한국철도학회논문집
제12권 제2호 2009년 | pp. 276-284

수치해석을 통한 성토지지말뚝에 대한 토목섬유 보강 효과 분석

Numerical Study on the Effects of Geosynthetic Reinforcement on the Pile-supported Embankment

이수형†
Su-Hyung Lee

Abstract Recently pile-supported embankments have emerged as an optimum method when the rapid construction and strict deformation of structures are required on soft soils. Especially geosynthetic-reinforced and pile-supported (GRPS) embankments are used worldwide as they can provide economic and effective solutions. However the load transfer mechanism in GRPS embankments is very complex, and not yet fully understood. Particularly the purpose and effect of geosynthetic inclusion are ambiguous and considered as an auxiliary measure assisting the arching effect of piles. Numerical parametric study using 3D finite element method has been conducted to investigate the effect of geosynthetic reinforcement on the load transfer mechanism of GRPS embankments. Numerical results suggested that as more stiffer geosynthetic is included, arching effect decreases considerably and the load concentration to the piles mostly caused by tension effect of geosynthetic. This finding is contradictory to the common understanding that geosynthetic inclusion only enhance the efficiency of load transfer. Consequently the design parameters determined from the numerical analyses are compared with those of three existing design methods. The problems of the existing methods are discussed.

Keywords : pile, geosynthetic, reinforcement, embankment, soft soils, arching effect. load transfer mechanism

요 지 최근 연약지반에서 급속시공과 엄격한 침하억제가 필요한 경우가 빈번해짐에 따라 성토지지 말뚝공법이 이에 대한 해결책으로 대두되고 있다. 특히 토목섬유로 보강한 성토지지 말뚝 공법의 경우 경제성 및 안정성 측면에서 효용성이 커서 전 세계적으로 활발히 적용되고 있다. 그러나 성토지지말뚝에서의 하중전달작용은 매우 복잡하여 아직까지 이에 대한 완전한 파악이 이루어지지 않은 상태이다. 특히 토목섬유의 보강 목적 및 효과에 대한 이해는 매우 부족한 상태로, 지반의 아칭효과에 의한 말뚝 지지효과를 보조하기 위한 수단으로서 토목섬유의 보강효과를 간주하고 있다. 본 논문에서는 3차원 유한요소해석을 이용한 변수연구를 통해 토목섬유의 보강효과를 구명하였다. 해석 결과의 분석을 통해 토목섬유의 보강 정도가 증가함에 따라 성토하중이 말뚝으로의 집중하는 작용이 지반의 아칭효과에서 토목섬유의 인장효과로 전이되는 현상을 발견하였다. 이는 토목섬유가 일방적으로 말뚝으로의 하중 전달 작용을 향상시킨다는 기존의 인식과는 상반된 결과이다. 최종적으로는 기존 설계방법과 수치해석으로 산정된 설계변수의 비교를 통해 기존 설계방법의 문제점과 개선 방안을 제시하였다.

주 요 어 : 말뚝, 토목섬유, 보강, 성토, 연약지반, 아칭효과, 하중전달작용

1. 서 론

최근 경제성 측면이나 정책적인 이유로 지반 개량에 오랜 기간이 소요되는 전통적인 공법들을 적용이 불가능한 경우가 많이 발생하고 있다. 또한 특정 연약지반층에 대해서는 이차압축침하 등으로 인해 기존의 전통적인 연약지반 개량공법의 적용이 근본적으로 불가능한 경우도 있다. 현재 국내 철도분야에서는 경부고속철도 2간계 구간, 호남고속철도등의 철도 건설에 콘크리트궤도를 도입함에 따라 궤도 유지관리를 위해 연약지반 상에서 궤도의 잔류침하량을 30mm 이하로 억제할 수 있는 지반개량 공법의 적용이 요

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 선임연구원
E-mail : geoxlee@krri.re.kr
TEL : (031)460-5399 FAX : (031)460-5319

구되고 있다. 그러나 국내의 연약지반 특성으로 인해, 100mm의 잔류침하 또는 90~95%의 압밀도를 허용하는 도로의 경우 침하 문 제로 연약지반구간에서는 침하 발생에 따른 유지, 보수가 어려운 콘크리트포장을 기피하고 덧씌우기가 가능한 아스팔트포장을 시공하고 있는 상황이다[25]. 따라서 연약지반 상에 콘크리트궤도부설시 지금까지의 일반적인 지반개량공법을 적용하는 데는 한계가 있으며, 이러한 문제점을 근본적으로 해결할 수 있는 새로운 공법의 적용이 요구되고 있다. 이에 대한 대안으로 말뚝지지 성토공법이 새롭게 부각되고 있다. 말뚝 기초위에 성토 하는 공법은 60년 전부터 이미 사용되어 왔으나 경제적인 이유로 배제되어 왔다. 그러나 최근 직간접 시공비 측면에서 보다 경제적인 새로운 설계가 가능해 짐에 따라 전 세계적으로 성토지지말뚝의 사용이 급격히 증대되고 있으며, 유럽, 미국 등에서는 말뚝지지 성토 공법의 합리적인 설계 기준을 만들고자 많은 연구가 활발히 이루어지고 있다[5,8,18,14,19]. 프랑스에서는 발주처, 설계사, 시공사들이 IREX라는 비영리 단체를 만들어, ASIRI project라는 이름으로 2005년에서 2009년까지 2,400,000 유로를 투자하여 말뚝지지 성토기법에 관련된 설계기법을 개발하고 공법을 검증하는 연구를 수행하고 있다.

말뚝지지 성토공법은 성토지반의 지반 아칭현상을 이용하여 성토하중을 말뚝을 통해 직접 지지층에 전달시킴으로서 성토구조물의 안정성을 도모하고 침하를 근본적으로 억제하는 공법으로, 지지요소들 간의 하중 전달 메커니즘이 복잡하여 그 해석이 쉽지 않다. 유럽의 경우 단순화된 지반모델을 적용한 해석적인 방법에 의해 설계가 이루어지고 있으며, 장기 계측을 통한 연구도 함께 수행되고 있다[2,3,7,23]. 미국 및 중국의 경우도 3차원 수치해석과 현장계측을 통한 말뚝 지지 성토체의 거동에 대한 연구가 수행되고 있다[6,9,12,16,21] 국내의 경우는 아직까지 성토지지말뚝 공법의 실제 현장에 대한 적용 실적은 미비한 상태로 주로 모형실험과 시험시공을 통한 이론적 연구가 진행 중에 있다[26-30].

특히 최근에는 Fig. 1과 같이 말뚝 상부의 연약지반과 성토지반 경계부에 토목섬유를 보강하여 말뚝에 전달되는 하중을 증가시키는 공법(geosynthetic-reinforced and pile-supported (GRPS) embankment)이 주로 적용되고 있다. 이 경우는 말뚝, 캡, 연약지반, 성토지반, 토목섬유 등 많은 지지요소들 사이의 상호작용이 발생하기 때문에 지지 메커니즘이 매우 복잡해진다. 일반적으로 토목섬유의 설치 효과에 대해서는 연약지반에 전달되는 하중을 토목섬유 인장력의 수직성분에 의하여 말뚝으로 전달시키는 것으로 알려져 있다. 그러나 토목섬유의 설치로 인해 말뚝 사이 지반의 지지강성이 증대되면 이로 인해 아칭효과가 오히려 감소하는 결과를 낳을 수 있다. 이는 아칭효과가 주로 성토지반의 말뚝 지지부와 연약지반 지지부에서 발생하는 변위차이에 저항하는 전단응력으로 인해 발현되기 때문이다. 토목섬유의 보강은 말뚝 지지부와 연약지반 상부의 흙 사이의 상대변위를 감소시켜 아칭효과를 감소시킬 수 있는 것으로 예측된다. 현재까지 성토지지말뚝에 관련된 많은 설계기법들[5,10,14,18,24,26]이 제안되어 왔으나, 토목섬유의 적용으로 인한 하중 전달 메커니즘의 변화는 고려하지 않고 있으며, 토목섬유의 설치 여부와 상관없이 동일한 아칭효과가 발생한다고 가정하고 있다.

본 논문에서는 3차원 유한요소해석을 통해서 토목섬유가 성토말뚝의 지지 메커니즘에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 토목섬유의 강성을 달리한 일련의 수치해석을 통해 토목섬유의 설치가 말뚝으로의 하중전달 작용에 미치는 영향을 분석하였으며, 그 결과를 토대로 기존의 성토지지말뚝공법의 설계 방법들의 문제점을 지적하고 이에 대한 보완 방안을 제시하였다.

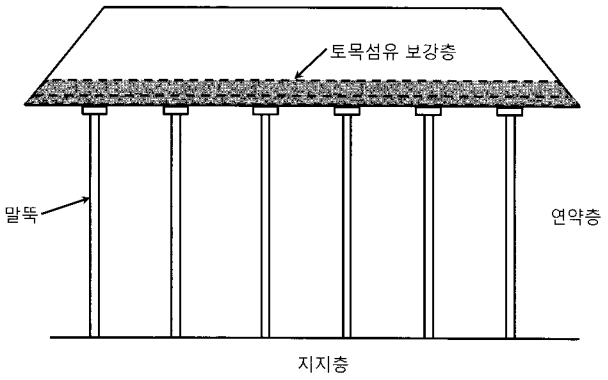

Fig. 1. Schematics of GRPS embankment

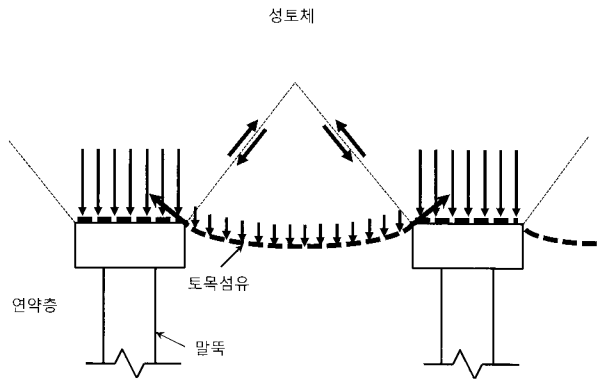

Fig. 2. Load transfer mechanism of GRPS embankment

2. 하중전달 메커니즘

2.1 말뚝으로의 하중 집중 원리

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

1) 말뚝 지지부와 연약지반 상부 지반의 상대적 침하 차이로 인한 아칭효과
2) 토목섬유에 발생하는 인장력의 수직성분

첫 번째 작용인 지반의 아칭효과는 토목섬유가 설치되지 않은 경우 성토하중이 말뚝에 집중되는 주요 원리이다. 성토하중에 의해 말뚝 사이 연약한 지반 상부의 성토지반은 침하한다. 말뚝사이 성토지반의 침하는 상대적으로 침하가 적은 말뚝 상부의 성토지반으로 부터의 전단 저항에 의해 억제되게 된다. 이러한 전단 저항으로 인해 연약지반에 전달되는 응력은 감소하고 말뚝에 전달되는 응력은 증가하게 되는데 이러한 하중 전달 메커니즘을 지반 아칭효과라고 한다[22]. 아칭효과는 말뚝지지 성토체의 거동에 중요한 역할을 한다. 현장계측 결과의 분석을 통해 말뚝으로 전달되는 하중이 연약지반의 압밀에 의한 시간에 따른 아칭효과의 발현에 따라 증가된다고 보고된 바 있다[13]. 아칭효과의 크기는 말뚝 사이의 거리, 성토체의 높이, 성토재료의 특성, 주변 연약지반에 대한 말뚝의 상대적인 강성차이에 영향을 받는다고 알려져 있다[15,27].

두 번째 작용은 성토지지 말뚝에 토목섬유가 보강된 경우에 발생하며 Fig. 2와 같이 토목섬유에 발생하는 인장력의 수직성분을 통해 성토하중이 말뚝에 전달되는 것이다.

이 두 종류의 하중 전달 작용은 독립적으로 발생하는 것이 아니라 서로 영향을 주게 된다. 토목섬유로 보강하지 않은 경우에 비해, 토목섬유로 보강한 경우는 말뚝 사이 연약지반의 침하를 감소시키게 된다. 침하의 감소로 인한 상대변위의 감소는 지반 아칭에 의해 발생하는 전단응력을 감소시키며, 이로 인해 말뚝으로 전달되는 하중이 감소하게 된다. 이러한 지반아칭과 토목섬유의 보강작용 사이의 상관관계는 Han & Gabr(2002)의 수치해석 결과에도 제시된 바 있다[9]. 토목섬유로 보강된 성토지지말뚝의 경우 이러한 상호 의존적인 두 종류의 하중 전달작용이 동시에 발생하므로 설계가 매우 복잡하게 되며 합리적이고 경제적인 설계를 위해서는 두 하중전달 작용 사이의 상관관계에 대한 정확한 파악이 매우 중요하다.

2.2 하중전달 특성을 나타내는 계수

성토지지말뚝의 하중 전달 특성을 표현하기 위하여 전체 성토하중, 말뚝에 작용하는 응력, 말뚝사이 연약지반의 표면에 작용하는 응력 사이의 관계를 정의하기 위하여 기존의 연구에서 많이 사용해왔던 대표적인 계수는 응력감소비(stress reduction ratio, SRR)와 말뚝효율(Pile Efficacy, E)이다.

응력감소비 SRR은 성토 및 상재하중에 의해 말뚝이 설치되지 않은 경우 기초지반에 전달되는 평균응력(σ)에 대한 말뚝이 설치된 경우 말뚝 사이 기초지반(또는 토목섬유)에 작용하는 응력(σ_s)의 비로 아래의 식 (1)과 같이 정의된다.

$$SRR = \frac{\sigma_s}{\sigma} \tag{1}$$

$$\sigma = \gamma \cdot H + q \tag{2}$$

여기서, γ는 성토지반의 단위중량, H는 성토높이, q는 교통하중 등의 상재하중을 나타낸다. 응력감소비가 작을수록 연약지반에 전달되는 하중이 작아져서 말뚝으로의 하중 집중이 잘 되었다는 것을 의미한다.

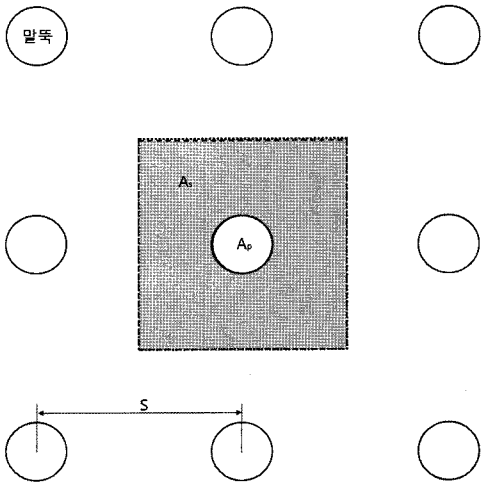

Fig. 3. Contribution area of a pile for square arrangement

말뚝효율 E는 말뚝 한 개가 기여하는 지지면적에 작용하는 성토하중 및 상재하중에 대하여, 말뚝 자체가 지지하는 하중의 비로 정의되며, 아래의 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$E = \frac{\sigma_p \cdot A_p}{\sigma \cdot (A_p + A_s)} = \frac{\sigma_p \cdot a_s}{\sigma} \tag{3}$$

여기서 A_p는 말뚝 한개의 단면적이고, A_s는 말뚝 한개가 지지 하는 기여 면적으로 Fig. 3과 같은 말뚝 중심 간격이 s인 정방향 배치의 경우 s^2-A_p 가 된다. a_s는 면적치환비로 다음

과 같이 정의된다.

$$a_s = \frac{\text{말뚝 한본의 단면적}}{\text{말뚝 한본당 기여 면적}} = \frac{A_p}{A_p + A_s} \quad (4)$$

따라서 말뚝효율은 성토하중 및 상재하중이 말뚝으로 하중이 얼마나 집중되는지 정도를 나타내는 계수로 사용될 수 있다.

3. 수치해석 방법

3.1 해석 방법 및 범위

상용프로그램인 ABAQUS를 이용한 3차원 유한요소해석 기법을 이용하여 토목섬유의 보강효과에 관한 변수 연구를 수행하였다. 해석 조건은 이광우(2006)가 제시한 부산 oo현장의 시험 시공 조건을 참조하여 국내의 전형적인 지반조건에 직경 60cm인 PHC 말뚝을 설치한 경우로 설정하였다[26]. 말뚝의 상부에는 가로, 세로 1.2m, 두께 60cm의 폭의 말뚝캡을 설치하였다. 성토 높이는 8.1m로, 모든 성토 및 교통 하중을 말뚝이 부담하는 조건으로 말뚝 지지력 설계가 이루어 졌으며, 말뚝 사이의 중심 간격은 3m로 결정되었다. 토목섬유로는 지오그리드가 사용되었다. 해석 목적이 아칭효과를 포함한 정확한 지지 메커니즘을 파악하는데 있기 때문에 전체 성토체가 아닌 한 개의 말뚝이 기여하는 지지영역(Fig. 4)을 해석 범위로 결정하였으며, 대칭성을 고려하여 1/4만을 고려한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 경계조건으로는 수직 경계면은 수평방향, 하부 수평 경계면은 수직, 수평방향으로 각각 고정하였다.

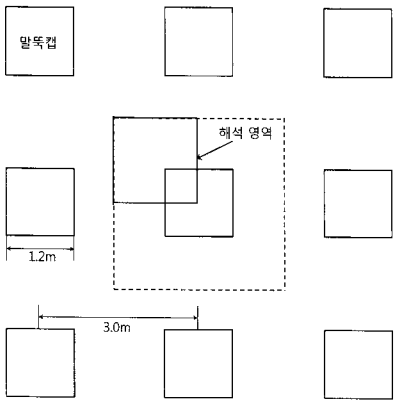

Fig. 4. Pile arrangement and analysis region

3.2 지층조건 및 유한요소망

지층 조건은 Fig. 5에 나타내었으며, 25m 두께의 연약 점성토층에 길이 27m의 PHC 말뚝을 풍화암 지지층까지 설치한 조건이다. 말뚝 상부에는 2m 두께의 매립층이 존재하고 있으며, 총 성토 높이는 8.1m이다. 유한요소망은 6,976개의 육면체 linear 엘리먼트를 이용하여 구성하였으며 Fig. 6에 나타내었다.

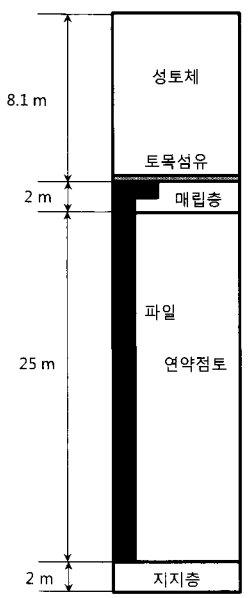

Fig. 5. Soil profile of Pusan site

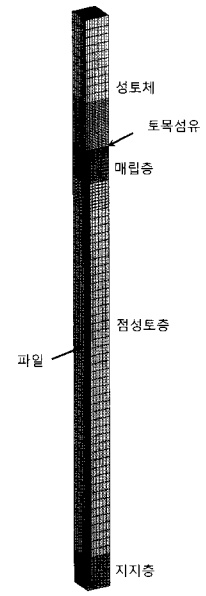

Fig. 6. Finite element mesh for numerical model

Table 1. Properties of soils and piles

대 상	매립층	점성토층	지지층	말뚝	캡	성토체
수치 모델	Mohr-Coulomb	Cam Clay	Mohr-Coulomb	선형 탄성	선형 탄성	Mohr-Coulomb
단위중량, kN/m^3	18	17	22	27	25	19
탄성계수, MPa	11	-	250	30,000	23,000	30
포아송비	0.35	0.35	0.35	0.3	0.18	0.3
점착력, kPa	20	-	30	-	-	15
마찰각	20	-	35	-	-	25
팽창각	0	-	0	-	-	0
한계응력비, η_{crit}	-	1.7	-	-	-	-
λ	-	0.17	-	-	-	-
κ	-	0.03	-	-	-	-
비체적 응력, kPa	-	2,100	-	-	-	-
비체적	-	4.1	-	-	-	-
간극비	-	0.68	-	-	-	-

3.3 적용 수치모델 및 하중조건

성토체, 매립층에 대해서는 Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용한 선형탄성 완전소성 모델, 점성토층에 대해서는

Cam Clay 모델을 각각 사용하였다. 재료의 물성치로는 점성토 지반을 제외한 지반, 말뚝, 말뚝캡에 대해서는 이광우(2006)가 평가한 값을 적용하였으며[26], Cam Clay 모델의 물성치에 대해서는 연약한 점성토에 대한 전형적인 값을 적용하였다. 각 재료의 물성치는 Table 1에 나타내었다.

토목섬유는 Smith(2006)가 적용한 방법에 따라, 두께가 10cm인 얇은 탄성연속체로 모델링하였다[21]. 토목섬유의 인장강성은 1 MN/m에서 100 MN/m로 다양하게 변화시킨 조건에서 해석을 수행함으로써 토목섬유의 강성에 따른 하중전달 메커니즘의 변화 특성을 파악할 수 있도록 하였다. 토목섬유와 흙 사이의 경계면은 완전부착된 것으로 가정하였다. 성토 하중은 8.1m의 성토체를 16개 층으로 나누어 단계별로 재하 하였다.

4. 해석결과 및 분석

4.1 하중전달 메커니즘의 분석 방법

해석 결과의 분석에는 직관적으로 이해가 쉬운 응력감소비와 말뚝효율을 이용하였다. 말뚝만 설치된 경우와 달리 토목섬유가 보강된 경우에는 토목섬유 상부에 전달되는 응력과 하부에 전달되는 응력을 Fig. 7와 같이 구분하여 고려해야 하며 이에 따라 응력감소비와 말뚝효율도 구분하여 정의하여야 한다. Fig. 7에서 $\sigma_{p,상부}$, $\sigma_{s,상부}$는 각각 말뚝 위치와 말뚝 사이 연약지반 위치의 토목섬유 상부에 작용하는 평균응력을 나타내고, $\sigma_{p,하부}$, $\sigma_{s,하부}$는 각각 토목섬유 하부의 말뚝과 연약지반에 직접 작용하는 평균응력을 나타낸다. 각각의 위치에 따른 응력으로부터 구한 응력집중비와 말뚝효율은 다음과 같이 정의할 수 있다.

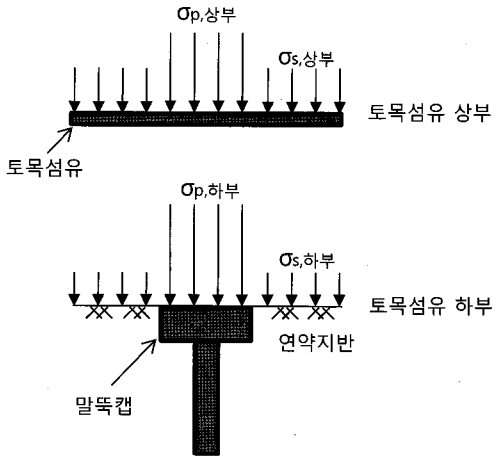

Fig. 7. Stresses on geosynthetic, ground and pile

$$SRR_{상부} = \frac{\sigma_{s,상부}}{\sigma} \quad (5)$$

$$SRR_{하부} = \frac{\sigma_{s,하부}}{\sigma} \quad (6)$$

$$E_{상부} = \frac{\sigma_{p,상부} \cdot a_s}{\sigma} \quad (7)$$

$$E_{하부} = \frac{\sigma_{p,하부} \cdot a_s}{\sigma} \quad (8)$$

토목섬유 상부에 전달되는 응력으로부터 구한 응력집중비($SRR_{상부}$)와 말뚝효율($E_{상부}$)에는 아칭효과에 의한 하중분담 메커니즘만이 반영되어 있는 반면에, 말뚝과 연약지반에 직접 전달되는 응력으로부터 구한 응력집중비($SRR_{하부}$)와 말뚝효율($E_{하부}$)에는 아칭효과와 더불어 토목섬유의 인장효과로 인한 하중 전이 메커니즘도 동시에 반영되어 있다. 따라서 이 네 가지 값들을 비교 분석하면 토목섬유로 보강된 성토지지 말뚝의 하중전이 메커니즘을 파악할 수 있다. 본 논문에서는 위의 네 종류의 계수를 이용하여 토목섬유 보강 성토지지 말뚝의 하중전이 메커니즘을 분석한다.

4.2 토목섬유의 설치에 따른 지반 아칭효과의 변화

Fig. 8은 토목섬유의 인장강성 변화에 따른 토목섬유 상부에서의 응력감소비($SRR_{상부}$)의 변화를 나타낸다. 전술한 바와 같이 $SRR_{상부}$은 토목섬유 상부에 작용하는 응력을 이용하여 구한 값이므로, 아칭효과만으로 지반에 작용하는 응력이 감소되는 정도를 나타내는 계수이다. 해석 결과에 의하면 토목섬유가 설치되지 않은 경우 응력감소비는 0.55로 나타났으며 이는 연약지반이 받는 수직응력이 말뚝 설치에 의한 아칭효과로 인해 45% 정도 감소하는 것을 의미한다. 반면에 토목섬유의 설치된 경우는 $SRR_{상부}$은 급격히 증가하였다. 1MN/m의 아주 작은 인장강성의 토목섬유를 설치한 경우에도 0.72로 증가하여, 토목섬유가 설치되지 않은 경우 연약지반에 전달되는 하중에 비해 전체 성토하중의 17%에 달하는 더 큰 하중이 토목섬유에 전달되는 것으로 나타났다. 이는 토목섬유 설치에 의해 아칭효과가 상당히 감소한다는 것을 의미하며, 이는 토목섬유의 지지효과에 의하여 말뚝과 주변지반사이의 상대변위가 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 토목섬유 인장강성이 증가함에 따라 $SRR_{상부}$은 서서히 증가하여 인장강성이 100 MN/m인 경우 0.92에 이르는 것으로 나타났다(Fig. 8). 이론적으로 토목섬유의 인장강성을 극단적으로 크게 증가시키면 토목섬유가 완전강성의 슬래브로 작용하여 $SRR_{상부}$는 1로 수렴하게 되고 아칭효과는 전혀 발생하지 않게 된다.

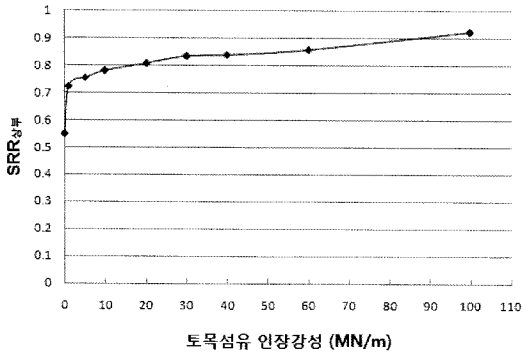

Fig. 8. Variation of $SRR_{상부}$ with tensile stiffness of geosyntehtic

4.3 토목섬유의 하중 분담

Fig. 9는 토목섬유의 하부의 연약지반에 작용하는 응력으로 계산한 응력감소비($SRR_{하부}$)를 나타낸 것이다. 토목섬유 하부의 지반에 직접 전달되는 응력을 이용하여 산정된 $SRR_{하부}$는 아칭효과 뿐만 아니라 토목섬유의 인장력에 의한 인한 지반응력의 감소 효과도 반영하게 된다. 토목섬유가 설치되지 않은 경우 0.55인 $SRR_{하부}$는 토목섬유의 강성이 커짐에 따라 감소하여 인장강성이 100MN/m인 경우 0.35가 되는 것으로 나타났다. 이는 토목섬유 상부에서의 응력감소비 $SRR_{상부}$가 토목섬유 강성에 따라 증가하는 것과 대조를 이룬다. 즉, 토목섬유의 인장력에 의한 지반응력 감소 효과가 아칭효과의 감소로 인한 지반응력 증가 효과에 비하여 크며, 토목섬유 인장강성이 증가함에 따라 그 차이가 더 커진다는 것을 의미한다. 이와 같이 토목섬유의 보강효과로 인해 말뚝으로의 하중 집중 작용의 원인이 아칭효과에서 토목섬유의 인장력으로 변화하는 것으로 나타났다. 결국 토목섬유의 보강으로 인해 연약지반에 전달되는 하중이 토목섬유를 설치하지 않은 경우에 비해 감소하는 것으로 나타났지만, 그 감소효과는 아칭효과 만으로 나타난 전체적인 응력감소효과와 비교할 때 대체로 미비한 것으로 평가된다. 즉 토목섬유의 인장효과에 의한 말뚝으로의 하중 전달효과는 상당히 크지만, 동시에 발생하는 아칭효과의 감소효과 역시 크기 때문에 토목섬유의 보강으로 인한 연약지반 전달응력의 감소효과는 상대적으로 작게 나타났다.

4.4 토목섬유의 설치로 인한 말뚝 하중 분담의 변화

Fig. 10은 토목섬유 상부에 작용하는 응력으로 산정한 말뚝효율($E_{상부}$)을 나타내었다. 이렇게 산정된 말뚝효율은 토목섬유의 인장효과에 의한 말뚝으로의 하중 전달효과를 배제할 수 있기 때문에, 아칭효과에 의한 말뚝으로의 하중전달 효과만을 독립적으로 평가할 수 있다. $E_{상부}$는 토목섬유의 설치로 급격히 감소하여, 토목섬유를 설치하지 않은 경우의 0.54에서 인장강성이 1MN/m로 매우 작은 토목섬유를 설치하였을 때 0.40으로 상당히 감소하였다. 즉 아칭효과로 말뚝에 하중이 집중되는 효과가 토목섬유의 설치로 인해 급격히 감소하는 것으로 나타났다. $E_{상부}$는 토목섬유의 인장강성이 증가함에 따라 서서히 감소하여 토목섬유 인장강성이 100MN/m인 경우 0.27이 되는 것으로 나타났다(Fig. 10).

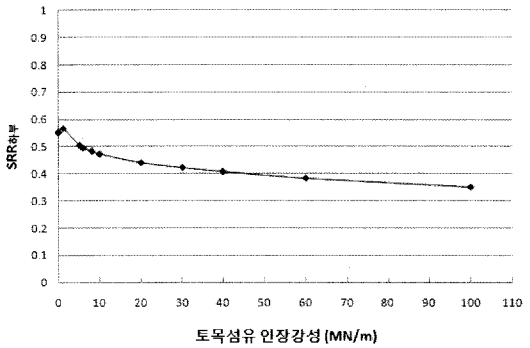

Fig. 9. Vairation of $SRR_{하부}$ with tensile stiffness of geosyntehtic

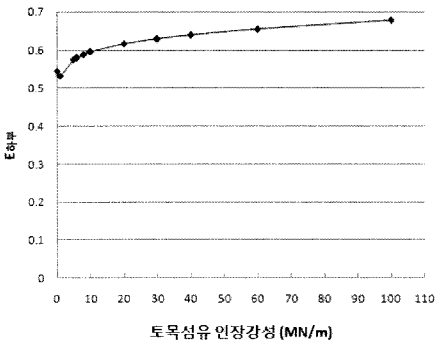

Fig. 10. Variation of $E_{하부}$ with with tensile stiffness of geosyntehtic

Fig. 11은 말뚝에 직접 전달되는 응력으로 산정한 말뚝효율($E_{하부}$)을 토목섬유의 인장강성에 따라 나타낸 것이다. $E_{하부}$는 토목섬유가 설치되지 않았을 때 0.54이고, 인장강성이 1MN/m로 매우 작은 토목섬유를 설치하였을 때 0.53으로 미소하게 감소하였다가 인장강성이 증가함에 따라 다시 증가하였다. 토목섬유 인장강성이 약 20MN/m로 증가할 때까지 효율이 0.62로 급격히 증가하다가 그 이후로는 서서히 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 토목섬유의 인장강성이 매우 작은 경우를 제외하면, 토목섬유의 효과로 인해 말뚝의 효율이 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 성토하중의 말뚝으로의 집중이 토목섬유의 인장강성 증가에 따라 아칭효과에서 토목섬유의 인장효과로 전이되기 때문인 것으로 평가된다.

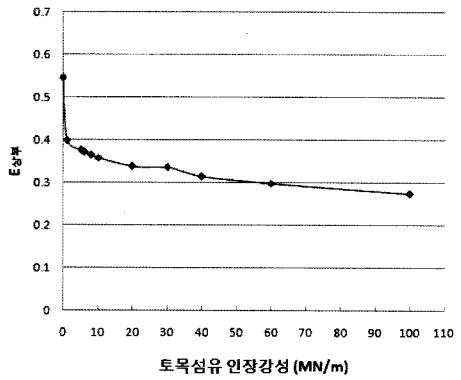

Fig. 11. Variation of $E_{상부}$ with tensile stiffness of geosyntehtic

4.5 토목섬유 설치에 따른 부등침하

Fig. 12는 말뚝캡 상부의 연약지반과 성토지반의 경계부에서 발생한 부등침하를 토목섬유의 인장강성에 따라 나타낸 것이다. 토목섬유가 설치되지 않은 경우 11.3mm로 나타난 부등침하는 토목섬유의 인장강성의 증가에 따라 감소하여 토목섬유 인장강성이 100MN/m인 경우 5.6mm까지 감소하였으며, 이러한 부등침하의 감소는 아칭효과의 감소의 주된 원인인 것으로 판단된다.

그러나 수치해석 결과 성토 최상부 표면에서의 부등침하는 토목섬유의 설치여부와 상관없이 0.001mm 이하의 무시할 만한 크기로 발생하였다. 즉 말뚝캡 위치에서의 부등침하가 성토 최상부에서의 부등침하에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 아칭효과가 제대로 발휘되는 경우 성토체의 높이가 일정 높이 이상이 되면 토목섬유를 설치하지 않아도 성토체 상부에서는 부등침하가 거의 발생되지 않는 것을 의미한다. 이론적으로 성토체 최상부에서 부등침하가 발생하지 않기 위하여 필요한 최소 성토 높이를 임계높이(critical height)라고 하며, 실험적으로 그 존재가 증명된 바 있고[10,11], 그 값을 이용하여 성토지지말뚝을 설계하고자 하는 연구가 이루어지고 있다[17].

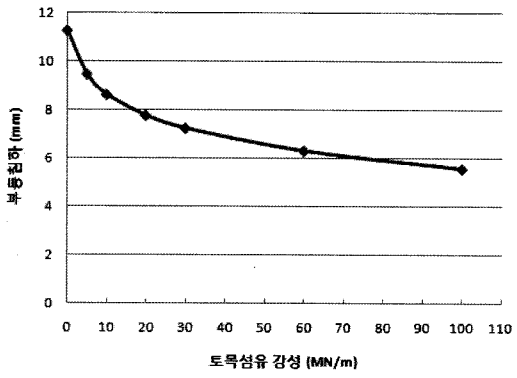

Fig. 12. Differential settlements at pile cap level with tensile stiffness of geosyntehtic

Russel 등(2003)은 말뚝캡 위치의 부등침하로 발생하는 접시형의 침하형상에 대한 부피로 부터 성토체 상부에서의 부등침하를 예측할 수 있는 다음의 식 (9)를 제안하였다[19].

$$S_E = \frac{d(1-a_s)}{2} \tag{9}$$

수치해석으로 산정된 말뚝캡 위치의 부등침하로부터 위의 식을 이용하여 성토체 최상부에서의 부등침하를 계산하면, 토목섬유를 설치하지 않은 경우 성토체 최상부에서의 부등침하는 4.7mm로 계산되었다.

이러한 결과로부터 본 연구의 조건에서는 토목섬유가 설치되지 않은 경우에도 아칭효과가 충분히 발현된다면 성토체 상부에서의 부등침하가 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있으며, 따라서 부등침하 감소 목적의 사용성 측면에서의 토목섬유 보강효과는 거의 없는 것으로 평가되었다.

5. 현행 설계 방법과 수치해석 결과의 비교

5.1 성토지지말뚝 설계 기법

현행 설계방법의 적정성을 평가하기 위하여, 세 가지 설계 방법으로 산정된 응력감소비 및 말뚝효율을 수치해석으로 산정된 값들과 비교하였다. 설계방법으로는 BS8006, Terzaghi 방법, Hewlett과 Randolph(1994)의 방법을 적용하였으며 각 설계방법의 개략적인 특성은 다음과 같다.

(1) BS8006

영국의 관련 기준인 BS8006(1995)에서는 토목섬유에 작용하는 하중을 구하기 위하여 말뚝으로 인해 지지되지 않는 면적에 작용하는 하중을 균등한 수직선하중으로 간주하여 응력감소비를 구한다[4].

(2) Terzaghi 이론

Russel과 Pierpoint (1997)은 3차원 말뚝 배치를 고려할 수 있는 응력감소비를 구하기 위하여 Terzaghi의 아칭이론을 적용하였다. 말뚝 사이 지반의 침하 형상을 십자형으로 가정하였다[20]

(3) Hewlett과 Randolph(1988)

Hewlett과 Randolph(1988)는 말뚝 상부 사질토의 반구형 돔형상 부분에 대하여 극한평형법을 적용함으로써 아칭효과에 의해 말뚝과 기초지반에 작용하는 성토하중을 결정할 수 있는 이론적인 방법을 제시하였다. 이 모델에서는 돔의 첨단 또는 말뚝 상부에서만 파괴가 발생한다고 가정하였으며, 파괴가 발생하는 두 위치에서의 응력감소비를 계산하여 더 큰 값을 적용한다[10].

5.2 각 설계방법 및 수치해석 결과의 비교

Table 2에는 앞에서 소개한 설계방법으로 산정한 응력감소비 및 말뚝효율을 수치해석 결과와 함께 나타내었다. 현재까지 적용되고 있는 설계방법에서는 토목섬유의 설치에 따른 응력집중비의 변화를 고려할 수 있는 방법이 개발되지 않았다. 따라서 수치해석 결과는 토목섬유의 특성에 따라 응력감소비와 말뚝효율이 변화되는데 비해서 기존 설계방법의 결과는 토목섬유의 적용 여부에 상관없이 동일한 값들을 적용하게 된다. 산정된 응력감소비 중 Terzaghi 방법과, Hewlett & Randolph 방법으로 산정된 값들은 수치해석으로 산정된 응력감소비의 범위안에 있으며 그 값의 차이도 크지 않다. 그러나 현재 가장 많이 적용되고 있는 BS8006의 방법으로 계산된 응력감소비는 다른 방법 또는 수치해석의 결과와 많은 편차를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. Filz & Smith(2006) 역시 BS8006의 방법으로 계산된 응력감소비가 다른 방법들과 많은 차이를 나타낸다고 지적한 바 있다[6].

이처럼 기존의 설계 방법으로는 토목섬유의 적용에 따른 아칭효과의 감소를 고려할 수 없다. 따라서 아칭 효과가 최대로 발현된 경우를 가정한 응력감소비를 이용하여 설계가 이루어지고 있으며, 이로 인해 토목섬유에 전이되는 하중을 과소평가할 가능성이 많다. 따라서 합리적인 설계를 위해서는 토목섬유의 특성에 따른 아칭효과의 변화를 고려할 수 있는 설계 방법의 개발이 필요하다.

현행 설계에서는 말뚝이 모든 성토하중을 부담한다는 매우 보수적인 가정으로 말뚝의 지지력 측면에서는 매우 안전측의 설계가 이루어지고 있다. 그러나 토목섬유의 설계는 응력감소비를 토대로 계산된 토목섬유에 전달되는 수직응력을 토대로 이루어지므로, 안전한 설계를 위한 합리적인 응력감소비의 산정 방법의 개발이 필요하다. 또한 현행 설계 개념에서는 토목섬유의 보강 목적이 불분명하다. 일반적으로 토목섬유의 역할을 말뚝으로의 하중전달을 증가시키는 것으로 평가하여 적용하고 있으나, 이론적으로나 본 연구의 수치해석 결과를 평가할 때 아칭효과가 충분히 발휘된다고 가정하면 지지력측면이나 사용성 측면에서는 모두 토목섬유의 보강이 필요 없는 것으로 판단된다. 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.

Table 2. 현행 설계방법으로 산정된 응력감소비 및 말뚝효율

산정 방법	응력감소비 (SRR)	말뚝효율 (E)
수치해석 결과	0.55~0.92	0.55~0.68
BS8006	0.22	0.59
Terzaghi	0.60	0.50
Hewlett & Randolph	0.70	0.41

6. 결 론

본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 통한 변수연구를 통해 토목섬유의 보강이 성토지지말뚝의 하중 전달 메커니즘에 미치는 효과를 평가하였다. 토목섬유의 인장강성의 변화에 따라 말뚝 및 말뚝 사이 연약지반에 전달되는 하중크기, 부등침하 등의 변화를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 말뚝으로 지지되는 성토체에서 성토하중이 말뚝으로 집중되는 작용은 토목섬유 무보강시에는 지반 아칭효과로 인해 발생하나, 토목섬유의 보강 정도가 커짐에 따라 아칭효과는 감소되고 토목섬유에 발생하는 인장력의 수직성분에 의해 발생하는 것으로 나타났다.
2) 토목섬유의 보강으로 인해 성토체와 연약지반의 경계부, 즉 말뚝 두부 위치에서 부등침하는 상당히 감소하나, 성토체 최상부에서의 부등침하는 토목섬유 보강 여부에 상관없이 거의 나타나지 않았다. 즉 일정 높이 이상의 성토 높이가 확보되는 경우 부등침하량 감소를 통한 사용성 향상 측면에서의 토목섬유 보강 효과는 미비한 것으로 평가되었다.
3) 현행 성토지지말뚝 설계 기법에서는 토목섬유의 보강 목적이 명확하지 않으며, 토목섬유의 설치로 인한 하중전달 메커니즘의 변화도 전혀 고려하지 못하고 있다. 이는 성토지지말뚝공법에서 지반 아칭효과의 발생에 대한 불확실성으로 인해, 토목섬유를 단지 아칭효과 미발생시 안전성 확보를 위한 보조수단으로 간주하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 합리적이고 경제적인 설계를 위해서는 현장 계측, 실물크기 시험시공 등을 수행하여 아칭효과 및 토목섬유의 보강효과에 대한 실질적이고 정량적인 평가를 통한 설계기법의 보완이 시급하다.

참 고 문 헌

1. ASIRI, http://www.irex-asiri.fr
2. Alexiew, D. and Gartung, E. (1999), "Geogrid Reinforced Railway Embankment on Piles Performance Monitoring 1994-1998", 1st South American Symposium on Geosynthetics, Brazil, pp.403-411.

3. Brandl, H., Gartung, E., Verspohl, J., and Alexiew, D. (1997), "Performance of a geogrid reinforced railway embankment on piles", Proc. of the Fourteenth Int. Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, 6-12 Sept, Vol. 3, 1731-1736.
4. BS8006. (1995), British Standard, Code of practice for: Strengthened/reinforced soils and other fills.
5. 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
6. Filtz, M. & Smith, M.E. (2006), Design of Bridging Layers in Geosynthetic-Reinforced, Column-Supported Embankments, Report VTRC 06-CR12, Virginia Department of Transportaion.
7. Gartung, E., Verspohl, J., Alexiew, D., and Bergmair, F. (1996), "Geogrid reinforced railway embankment on piles-Monitoring." Geosynthetics: Application, Design and Construction, DeGroot, Den Hoedt & Termaat(eds), Balkema, Rotterdam, 251-258.
8. 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.
9. 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.
10. Hewlett, W. J. and Randolph, M. F. (1988), "Analysis of piled embankments", Ground Engineering, 21, no. 3: 12-18.
11. Horgan, G. J. and Sarsby, R. W. (2002), "The arching effect of soils over voids and piles incorporating geosynthetic reinforcement". 7th ICG, Delmas, Gourc & Girard, Lisse: Swets & Zetilinger, pp 373-378
12. Huang, J., Han, J., and Collin, J. G. (2005), "Geogrid-reinforced pile-supported railway embankments three dimensional numerical analysis". Journal of Transportation Research Board, 1936, 221-229
13. Huat, B. B. K., Craig, W. H. and Ali, P. (1994), "The Mechanics of Piled Embankment", Proceedings, International Conference on Design and Construction of Deep Foundations, 1069-82.
14. Kempfert, H. G., Gobel, C., Alexiew, D.,and Heitz, C. (2004), "German recommendations for reinforced embankments on pile-similar elements", EuroGeo3 - Thrid European Geosynthetics Conference, Geotechnical Engineering with Geosynthetics, pp279-284.
15. Lawson, C. R. (1992), "Soil reinforcement with geosynthetics", Applied Ground Improvement Techniques, Southeast Asian Geotechnical Society (SEAGS): pp.55-74.
16. Liu H. L., Ng, C. W. W. and Fei, K. (2007), "Performance of a geogrid-reinforced and pile supported embankment over oft clay: case study", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.133, No.12, pp.1483-1493.
17. Naughton, P. J. (2007), "The significance of critical height in the design of piled embankments", Geo-Denver:New Peaks in Geotechnic, GSP, pp.13-23.
18. Nordic Geotechnical Societies (2003), Nordic guidelines for reinforced soils and fills.
19. Russell, D., Naughton, P. J., and Kempton G. (2003), "A new design procedure for piled embankments", Proceedings of the 56th Canadian Geotechnical Conference and the NAGS Conference, pp.858-865.
20. Russell, D. and Pierpoint, N. (1997), "An assessment of design methods for piled embankments", Ground Engineering, 30, No. 11: pp.39-44.
21. Smith E. M. (2006), Design of Bridging Layers in Geosynthetic-Reinforced Coulum-Supported Embankments, Virginia Polytechnic Institute and State University Ph. D Dissertation.
22. Terzaghi, K. (1943), Theoretical Soil Mechanics. New York: John Wiley and Sons, Inc.
23. Zanzinger, H. and Gartung, E. (2002), "Performance of a geogrid reinforced railway embankment on piles", Geosynthetics-7th ICG-Delmas, Gourc & Girard, Swets & Zeitlinger, Lisse 381-386
24. 日本鐵道総合技術研究所 (2000), 杭網工法 設計, 施工の手引き.
25. 김홍종, 정종홍, 정경자 (2006), "연약지반 구간 고속도로의 개통 후 침하량 평가", 도로교통기술원 제22회 연구성과 발표회 논문집, 한국도로공사, pp.79-86.
26. 이광우 (2006), 연약지반 측방유동 억지를 위한 토목섬유 보강 성토지지말뚝시스템의 설계법, 중앙대학교, 박사학위논문
27. 이재호 (2006), 토목섬유보강 성토지지말뚝시스템에서의 지반아칭, 중앙대학교, 박사학위논문
28. 오영인, 신은철 (2005), "지오그리드와 말뚝으로 보강된 성토지반의 보강 및 아칭효과 연구, 한국지반공학회논문집, 제21권, 제10호, pp.5-16.
29. 홍원표, 이재호 (2007), "말뚝과 토목섬유로 지지된 성토지반의 아칭효과", 한국지반공학회논문집, 제23권, 제6호, pp.53-66
30. 홍원표, 이재호 (2008), "토목섬유보강 성토지지말뚝시스템의 지반아칭에 관한 이론해석, 대한토목학회논문집C, 제28권, 제2호, pp.133-141

접수일(2008년 10월 22일), 수정일(2009년 1월 21일),
게재확정일(2009년 4월 11일)