

사면에 설치된 쏘일네일링의 활동억지효과에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Stabilizing Effect of Nails Against Sliding

홍 원 표¹ Hong, Won-Pyo

송 영 석² Song, Young-Suk

Abstract

In order to investigate the stabilizing effect of nails against sliding, a series of model tests were carried out. The apparatus of model test was designed to perform the model test of soil slope reinforced by nails. The instrumentation system was used to measure the deflection behavior of nails during slope failure. As a result of model tests, the quantity and the occurred position of the maximum bending stress are changed according to the area ratio and the inclination angles of nails. The maximum stabilizing effect against sliding of nails is presented at 0.7% of the area ratio because the biggest maximum bending stress occurs at this time. But, the stabilizing effect of nails decreases with more than 0.7% of the area ratio. In the same condition of the area ratio, the stabilizing effect of nails is excellent at -10° of the inclination angles of nails. The sliding surface can be predicted on the basis of the position of the maximum bending stress in each nails. The shape and depth of sliding surface are changed according to the area ratio and the inclination angles of nails.

요 지

쏘일네일링의 활동억지효과를 조사하기 위하여 일련의 모형실험을 수행하였다. 이를 위하여 쏘일네일링이 설치된 토사 사면에 대한 모형실험장치를 고안하였다. 그리고, 모형실험시 각종 계측시스템을 이용하여 사면활동에 따른 쏘일네일링의 변형거동을 조사하였다. 모형실험결과 네일의 면적비 및 삽입각도가 변화됨에 따라 네일의 최대휨응력 크기 및 발생위치가 변화됨을 알 수 있다. 네일의 면적비가 0.7%인 경우 최대휨응력이 가장 크게 발생되므로, 사면활동에 대한 억지효과가 가장 크게 발휘됨을 알 수 있다. 그리고, 네일을 과다하게 설치하는 것은 오히려 네일의 저항효과를 저하시키는 것으로 나타났다. 한편, 네일의 삽입각도가 -10° 인 경우 최대휨응력이 가장 크게 발생되므로, 사면활동에 대한 저항효과가 가장 크게 발휘됨을 알 수 있다. 한편, 모형실험에서 네일의 최대휨응력이 발생하는 위치를 토대로 사면활동면을 추정할 수 있으며, 네일의 면적비 및 삽입각도에 따라 사면활동면이 변화됨을 알 수 있다.

Keywords : Area ratio, Bending stress, Model test, Inclination angle, Soil nailing, Soil slope

1. 서 론

쏘일네일링 공법은 보강재를 일정한 간격으로 지중

에 삽입하여 원지반의 전단강도를 증가시키고 변형을 억제시켜 굴착도중 및 굴착완료 후에 지반의 이완을 방지함으로써 지반의 안정성을 유지시키는 공법이다. 쏘

1 정희원, 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng. Chung-Ang Univ.)

2 정희원, 한국지질자원연구원 지질환경경제연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geological & Environmental Hazards Div., Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, yssong@kigam.re.kr)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

일네일링 공법은 1972년에 최초로 프랑스에서 시공된 이후로 프랑스, 독일 등의 유럽지역에서 주로 설계 및 시공되어 왔다. 특히, 프랑스에서는 쏘일네일링 공법에 대한 설계 및 시공기준을 마련하기 위하여 CLOUTERRE라고 하는 국책연구과제가 시행되었다. 또한, 미국에서는 Shen et al.(1981)에 의해 주로 흙막이 지보체계로 제안되었으며, 18.3m깊이의 굴착지보에 성공적으로 적용되었다.

쏘일네일링 공법에 대한 연구는 주로 흙막이벽을 대상으로 수행되었다. Stocker & Riedinger(1990)와 Juran & Elias(1990)는 현장계측결과를 활용하여 쏘일네일링 흙막이벽에 작용하는 측방토압 및 변형에 미치는 요인 등을 검토하였다. 한편, Schlosser(1983)는 쏘일네일링 공법과 보강토공법에 대한 변형거동의 차이점을 검토하였다. 그 밖에도 여러 학자들에 의하여 각 지반조건에 따른 쏘일네일링 흙막이벽의 최대수평변위의 발생범위도 제시되었다(Gassler & Gudehus., 1981; Shen et al, 1981; Cartier & Gigan, 1983; Plumelle et al, 1990). 국내에서도 쏘일네일링 흙막이벽의 거동 및 네일축력에 대한 모형실험 및 수치해석적 연구(김준석 등, 1994; 김홍택 등, 1995)가 활발히 진행되었으며 최근에는 현장계측결과를 토대로 쏘일네일링 흙막이벽의 변형 및 네일의 축력 등을 분석한 연구가 있다(전성근, 1999).

이와 같이 쏘일네일링 공법에 관한 연구는 흙막이굴착에 대한 것이 대부분이며, 사면의 안정성 확보를 위한 활동역지시스템으로서의 연구는 미흡한 편이다. 현재 사면보강을 위하여 쏘일네일링 공법이 많이 적용되고 있으나 효과적인 설계방법이나 영향요소에 대한 연구가 부족하며, 쏘일네일링의 사면보강조건에 따른 활동

역지효과에 대한 연구는 매우 미흡한 편이다.

따라서, 본 연구에서는 쏘일네일링의 면적비 및 삽입각도에 따른 활동역지효과를 조사하여 토사사면에 설치된 쏘일네일링에 대한 설계 및 시공기준을 마련하고자 한다. 쏘일네일링의 시공조건에 따른 활동역지효과를 조사하기 위하여 일련의 모형실험을 수행하였다. 이를 위하여 쏘일네일링이 설치된 토사 사면에 대한 모형실험장치를 고안하였으며, 모형네일을 제작하고 모형사면지반을 조성하였다. 그리고, 각종 계측시스템을 이용하여 사면활동에 따른 쏘일네일링의 변형거동을 조사하였다. 이를 통하여 쏘일네일링의 면적비 및 삽입각도에 대한 영향을 조사하고, 이에 따른 쏘일네일링의 활동역지효과를 고찰하고자 한다.

2. 모형실험

2.1 모형실험장치 및 설치방법

사면에 설치된 쏘일네일링의 사면안정효과를 검증하기 위하여 모형실험장치를 제작하였다. 그림 1은 모형실험장치의 계통도를 도시한 것으로서 지반변형제어장치, 모형사면지반토조 및 데이터입력장치의 세부분으로 구성되어 있다. 여기서 지반변형제어장치와 모형사면지반토조를 모형사면실험장치라고 한다.

지반변형제어장치는 사면지지판과 롤러 및 동력장치(모터)로 이루어져 있으며, 속도조절이 가능하도록 제작하였다. 모형사면지반토조는 모형쏘일네일링과 모형사면으로 이루어져 있으며, 모형쏘일네일링의 휨응력을 측정하기 위하여 변형률계를 설치하였다. 그리고, 데이

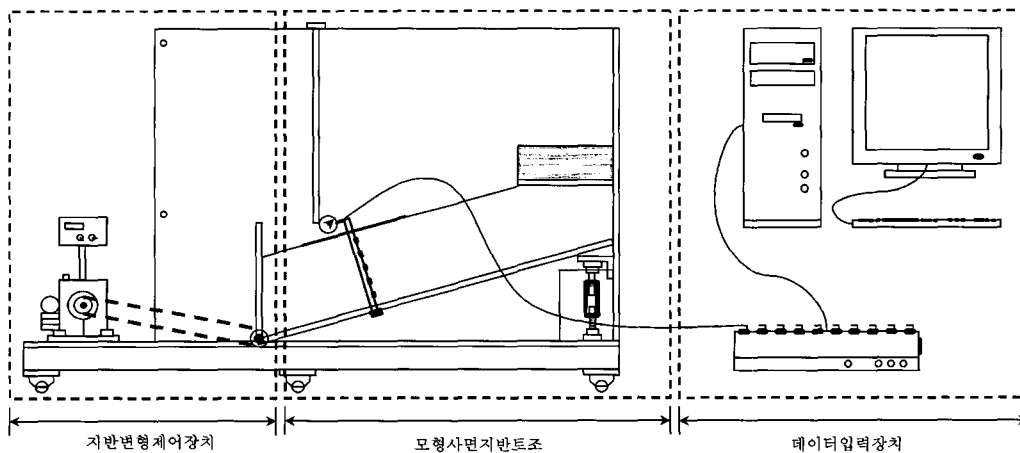


그림 1. 쏘일네일링으로 보강된 모형사면실험장치 계통도

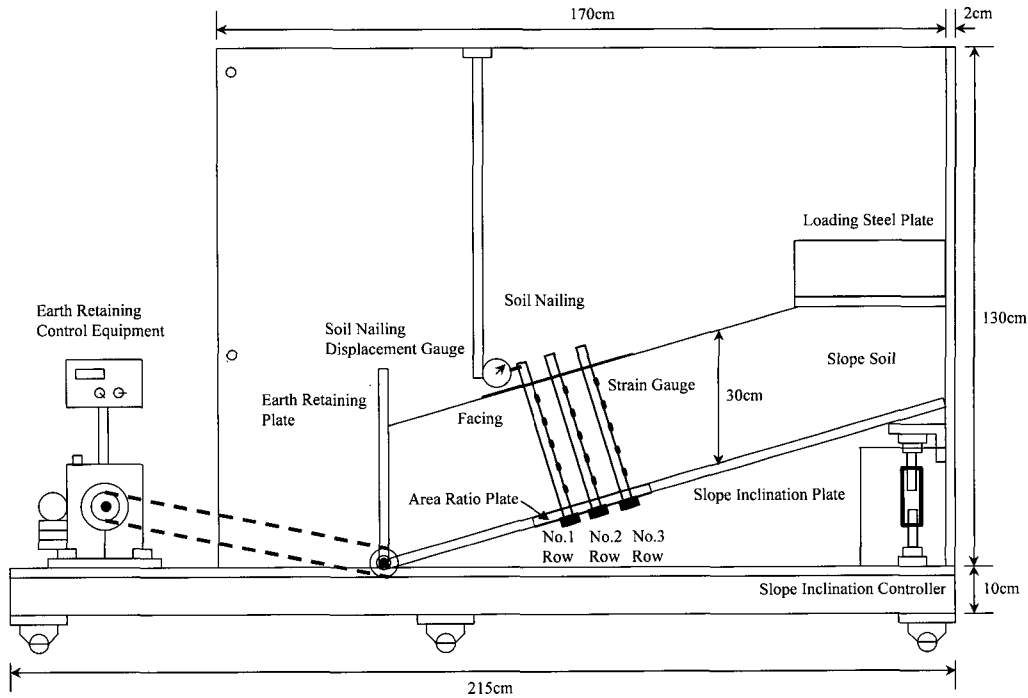


그림 2. 쏘일네일링으로 보강된 모형사면 실험장치

표 1. 모형쏘일네일링의 제원

재질	직경(cm)	두께(cm)	단면적(cm ²)	E(kg/cm ²)	EI(kg·cm ²)
알루미늄	1	0.1	0.283	7.0×10^5	2.03×10^4

터입력장치는 변형률계, 데이터기록장치(U-CAM) 및 컴퓨터로 이루어져 있다.

그림 2는 모형사면실험장치를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 모형사면실험장치는 길이 215cm, 높이 140cm, 폭 54cm이며, 모형사면지반토조와 지반변형 제어장치(earth retaining plate 및 earth retaining control equipment)로 구성되어 있다. 모형사면지반토조는 길이 170cm, 높이 130cm, 폭 50cm의 크기를 갖는다. 모형실험시 모형사면지반토조 내부의 지반변형을 관찰하기 위하여, 두께가 2cm인 투명아크릴 판을 사용하여 제작하였다. 그리고, 사면지반의 경사를 자유롭게 조절하기 위하여 사면경사조절장치(slope inclination plate 및 slope inclination controller)를 설치하였으며, 모형사면의 경사는 최소 16.5°에서 최대 45°까지 조절이 가능하도록 제작하였다. 한편, 모형사면지반의 깊이는 30cm로 조성하여 실험을 수행하였다.

모형쏘일네일링의 제원은 표 1에 나타나 있으며, 직경이 10mm이고 두께가 1mm인 알루미늄관을 사용하였다. 표에서 보는 바와 같이 알루미늄관의 탄성계수는 $7.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 이며, 단면적은 0.283 cm^2 이다. 그리고,

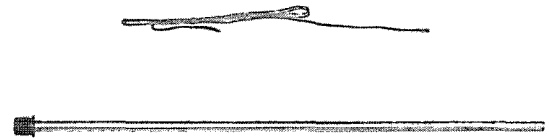


그림 3. 모형쏘일네일링 및 변형률계

모형쏘일네일링은 지반변형제어판(earth retaining plate)으로부터 30cm떨어진 곳에 1열을 설치하도록 하였다. 그림 3은 네일의 변형을 측정하기 위한 변형률계(strain gauge)와 모형쏘일네일링을 나타낸 것으로 네일의 하단부에 나사형태의 연결부분을 제작하였다.

쏘일네일링의 면적비에 대한 영향을 조사하기 위하여 다양한 면적비에서 실험이 가능하도록 탈부착식 면적비조절판(area ratio plate)을 고안하여 사면경사조절판(slope inclination plate)에 설치하였다. 탈부착식 면적비조절판은 네일이 설치될 위치에 미리 홈을 내어 면적비를 조절할 수 있도록 하였다. 여기서, 네일의 면적비란 다음과 같이 정의하였다(그림 4 참조).

1) 네일 1개의 면적

$$A_{nail} = \frac{\pi d^2}{4}$$

여기서, d = 네일그라우팅의 지름(일반적으로 10cm 적용)

2) 1개의 네일이 지지하는 보강분담면적

$$A = S_v \times S_h$$

3) 네일면적비 = 단위면적당 1개의 nail의 밀도

$$= \frac{A_{nail}}{A} \times 100(\%)$$

쏘일네일링의 전면판을 고려하기 위하여 사면지표면을 스프레이 풀로 처리한 후 부직포를 이용하여 사면지표면에 부착하였다. 이는 실제 사면보강용 쏘일네일링 공법에서 숏크리트를 이용한 전면판의 기능을 모사한 것으로 지표면에서의 부분적인 파손을 방지하기 위한

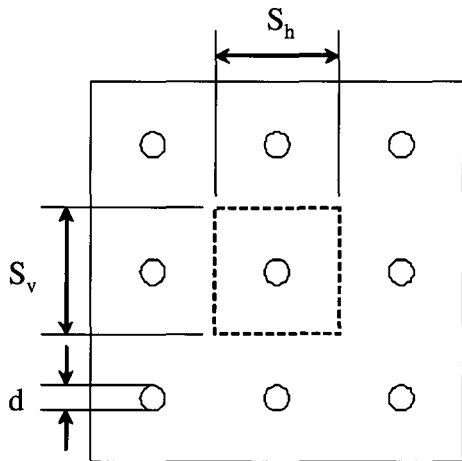
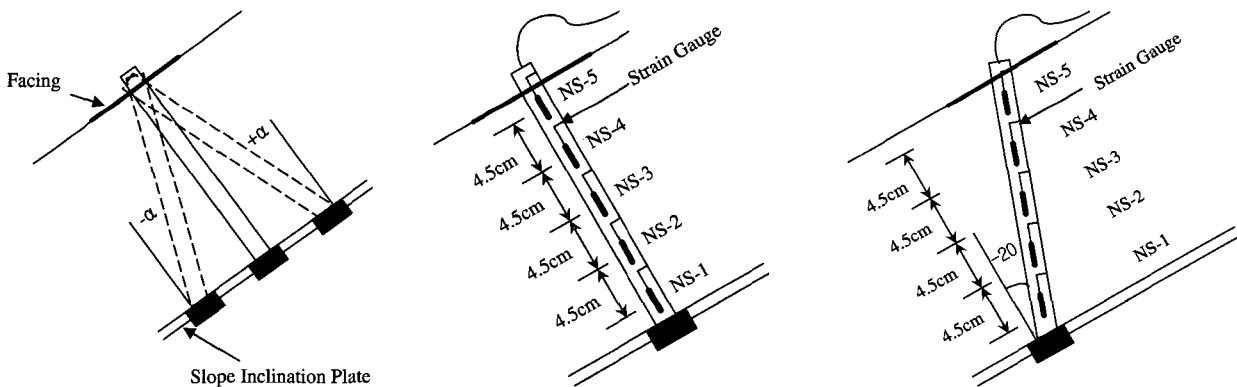


그림 4. 쏘일네일링의 단위면적당 설치간격

것이다.

모형쏘일네일링의 1열 두부에서 변위를 측정하기 위하여 쏘일네일링 변위측정기를 고안하여 설치하였으며, 모형쏘일네일링의 휨응력을 측정하기 위하여 변형률계를 설치하였다. 그림 5는 쏘일네일링의 삽입각도와 쏘일네일링에 설치된 변형률계의 모습을 나타낸 것이다. 그림 5(a)는 쏘일네일링의 삽입각도를 개략적으로 나타낸 것으로 쏘일네일링의 삽입각도는 경사진 사면지반에 수직선을 기준으로 기울어진 각도를 의미하는 것이다. 그림 5(b)는 쏘일네일링의 삽입각도가 0°인 경우로 쏘일네일링은 경사진 사면지반에 수직으로 설치된다. 그림 5(c)는 쏘일네일링의 삽입각도가 20°인 경우로 쏘일네일링이 경사진 사면지반에 일정한 각도로 설치된다. 그리고, 쏘일네일링에 설치된 변형률계는 활동면으로 가정한 사면경사조절판에서부터 지표면까지 5개를 설치하였으며, 편의상 NS-1부터 NS-5까지 명명하였다.

지반변형제어장치는 사면지지판과 롤러 및 동력장치(모터)로 구성되어 있다. 사면지지판은 동력장치에 의한 회전속도를 롤러를 통하여 전달받게 되며, 이를 통하여 사면지지판이 회전하게 된다. 사면지지판은 최대 90°까지 회전이 가능하도록 고안되었으며, 동력장치는 각속도를 다양하게 변화시킬 수 있도록 고안되었다. 본 실험에서는 사면지지판은 1.5°/min의 각속도로 회전하며, 사면지반의 파괴를 유발하도록 하였다. 사면지지판의 회전속도는 사질토에 대한 직접전단시험(KSF 2343)시 전단속도(0.25~1.9mm/min)를 고려하여 결정하였다(이상덕, 1996). 한편, 사면지반의 파괴를 유발하기 위하여 모형사면지반의 상단에 하중재하판을 설치하여 상재하중을 가하도록 하였다. 한편, 토조면과 사면경사조절판 및



(a) 삽입각도 모식도

(b) 삽입각도 0°인 경우 변형률계 설치개략도

(c) 삽입각도 -20°인 경우 변형률계 설치개략도

그림 5. 쏘일네일링 삽입각도 및 변형률계 설치도

사면지지판 사이의 접촉부는 실리콘을 이용하여 사면지반의 유출을 방지하였다.

데이터입력장치는 변형률계, 데이터기록장치 및 컴퓨터로 구성되어 있다. 변형률계는 크기가 5mm이며, 저항이 12Ω인 Steel용이며, 일본 KYOWA사 제품이다. 그리고, 데이터기록장치는 일본 KYOWA사의 U-CAM으로서 30채널의 데이터를 동시에 입력할 수 있다.

2.2 모형사면지반

본 모형실험에서는 모형사면지반의 재료로 주문진 표준사를 사용하였다. 본 모형실험에 사용된 주문진 표준사의 공학적인 특성은 홍원표와 송영석(2005)의 결과를 이용하였다.

모형사면지반을 균질하게 조성하기 위하여 낙하고에 따른 상대밀도 실험결과를 적용하였다. 본 모형실험에서 적용된 사면지반은 상대밀도 60%인 모래로서, 낙하고는 90cm이다. 이때 주문진 표준사의 내부마찰각은 삼축압축시험을 통하여 측정하였으며, 상대밀도 60%일 때 주문진 표준사의 내부마찰각은 38.5°로 나타났다(홍원표와 송영석, 2005).

3. 실험방법 및 계획

3.1 실험방법

실제 쏘일네일링 시공은 이미 조성되어 있는 사면에 천공을 실시하고 네일을 삽입하여 시공한다. 그러나, 모형실험상에서는 시공순서를 동일하게 재현하기 어려우므로 네일을 설치한 이후 사면을 조성하는 것으로 하였다. 모형실험은 다음과 같은 순서로 수행하였다.

- 1) 모형실험토조에 경사조절판을 설치한다.
 - 경사조절판에 해당 면적비(0.3%, 0.5%, 0.7%, 0.9%)의 탈·부착식 판을 부착한다.
 - 경사조절장치로 사면경사각을 30°로 맞춘 후 경사조절판을 모형토조에 설치한다.
- 2) 모형네일에 변형률계를 부착한다.
 - 네일에 변형률계를 부착할 위치를 미리 표시한 후 강력접착제로 기술적인 문제가 발생하지 않도록 주의하여 부착한다.
 - 변형률계는 각 열의 중심에 위치한 한 개의 네일에 부착한다.

- 모형네일의 하단부에는 나사형태로 제작된 연결부를 부착한다.
- 3) 모형네일을 사면경사조절판에 설치한다.
 - 사면경사조절판에 탈부착식 면적비조절판을 설치하고 모형네일을 설치한다.
 - 모형네일의 수직도 및 탈부착식 면적비조절판과 접착력을 확보할 수 있도록 확실하게 설치하여야 한다.
 - 4) 모형사면을 조성한다.
 - 강사법에 의해 상대밀도 60%, 사면높이 30cm의 모형사면을 조성한다.
 - 모형토조의 토조벽면에 테프론시트를 부착하여 모래와 토조벽면과의 마찰력을 최소화 한다.
 - 5) 전면판(Facing)을 설치한다.
 - 조성된 모형사면의 모래입자가 흘러내리는 것을 방지하기 위해 스프레이 플로 표면을 처리한다.
 - 부직포로 제작된 전면판을 스프레이 플로 처리된 모형사면에 설치한다.
 - 6) 상재하중을 재하한다.
 - 원활한 사면파괴를 유도하기 위해 조성된 모형사면의 상부에 하중재하판을 이용하여 400kg의 상재하중을 재하한다.
 - 상재하중은 40kg씩 10단계로 나누어 재하한다.
 - 7) 지반변형제어장치를 이용하여 사면의 파괴를 유발한다.
 - 모터를 작동시켜 사면지지판을 회전시킨다.
 - 사면지지판의 회전속도는 1.5/min이 되게 모터의 속도를 유지한다.
 - 8) 모형네일에 부착된 변형률계로부터 변형률을 측정한다.
 - 데이터기록장치(U-CAM)와 연결된 변형률계로부터 사면지반변형시 발생하는 모형네일의 변형률을 측정하게 된다.

3.2 실험계획

본 모형실험에서는 쏘일네일링으로 보강된 사면의 활동역지효과를 규명하고, 이와 관련된 영향요소들을 검토하고자 한다. 쏘일네일링의 사면안정효과는 네일의 면적비, 삽입각도, 설치열수, 천공경, 전면판의 강성, 지반의 내부마찰각 및 접착력 등에 의해 영향을 받는다

표 2. 영향인자를 고려한 실험계획

구분	주요변수			사면 경사각	지지판 회전속도
	면적비	삽입각도	보강열수		
네일 면적비 영향	0.3%	0°	3열	30°	1.5°/min
	0.5%	0°	3열		
	0.7%	0°	3열		
	0.9%	0°	3열		
네일 삽입각도 영향	0.5%	-20°	3열		
	0.5%	-10°	3열		
	0.5%	0°	3열		
	0.5%	10°	3열		
	0.5%	20°	3열		
	0.7%	-20°	3열		
	0.7%	-10°	3열		
	0.7%	0°	3열		
	0.7%	10°	3열		
	0.7%	20°	3열		

(Schlosser, 1993). 본 모형실험에서는 네일의 면적비 및 삽입각도에 따른 영향을 조사하고자 한다. 네일의 면적비에 대한 영향을 검토하기 위하여 기존의 현장계측 자료에 대하여 분석한 결과(홍원표 등, 2001)를 적용한다. 현장계측자료에 의하면 네일의 단위면적당 밀도는 0.34%~1.1%의 범위에 분포되어 있는 것으로 나타났다. 이를 토대로 본 모형실험에서는 네일의 면적비가 0.3%, 0.5%, 0.7% 및 0.9%인 경우에 대하여 모형실험을 수행한다. 이때 네일의 삽입각도는 0°이고, 보강열수는 3열로 한다.

쏘일네일링은 일반적으로 수평면과 10°~20°정도 삽입각도로 시공되고 있다. 따라서, 쏘일네일링의 삽입각도에 따른 영향을 검토하기 위하여 네일의 삽입각도를 -20°, -10°, 0°, 10°, 및 20°의 경우에 대한 실험을 수행한다. 이때 네일의 면적비는 0.5% 및 0.7%, 보강열수는 3열로 동일하게 하였다. 각각의 실험에 대하여 사면의 경사는 30°, 사면지지판의 회전속도는 1.5°/min으로 동일한 상태에서 실험을 실시한다. 표 2는 쏘일네일링으로 보강된 사면의 모형실험계획을 나타낸 것이다.

4. 실험결과

4.1 네일의 면적비

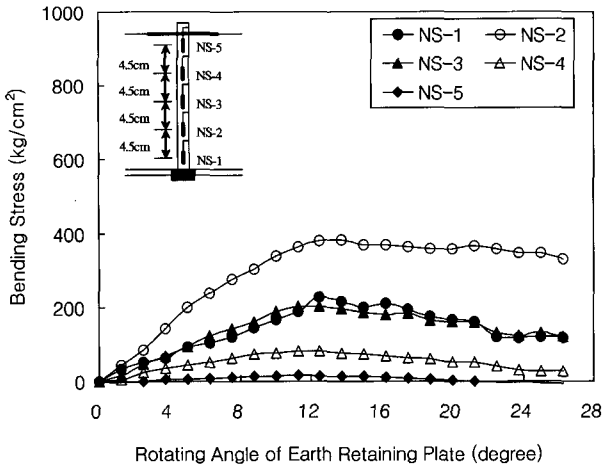
쏘일네일링으로 보강된 사면에서 네일의 분담면적

은 매우 중요한 영향인자이다. 흙막이굴착에 적용될 경우 Schlosser(1993)는 네일 1개당 보강분담면적을 2.5m²~6.0m²로 설계 및 시공할 것을 제안하였으며, 국내에서는 네일 1개당 보강분담면적이 0.8m²~2.25m²에서 시공되고 있는 실정이다(홍원표 등, 2001). Juran et al.(1990)은 네일로 보강된 지반에서 겉보기 점착력을 유발하여 보강지반의 전반적인 전단저항력을 증가시킨다고 하였으며, 이에 가장 영향을 크게 미치는 요소로서 네일의 삽입간격을 언급하였다. 이와 같이 네일의 보강분담면적, 삽입간격 등은 모두 네일의 면적비에 대한 사항이다.

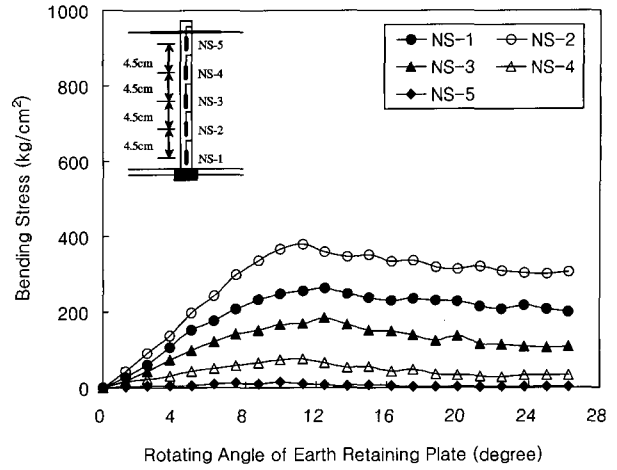
본 연구에서는 앞서 설명한 네일의 면적비 개념을 도입하여 네일의 면적비에 따른 사면의 보강효과를 확인하고자 한다. 네일의 면적비에 따른 네일의 거동을 조사하기 위하여 네일의 면적비를 각각 0.3%, 0.5%, 0.7% 및 0.9%로 하여 실험을 실시하였다. 이때 네일의 삽입각도는 0°이고, 네일은 3열로 설치하였다.

그림 6은 네일의 면적비가 각각 0.3%, 0.5%, 0.7% 및 0.9%일 경우 사면의 활동에 따른 네일에 휨응력을 측정 한 결과이다. 그림에 나타난 것은 3열의 네일 가운데 No.2열 네일의 휨응력을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 네일의 면적비가 0.3% 및 0.5%의 경우 최대휨응력은 사면경사조절판의 상부에 있는 NS-2위치에서 발생하는 것으로 나타났으며, 최대휨응력의 크기는 각각 382.8kg/cm² 및 379.3kg/cm²으로 나타났다. 그리고, 네일의 면적비가 0.7% 및 0.9%의 경우 최대휨응력은 사면경사조절판의 바로 위에 있는 NS-1위치에서 발생하는 것으로 나타났으며, 최대휨응력의 크기는 각각 744.6kg/cm² 및 648.5kg/cm²으로 나타났다.

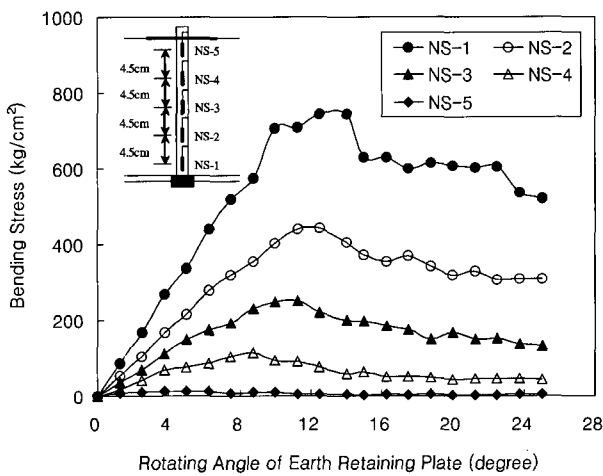
실험결과에 의하면 네일의 면적비가 증가함에 따라 네일의 휨응력과 네일의 최대휨응력이 발생하는 위치가 변화됨을 알 수 있다. 네일의 휨응력은 면적비가 0.3% 및 0.5%인 경우 보다 0.7% 및 0.9%인 경우에 더 크게 발생되고, 특히, 면적비가 0.7%인 경우에 네일의 휨응력이 가장 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그리고, 네일의 최대휨응력 발생위치도 면적비가 커짐에 따라 NS-2에서 NS-1의 위치로 변화되는 것으로 나타났다. 즉, 네일의 면적비가 증가됨에 따라 네일에 작용하는 휨응력은 증가되고, 최대휨응력의 발생위치도 지표면으로부터 깊어지는 것을 알 수 있다.



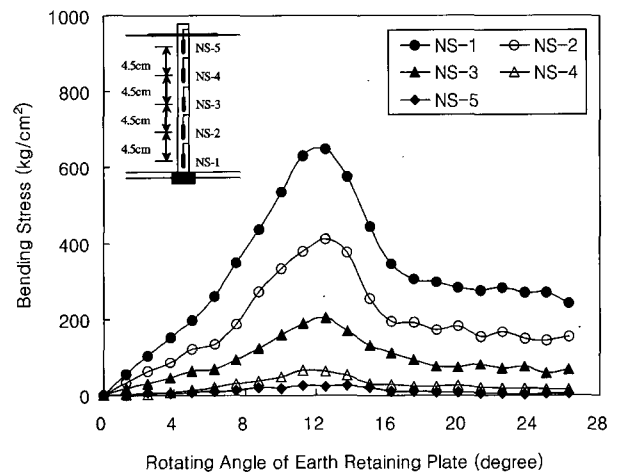
(a) 면적비 0.3%



(b) 면적비 0.5%



(c) 면적비 0.7%



(d) 면적비 0.9%

그림 6. 면적비에 따른 네일의 휨응력

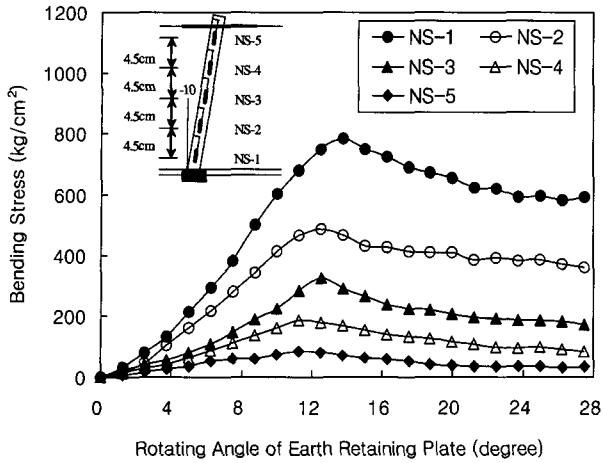
4.2 네일의 삽입각도

Marchal(1984)은 가상과괴면상에 위치한 네일의 설치각도가 네일보강지반의 전체전단강도에 상당한 영향을 미친다고 하였다. 그리고, Jewell(1980)은 전단실험을 통하여 전단강도를 증가시키는 최적의 삽입각도가 전단면의 법선과 30°일 경우라고 하였다. 한편, 홍원표 등(2002)은 보강재의 삽입각도에 따른 점성토의 전단강도를 측정하기 위하여 삼축압축시험을 실시하였으며, 삽입각도가 수평면을 기준으로 10° 및 -10°에서 효과가 가장 우수한 것으로 나타났다. 이와 같이 네일의 삽입각도에 따라 지반의 강도는 상당히 많은 영향을 미치고 있으며, 이에 대한 연구도 계속적으로 진행되고 있다 (Gary & Ohashi, 1983; Jewell & Worth, 1987).

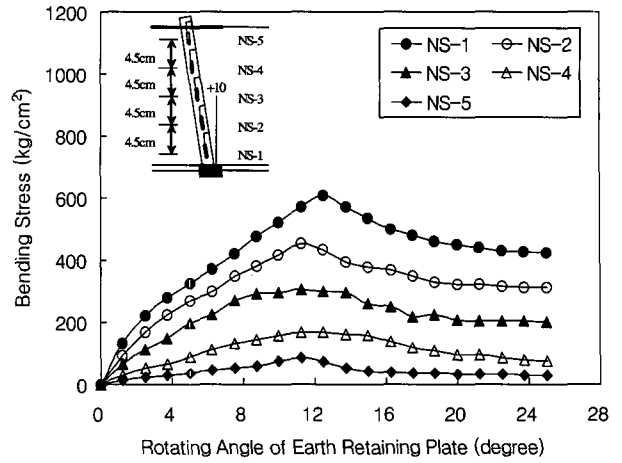
네일의 삽입각도에 따른 사면의 보강효과를 조사하기 위하여 지표면과의 수직면을 기준으로 삽입각도가

-20°, -10°, 0°, 10°, 20°인 경우에 대한 실험을 실시하였다. 그림 7은 네일의 면적비가 0.7%이고, 3열의 네일 가운데 No.2열 네일의 휨응력을 나타낸 것이다. 그림 7(a)와 7(b)는 네일의 삽입각도가 각각 -10°와 10°일 경우 사면지반의 변형에 따른 네일의 휨응력을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 네일의 최대휨응력은 NS-1위치에서 발생되며, 최대휨응력의 크기는 각각 784.5kg/cm² 및 607.0kg/cm²인 것으로 나타났다. 그림 7(c)와 7(d)는 네일의 삽입각도가 각각 -20°와 20°일 경우 사면지반의 변형에 따른 네일의 휨응력을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 네일의 최대휨응력은 NS-1위치에서 발생되며, 최대휨응력의 크기는 각각 593.0kg/cm² 및 516.0kg/cm²으로 나타났다.

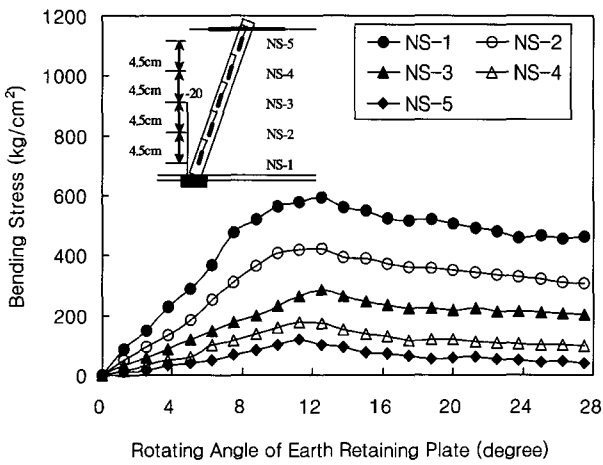
실험결과에 의하면 네일의 삽입각도가 변화됨에 따라 동일한 조건의 네일 휨응력이 서로 다른 것으로 나타났다. 네일의 휨응력은 네일의 삽입각도가 사면활동에



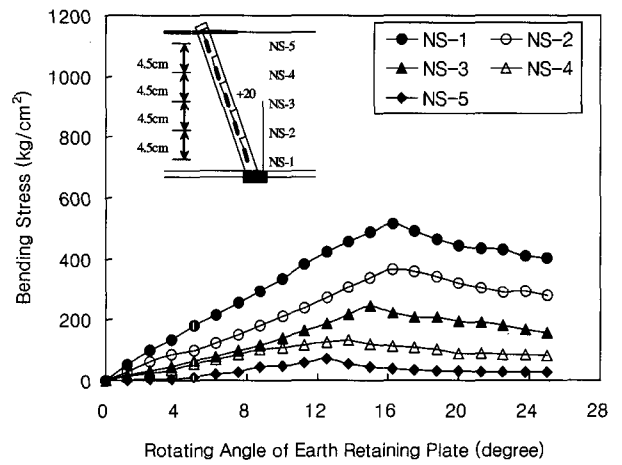
(a) 삽입각도 -10°



(b) 삽입각도 10°



(c) 삽입각도 -20°



(d) 삽입각도 20°

그림 7. 삽입각도에 따른 네일의 휨응력

저항하는 방향 즉, 음(-)의 방향일 경우 상대적으로 크게 발생되며, 특히, 삽입각도가 -10° 인 경우에 네일의 휨응력이 가장 크게 발생하는 것으로 나타났다.

5. 분석 및 고찰

5.1 면적비에 따른 거동

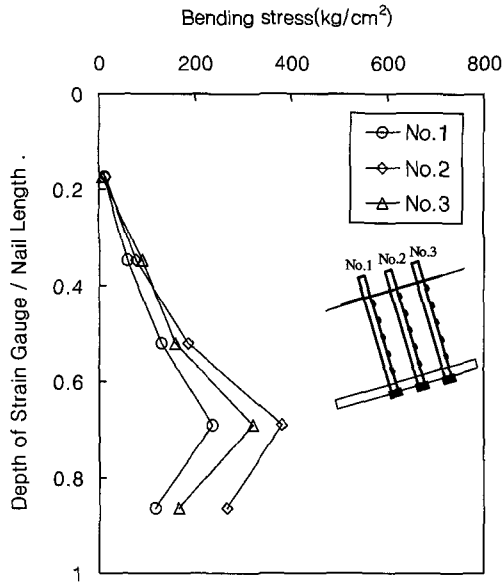
그림 8은 깊이에 따른 네일의 최대휨응력 분포를 나타낸 것이다. 그림의 종축에는 네일의 전체길이에 대한 지표면으로부터 변형률계 설치위치의 비(네일의 깊이 비)로 도시하였으며, 횡축에는 네일의 휨응력을 도시하였다. 이때 네일의 삽입각도는 0° 이고 설치열수는 3열인 경우이다.

그림 8(a)는 네일의 면적비가 0.5%일 경우 네일의 최대휨응력 분포를 깊이에 따라 나타낸 것이다. 그림에서

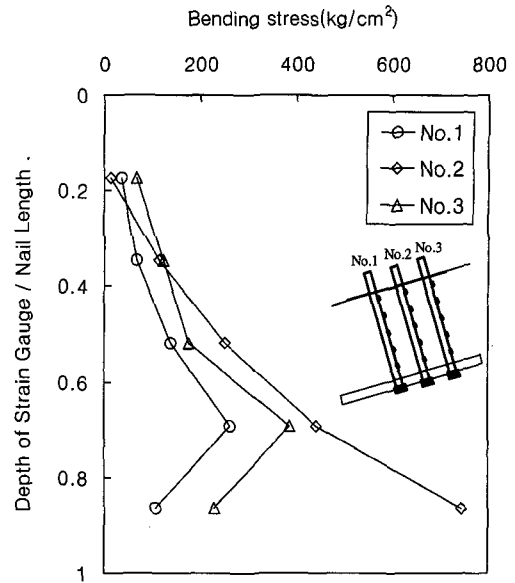
보는 바와 같이 모든 열에서 네일의 최대휨응력은 깊이 비 0.7에서 발생되고 있음을 알 수 있다. 한편, 그림 8(b)는 네일의 면적비가 0.7%일 경우 네일의 최대휨응력 분포를 깊이에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 No.1 및 No.3열 네일의 최대휨응력은 깊이 비 0.7에서 발생되었으며, No.2열 네일의 최대휨응력이 깊이 비 0.9에서 발생되었다. 이와 같이 네일의 면적비가 변화됨에 따라 최대휨응력이 발생하는 네일의 위치가 변화됨을 알 수 있다.

본 실험에서 측정된 네일의 최대휨응력은 실제 네일에서의 최대인장력(T_{max})으로 가정할 수 있으므로, 최대휨응력을 연결한 선은 최대인장력선(T_{max} -line)이 되고, 이를 모형실험에서의 사면활동면으로 간주할 수 있을 것이다(Schlosser, 1993).

그림 9는 각각의 네일 열에 발생된 최대휨응력을 연결한 것이다. 이때 네일의 삽입각도는 0° 이고 설치열수

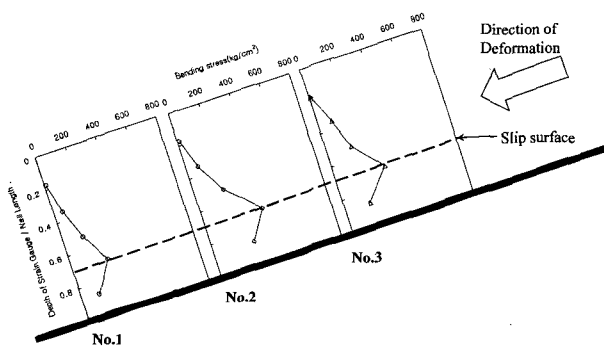


(a) 면적비 0.5%일 경우

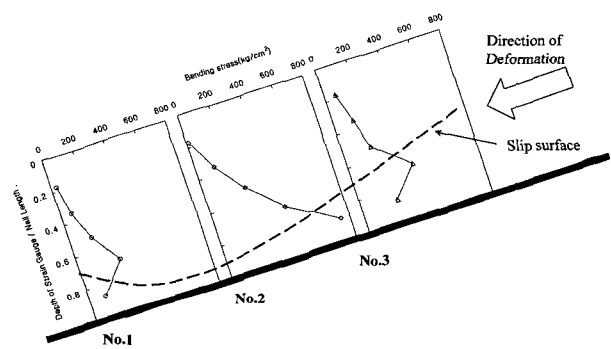


(b) 면적비 0.7%일 경우

그림 8. 면적비에 따른 네일의 최대휨응력 분포



(a) 면적비 0.5%일 경우



(b) 면적비 0.7%일 경우

그림 9. 면적비에 따른 사면활동면의 변화

는 3열인 경우이다. 그림 9(a)는 네일의 면적비가 0.5%인 경우 네일 열의 최대휨응력을 연결하여 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 열의 네일에서 최대휨응력 발생위치가 깊이비 0.7로 동일하므로, 최대휨응력 연결선은 직선으로 도시할 수 있다. 한편, 그림 9(b)는 네일의 면적비가 0.7%일 경우 네일 열의 최대휨응력을 연결하여 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 네일의 최대휨응력은 No.2열의 경우 깊이비 0.9에서 발생되고, No.1열 및 No.3열에서는 깊이비 0.7에서 발생하는 것으로 나타났다. 따라서, 최대휨응력 연결선은 원호형태의 곡선으로 도시할 수 있다. 앞서 설명한 바와 같이 최대휨응력 연결선이 최대인장력선이라고 가정하면, 면적비가 0.5%로 보강된 사면에서는 네일이 설치된 위치에서 수평형태의 사면활동이 발생되고, 네일의 면적비가 0.7%로 보강된 사면에서는 네일이 설치

된 위치에서 곡선형태의 사면활동 발생됨을 추정할 수 있을 것이다. 따라서, 네일의 면적비가 변화됨에 따라 네일 설치위치에서의 사면활동양상이 변화됨을 확인할 수 있다.

그림 10은 면적비에 따른 네일의 최대휨응력을 나타낸 것이다. 그림은 No.2열에서의 최대휨응력을 도시한 것으로 면적비가 0.7%일 경우 최대휨응력이 가장 크게 발생하고 0.9%일 경우에는 오히려 최대휨응력이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 사면활동에 저항하는 네일의 최적설치간격이 존재한다는 것의 미한다. 즉, 네일의 면적비가 너무 작으면 네일의 저항력이 중첩되어 감소되고, 네일의 면적비가 너무 크면 네일 상호간의 간섭효과가 감소되기 때문이다. 본 모형실험에서 네일의 저항력 및 상호간 간섭효과가 가장 잘 발휘되는 조건은 네일의 면적비가 0.7인 경우임을

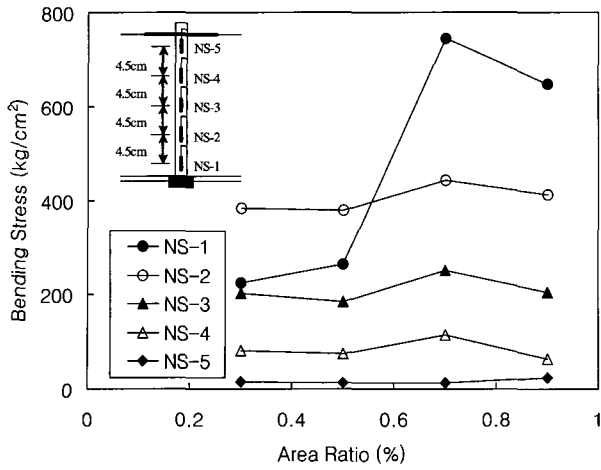


그림 10. 면적비 변화에 따른 네일의 최대휨응력

알 수 있다. 따라서, 면적비가 0.7인 경우 사면활동에 대한 네일의 저항력이 가장 크게 발휘됨을 알 수 있다. 그리고, 네일에 작용하는 최대휨응력은 사면의 지표부에서 깊이가 깊어질수록 크게 발생되는 것으로 나타났다. 그러나, 네일의 면적비가 0.5%이하인 경우에는 NS-2위치에서 최대휨응력이 발생되지만, 면적비가 0.5%이상인 경우에는 NS-1위치에서 최대휨응력이 발생됨을 알 수 있다.

5.2 삽입각도에 따른 거동

그림 11은 네일의 삽입각도가 지표면과 수직면을 기준으로 -10° , 0° 및 10° 일때 네일의 깊이에 따른 최대휨응력 분포를 나타낸 것이다. 이때 네일의 면적비는

0.5%이고 설치열수는 3열인 경우이다. 그림의 종축에는 네일의 깊이비를 도시하고, 횡축에는 네일의 휨응력을 도시하였다. 먼저 그림 11(a)는 네일의 삽입각도가 -10° 인 경우로서 최대휨응력의 크기는 921.5kg/cm^2 이고, 네일의 깊이비가 0.9의 위치에서 발생되는 것으로 나타났다. 그림 11(b)는 네일의 삽입각도가 0° 인 경우로서 최대휨응력의 크기는 379.3kg/cm^2 이고, 네일의 깊이비가 0.7의 위치에서 발생되는 것으로 나타났다. 그리고, 그림 11(c)는 삽입각도가 10° 인 경우로서 네일의 최대휨응력의 크기는 609.5kg/cm^2 이고, 삽입각도가 -10° 인 경우와 마찬가지로 네일의 깊이비가 0.9의 위치에서 발생되는 것으로 나타났다.

위의 그림들을 살펴보면 네일의 삽입각도에 따라 최대휨응력의 크기와 최대휨응력의 발생위치가 변화됨을 알 수 있다. 이는 네일의 삽입각도에 따라 사면활동에 대한 네일의 저항력이 변화된다는 것이다. 네일의 최대휨응력은 삽입각도가 0° 인 경우보다 삽입각도가 -10° 및 10° 인 경우가 전체적으로 30%이상 크게 증가하였으며, 삽입각도가 -10° 인 경우에 가장 크게 발생되었다. 즉, 네일의 삽입각도는 지표면과 수직면을 기준으로 -10° 인 경우 사면활동에 대한 네일의 저항력이 가장 크게 발휘됨을 알 수 있다. 그러므로, 쏘일네일링으로 사면을 보강할 경우 사면활동에 저항하는 방향(음의 방향)으로 경사를 주어 네일을 설치하는 것이 보강효과를 증가시키는데 도움이 될 것이다.

그림 12는 네일의 삽입각도가 지표면과 수직면을 기준으로 -10° , 0° 및 10° 일 경우에 네일 옆에 발생된 최대휨응

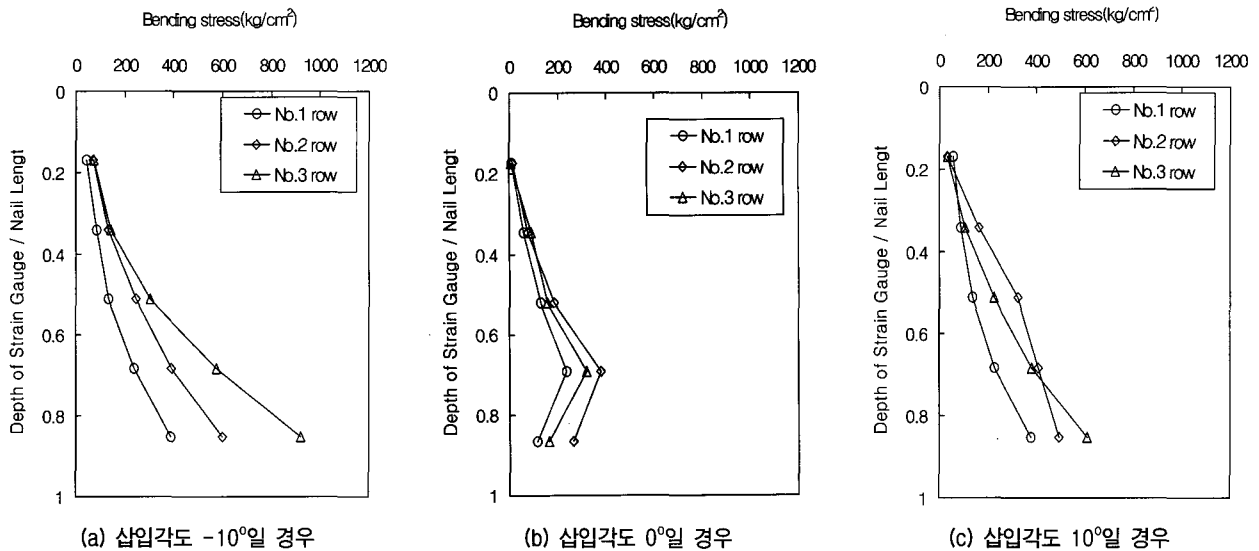
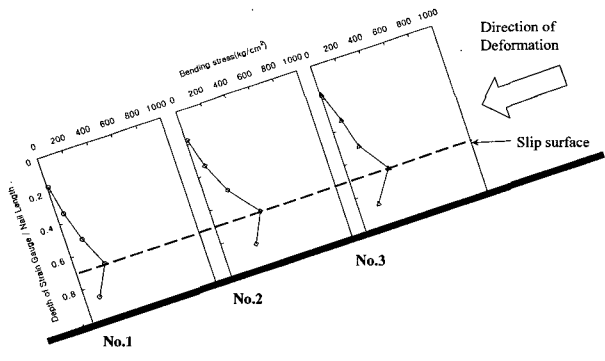
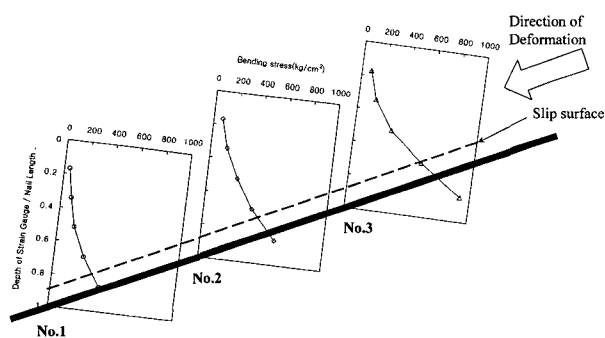


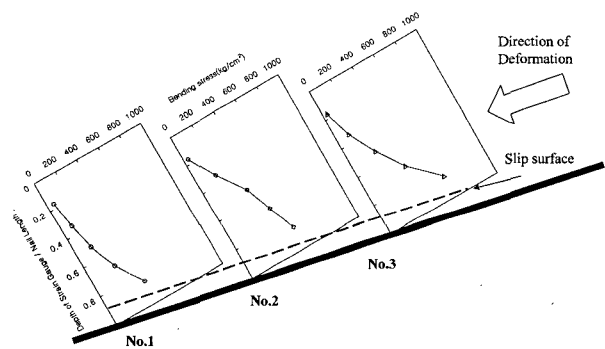
그림 11. 삽입각도에 따른 네일 휨응력 분포



(a) 삽입각도 0°일 경우



(b) 삽입각도 -10°일 경우

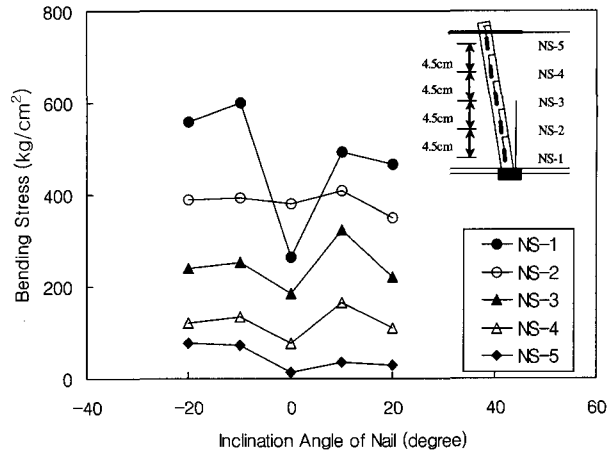


(c) 삽입각도 10°일 경우

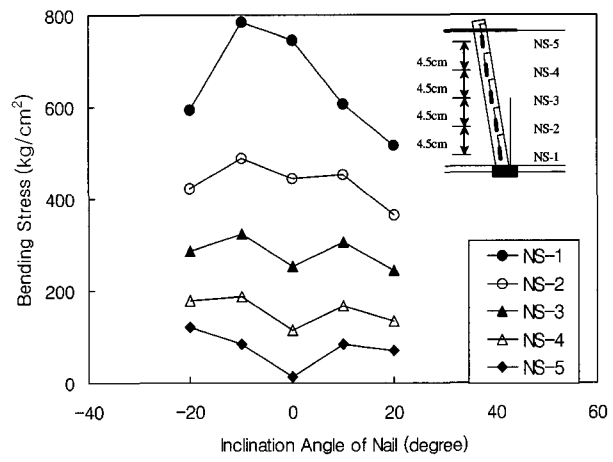
그림 12. 삽입각도에 따른 사면활동면의 예측

력을 연결한 것이다. 앞서 설명한 바와 같이 네일에 발생하는 최대휨응력을 연결한 선은 최대인장력선(T_{max} -line)으로 가정할 수 있으므로, 최대휨응력 연결선은 사면활동면으로 간주할 수 있다. 그림 12(a)는 네일의 삽입각도가 0°일 경우 최대휨응력 연결선을 나타낸 것으로 모든 열에서 네일의 최대휨응력은 지표면으로부터 깊이가 0.7인 위치에서 발생하는 것으로 나타났다. 한편, 그림 12(b) 및 (c)는 네일의 삽입각도가 -10° 및 10°일 경우 최대휨응력 연결선을 나타낸 것으로 모든 열에서 네일의 최대휨응력은 지표면으로부터 깊이가 0.9인 위치에서 발생하는 것으로 나타났다.

그림에서 보는 바와 같이 최대휨응력 연결선은 모두



(a) 면적비 0.5%인 경우



(b) 면적비 0.7%인 경우

그림 13. 삽입각도에 따른 네일의 최대휨응력 비교

직선인 것으로 나타났다. 최대휨응력 연결선을 사면활동면이라고 가정하면 모두 평면파괴형태의 사면활동이 발생할 것을 알 수 있다. 그리고, 삽입각도가 -10° 및 10°인 경우는 0°인 경우 보다 최대휨응력이 더 크게 발생되고, 최대휨응력 연결선의 깊이비도 0°인 경우 보다 더 깊은 위치에서 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서, 네일에 일정한 삽입각도가 주어진 경우 사면활동에 대한 저항효과는 증가되며, 이로 인하여 사면활동면이 깊어지는 경향을 보임을 알 수 있다.

그림 13은 삽입각도에 따른 네일의 최대휨응력을 비교한 것으로, 3열이 설치된 경우 No.2열의 네일에 대한 휨응력을 도시한 것이다. 그림 13(a) 및 (b)는 네일의 면적비가 각각 0.5% 및 0.7%인 경우를 나타낸 것으로 삽입각도가 -10°인 경우 최대휨응력이 가장 크게 발생되었으며, 삽입각도가 0°인 경우에는 최대휨응력이 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 그리고, 삽입각도

가 -20° 인 경우 최대휨응력은 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 최대휨응력이 발생한다는 것은 사면활동에 저항하는 힘이 크다는 것을 의미하므로, 쏘일네일링으로 사면을 보강할 경우 사면활동에 저항하는 방향(음의 방향)으로 경사를 주어 네일을 설치하는 것이 효과적이며, 쏘일네일링의 삽입각도는 지표면과 수직면을 기준으로 -10° 내외로 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 모형실험을 통하여 사면에 설치된 쏘일네일링의 면적비 및 삽입각도에 따른 사면안정효과를 검증하였으며, 이를 토대로 토층사면에 설치된 쏘일네일링에 대한 설계 및 시공기준을 마련하고자 하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결과를 요약정리하면 다음과 같다.

- (1) 모형실험에서 측정된 네일의 최대휨응력은 실제 네일에서의 최대인장력(T_{max})으로 가정할 수 있으므로, 최대휨응력을 연결한 선은 최대인장력선(T_{max} -line)이 된다. 그러므로, 모형실험에서의 최대휨응력 연결선은 사면활동면으로 간주할 수 있다.
- (2) 네일의 면적비가 변화됨에 따라 네일 설치위치에서의 사면활동양상이 변화되며, 네일의 면적비가 0.7%인 경우 최대휨응력이 가장 크게 발생되므로, 이때 사면활동에 대한 억지효과가 가장 크게 발휘됨을 알 수 있다.
- (3) 네일의 삽입각도가 변화됨에 따라 네일 설치위치에서의 사면활동깊이가 변화되며, 네일의 삽입각도가 지표면과 수직면을 기준으로 -10° 인 경우 최대휨응력이 가장 크게 발생되므로, 이때 사면활동에 대한 억지효과가 가장 크게 발휘됨을 알 수 있다.
- (4) 네일의 최대휨응력이 발휘되는 면적비 0.7% 및 삽입각도 -10° (지표면과 수직면을 기준)는 실제 토층사면에 설치된 쏘일네일링의 설계 및 시공시 적용 가능할 것으로 판단된다. 그리고, 이에 대한 검증을 위하여 현장자료를 수집하고 분석작업을 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 2001년 산학연 공동연구개발사업(R&D 2001-B04 : 활동역지시스템으로 보강된 사면의 설계법 및 안정해석 프로그램 개발연구)에 의하여 실시된 연구 결과임을 밝히며, 이에 감사의 뜻을 전하는 바이다.

참고 문헌

1. 김준석, 이석태, 김두년, 이상덕, 이승래 (1994), "Soil Nailing공법의 파괴구조에 관한 실험적 연구", '94 대한토목학회 학술발표회 논문집(I), pp.589-592.
2. 김홍택, 강인규, 성안제, 방윤경 (1995), "Nailed-Soil 굴착벽체의 발휘인장력 예측", 한국지반공학회논문집, 제11권 제2호, pp.79-97.
3. 이상덕 (1996), 토질시험 - 원리와 방법 -, 세론, pp.267-278.
4. 전성곤 (1999), "단계별 굴착시 쏘일네일링 벽체의 변위와 네일의 인장력 분석", 한국지반공학회논문집, 제15권 제6호, pp.71-86.
5. 홍원표, 송영석 (2005), "사면에 설치된 억지말뚝의 활동역지효과에 대한 실험적 연구", 한국지반공학회논문집, 제21권 제1호, pp.69-80.
6. 홍원표, 윤중만, 송영석, 공준현 (2001), "깊은 굴착시 쏘일네일링 흠막이벽의 변형거동", 대한토목학회논문집, 제21권 제2-C호, pp.141-150.
7. 홍원표, 한중근, 송영석, 문인철 (2002), "보강재 삽입각도에 따른 해성점토의 전단강도 특성", 02년 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.462-465.
8. Cartier, G. and Gigan, J. P. (1983), "Experiments and observations on soil nailing structures", Proc. 8th Congr. Europ. Mec. Sols. Trav. Fond., Vol.2, Helsinki, pp.473-476.
9. Gary, D. H. and Ohashi, H. (1983), "Mechanics of fiber reinforcement in sand", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.109, No.GT3, pp.335-353.
10. Gassler, G. and Gudehus, G. (1981), "Soil nailing - some soil mechanic aspects of insitu reinforced earth", Proc. 10th ICSMF, Vol.3, Session 12, Stockholm, pp.665-670.
11. Jewell, R. A. (1980), Some effects of reinforcement on the mechanical behaviour of soils, Ph.D. Thesis, Cambridge University.
12. Jewell, R. A. and Worth, C. P. (1987), "Direct shear tests on reinforced sand", Geotechnical Testing Journal, Vol.37, No.3, ASTM, pp.112-119.
13. Juran, I. and Elias, V. (1990), "Behavior and working stress design of soil nailed retaining structures", Performance of Reinforced Soil Structures, British Geotechnical Society, Thomas Telford, pp.207-212.
14. Juran, I., Baudrand, G., Farrag, K. and Elias, V. (1990), "Design of soil nailed retaining structures", Proc. on Design and Performance of Earth Retaining Structures, Geotechnical Special Publication No.25, ASCE, pp.644-659.
15. Marchal, J. (1984), "Reinforcement des sols par clouage-Etude experimentale en laboratoire", Proc. Int. Conf. on In Situ Soil and Rock Reinforcement, Paris, pp.275-278.
16. Plumelle, C., Schlosser, F., Delage, P. and Knochenmus, G. (1990), "French national research project on soil nailing : Clouterre",

- Proc. of Con. Design and Performance of Earth Retaining Structures, Geotechnical Special Publication No.25*, ASCE, pp.660-675.
17. Schlosser, F. (1983), "Similarities and differences in the behavior and design of reinforced earth and soil nailing, retaining structures", *Sols et Foundations*, pp.1184.
 18. Schlosser, F. (1993), *Recommendations Clouterre 1991 (English Translation)*, Federal Highway Administration, FHWA-SA-93-026.
 19. Shen, C. K., Bang, S., Romstad, J. M., Kulchin, L. and Denatale, J. S. (1981), "Field measurements of an earth support system", *Journal of the Geo. Eng. Div. ASCE*, Vol.107, GT12, pp.1625-1642.
 20. Stocker, M. F. and Riedinger, G. (1990), "The bearing behaviour of nailed retaining structures", *Proc. of Con. Design and Performance of Earth Retaining Structures, Geotechnical Special Publication No.25*, ASCE, pp.612-628.

(접수일자 2005. 5. 16, 심사완료일 2006. 2. 23)