대형블럭시료를 이용한 해성점토 시료의 품질 평가
Evaluation of Sample Quality for Marine Clay by Large Block Samples

김종국[1], Jong-Kook Kim, 윤원섭[2], Won-Sub Yoon, 김지희[3], Ji-Hee Kim, 채영수[4], Young-Soo Chae

[1]한국건설품질시험원 지반공학센타 팀장, Chief of Geo-Team., Institution of Korea Construction Quality Test&Analysis.
[2]수원대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.
[3]수원대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.
[4]수원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.

SYNOPSIS : In this study, obtained large block sample and piston sample of marine clay in korea were performed unconfined compression and consolidation test. Soil properties of two type samples such as failure strain, between two parameter's ratio(E_{50} and q_u), and volumetric strain were used to evaluate sample disturbance. The result, large block samples show a low disturbance than piston samples. Therefore, we suggest new sample disturbance evaluated method through the relation of OCR and volumaric strain at shallow of marine clay in Korea and suggest new sample disturbance classified method by subdivided grade for failure strain of unconfined compression test.

Key words : Large block samples, Sample disturbance, Volumaric strain

1. 서 론

여러 구조물의 기초 및 지반공학적 문제점을 해결하기 위해 설계지반정수를 산정하기 위한 시험이 널리 이루어지고 있다. 이 과정에서 응력해방, 시료채취기술, 핸들링방법 등의 원인에 의해 시료교란이 발생하게 된다. 시료교란으로 인해 산정된 지반정수는 신뢰도가 많이 낮아질 수밖에 없다. 외국에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 샘플링 방법에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 국내에서는 이러한 연구들이 많이 부족하며 채취한 시료에 대해서도 교란정도에 대한 평가가 제대로 이루어지지 않는 실정이다. 이는 구조물의 안정성과 경제성에 영향을 미칠 수 있다.

본 연구에서는 국내 서해안과 남해안 지역의 해성점토 지반을 대상으로 채취한 대형블록시료와 피스톤시료를 이용하여 일축압축시험 및 압밀시험을 수행하여 시료의 교란도를 분석하여 국내 점토지반에 적합한 새로운 시료교란도 평가방법을 제안하고자 한다.

2. 시료의 품질 평가 방법

2.1 체적변형률에 의한 방법

불교란시료의 품질은 응력-변위 곡선, 간극수압 결과를 통해 평가할 수 있고 점성토에 있어서 현장 유효응력으로 압밀 시 체적변형률을 이용하여 시료의 품질을 파악할 수 있다. Shogaki(1996)는 교란

정도가 다른 압밀시험결과로부터 그림 1과 같은 압밀곡선을 얻었다. 이때 체적변형률은 식 (1)과 같다. Andersen과 Kolstad(1979)는 시료교란의 정량적 평가에 자주 이용되고 있는 방법으로 시료의 품질등급(SQD, Specimen Quality Designation)을 제안하였다. 이 방법은 시료가 교란될수록 압밀곡선이 완만해 지고 원위치응력과 동일한 응력에 도달할 때까지의 변형이 커진다는 원리이다.

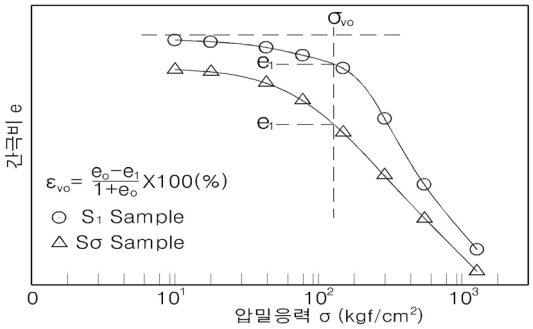


그림 1. 압밀시험에서 체적변형률(Shogaki, 1996)

$$\varepsilon_v = \frac{e_o - e_1}{1+e_o} \times 100(\%) \qquad (1)$$

여기서 e_0는 초기간극비, e_1은 유효상재응력에 해당하는 간극비이다.

표 1은 체적변형률에 의한 시료품질 평가방법 및 이와 유사한 방법, 그리고 Lunne 등(1997)이 SQD와 유사한 개념으로써 초기 간극비 e_0와 초기 간극비에서 항복시까지의 변화 $\triangle e$의 비 로서 $\triangle e/e_o$ 시료의 품질을 4개의 등급으로 시료의 품질평가방법을 정리하였다. 또한 Kleven 등(1986)은 과압밀비(OCR)과 심도를 고려하여 표 2와 같이 체적변형률과 유효응력에 따른 시료교란의 분류를 제안하였다.

표 1. 체적변형률에 의한 시료품질평가

SQD(1979)		NGI(1979)		Lunne 등(1997)	
체적변형률 (ε_v, %)	시료품질등급	체적변형률 (ε_v, %)	시료품질등급	$\triangle e/e_o$	시료품질등급
< 1	A (①)	< 1	very good to excellent (①)	0 ~ 0.04	very good to excellent (①)
1 ~ 2	B (②)	1 ~ 2	good (②)	0.04 ~ 0.07	good to fair (②)
2 ~ 4	C (③)	2 ~ 4	fair (③)	0.07 ~ 0.14	Poor (③)
4 ~ 8	D (④)	4 ~ 10	poor (④)	> 0.14	very poor (④)
> 8	E (⑤)	> 10	very poor (⑤)	-	-

표 2. 체적변형률과 유효응력에 따른 시료교란의 분류(Kleven, 1986)

OCR	깊이 (m)	아주 양호 (ε_v, %) <	양 호 < (ε_v, %) <	불 량 < (ε_v, %)
1~1.1	0~10 10~50	3 2	3~5 2~4	5 4
1.2~1.5	0~10 10~50	2 1	2~4 1~3	4 3
1.5~2	0~10 10~50	1.5 1	1.5~3.5 1.0~2.5	3.5 2.5
2~3	0~10 10~50	1 0.75	1~3 0.75~2	3 2
3~8	0~10 10~50	0.5 0.5	0.5~1 0.5~2	1 2
8<	0~10	(0.25)	(0.25)~(0.5)	(0.5)

2.2 일축압축시험에 의한 방법

일반적으로 시료가 교란될수록 일축압축강도(q_u)와 50% 변형 시의 탄성계수(E_{50})가 감소하고, 극한강도 시의 변형률(ε_p)은 증가한다. 일축압축강도시험에서 교란도의 평가는 정성적이기는 하지만 ε_p 값의 범위를 이용하는 경우가 많다. Skempton 등(1957)에 의해 E_{50}과(q_u) 비 $\alpha = E_{50}/(q_u) = 1/\varepsilon_{50}$가 클수록 불교란시료로 판정할 수 있으며 이는 시료의 교란정도를 판정하는 기준으로 사용 가능하다. Tanaka 등(1996)은 $E_i = 210C_u$의 관계가 있으며 보통의 불교란시료에서는 교란이 심할수록 그 계수가 감소함을 발견하였다. 불교란시료에 대한 α의 값은 London 점토에서 140, 해성점토에서 165~210 정도라고 하였다(황정규, 1999). 또한 q_u가 클수록 E_{50}도 비례적으로 증가하며 파괴변형률 6% 기준 시 E_{50}과(q_u) 비가 50을 기준으로 불교란은 대략 그 비가 50~243(평균 110), 교란은 32~50(평균 42)의 범위에 존재한다. Horiuchi 등(1987)은 E_{50}/q_u를 사용하여 교란도를 정의하고 표 3과 같이 이 값이 50이하에서는 교란시료이며 50이상이면 불교란시료로 평가하고 있다. 그리고 파괴변형률(ε_f)를 이용하여 교란도를 평가하는 경우에는 파괴변형률이 6%이상은 교란된 결과로 평가한다.

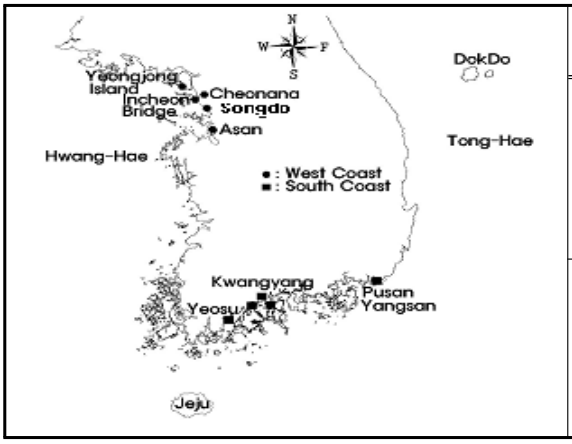
표 3. 일축압축시험에 의한 시료교란 판정

구 분	E_{50}/q_u 기준	파괴변형(ε_f) 기준
불교란시료	50이상	6%이하
교란시료	50이하	6%이상

3. 실험시료 및 시험

본 연구에서 사용한 불교란 시료는 크게 서해안 지역과 남해안 지역의 해성점토지반에서 채취한 대형블럭시료와 동일 위치에서 채취한 피스톤시료를 이용하였다. 표 4는 시료채취 위치 및 현황이다.

표 4. 서·남해안지역의 시료채취위치 및 현황



대상 지역		시료채취 현황	
		대형블럭시료	피스톤시료
서해안지역	영종도 #1 -인천공항	6개소	6개소
	영종도 #2 -인천대교	5개소	4개소
	인천청라지구	7개소	5개소
	인천송도지구	6개소	4개소
	아산인주지방	3개소	2개소
남해안지역	진주광양철도	2개소	2개소
	광양서측인접	8개소	4개소
	광양우회도로	2개소	2개소
	광양동측배후	9개소	4개소
	부산양산지구	3개소	3개소

이들 지역의 지반특성은 서해안은 조수간만의 차가 다소 크고 지표면에서 심도 10m~17m정도까지의 N치가 3~5정도의 연약한 지층으로 무기질 실트 혹은 무기질 점토층으로 구성되어 있다. 남해안의 연약지층은 지표면에서 심도 22m이상으로 소성이 큰 무기질 실트에서 고 소성 점토층이 존재하였다. 각 지역의 대표적인 물리적 특성은 표 5와 같다.

표 5. 대형블럭시료의 물리적 특성

시 료 구 분		W_n(%)	Gs	LL(%)	PI(%)	e_o	U.S.C.S
서해안	영종인천공항	32.4~49.4	2.65~2.69	28.4~53.7	9.5~28.3	0.94~1.31	CL
	영종인천대교	41.1~48.2	2.67~2.72	34.5~45.6	11.5~21.8	1.12~1.29	CL
	김포,청라지구	35.5~57.1	2.70~2.73	31.1~55.0	6.2~29.5	0.96~1.55	CL
	인천송도지구	29.8~42.5	2.67~2.73	27.1~36.7	2.6~14.2	0.81~1.16	ML, CL
	아산인주지방	34.5~36.2	2.69~2.70	30.2~35.6	7.7~12.8	0.93~0.97	CL
남해안	광양배후단지	63.3~105.9	2.71~2.73	66.3~92.2	42.1~59.9	1.74~2.81	CH
	광양진주철도	47.2~64.8	2.72~2.72	40.5~57.4	16.1~30.9	1.28~1.76	CL, CH
	광향우회도로	70.5~89.7	2.69~2.72	68.5~75.3	40.0~50.8	1.65~2.40	CL, CH
	광양서측철도	71.0~94.4	2.69~2.72	61.6~95.2	35.7~66.6	2.05~2.54	CH
	부산양산지구	53.6~88.9	2.71~2.74	53.6~88.3	26.9~46.2	1.48~2.54	CH

본 연구에서는 현장에서 채취한 대형블럭시료와 피스톤시료에 대한 시료교란도 분석을 통해 교란효과를 평가하기 위하여 일축압축강도시험 및 표준압밀시험을 비롯해 대형압밀시험을 실시하였으며 시험방법은 표 6과 같다.

표 6. 실험시료 및 시험방법

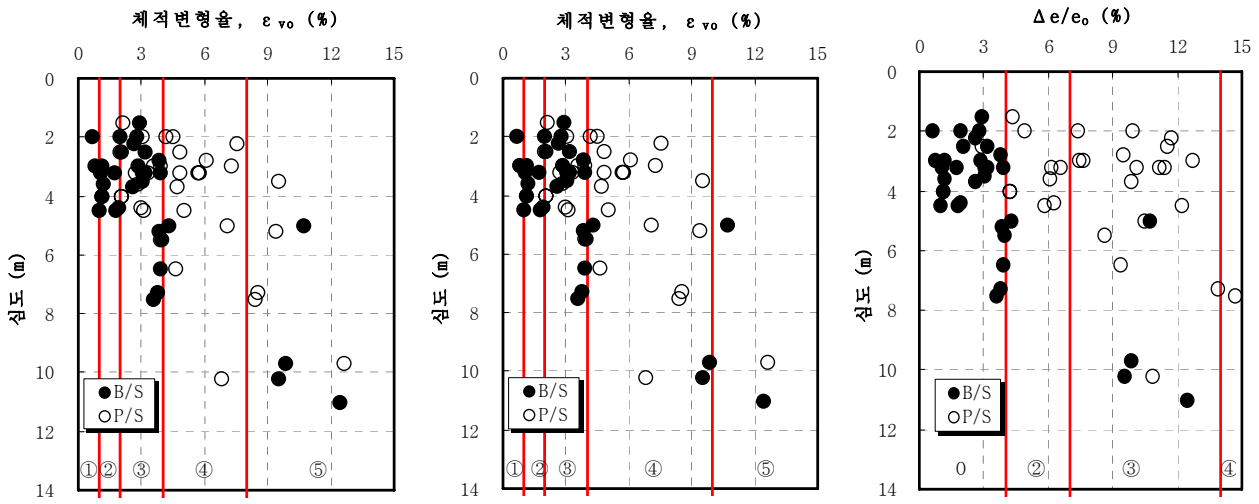
시 험 항 목	시료크기	시험방법	사용시료	적용지역
일축압축강도시험	Ø=50㎜, H=100㎜	KS F 2314	대형, 피스톤시료	공통
표준압밀시험(SC)	Ø=60㎜, H=20㎜	KS F 2316	피스톤	공통
대형압밀시험(LSC)	Ø=250㎜, H=90㎜	KS F 2316 준용	대형블럭시료	공통

4. 시험결과 분석

4.1 체적변형률 평가

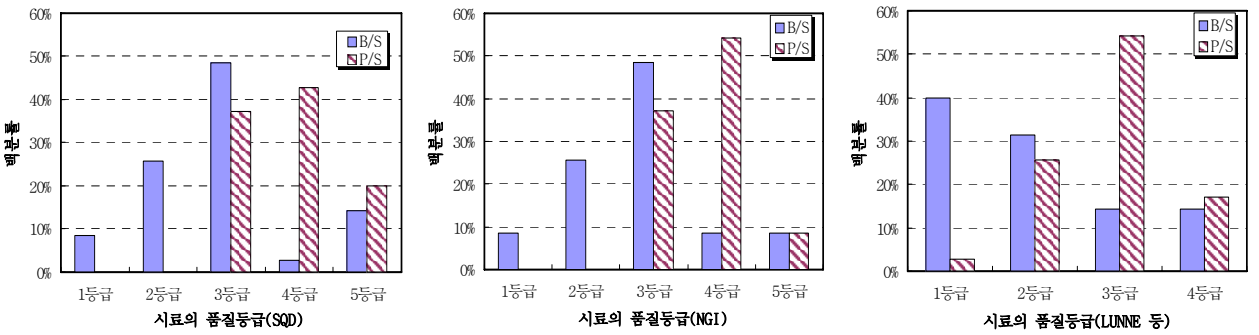
체적변형률에 의한 시료교란도는 표 1의 SQD(Specimen Quality Designation, 1979), NGI(1979), Lunne 등(1997)의 제안방법에 따라 그림 2(a), 그림 2(b), 그림 2(c)와 같이 각각의 시료교란도를 평가하였으며, 이들 방법에 따른 등급별 분포 비는 그림 3과 같다.

그림 3(a)의 SQD에서 대형블럭시료의 체적변형률은 대부분 우수 A(①)등급에서 보통 C(③)등급으로 약 83%의 높은 비를 보이고 있으나, 피스톤시료의 체적변형률은 C(③)등급이하의 불량 D(④) 내지 매우 불량 E(⑤)등급이 67%정도의 비를 보인다. NGI의 방법은 대형블럭시료는 ①등급에서 ③등급으로 약 83%의 비를 보인 반면 피스톤시료는 ③등급이하의 ④ 내지 ⑤등급이 63%정도로 나타났다. Lunne 등(1997)방법에 의한 대형블럭시료의 ε_v은 very good(①)에서 good(②)등급으로 약 71%의 비를 보이고 피스톤시료의 ε_v는 poor(③)에서 very poor(④)에 해당되는 결과가 71%로 평가되었다. 이와 같이 대형블럭시료의 체적변형률은 피스톤시료의 체적변형률보다 ①~③등급으로 대체적으로 시료의 품질이 양호하였다.



(a) SQD(1979) (b) NGI(1979) (c) Lunne 등(1997)

그림 2. 체적변형률 및 간극비 변화량에 의한 시료의 품질평가



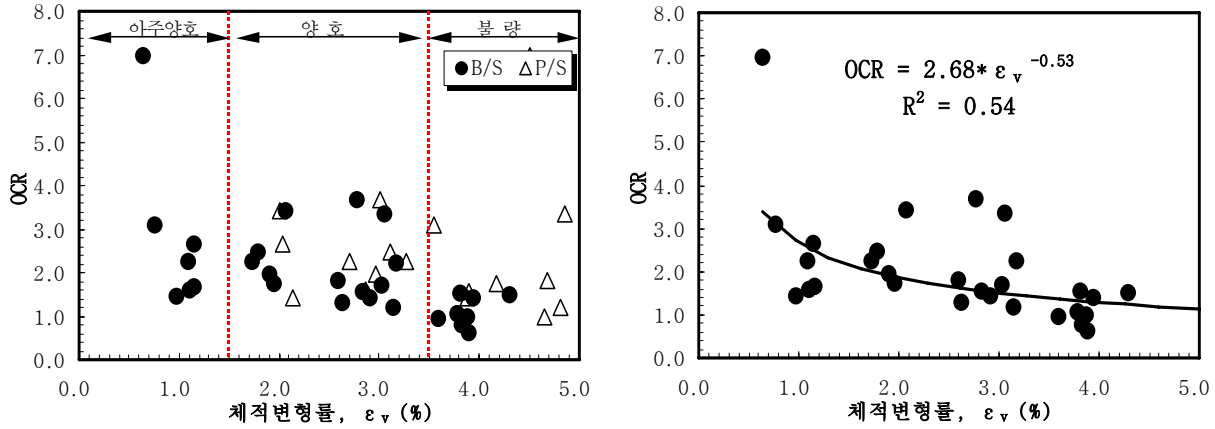
(a) SQD(1979) (b) NGI(1979) (c) Lunne 등(1997)

그림 3. 체적변형률 및 간극비 변화량에 의한 시료의 품질등급 비교

또한 Kleven 등(1986)의 체적변형률과 심도에 따른 응력이력을 기준으로 현장유효응력으로 압밀 시 발생하는 체적변형률은 그림 4와 같다. 그림 4(a)의 평가 결과 대형블럭시료의 체적변형률은 평균 1.5%로 양호~아주 양호한 상태를 보이며, 피스톤시료는 평균 2.9%로 양호~불량한 상태를 보여준다. 이는 대형블럭시료 채취에 의한 시료가 피스톤 채취에 의한 시료에 비해 시료 채취 시 교란을 적게 받았을 것이라 판단된다. 그림 4(b)는 대형자연시료의 OCR과 체적변형률과의 관계를 회귀분석 한 것이다. 이처럼 OCR과 체적변형률과의 관계를 통해 시료의 품질을 평가하는 방법을 착안하고 시료의 품질평가 방법은 다음 식(2)와 같다.

$$OCR = 2.68 \times \varepsilon_v^{-0.53} \qquad (2)$$

여기서 , OCR는 과압밀비이고, ε_v : 체적변형률이다. 식 (2)는 심도 0m~10m에서 채취한 대형자연시료의 체적변형률을 얻어진 결과로 Kleven 등(1986)의 체적변형률과 심도에 따른 응력이력의 기준과 유사하였다.

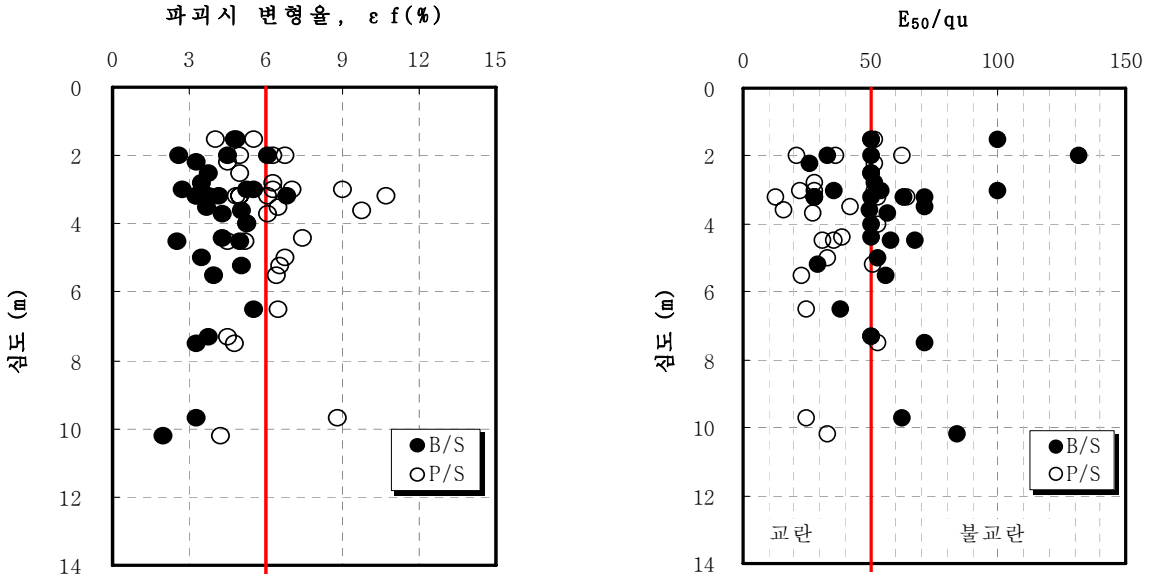


(a) OCR 과 체적변형률에 의한 시료교란도 (b) OCR 과 체적변형률과의 관계

그림 4. 체적변형률과 OCR에 따른 시료의 품질평가

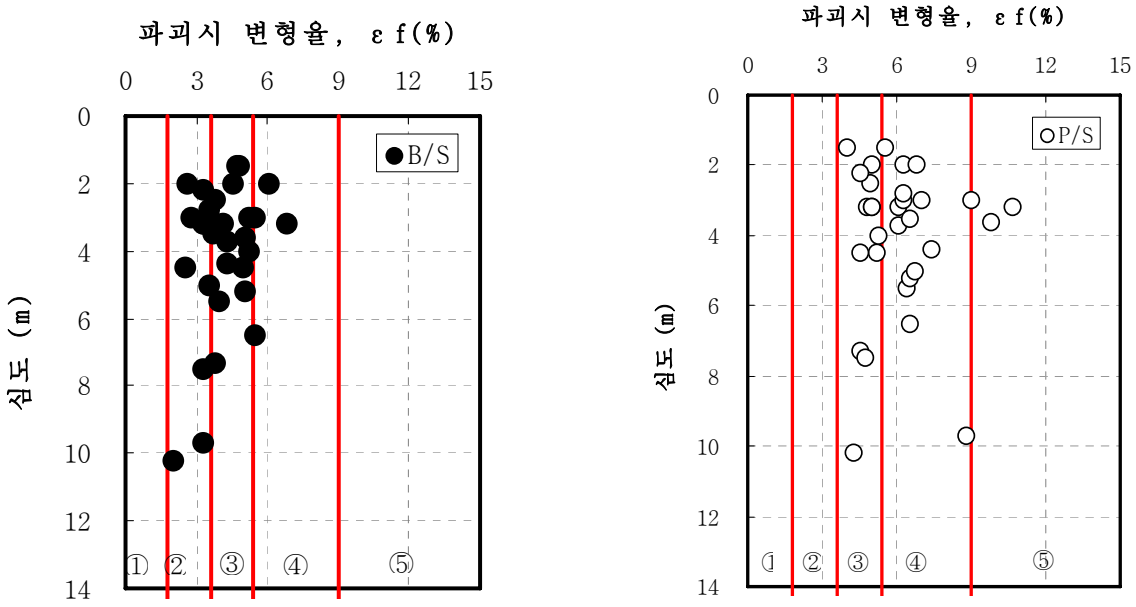
4.2 일축압축시험결과 분석

그림 5(a)의 일축압축시험에 의한 대형블럭시료의 파괴변형률은 약 2.0%~6.8%로 전체적으로 6%보다 작은 상태를 보이며 피스톤시료의 파괴변형률은 4.0%~10.7%의 범위로 나타나 일부 시료는 교란 정도가 다소 심하였다. 또한 대형블럭시료는 파괴변형률이 6%보다 적은 값에서는 94%를, 파괴변형률이 6%보다 큰 값에서는 6%를 나타낸 반면 피스톤시료는 6%이하가 45%를, 6%이상에서는 55%를 보였다. 그림 5(b)의 대형블럭시료의 E_{50}과(q_u) 비는 26~132의 범위를 보이고 피스톤시료의 E_{50}과(q_u) 비는 13~65의 범위로 나타나 시료 교란정도가 클수록 E_{50}과(q_u) 비가 감소하였다.



(a) 파괴변형률 (b) E_{50}과 q_u의 비

그림 5. 일축압축시험의 E_{50}과 $q_{u/2}$의 비 와 파괴변형률에 의한 시료의 품질평가



(a) 대형불럭시료(B/S) (b) 피스톤시료(P/S)

그림 6. 일축압축시험의 파괴변형률에 의한 새로운 시료교란의 분류

이와 같이 일축압축시험의 표 3의 파괴변형률과 E_{50}과(q_u) 비를 기준으로 시료교란도를 분석하는 경우 분포범위가 분산되고 신뢰도가 낮아졌다. 즉 세분화된 체적변형률을 이용하는 경우보다 분산도가 크고 신뢰도가 낮았다. 따라서 그림 6과 같이 일축압축시험의 파괴변형률에 의한 새로운 시료교란 분류를 하였다. 이때 시료교란 분류 등급은 표 7과 같다.

표 7. 파괴변형률 ε_f과 시료의 품질등급

파괴변형률, ε_f (%)	시료의 품질 등급
< 1.8	very good to excellent (①)
1.8 ~ 3.6	good (②)
3.6 ~ 5.4	fair (③)
5.4 ~ 9	poor (④)
> 9	very poor (⑤)

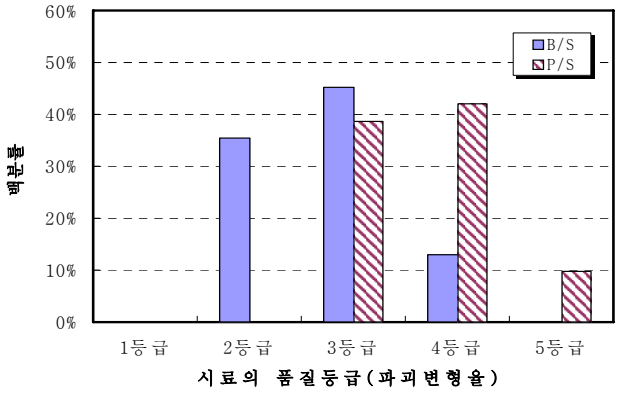


그림 7. 파괴변형률에 의한 시료 품질등급 비교

그림 7과 같이 파괴변형률을 세분하여 시료교란도를 평가한 경우 체적변형률을 이용한 경우의 시료교란 정도와 유사하였다.

5. 결 언

본 연구에서는 서해안과 남해안 지역의 해성점토 지반에서 채취한 대형블록시료와 피스톤시료를 이용하여 일축압축시험결과 및 압밀시험결과를 통해 시료의 교란도를 파악하였으며 그 결론은 다음과 같다.

1. 시료의 품질평가 결과 대형블럭시료의 체적변형률은 피스톤시료의 체적변형률에 비해 A(①)등급에서 보통 C(③)등급으로 대체적으로 블럭시료의 품질이 양호하였다.
2. Kleven 등(1986)의 체적변형률과 유효응력에 따른 시료의 교란도에서 대형블럭시료의 평균 체적변형률은 1.5%로 양호~아주 양호한 상태를 보였으며 피스톤시료는 평균 2.9%로 양호~불량한 상태를 보였다.
3. 대형블럭시료의 과압밀비(OCR)과 체적변형률과의 관계를 통해 회귀 분석하여 식 $OCR=2.68\times\varepsilon_v^{-0.53}$ 와 같이 표현되며, Kleven 등(1986)의 체적변형률과 심도에 따른 응력이력의 기준의 시료교란 분류표와 유사하였다.
4. 일축압축시험에 의한 시료교란 판정방법의 파괴변형률과 E_{50}과(q_u)비를 기준으로 시료교란도를 분석하는 경우 분포범위가 분산되고 신뢰도가 낮아지는 점을 감안하여 파괴변형률의 등급을 세분하여 새로운 시료교란 평가방법(표 7)을 제시하였다.

참고문헌

1. 김종국, 이강운, 채영수, (2003a), “대형자연시료를 이용한 시료교란의 공학적 특성 연구”, 대한토목학회 정기학술발표회논문집, pp.3742~3747.
2. 유성진, 김종국, 채영수, (2005), “대형자연시료를 이용한 광양점토의 압밀특성에 관한 실험적 연구”, 한국지반공학회공동학술발표회논문집, pp.429~436.
3. 유성진, 김종국, 채영수, (2005), “대형압밀시험에 의한 광양점토의 시료 교란특성에 관한 연구”, 대한토목학회 정기학술발표회논문집, pp.3503~3506.
4. 한국지반공학회, (2003), “지반조사결과의 해석과 이용”, 구미서관, pp.91~167.
5. 황정규, (1999), “건설기술자를 위한 지반공학의 기초이론”, 구미서관, pp.349~391.
6. Andresen, A., Kolstad P., (1979), "The NGI 54mm Samplers for Undisturbed Sampling of Clay and Representative Sampling of Coarser Materials", Proceeding International Symposium on Soil Sampling, Singapore, pp.1~9.
7. Horiuchi, T., Eiki, A., Funahashi, M., (1987), "Evaluation of Sample Quality by Thin-well Sampling Tube", Proceeding of the 8th Asian Regional ICSMFE, 1.
8. Kleven, A., Lacasse, S., Andersen, K.H., (1986), "Foundation Engineering Criteria for Gravity Platforms", Soil Parameters for Offshore Foundation design, PartⅡ, Repor 40013-34, 9, April.
9. Lunne, T., Berre, T., Strandvik, S., (1997), "Sample Disturbance Effect in Soft Low Pplastic Norwegian Clay", Symposium on Developments in Soil and Pavement Mechanics, Rio de Janeiro, pp.81~102.
10. Shogaki, T., (1996). "A Method of Correction Consolidation Parameter of Sample Disturbance Using Volumetric Strain", Soil and Foundations, 36(3), pp.123~131.
11. Skempton, A.W., Henkel, D.J., (1957), "Tests on London Clay from Deep Borings at Paddington", Victoria and South Bank. 4th ICSMFE, 1, pp.100~106.
12. Tanaka, H., Sharma, P., Tsuchida, T., Tanaka, M., (1996), "Comparative Study on Sample Quality Using Several Types of Samplers", Soils and Foundations, 36(2), pp.37~68.