

다철근 네일의 현장인발시험 및 수치해석

Field Pull-out Test and Numerical Analysis for Multi-rebar Nail

전 상 수¹ Jeon, Sang-Soo
김 두 섭² Kim, Doo-Seop
장 양 원³ Jang, Yang-Won

Abstract

In this study, the verification test and creep test for both a single-rebar nail and a multi-rebar nail are carried out to investigate a tensile strength for both nails. The adhesion effects between a rebar and a cement grout, a mobilized frictional force induced by pull-out load, and load transfer characteristics are examined. The results obtained from the field pull-out tests and from the numerical analysis using FLAC^{2D} which is one of the programs developed based on the finite difference method are analyzed and compared for a single-rebar nail and a multi-rebar nail. The field pull-out test results for a multi-rebar nail relative to a single-rebar nail show that a tensile failure load is relatively large and the pull-out loads are well transferred to the ground in deep depth.

요 지

본 연구에서는 단철근 네일과 다철근 네일의 인장강도를 조사하기 위해 단철근과 다철근 네일의 극한인발시험과 크리프시험을 수행하였다. 철근과 시멘트 그라우트의 부착력과 인장하중에 의해 유발된 마찰력, 하중전이 특성을 조사하였다. 단철근과 다철근 네일의 현장인발시험과 유한차분해석 프로그램의 하나인 FLAC^{2D}를 이용하여 얻은 결과를 분석하고 비교하였다. 다철근 네일의 현장인발시험결과 단철근 네일에 비해 인발파괴하중이 크고 하중전이가 큼을 알 수 있다.

Keywords : Field pull-out tests, Finite difference analysis, Load transfer, Multi-rebar nail

1. 서 론

1990년대 국내 가시철 흙막이 벽체 보강에 처음으로 도입된 쏘일 네일링 공법은 NATM 공법의 록볼트 기본 개념 및 보강토, 앵커공법, 수평하중을 받는 말뚝의 보강체계와 유사하며, 쏘일 네일링으로 보강된 구조체는

주로 촘촘한 간격으로 시공된 네일과 주변 흙과의 마찰력에 의해 인장응력과 전단응력 및 휨모멘트에 저항하면서 지반 자체의 전단강도를 증가시켜 지반을 안정화시킨다.

굴착된 면이 수직에 가까울 경우 수동토압에 의해 네일에 발생하는 저항 전단력 및 휨 모멘트는 네일에 발생

1 정회원, 인제대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Inje Univ., ssj@inje.ac.kr, 교신저자)

2 상합 E&C. 대리 (Assistant Manager, Sanghap E&C)

3 인제대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Inje Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 2월 28일까지 그 내용을 회의로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

되는 축력에 비해 15% 미만으로 미미하여 기존의 일반적인 비탈면 설계나 안정해석에서는 네일의 전단 저항력 및 휨 저항력은 고려하지 않았다. 하지만, 시멘트로 그라우팅된 네일은 구조상 인장과 전단, 그리고 휨에 대한 저항력을 가진다. 지반에 보강된 네일은 토체의 파괴면 부근에서 휨 저항이 발생되며, 보강된 토체의 변형이 발생된다면 네일 또한 전단과 휨에 대한 저항이 발생하게 된다(전상수 등, 2006). 이러한 이론을 바탕으로 전상수 등(2007)은 수치해석 프로그램을 이용하여 네일의 전단저항 및 휨 저항을 증가시키기 위해 굴착공 내에 단일 철근(single-rebar)이 설치된 네일과 네 개의 철근(multi-rebar)이 설치된 네일을 지반에 시공한 후 네일의 인발거동 특성을 분석하였다.

쏘일 네일링의 인발시험에 대한 규정과 시험방법에 대한 연구는 흙과 네일의 상호거동에 대한 연구와 함께 공법에 대한 시공지침과 검사기준이 마련되면서 시작되었다. 1986년에 착수된 프랑스의 국책 연구프로젝트 Clouterre는 영구 구조물에 대한 연구와 시공기술을 개발하면서 인발시험의 기준을 구체적으로 규정하였으며, 1994년 미연방도로국에서는 쏘일 네일링 공법의 시공지침과 검사기준에 대한 연구 결과를 제시한 바 있다(이송 등, 1999).

본 연구에서는 단일 철근이 설치된 단철근 네일(single-rebar nail)과 네 개의 철근이 설치된 다철근 네일(multi-rebar nail)의 인발특성 및 지반-네일 간 마찰특성, 하중전이 특성을 분석하기 위해 미연방도로국의 검사기준에 따라 극한인발시험(Verification Test)과 크리프시험(Creep Test)을 실시하였으며, 유한차분해석 프로그램인 FLAC^{2D}를 이용하여 지반-네일 간 상호작용을 분석하였다.

2. 현장인발시험

2.1 현장인발시험 개요

현장인발시험은 경기도 곤지암 건설현장에서 극한인발시험과 크리프시험을 수행하였다. 네일 인발시험은 시험목적에 따라 극한인발시험 또는 확인인발시험(Proof

Test) 및 크리프시험으로 나눌 수 있다. 극한인발시험의 경우 실제 시공에 앞서 시험지반의 인발저항력과 시공방법의 적절성을 확인하기 위해서 실시하며 최대시험하중을 네일이 파괴되어질 때까지 실시하고 인발시험에 규정되어진 안전율을 설계하중에 곱한 하중까지 수행한다. 크리프시험은 일반적으로 설계하중의 150%까지 점진적으로 하중을 증가시키면서 네일 두부에서 발생하는 하중과 변위를 측정한다. 크리프시험은 극한인발시험과 확인인발시험의 한 부분으로 수행되어진다. 특히 크리프 변위가 크게 발생하는 일반토사나 점토지반에서 중요하다. 네일의 크리프시험은 시간 변화에 따른 네일의 장기 거동을 측정하기 위한 것이다. 크리프시험은 인발적성시험과 같이 설계하중의 일정 비율로 하중을 재하 하거나 인발시간을 더 주어 시간에 따른 크리프를 확인하는 시험이다(FHWA, 1994).

시험 네일로는 단일 철근으로 시공된 단철근 네일 1공과 네 개의 철근으로 시공된 다철근 네일 1공에 대하여 현장시험을 수행하였으며, 시공된 네일의 사양은 표 1에 나타내었다.

네일 두부에서 발생하는 하중-변위 관계를 확인하기 위해 하중계인 Load Cell과 변위계인 LVDT(linear variable differential transformer)를 설치하였다. 단철근 네일과 다철근 네일의 설계최대하중은 각각 네일 강봉(철근) 항복강도의 90% 이상의 하중인 24tonf와 29tonf 로 설정하였다. 현장시험은 극한인발시험 절차에 의해 수행되었으며, 그림 1과 같이 네일 두부에 발생하는 변위는 현장 여건에 맞도록 제작된 반력지지대와 LVDT

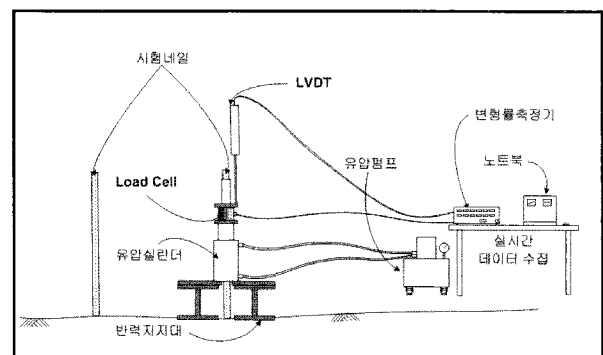
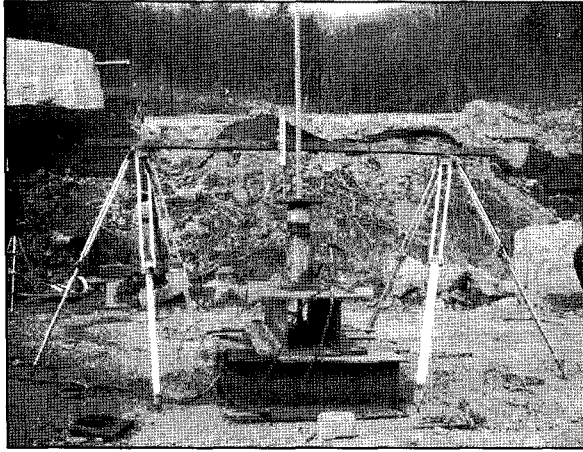


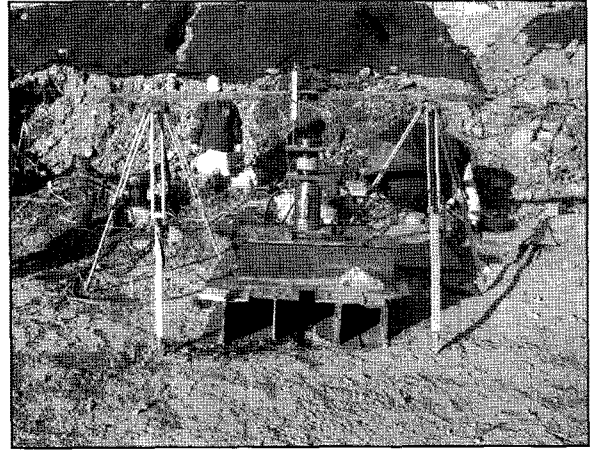
그림 1. 현장인발시험 개요도

표 1. 시험 네일 제원

종 류	길이(m)	직경(m)	강봉 종류	자유 길이(m)
단철근 네일	9.6	0.105	D29(SD40) × 1	1.2
다철근 네일	10.7	0.105	D16(SD40) × 4	1.2

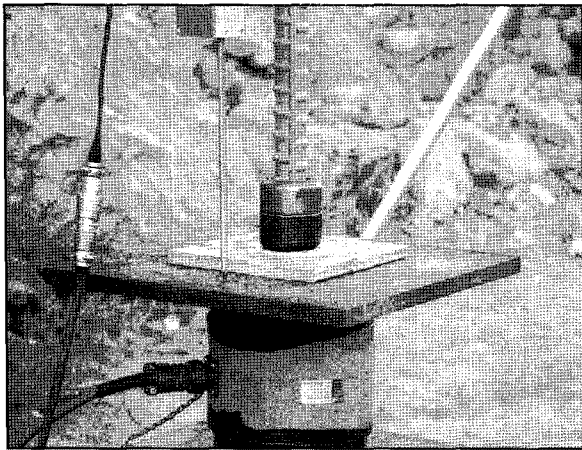


(a) 단철근 네일

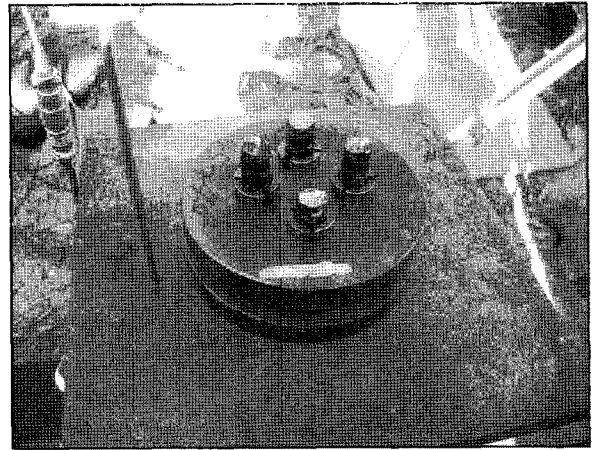


(b) 다철근 네일

그림 2. 현장인발시험 전경



(a) 단철근 네일



(b) 다철근 네일

그림 3. 네일 인발

Set를 이용하여 실시간으로 측정하였고, 재하된 하중 또한 실시간으로 Load Cell에 의해 계측하였다. 또한 철근과 그라우트에 변형률계(strain gauge)를 부착하여 네일 두부에 작용하는 인발하중에 의한 네일 심도별 하중전이를 측정하였다. 그림 2는 각각 단철근 네일과 다철근 네일의 현장인발시험 전경을 나타낸다. 단철근 네일과 다철근 네일 모두 길이 12m로 계획하였으나, 지반 천공 후 굴착면의 저면 공벽이 붕괴된 관계로 총 네일 길이 12m 중 단철근 네일은 9.6m, 다철근 네일은 10.7m로 지반에 관입시켜 현장시험을 수행하였다. 단철근 네일의 경우 그림 3과 같이 철근에 커플러를 설치하여 철근을 직접 인발하였고, 다철근 네일의 경우 네 개의 철근을 원형 철판 플레이트에 앵커시켜 철근을 인발하였다.

그림 4는 단철근 네일과 다철근 네일에 설치된 변형률계의 위치를 나타내며, 다철근 네일의 평면도상 네 개 철근 중 대각선 방향으로 No. 1 철근과 No. 2 철근에

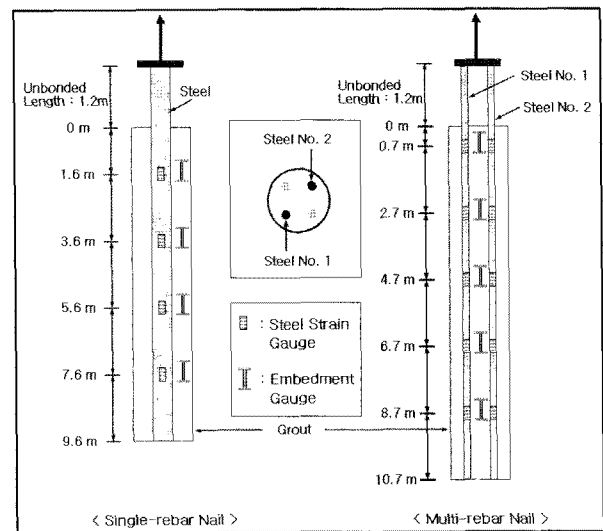


그림 4. 게이지 부착 위치도

대해 측정하였다. 네일의 그라우트 부에 설치된 변형률계는 그림 5와 같이 대각선상에 위치한 철근 사이에 굽

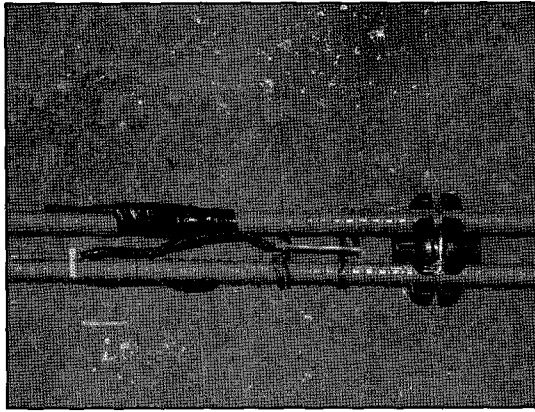


그림 5. 그라우트 변형률계 부착도

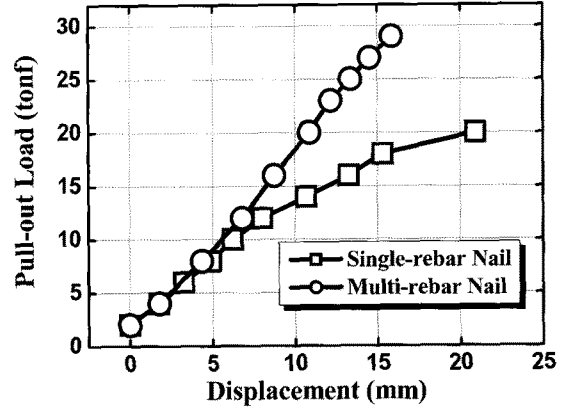


그림 7. 현장인발시험 하중-변위 관계

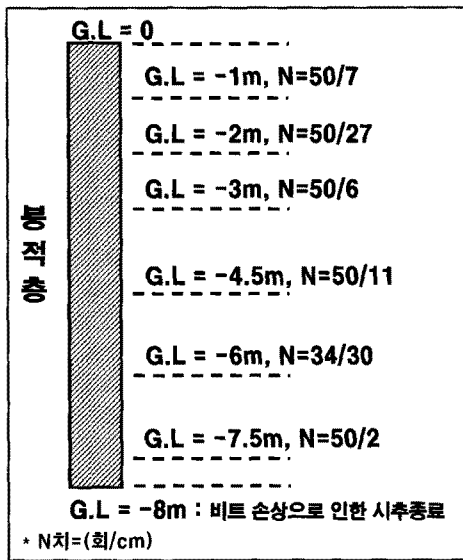


그림 6. 지반 시추주상도

은 철사를 이용하여 변형률계가 설치될 자리를 만든 후 얇은 철사를 이용하여 변형률계의 유동이 확보되도록 설치하였다.

그림 6은 현장에서 실시한 시추조사 결과를 나타낸다. 현장지반은 주변에서 발파된 암반과 지표면의 굴착된 흙을 성토한 지역으로써 지추조사 결과 황갈색의 매우 조밀한 모래질 자갈의 붕적토와 전석층이 혼합된 지반으로 조사되었으며, 심도 8m에서 굴진 중 직경 50cm 이상의 전석층이 나타나 비트의 손상으로 인해 시추가 종료되었다. 표준관입시험(standard penetration test, SPT) 결과 N치는 심도 6m를 제외한 전 깊이에서 50 이상으로 조사되었다.

2.2 현장인발시험 결과

현장시험에서 단철근 네일과 다철근 네일의 인발하중-

변위 관계의 측정하였으며, 시험 결과는 그림 7에 나타났다. 단철근 네일의 경우 인발하중 16tonf에서 13.2mm, 18tonf에서 15.3mm의 변위가 측정되었으나, 인발하중 20 tonf에서는 변위가 20.9mm로 각 하중단계에 따른 변위의 증가폭이 커지는 것으로 나타나 인발하중 20tonf에서 네일이 파괴상황에 이른 것으로 나타났다. 다철근 네일은 29tonf의 하중에서 시험이 종료되었으며 15.8mm의 변위가 발생하였으며, 각 하중단계에 따른 변위의 증가폭이 일정한 것으로 나타나 인발하중 29tonf에서도 다철근 네일은 안전한 것으로 판단된다. 단철근 네일과 다철근 네일의 최대인발하중과 변위가 큰 차이를 보이는 원인으로서는 네일의 인발저항력은 지반-네일 마찰력과 철근-그라우트 부착력 중 약한 부분에서 네일의 파괴가 발생하는데, 단철근 네일은 철근과 그라우트의 경계면에서 네일의 파괴가 발생하고 다철근 네일은 철근과 그라우트의 부착면적의 증가로 인한 부착력이 커져 지반과 네일의 경계면에서 네일의 파괴가 발생하여 다철근 네일의 인발 저항력이 더 큰 것으로 분석된다.

한편, FHWA에서 규정된 극한인발시험 시 네일 두부에서 발생하는 네일의 변위는 네일 자유길이에 대한 탄성 변위의 80% 이상이 되어야 한다. 네일 자유길이의 탄성 변형량(δ_E)은 아래의 식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\delta_E = \frac{\Delta P \times L_u}{E \times A} \quad (1)$$

여기서, ΔP = 인발하중

L_u = 네일의 자유장

E = 철근의 탄성계수

A = 철근의 단면적

네일 자유길이의 탄성변형량을 계산한 결과, 단철근

네일과 다철근 네일의 탄성변형량은 각각 1.3mm와 1.6 mm로 계산되어 FHWA의 규정에는 적합한 것으로 나타났다.

또한, 현장인발시험을 통해 네일의 인발하중을 측정할 수 있으며, 현장인발시험을 통해 측정된 인발하중을 아래의 식 (2)에 적용하면 네일의 단위길이 당 주면마찰력(q_s)을 산정할 수 있다.

$$q_s = \frac{\Delta P}{p \times L_b} \quad (2)$$

여기서, ΔP = 인발하중
 p = 네일의 주면장(πD)
 L_b = 네일의 정착장

단철근 네일의 경우 시험에서 측정된 최대인발하중인 18tonf를 네일 정착 길이인 9.6m와 네일의 주면장인 0.33m를 이용하여 단위길이 당 주면마찰력을 산정한 결과, 약 5.7tonf/m²으로 계산되었고, 다철근 네일의 경우 최대인발하중인 29tonf를 네일 정착 길이인 10.7m와 네일의 주면장인 0.33m를 이용하여 단위길이당 주면마찰력을 산정한 결과, 약 8.2tonf/m²으로 계산되어 다철근 네일의 단위길이당 주면마찰력이 단철근 네일에 비해 약 30% 정도 크게 나타남을 알 수 있다.

그림 8은 크리프시험에 대한 측정결과로 인발된 하중에 비례하여 선형적으로 변위량이 증가하였다. 단철근 네일은 인발하중 18tonf에서 크리프 변위가 최대 0.4mm가 발생하였고, 다철근 네일은 인발하중 29tonf에서 크리프 변위가 최대 0.6mm로 발생하였으며, 단철근 네일의 경우 인발하중 20tonf에서는 5.2mm의 크리프 변위가 발생하였다. FHWA에서는 극한인발시험 시 시험최대 하중에서 1분에서 10분 동안 발생된 크리프 변위량은

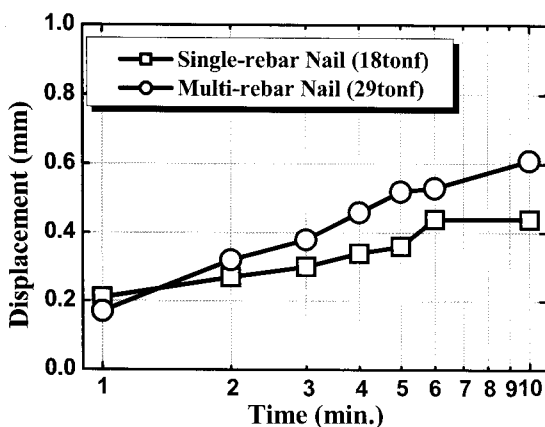


그림 8. 현장인발시험 크리프 변위

1mm 이하가 되도록 규정을 하고 있다. 따라서 단철근 네일의 경우 18tonf 이하의 하중에서, 다철근 네일의 경우 29tonf 이하의 하중에서 FHWA에서 제시하고 있는 규정을 만족하는 것으로 나타났다.

그림 9는 각각 단철근 네일에 작용하는 인발하중에 따른 철근에 대한 하중전이 관계를 나타내고, 그림 10은 다철근 네일에 작용하는 인발하중에 따른 다철근 네일

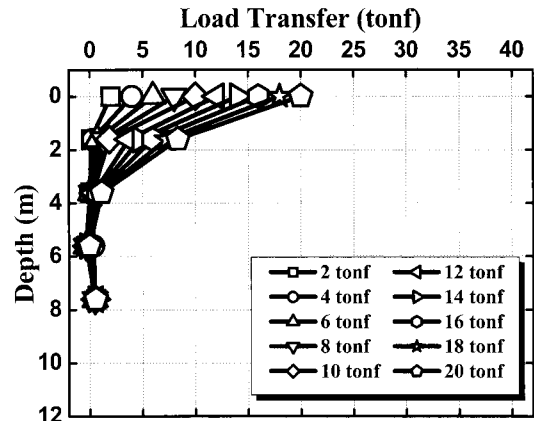
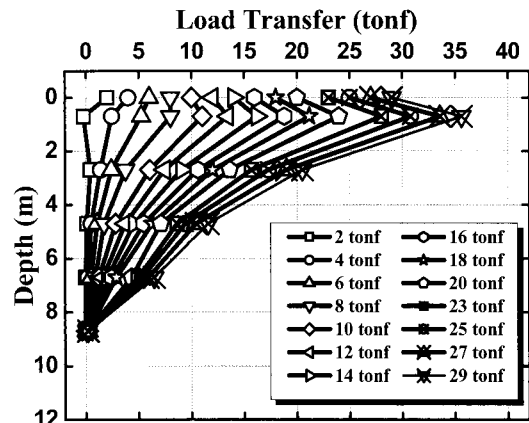
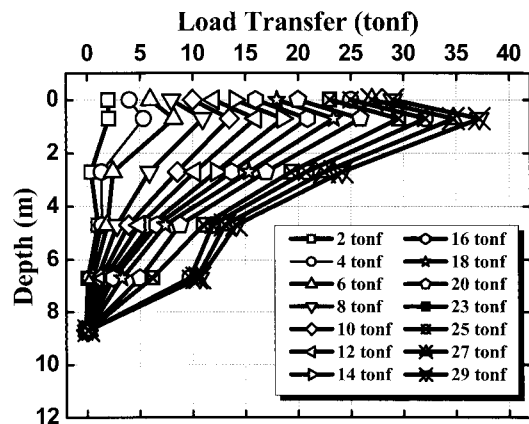


그림 9. 현장인발시험에 의한 단철근 네일 심도별 하중전이



(a) No. 1 철근 하중전이



(b) No. 2 철근 하중전이

그림 10. 현장인발시험에 의한 다철근 네일 심도별 하중전이

의 No. 1 철근과 No. 2 철근에 대한 하중전이 관계를 나타낸다. 단철근 네일은 네일 두부에 재하된 인발하중에 대하여 네일의 두부와 깊이 1.6m까지는 하중전이가 발생하나, 깊이 3.6m에서는 하중전이가 거의 발생하지 않아 재하된 하중의 대부분을 네일의 상부에서 저항하는 것으로 나타났다. 다철근 네일의 경우 깊이 0.7m에서 측정된 하중을 제외한 나머지의 깊이에서의 하중전이를 살펴보면 네일 두부에 재하된 인발하중에 대하여 하중전이가 네일의 선단까지 비교적 선형적으로 발생하는 것으로 나타났다.

단철근 네일의 하중전이는 실험오차로 인해 그라우트에서 (-)의 하중전이가 측정되었으며, 다철근 네일에서도 실험오차로 인하여 깊이 0.7m에서 인발하중보다 측정된 전이하중이 크게 측정되었다. 단철근 네일과 다철근 네일의 그라우트에 설치된 변형률계는 그라우트 타설시 파손되어 작동이 되지 않았고, 일부 작동된 변형률계에서 측정된 데이터 또한 변형률계의 손상으로 인하여 데이터에 오차가 발생하여 분석대상에서 제외되었다. 이러한 오차의 원인으로는 게이지가 그라우트에 완전히 부착이 되지 않았거나, 하중전이를 측정할 때의 게이지의 적정온도가 23℃인데 반해 시험시공 시 현장온도가 -10℃로 약 33℃의 온도차에서 시험이 실시되었고, 게이지 부착 시 철근의 그라인딩 작업에서의 단면손실 등의 복합적인 요인에 의해 전이된 하중의 측정치가 재하하중을 상회하는 수치가 나온 것으로 판단된다. 또한 네일 설치 시 일부 구간에서 발생된 네일의 굴곡이

(-)의 하중전이와 인발하중보다 큰 하중전이가 계측된 원인으로 추정할 수 있다.

최대인발하중에 의한 철근의 전이율을 살펴보면, 단철근 네일이 깊이 3.6m에서 전이율 5.5%로 재하된 하중 대부분을 상부에서 저항하는 반면 다철근 네일은 깊이 4.7m, 6.7m에서 전이율이 각각 40.0%와 22.4%로 인발하중에 의한 철근의 효율성이 단철근 네일에 비해 상대적으로 매우 높게 산정되었다.

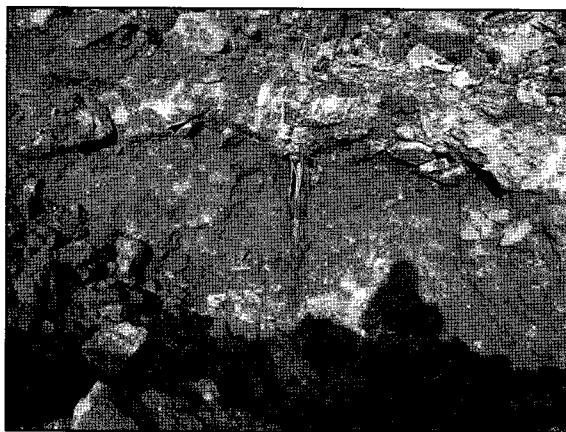
그림 11은 인발시험이 종료된 후 단철근 네일과 다철근 네일이 시공된 지반의 상부지층을 굴착한 그림으로 단철근 네일과 다철근 네일은 동일한 지반에 시공되었지만, 단철근 네일의 경우 상부지층이 호박돌 등의 전석층으로 구성되어 있어, 단철근 네일이 상부에서 재하된 하중 대부분을 저항한 원인으로 추정된다.

3. 인발시험 수치해석

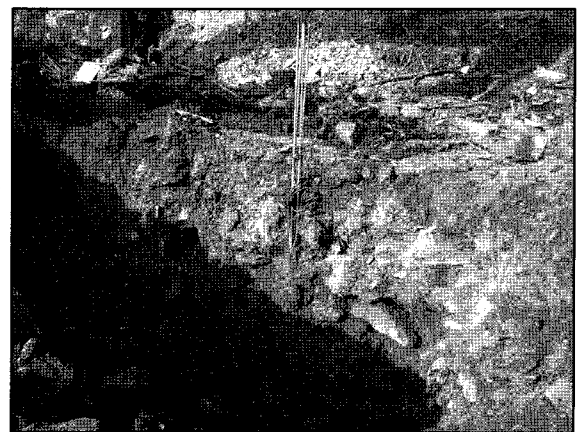
3.1 인발시험 수치해석 모형

표 2는 수치해석에 사용된 지반의 물성치로써 현장시험의 계측자료를 역해석한 결과와 지반 시추주상도를 기준으로 기존 문헌(Terzaghi et al, 1984; 한국도로공사, 2002; Das, 2003)에 제시된 대표적인 지반 물성을 근거로 산정하였다.

해석 모형의 경계 조건은 양쪽 측면의 경우 수평 변위를 고정하였으며, 바닥면은 수평과 수직 변위 모두를



(a) 단철근 네일



(b) 다철근 네일

그림 11. 시험 후 지반굴착

표 2. 수치해석에 사용된 지반 물성

지반종류	단위중량(tonf/m ³)	탄성계수(tonf/m ²)	점착력(tonf/m ²)	내부 마찰각(°)	포아송비
매립층(붕적토, 전석층)	2.1	17,000	0	40	0.35

고정하였다. 또한 네일 인발 시 지표면의 거동을 배제하기 위해 원지반 형성 후 지표면의 수직변위를 고정하였다. 수치해석 모형에는 총 3,840개의 Zone이 사용되었으며, 요소망의 크기는 0.25m로 하였고 해석모델로는 가장 일반적인 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 그림 12는 해석에 사용된 수치해석 모식도이다.

해석 시 단철근 네일과 다철근 네일은 케이블 요소를 이용하여 모델링 하였다. 케이블 요소는 그리드(grid)내의 특정점에 앵커링되거나 그라우트된 일차원 축 요소이다. 케이블 요소는 그리드가 변형함에 따라 길이 방향으로 축력이 발생한다. 케이블 요소는 압축이나 인장으로 항복할 수 있지만 휨 모멘트를 받지는 못한다(Itasca, 2002).

케이블 요소의 그라우트 점착강도(grout cohesive strength, S_{bond})와 그라우트 전단강성(grout shear stiffness, K_{bond})은 현장인발시험의 결과를 이용하여 그림 13의 관계로부터 식 (3)과 식 (4)를 사용하여 계산할 수 있다. 철근이 항복하지 않는다면 그라우트 전단강성은 하중-변위 곡선의 기울기가 되며, 그라우트 점착강도는 단위길이 당 최대인발력이 된다.

$$K_{bond} = \frac{F_s^{max}}{L \times \delta_{max}} \quad (3)$$

$$S_{bond} = \frac{F_s^{max}}{L} \quad (4)$$

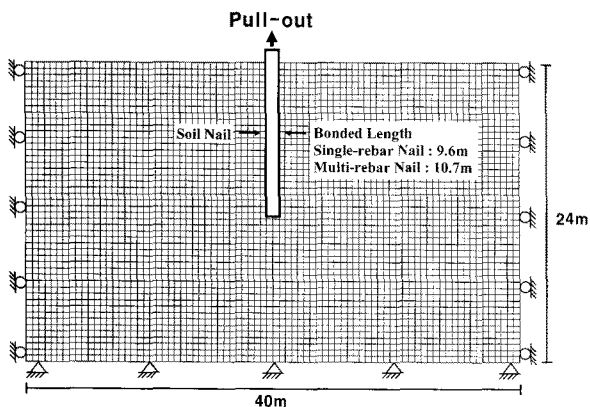


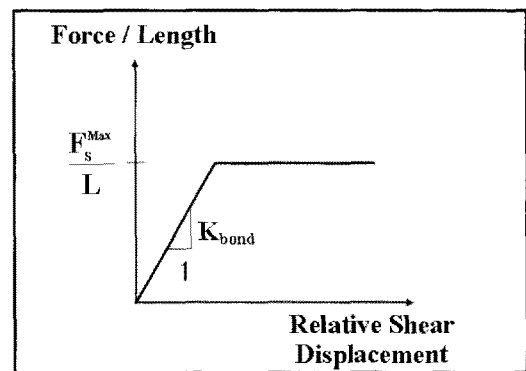
그림 12. 수치해석 모식도

여기서, F_s^{max} = 최대인발력

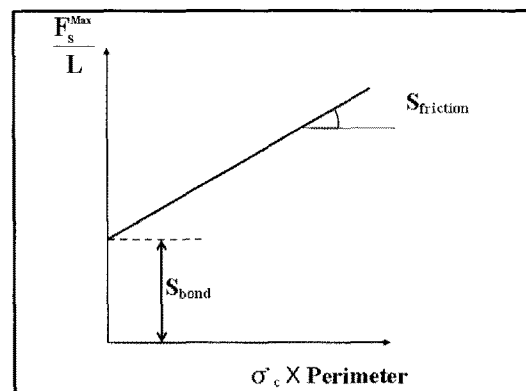
L = 네일 정착길이

δ_{max} = 네일의 최대변위

표 3은 수치해석에서 사용된 네일의 물성을 나타낸다. 네일의 파괴는 크게 철근-그라우트 경계면에서의 파괴와 네일-지반 경계면에서의 파괴로 구분할 수 있으며, 본 연구에서는 단철근 네일은 네일이 철근-그라우트 경계면에서 파괴되는 것으로 모델링하였고, 다철근 네일은 네일-지반 경계면에서 네일이 파괴되는 것으로 모델링하였다. 본 연구에서 사용된 수치해석 프로그램인 FLAC^{2D}의 경우, 네일의 파괴면에 대한 설정은 표 3의 네일의 입력 물성에서 네일의 주면장을 철근의 주면장으로 할 경우 철근-그라우트 경계면에서 네일의 파괴가 발생하는 것으로 해석하고, 네일의 주면장을 그라우트



(a) 그라우트 전단강성



(b) 그라우트 점착강도

그림 13. 케이블 요소의 거동 특성

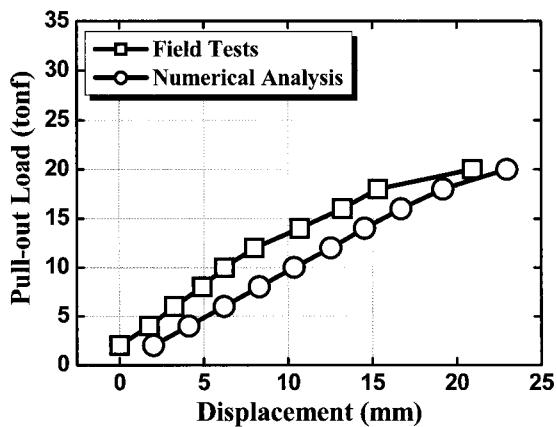
표 3. 수치해석에 사용된 네일 물성

	길이 (m)	단면적 (m ²)	탄성계수 (tonf/m ²)	주면장 (m)	그라우트 전단강성 (tonf/m/m)	그라우트 점착강도 (tonf/m)
단철근 네일	9.6	6.6 × 10 ⁻⁴	2 × 10 ⁷	0.0911	156.2	2.08
다철근 네일	10.7	8.659 × 10 ⁻³	3.687 × 10 ⁶	0.3299	170.9	2.71

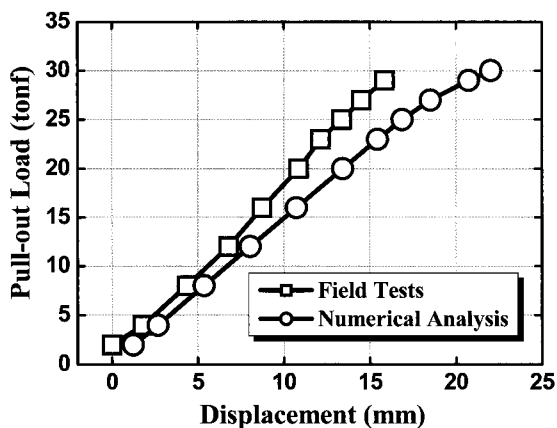
의 주변장으로 할 경우 네일-지반 경계면에서 파괴가 발생하는 것으로 해석을 수행한다. 다철근 네일의 단면적과 탄성계수는 철근과 시멘트 그라우트의 단면적을 복합단면으로 환산한 값을 사용하였다.

3.2 인발시험 수치해석 결과

그림 14는 단철근 네일과 다철근 네일의 현장인발시험과 수치해석에 의해 계산된 하중-변위 관계를 나타낸다. 단철근 네일의 경우 최대인발하중인 20tonf에서 현장인발시험에 의한 네일의 변위량은 20.9mm이었으나, 수치해석에 의한 네일의 변위량은 22.9mm로 계산되어 수치해석의 결과가 현장인발시험에 비해 약 10% 정도 크게 나타났다. 다철근 네일의 경우 최대인발하중인 29tonf에서 현장인발시험에 의한 네일의 변위량은 15.8mm, 수치해석에 의한 변위량은 22.0mm로 계산되었고, 31tonf의 하중에서 네일이 파괴되는 것으로 계산되었다. 다철근 네일의 수치해석 결과 또한 현장인발시험에 비



(a) 단철근 네일



(b) 다철근 네일

그림 14. 현장시험과 수치해석의 하중-변위 관계

해 약 30% 정도 크게 발생하였는데 이러한 결과는 수치해석 시 지반물성과 해석조건이 실제현상을 정확하게 묘사하기 힘들고 수치해석은 지반과 네일간의 상호작용만 고려하여 해석하는데 비해 현장시험은 철근과 그라우트 및 지반과 그라우트의 복합적인 상호작용이 고려되기 때문에 차이가 발생하리라 판단된다.

단철근과 다철근 네일은 20tonf의 동일한 하중에서 각각 22.9mm와 13.4mm의 변위가 계산되어 다철근 네일이 단철근 네일에 비해 변위가 약 40% 정도가 감소하여 다철근 네일의 변위가 적게 발생하는 것으로 계산되었다.

그림 15는 단철근 네일의 심도별 하중전이 특성을 나타낸 해석결과로서, 하중전이는 현장시험과는 거동 양상이 다르게 계산되었는데, 네일이 지반에 근입된 네일 길이 1.2m 이후 끝단으로 갈수록 축력이 선형적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 그림 16은 단철근 네일의 심도별 변위를 나타낸 해석결과로서, 인발하중이 재하된 네일 두부에서부터 곡선형태로 감소되는 경향을 나타내었다. 인발하중 18tonf에서 네일 두부의 변위는 19.1mm, 네일 선단의 변위는 11.1mm로 네일 탄성인발량은 8mm

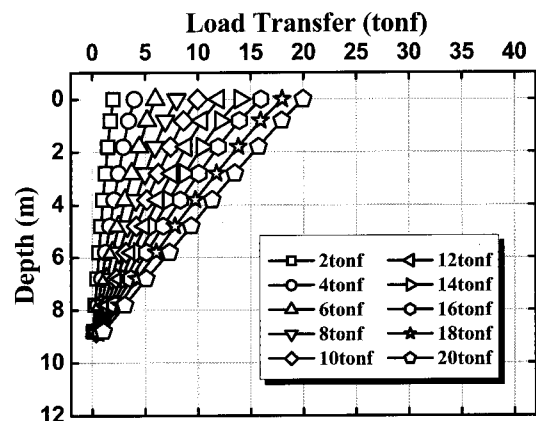


그림 15. 수치해석에 의한 단철근 네일 심도별 하중전이

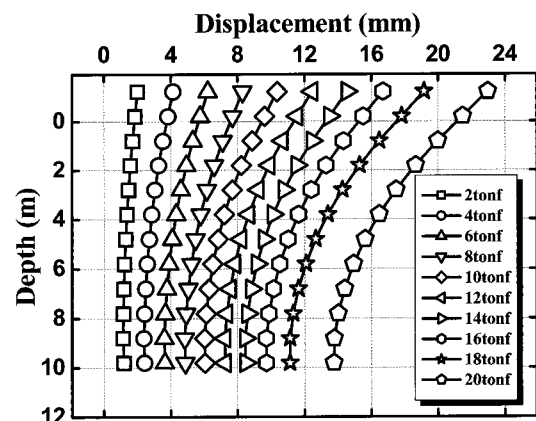


그림 16. 수치해석에 의한 단철근 네일 심도별 변위

로 계산되어, 네일 전체 변위의 약 40%가 네일의 자체의 탄성변위인 것으로 계산되었다. 인발하중 20tonf에서는 네일의 하중단계별 변위차가 약 2배 가량 증가하여 네일이 20tonf의 인발하중에서 파괴상태에 근접하는 것으로 나타났다.

그림 17과 그림 18은 각각 다철근 네일의 심도별 하중전이와 변위를 나타낸다. 다철근 네일의 심도별 하중전이와 변위는 단철근 네일과 유사한 거동 양상을 나타냈다. 최대인발하중인 30tonf에서 네일 두부의 변위는 22.0mm, 네일 선단의 변위는 16.3mm로 계산되어, 다철근 네일의 자체변위는 26%로 계산되었다. 다철근 네일 또한 29tonf의 하중에서 네일의 하중단계별 변위차가 증가하는 것으로 계산되어 29tonf의 인발하중에서 파괴상태에 근접하는 것으로 나타났다.

그림 19와 그림 20은 각각 현장시험과 수치해석에 의한 단철근 네일과 다철근 네일의 하중전이를 비교해서 나타낸 그림이다. 현장시험에 의한 단철근 네일의 하중전이는 네일 상부에서 재하된 하중을 대부분 저항하는

반면 수치해석에 의한 네일의 하중전이는 네일 두부에서 선단까지 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 수치해석의 경우 해석 시 지반의 구성이 심도에 따라 균일한 것으로 모델링되어 네일의 길이별로 동일한 단위 주면마찰력을 가지는 것으로 모델링 되나, 네일이 시공된 현장의 지반이 전석층과 사질토 등이 혼합되어 지반의 구성이 심도에 따라 균일하지 않고 지층 상부에 존재하는 전석층에서 네일의 주면 마찰력이 대부분 발휘되었기 때문이라고 추정된다. 또한 수치해석 시에는 다철근 네일의 경우 철근의 단면적과 그라우트의 단면적을 복합단면으로 환산하여 계산하였으므로 철근의 기하학적 위치설정이 고려되지 않으므로 하중전이 값이 현장시험과 차이가 있으리라 판단된다.

다철근 네일의 경우 현장시험과 수치해석의 하중전이 결과 값에는 차이가 있으나 네일의 두부에서 선단으로 갈수록 인발된 하중에 대하여 하중전이가 선형적으로 감소하는 일반적인 강성보강재의 거동과 유사한 것으로 나타났다.

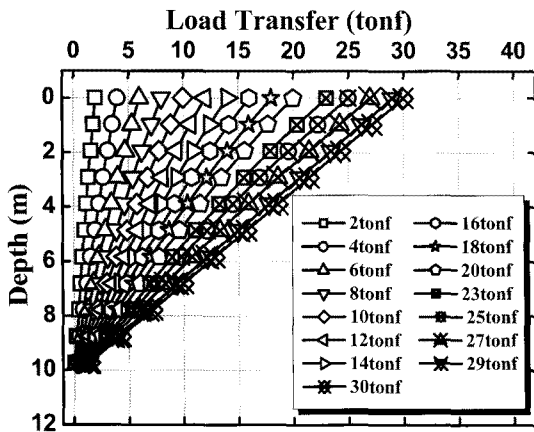


그림 17. 수치해석에 의한 다철근 네일 심도별 하중전이

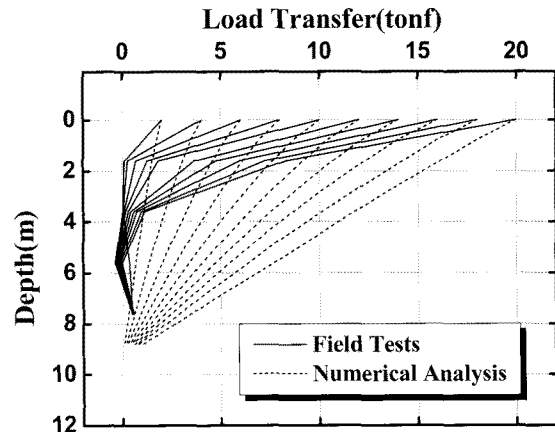


그림 19. 현장시험과 수치해석에 의한 단철근 네일 하중전이

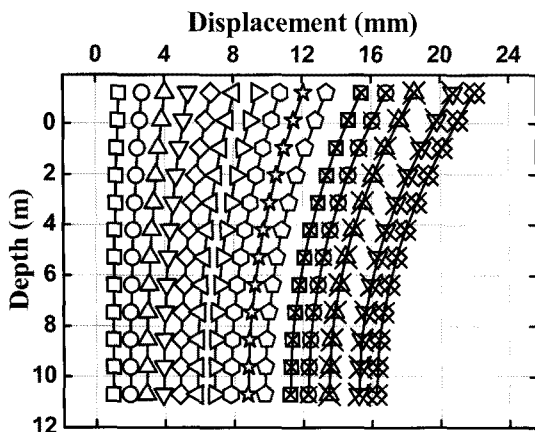


그림 18. 수치해석에 의한 다철근 네일 심도별 변위

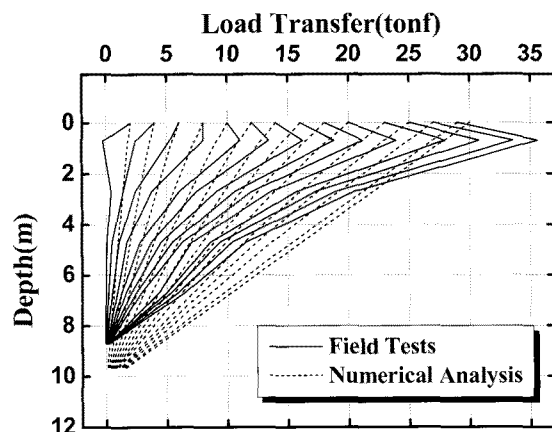


그림 20. 현장시험과 수치해석에 의한 다철근 네일의 하중전이

4. 결 론

본 연구에서는 단일 철근이 설치된 네일(Single-rebar Nail)과 네 개의 철근이 설치된 네일의(Multi-rebar Nail) 각각 1공에 대하여 극한인발시험(Verification Test)과 크리프시험(Creep Test)을 실시하고, 수치해석 프로그램을 이용하여 단철근 네일과 다철근 네일의 거동 특성을 분석하였다.

본 현장지반조건에서의 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 현장인발시험 결과, 네 개의 철근으로 시공된 다철근 네일이 단일 철근으로 시공된 단철근 네일보다 인발과괴하중이 큰 것으로 나타났고, 동일한 인발하중에 대해 변위가 적은 것으로 나타났으며, 다철근 네일이 단철근 네일에 비해 철근-그라우트 간의 부착력이 크므로 다철근 네일의 인발하중에 대한 저항력이 단철근 네일에 비해 우수한 것으로 나타났다.
- (2) 단철근 네일은 재하된 인발하중 대부분을 상부에서 저항하는 반면 다철근 네일은 재하된 인발하중에 대한 하중전이율이 단철근 네일에 비해 높아 인발하중에 의한 철근의 효율성이 상대적으로 매우 높게 산정되었다.

- (3) 수치해석 결과, 다철근 네일의 인발하중에 대한 저항력이 단철근 네일에 비해 우수한 것으로 나타났으며, 동일한 하중 조건에서 다철근 네일이 단철근 네일에 비해 변위가 적음을 알 수 있다.
- (4) 수치해석 결과, 단철근 네일 또한 다철근 네일과 유사하게 네일 두부에서 선단까지 하중전이가 선형적으로 감소하는 것으로 나타났으나, 현장시험에서 단철근 네일은 인발하중의 대부분을 네일 상부에서 저항함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 이승, 이용원, 이장덕 (1999), "현장 인발시험에 의한 SOIL-NAIL의 상호작용에 관한 연구", *대한토목학회 논문집*, 제19권, III-5호, pp. 975-983.
2. 전상수, 이충호, 김두섭, 장양원 (2006), "MS 네일(Multi-bar Spring Nail) 거동 특성-현장시험", *대한토목학회 학술발표논문집*, pp. 191-194.
3. 전상수, 김두섭, 장양원 (2007), "흙 저항을 고려한 네일 거동에 대한 수치해석적 분석", *한국지반공학회 논문집*, 제23권, 10호, pp. 85-96.
4. 한국도로공사 (2002), 도로설계요령, 도로교통협회.
5. Das, B. M. (2003), *Principles of Geotechnical Engineering*, Thomson, pp. 281-384.
6. FHWA (1994), *Soil Nailing Field Inspectors Manual*, Publication No. FHWA-SA-93-068, pp. 46-53.
7. Itasca Consulting Group, Inc. (2002), *FLAC^{2D} Manual: Structural Elements*, Itasca Consulting Group, Inc., Minnesota, USA.
8. Terzaghi, K., Peck, R. B. and Mesri, G. (1984), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley & Sons Inc., pp. 21-22.

(접수일자 2008. 1. 22, 심사완료일 2008. 8. 5)