_3 = 1-2$

- ① 관입에 의해 발생하는 지반의 교란효과
Flat DMT는 관입에 의한 지반의 교란을 줄이기 위해 wedge의 각이 16° 인 얇은 blade를 사용하는 대신 cone의 경우 apex angle이 60° 이기 때문에 Schmertmann등¹⁸⁾에 의하면 관입에 의해 발생하는 최대 체적 및 전단변형률은 DMT보다 3배정도 크다.
- ② 관입에 의해 발생하는 간극수압에 의한 효과
- ③ 흙의 비등방성(soil anisotropy)의 영향
DMT는 수평방향의 강도를 측정하는 반면 CPT는 수직방향의 강도를 측정하고, FV는 지반이 등방성이고 비배수 전단강

도의 분포가 균일하다고 가정하고 강도를 추정한다.

- ④ 점토의 비배수 전단강도는 시험장치, 변형률 증분(strain rate) 및 파괴평면의 방향등에 의존한다.
- ⑤ N_k 값 산정의 불확실성
앞에서 얻어진 DMT, FV 및 실내실험의 결과들로부터 추정된 비배수 전단강도를 비교하여 보면 비교적 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 이 결과를 바탕으로 추정된 N_k 값은 표 3에 나타내었다.
- ⑥ DMT 상관관계의 신뢰성

표 3 DMT, FV 및 실내실험의 결과들로부터 추정된 N_k 값

	PI	OCR	평균 N_k 값	N_k 값의 범위
오산	15-20	3-8	27.5	22-33
일도	19-25	1-2	23.0	18-28
소래	20-26	2-4	24.5	19-30

3.5 변형특성(Deformation Characteristics)

중요한 구조물의 침하량을 산정하기 위하여 Marchetti¹¹⁾는 E_D , K_D 및 I_D 값을 교란되지 않은 시료에 대한 일차원(1-D) oedometer 실험을 통해 얻어진 자료와 비교하여 다음의 관계식을 제안하였으며,

$$M = R_M E_D \quad (13)$$

여기서,

$$I_D \leq 0.6 \quad R_M = 0.14 + 2.36 \log K_D \quad (13a)$$

$$0.6 < I_D < 3 \quad R_M = R_{M,0} + (2.5 - R_{M,0}) \log K_D \quad (13b)$$

$$R_{M,0} = 0.14 + 0.15(I_D - 0.6) \quad (13c)$$

$$I_D \geq 3 \quad R_M = 0.5 + 2 \log K_D \quad (13d)$$

$$K_D > 10 \quad R_M = 0.32 + 2.18 \log K_D \quad (13e)$$

이로부터 구한 $R_M < 0.85$ 이면 항상 $R_M = 0.85$ 를 사용해서 M 값을 구하도록 제안하였다. DMT에서 구한 M 값과 oedometer 실험에서 구한 체적변화계수의 역수와 잘 일치한다고 보고되었다. 그러나 선행하중(prestress)이나 과압밀(overconsolidation)의 효과는 지반의 압

축성에 큰 영향을 미치고 Baldi²²⁾ 등은 모형토
조 실험에서 DMT로부터 추정된 침하량이 실
제의 침하량보다 과대 평가하는 경향이 있기
때문에 NC 상태인 경우 $M'=1.3M$, OC 상태인
경우 $M'=2.4M$ 을 제안했다.

본 연구에서는 DMT의 전형적인 응력-변
형률 관계그림(그림 13)에서 Marchetti가 제
안한 식 (13)보다는 식 (14) 및 (15)와 같은
새로운 관계식을 제안하고자 한다.

$$E_{D-1} = 34.7(P_1 - P_2) \quad (14)$$

$$M-1 = R_M E_{D-1} \quad (15)$$

이 관계식은 reloading 과정에서 구하였기
때문에 E_{D-1} 이 E_D 보다 탄성침하에서 사용되
는 초기 tangential modulus와 근사할 것이고
침하량을 과대 평가하는 효과는 줄어들 것이라
고 사료되나, 아직 이에 대한 많은 연구와 검증
을 필요로 한다.

그림 14의 (a), (b)는 일도와 소래지방의 깊
이에 따른 M값의 변화를 나타낸 그림이다.
NC 상태인 일도지방에서는 M과 M-1 사이에
별 차이가 없으나 OC 상태인 소래지방에서는
차이가 크다. 따라서 현장지방과 같은 응력수
준(stress level)을 갖는 시료에 대한 실내실험
의 자료를 비교하여 DMT에서 구한 M값의
신뢰성을 우리나라 여러지방에 대하여 더욱 많
은 검토를 행해야 한다고 사료된다.

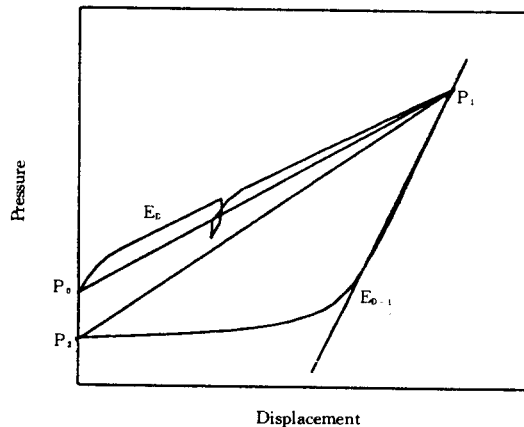


그림 13 DMT의 전형적인 응력-변형률 곡선
(Campanella, R. G. and Robertson, P. K.(1990))

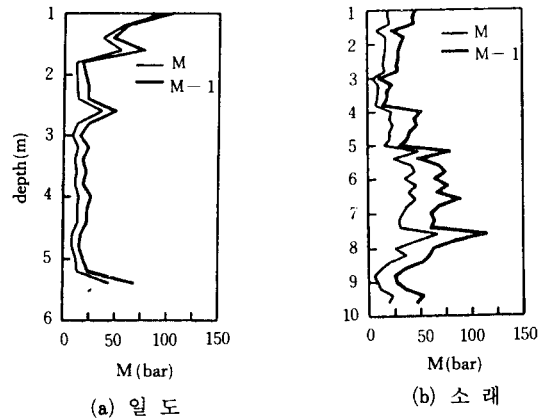


그림 14 깊이의 변화에 따른 M 값의 변화

3.6 과압밀비(OCR), 비배수 전단강도, λ 및 κ 의 비교

Ladd와 Foott⁹⁾가 제안한 SHANSEP방법
이나 한계상태개념에 의하면 점토의 표준화된
(normalized) 비배수 전단강도는 아래식과 같
이 OCR과 함께 증가한다고 했다.

$$(S_u / \sigma_v')_{OC} = (s_u / \sigma_v')_{NC} \text{OCR} \quad (16)$$

$$\Lambda = (1 - C_s / C_c) \quad (17)$$

위 식에서 Λ 는 소성체적 변형률의 비(plastic
volumetric strain ratio)에 관계되는 상수값
이다. Λ 는 보통 0.8에서 1.35 사이에 있으며
 $(S_u / \sigma_v')_{NC}$ 의 값은 0.16에서 0.33의 범위에 있
다.

본 연구에서는 $(S_u / \sigma_v')_{NC}$ 의 값으로 Bje-
rrum이 제안한 관계그림을 사용하였으며
OCR의 값은 Lacasse와 Lunne이 제안한 식
(11)을 사용하고 $(S_u / \sigma_v')_{OC}$ 의 값은 DMT에
서 구한 비배수 전단강도를 사용하여 추정된
 Λ 값을 oedometer 실험에서 구한 Λ 의 값과 비
교하여 그림 15에 나타내었다. 제한된 자료에
의존하지만 DMT에서 추정한 평균 Λ 값으로
는 오산지방에서 0.9385, 소래지방에서 1.0055
로 Jamiolkowski⁶⁾ 등이 보고한 범위에 속하나
oedometer 실험에서 구한 값보다 큰 값이 얻
어졌다.

Ladd²¹⁾는 소성지수(PI)가 20에서 80 정도의 범위에 있고 등방성의 점토지반에서 $\Lambda=0.88$ ($1-C_s/C_c$)를 제안했다. 이 Λ 값을 구해보면 그림 15에서 보는 것과 같이 DMT에서 산정한 값보다 크게 산정되고 있다. 앞으로 많은 연구와 연구자료가 축적된다면 현장실험으로부터 수치해석적으로 지반의 거동을 예측할 때 필수적인 지반정수 및 직접 산정할 수 있는 상관관계도를 제안할 수 있을 것으로 사료된다.

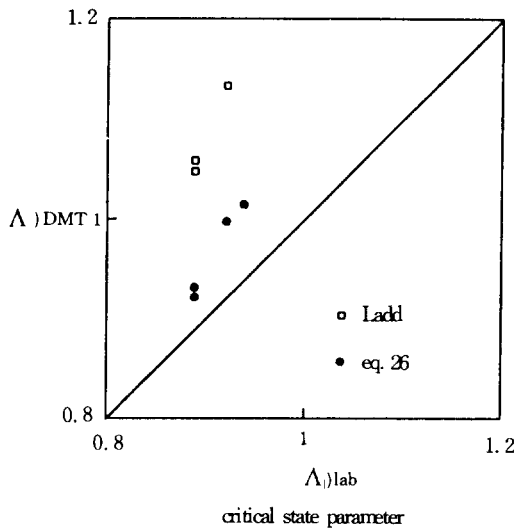


그림 15 DMT와 압밀실험에서 구한 critical state parameter의 비교

4. 결 론

Flat DMT에 의한 현장상태의 지반정수 추정방법은 경제적이며 신속하고 간단하면서도 신뢰할 만한 결과를 줄 수 있다. 또한 많은 지반정수값들의 추정이 가능하므로 설계 및 시공 관련 문제에 그 적용성이 크다고 하겠다. 특히 PMT나 CPTU 등 다른 실험과 병행했을 때는 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있게 된다. 이상과 같은 세 장소의 여러 현장시험 및 실내실험 결과를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. DMT로부터 추정된 지반의 분류와 특성

은 실내실험 및 CPT의 결과와 비교적 잘 일치하나, DMT로부터 추정된 단위중량은 다소 과소 평가하는 것으로 사료된다.

2. Marchetti가 제안한 K_0 의 관계식은 NC 상태의 점토지반에서는 다른 결과들과 잘 일치하나, OC 상태의 지반에서는 다소 과대 평가하는 경향이 있는 것으로 나타났다.
3. DMT로부터 추정된 OCR의 값은 oedometer 실험 및 Chandler의 결과와 잘 일치하는 경향이 있는 것으로 나타났다.
4. 일정한 장소, 임의의 깊이에서 얻은 DMT 결과들로부터 구한 비배수 전단강도들을 서로 비교했을 때 비교적 일관된 결과를 얻을 수 있었다.
5. CPT의 q_c 에 의해 추정된 비배수 전단강도는 DMT에 의한 결과보다 1.2~2배 정도 더 큰 값을 갖는 것으로 나타났다.
6. DMT에 의해 추정된 비배수 전단강도와 CPT의 f_s 는 점토지반에서 비교적 잘 일치하며, 점토지반의 비배수 전단강도는 f_s 값으로 추정하는 것이 보다 간편하리라고 사료된다.
7. DMT, FV 및 실내실험의 결과들로부터 추정된 N_k 값은 표 3에 나타내었으나, 더욱 많은 FV 및 실내실험등의 연구자료들로부터 검증이 필요하다.

이상에서와 같이 DMT는 많은 지반정수값을 추정할 수 있으나 현장지반상태의 지반정수값의 기준값(reference value)을 산정하는데에 많은 어려움이 있어 지역적 특성에 의존하는 상관관계식의 유도에 많은 한계가 있었다. 따라서 추후 이들 기준값에 대한 더 많은 연구와 연구자료들의 축적이 필요하다.

감사의 말

본 연구는 한국과학재단의 기초연구비 지원에 의해 이루어진 것으로 귀 재단에 감사드리

며, 실험을 같이 수행한 (주)대우 김기영 대리
님과 실험실원 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. Alpan, I.(1967), "The Empirical Evaluation of the Coefficient K_0 and K_{OR} ", *Soils and Foundations*, Vol. 7 No.1, p.31.
2. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V. and Jamiolkowski, M.(1986), "Flat Dilatometer Tests in Calibration Chambers", *Proc. ASCE Specialty Conf. on Use of In-Situ Tests in Geotechnical Engineering.*, pp.431-446.
3. Bjerrum, L.(1972), "Embankment on Soft Grounds", *Proc., ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earthsupported Structures*, W. Lafayette, IN, Vol.2, pp.1-54.
4. Brooker, E.W. and Ireland, H.D.(1965), "Earth Pressures at Rest Related to Stress History", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.2, pp.1-15.
5. Chandler, R.J.(1987), "The In Situ Measurement of the Undrained Shear Strength of Clays Using the Field Vane", *Proc., the ASTM International Symposium on Lab. and Field Vane Shear Strength Testing*, Tampa, pp.13-44.
6. Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J. and Lancellotta, R.(1985), "New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils", *11th ICSMFE*, San Francisco, Vol.1, pp.57-154.
7. Lacasse, S. and Lunne, T.(1988), "Calibration of Dilatometer Correlation", *ISOPT-1*, pp.137-155.
8. Ladd, C.C.(1991), "Stability Evaluation During Staged Construction", *J. of Geotech. Engrg. Div., ASCE*. Vol.117, GT4, pp.540-615.
9. Ladd, C.C. and Foott, R.F.(1974), "New Design Procedure for Stability of Soft Clays", *J. of Geotech. Engrg. Div., ASCE*. Vol.100, GT7, pp.763-785.
10. Ladd, C.C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, K.F. and Poulos, H.G.(1977), "Stress-Deformation and Strength Characteristics", *Proc., 9th ICMEFE*. Vol. 2, pp.421-494.
11. Marchetti, S.(1980), "In Situ Testing by Flat Dilatometer." *J. of Geotech. Engrg. Div., ASCE*. 106(3), Mar., pp.96-120.
12. Marchetti, S. and Crapps, D.K.(1981), "Flat Dilatometer Manual, Internal Report of G. P. E Inc., distributed to purchasers of the DMT equipment.
13. Marchetti, S.(1985), "On the Field Determination of K_0 in Sand", *submitted for publication in the discussion volume, Proc., XI ICSMFE*, San Francisco. Vol. 5, pp.2667-2673.
14. Massarsch, K.R.(1975), "New Method for Measurement of Lateral Earth Pressure in Cohesive Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.12, pp.142-146.
15. Mayne, P.W. and Mitchell, J.K.(1988), "Profiling of Overconsolidation Ratio in Clays by Field Vane.", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.25, pp.150-157.
16. Meigh(1987), A.C., *Cone Penetration Testing : Methods and Interpretation, CIRIA Ground Engineering Report : In-Situ Testing*
17. Schmertmann, J.H.(1982), "A Method for Determining the Friction Angle in Sands from the Marchetti Dilatometer Test(DMT)", *Proc., 2nd European Symposium on Penetration Testing*. Amsterdam, pp.853-861.
18. Schmertmann and Crapps Inc.(1988), *Guideline Summary for Using the CPT 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, Feb., in 4 volumes with the three below concerning primarily the DMT

(접수일자 1992. 2. 28)