

붕괴사면보강을 위한 Soil Nailing의 적용성에 관한 연구

Study of Soil Nailing Application as a Reinforcement Method for Slided Slope

이성철¹⁾, Sung-Chul Lee, 김명학²⁾, Myung-Hak Kim

인제대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Inje Univ.

인제대학교 공과대학 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Inje Univ.

SYNOPSIS : Soil nailing is in-situ ground improvement technique of reinforcing soils using passive inclusions for the purpose of slope stability. Also soil nailing, in general, was used and studied as a reinforcement technique at cut slope, but this paper presents the results of study for soil nailing application as a reinforcement technique at the banking over slided slope. In-situ pull-out tests of nails, instrumented with strain gauges, were performed to investigate the maximum pull-out load and to calculate the unit side resistance in each different layer. And the apparent average unit side resistance of this study was compared with that of other sites installed at cut slope.

Key Words : soil nailing, nail, slided slope, unit side resistance, pull-out test

1. 서론

급경사지에 대한 적극적 대책 방법 중 현장에 대한 적용성이 용이한 Soil Nailing 공법에 대한 관심이 증대되고 있다. Soil Nailing에 의한 급경사면 보강방법은 기존 지반의 강도를 유지하면서 인장응력, 전단응력 및 휨모멘트에 저항할 수 있는 Nail을 프리스트레싱 없이 촘촘한 간격으로 삽입함으로써 원지반의 전체적인 전단강도의 증대 및 이에 따른 발생변위를 억제하여 굴착공사 도중 및 완료후 사면파괴에 대한 안정성을 향상시키는 현장지반 보강공법의 일종이다(김홍택, 1993). Soil Nailing이 가지는 이러한 특성은 이미 붕괴된 사면의 보강에 대해서도 높은 안정성의 확보와 적용성을 발휘하여 뛰어난 보강효과를 기대할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 최근에 급경사지의 보강을 목적으로 활발히 연구되고 있는 Soil Nailing에 대해서 올바른 설계방법의 고찰과 아직 우리나라에서 찾아보기 힘든 사례로서 이미 붕괴된 사면을 재성토한후에 보강공법으로서 Soil Nailing 공법을 적용시켰을 때 그에 대한 효과를 연구하였다. 변형율계(strain gauge)를 부착한 Nail을 현장에 시공하여 인발시험을 통해 지중에 설치된 Soil Nailing의 최대인발력 및 하중전이를 깊이별로 확인하여 최대주면마찰력을 구해 성토지반에서의 흙과 Nail의 상호 마찰특성을 알아보았다.

2. Soil Nailing 설계방법의 이론적 배경

2.1 최대 단위 주면마찰력의 산정

Soil Nailing의 시공방법이 타당한지, Soil Nailing이 설계하중을 잘 견디는지 등을 검토하기 위해 현장 인발시험을 수행하고 현장 인발시험을 통해 최대 단위 주면마찰력을 산정할 수 있다(이송 외, 1999).

$$q = \frac{T_l}{\pi D L_s} \quad (1)$$

여기서, q 는 단위 최대 주면마찰력, T_l 는 최대 인발력, D 는 보강재 지름, L_s 는 유효 그라우트 길이이다.

2.2 프랑스방법

Schlosser(1991)에 의해 제시된 사면안정해석 접근방법으로 보강토체를 합성요소로 다루고 있으며, 다음의 네가지 파괴기준을 따라 그 Nail이 발휘하는 힘을 평가하게 된다.

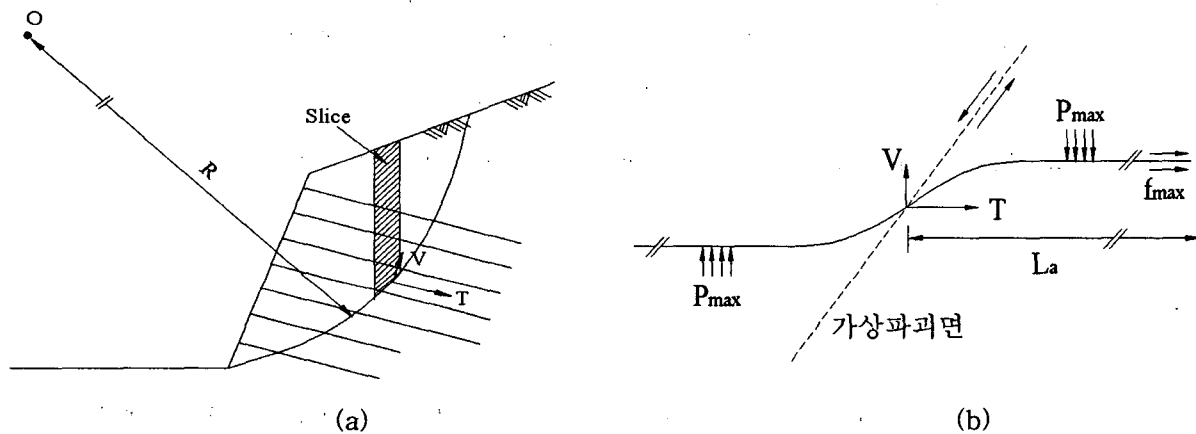


그림 1. 프랑스 설계 방법 (Schlosser, 1991)

(1) 흙의 전단저항

흙의 전단저항력은 Mohr-Coulomb 파괴곡선에서 나오는 ϕ , c 를 이용하여 구한다.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2)$$

여기서, τ 는 흙의 전단응력, c 는 점착력, σ 는 압축응력, ϕ 는 내부마찰각이다.

(2) 흙-보강재의 마찰

흙-Nail사이의 최대 마찰력 (limit skin friction) f_{max} 가 보강재의 유효길이(L_s)전반에 걸쳐 일정한 값

을 갖는다고 가정하여 작용되는 인발력이 인발저항력을 넘을 수 없도록 설계한다.

$$T_m < \pi D L_a f_{\max} = T_{pi} \quad (3)$$

여기서, T_m 은 작용되는 인발력, D 는 보강재의 직경, L_a 는 가상 파괴면 뒤쪽(수동영역)에 매입된 Nail의 유효길이, f_{\max} 는 흙-보강재 사이의 최대마찰력, T_{pi} 는 인발 저항력이다.

(3) 흙과 보강재 사이의 수직방향 상호작용

흙과 Nail의 상호작용에 대한 해석은 횡방향 하중을 받는 말뚝의 저항력을 구하는 것과 유사하다. 보강재에 작용하는 수직응력은 지반의 최대 수동저항 지지력보다 작아야 한다. Nail에 일어나는 휨모멘트와 전단력은 허용치보다 크면 Nail이 파괴된다.

Nail에서 일어나는 최대 전단력과 최대모멘트는 각각 파괴면과 Nail이 만나는 지점과 이 지점에서 $\pi/2L_o$ 정도 떨어진 지점에서 발생한다.

$$V_o = p \frac{D}{2} L_o \quad (p < p_{lim}) \quad (4)$$

$$M_{\max} = 0.16 p D L_o^2 < M_p \quad (5)$$

$$L_o = \left(\frac{4EI}{K_h D} \right)^{0.25} \quad (6)$$

여기서, V_o 는 Nail과 파괴면과의 교점 o에서 작용하는 최대전단력, p 는 보강재에 작용하는 수동토압, p_{lim} 는 보강재에 작용하는 수동토압의 상한값, L_o 는 특성장, M_{\max} 는 점 o에서 $(\pi/4)L_o$ 만큼 떨어진 곳에서의 최대 휨모멘트, M_p 는 보강재의 한계 휨 저항모멘트, E 는 Nail의 탄성계수, I 는 Nail의 단면 이차모멘트, K_h 는 지반의 수평반력계수이다.

(4) 보강재의 강도

데이비스(Shen at al, 1982)나 독일 방법(Stocker, 1979)과는 달리 보강재는 인장력(T)뿐만 아니라 전단력(V)에도 저항하므로 이때의 설계 양상은 Nail 부재가 Tresca 파괴양상을 고려하면서 Nail에 발생하는 응력에 대해 Mohr 원의 해석에서 유도되는데, 임계활동면과 Nail사이의 상대각도가 만일 직각이면 전단력만 발휘된다.

$$\frac{T^2}{R_n^2} + \frac{V^2}{R_c^2} < 1 \quad (7)$$

$$V_f = \frac{R_c}{\left[1 + 4 \tan^2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

$$T_f = 4V_f \tan \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \quad (9)$$

여기서, R_n 는 보강재의 인장강도, R_c 는 보강재의 전단강도 ($R_c = R_n/2$), V_f 는 파괴시 보강재에 발휘되는 인장력, T_f 는 파괴시 보강재에 발휘되는 전단력, α 는 보강재와 파괴면이 이루는 각이다.

3. 현장실험방법

붕괴된 성토사면에 재성토한후 보강공법으로 Soil Nailing을 시공했을 때, 성토지반과 Soil Nailing의 상호작용과 안정성검토, 또한 Soil Nailing 공법의 성토사면에서의 적용이 적절한 것인지 판단하기 위하여 실제 붕괴된 성토사면을 재성토한 사면에서 현장인발실험을 실시하였다.

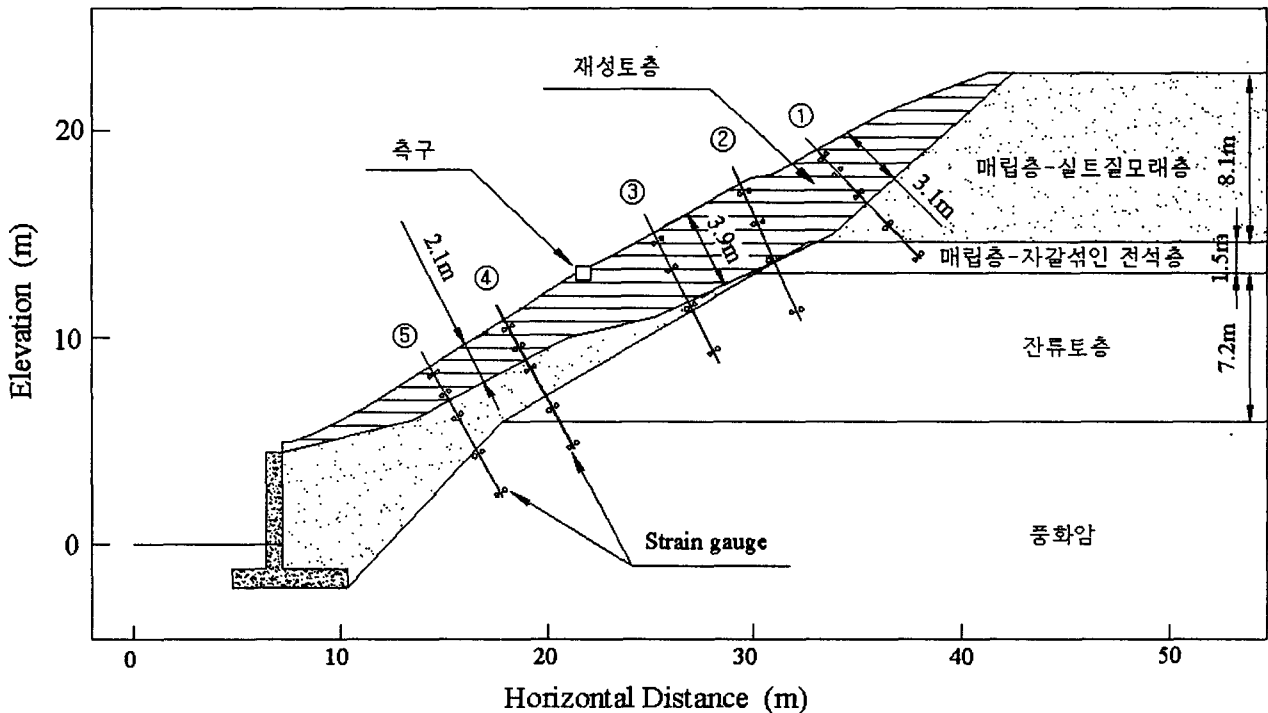


그림 2. 시험구간 단면도

그림 2에서 표시된 바와 같이 현장인발실험은 재성토한 붕괴사면중에서 재성토층이 가장 두꺼운 단면을 선택하여 5개소에서 실시하였고, Nail은 8 m 길이의 32 mm 철근을 사용하였고 천공지름은 130 mm, 물/시멘트비 45 %의 Grout를 사용하였다.

현장인발실험시 Nail에서의 하중전이를 파악하기 위하여 각 Nail에 적당한 간격으로 strain gauge를 설치하였는데. ①, ④, ⑤번 Nail은 지표면으로부터 0.5 m, 1.5 m, 3.0 m, 5.0 m, 7.0 m의 5군데 지점에, ②, ③번 Nail은 지표면으로부터 0.5 m, 2.0 m, 4.0 m, 6.5 m의 4군데 지점에 strain gauge를 설치하였다. Nail의 각 지점마다 180° 방향으로 두 개의 active strain gauge를 부착시켰다.

인발시험은 하중재하 및 제하 단계를 반복하며 최대인발하중이 발휘되는 시점까지 재하 하였고 각 하중단계에서 일정한 시간동안 하중을 유지하는 하중제어방식으로 실시하였다. Strain gauge의 변위값은 각 하중단계마다 1분, 2분, 3분, 5분의 시간간격을 두고 기록하였고 Nail의 인발량을 알아보기 위해서 Nail 두부에 dial gauge를 설치하여 그 값을 매 하중단계마다 기록하였다.

표 1. 보강재의 제원

Nail 길이	천공지름	철근지름	탄성계수 (E)	그라우트의 물/시멘트비(w/c)	그라우트의 28일 압축강도
8.0m (근입길이: 7.15m)	130mm	32mm	2.04×10^6 kg/cm ²	45%	230 kg/cm ²

4. 현장시험결과분석

지반물성치는 표 2에 표시하였다. 재성토지반의 평균다짐도는 95%이었고 다짐 후 재성토지반의 단위 중량은 1.99 t/m³, 통일분류법으로는 SM으로 분류되었다. 재성토지반의 압축강도는 0.41 kg/cm²이었으며 탄성계수는 16.88 kg/cm²이었다.

4.1 하중-인발량 관계

그림 3의 하중-인발량 관계곡선에서 보는 바와 같이 각 Nail은 하중 10 ton까지는 대체로 인발량이 탄성변형거동을 보였고 그 이상의 하중에서는 조금씩 소성변형거동을 보였다. 접선교차법에 의한 항복하중은 10-22 ton으로 추정되었다. 인발량은 과도한 지지지반 침하가 발생한 1번 Nail을 제외한 나머지 Nail에서는 10-17 mm까지 발생하였는데, 이는 현장의 지반조건이 유실성토사면상부에 재성토를 하고 다짐을 하여 재성토층의 두께가 각각 다르기 때문이라 판단되었다.

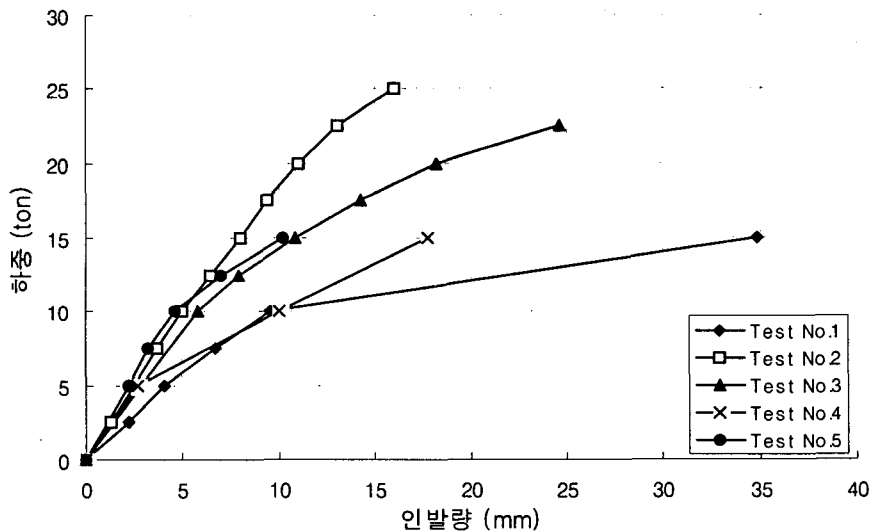


그림 3. 하중-인발량 관계 곡선

4.2 하중전이와 층별 평균 주면마찰력

그림 4에서 나타난 바와 같이 인발시험을 통하여 Nail이 지반에 묻힌 깊이에 따라 Nail에 작용하는 하중이 점차 감소하는 일반적인 하중전이의 양상을 볼 수 있었으며, Nail의 끝단(약 7 m이후)에서는 하중 전이가 거의 나타나지 않았다. 그림 4의 하중전이 곡선으로부터 각 Nail의 깊이별 평균 주면마찰력을

계산하여 그림 5에 나타내었다. 원지반인 잔류토층의 평균 주면마찰력은 0.8-0.9 kg/cm², 풍화암층은 0.5-0.8 kg/cm² 나타났고, 유실전 성토층인 매립층은 0.3-0.5 kg/cm² 재성토층은 0.3-1.5 kg/cm² 까지 계산되어 재성토층의 층별 다짐이 일정하지 않았음을 확인할 수 있었다.

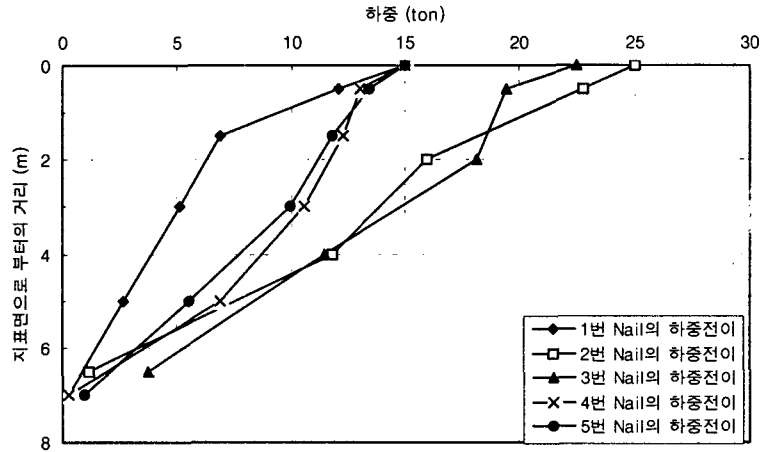


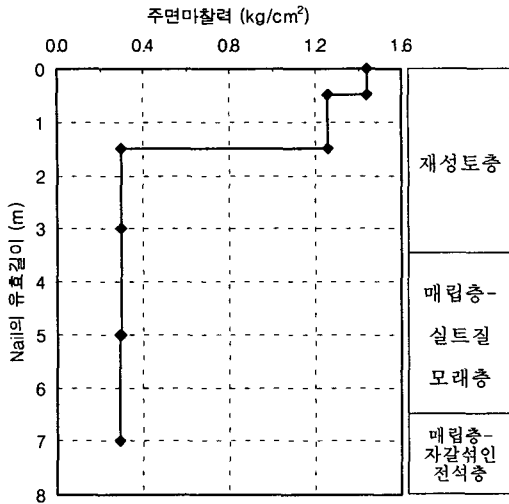
그림 4. 하중전이 곡선

4.3 성토지반과 절토지반에서의 비교

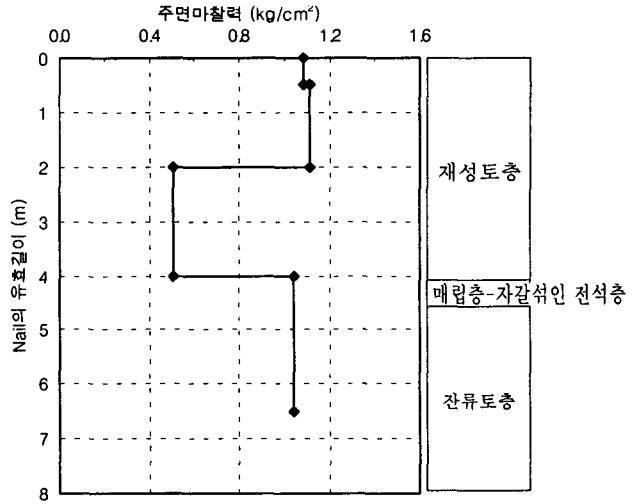
그림 3에서 최대인발하중을 추정하여 보았다. 추정되는 최대인발하중은 15-25 ton까지 였고 최대 겘보기 단위주면마찰력은 0.51-0.96 kg/cm² 정도로 나타났으며 이때의 최대 Nail 인발량은 15-25 mm로 나타났다. 여기서 구해진 최대 겘보기 단위주면마찰력의 평균 값은 0.71 kg/cm²이었는데 이것은 사례 1. Y지역 사면 보강공사 Nail 인발시험 결과 보고서(동아지질, 1998)에서 나타난 최대 겘보기 단위주면마찰력 1.99 kg/cm²보다 작게 나타났으며 또한 표 3에 나타난 바와 같이 지반 조건이 비슷한 사례 2. (이송 etal, 1999)의 현장인발시험으로 나타난 최대 겘보기 주면마찰력 1.35 kg/cm²보다 작게 나타났다. 그러므로 붕괴사면에 성토 후 Soil Nailing을 시공했을 때는 일반 절토사면에서 Soil Nailing을 시공했을 때 보다 겘보기 단위주면마찰력이 적게 발휘되는 것으로 판단된다. 그러나 설계인발력 10 ton과 설계 주면마찰력 0.36 kg/cm²보다는 인발력에서는 1.5-2.5배, 주면마찰력에서는 1.4-2.6배 정도 크게 나타남을 알 수 있다.

표 2. 지반물성치

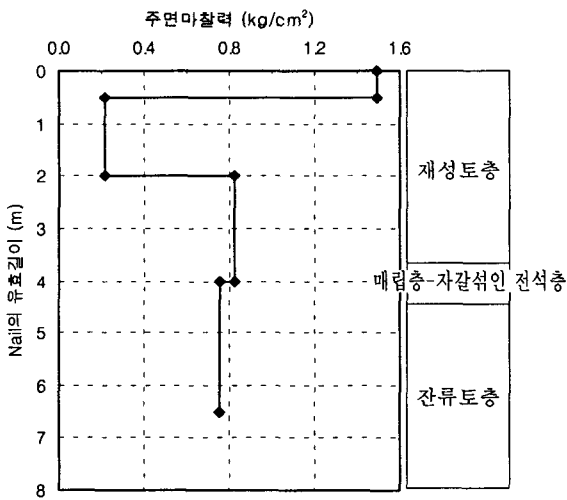
	토 층		단위중량 (γ_t , t/m ³)	점착력 (c, t/m ²)	내부마찰각 (ϕ , °)
	매립층	원지반			
성토 지반		실트질모래층	1.8~1.9	0.5	22~34
		자갈섞인 전석층	1.9	0	45
		잔류토층	1.9	0.5	30~40
	재성토지반	실트질모래층	1.99	0.3	25
절토 지반	퇴 적 토		1.9	0.1	28



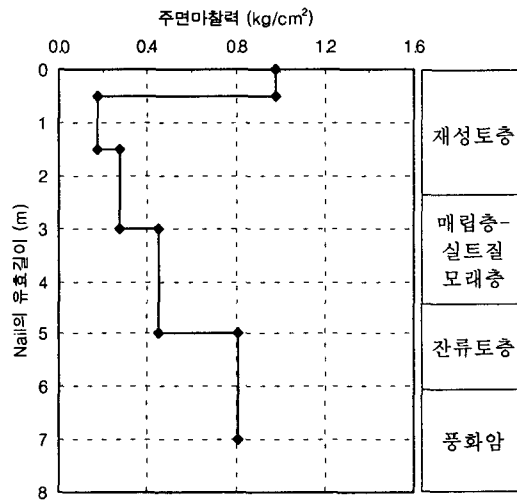
(a) ①번 Nail에 15ton 재하시



(b) ②번 Nail에 25ton 재하시



(c) ③번 Nail에 22.5ton 재하시



(d) ④번 Nail에 15ton 재하시

그림 5. 각 지층에서 발휘된 평균 주면마찰력

표 3. 길보기 주면마찰력 비교

사례	그라우트 길이(cm)	천공직경(cm)	최대인발력(kg)	길보기 주면마찰력(kg/cm ³)
본 연구 (평균)	715	13	20600	0.71
사례 1	400	10	25000	1.99
사례 2 (평균)	300	10	15033	1.59

6. 결론

본 논문은 붕괴된 성토사면을 재성토한후 보강공법으로 시공된 Soil Nail에 정규화된 현장인발시험을 실시하였고, 깊이별로 설치한 Strain gauge를 이용하여 하중전이곡선을 구해 층별 주면마찰력을 수해 일반적 시공방법인 절토사면에 시공된 Soil Nailing에서 구한 주면마찰력과 비교 연구하였다. 이에 연구 결과는 다음과 같다.

1. 현장 인발시험으로 구한 최대 인발하중은 15-25 ton, 인발량은 10-25 mm까지 발생하였다. 이는 현장의 지반조건이 붕괴유실된 사면상부에 재성토를 하고 다짐을 하여 재성토층의 두께가 Nail의 설치 위치에 따라 각각 다르기 때문이라 판단된다.
2. 현장 인발시험으로 구한 Soil-Nail의 접촉면에서 구한 겉보기 주면마찰력은 설계시 고려한 Nail의 설계인발력 10 ton 때의 주면마찰력보다 1.4-2.6배정도 크게 나타났다.
3. Nail의 축별 하중전이거동은 하중을 가한 지점에서 최대, 끝단으로 갈수록 감소하는 일반적인 하중전이거동을 보였지만 Nail이 설치된 층별로 많은 변화를 보였고 Nail의 끝단에서는 하중전이가 거의 일어나지 않았다.
4. 현장 인발시험으로 구한 Soil-Nail의 접촉면에서 구한 최대 겉보기 주면마찰력의 평균값은 0.71 kg/cm^2 이었는데 지반조건이 비슷한 일반 절토사면에서 구한 최대 겉보기 주면마찰력의 35-50% 였다.

참고문헌

1. 김홍택, 강인규, 최인식, 순광수(1993), "Soil Nailing 공법의 적용 및 설계
2. 동아지질(1998), "양산덕계 장백아파트 사면보강공사 Nail 인발시험 결과정리", pp. 1~9.
3. 이송, 이용원, 이장덕(1999), "현장 인발시험에 의한 Soil-Nail의 상호작용에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 제19권 제III-5호, pp. 975~983.
4. Schlossor, F.(1991), "Recommendations Clouterre", Soil Nailing Recommendations, French National Research Project Report No. FHWA-SA-93-026.
5. Shen, C. K., Y. S. Kim, S. Bang, and J. F. Mitchell, "Centrifuge Modeling of Lateral Earth Support" ASCE, Vol. 108, GT9, 1982, pp. 1150~1164.