울산대학교 공학연구논문집 제30권 2호 pp. 45~57, 울산대학교.
Journal of Engineering Research Vol. 30, No. 2, pp. 45~57, 1999
University of Ulsan.

점토의 이차 압축특성에 관한 연구
- 울산의 '삼산'지역 해성퇴적점토를 대상으로 -

민덕기 · 황광모
토목 · 환경공학부

<요 약>

울산의 '삼산'지역은 유기질을 많이 함유한 점성토가 넓고 두껍게 분포되어 있으며, 이러한 연약지반에 교층 구조물이 축조될 경우, 시간이 경과함에 따라 장기적인 침하가 유발되므로 이차압축을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 현장에서 채취한 불교란시료에 대하여 실내 표준압밀시험을 수행하고, 그 결과를 이용하여 포화된 '삼산'지역 연약점토의 이차압축특성을 밝혔다.

분석 결과, 자연함수비와 이차압축의 관계는 Mesri의 선보다 상부에 분포하여 이차압축의 영향이 큰 것으로 나타났으며, 정규압밀점토의 침하거동을 하는 것으로 나타났다. 이차압축지수, C_α 와 일차압축지수, C_c 관계는 $C_\alpha = 0.049\,C_c + 0.0017$ 의 선형관계식으로 표현할 수 있으며, C_r/C_c 가 0.1~0.2의 범위에 있어 팽창성이 큰 예민점토로 나타났다. 따라서, '삼산'지역 퇴적점토의 침하문제를 취급할 경우 이차압축의 영향을 반드시 고려하여야 할 것으로 판단된다.

Characteristics of Secondary Compression of a Clay
- On a Marine Deposit Clay in 'Samsan' area, Ulsan -

Tuk-ki Min and Kwang-mo Hwang
School of Civil & Environmental Engineering

<Abstract>

The organic clay is widely and thickly deposited at 'Samsan', Ulsan. Usually the soft soils are settled continuously due to self-weight during a long period. The long-term settlement depending on the time has to consider the effect of secondary compression. In this research, the secondary compression characteristics of the soft clay has been analysed from the results of standard consolidation tests with the undisturbed samples.

The test results of the 'Samsan' clay has been plotted at the upper part in the Mesri's chart so the effect of secondary compression could not be ignored. The secondary compression index, C_a has been increased linearly with the compression index, C_c ; $C_a = 0.049\,C_c + 0.0017$. And the ratio of the swell index and the compression index, C_r / C_c has been ranged from 0.1 to 0.2. Consequently, for prediction of the settlement in 'Samsan', the effect of secondary compression has to be considered

Keywords : organic soil, settlement, secondary compression, Mesri's chart

1. 서 론

흙 입자와 입자 사이 간극은 물과 공기로 채워져 있어 그 거동을 수치해석으로 밝히기가 쉽지 않으며, 그 양상도 다양하다. 일반적으로 연약지반에 외력이 작용하면 시간이 경과함에 따라 지속적으로 변형된다. 특히 간극비가 큰 해성퇴적점토와 매립층은 시간의 경과와 하중의 증가에 따라 연직방향의 변형이 장기간에 걸쳐 크게 발생된다. 이러한 장기적으로 유발되는 침하량 산출은 이차압축거동의 파악이 중요하다.

Terzaghi의 1차원 압밀론은 점토의 압밀도와 간극수압을 예측하기 위한 공학적 문제에 광범위하게 사용되고 있다[13]. 그러나, Terzaghi의 압밀론은 이상적인 가정을 가지고 있으며, 연약지반에서의 성토나 구조물축조로 인한 침하량 산정시에 이차압축의 영향을 무시하는 경향이 있어 실제의 계측치와 일치하지 않는 경우가 많다. Terzaghi의 이론이 발표된 이후 많은 학자들에 의하여 점토의 특성지수들과 압축지수(C_c)의 상관관계를 주제로 한 연구가 진행되었다[7].

이러한 관점에서, 울산 '삼산'지역에 넓고 깊게 분포된 해성퇴적점토에 대하여 piezocone penetration test과 standard penetration test의 현장시험을 수행하였고[1], 이 지역에서 채취한 불교란시료로 실내에서 유기물 및 염분함유량, 표준압밀시험 등 물리적 · 역학적 시험을 실시하였다. 시험의 결과를 분석하여 유기물을 함유하고 있는 '삼산'지역의 해성퇴적점토에 대하여 이차압축에 관한 공학적특성을 밝히고자 한다.

2. 이차압축

점토의 압축성은 재하기간, 재하속도, 하중의 크기, 유기물의 함유량 등에 영향을 받는다. 그러나, 이러한 요소들은 통상적인 침하해석에서는 무시되고 있다. 입자의 creep현상에 관련한 이차압축이론이 Bjerrum[3]에 의해 처음 제시된 이후 Berre와 Inversen 등에 의하여 발전되어, Ladd에 의해 더욱 구체화되었다. 국내에서도 해성퇴적점토와 준설매립현장에서 이차압축거동에 대한 검토가 계속적으로 수행되었으며, 일반적으로 creep는 전체침하량의 약 10% 이상인 것으로 알려져 있다[18]. creep 변위는 일반적으로 대수 시간에 직선으로 변화하는 것으로 고려되며[8], Mesri와 Choi[11,12]는 일차압밀 종료 후 (end of primary consolidation, EOP) 압축변형은 일정하며, creep는 과잉간극수압이 완전히 소산된 후에 시작된다고 하였다. 문헌[11,12]에서는, EOP일 때 $e-\log\sigma_v'$ 관계에서 점토의 거동을 설명하고, 임의의 점토에서 C_{ae}/C_c 를 고려하여 이차압축이 큰 점토의 특성과 범위을 제안하였다. 한편 Kabbaj 등[6]은 실내 EOP 곡선이 현장침하를 과소 평가됨을 제시하였다. 또한 Wahls[17], Metchell[15], Crawford[4] 등은 일차와 이차단계의 압밀 변형이 명확히 구분되지 않으며, 점토의 시간의존적 변형 원인 중의 하나인 "내부구조의 재배열"과 일차 압밀 기간 동안 시간의존적 요소들이 포함된 변형을 고려하는 것이 옳다고 하였다. 이와 비슷한 방법으로, Bjerrum[3]은 동수역학적 압밀론(hydraulic consolidation)에서 즉시압축(instant compression)과 지연압축(delayed compression)으로 분리하였으며, 연속재하 기간 후에 평형관계를 나타내는 $e-\log\sigma_v'$ 공간 내에 평행선들로 지연압밀(delayed consolidation)의 표현법을 제안하였다.

3. 울산 '삼산'해성퇴적점토의 특성

울산광역시의 남구 삼산동과 달동 지역은 10~35m 깊이까지 점토층이 퇴적되어 있어서, 여기에 구조물을 축조하는데 많은 문제를 야기하고 있다.

閔 등[1]은 이 지역에서 구조물설계에 필요한 공학적인 특성을 구하고자 표준관입시험(standard penetration test) 결과를 150개 수집·분석하고, 추가적으로 8개소에서 표준관입시험을 실시한 바 있으며, 점성토지반의 공학적 특성을 보다 명확하게 밝히기 위해 piezo-cone penetration test를 2개소(지표아래 30m까지)에서 실시하여 '삼산'지역의 점성토층에 대한 지반특성을 연구한 바 있다. 이 지역에서 채취한 불교란시료 17개를 본 연구를 위해 사용되었다. Fig 3.1은 본 연구대상지역의 X방향의 일부 지층단면도와 대표적인 지층단면 설명으로 비교적 두꺼운 점토층으로 이루어져 있다.

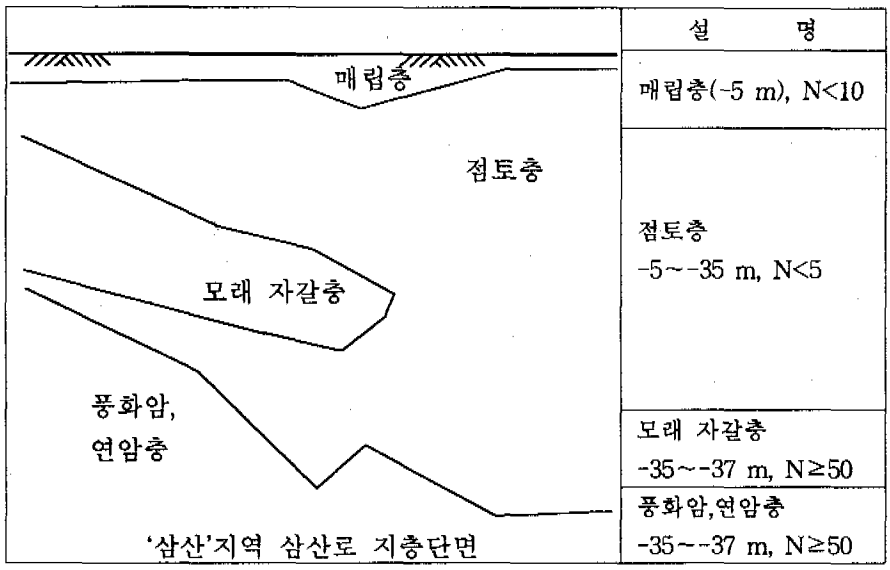


Fig 3.1 Borehole Log

3.1 Soil Properties

'삼산'지역의 점토층은 신생대 제 4기의 충적층으로 10m~35m로 분포되어 있다. 자연함수비가 51.3%~74.9%, 액성한계가 40%~76%, 소성한계는 10%~28%로 액성지수가 0.6이상으로 연약한 지반이다. 이 지역의 유기물함량은 10% 이상이며, 일반적으로 유기물함량이 4% 이상이 되면 유기질토의 공학적 특성을 나타내는 것으로 보고[16]되는 바 '삼산'의 점토층은 유기토의 특성을 나타내고 있어, 이차압축의 영향이 비교적 클 것으로 판단된다. '삼산'지역에서 깊이별로 채취된 시료에 대한 흙의 물리적 성질은 Table 3.1과 같다.

Table 3.1 Physical Properties of Samsan Clay

구 분 / 실측치	#200체 통과량 (%)	비 중 Gs	함수비 ω_n (%)	액성한계 LL(%)	소성지수 PI(%)	pH	유기물 함유량 (%)	염 분 함유량 (%)
범 위	97~100	2.61 ~2.68	51.3 ~72.7	40~76	10~28	8.3 ~9.1	8.24~ 14.1	0.25~ 0.39

note : 채취심도는 지표 아래 10m~26m, 1m마다 연속 채취

흙의 특성은 광물학적 및 화학적 조성, 조직, 입자의 배열, 환경의 영향 등에 직접적인 관계가 있다. 따라서 '삼산'점토를 구성하고 있는 화학성분을 분석하고자 건조점토의 표면에서의 EDX(Energy Dispersive X-ray Spectrometer)분석을 실시한 결과는 Table 3.2와

같다. 여기서, 깊이에 따른 화학성분의 차이는 거의 없으며, 특히, SiO_2가 60.7%~61.8%, Al_2O_3이 17.9%~18.3%로 전체의 79%를 차지한다. 또한 점토광물의 검토를 위하여 2 μm 이하의 점토분에 대하여 흙 구조의 상대적 변화를 나타내는데 유용한 X-선 회절분석을 실시하였다. Fig 3.2는 '삼산'해성퇴적점토에 대한 X-선 회절분석(XRD)의 결과로 '삼산'지역 해성퇴적점토는 Quartz가 높은 peak를 보이며, Smectite, Chlorite, Kaolin mineral, Illite, Feldspar로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 점토광물의 식별과 그 특성을 조사하기 위해 가열처리 및 약품처리(ethylene-glycol 전처리)를 행한 후 2 μm 이하의 점토분을 분리하여 정방위시편을 만들어 분석하였다. 전처리 후 분석결과는 Fig 3.3에서 보여주는 바와 같으며, '삼산'지역의 점토광물은 Chlorite, Kaolin mineral, Illite 등으로 분포되어 있는 것으로 나타났다.

Table 3.2 The Surface Ion Composition of 'Samsan' Clay

심 도 / 성 분(%)	6m~6.7m	14m~14.7m
Al_2O_3	17.9	18.3
SiO_2	61.8	60.7
SO_2	4.2	4.1
K_2O	3.9	3.8
CaO	1.8	1.6
TiO_2	1.0	1.2
Fe_2O_3	9.4	10.3

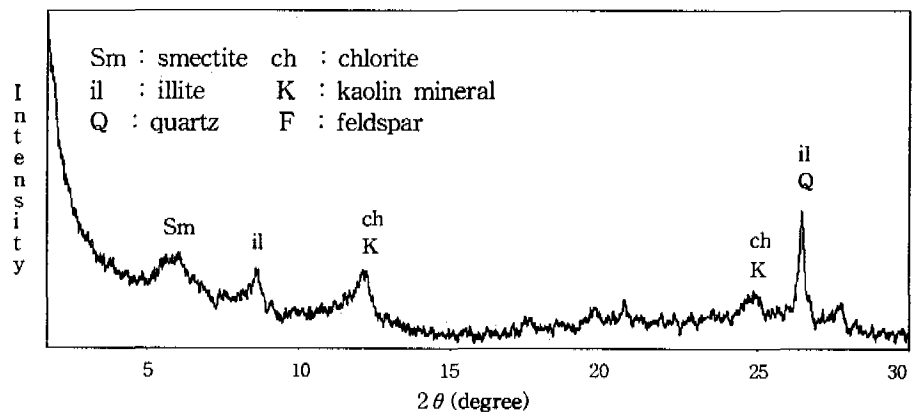


Fig 3.2 The Result of Chemical Composition Analyze(XRD) of 'Samsan' Clay

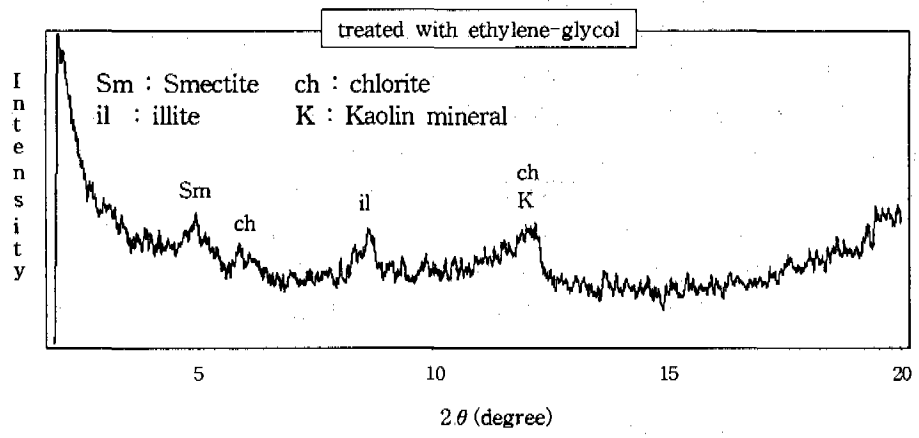


Fig 3.3 The Result of Chemical Composition Analyze(XRD) after Pretreatment

3.2 표준 압밀시험

Terzaghi의 일차원압밀의 기본미분방정식은 식 3.1과 같다.

$$C_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} \tag{3.1}$$

이 방적식은 시공하는 순간 구조물 전체의 하중이 지반에 작용한다는 가정에서 유도되었다. Fig 3.4는 표준 압밀시험의 각 하중단계에 대한 간극비 및 변형율의 관계이다.

Fig 3.4(a)에서, 초기 간극비 e_o는 깊이에 따라 1.29~1.96의 범위로 연약지반의 특성을 반영하고 있다. Fig 3.4(b)는 깊이에 따른 하중단계별 변형율을 나타낸 것으로 전 깊이에 대하여 변형특성이 유사하므로 모든 층에 대하여 동일한 방법으로 공학적 해석을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 이차압축 특성

최근 유기질 점토에서 특징적인 시간 의존적 항복과 이차압축의 영향을 고려하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구에서 통상적인 압밀해석의 결과가 현장에서의 압밀침하량과 많은 차이가 있음이 밝혀지고 있다. 침하에 영향을 미치는 요소는 재하기간, 재하속도, 하중의 크기, 점토층 내에서의 압밀계수(C_v)의 변화, 응력-변형률간의 비선형거동, 불균등 변형률 이력 등이다. 이 연구에서는 울산 '삼산'지역의 불교란시료를 깊이별로 채취하여 유기질 점토의 이차압밀특성에 대하여 검토하였다.

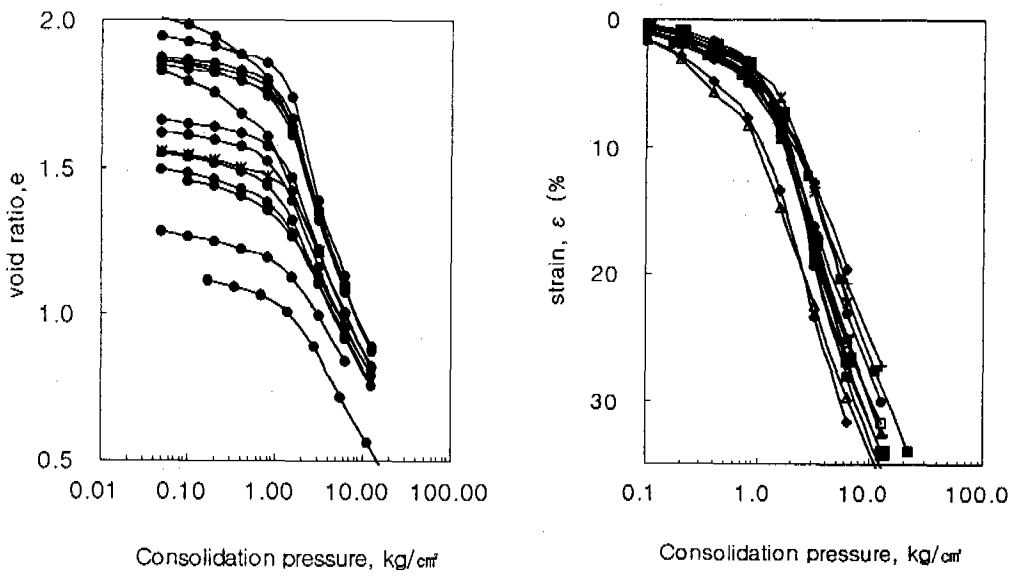
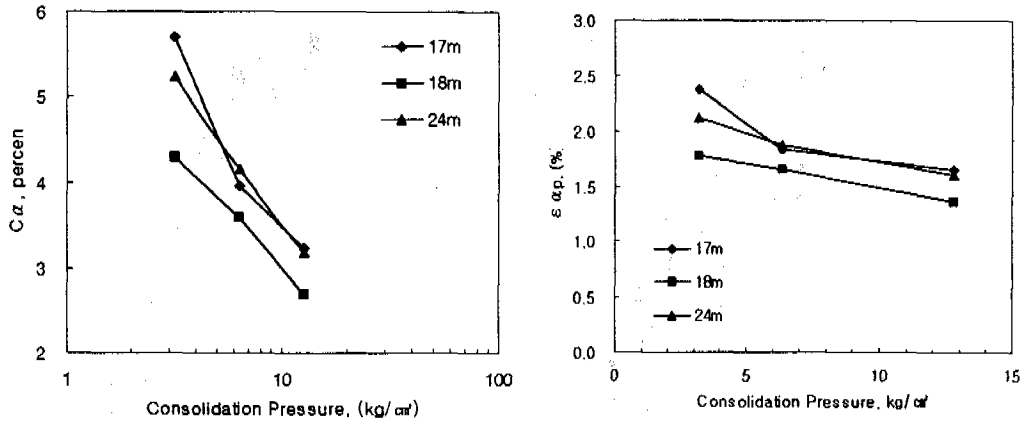


Fig 3.4 (a), (b) Void Ratio and Vertical Strain versus Consolidation Pressure Curves

4.1 '삼산'점토의 이차압축

Fig 4.1(a)는 압밀하중의 증가에 따른 C_α 의 변화이다. Fig 4.1(a)에서는 모든 깊이에서 압밀하중의 증가에 따라 C_α 는 선형적으로 감소하고 있다. 일반적으로 과압밀된 퇴적점토는 이차압축비와 압밀하중의 관계에서 이차압축비는 압밀하중의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보이며, 정규압밀된 신생점토(young clay)는 하중의 증가에 따라 이차압축비가 선형적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 閔 등[1]은 '삼산'지역의 점토가 정규압밀에 가깝다는 것을 표준압밀시험 및 piezo-cone 시험결과로 제시하였다. Fig 4.1(b)는 이차압축비, $C_{e\alpha} = C_\alpha/(1+e_p)$ (여기서, e_p : 압밀도 100%일 때의 간극비)와 압밀하중과의 관계인데, 압밀하중이 증가함에 따라 $C_{e\alpha}$ 는 감소하는 경향을 보인다. 이는 Mesri의 시험결과[9], $C_{e\alpha}$ 가 압밀하중의 크기에 관계없이 일정한 값을 나타낸 것과는 다른 결과이다. 이는 '삼산'점토의 경우 유기질을 함유하고 있기 때문으로 추정된다.



(a) C_α versus σ_v' (b) $\varepsilon_{\alpha p}$ versus σ_v'

Fig 4.1 Properties of Secondary Compression on the 'Samsan' Clays

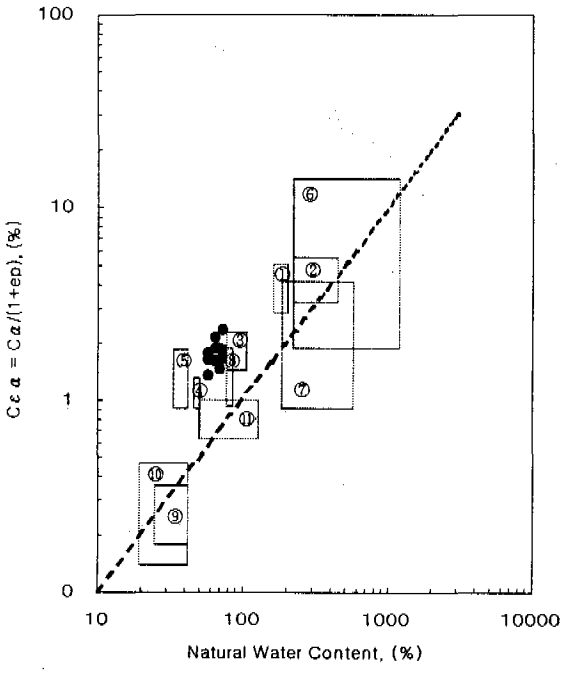
4.2 자연함수비와 이차압축비 관계

이차압밀에 대한 많은 연구에도 불구하고 아직 정립된 이론이 없는 실정이다. Mesri는 세계 각국의 퇴적점토지반에 대하여 이차압축비와 자연함수비의 관계를 양대수눈금으로 나타내었는데, Fig 4.2의 파선으로 표시한 것이 이들 퇴적점토지반의 평균선이다. 이차압축은 무기질 점토보다 유기질토에서 더 크며, Mesri가 제안한 선[9]보다 상향 분포하는 경우 creep량이 크다는 것을 의미한다.

본 연구대상 퇴적점토의 이차압축비가 Fig 4.2에 검은 원으로 나타나 있다. Fig 4.2에서 보는 바와 같이 '삼산'지역의 점토가 Mesri 선 보다 상부에 분포되므로 이차압축 침하의 영향이 클 것이 예상된다.

4.3 C_α/C_c 와 C_c 관계

Mesri[14]는 여러 연구결과를 취합하여 C_α 와 C_c 가 거의 직선관계이며, 그 범위가 매우 좁다고 제시하였다. Table 4.1은 Mesri가 제안한 이차압축지수와 일차압축지수의 관계이다. 무기질 점토와 실트는 C_α/C_c 가 0.04±0.01, 유기질 점토와 실트는 0.05±0.01이다. Peat는 Mesri[15]는 0.06±0.01을 제안하였으나, Mitchell은 0.075±0.01을 제안하였다.



①Whangamarino Clay
(Newland and Allely, 1960
②Mexico City Clay
(Leonards and Girault, 1961_
③Calcareous Organic Silt
(Walhs, 1962)
④Leda Clay(Crawford, 1965)
⑤Norwegian Plastic Clay
(Bjerrum, 1967)
⑥Amorphous and Fibrous
Peat(Lea and Brawner, 1963)
⑦Canadian Muskeg
(Adams, 1965)
⑧Organic Marine Deposits
(Keene, 1965)
⑨Boston Blue Clay
(Horn and Lambe, 1965)
⑩Chicago Blue Clay
(Peck Personal Files)
⑪Organic Silty Clay
(Jonas, 1965)
●'Samsan' Clay

Fig 4.2 Secondary Compression Ratio($C_{\varepsilon\alpha}$) for Natural Soil Deposits

'삼산'점토의 $C_\alpha - C_c$ 관계를 선형회귀분석한 결과는 식 4.1에 나타내었다. $C_\alpha - C_c$ 의 상관계수(Correlation Coefficient)는 0.996 으로 높은 상관성을 가지며, Mesri가 제안한 유기질 점토와 유기질 실트의 범위에 있다. Fig 4.3은 '삼산'지역 점토에 대한 일차압축지수와 이차압축지수의 관계이다. Fig 4.3에서 일차압밀이 클수록 이차압밀도 크게 나타남을 알 수 있다.

$$C_\alpha = 0.049\, C_c + 0.0017 \quad (r = 0.996) \tag{4.1}$$

Table 4.1 Viscous parameter C_α / C_c for Geotechnical Materials

Material	C_α / C_c
Shale and mudstone	0.03±0.01
Inorganic clays and silts	0.04±0.01
Organic clays and silts	0.05±0.01
Peat and muskeg	0.06±0.01

note : Types of material and C_α / C_c values are from Mesri et al.(1995)

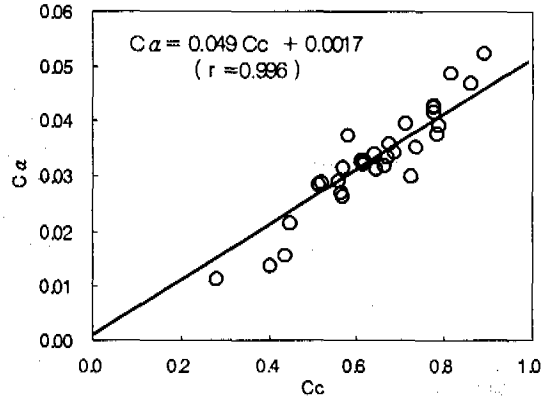


Fig 4.3 Values of Secondary Compression Index, C_a and Compression Index, C_c

Fig 4.4는 국내외 유기물 점토의 일차압축지수와 이차압축지수의 관계를 비교한 것인데, '삼산'지역의 이차압축지수가 다른 지역에 비해 상대적으로 높게 나타나므로 이차압축을 고려해야 할 것이다.

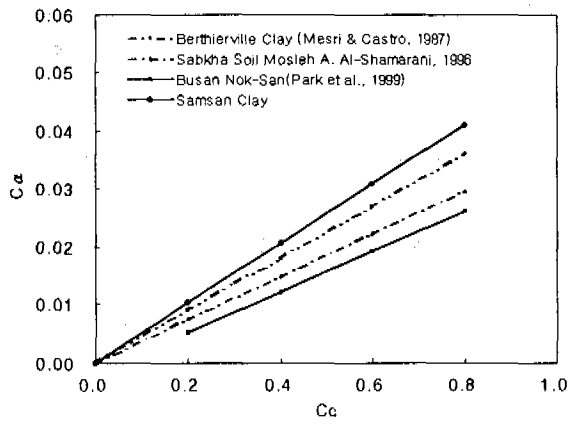


Fig 4.4 C_a - C_c Relationships for 'Samsan' Soils and Other Materials.

4.4 C_c 와 C_r 관계

$e-\log \sigma_v'$ 관계를 두 가지 직선으로 고려할 수 있다. 하나는 선행압밀하중 σ_c' 까지의 기울기 C_r 로, 다른 하나는 제하와 재재하에 의한 기울기를 재압축 곡선으로 나타낼 수 있는데, 이들 두 곡선은 일반적으로 평행하다. 이 연구에서는 후자의 $C_r = \Delta e / \Delta(\log p)$ 를 이용하였다.

Ladd[7]는 다른 퇴적토의 상대적인 크기를 나타내기 위하여 다양한 흙의 C_r/C_c 을 제시하였다. C_r/C_c 가 클수록 팽창성 점토광물이 포함된 과압밀 점토와 대응되는 반면, 작을수록 이차압축과 고결화 또는 thixotropic 메커니즘의 결과로 나타나는 매우 예민한 점토와 대응된다. Ladd는 퇴적토의 C_r/C_c = 0.1~0.2의 범위로 제안했다. Fig 4.5는 압축지수와 재압축지수의 상관관계에 대하여 국외의 점토와 비교하였다. '삼산'지역 점토의 C_r/C_c 의 값은 0.1~0.2의 범위에 있으며, C_r/C_c 값이 작은 범위에 많이 존재하고 있는 것으로 보아 다소 예민한 점토이며, 지반 굴착시 발생되는 점토의 유동에 대하여 실질적인 고려가 있어야 될 것으로 판단된다.

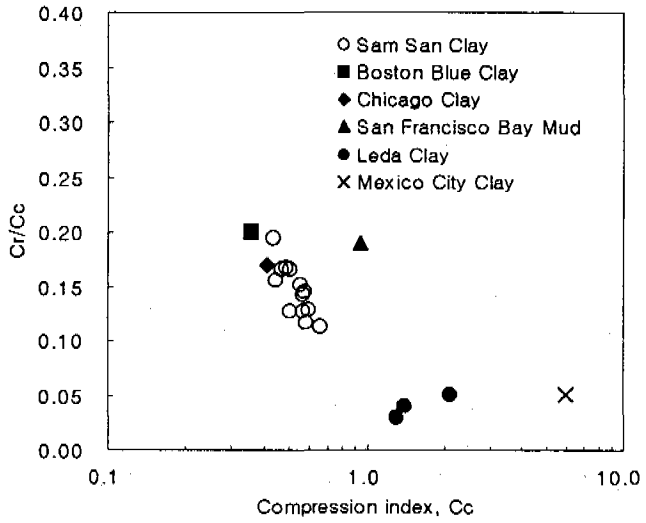


Fig 4.5 Relationship between Compression Index and Recompression Index for Natural Soil Deposits

5. 결 론

울산광역시 남구 삼산동 퇴적층에서 채취한 불교란시료로 일반적 특성과 표준압밀시험을 실시한 결과로 이차압축지수와 이차압축비를 구하였다. 그리고, 흙의 특성은 광물학적 및 화학적 조성, 조직, 입자의 배열, 환경의 영향 등에 직접 의존하므로 '삼산'지역 해성퇴적점토에 대해서 EDX 및 XRD 분석을 실시하였다. 이러한 자료를 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 자연함수비와 이차압축비의 관계는 Mesri의 선보다 윗 부분에 분포되므로, '삼산'퇴적점토는 이차압축의 영향이 클 것으로 예상된다.
2. 이차압축지수, C_α 와 일차압축지수, C_c 는 다음과 같은 선형관계가 있다.

$C_a = 0.049\,C_c + 0.0017$ ($r = 0.996$)

3. '삼산'퇴적점토의 이차압축지수는 압밀하중이 증가에 따라 감소되었으며, 압축거동은 정규압밀거동을 보인다.
4. C_r/C_c 가 0.1~0.2이므로, 지반 굴착시 흙의 팽창특성을 반드시 고려해야할 것이다.
5. '삼산'퇴적점토에 대한 EDX분석 결과 SiO_2가 60.7%~61.8%, Al_2O_3이 17.9%~18.3%로 전체 성분의 79%이며, X-선 회절분석(XRD)결과 점토광물은 Chlorite, Kaolin mineral, Illite로 구성되어 있었다.

Reference

1. 민덕기, 김용웅.(1999), "Cone Penetration Test를 이용한 울산 '삼산'지역의 지반특성에 관한 연구", Journal of Engineering Research Vol. 30, No. 1, pp463~480, University of Ulsan.
2. 박성재, 조경태, 정재형.(1999), "The Time Dependent Stress-Strain Behaviour of Clays Based from the Consolidation Creep Test", 대한토목공학회논문집 제 19권 제III-1호, pp.117~127.
3. Bjerrum, L.(1967), "Engineering geology of Norwegian normally consolidated marne clays as related to the settlements of buildings", Géotechnique. 17: pp.83~118.
4. Crawford, C. B.(1986), "State of the art : evaluation and interpretation of soil consolidation tests", In consolidation of soils : testing and evaluation, Edited by R. N. Young and R. C. Townsend. ASTM, S. T. P 892, pp.71~103.
5. Duncan, J. M., Rajot, J. P & Perrone, V. J.(1996), "Coupled Analysis of Consolidation and Secondary Compression", Proceedings of Second International conference on Soft Soil Eng. Vol. 1, pp.3~27.
6. Kabbaj, M., Tavenas, F., and Leroueil, S.(1988), "In situ and laboratory stressstrain relationship", Géotechnique. 38 : pp.83~100.
7. Ladd, C. C.(1971), "Settlement Analysis of Cohesive Soils", Soil Publication 272, Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering Cambridge, Mass., pp.92.
8. Ladd, C. C., Foot, R., Ishihara, K., Schlosser, F., and Poulos, H.G.(1977),"Stress-deformation and strength characteristics", General report, Proceedings, 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Vol. 2, pp.421~494.
9. Mesri, G.(1973), "Coefficient of Secondary Compression", Journal of Soil Mechanics and Foundations Devision, ASCE, Vol. 99, No. SM1, January, pp.123~137.
10. Mesri, G., Castro.(1987), " C_a / C_c and K_0 during secondary compressiom", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 113, No. 3, ASCE, pp230~247.
11. Mesri, G., Choi, Y. K.(1985a), "Settlement analysis of embankments on soft clays", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 111: pp.441~464.

12. Mesri, G., Choi, Y. K.(1985b), "The uniqueness of end-of-primary(EOP) void ratio effective stress relationship", Proceedings, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Vol. 2, pp.587~590.
13. Mesri, G., Rokhsar, A.,(1974), "Theory of Consolidation for Clays", Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 100, No. GT8, pp.889~904.
14. Mesri, G., Shahien, M., and Feng, T. W.(1995), " Compressibility parameters during primary consolidation", Int. Symp. on Compression and Consolidation of Clayey Soils- IS-Hiroshima's 95, Hiroshima, 2, pp.1021~1037.
15. Mitchell, L. K.(1976), "Fundamentals of soil behavior", John Wiley & Sons, New York, NY. pp.293~333.
16. Mosleh A. Al-Shamrani. (1998), "Application of the C_α / C_c concept to secondary compression of sabkha soils", Can. Geotechnical Journal. Vol. 35, pp.15~26.
17. Walls, H. E.(1962), "Analysis of primary and secondary consolidation", ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 88(SM6): pp.207~231.
18. Yin., J. H., Graham, J. (1988),"Viscous-elastic modelling of one-dimensional time-dependent behaviour of clays", Can. Geotechnical Journal. Vol. 26, pp.199~209.