

기존선 성토사면 급구배화를 위한 열차 하중 하 대구경 봉상보강재의 최적 보강조건

Optimum Reinforcement Conditions of Large Diameter Reinforcement for Steep Slope of Conventional Railway Embankment under Train Loading

곽 창 원¹ Kwak, Chang-Won

김 대 상² Kim, Dae-Sang

Abstract

A reinforcement is required to ensure the structural safety in case of railway embankment excavation under railway load. A large diameter soil nailing with concrete wall is applied as the reinforcement method instead of the conventional soil nailing system. In this study, a series of 3 dimensional numerical analyses are performed to investigate the optimum reinforcement considering 15 different conditions based on the length, lateral spacing, diameter, and inclination of the reinforcement. The interface between soil nail and perimeteric grout is considered by means of cohesion, stiffness and perimeter of the grout. 0.3 m of reinforcement diameter is assessed as the most appropriate based on the economical viewpoint though ground displacement decreases with the increase of diameter, however the difference of displacement is negligible between 0.4 m and 0.3 m of diameter. Surface settlement, lateral displacement of wall, and stress of reinforcement are calculated and economic viewpoint to reinforce embankment considered. Consequently, the optimum reinforcement conditions considering those factors are evaluated as 3 m in length, 0.3 m in diameter, 1.5 m in lateral spacing, and 10 degree of inclination angle in the case of 3 m of excavation depth. Additionally, inclined potential failure surface occurs with approximately 60 degrees from the end of nails and the surface settlement and wall lateral displacement are restrained successfully by the large diameter soil nailing, based on the result of shear strain rate.

요 지

철도하중을 지지하고 있는 성토사면을 연직으로 굴착할 경우 철도노반의 안정성 확보를 위하여 보강이 필요하다. 본 연구에서는 사면굴착 후 전면 벽체를 형성하고, 통상적으로 사용되고 있는 쏘일네일링 시스템보다 짧으면서도 대구경인 봉상보강재를 적용하여 보강재의 길이, 수평 간격, 직경 및 설치 각도를 기준으로 총 15개 Case로 구분하여 각각에 대하여 조건별 안정성을 3차원 수치해석을 이용하여 검토하였다. 수치해석시 보강재와 주변 그라우팅과의 접촉면을 고려하기 위하여 그라우트재의 점착력과 강성 및 주변장을 고려하였다. 굴착심도 3m인 경우, 그라우트 직경 변화에 따른 변위해석 결과 보강재 직경이 커질수록 변위가 감소하나 직경 0.3m일 경우와 0.4m일 경우의 변위 차이가 미소하므로 경제성을 고려한다면 직경 0.3m가 가장 적합한 것으로 검토되었다. 보강재 조건별로 굴착 시 지표면 침하량과 벽체의 수평변위 및 보강재의 응력 및 경제성을 수치해석적으로 검토한 결과, 보강재 길이 3m, 직경 0.3m, 수평간

1 정회원, 한국지역난방기술 토건설계그룹 (Member, Ph.D. Civil & Architecture Group, KDHEC)

2 정회원, 한국철도기술연구원 광역도시철도융합연구실 (Member, Ph.D. Metropolitan Transportation Research Center, KRRI, Tel: +82-31-460-5305, Fax: +82-31-460-5034, kds@krii.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

격 1.5m, 경사각도 10도로 보강재를 배치하는 것이 최적의 조건으로 검토되었다. 또한 보강노반의 잠재적인 파괴면은 보강재 끝단에서 약 60도의 경사면으로 나타났으며, 철도하중 재하 시 보강재가 지표침하 및 벽체 수평변위를 안정적으로 억제하고 있는 것으로 판단되었다.

Keywords : Railway embankment, Large diameter soil Nailing, 3 Dimensional Numerical Analysis, Optimum Reinforcement

1. 서론

우리나라는 협소한 국토 면적으로 인하여 사회 기반 시설물들이 근접 시공되는 경우가 많고, 특히 철도노반과 같은 선상 구조물의 경우 단면 형상에 따라 경제성과 시공성이 좌우되는 경우가 많다. 도심지 등에서는 주변 여건에 따라 철도노반 성토사면에 대하여 연직굴착이 필요한 경우가 빈번하게 발생하고 있는데 이에 대하여 철도노반의 안정성을 확보하기 위하여 굴착 배면에 대한 지반보강이 필수적이다. 굴착 배면에 대한 대표적인 보강 방식으로는 쏘일 네일링(Soil Nailing) 공법을 들 수 있다. 쏘일 네일링 공법에서 사용되는 보강재는 주로 인장력에 저항하며 본 연구에서는 수평변위를 억제하기 위하여 전면 콘크리트 벽체를 형성하도록 하였다. 쏘일 네일링 공법에 의한 굴착 보강시 보강 성능에 영향을 미치는 중요한 요소는 보강재-지반 접촉면에서의 극한 인발저항력(ultimate pullout resistance)이며 이는 보강재의 직경과 보강재-지반 접촉면의 전단응력에 영향을 받는다(FHWA, 1998). 특히 접촉면 전단응력에 영향을 미치는 보강재와 주위 지반 사이의 부착력은 1~2mm 이내의 미소 변위 하에서도 발휘되므로(FHWA, 1998), 쏘일 네일링 시스템 전체 안정성은 지반 변위의 영향을 크게 받게 된다. 쏘일 네일링 시스템에 대한 전통적인 해석 방법은 내적, 외적 안정성을 평가할 수 있는 한계 평형해석(limit equilibrium analysis)을 주로 이용하였고 최근에도 이에 대한 많은 연구가 진행되었으나(Wei and Cheng, 2010; Yuan et al., 2003; Michalowski, 1998; Juran et al., 1990), 변위를 산정할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 최근에는 변형을 및 변위 발생 경향을 계산할 수 있는 수치해석적 연구가 중점적으로 이루어지고 있다. Unterreiner et al.(1997)은 쏘일 네일링 벽체에 대한 실험 시험을 수행하고 이에 대한 시공 단계별 수치해석을 수행하여 유사한 결과를 도출하고 관련 파라메타들을 산정하였다. Smith and Su(1997)는 곡선벽체에 대한

쏘일 네일링 보강시 사용하중 및 극한하중 상태에서의 거동을 보강재-지반 접촉면을 고려한 3차원 수치해석을 통하여 예측하였다. Zhang et al.(1999)은 3차원 유한요소해석(finite element analysis)을 이용하여 지반의 비선형성을 고려하여 사용하중 하에서의 지반변위를 예측하고, 시공 결과와 비교하였다. Yang and Drumm(2000)은 광산폐기물 사면에 쏘일 네일링 보강을 수행하고 굴착을 진행하면서 쏘일 네일링 시스템에 작용하는 하중 전이와 변위 발생경향을 3차원 수치해석을 통하여 산정하고 예측 결과와 비교하여 사면 전체의 파괴를 유도하는 항복영역을 제안하였다. Fan and Luo(2008)는 2차원 수치해석을 이용하여 쏘일 네일링으로 보강된 사면에서의 최적 보강재 배치에 대한 연구를 수행하였다. 보강재의 배치 및 사면의 각도에 따라 조건별 수치해석을 수행한 결과 보강재의 최적 설치 각도는 사면의 기울기가 감소할수록 증가한다는 사실을 발표하였다. Rabie(2014)는 보강토 옹벽과 결합된 하이브리드 형태의 쏘일 네일링 시스템에 대하여 2차원 수치해석을 수행하여 그 결과를 한계평형해석 결과 및 실측 자료와 비교하였다. 보강재 축력을 비교한 결과 수치해석과 실측 자료의 값이 유사하게 산정되었고, 한계평형해석 결과는 거의 모든 경우에 대하여 과대한 값을 나타내어 수치해석 결과의 신뢰성이 높다는 결론을 도출하였다.

본 연구에서는 철도하중을 받고 있는 성토사면에 대하여 연직 절토 시 대구경 쏘일 네일링 보강 시스템을 적용할 경우, 보강재의 길이, 수평 간격, 직경 및 설치 각도에 대한 조건별 안정성을 3차원 수치해석을 이용하여 검토하여 최적의 보강 조건을 검토하였다.

2. 수치해석 조건

철도하중을 받고 있는 높이 3m의 성토사면을 연직으로 절토할 경우에 대한 보강 조건을 분류하고 각 조건별로 3차원 유한차분해석법에 의한 수치해석을 수행하여

지표면 연직침하량, 벽체 수평변위량 및 보강재 축력을 검토하였다. 본 연구에 적용된 전체적인 해석 조건은 다음 Table 1과 같다.

지하수위는 성토지반임을 감안하여 고려하지 않았고, 성토면과 보강재 형성 후 지반 변위 및 속도를 초기화하고 하중을 재하하는 순으로 해석을 수행하였다.

해석 Case 별 해석 단면도의 예는 다음 Fig. 1과 같고, 구체적인 해석 변수는 Table 2와 같이 보강재 길이, 직경, 수평간격, 수직간격 및 설치 각도이다. 수치해석을 위한 모델링 시 보강재는 인장력에 저항할 수 있는 케이블 요소를 사용하였다. 보강재는 세장비가 크고 휨강성이 상대적으로 작으므로 보강재 자체에 발생하는 전단력

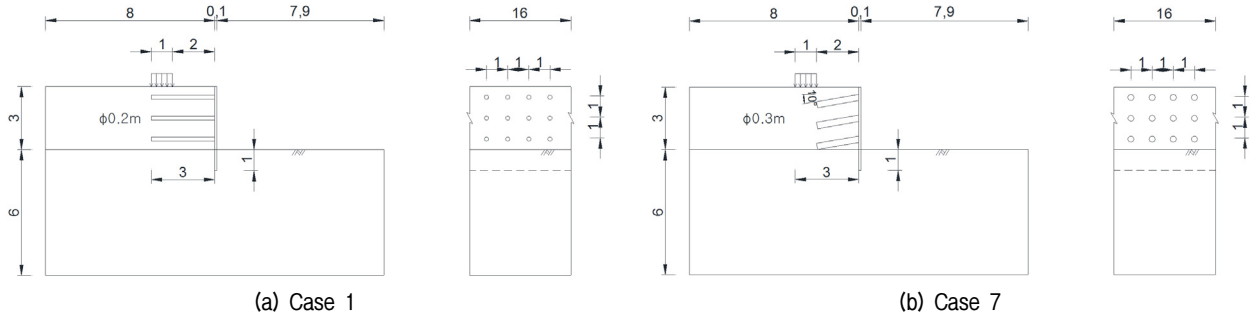


Fig. 1. Examples of analysis section

Table 1. Numerical analysis conditions

Analysis conditions	Description
Method	• Finite Difference Method (FDM)
Program	• FLAC3D 3.0
Procedure	• Initial stress condition → Reinforcement → Initializing → Railway loading
Model	• Ground : Mohr-Coulumb • Reinforcement : Elastic model
Reinforcement element	• Cable element • Considering grouting-soil interface properties
Boundary conditions	• Fixed boundaries of mesh sides and bottom
Railway load	• 50 kPa
Case	• 15 Case in accordance with length, diameter, lateral spacing, inclination of the reinforcement

Table 2. Analysis parameters

No	Case	Length (m)	Diameter (m)	Lateral spacing (m)	Vertical spacing (m)	Inclination (deg)	Remarks
1	1	3.0	0.2	1.0	1.0	0	No inclination
2	2	3.0	0.3	1.0	1.0	0	
3	3	3.0	0.4	1.0	1.0	0	
4	4	2.0	0.3	1.0	1.0	0	
5	5	4.0	0.3	1.0	1.0	0	
6	5-1	4.0	0.3	1.5	1.0	0	
7	6	3.0	0.3	1.5	1.0	0	
8	7	2.0	0.3	1.0	1.0	10	Inclination (10 deg)
9	7-1	3.0	0.3	1.0	1.0	10	
10	7-2	4.0	0.3	1.0	1.0	10	
11	7-3	3.0	0.3	1.5	1.0	10	Inclination (20 deg)
12	8	2.0	0.3	1.0	1.0	20	
13	8-1	3.0	0.3	1.0	1.0	20	
14	8-2	4.0	0.3	1.0	1.0	20	
15	8-3	3.0	0.3	1.5	1.0	20	

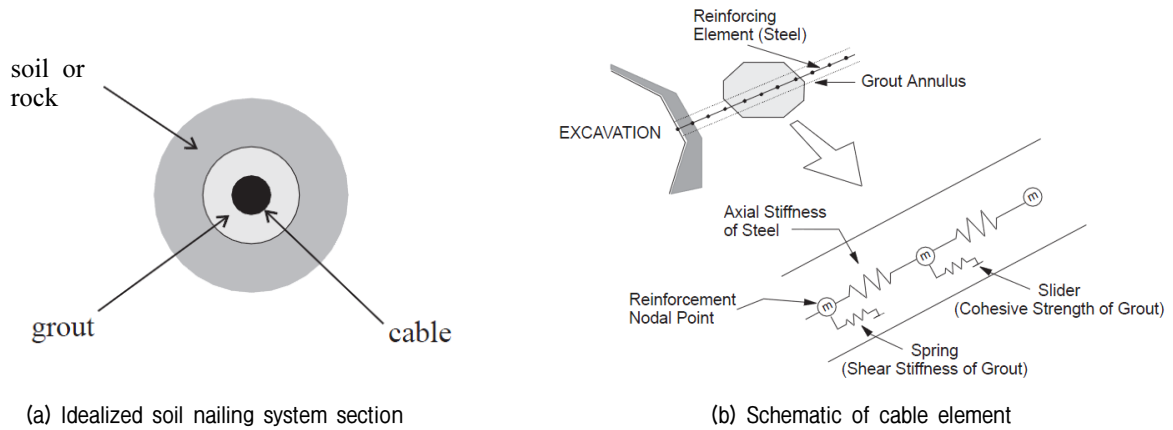


Fig. 2. Method to consider grout interface

과 모멘트는 해석 시 고려하지 않았다(FHWA, 1998). 소일 네일링 공법에서는 보강재로 사용되는 철근 또는 강선(steel tendon) 주위에 그라우팅을 실시하게 되는데 그라우팅 영역을 포함한 전체 보강재의 직경을 고려하여야 하고 그라우트의 전단강도와 부착강도를 각각 스프링(spring)과 슬라이더(sliding)로 고려하였다(Fig. 2 참조).

그라우트의 물성치를 정확하게 산정하는 것은 어려우나 그라우트를 탄성-완전 소성체로 가정하면 그라우트에 작용하는 전단력 F^t 는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$F^t = k_g u^t \quad (1)$$

여기서, k_g 는 그라우트의 강성, u^t 는 상대 전단변위이

다. k_g 는 보강재에 대한 인발시험을 통해 구할 수 있으나 다음 식(John and Dillen, 1983)을 통하여 해석적으로 계산할 수 있다.

$$\tau_G = \frac{Gg}{(D/2 + t)} \frac{\Delta u}{\ln(1 + 2t/D)} \quad (2)$$

여기서, τ_G 는 보강재에 작용하는 전단응력, Δu 는 접촉면 주변 재료와 구조요소와의 상대변위, Gg 는 그라우트의 전단탄성계수, D 는 보강재 강선의 직경, 그리고 t 는 보강재 강선 주위 그라우트재의 두께이다. 실무적으로 수치해석에서 적용하는 식은 다음과 같다.

$$k_g = \frac{2\pi G}{10 \ln(1 + 2t/D)} \quad (3)$$

또한 그라우트에 작용하는 부착강도(c_g)는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$c_g = \pi(D + 2t)\tau_{peak} \quad (4)$$

여기서, τ_{peak} 는 최대 전단강도이며 주위지반과 그라우트재의 일축압축강도 중 작은 값의 절반을 취한다. 다음 Table 3, 4에서는 해석에 적용된 그라우트 물성과 입력 지반정수를 나타내었다.

Table 3. Properties of grout for numerical analysis

Parameters	Values
Cable diameter (D)	0.035 m
t	0.1325 m
Hole diameter (D+2t)	0.3 m
Cable modulus (E)	2.10E+11 Pa
Cable ultimate tensile capacity	0.548 MN
Grout compressive strength	2.00E+07 Pa
Grout shear modulus (Gg)	9.00E+09 Pa
Friction	25 deg
Uniaxial strength of surrounding material	3.00E+05 Pa

Table 4. Properties of ground for numerical analysis

Material	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (°)	Young's modulus (E, MPa)	Poisson's ratio (ν)
Embarkment	18.0	-	25.0	50.0	0.3
Weathered soil	19.0	30.0	29.0	80.0	0.3

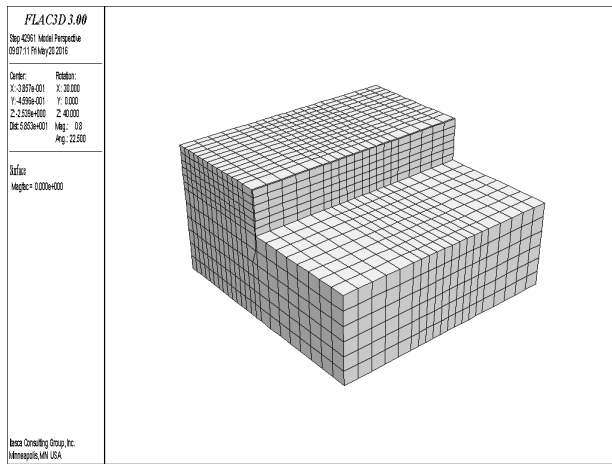
노반압력은 철도설계기준(Railway design standards, 2011)에 따라 50kPa로 적용하였다.

3. 수치해석 결과

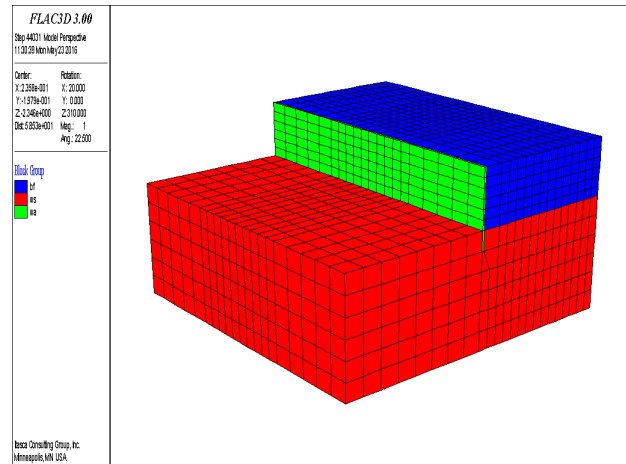
3차원 유한차분해석을 위한 모델링 결과 및 지반과 보강재의 결과값 모니터링 위치는 다음 Fig. 3과 같다.

먼저 그라우트 직경변화에 따른 보강성능 차이를 확인하기 위하여 Case 1, 2, 3에 대한 해석 결과를 비교하였다. 그라우트 직경이 0.2m(Case 1)에서 0.4m(Case 3)

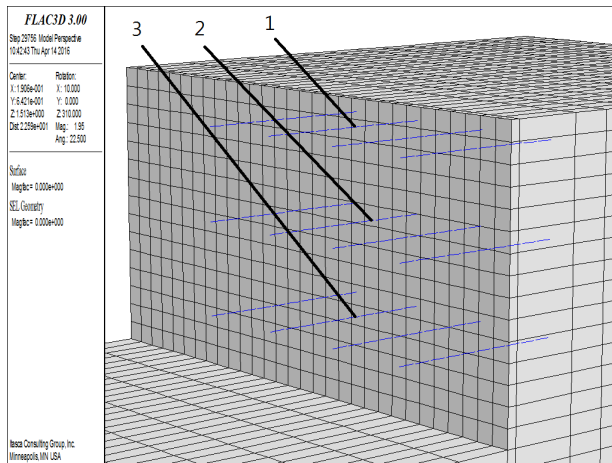
으로 증가할 경우 지표침하량은 3.6% 감소하였고 벽체 최상단 수평변위는 13.3%, 벽체 중간부 수평변위는 11.8% 감소하였다. 그러나 그라우트 직경 0.3m인 Case 2에 비하여 Case 3에서의 변위 차이는 지표 침하량 0.6%, 벽체 최상단 수평변위 3.4%, 벽체 중간부 수평변위 2.8%로 미소하므로 경제성을 고려한다면 그라우트 직경 0.3m를 적용하는 것이 가장 합리적이라 판단된다. Table 5는 Case 1, 2, 3에 대한 지표침하 및 벽체변위 산정결과이다. 전체 해석케이스에 대한 지표침하량, 벽체 최상단 및 벽체 중간부의 수평변위량 산정 결과는 다음 Fig. 4와



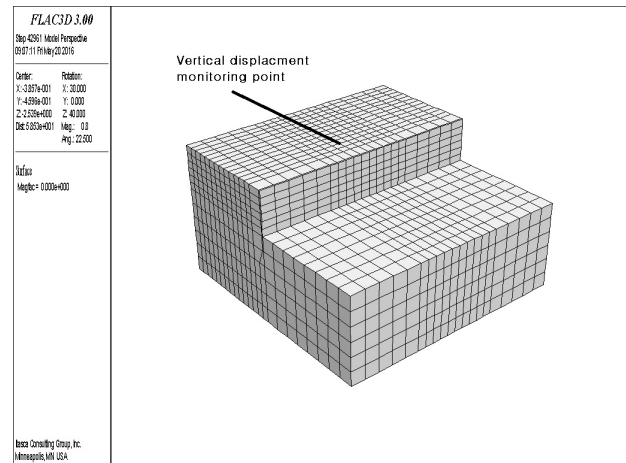
(a) 3D Modeling



(b) Grouping



(c) Monitoring for reinforcement



(d) Monitoring for ground

Fig. 3. 3D Model

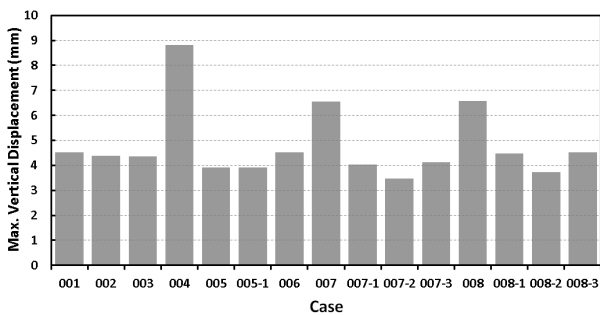
Table 5. Analysis results on settlements and wall displacements of Case 1, 2, 3

Case	Grout diameter (m)	Surface settlement (mm)	Wall lateral displacement at top (mm)	Wall lateral displacement at middle (mm)
1	0.2	4.518	1.768	1.135
2	0.3	4.383	1.585	1.030
3	0.4	4.358	1.532	1.001

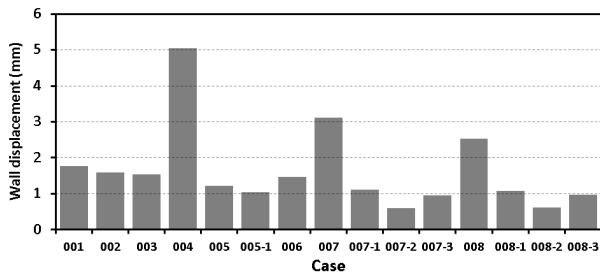
같다. 지표침하 분석결과 보강재 길이가 가장 긴(4m) Case 7-2에서 가장 작은 침하량(3.462mm)이 발생했고 보강재 길이가 가장 짧은(2m) Case 4에서 가장 큰 침하량(8.819mm)이 발생하였다. 또한 수평보강보다는 경사보강 시 침하량이 작게 산정되는 경향을 보였다. 따라서 보강재 길이 2m는 상대적으로 큰 지표면 침하를 유발할 수 있으므로 추가 대책이 필요하며, 경사보강 방식이 지표침하량 감소 측면에서 유리할 것으로 판단된다. 수평보강의 경우, 지표침하량에서는 보강재 길이가 긴(4m) Case 5(3.906mm) 및 5-1(3.911mm)이 가장 유리하고, 보강재 간격 1.0m(Case 5)와 1.5m(Case 5-1)에서의 지표침하량 차이가 미소하므로 보강재 간격이 넓은 Case 5-1이 경제성 면에서 보다 유리할 것으로 판단된다. 또한 10도 경사보강의 경우, Case 7-2에서 침하량(3.462mm)이 가장 작게 나타났다. 그러나 Case 7-2는 보강재 길이가 4.0m로 길어 경제성에서 불리하다. 또한 Case 7-2 대비

Case 7-3의 지표침하량 차이가 0.665mm로 미소하므로 따라서 보강재 길이가 3.0m이고, 수평간격이 1.5m로 넓어 경제성이 유리한 Case 7-3이 가장 적절한 보강방안이라 판단되었다. 20도 경사보강의 경우, 10도 경사보강과 마찬가지로 Case 8-2에서 침하량이 가장 작게 나타났으나 보강재 길이가 길어 경제성에서 불리하고, Case-8 대비 Case 8-3의 지표침하량 차이가 0.784mm로 미소하다. 따라서 보강재 길이가 3.0m이고, 수평간격이 1.5m로 넓어 경제성이 유리한 Case 8-3이 적절한 보강방안이라 판단된다. 그리고 벽체 최상단부 및 중간부 수평변위량을 검토한 결과 수평보강 보다 경사보강 시 변위가 더 작게 산정되는 경향을 보였다. 보강재 길이가 3m 이상인 경우 경사각 10도와 20도에서의 수평변위는 거의 같게 산정되었다.

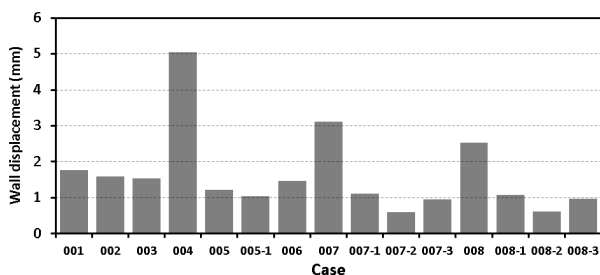
Case 7-3과 조건이 같고 경사각도만 20도로 다른 Case 8-3에 대한 해석 결과를 비교분석하면 Case 8-3의 경우 지표침하량은 9.4%, 벽체 최상단 수평변위량은 0.7%, 벽체 중간부 수평변위량은 3.8% 증가하여 Case 7-3이 가장 최적안이라 할 수 있다. 단, 변위 증가량 자체가 미미하므로 경사각도에 따른 보강 성능은 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. Case 7-3과 8-3 결과의 비교는 Fig.



(a) Surface settlement

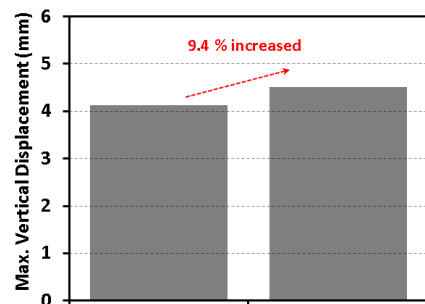


(b) Lateral displacement of wall (top)

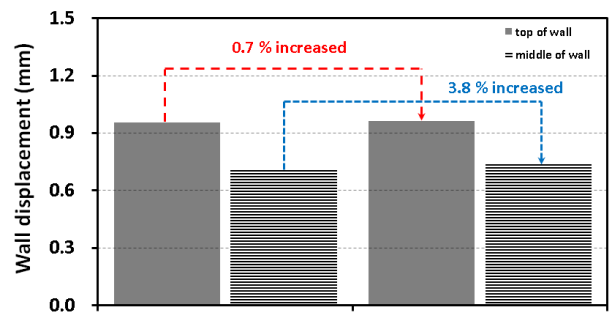


(c) Lateral displacement of wall (middle)

Fig. 4. Analysis results of wall displacements



(a) Surface settlement

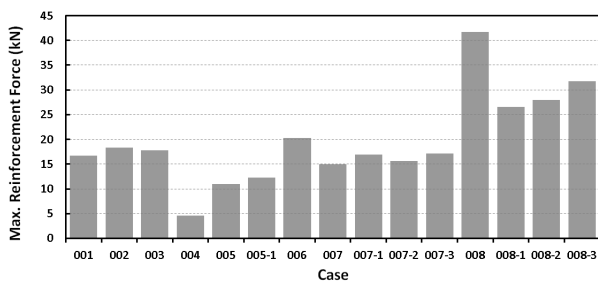


(b) Lateral displacement of wall

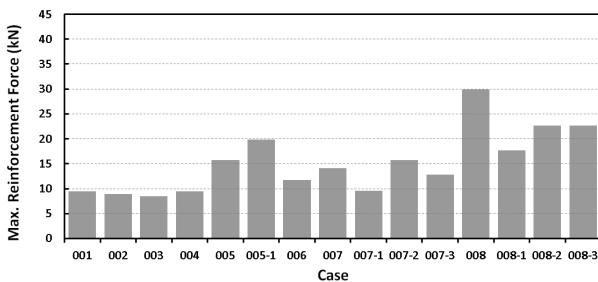
Fig. 5. Comparison of displacement results between Case 7-3 and 8-3

5와 같다.

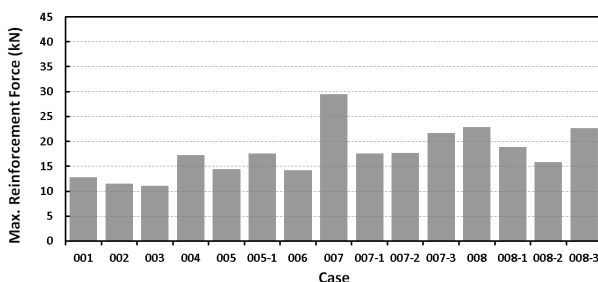
보강재 축력 산정결과는 다음 Table 6 및 Fig. 6에 나타내었다. 보강재 축력 발생경향을 검토한 결과, 보강재를 수평으로 배치할 경우 Case 4에서 보강재 축력이 가장 작은 경향을 나타내었다. 이는 보강재 길이가 짧기 때문이며, 보강재가 부담하는 하중이 적으므로 지표침하량이 가장 크게 발생한 것으로 판단된다. 보강재를 경사방향으로 배치할 경우 보강재 축력이 증가하는 경향을 나타내었으나 허용인장응력의 28.9% 이내로 작게 산정되었으므로 경사보강의 경우에도 보강재 축력에서 파괴가 발생할 가능성은 낮다고 판단된다.



(a) Axial force at the 1st reinforcement (top)



(b) Axial force at the 2nd reinforcement (middle)



(c) Axial force at the 3rd reinforcement (bottom)

Fig. 6. Results of reinforcement axial force

Table 6. Allowable reinforcement stresses

Location	Area (m ²)	Max. axial force (kN)	Max. tensile stress (MPa)	Case showing max. stress	Allowable tensile stress (MPa)	Ratio (%)
1st	0.0009621	41.74	43.38	8	150	28.9
2nd	0.0009621	29.89	31.07	8	150	20.7
3rd	0.0009621	29.53	30.69	7	150	20.5

이와 같이 지표침하, 벽체변위 및 보강재 축력에 대한 검토결과 보강 성능과 경제성 면에서 Case 7-3이 가장 최적의 안으로 판단되었다. Case 7-3에 대한 노반 파괴면 형상을 검토하기 위하여 전단변형을 분포를 산정한 결과는 다음 Fig. 7과 같다. 지반의 잠재적인 파괴면은 보강재 끝단에서 약 60도의 경사면으로 나타났으며, 철도하중 재하시 보강재가 지표침하 및 벽체 수평변위를 안정적으로 억제하고 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

철도하중을 받는 성토사면의 안정적인 연직굴착 및 굴착 중 침하를 최소화하기 위하여 통상적으로 사용되고 있는 쏘일네일링 시스템보다 짧으면서도 대구경인 봉상보강재를 적용한 최적 보강안을 3차원 유한차분해석을 수행하여 검토한 결과는 다음과 같다.

- (1) 그라우트 직경 변화에 따른 변위해석 결과 보강재 직경이 커질수록 변위가 감소하나 직경 0.3m일 경우와 0.4m일 경우의 변위 차이가 미소하므로 경제성을 고려한다면 직경 0.3m가 가장 적합한 것으로 검토되었다.
- (2) 굴착깊이 3m의 경우에 대하여 보강재의 길이, 직경,

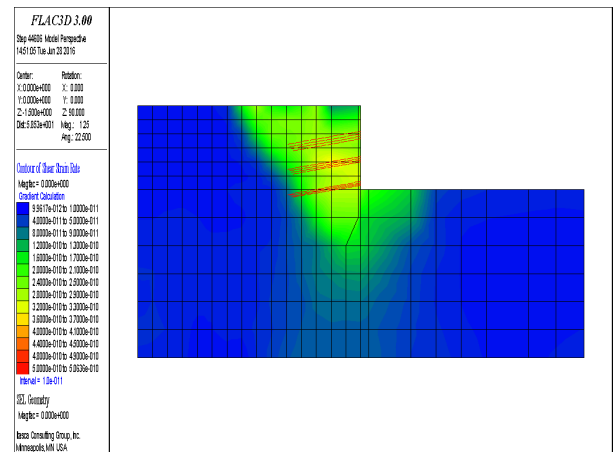


Fig. 7. Shear strain rate of Case 7-3

수평간격을 고려하여 Case별 해석을 수행하였고 지표침하량, 벽체 수평변위량 및 보강재 발생 응력과 경제성을 종합적으로 검토한 결과, 보강재 길이 3m, 직경 0.3m, 수평간격 1.5m, 경사각도 10도인 Case 7-3이 가장 최적의 안으로 판단되었다.

- (3) 최적안인 Case 7-3 해석결과, 보강노반의 잠재적인 파괴면은 보강재 끝단에서 약 60도의 경사면으로 나타났으며, 철도하중 재하 시 보강재가 지표침하 및 벽체 수평변위를 안정적으로 억제하고 있는 것으로 판단되었다.
- (4) 최적안은 철도하중 조건과 본 연구에서 제시된 단면일 경우에 한하며, 추후 보다 다양한 단면 형상에 따라 변동될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 주요사업 “도심지 철도 법면 제거를 통한 용지 활용 기술개발” 과제의 연구비지원에 의해 수행되어 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Fan, C.C. and Luo, J.H. (2008), “Numerical Study on the Optimum Layout of Soil-nailed Slopes”, *Computers and Geotechnics*, Vol. 35, pp.585-599.
2. FLAC3D User’s Guide. (2005), Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota.
3. Hang, M., Song, E., and Chen, Z. (1999), “Ground Movement Analysis of Soil Nailing Construction by Three-dimensional (3-D) Finite Element Modeling (FEM)”, *Computers and Geotechnics*,

- Vol.25, pp.191-204.
4. Juran, I., Baudrand, G., Farrag, K., and Elias, V. (1990), “Kinematical Limit Analysis for Design of Soil-nailed Structures”, *Journal of geotechnical engineering*, Vol.116, No.1, pp.54-72.
5. Manual for Design & Construction Monitoring of Soil Nail Walls, Federal Highway Administration, 1996, US Department of Transportation, pp.11-51.
6. Michalowski, R. L. (1998), “Limit Analysis in Stability Calculations of Reinforced Soil Structures”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.16, No.6, pp.311-331.
7. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. (2011), “Railway design standards”, pp.8-31-43.
8. Rabie, M. (2016), “Performance of Hybrid MSD/Soil Nail Walls Using Numerical Analysis and Limit Equilibrium Approaches”, *HBRC Journal*, Vol.12, pp.63-70.
9. Smith, I.M. and Su, N. (1997), “Three-dimensional FE Analysis of a Nailed Soil Wall Curved in Plan”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.21, No.9, pp.583-597.
10. Unterreiner, P., Benhamida, B., and Schlosser, F. (1997), “Finite Element Modelling of the Construction of a Full-scale Experimental Soil-nailed Wall”, French National Research Project CLOUTERRE. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, Vol.1, No.1, pp.1-8.
11. Wei, W.B. and Cheng, Y.M. (2010), “Soil Nailed Slope by Strength Reduction and Limit Equilibrium Methods”, *Computers and Geotechnics*, Vol.37, No.5, pp.602-618.
12. Yang, M.Z. and Drumm, E.C. (2000), “Numerical Analysis of the Load Transfer and Deformation in a Soil Nailed Slope”, *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, pp.102-115.
13. Yuan, J.X., Yang, Y., Tham, L.G., Lee, P.K.K., and Tsui, Y. (2003), “New Approach to Limit Equilibrium and Reliability Analysis of Soil Nailed Walls”, *International Journal of Geomechanics*, Vol. 3, No.2, pp.145-151.

Received : August 11th, 2016
 Revised : October 17th, 2016
 Accepted : November 1st, 2016