

일정변형률 시험을 이용한 재성형 광양 해성점토의 압밀특성 연구

A Study on the Consolidation Characteristics Using the Constant Strain Rate Test of Remolded Gwangyang Marine Clay

장정민¹, 김진영¹, 정운기¹, 최진¹, 진영식¹, 강권수², 백원진³, 이강일^{4*}
Joeng-Min Jang¹, Jin-Young Kim¹, Woon-Ki Joeng¹, Jin Choi¹, Young-Sik Jin¹
Kwon-Soo Kang², Won-Jin Baek³, Kang-Il Lee^{4*}

¹Member, Graduate students, Department of Rural & Boisystems Eengineering, Chonnam National University, 77 Yongbong-Ro, Buk-gu, Gwangju, 500-757, Republic of Korea

²Member, Professor, Department of Civil Engineering, Seonam University, 439 Choonhyang-Ro, Namwon City, Jeollabukdo, 590-711, Republic of Korea

³Member, Associate Professor, Department of Rural & Boisystems Eengineering, Chonnam National University, 77 Yongbong-Ro, Buk-gu, Gwangju, 500-757, Republic of Korea

⁴Member, Professor, Department of Civil Engineering, Dae-Jin University, Seondan-dong, Pocheon City, Kyounggi-Do, 487-711, Republic of Korea

ABSTRACT

Recently, the case to construct the structure on the soft clayey ground has increased and in order to the reduction of the cost of construction and maintenance on the social infrastructure facilities we have been trying to improve the soft clayey ground using the existing methods such as the pre-loading method and the vertical drain method. Like this, when various ground improvement methods are applied on the soft clayey ground, a long-term consolidation settlement will be key issue due to low permeability coefficient of cohesive soil. According to existing research results that relate to the consolidation settlement, the loading periods for existing the standard consolidation test (Oedometer test) to obtain the consolidation parameters are needed for minimum ten days or more. Therefore, in this study, the standard consolidation test (24 hours step-loading) and constant strain rate consolidation test changed by strain rate was performed using the remolded marine clay on Gwangyang bay composed of a soft clayey ground of the south-west coast. From the laboratory test results, the characteristics of compression, strain-effective stress relations by constant strain rate and the variation characteristic of the pore water pressure by different of loading speed and the relation between consolidation parameters and constant strain rate are compared and analyzed.

요 지

가 가 ,

가

10

Keywords : Consolidation, Ground improvement, Constant strain rate, Loading periods

Received 11 Oct. 2014, Revised 3 Nov. 2014, Accepted 4 Nov. 2014

*Corresponding author

Tel: +82-62-530-2151; Fax: +82-62-530-2159

E-mail address: bwj215@jnu.ac.kr (W. J. Baek)

1. 서론

국내 연약지반에 대한 연구는 하천을 중심으로 하상점토에 대한 낙동강 델타지역, 영산강 하류지역에 대한 압밀 관련 연구와 해안선에 분포하는 해성점토를 대상으로 한 광양만 및 양산-물금 지역 등에 대해 활발히 진행되어져 왔으며, 주로 정규압밀 상태에 대한 연약점토지반의 안정성과 관련하여 전단특성 및 압밀/배수 특성에 관한 연구가 대부분이었다. 표준압밀시험은 국내-외적으로 아직까지도 Terzaghi의 일차원 압밀이론에 의한 단계하중 증가에 따른 간극비의 변화를 구하여 압축곡선을 구하고, 각 하중단계의 압밀정수를 구하는 방법이다. 이러한 절차 때문에 실험기간이 8~14일 정도의 장시간이 소요되며, 각 단계별로 하중 재하가 균일하지 않은 하중상태와 변형속도가 일정하지 않으므로 압밀곡선이 뚜렷하게 정의되지 않으며, 부족한 데이터로 인해 얻어진 간극비와 유효응력 관계곡선은 동일한 시료의 선행압밀하중 해석시 도해적으로 해석하는 과정에서 개인적인 오차가 발생하여 상이한 결과를 얻게 된다(Yoshikuni et. al, 1990, 1991). 또한, 표준압밀시험은 강성 가압판에 의한 응력의 불균등 분포와 링마찰, 간극수압측정, 수평배수가 불가능하다는 문제를 가지고 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 표준압밀시험방법을 개선하고 대신할 여러 가지 압밀시험법이 발전되어왔다.

그 대표적인 시험으로는 Smith and Wahls(1969), Wissa et al.(1971)의 일정변형률 압밀시험(Constant Rate of Strain Consolidation), Gorman et al.(1978)의 동수구배 압밀시험, Aboshi et al.(1970)의 일정하중률 압밀시험 등이 제안되었다. 이러한 시험방법은 주로 시험기간을 줄이고 압밀정수를 구하는데 여러 가지 유리한 점을 제공해주고 있다. 특히, 일정변형률 압밀시험은 일정한 속도로 시료에 연직변위를 유발시키고, 변위 발생에 따른 전응력과 비배수면에 발생하는 과잉간극수압을 측정하여 연직유효응력과 그에 상응하는 간극비를 산정함으로써 간극비와 유효응력의 관계, 압밀계수와 유효응력 관계 등을 연속적으로 빠른 시간 내에 개인적인 오차 없이 구할 수 있는 효과적인 시험방법으로 인식되고 있다. 또한, 연속적으로 재하한다는 점에서 표준압밀시험보다 현장조건에 부합되며, 신속하게 압밀특성을 구할 수 있다는 장점 때문에 외국에서는 널리 사용되고 있으며, 표준시험법으로 인정되었다. 반면에 국내의 경우, Lee(1986), Bang(1997), Lee et al.(1996)에 의해 지역 특성에 따른 압밀특성시험에 일정변

형률 시험을 적용한 사례 등이 있으며, 또한 Kim(2001), Oh(2002)에 의해 해성점토를 이용하여 일정변형률 시험과 표준압밀시험에서 얻어진 압밀특성을 비교한 연구와 Jung(2002)에 의해 흙의 물성자료를 이용하여 변형률 속도를 종속변수로 한 통계식을 제시한 연구가 있으나 아직까지도 그 연구가 미미할 뿐만 아니라 시험 기준도 확립되지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 해성점토를 재성형하여 균질한 시료를 대상으로 표준압밀시험결과로부터 얻어진 압밀정수와 변형률 속도를 변화시킨 등변형률 시험을 통해 얻어진 압밀정수와 상관성을 비교/분석함으로써 단기간에 압밀정수를 산정할 수 있는 적정 변형률 속도를 제안하고자 한다.

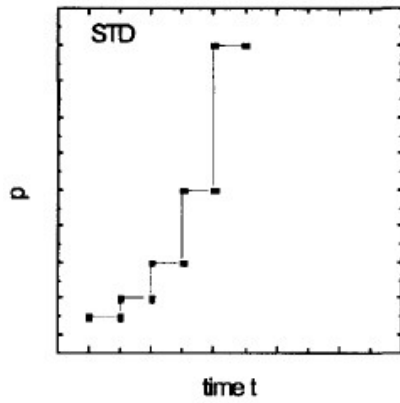
또한 하중단계별 재하시간을 변화시킨 압축곡선과 연속재하인 등변형률 곡선의 압축곡선의 비교/분석을 통해 압축곡선의 크리프 특성을 명확히 하고자 하였으며, 변형률 속도의 변화에 따른 간극수압 발생 과정을 분석하고자 한다.

2. 일정변형률 압밀이론

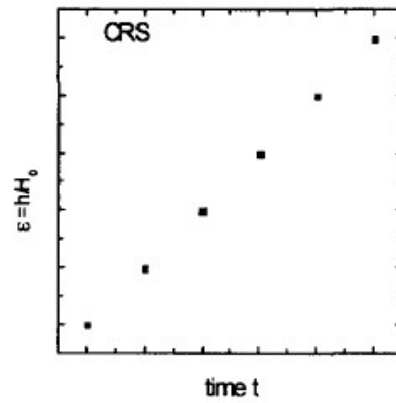
2.1 개요

Terzaghi의 1차원 압밀이론에 근거한 표준 압밀시험은 Fig. 1 (a)와 같이 단계 하중을 하중증분비 $\Delta p/p_0 = 1.0$ 으로 각단계별로 24 hr 재하하는 시험으로, 현재까지 연약점토의 압밀 정수의 산정에 널리 이용되고 있으나, 일주일 이상의 시험기간이 소요되며 경우에 따라 선행 압밀 하중과 압밀계수의 산정에 문제점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 여러 형태의 급속압밀 시험이 제안되었으며, Fig. 1의 (b)와 같이 일정 변형에 따른 하중의 변화를 측정하는 일정변형률 압밀시험이 널리 이용되고 있으며, (ASTM, 1989)에 압밀시험으로 제시되어져 있다.

일정변형률 압밀시험에 대한 내용은 초기에 Crawford(1964)에 의하여 언급된 이후 Smith and Wahls(1969)는 전이상태가 소산된 뒤에 적용되는 해를 이용하여 일정변형률 압밀로부터 구한 데이터를 해석하였다. 그들은 흙의 투수계수는 임의의 시간에서 시료의 깊이에 따라 일정하고 흙의 간극비는 심도에 따라 선형적으로 변화한다고 가정하였다. 또한 그들이 사용한 해에서는 시간에 따른 간극비의 변화가 작아서 미소변형률이 존재한다고 가정하였다.



(a) Oedometer test



(b) Constant strain rate test

Fig. 1. Loading process of consolidation tests

또한, Wissa et al.(1971)은 배압을 주어서 시료를 포화시킬 수 있는 일정변형률 압밀시험기를 개발하고 이론을 적용하여 검증하였다.

2.2 변형속도의 산정

연속으로 재하하는 압밀시험 방법이 많이 이용되고 있지만 변형속도와 과잉간극수압비에 관한 결정은 여전히 확립되지 않았다. CRS 시험을 통해 압밀특성을 추정하는 경우 적절한 변형률 속도를 산정하는 것이 매우 중요하다. 변형률 속도가 너무 작으면 시료 하단에서 과잉간극수압이 발생하지 않아 압밀정수를 산정할 수 없으며, 반대의 경우 상대적으로 큰 과잉간극수압이 발생하게 되면 시료 양단의 응력차이의 증가로 인하여 시험결과의 신뢰도가 떨어진다. 최적의 변형속도는 연직유효응력과 압밀계수를 동시에 고려하고 시료의 물리적 특성에 따라 간극수압의 허용범위 내에서 합리적으로 결정해야 한다.

지금까지 연구된 변형속도 결정방법에는 여러 가지가 있으나 가장 대표적으로 Gorman et al.(1978)이 제시한 방법을 기초로 액성한계에 따라 Table 1과 같이 세분화하는 방법이 있다. 하지만 ASTM의 규정은 흙의 액성한계만을 고려하여 변형률의 속도를 산정하고 액성한계 60%를 초과하는 대상 시료에 대해서는 변형속도가 너무 느려 소요시간이 장기화 되는 단점이 있다.

2.3 과잉간극수압과 간극수압비

CRSC 시험에서 압밀응력이 발생되면 시료 하단의 비

Table 1. Value of strain rate according to liquid limit at ASTM D4186-89 method

Liquid limit (%)	Strain rate (%/min)
0~40	0.04
40~60	0.01
60~80	0.004
80~100	0.001
100~120	0.0004

배수면에서는 과잉간극수압이 발생하게 된다. 시간에 따른 과잉간극수압의 변화는 압밀응력이 선형압밀하중에 근접하기 전까지는 초기간극비의 영향에 따라 과잉간극수압이 발생되며 압밀응력이 선형압밀하중을 초과하면서 점토 입자가 파괴되기 시작하고 과잉간극수압은 다시 증가하게 된다. 간극수압비 u_v/σ_v 는 배수면인 시료 상부에 가해진 전응력 σ_v 에 대한 비 배수면인 시료 하부에서 측정되는 과잉간극수압 u_b 의 비이다.

CRSC 시험을 수행하기 전 Smith and Wahls(1969), ASTM (1989) 등에서 제안된 방법에 의해 변형률 속도를 선정한다. 선정된 변형 속도의 타당성과 유효성을 검증하기 위해 시험결과로부터 산정된 간극수압비가 높으면 계산된 유효응력, 압밀계수 값에 오차를 내포할 수 있으므로 오차를 최소화하고 합리적인 해를 얻기 위해서는 간극수압비의 범위를 결정해야 한다. 간극수압비의 범위 결정시에 초기 간극비 상태와 시료의 구조적 특성, 압축성과 투수성을 나타낸다. 따라서 시료의 물리적 특성에 따라 합리적인 간극수압계수의 범위를 결정함으로써 경제적인 일정변형률 압밀시험을 수행할 수 있다.

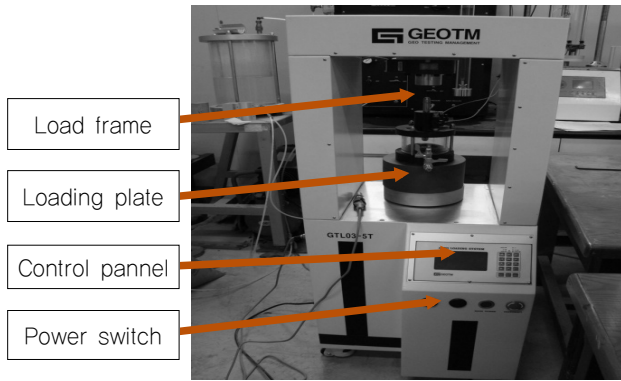


Fig. 2. Constant strain rate test equipment

3. 실내시험 재료 및 방법

3.1 시험장치

본 연구에서 사용한 일정변형률 압밀시험기는 국내의 GEOTM사에서 제작한 실험기로서 Fig. 2와 같은 로드 프레임(Load Frame), 압밀 셀(Consolidation Cell), 하중프레임(Load Frame), 배압 시스템(Backpressure System), 측정장치(Measuring Instrument), 신호변환장치(Signal Conditional Unit), 데이터 처리용 컴퓨터 등으로 구성되어 있다.

3.2 실내시험 재료 및 방법

3.2.1 시료특성

본 연구에서 이용한 시료는 광양항 컨테이너부두 매립 시에 발생된 해성 준설점토 채취 후 실험실에 반입하여 조개껍질 등 불순물을 제거하기 위해 #40번체(0.42mm)를 이용하여 체가름 한 원지반 점성토를 액성한계의 약 2배에 해당하는 함수비(90±5%)로 교반하여 재성형 점토를

제작하였다. 이는 반복되는 장기압밀시험을 위해 균일한 점토를 확보하기 위한 방법이다. 재성형 점토시료의 제작 방법은, 액성한계의 2배의 함수비로 교반한 슬러리상 점토를 토조내에 투입하고 토조상단부까지 점토를 채운 후에 초기 안정화를 위해 2-3일간의 방치를 통해 자중압밀 시킨다. 그 후, 재하판을 올리고 초기하중은 4.9kPa로 침하-시간곡선으로부터 2차압밀 개시시점을 확인한 후에 다음 단계인 9.8kPa, 19.6kPa를 재하하도록 하였다. 마지막으로 원지반 점성토의 심도 약 5.0m에 해당하는 유효상재 하중과 유사한 최종압밀하중 39.2kPa의 압밀하중에서 실제지반과 같은 안정된 재성형 점토를 얻기 위하여 1차압밀이 종료된 시점을 3 te법(각 하중단계에 대한 압밀시험 결과로부터 얻어진 s-log t 곡선의 최급 기울기선과 log t 시간축이 교차하는 시간 t를 구하고, 이 시간의 3배일 때의 동일 기울기를 갖는 직선(3 te : 총 재하기간 약 83일)과 침하곡선이 교차할 때를 1차압밀 종료시점으로 정의)을 적용하여 압밀종료시점으로 하고, 블록(20cm x 10cm x 12cm)으로 자른 후 공시체의 함수비 변화를 방지하기 위해 랩으로 도포하고 다시 호일로 도포한 후, 파라핀으로 도포하여 공기와의 접촉을 방지한 상태로 실온에서 보관하는 것으로 하였다.

이 연구에서 이용한 재성형 점토의 원지반 상태에서의 물리특성을 나타낸 것이 Table 2와 같다. 표에서 알 수 있는 것처럼 200번체 통과량이 87%를 초과하고 있으며 소성지수 15% 정도의 약간 저소성 상태의 저압축성 점토의 특성을 가지고 있다.

3.2.2 시험방법

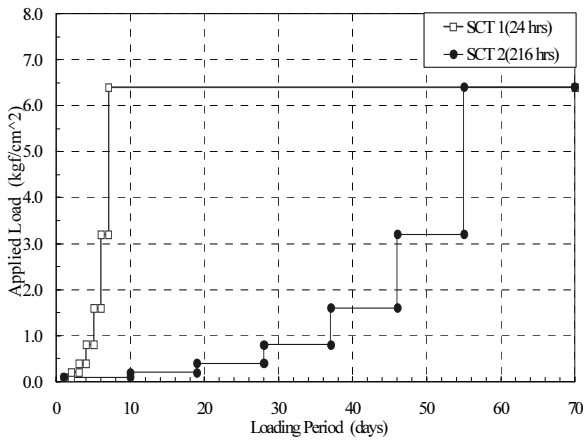
본 연구에서 수행한 일정변형률 압밀시험의 하중재하 방법을 나타낸 것이 Table 3이다. 일정변형률 압밀시험기

Table 2. Physical properties of marine clay in laboratory test

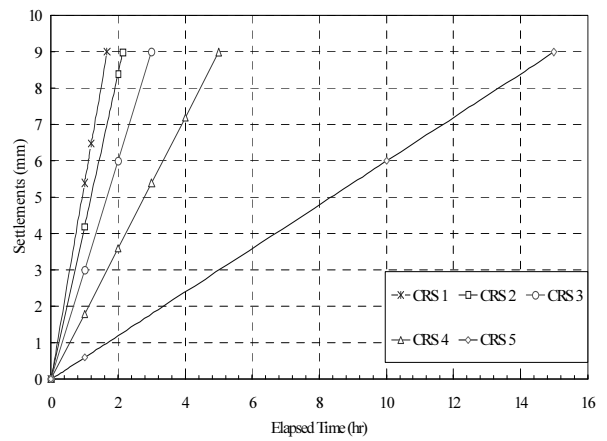
Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plasticity Index	Specific Gravity	Percent finer by 0.074 mm
46.91	31.19	15.72	2.69	87.3%

Table 3. Loading method of constant strain rate test

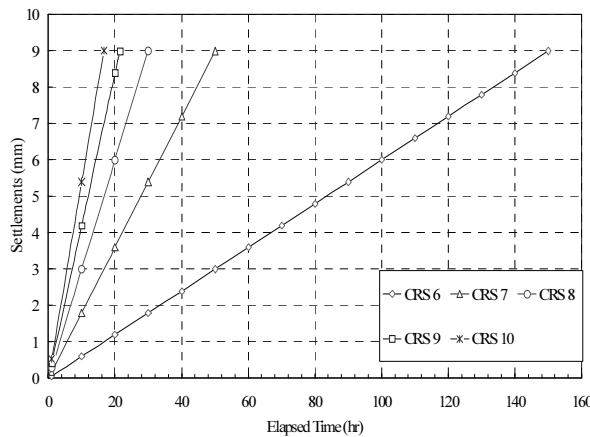
Case	Loading Speed (mm/min)	Case	Loading Speed (mm/min)
CRS 1	0.01	CRS 6	0.009
CRS 2	0.03	CRS 7	0.007
CRS 3	0.05	CRS 8	0.005
CRS 4	0.07	CRS 9	0.003
CRS 5	0.09	CRS 10	0.001



(a) Oedometer test



(b) Constant strain rate test (CRS 1~CRS 5)



(c) Constant strain rate test (CRS 6~CRS 10)

Fig. 3. Loading pattern of oedometer and constant strain rate tests

를 이용한 변형률 속도의 변화에 따른 표준압밀시험의 압축곡선과의 상관성을 분석하고 이를 통해 적합한 변형률 속도를 제안하여 단시간에 현장에서 필요한 압밀정수를 산정하는 방법을 제안하고자 한다. 또한 표준압밀시험과의 비교를 위해 하중 단계별 재하시간을 24 시간 재하와 216시간 재하한 SCT 1과 SCT 2를 표준압밀시험기를 이용하여 실시하였다.

본 연구에서 수행한 하중재하 패턴을 나타낸 것이 Fig. 3이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 표준압밀시험의 경우 각 단계하중별로 24hr, 216hr씩의 방치기간을 두고 다음 단계 하중을 재하하였으며, 등변형률압밀시험은 CRS 1의 경우 0.01mm/min의 연속재하로 변형률 45%(침하량 9.0 mm)에 도달하는데 1.67hr에 실험이 종료됨을 알 수 있다. 또한 재하기간이 가장 긴 경우인 CRS 10의 경우 0.001 mm/min의 연속재하로 변형률 45%에 도달하는데 150hr의 재하기간이 소요됨을 알 수 있다. 이러한 실험결과를

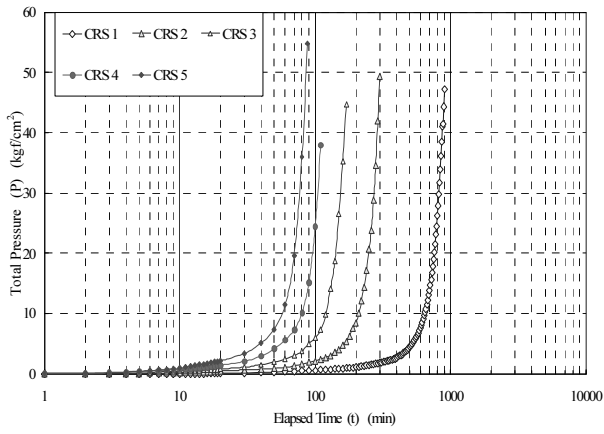
토대로 표준압밀시험과 등변형률 압밀시험의 압축특성을 비교/분석하고자 하였다.

4. 실내시험 결과 및 고찰

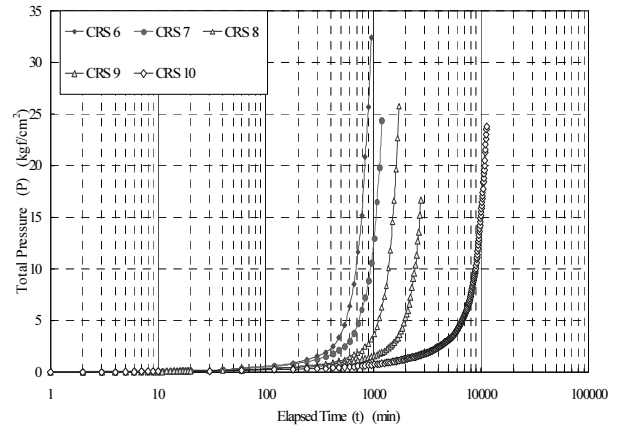
4.1 실내시험결과

4.1.1 변형률 속도에 따른 압축특성

일정변형률 압밀시험에서 입력된 변형률 속도가 압축곡선(e -log p') 또는 압밀정수에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이 연구에서 변형률 속도를 변화시킨 시험 Case CRS 1(0.01 mm/min)~5(0.09 mm/min), CRS 6(0.009 mm/min)~10(0.001 mm/min)에서 얻어진 변형률 속도 변화에 따른 시간-전응력 변화곡선을 나타낸 것이 Fig. 4이고, 시간-유효응력 변화곡선을 나타낸 것이 Fig. 5이다. 그림들에서 알 수 있는 것처럼 등변형률 속도가 빨라질수록 초기에 큰

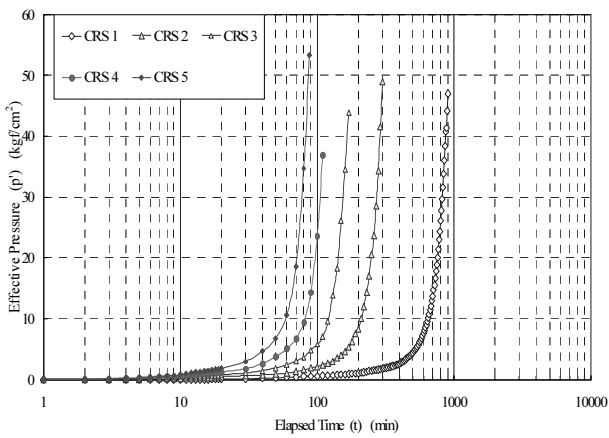


(a) CRS 1 ~ CRS 5

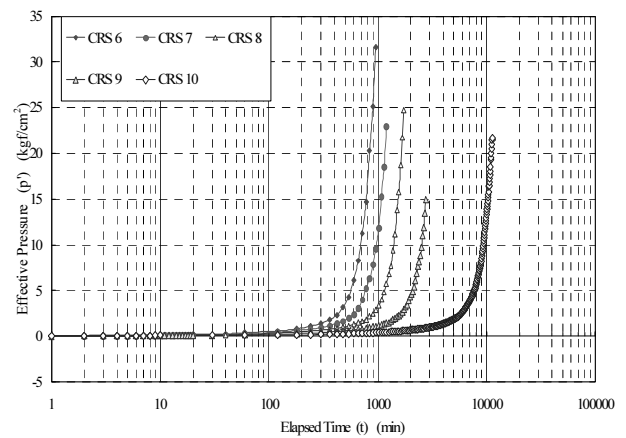


(b) CRS 6 ~ CRS 10

Fig. 4. Time-total stress curves according to various strain rate

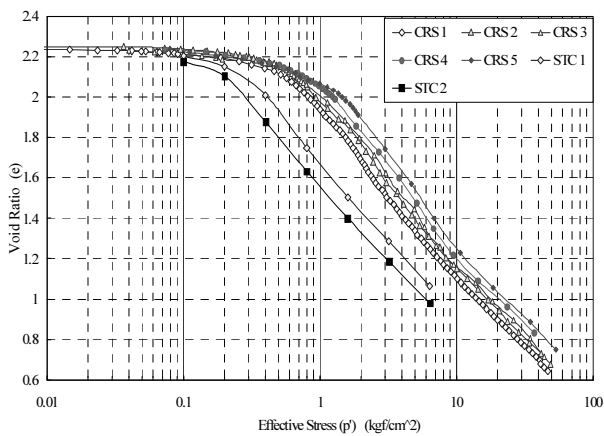


(a) CRS 1 ~ CRS 5

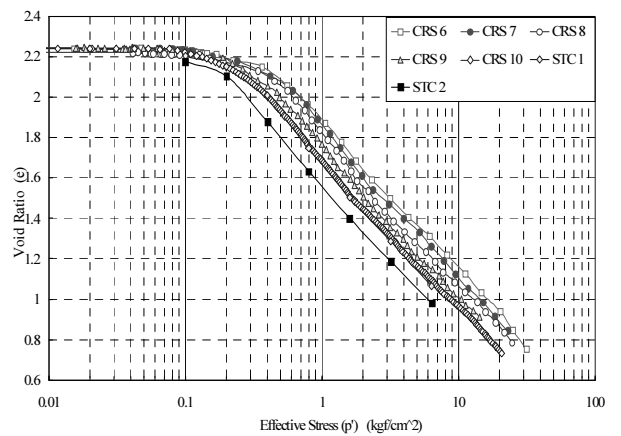


(b) CRS 6 ~ CRS 10

Fig. 5. Time-effective stress curves according to various strain rate



(a) CRS 1 ~ CRS 5



(b) CRS 6 ~ CRS 10

Fig. 6. e - $\log p'$ compression curves

전응력이 발생함을 알 수 있으며, 시간-유효응력 변화곡선에도 동일한 경향이 나타났다. 이 결과는 변형률 속도가 빠르게 될 경우 입자간 마찰저항의 증가를 유발하여 초기에 큰 응력이 발생되고 이로 인해 초기 압밀량의 증가로

간극비가 크게 감소하여 공시체 내부 간극의 감소로 인해 토립자간 맞물림력의 증가에 따른 토립자 골격의 강성 증대로 인해 초기하중이 크게 발생한 것으로 판단된다.

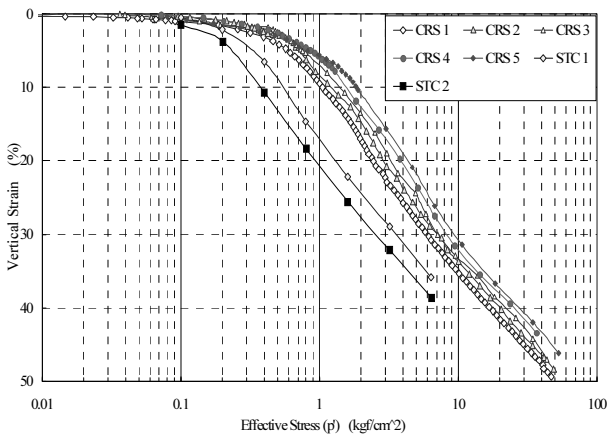
Fig. 6 (a), (b)는 표준압밀시험을 수행한 STC 1(하중단

계별 24hr 재하)와 STC 2(하중단계별 216hr 재하) 및 일정변형률 압밀시험을 수행한 CRS 1~5, CRS 6~10에 대한 압축곡선(e - $\log p$ 곡선)을 나타낸 것이다. 재성형 시료 성형당시의 초기 함수비 차이에 따른 초기 간극비에 약간의 차이를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 것처럼, 단계 하중에 따른 표준압밀시험의 경우 하중단계별 재하시간의 증가에 따른 단계별 2차압밀침하(일정유효응력하에서의 크리프 침하)의 증가와 더불어 적은 압축곡선이 왼쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 또한 등변형률 시험결과에서 변형률 속도의 증가와 더불어 압축곡선이 오른쪽으로 이동하여 압축곡선의 형상에 변형률 속도가 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. Fig. 6 (b)에서 CRS 10(0.001 mm/min)의 경우 총 재하시간이 190hr(7.9 days)로 표준압밀시험과 유사한 재하시간을 가지며 e - $\log p$ 곡선의 형상도 유사한 결과를 나타내었다.

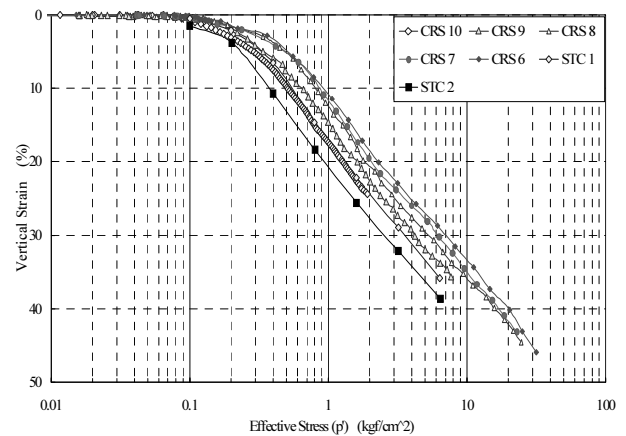
4.1.2 등변형률 속도에 따른 변형률-유효응력 관계
 Fig. 7 (a) (b)는 표준압밀시험을 수행한 STC 1과 STC 2 및 일정변형률 압밀시험을 수행한 CRS 1~5, CRS 6~10에 대해 초기 간극비의 영향을 최소화하기 위해 변형률- $\log p$ 곡선을 나타낸 것이다. e - $\log p$ 곡선과 마찬가지로 변형률 속도의 증가와 더불어 압축곡선이 오른쪽으로 이동하여 압축곡선의 분포에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4.1.3 재하속도에 따른 선행압밀하중 변화 특성
 선행압밀하중은 연약지반의 거동에 많은 영향을 미치는 특성치이다. 일반적으로 선행압밀하중은 과거에 받았던 최대 하중으로 표현되며 압밀속도에 크게 영향을 받는 것으로 보고되어있다(Crawford, 1988).

Fig. 8 (a), (b)는 Casagrande (1936)법을 이용하여 표준압밀시험과 등변형률 시험에 대한 선행압밀하중과 변형속

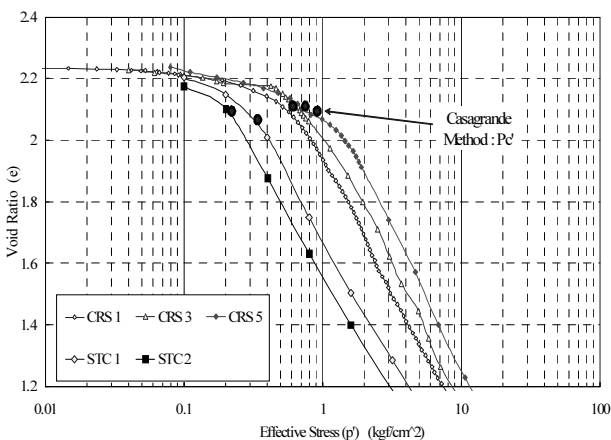


(a) CRS 1 ~ CRS 5

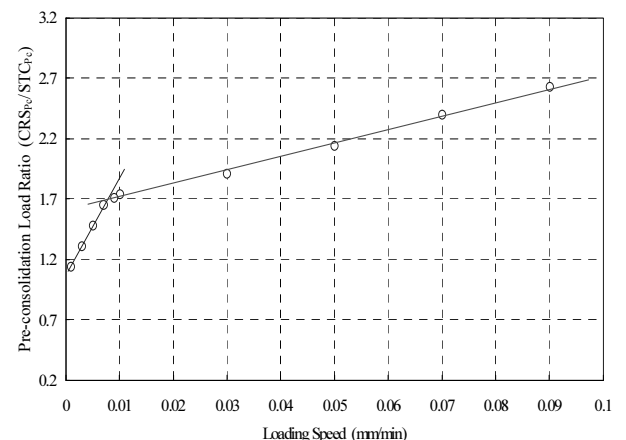


(b) CRS 6 ~ CRS 10

Fig. 7. Curves of strain rate and effective stress



(a) Pre-consolidation pressure



(b) CRS_{P_c}/STC_{P_c} and strain rate

Fig. 8. Relationships of pre-consolidation pressure and strain rate

도에 따른 선행압밀하중의 증가경향(CRS_{Pc}/STC_{Pc} , STC_{Pc} : 표준압밀시험 24hr 재하시의 p_c , CRS_{Pc} : 등변형률 압밀시험에서 변형률 속도에 따른 P_c)의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 8 (a)에서 알 수 있는 것처럼 변형률 속도의 증가와 더불어 p_c 값이 오른쪽으로 이동하며 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 또한 Fig. 8 (b)에서 알 수 있는 것처럼 등변형률 압밀시험에서 구해진 선행압밀하중의 변화가 변형률 속도 0.01mm/min를 기점으로 서로 다른 경향을 보임을 알 수 있다. 이는 변형률 속도의 증가와 더불어 간극의 감소와 점토시료의 강성이 크게 증가되어 큰 선행압밀하중 값을 나타낸 것으로 판단된다.

4.1.4 재하속도에 따른 간극수압 변화특성

가. 간극수압과 유효응력변화

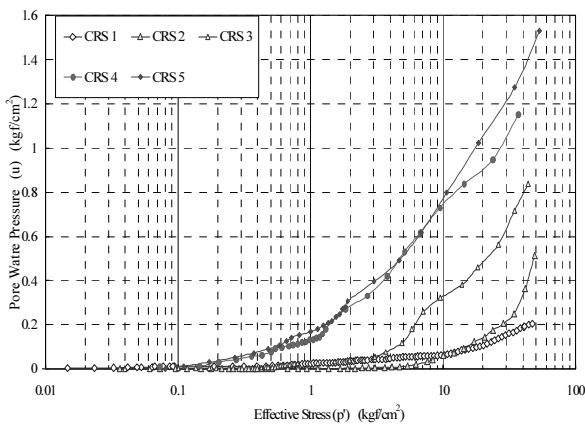
Fig. 9는 간극수압과 유효응력의 관계를 나타낸 것으로 하중재하 초기에는 압밀응력의 대부분을 간극수와 흙 입

자가 일정한 비율로 받게 되며 시료 성형시와 압밀셀과의 불완전한 접촉 등으로 간극수압이 미소하게 증가하지만 선행압밀하중 부근부터 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 과압밀 영역에서의 구조의 안정화가 정규압밀 영역에서 파괴됨으로써 입자간 접촉력 보다 간극수의 배수 지연으로 인한 간극수의 저항이 증가한데 따른 것으로 판단된다. 또한 그림에서 볼 수 있듯이 변형률 속도가 빠를수록 간극수압의 크기도 증가하는 것으로 나타났다.

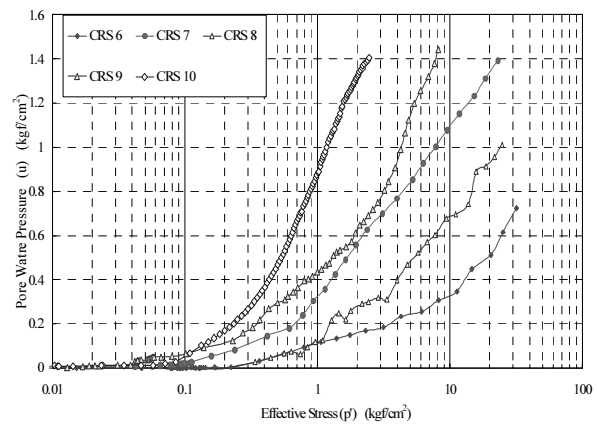
4.1.5 압밀정수와 등변형률 속도의 관계

가. 압축지수의 변화특성

Fig. 10 (a) (b)는 표준압밀시험에서 구한 압축지수와 등변형률 압밀시험을 수행한 CRS 1~5, CRS 6~10에 대한 압축곡선(e - $\log p$ 곡선)으로부터 압밀후반부의 압축곡선의 기울기인 C_c 를 구한 것을 나타낸 것이다. 재성형 시료 성형당시의 초기 함수비 차이에 따른 초기 간극비에 약간의

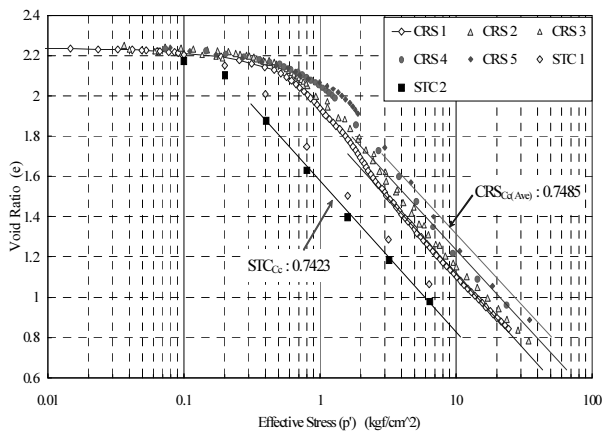


(a) CRS 1 ~ CRS 5

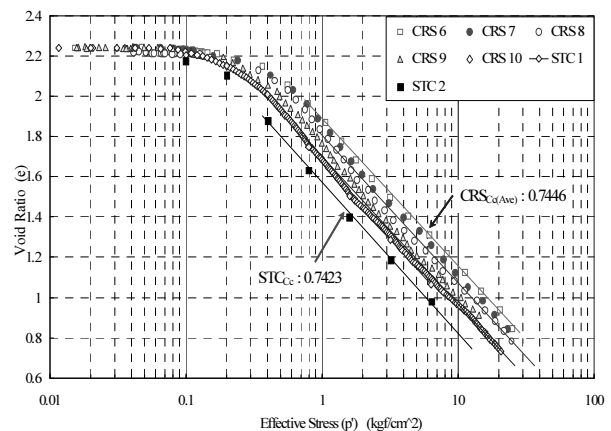


(b) CRS 6 ~ CRS 10

Fig. 9. Relationships of pore water pressure and effective stress

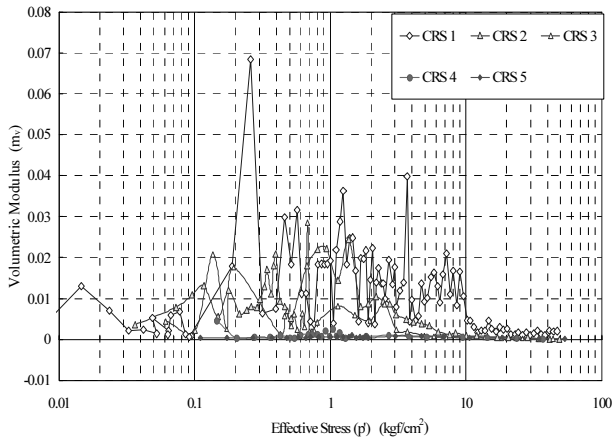


(a) CRS 1 ~ CRS 5

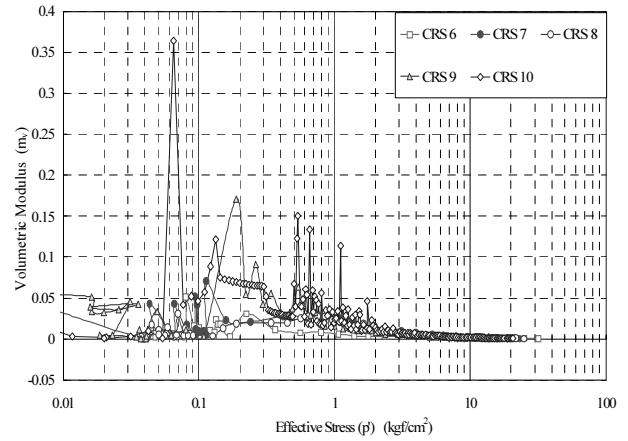


(b) CRS 6 ~ CRS 10

Fig. 10. Variety of compression index from e - $\log p'$ curves

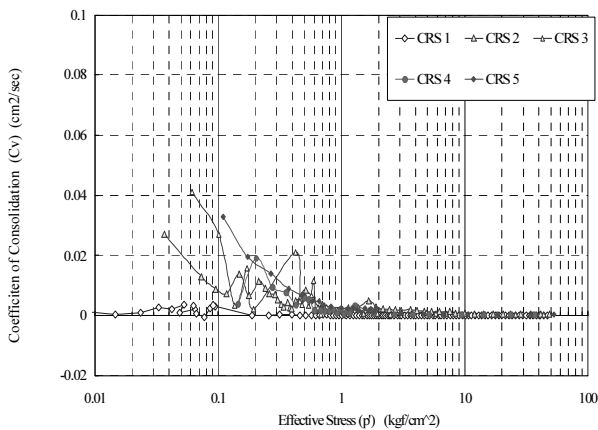


(a) CRS 1~CRS 5

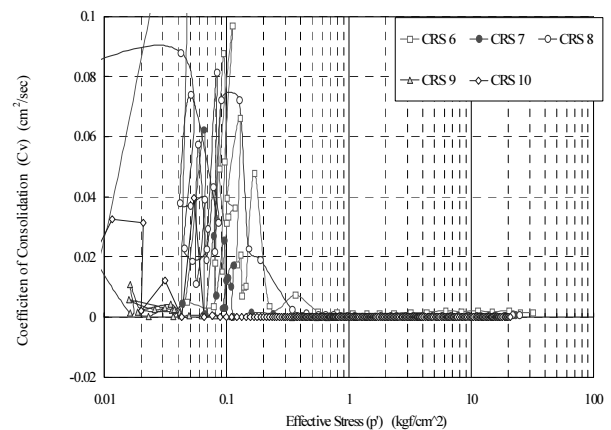


(b) CRS 6~CRS 10

Fig. 11. Relationships of coefficient of volumetric compressibility and effective stress



(a) CRS 1~CRS 5



(b) CRS 6~CRS 10

Fig. 12. Relationships of coefficient of consolidation and effective stress

차이를 나타내고 있으나, 표준압밀시험에서 구한 $C_c=0.7423$ 과 CRS 1~ CRS 5의 평균 $C_c=0.7485$, CRS 6~CRS 10의 평균 $C_c=0.7446$ 으로 변형률 속도의 증가와 더불어 약간 증가하는 경향을 나타내지만, 전체적인 압축지수에 큰 차이는 나타나지 않았다.

나. 체적압축계수의 변화특성

Fig. 11은 등변형률 압밀시험에서 구한 체적압축계수 (m_v)와 유효응력의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 변형률 속도의 증가와 더불어 체적압축계수가 약간 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 상면 배수를 통한 시험 조건으로 인해 하부에서 발생하는 간극수압이 변형과 더불어 불규칙하게 발생되어 등변형률 조건하에서 수행된 시험으로 일정하게 증가되는 전응력으로 계산된 유효응력의 변화가 증가와 감소를 반복하여 체적압축계수 또한 변화함을 알 수 있다. CRS 1과 CRS 10에서의 돌출

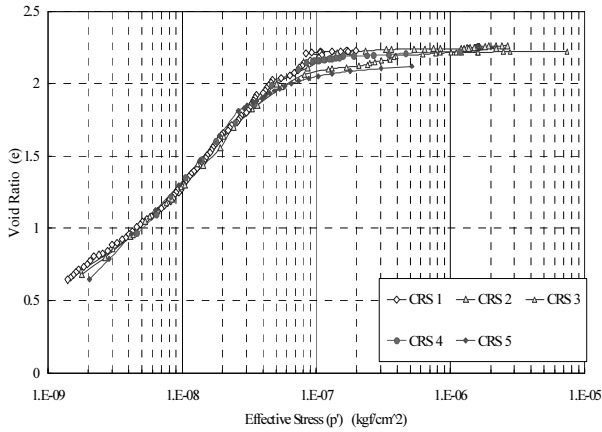
된 한점의 데이터는 시험기의 오작동에 의한 것으로 판단 된다.

다. 압밀계수의 변화특성

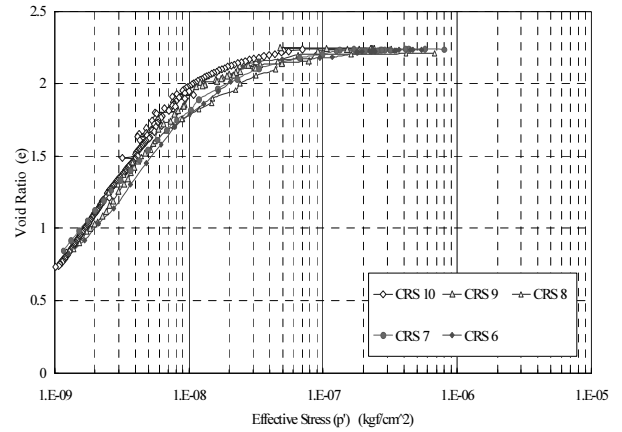
Fig. 12는 일정변형률 압밀이론을 이용하여 구한 압밀계수를 나타낸 것으로, 그림에 나타난 바와 같이 초기 재하 압밀응력에서는 압밀계수가 일정한 경향을 보이지 않고 불규칙적으로 산정되었으나, 선형압밀하중을 넘어선 정규압밀구간에서는 일정한 형태로 수렴하여 변형률 속도의 영향이 적은 것으로 나타났다. 또한, 초기 구간에서 불규칙적으로 산정된 이유는 변형률 속도 때문이 아니라 시료와 하중장치의 불완전한 접촉, 미소변위의 발생, 시료의 교란 때문인 것으로 판단된다.

라. 간극비와 투수계수의 관계

Fig. 13은 간극비의 변화에 따른 투수계수의 변화를 나



(a) CRS 1~CRS 5



(b) CRS 6~CRS 10

Fig. 13. Relationships of void ratio and coefficient of permeability

타낸 것으로, 그림에서 알 수 있듯이 평균적인 변형률 속도가 빠를수록 큰 투수계수를 나타냄을 알 수 있다. 또한 Yoshikuni 등(1994)이 제안한 것처럼 간극비 (e)와 투수계수(log k)사이의 직선관계가 이 실험결과에서도 동일한 경향을 나타내었다. 이는 유효응력의 증가와 변형량의 증가로 인한 간극의 감소와 더불어 투수계수가 감소하는 경향을 나타낸 것으로 판단된다.

5. 결론

이 연구에서는, 균질한 재성형 광양 점토를 이용한 표준 압밀시험과 등변형률 압밀시험결과를 통해 등변형률 속도에 따른 압축특성, 변형률-유효응력관계, 재하속도에 따른 간극수압 변화특성, 압밀정수와 등변형률 속도의 관계를 비교/분석하였다. 이 연구를 통해 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) CRS 10(0.001mm/min)의 경우 총 재하시간이 190 hr(7.9days)로 표준압밀시험과 유사한 재하시간을 가지며 e-log p' 곡선의 형상도 유사한 결과를 나타내었고, 등변형률 속도의 크기가 빠를수록 큰 전응력과 유효응력이 발생함으로써, 압축곡선의 형상에 변형률 속도가 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (2) 선형압밀하중은 간극수압과 유효응력의 곡선으로부터 Casagrande 법을 이용하여 압축곡선의 변곡점을 통해 결정할 수 있었고, 변형률 속도가 빠를수록 선형압밀하중이 증가하는 경향을 나타내었으며, 변형률 속도의 크기에 따라 0.01mm/min를 기점으로 선형 비례

관계가 다르게 나타났다.

- (3) 압축지수는 변형률 속도의 증가와 더불어 약간 증가하는 경향을 나타내었지만 표준압밀시험에서 구한 압축지수와 큰 차이는 없었고, 간극비-투수계수(e-log k) 관계는 압밀후반부에 간극비의 감소와 더불어 투수계수가 감소하여 선형적인 관계를 나타냈으며, 평균적인 변형률 속도가 빠를수록 큰 투수계수를 나타내었다.

Acknowledgement

This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No.PJ009137)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

1. Aboshi, H. and K. and Maruyama, S., (1970), “Constant loading Rate Consolidation Test”, *Soils and Foundations*, Vol.10 pp.43-56.
2. Annual Book of ASTM (1989), “Standard test method for one-dimensional consolidation of using controlled-strain loading”, *American Soc. for Testing and Materials*, Philadelphia, D4186-89. pp.1-5.
3. ASTM D 4186-89, (1989), “Standard Test Method for One-dimensional Consolidation Properties of Soils using Controlled-Strain Loading”, *American Soc. for Testing and Materials*, Philadelphia.
4. Bang, E., (1997), *The Experimental Study on the Consolidation Characteristics of Ooni at Han-River due to Constant Strain Rate of Consolidation Test*, Master thesis of Su-won University.

5. Casgrande, A. (1936), "The determination of the pre-consolidation load and its practical significance", *Proceedings, 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge*, Vol.3, pp.60-64.
6. Crawford, C. B., (1964), "Interpretation of the consolidation test", *J. SMFD., ASCE., SM 5*, pp.87-102.
7. Crawford, C. B., (1988) "On Importance of Rate of Strain in the Consolidation Test", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.11, No.1, pp.60-62.
8. Gorman, C. T., Hopkins, T.C., Deen, R. C. and Drnevich, V.P., (1978) "Constant Rate of Strain and Controlled Gradient Consolidation Testing", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.1, No.1, pp.3-15.
9. Jung, N., (2002), "The Study on the selection of the strain rate for the constant rate-of-strain consolidation test by applying several soil indexes, Master thesis of Daejeon University.
10. Kim, S., (2001), *A study on the Consolidation Characteristics of Soft Clay by CRS and Conventional tests*, Master thesis of Chosun University.
11. Lee, J., (1986), *The Characteristics of Constant Rate of Strain Consolidation on the Nakdong River Soils*, Master thesis of Dong-A University.
12. Lee, N., Lee, D., Chung, S. and Yoo, G., (1996), "Characteristics of Constant Rate of Strain Consolidation on Yang-San clay", *Korea Geotechnical Society of '96 National Conference*, pp.267-276.
13. Oh, I., (2002), *A Study on Consolidation Characteristics of Recomposed Clay by CRSC and Standard Consolidation Tests*, Master thesis of Chonnam National University.
14. Smith, R. E. and Wahls, H. E. (1969), "Consolidation under constant rate of strain", *J. SMFD., ASCE., SM2*, pp.519-539.
15. Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H. and Heiderg, S., (1971), "Consolidation at Constant Rate of Strain", *J. SMFD, ASCE, SM 10*, pp.1393-1413.
16. Yoshikuni, H., (1990), "An Interpretation of Consolidation and Compression Curves of Soft Clayey Soils (I), *Proceedings of Japanese Geotechnical Society*, No.3, pp.307-310.
17. Yoshikuni, H., (1991), "An Interpretation of Consolidation and Compression Curves of Soft Clayey Soils (IV), *Proceedings of Japanese Geotechnical Society*, No.3, pp.354-355.
18. Yoshikuni, H. and Kusakabe, O., Hirao, T. & Ikegami, S., 1994. "Elasto-viscous modeling of time dependent behaviour of clay." *Proc. of the 13th ICSMFE, New Delhi*, Vol.1, pp.417-420.