

토목섬유 보강 성토지지말뚝의 최신 설계동향



이수형
한국철도기술연구원
선임연구원
(geoxlee@krti.re.kr)



이일화
한국철도기술연구원
선임연구원
(iwlee@krti.re.kr)



이성진
한국철도기술연구원
선임연구원
(geolsj@krti.re.kr)



최정환
한국철도시설공단
부장
(kanina@hanmail.net)

1. 서론

최근 경제성 측면이나 정책적인 이유로 연약지반에서의 급속시공이 필요한 경우가 많아지고 있다. 특히 이차압축이 큰 특정 연약지반에 대해서는 기존의 전통적인 연약지반 개량공법의 적용이 근본적으로 불가능한 경우도 있다.

도로의 경우는 연약지반에 대하여 100mm의 잔류침하 또는 90~95%의 압밀도를 허용하고 있지만, 침하 문제로 연약지반구간에서는 침하 발생에 따른 유지, 보수가 어려운 콘크리트포장을 기피하고 덧씌우기가 가능한 아스팔트포장을 시공하고 있는 상황이다(김홍중 등, 2006). 철도분야에서는 경부고속철도 2단계 구간, 호남고속철도 등의 철도 건설에 콘크리트궤도를 도입함에 따라 궤도 유지관리를 위해 연약지반 상에서 궤도의 잔류침하량을 30mm 이하로 억제할 수 있는 연약지반 대책공법의 적용이 요구되고 있다. 이러한 여건에서는 지금까지의 일반적인 지반개량공법을 적용하는 데는 한계가 있으며, 이러한 문제점을 근본적으로 해결할 수 있는 해결책으로 말뚝지지 성토공법이 새롭게 부각되고 있다.

말뚝 기초위에 성토하는 공법은 60년 전부터 이미 사용되어 왔으나 경제적인 이유로 배제되어 왔다. 그러나 최근 직간접 시공비 측면에서 보다 경제적인 새로운 설계가 가능해짐에 따라 전 세계적으로 성토지지말뚝의 사용이 급격히 증대되고 있으며, 특히 유럽, 미국 등에서는 말뚝지지 성토 공법의 경제적인 설계가 가능한 기준을 만들고자 많은 연구가 활발히 이루어지고 있다. 프랑스에서는 발주처, 설계사, 시공사들이 IREX라는 비영리 단체를 만들어, ASIRI project(<http://www.irex-asiri.fr>)라는 이름으로 2005년에서 2009년까지 2,400,000 유로를 투자하여 말뚝지지 성토기법에 관련된 설계기법을 개발하고 공법을 검증하는 연구를 수행하고 있다. 미국에서는 2002년 FHWA (Federal Highway Administration)를 중심으로 연약지반에서 급속시공을 위한 공법으로 토목섬유 보강 성토지지말뚝공법을 선정하여 개발하고 있다.

말뚝지지 성토공법은 성토지반의 지반아칭현상을 이용하여 성토하중을 말뚝을 통해 직접 지지층에 전달시킴으로써 성토구조물의 안정성을 도모하고 침하를 근본적으로 억제하는 공법이다. 최근에는 그림 1과 같이 말뚝 상부의

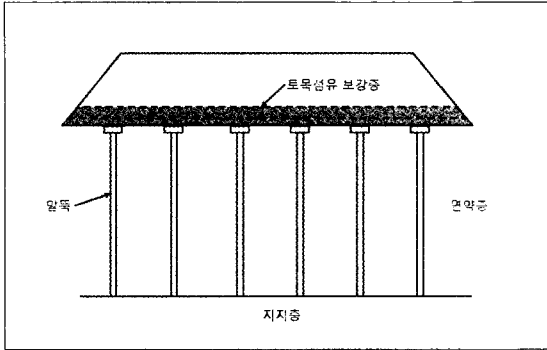


그림 1. 토목섬유 보강 말뚝지지 성토공법 개념도

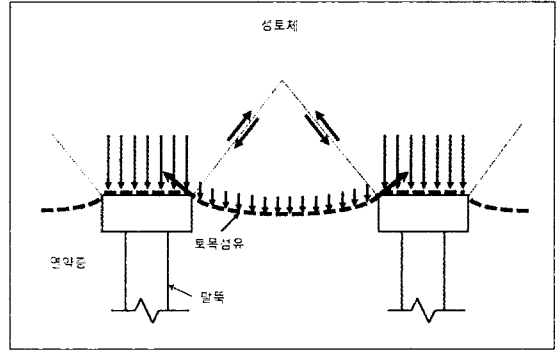


그림 2. 토목섬유 보강 성토지지말뚝공법의 하중전달 메커니즘

연약지반과 성토지반 경계부에 토목섬유를 보강하여 말뚝에 전달되는 하중을 증가시키는 공법(Geosynthetic-Reinforced Pile-Supported Embankment)이 주로 적용되고 있다. 이 경우는 말뚝, 캡, 연약지반, 성토지반, 토목섬유 등 많은 지지 요소들 사이의 상호작용이 발생하기 때문에 지지 메커니즘이 매우 복잡해진다.

현재까지 성토지지말뚝에 관련된 많은 설계방법들(Collin, 2006; Nordic Geotechnical Societies, 2003; Kemfert 등, 2004; 이광우, 2006; Hewlett & Randolph, 1994, 日本鐵道 合技術研究所, 2000)이 제안되어 왔다. 본 기사에서는 이들 설계방법의 특징과 미국 및 영국을 중심으로 새롭게 대두되고 있는 하중전달층(Load Transfer Platform)을 적용한 새로운 설계방법을 소개하고, 국내 연약지반에 대하여 성토지지말뚝 공법을 적용하기 위해 필요한 방안을 제시하고자 한다.

2. 토목섬유 보강 성토지지말뚝의 하중전달 메커니즘

2.1 말뚝으로의 하중전달 원리

토목섬유로 보강된 말뚝지지 성토체에서 말뚝, 연약지반, 성토지반, 토목섬유 간의 상호작용은 그림 2와 같이 나타낼 수 있으며, 성토하중이 말뚝에 집중되는 원리는 크게 다음의 두 가지 작용에 의한 것으로 분류할 수 있다.

1) 말뚝과 연약층 상부 성토지반의 상대적인 침하 차이

로 인한 이칭효과

2) 토목섬유에 발생하는 인장력의 수직성분

첫 번째 작용인 지반의 이칭효과는 토목섬유가 설치되지 않은 경우 성토하중이 말뚝에 집중되는 주요 원리이다. 성토하중이 가해지면 연약지반은 침하되고 이로 인해 말뚝 사이 성토지반의 침하가 발생한다. 반면 말뚝 상부의 성토지반은 말뚝의 지지 효과로 인해 침하가 매우 작게 발생하며 침하가 상대적으로 큰 주변 지반의 침하를 억제하는 전단저항을 유발하게 된다. 이러한 효과로 인해 연약지반에 전달되는 응력은 감소하고 말뚝에 전달되는 응력은 증가하게 되는데 이를 지반 이칭효과라고 한다(Terzaghi, 1943).

두 번째 작용은 성토지지 말뚝에 토목섬유가 보강된 경우에 발생하며 그림 2와 같이 연약지반에 전달되는 하중을 토목섬유가 부담하게 됨에 따라, 토목섬유에 발생하는 인장력의 수직성분이 말뚝에 전달되는 것이다.

2.2 하중전달 특성을 나타내는 계수

성토지지말뚝의 하중 전달 특성을 표현하기 위한 대표적인 설계변수는 응력감소비(stress reduction ratio, SRR)로 전체 성토하중, 말뚝에 작용하는 응력, 말뚝 사이 연약지반에 작용하는 응력 사이의 관계를 정의한다. 응력감소비(SRR)는 성토 및 상재하중에 의해 말뚝이 설치되지 않은 경우 연약지반에 전달되는 평균응력(σ_0)에 대한 말뚝이 설치된 경우 말뚝 사이 연약지반(또는 토목섬유)에 작용하는 응력(σ_1)의 비로 아래의 식 (1)과 같이 정의된다.

$$SRR = \frac{\sigma_s}{\sigma} = \frac{\sigma_s}{\gamma \cdot H + q} \quad (1)$$

여기서, γ 는 성토지반의 단위중량, H 는 성토높이, q 는 교통하중 등의 상재하중을 나타낸다. 응력감소비가 작을수록 연약지반에 전달되는 하중이 작아져서 말뚝으로의 성토하중 전달이 잘 되었다는 것을 의미한다. 토목섬유가 보강된 경우에는 응력감소비를 이용하여 토목섬유에 작용하는 응력을 구할 수 있으며, 이를 통해 토목섬유의 설계 인장 강도를 산정할 수 있다.

3. 토목섬유 보강 성토지지말뚝 설계 방법

3.1 설계방법의 분류

표 1에는 현재까지 발표된 대표적인 성토지지말뚝의 설

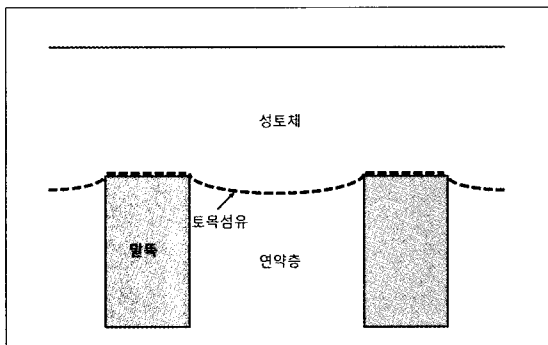
표 1. 성토지지말뚝 공법 설계 방법

설계 개념	막방법	보방법
설계 방법	BS8006 (1995)	Collin (2006) 방법
	EBGEO (1997)	TENSAR(2006) 방법
	Nordic 방법	Guido 방법 (1987)
	일본종합연구소 (2000)	
	Hewlett & Randolph (1988)	
	수정 Terzaghi 방법 (1997)	
	이광우 (2006)	

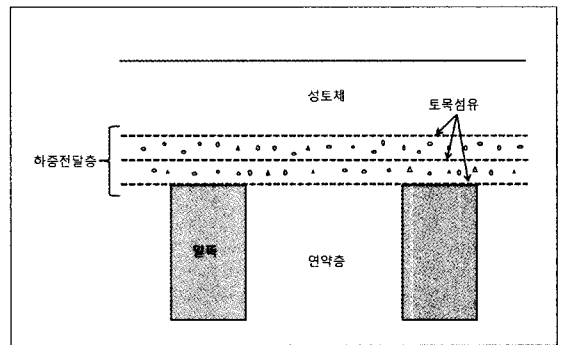
계방법을 정리하여 나타내었다. 이들 설계방법은 크게 두 가지 형태로 구분할 수 있으며, 첫 번째 형태는 아칭효과가 일반 성토지반 내에서 형성된다는 초기의 이론을 토대로 한 설계방법으로 토목섬유가 그림 3a와 같이 일종의 막(membrane)과 같이 변형하여 인장응력의 수직성분을 통해 말뚝으로의 성토하중의 전달을 향상시킨다고 가정한다(membrane method 또는 catenary method). 2000년대 전반기까지 개발된 설계 방법은 모두 이러한 가정을 따르고 있다. 두 번째 형태는 최근 대두되고 있는 방법으로 그림 3b와 같이 양질의 조립재료와 토목섬유로 이루어진 일정 두께 이상의 하중전달층 내에 아칭효과가 국한되어, 하중 전달층이 보 또는 슬래브로 작용한다는 이론을 토대로 한 방법이다(beam method, Collin method). 본 기사에서는 막방법으로 분류되는 7종류와 보방법으로 분류되는 3종류 설계방법의 특성을 소개한다.

3.2 주요 설계요소

현재까지의 설계방법에서는 말뚝의 지지력 설계시 모든 성토하중 및 상재하중이 말뚝에 전달된다는 매우 보수적인 가정을 토대로 하고 있다. 실제로는 아칭효과나 토목섬유의 보강효과로 인해 모든 성토하중 및 상재하중이 말뚝에 전달되지는 않는다. 현행 설계에서는 말뚝에 전달되는 하중을 단순히 말뚝 배치에 의해서만 결정하고 있으며, 이와 같은 매우 안전한 가정으로 인해 성토지지말뚝 공법에서 말뚝의 지지력 측면의 문제가 생길 가능성은 매우 희박



(a) 막방법



(b) 보방법

그림 3. 토목섬유의 하중전달 메커니즘

하다. 따라서 현재 여건에서 토목섬유 보강 성토지지말뚝 공법에서 가장 주된 설계요소는 토목섬유에 전달되는 하중을 결정하여 적절한 토목섬유의 인장강도를 결정하는데 있다. 토목섬유에 전달되는 하중은 앞에서 설명한 응력감소비를 합리적으로 산정하여 구할 수 있으며, 본 기사에서는 응력감소비를 산정하는 방법을 중심으로 지금까지 발표된 성토지지말뚝 설계기법의 특징을 소개한다.

3.3 설계방법의 특성

3.3.1 막방법 (membrane method, catenary method)

(1) BS8006

영국의 관련 기준인 BS8006(1995)에서는 토목섬유에 작용하는 하중을 구하기 위하여 말뚝으로 인해 지지되지 않는 면적에 작용하는 하중은 균등한 수직 선하중으로 간주하며, 성토높이에 따라 다음의 식 (2)와 (3)을 이용하여 응력감소비를 구한다.

$$SRR = \frac{2s}{(s+a)^2(s^2-a^2)} \left[s^2 - a^2 \left(\frac{P_c'}{\gamma \cdot H + q} \right) \right] \quad H \leq 1.4(s-a) \quad (2)$$

$$SRR = \frac{2.8 \cdot s \cdot \gamma}{(s+a)^2(\gamma \cdot H + q)} \left[s^2 - a^2 \left(\frac{P_c'}{\gamma H + q} \right) \right] \quad H > 1.4(s-a) \quad (3)$$

여기서 P_c' 는 말뚝에 작용하는 수직응력으로 아래의 식 (4)로부터 구한다.

$$\frac{P_c'}{(\gamma \cdot H + q)} = \left(\frac{C_a}{H} \right)^2 \quad (4)$$

여기서 C_a 는 아칭계수이며 성토높이, 말뚝캡의 폭(a), 말뚝의 강성에 따라 결정된다.

(2) Terzaghi 이론

Russel과 Pierpoint (1997)는 3차원 말뚝 배치를 고려할 수 있는 응력감소비를 개발하기 위하여 Terzaghi의 아칭이론을 적용하고 말뚝 사이 지반의 침하 형상을 십자형으

로 가정하여, 응력감소비 산정을 위한 다음의 식 (5)를 제안하였다.

$$SRR = \frac{(s^2 - a^2)}{4 \cdot H \cdot a \cdot K \cdot \tan \phi} \cdot \left[1 - \exp \left[\frac{-4 \cdot H \cdot a \cdot K \cdot \tan \phi}{(s^2 - a^2)} \right] \right] \quad (5)$$

여기서 ϕ 는 성토재료의 내부마찰각, K는 수평토압계수이다.

(3) Hewlett & Randolph의 방법

Hewlett & Randolph(1988)는 그림 4와 같은 말뚝 상부 지반에 반구형 돔형상의 아치가 발생한다고 가정하고 극한평형법을 적용함으로써 말뚝과 연약지반에 작용하는 성토하중을 결정할 수 있는 이론적인 방법을 제시하였다. 이 모델에서는 돔의 침단 또는 말뚝 상부에서 파괴가 발생한다고 가정하였으며, 두 경우에 대하여 응력감소비를 계산하여 더 큰 값을 적용한다.

아치 침단에서 파괴가 일어나는 경우 응력감소비는 다음의 식 (6)과 같다.

$$SRR = \left(1 - \frac{a}{s} \right)^{2K_p} \cdot \left(1 - \frac{2s(K_p - 1)}{\sqrt{2H(2K_p - 3)}} \right) + \left(\frac{(s-a)2(K_p - 1)}{\sqrt{2H(2K_p - 3)}} \right) \quad (6)$$

여기서 K_p 는 Rankine의 수동토압계수이다.

말뚝 상부에서 파괴가 일어나는 경우의 응력감소비는 다음의 식 (7)과 같다.

$$SRR = \frac{1}{\left(\frac{2K_p}{K_p + 1} \right) \left[\left(1 - \frac{a}{s} \right)^{K_p} - \left(1 - \frac{a}{s} \right) \left(1 + \frac{a}{s} K_p \right) \right] + \left(1 - \frac{a^2}{s^2} \right)} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)의 결과를 비교하여 더 큰 경우의 응력감소비를 적용하게 된다.

(4) 독일 방법

Kempfert 등(2004)은 EBGEO(German Recommendations for Geosynthetic Reinforced Earth Structure)에

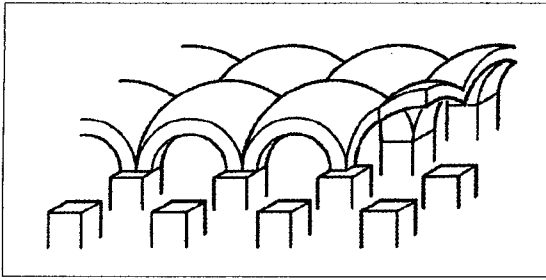


그림 4. Hewlett과 Randolph(1988)의 3차원 아칭 모델

적용된 독일의 설계 방법을 소개하였다. 이 방법은 그림 4와 유사한 돔형상의 아칭모델을 적용하여, 소성이론, 실내시험, 수치해석 등을 통하여 개발되었으며, 다음의 식 (8)을 이용하여 응력감소비를 구한다.

$$SRR = \frac{1}{(1+\lambda)^x} + \frac{h_g}{H} \left[\frac{1}{(1+\lambda)^x} - \frac{1}{(1+\lambda)^x} \right] \quad (8)$$

여기서 s_g 를 정방향으로 배치된 말뚝의 대각선 방향 중심 거리 ($s\sqrt{2}$)이고, d_c 를 말뚝의 직경이라 할 때,

$$h_g = \frac{S_g}{2} \quad (H \geq \frac{S_g}{2} \text{ 인 경우}), \quad h_g = H \quad (H < \frac{S_g}{2} \text{ 인 경우})$$

$$\lambda = \frac{h_g^2 \cdot \lambda_2}{\lambda_1}, \quad \lambda_1 = 1 - 8(s_g - d_c)^2, \quad \lambda_2 = \frac{S_g^2 \cdot 2d_c s_g - d_c^2}{2S_g^2}$$

$$K_c = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right), \quad x = \left(\frac{d_c(K_c - 1)}{\lambda_2 S_g} \right)$$

(4) Nordic Method

Nordic Geotechnical Societies (2003)에 의해 제안된 방법에서는 그림 5와 같이 말뚝 사이에 침각이 30도인 썩기 모양의 아치가 형성되어 흙 썩기의 무게가 토목섬유에 작용하는 것으로 가정한다. 썩기 상부의 하중은 모두 말뚝으로 전달된다고 가정한다. 이때 썩기의 높이는 $1.87(s-a)$ 이며, 이를 아칭이 발생하기 위한 한계높이 (critical depth)라고 한다.

3차원 효과를 고려하고 상재하중을 추가적으로 고려하여 응력감소비를 대한 다음의 식 (9)를 이용하여 구한다.

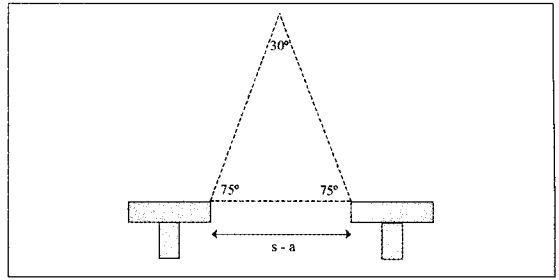


그림 5. Nordid 방법의 아칭모델

$$SRR = \frac{(s-a) \cdot \gamma}{4 \cdot (\gamma H + q) \cdot \tan 15^\circ} \quad (9)$$

식 (9)는 한계높이보다 성토고가 높은 경우에 적용이 가능하며, 성토고가 낮은 경우에는 그림 5에서 삼각형 위쪽을 잘라내어 응력감소비를 계산한다.

(5) 일본철도종합연구소 방법

일본철도종합연구소의 방법(2000)도 침단각이 30도인 썩기형의 아치가 형성된다고 가정하며, 결국 이 방법은 아칭효과에 대하여 Nordic 방법과 동일한 방법을 적용하고 있다고 볼 수 있다. 일본에서는 특히 토목섬유와 더불어 말뚝을 연결한 철근망을 사용하여 보강효과를 증대시키는 방법을 적용하고 있다.

(6) 이광우(2006)의 방법

이광우(2006)는 그림 4와 유사한 돔형상의 아치가 말뚝 캡의 1/4 단면이 아닌 전단면에 걸쳐 형성되는 모델을 이용한 설계법을 제안하였다. 이 방법은 아칭효과에 대하여 이재호(2006)가 수행한 모형실험의 실제 관측 결과를 토대로 해석적으로 개발한 방법으로 토목섬유에 전달되는 하중을 구하기 위한 하중감소비는 아래의 식 (10)으로 구할 수 있다.

$$SRR = \frac{\gamma \left(H - R_1 - \frac{R_1}{2N_\phi - 3} \right) \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{2N_\phi - 1} + \gamma \cdot \frac{R_2}{2N_\phi - 3} - \frac{2cN_\phi^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{2N_\phi - 1} \right\} + R_2 \cdot \gamma}{\gamma \cdot H + q} \quad (10)$$

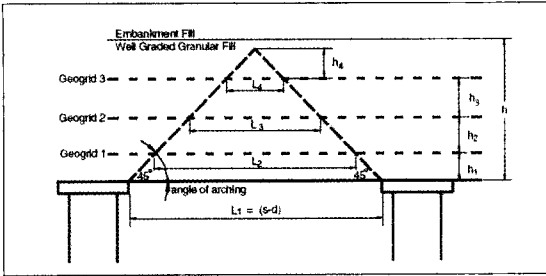


그림 6. Collin (2006)의 하중전달층 모델

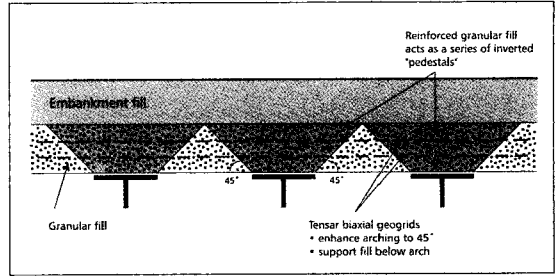


그림 7. Tensar(2006)의 하중전달층 모델

여기서, c 는 성토지반의 점착력

$$N_q = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right), R_1 = \frac{s+a}{2}, R_2 = \frac{s-a}{2}$$

3.3.2 보방법 (Beam method, Collin method)

(1) 수정 Guido 방법

Guido 등 (1987)은 강성 이축 지오그리드를 얇은 기초 하부의 조립층에 삽입하여 기초지반의 지지력을 증가시켰다. 지오그리드로 보강된 비점착성 지반을 통해 하중이 전파되는 하중의 각도가 보수적으로 볼 때 45도로 간주할 수 있다고 제시하였다. Russel & Pierpoint(1997)는 Guido의 방법을 수정하여 토목섬유가 말뚝에 의해 지지되지 않는 모서리 각이 45도인 피라미드 형상의 흙의 무게를 지지하는 것으로 가정하여 다음과 같은 응력감소비를 표현하는 식 (11)을 제시하였다.

$$SPRR = \frac{(s-a)\gamma}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot (\gamma H + q)} \quad (11)$$

(2) Collin 방법

Collin (2006)에 의해 제안된 이 방법은 최소 3층 이상의 토목섬유가 설치되어 흙과 함께 하중전달층을 형성하는 경우 보강층이 강성이 증가된 보로 작용하여 성토하중을 말뚝으로 전달한다는 것을 전제로 한다(그림 6). 이 방법은 최소 3층 이상의 토목섬유를 보강하고 유효내부마찰각이 34도 이상인 양질의 조립재료를 사용하는 것을 전제로 하

고 있으며, 토목섬유의 주된 기능은 하중전달층내 재료를 횡방향으로 구속하여 하중전달층 내에서 아칭효과가 발생하도록 하는 것이며, 부가적으로 아치 내부의 흙찌꺼기의 무게를 지지하는 역할도 한다고 가정한다. 각 층의 토목섬유가 받는 수직하중은 말뚝 배치 형태와 토목섬유의 수직 간격에 따라 결정된다. 각 층은 하중전달층의 아치 하부의 흙찌꺼기 안에 있는 흙의 무게에 해당하는 하중을 지지할 수 있도록 설계한다. 각 층의 토목섬유에 작용하는 성토하중은 토목섬유 사이의 재료의 무게에 해당한다. 아칭각이 45도인 경우 n 번째 층에 작용하는 등분포 수직응력은 아래의 식(12)에 의해 결정된다.

$$W_{tn} = \frac{(A_n + A_{n+1})h_n\gamma}{2A_n} \quad (12)$$

여기서, A_n = n 번째 토목섬유의 흙찌꺼기 내 면적

h_n = n 번째 토목섬유와 직전 토목섬유와의 간격

γ = 하중전달층의 단위중량

식 (12)로부터 구한 각 층의 토목섬유에 전달되는 수직응력으로부터 토목섬유의 소요 인장강도를 결정하게 된다.

(3) Tensar 설계법

Tensar(2006)의 방법도 조립토와 토목섬유를 이용하여 하중전달층을 조성하는 방법으로, 하중전달층의 작용으로 그림 7과 같이 거꾸로 놓은 받침대 형상으로 말뚝에 성토하중이 집중된다고 가정하고 있다. 토목섬유의 설치로 인해 아칭각은 45도가 되며 하중전달층 내부에서 모든 아칭효과가 발휘되는 것으로 설계된다. 그러나 자세한 토목섬

표 2. 성토지지말뚝 공법 설계 방법

방법	SRR					
	a/s=0.25		a/s=0.333		a/s=0.5	
	H/s=1.5	H/s=4	H/s=1.5	H/s=4	H/s=1.5	H/s=4
BS8006 (1995)	0.92	0.34	0.62	0.23	0.09	0.02
Adapted Terzaghi, K=1	0.60	0.32	0.50	0.23	0.34	0.13
Adapted Terzaghi, K=0.5	0.77	0.52	0.69	0.42	0.54	0.26
Kempfert et al. (2004)	0.55	0.46	0.43	0.34	0.23	0.15
Hewlett and Randolph (1988)	0.52	0.48	0.43	0.31	0.30	0.13
Adapted Guido (1987)	0.12	0.04	0.10	0.04	0.08	0.03

유의 설계방법과 하중전달층에 사용되는 재료의 조건은 공개되지 않은 상태이다.

4. 결론 및 제언

표 2는 Filz & Smith(2006)가 수행한 연구 결과로 5종류의 대표적인 설계방법을 적용하여 응력감소비를 구하고 이를 비교한 것으로, 동일한 지반 조건에 대하여 성토높이(H)에 대한 말뚝간격(s)의 비와 성토 면적(a)에 대한 말뚝의 설치간격 비의 변화에 따라 계산한 결과이다.

표 2에 제시된 결과에 의하면 각 설계방법에 따라 응력감소비는 현저한 차이를 나타내고 있으며, 특히 현재 가장 많이 사용되고 있는 BS8006 (1995)의 경우는 다른 방법들의 결과와 많은 편차를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 합리적이고 경제적인 설계를 위해서는 각 설계방법의 특성에 대한 정확한 파악과 이를 토대로 한 설계방법의 정형화가 반드시 필요한 것으로 평가된다. 최근까지의 토목섬유 보강 성토지지말뚝의 설계방법을 조사한 결과 다음과 같은 결론과 제언사항을 얻을 수 있다.

- 1) 현재까지의 모든 설계방법에서는 말뚝이 모든 성토하중을 부담한다는 가정을 토대로 말뚝의 지지력 측면에서 매우 보수적인 설계가 이루어지고 있다. 향후 경제적인 설계를 위해서는 말뚝에 전달되는 하중을 보다 정확히 산정하여 말뚝의 설치개수나 단면을 줄일

수 있는 방법의 개발이 필요하다.

- 2) 현행 설계 개념에서는 토목섬유의 보강 목적이 불분명하다. 일반적으로 토목섬유의 역할을 말뚝으로의 하중전달을 증가시키는 것으로 평가하여 적용하고 있으나, 이론적으로는 아칭효과가 충분히 발휘되면 지지력 측면이나 사용성 측면에서는 모두 토목섬유의 보강이 필요 없는 것으로 계산된다. 그럼에도 불구하고 토목섬유를 보강하는 이유는 지반 아칭효과에 대한 불확실성 때문일 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법은 실제 시공, 실물 크기 시험을 통해 지반 아칭효과를 확실히 확인하는 방법이 가장 확실한 방법으로 이에 대한 연구가 시급하다. 최근 많이 적용되고 있는 3층 이상의 토목섬유와 선택된 양질의 재료를 이용하여 특정 두께 이상의 하중전달층을 조성하고 이 층을 슬래브로서 고려하여 성토체 자체의 아칭효과를 배제하고 설계하는 방법도 이러한 문제점에 대한 대안이 될 수 있다.
- 3) 현재까지 설계방법은 대부분 이론적으로 유도된 것으로 이에 대한 검증이 반드시 필요하다. 성토지지말뚝 공법은 성토 완료 후에도 원지반의 압밀에 의한 근본적인 강도증가를 기대할 수 없으므로 최대 높이 10m 이하의 성토에만 적용되어 왔으며, 주요 구조물에는 사용이 배제되어 왔다. 특히 철도의 콘크리트궤도와 같이 침하에 민감한 구조물에 대하여 이 공법을 적용하기 위해서는 실험적 시험시공, 수치해석 등을 통한 상세한 검토가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

토목섬유 말뚝지지 성토공법은 경제적으로 급속시공이 가능한 공법으로 향후 설계방법의 정형화와 이에 대한 검증이 이루어진다면 국내 주요구조물에 대한 많은 적용이 기대된다

참고문헌

1. ASIRI, <http://www.irex-asiri.fr>
2. BS8006. (1995), British Standard, Code of practice for: Strengthened/reinforced soils and other fills.
3. Collin, J. G. (2006), "U. S. State-of-Practice for the Design of Geosynthetic Reinforced Load Transfer Platform in Column Supported Embankments", Geo-Denver 2007: New Peaks in Geotechnics, GSP 172, pp.1-12
4. Filtz, M. & Smith, M.E. (2006), Design of Bridging Layers in Geosynthetic-Reinforced, Column-Supported Embankments, Report VTRC 06-CR12, Virginia Department of Transportation.
5. Guido, V. A., Knueppel, J. D., and Sweeny, M. A. (1987) "Plate loading tests on geogrid-reinforced earth slabs", Geosynthetic '87 Conference New Orleans, pp.216-25.
6. Han, J. and Gabr, M.A. (2002), "Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.128, No.1, pp.44-53.
7. Hewlett, W. J. and Randolph, M. F. (1988), "Analysis of piled embankments", Ground Engineering, 21, no. 3: 12-18.
8. Kempfert, H. G., Gobel, C., Alexiew, D., and Heitz, C. (2004), "German recommendations for reinforced embankments on pile-similar elements", EuroGeo3 - Third European Geosynthetics Conference, Geotechnical Engineering with Geosynthetics, pp.279-284.
9. Nordic Geotechnical Societies (2003), Nordic guidelines for reinforced soils and fills.
10. Russell, D. and Pierpoint, N. (1997), "An assessment of design methods for piled embankments", Ground Engineering, 30, No. 11: pp.39-44.
11. Smith E. M. (2006), Design of Bridging Layers in Geosynthetic-Reinforced Coulum-Supported Embankments, Virginia Polytechnic Institute and State University Ph. D Dissertation.
12. Tensar (2006), Foundations over piles, Constructing over weak ground without settlement, Brochure Issue7, 79010035
13. Terzaghi, K. (1943), Theoretical Soil Mechanics. New York: John Wiley and Sons, Inc.
14. 日本鐵道 合技術研究所 (2000), 杭網工法 設計, 施工の手引き.
15. 김홍중, 정종홍, 정경자 (2006), "연약지반 구간 고속도로의 개통 후 침하량 평가", 도로교통기술원 제22회 연구성과 발표회 논문집, 한국도로공사, pp.79-86.
16. 이광우 (2006), 연약지반 측방유동 억제를 위한 토목섬유 보강 성토지지말뚝시스템의 설계법, 중앙대학교, 박사학위논문
17. 이재호 (2006), 토목섬유보강 성토지지말뚝시스템에서의 지반아칭, 중앙대학교, 박사학위논문