

剛성이 다른 多層土 地盤의 變形 및 應力傳達

Deformation and Stress Distribution on Multi-Layered Foundation
with Different Rigidity

朴炳基*1 · 張龍彩*2 · 朴鍾千*3 · 朴善培*4

Park, Byong Kee · Chang, Yong Chai · Park, Jong Cheon · Park, Seon Bae

Abstract

Load tests for fourteen small-scale foundation models combined with geotextile, sand mat and rigid mat were conducted to study the effect of geotextile(G/T), sand mat(S/M), and foundation types on deformation of foundation soils. In addition, the experimental results were compared with those obtained from numerical analysis using a software program.

The main conclusions were summarized as follows:

1. The restraint effect on G/T is more outstanding on the lateral displacement than on the vertical one.
2. The single use of S/M has better effect on the restraint of vertical displacement than lateral one.
3. The use of both S/M and G/T is required for the restraint of lateral and vertical displacement.
4. Multi-layered foundation with large rigidity shows similar tendency to that of foundation reinforced with S/M and G/T

요 지

본문은 점토지반에 기초를 통해 하중이 전달 될 경우 기초의구조(강성기초 및 요성기초), Geotextile, Sand Mat, 다층구조의 지반 등이 점토 기초지반에 어떤 거동을 이끄는 가를 모형재하시험을 통해 관찰하고 수치계산을 시도한 것이다. 총 14개의 시험을 통해 수직, 수평변위를 기초형태별, 기초치리별, 강성차이별로 고찰하고 이들 변형을 예측하는 프로그램을 통해 변형과 응력을 예측하였다. 그 결과는 지반지지력은 강성기초가 유리하지만 이보다는 지반 강성이 큰 다층 구조지반이 가장 유리하며 수평, 수직, 변위에 대해서는 G/T, S/M의 병용공법이 가장 유리하고 S/M 공법만 단독으로 이용할 경우는 연직변위 억제 효과가 탁월하다. 그리고 강성이 큰 다층구조 지반은 이를 G/T와 S/M의 병용공법과 같은 효과가 있다. 본 연구결과는 강성이 큰 지반(여기서는 Rubber층)이 상층에 있고, 두께 또한 두꺼울 수록 지반의 침하가 크게 억제되는 것을 확인하였다. 측방변위에서도 강성차이도 중요하지만, 이보다는 강성지반의 두께에 더 깊은 관계가 있다. 모형 토조실험을 통한 실측치와 수치해석 결과가 연직변위에 대해서는 서로 좋은 결과를 나타내 다층토 지반의 침하예측이 가능하다.

*1 정희원 · 전남대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정희원 · 전남대학교 공업기술연구소 연구원

*3 정희원 · 한국토지개발공사

*4 정희원 · 전남대학교 대학원 토목공학과 석사과정

1. 서 론

본문은 점토 지반위에 놓인 기초를 통해 일정하중이 작용할 경우 지반의 변형에 대한 일련의 연구 가운데서 특히 지층의 강성이 서로 다른 다층지반의 경우에 대하여 2차원 모형재하시험을 실시하여 그 변형 결과를 관찰하고 수치계산 결과와 비교한 것이며 또한 단일 지반의 경우와도 비교 고찰한 것이다.

지반에 기초하중이 작용할 경우 지반이 연약하면 여러가지 장애가 발생한다. 따라서 현실적으로는 Geotextile(약칭G/T)이나 Sand mat(약칭S/M)등의 포설이 선행되는데 이와 같은 기초처리 공법의 효과가 확실한 반면, 변형이나 파괴양상, 응력의 전달, 그리고 포설의 범위, 기초의 강성 효과등에 대해서는 잘 알려져 있지 않는 상태에서 처리되고 있다. 필자들은 이와 같은 관점에서 중간규모의 모형재하장치(140×100×25cm)를 제작하여 일련의 모형시험을 통해서 1986년 이후부터 위와 같은 문제점을 밝히려고 노력하고 있다.^(1,2,3,4)

그 동안의 집적된 시험 결과에 의해 어느 정도의 견해를 밝힐 수 있었으며 금번에는 여기에 다층지반의 경우의 모형재하시험을 추가하여 단일지반일 경우와는 어떻게 차이가 나타나는가를 연구한 것이다. 지금까지 시행해 온 모형재하시험의 조건과 시험종류는 다음 표 1과 같이 10종이 수행되었다.

이들 연구는 동일한 기초지반에 대해서 시행된 것이지만, 지반은 1 kgf/cm²와 0.5 kgf/cm²의 압밀응력에 의해 제작된 지반강도의 차이가 나는 2종류의 지반이고, 여기에 대해서 기초형식은 강성기초와 요성기초별로 G/T, S/M 또는 이들의 합성인 3종류의 기초처리를 하는 경우와 무처리 상태와의 변형을 비교 하였다. 이과정에서 G/T의 포설범위는 모형시험 결과로는 기초폭(B)의 5B정도가 가장 적당한 포설너비인 것이 판명되었다. 또한 이들 재하시험 결과의 변형은 연직방향 및 수평방향의 변위를 모형토조 내의 각 측정에서 관찰 측정한 것이며 수치해석은 이들 측정점을 포함하는 요소분할에 의해 유한요소 해석을 시행하였다. 이 두가지 즉, 실험결과 및 수치해석의 결과를 재하판의 중앙 및 끝부분을 중심으로 일정 깊이에 따라 비교 검토하여 수치해석의 정밀도를 판단하고 프로그램의 실용화를 시도

하고자 한 것이다. 수치해석에 쓰인 지배방정식은 Biot의 압밀방정식을 이용하였고 여기에 쓰이는 구성모델은 시산한 결과 modified Cam clay모델이 가장 근접하다는 것을 확인하여 이를 채택 하였다.

이번에 시행된 재하시험은 표 2와 같은 4종류로서 (No. 11-14) 표 1에서 (No. 1-10)와는 달리 지반은 0.5 kgf/cm²로 압밀된 지반이지만 강성이 다른 다층지반을 재현하기 위하여 지반보다 강성이 큰 연성 고무판을 포설하는 2층지반과 (No. 11-12) 여기에 S/M를 포설하는 3층지반(No. 13-14)을 추가하고, 이들의 두께 변화에 의한 지반의 변형과 응력의 전달을 관찰하고, 같은 방법으로 수치해석을 시도한 것이다. 이들 결과를 앞서 시행한 결과와도 비교하고, 또한 다층기초지반의 거동특성을 모형을 통해 밝혀보고자 한 것이다.

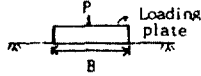
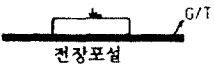
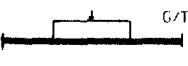

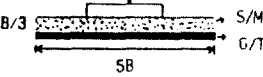
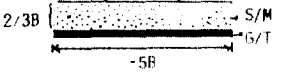
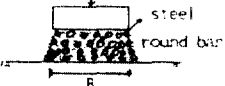

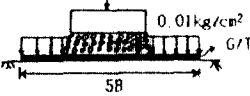
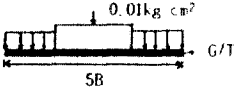
본 연구는 중간규모의 모형지반을 통한 거동해석의 기초적 연구이기 때문에 여기서 사용되는 프로그램이 실제에 곧 적용되리라는 확신은 아직 없다. 그러나 이와 같은 모형실험에 대한 해석결과의 정밀도를 높이려는 연구가 집적되면 실용성이 있을 것으로 내다보고 있다.

2. 지금까지의 실험결과 개관

표 1에 나타난 시험 항목에 대한 시험 연구를 (1) 무처리 지반과 G/T 포설지반의 유효성 및 포설너비의 영향, (2) S/M의 유효성과 그 두께의 영향, (3) 강성기초 및 요성기초에 대한 S/M 및 G/T의 영향, (4) 이상의 시험 조건을 갖는 지반 수치해석 결과의 정밀성 등을 중심으로 비교 고찰해 보면 다음과 같다.

- 1) G/T는 수직변위의 억제효과 보다는 수평변위의 억제효과가 탁월하며 포설너비에 비례하고 그 한계는 대략 기초폭의 5배 정도임이 시험 결과에서 확인된다.
- 2) S/M 만을 단독으로 쓸 경우는 수평변위 보다는 수직변위의 억제효과가 탁월하다.
- 3) 수직, 수평 두 변위를 억제하기 위해서는 G/T, S/M를 함께 병용하는 공법이 합리적이다.
- 4) 지반 지지력의 발휘는 요성기초보다 강성기초가 더 유리하고 G/T 포설 보다는 S/M의 포설이 더 효과가 있다.

표 1. 시험조건과 시험종류

No.	Test type	적 요	기초형식	지반의 압밀용력
1		무 처 리	강성기초	1.0 kgf/cm ²
2		G/T전장 포 설	강성기초	1.0
3		G/T양단 고 정	강성기초	1.0
4		G/T및S/M 전장포설	강성기초	1.0
5		G/T 및 Sand Mat	강성기초	0.5
6		G/T 및 Sand Mat	강성기초	0.5
7		무 처 리 강봉기초	요성기초	0.5
8		(7)+ Sand Mat	요성기초	0.5
9		(7)+ G/T 및 Surcharge (0.01 kg/cm ²)	요성기초	0.5
10		G/T 및 Surcharge (0.01 kg/cm ²)	강성기초	0.5

- 5) 요성기초의 수직변위 억제에도 S/M가 더 효과적이는데 수평변위에 있어서는 요성기초는 강성기초보다 불리하고 어떤 기초형식이든 수평변위 억제에는 S/M보다는 G/T가 효과적이다.
- 6) 침하에 대비한 기초형식의 차이는 요성기초에 대해서는 S/M만의 단독 효과는 기대할 수 없고 병용공법이 바람직한 반면, 강성기초는 S/M, G/T를 단독으로 사용해도 그 억제효과가

인정되며 물론 병용공법은 효과가 더 크다.

- 7) 수치계산에 있어서 변형예측은 시험결과와 매우 양호한 접근성을 보이고 있다.

3. 다층토 지반의 재하시험

3.1 모형시험 장치

장치는 시료의 투입, 압밀, 하중재하, 변형관측,

표 2. 시험조건과 시험종류

No.	Test type	적 요	기초형식	지반의 압밀용력
11	2cm 고무 고무 판 (2층구조)	고 무 판 (2층구조)	강성기초	0.5 kgf/cm ²
12	4cm 고무 고무 판 (2층구조)	고 무 판 (2층구조)	강성기초	0.5
13	2cm 고무 2.5cm S/M 고무 판 및 S/M (3층구조)	고무판 및 S/M (3층구조)	강성기초	0.5
14	2cm 고무 5cm S/M 고무판 및 S/M (3층구조)	고무판 및 S/M (3층구조)	강성기초	0.5

압력 및 간극수압의 측정이 일관성 있게 이루어질 수 있도록 고안된 대형토조 및 강제 재하틀로 구성되어 있으며 재하틀 상부에 재하장치의 구동부가 설치되어 있다. 모형토조는 높이 100cm 길이 140cm, 폭 25cm의 강구조의 전면에 2cm 두께의 아크릴 관측창이 부착되어 있고, 여기에 5cm 크기의 격자 규준선이 음각되어 있다. 이 토조는 수밀성이 유지 되도록 고무 패킹에 의해 조립되고, 분해되며 후면에 간극수압의 측정공과 토압의 측정공이 설치되어 있다. 이 장치의 개관도는 그림 1 및 사진-1과 같다. 그리고 측정시스템은 그림 2와 같다.

3.2 시료

시료는 전남 무안군 해체면에서 채취된 해성점토를 수중에 투입하여 완전히 교란시킨후 120번체를 통과시킨 slurry 상태의 시료를 모형토조에 넣어 0.5 또는 1.0 kgf/cm²의 압력으로 압밀 재생성한 것이며 통상 1개월이면 압밀이 완료되지만 3-4개월 방치하여 숙성되기를 기다려 모형지반으로 한다. 압밀은 모형토조 하부에 모래를 깔고 배수층으로 하며 4

unit: cm

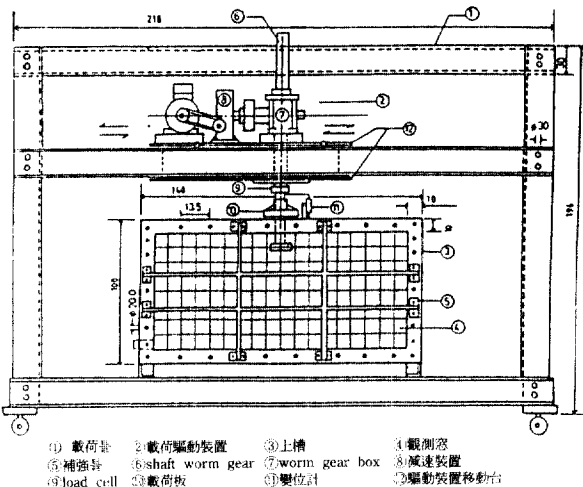


그림 1. Tow-dimensional model loading apparatus

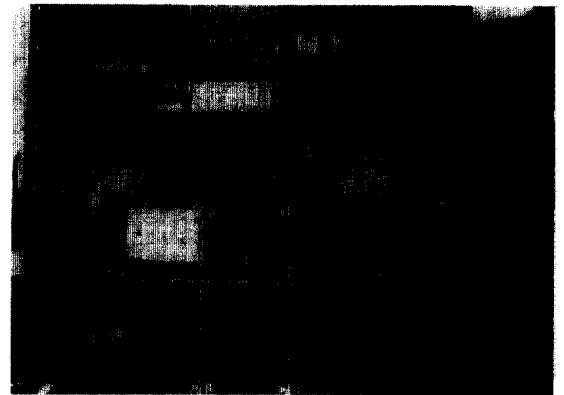


사진 1.

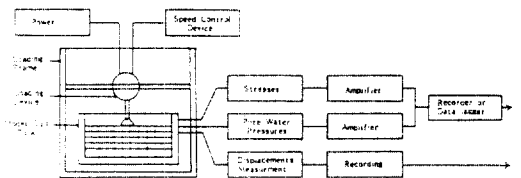


그림 2. Systematic diagram of loading apparatus

표 3. 점토의 물리적 성질

Pro- perties	Gs	LL	PI	USCS	A	Wn	qu
	2.67	52.0	23.0	CH	0.7	43%	0.24kg/cm ²

표 4. 연성고무판, 모래 그리고 G/T의 물리적 성질

Geotextile					
Weight (g/cm ²)	Tention (kg/cm)	Rate of elongation	K (cm/sec)		
220	75	10-30%	10 ⁻² -10 ⁻³		
Rubber			Sand		
μ	E (kg/cm ²)	G (%)	μ	E (kg/cm ²)	Go (%)
0.485	2820	950	0.2	1320	550

면을 여과지로 막고, 그안에 시료를 투입 여과지로 쌓은 뒤, 상부에 배수층과 가압용 비닐주머니를 설치하여 외부로 통하게 하고, 토조를 밀폐한후, 외부에서 비닐주머니에 0.5 또는 1.0 kgf/cm²의 수압을 가하여 압밀시킨다.

금번 시험은 표 2에서 처럼 강성이 서로 다른 지반에 재하하는 시험이므로 강성차이를 본 토조의 모형지반과 연성고무판 그리고 모래층의 3종류의 재료의 강성차이를 노려 다층구조의 지반을 형성하여 시험하고자 한 것이다. 여기에 사용된 이들 재료의 물리적 성질은 표 3, 표 4와 같다.

3.3 시험방법

1) 준비작업

압밀이 완료되면 먼저 토조를 해체한뒤 토조내에 설치된 배수용 여과지를 제거하고 상하좌우 여러 지점에서 함수비 및 Pocket penetrometer로 일축 압축강도를 측정하여 시험전 시료의 초기상태를 확인한 뒤 상단부를 정형(整形)한다. 이어서 재하중에 일어나는 지반의 변형을 관측하기 위해 지반전면에 식용국수 가락으로 (Photo-2)격자 요소화하여 아크릴 판(관측창)에 음각한 기준 격자망과 상대변위를 측정할 수 있도록 한다.

2) 재하실험

여러종류별 재하장치가 완료되면 피스톤을 통해 하중을 작용시킨다. 재하 시험방법은 변형을 제어

방식을 택하여 0.2mm/min의 일정속도로 재하를 시작하여 하중 및 침하량은 10초 마다 측정되고 컴퓨터로 입력되며 지반의 상대변위는 5분 간격으로 측정한다. 언급한 바와 같이 지반의 변위량은 관측창을 통하여 해석지점을 선정 관측창의 기준선과의 변위를 직접 자료 측정하고 지반이 완전히 파괴될 때까지 되풀이 실시한다. 그리고 시험과정의 한 예를 사진-2에 나타낸다.

3) 압밀장치

토조를 조립하여 4면에 대형 여과지를 세우고 반죽 상태의 점토를 투입하여 어느 정도의 침전을 기다려 시료를 여과지로 쌓은 뒤 상면에 배수용 모래를 깔고 압밀용 비닐 물주머니를 설치한다. 물주머니에 연결된 호스를 밖으로 내고 철판 뚜껑으로 토조를 밀폐한 다음 수두를 이용하여 물주머니에 물을 채우고 수압을 가한다. 수압은 5m 높이의 옥상에 물탱크를 통해 호스에 연결하여 압밀 응력 0.5 kgf/cm²을 발생시킨다. 토조내 지반의 압밀침하에 따라 물주머니는 퍼지도록 접어서 설치되어 있다.

4. 수치계산

4.1 본 해석의 기본식

언급한 바와 같이 일련의 본 연구실험은 이들 응력-변형관계를 수식화 하여 수치계산 결과와 비교하므로써 그 정도가 확인되면 수치계산의 프로그램은 사전, 사후의 정보화 시공의 수단이 된다.

본 연구에서는 지반의 응력-변형에 대한 지배방정식 으로서 Biot의 방정식을 택하여 유한요소 해석을 하였다. 이는 어떠한 토질에도 이용되는 보편성이 있는 응력-변형식 이다. 그러나 사용하는 토질의 특성을 극명하게 이 식에 반영하여야 만 수치해석 결과의 정도가 높아진다. 이 지배방정식에 삽입되는 식이 각종 재료에 따른 구성식 또는 구성모델이다. 표 1의 시험종목에 대한 모형실험 결과와 수치해석 결과는 이 Biot 방정식에 modified Cam clay 모델을 구성식으로 결합하여 매우 근사한 결과를 얻었다.

금번 시험에 있어서는 강성이 매우 큰 지반과 상대적으로 강성이 약한 지반과의 다층구조지반이

연구 대상이므로, 유한요소 해석에는 Biot의 방정식을 종전과 같이 이용하지만, 구성식은 기초지반의 강성의 차이에 따라 연성고무층은 탄성모델, 모래층은 ϕ 모델, 점토층은 modified Cam clay 모델을 결합하였다. 이들 모델은 각각 그 재료의 특성을 표현하고 있기 때문이다.

4.2 입력자료

모형토조내의 지반의 요소 분할은 그림 3과 같으며 지반폭은 140cm, 깊이는 60cm에 대해 180개 절점과 154개 요소의 사각형 요소이다.

지반의 경계조건은 하단과 양측면은 고정, 상단은 자유이고 배수조건은 상단은 배수, 하단과 양측면은 비배수 조건으로 해석하며 재하조건은 평면변형을 조건으로 해석한다.

입력자료는 다음 표 5와 같으며 매 시험전 소정의 실험을 거쳐 결정되거나 계산된 값이며 약간씩의 차이는 있으나 수치계산에는 거의 영향을 주지 않는다.

4.3 프로그램의 개요

본 연구에 이용되는 유한요소 program의 특징은 본래 연약지반용이기 때문에 압밀방정식으로 Biot의 식을 주축으로 구성되어 있으며 구성식은 탄성(ELAST), 탄.소성(Cam clay 모델), 비선형(NLE), 탄.점소성(EVP) 등을 부프로그램으로 활용할 수 있으며

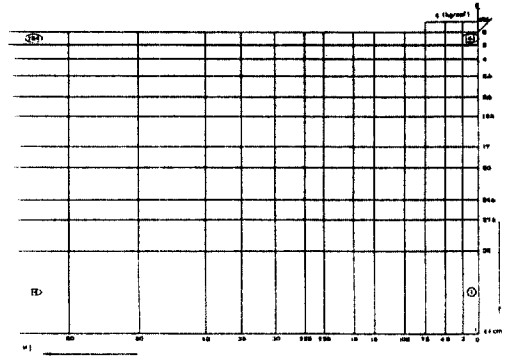


그림 3. FEM Grid

이 프로그램의 개요를 flow chart 로 나타내면 표 6과 같다.

5. 실험 및 해석결과

5.1 시험종류별 침하 및 지지력 관계

그림 4는 0.5 kgf/cm²의 압력으로 압밀된 모형지반에 대해서 기초의 침하에대한 하중관계를 나타낸 것이다.

No. 7, No. 9, No. 8은 요성기초에 S/M, G/T, 또는 무처리에대한 것이며 No. 10, No. 5, No. 6은 똑같이 강성기초의 경우이다. No. 11, 12, 13, 14는 이번에 시행된 강성이 서로 다른 다층지반에 대한 것이다.

요성기초인 경우 침하-하중관계는 다른 강성기초

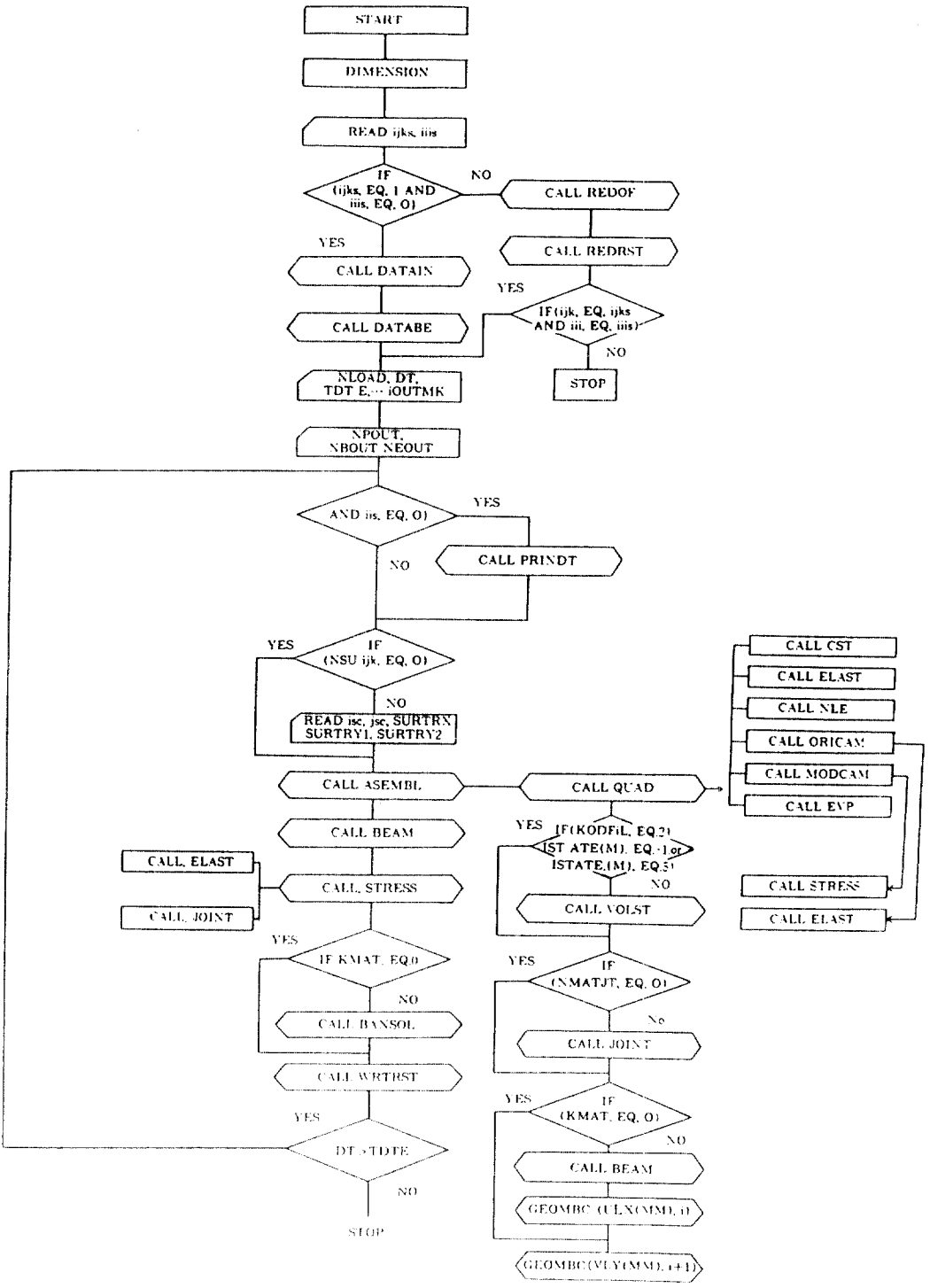
표 5. 계산에 사용된 재료상수

	λ	κ	M	$C\alpha$	G_0	μ	σ_{vc}	K_{oc}
$\sigma_{vc}=0.5$	0.149	0.022	1.34	0.0069	105	0.215	0.72	0.69
$\sigma_{vc}=1.0$	0.146	0.023	1.34	0.048	150	0.374	1.0	0.597
	σ_{vc}'	K_{oc}	e_0	γ_t	v_0	λ_k	k_{x0}	k_{y0}
$\sigma_{vc}=0.5$	0.5	0.69	1.169	1.76	0.0086	0.149	$2.23 \cdot 10^{-8}$	$2.23 \cdot 10^{-8}$
$\sigma_{vc}=1.0$	1.0	0.597	0.972	1.8	$0.1 \cdot 10^{-6}$	0.146	$3.75 \cdot 10^{-7}$	$3.75 \cdot 10^{-7}$

λ ; e-lnp 곡선의 정규압밀 부분의 기울기
 K ; e-lnp 곡선의 팽윤-재압축 곡선의 기울기
 M ; p-q 평면에서 한계상태의 기울기
 $C\alpha$; 2차압축 지수
 G_0 ; 초기전단 탄성계수
 σ_{vc} ; 선행시의 유효수직 응력
 k_{oc} ; 선행시의 정지토압 계수
 μ ; Poisson 비

σ_{vc} ; 현재의 유효연직 응력
 k_{oc} ; 정지토압 계수
 e_0 ; 초기간극비
 γ_t ; 흙의 단위 중량
 v_0 ; 초기체적 변형률 속도
 λ_k ; e-lnk 곡선의 기울기
 K_{x0} ; 초기 수평방향의 투수계수 (cm/sec)
 K_{y0} ; 초기 연직방향의 투수계수 (cm/sec), 단 $K_{x0}=K_{y0}$ 로 함

图 6. Flow Chart



에 비해 적은 하중에 대해 침하가 크고 지지력이 저하되고 있다.^(5,6,7,8)

그러나 기초 강성이 크고 G/T, S/M를 크게 설치할수록 이 지지력은 증가되는 경향이 현저하다. 지지력이 증가되는 순서는 No. 14, 12, 6, 13, 11, 5, 10, 8, 9, 7이고 8, 9, 7은 요성기초이다. 14, 12, 13, 11은 본 시험인데 표층토의 강성이 크고 두꺼울수록 지지력이 증가되고 있음을 보여주고 있다. 다음으로 5, 10인데 G/T의 영향이 있음을 보여주고 특히 S/M이 두꺼우면 No. 6 처럼 지지력이 증가되고 No. 12, 13과 거의 버금간다. 요성기초는 S/M나 G/T의 영향을 받지만 지지력 증가에는 효과가 없다. 그리고 경향으로서는 강성이 큰 지반일수록 전반전단파괴의 양상을 띠고 있다.

5.2 수직변위 및 수직응력

그림 5는 시험종별 최대수직변위(침하)를 나타낸 것으로서 지표면으로부터 0.5B깊이에서의 수직변위량을 보인것이다. 이번 시험종목(No. 11-14)에 전번까지의 시험 결과를 함께 나타내면 분간할 수 없으므로 가장 대표적인 No. 5와 No. 6만 나타내서 비교한다. 강성이 다른 다층구조의 지반은 강성이 큰 층이 상부에 있을 때 하중의 분산 효과가 커 침하가 억제되는 경향은 분명하지만, 그 효과는 G/T 및 S/M의 복합처리만 못하다.

다층구조의 지반에 있어서 수직변위의 효과는 No. 14, 12, 13, 11의 순서로서 차이는 근소하지만, S/M가 두껍고 그위에 강성지반이 있는 3층구조의 경우(No. 14)가 비록 두꺼운 강성기초 일지라도 2층 구조인 경우(No. 12)에 비해 침하가 작다.

다음으로 No. 13의 순인데 이는 3층구조 이지만

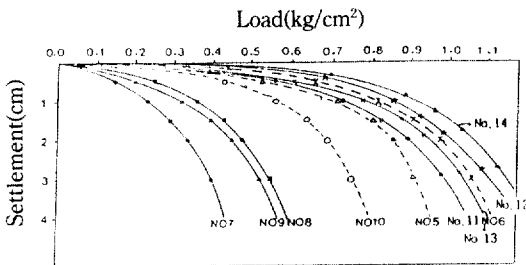


그림 4. Settlement-load relations due to model foundations

S/M가 No. 14의 1/2 두께이다. 이때의 하중은 대략 0.6 kgf/cm²으로서 파괴시 하중은 대략 0.95 kgf/cm²이다. 용기도 이와 같은 순서이며 이는 후술하는 파괴양상이나 수치계산에서의 수평변위벡터의 방향과도 잘 일치하고 있다. 수치계산 결과도 약간의 차이는 있으나 대체로 잘 따라가고 있으며 침하에 있어서는 실측치보다 크고 용기에서는 작게 나타나고 있다.

그림 5는 변위에 대한 것이지만, 이와 같은 변위에 대한 응력전달을 그림 6 (a) (b)에 나타낸다.⁽⁹⁾

이는 수치계산의 결과이지만 그림 (a)에 비해서 그림 (b)의 경우 응력분포도(응력 Bulb)의 크기가 알게된다. 또한 두 그림에서 각각 기초판 아래 모형지반의 강성, 지층의 두께가 크면 응력분포도 역시 알게 위쪽으로 분포되어가는 것을 알수 있다. 상부에서 작용하는 하중의 10% 분포 범위를 비교해보면 No. 14, 13, 12, 11의 순서로 수직분포가 알아진다. 또한 횡방향의 분포 폭도 기초폭 B를 기준으로 위의 순서대로 약 0.8B에서 (No. 11) 0.6B(No. 14)로 좁아지고 있다.

5.3 수평변위

재하에 의한 수평방향의 변위의 한 예를 그림 7에 나타낸다. 이 그림은 재하판 끝점(재하판 중심에서 0.5B 거리)에서 연직방향으로 깊이에 따른 수평변위량을 시험종목에 따라 정리한 것이다. 실선이 관측치인데 변위가 작게 나타난 순서는 No. 14, 12, 6, 13, 11, 5이고 최대수평변위의 위치는 지표에서

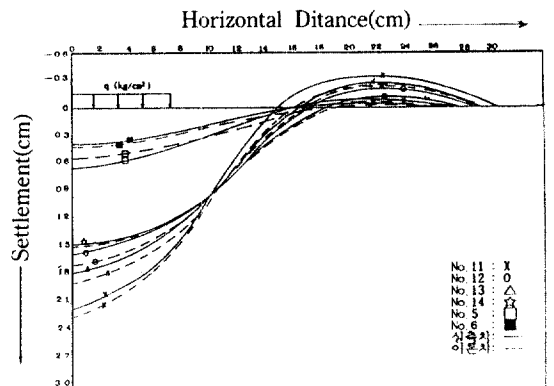


그림 5. Vertical displacement at the center of foundations(depth = 0.5B)

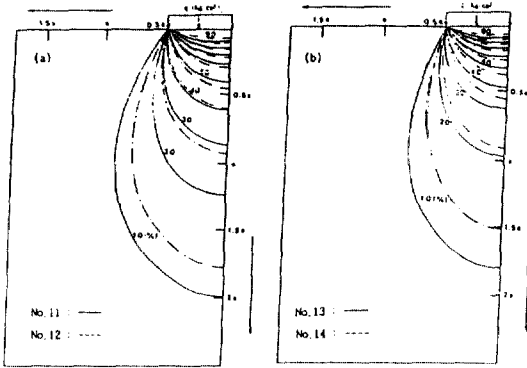


그림 6. Vertical stress distribution(a, b)

0.5B~B 깊이에서 발생하고 있다. 변위가 가장 억제되고 있는 No. 14는 앞절에서도 보인바 있는 수직변위가 가장 적은 3층구조 지반이고 다음으로 2층구조 No. 12이다. 이순서는 수직변위에서와 같다. 그러나 No. 13과 No. 6은 큰 차이는 아니지만 뒤바뀌고 있다. 전자는 강성지반(2.0 cm 두께)에 S/M(2.5cm 두께), 후자는 S/M (5cm 두께)에 G/T가 있는 경우이다. 전체 두께는 거의 같을 것으로 보아 후자의 경우 G/T의 수평변형 억제에 효과가 나타난 것으로 추정된다. 수평변위에 대한 수치 계산 결과는 실측과 동일한 경향을 보이지만 과소하게 나타나고 있어 한마디로 역부족이다. 수직변위에 대해서는 만족할만 하지만 수평변위에 대해서 2배 이상의 차이를 보이고 있다. 현재 그 원인을 규명중인데 모형 토조의 압밀 과정이 비등방 상태에 있으나 프로그램의 입력 자료는 $K_x=K_y$ 를 비롯하여 관계되는 상수 K_{oc} , K_o , μ , G_o 등에 이의 영향을 고려하지 않고 등방상태로 계산이 수행된데 원인이 있는 것으로 판단하고 있다.

5.4 파괴형태

모형재하시험 과정에서 하중의 증가와 더불어 변형이 진행되면 사진-2에서와 같이 기초판의 침하와 측방용기 그리고 지반내에서는 미리 심어둔 표적과 기준선과의 변형에 의한 차이가 시시각각 변화되어 나타나고 시험 중반에 들어서면 무수한 균열이 발생한다. 완전히 파괴된 상태(Load cell의 하중감지가 감소 될때)에서 (0.95 kgf/cm²) 시험을 중단하여 시험 종목별 균열형태와 변형범위를 모식적으로 기록한

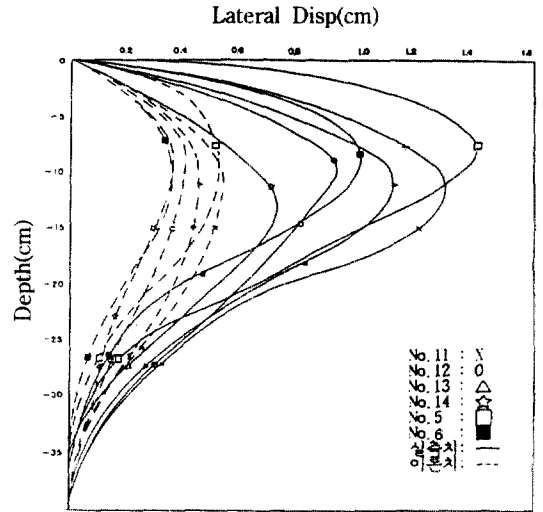


그림 7. Lateral displacement at the edge of model foundation (distance = 0.5B)

예를 그림 8에 나타낸다.

그림(a)는 G/T를 깔고 강성기초를 통해 재하하여 파괴 되었을때의 일반적인 균열발생의 패턴을 도식적으로 나타낸 것이다. 지반내의 삼각형은 변형이 감지되는 범위를 나타낸 것인데 용기의 끝점과 일치되고 중앙에서의 깊이는 대략 2B에 해당된다. 그림(b)는 이것을 수치계산에 의해 변위벡터로 그린 예인데 잘 대응되고 있음을 알 수 있다. 그림(c)는 No. 9과 No. 10 즉, 요성기초와 강성기초를 좌우에 그린 것인데 변형범위의 형태가 매우 다르다.

No. 9는 요성기초에 S/M 와 G/T를 간 경우이고 No. 10 은 강성기초에 G/T만 간 경우인데 전자는

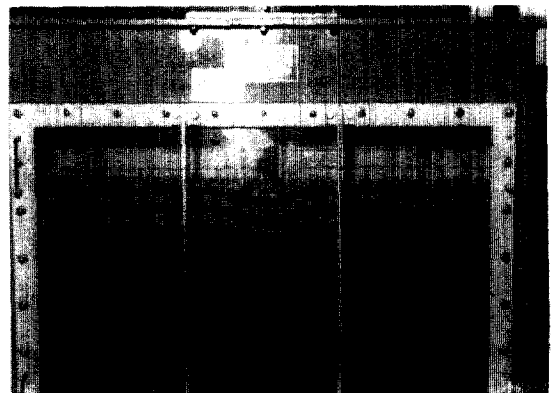


사진 2.

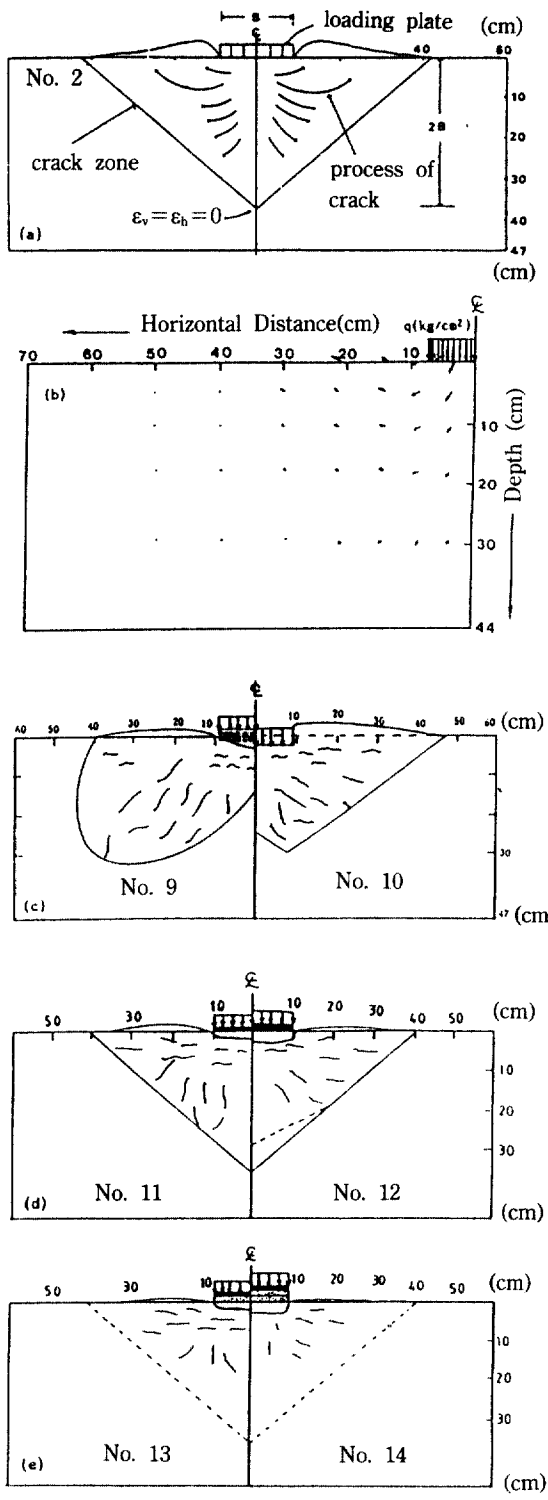


그림 8. Crack zone of shear failure on model

기초가 요성이므로 중앙부에서 응력이 조정되어 G/T 의 영향과 함께 좌하(左下) 방향으로 분산되는 과정에서 균열이 발생하고 원형에 가까운 범위를 이루는데 비하여 후자는 상부에서 거의 수평방향으로 그리고 길게 균열이 분포되고 있다. 즉 기초가 매우 강성이 크므로 기초판 직하에서의 응력조정보다는 밀려나가고 이 과정에서 No. 9와는 특이하게 나타난 것으로 보이며 여기에는 관측창과의 마찰도 관여되고 있어 더 연구 할 과제이다. 물론 모형지반을 성형하고 관측창을 지반에 밀착시키기에 앞서 관측창에 얇은 투명 실리콘 그리스를 발라 마찰을 감소시키도록 하였다.

그림(d) 와 (e)는 본 시험의 경우인데 (d)에 비해 (e)의 경우가 더 얇고 좁게 분포된다. 이 경우는 S/M 의 효과를 보인 것인데 점선은 그림(d)의 범위를 옮긴 것이다. (d)에 있어서는 2층 지반에 있어서 강성 기초의 두께가 두꺼우면 균열 범위가 감소되고 있다. 특히 중앙부에서 변형의 감지 그리고 균열은 No. 12의 경우 균열수나 깊이가 더 얇고 균열의 범위도 점선처럼 꺾인다. 그림 (e)에 있어서는 S/M 의 두께에 따라 훨씬 균열의 수나 범위가 감소되고 있으며 그 범위는 점선의 삼각형보다 안쪽에 있다. 이와 같은 관찰 결과는 아직 수치계산으로 표현할 수 없기 때문에 더많은 관찰 기록과 더불어 앞으로 연구해 볼 여지가 있다.

6. 결 론

여러 지층으로 구성된 다층토 지반의 변형에 대한 해석은 현재 도로와 같은 경우 Burmister나 Fox 등이 연구개발한 탄성모델에 의존하고 있으며, 기초지반에서는 탄성지반의 경우 Boussinesque의 탄성해를 이용하고 있다. 본 연구에서는 기존의 학자들이 제안한 탄성제안식과는 달리 지반의 구성식을 지층의 조건에 따라 탄성, Φ , 탄소성 모델(Modified cam-clay model)을 도입하여 수치해석하고, 또한 이를 모형토조실험 장치를 통해 얻은 값들을 지금까지의 일련의 재하실험 결과와 함께 비교 고찰한 결과는 다음과 같다.

1) 지반 지지력의 증가 추세는 강성이 큰 다층토 기초지반이 다른 경우에 비해 단연 유리하다. 요성 기초는 강성기초 보다 지지력 증가가 약하고 강성

기초는 S/M, G/T 등으로 처리되고 S/M가 두꺼울 경우(No. 6)를 제외하고는 강성이 큰 (지층이 3층, 2층으로 구성) 다층지반 보다 약하다.

2) 수직변위는 역시 전변에 이어 G/T 및 S/M의 복합지반이 가장 억제효과가 있고 다층토지반의 경우는 강성지반의 두께에 따라 억제효과가 있으며 이 가운데에서도 같은 두께이면 (No. 12와 No. 13) S/M가 더 유리한 듯 하다. 그리고 응력의 분포는 강성층이 두꺼울 수록 얇게 분포하는 경향이 있다. (Fig. 6) 또한 수치계산 결과는 매우 근사하다.

3) 수평변위는 좀더 시험데이터의 축적이 필요하지만 현재로서는 강성이 큰 다층토지반이 가장 억제효과가 있으며 (No. 14, No. 12) 이는 이들 강성지반이 G/T와 흡사한 역할을 하는 것으로 이해된다. 그러나 이것도 두께가 얇으면 억제효과가 G/T와 S/M 병용공법 보다 못하지만 (No. 6과 No. 13 및 No. 11) 위 병용공법에서 S/M의 두께가 얇을 때 보다는 효과적이다. 결국 수평변위의 억제효과는 수평방향으로의 변위를 상재하중과 직접적으로 변위를 억제하는 G/T나 지반(다층토지반에서는 모래층)의 두께에 의존하는 것 같다.

4) 파괴시의 균열 패턴은 강성이 큰 지반일 수록 균열의 수나 변형의 범위가 축소되고 기초판 아래에 응력이 집중되는 경향이 있으며 응력이 큰 탄성영역이 형성되어 Terzaghi의 파괴 형태가 되어 간다.

감사의 글

“이 논문은 1990년도 문교부 지원 한국학술진흥

재단의 지방대육성 학술연구 조성비에 의하여 연구 되었음”

참 고 문 헌

1. 박병기의 “연약지반의 변형억제 효과에 대한 2차원 모형실험 및 수치계산” 대한토질공학회지 vol.6, No 3, pp.53~64, 1990
2. 박병기의 “연약지반변형에 대한 2차원 모형재하 실험연구” 대한토목학회 학술강연집, pp.398-402, 1989
3. 박병기의 “연약지반 개량공법에 이용될 범용 프로 그래프” 대한토질공학회지 vol.No2, 1985
4. 강권수의 “2차원 지반재하 시험장치” 대한토질공학회지 vol.4, No. 2, pp 56-64, 1988
5. 박병기의 “다층토지반의 변형에 대한 수치해석 및 실험연구” 대한토목학회 학술강연집, pp. 565-568, 1991
6. 손순종의 “Geotextile을 이용한 연약지반 성토의 수치해석” 대한토목학회 학술강연집, pp.408-411, 1989
7. Park, Byong Kee et al. “Restraint effect on deformation of soft foundation with geotextile”, *Proceedings of the international geotechnical symposium, Theory and practice of earth reinforcement*, International association of Geotechnical engineering 153-158, 1988.
8. 남진희 “연약지반의 변형에 대한 2차원모형 재하 실험 연구” 석사학위 논문, 1990.2
9. 장용재 “유한 다층토 지반의 응력분포” 박사학위 논문, 1991.2

(接受 : 1992. 2. 11)