

원심모형시험을 통한 연약지반의 강제치환거동 연구

A Study on Replacement Behaviour of Soft Soil by Centrifuge Modelling Test

이 승 원*1 Lee, Seung-Won

이 영 남*2 Lee, Young-Nam

Allersma, H.G.B.*3

Abstract

A series of centrifuge modelling tests were performed at 100g to investigate the replacement behaviour of soft subsoil for several embankment construction conditions. It was possible to simulate the dumping process by an in-flight computer-controlled pouring machine. A number of interesting observations could be obtained as the results of the test program. It was found that the replacement behaviour of the subsoil is strongly dependent on the method of embankment construction, the particle size of the dumped material and the strength and permeability of subsoil. Dumping at a single point for a short period results in the deepest replacement and grains with a larger diameter penetrate deeper into the subsoil than smaller grains. The magnitude and the dissipation rate of excess pore water pressure are important factors for analyzing the replacement behaviour of soft subsoil.

요 지

본 연구에서는 토사나 사석을 이용하여 제체를 축조하는 과정에서 발생하는 연약지반의 강제치환거동을 연구하기 위하여 다양한 시험조건에 대한 원심모형시험을 수행하였다. 제체축조에 따른 연약지반의 강제치환거동은 제체의 성토시공방법, 성토재의 입경, 연약지반의 종류 및 강도 등에 따라 많은 차이를 보였는데, 특히 성토과정중에 발생하는 과잉간극수압의 크기와 밀접한 상관관계를 보였다. 급속시공인 경우에 연약지반의 파괴영역은 횡적으로 확대되고 성토사면의 기울기는 완만해졌으며, 성토재의 입경이 클수록 치환깊이가 증가하고 성토사면의 기울기가 급하게 형성되었다. 그리고 동일점토에서는 지반의 강도가 클수록 치환량이 적었지만, 점토의 종류가 다른 경우에는 지반내 발생하는 과잉간극수압의 크기 및 소산정도에 따라 치환거동이 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.

Keywords : Centrifuge modelling test, Replacement behaviour, Embankment construction

1. 서론

해안지역에서 매립공사를 수행하기 위해서는 바닷가에 호안을 축조하고 매립블록 분할을 위하여 매립부지 내부에 가토제를 시공하게 되는데, 국내에서는 연약점토층에 사석이나 산토를 매립하여 강제적으로 연약지반을

치환하는 공법을 많이 이용하고 있다. 이러한 강제치환 공법을 적용하기 위해서는 연약지반의 치환거동에 대한 연구가 요구되나 아직까지 이에 대한 실험적인 연구 및 이론적인 연구가 많이 이루어지지 않은 실정이다. 일반적으로 연약지반의 치환거동(치환 모양, 치환 심도 및 체적)에 영향을 미치는 변수로는 강제치환 시공방법, 연약지반의

*1 정회원, 현대건설(주) 기술연구소 선임연구원

*2 정회원, 현대건설(주) 기술연구소 소장

*3 Associate Professor, Delft University of Technology, Netherlands

강도, 체체 성토고, 체체 성토재의 특성 등을 들 수 있다. 따라서 다양한 현장 조건에 대한 연약지반의 치환거동을 연구하기 위해서는 이들 조건들을 변화시키면서 다양한 실험을 수행하여야 한다. 그러나 매립을 위한 체체 축조공사의 규모가 크고 연약지반의 파괴를 적극적으로 유발하여 강제치환을 실시하기 때문에 현장에서 다양한 실험 조건을 적용하여 정확한 계측을 수행하기가 거의 불가능하다. 따라서 이에 대한 연구가 실험실에서 제한적으로 수행(이원택, 1985)되거나 체체가 축조된 현장에서 제한된 시추조사를 이용하여 체체의 치환형상을 판단(이양희, 1983)하는 수준에 머물렀다. 그러나 실험실에 축조된 모형으로 실험하는 경우에는 연약지반내 응력이 현장 응력 수준과 큰 차이를 보이게 되고 체체 성토재의 크기 등에서도 현장 조건과 상이하여 신뢰할 수 있는 결과를 보이지 못하며, 현장에서의 시추조사를 통하여 치환형상을 유추하는 것도 정확한 치환 메카니즘을 연구하는데에 충분한 해답을 주지 못하고 있다.

본 연구에서는 현장 응력 조건과 크기 효과를 극복할 수 있는 원심모형시험을 통하여 연약지반의 강제치환 거동에 대한 다양한 조건의 시험과 계측을 수행하여 치환 메카니즘을 규명하고자 하였다. 원심모형시험은 소형 토조에서 현장의 응력조건을 구현하기 위하여 사용되는 시험방법으로 원심모형시험시 토조에 작용하는 임의의 중력가속도(Ng)에 따라 표 1과 같은 상사관계가 발생한다. 표 1에서 N 은 중력가속도의 크기를 나타내며, L, A, V, T, Q 는 각 비교항목의 크기를 나타낸 것이다.

본 원심모형시험에 적용된 중력가속도는 $100g$ 이고, 사용된 시료는 카올리나이트(Kaolinite) 점토와 전라남도 울진 현장에서 채취한 해성점토를 사용하였으며, 치환거동 분석을 위하여 지반내에 간극수압계를 설치하였고, 체체의 형상과 치환형상을 측정하기 위하여 3차원 광학 스캐닝 장비를 사용하였다.

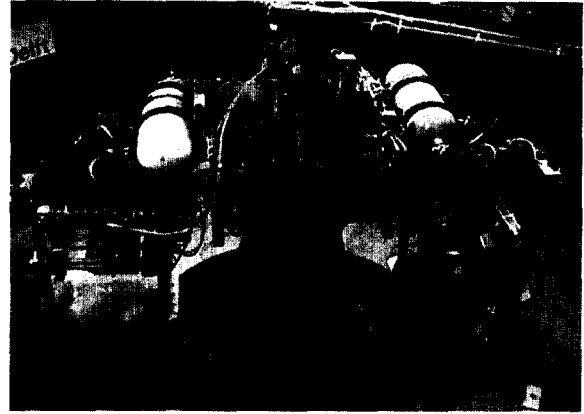


사진 1. 델프트 공대의 원심모형시험기

2. 시험 장비

본 연구에 사용된 장비는 원심모형시험기와 $100g$ 의 중력가속도에서 체체를 성토하기 위하여 사용된 성토 장비, 완전포화 점토지반 조성을 위한 점토시료 성형 장비, 그리고 체체 및 치환 형상 측정을 위한 광학 스캐닝 장비와 원심모형시험중 지반의 강도를 측정할 수 있는 베인시험기 등으로 이에 대한 설명은 다음과 같다.

2.1 원심모형시험기

본 시험에 사용된 원심모형시험기는 네덜란드 Delft 공대에서 직접 제작한 시험기로 직경 $2.4m$ 에 $30kg$ 이상의 시험하중을 $150g$ 의 중력가속도로 회전시킬 수 있는 장비이다(사진 1). 본 시험기는 회전중에 정하중의 재하 및 제거, 동하중의 재하, 성토 등의 시험을 컴퓨터로 조정하여 수행할 수 있다(Allersma, 1994a). 시험중 발생한 변위는 비디오 화상으로 전송받아 이미지 프로세싱 기법으로 정량화시킬 수 있으며(Allersma, 1997), 간극수압계를 모형지반내에 설치하여 실시간으로 간극수압의 변화를 측정할 수 있다. 이렇게 측정된 변위 및 간극수압을 이용하여 변화된

표 1. 원심모형시험시 발생하는 상사관계

Quantity	Dimension in Model	Dimension in Prototype
Length	L	$N \times L$
Area	A	$N^2 \times A$
Volume	V	$N^3 \times V$
Consolidation Time	T	$N^2 \times T$
Strain, Density, Void Ratio, Coeff. of Consolidation & Permeability	Q	Q

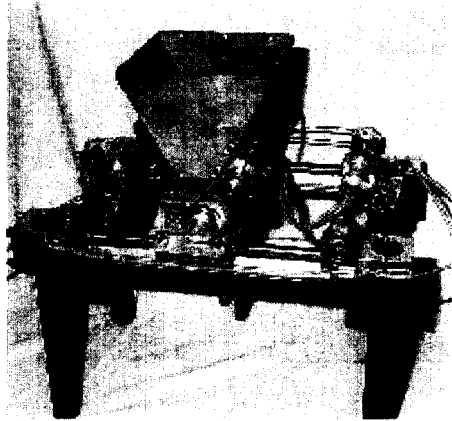


사진 2. 모래용 성토장비

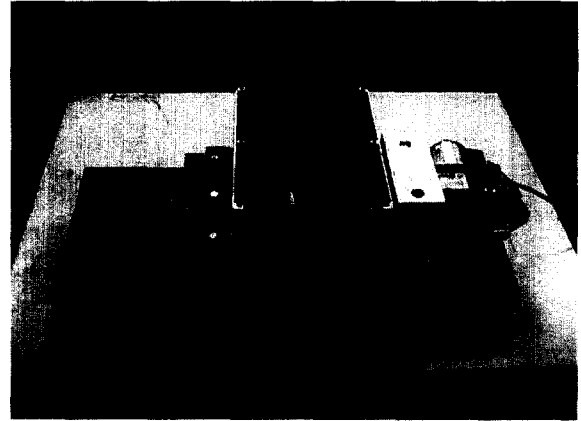


사진 3. 자갈용 성토장비

조건들에 대한 시험을 미리 프로그램화하여 수행할 수도 있다.

2.2 성토용 장비

원심모형시험기 회전중에 연약지반위에 제체를 성토하기 위하여 자동제어 성토장비를 개발하였다. 이 성토장비는 수평으로 자동 제어되는 호퍼와 성토량을 조절할 수 있는 볼 베어링 막대로 구성되어 있으며 중량은 약 10kg이다(Allersma, 1994b). 이 장비는 호퍼에 직경 2mm 이내의 모래를 넣어 모형토조내의 연약지반위로 모래를 자유낙하시켜 제체를 성토하는 장치로 수평으로 150mm 까지 이동할 수 있도록 제작되었다(사진 2). 장비의 위치와 성토량은 펄스 휠의 16비트 카운터와 호퍼 배출구에 설치된 볼 베어링 막대의 회전수를 조절하여 컴퓨터로 자동 제어할 수 있도록 되어 있어서 성토 위치와 성토량, 그리고 성토시공 방법(단계별 층성토 또는 일점 연속 성토 등)을 조절하여 시험할 수 있다. 직경이 2mm 보다 큰 성토재로 제체를 성토하기 위하여 직경 15mm 이내의 자갈을 성토할 수 있는 장비를 별도로 제작하였다(사진 3). 이 장비는 호퍼와

고압의 공기압으로 조절되는 오픈너(opener)로 구성되어 있으며, 수평으로의 이동이 없어 한 지점에서 일시에 제체를 성토할 수 있도록 제작되었다. 원심모형시험기 회전중에 성토재를 자유낙하시키면 원심력에 의해 코리올리의 힘(Corioli's force)이 성토재에 작용하여 성토재가 연직방향으로 떨어지지 않고 한쪽으로 치우쳐 떨어지게 된다. 이러한 오차를 줄이기 위해 성토장비 배출구 하단에 성토재의 낙하 방향을 조절할 수 있는 방향판을 설치하였다.

2.3 점토시료 성형 장비

본 시험에서는 연약지반 조성을 위하여 카올리나이트 점토와 울촌 현장에서 채취한 해성점토를 사용하였다. 울촌 점토는 자연함수비가 약 120% 정도로 자동 시료 반죽기로 2시간 이상 반죽하여 균질하고 완전포화된 시료를 만들어 사용하였다. 카올리나이트 시료는 분말 시료를 완전 포화상태로 물과 혼합하기 위하여 그림 1과 같은 점토시료 성형기를 이용하여 완전 포화된 점토를 만들고 이 시료를 자동 시료 반죽기로 1시간 이상 반죽하여 균질한 시료를 만들 수 있었다. 그림 1의 점토시료 성형기의 기본 원리는 회전하는 수면위에 점토 입자를 얇은 층으로 떨어뜨려 모세관 현상에 의해 분말 입자사이의 공극을 물로 채워주는 것이다. 이렇게 준비된 카올리나이트 점토와 울촌 점토는 현장 응력 조건으로 정규압밀상태의 지반을 만들기 위하여 직경 1m의 소형 원심모형시험기에서 100g의 중력가속도로 자중압밀시켰다. 본 시험에서는 카올리나이트 시료는 12시간 동안, 그리고 울촌 시료는 48시간 동안 자중압밀을 시켜 정규압밀상태의 지반을 조성하였다.

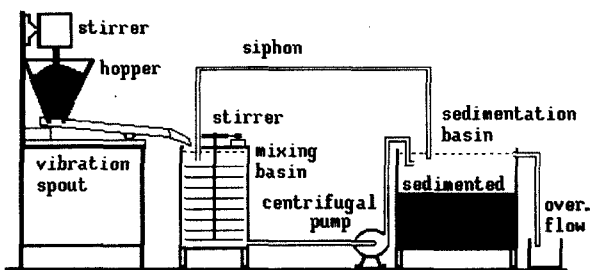


그림 1. 점토시료 성형장비

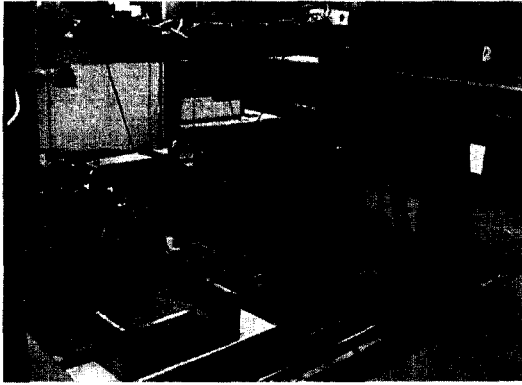


사진 4. 광학 스캐닝 장비

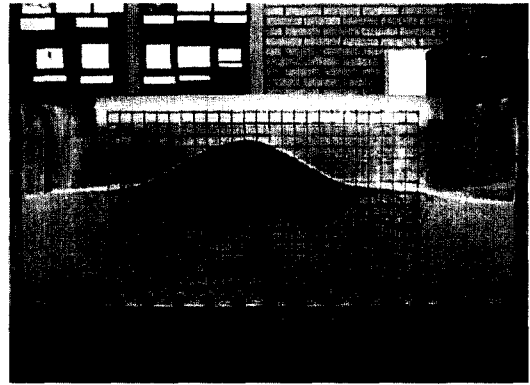


사진 5. 제체 성토 완료후 제체형상

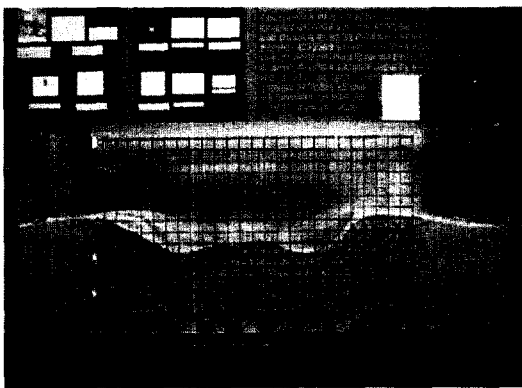


사진 6. 제체 제거후 연약지반 치환형상

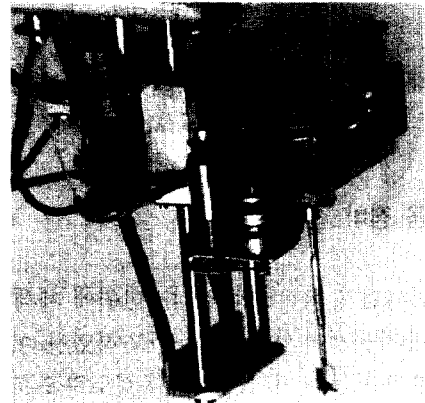


사진 7. 베인시험기

2.4 광학 스캐닝 장비

제체의 형상 및 연약지반의 치환 형상을 3차원으로 측정하기 위하여 광학 스캐닝 장비가 이용되었다(사진 4). 이 장비는 x, y축으로 이동이 가능한 디지털라이저(digitizer)에 광학센서를 부착하여 z 방향의 거리를 측정하는 장비이다. 사진 5와 사진 6은 원심모형시험으로 제체 성토를 완료한 후의 제체형상과 제체 제거후 연약지반의 치환형상을 보인 것인데, 이때의 형상을 광학스캐닝 장비로 측정하여 3차원 좌표로 도시한 것이 그림 2이다.

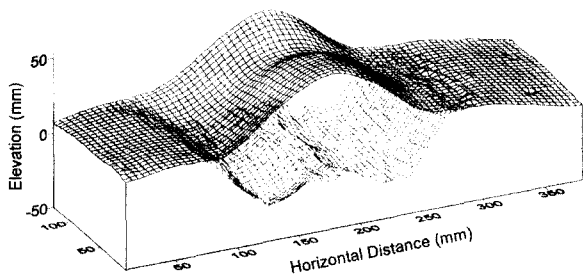


그림 2. 광학 스캐닝 장비로 측정한 제체 형상 및 지반의 치환 형상

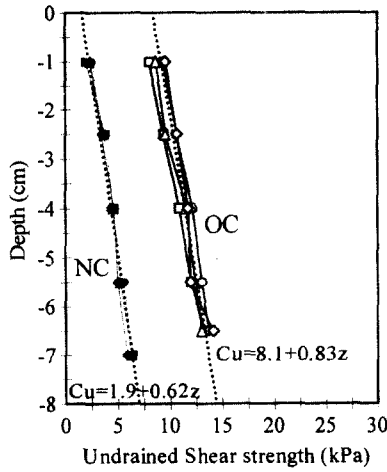
2.5 베인시험기

원심모형시험중에 연약지반의 강도를 측정하기 위하여 자동 베인시험기를 사용하였다(사진 7). 이 장비는 수평으로 250mm 이동이 가능하고 100mm 깊이까지 베인시험을 할 수 있도록 고안되었으며, 베인날의 관입 및 회전 속도를 조절할 수 있도록 되어 있다. 또한 원심모형시험기가 회전하는 동안 원격으로 조정하여 원하는 위치와 깊이에서 베인시험을 수행할 수 있으며, 미리 시험할 위치와 간격, 그리고 시험시간 등을 프로그래밍하여 자동으로 베인시험을 수행할 수도 있다.

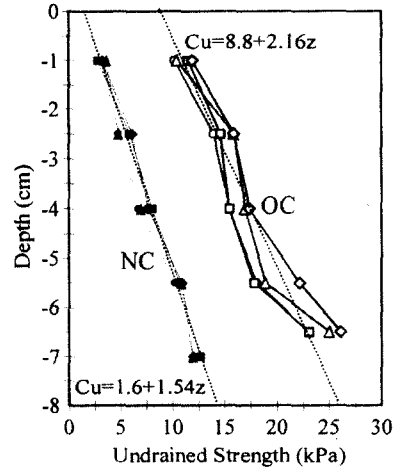
3. 시험 내용

3.1 토질시험

본시험에 사용된 카올리나이트 점토와 울촌 점토의 특성을 알아보기 위하여 기본 물성시험과 강도 및 압밀 시험을 수행하였으며, 성토재의 입경에 따른 내부마찰각과 안



(a) 카올리나이트 점토 지반



(b) 율촌 해성점토 지반

그림 3. 정규압밀지반 및 과압밀지반의 비배수전단강도 분포(베인시험 결과)

식각을 결정하기 위하여 진공삼축압축시험과 자연경사 시험을 수행하였다.

3.1.1 연약점토지반

카올리나이트 점토와 율촌 점토에 대한 기본 물성시험으로 비중시험과 액소성시험을 수행하였으며(표 2), 정규 압밀된 시료에 대하여 압밀시험을 수행하였고(표 3), 정규 압밀 지반과 과압밀된 지반에 대한 베인시험을 실시하여 강도 특성을 구하였다(그림 3). 여기에서 과압밀 지반은 정규압밀지반 위에 3cm 두께의 모래층으로 상재하중을 가하여 압밀시킨 후 상재하중을 제거하여 조성하였다.

3.1.2 성토재

성토재로 쓰인 모래와 자갈은 직경이 0.175~0.3mm(대

표 직경: 0.2mm), 1.0~1.7mm(대표직경: 1.5mm), 4.0~5.6mm(대표직경: 5.0mm), 8.0~11.0mm(대표직경: 10.0mm)의 네 가지 재료였으며, 이들의 내부마찰각 결정을 위하여 진공 삼축압축시험을 각각 3회씩 수행하였고 이들 재료의 자연 경사(안식각)를 결정하기 위하여 자연경사시험을 각 1회씩 수행하였다(표 4).

3.2 원심모형시험

표 4. 성토재료의 내부마찰각 및 자연경사

Grain Size(mm)	Friction Angle(°)	Natural Slope
0.2	33.7	1.642 : 1
1.5	37.2	1.622 : 1
5.0	43.2	1.613 : 1
10.0	44.1	1.610 : 1

표 2. 카올리나이트 점토와 율촌 점토의 기본 물성치

Clay Type	G_s	LL(%)	PL(%)	PI
Kaolinite Clay	2.69	48	26	22
Yulchon Clay	2.66	61	23	38

표 3. 카올리나이트 점토와 율촌 점토의 압밀 특성치

Clay Type	Initial State			c_c	$c_v(\text{cm}^2/\text{sec})$	$k(\text{cm}/\text{sec})$
	$w_i(\%)$	$\gamma(\text{t}/\text{m}^3)$	e_0			
Kaolinite Clay	55	1.681	1.480	0.433	1.31×10^{-2}	1.28×10^{-5}
Yulchon Clay	54	1.682	1.436	0.445	6.25×10^{-4}	5.34×10^{-7}

본 연구에서는 연약지반의 강제치환거동에 영향을 미치는 성토시공방법, 성토재의 입경, 연약지반의 압밀도, 점토의 종류 등과 같은 시험조건을 변화시켜 총 9회의 원심모형시험을 실시하였다. 성토시공방법은 세가지 방법이 적용되었는데, 첫 번째 방법은 일정두께의 층을 단계적으로 성토하는 방법(L)이고, 두 번째 방법은 고정된 성토지점에서 일정한 시간 간격을 두고 단계적으로 성토하는 방법(PI)이고, 세 번째 방법은 고정된 성토지점에서 일시에 성토를 하는 방법(PO)이 사용되었다. 성토재로 사용된 재료의 입경은 0.175~0.3mm (0.2mm), 1.0~1.7mm (1.5mm), 4.0~5.6mm (5.0mm), 8.0~11.0mm (10.0mm)의 네가지 재료가 사용되었으며, 연약지반의 강도 변화에 대한 치환거동을 보기 위하여 연약지반의 압밀도를 정규 압밀상태(NC)와 과압밀상태(OC : 3cm 두께의 모래층으로 상재하중 재하)로 조성하여 시험을 수행하였다. 그리고 시험에 사용된 점토는 카올리나이트 점토와 울촌 해성 점토를 사용하였다.

각각의 시험에 적용된 시험조건의 상세내용은 표 5와 같은데, 연약지반의 두께와 수위고는 75mm와 5mm로 동일한 조건에서 시험을 실시하였다. 본 시험에 사용된 모형토조의 크기(400×140×160mm)를 현장응력 조건으로 환산하면 40×14×16m가 되고, 연약지반의 두께는 7.5m가 된다.

4. 시험 결과 분석

각 시험조건에 따른 성토체 형상 및 연약지반 치환 형상은 광학 스캐닝 장비를 이용하여 측정하였으며, 강제치환

시 발생하는 지반내 과잉간극수압은 성토체 중앙 하부(P₁)와 성토체 선단 하부(P₂)에 간극수압계를 설치하여 측정하였다(그림 4). 이들 간극수압계는 토조바닥면으로부터 각각 20mm(P₁)와 40mm(P₂) 높이에 설치되었는데, 측정된 간극수압값들은 원심모형시험중에 상당한 신뢰성을 가지는 것으로 나타났다.

4.1 성토시공방법에 따른 치환거동

제체의 성토시공방법에 따른 연약지반의 치환거동을 보기 위하여 카올리나이트 점토 지반에 직경 1.5mm의 모래를 이용하여 세가지 성토방법에 대한 시험을 수행하였다. 첫 번째 방법은 단계별 층 성토방법(L)으로 제체의 하부폭을 20cm로 하여 일정시간 간격으로 단계적으로 층 성토를 하는 방법이다(A1 시험). 두 번째 방법은 단계별 일점 성토방법(PI)으로 제체 중앙지점에서 일정시간 간격으로 단계적으로 성토하는 방법이다(B1 시험). 세 번째 방법은 일시 일점 성토방법(PO)으로 제체 중앙지점에서 일시에 성토하는 방법이다(C2 시험). 단계별 층 성토방법과 단계별 일점 성토 방법으로 제체를 시공하는데에는 약 20분 정

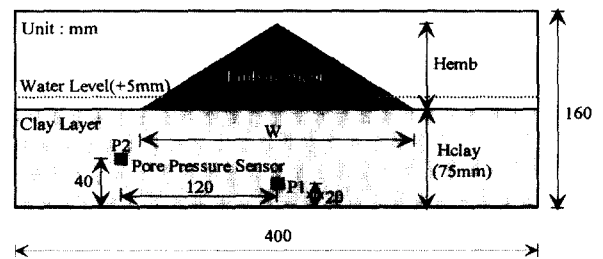


그림 4. 모형토조내에서의 간극수압계 설치 위치

표 5. 각 시험의 상세 시험 조건

Test No.	Pouring Method	Grain Size (mm)	Degree of Consolidation	Clay Type
A	L	1.5	NC	Kaolinite Clay
			OC	
B	PI	0.2, 1.5, 5.0, 10.0	NC	
C	PO			
D	L	1.5	OC	Yulchon Clay

도가 소요되었으며, 일시 일점 성토방법은 수 초이내의 시간이 소요되었다. 제체를 성토하는데 소요되는 시간에 따라 연약지반내에서의 배수조건이 달라지게 되고 간극수압의 발생 및 소산 정도에 큰 차이를 보이게 된다. 따라서 궁극적으로 동일한 지반조건에서도 시공속도에 따라 지반의 치환거동에 많은 차이를 보이게 된다.

그림 5는 세가지 성토방법으로 시험했을 때의 제체의 단면 형상과 연약지반의 치환 단면 형상을 보인 것이고, 그림 6은 각 시험중에 제체 중앙 하부에서 발생한 간극수압(P_i)의 측정결과를 도시한 것이다. 원심모형시험 초기에는 중력가속도가 1g에서 100g로 증가하는 과정에서 지반내 간극수압이 최대로 발생하다가 시간이 지남에 따라 과잉간극수압이 소산되는 거동을 보이게 되며, 정규압밀상태의 지반조건을 만족시키기 위해서 지반내의 과잉간극수압이 거의 소산되어 정수두상태로 되는 시점에서 제체 성토를 위한 성토재 투하가 시작되었다. 성토가 시작되면 지반내 간극수압은 다시 증가하게 되는데, 그림 6으로부터 각 시험에 대한 성토직전의 초기 간극수압(p_0)과 성토중 발생한 최대 간극수압(p_{max}), 그리고 이들 값으로부터

표 6. 성토시공방법별 최대 과잉간극수압

Test No.	p_0 (bar)	p_{max} (bar)	$p_{max,excess}$ (bar)
A1	0.53	0.89	0.36
B1	0.42	0.92	0.50
C2	0.52	1.25	0.73

구한 최대 과잉간극수압($p_{max,excess}$)을 구하여 표 6에 정리하였다. 성토소요시간이 거의 같은 A1 시험과 B1 시험에서는 제체의 단면과 지반의 치환단면이 비슷한 양상을 보였으며, 간극수압의 발생 및 소산 거동도 비슷한 양상을 보였다. 그러나 중앙부 한 지점에서만 성토가 이루어진 B1 시험에서 치환량과 최대 과잉간극수압이 약간 크게 발생하였다. 반면에 일시에 한 점에서 성토가 이루어진 C2 시험의 경우에는 최대 과잉간극수압이 상당히 크게 발생하여 넓은 범위의 지반에서 파괴가 진행되어 치환범위가 넓게 형성되었다. 제체 주변 지반의 용기량도 C2 시험의 경우가 A1과 B1 시험의 경우 보다 상당히 많이 발생하였다. 따라서 동일한 성토량으로 제체를 형성하는 경우에 제체

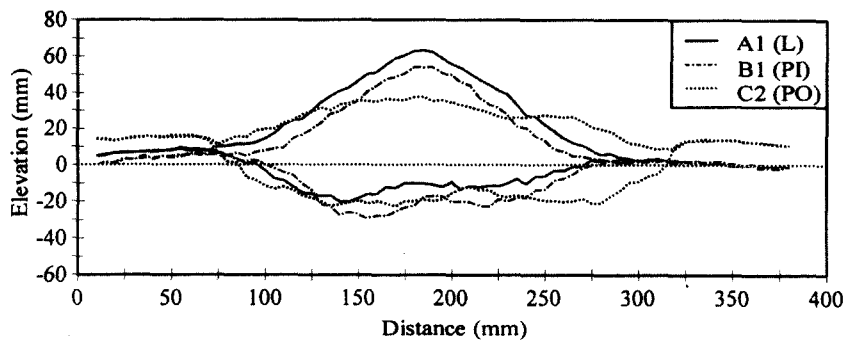


그림 5. 성토시공방법별 제체 단면 형상 및 연약지반 치환 단면 형상

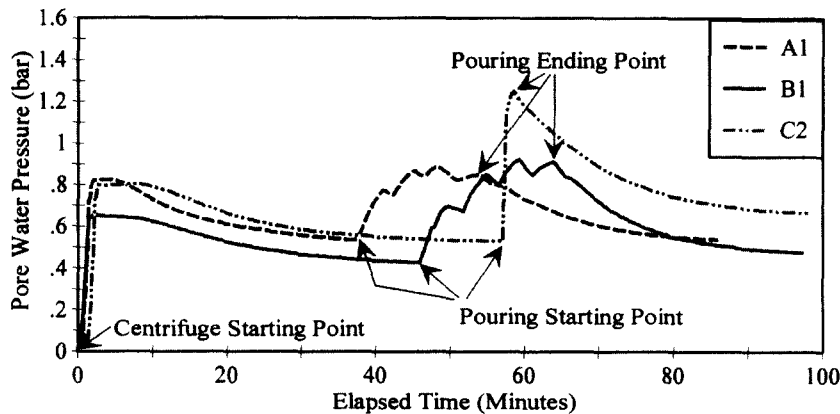


그림 6. 성토시공방법별 지반내 간극수압의 변화

의 성토 시공 속도가 빠를수록 지반내에 발생하는 과잉간극수압이 크고 지반의 파괴 범위도 커짐을 알 수 있다.

4.2 성토재 입경에 따른 치환거동

제체축조를 위해서 사용되는 성토재의 입경에 따라 제체 형상 및 지반의 치환 형상에 많은 차이를 보이게 된다. 본 연구에서는 카울리나이트 점토 지반에서 성토재의 대표입경을 0.2mm(C1 시험), 1.5mm(C2 시험), 5.0mm(C3 시험), 10.0mm(C4 시험)로 변화시켜 연약지반의 치환거동에 대한 시험을 수행하였다. 본 시험에 사용된 성토재의 입경을 현장조건으로 환산하면 각각 2cm, 15cm, 50cm, 100cm가 된다. 이들 시험에 적용한 성토시공방법은 일시일점 성토방법(PO)이다. 각 시험에 대한 제체의 단면 형상과 지반의 치환 단면 형상은 그림 7과 같으며, 시험중 발생 및 소산된 간극수압의 변화는 그림 8과 같다. 그리고 그림 8로부터 성토직전의 초기 간극수압과 최대 발생 간극수압, 그리고 이값들로부터 구한 최대 과잉간극수압은 표 7과 같다.

표 7. 성토재 입경별 최대 과잉간극수압

Test No.	p_0 (bar)	p_{max} (bar)	$p_{max,excess}$ (bar)
C1	0.64	1.36	0.72
C2	0.52	1.25	0.73
C3	0.55	1.39	0.84
C4	0.50	1.53	1.03

시험 결과, 성토재로 모래를 사용한 C1과 C2 시험 결과가 유사한 양상을 보였으며, 자갈을 사용한 C3와 C4 시험 결과가 서로 유사한 경향을 보였다. 즉, 성토재의 입경이 크고 내부마찰각이 큰 자갈 성토재로 제체를 축조한 경우에는 제체 사면의 기울기가 급하게 형성되고 지반내 치환심도가 큰 반면, 치환폭은 좁은 양상을 보였다. 그러나 제체 주변 지반의 용기량은 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 자갈인 경우에는 제체 하부 자갈이 지반내로 20mm 이상 관입되어 연약지반과 자갈이 혼재된 양상을 보이지만, 모래인 경우에는 제체 하부로 모래가 2~3mm 이내로 관입되어 성토재와 연약지반의 경계가 뚜렷이 구분되는 특징

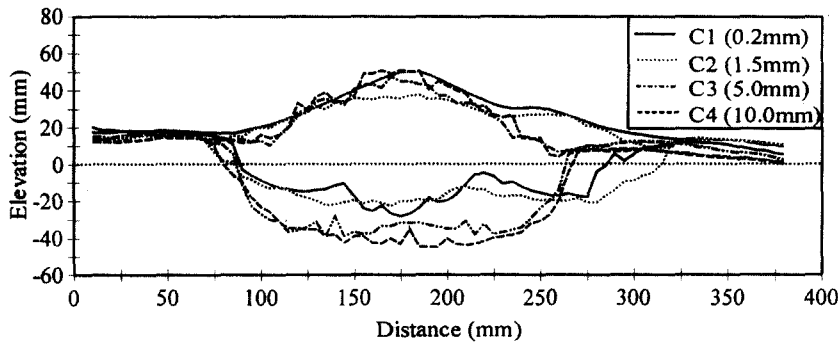


그림 7. 성토재 입경에 따른 제체 단면 형상과 연약지반 치환 단면 형상

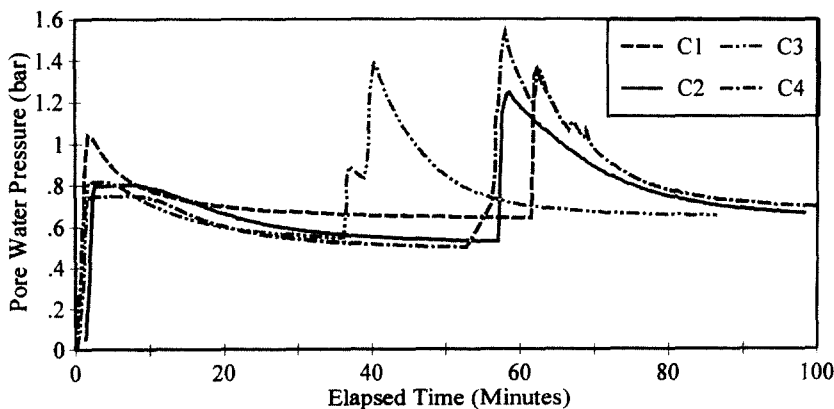


그림 8. 성토재 입경별 지반내 간극수압의 변화

을 보였다. 체체 성토시 발생한 최대 과잉간극수압에 있어 서도 성토재 입경이 클수록 크게 발생하였는데, 이는 동일 성토량으로 체체를 축조한 경우에 입경이 클수록 체체 중앙부에서의 체체의 두께가 커서 간극수압이 크게 발생하기 때문이다.

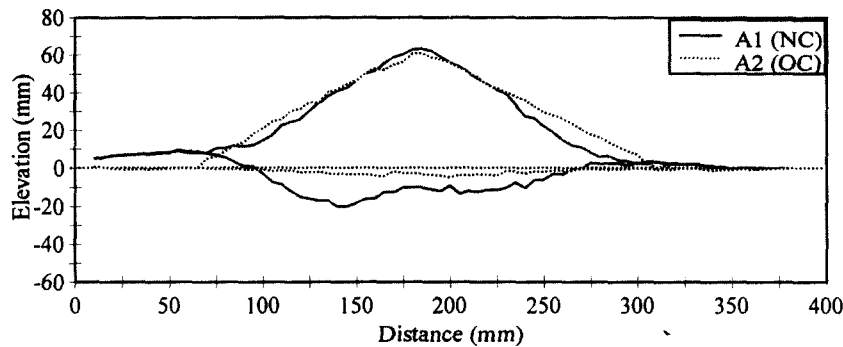
4.3 점토의 종류 및 지반 강도에 따른 치환거동

본 연구에서는 카올리나이트 점토와 율촌 해성점토를 이용하여 강제치환거동에 대한 시험을 수행하였으며, 각 점토 지반을 정규압밀상태와 과압밀상태로 조성하여 동일 시료에 대한 강도 변화에 따른 치환거동을 분석하기 위한 시험을 수행하였다. 본 시험에 사용된 카올리나이트 점토시료는 저소성 점토(CL)로 분류되었으며, 정규압밀상태에서의 최종 함수비는 55%, 투수계수는 $1.28 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 로 비교적 투수성이 양호한 상태였다. 반면에 율촌 해성점토는 카올리나이트 광물보다 입경이 작고 활성이 큰 일라이트계 광물과 몬몰리올라이트계 광물이 주성분으로 되어 있는 고소성 점토(CH)로 분류되었고, 정규압밀상태에서의 최종 함수비는 카올리나이트 점토와 비슷한 54%였으나, 투수계수는 $5.34 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 로 카올리나이트 점토에

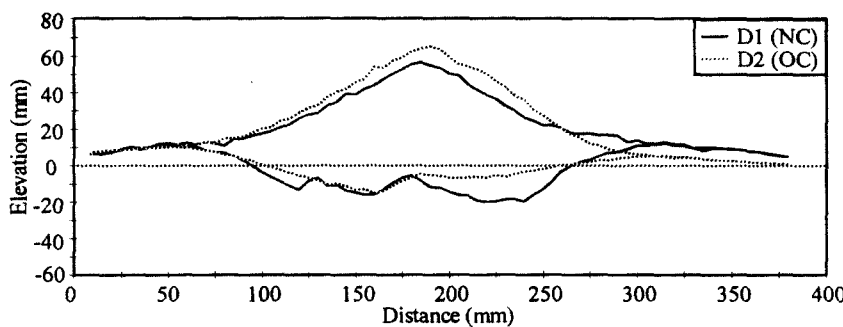
비하여 투수계수가 20배 이상 작은 것으로 나타났다. 반면에 정규압밀상태와 과압밀상태에서의 심도별 비배수전단강도는 율촌 시료가 크게 나타났고 강도증가율도 율촌 시료가 2배 정도 크게 나타났다. 이들 점토 시료에 대한 그 밖의 물성치는 표 2, 표 3과 같고, 강도 변화는 그림 3과 같다.

카올리나이트 점토지반(A1, A2 시험)과 율촌 점토지반(D1, D2 시험)의 정규압밀상태와 과압밀상태에서의 치환 단면 형상은 그림 9와 같다. 이들 시험은 성토재 입경이 1.5mm인 모래를 사용하여 단계별 층 성토시공방법으로 체체를 축조하였다. 그리고 각 시험중에 발생한 간극수압의 변화는 그림 10과 같으며, 이들 결과로부터 체체 중앙하부에서 발생한 최대 과잉간극수압을 구한 결과는 표 8과 같다. 그림 10에서 체체 성토를 위한 성토재 투하시기가 율촌 점토지반인 경우가 카올리나이트 점토지반인 경우보다 늦은 이유는 율촌 점토지반의 투수계수가 작아 정규압밀상태에 도달하기 위한 과잉간극수압의 소산기간이 길었기 때문이다.

동일한 점토인 경우에 지반의 강도가 클수록 치환심도 및 범위가 작았으며 주변 지반의 용기량도 작았다. 그러나 지반내에 발생하는 과잉간극수압의 크기는 지반의 강도에 크게 영향을 받지 않은 것으로 나타났다. 반면에 카올리



(a) 카올리나이트 점토 지반



(b) 율촌 해성점토 지반

그림 9. 압밀도에 따른 연약지반 치환 단면 형상

나이트 점토보다 강도는 크지만 투수계수가 작은 울촌해성점토 지반에서 과잉간극수압이 크게 발생하였고 지반의 치환 범위 및 융기량도 크게 발생하였다. 이는 투수계수가 작은 울촌 점토지반에서 과잉간극수압의 소산 속도가 작아 단계적으로 성토되는 과정에서 발생하는 최대 과잉간극수압이 카올리나이트 지반에서 보다 크게 일어났기 때문이다. 일반적으로 연약지반의 강도가 클수록 강제 치환의 범위와 심도는 작아지게 된다. 그러나 연약지반의 특성이 다른 경우, 특히 지반의 투수성에 큰 차이를 보이는 경우에는 지반의 강도와 간극수압의 소산과 관련된 시공 속도 등과 복잡한 연관성을 가지게 된다. 즉, 지반의 강도가 크더라도 투수계수가 작고 시공속도가 빨라 제체 시공 중에 유발되는 과잉간극수압이 크게 발생하면 지반의 강도는 작지만 투수계수가 큰 지반에서보다 강제 치환 영역이 크게 발생할 수 있다.

4.4 연약지반의 치환비 비교

표 8. 지반의 종류 및 압밀도별 최대 과잉간극수압

Test No.	p_0 (bar)	p_{max} (bar)	$p_{max,excess}$ (bar)
Kaolinte Clay	A1	0.53	0.89
	A2	0.44	0.77
Yulchon Clay	D1	0.55	1.05
	D2	0.73	1.22

여러 가지 시험조건에 대하여 연약지반의 강제치환 거동을 정량적으로 비교하기 위하여 치환심도비(R_D)와 치환체적비(R_V)를 그림 11과 같이 정리하였다. 여기에서 치환심도비는 제체 중앙에서의 성토고에 대한 연약지반 치환심도의 비를 나타낸 것이고, 치환체적비는 총 성토량에 대한 연약지반의 총 치환체적의 비로 나타낸 값이다. 대체적으로 시공속도가 빠를수록, 그리고 성토재의 입경이 클수록 치환비가 컸다. 또 동일 점토에서는 지반강도가 클수록 치환비가 컸으나, 점토 종류가 다른 경우에는 지반의 투수계수가 클수록 치환비가 작았다. 이들 치환비는 성토중

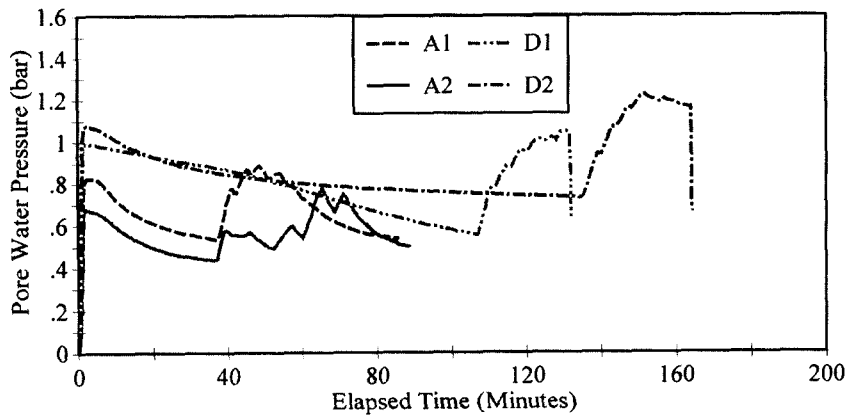


그림 10. 지반의 종류 및 압밀도별 지반내 간극수압의 변화

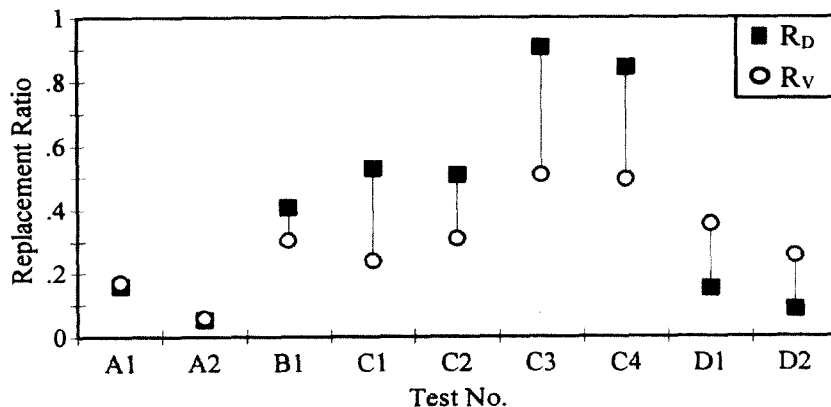


그림 11. 시험 조건에 따른 치환심도비(R_D) 및 치환체적비(R_V) 비교

발생하는 최대 과잉간극수압의 크기와 밀접한 상관관계를 보였는데, 이 최대 과잉간극수압은 성토 시공속도와 성토지점, 그리고 지반의 투수계수에 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉 연약지반의 투수계수가 작아 성토시공중에 발생하는 과잉간극수압이 큰 경우에는 지반의 강도가 큰 지반에서도 치환비가 크게 발생할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 현장 응력조건을 구현할 수 있는 원심모형시험기를 이용하여 제체 성토시의 연약지반의 강제치환거동을 비교하여 보았다. 이를 위하여 제체의 성토시공방법, 성토재의 입경, 연약지반의 종류 및 강도를 변화시켜 시험을 수행하였으며, 이들 시험으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 연약지반의 강제치환거동은 성토시공시에 지반내에서 발생하는 과잉간극수압의 크기에 많은 영향을 받는데, 이때 발생하는 최대 과잉간극수압은 성토시공기간, 성토지점, 성토고, 연약지반의 투수계수 등과 밀접한 상관관계를 가지고 있다.
- (2) 성토기간이 짧을수록, 성토지점이 고정되어 있을수록, 그리고 성토고가 높을수록 지반내에 발생하는 최대 과잉간극수압은 크고 치환비도 크게 나타났다.

- (3) 동일한 점토에서는 지반의 강도가 클수록 치환비가 작은데, 투수계수가 다른 점토지반에서는 시공조건에 따라 지반내에 발생하는 최대 과잉간극수압의 크기가 달라지고 이에 따라 지반의 치환비도 영향을 받는 것으로 나타났다.
- (4) 성토재 입경이 클수록 지반내 관입되는 깊이가 깊어지고 치환비 또한 증가하는 것으로 나타났으며, 제체 사면의 기울기도 급하게 형성된다.
- (5) 향후에는 추가적인 시험과 실제 시공사례의 정밀 분석을 통하여 연약지반의 치환거동에 영향을 주는 변수들을 정량적으로 고려할 수 있는 해석방법의 개발이 필요하다.

참고문헌

1. 이양희(1983), "강제치환공법에 의한 변위 특성", 석사학위논문, 동국대학교
2. 이원택(1985), "연약한 점성토지반의 치환깊이에 대한 연구", 석사학위논문, 서울대학교
3. Allersma, H.G.B.(1994a), "The university of Delft geotechnical centrifuge", International Conference Centrifuge94, Singapore, pp. 47~52
4. Allersma, H.G.B.(1994b), "Development of miniature equipment for a small geotechnical centrifuge", Transportation Research Record, No. 1462, National Academy Press, Washington D.C., pp. 99~105
5. Allersma, H.G.B.(1997), "Using image technologies in experimental geotechnics", Second International Conference on Image Technology Techniques in Civil Engineering Applications, ASCE publication, pp. 1~9

(접수일자 2000. 8. 28)