

저치환율 모래다짐말뚝에 의한 복합지반의 응력분담거동에 대한 실험적 연구

Experimental Study on Stress Sharing Behavior of Composition Ground Improved by Sand Compaction Piles with Low Replacement Area Ratio

유 승 경* You, Seung-Kyong

Abstract

Mechanical behavior of composition ground improved by sand compaction pile (SCP) with low replacement area ratio could be more significantly affected by mechanical interaction between sand piles and clays than that of clay ground improved by SD or SCP with high replacement area ratio. It is essential to elucidate the mechanical interaction in the improved clay ground, in order to accurately estimate behavior in reducing settlement of the improved ground and increasing strength of clays. In this paper, through a series of model tests of composition ground improved by SCP with low replacement area ratio, each mechanical behaviors of sand piles and clays in the composition ground during consolidation was elucidated, together with stress sharing behavior between sand piles and clays.

요 지

샌드드레인공법(SD공법)이나 고치환율의 샌드콤팩션파일공법(SCP공법)과 비교하여 저치환율SCP공법에 의해 개량된 복합지반의 역학거동은 모래말뚝과 점토지반 양방의 역학적 상호작용의 영향을 보다 현저하게 받는다. 따라서 본 공법의 적용에 있어서 침하저감효과나 모래말뚝 사이의 점토의 강도증가 등을 정확히 평가하기 위해서는 복합지반 내부에서의 모래말뚝과 점토와의 역학적 상호작용을 설명하여야 할 필요성이 있다. 본 연구에서는 저치환율의 모래말뚝이 타설된 복합지반에 대한 일련의 모형실험을 통하여 압밀중에 발생하는 모래말뚝과 점토 각각의 역학거동과 복합지반 내부에 대한 응력분담거동에 대하여 고찰하였다.

Keywords : Composition ground, Ground improvement, Model test, Sand compaction pile, Stress sharing mechanism

1. 서 론

샌드드레인공법(SD공법)이나 샌드콤팩션파일공법(SCP공법)은 연약점토지반에 대한 개량공사에 있어서 가장 일반적으로 사용되는 공법이다. SD공법의 경우, 지반중에 관입되는 모래말뚝은 압밀축진을 위해서만 사용되기 때문에 개량지반의 침하저감 및 지지력증대 효과에 적극적으로 기여하지 못한다. 치환율이 70% 정도의 고치환율의 SCP공법의 경우, 개량지반은 모래

말뚝과 점토에 의해 구성되는 복합지반이라기 보다는 오히려 강제적으로 치환된 모래지반으로서 간주된다. 치환율이 약30%이하의 저치환율 SCP공법은 육상공사에 주로 사용되지만 최근에는 해상공사에서도 그 이용의 수가 증가하고 있다(北誌, 1994). 이 공법에 의해 개량된 복합지반의 역학거동은SD공법이나 고치환율 SCP공법의 경우와는 달리 모래말뚝부 또는 점토부의 어느쪽의 역학거동에 의해 지배되는 것이 아니라 양자의 역학거동의 상호작용에 의해 결정된다. 결국 이 공

* 정희원, 한국해양연구원 연안항만공학연구본부, 위촉선임연구원 (Member, Ph.D Geotechnical Engrg., Senior Researcher, Costal & Harbor Engrg. Research Lab., Korea Ocean Research & Development Institute, yousk@kordi.re.kr)

법을 적용하여 점토지반을 유용하게 이용하기 위해서는 복합지반내부의 역학거동을 정확히 파악하고 그 메커니즘을 밝혀야 할 필요성이 있다.

저치환율 SCP공법에 의해 개량된 복합지반의 역학거동에 큰 영향을 미치는 요인중의 하나로 모래말뚝과 점토와의 응력분담거동을 들 수 있다. 복합지반에 대한 응력분담거동에 대해서는 이전부터 연구가 진행되어 왔다. 八木(1984) 등은 복합지반의 응력상태를 소성평형론적으로 논의하였으며, 山口(1977) 등은 모래말뚝이 Mohr-Coulomb법칙에 따르는 탄소성 상태, 점토는 탄성 혹은 탄소성 상태라는 가정에 의해 복합지반의 응력분담비를 이론적으로 결정하였다. 福本(1984) 등은 모래말뚝과 그 주변의 점토의 침하량의 차에 의해 발생하는 전단응력의 전달 메커니즘으로부터 복합지반에 작용하는 연직응력의 분담에 대한 차분방정식을 유도하였다. 그러나 이러한 연구들은 대부분 모래말뚝은 배수조건, 점토부는 배수조건이거나 비배수조건 이라는 한정된 조건에서 응력분담거동을 점토대상으로 하고 있다. 따라서, 하중이 재하되는 시점(점토부의 비배수조건)부터 압밀이 종료할때(점토부의 배수조건)까지의 개량지반내부의 역학거동, 특히 응력분담거동은 아직 충분히 밝혀져 있지 않다.

본 논문에서는 저치환율 SCP공법의 합리적인 설계법 확립의 일환으로 저치환율 모래말뚝에 의해 개량된 복합지반의 역학거동의 규명을 그 목적으로 하고 있다. 우선, 저치환율의 모래말뚝에 의해 개량된 복합지반의 압밀거동에 관한 일련의 실내모형실험을 실시한다. 이 모형실험에서는 복합지반의 압밀이 진행됨에 따라 발생하는 복합지반전체의 침하량의 변화, 점토부의 과잉간극수압의 변화, 모래말뚝부와 점토부에서 발생하는 연직응력증분의 변화들을 측정하여 그것들의 거동을 파악한다. 또한, 개량지반을 구성하는 모래말뚝과 점토 각각의 역학거동과 응력분담 메커니즘에 대하여 고찰한다.

2. 실내모형실험

2.1 실험장치

그림 1은 실내모형실험장치의 상세도를 나타내고 있다. 실험에 사용된 토조는 내경 280mm, 내부심도 625mm 이고 토조내부의 측면마찰을 저감시키기 위해 크롬으

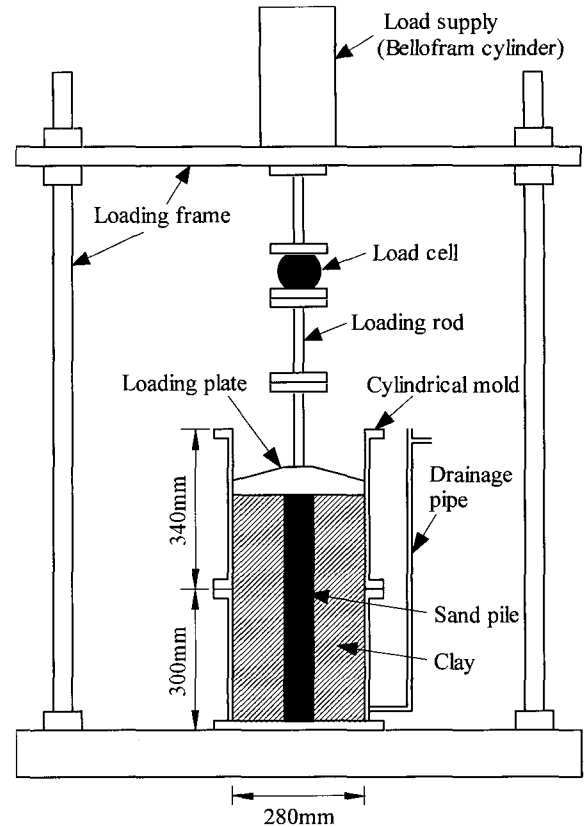


그림 1. 실내모형실험장치의 상세도

로 표면처리를 하였다. 토조하부는 배수용 파이프를 설치하여 모형지반의 하부로부터 배수를 가능하게 하였다. 또한, 재하판에는 직경 2mm의 구멍을 다수 만들어 모형지반 상부로 부터의 배수성을 확보하였다. 모형지반에 대한 재하는 복동식의 벨로프레임 실린더를 사용해 재하봉과 재하판을 통해 실시하였다.

2.2 사용시료 및 모형지반의 제작

2.2.1 사용시료

모형실험에서는 시판의 카오린(Kaolin) 점토를 사용하였으며, 본 점토의 물리적 특성은 표 1에 나타난 바와 같다. 표 1에서 알 수 있는 바와 같이 이 점토는 통일분

표 1. 점토의 물리적 특성

G_s	W_L	W_p	I_p	C_c
2.62	82.6%	28.6%	54.0	0.87

표 2. 모래의 물리적특성

G_s	e_{max}	e_{min}	D_{10}	D_{30}	D_{60}	C_u	C_g
2.64	0.87	0.58	0.17	0.30	0.63	3.71	0.84

류법상 소성과 압축성이 큰 점토로 분류된다.

표 2는 모래말뚝과 배수용 부설모래에 사용된 모래의 물리적 특성을 나타내고 있다. 문헌에 의하면 본 실험에 사용된 모래는 배수재로서 그 기능을 충분히 발휘할 수 있음을 알 수 있다(일본 지반공학회, 1988).

2.2.2 모형지반의 제작

본 실험에서는 다음의 순서에 의해 모형지반을 제작하였다. 우선, 점토를 그 액성한계의 약 2배에 해당하는 150%의 함수비로 반죽하고 약 50mm높이의 배수용 모래층을 설치한 토조내에 550mm의 높이가 되도록 충전하였다. 그 때에 소정의 위치에 토압계와 간극수압계를 설치하였다. 그 다음, 재하압 2.16kPa과 9.8kPa의 조건에서 2단계로 나누어 예비압밀을 실시하여 약 2.72의 간극비를 갖는 점토지반을 제작하였다. 그 후 점토지반의 중심에 치환율에 상당하는 원형 케이싱을 삽입하면서 주변의 점토가 교란되지 않도록 주의하며 굴삭하였고, 소정의 심도에 토압계를 설치하면서 수증낙하법에 의해 모래말뚝을 형성시켰다. 사전의 예비실험에서 같은 방법으로 제작한 모래공시체의 간극비는 약0.72였다. 따라서 모래말뚝의 상대밀도는 약52%로 추정된다. 모래말뚝 타설후, 다시 상재압 9.8kPa로 압밀을 실시함으로써 모래말뚝타설에 의

한 응력변동을 제거하여 모형지반의 제작을 완료하였다.

2.3 실험케이스와 실험조건

표 3은 실험케이스와 실험조건을 나타내고 있다. 실험은 복합지반의 치환율이 5%, 10% 및 25%인 세가지의 시리즈에 대하여 실시하였다. 각각의 시리즈에서는 소정의 재하응력에 도달하기 까지 3~4단계로 나누어서 단계재하를 실시하였다.

2.4 계측시스템

표 4는 모형실험에서의 측정항목과 각각의 항목에 대응하는 계측기를, 또한 그림 2와 표 5는 계측기들의 설치위치를 나타내고 있다. 실험에서는 토압계와 간극수압계를 중간심도에 대하여 대칭이 되도록 설치하였다. 특히, 점토부에 계측기를 설치할 때는 수압면을 소정의 위치와 방향이 되도록 신중히 설치하였으며 설치 후 점토의 충전은 가능한한 균등하게 소량으로 실시하여 점토충진에 따른 계측기의 이동을 최대한 방지하였다. 단, 계측기들의 설치위치는 실험종료후에 재확인 불가능하였다. 또한, 본 실험을 실시하기 전에 토압계와 간극

표 3. 실험케이스와 실험조건

Test Series	Replacement Area Ratio (%)	Test Case	Loading Stage	Pressure Before Applying Surcharge (kPa)	Total Surcharge (kPa)	Increment Pressure (kPa)	Initial Height of Model Ground (mm)
As-5	5	As-5-1	1	9.8	39.2	29.4	379
		As-5-2	2	39.2	68.6	29.4	
		As-5-3	3	68.6	98.0	29.4	
As-10	10	As-10-1	1	9.8	39.2	29.4	377
		As-10-2	2	39.2	68.6	29.4	
		As-10-3	3	68.6	98.0	29.4	
As-25	25	As-25-1	1	9.8	49.0	39.2	394
		As-25-2	2	49.0	88.2	39.2	
		As-25-3	3	88.2	127.4	39.2	
		As-25-4	4	127.4	161.7	34.3	

표 4. 측정항목과 계측기

Measuring items	Measuring instruments
Applied load	Load cell (LTZ-1TA)
Settlement	Dial gauge
Vertical stress in sand	Earth pressure transducer (BE-5KC, 5KD)
Vertical stress in clay	Earth pressure transducer (BE-2KC, 2KD)
Excess pore pressure	Pore pressure transducer (BP-2KB)

표 5. 계측기의 설치위치 (Unit : mm)

Test series	lc1	lc2	lc3	lc4	lc5	ls1	ls2	ls3	ls4	ls5	r _m
As-5	21	164	175	148	22	15	117	125	106	16	80
As-10	37	112	234	106	43	26	79	166	75	31	90
As-25	21	148	193	143	45	25	96	138	103	32	100

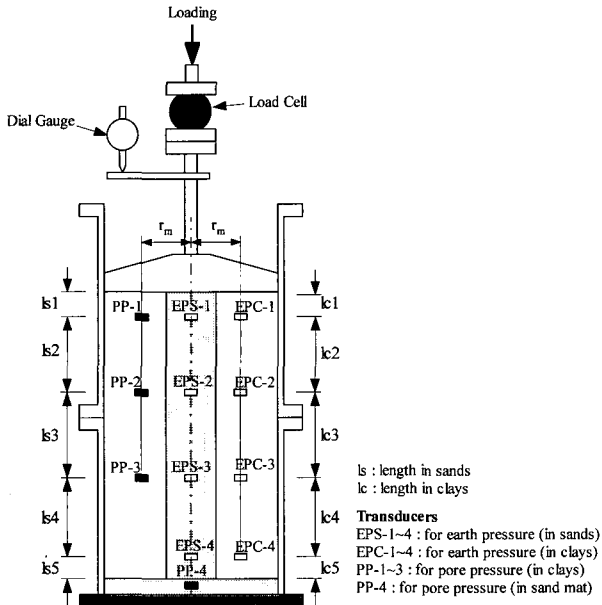


그림 2. 계측기의 설치도

수압계의 캘리브레이션을 위한 예비실험을 실시하였다. 토압계에 대해서는 모래 혹은 점토만이 충전된 토조에 대한 재하실험을, 간극수압계에 대해서는 압력용기를 사용한 재하실험을 실시하여 각각의 교정계수를 산정하였다.

3. 모형지반의 거동

3.1 침하량의 경시변화

그림 3은 모형실험 시리즈 As-5, As-10 및 As-25에 대한 각 재하단계에서의 침하량의 경시변화를 나타내고 있다. 모든 실험케이스에서 시간에 따른 침하량의 변화곡선은 압밀곡선을 나타내고 있으며, 각각의 치환율에 대한 침하량은 재하단계가 높을수록 적은 값을 나타내고 있다.

3.2 과잉간극수압의 경시변화

그림 4는 모형실험 As-5-1, As-10-1 및 As-25-1에 대한 과잉간극수압의 경시변화를 나타내고 있다.

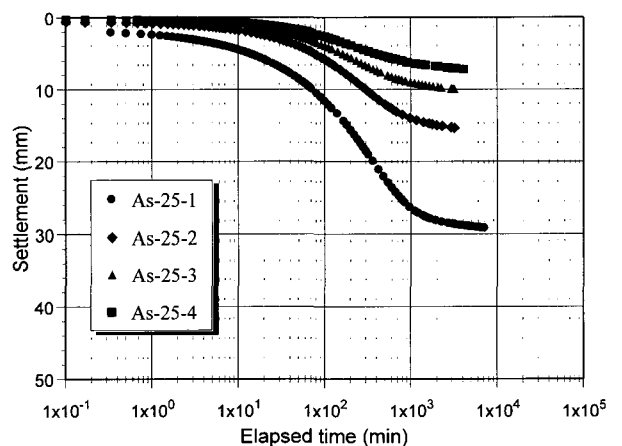
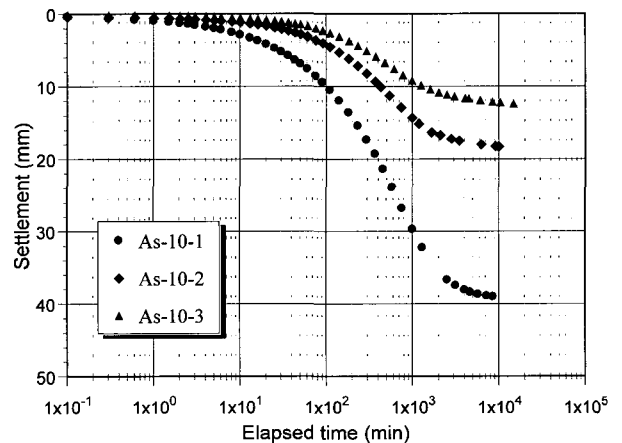
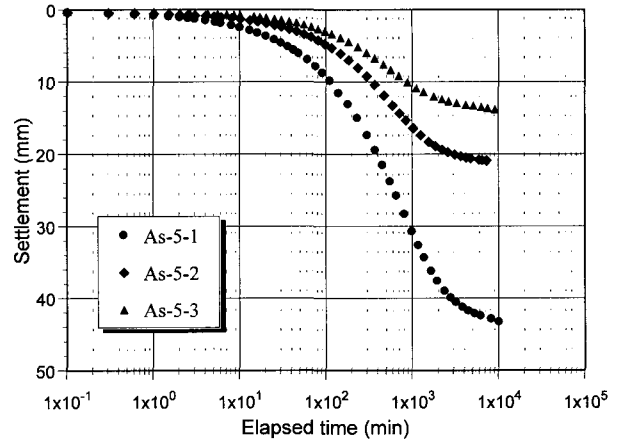


그림 3. 침하량의 경시변화

As-5-1과 As-10-1의 경우, 재하 직후부터 약10분 정도 까지 과잉간극수압은 초기치 보다 큰 상태로 있다가

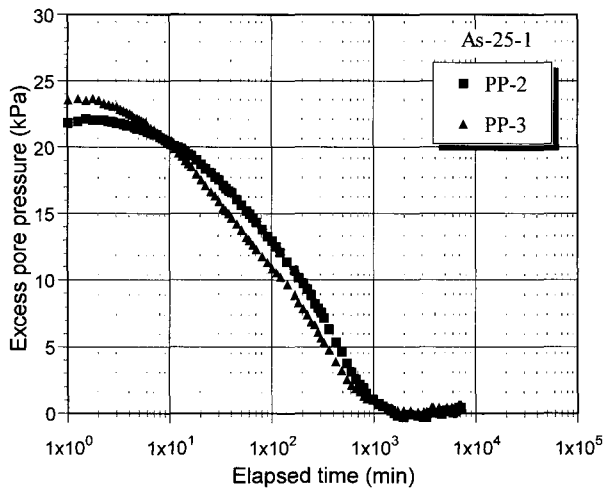
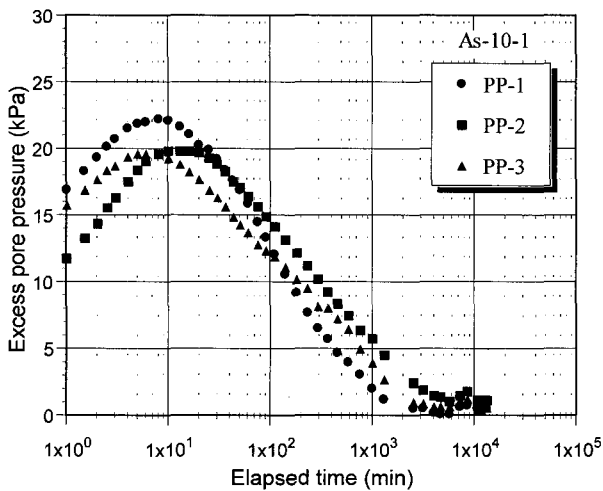
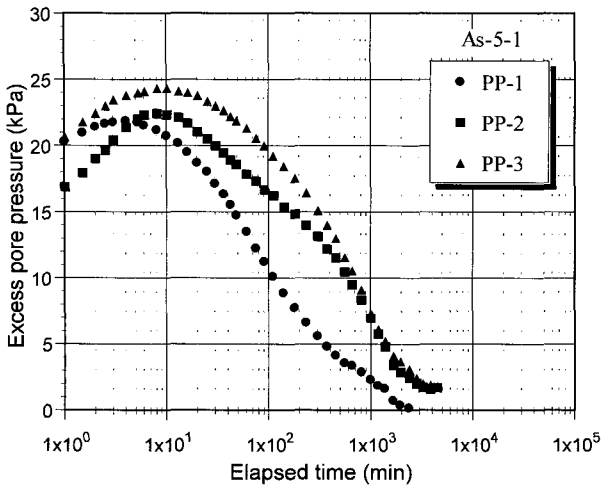


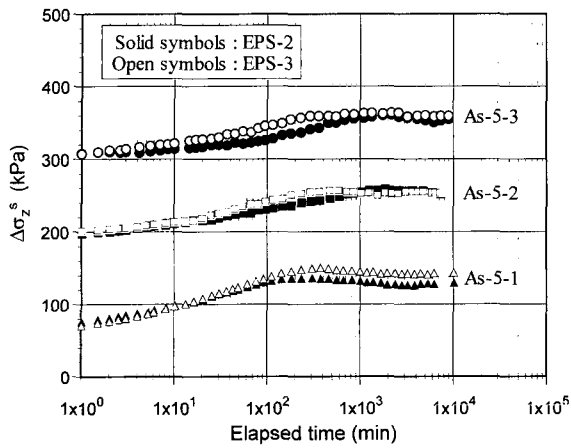
그림 4. 과잉간극수압의 경시변화

그 후 감소로 전화되는, 즉, 간극수압계의 반응이 지연되는 현상이 관찰되었다. 이것은 모형지반과 간극수압계에 미소량의 기포가 존재하여 완전하게 포화 되지 못했기 때문이라고 생각된다. 또한, 그림 2의 모형지반

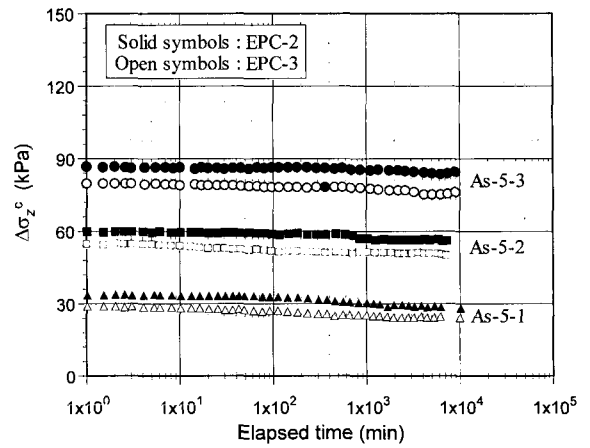
의 가장 상부에 설치한 간극수압계(PP-1)로부터 측정된 과잉간극수압은 그 외의 간극수압계로부터 측정된 과잉간극수압들보다 빨리 소산되고 있음을 알 수 있다. 이것은 모형실험에서 상면으로부터의 배수를 허용하고 있기 때문이라고 판단된다. 한편 모든 실험에서, 모형지반의 중심으로부터 상부와 하부방향으로 대칭적으로 설치된 간극수압계들(PP-2와 PP-3)로부터 측정된 과잉간극수압의 경시변화는 서로 거의 일치하고 있다. 따라서 본 모형실험에서는, 모형지반의 상부면과 하부면의 배수조건에 의해서, 모형지반의 상하부에서 대칭적으로 과잉간극수압의 소산거동이 발생하였음을 알 수 있다. 한편 모형지반의 상부면 배수조건에 영향을 받는 위치(간극수압계 PP-1)를 제외하면, 치환율이 증가할수록 과잉간극수압의 소산시간이 짧아질 수 있다.

3.3 연직응력증분의 경시변화

그림 5~7은 치환율 변화(As-5, As-10 및 As-25)에 따른 모형실험에 대해, 모래말뚝과 점토 각각의 연직응력증분($\Delta\sigma_z^s$ 와 $\Delta\sigma_z^c$)의 경시변화를 나타내고 있다. 여기서, $\Delta\sigma_z^s$ 와 $\Delta\sigma_z^c$ 는 각각 그림 2에 나타난 토압계 EPS-2, EPS-3, EPC-2 및 EPC-3에 대한 값들이다. 모래말뚝부의 경우, 모형지반의 중심으로부터 상부와 하부방향으로 대칭적으로 설치된 토압계들(EPS-2와 EPS-3)로부터 측정된 $\Delta\sigma_z^s$ 의 경시변화들은 서로 거의 일치하고 있지만, 점토부의 경우, 토압계들(EPC-2와 EPC-3)로부터 측정된 $\Delta\sigma_z^c$ 의 경시변화들은 각각 약간의 차이를 보이고 있다. 이는 점토부에 설치한 토압계들이 정확히 대칭의 위치에 있지 않기 때문이라고 판단된다. 한편, 모든 치환율에 대한 $\Delta\sigma_z^s$ 는 각각 재하초기부터 재하하중과 비교하여 큰 값들을 나타내고 있으며 시간이 경과함에 따라서 증가하고 있지만, $\Delta\sigma_z^c$ 는 모든 치환율에 대하여 재하초기부터 재하하중보다 각각 약간 작은 값들을 나타내고 있으며 시간이 경과함에 따라서 약간 감소하고 있다. 따라서, 이러한 결과들로 미루어 보면, 등침하 조건의 모형지반에서는 재하된 하중이 모래부에 집중하고 있으며, 이러한 특성은 모형지반의 압밀이 진행됨에 따라서 현저해지고 있음을 알 수 있다.

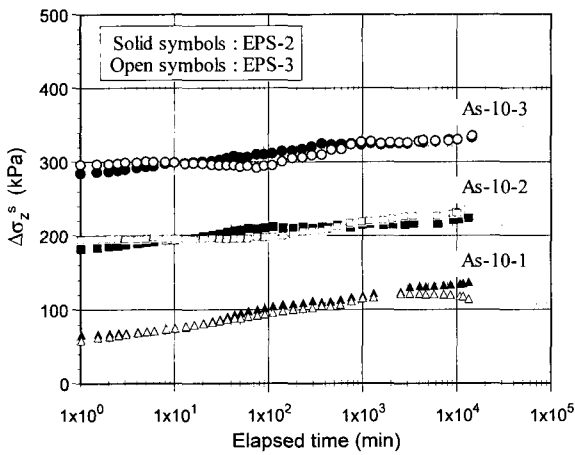


(a) Sand pile

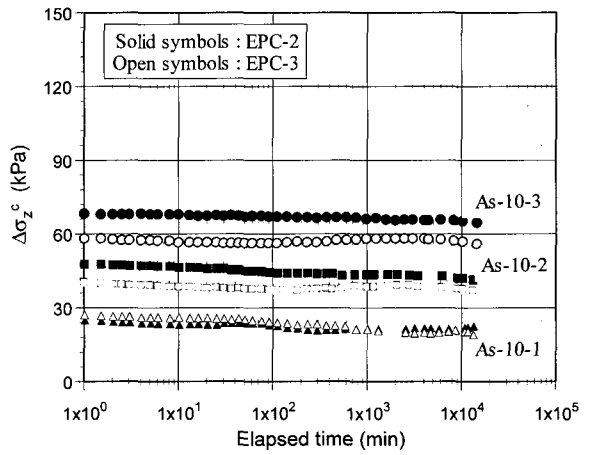


(b) Clay

그림 5. 모래말뚝과 점토의 연직응력증분의 경시변화 (As-5)

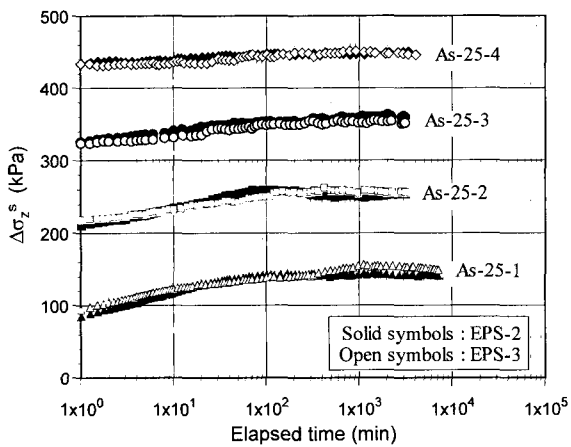


(a) Sand pile

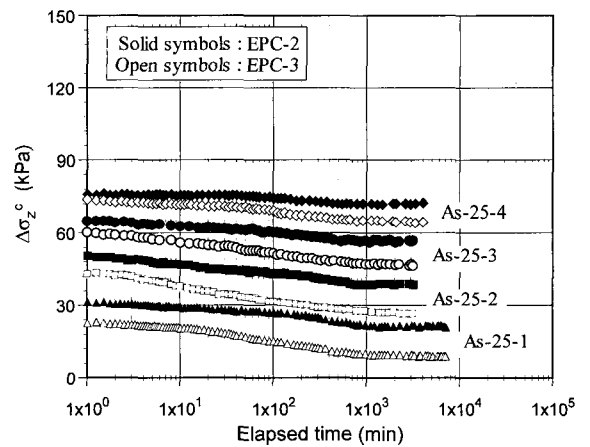


(b) Clay

그림 6. 모래말뚝과 점토의 연직응력증분의 경시변화 (As-10)



(a) Sand pile



(b) Clay

그림 7. 모래말뚝과 점토의 연직응력증분의 경시변화 (As-25)

4. 복합지반의 응력분담거동

4.1 복합지반의 재하압력과 연직응력증분과의 관계

그림 8은 복합지반에 적용된 재하압력과 압밀종료시의 $\Delta\bar{\sigma}_z^s$ 및 $\Delta\bar{\sigma}_z^c$ 의 관계를 나타내고 있다. $\Delta\bar{\sigma}_z^s$ 의 값은 그림 2의 토압계 EPS-2와 EPS-3에 의한 평균치를, $\Delta\bar{\sigma}_z^c$ 의 값은 EPC-2와 EPC-3에 의한 평균치를 사용하였다. 앞장에서 설명한 바와 같이 모든 재하압력에 대해서 $\Delta\bar{\sigma}_z^s$ 는 $\Delta\bar{\sigma}_z^c$ 보다 큰 값들을 나타내고 있다. 한편, $\Delta\bar{\sigma}_z^s$ 및 $\Delta\bar{\sigma}_z^c$ 의 값들은 각각 재하압력이 증가함에 따라 모두 선형적으로 증가하고 있으며, 특히 재하압력증가에 따른 $\Delta\bar{\sigma}_z^s$ 의 증가율은 $\Delta\bar{\sigma}_z^c$ 의 증가율보다 현저히 크게 나타나고 있다. 이와 같은 사실에서 복합지반에 작용하는 재하압력이 증가할수록 모래말뚝에 집중되는 응력이 커짐을 알 수 있다. 한편, 재하단계 1과 2의 모래말뚝부의 연직응력증분을 제외하면, 치환율이 작을수록 $\Delta\bar{\sigma}_z^s$ 및 $\Delta\bar{\sigma}_z^c$ 값들은 각각 큰 값을 나타내고 있다.

4.2 복합지반의 응력분담비의 경시변화

그림 9는 복합지반의 응력분담비(n)의 경시변화를 나타내고 있다. 여기서, n 은 식 (1)에 의해 산정하였다.

$$n = \frac{\Delta\bar{\sigma}_z^s}{\Delta\bar{\sigma}_z^c} \quad (1)$$

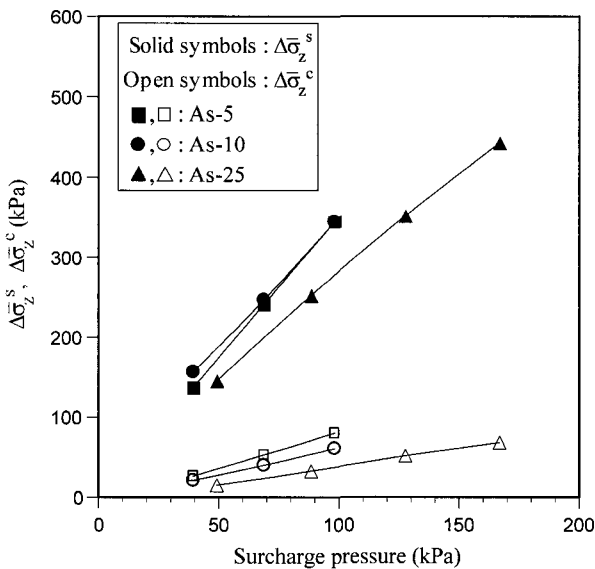


그림 8. 재하압력과 연직응력증분의 관계

복합지반의 치환율에 관계없이 n 은 복합지반의 압밀이 진행됨에 따라서 그 값이 증가하고 있지만, 그 증가율은 재하단계가 높아짐에 따라서 감소하고 있다. 또한 복합지반의 압밀 초기에서는 재하단계가 높을수록 n 값이 크게 나타나지만, 압밀이 진행됨에 따라 그 차이가

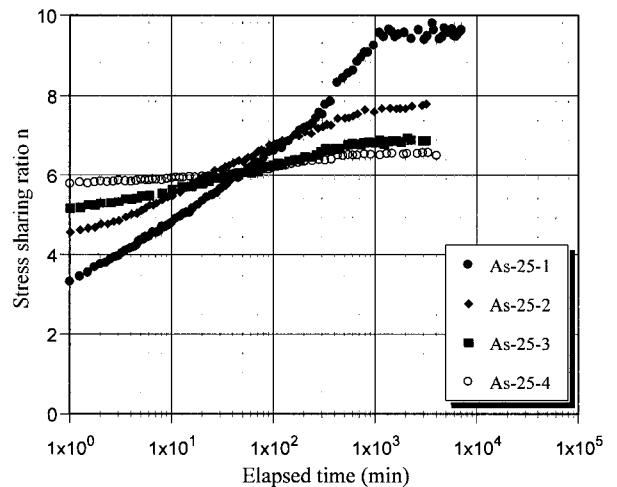
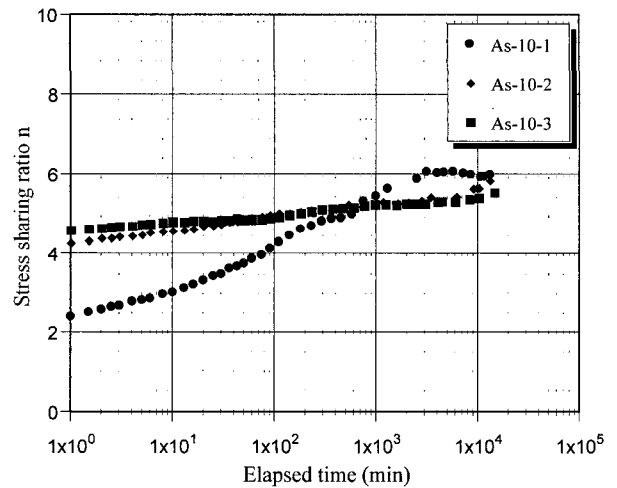
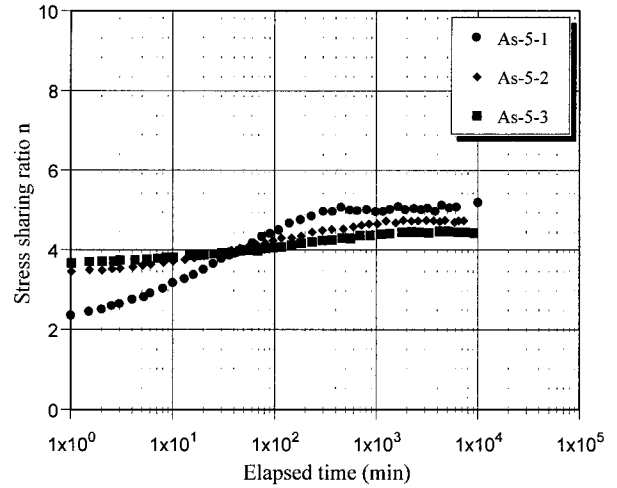


그림 9. 응력분담비(n)의 경시변화

점점 작아지며 압밀이 종료되는 시점에서는 그와 반대로 재하단계가 낮은 경우의 n 값이 크게 나타났다. 이와 같은 실험결과들로부터 저치환율 SCP에 의한 복합지반의 응력분담 거동은 압밀이 진행됨에 따라서 그 특성이 변화함을 알 수 있다.

4.3 복합지반의 재하압력 및 치환율과 응력분담비와의 관계

그림 10은 복합지반에 적용된 재하압력과 압밀종료시의 응력분담비(n)와의 관계를 나타내고 있다. 모든 치환율에 대해서 복합지반의 n 값은 재하압력이 증가함에 따라 단순히 감소하고 있으며, 치환율이 클수록 큰 값을 나타내고 있다. 이러한 거동은 기존의 연구 결과들에서 관찰된 거동과 일치하고 있다(樓 등, 1986; 石崎 등, 1989). 따라서, 본 모형실험결과는 충분한 신뢰성이 있다고 할 수 있다. 그런데, 4.1절에서의 고찰결과에 의해서 재하압력이 증가함에 따라 $\Delta\sigma_v^s$ 의 증가율이 $\Delta\sigma_v^e$ 의 증가율보다 현저히 커짐을 알 수 있었지만, 그림 10에서의 응력분담비는 재하압력이 증가함에 따라 감소하고 있다. 이와 같은 사실에서 복합지반에 재하되는 압력이 커질수록 모래말뚝에 집중되는 응력은 증가하지만 상대적으로 점토부에 발생하는 응력 또한 증가하여 그것들의 증가비율의 변화에 의해 응력분담비가 감소함을 알 수 있다. 이러한 현상은 복합지반의 치환율의 변화에 따른 응력분담비의 변화특성에서도 볼 수 있다. 그림 8에서

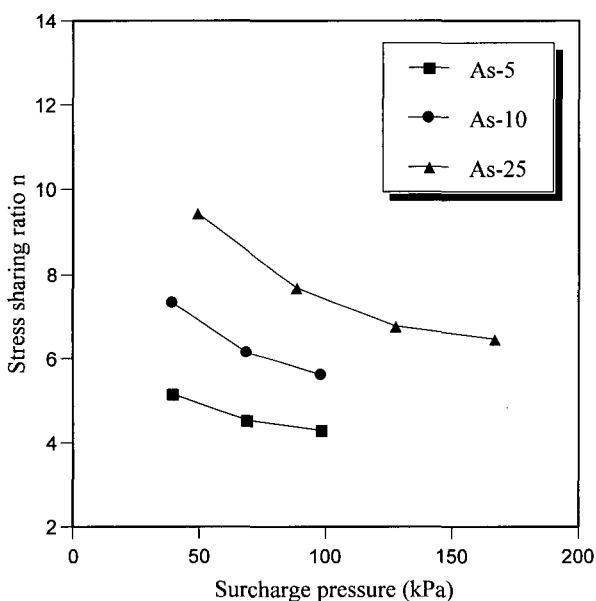


그림 10. 재하압력과 응력분담비(n)의 관계

알 수 있는 바와 같이 복합지반의 치환율이 증가함에 따라서 $\Delta\sigma_v^s$ 는 감소하지만, 그림 10에서는 치환율이 증가함에 따라서 복합지반의 응력분담비는 증가하고 있다. 이러한 현상은 복합지반의 치환율이 작을수록 모래말뚝에 집중되는 응력은 증가하지만 상대적으로 점토부에 발생하는 응력 또한 증가하여 그것들의 증가비율의 변화에 의해 응력분담비가 감소한다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는, 저치환율의 SCP에 의해 개량된 복합지반의 압밀거동에 관한 일련의 모형실험을 실시하였다. 그 결과, 등침하 조건하에서 복합지반전체의 침하거동, 점토부의 과잉간극수압 소산거동, 개량지반 내부의 응력상태의 경시변화를 파악하였다. 또한, 그 결과를 토대로 하여 압밀중에 발생하는 복합지반 내부의 응력분담거동을 고찰하였다. 이하에 본 연구에 의해 얻은 결과를 요약한다.

- (1) 복합지반의 침하량은 치환율에 관계없이 재하단계가 높을수록 적은 값을 나타낸다. 또한, 상부면 배수 조건의 영향을 받는 위치를 제외하면, 치환율이 증가할수록 과잉간극수압의 소산시간이 빠르게 나타난다.
- (2) 복합지반의 치환율에 관계없이 모래말뚝부의 연직응력증분은 재하초기부터 재하하중 보다 큰 값을 나타내고 압밀이 진행함에 따라서 증가하지만, 점토부의 연직응력증분은 재하초기부터 재하하중 보다 약간 작은 값들을 나타내며 압밀이 진행함에 따라서 다소 감소한다.
- (3) 복합지반에서는 재하하중의 크기에 관계없이 재하된 하중이 모래말뚝부에 집중하며, 이러한 특성은 압밀이 진행함에 따라서 현저하게 나타난다.
- (4) 복합지반의 모래말뚝부와 점토부에 대한 압밀종료시의 각각의 연직응력증분은 재하하중이 증가함에 따라서 선형적으로 증가하며, 특히 모래말뚝부의 연직응력증분의 증가율은 점토부에 비하여 현저히 크다.
- (5) 복합지반의 응력분담비는 압밀이 진행됨에 따라서 그 값이 증가하며, 재하단계가 낮을수록 그 증가율이 크다. 또한 복합지반의 압밀초기에서는 재하단계가 높을수록 응력분담비가 크지만 압밀이 진행되면서 그 차이가 없어지며 종료되는 시점에서는 오히려

재하단계가 낮은 경우의 응력분담비가 크게 된다.
 (6) 복합지반에 재하되는 압력이 커질수록, 또한 치환율이 작을수록 모래말뚝에 집중되는 응력은 증가하게 되지만, 상대적으로 점토부에 발생하는 응력 또한 증가하여 그것들의 증가비율의 변화에 의해 압밀종료시의 응력분담비는 감소한다.

본 연구에서 얻은 일련의 모형실험결과는 기존의 연구성과와 비교하여도 충분한 신뢰성이 있음을 알 수 있었다. 그러나, 모형실험에서의 $\Delta\sigma_z^s$ 와 $\Delta\sigma_z^c$, 그리고 과잉간극수압의 계측치만으로는 지반내의 전반적인 역학거동을 설명하는 것은 어려운 일이다. 특히, 실험결과로부터 얻은 재하압력과 치환율에 따른 응력분담비 변화 특성을 규명하기 위해서는 모래말뚝과 점토부의 응력상태를 엄밀히 고찰할 필요가 있다. 따라서, 필자는 저치환율 SCP에 의한 복합지반의 응력분담 메커니즘에 대한 수치해석적 연구를 실시하여 재하 직후로부터 압밀종료까지의 모형지반내부의 역학거동과 응력분담 메커니즘을 보다 엄밀히 고찰하고자 한다.

참 고 문 헌

1. 北詰昌樹(1994), “低置換率SCP工法の開発と港灣工事への適用”, 土と基礎, Vol.42, No.2, pp.31-36.
2. 八木則男, 榎明潔, 矢田部龍一 (1984), “砂杭を用いた複閤地盤の力學特性に關する模型實驗”, 複閤地盤の強度と變形に關するシンポジウム發表論文集, pp.147-152.
3. 榎明潔, 八木則男, 矢田部龍一 (1986), “複閤地盤要素の壓密時の砂杭への應力集中”, 土木學會論文集, No.376/III-6, pp.201-209.
4. 山口栢樹, 邨上倅利(1977), “複閤地盤の應力分擔比について”, 第12回土質工學研究發表會, pp.543-546.
5. 福本和正, 山肩邦男(1984), “複閤地盤中の砂杭部と粘土部の分擔する應力について”, 複閤地盤の強度と變形に關するシンポジウム發表論文集, pp.139-146.
6. 日本 地盤工學會編 (1988), “軟弱地盤對策工法”, pp.548-551.
7. Oda, K., Matsui, T. and You, S. K. (2001), “Model Tests and Numerical Simulations on Consolidation Behavior of Clay Ground Improved by SCP with Low Replacement Area Ratio”, International Symposium on Recent Developments of Ground Improvement (ISRDCI 2001), Special Technical Publication-2, pp.9-12.

(접수일자 2003. 6. 26, 심사완료일 2003. 10. 13)