

현장인발시험을 통한 흙-네일의 하중 전이특성에 대한 연구

A Study on Load Transfer between Soil and Nail Using In-situ Pull-out Tests

김종수¹⁾, Jong-Soo Kim, 이장덕²⁾, Chang-Tok Yi, 민경준²⁾, Kyong-Jun Min, 이송³⁾, Song Lee

¹⁾ (주)현대산업개발 엔지니어링 팀장, Dept. of Engineering, Hyundai Industrial Development Co. Ltd

²⁾ (주)B&G건설엔지니어링, B&G Construction Engineering,

³⁾ 서울시립대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, University of Seoul.

SYNOPSIS : A Land slide in Granitic Gneiss weathered soil was stabilized successfully with soil nailing using $\varnothing 29\text{mm}$ steel bar. To understand the behavior of load transfer between soil and nail, in-situ pull-out tests were carried out. The strains of steel bars were measured using strain gauges during pull-out tests. Forces-strain data from laboratory tension tests on steel bar and grouted steel bar were examined to compare with those of the pull-out tests. Comparisons were made between the pull-out test results and laboratory test result to understand load transfer mechanism.

Key words : pull-out test, load transfer mechanism, strain of steel bar, interaction between soil and nail.

1. 서론

Soil Nailing 공법은 NATM공법의 Rock bolt 기본개념 및 보강토 이론을 배경으로 연구되었으며 최초의 현장적용은 지반 보강의 목적으로 1973년에 프랑스의 철도사면보강에 최초로 적용되었다. 그 이후 주로 프랑스 독일 중심으로 사면보강목적으로 사용해오다 유럽과 북미지역을 중심으로 사면보강 및 지반굴착 공법으로 널리 쓰이고 있다 특히 홍콩이나 일본 등에서는 협소한 국토 면적을 효율적으로 사용하기 위하여 Soil Nailing 공법을 많이 적용하고 있으며 국내에서도 사면보강 및 지반굴착 등에 적용이 차츰 확대되어 가고 있는 실정이다. 이러한 Soil Nailing 설계 방법은 사면 안정해석 방법이다 Nailing에 작용하는 인장력, 전단력 등을 고려한 한계 평형해석법(Limit Equilibrium Method)이 주로 사용되어오고 있으며 이러한 해석방법들에서 흙-Nail의 상호작용을 이해하고 효과적으로 설계에 반영하는 것이 중요한 관심사가 되어 많은 현장 및 실내시험들이 이러한 흙-Nail의 상호작용 규명 뿐 아니라 전체적인 Soil Nailing의 거동분석에 집중되었다.

Guilloux(1979)는 실내 인발시험을 통해 흙과 Nail 사이의 마찰계수를 측정하였고 Cartier와 Gigan(1983)도 Nail의 인발시험을 통하여 Nail과 흙사이의 상대변위를 측정하여 단위 주면 마찰력과 상재하중과의 상관관계를 규명하기도 하였다. 1986년에 프랑스 교통국에서 4백만 달러를 투자하여 4년동안 수행한 CLOUTERRE 연구는 기존설계 개념의 개선과 Soil Nailing의 거동을 이해하려고 450회 현장 인발시험의 수행을 통해 흙과 보강재 사이의 상호작용을 규명하고자 하였다. Smith(1990)는 홍콩전역에서 많은 인발시험을 통하여 지반의 상태가 Nail에 미치는 영향을 조사하였으며 Heymann(1992)등은 잔적토에서 Nail의 인발 중 지반의 dilatancy가 흙과 Nail의 마찰특성에 미치는 영향을 분석하기도 하였다. 이러한 흙과 Nail의 마찰특성에 대한 연구들은 대부분 흙에서만 이루어져 인발중 지반의 dilatancy의 영향이 Nail의 마찰특성에 큰 영향을 미치는 것이 사실이다. 하지만 국내지반에서 지반굴착이나 사

면보강목적으로 Soil Nailing공법이 적용되는 경우 풍화토 및 풍화암 지반에서 많은 시공이 이루어지는 현실을 감안할 때 풍화암에서의 지반과 Nail의 거동특성에 대한 연구가 국내에서 이루어져야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 풍화암에서 수행했던 Nail의 인발시험을 분석하여 지반과 내일의 마찰특성을 파악하고 하중전이 특성을 분석하고자 하였다.

2. Soil Nailing의 설계

Soil Nailing은 일반 보강토의 기본 개념과 마찬가지로 흙이 받을 수 없는 인장력을 Nail이 받으므로 흙 구조물의 안정성을 증가시켜주는 개념이다. 이러한 구조물의 설계는 흙 구조물의 안정성을 평가 할 수 있는 한계평형법(Limit Equilibrium Method)이 널리 사용되고 있다. 이 해석 방법은 우선 Soil Nailing 구조물의 파괴면을 가정하고 파괴면위의 Nail로 보강된 흙구조체의 평형을 고려하여 안전율을 계산하는 작업을 반복하여 최소 안전율을 구한다. 그림 1에서 보는바와 같은 Soil Nailing 구조물에서 Nail에 작용하는 최대 인장력이 작용하는 점을 연결하면 가상파괴면을 얻을 수 있다.

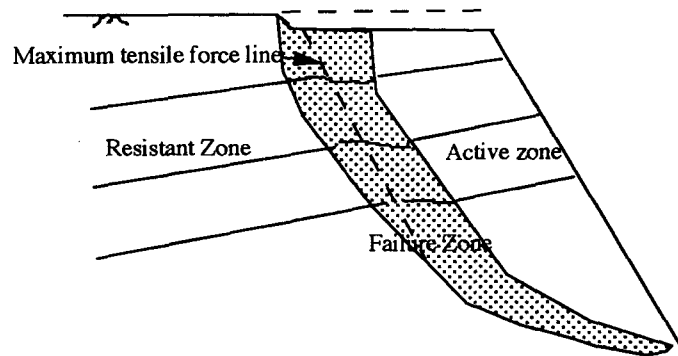


그림 1. Soil Nailing 사면의 파괴영역

이러한 파괴면은 전면판 부근의 주동영역(active zone)과 저항영역(Resistant Zone)으로 나누는데, 주동영역에서는 흙에 작용하는 전단응력이 바깥쪽으로 향하기 때문에 Nail에 인장력을 주는 반면 저항영역에서는 흙에 작용하는 전단응력이 Nail의 인발에 의해 저항받게 된다. 그러므로 Nail에 작용하는 힘은 대부분 인장력만 작용하게 된다. 그러나 Soil Nailing 구조가 어느정도 변위가 발생하게 되면 Nail에 전단응력과 모멘트가 작용하게 되며 변위량이 증가하여 파괴에 이르게 되면 전단응력과 모멘트가 대부분 작용하게 되어 결국 전단력과 모멘트에 의하여 파괴면이 그림1과 같은 변형된 파괴영역(Failure Zone)이 형성되게 되는 것이다. 그러므로 Nail에 작용하는 힘은 변위의 함수로 Soil Nailing 구조물이 사용성이 확보된 상태에서는 Soil Nailing 구조물의 변위가 미소하므로 대부분 Nail에 작용하는 힘은 인장력만 작용하게 된다. 하지만 변위가 커지면서 파괴상태에 이르게 되면 Nail에 작용하는 힘은 전단력과 모멘트 및 인장력이 작용하게 된다. 이러한 전단력과 모멘트를 설계에 반영하는 프랑스 설계 방법이 있는 반면 Nail에 작용하는 인장력만 고려하는 독일 미국식 설계방법이 있다. 하지만 이러한 설계방법이 한계평형 이론으로 한계상태, 즉 파괴상태에서 힘의 평형을 고려하므로 한계상태에서 Nail에 작용하는 전단력과 모멘트를 고려해야겠지만 실제로 사용중인 Soil Nailing 구조물이 전단력과 모멘트가 발생할 정도의 변형은 발생하지 않은 것을 감안할 때 미소변형상태에서 지반과 Nail의 상호작용은 대부분 인장력이 작용하는 Nail의 마찰특성에 의해 영향을 받게 된다. 이러한 마찰특성은 Soil Nailing 설계시 중요한 설계 인자로서 정확한 마찰특성은 인발시험(Pull-out)에 의해서 평가할 수 있다. 국내에서는 이런 인발시험이 Soil Nailing 시공 중 설계 인자를 확인하는 차원에서 현장시험으로 행하여지고 있는 실정이다. 본 논문에서는 풍화암층에 사면보강용으로 시공되고 있는 Soil Nailing 현장에서 수행한 인발시험을 분석하여 지반-Nail의 상호작용을 규명하고자 한다.

3. 인발 시험

3.1 현장개요

현장 사면은 도로의 절토구간에 위치하며 사면의 수직고는 28m이고 연장은 180m로써 사면경사는 1:1.5를 이루고 있는 7단의 사면이다. 호우시 사면우측 2~3단 사이에 원호형태의 사면붕괴가 발생하여 Soil Nailing으로 보강하였다. Nail은 $\varnothing 29\text{mm}$ 이형철근을 10m길이로 $\varnothing 100\text{mm}$ 로 천공된 지반에 삽입하였으며 1.5m간격으로 그림 2와 같이 Nail를 시공하였다.

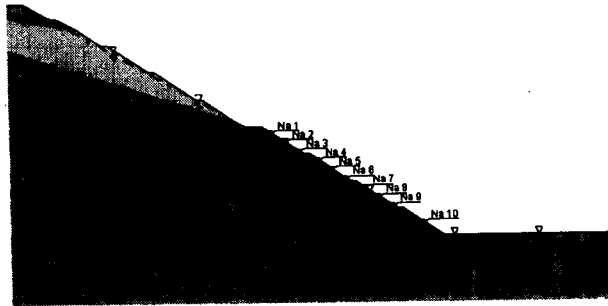


그림 2. 사면보강 단면

사면의 지반은 풍화가 심하게 진행된 화강암질 편마암으로 밝은 회색을 띤 풍화암으로 코아회수가 되지 않은 N치 50이상으로 이 Soil Nailing 시공을 위한 100mm 천공시 공벽이 붕괴되지 않고 유지되었으며 그라우팅시 압력없이 중력에 의해 주입되도록 하였다. 이렇게 현장에 시공조건과 같게 철근에 그라우팅 한 후 2주 후 굴착 회수한 그라우트된 철근을 보인 것이 사진 1이다.



사진1. 양생 후 시멘트 그라우팅된 철근의 형상

사진에서 보는 바와 같이 철근주위로 천공직경과 같은 그라우팅 구체가 형성되었으며 그라우팅 구체는 불규칙한면을 보이고 있어 지반과 충분한 마찰력을 갖을 수 있는 형상으로 판단된다.

3.2 현장인발시험

시공된 Soil Nailing의 마찰계수 및 하중전이 특성을 파악하기 위하여 9회의 현장인발 시험을 계획하였다. 이론적으로 마찰계수는 상재하중과 밀접한 관계가 있으므로 이러한 마찰특성을 파악하기 위하여 사면높이를 다르게 하면서 3회씩 인발시험을 수행하였다. Soil Nail를 시공한 지반이 풍화암이므로 인

해 상당한 마찰력이 발생할 것으로 예상되므로 사용한 10m 길이의 철근 전체에 그라우팅을 할 경우 그라우팅된 철근이 인발되지 않아 Soil Nailing의 하중전이 특성을 파악할 수 없으므로 시험 철근에 대해서는 천공 후 0.8, 2.8, 5.5m 깊이까지만 그라우팅 하도록 하였다. 이렇게 일정한 깊이 까지의 그라우팅은 Soil Nail 시공 중 그라우팅 속도, 그라우팅량등을 조절해 가면서 시행 착오를 통해 그라우팅 깊이를 조절 할 수 있으며 막대자를 그라우팅 후 천공된 홀(hole)에 삽입하여 최종 그라우팅 깊이를 확인하였다. 이렇게 천공한 홀의 앞부분을 그라우팅 하지않고 인발시험을 수행하는 것은 사면 부분까지 그라우팅 했을 경우 단효과(end effect)로 인해 사면 부분에서는 상재하중이 제대로 Nail에 전달되지 않기 때문이다. 그러므로 사면의 높이가 다른 3장소에서 3가지 경우의 그라우팅 깊이로 총 9개의 인장시험을 수행하였다. 하지만 0.8m 깊이 그라우팅의 경우 인발시험 중 그라우팅 된 철근이 인발되었고 5.5m 깊이가 그라우팅의 경우는 철근이 파단(rupture)되어 2.8m 깊이까지 그라우팅한 철근의 인발시험 결과만 분석하기로 하였다. 인발시험 중 하중전이 현상을 효과적으로 파악하기 위하여 철근에 변형률게이지(strain gauge)를 부착하였다. 철근에 사용된 변형률게이지는 철근 양쪽면에 철근과 나란하게 2개씩 부착하여 보다 정확한 변형을 측정하도록 하였으며 철근위치에 따른 하중전이 특성파악을 위해 그림 3와 같이 변형률게이지를 설치하였다.

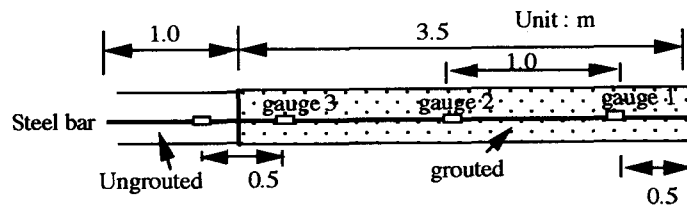


그림 3. 시험 Nail에 설치한 변형률게이지의 위치

또한 인발시험시 철근만의 변형특성을 파악하기 위해 그라우팅되지 않은 부분에도 변형률게이지를 설치하였다.

3.3 실내인장시험

사용한 철근 SD40은 일반적으로 항복응력이 $4,000\text{kg}/\text{cm}^2$ 인 것으로 알려졌지만, 정확한 응력-변형관계를 알아야 Soil-Nail의 하중전이 특성을 파악 할 수 있으므로 사용한 SD40 $\text{Ø}29\text{mm}$ 철근의 응력-변형관계를 파악하기 위해 인발시험기(UTM)을 사용하여 철근 중앙에 변형게이지를 양쪽으로 부착하고 인장시험을 수행하였다. 또한 사진 1에서와 같이 현장에서 회수한 그라우팅된 철근에 변형률게이지를 부착하고 철근 주위의 시멘트 몰탈 그라우팅도 그라인더로 대칭되게 편편하게 갈아 2개의 콘크리트용 변형률게이지를 설치하여 철근인장시 철근과 콘크리트의 변형을 동시에 측정하였다.

4. 실험 결과 및 분석

사면보강용 Soil Nailing에 사용한 $\text{Ø}29\text{mm}$ SD40 철근의 응력-변형 관계는 그림 4와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 철근의 항복응력은 $3950\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 측정되었고 항복응력에 도달할 때 변형률 2450μ 으로 그 이후의 거동은 소성거동으로 응력의 증가없이 변형만 증가하다가 변형경화(strain hardening)현상을 보이며 총 하중이 36.1ton까지 증가하면서 철근이 파단(rupture)이 일어났다. 하지만 사용한 변형률계의 한계가 초과되어 항복응력 이후 극한응력 $5450\text{kg}/\text{cm}^2$ 발생시 변형은 측정하지 못했다.

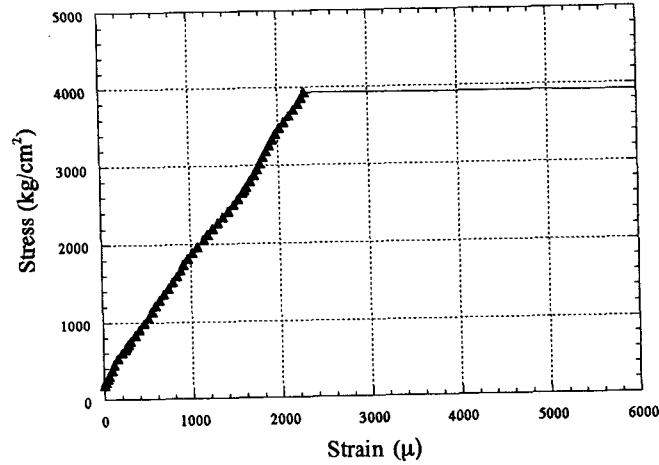


그림 4. 철근의 응력-변형관계

그림 5는 그라우팅된 철근과 그라우팅되지 않은 철근의 하중-변형관계를 비교한 것이다.

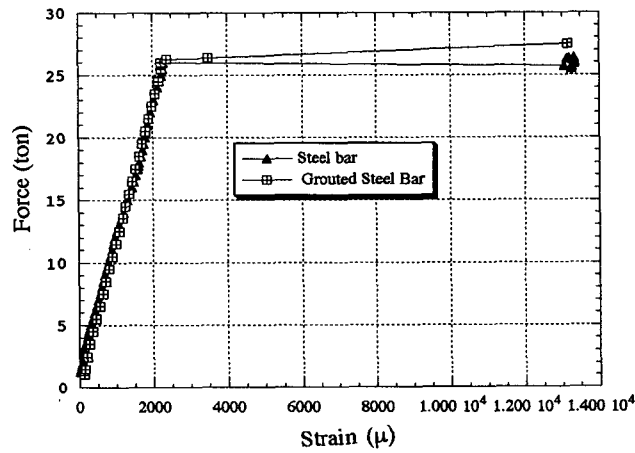


그림 5. 그라우팅된 철근과 그라우팅 되지않은 철근의 하중-변형관계

그림에서 보는 바와 같이 그라우팅된 철근이 그라우팅되지않은 철근보다 탄성영역이 조금 확대된 것으로 확인되었다. 그림 6은 그라우팅된 철근의 인장시험시 시멘트 몰탈 그라우팅재의 하중-변형관계를 보이는 것인데 시멘트의 몰탈의 취성파괴(brittle failure)특성 때문에 낮은 변형률범위에서는 하중-변형률 관계가 선형으로 변하다가 철근에 작용하는 인장력률이 10ton 이상이 되면 변형률이 비선형으로 오히려 하중이 증가함에 따라 변형률이 감소하는 경향을 보이고 철근에 작용하중이 15.5ton 정도에 도달하면 그라우팅에 인장균열이 발생하였으나 철근은 여전히 탄성거동을 보였다.

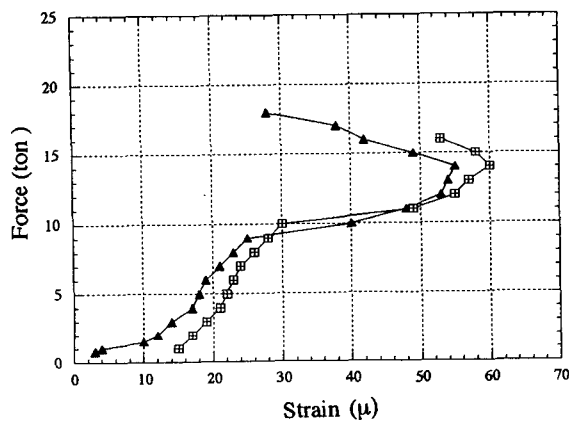


그림 6. 그라우팅 시멘트의 응력-변형관계

하지만 철근이 항복응력에 도달하면 그라우팅재에 발생했던 인장균열은 사진 2와 같이 폭이 3mm이상으로 확대 되다가 항복응력 이후에는 균열폭이 계속 증가하여 결국 철근에서 그라우팅재가 분리되었다.



사진2. 철근의 인장응력에 의한 시멘트 그라우팅의 균열

이러한 현상은 만일 Soil Nailing이 본 현장과 같이 마찰저항이 큰 풍화암과 같은 지반에 시공되었고 과도한 인장력이 Nail에 작용한다면 Nail의 파괴형태는 Nail의 파단(rupture)보다는 Nail 주위의 그라우팅재가 손상되면서 Nail이 인발(slippage)되는 파괴형태로 발생할 것으로 예상된다.

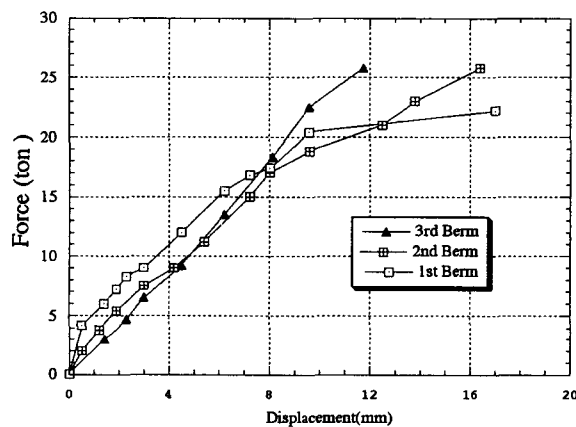


그림 7. 인발시험의 힘-변위 관계

실제로 현장 인발시험 결과 대부분의 파괴형태가 철근의 항복하중전에 철근이 인발되는 파괴로 시험이 종료되었는데 이러한 철근의 인발은 그라우팅재와 지반사이에서 발생하는 전단파괴 보다는 철근과 그라우팅재 사이의 전단파괴로 철근이 인발될 때 그라우팅의 손상으로 철근만 인발되었다. 그림 7은 현장인발시험의 하중과 변위관계를 그린 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 상재하중이 커지면 즉 사면하중으로 내려갈수록 인발하중은 약간 증가하는 경향을 보이다가 철근의 항복 하중에 가까워지면서 그러한 경향을 보이지 않는다. 이러한 경향은 흙에서 인발시험결과와 차이를 나타내는데, 흙의 경우 인발시험시 Nail의 인발저항은 크게 상재하중에 영향을 받지않는데 이는 흙이 전단시 체적팽창(dilatancy)의 영향때문인 것으로 보고 있다. 하지만 풍화암인 경우 전단시 체적팽창 현상의 영향이 없으므로 상재하중의 영향이 있는 것으로 조사되었다.

인발시험 중 그라우팅되지 않은 철근에 설치한 변형률계는 그라우팅된 철근 부위가 지반과 충분한 마찰력으로 고정되어 있다면 현장인발 시험시 철근 거동이 실험실에서 철근의 인장시험과 같은 결과를 보일 것이다. 이러한 2가지 시험결과를 비교한 것이 그림 8이다.

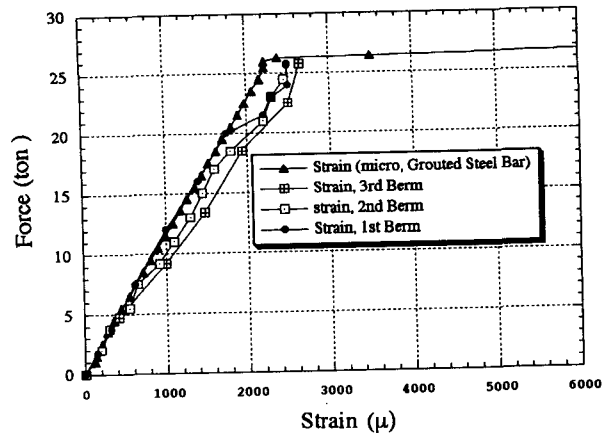


그림 8. 현장인발시험 중 그라우팅 되지않은 철근의 하중-변형관계

그림에서 보는 바와 같이 초기 하중하에서는 인발시험과 인장시험 결과가 같다가 어느정도 하중이 증가하면 두 시험 결과가 차이를 보이게 되는데 이는 지반 내 그라우팅체의 변위가 발생하기 시작했다는 것을 의미한다. 이렇게 두 시험 결과의 차이가 시작되는 하중은 그림과 같이 상재하중이 클수록 증가하는데 이는 상재하중이 클수록 지반 내 그라우팅체의 전단저항력이 커지는 것을 의미한다. 하지만 이러한 변위의 발생은 그라우팅체의 인발과파괴에 즉시 도달하지 않고 그라우팅체와 지반사이에 발생하는 전단변형이 최대 전단응력(peak shear stress)이 발생할 때까지 인발하중은 그림 8과 같이 증가한다. 그후에는 그라우팅체에 과도한 인장균열이 발생하고 계속적인 철근의 변위는 그라우팅체가 철근에서 분리되면서 결국 철근의 인발과파괴가 발생하게 된다. 그림9는 인발시험 중 철근 위치에 다른 변위의 분포를 보인 것이다.

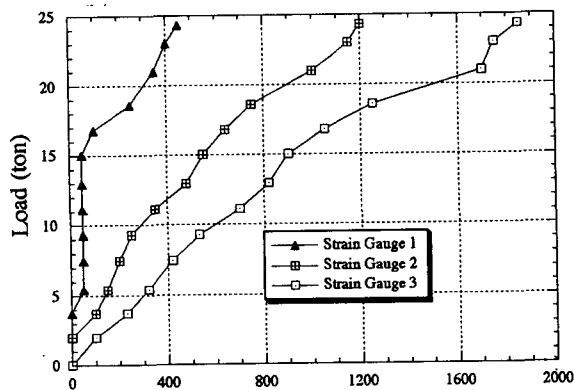


그림 9. Nail에 따라 발생하는 변형의 분포

그림에서 보는 바와 같이 인발하중이 증가함에 따라 철근 전면부에서부터 하중을 분담하다가 차츰 철근의 후반부로 응력이 전달되는데 연성(flexible)보강재에서 볼 수 있는 점진파괴(progressive failure)형태로 파괴가 발생하는 것보다는 철근의 전면부가 파괴가 발생하기 전에 이미 변위가 철근 후반부까지 전달된 형태로 강체운동(rigid body motion)에 가깝게 철근전체가 변형을 분포는 다르지만 일체로 거동하는 양상을 보인다.

5. 결론

풍화암 사면보강 중에 실시한 현장 인발시험과 실험실에 실시한 철근 및 그라우팅된 철근의 인장시험 결과를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었으며 일반적인 결과를 얻기 위해서 많은 시험과 연구가 필요한 것으로 판단된다.

1) SD40 Ø29mm 철근의 인장시험결과 항복 응력은 $3950\text{kg}/\text{cm}^2$ 이었고 항복이후 계속적으로 변형이 발생하며 연성과파괴(ductile failure) 형태를 보이다가 $5450\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서 파단(rupture)이 발생하였다.

2) 그라우팅된 철근의 인장시험결과 철근의 인장시험보다 탄성영역이 조금 확대되었으며 그라우팅된 시멘트 몰탈은 철근의 항복하중에서 3mm이상의 인장균열을 보이다가 하중이 증가하면서 철근에서 이탈되었다.

3) 2)와 같은 결과는 마찰저항이 큰 풍화암과 같은 지반에 Soil Nailing을 시공했을 경우 인장력이 작용하는 Nail의 파괴는 Nail의 파단(rupture)보다는 Nail 주위의 그라우팅재가 손상되면서 Nail이 인발파괴(slippage)형태를 보일 것으로 판단된다.

4) 현장인발시험결과 인발저항력은 상재하중이 직접적인 영향이 있는 것으로 조사되었으며, 인발하중이 증가하면 그라우팅체에 미소변위가 발생하게 되면서 그라우팅체와 지반사이에 최대 전단응력이 발생할 때까지 인발하중이 증가하면 그라우팅체가 철근에서 분리되면서 결국 철근의 인발파괴가 발생한다.

5) 인발시 Nail의 위치에 다른 응력 분포를 조사한 결과 Nail의 전면부가 파괴가 발생하기 전에 이미 변위가 Nail 후반부까지 전달된 형태로 Nail 전체가 변형 분포는 다르지만 일체로 거동하는 양상을 보인다.

참고문헌

1. Cartier, G and Gigan, J.P.(1983) "Experiments and observations on soil nailing structures", Proceeding of the 8th ECSMFE., Helsinki, Finland, pp.473-476.
2. Michell, J.K(1987), "Reinforad of earth slopes and embankments", NCHRP-290, Transportation Research Board, 323p.
3. Schlosser, F(1982)," Behavior and Design of Soil Nailing", International Symposium on Recent Developemnt in Ground Improvement Techniques, Bangkok.
4. Recommendations CLOUTERRE(1991), "Soil Nailing Recommendations", French National Research Project, 302p.
5. Soil Nailing for Stabilization of Highway Slopes and Excavations(1991) FHWA-RD-89-193, 210p.