

강제치환 거동특성에 관한 원심모형실험

Centrifuge Model Experiments on Behaviour Characteristic in Forced Replacement Method

이 종 호* 박 병 수** 정 길 수*** 유 남 재****
Lee, Jong-Ho Park, Byung-Soo Jeong, Gil-Soo Yoo, Nam-Jae

Abstract

This thesis is results of centrifuge model experiments to investigate the behavior of replacement method in dredged and reclaimed ground

For experimental works, centrifuge model tests were carried out to investigate the behavior of replacement method in soft clay ground. Basic soil property tests were performed to find mechanical properties of clay soil sampled from the southern coast of Korea which was used for ground material in the centrifuge model tests. Reconstituted clay ground of model was prepared by applying preconsolidation pressure in 1g condition with specially built model container. Centrifuge model tests were carried out under the artificially accelerated gravitational level of 50g. Replacing material of leads having a certain degree of angularity was used and placed until the settlement of embankment of replacing material was reached to the equilibrium state.

Vertical displacement of replacing material was monitored during tests. Depth and shape of replacement, especially the slope of penetrated replacing material and water contents of clay ground were measured after finishing tests. Model tests of investigating the stability of embankment after backfilling were also performed to simulate the behavior of the dike treated with replacement and backfilled with sandy material. As a result of centrifuge model test, the behavior of replacement, the mechanism of the replacing material being penetrated into clay ground and depth of replacement were evaluated.

키워드 · 강제치환, 원심모형실험, 준설매립지반

Keywords : *Forced Replacement Method, Centrifuge Model Test, Dredged and Reclaimed Ground*

1. 서론

일반적으로 연약지반을 대상으로 각종 건설공사를 수행하는 과정에서 연약지반으로 인하여 공사상의 많은 어려움이 있을 뿐만 아니라 공사기간이 장기화되고 공사비가 크게 증대되는 경우가 많다.

그러나 공사 과정상 연약지반문제가 먼저 처리되어야 하고 이를 위해서는 대상 연약지반의 토질 및 지질상태를 정확히 판단하여 가장 적절한 공법을 선정하는 것이 필요하다. 연약지반처리를 위한 대책공법은 그 종류가 대단히 많으며, 이 중에서 가장 오래 전부터 이용되고 있는 공법의 하나인 치환공법은 연약토의 활동과피의 방지, 침하의 감소, 지반전단변형의 억제를 위해서 점성토 지반이나 유기질토 지반에 적용하여 모래나 자갈 등의 양질토로 치환하는 공법으로 연약토의 제거방법에 따라 굴착 치환공법과 강제 치환공법으로 분류

* 경동대학교 건축환경공학부 전임강사, 공학박사
** 강원대학교 토목공학과 연구원, 공학박사
*** 강원대학교 토목공학과 대학원, 박사과정
**** 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

된다. 굴착 치환공법은 연약토를 굴착 제거하여 양질토로 되메우는 공법으로 조기에 가장 확실하게 소정의 강도를 얻을 수 있으므로 해상과 육상의 각종 구조물의 기초공법으로 사용되고 있다. 한편, 강제 치환공법은 연약토를 성토자중이나 폭파 등으로 연약토를 횡방향으로 강제적으로 압출하여 양질토로 치환하는 공법이다. 이 중에서 성토하중에 의한 치환공법은 연약토층의 두께가 얇은 경우에 특히 효과적이지만, 연약토층이 상당히 두꺼운 경우에도 공사의 종류와 목적에 따라서 효과적이고 경제적인 공법으로 채택되어 간척의 제방, 도로, 호안, 하천 등의 연약지반을 개량하는 곳에 널리 이용되어 왔다. 하지만 치환공법은 연약지반토를 양질토로 치환하는 것이므로 시공적으로 불확실하고 공사기간을 예측할 수 없을 뿐만 아니라 치환재료, 치환깊이, 치환폭, 치환단면형상이 합리적이고 경제적이며 치환 후의 토질특성이 소요효과를 만족할 수 있는냐는 것이 중요한 문제이므로 이에 대한 검토가 선행되어야만 한다.

활동 파괴면이나 용기면, 용기량 등은 토질 조건, 시공 조건(속도, 방법, 순서)에 따라 크게 변하기 때문에 실제로는 침하량이나 용기 현상을 정량적으로 해석하는 것은 곤란하다. 따라서 국내의 토질조건과 유사한 일본의 계측결과를 설계에 반영하고 있는 실정이다. 그러나, 한정된 국토를 보다 효율적으로 사용하기 위해 해안 매립이 지속적으로 추진되고 그 범위가 증가하고 있는 국내의 실정을 볼 때, 상대적으로 경제성을 띠는 강제치환에 의한 공법의 적용이 불가피하고 이에 따라 강제치환에 대한 이론적인 정립과 아울러 치환심도 결정, 사석투입물량 산출, 치환종료 시점의 예측, 치환에 의한 안정성 확보 등에 있어서 기술적이고 보다 정확한 설계 방안이 요구되고 있다.

강제치환공법의 경우 1952년 미국 San Francisco 지역의 고속도로 제방 건설에 Webber가 처음으로 시공한 이래 그 경제성이나 시공의 용이성 등에 비추어 현재까지 사용되어 오고 있다. 이후 일본의 Yasuhara와 Tsukamoto(1982)는 성토에 따른 하부 연약지반의 변형관계를 모형실험을 통하여 규명하고 연약지반위에 Geotextile을 포설하였을 때 치환후의 지반의 극한 지지력으로부터 치환깊이를 제안하였으며, 국내에서도 이양희(1982), 이원택(1985), 정형식(1986), 이승호(1992), 신현영(1999), 이승원 외(2000) 등의 강제치환거동에 관한 연구가 지속적으로 수행되어 왔다. 그러나, 치환심도 산정에 따른 이론적 배경의 정립이 미약한 상태이고 기존의 시공 사례를 검토한 결과 치환심도의 예측치와 실측치간에 차이가 발생하고 있으며, 치환과정 및 이후의 하부지반 물성치 변화

와 용기량에 대한 지속적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다

따라서 본 연구에서는 원심모형시험기를 이용하여 사다리꼴 형태의 모형제방을 설치하고 소정의 중력수준까지 도달하는 동안 중력수준 상승에 의한 체체의 자중증가 현상을 이용하여 지반의 전반 진단파괴를 유발시켜 지반의 침하깊이와 치환형상, 치환 후 물성변화 등을 파악하였으며, 강제치환에 의한 지반 보강 후 형성된 체체의 배면 성토에 따른 안정성 확보 여부에 대한 안정성 검토시험을 실시하여 강제치환에 따른 지반거동 특성에 관한 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

강제치환에 의한 지반 거동을 파악하기 위하여 실시한 실험은 시료의 물리적 특성 파악을 위한 기본물성시험과 치환심도 및 치환형상 예측, 그리고 치환이후 변화된 지반물성 분석을 위한 원심모형실험을 수행하였다.

2.1 기본물성

본 연구에 사용된 준설패립토의 비중은 평균 2.72로 나타났으며, 노건조 및 자연건조 시킨 시료를 이용하여 실시한 액·소성한계 실험결과를 표 1에 나타내었다 표에서 보는 바와 같이 노건조된 시료의 경우 액성한계 45.9%, 소성한계 21.9%, 소성지수 24.0%의 분포를 보이며, 자연건조된 시료의 경우 액성한계 52.7%, 소성한계 24.5%, 소성지수 28.2%의 분포를 보이는 것으로 나타났다 이와 같이 시료의 건조조건에 따라 액·소성한계 값의 차이가 나타나는 것은 해성 점토층에 있는 염도의 변화에 따른 영향으로 설명할 수 있다. 즉 노건조된 시료가 공기 건조된 시료에 비하여 건조과정에서 점토에 흡착되어 있는 염분의 증발량이 클 것으로 가정하면 액성한계실험에서 추가되는 담수에 의한 희석효과로 노건조 시료에서 저하된 염도의 농도는 이중층의 두께증가에 의한 토립자 간의 반발력 증가로 전단강도의 저하를 유발시킬 수 있어 일종의 충격전단에 의한 흙의 유동성을 측정하는 액성한계실험의 특성을 고려할 때 그 가능성을 추정할 수 있다.

표 1 액·소성한계 시험 결과

건조조건	LL(%)	PL(%)	PI(%)
노 건 조	45.9	21.9	24.0
자연건조	52.7	24.5	28.2

체분석시험과 비중계분석시험을 통하여 실시한 입도분석 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 준설패립토 시료의 경우 200번체

통과량이 96.7~97.2%으로 대부분 세립분으로 구성되어 있으며, 통일분류법에 의한 흙의 공학적 분류를 실시한 결과 CH로 분류되었다.

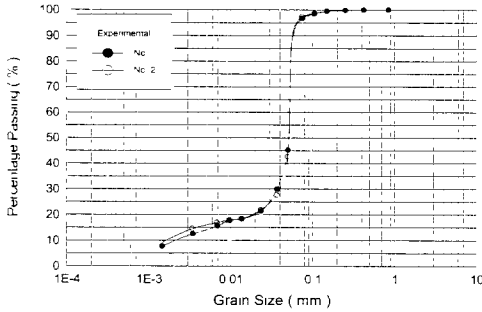


그림 1 입도분포곡선

2.2 원심모형실험

준설패립지반의 강제치환 특성을 파악하기 위하여 모형체제를 성토하중으로 이용하여 원심모형실험을 실시하였다. 강제치환 모형시험은 강제치환에 의한 치환특성 파악을 위한 시험과 배면성토에 의한 체제의 안정성 검토를 위한 시험으로 나누어 각각 실시하였다.

2.2.1 강제치환 특성시험

강제치환 특성시험은 치환깊이 및 치환형상 파악을 위해 표 2의 실험조건에 의해 원심모형실험을 수행하였다. 준설패립지반 모사를 위해 강제압밀을 이용하여 모형지반을 성형하였는데, 먼저 초기함수비 99~108% 조건으로 시료를 균질하게 혼합한 다음 그림 2에 나타난 바와 같이 아크릴 토조에 시료를 투기한 다음 공기압을 이용하여 최대 0.2 kgf/cm²의 압밀하중을 단계적으로 재하 하였다.

표 2 원지반 시료성형 조건

초기 시료 높이	성토재료	지반성형후 평균함수비 (%)	모형지반 성형방법
20cm	사석+남 (중량비1:1)	72.5	강제압밀 + 자중압밀

강제압밀된 시료의 평균함수비는 72.5%의 분포를 보이는 것으로 나타났으며, 시료의 함수비가 높아 중력수준 50G조건에서 17시간동안 자중압밀을 실시하여 평균함수비 72.5% 조건에서 모형실험을 실시하였다.

강제치환 형상파악을 위해 모형체제의 경우 실

제 단면을 기준으로 상사법칙을 적용하는 경우 평균 체체폭은 128cm가 되어 모형토조폭 45cm를 고려할 때 실험이 불가능하므로, 그림 3에서와 같이 체체의 체원을 81수준으로 축소하여 평균 폭 15.5cm로 체체의 체원을 결정하였다 또한 체체 수형을 위하여 시료는 사석과 남을 중량비 1:1를 수어서 사용하였으며, 평균 건조단위중량은 22~2.4 tf/m³ 분포를 유지하였다 사용된 남 입자는 자척의 마찰저항력이 작아 실험중 치환과정에서 퍼짐현상 발생이 예상되어 이를 보완하기 위하여 구슬 형태의 입자를 녹여 불규칙한 형상으로 남 입자를 제작하여 사용하였으며, 사석은 남입자와의 치밀한 구성을 위해 #10잔류 시료를 사용하였다.

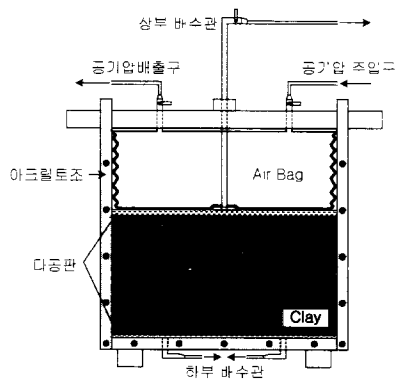


그림 2 강제압밀에 의한 시료성형

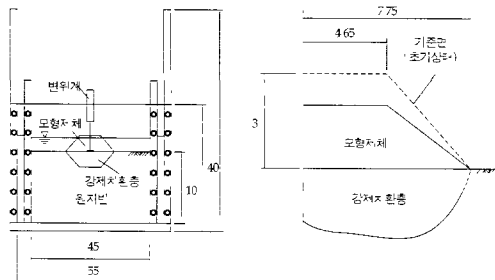


그림 3 강제치환 특성시험 개요

2.2.2 안정성 검토시험

강제치환공법에 의해 개량된 지반 위에 해안구조물을 축조하여 뒷채움을 실시하는 과정에서 체체의 안정성 여부를 확인하기 위하여 표 3에서와 같이 안정성 검토시험을 수행하였다.

실험은 그림 4에서와 같이 강제치환 모형실험이 종료된 상태에서 체체 배면에 주문진 표준사를 포설한 다음 중력수준 50G조건에서 안정성 검토를

실시하였다. 또한 실험 과정 중 배면성토에 의한 제체의 수평변위 발생여부와 제체지 모형지반의 침하량을 예측하기 위하여 2개소에 변위계를 설치하였으며, 성토하중으로 사용된 주문진 표준사의 경우 평균 1.54 tf/cm³의 단위중량을 유지하였으며, 이는 현장에서 산토를 이용하여 매립 성토하는 것을 모사하였다.

표 3 안정성 검토시험 원지반 시료성형 조건

초기 시료 높이	성토재료	지반 성형후 평균함수비 (%)	모형지반 성형방법	비고
15cm	사석+납 (중량비1:1)	58.2	강제압밀 자중압밀	20시간 자중 압밀

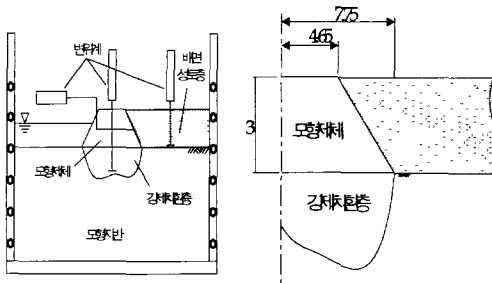


그림 4 안정성 검토 모형실험 개요

그림에 나타난 바와 같이 강제치환 단면 형상은 중심축을 중심으로 하여 좌우 대칭으로 오목한 형태의 치환 형상을 나타낸다. 치환 형상은 성토하중, 성토제원, 하부지반의 비배수전단강도, 성토제의 전단강도(내부마찰각), 하부지반의 과잉간극수압 발생 및 소산속도, 시공속도 등에 따라서 영향을 받을 것으로 예상되나, 강제치환공법의 특성상 현장에서 성토체의 시공속도가 간극수압의 소산속도 보다 비교적 빠를 것으로 예상되므로 과잉간극수압소산에 의한 압밀 침하보다 비배수 전단 상태에서 연직 변위의 발생과 수평 변위가 진행되는 측방유방에 의한 성토체의 하부지반 관입이 발생할 것으로 판단된다. 장기적으로 전단 변형시 발생한 간극수압의 소산이 진행되면서 성토체의 부분적 치환이 발생할 것으로 예상된다.

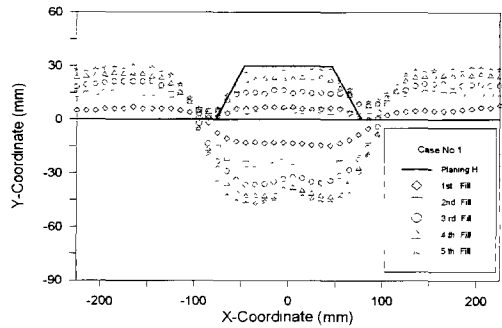


그림 5 모형지반의 성토단계별 침하형상 I

3. 실험결과

3.1 강제치환 특성시험결과

그림 5는 각 지반 조건에서 성토과정에 따라 발생하는 치환 형상 및 주변 지반의 융기 형상을 나타내고 있으며, 그림 6은 각 지반조건 실험결과 완료 후 지반 변형 형상을 3차원적으로 표현한 것이다.

그림 5에서 성토단계별 지반침하 형상을 분석한 결과 1단계성토에 의해 발생된 지반침하는 제체 중앙부를 중심으로 좌우 대칭형태의 변위가 유발되고 있으며 제체 전단부를 기준으로 중심부에서 치환이 가장 작게 이루어지며 사면부에서 가장 크게 치환이 유발됨을 알 수 있다. 이러한 경향은 2~5단계 성토과정에서도 일관된 경향을 보이고 있으며 치환된 부분의 최종경사는 62.8° 분포를 보이며 최종적인 형상은 그림 6에서와 같이 정면에서 보았을 때 모형지반 중앙을 중심으로 좌우대칭 형태의 치환형상을 보이며 측면에서 관측한 경우 토조 벽면과 인접한 부분보다 중앙부에서 상대적으로 치환이 크게 발생하는 것으로 보아 벽면마찰의 영향이 있는 것으로 판단된다.

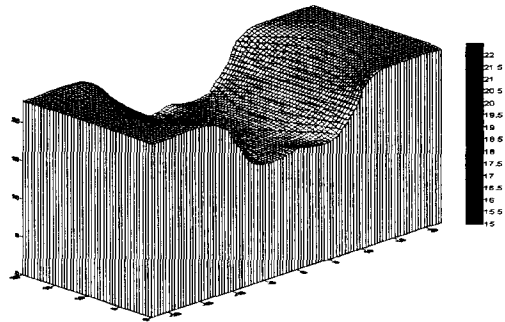


그림 6 모형지반의 최종 변위 형상 I

그림 5에서와 같이 성토단계별로 발생된 치환형상을 분석하여 치환율을 산정한 결과를 표 4에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 1차성토시 54.9%의 치환율을 보이며 최종적으로 196.8%의 치환율을 보이고 있다. 모형실험을 위해 강제압밀에 의해 모형지반 성형 후 측정된 초기 평균함수비는 72.5%로 나타났다.

표 4 성토단계별 치환율 산정결과 I

구분	1차 성토	2차 성토	3차 성토	4차 성토	5차 성토
성토누계량(kg)	1.47	2.67	3.62	4.25	4.55
치환면적(cm ²)	20.4	39.4	54.9	65.8	73.2
치환율(%)	54.9	105.9	147.6	176.8	196.8

실험종료 후 위치별 함수비를 측정된 결과 그림 7에서와 같이 실험이 진행되는 동안 하부 점토지반에서 자중에 의해 압밀이 진행되어 함수비가 감소하는 경향을 보이며, 특히 치환단면 주변에서는 성토에 의해 압밀하중이 상대적으로 크게 작용하여 주변지반보다 함수비 감소가 두드러진 것으로 나타났다

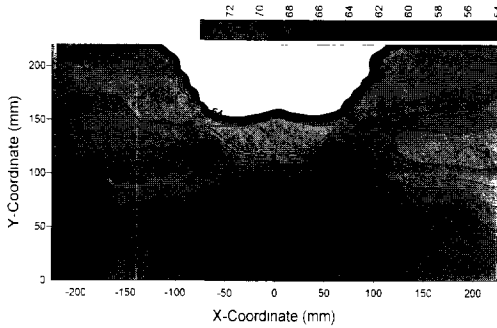


그림 7 모형지반의 최종 함수비 분포 I

3.2 안정성 검토시험결과

강제치환 후 배면성토에 의한 제체의 안정성 검토를 위하여 원심모형실험을 실시하였다. 실험은 앞서 언급한 바와 같이 모형제체를 이용하여 강제치환을 실시한 다음 주문진 표준사를 이용하여 배면에 성토를 실시하는 순서로 진행되었다

그림 8은 각 지반 조건에서 성토과정에 따라 발생하는 치환 형상 및 주변 지반의 용기 형상을 나타내고 있으며, 그림 9는 각 지반조건 실험결과 완료 후 지반 변형 형상을 3차원적으로 표현한 것이다

성토단계별 지반침하 형상은 제체 중앙부를 중심으로 좌우 대칭형태의 변위가 유발되고 있으며 사면부에서 가장 크게 치환이 유발되는 등 앞서 언급한 강제치환 모형실험 결과와 동일한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 치환된 부분의 최종경사는 34.9°의 분포를 보이며, 성토단계별 치환형상을 분석하여 치환율을 산정한 결과 표 5에서 보는 바와 같이 1차성토시 11.0%의 치환율을 보이며 최종적으로 87.1%의 치환율을 보이고 있다 모형실험을 위해 강제압밀에 의해 모형지반 성형후 측정된 초기 평균함수비는 53.3%로 나타났다.

실험종료 후 위치별 함수비를 측정된 결과 그림 10에서와 같이 실험이 진행되는 동안 하부 점토지반에서 자중에 의해 압밀이 진행되어 함수비가 감소하는 경향을 보이며, 특히 치환단면 주변에서는 성토에 의해 압밀하중이 상대적으로 크게 작용하여 주변지반보다 함수비 감소가 두드러진 것으로 나타났다

강제치환이 종료된 이후 주문진 표준사를 이용하여 배면성토를 실시하고 안정성 검토를 실시한 결과를 정리하여 그림 10에 나타내었다 그림에서 보는 바와 같이 성토하중에 의해 제내지에서는 0.2~0.5mm 내외의 압밀침하가 유발되었으며 모형제체의 수평변위의 경우 0.2~0.5mm내외로 발생되었는데, 이는 배면에 실시된 성토하중에 의한 영향보다는 제체하중에 의한 하부지반의 압밀침하에 의해 발생하는 제체의 연직변위에 의해 유발되는 것으로 추정된다

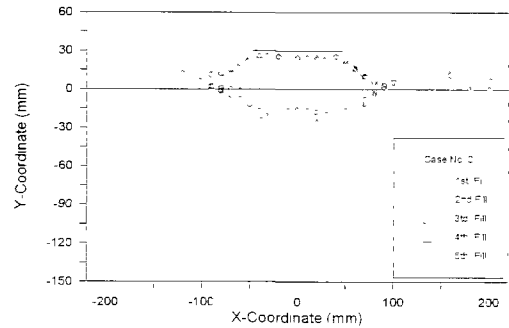


그림 8 모형지반의 성토단계별 침하형상 II

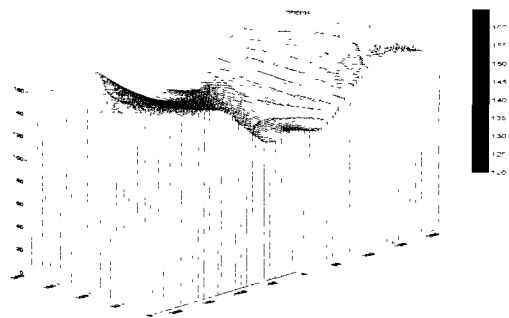


그림 9 모형지반의 최종 치환 형상 II

표 5 성토단계별 치환율 산정결과 II

구분	1차 성토	2차 성토	3차 성토	4차 성토	5차 성토
성토누계량(kg)	1.73	2.22	2.64	2.87	3.03
치환면적(cm ²)	4.1	13.0	22.5	25.4	32.4
치환율(%)	11.0	34.9	60.4	68.2	87.1

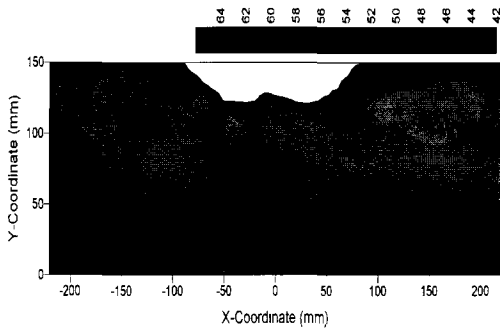
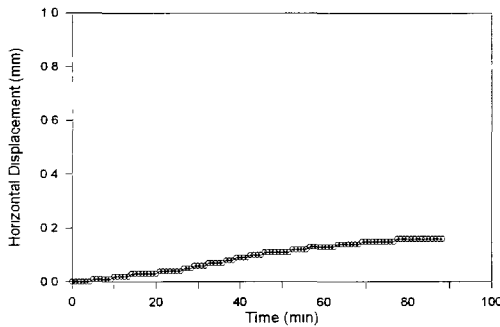
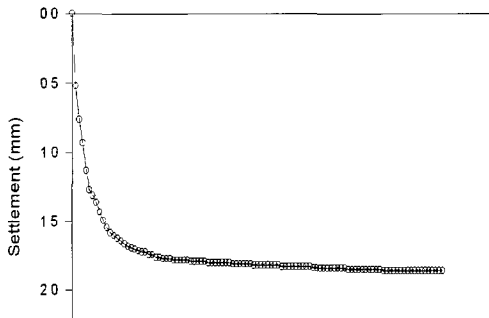


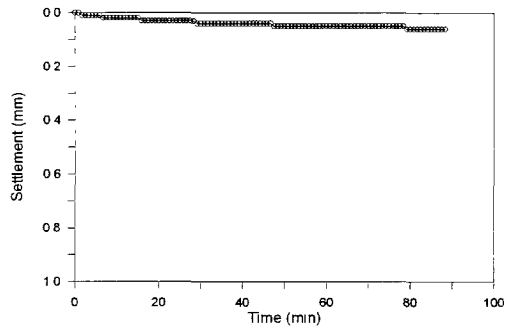
그림 10 모형지반의 최종 함수비 분포 II



(a) 제체의 수평변위



(b) 제체의 연직변위



(c) 배면성토부의 시간-압밀침하 관계곡선
그림 11 안정성 검토 모형실험 결과

5. 결론

본 연구에서는 현장의 강제치환상태를 원심모형 시험에서 모사하기 위하여 강제치환 특성시험과 강제치환에 의한 지반보강 후 형성된 제체의 배면 성토에 따른 안정성 검토시험에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 강제치환 형상과 메카니즘에 대하여 조사하기 위하여 원심모형 실험 결과, 관찰된 하부 점성토 지반의 치환 형상은 제체 중앙부를 중심으로 제체 하부 지반이 오목한 형태로 나타났으며 이러한 치환 형상은 제체하중에 의한 진행성 관입파괴, 중앙부 제체 하중에 의한 압밀 진행으로 인한 비배수 강도증가 및 구속응력 증가에 의한 변형계수 증가, 제체 사면 하부 지반의 측방 유동에 의한 성토재의 진행성 관입에 의한 것으로 판단된다.
- 2) 원심모형 실험결과, 하부지반의 치환심도 및 치환율(=치환단면/제체단면)은 하부지반의 함수비와 하부지층의 깊이에 따라 증가하는 경향을 확인하였다.
- 3) 강제치환 모형 실험결과, 성토하중과 치환하중에 의한 간극수압과 강제치환에 의한 진단에 따른 간극수압의 발생 및 소산으로 인하여 치환단면 주변에서 함수비 감소 현상을 확인하였다.
- 4) 강제치환에 의한 지반 보강 후 형성된 제체의 배면 성토에 따른 안정성 확보 여부에 대한 원심모형 실험결과, 제한된 축소모형의 사용으로 정량적 평가는 어려우나 주어진 제원 및 실험 조건에 대하여 제체의 연직 및 수평 변위량을 측정하여 제체의 안정성 확보 여부를 판단할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 신현영. 강제치환 심도산정에 영향을 미치는 인자에 관한 연구, 중앙대학교, 석사학위 논문, 1999.
- [2] 이승원 외. 원심모형시험을 통한 연약지반의 강제치환거동 연구, 한국지반 공학회, 제16권, 제 6호, pp. 141~151, 2000.
- [3] 이승호. 토질구조물 축조에 의한 연약 점토지반의 변형에 관한 연구, 한양 대학교, 박사학위 논문, 1992
- [4] 이양희. 강제치환 공법에 의한 변위특성, 동국 대학교, 석사학위 논문, 1982.
- [5] 이원택. 연약한 점성토지반의 치환깊이에 대한 연구, 서울대학교, 석사학위논문, 1985
- [6] Carsten, P, "chap 8 Replacement" Embarkments on Organic Soils, Developments in Geotechnical Engineering, 80. Hartlen and Wolski(Editors, Elsever), 1996.
- [7] Poulos, H G, "Difficulties in prediction of horizontal deformations of foundations, ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations" Division, Vol 98, pp. 843~848, 1972.
- [8] Perloff W. H and Baron. W, "Soil mechanics-Principles and applications". The Ronard Press Company, New York (1976)
- [9] Stamatopoulos A. C, "Embankment construction on yielding sea bottom". Journal of the soil mechanics and foundation division, pp 727~747, 1972. 7
- [10] Tavenas, F. Mieussens, C and Bourges, F . "Lateral displacement in clay foundations under embankments". Canadian Geotechnical Journal, Vol 16, pp. 532~550, 1979.
- [11] Weber E. G, "Construction of a fill by a mud displacement method" Highway research proceeding, Vol 41, pp 591~610, 1952.
- [12] Yashuhara, K and Tsukamoto, Y, "A rapid banking method using the resinous mesh on soft reclaimed land" Second International Conference on Geotextiles, 1982.