

## DMT를 이용한 해성점토의 과압밀비 추정에 관한 연구 A Study on the Evaluation of Overconsolidation Ratio of Marine Clay by Flat DMT

정혁<sup>1)</sup>, Hyeok Jeong, 김종국<sup>2)</sup>, Jong-Kook Kim, 채영수<sup>3)</sup>, Young-Su Chae, 윤원섭<sup>4)</sup>, Won-Sub Yoon

<sup>1)</sup> 수원대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.

<sup>2)</sup> 한국건설품질시험원 지반공학센터 팀장, Chief of Geo-Team, Institution of Korea Construction Quality Test&Analysis

<sup>3)</sup> 수원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.

<sup>4)</sup> 수원대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.

**SYNOPSIS** : In this study, it enforced DMT test, CPTu test, laboratory consolidation test, because it estimated stress history of Gwangyang port marine clay. Through DMT test obtained Horizontal stress index( $K_D$ ), predicted overconsolidation ratio by  $K_D$ . To compare empirical equation with laboratory consolidation test and CPTu test calculated OCR examined application. The result, Powell & Uglow(1988) method underestimated OCR value in comparison with Suggestion. Comparatively Byeon wi yong(2004) and Chang(1991) method seem to exactly predict in-situ stress states. Sugawara(1988) method of CPTu test seems to underestimate OCR

**Keywords** : Flat Dilatometer Test(DMT), Overconsolidation ratio(OCR)

### 1. 서론

대부분의 건설지역에 분포하는 지반을 대상으로 지반정보를 얻기 위한 수단으로 현장 지반조사가 수행되고 있으며, 최근 다소의 시험시간이 소요되는 실내시험 결과를 분석하는 방법보다는 현장에서 직접 측정을 통해 지반정보를 추정할 수 있는 신속하고 경제적이며 연속적인 지반조사 방법을 선호하고 있다. 국내에서는 최신 시험 장비인 피에조관입시험(CPTu), 프래시미터시험(PMT), 딜라토미터시험(DMT) 등의 도입으로 다각적인 원위치 시험이 수행되고 있다. 그 중에서 신뢰성이 입증된 CPTu을 이용한 지반조사가 증가하는 추세에 있으며, 이와 병행하여 DMT에 의한 지반조사가 소규모로 이루어지고 있다. DMT시험은 1975년 이태리 Marchetti교수에 의해 고안되어 1990년대 후반부터 영종도 지역을 필두로 국내에서 활성화 되고 있는 현장 지반조사 방법이다. CPTu 관입장비를 사용하여 DMT 블레이드(blade)를 관입한 후 질소가스 주입에 의한 멤브레인의 팽창으로 지반내의 변형을 유발하게 되는 원리를 이용하는 방식으로 자갈층을 제외한 점토 및 모래지반 등 거의 모든 지반에 적용할 수 있고, 불교란 시료의 채취 없이 지반 공학적 특성을 파악할 수 있어 장비자체의 경제성측면 뿐만 아니라 결과의 신뢰성 측면에서 대단히 높다.

본 연구에서는 연약지반 특성을 파악을 위해 최근 많이 사용되고 있는 DMT, CPTu 및 실내압밀 시험을 바탕으로 과압밀비(OCR)을 산정하고, 기존의 경험식과의 상호 비교·분석하였다.

### 2. 과압밀비(OCR)추정 방법

DMT는 1980년대 이탈리아의 Silvano Marchetti 교수에 의하여 고안된 장비로 매우 신속하고 간편하

며 경제적으로 시험을 수행할 수 있을 뿐 아니라 시험자에 거의 상관없이 매우 신뢰성 있는 결과를 제공하는 장점을 가지고 있다. 두께 14mm, 폭 95mm의 강관에 지름 6cm인 스틸 멤브레인이 한쪽 면에 부착된 브레이드를 사용할 수 있어 외부로부터 압축공기를 주입하면 스틸멤브레인이 팽창되고, 그 압력으로 인하여 지반 내에 변형을 발생시킨다. 이때 브레이드는 케이블을 통해 압축공기를 주입하면 스틸멤브레인이 팽창되고, 그 압력으로 인하여 지반 내에 변형을 발생시켜 A, B, C 값을 얻을 수 있다. A, B, C 값의 관계식은 식 (1), 식 (2), 식 (3)과 같다.

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

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

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

여기서,  $\Delta A$ 는 대기 중에서 A값에 대한 보정,  $\Delta B$ 는 대기 중에서 B값에 대한 보정,  $Z_m$ 은 대기압으로 배출할 때의 압력 값이다. 식 (1)에서 식 (3)을 토대로 여러 설계변수들을 예측하는 상관관계식은 식(4) ~ 식(7)과 같다.

$$I_D = \frac{p_1 - p_0}{p_0 - u_0} \quad (4)$$

$$E_D = 34.7(p_1 - p_0) \quad (5)$$

$$K_D = \frac{p_0 - u_0}{\sigma'_v} \quad (6)$$

$$U_D = \frac{p_2 - u_0}{p_0 - u_0} \quad (7)$$

여기서  $I_D$ 는 재료지수,  $K_D$ 는 수평응력지수,  $E_D$ 는 DMT modulus,  $U_D$ 는 간극수압력지수,  $u_0$ 는 관입 전 현장지반의 간극수압,  $p_0$ 는 초기 접촉압력,  $p_1$ 는 1.1mm 팽창압력,  $\sigma'_v$ 는 연직유효응력이다. 이를 통해 주로 흙의 분류, 정지토압계수( $K_o$ ), 비배수전단강도( $s_u$ ), 연직배수 구속 변형계수( $M$ ), OCR, 수평압밀계수( $C_h$ ) 및 단위중량 등을 예측한다.

Marchetti(1979, 1980)는 DMT의 수평응력지수와 압밀시험의 결과로부터 OCR를 추정하는 경험식을 제안하였으며, 이를 기초로 한 많은 경험식은 표 1과 같다. 본 연구에서는 DMT시험 결과로부터 OCR를 추정하는 경험식을 상호 비교하였다.

표 1. DMT에 의한 OCR추정식

Reaseacher	OCR	note
Marchetti (1980)	$OCR = (0.5K_D)^{1.56}$	Cohesive soils, $I_D < 1.2$
Powell & Uglow (1988)	$OCR = 0.24(K_D)^{1.32}$	Young Clay(U.K)
Chang (1991)	$OCR = (0.5K_D)^\lambda$	Marine Clay(Singapore), $\lambda = 0.84$
Kamei & Iwasaki (1995)	$OCR = 0.34K_D^{1.43}$	Soft Clay (Japan)
변위용 등 (2004)	$OCR = 0.6K_D^{0.75}$	남해/서해 연약지반, $OCR < 5(Korea)$

또한, CPTu의 시험결과를 토대로 Chang(1991), Sugawara(1988)의 제안식을 이용하여 OCR값을 산

정하여 실내시험 값과의 비교를 통해 적용성을 파악하였다.

표 2. CPTu에 의한 OCR추정식

Reaseacher	OCR	note
Chang(1991)	$OCR = \frac{2.3B_q}{(3.7B_q - 1)}$	<i>sensitivity ratio, OCR &lt; 8</i>
Sugawara(1988)	$OCR = \frac{(q_T - \sigma_{v0})}{K \cdot \sigma_{v0}}$	$K = 2.5 \sim 5.0$

### 3. 지반특성

본 연구에서는 광양항지역의 동측배후단지와 서측인접철도 구간의 연약점성토를 대상으로 수행한 DMT, CPTu 및 실내압밀시험결과를 분석하였다. 표 3과 같이 7개소에서 시험이 수행되었으며 시험지역의 불교란시료를 이용하여 수행한 기본물성 시험을 통해 기본적인 지반특성을 획득하였다. 본 지역의 연약층의 함수비는 심도가 깊어질수록 감소하고 소성한계는 22.3%~30.4%범위에 존재하며, 액성한계는 34.5%~104.2%범위로 심도가 깊어질수록 증가하였다. 흙의 분류에서는 BH-34공의 상부 지층을 제외한 모든 구간이 CH로 분류되었다.

표 3. 기본물성 시험결과

위치	구분		Wn (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	E <sub>o</sub>	γ <sub>t</sub> (tonf/m <sup>3</sup> )	P <sub>o</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	U.S.C.S
	공번	심도(m)								
동측 배후	BH-34	2.9	63.3	34.5	22.3	12.2	1.713	1.616	0.209	CL
		10.1	83.9	54.7	30.4	24.3	2.294	1.514	0.549	CH
	BH-41	4.9	110.1	104.2	29.5	74.7	3.057	1.404	0.208	CH
		10.9	69.5	61.1	26.5	34.6	1.95	1.556	0.616	CH
	BH-51	5.6	68.8	86.3	28.2	58.1	1.937	1.561	0.344	CH
		12.9	66.3	56.7	27.2	29.5	1.869	1.573	0.769	CH
	BH-54	2.6	94.8	95.2	28.6	66.6	2.673	1.441	0.145	CH
		10.1	69.9	59.6	25.9	33.7	1.938	1.57	0.606	CH
서측 철도	NBH-7	3.5	76.4	72.5	27.2	45.3	2.21	1.496	0.234	CH
		5.5	59.7	52.5	24.2	28.3	1.71	1.596	0.382	CH
	NSB-8	4.4	67.1	75.5	26.9	48.6	0.207	1.454	0.207	CH
		10.0	62.4	52.5	26.2	26.3	1.754	1.582	0.602	CH
	NSB-26	7.0	53.2	68.2	26.9	41.3	1.633	1.577	0.434	CH
		13.5	41.6	44.4	23.2	21.2	1.13	1.804	1.115	CH

### 4. 시험결과 및 분석

#### 4.1 지반정수 산정

DMT시험으로 얻어지는 3가지 지수 중 하나인 재료 지수  $I_D$ 를 활용하여 깊이에 따른 흙의 종류를 추정할 수 있다.  $K_D$ 는 지반설계 변수와 상관관계에서 가장 근간이 되는 계수이며 DMT결과 중 핵심이 되는 계수이다.  $E_D$ 는 응력이력에 대한 정보가 함축되어 있지 않으며 일반적으로  $I_D$ 와  $K_D$ 의 관계로 사용된다.

DMT시험의 세 가지 중간계수를 이용하여 작성한 그림 1과 그림 2에서  $I_D$ 값은 시험 전 구간에

0.03~2.57까지 분포하고 있고 대부분 0.4이하 값을 가진다.  $K_D$ 는 0.53~7.55까지 분포하고 대부분 2.0이하의 값을 보인다.  $E_D$ 값 역시 0.49~187.6까지 값을 보였지만 대부분 20.0이하이다. 두 지역의 시험결과를 통하여 일부 심도의 모래층을 제외하면 대부분 유사한 지반특성을 보이며 고소성 점토층으로 나타났다.

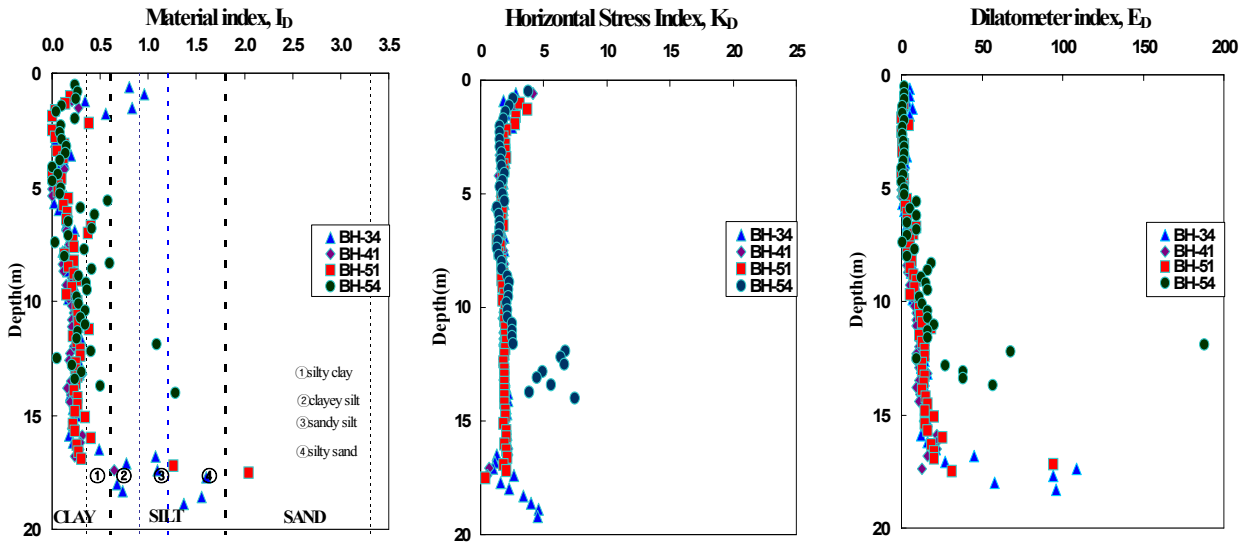


그림 1. 광양항 동측배후단지 지역의 DMT시험결과

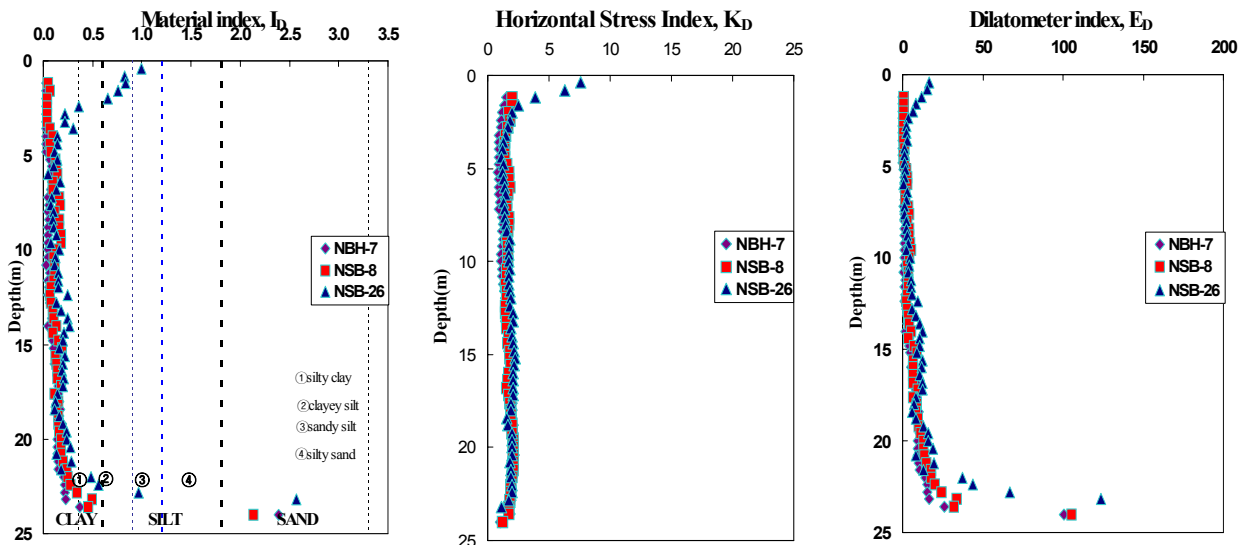


그림 2. 광양항 서측인접철도 구간의 DMT시험결과

재료지수를 통해 깊이에 따른 흙의 종류를 추정하면 광양항 동측배후단지 지역의 경우 BH-34공의 상부층만 실트 내지 실트질 점토층이고 하부 지반은 대체적으로 균질한 고소성 점토층으로 구성되어 있으며 부분적으로 실트층이 존재하였다. 서측인접철도 구간의 경우 NSB-26공 역시 상부가 실트층 지반이고 24m이상의 연약지반이 존재하며 비교적 균질한 고소성 점토로 구성되어 있다.

그림 3과 그림 4는 DMT시험결과를 이용하여 Marchetti & Crapps(1981)가 제안한  $I_D$ 와  $E_D$ 를 사용하여 흙의 단위중량과 흙의 종류를 도시하였다. 이들 그림에서도 두 지역에서의 지반특성은 유사하였다. 대부분이  $I_D < 0.6$  이하의 점토지반에 해당하는 영역이 많았고,  $0.6 < I_D < 1.8$  사이의 실트지반에 해

당하는 경우로 흙의 종류는 점토가 우세한 지반으로 나타났다. 다만 점토층에 모래가 섞인 경우 보편적으로 실트로 분류되며, 점토라도 강성이 큰 경우에는 실트로 분류되는 경우도 있었다.

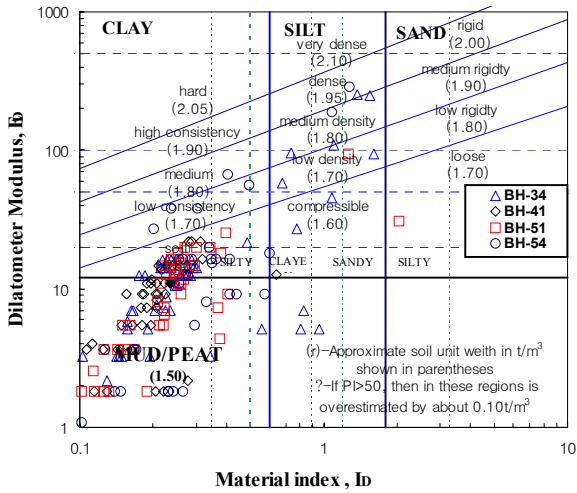


그림 3. 광양항 동측배후단지 지역의 지반특성

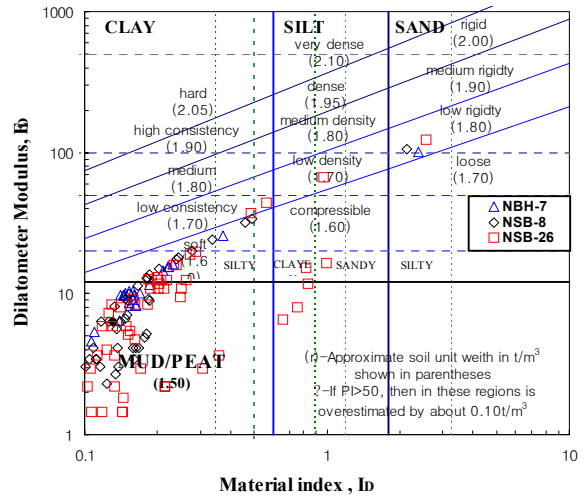


그림 4. 광양항 서측인접철도 구간의 지반특성

## 4.2 과압밀비(OCR) 분석

OCR은 흙의 공학적 거동 특성 파악을 위해 이용되는 매우 중요한 인자이며, 특히 점성토의 강도, 압축성과 응력-변형률 거동에 많은 영향을 미친다. 따라서 연약지반에 이러한 응력이력 특성을 파악하는 것이 지반공학과 관련된 대상 문제 설계 시 합리적인 설계변수를 선택하는데 있어서 매우 중요한 문제이다(Chang, 1991).

본 연구는 표 1의 선행 연구자들의 제안 식으로부터 심도에 따른 OCR값을 추정하여 그림 5와 그림 6에 도시하였다. 시료 전체적으로 동측 배후단지 지역과 서측인접철도 구간에서 대략 2m까지 과압밀 상태를 보이며 2m이하 심도에서는 정규압밀상태를 보였다.

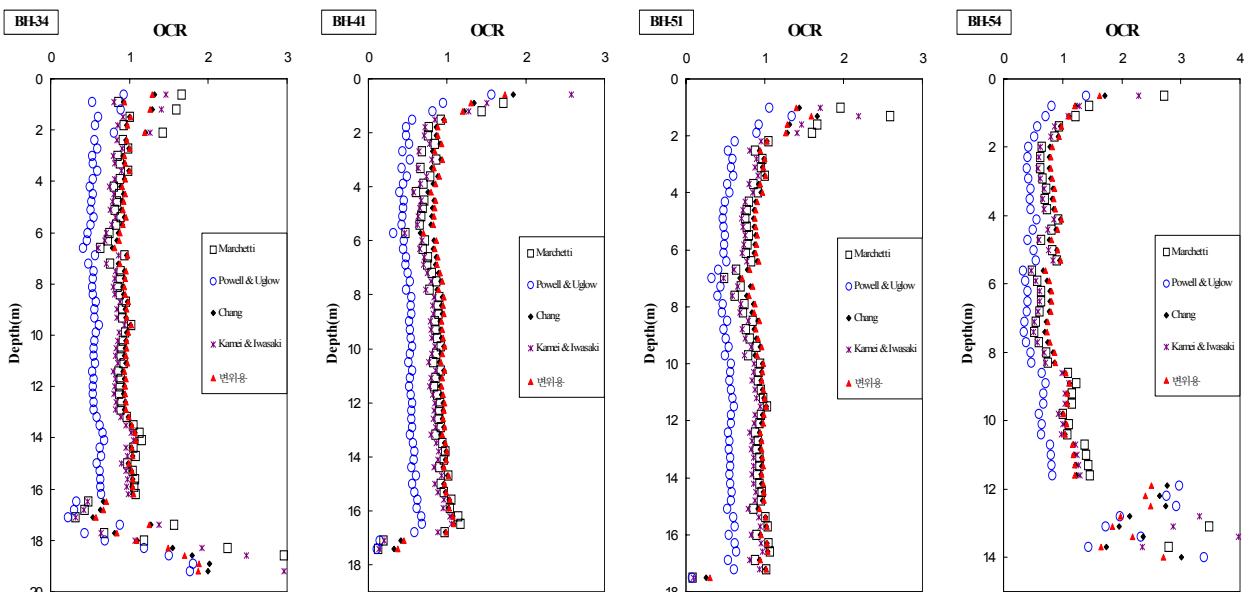


그림 5. DMT의 경험식에 의한 OCR비교(동측배후)

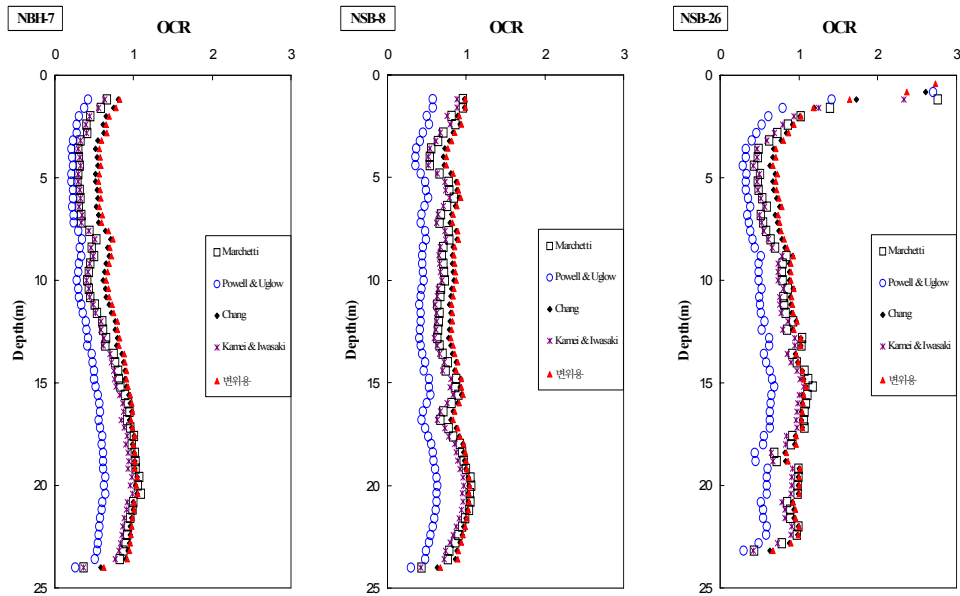


그림 6. DMT의 경험식에 의한 OCR비교(서측철도)

특히 동측배후지역에서 BH-34공의 심도 15m와 BH-54공의 심도 12m에서는 급격한 지층변화를 통해 과압밀상태로 보였으며, 이를 제외한 경우 전체적으로 Powell & Uglow (1988)의 방법은 다른 제안식에 비해 OCR값이 작게 평가되었고, Marchetti(1980), Chang (1991), Kamei & Iwasaki (1995), 변위용 등(2004)의 방법은 매우 유사하였다. 특히 변위용 등 (2004)과 Chang(1991)의 방법은 광양항의 현장 응력상태를 정확히 예측하고 있는 것으로 실내 압밀 시험과의 결과와 비교를 통해 알 수 있었다.

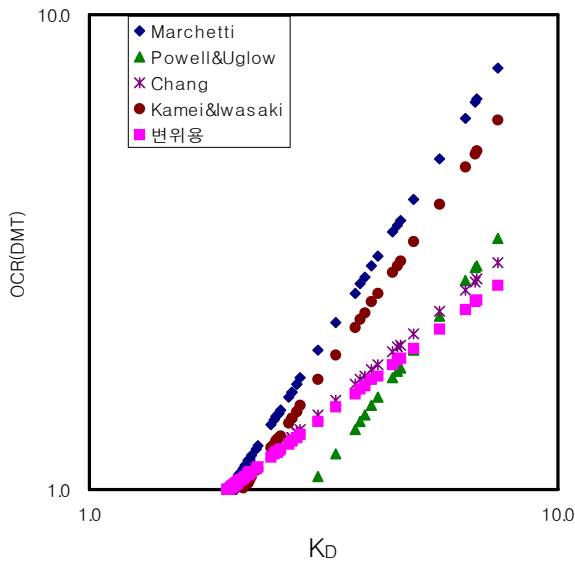


그림 7.  $K_D$ 와 OCR관계(광양항 동측배후)

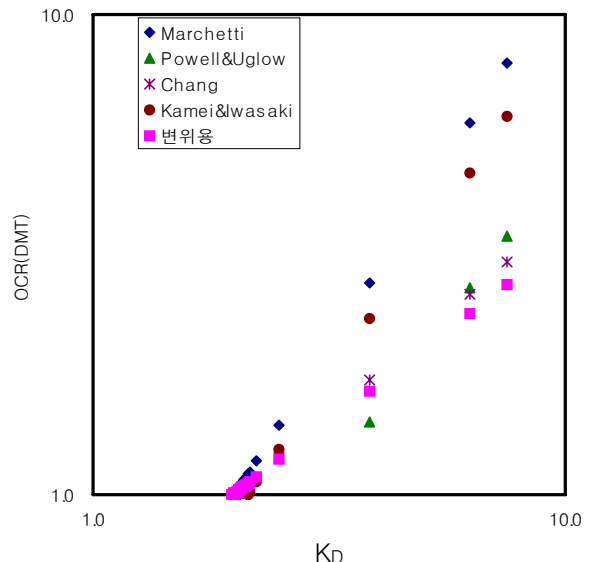


그림 8.  $K_D$ 와 OCR관계(광양 서측인접)

또한 상부층에서는 OCR의 차이를 보였지만 심도가 깊어질수록 동측은 대략 10m이하에서, 서측은 15m 이하에서 OCR이 같았다. 이는  $K_D$ 값이 2에 가까울 때 OCR값이 같아지는 것은 그림 7과 그림 8에 나타냈다. 두 그림에서 5가지 방법 중 Kamei & Iwasaki (1995)와 Marchetti (1980)값이 유사하였

고, 변위용 등(2004)과 Chang(1991)의 값이 비교적 일치하였다.  $K_D > 2$  이상으로 커질수록 OCR값의 차이가 증가하였다.

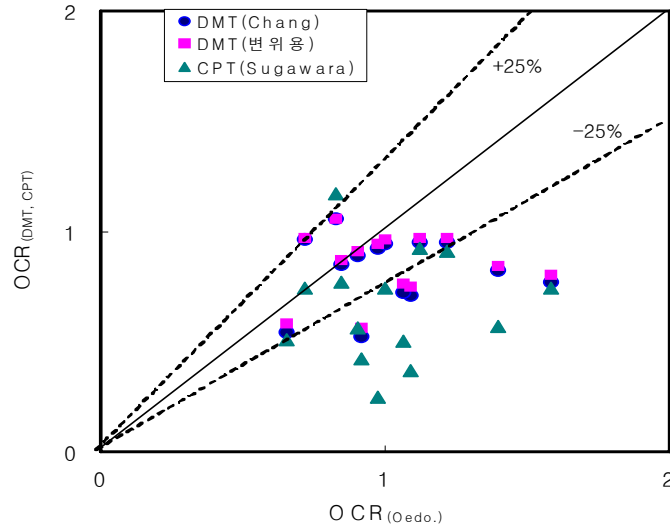


그림 9. 실내 시험 OCR와 DMT, CPTu의 OCR비교(광양 동측, 서측)

그림 9에서는 상기의 제안식 중 비교적 근사한 값을 가지는 경험식들과 실내 압밀시험으로 구한 OCR를 비교하였다. 그림과 같이 변위용 등(2004)과 Chang(1991)의 방법으로 구한 OCR값은 분산도는 있지만 서로 일치하였다. 그러나 CPTu에서는 원추관입저항력을 이용한 Sugawara(1988)의 방법은 과소평가되는 경향을 보였다. 이는 CPTu으로 측정된 간극수압 값이 실트질 점토 지반에서 실제보다 매우 작아 OCR를 산정하기가 어렵기 때문에 과소평가하는 경향을 보인다. 한편 김주형 등(2000)은 인천공항(영종도)지역의 점토지반 OCR의 경우,  $B_q$  값에 따라 피에조콘, 딜라토미터 그리고 표준압밀시험으로 구한 각각의 OCR이 서로 차이를 보일 수 있고,  $B_q$ 가 0.1보다 큰 실트질 점토에 대해서는 CPTu로 구한 OCR( $OCR_{CPTu, K=4.5}$ )와 실내압밀시험으로 구한 OCR( $OCR_{Lab.}$ )는 비교적 잘 일치하며, DMT 결과로 산정한 OCR( $OCR_{Mar.}$ ,  $OCR_{Lun.}$ )도 이와 비슷하였다. 그러나  $OCR_{Mar.}$ 은  $B_q$ 가 증가할수록  $OCR_{Lab.}$ 과  $OCR_{CPTu, K=4.5}$  보다 작은 값을 나타내는데, 이는 Marchetti가 제안한 식은 대체로 OCR을 크게 평가한다는 것을 의미한다. 본 연구지역의 고소성지반의 OCR을 산정결과 차이를 보이고 있어 앞으로 국내 점토지반을 대상으로 피에조콘, 딜라토미터시험과 실내의 다양한 압밀시험 등의 보다 많은 시험자료를 통해 정밀한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

## 5. 결론

본 연구의 광양지역 연약지반을 대상으로 수행한 DMT를 중심으로 산정한 OCR와 CPTu 및 실내압밀 시험으로 산정한 OCR를 비교·분석하였으며, 그 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. DMT로 추정된 과압밀비(OCR)는 전체적으로 Marchetti(1980), Chang (1991), Kamei & Iwasaki (1995), 변위용 등(2004)의 방법은 매우 유사하였고 반면에 Powell & Uglow (1988)의 방법은 다른 제안 식에 비해 OCR값이 작게 평가되었다. 특히 변위용 등(2004)과 Chang(1991)의 방법은 광양항의 현장 응력상태를 정확히 예측하고 있었다.
2. 실내 압밀시험의 OCR과 DMT, CPTu의 OCR값을 비교한 결과, DMT의 경우 변위용 등(2004)과 Chang(1991)의 방법으로 구한 OCR 값은 얼마간의 분산은 있지만 서로 일치하였으나, CPTu는 원추관입저항력을 이용한 Sugawara(1988)의 방법은 과소평가되었다.

3. 추후, 국내 점토지반을 대상으로 보다 정확한 OCR를 산정하기 위해서는 DMT, CPTu와 실내의 다양한 압밀시험 등의 보다 많은 시험자료를 통해 정밀한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. 김종국, 김영웅, 최인걸, 박영목, (2001), "CPTu와 DMT를 이용한 인천국제공항 해성점토의 공학적 특성연구", 한국지반공학회 논문집, 17(2), pp.41~49.
2. 김주형, 김영웅, 조성민, 김명모, (2000), "인천국제공항 부지 해성 세립토에 대한 CPTu와 DMT 결과 비교", 한국지반공학회 논문집, 16(6), pp.23~33.
3. 변위용, 김영상, 이승래, (2004), "Flat DMT를 이용한 국내 연약지반의 비배수 전단강도 추정 시 미치는 요소들", 한국지반공학회 논문집, 20(4), pp.103~113.
4. 이강운, (2003), "콘관입시험을 이용한 해성점토의 전단강도 및 압밀특성 평가 연구", 수원대학교 토목공학과 박사학위논문.
5. 전창대, 김종국, (1998), "Flat Dilatometer시험을 이용한 인천국제공항 점성토의 비배수 전단강도 추정", 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp.151~154.
6. 홍성진, 신동현, 김동휘, 정상진, 이우진, (2007), "DMT를 이용한 부산신항 점토의 비배수 전단강도 추정", 한국지반공학회 논문집, 23(7), pp.87~98.
7. Chang, M.F., (1991), "Interpretation of Overconsolidation Ratio from In-Situ Tests in Recent Clay Deposits in Singapore and Malaysia", *Canadian Geotechnical Journal*, 28(2), pp.210~225.
8. Kamei, T., Iwasaki, K., (1995), "Evaluation of Undrained Shear Strength of Cohesive Soils Using a Flat Dilatometer", *Soils and Foundations*, 35(2), pp.111~116.
9. Lacasse, S., Lunne, T., (1988), "Calibration of Dilatometer Correlations", Penetration Testing, (Proceedings, ISOPT-1, Orlando), 1, Balkema, Rotterdam, pp.539~548.
10. Marchetti, S., (1980). "In Situ Tests by Flat Dilatometer." *Journal of Geotechnical Engineering*, 106, 299~321.
11. Marchetti, S., Crapps, D. K., (1981), "Flat Dilatometer Manual", GPE Inc., Gainesville, FL.
12. Sugawara Noriaki, (1988), "On the Possibility of Estimating In-Situ OCR Using Piezometer(CPTu)", Proceedings of 1st International Symposium on Penetration Testing, 2, pp.985~991.
13. ASTM, (2001), "Standard Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer", Approved Draft.