

해성점토의 교란이 압축특성에 미치는 영향

Effect of Disturbance on the Compressibility Characteristics of Marine Clay

유 성 진¹ Yu, Sung-Jin

채 영 수² Chae, Young-Su

김 종 국³ Kim, Jong-Kook

윤 원 섭⁴ Yoon, Won-Sub

Abstract

This study describes compressive characteristics of marine clay at southwestern coast in Korea by large block and piston samples. Through the analysis of disturbance effect and various consolidation test, consolidation result shows that volumetric strain from large block samples is lower than piston samples and compression index of large block samples is larger than piston samples value. We suggest new empirical equation of compression index by the effect of compression index following sampling method. If consolidation settlement is presumed using empirical equation of compression index, the result will be more reasonable in predicting settlement than that obtained by the decision of compressibility characteristics from piston samples.

요 지

본 연구에서는 국내 서·남해안의 해성점토를 대상으로 대형블럭시료와 피스톤 시료를 채취하여 시료교란도 평가와 다양한 압밀시험을 수행하였다. 이들 시료에 대하여 시료교란도 분석과 다양한 압밀시험결과를 토대로 압축특성을 규명하였다. 그 결과, 대형블럭시료는 압밀시험으로 결정한 선형압밀하중까지의 체적변형률이 피스톤 시료보다 더 낮으며, 대형블럭시료에서 얻은 압축지수는 피스톤시료의 압축지수에 비하여 더 크게 나타났다. 샘플링 방법에 따른 압축지수에 끼치는 영향을 고려하여 새로운 압축지수 추정식을 제안하였다. 이러한 압축지수 제안식을 이용하여 압밀 침하량을 추정한다면, 관행적으로 피스톤 샘플로부터 압축특성을 결정하는 경우보다 더 합리적으로 침하량을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

Keywords : Compression index, Large block sample, 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 나타나며, 침하변형에 의한 균열, 파손을 비

롯해 대형붕괴사고 등을 야기 할 수 있다. 특히, 연약점토의 역학적특성을 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 산

1 정회원, 동남이엔씨(주) 부회장 (Member, Vice Chairman, DONGNAM E&C Co., Ltd., ysjin50@nate.com, 교신저자)

2 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., The Univ. of Suwon)

3 정회원, 한국건설품질시험원 지반공학센터 부장 (Member, Chief Engineer, Institution of Korea Construction Quality Test)

4 정회원, 수원대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., The Univ. of Suwon.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

정하여야 한다. 그러므로 지반정수의 불확실성에 따른 설계를 예측하는 것이 필요하며 이를 현장조건에 맞게 적용되어야 한다. 지반정수는 연약지반 설계에 있어서 공사기간과 공사비 증가는 물론 안전사고 발생의 원인이 되는 경우 사회, 경제적으로 미치는 영향이 대단히 크다 할 수 있다. 그러나 지반정수 산정의 신뢰성 제고를 위해 시료교란특성을 고려한 다양한 시험법과 시료 채취방법을 제안하여 자료축적을 하고 있으나, 현실화는 상당한 시간이 소요되고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 해성점토를 대상으로 대형블럭시료와 피스톤 시료를 채취하여 시료교란도 평가 및 다양한 압밀시험을 수행하였다. 각각의 시료에 대하여 체적변형률에 따른 시료교란도를 분석하였으며, 다양한 압밀시험으로 압밀 특성을 파악하였다. 대형블럭시료로 얻은 압축지수를 이용하여 자연함수비, 액성한계, 소성지수 등의 지반변수에 미치는 영향인자와의 관계를 비교·분석하여 새로운 압축지수 추정식을 제안하였다.

2. 시험개요

2.1 연구대상의 지반 특성

본 연구에서는 국내 서·남해안 해성점토 지반을 대상으로 대형블럭시료와 피스톤 시료를 채취하였으며, 그 위치도는 그림 1과 같다.

국내 연안의 지반특성을 보면, 서해안은 조수간만의 차가 다소 크고 지표면에서 심도 10m~17m정도까지의 N치는 3~5정도의 연약한 지층으로 무기질 실트 혹은 무기질 점토층으로 구성되어 있다. 남해안의 연약 지층은 지표면에서 심도 22m이상으로 소성이 큰 무기질 실

트에서 고소성 점토층이 존재하였다. 각 지역의 대표적인 물리적 특성은 표 1과 같다.

2.2 시료채취 및 실험시료

대형블럭시료는 시추공의 시료채취심도까지 오거($\phi=500\text{mm}$)를 이용하여 steel casing을 설치하고, 천공 슬라임을 제거한 후 대구경샘플러($\phi=400\text{mm}$, $H=600\text{mm}$)를 룯트에 연결 채취심도까지 내린 다음 샘플러를 지반에 관입하게 되면 특별하게 고안된 하부 시료절단장치로 시료를 절단하여 샘플러를 끌어 올리게 된다. 채취한 시료는 그림 2와 같이 샘플러 내부의 시료를 추출하고 표면정리 후 왁스와 랩을 이용 완전히 밀봉한다(김중국 등, 2003, 2005). 또한, 동일 위치에서 피스톤 샘플러(NX)로 자연시료를 채취하였다.

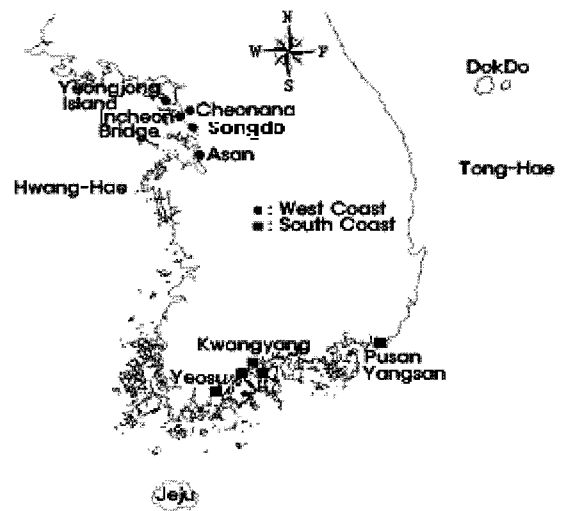
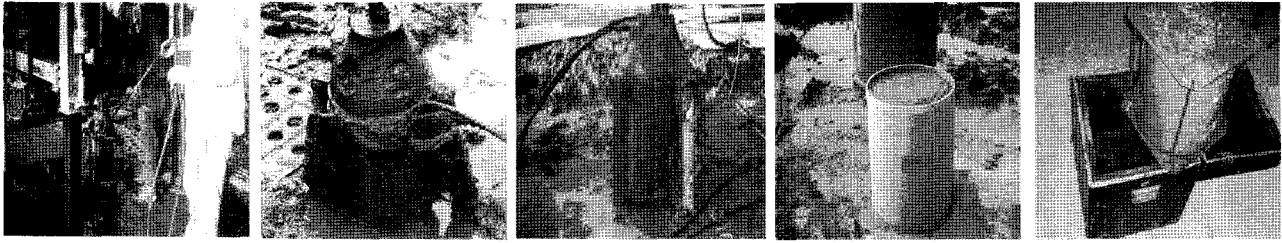


그림 1. 국내 해성점토의 자연시료 채취위치

표 1. 대형블럭시료의 물리적 특성

시료구분		Wn(%)	Gs	LL(%)	Pl(%)	e_0	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
	광양우회도로	70.5~89.7	2.69~2.72	68.5~75.3	40.0~50.8	1.65~2.40	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



a) 대구경샘플러관입 b) 샘플러 인발 c) 시료 추출 d) 시료밀봉 e) 시료 운반

그림 2. 대형블럭시료 채취과정

표 2. 시료 채취 현황

대상지역	시료채취 현황		비고 (대형블럭시료 크기)	
	피스톤 시료	대형블럭시료		
서해안지역	영종도 #1 -인천공항	6개소	6개소	Ø:200mm×H:350mm
	영종도 #2 -인천대교	4개소	5개소	Ø:180mm×H:400mm
	인천청라지구	5개소	7개소	Ø:250mm×H:400mm
	인천송도지구	4개소	6개소	Ø:250mm×H:400mm
	아산인주지방	2개소	3개소	Ø:250mm×H:400mm
남해안지역	진주광양철도	2개소	2개소	Ø:250mm×H:400mm
	광양서측인접	4개소	8개소	Ø:250mm×H:400mm
	광양우회도로	2개소	2개소	Ø:250mm×H:400mm
	광양동측배후	4개소	9개소	Ø:250mm×H:400mm
	부산양산지구	3개소	3개소	Ø:180mm×H:800mm

표 3. 실험시료 및 시험방법

시험항목	시료크기 (압밀링)	시험방법	사용시료	적용지역
표준압밀시험(SC)	Ø=60mm, H=20mm	KS F 2316	피스톤시료(NX)	공통
일정변형률 압밀시험(CRS)	Ø=63mm, H=30mm	ASTM D 4186-89	피스톤시료(NX)	남해안(광양)
Rowecell압밀시험(Ro)	Ø=150mm, H=50mm	ELE, Manual	대형블럭시료	서해안(인천)
대형압밀시험(LSC)	Ø=250mm, H=90mm	KS F 2316 준용	대형블럭시료	공통

본 연구에 이용된 실험시료는 표 2와 같이 대형블럭시료는 직경(Ø) 180mm~250mm, 높이(H) 350mm~800mm의 자연시료로 37개소에서 채취하였고, 피스톤 시료(NX)는 이와 동일한 위치에서 채취하였다.

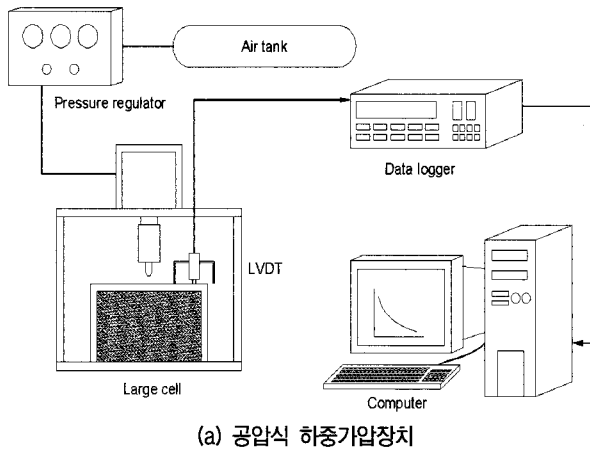
2.3 시료성형 및 시험방법

실험은 자연시료를 이용하여 교란으로 인한 압밀거동을 살펴보기 위하여 표준압밀시험(standards consolidation test; SC)과 일정변형률 압밀시험(constant rate of strain consolidation test; CRS), RoweCell압밀시험(Ro) 그리고 대형 압밀링을 개발하여 대형압밀시험(large standards consolidation test; LSC)을 실시하였으며, 실험에 이용된 시료와 시험방법은 표 3과 같다. CRS시험은 ASTM의 기준에 따라 0.01%/min~0.2%/min상의 변형률 속도를 적용하였고, 시험 시 시료의 포화를 위해 압력셀의 압력

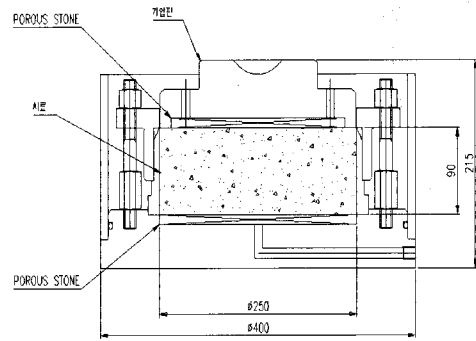
과 같은 크기의 배압(back pressure)를 가한 후 시료저면에서 과잉간극수압을 측정하여 B계수 0.98이상의 경우에 실시하였다. Ro압밀시험은 Geocomp사와 ELE사의 조합장비로 자동측정 및 자동 입력되는 장치를 이용하여 배수조건에 따라 수직방향과 수평방향 즉, 외향(inward) 방사배수와 내향(outward) 방사배수 조건을 고려하여 실시 할 수 있다.

대형압밀시험장비의 구성도는 그림 3a)와 같고, 대형 압밀링은 그림 3(b)의 대형 압밀링은 직경 250mm, 높이 90mm로 제작하였다. 상재하중은 공기압에 의하여 조절할 수 있고, 압밀시험 시 상재하중은 약 1000kPa까지 재하할 수 있는 특징이 있다. 각 단계별 하중은 10kPa, 20kPa, 40kPa, 80kPa, 160kPa, 320kPa, 640kPa에 대하여 수행할 수 있다. 대수시간-변형률 관계 및 대수응력-변형률 관계를 이용하여 압밀특성을 분석할 수 있다.

시료추출 및 성형 시 교란을 최소화하기 위하여 속도

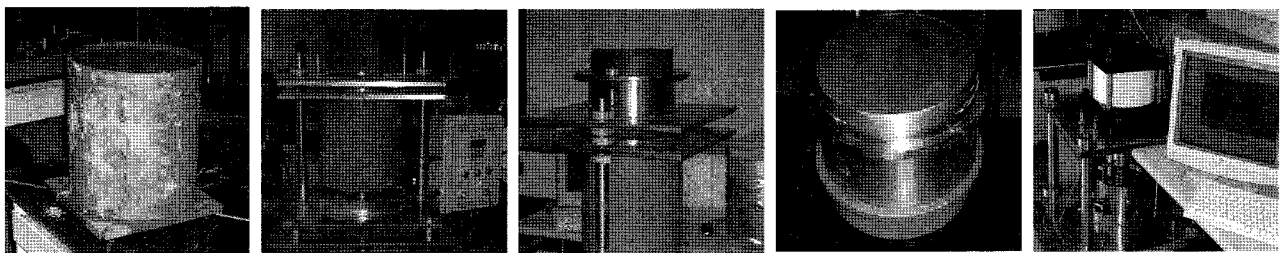


(a) 공압식 하중가압장치



(b) 대형압밀링

그림 3. 대형압밀시험의 구성도



a) 대형블럭시료

b) 대형시료추출기

c) 시료 추출

d) 대형압밀시료성형

e) 대형압밀시험

그림 4. 대형압밀시험(LSC) 과정

저감기를 장착한 대형시료추출기(그림 4b))를 개발하여 이용하였으며, 대형압밀링은 그림 4d)와 같고, 시료성형 시 $\phi=250\text{mm}$, $H=90\text{mm}$ 의 크기로 제작하였다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 시험결과

본 연구의 국내 해성점토지반에서 채취한 대형블럭 시료와 피스톤 시료에 대하여 수행한 압밀시험결과는 표 4와 같다. 표 4에서 기본물성시험 즉, 자연함수비 (W_n), 흙의 밀도(ρ_s), 액성한계(LL), 소성한계(PL) 및 입도시험 등은 압밀시험 전에 각각의 시료에 대하여 시험한 결과이다. 압밀시험결과는 시료교란에 따른 압축특성을 살펴보기 위하여 각 시료의 시험방법에 따른 선행 압밀하중(P_c)과 압축지수(C_c)를 나타냈다.

이처럼 수행한 시험결과를 토대로 시료교란도 평가 및 압밀특성을 간단하게 살펴보고 압축지수와 기본물성치와의 관계를 통해 새로운 압축지수와와의 관계를 제안하였다.

3.2 시료교란도 분석

시료채취로부터 실내시험까지의 과정에서 역학적 교란 및 응력해방에 따른 교란이 발생하여 역학적 특성치의 신뢰도를 저하시킬 가능성이 높다. Shogaki(1996)는 교란정도가 다른 압밀시험결과로부터 그림 5와 같은 압밀곡선을 얻었으며, Andersen와 Kolstad(1979)는 시료가 교란되면 압밀곡선이 완만해지는 것으로 그림에서는 S_1 sample의 압밀곡선이 S_0 sample의 압밀곡선으로

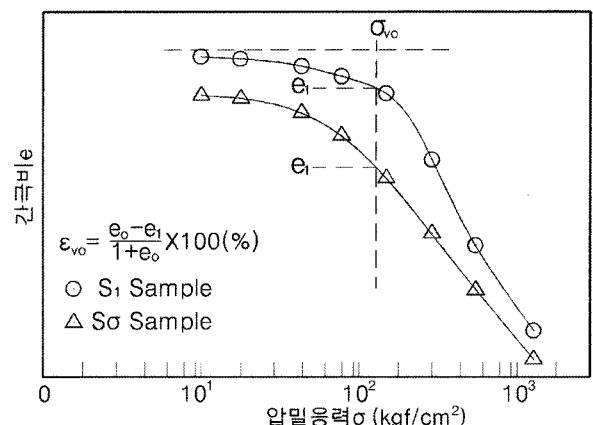


그림 5. 압밀시험에서 체적변형률(Shogaki,1996)

표 4. 시험결과

구간	공번	심도 (m)	함수비 (%)	0.02 (mm)	LL (%)	PI (%)	USCS	대형블럭시료		피스톤시료				
								Ro / LSC시험		SC시험		CRS시험		
								Cc	Pc (kPa)	Cc	Pc (kPa)	Cc	Pc (kPa)	
서해안 지역	인천공항	045P	3.8~4.9	36.7	25	39.1	20.1	CL	0.345*	78.46	0.330	71.59	-	-
		072P	3.0~3.5	32.4	20.0	35.1	14.8	CL	0.226*	80.42	0.182	74.53	-	-
		124P	3.2~3.65	35.1	12.1	28.4	18.5	CL	0.223*	75.51	0.201	60.80	-	-
		A-1	3.7	40.7	18.0	45.5	26.3	CL	0.237*	53.93	0.202	49.03	-	-
		A-2	3.2	49.7	31	53.7	28.3	CL	0.481*	57.86	0.395	53.94	-	-
		A-3	5.2	34.4	17.0	32.4	9.5	CL	0.319*	67.67	0.297	67.67	-	-
	인천대교	BA-6	3.0~3.5	41.1	18	35.6	11.5	CL	0.303	96.99	0.284	96.21	-	-
		BA-6	3.0~3.5	42.2	16	36.9	12.4	CL	0.357	65.02	0.333	64.04	-	-
		BA-13	3.0~3.5	48.2	30	42.5	18.7	CL	0.285	66.19	0.256	61.98	-	-
		BA-13	3.0~3.5	44.6	33	45.6	21.0	CL	0.366	27.46	0.343	27.06	-	-
		BA-20	5.0~5.5	42.3	15	36.5	14.3	CL	0.327	29.91	0.309	29.32	-	-
	송도지구	BC-18	1.5	36.2	18.5	36.7	14.2	CL	0.287	51.48	0.262	48.44	-	-
		BC-18	2.5	29.8	8.8	27.1	2.6	ML	0.203	53.93	0.189	53.25	-	-
		BC-18	4.5	30.2	10.2	28.8	5.5	CL-ML	0.254	64.72	0.246	63.55	-	-
		BC-18	6.5	42.5	14.5	35.6	8.8	CL	0.308	70.90	0.298	71.59	-	-
	청라지구	RB-10	2.0	35.5	11.7	34.5	15.1	CL	0.323	134.80	0.299	130.43	-	-
		RB-14	4.0	36.9	30.4	36.8	12.3	CL	0.275	99.45	0.266	97.09	-	-
		RB-14	1.5	38.4	11.2	34.6	13.0	CL	-	-	-	-	-	-
		SB-6	2.0	57.1	26.2	55.0	29.5	CL	0.478	30.58	0.458	29.03	-	-
		SB-7	3.0	35.5	9.5	31.1	6.2	CL	0.211	100.68	0.197	99.30	-	-
남해안 지역	진주 광양	2A-BB01	2.0	64.8	33.1	57.4	30.9	CH	0.84	62.76	0.62	60.90	0.746	40.70
		2A-BB02	4.5	47.2	22.1	40.5	16.1	CL	0.45	60.02	0.43	59.63	0.788	41.29
	광양 동측	2A-BH01	5	105.9	37.8	90.2	58.7	CH	1.705	34.91	1.404	33.15	1.039	36.87
		2A-BH02	3	63.3	25.2	66.3	42.1	CL	0.966	29.65	0.818	29.13	1.122	37.46
		2A-BH03	10.2	83.9	31.9	74.2	43.8	CH	1.146	34.91	1.056	33.15	1.58	34.52
		2A-BH04	7.3	84.2	43.5	80.3	53.5	CH	1.195	38.44	0.911	30.01	1.296	23.14
	광양 서측 우회	2B-BH05	7.5	70.5	21.9	68.5	40.0	CH	0.896	40.41	0.890	34.13	1.09	33.93
		2B-BH06	2.5	89.7	25.5	75.3	50.8	CH	1.532	40.89	1.425	22.46	0.832	35.11
		2B-BH07	3.5	74.5	46.8	73.9	45.4	CH	1.014	32.56	0.896	30.40	0.843	34.23
		2C-BH08	2.2	94.4	49.2	95.2	66.6	CH	1.613	35.84	1.423	34.42	1.206	63.94
		2C-BH09	9.7	79.7	30.2	61.6	35.7	CH	1.255	30.45	0.912	30.01	0.902	57.86
		2C-BH10	2.8	86.8	52.9	85.2	54.3	CH	1.209	37.85	0.995	43.25	0.980	46.29
	부산 양산	BO-1	16.0	78.9	36.8	62.5	36.8	CH	1.497	79.11	1.208	77.17	-	-
		BO-2	5.0	53.6	26.9	53.6	26.9	CH	0.815	25.08	0.732	24.36	-	-
		BO-3	11.0	88.9	42.2	78.4	46.2	CH	1.789	56.16	1.516	55.82	-	-

주) (*) : Rowe cell 압밀 시험 결과

완만해져 시료가 교란되는 것이며, 또한 원위치응력에 해당하는 응력에 도달할 때의 변형이 커진다는 원리로부터 시료의 품질등급(SQD)을 제안하였다. 압밀시험에서 시료채취 심도의 유효상재하중에 해당하는 하중 재하 시에 발생하는 체적변형률의 크기에 따라 시료교란도를 평가하였다. 그리고 Lunne 등(1997)은 체적변형률

과 유사한 개념으로써 $\Delta e/e_0$ 의 비로써 시료의 품질을 4개의 등급으로 분류하였다. 이들의 자연시료의 품질 평가방법을 표 5와 같이 요약하였다.

$$\Delta e = e_0 - e_1 \tag{1}$$

여기서, e_0 는 초기간극비이고, e_1 : 유효상재응력에서

표 5. 자연시료의 품질평가방법

SQD(1979)		NGI(1979)		Lunne et al.(1997)	
체적변형률 (ev, %)	시료품질등급	체적변형률 (ev, %)	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	-	-

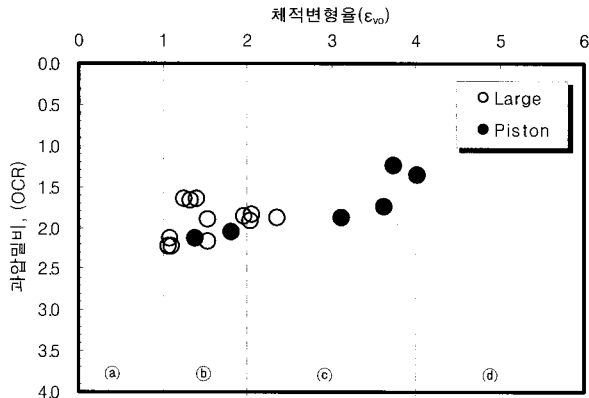
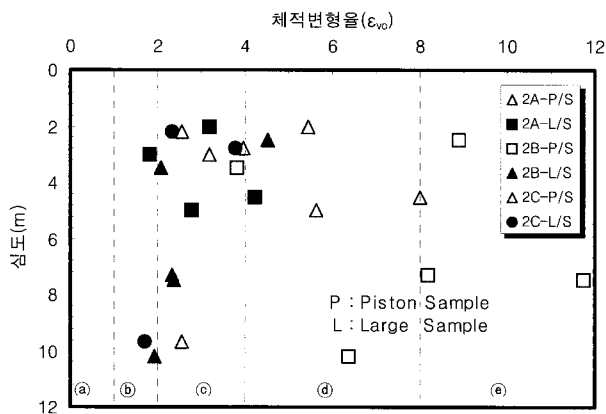
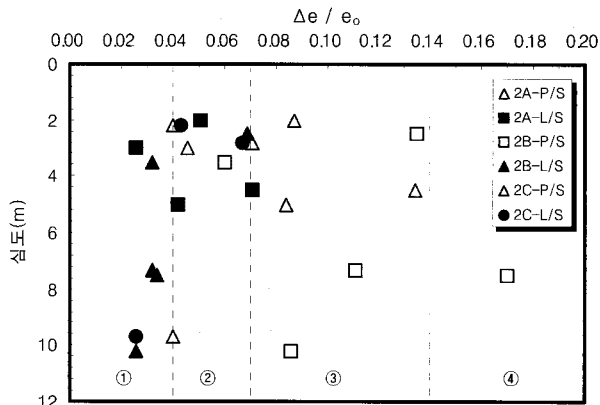


그림 6. 채취시료의 교란도 평가(서해안)



a) 체적변형률에 의한 시료교란도 평가



b) 간극비 변화량에 따른 시료교란도 평가

그림 7. 채취시료의 교란도 평가(남해안)

의 간극비이다.

그림 6은 서해안지역의 심도에 따른 응력이력과 과압 밀비(OCR)를 고려하여 체적변형률(ϵ_v)을 산정하여 시료 교란도를 분석한 것이다. 그림에서 대형블럭시료는 OCR이 1.65~2.22에서 체적변형률은 1.0%~2.4%로 아주 양호~양호한 시료상태를 보이고, 피스톤 시료는 OCR이 1.23~2.13에서 체적변형률은 1.4%~4.0%로 양호~불량한 시료상태를 보인다.

그림 7은 남해안지역에서 채취한 피스톤시료와 대형블럭시료의 압밀시험결과를 이용하여 산정한 교란도 분석결과이다. 그림 7a)는 체적변형률에 의한 교란도로 대형블럭시료는 체적변형률이 1.7%~4.5% 범위를 보이고 있는 반면에 피스톤시료는 2.5%~11.7% 범위를 보이고 있다. 그림 7b)는 간극비 변화량에 따른 교란도에 의하면, 대형블럭시료는 0.025~0.07을, 피스톤시료는 0.04~0.164이다. 이와 같이 대형블럭시료는 피스톤 시료에 비하여 시료의 품질이 양호한 시료상태로 평가되었다.

3.3 시험방법에 따른 압밀특성 분석

대상지역의 해성점토에서 채취한 각 시료에 대한 압밀시험결과 중 대표적인 압축곡선을 그림 8~그림 10과 같이 비교하였다.

그림 8의 e -log P 곡선에서 대형블럭시료의 최소 곡률 점은 피스톤시료보다 더 명확하여 선행압밀응력을 명확히 찾아낼 수 있을 뿐 만 아니라 선행압밀하중 값이 더 큰 경향을 보인다. 특히 대형시료의 Rowcell시험으로 구한 선행압밀하중(P_c')이 피스톤시료의 선행압밀하중(P_c')보다 약 1.3배 정도 컸으며, 표준압밀시험(SC)으로 구한 대형시료의 P_c' 값은 피스톤 시료의 P_c' 값에 비해 1.1배 큰 것으로 나타났다. 그림 9의 표준압밀시험의 압

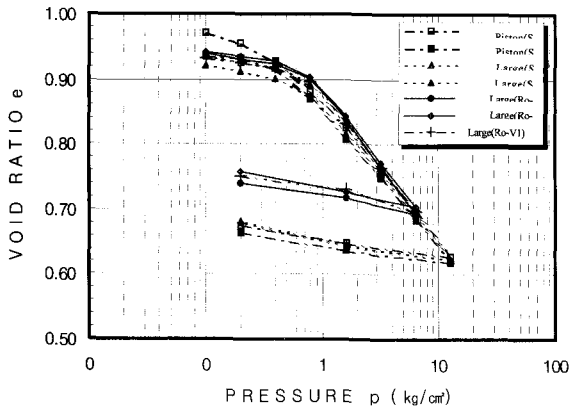


그림 8. 시험방법에 따른 e-log P곡선 비교(서해안)

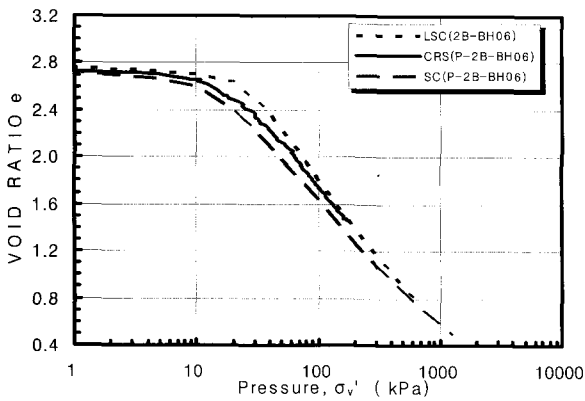


그림 9. 시험방법에 따른 e-log P곡선 비교(남해안)

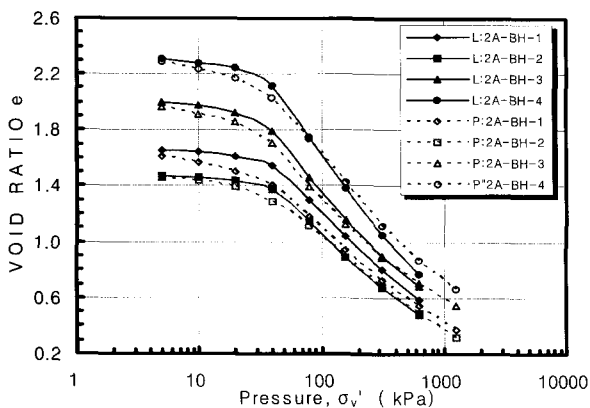
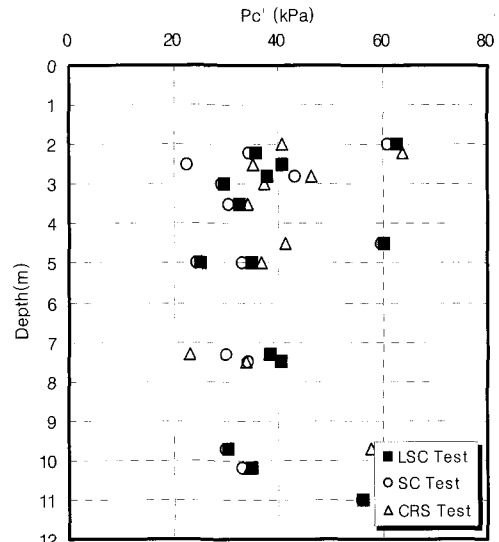
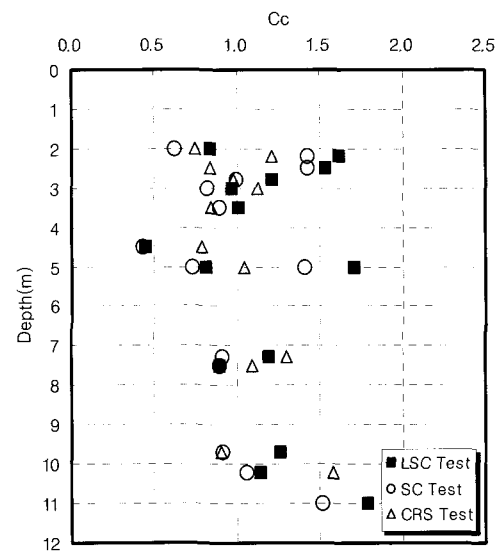


그림 10. 채취시료에 따른 e-log P곡선 비교 (남해안)

축곡선은 대형블럭시료에 대한 LSC시험의 압축곡선보다 완만한 경사의 기울기의 보이며, 선행압밀응력(P_c')이 LSC시험의 P_c' 값보다 작았다. 그리고 CRS시험의 P_c' 값은 SC시험의 P_c' 값보다 크고, LSC시험의 P_c' 값보다 다소 작은 값을 보였다. 전반적으로 그림 10에서처럼 피스톤시료의 압축곡선은 대형블럭시료의 압축곡선보다 대체적으로 완만한 경사를 보이며, P_c' 와 압축지수(C_c)가 작은 값을 보였다.



a) 선행압밀응력(P_c')



b) 압축지수(C_c)

그림 11. 시험방법에 따른 압밀정수 비교(남해안)

심도에 따른 시험방법별 선행압밀응력(P_c')과 압축지수(C_c)를 그림 11과 같이 비교하였다. 그림 11a)의 선행압밀응력(P_c')의 평균값에 의하면, 피스톤시료의 SC시험의 P_c' 값은 CRS시험보다 약 5%정도 작았고, 대형블럭시료의 LSC시험의 P_c' 보다 약 9%정도 적게 평가되었다. 그리고 그림 11b)의 SC시험의 압축지수의 경우에도 CRS시험의 C_c 값보다 약 9%정도 작은 값을 보이며, 대형블럭시료의 LSC시험의 C_c 보다 약 19%정도 작게 평가되었다.

과압밀비의 경우에도 그림 12와 같이 대형시료의 OCR이 피스톤 시료의 OCR에 비해 약 15%정도 컸다.

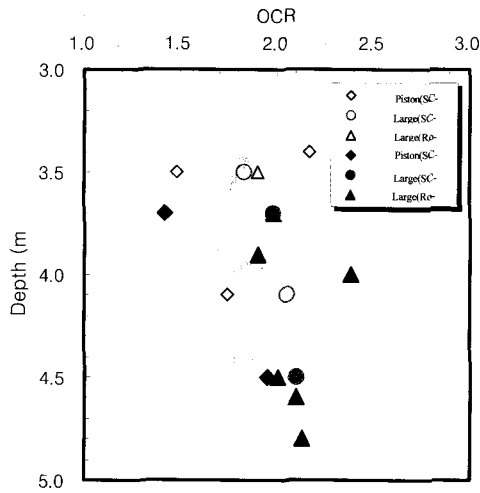
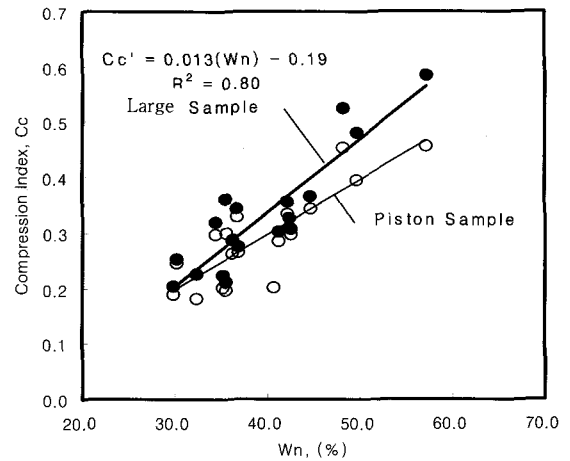


그림 12. 채취시료의 과압밀비 비교(서해안)

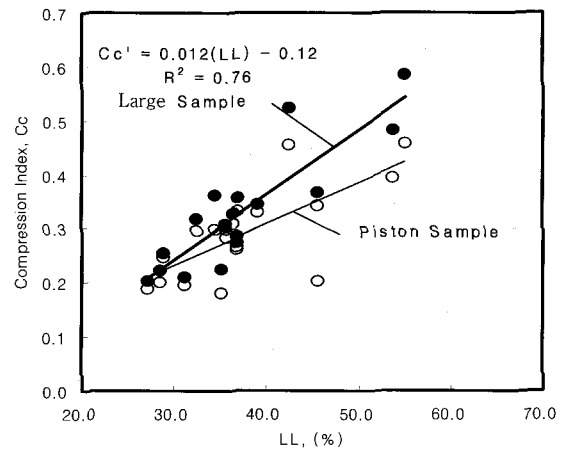
3.4 채취시료에 따른 압축지수의 상관성 분석

점토지반의 압축특성을 규명하기 위하여 다양한 현장시험과 실내시험, 시료채취법 및 시료교란보정, 시험 결과의 보정 등의 많은 연구에도 불구하고 압밀침하에 대한 과소평가는 아직도 야기되고 있는 문제점이다. 본 연구에서는 해성점토 지반에서 채취한 대형블럭시료로 구한 압축지수를 중심으로 피스톤 시료로 구한 압축지수와 상호 비교하였다. 국외의 많은 연구자들의 연구결과에 따르면, 압축지수에 직접적인 영향을 줄 수 있는 지반정수로는 자연함수비(W_n), 액성한계(LL), 소성지수(PI) 등으로 보고하고 있으며, 압축지수와와의 관계는 대부분 선형식으로 제안되고 있다. AI-Khafaji(1979)는 압축 특성을 표현하는 압축지수는 큰 등가 간극비를 갖는 콜로이드 입자와 점토의 간극이 클수록 많은 물을 내포하고 있기 때문으로 보고하고 있다. 따라서 국내 해성점토 지반의 기본 지반정수에 근거한 대형블럭시료로 구한 압축지수와와의 상호관계를 선형회귀 분석하여 국내지반에 적합한 압축지수의 경험식을 제안하였다.

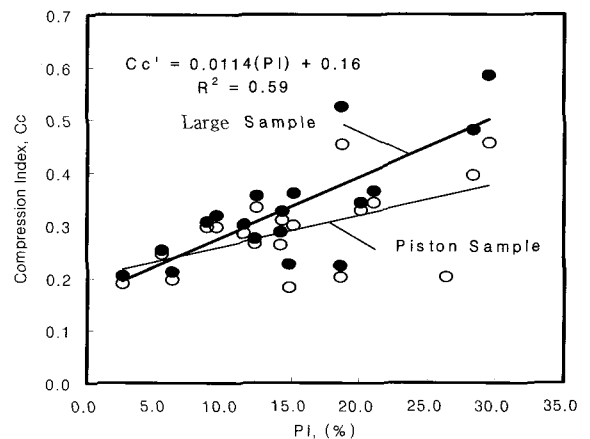
그림 13은 서해안지역에 채취한 대형블럭시료와 피스톤 시료로 구한 압축지수를 지반 물성값 즉, 자연함수비(W_n), 액성한계(LL), 소성지수(PI)와의 관계를 선형회귀 분석하여 나타냈다. 그림에서 압축지수에 영향을 미치는 인자들과의 상호관계를 표현한 것으로 액성한계와 소성지수에 의한 압축지수 변화의 분산분포가 큰 반면에 자연함수비와 압축지수와의 상관성이 높게 나타났다. 피스톤 시료로 얻은 압축지수보다 대형블럭시료로 얻은 압축지수가 기본물성치가 커질수록 그 증가폭



(a) 자연함수비(W_n) - 압축지수(C_c)



(b) 액성한계(LL) - 압축지수(C_c)



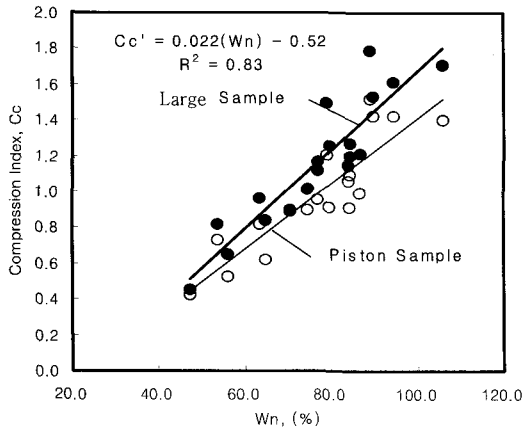
(c) 소성지수(PI) - 압축지수(C_c)

그림 13. 대형블럭시료와 피스톤시료의 압축지수 비교(서해안)

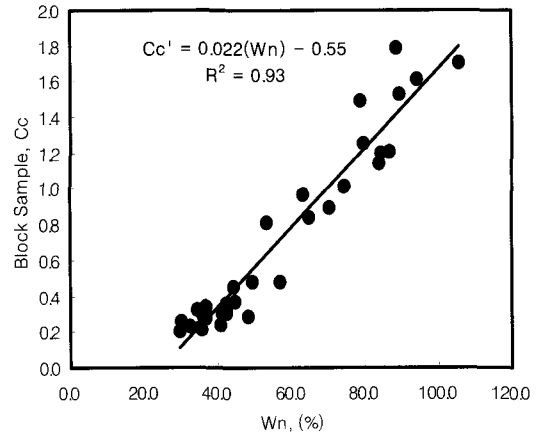
이 커졌으며, 그 편차는 자연함수비(W_n)의 경우는 1.0~1.19, LL는 1.02~1.29, PI는 1.25~1.45배 정도를 보인다.

그림 14는 남해안 지역에서 채취한 자연시료로 얻은 압축지수와 기본 물성치를 비교한 것으로, 대형블럭시료의 압축지수와 피스톤 시료의 압축지수와와의 편차는 자연함수비의 경우는 1.10~1.16, LL는 1.18~1.35, PI

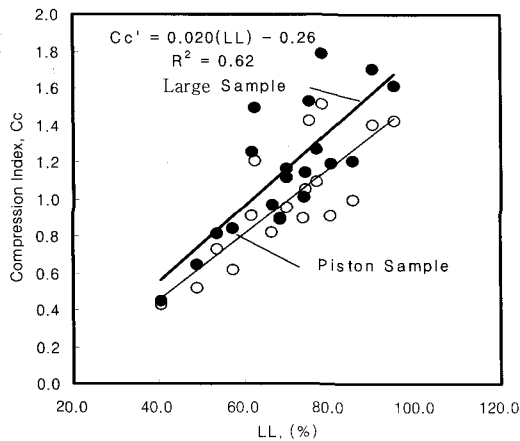
는 1.19~1.22배 정도를 보인다. 이는 서해안지역의 자연시료로 구한 압축지수와 기본 물성치와의 상관성의 편차가 약간 크나 그 경향성은 지역에 관계없이 유사하였다.



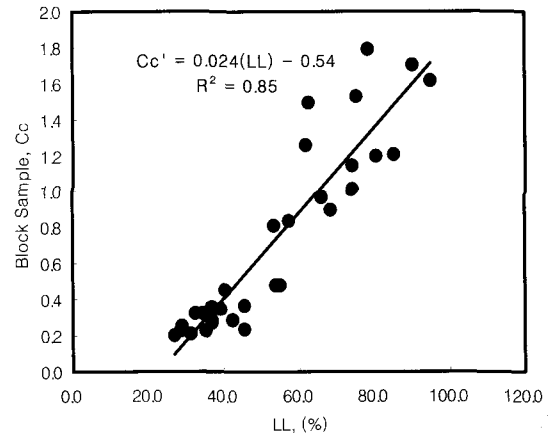
(a) 자연함수비(W_n) - 압축지수(C_c)



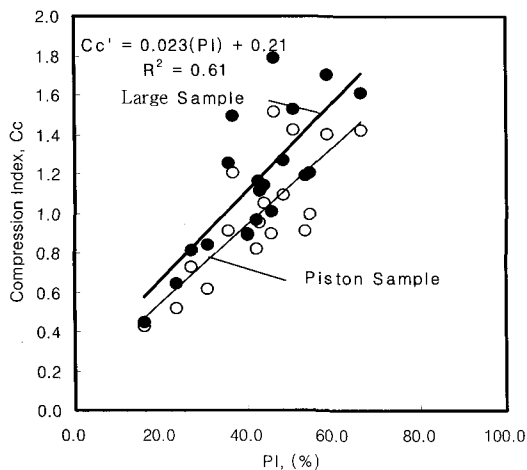
(a) 자연함수비(W_n) - 압축지수(C_c)



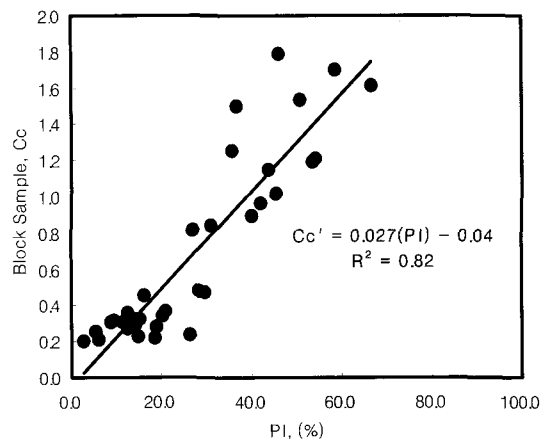
(b) 액성한계(LL) - 압축지수(C_c)



(b) 액성한계(LL) - 압축지수(C_c)



(c) 소성지수(PI) - 압축지수(C_c)



(c) 소성지수(PI) - 압축지수(C_c)

그림 14. 대형블럭시료와 피스톤시료의 압축지수 비교(남해안)

그림 15. 대형블럭시료의 지반정수에 따른 압축지수 추정

표 6. 대형시료를 이용한 압축지수 추정식

기본 물성치	상관식	비고
자연함수비(W_n)	$Cc' = 0.022 \cdot (W_n) - 0.55$	$R^2 = 0.93$
액성한계(LL)	$Cc' = 0.024 \cdot (LL) - 0.54$	$R^2 = 0.85$
소성지수(PI)	$Cc' = 0.027 \cdot (PI) - 0.04$	$R^2 = 0.82$

표 7. 기존의 국내외의 압축지수의 경험식

제안자	제안식	지반 변수	비고
송(1988)	$Cc=0.016(W_n-22)$	W_n	Korea (west&south)
김(2003)	$Cc=0.0014(W_n-1.556)$	W_n	
송(1988)	$Cc=0.016(LL-15)$	LL	
Chung(2002)	$Cc=0.0197(LL-0.28)$	LL	
Koppula(1981)	$Cc=0.01W_n$	W_n	
Herrero(1983)	$Cc=0.01(W_n-7.549)$	W_n	
Shouka(1964)	$Cc=0.017(LL-20)$	LL	
Mayne(1980)	$Cc=(LL-13)/109$	LL	

상기의 그림 13과 그림 14에서와 같이 서·남해안 지역 해성점토의 대형블럭시료로 구한 압축지수와 기본 물성치와의 상관성이 유사한 경향성을 보이고 있는 바와 같이 이들 상호관계를 통하여 국내 해성점토의 교란으로 인한 압축지수의 영향을 고려하여 새로운 압축지수 상관식을 단일변수의 선형회귀분석에 의하여 그림 15처럼 도시하였으며, 그 상관식을 표 6과 같이 제시하였다.

3.5 기존 압축지수의 경험식과의 비교분석

이와 같이 국내 서·남해안 지역의 해성점토의 대형블럭시료에 대한 압밀시험 결과를 근거로 하여 시료 교란으로 인한 영향을 고려한 새로운 압축지수를 산정식을 이용하여 사전에 압축지수를 보정함으로써 설계에 보다 합리적으로 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 이와 관련하여 압축지수의 산정에 있어서 국내 연약의 해성점토지반의 다양한 흙의 입자의 구조배열 및 응력이력 등에 따른 불확실성은 포함할 수 있는 바와 같이 다양한 압밀시험방법으로 산정한 압축지수와 기존의 경험식으로 추정된 압축지수와의 비교·분석을 통하여 국내지반에 대한 적합성을 검토하였다.

본 연구에서 추정한 압축지수 추정식과 표 7의 기존의 국내외에서 제안된 경험식들과 상호관계를 비교하면 그림 16, 그림 17과 같다.

그림 16은 자연함수비와 압축지수와의 관계를 기존의 국내·외에서 제안된 경험식들과 비교한 것이다. 비

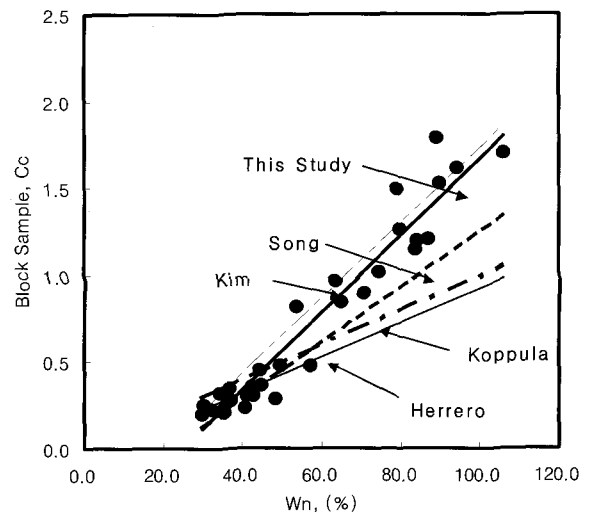


그림 16. 대형시료의 C_c 의 제안식과 기존의 경험식 비교(W_n)

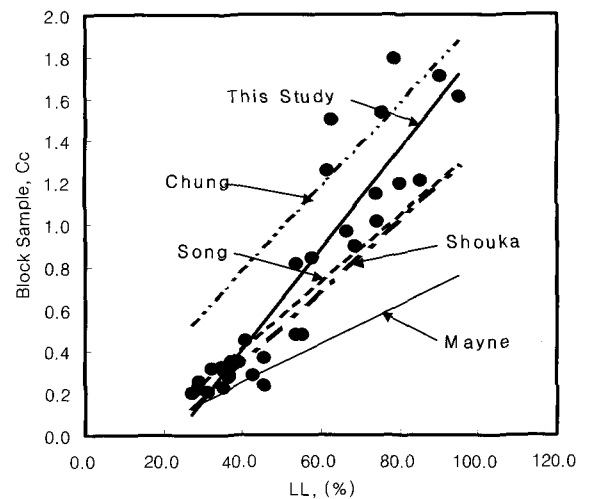
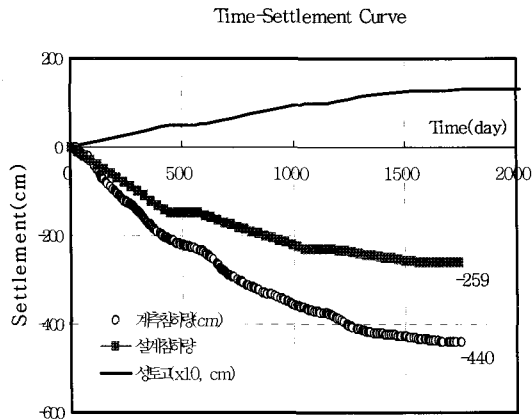


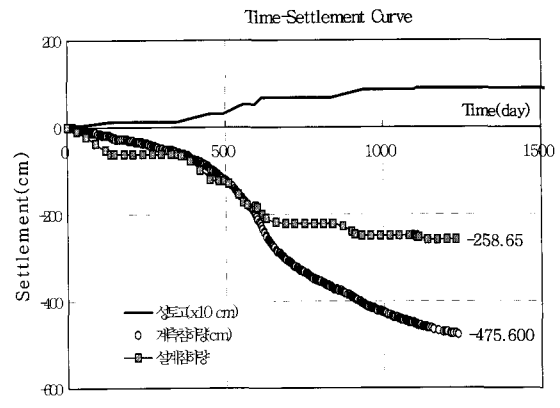
그림 17. 대형시료의 C_c 의 제안식과 기존의 경험식 비교(LL)

표 8. 부산점토의 설계 값과 예측침하량의 비교(정성교, 1999)

지역	두께 (m)	성토높이 (m)	설계침하량 (cm)	예측침하량 (cm)	비고
녹산	36.8	5.5	112.0	188.3	1-D Terzaghi
신호	26.2	3.6	71.8	182.1	
명지	19.5	6.5	102.9	119.0	
을숙도	21.0	8.0	280.0	120.0	
양산	15.0	5.0	184.5	155.3	



(a) 낙동강 하구의 상류지역



(b) 낙동강 하구의 하류지역

그림 18. 부산점토의 설계침하량과 실측침하량 비교(이강운 등, 2003)

교 결과, 본 연구의 제안식은 Chung 등(2002)에 남해안의 부산점토 시료 이용하여 제안한 식과 근접하게 나타났으며, 송(1988)이 서·남해안의 14개 지역에서 시험결과와 554개의 피스톤시료에 대하여 제안한 경험식보다 압축지수를 상당히 크게 산정되었다. 기타 외국의 Koppula(1981)와 Herrero(1983)의 경험식은 압축지수를 과소평가하고 있다. 그림 17에서도 본 연구의 압축지수의 경험식은 김 등(2002)의 국내의 남해안의 낙동강 지역의 자료 분석을 통해 제안한 경험식과 송(1988)의 제안식과의 중간정도의 값을 보였다. 이처럼 기존의 국외의 경험식들은 대부분 육상점토에 대한 것으로서 해상점토의 특성과 다른 특성을 보이고 있기 때문에 사료된다.

한편, 기존에 실시된 부지조성 자료의 실측된 침하량이 설계 예상 침하량의 2배~3배까지 초과되어 공학적 및 사회적인 문제점으로 비화되기도 하였으며, 이 같은 원인 규명을 위하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 이 같은 현상에 대해 정성교(1999)는 부산점토로부터 표 8과 같은 자료를 제시하여 관련 지반정수의 신뢰성에 의문을 제기하였고, 김상규 등(2001)은 고전적인 Terzaghi의 침하량 산정방법의 개선을 제안하였으며, 정성교 등(2002)은 시료의 교란정도가 시험값에 미치는 영향이

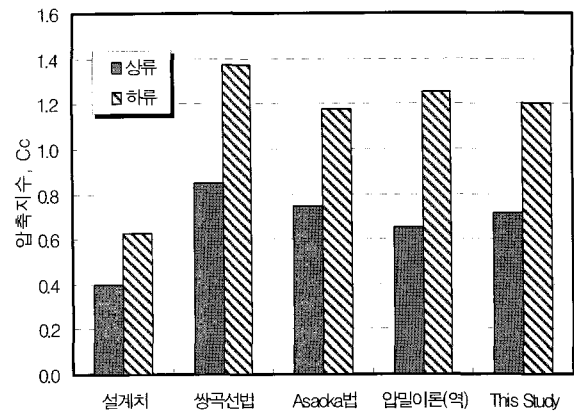


그림 19. 본 연구의 Cc의 경험식과 역해석에 의한 압축지수(Cc) 비교

크므로 이를 보정하여 사용할 것을 제안하였다.

이에 따라 사례분석을 통해 과대침하 발생 원인에 대한 검증보다는 설계 예측 침하량과 현장의 침하계측을 분석하여 압축지수의 변화를 고찰하고, 대형블럭시료로 얻은 압축지수의 추정식의 결과와의 관계를 비교하였다.

기존의 사례는 낙동강하구 지역의 자료는 1차적으로 최근 연구 발표된 Chung(1999), 임 등(2001), Chung and Giao(2001), Chung 등(2002)의 자료를 기준으로 연구 전·후의 설계와 시공된 사례를 중심으로 지반거동을 분석하였다. 그림 18은 부산점토의 낙동강 하구지역의 실

측침하량과 설계침하량을 비교한 예로 성토시공 후 3.6년~4.6년이 경과한 경우로 압밀이 약 73%~95%까지 진행된 상태이다(이 등, 2003).

그림 18의 부산 낙동강 하구의 상류지역은 대부분 토질분류상 CL층으로 예측침하량은 약 259cm로 비해 실측침하량은 약 440cm로 나타나 약 181cm의 편차가 발생하였으며, 하류지역은 CH층으로 설계 시 예측침하량 259cm~275cm에 비해 실측 침하량은 약 476cm~503cm로 나타나 약 212cm~228cm 이상의 편차를 보여 설계 지반정수가 상당히 과소평가되었다. 이를 이용하여 그림 19에서처럼 낙동강 하구구간의 계측자료의 역해석에 의한 압축지수를 추정하여 설계 시의 압축지수와 본 연구의 대형블럭시료를 이용하여 추정한 제안식으로 산정한 압축지수를 비교하였다. 그림에서 상류지역의 설계 시의 압축지수는 계측 역해석에 의한 압축지수와 비교하면, 약 1.6배~2.1배 정도 과소평가되었으며, 하류지역은 약 1.9배~2.2배 정도 차이를 보였다. 특히, 본 연구의 제안식으로 산정한 압축지수와 압밀이론의 역해석방법 및 실측치의 역해석으로 추정한 압축지수와 유사하였다.

이상에서와 같이 피스톤 시료에 의한 압축지수는 고소성 점토지반에서 예측침하량을 과소평가 할 수 있는 바와 같이 시료교란 정도 시험값에 미치는 영향이 크므로 교란 영향을 충분히 보정하여 사용하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 국내 해성점토를 대상으로 채취한 대형블럭시료와 피스톤 시료의 시료교란도 평가 및 다양한 압밀시험을 수행하였으며, 그 결과를 바탕으로 시료교란도 분석과 압축특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 체적변형률(ϵ_v)에 의한 시료 교란도 분석결과, 서해안의 대형블럭시료는 OCR이 1.65~2.22에서 체적변형률은 1.0%~2.4%로 아주양호~양호한 시료상태를 보이고, 피스톤 시료는 OCR이 1.23~2.13에서 체적변형률은 1.4%~4.0%로 양호~불량한 시료상태를 보인다. 남해안의 대형블럭시료는 체적변형률이 1.7%~4.5% 범위를 보이는 반면에 피스톤시료는 2.5%~11.7% 범위를 보이고 있어 대체적으로 대

형블럭시료는 피스톤시료보다 시료의 품질이 양호한 시료상태로 평가되었다.

- (2) 압밀시험의 e-log P 곡선으로부터 대형블럭시료의 최소 곡률점은 피스톤시료보다 더 명확하게 나타나 선형압밀응력을 명확히 찾아낼 수 있을 뿐 만 아니라 선형압밀하중 값이 더 컸으며 압축지수도 더 크게 나타났다.
- (3) 시험방법에 따른 압밀시험결과, 대형시료의 Rowcell 시험으로 구한 P_c' 이 피스톤시료로 얻은 P_c' 보다 약 1.3배 정도 크게 나타났으며, 동일한 표준압밀시험으로 구한 대형시료의 P_c' 값은 피스톤 시료의 P_c' 값에 비해 1.1배 컸다. 또한, 피스톤시료의 표준압밀시험의 P_c' 값은 일정변형률 압밀시험보다 약 5%정도 작았고, 대형블럭시료의 대형압밀시험의 P_c' 보다 약 9%정도 적게 평가되었다. 그리고 표준압밀시험의 압축지수의 경우에도 일정변형률 압밀시험의 C_c 값보다 약 9%정도 작은 값을 보이며, 대형블럭시료의 대형압밀시험의 C_c 보다 약 19%정도 작았다.
- (4) 압축지수와 지반 물성치와의 상관성 분석결과, 전반적으로 서·남해안의 대형블럭시료로 구한 압축지수와 기본 물성치와의 상관성은 단일변수의 선형회귀 분석의 경우 유사하였으나, 액성한계, 소성지수에 의한 압축지수 변화가 분산분포가 큰 반면에 자연함수비와 압축지수와의 상관성은 높았다. 전반적인 편차는 서해안의 경우 전체적으로 1.01배~1.46배 차이를 보인 반면, 자연함수비는 1.01배~1.19배를 보이고, 남해안의 경우 전체적으로 1.1배~1.25배 차이를 보이며, 자연함수비는 1.10배~1.16배를 보였다. 또한, 서·남해안의 대형블럭시료로 얻은 압축지수는 기본물성치가 커질수록 그 증가폭이 컸다.
- (5) 국내 해성점토의 교란으로 인한 압축지수의 영향을 고려하여 기본 물성치와의 관계를 단일변수의 선형회귀분석에 통해 추정한 새로운 압축지수 상관식(표 6)을 제안하였다.
- (6) 본 연구의 제안식과 기존의 경험식의 비교 결과, Chung 등(2002)에 남해안의 부산점토 시료 이용하여 제안한 식과 근접하였으며, 송(1988)이 서·남해안의 14개 지역의 피스톤시료로 제안한 경험식보다는 압축지수가 상당히 크게 산정되었다. 기타 외국의 Koppula(1981)와 Herrero(1983)의 경험식은 압축지수를 과소평가하고 있다.
- (7) 상기 표의 제안식과 해성점토지반의 실측침하량과

설계침하량을 역해석하여 산정한 압축지수를 비교한 결과 압밀이론의 역해석방법 및 실측의 역해석 방법으로 구한 압축지수의 범위와 유사하였다.

- (8) 항 후 대구형시료채취기 및 대형압밀시험장비의 표준화 개발 및 적용성 연구를 비롯해 이론 및 실측침하량을 토대로 수치해석 등을 통한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 김상규, 박성재, 정성교 (2001), “대심도 연약지반에 시공된 매립 단지 및 구조물의 기초 공법에 대한 평가” ISSMGE ATC-7 Symposium, September, 13, 2001, Busan, Korea
2. 김종국, 이강운, 채영수 (2003), “대형자연시료를 이용한 시료교란의 공학적특성 연구”, 대한토목학회 정기 학술발표회 논문집, pp.3742-3747.
3. 김종국, 유성진, 채영수 (2005), “대형압밀시험에 의한 광양점토의 시료 교란특성에 관한 연구” 대한토목학회 정기 학술발표회 논문집, pp.3503-3506.
4. 송만순 (1988), “우리나라 해성점토의 토질계수의 상관관계”, 한양대학교 석사학위논문.
5. 유성진, 김종국, 채영수 (2005), “대형자연시료를 이용한 광양점토의 압밀특성에 관한 실험적 연구” 한국지반공학회 공동 학술발표회 논문집, pp.429-436.
6. 유성진, 김종국, 채영수 (2006), “대형자연시료를 이용한 지반교란 특성에 관한 연구”, 한국지반공학회 학술발표회 논문집, pp.709.
7. 이강운, 김광호, 안병규 (2003), “계측사례를 통한 낙동강 하구 점토의 압축 및 압밀특성 재평가”, 한국지반공학회 연약지반위원회, 논문집, pp.101-122.
8. 정성교, 박정민, 김규중, 백승훈 (2001), “부산점토의 지반공학적 특성에 관한 고찰”, ISSMFE ATC-7 Symposium September 9, Busan, Korea.
9. 정성교, 박정민, 김덕곤, 장우영 (2002), “낙동강 하구 점토의 압축특성에 관한 연구”, 한국지반공학회 논문집, 18(4), pp.295-307.
10. Andresen, A. and P. Kolstad (1979), “The NGI 54mm Samplers for Undisturbed Sampling of Clay and Representative Sampling of coarser materials”, Proc. Int. Symp. on Soil Sampling, Singapore, pp.1-9.
11. S.K., (1999), “Large Consolidation Settlement Occurred During Reclamation Works in the Nakdong River Mouth”, KGS 99 Dredging and Geoenvironmental Conference, pp.35-48.
12. Chung, S.G., (1999), “Engineering Properties and Consolidation Characteristics of Kimhae Estuarine Clayey Soils”, Thick Deltaic Deposits, Special Publication, Roc. of the 11th ARC on SMGE, pp.93-108.
13. Chung, S.G., Giao, P.H., Kim G.J. and Leroueil, S., (2002), “Geotechnical Properties of Pusan Clays”, Canadian Geotechnical Journal.
14. Herrero, O.r., (1983), “Universal compression index equation Closure, J. Geotech. Engrg. ASCE, 109(5), pp.755-761.
15. Koppula, S.D. (1981) Statistical estimation of compression index, Geotech. Testing J., 4(2), pp.68-73.
16. Lunne, T., Berre, T., Strandvik, S., (1997), “Sample Disturbance Effect in Soft Low Plastic Norwegian Clay”, Symposium on Developments in Soil and Pavement Mechanics, Rio de Janeiro, pp.81-102.
17. Mayne, P.W. (1980), “Cam-clay predictions of undrained strength, J. Geotech. Engrg. Div, ASCE, 106(11) pp.1219-1242.
18. Shogaki, T., (1996), “A Method of Correction Consolidation Parameter of Sample Disturbance Using Volumetric Strain”. Soil and Foundation, 36(3), pp.123-131.

(접수일자 2007. 10. 19, 심사완료일 2007. 12. 24)