

목재옹벽의 내적안정 평가에 관한 연구

Internal Stability of Timber Framed Earth Retaining Wall

이 광 우¹ Lee, Kwang-Wu
김 주 형^{2*} Kim, Ju-Hyong
조 삼 덕³ Cho, Sam-Deok

ABSTRACT

This paper introduces a recently developed thinning-out timber framed earth retaining wall system. Timber framed retaining walls are usually designed by using design code of gravity type retaining wall but internal stability of timber framed earth retaining walls is often neglected. In this study, it is recommended to use the design code for segmental retaining walls by National Concrete Masonry Association (NCMA, 1997) to check internal stability of timber framed earth retaining wall. Based on the several shear test results for 3 types of timber frames, a simple design chart including internal stability is suggested.

요 지

본 연구에서는 국내 간벌 목재를 사용하여 개발한 목재옹벽에 관한 연구를 수행하였다. 목재옹벽은 일반적으로 중력식 옹벽의 설계방법과 동일한 방법으로 설계하고 있지만, 목재를 전면벽체의 내적안정성에 대한 검토는 일반적으로 수행하고 있지 않다. 본 연구에서는 조적식 콘크리트 블록 옹벽에 적용하고 있는 NCMA(1997)의 내적 안정성 검토 방법을 목재옹벽에 적용할 것을 제안하였다. 또한, 3종류의 목재를 전면벽체에 대한 전단시험을 수행하여 내적안정을 검토하고 간단한 설계도표를 제안하였다.

Keywords : Timber framed earth retaining wall, Internal stability, Shear test

1. 서 론

정부차원에서 추진되고 있는 산림정책으로 인하여 간벌사업이 확대되고 있다. 그러나 간벌목재의 수요처가 충분히 확보되지 못한 실정인바, 국산 간벌목재의 과잉공급 현상과 이로 인한 목재의 환경폐기물화가 새로운 문제로 대두되고 있다. 따라서 국산 간벌목재의 수요를 창출할 수 있는 방안의 마련이 필요하다.

임업선진국인 독일(ha 당 임목축적 270m³), 일본(ha 당 임목축적 149m³), 스위스(ha 당 임목축적 337m³) 등에서는, 간벌목재를 이용한 틀형 목재공(치산용 댐 시공 등에

사용), 교환가능한 원통형 옹벽공(비교적 토압이 작은 토류구조물에 적용) 등이 이미 개발되어 적용되고 있고, 안정성 및 내구성 측면에서 문제가 비교적 없는 것으로 입증되어 사방, 임도사업 등에 활발히 적용되고 있다.

반면에, 우리나라는 임목축적이 ha 당 67m³이고, 30년 생 이하의 수목이 전체산림의 68%를 차지하고 있어 최근에서야 간벌이 활성화되고 있는 실정이지만, 국내 간벌목재의 수요는 간벌되고 있는 목재량을 충분히 소화하지 못하고 있는 실정이다. 이로 인해 간벌목재의 재고량이 지속적으로 증가하고 있어 궁극적으로는 환경폐기물화 되어 많은 환경적/경제적 손실을 초래하고 있다. 이에 산림청, 산

1 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원 (Researcher, Geotechnical Eng. & Tunnelling Research Div., KICT)

2* 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구위원 (Research Fellow, Geotechnical Eng. & Tunnelling Research Div., KICT, E-mail: haitink@kict.re.kr)

3 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구위원 (Senior Research Fellow, Geotechnical Eng. & Tunnelling Research Div., KICT)

림과학원 등 유관 국가기관에서는 간벌목재의 사용을 장려하고, 수요처를 창출하기 위한 노력을 적극적으로 경주하고 있으며, 특히 휴양림, 국립공원 등의 조성공사에는 반드시 간벌목재를 이용한 옹벽 시설을 시공하게 하고 있다.

목재를 산림청고시 제2003-86호 「목재의 방부·방충처리 기준」(산림청, 2003)에 의거하여 가압식으로 방부처리하면 건축재와 버금가는 수명을 얻을 수 있다. 이에 국내에서는 2000년~2006년에 걸쳐 산림청에서 간벌목재를 이용한 틀재형 옹벽을 개발하고, 이에 대한 처리방법들을 개발하여(산림청, 2005) 민간기업에 목재방부처리 관련기술과 함께 이양한 사례가 있으며, 목재옹벽의 강도특성을 평가하기 위한 일련의 실험 결과를 발표한 바 있다(이동흡 등, 2007; 홍순일 등, 2007; 박준철 등, 2010).

한편, 국내 일부 기업에서는 간벌목재를 활용한 옹벽구조물 축조기술을 적용하고 있으나, 구조적 안정성에 대한 충분한 검토 없이 현장에 적용하는 경우가 많아, 각 부재의 결속부에서 응력집중 등으로 인한 구조적 결함이 야기되는 경우가 많다. 특히, 목재옹벽 설계시 목재를 전면벽체를 중력식 옹벽으로 간주한 외적안정 해석(전도, 저면활동, 지지력 등)만을 실시하고, 목재를 전면벽체의 내부과괴에 대한 내적안정 해석은 간과하는 경우가 많은 실정이다.

이에 본 논문에서는 목재와 속채움재(토사 혹은 자갈)로 이루어진 목재를 전면벽체의 전단 특성을 평가하기 위해 일련의 전단강도시험을 실시하고, 목재를 전면벽체의 내적안정 평가 방법을 제안하였다.

2. 목재옹벽의 내적안정 평가 방법

지금까지 목재옹벽의 내적안정에 대한 설계기준이 정립되어 있지 않은 실정이어서, 본 연구에서는 콘크리트 블록식 보강토옹벽에 대한 설계 지침인 NCMA(1997)을 바탕으로 목재옹벽의 내적안정을 평가하는 방법을 제안한다. NCMA(1997)에 따르면, 보강재를 포설하지 않은 경우, 벽체의 내적안정성은 식 (1)에 나타난 바와 같이 벽체의 전단저항력과 벽체에 작용하는 수평토압의 비를 산정하여 평가하고, 이때의 기준안전율은 1.5로 규정하고 있다. 여기서, 수평토압은 시행썰기법의 근간이 되는 흩썰기 이론을 이용하여 산정한다.

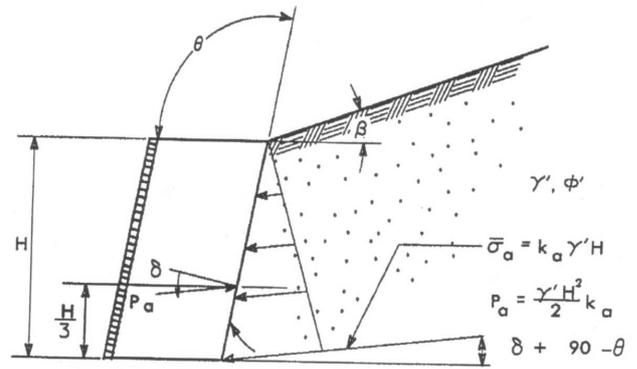


그림 1. Coulomb의 토압산정

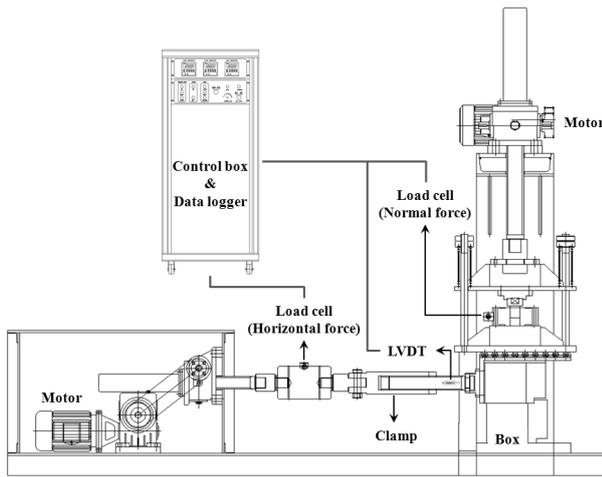
$$F.S = \frac{V_u}{P_a} \quad (1)$$

- 여기서, V_u : 전단저항력(kN/m) ($= a_u + W_W \tan \lambda_u$)
- a_u : 전단지점 점착력 (kN/m)
- λ_u : 마찰각 ($^\circ$)
- W_W : 벽체의 전체 중량 (kN/m) ($= H_h \gamma_u W_u$)
- H_h : 벽체의 힌지높이 (m)
- W_u : 벽체 폭 (m)
- γ_u : 벽체의 단위중량 (kN/m^3)

한편, 내적안정성 평가를 위한 토압은 앞서 설명했던 바와 같이 Coulomb이 제안한 흩썰기 이론으로부터 산정할 수 있는데, 그림 1토에서 보는 바와 같이 옹벽배면 벽체의 기울기가 존재하는 경우, 옹벽의 벽면마찰각(δ°)을 고려하는 토압이론을 제안하였다. Coulomb의 토압이론은 옹벽 배면의 뒤채움 지반에 활동면을 따라 썰기모양으로 형성된 흩썰기에 의해 옹벽구조물에 작용하는 압력을 산정하는 방법이다. 그림 1을 바탕으로 주동토압 산정식을 유도하면 식 (2)와 같다.

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma' H^2 K_a \quad (2)$$

- 여기서, γ' : 뒤채움 흙의 단위중량 (kN/m^3)
 - H : 옹벽높이 (m)
 - K_a : 주동토압계수
- $$\left(= \frac{\sin^2(\theta + \phi')}{\sin^2 \theta \sin(\theta - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi' + \delta) \sin(\phi' - \beta)}{\sin(\theta - \delta) \sin(\theta + \beta)}} \right]^2} \right)$$
- θ : 옹벽 배면 기울기 ($^\circ$)



(a) 단면도



(b) 전면 모습

그림 2. 전단시험 장치

표 1. 흙시료의 공학적 특성

비중 (G_s)	액성한계 (W_L)	소성지수 (PI)	U.S.C.S	다짐시험	
				최적함수비 (OMC, %)	최대건조밀도 ($\gamma_{d_{max}}$, kN/m^3)
2.67	N.P.	N.P.	SW	14.05	18.82

ϕ' : 뒤채움 흙의 내부마찰각 ($^\circ$)

δ : 벽면마찰각 ($^\circ$)

β : 배면 성토부 기울기 ($^\circ$)

3. 목재틀 전면벽체에 대한 전단강도시험

3.1 실험 장치

국산 리기다소나무 간벌재를 이용한 목재옹벽의 전단 특성을 평가하기 위하여 일련의 전단시험을 수행하였다. 그림 2는 본 연구에서 사용한 전단시험 장치를 나타낸 것이다. 본 시험장비는 크게 목재옹벽을 거치할 수 있는 토조(길이 155cm, 폭 100cm, 높이 50cm), 전단장치, 수직하중 재하장치, 전단변위의 측정이 가능한 수평변위계 및 데이터수집부 등으로 구성되어 있다. 여기서, 전단장치는 변형률 제어가 가능하며, 전단력은 300kN까지 측정할 수 있도록 되어 있다. 또한 수직하중 재하장치의 최대용량은 200kN이다.

3.2 실험재료

본 실험에서는 목재옹벽 내부의 속채움 흙시료로 화강

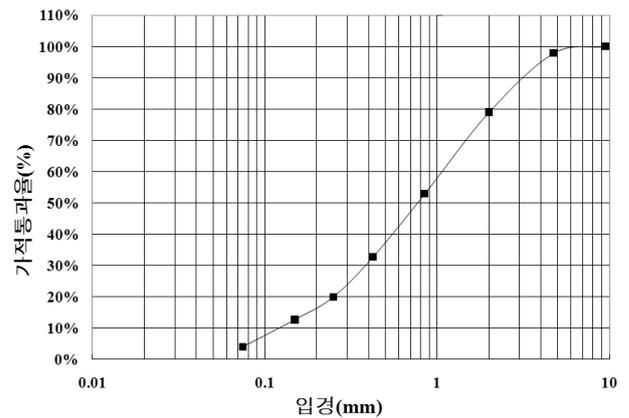


그림 3. 흙시료의 입도분포곡선

풍화토를 사용하였으며, 흙시료의 공학적 특성은 그림 3과 표 1에 나타내었다. 그림 3에서 나타낸 것과 같이 흙시료는 200번체 통과율이 4.07%이고, 통일분류법상 SW로 분류할 수 있다. 또한 흙시료의 비중(G_s)은 2.67이고, 소성지수는 N.P로 나타났다. 한편, 표준다짐시험(A다짐) 결과, 표 1에서 보는바와 같이 최적함수비(OMC)와 최대건조밀도($\gamma_{d_{max}}$)는 각각 14.05%와 $18.82kN/m^3$ 인 것으로 평가되었다.

한편, 목재틀 조립에 사용한 목재시료는 국산 리기다소나무를 직경 90mm인 원주형으로 가공하여 사용하였다.

3.3 실험내용

목재를 전면벽체의 조립 형태에 따른 목재옹벽의 전단 저항 특성을 평가하기 위하여, 그림 4에 나타난 바와 같이 3가지 형태로 조립된 목재옹벽에 대한 전단시험을 수행하였다. 그림 4(a)에 나타난 조립방식은 일본의 아제리락옹벽이나 산림청에서 개발한 틀제형 목재옹벽 등과 같은 기존 목재옹벽 시스템의 부재 조립방법과 동일하다. 이러한 조립방법은 곡선부 시공 상의 문제점 등이 발생할 수 있기 때문에 곡선부 시공성을 개선하기 위한 조립방법으로 그림 4(b)와 그림 4(c)에 나타난 바와 같이 목재옹벽 시편을 제작하여 전단시험을 수행하였다. 본 실험에서는 수직하중을 30, 60 및 90kN/m²으로 재하한 경우에 대해 각각의 전단저항력을 측정하였다. 전단시험용 목재옹벽은 실험장비의 크기를 고려하여, 길이 140cm×폭 70cm로 제작하였고, 횡방향 및 종방향 부재를 각각 5단씩 설치하였다.

그림 5에는 전단시험 과정을 나타내었다. 우선 횡방향 및 종방향 부재를 회전 나사못(직경 6mm×길이 150mm)으로 결속시키는 방법으로 목재를 시편을 조립한다. 전면 및 후면의 횡방향 부재에는 종방향 부재와 만나는 위치에 안착홈이 형성되어 있어, 일정한 형태의 목재를 조립이 용이하다. 다음으로 조립된 목재를 시편을 전단시험기에 거치시킨다. 목재를 내부에 속채움 토사의 유출을 방지하기 위한 부직포를 포설한 후 화강풍화토 흙시료를 채워 목재옹벽을 완성한다. 유압장치를 이용하여 수직하중을 재하하고, 변위계를 설치한다. 마지막으로 전단하중을 10mm/min의 속도로 재하하면서, 목재옹벽의 수평변위를 측정하였다.

3.4 실험 결과

그림 6에는 목재옹벽 조립 형태별로 임의 수직응력 재하시 전단변위-전단응력을 측정하여 그 관계를 나타내었으며, 옹벽 배면 및 전면부에서 수평방향의 전단변위도 측정하여 목재옹벽 배면의 전단하중 재하부에서 측정된 수평변위 이외에도 목재옹벽 전면부에서 측정된 결과가 일부 함께 표시되어 있다. 그림 6에서 Front Disp. 는 전면부에서 측정된 수평변위를 의미한다. 본 실험 결과에서는 수평변위 증가에 따라 전단하중이 지속적으로 증가하는 경향을 보여 극한 전단하중을 결정하기가 쉽지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 NCMA(1997)의 설계지침에서 제시하고 있는 전단마찰시험시 사용성을 고려한 벽체 전면의 수평변위를 19mm 이내로 규정하고 있는 것을 참고하여 목재옹벽 전면부의 수평변위가 대략 19mm 발생할 때의 전단하중을 극한 전단하중으로 판단하였다.

그림 7에는 목재옹벽 조립 형태별 수직응력-전단응력 관계를 나타내었고, 표 2에는 목재옹벽의 전단강도를 정리하였다. 그림 7과 표 2에서 알 수 있는 바와 같이, 곡선부 시공성을 개선하기 위한 조립구조를 가진 목재옹벽(Case II 및 Case III)이 기존 목재옹벽(Case I)에 비해 전단강도 특성이 우수한 것으로 나타났다. 즉 그림 7에서 동일한 수직응력 조건에서, Case II와 Case III의 전단강도는 유사하게 나타난 반면에 Case I은 Case II 및 Case III에 비해 대략 10% 이상 전단강도가 작게 측정되었다.

전단시험결과 전단저항 특성은 일반적으로 점착력과 마찰저항(내부마찰각)에 의해 발현된다. 본 실험에 사용한 목재옹벽의 경우는 점착력 성분은 회전나사못에 의한 강제 결속부에서 주로 발현되고, 마찰저항은 속채움 토사에

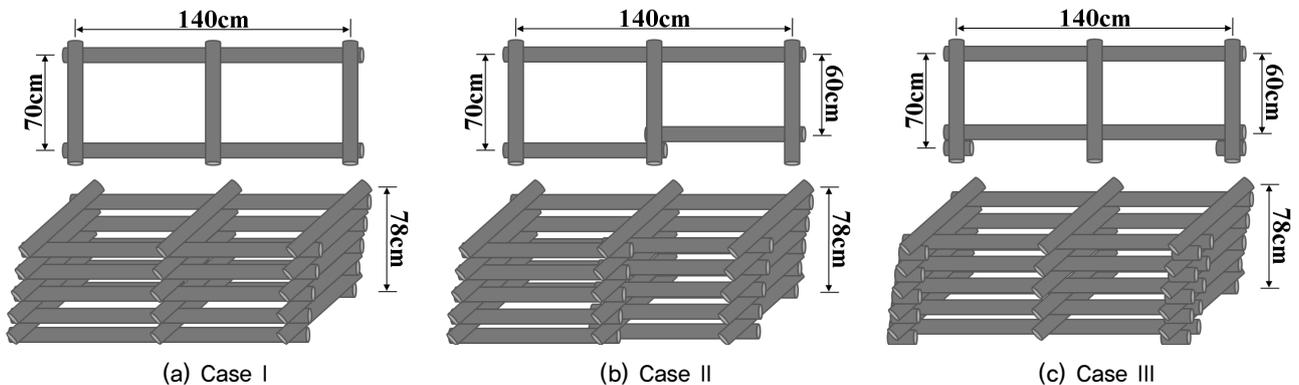


그림 4. 전단시험용 목재옹벽 조립 형태



(a) 목재들 시편 제작



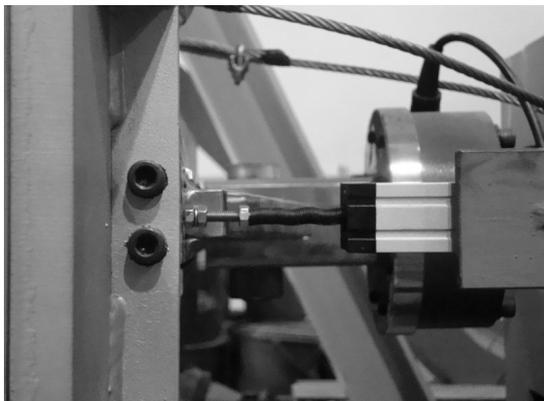
(b) 목재옹벽 거치



(c) 목재옹벽 내부 속채움



(e) 재하판 설치 및 수직하중 재하



(f) 수평변위계 설치



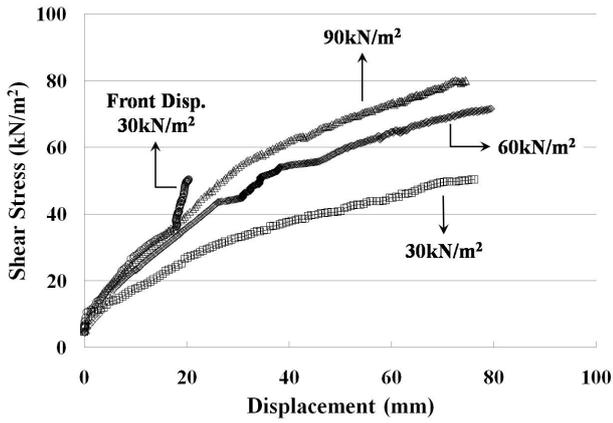
(g) 전단하중 재하

그림 5. 목재옹벽의 전단저항 특성 실험 과정

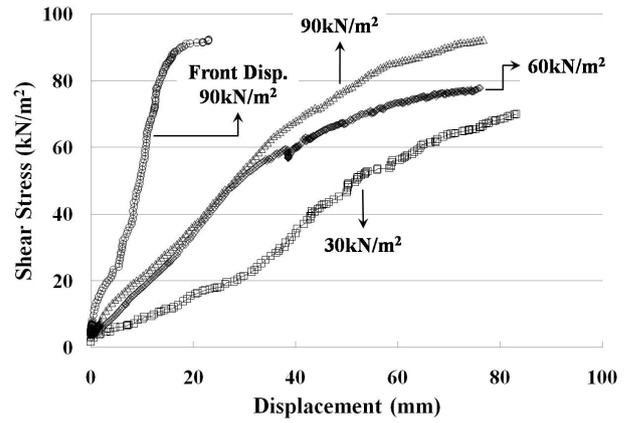
의해 주로 발현될 수 있다. 그림 7과 표 2에 나타난 전단시험 결과를 살펴보면, 점착력은 Case III이 가장 크고 Case I이 가장 작은 반면에, 내부마찰각은 Case I이 가장 크고 Case III이 가장 작게 나타났다. 이와 같은 전단강도 특성이 발현된 원인은, 기존의 목재틀 벽체 조립방식(Case I)에 비해, 개선된 조립방식이 회전나사못에 의한 결속부가 많기 때문이다. 즉, 회전나사못에 의해 강제적으로 결속된 부분에서는 전단강도가 점착력 성분으로 발현되기

때문에 회전나사못에 의한 결속부가 증가 할수록 점착력이 더 커지게 되는 것으로 판단된다.

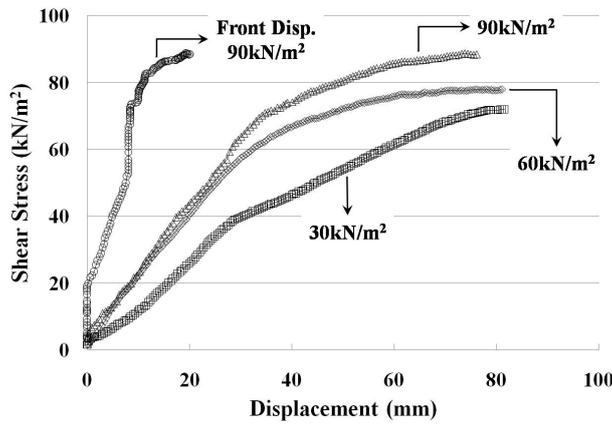
한편, 목재옹벽의 내부마찰각은 이론적으로 속채움 토사에 의해 주로 발현되기 때문에 3종류의 목재옹벽 조립 형태와 관계없이 유사한 크기로 산정될 것으로 예측하였으나, 본 실험결과에서는 목재옹벽 조립 형태에 따라 내부마찰각의 크기가 상당히 상이한 결과를 나타냈다. 이와 같은 원인으로서는 목재옹벽 시편의 전단변형시 속채움 토사



(a) Case I



(b) Case II



(c) Case III

그림 6. 전단변위-전단응력 관계

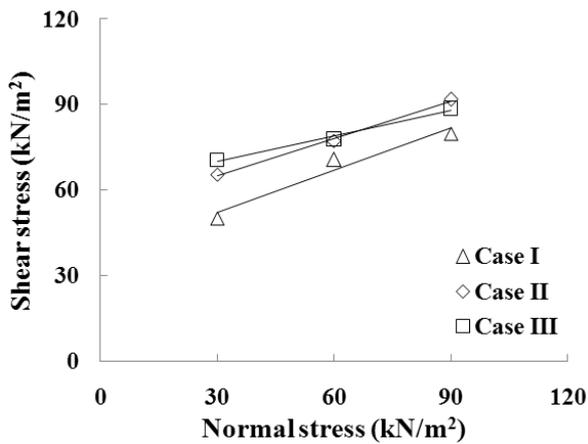


그림 7. 수직응력-전단응력 관계

내부에는 입자 재배열로 인한 체적변형이 발생하게 되는데, 본 실험에서는 강성 재하판을 이용하여 수직하중을 재하하였기 때문에, 체적변형시 속채움흡에 수직하중이 충분히 가해지지 않았을 것으로 판단된다. 이로 인해 실제

표 2. 목재옹벽 전단강도 산정 결과

구분	Normal stress (kN/m^2)	Shear stress (kN/m^2)	c (kN/m^2)	ϕ ($^\circ$)
Case I	30	50.16	37.21	26.3
	60	70.69		
	90	79.84		
Case II	30	65.59	51.99	23.6
	60	77.28		
	90	91.83		
Case III	30	70.53	60.96	16.7
	60	77.84		
	90	88.53		

재하된 수직하중 보다 작은 하중만이 토사에 작용하게 되어 결과적으로 목재옹벽의 내부마찰각이 실제보다 작게 산정된 것으로 볼 수 있다. 실제 현장에서는 목재옹벽 내부의 속채움 토사가 연속적으로 연결되어 있어 중력에 의해 수직하중을 받게 되기 때문에 본 실험에서 보다 더 큰 마찰저항이 발현될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 목재옹벽의 내적안정성 평가 사례

목재옹벽의 내적안정 평가는 식 (1)에 나타낸 바와 같이 벽체 자체의 전단저항력과 배면토압의 비를 산정함으로써 수행될 수 있다. 그림 8(a)에 보인 바와 같이 목재들을 기울어진 형태로 시공하면, 그림 8(b)와 같은 경우 보다 더 큰 전단저항력을 기대할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 안전측 검토를 위해 그림 8(b)와 같이 옹벽저면이 수평하게 시공된 경우를 가정하였으며, 그림 7에 나타낸 전단시험결과를 반영하여 목재옹벽의 내적안정을 검토하였다.

아래와 같은 목재옹벽의 일반적인 설계조건을 토대로 내적안정성을 평가해 보았다. 이 때 토압산정을 위한 뒤채움 흙의 내부마찰각은 현장에서 발생하는 토사나 양질의 토사를 이용하는 경우 등을 고려하여 30°, 32.5° 및 35°로 적용하였다.

(1) 목재옹벽 제원

- 목재옹벽 폭(B) : 1.8m
- 목재옹벽 높이(H) : 1.0m ~ 6.0m
- 옹벽의 기울기(θ) : $90^\circ + 16.7^\circ = 106.7^\circ$
- 옹벽의 벽면 마찰각(δ) : $20^\circ \sim 23.33^\circ$
- 옹벽 속채움 흙의 단위중량(γ_w) : $18.0kN/m^3$

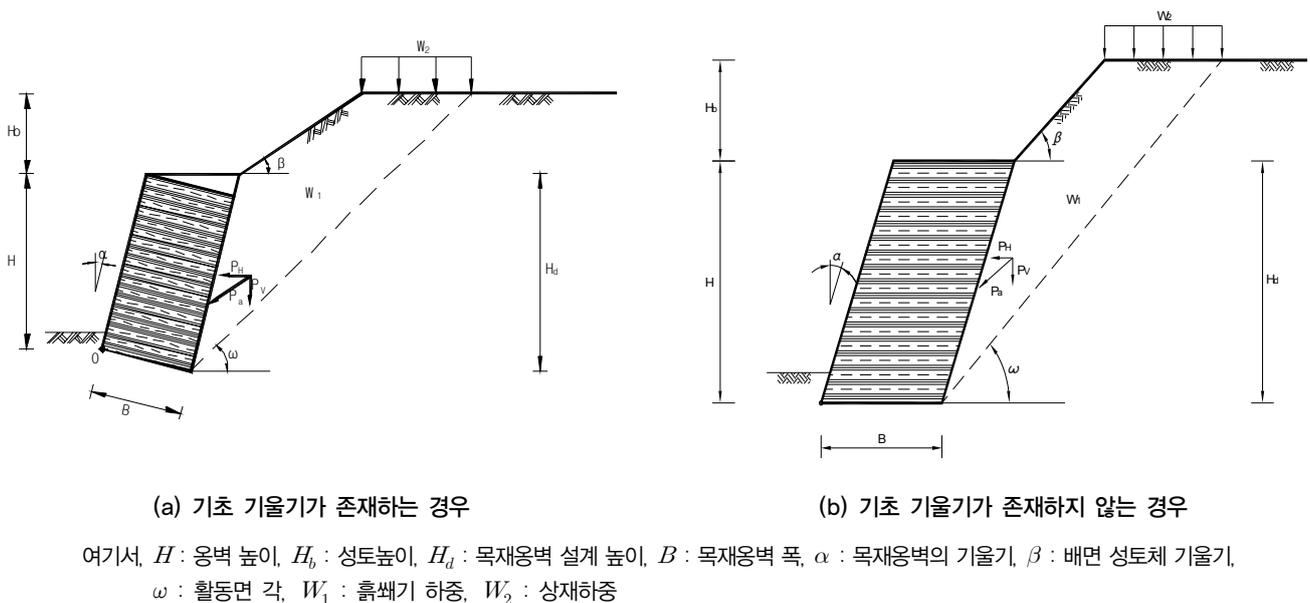
(2) 뒤채움흙 및 배면 성토체 특성

- 단위중량(γ') : $19.0kN/m^3$

- 내부마찰각(ϕ') : $30^\circ \sim 35^\circ$
- 점착력(c) : $0kN/m^2$
- 배면 성토체 기울기(β) : $33.7^\circ(1:1.5)$

대표단면(옹벽높이 $H = 5m$)에 대한 각각의 뒤채움 흙의 조건에 따른 내적안정성 평가결과를 그림 9에 나타내었다. 뒤채움흙의 내부마찰각이 각각 30° 및 32.5°인 경우에는 옹벽 배면의 성토높이를 각각 4m 및 5.5m 이내로 시공해야 내적안정성을 만족하는 것으로 나타났다. 그리고 뒤채움흙의 내부마찰각이 35°인 경우에는 최대 6m~6.5m까지 성토 시공이 가능한 것으로 확인되었다. 결론적으로 그림 9를 이용하면, 뒤채움흙의 품질에 따라 내적안정성을 만족하는 목재들 옹벽 벽체의 높이와 각 벽체 높이별 배면의 성토가능 높이를 쉽게 평가할 수 있다.

안정성 검토결과를 바탕으로 성토높이에 따른 뒤채움 흙의 내부마찰각과 기준안전율 관계를 그림 10에 나타내었다. 그림 10에서 보는바와 같이 옹벽배면의 성토높이를 5.5m~6.5m로 하여 설계/시공 하는 경우에는 뒤채움 흙의 내부마찰각이 32.5°이상인 토사를 적용해야 내적안정성을 만족할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 설계시에는 반드시 현장에 적용되는 뒤채움 흙의 공학적 특성, 즉 내부마찰각을 명확히 평가한 후, 목재옹벽의 내적안정성을 만족할 수 있는 배면성토 높이를 산정하여야 한다.

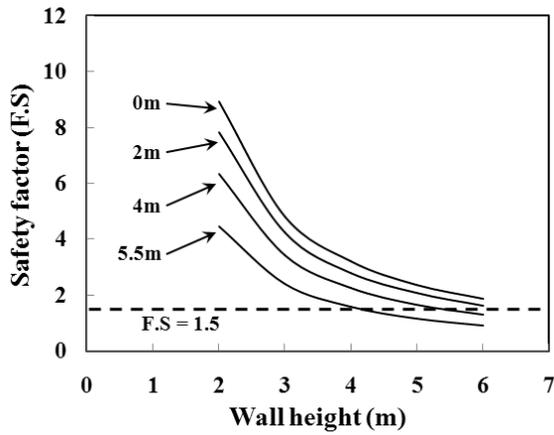


(a) 기초 기울기가 존재하는 경우

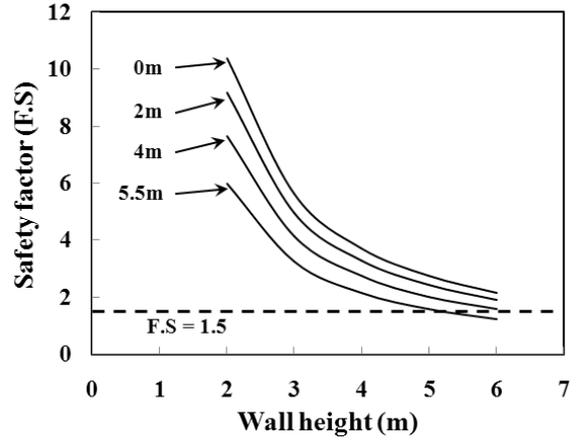
(b) 기초 기울기가 존재하지 않는 경우

여기서, H : 옹벽 높이, H_b : 성토높이, H_d : 목재옹벽 설계 높이, B : 목재옹벽 폭, α : 목재옹벽의 기울기, β : 배면 성토체 기울기, ω : 활동면 각, W_1 : 흙쌓기 하중, W_2 : 상재하중

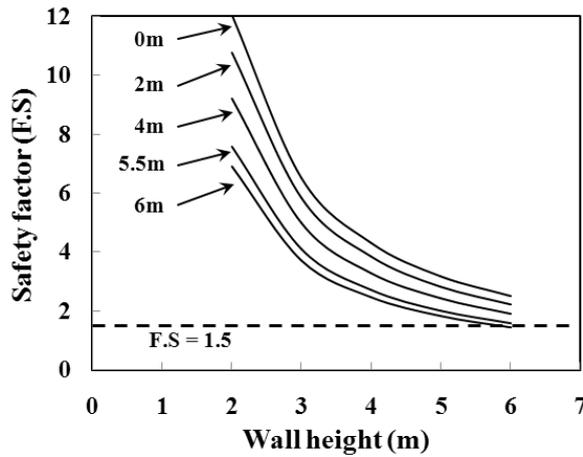
그림 8. 내적안정 검토를 위한 목재들 옹벽 대표단면도



(a) 뒤택움 흙의 내부마찰각이 30°인 경우



(b) 뒤택움 흙의 내부마찰각이 32.5°인 경우



(c) 뒤택움 흙의 내부마찰각이 35°인 경우

그림 9. 성토높이에 따른 옹벽높이-안전율 관계

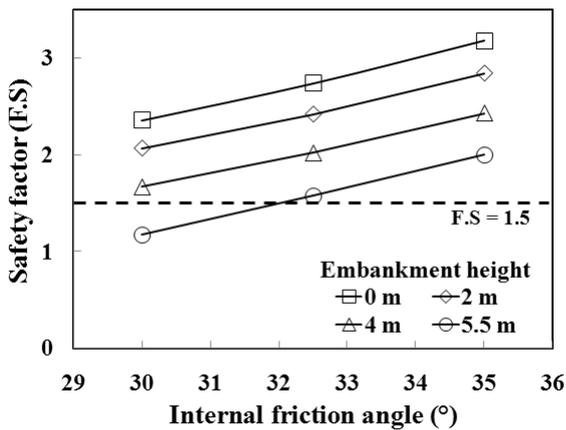


그림 10. 성토높이에 따른 흙의 내부마찰각-안전율 관계

5. 결론

본 연구에서는 정부차원에서 추진되고 있는 간벌사업으로 인해 다량 발생하고 있는 리기다소나무 간벌목재의

수요처 창출방안의 일환으로 최근 그 적용이 점차 증가하고 있는 목재옹벽의 내적안정을 평가하였다. 국내에서 적용되고 있는 목재옹벽은 원주형 가공목재를 현장 조립하여 목재틀을 만들고 그 내부에 토사 혹은 쇄석을 채우는 방식으로 전면벽체를 형성하여 외부토압에 저항한다. 이러한 목재옹벽 설계시 외적안정에 대해서는 중력식옹벽의 외적안정해석과 동일한 방법으로 검토하고 있으나, 내적안정(즉, 목재를 전면벽체의 전단파괴)는 검토하고 있지 않은 실정이어서, 부재 파손, 전면벽체간의 벌어짐, 채움재 누출 등과 같은 문제가 종종 발생하고 있다. 이에 본 연구에서는 조적식 콘크리트 블록옹벽의 전단파괴 검토방법을 적용한 목재옹벽의 내적안정 평가방법을 제안하였다. 또한 목재틀 전면벽체의 조립 방법을 3가지 형태로 변화시켜 일련의 전단시험을 수행하였으며, 이 결과를 바탕으로 목재옹벽의 내적안정을 평가하고 설계차트를 제시하였다.

감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “도시기후 영향 최소화 핵심 녹색 건설기술 개발”의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 박준철, 김건호, 이동흡, 황원중, 홍순일 (2010), “리기다소나무 방부 정각재를 이용한 목재 옹벽의 강도 성능 평가”, *목재공학*, 제38권, 제3호, pp.532-540.
2. 산림청 (2003), *목재의 방부, 방충처리 기준*.
3. 산림청 (2005), *목재틀 옹벽 (Wood frame retaining wall)*, 특허 제10-2005-7717호.
4. 이동흡, 손동원, 김외정 (2007), “간벌재를 이용한 블록형 목재옹벽 현장실연”. *한국목재공학회 2007 학술발표논문집*, pp.247-248.
5. 홍순일, 박준철, 손동원, 이동흡 (2007), “리기다소나무를 이용한 목재옹벽의 강도성능평가”. *한국목재공학회 2007 학술발표논문집*, pp.57-58.
6. NCMA (1997), *Design Manual for Segmental Retaining Walls 2nd Edition*, edited by Collin, J. G., National Concrete Masonry Association, Virginia, USA.

(논문접수일 2011. 5. 6, 심사완료일 2011. 6. 27)