한국지반환경공학회 논문집
제8권 제2호 2007년 4월 pp. 19～27

준설 점토사면의 변형양상에 관한 원심모델링

Centrifuge Modeling on the Deformation Modes of Dredged Clay Slope

안 광 국† · 김 정 열[1] · 정 소 전[1] · 이 처 근[2]
Ahn, Kwangkuk · Kim, Jeongyeol · Zheng, Zhaodian · Lee, Cheokeun

ABSTRACT : In this study, the centrifugal tests were performed with varying the angle of slope such as 1:3, 1:2.5, and 1:2 in order to analyze the deformation and failure type of dredged clay slope for a short term. The displacement mode, displacement vector and the variation of pore pressure with the different slope angle were measured. As a results, even though the displacement in the slope after 4 months were developed in the case of 1:3 for the dredged slope, there are little problems to obtain the stability of dredged slope because the original construction section maintains. Also, in the case of 1:2.5 after 4 months the local slope failure occurred and in the case of 1:2 after 2 months the circle failure starting from the point of the tensile crack occurred. After reviewing the results, the maximum vertical displacement occurred at the crest of slope and maximum horizontal displacement was about double of maximum vertical displacement.

Keywords : Centrifuge model test, Dredging, Angle of slope, Maximum vertical displacement, Maximum horizontal displacement

요 지 : 본 연구에서는 준설에 따른 점토사면의 변형 및 변위양상과 파괴형태를 평가하기 위하여 준설사면의 기울기를 변화시키면서 원심모형실험을 실시하였다. 준설사면의 기울기는 1:2, 1:2.5, 1:3으로 변화시키면서 모형실험을 수행하였다. 실험 결과 기울기 1:3인 경우에는 4개월 경과시점까지 사면부내에서 변위는 발생되었지만, 초기단면과 유사하게 사면을 유지하고 있어 준설후 사면 안정성의 확보에는 문제가 없는 것으로 평가되었다. 준설사면 기울기가 1:2.5인 경우에는 4개월 경과시점에서 사면부내에서 국부적인 사면파괴가 발생하였으며, 기울기가 1:2인 사면의 경우 경과시간 2개월 후 원호파괴형태의 사면내 파괴가 발생되었다. 실험결과 지반의 최대 연직변위는 사면의 비탈머리에서 발생하였으며, 최대 수평변위는 비탈머리를 기준으로 0.5～1H(H : 초기 점토층의 높이) 떨어진 지점의 사면부 아래에서 발생하였으며, 최대 수평변위는 최대연직변위의 약 2배 정도인 것으로 나타났다.

주요어 : 원심모형실험, 준설, 사면의 기울기, 최대수직변위, 최대수평변위

1. 서 론

최근 우리나라는 급속한 산업발전과 경제성장을 바탕으로 도시화 산업사회화가 광범위하게 진행됨에 따라 산업구조 뿐만 아니라 사회구조 등에서 매우 다양하고 큰 변화가 일어나고 있다. 또한 시대의 변화는 선진 공업국과 끊임없이 경쟁하여야 할 입장에 놓이게 되었다. 이러한 세계 선진 무역국가와의 경쟁력을 도모하고, 사회간접자본 시설을 통한 새로운 국제적 경쟁력을 확보하기 위해 국가적 사업이 여러 분야에서 추진되고 있다. 이러한 사업 중에서 항만공사의 확충에 대한 필요성이 무엇보다도 중요한 국가적 과제가 되고 있다. 항만공사를 시행하는 데는 방파제 공사가 필수적으로 수반되는데 이에 따른 해안 준설과 제방 축조가 토목공학적 첨단 기술력을 필요로 하고 있다.

이에, 원지반이 연약지반으로 구성되어 있는 지역에서 방파제나 안벽 등 항만시설을 설치할 경우 연약지반의 안정성을 고려하여 지반을 처리한 후 공사를 통상적으로 시행하게 된다. 이 경우 시행 할 수 있는 연약지반 처리공법으로서는 연약지반의 역학적 물리적 성질을 개선하는 방법 즉 개량공법과 연약지반을 양질의 토사로 치환하는 치환공법 등이 대표적인 적용공법이다. 이들 중에서 현장 인근에 양질의 토취장과 준설 사토장이 있을 경우 연약지반을 준설하여 사토하고 그 자리를 양질의 토사로 채우는 치환공법이 확실한 연약지반 처리공법이라고 할 수 있다.

현재 항만공사에 시행되고 있는 안정한 준설경사는 통상 1 : 3을 사용하고 있다(한국지반공학회, 1999). 이러한 논리는 소성에 따라 변화하는 연약지반의 유효마찰각을 고려하여 볼 때 타당하다고 볼 수 있다. 그러나, 이러한 1 : 3 준설경사는 장기적 안정성을 요하는 영구적인 준설사면 즉 잔교식 안벽의 전면부, 또는 항로준설사면 등에는 반드시 지켜져야 할 사항이지만 단기적인 안정성이 요구되는 준설에서는 방치기간에 따라 그 경사가 조절될 수 있

† 정회원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 전임강사(E-mail : akk@chungbuk.ac.kr)
1) 비회원, 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정
2) 정회원, NGEO 컨설턴트 기술연구소 소장

다고 할 수 있다. 특히, 연약지반의 준설시 준설직후에는 상재하중의 제거로 인하여 준설사면 내부에서 부 과잉간극수압의 영향으로 준설경사가 급하더라도 준설사면의 안정성이 상당기간 확보된다고 볼 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 원심모형실험을 통하여 방파제 축조를 위하여 비교적 단 기간의 준설 점토사면의 안정성을 분석하기 위하여 사면의 기울기를 변화시키면서 모형실험을 수행하였다.

2. 실험내용 및 방법

2.1 대상시료의 특성

본 연구에서 모형실험시 지반형성 재료로는 울산 지역에 걸쳐 널리 분포하고 있는 점성토를 재성형하여 사용하였다. 시료는 울산 지역에서 채취한 해성점토로 액성한계의 2배의 함수비를 갖도록 물을 첨가하고 교반기를 이용 교반한 후 슬러리 상태에서 0.074mm체를 통과시켜 원지반 내에 함유되어 있는 조개껍질 등의 불순물을 제거하였다. 이에 앞서 실험에 사용된 대상시료의 물리적 특성을 파악하기 위하여 비중, 액·소성한계, 체분석 및 비중계분석의 물성시험을 실시하였으며, 실험에 사용된 대상시료에 대한 물성실험 결과를 표 1에 나타내었다.

2.2 실험장치 및 기구

본 연구에서 사용한 원심모형 시험기의 최대 원심가속도는 200g-level, 최대용량은 25g·ton으로 실험 가능한 모형토조의 최대크기는 500×500×300mm이고, 중심축에서 힌지까지의 거리가 920mm, 스윙바스켓 저면까지의 거리는 1280mm로 제작되었다(허열 등, 2006).

원심모형실험은 실내에서 축소모형을 사용하여 인위적으로 모형을 가속시켜 흙입자의 자중을 증가시킴으로서 현장상태의 응력을 재현하여 경제적으로 실험을 수행할 수 있는 효율적인 실험기법이며, 원심모형실험의 원리 등에 대해서는 Goodings(1979), Atkinson(1993), Taylor(1995), 이처근(2001)의 연구결과에 자세히 설명되어 있다.

2차원 평면변형률 조건을 모사하기 위한 모형토조의 3면과 밑면은 2mm 두께의 스테인레스로 제작되었고, 실험 중 측방 관찰할 수 있도록 모형토조의 전면은 20mm 두께의 투명아크릴 판으로 제작하였다. 본 실험에서 사용한 모형토조의 내부 크기는 가로 52cm, 세로 17cm, 높이 35cm 이다.

본 실험에서는 지반의 변위를 측정하기 위하여 Potentiometer를 사용하였으며, 이 Potentiometer의 측정용량은 50mm 이고, 0.01mm까지 측정이 가능하다. Potentiometer의 calibration은 Potentiometer에 버어니어캘리퍼스를 연결한 후 일정간격으로 막대기를 이동시켜 얻어진 길이와 그 때 얻어진 전압 값과 비교하여 구하였다. 실험중 간극수압을 측정하기 위하여 모델명 P306A인 초소형 간극수압계를 사용하였으며, 이 간극수압계의 크기는 지름 약 7mm, 높이 6mm 정도이며, 측정용량은 1～2kgf/cm^{2}이고, 0.0002～0.0004kgf/cm^{2}의 정도로 측정할 수 있다.

본 실험에서 간극수압계 등의 계측기로부터 측정 자료를 기록하기 위하여 PC에 내장된 UPC(Universal PC sensor interface card)보드와 TDS 601 자료 획득장치를 사용하였으며, TDS 601은 또한 모델명 ASW 20B인 switching box와 연결하여 사용하였다. UPC 보드를 통해서는 LVDT로부터의 자료만 측정 저장하였다.

2.3 실험내용 및 방법

본 실험에서는 준설사면 안정성 평가를 확인하기 위하여 표 2와 같이 총 3회의 원심모형실험을 수행하였다. 준설사면 안정성평가 실험은 실제 단면을 1/150로 축소 모델링하여 150g의 중력수준에서 실험을 수행하였다.

그림 1에 나타낸 바와 같이 실험 DT 1～DT 3은 각각 준설사면의 기울기를 1 : 3, 1 : 2.5, 1 : 2로 준설한 후 점토사면의 안정성을 평가하기 위하여 실시하였다. 모형실험은 현장의 대표단면을 1/150로 축소 모델링하여 실시하였

표 1. 대상 시료의 물성치

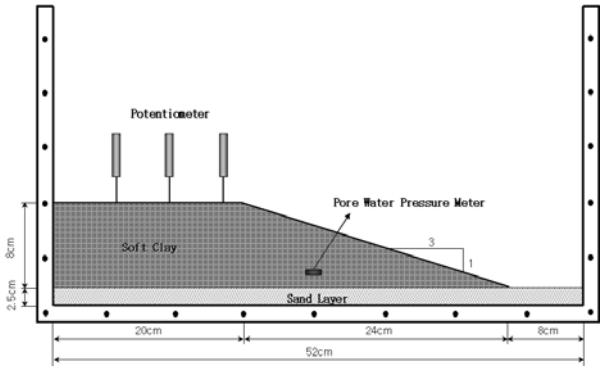
구분	측정값
통일분류법	CH
No.200체 통과율(%)	97.3
액성한계, *LL*(%)	94.5
소성지수, *PI*(%)	62.5
자연함수비, ω(%)	87.3
비중, *Gs*	2.73
초기간극비, e_o	2.38
압축지수, *Cc*	1.03
비배수전단강도, *Su*(tf/m^2)	1.0
내부마찰각, ϕ(°)	19.1
전체단위중량, $\gamma_t(tf/cm^3)$	1.51

표 2. 원심모형실험 조건

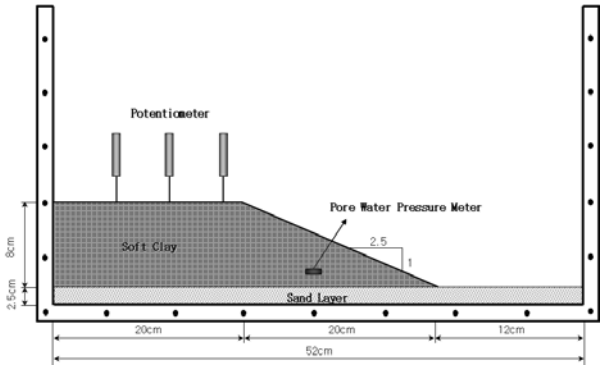
실험 번호	사면경사	점토층높이(cm)	중력수준(g-level)
DT 1	1 : 3.0	8.0	150
DT 2	1 : 2.5	8.0	150
DT 3	1 : 2.0	8.0	150

다. 실험 DT 1～DT 3은 준설후 점토사면의 안정성을 평가하기 위하여 자중압밀이 완료된 점토를 각각 1 : 3, 1 : 2.5, 1 : 2의 기울기로 성형하여 원심모형실험을 실시하여 시간경과에 따른 점토지반의 표면침하 및 변형형태와 변위벡터, 그리고 지반내의 간극수압변화를 측정하였다.

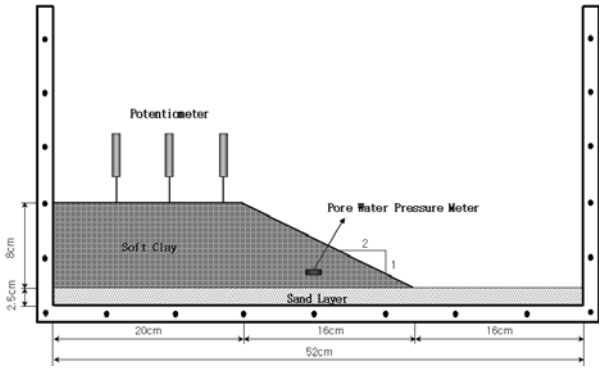
이러한 일련의 실험을 수행하기 위하여 먼저 흐트러진 현장 채취시료를 가지고 자중압밀 실험을 수행하였다. 자중압밀은 현장에서 채취된 교란된 점토시료를 슬러리 상태로 교반하여 모형토조에 투기한 후 150g-level의 중력수준에서 실시하였다. 자중압밀 완료시점은 점토층 중앙부분에서의 비배수전단강도($S_u = 1.0tf/m^2$)를 기준으로 하였다. 원심모형실험에서 점토층의 높이는 8cm로 하였으며, 이는 현장조건으로 12m에 해당되며, 점토층의 하부에는 현장 배수조건을 고려하여 2.5cm의 모래층을 포설하여 투수층을 형성하였다.



(a) 실험 DT 1



(b) 실험 DT 2



(c) 실험 DT 3

그림 1. 원심모형실험 단면

준설사면의 변위를 계측하기 위하여 점토층 표면에 3개의 Potentiometer를 설치하였으며, 사면 내 중앙 부분에 초소형 간극수압계를 설치하여 간극수압을 계측하였다. 또한 모형지반 전면부에 정방형의 그리드를 설치하여 점토지반의 변위를 측정토록 하였다. 실험 DT 1～DT 3에서 계측은 현장 환산시간으로 3～4개월까지 측정하였다. 모형실험은 간극수압계설치, 자중압밀, 사면형성, 지반변위 측정을 위한 정방형 메쉬설치, Potentiometer 설치, 원심모형시험기 스윙바스켓 탑재, 중력수준을 150g-level까지 가속하여 모형실험을 실시하였다. 표 3은 준설사면 기울기 안정성 평가실험에 사용된 계측기의 설치위치를 나타낸 것이다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 지반의 변위벡터

본 준설사면 기울기 안정성 평가실험에서 시간경과에 따른 지반의 변형형태를 파악하기 위하여 모형지반의 형성이 완료된 후에 모형토조 전면의 아크릴판을 분리한 다음 점토지반 표면에 1.5cm 간격으로 정방형의 그리드를 설치하였다. 지반의 변위벡터는 시간경과에 따라 변형된 그리드의 좌표를 읽어 측정하였다.

그림 2～그림 5는 준설사면 기울기가 1:3인 실험 DT 1에서 시간경과(1, 2, 3, 4개월)에 따라 측정된 지반의 변위벡터를 나타낸 것이다. 그림 2～그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 시간경과에 따라 사면에 인접한 부분에서 지반의 변위벡터가 크게 발생하고 있으며, 사면의 비탈머리에서 천단방향으로 0.5H이상 떨어진 지점부터는 시간경과에 따른 변위가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 여기서, H는 초기 점토층의 높이로 8cm이다. 시간경과에 따른 최대 변

표 3. 계측기의 설치위치

센서명	수평방향 위치(cm)	연직방향 위치(cm)
Potentiometer-1	준설사면 비탈머리 左방향 : 2.0	모형토조 저면 上방향 : 11.0
Potentiometer-2	준설사면 비탈머리 左방향 : 7.0	모형토조 저면 上방향 : 11.0
Potentiometer-3	준설사면 비탈머리 左방향 : 12.0	모형토조 저면 上방향 : 11.0

위벡터의 크기는 각각 0.99, 1.36, 1.61, 1.93cm로 시간경과에 따라 0.307의 기울기로 거의 선형적($R^2 = 0.99$)으로 증가하는 것으로 나타났다. 초기 좌표를 기준으로 하면 시간경과에 따라 최대 변위벡터의 발생위치는 사면 선단부 방향으로 이동하는 것으로 나타났다. 또한, 사면부 아래 부분에서 깊이에 따른 변위벡터로부터 시간경과에 따라 수평방향의 변위가 지배적으로 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 6~그림 9는 각각 준설사면 기울기가 1:2.5인 실험

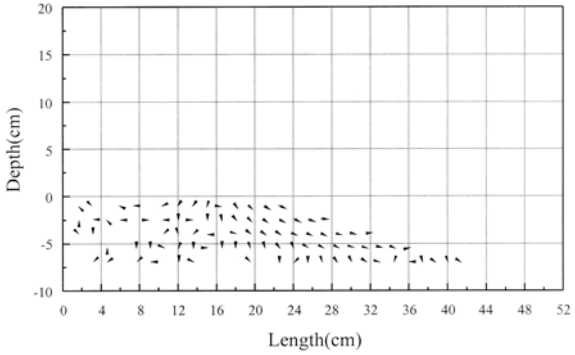


그림 2. 실험 DT 1에서 1개월후 지반변위

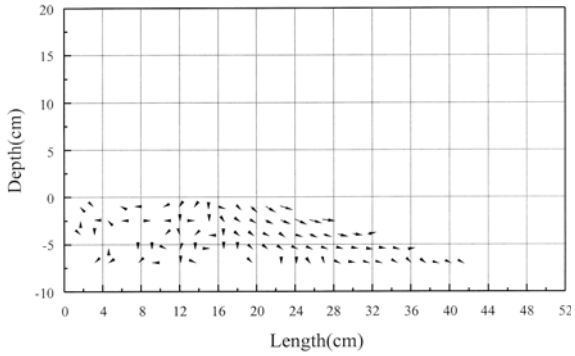


그림 3. 실험 DT 1에서 2개월후 지반변위

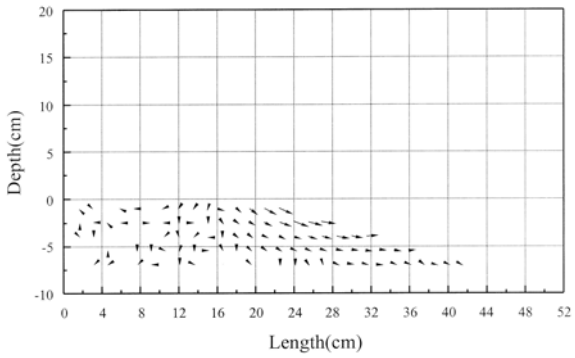


그림 4. 실험 DT 1에서 3개월후 지반변위

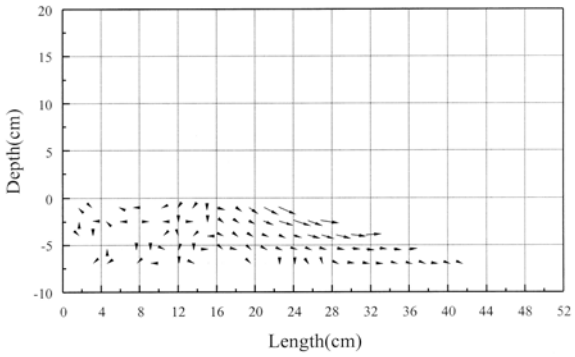


그림 5. 실험 DT 1에서 4개월후 지반변위

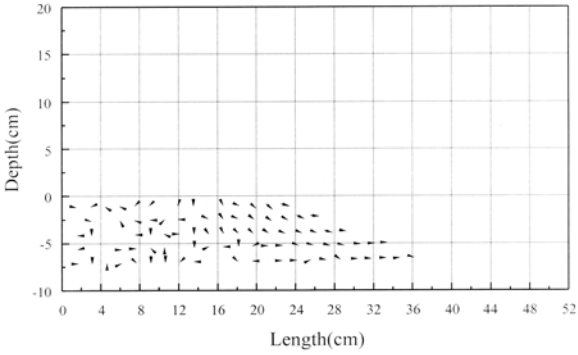


그림 6. 실험 DT 2에서 1개월후 지반변위

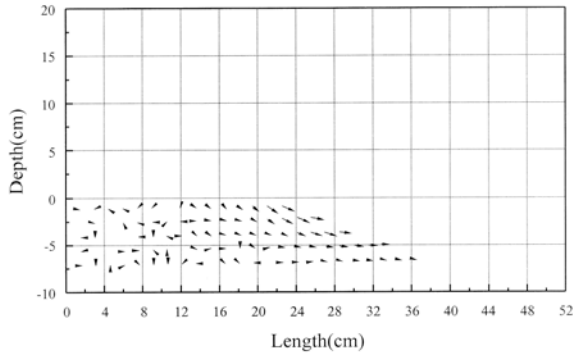


그림 7. 실험 DT 2에서 2개월후 지반변위

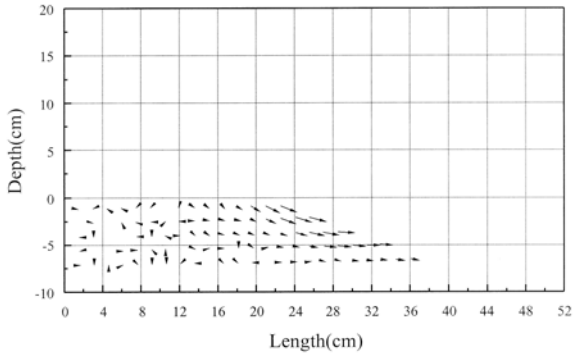


그림 8. 실험 DT 2에서 3개월후 지반변위

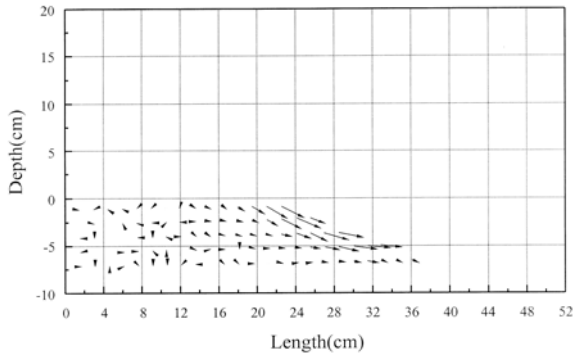


그림 9. 실험 DT 2에서 4개월후 지반변위

DT 2에서 시간경과에 따라 측정된 지반의 변위벡터를 도시한 것으로 변위벡터의 크기에 차이가 있을 뿐 전반적인 변위의 발생경향은 실험 DT 1의 결과와 유사한 것으로 나타났다. 즉, 시간경과에 따라 지반의 변위벡터가 크게 발생하고 있으며, 특히, 사면에 인접한 부분에서 지반의 변위벡터가 크게 발생하였다. 실험 DT 1과 마찬가지로 사면의 비탈머리에서 천단방향으로 0.5H이상 떨어진 지점부터는 시간경과에 따른 변위가 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 시간경과에 따른 최대변위벡터의 크기는 각각 0.941, 1.477, 1.848, 2.776cm으로 3개월까지는 거의 비례적으로 증가하다가 3개월 이후부터 변위벡터의 크기가 크게 증가하였다. 이것은 지반의 변형형태에서 후술하는 바와 같이 3개월～4개월 경과시점에서 사면의 파괴가 발생하였기 때문이다. 시간경과에 따른 최대수평변위는 0.91～2.63cm로 사면 비탈머리에서 0.69～0.82H 정도 떨어진 지점에서 발생하였으며, 최대 연직변위는 0.59～1.29cm 정도로 지표면에서 0.26～0.47H 지점에서 발생하는 것으로 나타났다.

그림 10～그림 12는 각각 준설사면 기울기가 1:2인 실험 DT 3에서 시간경과(1, 2, 3개월)에 따라 측정된 지반의 변위벡터를 나타낸 것으로 전반적인 변위의 발생경향은 준설사면의 기울기가 1:3, 1:2.5인 경우와 유사한 것으로 나타났다. 시간경과에 따른 최대변위벡터는 각각 1.63, 2.55, 3.55cm로 시간경과에 따라 0.962의 기울기로 거의 선형적(R^2 = 0.999)으로 증가하는 것으로 나타났으며, 최대변위벡터는 사면부 바로 아래 부분에서 발생하였다. 시간경과에 따른 최대수평변위는 1.45, 2.45, 3.38cm로 사면 비탈머리에서 수평방향으로 0.88～1.1H 정도 떨어진 지점에서 발생하였으며, 최대 연직변위는 1.12～1.93cm 정도로 지표면에서 0.5H 지점에서 발생하는 것으로 나타났다.

준설사면의 기울기가 1:3인 경우 2개월 및 3개월 경과시점에서의 최대변위벡터는 각각 1.36cm와 1.61cm로 기울기가 1:2인 경우에 비해 각각 47%와 55% 정도 감소하였으며, 후술하는 바와 같이 준설사면의 기울기가 1:3인 경우에서는 사면부 아래 부분에서 변위는 발생되었으나, 4개월 경과시점까지 사면의 파괴는 발생하지 않는 것으로 나타났다. 표 4는 실험조건별 경과시간에 따른 최대변위벡터의 크기와 초기좌표를 기준으로 한 최대변위벡터 발생지점을 나타낸 것이다. 단, 수평거리는 모형토조 좌측을 기준으로, 연직방향 거리는 초기 지표면을 기준으로 아랫방향을 (-)로 나타내었다.

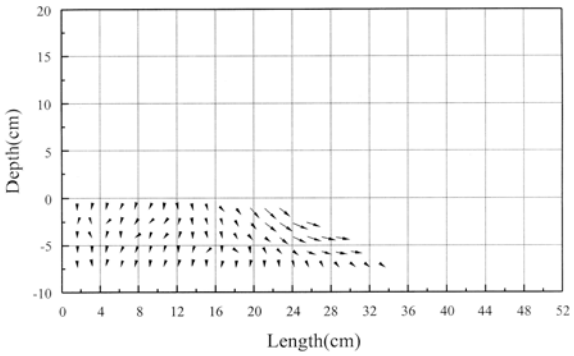


그림 10. 실험 DT 3에서 1개월후 지반변위

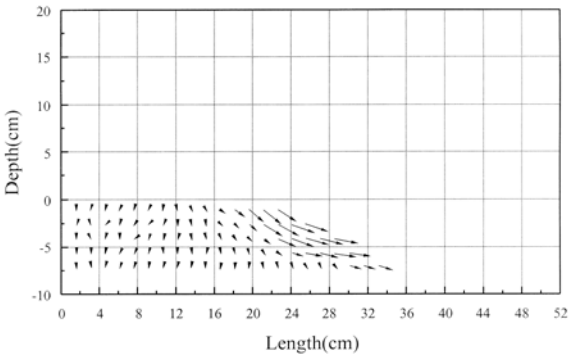


그림 11. 실험 DT 3에서 2개월후 지반변위

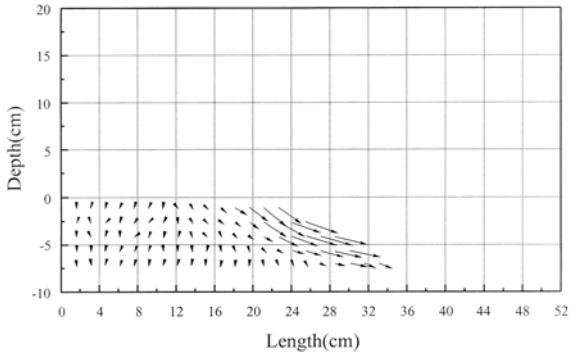


그림 12. 실험 DT 3에서 3개월후 지반변위

표 4. 최대변위벡터의 크기 및 발생위치

실험 번호	경과 시간 (개월)	최대변위벡터 (cm)	최대변위벡터 발생위치	
			X좌표	Y좌표
DT 1	1	0.99	22.44	-0.95
	2	1.36	22.44	-0.95
	3	1.61	24.00	-2.35
	4	1.93	26.83	-2.38
DT 2	1	0.94	22.53	-0.84
	2	1.48	24.11	-2.05
	3	1.85	25.54	-2.06
	4	2.78	24.11	-2.05
DT 3	1	1.63	24.1	-2.67
	2	2.55	24.1	-2.67
	3	3.55	25.52	-2.57

3.2 지반의 변형형태

본 실험에서 지반의 변형형태는 모형지반의 형성이 완료된 후에 점토지반 표면에 설치한 정방형의 그리드의 변형을 분석하여 파악하였으며, 그림 13~그림 19는 실험 DT 1~DT 3에서 경과시간에 따른 모형지반의 변형형태를 나타낸 것이다. 이로부터 전반적인 지반의 변형형태는 지반의 변위벡터에서 기술한 바와 같이 사면부 아래 부분에서 지표면에 인접한 부분에서 크게 발생하였으며, 지표면으로부터 깊이가 증가할수록 변형이 감소되어 지반하부에서는 거의 변형이 발생하지 않고, 사면의 비탈머리에서 0.5*H* 이상 떨어진 지점부터는 거의 그리드의 변형이 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

그림 13은 준설사면 기울기가 1:3인 실험 DT 1에서 2개월 경과시점에서의 모형지반의 변형형태를 나타낸 것으로 상부에 일부 인장균열이 발생하고 있으며, 사면 비탈머리부분에서 최대 연직변위 0.66cm가 발생하고, 사면부에서 최대 수평변위 1.33cm정도 발생하고 있지만, 전반적으로 초기단면과 비교하여 큰 변형이 발생하고 있지 않음을 확인할 수 있다. 이로부터 준설사면 기울기 시공지연기간을 2개월로 고려하는 경우 준설사면 기울기가 1:3인 경우 사면부에서 변위는 발생되지만 사면의 안정성 확보에는 문제가 없는 것으로 판단할 수 있다. 그림 14는 준설사면 기울기가 1:3에서 4개월 후의 모형지반 정면의 변형형태를 나타낸 것으로 전반적으로 사면부의 변위가 증가하였을 뿐 안정성에는 큰 문제가 없음을 확인할 수 있으며, 최대수평변위는 1.91cm로 2개월인 경우에 비해 44% 정도 크게 나타났다. 최대 수평변위는 수평방향으로 비탈머리에서 0.85*H* 지점, 연직방향으로 지표면기준 0.3*H* 떨어진 지점에서 발생하였다. 또한, 사면의 비탈머리 부분과 사면부내에서 인장균열이 발생하고 있으며, 인장균열의 깊이는 0.6cm 정도로 나타났다.

그림 15는 사면 기울기가 1:2.5인 경우 2개월 후의 모형지반 전면의 변형형태를 나타낸 것으로 사면비탈머리에서 좌측방향으로 0.5*H* 이상 떨어진 지점부터는 거의 변형이 발생하지 않고, 초기단면과 거의 같은 정방형의 그리드를 유지하고 있는 반면, 사면의 비탈머리 부분과 사면부 아래 부분에서는 연직 및 수평방향의 변위가 발생하고 있다. 최대 수평변위는 1.38cm 정도로 실험 DT 1에 비해 약간 크게 나타났지만 전반적으로 초기단면과 비교하여 큰 변형이 발생하고 있지 않음을 알 수 있다. 최대 수평방향변위는 비탈머리에서 0.69*H* 지점, 연직방향으로 지표면기준 0.26*H* 떨어진 지점 발생하는 것으로 나타났다. 그림 16은 준설사면 기울

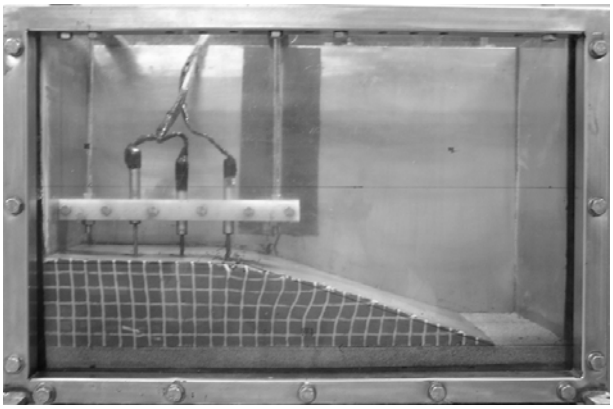


그림 13. 실험 DT 1에서 2개월후 모형지반

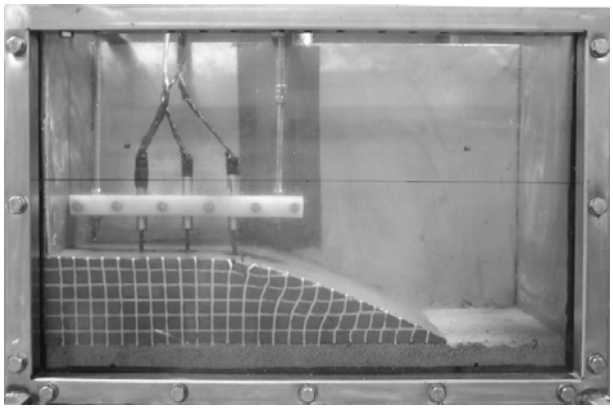


그림 15. 실험 DT 2에서 2개월후 모형지반

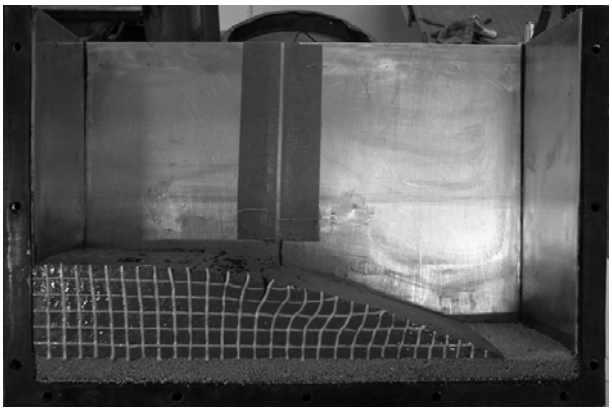


그림 14. 실험 DT 1에서 4개월후 모형지반

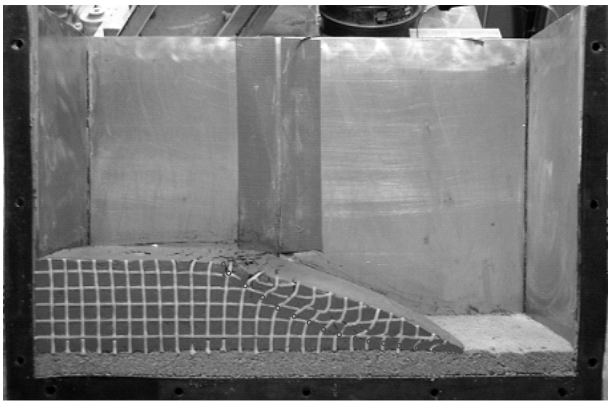


그림 16. 실험 DT 2에서 4개월후 모형지반

기가 1:2.5인 실험 DT 2에서 4개월 후의 모형지반의 변형형태를 나타낸 것으로 사면부내 일부 그리드의 파단면이 발생한 것으로부터 사면내부 파괴가 발생하고 있음을 알 수 있다. 최대수평변위의 크기는 2.63cm로 2개월인 경우에 비해 90% 정도 크게 나타났으며, 최대 수평변위는 수평방향으로 비탈머리에서 0.82*H* 지점, 연직방향으로 지표면기준 0.46*H* 떨어진 지점에서 발생하였다. 즉, 4개월 후 실험 DT 1의 결과와 비교하면 최대 수평변위가 발생하는 수평방향 위치는 거의 같지만, 지표면을 기준으로 한 연직방향 깊이가 증가함을 알 수 있다. 4개월 후 모형지반의 상부에서는 사면의 비탈머리 부분과 사면부내에서 인장균열이 발생하였으며, 최대 인장균열깊이는 0.7cm 정도로 나타났다.

그림 17은 실험 DT 3에서 1개월 후 모형지반의 전면의 변형형태를 보인 것으로 전반적인 변위발생 경향은 실험 DT 1의 경우와 유사한 것으로 나타났다. 즉, 사면비탈머리에서 좌측방향으로 0.5*H* 이상 떨어진 지점부터는 거의 변형이 발생하지 않으며, 사면부에서는 수평변위가, 사면 비탈머리부분에서는 연직방향의 변위가 주로 발생하고 있으나 사면의 파괴는 발생하지 않는 것으로 확인되었다. 모형지반의 상부에서는 인장균열이 발생하였으며, 최대 인장균열깊이는 2.1cm 정도이고, 최대 인장균열의 폭은 0.8cm 정도로 발생하였다.

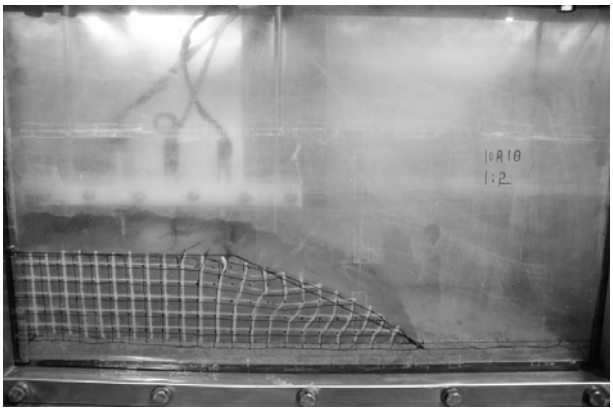


그림 17. 실험 DT 3에서 1개월후 모형지반

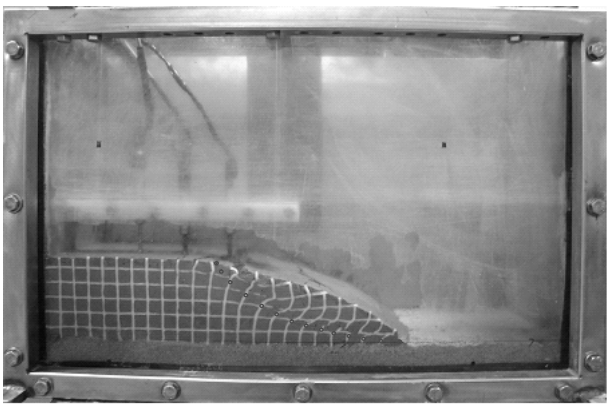


그림 18. 실험 DT 3에서 2개월후 모형지반

그림 18은 준설사면 기울기가 1:2인 경우 2개월 후의 모형지반 전면의 변형형태를 나타낸 것으로 사면 비탈머리에서의 인장균열 발생지점을 시점으로 하는 명백한 원호파괴의 형태를 보이고 있다. 지반의 최대 수평변위는 2.45cm 정도로 실험 DT 4에서 4개월 후의 최대 수평변위와 거의 같은 크기로 발생하고 있다. 실험 DT 2와 실험 DT 3의 결과로부터 사면의 파괴는 변위벡터의 크기가 약 2.0～2.45cm(0.25～0.30*H*)의 범위에서 발생함을 유추할 수 있다. 그림 18로부터 최대 수평변위는 비탈머리에서 1.07*H* 지점, 연직방향으로 지표면기준 0.52*H* 떨어진 지점 발생하는 것으로 나타났다. 그림 19는 실험 DT 3(1:2)에서 3개월 후 모형지반의 변형형태를 나타낸 것으로 그림 18의 결과와 비교하여 더 명백한 사면파괴의 형태를 보이고 있음을 알 수 있다. 최대수평변위의 크기는 3.38cm로 2개월인 경우에 비해 38% 정도 크게 나타났으며, 최대 수평변위 발생위치는 DT 3에서 2개월 후와 동일한 것으로 나타났다.

표 5는 실험 DT 1～DT 3에서 측정된 최대 연직 및 수

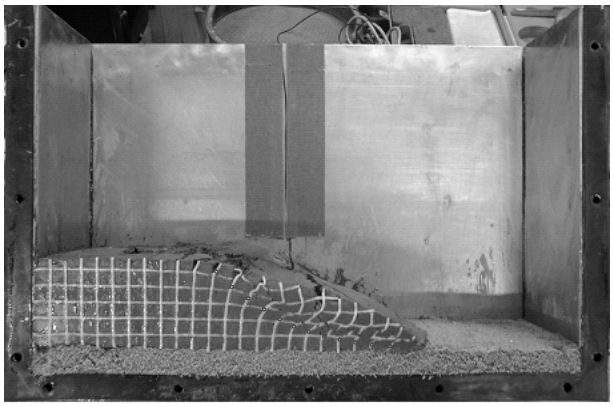


그림 19. 실험 DT 3에서 3개월 후 모형지반

표 5. 점토지반의 최대 수평 및 연직변위

실험 번호	경과 시간 (개월)	최대수평변위 (cm)	최대수평변위 발생위치(cm)		최대연직변위 (cm)	최대연직변위 발생위치(cm)	
			X좌표	Y좌표		X좌표	Y좌표
DT 1	1	0.92	26.80	-2.38	0.44	19.40	-1.00
	2	1.33	26.83	-2.38	0.66	20.92	-0.96
	3	1.51	24.00	-2.35	0.69	20.92	-0.96
	4	1.91	26.83	-2.38	0.81	20.92	-0.96
DT 2	1	0.91	25.5	-2.06	0.59	21.00	-0.85
	2	1.38	25.54	-2.06	0.78	21.00	-0.85
	3	1.79	25.54	-2.06	0.77	21.00	-0.85
	4	2.63	26.59	-3.65	1.29	21.00	-0.85
DT 3	1	1.45	27.05	-4.12	1.12	21.15	-1.10
	2	2.45	28.55	-4.15	1.33	19.63	-1.05
	3	3.38	28.55	-4.15	1.93	21.15	-1.10

평변위의 크기와 발생위치는 나타낸 것이다. 여기서, 수평거리는 모형토조 좌측을 기준으로, 연직방향 거리는 초기 지표면을 기준으로 아래 방향을 부(-)로 나타내었다.

3.3 지반의 표면침하

그림 20～그림 22는 각각 실험 DT 1(기울기 1:3)～DT 3(기울기 1:2)에서 시간경과에 따라 측정된 지표면의 침하량을 나타낸 것으로 사면의 비탈머리에 인접한 Potentiometer

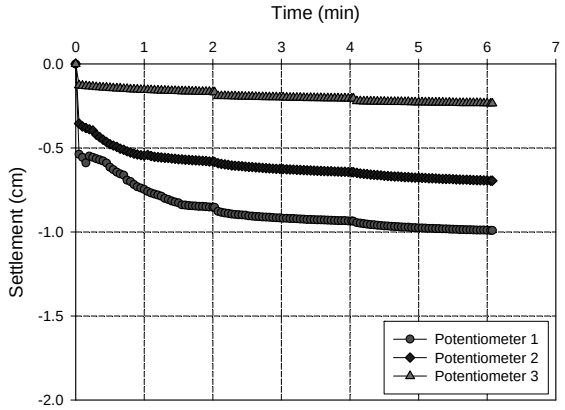


그림 20. 실험 DT 1에서 시간-침하량 곡선

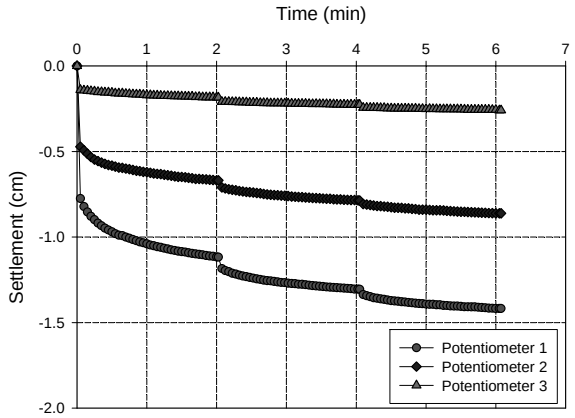


그림 21. 실험 DT 2에서 시간-침하량 곡선

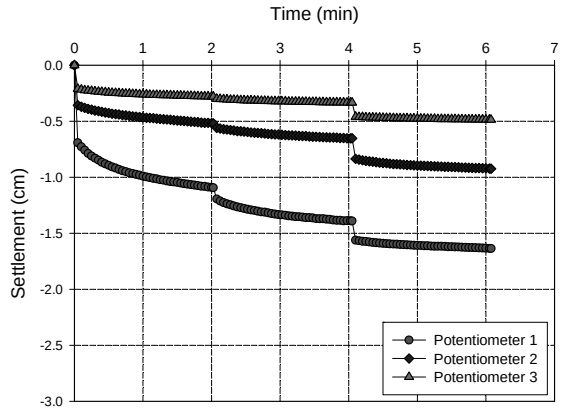


그림 22. 실험 DT 3에서 시간-침하량 곡선

1에서 측정된 침하량이 가장 크게 나타났으며, 시간경과에 따라서는 점진적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

표 6은 150g의 중력수준에 도달한 직후 및 시간경과에 따른 지표면의 침하량을 나타낸 것이다. 이로부터 실험 DT 1～DT 3에서 경과시간 6분(현장조건으로 환산하면 3개월)에서의 경과 최대 표면침하량은 각각 -0.991, -1.418cm, -1.637cm로 준설사면의 기울기가 증가할수록 증가하였다.

3.4 비배수 전단강도의 변화

본 원심모형실험에서는 지중압밀과정을 통하여 원지반 점토층의 비배수 전단강도와 동일한 지반강도를 갖는 모형지반을 형성하여 실험을 실시하였다. 표 7은 자중압밀 완료시와 모형실험종료 후 베인시험에 의해 측정된 점토층 천단부에서의 비배수 전단강도를 나타낸 것이다. 표 7로부터 실험 DT 1～DT 3의 경우 실험종료 후 사면부에서의 비배수 전단강도는 약간 증가하는 반면, 천단부에서는 자중압밀 완료시에 비해 8% 정도 증가하는 것으로 측정되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 준설에 따른 점토사면의 변형 및 변위양

표 6. 시간경과에 따른 지표면 침하량

실험번호	경과시간(분)	지표면 침하량(cm)		
		Pot 1	Pot 2	Pot 3
DT 1	150g에 도달직후	-0.538	-0.355	-0.127
	2	-0.854	-0.583	-0.169
	4	-0.936	-0.644	-0.206
	6	-0.991	-0.695	-0.235
DT 2	150g에 도달직후	-0.775	-0.472	-0.140
	2	-1.118	-0.669	-0.185
	4	-1.306	-0.787	-0.227
	6	-1.418	-0.862	-0.259
DT 3	150g에 도달직후	-0.692	-0.357	-0.211
	2	-1.093	-0.519	-0.281
	4	-1.391	-0.653	-0.334
	6	-1.637	-0.924	-0.487

표 7. 비배수전단강도의 변화

실험번호	자중압밀완료 후의 비배수 전단강도(kPa)	실험완료 후 비배수 전단강도(kPa)	
		사면부	천단부
DT 1	10.0	10.3	10.8
DT 2	10.2	10.5	11.2
DT 3	10.0	10.1	10.6

상과 파괴형태를 평가하기 위하여 준설사면의 기울기를 변화시키면서 원심모형실험을 실시하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 준설사면 기울기에 따른 실험 결과 기울기 1:3인 경우에는 4개월 경과시점까지 사면부내에서 변위는 발생되었지만, 초기단면과 유사하게 사면을 유지하고 있어 준설후 사면 안정성의 확보에는 문제가 없는 것으로 평가되었다.
(2) 준설사면 기울기가 1:2.5인 경우에는 4개월 경과시점에서 사면부내에서 국부적인 사면파괴가 발생하였으며, 기울기가 1:2인 사면의 경우 경과시간 2개월 후 사면 비탈머리에서의 인장균열 발생지점을 시점으로 하는 명백한 원호파괴형태의 사면내 파괴가 발생되었다.
(3) 실험결과 시간경과에 따라 지반변위의 크기와 발생범위가 증가하였으며, 사면의 비탈머리에서 0.5H이상 떨어진 지점부터는 시간경과에 따라 지반의 변형이 거의 발생하지 않는 것으로 확인되었다.
(4) 실험결과 지반의 최대 연직변위는 사면의 비탈머리에서 발생하였으며, 최대 수평변위는 비탈머리를 기준으로 0.5～1H 떨어진 지점의 사면부 아래에서 발생하였으며, 최대 수평변위는 최대연직변위의 약 2배 정도인 것으로 나타났다. 지반의 표면침하량은 준설사면의 기울기 증가할수록 크게 발생하였다.
(5) 모형실험 전후에 점토층의 사면부와 천단부에 대한 비배수 전단강도 측정결과 실험 DT 1～DT 3의 경우 사면부에서의 비배수 전단강도는 약간 증가하는 반면, 천단부에서는 자중압밀 완료시에 비해 8% 정도 증가하였다.

참 고 문 헌

1. 이처근(2001), *원심 및 수치모델링에 의한 화강토 지반상 Diaphragm Wall의 거동*, 박사학위논문, 충북대학교, pp. 70～90.
2. 허열, 정소전, 이처근, 안광국(2006), SCP 및 GCP로 개량된 복합지반의 변위양상에 관한 원심모델링, *한국지반환경공학회 논문집*, 제7권 제5호, pp. 57～66.
3. 한국지반공학회(1999), *준설매립과 환경매립 지반공학시리즈 10*, 도서출판 구미서관, pp. 34～132.
4. Atkinson, J.(1993), *An Introduction to the Mechanics of Soils and Foundations Through Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill, pp. 316～323.
5. Goodings, D. J.(1979), *Centrifugal Modeling of Slope Failures*, Ph. D. Thesis, Cambridge University, pp. 1～174.
6. Taylor, R. N.(1995), *Geotechnical Centrifuge Technology*, Chapman & Hall, London, pp. 1～115.

(접수일: 2007. 1. 2 심사일: 2007. 1. 2 심사완료일: 2007. 3. 7)