

대형자연시료를 이용한 지반교란 특성에 관한 연구

Article

05

A Study on the Soft Ground Disturbance Characteristics by Large Block Sample



유성진
동남이엔씨(주) 부회장

SYNOPSIS : In this paper, a ground disturbance effects, strength and consolidation characteristics of soft clay through using the large block samples(ϕ :300mm, H:400mm) and the piston samples, those which had been gathered in west coast and south coast, Especially, we have assessed the coefficient of horizontal consolidation when penetrating the mandrel considering the variance of ratio between diameter and height in drainage sample through the experiment of the oedometer test and Rowecell and also investigated the disturbance area in smear zone by interior model test, the strength originated by disturbance, the variance in characteristics of the consolidation. As the result, the large block sample has been investigated that the uniaxial compression test(q_u) was shown bigger than the piston sample by about 11~19%. Under the size of anistropy in consolidation, the coefficient ratio of consolidation(c_{hr}/c_v) performed by standard consolidation test(SC) was shown bigger than that of (c_{ro}/c_v) by the Rowecell test. And the coefficient ratio of consolidation(c_{ro}/c_v) performed by piston sample was evaluated bigger than that of (c_{ro}/c_v) by the large block sample by about 0.9~1.9. The coefficient ratio of consolidation along with the variance in ratio of between diameter and height when penetrating the mandrel was shown big difference according to the characteristics of soil of the specimen. In addition, d_s/d_w of smear zone at the marine clay in west-south was ranged from 1.6 to 4.2. The width of variance in ratio[$(q_{ud})/(q_{uud})$] of strength in the area between disturbance and undisturbance was shown big as about 72~91% but the principle was judged with the similiar range when the decrease of the strength in smear zone become the zone under 25% in undisturbance area.

Keywords : large block sample, mandrel, sample disturbance, anistropy of clay.

1. 서론

최근 국내의 서해안 및 남해안지역의 연약지반을 대상으로 건설부지를 조성하는 공사가 활발히 진행되고 있어 연약지반의 활용도가 증가하고 있는 추세이다. 연약지반은 지반개량을 통해 강도증가와 변형의 감소를 목

적으로 지반개량공법을 설계하게 되며, 주로 연직배수재를 사용하는 배수공법이 많이 사용되고 있다. 그러나, 연직배수공법은 수평배수 증진을 통해 압밀을 촉진시키는 공법이나 맨드렐(mandrel)의 타입으로 주변지반의 교란영역이 형성하게 되어 압밀촉진을 지연시키는 요인으로 알려졌다.

연직배수공법은 Rendulic(1935)에 의하여 샌드드레인 의 이론적 해석을 제시하였고, Barron(1948), Hansbo(1981), Onoue(1988) 등은 연직배수재가 타설된 지반의 거동과 교란영향이나 배수저항의 영향 등을 고려한 간편식을 제안하였다. 그리고, Rowe(1966)는 방사 선 방향의 2차원 흐름에 대한 압밀거동을 분석하는 실내 시험장치를 개발하였으며, Singh와 Hattab(1979)은 Rowecell을 이용하여 연직배수재의 타입 및 관입방법과 셀의 크기의 변화에 따른 압밀시험을 수행하였다. 또한, 압밀지연에 관한 연구는 Hansbo(1979), Bergado et al.(1991) 등에 의하여 스미어존에 관한 연구가 실시되었고, Madhav, Park and Miura(1993), 朴永穆(1994)에 의하여 현장조건을 고려한 스미어 존에 대한 실측에 의한 연구를 실시하였다. 국내에서는 김수삼 등(1997)이 朴(1994)의 시험법을 이용하여 스미어 존의 형성을 파악 하고, 투수성 변화에 미치는 맨드렐의 영향에 관한 연구를 수행한 바 있다. 근래들어 현장 및 실내시험에서 맨드

렐의 형상 및 크기를 고려하여 압밀현상의 예측과 스미 어존에 관한 평가가 다양하게 이루어지고 있는 실정이다. 이와 더불어 실내에서 수평방향 압밀계수 및 투수계 수를 등을 구하기 위하여 Rowecell시험을 통해 배수조 건을 고려한 압밀시험을 실시하고 있다.

본 연구에서는 서해안과 남해안지역의 연약지반에서 채취한 피스톤시료와 대형자연시료를 이용하여 지반교란특성을 살펴보기 위하여 표준압밀시험, Rowecell시험에 의하여 다양한 압밀시험을 실시하였으며, 실내모형 시험에 의한 스미어 존의 교란영역과 교란에 의한 강도 및 압밀특성 변화를 고찰하였다.

2. 시험

2.1 채취 시료

대구경 시료채취는 시추공의 시료채취심도까지 오거 (Ø=500mm)를 이용하여 steel casing을 설치하고, 천

[표 1] 채취시료의 물리적 특성

시료 구분			Wn(%)	Gs	LL(%)	PI(%)	eo	U.S.C.S	
서해안	인천청라지구	스미어 존 측정	36.8	2.704	35.2	11.8	1.055	CL	
	인천송도지구	A구간	피스톤 시료	31.6	2.68	27.4	5.1	0.858	ML
			대형자연시료	31.4	2.68	28.0	5.8	0.866	ML
		스미어 존 측정	29.8	2.674	31.4	5.4	0.904	ML	
	인천영종지구	B구간	피스톤 시료	42.1	2.71	37.2	13.9	1.176	CL
			대형자연시료	41.9	2.71	36.9	13.4	1.185	CL
	인천청라지구	스미어 존 측정	36.8	2.704	35.2	11.8	1.055	CL	
아산인주지방	스미어 존 측정	34.5	2.693	32.1	7.7	0.941	CL		
남해안	광양배후단지	B구간	피스톤 시료	80.2	2.71	82.5	50.6	2.242	CH
			대형자연시료	80.4	2.71	83.4	50.8	2.255	CH
		스미어 존 측정	98.5	2.716	92.2	59.9	2.787	CH	
	광항우회도로	스미어 존 측정	61.0	2.688	53.6	24.9	1.654	CH	
	서측인접철도	스미어 존 측정	71.0	2.724	63.1	37.5	2.180	CH	

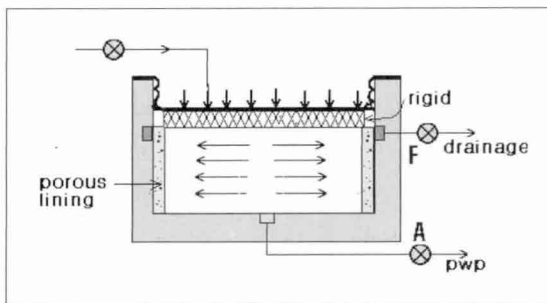
공 슬라임을 제거한 후 대구경샘플러($\varnothing=400\text{mm}$, $H=600\text{mm}$)를 롯데에 연결 채취심도까지 내린 다음 샘플러를 지반에 관입하게 되면 특별하게 고안된 하부 시료절단장치로 시료를 절단하여 샘플러를 끌어 올리게 된다. 채취한 대형시료($\varnothing=300\text{mm}$, $H=350\text{mm}$)는 샘플러 내부의 시료를 추출하고 표면정리 후 왁스와 랩을 이용하여 완전히 밀봉한다(김중국의, 2005).

대형자연시료는 시료추출 및 성형시 교란을 방지하기 위하여 속도 저감기를 장착한 대형시료추출기를 이용하여 대형압밀 및 대형 Rowecell시험을 실시하였다. 압밀셀은 ELE의 형태로 $\varnothing=250\text{mm}$, $H=90\text{mm}$ 의 크기 시료로 성형하여 시험하였다. 본 연구에 사용한 자연시료는 서·남해안지역에서 피스톤샘플러 및 대구경샘플러를 이용하여 채취한 것으로 이들 시료의 물리적 성질은 [표 1]과 같다.

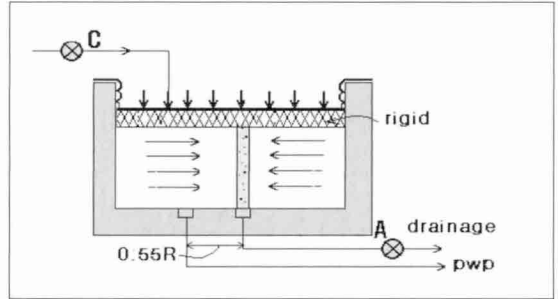
2.2 시험방법

2.2.1 압밀거동시험

압밀시험은 표준압밀시험과 Rowecell압밀시험을 실시하였다. Rowecell시험기는 Geo.c와 ELE사의 조합장치로 자동측정 및 자동입력되는 장치이다. 이 시험기는 기존압밀시험에 비해 시료에 기계적인 레버 대신에 횡경막에 압력을 작용시키는 것으로 배압의 조절이 가능



a) 외향 수평배수(Cro)



b) 내향 수평배수(Cri)

[그림 2] Rowecell의 수평배수 압밀시험방법

하고, 큰 공시체($\varnothing 75\text{mm}$, $\varnothing 150\text{mm}$, $\varnothing 254\text{mm}$)를 이용한 시험이 가능하며 배수방향을 쉽게 조절할 수 있는 장점이 있다. 특히, 수평배수 압밀시험은 [그림 2]와 같이 a)의 외향(inward) 방사배수와 b)의 내향(outward) 방사배수 조건을 고려하여 실시할 수 있다.

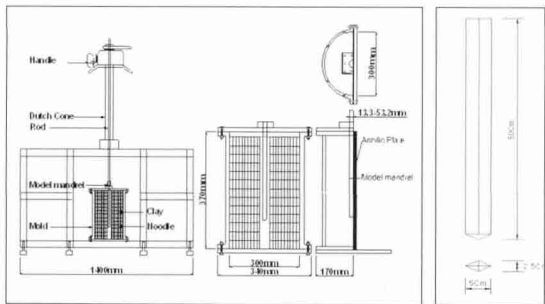
본 연구에서는 현장에서 채취한 자연시료를 이용하여 표준압밀시험(SC)방법으로 연직압밀시험과 퇴적방향과 직각($\beta=90^\circ$)이 되도록 회전시켜 횡방향 압밀시험을 실시하였다. 그리고, Rowecell시험은 피스톤 시료와 대형자연시료에 대하여 수평압밀시험을 실시하였다. 또한, 배수재의 타설시 맨드릴(mandrel)의 타입으로 시료 교란에 따른 압밀거동 특성을 살펴보기 위하여 각각의 자연시료에 대하여 직경비(d_e/d_w)를 변화시켜 압밀시험을 수행하였다. 각각의 공시체의 시험방법과 시험조건은 [표 2]와 같다. 이때, 배수재는 모래로 샌드드레인의 입도특성에 적합한 입자를 가지며, 투수계수가 $3 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 정도의 물성을 보인다. 점토시료내의 배수재를 설치하기 위하여 맨드릴은 원형의 선단 폐쇄형을 직경비별로 제작하였다. 모래 배수재의 타입은 공시체에 맨드릴을 시료중앙에 관입시킨 후 구멍을 형성하고 깔대기를 이용하여 모래를 설치하였다.

[표 2] 시험방법 및 시험조건

시료구분	시험방법	시험조건	시험횟수			비고 (압밀링 크기)
			A구간	B구간	C구간	
피스톤시료	표준압밀시험 (SC)	연직 배수 (SCCv)	1	1	1	∅: 60 x H: 20mm
	표준압밀시험 (SC)	횡 배수 (SCCh)	1	1	1	∅: 60 x H: 20mm
	Rowe cell시험 (R/C)	외향 수평배수 (R/CCro)	1	1	1	∅: 75 x H: 30mm
대형 시료	Rowe cell시험 (R/C)	외향 수평배수 (R/CCro)	1	1	1	∅: 150 x H: 50mm
피스톤시료	Rowe cell시험 (R/C)	내향 수평배수 (R/CCri)	5	5	-	n=3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5
대형 시료	Rowe cell시험 (R/C)	내향 수평배수 (R/CCri)	4	4	-	n= 3.5 4.5, 5.5, 6.5
피스톤시료	Rowe cell시험 (R/C)	내향 수평배수 (R/CCri)	-	-	4	n=4.5, 5.5, 6.5, 7.5
대형 시료	Rowe cell시험 (R/C)	내향 수평배수 (R/CCri)	-	-	4	n= 4.5, 5.5, 6.5, 7.5

2.2.2 스미어 존 측정

스미어 존 측정시험은 대형자연시료를 이용하여 시험용 몰드속에 5cm 두께로 이동시킨 후, 시험용 몰드 속에 이동된 5cm 두께의 점토시료를 수평이 되게 와이어로 절단한 후 점토 상부에 국수를 수평으로 부착시키는 과정을 거쳐 멘드렐을 일정속도로 관입하게 되고, 그 형상의 변화, 즉 소성변형 및 등강도 등을 관찰 후 스미어존 관련 시험을 하게된다(박영목, 2003). 본 연구에 사용된 멘드렐은 마름형으로 그 형태 및 규격은 [그림 4]와 같고, 시험시 멘드렐 관입속도는 50mm/sec의 일정한 속도로 관입하였다.



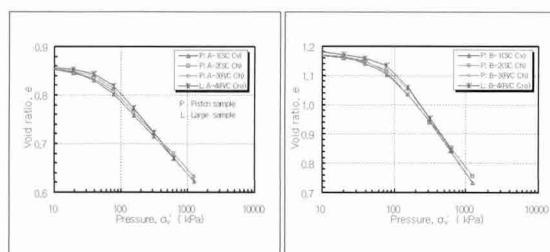
[그림 3] 실내 스미어 존 시험장치

[그림 4] 멘드렐 형상

3. 실험결과 및 분석

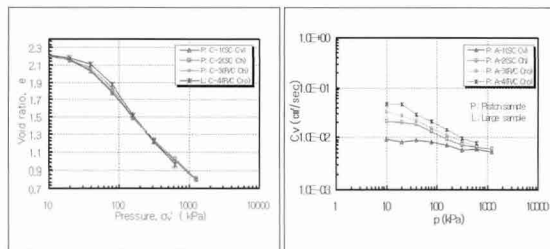
3.1 시험방법에 따른 압밀거동 분석

대상지역 즉, [표 1]의 A, B, C구간에서 채취한 피스톤 시료와 대형자연시료에 대하여 표준압밀시험(SC)과 Rowecell시험을 일련의 시험조건에 따라 수행하였으며, 시험방법에 따른 압밀시험결과를 [그림 5]와 같이 도시하였다.



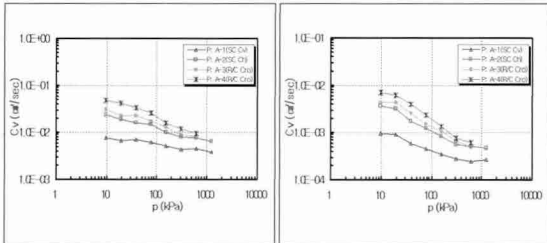
a) $e-\log P$ 곡선(송도지구 A구간)

b) $e-\log P$ 곡선(영종지구 B구간)



c) $e-\log P$ 곡선(광양배후 C구간)

d) Cv vs $\log P$ (송도지구 A구간)



e) CvorCh-logP(영종지구B구간) f) CvorCh-logP(광양배후C구간)

[그림 5] 시험방법 및 채취시료에 따른 압밀시험결과 비교

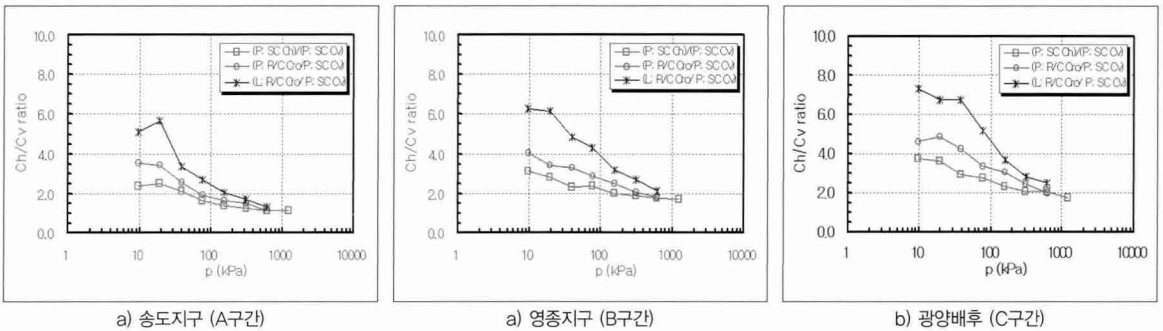
그림처럼 피스톤 시료의 $e-\log P$ 곡선은 배수방향, 시험방법에 관계없이 유사한 거동을 보이고 있는 반면, 대형자연시료는 $e-\log P$ 곡선상에서 최소 곡률반경을 명확하게 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이 때의 선행압밀하중($P'c$)은 피스톤시료의 $P'c$ 값보다 더 큰 값을 보이고 있다. 압밀응력에 따른 압밀계수는 압밀응력이 낮은 과압밀응력 영역에서는 압밀계수가 상당히 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있고, 정규압밀응력 영역에서는 압밀계수의 차이가 작아지는 것을 알 수 있다.

3.2 수평방향 압밀특성 분석

[그림 6]은 배수조건에 따른 수평압밀계수를 나타낸 것으로 표준압밀시험의 횡방향압밀계수(Ch)에 비하여 RoweCell시험의 수평압밀계수($P;R/CCr$)가 다소 크게 나타났으며, 피스톤시료의 RoweCell시험의 압밀계수($P;R/CCr$)보다 대형자연시료의 수평압밀계수($L;R/CCr$)가 상당히 큰 압밀계수를 보이는 경향을 알 수 있다. 또한, 점토시료의 성분에 따른 압밀계수의 이방성은 A구간(실트[ML]) < B구간(실트질 점토[CL]) < C구간(고소성 점토[CH]) 순으로 그 차이가 커지는 것을 알 수 있다.

[그림 6]의 압밀계수비(Ch/Cv)를 시험방법별로 정리하면 표 3과 같다. 이는 전체 압밀응력영역에서의 압밀계수비를 나타낸 것이며, ()은 100kPa일때의 압밀응력에 해당하는 압밀계수비이다.

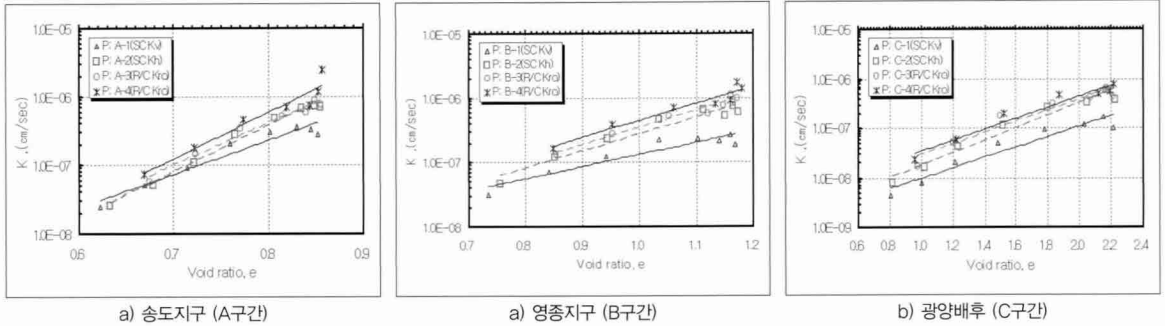
또한, 시험방법에 따른 투수계수의 비(k_h/k_c)는 [그림 7a)]와 같이 피스톤시료를 이용한 표준압밀시험(SC)의



[그림 6] 시험방법 및 채취시료에 따른 압밀계수비 비교

[표 3] 압밀계수비 비교

구 분		압밀계수비(Ch/Cv)		
		송도지구(A구간)	영종지구(B구간)	광양배후(C구간)
표준압밀시험 ($P;Ch/Cv$)	피스톤 시료	1.1~2.5(1.5)	1.6~3.1(1.8)	1.7~3.6(2.5)
RoweCell시험 ($P;R/CCr/Cv$)	피스톤 시료	1.1~3.6(2.3)	1.8~4.0(2.7)	1.9~4.9(3.8)
RoweCell시험 ($L;R/CCr/Cv$)	대형자연시료	1.3~5.1(2.6)	2.1~6.3(3.3)	2.5~7.3(4.6)



[그림 7] 시험방법 및 채취시료에 따른 간극비와 투수계수와의 관계

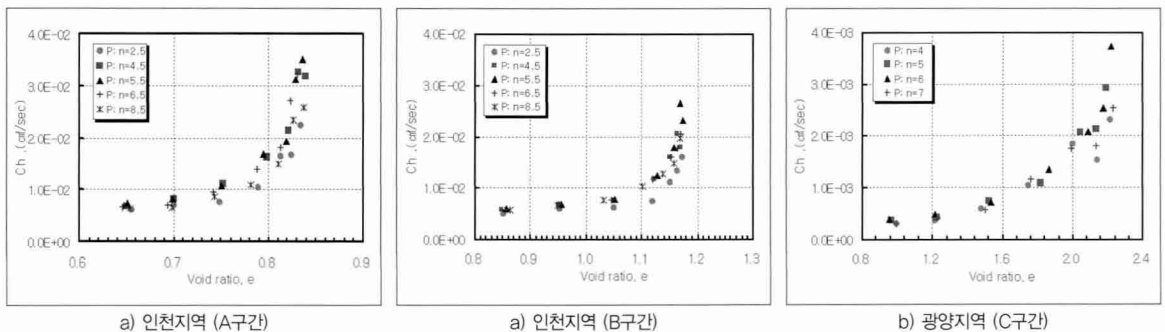
투수계수비($P:k_h/k_c$)와 Rowecell시험에 의한 투수계수비($P:k_{hri}/k_c$)는 각각 평균은 1.6, 1.9 정도이고, 대형자연시료에 대한 투수계수비($L:k_{hri}/k_c$)는 3.2정도이다. [그림 7b)]에서의 피스톤 시료의 횡방향 투수계수비($P:k_h/k_v$)는 2.3, Rowecell시험에 의한 투수계수비($P:k_{hri}/k_c$)는 3.1, 대형자연시료에 대한 투수계수비($L:k_{hri}/k_c$)는 4.3으로 나타났다. [그림 7c)]의 경우에는 피스톤 시료의 k_h/k_c 는 2.6, Rowecell시험의 k_{hri}/k_c 는 3.6, 그리고, 대형자연시료의 k_{hri}/k_v 는 4.4 정도의 이방성 크기를 보이고 있다.

3.3 직경비 변화에 따른 압밀 거동

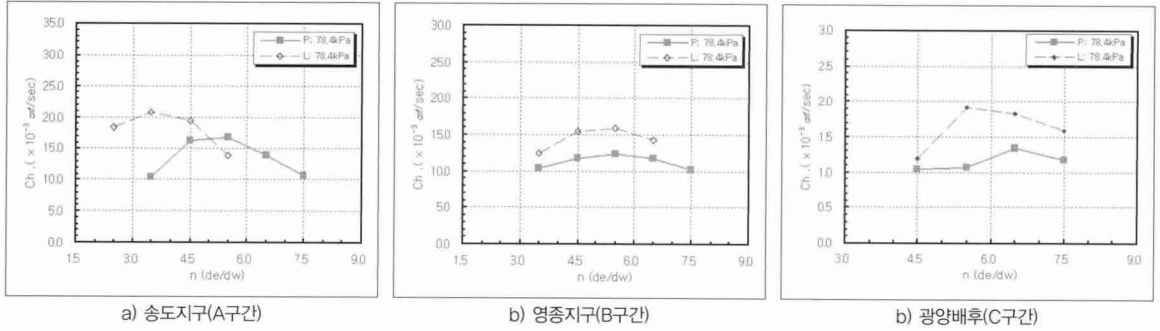
각 구간의 피스톤시료에 대하여 배수재의 직경비(d_e/d_w)를 변화시켜 수행한 Rowecell시험결과의 간극비

와 수평압밀계수와의 관계를 [그림 8]와 같이 나타내었다. [그림 8]에서 각 구간의 수평압밀계수는 시료의 토질 특성이 투수에 미치는 영향에 따라 간극비가 커질수록 압밀계수가 작아지는 경향을 보이며, 배수재의 직경비 변화에 따라서도 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있었다.

[그림 9]는 피스톤시료와 대형자연시료에 대하여 직경비(d_e/d_w)별로 실시한 압밀시험의 압밀계수를 비교한 것이다. 피스톤시료의 직경비별 n 값(d_e/d_w)은 압밀응력의 변화에 관계없이 $n=4.5\sim 6.5$, 대형자연시료는 값이 $3.5\sim 6.0$ 일때 압밀계수가 최대값의 영역에 있는 것으로 나타났다. 이는 배수재의 직경 증가에 따라 n 값의 적정 범위에서 압밀계수가 최고값을 갖게되나 그 이상의 배수재의 직경 증가는 멘델관입시 발생하는 주변지반의 교란현상으로 압밀 지연으로 압밀계수가 저하되는 것으



[그림 8] 직경비(d_e/d_w) 변화에 따른 간극비-압밀계수와의 관계



[그림 9] 직경비(d_e/d_w) 변화에 따른 입밀계수 변화

로 판단되기 때문이다.

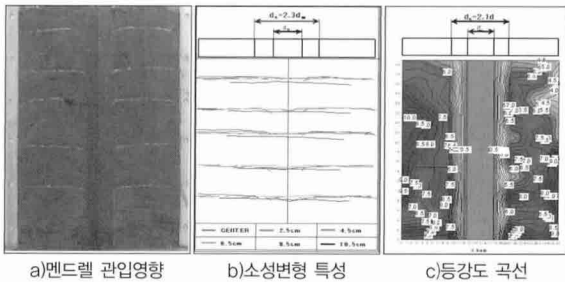
3.4 스미어존의 교란영향 분석

대형자연시료를 이용한 실내 스미어 존 측정결과를 토대로 소성변형 및 등강도 분석을 스미어 존 발생범위를 [그림 10~13]과 같이 나타냈다.

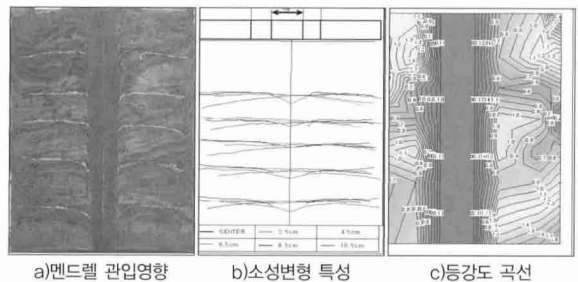
[그림 10~13]처럼 멘드렐 관입에 따른 소성변형 및 등강도 특성을 토대로 스미어 존의 교란영향 범위를 [표 4]

에 정리하였으며, 이와 함께 스미어 존 평가 후의 교란영역과 불교란 영역의 강도특성 변화를 나타내었다.

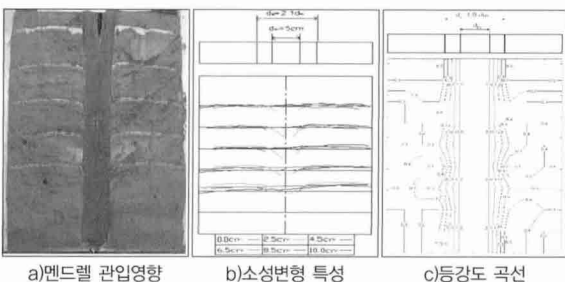
[표 4]와 같이 서해안지역의 저소성점도($ML \sim CL$)의 스미어 존 은 1.9~2.3, 남해안지역의 고소성점도(CH)의 d_s/d_m 은 1.6~4.2로 나타났으며, 시료의 상태 및 시료내에 골패각이 혼재되어 있는 경우 측정값에 약간의 편차가 발생할 수 있는 것으로 보인다. 또한, 표에서 처럼, 교란영역과 불교란영역의 강도비[(q_{ud})/(q_{uud})]는 저소성점



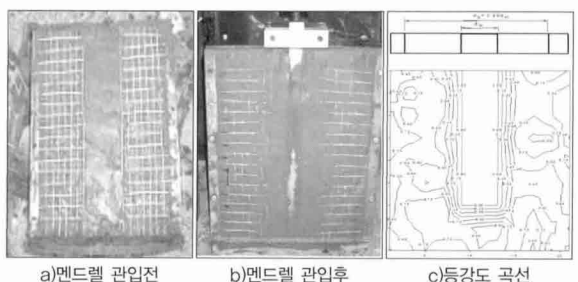
[그림 10] 서해안의 인천청라지구



[그림 11] 서해안의 아산인주지방



[그림 12] 남해안의 광양배후단지



[그림 13] 남해안의 서측인접철도

[표 4] 멘드렐 관입에 따른 스미어 존의 교란 효과

시료구분	USCS	d_s/d_m		일축압축강도(kgf/cm ²)			압밀계수(Ch , x 10 ⁻³ cm ² /sec)			
		소성변형	등강도	불교란	교란	교란/불교란	불교란	교란	교란/불교란	
서해안	인천청라지구	CL	2.2~2.3	2.0~2.1	0.22~1.04	0.18~0.85	0.82	2.18~9.52	1.88~6.92	0.73~0.86
	인천송도지구	ML	1.9~2.1	1.9~2.1	0.65~0.78	0.47~0.58	0.72~74	-	-	-
	아산인주지방	CL	2.1~2.2	1.9~2.1	2.04~2.2	1.75~2.02	0.86~0.91	1.51~3.04	2.04~85.0	0.56~0.67
남해안	광양배후단지	CH	1.6~2.1	1.8~1.9	0.18~0.33	0.14~0.27	0.77~0.82	-	-	-
	광항우회도로	CH	2.3~2.5	2.2~3.3	0.42~0.58	0.33~0.51	0.80~0.87	1.6~2.9	2.1~8.5	0.65~0.76
	서촉인접철도	CH	3.0~4.2	2.8~3.7	0.21~0.39	0.17~0.33	0.81~0.85	8.9~9.1	6.3~6.9	0.70~0.75

토(ML~CL)의 강도비 $[(q_{ud})/(q_{uud})]$ 는 0.72~0.91, 고소성점토(CH)의 강도비 $[(q_{ud})/(q_{uud})]$ 는 0.77~0.87로 나타났으며, 저소성점토(ML~CL)의 수평압밀계수는 0.56~0.86, 고소성점토(CH)의 압밀계수는 0.65~0.76으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 서해안과 남해안지역의 연약지반에서 채취한 피스톤시료와 대형자연시료를 이용하여 지반교란특성을 고찰하였으며, 그 결과를 다음과 같이 정리하였다.

1. 피스톤시료와 대형자연시료를 이용한 압밀시험결과, 피스톤 시료의 e -log*P* 곡선은 배수방향, 시험방법에 관계없이 유사한 거동을 보이고 있는 반면, 대형자연시료는 e -log*P* 곡선상에서 최소 곡률반경을 명확하게 나타났다.
2. 시험방법에 따른 압밀계수는 피스톤시료의 표준압밀시험의 Ch < 피스톤시료의 Rowecell시험의 $P:R/CCro$ < 대형자연시료의 Rowecell시험의 $P:R/CCro$ 순으로 나타났다. 특히, 수평압밀계수의

이방성은 A구간[실트(ML)] < B구간[실트질 점토(CL)] < C구간[고소성 점토(CH)] 순으로 그 차이가 커지는 것을 알 수 있으며, 압밀계수비(Ch/Cv)는 [표 3]과 같이 피스톤 시료보다 대형자연시료가 더 크게 나타난 것을 알 수 있다.

3. 피스톤시료와 대형자연시료에 대한 직경비(d_e/d_w) 별 압밀시험결과, 피스톤시료의 직경비별 n 값(d_e/d_w)은 $n=4.5\sim6.5$, 대형자연시료는 n 값이 3.5~6.0일 때 압밀계수가 최대값의 영역에 있는 것으로 나타났다.
4. 서해안 저소성점토(ML~CL)의 스미어 존 d_s/d_m 은 1.9~2.3, 남해안의 고소성점토(CH)의 d_s/d_m 은 1.6~4.2로 나타났다.

이와같이 대형자연시료는 점성토의 소성이 클수록, 시료의 크기가 클수록 교란도는 상당히 양호한 품질을 확보할 수 있으며, 압밀계수비 및 투수계수비, 그리고 스미어 존의 영향범위도 시료의 연경도와 교란도에 따라 다소 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 김수삼, 장연수, 고경환(1997), "스미어 존 형성과 투수성 변화에 미치는 멘드렐의 영향에 관한 연구", 한국지반공학회, 제 13권, 제5호, pp.45~57.
2. 김종국, 유성진, 채영수,(2005), "대형자연시료를 이용한 광양점토의 압밀특성에 관한 실험적 연구", 한국지반공학회 공동 학술발표회 논문집, pp. 429-436.
3. 박영목,(2003), "멘드렐 관입에 기인하는 스미어 존 평가", 한국지반공학회 논문집, 제19권 제6호 vol. 19, No.6, pp. 217-226
5. Barron, R. A.,(1948), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells", Transactions, ASCE, Vol. 113, No.2346, pp.718-754.
6. Hansbo, S.,(1981), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains", Proc 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol.105, No.7. pp.839-856.
7. Onoue, A.,(1988), "Consolidation by Vertical Drains Taking Well Resitance and Smear into Consideration", Soil and Foundation, JSSMFE, Vol.28, No.4, pp.165-174
8. Rowe, P. W. and Barden, L.,(1966), "A New Consolidation Cell", Geotechnique, Vol. 16, No.2, pp.162-169.
9. 三浦哲彦?朴 永穆?Madhav M.R.(1993),"ドレーンの排水性能に関する基礎的研究", 土木學會論文集 No.481.III-25. pp. 31-40.