네일 및 지오텍스타일을 이용한 원위치 사면보강공법에 관한 연구

A Study on In-Situ Slope Reinforcement Methods Using Nailed Geotextiles

김 홍 택*
Kim, Hong - Taek

Abstract

In the present study, an economic design of Anchored Geosynthetic(AG) System applied mainly to reinforce unstable soil slopes is investigated. For this purpose methods of stability analysis are developed to determine the optimum installation angle, required minimum length and maximum spacing of nails. Anchorage of nails within the soil mass is achieved by frictional resistance to pull out along the effective length of the nails. Cases of infinite slope and finite slope are dealt with individually. Slice methods of stability analysis developed in the present study are limit-equilibrium-based. For the case of finite slope Spencer method which considers interslice forces is modified to evaluate the overall stability. In addition, the effects of various design parameters on required length and spacing of nails corresponding to the optimum orientation of nails are analyzed. Based on the analysis, a simplified equation is given for the optimum nail orientation. Also the importance of optimum nail orientation is illustrated throughout design example, and the appropriateness of judgment criterion are examined.

요 지

본 연구에서는, 불안정한 흙사면 보강에 주로 적용되는 Anchored Geosynthetic(AG) System의 경제적인 설계(네일의 길이는 최소화하고, 네일의 설치간격은 최대화하는 설계)를 위해 요구되는 네일의 최적타입각도를 결정하기 위한 안정해석법의 제시가 이루어졌다. 고려한 정착형태는 네일을 원지반에 타입시켜 주변마찰에 의해 정착이 이루어지는 형태이다. 본 연구에서는 무한사면 및 유한사면의 경우를 각각 구분하여 한계평형 절편법을 토대로 한 안정해석법의 제시가 이루어졌으며, 유한사면의 경우에는 인접된 각 절편 사이의 경계면에 작용하는 수직력 및 전단력을 모두 고려하는 Spencer 방법을 일부 변형하여 안정해석법의 제시가 이루어졌다. 또한 제시된 안정해석법을 토대로, 다양한 설계상의 변수가 네일의 최적타입각도, 요구되는 네일의 길이 및 설치간격 등에 미치는 영향이 분석되었으며, 이를 통해 최적타입각도 결정을 위한 간편식의 제시도 이루어졌다. 이외에도 네일 최적타입각도 결정의 중요성을 설계예를 통해 설명하였으며, 판정기준의 적합성 검토도 이루어졌다.

* 정회원, 홍익대학교 공과대학 토목공학과 부교수

1. 서 론

AG(anchored geosynthetic) System 또는 ASN(anchored spider netting) System으로 불리우는 사면보강공법은 1980년도 중반에 Koerner[5),6)]에 의해 최초로 제안되었다. 이 공법의 개요는 앵커역할을 하는 네일(nail)을 전체 설계길이의 75~90% 정도까지 원지반에 일차적으로 타입한 다음, 표면에 포설된 지오텍스타일(geotextiles)을 타입된 네일의 상단부에 단단히 접속시킨 후, 네일의 나머지 부분 타입을 계속하여 정착시킴으로써 표면에 포설된 지오텍스타일의 인장을 통해 유발된 압축력을 원지반에 추가적으로 가해 결국은 파괴면을 따라서의 전단저항을 증대시키는 공법이다(그림 1). 또한 타입에 의한 정착방법 대신에, 타이백(tieback)의 경우처럼 그라우팅 네일을 인장시켜 지지판에 접속시키는 방법도 개략적으로 제시[4)]된 바 있다. AG System은 사면의 선단 또는 상단 부근에 구조물 및 도로 등이 존재하거나 또는 새로운 구조물 축조공사가 진행되는 경우에, 불안정한 사면의 흙을 굴착·제거하지 않은 상태에서 보강이 이루어지는 원위치(in-situ) 사면안정공법이다. 또한 Myles와 Briddle[7)]이 그들의 논문에 소개한 fired soil nails 기계(길이 3~6m 정도, 직경 25mm 또는 38mm의 네일을 200mph의 속도로 시간당 15개 이상 설치가능한 기계) 또는 경장비에 해당되는 vibropercussion, pneumatic hammer 등을 이용하여, 비교적 신속·간편하게 시공할 수 있는 장점을 아울러 지니고 있다. 이 공법의 기본원리는, 단기적으로는 지반이 압축력을 추가적으로 받게하여 불안정한 흙사면의 안정성을 증대시키고, 장기적으로는 지반의 조밀화(다짐/압밀)를 유도하여 네일 및 지오텍스타일의 인장효과에 의존함이 없이 개선된 지반자체의 전단강도로서 충분한 사면안정이 유지되게 하는 공법이다. 함수량이 특히 많은 점성토 지반의 경우에도 적용이 가능하나, 이 경우에는 장기적인 압밀침하특성 때문에 일정기간 동안 네일의 주기적인 재정착이 필요시 된다고 Koemer는 밝히고 있다. 이외에도, 네일의 설치간격이 촘촘해 네일-주변흙 사이의 국부적인 전단저항이 주된 보강역할을 하는 쏘일네일링 시스템(soil nailing system)의 경우와는 달리, AG System의 경우에는 인장된 지오텍스타일에 의해 원지반에 가해지는 추가적인 압축력이 주된 강도증대의 원인이며, 따라서 네일의 길이가 일반적인 쏘일네일링 시스템에 비해 비교적 짧은 특성을 지니고 있다. AG System에 의한 사면보강은 얕은파괴인 경우에 특히 효율적이며[4)], 그 이유는 파괴면이 깊어질수록 파괴흙쐐기의 중량은 커지게 되며, 따라서 AG System에서 주된 보강효과를 유발하는 지반압축력이 전체적인 사면안정에 미치는 영향이 점차 감소하는 데 있다.

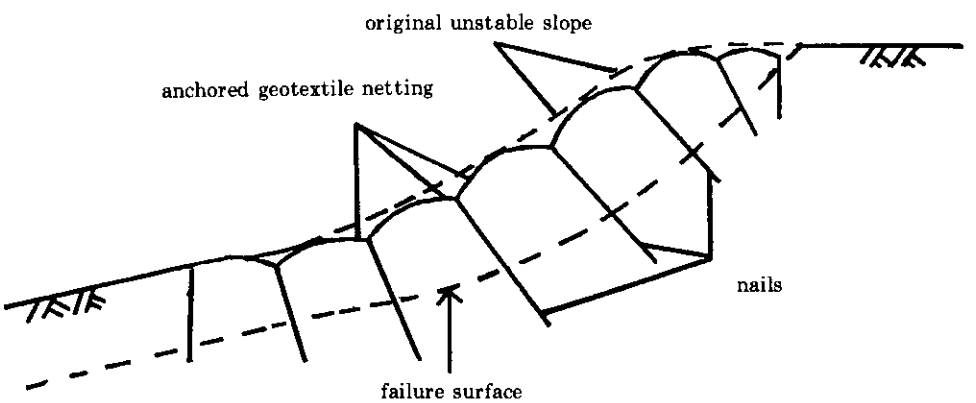

그림1. AG System 개요.

본 연구에서는, AG System의 경제적인 설계(네일의 길이는 최소화하고, 네일의 설치간격은 최대화하는 설계)를 위해 요구되는 네일의 최적타입각도를 결정하기 위한 안정해석법의 제시가 이루어졌다. 고려한 정착형태는 네일을 지반에 타입시켜 주변마찰에 의해 정착이 이루어지는 형태(frictional anchorage type)이다. 본 연구에서는 무한사면(2장) 및 유한사면(3장)의 경우를 구분하여 한계평형 절편법을 토대로 한 안정해석법의 제시가 각각 이루어졌으며, 유한사면의 경우에는 인접된 각 절편 사이의 경계면에 작용하는 수직력 및 전단력을 모두 고려하는 Spencer 방법을 일부 변형하여 안정해석법의 제시가 이루어졌다. 또한 제시된 안정해석법을 토대로, 다양한 설계상의 변수가 네일의 최적타입각도, 이에 해당되는 네일의 최소길이 및 최대설치 간격 등에 미치는 영향이 분석되었으며, 이를 통해 최적타입각도 결정을 위한 간편식의 제시가 AG System 보강유한사면에 대해 이루어졌다. 이외에도, 최적타입각도 결정의 중요성 및 판정기준에 대한 적합성 검토가 이루어졌으며, 설계예 및 설계도표의 제시 등이 포함되었다.

2. 보강무한사면

본 AG System 보강무한사면 안정해석에서는 균질한(homogeneous) 지반의 경우를 다루었으며, 지하수면의 위치는 경사면의 방향과 평행하게 가정하여 이에 따른 간극수압의 영향을 포함하였다. 지진하중의 영향은 수평진도 $k_h(=a_h/g,\ a_h$=수평가속도, g=중력가속도)를 토대로 근사적으로 다루었으며, 지진하중시 예상되는 지반내부의 거동적 특성변화 및 간극수압의 증가현상 등은 고려하지 않았다. 네일의 휨강성(bending stiffness)에 따른 영향은 일반적으로 무시되며[8], 따라서 본 연구에서는 인장된 지오텍스타일에 의해 지반에 가해지는 압축력의 작용방향을 네일의 타입방향과 동일하게 가정하였다. 이외에도 각 네일에 의해 유발되는 압축력의 크기, 네일의 타입각도 및 길이는 모두 동일하게, 또한 압축력은 파괴면에 균등한(uniform) 응력증가를 유발하는 것으로 가정하였다. 아울러 본 장의 AG System 보강무한사면 안정해석법은, 사면 선단 및 상단의 단부영향을 거의 무시할 수 있을 정도로 파괴면의 길이가 길고 또한 파괴면까지의 깊이가 얕은 경우(Hryciw[4]가 언급한 Gonsior 등의 제시기준에 따르면, 파괴면의 길이가 파괴면까지의 깊이에 대략적으로 20배 이상인 경우), 또한 지표면에 대체적으로 평행하다고 판단되는 파괴면의 위치(깊이)를 비교적 분명하게 예측할 수 있는 경우에 한하여 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

2.1 기본안정해석

무한사면 한계평형 해석법의 경우, 안전율 FS는 파괴면을 따라서의 활동력과 이에 대응하는 저항력의 비(ratio)로서 일반적으로 정의된다. Mohr-Coulomb 파괴규준을 토대로 그림 2-a에 도시된 보강되지 않은(unreinforced) 절편의 안전율 FS_u의 계산식을 정리하면 다음과 같다.

$$FS_u = \frac{\{\cos(\omega+\beta)-(U/W')\}\cdot\tan\phi+(C/W')}{\sin(\omega+\beta)} \quad (1)$$

여기서 $W'=W\sqrt{(1.0+k_h^2)}$

$W=s_s\cdot s_y\cdot\cos\beta\{\gamma\cdot m\cdot Z+\gamma_{sat}\cdot(1.0-m)\cdot Z\}$

$\omega=\tan^{-1}(k_h)$

$U=(1.0-m)\cdot Z\cdot\gamma_w\cdot\cos^2\beta\cdot s_s\cdot s_y$

$C=c_s\cdot s_s\cdot s_y$(c_s=지반흙의 점착력)

m=지하수면의 위치를 표시하는 계수

이며; m>1.0인 경우의 FS_u값은 m=1.0에 해당되는 FS_u값과 동일하다. 또한 Y-방향(그림 2)으로의 네일 설치간격 s_y는, 경사면 방향으로의

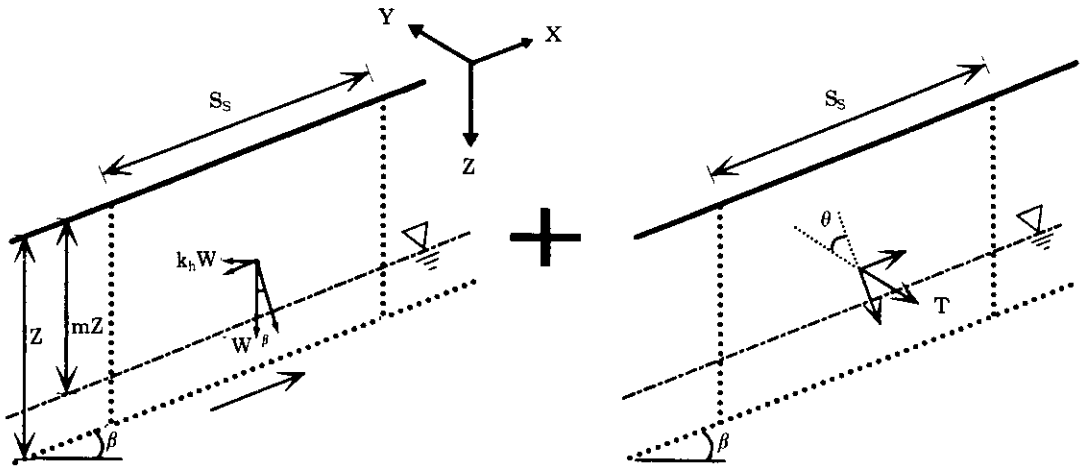

그림2. 무한사면－절편에 작용하는 힘들

설치간격 s_s와 계수 α를 이용해 결정하는 것으로 가정하였다($s_y=s_s/\alpha$).

한편 지오텍스타일 및 네일을 이용해 보강이 이루어진 즉 압축력 T가 추가된(그림 2-b) 보강절편의 안전율 FS_r의 계산식은 다음과 같다.

$$FS_r=(1.0+f)\frac{\{(\cos(\omega+\beta)-(U/W')+(T/W')\cos\theta\}\cdot\tan\phi+(C/W')}{\sin(\omega+\beta)-(T/W')\sin\theta} \quad (2)$$

AG System의 경우, 인장된 지오텍스타일에 의해 원지반에 가해지는 압축력 T 이외에도, 네일-주변흙 사이의 상호작용에 의해 추가적인 여러 보강효과(접촉면을 따라 발휘되는 마찰저항 및 부착저항, 또한 네일의 휨저항 및 비틀림저항 등)가 예상됨을 Koerner[6]는 밝혔으며, 식(2)에 포함된 f는 이와같은 추가적인 여러 보강효과를 복합적으로 표시하기 위한 계수(lumped parameter)이다.

또한 식(1) 및 (2)를 보강효과의 정도를 표시하는 관계식 $FSR=FS_r/FS_u$에 대입하여, 원지반에 가해지는 압축력 T와 파괴흙쐐기의 중량에 관련된 W′과의 비(ratio)로 정의되는 ξ 값으로 표현하면 다음과 같다.

$$\xi=\frac{T}{W'}=\frac{\{FRS-(1.0)+f\}\sin(\omega+\beta)}{\left[\frac{\cos\theta(1.0+f)\cdot\sin(\omega+\beta)}{\cos(\omega+\beta)-\frac{U}{W'}+\frac{C}{W'\tan\phi}}+FSR\sin\theta\right]} \quad (3)$$

만약 FSR=(1.0+f)인 경우 식(3)에서 ξ값은 0(zero)이 되며 이는, 네일 주변에서 예상되는 추가적인 보강효과 만으로도 소요안전율이 확보되는 상태를 의미한다. 따라서 인장된 지오텍스타일에 의해 원지반에 가해지는 압축력 T에 의해 주된 보강이 이루어지는 본 연구 AG System 안정해석법의 경우, 설계시 채택 가능한 f값은 일정한 크기 미만 즉, $f<(FSR-1.0)$으로 제한되어야 한다.

2.2 압축력 T의 계산

원지반에 추가적으로 작용하여 AG System 보강효과가 유발되는 압축력 T는 타입되는 네일이 지표면에 포설된 지오텍스타일을 인장하므로써 유발된다. 따라서 압축력 T의 크기는 네일의 전체길이 L 중에서, 파괴면 바깥쪽에 위치한 네일의 길이(유효길이)에 한해 주변흙과 마찰을 토대로 다음과 같이 계산되어진다.

$$T=\pi r K_n \tan\delta (mZ\frac{\cos\beta}{\cos\theta})^2(\gamma-\gamma_{sub}) \qquad (4-1)$$
$$+\pi r K_n \gamma_{sub}\tan\delta L^2-\pi r K_n \gamma \tan\delta (Z\frac{\cos\beta}{\cos\theta})^2$$
$$+2\pi r c_a(L-Z\frac{\cos\beta}{\cos\theta})\leq (G_{yield}/FS_y)$$

여기서, r은 네일의 반지름을, δ는 네일-주변흙 사이의 마찰각을, c_a는 부착응력을 각각 나타낸다.

식 (4−1)에서, G_{yield}는 네일과 지오텍스타일의 인장항복강도 중에서 작은 값을 의미하며, FS_y는 설계시 G_{yield}에 적용하는 안전율을 의미한다. Koener[5]는 $G_{yield}\fallingdotseq 13.3KN$ (네일과 지오텍스타일의 결합부에서 요구되는 지오텍스타일의 인장항복강도) 정도라고 밝힌 바 있다.

식 (4−1)의 적용범위는 $1.0\leq m<m_{lim}$이며, $0\leq m<1.0$인 경우는 식 (4−1)에서 m=1.0인 경우와 동일한다(그림2 참조). 여기서 $m_{lim}(=\frac{L\cos\beta}{Z\cos\theta})$는 네일 끝부분에 지하수면이 위치하는 경우를 정의하며, 만약 지하수면의 위치가 네일 끝부분 또는 이를 벗어나는 경우($m>m_{lim}$) 또는 지하수가 존재하지 않는 경우에는 아래의 식 (4−2)로 부터 압축력 T의 크기가 결정된다.

$$T=\pi r K_n \gamma \tan\delta [L^2-(Z\frac{\cos\beta}{\cos\theta})^2] \qquad (4-2)$$
$$+2\pi r c_a(L-Z\frac{\cos\beta}{\cos\theta})\leq (G_{yield}/FS_y)$$

2.3 유효수직응력계수 K_n값의 결정

식(4) 압축력 T의 계산에 포함된 K_n은, 지반에 경사지게(그림 3) 타입된 네일에 작용하는 유효수직응력 $\sigma_n(\sigma_n=K_n\cdot\gamma'\cdot z)$을 결정하기 위한 계수이며, 탄성해석법 및 중첩의 원리(principle of superposition) 등을 토대로 Hryciw[4]가 제시한 식을 정리하면 다음과 같다.

$$K_n=\frac{K_X+2K_Y+1}{4}\cos(\theta+\beta)$$
$$+\frac{K_X-1}{4}\cos(\theta+\beta)\cos 2(\theta+\beta) \qquad (5)$$
$$+\frac{1+2\nu}{2}\sin(\theta+\beta)\tan\beta$$
$$+\frac{\theta+\beta}{\pi}\cos(\theta+\beta)\sin 2(\theta+\beta)\tan\beta$$

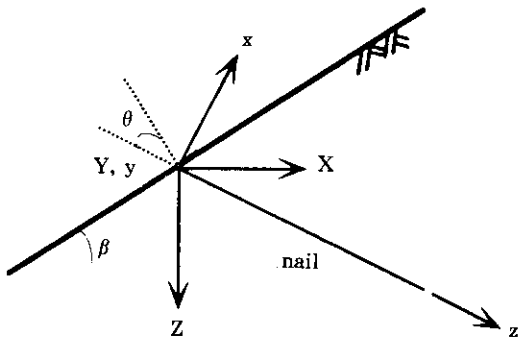

그림3. 좌표체계

식(5)에 포함된 X-축 방향 토압계수 K_X 및 Y-축 방향 토압계수 K_Y를 결정하는 것은 이상적인 경우(지반이 수평이고 또한 정지토압상태인 경우 등)라도 쉽지 않으며, 본 연구에서 다루는 AG System의 경우처럼 네일의 타입 및 이에 따른 변형발생이 주변흙의 성질변화에 미치는 영향 등을 감안할 때 K_X 및 K_Y값의 정확한 결정은 더더욱 쉽지 않은 일이다. 따라서 본 연구에서는 근사적이긴 하나 K_X 및 K_Y를 동일한 값 K로 가정하고, K값은 Jaky의 경험식(모래지반의 경우, $K=1.0-\sin\phi$) 및 탄성론(점토지반의 경우, $K=\nu/(1.0-\nu)$, ν=지반 흙의 포아슨비)을 토대로 각각 결정하였다.

2.4 네일의 설치간격 결정

식(4−1) 또는 (4−2)로 부터 결정되는 압축력 T를 식(3)에서 정의된 $\xi=T/W'$ 관계에 대입하여 정리하면, 네일의 설치간격 s_s 및 s_y $(=s_s/\alpha)$ 결정을 위한 아래와 같은 표현식이 얻어진다.

$$(\frac{S_s^2}{\alpha})=\frac{\text{식(5)}}{\sqrt{(1.0+k_h^2)}\cdot\xi\cdot\cos\beta[\gamma\cdot m\cdot Z+\gamma_{sat}\cdot(1.0-m)\cdot Z]} \qquad (6)$$

2.5 해석절차 및 판정기준

설계에서 채택할 AG System 보강무한사면의 한계안전율 FS_r값을 우선 결정한 다음, 기존 불안정한 사면의 안전율 FS_u값(식 (1))을 토대로 보강효과의 정도를 표시하는 FSR ($=FS_r/FS_u$) 값을 계산한다. 또한 네일의 길이 L을 가정하고, 임의의 각도 θ에 대해 ξ값(식(3)) 및 K_n값(식(5))을 계산한 다음, 이 값들을 식(6)에 대입하여 네일의 설치간격 s_s 및 $s_y(s_y=s_s/\alpha)$를 결정한다. 이와같은 과정을 각도 θ의 크기를 다양하게 변화시켜 반복하고 이 중에서, 판정기준 즉 $R_l \times R_b$값이 최소가 되는 각도 θ의 크기를 결정한다. R_l 및 R_b는 쏘일네일링 시스템에 적용되어온 설계변수[3]로서, 각각의 정의는 다음과 같다.

$$\text{길이비 } R_l = \frac{\text{nail length}}{\text{slope height}} = \frac{L}{Z}$$

$$\text{정착비 } R_b = \frac{\text{nail diameter} \times \text{nail length}}{\text{nail spacing}} = \frac{2r \times L}{s_s \times s_y}$$

네일의 길이 L을 변화시켜 앞의 과정이 계속해서 반복되며, 이를 통해 최종적으로 가장 효율적인 네일의 최소길이 L, 최대설치간격 s_s 및 s_y, 이에 해당되는 최적타입각도 θ_{opt} 등이 결정된다. 또한 현재의 지하수면 위치가 설치될 네일의 끝부분을 벗어나는지의 여부는, 각각의 L 및 θ에 대해 관계식 $m_{lim} = \frac{L\cos\theta}{Z\cos\beta}$를 토대로 검토된다.

실제의 예를 통해 앞에서 기술된 해석절차를 구체적으로 설명하면 다음과 같다. 본 예($\beta=35°$, Z=2.5m, 그림2 참조)에 있어 지하수의 영향은 고려하지 않았으며, 적용된 지반조건 등은 표1에 명시되어 있다.

표 1. 지반강도정수 및 기타조건

$\gamma=14.7KN/m^3$
$\phi=\delta=30°$, $c_s=c_a=4.9KN/m^2$
$k_h=0.0$, $f=0.0$, $FS_r=1.3$
$r=0.013m$

서로 다른 네일의 길이 L 각각에 비해, 네일의 타입각도 θ를 다양하게 변화시켜 각각의 θ에 대해 계산된 $R_l \times R_b$값 중 최소값을 도시하면 그림4와 같다. 그림 4를 통해볼 때, 네일의 길이 L이 커짐에 따라 각 경우에 대해 계산된 $(R_l \times R_b)_{min}$값은 점차 감소하는 현상을 나타내고 있다. 그러나 L=4.61m를 초과하는 경우, $(R_l \times R_b)_{min}$값에 해당되는 압축력 T가 지오텍스타일의 설계인장항복강도 $G_{design}(=G_{yield}/FS_y$, $G_{yield}=13.3KN$, $FS_y=2.0$) 보다 커지는 ($T>G_{design}$) 문제점을 지니게 된다. 따라서 L>4.61m인 경우에, $T \le G_{design}$ 조건이 충족되는 범위 내에서 계산된 $(R_l \times R_b)_{min}$값의 크기를 L=4.61m인 경우와 서로 비교하는 추가적인 절차가 필요시 되며, 상세한 결과는 그림5에 도시되어 있다. 그림5의 결과를 살펴볼 때, L=4.70m인 경우까지는 $(R_l \times R_b)_{min}$ 값이 L=4.61m인 경우 보다 감소하나, L=4.70m를 초과하면서 $(R_l \times R_b)_{min}$ 값이 점차 증가하는 현상을 나타내고 있다. 따라서 그림4의 결과 중에서 $T>G_{design}$에 해당되는 즉 L>4.61m인 경우는 $(R_l \times R_b)_{min}$값의 수정이 불가피하며, 수정된 결과는 그림6에 도시되어 있다. 그림 6을 통해 최종적으로, $(R_b \times R_b)_{min}$ 값에 해당되는 네일의 최소설계길이 L은 4.70m임을 거듭 확인할 수 있다. 또한 본 연구 안정해석법 판정기준의 적합성을 확인하기 위해, 본 예의 경우처럼 네일의 배치형태가 정사각형인 경우 ($s=s_s=s_y$, $\alpha=1.0$인 경우), 네일의 길이 L과 설치간격 s의 비(ratio)에 해당되는 L/s값이 최소인 판정기준(요구되는 네일의 길이는 최소화하고, 네일의 설치간격은 최대화하는 판정기준)을 적용하여 비교해 보았으며, 본 해석에 적용된 판정기준인 $R_l \times R_b$ 값이 최소인 경우와 동일한 결과가 얻어짐을 그림 7을 통해 확인할 수 있다.

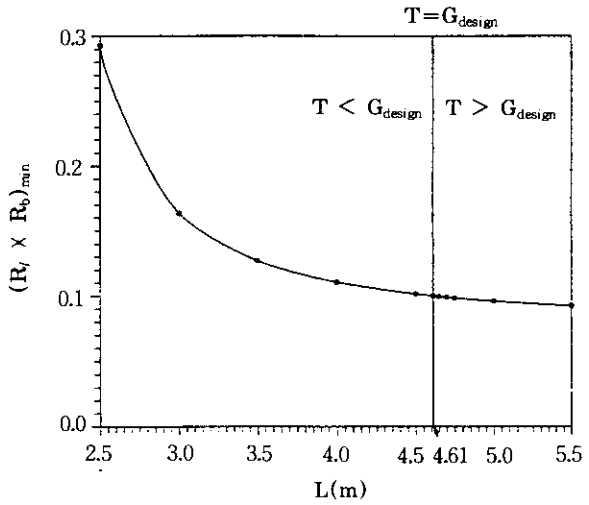

그림4. $L-(R_f \times R_b)_{min}$ 관계

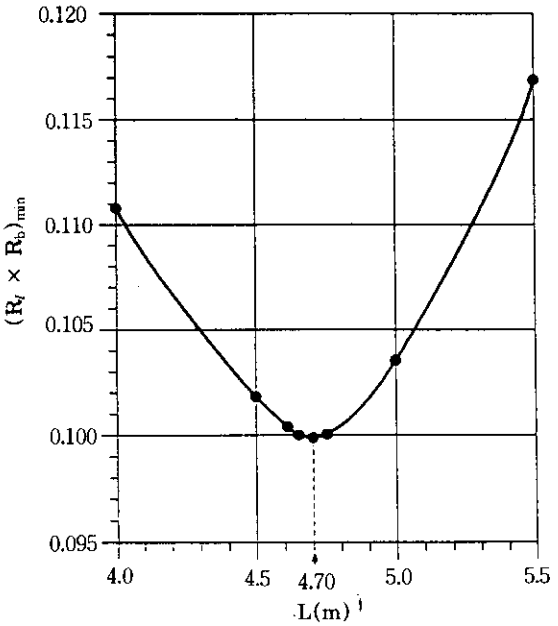

그림6. 그림 4의 일부(L>4.61m의 경우) 수정결과

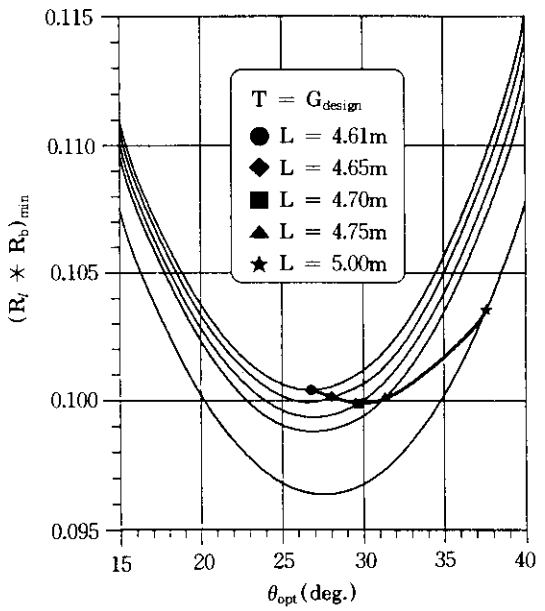

그림5. $\theta_{opt} - (R_f \times R_b)_{min}$ 관계

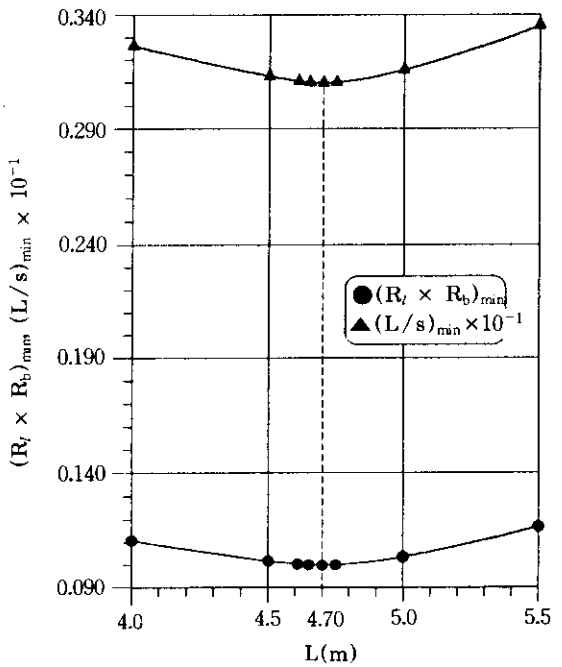

그림7. 판정기준 비교결과

2.6 분 석

본 장에서는 지반강도정수 및 설계상의 변수가, 네일의 최적타입각도 θ_{opt} 및 이에 해당되는

$(L/s)_{min}$ 값 등에 미치는 영향을 살펴보기 위한 분석이 이루어졌다. 본 분석에서 AG System 보강사면의 한계요구안전율 FS_r은 1.3으로, 네일의 배치형태는 정사각형($s=s_s=s_y$)으로 가정하였다.

2.6.1 분석 1

사면의 경사각 β의 크기를 달리한($\beta=25°\sim45°$) 본 분석에서는 지하수의 영향을 포함하였으며(m=0.5인 경우), 적용된 변수 등은 표 2에 또한 계산결과는 그림 8 및 9에 각각 명시되어 있다.

그림 8의 결과는, 사면의 경사각 β가 커짐에 따라(사면의 안정도가 낮아짐에 따라) 네일의 최적타입각도 θ_{opt}은 점차 작아지는 현상을 여러가지 case 모두에 대해 나타내고 있다. 이와 같은 현상에 대한 원인분석 결과를 간략히 정리하면 다음과 같다. 경사각 β가 커짐에 따른 $\cos\beta$값의 감소량 보다 ξ값의 증가량이 더 크기 때문에, 결과적으로 식(6)에 포함된 $\xi\cdot\cos\beta$값이 증가하게 되어 네일의 설치간격 s값은 감소하게 된다. 결국 파괴흙쐐기의 중량 W는 경사각 β가 커짐에 따라 감소하게 되고, 따라서 네일의 최적타입각도 θ_{opt}은 작아지는 현상을 나타내게 된다. 본 절에서 분석이 이루어진 다양한 case를 종합하면, θ_{opt}의 범위는 28.3°~34.9° 정도이다. case 1(그림8에서 진하게 표시된 경우)을 기준으로 하여 비교분석하면, 지반강도

표 2. case별 적용조건

case 1	$\phi=\delta=30°$ $c_s=c_a=4.9KN/m^2$ m=0.5	$\nu=0.4$, Z=2.5m, $k_h=0.0$, f=0.0, $FS_y=2.0$	$\gamma=14.7KN/m^3$ $\gamma_{sat}=19.6KN/m^3$ $G_{yield}=13.3KN$ r=0.013m
case 2		$\nu=0.3$, Z=2.5m, $k_h=0.0$, f=0.0, $FS_y=2.0$	
case 3		$\nu=0.4$, Z=2.5m, $k_h=0.1$, f=0.0, $FS_y=2.0$	
case 4		$\nu=0.4$, Z=2.5m, $k_h=0.0$, f=0.05, $FS_y=2.0$	
case 5		$\nu=0.4$, Z=2.5m, $k_h=0.0$, f=0.0, $FS_y=1.5$	
case 6	$\phi=\delta=25°$ $c_s=c_a=2.45KN/m^2$	$\nu=0.4$, Z=2.5m, $k_h=0.0$, f=0.0, $FS_y=2.0$	

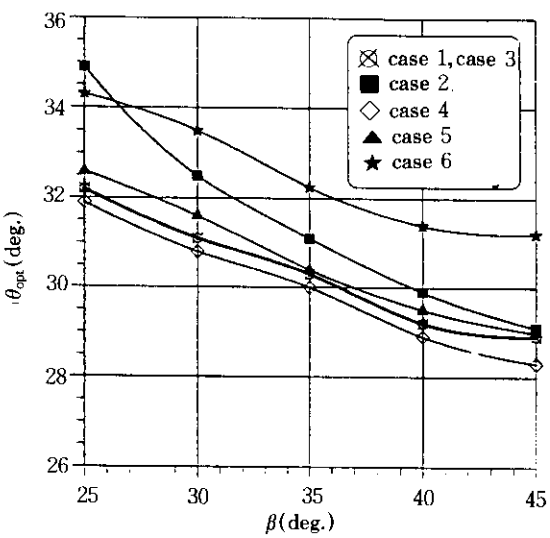

그림8. case별 $\beta-\theta_{opt}$ 관계

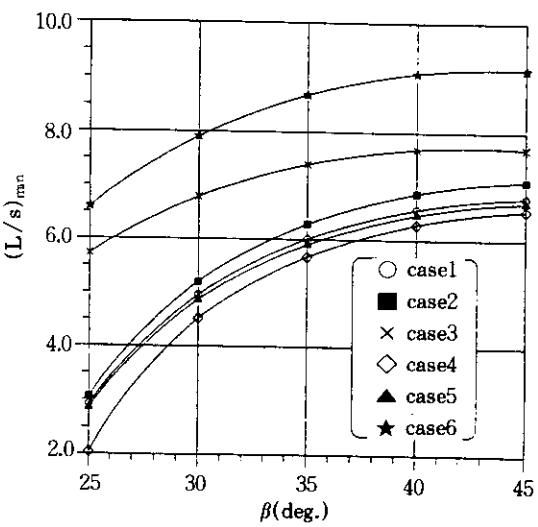

그림9. case별 $\beta-(L/s)_{min}$ 관계

정수(ϕ, δ, c_s 및 c_a)값의 차이가 θ_{opt}의 크기 변화에 미치는 영향이 가장 큼을 알 수 있으며(case 6), 또한 포아슨비 ν의 차이가 θ_{opt}의 크기 변화에 미치는 영향은 경사각 β가 커짐에 따라 점차 작아지는 뚜렷한 현상을 확인할 수 있다(case 2). 지진하중을 고려한 경우(수평진도 k_h=0.1인 case 3)에도 θ_{opt}의 크기는 정적하중의 경우(k_h=0.0인 case 1)와 동일하며, 5%의 추가 보강효과를 고려한 경우(f=0.05인 case 4)를 제외하고는 case 1에 비해 모두 θ_{opt}이 큼을 알 수 있다. 즉 포아슨비 ν값이 작을수록, 강도정수값이 작을수록, 또한 지오텍스타일의 설계인장항복강도 G_{design} 값이 클수록(FS_y=1.5인 case 5) θ_{opt}의 크기는 증가함을 알 수 있다.

이외에도 경사각 β가 커짐에 따라 θ_{opt}의 크기 감소율은 일반적으로 점차 둔화되는 경향을 보이고 있으며, 특히 case 1(case 3) 및 case 6는 β가 40° 이상인 경우 θ_{opt}의 크기 변화가 0.3° 이하의 작은 차이에 그치는 결과를 나타내고 있다. 이외에도 β=45°인 경우, case 1(case 3), case 2 및 5는 θ_{opt}의 크기가 거의 동일한(θ_{opt}=29° 정도) 결과를 보이고 있다. 그림 9는 앞에서 언급한 효율성 판정기준 즉 각 case별로 계산된 $(L/s)_{min}$값을 경사각 β의 변화에 따라 도시한 결과이다. 그림 9를 통해볼 때, 경사각 β가 커짐에 따라 사면의 안정도는 낮아지게 되므로 더욱 많은 보강이 필요시되어, 결과적으로 $(L/s)_{min}$ 값이 증가함을 알 수 있다. 그러나, 일반적으로 $(L/s)_{min}$값의 증가율은 그림 8에 명시된 θ_{opt}의 크기 감소율과 유사하게 경사각 β가 커짐에 따라 점차적으로 둔화되는 경향을 보이고 있으며, 이와같은 경향은 β가 커짐에 따라 유효수직응력계수 K_n값이 커지게 되어(유효수직응력 σ_n이 커지게 되어) 결국 요구되는 네일의 길이 L값이 점차 감소하는데 원인이 있다. 특히 지진하중의 영향(수평진도 k_h=0.1)이 고려된 case 3는, 경사각 β가 40° 이상인 경우 $(L/s)_{min}$ 값에 거의 변화가 없으며 그 크기는 7.70 정도이다. 여기서 case 1을 기준으로 하여 다른 case들과 서로 비교하여 보면, 추가 보강효과를 5% 고려한 case 4(f=0.05인 경우)는 case 1과 요구되는 네일의 길이 L은 거의 차이가 없으나, 식(3) 및 (6)의 ξ값 증가에 따라 설치간격 s가 훨씬 커져서, 결과적으로 $(L/s)_{min}$값이 case 1보다 작게 계산되는 경향을 나타내고 있다. G_{design} 값을 case 1보다 2.22KN 정도 더 크게 가정한 case 5(FS_y=1.5)는 case 1 보다 더욱 길이 L이 긴 네일이 요구되긴 하나, 동시에 설치간격 s의 크기도 증가되어, 결과적으로는 $(L/s)_{min}$ 값이 다소(0.06~0.11 정도) 감소하는 결과를 나타내고 있다. 수평진도 k_h=0.1인 case 3를 살펴볼 때, 지진하중이 작용할 경우 사면의 안정도는 저하됨으로 case 1 보다 네일의 설치간격 s가 좁혀져 결국 case 1 보다 훨씬 증가한 5.72~7.70 정도의 $(L/s)_{min}$ 값이 요구되고있다. case 3의 경우는 case 1과 요구되는 네일의 길이 L은 변동이 없으며, 그 이유는 그림8을 통해 앞에서 분석한 대로 네일의 최적타입각도 θ_{opt}이 case 1과 동일한 데 있다. $(L/s)_{min}$값의 크기는 강도정수값을 작게 가정한 case 6이 가장 크며, 이와같은 현상은 case 3과는 달리 설치간 s값의 감소와 더불어 요구되는 네일의 길이 L이 동시에 증가하는 데 원인이 있으며, 결국 case 1과의 차이는 더욱 커져 5.72~7.70 정도의 $(L/s)_{min}$값이 case 6에 있어 요구되고 있다. 포아슨비 ν=0.3(토압계수 K=0.43)인 case 2는 ν=0.4(K=0.67)인 case 1에 비해 요구되는 네일의 길이 L이 0.23~0.41m 정도 증가하는 결과를 나타내고 있으며, 이와같은 결과는 포아슨비 ν가 커짐에 따라 유효수직 응력계수 K_n값이 증가하는데 원인이 있다. 그러나 네일의 설치간격 s의 크기는 거의 변화가 없어, $(L/s)_{min}$값의 증가가 case 1에 비해 0.31 정도 이하의 비교적 작은 범위에 그치는 즉 상대적으로 지진하중 및 지반강도정수의 영향 등에

비해 작게 평가되는 결과를 나타내고 있다.

그림 8 및 9의 결과를 종합하면, AG System 보강무한사면 최적설계에 요구되는 θ_{opt}, L 및 s의 크기 모두는 사면의 경사가 급할수록 작아지고 있으며, 또한 s의 감소율이 L의 감소율에 비해 크기 때문에 결국$(L/s)_{min}$값은 사면의 경사도에 비례하여 커지는 결과를 나타내고 있다. 특히 사면의 경사가 낮을수록, 네일-주변흙 사이에서 발휘가 예상되는 마찰력의 정도 및 지진하중의 작용여부에 따라 s의 크기가 큰 폭으로 변화함을 알 수 있다.

2.6.2 분석 2

본 절에서는 지하수면의 위치변화(m값의 변화)가 네일의 최적타입각도 θ_{opt} 및 이에 해당되는 $(L/s)_{min}$값 등에 미치는 영향을 살펴보기 위해, β=35° 및 45°인 2가지 경우에 한해 분석이 이루어졌다. 분석에 적용된 지반조건 등은 표2의 case 1과 동일하며, 계산결과는 그림 10~13에 각각 도시되어 있다. 그림 10 및 11의 결과에 따르면 m=0.0(지하수면의 위치가 지표면과 일치하는 경우)~m=1.0(지하수면의 위치가 파괴면과의 일치하는 경우)인 경우까지는 θ_{opt} 및 L의 크기에 변화가 없으며 그 이유는, AG System 보강효과를 유발시키는 압축력 T가 본 연구 해석법의 경우, 네일의 전체길이 L 중에서 파괴면 바깥쪽으로의 네일길이(유효길이)에 한해 주변마찰을 토대로 계산되기 때문이다. 그러나 m값이 증가할수록(지하수면의 위치가 낮아질수록) 파괴면에 작용하는 간극수압합력 U의 크기는 점차 감소하게 되어 결국, 동일한 보강효과(FS_r=1.3)를 위해 필요시 되는 네일의 개수는 감소하게 되며(네일의 설치간격 s는 커지게 되며) 따라서 요구되는 $(L/s)_{min}$값은 감소하게 된다.

또한 m>1.0인 경우(지하수면이 파괴면 바깥쪽에 위치하는 경우)에는, m값의 증가에 따라 요구되는 네일의 길이 L이 점차 감소하는 현상을 보이고 있다(그림 11). 이와같은 현상

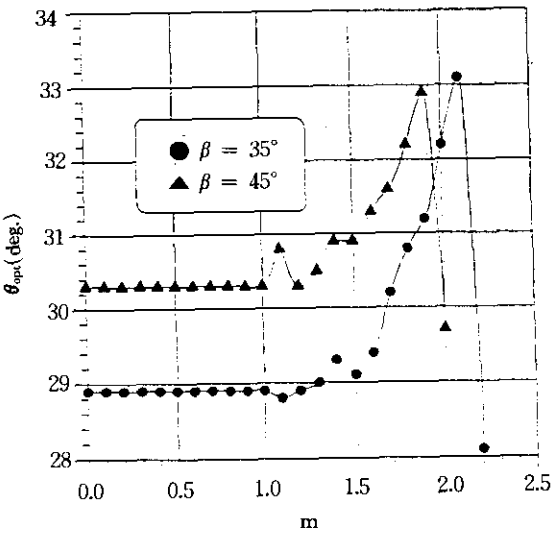

그림10. case별 m－θ_{opt} 관계

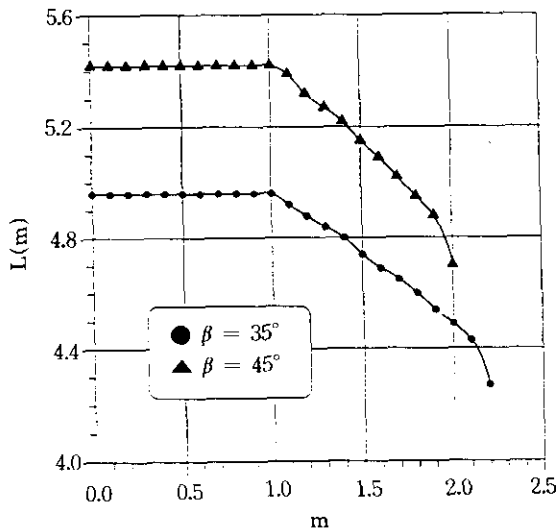

그림11. case별 m－L 관계

은, m값이 커질수록 총단위중량 γ의 영향범위는 커지고 상대적으로 수중단위중량 γ_{sub}의 영향범위는 감소하게 되어(식(5－1)에서 $m^2(\gamma-\gamma_{sub})$의 크기가 증가하게 되어) 결국 동일한 크기의 압축력 T가 발휘되기 위해 요구되는 네일의 길이 L은 짧아지게 된다. 반면에 요구되는 네일의 설치간격 s는 m>1.0인 경우에 거

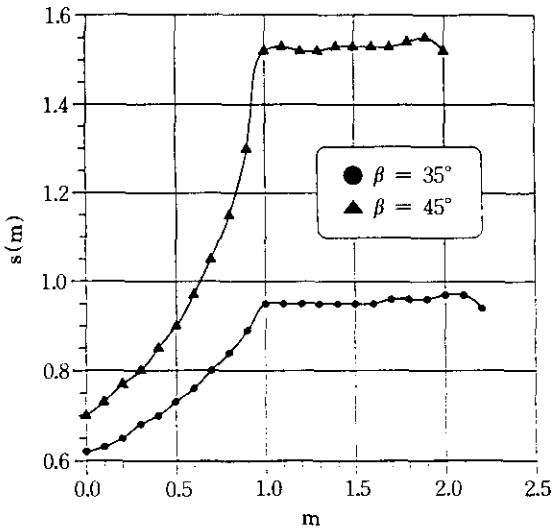

그림12. case별 m－s 관계

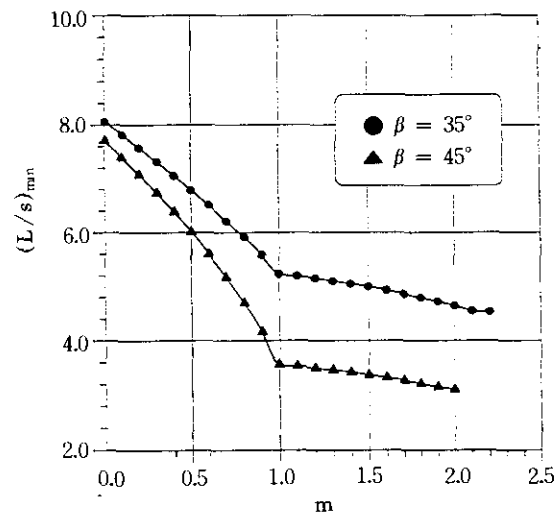

그림13. case별 m－$(L/s)_{min}$ 관계

의 변화가 없는 결과를 나타내고 있다(그림 12). 네일의 최적타입각도 θ_{opt}은 일반적으로, m값이 1.0을 초과하면서 점차 커지다가, 지하수의 위치가 네일의 거의 끝부분에 근접하는 상태(β=35°인 경우 m=1.9, β=45°인 경우 m=2.0)에서 θ_{opt}은 최대치에 도달한 다음 급격히 감소하여 지하수가 존재하지 않는 경우에 해당되는 θ_{opt}(β=35°인 경우 θ_{opt}=29.7°, β=45°인 경우 θ_{opt}=28.1°)으로 접근하게 된다(그림 10). 본 해석법에서 m값의 증가는 간극수압의 영향 감소를 의미하며 따라서 m값 증가에 따라 동일한 보강효과를 위해 요구되는 $(L/s)_{min}$값은 계속해서 작아져 지하수가 존재하지 않는 상태의 $(L/s)_{min}$값(β=35°인 경우 $(L/s)_{min}$=3.10, β=45°인 경우 $(L/s)_{min}$=4.53)에 도달하는 결과를 그림 13은 보여주고 있으며, 또한 m=1.0인 경우를 기점으로 $(L/s)_{min}$값의 감소율이 훨씬 둔화되는 현상을 그림 13을 통해 알 수 있다.

2.7 설계예

그림 14에 도시된 무한사면(β=35°, Z=2.5m)은 지하수 영향을 무시하는 경우에도 안전율 FS_u 값은 1.11 정도에 그쳐, 요구되는 한계안전율 FS_r=1.3에 미달되는 불안정한 상태이다. 또한 지하수의 영향을 포함하는 경우(m=0.75)에는 안전율이 이보다 낮아져 FS_u=0.96 정도로 평가되며, 비교적 낮은 수준이긴 하나(수평진도 k_h=0.1) 지진하중의 영향이 여기에 추가되는 경우 안전율은 더욱 떨어져 FS_u=0.79 정도로 예상된다.

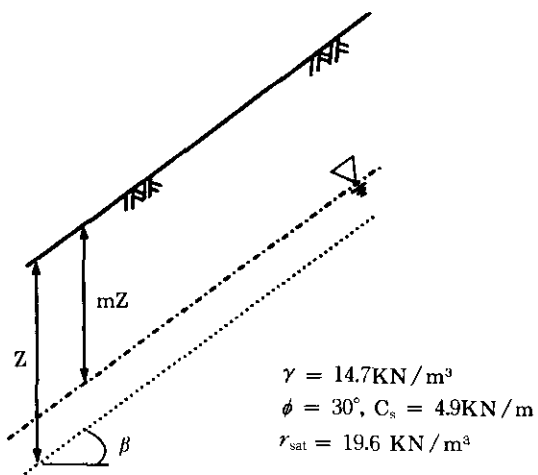

그림14. 무한사면－설계예

표 3. 본 연구해석법에 의한 설계결과

	θ_{opt}	L(m)	s(m)	$(L/s)_{min}$	적용조건	$\delta=30°$ $c_a=4.9KN/m^2$ r=0.013m
case a	28.3°	4.66	2.37	1.97	지하수 영향 무시, $k_h=0.0$	
case b	29.4°	5.39	1.32	4.09	m=0.75, $k_h=0.0$	
case c	29.4°	5.39	0.93	5.82	m=0.75, $k_h=0.1$	

따라서 불안정하다고 판단되는 그림14의 무한사면을 AG System을 이용해 보강하는 경우, 본 연구 해석법을 토대로 각각의 적용조건에 대해 설계한 결과를 정리하면 표3과 같다. 표3의 결과 모두는, 추가적인 보강효과를 10%(f=0.1)로 가정하고, 네일의 배치형태는 정사각형($s=s_s=s_y$)으로 하여 계산된 결과이다.

표3의 결과에 따르면, 요구되는 네일의 길이 L이 5.39m인 case b 및 c에 있어, 네일의 최적타입각도 θ_{opt}은 29.4°이다. 만약 이와같은 2가지 경우 모두에 대해, 네일의 타입각도 θ를 θ_{opt}보다 작게하는 경우($\theta<\theta_{opt}$) 본 설계예에서 채택한 한계안전율 $FS_r=1.3$을 충족시키기 위해서는, 본 예에서 채택한 지오텍스타일의 설계인장항복강도 G_{design}값($=G_{yield}/FS_y$, $G_{yield}=13.3KN$, $FS_y=2.0$)보다 더 큰 압축력 T가 필요시 되는 문제점을 지니게 된다(그림 15). 또한 네일의 타입각도 θ를 $\theta_{opt}=29.4°$ 보다 크게 하는 경우($\theta>\theta_{opt}$), 발휘가 예상되는 압축력 T가 $G_{design}=6.65KN$ 보다 작게되어, 네일의 설치간격 s를 1.32m(case b) 또는 0.93m(case c) 보다 촘촘히 하지 않고서는, AG System을 적용한 본 설계예 보강무한사면의 안전율이 한계안전율 $FS_r=1.3$에 미달되는 문제점을 역시 지니게 된다(그림 16). 본 설계예의 경우는 Koerner[5]가 AG System에 대해 제시한 네일의 최소길이 기준(파괴면 바깥쪽으로 최소한 1.5m 이상)에 충족됨이 확인된 결과이다.

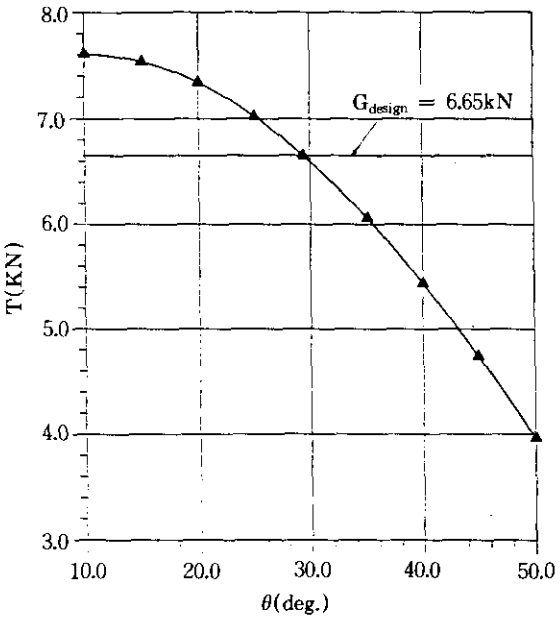

그림15. 최적타입각도의 중요성 확인($\theta < \theta_{opt}$인 경우)

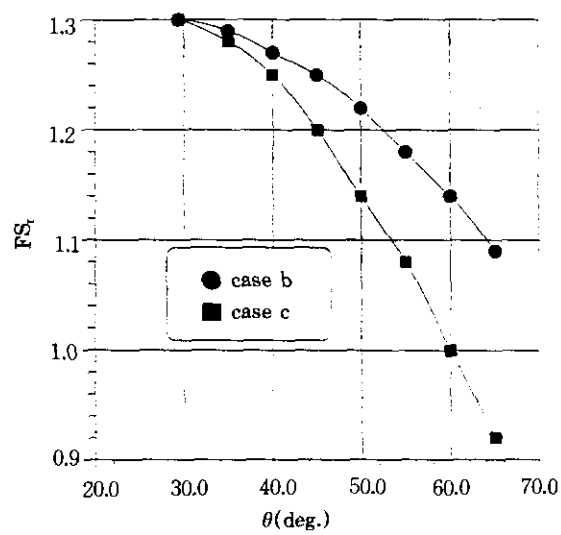

그림16. 최적타입각도의 중요성 확인($\theta > \theta_{opt}$인 경우)

3. 보강유한사면

본 장에서 다루게 되는 AG System 보강유

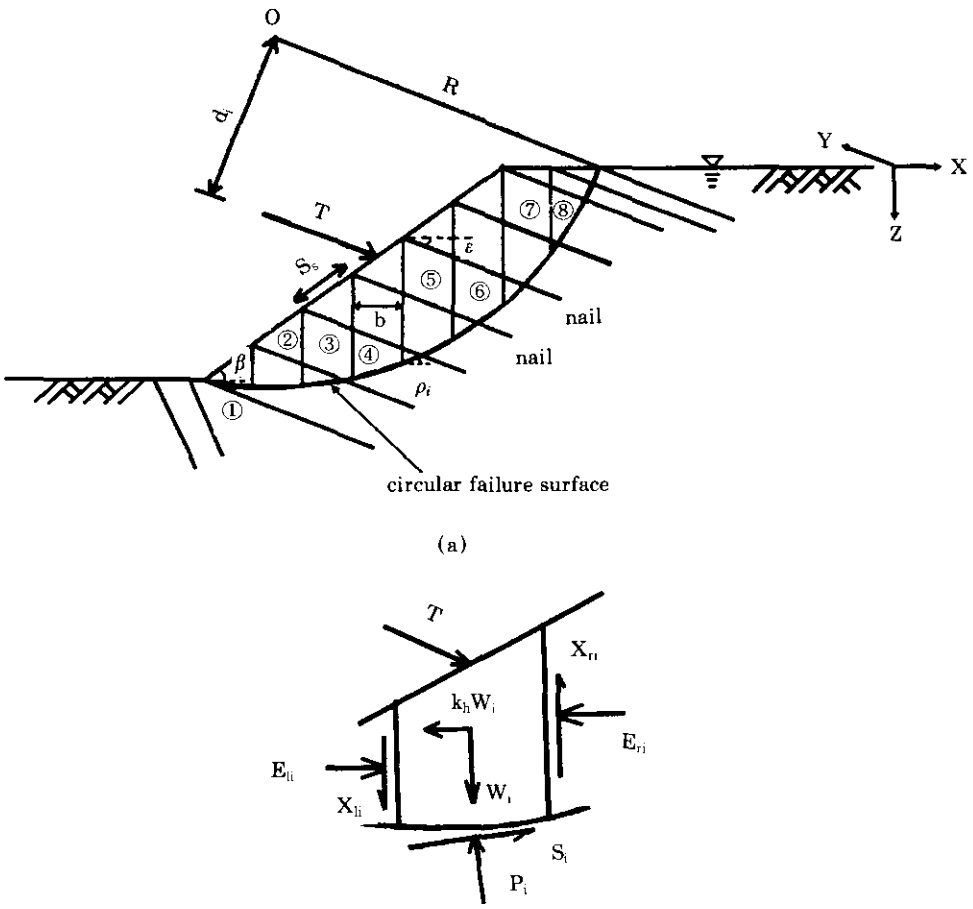

그림17. 절편에 작용하는 힘들(AG System 보강유한사면)

한사면의 경우, 기본적인 가정사항 등은 2장 보강무한사면 경우와 동일하며, 다만 지하수의 위치를 수평방향 X-축(그림 17)과 평행한 것으로 가정하였다. 또한 본 연구에서는 파괴면의 형상을 원호로 가정하였으며, 인접된 절편들 사이의 힘들(interslice forces)을 고려하는 Spencer 방법[1]을 일부 변형하여 AG System 보강유한사면 안정해석법의 제시가 이루어졌다.

3.1 기본안정해석

지오텍스타일 및 네일을 이용해 보강이 이루어진 그림 17－a 유한사면의 경우, 파괴흙쐐기 내부 임의의 절편 i에 작용하는 힘들을 모두 표시하면 그림 17－b와 같다. 그림 17－b에 표시된 절편 i의 하단부(파괴면)를 따라 발휘되는 마찰저항력 S_i는, Mohr-Coulomb 파괴규준 및 지반강도정수(내부마찰각 ϕ 및 점착력 c_s)에 대한 Taylor 안전율[1] FS를 토대로 다음과 같이 계산되어 진다.

$$S_i = \{C_i + (P_i - U_i) \cdot \tan\phi\} / FS \qquad (7)$$

식(7)에 포함된 $C_i (= c_s \cdot l_i \cdot s_y)$는 파괴면을

따라서 발휘되는 점착저항력을, $U_i(=r_{ui}\cdot\gamma_{sat}\cdot h_i\cdot l_i\cdot s_y$, r_{ui}=간극수압계수)는 간극수압합력을 각각 의미하며, Y-방향(그림 17-a)으로의 네일 설치간격 s_y는, 보강무한사면의 경우와 마찬가지로 경사면 AB 방향으로의 설치간격 $s_s(=b/\cos\beta)$를 적절한 계수 α로 나누어 주어 결정하는 것으로 가정하였다($s_y=s_s/\alpha$). 또한 파괴면에 수직되게 작용하는 반력 P_i의 계산식은 연직방향힘들의 평형조건($\Sigma V=0$) 및 식(7)을 토대로 다음과 같이 표현되어 진다.

$$P_i=[W_i+(X_{li}-X_{ri})+T\cdot\sin\varepsilon-\{(C_i-U_i\cdot\tan\phi)\cdot\sin\rho_i/FS\}]/M_i \quad (8)$$

여기서, $W_i=\gamma_{sat}\cdot s_s\cdot s_y\cdot\cos\beta\cdot h_i$

$$M_i=\cos\rho_i(1+\tan\rho_i\tan\phi/FS)$$

식(8)에 포함된 X_{li} 및 X_{ri}는 인접된 절편과의 경계면을 따라 작용하는 전단력을 의미한다. 또한 절편 i에 수평방향으로 작용하는 힘들의 평형조건($\Sigma H=0$) 및 식(7)을 이용해, 인접 절편과의 경계면에 작용하는 수직력 E_{ri} 및 E_{li} 사이의 관계를 표현하면 다음과 같다.

$$E_{ri}-E_{li}=\frac{1}{FS}\{(C_i+(P_i-U_i)\tan\phi\}\cos\rho_i-P_i\sin\rho_i+T\cos\varepsilon-k_hW_i \quad (9)$$

여기서, 파괴흙쐐기를 구성하는 모든 절편에 대해 식(9)의 관계를 확대 적용하고 또한 조건식 $\Sigma(E_{ri}-E_{li})=0$을 토대로 힘의 평형조건에 대한 안전율 FS_f 계산식을 정리하면 다음과 같다.

$$FS_f=\frac{(1.0+f)\Sigma\{C_i+(P_i-U_i)\tan\phi\}\cos\rho_i}{\Sigma P_i\sin\rho_i-\Sigma T\cos\varepsilon+\Sigma k_hW_i} \quad (10)$$

식(10)에 포함된 f는 2.1절 보강무한사면 기본안정해석에서 이미 기술한 대로, 압축력 T에 의한 주된 보강효과 이외에 네일-주변흙 사이의 상호작용에 의한 추가적인 여러 보강효과를 복합적으로 표시하기 위한 계수이다.

또한 원호로 가정된 파괴면의 원점 O(그림 17-a)에 관한 모멘트 평형조건(Σ저항모멘트 =Σ활동모멘트)을 토대로, 모멘트 평형조건에 대한 안전율 FS_m이 추가적으로 정의되며 이에 대한 계산식을 정리하면 다음과 같다.

$$FS_m=\frac{R\cdot(1.0+f)\cdot\Sigma\{C_i+(P_i-U_i)\cdot\tan\phi\}}{R\Sigma(W_i\cdot\sin\rho_i)+\Sigma(T\cdot d_i)+\Sigma(k_h\cdot W_i\cdot a_i)} \quad (11)$$

식(8)~(11)에 포함된 각도 ρ_i, moment arm d_i 및 a_i는, 원점 O 및 해당 절편의 위치에 따라 양(+) 또는 음(-)의 값이 된다. 본 안정해석에서는, 경사면 AB에 동일한 각도 ε으로 타입·설치되는 네일의 경우(그림 17-a에서, 절편 ①~⑥의 경우)만 압축력 T에 의한 보강효과를 고려하였으며, 절편 ⑦ 및 ⑧의 경우에는 식(9)~(12)에서 T=0.0으로 간주되어(즉, 압축력 T에 의한 보강효과가 고려되지 않고) 계산이 이루어 진다. 따라서 실제적인 안전율은 본 해석법에 의한 결과치보다 다소 클 것으로 예상되어 진다.

AG System 보강유한사면의 전체적인 안정성 평가는, 힘의 평형조건에 대한 안전율 FS_f(식(10))와 모멘트 평형조건에 대한 안전율 FS_m(식(11))이 서로 일치하는 조건 즉 $FS_t=FS_f=FS_m$을 충족시키는 전체안전율 FS_t로 정의되어진다. 각각의 안전율 FS_f 및 FS_m을 결정하기 위해서는, 최상단에 위치된 절편($X_r=E_r=0.0$인 절편 ⑧의 경우, 그림 17-a 참조)으로부터 순차적으로 P_i(식(8), E_i(식9)) 및 X_i값 계산이 각각 이루어지며, 이 과정에서 필요로 하는 각 절편 경계면의 전단력 X_i와 수직력 E_i 사이의 관계는 Spencer가 제시한 조건 즉, $X_i/E_i=\tan\theta$를 토대로 하였다. 이와같은 계산과정을 각도 θ를 서로 달리하여 반복하여 $FS_t=FS_f=FS_m$ 조건을 충족시키는 전체안전율 FS_t값이 결정된다.

3.2 압축력 T의 계산

식(9)에 포함된 압축력 T는, 네일의 타입을 통해 인장된 지오텍스타일에 의해 유발되어지

며, 보강효과가 고려되는 절편들(예를 들어, 그림 17-a의 절편 ①~⑥의 상부 경사면에 작용하는 동일한 크기의 압축력 T는 결국 네일의 인발저항(pullout resistance)에 해당된다. 따라서 압축력 T의 크기는, 2.2절에 기술된 보강무한 사면의 경우와 마찬가지로, 파괴면 바깥쪽에 위치되는 네일의 유효길이 L_e(네일의 전체길이 L 중에서 원호파괴면 바깥쪽에 위치되는 네일의 길이)에 한해 주변지반과의 마찰 등을 토대로 다음과 같이 계산되어진다.

$$T=\pi\cdot r\cdot K_n\cdot(\gamma-\gamma_{sub})\cdot(mL_e)^2\cdot\tan\delta + \pi\cdot K_n\cdot\gamma_{sub}\cdot\tan\delta\cdot L_e^2+2\pi\cdot\gamma\cdot c_a\cdot L_e \quad (12)$$

식(12)에서 m=1.0은 지하수면 위쪽 건조지반에 설치되는 네일의 경우를, m=0.0은 지하수면 아래쪽 포화지반에 설치되는 네일의 경우를, 또한 $0.0<m<1.0$은 네일 유효길이 L_e의 일부분이 지하수면 아래쪽에 위치하는 경우를 각각 나타낸다. 또한 식(12)의 압축력 T는 조건 즉, $T\leq(G_{yield}/FS_y)$에 충족되는 값이어야 한다.

여기서 지오텍스타일의 인장항복강도 G_{yield}, 안전율 FS_y 및 유효수직응력계수 K_n값의 정의 등은 2.2 및 2.3절의 기술내용과 동일하다.

3.3 $L_{e(min)}$, ε_{opt}의 결정 및 해석절차

설계를 위한 해석절차는, 지오텍스타일의 인장항복강도인 G_{yield}에 적절한 안전율 FS_y를 적용하여 지반에 가해지는 압축력 T의 크기를 우선 결정하고, 각도 ε(타입된 네일이 수평방향 X-축과 이루는 각도, 그림 17-a 참조)을 다양하게 변화시켜 각각의 경우에 해당되는 네일의 유효길이 L_e를 계산한 다음, 이 중에서 L_e값이 최소가 되는 네일의 최적타입각도 ε_{opt}을 결정한다. 즉, $f(L_e)$=식(12)$-(G_{yield}/FS_y)=0.0$, $df(L_e)/dL_e$ 및 Newton-Raphson 반복계산법을 이용해 결정된 ε_{opt}값 및 3.1절에 기술된 방식에 의해, AG System을 적용한 보강유한사면의 전체안전율 FS_t값이 결정된다. 또한 여러개의 가상 원호파괴면 중에서 전체안전율 FS_t값이 최소가 되는 파괴면을 결정하기 위해서는 반복계산이 필요시 되며, 본 해석법에서는 Bishop-Morgenstern[2]이 제안한 guiding locus zone 방법을 참고로 하여 가상 원호파괴면 원점 O의 위치선택이 이루어졌다.

3.4 간편식의 제시

식(12) 및 3.3 해석절차에 기술된 방법에 의해, 네일의 최적타입각도 ε_{opt}을 결정하기 위한 다양한 분석이 이루어졌다. 이를 통해 압축력 T, 지반흙의 단위중량 γ 및 γ_{sub}, 네일의 반지름 r, 지하수의 위치 m, 네일-주변흙 사이의 마찰각 δ 및 부착응력 c_a 등은 네일의 최적타입각도 ε_{opt}의 크기 결정에 거의 영향을 미치지 않음을 확인하였고, 결과적으로 사면의 경사각 β 및 지반흙의 포아슨비 ν가 주된 영향요소 임을 알 수 있었다. 여기서 다양한 계산결과를 종합적으로 분석하여 얻어진 ε_{opt} 결정 간편식을 제시하면 다음과 같다.

$$\varepsilon_{opt}=26.5+0.042+\beta+68\cdot\nu-0.9\cdot\beta\cdot\nu \quad (13)$$

(ε_{opt} 및 β의 단위는 도(deg.))

3.5 분 석

본 분석에서는 지진하중에 의한 영향은 고려하지 않았으며(수평진도 $k_h=0.0$), 타입·설치되는 네일의 반지름 r은 0.013m로, 또한 압축력 T의 크기에 해당되는 지오텍스타일의 설계인장항복강도 G_{design}은 6.65KN($=G_{yield}/FS_y$, $G_{yield}=13.3$KN, $FS_y=2.0$)으로 가정하였다. 분석에 적용된 사면개요는 그림18에 또한 해당되는 강도정수 등은 표4에 명시되어 있으며, 분석결과는 다음과 같다.

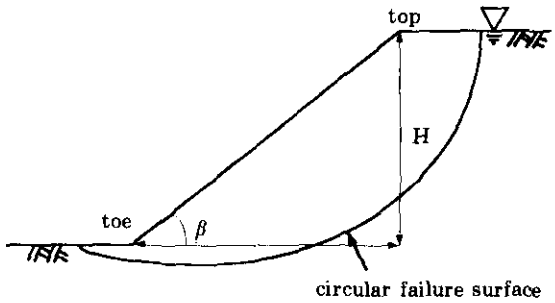

그림18. 불안정한 유한사면 개요(분석 및 설계예에 적용된)

표 4. 지반강도정수 및 기타조건

ϕ	30°	ν	0.3, 0.4
δ	30°	K	$\nu/(1.0-\nu)$
γ	14.7KN/m³	m	0.0, 1.0
γ_{sat}	19.6KN/m³	β	50°
c_s	4.9KN/m³	r_u	0.1
c_a	4.9KN/m³	H	6.0m

사면의 경사가 급해질수록(경사각 β가 증가할수록), 네일의 최적타입각도 ε_{opt} 및 이에 해당되는 네일의 최소유효길이 $L_{e(min)}$의 크기는 모두 작아지고 있음을, 그림 19, 20 및 21을 통해 알 수 있다. 이와같은 현상은, 식(12)로 부터 수직응력계수 K_n값이 가장 클 때 네일의 유효길이 L_e값이 최소가 됨을 알 수 있으며, 또한 K_n은 사면의 경사각 β 및 네일의 타입각도 ε의 함수이므로 (2.3절 식(5) 참조), 타입각도 ε에 따른 K_n값의 변화를 각각의 사면경사도 β에 대해 살펴본 그림22(포아슨비 $\nu=0.4$인 경우)의 결과를 통해 설명되어 진다. 즉 각각의 경사각 β에 대해 K_n값이 최대가 되는 네일의 타입각도 ε은 결과적으로 네일의 유효길이 L_e값이 최소가 되는 최적타입각도 ε_{opt}에 해당되며, 이와 같은 K_n의 최대값은 경사각 β에 비례하여 점점 커지고 또한 K_n의 최대값에 해당되는 ε_{opt}은 경사각 β의 크기가 증가할수록 점차 작아지는 분명한 현상을 그림 22를 통해 확인할 수 있다.

이외에도 지반흙의 포아슨비 ν값이 클수록, ε

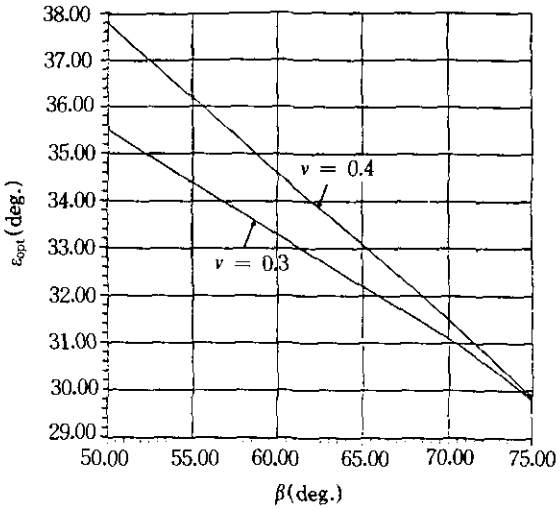

그림19. β – ε_{opt} 관계

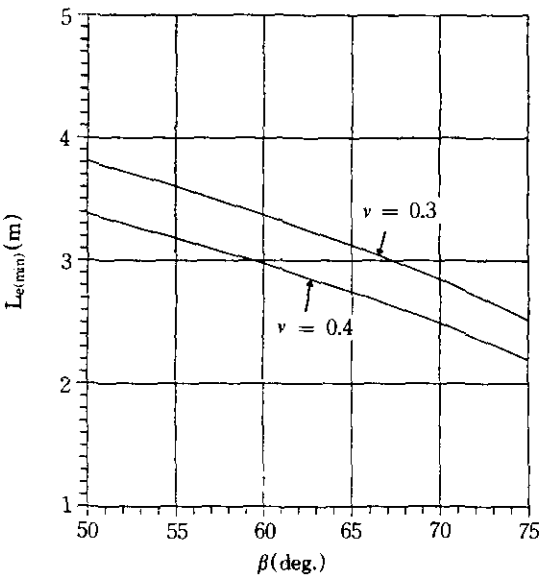

그림20. β – $L_{e(min)}$ 관계(m=1.0인 경우)

opt의 크기는 증가하는 반면에 $L_{e(min)}$값은 감소하는 경향을 보이고 있다(그림19~21). 또한 ν값의 차이가 ε_{opt}에 미치는 영향은 경사각 β가 커짐에 따라 점차적으로 줄어들어, $\beta=75°$인 경우 ε_{opt}은 ν값에 상관없이 29.8° 정도의 거의

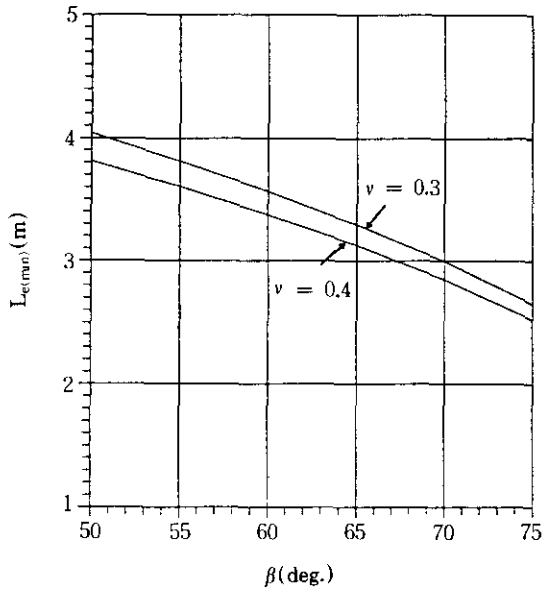

그림21. β – $L_{e(min)}$ 관계(m=0.0인 경우)

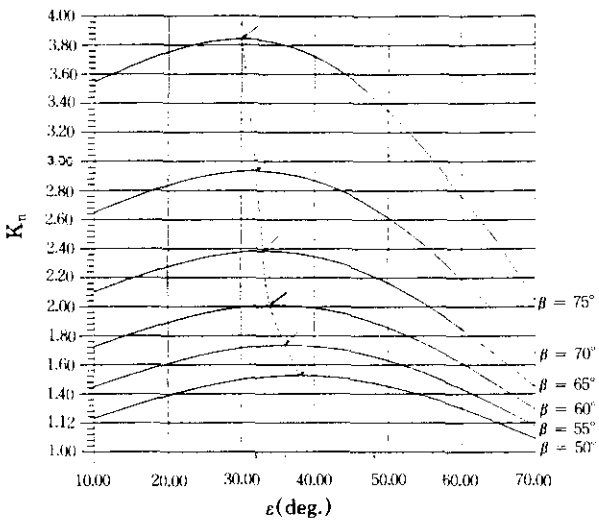

그림22. K_n –ε – β 관계(ν=0.4인 경우)

일정한 값을 나타내고 있다(그림 19). 아울러 ν 값의 차이가 $L_{e(min)}$의 크기 변화에 미치는 영향은, 포화된 지반(m=0.0)에 비해 지하수의 영향이 없는 지반의 경우(m=1.0)에 더욱 민감한 결과를 보이고 있다(그림 20 및 21).

3.6 설계예

그림18에 기 도시된 포화유한사면(간극수압비 r_u를 0.1로 가정하고, 수평진도 k_h=0.0인 정적하중의 경우에, PCSTABL6 프로그램을 이용해 계산하면 최소안전율 FS_{min}=0.87, k_h=0.1인 경우 FS_{min}=0.75로 판명되는 불안정한 사면)의 보강을 위해 AG System을 적용하였다. 보강효과가 고려된 네일(반지름 r=0.013m)의 숫자는 10개이며, 각 네일의 Y-방향 설치간격 s_y(=s_s/α) 및 계수 f(식(10) 및 (11) 참조)를 서로 달리하여 본 연구해석법을 토대로(m=0.0인 경우) 각각 계산된 보강유한사면의 전체적인 최소안전율 FS_{min} 값은 표5(정적하중 k_h=0.0인 경우) 및 6(지진하중 k_h=0.1인 경우)에 정리되어 있으며, 본 설계 예에 적용된 지반강도정수 및 기타조건 등은 표4와 동일하다. 또한 본 해석법에서 각 절편마다 요구되는 네일의 길이 L은 서로 달리 계산되나, 본 예에서는 동일한 길이의 네일을 사용하는 것으로 가정하여 즉 각 절편에 대한 계산치 중에서 가장 길이가 긴 네일을 택해 그 결과를 설계도표화 하여 그림 23 및 24에 각각 정리하였다. 따라서 보강효과에 포함되지 않은 네일의 영향 및 가

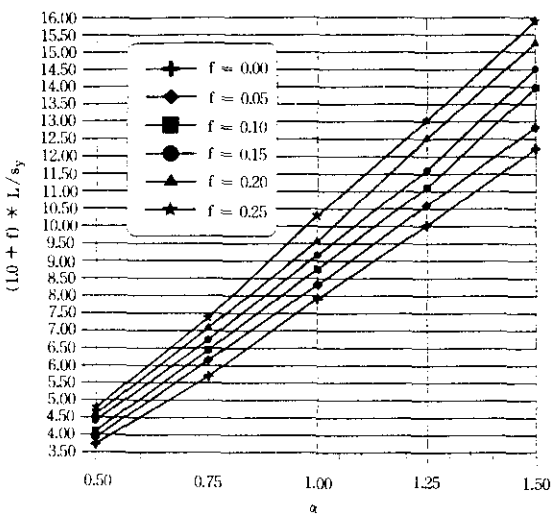

그림23. 설계도표1 (k_h = 0.0)

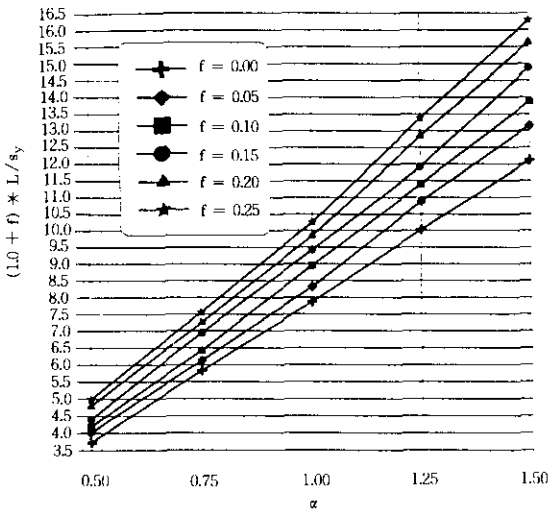

그림24. 설계도표2 (k_h = 0.1)

장 길이가 긴 네일을 모든 절편에 대해 동일하게 적용한 점 등을 감안할 때, 실제적인 안정성은 본 연구의 계산결과 보다 다소 클 것으로 예상된다.

표 5. 최소안전율 FS_{min} 계산결과(k_h=0.0)

α	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5
s_s(m)	0.78				
$s_y=(s_s/\alpha)$	1.57	1.04	0.78	0.63	0.52
	FS_m				
f=0.00	1.04	1.14	1.24	1.34	1.44
f=0.05	1.08	1.19	1.29	1.39	1.49
f=0.10	1.12	1.23	1.33	1.44	1.55
f=0.15	1.16	1.27	1.38	1.49	1.60
f=0.20	1.20	1.31	1.43	1.54	1.65
f=0.25	1.24	1.35	1.47	1.58	1.70

표 6. 최소안전율 FS_{min} 계산결과(k_h=0.1)

α	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5
s_s(m)	0.78				
$s_y=(s_s/\alpha)$	1.57	1.04	0.78	0.63	0.52
	FS_m				
f=0.00	0.89	0.98	1.07	1.16	1.24
f=0.05	0.92	1.02	1.11	1.20	1.29
f=0.10	0.96	1.05	1.15	1.24	1.33
f=0.15	0.99	1.09	1.18	1.28	1.37
f=0.20	1.02	1.12	1.22	1.32	1.41
f=0.25	1.05	1.15	1.25	1.35	1.45

표 5 및 6의 계산결과를 살펴볼 때, 일반적으로 계수 f의 크기 변화가 최소안전율 FS_{min}에 미치는 영향은, 네일의 Y-방향 설치간격 s_y의 변화가 FS_{min}에 미치는 영향에 비해 작은 경향을 보이고 있다. AG System 보강유한사면 설계에 요구되는 네일의 최적타입각도 ε_{opt}은 3.3 해석절차에 기술된 방법을 토대로 또는 간편식 (13)을 이용해 결정되며, 본 설계예 조건의 경우에는 ε_{opt}=37.8°로 계산되어 진다. 또한 본 설계예의 결과는, AG System에 대해 Koerner[5]가 제시한 네일의 최소길이 조건(파괴면 바깥쪽으로 최소한 1.5m 이상)은 모두 충족됨이 확인된 결과이다.

설계자가 AG System 보강이 이루어진 유한사면의 한계최소안전율을 1.3(정적하중 k_h=0.0인 경우) 및 1.2(지진하중 k_h=0.1인 경우)로 택할 경우, 그림 23 및 24에 도시된 설계도표를 이용해, 필요시 되는 네일의 Y-방향 설치간격 s_y 및 길이 L을 결정할 수 있다. 여기서 계수 f 값의 크기 결정은 현장지반상태, 안정성 및 경제성 등을 고려한 설계자의 공학적 판단에 따른다. 예를 들어 계수 f값을 0.1로 택하는 경우, 네일의 Y-방향 설치간격 s_y는 0.63m 이하($\alpha \geq$ 1.25)가 또한 네일의 길이 L은 6.50m 이상이 되어야만, 위에서 기술된 지진하중 및 정적하중 모두에 대해 한계최소안전율 조건의 충족이 가능하다.

4. 결 론

본 연구에서는 무한사면 및 유한사면 모두에 대해, 네일 및 지오텍스타일을 이용한 원위치 사면보강공법인 AG(anchored geosynthetic) System의 경제적인 설계를 위한 한계평형 안정해석법의 체계화가 이루어졌으며, 고려한 정착형태는 네일을 지반에 타입시켜 주변마찰에 의해 정착이 이루어지는 형태이다. 본 안정해석법에서는, 지하수, 점착력, 부착력 및 지진하중 등에 의한 영향을 고려하였으며, 모래지반

및 점토지반 모두에 대해 적용 가능하다. 유한사면의 경우에는 인접된 각 절편 사이의 경계면에 작용하는 수직력 및 전단력의 변화를 고려하는 Spencer 절편법을 변형하여 안정해석법의 제시가 이루어졌다. 또한 제시된 안정해석법을 토대로, 다양한 설계상의 변수가 네일의 최적타입각도, 요구되는 네일의 최소길이 및 최대설치간격 등에 미치는 영향이 분석되었으며, 이를 통해 최적타입각도 결정을 위한 간편식의 제시가 AG System 보강유한사면에 대해 이루어졌다. 이외에도 본 연구에서 채택한 네일 최적타입각도 결정의 판정기준에 대한 적합성 검토가 이루어졌으며, 또한 최적타입각도 결정의 중요성 등을 설계예를 통해 분석하였다.

감사의 글

이 논문은 1994년도 홍익대학교 학술연구 조성비에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1) Anderson, M.G. and Richards, K.S.(1987), Slope Stability, John Wiley & Sons Ltd.
2) Bishop, A.W. and Morgenstern, N.(1960), "Stability Coefficients for Earth Slopes, "Geotechique, pp.129~150.
3) Bruce, D.A. and Jewell, R.A.(1987), "Soil Nailing : Application and Practice," Ground Engineering, pp.10~33.
4) Hryciw, R.D.(1991), "Anchor Design for Slope Stabilization by Surface Loading," ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, pp.1260~1274.
5) Koerner, R.M.(1990), Designing with Geosynthetics, 2nd Ed., Prentice Hall.
6) Koerner, R.M. and Robins, J.C.(1986), "In-Situ Stabilization of Soil Using Nailed Geosynthetics," 3rd Int. Conf. on Geotextiles, pp.395~400.
7) Myles, B. and Briddle, R.J.(1991), "Fired Soil Nails-the Machine," Ground Engineering, pp. 38~39.
8) Pedley, M.J., Jewell, R.A. and Milligan, G.W. E.(1990), "A Large Scale Experimental Study of Soil Reinforcement Interaction," Ground Engineering, pp.45~49.

(접수일자 1994. 9. 30)