

## 양산-물금 택지조성 지역의 총적점토에 대한 항복특성

### Yielding of a Natural Soft Clay in the Yangsan-Mulgeum Area

손성곤, Sung-Gon Son\*<sup>1</sup> 고헌진, Kwang-Jin Ko\*<sup>2</sup> 유갑용, Gap-Yong Yoo\*<sup>3</sup> 정성교, Sung-Gyo Chung\*<sup>4</sup>

\*<sup>1</sup> 동아대학교 토목공학과 대학원 석사과정, Graduate student, Dept. of Civil Engineering, Dong-A Univ.

\*<sup>2</sup> 동남기초 대표이사, Head, Dongnam Geotech. Consultant.

\*<sup>3</sup> 한국토지공사 과장, Manager, Korea Land Corporation.

\*<sup>4</sup> 동아대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dong-A Univ.

#### <Synopsis>

Yielding is an important feature of the stress-strain behavior of normally consolidated clay and lightly overconsolidated clay. This paper describes tests on 50mm triaxial samples of natural Yangsan clay. The specimens are carefully trimmed, consolidated in increments along various stress paths to determine the yield-point characteristic curve of Yangsan clay. Once yielding is clearly defined, the specimens are subject to an undrained compression at a constant strain rate. The clay exhibits marked changes in stiffness when it yields, and, thus, a well-defined yield envelope in stress space is obtained. This yield curve is very similar to those obtained for other natural clays in the world and reflects the stress anisotropy of the clay during its deposition. The laboratory-determined coefficient of earth pressure at rest in the normally consolidated Yangsan clay is  $K_0_{NC}=0.47$ , which is very similar to that applied to the Jaky equation(1944). It is showed that the modified Cam-clay model would be applied to this clay.

**Key words :** yield locus, clay, anisotropic, stress-path test, Cam-clay

### 1. 서론

항복에 대한 개념은 재성형 점토시료를 사용하여 Roscoe et al.(1958)에 의해 개발되었으며, 자연 연약 지반의 거동특성을 파악하는데 매우 유용하게 사용되고 있다(Mitchell 1970; Wong and Mitchell 1975; Tavenas and Leroueil 1977; Graham et al. 1983). 하중이 재하되는 동안 어떠한 특징적인 강도의 변화가 발생하는 경계를 사이에 두고 탄성 과압밀 영역에서 소성 정규압밀 영역으로의 변화 즉, 항복(yielding)이 발생한다. 이러한 점토의 거동특성은 제방의 거동해석(Tavenas and Leroueil 1980 ; Folkes and Crooks 1985)과 사면의 거동해석(Tavenas and Leroueil 1981)에 직접적으로 이용되었다.

지금까지 10여 개국이상에서 약 50여종의 자연 연약점토에 대한 항복곡선(yield locus)이 결정되었다. 이들의 형상은 매우 유사하며, 항복곡선의 크기는 선행압밀압력( $\sigma_p'$ )에 의해 지배되었다. 그러나 아직까지 이러한 항복곡선을 위한 단일모형을 정의하지는 못하고 있다. 우리나라의 경우 이러한 총적지반이 광범위하게 분포되어 있지만 아직까지 자연점토에 대한 기본적인 토질특성 뿐만 아니라 항복특성에 대한 연구는 희귀하다.

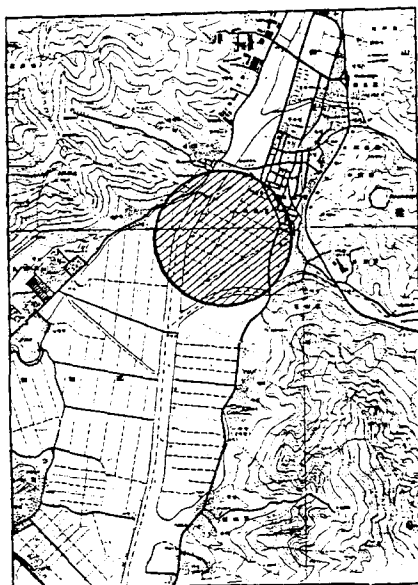
따라서 본 논문에서는 양산-물금 택지조성 지역의 불교란 시료를 채취하여 삼축압축시험(CIU), 비등방 압밀(anisotropic consolidation)시험 그리고 현장 응력상태를 고려한  $K_0$ -압밀시험을 수행하여 이 지역의 총적점토에 대한 항복특성을 규명하였다.

## 2. 양산-물금 택지조성 지역의 지질 및 토질특성

### 2.1 지질특성

양산-물금 택지조성 사업지구는 남측으로는 낙동강이 흐르며, 중앙은 낙동강의 제 1지류인 양산천, 동북측에는 양산천으로 합류되는 다방천이 흐르고 있다.

양산-물금지구 택지조성 공사가 실시되고 있는 현장의 지질상태는 경상남·북도 일원에 널리 분포되어 있는 가장 대표적인 백악기의 불국사 화강암류가 그 기반암을 이루고 있으며, 그 위를 제 4기의 충적층이 부정합으로 두껍게 덮고 있다. 이 충적층은 낙동강 하구부근을 따라 넓게 분포하고 있으며 충적퇴적물은 주로 점성토와 미세한 모래로 구성되어 비옥한 농토를 형성시켰으며, 하곡연변을 따라 대소의 자갈들이 점성토 및 모래와 혼재하고 있다. 이러한 충적 연약지반이 이루어지기 쉬운 지형조건은 지표면의 구배가 완만하여 평탄하고 하천의 홍수류나 바다의 연안류가 돌출된 산능 인접부에서 유속이 작아지거나 정체되는 곳으로, 이 지역의 충적층은 바다에 연하여 있는 충적평야와 함께 광범위하게 분포되었다고 추측된다.



지층의 구성 상태는 퇴적층의 상부에 농토 건설을 위하여 인위적으로 성토된 매립층과 10~30m의 두께로 두껍게 분포하고 있는 대단히 연약한 퇴적층으로 이루어져 있으며, 부분적으로 잘 발달된 sand seam과 모래질 자갈 등이 혼재하고 있다.

퇴적층의 하부에는 풍화대가 발달해 있으며, 이 지역의 기반암인 안산암질의 연암이 분포하고 있다.

<그림.1> 조사지역

### 2.2 토질특성

본 연구에 사용된 시료는 <그림.1>에서 볼 수 있는 양산-물금 택지조성 사업지구(경남 양산시 남부동 일원)에서 깊이 21.0 - 21.8m에서 직경 100mm의 Thin-wall sampler에 의해 채취된 불교란 시료이다.

본 실험에 사용된 시료의 기본적인 물리적 특성은 <표.1>과 같다. 그리고 토질시험결과보고서(동아대학교, 1996)에 의하면, 이 지역의 점성토는 과압밀비(OCR)가 0.84~2.00로써 미완속압밀(조기영 등, 1996), 정규압밀 및 과압밀점도로써 폭넓게 분포하고 있다. 즉, 산지측에서는 과압밀, 강변에서는 미완속압밀 상태로 나타났다. 본 실험에 사용된 시료는 OCR이 1.00~1.45로써 정규압밀 내지는 약간과압밀된 점토이었다.

<표.1> 양산-물금 지역의 점성토에 대한 대표적인 물리적 특성

Properties	범 위	비 고
Moisture content(%)	45 ~ 53	
Liquid limits(%)	21 ~ 42	
Plastic index(%)	17 ~ 25	
Clay fraction(%)	63 ~ 75	
Specific gravity(Gs)	2.63 ~ 2.67	
Void ratio	1.30 ~ 1.44	

### 3. 실험과정 및 결과

본 연구에 사용된 삼축시험기는 2 종류로써, 먼저 미국 Berkeley 대학의 C. K. Chan 교수에 의해 개발된 것으로 시험 중에 축차응력( $q$ ), 축변형률( $\epsilon_a$ ), 구속압( $\sigma_3$ ), 간극수압( $u$ ), 체적변형률( $\epsilon_v$ ) 등이 시간에 따라 컴퓨터에 자동입력되고, 연직압( $\sigma_1$ )과 구속압( $\sigma_3$ )을 사용자가 원하는대로 자동제어 할 수 있으며, 축변형률 제어를 통한 전단시험이 가능한 자동화 삼축시험기(Automated Triaxial Testing System)이며, 그리고 최근 영국 GDS Instruments Ltd.에서 개발되어 우리나라에도 널리 보급된 GDS 자동 삼축시험기이다.

삼축시험은 정교하게 성형한 지름 50mm, 높이 100mm의 시료를 사용하였으며, 측면 배수를 원활히 하기 위해 Filter-paper strip을 사용하였다. 시료의 포화상태를 판별하기 위해 Skempton의 간극수압 계수 B값이 모든 시료에 대하여 0.975이상 이 되도록 하였으며, 이에 미치지 못할 경우 포화단계를 거쳐 실험을 수행하였다.

<표.2>는 본 연구를 위한 실험방법 및 결과를 나타내고 있다. 여기서 비등방 압밀시험(YM9, YM10, YM11 및 YM12)은 일정 응력비  $K(=\sigma_3' / \sigma_1')$ 가 0.5~1.0 범위인 응력경로를 따라 24시간 동안 압밀을 실시하였으며, 그 결과  $\phi'$  선(정규압밀 상태에서 강도포락선) 아래에서 항복점을 선명히 찾을 수 있었다. YM1~YM4는 유효응력 200kPa까지 등방압밀 시킨 후에 50~100kPa까지 제하(unload)를 그리고 재재하(reload)를 실시하였다. 재재하 시에는 2.0%/hr의 일정비로 비배수 압축시험을 수행하여 파괴시의 응력을 구하였다. 부가적으로 4개(YM5~YM8)는 50~100kPa로 등방압밀 시킨 후에 2.0%/hr의 변형률로 비배수 압축을 파괴시까지 가하였다(CIU 시험). YM13은 등방압밀 후에 축력( $\sigma_a'$ )을 감소시키는 비배수 신장시험을 수행하여 파괴시의 응력을 구하였다. 또한  $K_0$ 시험은 0.1kPa/min의 일정 축변형률로 수행되었다.

<표.2> 실험 종류 및 삼축시험 결과

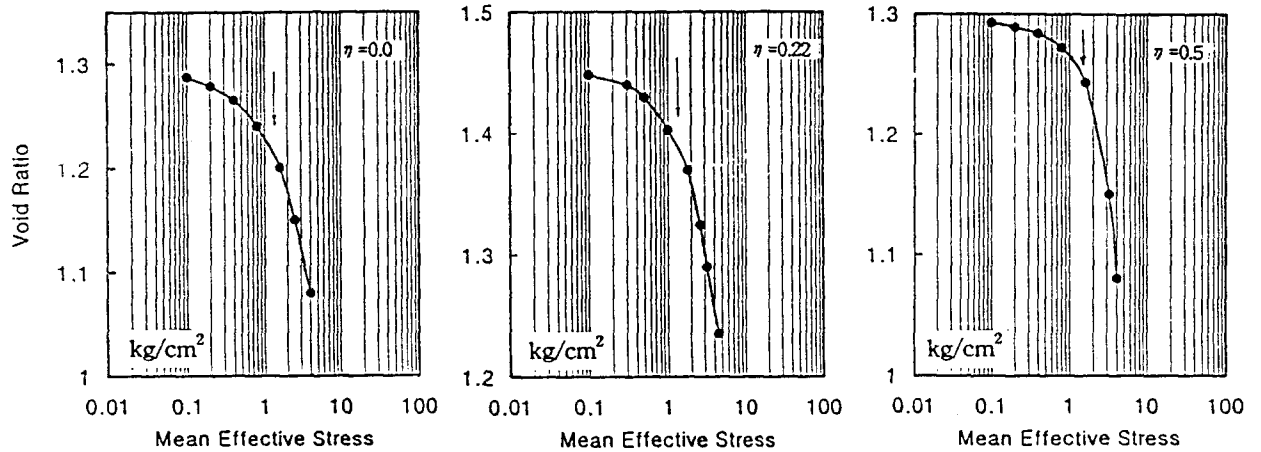
Test number	Water content	Stress ratio		Yielding		Consolidation			Failure	
		$K = \sigma_3' / \sigma_1'$	$\eta = q / p'$	$p_y'$ (kPa)	$q_y$ (kPa)	$\lambda'$	$p'_0$ (kPa)	$q_0$ (kPa)	$p'_f$ (kPa)	$q'_f$ (kPa)
YM1	49.70	1	0	167.60	107.00	-	200	0	115.00	166.40
YM2	49.30	1	0	159.00	120.00	-	200	0	107.00	140.00
YM3	49.60	1	0	171.42	134.75	-	200	0	123.72	222.42
YM4	49.80	1	0	125.00	160.50	-	200	0	127.37	205.13
YM5	52.20	1	0	-	-	-	100	0	113.23	156.70
YM6	52.20	1	0	-	-	-	75	0	86.57	157.72
YM7	52.20	1	0	-	-	-	75	0	85.90	151.23
YM8	52.20	1	0	-	-	-	50	0	62.05	120.15
YM9	47.64	1	0	142.00	0	0.247	-	-	-	-
YM10	52.42	0.808	0.22	160.04	35.20	0.263	-	-	-	-
YM11	47.85	0.625	0.50	174.00	87.00	0.310	-	-	-	-
YM12	52.42	0.500	0.75	158.40	118.80	0.312	-	-	-	-
YM13	52.66	1	0	-	-	-	200	0	127.00	-103.2
$K_0$	51.64	-	-	152.00	110.23	0.270	-	-	-	-

### 4. 실험 결과의 분석

일반적으로 자연상태의 지반형태는 비등방 상태의 퇴적형태를 가지며, 이러한 퇴적형태에 대해서는 이미 많은 연구가 이루어져 왔다(권오순 등, 1995 ; 그외 다수). 이러한 지반의 비등방 상태에 대한 실험,

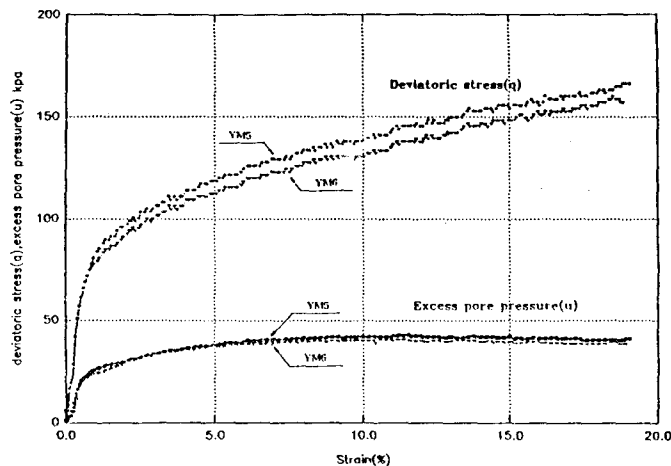
즉 일정 응력비  $K = \sigma_3' / \sigma_1'$  ( $\eta = q / p'$ , 0.0 ~ 0.75) 하에서 수행된 비등방 압밀시험의 대표적인 결과를 간극비( $e$ ) - 평균유효응력( $p'$ )의 관계로 나타낸 것이 <그림.2>와 같다.

비등방 압밀시험에 의한 항복응력의 결정은 과압밀 탄성영역을 지나 정규압밀 소성영역에 이르는 곡선에서 두 직선부의 연장선에 대한 교점으로서 정의할 수 있다. <그림.2>와 <표.2>에서 보면 비등방 압밀시험을 통한 평균유효응력( $p'$ )의 변화는 142.0~174.0kPa이며,  $\phi'$  선 아래의 항복곡선을 그릴 수 있었다. <표.2>에서 보면 응력비( $K$ )가 작아지면 정규압밀선의 기울기( $\lambda'$ )는 증가하는 경향을 보여 주고 있으며, 이것은 Tavenas and Leroueil(1977), Graham et al.(1983)에 의해 연구된 자연 연약점토의 특성과 일치한다.



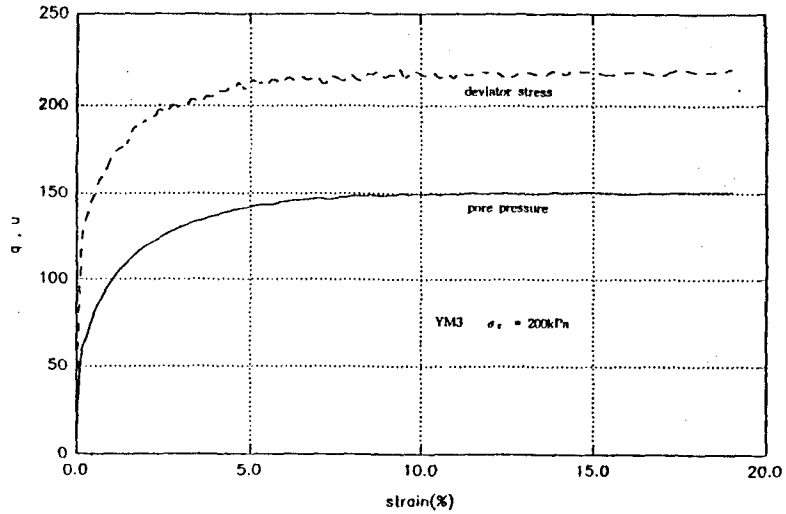
<그림.2>비등방 압밀시험 결과

<그림.3>은 200kPa로 등방압밀한 후에 압력을 각각 50~100kPa까지 제하하여 과압밀 상태로 만들어서 비배수 압축시험(CIU)을 수행한 결과로써 대표적인 축차응력-변형률 및 간극수압-변형률 곡선을 나타내고 있다(YM 5~YM 8). <그림.3>에서 축차응력-변형률 곡선은 대략 1.5%의 변형률에 이를 때까지 거의 직선적으로 증가를 보이다가, 그점을 넘어서면서 20%의 변형률까지 거의 일정비로 증가하는 경화현상(hardening)을 나타내고 있다. 반면에 간극수압-변형률 곡선은 항복점보다 조금 작은 변형률까지 간극수압이 증가하지만, 그 이후에는 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 여기서 나타낸 이외의 YM7 및 YM8에서도 동일한 거동을 보였었다. 이러한 경향은 과압밀점토에서 뚜렷한 최대점(peak)을 나타내는 일반적인 경향(Diaz-Rodriguez, 1992)과는 상이함을 알 수 있다.



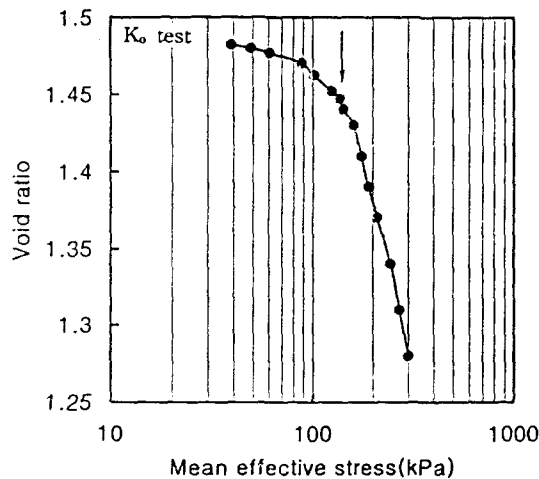
<그림.3> 과압밀된 시료에서 CIU시험으로 관찰된 대표적인 축차응력 - 변형률 및 간극수압 - 변형률 곡선

<그림.4>는 유효상재응력보다 큰 압력으로 등방압밀을 실시하여 시료를 정규압밀 상태로 만든 후에 2.0%/hr의 변형률로 비배수 압축시험을 수행한 결과이다. <그림.3>의 과압밀된 상태의 거동과는 달리 약 2.0%의 변형률까지 축차응력과 간극수압은 거의 선형적으로 증가한 후, 15%의 변형률에 이를 때까지 대략 일정하게 나타나는 경향을 보여주고 있다. 그리고 여기서 보여주는 YM3 이외 동일 종류의 실험에서도 비슷한 결과를 나타내었다.



**<그림.4> 정규압밀 영역 내에서 실시된 CIU시험으로 부터 얻은 축차응력-변형률 및 간극수압-변형률 곡선**

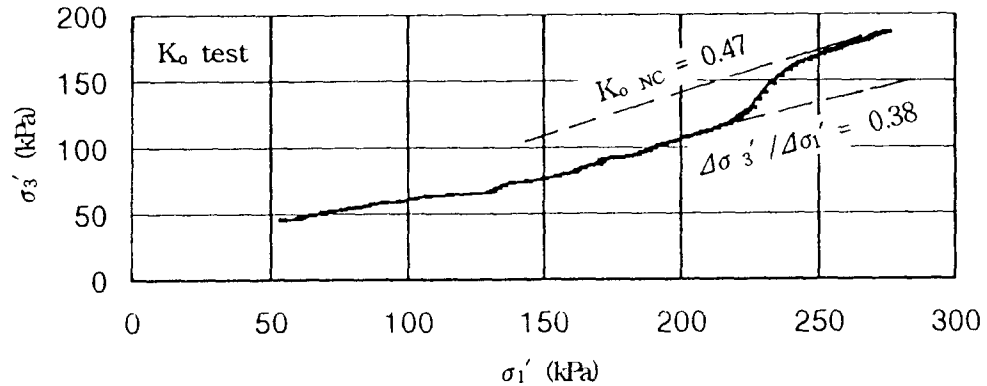
$K_0$  압밀시험은 삼축압축기의 특성상 초기에 불안정한 값을 나타내므로, 압밀압이 50kPa에 이를 때까지  $K_0$  값을 내부마찰각으로 산정한 0.45로 보고 비등방 압밀을 실시한 이후에  $K_0$  압밀시험을 실시하였으며, 이때의 증분속도는 0.1kPa/min으로 하였다. <그림.5>는  $K_0$  압밀시험에서 얻어진 간극비( $e$ )-대수 평균 유효응력( $p'$ ) 관계를 나타내고 있다. 여기서 보면, 정규압밀 영역에서는 직선적인 형태를 나타내며, 직선의 기울기  $\lambda'$  는 0.270이다. 이 값은 일정 응력비( $K$ )가 0.5인 경우에 수행된 비등방 압밀시험에서의 결과보다 약간 작게 산출되었다는 것을 <표.2>에서 볼 수 있다. 이러한 원인은 시료의 불균질성에서 발생된 것으로 사료된다. 그리고 항복점은 <그림.5>에서와 같이 잘 정의될 수 있다.



**<그림.5>  $K_0$  시험에서의 간극비-평균유효응력 곡선**

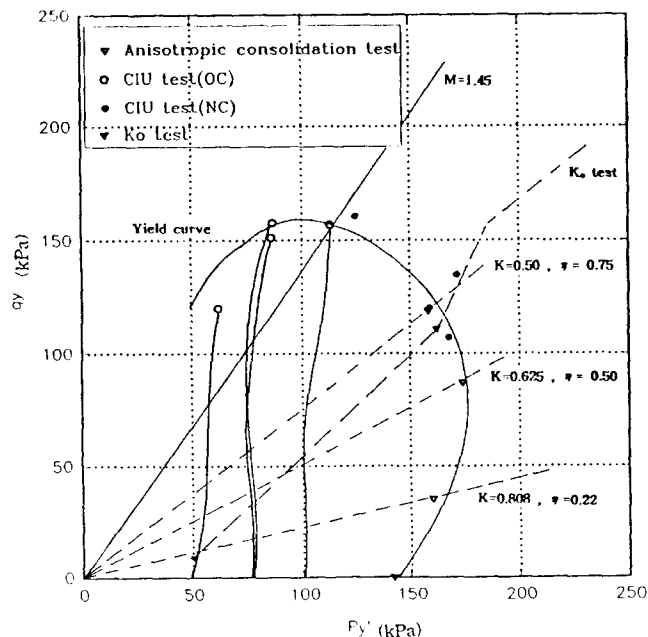
<그림.6>은  $K_0$ 압밀시험 동안에 얻어진  $\sigma_1'$  및  $\sigma_3'$ 의 변화를 보여주고 있다. 항복응력인 153kPa의 평균 유효응력에 도달할 때까지, 즉 과압밀 영역에서 응력증가비  $\Delta\sigma_3' / \Delta\sigma_1'$ 는 약 0.38이다. 그리고 정규압밀 영역에서 이 비는 0.47로 증가함을 보여주고 있다.

Mayne & Kulhawy(1982)는 점성토에 대하여  $K_{0 NC} = 1 - \sin \phi'_{NC}$ 가 타당하다는 것을 입증하였다. 본 실험에 사용된 시료에 대한  $\phi'_{NC} = 33 \sim 36^\circ$  이므로  $K_{0 NC} = 0.45$ 이다. 이 값은 <그림.6>의 정규압밀 영역에서 얻어진 0.47과 거의 유사한 것이다. 따라서 이 지역의 정규압밀 점토에 대하여  $K_{0 NC}$ 값을 0.45로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.



<그림.6>  $K_0$ 시험 동안에 얻어진 응력경로

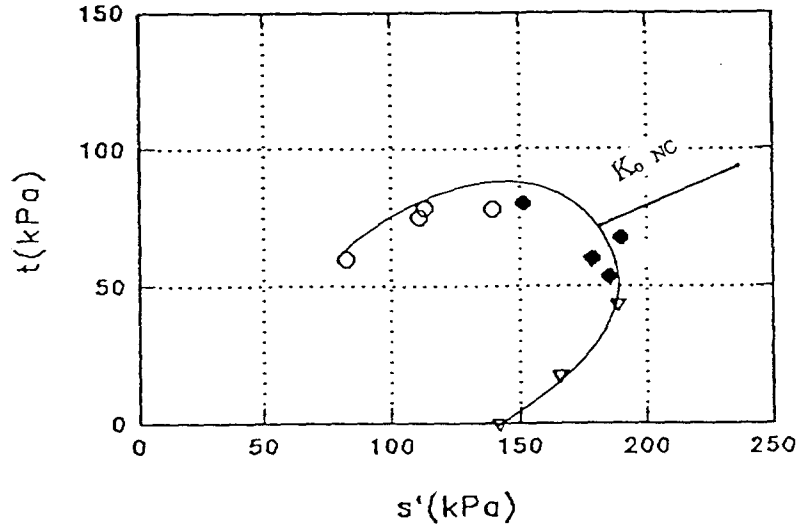
<그림.7>은 일정응력비에 의한 비등방 압밀시험( $K = 0.5, 0.625$  및  $0.808$ ), CIU 삼축압축시험 및  $K_0$ 압밀시험으로 부터 얻어진 항복점을 평균유효응력( $p'$ )와 축차응력( $q$ )의 응력공간에 나타낸 것이다. 이 그림에서 보면,  $\phi'$  선 위에 있는 항복점들은 과압밀 영역에서 실험이 수행된 것으로 대략  $p'$ 가 일정하게 되는 응력경로를 나타내고 있다. 정규압밀 영역에서 수행된 CIU 삼축압축시험 결과에서 얻어진 항복점들은 비등방 압밀시험과  $K_0$ 압밀시험에서의 항복점들과 비슷한 경향을 나타내었다. 그리고, 자연점토에서 나타나는 일반적인 경향과 비슷하게 이 지역의 점성토에서 얻어진 항복곡선은 대략  $K_0$ 선에 대하여 대칭적인 형태로 나타나고 있다.



<그림.7> 양산점토의 항복곡선

<그림.8>은 항복곡선을  $t (= \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2})$  와  $s' (= \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2})$ 의 응력공간에 도시한 것이다. 이 모

양은 다른 자연점토(Tavenas & Leroueil, 1979; Graham et al. 1988)에서와 비슷하며, 충전점토가 퇴적할 때 응력의 비등방성에 따른 영향으로  $K_0$  NC선에 대하여 대략 대칭적인 형태를 나타내고 있다.



<그림.8> t-s'공간에 표시된 양산-물금 점토의 항복곡선

## 5. Cam-clay 모형에의 적용

연약지반의 거동해석을 위하여 특정한 수치모형을 선정하여 유한요소해석을 수행하는 것이 보편적인 사례이다. 그런데, 이러한 종류의 해석시에 연약 점성토에 속하는 적합한 흙의 모형을 옳게 선정하는 것이 극히 중요하다.

Wroth(1977)는 정규압밀 및 약간 과압밀된 점성토에 대하여 Cam-clay모형 또는 수정 Cam-clay모형을 적용하는 것이 적절하다고 하였다. 그리고 Pickles(1989)는  $K_0$ 상태로 정규압밀된 점성토에 대한 상태경계면(state boundary surface)이 통상 수행되고 있는 등방압밀 비배수압축시험(CIU)에 의한 것과 일치된다고 하였다. 이러한 가정에 따라 해석된 결과가 실제의 거동과 좋은 일치를 보였던 사례를 Pickles and Wood(1989)에 의하여 나타내고 있다.

Cam-clay 모형(Schofield and Wroth,1968)에서 항복곡선은 다음 식(1)으로 표현된다.

$$q = Mp' \ln\left(\frac{p_c'}{p'}\right) \quad (1)$$

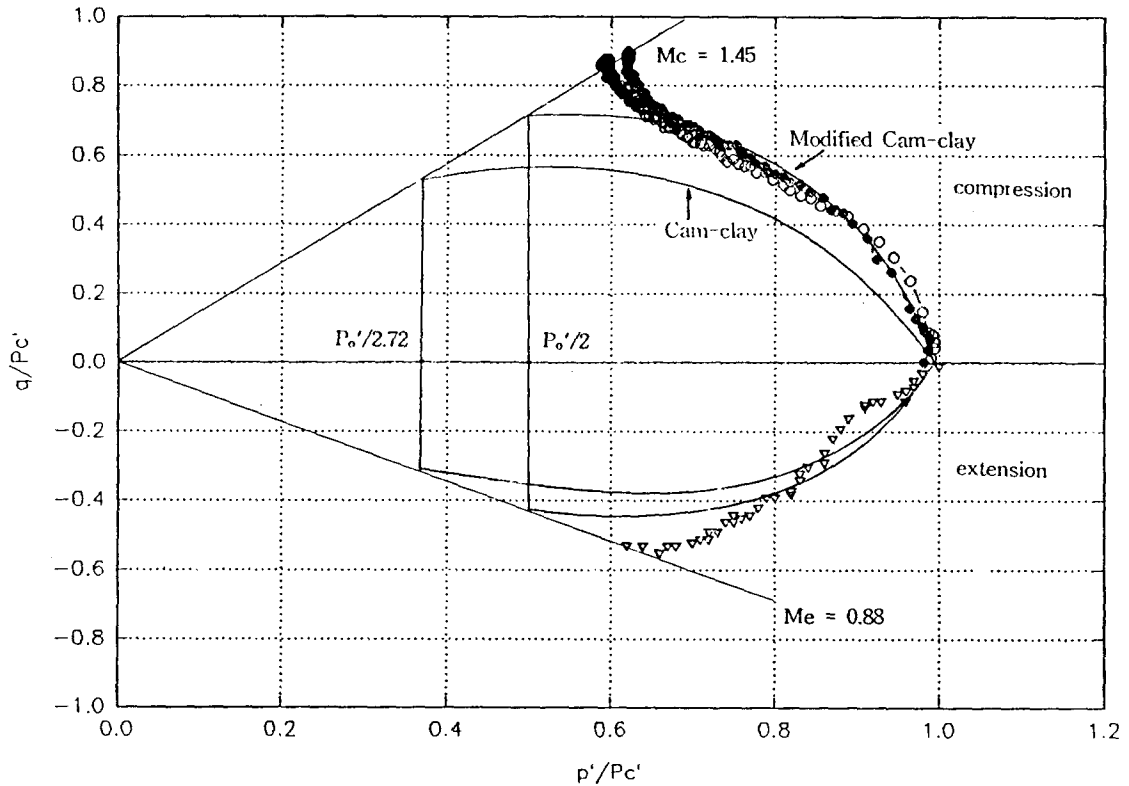
여기서 M=한계상태선의 기울기,  $p_c'$ 는 선행압밀응력이다.

수정 Cam-clay 모형(Burland, 1967)에서 항복곡선을 위한 식은 다음의 식 (2)로 정의 되었다.

$$q = Mp' \sqrt{\frac{p_c'}{p'} - 1} \quad (2)$$

<표.2>에서 비배수 압축시험에 의한 YM3 및 YM4 또한 신장시험에 의한 YM13을 위의 Cam-clay 및 수정Cam-clay에 적용하면 <그림.9>와 같이 된다. 이 그림에서 축차응력 및 평균유효응력은  $p_c'$ 에 의하여 정규화 되었다. 여기서 보면, 실험 결과에서 항복곡선은 한계상태선(M-line) 가까이에서 약간 벗어나

지만 수정 Cam-clay에 의한 것과 대체로 좋은 일치를 나타내고 있다. 이러한 차이는 자연점성토의 비등방 때문인 것으로 생각된다. 그러나 Cam-clay에 의한 항복곡선과는 압축영역에서 상당한 차이를 보여주고 있다. 따라서, 이 지역의 점성토에 대해서는 수정 Cam-clay를 이용한 수치해석의 적용이 적절하다고 사료된다.



<그림.9> 삼축시험결과와 Cam-clay 모형의 비교

## 6. 결론

양산-물금 택지조성공사 현장에서 채취된 시료에 대하여 항복특성을 규명하고자 비등방압밀시험, 등방압밀 비배수(CIU)삼축시험 및  $K_0$ 압밀시험을 수행한 결과는 아래와 같다.

- (1) 이 지역의 점성토에 대한 항복곡선은 다른 지역의 자연점토에서와 같이 퇴적시의 응력의 이방성 때문에  $K_{0NC}$ (정규압밀 때의 정지토압계수)선에 대하여 대체적으로 대칭으로 나타났다.
- (2)  $K_0$ 압밀시험에서 얻어진  $K_{0NC}$ 값은 Jaky공식인  $1 - \sin \phi'_{NC}$ 와 비슷하게 0.47로 얻어졌다.
- (3) 본 지역의 점성토에 대한 CIU삼축시험의 결과는 수정 Cam-clay모형의 항복곡선과 비교적 좋은 일치를 보였다.

앞으로 국내의 점성토에 대하여 항복특성을 규명하기 위한 많은 자료가 축적되기를 기대한다.

## \* 참고 문헌 \*

1. Atkinson, J. H. and P. L. Bransby (1978). "The mechanics of soils." ; an introduction to critical state soil mechanics. London , McGraw-Hill Co., 375p.



2. Burland, J. B.(1967). "Deformation of soft clays." Ph.d. thesis, Cambridge University.
3. Callisto, L. and G. Calabresi (1995). "Yielding of a natural soft clay." *Compression and Consolidation of Clayey Soils*, Yoshikuni and Kusakabe(eds), Balkema, Rotterdam, pp.37-42.
4. Crooks, J. H. A. and J. Graham (1976). "Geotechnical properties of the Belfast estuarine deposit." *Geotechnique*, 26, pp.293-315.
5. Diaz - Rodriguez, J. A., S. Leroueil and J. D. Aleman (1992). "Yielding of Mexico City clay and other natural clays." *J. Geotech. Engng, Am. Soc. Civ. Engrs* 118 , pp.981-995.
6. Folkes, D. J., and Crooks, J. H. A.(1985). "Effective stress paths and yielding in soft clays below embankments." *Can. Geotech. J.* , 22(3), pp.357-374.
7. Graham, J., Crooks, J. H. A. and Lau, S. L. K.(1988) "Yield envelopes : identification and geometric properties." *Geotechnique*, 38, No. 1, pp.125-134.
8. Graham, J., Noonan, M. L., and Lew, K. V.(1983). "Yield states and stress-strain relationships in a natural plastic clay." *Can. Geotech. J.*, 20(3), pp.502-516.
9. Head, k. H.(1986). "Manual of laboratory soil testing." Pentech Press, London, vol. 1, 2 and 3.
10. Mitchell, R. J.(1970). "On the yielding and mechanical strength of Leda clays." *Canadian Geotechnical Journal*, 7,. pp.297-312.
11. Pickles, A. R.(1989). "The application of critical state soil mechanics to predict ground deformations below an embankment constructed on soft ground." Ph.D. Thesis, City university, UK.
12. Pickles, A. R and Wood, R. I.(1989). "Finite element studies of an embankment on soft ground." 3rd Int. Symp. *Numerical Model in Geomechanics*, Niagara Falls, pp.628-635.
13. Roscoe, K. H., Schofield, A. N., & Wroth, C. P.(1958). "On the yielding of soils." *Geotechnique*, 8(1), pp.22-52
14. Skempton, A. w.(1954). "The pore-pressure coefficients A and B." *Geotechnique*, vol. 4:4, pp 143-147.
15. Tavenas , F., and Leroueil, S.(1977). " Effects of stresses and time on yielding of clays." *Proc. 9th Int. Conf on Soil Mech and Found. Engrg.*, Tokyo, Japan, vol.1, pp.319-326.
16. Tavenas , F., and Leroueil, S.(1979). " Clay behavior and the selection of design parameters." *Proc. 8th European Conf on Soil Mech and Found. Engrg.*, British Geotechnical Society, vol. 1, pp.281-291.
17. Tavenas , F., and Leroueil, S.(1980). "The behavior of embankments on clay foundations." *Can. Geotech. J.*, 17(2), pp.236-260.
18. Tavenas , F., and Leroueil, S.(1977). "Creep and failure of slopes in clays." *Can. Geotech. J.*, 18(1), pp.106-120.
19. Wood, D. M. (1990). "Soil behaviour and critical state soil mechanics." New York ; Cambridge university press, 462p.
20. Wroth, C. P.(1977). "The predicted performance of soft clay under a trial embankment loading based on the Cam-clay model." in *Finite elements in Geomechanics*, edited by Gudehus, Wiley, pp. 191-208.

21. 권 오순, 김 병일, 정 충기, 김 명모(1995). “정규압밀점성토의 이방성에 관한 연구”, 한국지반공학회지, 제11권 제1호 pp.41-50.
22. 조 기영, 이 남기, 정 진교, 정 성교(1996). “낙동강 하류지역의 미완속압밀점토에 대한 토질특성 및 압밀침하예측”, 96학술발표회 논문집, 대한토목학회(개재예정).
23. 동아대학교 건설기술연구소 (1996). “양산-물금지구 택지개발사업조성공사(1단계) 보고서”.