

모래다짐말뚝의 원심모델링

Centrifugal Modeling of Sand Compaction Pile

유 남 재^{*} 정 길 수^{**} 김 상 진^{***} 채 승 호^{****}
Yoo, Nam-Jae^{*} Jeong, Gil-Soo^{**} Kim, Sang-Jin^{***} Chae, Seung-Ho^{****}

ABSTRACT

This paper is results of extensive centrifuge model experiments about design factors influencing the bearing capacity and the settlement behaviors of SCP (Sand Compaction Pile).

Centrifuge model tests were carried out changing design factors for SCP method such as replacement area ratio ($a_s = 20, 40, 70\%$), improvement ratio to footing width ($W/B = 1, 2, 3$), and amount of fines in sand pile ($\#200 = 5, 10, 15$). Therefore, the effects of these design factors on the bearing capacity and the settlement behavior of SCP were investigated and changes of stress concentration ratio due to such an design factors were also investigated. Centrifuge model testing technique for preparing and installing centrifuge model of sand compaction pile, using freezing them, was also developed.

As results of centrifuge model tests, more fines in sand compaction pile increases the bearing capacity of SCP. Optimum improvement ratio to footing width was found to be 2. Values of stress concentration ratio was in the ranges of 1.5 - 3.5. The depth of bulging in sand piles was found in the range of 2.0 - 2.5 times of pile diameter.

키워드 : 모래다짐말뚝, 복합지반, 응력분담비, 치환율

Keywords : Sand Compaction Pile, Composite Ground, Stress Concentration ratio, Area Replacement Ratio

1. 서론

모래다짐말뚝공법(Sand Compaction Pile)은 느슨한 모래나 점토로 된 연약지반에 모래를 압입하여 지름이 큰 모래말뚝을 다져 시공하는 지반개량공법으로서, 점토지반에서는 원지반과 다져진 모래말뚝으로 이루어진 복합지반을 형성함으로써 지반의 전단강도와 지지력을 증대시키고, 측방변위를 억제하

며, 압밀침하를 감소시키는 등의 효과를 목적으로 시공한다. 이러한 SCP공법은 연약층의 토질 특성과 지지층의 변화가 심한 경우에 일반적으로 사용되고 있는 양질토 준설치환공법에 비하여 경제적이며 개량효과가 강제치환 공법에 비하여 확실한 것으로 알려져 그 적용성이 증대되고 있는 현실이다.

1830년에서 1850년대에 걸쳐 유럽에서는 연약지반의 압밀축진공법으로 초기에는 연약지반에 말뚝을 관입, 인발한 후 그 구멍에 모래를 다져넣는 형태의 시공법을 사용하였고, 1900년대부터 케이싱을 사용한 프랭키 그라벨 파일(Franky Gravel Pile)과 현장타설 콘크리트 시공법을 응용한 충격식 방법을 사용하였지만 시공 능률이 나빠서 사용실적이 많지 않았다.(shinsha 등, 1991). SCP공법이 하나의 지반

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사
** 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정
*** 강원대학교 대학원 토목공학과, 석사과정
**** 삼성중공업 기술연구소 연구원

개량공법으로 발전된 것은 1955년 일본에서 특허권을 등록한 일에서 시작되며(Miyake 등, 1991), 모래다짐말뚝이 적극적으로 활용된 것은 1957년 충격식 모래다짐말뚝이며 이후, 1959년 진동기의 개발로 바이브로식 모래다짐말뚝공법이 개발되어 시공능률과 모래말뚝 조성의 자동관리로 인하여 수중시공이 가능하게 되었고, 진동식을 이용하는 현재공법의 기초가 확립되었다(Mikasa, 1984). 이후, 1966년 일본은 수성에서 강제치환공법이 개발되어 해상시공에도 적용되기 시작하였다(Matsuo, 1967).

국내의 경우 1984년 광양제철소 기초지반 조성시 샌드드레인과 SCP공법을 병용하여 연약지반개량을 실시한 이래 최근의 경우 모래다짐말뚝공법이 호안안벽 시설물의 효과적인 기초 처리 공법으로 제시되고 있다. 국내에서 적용 가능성이 증가할 것으로 예상되는 SCP공법은 국외, 특히 일본의 시공 실적이나 미국 및 유럽의 쇄석공법 사용 실적에 비하여 시공 실적이 매우 적은 편이며, 대부분의 시공이 육상 시공에 한하여 수행된 반면에 해상의 연약 점성토 지반에서 그 적용 사례는 매우 적은 실정이다. 그러나 우리나라는 경제성장과 국토개발로 인하여 개량대상지역으로 점차 연약지반이 증가하는 추세에 있고, 구조물이 증량화, 대규모화됨에 따라 점성토의 강도증가, 또는 시공기간의 단축화 등을 위한 개량공법이 요구되며, SCP 공법의 적용범위도 확대되고 있다.

따라서 본 연구에서는 SCP공법에 사용되는 모래자원의 경제성을 극복하기 위하여 다양한 입도에 대한 적용성 및 SCP공법에 의해 개량된 정규압밀 점토지반의 지지력을 명확하게 하기위해 원심모형 실험방법에 의한 SCP개량지반을 모델화하여 각종 요인이 복합지반의 극한지지력 및 변형·파괴모드에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다.

2. 모래다짐말뚝

2.1 치환율

치환율(a_s)이란 원지반 면적과 모래말뚝이 차지하는 부분의 면적비로 정의되며, 주로 모래말뚝 타설 간격에 의해 결정된다.

한편, 성토 등 상부구조물이 비교적 경량인 경우에는 치환율(a_s)이 20~40% 정도인 저치환율 SCP공법이 많이 사용되며, 항만공사 등 모래말뚝 자체로 지지력, 전단강도 증가효과 등을 발휘해야 하는 경우에는 치환율(a_s)이 70% 정도인 고치환율 SCP공법이 사용되고 있다(Mikasa 등, 1984). 그러나, 항만공사에서 주로 사용하던 고치환율 SCP공법은 모래의 부족현상과 파다설계에 의한 경제적인 문제로 인하여 치환율 30~40% 정도인 저치환율 SCP공법

으로 대체중이다.

그림 1에 모래다짐말뚝과 원지반의 치환율을 나타내었다.

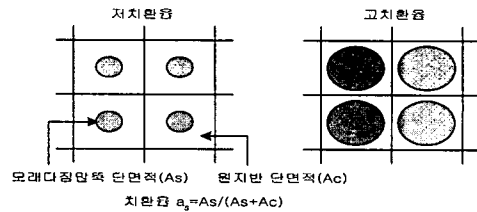


그림 1. 치환율(a_s)

2.2 응력분담비

SCP공법은 연약지반에 모래다짐말뚝을 타설하여 원지반과 모래말뚝의 복합작용에 의한 지반의 지지력증대, 침하의 감소를 기대하는 공법으로서 복합지반에서 상재하중이 재하되는 경우 모래말뚝과 원지반의 변형특성으로 모래말뚝 사이에 아칭(arching) 현상이 발생하게 된다. 즉, 변형이 작은 모래말뚝에 원지반보다 큰 응력이 집중하게 되고, 연약층이 그 나머지를 분담하게되며 이 응력의 비를 응력분담비(n)라 한다.

$$n = \frac{\sigma_s}{\sigma_c} \quad (1)$$

여기서, σ_s = 상재하중에 의한 모래말뚝에 발생하는 연직응력

σ_c = 상재하중에 의한 점토에 발생하는 연직응력

복합지반은 하중재하시 전단응력과 압축응력이 작용하게 되고, 전단변형과 압밀변형으로 인한 응력집중이 복합하여 연약층의 압밀이 진행됨에 따라 응력분담이 달라지며, 응력분담에 미치는 영향 인자가 불명확하게 된다. 그러므로 응력분담비는 실제 현장경험에 의존하여 2~6(보통 3)범위 안에서 결정하고 있다.

3. 실내실험

연약점토지반에서 모래다짐말뚝공법의 지지력과 침하거동에 영향을 주는 인자들에 대한 광범위한 원심모형실험을 수행하였다.

SCP공법은 점토와 모래말뚝의 복합지반으로 형성되어 있기 때문에 모래말뚝의 강도, 치환율(a_s), 개량폭비(W/B), 기초와 개량범위의 위치관계, 모래말뚝의 착지조건, 원지반의 강도분포, 외력조건, 압

모래다짐말뚝의 원심모델링

밀조건, 하중의 재하속도, 대상구조물의 종류와 기하학적 형상 등 다양한 요인에 의해 영향을 받으나 본 연구에서는 상기의 제 요인중에서 모래말뚝의 세립분함유량 및 치환율(as), 개량폭비(W/B) 등을 중심으로 다음 표 1과 같이 원심모형실험을 실시하였다.

표 1. 시험 조건표

시험번호	구분조건	시험조건		
		as (%)	개량폭비(W/B)	세립분함유률 (#200)
A-1	R-SD-W-1	40	1	5
A-2	R-SD-W-2	40	2	5
A-3	R-SD-W-3	40	3	5
B-1	R-SD-#200-10	40	2	10
B-2	R-SD-#200-15	40	2	15
C-1	R-SD-AS-20	20	2	5
C-2	R-SD-AS-70	70	2	5

여기서, R : Rectanglar Model Box

SD : Sand(Ju Mun Jin standard sand)

W : Improvement Width

AS : Area Replacement Ratio

DR : Relative Density

#200 : Passing to No.200

1) 원지반 성형

모형지반에 사용된 시료는 부산인근에서 채취한 해성점토로서 기본물성은 표2에 나타낸 바와같고, 시료를 액성한계 2배의 함수비로 교반시켜 압밀토조(폭 20mm, 길이 450mm, 높이 400mm)에 투기한 후, 압밀토조 상부에 0.05, 0.1, 0.2 kg/cm²의 공기압력을 단계적으로 가하여 7일 정도 예비압밀을 실시하여 예비압밀완료후 20cm 높이의 원지반을 조성하였다.

2) 모래다짐말뚝의 성형

모래다짐말뚝은 원통형 관(내경 2cm)에 일정한 함수비의 주문진표준사를 투입하여 진동대위에서 90%의 상대밀도를 갖는 모래말뚝을 만든후 물로 포화시켜 동결하였다. 한편, 모래말뚝의 세립분함유량은 200번체를 통과한 실리카 세립분을 이용하여 조절하였다.

표 2. 주문진 표준사와 점토의 기본물성

Test	JuMunJin Standard Sand	Clay	
Specific Gravity (Gs)	2.60	2.72	
Results of Consistency Test	LL, %	NP	43.0
	PL, %	NP	23.6
	PI, %	NP	20.6
Grain Size Distribution	Cu	1.2	12.5
	Cc	1.0	3.6
	USCE	SP	CL

3) 복합지반의 성형 및 계측기 설치

복합지반은 예비압밀이 종료된 원지반을 탈착하여 원심모형토조에 부착한후 50G의 원심력장에서 자중압밀를 실시하여 실물규모 10m에 상당하는 높이 약 20cm의 정규압밀 점토지반을 제작하였으며 이때, 점토층 중심부에 간극수압계를 매설하여 과잉 간극수압의 소산을 확인하였다.

자중압밀 종료후 1G상태에서 모래말뚝을 타설한후, 하중재하시 기초 및 지반에 발생하는 연직변위량 및 수평 변위량을 측정하기 위하여 변위계를 설치하였고, 모래말뚝과 점토지반의 응력분담비를 알아보기 위하여 모래다짐말뚝과 점토지반의 표면에 직경 6.5 mm의 토압계를 매설하는 한편, 점토층 중간 깊이에서 개량지반의 외각으로부터 1cm, 4cm, 9cm 위치에 간극수압계를 매설하여 위치별 과잉간극수압 변화를 측정하였다.

4) Marker

연직하중 재하에 따른 모형지반의 활동선을 관찰하기 위하여 원심모형시험기에서 자중압밀 완료후 모형토조의 전면 벽체를 탈착하여 일정 격자상에 Marker를 매설하여 활동선을 관찰하였다.

5) 연직하중재하장치

연직하중의 재하는 그림 2에 도시한 바와 같이 연직하중 계측용 로드셀(Load Cell)을 매개체로 하여 하중재하 장치 로드케에 강결하여 재하중위 재하판의 회전 및 수평변위를 구속하고 있는 하중재하장치를 사용하여 2mm/min. 으로 하중을 재하하였다. 하중재하판은 70×200mm에서 저면을 거칠게 만들고 개량지역 중앙의 3열의 모래말뚝을 재하하는 위치에 설치한다. 그림 3에 치환율(as), 개량폭비(W/B)에 따른 말뚝중심간 간격, 말뚝갯수등을 나타내었다.

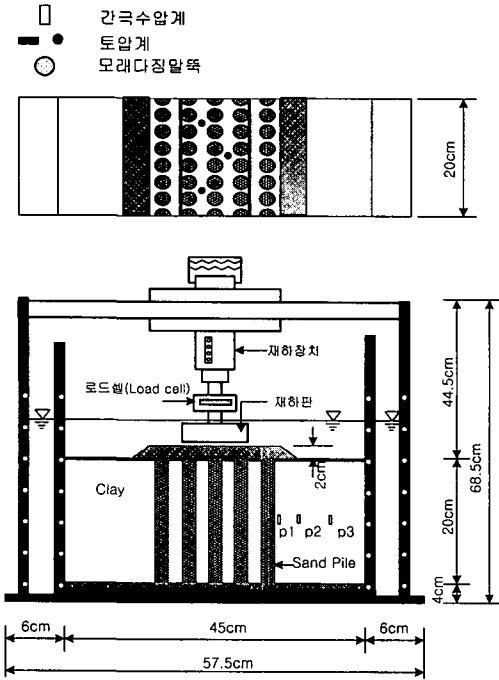


그림 2. 연직하중 재하시험 모식도

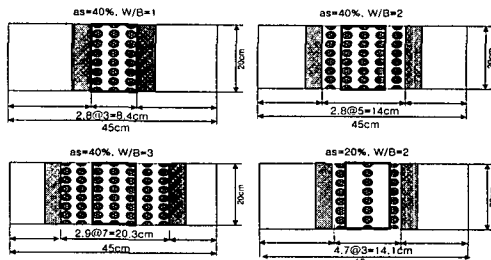


그림 3. 치환율 및 개량폭비에 따른 모래말뚝배치도

4. 결과분석

SCP공법에 의해 개량된 복합지반의 거동을 조사 연구하기 위하여 치환율(a_s), 모래말뚝의 상대밀도(D_r), 개량폭비(W/B), 모래말뚝의 입도조정 등을 달리하여 원심모형시험을 수행하였으며, 시험결과를 바탕으로 각종 요인에 따른 하중-침하특성, 하중-토압특성, 응력분담비의 관계, 과잉간극수압-침하특성, 재하시험후 함수비분포 등의 복합지반에 대한 거동을 분석하였다.

4.1 세립분 함유량

그림 4는 세립분 함유율(#200) 5%, 10%, 15%에 대한 하중-침하 곡선을 나타낸 것이다. 재하실험결과 상대밀도(D_r)=90%, 치환율(a_s)=40%, 개량폭비(W/B)=2일 때 세립분 함유율 5, 10, 15%에 따른 각각의 극한지지력(q_{ult})은 0.47, 0.62, 0.65 kg/cm^2 로 나타났으며, 세립분 함유율이 클수록 극한하중이 커지는 경향을 보인다. 그러나, 세립분 함유율 5%일 때와 10%일 때의 극한값은 많은 차이를 보이지만 10%와 15%의 극한 지지력의 값은 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 또한, 하중재하시 침하량이 3~5mm정도에서 극한하중에 도달하는 것을 알 수 있다.

세립분 함유율에 따른 지지력의 증가는 세립분에 의한 간극의 충전효과와 입자의 역물림(Interlocking)에 의한 모래말뚝의 전단강도 증가에 의한 것으로 판단된다.

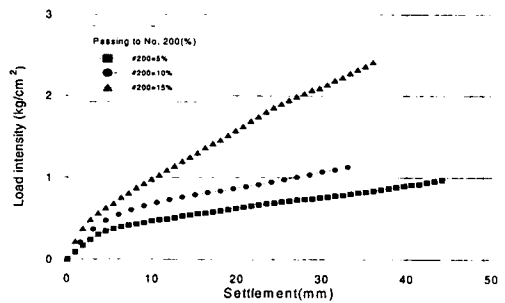


그림 4. 세립분 함유량에 따른 하중-침하 곡선 (#200: 5%, 10%, 15%)

4.2 개량폭비의 영향

그림 5는 상대밀도(D_r)=90%, 치환율(a_s)=40%, 세립분 함유율(#200)=5%, 개량폭비(W/B) 1, 2, 3에 대한 모래다짐말뚝과 점토의 토압-침하 곡선을 보여 주고 있다. 실험결과 개량폭비가 클수록 토압분포가 증가하였으며, 개량폭비가 1인 경우와 2인 경우의 항복시점에서의 토압분포는 차이가 있었으나, 개량폭비가 3인 경우는 2인 경우와 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 이는 개량폭비가 2부근에서 최대의 효과를 얻을 수 있다는 Kimura 등(1983)의 제안과 일치하는 것이다.

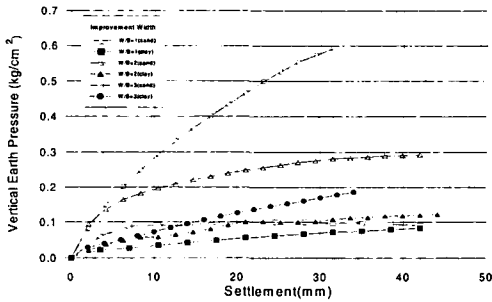


그림 5. 개량폭비에 따른 토압-침하 곡선 (W/B : 1, 2, 3)

4.3 응력분담비

그림 6은 상대밀도(Dr)=90%, 개량폭비(W/B)=2, 세립분 함유율=5%, 치환율(as)=20%, 40%에 대한 모래말뚝과 점토지반의 응력분담비 분포를 나타낸 것이다. 실험결과 치환율 20%일때와 40%일 때 각각 1.5, 3.5의 응력분담비의 분포를 나타내고 있으며 40%일때의 응력분담비는 일반적인 값을 나타내며 극한하중이후 감소하는 경향을 보이고 있다. 이와같이 극한하중이후 나타나는 응력분담비의 감소는 응력이 집중되어 있던 모래말뚝의 항복으로 인한 응력분산에 의한 것으로 판단된다. 또한, 극한하중시점에서 치환율 20%일 때 보다 40%일때의 응력분담비가 크게 분포하고 있으며 치환율 20%일 때 극한하중시점에서의 낮은 응력분담비는 극한하중시점 이후 하중증가에 따라 증가하는 경향이 나타난다.

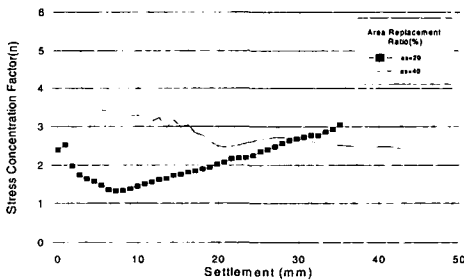


그림 6. 치환율에 따른 응력분담비-침하 곡선 (as= 20, 40%)

4.4 지반변형 및 파괴메카니즘

그림 7~10은 상대밀도(Dr), 치환율(as), 개량폭비(W/B), 세립분함유율에 따른 조건을 변화시킨 재하시험 종료(큰 변형을 유도)후에 모형지반을 해체해서 조사한 모래말뚝의 상태를 보여주고 있다.

그림 7, 8은 재하시험후 모형지반 중앙의 모래말뚝

의 파괴상태를 보여주고 있으며, 재하판아래 모래말뚝 상부로부터 2D~2.5D깊이에서 말뚝의 명료한 전단면이 나타나고 있다. 또한, 재하판 외측의 좌우 각각 2열의 모래말뚝은 수평방향으로 변형하고 있지만 원형활동은 발생하지 않았으며, 말뚝상부를 기준으로 말뚝길이의 2/3정도 즉 상부로부터 6D~6.5D부근에서 수평변위가 시작되는 것을 볼수 있다. 이와같이 과도한 수평변위의 발생은 하중재하시 재하판이 복합지반의 파괴시점을 지나 깊이 40mm정도의 강제침하에 의한 원인으로 판되며 수평변위의 크기는 0.75D~1.5D정도로 발생하였다. 한편, 하중 재하시 강제 침하에 의한 재하판 주변에서 점토지반의 용기가 발생하였으며 모형토조의 전단면을 탈착후 부착한 Marker에 의한 점토지반의 관찰결과 전반전단파괴가 발생하였음을 확인하였다.

한편, 그림 9, 10은 그림 7, 8과 달리 모래말뚝의 명료한 전단면은 보이지 않았으나 재하판 주변에서 점토지반의 용기발생과 모래말뚝의 전체적인 수평변위를 확인할수 있었다. 또한, Marker에 의한 관찰결과 지반의 전반전단파괴를 관찰할 수 있었다. 한편, 상대밀도, 치환율, 개량폭비의 동일한 시험조건에서 모래말뚝의 세립분이 증가할수록 모래말뚝의 명확한 전단파괴가 발생하지 않았으며, 상대밀도, 치환율, 세립분함유율이 동일한 시험조건에서도 개량폭비가 증가할수록 모래말뚝의 전단면이 발생하지 않았다. 이와같이, 세립분함유율과 개량폭비에 따른 복합지반의 개량조건은 앞에서 언급하였듯이 지반의 지지력변화에 많은 영향을 주고 있다.



그림 7. 재하시험후 파괴형태(Dr=90%, as=40%, W/B=2, #200=5%)

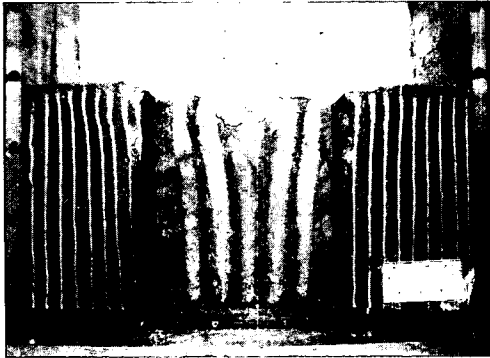


그림 8. 재하시험후 파괴형태 (Dr=90%, as=40%, W/B=2, #200=10%)

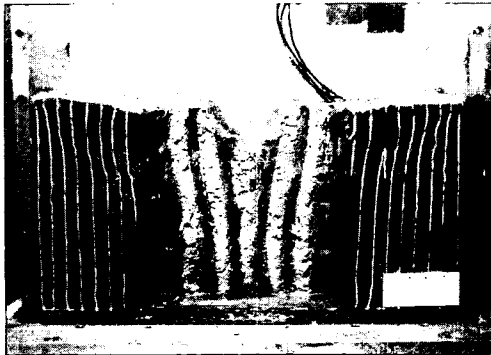


그림 9. 재하시험후 파괴모드(Dr=90%, as=40%, W/B=2, #200=15%)



그림 10. 재하시험후 파괴모드 (Dr=90%, as=40%, W/B=3, #200=5%)

4.5 재하시험후 위치별 함수비분포

하중재하시험후 모형토조를 해체하여 개량지반과 주위 점토지반의 함수비를 측정하였다.

표 3은 재하시험전·후 위치별 함수비 분포를 나타내며, 재하시험전 원지반 함수비는 각각의 실험조건에 따라 65~70%의 범위에 분포하고 있다. 또한 재하시험전 원지반의 단위중량은 1.67~1.70 t/m³, 간극비(e)는 1.538~1.616의 범위를 나타내고 있다.

표 3. 위치별 함수비 분포

구분	함수비 분포(%)					모형지반 (시험전)	
	시험전 (W ₀)	시험후(W _i)				단위중량	간극비
		개량지반 (W _i)	미개량지반				
원지반 (W ₀)	P1 (W _i)	P2 (W _i)	P3 (W _i)				
A-1	69	52	62	65	68	1.68	1.585
A-2	69	53	62	67	67	1.66	1.616
A-3	69	52	63	67	68	1.67	1.584
B-1	68	51	60	64	67	1.67	1.584
B-2	70	53	67	70	70	1.70	1.554
C-1	70	59	62	67	68	1.69	1.585
C-2	65	-	60	64	65	1.69	1.538

한편, 그림 11~14는 상대밀도, 치환율, 개량폭비에 따른 각각의 하중재하시험후 모형토조를 해체하여 위치별 함수비분포를 나타낸 것이며 개량지역은 51~59%, 미개량지반은 위치에 따라 60~70%의 함수비 분포를 나타낸다. 이와같이 개량지반과 미개량지반의 함수비 차이는 SCP공법에 의한 배수거리의 단축과 점토지반의 압밀축진에 의한 강도증진 효과를 기대할 수 있다.

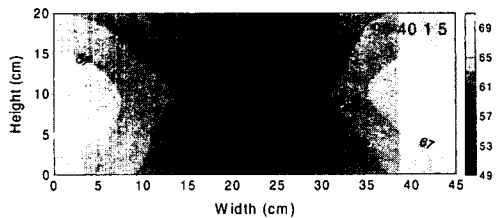


그림 11. 재하시험후 함수비 분포(as=40%, W/B=1, #200=5%)

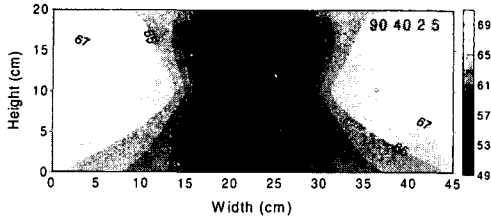


그림 12. 재하시험후 함수비 분포($a_s=40\%$, $W/B=2$, #200=5%)

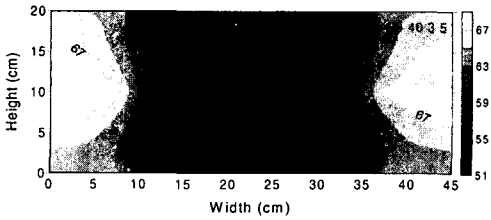


그림 13. 재하시험후 함수비 분포($a_s=40\%$, $W/B=3$, #200=5%)

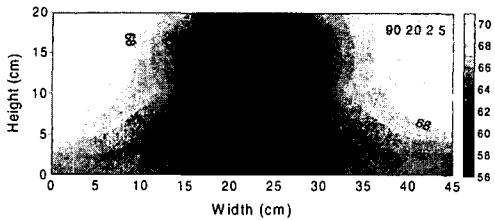


그림 14. 재하시험후 함수비 분포($a_s=20\%$, $W/B=2$, #200=5%)

5. 결론

- 1) 모래다짐말뚝의 세립분 함유율을 5, 10, 15%로 증가시킨 결과, 세립분 함유율이 증가할수록 극한 지지력이 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 개량폭비가 커질수록 극한 지지력이 증가하였으며, 개량폭비가 2일 때 극한 지지력에 대한 최대 효과를 얻을 수 있었다.
- 3) 응력분담비는 극한하중 시점에서 치환율에 따라 1.5~3.5의 범위에 분포하는 것으로 나타났다.
- 4) 모래말뚝과 점토지반의 파괴형태는 모래말뚝 상부로부터 2D~2.5D깊이에서 말뚝의 명료한 전단면이 나타나 전반전단파괴가 발생하는 것으로 나타났다.
- 5) 재하시험 시작전과 종료후의 개량지반과 미개량

점토지반의 함수비를 측정한 결과, 미개량지반인 원지반 함수비는 각각의 실험조건에 따라 65~70%의 범위에 분포하였으며, 개량지역은 51~59%의 함수비 분포를 나타내 SCP공법에 의한 배수거리의 단축과 점토지반의 압밀축진에 의한 강도증진 효과를 기대할 수 있다.

참고 문헌

- [1] Kimura, T., Nakase, A., Saitoh, K., and Takemura, J. (1983), "Centrifuge Tests on Sand Compaction Piles Improvement : Proc. 7th ACSMFE, (1), 225-260, Haifa.
- [2] Shinsha, H., Takata, K., and Kurumada, Y., Fujii, N. (1991), "Centrifuge Model Tests on Clay Ground Partly Improved by Sand Compaction Piles", 1991 Balkema, Rotterdam. ISBN 90 6191 193 1.
- [3] Miyake, M., Akamoto, H., and Wada, M. (1991), "Deformation Characteristics of Ground Improved by A Group of Treated Soil Columns", 1991 Balkema, Rotterdam. ISBN 90 6191 193 1.
- [4] Mikasa, N., Takada, N., Ohshima, A., Kawamoto, K., and Higashi, S. (1984), "An Experimental Study on The Stability of Clay Ground Improved by Sand Compaction Piles", Proc. of JSSMFE Symposium on the Strength and Deformation of the composite Ground, pp.113-118.
- [5] Matsuo, M. (1967), "Stability Analysis of Clay Improved with Sand Piles", Tsuchi to Kiso, Vol. 15, No.12, pp. 27~35.