

다철근 스프링 네일링 공법의 보강효과 검토에 관한 연구

이 충 호 (주/ 알지오이엔씨 대표이사)

정 영 진 (주/ 알지오이엔씨 차장)

김 동 식 (주/ KCC건설 이사)

채 영 수 (수원대학교 토목공학과 교수)

A Study on Reinforcing Effect of Multi-Bar Spring Nailing

Lee, Choong-Ho · Jung, Young-Jin ·
Kim, Dong-Sik · Chae, Young-Su

Abstract

This study investigates the reinforcing effects of the Multi-bar Spring nails with respect to the conventional Soil-nails in artificial slopes. Based on wide experience related to design and construction, soil nails have been widely applied to reinforce slope in the world. Multi-bar spring nails are one of the improved soil nailing methods. These method maximizes bending, shearing, pull-out resistance for those multi-nails, not unit nail, that are inserted in the borehole using special spacer at regular intervals. In addition, because cutting plane is confined effect resulting from a pressured plate at the end of the nails with compression spring equipment, slope stability is secured using MS-nailing method. Analyzing bending, pull-out, shearing

condition of MS-nail, it was examined throughly elastic region, load transfer capacity, reinforcing effect on cutting plate of MS-nails. In addition, Pilot and laboratory tests, numerical analysis were carried out to verify the superiority of MS-nailing method. In case, MS nailing method is applied to reinforce artificial slope, it was analyzed that bending, pull-out, shearing resistance was increased more than existing nailing method was applied. In this study, it was shown that surface failure was more or less prevented using MS-nailing method, confining effect on cutting plane using spring stuck to flexible equipment.

[Key words : Soil Nails, Multi Bar Spring Nails, Slope Stability, bending stiffness, Multi Bar Nail, Spring Nail, Model Test, Field Test, Finite Element Analysis]

I. 서 론

현재 우리나라의 국도, 고속도로 및 철도를 비롯하여 지방도, 주거지 및 사업장 주위에 파악이 안 될 정도로 많은 갯수의 비탈면 시설물이 존재하고 있다. 이러한 막대한 양의 시설물의 안정성은 국민의 생명과 재산에 직간접적인 영향을 미칠 수 있으므로 비탈면 안정에 대한 조사, 해석 및 설계, 시공 등의 기술개발의 필요성이 급격하게 부각되고 있으며, 신설 비탈면의 안정성증대 방안과 기존 비탈면의 안정성 유지관리 체계를 구축하는 것이 국가적 과제로 대두되고 있다.

비탈면의 붕괴를 효과적으로 방지하기 위한 대책은 대상지역의 지질학적, 지형학적 및 암반공학적 특성에 따라 달라질 수 있다. 종래에는 소규모 사면 또는 자연사면을 대상으로 경사면을 식물이나 불록 또는 뿔어붙임 콘크리트로 피복하여 강우에 의한 세굴을 방지하는 수동적인 보강이나 사면의 구배를 완만하게 하는 공법이 많이 사용되었다. 최근에는 절취 비탈면의 대형화로 이들 공법으로 비탈면 붕괴를 억제시키기에는 한계가 있어 억지말뚝, anchor, rock bolt, nailing, 옹벽 등으로 비탈면의 저항력을 증대시키는 적극적인 공법이 많이 사용되고 있다.

본 연구에서는 적극적인 비탈면 보강공법의 일환으로 널리 활용되고 있는 soil nailing 공법의 품질을 개선하여, 최근 건설교통부 신기술 제540호로 등록된 다철근 스프링 nail링(multi bar spring nailing, 이하는 MS nailing이라 함) 공법을 대상으로 현장 시험시공과 실내모형시험 및 수치해석을 통하여 일반 nailing 공법과 비교 분석함으로써 적용효과를 검증하였다.

1. Soil nailing 공법

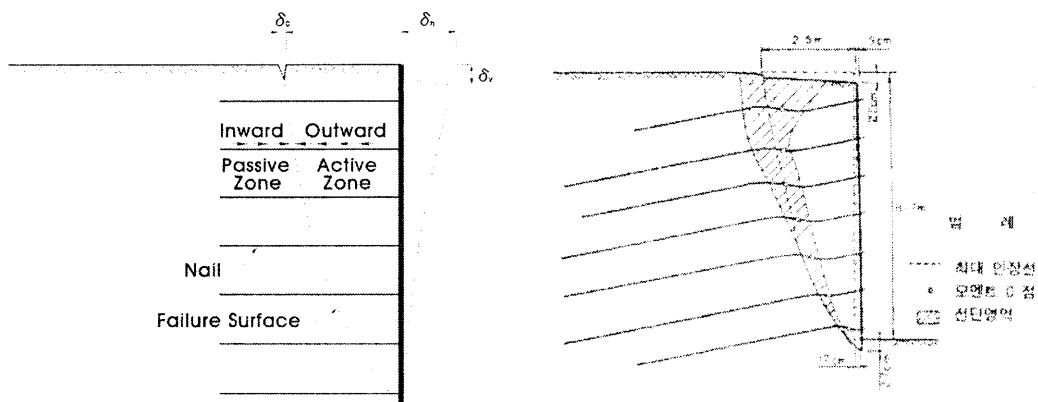
Soil nailing 공법은 강봉과 같은 비인장성 보강재(일반적으로 이형철근)를 적용한 지반보강공법으로 토체와 보강재 사이에 발생하는 상대변위에 따라 보강효과가 발현되는 수동보강 공법이다.

Soil nailing 공법은 토체를 지지하는 것이 아니라 토체를 보강하는 개념으로 많은 수의 nail이 하나의 형태로 설치되어 지반자체가 중력식 옹벽과 같이 안정된 블럭으로 거동 하게 된다. 즉 보강된 토체 자체가 주된 구조요소로 작용하고 전면판은 보강재와 보강재 사이에 국부적인 안정만을 유지시켜 주는 역할을 한다.

무보강 지반의 굴착시에는 굴착 측의 구속응력이 급감하여 mohr원이 파괴포락선에 접하면서 파괴가 발생하게 된다. 그러나 nail을 이용하여 보강을 하게 되면 보강재 사이의 흙이 보강재들에 의해 구속되어 쉽게 변형되지 않으므로 구속응력 감소를 줄일 수 있고 mohr원은 파괴포락선까지 도달하지 않는 안정한 상태를 유지할 수 있다.

Soil nailing 공법으로 보강된 비탈면에서의 거동은 변위해석방법과 한계평형해석방법을 토대로 한 분석이 일반적이며 nail과 파괴면이 교차하는 지점에서의 변위 벡터 성분 파악이 중요하다. nail에 발현되는 힘은 구조물의 기하학적인 형태, 흙의 파괴거동, nail의 파괴거동 및 두 재료의 상호작용에 의한 거동 등을 토대로 결정되며 nail의 효과가 발휘되려면 한계상태에서 흙과 nail이 같이 거동한다는 가정이 필요하다. 다시 말해 nail은 연성, 혹은 점차 소성 상태로 변화한다는 전제 조건에서 시작한다.

<그림 1-1> Nail로 보강된 벽체의 파괴 거동



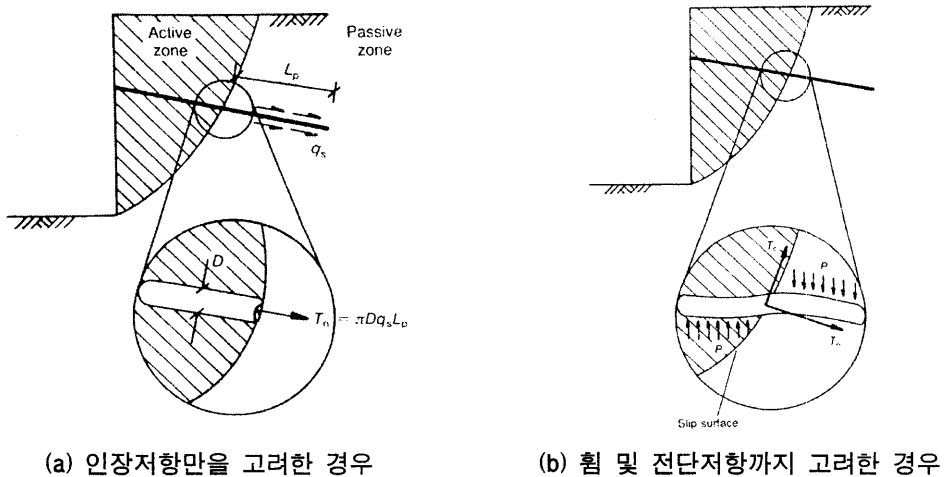
(a) 수평nail로 보강된 수직 벽체의 파괴형상 개념도

(b) CEPTP No.1 실험벽체의 파괴형상 (Schlosser, 1986)

그림 1-1의 (a)와 같이 수평 nail로 보강된 수직에 가까운 벽체에서는 nail의 인장응력에 의한 보강 효과가 지배적이고 전단과 휨응력에 대한 분포는 적다(Jewell and Pedley, 1991; Schlosser, 1991). 이러한 이유로 실제 설계에서 사용하중 조건하의 전단과 휨저항은 무시할 수 있고 파괴조건에서도 마찬가지이다. 일반적으로 휨과 전단응력은 사용하중 상태에서 인장응력의 10%보다 작다. 이로 인해 대부분의 nail 설계나 해석프로그램에서도 인장하중만 고려한 간편 설계법이 널리 사용된다.

그러나 이러한 설계개념은 수평 혹은 수평에 가까운 각도로 nail이 설치된 벽체구조물의 경우에 유효한 것으로 비탈면과 같이 nail의 휨거동이 뚜렷한 경우에는 적용성의 한계가 있다. 특히 Schlosser(1991)는 극한상태로 갈수록 전단 및 휨응력의 영향이 증가하고 있음을 보여준다. 따라서 인장력만을 고려하는 현재의 간편 설계개념으로 nail보강 비탈면을 설계할 경우 휨거동을 고려하지 않아도 될 정도의 충분한 휨저항을 확보하는 방안을 강구해야 한다. 그림 1-2는 nail에 발생하는 저항력을 도시한 것으로 (a)는 인장저항만을 고려한 경우를, (b)는 휨 및 전단저항까지 고려한 경우를 나타냈다.

<그림 1-2> Nail의 보강메커니즘(Ortigao, 1995)



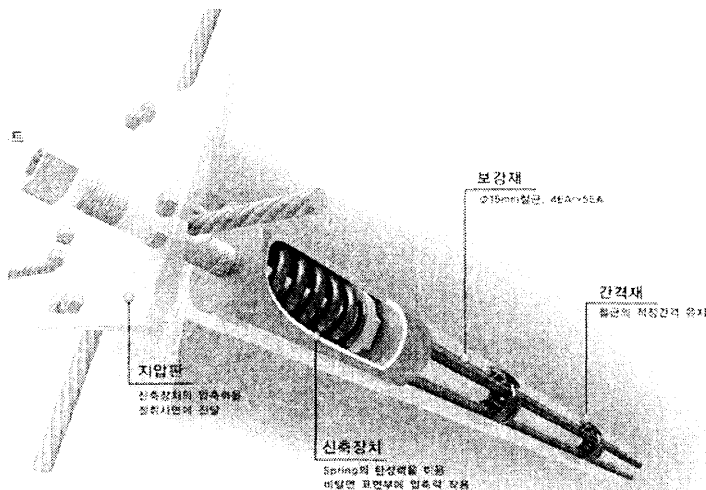
2. MS nailing 공법

MS nailing 공법은 천공홀 중앙에 단일 철근(보강재)이 배치되어 비탈면 활동에 의한 nail의 휨거동시, 인장에 취약한 그라우트가 인장하중을 부담하여 그라우트가 쉽게 소성파괴되는 구조적인 문제점과 일정간격이상으로 nail을 느슨하게 설치하여 보강할 경우 표면의 얇은 파괴에 취약한 기존 nailing 공법의 단점을 보완한 기술이다.

이러한 MS nailing 공법은 천공홀 내에 단철근이 아닌 다철근(4EA~5EA)을 특수 간격재를 이용하여 일정한 간격으로 배열함으로써, 철근단면적 및 부착면적을 증가시켜 인발 저항력을 증대시키고, nail의 휨거동시 인장축에 배열된 철근으로 휨강성이 증가되어 전단 및 휨 저항력을 증대시킴으로서 보강 비탈면의 안정성을 증가시킨다. 또한 보강재(이형철근) 두부에 부착된 신축장치(압축 스프링 내장)의 탄성복원력을 이용하여 와이어 로프와 연결된 지압판을 비탈면에 압착시킴으로서 낙석 및 낙반, 세굴 등의 표면파괴를 적극적으로 억제할 수 있다.

표면과 비탈면을 동시에 보강할 수 있는 MS nailing 공법의 구조는 그림 1-3과 같이 다수(4본~5본)의 이형철근, 특수 간격재, 압축스프링이 내장된 신축장치, 지압판, 고정형 너트 등으로 구성된다.

<그림 1-3> MS nail의 구조

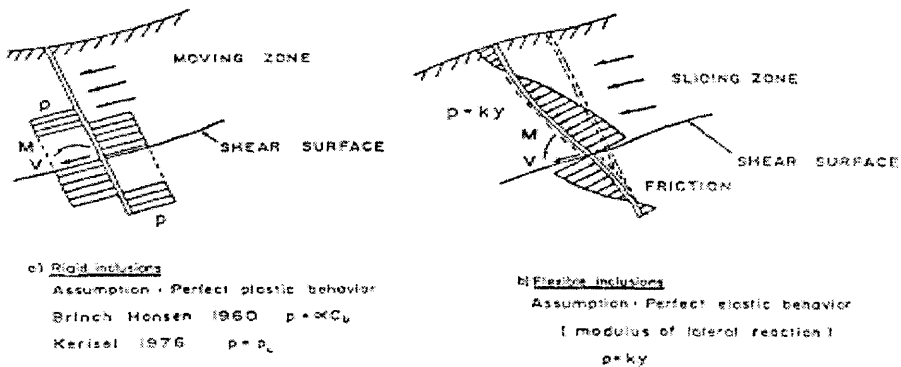


3. 연구 방법

기존의 soil nailing에서는 일반적으로 D25mm~29mm 이형철근 한가닥을 천공홀 중앙에 삽입한 철근콘크리트 부재를 형성하여 지반의 변형에 저항하였으나 본 연구대상인 MS nailing은 D16mm 철근 (4~5)가닥을 사용하여 철근의 단면적이 증가된 철근콘크리트 부재를 형성한다. 따라서 nail체의 전체 전단력과 휨강성이 증대되고, 그라우팅 작업시 특수 간격재를 사용하여 설치된 철근이 천공홀내에서 일정한 간격을 유지함으로써 철근과 콘크리트와의 부착력 또한 증대시켰다.

Nail과 같이 소구경 구조부재로 이루어진 연성 보강재(flexible inclusions)는 역지말 쪽으로 대표되는 강성 보강재(rigid piles)에 비해 보강재에 작용하는 토압이 한계수평 토압 P1에 이르는 데 요구되는 흙-보강재의 상대변형은 훨씬 커져 흙-보강재 사이에 마찰을 유발시킨다(그림 1-4-b). 따라서 전단력과 휨모멘트에 인장력이 추가적으로 발휘되게 된다. 보강재에 발생하는 인장력은 주로 파괴면에 대한 보강재의 설치위치에 영향을 받는다(Jewell, 1980).

<그림 1-4> Soil-reinforcement interaction in an unstable slope stabilized by nailing



따라서 연성 보강재인 nail로 보강된 지반은 인발 저항뿐만 아니라 전단저항을 통하여 지반의 전단변형에 저항하므로, 보강재에는 인장 및 전단과 더불어 휨 응력이 발생한다. 따라서 전단변형을 일으키는 지반에서 nail체가 부담하는 응력의 형태 및 크기에 대하여 연구해 볼 필요가 있다.

본 연구에서는 MS nail의 인발 저항, 전단 및 휨 저항 거동 특성을 파악하기 위하여 현장시험시공 및 실내모형실험, 각종 수치해석을 수행하였으며 시행된 시험방법과 종류 및 해석 내용은 다음과 같다.

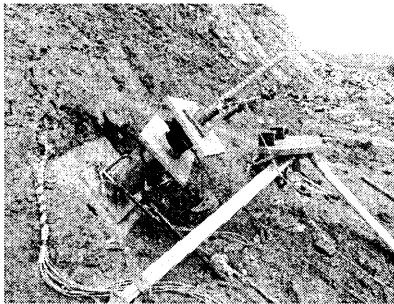
- ① 현장시험시공을 통한 MS nail의 효과 검증
 - MS nail 및 일반 nail일의 현장인발시험(verification tests, creep tests)
 - Load cell을 이용한 지압판 압착하중 확인시험
- ② 모형시험을 통한 MS nail의 효과 검증
 - MS nail 및 일반 nail의 보강효과 확인을 위한 대형전단실험
- ③ 수치해석을 통한 MS nail의 효과 검증
 - 수치해석을 통한 인발, 전단, 휨 거동특성 분석
 - 수치해석을 통한 스프링의 표면 압착효과 검증

II. 현장시험을 통한 MS nail의 효과 검증

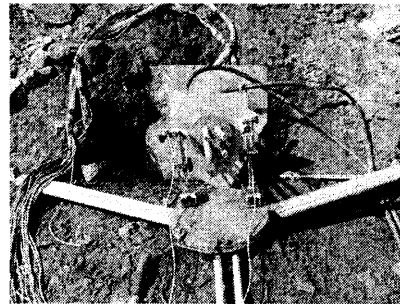
1. 현장 인발 및 하중전이 시험

MS nail의 효과를 검증하기 위해 현장 인발 및 하중전이 시험을 수행하였다. 이를 통하여 일반 nail체와 MS nail체에서 과도한 변위가 발생하지 않으면서 설계축력이 확보되는지 여부와 인발 하중에 대한 nail체의 전이 효과를 검증하였다. 본 현장 인발시험은 FHWA에서 규정하고 있는 인발시험 방법 중 verification tests 절차에 의해 수행하였으며, nail 두부에 발생하는 변위는 LVDT set를 이용하여 측정하고 재하 된 하중은 load cell을 이용하여 측정하였다. 인발시험과 연계하여 수행한 하중전이 시험은 천공홀에 삽입 전 nail체에 부착된 계측기를 통하여 보강재 및 그라우트에 작용되는 하중의 분포를 각 재하 단계별로 직접 측정하여 하중 전이 비율, 주변 마찰력 등을 확인하였다.

<그림 2-1> 현장 인발시험 전경



(a) 일반nail 인발시험 전경



(b) MS-nail 인발시험 전경

1) 하중-변위 상관관계

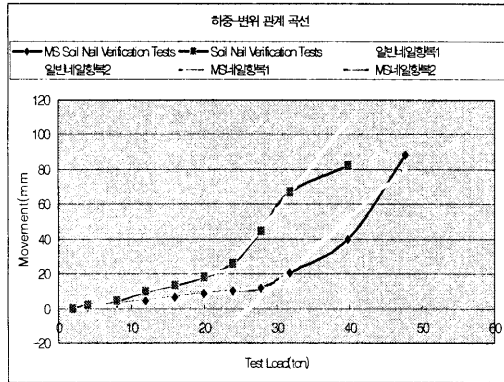
인발시험 결과 일반 nail은 하중 39.73ton에서 81.885mm, MS nail은 47.67ton에서 88.195mm의 변위가 발생하였다. nail의 파괴는 일반 nail의 경우 하중 47.6ton에서 MS nail의 경우 50ton에서 각각 발생되었으며, 항복하중은 일반 nail의 경우 23.44ton, MS nail의 경우 29.46ton이다.

2) 크리프 테스트 결과

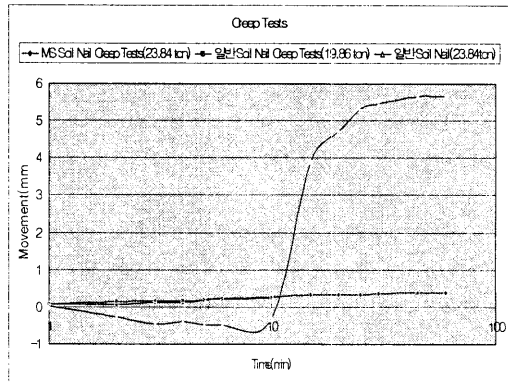
FHWA에서 규정하고 있는 verification tests는 1.50 DTL 하중에서 10분 동안 발생된 크리프량이 1mm 이하 또는 60분 동안 발생된 크리프량이 2mm 이하 이어야 한다. 시

험결과 일반 Nail은 인발하중 19.86ton과 1.50 DTL인 23.64ton에서 크리프 변위가 각각 0.250mm와 5.655mm 발생하였다. 반면 MS nail은 1.50 DTL인 23.64ton에서 크리프 변위가 최대 0.385mm 발생하였다.

<그림 2-2> MS nail과 일반 nail의 항복점



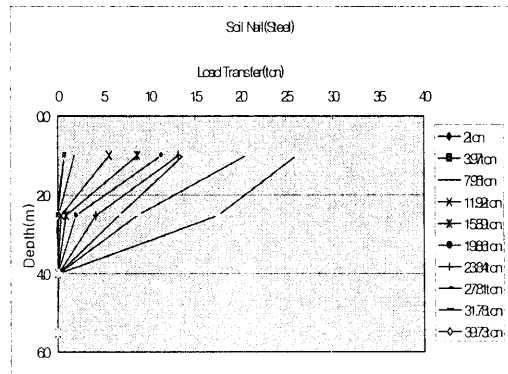
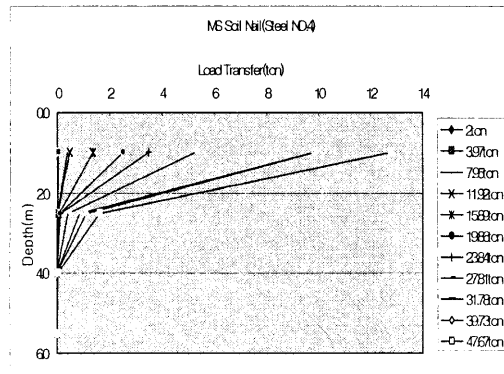
<그림 2-3> 크리프 변위



3) 하중전이 측정 결과

MS nail(steel No.4)은 일반 nail 항복하중과 근접한 23.84ton에서 깊이에 따라 하중 전이율이 14.6%, 0.5%, 0.02% 및 0.01%가 계산되고, 일반 nail은 59.6%, 13.2%, 0.2% 및 0.03%가 산출되었다. MS nail은 깊이 4.5m이하에서 전이율 0.15%로 재하된 하중 대부분을 상부에서 부담하였고, 일반 nail도 깊이 4.5m이하에서 전이율이 0.35%로 재하된 하중 대부분을 상부에서 부담하였다.

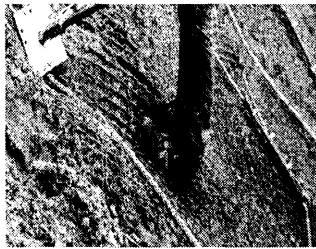
<그림 2-4> 깊이-하중전이 관계 (MS nail) <그림 2-5> 깊이-하중전이 관계 (MS nail)



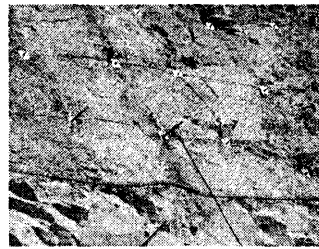
2. 지압판 압착하중 확인 시험

신축장치의 탄성복원력에 의해 비탈면 표면에 가해지는 압착력을 정량적으로 확인하기 위하여 수행한 압착하중 확인시험은 nail과 nail 사이에 연결된 보강와이어 중앙부 하단에 load cell을 설치하여 턴버클 조임, 좌, 우측 신축장치 인장 단계에 따른 압착하중 측정하였다.

<그림 2-6> 압착하중 체크



(a) 턴버클 조임(1차 압착)



(b)신축장치 인장(2차 압착)

<표 2-1> 압착하중 확인 시험 결과

구 분	압착하중(ton)	비 고
턴버클 조임시	0.112	
한쪽(좌측)만 신축장치 인장시	0.432	좌측 2.5tf 압착시공
양쪽(좌우)모두 신축장치 인장시	0.726	우측 2.5tf 압착시공

턴버클 조임 시공에 의하여 보강 와이어로프를 최대로 인장하였을 경우 비탈면에 약 0.112ton의 압착하중이 가해지는 것을 확인하였으며, 좌측과 우측 nail에 부착된 신축장치를 단계적으로 인장하여 지압판을 압착 시공하였을 때 각각 0.432ton, 0.726ton의 압착하중이 비탈면 표면에 가해지는 것으로 측정되었다.

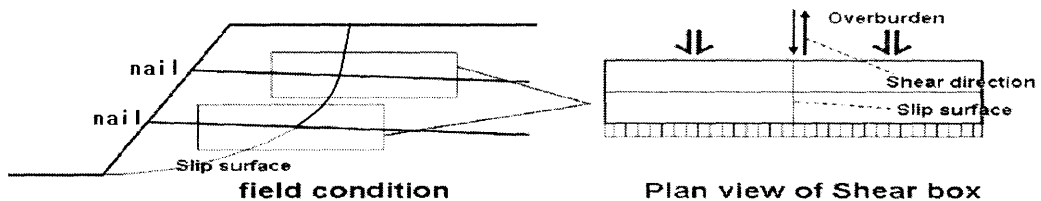
Ⅲ. 모형실험을 통한 MS nail의 효과 검증

1. 개요

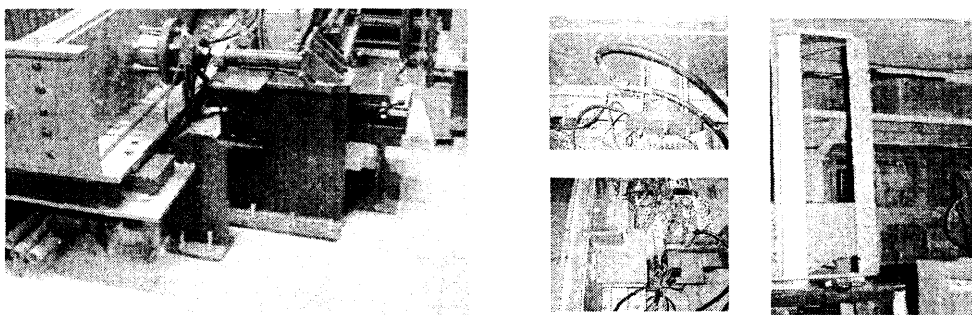
nail은 인발저항뿐 아니라 전단저항에 의하여 지반의 강도를 증가시키는 역할을 한다. nail 보강재에 있어서 인발에 의한 저항력과 보강재가 부담하는 전단력은 보강재의 강성뿐만 아니라 보강재의 삽입각도에 따라 변한다.

Jewell(1980)은 연성nail의 인장력 발휘에 대해서 최적방향이 전단표면에 그은 범선과 약 30°를 이루는 각도임을 실험적으로 입증·제시했으며, 이는 보강되지 않은 토체내의 최대 팽창방향과 일치하는 성향을 나타내었다. 그러나 본 연구에서는 MS nail이 부담하는 인장, 전단 및 휨모멘트등을 분석하기 위해서 전단표면에 범선방향으로 삽입된 MS nail의 거동을 분석하는 것이 우선적으로 필요하다고 판단되어 전단표면에 직각인 삽입각도를 갖는 경우에 대하여 대형전단실험을 수행하였다.

<그림 3-1> 현장상태를 모델링한 대형전단 실험기



<그림 3-2> 모형실험장치 구성



실험은 MS nail의 압착효과를 고려하기 위하여 보강재 두부에 재하하중을 달리하여 보강토체의 전단저항력과 보강재의 응력을 관찰하였다. 또한 무보강 지반과 일반 nail 보강 지반의 실험을 함께 수행함으로써 MS nail의 설치에 따른 보강효과를 일반 nail 보강조건과 정량적으로 비교하였다.

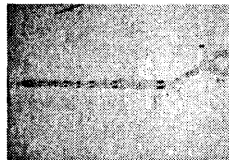
<표 3-1> 모형실험 조건 및 실험명

실험명	GR	SN	MS-1	MS-2	MS-3
실험조건	무보강 지반	일반 nail	MS nail (1ton/m' 하중재하)	MS nail (2ton/m' 하중재하)	MS nail (3ton/m' 하중재하)

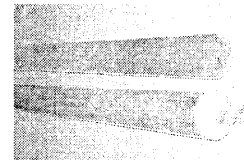
2. 모형실험 순서

대형전단실험은 무보강 조건, 일반 nail 보강 조건, MS nail 보강조건으로 구분하여 다음과 같은 순서로 수행하였다.

- ① 스트레인게이지를 방향이 틀어지지 않도록 주의해서 nail체에 부착한 후 그라우팅하여 실험재료를 준비한다.

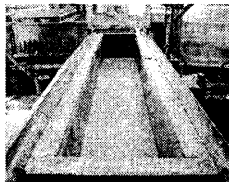


strain gauge연결

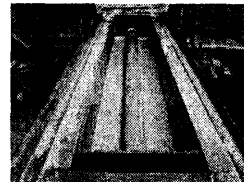


그라우팅

- ② 일정강사고와 강사량을 유지하여 강사한다. 이동속도와 강사량을 일정하게 하여 동일한 두께로 지반을 반복 조성한다. 토피고가 일정높이에 도달하면 준비된 nail체를 설치한 후 게이지를 연결한다.

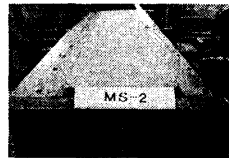


강 사



nail 보강재 설치

- ③ Nail 보강재 설치 후 일정높이로 강사를 완료하고 덮개판 및 상부가이드를 설치한다.



강사 완료

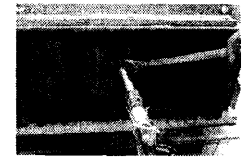


덮개판 및 상부가이드 설치

- ④ 덮개하중을 재하한다. 본 연구에서는 모든 실험에서 덮개하중 1kgf/cm'를 동일하게 재하하였다. 그리고 MS Nail의 경우 덮개하중 재하 후 지압판 압축하중의 크기만큼 너트를 조여준다.



덮개하중 재하



지압판 하중재하

- ⑤ 유압실린더를 이용하여 1mm/min의 속도로 전단한다. 전단중에 일정한 변위마다 모든 계측치를 정한다.



전단력 재하



실험 후

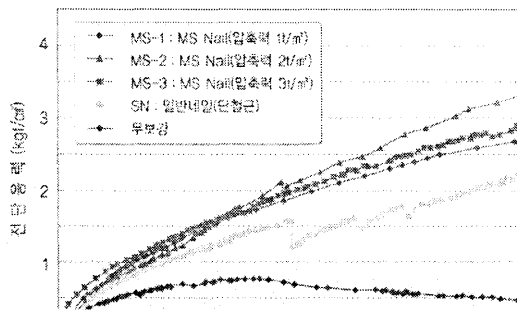
- ⑥ 스프링 하중을 달리하여 위의 과정을 반복하여 시험한다.

3. 실험결과 분석

1) 전단 저항

동일한 지반조건에서 상재하중을 1kgf/cm^2 의 크기로 재하한 후 1mm/min 의 속도로 전단하여 얻은 전단응력-전단변위의 관계는 다음과 같다. nail로 보강된 지반은 전단시 전단저항력은 뚜렷한 peak값을 나타내지 않고 지속적으로 증가하였다. 보강하지 않은 지반의 전단저항력이 최대값을 나타내는 시점에서 MS nail의 전단저항력은 일반 nail의 전단저항력에 비해 28%정도 큰 값을 보였다. MS nail로 보강된 지반은 일반 nail로 보강된 지반보다 전단저항력이 크며, 전단변위가 증가할수록 그 차이가 커졌다.

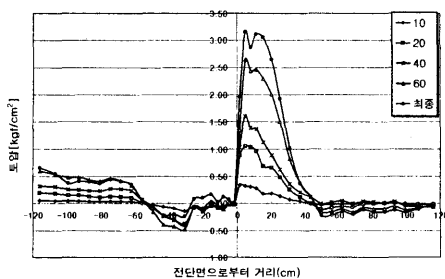
<그림 3-3> 전단변위 60mm 기준



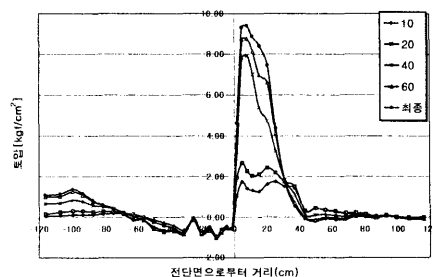
2) Nail 전단 영향권

보강재의 배면에 설치된 42개의 segment를 이용하여 nail로부터 15cm 떨어진 평면에서의 수직토압을 측정하여 nail의 전단이 진행되면서 MS nail의 지압판 압축하중에 따른 주변지반의 영향범위를 살펴볼 수 있었다.

<그림 3-4> 무보강 및 일반 nail 적용시 전단 영향범위



(a) 일반 nail



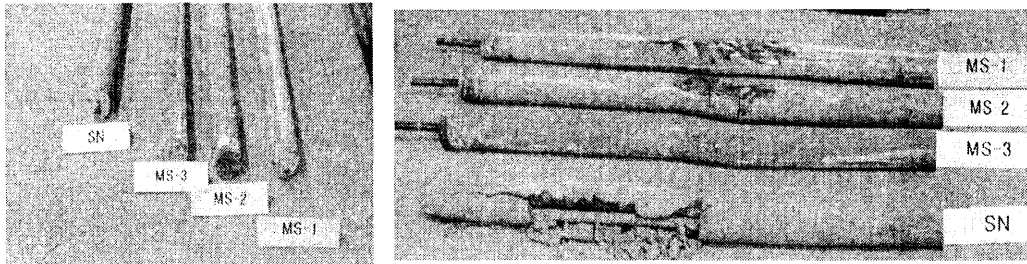
(b) MS nail

보강재와 지반의 전단거동에 의해 보강재 주변지반의 수직응력이 변하는 영역은 주로 전단면 부근에서 발생하였으며 전단면의 응력집중현상은 MS nail이 일반 nail에 비해 약 3배가량 크게 나타났다.

3) Nail체의 crack 비교

실험 후 nail에 생긴 crack을 관찰하여 전단거동시 nail의 파괴형태와 전단영향범위 그리고 일반 nail과 MS nail의 차이 등을 찾아내고자 하였다. 전단된 nail들의 crack을 스케치 하였으며 전단면은 점선으로 나타내었다.

<그림 3-5> 전단실험후 파괴된 nail체 비교모습



<표 3-2> 각 실험별 발생된 균열

SN (일반 nail)		
MS nail	MS 1	
	MS 2	
	MS 3	

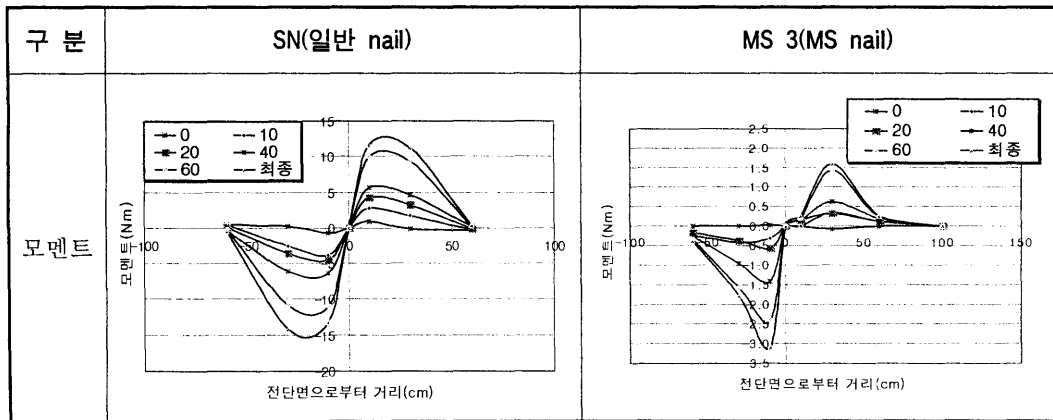
그라우트재에 작용하는 전단영향범위는 전단면을 기준으로 좌우 대칭으로 약 15cm 부근이며, 이 부분에서 약 45° 기울기의 사인장 균열이 발생하였다. 일반 nail에서는

crack이 크게 확대되어 그라우트재가 큰 덩어리로 이형철근과 분리되었다. 반면에 MS nail에서는 작은 crack이 다수 발생되었으나 그라우트재가 이형철근과 분리되는 현상이 발생하지 않았다.

4) 전단시 보강재에 작용하는 모멘트

보강재의 응력을 측정하기 위해 전단면으로부터 좌우측에 대칭으로 일정간격으로 strain gauge를 부착하였다. 일반 nail과 MS nail 모두 변위가 진행될수록 모멘트가 지속적으로 증가하였으며 특히 40mm~60mm 변위시에 그 증가량이 크게 측정되었다.

<표 3-3> nail 부재의 모멘트 비교



5) 전단시 보강재에 작용하는 축력

Nail에 발생하는 축력은 전단면에 근접 부분에서 가장 크게 나타났으며 인장력을 받는 것을 알 수 있다. 축력의 크기는 일반 nail과 MS nail 모두 peak값이 100kg~150kg정도이다. 그러나 이 축력의 크기는 전단변위를 기준으로 산출한 것으로써 MS nail이 일반 nail보다 큰 전단 저항력을 가지고 있음을 감안한다면 동일한 전단력 재하조건에서 발생된 축력의 크기와 동일한 조건으로 판단하기는 어렵다.

일반 nail과 MS nail에 동일한 축력(P)이 작용한다면 MS nail의 단면적이 일반 nail에 비해 3배가량 작으나 4가닥의 철근 사용으로 인해 축력을 P/4로 분담함으로써 일반 nail의 축응력을 σ 라 할때 MS nail은 $(3/4)\sigma$ 의 응력을 받게 되어 25%의 안정성을 더 확보한다.

IV. 수치해석을 통한 MS nail의 효과 검증

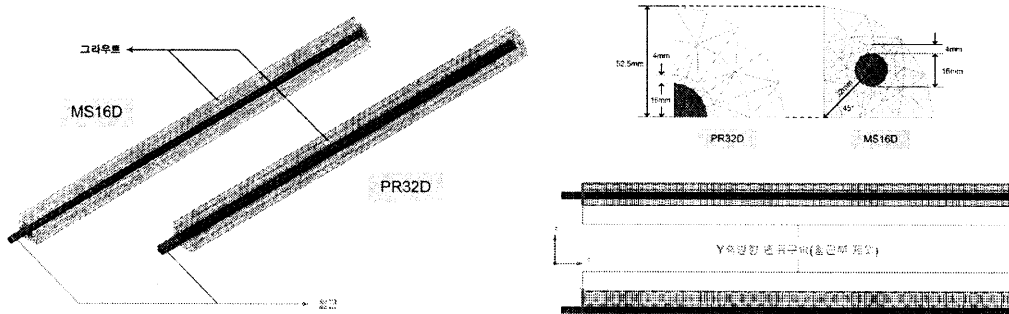
MS nail공법은 다철근(4EA~5EA)을 간격재를 이용하여 일정하게 배치함으로써 인발저항력, 휨저항력 및 전단저항력을 증가시켜 사면의 안정성을 증가시킨 공법이다. 또한 보강재 두부에 설치된 신축장치의 탄성 복원력을 이용하여 비탈면에 압착력을 작용시킴으로써 표면의 활동력을 감소시키는 특징을 가지고 있다. 이러한 MS nail의 효과를 정량적, 정성적으로 파악하기 위하여 2차원 및 3차원 유한요소해석을 수행하였다.

1. MS nail의 인발저항 효과

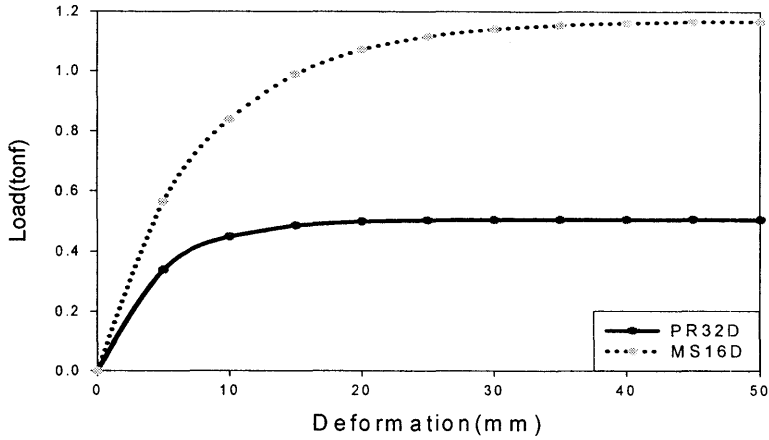
인발모델은 철근과 그라우트재의 접촉면을 정확히 모사하여야 하므로 3차원 유한요소해석에 의해 수행하였다. 본 모델은 nail의 형태가 대칭형이므로 1/4 대칭모델을 사용하고, 대칭면상에 수직인 방향으로 변위구속을 가하였다. 또한, 그라우트와 nail사이에 탄소성 인터페이스 요소를 두어 변위로 제어하여, 단계별 변위에 해당하는 인발하중을 확인하였다.

인발모델의 경우 하중이 커짐에 따라 탄성, 소성을 거쳐 최종적으로 완전소성상태가 되는 양상을 보였다. PR모델에서 MS모델로 변환 시 단면적은 같았지만 철근과 그라우트재의 접촉 표면적이 늘어남에 따라 하중-변위곡선에서 탄성, 소성구간에서의 거동도 크게 다른 변위양상을 보였고, 인발강도를 의미하는 파괴 시의 하중값에도 큰 차이를 보였다.

<그림 4-1> 인발모델의 구성



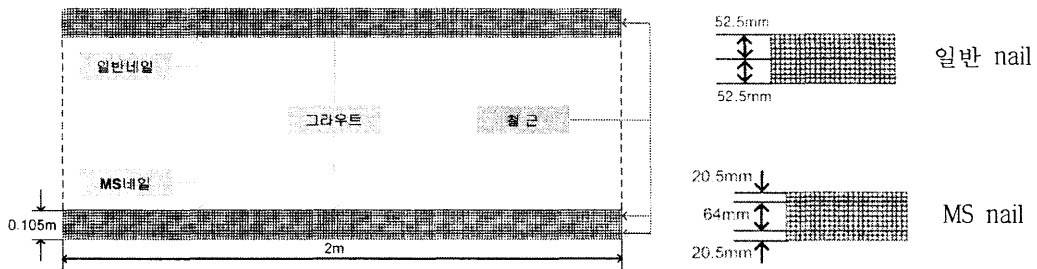
<그림 4-2> 인발모델의 하중-변위곡선



2. MS Nail의 휨저항 효과

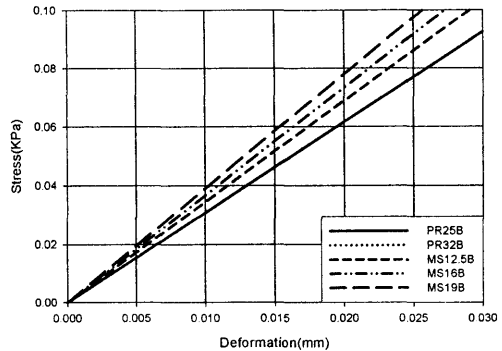
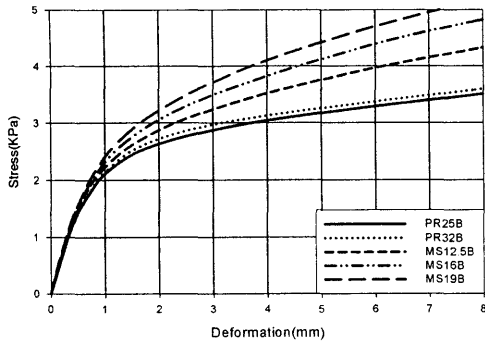
휨모델은 nail에 설치된 철근의 두께와 배치형태를 통한 외력저항능력에 초점을 맞춰 좌우측에 1m씩 총 2m의 nail체로 단순화 시켰다. 하중조건은 사면파괴시 nail에 발생할 휨 응력을 확인하기 위해 모델(그라우트+nail)의 중앙부 한 쪽에 단계별 하중을 재하하여 캔틸레버와 유사한 휨거동을 발생시켰다.

<그림 4-3> 휨모델의 구성



해석결과 일반 nail의 경우 철근의 직경에 따른 휨저항 증가 현상은 나타나지 않았으며, MS nail의 경우 인장응력이 발생하는 위치에 철근이 설치되므로, 철근 직경에 따라 휨저항 증가하였다.

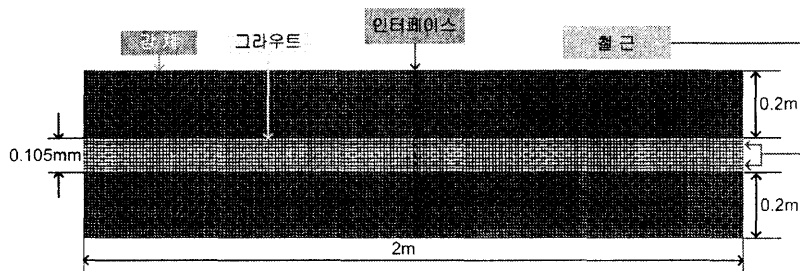
<그림 4-4> 휨모델의 하중-변위곡선(전체) <그림 4-5> 휨모델의 하중-변위곡선(탄성)



3. MS nail의 전단저항 효과

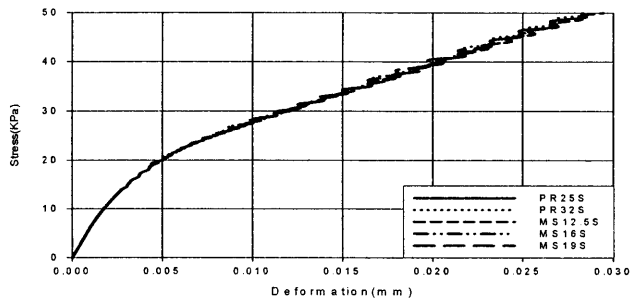
전단모델 역시 해석시간을 고려하여 좌우측에 1m씩 총 2m의 nail체로 단순화 시켰다. 하중조건은 사면파괴시 nail에 발생할 전단응력을 확인하기 위해 모델(그라우트+nail+강체지반)의 중앙부 한 쪽에 단계별 하중 재하하고, 경계조건을 탄성계수가 높은 강체가 인터페이스요소로 사용된 rigid link를 따라 Z축 방향으로만 움직일 수 있게 함으로써 nail의 중앙에 전단력이 집중하도록 유도하였다.

<그림 4-6> 전단모델의 구성



해석결과 철근의 직경이나 배근 위치와 관계없이 동일한 단면적인 경우 순수전단에 대한 보강효과는 유사하였으나, 실제 작용하는 전단강성은 지반의 소성한계 및 nail체의 소성모멘트와 밀접한 관계가 있기 때문에 일반 nail과 MS nail에서의 전단강성의 차이는 발생할 것이다. 이 차이는 대형전단 모형시험에서 확인할 수 있으며, 동일한 전단력에 대해서 MS nail이 전단저항에 우수하였다.

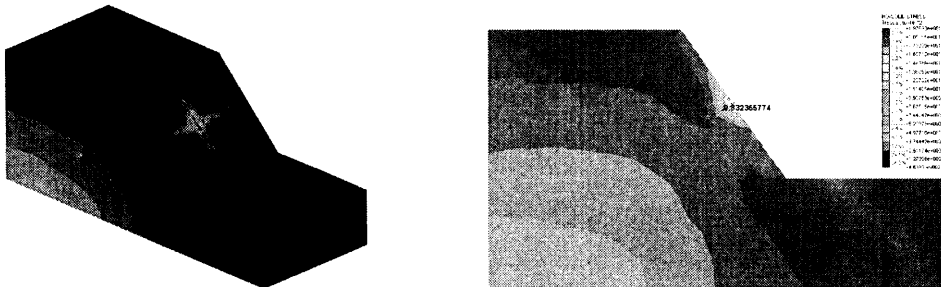
<그림 4-7> 전단모델의 하중-변위곡선



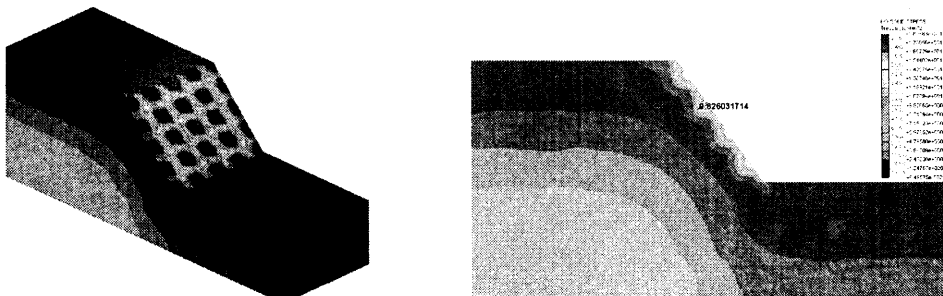
4. 신축장치의 비탈면 압착 효과

MS nail에 의한 스프링의 압축효과를 검증하기 위해 솔리드 및 tension only 요소를 이용하여 지반, 지압판, 보강와이어를 모델링하였으며, 보강와이어는 1.2m×1.2m 간격으로 배치하고 0.2ton의 긴장력을 가하였으며, 지압판은 보강와이어의 교차부에 배치하고 3.0ton의 압착하중을 작용시켰다.

<그림 4-8> 단독 지압판 설치시 비탈면 압착력 분포



<그림 4-9> 복수 설치시 비탈면 압착력 분포



해석결과 단독 설치시 표면에 작용하는 최대 압착력은 19.8ton/m^2 이며, nail 설치방향으로 1.80m~2.00m, nail 길이 방향으로 0.60m 까지 영향을 주는 것으로 나타났으며, 복수 설치시 표면에 작용하는 최대 압착력은 19.0ton/m^2 로 nail 길이 방향으로 0.80m 까지 영향을 주는 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 MS nail의 신축장치에 의해 표층부에는 활동을 억제하는 압착력이 일정 범위로 분포하며, 분포하는 압착력에 의해 표층부의 활동을 억제하는 효과가 있을 것으로 판단된다.

V. 결과 및 분석

다철근 스프링 nail공법(일명 MS nailing)에 관한 현장시험 및 실내모형실험, 수치 해석적 기술 검토 결과를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

1. 현장시험 결과

- 1) 동일 철근단면적(D32mm) 조건에서 수행된 인발시험 결과 Nail의 항복하중은 MS Nail과 일반 nail이 각각 하중 29.46ton과 23.44ton으로 MS nail이 일반 nail보다 약 6ton 이상을 지지하였다.
- 2) Verification tests는 시험최대하중에서 1분에서 10분 동안 발생된 크리프량이 1mm이하이거나 60분 동안 발생한 크리프량이 2mm 이하이어야 한다. 시험결과, MS nail의 경우 설계하중의 1.5배인 23.64ton에서 크리프 변위가 최대 0.385mm 가 발생하였고, 일반 nail은 19.86ton 및 23.64ton에서 각각 0.250mm 및 5.655mm 가 발생되었다.
- 3) 하중전이 측정결과는 MS nail과 일반 nail은 각각 4.5m 이하에서 전이율 0.15%, 0.35%이다. 따라서 재하된 하중 대부분을 상부에서 받았다.
- 4) 신축장치의 표면압착효과를 확인하기 위하여 수행된 확인시험 결과, 턴버클 시공시 비탈면에 약 0.112ton의 압착하중이 작용하고, 신축장치 좌,우 인장순서에 따라 각각 0.432ton과 0.726ton의 압착하중이 표면에 가해졌다.

2. 모형실험(대형전단실험) 결과

- 1) Nail체로 보강된 지반은 전단시 전단저항력은 뚜렷한 peak값을 나타내지 않고 지속적으로 증가하였다. 보강하지 않은 지반의 전단저항력이 최대값을 나타내는 시

점에서 MS nail의 전단저항력은 일반 nail의 전단저항력에 비해 28%정도 큰 값을 보였다. MS nail로 보강된 지반은 일반 nail로 보강된 지반보다 전단저항력이 크며, 전단변위가 증가할수록 그 차이가 커졌다.

- 2) MS nail에서 스프링의 복원력에 의한 지압판의 압축하중은 nail체의 전단저항력에 영향을 미치지 않았다. 그러나 지압판의 압축에 의해 nail의 두부가 지점기능을 하고 있음을 확인하였다.
- 3) 그라우트재에 작용하는 전단영향범위는 전단면을 기준으로 좌·우 대칭으로 약 15cm 부근이며, 이 부분에서 약 45° 기울기의 사인장 균열이 발생하였다. 일반 nail에서는 crack이 크게 확대되어 그라우트재가 큰 덩어리로 이형철근과 분리되었다. 반면에 MS nail에서는 작은 crack이 다수 발생되었으나 그라우트재가 이형철근과 분리되는 현상이 발생하지 않았다.
- 4) 일반 nail과 MS nail에 동일한 하중(P)이 작용하면 MS nail은 4가닥의 철근을 사용하기 때문에 발생하는 축력의 크기가 작아 안정성을 더 확보한다고 할 수 있다. 축력은 모멘트와 마찬가지로 지압판 압축하중에 따른 뚜렷한 특징을 나타내지 않았다.

3. 수치해석 결과

- 1) 인발력에 대한 해석모델에서는 동일한 단면적에서도 MS nail의 인발저항력이 일반 nail에 비하여 월등히 높은 것으로 나타났다. 동일 철근단면적 조건에서 비교된 MS16D모델의 표면적은 PR32D모델 표면적의 2배이며, 인발과파괴가 일어난 시점에서의 최대지지하중은 약 2.3배를 나타냈다.
- 2) 휨모멘트에 대한 MS nail의 보강효과를 확인하였고, 탄성범위내에서 nail의 단면적이 넓어질수록 큰 강성도를 보이며 처짐억제효과를 기대할 수 있는 것으로 검토되었다. 하지만 일반 nail 경우는 MS nail에 비해 처짐에 대한 저항을 의미하는 탄성 보강효과가 상대적으로 크지 않으며, 철근 단면적의 비율이 약 63.8%나 증가한 경우(D25mm에서 D32mm로 철근의 직경이 증가한 경우)에도 처짐억제효과는 매우 미미하였다. 이는 철근이 투입되는 위치가 휨모멘트의 작용으로 발생하는 그라우트 영역의 응력분포에 민감하며, 특히 인장응력이 발생하는 영역에 철근이 투입되는 MS nail의 경우가 휨에 대한 저항력이 크게 작용하게 됨을 알 수 있었다. 소성영역 범위에서의 변위는 하중이 지속적으로 재하되면서 각 모델간에 차이가 커지는 양상을 보였다. 일반 nail의 경우에는 약 0.35ton/m²의 등분포 응력이 재하된 이후부터 변위값이 수렴되지 않는 양상을 보였지만, MS nail의 경우에는 그라우트가 완전 파괴된 이후에도 보강효과가 잘 발현됨을 알 수 있었다.

- 3) 직접전단하중을 가한 모델의 경우에는 철근의 직경이나 배치가 변위에 큰 영향을 미치지 못하였다. 해석결과를 통해 철근이 동일한 단면적인 경우 순수전단에 대한 보강효과는 MS nail과 일반 nail이 유사하다고 판단할 수 있으나, 실제 작용하는 전단강성은 지반의 소성한계 및 nail체의 소성모멘트와 밀접한 관계가 있기 때문에 일반 nNail과 MS nail에서의 전단강성의 차이는 발생할 것이다. 이 차이는 본 연구에서 수행한 대형전단 모형시험을 결과를 통하여 확인할 수 있으며, 동일한 전단력에 대해서 MS nail이 전단저항에 우수하였다.
- 4) 지압판의 압착하중에 의한 지반의 응력분포 양상을 분석한 결과, 단독 설치시 표면에 작용하는 최대 압축력은 19.8ton/m^2 이며, nail 설치방향으로 1.80m~2.00m, nail 길이 방향으로 0.60m 까지 영향을 주는 것으로 나타났으며, 복수 설치시 표면에 작용하는 최대 압축력은 19.0ton/m^2 로 nail 길이 방향으로 0.80m 까지 영향을 주는 것으로 나타났다. MS nail의 신축장치에 의해 표층부에는 활동을 억제하는 압축력이 일정 범위로 분포하며, 분포하는 압축력에 의해 표층부의 활동을 억제하는 효과가 있을 것으로 판단된다.

4. 종합분석 결과

위 결과를 모두 종합하여 일반 nail과 MS nail의 보강효과를 비교해보면 동일 철근 단면적 조건에서 부착면적이 2배이상 증가된 MS nail이 일반 nail보다 약 6ton 이상의 인발하중을 지지할 수 있으며, 일반 nail에 비해 증가된 MS nail의 휨강성은 일반 nail보다 더 큰 전단저항력을 발현시키는 것을 확인하였고, 파괴시에도 그라우트재와 철근이 분리되는 현상은 발생하지 않았다. MS nail의 압착하중은 보강재의 전단 저항력, 모멘트, 축력등에 미치는 영향은 미비한 것으로 검토되었으나 현장시험 및 수치해석 결과 비탈면 표층의 일정범위까지 하중이 작용하는 것으로 검토되어, 하중이 작용하는 영향 범위내에서는 표층 보강효과가 있다고 판단된다.

따라서, MS nailing 공법은 일반 nail에 비해 인발, 전단, 휨 등의 보강재의 저항력이 증가되었고, 비탈면 표면의 일정 범위까지 압착하중을 작용시킴으로서 비탈면과 표면의 안정성을 동시에 증대시킨 공법이라 판단할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, (1999), “쏘일네일링 공법의 실용화방안 연구”.
2. 김홍택, (2001), “쏘일네일링의 원리 및 지침”.
3. 김홍택, (1995), “쏘일네일링 시스템의 최적설계방법에 관한 연구”, 「한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집」, pp.91~96.
4. 김홍택, 강인규, (1995), “Nailing System으로 보강된 역지벽체공법에 관한 연구”, 「한국지반공학회지」, 11(1), pp.79~99.
5. 이충호, 광상돈, (2006), “다철근 스프링 네일의 특성연구”, 「한국지반환경공학회 학술발표회 논문집」, pp.201~208.
6. 이송, 김종수, (2001), “현장 인발시험에 의한 지반-네일의 하중전이 특성 연구”, 「대한토목학회논문집」, 21(3-C), pp.91~288.
7. 전상수, 이충호, 김두섭, 장양원, (2006), “MS 네일(Multi-bar Spring Nail)거동 특성-현장시험”, 「대한토목학회 가을 정기학술대회 논문집」, pp.191~194.
8. 전상수, 김두섭, 장양원, (2006), “MS Nailing 공법의 실용화방안 연구”, 연구보고서, 알지오 기술.
9. 한국지반공학회, (2007), “다철근 스프링 네일공법(일명 MS Nailing)에 관한 기술 검토 연구보고서”.
10. 이충호, 박상욱, 신휴성, 백 용, 윤동준, (2007), “다철근 스프링 네일의 보강효과 검토를 위한 수치 해석적 연구”, 「한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집」.
11. 한국시설안전관리공단, (2004), “절토사면유지관리메뉴얼”.
12. Chappell, B.A., (1987), “Predicted and Measured Rock Mass Moduli”, Mining Science and Technology, 6, pp.89~104.
13. Cartier, G., Gigan, J.P., (1983), “Experiments and Observations on Soil Nailing Structures”, Proceeding of the 8th ECSMFEE., Helsinki, Finland, pp.473~476.
14. CEBTP, (1986), “Compte Rendu de L'expérimentation en Vraie Grandeur de la Paroi clouee NO 1. Pupture D'une Paroi Clouée par Cassure des Armatures, Mai Reprot on the Experiment No.1 of a Full-Scale Soil Nailed Wall. Failure of Soil Nailed Wall as a Result of Breakage of the Nails”.
15. Fatani, M.N., Bauer, G.E., (1991), “Strength Characteristics of Sand Reinforced with Rigid and Flexible Elements”, Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.471~474.
16. FHWA, (1998), “Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls”, SA-96-069R.

17. FHWA, (1989), "Reinforced Soil Structures", Summary of Research and Systems Information, 2.
18. FHWA, (2000), "Micropile Design and Construction Guidelines", Implementation Manual, FHWA-SA-97-070.
19. FNRP, (1991), "Recommendations Clouterre: Soil Nailing Recommendations for Designing", Calculating, Constructing, and Inspecting Earth Support Systems Using Soil Nailing.
20. Gässler, G., Gudehus, G., (1981), "Soil Nailing-Some Aspects of New Technique", Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 3, pp.665~670.
21. Gässler, G., (1988), "Soil Nailing Theoretical Basis and Practical Design", Proceedings of the Geotechnical Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement, Balkema, pp.283~288.
22. Gässler, G., Gudehus, G., (1989), "Anchored walls - model tests and statistical design - Proc 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering", Rio de Janeiro, 13-18 August V2, pp.829~832.
23. Gutierrez, V., Tatsuoka, F., (1988), "Roles of Facing in Reinforcing Cohesionless Soil Slopes by Means of Metal Strips", Proceedings of the International Geotechnical Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement, pp.289~294.
24. Guilloux, A., Schlosser, F., (1982), "Soil nailing, Practical application. Symposium on Soil and Rock improvement Techniques", Geotextiles, Reinforcement Earth, and Modern Piling Methods. Bangkok, November/December.
25. Ortigao, J.A.R, Palmeira, E.M., Zirlis, A.C., (1995), "Experience with soil nailing in Brazil" Geotechnical Engineering Advisory Panel Paper 10584.
26. Jaran, I., Baudrand, G., Farrag, K., Elias, V., (1990), "Kinematical Limit Analysis for Design of Soil Nailed Structure", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, pp.54~72.
27. Jewell, R.A., Pedley, M.J., (1992), "Analysis of Soil Reinforcement with Bending Stiffness", Journal of Geotechnical Engineering, 118(10), pp.1505~1528.

논문접수일 : 2007년 10월 15일

심사의뢰일 : 2007년 10월 22일

심사완료일 : 2007년 11월 22일