

유한요소해석에 의한 쏘일네일링의 네일 경사각의 영향에 관한 연구

The Effects of Nail Inclination in Soil Nailing by Finite Element Analysis

천 병 식¹ Chun, Byung-Sik

김 원 철² Kim, Won-Cheul

윤 창 기³ Yoon, Chang-Ki

Abstract

Since the first construction of soil nailing in France in 1972, the application of soil nailing has increased. However, there is currently no design method which is universally accepted or agreed upon for soil nailed wall, because each of the design methods has different assumptions and, therefore, different approaches, moreover, since the suggested optimal inclination angles of nails are different by researchers. Therefore, the effect of nail inclination with soil nailing is analyzed by FEM. In this study, Finite element program SOILSTRUCT was applied for the effect analysis of nail inclination in soil nailed wall. For this finite element analysis, CEBTP No. 1 project data were used. The analyzed nail inclination ranged from 0° to 30° with 5° intervals. The result of finite element analysis showed that the most optimal inclination was 20°. Also, the tension force in the nails increased as the nail inclination increased. However, the effect of nail inclination on the wall deformation was very little. Therefore, constructability seems to be more important than nail inclination. Also, the tension force in the nails increases as the nail depth below the top of the wall increases, except for the lowest nail. Therefore, appropriate nail diameter should be used to prevent breakage of nails with considering nail strength-deformation interaction.

요 지

쏘일네일링 공법은 1972년 프랑스에서 처음 시공된 이래로, 최근 들어 그 적용성이 더욱 확대되고 있으나 아직까지 세계적으로 공인된 설계방법은 없으며 서로 다른 가정을 가지므로 설계접근 또한 완전히 다르다. 또한 기존의 제안된 네일의 최적 경사각은 제안자에 따라 서로 다르므로 네일 경사각에 대한 영향은 규명되어야 할 설계변수이다. 따라서, 본 연구에서는 쏘일네일링 벽체의 수평변위에 대한 네일의 경사각에 대한 영향을 분석하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 SOILSTRUCT가 사용되었다. 프랑스의 쏘일네일 연구 프로젝트인 CLOUTERRE의 CEBTP No. 1에서 측정된 수평변위와 제시된 지반 물성치를 적용하여 FEM해석을 위한 기본 모델을 선정하였다. 그리고, 선정된 기본 모델을 사용하여 네일의 설치 각도에 따른 벽체 수평변위의 영향을 분석하기 위해서 네일의 경사각을 0°에서 30°까지 5°간격으로 변화시키면서 최적의 네일경사각을 얻고자 하였다. 그 결과, 벽체의 변위가 최소로 발생하는 경사각은 20°였으며, 네일의 경사각이 증가할수록 네일에서 유발되는 인장력은 증가하였다. 그러나 수평변위에 대한 네일 경사각의 영향은 적으므로 현장여건에 따라 시공성이 우선되어야 하는 것으로 분석 되었다. 또한 최하단 네일을 제외하고, 네일의 심도가 깊어질수록 네일에서 유발되는 인장력이 증가하므로 설계시 네일의 재료파괴를 방지하기 위해 네일의 강도와 변위 관계를 고려하여 적절한 네일직경을 적용하여야 한다.

Keywords : Finite element analysis, Nail inclination, Soil nailing, SOILSTRUCT

1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg, Hanyang Univ., hengdang@unitel.co.kr)

2 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 겸임교수 (Member, Adjunct Prof., Dept. of Civil Engrg, Hanyang Univ.)

3 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Civil Engrg, Hanyang Univ.)

1. 서론

약 40년 전에 소개된 깊은 굴착에 대한 횡방향지공법인 쏘일네일링 공법은 벽체의 강성에 의존하는 기존 공법과는 달리 배면지반을 보강하는데 기초를 두고 있으며 공기단축, 경비절감 면에서 유리한 공법으로 사면 안정, 굴착면에 대한 유연한 지보 등의 목적으로 적용되고 있다(천병식 등, 1998).

최근 쏘일네일링 공법은 그 적용성이 더욱 확대되고 있으나 아직까지 세계적으로 공인된 설계방법은 없으며 서로 다른 가정을 가지므로 설계접근 또한 완전히 다르다. 또한 설계변수가 많고 설계변수 상호간의 민감도에 대한 연구가 되지 않은 상황에서 대부분의 경우 설치간격이나 네일의 설치각도는 고정시키고 네일의 길이만을 변화시키거나 서로 다른 직경의 네일을 명확한 근거 없이 사용하고 있다. 따라서 네일의 강성 및 설치각도를 포함한 여러 가지 설계변수에 대한 영향이 규명되어야 한다. 특히, 네일의 경사각의 경우 제안자들에 따라 서로 다른 제안을 나타낸다. 특히, Shen (1978) 등에 의하면 최적의 네일 경사각은 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 사이이며, Juran(1990) 등은 네일의 경사각이 0° 에서 30° 까지 증가함에 따라 벽체의 수평변위 또한 증가함을 발견하였으며, 이러한 사실에 근거하여 FHWA에서는 네일의 경사각은 가능한 수평이 되어야 한다고 제안하고 있다. 이는 최적의 네일 경사각은 0° 임을 나타내는 것으로 Shen(1978) 등의 제안과는 상반된 주장이다. 또한 김원철(2003) 등은 한계평형해석 프로그램을 15개 현장 사례에 적용하여 프로그램의 검증에 수행하였으며, 한계평형해석 프로그램을 15개 단면에 대하여 동일하게 적용하여 네일 경사각에 대한 민감도 분석을 수행한 결과, 한계평형해석에 의한 방법으로는 네일 경사각에 대한 뚜렷한 경향성을 확인할 수 없었다. 따라서, 본 연구에서는 프랑스의 쏘일네일 연구 프로젝트인 CLOUTERRE의 CEBTP No.1(1986) 실험 벽체를 해석 단면으로 사용하였으며, FEM의 기본 모델을 선정하기

위하여 측정된 변위와 제시된 지반 물성치를 적용하여 모델링 하였다. 선정된 기본 모델을 사용하여 네일경사각에 대한 영향을 분석하기 위해 유한요소해석 프로그램인 SOILSTRUCT(1990)를 적용하여 네일의 경사각을 0° 에서 30° 까지 5° 간격으로 변화시키면서 최적의 네일경사각을 얻고자 하였다.

2. 적용 사례

프랑스의 쏘일네일 연구 프로젝트 CLOUTERRE는 3개의 실험 벽체에 계측장비를 완벽하게 갖춘 상태에서 시공 초기부터 파괴시 까지 관찰되었다(Soulas 등, 1991). 각각의 실험 벽체들은 여러가지 서로 다른 파괴 형상을 연구하기 위해 고안되었다. CEBTP No. 1 실험 벽체는 벽체의 상부로부터 흙을 부분적으로 포화시킨 후에 네일의 파단에 의한 파괴를 유도시켰다. 이에 반하여 CEBTP No. 2 실험 벽체는 굴착단의 높이를 증가시켜 파괴시켰으며, CEBTP No. 3 실험 벽체는 점차적으로 네일의 길이를 짧게 하여 파괴를 유도하였다(CEBTP, 1986; CEBTP, 1989a; CEBTP, 1989b).

본 해석에서는 CEBTP No. 2와 CEBTP No. 3 실험 벽체는 보강재 정수에 대한 정보가 불충분하기 때문에 CEBTP No. 1 실험 벽체를 사용하였다. CEBTP No.1 벽체에는 aluminum 파이프가 보강재로 사용되었다. 프로그램해석에 적용할 보강재 직경은 aluminum 파이프의 면적을 환산하여 계산하였다(SNAIL, 1994). 또한, 포화되기 전과 포화된 후의 두 가지 경우에 대한 해석을 수행하였으며 통일분류법에 의한 지반분류는 입도분포가 좋은 모래(SW)로 분류되며 지반 물성치와 보강재 정수는 표 1과 표 2에 나타내었다.

CEBTP No. 1 벽체는 7m를 굴착하였으며 시공 완료 후 벽체 상부로부터 0.5m의 깊이에서 수평 변위 21.1mm가 관찰되었다. 그리고 포화의 영향을 조사하기 위하여 벽체의 상단부에 살수를 하였다. 그 결과 벽체의 상부에서 269.2mm의 침하가 발생했으며, 벽체하부에서 170.2mm

표 1. CEBTP No. 1 벽체에 적용된 지반 물성치

조 건	깊이(m)	단위중량 (kN/m ³)	내부마찰각 (deg)	점착력 (kN/m ²)	설계부착력 (kPa)
포화 전	0-7	15.1	38	3.0	80.0
포화 후	0-4.5	16.5	38	3.0	80.0
	4.5-7	20.3	38	0	55.2

표 2. CEBTP No. 1 벽체에 적용된 보강재 정수

수평간격(m)		항복강도(MPa)		천공직경(mm)		편칭전단력(kN)	
1.15		103.4		63		133.4	
위치	네일길이(m)	네일경사(deg)	수직간격(m)	네일직경(mm)	극한부착응력(kPa)		
1	6.0	10	0.5	8.3	80.0		
2	8.0	10	1.0	18.3	80.0		
3	7.4	10	1.0	18.3	80.0		
4	8.0	10	1.0	18.3	80.0		
5	8.0	10	1.0	11.1	80.0		
6	8.0	10	1.0	11.1	80.0 or 55.2*		
7	6.0	10	1.0	18.3	80.0 or 55.2*		

* : 포화 후 적용

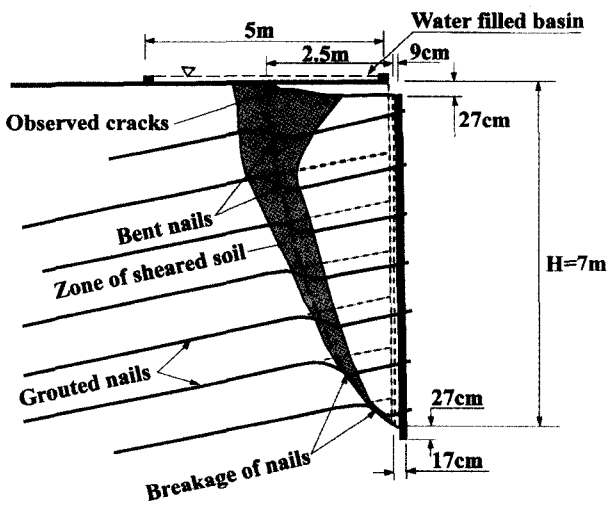


그림 1. CEBTP No. 1 실험 벽체의 파괴 후 관찰(Soulas 등, 1991)

의 수평 변위가 발생하였다. 또한 모든 네일은 전단영역에서 굽어졌으며, 특히 6번째와 7번째 네일은 파단되었다. 그림 1에서 보여진 바와 같이 벽체 상단부로부터 2.5m뒤에서 파괴면이 발생하였다.

3. 유한요소해석

3.1 해석 프로그램 개요

본 연구에서는 1990년 PC version인 유한요소해석 프로그램 SOILSTRUCT(1990)가 사용되었다. SOILSTRUCT는 굴착으로 인한 응력과 변형에 대한 고려를 포함한 지반공학 문제의 정적 해석을 위한 general, plane strain, soil-structure interaction이 가능한 프로그램이다. 이 프로그램은 Microsoft Fortran version 5.0을 사용하여 컴파일 되었으며, main program과 21개의 서브루틴으로 구

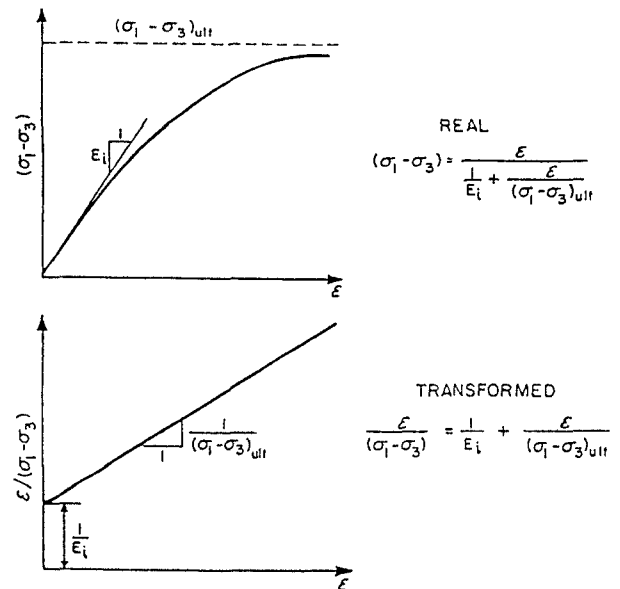


그림 2. Hyperbolic representation of a stress-strain curve (Duncan 등, 1980)

성되어 있다. 이 프로그램은 soil element의 응력, 변형을 및 변위를, structural element의 내부응력과 변위를 계산하며 soil element, bar element, beam element, 그리고 interface element를 사용한다(Kim, 1998).

지반의 비선형 응력-변형을 특성을 표현하기 위해 SOILSTRUCT(1990)는 Duncan(1980)에 의해 제안된 hyperbolic relationship을 사용한다. Soil element는 세 개 또는 네 개의 절점으로 구성된 2차원 요소로 표현된다. 이러한 요소들의 거동은 nonlinear, stress-dependent, hyperbolic stress-strain, bulk modulus 모델로 제어된다. 이러한 hyperbola-shaped curve는 그림 2에 나타나 있으며 식 (1)로 표현된다.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon}{\frac{1}{E_i} + \frac{\epsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}} \quad (1)$$

여기서, $\sigma_1 - \sigma_3$ = principal stress difference
 ϵ = axial strain
 E_i = initial tangent modulus
 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ = ultimate principal stress difference

네일을 표현하기 위해 사용되는 bar element는 두 개의 절점으로 이루어지며 전면벽체는 Euler-Bernoulli beam element를 사용하여 모델링 된다. 이 beam element는 휨저항과 축방향 응력에 대한 저항을 고려한다(Filz 등, 1990). Interface element는 soil element와 bar element의 상대변위를 허용하기 위해 사용되며 각각의 interface element는 네 개의 절점으로 구성되며 두께와 폭은 존재하지 않는 것으로 모델링 하였다. 초기전단강성은 Mitchell and Villet(1987)의 보고서에 근거하여 25.4mm (0.1in)의 지반과 네일의 상대변위를 적용하여 산정하였다.

3.2 해석 모델링

본 연구에서는 해석단면으로는 CEBTP No. 1(1986)의 실험 벽체가 사용되었다. CEBTP No. 1 실험 벽체에서 실제 적용된 네일의 설치각인 10°를 기본으로 하여 네일의 설치각도를 0°에서 30°까지 5°간격으로 변화시켜 가면서 유한요소 모델을 표현하였으며 각 모델은 278개의 절점, 15개의 beam 요소, 88개의 interface 요소,

35개의 bar 요소, 150개의 soil element로 구성된다.

해석에 사용된 CEBTP No. 1 실험 벽체의 유한요소 메쉬는 그림 3과 같으며 현장조건을 재현하기 위해 2열 굴착 후 네일 설치의 순서로 7단계의 굴착과 시공을 적용하였다. 여기서 유한요소 메쉬는 SOILSTRUCT 프로그램이 global stiffness vector가 최대 30,000개로 제한되어 있는데 global stiffness vector에 대한 sensitivity study결과 global stiffness vector가 25,000개를 넘을 경우 결과에 미치는 영향이 무시할 수 있을 정도로 작게 나타나서, 그림 3에서 보는 바와 같이 나타내었다.

3.2.1 전면벽체

썬크리트 벽체를 모델링 하기 위해 3개의 서로 다른 길이로 이루어진 beam element가 사용되었다. 콘크리트의 탄성계수는 이전의 연구에서 적용된 바 있는 2.17E7kN/m²를 사용하였다(Sampaco, 1996). 벽체두께는 76.2mm이며, 단위 폭에 대한 관성모멘트와 단면적을 고려하였다.

3.2.2 Hyperbolic soil modeling

SOILSTRUCT(1990)는 지반의 모델링을 위해 적용된 hyperbolic soil parameter는 Duncan(1980)의 보고서에 제시된 표에 근거하여 해석지반의 hyperbolic parameter로 선정하였다. 좀 더 실제와 부합하는 모델링을 하기 위해 지반을 세 개의 지층으로 구분하였으며 각 층까지의 중간깊이는 0.75m, 2.74m, 5.43m이다. Duncan(1980)의 보고서에 제시된 표에 근거하여 해석시 요구되는 입력 물성치를 산정하였으며 그 결과는 표 3과 같다.

3.2.3 Bar element

7열의 bar가 사용되었으며 10°의 경사각을 갖는다. 합성 grout-aluminum 보강재인 네일은 탄성적으로 거동하며 aluminum과 grout는 완전히 부착된 것으로 가정하였다. Aluminum의 탄성계수는 7.38E7kN/m²를 적용하였다(Angermayer, 1987). Bar element의 면적은 콘크리트면적으로 환산하여 사용하였으며 실제 네일의 강성(AE/L)은 평면변형율조건으로 해석하기 위해 네일의 수평간격으로 정규화하여 산정한 결과 표 4와 같다.

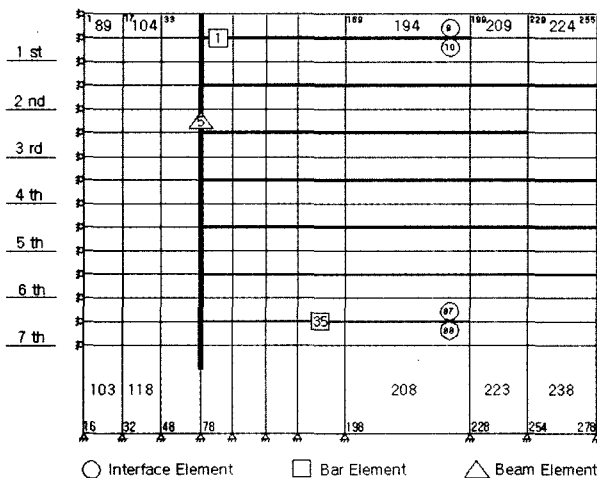


그림 3. 네일경사각이 0°인 경우의 유한요소 메쉬

표 3. 해석에 사용된 soil parameters

Input Data	CEBTP	1st Layer	2nd Layer	3rd Layer	비 고
통일분류	SW	SW	SW	SW	
IDRAIN	0	0	0	0	비배수 조건 : 0, 배수조건 : 1
γ_d (kN/m ³)	15.1	15.1	15.1	15.1	dry unit weight
c(kN/m ²)	3.0	3.0	3.0	3.0	cohesion
ϕ (°)	38	38	38	38	internal friction angle
TENS(kN/m ²)	NA*	3.84	3.84	3.84	tensile strength : $c/\tan(\phi)$
K_o	0.38	0.38	0.38	0.38	coefficient of earth pressure at rest : $1 - \sin(\phi)$
n	NA*	0.5	0.5	0.5	modulus exponent
K	NA*	260	260	260	modulus number
K_{ur}	NA*	500	400	312	unloading-reloading modulus number
R_f	NA*	0.84	0.81	0.58	failure ratio
E_i (kN/m ²)	NA*	5433	10413	14644	initial tangent modulus
m	NA*	0.18	0.18	0.58	bulk modulus exponent
K_b	NA*	100	100	100	bulk modulus number
E(kN/m ²)	NA*	47.9	47.9	47.9	tangent modulus at failure
ν	NA*	0	0	0	poisson's ratio
α	NA*	0	0	0	coefficient of thermal expansion

NA* : Data is not available

표 4. 해석에 사용된 네일의 강성(단위 : kN/m²)

1단 네일	2단 네일	3단 네일	4단 네일	5단 네일	6단 네일	7단 네일
79,993	122,624	111,128	122,624	109,691	109,691	151,364

표 5. Interface element의 입력 물성치

Parameter	1st Layer	2nd Layer	3rd Layer
점착력(kN/m ²)	21.8	80.0	158.2
내부마찰각(deg)	78.8	78.8	78.8
인장강도(kN/m ²)	4.3	15.8	31.3
Material number*	0	0	0
초기 전단강성(kN/m ³)	8564.9	31462.8	62226.4
파괴시 전단강성(kN/m ³)	100	100	100
초기 축강성(kN/m ³)	1.57E7	1.57E7	1.57E7
파괴시 축강성(kN/m ³)	15.7	15.7	15.7
Correlation coefficient	0.0	0.0	0.0
감소계수	0.0	0.0	0.0

* : Used only for build-up situation

3.2.4 Interface element

88개의 interface element가 사용되었으며 bar element 상하부에 위치한다. 4개의 절점으로 구성되지만 두께는 존재하지 않는다. CEBTP No. 1(1986) 실험 벽체에서 세 번째 네일의 인발력(80kN/m²)에 근거하여 interface element의 마찰각과 세 개의 지층에 대한 횡방향 마찰력

을 산정하였으며, 초기 전단강성은 Mitchell and Villet (1987)의 보고서에 근거하여 지반과 보강재의 2.54mm (0.1in)의 상대변위를 적용하였다. Interface element의 입력 물성치는 표 5와 같다.

3.2.5 현장계측치에 의한 모델링 검증

SOILSTRUCT(1990)에 의한 해석 모델을 검증하기 위해 해석결과와 실측된 벽체의 수평변위를 비교하였으며 그 결과는 그림 4와 같다. 그림 4와 같이 FEM해석에 의한 결과가 실측치와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 한편, 해석에 사용된 CEBTP No. 1(1986) 실험벽체의 축력에 대한 실측 데이터가 없으므로 수치해석에 의한 모델검증에 포함시키지 않았다.

3.3 해석 결과 및 분석

앞서 실측변위와 비교를 통하여 검증된 모델링을 사용하여 벽체의 수평변위에 대한 네일 경사각의 영향을 분석하기 위해 네일의 경사각을 0°에서부터 30°까지 5°간격으로 7개의 모델을 선정하였다. 각 모델에서 네일의 경사각을 제외한 나머지 입력 데이터는 모두 동일하게 적용하였으며 해석 결과는 그림 5와 같다. 또한 네일에서 유발되는 인장력에 대한 네일 경사각 및 심도의 영향을 분석하였으며, 그 결과는 그림 6~7과 같다.

그림 5와 같이 네일의 경사각이 20°인 경우 전면벽체의 변위가 최소로 발생하였다. 하지만 수평변위에 대한 네일 경사각의 영향은 적은 것으로 나타났다. 또한 네일의 설치각이 5°이하인 경우는 그라우팅이 어렵고, 그리우팅시 천공홀에 공극이 형성되기 쉽기 때문에 특별한 경우를 제외하고 사용하지 않아야 한다(FHWA, 1996). 따라서 네일의 설치각도를 결정함에 있어 벽체의 변위보다는 현장여건에 따라 시공성을 우선하여 네일을 설치하여야 할 것으로 분석된다.

그림 6과 같이 모든 네일에서 네일의 경사각이 증가

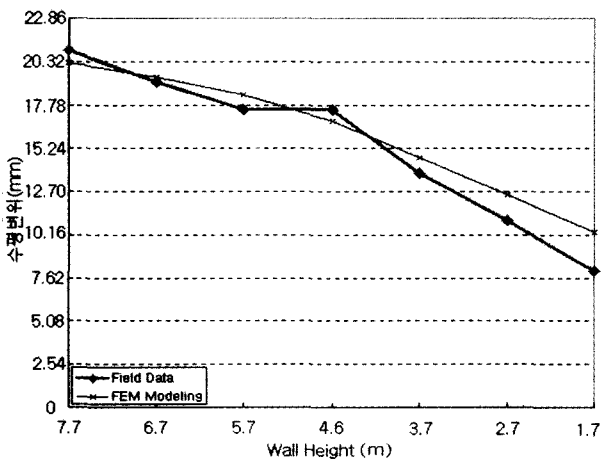


그림 4. 실측변위와 FEM 해석결과와의 비교

할수록 네일에서 유발되는 인장력도 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 네일의 경사각이 증가하는 경우, 네일의 직경을 증가시키거나 네일의 강도를 증가시켜야 한다. 그림 7과 같이 최하단에 있는 네일을 제외하고, 동일한 네일 경사각에서 네일의 심도가 깊어질수록 네일에서 유발되는 인장력도 증가하였다. 즉, 본 해석 단면의 경우 최하단 네일인 7단 네일을 제외하고 6단 네일에서 인장력이 최대로 발생하였으며 네일의 심도가 알아짐에 따라서 네일에서 유발되는 인장력이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 최하단 네일을 제외하고, 구조적 안정성을 확보하기 위해서는 네일의 설치 심도가 깊어지면 네일의 직경도 증가되어야 한다.

4. 결론

본 연구에서 유한요소해석 프로그램인 SOILSTRUCT (1990)를 적용하여 쏘일네일링 벽체의 수평변위에 대한 네일 경사각에 대한 영향을 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 일반적으로 네일의 설치 각도는 15° 정도이지만 배면지반이 수평이고 수직벽체인 경우, 네일의 경사각을 0°에서부터 30°까지 5°간격으로 변화시키면서 벽체의 수평변위에 대한 네일 경사각의 영향을 분석한 결과, 전면벽체의 변위가 최소로 발생하는 최적의 네일 경사각은 20°인 것으로 분석되었다.
- (2) 본 해석에서 사용된 CEBTP No. 1 벽체의 경우, 최적의 네일 경사각은 20°로 분석되었으나, 수평변위에 대한 네일 경사각의 영향은 적게 나타났다. 또한 네일 경사각이 5°이하인 경우는 그라우팅이 어렵

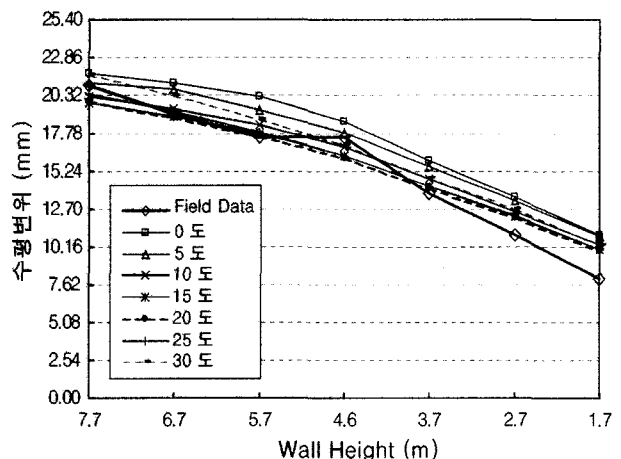
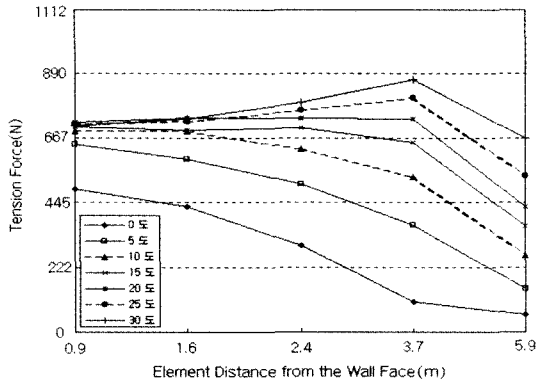
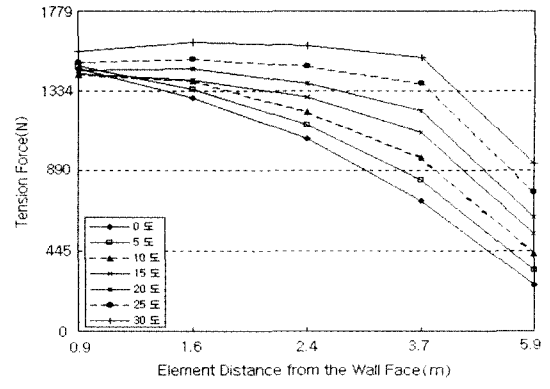


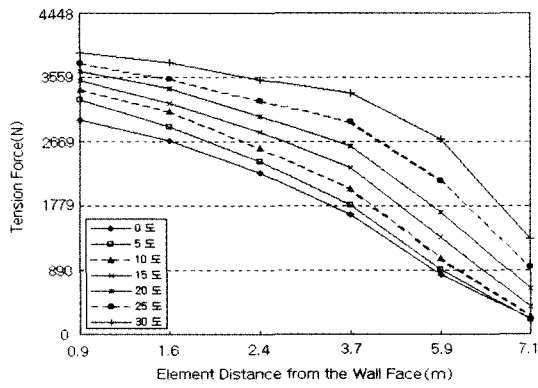
그림 5. 네일 경사각에 대한 벽체의 수평변위



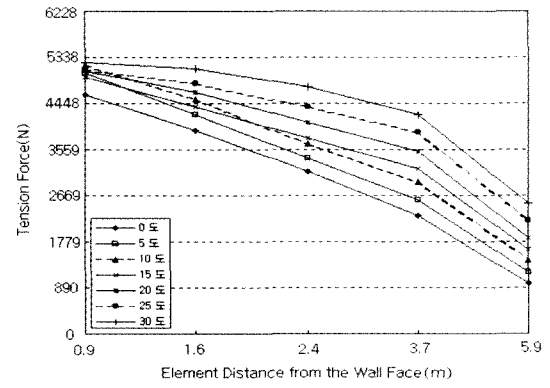
(a) 1단 네일



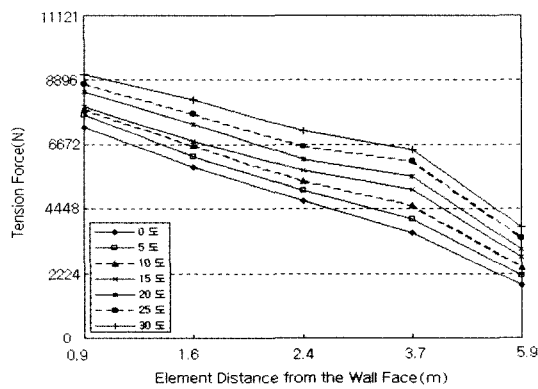
(b) 2단 네일



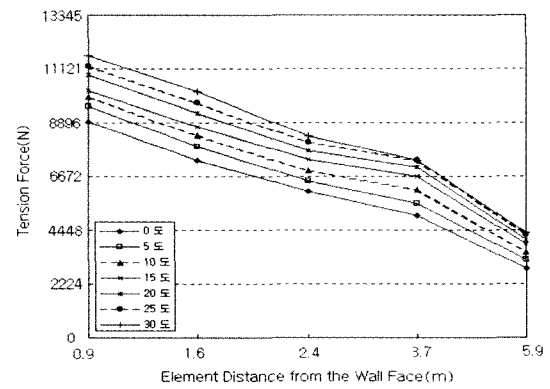
(c) 3단 네일



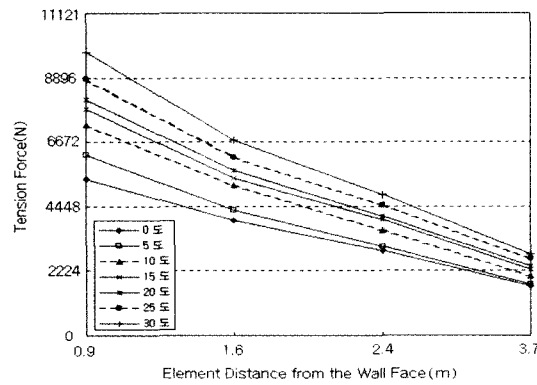
(d) 4단 네일



(e) 5단 네일

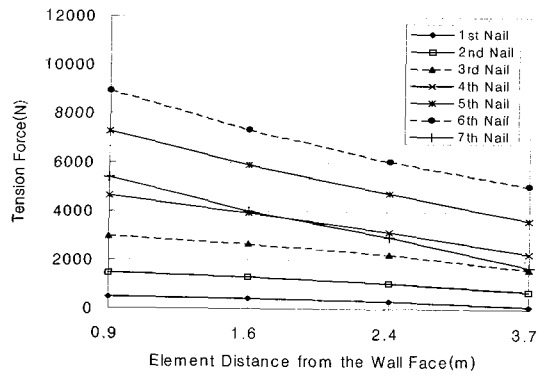


(f) 6단 네일

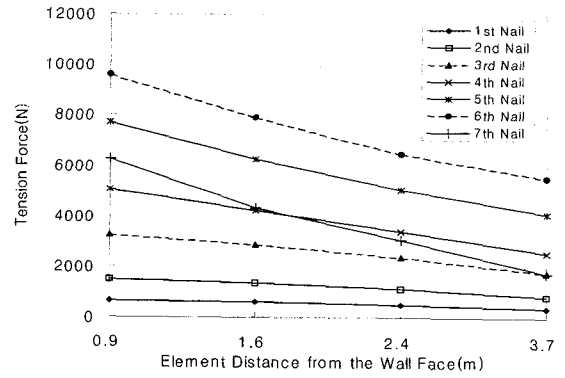


(g) 7단 네일

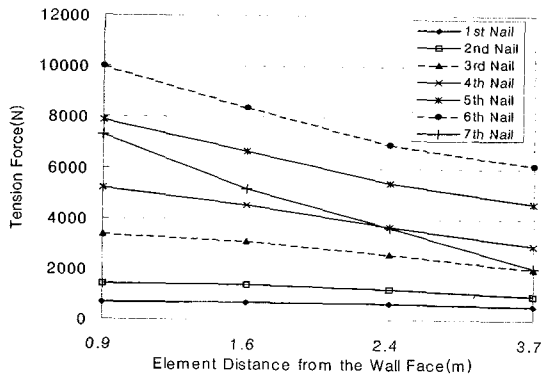
그림 6. 네일 경사각과 네일 인장력



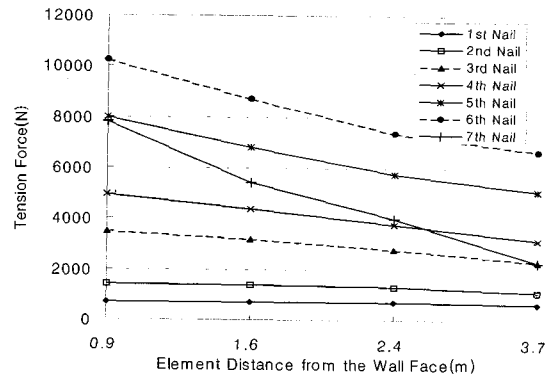
(a) 0°



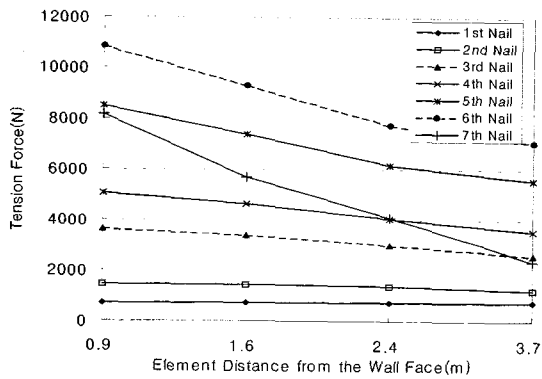
(b) 5°



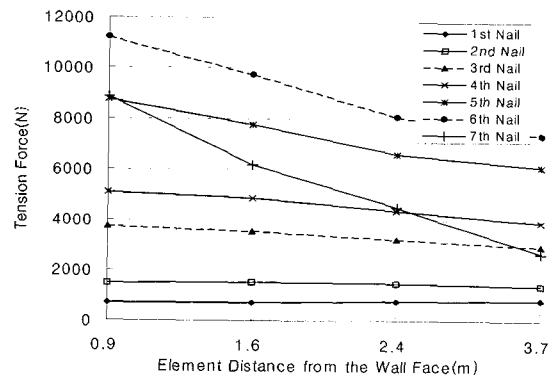
(c) 10°



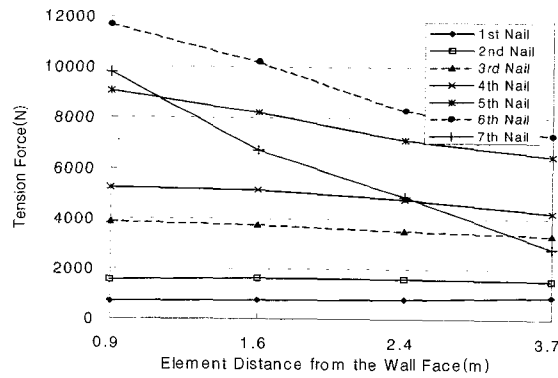
(d) 15°



(e) 20°



(f) 25°



(g) 30°

그림 7. 네일 경사각에 대한 네일 심도별 인장력

고, 그리우팅시 천공홀에 치밀한 주입시공이 용이하지 않다. 따라서 네일의 설치각도를 선정함에 있어, 벽체의 수평변위 보다는 현장여건에 따른 시공성을 우선적으로 고려하여야 한다.

- (3) 유한요소해석을 통하여 네일에서 유발되는 인장력과 네일 경사각의 상관관계를 분석한 결과, 네일의 경사각이 증가할수록 네일에서 유발되는 인장력도 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 네일의 경사각이 증가하는 경우, 네일의 직경을 증가시키거나 네일의 강도를 증가시켜야 한다.
- (4) 유한요소해석을 통하여 네일에서 유발되는 인장력에 대한 네일 심도의 영향을 분석한 결과, 최하단 네일을 제외하고, 네일 경사각이 동일한 경우에는 네일의 심도가 깊어질수록 네일에서 유발되는 인장력도 증가하였다. 따라서 최하단 네일을 제외하고, 네일의 설치 심도에 따라 네일의 직경을 증가시킴으로써 구조적 안정성을 확보하여야 할 것으로 분석된다.
- (5) 향후 연구로써 배면 지반이 수평인 경우에 대한 벽체 경사각, 외부 하중 혹은 surcharge 및 지표 경사각 등 다양한 조건에 대한 해석이 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 김원철, 천병식, 박신영 (2003), "실측 Data를 통한 Soil nailing 해석 프로그램의 설계 적용성에 관한 연구", 한국지반환경공학회 학술발표회 논문집, pp.233-249.
2. 천병식, 임해식 (1998), "쏘일 네일링", 유림출판사, p.3.
3. Angermayer, K. (1987), "Structural aluminum design", CEP Corporation, Richmond, Virginia, p.157.
4. CEBTP (1986), "Compte rendu de l'expérimentation en vraie grandeur de la paroi clouée No. 1. Rupture d'une paroi clouée par cassure des armatures", Recommendations CLOUTERRE 1991, Press de l'ENPC, Paris, France, p.302.
5. CEBTP (1989a), "Compte rendu de l'expérimentation en vraie grandeur de la paroi clouée No. 2. Rupture du massif de sol clouée en cours de terrassement", Recommendations CLOUTERRE 1991, Press de l'ENPC, Paris, France, p.302.
6. CEBTP (1989b), "Compte rendu de l'expérimentation en vraie grandeur de la paroi clouée No. 3. Rupture du massif de sol clouée par raccourissement des clous", Recommendations CLOUTERRE 1991, Press de l'ENPC, Paris, France, p.302.
7. Duncan, J. M., P. Byrne, K. S. Wong, and P. Mabry (1980), "Strength, Stress-strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analysis of Stresses and Movements in Soil Masses", University of California, Berkeley, Report No.UCB/GT/80-01, p.69.
8. FHWA (1996), "Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls", Federal Highway Administration Publication No. FHWA-SA-96-069R, November, pp.118-129.
9. Filz, G., G. W. Clough, and J. M. Duncan (1990), "Draft user's manual for program SOILSTRUCT plain strain with beam element", Department of Civil Engineering, Virginia Tech., Blacksburg, Virginia, p.89.
10. Juran, I., G. Baudran, K. Farrag, and V. Elias (1990), "Design of Soil-nailed Retaining Structures", In P. C. Lambe and L. A. Hansen (Eds.), Design and Performance of Earth Retaining Structures, ASCE Geotechnical Special Publication No.25, pp. 644-659.
11. Kim, W. C. (1998), "The Effect of Nail Stiffness and Inclination in Soil Nailing by Finite Element Method", Ph. D. Thesis, Utah State University, Logan, Utah, pp.125-138.
12. Mitchell, J. K., and W. C. Villet (1987), "Reinforcement of Earth Slopes and Embankment", National Cooperative Highway Research Program Report No.290, p.323.
13. Sampaco, C. L. (1996), "Behavior of Welded Wire Mesh Reinforced Soil Walls from Field Evaluation and Finite Element Simulation", Unpublished doctoral dissertation, Utah State University, Logan, Utah, p.473.
14. Shen, C. K., S. Bang, L. R. Herrman, and K. L. Romstad (1981), "A Reinforced Lateral Earth Support System", Symposium on Earth Reinforcement, April, ASCE, Pittsburgh, Pennsylvania, pp.764-793.
15. SNAIL (1994), "Program for Soil Nailing-PC version 2.11", California Department of Transportation, Los Angeles, California, p.126.
16. Soulas, R., R. Aris, F. Schlosser, and C. Plumelle (1991), "Recommendations CLOUTERRE 1991 : English translation July 1993", FHWA Report No.SA-93-026, p.302.

(접수일자 2003. 12. 17, 심사완료일 2004. 7. 19)