

가압식 쏘일네일링의 지반 굴착면 보강효과

Effects of Multi-Pressurised Soil Nails in the Underground Excavation

조재연¹⁾, Jae-Yeon Cho, 이철주²⁾, Cheol-Ju Lee, 정상섭³⁾, Sang-seom Jeong

¹⁾ 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

²⁾ 강원대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Kangwon University

³⁾ 연세대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

SYNOPSIS : A series of three-dimensional numerical modelling have been conducted to clarify the behaviour of multi-pressurised soil nails with high strength steel pipes. In this study, the soil non-linearity, the soil-nail interaction and staged construction are considered. It has been found that pressurised soil nails can reduce lateral ground movement by 14-21% compared to general soil nails with very low pressure. In addition, ground settlement was reduced when using multi-pressurised soil nails. The pressurised soil nail may result in an increase in the surcharge loading on the ground surface.

Key words : Soil nails, FLAC-3D, numerical modelling and analysis, interface, excavations

1. 서 론

쏘일네일링 공법은 토류벽, 성토사면, 굴착 및 절토사면 등을 지지하거나 안정화시키기 위해서 1970년대 이후 널리 사용되어 오고 있다(Recommendations Clouterre 1991; Watkins and Powell 1992; Byrne 등 1996). 국내에서는 1980년대 후반부터 쏘일네일링에 대한 기초이론 및 설계기법이 처음으로 적용되기 시작했고, 1990년대 이후 중력식 쏘일네일링 공법이 가시설, 사면등의 보강에 널리 사용되어 왔다. 그 동안 쏘일네일링의 거동은 현장계측, 실내모형실험, 원심모형실험 및 수치해석 등을 통해 많은 자료가 축적되어 오고 있으며(Lee & Ng, 2003), 특히 최근에는 보편적으로 사용되었던 중력식 쏘일네일링 공법이 아닌 가압을 통한 그라우트 주입방식을 적용함으로써 그라우트의 충전성은 물론 인발저항력의 향상을 가져오고 있고, 김홍택(1998), 천병식 & 최창현(2000), 황영철 & 김낙영(2002) 및 배경태 등(2008)에 의해 가압식 쏘일네일링에 대한 연구가 실시되었다. 그러나 가압식 쏘일네일링의 경우 현장계측 및 수치해석의 사례가 중력식 네일과 비교하여 많이 부족한 실정이다.

본 연구에서는 FLAC-3D 프로그램을 사용하여 가압식 쏘일네일링에 대한 수치해석을 시행하였으며, 풍화토 및 풍화암 굴착사면에 중력식 네일과 강관, packer를 이용한 가압식 네일을 모델링하여 10m 연직 굴착면에 시공하고 상재하중 조건에서 굴착면의 횡방향 변위 및 배면의 지반침하량과 슛크리트 벽체의 변위와 상재하중 관계를 통하여 두 공법의 지반에 대한 구속 효과를 비교하였다. 또한 지반과 그라우트 사이의 거동을 실제와 유사하게 구현하기 위하여 interface요소를 고려한 해석을 수행하였다.

2. 유한차분해석

2.1 해석 메쉬와 경계조건

본 연구에서는 3차원 유한차분 해석 프로그램인 FLAC-3D(Fast Lagrangian Analysis of Continua)를 이용하여 중력식 및 가압식 쏘일네일로 보강된 사면의 거동을 분석하였다. 해석에 사용된 대표적인 단면으로는 지반조건이 균질한 직육면체(2m×20m×15m)의 메쉬를 사용하였다. 이러한 메쉬는 실제 복잡한 네일 보강사면의 거동을 비교적 간단한 3차원 해석을 통하여 분석할 수 있으며 쏘일네일의 시공순서가 일정하고 대칭으로 시공되는 점을 고려하여 얇은 3차원 유한차분해석 메쉬를 사용한 것이다(I.M. Smith and N. Su, 1997). 따라서 네일간의 수평 및 수직간격은 2m로서 이는 메쉬의 X방향의 두께와 일치한다. 그림 1의 (a)와 (b)는 해석에 사용된 직육면체 메쉬의 정면도와 측면도를 나타내었다. 해석에서는 전체 10m의 굴착 깊이를 가정하였고 이에 따라 10m길이의 네일이 2m간격으로 총 5줄이 시공되는 것으로 모델링 하였다.

해석 모델의 경계의 바닥은 핀으로 고정하였으며, X, Y방향의 수직 경계면은 모두 롤러로 가정하였다. 또한 초기 지반 응력상태를 반영하기 위해 시공 및 하중재하 전에 중력을 가하여 지반의 응력상태를 수립시켰다. 그림 2는 해석 메쉬의 경계조건을 나타내고 있다.

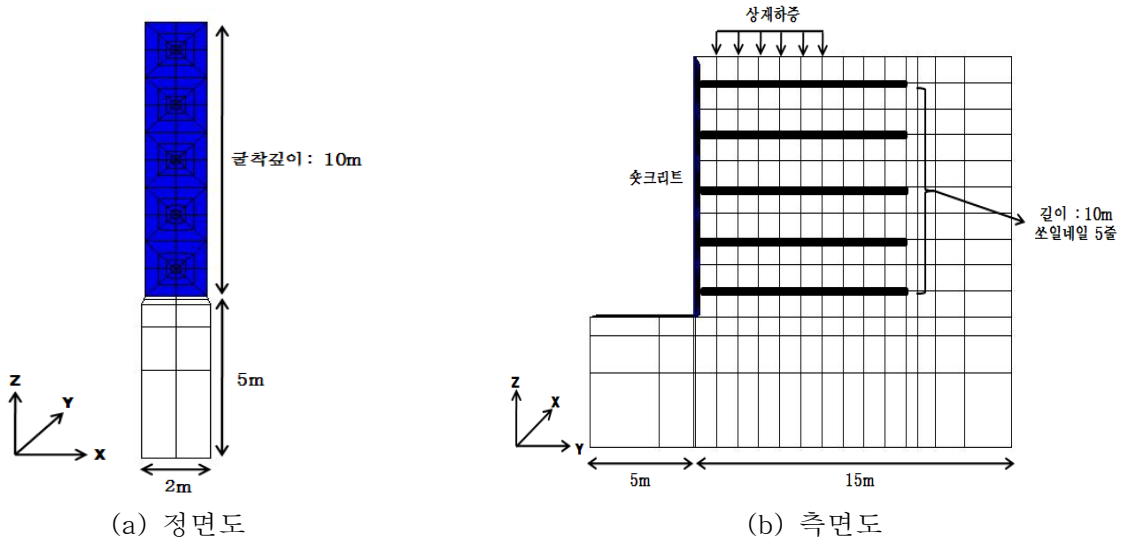


그림 1. 해석에 사용된 mesh

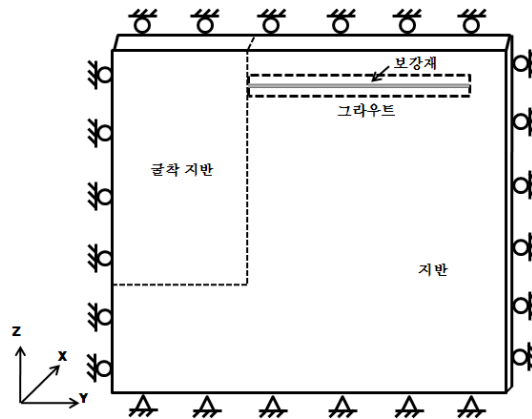


그림 2. 해석의 경계조건

2.2 구성모델 및 물성치

본 해석에서는 원지반은 Mohr-Coulomb의 구성 법칙을 따르는 탄소성 재료로 가정하였고 네일의 보강재 및 그라우트, 숏크리트는 탄성재료로 가정하여 모델링하였다. 해석상의 편의를 위하여 지하수위는 해석대상 지반보다 하부에 위치한 것으로 가정하여 고려하지 않았다. 중력식 네일의 경우 일반 이형철근인 D29를 사용한 것으로 해석하였다. 가압식의 경우 고강도 강관으로서 해석의 간편함을 위하여 환산 단면을 이용한 탄성계수를 적용하였고, 이형철근보다 큰 인장강도는 고려할 수 없었다.

지반과 그라우트 사이의 interface의 수직, 전단 강성도는 풍화암의 경우 현장타설말뚝과 연암을 대상으로 한 직접전단시험(Williams, 1980)을 통해 구한 값을 적용하였으며 풍화토의 경우 말뚝과 풍화토의 불연속면 모델링에 사용한 값(Chen & Martin, 2001)을 적용하였고, 부착력 및 마찰각은 원지반의 접착력과 내부 마찰각의 약 2/3정도의 값(Bowles, 1988)을 사용하였다. 표 1과 2는 해석에 사용된 입력물성치를 나타낸 것이다.

표 1. 해석에 적용된 물성치

구 분	풍화토	풍화암	숏크리트	이형철근	강 관	그라우트
E (MPa)	50	200	30000	210000	85079	20000
γ (t/m ³)	2.0	2.0	1.6	2.0	2.0	2.0
ν	0.3	0.25	0.2	0.2	0.2	0.2
k_0	0.6	0.6	-	-	-	-
c (MPa)	36	50	-	-	-	-
Φ (°)	30	40	-	-	-	-
K (MPa)	41.67	133.33	16666	116666	47266	11111
G (MPa)	19.23	80	12500	87500	35449	8333
구성모델	Mohr-Coulomb		Elastic			

표 2. 해석에 적용된 interface 물성치

구 분	풍화토	풍화암
k_n (MPa/m)	100	1000
k_s (MPa/m)	100	5000
c (MPa)	24	33
Φ (°)	20	27

2.3 네일의 모델링 및 해석절차

쏘일네일로 보강된 사면의 거동을 수치해석에서는 크게 세 단계로 분리하여 해석을 수행하였다(굴착, 네일/숏크리트 시공, 상재하중 재하). 중력식 네일의 경우 직경 105mm로 천공 후 네일 보강재(D29)를 삽입하고 천공홀을 그라우트로 채워 물성을 적용하였고, 가압식은 천공과정과 보강재(고강도 강관)삽입 과정 사이에 천공홀에 수직방향의 일정한 압력을 작용시켜 packer를 이용하여 주입압이 천공홀 전체에 영향을 미치는 현상을 모사하였다. 천공홀에 압력을 가하는 과정과 네일 보강재 삽입 및 그라우트의 충전을 동시에 수행하도록 해석을 시행하였으며, 그림 3은 가압을 한 후 천공홀과 지반사이에서 Z방향의 수직응력 증가를 나타내고 있다. 수직응력 증가로 인한 그라우트와 지반사이의 전체적인 전단강도의 향상이 전체 지반의 구속효과를 증대시킬 것으로 보인다.

쏘일 네일 보강체의 해석절차는 실제 현장의 시공순서와 유사하게 구현하였다. 전체 Y방향 길이 20m의 초기 지반에서 각 시공단계에 Y방향으로 5m, Z방향으로 2m씩 굴착을 하고 직경 105mm의 천공과정을 거친 후 중력식 네일은 보강재 삽입, 그라우트 충전, 숏크리트 타설 순으로 시공단계를 설정하였고 가압식 네일은 주입압력(500kPa)을 천공홀에 작용하면서 보강재 삽입 이후의 일련의 단계들을 그대로 모사하게 된다. 또한 interface요소는 천공과정 직후 interface 격자망을 천공홀과 지반의 접촉면 사이에 형성하고 물성을 입력함으로써 강성이 다른 두 개의 구성요소 사이의 거동을 실제와 가깝게 고려할 수 있도록 하였다.

보강사면을 시공한 후 굴착면의 시작 위치에서부터 Y방향으로 6m에서 11m까지 10kPa씩 단계별로 하중을 증가 시키면서 사면 굴착면의 횡방향 변위 및 배면 지반의 침하량과 숏크리트 벽체의 변위량을 통하여 중력식 네일과 가압식 네일의 보강효과를 비교하였다.

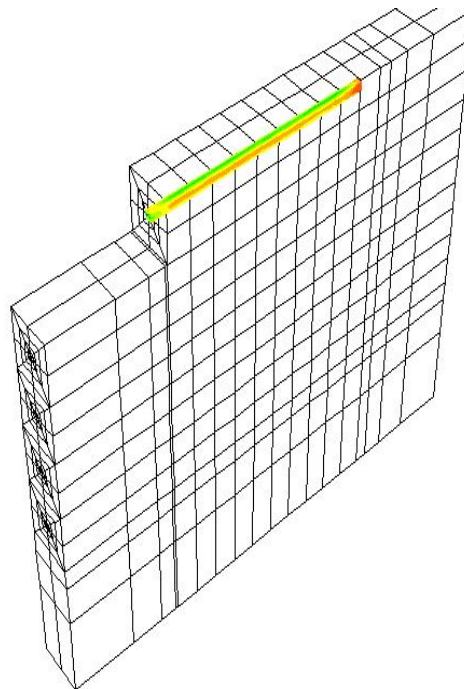
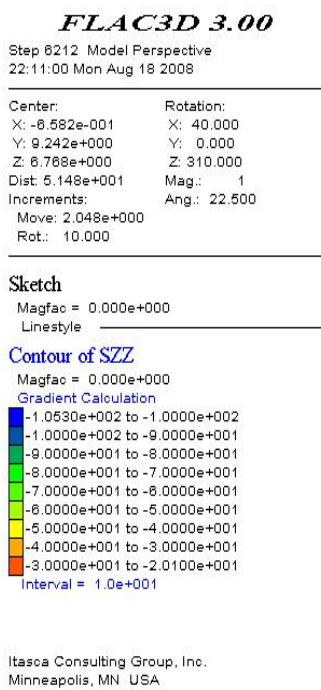


그림 3. 가압에 의한 수직응력의 증가

3. 해석결과 분석

3.1 슛크리트 배면 지반의 수평변위 비교

그림 4는 풍화토와 풍화암 사면에서 중력식 네일과 가압식 네일의 지반 구속효과를 비교하기 위하여 세가지 상재하중 조건에서 굴착면 지반의 수평변위분포를 나타낸 것이다. 지반의 최대 수평변위는 상재하중이 작용하지 않을 경우전체 굴착심도의 약 2/3 지점인 7m~9m 사이에서 발생하는 것으로 나타났다. 또한 상재하중이 증가하면서 최대 수평변위 발생 지점은 중앙부의 위쪽으로 이동하는 경향을 보이고 있다.

전체적으로 중력식 네일로 보강한 사면의 지반 수평변위가 가압식 네일과 비교하여 동일한 상재하중 조건에서 크게 나타나고 있는데 이는 가압식 네일의 지반 구속효과가 크다는 것을 간접적으로 나타내는 것이라 할 수 있다. 약 14~21%의 변위감소율을 보이고 있으며 상재하중이 증가할수록 감소율도 소폭 늘어나는 것으로 나타났다. 표 3은 6가지 경우의 상재하중 조건에서 가압식 네일의 지반 최대수평변위를 중력식 네일과 비교하여 변위 감소율을 제시한 것이다.

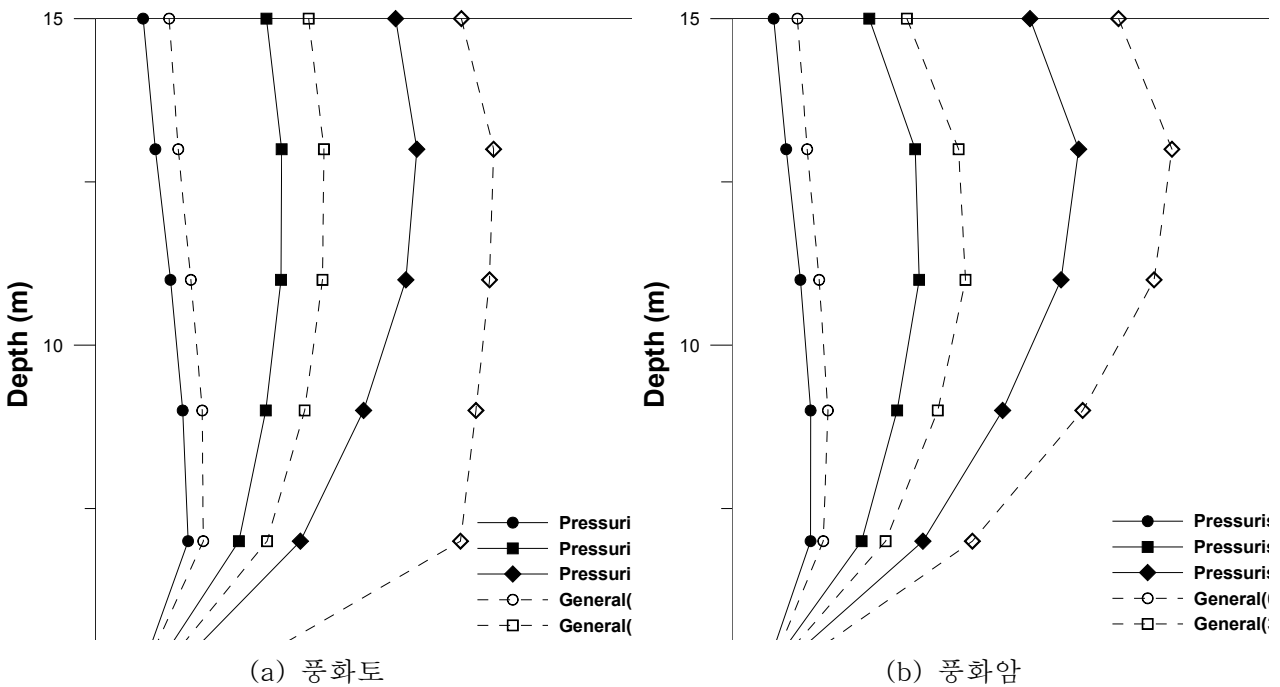


그림 4. 지반의 수평변위 분포

표 3. 지반 최대수평변위 비교

구 분	풍화토		풍화암	
	중력식 네일	가압식 네일	중력식 네일	가압식 네일
0(kPa)	11.56mm	9.92mm(-14.17%)	2.94mm	2.41mm(-18.03%)
100(kPa)	14.16mm	11.82mm(-16.53%)	3.80mm	3.18mm(-16.31%)
200(kPa)	18.25mm	15.20mm(-16.71%)	5.15mm	4.31mm(-16.31%)
300(kPa)	24.52mm	19.98mm(-18.52%)	7.16mm	5.74mm(-19.83%)
400(kPa)	31.96mm	26.89mm(-15.58%)	9.96mm	7.90mm(-20.68%)
500(kPa)	42.75mm	34.50mm(-19.3%)	13.50mm	10.60mm(-21.48%)

3.2 굴착 배면 지표면의 수직침하량 비교

상재하중 조건에 따른 굴착면에서 부터 배면 전체의 수직 침하량분포가 그림 5에 나타나 있다. 지반의 수평면위분포와 마찬가지로 가압식 네일로 보강된 배면의 침하량이 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 그래프에서 굴착면으로부터 1~6m 지점은 상재하중이 작용하는 구간으로서 침하량이 다른 지점보다 크게 나타나고 있다. 일반적으로 숏크리트 보강이 이루어지지 않은 굴착사면의 배면 침하량 분포는 굴착면에서 최대값을 나타내고 후면으로 갈수록 점차 감소하는 경향을 보이지만 이와는 달리 본 연구에서는 숏크리트 보강으로 굴착면에서의 침하가 억제되고 상재하중의 영향이 크게 작용하여 지반 침하가 발생하는 것을 알 수 있다.

침하량의 감소율을 살펴보면 침하가 거의 발생하지 않는 상재하중 0kPa이 작용할 경우를 제외하고 약 6~11%의 침하 감소율을 보이고 있다. 표4에서는 지반의 최대 수직침하량을 비교하였으며 배면의 수직침하량 감소는 실제 현장에서 기존 구조물 측면을 굴착하는 경우나 사면위에 구조물을 시공하는 경우 구조물의 침하량과 직접적으로 관련되기 때문에 시공 안정성에 있어서 그 효과를 기대할 수 있을 것이다.

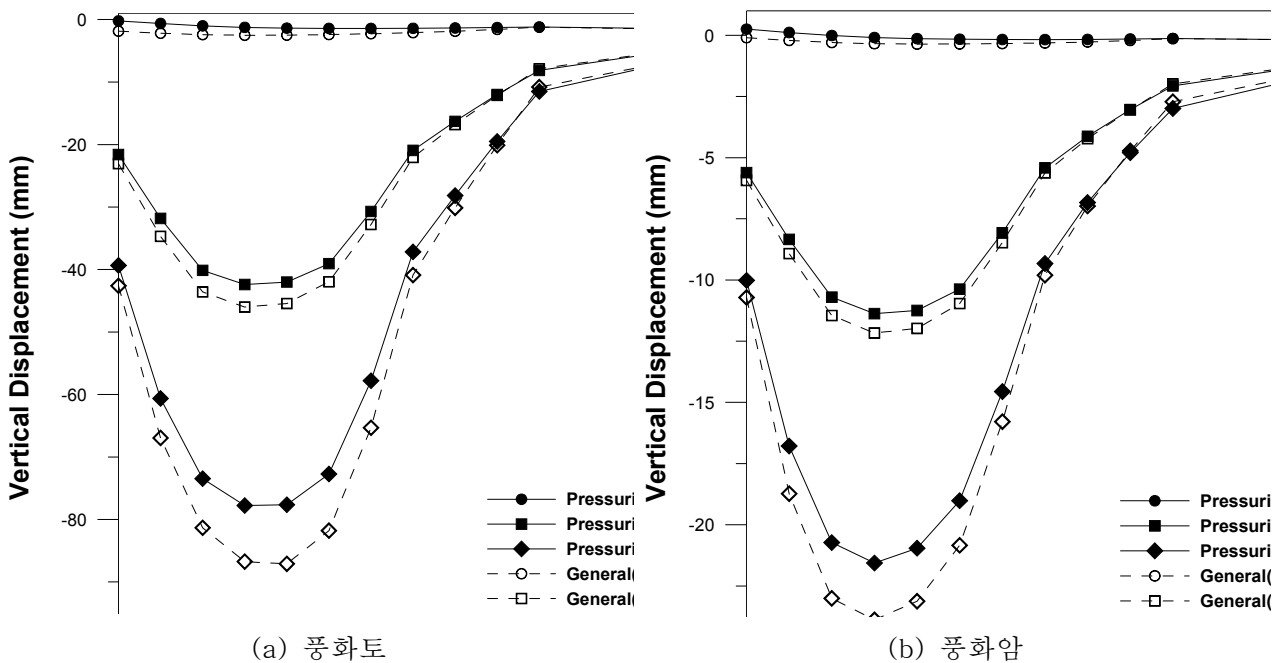


그림 5. 지반의 수직 침하량 분포

표 4. 지반의 최대수직침하량 비교

구 분	풍화도		풍화암	
	중력식 네일	가압식 네일	중력식 네일	가압식 네일
100(kPa)	15.44mm	14.23mm(-7.84%)	3.99mm	3.75mm(-6.01%)
200(kPa)	29.36mm	27.61mm(-5.96%)	7.70mm	7.45mm(-3.24%)
300(kPa)	46.01mm	42.40mm(-7.84%)	12.20mm	11.40mm(-6.56%)
400(kPa)	65.20mm	59.19mm(-9.22%)	17.8mm	16.2mm(-8.99%)
500(kPa)	87.11mm	77.78mm(-10.71%)	23.90mm	21.60mm(-9.62%)

3.3 상재하중-벽체 변위관계

현재 국내의 경우 쏘일네일링 공법에서 일반적으로 적용하고 있는 벽체의 사용한계에 대한 기준은 0.3%H로서 그 이상의 변형에 이르면 쏘일네일링 구조체의 사용상에 문제가 있는 것으로 판단하며 이는 외국 연구 보고서의 기준을 사용하고 있다. 프랑스의 연구보고서(Clouterre, 1991)에 의하면 지반의 조건별로 쏘일네일로 보강된 벽체 최상부의 변위에 대한 최소값을 통하여 사용한계를 제시하고 있다. 표 5에서는 지반 조건에 따른 쏘일네일 벽체 최상부의 변위에 대한 기준을 나타내고 있다.

본 연구에서는 풍화암의 기준 및 일반적으로 사용하는 점토질 흙의 기준을 풍화토에 적용하여 중력식 네일 또는 가압식 네일로 보강된 사면에 시공된 슛크리트 벽체의 최상부 수평변위를 상재하중과 함께 비교하였다. 해석에 적용된 굴착면의 높이는 10m이므로 풍화토의 경우 30mm, 풍화암의 경우 10mm의 허용변위가 적용 되었다. 그림5에서는 풍화토와 풍화암에서 상재하중과 슛크리트 벽체의 최상부 변위관계 곡선을 나타냈으며 점선은 중력식 네일, 실선은 가압식 네일을 나타내고 있다. 풍화토에서 중력식 네일의 경우 상재하중이 480kPa 작용하였을 때 30.04mm, 가압식 네일은 상재하중 730kPa에서 30.00mm의 벽체변위가 발생하였다. 또한 풍화암의 경우 중력식 네일과 가압식 네일은 각각 510kPa에서 10.32mm와 570kPa에서 10.086mm의 변위발생을 보이고 있다.

이것은 동일한 하중에서 가압식 네일로 보강된 사면에서 슛크리트 벽체의 변위가 작게 발생하는 것을 알 수 있으며 이는 구속효과 증가에 따른 지반의 수평변위 감소와 벽체에 작용하는 토압의 감소로 인한 결과로 판단된다.

표 5. 쏘일네일 벽체의 변형(Clouterre, 1991)

지반 조건	풍화암	모래질 흙	점토질 흙
벽체수평변위(δ_h)	H/1000	2H/1000	3H/1000

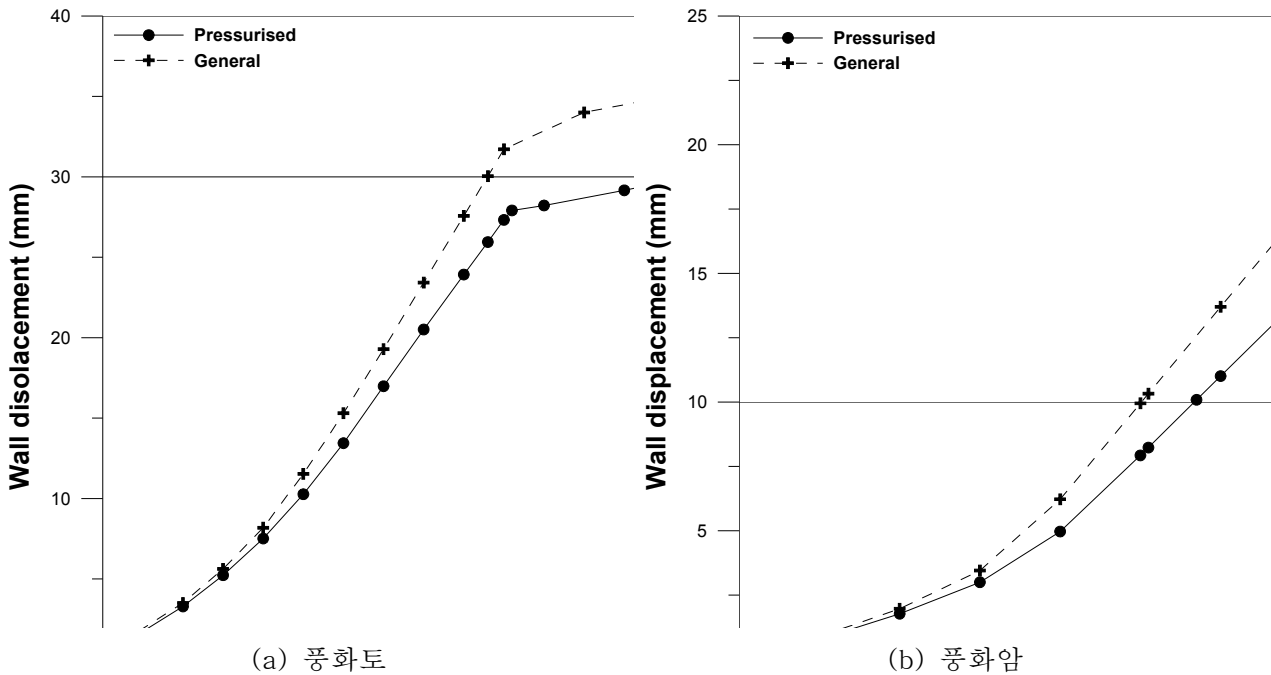


그림 6. 상재하중-벽체변위 곡선

4. 결론

3차원 유한차분해석 프로그램인 FLAC3D를 이용하여 중력식 네일과 가압식 네일의 보강효과를 풍화토 및 풍화암의 지반조건에서 지반의 거동 및 벽체의 거동을 통하여 비교하였으며, 향후 가압식 네일에 대한 현장 계측자료 확보 및 수치해석과의 비교분석과 전단강도 감소기법을 이용한 보강사면의 안전율, 네일과 숏크리트 사이의 결속 및 interface 모델링에 대한 보다 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

1. 지반의 수평변위 분석 결과 가압식 네일 보강사면의 수평 변위량이 중력식 네일과 비교하여 약 14~21% 감소하는 것으로 나타났으며 이는 가압으로 인한 천공홀에서 지반에 대한 수직응력의 증가로 네일 보강 토체의 구속효과가 증가하였기 때문으로 보인다. 수직응력의 증가로 인한 네일 구조체 전체의 전단저항력 증가에 대한 신중한 검토가 필요할 것으로 판단된다.
2. 굴착배면의 침하량 감소는 실제 시공 구조물의 안정성 증대에 직접적인 영향을 미치는데, 가압식 네일로 보강된 사면의 경우 중력식 네일 보강사면보다 약 6~11%의 침하량 감소효과가 나타났다. 또한 숏크리트의 시공 모델링을 통하여 굴착 단계에서의 굴착면의 국부적인 붕괴를 방지함으로써 상재하중에 대한 네일 보강 사면의 침하량을 비교할 수 있었다.
3. 벽체의 허용 변위에 대한 보강사면에 작용하는 상재하중의 크기를 비교한 결과 풍화토에서 중력식 네일 보강사면은 480kPa, 가압식 네일 보강사면은 730kPa로 나타났으며, 풍화암에서는 각각 중력식 510kPa, 가압식 570kPa의 상재하중 크기를 보였다. 이는 지반의 수평변위와 침하량 비교 결과와 종합하여 보강 사면의 구속효과의 차이에서 나온 결과로 보인다.

참고문헌

1. 강인규, 권영호, 박신영, 이승현, 김홍택(2008), “대형파괴재하시험을 통한 쏘일네일 벽체의 거동 분석”, **한국지반환경공학회 논문집**, 제 9권, 제 3호, pp.51~60.
2. 김종수, 최혁, 전진규, 이송(2001), “쏘일 네일링을 이용한 굴착토류벽의 거동 분석”, **한국지반환경공학회 논문집**, 제 2권, 제 2호, pp.23~32.
3. 김홍택, 강인규, 권영호, 박사원, 박시삼(1998). “압력분사 그라우트 유효경 평가기법 및 실내모형실험”, **한국지반공학회 가을학술발표회 논문집**, pp.11~18
4. 김홍택, 강인규, 권영호(2004), “전면벽체의 강성이 Soil Nailing 시스템의 전체안정성에 미치는 영향”, **한국지반환경공학회 논문집**, 제 5권, 제 3호, pp.51~60.
5. 배경태, 최경집, 조국환, 김현정, 김지환(2008), “고무막 패커시스템을 적용한 가압 그라우팅 쏘일네일링 공법의 인발거동 특성”, **한국지반공학회 봄학술발표회 논문집**, pp.405~411
6. 이선근(2003), “전단강도 감소기법을 이용한 보강사면의 상호작용 효과”, 연세대학교 석사학위논문.
7. 이철주, 전상형(2007), “경계면에서의 다이레이션과 전단강도 분포를 고려한 쏘일네일로 보강된 사면에 대한 연구”, **대한토목학회논문집**, 제 27권, 제 4C호, pp.263~268.
8. 천병식, 최창현(2000), “쏘일네일링 시공시 가압 그라우팅에 의한 지반확공에 관한 연구”, **대한토목학**

회논문집, 제 20권, 제 5C호, pp.419~427.

9. 황영철, 김낙영(2002), “풍화암 사면에서의 압력분사 그라우팅 네일 보강효과 연구”, *Journal of the KOSOS*, 제 22권, 제 1호, pp.54~60
10. Bowles, J. E.(1988), "Foundation Analysis and Design", 4th edition, McGraw-Hill.
11. Byrne, R. J., Cotton, D., Porterfield, J., Wolschlag, C., and Ueblacker, G.(1996) "Manual for design and construction monitoring of soil nail wall", Report No. FHWA-SA-96-096R. U.S. Department of Transportation.
12. Carlos A. Lazarte, Ph.D., Victor Elias, P.E., R. David Espinoza, Ph.D.,P.E., and Paul J. Sabatini, Ph.D., P.E.(2003) "Geotechnical Engineering Circular No.7 - Soil Nail Walls", Report No. FHWA0-IF-03-017. U.S. Department of Transportation.
13. Chen, C. Y. and Martin G. R.(2001). "Effect of embankment slope on lateral response of piles" *Flac and numerical modeling in geotechnics*, Billiaux et al. (eds), Swets & Zeitlinger, 205-213.
14. Lee, C. J., and Ng, C. W. W.(2003). "Parametric study of soil nailed slope: effects of dilation and shear strength distribution at interface", *12th Panamerican Conference on Soil mechanics and Geotechnical Engineering, 39th U.S. Rock Mechanics Symposium*, MIT,(2), 2147-2152.
15. Recommendations Clouterre.(1991) Soil Nailing recommendations,-1991(English translation by Federal Highway Administration). Report No. FHWA-SA-93-093.
16. Smith I. M. and Su. N.(1987), “Three-Dimensional FE analysis of a nailed soil wall curved in plain”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geotechnics*, Vol. 21, pp.583-597.
17. Watkins, A. T. and Powell, G. E.(1992). "Soil Nailing to Existing Slope as Landslip Preventive Works", Hong Kong Engineer. March. pp.20-27.
18. Williams, A. F. and Johnston, I. W., and Donald, K.B.(1980), "The Design of Socketed Piles in Weak Rock", *Proceeding of International Conference on Structural Foundations on Rock*, pp.327-347.