

3D 프린팅 기술 기반 보강토 옹벽 순환토사 적용 뒤택움재의 성능 평가

Performance Assessment of 3D Printed Mechanically Stabilized Earth Retaining Wall Backfilled with Recycling Soil

김 재 환¹ Kim, Jae-Hwan

오 정 호² Oh, Jeongho

Abstract

In Korea, numerous large-scale infrastructure construction projects and housing site developments are being undertaken. However, due to limited land availability, sourcing high-quality backfill materials that meet the standards for railroad and road embankment compaction and mechanically stabilized earth (MSE) retaining wall construction poses significant challenges. Concurrently, there has been an increase in structural failures of many MSE retaining walls, attributed primarily to reduced bearing capacity and impaired drainage performance, resulting from inadequate backfill compaction. This study aimed to analyze the structural performance and safety of an MSE retaining wall using recycled soil as backfill. We conducted small-scale model tests utilizing 3D printing technology combined with two-dimensional numerical analysis. The study quantitatively evaluated the MSE retaining wall's performance concerning the recycled soil mixing ratio and reinforcement installation methods. Furthermore, the utility of 3D printing was confirmed through the production of an experimental wall designed to facilitate easy reinforcement attachment, mirroring the conditions of actual MSE retaining wall construction.

요 지

최근 국내는 다양한 대규모 사회기반 시설물 공사 및 택지 개발 등이 시행되고 있으나, 이에 반해 제한적인 국토 여건으로 철도 또는 도로 흙쌓기 비탈면 다짐 시공 또는 보강토 옹벽 뒤택움재 시공 시 기준에 부합하는 양질의 토사 공급이 어려운 실정이다. 특히, 다수의 보강토 옹벽은 부적절한 뒤택움재 다짐 시공으로 인한 지지력과 배수 성능 저하로 인한 구조물 피해사례 등이 증가하고 있다. 이에 본 연구에서는 뒤택움재로 순환토사를 활용하는 보강토 옹벽에 대하여 3D 프린팅 기술 기반 실내 모형실험 및 2차원 수치해석을 수행하여 구조적 성능 및 안전성을 분석하고자 하였다. 그 결과, 순환토사 배합비 및 보강재 설치 방법에 따른 뒤택움재 성능을 확인하였으며, 3D 프린팅 기술을 통해 실제 보강토 옹벽 시공과 유사하게 보강재 체결이 쉬운 형태의 실험상 벽체를 제작하여 3D 프린터의 활용성을 확인하였다.

Keywords : 3D printing, Mechanically stabilized earth retaining wall, Recycled soil

1 정회원, 한국교통대학교 철도인프라공학과 석사연구원 (Member, Researcher, Dept. of Railroad Infrastructure Eng., Korea National University of Transportation)
2 정회원, 한국교통대학교 철도인프라공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Railroad Infrastructure Eng., Korea National University of Transportation, Tel: +82-31-460-0566, j-oh@ut.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2024년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

보강토 옹벽은 기존의 옹벽 구조물에 비해 보강재와 뒤채움재간의 결속력을 활용하여 경제적이고 시공성이 우수한 공법으로 인식되고 있다. 그러나, 최근 국내 다양한 대규모 단지 공사 및 도로, 철도 공사 등의 개발 계획으로 양질의 토사 수급이 어려우며(Heo et al., 2016), 제한적인 국토 여건상 양질의 토사가 부족하여(Kim, 2007) 다수의 보강토 옹벽 구조물들이 부적절한 뒤채움 재료 및 보강재 적용, 다짐 시공 관리 미흡, 배수 체계 저하 등으로 인한 구조적 건전도가 문제가 되는 사례가 증가하고 있다(Lee et al., 2018).

한편, 최근 국제사회는 지구온난화로 인한 사막화, 폭우 등의 이상기후를 인류 생존에 가장 큰 위협 요소로 평가하고 있으며, 국내에서도 2020년 10월에 ‘2050년 탄소 중립 선언’을 통해 온실가스 순 배출량 저감 목표를 수립하여(Jeon, 2021), 탄소 배출량의 상당 부분을 차지하는 건설산업 분야에서 대표적인 탄소 저감 방안으로 건설폐기물의 재활용을 제기하였다.

국내 건설폐기물은 재활용을 위하여 중간처리장에서 순환골재와 순환토사로 선별 생산되는데, 최근 순환골재는 건설공사 사용 의무화 제도에 따라 재활용률이 향상되었으나, 순환토사는 일괄적인 생산공정이 아닌 업체별 공정의 차이로 인한 입경 및 이물질 함유량 등의 순환토사 품질 차이를 발생시켜 제한적인 성능 및 활용 용도로 인해 용처를 찾지 못하고 있다(Ministry of Environment, 2015). 이러한 이유로 환경적, 경제적인 문제점으로 지적되고 있으며, 순환토사의 적정 처리와 재활용 기술개발은 국가적인 기술개발 과제인 실정이다.

이와 관련하여 Kim et al.(2002)은 순환토사의 문제점으로 유기물질과 압축성이 큰 물질로 구성되어 장기침하 및 부등침하를 야기시켜 제한적인 목적으로 사용할 수밖에 없는 특성을 지적하였으며, 이러한 순환토사를 재활용하는 방안으로 순환토사 선별 기술의 개발이 필요하고 선별된 토사의 환경공학 및 지반공학 특성에 대한 규명의 필요성을 제시하였다.

이에 본 연구에서는 보강토 옹벽 뒤채움용 양질의 재료 수급 문제와 순환토사 처리 문제를 개선하는 방안으로, 3D 프린팅 기술을 접목한 보강토 벽체 설계 및 시공을 통해 실내 모형 실험체를 구성하고 뒤채움대로 순환토사와 순환골재를 혼합하여 사용한 보강토 옹벽에 대하여 보강토 옹벽의 구조적 성능 및 안전성을 분석하고

자 하였다.

이를 위해, 보강토 옹벽 구조적 성능 평가 주요 인자인 전면벽체의 수평변위와 토압 분포를 실험 및 수치해석 병행을 통해 보강토 옹벽의 성능 및 내적 안정성을 평가하였으며, 이를 바탕으로 보강토 옹벽 뒤채움재의 최적 순환토사 배합비를 제안하고자 한다.

2. 3D 프린팅 기반 실내모형실험 및 뒤채움재 성능 평가

2.1 보강재 및 뒤채움재 선정

보강토 옹벽 실내모형을 구축하고자 Jung(2004)의 기하학적 축소율 산정식을 바탕으로 1/7.5로 설정하였으며, 보강재의 인장강도에도 상사 법칙을 적용하였다. Yoo et al.(2005)에 의하면 일반적인 보강재의 인장강도는 50kN이며, 상사율을 적용한 값인 0.12kN 이상의 인장강도를 갖는 재료를 실내모형실험상 보강재로 사용하기 위해 Kim(2020)의 보강재별 인장강도 시험 결과를 참고하여 모기장을 보강재로 선정하였다.

실내모형실험에서 사용된 뒤채움재는 순환골재와 순환토사를 혼합하여 사용하는데, 순환골재는 선별장치를 통해 직접 선별한 순환골재(폐콘크리트 파쇄물)를 선정하였으며, 순환토사는 다짐 작업을 동반하는 반복적인 실험 특성을 고려하여 재사용이 용이하고 순환토사와 입경이 유사한 표준사로 대체하였다.

실험에서 선정된 순환골재의 물리적 성질과 뒤채움재료의 적합성을 판정하기 위하여 한국산업규격(KS F)에 따라 체분석 시험, 액·소성한계 시험, 유기이물질 함량 시험, 실내투수시험 등 골재 실내 시험을 항목별로 3회에 걸쳐 실시하였다. 체분석 시험 결과를 Fig. 1에 나타

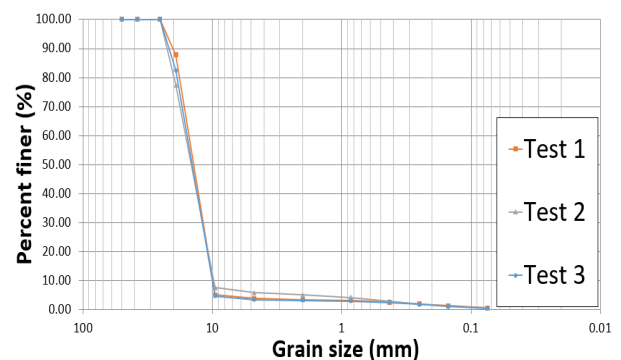


Fig. 1. Particle size distribution of the recycling aggregate

Table 1. Quality specification of backfill for MSE wall (KR C-06030, 2012)

Grain size (mm)	Percent finer (%)	Plastic index (%)
53	75 ~ 100	≤ 6
19	75 ~ 100	
4.75 (No.4)	20 ~ 100	
0.425 (No.40)	0 ~ 60	
0.075 (No.200)	0 ~ 15	

Table 2. Quality specification of recycling soil (Ministry of Land, Infrastructure, and Transportation, 2021)

Test type	Standard	Manual
Liquid limit (%)	≤ 25	KS F 2303
Plastic index (%)	≤ 6	KS F 2303
Impurities (%)	≤ 1	KS F 2576

내었으며, 유효입경(D10)은 10mm, 최대입경은 약 19mm로 분석되었고 통일분류법상 GP로 분류되었다.

이를 통해 Table 1과 같은 국내 보강토 옹벽 뒤채움재 입도 기준(KR C-06030)을 만족하였으며, 국내 기준과 유사한 미국의 FHWA(2001), NCMA(1997) 및 프랑스의 MOT(1980)에 의한 국외 뒤채움재 입도 기준에도 적합한 것을 확인하였다.

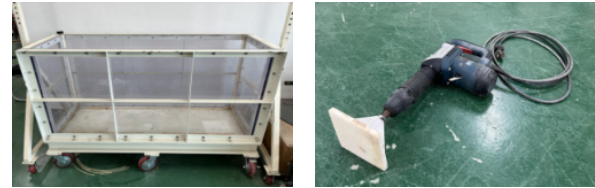
액·소성한계 시험 결과, 액성한계(Liquid limit)는 약 23%, 소성지수(Plastic index)는 NP로 나타났으며, 유기 이물질 함량 시험 결과, 이물질 함량 기준치인 1% 이하로 확인되어 모든 시험 항목에서 Table 2와 같은 순환토사 품질 기준(Ministry of Land, Infrastructure, 2021)을 만족하였다. 또한, 실내투수시험 결과, 투수계수가 최대 0.0196cm/sec로 나타나 토양 투수성 평가 기준의 상급에 해당하는 0.001cm/sec를 크게 초과하여 투수성이 양호한 것을 확인하였다.

2.2 모형 보강토 옹벽의 제원 및 조건

2.2.1 모형 토조 및 진동 다짐기 제원

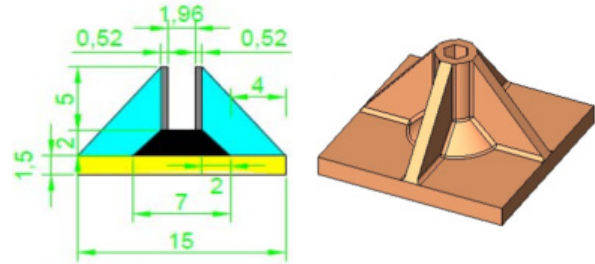
실험에서 사용된 모형 토조는 그림 Fig. 2(a)와 같이 규격은 1.5m×0.5m×0.75m(가로×세로×높이)로 높이가 3m, 길이 3.8m에 1/7.5 상사율을 적용한 모형 보강토 옹벽을 설치하기에 적합하다. Fig. 2(b)는 모형 보강토 옹벽 시공 과정에서 뒤채움재 포설 후 일정한 다짐도를 조성하기 위한 진동 다짐기이다.

진동 다짐기는 뒤채움재로 다짐에 사용될 진동 콤팩터를 대체할 장비로 파괴해머드릴을 개량하여 사용하



(a) Model chamber (b) Compactor

Fig. 2. Model chamber and compactor



(a) 2D design (b) 3D design

Fig. 3. Designs of compactor board

였으며(Kwon, 2016), 진동 다짐기의 다짐판은 ABS 플라스틱 재질로 3D 제작되었다. Fig. 3은 다짐판의 2D 및 3D 제작 도면과 규격을 보여주고 있다.

2.2.2 3D 프린팅 기반 모형블록 제작

모형 보강토 옹벽 구성 요소 중 전면 벽체는 3D 프린터를 사용하여 제작하였는데, 시공 시 실제 보강재 체결 형태와 유사한 형태로 제작하고자 하였다. 3D 프린터는 Fig. 4(a)와 같은 Makerbot사의 Replicator Z18 모델이며, 이는 기존의 깎아내는 방식을 통해 조형물을 제작하는 절삭가공 방식의 CNC(Computerized Numerical Control, 컴퓨터 수치제어기술)가 아닌 최소 0.1mm 높이로 조형물을 층층히 쌓아 올리는 적층 가공 방식을 사용하기에 복잡하고 난해한 형상 제품의 정밀 제작이 가능하며(No, 2017), 별도의 성형 장비가 필요하지 않아 비교적



(a) Replicator Z18 (b) 3D printed walls

Fig. 4. 3D printer and examples of 3D printed walls

시간 및 공간의 제약이 적은 이점이 있다.

출력물에 사용된 재료는 강관 및 연결재 재질과 유사한 연성재료로 일반적으로 사용되는 Filament에 비해 강도가 4배 이상 우수한 Tough PLA Filament를 사용하였으며(Paeng, 2022), 이를 통해 일반적인 블록식 보강토 옹벽에 사용되는 블록에 상사율을 적용하여 Fig. 4(b)와 같이 500mm(L)×26.6mm(B)×26.6mm(H) 크기의 블록 내부에 다수의 체결용 핀들이 솟아있는 모형 블록 형태로 제작하였다.

2.3 모형실험 방법 및 조건

2.3.1 실험방법 및 내용

실내모형실험을 통해 보강토 옹벽 뒤채움재의 배합비(표준사:순환골재)를 달리함에 따른 전면 벽체의 수평변위를 검토 하였다. 시공과정은 실제 보강토 옹벽 시공 과정을 모사하여 모형 블록을 보강재가 체결되는 층까지 축조하고 뒤채움재를 포설 및 다짐한 후 보강재를 체결하고 다시 보강재의 연직 설치간격에 해당하는 높이까지 블록을 추가로 축조하는 일련의 과정을 반복적으로 실시하였다. 옹벽 시공이 완료되면 수평변위 계측기(LVDT)를 전면 벽체의 중단(0.6H) 및 상단(0.9H)에 각각 1개씩 설치하였다. Fig. 5는 실험 방법을 요약한 개요도를 정면도와 측면도로 구분하여 보여주고 있다.

최대 상재하중은 열차하중으로 설정하여 보강토 옹벽의 철도 구조물을 가정하였으며, Kim et al.(2007)의 열차하중을 참고하였다. 실험 시 상재하중은 50kPa에

옹벽 배면의 실제 면적(3.8m×3m)을 고려하여 570kN의 하중을 구하고 아래의 하중 및 응력에 대한 축소율 식 (1), (2)로 산정한 하중 축소비 0.0024를 적용하여 목표 상재하중을 140kg으로 설정하였다. 상재하중은 전면 벽체로부터 0.2H(80mm) 이격하여 원판 형태의 무게추로 모사하였다.

$$\frac{F_m}{F_p} = \frac{M_m L_m T_m^{-2}}{M_p L_p T_p^{-2}} = \left(\frac{M_m}{M_p}\right) \left(\frac{L_m}{L_p}\right) \left(\frac{T_p}{T_m}\right)^2 \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_p} = \frac{M_m L_m^{-1} T_m^{-2}}{M_p L_p^{-1} T_p^{-2}} = \left(\frac{M_m}{M_p}\right) \left(\frac{L_p}{L_m}\right) \left(\frac{T_p}{T_m}\right)^2 \quad (2)$$

여기서, F는 하중, M은 질량, L은 길이, T는 시간, σ 는 응력, 첨자 m은 model, 첨자 p는 prototype이다. 본 실험에서의 수평변위 허용 기준은 옹벽 시공 완료 후 계측기를 설치하는 점, 신장성 보강재인 모기장을 사용하는 점을 고려하여 시공 중 발생 변위를 포함하지 않고 시공 완료 후 잔류 변형만을 보는 FHWA(2001)의 수평변위 허용 기준을 적용하여 0.0167H(H=400mm)인 6.68mm를 최대 허용수평변위로 설정하였다. 실험은 목표한 상재하중까지 단계적으로 하중을 재하함에 따라 발생하는 전면 벽체 수평변위를 계측하였고 수평변위 허용 기준을 초과한 후 변위가 충분히 수렴된 후에 계측을 종료하였다.

2.3.2 실험 조건 설정

Table 3은 실험상 설정한 조건을 요약하여 보여주는데, 실험 조건 중 뒤채움재 조건은 표준사:순환골재인 배합비(무계비)를 10:0/9:1/7:3/5:5로 4종류로 구분하고 뒤채움 영역을 다짐 정도에 따라 느슨한 지반과 조밀한 지반 두 경우로 나누어 모사하였고 각각의 다짐도를 85%, 95%로 설정하였다.

Table 4는 배합비별 뒤채움재의 최대 포설량을 보여주는데, 배합비별로 구분한 뒤채움재를 각각 실내 다짐 시험을 실시하여 최대 건조밀도를 구한 후 상대다짐도

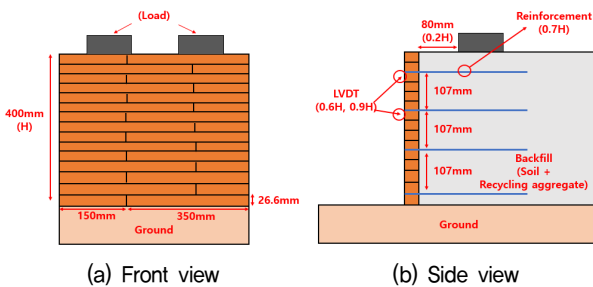


Fig. 5. A scheme of model MSE retaining wall

Table 3. Model test conditions

Cases										
Mixing ratio (Soil : Aggregate)				Relative compaction		Reinforcement vertical spacing			Reinforcement fastening	
10:0	9:1	7:3	5:5	85% (Loose)	95% (Dense)	108mm	54mm	27mm	with pin	w/o pin

Table 4. Mixture ration for backfill material

Relative compaction	Mixture ration for backfill material (Soil : Aggregate)		
	9:1	7:3	5:5
85%	113kg	127kg	136kg
95%	126kg	142kg	152kg

공식을 이용하여 배합비 및 다짐도 조건에 따른 각기 뒤채움재의 포설량을 결정하였다. 이후 포설량을 정량씩 소분하여 모형 블록 1단 설치 시 마다 포설하였으며, Fig. 2의 진동 다짐기를 통한 다짐 및 평탄화 작업을 실시하여 95% 다짐도 조건을 충족하였다. 반면, 85% 다짐도 조건은 뒤채움재가 모형 블록 높이를 초과하지 않고 포설되어 다짐이 불필요한 것으로 판단되어 평탄화 작업만을 실시하였다.

추가적으로 95% 다짐도 및 배합비 5:5 조건에서는 보강재 연직 설치간격을 달리하여 보강재 성능 증대에 따른 거동을 분석하고자 보강재 연직 설치간격(S_v)을 국내 기준 최대 0.8m(모형블록 4층 간격 : 약 108mm)로 제한하는 점을 고려하여 기본 간격은 108mm로 설정하였으며, 기본 간격으로부터 층 간격을 1/2씩 감소시켜 54mm, 27mm로 총 세 경우로 나누어 설정하였다. 또한, 3D 프린팅 기술을 활용하여 보강재 체결 방법을 달리함에 따른 벽체 거동에 대해 검토하였다.

2.4 모형실험 결과분석 및 뒤채움재 성능 평가

뒤채움재의 순환토사 배합비별 전면 벽체 수평변위를 다짐도에 따라 분석하였다. 그래프에 수평변위 허용 기준을 표시하였으며, 실험 조건인 배합비(표준사:순환골재), 다짐도, 계측기 설치 높이를 순서대로 표시하였고 H는 전면 벽체의 전체 높이를 의미한다.

2.4.1 뒤채움재의 배합비에 따른 분석

(1) 85% 다짐도 (85% R.C)

85% 다짐도의 경우는 모든 배합비에 대하여 실내 모형실험을 실시하였으며, 전면벽체 수평변위 허용 기준인 6.68mm를 초과할 때까지 계측하였다. 이에 따른 배합비별 수평변위 결과가 Fig. 6과 같다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 하중을 단계적으로 재하함에 따라 전면벽체의 수평변위가 일정하게 증가하였으며, 배합비별 최대 상재하중 및 배합비 증가에 따른 하

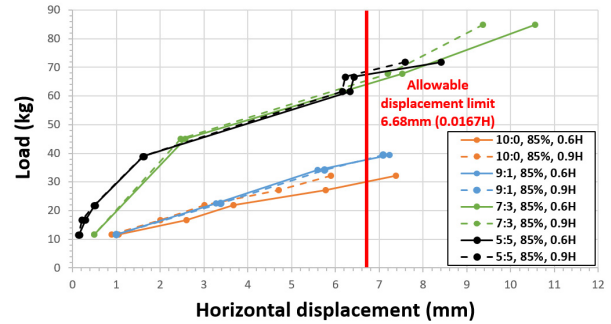


Fig. 6. Horizontal displacement of MSE retaining wall (85% R.C)

Table 5. Maximum allowable load (85% R.C)

Mixing ratio	Maximum load	Increase rate of load bearing effect
10:0	30kg	-
9:1	38kg	21%
7:3	64kg	41%
5:5	68kg	6%

중지지 효과 증가율을 정리하여 Table 5에 나타내었다.

Table 5의 결과 요인은 순환골재의 양이 증가할수록 뒤채움재의 조립토 함유량이 높아지게 되는데, 이에 따라 뒤채움재의 성능 및 보강재간의 결속력이 증대되어 하중지지 효과가 크게 나타난 것으로 판단된다.

다만, 실험 조건상 성능이 가장 우수할 것으로 예상되는 배합비 5:5의 경우에서도 최대 상재하중이 68kg으로 목표한 상재하중 140kg에 비하여 현저히 낮은 하중이 재하 되었을 때 실험을 종료하였다. 또한, 배합비 7:3에 비하여 하중지지 효과 증가율이 미소한 것을 알 수 있다.

이에 뒤채움재를 85% 다짐도로 설정하는 조건은 느슨한 지반을 모사하였기에 보강도 옹벽 뒤채움재 설계 기준(95% 다짐도)을 고려하여 볼 때 다짐 관리가 매우 불량한 것으로 판단 된다.

(2) 95% 다짐도 (95% R.C)

95% 다짐도의 경우는 표준사의 물리적 특성상 다짐이 용이하지 않아 배합비(표준사:순환골재) 10:0의 조건을 제외하여 실험을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7에서도 상기 85% 다짐도 결과와 동일하게 하중을 단계적으로 재하함에 따라 전면 벽체의 수평변위가 일정하게 증가하였다. 실험 종료 시 최대 상재하중은 배합비 9:1의 경우에서 약 120kg으로 나타난 반면, 배합비

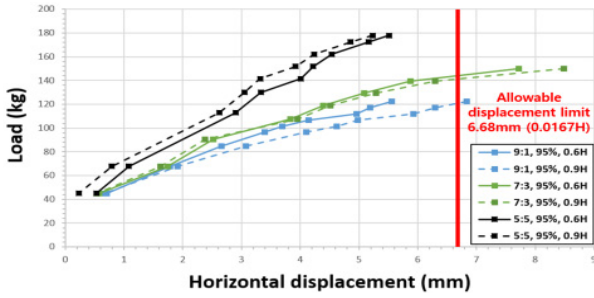


Fig. 7. Horizontal displacement of MSE retaining wall (95% R.C)

Table 6. Maximum allowable load (95% R.C)

Mixing ratio	Maximum load	Increase rate of load bearing effect
9:1	120kg	—
7:3	140kg	14%
5:5	180kg (Maximum displacement : 5.5mm)	≥ 30%

7:3의 경우에서 최대 상재하중이 약 140kg으로 나타나 실험 조건상 목표한 최대 상재하중에 상회하는 결과를 보였다. 또한, 배합비 5:5의 경우에서는 약 180kg의 하중이 재하되었음에도 전면 벽체의 최대 수평변위가 약 5.5mm로 수평변위 허용기준(6.68mm)을 만족하였다. Table 6은 배합비별 최대 상재하중 및 배합비 증가에 따른 하중지지 효과 증가율을 정리하여 보여주고 있다.

Table 5와 달리 95% 다짐도의 경우에서는 배합비별 최대 상재하중이 크게 증가할 뿐만 아니라 7:3 배합비에서 5:5 배합비로 변화할 때 약 30% 이상의 높은 증가율이 예상되며, 높은 다짐도로 인해 뒤채움재와 보강재 사이의 결속력이 크게 발휘됨에 따른 결과로 보인다.

이에 실내모형실험 결과를 종합하여 볼 때 95% 다짐도 및 5:5 배합비의 조건이 최대 성능을 발휘하는 뒤채움재 배합설계로 판단되며, 실제 설계 시 배합비 증가에 따른 유효한 효과를 발휘하기 위해서는 양호한 다짐관리가 필수적일 것으로 사료된다.

2.4.2 보강재 연직 설치 간격에 따른 분석

Fig. 8은 보강재 연직 설치 간격(S_v)에 따른 실험 결과를 보여주는데, 실험은 95% 다짐도 및 5:5 배합비 조건에서 진행되었다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 보강재 연직 설치 간격 108mm(0.8m)의 경우에 비하여 설치 간격 54mm(0.4m)와 27mm(0.2m) 각각에서 최대 약 35%, 53%의 수평변위 저감 효과를 보였다.

이는 보강재의 연직 설치 간격이 줄어들어 따라 보강

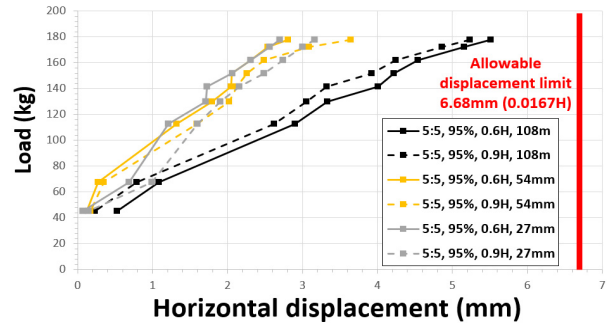


Fig. 8. Horizontal displacement of MSE retaining wall for S_v

재의 개수 증가로 인한 성능 증대로 볼 수 있다. 또한, 설치간격 108mm의 경우는 최대 수평변위가 전면 벽체 높이(H)에 대하여 0.6H에서 나타난 반면, 설치간격 54mm와 27mm의 경우는 최대 수평변위가 0.9H에서 나타났다.

이를 통해 Ju et al.(2011)의 보강토 옹벽 배부름에 관한 실험적 연구에서 보강재의 강성이 증가함에 따라 최대 수평변위의 발생지점이 벽체 상부로 이동하는 특성의 연구 결과와 유사함을 확인하였다.

2.4.3 보강재 체결 방법에 따른 분석

보강재 체결 방법에 따른 실험은 보강재의 형상을 변형시켜 체결 시 모형 블록의 핀을 사용하지 않은 경우에 대하여 실시하였으며, 별도의 다짐 없이 배합비별로 총 네 경우에 대하여 진행하였다. 실험 종료 후 전경을 나타낸 Fig. 9에서 보는 바와 같이 모든 경우에서 전면 벽체 축조 과정 중 전도에 의한 파괴가 발생하였다. 배합비가 증가함에 따라 축조 가능한 층수가 늘어나는 등의

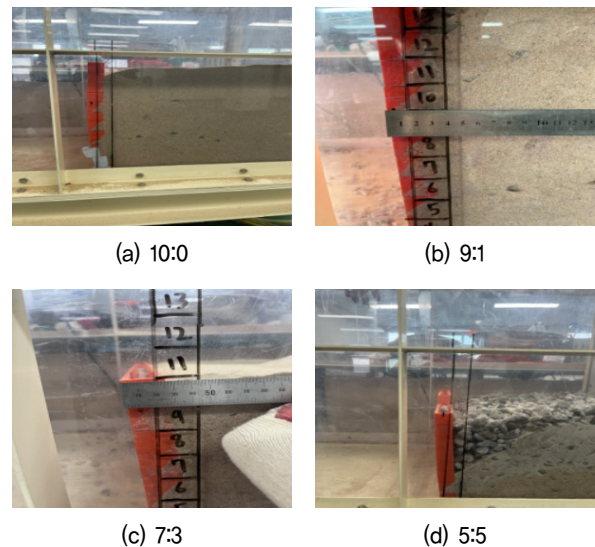


Fig. 9. MSE retaining wall behavior without pin

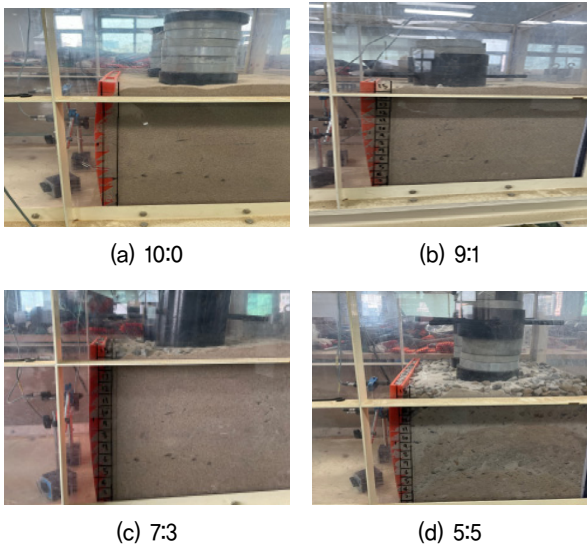


Fig. 10. MSE retaining wall behavior with pin

일관성은 보이지 않았으나, 배부름 현상이 나타나는 0.6H에서 발생한 전면 벽체 수평변위가 일정하게 증가하는 경향이 나타났다. 이는 보강재가 전면 벽체에 견고하게 체결되지 않은 상태에서는 뒤채움재의 단위중량이 증가할수록 벽체에 작용하는 주동토압이 커져 보강재의 인발저항력이 저하되어 나타난 결과로 보인다.

반면, Fig. 10은 85% 다짐도 조건에서 순환토사 배합비별 실험 종료 전경을 보여주는데, 옹벽의 전체 높이까지 벽체를 축조할 수 있었으며, 실험 종료 시 높은 하중이 재하 되었음에도 벽체 허용 수평변위를 초과하는 정도의 배부름 현상이 나타나는 것 이외에는 전도 등에 의한 파괴가 발생하지 않은 것을 알 수 있다.

이를 통해 본 실내모형실험에서의 3D 프린팅 기술의 활용성 및 모형 블록의 체결 용이성을 확인하였으며, 실제 보강토 옹벽 설계 시 보강재를 전면 벽체에 견고히 체결하는 것이 필수적임을 확인하였다.

3. 수치해석 및 내적 안정성 평가

3.1 수치해석적 내적 안정성 평가 방법(FEM)

보강토 옹벽의 내적 안정성 평가 방법에는 보강재의 인장신율에 따라 Tie Back Wedge 방법(TWM)과 Coherent Gravity 방법(CGM)으로 구분되는 이론적 방법이 존재하는데, 이러한 이론적인 방법은 대부분 뒤채움재와 보강재의 변위 및 변형을 무시한 한계평형이론에 근거하기에 실제 변형을 고려한 현실적인 검토가 필요하다.

이와 관련하여 Drusa et al.(2016)과 Yoo et al.(2008)은 보강토 옹벽의 내적안정 설계 시 기존의 복잡한 설계 및 평가 방법을 대체하여 간단하고 합리적인 수치해석적 방법(FEM)을 제시하기 위해 PLAXIS 2D 프로그램을 이용한 수치해석적 방법(FEM)과 이론적 방법(TWM, CGM) 각각의 결과를 비교·분석하여 평가 방법별 상관관계를 확인하고 수치해석적 방법(FEM)의 효율성을 제시하였다.

이를 바탕으로 본 장에서는 뒤채움재로 순환토사를 활용한 보강토 옹벽에 대하여 PLAXIS 2D 프로그램을 활용하여 2차원 수치해석을 실시하여 앞서 수행한 실내 모형실험 결과를 검증하고 내적 안정성을 평가하고자 한다. 또한, 실험과 동일한 조건에서의 내적 안정성을 평가하기 위해 이론적 평가는 본 연구에서 사용된 보강재의 인장신율이 큰 점을 고려하여 신장성 보강재의 이론적 평가 방법인 TWM을 채택하였다.

3.2 모델링 및 지반 물성치 도출

수치해석 모델링은 Fig. 11과 같으며, 실험상 보강토 옹벽 구성과 일치하나, 상사법칙을 적용하지 않은 실제 규격으로 설계하였다. 전면 벽체 높이(H)는 3m, 보강재의 길이(0.7H)는 2.1m, 연직 설치간격(S_v)은 0.8m로 설정하여 원지반에서 0.2m부터 2.6m 높이까지 설계하였으며, 하중 재하 위치는 전면 벽체로부터 0.2H 이격하였다. 뒤채움 영역의 배면 길이는 경계면의 영향을 배제하기 위하여 모형실험보다 3m 연장하였다.

지반은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하고 지층은 일괄적으로 뒤채움 영역과 원지반으로 구분하였다. 지하수위는 순환토사 뒤채움재의 높은 투수 특성을 고려하여 배제하였으며, 보강재는 Geogrid를 사용하고 전면 벽체

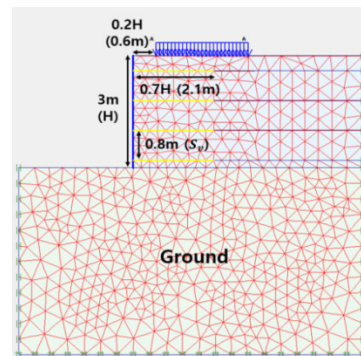


Fig. 11. Numerical analysis modeling

는 Plate를 사용하여 모델링 하였으며, 좌우연직면 수평 변위와 저면 연직변위를 구속하기 위하여 경계조건을 설정하였다.

수치해석상 시공 과정은 모형실험 및 실제 시공 조건을 재현하도록 단계별로 설정하였다. 순서대로 원지반 (Ground)을 조성하고 전면 벽체를 축조한 후 뒤채움재를 포설하고 보강재를 설치하는 일련의 과정을 옹벽 전체 높이 3m에 도달할 때까지 반복하였으며, 옹벽 축조가 완료되면 하중을 재하 하였다.

수치해석 요소 중 전면 벽체(Plate) 및 보강재(Geogrid) 물성치는 Lee(2015)의 연구를 참고하여 일반적인 지오그리드를 보강재로 사용하는 보강토 옹벽의 물성치(Table 7)를 적용하였다. 지반 물성치는 실내 모형실험에서의 뒤채움재 조건별 전면 벽체 수평변위 결과를 바탕으로 역해석 기법을 이용하여 도출하였는데, 각 지반 물성치들의 초기값은 PLAXIS 2D/3D 프로그램을 통해 보강토 옹벽의 거동을 분석한 다양한 연구(Jung, 2017; Lee, 2015; Choi, 2019; Christine Patinga Langcuyan, 2021; Won et al., 2020)에서 적용된 지반 물성치를 참고하였다.

역해석 방법으로는 실내 모형실험 종료 시의 상재하중을 실제 하중(열차하중)으로 환산하여 수치해석상 분포하중으로 입력하고 이때 발생하는 전면 벽체 수평변위가 약 6.68mm에 근접하여 발생할 때까지 지반 물성치를 다양하게 변화시키며 수치해석을 반복 수행하였다. 이를 통해 도출한 지반 물성치가 Table 8과 같다.

3.3 수치해석 결과분석 및 내적 안정성 평가

3.3.1 벽체 거동에 따른 파괴면 형상

뒤채움재 성능에 상응하는 파괴면 형상이 나타나는지 확인하여 모형 실험을 바탕으로 설계한 모델링이 수치해석상 적합한지 검증하고자 하였다. 이에 가장 연약한 지반과 조밀한 지반을 85% R.C 및 배합비 10:0의 경우와 95% R.C 및 배합비 5:5의 경우로 나누어 각각의 파괴면 형상을 확인하고자 하였다. 설계된 모델링에서 벽체의 변위는 우측에서 좌측으로 발생하는데, 이때 벽체 배면은 주동 파괴면이 형성된다. 이에 허용 수평변위 (0.0167H)에 대하여 발생한 주동파괴면 형상을 검토하였으며, 해석 결과를 Fig. 12와 같이 변형률증분(Incremental strains)으로 나타내었다.

Fig. 12에서 벽체 배면의 주동파괴면은 벽체의 변위가 상부에서부터 시작하므로 벽체 변위가 증가함에 따라 상부에서부터 파괴면이 발생하여 하부로 진행되는 진행성 파괴의 형태를 보였다. 또한, 보강 효과가 저하되는 보강재가 끝나는 지점에서 파괴면 형상이 기존의 연구 결과(Yoon et al., 2023)와 유사한 것을 확인하였다.

또한, Fig. 12에서 (a)와 (b)의 파괴면 형상을 비교할 때, 뒤채움재 성능이 저조한 (a)의 파괴면이 (b)에 비하여 더욱 하부로 진행된 것으로 보아 조밀한 지반을 모사한 (b)의 지반 정수가 올바르게 적용되었으며, 벽체 근입부의 지지력이 확보된 것을 알 수 있다. 다만, (a)에 비하여 조밀한 지반을 모사한 (b)에서 발생한 변형률증분이 대체적으로 크며, 보강토체 상부의 최대 변형률증

Table 7. Properties of wall and geogrid for numerical analysis

Element	Model type	EA (kN/m)	EI (kN · m ² /m)	v	d (m)	w (kN/m/m)
Plate	Elastic	540,000	36,450	0.35	0.90	2.12
Geogrid	Elastic	52,500	-	-	-	-

Table 8. Properties of soil

Element	Back fill (Mohr-coulomb)						
	Mixing ratio						
	85% Relative Compaction				95% Relative Compaction		
	10:0	9:1	7:3	5:5	9:1	7:3	5:5
γ (kN/m ³)	13.50	14.10	15.84	16.96	15.75	17.71	18.95
E (kPa)	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000
c (kPa)	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86
Φ (deg)	26	27	28	29	32	34	36
v	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26
Load (kPa)	10.71	12.86	23.21	24.29	45.86	50	64.23

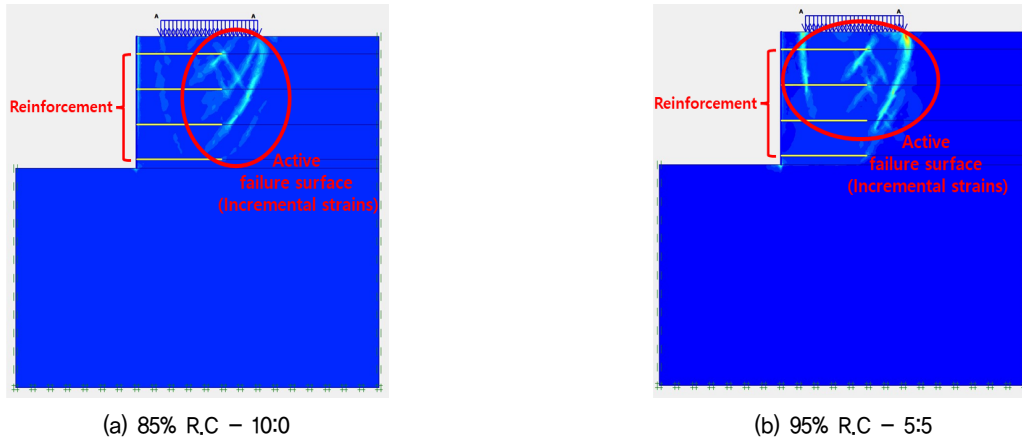


Fig. 12. Comparison of incremental strains

분은 2배 이상 크게 발생하여 파괴면이 뚜렷하게 나타났는데, 이는 동일한 상재하중이 작용함을 가정할 때 (a)의 벽체 수평 변위가 더욱 크게 발생하여 수평토압이 급격히 감소하고 극한상태에 도달하는 변위-토압 관계에 기인한 것을 알 수 있다.

3.3.2 보강재 최대 유발 인장력(T_{max}) 분석

수치해석적 방법(FEM)과 이론적 방법(TWM) 각각의 방법별로 보강재의 인발파괴에 대한 안정성을 평가하기 위해 Fig. 13과 같은 보강토체 내부의 가상파괴면(Hypothetical failure surface)과 보강재가 겹치는 지점에서 발생하는 보강재의 최대 유발 인장력(T_{max})을 분석하였다.

보강재 높이에 따라 분석한 최대 유발 인장력을 순환토사 배합비 및 평가 방법별로 종합한 후 다짐도 조건에 따라 구분하여 Fig. 14, 15에 나타내었다. Fig. 14, 15에서 보는 바와 같이 FEM과 달리 TWM에 의한 최대 유발 인장력 결과는 선형으로 나타났으며, 옹벽 높이 1m 지점 이하의 하단부에서 최대 유발 인장력이 큰 차이를 보여 Drusa et al.(2016)의 연구 결과와 유사하다.

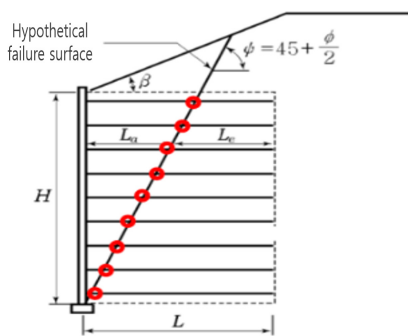


Fig. 13. T_{max} point

Drusa et al.(2016)은 옹벽 배면 하단부의 뒤채움재를 양질의 재료로 바꾸거나, 벽면부가 말뚝으로 지지되어 있을 시 결과의 차이가 더욱 클 것이며, 보강재의 강성이 커질수록 벽체의 변형과 보강재 위치별 유발 인장력이 작게 나타남을 제기하였는데, 상기 Fig. 14, 15의 결과를 종합하여 볼 때 뒤채움재의 순환토사 배합비가 커질수록 최대 유발 인장력이 작게 나타나는 본 수치해석 결과와 일치하였다.

이는 뒤채움재와 보강재 사이의 마찰효과를 증대시킬 수 있는 조립토의 비율이 커짐에 따른 영향으로 판단되며, 보강효과 증대로 인한 보강토체의 성능 증대로 볼 수 있다.

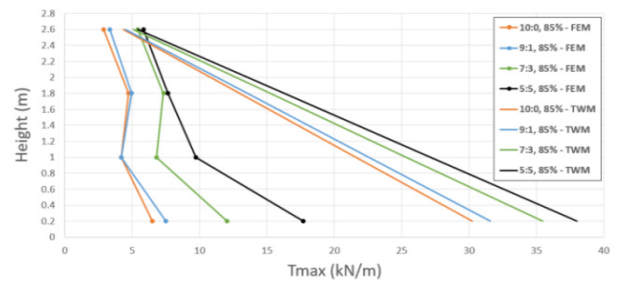


Fig. 14. T_{max} (85% R.C)

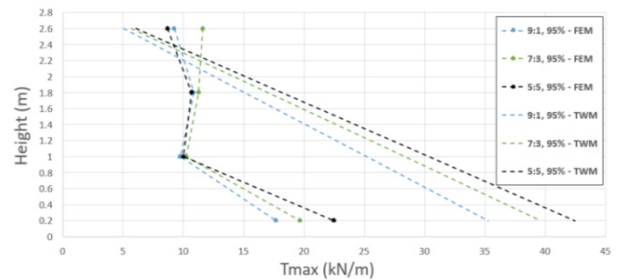


Fig. 15. T_{max} (95% R.C)

다만, 다짐도 95% 조건의 최대 유발 인장력이 전체적으로 더욱 크게 나타났는데, 이는 수치해석상 95% 다짐도 조건에서 85% 조건에 비하여 2배 이상 큰 하중이 재하되어 나타난 결과로 판단된다.

3.3.3 내적 안정성 평가

보강토 옹벽의 내적 안정성 평가는 보강재에 작용하는 최대 유발 인장력을 저항영역내에 근입된 보강재와 흙 사이의 마찰저항력이 견디는지에 대한 검토를 통해 이루어진다. 마찰저항력은 아래 식 (3)과 같은 보강재의 인발파괴에 대한 안전율 공식을 이용하여 산정할 수 있다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012).

$$FS = \frac{2 \times R_c \times L_e \times \sigma_v \times F^o}{T_{max}} \geq 1.5 \quad (3)$$

여기서, R_c 는 보강재 적용면적비(= b/S_h), b 는 보강재의 폭(평면형인 경우 : 1.0m), S_h 는 보강재의 수평간격(평면형인 경우 : 1.0m), L_e 는 저항영역내의 보강재 길이, σ_v 는 보강재에 작용하는 수직응력(활하중은 무시), F^o 는 보강재-흙 사이의 인발마찰계수(= $0.67 \tan \phi$)이다.

식 (3)을 통해 산정한 각 보강재의 마찰저항력과 상기 도출한 최대 유발 인장력을 이용하여 평가방법에 따른 보강재 높이별 안전율을 구하였으며, 뒤채움재의 순환

토사 배합비별로 설계 안전율 1.5 이상을 만족하는지에 대한 내적 안정성 평가 결과가 아래와 같다.

(1) 수치해석적 방법(FEM)에 의한 내적 안정성 평가

Table 9에서 알 수 있듯이 다짐도 조건과 무관하게 보강재 설치층 전체에서 순환토사 배합비가 증가할수록 안전율이 증가하는 것을 확인하였다. 다만, 최상단 보강재의 안전율이 설계 안전율 1.5를 만족하지 못하였다. 이는 지표면에 작용하는 상재하중이 전면벽체의 변형보다 보강토체의 침하에 더욱 큰 영향을 미친 것으로 보인다.

또한, 85% 다짐도 조건에 비하여 95% 조건에서 최상단 보강재와 최하단 보강재의 안전율이 저하되는 것을 알 수 있는데, 이는 상기 최대 유발 인장력 분석 결과와 마찬가지로 95% 다짐도 조건의 수치해석상 상재하중이 비교적 큰 값이 입력되어 나타난 결과로 보인다. 이에 95% 다짐도 조건의 상재하중을 낮추어 85% 조건과 동일한 하중이 재하될 시 더욱 높은 안전율이 산출될 것으로 판단된다.

(2) Tie Back Wedge 방법(TWM)에 의한 내적 안정성 평가

TWM에 의한 내적 안정성 평가 결과는 Table 10에 나타냈으며, FEM에 의한 결과와 마찬가지로 순환토사 배합비가 증가할수록 안전율이 증가하였으나, 최상단

Table 9. Internal stability assessment results by FEM

		85% Relative Compaction Mixing ratio				95% Relative Compaction Mixing ratio		
		10:0	9:1	7:3	5:5	9:1	7:3	5:5
FS	2.6m	0.57	0.55	0.66	0.75	0.31	0.42	0.45
	1.8m	2.35	2.51	3.12	3.66	3.03	4.31	4.40
	1.0m	5.25	5.82	7.57	9.28	5.68	10.45	10.74
	0.2m	6.47	6.41	7.10	7.57	4.84	5.90	6.50
Assessment results (FEM)					N.G			

Table 10. Internal stability assessment results by TWM

		85% Relative Compaction Mixing ratio				95% Relative Compaction Mixing ratio		
		10:0	9:1	7:3	5:5	9:1	7:3	5:5
FS	2.6m	0.39	0.43	0.48	0.52	0.69	0.82	0.95
	1.8m	0.80	0.85	0.91	0.96	1.16	1.30	1.45
	1.0m	1.22	1.26	1.35	1.40	1.62	1.77	1.95
	0.2m	1.63	1.68	1.78	1.83	2.09	2.24	2.45
Assessment results (TWM)					N.G			

보강재 뿐만 아니라 그 이하 높이의 보강재에서도 설계 안전율을 만족하지 못하였다. FEM과 달리 TWM은 전면벽체 및 보강토체의 변형을 고려하지 않기 때문에 FEM보다 더욱 작은 안전율이 산정되며 보수적인 평가가 이루어진다. 따라서 상재하중에 의한 영향이 반영되지 않았음에도 실제 내적안정 설계 측면에서 적용성이 떨어지는 것으로 판단된다.

이에 따라 보강토 옹벽의 내적 안정성 평가 방법으로 기존의 이론적 방법에 비하여 수치해석적 방법이 더욱 합리적으로 판단되며, 수치해석적 방법(FEM)을 통해 보강재 조건을 변경하여 내적 안정성이 확보되는 조건을 파악하여 뒤채움재의 최적 배합비 설계로 제안하고자 한다.

3.3.4 보강토 옹벽 뒤채움재의 최적 배합비 설계 제안

실내모형실험에서 뒤채움재의 최대 성능을 보이며, 내적 안정성 평가 방법별 비교적 높은 안전율을 나타낸 95% 다짐도 및 순환토사 배합비 5:5 조건에서 보강재 조건을 변경하여 내적 안정성을 평가하였다. 보강재 조건을 Fig. 16과 같이 연직 설치간격(S_v)을 0.4m와 0.2m로 줄여 보강재 개수를 2배씩 증가시켰고 보강재의 최대 유발 인장력이 Fig. 17과 같이 나타났다.

보강재의 연직 설치간격(S_v)이 줄어들면서 옹벽 중간부에서 발생하는 최대 유발 인장력이 크게 저하되었는데, 이는 옹벽 중간부에 작용하는 토압이 저감되어 나타

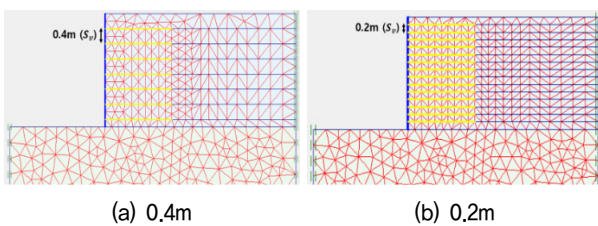


Fig. 16. Modified modeling for S_v change

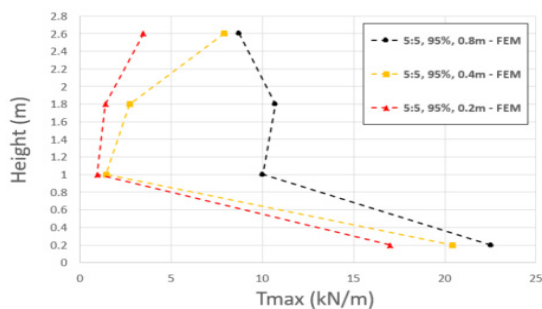


Fig. 17. T_{max} for S_v change

Table 11. Internal stability assessment results for S_v change

		S_v (m)		
		0.8	0.4	0.2
FS	2.6m	0.45	0.50	1.66
	1.8m	4.40	9.68	18.81
	1.0m	10.74	41.29	62.16
	0.2m	6.50	5.09	6.11
Assessment results (FEM)		N.G	N.G	O.K

난 효과로 보이며, 옹벽 상단부의 최대 유발 인장력은 중간부에 비하여 크게 나타나기에 수치해석상 올바른 상재하중의 영향이 반영된 것으로 판단된다. Table 11은 상기 도출된 보강재 연직설치간격별 최대 유발 인장력을 이용하여 안전율을 산정하고 내적 안정성을 평가한 결과를 나타내고 있다.

Table 11에서 보는 바와 같이 보강재 연직 설치 간격이 0.2m인 경우에서 모든 보강재 설치층에 대한 안전율이 설계 안전율 1.50를 만족하였다. 이에 본 연구에서의 보강토 옹벽 뒤채움재의 최적 배합비 설계로 95% 다짐도 및 순환토사 배합비 5:5 조건에서 보강재를 연직 방향 0.2m 간격으로 시공하는 조건을 제안하고자 한다.

다만, 이는 20cm 높이의 블록식 옹벽의 시공 조건에서 매 층당 보강재를 포설해야 하므로 높은 안전성 대비 시공성이 저하될 우려가 있으며, 단일의 보강재를 사용하여 보강재 종류를 달리함에 따른 효과가 고려되지 않은 한계가 있다.

이에 국내의 일반적 층다짐 높이를 고려하여 보강재를 30cm 간격으로 설치하는 조건이 20cm 간격에 비하여 옹벽 상단부의 안전율은 비교적 저하될 수 있으나, 시공 후 지표면 보강 등의 처리를 추가하는 등의 시공비를 절감할 수 있는 방안을 고려해 볼 수 있다. 이처럼 시공성을 더불어 비용적 측면에서 더욱 합리적인 시공 조건을 제시하기 위해서는 보강재 설치 위치별 보강재의 길이 및 강성을 달리하는 등의 보강재 시공 조건의 변경을 고려한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 보강토 옹벽 뒤채움용 양질의 재료 수급 및 순환토사 처리 문제를 해소하기 위한 방안을 제시하고자 실내모형실험 및 수치해석을 수행하여 뒤채움재 순환토사 배합비를 달리함에 따른 보강토 옹벽의 구

조적 성능 및 안전성을 분석하였다. 또한, 3D 프린터로 제작한 출력물을 실내모형실험상 전면 벽체로 사용하여 실내모형실험에서의 3D 프린팅 기술 활용성을 확인하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 다양한 실험조건(순환토사 배합비(표준사:순환골재), 다짐도, 보강재 연직 설치간격, 보강재 체결방법) 및 목표 상재하중(140kg)을 설정하였으며, 이를 변화시키며 실내모형실험을 수행한 결과, 뒤채움 영역의 85% 다짐도 경우에는 순환토사 배합비 5:5 조건에서 목표하중에 비하여 현저히 낮은 하중(68kg)이 재하되었을 때 벽체의 최대 수평변위가 허용변위 기준(6.68mm)을 초과하였다. 반면, 95% 다짐도 경우에는 순환토사 배합비 5:5 조건에서 180kg의 상재하중에도 벽체의 최대 수평변위가 5.5mm로 나타나 허용변위 기준을 만족하여 뒤채움재로써 최대 성능을 발휘하는 배합설계로 판단된다. 또한, 이 배합설계에서 보강재 연직 설치간격을 1/2과 1/4로 감소시킴에 따른 실험 결과, 벽체 수평변위가 각각 약 35%, 53% 저감되어 보강재 개수 증가로 인한 성능 증대 효과를 확인하였다.
- (2) 또한, 보강재 형상을 변형시켜 보강재 체결 방법을 달리함에 따라 벽체 거동을 분석한 결과, 체결용 핀을 사용하지 않을 경우, 보강재의 인발저항력이 저하되어 전면 벽체 시공 중 전체 높이 H에 대하여 0.6H에서 전도에 의한 파괴가 발생하였다. 이를 통해 실내모형실험에서의 3D 프린팅 기술 활용성과 모형 블록의 보강재 체결 용이성을 확인하였다.
- (3) 보강토 옹벽의 내적 안정성 평가는 이론적 방법과 2차원 수치해석적 방법으로 평가 방법을 나누어 수행하였으며, 뒤채움재 조건별로 모든 보강재 설치층에 대한 내적 안정성 평가 결과, 보강재 연직 설치간격을 0.8m로 설정할 시 평가 방법 및 뒤채움재 조건에 상관없이 최상단 보강재의 내적 안정성이 확보되지 않았다. 이에 보강재 연직 설치간격을 0.2m로 줄여 수치해석적 방법으로 내적 안정성을 평가한 결과, 최상단 보강재의 안전율이 1.66으로 향상되며, 인발파괴에 대한 설계 안전율(1.50)을 만족하였다.
- (4) 이에 실내모형실험에서 최대 성능을 보인 95% 다짐도 및 순환토사 배합비 5:5 조건에서 내적 안정성이 확보되는 보강재 연직 설치간격 0.2m의 시공조

건을 본 연구의 보강토 옹벽 뒤채움재의 최적 배합비 설계로 제안한다. 다만, 이는 높은 안전성 대비 시공성이 저하될 우려가 있으며, 보강재 종류를 달리함에 따른 효과가 고려되지 않은 한계가 있다. 이에 추후 보강재의 길이 및 강성 등의 시공조건을 달리한 추가적인 연구가 수행될 시 시공성과 더불어 비용적 측면에서 더욱 합리적인 고려가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2023년 한국교통대학교 교내 연구지원 사업 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Choi, K.H. (2019), "A Study on the Behavior Characteristics of MSE Walls having a Full-Height Rigid Facing and Segmental Panels by Experimental and Numerical Analyses", Kunsan National University, Degree of Doctor, Korea.
2. Drusa, M., Vlček, J., Holičková, M., and Kais, L. (2016), "Analytical and Numerical Evaluation of Limit States of MSE Wall Structure", *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol. 12, No.2, pp.145-152.
3. Heo, K.K., Park, H.K., Ahn, B.C., and Min, B.W. (2016), "Analysis on the Safety of Structure and Economics of Replacement Method Using Rock Debris in the Soft Ground - Case Study of Miho Stream Crossing Road in Cheongju City", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.36, No.4, pp.705-713.
4. Jeon, M.H. (2021), "Carbon Neutrality and Recycled Construction Resources", *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol.16, No.3, pp.6-10.
5. Ju, J.W., Park, J.B., and Na, H.H. (2011), "Bulging of Reinforced Retaining Walls", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.10, No.2, pp.45-53.
6. Jung, H.S. (2004), "Behavior of A Full-Scale Geosynthetic-Reinforced Segmental Retaining Wall in A Tiered Configuration", Seongkyunkwan University, Degree of Master, Korea.
7. Jung, H.S. (2017), "Comparison of Behaviour of Straight and Curved Mechanically Stabilized Earth Walls from Numerical Analysis Results", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.16, No.4, pp.83-92.
8. Kim, B.S. (2007), "Characteristics of the Density Change of Dredged Soil by Tide Influence", Hanyang University, Degree of Master, Korea.
9. Kim, D.S., Jung, Y.H., and Choi, C.Y. (2007), "On the Enhanced Application of Retaining Walls in the Railway Industry", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.2007, No.11, pp.77-84.
10. Kim, Y.J. (2020), "Behaviour Analysis of Mechanically Stabilized Earth Wall in Curved Section by Laboratory Scale Test", Dongyang University, Degree of Master, Korea.

11. Kim, Y.M., Jeon, I.G., and Shin, Y.S. (2004), "Behavior Characteristics of Reinforced Earth Wall in Crushed Stone Soil Backfill", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.2004, No.10, pp. 4249-4254.
12. Kwon, H.M. (2016), "Performance Evaluation of Geogrid-Reinforced Crushed Stone Subbase Layer", Korea National University of Transportation, Degree of Master, Korea.
13. Langcuyan, C.P. (2021), "A Study on the behavior of Integral Bridges Using the Geosynthetic Reinforced Soil Wall with Full Height Rigid Facing based on Numerical Analysis", Kunsan National University, Degree of Doctor, Korea.
14. Lee, K.M. (2015), "A Study on Cost Effective Reinforcing Method of Geogrid MSE Wall Using Model Test and Numerical Analysis", Seoul National University of Science and Technology, Degree of Master, Korea.
15. Lee, S.Y., Do, J.N., Nam, M.S., Lee, B.J., Park, Y.H., Kim, N.Y., and Lee, Y.I. (2018), "Maintenance of Highway Reinforced Earth Retaining Walls", *Geotechnical Engineering*, Vol.34, No.5, pp.19-33.
16. Ministry of Environment. (2015), "Research on Ways to Expand Recycled Soil Recycling."
17. Ministry of Land, Infrastructure. (2021), "Quality Specification of Recycling Soil."
18. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. (2012), "RD-12-E6-020 Retaining Wall."
19. No, S.H. (2017), "3D Printing & Introduction to Modeling Use", Mechapia.
20. Paeng, J.Y. (2022), "Establishment of Optimum Design and Quality Control of Geocell based on 3D Printing Technique and Image Analysis System", Korea National University of Transportation, Degree of Master, Korea.
21. Won, M.S., Langcuyan, C.P., Choi, J.H., and Ha, Y.S. (2020), "A Case Study on the Reinforcement of Existing Damaged Geogrid Reinforced Soil Wall Using Numerical Analyses", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.19, No.1, pp.75-82.
22. Yoo, C.S., Jung, H.S., Jeon, S.S., Lee, B.W., Kim, K.Y., and Jeon, H.Y. (2005), "Failure Mechanism of Geosynthetic Reinforced Segmental Retaining Wall in Tiered Configuration Using Reduced-scale Model Tests", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.21, No.3, pp.65-77.
23. Yoo, C.S., Kim, S.B., and Han, J.Y. (2008), "Numerical Investigation on the Stability of Reinforced Earth Wall during Rainfall", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.12, pp.23-32.
24. Yoon, Y.H., Kim, T.H., Kim, T.O., and Woo, M.S. (2023), "Proposal of Mobilized Passive Earth Pressure to Allowable Wall Displacement and Movement Types in Sandy Soil", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.39, No.7, pp.5-15.

Received : March 25th, 2024

Revised : April 3rd, 2024

Accepted : April 4th, 2024