

그라우트의 균열 및 Creep 현상을 고려한 쏘일네일의 축인장력 산정 Estimation of Axial Nail Force Considering Cracks and Creeps of Grout

임유진¹⁾, Yu-Jin Lim, 황상기²⁾, Sang-Ki Hwang

¹⁾ 배재대학교 공과대학 토목환경공학과 전임강사, Full-time Lecturer, Dept. of Civil & Geotechnical Engineering, Paichai Univ.

²⁾ 배재대학교 공과대학 토목환경공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil & Geotechnical Engineering, Paichai Univ.

개요(SYNOPSIS) : A new method of estimating axial nail force is proposed. An instrumented soil nail wall is selected to investigate the effectiveness of the new proposed method. The new method includes effect of creep and age of cement grout surrounding the steel bar. The new method also considers cracks in the grout generated during and after the end of the wall construction. It is found from this study that a reduced grout stiffness due to creep with age and crack of the grout must be considered for estimating correct axial nail forces. The reduced grout stiffness is considered also providing significant part of axial nail load compared to that of steel bar.

주요어(Key words) : soil nails, grout, axial nail force, creep, age, crack

1. 도입

근래 굴착사면 및 굴착 토사지반의 안정을 도모하기 위해 쏘일-네일링 공법이 국내외 토목공사현장에 널리 사용되고있다. 그러나 네일링 공법의 경제성과 시공상의 용이성에도 불구하고 정확한 네일축력의

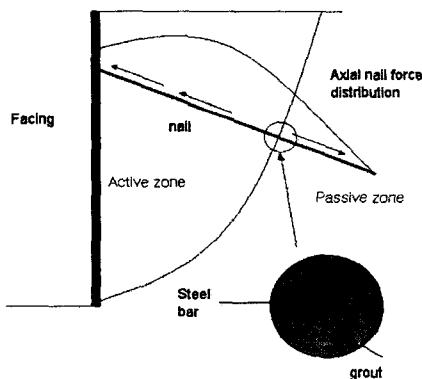


그림 1 쏘일-네일 보강 벽체의 구성 및 힘-평형관계

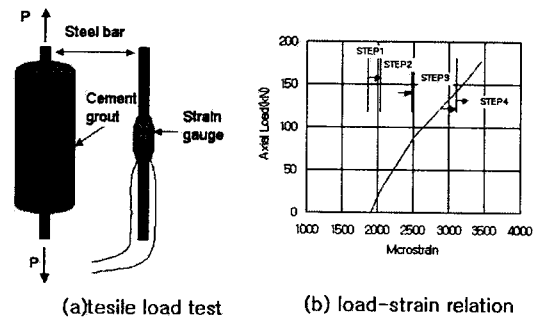
산정은 현재까지도 의문으로 남아있는 실정이다. 현재 까지 쏘일-네일 억지벽체에 대한 연구는 대부분 한계평형개념에 근거한 설계법에 관한 것이거나 이 방법의 단점을 보완하는 측면에서 수행되어왔다. 기존의 모든 방법은 네일에 발생하는 축력을 단일의 소요축력으로 계산하는 단점이 있다. 그러나 통상 현장에서 사용되는 네일은 이형철근과 그라우트의 복합단면으로 구성되어 있어서 각 재료단면에 발생하는 정확한 축력을 계산한 후 소요 축인장력을 산정함으로써 전체 네일-보강토체의 안정성을 검토하는 것이 보다 정확한 네일 설계법이 될 것이다(그림 1. 참조). 이를 위해서는 네일의 각 재료단면에 발생하는 변형율의 장기간에 걸친 정밀한 측정이 필요하며 대표적인 계측결과로는 Stocker and Riedinger(1990), Sakr(1992), Sakr and Kimmerling(1992) 등이 있다.

그러나 현장계측에서 측정된 네일의 변형율을 인장력으로 환산하는 방법은 몇 가지 문제점을 갖고 있

다. 그 이유는 첫째, 네일이 콘크리트 그라우트재와 인장철근으로 구성된 복합체이므로, 철근표면에 부착된 스트레인 게이지로 측정된 변형율을 바로 네일인장력으로 상관식 등을 이용해 환산하기가 어려우며; 둘째, 실제 인장력의 발생이 변형율에 대해 비선형 거동을 보인다는 것; 셋째, 현재까지는 네일의 그라우트부에 발생하는 크리프(creep)현상과 크랙(crack)등에 의한 영향을 네일 인장력의 산정시 고려하기가 곤란한 점등을 들 수 있다. 현재의 대표적인 네일 인장력의 산정 기법은, 현장에 타설되는 네일과 같은 재료(그라우트재 및 이형철근)를 사용하여 그림 2.(a)와 같이 소형몰드내에 두 재료를 넣고 양생하여 기준시간(7일 또는 28일) 경과 후 시편을 인장하여 하중-변위관계를 설정하고 스트레인게이지로 읽은 변형율값으로부터 인장력으로 환산하는 간접적인 방법이다. 이때 읽은 변형율값은 그라우트의 임의 재령, 특정 게이지 위치에서 네일의 전(全)절단면에 대해서 일정하다고 가정한 것($\epsilon_{grout} = \epsilon_{steel}$)이므로 네일 인장력은 변형율 발생크기와 재료특성, 게이지의 부착위치 등을 고려한다면 현재의 방법과는 매우 상이한 결과를 초래할 수 있다. 현재 국내의 네일링 계측현장에서의 축인장력 산출은 이와 같은 간접방법도 고려하지 않는 실정이며 대부분 그라우트가 완전균열 상태에 있다고 가정하여 이형철근만의 축인장력을 계산, 고려하거나 그라우트의 균열을 고려하지 않은 채로 그라우트가 완전히 기여하는 것으로 가정하여 양 극단을 보이고 있다.

한편, 인장하에 있는 네일의 하중-변형 거동은 그림 2.(b)와 같다. 하중-변위관계는 그라우트의 재료 특성, 재령, 주변 지반의 토질에 따라 다를 수 있으나 발생형태에 따라 일반적으로 3 ~ 4단계로 구분된다: 1단계 - 그라우트에 전혀 균열 발생이 없는 단계; 2단계 - 미세 균열 발생 단계; 3단계 - 대규모 균열 발생으로 그라우트의 기여도 상실 단계. 따라서 축인장력 산출법은 1단계에서의 복합 축강성, 그라우트부내 균열 발생 시점의 변형율, 그라우트의 극한강도에 크게 좌우된다.

본 연구는 계측 시험시공된 쏘일-네일벽체 내의 네일에 발생하는 인장력의 크기를 환산하기 위해 사용하는 방법들을 비교, 검토하고 이의 적정 산정법을 제시하여 쏘일-네일 보강 구조물의 합리적이고 경제적인 해석 및 설계에 필요한 자료를 제공하는데 목적이 있다.



2. 네일 인장력의 환산법

그림 2 하중-변형을 관계 설정을 위한 네일 시편의 직접인장시험

2.1 그라우트부의 인장력에 미치는 영향인자

그림 2는 실내에서 네일시편을 만들고 양단인장시험을 수행, 네일의 인장력-변형율관계를 구하여 현장의 네일 인장력을 환산하는 간접적인 방법을 도시한 것이다. 그러나 간접법으로부터 구한 인장력은 여러 가지 문제점을 갖고 있다. 먼저, 실내시험법은 양단인장시험에 의해 인장력-변형율 관계식을 구하나 실제에 있어서는 스트레인 게이지가 부착된 이형철근과 그라우트재, 그리고 주변 흙 사이의 접촉면에서의 마찰 또는 전단효과에 의해 이형철근 상에 변형율이 발생된다고 보아야한다(그림 1. 및 그림 2. 참조). 즉, 경계조건과 인장력 발생 메카니즘이 완전히 다르다. 또한 실내 간접시험법은 시멘트 그라우트재의 크리프, 응력완화현상(stress relaxation) 및 네일 그라우트재의 재령(curing age)을 고려하여 네일의 인장력변화를 다룰 수가 없다.

쏘일-네일은 이형철근과 시멘트 그라우트로 구성된 복합체로서 스트레인 게이지는 통상 이형철근상에 쌍으로 부착되어 그라우트와 철근사이의 접합부에서의 변형율을 측정한다. 이때 철근이 탄성거동을 한다고 가정하여 스트레인 게이지 부착위치에서의 인장력을 계산하게 된다. 그러나 네일 보강재의 저항력은 이형철근의 축인장력에 의한 것만이 아니고 이형철근-그라우트 복합체에 의한 것으로 보아야 한다

(Thompson and Miller, 1990; Elias and Juran, 1990). 즉, 그라우트에 의해 상당량의 네일 인장력이 분담된다고 보아야 한다. 그라우트에 의한 네일인장력의 분담량은 네일의 총복합축강성도($A_{total}E_{total}$)에 대한 그라우트의 축강성도($A_G E_G$)의 분담비를 이용하여 구한다. 그러나 적정 분담비의 산정이 어려운데 그 이유는 첫째, 그라우트의 비탄성 거동, 둘째, 재령에 따른 그라우트의 시간의존성 크리프 발생, 셋째, 작은 하중/변형을 하에서의 그라우트의 크랙 발생으로 인한 네일의 인장강도 감소를 들 수 있다.

2.2 그라우트부의 인장력 환산

기존의 방법(Thompson and Miller, 1990)은 그라우트의 크리프에 의한 강성도의 감소를 무시하고 재령에 따라 적정크기의 콘크리트 강성을 선정하여 스트레인 게이지에 의해 측정된 변형율이 네일의 전단면에 걸쳐 일정하다고 가정($\epsilon = \epsilon_S = \epsilon_G$)하여 네일의 총복합 축인장력을 구하는 것이며 네일인장력의 상한값이 된다. 이 방법은 크랙이 발생하지 않았을 경우를 가정하면 식 (1)과 같이 총인장력은 두 재료내에 발생하는 인장력의 합으로 계산된다.

$$T = T_S + T_G = \epsilon_S A_S E_S + \epsilon_G A_G E_G \quad (1)$$

한편 인장력의 하한값은 그라우트부에 한계인장력이 작용하여 균열이 발생, 이형철근에만 인장력이 집중되는 경우이다(식 (2) 참조).

$$T = T_S = \epsilon_S A_S E_S \quad (2)$$

따라서 통상의 인장력은 이 두 극한값 사이에 놓이게 되며 그라우트부의 네일 전단면적에 대해 차지하는 면적과 그라우트의 재령, 크리프의 고려여부, 응력완화정도에 따라 그 값이 크게 변한다.

네일에 생성되는 인장력은 벽체의 축조가 진행됨에 따라 계속 증가하는 경향을 보인다. 측정된 변형율로부터 네일의 인장력을 산정하기 위해서는 그라우트의 탄성계수 값과 인장강도 값을 추정하거나 시험으로부터 구하여야 하지만 앞서 지적한 바와 같이 이 들은 재령에 따라 계속 변화한다. 따라서 그라우트의 재령을 고려, 탄성계수와 극한강도를 추정한 후 인장력을 산출하여야 한다.

2.2.1 그라우트 재령에 따른 강도 및 탄성계수 값의 산정

재령에 따라 그라우트의 탄성계수(E_G) 값이 변하므로 네일 타설직후로부터 벽체 완공시(t_{end})까지의 기간 중 임의시점에서의 재령에 상당하는 탄성계수를 계산할 수 있다. 이를 위해 평균재령(t_{avg})을 사용하였다(그림 3. 참조). 또한 그라우트의 극한강도(f_{ult})는 보강벽체 완성시에 상당하는 재령으로부터 구하였다. t_{end} 는 최하열 네일이 타설된 시점으로부터 통상 2주 후로 보며 이때 보통 네일의 변형을 증가 속도($\epsilon \cdot$)가 급하게 감소한다(Sakr and Kimmering, 1992). 네일에 사용된 그라우트에 대한 국내 현장의 가용 자료가 매우 부족하여 미국 콘크리트협회(ACI, 1992)에서 제안된 식을 사용하였다. ACI209R에 의한 콘크리트의 압축강도는 재령28일 강도(f_{28})를 기준으로 재령을 t 라 할 때 1종 시멘트의 경우 식 (3)으로부터 계산된다.

$$f_c^t = f_c^{28} \left(\frac{t}{4 + 0.85t} \right) \quad (3)$$

그라우트의 인장강도는 압축강도와 식 (4)의 관계를 갖는다.

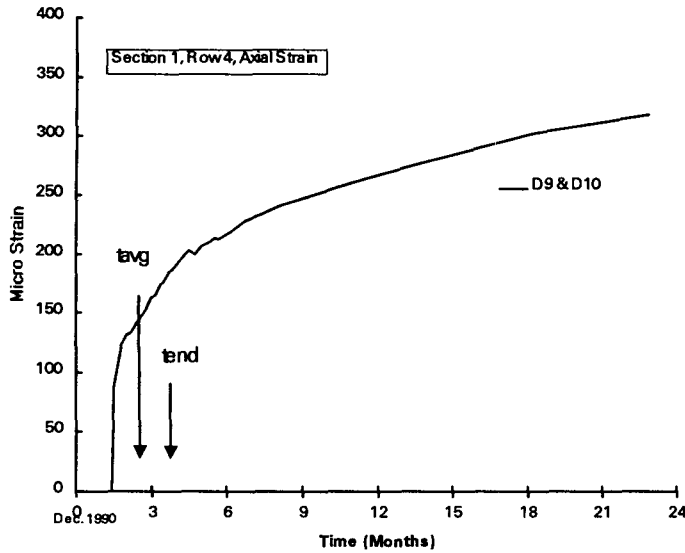


그림 3 장기간에 걸친 네일의 변형을 변화 및 평균재령의 정의

현상이 일어나는 것으로 알려져 있다. 크리이프는 균일하중 하에서 장시간에 걸쳐 변형율이 계속 증가하는 것이고 응력완화는 재료가 균일 변형을 하에서 장시간에 걸쳐 응력이 감소하는 현상이다. 쏘일네일 보강 구조물의 경우, 외력이 크게 변하지 않았음에도 불구하고 구조물의 완공(t_{end})후에도 측정된 변형율이 계속 증가하는 현상이 수차 보고된 바 있다(Sakr and Kimmering, 1992; Thompson and Miller, 1990; 그림 3. 참조). 이와 같은 현상은 Byrne(1992)에 보고된 것과 같이 타설초기 그라우트에 의해 대부분 분담되던 하중이 그라우트의 크리이프 발생으로 인해 점차 이형철근으로 전이되는 것을 의미한다(그림 4. 참조). 크리이프와 응력완화에 의한 그라우트 내의 하중은 ACI-209R(ACI, 1992)에 따라 계산 가능하다. 재령 t 에 해당하는 크리이프 비는 탄성변형율에 대한 크리이프 변형율의 비로 정의된다(식 (6) 참조).

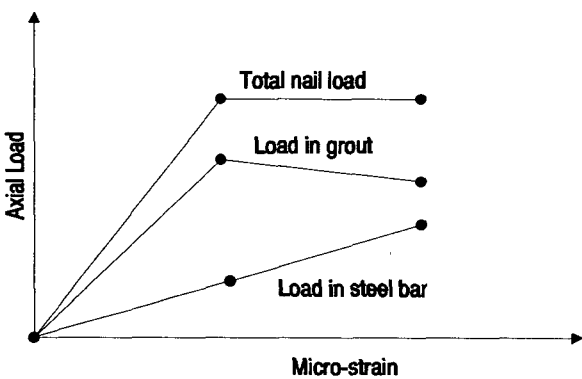


그림 4 크리이프와 응력완화에 의한 쏘일네일 내에서의 하중 분담을 변화 추이

$$f_c^t = 0.33 (f_c^t)^{0.5} \quad (4)$$

한편 그라우트의 재령에 따른 탄성계수값은 식 (5)를 이용해 계산된다.

$$E_c^t = 4800 (f_c^t)^{0.5} \quad (5)$$

식 (3) ~ 식 (5)의 단위는 모두 MPa이다. 일반적으로 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 $f_{28} = 20.7$ MPa(약 210 kgf/cm^2)이며 이를 준용하여 모든 경우에 적용하였다.

2.2.2 그라우트의 크리프(creep)와 응력완화(stress relaxation)의 영향

콘크리트는 크리이프 변형과 응력완화

$$v_{t_d} = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_e} \quad (6)$$

크리이프 비는 식 (7)로 계산된다.

$$v_{t_d} = \frac{C t_d^{0.6}}{10 + t_d^{0.6}} \quad (7)$$

여기서 ϵ_c = 크리이프 변형율, ϵ_e = 탄성변형율, t_d = 재하기간(일), C는 상수로서 습도, 콘크리트부재의 두께 및 수중양생시의 재령 등의 영향계수의 곱이다. 따라서 크리이프 비를 이용하면 그라우트의 유효 탄성계수를 식 (8)을 이용해 계산할 수 있다.

$$(E_c^t)_{eff} = \frac{E_c^t}{1 + v_{t_d}} \quad (8)$$

재령 t 는 재령이며 재하기간(t_d)는 t_{avg} 로부터 임의 결정일까지의 경과일이다(그림 4. 참조). 계산된 유효 탄성계수와 측정된 변형을, 그라우트의 단면적을 이용하면 그라우트의 분담 하중을 구할 수 있다. 따라서 식 (1)로부터 네일에 발생하는 총하중을 구할 수 있다.

2.2.3 그라우트 균열에 의한 네일 인장력의 변화

그림 5.는 그라우트에 인장균열 발생 시 네일 내에서의 응력분포를 도시한 것이다. 균열 발생위치에서는 이형철근에 응력이 집중 발생하며 이형철근 및 그라우트내 응력의 크기가 균열발생 유무에 따라 크게 다른 양상을 보인다. 따라서 균열에 의한 하중분담 차이를 분석하면 읽은 변형을 값을 보다 정확히 인장력으로 환산할 수 있다. 식 (3)~(5)를 고려하여 균열 발생 직전 그라우트에 발생하는 최대 인장하중은 식 (9)로 계산된다.

$$T_{g-lim} = f_t^t A_G \quad (9)$$

한계 변형을 ϵ_{lim} 은 식 (10)과 같이 볼 수 있으므로 균열 발생전의 최대 총네일하중은 식 (11)로 계산된다.

$$\epsilon_{lim} = \frac{f_t^t}{E_c^t} \quad (10)$$

$$T_{n-lim} = T_{g-lim} + \epsilon_{lim} A_S E_S \quad (11)$$

파괴되지 않은 상태인 공용중의 네일 인장하중은 벽체 완공시의 측정된 변형을 선택하여 계산하였다. 그라우트부 하중은 식 (12)로 계산되지만 균열에 따른 그라우트부 하중(T_g)의 발생 크기에 따라 이형철근에 발생한 하중을 식 (13) 또는 식 (14)와 같이 표시할 수 있다.

$$T_g = \epsilon E_g A_g \quad (12)$$

$$T_n = \epsilon (E_s A_s + E_g A_g) = T_s + T_g \quad (13)$$



(a) nail in axial tension



(b) variation of stress in steel bar



(c) variation of stress in grout

$$T_n = T_{n-lim} \quad (14)$$

식 (13)의 경우는 그라우트부 발생하중이 한계값 이하일 경우, 식 (14)는 한계값을 초과할 경우에 적용된다.

따라서 네일에 발생하는 인장력은 그라우트의 균열유무에 따라 상한값과 하한값으로 구별될 수 있으며, 상한값은 균열이 없을 경우의 최대 하중, 하한값은 균열 발생시 이형철근에만 발생하는 것으로 판단할 수 있다. 스트레인 게이지는 이형철근상에 부착되고 벽체의 축조완료 후 측정된 변형율이 계속 선형탄성 거동영역 내에 존재한다면 이형철근에 발생하는 최대 인장력이 곧 네일에 발

그림 5 인장에 의한 균열 발생시 이형철근과 그라우트 내의 응력 발생 차이 (Won et al, 1990)

생하는 하한값이 된다. 반면, 네일에 발생하는 인장력의 상한값은 벽체의 축조완료 후 측정된 변형율을 이용해 네일의 복합단면을 해석함으로써 식 (15)와 같이 계산된다.

$$T_{n-max} = T_{s-max} + T_{g-max} \quad (15)$$

그림 6.은 네일 인장력의 변형을 발생크기에 따른 변화를 약식으로 도시한 것이다. 약 $200 \mu \epsilon$ (microstrain)에서 균열이 발생하기 시작함으로써 네일내 인장력이 변형율의 크기에 따라 상한값, 하한값 또는 그 중간값을 생성하게 되는 과정을 설명한 것이다. 그라우트에 미소 균열이 발생할 경우에도 발생된 변형율이 일정값 이하라면 이 영역내에서는 그라우트가 일정량의 인장력을 담당하는 것으로 가정하였다.

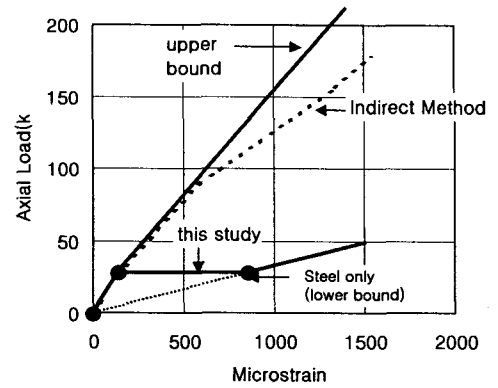


그림 6 네일에 발생하는 인장력의 변형을 발생크기에 따른 변화

3. 현장계측에 대한 적용

제안된 네일 인장력 환산법을 장기간에 걸쳐 정밀 계측된 한 현장에 적용하여 적정성을 검토하였다. 계측된 쏘일-네일 벽체는 미국 오리건 주의 I-5 고속도로 상의 한 교대 밑에 축조된 것을 대상으로 삼았다. 그림 7.은 네일벽체의 계측기 매설상태를, 그림 8.은 시편네일의 직접인장에 의한 인장력-변형율관계도를 도시한 것이다. 그림 9.-그림 12. 는 1열 네일부터 최하단 5열 네일의 타설 후 부터의 변형을 변화추이를 도시한 것이다.

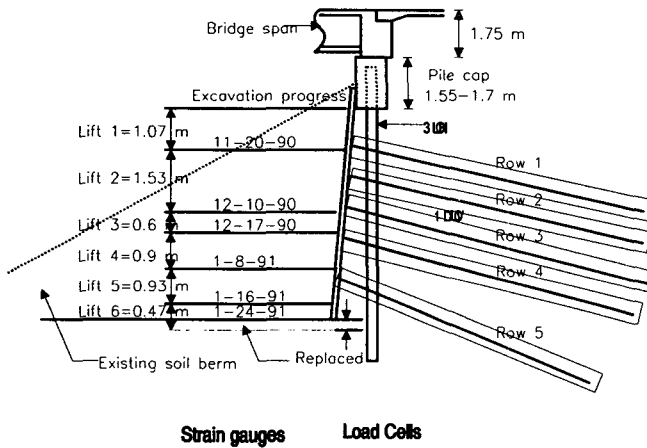


그림 7 축조순서 및 현장계측개요도

Force - Strain Relationship Curve of a Lab Test Nail

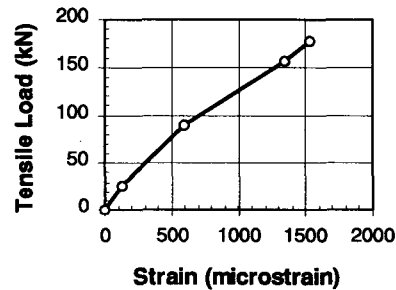


그림 8 네일시편의 직접인장에 의한 인장력-변형율관계도

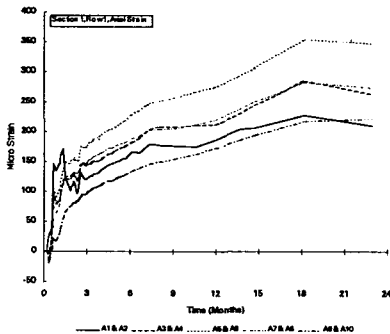


그림 9 네일의 변형을 변화추이 (1열)

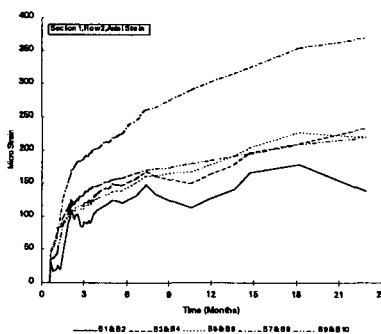


그림 10 네일의 변형을 변화추이 (2열)

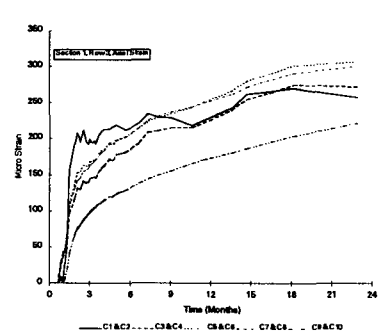


그림 11 네일의 변형을 변화추이 (3열)

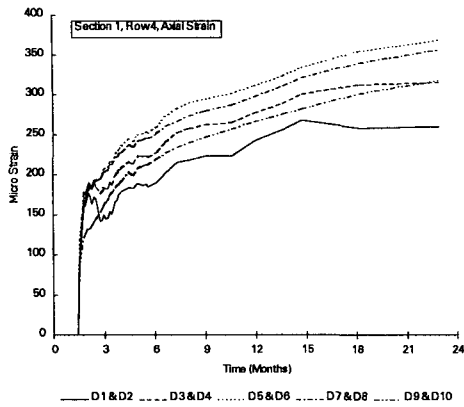


그림 12. 네일의 변형을 변화추이(4열)

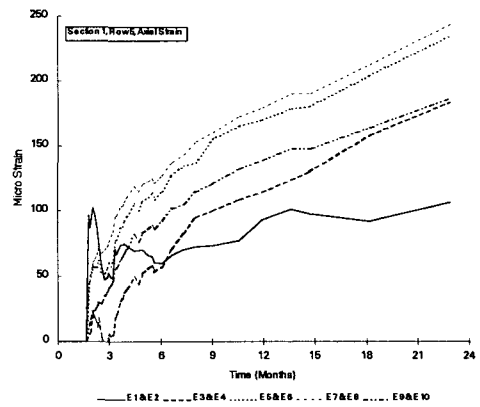


그림 13. 네일의 변형을 변화추이(5열)

그림 14.는 본 연구에서 채택한 API식을 사용하여 그라우트의 강도변화추이를 계산, 도시한 것이며 이때 그라우트는 1종의 단위중량 2300kgf/m^3 인 시멘트 페이스트로 가정하였다. 최하열 네일 타설 후 약 2주 지난 시점을 t_{end} 로 설정하고 읽은 변형을 값으로부터 각 네일의 인장하중을 계산/비교하였다.

그림 15. ~ 그림 19.는 네일에 발생하는 인장력을 도시한 것으로서, 실내 인장시험으로 설정된 인장-변형을 관계로부터 구한 인장력, 그라우트의 크리이프 및 균열을 고려한 네일 인장력, 네일의 가상 최대값, 그라우트가 전혀 구실을 못할경우의 최하한값으로 함께 표시하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 네일 시편의 실내 인장에 의한 인장-변형을 관계로 간접 계산한 네일 인장력은 상한값에 상당히 근접해 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 본 연구에서 균열 및 크리이프 효과를 고려하여 제안한 방법에 의해 계산된 네일 인장력은 하한값에 근접한 결과를 보였다. 이는 네일의 그라우트부가 2주 지난 시점에서 이미 상당부분 균열을 경험하고 있다는 것을 말한다. 국내에서 흔히 가정하는 네일 인장력은 통상 상한값에 해당하며 이는 측정 되는 네일 인장력이 실제 네일에 발생하는 것 보다 과대하게 계상되고 있음을 보여준다.

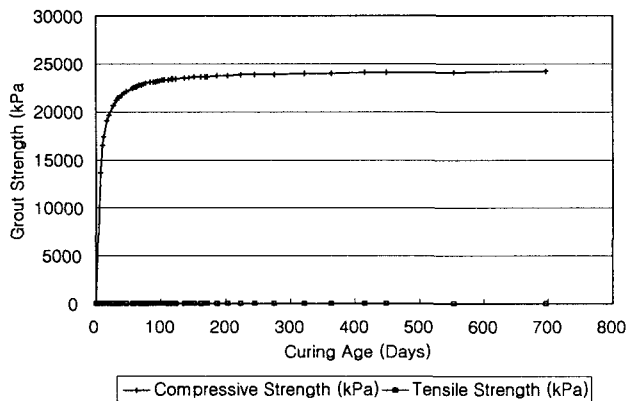


그림 14 그라우트 재령에 따른 압축강도 및 인장강도의 변화추이

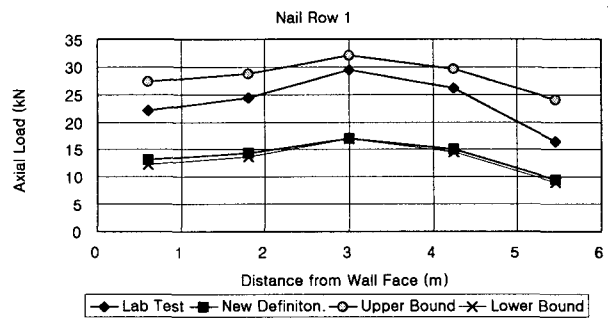


그림 15 네일에 발생한 인장력 크기 비교
(a) 1열네일

따라서 그라우트 재료에 대한 정밀한 실험을 통해, 쏘일-네일에 사용되는 그라우트의 균열 및 크리이프 특성을 정확히 밝힘으로서 실제 네일에 발생하는 인장력을 산출할 수 있는 방법이 설정되어야 하며 이를 이용하여 네일벽체의 설계시에도 반영할 수 있는 대책이 강구 될 필요가 있다.

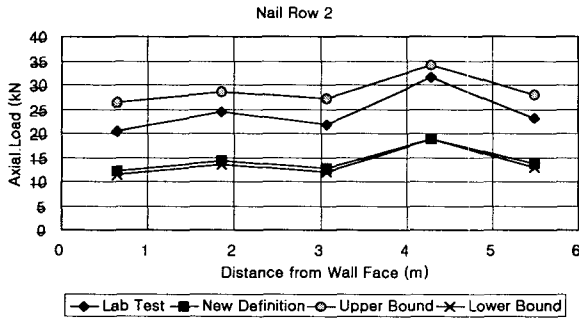


그림 16 네일에 발생한 인장력 크기 비교
2열 네일

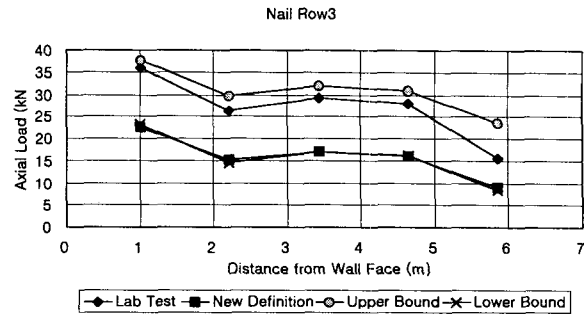


그림 17 네일에 발생한 인장력 크기 비교
3열 네일

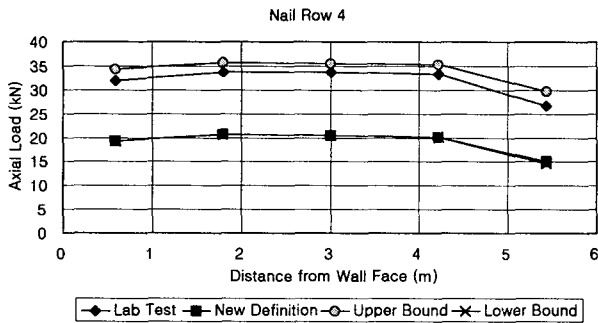


그림 18 네일에 발생한 인장력의 크기 비교
4열 네일

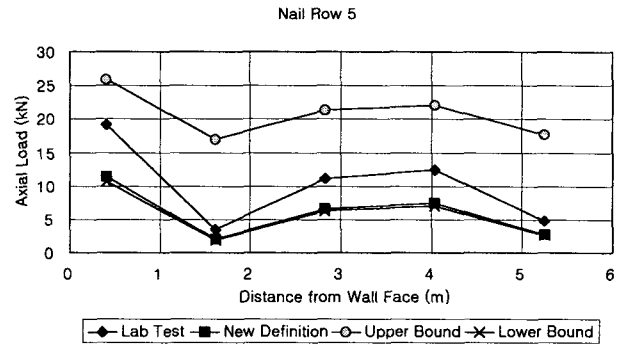


그림 19 네일에 발생한 인장력의 크기 비교
5열 네일

4. 결론

네일의 인장력 산출을 위한 여러 가지 방법을 비교 검토하였으며 특히 그라우트의 균열과 크리이프 특성을 고려할 수 있는 방법을 적용해 네일 인장력을 산출하여 다음과 같은 결과를 구할 수 있었다.

1. 최하열 네일 타설 후 약 2주 지난 시점을 t_{end} 로 설정하고 읽은 변형을 값으로부터 각 네일의 인장하중을 계산/비교하여 네일 시편의 실내 인장에 의한 인장-변형을 관계로 간접 계산한 네일 인장력은 상한값에 상당히 근접해 있는 것을 확인할 수 있었다.
2. 본 연구에서 균열 및 크리이프 효과를 고려, 제안한 방법에 의해 계산된 네일 인장력은 하한값에 근접한 결과를 보였다. 이는 네일의 그라우트부가 2주 지난 시점에서 이미 상당부분 균열을 경험하고 있다는 것을 말한다.
3. 국내에서 흔히 가정하는 네일 인장력은 상한값에 해당함을 확인하였으며 이는 측정 되는 네일 인장력이 실제 네일에 발생하는 것 보다 과대하게 계상되고 있음을 보여준다.
4. 본 연구에서 제안한 방법은 균열뿐만 아니라 네일의 장기거동의 바른 해석을 위해서 그라우트의 재령에 따른 크리이프도 고려할 수 있는 방법이며 정확한 네일의 거동파악을 위해 지속적인 연구가 필요하다.

5. 참고문헌

1. Sakr, T. C and Kimmerling, R. (1995). "Soil Nailing of a Bridge Embankment Report 2: Design and Field Performance", Oregon Department of transportation
2. Thompson, S. R. and Miller, I. (1990). "Design, Construction and Performance of a Soil Nailed Wall in Seattle, Washington", Ed. Lambe, P. and Hansen, L., ASCE GSP no.25.