

한국 남부 해안 고소성 점토 및 실트의 비선형 압축특성 연구

† 홍석우 · 임종철*

† 동의대학교 토목공학과 조교수, * 부산대학교 토목공학과 교수

Nonlinear Compression Characteristics of Highly Plastic Clays and Silts of Korea South Coast

† Seok-Woo Hong · Jong-Chul Im*

† Dept. of Civil Engineering, Donggeui University, Pusan 614-714, Korea
* Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

요 약 : 고소성 점토 및 소성, 비소성 실트의 정규압밀상태시의 처녀압축곡선이 항상 선형적 거동을 하는 것은 아니며, 비선형성을 가진 한국의 남해안 점토의 경우 압밀압력이 증가함에 따라 압축지수가 감소하며, $e - \log \sigma_v'$ 곡선은 아래로 오목한 형태의 거동을 하는 것으로 연구되었다. 본 연구에서는 한국 남부 해안의 점토를 대상으로 압밀시험을 수행하였고, 결과를 분석하여 초기간극비, 액성한계, 소성지수와 압축지수의 비선형성을 분석하였다. Butterfield의 기법을 이용한 $\ln v - \ln \sigma_v'$ 에서 액성한계 50~100%사이의 처녀압축곡선은 선형성을 보였으나, 초기간극비 2.24%, 액성한계 100%, 소성지수 60이상에서의 고소성 점토의 시험결과에서는 뚜렷한 비선형성이 나타났다. 비소성 실트(fly ash)를 90%이상 함유한 재성형 시료의 경우 압밀압력이 증가함에 따라 압축지수가 증가하는 경향을 보였다.

핵심용어 : 비선형 압축지수, 고소성 점토, 소성 실트, 비소성 실트, 압밀시험, 수정압축지수

Abstract : Highly plastic clays in their normally consolidated states are not always linear but are concave downwards. Thus their compression index decreases with the increase of consolidation pressure. The $e - \log \sigma_v'$ curves of plastic or non-plastic silty clays are not linear but are convex upwards. In this paper, consolidation tests were conducted with several undisturbed field soils of Korea south coast and their $e - \log \sigma_v'$ plots are not always linear. In case of using Butterfield's method(liquid limit 50~100%), $\ln v - \ln \sigma_v'$ plots are linear. But some undisturbed samples which have void ratio over 2.24, liquid limit over 100% and plasticity index over 60% are not linear. In results of consolidation tests with remolded samples which contain silt(fly ash) contents of 90% has compression index increasing with the increase in consolidation pressure.

Key words : nonlinear compression index, highly plastic clay, plastic silt, non-plastic silt, improved compression index

1. 서 론

도로 성토 및 구조물의 시공으로 인해 증가된 지중응력은 지반내에 과잉간극수압을 발생시키고, 발생된 과잉간극수압의 소산으로 인해 지반의 압밀침하가 발생한다. 이런 압밀침하를 예측하기 위해 Terzaghi의 1차원 압밀이론에 근거한 압밀시험이 수행되는데 이 시험을 통해 압밀침하량 산정에 필요한 간극비(e)-유효압밀압력($\log \sigma_v'$) 그래프가 산정된다. 일반적으로 정규압밀 된 점토의 경우 $e - \log \sigma_v'$ 의 처녀압축곡선은 선형이며, 그 기울기를 압축지수(C_c)로 정의하여 압밀침하량 산정시 편리하게 이용되고 있다. 일반적으로 정규압밀 된 점토에 있어서 $e - \log \sigma_v'$ 가 선형이라는 가정에서 이론의 전개 및 설계가 이루어져 왔다. 그러나 Butterfield(1979)에 의하면 이는 항상

사실이 아니며, Fig. 1(a)처럼 정규압밀상태인 고소성점토의 경우 $e - \log \sigma_v'$ 의 관계가 아래로 오목한 형태임을 보여주고 있다. 따라서 고소성 점토의 경우 압밀압력의 증가에 따라 압축지수가 감소하는 현상이 다른 고소성 점토에서도 보고되고 있다(Mesri and Rockhsar, 1971; Mesri et al., 1975). 이와 달리 Fig. 1(b)처럼 실트질이 많이 함유되어 있는 자연상태의 점토에서는 압밀압력의 증가에 따라 압축지수가 증가하는 경향이 나타나며, 인공적으로 만든 비소성 및 소성 실트의 압밀시험 결과에서도 동일한 결과가 얻어졌다(Robinson and Allam, 2002).

국내에서 고소성 해성점토에 대한 연구는 주로 해성점토의 물리적 특성과 압축지수와와의 관계, 해성점토의 토질특성 및 해성점토의 전단강도특성 등에 관한 것으로 고소성 해성점토의

† 교신저자 : 연희원, hongswoo@deu.ac.kr 051)890-1632

* 연희원, imjc@pusan.ac.kr 051)510-2442

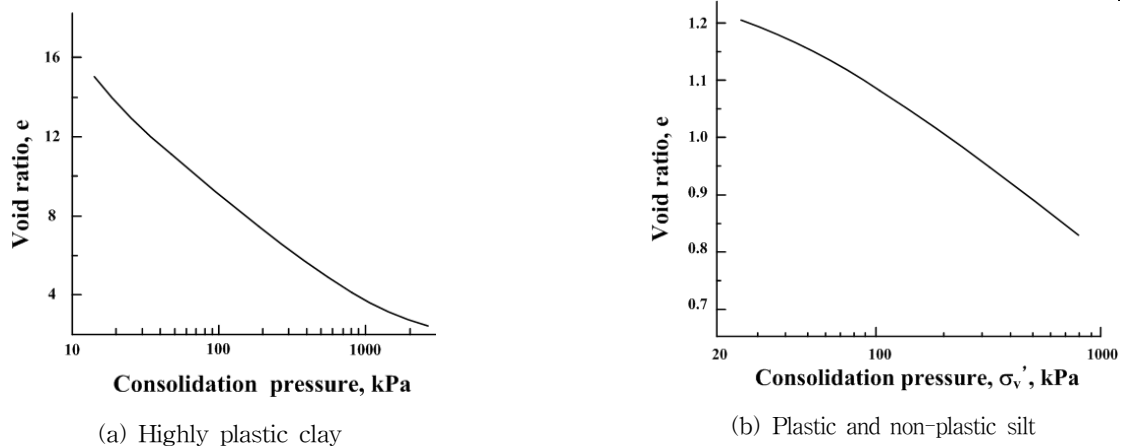


Fig. 1 Nonlinear behavior of compression index of plastic and non-plastic silt

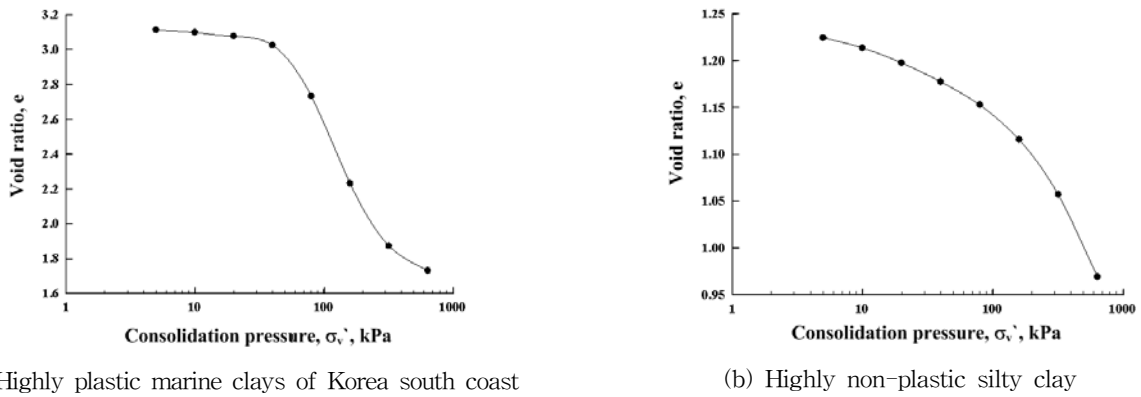


Fig. 2 Consolidation characteristics of plastic marine clays of Korea south coast

응력증가에 따른 간극비의 비선형적 변화에 대한 연구는 Suneel et al(2008)의 연구를 제외하고는 거의 이루어지지 않고 있다. 그러므로 실제 압밀시험결과로부터 압축지수의 산정시 비선형성이 명확하게 나타나지만, 인위적으로 $e-\log\sigma'_v$ 을 선형으로 간주하여 압축지수를 산정하고 있다. Fig. 2(a)는 전형적인 고소성 점토인 남해안 해성점토로 $e-\log\sigma'_v$ 를 직선으로 가정하여 구한 압축지수를 사용하여 침하량 산정시 압밀침하량을 과소 또는 과대평가할 수 있다. 또한 Fig. 2(b)는 실트질의 함유율이 78.58%인 점토로, Robinson and Allam(2002)의 연구결과와 마찬가지로 압축지수가 압밀응력의 증가에 따라 증가한다. 그러므로 고소성 점토와 마찬가지로 압밀침하량을 과소 또는 과대평가할 소지가 있다. 따라서 본 연구에서는 현재 정성적으로 보고되어 있는 압축지수의 비선형성을 정량적으로 분석하기 위해 남해안 점토의 초기간극비, 액성한계, 소성지수에 따른 압축지수의 변화율을 분석하였다. 또한 비선형 압축지수를 가지는 점토의 응력증가에 따른 압밀계수도 분석하여 고소성 점토의 비선형거동이 압밀압력증가에 따라 압축지수와 압밀계수에 어떤 영향을 미치는지 분석하였다.

2. 선행연구

2.1 고소성점토의 압밀특성

Mesri et al., (1975)의 연구에 의하면 시험시 사용된 Mexico City Clay는 자연함수비 421 ~ 574%로 고함수비를 가지고 있고 액성한계 500%, 소성한계 150%, 소성지수가 350으로 고소성의 점토에 해당되며, 교란되지 않은 점토를 사용하여 표준압밀시험을 하였으며 그 결과, 고소성의 점토에서는 Fig. 3 (a)와 같이 $e-\log\sigma'_v$ 그래프에서 처녀압축곡선이 선형이 되지 않고, 아래로 오목한 그래프 형상을 나타내는 것으로 연구되었다. 따라서 압축지수의 값은 압밀하중이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 Fig. 3 (b)와 같이 C_c 는 선행압밀하중을 약간 초과하는 응력상태까지는 급격히 증가하다가 이를 초과한 후에는 압밀응력이 증가함에 따라 급격히 감소하는 경향을 나타내고 있다(Mesri et al., 1975).

2.2 비소성실트의 압밀특성

Robinson and Allam(2002)은 네 가지의 비소성실트인 powdered quartz, granite dust, fly ash 그리고 silicon carbide

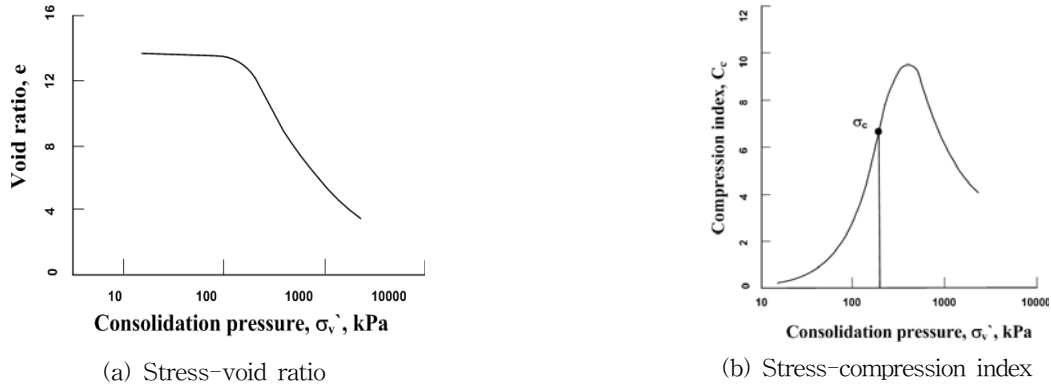


Fig. 3 Compression characteristics of Mexico City clay

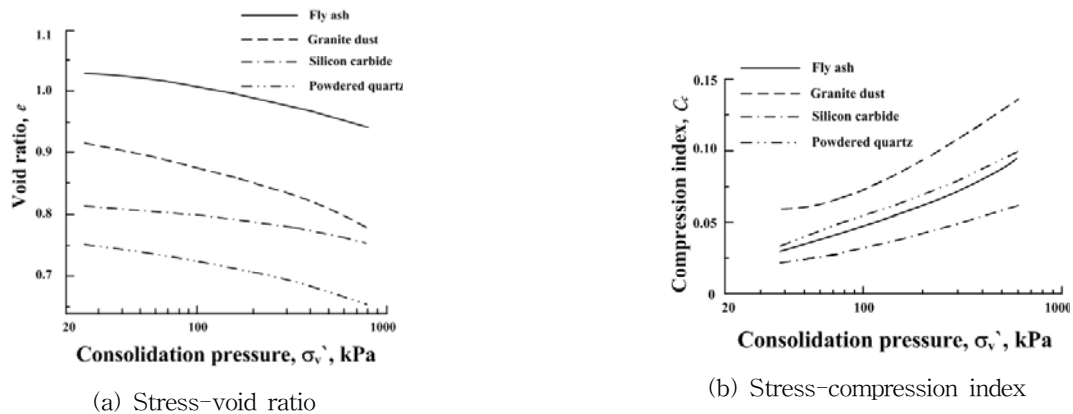


Fig. 4 Compression characteristics of non-plastic silt

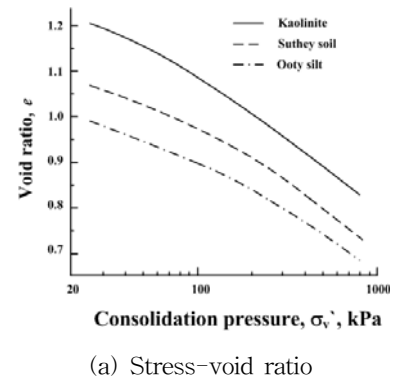
의 압밀특성을 분석하였다. 네 가지 실트는 인도의 임의의 장소에서 채취된 시료로 비중은 각각 2.64, 2.68, 2.03 그리고 3.19이다. 또한 압밀시험에 사용한 네 가지 비소성실트는 초기함수비가 각각 액성한계의 약 1.2배인 37.6%, 36.2%, 42% 그리고 32%의 슬러리상태로 만든 다음, 압밀링에 재성형하여 24시간 간격으로 하중증가비 1을 적용하여 시험을 수행하였다.

비소성실트의 압밀시험 결과를 분석하면, Fig. 4(a)와 같이 $e - \log \sigma_v'$ 그래프는 선형이 아닌 위로 볼록한 형상으로 나타난다. 또한 압밀하중이 증가함에 따라 압축지수 C_c 도 증가하는 경향을 보이고 있다(Robinson and Allam, 2002).

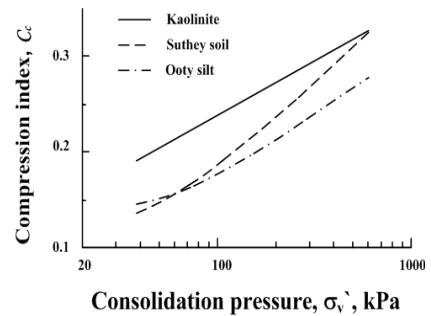
2.3 소성실트의 압밀특성

Robinson and Allam(2002)의 연구에서 시험에 사용된 시료는 Kaolinite, Ooty silt 그리고 Suthey silt로 소성도표의 A-line 밑에 존재하는 실트성분을 50%이상 함유하고 있는 실트성분의 흙이다. 여기서 사용된 Kaolinite는 순수 점토가 아닌 71%의 실트성분을 포함하고 있다. 그러므로 소성이 있는 실트로 분류되었다.

소성실트의 표준압밀시험 결과, Fig. 5 (a)와 같이 비소성실트와 유사하게 $e - \log \sigma_v'$ 그래프는 선형이 아닌 위로 볼록한 형상으로 나타났으며, 또한 Fig. 5 (b)와 같이 압밀하중이 증가함에 따라 압축지수 C_c 도 증가하는 경향을 보이고 있다.



(a) Stress-void ratio



(b) Stress-compression index

Fig. 5 Consolidation characteristics of plastic silt

2.4 Butterfield의 수정 압축지수

정규압밀된 점토에 있어서 $e - \log \sigma'_v$ 가 선형이라는 가정은 실험적인 근거에 의해 사용되고 있지만, 응력에 따라서 간극비의 변화가 상대적으로 큰 흙에서는 압축성이 더 크며, 이러한 흙의 압밀시험 결과 $e - \log \sigma'_v$ 곡선은 일반적인 선형이 아니다.

비선형성을 선형적으로 표현하기 위해 $\ln \sigma'_v$ 에 대한 $\ln(1+e)$ 의 그래프를 이용한다. 이 그래프의 기울기는 수정압축지수를 의미한다(Fig. 6 참고).

$$d(\ln(1+e)) = \frac{de}{1+e} = -C d(\ln \sigma'_v) = -C \frac{d\sigma'_v}{\sigma'_v} \quad (1)$$

여기서 C : 수정압축지수

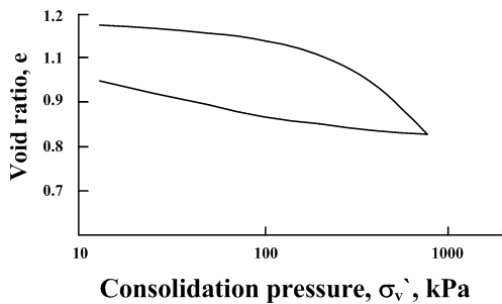
또는 간극비를 사용하지 않고 $\ln v$ 에 대한 $\ln \sigma'_v$ 그래프를 그리기 위해 비체적($v = 1+e$)을 이용하여 표현할 수 있다.

$$d(\ln v) = \frac{dv}{v} = -C d(\ln \sigma'_v) = -C \frac{d\sigma'_v}{\sigma'_v} \quad (2)$$

Table 1은 $\ln v - \ln \sigma'_v$ 에서 얻어진 각 지역의 수정압축지수에 대한 실험값이다.

Table 1 Improved compression index by Butterfield

	C
Mexico City Clay	0.498
London Clay	0.083
Newfoundland peat	0.214
Newfoundland silt	0.103
Chicago Clay	0.154
Boston blue Clay	0.122
Drammen Clay, plastic	0.140
Drammen Clay, lean	0.104



(a) $e - \log \sigma'_v$

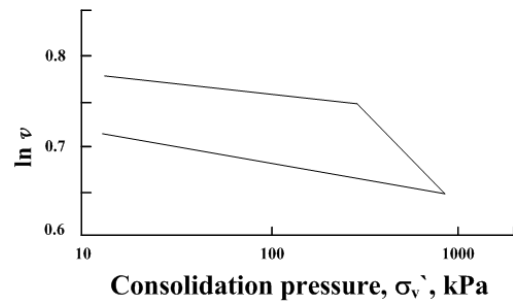
3. 한국 남부 해안 점토의 압밀특성

한국 남부 해안의 고소성 점토 및 실트의 압밀특성을 분석하기 위해서 여러 현장에서 불교란 시료를 채취하여 표준압밀시험을 수행하였다. Table 2는 여러 현장 중 대표적인 시료의 물리적 성질을 나타내고 있다.

Table 3 Consolidation test results of several undisturbed field soils

위치	항목	선형압밀압력, σ'_{vp} (kPa)	간극비, e_0	압축지수, C_c	Butterfield의 압축지수, C
Busan New Port		100	1.184	0.403	0.096
Gimhae		120	1.69	0.787	0.166
Busan Nak-dong River		93	0.91	0.149	0.031
Yangsan		109	1.67	0.674	0.145
Busan-Geoje		120	2.509	1.59	-

한국 남부 해안의 여러 현장의 점토 및 실트를 채취하여 표준압밀시험을 수행한 결과, 일반적으로 CH와 SM에서 $e - \log \sigma'_v$ 의 처녀압축곡선이 비선형으로 나타내며, Butterfield가 제안한 $\ln v - \ln \sigma'_v$ 로 표현한 그래프에서는 선형연구와 같이 처녀압축곡선이 선형에 근접하게 나타났다. 그러나 부산-거제구간의 시료와 같이 비선형 거동이 뚜렷이 나타나는 고소성 점토의 경우 압축곡선의 비선형이 그대로 나타났다. Table 3과 Fig. 7~Fig. 9은 표준압밀시험 결과를 나타내고 있다.



(b) $\ln v - \ln \sigma'_v$

Fig. 6 $\ln v - \ln \sigma'_v$ by Butterfield

Table 2 Soil composition test results of several undisturbed field soils

위치	항목	통일분류법 (USCS)	함수비 (W_n)	비중 (G_s)	액성한계 (LL, %)	소성한계 (PL, %)	소성지수 (PI)	모래(%)	실트 및 점토(%)
Busan New Port		ML	44.84	2.67	38.15	11.78	26.37	1.76	98.24
Gimhae		CH	52.74	2.66	56.45	21.09	35.36	3.86	96.14
Busan Nak-dong River		SM	29.81	2.65	N.P	N.P	N.P	87.89	12.11
Yangsan		CH	64.43	2.68	53.78	26.23	27.54	3.61	96.39
Busan-Geoje		CH	91.88	2.69	107.2	34.5	72.7	6.00	94.00

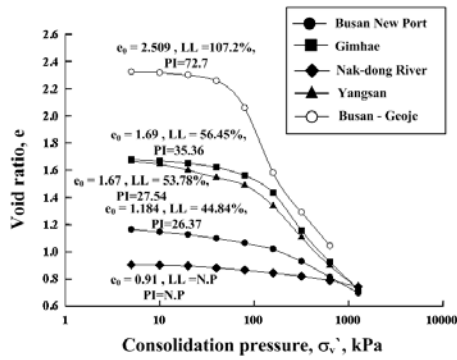


Fig. 7 $e - \log \sigma'_v$ of undisturbed samples

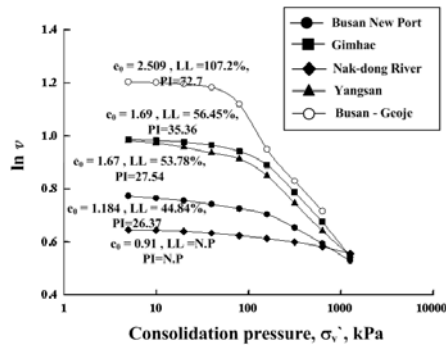


Fig. 8 $\ln v - \ln \sigma'_v$ of undisturbed samples

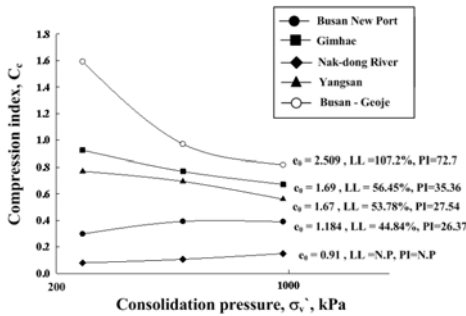


Fig. 9 Behavior of compression index by stress

4. 재성형 시료의 압밀특성

시험 시료의 압축성을 극대화하기 위해 압축성이 큰 Montmorillonite를 사용하였으며, 소성지수에 따른 압축지수의 거동을 분석하기 위해서 실트를 혼합하였다. 혼합재료는 비소성 실트인 fly ash를 사용하였다. fly ash는 화력발전소에서 연소 중 연기 속에 날아드는 재를 모은 것으로 한국공업규격 (KS L-5405)에 명시된 품질규정에 적합하도록 정제 처리된 제품인, 금륜 MEGAMIX-1000을 이용하였다. 각 함유율로 혼합된 시료는 물성 시험을 통하여 각각의 액성한계에 근접한 함수비로 압밀링에 재성형하여 표준압밀시험을 시행하였다. Table 4는 Montmorillonite와 Fly ash의 물리적 성질을 나타내고, Table 5, 6은 시험에 사용되는 시료의 배합비 및 토질시험결과를 나타내고 있다.

Table 4 Soil test results of Montmorillonite and Fly ash

구분	비중 (G_s)	액성한계 (LL, %)	소성한계 (PL, %)	소성지수 (PI)	통일분류법 (USCS)
Montmorillonite	2.6	385	132	253	CH
Fly ash	2.3	N.P	N.P	N.P	ML

Table 5 Mixture ratio of samples

구분	각 시료의 혼합제 함유율(%)				
	ST-1	ST-2	ST-3	ST-4	ST-5
Montmorillonite	90	70	50	30	10
fly ash	10	30	50	70	90

Table 6 Soil test results of mixing samples

항목 시료	통일분류법 (USCS)	비중 (G_s)	액성한계 (LL, %)	소성한계 (PL, %)	소성지수 (PI)
ST-1	CH	2.68	163.80	72.00	91.80
ST-2	CH	2.65	130.55	44.52	86.03
ST-3	CH	2.66	109.00	36.63	72.37
ST-4	CH	2.65	62.50	24.52	37.98
ST-5	ML	2.64	N.P	N.P	N.P

압밀시험 결과, 불교란시료의 비선형성과 유사한 경향을 나타냈다. Fig. 10, Fig. 11은 압밀시험 결과를 나타내고 있으며, Fig. 12~Fig. 15는 3장에서 시험한 불교란시료의 응력에 따른 압축지수의 변화와 간극비, 액성한계, 소성지수의 관계 그래프를 재성형시료의 결과와 비교한 것이다.

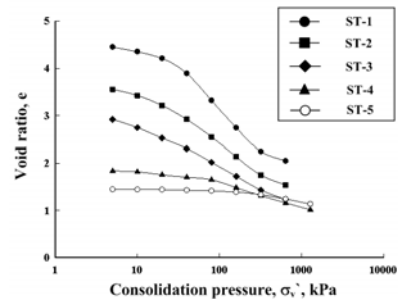


Fig. 10 $e - \log \sigma'_v$ of remolded samples

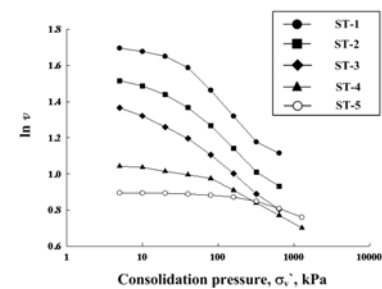


Fig. 11 $\ln v - \ln \sigma'_v$ of remolded samples

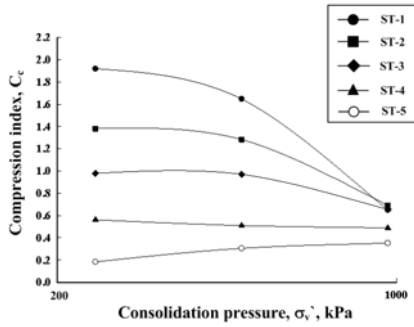


Fig. 12 Behavior of compression index of remolded samples

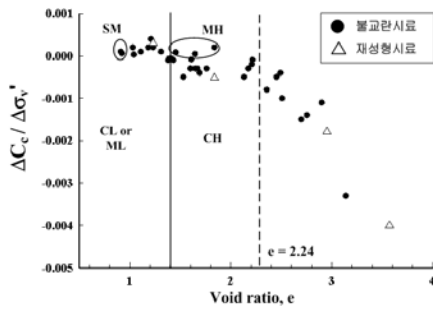


Fig. 13 Gradient of compression index by void ratio

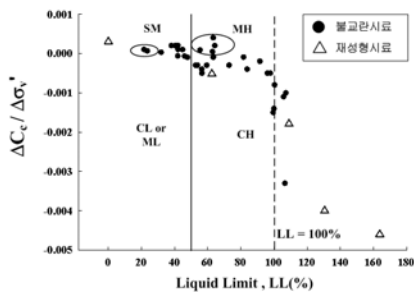


Fig. 14 Gradient of compression index by Liquidity Index

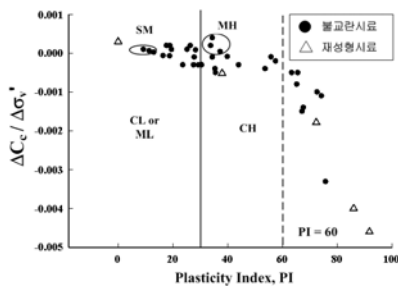


Fig. 15 Gradient of compression index by Plasticity Index

5. 압밀계수와 비선형 압축지수와의 관계

한국 남부 해안 점토의 압밀압력증가에 압밀계수의 변화를 분석하기 위해 압축지수가 선형인 점토와 약간 비선형을 나타내는 점토 그리고 뚜렷한 비선형성을 가지는 점토의 압밀압력 증가에 따른 압밀계수의 변화를 분석하였다. 압밀계수는 $\log t$ 법을 이용하여 산정하였다. Fig. 16, 17은 각 시료의 압밀압력의

증가에 따른 압축지수와 압밀계수의 변화를 나타낸 그래프이다. 그 결과, 압밀계수는 압밀압력의 증가에 따라 압축지수가 선형을 가지는 점토에서는 큰 변화가 없으나, 비선형이 나타나는 시료의 경우 최대곡률지점 이후에서 압밀계수가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 이는 선형압밀하중 이후 1차원압밀이 완료되는 시간은 큰 차이가 없지만, 간극비의 변화폭이 최대곡률점을 기준으로 급격하게 변하기 때문으로 판단된다.

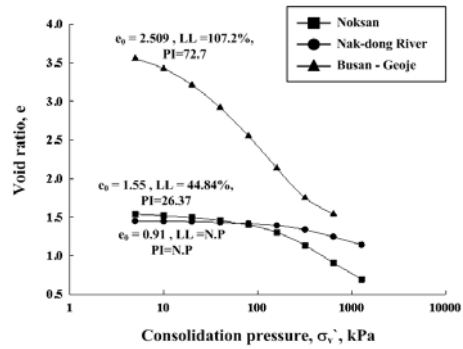


Fig. 16 $e - \log \sigma_v'$ of typical samples

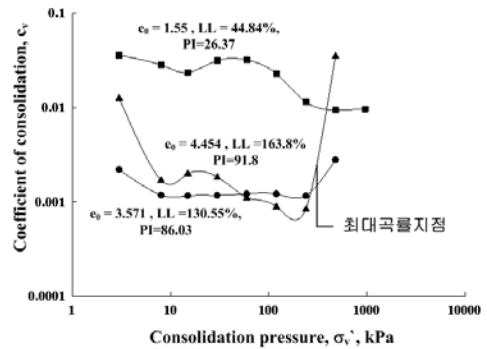


Fig. 17 Coefficient of consolidation by stress

6. 결 론

한국 남부 해안 흙의 압밀특성 중 처녀압축곡선의 비선형성을 파악하기 위해 여러 현장의 불교란 시료를 추출하여 표준압밀시험을 시행하였으며, 그 결과로 부터 압축지수(C_c)와 Butterfield의 수정압축지수(C)를 비교·분석하였으며, 실트량의 함유량에 따른 압축지수의 거동을 분석하기 위해 시료를 재성형하여 표준압밀시험을 시행하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 통일분류법 상 CH로 분류되는 현장의 흙과 SM로 분류되는 흙에서 비선형성이 나타났으며, 액성한계와 초기간극비가 클수록 비선형성이 뚜렷하게 나타났다.
2. 일반적인 고소성의 분류인 액성한계 50%이상인 흙의 경우 액성한계 100%까지는 압밀압력의 증가에 따른 압축지수의 변화가 크지 않으나 간극비 $e=2.24$, 액성한계 (LL)=100%, 소성지수(PI)=60 이상인 흙에서 응력에 따른 압축지수의 변화가 크게 나타났으며, 이렇게 비선형성이

심한 고소성점토의 경우 새로운 압밀침하량 산정기법이 필요한 것으로 나타났다.

3. 고소성이지만 실트질이 많이 함유되어 있는 MH의 경우 동일한 액성한계인 CH보다 처녀압축곡선이 선형을 잘 유지하는 것으로 나타났다.
4. 압밀계수는 압밀압력의 증가에 따라 압축지수가 선형을 가지는 점도에서는 큰 변화가 없으나, 비선형이 나타나는 시료의 경우 최대곡률지점 이후에서 압밀계수가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 이는 선형압밀하중 이후 1차 원압밀이 완료되는 시간은 큰 차이가 없지만, 간극비의 변화폭이 최대곡률점을 기준으로 급격하게 변하기 때문에 판단된다.

후 기

이 논문은 2011 학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(과제번호 2011AA151).

참 고 문 헌

- [1] 임종철(2005), “토질공학의 길잡이”, 새론 도서출판.
- [2] Butterfield. R.(1979), "A Natural Compression Law for Soils(An Advance on e -log p')," Geotechnique, Vol. 29, pp. 469-480
- [3] Mesri, G. and Olson, R. E.(1971), "Consolidation Characteristics of Montmorillonite," Geotechnique, Vol.21, No. 4, pp. 341-352.
- [4] Mesri, G., Rockhsar, A., and Bohor, B. F.(1975), "composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay," Geotechnique, Vol. 25. pp. 527-554.
- [5] Olson, R. E., and Mesri, G.(1970) "Mechanisms Controlling Compressibility of Clays," Journal of Soil Mechanics and Foundations Divisions, ASCE, Vol. 96, No. SM 6, pp. 1863-1878.
- [6] Robinson R. G. and Allam M. M.(2002), "Compression index of clays and silts", Journal of Testing and Evaluation, Vol. 31, No.1
- [7] Suneel, M. and Park L. K and Im, J. C(2008), "Ccompressibility Characteristics of Korean Marine Clay", Marine georesources & geotechnology , Vol. 26, No. 1, pp. 111-127.

원고접수일 : 2012년 3월 2일

심사완료일 : 2012년 4월 4일

원고채택일 : 2012년 4월 4일