

운영중인 철도비탈면 보호를 위한 초속경 복합매트 보강 효과

Reinforcement Effect of Rapid Hardening Composite Mat for Protect Railway Slope in Operation

강태희¹, 정혁상^{2*}, 김진환³, 백인철⁴

Tae-Hee Kang¹, Hyuk-Sang Jung^{2*}, Jin-Hwan Kim³, In-Chul Back⁴

¹Nonmember, Graduate Student (Master Course), Dept. of Railroad Construction and Safety Engineering, Dongyang University, 145 Dongyangdae-ro, Punggi-eup, Yeongju-si, Gyeongsangbuk-do 36040, Republic of Korea

²Member, Professor, Dept. of Railroad Construction and Safety Engineering, Dongyang University, 145 Dongyangdae-ro, Punggi-eup, Yeongju-si, Gyeongsangbuk-do 36040, Republic of Korea

³Nonmember, Graduate Student (Master Course), Dept. of Railroad Construction and Safety Engineering, Dongyang University, 145 Dongyangdae-ro, Punggi-eup, Yeongju-si, Gyeongsangbuk-do 36040, Republic of Korea

⁴Nonmember, Senior Research, Dept. of Technology Reserch, 240 Jungang-ro, Dong-gu, Daejeon city 34618, Republic of Korea

ABSTRACT

This paper is dealt with railway slope stability for slope reinforcement using a geosynthetic concrete composite mat(GCCM). Recently, according to a change in weather caused by global warming, train operation has been restricted by the loss of backfill slope at the roadbed, which is consists of gravel, due to typhoons and heavy rainfall. In addition, the amount of damage is getting more significant than the cost of restoration, and the safety of workers is worried. In order to improve this limitation, a slope stability analysis was applied with a rapid hardening composite mat so that it can quickly secure a construction surface with increased workability and work stability and reduce maintenance costs by preventing re-loss in case of heavy rain and fundamentally blocking vegetation. As a result of the analysis, it was confirmed that the increase in safety factor was confirmed when the rapid harding composite mat was applied.

요 지

본 논문에서는 초속경 복합매트를 이용하여 비탈면 보강 시 비탈면 안정해석에 대한 내용을 다루었다. 최근 지구온난화에 따른 기상이변으로 태풍, 집중호우 등에 의해 철도 성토 노반 비탈면 유실로 열차 운행이 제한되고 있다. 또한 복구 비용보다 피해액이 증가하고 있으며 유실로 인한 작업환경 저하로 작업자들의 안전이 우려되고 있다. 이를 위해 기존에 다양한 비탈면 보호공법이 개발되었지만 철도 현장 특성상 증장비의 투입이 곤란하여 적용이 곤란한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 시공기면 확보가 용이하여 시공성 및 작업 안정성을 증대시키며 집중호우 시 채유실 방지 및 식생생장을 원천적으로 차단하여 유지보수 비용을 절감할 수 있는 초속경 복합매트를 적용한 비탈면 안정해석을 실시하였다. 해석 결과 초속경 복합매트의 적용 시 안전율 증가가 확인되었지만 초속경 복합매트의 두께에 따른 안전율 증가는 미미한 것으로 확인되었다.

Keywords : Railway slope, Rapid hardening composite mat, Formation level, Rapid construction backfill, Emergency restoration

1. 서 론

성토노반 비탈면 유실은 주로 태풍 및 집중호우로 인해 발생하고 있으며 우리나라 기후 특성상 우기에 집중적으로 발생되고 있다. 성토 노반의 비탈면 유실 발생 시 자갈 및 침목과 같은 구조물도 함께 유실되는데 궤도의 형상이

Received 5 Nov. 2021, Revised 24 Nov. 2021, Accepted 25 Dec. 2021

*Corresponding author

Tel: +82-54-630-1726; Fax: +82-54-630-1308

E-mail address: yoricom@dyu.ac.kr (H. S. Jung)

변형될 뿐만 아니라 열차 주행 시 충분한 지지력이 확보되지 못하여 탈선 및 궤도파괴가 빈번히 발생하고 있다. 또한 유지보수를 위한 작업자들의 작업로 확보가 곤란하여 많은 비용과 시간이 소요되며 작업자의 안전을 위협하고 있다. 최근 지구온난화에 따른 기상이변으로 인해 성토 노반 비탈면 유실 사례가 증가하고 있는 추세이다. 실제로 Choi et al.(2008)은 1995년~2001년 및 2002년~2007년 동안의 피해액과 복구비용을 비교분석 하였는데 1995~2001년 보다 2002~2007년에 발생했던 피해액에 대한 복구비용이 약 4배 정도 증가하였음을 시사하였다. 또한 철도 작업자들의 공사 중 산재 비율이 59%로 줄어들지 않고 지속적으로 발생하는 것으로 나타났다(Kwak et al., 2004). 이러한 문제를 해결하고자 Bang(2007)은 표면식생을 통한 비탈면유실 방지를 위해 친환경적이며 새로운 비탈면 보호공법을 제안하였지만 철도현장 특성 상 철도구조물의 밀집, 협소한 궤도현장, 열악한 접근성 등의 이유로 중장비의 투입이 제한되어 이를 철도비탈면에 적용하기는 곤란한 실정이다. 최근 해외 현장에서 별도의 장비가 필요하지 않으며, 시공이 간편한 GCCM(Geosynthetic Concrete Composite Mat) 공법이 실용화되어 다양한 현장에 널리 적용되고 있다. 그러나 GCCM을 철도 현장에 적용한 사례는 현재까지 없는 것으로 확인되었으며, 철도 현장의 적

용을 위한 연구가 필요하다(Kim, 2016). 따라서 본 연구에서는 대규모 장비가 필요하지 않으며 협소한 공간에도 작업이 가능할 뿐만 아니라 긴급공사가 가능한 초속경 복합매트를 개발하여, 이를 실제 철도현장에 적용하기 위한 다양한 비탈면의 기울기에 따른 초속경 복합매트를 적용한 비탈면 안정해석을 수행하였다.

2. 비탈면 설계 및 유지관리

2.1 개요

철도 비탈면의 설계는 열차의 종류, 비탈면의 높이에 따라 기울기가 조금씩 다르며 비탈면 붕괴의 형상도 다양하게 나타나고 있다. 본 연구에서는 개발된 초속경 복합매트를 철도 비탈면에 적용하기 위해 기존의 다양한 붕괴형상 및 원인과 유지관리방안에 대한 조사를 실시하였다.

2.2 비탈면 설계 기준

성토 비탈면의 기울기는 Table 1에 나타난 설계 기준을 만족해야 하며 최종 기울기는 성토 지지지반의 형상 및 강도 등을 고려한 비탈면 안정을 해석하여 결정해야 한다.

Table 1. Standard slope (MOLIT, 2017)

Height of formation level width		Regular railways	High-speed railway
Regular railways	High-speed railway		
H < 5.0 m	H < 3.0 m	1 : 1.5	1 : 1.8
5.0 m ≤ H < 10.0 m	3.0 m ≤ H < 9.0 m	1 : 1.8	1 : 1.8
10.0 m ≤ H < 15.0 m	9.0 m ≤ H < 15.0 m	1 : 2.0	1 : 2.0
H ≥ 15.0 m	H ≥ 15.0 m	1 : 2.3	1 : 2.3

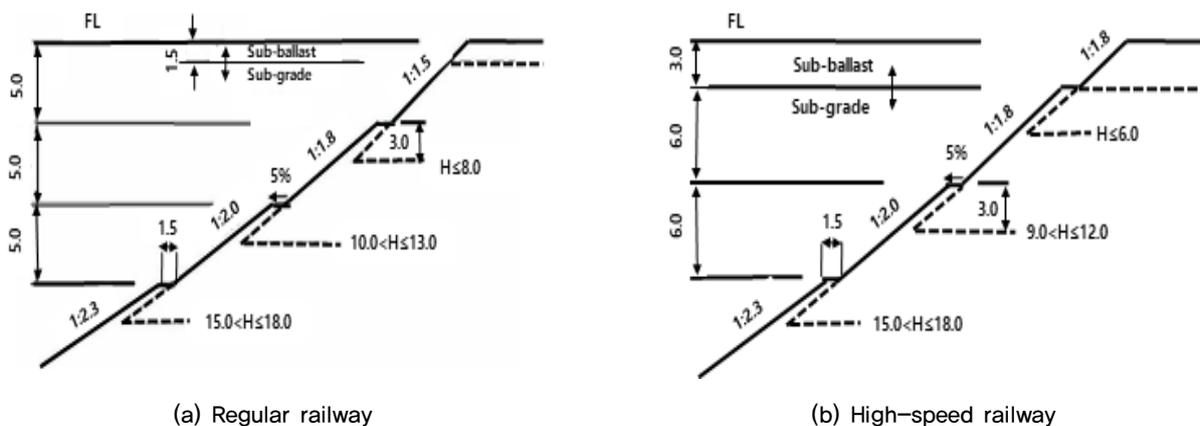


Fig. 1. The standard of slope gradient (MOLIT, 2017)

일반철도의 경우 비탈면의 안전율을 고려하여 비탈면의 높이가 5m씩 증가할 때 기울기를 완만하게 적용하여야 하며 고속철도의 경우 성토고 3m를 제외하고 6m씩 증가 시 기울기를 완만하게 적용해야 한다. 또한 실제 시공 시 변경된 사항이 있을 경우에는 반드시 재설계를 해야 한다 (MOLIT, 2017).

일반철도의 소단은 시공기면에서 매 5m마다 설치하며, 고속철도의 경우 상부노반 성토와 하부노반 성토의 경계에 설치한 다음 6.0m 높이마다 설치한다. 이때 일반철도와 고속철도의 소단 폭은 1.5m로 하며 외측으로 향하는 5%의 횡단 기울기를 둔다. 성토 지지 지반면에서 소단의 위치가 3.0m 이하인 경우에는 소단을 생략하며(MOLIT, 2017), Fig. 1은 성토 비탈면의 표준기울기를 보여주고 있다.

2.3 비탈면 붕괴 원인 및 노반 유실 사례

비탈면 붕괴 원인으로는 비탈면의 용출수, 비탈면 성토 구간, 배수 불량 지역, 매우 높은 성토고, 집중호우로 인한 붕괴 등이 있다. Fig. 2는 비탈면의 붕괴형상을 보여주고 있다. Fig. 2(a)는 비탈면 용출수로 인한 비탈면의 붕괴를 보여주고 있으며 비탈면 하부에 위치한 용출수는 토사를

약화시켜 강도 저하로 인한 성토부 파손 우려가 있으며, 토공부의 용출수가 생긴 경우, 성토부 옆면이 포화되어 성토부의 파괴가 일어날 수 있다. Fig. 2(b)는 비탈면 성토구간의 벤치시공을 보여주며 성토비탈면이 경사지면에 위치하는 경우, 지면과 성토부 재료 사이에 벤치의 미 시공으로 인한 성토부의 파손이 일어날 수 있다. Fig. 2(c)는 배수가 원활하지 못한 지역의 비탈면파괴를 보여주며, 배수는 비탈면파괴와 관계된 가장 중요한 원인으로 지하수는 성토부, 기초의 토사와 자연 토사를 포화 및 약화시킬 수 있다. 그 결과로 비탈면파괴가 나타나는 경우가 많아 배수가 원활하게 해야 한다. Fig. 2(d)는 매우 높은 성토고의 침하를 보여주며, 성토부는 자체 자중으로 인한 변형 및 침하가 발생하는데 이는 매우 오랜 기간에 걸쳐 발생하므로 비탈면에 미소한 침하가 나타날 우려가 있다.

집중호우로 인한 성토비탈면의 일반적인 붕괴원인은 주로 지하수에 영향을 많이 받게 되는데 국내 철도 성토비탈면은 지표 및 지하에 존재하는 유입수의 영향으로 붕괴가 발생하고 특히, 연중 강우량이 많은 6, 7, 8월에 집중호우로 인한 붕괴가 발생하는 것으로 알려져 있다(Shin et al, 2000). 철도 성토비탈면의 붕괴는 열차의 안전과 안정적인 운송을 저해하게 되고, 인명피해를 유발할 뿐만아니

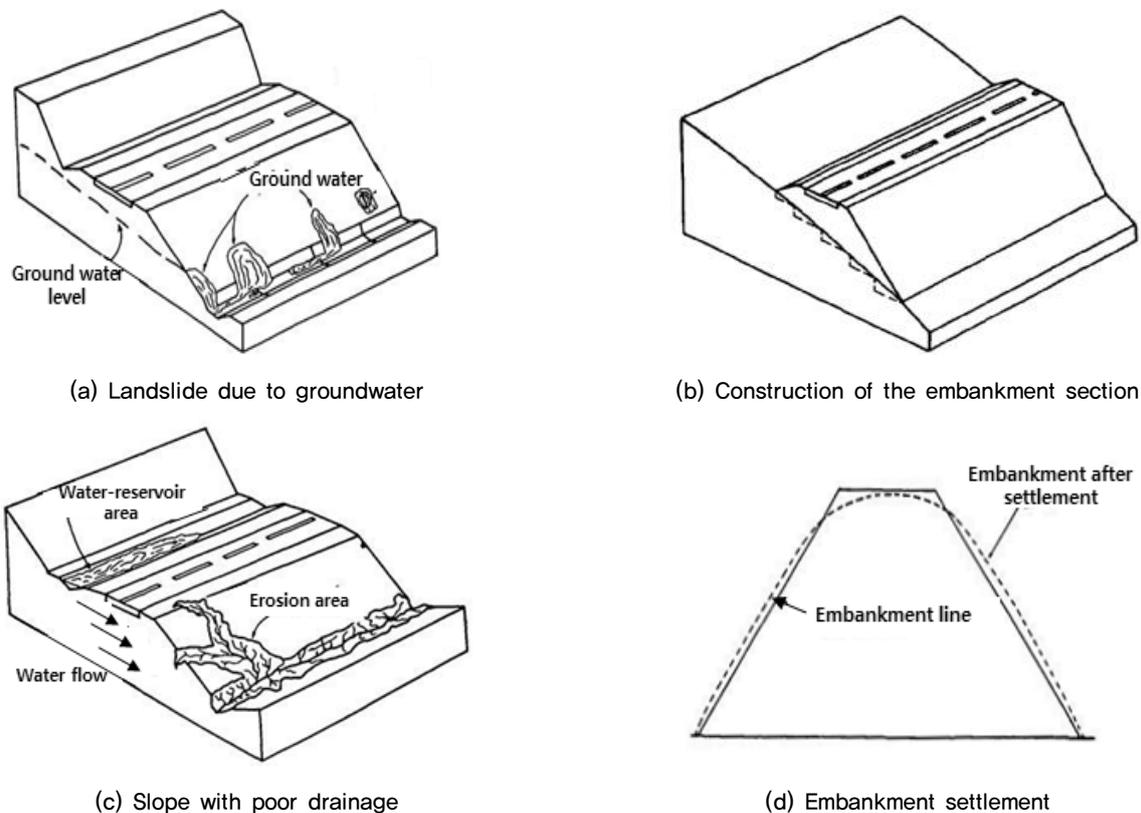


Fig. 2. Type of slope collapse



(a) Roadbed soil erosion



(b) Slope surface soil erosion

Fig. 3. Soil erosion at railway sites



(a) Shortcrete method



(b) Planting method

Fig. 4. Slope protection method (Bae et al, 2010)

라, 복구에 있어서도 경제적, 시간적인 손실을 유발하게 된다. Fig. 3은 철도 비탈면의 노반 유실이 일어난 현장을 보여주고있다.

2.4 비탈면 유실 방지 공법

기존의 많이 이용되고 있는 비탈면 유실 방지 공법에는 숏크리트 공법, 식생공 공법이 있다. 숏크리트 공법은 압축공기를 사용하는 장비를 이용하여 시멘트와 급결제, 모래 등의 골재가 혼합된 모르타르의 시공을 요하는 표층에 타설하여 콘크리트층을 형성하여 비탈면의 안정성을 확보하는 공법이다. 숏크리트 공법의 장점으로는 급결제의 첨가로 인해 조기강도의 발현이 가능하여 급속 시공이 가능하다. 또한 임의 방향에서 시공이 가능하며 시공에 필요한 장비가 소규모이기 때문에 협소한 장소의 시공 또한 가능하다. 그러나 겨울철에 추운 날씨에 동결되거나 주야간 온도차에 의해 균열이 발생한다. 또한 장기적으로 비탈면 내부의 배수문제가 발생한다. 식생 공법의 경우 미적효과를

목적으로 하여 비탈면에 식생을 피복하여 비탈면파괴의 방지 및 완화하는 공법으로 풍화가 심하게 진행된 풍화암층이나 토층에 주로 적용이 된다. 식생 공법은 크게 파종공법과 식재공법으로 나눌 수 있으며, 파종공법은 종자 뿌칠공, 식생매트공, 식생반공, 식생근공, 식생대공, 식생혈공, 객토식생 등이 있고 식재공법은 잔디입히기공, 줄잔디공 등이 있다. 식생 공법의 장점으로는 우수침식을 방지하고 녹화에 의한 미적 효과의 기대가 가능하다. 그러나 실트질 지반에 녹생토 공법 적용 시 동상되기 쉬우므로 시공 시 주의가 필요하다. 또한 모래, 자갈 지반에 적용 시 침식에 약하여 급속한 전면 피복이 필요하다. Fig. 4는 숏크리트 공법과 식생 공법의 모습을 보여주고 있다(Bae et al, 2010).

3. GCCM

GCCM은 여러 장의 토목섬유 사이에 수경성 건조모르타르 등을 혼입하여 제작하는 것이 일반적이며 해외 현장

에서는 이미 실용화되어 널리 적용되고 있다. 영국 콘크리트 캔버스사는 2011년부터 토목섬유 내부에 건조모르타르 재료를 혼입한 콘크리트매트를 현장거치, 살수 후 경화시키는 급속시공법을 개발하여 배수로 라이닝, 비탈면보호, 제방라이닝, 배출구 및 배수로 등에 적용되고 있다(Kim, 2016). 콘크리트 캔버스의 특징으로는 Table 2와 같이 살수 후 1일에 내부 건조모르타르의 압축강도가 40 MPa 이상에 이르는 고강도를 확보가 가능하고 한쪽 면에 코팅된 PVC는 불투수성 재료로 방수성이 우수한 것으로 알려져 있다. 또한 내기후성과 자외선에 대한 저항성이 우수한 내화학성 제품으로 고온에서도 기능이 탁월하여 화재를 예방할 수 있다.

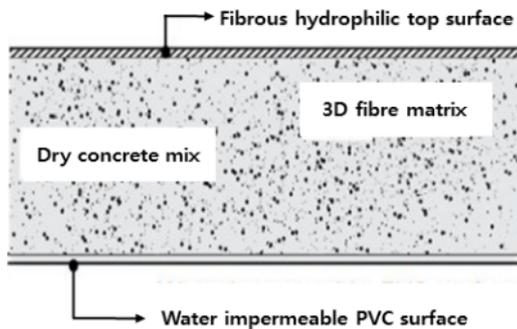
국내에서는 GCCM을 개발하거나 적용한 사례는 없는 것으로 보이며, 유사한 토목섬유 사이에 벤토나이트를 넣은 차수목적의 벤토나이트 매트는 연못의 방수시공, 매립장의 침출수 방지, 건축구조물의 방수 등의 목적으로 여러 나라에서 널리 사용되고 있는 추세이다. 다만 살수 시 초속경시멘트 수화에 필요한 수분의 전달이나, 연신율, 강도 등 철도비탈면보강 용도에 맞는 토목섬유의 구체적인 성

능과 검증이 필요한 상황이라 철도비탈면에 적용하기는 어려운 부분이다. Fig. 5는 콘크리트 캔버스 공법의 모습을 보여주고 있다.

국내에서 개발이 진행중인 GCCM은 해외에서 개발한 일반 GCCM 대비 경화속도를 향상 시킨 것으로 GCCM의 일종으로서 초속경 복합매트라고 하며 이는 Fig. 6과 같이 상하단의 표면은 토목섬유로 이루어져 있으며 중간층이 초속경 시멘트로 이루어져 있는 3차원 섬유 구조물로 물을 뿌리면 경화하여 6시간 이내에 35 MPa 이상의 고강도를 확보할 수 있는 특징을 가지고 있다.

Table 2. Features of concrete canvas (Kim, 2016)

Division	Content
Waterproofing	PVC coated on one side of the concrete canvas is an impervious material to ensure water resistance
Strength	Daily strength 40 MPa
Durability	Chemical resistance product with excellent weather resistance and UV resistance
Fire safety	Excellent function at high temperature to prevent fire

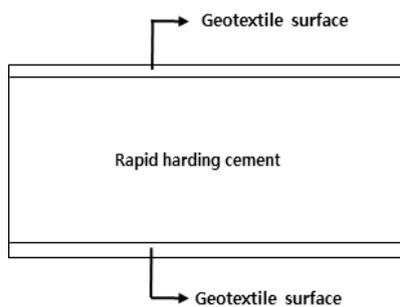


(a) Composition of the concrete canvas



(b) Field application of concrete canvas

Fig. 5. Concrete canvas method (Kim, 2016)



(a) Composition of the rapid harding composite mat



(b) Cross section of the rapid harding composite mat

Fig. 6. Rapid harding composite mat method

초속경 복합매트의 특징으로는 경제적으로 시공기면을 확보할 수 있으며 식생의 성장을 원천적으로 차단함으로써 작업자의 안전 확보가 가능할 뿐만 아니라 긴급복구 시설도 노반 비탈면 유실 긴급복구를 위해 대규모 장비가 불필요하다. 이로 인하여 수해복구 시간의 최소화 가능하며 시공 시 노반에 반영구적인 배수로를 확보하게 되므로 집중호우가 발생하여도 비탈면에 우수의 침투를 최소화하여 노반의 비탈면 안전성을 최대화 할 수 있다. 유실된 비탈면의 경우 경량 채움재로 유실된 부분의 신속한 복구가 가능하며 토공량 복구를 최소화 할 수 있다. 또한 복구된 비탈면은 초속경 복합매트와 경량채움재로 보호되어 재유실을 원천적으로 방지할 수 있다. Table 3은 초속경 복합매트의 특징을 나타내고 있다. 또한 초속경 복합매트는 기존의 이용되고 있는 슛크리트 공법과 비교하였을 때 특수

한 장비가 불필요하며 폐기물이 발생하지 않는다는 장점이 있고, 콘크리트 캔버스 공법과 비교하였을 때는 물을 뿌리면 경화하면서 빠르게 강도를 발휘한다는 공통점이 있지만 초속경 복합매트의 강도가 6시간 35 MPa 이상의 강도를 발휘할 수 있어 긴급 복구가 가능하고 경량채움재로 유실된 비탈면의 신속한 복구 가능하며 토공량 복구를 최소화할 수 있다는 장점이 있다.

초속경 복합매트의 시공 순서로는 ① 시공기면 부족 또는 노반 유실이 발생하면 ② 초속경 복합매트 가이드를 설치한 후 ③ 초속경 복합매트를 거치한다. ④ 그 다음으로 초속경 복합매트 고정 및 배수로를 설치하고 ⑤ 초속경 복합매트에 살수 및 양생을 한다. ⑥ 마지막으로 내부 공극 채움 속 경량채움재 충전 및 경화 순으로 진행되며 Fig. 7은 초속경 복합매트 공법의 시공 순서를 보여주고 있다.

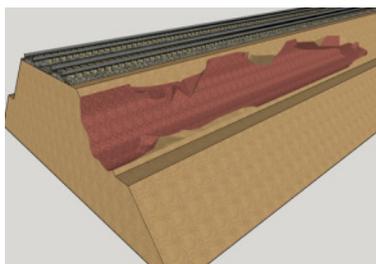
Table 3. Features of rapid harding composite mat

Division	Content
Economics	Possible to secure the construction surface and reduce the maintenance cost
Strength	35MPa or more within 6 hours
Construct ability	Large-scale equipment is not required and the recovery time from flood damage can be minimized
Safety	Since a semi-permanent drainage channel is provided on the roadbed, the penetration of rainwater on the slope can be minimized

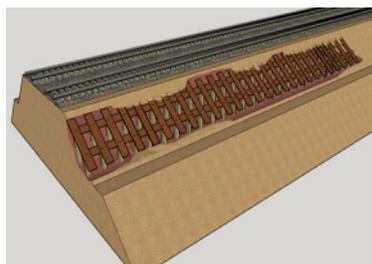
4. 수치해석

4.1 개요

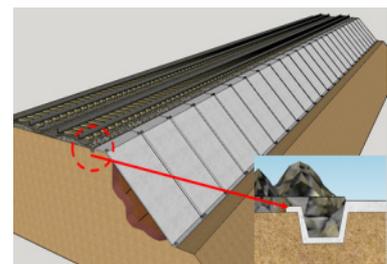
본 장에서는 비탈면의 안정성 확보를 위해 초속경 복합매트의 수치해석적 연구를 수행하였다. 기존의 한계평형법에 의한 해석은 안전율을 근거로 하여 비탈면의 안정성을 판단하며 활동면을 따라 파괴가 일어나려는 순간에 있는 토체의 평형조건으로부터 안정성을 해석하는 방법으로



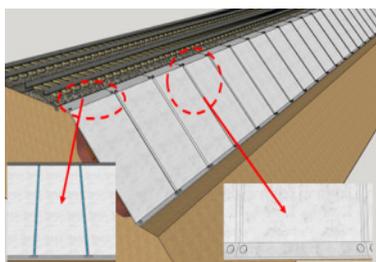
(a) Lack of construction surface or loss of slope



(b) Guide installation



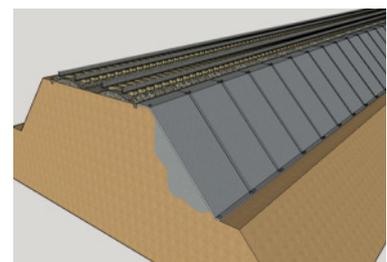
(c) Rapid harding cement composite mats setting



(d) Roadbed fixing and drainage installation



(e) Lightweight filler injection



(f) Watering and curing

Fig. 7. Rapid harding composite mat construction sequence

본 개발공법의 재료특성을 반영한 비탈면 보강효과를 검증하기에는 한계가 있어 강도감소법의 검토 방법을 적용하여 비탈면의 파괴 거동 해석과 안전율 변화를 평가하였다. 강도감소법은 안전계수에 의해 강도를 감소시키면서 비탈면 파괴상태에 도달할 때까지 반복적으로 수치해석하여 안전율을 산정하는 방법으로 비탈면의 가장 핵심 요소인 지반의 점착력(c), 내부마찰각(ϕ)을 변화시켜가며 복합매트가 적용된 비탈면의 안정성에 대해 검토를 수행하였으며, 사용된 프로그램은 Midas사의 GTS NX(New Experience of Geo-Technical Analysis System)를 사용하였다. MIDAS GTS NX는 정적 및 동적 평형방정식, 연속방정식을 선택하여 3차원 연속체 공간을 유한요소망으로 생성시키고 강성행렬을 만들어 지반의 변형특성을 응력-변형률 법칙에 의해 해석하는 프로그램이다.

4.2 해석 조건

해석에 앞서 성토노반 및 원지반에 대한 모델링은 Fig. 8

과 같으며 높이 H에 변화에 따라 폭은 2H가 되도록 설정하였다.

비탈면 상부 철도하중은 기존설계사례 및 철도설계기준(MOLIT, 2017)을 반영하였으며 사하중은 15 kN/m^2 , 활화중은 35 kN/m^2 , 설계하중은 50 kN/m^2 이고 적용 하중

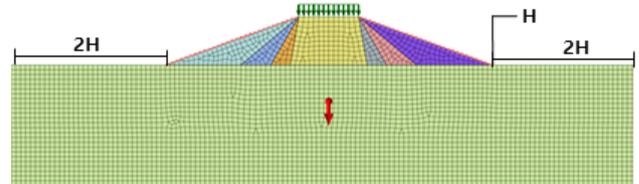


Fig. 8. Meshing in FEA

Table 4. Design load (MOLIT, 2017)

Railway load (kN/m ²)	Applied load (kN/m ²)
Dead load : 15	Railway load : 50
Live load : 35	
Design load : 50	

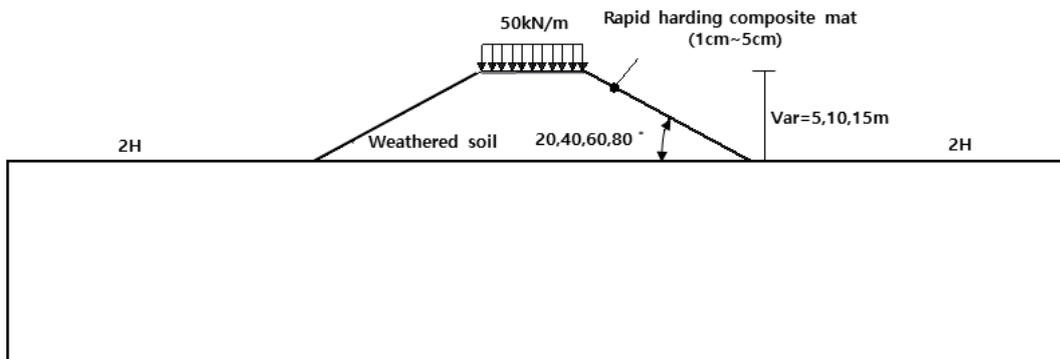


Fig. 9. review cross section

Table 5. Numerical study case

Case	Slope height (m)	Reinforcement thickness (cm)	Inclination (°)
1	5	Unreinforced, (1 ~ 5)	20
			40
			60
			80
2	10	Unreinforced, (1 ~ 5)	20
			40
			60
			80
3	15	Unreinforced, (1 ~ 5)	20
			40
			60
			80

Table 6. 50-year frequency daily maximum rainfall

Seoul	Busan	Incheon	Jangheung	Namwon
13.9 mm/hr	18.3 mm/hr	12.6 mm/hr	22.8 mm/hr	12.1 mm/hr

Table 7. Ground property

Division	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Permeability (cm/sec)
Weathered soil	18.5	14.0	28.0	4.0×10 ⁻⁴
Embankment	19.0	15.0	25.0	1.0×10 ⁻⁴

Table 8. Concrete canvas property

Division	Unit weight (kN/m ³)	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio (-)	Thickness (mm)
Reinforcement	17.0	19,000	0.35	10.0

은 50 kN/m²이며 Table 4 와 같다.

비탈면의 높이는 철도노반설계 기준을 적용하여 각각 성토고 5 m, 10 m, 15 m를 적용하였으며, 이에 대한 기울기는 각도로 환산해본 결과 20~23°로 나타났으나 급경사지 및 철도설계 기준의 기울기 적용이 다소 곤란한 현상이 존재하는 경우를 고려하여 이에 대한 안전율을 두어 최대 80° 까지 검토하였다. 초속경 복합매트의 두께의 따른 보강 효과를 검토하기 위하여 보강 전·후 및 보강시 매트의 두께는 10~50 mm로 적용하였다. 소단 미적용 단면으로 선정하였으며 수치해석을 위한 고속철도 성토부 대표횡단은 Fig. 9와 같다. 총 Case는 Table 5과 같다.

강우침투가 발생하는 경우에는 설계 계획빈도에 따른 해당지역의 강우강도, 강우 지속시간 등을 고려하여 강우 침투를 고려한 해석을 실시해야 하며 건기시 기준 안전율은 1.5 이상 우기시는 1.3 이상을 만족해야한다(MOLIT, 2017). 본 해석에 적용된 강우 강도는 50년 빈도 일 최대 강우량 중 장흥지역의 22.8 mm/hr 강우량을 72시간 적용하였으며 Table 6과 같다.

4.3 적용 물성치

원지반의 모델 및 성토노반의 모델은 MC(Mohr Coulomb) 모델을 사용하였으며 복합매트의 모델은 LE(Linear Elastic) 모델을 사용하였다. 또한 복합매트는 Beam 요소를 적용하였다. 지반의 물성은 OO고속철도 OO구간의 풍화토와 성토재의 물성치를 적용하였다. 풍화토의 단위중량은 18.5 kN/m³, 점착력은 14.0 kPa이며 내부마찰각은 28.0°, 투수계수는 4.0×10⁻⁴ cm/sec이다. 쌓기재의 단위중량은 19.0 kN/m³, 점착력은 15.0 kPa이고 내부마찰각은 25.0°, 투수계수는

1.0×10⁻⁴ cm/sec이며 Table 7과 같다.

초속경 복합매트는 기존의 유사한 제품인 콘크리트 캔버스의 물성을 사용하였으며 콘크리트 캔버스의 단위중량은 17.0 kN/m³ 탄성계수는 19,000 MPa이고 포아송비는 0.35, 두께는 10.0mm(Hui Li, 2019)이며 Table 8과 같다.

4.4 해석결과

4.4.1 건기시

비탈면의 높이가 5 m 일 때 보강 전·후에 대한 분석은 Fig. 10(a)에 나타난 바와 같다. 초속경 복합매트 미보강시 안전율은 비탈면의 기울기 20° 일 때 2.60, 40° 일 때 1.73, 60° 일 때 1.35, 80° 일 때 1.05 의 안전율을 확인하였다. 비탈면의 기울기가 커질수록 감소율은 각각 22%로 비교적 안전율이 작아지는 것으로 나타났으며 비탈면의 기울기가 20°에서 40°로 증가할 할 경우 안전율이 33%로 가장 크게 감소하는 것으로 나타났다. 초속경 복합매트 적용 후 비탈면의 기울기 20°, 40°, 60°, 80°에 대한 안전율은 각각 2.69, 2.00, 1.70, 1.30으로 분석되었으며 비탈면의 기울기가 20°에서 40°로 증가할 때 안전율이 25%로 가장 크게 감소하였다. 비탈면 무보강의 경우와 마찬가지로 비탈면의 기울기가 커질수록 안전율은 각각 15, 23%로 감소하는 경향을 확인하였으며 모든 Case에서 유사한 경향을 띠는 것으로 확인되었다. 초속경 복합매트의 보강 전·후 비탈면의 안전율을 비교분석한 결과 비탈면의 기울기가 20° 일 때 안전율이 3% 정도 증가 하였지만 비탈면의 기울기가 증가하였을 때 안전율의 증가폭은 최대 약 26%로 증가하였다. 마지막으로 초속경 복합매트의 두께변화에 따른 안전율을 비교분석한 결과 대부분 두께가 커질수록 안전율

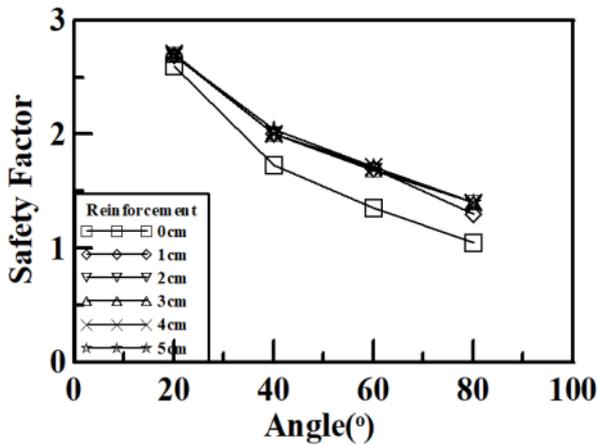
이 증가하였지만 상대적으로 미비한 것을 확인하였다.

비탈면의 높이 10 m의 경우 Fig. 10(b)와 같은 결과가 나왔으며, 초속경 복합매트를 보강하지 않았을 때의 안전율은 비탈면의 높이 5 m 일 때 보다 약 12% 감소하였으며 비탈면의 기울기에 따라 2.20, 1.38, 1.20, 1.02으로 나타났다. 비탈면의 기울기가 20°에서 40°로 증가할 때 약 37%, 40°에서 60° 증가할 때 13%, 60°에서 80° 증가할 때 15% 안전율이 감소하였으며 초속경 복합매트 두께 1 cm 적용 후 비탈면의 기울기에 따라 각각 2.24, 1.51, 1.23, 1.03의 안전율을 확인하였다. 보강 전후에 대한 비교분석 결과 20°일 때 약 2%의 안전율이 증가하였으며 40°일 때 약 9%의 안전율이 증가하였지만 60° 부터 안전율의 증가가 거의 없는 것으로 확인되었다. 이는 성토고 10 m의 기울기 60° 이상의 경우에는 보강효과가 미비할 것으로 예상된다.

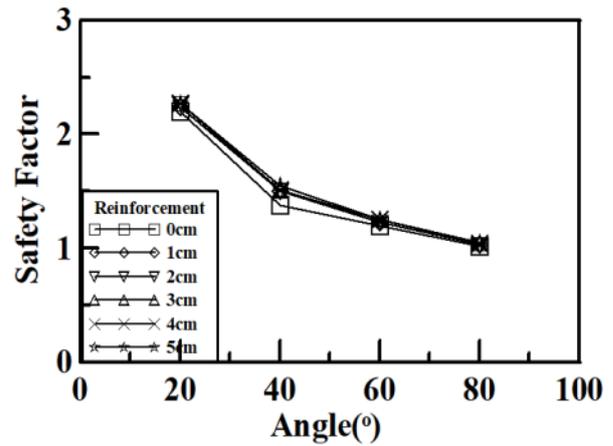
마지막으로 비탈면의 높이 15 m의 경우 해석결과 Fig. 10(c)와 같은 결과가 나왔으며, 초속경 복합매트를 보강하

지 않았을 때 안전율은 비탈면의 기울기 20°에서 2.06, 40°에서 1.23, 60°에서 1.01 으로 확인하였으며 80°의 경우 수렴오류로 인하여 확인이 불가하였다. 비탈면의 기울기 20°에서 40°로 증가할 때 40%, 40°에서 60°로 증가할 때 17% 안전율이 감소하였지만 초속경 복합매트의 적용 후 안전율을 분석해본 결과 비탈면의 기울기 20°일 때 1%의 안전율이 증가하였으며, 40°일 때 약 4%의 안전율이 증가하였다. 60°의 경우 성토고 10 m와 마찬가지로 안전율의 증가율이 2%미만으로 그 이상의 기울기의 경우에서도 보강효과는 다소 미비할 것으로 예상된다.

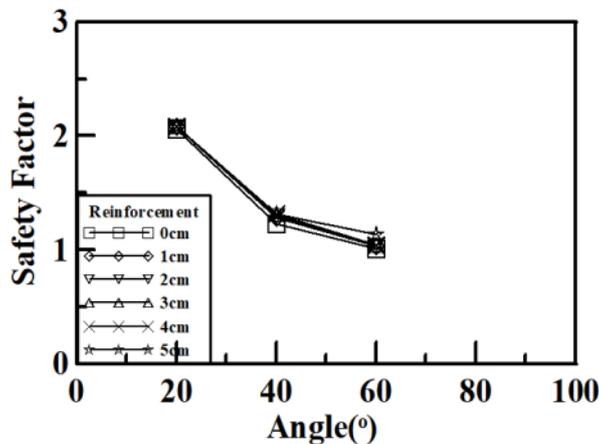
건기시 초속경 복합매트를 비탈면에 적용하지 않았을 때의 전단변형률은 상부에 집중되어 원호 파괴형상이 나타나고 있었으나 초속경 복합매트 적용시 안전율이 증가함에 따라 전단변형률이 작아지는 것으로 나타났으며 초속경 복합매트의 두께에 대한 안전율 증가가 미미한 만큼 전단변형률도 초속경 복합매트의 두께에 대한 영향은 크지



(a) Roadbed height 5m

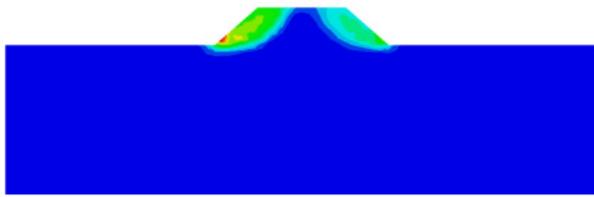


(b) Roadbed height 10m

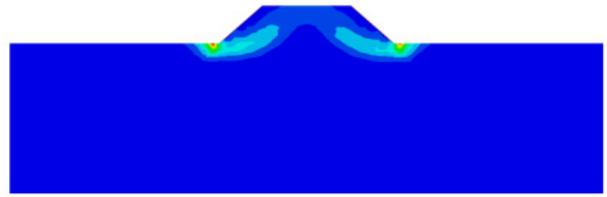


(c) Roadbed height 15m

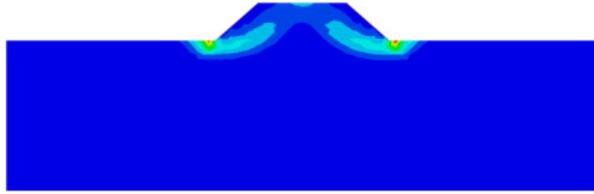
Fig. 10. Stability analysis according to the height of the slope during the dry season



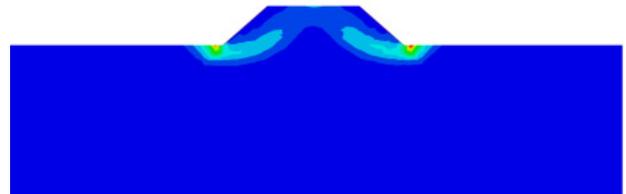
(a) 5m - 40° Unreinforced max shear strain



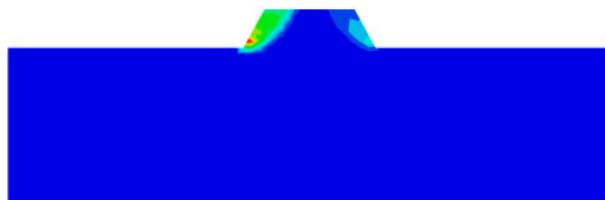
(b) 5m - 40° 1cm reinforcement max shear strain



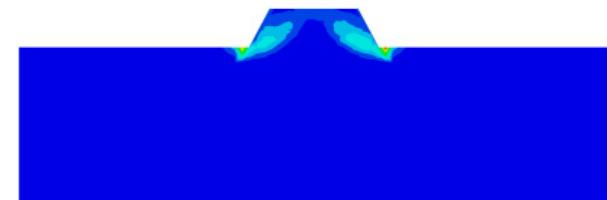
(c) 5m - 40° 3cm reinforcement max shear strain



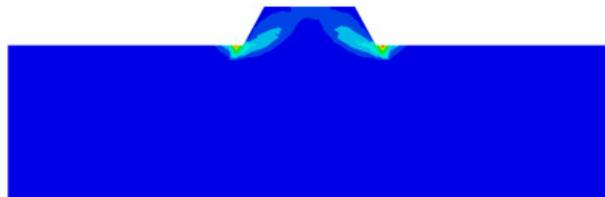
(d) 5m - 40° 5cm reinforcement max shear strain



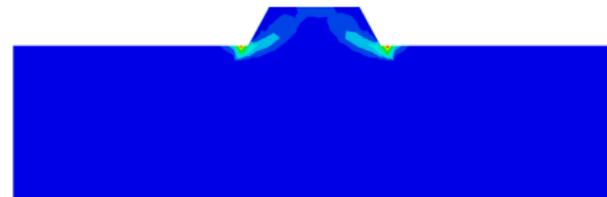
(c) 5m - 60° Unreinforced max shear strain



(c) 5m - 60° 1cm Unreinforced max shear strain



(c) 5m - 60° 3cm Unreinforced max shear strain



(c) 5m - 60° 5cm Unreinforced max shear strain

Fig. 11. Dry periods shear strain

않았다. Fig. 11은 건기시 초속경 복합매트의 적용 여부에 따른 전단변형률을 보여준다.

4.4.2 우기시

비탈면의 높이가 5m 일 때 보강 전·후에 대한 분석은 Fig. 12(a)와 같다. 초속경 복합매트 미보강시 비탈면의 기울기 20° 일 때 2.20, 40° 일 때 1.58, 60° 일 때 1.25, 80° 일 때 1.06 의 안전율을 확인하였다. 비탈면의 기울기가 20°에서 40°로 증가할 때 안전율이 가장 크게 감소하였으며 28% 감소되었다. 건기 시와 마찬가지로 모든 Case에서 유사한 경향이 나타났으며 비탈면의 기울기가 커질수록 감소율은 각각 20%, 15%로 비교적 감소율이 작아진 것을 확인되었다. 초속경 복합매트의 두께를 1cm 적용 후 안전율은 20°, 40°, 60°, 80° 일 때 각각 2.31, 1.81, 1.55, 1.30 으로 확인되었으며 비탈면의 기울기가 20°에서 40°로 증

가할 때 안전율이 약 22% 감소하였으며, 비탈면 무보강의 경우와 마찬가지로 비탈면의 기울기가 커질수록 감소율은 각각 14%, 16%로 작아지는 경향을 확인하였다. 초속경 복합매트 보강 전 후 비탈면의 안전율을 비교분석한 결과 비탈면의 기울기가 20° 일 때 안전율이 5% 정도 증가해 비교적 증가폭이 작았지만 기울기가 증가할수록 안전율의 증가폭은 최대 23%로 커진 것을 확인하였다. 초속경 복합매트의 두께변화에 따른 안전율을 비교분석한 결과 건기 시와 마찬가지로 대부분 두께가 커질수록 안전율이 증가하였지만 안전율 증가 폭이 상대적으로 미비한 것을 확인하였다.

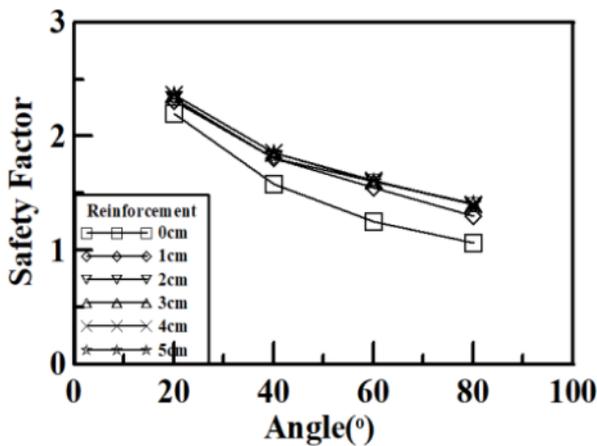
비탈면의 높이 10m의 경우 Fig. 12(b)와 같이 초속경 복합매트를 보강하지 않았을 때 비탈면의 기울기에 따라 2.19, 1.34, 1.05, 1.03의 안전율을 확인하였으며 안전율이 비탈면의 기울기가 20°에서 40°로 증가할 때 약 39%, 40°

에서 60°로 증가할 때 21%, 60°에서 80°로 증가할 때 약 2%의 안전율이 감소한 것으로 확인되었다. 평균적으로 20%의 안전율이 감소되었으며 이는 비탈면의 높이 5 m 일 때와 비슷한 수치이다. 초속경 복합매트 적용 후 비탈면의 기울기에 따라 각각 2.23, 1.45, 1.14, 1.03의 안전율을 확인하였으며 보강 전후에 대한 비교분석 결과 비탈면의 기울기가 20°일 때 약 2%, 40°일 때 약 8%, 60°일 때 약 9%의 안전율이 증가하였으나 80° 일 때 안전율의 증가는 없는 것으로 확인되었다. 이는 성토고 10 m의 기울기 80°의 경우에서는 보강효과가 미비할 것으로 예상된다.

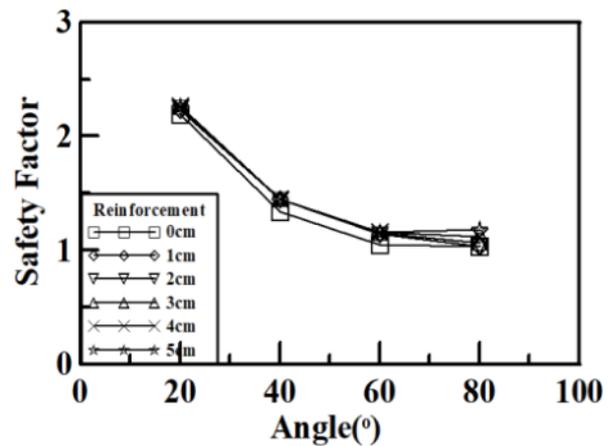
비탈면의 높이 15 m의 경우 Fig. 12(c)와 같이 초속경 복합매트 미보강 시 비탈면의 기울기 20°에서 2.11, 40°에서 1.28, 60°에서 1.01, 80° 일 때 1.00의 안전율을 확인하였다. 비탈면의 높이 15 m의 분석 결과 안전율이 비탈면의 기울기 20°에서 40°로 증가할 때 39%, 40°에서 60°로 증

가할 때 약 21%, 60°에서 80°로 증가할 때 약 1% 감소하였다. 또한 초속경 복합매트를 적용 후 안전율을 분석해본 결과 비탈면의 기울기 20°일 때 약 2%의 안전율이 증가하였으며, 40°일 때 약 4%의 안전율이 증가하였다. 60°의 경우 안전율이 약 1% 증가하였으며 80°의 경우도 약 1% 증가하였다. 이는 성토고 15 m의 기울기 60° 그 이상의 기울기의 경우 보강효과는 다소 미비할 것으로 예상된다.

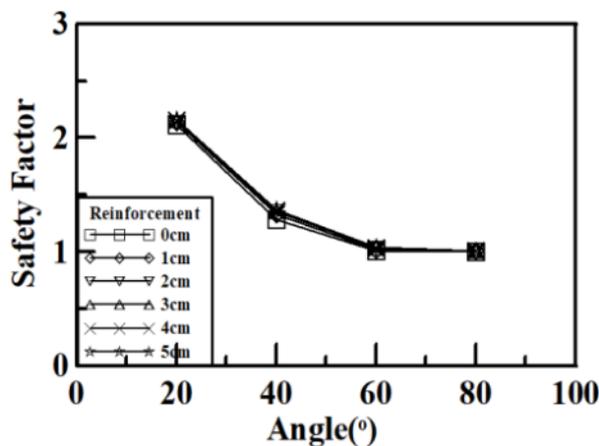
우기시에도 건기시와 같이 초속경 복합매트의 미보강 시 비탈면의 전단변형률은 상부에 집중되어 원호 파괴형상을 나타내고 있으나 초속경 복합매트 적용 시 안전율이 증가함에 따라 전단변형률이 작아지는 것으로 나타났으며 초속경 복합매트의 두께에 대한 안전율 증가폭이 크지 않은 만큼 전단변형률도 초속경 복합매트의 두께에 대한 영향은 크지 않았다. Fig. 13은 우기시 초속경 복합매트의 적용 여부에 따른 전단변형률은 보여준다.



(a) Roadbed height 5m



(b) Roadbed height 10m



(c) Roadbed height 15m

Fig. 12. Stability analysis according to the height of the slope during the dry season

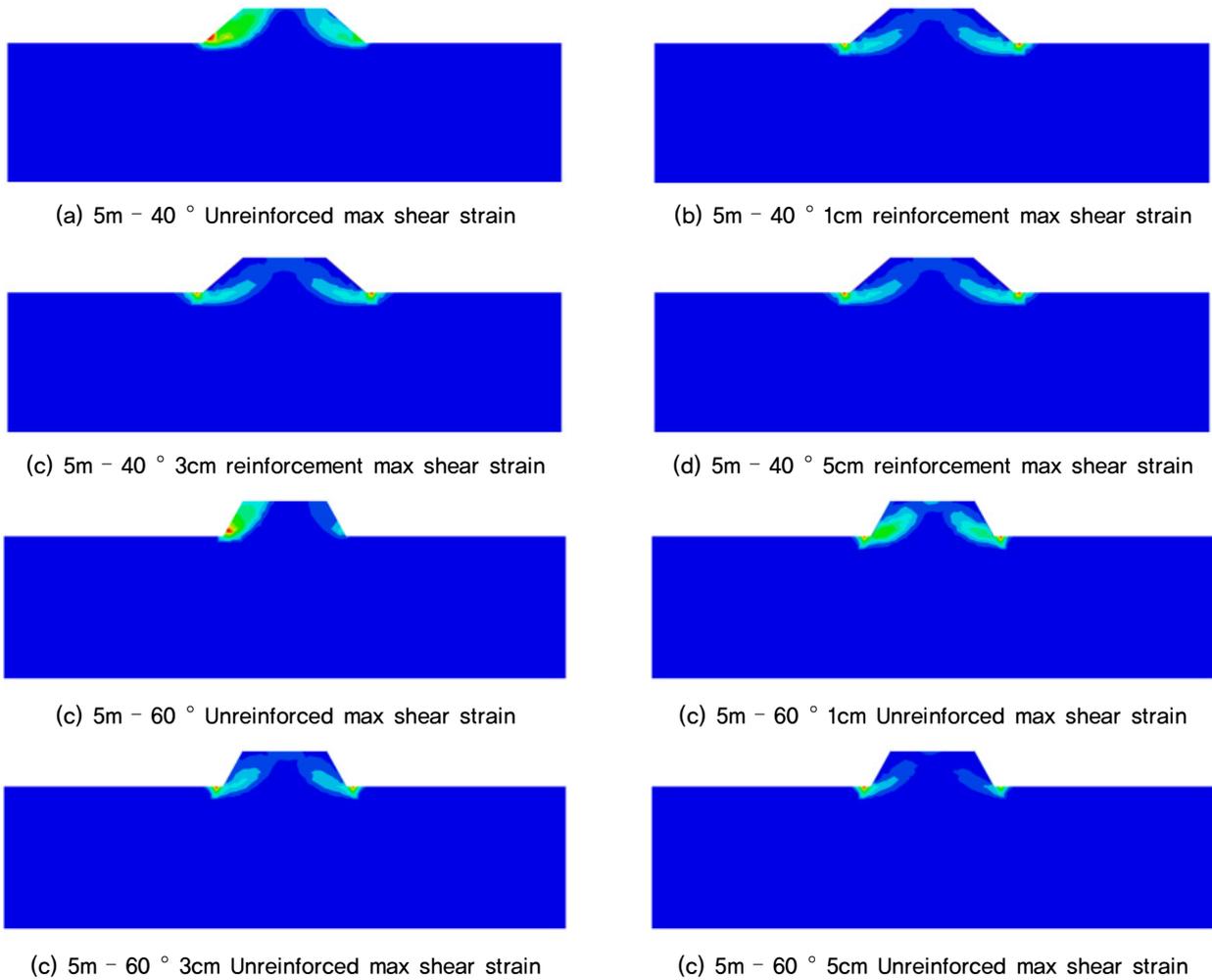


Fig. 13. Dry periods shear strain

5. 결론

본 연구에서는 초속경 복합매트를 철도비탈면에 적용하였을 때의 안전성 분석을 위해 비탈면의 높이와 비탈면의 기울기, 강우를 고려한 수치해석에 대한 내용을 다루었다. 수치해석 결과인 안전율, 전단변형률을 이용하여 초속경 복합매트를 철도비탈면에 적용하였을 때 안전성을 판단하였으며 내용을 요약 정리하면 다음과 같다.

(1) 건기시, 우기시 모두 초속경 복합매트를 적용하지 않았을 때 보다 초속경 복합매트를 적용하였을 때 안전율이 증가하는 것으로 확인하였다. 그러나 비탈면의 기울기가 60° 이상인 경우 안전율을 만족하지 못하는 경우가 있어 적용시 이를 감안한 대안이 필요할 것으로 보인다.

(2) 초속경 복합매트 미보강시 비탈면의 전단변형률이 상부에 집중되어 원호파괴형상이 나타났으나 초속경 복합매트 적용 시 전단변형률이 작아지는 것으로 나타났다. 이는 초속경 복합매트를 비탈면에 적용시 안전율 증가에 따른 결과로 판단되며 초속경 복합매트의 보강능력이 검증되었다고 판단된다.

(3) 초속경 복합매트의 두께에 대한 검토 결과 안전율의 증가는 미미한 것으로 검토되었으며 이는 비탈면에 초속경 복합매트 적용 시 파괴면이 전도활동으로 바뀌에 따라 두께에 대한 영향보다는 적용의 효과가 중요한 것으로 사료된다.

(4) 초속경 복합매트를 철도비탈면에 적용하였을 때의 안전성 해석은 수치해석을 통한 결과이므로 실제 실험을 통해 검증하는 과정이 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

This research was by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant 21TBIP-C161320-01).

References

1. Bae, S. W., Shin, C. G., Park, J. Y. and Jang, B. S. (2010), "The problems of shotcrete and revegetation methods according to slope direction", Korean Geotechnical Society, Proceedings of the 2010 Spring Conference of the Korea Geotechnical Association, pp.1309-1314.
2. Bang, I. H. (2007), "A study on the technology related to the control and rehabilitation of slope surface erosion", Master's Thesis, JeonBuk University.
3. Choi, C. Y., Lee, J. W., Shin, M. H. and Lee, S. Y. (2008), "Analysis on disasters pattern of the railroad caused by heavy rainfall (2002~2007)", Korean Society For Railway, Proceedings of the 2008 Fall Conference of the Korea Railroad Association, pp.88-92.
4. Hui Li, Huisu Chen, Xiangyu Li and Fangyuan Zhang (2019), "Design and construction application of concrete canvas for slope protection", Powder Technology, Vol.344, pp.937-946.
5. Kim, J. S. (2016), "An experimental study on protection performance improvement of concrete of military facilities using concrete canvas", Master's Thesis, HanYang University.
6. Kwak, S. L., Cho, Y. O. and Wang, J. B. (2004), "Risk assessment case study for the track worker safety", Korean Society For Railway, Proceedings of the 2004 Spring Conference of the Korea Railroad Association, pp.95-101.
7. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017), Railroad design standard roadbed.
8. Shin, M. H., Park Y. K., Lee, S. H., Kim, H. K. and Kim, K. T. (2000), "A study on the stability evaluation of railway embankment under rainfall", Korean Society For Railway, Proceedings of the 2000 Fall Conference of the Korea Railroad Association, pp.402-409.