

## 대형자연시료를 이용한 광양점토의 압밀특성에 관한 실험적 연구

### Experimental Study on the Consolidation Characteristics of Kwang-Yang Clay by Large Block Sampling

김종국<sup>1)</sup>, Jong-Kook Kim, 유성진<sup>2)</sup>, Yu, Seong-Jin, 채영수<sup>3)</sup>, Young-Su Chae

<sup>1)</sup> 한국건설품질시험원 지반환경연구실, 실장, Chief of Geo.-Env. Reaserch Dev., Institution of Korea Construction Quality Test & Analysis.

<sup>2)</sup> 인본건설(주) 엔지니어링사업본부, 사장, President, Civil Engineering Div., Inwon E & C, Ltd.

<sup>3)</sup> 수원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Suwon University

**SYNOPSIS** : In this study, we have compared with the differences between the extent of sampling disturbance and consolidation characteristics by experiments, which are consolidation test and constant rate of strain consolidation(CRS), large size consolidation tests( $\phi=250\text{mm}$ ,  $H=90\text{mm}$ ), which have been performed with Kwang-Yang Clay samples. The effects on sampling disturbance to consolidation characteristics of soft clay have been inverstigated by using soil samples obtained from large block sampling and piston sampling methods. Through a few experiments, we've got important results which are that the consoildation parameter of large block sample( $P_c$ ,  $C_c$ ,  $C_v$ ) is much larger than the value of parameter of piston sample. We've also found the fact that the large block sample using the large size sampler is much better than piston sample in the quality of goods to lessen the effects on disturbance of sampling. When compared to the parameter of consolidation along with the methods of experiment, we found that the result performed by large size consolidation test is the greatest one and CRS is much better than standard consolidation test to seek for proper parameter.

**Keywords** : large block sampling, large size consolidation tests, sampling disturbance

## 1. 서 론

최근 대단위 주거단지 및 공공시설에 대한 투자가 활발히 진행되면서 연안매립 및 해상개발 등의 연약지반 활용에 대한 관심이 고조되고 있다. 연약지반은 구성광물, 퇴적조건 및 응력이력 등에 따라 물리·역학적 특성이 다르게 나타난다. 이러한 지반은 침하변형에 의한 균열, 파손을 비롯해 대형붕괴사고 등을 야기 할 수 있어 사전에 충분한 지반특성을 파악하여 보다 정확한 지반정보를 토대로 설계에 적용하는 것이 중요하다. 특히, 연약점토의 역학특성을 평가하는데 있어 자연시료를 채취하여 실내시험을 시행할 경우 시료의 교란 영향에 따라 시험결과치의 신뢰성이 저하되는 문제가 발생하게 된다. 시료교란은 원지반의 강도 및 압축특성에 영향을 미치게 되므로 연약지반의 정확한 거동을 파악하기 위해서는 교란을 최소화하고 합리적인 설계지반정수를 산정하여야 한다. Dazawa and Wakamei(1976), Nagaraj et al.(1990), Shogaki(1994) 등이 시료교란이 압밀특성에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였고, 최근 국내에서도 박성재 외(2001) 등은 채취방법에 따른 시료교란도 및 특성변화에 관한 연구 등을 수행하였으며, 이용길 외(1998), 김영진(2000), 김종국(2003) 등은 대구형샘플러 개발을 통해 다양한 시험에 활용하였다.

최근, 시료의 교란을 최소화하기 위한 방법으로 대형자연시료를 채취하여 다양한 실내시험에 이용하는 추세가 증가하고 있다. 본 연구에서는 광양지역에서 NX크기의 피스톤 샘플러와 대구경샘플러를 이용하여 자연시료를 채취하였으며, 표준압밀시험(SC)과 일정변형률압밀시험(CRS) 그리고, 대형표준압밀시험(LSC)을 실시하고 그 결과를 비교·분석하여 연약점토의 압밀특성 및 시료 교란특성을 살펴보았다.

## 2. 시험개요

### 2.1 연구대상지반

연구대상지반은 전남 광양항 배후단지 일원으로 여수반도 및 묘도와 남해도로로 둘러싸인 반폐쇄적인 지형으로 광양만은 지형적 특성과 침진강 등에 의한 하천수의 유입으로 삼각주, 조간대, 조하대, 수로 등에 의하여 상이한 퇴적환경이 발달되었으며, 그 주변은 선캠브리아기 변성암 복합체 및 백악기 퇴적암, 화성암류로 구성되었다. 이 지역의 지반특성은 원지반위에 점성토로 준설했던 매립층이 약 6m내외의 연약한 상태를 보이며, 기본적인 지반정수는 그림 1과 같다. 그림 1에서 자연함수비는 19.6~181.4%로 심도가 깊어짐에 따라 점진적으로 감소하고 액상한계 27.5~114.9%보다 더 크게 나타나고 있다. 그리고, 소성지수는 83.1~82.7% 범위를 보이며, 초기 간극비는 0.739~4.491, 전체 단위중량은 1.051~1.993tf/m<sup>2</sup>, 비배수강도는 0.025~7.61tf/m<sup>2</sup>의 분포범위를 보이는 등 매우 연약한 점토지반의 지반특성을 보이고 있다.

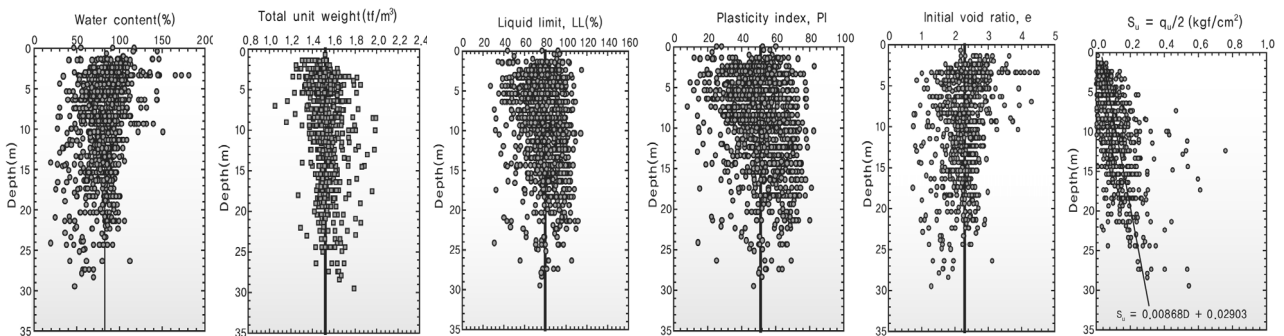


그림 1. 광양점토의 지반특성

### 2.2 시료 및 실험방법

본 연구의 시험시료는 광양항 서측부지(2A구간-4개소)와 동측배후부지(2B구간-5개소), 그리고 인접철도부지(2C구간-3개소)로 구분하여 피스톤 시료와 대형자연시료를 채취하였다.



사진 1. 대형자연시료 채취과정

대형자연시료는 시추공의 시료채취심도까지 오거(Ø=500mm)를 이용하여 steel casing을 설치하고, 천공 슬라임을 제거한 후 대구경샘플러(Ø=400mm, H=600mm)를 룯드에 연결 채취심도까지 내린 다음 샘플러를 지반에 관입하게 되면 특별하게 고안된 하부 시료절단장치로 시료를 절단하여 샘플러를 끌어 올리게 된다. 채취한 시료는 샘플러 내부의 시료를 추출하고 표면정리 후 왁스와 랩을 이용 완전히 밀봉한다(사진 1 참조). 또한, 동일 위치와 심도에서 피스톤샘플러로 자연시료를 채취하였다. 이처럼 동일한 심도에서 채취한 NX크기의 피스톤시료에 대하여 표준압밀시험(Ø=60mm, H=20mm)과 일정변형률압밀시험을 수행하였으며, 대구경샘플러로 채취한 대형자연시료(Ø=300mm, H=350mm)에 대하여 대형압밀시험(Ø=250mm, H=90mm)을 실시하였다.



a) 대형자연시료      b) 대형시료추출기      c) 시료 추출      d) 대형압밀시료성형      e) 대형압밀시험

사진 2. 대형압밀시험(LSC) 과정

실험방법은 대형자연시료의 압밀거동 특성에 따른 교란영향을 조사하기 위하여 대형압밀 셀을 개발하여 대형 크기의 대형표준압밀시험(LSC)을 실시하였다. 시료추출 및 성형시 교란을 최소화 하기 위하여 속도 저감기를 장착한 대형시료추출기(사진 2b)를 개발하여 이용하였으며, 대형압밀셀은 사진 2d)와 같고, 그 크기는 ELE의 압밀셀 형태로 시료성형시 Ø=250mm, H=90mm의 크기로 수행할 수 있도록 제작하였다. 본 시험의 각 구간에서 채취한 자연시료의 물리적 성질은 표 1과 같다.

표 1. 기본 물성시험결과

구 분		W <sub>n</sub> (%)	G <sub>s</sub>	LL (%)	PI (%)	e <sub>0</sub>	U.S.C.S
시험 결과	2A구간	53.3~86.8	2.686~2.714	52.6~85.3	27.7~54.3	1.486~2.335	CH
	2B구간	62.8~105.9	2.689~2.706	60.5~92.2	34.3~59.9	1.920~2.872	CH
	2C구간	44.4~64.8	2.701~2.706	44.5~59.6	20.7~33.7	1.220~1.811	CL~CH

### 3. 실험결과 분석

#### 3.1 압밀거동 분석

대상지역의 연약지반에서 채취한 피스톤시료에 대해 일반 표준압밀시험(SC)과 일정변형률압밀시험(CRS)을, 대형자연시료에 대해 대형표준압밀시험(LSC)을 실시하였으며, 그 결과 중 대표적으로 그림 2~그림 5와 같이 나타내었다. 그림 2는 동일한 위치에서 채취한 시료에 대해 시험방법에 따른 압축곡선을 비교한 결과로 피스톤시료에 대한 표준압밀시험의 압축곡선은 대형자연시료에 대한 LSC시험의 압축곡선보다 완만한 경사의 기울기의 보이고 있으며, 선행압밀응력이 LSC시험의 값보다 작게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 CRS시험결과는 표준압밀시험의 결과보다 크고 LSC시험결과보다 다소 작은 값을 보이고 있다. 또한, 그림 3은 시료채취방법에 따른 압축곡선을 비교한 것으로, 피스톤시료를 이용한 표준압밀시험의 압축곡선은 LSC시험의 압축곡선보다 대체적으로 완만한 경사를 보이며, 선행압

밀응력과 압축지수가 적아지는 것을 알 수 있다. 이처럼 자연시료의 시료교란 영향으로 압축곡선에 미치는 영향이 커지는 것을 확인할 수 있다.

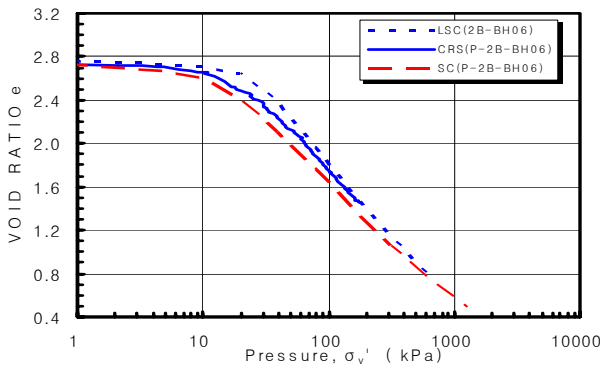


그림 2. 압밀시험방법에 따른 e -log P곡선 비교

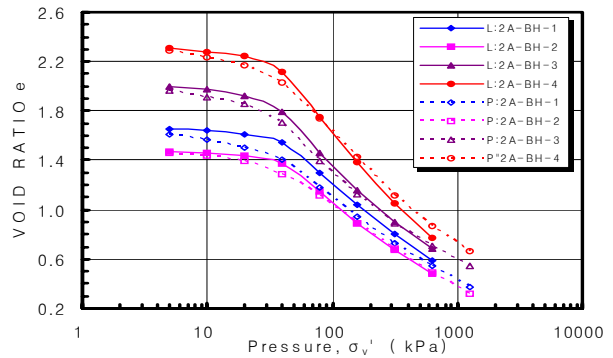


그림 3. 채취시료에 따른 e -log P곡선 비교 (2A구간)

그림 4와 그림 5는 채취시료에 대해 각 시험방법에 따른 압밀계수를 나타낸 것이다. 그림에서 압밀계수는 지층에 따라 그 값이 매우 다양하게 분포하고 있는 것을 알 수 있으며, LSC시험의 압밀계수는 선행압밀응력 이전에는 상당히 큰 값의 범위를 보이다가 선행압밀응력 이후에는 압밀계수의 값이 작아져 SC시험의 압밀계수 값과 유사한 범위로 수렴되는 경향을 보이고 있다. 즉, 항복응력 이전의 정규압밀영역에서의 압밀계수는 약 2.3~5.1배 정도의 큰 차이를 보이다가 항복응력 이후에는 그 차이가 점차 작아져 거의 같은 값을 보이는 바와 같이, 시료교란은 항복이전의 정규압밀영역에서 크게 발생하여 압밀특성에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

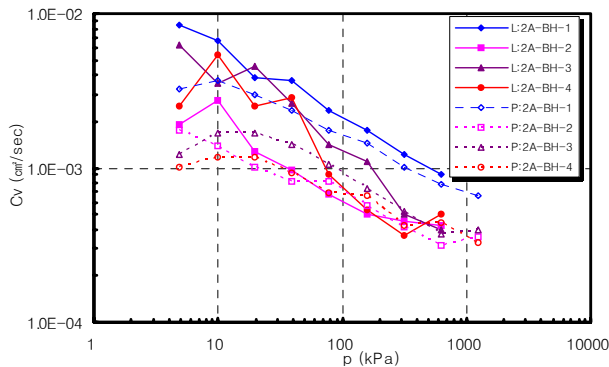


그림 4. LSC시험과 SC시험의 압밀계수 비교 (2A구간)

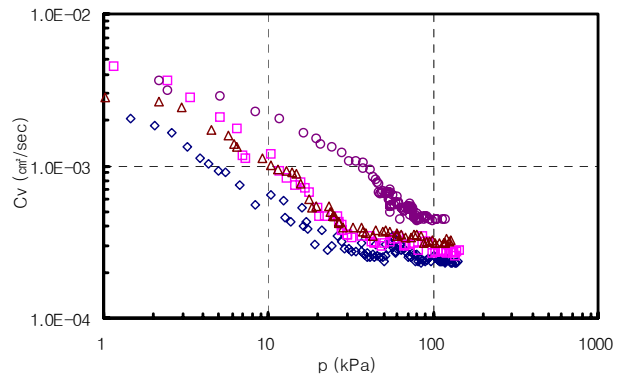


그림 5. CRS시험에 의한 압밀계수 (2A구간)

그림 6에서는 압밀시험방법에 따른 선행압밀응력( $P_c'$ )과 압축지수( $C_c$ )를 비교하였다. 피스톤시료에 대한 표준압밀시험(SC)의 압밀정수는 대형자연시료에 대해 실시한 LSC시험의 압밀정수보다 적은 값을 보이고 있는 것을 알 수 있다. LSC시험의 선행압밀응력( $P_c'$ )은 표준압밀시험(SC)의 선행압밀응력( $P_c'$ )보다 1.2~23%정도 크게 나타났으며, LSC시험의 압축지수( $C_c$ )는 표준압밀시험(SC)의  $C_c$ 보다 약 8~47%정도 크게 나타났다. CRS시험의 경우, 표준압밀시험(SC)의 선행압밀응력( $P_c'$ ) 값보다 약 1~12%정도 크게 나타났으며, 압축지수( $C_c$ )는 약 2~25%정도의 차이를 보인다.

이들의 평균값을 보면, 피스톤시료의 SC시험의  $P_c'$ 은 CRS시험의  $P_c'$ 보다 약 5%정도 적은 값을 보이고, 대형자연시료의 LSC시험의  $P_c'$ 보다 약 9%정도 적게 평가되었다. 그리고, 압축지수는 CRS시험의  $C_c$ 값보다 약 9%정도 적은 값을 보이고, 대형자연시료의 LSC시험의  $P_c'$ 보다 약 19%정도 작게 평가되

었다.

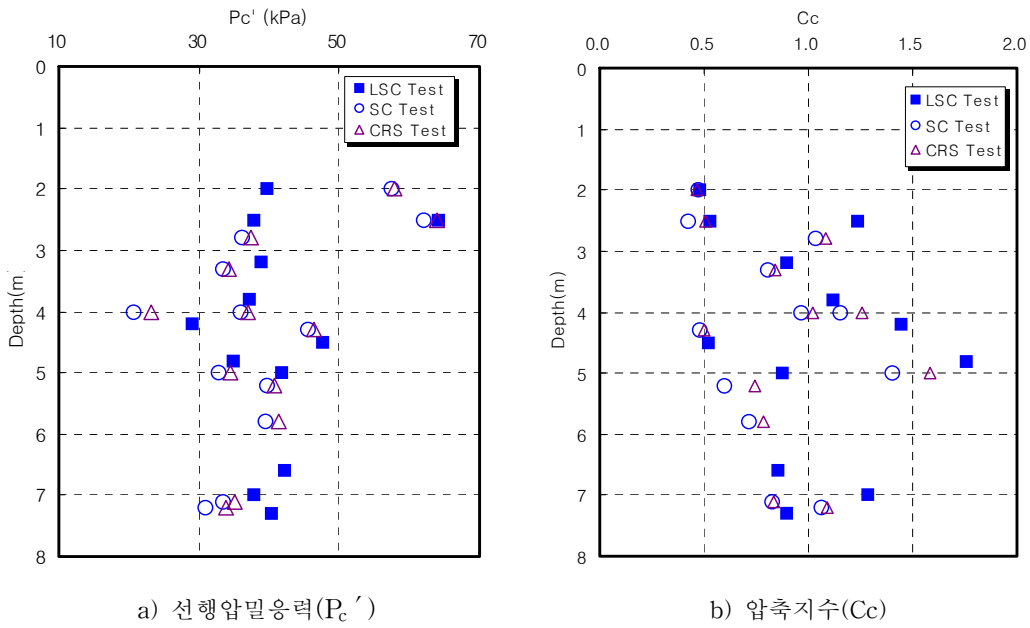


그림 6. 압밀시험방법에 따른 압밀정수 비교

### 3.2 시료 교란특성 분석

시료채취로부터 실내시험까지의 과정에서 역학적 교란 및 응력해방에 따른 교란이 발생하여 역학적 특성치의 신뢰도를 저하시킬 가능성이 높다. Shogaki(1996)는 교란정도가 다른 압밀시험결과로부터 그림 7과 같은 압밀곡선을 얻었으며, 시료가 교란되면 압밀곡선이 완만해지고 원위치응력에 해당하는 응력에 도달할 때의 변형이 커진다는 원리로부터 Andersen and Kolstad(1979)는 시료의 품질등급(SQD)을 제안하였다.

압밀시험에서 시료채취 심도의 유효상재하중에 해당하는 하중 재하시에 발생하는 체적변형률의 크기에 의해 표 2와 같이 분류하여 시료교란도를 평가하였다. 그리고 Lunne et al.(1997)은 체적변형률과 유사한 개념으로써  $\Delta e/e_0$ 의 비로써 시료의 품질을 4개의 등급으로 분류하였고 표 2에 함께 나타내었다.

$$\Delta e = e_0 - e_1 \quad (1)$$

여기서,  $e_0$  는 초기간극비이고,  $e_1$  : 유효상재응력에서의 간극비이다.

표 2. 체적변형률에 의한 시료품질평가

SQD(1979)		NGI(1979)		Lunne et al(1997)	
체적변형률( $\epsilon_v$ , %)	시료품질등급	체적변형률( $\epsilon_v$ , %)	시료품질등급	$\Delta e/e_0$	시료품질등급
< 1	A	< 1	Very good to excellent	0 ~ 0.04	Very good to excellent
1 ~ 2	B	1 ~ 2	Good	0.04 ~ 0.07	Good to fair
2 ~ 4	C	2 ~ 4	Fair	0.07 ~ 0.14	Poor
4 ~ 8	D	4 ~ 10	Poor	> 0.14	Very poor
> 8	E	> 10	Very poor	-	-

채취 시료의 품질평가를 통해 시료교란도를 평가할 수 있으며, 시료교란이 압밀특성에 미치는 영향을 파악할 수 있게 된다. 시료교란 영향이 큰 경우 압밀곡선의 완화로 선행압밀하중을 구하기 힘들거나, 작아지는 경우가 많고, 선행압밀응력 이전의 압축지수는 커지고 그 이후는 작아지며, 선행압밀응력 전후의 압밀계수 · 투수계수 · 2차 압밀계수는 그림 8과 같이 많은 차이가 발생하게 된다. 이러한 영향을 고려해 압밀특성 보정이 필요하게 된다.

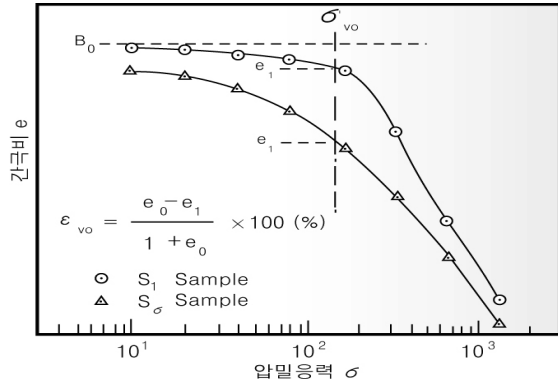


그림 7. 압밀시험에서 체적변형률(Shogaki,1996)

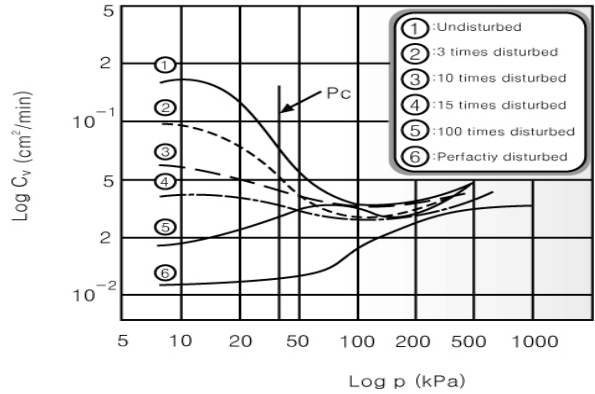
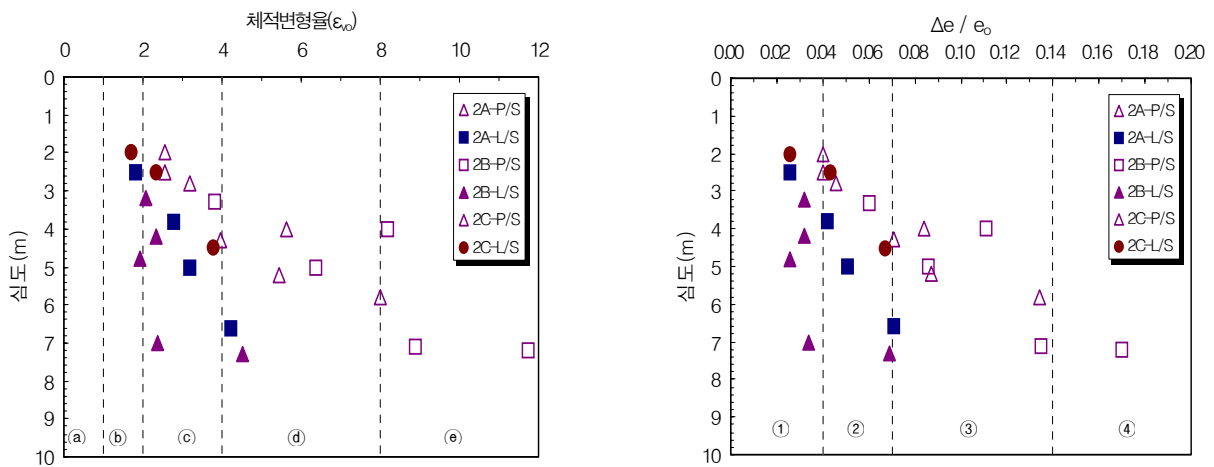


그림 8. 시료교란과 압밀계수와의 관계 (Dazawa and Wakamei, 1976)

그림 9는 각 구간에서 채취한 피스톤시료와 대형자연시료의 압밀시험결과를 이용하여 산정한 교란도 분석결과이다. 그림 9a)는 체적변형률에 의한 교란도를, 그림 9b)는 간극비 변화량에 따른 교란도를 도시하였다.



a) 체적변형률에 의한 시료교란도 평가

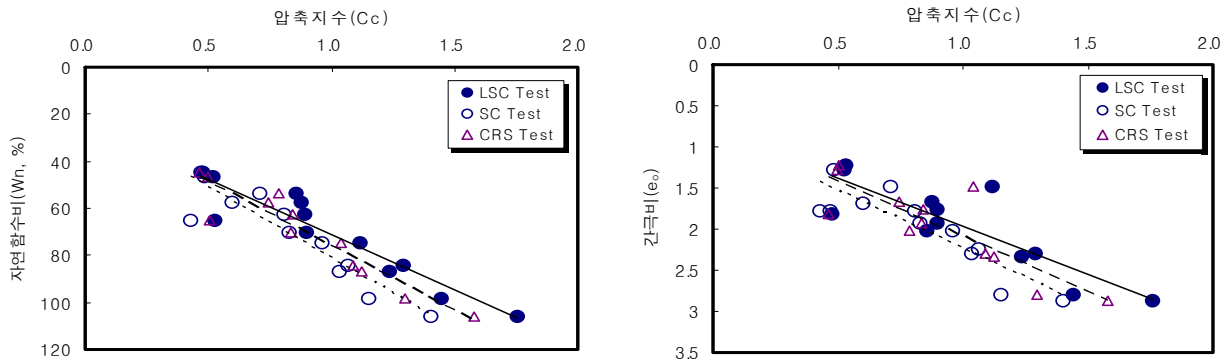
b) 간극비 변화량에 따른 시료교란도 평가

그림 9. 피스톤시료와 대형자연시료의 교란도 비교

그림 9a)에서 대형자연시료는 체적변형률이 1.83~4.52 범위를 보이고 있는 반면에 피스톤시료는 2.5~11.74 범위를 보이고 있어 대형자연시료의 교란도가 약 1.1~5.0배정도 더 적은 것으로 나타났다. 그림 9b)에서도 대형자연시료는 약 83%정도 양호한 등급으로 평가된 반면, 피스톤시료는 약 48%정도의 보통상태의 품질을 보이고 있어 대형자연시료의 품질이 약 1.7배정도 더 좋은 상태로 평가되었다. 다만, 현장에서 채취한 자연시료는 채취심도에 따라 교란도가 점진적으로 증가하는 것으로 나타나 깊은 심도에서의 시료채취시 많은 주의가 필요한 것으로 사료된다.

### 3.3 압밀특성 보정

시료의 교란은 원지반의 압밀 특성에 영향을 미치게 되어 왜곡된 설계를 수반하게 될 수 있다. 이에 대하여 압밀시험결과의 신뢰성을 제고하기 위하여 교란도에 따른 보정방법을 통하여 설계에 적용하는 방안이 대두되고 있다. 압밀특성의 보정방법으로는 Schmertmann(1953), Nagaraj(1990), Shogaki(1996) 방법 등이 있으며, Terzaghi and Peck(1967), Worth and Wood(1978) 등의 경험식에 의하여 압밀정수를 유추하는 방법들이 많이 이용되고 있다. 본 연구에서는 대상부지가 고소성 점토지반인 점을 감안하여 시료교란에 따른 압축지수의 영향을 고찰하기 하기 위하여 Schmertmann(1953)과 Terzaghi and Peck(1967), Worth and Wood(1978), NAVFAC(1971) 등의 경험적인 방법으로 압축지수를 보정하고 대형압밀시험(LSC)으로 구한 압축지수와와의 상호관계를 비교하였다.



a) 압축지수(Cc) - 자연함수비(Wn)      b) 압축지수(Cc) - 간극비(e<sub>0</sub>)  
 그림 10. 대상점토의 압축지수 특성

그림 10에서와 같이 자연함수비 및 간극비가 커질수록 압축지수도 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 압축지수(Cc)는 자연함수비와 간극비가 커질수록 시험방법에 따른 압축지수의 값의 편차가 점차 커지는 것으로 나타나, 고소성 점토일수록 시료 교란이 압밀정수에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있다.

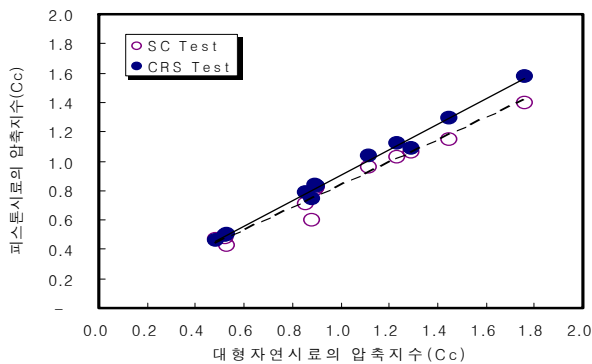


그림 11. 대형자연시료와 피스톤시료의 압축지수 비교

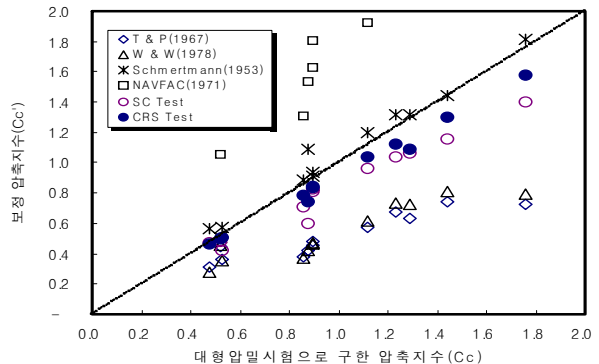


그림 12. 여러방법에 의한 압축지수의 보정

그림 11과 같이 대형자연시료의 압축지수에 대해 피스톤시료를 이용한 경우의 표준압밀시험(SC)과 CRS시험의 압축지수를 비교하였다. CRS시험은 적용되는 하중조건이나 하중증가 방식이 상이하지만 압축지수가 약간 더 크게 산정되어 시료교란 영향을 다소 저감할 수 있는 것으로 사료된다. 다만, CRS시험결과의 선형압밀응력과 압축지수는 변형률 속도 변화에 따라 약간 증감될 수 있는 점을 고려하여 지반특성에 적절한 변형률 속도를 가하는 것이 중요하다. 그림 12는 피스톤시료의 SC시험으로 구한 압축

지수를 각 보정방법에 따라 수정한 결과이다. Terzaghi and Peck(1967) 및 Worth and Wood(1978)의 경험식에 의한 보정압축지수는 표준압밀시험(SC)의 압축지수보다 낮게 산정되었으며, NAVFAC(1971)의 경험 방법은 상대히 과대평가되는 것으로 나타났다. 또한, 대형압밀시험(LSC)으로 구한 압축지수는 Schmertmann(1953)의 보정 방법으로 구한 압축지수와 상당히 근사한 값을 보이고 있는 것으로 나타났으며, 샘플 시료의 직경이 클수록 시료교란 영향이 크게 감소하는 경향을 보여주고 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 광양 점토에 대하여 피스톤시료와 대형자연시료를 이용하여 표준압밀시험(SC)과 일정변형률압밀시험(CRS) 그리고, 대형압밀시험(LSC)을 실시하여 압밀특성 및 시료교란 특성을 살펴보았으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 피스톤시료에 대한 표준압밀시험(SC)의 압밀정수는 대형자연시료에 대한 LSC시험의 압밀정수보다 적은 값을 보이는 것으로 나타났다. 평균적으로 피스톤시료의 SC시험의 선형압밀응력( $P_c'$ )은 CRS 시험의  $P_c'$ 보다 약 5%정도 작고, 대형자연시료의 LSC시험의  $P_c'$ 보다 약 9%정도 작게 평가되었으며, 압축지수( $C_c$ )는 CRS시험의  $C_c$ 값보다 약 9%정도 작고, 대형자연시료의 LSC시험의  $C_c$ 보다 약 19%정도 작게 평가되었다. 또한, LSC시험의 압밀계수( $C_v$ )는 항복응력 이전의 정규압밀영역에서 약 2.3~5.1배 정도의 큰 차이를 보이다가 항복응력 이후에는 그 차이가 점차 작아져 거의 같은 값을 보이고 있는 것으로 나타났다.
2. 보정방법에 따른 압축지수는 Terzaghi and Peck(1967) 및 Worth and Wood(1978)의 경험식에 의한 압축지수는 실내의 표준압밀시험(SC)의 압축지수보다 낮게 산정되었으며, NAVFAC(1971)의 경험 방법은 상대히 과대평가 되었다. CRS시험의 경우 압축지수가 약간 증가됨에 따라 시료교란 영향을 저감할 수 있는 것으로 나타났으며, LSC시험으로 구한 압축지수는 Schmertmann(1953)의 보정 방법으로 구한 압축지수와 상당히 근사한 값을 보이고 있는 것으로 나타났다.
3. 고소성 점토 시료에 대해 시료의 크기가 클수록 교란도는 상당히 양호한 품질을 확보 할 수 있는 것으로 나타났으며, 대형자연시료의 LSC시험을 통하여 산정한 압밀정수를 토대로 축적 data의 신뢰성 확보 및 물성·역학 특성치 상호관계의 정밀한 분석을 바탕으로 설계에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. 김영진,(2000), “비교란 시료 채취가 가능한 대구경샘플러의 개발 및 적용”. 한국건설기술연구원, 국제심포지엄 논문집, pp.27-71.
2. 김종국, 이강운, 채영수,(2003), “대형자연시료를 이용한 시료교란의 공학적특성 연구”, 대한토목학회 논문집, pp.3742~3747.
3. 박성재, 오원택, 정경환,(2001), “종류가 다른 샘플러 채취된 점성토의 토질특성에 관한 연구”, 한국지반공학회
4. 이용길, 이영남(1998), “채취된 시료의 교란도에 따른 특성변화에 대한 연구”, 현대기술연구소 연구보고서, 96GEO 02, 현대기술연구소.
5. Dazawa and Wakamei,(1976), "Variation of Coefficient of Consolidation on Disturbed Cohesive Soil." D. S. Construction Engineering Technical Report, No. 9, 101-107.
6. Lunne, T., Berre, T. & Strandvik, S.(1997), "Sample Disturbance Effect in Soft Low Plastic Norwegian Clay, "Symp. on Developments in Soil and Pavement Mechanics, Rio de Janeiro, 81-102.
7. Nagaraj, T.S., Murthy, B.R.S., Vatsala, A. and Joshi, R.C, (1990). "Analysis of Compressibility of Sensitive Soils".
8. Shogaki, T. (1996). "A Method of Correction Consolidation Parameter of Sample Disturbance Using Volumetric Strain". Soil and Foundation, Vol. 36, No. 3, pp. 123~131.