

성토지지말뚝공법의 국내 적용성 분석

Applicability of the Pile-Supported Embankment in Korea

이 일 화 ¹	Lee, Il-Wha	김 승 선 ²	Kim, Seung-Sun
이 주 공 ³	Lee, Joo-Gong	심 성 규 ⁴	Shim, Shung-Kyu
이 수 형 ⁵	Lee, Su-Hyung		

Abstract

Stability analysis was conducted to analyze the application of pile-supported embankment to concrete slab track on the soft ground in Korea. Pile efficiency and tension of geosynthetics in accordance with the height of embankment and the depth of soft soil were carried out by theoretical and numerical methods. Theoretical method predicted more conservatively than the numerical method for all the cases presented herein. The settlement stability is satisfied to allowable criteria of high speed railway in Korea. The pile-supported embankment has great potential for application to soft ground condition.

요 지

성토지지말뚝 공법의 국내 적용성 평가를 위해 이론적인 설계방법과 수치해석적인 방법을 통해 거동특성을 분석하고 침하 안정성 검토를 수행하였다. 성토고와 연약지반 두께에 따른 말뚝의 효율과 보강재의 인장력 및 침하 안정성을 분석한 결과 이론식의 경우 연약지반 특성에 따른 거동특성을 반영하지 못하고 있으며, 수치해석 결과 대비 다소 보수적인 결과가 나타났다. 수치해석에서는 이론식에서 제시한 성토고 높이 보다 작은 성토고에서는 말뚝 효율의 급격한 감소가 나타났으며, 연약층 대비 성토고가 높은 경우에도 말뚝의 효율의 감소가 나타났다. 기존 이론식을 바탕으로 설계가 이뤄질 경우 성토노반의 침하 안정성은 확보되는 것으로 나타났다. 성토지지말뚝은 국내의 고속철도의 침하관리기준을 확보할 수 있는 토공 침하억제공법으로 그 적용성이 기대된다.

Keywords : Pile-supported embankment, Geosynthetics, Arching effect, Soft ground

1. 서 론

콘크리트 궤도는 주행안정성 및 승차감과 생애 주기

비용(Life Cycle Cost) 측면에서 유리하여 자갈도상 궤도의 단점을 보완할 수 있는 대안으로 자리 잡아가고 있다. 그러나 콘크리트 궤도는 기존 자갈도상궤도와 달

1 이 일 화, (Member, Principal Researcher, Korea Railroad Research Institute)
2 이 승 선, (Deputy General Manager, BON E&C)
3 이 주 공, (Member, President, BON E&C)
4 이 수 형, (Executive Director, BON E&C)
5 이 일 화, (Member, Principal Researcher, Korea Railroad Research Institute, Tel: +82-31-460-5399, Fax: +82-031-460-5326, geoxlee@krii.re.kr, Corresponding author,)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

리 침하가 발생하였을 경우 궤도의 사용성 저하가 크고 대처 방안이 매우 제한적이기 때문에 토공공간에 부설 시 장기적인 노반침하를 엄격히 제한하여야 한다. 현재 국내에서는 연약지반공간에 콘크리트 궤도를 건설할 경우 연직배수공법등의 압밀촉진공법은 과도한 잔류침하 등으로 인하여 노반의 허용 침하기준인 30mm 이내로 유지하기 매우 어렵고 공기가 길어지게 된다. 또한 치환 공법은 연약지반 심도가 깊어짐에 따라 적용성이 떨어 지므로 대부분은 교량으로 건설하고 있는 실정이다. 따라서 토공을 이용한 노반 조성공사 시 장기침하를 근본 적으로 억제하여 잔류침하기준을 만족하고 교량건설비 절감을 위한 신형식의 토공 침하억제공법 개발이 필요 하다. 최근 유럽, 미국 및 중국 고속철도의 경우 침하억 제를 위하여 성토지지말뚝공법[geosynthetics-reinforced pile-supported(GRPS) embankment]을 적용하고 있다. 이 공법은 대부분의 성토 및 열차운행하중을 성토체내 아칭(arching)과 토목섬유의 인장력을 이용하여 말뚝을 통해 지지층으로 전달하므로 침하를 능동적으로 억제 하는 공법이다. 그러나 현재까지 공법에 대한 명확한 이 론적 정리가 되어 있지 않고 말뚝이 모든 성토하중을 지지한다는 가정과 지반아칭의 불확실성으로 인하여 보수적인 설계가 이루어지고 있다. 따라서 국내 적용을 위해서는 연약지반의 특성을 반영한 이론적 분석, 수치 해석 등을 통한 검증이 수행되어야 한다. 본 연구는 성 토지지말뚝공법 설계방법 중 네델란드 Houten 철도에 대한 현장계측결과(Van Duijnene, 2010)와 비교적 유사 한 결과를 나타내는 EBGEO(German Recommendation for Geosynthetic Reinforced Earth Structure) 설계방법 과 수치해석을 통하여 성토지지말뚝의 거동특성을 분 석하고 국내 적용성을 검토하였다.

2. 성토지지말뚝공법

2.1 공법 개요

성토지지말뚝공법은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 성토 및 열차 운행에 따른 상부 하중을 말뚝을 통하여 지지력 이 양호한 지반에 전달하여 연약지반의 침하를 억제하 는 공법이다. 연약지반과 말뚝의 강성차이는 성토체 내 부의 아칭구조를 유발시키고 이를 통해 상대적으로 큰 하중이 말뚝두부로 전달된다. 형성된 아칭의 상부에서 는 하중이 말뚝방향으로 전달되고 아칭 하부의 토체 하

중은 연약지반 방향으로 전달된다고 가정한다. 연약지 반 방향으로 전달되는 하중의 일부는 양질의 다져진 조 립재와 토목섬유로 보강된 하중전이층(Load Transfer Platform)을 통해 연약지반으로 전달되는 하중을 저감 시킬 수 있다. 토목섬유를 포함한 하중전이층의 거동에 대한 분석은 지반을 단순화하여 해석적인 방법에 의해 수행하고 있으며, 장기계측을 통한 연구가 계속적으로 수행되고 있다.

2.2 하중전달특성

현재까지 개발된 성토지지말뚝의 설계방법은 응력전달 경로를 가정하고, 가정한 아칭형상으로부터 말뚝과 연 약지반으로 전달되는 하중을 각각 계산한다. 말뚝과 연 약지반으로 전달되는 하중은 성토지지말뚝 공법의 아칭 발현여부를 판단하는 중요한 잣대중 하나이며, 다양한 방법으로 수치화 하고 있다. McNulty(1965)는 응력감소 비(stress reduction ratio, SRR), Hewlett and Randolph (1988)은 말뚝효율(pile efficacy, Ep), Low et al.(1994) 는 말뚝 응력비(column stress ratio, CSR) 그리고 Han et al.(2002)는 응력집중비(stress concentration ration, n) 를 제안 한바 있다. 본 연구에서는 Hewlett and Randolph (1988)가 제안한 식 (1)의 말뚝효율을 사용하였다.

$$E_p = \frac{\sigma_p A_p}{\sigma_E A_E} \quad (1)$$

여기서 A_p 는 말뚝두부의 실제면적, σ_p 는 말뚝두부면 에서 측정된 평균 연직응력, A_E 는 말뚝 1본이 부담하는 등가 면적, σ_E 는 성토체의 단위중량에 성토체의 높이를 곱하여 구한 평균적인 연직응력이다. 즉 말뚝효율은 말

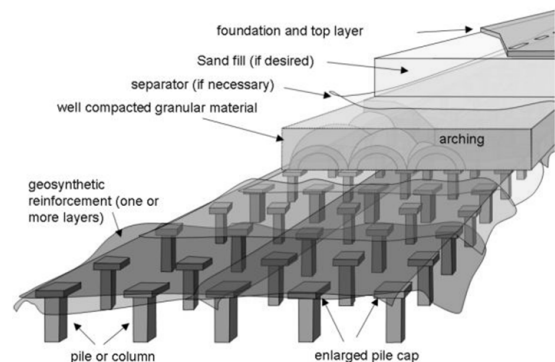


Fig. 1. The pile-supported embankment diagram (Van Eekelen et al., 2012)

독 1본이 부담해야하는 등가 면적에 작용하는 하중과 실제 말뚝두부로 전달되는 하중의 비이다.

상부 하중이 하중전이층을 통하여 말뚝으로 전달되는 과정에서 토목섬유는 인장력이 발생한다. 이때 발생하는 토목섬유 인장력은 현수선방법(Catenary Method)과 보방법(Beam Method)을 이용하여 추정할 수 있다. 이 방법은 아칭효과(Arching Effect) 발생 위치 및 형상에 따라 구분되며 두 방법 모두 이론적인 방법에 의하여 유도되었다. 현수선방법은 토목섬유가 Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 상부하중에 의하여 일종의 막(membrane)과 같이 변형하고, 인장응력의 수직성분은 말뚝으로 성토하중의 전달을 향상시킨다고 가정하고 있다. 독일의 EBGEO는 이러한 설계법 중의 하나이다. 빔 방법은 Fig. 2(b)와 같이 토목섬유를 3층 이상 설치할 경우에 주로 사용하며, 토목섬유와 주변 재료를 일종의 복합재료층으로 가정한다. 토목섬유는 하중전달층 내 재료를 횡방향으로 구속하여 하중 전달층 내에서 아칭효과가 발생하도록 하며, 아치 내부의 흙째기 무게를 지지하는 역할

도 한다고 가정한다. 현재 각국에서 제안하고 있는 성토 지지말뚝공법의 거동을 방법 개념별로 정리하면 Table 1과 같다.

3. 이론적 방법과 수치해석 방법을 이용한 거동특성 분석

3.1 거동분석을 위한 모델 설정

본 논문에서는 독일의 설계기준 EBGEO의 이론과 수치해석 기법을 이용하여 성토지지말뚝의 거동특성 및 안정성을 검토하였다. 거동분석을 위한 검토단면은 연약지반 개량 시 침하 안정성과 공사비 측면에서 큰 영향을 미치는 인자 중 하나인 성토고와 연약지반 층두께를 변수로 하여 단면을 선정하였다. 성토사면의 높이는 3m, 6m, 9m, 12m인 경우와 연약층 두께가 5m, 10m, 15m, 20m인 단면을 기준으로 하였다. 검토단면은 Fig. 3과 같이 철도 설계기준(KR-code, 2012)의 고속철도 쌓기 비

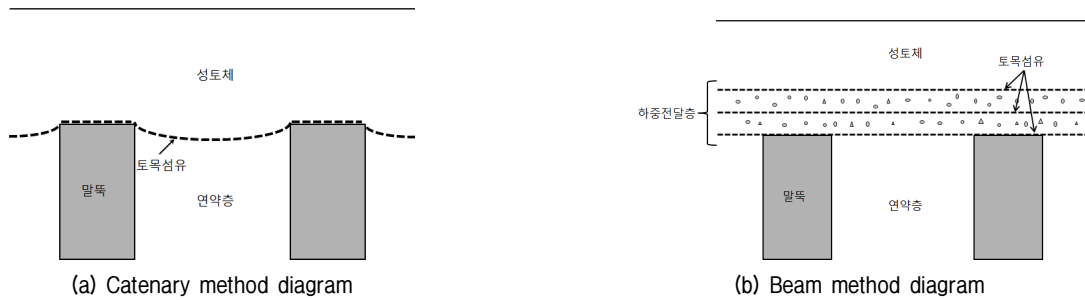


Fig. 2. Theoretical method of the pile-supported embankment

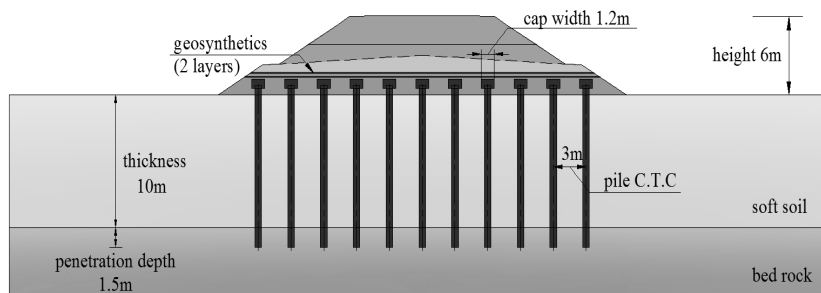


Fig. 3. Cross-section profile

Table 1. Pile-supported embankment design method

Design conception	Catenary method	Beam method
Design method	BS8006 (1995) EBGEO (1997) Nordic method Japon method (2000) Hewlett & Randolgh (1997) Modified Terzaghi method (1997)	Collin method (2006) TENSAR method (2006) Guido Method (1987)

탈면 표준 기울기를 적용한 단면으로 선정하였으며, 검토에 적용한 물성치는 Table 2에 나타내었다. 말뚝은 직경 60cm의 PHC 말뚝으로 설정하였으며, 3.0m 중심간격으로 정사각형으로 배치하였다. 말뚝의 근입깊이는 1.5m로 연암에 지지하는 조건으로 검토하였으며, 말뚝의 상부에는 가로 및 세로 1.2m, 두께 70cm의 말뚝캡을 설치하였다. 토목섬유로는 지오그리드를 사용하였다. 상부하중은 표준활하중(KRS-22) 36kN/m²과 궤도하중 17kN/m² 적용하였다.

3.2 이론적 방법에 의한 거동특성 분석

독일 설계법인 EBGEO는 돔형상의 아칭모형을 가정하여 소성이론, 실내시험, 수치해석 등을 통하여 개발되었다. Fig. 4는 EBGEO 설계법에서 적용한 3차원 아칭의 형태이다. 최근 현장계측 모형시험 등을 적용한 연구 결과에 따라 조금 안전측으로 연약지반에 전달되는 하중을 예측할 수 있는 것으로 검증되고 있다.

3.2.1 설계기준 분석

독일 EBGEO 설계법은 말뚝의 간격과 배치 및 말뚝캡의 규격에 따라 간격비 등을 규정하고 있으며, LTP층의 특성치와 토목섬유의 최소 인장력 등을 규정하고 있

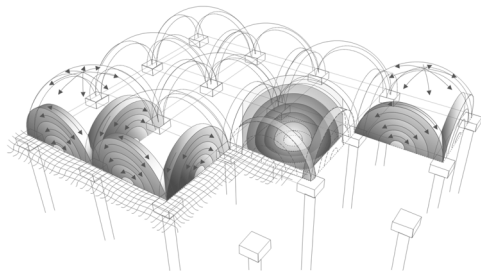


Fig. 4. Geometry arching assumed in EBGEO method (Van Eekelen et al., 2012)

다. 그리고 지반의 아칭이 발달하여 말뚝으로의 성토하중 전이가 효과적으로 달성될 수 있는 성토높이 기준과 하중전이층(load transfer platform, LTP)의 높이 등을 권장하고 있으며 식 (2)~(6)과 같다.

$$h^* \geq (s-d) \quad (2)$$

$$h/(s-d) \geq 0.8 \quad (3)$$

$$d/s \geq 0.15 \quad (4)$$

$$s-d \leq 3.0m \text{ (정적하중)}, s-d \leq 2.5m \text{ (동적하중)} \quad (5)$$

$$0.5 \leq s_x/s_y \leq 2.0 \quad (6)$$

여기서 s 는 말뚝 대각방향의 중심간격, d 는 말뚝캡의 환산직경, S_x, S_y 는 x 방향 및 y 방향의 말뚝간격이다. Fig. 5는 말뚝배치와 이에 따른 말뚝의 간격을 나타낸다. 말뚝내 작용하는 h^* 는 하중전이층의 높이, h 는 말뚝캡 상단부터 성토체까지의 높이이다. EBGEO 설계법에서는 하중전이층 높이 h^* 가 말뚝의 대각선 방향 순간격보다 더 크도록 권장하고 있다. 성토고 h 의 경우 말뚝 대각선 방향 순간격 길이의 0.8배 이상을 권장하고 있으나 크고

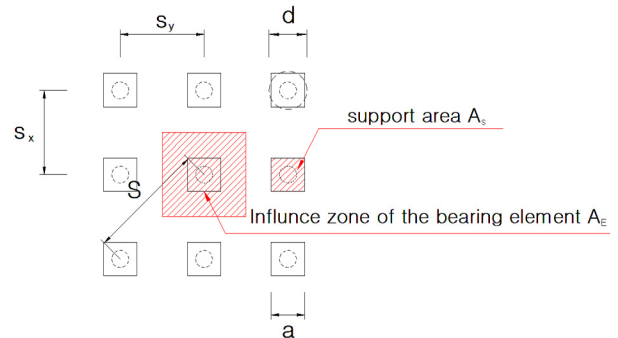


Fig. 5. Support conditions and definition of the distances

Table 2. Reference values of material properties

Item	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Elastic modulus (MPa)	Poisson ratio (-)
Ground	Soft soil	17.5	23	15	0.40
	Bed rock	23.0	400	500	0.27
Embank	Upper railbed	19.0	15	80	0.33
	Lower railbed	19.0	15	60	0.33
	Load transfer layer	20	-	80	0.33
Structure	Pile	27	-	30,000	0.20
	Pile cap			23,000	0.20

다양한 하중이 전달될수록 큰 값을 권장하고 있다. 특히 순간격의 2.0이상일 경우 하중충격에 의한 부정적인 영향을 무시될 수 있는 것으로 명기되어있다. Table 3은 검토단면을 EBGEO 설계기준에 따라 검토한 결과이다. 성토고 3m의 경우 한계 성토고의 기준에 미달하며 이외 6~9m의 경우는 모두 조건을 만족한다.

3.2.2 하중전달특성

EBGEO 설계법은 Zaeske(2010) 모델을 적용하여 비늘형태의 아칭영역에 대한 소성역학의 적용을 통해 유도한 식을 이용하는 방법이다. 한계응력상태의 아치가 말뚝사이의 토목섬유와 연약지반 상부에 형성된다고 가정하며, 토목섬유와 연약지반에 전달되는 하중은 아치의 평형을 고려하여 계산된다. Fig. 6은 원지반과 말뚝에 작용되는 하중전이 메커니즘을 나타낸다. 독일설계법의 경우 원지반과 말뚝에 작용되는 하중을 식 (7)~(8)과 같이 산정한다.

$$\sigma_z = \lambda_1 \left(\gamma + \frac{p}{h} \right) \left\{ h(\lambda_1 + h_g^2 \lambda_1)^{-x} + h_g \left[\left(\lambda_1 + \frac{h_g \lambda_2}{4} \right)^{-x} - (\lambda_1 + h_g^2 \lambda_2)^{-x} \right] \right\} \quad (7)$$

$$h_g = \frac{s}{2} \quad (\text{for } h \geq \frac{s}{2}), \quad h_g = h \quad (\text{for } h < \frac{s}{2}),$$

Table 3. Design criteria

Hight of embankment (m)	d/s	as	s-d	h/(s-d)
3	0.32	0.16	2.89	0.62
6	0.32	0.16	2.89	1.66
9	0.32	0.16	2.89	2.70
12	0.32	0.16	2.89	3.74
Criteria	≥ 0.15	≤ 0.10	≤ 3.0	≥ 0.8

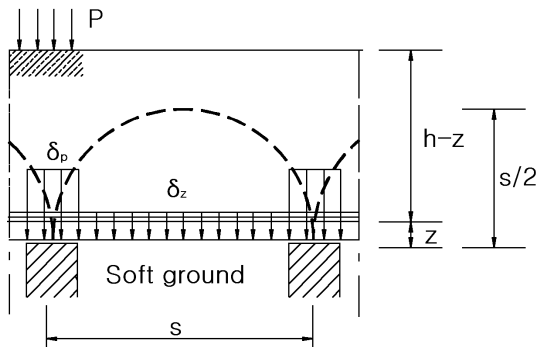


Fig. 6. Mechanisms of load transfer

$$k_c = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right), \quad \chi = \frac{d(k_c - 1)}{\lambda_2 s}, \quad \lambda_1 = \frac{1}{8}(s-d)^2, \quad \lambda_2 = \frac{s^2 + 2ds - d^2}{2s^2}$$

$$\sigma_p = [(\gamma h + p) - \sigma_z] \frac{A_E}{A_s} + \sigma_z \quad (8)$$

여기서 σ_z 는 지반에 작용하는 응력, σ_p 는 말뚝에 작용하는 응력이며, γ 는 성토체 단위중량 p 는 성토상단에서의 상재하중 및 교통하중, ϕ 는 하중전이층의 내부마찰각이다. Fig. 7은 독일 설계법에 따라 계산된 말뚝 1본이 부담해야하는 등가 면적에 작용하는 하중과 실제 말뚝 두부로 전달되는 하중의 비 즉 말뚝의 효율을 나타낸다. 말뚝의 효율은 성토고의 증가에 따라 증가하다 수렴하는 경향이 나타난다. 현재 적용되는 설계법의 아칭이론은 연약층 특성치나 토목섬유의 설치에 따른 변화에 따른 지반강성의 변화에 따른 하중전달 메커니즘을 고려하지 않고 동일한 아칭효과가 발생한다고 가정하고 있다. 따라서 연약층의 특성치 여부와 관계없이 말뚝간격과 캡규격 및 성토고에 따라 동일한 값이 산정된다.

3.2.3 토목섬유 작용인장력

토목섬유에 작용되는 인장력은 지반에 전달되는 하중이 Fig. 8과 같이 삼각형 하중분포로 말뚝 사이의 말뚝캡 폭 두께의 띠형태 토목섬유에 작용한다고 가정하여 산정한다. 토목섬유에 작용되는 하중 Q 는 지반에 전달되는 하중과 하중의 영향면적으로부터 산정되며 식 (9), (10)과 같다.

$$A_{Lx} = \frac{1}{2}(s_x s_y) - \frac{d^2}{2} \text{ant} \left[\frac{s_y}{s_x} \right] \frac{\pi}{180}, \quad A_{Ly} = \frac{1}{2}(s_x s_y) - \frac{d^2}{2} \text{ant} \left[\frac{s_x}{s_y} \right] \frac{\pi}{180} \quad (9)$$

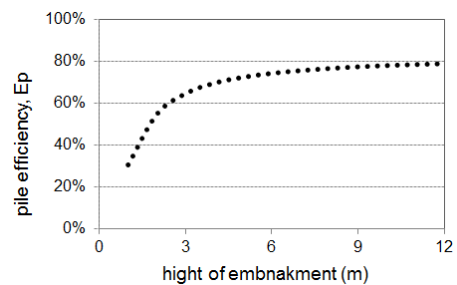


Fig. 7. Pile efficiency by EBGEO

$$Q_x = A_{Lx}\sigma_z, \quad Q_y = A_{Ly}\sigma_z \quad (10)$$

토목섬유에 작용되는 인장력은 띠형태의 토목섬유에 작용하는 삼각형 분포의 선하중에 대하여 단위띠 요소에 대한 힘을 평형을 고려하여 산정한다. 연약지반의 지반반력은 선형 스프링형태로 지지된다고 가정하며 연약지반의 탄성계수를 층두께로 나눈 값을 적용한다. EBGEO에서는 단위 폭당 작용되는 최대 인장력을 식 (11)와 같

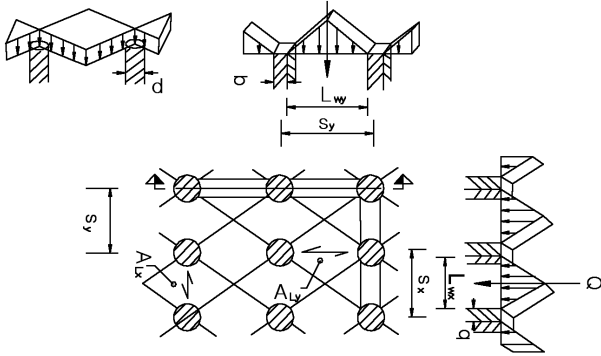


Fig. 8. Calculation of the resulting force (Q) assigned to the load influence area A_L (EBGEO, 2011)

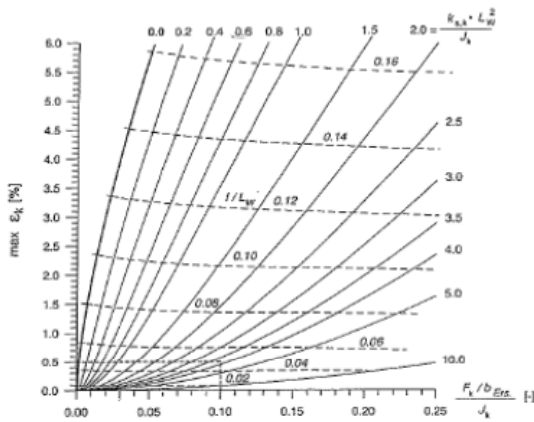
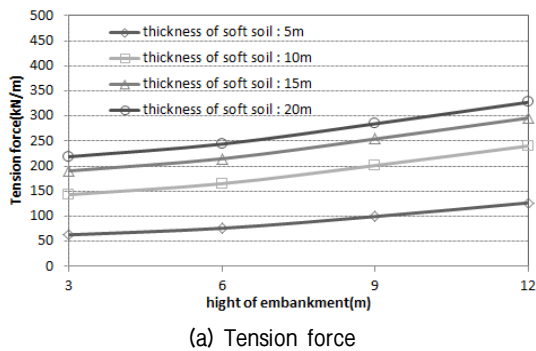


Fig. 9. Maximum strain (ϵ_k) of reinforcement (EBGEO, 2011)



(a) Tension force

이 산정하며 Fig. 9와 같이 도표 형태로 그 해를 제시하고 있다.

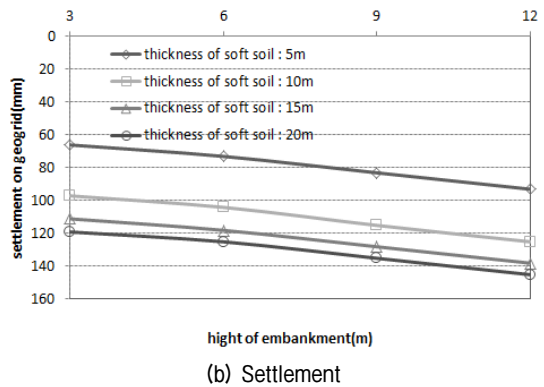
$$E_k = \epsilon_k J_k \quad (11)$$

여기서 E_k 는 토목섬유에 작용되는 최대 인장력, ϵ_k 토목섬유에 작용되는 최대 변형률, J_k 는 토목섬유의 인장강성을 나타낸다.

Fig. 10(a)는 성토고와 연약지반 두께에 따른 토목섬유 발생하는 최대 인장력을 나타내며, Fig. 10(b)는 토목섬유의 처짐을 나타낸다. 최대 인장력은 파일갭 모서리부분에서 발생하고 최대변형은 말뚝사이 중앙부에서 발생하는 것으로 계산된다. 토목섬유의 최대 인장력과 최대 처짐량은 성토고의 증가에 따라 증가하는 경향이 나타나며, 연약지반층 두께에 따라 증가하다 수렴하는 경향이 나타난다.

3.3.1 유한요소 해석조건

본 논문에서는 상용프로그램인 Plaxis 3D를 이용하여 3차원유한요소 해석을 수행하였다. Fig. 11은 해석에 사용한 유한요소모델을 보여준다. 성토체와 원지반에 대해서는 Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용한 선형탄소성 모델을 적용하였으며, 말뚝의 경우 Beam 모델을 적용하였다. 말뚝갭의 경우 탄성체로 해석하였으며, 토목섬유는 인장력에만 저항하는 geogrid 모델을 적용하였다. 토목섬유와 흙 사이의 경계면은 완전부착된 것으로 가정하였다. 수치해석 모델링시 측방향 경계는 상부하중에 의한 전단변형의 영향범위 이상으로 적용하였다. 수치해석 시에는 운영하중에 의한 침하량을 분석하기 위해 원지반 조건, 말뚝 및 갭 시공, 하중전이층 포설, 성토체 단계시공, 궤도하중재하 및 운영하중재하의 시공 단계를 고려하여 수행하였다.



(b) Settlement

Fig. 10. Tension force and settlement on geogrid by EBGEO

3.3.2 하중전달특성

Fig. 12(a)은 성토고와 연약층 두께에 변화에 따른 말뚝 효율을 보여준다. 수치해석에서 말뚝의 효율은 말뚝이 부담해야하는 등가 면적에 작용하는 하중과 말뚝의 두부에 작용하는 하중 축력의 비로 산정하였다. 수치해석의 경우 3m의 성토고를 제외하고 성토고의 증가에 따라 말뚝의 효율이 감소되는 경향이 나타난다. 그리고 연약층이 증가할수록 말뚝의 효율이 증가하다가 수렴하는 경향이 나타난다. Fig. 12(b)는 연약층 두께(D)와 성토고(H)의 비율 대비 말뚝효율을 보여준다. 말뚝의 효율은 성토고 대비 연약층 두께가 1.0이하에서 효율이 급격히 낮아지는 경향이 나타난다. 성토고 대비 연약층 두께가 낮아지면 지지층의 강성의 영향을 받아 원지반의 지지강성이 증가하게 되며 이로 인해 아칭효과가 오히려 감소하는 것을 보여준다. 이는 아칭효과가 주로 성토지반의 말뚝지지부와 연약

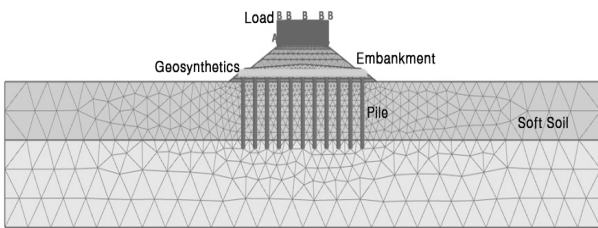
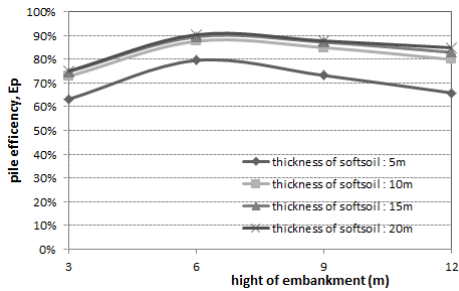
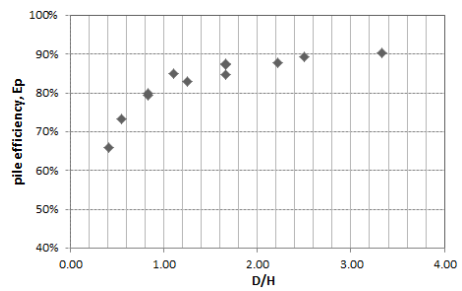


Fig. 11. Finite element mesh for simulations

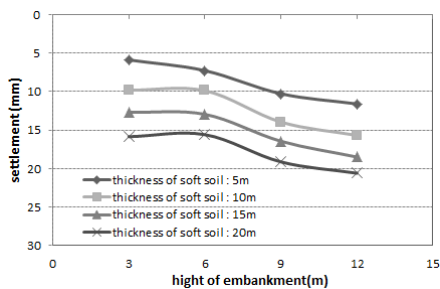


(a) Pile efficiency

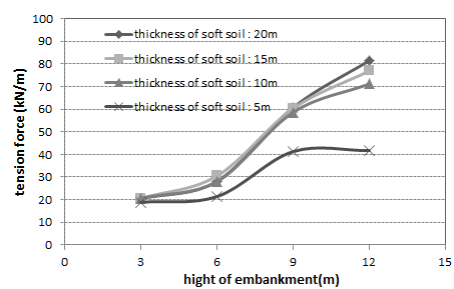


(b) Variation of pile efficiency with D/H

Fig. 12. Pile efficiency by FEM



(a) Settlement



(b) Tension force

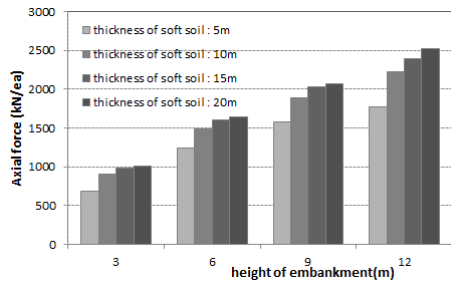
Fig. 13. Tension force and settlement on geogrid by FEM

지반 지지부에서 발생하는 변위차이에 저항하는 전단응력으로 발생되기 때문에 지반의 반력이 증가할 경우 말뚝 지지부와 연약지반 상부의 흙 사이의 상대변위를 감소시켜 아칭효과를 감소시킬 수 있는 것으로 판단된다.

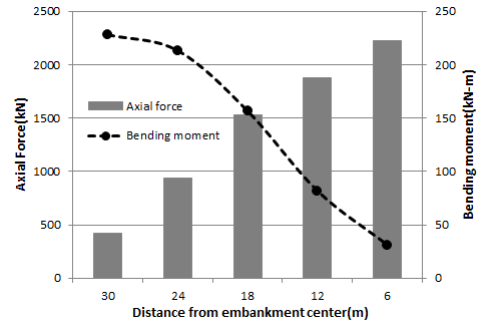
성토고 3m의 경우는 한계성토고 보다 낮은 성토고로 성토고 6m의 경우보다 약 15%이상 말뚝효율이 낮은 것으로 나타났다. 이는 지반아칭이 발달하지 못하므로 말뚝으로 성토하중의 전이가 효과적으로 이뤄지지 못하는 것을 나타낸다.

3.3.3 토목섬유 보강재 인장력 및 처짐

Fig. 13(a)는 성토높이와 연약층 두께에 따른 토목섬유의 처짐을 나타낸다. 토목섬유 처짐은 말뚝과 말뚝사이의 중앙지점에서 측정하였으며, 토목섬유의 인장력은 말뚝이 부담하는 면적내에 최대값을 측정하였다. 해석 결과에 의하면 토목섬유의 침하량은 지반아칭이 발달하지 못한 성토고 3m를 제외하고 성토고와 연약층 두께에 따라 증가하는 경향이 나타난다. 토목섬유에 작용되는 인장력은 Fig. 13(b)에 나타내었으며 성토고가 증가할수록 커지며 연약층 두께가 증가할수록 증가하는 경향이 나타난다. 특히 연약층 두께가 낮은 5m에서는 지반의 지지력이 커져서 토목섬유 보강재에 작용되는 인장력이 51%~76% 감소하는 것으로 나타났다.



(a) Maximum axial force



(b) Axial force & Bending moment

Fig. 14. Axial force on the pile by FEM

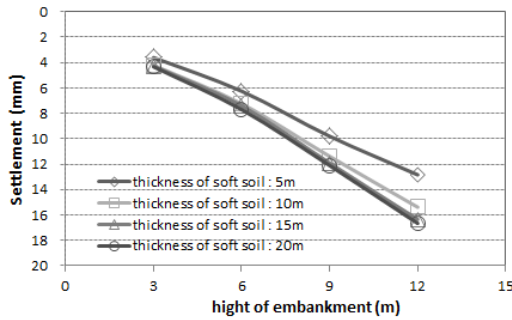


Fig. 15. Settlement on the railbed

3.3.4 말뚝의 축력 및 운영중 침하량

Fig. 14(a)는 성토고와 연약층 두께에 따른 말뚝의 최대 축력을 나타낸다. 말뚝의 축력은 성토고가 증가할수록 증가하며 연약층두께에 따라서도 증가하는 경향이 나타났다. Fig. 14(b)는 성토부 중심에서부터 발생하는 말뚝의 축력과 휨모멘트를 나타낸다. 성토체 중앙에서 가장 큰 축력이 나타나며 성토부 끝단으로 갈수록 성토 하중과 운영하중에 의한 영향이 작아져 축력이 감소되는 경향이 나타난다. 휨모멘트의 경우 사면경사부로 갈수록 휨모멘트가 증가하는 경향이 나타난다. Fig. 15는 운영하중에 의한 노반의 침하량을 나타낸다. 해석결과에 의하면 운영중 노반의 침하량은 성토고에 따라 증가하는 경향이 나타난다. 그리고 연약층 두께가 증가할수록 운영 중 노반의 침하량은 증가하다 수렴하는 경향이 나타난다. 성토고가 12m이고 연약층 두께가 20m일 때 침하량이 최대이며 17mm로 나타난다.

3.4 현행 설계법과 수치해석적의 결과 비교 분석

EBGEO 방법으로 산정된 말뚝의 효율은 0.72~0.78 사이로 수치해석으로 산정된 말뚝의 효율 0.66~0.90과 다소 편차를 나타내고 있다. 특히 수치해석 결과는 연약

층의 두께에 따라 말뚝효율이 변화되는데 비해서 기존 설계방법의 결과는 원지반의 지지강성 변화에 상관없이 동일한 값이 산정된다. 토목섬유에 작용되는 인장력의 경우 수치해석 결과는 기존의 설계법 대비 작용 인장력이 10~41%로 나타난다. 최근 현장계측 및 모형실험 등을 적용한 연구결과에 따르면 이론식에 의한 인장력이 안전측으로 나타나는 것으로 검증되고 있다. 연약층 두께에 따른 인장력은 이론식의 경우 연약층 두께에 따라 비례하는 경향이 나타난다. 그러나 수치해석의 경우 연약지반이 10m이상의 경우 연약층 두께에 따른 인장력의 변화가 미소하나 연약지반이 5m의 경우 50%~90%가 감소하는 것으로 나타났다. 연약층 두께가 낮아 하부 지지층의 강성의 영향을 받는 경우 말뚝의 효율뿐만 아니라 토목섬유에 작용되는 인장력도 작아지는 경향이 보인다.

현행 설계법은 말뚝의 효율이 수치해석결과보다 대체로 낮은 경향이 나타나며 토목섬유에 작용되는 인장력은 큰 경향이 나타난다. 그러나 기존 설계방법으로는 연약지반 강성에 따른 아칭효과의 감소를 고려할 수 없으며, 아칭효과가 최대로 발현된 경우를 가정한 말뚝효율을 이용하여 설계가 이루어지고 있다. 이로 인해 지반의 지지강성이 큰 경우 원지반에 전이되는 하중을 과소평가 할 가능성도 있다. 현재 설계법에서는 이론적인 배경이 아칭형상에 대한 여러 가정을 토대로 산정되며, 지반반력의 단순화 과정으로 인해 설계 시 불확실성을 내포하고 있으므로 보수적인 값을 제안한다고 판단된다. 따라서 지반특성에 따른 아칭효과를 고려한 설계법과, 지지강성 변화에 따른 아칭효과, 사면 경계부 효과에 따른 아칭의 변화 등이 고려된 연구가 수행될 경우 현장에서 좀 더 합리적이고 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 성토지지말뚝의 국내 적용성을 분석하기 위해 성토고와 연약지반 두께에 따른 말뚝의 효율과 토목섬유에 작용하는 인장력을 수치해석적인 방법과 이론적인 방법으로 분석하였다. 분석결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 이론해를 통한 성토지지말뚝의 말뚝의 효율은 말뚝의 순간격과 작용하중에 따라 변화하며 연약층의 두께에 따른 영향은 없는 것으로 나타났다. 반면 수치해석 결과에서는 말뚝의 효율은 연약지반의 두께에 따라 변동하는 것으로 나타났다. 성토고가 아칭발생 높이 보다 작은 경우 15%이상의 말뚝효율의 감소가 나타났다. 그리고 성토고 대비 연약층 두께가 1.0 이하인 경우 말뚝의 효율이 급격히 작아지는 경향이 나타났다. 따라서 성토지지말뚝 공법의 적용 시 아칭높이를 확보하기 위한 성토고와 연약지반의 강성과 두께에 대한 고려가 필요하다. 토목섬유에 작용하는 인장력 및 처짐은 이론해의 경우가 수치해석결과보다 보수적으로 나타난다. 말뚝의 경우 중앙부에서 사면경사부로 갈수록 압축력이 줄고 모멘트가 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) 성토지지말뚝공법은 독일 EBGEO 설계기준에 따라 설계할 경우 침하 안정성이 확보되는 것으로 나타난다. 따라서 콘크리트 궤도와 같은 침하기준이 엄격한 구간에서 교량을 대체할 수 있는 공법으로 그 적용성이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지

원(연약지반구간 교량대체를 위한 침하억제공법 개발, 15RTRP-B067919-03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. BS8006 (1995), British Standard, Code of practice for: Strengthened/reinforced soils and other fills.
2. Design criteria for Railroad (road bed) (2011), Korean Rail Network Authority (in Korea).
3. Korea Rail Network Authority (2012), "Design of Embankment", KR C-04020.
4. Lee, Taehee, Lee, Il-Wha, Lee, Su-Hyung, Jung, and Young-Hoon (2015), "Numerical Analysis on the Effect of Increasing Stiffness of Geosynthetics on Soil Displacement and Pile Efficiency in Piled Embankment on Soft Soil", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.4, pp.31-43.
5. Low, B.K., Tang, S.K., and Choa, V. (1994), "Arching in Piled Embankments", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE., Vol. 120, No.11, pp.1917-1937.
6. McNulty, J. W. (1965), "An Experimental Study of Arching in Sand", Technical Report No. I-674, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.
7. Han, J. and Gabr, M. A. (2002), "Numerical Analysis of Geosyntheticreinforced and Pile-supported Earth Platforms Over Soft Soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.128, No.1, pp.44-53.
8. Hewlett, W. J. and Randolph, M. F. (1988), "Analysis of Piled Embankments", *Ground Engineering*, Vol.21, No.3, pp.12-18.
9. The German Geotechnical Society (2011), "Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures Using Geosynthetic Reinforcements-EBGEO".
10. Van Duijnen, P., Van Eekelen, S.J.M. (2010), "Holland's Firist Railway on a Piled Embankment, Design Against Monitoring" In:Proceedings of 9ICG, Brawil, 2010, pp.1461-1464.
11. Van Eekelen, S. J., Bezuijen, A., Lodder, H. J., and Van Tol, A. F. (2012), "Model Experiments on Piled Embankments. Part I", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.32, pp.69-81.

Received : December 15th, 2015

Revised : February 5th, 2016

Accepted : March 16th, 2016