

## 상재하중 하의 Soil Nailing System의 모형실험

유 남 재 \* · 유 건 선 \*\* · 김 재 일 \*\*\*

### Model Tests of Soil Nailing System under Surcharges

Nam - Jae Yoo \* · Kun - Sun Yoo \*\* · Jae - Il Kim \*\*\*

---

#### ABSTRACT

This research is an experimental work of investigating the behavior of soil nailing system under surcharges whereas most of them were concentrated on evaluating its capacity under selfweight of excavated ground. Model tests in laboratory were performed to investigate the ultimate bearing capacity of soil nailing system under surcharges in forms of strip loading.

Tests were carried out to find parameters controlling its capacity such as length of nail, vertical and horizontal spacings between nails, inclination of nail installation, and loading position of surcharges. Failure mechanism of forming failure line due to surcharge to soil nailing system was also observed by using dyed sand and monitoring its behavior. From results of these test, effects of parameters was analyzed qualitatively.

Thus, this experimental results could provide meaningful data to analyze and design this system later.

---

#### 1. 서 론

Soil Nailing 공법은 흙속에 보강재를 삽입하여 지반의 안정을 도모하는 지반보강 공법의 일종으로서 Stocker<sup>1)</sup>와 Schlosser<sup>2)</sup>

등에 의해 처음으로 개발되어 연구가 수행되어 지난 20여년 동안 독일과 프랑스 등의 유럽지역에서 주로 설계·시공되어 왔다. 미국에서는 Shen<sup>3,4)</sup> 등에 의해 통상적인 엄지말뚝 혹은 버팀보 흙막이 공법 대신에 Lateral Earth Support System이라 불리우는 Soil Nailing System이 개발되어 굴착사면의 안정공법 뿐만 아니라 연약지반 터

---

\* 강원대학교 토목공학과 조교수

\*\* (주) 동명기술단 상무이사

\*\*\* 강원대학교 토목공학과 석사과정

널공사에까지 확대되어 폭넓게 응용되었다. 1980년대 후반에 Mitchell<sup>5)</sup>에 의해 Soil Nailing System에 대한 이론이 정립되면서 이 공법에 관한 적용성이 확대되었고, 최근 Juran<sup>6)</sup>, Bang<sup>7,8,9)</sup> 등 많은 연구자들에 의하여 활발한 연구가 수행되고 있다.

Soil Nailing 공법은 기존의 가설 흙막이 공법 및 사면보강 공법에 비하여 경제성, 공기단축, 작업공간의 활용, 지반의 자연 상태 유지 등 많은 공법의 장점이 인식되어 주로 유럽지역과 일본등지에서 폭넓게 연구·시공되고 있으며, 보강재의 개발 및 내식성에 대한 연구결과, 가설구조물에서 영구적인 구조물로의 적용도 가능하게 되어 그 활용이 확산되고 있는 상황이다. 그러나, 이와같은 신공법의 적용이 국외에서는 활발히 수행되고 있는 반면에 국내에서는 최근들어 뒤늦게 연구가 수행되고 있으며 제한된 현장에서만 시공되고 있는 실정이다.<sup>10,11)</sup>

매년 사면붕괴 사고로 인한 경제적인 피해와 도심지의 좁은 공간에서의 지반굴착 공사가 증대되고 있는 국내 실정을 감안할 때, 이러한 공법에 대한 관심과 연구가 요구되고 있다.

그러나, Soil Nailing에 관한 기존의 연구가 대부분 사면의 자중에 의한 극한지지력 및 파괴 메카니즘과 관련된 안정성 연구가 수행되고 있는 반면에 굴착사면 상부 지표면에 상재하중이 재하된 경우에는 그에 관련된 연구가 미비한 편이다.

따라서, 본 연구에서는 도심지의 좁은 공간에서 지반굴착공사 수행시 Soil Nailing 공법에 의하여 굴착사면을 보강하는 경우에 사면의 지표면에 근접구조물이 위치함에 따라서 상재하중이 작용하는 현장조건에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 이와같은 현장조건을 실내실험에서 재현하고 그와 관련하여 Soil Nailing에 의하여 보강된 굴착사면에 상재하중 재하에 따라서 그의

극한지지력 및 파괴메카니즘에 관하여 조사하기 위하여 일련의 축소모형실험을 실시하였다. 실험은 상기의 조건에 영향을 미치는 변수(네일의 길이와 간격, 네일의 설치 경사각, 상재하중의 재하위치)를 고려하여 수행하였다.

본 연구로부터 얻어진 결과는 Soil Nailing System의 설계 및 해석상에서 도심지의 좁은공간에서 파괴면 안쪽에 위치하는 근접구조물의 영향을 고려하는데 있어 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 시험 내용

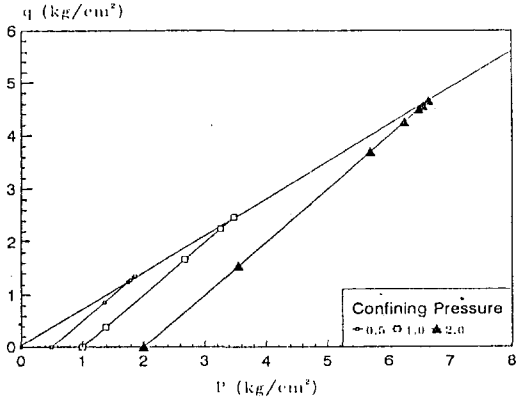
### 2.1 모형지반의 기본물성 및 삼축압축 시험

본 연구에서 실내모형시험의 모형지반으로 사용된 주문진 표준사는 통일분류법(USCS)으로 분류했을 때, SP에 해당하는 균등한 중립모래이며, 주문진 표준사의 기본적인 물리적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1. Basic Soil Properties of Ju Mun Jin Standard Sand.

Grain Size Distribution	$D_{10} = 0.21 (mm)$ $C_u = 1.19$ $C_c = 1.01$
Maximum Dry Density	1.682g/cm <sup>3</sup>
Minimum Dry Density	1.384g/cm <sup>3</sup>
Maximum Void Ratio	0.879
Minimum Void Ratio	0.546
Specific Gravity	2.6

한편, 공기 건조된 주문진 표준사를 강사법(Raining Method)을 이용하여 상대밀도 80%의 시료를 성형하여 배수 삼축압축시험을 실시하였다. 시험결과, Fig. 1에 보인 바와같이 상대밀도 80%에 대한 응력경로를 이용하여 구한 내부마찰각은 44.2°이고, 점착력은 없는 것으로 나타났다.

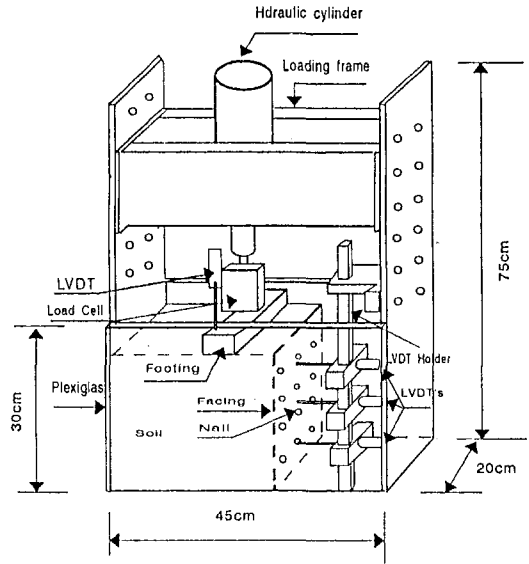


**Fig. 1. Stress Paths and Failure Envelope for Consolidated Drained Triaxial Tests.**

## 2.2 모형시험

### 2.2.1 시험장치

상재하중하의 Soil Nailing System의 극한지지력과 파괴메카니즘을 알기 위한 모형실험을 수행하기 위하여 Fig. 2에 보인 바와같이 2차원 평면변형 조건 하에서 현장 조건을 모사하기 위하여 모형토주는 구형 토조를 사용하였다. 토조의 좌우측벽 및 후면 그리고 저면은 16.5mm 두께의 고강도 알루미늄으로 제작하였으며, 지반과 벽체 사이에서 유발되는 벽마찰력을 최소화하기 위하여 벽체에 Teflon Sheet를 부착하였다. 한편, 토조의 정면은 실험중 모형의 거동을 관찰할 수 있도록 20mm 두께의 투명한 Plexiglass를 사용하였으며, 토조의 제원은 길이 450mm, 폭 200mm, 높이 300mm이다. 현장의 재하조건을 모사하기 위하여 길이 200mm, 높이 30mm, 폭 40mm의 고강도 알루미늄의 모형기초를 사용하여 평면조건 하의 대상기초를 모사하였다. 하중재하는 복동식의 유압실린더를 제작 설치하였으며, 유압실린더는 직경 60mm, 높이 25mm, 재하능력



**Fig. 2. A Schematic of Model Wall and Instrumentation.**

210kg/cm, 최대주행거리 200mm로 하중의 재하(Loading) 및 제하(Unloading)가 가능한 복동식 실린더 형태로 제작하였다. 실린더는 모형의 좌우측벽에 하중재하 지지대를 설치하고, 그 위에 안착하도록 설계·제작하였으며, 상재하중의 재하위치를 변화시킬 수 있도록 실린더를 지지대 위에서 상하좌우로 위치 변경이 가능하도록 설치하였다. 하중 재하를 위한 유압장치는 Fig. 3에 보인 바와같이 유압 pump를 이용하였으며 하중 재하는 일정한 유압의 흐름을 조절하므로써 1mm/min의 속도로 재하되도록 조절하였다. 상재하중 재하시, 모형기초의 재하응력과 연직변위를 측정할 수 있도록 Load Cell과 LVDT를 사용하였다. Load Cell은 모형기초와 재하 실린더의 피스톤 측에 연결하였으며, LVDT는 모형기초 위에 설치하였다. 한편, 하중재하에 따른 모형 전면벽의 수평변위를 측정하기 위하여 40mm 간격으로 3개의 LVDT를 설치하였다.

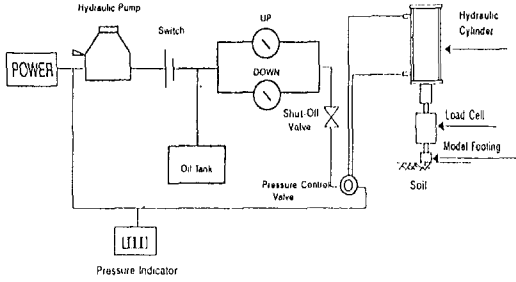


Fig. 3. A Schematic of Hydraulic System for Footing Tests.

이와같이, 시험중 측정된 기초의 연직재하 응력, 기초의 연직변위, 전면벽의 수평변위에 관한 측정자료는 P.C에 내장되어 있는 A/D변환기를 통하여 저장되며 시험중에 컴퓨터의 모니터를 통하여 시험결과를 알 수 있도록 자료획득장치(Data Acquisition System)을 구성 설치하였다.

### 2.2.2 시험방법

대상하중 하의 Soil Nailing System의 극한지저력 및 파괴메카니즘에 영향을 미치는 매개변수의 영향을 규명하기 위한 실내 실험은 다음과 같은 과정으로 수행하였다.

모형실험의 수행전에 네일을 모사하기 위하여 강선을 75, 100, 125, 150mm 길이로 절단한 후 그의 각 단부를 ㄱ형으로 절곡하여 전면벽과 밀착하여 일체화시킴으로서 전면벽과 상대변위가 발생하지 않도록 하였다. 강선의 네일을 접착제를 사용하여 표면에 바른 후 주문진 표준사를 부착시켜 소정의 시간동안 양생하였다. 또한, 전면벽을 모사하기 위한 합석판을 소정의 네일 설치간격 별로 천공하여 준비하였다. 모형지반의 성형은 강사법을 사용하였으며, 상대밀도를 일정하게 유지하기 위하여 시료 낙하장치의 slit 크기와 높이를 조정하여 좌우로 일정한 속도로 이동하면서 시료를 낙하하였다. 모형지반의 성형은 우선 강사법에

의한 주문진 표준사의 낙하로 모형토조 저면에서 100mm까지 원지반을 조성한 후 전면벽을 모사한 합석판을 수직으로 설치하고 그 배면을 지속적으로 강사법에 의하여 주문진 표준사를 낙하하여 배면 지반을 Fig. 4와 같이 성형하였다. 배면 지반 성형중 전면벽의 이동 방지를 위하여 전면벽 양단과 토조의 전후면 사이에 테이프를 부착하므로써 시료 성형중에는  $K_0$  상태를 유지하도록 하고 네일 설치후 상재하중 재하시의 잉여의 저항력 유발을 방지하기 위하여 테이프를 제거하였다.

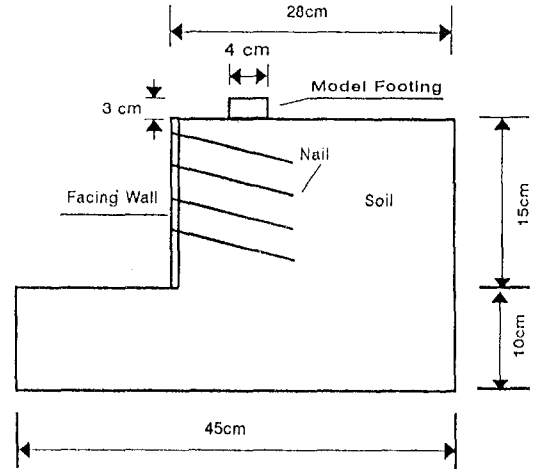


Fig. 4. Configuration and Demension of the Model.

현장의 네일을 실험실에서 모사하기 위하여 2mm 직경의 강선을 사용하였다. 현장에서는 네일 설치를 위한 사면내의 천공 후, 보강재 삽입과 함께 시멘트 그라우팅을 실시하는 바 모형실험에는 현장조건을 단순화하여 2mm 직경의 강선에 지반으로 사용되는 주문진 표준사를 접착제를 사용하여 부착시킴으로써 시멘트와 지반사이의 내부마찰각 대신에 지반 자체의 내부마찰각으로 전단저항력을 발휘할 수 있도록 하였다.

한편 현장에서의 전면벽은 wire mesh의

설치후 shotcrete의 타설로 법면의 유실을 방지하도록 수행하는 바 모형실험에서는 0.025mm의 얇은 합석판을 사용하여 전면벽으로 사용하므로써 소정의 연성을 유지하도록 하였다. 이미 소정의 위치에 일정한 간격으로 천공된 합석판에 이미 마련된 네일을 일정한 간격 및 경사각을 유지하면서 지반내 삽입을 수행하였다. 네일 설치 후, 모형기초를 전면벽 배면 원지반의 지표면에 소정의 위치에 설치한 후, 하중재하장치 및 전면벽 수평변위 측정을 위한 LVDT를 설치하였다. 시험중 지반내의 활동선 형성을 관찰하기 위하여 Still Camera를 사용하여 소정의 시간 간격별로 촬영을 실시하였다.

한편, Soil Nailing System에 영향을 미치는 변수를 Table 2에 보인 바와같이 네일의 길이, 네일의 수평 및 연직 간격, 네일의 경사각, 상재하중의 재하위치 등 4가지로 구별하여 실험을 수행하였다.

Table 2. Geometric and Material Parameters.

매 개 변 수	제 원	
네일의 길이 (cm)	7.5, 10, 12.5, 15	
네일의 간 격	연직간격 (cm)	2, 3, 4, 5
	수평간격 (cm)	2, 3, 4, 5
네일의 경사각	0°, 10°, 20°	
상재하중의 재하위치 (cm)	5, 7.5, 10	

### 3. 결과분석 및 고찰

#### 3.1 극한지지력

Soil Nailing System의 거동에 주 영향을 미치는 네일의 길이와 간격, 네일의 설치 경사각, 상재하중의 재하위치 등을 Table 2의 범위 내에서 변화시키면서 시험을 수행한 결과로부터 얻은 하중-침하 특성 및 극

한지지력 값을 도시하여 비교·분석한 결과를 Figs. 5-12에 나타냈다.

Fig. 5는 네일의 수평 및 연직간격 5cm, 네일의 설치 경사각 0°, 상재하중의 재하위치 5cm(벽체로부터)를 일정하게 유지하고 네일의 길이를 7.5, 10, 12.5, 15cm로 변화시켰을 경우의 하중-침하 곡선을 나타낸 것으로 네일의 길이가 증가함에 따라 보강지반의 탄성계수를 나타내는 곡선의 기울기가 급해지고, 선명한 Peak를 보인 후 연직변위의 증가에 따라 하중이 급격히 감소하였다. 이러한 네일의 길이 증가에 따른 하중-침하 특성은 전체실험에서 극한지지력의 절대값에서 어느정도의 차이는 보이지만 전반적으로 Fig. 5와 같은 형태를 보였다. Fig. 6은 네일의 길이 변화에 따른 극한지지력 값을 도시한 것으로서 네일의 길이가 증가함에 따라 극한지지력은 전반적으로 증가하지만 네일의 길이가 12.5, 15cm로 증가하면서 극한지지력의 증가폭이 급격히 감소함을 볼 수 있다.

이것은 Soil Nailing System의 사면 정부에서부터 상재하중의 위치를 변화시켰을 경우에 상재하중으로 인한 지반내 연직응력이 2:1 응력분포 이론으로 작용된다고 가정할 때, 연직응력 전달범위 내에서 네일

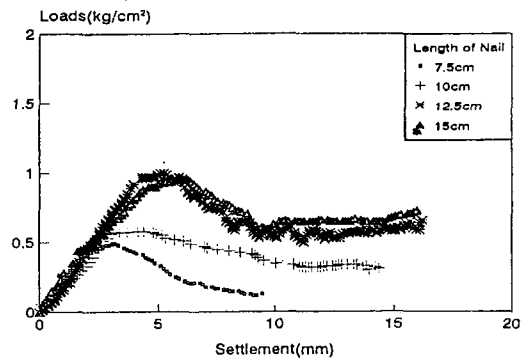


Fig. 5. Load-Settlement Curve.

(VS = HS = 5cm, Inclination = 0°, d = 5cm)

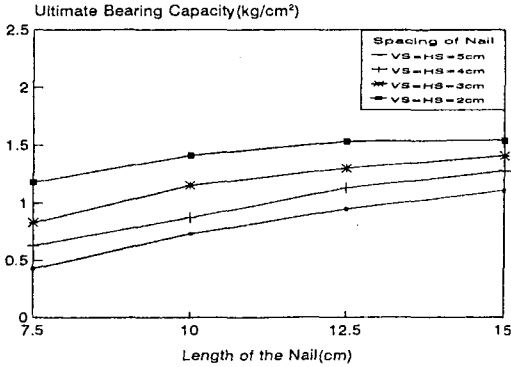


Fig. 6. Effect of Nail Length on Ultimate Bearing Capacity.

길이의 증가는 네일의 유효길이 증가로 인하여 지반과 네일 사이의 마찰저항력과 전반적인 지반 보강효과를 크게함으로써 극한지지력이 증가하지만, 연직응력 전달범위 바깥쪽에서 네일의 길이 증가는 지반과 네일사이의 마찰저항이 자중에 의해 미소하게 증가하지만 상재하중에 의한 극한지지력에는 큰 영향을 주지 못함을 예상할 수 있다. 한편, Fig. 7은 네일의 길이가 7.5 cm, 상재하중의 재하위치를 5, 7.5, 10cm로 변화시켰을 때의 극한지지력 값을 도시한 것으로서 상재하중의 재하위치가 7.5cm에

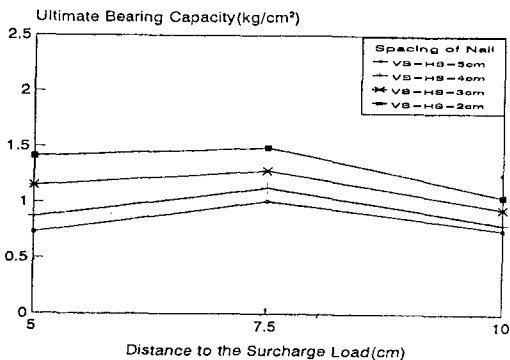


Fig. 7. Effect of Surcharge Position on Ultimate Bearing Capacity.

서 10cm로 변화되면서 극한지지력이 급격하게 저하됨을 볼 수 있다.

이것은 위에서 설명하였듯이 지반 내에서 상재하중으로 인한 연직응력이 2:1 응력분포이론에 의해 상재하중의 위치가 7.5 cm에서 10cm로 변화되면서 네일로 보강된 7.5cm의 바깥쪽에 재하하중이 위치하므로 연직응력 전달범위 내에서 네일에 의한 보강정도가 현격하게 저하되어 극한지지력이 급격하게 감소되는 결과는 Soil Nailing System에서 대상하중이 작용할 경우 2:1 응력분포이론에 의한 지반내의 연직응력을 산정함에 있어 적당한 이론임을 반증해 준다.

Fig. 8은 네일의 길이 10cm, 네일의 설치 경사각 0°, 상재하중의 재하위치 5cm(벽체로부터)이고 네일의 수평 및 연직간격이 3, 4, 5cm로 변화할 경우의 하중-침하 곡선으로서 네일의 간격이 좁아질수록 선명한 Peak를 보이며 기울기가 급해짐을 알 수 있고, Fig. 9에 보인 바와같이 네일의 간격이 좁아질수록 지반보강효과의 증대로 인하여 극한지지력이 거의 선형적으로 증가하는 당연한 결과를 볼 수 있다.

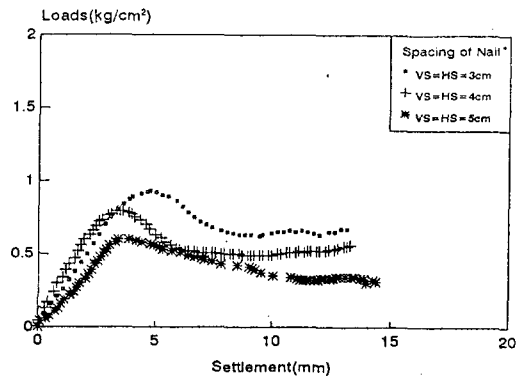


Fig. 8. Load-Settlement Curve.  
(Length = 10cm, Inclination = 0°, d = 5cm)

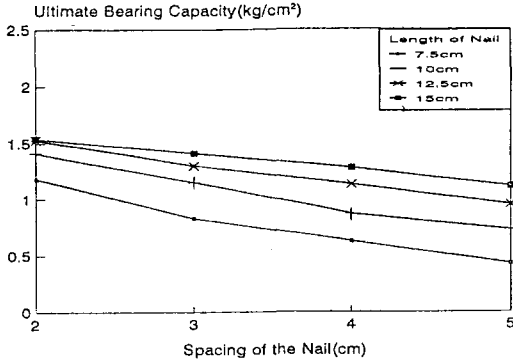


Fig. 9. Effect of Nail Spacing on Ultimate Bearing Capacity.

한편, 네일의 경사각 변화에 따른 하중-침하 곡선 및 극한지지력 값을 도시한 결과를 Figs.10-11에 보인 바와같이 네일의 경사각이 대략  $10^\circ$ 에서 최대 극한지지력이 발생하였다. Fig. 10에서 네일의 길이 10cm, 네일의 수평 및 연직간격 5cm, 상재하중의 재하위치 5cm를 일정하게 유지하고 상재하중을 재하하여 관찰된 파괴면과 네일의 설치 경사각과 이루는 각도를 측정하여 결과 거의 직각으로 교차하는데 특히 구조물의 상단부분에서 직각으로 교차함을 확인할 수 있었다. 하지만 본 연구의 모형실험에서 상재하중의 재하위치에 따라 약간의 차이를 보여주고 있는데 전반적으로 약  $10^\circ$ - $20^\circ$ 에서 최대 극한지지력이 발생하고 파괴면과 이루는 각도 역시 약간의 차이를 보이고 있다. 기존의 Soil Nailing System에 대한 실내모형실험 및 유한요소해석 등의 결과를 살펴볼 때, 각 네일에서 유발되는 최대인장력의 작용점을 서로 연결한 선 즉, 가능파괴면은 특히 구조체의 상단부분에서 네일의 설치방향과 파괴면이 거의 직각을 이루는 형상임을 보여주고 있는데 본 연구에서 대상하중을 재하하였을 경우와도 거의 유사함을 알 수 있었다. 하지만 네일을 아래

쪽으로 기울여 설치할수록 지반과 네일 사이의 인발저항을 감소시키는 결과를 초래할 수 있고, 아울러 네일 설치 경사각의 증가는 전면판 변위의 현저한 증가를 초래할 수 있으므로 네일의 설치각도는 설계 및 해석상에서 유의하여 고려되어야 할 것으로 사료된다.

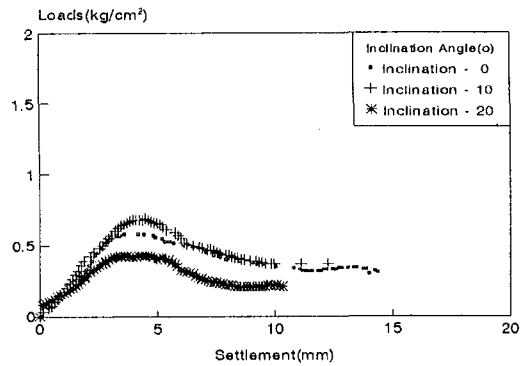


Fig. 10. Load-Settlement Curve.  
(Length = 10cm, VS = HS = 5cm, d = 5cm)

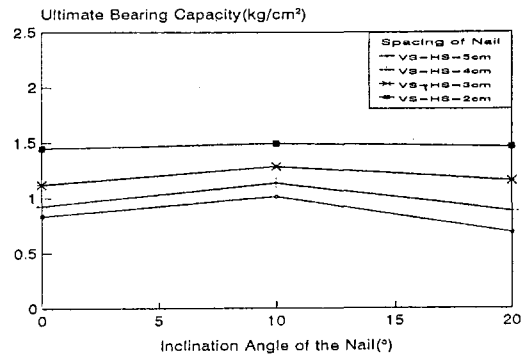


Fig. 11. Effect of Nail Inclination on Ultimate Bearing Capacity.

상재하중의 위치변화에 따라서 극한지지력에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Fig. 12의 하중-침하 곡선과 Fig. 7의 극한지지

력 값을 도시한 결과에서 살펴보면 네일의 길이 10cm, 네일의 간격 4cm, 네일의 경사각 20°로 일정하게 유지하고 상재하중의 위치를 5, 7.5, 10, 12.5cm로 변화시켰을 때, Fig. 12의 하중-침하 곡선상에서 점차적으로 극한지지력이 증가하지만, 상재하중의 위치가 10cm에서 12.5cm로 증가되면서 극한지지력이 급격히 감소함을 알 수 있다.

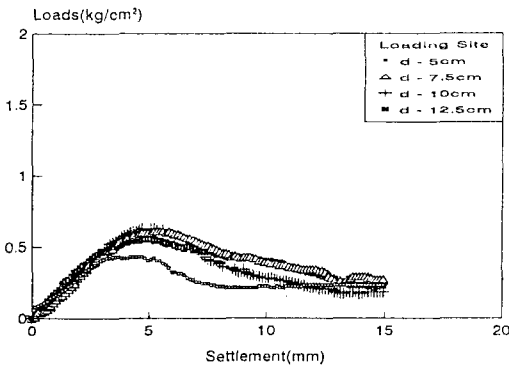


Fig. 12. Load-Settlement Curve.  
(Length = 10cm, VS = HS = 5cm,  
Inclination = 0°)

또한 극한지지력 값을 도시한 Fig. 7에서 네일의 설치간격이 좁아지면서 전체적인 지지력 값은 증가하지만 네일로 보강된 영역 바깥쪽에 상재하중이 재하될 경우 급격하게 극한지지력이 감소함을 좀더 명확하게 볼 수 있다. 이것은 네일에 의하여 과도하게 보강되었을 지라도 보강된 영역과 보강되지 않은 영역 사이의 상재하중이 위치하게 되면 네일에 의한 보강효과가 최소화되고 네일로 보강된 영역이 하나의 강성토체를 형성한다고 가정할 때, 재하하중과 지반의 자중에 따른 수평토압으로 인하여 강성토체를 활동시키므로 안정성 해석시 상재하중의 재하위치에 따라서 내적안정 및 외적안정 문제에 대하여 중요한 문제로 고려해야 될 것으로 사료된다.

### 3.2 전면벽의 수평변위

본 실험에서 전면벽의 수평변위를 측정하기 위하여 전면벽에 40mm 간격으로 3개의 LVDT를 설치하여 재하하중과 전면벽의 수평변위와의 관계를 측정된 결과 네일의 길이, 네일의 간격, 네일의 설치 경사각, 상재하중의 재하위치에 따라 정도의 차이는 있지만 전반적으로 네일에 의한 보강정도가 클 경우는 극한하중에 대한 전면벽의 수평변위가 미소하고, 보강정도가 작아지면서 전반적으로 전면벽의 수평변위가 증가하였다. 네일의 길이 10cm, 네일의 경사각 0°, 상재하중의 재하위치 5cm를 일정하게 유지하고 네일의 간격을 2, 3, 4, 5cm로 변화시켰을 경우의 재하하중과 전면벽의 수평변위와의 관계를 Figs. 13-16에 나타내었다.

전체적으로 극한하중까지는 서서히 벽체의 변위가 유발되지만 극한하중을 지나면서 하중의 감소에도 전면벽의 수평변위는 급격히 증가함을 볼 수 있다. 네일의 간격이 2, 3, 4, 5cm로 증가하면서 극한하중에 대한 전면벽의 수평변위가 0.8-3mm로 전체

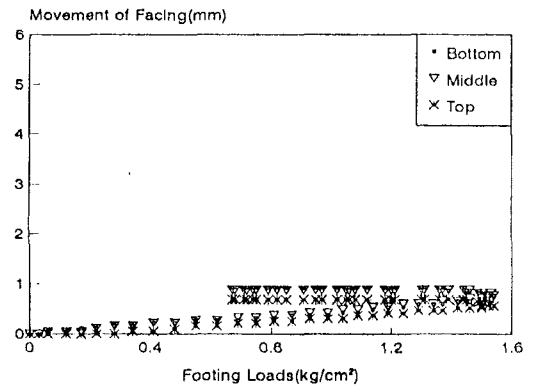


Fig. 13. The Response of Footing Loads versus Lateral Movement of the Facing.

(VS = HS = 2cm, Length = 10cm,  
d = 5cm, Inclination = 0°)



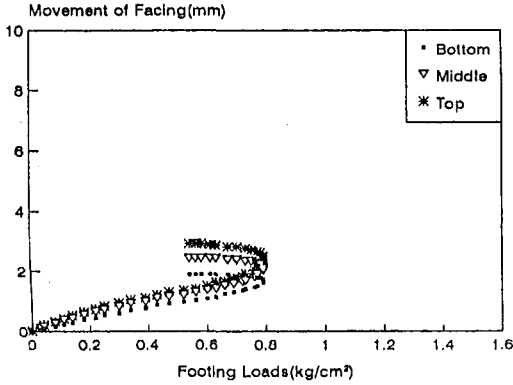


Fig. 14. The Response of Footing Loads versus Lateral Movement of the Facing.

(VS = HS = 3cm, Length = 10cm,  
d = 5cm, Inclination = 0°)

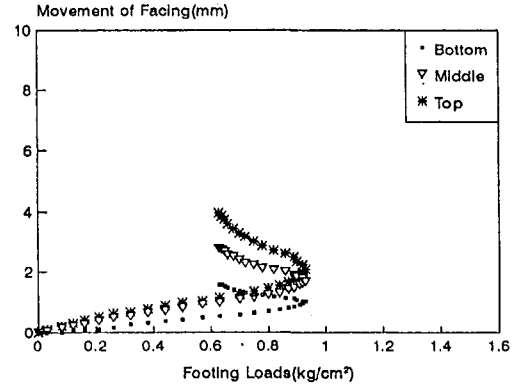


Fig. 15. The Response of Footing Loads versus Lateral Movement of the Facing.

(VS = HS = 4cm, Length = 10cm,  
d = 5cm, Inclination = 0°)

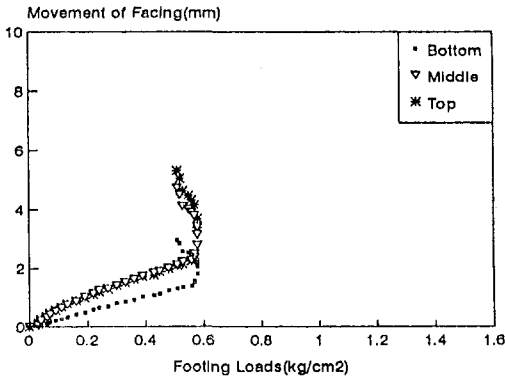


Fig. 16. The Response of Footing Loads versus Lateral Movement of the Facing.

(VS = HS = 5cm, Length = 10cm,  
d = 5cm, Inclination = 0°)

벽체의 높이 150mm에 대하여 최대 2% 정도의 수평변위가 유발되었다.

또한 전면벽의 하단부에서 보다 상단부와 중간부분에서 더 많은 변위가 유발되었다. 이러한 결과로 미루어 전면벽의 중·상

단부에 가장 큰 토압이 작용됨을 예상할 수 있다.

### 3.3 파괴메카니즘

본 연구의 모형시험을 통하여 관찰된 Soil Nailing System의 파괴형태는 상재하중의 재하위치에 따라 지배적으로 형성됨을 알 수 있었으며, Fig. 17과 Fig. 18에 보인 바와같이 두가지 형태의 파괴면이 관찰되었다.

Fig. 17은 본 모형시험에서 관찰된 전반적인 파괴형태로서 벽체의 저면 앞굽과 기초의 끝으로 연결되는 포물선 형태의 파괴면으로 네일에 의한 보강정도가 상대적으로 과소한 경우 또는 네일에 의한 보강정도는 크지만 상재하중의 위치가 네일로 보강된 영역의 끝부분에 인접하여 재하될 경우에 관찰되었다.

Fig. 18에 보인 파괴형태는 네일의 길이와 간격이 과다하게 보강되고, 네일로 보강된 영역 안쪽에 상재하중이 작용하는 경우에 얇은 기초의 국부전단파괴 형태의 파괴

면이 관찰되었다. 그러나 Fig. 18과 같은 파괴형태는 재하하중을 크게 증가시킨다면 구조물의 과도한 변형을 유발시키면서 Fig. 17과 같은 포물선 형태의 파괴면이 형성한다.

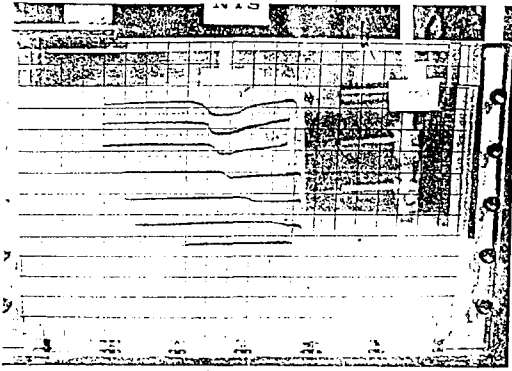


Fig. 17. Failure Plane of Parabola Shape.

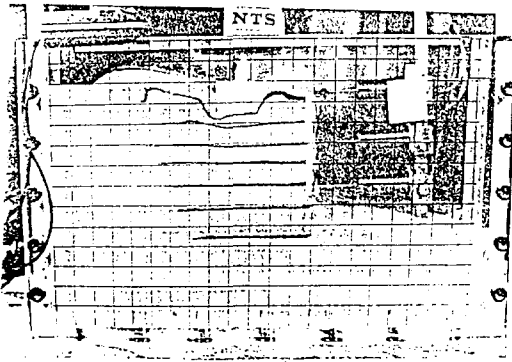


Fig. 18. Local Shear Failure of Shallow Foundation.

Soil Nailing System에서 파괴면의 가정은 설계 및 안정성 해석에서 가장 큰 영향을 주는 변수이므로 위와 같은 실험결과로부터 도심지의 좁은 공간에서 파괴면 안쪽에 인접구조물이 위치할 경우의 설계 및 안정성 해석에 대하여 중요한 자료로 이용될 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 도심지의 좁은 공간에서 지반굴착공사시 인접구조물의 영향에 대한 현장조건을 고려하기 위하여 Soil Nailing System에 상재하중을 재하하는 모형실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 네일의 길이가 증가하면서 점차적으로 극한지지력은 증가하지만 상재하중으로 인한 지반내 연직응력 전달범위 바깥쪽에서의 네일 길이의 증가는 극한지지력에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.

2) 네일의 설치간격이 좁아질수록 지반 보강효과는 현저하며, 극한지지력은 네일의 설치간격이 좁아질수록 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.

3) 네일의 설치 경사각은 대략  $10^\circ$ 에서 최대 극한지지력이 발생하였으며, 네일의 경사방향과 실험에서 관찰된 파괴면과 이루는 각도를 측정한 결과 특히 구조체의 상단부에서 거의 직각으로 교차함을 알 수 있었다.

4) 상재하중의 재하위치가 극한지지력에 미치는 영향은 네일의 길이와 관련하여 보강영역 내에 상재하중이 위치하는 경우는 내적안정으로 보강영역 밖에 위치한 경우는 외적안정성 문제로 관계된다.

5) 모형실험에서 측정된 전면벽의 수평변위는 벽체의 중단부와 상단부에서 최대의 수평변위가 유발되었으며, 전체 벽체의 높이에 대하여 2% 내외의 크기임을 관찰하였다.

6) 모형실험을 통하여 관찰된 파괴메카니즘은 상재하중의 위치에 의해 지배적으로 형성됨을 알 수 있었고, 전반적으로 벽체의 저면 앞굽과 기초의 끝으로 연결되는 포물선 형태의 파괴면이 관찰되었다.

7) 보강정도가 과도한 경우 일부 얽은 기초의 국부전단파괴 형태의 파괴면이 관찰되었지만 큰 재하하중이 작용할 경우 구조

물의 과도한 변형과 함께 포물선 형태의 파괴면이 형성됨을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- 1) Stocker, M. F., Korber G. W., Gassler G. and Gudehus G., "Soil Nailing", Intl. Conf. on Soil Reinforcement, Paris, France, Vol. 2, pp. 469-474. (1979)
- 2) Schlosser, F., "Behavior and Design of Soil Nailing", Symposium on Recent Developments in Ground Improvement Techniques, Bangkok, pp. 399-413. (1982)
- 3) Shen, C. K., Bang, S., Herrmann, L. R., Romstad, K. M., "A Reinforced Lateral Earth Support System", Proc. ASCE Symposium on Earth Reinforcement. (1978)
- 4) Shen, C. K., Kim, Y. S., Bang, S. and Michell, J. F., "Centrifuge Modeling of Lateral Earth Support", Proc. ASCE, Vol. 108, No. GT9, September. (1982)
- 5) Michell, J. K., "Reinforcement of Earth Slopes and Embankments", National Cooperation Highway Research Program Report No. 290, Transportation Research Board. (1987)
- 6) Juran, I., "Kinematical Limit Analysis for Design of Soil-Nailed Structures", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 116, No. 1, January. (1990)
- 7) Bang, S., "Analysis and Design of Lateral Earth Support System", Ph. D. Thesis, University of California, Davis, Calif. (1982)
- 8) Bang, S., Shen C. K., Kim, J., "Investigation of Soil Nailing System", Transportation Research Record. (1990)
- 9) Bang, S., Kroeck, P. P. and Shen, C. K., "Analysis of Soil Nailing System", (1992)
- 10) 이승래, 김준석, 김주용, 정치광, 이석태, "Soil Nail에 의하여 급경사면의 해석 및 설계", 한국지반공학회 가을 발표회 논문집, pp. 63-68. (1993)
- 11) 김홍택, 강인규, 최인식, 순광수, "Soil Nailing 공법의 적용 및 설계", 한국지반공학회, 제2집, pp. 19-47. (1993)