

그라우팅 네일을 이용한 사면보강공법의 설계인자 추출 연구 Evaluation of Design Parameters of Grouting Nail

황영철¹⁾, Young-Cheol Hwang, 김낙영¹⁾, Nak-Young Kim, 석정우²⁾, Jeong-Woo Seok

¹⁾ 한국도로공사 연구개발실 책임연구원, Chief Researcher, HRC, Korea Highway Corporation

²⁾ 서울대학교 공학연구소 연구원, Researcher, Research Institute of Engineering Science, Seoul National University

개요(SYNOPSIS) : FRP(Fiberglass Reinforced Plastic)관을 이용한 사면보강은 천공 후 그라우트재에 압력을 가하여 그라우트재의 천공홀 충전뿐만 아니라 지반으로의 침투주입 효과를 일으켜, 전체적인 보강력 증대를 기대하는 공법이다. 이런 특성을 설계에 반영하기 위해서는 구조재료인 FRP관 자체에 의한 지반보강효과 뿐만 아니라 그라우팅에 따른 지반강도의 증진효과를 정량적으로 평가하는 것이 선행되어야 하나 아직까지는 이에 대한 연구가 부족한 실정이다. 따라서 대상지반을 토사와 암반사면으로 구분하여 각각의 보강효과를 확인하고자 현장시험 및 수치해석을 실시하였으며, 이로부터 지반종류에 따른 보강특성과 합리적인 설계를 위한 설계인자를 추출하고자 하였다.

주요어(Key words) : FRP, 사면안정, 사면보강, 사면설계, 그라우팅, 압력그라우팅, 지반보강특성

1. 서 론

최근들어 도로선형의 직선화로 대절토 사면이 많이 생겨나고 있으며, 이에 따른 문제점 해결을 위하여 적절한 보조공법의 적용이 증가하고 있다. 현재 국내에서 많이 적용되고 있는 사면 안정화 대책으로는 크게 사면 경사를 완화시키는 방법, 중력식·역T형 옹벽이나 보강토 옹벽 등의 토류 구조물을 이용하는 방법, 그리고 어스앵커 및 락볼트 또는 쏘일네일링 등을 이용하여 사면을 보강하는 방법 등으로 구분할 수 있다. 이들 중 구조적 재료를 이용하여 사면을 보강하는 공법에서는 주로 이형철근을 보강재로 사용하여 왔는데, 이러한 강 보강재는 무거운 중량으로 인하여 취급이 어렵고, 지하수에 의한 부식으로 보강된 사면의 장기적인 안정성이 저하될 수 있다. 이러한 보강재의 재료적 특성에 따른 단점을 보완하기 위하여 개발된 토목 구조용 신소재 중에서 대표적인 것으로는 불포화 폴리에스테르 수지를 유리섬유나 기타 보강재와 혼합 성형된 FRP(Fiberglass Reinforced Plastic)를 들 수 있다. FRP는 가볍고 가공성이 뛰어나며 인장강도가 크기 때문에, 지반 보강재료의 적용이 용이하며 부식 및 열에도 강한 특성을 가지고 있다.

이런 특성을 설계에 반영하기 위해서는 구조재료인 FRP관 자체에 의한 지반보강효과 뿐만 아니라 그라우팅에 따른 지반강도의 증진효과를 정량적으로 평가하는 것이 선행되어야 하나 아직까지는 이에 대한 연구가 부족한 실정이다. 따라서 대상지반을 토사와 암반사면으로 구분하여 각각의 보강효과를 확인하고자 현장시험 및 수치해석을 실시하였으며, 이로부터 지반종류에 따른 보강특성과 합리적인 설계를 위한 설계인자를 추출하고자 하였다.

2. 그라우팅에 의한 지반 보강 효과

2.1 공법개요

본 공법의 기본 메카니즘은 네일에 의한 지반보강공법과 유사하다. 그러나 FRP관을 이용한 그라우팅 보강공법은 FRP관에 의한 구조체 보강뿐 아니라 이미 이완된 지반의 간극으로 시멘트 현탁액을 침투시켜 지반의 전체 강도를 증대시키는 공법이라는 점에서는 터널보강공사로 이용되는 강관다단그라우팅 공법과 유사하다고 할 수 있다. FRP관 보강공법은 FRP 강성체관과 이 관에 뚫어 놓은 구멍을 통하여 그라우트액을 지반 내로 침투주입 시키며 이로부터 지반의 전단강도를 향상시키는 복합적인 보강시스템을 제공한다(그림 1 참조).

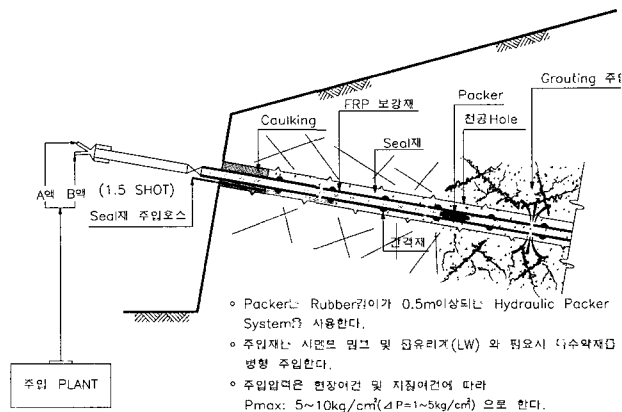


그림 1. FRP공법의 개념도

또한 FRP관을 이용한 그라우팅 공법은 그라우트재의 지반침투에 의한 보강효과를 극대화 하기 위하여 다단그라우팅을 실시할 수 있도록 설계되었다.

2.2 그라우팅에 의한 지반 강도 증가

2.2.1 Ata & Vipulanandan 방법

Ata & Vipulanandan(1998)은 일축압축시험 및 인발시험 결과로부터 그라우트의 점착 및 부착강도가 silicate-grouted sand의 역학적 거동에 미치는 영향을 평가하였다. 일축압축시험을 위한 시편은 그라우트와 grouted sand에 대하여 각각 준비되었으며, 최대 2년까지 양생기간을 변화시켜가며 시험을 실시하였다. Grouted sand의 압축강도는 식 (1)에서와 같이 그라우트의 압축강도 및 부착강도(σ^G , σ^{AT})와 지반의 간극비(n_p)의 함수로 표현할 수 있다.

$$\sigma^{GS} = \frac{L\sigma^G + M\sigma^{AT}}{1 + N\sigma^G + P\sigma^{AT}} \quad (1)$$

여기서, L , M , N , 그리고 P 는 모래와 그라우트의 특성에 따라 실험적으로 결정되는 계수이다. 계수 L 과 M 은 그라우트 체적비에 비례하며, N 과 P 는 모래의 초기 간극비, 입경 그리고 균등계수에 좌우된다.

지반의 간극비와 그라우트재의 압축강도 및 부착강도가 결정된다면, 식 (1)은 grouted sand의 압축강도를 추정하는 데에 이용될 수 있다. 초기 간극비가 0.36인 Ottawa sand의 그라우트 강도와 식 (1)으로부터 예측된 grouted sand의 강도는 그림 2와 같다.

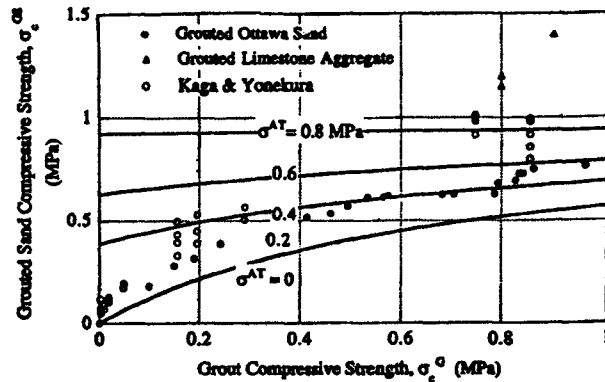


그림 2. 그라우트의 부착강도로부터 예측된 grouded sand의 압축강도

그라우트의 압축강도와 부착강도에 대한 실험결과가 없는 경우에는 그림 3과 4로부터 추정된 값을 이용하여 grouded sand의 압축강도를 구할 수 있다.

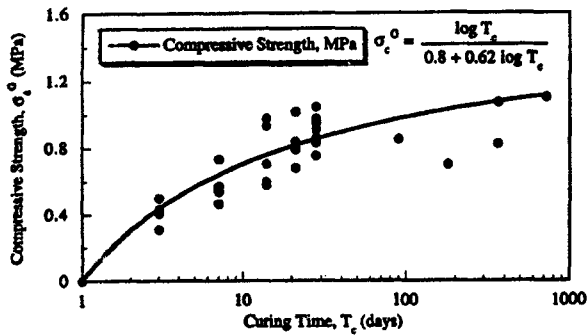


그림 3. 양생기간에 따른 그라우트의 압축강도

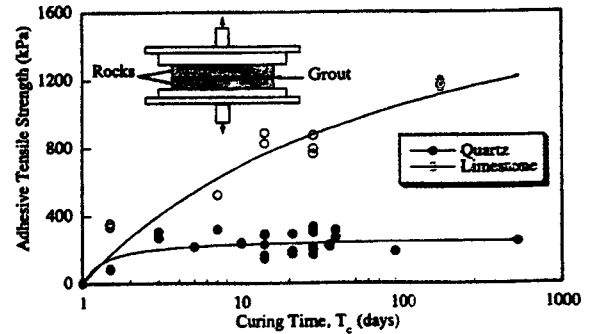


그림 4. 골재종류와 양생기간에 따른 부착강도 변화

2.2.2 시멘트현탁액 주입에 의한 신선한 암석절리의 강도특성 변화

김태혁 등(2000)은 주입에 의한 암석 절리면의 수직 압축특성과 전단특성 변화를 규명하기 위하여 신선한 인공절리에 대하여 시멘트현탁액을 주입한 후, 절리압축시험과 직접전단시험을 실시하였다. 화강암과 대리석에 대한 강도시험 결과로부터, 절리면의 파괴식으로 가장 많이 적용되고 있는 Barton의 식에 기초하여 주입후 절리면의 최대전단강도 예측식을 식 (2)와 같이 제안하였다. 이 식은 절리 간극이 비교적 크고 절리면이 신선한 경우에 대해서만 적용할 수 있으며, 절리압축강도가 주입재의 압축강도보다 작은 경우나 절리간극이 매우 작은 경우에는 적용할 수 없다.

$$\tau_p = c_i \sigma_n \tan \left[\phi_{bi} + \alpha \frac{A}{F} \log(GCS/\sigma_n) \right] \quad (2)$$

- 여기서, c_i : 절리면과 주입재 접촉면의 점착력
 σ_n : 절리면에 작용하는 수직응력
 ϕ_i : 편평한 절리와 주입재 사이의 접촉면 마찰각
 F : 주입두께와 관련된 팽창 감쇠함수
 GCS : 주입재의 단축압축강도
 α : 시험상수 (절리면 거칠기 및 절리압축강도와 관련된 보정상수)
 A : 절리면 거칠기 계수

3. Nail로 보강된 사면의 안정해석법

Nail로 보강된 토사사면의 고전적 해석방법은 크게 수정 사면안정 해석법(외적 안정성 해석)과 운동학적 해석법(kinematical limit analysis, 내적 안정성 해석)으로 구분할 수 있다. 수정 사면안정 해석법은 기존의 사면 안정해석법을 수정하여 잠재적인 원형 또는 썩기 형상의 활동면을 따라 일어나는 파괴에 대해 네일로 보강된 토체와 주변 지반의 전체 안전율을 구한다. 운동학적 해석법은 파괴면에 의하여 경계지어진 주동영역의 국부 평형조건에 대한 해석을 토대로 한다. 이 방법을 이용하여 각 네일에 발생하는 최대 인장력 및 전단력의 크기와 작용 위치를 구할 수 있으며, 주요 설계변수(구조물 형상, 네일의 경사각, 간격 그리고 휨강성)가 시공 도중 네일의 인장력과 전단력에 미치는 영향을 평가할 수 있다. 또한 이 방법을 통하여 모형 벽체에서 관측된 여러 메카니즘(네일의 인발파괴, 인장이나 과도한 휨에 의한 네일의 절단)을 해석할 수 있다.

수정 사면안정 해석법(Stocker et al., 1979; Shen et al., 1981; Schlosser, 1983)을 통하여 유도된 여러 해석법들은 안전율의 정의, 파괴면의 형태, 흙-네일간의 상호작용 형태, 네일의 저항력에 대해 각각 다른 가정을 가지고 있다. Stocker et al.(1979)은 임계 활동면을 두 개의 직선으로 가정한 반면에, Shen et al.(1981)은 포물선 형태의 임계 활동면을 가정한 설계 방법을 제안하였다. 두 가지 방법 모두 힘에 대한 극한 평형법을 이용하였고 네일의 인장력만을 고려하였다. Schlosser(1983)는 복합적인 파괴 양상의 해석절차를 절편법을 이용하여 제시하였다. 이 방법은 네일의 인장력은 물론, 네일의 휨강성과 전단력을 고려할 수 있다. 앞에서 언급한 설계법들은 각 네일에 기대되는 하중이 작용할 때 발생하는 최대 인장력과 최대 전단력의 크기 및 그 작용 위치에 대한 해를 제시하지는 못하고 단지 흙의 파괴나 네일의 파괴에 대한 전체 안전율을 구하는 데에만 사용할 수 있다. 실제로, 네일로 보강된 지반의 파괴는 점진적으로 발생하며 상층부 네일의 인발에 의해 사면 상부에서부터 시작될 것이기 때문에, 모든 네일에 같이 적용되는 전체 안전율은 파괴가 일어나는 동안에 하부 네일의 거동을 정확히 예측할 수 없다.

운동학적 해석법은 파괴면에 의하여 구분되는 주동영역의 국부 평형조건에 대한 해석에 기초하고 있다. 파괴면은 지반 내에서 최대 인장력선을 따라 일어나며 그 형상은 대수나선이나 원호로 가정된다. 파괴는 네일의 점진적인 절단에 의하여 일어나며 파괴시 전단에 대한 흙의 저항력은 파괴면을 따라서 모두 발휘된다고 가정된다. 실물 크기의 현장시험과 실내모형시험 모두가 정적 하중에 대한 흙-네일간 상호작용의 다른 메카니즘과 잠재적인 파괴형태를 관찰하는 데에만 사용되었으며, 동적 하중에 의한 수직 및 수평 진동의 영향을 구하는데 필요한 자료는 현재까지 제안된 바 없다. 그러나, 설계시 동적 하중의 영향은 등가 정적법을 이용하여 근사적으로 고려할 수 있다(Seed & Whitman, 1970).

다음 표 1은 위에서 언급한 각 해석방법의 특징을 요약한 것이다.

표 1. 각 해석방법의 비교

구분	Germany method (Stocker, 1979)	Davis method (Shen, 1981)	France method (Schlosser, 1983)	Kinematic method (Juran, 1990)
해석개념	한계 평형법 전체 안정성	한계 평형법 전체 안정성	한계 평형법 전체 안정성	작용 응력 해석법 국부 안정 해석
보강재 강도 (설계변수)	인장력(휨방향 마찰력) = \min (인발저항력, 재료 인장강도)	인장력(휨방향 마찰력) = \min (인발저항력, 재료 인장강도)	극한 네일강도 (인장, 전단, 휨강성)	무차원 휨강성 계수
보강재 저항력	인장력	인장력	인장력, 전단력, 모멘트	인장력, 전단력, 모멘트
파괴면 형상	직선형	포물선	원호, 임의 형상	원호, 대수나선

4. 토사사면 보강특성

암반사면에 비하여 비교적 강성이 작은 토사지반은 압력그라우트 주입을 할 경우, 그 거동을 달리 해석할 필요가 있다. 이는 그라우트재를 가압함으로써 그라우트재의 침투에 의한 지반보강 뿐만 아니라 천공된 지반이 압력을 받아 주변마찰력이 증가하고, 또 천공으로 이완된 지반이 가압에 의해 압축을 받아 실제 천공된 공경의 확장이 기대되기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 토사사면의 경우 느슨한 지반에서 실제 시험시공을 실시하고 시공 후 보강 구근을 추출하여 확장된 공경을 확인하였으며, 주변마찰력 증대정도를 파악하기 위하여 수치해석을 실시하였다.

4.1 현장 시험시공

4.1.1 현장시험 개요

FRP관을 이용한 그라우트 네일공법의 토사지반에 대한 적용성을 분석하기 위하여 2000년 6월 경기도 광주군 퇴촌지역에 시험시공을 실시하였다. 현장시험에서는 시공 전 후의 그라우트 액 주입효과를 확인하기 위하여 탄성과 탐사 및 전기비저항 탐사를 실시하고, 시공 후 직접 굴착하여 약액반응 시험을 시행하였다. 또한 천공직경의 확공상태를 확인하기 위하여 그라우트된 구근을 추출하여 직경을 측정하였다. 현장 시험시공 단면 및 현장에서 실시한 시험 항목은 다음과 같다(표 2, 그림 5 참조). 본 현장은 건물 축조를 위하여 암버력과 토사가 혼합되어 다짐이 된 지역으로, 6m 높이의 사면이 형성되어 있으며 이곳에 FRP 그라우트 네일을 2.0m 간격으로 2단 4열 시공하였다.

표 2. 현장시험 항목 및 목적

시험목적	시험방법	비 고
유효경의 평가	구근 돌려 측정	시공 후 굴착에 의해 구근 추출
주입효과 확인	탄성과탐사	시공 전·후를 각각 시험
	전기비저항 탐사	시공 전·후를 각각 시험
	약액반응 시험	시공 후 시험

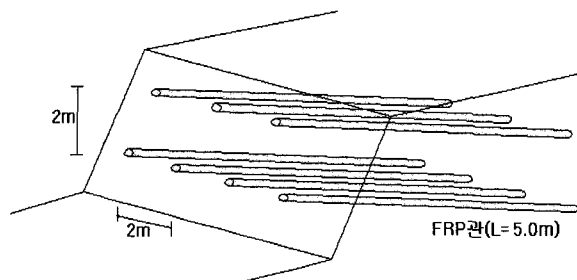
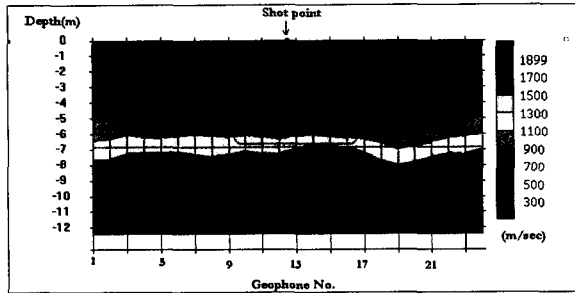


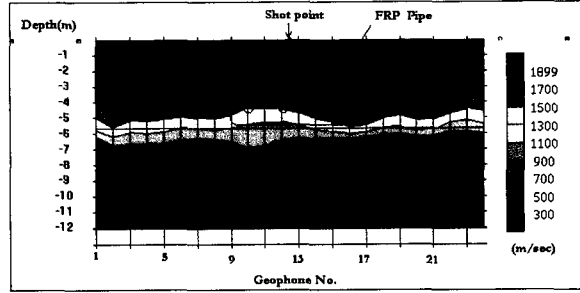
그림 5. 현장 시험시공 개요도

4.1.2 그라우트재 침투효과 확인 시험

본 시험시공시 시멘트 그라우트의 지반 주입효과를 확인하기 위하여 보강 전·후에 대하여 각각 고밀도 탄성과 탐사 및 전기비저항 탐사 그리고 굴착 후 약액반응시험을 실시하였다(그림 6,7 참조).

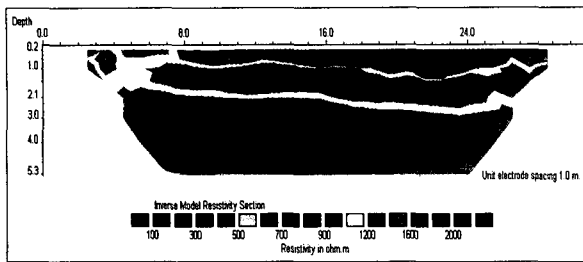


(a) 보강 전 탄성파탐사 결과

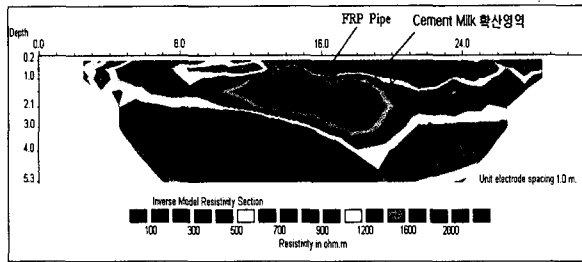


(b) 보강 후 탄성파탐사 결과

그림 6. FRP관을 이용한 시멘트 그라우팅 보강 전·후의 고밀도 탄성파 탐사 결과



(a) 보강 전 전기비저항 시험 결과



(b) 보강 후 전기비저항 시험 결과

그림 7. FRP관을 이용한 시멘트 그라우팅 보강 전 후의 전기비저항 시험 결과

탄성파 탐사에 의한 경우, 보강 후 주입공 위치를 중심으로 동일위치에서 탄성파 속도가 약 200~400m/sec 정도 증가된 것으로 해석되어, 그라우트 액 주입에 의한 지반 개량 효과를 확인 할 수 있었다. 또한, 전기비저항 시험의 경우도 비저항대의 범위가 현저하게 달라진 것을 확인할 수 있었다. 탄성파시험 및 전기비저항 시험 후 지반내로의 그라우트 액의 침투정도를 파악하기 위하여 지반을 직접 굴착하여 약액 반응시험을 실시하였다. 그 결과 그라우트제는 주입공을 중심으로 토층내의 공극을 따라 약 2m 정도까지 뻗어나가 있었다(그림 8 참조).



(a) 시공 후 굴착광경



(b) 약액반응 시험

그림 8. 굴착 후 주입효과 확인을 위한 약액반응 시험

4.1.3 인발저항력 증가량 추정

일반적으로 네일의 축방향 인장력은 활동면 외부에 있는 네일의 마찰저항력을 계산함으로써 얻을 수 있다. 네일의 축방향 인장력은 인장강도와 인발저항력 중에서 작은 값을 수평간격으로 나누어 결정하며, 일반적으로 다음의 식을 사용하여 구할 수 있다(Shen et al. 1979).

$$T = \pi DL_a(\sigma_N \tan \phi_a' + C_a') \quad (3)$$

- 여기서, D : 네일의 직경(천공직경)
 ϕ_a' : 흙과 네일 사이의 마찰각 ($= \phi_d/F_p$)
 L_a : 활동면 외부에 있는 네일의 유효부착길이
 C_a' : 흙과 네일 사이의 점착력 ($= C_d/F_p$)
 F_p : 인발저항력에 대한 안전율
 σ_N : 평균 수직응력

위의 식에서와 같이 보강재의 인발저항력은 수동영역에서 네일의 길이를 따라 발생하는 마찰저항의 함수이다. 따라서, 인발저항력은 그라우트체의 주면면적, 그라우트체와 지반과의 마찰저항계수 및 구근에 작용하는 평균 수직응력의 함수이고 각각 이에 비례한다.

현장 시험시공시, 가압 그라우팅에 의한 굴착공경의 변화를 확인하기 위하여 지반을 굴착하여 그라우트된 구근을 추출하였으며, 현장에서 형성된 구근의 둘레를 측정된 결과 주입구부분, 중간부분, 끝단부분은 각각 475mm, 490mm, 485mm 로 측정되었다(그림 9). 주입구 부분의 비 정상적으로 확대된 부분은 제외시키고 측정하였다. 그 결과 평균지름은 약 154mm로 계산되므로 최초 $\phi 105$ mm의 공경은 압력 그라우트에 의해 약 47%가 증가된 것으로 계산된다(표 3).

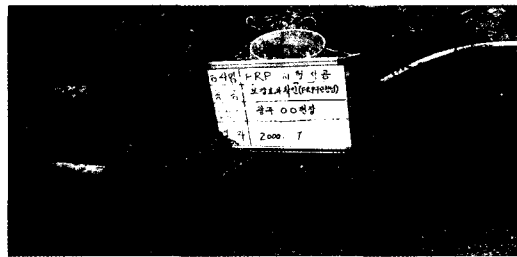


그림 9. 그라우팅 보강 후 추출한 구근

표 3. 압력그라우트 후의 보강재 구근 측정결과

구근 위치	둘레길이 (mm)	지름(mm)	평균지름 (mm)	천공지름 (mm)	확공비 (평균지름/천공지름)
주입구부분	475	151.2	154	105	1.47
중간부분	490	156.0			
끝단부분	485	154.4			

또한, 그라우트체의 확장은 주면면적의 증가뿐만 아니라, 지반의 압축에 의한 지반과 그라우트체와의 접촉압력 증가를 유발하며 따라서 인발저항력의 증가요인이 된다. 증가되는 접촉압력은 그라우트체의 주입압력이나 지반조건에 따라 다를 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서는 토사지반에서 시행한 현장 시험시공결과로부터 지반과 그라우트체와의 접촉압 증가정도를 역해석을 통하여 추정하였다(그림 10).

지반의 압축에 의한 접촉압력 증가정도는 범용 수치해석 프로그램인 Pentagon-3D 프로그램을 이용하여 추정하였으며 가압 그라우팅에 의한 접촉압력의 증가분을 계산하기 위하여 $\phi 105$ mm 천공 후와 $\phi 154$ mm가 되도록 천공홀을 강제변위 한 후 굴착주변요소의 응력을 비교하였다. 본 해석에서는 굴착면 주변의 지반 접촉압 정도를 파악하기 위함이므로 그라우트체는 탄성계수를 거의 무시하고 해석하였으며, 해석에 이용된 주요 지반강도정수는 표 4와 같다.

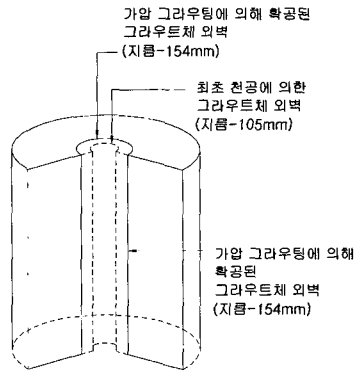


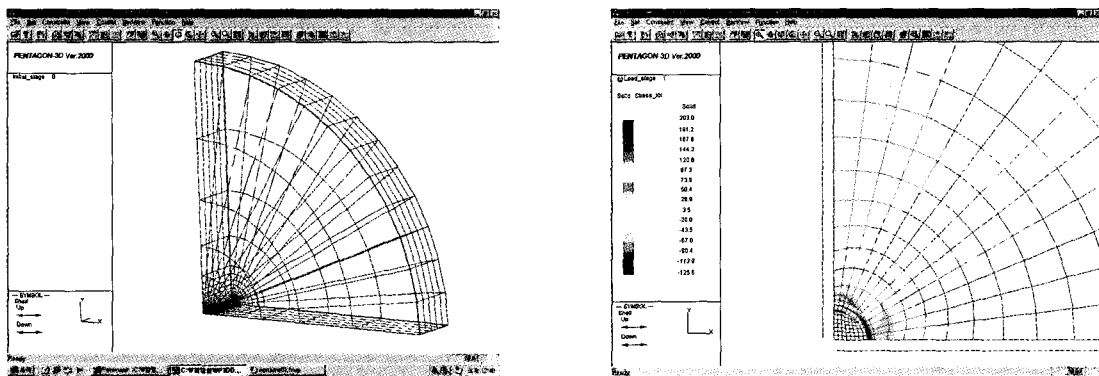
그림 10. 가압그라우팅에 의한 확공

표 4. 해석에 이용된 지반강도정수 값

지반	탄성계수	포아손비	단위중량	비고
풍화토	700 t/m ²	0.33	2.0 t/m ²	

해석결과 그라우트재와 지반과의 접촉면에서의 수직응력은 약 $\sigma_{xx}=9.2\text{kg/cm}^2$, $\sigma_{yy}=11.3\text{kg/cm}^2$ 정도 증가된 것으로 나타났으며, 따라서, 식(2)로부터 구조체의 인발저항력은 $\Delta\sigma_N \tan \phi'_a \pi DL_a$ 만큼 증가할 것으로 판단된다.

따라서, 현장시험 결과 가압그라우트에 의해 개개의 보강재의 인발저항력 증대효과를 확인할 수 있었으며, 그라우트 액의 침투에 의한 전체 지반의 강도개선 효과를 확인할 수 있었다. 해석결과 해석 전 후의 응력 변화는 그림 11과 같다.



(a) 해석에 이용된 3-D Mesh

(b) 강제변위 후 천공홀 주변 σ_{xx} 방향 응력도

그림 11. 그라우트재 확공후의 응력분포도

5. 암반사면 보강특성

5.1 그라우트재에 의한 보강효과 추정방법

암반은 암반내에 여러 불연속면이 존재하고 지반의 강도는 암반 불연속면의 특성에 좌우되게 된다. 이러한 불균질성과 이방성으로 인하여 암반 자체의 거동특성을 파악하기는 매우 어려운 일이며, 특히

그라우트재의 주입에 의해 거동특성이 어떻게 달라지는가에 대한 평가도 매우 어려운 문제이다. 그라우트재에 의한 주입효과를 현장 및 실험실에서 확인하고 정량화 하기란 매우 어려운 일이며, 특히 이러한 보강효과를 설계에 적용하고자 할 경우에는 지반의 불균질성으로 인해 많은 난관에 부딪히게 된다.

따라서, 본 논문에서는 현장에서 확인된 보강효과를 이용하여 역해석에 의해 지반강도의 증가정도를 추정하고자 하였다. 이를 위하여 현장에서는 동일한 사면에 nail과 FRP를 이용한 그라우팅 공법이 시공되었으며 nail 및 FRP관에 계측기를 설치하여 시간경과에 따른 응력변화 정도를 측정하고, 이를 수치해석기법을 이용하여 효과를 역추적 하였다.

수치해석기법을 이용한 그라우트재의 보강효과는 다음과 같은 절차를 거쳐 추정하고자 하였다(그림 12 참조).

- 1단계 : 동일한 사면에 nail과 FRP 그라우팅 공법을 시공하고 이를 장기계측하여 작용하는 평균응력의 차이를 분석
- 2단계 : 임의의 단면에 가정하여 유한차분해석을 통한 지반강성별 각 nail에 작용하는 응력을 계산
- 3단계 : 각 nail에 작용하는 응력을 이용하여 한계평형해석법으로 가정한 사면의 안전율을 계산
- 4단계 : 그라우트재의 지반보강효과를 고려하여 각 nail에 작용하는 응력의 일부를 감소시킨 후 가정한 사면의 안전율 재 계산
- 5단계 : 감소된 안전율은 지반강도를 증가시켜 당초 안전율을 확보 할 때까지 시행착오 계산
- 6단계 : 당초의 nail 응력과 증가된 지반강도정수를 이용하여 안전율을 계산하고, 이때 당초에 비하여 증가된 안전율이 당초 안전율이 될 때까지 nail의 중심간 간격을 변화하며 시행착오 계산

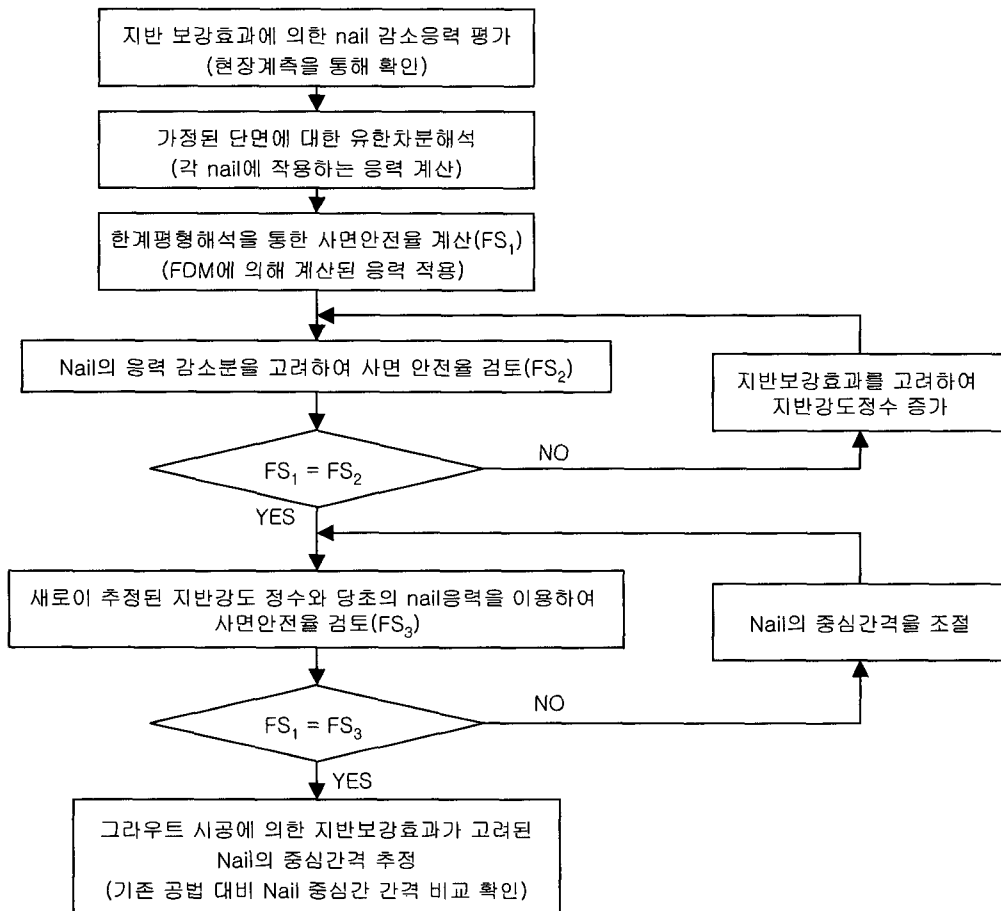


그림 12. 그라우트재에 의한 지반보강효과 추정을 위한 역해석 절차

5.2 현장계측

5.2.1 현장 및 계측개요

현장계측은 경부고속도로 구미-동대구간 확장공사 구간 중 절리면이 발달하여 사면의 안정이 문제시 되는 구간을 대상으로 시공하였다. 사면은 풍화암~연암 정도의 강도를 가지고 있으며, 시공중 일부 붕괴가 발생한 구간이다. 이 구간의 보강을 위하여 억지말뚝이 시공되고 그림 13에서와 같이 사면의 상부에는 $\varnothing 25\text{mm}$ 철근을 이용한 nailing 공법이 적용되고 하부에는 FRP관을 이용한 그라우팅 네일공법이 적용되었다.

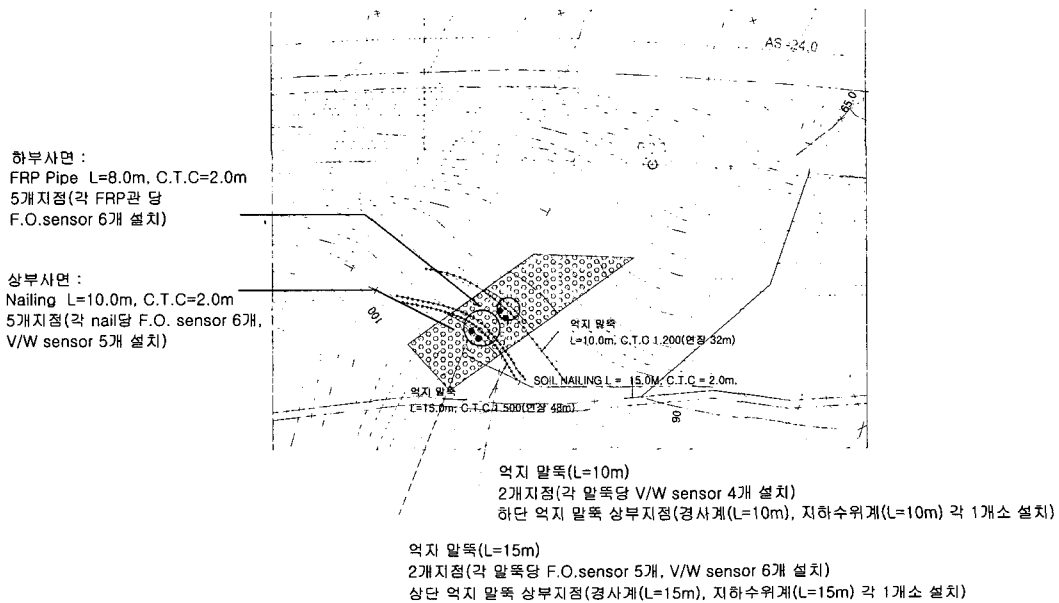


그림 13. 현장 보강 평면도 및 계측기 매설 개요도

지반거동 계측을 위한 계측기는 각각 nail 및 FRP관에 설치되었으며 계측기 설치 세부내용은 그림 14와 같다. 본 사면에 보강된 FRP관의 길이는 8.0m의 것이 사용되었으며 시공 후 FRP관 위치별로 작용하는 응력 및 변형율을 측정하기 위하여 지표면에서부터 1.0m 이격되어 1.2m 간격으로 총 6개의 센서를 설치하였다. 또한 동일사면의 FRP 그라우팅 보강 상부에 길이 10m의 nail이 시공되었으며 이 nail에도 응력 및 변형율 측정을 위한 센서가 설치되었다.

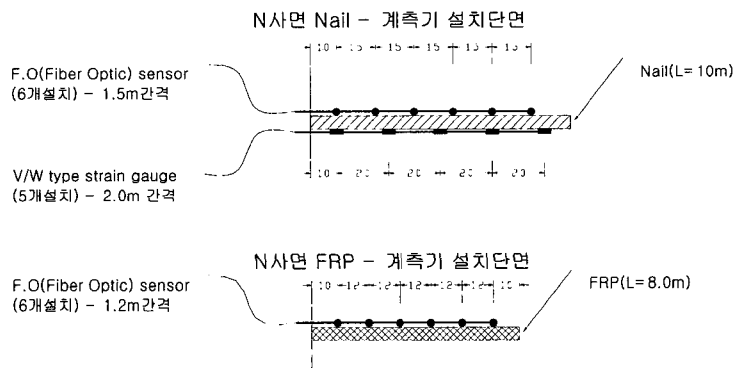


그림 14 Nail 및 FRP관에의 센서 설치 위치

FRP관의 거동계측을 위한 계측기는 광섬유 격자센서를 이용하였으며 총 4개의 FRP관에 각각 6개의 광섬유격자센서가 그리고 1개의 FRP관에는 5개의 광섬유격자센서가 부착되어 총 29개의 센서에 의해 측정되었다. 또한 총 5개의 nail에도 30개의 광섬유격자센서가 부착되었다.

일반적으로 구조물의 변형측정에 많이 사용되었던 빛의 간섭을 이용한 광섬유 센서는 변형율에 기인한 경로차에 의한 간섭신호로부터 변형율을 측정하는 방법을 이용한 것이나, 본 사면에 시공된 FRP관의 거동을 계측하기 위한 광섬유센서는 광섬유 브래그 격자센서(Fiber Bragg grating sensor, FBG sensor)로서 변형율과 온도 등의 외란을 반사파장의 변이 측정을 통해 측정하는 원리로 구성된 것을 적용하였다. 이 센서시스템의 특징은 광섬유 한 라인상에 여러개의 센서를 배열하여, 통신상에 이용되던 파장분할 다중화기법을 사용함으로써 실제 구조물의 변형상태를 배열된 여러개의 센서로 동시에 다점 측정을 구현할 수 있는 특징을 가지고 있다. 또한 출력신호가 변형에 대하여 선형적이며 센서가 광섬유 자체의 강도를 거의 유지하므로 강도특성 또한 우수하다는 장점이 있다(2000. 장).

5.2.2 FRP관 거동 계측결과

FRP관의 거동계측은 총 5개의 FRP관에 29개의 센서를 부착하여 2000년 7월 3일 초기계측을 실시한 이후 현재까지 지속적으로 계측을 실시중에 있으며 평균적으로 1회/3일 빈도로 측정 중에 있다.

그림 15는 2000년 7월 3일 초기측정 이후 각 FRP관 마다 최대 응력을 나타낸 부분에 대한 시간별 측정응력 변화이다. 대부분 설치 후 초기측정이 시작된 이후 9월 중순까지 응력이 지속적으로 증가하며 증가속도변화량이 많은 것으로 측정되었으며, 11월 이후의 응력변화는 거의 안정을 찾고 있는 것으로 판단된다. 이는 우리나라 기후 특성상 7월부터 9월중순까지의 강우량이 많으며, 이는 동일한 사면내에 설치된 간극수압계에 의한 지하수위 측정결과로 부터로도 알 수 있다(그림 16).

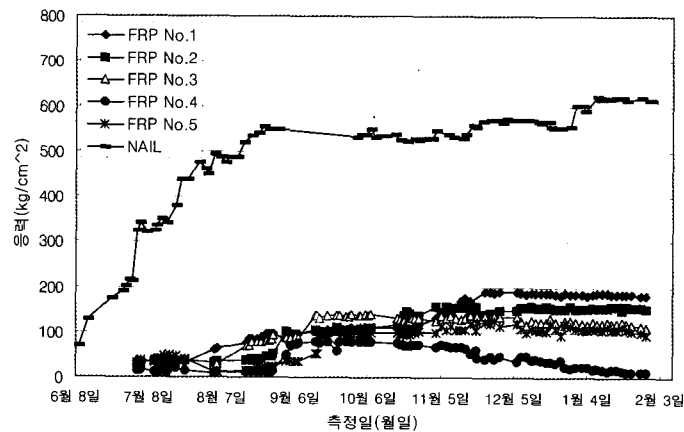


그림 15. FRP관 및 Nail의 응력변화량 계측결과(2000/7/3~2001/01/30)

FRP관에 부착된 센서에 의해 측정된 값은 No.1 FRP관에서 최대 약 179.8kg/cm²의 응력을 받고 있는 것으로 측정되었다.

FRP관의 인장시험결과에 의하면 극한최대응력은 5860 kg/cm² 이고 허용인장응력을 극한응력의 1/3 값을 적용할 경우 허용인장응력은 1953kg/cm²이 된다. 따라서, 계측결과 측정된 최대 응력과 인장시험에 의해 측정된 허용 저항응력을 비교할 때, FRP관을 이용한 사면보강공법 시공후 약 7개월이 경과된 시점에서 측정된 최대응력은 허용저항응력의 약 9.2%정도인 것으로 나타나 FRP 보강그라우팅 공법에 의해 보강된 사면은 현재 안정에 별문제 없는 것으로 판단된다.

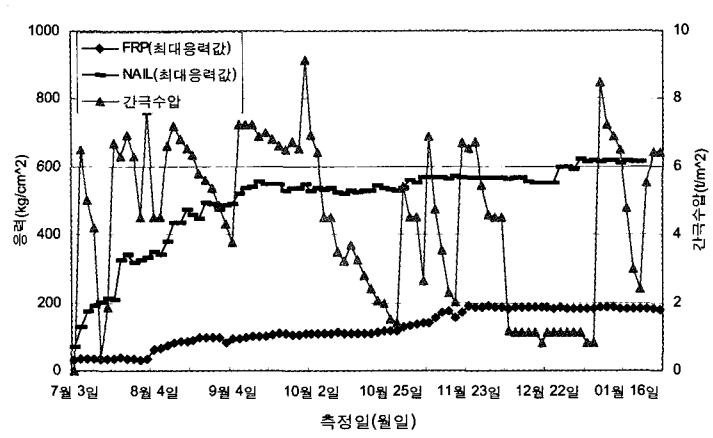


그림 16. FRP관 주변 간극수압계 측정결과 사면내 지하수위 변동(2000/7/3~2001/01/30)

또한, FRP관을 시공한 사면과 동일한 사면 소단 상부에 10m 길이의 nail이 시공된 상태이며 이 nail에 설치된 총 30개의 광섬유센서 중 현재까지 가장 큰 응력을 나타낸 값은 613.33kg/cm^2 으로서 FRP관에 설치된 최대 응력값인 179.8kg/cm^2 에 비하여 약 3.4배 정도 크게 작용하고 있는 것으로 측정되었다. 이를 단면을 고려하여 하중으로 환산하면, nail에 작용하는 하중은 약 3.01ton/ea 이고 FRP에 작용하는 하중은 약 1.27ton/ea 정도로 계산되므로 그라우트네일에 의해 보강된 지반에서의 작용하중은 일반 nailing에 의해 보강된 부분에 비하여 약 42%정도의 하중만이 작용하고 있는 것으로 평가된다. 이러한 경향은 최대값만을 비교한다는 점과 동일사면이라 하더라도 위치가 다소 다르다는 점에서 절대값의 비교에 다소 오차가 있을 수 있으나, 계측된 값을 경향을 비교할 때, FRP관에서 측정된 최대응력값이 작다는 것은 FRP관을 이용한 그라우팅 공법 시공시 가압그라우팅에 의한 그라우트재의 지반 충전으로 활동에 대한 하중을 FRP관과 그라우트된 지반이 분담하고 있기 때문인 것으로 추정된다.

따라서, 이러한 계측결과 및 계측값의 비교로부터 그라우팅 네일공법의 현장적용성을 확인 할 수 있었다.

5.3 수치해석에 의한 지반보강효과 추정

5.3.1 유한차분해석

수치해석에 의한 지반보강효과의 추정은 앞에서 언급한 절차를 이용하여 진행되었으며, 유한차분해석은 FLAC_2D 프로그램을 이용하였다(그림 12).

지반보강효과 추정을 위해 사용된 사면은 높이 10m, 경사 1:0.5(V:H)로서 nail은 총 5단이 중심간격 1.5m 간격으로 설치되었으며, 해석에 이용된 지반강도정수는 표 5와 같다. 해석은 지반의 강도정수를 일정하게 유지한 채 탄성계수가 각각 $3,000\text{t/m}^2$, $5,000\text{t/m}^2$, $10,000\text{t/m}^2$ 일 경우에 대해 해석을 실시하여 각 nail에 작용하는 응력을 계산하였다(그림 17 및 18).

표 5. 지반보강효과 추정을 위해 해석에 사용된 지반 강도정수

지반종류	단위중량	점착력	내부마찰각	탄성계수	비고
풍화암	2.0 t/m^3	3.0 t/m^2	35(deg.)	$E=3,000\text{ t/m}^2$ $E=5,000\text{ t/m}^2$ $E=10,000\text{ t/m}^2$	

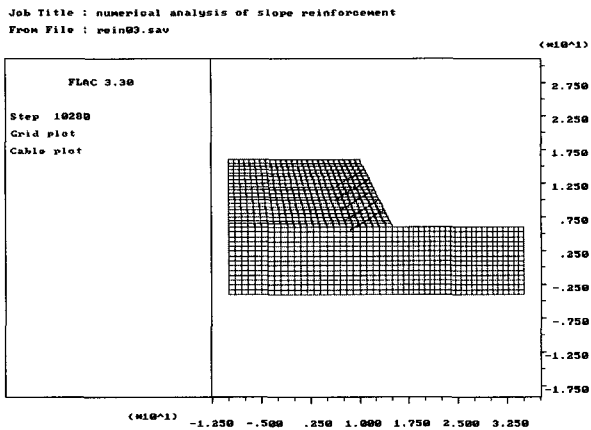


그림 17. Nail의 응력검토를 위한 mesh

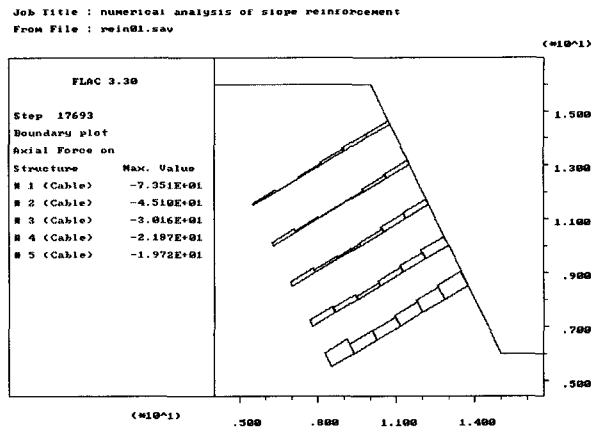


그림 18. 각 nail의 작용응력(지반 E=3,000t/m²)

해석결과 계산된 각 nail의 응력은 표 6과 같다.

표 6. 지반의 강성변화에 따른 각 nail의 작용응력

Nail의 위치 지반 탄성계수	Nail에 작용하는 하중(ton/ea)				
	1단 (최상부)	2단	3단	4단	5단 (최하부)
E=3,000t/m ²	1.23	1.24	1.98	2.93	6.02
E=5,000t/m ²	1.42	1.31	1.70	2.61	4.66
E=10,000t/m ²	1.32	1.23	1.26	1.92	3.04

5.3.2 역해석에 의한 그라우트 보강효과 추정

기존의 nail공법과 그라우트 nail공법의 현장계측결과 최대응력이 발생하는 nail을 대상으로 비교하였을 경우, 그라우트 네일공법에 의해 시공된 nail에 작용하는 하중은 기존의 nail에 작용하는 하중에 비하여 약 42%정도의 수준에 머물고 있고, 이는 나머지 하중을 그라우트 주입에 의해 강성이 증가된 지반이 지지하고 있는 것으로 추정된다. 따라서, 유한차분해석으로부터 구한 각 nail에 작용하는 하중을 임의로 각각 80%, 60%, 40%로 감한 후 각각의 경우에 대해 한계평형해석을 실시하고 이를 대상으로 역해석하였다.

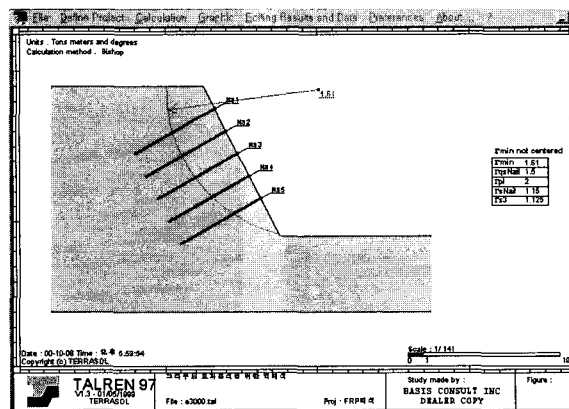


그림 19. 가정된 사면의 안정해석(한계평형해석, E=3000t/m²일 경우 nail 응력 고려)

파괴활동면은 지반의 탄성계수가 3000t/m²일때의 네일응력을 적용하여 구한 활동면으로 고정하여 해석함으로써, 지반강도정수의 변화에 따른 활동면의 변화를 최소화하고자 하였다.

해석은 탄성계수의 변화에 따라 산정된 nail의 응력을 이용하여 사면의 안전율을 계산하고, 각 nail의 응력이 80%, 60%, 40%로 감해질 때의 사면안전율을 계산한 후, 감해진 nail의 응력에 의해 감소된 사면 안전율이 원 응력인 100%의 nail 응력이 작용할 때의 안전율과 동일하도록 지반강도정수 중 점착력을 증가시켰다. 그 후 증가된 안전율이 다시 원 상태의 안전율이 될 때까지 nail의 간격을 늘이는 방법으로 진행하였다. 단, 해석시 nail의 수직간격은 고정된 채 수평간격만을 조정하였다.

Nail의 응력감소는 그라우트 주입에 의한 지반보강에 기인한 것이므로 이를 고려하여 nail의 응력감소에 의한 것 만큼 지반강도정수를 증가시켜, 동일한 사면안전율을 확보할 때의 nail의 간격을 결정한 결과는 그림 20과 같다.

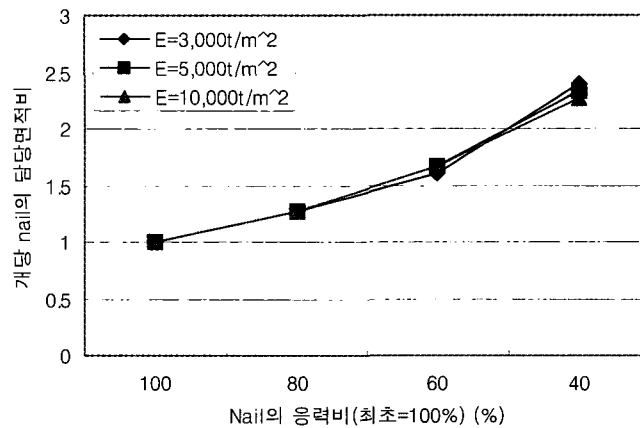


그림 20. Nail의 응력감소에 따른 개당 nail의 담당면적 비

해석결과 nail의 응력감소분이 클수록, 즉, 그라우트에 의한 지반 응력분담율이 커질수록 개개의 nail이 분담하는 면적이 커지는 것으로 나타났으므로, 그라우트 네일에 의한 지반보강으로부터 시공되는 nail의 중심간 간격을 늘임으로써 전체적인 경제성을 확보할 수 있을 것이라 판단된다.

6. 결론 및 고찰

본 논문에서는 그라우트 네일 공법에 의한 사면보강시 고려해야 할 설계인자를 추출하기 위해 토사사면과 암반사면 각각에 대한 그라우트 네일 공법의 보강특성을 연구하였으며, 이를 위하여 현장시험, 현장계측 및 프로그램에 의한 역해석을 실시한 결과는 다음과 같다.

(1) 그라우트재의 침투에 의한 지반강도 증대

그라우트재의 지반 침투로 인해 원지반의 강도가 증대되며 이는 현장에서 보강 전·후의 지반에 대한 탄성과 탐사와 전기비저항 탐사를 실시하여 그라우트 주입정도를 확인하였다.

(2) 공경확장에 의한 주면마찰력 증대

현장 시험시공에 의하면, 당 현장의 경우 당초 105mm로 천공된 직경이 시험 후 굴착에 의한 구근 측정결과 평균 154mm로 약 47%정도 증가 되었다. 보강재의 인발저항력은 주면면적에 정비례하므로 공경확장에 의해 네일 1개당 약 47%의 인발저항력 증대 효과를 확인하였다.

(3) 가압 그라우트에 의한 지반-네일간의 평균 수직응력 증대

천공에 의해 느슨해진 지반을 FRP관을 통하여 그라우트액을 가압할 경우, 그라우트체와 지반간의

응력은 당초에 비하여 증가하게 되며, 본 현장시험에서 측정된 확공량을 토대로 3차원 수치해석에 의해 역해석한 결과 응력은 약 $\sigma_{xx}=9.2\text{kg/cm}^2$, $\sigma_{yy}=11.3\text{kg/cm}^2$ 정도 증가된 것으로 나타났다. 따라서, 지반의 마찰각이나 점착력의 증가를 고려하지 않더라도, 네일에 작용하는 평균 수직응력의 증가로 보강재의 인발저항력의 증가를 확인하였다.

(4) 인발저항 내구성 개선 기대

내구성 측면은 수치적인 자료의 확보가 어려우나, 개념적으로 무압충진 그라우트 방법에 비하여 가압 그라우트 방법은 네일과 지반과의 일체화에 훨씬 유리하므로 장기적 측면에서 인발저항력에 대한 내구성 개선을 충분히 기대할 수 있다.

(5) 암반사면 지반보강 효과

암반사면에 대한 현장에서의 비교시공 후 nail 및 그라우트 nail 각각에 대한 장기계측결과 그라우트 네일의 경우 작용하는 하중이 작은 것으로 측정되었으며, 이는 그라우트재에 의해 보강된 지반이 하중의 일부를 부담하고 있기 때문인 것으로 추정된다. 이에 대한 효과를 확인하고자 그라우트 네일로 시공한 사면에 대해 동일한 안전율을 확보할 때의 nail의 중심간 간격을 조정한 결과 nail에 작용하는 응력이 원 응력의 약 40%정도일 경우 1개의 nail이 받는 면적은 당초에 비하여 약 2.3배 정도 증가되는 것을 확인하였다.

참고문헌

1. 김홍택(1998), 압력분사 그라우팅 유효경 평가기법 및 실내모형 실험, 한국지반공학회 가을학술발표회, pp.305~312.
2. 이준석(1999), 탄성파 및 역해석 기법을 이용한 침투그라우팅의 보강효과 검증에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제19권, 제III-6호, pp.1135-1142.
3. 장현삼(1999), 시추공 탄성파탐사 및 이의 토목공학적 응용, 한국지구물리탐사학회 학술발표회, pp.176~201.
4. 황영철(2000), 토사사면에서의 FRP보강 그라우팅 공법 적용성 평가, 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp.571~574.
5. Hobst, L. and Zajic, S.(1983), Anchoring in Rock and Soil, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
6. Rovert E. Sheriff and Lloyd P. Geldart(1995), Exploration Seismology, Cambridge University Press, pp.425~448.