

SOIL NAILING 공법의 적용 및 설계

* 김 흥 택

** 강 인 규

** 최 인 식

** 순 광 수

* 홍익대학교 토목공학과 부교수

** 홍익대학교 대학원

1. 서론

Soil Nailing은 NATM(New Austrian Tunneling Method)와 유사한 원위치(in-situ) 지반보강공법으로서, 굴착면에 대한 유연한 지보체계의 제공 또는 사면의 안정(그림 1-a) 등을 목적으로, 지난 20여년 동안 주로 프랑스와 독일에서 사용되어 왔다. 미국에서는 Shen등(1978, 1981)에 의해, 통상적인 엄지말뚝 + 버팀보(또는 지반앵커) 흠막이 공법 대신에 Lateral Earth Support System 이라 불리는 Soil Nailing System이 개발되었으며(그림 1-b), 60 ft 깊이의 굴착지보에 성공적으로 적용되었다. 또한 이 공법은 그 이후에 Spiling Reinforcement System 이라는 명칭으로 연약지반 터널공사에 확대 응용되었다(그림 2).

Soil Nailing은 기본적으로, 인장응력, 전단응력 및 휨모멘트에 저항할 수 있는 보강재(주로 # 8 re-bar를 사용하며, nail 이라 불리운다)를 프리스트레싱 없이 비교적 촘촘한 간격(대략적으로 one bar per 5 sq ft)으로 삽입하여, 원지반의 전체적인 전단강도 증대 및 발생변위를 가능한 억제하고 또한 굴착공사 도중 및 완료후에 예상되는 이완을 제한하는 공법이다.

그림 3은 굴착지보를 목적으로 Soil Nailing 공법을 적용할 경우, 단계별 시공과정을 개략적으로 보여주고 있다(1단계 굴착 + 1차 shotcrete + nailing, wire mesh + 2차 shotcrete + 2단계 굴착 ---). Top-Down 방식에 의해 지속적으로 공사가 진행되며, 원지반이 어느 정도의 단기(short-term) 점착력을 지니고 있는 경우, 3 - 6 ft 정도의 깊이가 단계별 굴착작업량(일일 굴착작업량)으로 무난하다고 알려져 있다. 또한 원지반 내부에 지하수가 존재하는 경우 적절한 배수체계를 갖추어야 한다.

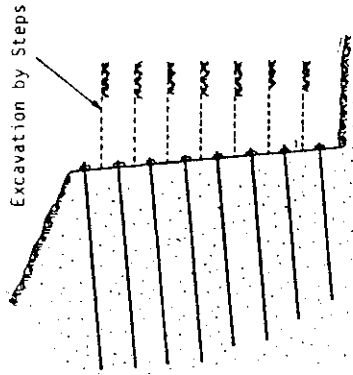
본 논문에서는 Soil Nailing 공법의 적용성 및 기술성, 시공과정, nailed-soil 토류구조물의 거동과 soil-nail 상호작용 등에 관한 내용들이 우선 다루어 졌으며, 계속해서 two-body translation mechanism을 토대로 침투수압을 고려한 해석방법의 제시, 설계에 및 관련 분석결과 등의 제시가 이루어 졌다. 또한 본 연구에서 제시된 해석방법의 적합성 검토 등을 위해 잘 알려진 (California) Davis Method 및 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) 프로그램과의 결과 비교 및 분석이 수행되었다.

2. 적용성

Soil Nailing은 철도 및 고속도로 인접사면의 보강, 지하구조물 및 터널 등과 같은 토목관련 시설물 축조에 필요한 굴착지보체계로 주로 이용되어 왔다(표 1). 특히 굴착지보체계의 경우 Soil Nailing은 가설구조물로 주로 이용되어 왔으며 이에 대한 원인은, 이질의 재료가 다분히 포함된 지반의 경우 nail의 장기적인 부식율을 정확히 예측하기 어렵고 또한 전면을 미적으로(aesthetic facing) 처리하는 기술이 미흡하였기 때문이다. 그러나 기술의 개발과 더불어 영구구조물의 적용이 점차 확대되어가는 추세이며, 한 예로서 프랑스에서는 80 ft 높이의 영구구조물 축조에 Soil Nailing 공법이 적용된 바 있다. 이외에도 Soil Nailing 공법을 특수구조물에 적용하기 위한 시도가 일부 이루어지고 있으며, 원형 shaft의 지지에 적용된 예가 그림 4에 개략적으로 표시되어 있다.

통상적으로 널리 이용되는 굴착지보체계(중력식 콘크리트옹벽, 엄지말뚝벽체, 현장타설 slurry 벽체 등)와 비교하여 볼 때, Soil Nailing 공법은 몇가지 상대적인 장점을 지니고 있으며, 이를 항목별로 정리하면 다음과 같다.

저렴한 공사비 - Soil Nailing 공법의 경우, 원지반 자체가 주된 구조적 요소의 하나로 이용되고, 또한 그 이외의 주된 구조적 요소는 상대적으로 가격이 저렴한 nail 이다. shotcrete 또는 기성 전면판은 단지 전면에만 존재하는(nail과 nail 사이의) 흠의 붕괴를 방지하기 위한 국부적인 역할(local role)이 전부이며, 따라서 비교적 두께가 얇고 가격도 저렴한 특징을 지니고 있다. 결과적으로 두꺼운 철근콘크리트 전면판 또는 프리스트레싱을 가하는 지반앵커를 이용하는



Retaining Structures

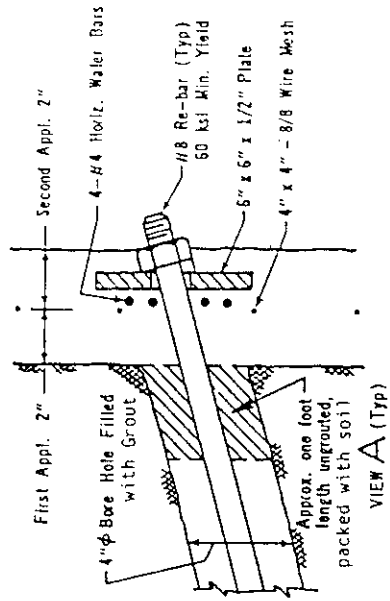
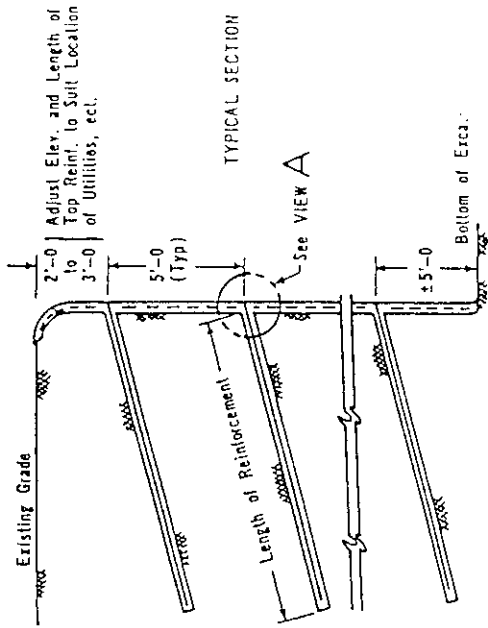
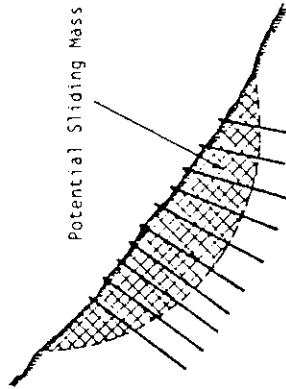
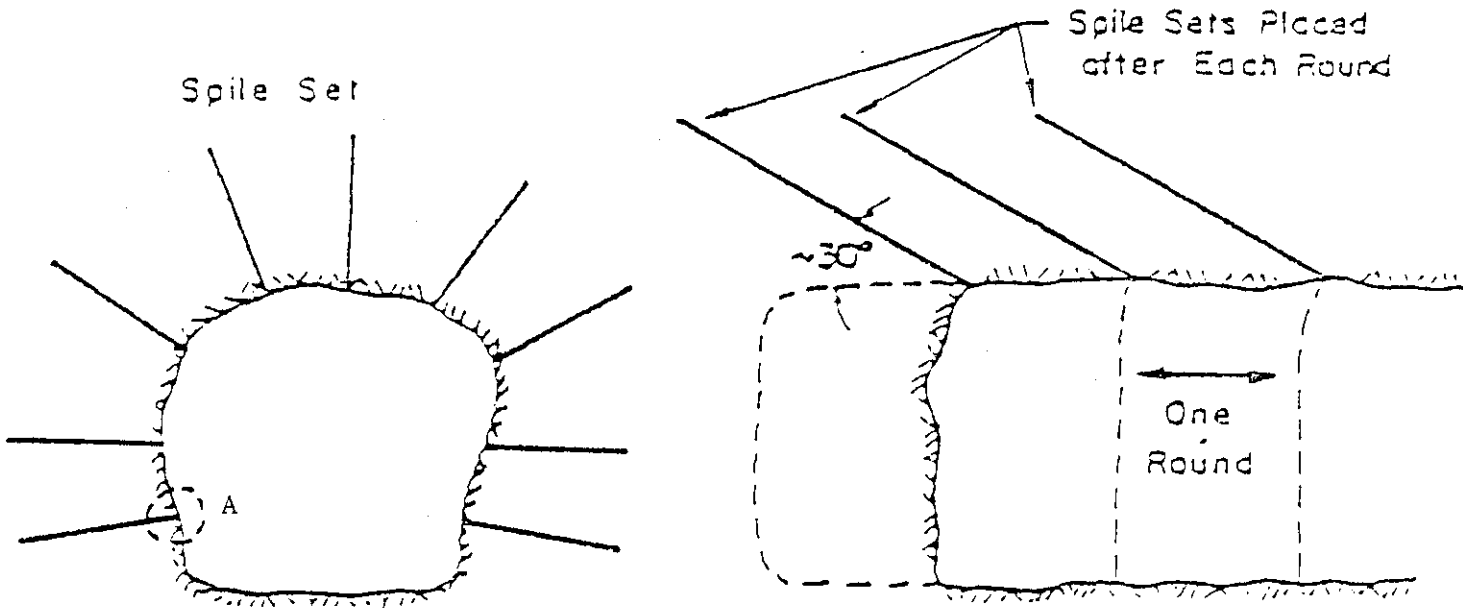
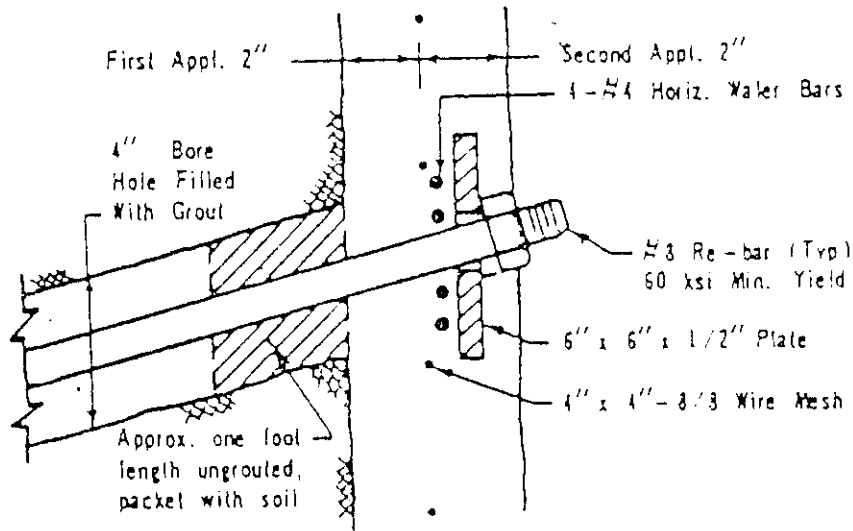


그림 1-a. Main applications of soil nailing

그림 1-b. Construction details of lateral earth support system [Shen et al., 1978]



(a) Spiling Reinforcement Ahead of the Face



VIEW A (Typ)

(b) Construction Details

그림 2. Spiling reinforcement system

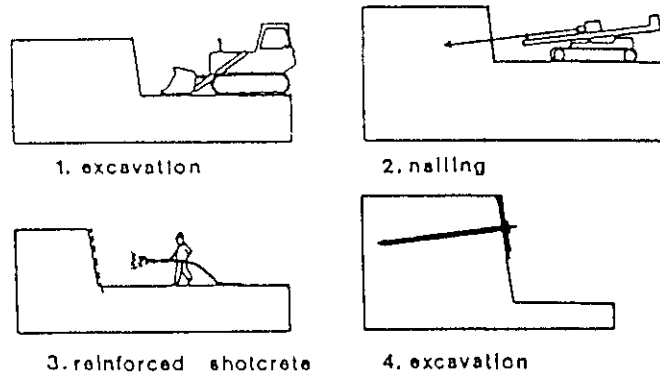
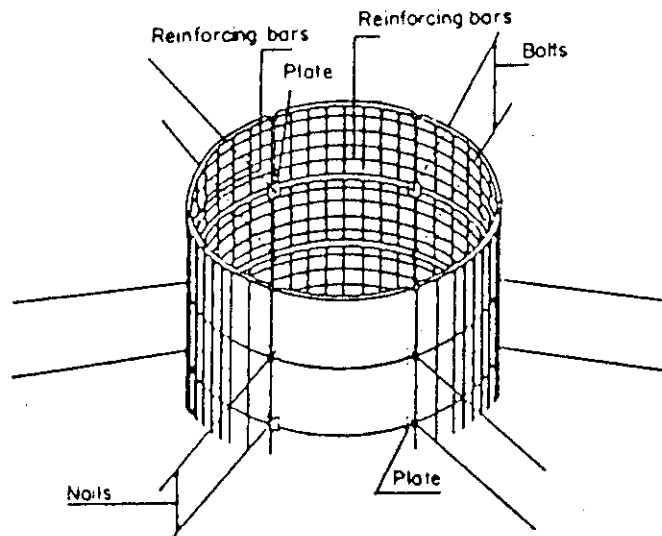


그림 3. Construction process of soil nailing system



Support of Circular Shafts Using Metallic Facing and Soil Nailing

그림 4. Example of nailed soil shaft (Louis, 1981)

Table 1. Some typical soil nailing projects

Type of structure	Type of soil	Height of structure (ft)	Type of reinforcement	Length of reinforcement (ft)	Spacing (ft) V x H
Railway retaining structure (Versailles) (1972) Temporary	cemented fine sand $\phi' = 32^\circ$ $c' = 400 \text{psf}$	79	grouted bars 2 bars/reinf 0.5 inch dia.	13 to 20	3.3 x 3.3
Urban retaining structure (Nice) (1975) Temporary	sandy marl $\phi' = 35^\circ$ $c' = 200 \text{psf}$	36	grouted bars	26	6.6 x 10
Urban retaining structure (Paris) (1976) Temporary	silty colluvium and sand $\phi' = 20^\circ \sim 35^\circ$	39	driven tubes 40/49 mm	20	2.5 x 2.5
Retaining structure for underground parking (France Alps) (1980) Temporary	compact moraine $\phi' = 55^\circ$ $c' = 0$	46	grouted bars 1 inch dia.	23 to 30	6.6 x 10
Cut slope retaining structure (France Alps) (1981) Permanent	clayey soils $c' = 0$ $\phi' = 28^\circ$	20	grouted bars 1 inch dia.	30 to 33	6.6 x 6.6
Excavation retaining structure (Lyon) (1984) Permanent	sand with sandstone layers	98	grouted bars 1 inch dia.	20 to 46	varying (average 6.6 x 10)
Excavation retaining structure (southeast France) Temporary	calcareous marl $\phi' = 35^\circ$ $c' = 400 \text{psf}$	36	grouted bars 1 to $\frac{1}{2}$ inch dia.	23 to 49	6.6 x 10
Retaining structure (Paris) Temporary	remolded stiff marl $\phi' = 25^\circ$ $c' = 0$	30	grouted bars $1\frac{1}{2}$ inch dia.	33	4 x 5
Excavation retaining structure (France) Temporary	weathered shale $\phi' = 45^\circ$ $c' = 0$	62	grouted bars 1 to $\frac{1}{2}$ inch dia.	16 to 30	3.3 x 6.6
Excavation for facing of tunnel entrance (Rosti)	marl, calcareous marl	131	-	-	-

공법에 비해, 공사재료비의 상당한 절감효과가 Soil Nailing 공법의 경우 예상되어 진다.

경량의 시공장비 - Soil Nailing은 단순한 천공 및 그라우팅 장비 (drilling by vibropercussion & grouting generally by gravity)를 이용해 시공이 가능하다. 또한 Top-Down 방식에 의한 단계별 시공이므로 장비를 다루기가 비교적 순쉬우며, 따라서 접근이 용이하지 않은 현장여건의 경우 Soil Nailing 공법의 효율성은 더욱 크다고 할 수 있다.

현장여건의 적용성 - Top-Down 방식에 의한 단계별 시공이 이루어 지므로, 현장여건 및 각 토층별 강도특성 등을 감안하여 이에 적합한 전체 구조체의 기하학적 형상(전면의 경사도를 포함하여) 및 nail의 강도, 치수 등의 선택이 가능하다.

지반조건의 적용성 - 표석 또는 경암 등의 이질재료가 포함된 지층을 접하게 되는 경우, 직경이 비교적 작은 구멍의 천공을 요하는 Soil Nailing 공법은, slurry 벽체 및 엄지말뚝공법 등과 비교하여 볼 때, 시공상 더욱 편리한 장점을 지니게 된다. 이에 관련하여 Guillaoux등이 보고한 시공사례(표석이 포함된 퇴적지층에 지하주차장 건설을 위한 깊이 70 ft. 의 가설구조물 설치공사, 프랑스 알프스 지역)를 소개하면, 당초설계는 3단 지반앵커 및 엄지말뚝 설치로 되어 있었으나 말뚝타입의 어려움 때문에 Soil Nailing 공법으로 설계 변경되어 시공이 완료되었으며, 결과적으로 공기단축 및 공사비 절약 측면에서도 상당한 효과가 얻어졌음이 보고되었다.

유연성 (flexibility) - Soil nailing 공법으로 시공된 흙막이 구조물은, 통상적인 현장타설 철근콘크리트 흙막이 구조물과 비교할 때, 훨씬 유연성을 지니고 있다. 이와같은 soil nailing 구조체의 유연성은, 주변지반의 움직임에 대한 적용성 향상, 또한 더욱 큰 수직침하 및 부등침하에 지탱하는 특성을 결과적으로 보여주게 된다. 이외에도 Gassler-Gudehus의 연구결과에 따르면, 동적하중이 작용하는 경우에도 과다한 움직임이 유발되지 않고 저항능력이 큰 것으로 밝혀진 바 있어, 지진이 자주 발생하는 지역에서는 관심있는 공법으로 예상되어 진다.

3. 기술성 및 구조적 요소

nailed-soil 토류구조물의 주된 구조적 요소는 원지반(in-situ ground), 저항력을 발휘하는 보강재(nail 또는 nail + grouting) 및 전면판 등이다. 이 공법의 경제성은 기술과 축조율(construction rate)에 지배적으로 관련되어 있다. Soil Nailing 기술의 장점은 적용의 유연성에 있다 - 즉 주된 구조적 요소(보강재 및 전면판) 및 설치기법은, 공사 도중인 경우라도, 특수한 현장여건 및 다양한 토층에 가장 적합한 공학적 해를 제공하도록, 쉽게 적용되어질 수 있다. 또한 앞의 2. 적용성 에서도 이미 언급된 바와 같이, Soil Nailing은 가설구조물에 주로 이용되어 왔으며, 그 이유는 주로 보강재의 내구성 문제와 전면판 기법의 미비점 등이다. 따라서 이와같은 문제의 해결을 위해 최근 몇년간, 값이 싸고 부식이 방지되는 nail의 제조 및 미적, 환경적 요구조건이 충족되고 또한 내구성이 강한 기성 콘크리트(또는 강재) 패널 전면판 제조에, 주로 기술개발의 초점이 맞추어져 왔다.

보강재 및 설치기법

현재 Soil Nailing 공법에 주로 사용되는 보강재는 driven nail, grouted nail, jet-grouted nail 및 부식방지용 nail 등의 4종류이며, 각 nail에 관련된

구체적인 내용은 다음과 같다.

driven nail - 주로 프랑스 및 독일에서 사용되고 있는 driven nail은 일반적으로, 값이 싸고, 350 MPa의 항복강도를 지닌 연강으로 제조되는 rod 또는 bar 이며, 직경은 15 ~ 46 mm 정도의 작은 크기이다. 또한 비교적 촘촘한 간격(2 ~ 4 bars per sq m)으로 설치되어지며 이를 통해 균질한 복합보강지반이 되도록 한다.

driven nail은 지반을 미리 천공하지 않고 vibropercussion pneumatic 또는 hydraulic hammer를 이용하여 설계된 경사각도로 지반에 타입된다. 특수한 경우로서, axial channel이 부착된 nail의 경우 완전히 타입된 후 주변지반과의 grout sealing이 가능하다.

이와같은 설치기법은 시공속도가 빠르고(4 ~ 6 bars per hour) 경제적이긴 하나, nail의 길이는 최대 20 m 정도로 제한되며 또한 지반내에 이질재료(예를 들면 표석 등)가 포함되어 있는 경우 타입이 여의치 않다.

grouted nail - grouted nail은 일반적으로 고강도 강봉(직경은 15 ~ 46 mm 정도)으로서 1050 MPa의 항복강도를 지니고 있다. 지반의 특성에 따라 결정되어지는 1 ~ 3 m 정도의 다양한 수직 및 수평간격으로, 미리 천공된 구멍(직경은 10 ~ 15 cm 정도) 내부에 nail이 설치된다. 이와같이 설치된 nail은 중력 또는 낮은 압력 하에서 시멘트 또는 resin 등으로 그라우팅 되어진다. nail-grout 사이의 부착력 향상을 위해 ribbed bar가 사용될 수 있으며, 또한 구멍이 뚫린 특수한 튜브를 이용해 분사 그라우팅이 가능하다.

jet-grouted nail - jet-grouted nail은 중앙부의 강재 rod와 grouted soil로 이루어진 합성보강재로서, 두께는 30 ~ 40 cm 정도까지 가능하다. vibropercussion driving과 고압(>20 Mpa)의 jet-grouting을 결합한 시공기술은 최근에 들어 Louis에 의해 개발되었고 특허권이 인정되어 진다. nail은 고주파수(70 Hz 까지)의 vibropercussion hammer를 이용해 설치되어지고(그림 5), nail이 설치되는 동안이나, 또는 설치완료 후에도 시멘트 또는 resin 그라우팅이 가능하다. 시멘트 또는 resin은 강재 rod 내부에 설치된 작은 직경(수 mm)의 종방향 관을 통해 분사주입 된다. 분사주입이 고압에서 이루어 질 경우 주변지반의 hydraulic fracturing이 유발되는 문제점이 예상되기는 하나, 현재까지는 특히 사질토 지반의 경우 현저하게 낮은 분사압력(4 Mpa)을 이용해 성공적으로 시공이 수행되었다. jet-grouting 설치기법은 주변지반의 재다짐 및 지반개량을 유발하며, 또한 합성보강재의 전단저항 및 인발저항을 현저하게 증가시킨다.

부식방지용 nail - 부식방지용 nail은 영구구조물에의 사용을 목적으로 최근에 프랑스 토건업자(Intrafor-Cofor, Solrenfor)에 의해 개발되었다. 부식방지용 nail은 물의 침투에 대해 보호하기 위하여 steel bar가 그라우트(grout)로 감싸여져 있다. Solrenfor Nail(그림 6-a)의 경우, steel bar 및 주변 그라우트는 강재 또는 플라스틱으로 만들어진 케이싱에 의해 보호된다. Intrafor-Cofor Nail(그림 6-b)의 경우, 프리스트레싱 효과는 그라우트 부분이 항시 압축을 받도록 유지시켜 주며 따라서 미소균열 발생을 억제시킨다. 앞에서 열거한 2가지 특수한 부식방지용 nail 이외에도, 지반앵커의 경우와 기술적 개념으로 거의 유사하고 또한 이중으로 보호된 또다른 형태의 nail도 사용될 수 있다. 한 예로서 미국에서는 토건업자들이, 이중(double) 보호를 목적으로 resin-bonded epoxy nail을 고안하여 사용하고 있다.

전면판 (facing)

전면판의 주요기능은 보강된 층 사이의 극부적인 지반에 대한 안정을 확보하고, 굴착 직후의 이완을 방지하며, 또한 침식 및 풍화작용으로 부터 지반을 보호하기 위한 것이다. 따라서 전면판은 연속적으로 연결되어 설치되고, 또한 절취된

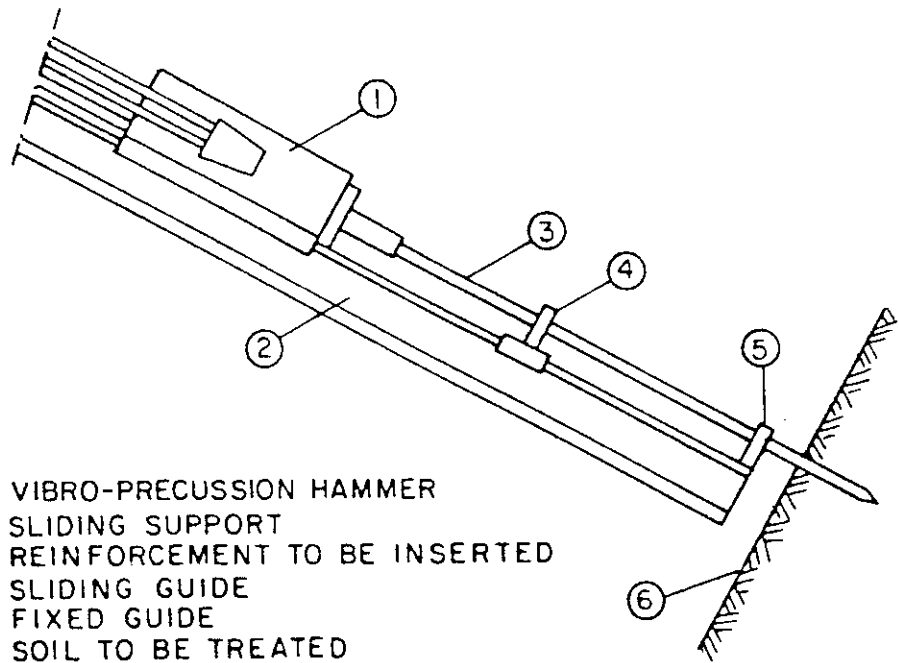


그림 5. Jet bolting: Installation of reinforcing elements with or without grouting simultaneously

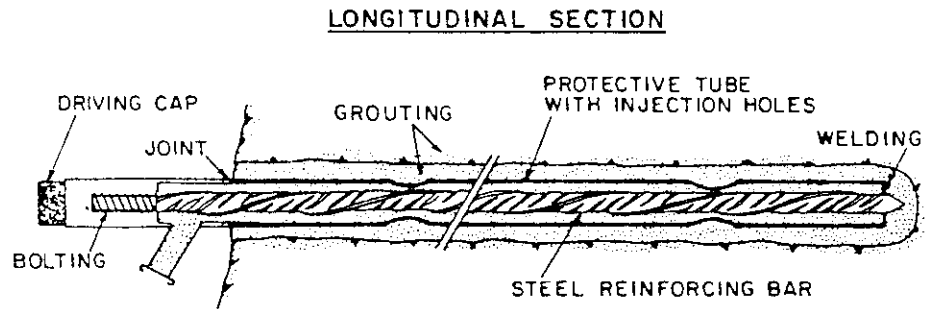


그림 6-a. 'TBHA' nail patented and developed by Solrenfor for permanent structures

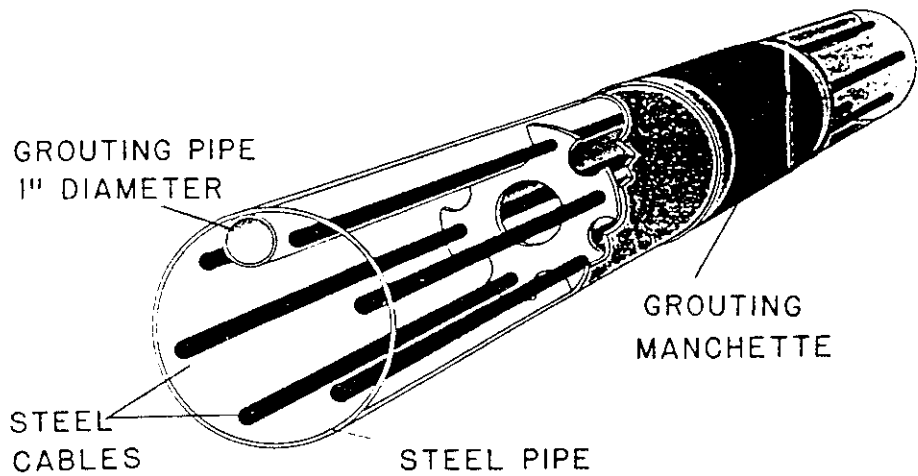


그림 6-b. Prestressed multireinforced nail 'INTRAPAC' developed by INTRAFOR-COFOR, France

사면의 다양한 표면 형상에 맞도록 설치되어지며, 이외에도 굴착이 진행되는 동안 지반변위를 견디기에 충분하도록 유연해야 한다. 지반의 특성 및 적용성에 따라, 4가지 종류의 전면판이 현재 사용되고 있다.

shotcrete facing - shotcrete facing(10 ~ 25 cm 두께)은 대부분의 가설 흩막이 구조물 전면판 기법으로 현재 주로 이용되고 있다. 이와같은 전면판 기법은, 주변지반 내부의 간극 및 균열을 채울 수 있는 연속적이고도 유연한 표면층을 제공한다. 또한 shotcrete facing은 용접된 wire mesh에 의해 일반적으로 보강이 이루어 지고, 최종적으로 요구되는 10 ~ 25 cm 두께는 shotcrete의 연속된 타설(일반적으로 1차 및 2차 타설, 각 9 ~ 12 cm 두께)에 의해 얻어진다. 이 전면판 기법은 시공이 비교적 쉽고 가격도 저렴한 장점을 지닌 반면, 영구구조물인 경우 일반적으로 요구되는 기술상의 질적인 면과 미적인 면을 충족시키지 못하는 단점을 내포하고 있다. 특히 shotcrete facing의 내구성은, 지하수 침투, 균열을 유발하는 기후변화 및 동결현상 등과 같은 환경요인에 의해 영향을 받을 수 있다. 더우기 shotcrete facing의 시공은 콘크리트-흙 사이의 접촉면에서 효율적인 배수를 어렵게 하는 경향이 있다.

welded wire mesh - 용접된 wire mesh는 일반적으로 쇠철암이나 중간 정도 성질의 흙(조주석, 혈암 등)에 전면판을 보강하기 위해 사용되어 진다.

영구구조물에 적용되는 콘크리트 및 강재 전면판 - 현재까지는 현장타설 철근콘크리트 전면판이 영구구조물에 대부분 적용되어 왔다. 그러나, 기성 콘크리트 또는 강재 패널이 근래에 개발되어 영구구조물에 점차 적용이 확대되고 있는 실정이다. 이와같은 기성 패널은 다양한 미적, 환경적 및 내구성 기준에 충족되도록 설계되어 질 수 있다. 또한 이와같은 기성 패널은, 전면판 뒤쪽의 지속적이고도 완벽한 배수를 위한 기술적인 해를 제공한다. 그림 7-a는 경사진 전면(C.Louis, unpublished results)에 Solrenfor 금속패널을 사용한 예를 보여준다. 직사각형 형태의 강재패널은 서로 볼트로 조여져 있으며, Soil Nailing은 패널 모서리에 설치된다. 그림 7-b는 연속적인 토목섬유 배수체계와 더불어 설치된 기성 콘크리트 패널을 보여준다. 또한 기성 강재패널과 현장타설 콘크리트를 병용하는 복합형태의 패널도 종종 사용되어 왔다. grouted nail은 일반적으로 사각형 강판(폭 30 ~ 40 cm)에 bar를 볼트로 조임으로써 전면판에 부착되며, 이에 반해 driven nail은 일반적으로 피복(cladding) 또는 다른 적절한 방법에 의해 전면판에 부착된다.

4. 시공과정, 배수체계 및 감리

nailed-soil 흩막이 구조물의 시공은 3가지의 주요한 단계를 반복하게 된다 - 즉, 적정깊이까지의 굴착, nail의 설치 및 배수, 그리고 전면판의 설치 등이다. Soil Nailing의 기술 및 시공과정은 근본적으로, 굴착하는 동안 지반의 교란을 최소화하고, 지반의 이완을 가능한 억제하며, 또한 원지반이 지닌 역학적 성질의 저하를 방지하는데 주목적을 두고 착안되었다. 따라서 nailing 체계(전면판 및 보강재)는 굴착후 가능한 신속하게 설치되어 져야 한다.

굴착공사는 종래의 경량 토공장비를 이용해 1.5 ~ 30 m 깊이 정도를 하루 즉 한단계 굴착깊이로 하여 시행되어 진다. 일반적으로, 지반이 지닌 단기(short-term) 점착력은 각 굴착단계에 있어서 국부적인 안정성을 확보하기에 충분하다. 또한, nailed-soil 벽체 상단부의 움직임을 유발할 수 있는 국부적인 불안정을 방지하기 위해서는 굴착시 특히 유의해야 한다.

지하수가 존재하는 경우, 적절한 배수체계를 반드시 갖추어야 하며, 구체적으로는 (a) 전면판 요소를 보호하기 위한 얇은 배수시설(플라스틱 파이프, 10 cm 직경, 30 ~ 40 cm 길이), (b) 구조체의 변위에 심각하게 영향을 미칠 수 있으며, 또한 굴착 도중이나 굴착완료 후의 불안정을 유발할 수 있는, nail이 설치된

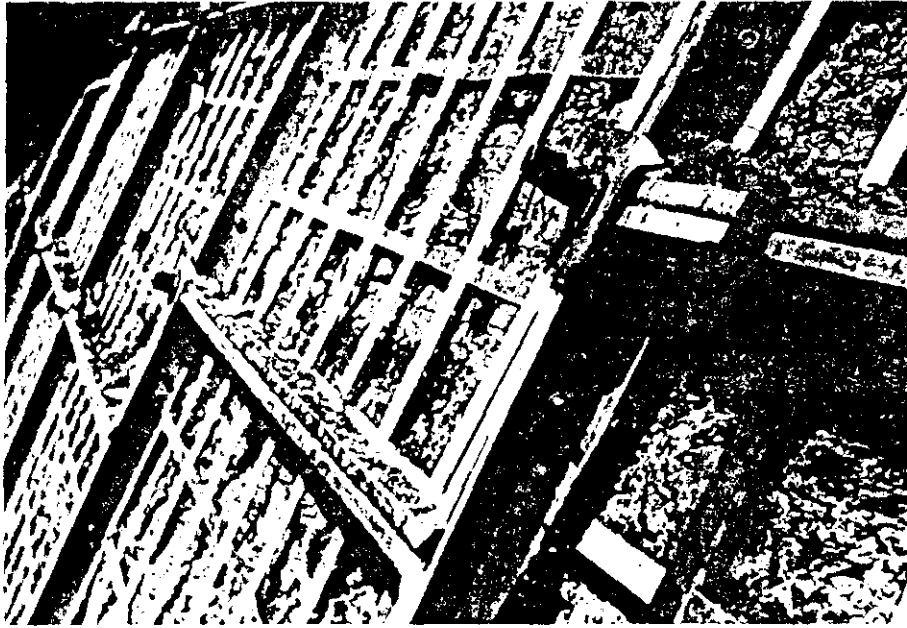


그림 7-a. Prefabricated steel panels

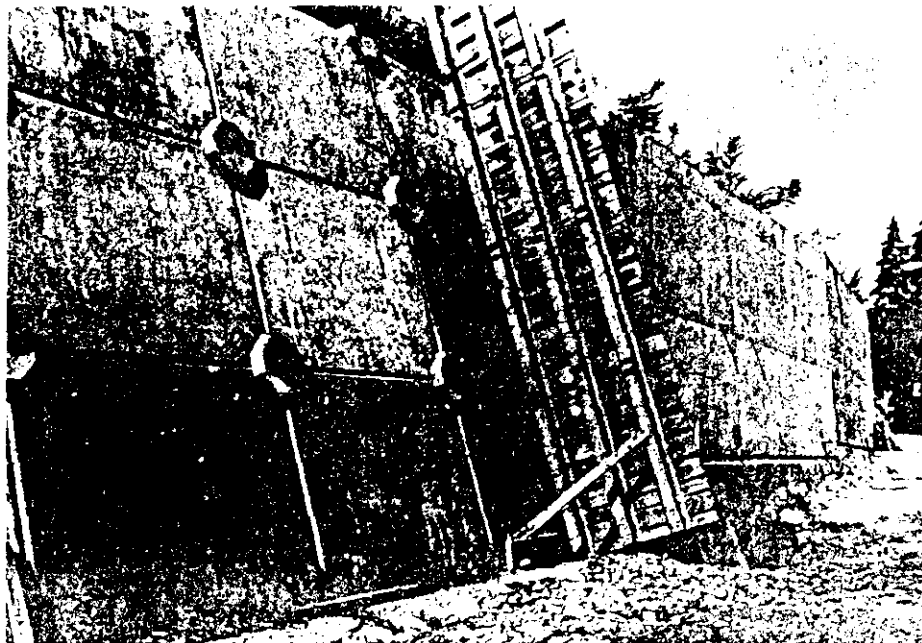


그림 7-b. Prefabricated concrete panels and nail connections

지반의 포화를 가능한 방지하기 위한 배수시설(nail보다 길이가 길고 흠이 있는 플라스틱 튜브) 등이다. 이와는 달리 기성패널을 이용하는 영구구조물의 경우에는, 토목합성섬유와 같은 연속적인 배수시설을 전면판 뒤쪽에 설치할 수 있다.

Soil Nailing 기술은 수동적인 보강재의 설치에 의존하며, 또한 보강재 주변의 마찰저항력을 효과적으로 유발하기 위해서는 어느 정도의 상대적인 지반변위가 요구되어 된다. 따라서 구조체의 거동을 항상 주의깊게 관찰하고, 전면판 변위를 지속적으로 측정하며 또한 측정된 변위가 허용변위에 대한 설계기준에 적합한지 확인하는 작업이 반드시 필요시 된다.

5. nailed-soil 토류구조물의 거동

nailed-soil 토류구조물에서 지반-보강재 사이의 상호작용은 몇가지 형태의 저항력(그림 8)을 유발하게 되며, 또한 이와같은 상호작용은 시공과정, 보강재의 설치기법 및 설치각도 등에 관련되어 있다.

마찰저항

보강재(말뚝, 보강요소 등)를 따라 유발되는 마찰저항에 대해서는 이미 폭넓은 연구가 이루어져 왔다. 실제의 일반 보강토 토류벽체에 대한 실험적 연구 및 인발시험 등은 지반-보강재 사이의 마찰계수에 관련된 다양한 인자(보강재의 표면특성, rib effect, 지반의 밀도 및 팽창특성, 세립질의 형태 및 양, 보강재에 작용하는 수직응력 등)의 영향을 적절히 평가하기 위한 많은 자료를 제공해 주었다. 이러한 실험적 결과들은 현재 보강토 토류구조물 설계지침으로 폭넓게 이용되고 있다. 일반적인 방법으로 보강된 성토제방 및 nail로 보강된 벽체 모두에 있어서, 마찰에 의한 지반-보강재 상호작용 원리는 거의 유사하다. 따라서, 실제의 nail에 대한 full-scale 인발시험 결과와 일반 보강토 토류구조물의 설계지침을 서로 연관지으려는 시도가 Cartier-Gigan에 의해 이루어 졌다. Cartier-Gigan에 의해 시행된 full-scale 인발시험 결과에 따르면, driven nail-사질토 지반 사이의 마찰계수는 일반 보강토 토류벽체 설계에 적용되는 지침과 유사한 경향을 보이고 있다(그림 9). 그러나 다른 연구자들에 의해 지적된 바와 같이, 지반-보강재 사이에서 발휘되는 마찰저항은 보강재를 설치하는 기법에 크게 연관되어 진다. 일반 보강토 토류벽체의 경우 보강재 주변지반은 다져지게 되며 또한 실제적으로 정지토압상태의 응력이 유발되는 반면, grouted nail을 위한 천공은 교란된 주변지반의 하중이 일부 제거되는 역할을 하게 되어 결과적으로 원지반의 성질 변화에 영향을 미치게 된다. 또한 grouted nail의 경우, 지반-보강재 사이의 마찰은 그라우팅에 의한 지반 재다짐에 의해 영향을 받게 되며, 아울러 soil-grout 접촉면의 특성은 일반 보강토 토류벽체의 금속재료 표면에 관련된 특성과는 현저히 다른 양상을 보여준다. 더우기, 일반 보강토 토류벽체의 경우에 뒤채움으로 주로 사용되는 균질한 사질토는 nail이 설치되는 원지반과 비교할 때 현저하게 성질이 서로 다를 수 있다. 따라서, 일반 보강토 토류벽체에 대한 설계지침이 nail로 보강되는 구조체에 그대로 적용되어서는 곤란하며, 또한 soil-nail 접촉면 전단응력의 한계값(또는 마찰계수)을 정확히 결정하기 위해서는 인발시험이 요구되어 진다.

Soil Nailing의 경우 일반적으로, 현장시험결과를 토대로 얻어진 설계변수를 사용하는 것이 훨씬 실질적이다. Guilloux-Schlosser는 pressuremeter test 결과를 토대로 제시된 마찰말뚝에 대한 경험적 설계방법을 이용해, driven nail에 대한 전단응력 한계값의 적절한 예측이 가능하다는 사실을 보여주었다(그림 10). 그러나 Guilloux-Schlosser이 driven nail에 대해 제시한 이와같은 예측방법은, 다져진 팽창성 지반에 설치되는 grouted nail의 경우 한계전단응력을 현저하게 과소평가하는 문제점을 지니고 있다. 그림 11은 지반종류 및 부착길이가 서로 다를 경우, grouted nail에 대한 인발저항의 크기 변화를 보여준다. 그림 11의 결과를 살펴보면, 지반종류에 따른 인발저항 크기의 커다란 변화는 지반특성에 적

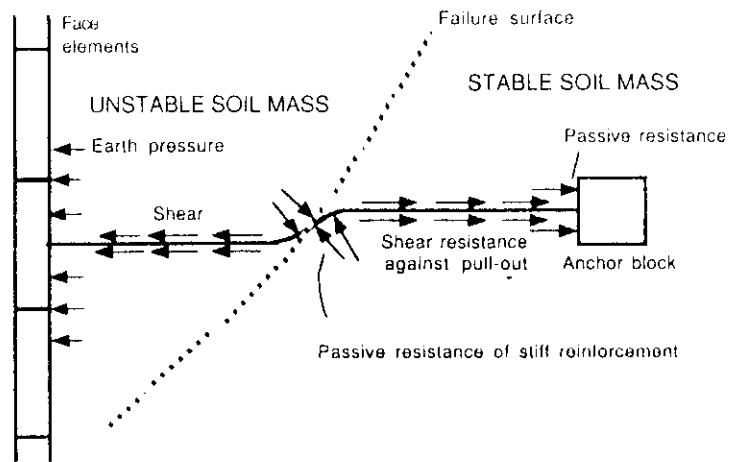
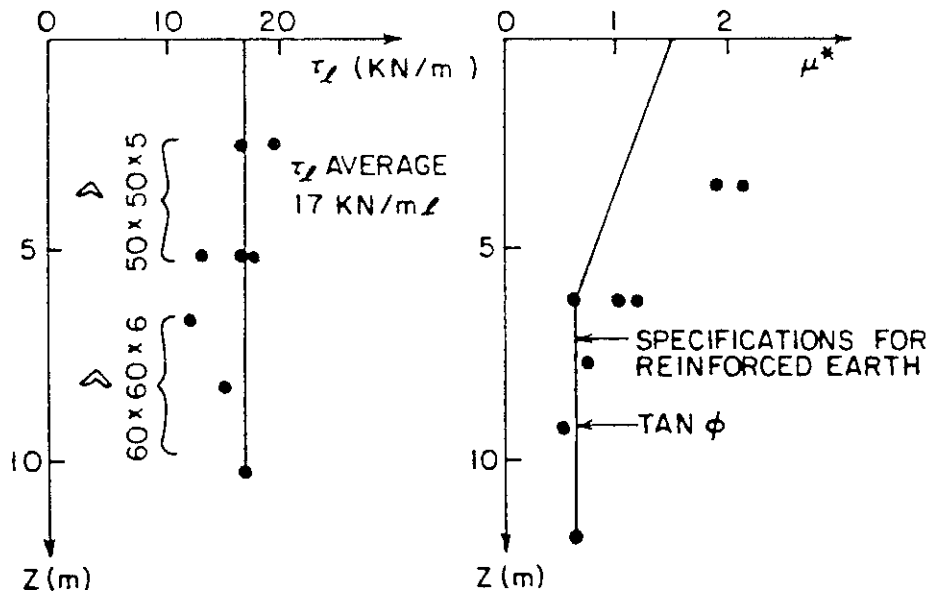


그림 8. Schematic sketch illustrating discrete soil-reinforcement action



SOIL: SAND $\phi=33^\circ$ $c=10\text{kPa}$
 NAILS: DRIVEN PROFILE

그림 9. Soil reinforcement friction between a driven nail and a granular soil (Cartier and Gigan, 1983)

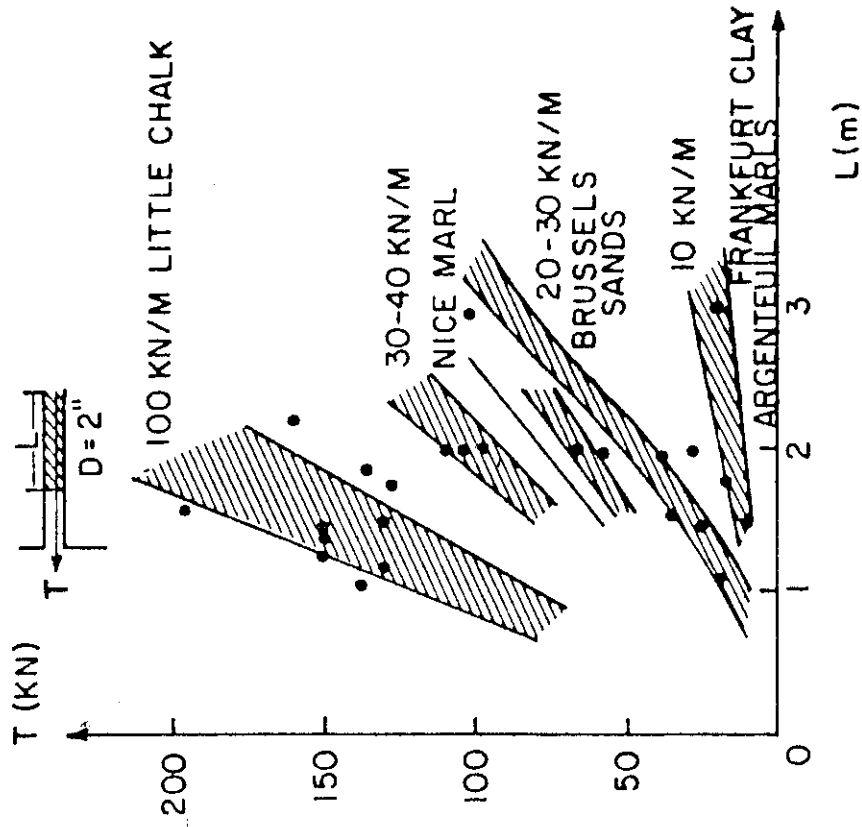


그림 11. Variation of pull-out resistance of reinforcing elements with depth of embedment (cement or resin grout) for different soils ((C. Louis, unpublished results))

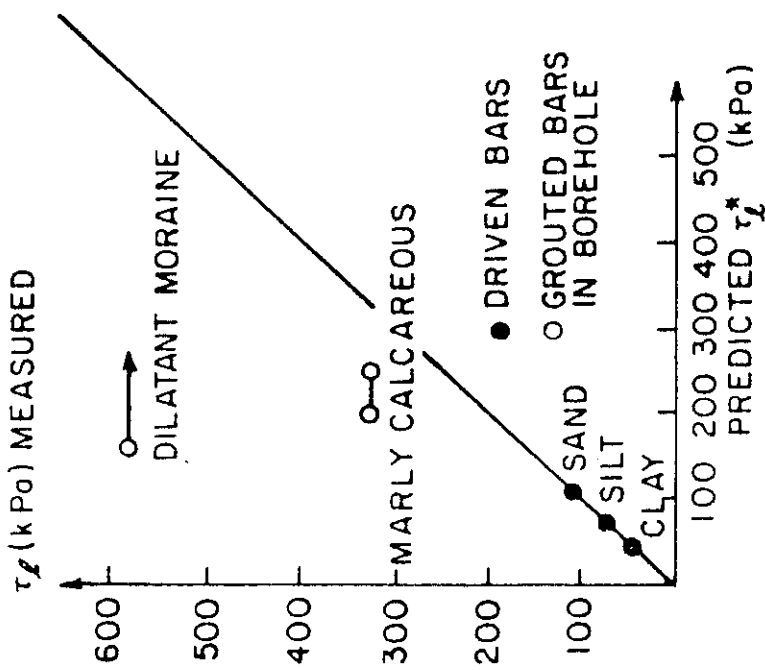


그림 10. Comparison between measured soil-bar lateral friction and design guidelines for friction piles using Pressuremeter test results, (Guilloux and Schlosser, 1984)

합한 설계변수를 결정하기 위해서는 현장인발시험이 반드시 필요하다는 사실을 분명히 나타내고 있다. 그러나, 한계 전단응력과 현장에서 측정된 지반특성 사이의 상관관계는 예비설계를 위한 적절한 기초자료로 활용될 수 있다.

보강재에 발휘되는 수동저항

nailed-soil 토류구조물의 경우, 현재 주로 사용되는 작은 직경의 보강재는 비교적 유연성을 지니고 있으며, 따라서 보강재에 직각된 방향으로 수동저항이 발휘되기 위해서는, 지반-보강재 접촉면에 마찰저항을 유발하기 위해 요구되는 변위보다 훨씬 더 큰 지반변위가 요구되어 진다. 따라서 보강재(가능파괴면 바깥 쪽 stable zone에 위치한) 주변에서 발휘되는 마찰저항이, 사용하중 하에서 예상되는 전면 토압에 저항하는 등 전체적인 안정성 확보에 주된 역할을 담당하게 된다(그림 8). 그러나 최근에 들어 jet-grouted nail 또는 큰 직경의 nail 등과 같이 강성이 큰(stiffer) 보강요소가 계속 개발되고 또한 이의 점차적인 사용확대는, 가능파괴면 양쪽에서 보강재에 직각된 방향으로 발휘되는 수동저항의 영향이 안정해석 포함되어야 하는 상황을 초래하며, 이와같은 수동저항력은 횡하중을 받는 말뚝해석에 통상 이용되는 p-y 방법을 이용해 계산될 수 있다.

전면 (facing) 변위

nail이 설치된 흙막이 구조물에 대해 여러 full-scale 실험들이 실시되었으며, 이에 따르면 보강재의 형태, 설치기법 및 지반성질 등이 현저히 다른 경우에도 비소성 지반에 대해 측정된 최대 전면변위는 구조체 전체높이의 0.3%를 초과하지 않는 결과를 보이고 있다(그림 12).

Soil Nailing의 경우 각 nail을 따라 작용하는 인장력의 분포는, 일반 보강토 옹벽에서 이미 측정되어 밝혀진 결과와 거의 유사하다. 또한, 각 nail에 있어서 최대 인장력이 작용하는 점을 서로 연결하면, 이 선이 nail이 설치된 토체 내부의 가능파괴면(unstable zone과 stable zone을 구분짓는, 그림 8)으로 볼 수 있다. 그러나, Soil Nailing의 경우 최대 인장력의 작용점을 연결한 이 가능파괴면은 사질토 지반인 경우에도, 잘 알려진 Coulomb 파괴면과는 형상이 아주 다른 경향을 나타내고 있다.

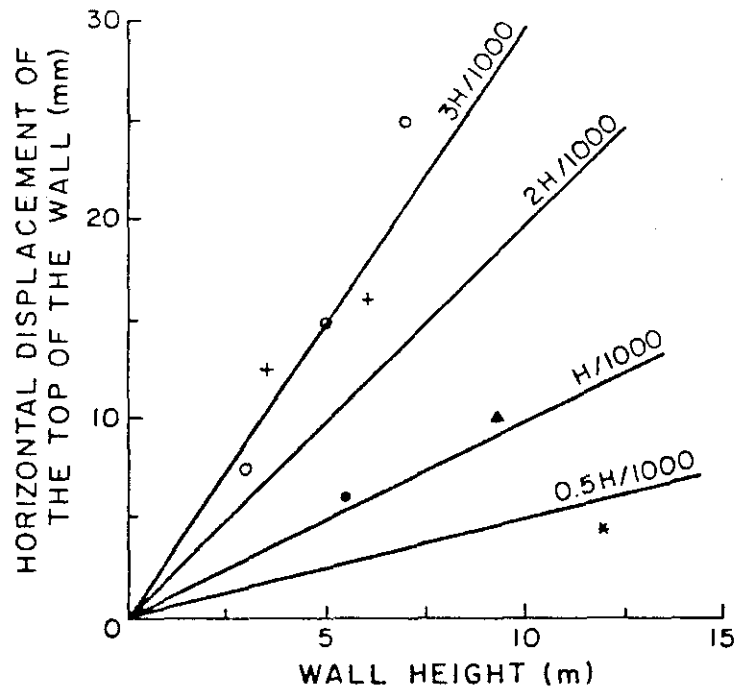
nail로 보강된 절취사면과 일반적인 보강이 이루어진 성토제방을 서로 비교할 때 분명히 유사성은 존재하나, 이와같은 두가지 보강체계 사이에는 현격한 차이점이 있다 - 즉, 공사과정, 보강재에 대한 설치기법, 보강재의 삽입각도 및 전면판의 기울기, 그리고 보강재의 휨강성 등이 서로 다르다.

시공과정이 미치는 효과

nail로 보강되는 굴착지반 구조체와 뒤채움 성토되어지는 일반 보강토 벽체 시공과정에는 근본적인 차이가 있으며, 이와같은 시공과정의 차이는 전면의 변위 형태 및 지지지반의 응력이력(stress history) 등에 대한 현저한 차이를 초래한다. 그림 13은 일반 보강토 옹벽 및 nail로 보강된 벽체 각각의 경우에 측정된 최대 인장력의 깊이에 따른 변화를 보여준다. 서로 다른 두가지 구조체의 경우 모두에 있어서, 보강재는 지지지반의 응력상태를 정지토압상태(즉 K_0 상태)로 유지하려는 경향을 보여주고 있다. 그러나, 시공과정의 근본적 차이는 최대인장력의 깊이에 따른 변화가 아주 다른 현상을 초래하고 있다. 이와같은 최대인장력 변화의 차이는, Juran 등에 의해 시행된 축소된 크기의 모형 실내시험을 통해 변위형태가 서로 다르다는 사실에 직접 연관되어 있음이 밝혀졌다.

nail의 설치각도

nail의 설치각도는 중요한 설계변수 중의 하나이다. 모형 실내실험 및 유한요소해석 등의 결과를 살펴볼 때, 각 nail에 유발되는 최대인장력의 작용점을 서



	SOIL	NAIL	REFERENCE
+	Medium sand	driven	Gassler et al., (1981)
▲	Silty sand (SM)	grouted	Shen et al., (1981)
●	Fine sand (SP) to clayey sand (SC)	driven	Cartier & Gigan (1983)
★	Residual clayey silt weathered shale, sandstone	grouted	Juran & Elias (1986)
○	Fontainebleau Sand (SP)	grouted	Plumelle (1986)

그림 12. Horizontal displacement of nailed soil walls

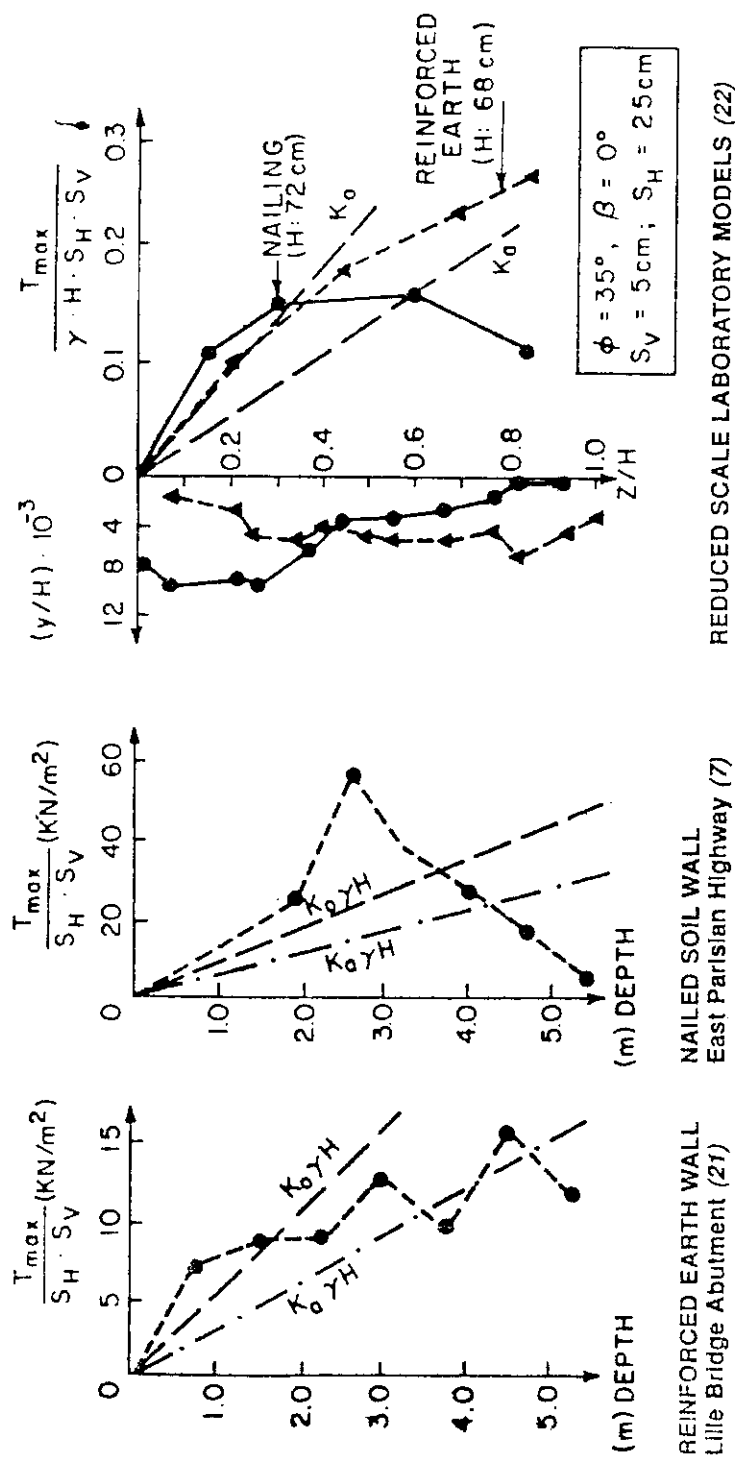


Fig 13. Effect of the construction mode on the facing displacements and on the maximum tension forces

로 연결한 선(즉, 가능파괴면)은, 특히 구조체의 상단부분에서, nail의 설치방향과 거의 직각을 이루는 형상임을 알 수 있다(그림 14). 결과적으로 nail을 아래쪽으로 기울여 설치할수록 더욱 큰 가능파괴면이 예상되어지며, 이는 nail 주변의 인발저항을 감소시키는 결과를 초래하게 된다. 아울러 nail 경사각(아래쪽으로)의 증가는 전면판 변위의 현저한 증가를 초래한다는 것을 알 수 있다(그림 14).

또한 그림 15에 명시된 대로, 일반 보강토 모형벽체(reinforced earth model wall)의 경우 보강재의 경사도는 발생하는 최대인장력의 크기 감소를 초래(벽체 상단부에서는 정지토압 크기 즉 K_0 line에 근접하는)함을 알 수 있다. 또한 nail이 설치된 벽체의 경우 굴착 도중에 발생하는 전면판 변위의 증가는 nail을 따라 유발되는 인장력의 증가와 연관되어 있음이 밝혀진 바 있다. 그러나, 실제적으로 설계 및 시공에 대부분 적용되는 nail의 경사각 범위(즉, $\beta = 10 \sim 12^\circ$ 범위) 내에서는, nail의 인장력에 경사각의 변화가 미치는 효과는 그다지 크지 않다.

6. 유의사항 및 특허권

유의사항

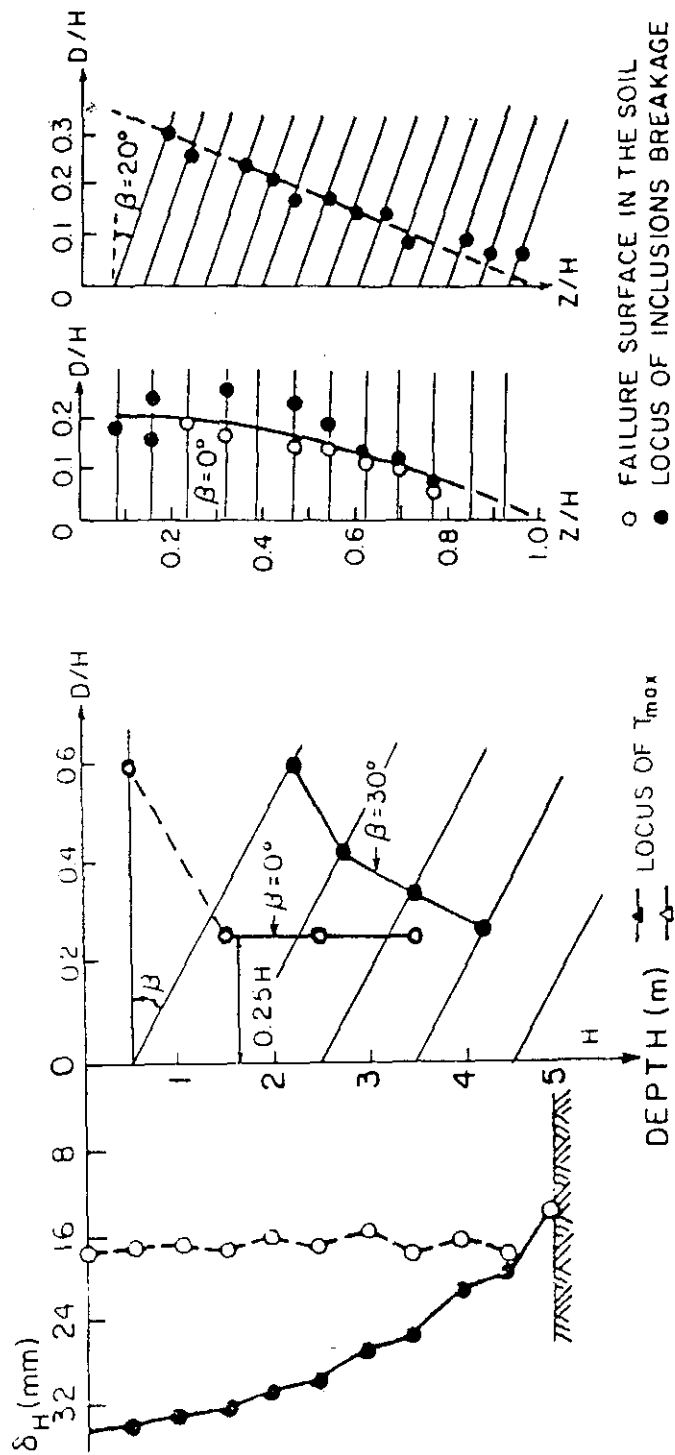
Soil Nailing 공법의 적용성 검토 단계 또는 설계 단계에서 유의해야 할 사항을 정리하면 다음과 같다.

점토질 지반 (clayey soils) 의 경우 - 포화도의 증가는 경우에 따라 nail과 주변지반 사이의 마찰 또는 부착을 현저히 감소시킬 수 있다. 또한, 포화도의 증가는 관련 지지지반의 전단강도를 감소시켜 결과적으로 nail에 작용하는 인장력의 증가를 초래할 수 있다. 간극수압 또한 치명적으로 영향을 미칠 수 있으며, 이외에도 지반의 크라이프 변형 또한 전면의 과도한 횡방향 변위를 유발할 수 있다. 한 예로서 Guilloux-Schlosser(1982)은 소성점토 지반에 축조된 15 ft. 높이의 soil nailing 벽체의 파괴사례를 보고한 바 있다. 따라서 지하수가 존재하는 점토질 지반의 경우, 길이가 길고 촘촘한 간격의 nail 설치가 안정성 확보 측면에서 필요시 될 수 있으며, 이와같은 경우에는 현재까지 주로 이용되어 온 통상적인 지보체계(conventional solutions) 보다 공사비가 다소 증가될 수도 있는 점을 감안하여야 할 것이다.

주변지반-보강재의 변위 - nail이 설치된 흙막이 구조물에 있어서 주변지반-보강재 사이의 상호작용 효과를 유발하기 위해서는 주변지반과 보강재의 상대적인 변위가 요구되어 진다. 따라서 복잡한 도심지역에서 인접건물의 움직임이 특히 제한되어야 할 경우 문제가 될 수도 있다. 그러나 주변지반-보강재 사이의 마찰저항력(즉, 보강재 내부의 인장력)을 유발하기 위해 요구되는 횡방향 움직임은 일반적으로 몇 mm 이내의 비교적 작은 크기이며, 이에 관련된 현장실험 측정 결과에 따르면 최대 횡방향변위는 벽체높이의 0.2 - 0.3 % 정도의 작은 크기이다. 또한 프리스트레싱을 전혀가하지 않는 soil nailing 공법의 경우에 예상되는 변위는, 프리스트레싱을 가하는 지반앵커 공법의 경우와 크기가 거의 비슷한 현상을 보이고 있다.

특허권

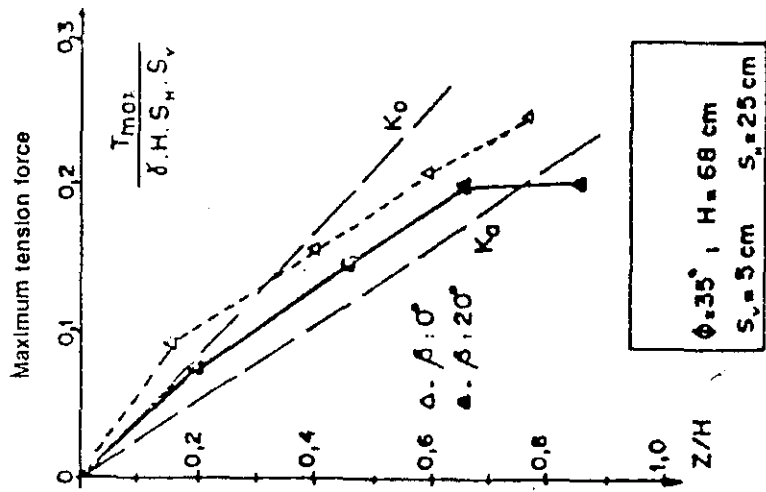
Soil Nailing 공법 자체는 특허권 등으로 묶여있지 않으나, 다만 기성전면판 또는 nail의 경우 몇몇 특정회사의 고유제품(예를 들면, corrosion-protected nail에 해당되는 Solrenfor Nail 또는 Intrafor-Cofor Nail, 그림 6 참조)에 한해서는 특허권이 인정되고 있다.



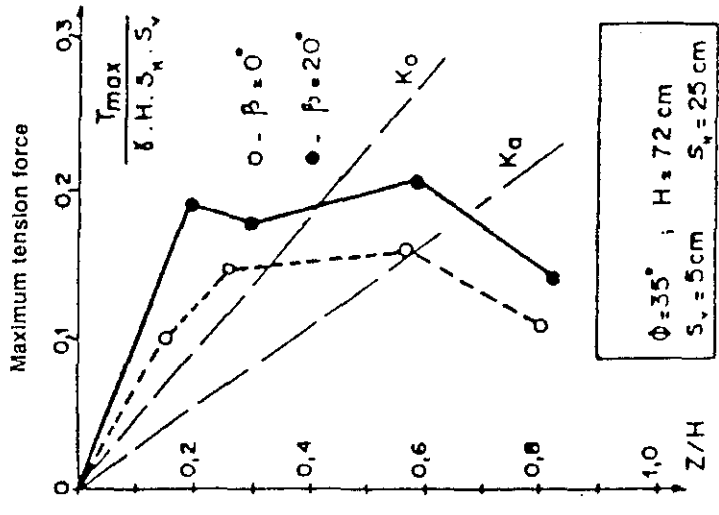
Laboratory model

Finite element analysis

그림 14. Effect of the inclination of the facing displacements and on the locus of maximum tension forces (Juran et al., 1984)



Reinforced Earth model wall



Soil Nailing model wall

Fig 15. Effect on the inclination on maximum tension forces (Juran et al, 1984)

7. 해석방법의 제시, 설계에 및 분석결과

Soil-Nailing 구조체에 대한 설계기준은 일반적으로 다음과 같은 내용을 포함한다.

- 지반, 보강재(과다한 인장 또는 휨), 또한 지반-보강재의 상호작용(인발 파괴 또는 보강재 사이에 위치한 흙의 소성흐름) 등에 관련된 가능파괴에 대한 안전성 검토
- 구조체 특히 전면에서의 예상변위 검토
- 특히 열악한 조건하에서, 영구구조물에 대한 내구성 검토
- 환경적 및 건축적 측면에서의 외관 검토
- 전면판 구조에 대한 안정해석

기본적으로 서로 다른 2가지의 접근방식을 토대로 Soil Nailing 해석 및 설계방법이 발전되어 왔다 - 즉, 수정된 사면안정해석법(대표적으로, Davis Method)과 운동학적 한계해석법(kinematic limit analysis)이 이와같은 접근방식에 해당되며, 상세한 내용은 참고문헌 2 및 7에 기술되어 있다.

본 연구에서는 two-body translation mechanism 및 침투수압(자세한 유도과정 등은 참고문헌 12 참조)을 고려하여 nailed-soil 토류구조물 안정해석방법을 제시하였으며, 또한 제시된 해석방법을 이용해 설계에 및 관련된 분석이 이루어졌다. 아울러 잘 알려진 Davis Method와의 결과(최적삽입각도 및 최소안전율 등에 관해) 비교, 분석이 수행되었으며, 이외에도 FLAC 프로그램에 의한 파괴면(파괴흙뺀기) 형상과 서로 비교가 이루어졌다.

7.1 two-body translation mechanism에 의한 안정해석방법

Gassler는 실험모형실험 등을 통해 점성토지반 및 사질토지반에 대한 nailed-soil 토체의 파괴 메카니즘(two-body translation mechanism)을 밝힌 바 있으며, 본 연구에서는 이를 참고로 하여 다음과 같은 안정해석방법의 제시가 이루어졌다.

주동영역(active block)

$$-W_2 + S_3 + S_2 \sin \theta_2 + N_2 \cos \theta_2 + P_{w, \cos \theta_2} = 0$$

$$N_3 + S_2 \cos \theta_2 - N_2 \sin \theta_2 - P_{w, \sin \theta_2} = 0$$

여기서,

$$S_2 = N_2 \tan \phi' + C_2'$$

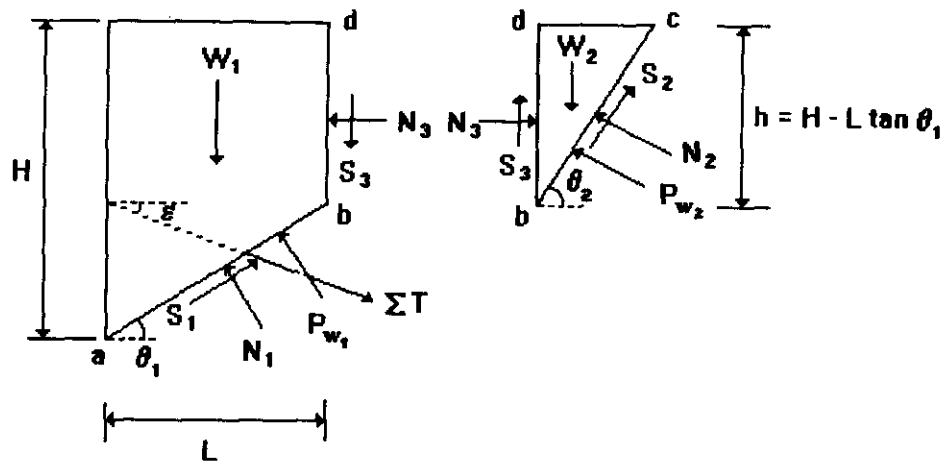
$$S_3 = N_3 \tan \phi' + C_3'$$

$$\tan \phi' = \frac{\tan \phi}{FS_s}$$

$$C_2' = \overline{bc} \frac{C_s}{FS_c} = \frac{h}{\sin \theta_2} \frac{C_s}{FS_c}$$

$$C_3' = \overline{bd} \frac{C_s}{FS_c} = h \frac{C_s}{FS_c}$$

$$W_2 = \frac{\gamma}{2} h^2 \cot \theta_2$$



(a) passive block

(b) active block

그림 16. Tow-Body Translation Mechanism

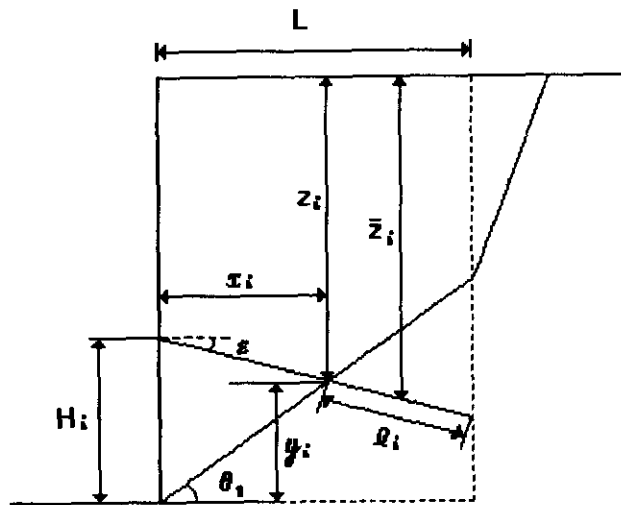


그림 17. nail의 유효길이

$$N_{3_{\text{active}}} = \frac{(W_2 - C_3') \sin(\theta_2 - \phi') - C_2' \cos \phi' + P_{W_2} \sin \phi'}{\tan \phi' \sin(\theta_2 - \phi') + \cos(\theta_2 - \phi')}$$

수동영역 (passive block)

$$-W_1 - S_3 - \sum T \sin \varepsilon + S_1 \sin \theta_1 + N_1 \cos \theta_1 + P_{W_1} \cos \theta_1 = 0$$

$$N_3 + \sum T \cos \varepsilon + S_1 \cos \theta_1 - N_1 \sin \theta_1 - P_{W_1} \sin \theta_1 = 0$$

여기서,

$$S_1 = N_1 \tan \phi' + C_1'$$

$$C_1' = \overline{ab} c_s = \frac{L}{\cos \theta_1} \frac{c_s}{FS_c}$$

$$W_1 = \frac{\gamma}{2} (H + h) L$$

$$N_{3_{\text{passive}}} = \frac{-(W_1 - C_3') \sin(\theta_1 - \phi') + \sum T \cos(\varepsilon + \theta - \phi') + C_1' \cos \phi - P_{W_1} \sin \phi'}{\tan \phi' \sin(\theta_1 - \phi') + \cos(\theta_1 - \phi')}$$

보강재에 작용하는 마찰력

본 해석방법에서는 지반-보강재 사이의 상호작용으로 보강재(nail 또는 nail + grouting)의 주변마찰만 고려하였으며, 지반과 보강재 사이에서 예상되는 최대 마찰저항(Mohr-Coulomb 파괴기준)에 Taylor 안전율 이론(FS = FS_s = FS_c)의 적용 및 유효길이(즉, 소성영역 바깥쪽에 해당하는 지반-보강재의 접촉길이)에 한해 마찰저항을 평가하였다. 각 보강재의 주변마찰력 T_i의 계산식은 다음과 같다.

$$l_i = L_n - \frac{x_i}{\cos \varepsilon}$$

$$x_i = \frac{H_i}{\tan \theta_i + \tan \varepsilon}$$

$$y_i = H_i - x_i \tan \varepsilon$$

$$z_i = H - y_i$$

$$\overline{z}_i = z_i + \frac{(L - x_i)}{2} \tan \varepsilon$$

$$\sigma_{y_i} = \gamma \overline{z}_i$$

$$\sigma_{x_i} = K \sigma_{y_i}$$

$$\tau_{n_i} = \frac{\sigma_{y_i} \cos^2 \varepsilon - \sigma_{x_i} \sin^2 \varepsilon}{\cos 2\varepsilon + \sin 2\varepsilon \tan \phi'}$$

$$T_i = \frac{\pi D}{S_H} l_i \left(\tau_{n_i} + \frac{c_s}{FS_c} \right)$$

7.2 설계에 및 분석결과

본 연구의 분석에 채택된 설계에 및 강도정수 등은 그림 18에 표시되어 있다.

예비 설계도표

서로 다른 길이비 R_L 값($R_L = L/H$, $L = \text{nail}$ 의 최대길이, $H = \text{굴착깊이}$) 각각에 대해 nail의 삽입각도 ϵ (그림 16)을 0° 에서 30° 까지 5° 간격으로 달리할 경우, 이에 따른 최소안전율 FS_{\min} 값의 변화를 살펴 보았으며 결과는 그림 19에 표시되어 있다. 그림 19의 결과를 살펴보면, R_L 값의 증가에 따라 FS_{\min} 값이 점차 커지는 일반적인 현상을 볼 수 있다. 또한 $R_L = 0.6$ 인 경우에는 설계에서 일반적으로 요구되는 최소안전율 $FS_{\min} = 1.5$ 에는 못 미치고 있으며, nail의 최적삽입각도는 R_L 값이 커짐에 따라 크기가 다소 증가하는(nail의 최적설치방향이 더욱 아래쪽으로 향하는) 경향을 보이고 있으나, 대체적으로는 $5^\circ - 10^\circ$ 범위에 해당됨을 알 수 있다.

해석방법 관련 분석

길이비 R_L 값을 0.8로 또한 이에 해당되는 nail의 최적삽입각도 10° (그림 19 참조)를 택해, 본 연구에 적용된 two-body translation mechanism 접근방법을 구체적으로 살펴 본 결과는 그림 20 및 21에 표시되어 있다. 즉, passive block 및 active block의 경계면에 각각 수직되게 작용하는(서로 반대방향으로) 것으로 가정한(수직력) N_3 의 크기가 서로 같아지는 - 즉, 반복계산에 의한 수치해석 수렴 기법에 의해 최소안전율 FS_{\min} 및 파괴면(passive block에 해당되는)의 경사각도 θ_1 이 최종적으로 결정되는 과정을 그림 20 및 21을 통해 확인할 수 있다.

침투수압 영향

원지반이 지하수 또는 우수(rainfalls) 등에 의해 완전히 포화되고, 또한 nailed-soil 흩막이 구조체의 전면판(facing) 바로 뒤쪽에 적절한 배수체계가 설치되어 있는 경우 - 즉 침투수압이 예상될 경우, 최소안전율 FS_{\min} 값 및 nail의 최적삽입각도를 건조상태의 경우와 서로 비교한 결과는 그림 22($R_L = 0.8$ 인 경우)에 표시되어 있다. 그림 22의 결과를 분석하면 침투수압이 작용할 경우, 최적삽입각도는 건조시에 비해 5° 정도(즉 10° 에서 5° 로) 작아지는 경향을 보이고 있으며, FS_{\min} 값은 1.73에서 1.14로 0.59 정도 낮아지고 있다.

Davis Method 비교

수정된 사면안정해석법에 해당되는 Davis Method를 이용해 계산된 최소안전율 FS_{\min} 값 및 nail의 최적삽입각도를, 본 연구에서 제시된 해석방법의 경우와 서로 비교한 결과는 그림 23($R_L = 0.8$ 인 경우)에 표시되어 있다. 그림 23의 결과를 살펴보면, FS_{\min} 값은 nail의 삽입각도에 따라 0.32 - 0.39 정도 본 연구 해석방법의 경우가 크게 계산되고 있으며, 이의 원인은 그림 24에 표시된 파괴면(파괴 흩빼기) 형상 비교를 통해 설명되어 진다 - 즉 파괴면 바깥쪽에 위치한 nail의 길이(각 nail의 마찰저항력 계산에 관련된 유효길이)가, 2개의 직선을 토대로 한 본 연구 해석방법의 경우 포물선 형상을 가정한 Davis Method 보다 더 길어지는데 원인이 있다. 최적삽입각도는 본 연구 해석방법의 경우 10° 정도로 Davis Method의 경우에 해당되는 15° 에 비해 5° 정도 작은 경향을 나타내고 있다.

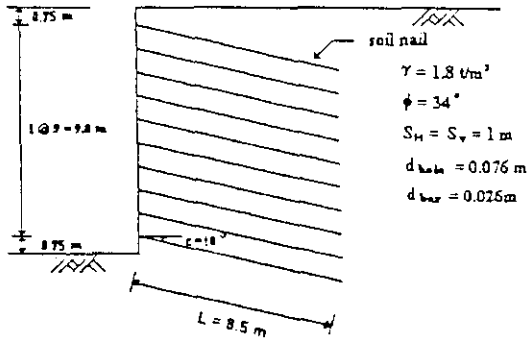


그림 18. 설계여

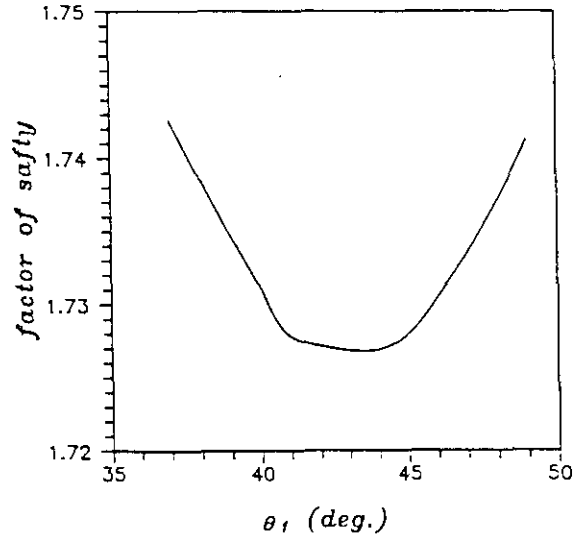


그림 21. θ_1 -FS 의 변화

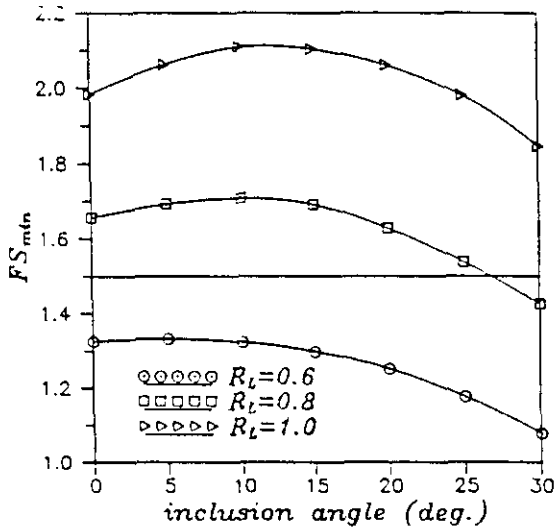


그림 19. 설계도표 ($\gamma=1.8 \text{ t/m}^3$, $\phi=34^\circ$, $S_H=S_V=1.0\text{m}$)

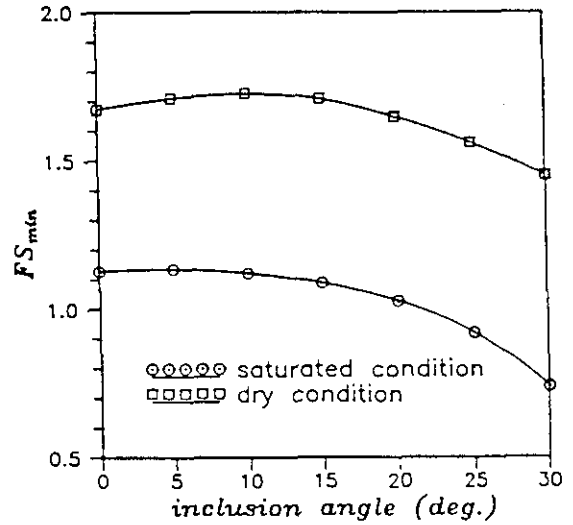


그림 22. 강우시 보강재의 삽입각도에 따른 영향

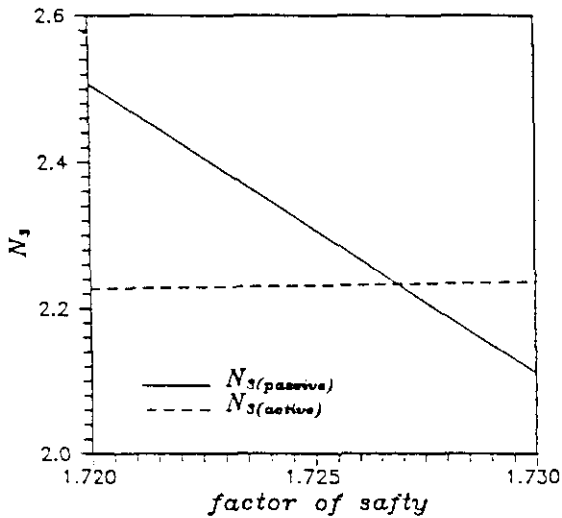


그림 20. $N_{3(\text{passive})}$ - $N_{3(\text{active})}$ 의 변화

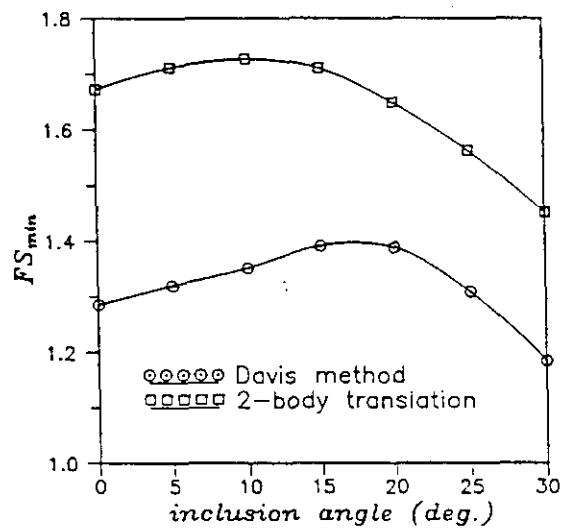


그림 23. Davis method 와의 비교 1 (최적삽입각도, 최소안전율)

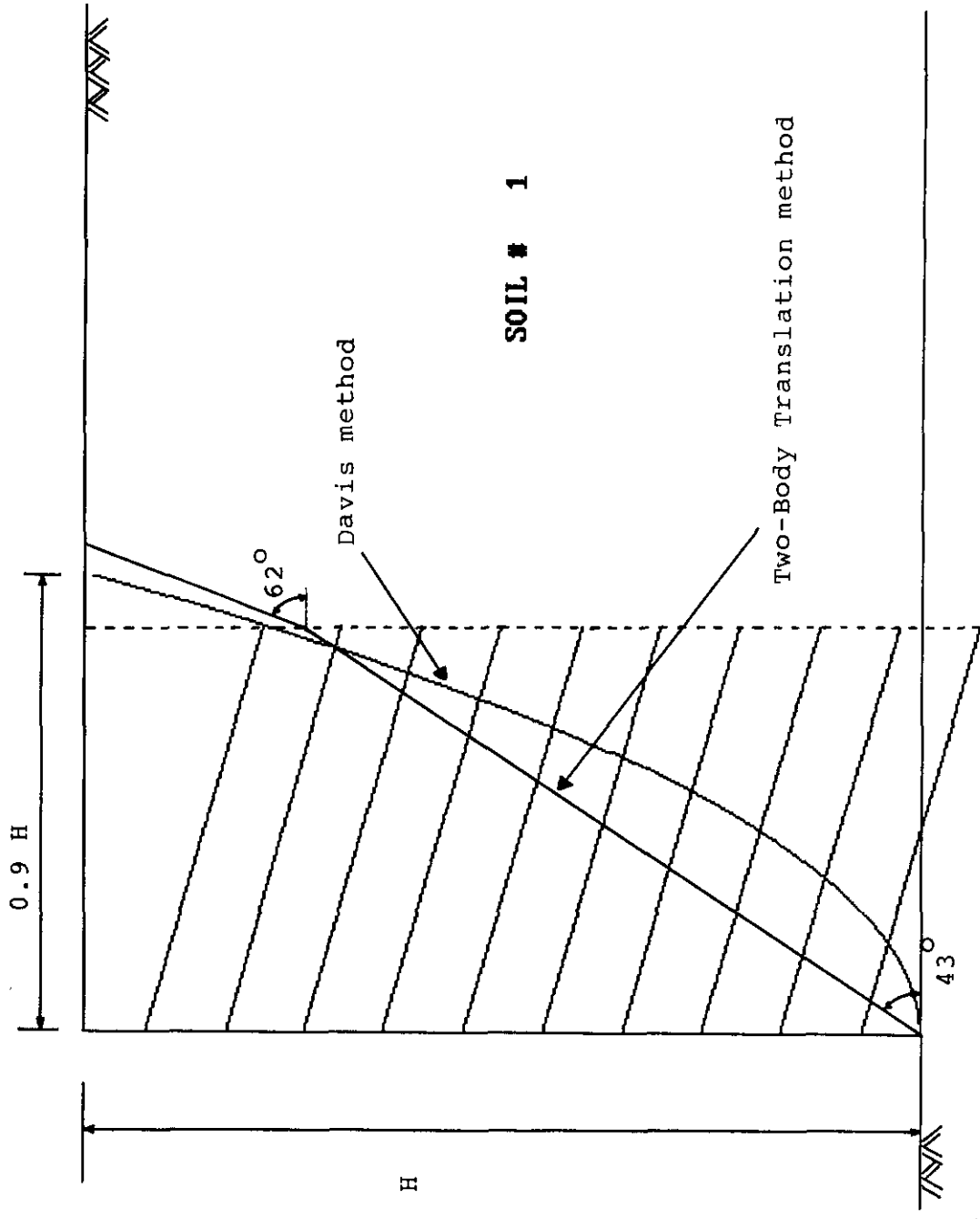


그림 24. Davis method 와의 비교 2 (가상활동면)

FLAC 프로그램 결과와의 비교

FLAC 프로그램을 이용해 계산되어지는 최대 전단변형률(maximum shear strain)의 발생지점을 연결한 선(즉, 파괴면)은 그림 25에 표시되어 있다. 이를 살펴보면, 본 연구의 해석방법에 해당되는 파괴흠쇄기 형상과 전체적으로 거의 유사한 경향을 나타내고 있다.

8. 요약 및 결론

본 연구에서는 Soil Nailing 공법에 관한 전반적인 고찰이 우선 이루어 졌으며, 또한 two body translation mechanism을 토대로 한 해석방법 및 이를 적용한 설계에의 제시도 이루어 졌다. 제시된 해석방법에는 침투수압 영향이 포함되었으며, 적합성 검토 등을 위해 Davis Method 또한 FLAC 프로그램과의 결과 비교 및 분석이 아울러 수행되었다. 여기서 Soil Nailing 공법의 적용상, 기술상의 장점 및 향후 Soil Nailing 공법의 발전을 위해 필요시 되는 내용을 요약 정리하면 아래와 같다.

- 특히 어려운 현장여건에 비해 볼 때 상대적으로 공사비가 저렴한 장점을 지니고 있다. 비교적 저렴한 가격의 보강재 및 원지반을 주요 공사재료로 사용하게 되어 현저한 경제성이 예상되어 진다. shotcrete 또는 기성 전면판은 단지 국부적인 역할만을 하게 되며, 따라서 비교적 두께가 얇고 또한 가격도 저렴한 특징을 지니게 된다.
- 현장여건과 지반조건에 적합한 기술(nail의 길이, 단면 및 설치기법, 전면판 등에 관련된)을 비교적 자유롭게 선택할 수 있으며, 또한 경량의 시공장비를 사용하게 되어 접근이 어려운 현장인 경우 특히 유리하다. 이외에도 공사 도중에 최초의 설계를 수정하거나 또는 최적화 하기가 비교적 쉽다.
- 통상적인 강성구조의 흠막이 구조물에 비해 볼 때 구조적 유연성을 지닌 nail이 설치된 흠막이 구조물은, 커다란 전체 침하 및 부등침하에 더욱 저항하는 능력을 지니게 된다. 또한 이와같은 구조적 유연성은, 동적하중에 대해 높은 저항성을 아울러 지닐 것으로 예상되어, 특히 지진 다발 지역에서 Soil Nailing 공법은 효율성이 기대되어 진다.
- Soil Nailing 기술의 현재까지의 발전은 실제의 경험을 바탕으로 이루어 졌다는 사실이 결코 간과되어서는 안된다 - 즉, 현장에서의 경험은 Soil Nailing 기술의 이론적 측면에서의 발전 및 개념 정립에 중요한 역할을 하였음이 더더욱 강조되어야 할 것이다. 따라서 영구구조물에 Soil Nailing 공법의 적용을 확대하기 위해서는, 다양한 특성을 지닌 여러 종류의 지반에 대해 Soil Nailing 체계의 거동, 흠-보강재의 상호작용 등을 더더욱 분석할 필요가 있으며, 이를 위해서는 실험실에서의 모형실험 및 이론적인 연구 못지 않게 현장에서의 대형실험 등이 반드시 요구되어 진다. 이러한 연구는 또한 기 적용되고 있는 설계법의 향상, 다양한 지반조건에서 구조체의 변위를 예측하기 위한 적절한 지침의 제시, 또한 연약한 점토질 지반에 효율적으로 Soil Nailing 공법을 적용하기 위한 설계상의 지침 정립 등에도 크게 기여할 것으로 기대된다.

JOB TITLE: stage 10 : sh, sv = 1.0 , L=9.5, AL=10 deg., nail no.10

FLAC (Version 3.22)

LEGEND

21/06/1993 12:57
step 5700

-2.417E+01 < x < 9.167E+00
-2.668E+01 < y < 6.655E+00

Max. shear strain-rate
Contour interval= 1.50E-05
MINIMUM 0.00E+00
MAXIMUM 6.00E-05
Boundary plot



Cable plot

Hong-Ik University

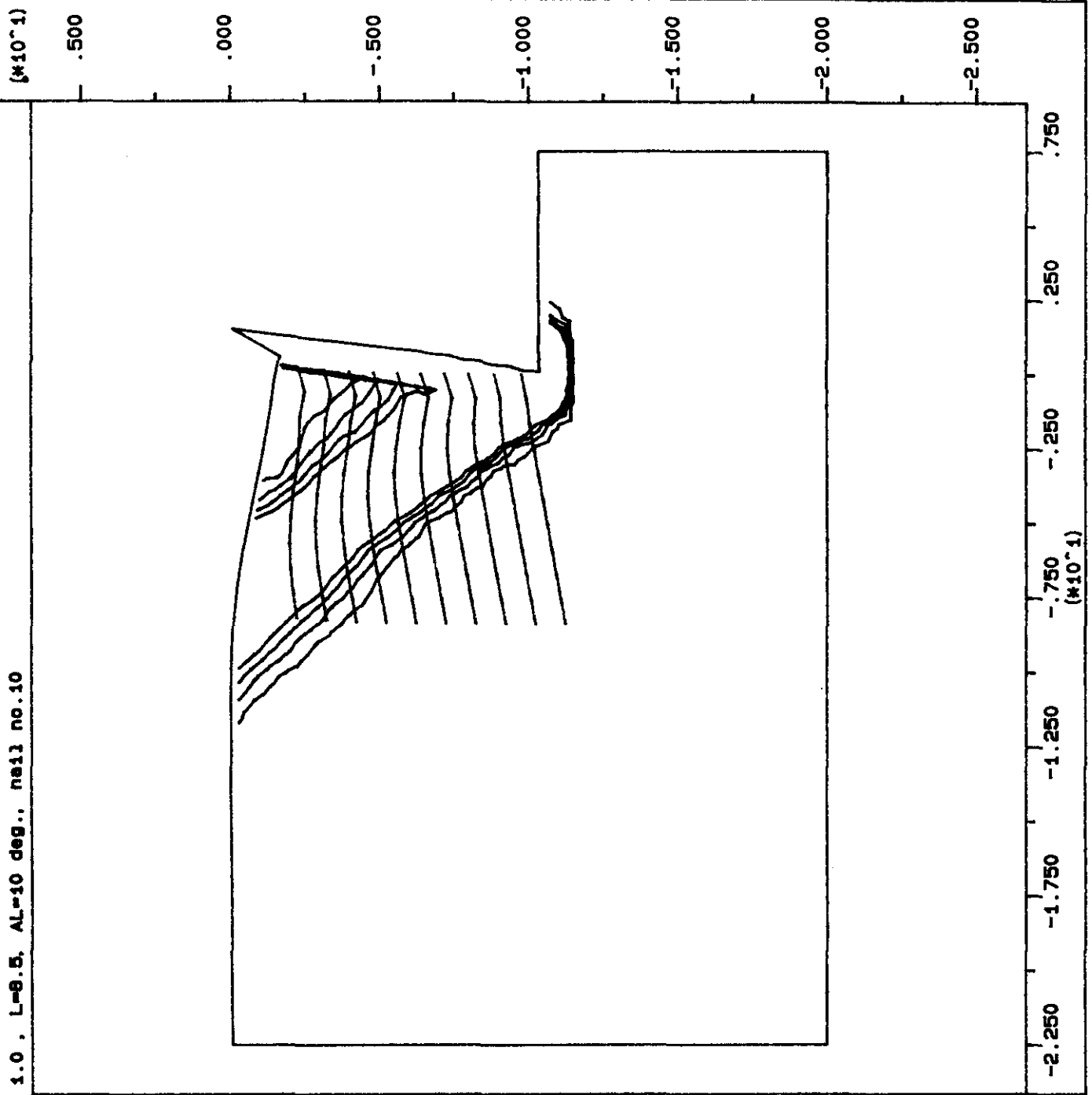


그림 25. FLAC Program Output

참고문헌

- 1) Bell, F.G.(1992), Engineering in Rock Masses, Butterworth-Heinemann.
- 2) Gassler, G.(1988), 'Soil Nailing-Theoretical Basis and Practical Design.' Proc. of the International Geotechnical Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement, Fukuoka, Japan, pp.283-288.
- 3) Gnisen, R and Shiver F.D.(1991), 'Advanced Soil Nailing Design-Improved Reliability and Predictability of Wall Performance', Deep Foundations Institute, pp 55-64.
- 4) Hausmann, M.R.(1990), Engineering Principles of Ground Modification, McGraw-Hill Publishing Co.
- 5) ITASCA Consulting Group, INC.(1993), Flac-Fast Lagrangian Analysis of Continua Version 3.22
- 6) Jones, Colin J.F.P.(1985), Earth Reinforcement and Soil Structures, Butterworths, London.
- 7) Juran, Ilan(1991), 'Nailed-Soil Retaining Structures: Design and Practice', Deep Foundations Institute, pp.65-89.
- 8) Karmozyn, J.W.(1980), 'A General Analysis of an Earth Reinforcing System for Deep Excavations', Department of Civil Eng., Univ. of Notre Dame, Indiana, U.S.A.
- 9) Michell, J.K.(1987), 'Reinforcement of Earth Slopes and Embankments', National Cooperative Highway Research Program Report No. 290, Transportation Research Board.
- 10) Schlosser, F. and Unterreiner, P.(1991), 'Soil Nailing in France: Research and Practice', Transportation Reserch Board 1330, pp.72-79.
- 11) Shen, C.K., Bang, S., and Herrmann, L.R.(1981), 'Ground Movement Analysis of an Earth Support System', Journal of the Geotech. Eng., ASCE, Vol.107, GT12, pp.1609-1624.
- 12) 김홍택(1992), 새로운 보강석축의 안정해석에 관한 연구, 한국과학재단 결과보고서.