

낙동강 삼각주 점토에 대한 과압밀비의 평가

Determination of OCR on the Deltaic Clay of the Nakdong River

정 성 교*¹ 김 규 종*²
Chung, Sung - Gyo Kim, Gyu - Jong

이 대 명*³ 조 기 영*⁴
Lee, Dae - Myoung Cho, Ki - Young

Abstract

For a deltaic clay in the mouth of the Nakdong river, OCR was investigated through methods using the results of field measurement, laboratory and field soil tests. As a result, OCRs were obtained around the range of 0.95 to 1.20 by analysis of field measurements, although they were estimated around the values of 0.4 to 0.7 by the results of conventional consolidation tests for the clay. From the dissipation test it was found out that the excess pore pressures scarcely existed in the clay deposit and then the soil was not in the underconsolidated condition. And the OCRs obtained through methods of Mayne(1991) and Cao et al(1996) using the piezocone test and of Mayne & Kemper(1988) using the cone penetration test were in good agreement with those of field measurement.

요 지

낙동강 하구의 삼각주 점토에 대하여 현장계측, 실내 및 현장토질시험결과를 이용한 산정법들에 의하여 OCR이 분석되었다. 그 결과, 표준압밀시험결과에 의한 OCR이 0.4~0.7인데 반하여, 현장계측값의 분석으로 얻어진 OCR은 0.95~1.20으로 얻어졌다. 소산시험에 의하여 과잉간극수압의 존재를 거의 확인할 수 없었으므로 미압밀점토의 존재는 찾기 어려웠다. 그리고 피에조콘시험을 이용한 Mayne(1991) 및 Cao 등(1996)의 산정법과 콘관입시험을 이용한 Mayne & Kemper(1988)의 산정법에 의한 결과가 현장계측값의 분석법에 의한 결과와 잘 일치하였다.

Keywords : OCR Deltaic clay, Vertical drains, Laboratory test, Field measurement

- *¹ 정희원, 동아대학교 공과대학 토목공학과 교수
*² 정희원, 동아대학교 공과대학 토목공학과 박사과정
*³ 정희원, 양산대학 토목과 전임강사
*⁴ 정희원, 동아대학교 건설기술연구소 특별연구원

1. 서 론

우리나라에서 가장 긴 낙동강은 여러 도를 거쳐 부산광역시로 이어지고 있다. 이 강의 하구지역은 지류들 사이에 자리잡고 있는 삼각주와 넓은 평야로 형성되어 있다. 근래에 이르러 이 지역에서는 국가공단, 주거단지, 공공시설 등을 위한 조성공사가 실시되고 있으나, 두터운 연약점성토층과 조립토층으로 형성된 층적층이 약 100m전후로 분포하고 있어서 개발사업을 수행하는 과정에서 상당한 애로를 겪고 있는 실정이다. 이 연약점성토층은 두껍게 또한 깊게 분포하고 있어서, 대부분의 조성지역에서는 경제적인 연직배수공법과 함께 성토공사를 시행하고 있다. 그러나 대부분의 공사지역에서 성토에 의한 지반침하가 설계값보다 2~3배를 초과하고 있어서 관계자들을 한층 긴장시키고 있다. 이러한 과소평가(또는 과대침하)의 원인을 규명하기 위해서는 무엇보다 이 지역의 토질특성을 정확히 정립하는 것이 중요한 문제일 것이다.

권 등(1996), 조 등(1996) 및 김 등(1997)은 이 지역에서 수행되었던 수많은 압밀시험 결과를 바탕으로 낙동강 하구의 자연점토가 OCR(과압밀비)이 1.0보다 작은 미압밀(underconsolidated)상태에 있을 것으로 추측하였다. 그럼에도 불구하고, 압밀상태에 대하여 명백한 규명이 없이 이 점성토를 정규압밀점토라고 가정하여 현재까지 설계에 임하고 있는 실정으로서 이 지역에서의 OCR이 정확히 규명되어야 할 필요성이 크게 대두되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 표준압밀시험 결과에 의하여 추정된 OCR이 0.4~0.7의 범위로 나타난 낙동강 하구의 삼각주 점토에 대하여 실제의 OCR을 결정하기 위하여 현장계측값을 이용한 산정법과 소산시험이 각각 적용 및 실시되었다. 그리고 각종 실내 및 현장토질시험 결과를 OCR산정공식에 적용하여 얻어진 값들을 전자의 경우와 비교를 통하여 수렴성이 좋은 산정방법을 찾고자 시도되었다.

2. OCR의 결정법

2.1 실내시험에 의한 OCR산정법

실내압밀시험에 의하여 과압밀비(OCR)는 유효연직응력에 대한 선행압밀응력의 비로서 나타낼 수 있다.

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}} \quad (1)$$

여기서 σ'_p 는 선행압밀응력이고, σ'_{vo} 는 유효연직응력이다.

NAVFAC(1982)에서는 일축압축강도와 소성지수사이의 경험적인 상관성을 이용하여 다음과 같은 방법을 제시하였다.

$$OCR = \frac{q_u/2}{(0.11 + 0.0037 \cdot PI) \sigma'_{vo}} \quad (2)$$

여기서 q_u 는 일축압축강도이고, PI는 소성지수이다.

SHANSEP 방법에서 정의된 기본식 $OCR = [(C_u/\sigma'_{vo})/(C_u/\sigma'_{unc})]^{1/A}$ 에 삼축 및 단순전단시험 결과를 적용하여 상수를 결정할 수 있다. Mayne(1988)은 등방 및 비등방 삼축압축시험 결과로부터 OCR을 산정하는 방법을 아래와 같이 제안하고 있다.

$$OCR_{UUC} = \left[\frac{(C_u/\sigma'_{vo})}{(0.75 \sin \phi')} \right]^{1.43} \quad (3a)$$

$$OCR_{UAUC} = \left[\frac{(C_u/\sigma'_{vo})}{(0.67 \sin \phi')} \right]^{1.28} \quad (3b)$$

여기서 C_u 는 최대 축차응력의 0.5배로 정의하였다. 그리고 삼축신장 및 직접단순시험에 대해서는 Mayne & Holts(1988) 및 Jamiolkowski 등(1985)에 의하여 매개변수들이 제안되고 있다.

2.2 현장시험에 의한 OCR산정법

2.2.1 표준관입시험(SPT)

Mayne & Kemper(1988)은 정규화된 N치(N / σ'_{vo})와 OCR의 관계를 통계분석하여 식 (4)와 같이 제안하였다.

$$OCR = ks(N / \sigma'_{vo}) P_a \quad (4)$$

여기서 P_a 는 대기압(=0.1MPa)이며, σ'_{vo} 의 단위는 MPa이다. 그리고 경험상수 k_s 는 여러 점토들에 대하여 0.2~1.0 사이로 분포하였으며, 평균적으로 0.5를 선택하고 있다.

Mayne & Kemper(1988)는 Robertson 등(1983)에 의해 연구되어진 SPT N치와 콘관입저항치 q_c 의 관계를 이용하여 식 (5)와 같이 간단한 표현을 나타내고 있다.

$$OCR = 48 N / \sigma'_{vo} \quad (5)$$

2.2.2 콘관입시험(CPT)

Tavenas & Leroueil(1979)은 캐나다의 2현장에서 조사된 예민점토에 대해서 식 (6)과 같이 간단한 관계를 제시하였다.

$$OCR = q_c / (3 \sigma'_{vo}) \quad (6)$$

Mayne & Kemper(1988)은 콘관입시험결과를 통계처리하여 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$OCR = 0.37 \left\{ \frac{q_c - \gamma z}{\sigma'_{vo}} \right\}^{1.01} \quad (7)$$

Mayne & Kemper(1988)는 식 (7)과는 달리 OCR과 q_c 의 직접적인 관계로부터 식 (8a) 및 식 (8b)과 같이 간단히 나타내고 있다.

$$OCR = 0.243(q_c)^{0.96} / \sigma'_{vo} \quad (8a)$$

$$\approx q_c / (4 \cdot \sigma'_{vo}) \quad (8b)$$

2.2.3 피에조콘시험(CPTU)

Chang(1991)은 Wroth(1984)가 정의하였던 간극수압계수 B_q 를 사용하였으며, 예민비와 OCR이 모두 8보다 작은 점토에 대해 다음과 같은 식을 추천하였다. 그러나 식 (9)에서 B_q 를 구할 때 필요한 u_o 를 정확히 구하기 어렵다는 단점이 있다.

$$OCR = \frac{2.3B_q}{3.7B_q - 1} \quad (9)$$

여기서 $B_q = \Delta u / (q_t - \sigma_{vo})$, $\Delta u = u_{bt} - u_o$, $q_t = q_c + u_{bt}(1 - a) =$ 보정된 콘 저항치, $q_c =$ 측정된 콘 저항치, $u_{bt} =$ 관입중에 발생된 최대간극수압, $u_o =$ 초기 간극수압 또는 정수압, $a =$ 콘의 순 면적비.

Cao 등(1996)은 MCC(Modified Cam Clay)에서 동공팽창이론을 바탕으로 B_q 의 값이 0.75보다 작을 때와 0.78~0.85일 때에 각각 식 (10a) 및 (10b)를 제안하였다.

$$OCR = 2 \left[\frac{0.866q_t + 0.134 \sigma_{vo} - u_{bt}}{\alpha_s \sigma'_{vo} (1 + 0.66M)} \right]^{1/\Lambda} \quad (10a)$$

$$OCR = 2 \left[\frac{q_t - u_{bt}}{\alpha_s \sigma'_{vo} (1 + 0.67M)} \right]^{1/\Lambda} \quad (10b)$$

여기서 $\alpha_s =$ 변형률비 보정계수=1.64, $M =$ 한계상태선의 기울기= $6 \sin \phi' / (3 - \sin \phi')$, 그리고 Λ 는 0.75로 가정하였다.

Mayne(1991)은 동공팽창이론과 Cam clay이론을 바탕으로 다음의 식 (11)을 제안하고 있다. 만약 u_{bt} 대신에 u_i (콘 내에서 측정된 간극수압)가 사용되었을 때에는 식 (11)이 약간 달라지게 표현된다.

$$OCR = 2 \left[\frac{1}{(1.95M + 1)} \left(\frac{q_t - u_{bt}}{\sigma'_{vo}} \right) \right]^{1.33} \quad (11)$$

Mayne & Holtz(1988)와 Mayne & Bachus(1988)는 각각 다음의 식 (12) 및 (13)과 같은 경

험식을 제안하고 있다.

$$OCR = \left[0.317 \frac{A_u}{\sigma'_{vo}} \right]^{1.79} \quad (12)$$

$$OCR = 0.38 \left[\frac{A_u}{\sigma'_{vo}} - 1 \right]^{1.38} \quad (13)$$

Schmertmann(1978)에 의한 제안식은 식 (14)와 같다.

$$OCR = \left[\frac{S}{S_1} \right]^{1.13+0.04\left(\frac{S}{S_1}\right)} \quad (14)$$

여기서 $S = c_{up}/\sigma'_{vo}$, $c_{up} = (q_t - \sigma_{vo})/N_{kt}$,
 $q_t =$ 보정된 콘 저항치 $= q_c + (1-a)u$,
 $a =$ 콘의 순 면적비(일반적으로 0.8로 가정), $N_{kt} \approx 12(OCR \leq 8$ 인 조건에 대해 Wroth(1988)에 의해 제시된 값),
 $S_1 = 0.01 + 0.0037PI = (C_u/\sigma'_{vo})_{NC}$ (Skempton(1957)에 의해 제시된 값).

2.2.4 현장베인시험(FVT)

현장베인시험을 이용한 대부분의 관계식은 SHANSEP 방법에 근거하여 식 (15)와 같이 표현하고 있다. 여기서, 아래첨자 FV는 현장베인이라는 뜻이다.

$$OCR = \left[\frac{(C_u/\sigma'_{vo})_{FV}}{(C_u/\sigma'_{vnc})_{NC}} \right]^{1/\Lambda} \quad (15)$$

식 (15)에서 $1/\Lambda$ 을 결정하기 위하여 다양한 점토에 대하여 통계분석한 결과, Jamiolkowski 등 (1985)은 1.03으로 분석하였으나, 그 후 Chandler (1987)는 좀 더 세밀한 분석에 의하여 $1/\Lambda$ 을 1.05로 결정하였다.

Mayne & Mitchell(1988)은 위의 두 자료를 참조하여 다음의 경험식을 제안하였다.

$$OCR = 22(PI)^{-0.48}(C_u/\sigma'_{vo})_{FV}/\sigma'_{vo} \quad (16)$$

Larsson(1980)은 소성지수 PI가 5%보다 큰 북유럽 점토에 대하여 식 (17)과 같은 경험식을 제안하고 있다.

$$OCR = \frac{(C_u/\sigma'_{vo})_{FV}}{(0.08 + 0.0055PI)} \quad (17)$$

그리고 Cao(1997)는 MCC개념에 근거하여 식 (18)과 같은 이론식을 제시하고 있다.

$$OCR = 2 \left[\frac{\sqrt{3}(C_u)_{FV}}{\sigma'_{vo} M \cos \phi'_{ps}} \right]^{1/\Lambda} \quad (18)$$

여기서 ϕ'_{ps} 는 삼축압축시험에 의한 ϕ' 의 1.12배이며, Λ 는 0.75로 가정하고 있다.

2.2.5 팽창계시험(DMT)

팽창계시험(DMT)에 의한 수평응력지수(K_D)를 이용하여 Marchetti(1980)는 이태리 점토에 대하여 식 (19)와 같은 경험식을 제안하였다. 이 관계식은 노르웨이 점토에서도 좋은 적용성을 나타내었다(Lacasse & Lanne, 1988).

$$OCR = (0.5K_D)^{1.56} \quad (19)$$

여기서 $K_D = (P_o - u_o)/\sigma'_{vo}$ = 수평응력지수, P_o = 최초의 접촉압력.

Lacasse & Lanne(1982)은 OCR이 1.25보다 큰 점토지반에 이용될 수 있도록 Marchetti의 관계식을 수정하여 제시하였다.

$$OCR = 0.225 K_D^n \quad (20)$$

여기서 n 은 1.35~1.67이며, 점토의 소성지수에 의존하는 값이다.

Powell & Uglow(1988)는 영국의 신생(young) 점토에 대해 다음과 같은 경험식을 제안하고 있다.

$$OCR = 0.24 K_D^{1.32} \quad (21)$$

동공팽창이론과 MCC이론에 근거하여 Cao

(1997)는 이론식을 제안하였으며, 또한 적절한 매개상수를 대입하여 식 (22)와 같은 관계식을 제안하였다.

$$OCR = 2 \left[\frac{P_o - \sigma_{vo}}{4.13 \sigma'_{vo}} \right]^{1.18} \quad (22)$$

2.3 현장계측자료의 이용법

Morin 등(1983)은 현장계측값을 이용하여 현장OCR을 결정하는 방법을 다음과 같이 (1)~(5)의 방법으로 제안하고 있다.

(1) 점토층에 대한 응력-변형을 해석

점토층내에 침하계와 간극수압계가 임의의 깊이에 설치되었을 때, 점토층의 유효연직응력(σ'_v)과 연직변형률(ϵ_v)이 계산될 수 있다. 이 값을 이용하여 $\epsilon_v - \sigma'_v$ 또는 $e - \log \sigma'_v$ 곡선을 그려서 선행압밀응력(σ'_p)을 결정할 수 있다.

(2) 함수비 분석

점토층에 대하여 성토 전후에 함수비를 깊이 별로 그려서 함수비 변화의 경계 깊이를 결정한다. 이 깊이에 대하여 전연직응력을 구하고 측정된 간극수압을 빼면 유효연직응력이 얻어지며, 이 값이 바로 선행압밀응력이다.

(3) 여러 높이의 제방에 대한 침하해석

높이가 다르고 폭이 비슷한 여러 제방에 대하여 장기적으로 침하계측을 실시하면 큰 침하가 일어나는 최대성토고를 정의할 수 있다. 성토고가 낮을 때에는 점토지반이 과압밀영역에 있으므로 침하량이 작고 급속하게 침하(간극수압의 소산)가 일어나게 된다. 이때 유효연직응력은 계산된 전응력으로부터 성토지역의 외곽에서 측정된 간극수압을 뺀 값으로 된다. 그러나 큰 침하가 일어날 경우(정규압밀상태)에는 간극수압과

유효연직응력을 알 수 없으므로, 작은 침하에서 큰 침하로 넘어가는 경계상태의 최대성토고는 점토지반내의 임의의 점들에서 선행압밀응력을 초과하는 경계유효응력곡선으로써 나타낼 수 있다. 이 유효응력곡선은 이들 깊이에서의 선행압밀응력을 정의한다.

(4) 경사진 제방에 대한 침하해석

경사진 제방이 연약지반 위에 축조되었을 때, 큰 침하와 작은 침하를 일으키는 경계점에서 선행압밀응력을 결정할 수 있다. 즉, 과잉간극수압이 완전히 소산된 후에 이 단면에 대한 전응력과 정수압을 이용하여 유효연직응력(선행압밀응력) 곡선을 정의할 수 있다.

(5) 제방축조 동안에 유발된 과잉간극수압의 해석

제방이 축조되는 초기상태에 측정된 간극수압의 증분과 전응력의 증분(성토고)의 관계곡선을 이용하여 선행압밀응력을 결정한다(Leroueil et al., 1978).

3. 삼각주의 지반조건 및 개량공사

3.1 지반조건

본 연구대상현장은 낙동강 하구의 삼각주에 위치하며, 행정구역상 부산광역시 사하구 하단동에 속하는 곳이다(Fig. 1). 이 삼각주는 낙동강의 상류로부터 운반되어 온 막대한 양의 하상쇄설물이 퇴적된 곳으로 약 100m 정도의 층적층으로 구성되어 있다.

본 현장의 지층구조 및 토질특성을 파악하기 위하여 7개의 시추조사(Fig. 2에서 층별침하계의 매설위치)가 실시되었다(사하구청, 1997). 지층구조는 상부의 약 20m의 두께가 모래층으로 구성되어 있으며, SPT N치는 1~21로 분포하고 있

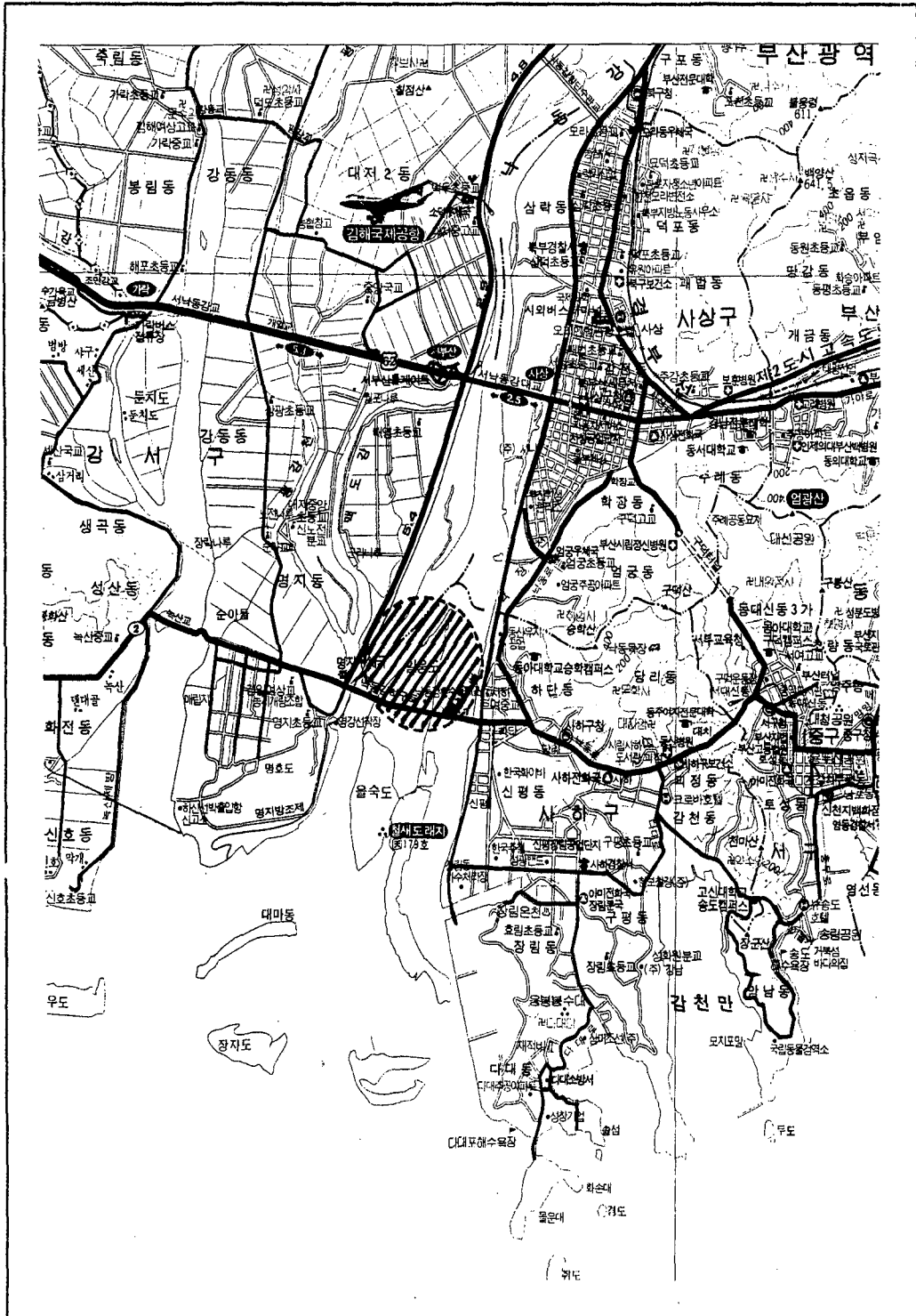


Fig. 1. Location of the construction site

Table 1. Engineering properties of clay.

	Index Properties	Range(Average)	Remarks
Physical Property	Water Content, w(%)	39.75 ~ 56.94(47.01)	
	Specific Gravity, G _s	2.658 ~ 2.675(2.664)	
	Liquid Limit, LL(%)	32.50 ~ 42.60(38.37)	
	Plasticity Index, PI(%)	17.20 ~ 31.49(23.81)	
Mechanical Property	Unconfined Compression Strength, q _u (kg/cm ²)	0.791 ~ 1.526(1.099)	Unconfined Compression test
	Angle of Internal Friction, φ'(°)	26.60 ~ 45.92(38.38)	
	Sensitivity Ratio, S _t	8 ~ 22(16)	
Compressibility	Over Consolidation Ratio, OCR	0.41 ~ 0.70(0.54)	
	Swell Index, C _s	0.032 ~ 0.094(0.061)	
	Compression Index, C _c	0.509 ~ 0.801(0.094)	

다. 그리고 이 모래층 내에는 가끔 얇은 점토층이 협재되어 있기도 한다. 그 아래로 약 20m 두께의 실트질 점토층이 존재하며, 조사위치에 따라 3~4m두께의 모래층이 불규칙적으로 협재되어 있기도 한다. 이 점성토층에는 부분적으로 소량의 폐각류가 함유되어 있으며, SPT N치는 4~28의 범위로 변하는 불규칙성을 나타내고 있다. 이 점성토의 아래로는 조밀한 모래 및 자갈층이 깊은 깊이까지 번갈아 쌓여있으며, 점성토층 내에도 부분적으로 약 3m 두께의 실트질 모래층이 30~33m의 깊이 사이에 협재되어 있기도 한다.

지표 아래로 약 20~40m의 깊이에 존재하는 점성토에 대하여 실내토질시험(Head, 1982)으로 얻어진 토질특성은 Table 1과 같다. 이 점성토는 액성한계가 자연함수비보다 약간 작게 나타나며, 일축압축 강도가 0.79~1.53 kg/cm²이고, 예민비가 8~22인 초예민점토로 분류된다. 여기서, 역학적 특성값이 다소 크게 나타나는 경우는 점성토 내에 부분적으로 모래질 흙이 협재되어 있기 때문이다.

3.2 지반개량공사

본 현장은 Fig. 2에서 볼 수 있는 바와같이 2~8층 규모의 건물을 축조하기 위하여 연약지

반개량을 실시하는 곳이다. 성토면적은 207×157m이며, 성토는 외지에서 유입된 실트질 세사를 약 30 cm씩 성층한 후 진동롤러로 다짐하여 단위중량이 2.0 t/m³가 되도록 조절하면서 8.0m의 높이까지 실시되었다. 4면의 성토사면은 1:1.5로 축조되었다. 성토속도는 대략 0.4 m/month로 성층되었고, 최종성토까지 단계적인 지연기간을 포함하여 330일이 소요되었다.

지반개량을 촉진시키기 위한 목적으로 PBD를 이용한 연직배수공법이 적용되었다. PBD는 Mebra MD-88제품이며, 그 크기는 폭 99.6 mm, 두께 3.9 mm이다. 이 PBD는 1.5m 간격의 격자형 배치이며, 지표로부터 약 43.0m까지 관입시켜서 양면배수가 되도록 하였다.

본 현장에서는 Fig. 2에서 나타난 바와같이 각종 현장계측이 수행되었다. 대표적으로 7개 지점을 선정하여 지표침하판, 층별침하계 및 간극수압계를 설치하였으며, 그 이외에도 지중경사계 및 지하수위계가 공사관리를 위하여 사용되었다.

4. OCR의 산정 및 분석

4.1 현장계측결과를 이용한 분석

본 현장에 대하여 계측결과를 이용하여 OCR

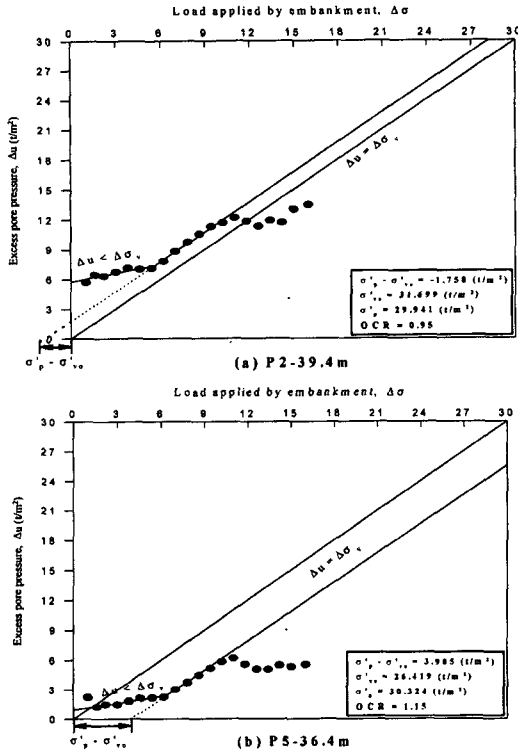


Fig. 3. Determination of OCR using analysis of pore pressure generation

을 산정하는 방법들(2.3절 참조)중에서 방법(5)가 직접적인 적용이 가능하였다. Fig. 3은 Fig. 2에서 볼 수 있는 7지점 중에서 지면의 제한 때문에 대표적으로 P2지점의 39.4m 및 P5지점의 36.4m 깊이에 매설된 간극수압계에 의한 계측값을 이용하여 방법(5)를 적용한 결과이다. 이 Fig에서 보면, 성토의 초기단계에 $\Delta u : \Delta \sigma$ 관계의 직선 부분은 $\Delta u = \Delta \sigma$ 로 되는 직선과 평행하게 되며, 이것은 재하중분($\Delta \sigma$)만큼 과잉간극수압이 동일하게 증가(Δu)되는 정규압밀상태를 의미한다. 따라서 절편으로 나타낸 ($\sigma'_p - \sigma'_{vo}$)을 이용하여 $OCR (= \sigma'_p / \sigma'_{vo})$ 을 구할 수 있다. Fig. 4는 Fig. 3과 같은 방법에 의하여 모든 간극수압계에서 얻어진 OCR을 나타내고 있다. 이 Fig에서 보면, 14개의 간극수압계에서 해석된 OCR은 0.95~1.20으로 나타나고 있다. 이들의 값들은

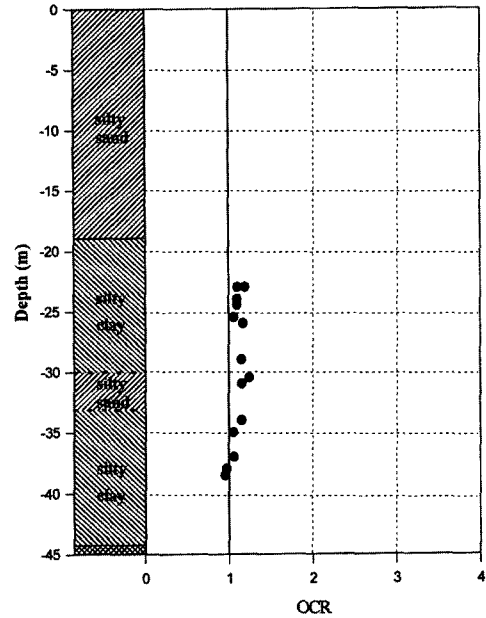


Fig. 4. OCR's determined by analysis of pore pressure generation

간극수압계의 계측값보다는 성토에 의한 하중중분($\Delta \sigma$)의 계산시에 발생할 수 있는 오차에 의하여 약간의 차이는 있을 것으로 판단된다.

4.2 Piezocone의 소산시험에 의한 잔류 과잉간극수압의 확인

낙동강 하류지역의 연약점성토가 미압밀상태 ($OCR < 1$)에 있을 가능성이 큰 것으로 권 등(1996), 조 등(1966) 및 김 등(1997)의 연구결과에 의하여 발표되었으며, 또한 본 현장에 대하여 실시된 실내압밀시험결과(사하구청, 1996)에서도 $OCR = 0.4 \sim 0.7$ 인 것으로 분석되었다. 따라서, 미압밀점토의 존재를 규명하기 위하여 점토층 내에서 과잉간극수압을 관찰할 필요가 있었다.

Fig. 5는 성토의 영향을 직접 받지 않는 본 현장 주변의 한 지점을 선정하여 피에조콘에 의한 소산시험을 실시한 결과이다. 소산시험은 지하수위를 측정하기 위하여 상부 모래층 내에서 4회가

실시되었으며, 과잉간극수압의 크기를 산정하기 위하여 점성토층 내의 네 위치에서 각각 40시간 이상 실시되었다(김 등, 1998). Fig. 5에서 보면, 본 현장의 점성토에서는 과잉간극수압이 거의 존재하지 않고 정수압상태에 있다. 이 Fig와 Fig. 4를 비교하면, 약 38m아래에서 작은 과잉간극수압이 존재하여 약간 미압밀상태($OCR < 1$)인 것으로 보여지지만, 측정오차 등을 감안하면 이 점토층에서 미압밀점토가 존재하는 것으로 보기는 어렵다.

4.3 실내 및 현장토질시험결과를 이용한 OCR의 분석

본 현장에서 OCR을 산정하기 위하여 이용될 수 있는 실내 및 현장토질시험결과는 다음과 같다: 7공의 시추공에서 총 210회의 SPT조사, 5공의 피에조콘 조사, 7공의 시추공에서 채취된 14개의 불교란시료에 대한 표준압밀시험과 CIU삼

축압축시험이다(사하구청, 1996).

Fig. 6은 실내토질시험인 표준압밀시험과 CIU삼축압축시험 결과를 이용하여 산정한 OCR을 깊이에 따라 나타내고 있다. 표준압밀시험에 의한 OCR은 깊이에 따라 거의 일정하며 대략 0.4~0.7로 분포하고 있어서 미압밀점토로 분류될 수 있다. 그러나 표준압밀시험은 e - $\log \sigma'_{\nu}$ 곡선에서 선행압밀응력까지 도달하는데 약 6~8%의 체적변형률로 나타나 시료가 몹시 교란되었다는 것을 알 수 있었다(건설기술연구소, 1998). 즉, 이 시료들은 Andresen & Kolstad (1979)의 시편 판정법(Specimen Quality Designation)에 의하면 D급에 속하고 있다. 그리고 CIU삼축압축시험결과를 이용한 NAVFAC(1982) 및 Mayne(1988)방법에 의하면, 특히 상부점성토층에서 OCR값이 크게 얻어지며 분산도 역시 크게 나타나고 있다. 이 방법 역시 시료교란에 따라 밀접한 관계가 있으므로 신뢰하기 어려울 것으로 사료된다.

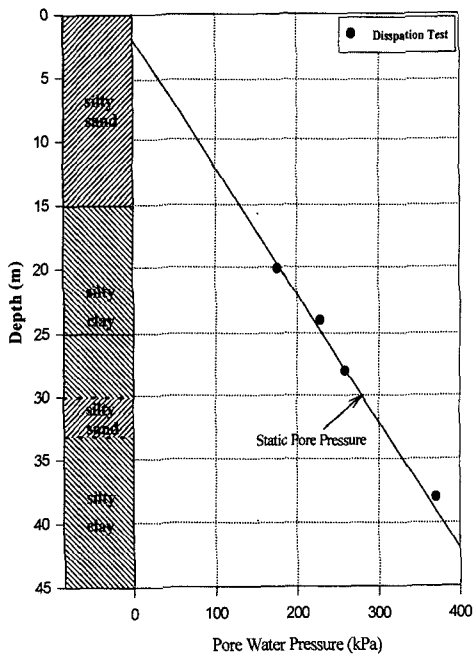


Fig. 5. Pore pressures from dissipation test

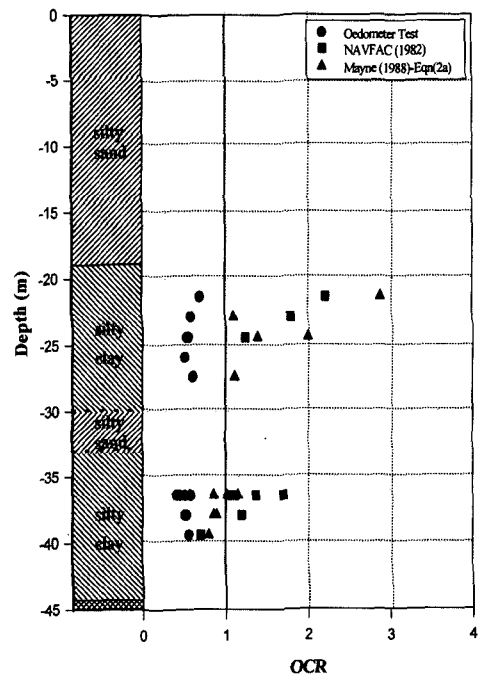


Fig. 6. Determination of OCR from laboratory soil tests

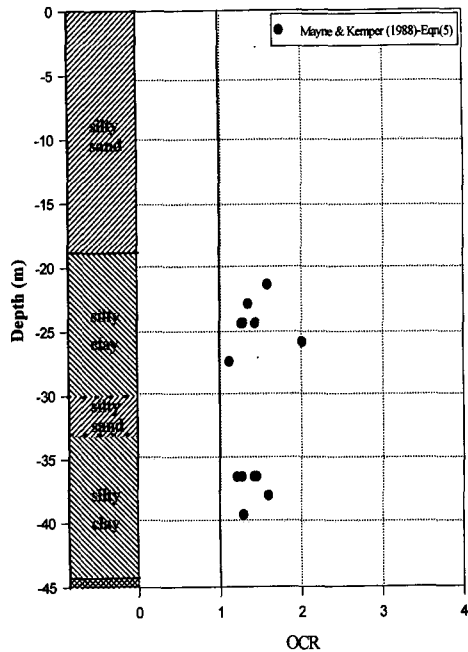


Fig. 7. Determination of OCR from SPT

Fig. 7은 SPT N값을 이용하여 계산된 OCR을 나타내고 있다. 여기서 N값은 깊이에 따라 보정이 이루어지지 않은 원시시험값이다. Mayne & Kemper(1988)에 의한 OCR은 Fig. 4에서 보여주었던 값들보다 약간 크게 얻어졌지만, 깊이에 따른 N값의 보정이 수행된다면 실제와 더 접근할 것으로 사료된다.

Fig. 8은 콘관입시험 결과를 이용하여 3방법으로 계산된 OCR을 보여주고 있다. 이물질의 존재 때문에 부분적으로 상이한 경향을 나타내는 점들을 제외하면 Mayne & Kemper(1988)의 산정법에 의한 결과가 현장계측값의 분석법으로 구해진 값과 좋은 일치를 나타내고 있다. 그러나 Tavenas and Leroueil(1979)에 의한 결과는 OCR 값이 아주 과대평가되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 피에조콘(CPTU)시험의 결과를 이용하여 구해진 OCR를 나타내고 있다. 이 Fig에서 보면, Mayne & Bachus(1988) 및 Mayne & Holtz(1988)에 의한 결과가 현장분석법에 의한 값보다

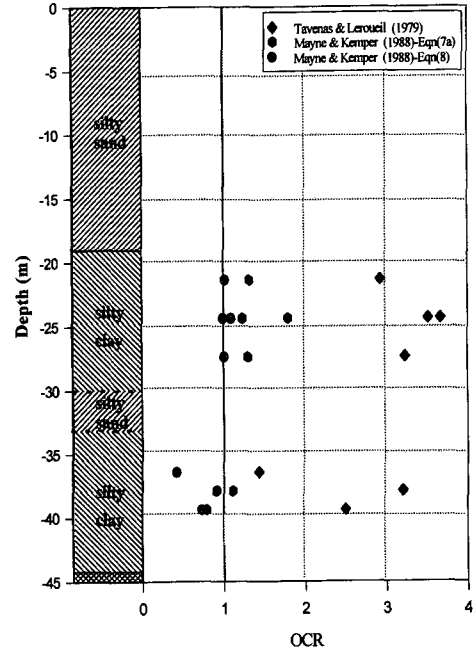


Fig. 8. Determination of OCR from CPT

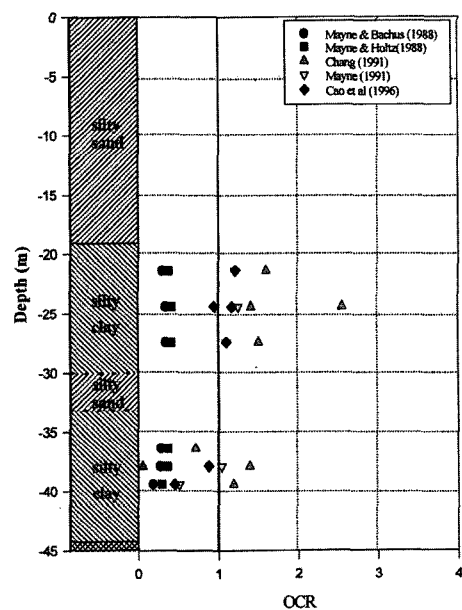


Fig. 9. Determination of OCR from CPTU

훨씬 과소평가하고 있으며, 다른 방법들에 비하여 OCR을 가장 작게 산정하고 있다. 반면에, Mayne(1991) 및 Cao 등(1996)에 의한 결과는 거

의 비슷하게 얻어졌으며, 현장분석법에 의한 값과 상당히 좋은 일치를 보여주고 있다. 그러나 Chang(1991)에 의한 OCR은 전자의 경우보다 약간 크게 나타나고 있다.

5. 결 론

낙동강 하구의 삼각주에서 퇴적된 초예민점토에 대한 과압밀비(OCR)를 결정하기 위하여 현장계측치를 이용한 분석법과 소산시험이 실시되었다. 그리고 이 결과는 실내 및 현장토질시험결과를 이용한 산정법으로 구해진 OCR과 비교되었다. 이러한 연구결과로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 성토 동안에 유발된 과잉간극수압을 이용한 해석으로부터 얻어진 점성토의 OCR은 0.95 ~ 1.20이었으며, 삼각주 점성토는 대략 정규압밀상태로 존재하였다. 이 결과는 표준압밀시험결과에 의하여 미압밀상태에 있다는 과거의 추정과는 상이하였으며, 소산시험에 의하여 이러한 사실을 뒷받침하였다.
- 2) 실내 및 현장토질시험결과를 이용한 OCR산정법 중에서 피에조콘시험을 이용한 Mayne (1991) 및 Cao 등(1996)의 산정법과 콘관입시험을 이용한 Mayne & Kemper(1988)의 산정법에 의한 결과가 현장계측에 의한 값과 잘 일치하였다.

낙동강 하구지역에 광범위하게 분포되어 있는 점성토에 대하여 다양한 실험 및 계측이 수행되어서 자연점토의 압밀상태가 충분히 규명될 수 있기를 기대한다.

감사의 글

본 연구를 위하여 도움을 주셨던 부산광역시 사하구청, 동방엔지니어링 및 신동아 종합건설

(주)의 관계자들에게 감사를 포함합니다.

참 고 문 헌

1. 건설기술연구소 (1998), 서부산 문화회관 건립공사 기반개량을 위한 현장계측 및 확인시험 결과보고서, 동아대학교 건설기술연구소.
2. 권기호, 배종권, 고광진, 정성교(1996), "낙동강 하류지역의 충적점토에 대한 토질역학적 특성", 대한토목학회 학술 발표회 논문집(III), pp. 395 ~ 398.
3. 김규중, 은성민, 정성기, 이대명, 정성교(1998), "연약점토지반에서의 OCR에 대한 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp. 315 ~ 318.
4. 김상규, 고성일 (1997), "낙동강 하구 및 인접해안 충적층의 미압밀 특성", 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, pp. 3 ~ 18.
5. 사하구청 (1996), 서부산 문화회관 신축공사 기초 설계변경-설계보고서, 부산광역시 사하구청.
6. 조기영, 이남기, 정진교, 정성교(1996), "낙동강 하류지역의 미완속압밀점토에 대한 토질특성 및 압밀 침하예측", 대한토목학회 학술 발표회 논문집 (III), pp. 543 ~ 546.
7. Andresen, A. and P. Kolstad (1979), "The NGI 54-mm samplers for undisturbed sampling of clays and representative sampling of coarser materials", Proc. Int. Symp. on Soil Sampling, Singapore, pp. 1 ~ 9.
8. Cao, L. F., M. F. Chang. and C. I. (1996), "Cavity expansion in modified Cam clay and its application to the interpretation of piezocone tests", Geotechnical Research Report NTU/GT 9603, Nanyang Technological University, Singapore.
9. Cao, L. F. (1997), Interpretation of in-situ tests in clay with particular reference to reclaimed sites, Ph.D Thesis, Nanyang Technological University, Singapore.
10. Chandler, R. J. (1987), "The in-situ measurement of the undrained shear strength of clays using the field vane", Proceedings of the ASTM International Symposium on Laboratory and Field Vane Shear Strength Testing, Tampa, pp. 13 ~ 44.
11. Chang, M. F. (1991), "Interpretation of overconsolidation ratio from in-suit tests in Recent clay deposits in Singapore and Malaysia", Canadian Geotechnical Journal, 28(2), pp. 210 ~ 225.
12. Head, K. H. (1982), Manual of Soil Laboratory Testing, 3 volumes, Engineering Laboratory Equip-

- ment Limited.
13. Jamiolkowski, M. et al. (1985), "New developments in field and laboratory testing of soils", Proc. 11th Int. Conf. on Soil Mechanics, San Francisco, Vol. 1, pp. 57~154.
 14. Lacasse, S. and Lunne, T. (1982), "Penetration tests in the Norwegian clays", Proceedings, 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, Vol. 2, pp. 661~669.
 15. Larsson, R. (1980), "Undrained shear strength in stability calculation of embankments and foundation on soft clays", Canadian Geotechnical Journal, 17(4), pp. 591~602.
 16. Leroueil, S., Tavenas, F., Trak, B., La Rochelle, P. and Rpy, M.(1978), "Construction pore pressures in clay foundation under embankments. Part II: generalized behaviour", Canadian Geotechnical Journal, 15(1), pp. 66~82.
 17. Marchetti, S. (1980), "In situ test by flat dilatometer", ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 106(GT3), pp. 229~321.
 18. Mayne, P. W. (1988), "Determining OCR in clays from laboratory strength", ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, 114(1), pp. 76~92.
 19. Mayne, P. W. (1991), "Determination of OCR in clays by piezocone tests using cavity expansion and critical state concepts", Soils and Foundations, 31(2), pp. 65~76.
 20. Mayne, P. W. and Bachus, R. C. (1988), "Profiling OCR in clays by piezocone soundings", Proc. 1st Int'l. Symp. on Penetration Testing, Orlando, pp. 857~864.
 21. Mayne, P. W. and Holtz, R. D. (1988), "Profiling stress history from piezocone soundings", Soils and Foundations, 28(1), pp. 1~13.
 22. Mayne, P. W. and Kemper, J. B., Jr. (1988), "Profiling OCR in stiff clays by CPT and SPT", ASTM, Geotechnical Testing Journal, 11(2), pp. 139~147.
 23. Mayne, P. W. and Mitchell, James K. (1988), "Profiling of overconsolidation ratio in clays by field vane", Canadian Geotechnical Journal, 25(1), pp. 150~157.
 24. Morin, P., Leroueil, S. and Samson, L. (1983), "Preconsolidation pressure of Champlain clays. Part I. In-situ determination", Canadian Geotechnical Journal, 20(4), pp. 782~802.
 25. NAVFAC (1982), Design Manual 7.1-Soil Mechanics, NAVFAC DM 7.1, U.S Department of Navy, Washington D.C.
 26. Powell, J. I. M. and Uglow, I. M. (1988), "The interpretation of the Marchetti dilatometer test in UK clays", Proceedings of the ICE Geotechnolgy Conference on Penetration Testing in UK, London, pp. 269~273.
 27. Robertson, P., Campanella, R. and Wightman, A. (1983), "SPT-CPT Correlations", ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, 108(4), pp. 599~620.
 28. Robertson, P. K. and Campanella, R. G. (1983), "Interpretation of cone penetration tests. Part II: Clay", Canadian Geotechnical Journal, 20(4), pp. 734~745.
 29. Schmertmann, J. H. (1978), "Guidelines for cone penetration test", Report No. FHWA TS-78-209, Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.
 30. Skempton, A. W. (1957), "Discussion on the planning and design of new Hong Kong Airport", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 7, pp. 305.
 31. Tavenas, F. and Leroueil, S. (1979), "Clay Behavior and the Selection of Design Parameters", Proceedings, 7th European Conference on Soil Mechanics, Vol. 1, Brighton, England, pp. 281~291.
 32. Wroth, C. P. (1984), "The interpretation of in-situ soil tests", Geotechnique, 34(4), pp. 449~489.
 33. Wroth, C. P. (1988), "Penetration testing—a more rigorous approach to interpretation", Proceedings, 1st International Symposium on Penetration Testing, Orlando, Vol. 1, pp. 303~311.

(접수일자 1999. 2. 3)