

휨 저항을 고려한 네일 거동에 대한 수치해석적 분석

Numerical Analysis of the Nail Behavior Considering Resisting Bending Moment

전 상 수¹ Jeon, Sang-Soo
김 두 섭² Kim, Doo-Seop
장 양 원³ Jang, Yang-Won

Abstract

The application of soil nailing method has increased because it provides easier construction, economic efficiency, and stability than existing support methods. The mechanical comprehension of the soil-nailing system has not been established and the resisting shear force and bending moment of the soil-nail have been disregarded for the design of soil-nailing system. The soil nail consists of cement associated with rebar and resists shear force and bending moment mobilized by applied loading or soil-self weight. In this study, the slope analysis in the consideration of the resisting shear force and bending moment of the nail has been performed using FLAC^{2D}, which is programed by the finite difference method.

요 지

쏘일 네일 공법은 기존의 지보공법에 비해 시공의 편리성과 경제성, 안정성이 우수하여 최근 현장에 적용되는 사례가 증가하고 있다. 하지만, 쏘일 네일 공법에 대한 공학적인 접근은 미흡하여 우리나라에서는 지금까지 체계적인 설계 공법이 확립되지 못한 실정이다. 기존의 쏘일 네일 공법 설계에는 네일에 작용하는 전단 저항 및 휨 저항을 고려하지 않았으나, 철근과 시멘트로 구성된 쏘일 네일은 전단 및 휨에 대한 저항을 가지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 네일의 전단 및 휨 저항을 고려한 쏘일 네일 보강시 수치해석 프로그램인 FLAC^{2D}를 이용해 사면의 안정성을 분석하였다.

Keywords : Axial force, Bending moment, Finite difference analysis, Slope stability, Soil nailing

1. 서 론

1990년대 초 국내에 도입된 쏘일 네일링 공법은 경제성과 안정성의 장점을 바탕으로 횡방향 토압 지지를 위한 공법 등으로 널리 사용되고 있으며, 국내에서도 많은

학자들에 의해 쏘일 네일링 공법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(전상수 등, 2005, 2006; 천병식 등, 2004; Jeong et. al., 2005; Kim et. al., 2002). 최근 들어 쏘일 네일링 공법은 그 적용성이 더욱 확대되고 있으나 아직까지 세계적으로 공인된 설계방법은 없으며, 서로 다른

1 정회원, 인제대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Inje Univ., ssj@inje.ac.kr, 교신저자)

2 상합 E&C. 대리 (Assistant Manager, Sanghap E&C)

3 인제대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Inje Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

가정을 가지므로 설계 접근 또한 완전히 다르다. 또한 설계 변수가 많고 설계 변수 상호간의 민감도에 대한 연구가 제대로 이루어지지 않았다(천병식 등, 2004).

현재 대부분의 쏘일 네일 공법을 적용한 설계 및 해석에서는 네일에 발생하는 축력만을 고려하고 있다.

하지만, 철근과 시멘트로 구성된 네일은 전단 및 휨에 대한 저항을 가지며, 모형 및 실측적 실험을 통해 예측된 네일의 휨 저항은 토체내의 전단파괴면 부근에서 발휘되고, 파괴면 부근에 전단영역이 발생할 때, 휨 모멘트는 중요한 요소로 작용한다. 네일의 휨 저항은 극한상태에서 발휘하며, 파괴면을 따라 일어나는 인장력의 원인이 되기도 하지만, 안정성 측면에서는 유용한 효과를 발휘한다(김홍택, 2001). 그러므로 네일의 전단 및 휨 저항을 고려한 수치해석을 수행하였다.

따라서, 본 연구에서는 기존 설계 방식으로 해석한 일반 쏘일 네일과 네일의 휨 저항을 고려한 쏘일 네일을 수치해석 프로그램인 FLAC^{2D}를 이용하여 암사면과 토사사면에 보강해 암사면의 경우 건기시, 토사사면의 경우 건기시와 우기시로 구분하여 네일에 발생하는 하중을 분석하였으며, 강도 감소법을 이용하여 사면의 안전율을 계산하여 비교·분석하였다.

2. 쏘일 네일링 공법

일반적인 쏘일 네일링(soil nailing) 공법은 'NATM (new austrian tunneling method)'과 유사한 원 지반 보강 공법으로, 절취사면 및 굴착면에 대해 유연한 지보 등의 목적으로 유럽, 북미 및 동남아 등의 지역에서 널리 활용되고 있다. 그림 1은 쏘일 네일링 공법의 모식도이다.

쏘일 네일링은 기본적으로 네일을 프리스트레싱 없

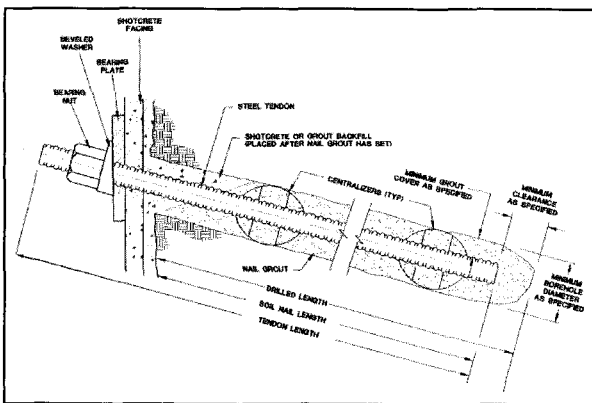


그림 1. 쏘일 네일링 공법의 모식도(FHWA, 1994)

이 비교적 촘촘한 간격으로 원 지반에 삽입하여 원 지반 자체의 전체적인 전단강도를 증대시키고 또한 공사도중 및 완료 후에 예상되는 지반의 변위를 억제하는 공법으로 지진 등 동적하중의 경우에도 과도한 변위 없이 저항능력을 충분히 발휘한다(Gässler & Gudehus, 1983).

굴착된 면이 수직에 가까울 경우 수동토압에 의해 네일에 발생하는 저항 전단력 및 휨 모멘트는 네일에 발생하는 축력에 비해 15% 미만으로 미미하여 기존의 일반적인 비탈면 설계나 안정해석에서는 네일의 전단 저항력 및 휨 저항력은 고려하지 않았다. 하지만, 시멘트로 그라우팅된 네일은 구조상 인장과 전단, 그리고 휨에 대한 저항력을 가진다. 지반에 보강된 네일은 토체의 파괴면 부근에서 휨 저항이 발생되며, 보강된 토체의 변형이 발생된다면 네일 또한 전단과 휨에 대한 저항이 발생하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 전단 저항 및 휨 저항을 고려한 쏘일 네일에 관한 연구를 수행하였다. 휨 저항을 고려한 쏘일 네일은 그림 2에서 보는 바와 같이 네일의 직경을 증가시키고, 단일 철근이 아닌 네 개의 철근을 일정한 간격으로 설치하여 네일의 단면 이차모멘트를 증가시켜 시멘트로 그라우팅하여 네일의 전단 저항 및 휨 저항을 증가시켰다.

3. 수치해석

3.1 수치해석 모형

표 1은 수치해석에 사용된 토사사면과 암사면의 지반 물성치다. 해석지반의 물성치는 기존 문헌(Terzaghi et al, 1984; 한국도로공사, 2002; Das, 2003)에 제시된 대표적인 지반 물성을 근거로 산정하였다. 토사사면의 경우 붕적층을 모사하였고, 암사면의 경우 경암층을 모사하였다.

해석 모형은 원호파괴를 재현한 토사사면과 평면파괴를 재현한 암사면을 모델링 하였다. 표 2는 토사사면과

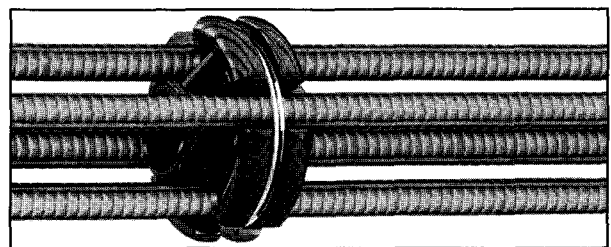


그림 2. 네일의 철근 배치도(전상수 등, 2006)

표 1. 수치해석에 사용된 지반 물성

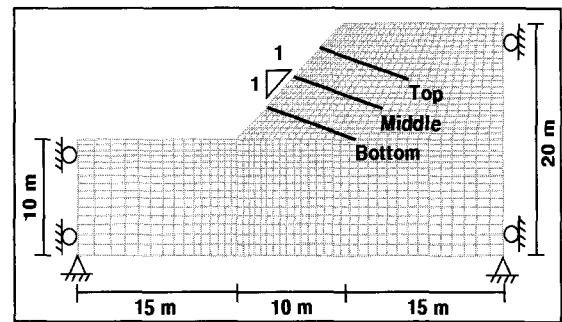
| | | 단위중량 (t/m ³) | 탄성계수 (t/m ²) | 점착력 (t/m ²) | 내부 마찰각 (°) | 프아송비 |
|------|----------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------|------|
| 토사사면 | | 1.5 | 1,500 | 2.5 | 30 | 0.25 |
| 암사면 | 암 | 2.5 | 2×10 ⁶ | 40 | 40 | 0.25 |
| | 점토(seam) | 1.5 | 200 | 1 | 20 | 0.4 |

표 2. 모델 해석조건

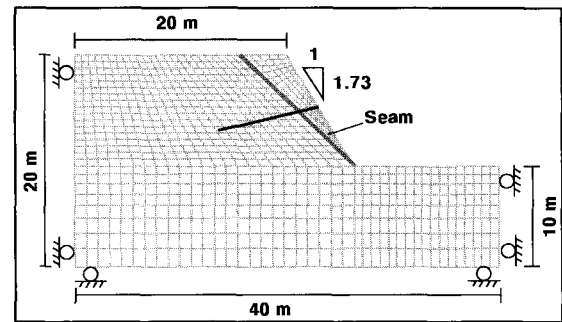
| | 경사(°) | 경계조건(fix) | | 격자 (개) | 네일길이 (m) | 네일각도 (°) | 네일직경 (mm) | 네일개수 (개) |
|------|--------------------|-----------|-------|-----------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| | | 측면 | 바닥 | | | | | |
| 토사사면 | 사면: 60 | 수평 | 수평·수직 | 1,275 | 10 | 15 | 90, 105, 130 | 1~3 |
| 암사면 | 사면: 60 seam: 45 | 수평 | 수직 | 855 | | | | |

암사면의 해석조건을 나타낸다. 토사사면은 그림 3(a)와 같이 경사 45°의 사면을 모델링 하였으며, 암사면은 그림 3(b)와 같이 경사 60°의 사면 방향으로 경사 45°와 폭 0.2m의 점토질 seam을 형성하였다. 토사사면의 경우 네일 개수와 직경 변화에 따라 축력 만을 고려한 일반 쏘일 네일과 휨 저항을 동시에 고려한 쏘일 네일을 사면에 보강하여 건기시와 우기시로 구분하여 영향을 분석하였고, 암사면의 경우 건기시 사면에 보강된 네일이 1개 일 경우 네일의 직경 변화에 따라 일반 쏘일 네일과 휨 저항을 동시에 고려한 쏘일 네일의 영향을 분석하였다. 우기시 사면은 완전 포화된 것으로 가정하였다.

토사사면에서 모델의 경계 조건은 양쪽 측면의 경우 수평 변위를 고정하였으며, 바닥면은 우기시 모델경계 부분에서 토사의 유동을 억지하기 위해 수평과 수직 변위 모두를 고정하였다. 수치해석 모형에는 총 1,275개의 Zone이 사용되었으며, 해석모델로는 가장 일반적인 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 사면에 보강된 네일은 길이 10m, 각도는 15°로 설치되었다. 네일 보강재의 직경은 90mm, 105mm, 130mm로 변화시켰으며, 보강된 네일의 개수는 1개, 2개, 3개로 증가시켰다. 네일을 1개 보강한 경우는 사면의 중간(Middle), 네일을 2개 보강한 경우는 중간과 하단(Bottom), 네일을 3개 보강한 경우에는 상단(Top)과 중단, 하단에 설치하였다. 암사면에서 모델의 경계조건은 양쪽 측면의 경우 수평변위를 고정하였으며, 바닥면의 경우 수직변위를 고정하였다. 수치해석을 모형에는 총 855개의 Zone이 사용되었고, 해석 모델과 사면에 보강된 네일의 길이, 설치 각도는 토사사면과 동일하게 모델링 되었다. 네일 보강재의 직경은 90mm, 120mm, 150mm가 사용되었다. 그림 3은 해석에 사용된 수치해석 모식도이다.



(a) 토사사면



(b) 암사면

그림 3. 수치해석 모식도

일반적으로 쏘일 네일 거동 해석시 네일의 직경이 작으므로 휨 저항을 무시하고 축력만을 고려한 케이블 요소로 모델링 하였으나, 실제로 네일의 직경을 증가시키면 휨 저항이 급격히 증가하므로, 본 논문에서는 직경의 변화에 따른 네일의 휨 저항을 고려한 파일 요소로 모델링 하여 사면에 안정성에 어떠한 영향을 미치는지를 조사하였다. 케이블 요소는 그리드(grid)내의 특정점에 앵커링되거나 그라우트된 일차원 축 요소이다. 그림 4는 케이블 요소의 모식도이다. 케이블 요소는 그리드가 변형함에 따라 길이 방향으로 축력이 발생한다. 그림 5에 케이블 요소의 거동특성을 나타내었다. 케이블 요소는

압축이나 인장으로 항복할 수 있지만 휨 모멘트를 받지는 못한다. 원한다면 미리 인장을 가할 수 있다.

파일 요소는 그리드에 수직력 및 전단력과 휨 모멘트

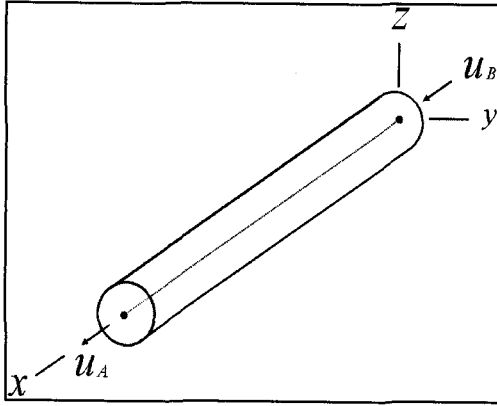


그림 4. 케이블 요소의 모식도

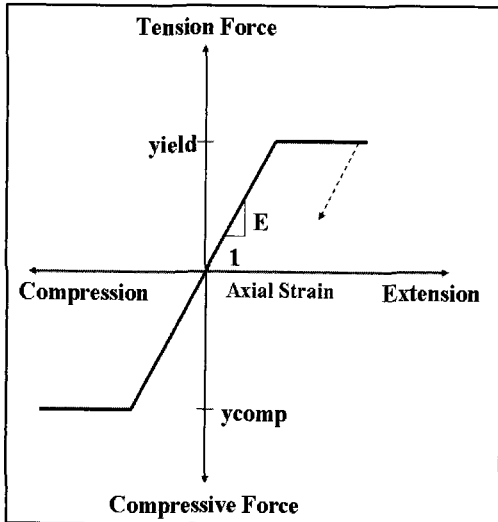
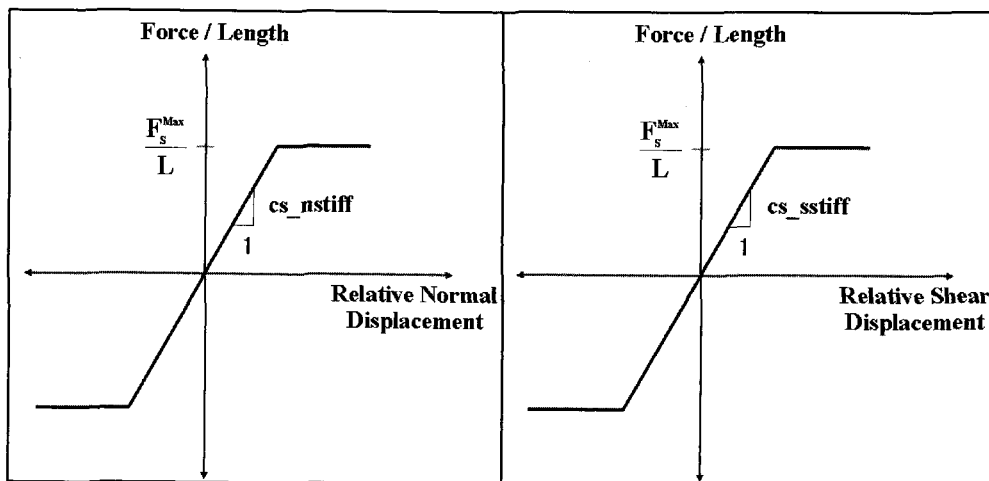


그림 5. 케이블 요소의 거동특성

를 전달할 수 있는 이차원 요소로 전단력(shear force)은 요소에 평행하게 작용하며 수직력(normal force)은 요소에 수직인 방향으로 작용한다. 그림 6은 파일 요소의 수직 스프링과 전단 스프링의 거동을 나타낸다. 파일 요소와 지반과의 전단거동은 파일 요소의 절점에서 스프링-슬라이더 시스템으로 기술된다. 파일 절점과 지반과의 상대변위가 발생하는 동안 경계에서의 전단거동은 전단강성(coupling spring shear stiffness, cs_sstiff)에 의해 기술된다. 파일 요소와 지반과의 수직거동은 파일절점의 운동방향에 종속적인 한계수직력을 지니는 선형스프링으로 표현된다. 파일요소와 지반과의 경계에서 수직거동은 수직강성(coupling spring normal stiffness, cs_nstiff)에 의해 기술된다. 파일 요소는 그리드와 수직 및 전단 스프링을 통해서 상호작용을 하며, 여기서 스프링은 파일 요소 절점의 그리드간에 힘과 운동을 전달하는 비선형 연결체로 정의될 수 있다. 전단 스프링은 케이블 요소의 그라우트 전단거동과 동일하며 수직 스프링은 하중반전(load reversal)과 파일과 그리드간의 갭(gap)의 형성을 모델링하는 능력을 포함하며, 연속 파일 벽체와 접촉 가능한 지반이나 파일 주위를 누르는 지반의 효과를 묘사할 수 있다(Itasca, 2002).

일반 쓰일 네일은 29mm(SD40)의 철근을 사용하였고, 휨 저항을 고려한 쓰일 네일은 4개의 16mm(SD40) 철근을 사용하였으며, 수치해석에 적용된 휨 저항을 고려한 쓰일 네일의 단면적과 탄성계수, 단면 이차모멘트는 철근과 시멘트 그라우트의 단면을 환산한 값을 사용하였다. 사면에 보강된 네일을 파일 요소로 해석할 경우 네일은 횡 하중을 받게 된다. 따라서, 실제 사면안정 해



(a) 파일 요소의 수직 스프링 거동

(b) 파일 요소의 전단 스프링 거동

그림 6. 파일 요소의 거동특성

표 3. 토사사면에 보강된 네일 물성(90mm)

| | 단면적 (m ²) | 탄성계수 (t/m ²) | 단면이차모멘트 (t/m ⁴) | 그라우트 전단강성 (t/m ²) | 그라우트 점착강도 (t/m ²) | 지반-네일 경계면 전단강성 (t/m/m) | 지반-네일 경계면 전단점착력 (t/m) | 지반-네일 경계면 수직강성 (t/m/m) | 지반-네일 경계면 수직점착력 (t/m) |
|-----------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 케이블 요소 | 6.6×10 ⁻⁴ | 2×10 ⁷ | - | 7.069 | 5×10 ⁵ | - | - | - | - |
| 파일 요소 | 6.4×10 ⁻³ | 4.4×10 ⁶ | 1.89×10 ⁻⁶ | - | - | 1,000 | 0.707 | 431 | 12.6 |

표 4. 암사면에 보강된 네일 물성(90mm)

| | 단면적 (m ²) | 탄성계수 (t/m ²) | 단면이차모멘트 (t/m ⁴) | 그라우트 전단강성 (t/m ²) | 그라우트 점착강도 (t/m ²) | 지반-네일 경계면 전단강성 (t/m/m) | 지반-네일 경계면 전단점착력 (t/m) | 지반-네일 경계면 수직강성 (t/m/m) | 지반-네일 경계면 수직점착력 (t/m) |
|-----------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 케이블 요소 | 6.6×10 ⁻⁴ | 1×10 ⁷ | - | 14.14 | 2.5×10 ⁵ | - | - | - | - |
| 파일 요소 | 6.4×10 ⁻³ | 2.1×10 ⁶ | 2.93×10 ⁻⁷ | - | - | 66,700 | 5.65 | 29,000 | 87.73 |

석에 선행하여 지반-네일 간의 횡 방향 거동을 분석하기 위해 원 지반 모델을 모사한 후, 네일에 수평력을 가하여 하중과 지반-네일 간의 상대변위, 지반의 응력을 계산하여 파일요소로 해석한 네일의 거동특성을 분석한 후, 지반-네일 경계면의 전단강성과 전단점착력(cohesive strength of the shear coupling spring, cs_scoh), 수직강성, 수직점착력(cohesive strength of the normal coupling spring, cs_ncoh)을 계산하였다.

수치해석 시 일반 쏘일 네일은 축력과 지반-네일 경계면의 전단 스프링 거동을 분석하였으며, 휨 저항을 고려한 쏘일 네일은 축력과 지반-네일 경계면의 전단 및 수직 스프링 거동, 네일의 전단력 및 휨 모멘트를 분석하였다.

표 3은 토사사면에서 수치해석에 사용된 90mm의 케이블 요소로 모델링한 일반 쏘일 네일 물성과 파일 요소로 모델링한 휨 저항을 고려한 쏘일 네일 물성을 나타내며, 표 4는 암사면에서 수치해석에 사용된 90mm의 일반 쏘일 네일 물성과 휨 저항을 고려한 쏘일 네일 물성을 나타낸다.

3.2 강도 감소법

본 해석에 사용된 수치해석 프로그램인 FLAC^{2D}에서는 사면의 안전율(factor of safety, FS) 계산 시 강도 감소법(strength reduction method)을 사용하여 사면 안전율을 계산한다. 강도 감소법은 지반의 전단강도인 점착력과 내부 마찰각을 점차적으로 감소시켜 프로그램에서 계산이 수렴되지 않은 한계까지 계산을 수행하여 그

한계를 사면이 파괴되는 것으로 간주하며, 지반 전단강도의 최대 저하율을 사면의 최소안전율로 계산한다.

4. 해석결과

일반 쏘일 네일 해석에 사용된 케이블 요소는 네일의 길이 방향에 대해 수평으로 작용하는 힘, 휨 저항을 고려한 휨 저항 쏘일 네일 해석에 사용된 파일 요소는 케이블 요소에 작용하는 힘과 길이의 수직 방향으로 힘이 추가된다. 케이블 요소로 해석한 네일은 네일의 축력(axial force)과 지반-네일 경계면의 전단력(cs_shear force)을 분석하였고, 파일 요소로 해석한 네일은 네일의 축력(axial force)과 전단력(shear force), 휨 모멘트(bending moment), 지반-네일 경계면의 전단력과 수직 방향 반력(cs_shear force & cs_normal force)을 분석하였다.

4.1 토사사면

4.1.1 전기서

표 5는 직경 90mm와 105mm, 130mm의 케이블 요소로 해석한 네일과 파일 요소로 해석한 네일을 토사사면에 보강했을 때 네일의 반력을 나타낸다.

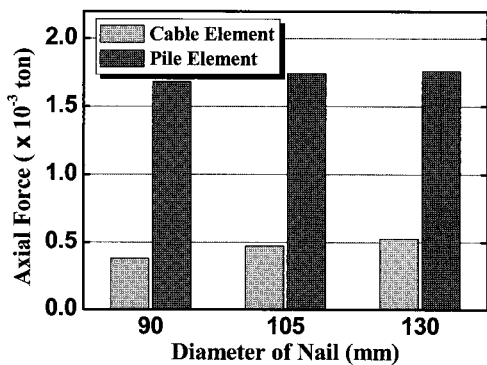
그림 7은 사면에 보강된 네일이 1개인 경우 각각 케이블 요소로 해석한 네일과 파일 요소로 해석한 네일의 직경에 따른 축력과 지반-네일 경계면의 전단력 변화를 나타낸다.

직경 90mm의 네일을 1개 보강했을 경우 케이블 요소로 해석한 네일의 축력은 3.79×10⁴ton, 지반-네일 경계

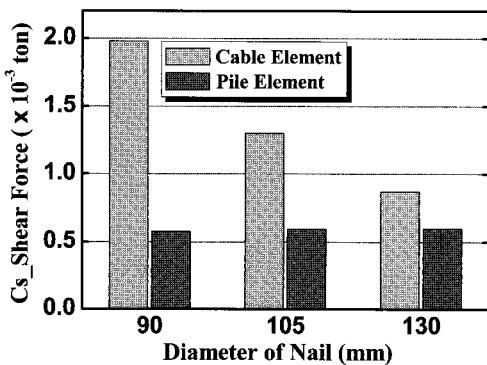
표 5. 건기시 토사사면에 보강된 네일 반력

| | | 케이블 요소 | | 파일 요소 | | | | |
|---------|-------|--|--|--|--|--|--|--|
| | | Axial force (ton) | cs_shear force (ton) | Axial force (ton) | cs_shear force (ton) | Shear force (ton) | Bending moment (t·m) | cs-normal force (ton) |
| 1개 보강 시 | 90mm | M: 3.79×10^{-4} | M: 1.98×10^{-3} | M: 1.68×10^{-3} | M: 5.76×10^{-4} | M: 3.88×10^{-6} | M: 4.03×10^{-6} | M: 4.21×10^{-6} |
| | 105mm | M: 4.71×10^{-4} | M: 1.30×10^{-3} | M: 1.74×10^{-3} | M: 5.93×10^{-4} | M: 6.53×10^{-6} | M: 7.18×10^{-6} | M: 6.47×10^{-6} |
| | 130mm | M: 5.27×10^{-4} | M: 8.72×10^{-4} | M: 1.76×10^{-3} | M: 6.00×10^{-4} | M: 1.30×10^{-5} | M: 1.59×10^{-5} | M: 1.31×10^{-5} |
| 2개 보강 시 | 90mm | M: 4.64×10^{-4} B: 2.56×10^{-4} | M: 8.72×10^{-4} B: 4.80×10^{-4} | M: 1.60×10^{-3} B: 1.10×10^{-3} | M: 5.53×10^{-4} B: 3.93×10^{-4} | M: 3.56×10^{-6} B: 3.19×10^{-6} | M: 3.88×10^{-6} B: 3.56×10^{-6} | M: 3.62×10^{-6} B: 3.58×10^{-6} |
| | 105mm | M: 7.18×10^{-4} B: 3.57×10^{-4} | M: 8.14×10^{-4} B: 4.96×10^{-4} | M: 1.64×10^{-3} B: 1.13×10^{-3} | M: 5.65×10^{-4} B: 4.03×10^{-4} | M: 5.91×10^{-6} B: 5.25×10^{-6} | M: 6.74×10^{-6} B: 6.43×10^{-6} | M: 5.98×10^{-6} B: 6.13×10^{-6} |
| | 130mm | M: 5.74×10^{-4} B: 3.33×10^{-4} | M: 8.11×10^{-4} B: 5.31×10^{-4} | M: 1.66×10^{-3} B: 1.14×10^{-3} | M: 5.72×10^{-4} B: 4.06×10^{-4} | M: 1.18×10^{-5} B: 1.03×10^{-5} | M: 1.53×10^{-5} B: 1.31×10^{-5} | M: 1.19×10^{-5} B: 1.02×10^{-5} |
| 3개 보강 시 | 90mm | T: 1.67×10^{-3} M: 9.44×10^{-4} B: 1.22×10^{-3} | T: 1.28×10^{-3} M: 8.99×10^{-4} B: 6.75×10^{-4} | T: 2.17×10^{-3} M: 1.36×10^{-3} B: 1.10×10^{-3} | T: 8.32×10^{-4} M: 4.80×10^{-4} B: 3.95×10^{-4} | T: 5.50×10^{-6} M: 3.07×10^{-6} B: 3.08×10^{-6} | T: 5.52×10^{-6} M: 4.02×10^{-6} B: 3.66×10^{-6} | T: 7.73×10^{-6} M: 3.09×10^{-6} B: 4.18×10^{-6} |
| | 105mm | T: 3.52×10^{-3} M: 1.95×10^{-3} B: 1.64×10^{-3} | T: 3.24×10^{-3} M: 1.95×10^{-3} B: 1.28×10^{-3} | T: 2.21×10^{-3} M: 1.38×10^{-3} B: 1.12×10^{-3} | T: 2.21×10^{-4} M: 4.89×10^{-4} B: 4.00×10^{-4} | T: 8.81×10^{-6} M: 5.03×10^{-6} B: 4.91×10^{-6} | T: 8.86×10^{-6} M: 6.87×10^{-6} B: 6.24×10^{-6} | T: 1.18×10^{-5} M: 5.03×10^{-6} B: 6.07×10^{-6} |
| | 130mm | T: 3.71×10^{-3} M: 1.93×10^{-3} B: 1.52×10^{-3} | T: 3.35×10^{-3} M: 1.92×10^{-3} B: 1.08×10^{-3} | T: 2.25×10^{-3} M: 1.40×10^{-3} B: 1.13×10^{-3} | T: 8.60×10^{-4} M: 4.93×10^{-4} B: 4.05×10^{-4} | T: 1.67×10^{-5} M: 1.02×10^{-5} B: 9.74×10^{-6} | T: 1.53×10^{-5} M: 1.25×10^{-5} B: 1.68×10^{-5} | T: 1.95×10^{-5} M: 1.02×10^{-5} B: 9.76×10^{-6} |

T : Nail at Top, M : Nail at Middle, B : Nail at Bottom



(a) 축력



(b) 지반-네일 경계면의 전단력

그림 7. 건기시 직경에 따른 네일 반력

면의 전단력은 1.98×10^{-3} ton으로 계산되었으며, 파일 요소로 해석한 네일의 축력은 1.68×10^{-3} ton, 지반-네일 경

계면의 전단력은 5.76×10^{-4} ton으로 계산되었다. 파일 요소로 해석한 네일은 케이블 요소로 해석한 네일에 비해 네일의 축력이 약 350%가 증가하였으며, 지반-네일 경계면의 전단력은 케이블 요소로 해석한 네일에 비해 약 71%가 감소하였다. 직경이 증가함에 따라 네일의 축력도 증가하였으며, 105mm와 130mm의 케이블 요소로 해석한 네일의 경우 90mm 네일에 비해 축력은 각각 약 24%와 39%가 증가하였고, 지반-네일 경계면의 전단력은 각각 약 34%와 56%가 감소하였다.

105mm와 130mm의 파일 요소로 해석한 네일의 축력은 직경이 증가함에 따라 90mm 네일에 비해 약 3.6%와 4.8%가 증가하였으며, 지반-네일 경계면의 전단력은 약 3.0%와 4.2%가 증가하였다. 네일의 전단력은 약 68%와 230%가 증가하였으며, 단면 이차모멘트가 증가함에 따라 휨 모멘트는 약 78%와 300%가 증가하였다. 지반-네일 경계면의 수직 방향 반력은 약 54%와 210%가 증가하였다. 파일 요소로 해석한 네일은 케이블 요소로 해석한 네일에 비해 축력과 지반-네일 경계면의 전단력 증가율은 작았으나 전단력과 휨 모멘트, 지반-네일 경계면의 수직 방향 반력의 증가율이 크게 나타났다.

90mm 네일을 2개 보강했을 경우 사면의 중단에 보강된 90mm 케이블 요소로 해석한 네일의 축력은 4.64×10^{-4} ton, 지반-네일 경계면의 전단력은 8.72×10^{-4} ton으로 계산되었으며, 하단에 보강된 네일의 축력은 2.56×10^{-4} ton, 지

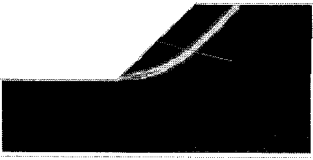
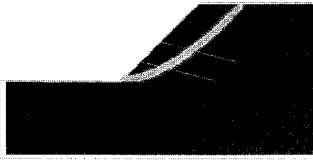
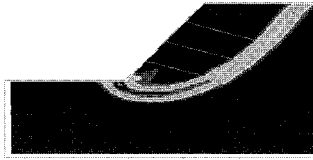
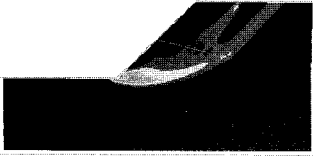
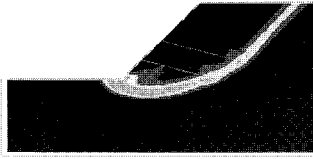
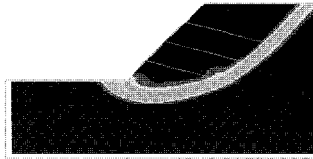
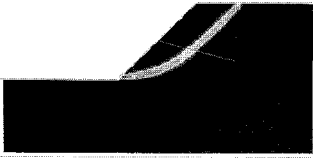
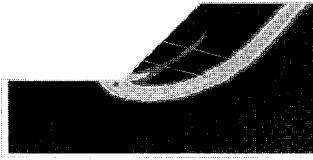
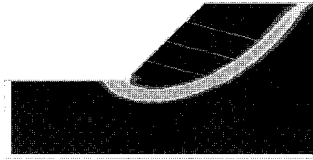

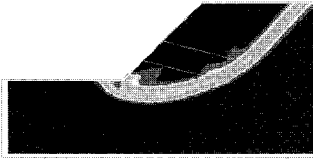
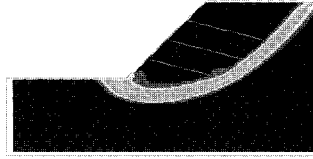
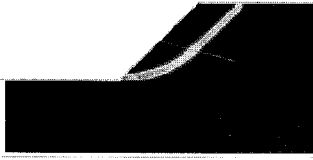
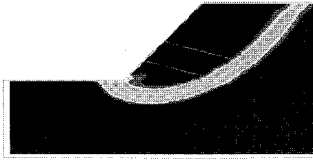
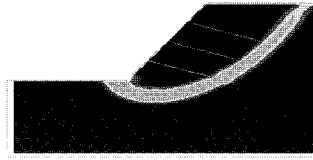
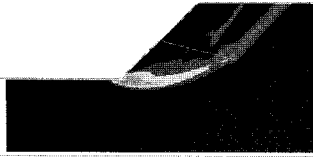
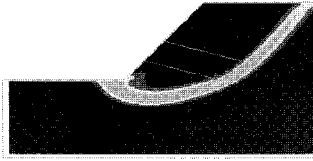
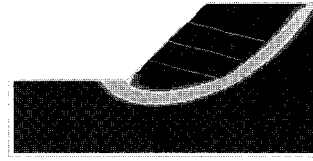
반-네일 경계면의 전단력은 $4.80 \times 10^4 \text{ ton}$ 으로 계산되어 사면의 중단에 보강된 네일이 하단에 보강된 네일보다 더 많은 하중을 분담하는 것으로 나타났다. 파일 요소로 해석한 네일에서도 중단에 보강된 네일이 하단에 보강된 네일에 비해 더 많은 하중을 분담하였고, 네일의 직경과 보강된 네일의 개수가 증가한 경우에도 케이블 요소로 해석한 네일과 파일 요소로 해석한 네일 모두 상단에 보강된 네일이 중단과 하단에 보강된 네일에 비해 더 많은 하중을 분담하는 것으로 나타났다.

표 6과 그림 8은 건기시 사면의 안전율을 나타낸다.

사면에 보강된 네일의 직경과 개수가 증가할수록 사면의 파괴면은 사면의 안쪽으로 이동함을 알 수 있다. 90mm 케이블 요소로 해석한 네일의 경우 보강된 네일이 1개인 경우 파괴면은 네일의 중간에서 발생하지만, 보강된 네일이 3개인 경우에는 파괴면이 네일의 끝부분에서 발생하였다.

90mm 네일을 사면에 1개 보강했을 경우 케이블 요소로 해석한 네일은 안전율이 2.29로 계산되었고, 파일 요소로 해석한 네일은 안전율이 2.41로 계산되어 케이블 요소로 해석한 네일에 비해 안전율이 5.2%가 증가하였

표 6. 건기시 토사사면의 안전율

| | 1개 보강시 | 2개 보강시 | 3개 보강시 |
|--------------------|--|---|--|
| 90mm 케이블 요소 |  FS : 2.29 |  FS : 2.58 |  FS : 2.65 |
| 90mm 파일 요소 |  FS : 2.41 |  FS : 2.65 |  FS : 2.69 |
| 105mm 케이블 요소 |  FS : 2.33 |  FS : 2.62 |  FS : 2.65 |
| 105mm 파일 요소 |  FS : 2.44 |  FS : 2.67 |  FS : 2.72 |
| 130mm 케이블 요소 |  FS : 2.39 |  FS : 2.66 |  FS : 2.66 |
| 130mm 파일 요소 |  FS : 2.48 |  FS : 2.72 |  FS : 2.74 |

다. 사면에 보강된 네일의 개수가 증가함에 따라 사면의 안전율도 증가하였으며, 사면에 보강된 네일이 3개인 경우에는 안전율이 케이블 요소로 해석한 네일에서는 2.65로 계산되었고, 파일 요소로 해석한 네일에서는 2.69로 계산되어 보강된 네일이 1개일 경우보다는 안전율의 증가율이 감소하였다.

케이블 요소로 해석한 네일은 105mm와 130mm 네일의 경우 90mm 네일에 비해 사면에 보강된 네일이 1개인 경우 안전율은 각각 1.7%와 4.4%가 증가하였으며, 네일이 2개 보강된 경우 안전율은 각각 1.5%와 3.1%가 증가하였다. 네일이 3개 보강된 경우 안전율은 각각 0%와 0.3%가 증가하여 안전율의 증가가 거의 없는 것으로 나

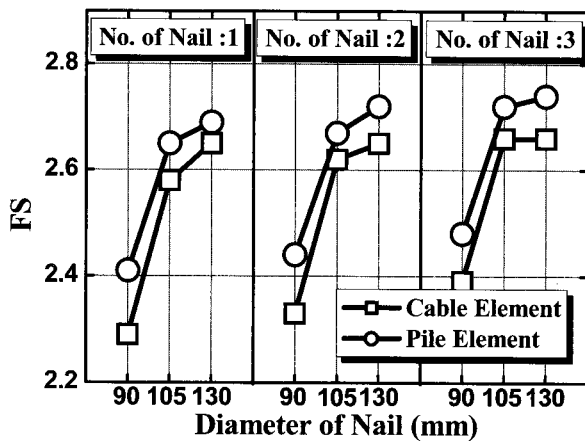


그림 8. 건기시 토사사면의 안전율 변화

타났다.

파일 요소로 해석한 네일은 105mm와 130mm 네일의 경우 90mm 네일에 비해 사면에 보강된 네일이 1개인 경우 안전율은 각각 1.2%와 2.9%가 증가하였으며, 네일이 2개 보강된 경우 안전율은 각각 0.7%와 2.6%가 증가하였다. 네일이 3개 보강된 경우 안전율은 각각 1.1%와 1.9%가 증가하였다.

본 해석에 사용된 프로그램인 FLAC에서는 사면 안전율을 강도 감소법으로 계산하여 산정하므로 건기시 안전율 계산후 사면에 보강된 네일의 반력은 매우 큰 폭으로 증가하였다. 안전율 계산후 네일의 반력은 사면 파괴 시 네일의 반력을 나타내는 것으로, 90mm 케이블 요소로 해석한 네일을 1개 보강한 경우 사면의 안전율은 2.29로 안전율 계산후, 축력은 6.8ton, 지반-네일 경계면의 전단력은 1.9ton으로 계산되었으며, 파일 요소로 해석한 네일의 사면 안전율은 2.41로 안전율 계산후, 축력은 6.9ton, 지반-네일 경계면의 전단력은 3.8ton, 네일의 전단력과 휨 모멘트는 각각 3.8ton과 7.4 t·m, 지반-네일 경계면의 수직 방향 반력은 3ton으로 계산되었다.

4.1.2 우기시

표 7은 직경 90mm와 105mm, 130mm의 케이블 요소로 해석한 네일과 파일 요소로 해석한 네일을 토사사면에 보강했을 때 네일의 반력을 나타낸다.

표 7. 우기시 토사사면에 보강된 네일 반력

| | | 케이블 요소 | | 파일 요소 | | | | |
|---------|-------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|---|--|
| | | Axial force (ton) | cs_shear force (ton) | Axial force (ton) | cs_shear force (ton) | Shear force (ton) | Bending moment (t·m) | cs-normal force (ton) |
| 1개 보강 시 | 90mm | M: 6.53 | M: 1.73 | M: 6.39 | M: 1.76 | M: 6.16 | M: 11.41 | M: 6.04 |
| | 105mm | M: 7.31 | M: 2.04 | M: 7.34 | M: 2.06 | M: 5.73 | M: 11.81 | M: 5.30 |
| | 130mm | M: 9.14 | M: 2.51 | M: 9.55 | M: 2.53 | M: 6.07 | M: 13.85 | M: 4.23 |
| 2개 보강 시 | 90mm | M: 5.20 B: 4.83 | M: 1.34 B: 1.46 | M: 5.37 B: 5.27 | M: 1.34 B: 1.47 | M: 7.14×10^{-2} B: 3.17×10^{-2} | M: 6.56×10^{-2} B: 3.22×10^{-2} | M: 0.11 B: 4.63×10^{-2} |
| | 105mm | M: 6.02 B: 5.40 | M: 1.62 B: 1.67 | M: 6.44 B: 5.44 | M: 1.56 B: 1.76 | M: 0.16 B: 3.89×10^{-2} | M: 0.11 B: 3.89×10^{-2} | M: 0.28 B: 4.72×10^{-2} |
| | 130mm | M: 7.40 B: 7.73 | M: 2.00 B: 2.03 | M: 7.95 B: 5.20 | M: 1.95 B: 2.12 | M: 0.25 B: 5.42×10^{-2} | M: 0.18 B: 4.59×10^{-2} | M: 0.44 B: 6.89×10^{-2} |
| 3개 보강 시 | 90mm | T: 4.67 M: 5.26 B: 4.79 | T: 1.29 M: 1.32 B: 1.47 | T: 5.26 M: 5.49 B: 6.32 | T: 1.28 M: 1.38 B: 1.46 | T: 0.88 M: 1.28 B: 2.47 | T: 0.99 M: 1.04 B: 1.47 | T: 1.68 M: 1.97 B: 2.84 |
| | 105mm | T: 6.12 M: 4.63 B: 4.91 | T: 1.41 M: 1.58 B: 1.68 | T: 5.11 M: 6.29 B: 4.05 | T: 1.35 M: 1.54 B: 1.77 | T: 0.17 M: 8.60×10^{-2} B: 2.22×10^{-2} | T: 0.15 M: 5.56×10^{-2} B: 3.15×10^{-2} | T: 0.27 M: 0.13 B: 3.88×10^{-2} |
| | 130mm | T: 5.62 M: 6.54 B: 5.44 | T: 1.60 M: 1.92 B: 2.12 | T: 5.84 M: 7.86 B: 5.01 | T: 1.68 M: 1.96 B: 1.99 | T: 0.23 M: 9.52×10^{-2} B: 4.18×10^{-2} | T: 0.18 M: 9.52×10^{-2} B: 5.16×10^{-2} | T: 0.41 M: 0.14 B: 5.19×10^{-2} |

T : Nail at Top, M : Nail at Middle, B : Nail at Bottom

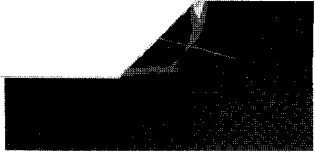


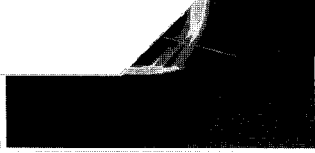

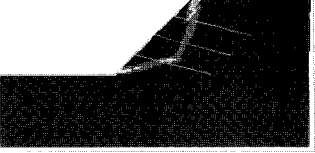
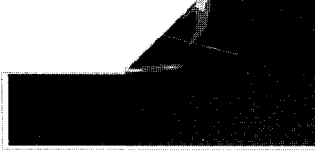
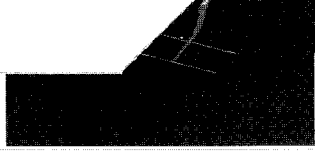

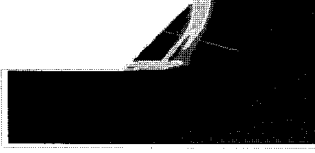
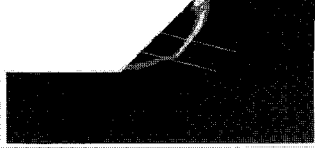
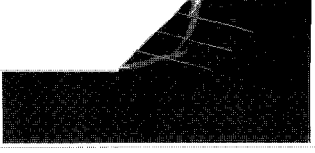


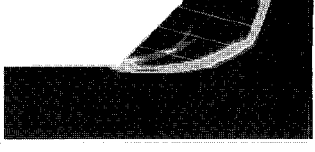
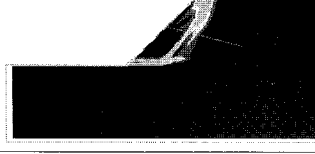
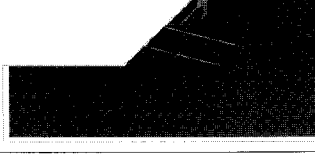
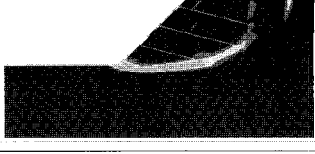
우기시 네일의 축력과 지반-네일 경계면의 전단력은 건기시에 비해 매우 큰 폭으로 증가하였다. 우기시 사면에 보강된 네일이 1개인 경우 케이블 요소로 해석한 네일과 파일 요소로 해석한 네일 모두 안전율이 1 이하로 계산되어 사면이 파괴되는 것으로 계산되었다.

90mm 네일을 2개 보강했을 경우 사면의 중단에 보강된 케이블 요소로 해석한 네일의 축력은 5.2ton, 지반-네일 경계면의 전단력은 1.34ton으로 계산되었으며, 하단에 보강된 네일의 축력은 4.83ton, 지반-네일 경계면의 전단력은 1.46ton으로 계산되었다. 파일 요소로 해석한 네일은 중단에 보강된 네일의 축력은 5.37ton, 지반-네

일 경계면의 전단력은 1.34ton으로 계산되었으며, 하단에 보강된 네일의 축력은 5.27ton, 지반-네일 경계면의 전단력은 1.47ton으로 계산되어 케이블 요소로 해석한 네일에 비해 큰 증가율이 나타나지는 않았다. 건기시 지반-네일 경계면의 전단력은 상부에 보강된 네일이 하부에 보강된 네일에 비해 더 큰 값으로 계산되었으나, 우기시는 하부에 보강된 네일이 더 큰 값으로 계산되었다. 표 8과 그림 9는 우기시 사면의 안전율을 나타낸다.

90mm 네일을 사면에 1개 보강했을 경우 사면의 안전율은 1 미만으로 나타났으며, 네일을 2개 보강한 경우 케이블 요소로 해석한 네일은 안전율이 1.06으로 계산되었

표 8. 우기시 토사사면의 안전율

| | 1개 보강시 | 2개 보강시 | 3개 보강시 |
|--------------------|---|---|--|
| 90mm 케이블 요소 |  FS : < 1 |  FS : 1.06 |  FS : 1.16 |
| 90mm 파일 요소 |  FS : < 1 |  FS : 1.03 |  FS : 1.18 |
| 105mm 케이블 요소 |  FS : < 1 |  FS : 1.11 |  FS : 1.23 |
| 105mm 파일 요소 |  FS : < 1 |  FS : 1.09 |  FS : 1.24 |
| 130mm 케이블 요소 |  FS : < 1 |  FS : 1.17 |  FS : 1.39 |
| 130mm 파일 요소 |  FS : < 1 |  FS : 1.21 |  FS : 1.39 |

고, 파일 요소로 해석한 네일은 안전율이 1.03로 계산되어 안전율의 변화가 크지 않았다. 사면에 보강된 네일의 개수가 증가함에 따라 사면의 안전율도 증가하였으며, 사면에 보강된 네일이 3개인 경우에도 안전율이 유사하였다. 130mm 네일을 사면에 2개 보강했을 경우 파일 요소로 해석한 네일의 안전율은 1.21로 케이블 요소로 해석한 네일에 비해 안전율이 3.4% 증가하였으나, 네일을 3개 보강한 경우 파일 요소로 해석한 네일과 케이블 요소로 해석한 네일의 안전율은 동일한 값이 계산되었다. 보강된 네일이 2개인 사면에서 케이블 요소로 해석한 네일의 경우 105mm

와 130mm 네일의 사면 안전율은 90mm 네일에 비해 각각 4.7%와 10.4%가 증가하였으며, 파일 요소로 해석한 네일의 경우 사면 안전율은 각각 5.8%와 17.5%가 증가하였다. 보강된 네일이 3개인 사면에서 케이블 요소로 해석한 네일의 경우 직경에 따른 사면 안전율의 증가량은 6.0%와 20%가 증가하였으며, 파일 요소로 해석한 네일의 경우 사면 안전율의 증가량은 5.1%와 18%가 증가해 우기시 보강된 네일의 직경 증가에 따른 사면 안전율 증가율은 건기시 보다 높은 것으로 나타났다.

우기시 사면의 안전율은 1에 가까운 값을 나타내어 안전율 계산후 네일의 하중변화는 크게 나타나지 않았다.

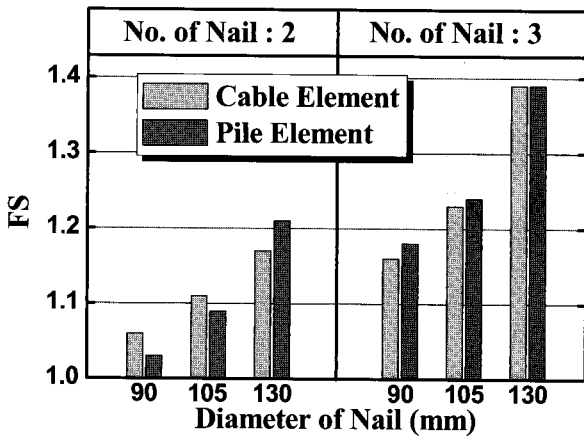
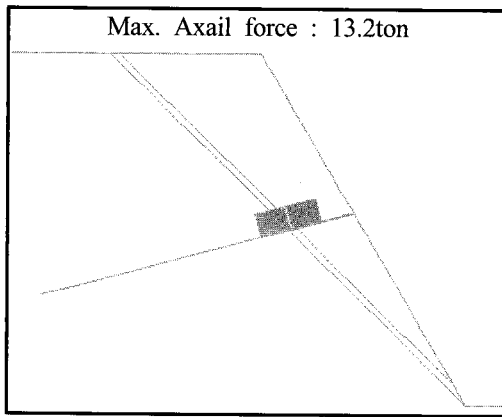


그림 9. 우기시 토사사면의 안전율 변화

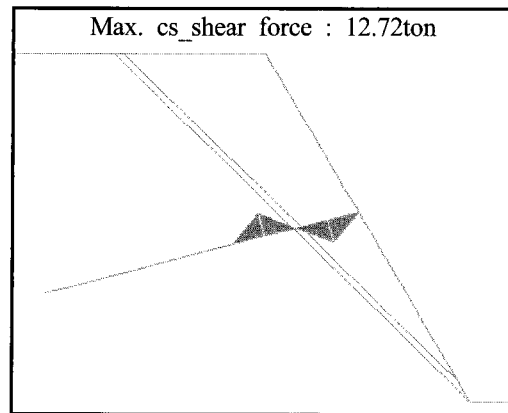
4.2 암사면

표 9는 직경 90mm와 120mm, 150mm의 케이블 요소로 해석한 네일과 파일 요소로 해석한 네일을 암사면에 보강했을 때 네일의 반력을 나타낸다. 그림 10과 11은 암사면에 보강된 90mm 케이블 요소로 해석한 네일과 파일 요소로 해석한 네일의 반력을 나타낸다.

케이블 요소와 파일 요소로 해석한 암사면의 안전율은 모두 1에 가까운 값으로 계산되었으며 안전율 계산 전과 계산후의 네일의 반력은 유사하였다. 반력의 경우,



(a) 축력

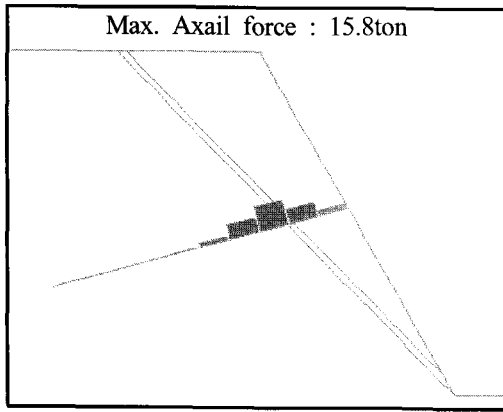


(b) 지반-네일 경계면의 전단력

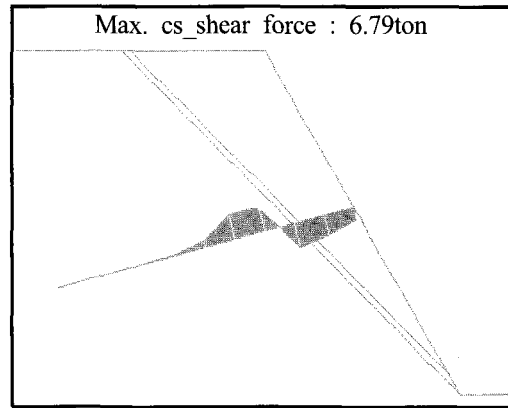
그림 10. 90mm 케이블 요소 해석시 네일 반력(암사면)

표 9. 암사면에 보강된 네일 반력

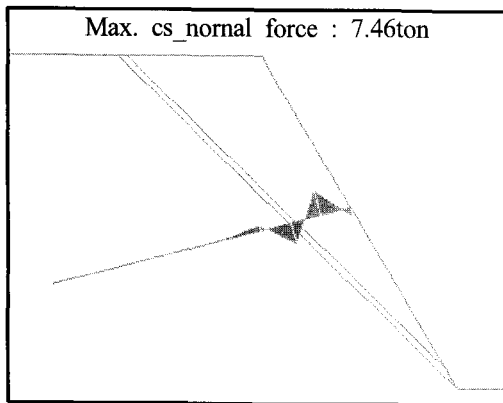
| | 케이블 요소 | | 파일 요소 | | | | |
|-------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| | Axial force (ton) | cs_shear force (ton) | Axial force (ton) | cs_shear force (ton) | Shear force (ton) | Bending moment (t·m) | cs-normal force (ton) |
| 90mm | 13.2 | 12.72 | 15.78 | 6.79 | 4.75 | 2.69 | 7.46 |
| 120mm | 13.2 | 12.64 | 20.54 | 9.05 | 3.94 | 2.01 | 6.18 |
| 150mm | 13.2 | 12.60 | 17.62 | 11.16 | 1.05 | 0.59 | 1.64 |



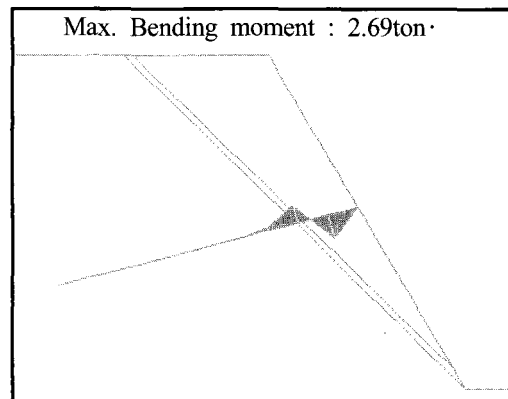
(a) 축력



(b) 지반-네일 경계면의 전단력



(c) 지반-네일 경계면의 전단력



(d) 휨 모멘트

그림 11. 90mm 파일 요소 해석시 네일 반력(암사면)

직경 90mm 네일을 암사면에 보강했을 경우 안전율 계산 후 케이블 요소로 해석한 네일의 축력은 13.2ton, 지반-네일 경계면의 전단력은 12.7ton으로 계산되었으며, 파일 요소로 해석한 네일의 축력은 15.8ton, 지반-네일 경계면의 전단력은 6.8ton으로 계산되었다. 파일 요소로 해석한 네일은 철근의 단면적이 증가하여 케이블 요소로 해석한 네일에 비해 축력은 약 20%가 증가하였고, 지반-네일 경계면의 전단력은 네일의 전단력과 모멘트, 지반-네일 경계면의 수직력으로 지반과 네일 경계면에 작용하는 하중이 분산되어 케이블 요소로 해석한 네일에 비해 약 46%가 감소하였다. 그림 10과 11에서 케이블 요소로 해석한 네일과 파일 요소로 해석한 네일의 하중 분포를 보면 케이블 요소로 해석한 네일의 축력과 지반-네일 경계면의 전단력은 사면의 붕괴가 발생하는 seam 부근에서만 나타나지만 파일 요소로 해석한 네일에서는 케이블 요소로 해석한 네일에 비해 하중이 비교적 균등하게 분포해 하중전이가 높은 것으로 나타났다. 케이블 요소로 해석한 네일의 축력과 지반-네일 경계면의 전단력은 네일의 직경 변화에 관계없이 일정한 수치가 계산되었지만, 파일

요소로 해석한 네일의 경우 네일의 직경이 증가함에 따라 120mm와 150mm 네일의 축력은 90mm 네일에 비해 각각 35%와 30%가 증가하였으며, 지반-네일 경계면의 전단력은 각각 33%와 65%가 증가하였다. 네일의 직경이 증가함에 따라 네일의 전단력과 모멘트는 감소하였고, 지반-네일 경계면의 수직 방향 반력 또한 감소하였다.

그림 12는 암사면에서 네일의 직경 변화에 따른 사면의 안전율 변화를 나타낸다. 사면에 보강된 네일의 직경이 90mm인 경우 케이블 요소로 해석한 네일과 파일 요소로 해석한 네일 모두 안전율이 0.92로 계산되었다. 케이블 요소로 해석한 네일의 경우 보강된 네일의 직경이 증가하더라도 사면의 안전율은 변화가 없었으나, 120mm와 150mm의 파일 요소로 해석한 네일이 보강된 사면에서는 네일의 단면적차모멘트의 증가로 인한 휨저항이 증가하여 사면의 안전율이 90mm 네일이 보강된 사면에 비해 각각 9%와 15%가 증가하여 네일의 전단저항 및 휨 저항을 고려한 경우 네일의 직경 변화에 따른 사면의 안전율이 현저하게 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 네일 직경이 90mm인 경우 네일을 케이블 요소로

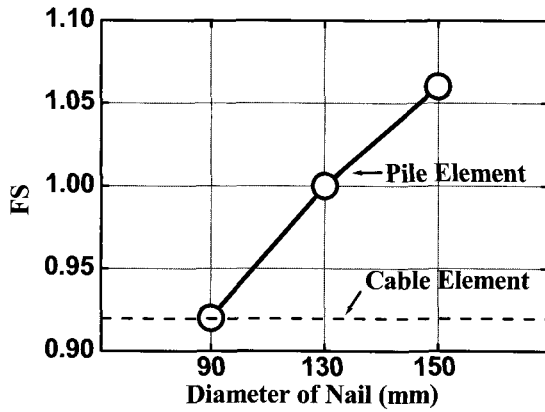


그림 12. 암사면의 안전율 변화

해석해도 무방하나 네일의 직경을 증가시킬 수 있는 경우, 네일을 파일 요소로 해석시 사면 안전율이 현저하게 증가하므로 네일 직경이 120mm 이상인 경우에는 네일을 파일 요소로 해석하는 것이 필요하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 일반 쓰일 네일인 케이블 요소로 해석한 네일과 네일의 전단 저항 및 휨 저항을 고려한 파일 요소로 해석한 네일을 수치해석 프로그램인 FLAC^{2D}를 이용하여 토사사면과 암사면을 모사한 후 사면에 보강하여 네일의 직경과 보강 개수를 달리하여 사면의 안정성 해석을 수행하였다. 본 연구는 수치해석을 이용한 분석이므로 추후 현장 실험을 통한 계측으로 비교·검토가 필요하다.

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구 해석의 조건에서는 건기시 파일 요소로 해석한 네일은 케이블 요소로 해석한 네일에 비해 축력이 매우 큰 폭으로 증가하였으며, 지반-네일 경계면의 전단력은 네일에 작용하는 하중이 네일의 전단력과 휨 모멘트로 분산되어 감소하였다. 케이블 요소로 해석한 네일의 경우 네일의 직경이 증가할수록 네일의 축력은 증가하였다. 파일 요소로 해석한 네일은 케이블 요소로 해석한 네일에 비해 축력과 지반-네일 경계면의 전단력 증가율은 작았으나 전단력과 휨 모멘트, 지반-네일 경계면에 수직 방향으로 작용하는 반력의 증가율이 크게 나타났다. 파일 요소로 해석한 네일의 안전율이 케이블 요소로 해석한 네일의 안전율에 비해 높은 것으로 나타났다.
- (2) 우기시 사면의 안전율은 건기시에 비해 큰 폭으로 감소하였으나, 네일 직경의 증가에 따른 사면 안전

- 율의 증가량은 건기시 보다 높은 것으로 나타났다.
- (3) 건기시 지반-네일 경계면의 전단력은 상부에 보강된 네일이 하부에 보강된 네일에 비해 더 컸으며, 우기시는 하부에 보강된 네일이 더 큰 값으로 나타났다.
 - (4) 암사면의 사면 보강에 대한 수치모델에서 케이블 요소로 해석한 네일은 사면의 안전율의 변화가 없었고, 파일 요소로 해석한 네일은 네일의 직경 증가에 따라 사면의 안전율이 현저하게 증가하였다. 네일 직경이 90mm인 경우 네일을 케이블 요소로 해석해도 무방하나 네일의 직경을 증가시킬 수 있는 경우, 네일을 파일 요소로 해석시 사면 안전율이 현저하게 증가하므로 네일 직경이 120mm 이상인 경우에는 네일을 파일 요소로 해석하는 것이 필요하다고 판단된다. 하지만, 본 연구는 수치해석을 이용한 분석이므로 네일 거동에 관한 수치해석시 파일 요소의 적용성 여부는 신뢰성 확보를 위해 추후 현장 실험을 통한 비교·검토 등의 연구가 더 이루어져야 한다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 인제대학교 학술조성비 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김홍택 (2001), *Soil Nailing 공법의 과거·현재·미래*, 평문각, 서울, pp.1-80.
2. 전상수 등 (2005), “한계평형해석(LEM), 유한차분법(FDM) 및 유한요소법(FEM)을 이용한 사면안정해석”, *한국지반공학회 학술 발표논문집*, pp.1-8.
3. 전상수 등 (2006), “M-S 네일 거동 특성-유한차분해석”, *한국지반공학회 학술발표논문집*, June, pp.61-78.
4. 천병식 등 (2004), “유한요소해석에 의한 쓰일 네일링의 네일 경사각 영향에 관한 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제20권, 제6호, pp.19-27.
5. 한국도로공사 (2002), *도로설계요령*, 도로교통협회
6. Das, B. M. (2003), *Principles of Geotechnical Engineering*, Thomson.
7. FHWA (1994), *Soil Nailing Field Inspectors Manual*, Publication No. FHWA-SA-93-068.
8. Gässler, G., and Gudehus, G. (1983), *Soil Nailing*, Statistical Design. Proc. 8th ECSMFE, Helsinki, (2) pp.401-494.
9. Itasca Consulting Group, Inc. (2002), *FLAC^{2D} Manual : Structural Elements*, Itasca Consulting Group, Inc., Minnesota, USA.
10. Jeong, Sang-Seom, et. al. (2005), “Coupled Effect of Soil Nail/ Slope System”, *Jour. of the KGS*, February, Vol.21, No.2, pp. 127-135.
11. Kim, Hong-Taek, et. al. (2002), “An Experimental Study of the Soil Nailed Wall Behaviour with Front Plate Rigidity”, *Jour. of the KGS*, June., Vol.18, No.3, pp.87-94.
12. Terzaghi, K., Peck, R. B., and Mesri, G. (1984), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley & Sons Inc.

(접수일자 2007. 4. 11, 심사완료일 2007. 8. 6)