

고속도로 도로부에 시공된 패널식 보강토 옹벽의 높이별 안전율과 경제성 검토

박민철
금오공과대학교 토목공학과

A Study on Stability and Economic feasibility according to Height on the MSE Wall with Pacing Panel

Min-Cheol Park

Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

요약 본 연구에서는 고속도로 도로부의 표준단면을 대상으로 패널식 보강토 옹벽의 높이별 안전율과 경제성에 대해 비교 검토하였다. 설계기준에 따라 하중조건은 고속도로의 단면 및 형상조건을 고려하여 콘크리트 포장의 사하중과 차량하중을 재하하고 최상단 보강재의 경우 방호벽의 충돌하중을 고려하였다. 보강재의 길이는 보강토 옹벽의 높이에 따라 0.9H로 배치하였기 때문에, 보강토체의 형상에 따라 지배되는 외적 안정성에 대해 높이의 증가에 따른 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 지지력에 대한 안전율은 보강토 옹벽의 높이에 따라 자중이 증가되기 때문에 급격히 감소되었다. 복합중력식 설계법에 따른 내적 안정성을 검토한 결과, 인발 안전율은 증가되고 파단 안전율은 감소되었다. 보강토 옹벽의 높이가 증가될수록 활동력으로 작용되는 수평토압과 저항력으로 작용되는 수직토압이 함께 증가되기 때문에 인발의 안전율은 증가되었다. 돌기형 강재 보강재의 장기 허용인장력은 상수이기 때문에, 높이에 따라 활동력에 대한 안전율은 수평토압이 증가되어 감소되었다. 블록식 보강토 옹벽보다는 패널식 보강토 옹벽의 경제성이 우수한 것으로 나타났고, 기존 옹벽과 비교하면 5.0 m이상의 높이에서 패널식 보강토 옹벽의 경제성이 가장 우수한 것으로 나타났다.

Abstract In this study, the stability and economic feasibility of a MSE (Mechanically stability earth) wall with a pre-cast concrete pacing panel was investigated for a standard section of highway. Based on the design criteria, the MSE walls of the panel type were designed considering the load conditions of the highway, such as the dead load of the concrete pavement, traffic load, and impact load of the barrier. The length of the ribbed metal strip was arranged at 0.9H according to the height of the MSE walls. Because the length of the reinforcement was set to 0.9H according to the height of the MSE wall, the external stability governed by the shape of the reinforced soil was not affected by the height increase. The factor of safety (FOS) for the bearing capacity was decreased drastically due to the increase in self-weight according to the height of the MSE wall. As a result of examining the internal stability according to the cohesive gravity method, the FOS of pullout was increased and the FOS of fracture was decreased. As the height of the MSEW wall increases, the horizontal earth pressure acting as an active force and the vertical earth pressure acting as a resistance force are increased together, so that the FOS of the pullout is increased. Because the long-term allowable tensile force of the ribbed metal strip is constant, the FOS of the fracture is decreased by only an increase in the horizontal earth pressure according to the height. The panel type MSE wall was more economical than the block type at all heights. Compared to the concrete retaining wall, it has excellent economic efficiency at a height of 5.0 m or more.

Keywords : Mechanically Stability Earth Wall, Highway, External Stability, Internal Stability, Economic feasibility

본 연구는 한국도로공사 도로교통연구원의 토압 분리형 교대의 해석 및 실험용역에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Min-Cheol Park(Kumoh National Institute of Technology)

Tel: +82-54-478-7618 email: xlage0@naver.com

Received February 21, 2018

Revised (1st March 30, 2018, 2nd April 2, 2018)

Accepted May 4, 2018

Published May 31, 2018

1. 서론

보강토 공법은 인장에 약한 흙을 성공적인 건설재료로 만들기 위한 개념 중의 하나로서 흙에 다른 재료를 접목시킨 방식이며, 오래 전부터 건설공사에 이용되어 왔다. 이와 같은 방식은 흙 속에 다른 재료를 넣어 보강하는 개념을 이론적으로 정립한 프랑스의 건축가 Henri Vidal(1966)[1]에 의해 보강토 공법이라는 명칭으로 옹벽, 교대 도로 등의 여러 구조물의 공사에 적용되어 왔다[2].

Henri Vidal(1966)[1]에 의해 보강토의 체계적인 해석과 설계에 대한 현대적인 개념이 개발되었다. 표면이 매끈한 판형 강재 보강재(smooth steel strip)에서 시작해 돌기를 만들어 흙과 접촉마찰력을 높인 돌기형 강재 보강재(ribbed steel strip)로 발전시켰다. 하지만, 강재는 부식되는 단점이 있어 아연도금을 통해 이를 보완했는데, 여전히 부식에 대한 고려가 필요하다[3]. 이러한 부식문제를 개선하기 위해 국내의 설계기준에서는 강재 보강재의 장기 인장력을 산정할 때 소요기간 동안의 부식두께를 공제하도록 하였다. 그리고 아연 도금된 강재 보강재만을 사용하도록 규정하고 있다.

합성재료의 발달로 보강재가 부식되는 단점을 보완한 각종 폴리머 재질의 보강재가 지오그리드, 지오택스타일, 지옴브레인 형태로 발전되었으며, 특히 영국에서 폴리에스테르 섬유를 폴리에틸렌으로 피복한 락트 섬유 보강재를 개발하였다[4]. 폴리머 재질의 토목섬유 보강재는 강재 보강재의 문제점인 부식성을 해결했지만, 흙속에서의 내구성(durability), 크리프(creep), 시공시 발생하는 외력에 의한 손상(installation damage)의 강도 저하가 단점으로 꼽히고 있다[5]. 특히, 시공 단계에서 발생하는 손상은 정량화하기 어렵기 때문에 설계에서 이에 대한 안전율의 적용에 많은 어려움이 있다. 이러한 문제로 최근에 개발된 한국도로공사의 연구보고서에서는 도금된 금속 보강재를 이용한 패널식 보강토 옹벽의 적용을 권고하고 있다[6].

보강토 옹벽의 경제적 측면에서 살펴보면, 보강토 옹벽은 현장에서 거푸집을 제작하여 콘크리트를 타설하는 기존의 옹벽과는 달리 전면판과 보강재의 순차적 조립에 의해 건설되기 때문에 옹벽 구조물의 높이가 높고 공사물량이 클수록 공기의 단축과 공사비의 절감 효과가 좋다[2]. 이와 같이 보강토 공법은 경제성이 우수하고 시공성이 용이하기 때문에 옹벽외에도 교대, 비탈면 및 연약

지반 등의 안정성 개선을 위하여 폭 넓게 활용되고 있다 [7][8][9][10][11].

보강토 옹벽에 대한 연구는 거동 특성을 규명하기 위한 실험적, 수치해석적 연구가 많이 수행되었다[12][13][14]. 하지만, 보강토 옹벽의 실무적 적용을 위해서는 실제 현장에 적용되는 사례를 토대로 안정성과 경제성을 검토하는 것이 필요하다. 특히, 고속도로는 고속의 차량이 주행하므로 보강토 옹벽의 상대적 변형에 매우 민감하다. 보강토 옹벽을 이용하여 새롭게 개발된 토압분리형 일체식 교대 교량은 패널식 프리캐스트 전면판과 비신장성 보강재만을 사용하도록 제한하고 있다[6]. 고속도로에서는 교대 외에도 도로 성토부에 보강토 옹벽이 많이 적용되고 있다. 특히, 교대와의 연결부에 많이 시공되고 있다. 하지만, 이러한 도로 성토부에 시공된 고속도로의 보강토 옹벽에 대한 안전성과 경제성을 검토한 사례는 많지 않다. 그리고 고속도로의 기하형상과 하중조건을 충분히 고려하여 설계하여야 한다. 이러한 적용 및 검토사례가 많지 않기 때문에 보강토 옹벽의 현장적용을 늘리지 않고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 보강토 옹벽의 실무적용을 위한 기초자료를 제시하기 위해, 고속도로 도로부의 패널식 보강토 옹벽을 대상으로 높이별 안정성과 경제성을 검토하였다. 패널식 보강토 옹벽의 대표단면은 한국도로공사에 적용되는 단면을 기준으로 상계하중을 모두 고려하였으며, 옹벽의 높이도 이를 고려하여 선정하였다. 그리고 블록식 보강토 옹벽, 재래식 콘크리트 옹벽과의 경제성을 비교검토하였다.

2. 보강토 옹벽의 설계

현재 국내에서 적용되는 대표적인 보강토 옹벽의 설계법은 FHWA(Federal Highway Administration) 방법과 NCMA(National Concrete Masonry Association)방법이다. FHWA방법과 NCMA방법은 이론적으로 유사하지만 몇 가지 차이점이 있다. 첫 번째로 FHWA는 미연방 도로국에서 제시하는 지침으로 전면벽체의 경우, 패널식과 블록식 외에 다양한 형태의 전면벽체가 사용될 수 있지만 NCMA는 미국 석조협회에서 제시하는 설계법이기 때문에 콘크리트 블록 형태의 전면벽체에만 사용한다. 또한, 보강재 적용에서는 FHWA는 신장성과 비신

장성 보강재를 모두 사용하지만, NCMA는 토목섬유 보강재(신장성)를 사용하도록 정해져 있다[4]. FHWA (2001)[15]에서는 순수형 보강토 교대는 횡방향 변위가 발생되지 않도록 금속 재질의 비신장성 보강재와 패널식 프리캐스트 전면판만을 사용하도록 제한하고 있다. 그리고 한국도로공사에서 최근 수행된 연구에서는 대부분 벽체의 변형이 상대적으로 작고 시공 중 손상이 발생되지 않는 비신장성 보강재를 우선 사용하도록 권고하고 있다.

보강토 옹벽의 안정성은 크게 외적 안정성과 내적 안정성에 대해 검토한다. 여기서, 외적 안정성은 보강토체의 활동, 전도, 지지력, 침하에 대해 검토한다. 그리고 내적 안정성은 보강재의 파단과 인발 그리고 연결부에 대해 검토한다[2].

보강토 공법에 의해 구축되는 조립식 옹벽은 보강된 토체가 일반 철근 콘크리트 옹벽구조물과 동일한 기능을 수행한다. 즉, 보강재에 의해 보강된 토체는 철근콘크리트처럼 강성을 지닌 구조체는 아니라도 일체화된 연성 구조물이다. 따라서, 외적 파괴과정에서 구조물의 부분적인 변형이 발생한다 하더라도 일체로 결속된 토체(soil mass)로 거동하므로 외적 안정성 해석은 일반 RC옹벽 구조물과 동일하다.

Fig. 1은 FHWA(2001)[15]에서 제시된 활동 및 전도에 대한 안정 해석이다. 보강토 옹벽 배면의 가상벽면을 경계로, 보강토체의 물성치와 배면토의 물성치 그리고 보강토체의 형상으로 외적 안정성을 검토한다. 특히, 보강토 옹벽의 외적 안정성 검토에서는 횡방향 토압계수와 횡방향 토압을 산정하는 것이 중요하다.

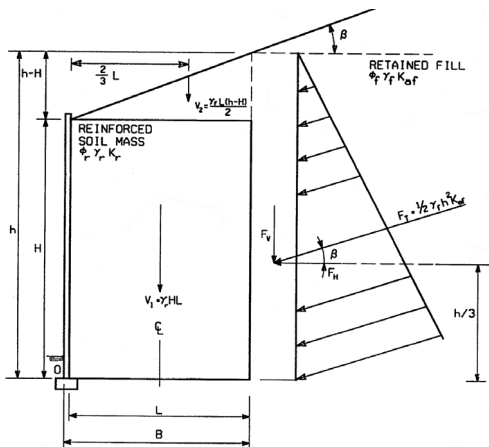


Fig. 1. External analysis: earth pressure/eccentricity [15]

보강토 옹벽의 외적 안정성 검토를 위해서는 Coulomb의 주동토압계수와 Rankine의 주동토압계수를 적용할 수 있다. Coulomb의 주동토압 계수는 Fig. 1과 같이, 배면 토압이 작용되고 토압은 식 (1), 주동토압계수는 식 (2)을 이용하여 산정한다.

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma_b h^2 K_a \quad (1)$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi_b + \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\alpha - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi_b + \alpha) \sin(\phi_b - \alpha)}{\cos(\alpha - \delta) \cos(\alpha + \delta)}} \right]^2} \quad (2)$$

여기서, P_a 는 보강토 옹벽 배면에 작용하는 주동토압이며, γ_b 는 배면토(retained soil)의 단위중량, h 는 보강토 옹벽 배면에 주동토압이 작용하는 가상높이, K_a 는 주동토압계수, ϕ_b 는 배면토(retained soil)의 내부마찰각, α 는 벽면경사(수직으로부터), δ 는 벽면마찰각, β 는 상부 사면 경사각이다.

고속도로의 도로에 적용되는 보강토 옹벽은 Fig. 1의 벽면 경사(α)와 상부 사면의 경사각(β)이 모두 0이므로, Rankine 방법으로 식 (3)과 같이 주동토압계수를 산정한다.

$$K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_b}{2} \right) \quad (3)$$

보강토 옹벽의 내적 안정성 검토는 토압계수와 가상 파괴면의 선정이 매우 중요하다. 비신장성 보강재를 사용한 보강토 옹벽은 복합중력식법(Coherent gravity method)을 적용한다[4].

비신장성 보강재를 적용한 보강토 옹벽 설계에 주로 적용되며 가상파괴면은 Fig. 2와 같이 두 개의 직선으로 가정한다. 보강토 옹벽의 벽체 최상단에는 정지토압계수 (K_0)를 적용하고, 벽체 최상단면을 기준으로 6.0m 하단 지점에서 벽체 하단까지는 주동토압계수(K_a)를 적용한다. 벽체 최상단 지점에서 6.0m까지의 토압계수는 최상단의 정지토압계수와 6.0m 지점의 주동토압계수를 선형으로 연결한 직선식 이용하여 산정한다[2]. 여기서, q 는 상재하중, γ 는 보강토의 단위중량이다.

이렇게 산정된 수직방향과 수평방향을 토압으로 최대 유발인장력과 인발저항력의 관계로 인발 안전율을 산정한다. 그리고 최대 유발인장력과 보강재의 장기 허용인장력의 관계로 파단에 대한 안전율을 산정한다.

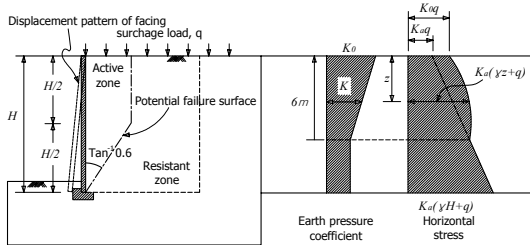


Fig. 2. The concept of the coherent gravity method [4]

3. 보강토 옹벽의 높이별 안전율

3.1 설계조건

본 장에서는 제 2장에 제시된 설계기준을 준수하여, 한국도로공사의 도로부에 시공된 보강토 옹벽의 표준단면을 토대로 높이별 외적/내적 안전율을 검토하였다. 패널식 프리캐스트 전면판과 비신장성 보강재인 돌기형 강재 보강재를 적용하였다. 보강토 옹벽의 길이는 총 60m로 적용하고 높이는 4.0 ~ 10.0 m까지 1.0 m간격으로 설계를 수행하였다. 이를 토대로 최소 안전율과 경제성에 대해 검토하였다.

Fig. 3은 고속도로의 도로부에 시공된 보강토 옹벽의 단면을 나타낸 것이다. 보강토 옹벽의 높이(H)는 4.0 ~ 10.0 m이고, 비신장성 보강재의 뒷 길이(L)는 $0.9 \times H$, 전면판의 최소근입깊이는 $0.1 \times H$ 로 산정하였다. 고속도로의 노선은 전면판의 배면으로부터 1.0m 이격되고, 1 : 1 경사도로 성토된다. 그리고 도로의 포장면과 방호벽과 연결된다. 따라서, 보강토 옹벽에는 콘크리트 포장의 사하중(10.0 kPa)과 차량 하중(13.0 kPa)을 적용하였다. 그리고 방호벽과 지주의 충돌하중을 추가적으로 고려하였다. 이들 하중조건은 KEC(2012)[16]에 제시된 사항을 준수하였다.

제 2장에서 제시된 보강토 옹벽의 안정성 검토는 외적과 내적 안정성을 구분된다. 설계기준에 제시된 최소 안전율(FOS, factor of safety)은 Table 1과 같다. 외적 안정성은 활동, 전도, 편심거리비, 지지력에 대해 검토하고 내적 안정성은 인발과 파단에 대해 검토하게 된다.

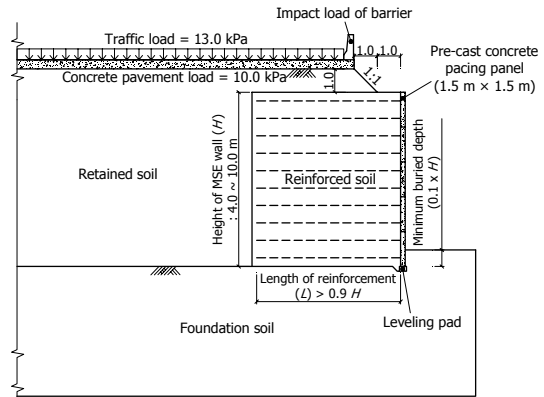


Fig. 3. The schematic of MSE wall

Table 1. Minimum factor of safety (FOS) on MSE wall

Division		Static	Seismic
External stability	Sliding ($FOS_{sliding}$)	1.5	1.1
	Overtuning ($FOS_{overtuning}$)	1.5	1.1
	Eccentricity (e/L)	0.167	0.250
Internal stability	Bearing capacity ($FOS_{bearing\ capacity}$)	2.5	2.5
	Pullout ($FOS_{pullout}$)	1.5	1.1
Overall ($FOS_{overall}$)		1.0	1.0

3.2 지반물성

Table 2는 보강토 옹벽의 설계에 적용된 지반조건 및 물성치를 나타낸 것이다. 한국도로공사의 연구보고서에 서는 보강지반의 내부마찰각은 25도로 설계하도록하였으며, 이는 현장유용토 등의 불량한 토사에 대한 영향을 고려하기 위함이다. 단위중량은 $19.0\ kN/m^3$ 이다. 그리고 기초 지반은 내부마찰각을 30.0도, 그리고 표준관입 시험의 N치는 20으로 변형계수를 14,000 kPa, 포아송비는 0.3으로 적용하였다. 지반의 대표물성치는 한국도로공사의 연구보고서를 인용하였다[17].

Table 2. The input data for design of soils on the MSE wall

Classification	γ_t (kN/m^3)	ϕ (deg)	c (kPa)	N	E (kPa)	ν
Foundation soil	19.0	30.0	0.0	20	14,000	0.3
Reinforced soil	19.0	25.0	0.0	-	-	-
Backfill soil	19.0	30.0	0.0	-	-	-

3.3 하중조건

Table 3은 보강토 옹벽의 설계에 적용된 하중조건을 나타낸 것이다. Fig. 3에서 제시한 바와 같이, 고속도로의 도로부에 시공된 보강토 옹벽의 표준단면을 고려하였다. 사하중은 콘크리트 포장의 포장하중으로 10.0 kPa를 재하하고 전면판 배면과의 이격거리(d)는 2.0m로 적용하였다. 그리고 활하중은 상부 성토의 상부면에 차량하중을 13.0 kN/m²을 재하하였다. 그리고 차량충돌과 가드레일 및 방호벽 등의 지주하중을 고려하여 최상단 보강재 2개에 방호벽의 충격 하중을 29.0 kN/m, 지주하중을 4.4 kN/m 재하하였다. 여기서, 사하중과 활하중은 응력단위로 재하되며, 충격하중은 선하중으로 재하되게 된다.

Table 3. Load condition applied to the design of MSE wall

Type	description	magnitude σ (kPa)	Separation distance, d (m)
Dead load	Pavement load	10.0	2.0
Live load	Traffical load	13.0	2.0
Type	description	PH1 (kN/m)	PH2 (kN/m)
Impact load	Barrier	29.0	29.0
	Holding	4.4	4.4

3.4 전면판과 보강재

고속도로 도로부의 보강토 옹벽의 전면판은 패널식 프리캐스트 전면판이고 보강재는 비신장성 보강재인 돌기형 강재 보강재(ribbed metal strip)를 적용하였고, 전면판으로는 패널식 프리캐스트 전면판을 적용하였다. 돌기형 강재 보강재의 단위 폭당 장기 허용인장력은 식 (4)와 같이 산정할 수 있다.

$$T_d = \frac{FS \cdot F_y \cdot A_c \cdot R_c}{b} \quad (4)$$

여기서, F_y 는 보강재의 항복강도(kN/m²)이며, FS 는 강도감소계수, b 는 돌기형 강재 보강재의 단면 폭(mm), A_c 는 상용 중 손실되는 면적을 반영한 보강재의 단면적이며, R_c 는 보강재 간격에 대한 폭의 비($R_c = b / S_h$), S_h 는 보강재의 수평간격이다.

본 설계에 적용된 돌기형 강재 보강재의 장기 허용인

장력을 산정하면 Table 4와 같다. 상용기간은 100년이고 이를 고려한 단면적(A_c)은 398.40 mm²이다. 수평간격(S_h)은 0.75m로 가로와 세로의 폭이 1.5 m이 패널식 전면판에 총 4개가 배치되도록 하였다. 이는 국내에서 가장 많이 사용되는 보강재의 배치형태이다. 이러한 설계조건을 고려하여 식 (4)로 산정된 장기 허용인장력(T_d)은 131.5 kN/m이다. 장기 허용인장력은 내적 안정성에서 파단에 대한 검토에서 중요한 설계인자이다.

Table 4. Long-term allowable tensile force of the ribbed metal strip

Reinforcement	F_y (MPa)	FS	A_c (mm ²)	b (m)	S_h (m)	R_c	T_d (kN/m)
Ribbed metal strip	450	0.55	398.4	0.10	0.75	0.13	131.5

3.5 안정성 검토

3.5.1 외적 안정성 검토

Fig. 4는 보강토 옹벽의 높이별 외적 안정성에 대한 검토 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4 (a)는 전도에 대한 안전율을 검토한 것이다. 보강토 옹벽의 높이에 따라 큰 변화의 경향이 나타나지 않았다. 이는 보강토 옹벽의 전도는 보강토체의 형상에 지배되는데, 보강토 옹벽의 높이에 따라 보강재의 뒷길이를 연장하였기 때문이다. Fig. 4 (b)는 활동에 대한 안전율을 나타낸 것이며, 이는 보강토체에 작용하는 외력과 저면의 마찰력에 지배된다. 보강토 옹벽의 높이가 높아지면 활동력이 배면 토압이 증가되고 이와 함께 보강토체의 저면 길이가 증가되어 저항력도 함께 증가되기 때문이다. Fig. 4 (c)는 편심거리비를 나타낸 것이다. 편심거리비도 활동에 대한 안전율과 같이, 보강토체의 형상에 지배되므로 보강토 옹벽의 높이로 인한 안전율 변화의 경향은 발생되지 않았다. Fig. 4 (b)는 지지력에 대한 안전율을 나타낸 것이다. 지지력의 안전율은 활동력인 보강토체의 자중과 저항력은 기초 지반의 지지력으로 산정된다. 보강토 옹벽의 높이가 높아지면, 활동력이 보강토체의 자중이 증가되기 때문에 안전율이 감소되었다.

보강토 옹벽의 높이별 외적 안정성에 대한 검토 결과, 보강토체의 형상에 지배되는 활동과 전도, 편심거리비는 큰 영향을 받지 않았다. 그 이유는 보강토 옹벽의 높이에 따라 보강재의 뒷길이를 배치하였기 때문이다. 따라서,

보강토 옹벽의 설계에서는 보강재의 뒷길이를 충분히 연장하여야 외적 안정성을 만족할 수 있다. 그리고 지지력의 경우, 보강토체의 형상이 아닌 기초지반 조건과 보강토체의 자중에 지배된다. 따라서, 보강토 옹벽의 자중을 기초지반이 충분히 고려하는 지를 설계에서 검토하여야 한다.

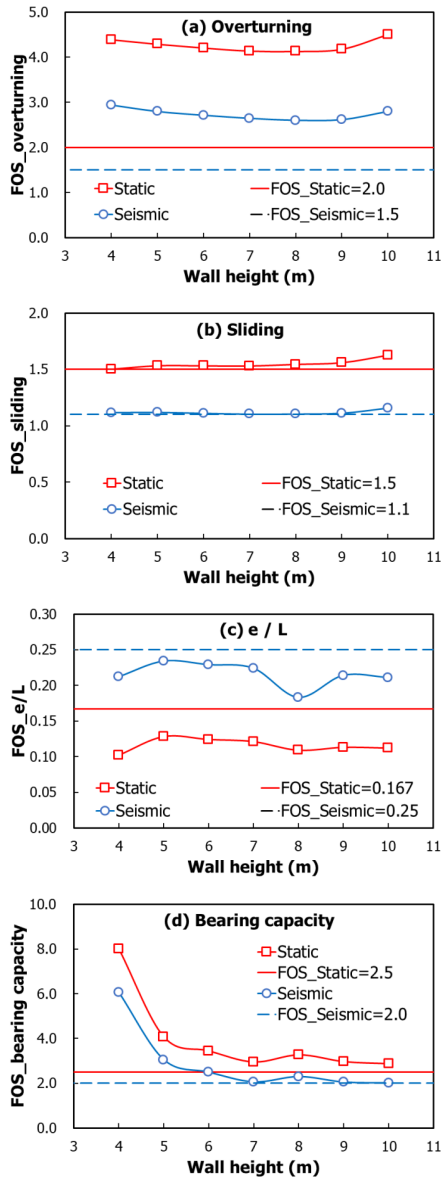


Fig. 4. The factor of safety for external stability according to the height of MSE walls; (a) Overturning, (b) Sliding, (c) Eccentricity, (d) Bearing capacity

3.5.2 내적 안정성 검토

Fig. 5는 보강토 옹벽의 높이별 내적 안전율 변화를 나타낸 것이다. 인발 안전율은 높이가 높아질수록 안전율이 증가되었으며, 파단 안전율은 감소되었다.

Fig. 5 (a)에 제시된 인발 안전율이 증가된 것은 보강토 옹벽의 높이가 높아질수록 보강재의 뒷길이가 증가되었기 때문이다. 인발 안전율은 활동력인 수평토압과 저항력인 인발저항력과의 관계이다. 보강토 옹벽의 높이가 증가될수록, 활동력인 수평토압이 증가되고 인발저항력은 보강재의 뒷 길이와 마찰저항에 관련된 수직토압도 함께 증가되기 때문이다. Fig. 5 (b)에 제시된 파단 안전율은 보강토 옹벽의 높이가 높아질수록 안전율이 감소되었다. 파단 안전율은 활동력인 수평 토압과 저항력인 보강재의 장기 허용인장력의 관계이다. 따라서, 보강토 옹벽의 높이가 높아지면 활동력인 수평 토압은 증가되지만 보강재의 장기 허용인장력은 동일하기 때문에 안전율이 감소되었다.

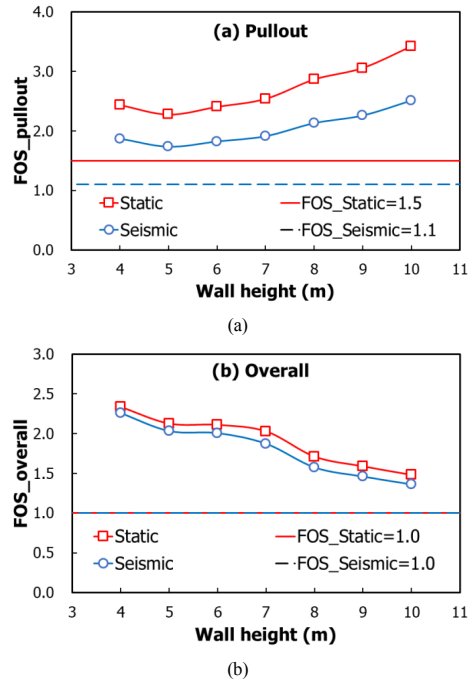


Fig. 5. The factor of safety for internal stability according to the height of MSE walls (a) pullout (b) overall

3.5.3 보강토 옹벽의 보강재 깊이별 인발 및 파단에 대한 안전율 검토

본 절에서는 보강토 옹벽의 보강재 깊이별 인발 및 파단에 대한 안전율을 검토하였다. 3.5.1절에 제시된 외적 안정성의 보강토 옹벽의 기하형상에 따라 좌우된다. 하지만, 3.5.2절에 제시된 내적 안정성은 수평토압에 좌우되므로 보강재의 깊이에 따라 안전율이 다르게 산정된다. 이를 검토하기 위해, 보강재의 깊이별 인발과 파단에 대한 안전율을 검토하였다.

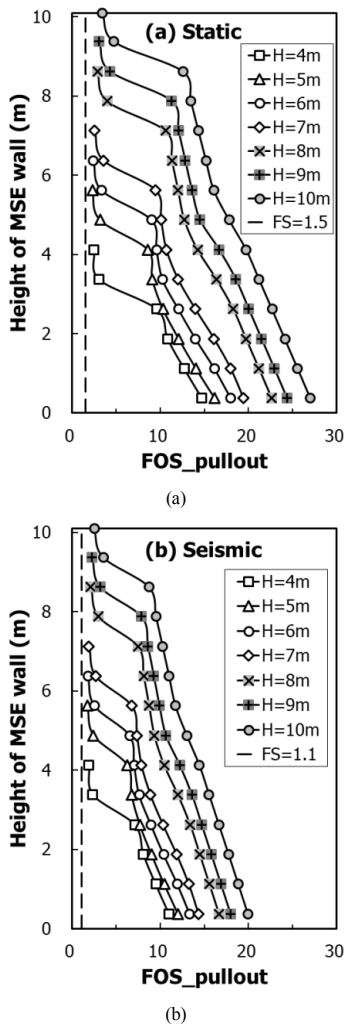


Fig. 6. Verification on the factor of safety on pullout according to the depth of reinforcement (a) static (b) seismic

Fig. 6은 보강토 옹벽의 보강재 깊이별 인발 안전율을 나타낸 것이다. 모든 보강토 옹벽에서 최상단 두 개의 보강재에서 안전율이 감소되는 것은 층돌하중과 지중하중을 적용하였기 때문이다. 인발에 대한 안전율은 옹벽 하부에서 안전율이 높게 산정되었다. 이러한 경향은 내적 안정성 해석을 Fig. 2에 제시된 복합중력식 설계법을 이용하였기 때문이다. 보강토 옹벽의 수평토압은 상부보다는 하부에서 크게 작용된다. 하지만, Fig. 6과 같이 하부의 안전율이 크게 나온 것은 상부의 수평토압이 더 크게 작용되었기 때문이다. 그 이유는 고속도로 도로부의 보강토 옹벽에는 포장하중과 차량하중 그리고 층돌하중이 작용되기 때문이다. 따라서, 패널식 보강토 옹벽을 고속도로 도로부에 적용할 때에는 상부 보강재의 인발 안전율에 대해 면밀히 검토하여야 한다.

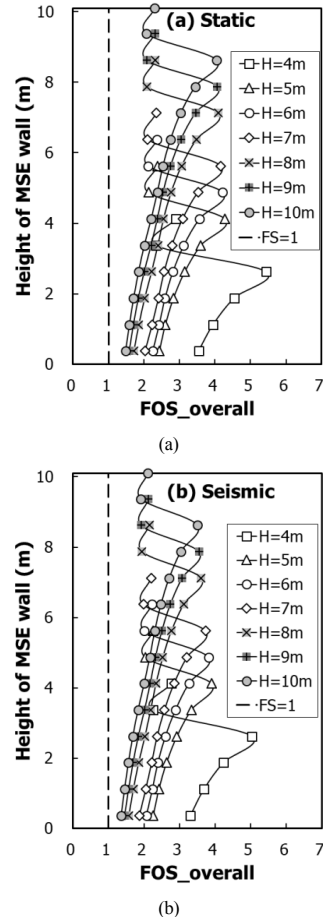


Fig. 7. Verification on the factor of safety on overall according to the depth of reinforcement (a) static (b) seismic

Fig. 7은 보강토 옹벽의 보강재 깊이별 파단 안전율을 나타낸 것이다. 보강토 옹벽의 높이가 낮을 때는 최상단 두 개의 보강재에서 안전율이 가장 작게 산정되었다. 이는 앞서 언급하였듯 고속도로 도로부의 보강토 옹벽에 작용되는 상재하중 때문이다. 그리고 인발과 달리 파단 안전율은 옹벽 하부에서 안전율이 낮게 산정되었다. 이는 Fig. 5에서 언급하였듯이, 활동력이 수평토압이 보강토 옹벽이 높아질수록 증가되고 저항력인 장기 허용인장력은 상수이기 때문이다. 파단은 보강토 옹벽의 높이가 높을수록 안전율이 낮기 때문에 높은 보강토 옹벽을 설계할 때는 필수적으로 검토하여야 한다.

4. 경제성 검토

4.1 보강토 옹벽의 높이 증가에 따른 경제성 검토

본 장에서는 고속도로 도로부의 패널식 보강토 옹벽에 대한 경제성을 비교검토하였다. 비교대상은 동일한 조건에서는 블록식 보강토 옹벽과 L형, 역T형의 콘크리트 옹벽이다. 시공비는 수량산출과 내역서를 통해 산정하였다. 그리고 토공비는 별도로 산정하였으며, 골재 및 자재의 운반거리는 200 km로 동일한 조건을 적용하였다.

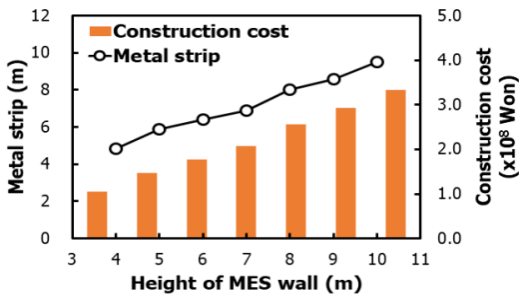


Fig. 8. Estimation of length of ribbed metal strip and construction cost according to height of MSE wall

Fig. 8은 보강토 옹벽의 높이별 비신장성 보강재의 길이와 시공비 산정결과를 나타낸 것이다. 보강토 옹벽의 높이에 따라 비신장성 보강재의 뒷길이는 $0.9 \times H$ 만큼 선형적으로 증가된다. 이에 따라 보강토체의 토공량과 전면판의 면적이 함께 증가된다. 따라서 보강재의 뒷길이가 동일하게 패널식 보강토 옹벽의 시공비도 선형적으

로 증가되었다.

4.2 블록식 보강토 옹벽과의 비교

Table 5는 패널식과 블록식 보강토 옹벽의 경제성을 비교한 것이다. 앞선 설계조건에서 설계기간을 50년으로 동일한 설계조건에서 패널식과 블록식 보강토 옹벽의 경제성을 비교하였다. 여기서, 시공비용과 설계에 적용되는 단위 면적당 단가를 산정하였다.

Table 5. Comparison of economic efficiency of panel type and block type MSE wall (Unit: KRW)

Height (m)	Block type		Panel type	
	Construction cost	Unit Price per m^2	Construction cost	Unit Price per m^2
4	97,906,000	329,650	87,467,065	294,502
5	124,532,401	343,064	115,860,056	319,174
6	160,527,009	374,189	139,651,664	325,528
7	194,231,001	392,386	164,597,051	332,519
8	236,633,851	421,807	214,827,731	382,937
9	285,408,384	455,197	242,070,976	386,078
10	332,967,835	480,473	274,037,090	401,814

Fig. 9는 패널식과 블록식 보강토 옹벽의 경제성 비교 그래프를 나타낸 것이다. 블록식 보강토 옹벽이 패널식에 비해 시공비가 많이 소요되는 것으로 나타났으며, 보강토 옹벽의 높이 증가에 따라 차이가 더 크게 나타났다. 그 이유는 블록식 보강토 옹벽은 높이의 증가에 따라 복합중력식 설계법에 의해 수평토압이 패널식 보다 더 크게 증가되기 때문이다. 그리고 신장성 보강재는 시공 중에 발생하는 손상을 고려하여 안전율과 크리프에 대한 안전율이 추가적으로 적용되어 많은 양의 보강재가 소요되기 때문이다. 10.0m 높이의 보강토 옹벽의 시공비는 패널식 보강토 옹벽은 2.7억원, 블록식 보강토 옹벽은 3.3억원으로 나타났다.

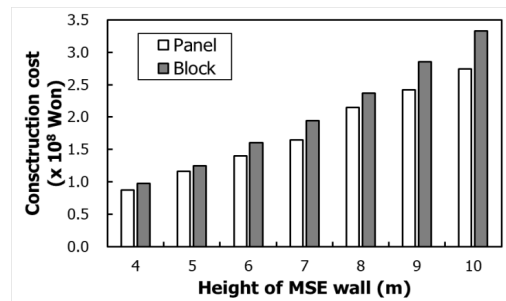


Fig. 9. Comparison of economic efficiency of panel type and block type MSE wall (Unit: KRW)

4.3 콘크리트 옹벽과의 비교

Table 6과 Fig. 10은 옹벽 종류별로 경제성을 비교한 것이다. L형 옹벽과 역T형 옹벽과의 비교를 위해 옹벽의 높이별로 m^2 당 단가를 산출하여 비교하였다. 철근콘크리트 옹벽의 시공비는 국토교통부의 표준단면과 수량으로 산정하였다. 옹벽 높이 5.0m 이하에서는 L형 옹벽과 역T형 옹벽이 경제성이 우수한 것으로 나타났으며, 옹벽 높이 5.0m 이상에서는 패널식 보강토 옹벽의 경제성이 가장 우수한 것으로 나타났다. 구조물기초설계기준 해설(2015)에서는 높이 3.0m까지 기존의 철근콘크리트 옹벽이 더 경제적이라고 하였지만, 본 연구에서는 5.0 m로 나타났다. 이는 고속도로 도로부의 보강토 옹벽에는 상재하중이 좀더 고려되기 때문이다. 철근콘크리트 옹벽에서는 방호벽의 충돌하중은 영향을 미치지않으므로 이를 고려하지 않는다. 국내에서는 철근콘크리트 옹벽은 8.0m 이상에서는 과도한 수평토압으로 인해 설계와 시공을 지향하고 있다. 그리고 구조물설계기준 해설(2015)에서는 높이 9.0m부터는 보강토 옹벽이 더 경제적으로 제시하였다. 일반적으로 옹벽 높이가 높아질수록, 공사 물량이 클수록 보강토 옹벽이 경제적인 것으로 보고하였다.

Table 6. Comparison on the economic efficiency by Retaining Wall Type (Unit: KRW)

Height (m)	Concrete retaining wall		MSE Wall	
	L-Type	Interced T-type	Panel	Block
3	597,253	593,953	614,076	674,266
4	795,481	792,181	824,105	906,116
5	1,047,653	1,038,636	1,034,253	1,209,831
6	1,339,130	1,369,491	1,242,549	1,465,411
7	1,728,336	1,727,440	1,470,067	1,752,473
8	2,230,649	2,150,270	1,748,793	2,121,288
9			2,028,762	2,513,055
10			2,341,053	2,949,121
11			2,701,350	3,430,203

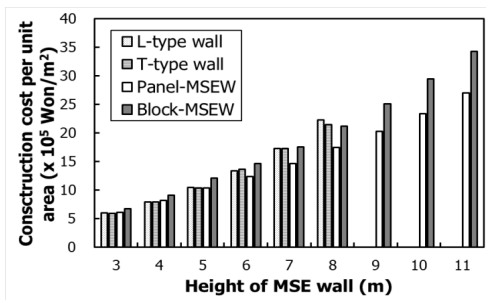


Fig. 10. Comparison on the economic efficiency by Retaining Wall Type (Unit: KRW)

5. 결 론

본 연구에서는 고속도로 도로부의 패널식 보강토 옹벽의 안정성과 경제성에 대해 검토하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 보강토 옹벽의 높이별 외적 안정성에 대한 검토 결과, 보강토체의 형상에 지배되는 활동과 전도, 편심거리비는 큰 영향을 받지 않았다. 그 이유는 보강토 옹벽의 높이에 따라 보강재의 뒷길이를 배치하였기 때문이다. 따라서, 보강토 옹벽의 설계에서는 보강재의 뒷길이를 충분히 연장하여야 외적 안정성을 만족할 수 있다. 그리고 지지력의 경우, 보강토체의 형상이 아닌 기초지반 조건과 보강토체의 자중에 지배된다. 따라서, 보강토 옹벽의 자중을 기초지반이 충분히 고려하는 지를 설계에서 검토하여야 한다.
- 2) 보강토 옹벽의 높이별 내적 안정성에 대한 검토 결과, 인발 안전율은 증가되고 파단 안전율은 감소되었다. 인발 안전율은 높이가 증가될수록 수평/수직 토압이 증가되어 활동력과 저항력이 함께 증가된다. 게다가 보강재의 뒷길이가 길어지므로 인발 안전율이 증가되었다. 돌기형 강제 보강재의 장기 허용인장력은 상수이기 때문에, 파단 안전율은 높이에 따라 활동력이 수평토압은 증가되어 안전율이 감소되었다.
- 3) 고속도로 도로부의 상재하중은 콘크리트 포장의 사하중과 차량하중, 방호벽의 충돌하중이 작용하므로, 최상단 보강재의 인발 안전율이 상대적으로 작게 산정되었다. 고속도로에 적용되는 보강토 옹벽은 상재하중을 설계기준에 따라 정확히 적용하여야 한다.
- 4) 패널식과 블록식 보강토 옹벽의 경제성을 비교한 결과, 블록식 보강토 옹벽이 패널식에 비해 시공비가 많이 소요되었다. 그리고, 보강토 옹벽의 높이 증가에 따라 차이가 더 크게 나타났다. 그 이유는 블록식 보강토 옹벽은 높이의 증가에 따라 복합중력식 설계법에 의해 수평토압이 패널식 보다 더 크게 증가되기 때문이다. 그리고 신장성 보강재는 시공 중에 발생하는 손상을 고려하여 안전율과 크리프에 대한 안전율이 추가적으로 적용되어 많은 양의 보강재가 소요되기 때문이다.

- 5) 옹벽 종류별 경제성을 검토한 결과, 옹벽 높이 5.0m 이하에서는 L형 옹벽과 역T형 옹벽이 경제성이 우수한 것으로 나타났으며, 옹벽 높이 5.0m 이상에서는 패널식 보강토 옹벽의 경제성이 가장 우수한 것으로 나타났다.

References

- [1] Henri Vidal, "La terre armee", *Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics*, vol. 19., nos. 223-4, July-August, France, 1966.
- [2] Korean Geotechnical Society, "Structure foundation design standards specification", Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2015.
- [3] Frankenberger, P. C., Bloomfield, R. A., Anderson, P. L., "Reinforced earth walls withstand Northridge Earthquake", *Proceedings of the international symposium on earth reinforcement*, Japan, vol. 1, pp. 345-350, 1996.
- [4] Korean Geosynthetics Society, "Practice of reinforced soil method : Design, Construction, Inspection", Book publishing C.I.R., 2014.
- [5] Shin, E. C., and Lee, C. S., "Analysis of the Segmental Reinforced Retaining Wall Behavior by Field Monitoring", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, vol. 3, no. 1, pp. 3-15, 2004.
- [6] Expressway & Transportation Research Institute, "Design guideline for integrated and pile bented abutment with mechanically stabilized earth wall bridge (IPM Bridge)", Korea Expressway Corporation, 2016.
- [7] Chen, H. T., Hung, W. Y., Chang, C. C., Chen, Y. J. and Lee, C. J., "Centrifuge modeling test of a geotextile reinforced wall with a very wet clayey backfill", *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 25, no. 6, pp. 346-359, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2007.01.003>
- [8] Won, M. S. and Kim, Y. S., "Internal deformation behavior of geosynthetic-reinforced soil walls", *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 25, no. 6, pp. 10-22, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.10.001>
- [9] Yoo, C. and Kim, S. B., "Performance of a two-tier geosynthetic reinforced segmental retaining wall under a surcharge load: Full-scale load test and 3D finite element analysis", *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 26, no. 6, pp. 460-472, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.10.001>
- [10] Tatsuoka, F., Hirakawa, D., Nojiri, M., Aizawa, H., Nishikiori, H., Soma, R., Tateyama, M. and Watanabe, K., "A new type of integral bridge comprising geosynthetic-reinforced soil walls", *Geosynthetics International*, vol. 16, no. 4, pp. 301-326, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1680/gein.2009.16.4.301>
- [11] Lee, K. W., Cho, S. D., Han, J. G., and Hong, K. K., "Evaluation on stability of reinforced earth wall using geosynthetic strip with rounded band anchor", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, vol. 11, no. 3, pp. 43-51, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.12814/jkgs.2012.11.3.043>
- [12] Yoo, C. S., Kim, S. B., and Lee, B. W., "Time-Dependent Deformation Characteristics of Geosynthetic-Reinforced Soil Using Plane Strain Compression Tests", *Journal of the Korean geotechnical society*, vol. 21, no. 10, pp. 85-97, 2005.
- [13] Hirakawa, D., Uchimura, T., Shibata, Y., and Tatsuoka, F., "Time-dependant deformation of geosynthetics and geosynthetic-reinforced soil structures", *Proc. of the 7th International Conference on Geosynthetics*, Nice, vol. 4, pp. 1427-1430, 2002.
- [14] Tatsuoka, F., Hirakawa, D., Shinoda, M., Kongkikul, W., and Uchimura, T., "An old but New Issue; Viscous Properties of Polymer Geosynthetic Reinforced and Geosynthetic-Reinforced Soil Structures", Kenote Lecture, *Proceedings of the 3rd Asian Regional Conference On Geosynthetics*, Seoul, Korea, pp. 29-77, 2004.
- [15] FHWA, "Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes, Design and Construction Guidelines", FHWA-NHI-00-043, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, 2001.
- [16] KEC, "Expressway Construction Guide Specification", Korea Expressway Corporation, 2012
- [17] Expressway & Transportation Research Institute, "Development of A New Concept Abutment", EXTRI-2016-47-534.9607, Korea Expressway Corporation, 2016.

박민철(Min-Cheol Park)

[정회원]



- 2010년 2월 : 금오공과대학교 토목공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 금오공과대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2016년 2월 : 금오공과대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2016년 2월 ~ 현재 : 금오공과대학교 응용지반연구실 박사후연구원

<관심분야>

토질 및 기초, 사면안정, 보강토 옹벽