

해성점토 굴착사면의 거동에 관한 원심모형실험 및 수치해석

박병수*

*(주) 지완테크 지반공학부

Centrifuge Model Experiments and Numerical Analyses of the Behavior of Excavated Marine Clay Slope

BYUNG-SOO PARK*

*G-1 Tech Co. Ltd., Seoul, Korea

KEY WORDS: Soft ground연약지반, Slope stability 사면안정, Centrifugal model test 원심모형실험, Replacement excavation 굴착치환

ABSTRACT: In this thesis, centrifuge model experiments and numerical analyses were carried out to investigate the behavior of an excavated slope in soft clay ground. Centrifuge model tests were performed with various slopes for the excavated ground, such as 1:1.5 and 1:2. Pore pressures in the model ground were measured to find their effects on the stability of the excavated slope. These experiments showed that the model with 1:2.5 maintained its stability within a short period of time and failed gradually. Therefore, an excavated slope of soft soil with this slope might maintain stable conditions within a certain time. The model with a 1:3 slope was observed to maintain a very stable condition, showing insignificant deformation in the ground after being excavated.

Numerical analyses with PLAXIS, a commercially available software implemented with the finite element numerical technique, were performed to find the pore pressure distribution within the ground mass and the deformation of the soil. From the results of numerical analysis, a negative pore pressure was developed after the excavation and thus the stability of the slope was maintained. The safety factor for slope failure was found to decrease with time because of the dissipation of negative pore pressure with time.

1. 서 론

해외 교역이 국가경제에 큰 비중을 차지하고 있는 우리나라의 산업특성상 서남해안 지역의 끊임없는 개발이 진행되어 오고 있으나, 연약지반이 널리 분포하고 있는 이들 해안지역의 지형적 특성은 지반공학자들에게 해결해야 할 많은 과제들을 안겨주었다.

지반공학적으로 불리한 여건을 지닌 해안의 연약지반위에 축조되는 구조물의 안정성을 유지하기 위하여 그동안 다양한 방법의 지반개량공법이 설계 및 시공되어 왔으며, 그에 따른 많은 연구들도 진행되어 왔다. 이러한 공법 중 연약지반을 원지반이 연약지반으로 구성되어 있는 지역에서 방파제, 안벽 등 항만 준설하고 사토하여 그 자리를 양질의 토사로 채워 넣는 치환공법이 가장 확실한 연약지반공법이 될 수 있다(Chappell, 1987).

현재 항만공사에서 시행되고 있는 준설시 형성되는 연약지반의 사면경사는 1:3을 사용하고 있다. 이러한 경사는 소성적 성질에 따라 18~30°로 변하는 연약지반의 유효마찰각을 고려해 볼 때 타당하다고 판단된다. 그러나 이러한 1:3의 준설경사는 장기적 안정성을 요구하는 영구적인 준설사면 등에는 반드시 지켜야 할 사항이지만, 치환을 목적으로 준설할 경우와 같이 단기적

안정성이 요구되는 경우 방치기간에 따라 그 경사가 조절될 수 있다. 특히 투수성이 매우 작은 연약지반을 준설하는 경우에는 상재하중이 제거될 때 준설사면 내에서 발생하는 부(-)의 과잉간극수압 영향으로 인하여 준설경사가 급하더라도 준설사면의 안정성이 상당기간 확보된다. 또한 준설경사를 연약지반의 유효마찰각(ϕ') 이상으로 급하게 준설할 경우 준설 후 방치시간이 경과함에 따라 소멸하는 연약지반의 부(-)과잉간극수압과 이에 따른 유효응력 감소 및 전단강도 감소로 인한 준설사면의 안전율 감소에 대한 연구가 요구된다.

그러나 기존의 해성점토지반에 대한 굴착문제에 대한 연구는 국내외적으로 거의 없는 상태로 국내에서는 윤요진(2000), 이정복(2001) 등이 다짐에 따른 굴착사면의 최적기울기 문제에 대한 연구를 발표하였고, 이명원(1997)이 수중 굴착사면에 대한 안정해석을 실시하였으며, 허열 등(2001)은 지하수위가 있는 굴착사면에 대한 원심모형실험과 수치해석을 통하여 파괴면은 원호형태로 나타나며 굴착사면의 각도가 증가할수록 파괴거리가 증가한다고 발표하였다. 한편 Goodings 등(1985)은 원심모형실험을 통하여 해성점토의 안정해석을 실시하였다.

따라서 본 연구에서는 해상구조물 축조시 지지력 확보를 위한 단기적 안정성이 요구되는 해성연약지반 준설에 대하여 경시적 안전율 변화를 알아보고자 하였다.

이를 위하여 본 연구에서는 연약지반의 재하 및 재하현상을 적절히 모사할 수 있는 모형실험과 Cam-clay모형을 사용한 수

교신저자 박병수: 서울시 금천구 가산동 481-11

011-477-7214 geo-group@hanmail.net

Table 1 Physical properties of kaolin

Specific gravity	Consistency			Grain size distribution	
	LL [%]	PL [%]	PI [%]	0.074mm≥ [%]	USCS
2.60	65.2	35.0	30.2	100	CH

치해석을 통하여 해성점토 준설사면 안정성의 경시적 변화와 거동 특성에 관하여 알아보아 향후 해안구조물 축조시 유용한 자료를 제공하고자 하였다.

2. 실험방법

해저 굴착사면의 안정성을 분석하기 위하여 본 연구에서는 상용으로 판매되는 카올린 시료를 사용하여 모형지반을 조성한 다음 사면의 경사각을 매개변수로 한 원심모형시험을 실시하였다. 또한 실험에 사용된 해성 점토시료의 물리 역학적 특성 파악과 수치해석시 사용될 매개변수 산정을 위하여 기본물성시험, 압밀 시험 그리고 삼축압축시험을 실시하였다.

2.1 물리적 특성

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에 사용된 카올린 시료에 대하여 기본물성시험을 실시하여 그 결과를 정리하여 Table 1에 나타내었다. Table 에서 보는 바와 같이 시험에 사용된 시료는 비중 2.60, 액성한계 65.2%, 소성지수 30.2%의 물성을 지녔으며, 입도분포는 통일분류법에 의해 CH로 분류된다.

2.2 시료성형 방법

실험에 사용될 연약지반을 모사하기 위하여 본 연구에서는 강제압밀과 자중압밀을 거쳐 재성형된 모형지반과 이와 동일한 초기함수비 조건으로 시료를 교반한 후 토조에 주입하여 모형지반을 성형하였다.

먼저 강제압밀과 자중압밀에 의한 모형지반 성형의 경우, 균질한 지반조건을 확보하기 위하여 초기함수비 120%(≈2.0LL)조건으로 카올린 시료를 교반한 다음 Fig. 1에서와 같이 강제압밀 토조에 넣고 24시간 동안 수침시킨 다음 공기압을 이용하여 압밀하중을 3단계(4.9, 9.8, 19.6kPa)에 걸쳐 단계적으로 증가시키며 압밀을 실시하였다.

이 때 배수는 양면배수조건을 유지하였으며, 총 소요기간은 7일이 소요되었으며 강제압밀 종료시 시료의 평균함수비는 80%로 추정된다. 강제압밀이 종료된 지반은 원심모형시험기에 장착한 후 중력수준 50g 조건으로 4시간 동안 자중압밀을 실시하여 잔류된 과잉간극수압을 완전히 소산시킴으로써 정수압이 작용하고 있는 정규압밀 조건을 확보하였다. 자중압밀이 완료된 시료의 최종 시료높이는 20cm이며, 평균함수비는 액성한계와 비슷한 65%내외로서 모래말뚝을 타입하기 위하여 천공된 굴착단

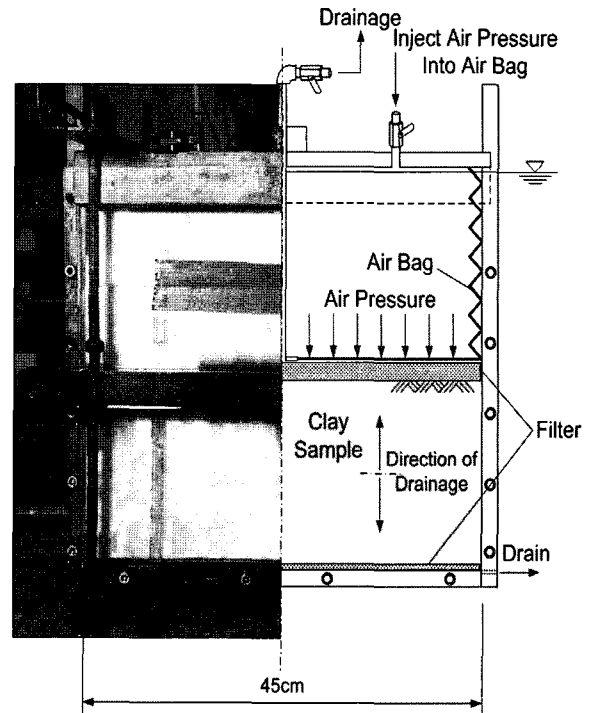


Fig. 1 Consolidation of soil sample by air pressure

Table 2 Result of consolidation test

e_0	c_v [m ² /sec]	k_v [m/sec]	c_c	c_s
2.236 ~2.344	3.72E-07	1.72E-09	0.537	0.015

면에 보강없이 단면형상이 유지되는 정도의 강도를 확보할 수 있었다.

2.3 역학시험 및 결과

실험에 사용된 카올린의 압밀 및 전단 특성을 파악하기 위하여 표준압밀시험과 삼축압축시험을 실시하였다. 실험에 사용된 시료는 2.2절에서 언급한 바와 같이 원심모형시험시 모형지반 조성방법과 동일한 조건으로 시료를 성형한 다음, 박벽튜브 (Thin wall tube)를 이용하여 추출한 후 트리밍하여 실험에 필요한 공시체를 성형하였다.

시료의 압밀특성 파악을 위해 KSF 2316 표준압밀시험 방법에 준하여 실험을 실시하였으며, Table 2에 시험결과를 정리하였다. 표에서와 같이 실험에 사용된 카올린 시료의 초기간극비는 2.236~2.344이며 시험 결과 압축지수는 평균 0.537, 투수계수는 1.72×10^{-9} m/sec로 나타났다.

또한 카올린 시료의 전단강도 특성 파악과 수치해석시 필요한 매개변수 산정을 위해 압밀 비배수 조건의 삼축압축시험을 실시하였으며, 세부적인 실험방법은 KSF 2346 삼축압축시험 방법에 준하여 실시하였다. Table 3은 삼축압축시험 결과를 나타낸다.

Table 3 Result of triaxial test(CU)

Confining stress, σ_3 [kPa]	Result at failure			Friction angle
	e_f [%]	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ [kPa]	A_f	
19.61	1.66	11.55	0.57	$\phi = 11.5^\circ$ $\phi' = 14.5^\circ$
49.03	6.88	26.83	0.76	
98.07	8.54	46.45	0.73	
147.10	7.66	73.20	0.50	

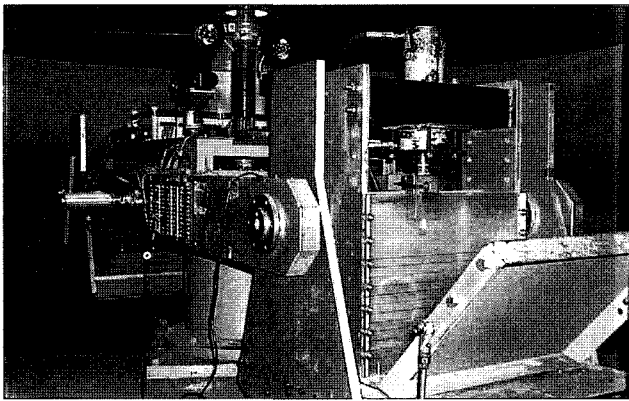


Fig. 2 Geotechnical centrifuge

삼축압축시험 결과 구속응력에 따라 파괴시 축차응력은 11.55~73.2kPa의 분포를 보이고 있으며, 이 때 간극수압계수(A_f)는 0.5~0.76으로 나타나 강제압밀과 자중압밀을 통해 시료를 성형하는 방법을 사용하여 정규압밀 상태의 모형지반을 성형할 수 있을 것으로 판단된다. 시험 결과를 이용하여 Mohr-Coulomb 파괴포락선과 p-q Diagram상의 파괴포락선을 도시하여 내부마찰각을 산정한 결과 전응력으로 표시한 내부마찰각은 11.5°, 유효응력으로 표시한 내부마찰각은 14.5°로 산정되었다.

2.4 원심모형실험 방법

현장지반의 거동특성 분석을 위한 실내실험 방법의 경우 현장의 원형(Prototype)실험에 비하여 저비용의 편리성의 장점을 지녔으나, 현장의 응력상태를 재현할 수 없는 한계가 있다. 본 연구에서는 실내실험에서 현장의 응력상태를 재현하여 현장조건의 응력상태하에서의 지반거동을 분석하기 위하여 원심모형실험 방법을 이용하였다.

원심모형실험은 Fig. 2, Fig. 3에 나타난 바와 같이 실내에서 축소된 모형을 사용하여 인위적으로 모형을 가속시킴에 따라 토립자의 자중을 증가시킴으로써 현장상태의 응력을 재현시키고, 축적감소에 따른 압밀 시간을 단축시킬 수 있는 경제적으로 실험을 수행할 수 있는 효율적인 시험기법으로 알려져 있으며 현재 국외에서는 대부분의 모형실험이 원심모형실험 내지는 현장 원형실험을 수행하고 있는 실정이다.

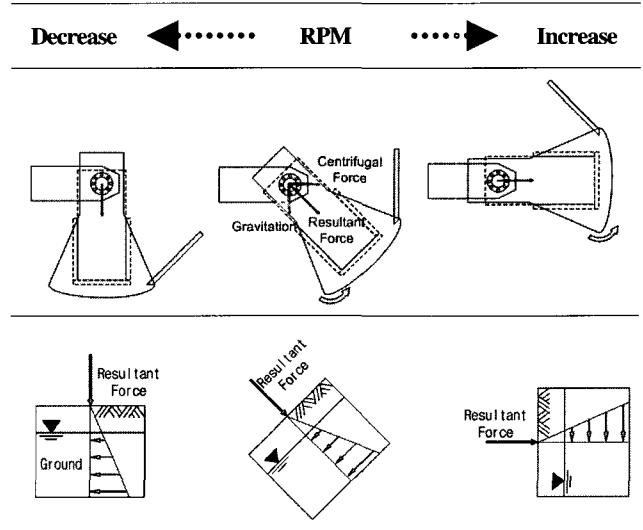


Fig. 3 Principle of geotechnical centrifuge model test

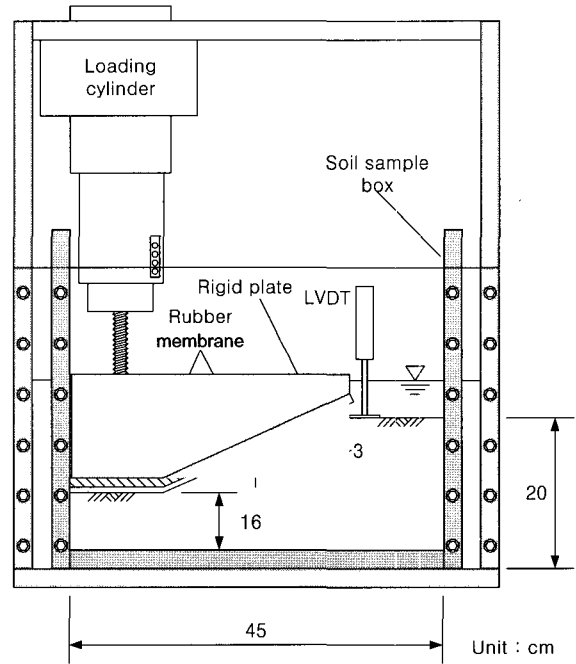


Fig. 4 Model container for experiments

한편, 굴착치환시 점토층에서 발생하는 사면의 활동 안정성을 분석하기 위하여 Fig. 4와 같이 모형지반 성형이 완료된 점토지반에 사면을 조성한 다음 사면의 활동변위를 측정하였다. 사면의 경사는 각각 1:1.5와 1:3 조건이며, 사면의 높이는 토조의 제원을 고려하여 9~10cm를 기준으로 하였으며 이는 상사법칙을 적용하는 경우 50g의 중력 현장에서 4.5~5m(=9~10cm×50)에 달하는 실험조건이다.

굴착사면의 활동안정성을 관찰하기 위한 모형실험의 세부적인 실험순서는 첫째로 자중압밀이 완료된 점토지반에 주어진 사면경사와 높이 조건에 맞추어 굴착을 실시한후 두번째로 사면부에서 굴착이전의 평형상태를 유지하기 위하여 굴착된 지반을 대

신하여 재하장치에 변위를 억지하기 위해 구속체(억지판)를 부착하여 점토층 사면에 완전히 밀착시켰다. 이후 원심모형 토조를 원심모형시험기 Swing basket에 부착한 다음 중력수준 50g 조건으로 가속한 다음, 점토층 사면부에서 평형상태를 이룰 수 있도록 약 30여분간 현 상태를 유지하였고 재하장치를 작동하여 점토층 사면부를 억지하고 있는 판을 들어 올리며, 사면 상부에 설치된 변위계를 이용하여 변위를 측정하며, 변위억지용 판을 들어 올리는 순간부터 약 5분간 실험을 지속하였다. 마지막으로 실험이 종료된 후 원심모형시험기를 멈추고 토조를 분리하여 사면의 활동형상을 스케치한 다음, 사면 활동구간에서 위치별 함수비를 측정하였다.

3. 수치해석 방법

연약지반 굴착시 간극비에 따른 전단강도의 변화를 설명함으로써 Mohr-Coulomb 파괴이론을 확장한 한계상태이론인 Roscoe와 Burland(1968)의 수정 Cam-clay 모델을 사용하여 준설 사면에 대한 안정성을 2차원 지반공학 범용 유한요소 프로그램인 PLAXIS(1998)를 이용하여 수치해석을 실시하였다.

3.1 유한요소 격자망 및 경계조건

수치해석은 굴착경사를 1:1.5, 1:2, 1:2.5, 1:3로 변화시켜 각 굴착경사에 따라 단계별로 지반을 굴착하였을 때 발생하는 변위와 굴착사면의 안전율을 수치해석적으로 검토하였으며, 단계별 굴착량을 결정하기 위하여 1일 굴착량을 2m/day로 가정함으로써 각 단계별로 0.02m(0.02m×50g=1m)를 0.5일에 1m의 지반을 굴착하는 것으로 하여 5단계에 걸쳐 굴착을 모사하였다.

한편 단계별 활동안정성 검토는 사면내 지반강도를 감소시켜 파괴를 유발할때의 전단강도비를 안전율로 산정하는 강도 감소법을 이용하여 단계별 사면의 안전율 및 파괴형태와 전단파괴영역을 확인하였다.

3.2 입력변수 및 해석내용

연약점토지반은 Soft soil 모델(Cam-clay)을 사용하였으며 해석에 사용된 내부마찰각과 점착력은 삼축압축시험 결과로부터 산정하였으며, Cam-clay 모델변수 값은 표준압밀시험 결과를 이용하여 구하였으며 수치는 Table 4에 나타내었다.

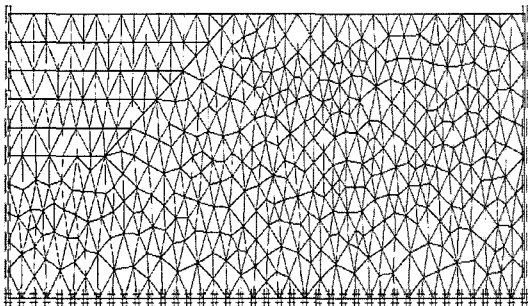


Fig. 5 Mesh for FEM analysis(PLAXIS, 1:1.5 slope)

4. 결과 분석

4.1 실험결과 분석

Fig. 4~Fig. 9 에 사면의 굴착경사를 변화시켜 실시한 사면 안정성관련 모형실험에 대한 지반변위 분포도를 나타내었다. 사면경사 1: 1.5인 경우 구속체를 제거하는 순간부터 급격하게 변위가 발생되어 그림에서와 같이 지반파괴가 발생되었으며, 실험 종료 후 활동선이 형성되는 경로를 따라서 함수비를 측정한 결과 평균 62.3%의 함수비 분포를 보이는 것으로 나타났다.

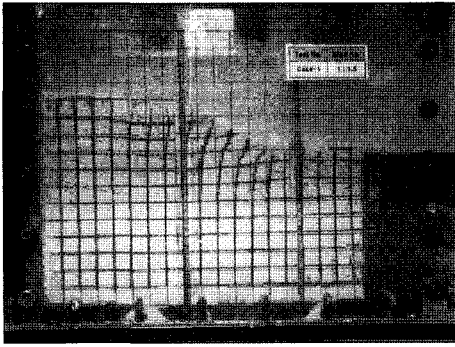
사면경사 1:2 조건인 경우도 마찬가지로 구속체가 제거된 직후 사면경사 1:1.5 조건과 같이 비슷한 형태로 지반파괴가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 사면경사 1:1.5와 1:2 두 조건에 대한 실험결과에 비추어 볼 때 사면경사 1:2.0 이하의 굴착경사 조건의 경우 굴착직후 지반파괴가 발생되기 때문에 현장에서 굴착시 적용이 불가할 것으로 판단된다.

한편 Fig. 6은 사면경사 1:2.5 조건에 대한 모형실험 결과를 나타낸다. 구속체 제거 직후 급격한 지반변위는 발생되지 않는 것으로 나타났으며, 시간이 경과함에 따라 점진적인 지반파괴가 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 결과에 비추어 볼 때 사면경사 1:2.5인 경우 굴착직후 단기적 안정성을 유지하므로 장기적 안정성을 요구하는 영구적 준설사면에 대해서는 적용이 불가하며, 단기적 안정성을 요하는 사면에는 적용이 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 7은 사면경사 1:3 조건에 대한 모형실험 결과로 실험 종료 후 촬영한 사진을 보면 일부 변위가 발생하는 것으로 나타났으나, 이는 일부 구간에서 굴착 후 변위 억지용 판을 사면에 밀착하는 과정에서 완전하게 밀착되지 않아 중력수준 50g로 가속하는 과정과 굴착직후 교란된 지반에 대하여 평형을 이루기 위해 압밀을 실시하는 과정에서 발생된 변위이며, 변위 분포 자료를 볼 때 구속체를 제거한 후에 발생하는 변위가 거의 나타나지 않아 비교적 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

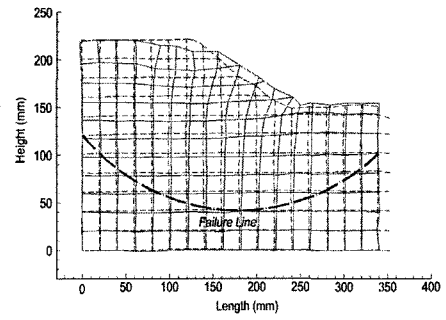
Table 4 Parameters of cam-clay model

Parameter	Value
$\lambda^* (= c_v / 2.3(1 + e_o))$	0.035
$\kappa^* (= c_s / 2.3(1 + e_o))$	0.0035
$\gamma_{sat} (kN/m^3)$	731.0
$k (m/day)$	0.043
$c (kN/m^2)$	1.962
$\phi (^{\circ})$	14.5

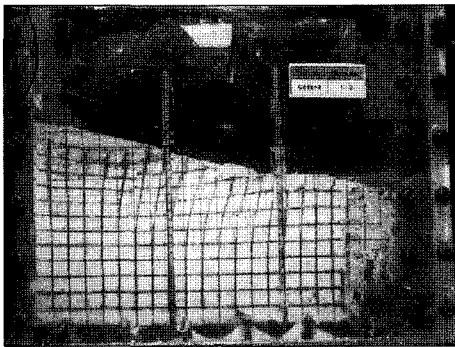


(a) Final displacement

Fig. 6 Result of centrifugal model test(1:1.5 slope)

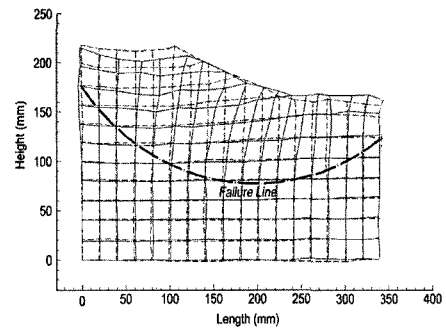


(b) Displacement contour



(a) Final displacement

Fig. 7 Result of centrifugal model test(1:2.0 slope)

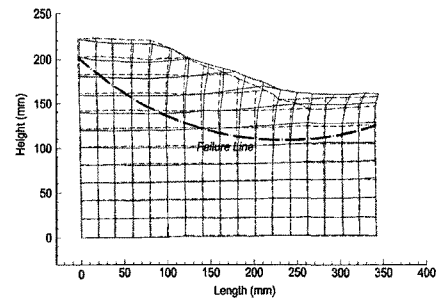


(b) Displacement contour



(a) Final displacement

Fig. 8 Result of centrifugal model test(1:2.5 slope)

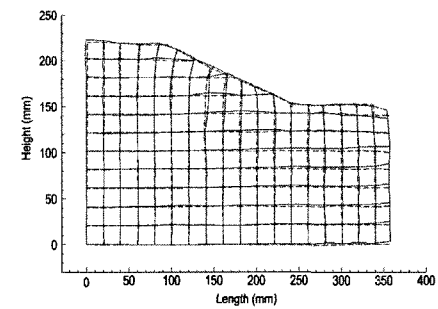


(b) Displacement contour



(a) Final displacement

Fig. 9 Result of centrifugal model test(1:3.0 slope)



(b) Displacement contour

4.2 수치해석 결과

굴착경사 1:1.5~1:3 조건에 대한 수치해석 결과, 굴착이후 굴착사면 주변지반에서 발생하는 단계별 안전율, 지반변위 등을 대표적으로 1:1.2 조건에 대하여 Fig. 10에 도시하였고 그 결과를 Table 5에 요약하여 나타내었다.

Fig. 10에 나타난 단계별 안전율과 굴착에 따른 지반변형에서 볼 수 있듯이 지반굴착에 의해 굴착면 주변에서 지반의 응력 평형상태가 붕괴되면서 지반변위와 파괴확률이 증가함을 알 수 있으며, 굴착단계가 진행됨에 따라 사면의 불평형력은 증가하여 안전율은 감소하고 지반변형은 상부사면에서 하부로 이동되어 가는 것으로 나타났다. 또한 Table 5에 나타난 바와 같이 굴착경사가 1:1.5에서 1:3으로 증가되어 감에 따라 1단계에서 $46.19 \times 10^{-3}m$ 에서 $42.21 \times 10^{-3}m$ 로 약 8.6% 최대변위가 감소하였으며 단계가 진행되어 감에 따라 약 1.8~8.6%의 최대변위가 감소하고 안전율은 증가하였다. 이와 같은 결과는 굴착이 진행됨에 따라 사면내부에서 발생하는 부(-)의 간극수압과 관련지어 설명될 수 있다.

한편, 각각의 굴착경사 조건에 따라 발생하는 최대 부의 간극수압의 크기와 이 때 사면의 최소안전율을 정리하여 Table 5에 나타내었으며 굴착사면 주변지반에서 발생하는 부(-)과잉간극수압 분포를 굴착경사 1:2를 대표로 하여 Fig. 11에 나타내었다.

Table 5 Results of maxium displacement and safety factor(FS) during excavated stage

Slope	Step	Maximum displacement [$\times 10^{-3}m$]	Safety factor	
			Directly after excavation	After 5 days
1:1.5	1	46.19	2.522	1.843
	2	74.27	1.723	1.315
	3	96.83	1.457	1.121
	4	108.55	1.230	1.047
	5	122.80	1.074	0.862
1:2	1	45.05	2.808	2.107
	2	73.03	1.907	1.409
	3	95.81	1.572	1.253
	4	107.76	1.357	1.125
	5	119.18	1.272	0.972
1:2.5	1	44.19	2.971	2.242
	2	72.21	2.232	1.724
	3	93.17	1.716	1.451
	4	107.02	1.564	1.277
	5	118.01	1.413	1.194
1:3	1	42.21	3.029	2.389
	2	70.04	2.349	1.852
	3	91.13	1.892	1.583
	4	106.61	1.668	1.439
	5	116.88	1.497	1.375

Table 6 Result of maxium negative pore pressure(-u) and minium safety factor(FS)

Slope		1:1.5	1:2.0	1:2.5	1:3.0
Directly after excavation	-u [kPa]	38.2	42.9	46.2	51.4
	FS	1.074	1.272	1.413	1.497
After 5 days	-u [kPa]	14.6	17.2	19.7	24.8
	FS	0.862	0.972	1.194	1.375

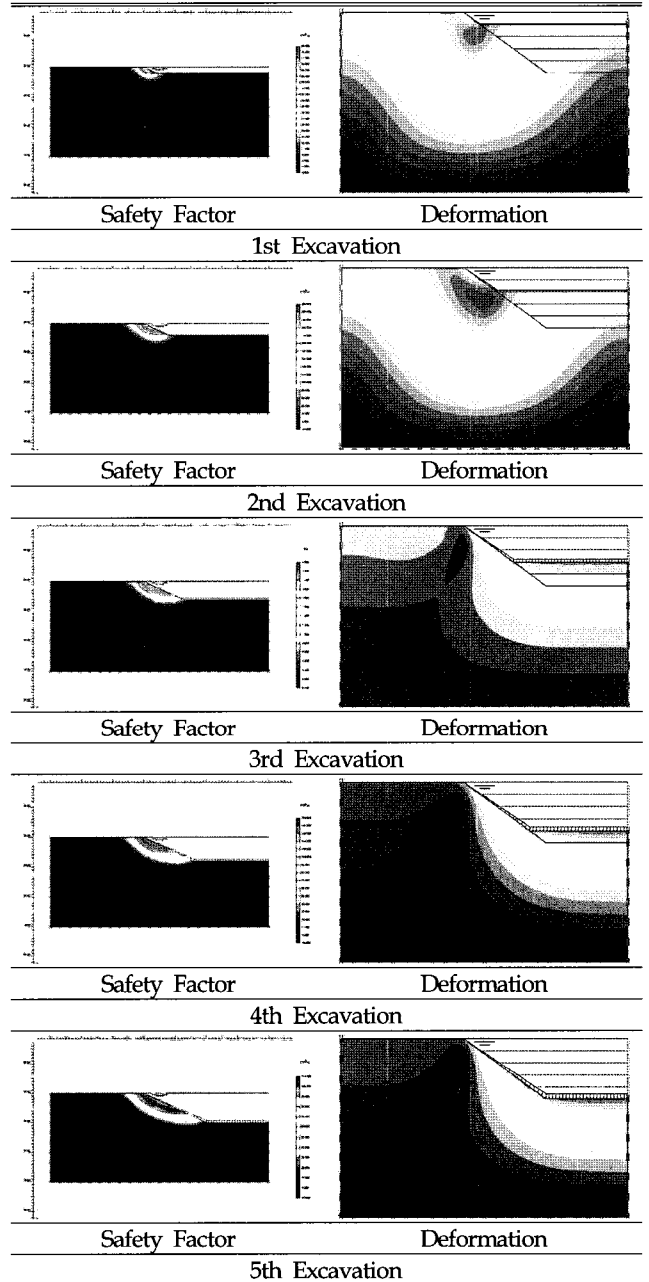
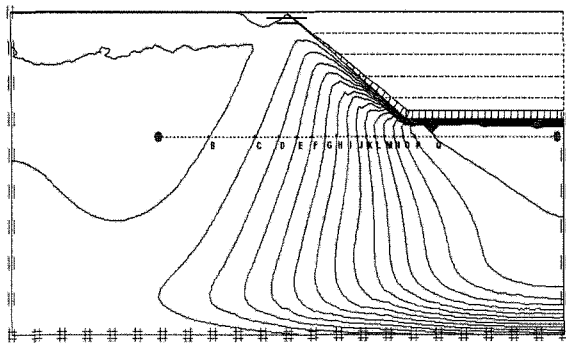
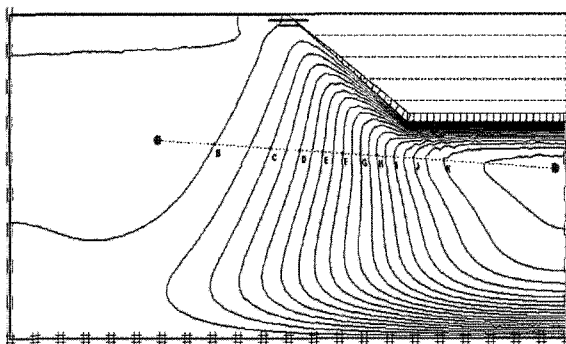


Fig. 10 Results of FEM analysis(PLAXIS, 1:2.0 slope)



(a) Directly after excavation ($-u_{max}=3.90\text{KPa}$)



(b) After 5 days ($-u_{max}=3.90\text{KPa}$)

Fig. 11 Negative pore pressure contour(1:2.0 slope)

Table 6과 Fig. 11에 나타난 바와 같이 굴착 직후가 부(-)과잉 간극수압의 최대가 되며 그 크기는 굴착경사에 따라 38.2~51.4kPa으로써 굴착경사가 완만할수록 부(-)의 과잉간극수압은 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같이 준설 사면내 부(-)의 과잉간극수압의 발생은 연약점토의 유효응력을 증가시켜 전단강도가 증가 요인이 된다. 전단강도가 증가하면 굴착사면의 안정성이 증가하므로 최종 굴착 직후 굴착사면의 안전율은 굴착경사에 따라 1.074~1.497로 산정되어 굴착경사가 완만할 수록 굴착사면의 안전율은 크게 산정되었다.

굴착 완료 후 시간이 경과함에 따라 부(-)의 과잉간극수압은 점진적으로 소산되어 방치 후 그 값은 굴착경사에 따라 14.6~24.8 kPa로써 굴착 직후에 비해 40~48% 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 굴착사면내의 부(-)과잉간극수압의 감소는 외부의 변화가 없더라도 연약점토의 유효응력을 감소시키므로 전단강도를 낮추어 굴착사면의 안전을 감소 원인으로 작용하게 된다. 방치 후 굴착사면의 안전율은 사면경사 1:2.0 이하의 조건에서는 0.862~0.972로 나타나 사면이 붕괴되는 것으로 나타났으며, 사면경사 1:2.5이상의 조건에서 최소안전율은 1.194~1.375로 안전율은 감소하나 사면의 안정성은 유지하는 것으로 산정되었다.

시간에 따른 부 과잉간극수압 분포는 굴착에 의해 유발된 전단응력에 따른 굴착사면주변지반의 탄소성변형과 굴착 경계면과의 배수거리, 점토층의 투수계수 등에 의해 변화하는 것으로 보인다.

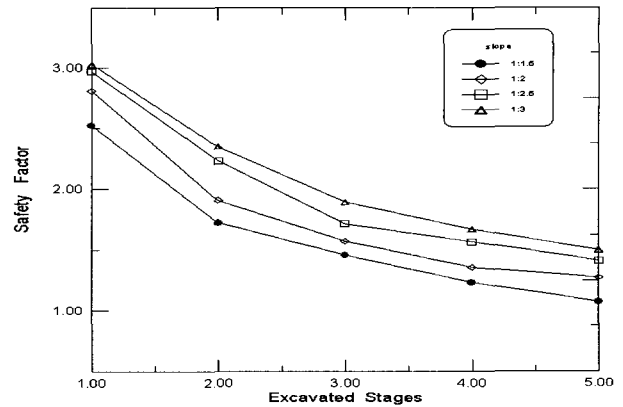


Fig. 12 Safety factor of excavated slope with excavated step

Fig. 12는 굴착경사를 1:1.5, 1:2, 1:2.5, 1:3로 굴착할 경우, 굴착경사 및 굴착단계에 따른 안전율을 도시한 것으로 굴착경사가 감소할수록 안전율은 감소하며 임의의 굴착경사에서 굴착단계가 증가할수록 안전율은 감소하는 경향을 나타내었다.

위의 결과를 종합해보면 연약지반을 굴착할 경우 굴착에 따른 부의 과잉간극수압의 영향으로 굴착 직후에 굴착사면의 안전율이 최대가 되며, 시간이 경과함에 따라 안전율이 감소하는 것으로 분석할 수 있다. 또한, 굴착직후 사면의 안정성이 유지된다 하더라도 굴착경사 및 시간에 따라 그 안정성이 지속될 수 없음을 알 수 있다.

5. 결 론

굴착치환 공법 적용시 굴착경사에 따른 굴착사면의 안정성을 분석하기 위하여 원심모형실험과 수치해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 점토지반 굴착에 의해 발생하는 사면의 안정성을 검토하기 위한 모형시험결과 1:1.5, 1:2 경사조건인 경우 구속체 제거 직후 지반파괴가 발생하여 사면경사 적용이 불가할 것으로 판단된다.

(2) 1:2.5인 경우 굴착직 후 급격한 변위가 발생하지 않고 서서히 지반파괴가 발생하는 것으로 보아 단기적 안정성을 요하는 사면에는 적용이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 1:3 경사조건인 경우 거의 변위가 발생하지 않아 비교적 안정성을 유지하는 것으로 나타났다.

(3) 수치해석 결과, 굴착경사가 클수록 부(-)의 간극수압은 크게 나타났으며, 동일한 조건에서 굴착경사가 완만할수록 안전율이 증가하는 경향을 보였으나 굴착 후 시간이 경과함에 따라 부(-)과잉간극수압의 소산으로 사면의 안전율은 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

윤요진 (2000). "다짐 지반에 조성되는 굴착사면의 최적 안정

- 기울기에 관한 연구”, 석사학위논문, 공주대학교.
- 이명원 (1997). “수중 굴착사면의 안정해석”, 석사학위논문, 충북대학교
- 이정복 (2001). “수중 굴착사면의 파괴형상에 관한 원심모형실험”, 석사학위논문, 충북대학교.
- 허열, 이처근, 안광국 (2001). “지하수위가 있는 굴착사면의 파괴양상에 관한 원심모델링”, 대한토목학회 논문집 21권, 제4-C호, pp 453-463.
- Chappell, B.A. (1987). “Deformational control in excavating unstable slopes”, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol 113, No 4, pp 299-319.
- Goodings, D.J. and Schofield, A.N. (1985). “A centrifugal model study of slope instability in Ottawa area Champlain Sea clay”, Canadian Geotechnical Journal, Vol 22, No 1, pp 102-109.
- PLAXIS (1998). "User's manual", BALKEMA.
- Roscoe, K.H. and Burland, J.B. (1968). "On the generalized stress-strain behavior of wet clays", Proceedings of Eng. Plasticity, Cambridge, Cambridge University Press, Cambridge, England, pp 535-609.

2006년 9월 11일 원고 접수

2006년 9월 20일 최종 수정본 채택