

쏘일네일링에서 압력분사 시멘트 그라우팅에 의한 천공경 확공에 관한 연구

(A Study on enlargement of the Borehole by Cement Grout Installation in Soil Nailing)

임해식¹⁾, Hae-Sik Im, 천병식²⁾, Byung-Sik Chun, 김종대³⁾, Jong-Dae Kim, 송경율⁴⁾, Kyoung-Yool Song, 이민현⁵⁾, Min-Hun Lee

요약(Abstract)

본 연구는 Soil Nailing 공법에서 압력분사 시멘트 그라우팅 방식이 적용된 네일의 설치시, 현장인발시험과 유한차분해석을 통하여 확공부분 및 그라우트 침투거리를 포함한 유효경을 정량적, 정성적으로 평가하기 위한 접근을 시도하였으며, 이러한 결과를 토대로 하여 예비 설계 단계에서의 주변마찰력의 산정의 중요인자인 유효경의 예측 방법을 수치해석적 차원에서 찾고자 함이다.

1. 서언

Soil Nailing 공법은 NATM이나 보강토공법과 유사한 지반보강공법으로서 네일에 의하여 보강된 영역의 토체가 일체화된 옹벽과 같이 작용한다는 기본개념을 바탕으로 1972년 프랑스에서 철도사면의 보강을 위해 처음 사용된 이후 미국, 프랑스, 독일 등지에서 널리 이용되고 있다.

그러나 아직까지 Soil Nailing의 다양한 특성(기하학적구조, 길이, 네일의 경사, 흙의 특성), 설계, 시공관리방안 등에 있어 체계적으로 정립되어 있지 않아, 현장적용에 어려움을 겪는 경우가 종종 발생하고 있다.

따라서 Soil Nailing의 신뢰성 확보 및 저변화를 위하여 설계기법이나 제반특성의 연구가 지속적으로 요구되는 상황이다.

Soil Nailing 공법의 압력분사 시멘트 그라우팅 기법 적용시 중력식 시멘트 그라우팅 기법에 비하여 가압으로 인한 천공공의 확장과 주변지반으로 침투된 시멘트밀크로 인하여 유효경이 증가 되며, 이로 인하여 네일-주변흙의 마찰력이 향상되는 것으로 보고 되고 있다. 그러나 지금까지 가압에 의한 확장량과 밀크의 주입에 의한 확장량이 명확히 구분되지 못하고 있다.

따라서, Soil Nailing 설계시 대부분 경험에 의존하여 정형화된 천공공의 직경 및 압력을 사용하고 있어, 지반 상태 및 조건에 따른 천공경의 직경과 압력이 유동성 있게 적용되지 못하고 있는 상황이다.

-
- 1) 주택공사
 - 2) 한양대학교
 - 3) 주택공사
 - 4) 한양대학교
 - 5) 세합토건

본 연구는 압력분사 시멘트 그라우팅 방식이 적용된 네일에 초점을 두어, 현장인발시험과 유한차분해석을 통하여 확공부분을 포함한 유효경을 정량적 정성적으로 평가하기 위한 접근을 시도하였으며, 이러한 결과를 토대로 하여 예비 설계단계에서의 주변마찰력의 산정의 중요한 자인 유효경의 예측 방법을 찾고자 한다.

2. 압력분사 시멘트 그라우팅 확공이론

2.1 유효경의 결정

중력식 시멘트 그라우트 방식과는 달리 압력분사 그라우트 방식을 적용하는 경우에는 당초의 천공면 바깥쪽으로 부분적인 확공현상이 예상되며, 여기서 당초의 천공부분과 확공된 부분을 합쳐 유효경으로 정의하면, 이와 같은 유효경의 크기는 천공면 주변지반의 투수성, 주입압 크기 및 시간 등에 따라 좌우된다.

Gabriel & Tirso(1994)는 천공면 주변의 지반은 탄성체로 가정하고, 천공면에 작용하는 초기주입압 p_0 를 외력으로 한, 방사방향으로의 평형조건식 및 적합조건식을 토대로하여 임의의 시간 t 에 대한 천공반경의 증가 Δr 을 다음과 같이 평가 하였다.

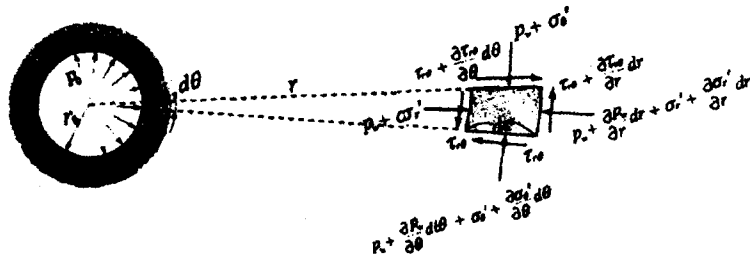


그림 1. 천공면 주변지반의 미소요소에 작용하는 응력.

Hooke의 법칙을 토대로 r 방향의 응력과 θ 방향의 응력을 극좌표계로 표현하였으며, 천공면 주변은 균일한 압력에 의한 평면침투로 보아 평면응력조건을 적용하였다.

$$\begin{aligned} \Delta r &= \int_0^t \Delta r = \int_0^t \frac{(1+\nu)}{E} \cdot \Delta p_w \cdot r_0 \cdot dt \\ &= \int_0^t \frac{(1+\nu)}{E} \cdot \frac{16p_0 h^2 r_0^2}{hr_0 + 4} [1 - U(t)] \cdot r_0 dt \end{aligned}$$

$$\text{여기서, } U(t) = 1 - \frac{4h^2 r_0^2}{\mu_1^2 (\mu_1^2 + h^2 r_0^2)} \exp\left[-\frac{c^* \mu_1^2 t}{r_0^2} \right]$$

c^* = 시멘트그라우트체의압밀계수(대략적으로 $0.5cm^2/sec$ 정도)

$$\bar{h} = \frac{k_s/k_g}{r_0 \ln \frac{R}{r_0}}, \quad \mu_1^2 = \frac{8\bar{h}r_0}{hr_0+4}, \quad R = \text{최대침투영향반경}$$

k_g = 시멘트그라우트체의투수계수, k_s = 천공주변지반의투수계수

μ_1 = Bessel함수, $J_0=0$ 의 해

윗 식은 압력분사후 공내부에 충전되어 있는 시멘트 그라우트의 양생과정이 점토의 압밀과정과 유사하다는 가정하에 공내부에 존재하는 유체가 주변의 인접지반으로 흡수되면서, 이에 따라 과잉간극수압도 시간경과와 더불어 점차 소산된다는 개념을 바탕으로 전개되었다.

압력분사 그라우트 방식을 견고한 암반층이 아닌 일반 토사층에 적용하는 경우에는 수압파쇄등의 문제가 수반될 수 있으므로, 현장지반조건에 맞는 주입압의 한계치가 필요하다. 지반조건 등에 따른 한계주입압 결정방법을 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta r_{lim} = \frac{8 \cdot p_{lim} \cdot \bar{h}^2 \cdot r_0^3}{G \cdot (\bar{h} + 4)} \int_0^t [1 - U(t)] dt$$

3. 현장인발시험

3.1 네일의 인발력

네일의 극한 인발력은 천공경의 크기와 형태, 천공방법, 네일의 길이, 지반의 강도특성, 그라우팅방법 등의 함수로 일반식은 다음과 같다.

$$P = \pi \cdot D \cdot L_a \cdot q_s$$

여기서, P : 네일의 인발저항력

D : 그라우팅 네일의 경우 천공홀의 직경

타입식 네일의 경우 네일의 직경

L_a : 네일의 유효길이

q_s : 네일의 단위 인발저항력을 의미한다.

위의 식은 토질에 따라 변수의 성격을 달리하나, 천공경의 유효직경이 인발력의 증대에 중요한 인자임을 알 수 있다.

3.2 인발시험 제원 및 결과

네일에 대한 인발시험의 가장 중요한 목적은 주변마찰력의 결정이며, 이때 반드시 네일-지반 사이의 상대 변위량 및 형성된 그라우트의 직경도 함께 측정하는 것이 필요하다.

표 1 인발시험 제원.

nail 번호	시험수 량	양생 일수	계획인발 하중	비고	적용지반	
①	1	7일	14.5ton	천공경=100mm 콘크리트혼화제 5% 무가압	풍화잔류토	
②	1	3일	14.5ton	천공경=100mm 콘크리트혼화제 5% 무가압	풍화잔류토	
③	1	4일	14.5ton	천공경=100mm 콘크리트혼화제 5% 무가압	풍화잔류토	
④	1	4일	14.5ton	천공경=80mm 콘크리트혼화제 5% 가압	풍화잔류토	
⑤	1	4일	14.5ton	천공경=80mm 콘크리트혼화제 5% 무가압	풍화잔류토	
⑥	1	10일	14.5ton	천공경=100mm 콘크리트혼화제 5% 가압	풍화잔류토	
⑦	1	10일	14.5ton	천공경=80mm 콘크리트혼화제 5% 가압	풍화잔류토	
⑧	1	10일	14.5ton	천공경=80mm 콘크리트혼화제 5% 가압	풍화암	
⑨	1	28일	14.5ton	천공경=80mm 콘크리트혼화제 5% 가압	풍화잔류토	
⑩	1	28일	14.5ton	천공경=80mm 콘크리트혼화제 5% 가압	풍화암	
⑪	1	28일	14.5ton	천공경=80mm 콘크리트혼화제 5% 가압	풍화암	
계	11개	* 사용철근 : SD40(d29), $\sigma_s=1800 \text{ kg/cm}^2$, $A_s=6.42 \text{ cm}^2$, 허용인장응력=11.5632ton *그라우트강도 : 3일강도=100 kg/cm^2 , 4일강도=200 kg/cm^2 , 7일강도=300 kg/cm^2				

표 2 인발시험 결과

nail 번호	정착 길이 (m)	양생 일수	천공경 D(mm)		극한파괴 점 (ton)	극한부착응 력 $\tau_u(\text{t/m}^2)$	파괴형태
			주입전	주입후			
①	2.50	7일	100	100	해당없음	9.55	극한파괴
②	2.30	3일	100	100	해당없음	5.81	극한파괴
③	2.65	4일	100	100	해당없음	7.56	극한파괴
④	2.90	4일	80	118	추정안됨	12.35	항복파괴후 소성거동
⑤	2.95	4일	80	121	추정안됨	8.09	항복파괴후 소성거동 및 극한파괴
⑥	2.70	10일	80	120	17.0	20.63	항복파괴후 소성거동 및 극한파괴
⑦	2.71	10일	80	123	17.0	20.55	항복파괴후 소성거동 및 극한파괴
⑧	2.41	10일	80	120	14.0	19.81	항복파괴후 소성거동 및 극한파괴
⑨	2.58	28일	80	120	17.0	21.59	항복파괴후 소성거동 및 극한파괴
⑩	2.58	28일	80	119	15.0	21.59	항복파괴후 소성거동 및 극한파괴
⑪	2.60	28일	80	116	18.0	22.19	항복파괴후 소성거동 및 극한파괴

4. FDM 해석

4.1 프로그램 개요 및 특징

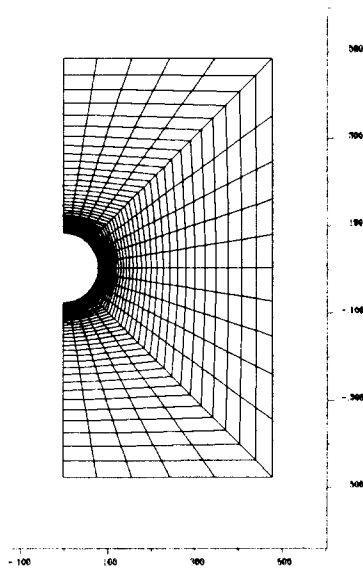
본 연구의 해석에는 이차원 explicit 유한차분 프로그램인 flac3.3을 사용하였으며, 요소의 각 절점에 구성된 방정식을 미세하게 세분된 시간단계에서 이전 시간단계에서 구한 값을 초기값으로 하여 방정식의 해를 구하는 방법이며, 평형 상태의 범위에 도달할 때까지 반복계산을 수행하여 최종해 (불균형 힘이 0에 근접한 수렴치)를 구한다.

이 때 응력, 변위 등과 관련된 시간단계는 실제의 물리적인 시간과 가속도가 아니라 불균형 힘을 소산시키는 계산을 위한 추상적인 값인 반면, 유체의 흐름과 관련된 시간단계는 real time이 적용된다.

4.2 해석단면 설정 및 물성치

해석 대상지반은 풍화잔류토의 얇은 표피층과 풍화암이 넓게 분포된 지역으로 수직, 수평 간격 1.2m로 시험네일이 거치되어 있다.

따라서, 본 해석단면은 천공경(80mm)을 중심으로 반경 0.5m을 그라우트 주입압의 영향범위로 정하고 modeling하였다.



단위(m)

그림 2 FLAC 해석 모델 단면도

그라우트의 침투해석을 위한 주변지반의 계 물성치를 정확히 평가하는 데는 많은 어려움이 있다. 본 수치해석에 적용한 지반물성치는 기본적인 물성시험과 관련 문헌을 통하여 산정하였으며, 본 program에 적합하다고 판단되는 값을 적용하였다.

표 3 수치해석에 적용된 물성치

구분	함수비 (%)	γ_t (t/m^3)	점착력 (t/m^2)	점성 (cps)	내부마찰각 (°)	지반의 투수계수 (cm/sec)	bulk modulus (t/m^2)
풍화토	14 ~ 15%	2.0	2.5	-	35	$2.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-6}$	1.67×10^4
그라우트		1.0	-	75~100	-	-	2×10^5

■ 투수계수의 산정

일반적인 darcy의 법칙은

$$q = k \frac{dh}{dx}$$

여기서, h : 수두

k : 투수계수

이다. 또 다른 표현은 intrinsic permeability κ 와 압력으로 표현된 K가 있다.

이들의 관계식은 다음과 같다.

$$\kappa = \frac{\mu k}{g \rho_w} = \mu K$$

FLAC의 해석을 위해 요구된 투수계수는 K로서 darcy의 법칙에서 수두보다는 압력으로 표현되는 비례상수로서

$$q = K \frac{dP}{dx}$$

여기서, $\frac{dP}{dx}$: 압력경사 (P_a/m) 이다.

W/C가 0.5~0.55정도의 시멘트의 점성은 제품에 따라 다소 차이가 있으나, 그라우트의 점성은 50~100(cps)이며, 참고로 물의 점성은 1(cps)이다.

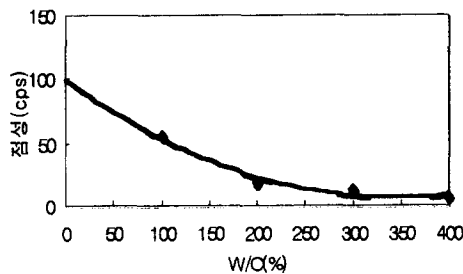


그림 3 W/C에 따른 점성의 변화.

그라우트의 bulk modulus는 그라우트의 점성이 투수계수 산정시 고려되었기 때문에 해석상의 편의를 위해 물의 bulk modulus를 사용하였으며, PROGRAM 특성상 큰 문제가 되지는 않는다.

4.3 침투해석결과

2차원 FDM 해석결과는 다음과 같으며, 유효경의 산정은 가압에 의한 지반의 변위량과 그라우트의 침투거리의 합으로 정의 하였다. 해석의 기법상 그라우트의 침투거리 산정은 가압에 의해 발생된 과잉간극수압이 지반속으로 침투, 소산되어 포화도 0으로 초기화된 지반의 포화도가 100%에 달하는 부분만으로 한정하였다.

1) 그라우트의 침투 양

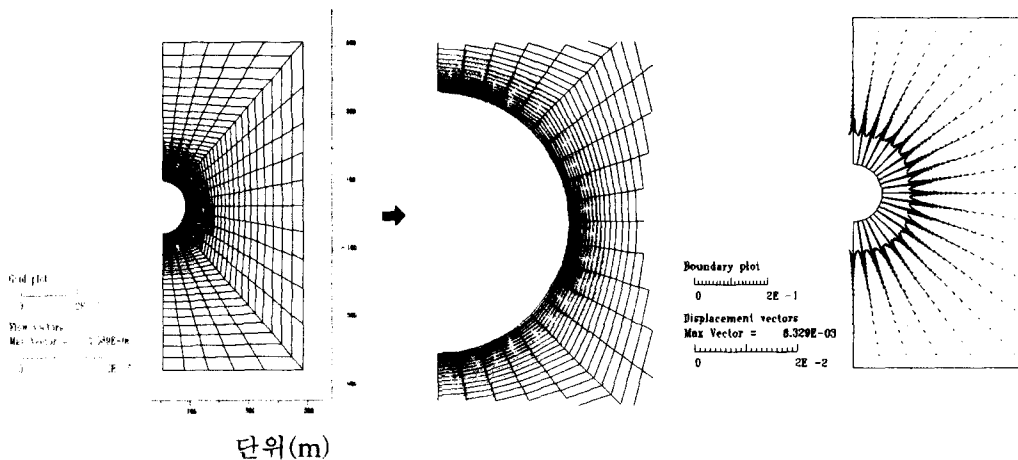


그림 4 그라우트의 침투 벡터.

그림 5 지반의 변위 벡터.

그라우트의 침투양상은 방사방향으로 비교적 일정한 크기로 분포하고 있으며, 평균적으로 5.5mm가량 지반중에 침투되었다. 또한, 포화도가 100%인 점의 외측으로 1~2mm가량의 부분 포화된 지역이 존재하였다.

천공경의 최상단과 최하단에서 평균치보다 크기가 큰 최대 흐름벡터가 나타나고 있으나, 이는 내공부와의 경계조건의 차이에서 발생한 것으로 판단된다.

압력에 의한 지반의 변위는 방사방향으로 상당히 고른 분포를 보여주고 있으며, 최대 변위는 8.3mm로 나타났다.

4.4 주입압의 변화에 따른 유효경

수치해석적 방법을 통하여 주입압의 변화에 따른 유효경의 변화를 알기위해 ○○지구를 대상으로 해석을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

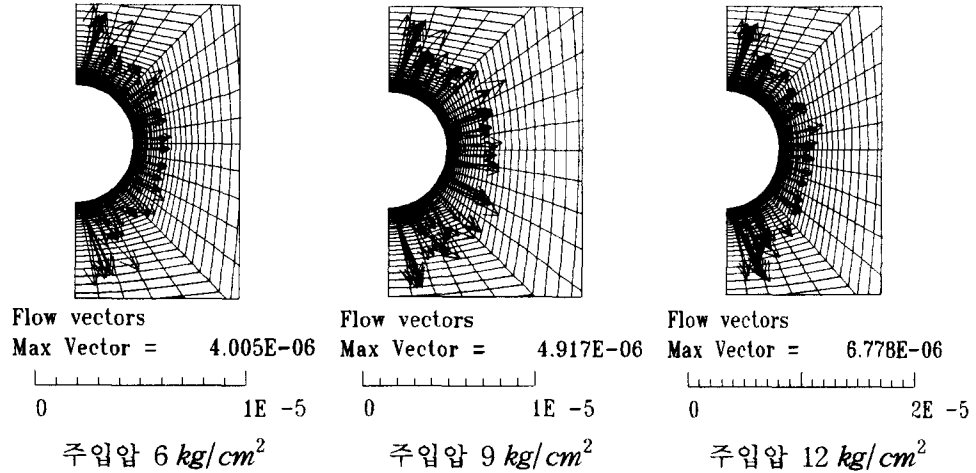


그림 6 주입압의 변화에 따른 지반의 침투

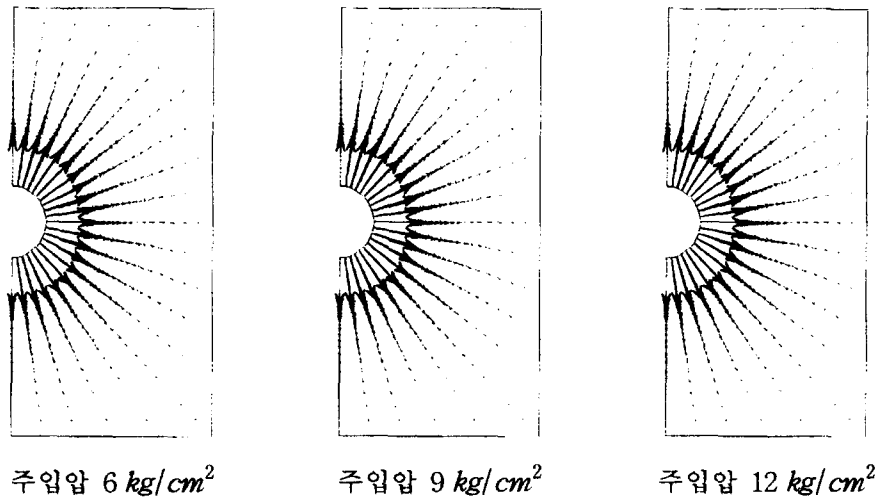


그림 7 주입압의 변화에 따른 지반의 변위.

주입압을 달리하여 해석한 결과 천공부의 지반변위나 그라우트의 침투 형태는 주입압의 크기에 관계없이 비슷한 양상을 보이고 있으나, 지반변위량과 침투거리는 그림 8과 9에서 보여 지듯이 많은 차이를 나타내고 있다.

지반의 변위는 주입압에 따라 비례적으로 증가하나, 그라우트의 침투거리는 9~15 kg/cm^2 에서 크게 증가되지 않음을 볼 수 있다.

수치해석결과 지반의 교란상태는 6~15 kg/cm^2 의 주입압에 상관없이 크거나 위치가 거의 유사하게 나타나고 있으며, 15 kg/cm^2 의 주입압이 적용된 결과가 6~12 kg/cm^2 보다 오히려 안정된 결과를 보이고 있다.

이는 Soil Nailing System에서 Nail 설치용 위한 천공작업시 천공부 주위의 지반이 교란되어 느슨한 상태를 나타낸다.

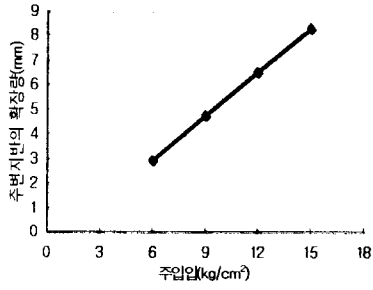


그림 8 주입압의 변화에 따른 지반의 변위.

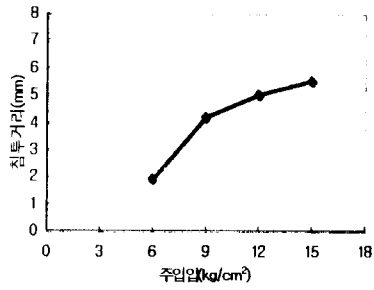
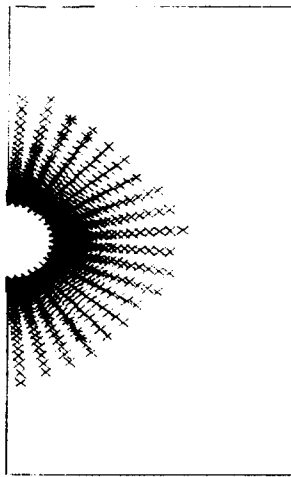
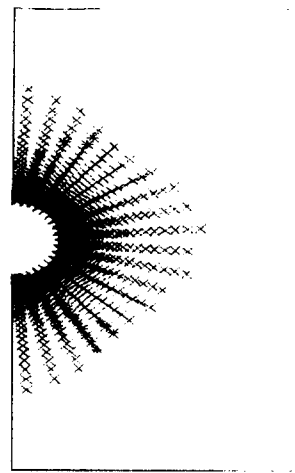


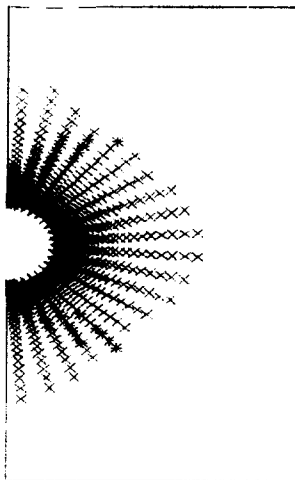
그림 9 주입압의 변화에 따른 침투거리.



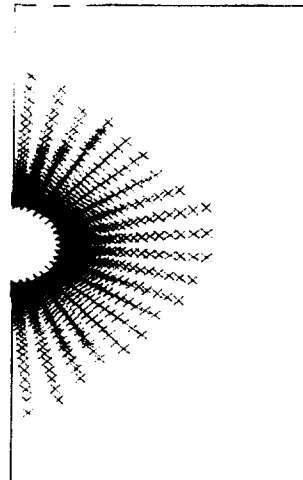
주입압 6 kg/cm^2



주입압 9 kg/cm^2



주입압 12 kg/cm^2



주입압 15 kg/cm^2

+ : 소성영역 × : 탄성영역

그림 10 주입압에 따른 지반의 탄·소성 영역.

따라서, 가압에 의한 그라우트가 주입될 시 이완된 지반이 주입압에 의하여 천공부 외측으로 변위하여, 느슨한 지반이 다시 밀한 상태로 되는 효과를 유발하는 것으로 판단 된다.

5. 결론

본 논문에서는 Soil Nailing의 네일 system에서 현장인발시험과 수치해석을 통하여 무압 시멘트 그라우팅과 가압 시멘트 그라우팅이 적용된 nail의 천공경의 확공량을 비교·검토하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 가압형 nail과 무가압형 nail의 인발에 대한 응력-변형 거동특성은 서로 상이하다. 즉, 가압형은 극한하중점까지 지속적인 탄성거동을 보이며, 극한하중 이후 잔류강도가 거의 나타나지 않는 반면에, 가압형은 항복점이 발생되며, 항복 이후 상당한 하중과 변형의 증가가 지속되면서 극한파괴에 도달하는 소성적 특성을 나타내었다.

본 인발시험은 동일 지반에서 실시한 결과이므로, 상기 소성적 거동형태는 지반자체의 소성적 특성에 의한 것이 아니라, 그라우트의 주입압에 의하여 그라우트의 침투에 의한 천공장 확공에 기인하는 것으로 판단된다.

(2) soil nailing 설계시 구조물의 안전에 필요한 주변마찰력을 얻기 방법으로는 nail의 간격이나 천공경의 직경을 조정한다. 가압형(주입압 15kg/cm^2) nail의 경우 인발시험에서 원 천공경에 비하여 직경은 약 50%, 횡단면적은 125% 정도 확대 효과를 기대할 수 있어 nail의 근접 시공이나 과도한 천공으로 인해 발생하는 추가적인 문제에 대처할 수 있을 것으로 판단 된다.

(3) FDM(fica3.3) 해석 결과 $\phi 80\text{mm}$ 로 천공후 시멘트 그라우팅 시공시 가압에 의한 지반의 확장이 16.60mm, 침투에 의한 확장이 11.0mm로서 해석완료 후의 유효경은 107.6mm로 나타났다. 이와 같은 결과는 현장계측 계측 평균치 120mm에 비하여 약 12.4mm 정도가 작게 나왔다. 이는 수치해석시 주입압을 15kg/m^2 하고, 10분의 시간경과에 의한 침투해석한 결과로서 잔류압력에 의한 영향이 고려하지 못했고, 지반의 포화도가 100% 포화도 달하는 위치만을 침투거리로 평가한 방법에 기인된다고 판단된다.

(4) ○○지구를 대상으로 하여 주입압을 변화시켜 해석한 결과 지반의 변위는 주입압에 따라 일차적인 비례를 보이고 있으나, 침투거리는 $9\sim 15\text{kg/cm}^2$ 에서 크게 차이를 나타내지 않음을 알 수 있다.

지반의 교란상태는 15kg/cm^2 의 주입압에서 $6\sim 12\text{kg/cm}^2$ 보다 안정된 상태를 보이는 데, 이는 천공으로 인하여 이완된 지반이 주입압에 의해 천공부 외측으로 변위 되어 밀한 상태로 된 것으로 판단 된다.

그러나 과도한 주입압은 지반의 수압파쇄를 야기하므로 지반의 상태를 고려한 적절한 주입압의 선정은 차후 많은 현장실험과 계측을 통하여 연구를 해야 할 부분으로 사료 된다.

(5) 본 해석은 토사 지반을 대상으로 modeling 되었으므로, 암반층에 네일이 거치될 경우는 침투 메카니즘의 차이로 인하여, 해석모델의 수정이 program 특성상 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 천병식, 임해식, “쏘일 네일링”, 유림 출판사, 1998. 6
2. 대한주택공사, “쏘일네일로 보강된 벽체구조물의 설계 및 시공기법”, 주택연구소 97-49, 1997. 10
3. 건설교통부, “건설공사의 안전시공을 위한 지반보강 신기술 개발 및 실용화 연구 - 마이크로시멘트 및 실리카졸을 중심으로”, 쌍용 양회공업(주), 한양대학교, 1996. 10
4. Kleyner, I. and Krizek, R. J., “Mathematical Model for Bore-Injected Cement Grout Installations”, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 121, No. 11, pp. 782~778
5. Kleyner, I., Krizek, R. J. and Pepper, S. F., “Influence of Grout Pressure on Capacity Of Bore-Injected Piles and Anchors”, Proc. of the International Conference on Grouting in Rock and Concrete, Salzburg, Austria, pp. 159~165
6. Stephanie Perret, Gerard Ballivy, Kamal Khayat, And Thameur Mnif, “Injectability of Fine Sand With Cement-Based Grout”, Grouting, Geotechnical Special Publication No. 66, pp. 289~305
7. Juran, I., “Nailed-Soil Retaining Structures : Design and Practice”, Soil Nailing Design and Applications, Slurry Wall Committee of Deep Foundation Institute, 1991