

하중재하시 소일네일링 구조물의 거동 및 파괴메카니즘에 관한 원심모형실험

Centrifuge Model Tests on the Behavior and Failure Mechanism of Soil Nailing Systems Under Surcharges

유 남 재*¹ Yoo, Nam-Jae 김 영 길*² Kim, Young-Gil
박 병 수*³ Park, Byung-Soo 홍 영 길*⁴ Hong, Young-Kil

Abstract

Most designs and stability analyses about soil nailing systems have been focused on the behavior of system under selfweight of excavated ground condition whereas researches about soil nailing system under surcharges applied on the surface of ground was very limited. Therefore, the parametric experimental works about soil nailing system under surcharges were performed to investigate the behavior and failure mechanism of the system by using centrifuge facilities. Centrifuge model experiments were carried out by changing length of nail, spacing between them, inclination of installing nail, and the location of surcharges. Tests were also performed under increased g-levels of 30 and 50g as well as 1g environments. From centrifuge model tests, characteristics of load-settlement of surcharges obtained by changing layout of nails as described, effects of increased g-level on them, and failure mechanisms induced by changing the influencing parameters to them were analyzed.

요 지

소일네일링 구조물의 설계 및 안정해석에 관한 지금까지의 연구는 대부분 굴착 배면지반의 자중만을 고려하여 연구 개발된 반면에 굴착사면에 인접하여 하중이 재하되는 경우, 그의 거동에 관한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 원심모형시험기를 사용하여 하중재하시 소일네일링 구조물의 거동과 파괴 메카니즘에 관한 매개변수적 실험을 실시하였다. 매개변수적 실험에서는 네일의 길이 및 간격, 네일의 설치각, 하중재하위치 등을 다양하게 변화시키면서 1g 상태에서 축소모형실험을 실시하는 한편, 30g 및 50g까지 중력수준을 증가시킨 상태에서 상재하중실험을 실시하였다. 실험으로부터 얻어진 결과를 바탕으로 하중-침하 특성, 매개변수의 변화에 따른 영향, 중력수준의 증가에 따른 영향, 파괴메카니즘 등을 비교분석하였다.

Keywords : Centrifuge modeling, Parametric experiments, Soil nailing system, Surcharges.

1. 서 론

해마다 사면붕괴 사고로 인하여 많은 인명과 재산 피

해를 입고 있고, 도심지의 좁은 공간에서의 지반굴착
공사가 날로 늘어가고 있는 국내실정에 비추어볼 때
흙 속에 보강재를 삽입하여 지반의 안정을 도모하는

*1 정희원, 강원대학교 공과대학 토목공학과 교수
*2 정희원, 한림정보산업대학 토목과 전임강사
*3 강원대학교 토목공학과, 공학박사
*4 정희원, 한림정보산업대학 토목과 겸임교수

이른바 지반보강공법이 최근 토목공사에서 주목을 받고 있으며, 이에 관한 많은 연구개발을 통하여 다양한 공법이 제시되어 각종 구조물 공사에 폭넓게 사용되고 있다.

이러한 지반보강공법중의 하나인 소일네일링 공법 (soil nailing system)은 활동 가능성이 큰 급경사의 자연 사면이나 굴착사면의 안정성을 증대시킬 목적으로 인장 및 전단응력 그리고 휨모멘트에 저항할 수 있는 네일 이라 불리는 보강재를 프리스트레싱 없이 비교적 촘촘한 간격으로 지반속에 삽입하여 지반강도를 증가시키고 동시에 발생변위를 억제시킴으로써 전체적으로 사면의 안정성을 향상시키는 공법으로 알려져 있다.

소일 네일링 구조물에 관한 대표적인 설계 및 해석법들은 현재 한계평형이론에 근거한 미국의 UCD 방법 (University of California at Davis, Shen외 2인, 1981), 독일 방법(Stocker외 3인, 1979), 프랑스 방법(Schlosser, 1983)과 운동학적 한계평형이론을 추가한 운동학적 한계해석법(Juran외 3인, 1990) 등으로 적용성 확대를 위한 활발한 연구가 수행되고 있으며, 더불어 다양한 설계 및 해석방법들이 제시되었다.

그러나, 이러한 설계 및 해석방법들은 실내모형실험이나 실험실실험을 바탕으로 주변지반과 보강네일 사이의 상호작용, 파괴 메카니즘, 네일의 저항력 산정 등에 있어서 서로 다른 가정 및 안전율을 제시하고 있다. 또한, 소일네일링 공법에 대하여 지금까지 수행되어 온 대부분의 연구는 주로 굴착사면에 대한 지보체계의 제공에 주안점을 두고 연구 개발되었으므로 굴착사면에 인접하여 하중이 재하되는 경우, 그의 거동에 관한 연구는 비교적 미흡한 실정이다. 그러므로, 기존의 설계법에 대한 타당성 검토 및 보다 합리적인 설계법을 제안하기 위해서는 소일네일링 구조물의 거동 및 파괴메카니즘에 대한 좀더 정확하고 충분한 자료의 획득이 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 원심모형시험기를 사용하여 하중재하시 소일네일링 구조물의 거동과 파괴 메카니즘에 관한 매개변수실험을 실시하였다. 원심모형실험에서는 네일의 길이 및 간격, 네일의 설치각, 재하위치, 재하시의 중력수준 등을 다양하게 변화시키면서 수행된 실험결과를 바탕으로 하중-침하 특성, 매개변수 및 중력수준의 변화에 따른 영향, 파괴메카니즘 등을 비교분석하였다.

2. 실험장치 및 모형제작

현장 응력수준을 실내에서 재현시키기 위하여 사용한 원심모형시험기는 강원대학에 소재한 있는 가속기로써 원심기의 중심축으로 부터 힌지까지의 거리가 1,000mm 일 때 20g·ton의 용량을 갖도록 설계되었다. 주요부품에는 스윙바스켓, 균형추, 슬립링 등이 있으며 스윙바스켓의 한쪽에 모형토조를 안착하고 다른 한쪽에는 모형토조의 무게에 상응하는 사하중을 재하하여 회전 가속시 균형을 유지하도록 하였다. 한편, 원심기 내외부의 전기적 신호를 상호 연결시켜 주는 슬립링은 실험중 계측된 출력자료 및 영상자료 그리고 원심기 밖에서 내부로 전력을 공급하는 역할을 주로 담당한다. 주요장치로는 구동장치, 자료획득장치, 모니터링장치, 유압식 재하장치 등이 있다(유남재 외 2인, 1994).

2.1 모형 및 계측장치

상재하중하의 소일네일링 구조물의 거동과 파괴 메카니즘을 규명하기 위하여 그림 1에서 보는 바와 같이 소형의 2차원 평면-변형율 토조(내경 : 폭=200mm, 길이=450mm, 높이=300mm)내에 모형구조물을 제작 설치하였다. 토조는 가속상태의 무게를 최소화시키기 위하여 좌우측벽 및 후면 그리고 저판은 두께 15mm인 고강도

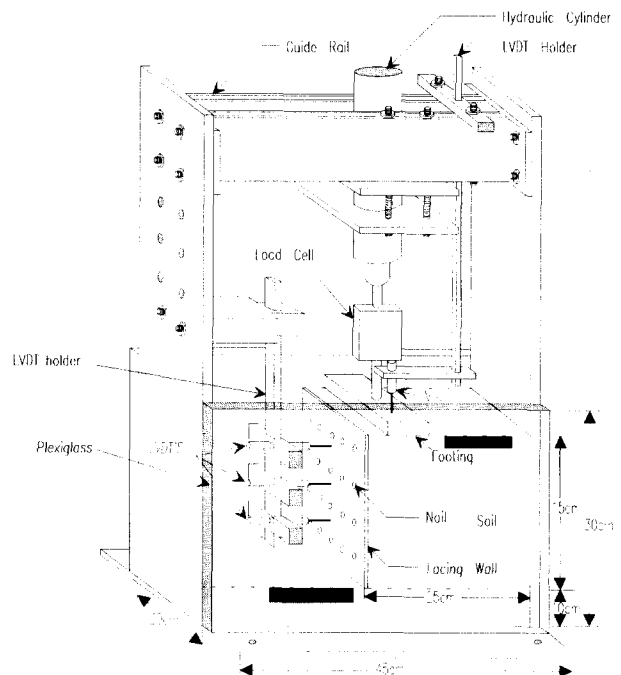


그림 1. 상재하중 실험장치

경량의 알루미늄판으로 제작하고, 토조의 한 측면은 실험중 모형의 거동을 관찰할 수 있도록 20mm 두께의 투명한 plexiglass 판으로 제작하였다.

전면벽의 횡방향 이동변위를 측정하기 위하여 3개의 변위측정기를 벽체 상단과 하단 그리고 중앙에 설치하고, 가속시 변위측정기 지지대가 힌지부를 중심으로 회전하는 것을 방지하기 위해 보조 지지대를 설치하였다. 또한, 벽체와 변위측정기 사이에 가지지대를 설치하여 벽체의 갑작스러운 붕괴로 인한 변위측정기의 손상을 방지할 수 있도록 하였다. 한편, 알루미늄으로 제작한 대상의 모형기초(길이 20cm, 폭 4cm)의 재하를 위하여 재하(load) 및 제하(unloading)가 가능한 복동식 유압 실린더 장치를 사용하고 하중계(load cell)와 변위측정기를 부착하여 모형기초에 가하여진 연직하중과 연직 변위를 각각 측정하였다. 모형기초는 그 중심이 전면벽으로부터 6cm, 9cm, 12cm 떨어진 곳의 배면 지표면에 설치하여 하중재하 위치에 따른 영향을 검토하였다. 하중 재하 속도는 일정한 유압의 흐름을 조절함으로써 1mm/min.의 속도로 재하되도록 조절하였다.

이와 같이 실험중 측정된 기초의 연직재하능력 및 연직변위, 전면벽의 수평변위에 관한 측정자료는 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터에 자동 저장되며 실험 중에 컴퓨터 모니터를 통하여 실험결과를 알 수 있도록 자료획득 장치를 구성 설치하였다.

2.2 모형 구성요소의 물성

모형지반 조성에 사용된 주문진 표준사는 통일분류법(USCS)으로 SP에 해당하는 균등한 중립질 모래로서 기본적인 물리적 성질은 표 1과 같다. 본 실험에서는 강

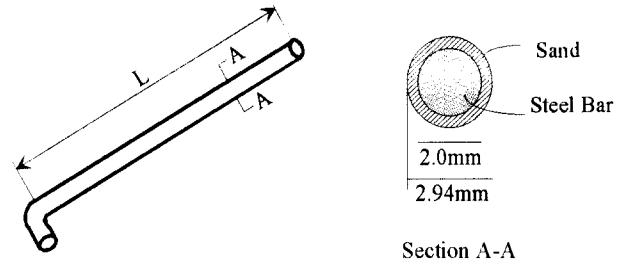


그림 2. 네일의 형상 및 단면

사장치(슬릿크기 2mm, 강사높이 75cm)를 사용하여 지반의 높이에 상관없이 80%의 상대밀도를 갖는 균질한 모래지반을 조성하였다.

네일은 그림 2에서 보는 것처럼 2mm 직경의 강선을 9, 12, 15cm의 길이로 절단한 후 전면벽으로부터 네일의 이탈현상을 방지할 목적으로 네일의 단부를 ‘ㄱ’형으로 절곡하여 사용하였다. 한편, 현장에서의 네일설치는 사면내 천공 후, 보강재의 삽입과 시멘트 그라우팅을 실시하지만 모형실험에서는 현장조건을 단순화하여 2mm 직경의 강선에 지반으로 사용되는 주문진 표준사를 네일 주변에 양면 테이프로 부착하여 사용함으로써 시멘트와 지반 사이의 내부 마찰각 대신에 지반자체의 내부마찰각으로 전단 저항력을 발휘할 수 있도록 하였다.

전면벽은 2mm 두께의 알루미늄판을 폭 20cm, 높이 15cm의 크기로 절단한 후 일정한 수평, 수직간격별로 천공하여 네일을 설치할 수 있도록 하였다. 한편, 네일의 설치간격에 따른 영향을 알아보기 위하여 이미 소정의 위치에 일정한 간격으로 천공된 알루미늄 전면벽에 수평 및 연직 방향으로 2열 3층(10cm×5cm), 4열 3층(5cm×5cm), 5열 4층(4cm×4cm)으로 배열하였다.

2.3 실험방법

대상하중하의 소일네일링 구조물의 극한 지지력 및 파괴 메카니즘에 미치는 매개변수의 영향을 규명하기 위한 1g 실험 및 원심모형실험은 다음과 같이 수행하였다.

먼저 본 실험을 수행하기에 앞서 원심모형시험기를 이용한 상재하중 실험에서 소정의 중력수준에 도달할 때까지 벽체의 수평변위를 억제하기 위하여 네일의 간격, 길이 및 설치각도 등을 다양하게 변화시키면서 예비 실험을 수행하여 원심기를 이용한 상재하중 실험시 요구되는 적정의 네일 배열수(5열 4층, 4열 3층)를 결정하였다.

표 1. 주문진 표준사의 물리적 특성

주문진 표준사	
통일 분류법	SP
입경 특성	D ₁₀ =0.21mm C _u =1.19 C _c =1.01
최대건조밀도	1.682 t/m ³
최소건조밀도	1.384 t/m ³
최대 간극비	0.879
최소 간극비	0.546
비중	2.6
상대밀도(%)	내부 마찰각(deg.)
80	42.6

실험중 발생하는 벽마찰을 최소화시킬 목적으로 토조의 양 측면에 테프론 쉬트(teflon sheet)를 부착함과 동시에 지반 성형 바로 직전에 분말가루를 바르고, 실험중 모형의 파괴 메커니즘을 관찰할 수 있도록 plexiglass판 안쪽에 15mm 간격의 격자판을 OHP상에 그려 부착하였다. 시료성형은 강사법에 의한 주문진 표준사의 낙하로 모형토조 저면에서 10cm까지 원지반을 조성한 후, 15cm 높이의 전면벽을 모사한 알루미늄판을 설치하였다. 배면지반 성형중 발생하기 쉬운 전면벽의 횡방향 이동변위를 억제하기 위하여 가지지대를 설치함으로써 배면지반 성형중에는 정지토압 상태를 유지하도록 하였다. 또한, 배면지반 성형시 전면벽의 선단부로부터 3cm의 연직간격별로 염색사를 plexiglass판 안쪽에 띠(strip) 형태로 포설하여 소일 네일링 구조물의 거동에 따른 활동선 및 파괴메커니즘을 확인할 수 있도록 하였다.

첫 번째 층의 네일은 네일의 설치각을 고려하여 그 위치까지 뒷채움재를 포설한 후 이미 소정의 위치에 일정한 수평 및 수직간격으로 천공된 알루미늄 전면벽을 통하여 준비된 네일을 배면지반에 관입·설치하였다. 두 번째 층의 네일도 전술한 방법과 동일하게 설치하였다. 이러한 배면지반의 성형과정을 전층에 대하여 반복 수행함으로써 모형 구조물을 제작 완료하였다.

모형지반의 성토완료 후 가지지대를 제거하고 제반의 계측장치 및 가압장치를 설치하여 1g 실험을 수행하였다. 한편, 상재하중실험은 준비된 모형토조를 원심모형실험기에 장착시킨 후 소정의 중력수준에 도달하도록

원심기를 가속시켰다. 소정의 중력수준을 유지한 후, 가압장치를 사용하여 모형기초를 재하하였다. 재하실험은 모형벽체가 파괴되어 잔류강도에 도달할 때까지 변형을 제어방법으로 하중을 가하여 재하응력 및 이에 따른 연직변위 그리고 벽체의 횡방향 이동변위를 측정하였다. 또한, 원심기를 가속시켜 실험하는 동안에 모형구조물의 파괴 메커니즘 및 거동을 비디오 카메라를 통하여 관찰, 녹화하고 모형의 거동중 중요한 장면을 순간 포착하여 사진촬영함으로써 실험종료 후 파괴메커니즘을 확인하는 자료로 활용하였다.

한편, 소일 네일링 구조물에 영향을 미치는 매개변수는 표 2에 보인 바와 같이 네일의 길이, 네일의 수직 및 수평 간격, 네일의 설치각, 상재하중의 재하위치, 하중 재하시의 중력수준 등이며 이를 변화시키면서 실험을 수행하였다.

표 2의 모형실험번호에서 알파벳은 상재하중실험을 의미하며 첫 번째 숫자는 보강네일의 설치간격이고, 두 번째 숫자는 재하위치, 세 번째 숫자는 네일의 길이, 마지막 숫자는 보강네일의 설치각을 나타낸다. 단, ST는 네일의 수평, 수직 설치간격이 각각 10cm, 5cm인 경우이다. 예를들어, 실험번호 S4-9-9-I10은 네일의 수평, 수직 설치간격이 4cm이고 재하위치는 벽체의 상단으로부터 수평으로 9cm 떨어진 지점에 위치시켰으며 네일의 길이는 9cm, 네일의 설치각은 수평면에 대해 10° 기울여 설치했음을 나타낸다.

표 2. 원심모형실험내용

모형 실험 번호	네일의 설치간격 (cm)		네일의 길이비 (L/H)	네일의 설치각 (θ)	하중 재하 위치 (cm)	하중재하시 중력수준(G)			
	수직 간격	수평 간격				1	20	30	50
S4-6-9-I10	4	4	0.6	10	6	○		○	○
S4-9-9-I0	4	4	0.6	0	9	○		○	○
S4-9-9-I10	4	4	0.6	10	9	○	○	○	○
S4-9-9-I20	4	4	0.6	20	9	○		○	○
S4-9-12-I10	4	4	0.8	10	9	○		○	○
S4-9-12-I20	4	4	0.8	20	9	○			
S4-9-15-I10	4	4	1.0	10	9	○		○	○
S4-12-9-I10	4	4	0.6	0	12	○		○	
S5-9-9-I10	5	5	0.6	10	9	○		○	
S5-9-9-I20	5	5	0.6	20	9			○	○
S5-9-12-I10	5	5	0.8	10	9	○		○	○
S5-9-15-I10	5	5	1.0	10	9	○		○	○
ST9-9-I10	5	10	0.6	10	9	○			

3. 실험결과 및 분석

상재하중 실험에서는 현장구조물의 크기를 실내에서 1/n배로 축소모형을 제작하여 1g 상태에서 축소모형실험(1g 실험)을 실시하는 한편, 축소모형이 갖는 작은 크기의 응력상태를 극복할 수 있는 원심모형실험기를 사용하여 실물구조물이 갖는 응력상태를 그대로 재현하고자 중력수준을 30g 및 50g 까지 증가시킨 상태에서 네일의 길이, 설치간격 및 설치각, 하중재하위치 등을 변화시키면서 상재하중실험을 실시하여 하중-침하 특성, 매개변수 및 중력수준의 변화에 따른 영향 등을 분석하였다.

3.1 하중-침하-수평변위 특성

그림 3, 4는 1g 실험에 대한 하중-침하-수평변위 곡선으로 이와 관련된 모식도를 각 그림에 도시하였다.

그림 3, 4를 비교해 보면 하중-침하 곡선은 크게 두가지 형상을 띠고 있는데, 그 중 하나는 일반적인 하중-침

하곡선과 동일하게 극한점이 한 개만 나타나는 형태이고 다른 하나는 극한점이 두 개 이상 나타나는 형태를 관찰할 수 있었다.

극한점이 한 개만 나타나는 경우(그림 3 참조), 상재하중이 증가함에 따라 침하량과 수평변위 역시 크게 유발되며, 모식도에서 보는 것처럼 네일로 보강된 영역 밖에 기초가 재하될 때이고, 이와 반대로 그림 4는 1차 극한점을 지나 2, 3차 극한점까지 보이는 형태로서 극한점이 한 개인 경우와는 달리 하중의 증가에 따라 침하량에 비해 수평변위는 극히 미소하게 발생하며, 이와 같은 경우는 네일로 보강된 영역내에 기초가 재하될 경우로 모식도를 통하여 확인할 수 있다.

한편, 그림 5는 극한점이 한 개만 나타나는 경우에 대한 파괴모드로 하중의 증가에 따라 벽체의 변위가 크게 유발되어 그림에서 보는 것처럼 모형구조물이 전체적으로 거동함을 보여주고 있다.

그림을 살펴보면 기초재하판 아래 켜기형태인 탄성영역의 파괴 후에 형성된 전단영역은 구속이 자유로운

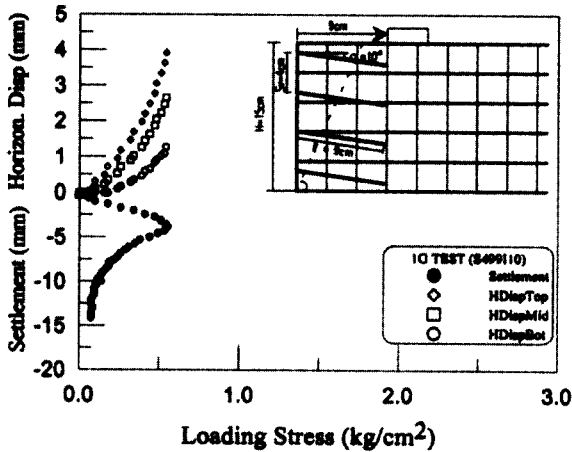


그림 3. 하중-침하-수평변위 곡선(실험번호 : S4-9-9-110)

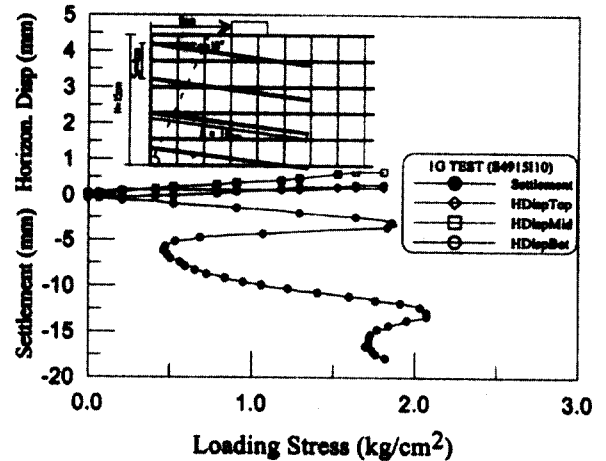


그림 4. 하중-침하-수평변위 곡선(실험번호 : S4-9-15-110)

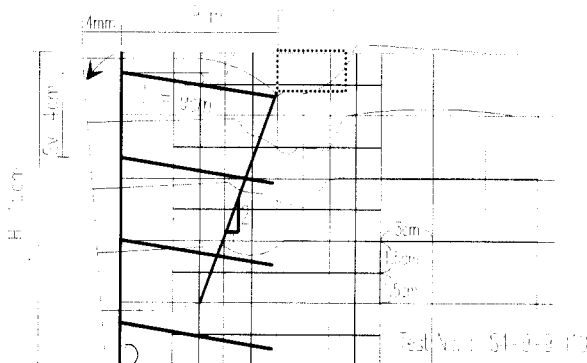


그림 5. 파괴모드(보강영역밖의 재하)

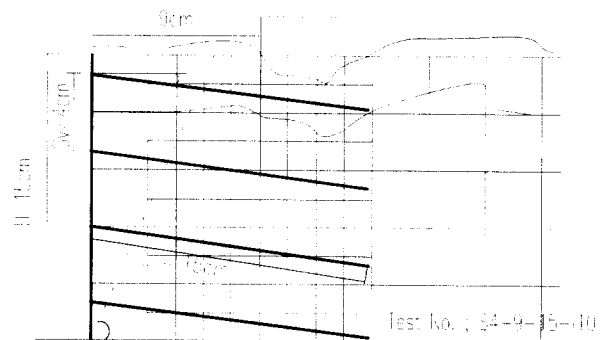


그림 6. 파괴모드(보강영역내의 재하)

벽체쪽으로 이동하면서 벽체의 선단을 향해 확장되어 간다.

그러나, 네일로 보강된 영역의 염색띠는 원형을 그대로 유지하고 있는 것으로 보아 보강토체가 하나의 강성 블록으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 또한 소성파괴가 발생된 전단영역의 경계선을 그어보면 수평 1에 대해 수직 2의 경사로 형성된다. 이는 보강토 용벽의 지표면에 대상기초를 재하했을 경우, 보강재상에 작용하는 인장력을 산정하기 위해 Schlosser & Long (1975)이 제안한 2:1 응력분포 선과 일치함을 관찰할 수 있었다. 이와는 반대로 그림 6을 보면 기초의 재하위치가 보강영역 내에 존재할 경우, 벽체의 수평변위는 거의 발생하지 않고 기초가 재하된 상부 지표면 근처에서만 파괴가 발생하는 것으로 미루어 볼 때, 소일네일링 구조물의 전반적인 거동보다는 지지력(bearing capacity) 문제로 간주되므로 하중-침하 곡선상의 1, 2, 3차 극한점은 기초 재하 판 아래에서 형성되는 전단영역이 확장됨에 따라 만나는 네일의 영향에 의한 것으로 추정된다.

3.2 매개변수의 변화에 따른 영향

매개변수의 변화에 따른 영향을 알아보기 위하여 네일의 설치간격(S_v, S_h), 네일길이(L_n), 설치각(θ), 하중 재하위치(LP) 등을 변화시키면서 수행된 실험결과로부터 얻은 하중-침하 곡선, 극한지지력을 기준으로 각각의 영향을 비교분석하였다.

먼저, 네일의 설치간격에 따른 영향을 알아보기 위하여 lg 실험에서 네일의 설치각($=10^\circ$)과 재하위치(보강영역 밖: 9cm) 그리고 네일길이를 9cm로 고정시킨 후, 보강네일의 배열을 각각 2열 3층(10cm×5cm), 4열 3층(5cm×5cm), 5열 4층(4cm×4cm)으로 변화시키면서 실험을 수행하여 가해진 재하응력에 따른 기초아래에서의 침하량을 그림 7에 도시하였다.

그림 7에서 보는 것처럼 기초에 가해진 재하응력은 최대강도(peak strength)를 지나 잔류강도(residual strength)에 도달할 때까지 변형을 연화구간을 나타내는데, 이는 네일로 보강된 지반의 파괴거동이 미끄러짐 파괴에 의해 지배됨을 알 수 있다. 또한, 보강네일의 설치간격이 조밀해질수록 지반보강효과의 증대로 인하여 극한지지력이 증가함을 알 수 있다. 그러나, 이와 같이 네일로 보강된 영역 밖에 하중이 재하될 경우, 그림 5의 파괴모드에서 볼 수 있듯이 파괴면이 모형기초의 우단과 벽체

의 선단을 중심으로 형성되어 네일로 보강된 지반은 마치 하나의 강성토체처럼 거동하는데, 그 이유는 지반강성 증가 효과에 기인한 것으로 사료된다.

그림 8~10은 2열 3층, 4열 3층, 5열 4층에 대한 가해진 재하응력에 따른 전면벽의 수평변위를 나타낸 것으로

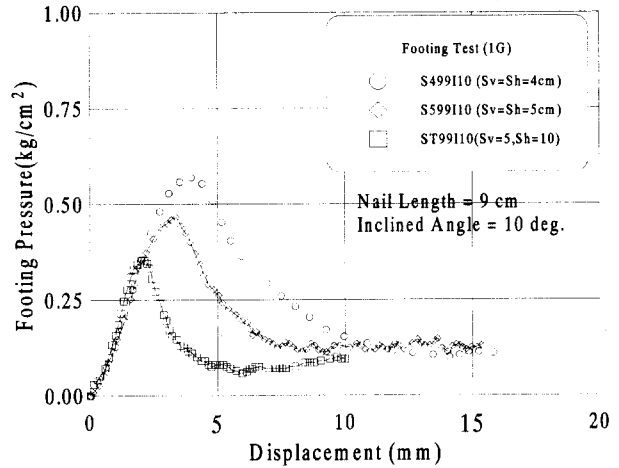


그림 7. 네일의 설치간격에 따른 영향(1g)

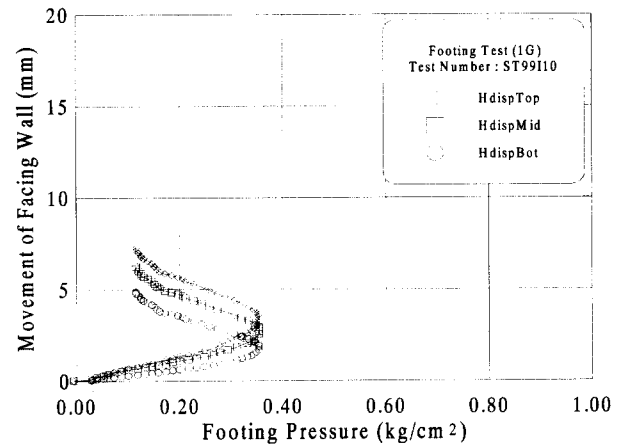


그림 8. 재하응력에 따른 벽체의 수평변위(ST9-9-110 실험)

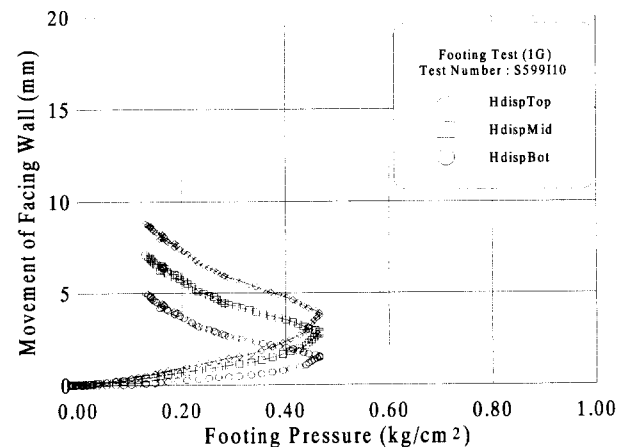


그림 9. 재하응력에 따른 벽체의 이동변위(S5-9-9-110 실험)

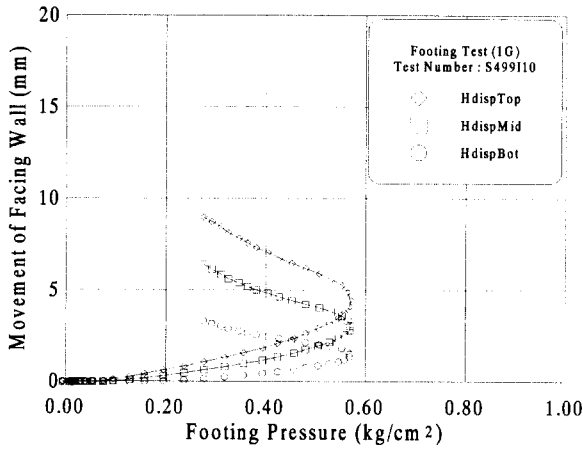


그림 10. 재하응력에 따른 벽체의 이동변위(S4-9-9-110 실험)

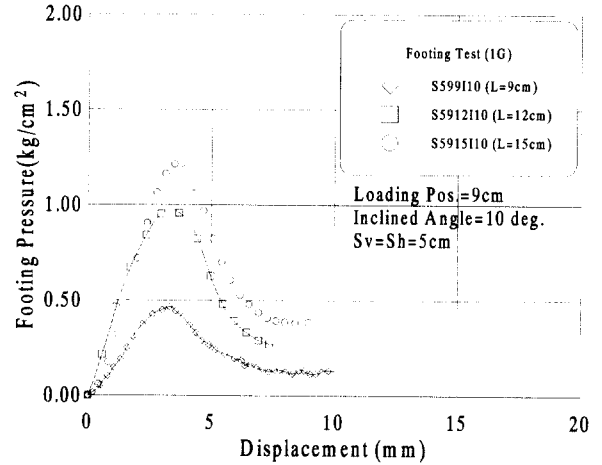


그림 11. 네일 길이에 따른 영향(1g)

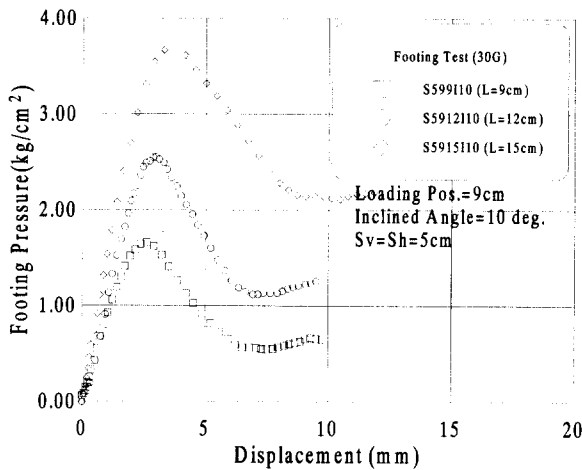


그림 12. 네일 길이에 따른 영향(30g)

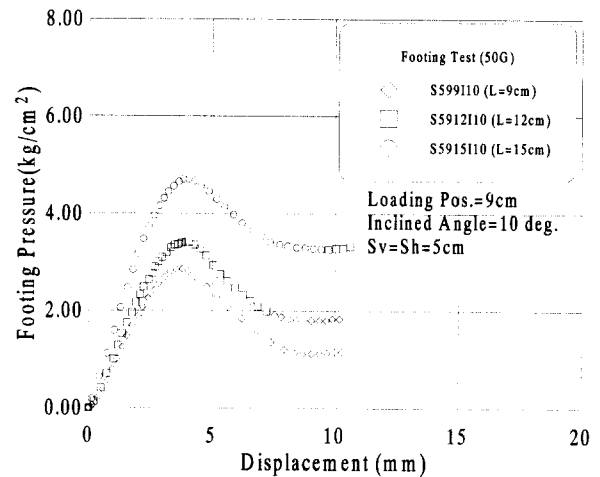


그림 13. 네일 길이에 따른 영향(50g)

네일의 간격이 조밀해질수록 벽체의 수평변위는 억제되며, 극한하중에 대한 전면벽의 수평변위는 0.5 -5mm 범위로 벽체높이에 대하여 최대 3.3% 정도의 수평변위가 유발되었다. 또한, 전면벽의 수평변위는 벽체의 하단부에서 상단부로 갈수록 점점 증가하는데, 이는 일반적인 옹벽의 거동과 흡사한 경향을 보인다.

이와 같이 재하하중에 따른 전면벽의 횡방향 이동변위는 네일의 길이, 간격, 설치각 및 상재하중의 재하위치에 따라 다소 정도의 차이는 있지만 전반적으로 네일에 의한 보강정도가 클 경우는 극한하중에 대한 전면벽의 수평변위가 감소하고, 보강정도가 작아질수록 증가하였다.

한편, 네일길이의 변화가 소일네일링 구조물의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 네일의 설치각을 10°로 고정시키고, 그 길이를 9, 12, 15cm로 변화시켰다.

그림 11은 1g 상태에서 재하위치가 9cm이고, 네일의

수평·수직 설치간격이 5cm일 때 하중-침하 곡선을 나타낸 것으로 네일길이의 증가에 따라 보강지반의 탄성계수는 증가하고, 극한점(peak)을 보인 후 연직변위의 증가에 따라 하중은 점차 감소한다. 또한, 네일길이의 증가에 따라 극한지지력 역시 증가한다. 이와 같은 결과는 30g 및 50g의 실험결과를 비교한 그림 12, 13을 보면 더욱 선명하게 나타난다.

한편, 1g 상태에서 네일의 설치각을 0°, 10°, 20°로 변화시키면서 네일의 설치각에 따른 영향을 그림 14에 도시하였다.

그 결과, 그림 14에서 보는 것처럼 1g에서는 네일 설치각에 따른 극한지지력 값의 차이를 확인할 수 없지만 30g에서 실험한 결과(그림 15 참조)를 보면 확인한 차이를 관찰할 수 있으며, 그 값의 크기는 0°, 20°, 10°순으로 크를 볼 수 있다.

이와 같은 결과는 그림 16의 50g 실험에서도 마찬가지로

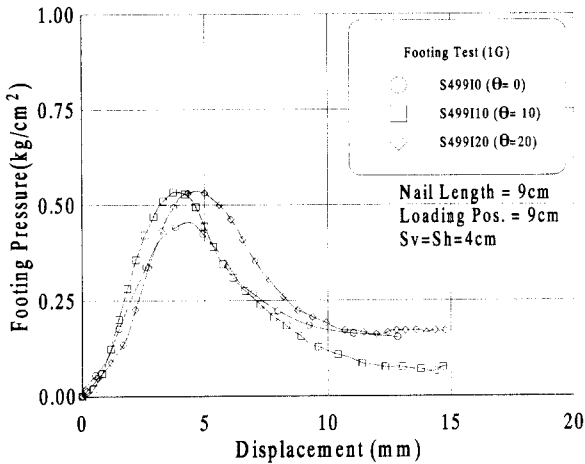


그림 14. 네일의 설치각에 따른 영향(1g)

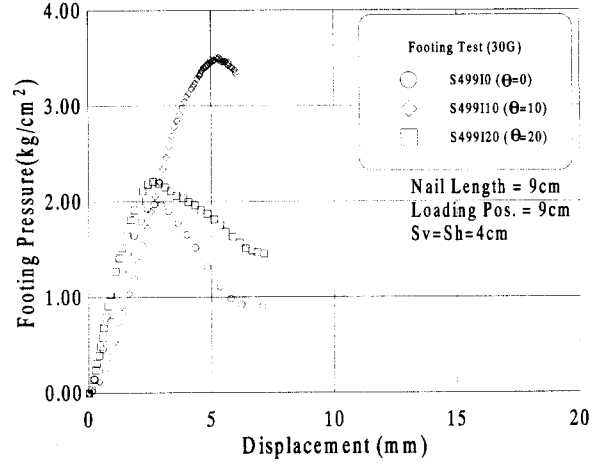


그림 15. 네일의 설치각에 따른 영향(30g)

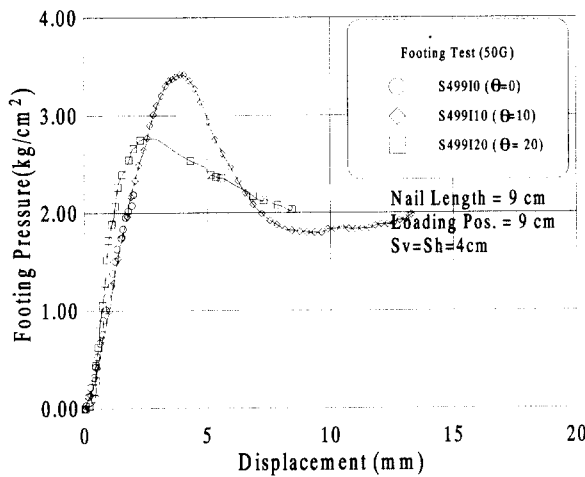


그림 16. 네일의 설치각에 따른 영향(50g)

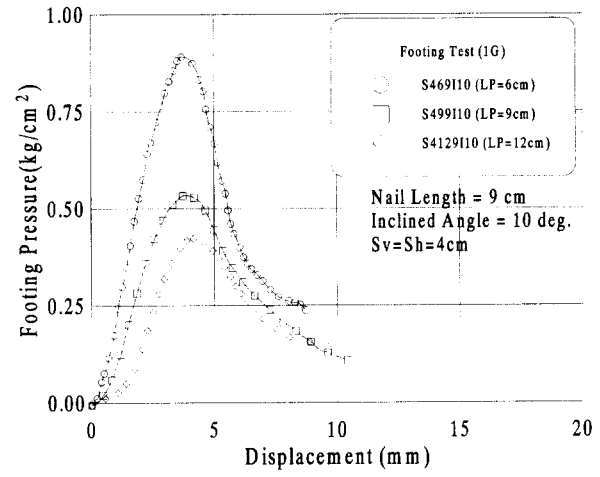


그림 17. 재하위치에 따른 영향(1g)

지의 결과를 보여준다. 이는 1g 실험에 비해 중력수준을 증가시킨 상태에서 실험할 경우, 중력수준이 증가함에 따라 네일에 작용하는 구속응력의 증가로 인해 네일과 주변 지반 사이에 유발되는 수동 저항력을 증대시킴으로서 그림 15, 16에서 보는 바와 같이 네일의 설치각도에 따른 영향을 확연히 관찰할 수 있었다.

하중재하 위치에 따른 영향을 알아보기 위하여 1g 상태에서 네일의 설치간격이 4cm이고, 길이가 9cm일 때, 상재하중의 재하위치를 보강영역내(6cm), 보강영역과 무보강 영역의 경계면(9cm), 보강영역밖(12cm)으로 변화시켜 얻은 결과를 그림 17에 도시하였다.

그림에서 보는 바와 같이 극한지지력은 네일로 보강된 영역의 경계면상에 상재하중이 작용할 경우에 가장 크며, 상재하중이 모두 네일로 보강된 영역 밖에 위치할 경우, 사면 정부로부터 12cm에 재하된 경우에 비해 9cm에 재하된 경우가 큼을 알 수 있다.

이것은 사면 정부로부터 상재하중의 재하위치를 변

화시켰을 경우에 상재하중으로 인한 지반내 연직응력이 2:1 응력분포 이론으로 작용된다고 가정했을 때, 연직응력 전달범위내에 존재하는 네일길이가 길수록 하중이 재하됨에 따라 지반과 네일사이의 수동 저항력을 증대시킴으로서 극한지지력이 증가함을 알 수 있다.

그림 18은 30g의 실험결과로 1g 실험과는 달리 극한 지지력 값의 크기는 상재하중이 네일로 보강된 영역과 무보강 영역의 경계면에 작용할 때 가장 작고, 보강영역 밖에 위치할 경우는 1g 실험과 동일하게 나타났다.

이는 중력수준의 증가로 인해 증가된 연직응력이 지반과 네일사이에서 작용하는 수동 저항력을 증대시킨 상태에서는 지지력 문제와 더불어 소일네일링 구조물의 전반적인 거동 문제를 동시에 고려함으로써 설명될 수 있다. 즉, 중력수준이 증가된 상태에서 네일로 보강된 영역의 경계면에 상재하중이 작용할 경우, 2:1 연직응력 전달 범위내에 존재하는 네일의 길이가 가장 크므로 수동 저항력 역시 가장 크게 작용한다. 한편, 보강영역밖

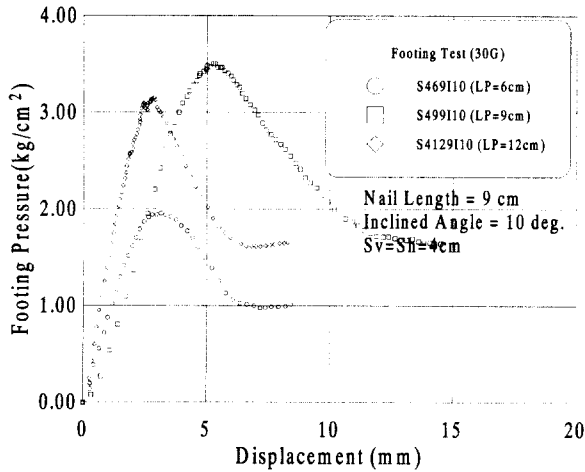


그림 18. 재하위치에 따른 영향(30g)

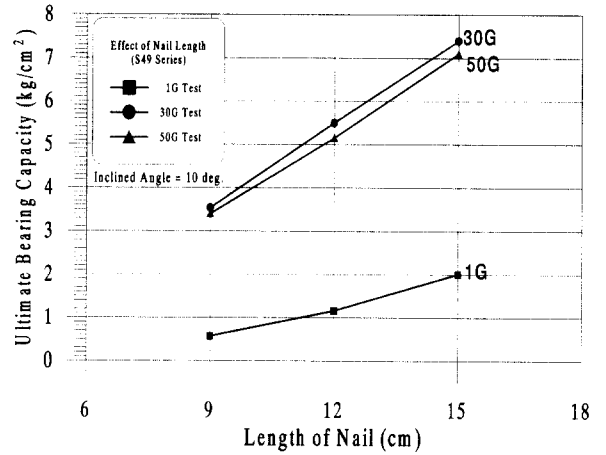


그림 19. 네일 길이에 따른 극한 지지력

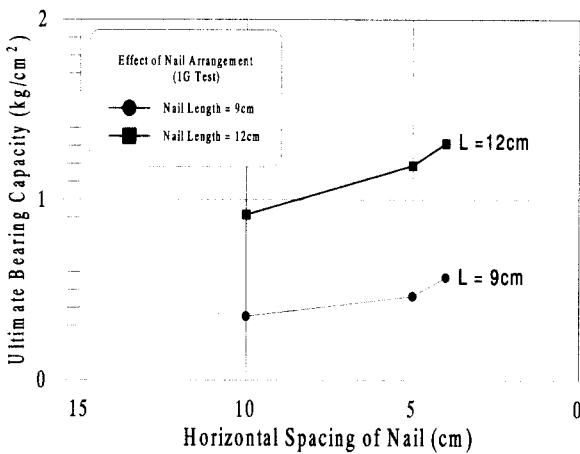


그림 20. 수평설치간격에 따른 극한지지력

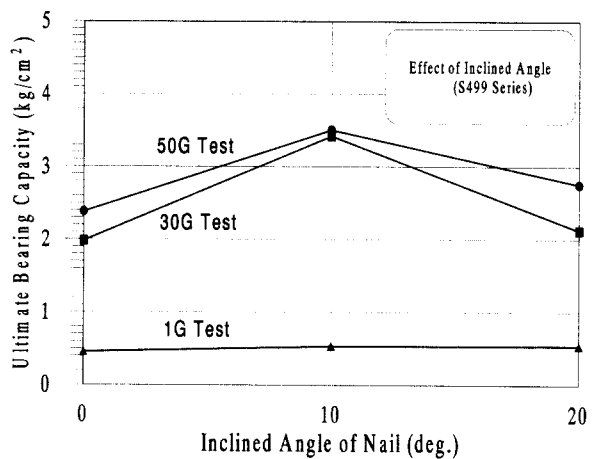


그림 21. 네일의 설치각에 따른 극한지지력

에 상재하중이 재하될 경우는 2:1 응력분포 전달 범위내에 존재하는 네일 길이가 클수록 수동 저항력이 증가하므로 극한지지력 값 역시 증가함을 알 수 있다. 특히, 보강영역 밖에 상재하중이 작용할 경우는 보강된 영역은 일반적인 옹벽과 마찬가지로 하나의 강체로 활동하게 됨으로서 극한지지력을 가장 크게 증대시킴을 알 수 있었다.

한편, 하중-침하 곡선을 바탕으로 극한지지력을 구하여 각각의 설계변수가 모형의 지지력에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

그림 19는 네일의 길이에 따른 극한지지력 값의 변화를 나타낸 것으로, 그림에서 보면 네일의 길이가 길어질수록 극한지지력은 증가함을 알 수 있다. 그러나, 극한지지력 값은 50g 실험에 비해 30g 실험일 경우가 더 크다. 이는 주변지반과 네일 사이에 작용하는 한계 수동 저항력의 크기에 따른 것으로 보인다.

그림 20은 1g 실험에서 네일의 수평 설치간격을 각각

10cm, 5cm, 4cm로 변화시켰을 때의 극한지지력 값으로 네일의 설치간격이 조밀해질수록 증가함을 알 수 있다.

그림 21을 보면 1g 실험에서는 네일의 설치각에 따른 극한지지력 값의 차이를 찾아볼 수 없으나 30g, 50g 실험에서는 설치각에 따른 극한지지력 값의 변화를 확연히 관찰할 수 있었다. 극한지지력은 네일 설치각 10°를 정점으로 하여 감소하므로 최적의 네일 삽입각은 10°임을 알 수 있었다.

3.3 중력수준의 증가에 따른 영향

중력수준의 증가가 소일네일링 구조물의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 네일의 간격(4cm)과 재하위치(9cm) 그리고 설치각(10°)을 일정하게 유지한 후, 중력수준을 1g, 30g, 50g로 변화시키면서 실시한 실험 결과를 그림 22-24에 도시하였다.

그림 22는 네일길이가 9cm인 경우로 중력수준이 1g,

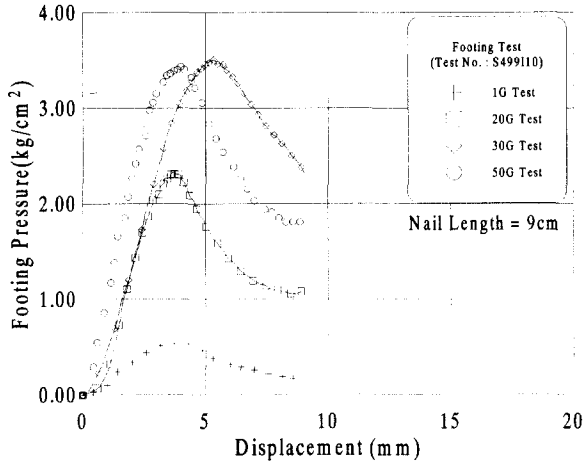


그림 22. 중력수준에 따른 영향(L=9cm)

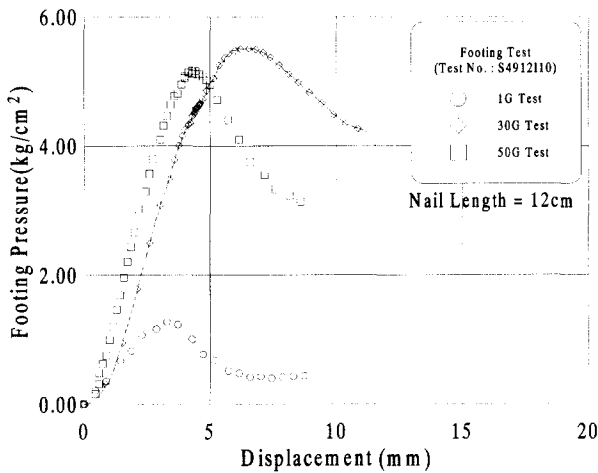


그림 23. 중력수준에 따른 영향(L=12cm)

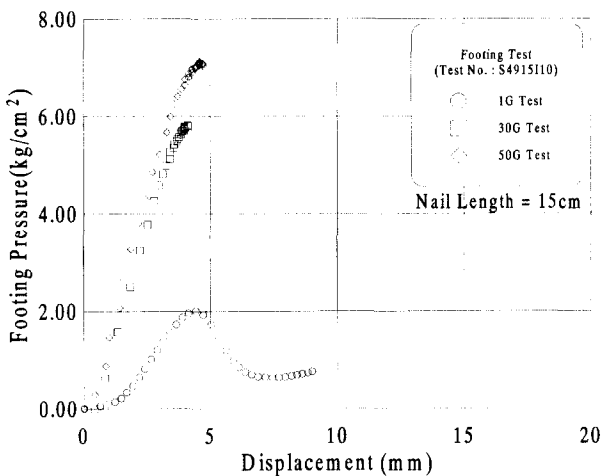


그림 24. 중력수준에 따른 영향(L=15cm)

20g, 30g로 증가함에 따라 극한지지력 역시 증가하지만 30g 및 50g에서 수행된 재하실험 결과를 보면 중력수준의 증가효과가 극한지지력에 미치는 영향은 매우 미소함을 알 수 있다. 이러한 현상은 네일길이가 12cm인 경우도 마찬가지로의 결과를 보여준다. 그러나, 네일길이가

15cm인 경우는 9, 12cm인 경우와는 달리 중력수준이 증가함에 따라 극한지지력이 역시 커짐을 볼 수 있다. 이와 같이 중력수준에 따른 극한지지력 값의 변화는 다음과 같은 이유로 설명될 수 있다.

일반적으로 소일 네일링 구조물의 배면 지표면상에 상재하중이 재하되는 경우, 1g 실험에서는 지반의 자중에 의한 효과를 무시할 수 있을 정도로 연직응력이 작으므로 단순히 상재하중에 의해 모형을 파괴되는 극한 지지력 문제로 간주되지만 중력수준이 증가하여 구속응력이 커지게 되면 지반의 자중에 의한 효과와 상재하중에 의한 효과를 동시에 지니게 된다. 즉, 충분한 인장강도를 갖고 있는 네일인 경우 모형의 파괴는 네일과 주변지반 사이에 유발되는 마찰 저항력의 부족으로 인해 미끄러짐 파괴(pullout failure)가 발생하게 된다. 이와 같이 미끄러짐 파괴에 대한 저항력 즉, 인발에 대한 수동저항력은 한계 마찰응력($f_{max} = \mu^* \gamma h$)과 보강네일의 표면적의 곱으로 표시할 수 있다. 따라서 네일의 표면에서 유발되는 수동인발 저항력이 크면 클수록 극한지지력은 점점 더 증가하게 된다. 그림 22, 23에서도 알 수 있듯이 중력수준이 1g에서 30g에 도달할 때 까지는 네일에 작용하는 연직 유효응력의 증가로 인해 인발에 대한 수동 저항력이 증가하므로 극한지지력 역시 증가하지만 30g 이상에서는 네일에 작용하는 마찰응력이 한계상태 즉, 한계 마찰응력에 도달함으로써 극한지지력 값의 차이를 보이지 않는 것으로 추정된다. 그러나, 그림 24에서 보는 것처럼 동일한 횡단면적을 갖는 네일길이가 일정길이 이상으로 증가하게 되면 수동 인발저항력을 유발시키는 네일주변의 표면적이 확장됨으로서 중력수준의 증가에 따라 극한지지력 역시 증가하는 것으로 보여진다.

3.4 파괴 메카니즘

중력수준, 네일의 길이, 설치간격, 설치 경사각 및 하중재하 위치등을 다양하게 변화시키면서 실험을 수행한 후, 모형지반에 일정한 층별로 강사시킨 염색사의 불연속면을 사진촬영(그림 25, 26 참조)하여 파괴메카니즘을 분석하였다.

그림 27에 도시한 바와 같이 상재하중 재하시 모형구조물의 파괴 메카니즘은 상재하중의 재하위치에 의해 지배적으로 형성됨을 알 수 있으며, 그의 파괴형태는 벽체의 저면 선단부와 기초의 우단으로 연결되는 원호 내



그림 25. 재하실험시 관찰된 파괴면의 형상(S-4-9-9-110)

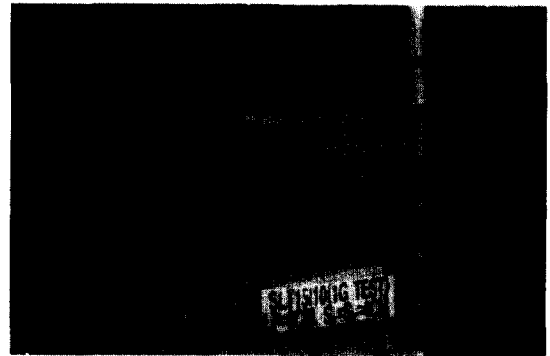
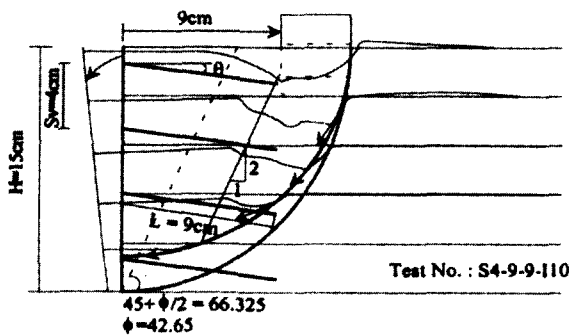
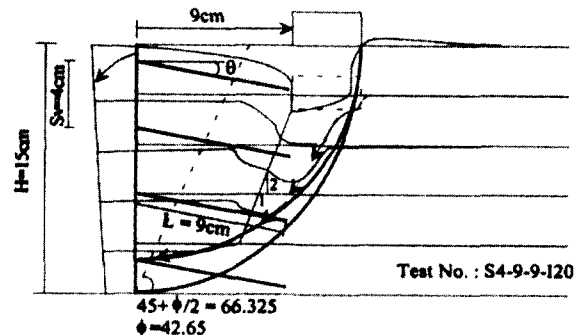


그림 26. 재하실험시 관찰된 파괴면의 형상(S4-9-15-110)



(a) $\theta = 10^\circ$



(b) $\theta = 20^\circ$

그림 27. 상재하중 재하시 파괴면의 형상

지 포물선 형태의 파괴면을 관찰할 수 있었다.

이와 같은 파괴형태는 네일의 길이 및 설치간격과 관련하여 보강정도가 비교적 과소한 경우에 주로 발생하는 것으로 관찰되며, 이와는 반대로 네일의 길이 및 설치간격이 비교적 과다할 경우 얇은기초의 국부전단 파괴형태와 유사한 활동선이 관찰되었다(그림 26 참조). 이와 같은 결과를 종합해 보면, 상재하중 재하시 소일네일링 구조물의 파괴형태는 상재하중의 재하위치에 따라 지배적으로 형성되며, 벽체의 저면 선단부와 기초판의 우단으로 연결되는 원호 내지 포물선 형태의 파괴면이 형성됨을 알 수 있다. 따라서, 소일네일링 구조물의 설계 및 해석과 관련하여 가장 큰 영향을 주는 변수의 하나인 파괴면 설정은 벽체의 저면 선단부와 재하판의 오른쪽 끝을 통과하는 원호 또는 포물선으로 가정함이 타당하다고 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 네일의 길이 및 간격, 네일의 설치각, 하중재하위치, 재하시의 중력수준 등을 다양하게 변화시키면서 매개변수가 하중재하시 소일네일링 구조물의

거동 및 파괴 메카니즘에 미치는 영향을 조사 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 중력수준의 증가효과가 극한 지지력에 미치는 영향에 관한 재하실험 결과로부터 중력수준이 30g 이상으로 증가해도 극한 지지력 값의 변화가 없는 것으로 보아 한계 수동 인발 저항력 개념이 유효한 것으로 판단된다.
- (2) 상재하중의 재하위치 변화가 극한지지력에 미치는 영향은 1g 실험에서는 단순히 지지력 문제로 귀결되지만 30g, 50g 실험에서는 지지력 문제와 소일네일링 구조물의 전반적인 거동문제를 동시에 고려하여 해석함이 타당하다.
- (3) 상재하중실험 결과로부터 상재하중에 의한 네일보강 영역내에서의 연직응력은 2:1 응력분포법에 의하여 확산됨을 확인하였다.
- (4) 1g 실험에서는 네일 설치각에 따른 극한지지력의 변화를 관찰할 수 없으나 중력수준을 증가시킨 경우, 그 값은 현저한 차이를 나타냄을 볼 때, 원심모형실험은 각 설계변수에 따른 영향을 확인하는데 있어서

매우 효율적인 실험으로 판단된다.

- (5) 재하실험을 통하여 관찰된 파괴메카니즘은 상재하중의 재하위치에 따라 지배적으로 형성되며, 파괴면의 형상은 벽체의 저면 선단부와 기초판의 우단으로 연결되는 원호 내지 포물선 형태로 형성됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김준석, 이상덕, 이석태, 이승래, 김두년(1994), "Soil Nailing 공법의 파괴구조에 관한 실험적 연구", 학술발표회 논문집(I), pp.589~592.
2. 김홍택, 강인구, 이제우(1994), "Soil Nailing 공법의 안정해석 : 지반-보강재 상호작용의 영향", 학술발표회 논문집(I), pp.593~596.
3. 유남재, 김영길, 이명옥 (1994), "강원대학교 원심모형시험기의 설치", 대한토목학회 학술발표회 개요집, pp.781~784.
4. Bang, S., Shen, C. K. & Romstad, K. M.(1980), "Analysis of an Earth Reinforcing System for Deep Excavation", Transportation Research Record, No.749.
5. Bruce, D., & Jewell, R. A.(19807), "Soil Nailing : Application and Practice, Part 2," Ground Engineering, Jan., pp.21~33.
6. Corte, J., F.(1988), "Design of Geotechnical Centrifuge", Proc. of the International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling, Paris, 25~27, April.
7. Gässler, G. & Gudehus, G.(1983), "Soil Nailing : Statistical Design", Improvement of Ground : Proc. of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, Finland, May, Vol.2, pp.491~494.
8. Juran, I. & Elias, V.(1990), "Behaviour and Working Stress Design of Soil Nailed Retaining Structures", Performance of Reinforced Soil Structures, British Geotechnical Society.
9. Ko, H. Y. & Sture, S.(1981), "State of Art : Data Reduction and Application for Analytical Modeling" Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM, STP 740 ASCE, pp.329~386.
10. Leung, C. F., Lee, F. H. & Tan, T. S.(1994), "Keynote Lecture and VELACS Report", Proc. of the International Conference Centrifuge 94, Singapore/31 August-2 September.
11. Pulmelle, C. & Schlosser, F.(1990), "A French National Research Project on Soil Nailing : CLOUTERRE", Performance of Reinforced Soil Structures, British Geotechnical Society.
12. Schlosser, F.(1983), "Analogies et differences dans le Comportement et le calcul des Ouvrages de Soutenement en Terre armee et par Clouage du Sol", Annales de L' Institut Technique de Batiment et des Travaux Publiques, No.148, pp.26~38.
13. Shen, C. K., Bang, S., Herrmann, L. R. & Rornstad, K. M.(1978), "A Reinforced Lateral Earth Support System", Proc. of the Symposium on Earth Reinforcement, ASCE, Apr., pp.764~793.
14. Shen, C. K., Kim, Y. S., Bang, S. & Mitchell, J. F.(1982), "Centrifugal Modeling of Lateral Earth Support", ASCE, Vol.108, GT9, pp.1150~1164.
15. Shen, C. K., Bang, S. & Herrmann, L. R.(1981 a), "Ground Movement Analysis of Earth Support System", ASCE, Vol.107, GT12, pp.1610~1624.
16. Shen, C. K., Bang, S., Romstad, K. M., Kulchin, L. & Denatale, J. S.(1981 b), "Field Measurement of an Earth Support System", ASCE, Vol.107, GT12, pp.1625~1642.
17. Stocker, M. F., Korber, G. W., Gässler G. & Gudehus G.(1979), "Soil Nailing", Int. Conf. on Soil Reinforcement, Paris, France, 2, pp.469~474.

(접수일자 2000. 10. 10)