

벽체변위를 고려한 Soil Nailing 공법의 안정해석 Stability Analysis of Soil Nailing System with Wall Displacements

김홍택¹⁾, HONG-TAEK KIM
강인규²⁾, IN-KYU KANG
성한재³⁾, AN-JAE SUNG

¹⁾홍익대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Hong-ik University
²⁾홍익대학교 과학기술연구소 연구원, Researcher, Research Institute for Science & Technology, Hong-ik University
³⁾(주) 동아지질 과장, Manager, Dong-A Geological Engineering Co., LTD.

SYNOPSIS : An analytical procedure is described to estimate the mobilized tensile forces along the effective lengths of nails. Based on the horizontal facing displacements of a nailed-soil wall experiencing outward tilt about the toe with granular soil deposit, the variation of nail-soil friction coefficient is modeled. Also, the method of overall stability analysis of a nailed-soil wall is presented using the Morgenstern-Price limit-equilibrium slice method. The results predicted by the developed procedure are compared with test measurements. The comparisons show in general good agreement.

1. 서론

Soil Nailing은 NATM(New Austrian Tunnelling Method)과 유사한 지반보강공법으로, 사면보강 및 굴착면에 대한 유연한 지보 등의 목적으로, 유럽 및 미국지역에서 널리 활용되고 있다. nailed-soil 토류구조물의 주된 구조적 요소는, 원지반(in-situ ground), 저항력을 발휘하는 보강재(driven nail 또는 grouted nail) 및 전면판(shotcrete facing, concrete 또는 steel panel) 등이다. Soil Nailing은 기본적으로, 보강재를 프리스트레싱 없이 비교적 촘촘한 간격으로 원지반에 삽입하여, 원지반 자체의 전체적인 전단강도를 증대시키고, 또한 공사도중 및 완료후에 예상되는 지반의 변위를 가능한 억제하는 공법이다. 특히 굴착지보의 경우, 다른 공법들(massive 콘크리트 벽체, 임시말뚝 벽체, 현장타설 슬러리 벽체 등)과 비교할 때, Soil Nailing 공법은 몇가지 상대적인 장점(저렴한 공사비, 경량의 시공장비, 현장여건 및 지반조건의 적용성, 유연성 등)을 지니고 있으며, 동적하중의 경우에도 과다한 변위 없이 저항능력을 충분히 발휘하는 것으로 Gassler-Gudehus는 보고한 바 있다.

nailed-soil 굴착벽체의 경우, 벽체전면부(facing)의 지반변위는 지표면에 가까운 상단부에서 가장 크게 발생되고 벽체하단부 쪽으로 내려갈수록 점차 감소하는 현상을, 또한 벽체전면에서 거리가 멀어질수록 변위는 점차 줄어드는 현상을 보이고 있으며, 각 깊이에서의 발생변위는 굴착이 진행됨에 따라 점차 커지는 현상을 나타내고 있다. 이와같은 변위의 변화형태는 top-down 방식의 시공과정과 관련이 있으며 결과적으로는, 각 nail을 따라 축방향으로 발휘되는 최대인장력의 깊이별 분포에 있어, bottom-up 시공 방식의 일반 보강토 토류벽체의 경우와는 달리, 벽체 상단부에 설치된 nail에서는 큰 인장력이 하단부 nail에서는 작은 인장력이 발휘되는 특성을 지니게 된다. nailed-soil 벽체의 이와같은 거동적 특성은 여러 연구자들(Shen, Cartier-Gigan 및 Juran 등)의 다양

한 실험 및 제측자료를 통해 이미 입증된 결과이며 따라서 실무에서는, 현장인발시험을 실시해 다음 단계의 굴착시공에 앞서 기 설계된 내용을 일부 수정하거나 또는 안전측에서 최하단 nail의 인장력을 무시하는 방식에 의해 이와같은 거동특성을 당초 설계에 근사적으로 반영하기도 한다.

본 연구에서는, 벽체전면부에서 발생하는 수평변위의 크기를 토대로, nail 주변에서 발휘되는 사질토지반의 전단강도를 변화시켜 벽체의 다양한 회전이동단계에서 각 nail의 축방향 인장력을 예측하는 수학적 모델을 제시하였다. 또한 사면안정해석에 적용되는 Morgenstern-Price 절편법을 응용하여 힘의 평형조건 및 모멘트 평형조건을 모두 고려하는 nailed-soil 벽체의 안정해석법 제시가 이루어 졌다. 아울러 제시된 모델 및 안정해석법의 적합성 검토를 위해 실제측정결과와의 비교가 이루어 졌다.

2. 안정해석법

2.1 힘의 평형조건

그림1에 표시된 파괴흙썩기 내부 임의의 절편 k에 대해, nail에 직각된 방향으로 작용하는 모든 힘들의 평형조건식을 세우면,

$$(E_{1k} - E_{2k}) + W_k \cos \epsilon - S_k \sin(\beta_k + \epsilon) - N_k \cos(\beta_k + \epsilon) = 0 \quad \dots \dots (1)$$

여기서, $S_k = \frac{1}{FS} (c_k + (N_k - U_k) \tan \phi)$.

또한 파괴흙썩기를 구성하는 모든 절편에 대해 식(1)을 확대 적용하고, 조건식 $\sum_{k=1}^n (E_{1k} - E_{2k}) = \sum_{k=1}^n (X_{1k} - X_{2k}) = 0$ 을 토대로 힘

의 평형조건에 대한 안전율 FS_f 계산식을 유도하면 다음과 같다.

$$FS_f = \frac{\sum (c l_k + (N_k - U_k) \tan \phi)}{\sum W_k \sin \beta_k + \sum (X_{tk} - X_{bk}) \cos(\beta_k + \epsilon) - \sum T_k \cos(\beta_k + \epsilon)} \quad \dots (2)$$

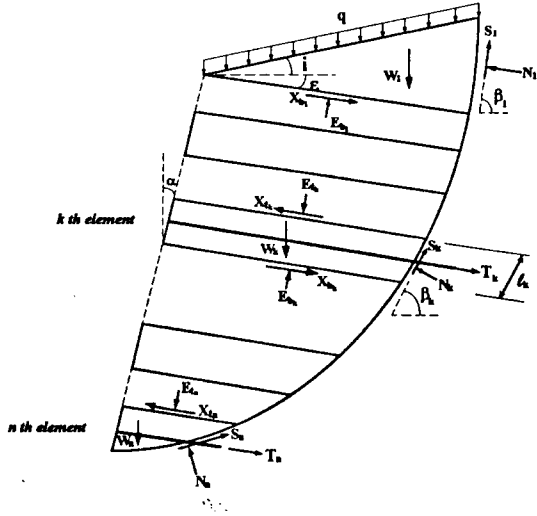


그림1. 파괴흙썰기에 작용하는 힘들

식(2)에 포함된, 각 절편 파괴면에 수직되게 작용하는 반력 N_k 의 계산식은 nail의 축방향으로 작용하는 힘들의 평형조건식을 토대로 유도되며, 이를 정리하면 다음과 같다.

$$N_k = \frac{(X_{tk} - X_{bk}) + W_k \sin \epsilon + \frac{1}{FS} (c l_k - U_k \tan \phi) \cos(\beta_k + \epsilon) + \sum T_k}{\sin(\beta_k + \epsilon) - \frac{\tan \phi \cos(\beta_k + \epsilon)}{FS}} \quad \dots (3)$$

여기서 식(3)에 포함된, 각 절편 경계면을 따라 작용하는 전단력 X_k 의 크기 결정은, Morgenstern-Price가 사면안정해석에 적용한 방식 즉 전단력 X_k 와 수직력 E_k 사이의 관계를 함수 $f(x)$ 및 scaling factor λ 로 표현하는 아래의 식(4) 및 식(1)의 평형조건식을 토대로, 최상단에 위치한 첫번째 절편으로부터 아래쪽으로 순차적으로 이루어진다.

$$X_k = \lambda f(x) E_k \quad \dots (4)$$

2.2 모멘트 평형조건

대수나선으로 가정된 파괴면을 토대로, nail로 보강된 벽체의 기하학적 조건을 극좌표계를 이용해 표시한 다음, 파괴흙썰기 자체 중량에 의해 예상되는 활동모멘트 M_a 의 계산식이 유도된다. 또한 이에 대응하는 저항모멘트 M_r 은 nail의 축방향 인장력에 의해 유발되어진다.

2.3 nail의 축방향 인장력

식(2) 및 (3)에 포함된 nail의 축방향 인장력 T_k 는 파괴면 바깥쪽에 위치하는 nail의 길이 즉, 유효길이 l_k 에 한해 주변흙과의 마찰을 토대로 결정된다. 본 연구에서는 T_k 의 계산에 관련된 즉, 유효길이 l_k 의 축방향을 따라 발휘되는 nail 주변흙의 전단강도를, 벽체전면부 수평변위와 직접적인 비례관계로 가정하였다(그림2). 벽체가 최하단을 중심으로 회전이동하는 경우, 최상단에 위치한 흙입자가 소성상태($\psi = \phi$)에 이미 도달하고 또한 이와같은 소성상태가 벽체의 추가적인 이동에 따라 아래쪽 지반으로 점차 확대되는 탄소성상태에 한해서, $\psi(z, l)$ 의 변화를 정의하는 관계식을 제시하면 다음과 같다.

i) $0 \leq z \leq (\beta-1)H$; 소성영역

① $(L - l_k \frac{\phi}{\psi_{zk}}) \leq l \leq L$ 인 경우

$$\psi(z, l) = \phi(\beta - z/H) \cdot \frac{L-l}{l_k} \quad \dots (5)$$

② $0 \leq l \leq (L - l_k \frac{\phi}{\psi_{zk}})$ 인 경우

$$\psi(z, l) = \phi$$

ii) $(\beta-1)H \leq z \leq H$; 탄성영역

① $(L - l_k) \leq l \leq L$ 인 경우

$$\psi(z, l) = \phi(\beta - z/H) \cdot \frac{L-l}{l_k} \quad \dots (6)$$

② $0 \leq l \leq (L - l_k)$ 인 경우

$$\psi(z, l) = \psi_{zk}$$

여기서, $\psi_{zk} = \phi(\beta - z/H)$

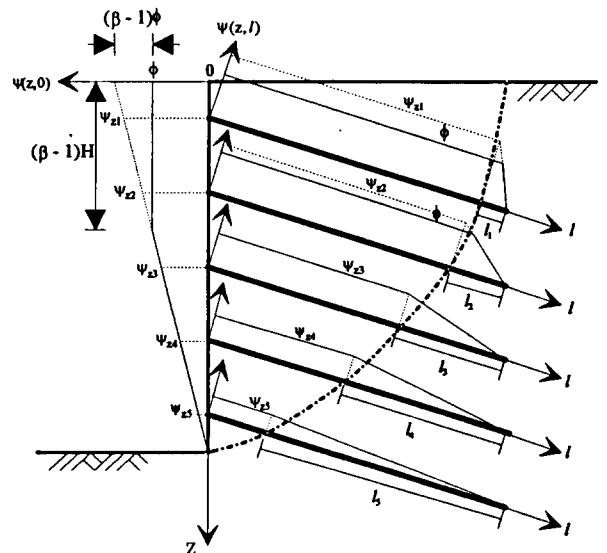


그림2. 벽체수평변위에 따른 nail 주변흙의 전단강도변화 모델

2.4 해석절차

nailed-soil 벽체의 전체안전을 FS 는 힘의 평형조건에 대한 안전율 FS_y 와 모멘트 평형조건에 대한 안전율 FS_m 이 같아지는 조건 ($FS = FS_y = FS_m$)으로 정의된다. 임의의 활동면은 그림3과 같이 각도 z 와 t 에 의해 결정되며, 임의의 활동면에 대한 전체안전을 FS 는 scaling factor λ 값을 변화시켜 조건식 $f(\lambda) = FS_m - FS_y = 0$ 을 충족시키는 λ 값을 계산하여 결정한다. 이를 위해 본 해석법에서는 bisection method를 적용하였으며, 계속해서 각도 z 및 t 를 변화시켜 최종적으로 전체안전을 FS 의 최소값 $FS_{(min)}$ 을 결정하며, 이때의 활동면이 예상되는 파괴면이 된다.

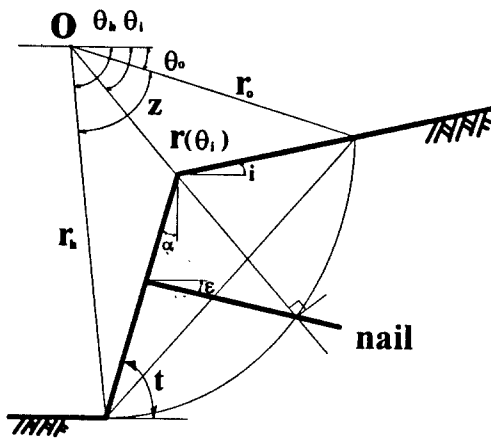


그림3. 각도 z 및 t 의 변화

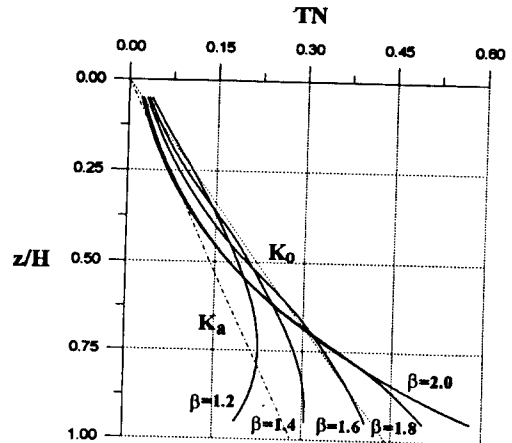


그림4. 벽체의 회전이동단계에 따른 T_k 의 변화

표 1. 분석에 적용된 nail의 제원 및 지반조건

지반조건	단위중량, $\gamma = 1.8 \text{ t/m}^3$ 내부마찰각, $\phi = 34^\circ$ 점착력, $c = 0$
nail	철근직경, $D_{bar} = 26 \text{ mm}$ 천공직경, $D_{hole} = 10 \text{ cm}$ nail의 항복강도, $\sigma_y = 3600 \text{ kg/cm}^2$ nail의 삽입각도, $\epsilon = 10^\circ$ 수평, 수직 설치간격, $S_H = S_v = 1 \text{ m}$
구조물 형상	벽체의 높이, $H = 10 \text{ m}$ nail의 길이, $L = 8 \text{ m}$ 벽체의 경사, $\alpha = 0^\circ$ 뒷채움경사, $i = 0^\circ$

3. 분석 및 고찰

3.1 분석

본 분석에서는 nailed-soil 벽체의 다양한 이동단계($1.0 \leq \beta \leq 2.0$, 그림2 참조)에서 예상되는 각 nail의 축방향 인장력 T_k 를 무차원화 하여 ($TN = \frac{T_k}{\gamma \cdot H \cdot S_H \cdot S_v}$); TN 의 깊이별 변화를 살펴 보았

다. 본 연구 제시방법을 토대로 얻어진 결과는 그림4에 도시되어 있으며, 적용된 nail의 제원 및 지반조건 등은 표1과 같다. 그림4의 결과를 살펴보면, 소성영역이 지반 아래쪽으로 점차 확대됨에 따라 (β 값이 증가함에 따라), 특히 벽체 중하단부 nail의 축방향 인장력이 급격히 커짐을 알 수 있다. 또한 상단부 nail의 인장력이 β 값의 증가에 따라 다소 작아지는 이유는, 최소안전을 파괴면의 위치변동에 따라 즉, 파괴회색기가 커짐에 따라 유효깊이가 감소하는데 원인이 있다.

3.2 측정결과와의 비교

Cartier & Gigan은 높이 $H=5.6\text{m}$ 의 nailed-soil 벽체를 현장에 직접 시공하고 계측을 실시하였으며, 이를 통해 깊이별 최대인장력의 크기 측정 및 파괴면의 위치확인 등이 이루어 졌다. 시공에 적용된 nail의 제원 및 지반조건 등은 표2와 같다.

표 2. 시공된 nail의 제원 및 지반조건

지반조건	단위중량, $\gamma = 2.0 \text{ t/m}^3$ 내부마찰각, $\phi = 33^\circ$ 점착력, $c = 0$
nail	철근직경, $D_{bar} = 26 \text{ mm}$ 천공직경, $D_{hole} = 10 \text{ cm}$ nail의 항복강도, $\sigma_y = 3600 \text{ kg/cm}^2$ nail의 삽입각도, $\epsilon = 20^\circ$ 수평, 수직 설치간격, $S_H = S_v = 0.7 \text{ m}$
구조물 형상	벽체의 높이, $H = 5.6 \text{ m}$ nail의 길이, $L = 5.5 \text{ m}$ 벽체의 경사, $\alpha = 0^\circ$ 뒷채움경사, $i = 0^\circ$

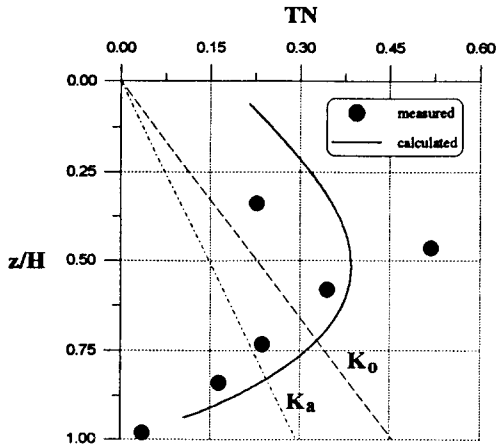


그림5. 측정결과와의 비교

측정된 각 nail의 축방향 최대인장력 T_k 의 깊이별 변화를 살펴보면, 일반 보강토벽체의 경우와는 달리 벽체 중앙부 아래쪽으로 발휘되는 T_k 의 크기가 점차 감소하는 즉, 전체적인 분포형상이 포물선에 가까운 현상을 나타내고 있다(그림5). 이는 그라우팅에 따른 지반층의 재다짐, 또한 시공과정의 근본적인 차이가 벽체 전면부 변위형태에 미치는 영향 등에 주요 원인이 있는 것으로 판단된다.

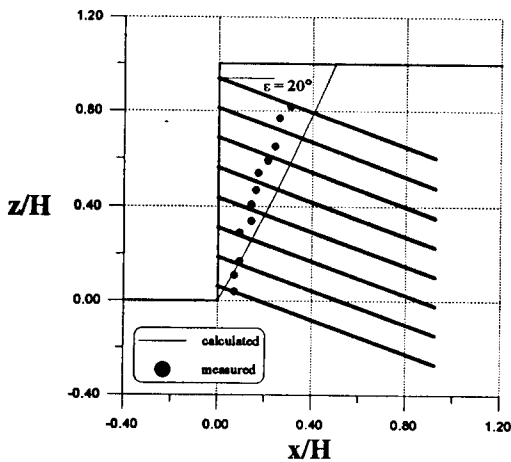


그림6. 측정결과와의 파괴면 위치비교

측정된 최대인장력 T_k 를 무차원화 하여 $(TN = \frac{T_k}{\gamma \cdot H \cdot S_H \cdot S_V})$,

본 연구 해석법에 의한 계산치($\beta=1.0$ 인 회전이동관계)와 서로 비교한 결과는 그림5와 같다. 그림5에 따르면 본 연구의 계산치는, 벽체 중앙부근을 제외하고는 대체적으로 측정치와 잘 부합되는 경향을 보이고 있다. 벽체 중앙부근에서 측정된 T_k 값이 본 연구 계산치 보다 큰 이유는, Cartier & Gigan이 full-scale 인발시험

을 통해 이미 밝힌대로, nail-주변층 사이에서 실제적으로 발휘되는 마찰계수 μ 값이 본 연구 해석법에 적용되는 마찰계수의 최대치 즉, $\mu = \tan \phi$ (ϕ =지반층의 내부마찰각) 보다 크게 측정되는 현상을 통해 부분적으로 설명 가능하다.

또한 본 연구 안정해석법 최소안전율에 해당되는 대수나선 파괴면의 위치를 살펴보면, 벽체 하단부근에서는 Cartier & Gigan의 측정결과(각 nail의 파괴지점)와 거의 일치하나, 전체적으로 볼 때 본 연구 파괴효율의 크기가 측정결과에 비해 다소 크게 평가됨을 그림6을 통해 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는, nailed-soil 벽체의 다양한 회전이동 단계에서 예상되는 각 nail의 축방향 인장력을 결정하기 위해, 벽체전면부 수평발생변위의 크기를 토대로 nail-주변 사질토지반 사이의 마찰계수변화를 예측하기 위한 모델을 제시하였다. 또한 Morgenstern-Price 절편법을 응용하여 힘의 평형조건 및 모멘트 평형조건을 모두 고려하는 nailed-soil 벽체의 전체적인 안정해석법 제시가 이루어 졌다. 최종적으로 실제측정결과와의 비교를 통해, 본 연구 제시 모델 및 안정해석법에 대한 부분적인 적합성 확인이 이루어 졌다.

5. 참고문헌

- (1) Anderson, M.G. and Richards, K.S.(1987), Slope Stability, John Wiley & Sons.
- (2) Juran, I., Baudrand, G., Farrag, K., and Elias, V.(1990), "Kinematical Limit Analysis for Design of Soil-Nailed Structure," Journal of Geotech. Eng., ASCE, pp.54-72.
- (3) Cartier, G. and Gigan, J.P.(1983), "Experiments and Observations on Soil Nailing Structures", Proceeding of the VIII Conference of the ECSMFE., Helsinki, Finland, pp.473-476.
- (4) Beech, J., Delaure, E., and Juran, I.(1984), "Experimental Study of the Behaviour of Nailed Soil Retaining Structures on Reduced Scale Models," International Symposium on In-situ Soil and Rock Reinforcement, pp.309-314.
- (5) Juran, I and Elias, V.(1990), "Behaviour and Working Stress Design of Soil Nailed Retaining Structures," Performance of Reinforced Soil Structures, British Geotechnical Society, Thomas Telford, pp.207-212.