

실단면 수치해석을 통한 선반식 옹벽의 최적 설계 조건

Optimal Design Conditions of Retaining Wall with Relieving Platform through Real-Scale Numerical Analysis

문 인 종¹ Moon, In-Jong 김 병 일² Kim, Byoung-II
한 진 태¹ Han, Jin-Tae Armin W. Stuedlein³

Abstract

Retaining wall with relieving platform has advantages in terms of stability and costs because it decreases the earth pressure by installing the relieving platform. However, there have not been previous studies of the optimal design for the retaining wall with relieving platform in practice. In this study, the optimal design conditions of the retaining wall with relieving platform are proposed by evaluating the reduction effect of lateral earth pressure based on the numerical analysis of 40 cross sections by changing wall types, wall heights, shelf locations and lengths. As a result, the optimal location of a shelf is the central part of a retaining wall ($h/H=0.50$) and the optimal length is recommended to be designed to satisfy $b/L=0.45$, at least.

요 지

캔틸레버식 옹벽의 단점을 보완하고자 개발된 선반식 옹벽은 선반 설치로 인해 옹벽에 작용하는 수평토압 크기가 감소하고 그로 인해 안정성 및 경제성에서 우수하다. 하지만 현장 적용을 위한 선반식 옹벽의 최적 설계에 대한 연구는 아직 진행된 바 없다. 본 연구에서는 옹벽 종류, 선반 위치 및 길이 등의 조건을 변화시켜 총 40개 단면에 대해 수치해석을 수행하였으며, 수평토압 감소효과와 안정성 검토를 통해 선반식 옹벽의 최적 설계 조건을 제시하고자 하였다. 연구결과, 선반식 옹벽 설계 시 선반의 최적 위치는 $h/H=0.50$, 최적 길이는 최소 $b/L=0.45$ 이상을 만족하도록 설계하는 것이 가장 바람직한 것으로 나타났다.

Keywords : Retaining wall, Relieving platform, Numerical analysis, Earth pressure, Optimal design

1. 서 론

옹벽은 성토와 절토로 인해 자연 사면을 유지할 수 없는 경우 흙 또는 기타 재료의 안정성을 확보하기 위해

사용하는 구조물이다. 우리나라에서는 검증된 옹벽 구조물이라는 장점으로 인해 캔틸레버식 옹벽을 가장 많이 사용하고 있다. 하지만 캔틸레버식 옹벽은 높이가 높아질수록 안정성 및 경제성이 불리한 단점이 있다. 이를

1 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engrg. Research Institute, Korea Institute of Civil Engrg. & Building Technology)

2 정회원, 명지대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Myongji Univ., Tel: +82-31-330-6415, Fax: +82-31-336-9705, bikim@mju.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 비회원, 오레곤 주립대학교 토목건설공학과 부교수 (Associate Prof., School of Civil and Construction Engrg., Oregon State Univ., U.S.A.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

보완하기 위해 개발된 선반식 옹벽은 Fig. 1과 같이 옹벽 상단 부근에 하나 이상의 선반을 설치함에 따라 옹벽에 작용하는 수평토압을 감소시키는 효과가 뚜렷하다. 따라서 캔틸레버식 옹벽과 비교할 경우 상대적으로 높은 옹벽의 시공이 가능하고, 옹벽의 높이가 일정할 경우 옹벽 단면 크기를 감소시킬 수 있기 때문에 안정성 및 경제성에서 유리하다(Bell, 1987).

Padhye & Ullagaddi(2005)에 따르면 선반식 옹벽은 1927년 Univ. of Western Australia의 School of Civil and Resource Engineering에서 처음 소개되었다. Jumikis(1964)는 한 개 이상의 선반을 추가한 부벽식 옹벽에 대해서 연구를 수행하여 선반의 존재가 옹벽에 작용하는 수평토압 감소와 옹벽의 전체적인 안정성 증가에 효과가 있음을 발표하였다. Ray Chaudhuri(1973)는 Coulomb(1776)의 토압이론을 적용하여 다양한 선반 설치 위치와 선반 길이에 따른 선반식 옹벽에 작용하는 전주동토압의 감소 크기와 분포를 제시하였다. 최근에는 Liu & Lin(2008)이 짧은 선반과 긴 선반을 갖는 경우에 대한 판단기준 및 수평토압 계산법을 제안하였다.

국내에서는 Yang et al.(2011)에 의해 선반식 옹벽에 대한 연구가 처음 발표되었다. 이후 추가적인 모형시험에 대한 연구(Kim et al., 2012; Moon et al., 2013)와 수치해석에 관한 연구(Yoo et al., 2012; Moon et al., 2014) 등을 통해 선반식 옹벽이 캔틸레버식 옹벽에 비해 수평토압 감소효과가 뚜렷함을 확인하였다.

하지만 국내외 연구결과는 고전적인 토압이론에 의한 이론적 접근이 다수이며, 다양하지 못한 조건에서 수행된 모형시험과 수치해석이 대부분이다. 따라서 기존 연구결과를 통해 현장 적용을 위한 선반식 옹벽의 최적 설계 조건을 제시하기에는 어려운 문제가 있으며, 국내 현장 적용을 위한 직접적인 연구사례는 존재하지 않는다.

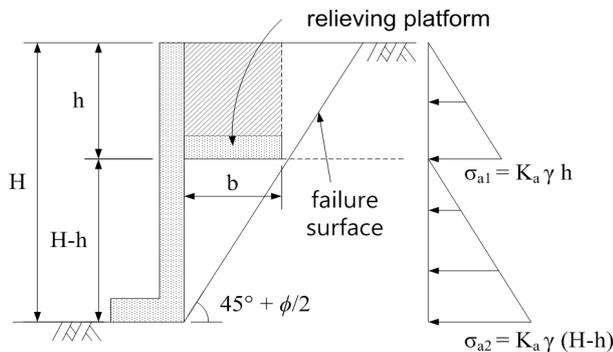


Fig. 1. Concept of retaining wall with relieving platform

것으로 파악된다.

본 연구에서는 기존 연구(Yoo et al., 2012; Moon et al., 2014; Moon, 2016)에서 사용된 수치해석 모델을 수정 및 확장하여 실단면 수치해석을 수행하고, 실단면 수치해석을 통해 얻은 수평토압 분포를 수평토압 감소효과 및 안정성(활동, 전도) 검토 측면에서 각각 분석하여 선반식 옹벽의 최적 설계조건(선반 위치 및 길이)을 제시하고자 하였다.

2. 수치해석

2.1 기존 수치해석 모델

기존 연구(Yoo et al., 2012; Moon et al., 2014; Moon, 2016)에서 수행된 수치해석은 모두 실내모형시험을 모사하였고, 수치해석 결과를 실내모형시험 결과와 비교 및 분석하여 사용된 수치해석 모델의 적정성을 판단하였다.

Yoo et al.(2012)과 Moon et al.(2014)의 연구결과를 통해 선반식 옹벽의 수평토압 감소효과를 판단할 수 있지만, 수치해석 결과와 실내모형시험 결과의 차이가 큰 것으로 나타났다. 따라서 Moon(2016)의 연구에서는 수치해석과 실내모형시험의 결과값 차이를 줄이고자 하였다. 기존 수치해석 모델을 사용하되 수치해석 단면을 실내모형시험의 실제 모형 및 구조를 최대한 유사하게 구현하기 위해서 실내모형시험 장비들(옹벽판, 모형토조, 되메움판, 선반, 로드셀 등)을 세분화한 뒤 요소 및 물성값을 각각 적용하였다(Moon, 2016). 그 결과 Fig. 2와 같이 수치해석(FR-)과 실내모형시험(MR-)의 결과값은 상당히 유사한 것으로 나타났으며, 수치해석 모델이

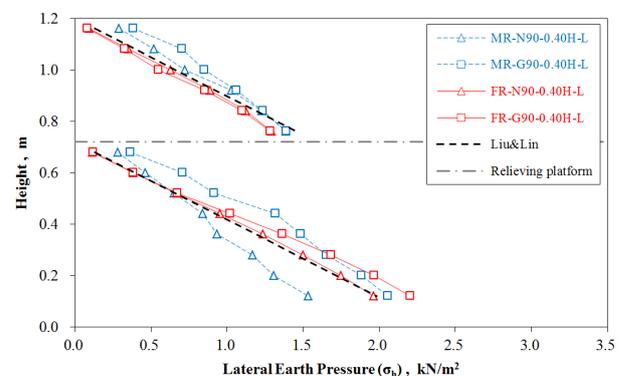


Fig. 2. Comparison of model test results and numerical analysis results

선반 상, 하부의 토압분포 특성을 유사하게 구현하는 것으로 나타났다.

2.2 수치해석에 사용한 프로그램

본 연구에서는 지반분야에서 폭넓게 사용되고 있는 2차원 유한요소코드(finite element code for soil and rock analyses)인 PLAXIS 2D를 사용하여 평면변형(plane strain) 해석을 적용한 수치해석을 수행하였다. 이 프로그램은 연약지반의 압밀거동 뿐만 아니라 과압밀 점토 그리고 사질토 및 암반지반에도 적용이 가능한 다양한 재료모형을 가지고 있다. 사용 가능한 지반 모델은 Linear-elastic model, Mohr-Coulomb model, Cam-clay model, Creep model, Hardening soil model, Jointed rock model 등이며 고차요소(15절점 삼각형 요소)의 사용으로 심한 비선형 거동의 해석에도 용이하다.

2.3 수치해석에 사용한 단면 및 모델링

일반적으로 옹벽을 설계할 때에는 옹벽의 설계 높이를 결정한 뒤 단면의 치수를 가정하게 되고, 가정된 단면을 안정성과 구조적 적합성에 대해 검토한다. 따라서 이 연구에서는 해석 단면을 캔틸레버식 옹벽의 단면 치

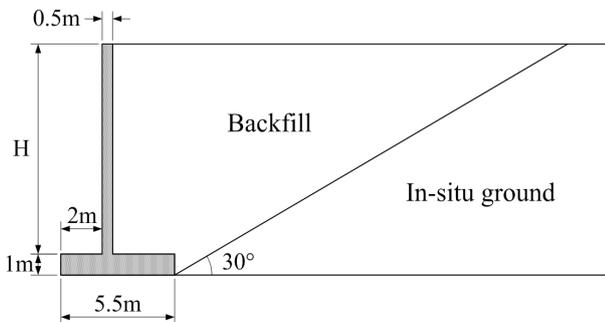


Fig. 3. Cross section of cantilever wall

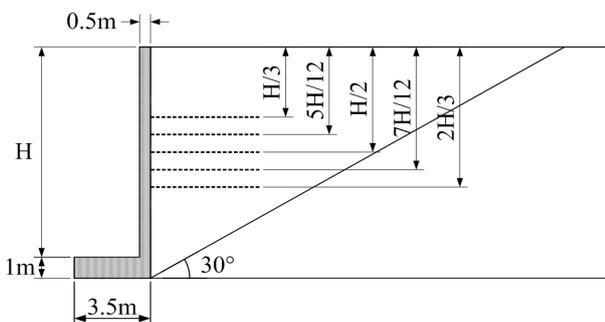


Fig. 4. Cross section of retaining wall with relieving platform

수 가정범위를 참고하여 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 캔틸레버식 옹벽과 선반식 옹벽의 단면을 결정하였다. 캔틸레버식 옹벽 단면 치수 가정범위는 다음과 같다(Oh, 2001).

- 기초저판 폭은 옹벽 높이의 1/2~2/3
- 기초저판 두께는 옹벽 높이의 7%~10%
- 앞굽판(toe)의 폭은 저판 폭의 1/4~1/3
- 벽체의 두께는 최소 30cm 이상

수치해석에서는 결정된 단면을 이용하여 옹벽 종류와 선반 설치 조건에 따라 캔틸레버식 옹벽과 선반식 옹벽을 각각 모델링하였으며, Fig. 5는 선반식 옹벽의 모델링 예이다. 옹벽과 굴착면에는 인터페이스 요소를 적용하여 흙-옹벽, 흙-굴착면 사이에 발생하는 벽마찰 효과를 고려할 수 있도록 하였다.

2.4 수치해석에 사용한 모델 및 물성값

기존 연구(Yoo et al., 2012; Moon et al., 2014; Moon, 2016)를 통해 수치해석을 사용하여 선반식 옹벽의 토압 분포를 유사하게 예측이 가능한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 기존 연구에서 사용한 수치해석 모델을 수정 및 확장하여 실규모에 맞는 실단면 수치해석을 수행하였다. 기존 연구와 달리 실단면 수치해석에서는 원지반(In-situ ground)과 뒤채움 흙(backfill)은 Hardening soil model을 적용하였고, 옹벽(wall)은 선형 탄성 거동을 예측하는 Linear elastic model을 적용하였다. Fig. 6은 삼축압축시험을 통해 파악할 수 있는 응력에 따른 흙의 변형 특성을 그래프로 나타낸 것이다. 그림을 통해 흙은 응력에 따라 탄성계수(E_{50} , E_{ur} , E_{ocd}) 값이 변하는데 Hardening soil model은 이러한 탄성계수를 입력자료로

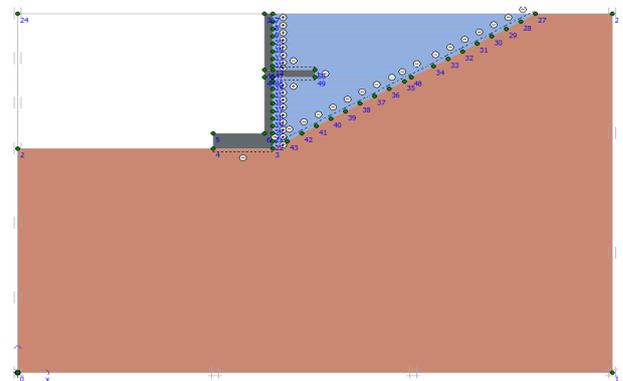


Fig. 5. Modelling for numerical analysis

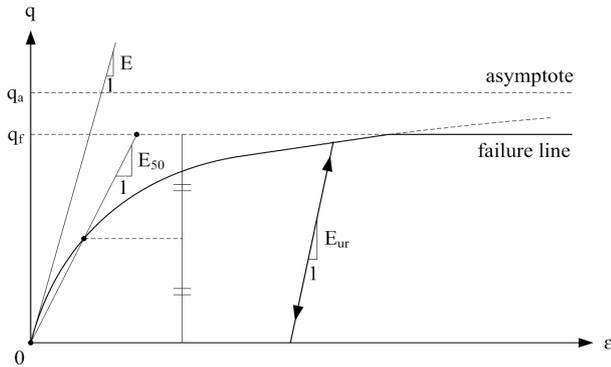


Fig. 6. Soil behavior by triaxial compression test

Table 1. Structure and soil properties

Classification	In-situ ground	Backfill	Wall
Model	Hardening soil	Hardening soil	Linear elastic
Soil type	Weathered rock	Sandy soil	-
Unit weight (kN/m ³)	21.0	17.0	24.0
Cohesion (kPa)	30.0	0.1	-
Friction angle (°)	33.0	27.0	-
Poisson's ratio	0.30	0.35	0.15
Modulus (MPa)	Young's	-	25,000
	Oedometer	150	-
	Unloading	450	-

사용하기 때문에 흙의 변형특성을 훨씬 더 정확하게 구현할 수 있으며, 지반 거동을 보다 진보적으로 시뮬레이션 할 수 있는 장점이 있다(Schanz et al., 1999).

수치해석 단면은 Fig. 5와 같이 크게 원지반, 뒤택흙 흙, 옹벽으로 구성된다. 원지반은 옹벽 구조물을 지지하는데 적합한 풍화암으로 고려하였고, 뒤택흙 흙은 옹벽의 뒤택흙 재료로 주로 사용하는 사질토(토사)로 결정하였다. 수치해석 단면(원지반, 뒤택흙 흙, 옹벽)의 물성값은 각종 지반공학 관련 문헌자료(Hunt, 1984; Das, 1995)와 실제 설계 적용사례 등을 참고하여 각각 평균값을 적용하였다. 수치해석에 사용된 모델 및 물성값을 정리하면 Table 1과 같다.

2.4 수치해석 조건

옹벽고, 선반 위치 및 길이에 따른 캔틸레버식 옹벽과 선반식 옹벽에 작용하는 수평토압의 변화를 비교, 분석하기 위해서 Table 2와 같은 수치해석 조건을 적용하였다. 옹벽의 형태는 캔틸레버식 옹벽과 선반식 옹벽의

Table 2. Conditions for numerical analysis

Wall type	Height of wall (H)	Height ratio (h/H)	Length ratio (b/L)
Cantilever, Relieving platform	8 m,	0.67,	0.90,
	9 m,	0.58,	0.75,
	10 m,	0.50,	0.60,
	11 m	0.42,	0.45,
		0.33	0.30

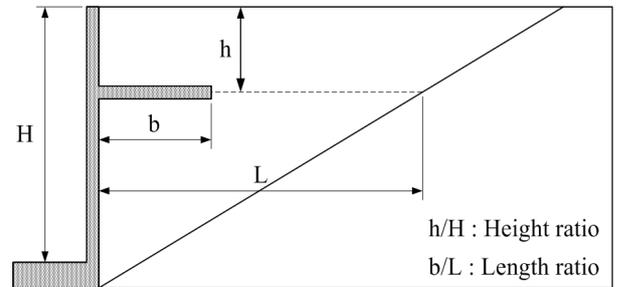


Fig. 7. Concept of height ratio and length ratio

로 2가지이고, 옹벽고(H)는 캔틸레버식 옹벽과 선반식 옹벽이 실제 설계에 반영되는 높이를 고려하여 8m, 9m, 10m, 11m 등 4가지 조건으로 결정하였다. 선반 위치(h)는 Fig. 4에서 나타낸 것과 같이 5가지로 결정하였는데, 옹벽고에 따라 선반 위치를 일정한 값으로 나타내기 위해서 높이비(h/H)를 적용하였다. 따라서 선반 위치는 높이비 0.67, 0.58, 0.50, 0.42, 0.33 등 5가지이다. 선반 길이는 Fig. 7과 같이 길이비(b/L, 선반 위치 기준으로 옹벽으로부터 굴착지점까지 수평거리 L에 대한 선반 길이 b의 비율)를 적용하여 0.90, 0.75, 0.60, 0.45, 0.30 등 5가지로 결정하였다. 높이비(h/H)와 길이비(b/L)의 개념은 Fig. 7에 나타내었다.

3. 수치해석 결과 및 분석

3.1 최적 선반 위치

3.1.1 수평토압 감소효과

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 캔틸레버식 옹벽과 선반식 옹벽의 수평토압 작용면을 나타낸 그림이다. 캔틸레버식 옹벽의 저판 상부와 선반식 옹벽의 선반 상부에 위치한 토사는 옹벽에 변위가 발생하는 경우 옹벽과 같은 거동을 하게 된다. 따라서 캔틸레버식 옹벽과 선반식 옹벽은 옹벽 저판 또는 선반 뒤축에서 연직 상향으로 뺀 선을 가상배면으로 설정하여 수평토압을 산정하게 된다. 본 연구에서는 Fig. 8 및 Fig. 9와 같은 방법으로 수평토압

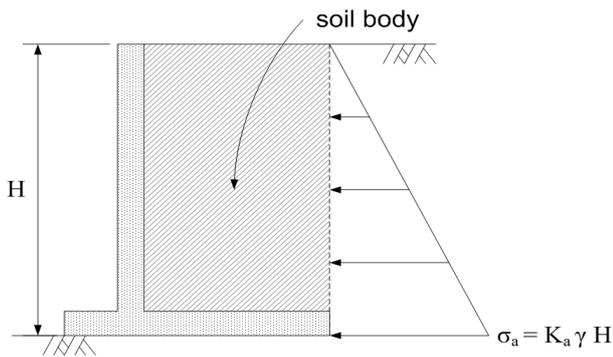


Fig. 8. Lateral earth pressure distribution of cantilever wall

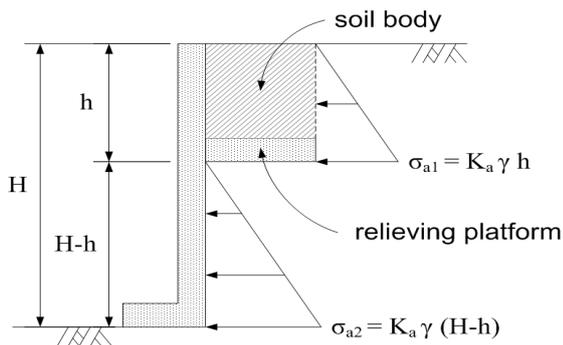


Fig. 9. Lateral earth pressure distribution of retaining wall with relieving platform

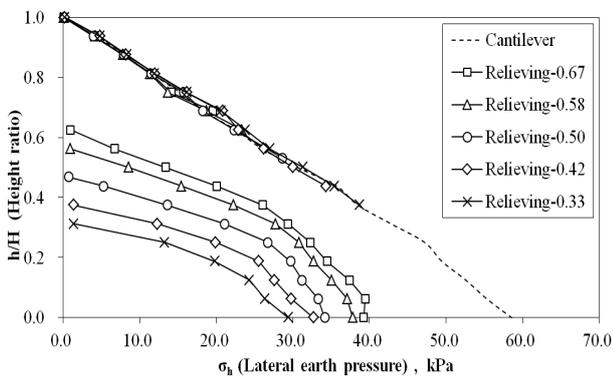


Fig. 10. Lateral earth pressure distribution according to the type of retaining wall (H = 8 m)

분포를 찾아낸 뒤 수평토압 감소효과와 활동 및 전도 안정성 검토를 수행하였다.

Figs. 10, 11, 12, 13은 옹벽고가 각각 8m, 9m, 10m, 11m일 때 선반 위치에 따른 캔틸레버식 옹벽과 선반식 옹벽에 작용하는 수평토압 분포를 나타낸 것이다. 이 때 선반 길이는 모든 조건에서 $b/L=0.60$ 으로 동일하다.

Fig. 10과 Fig. 11을 보면 옹벽고가 8m, 9m일 때 선반식 옹벽의 상부 수평토압 분포는 캔틸레버식 옹벽과 대체로 비슷한 경향을 보이지만, Fig. 12와 Fig. 13을 보면 옹벽고가 10m, 11m일 때 선반식 옹벽의 상부 수평토압 분포는 캔틸레버식 옹벽보다 다소 큰 경향을 보인다. 이러한 경향은 옹벽고가 높아질수록 캔틸레버식 옹벽보다 선반식 옹벽의 수평변위가 상대적으로 작아지기 때문에 선반 상부에서의 수평토압이 다소 크게 산정된 것으로 판단된다.

그림을 통해 캔틸레버식 옹벽은 높이가 낮아짐에 따라 수평토압이 연속적으로 증가하지만, 선반식 옹벽은 선반이 설치됨에 따라 선반 하부에서 수평토압이 급격하게 감소하고 높이가 낮아짐에 따라 다시 증가하는 경

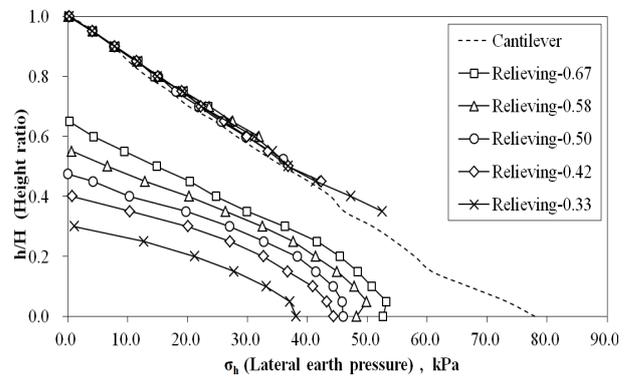


Fig. 12. Lateral earth pressure distribution according to the type of retaining wall (H = 10 m)

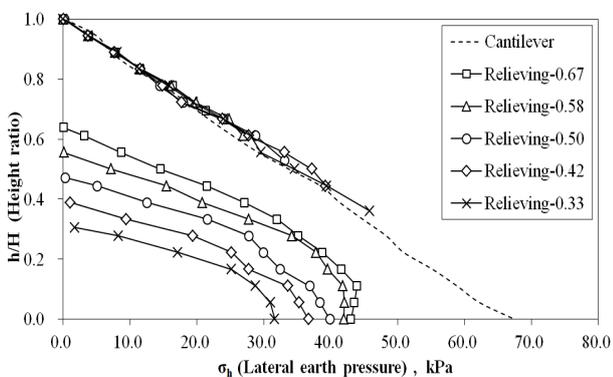


Fig. 11. Lateral earth pressure distribution according to the type of retaining wall (H = 9 m)

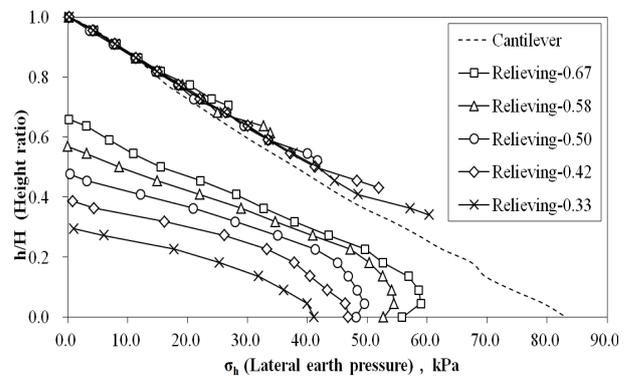


Fig. 13. Lateral earth pressure distribution according to the type of retaining wall (H = 11 m)

향을 확인할 수 있다. 이는 선반식 옹벽에 설치된 선반이 상부 흙의 무게를 대부분 지탱하기 때문에 하부에서는 상부 흙의 무게 영향을 거의 받지 않게 되는 선반식 옹벽의 일반적인 특징인 것으로 판단할 수 있다.

또한 선반식 옹벽은 캔틸레버식 옹벽에 비해 옹벽 하부로 갈수록 수평토압 증가율이 작아지는 경향이 뚜렷한 것을 확인할 수 있으며 기존 연구결과(Kim et al., 2012; Yoo et al., 2012; Moon et al., 2014)와 비슷한 경향을 보인다. 이것은 선반식 옹벽은 주어진 단면에서 옹벽 저판의 뒷굽이 없기 때문에 캔틸레버식 옹벽에 비해 뒤채움이 협소하게 되고, 그로 인한 야칭효과(Paik & Salgado, 2003)가 뚜렷하게 발휘되는 것으로 판단된다.

Table 3은 수평토압 분포 면적을 계산하여 수평토압 합력과 수평토압 감소율을 옹벽고에 따라 계산한 결과이다. Table 3을 통해 선반 위치에 따른 선반식 옹벽은 캔틸레버식 옹벽에 비해 평균 약 33%의 수평토압 감소효과를 기대할 수 있으며, 모든 옹벽고에서 선반 위치가

$h/H=0.50$ 일 때 수평토압 감소효과가 가장 좋은 것을 확인할 수 있다. 이는 Liu & Lin(2008)의 연구결과에 부합한다. 또한 옹벽고가 11m일 때 8m보다 수평토압 감소율이 작지만 최대 약 33%의 비교적 큰 감소율을 보인다. 일반적으로 캔틸레버식 옹벽은 옹벽고가 6~7m로 제한되는데 선반식 옹벽은 이러한 캔틸레버식 옹벽의 단점을 극복할 수 있는 옹벽 구조물이라 판단된다.

3.1.2 안정성 검토

(1) 활동 안정성

옹벽은 배면에 작용하는 토압의 수평성분에 의해 활동(수평이동)을 하게 되고, 활동에 저항하는 힘은 옹벽 저면의 마찰력과 점착력이 있다. 활동 안정성은 (옹벽 저면의 마찰력, 점착력/토압의 수평성분)에 의해 나타나며, 일반적으로 활동에 대한 저항력이 옹벽에 작용하는 수평력의 1.5배 이상 이어야 한다(Kim et al., 2015).

Table 4는 수치해석을 통해 얻은 수평토압 분포를 사

Table 3. Comparison of reduction rate of lateral earth pressure

Height of wall	Type of wall	Resultant force (kN/m)	Reduction rate (%)	
8 m	Catilever	302.31	-	
	Relieving platform	$h/H=0.67$	202.32	33.08
		$h/H=0.58$	195.39	35.37
		$h/H=0.50$	190.18	37.09
		$h/H=0.42$	195.16	35.44
		$h/H=0.33$	197.79	34.57
9 m	Catilever	367.75	-	
	Relieving platform	$h/H=0.67$	248.89	32.32
		$h/H=0.58$	248.21	32.51
		$h/H=0.50$	238.47	35.16
		$h/H=0.42$	239.66	34.83
		$h/H=0.33$	246.21	33.05
10 m	Catilever	441.71	-	
	Relieving platform	$h/H=0.67$	301.91	31.65
		$h/H=0.58$	298.93	32.32
		$h/H=0.50$	290.83	34.16
		$h/H=0.42$	296.21	32.94
		$h/H=0.33$	302.25	31.57
11 m	Catilever	519.09	-	
	Relieving platform	$h/H=0.67$	363.94	29.89
		$h/H=0.58$	357.89	31.05
		$h/H=0.50$	348.82	32.80
		$h/H=0.42$	356.38	31.35
		$h/H=0.33$	359.53	30.74

Table 4. Comparison of increase rate of safety factor for sliding ($F_s \geq 1.5$)

Height of wall	Type of wall	Safety factor	Increase rate (%)	O.K / N.G	
8 m	Catilever	1.73	-	O.K	
	Relieving platform	$h/H=0.67$	2.29	32.37	O.K
		$h/H=0.58$	2.45	41.62	O.K
		$h/H=0.50$	2.59	49.71	O.K
		$h/H=0.42$	2.52	45.66	O.K
		$h/H=0.33$	2.42	39.88	O.K
9 m	Catilever	1.54	-	O.K	
	Relieving platform	$h/H=0.67$	2.07	34.42	O.K
		$h/H=0.58$	2.17	40.91	O.K
		$h/H=0.50$	2.31	50.00	O.K
		$h/H=0.42$	2.29	48.70	O.K
		$h/H=0.33$	2.16	40.26	O.K
10 m	Catilever	1.37	-	N.G	
	Relieving platform	$h/H=0.67$	1.91	39.42	O.K
		$h/H=0.58$	2.04	48.91	O.K
		$h/H=0.50$	2.13	55.47	O.K
		$h/H=0.42$	2.09	52.55	O.K
		$h/H=0.33$	1.98	44.53	O.K
11 m	Catilever	1.25	-	N.G	
	Relieving platform	$h/H=0.67$	1.78	42.40	O.K
		$h/H=0.58$	1.91	52.80	O.K
		$h/H=0.50$	2.00	60.00	O.K
		$h/H=0.42$	1.95	56.00	O.K
		$h/H=0.33$	1.86	48.80	O.K

용하여 옹벽의 활동 안정성 검토를 수행한 결과를 수치로 표현한 것이다. Table 4를 통해 캔틸레버식 옹벽은 정해진 단면에서 옹벽고가 8m, 9m인 경우 활동 안전율 기준($F_s \geq 1.5$)을 만족하지만 옹벽고가 10m, 11m에서는 만족하지 못하는 결과를 보여주고 있다. 하지만 선반식 옹벽은 정해진 단면에서 활동 안전율 기준을 모두 만족한 것으로 나타났다. 이는 선반식 옹벽에 설치된 선반에 의해 옹벽에 작용하는 수평토압의 크기가 감소되고 그로 인해 활동을 일으키는 힘(활동력)이 감소한 것이 가장 큰 원인으로 판단된다.

또한 선반 위치에 따른 선반식 옹벽은 캔틸레버식 옹벽에 비해 평균 46.22%의 활동 안전율 증가를 기대할 수 있으며, 모든 옹벽고에서 선반 위치가 $h/H=0.50$ 일 때 활동에 대해 가장 안정한 것을 확인할 수 있다. 또한 옹벽고가 8m에서 11m로 갈수록 활동 안전율은 평균 2.45에서 평균 1.90으로 감소하지만, 옹벽고 11m에서 활동 안전율 증가율이 최대이고 모두 기준 안전율을 만족하기 때문에 높은 높이의 옹벽을 설계할 경우 캔틸레버식 옹벽보다는 활동 안정성 측면에서 유리한 옹벽 구조물이라 판단된다.

(2) 전도 안정성

옹벽에는 토압에 의해 저판의 양끝을 중심으로 옹벽을 앞으로 회전시키려고 하는 모멘트가 작용하는데 이것을 전도모멘트라 하고, 이것에 대하여 옹벽의 자중, 저판상부의 토사 중량 등에 의해 전도에 저항하는 모멘트가 작용한다. 전도 안정성은 (저항모멘트/전도모멘트)에 의해 나타나며, 전도에 대해 안정하려면 저항모멘트는 전도모멘트의 2.0배 이상이어야 한다(Kim et al., 2015).

Table 5는 수평토압 분포를 사용하여 옹벽의 전도 안정성 검토를 수행한 결과를 수치로 표현한 것이다. Table 5를 통해 캔틸레버식 옹벽은 정해진 단면에서 옹벽고가 8m인 경우를 제외하고 나머지 옹벽고에서 전도 안전율 기준($F_s \geq 2.0$)을 만족하지 못한 것으로 나타났다. 하지만 선반식 옹벽은 정해진 단면에서 전도 안전율 기준을 모두 만족한 것으로 나타났다. 이것은 선반식 옹벽에 설치된 선반에 의해 옹벽에 작용하는 수평토압의 크기가 감소되어 전도모멘트가 감소하였으며, 캔틸레버식 옹벽의 뒷굽 길이보다 선반 길이가 더 길기 때문에 선반 상부 토체의 단면적이 커짐에 따라 저항모멘트가 증가한 것이 가장 큰 원인으로 판단된다.

또한 선반 위치에 따른 선반식 옹벽은 캔틸레버식 옹

벽에 비해 평균 98.33%의 전도 안전율 증가를 기대할 수 있고, 모든 옹벽고에서 선반 위치가 $h/H=0.67$ 일 때 전도에 대해 가장 안정한 것을 확인할 수 있다. 또한 옹벽고가 8m에서 11m로 갈수록 전도 안전율은 평균 4.20에서 평균 3.17으로 감소하지만, 옹벽고 11m에서 전도 안전율 증가율이 최대이고 모두 기준 안전율을 만족하기 때문에 높은 높이의 옹벽을 설계할 경우 캔틸레버식 옹벽보다는 전도 안정성 측면에서 유리한 옹벽 구조물이라 판단된다.

3.1.3 최적 선반 위치 결정

수평토압 감소효과와 활동 안정성 검토를 통해서 옹벽 중심부($h/H=0.50$)에 선반이 위치하는 것이 가장 효과적인 것으로 나타났지만, 전도 안정성 검토의 경우에는 옹벽 상부($h/H=0.67$)에 선반이 위치하는 것이 가장 효과적인 것으로 나타났다. 옹벽 상부와 중심부를 비교했을 때 전도 안전율은 기준 안전율을 모두 만족하고

Table 5. Comparison of increase rate of safety factor for overturning ($F_s \geq 2.0$)

Height of wall	Type of wall	Safety factor	Increase rate (%)	O.K / N.G	
8 m	Cantilever	2.41	-	O.K	
	Relieving platform	$h/H=0.67$	4.63	92.12	O.K
		$h/H=0.58$	4.69	94.61	O.K
		$h/H=0.50$	4.41	82.99	O.K
		$h/H=0.42$	3.91	62.24	O.K
9 m	Cantilever	1.99	-	N.G	
	Relieving platform	$h/H=0.67$	4.20	111.06	O.K
		$h/H=0.58$	4.12	107.04	O.K
		$h/H=0.50$	3.97	99.50	O.K
		$h/H=0.42$	3.52	76.88	O.K
10 m	Cantilever	1.69	-	N.G	
	Relieving platform	$h/H=0.67$	4.06	140.24	O.K
		$h/H=0.58$	3.87	128.99	O.K
		$h/H=0.50$	3.73	120.71	O.K
		$h/H=0.42$	3.27	93.49	O.K
11 m	Cantilever	1.43	-	N.G	
	Relieving platform	$h/H=0.67$	3.74	161.54	O.K
		$h/H=0.58$	3.68	157.34	O.K
		$h/H=0.50$	3.33	132.87	O.K
		$h/H=0.42$	2.80	95.80	O.K
	$h/H=0.33$	2.30	60.84	O.K	

있고, 전도 안전율 증가율의 차이는 평균 약 17%로 크지 않다. 따라서 수평토압 감소효과, 활동 및 전도 안정성을 종합적으로 고려했을 때 선반의 최적 위치는 옹벽의 중심부($h/H=0.50$)가 가장 적절한 것으로 판단된다.

3.2 최적 선반 길이

3.2.1 수평토압 감소효과

Figs. 14, 15, 16, 17은 옹벽고가 각각 8m, 9m, 10m, 11m일 때 선반 길이에 따른 캔틸레버식 옹벽과 선반식 옹벽에 작용하는 수평토압 분포를 나타낸 것이다. 이 때 선반 위치는 모든 조건에서 최적 선반 위치인 $h/H=0.50$ 으로 동일하다.

Figs. 14, 15, 16을 보면 옹벽고가 8m, 9m, 10m일 때 선반식 옹벽의 상부 수평토압 분포는 캔틸레버식 옹벽과 대체로 비슷한 경향을 보이지만, Fig. 17을 보면 옹벽고가 11m일 때 선반식 옹벽의 상부 수평토압 분포는 캔틸레버식 옹벽보다 차이는 크지 않지만 다소 큰 경향을 보인다. 이러한 경향은 3.1.1절에서 언급하였듯이 옹벽

고가 높아질수록 캔틸레버식 옹벽보다 선반식 옹벽의 수평변위가 상대적으로 작아지기 때문에 선반 상부에서의 수평토압이 다소 크게 산정된 것으로 판단된다.

또한 그림을 통해 선반식 옹벽에서 선반 하부의 수평토압 분포는 3.1.1절에서 언급하였듯이 선반 상부 흙의 무게 영향을 거의 받지 않는 선반식 옹벽의 일반적인 특징과 옹벽 하부로 갈수록 아칭효과에 의해 수평토압 증가율이 작아지는 경향이 뚜렷해지는 것을 다시 확인할 수 있다. 그러나 선반 길이에 따라 수평토압 분포를 비교하면 긴 선반과 짧은 선반 사이의 수평토압 크기 차이는 그다지 뚜렷하지 않은 것을 알 수 있다.

Table 6은 3.1.1절에서와 같이 수평토압 분포 면적을 계산하여 수평토압 합력과 수평토압 감소율을 옹벽고에 따라 계산한 결과이다. Table 6을 통해 선반 길이에 따른 선반식 옹벽은 캔틸레버식 옹벽에 비해 평균 35.23%의 수평토압 감소효과를 기대할 수 있으며, 선반 길이는 $b/L=0.90$ 일수록 수평토압 감소효과가 가장 좋은 것을 확인할 수 있다. 하지만 $b/L=0.90$ (긴 선반)와 $b/L=0.30$ (짧은 선반)의 수평토압 감소율 차이는 평균 약 5%로

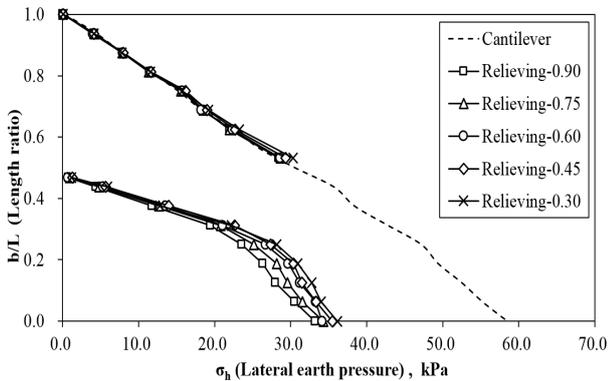


Fig. 14. Lateral earth pressure distribution according to the type of retaining wall ($H = 8\text{ m}$)

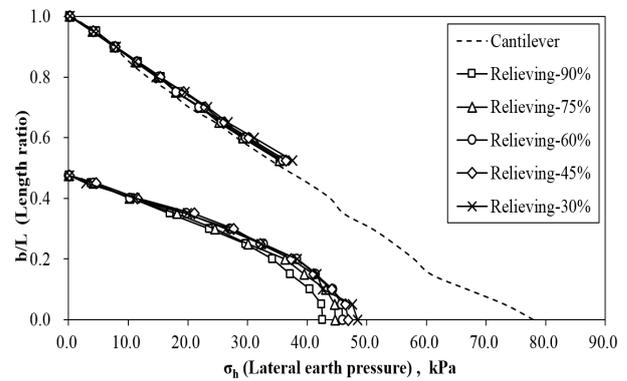


Fig. 16. Lateral earth pressure distribution according to the type of retaining wall ($H = 10\text{ m}$)

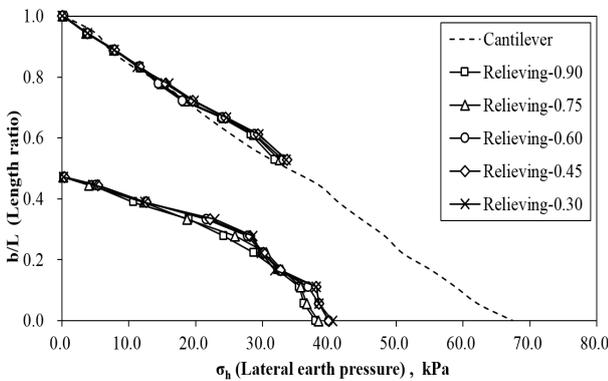


Fig. 15. Lateral earth pressure distribution according to the type of retaining wall ($H = 9\text{ m}$)

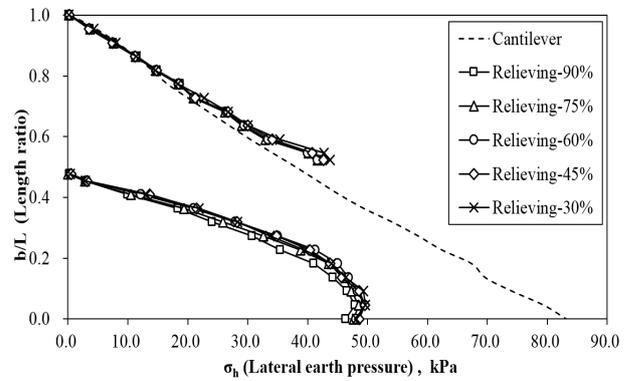


Fig. 17. Lateral earth pressure distribution according to the type of retaining wall ($H = 11\text{ m}$)

Table 6. Comparison of reduction rate of lateral earth pressure

Height of wall	Type of wall	Resultant force (kN/m)	Reduction rate (%)	
8 m	Catilever	302.31	-	
	Relieving platform	$b/L=0.90$	180.73	40.22
		$b/L=0.75$	186.44	38.33
		$b/L=0.60$	190.18	37.09
		$b/L=0.45$	195.72	35.26
$b/L=0.30$	198.37	34.38		
9 m	Catilever	367.75	-	
	Relieving platform	$b/L=0.90$	227.79	38.06
		$b/L=0.75$	232.54	36.77
		$b/L=0.60$	238.47	35.16
		$b/L=0.45$	242.37	34.09
$b/L=0.30$	242.93	33.94		
10 m	Catilever	441.71	-	
	Relieving platform	$b/L=0.90$	274.49	37.86
		$b/L=0.75$	281.70	36.23
		$b/L=0.60$	290.83	34.16
		$b/L=0.45$	295.51	33.10
$b/L=0.30$	297.78	32.58		
11 m	Catilever	519.09	-	
	Relieving platform	$b/L=0.90$	332.90	35.87
		$b/L=0.75$	340.47	34.41
		$b/L=0.60$	348.82	32.80
		$b/L=0.45$	350.96	32.39
$b/L=0.30$	353.46	31.91		

그다지 큰 차이를 보이지 않는다. 또한 옹벽고가 11m일 때 8m보다 수평토압 감소율은 작지만 최대 약 36%의 비교적 큰 감소율을 보인다. 이러한 결과를 통해 3.1.1 절에서 언급하였듯이 선반식 옹벽은 옹벽의 높이에 제한이 있는 캔틸레버식 옹벽의 단점을 극복할 수 있는 옹벽 구조물이라 판단된다.

3.2.2 안정성 검토

(1) 활동 안정성

Table 7은 3.1.2절 (1)과 같이 수평토압 분포를 사용하여 옹벽의 활동에 대한 안정성 검토를 수행한 결과를 수치로 표현한 것이다. Table 7을 통해 캔틸레버식 옹벽의 결과는 3.1.2절 (1)과 동일하며, 선반식 옹벽은 캔틸레버식 옹벽에 비해 모든 조건에서 활동 안전율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 옹벽고 10m, 11m에서 선반 길이가 $b/L=0.30$ 인 경우 활동 안전율 기준($F_s \geq 1.5$)을 만족하지 않는 것으로 나타났다. 이는 선반식 옹벽은

Table 7. Comparison of increase rate of safety factor for sliding ($F_s \geq 1.5$)

Height of wall	Type of wall	Safety factor	Increase rate (%)	O.K / N.G	
8 m	Catilever	1.73	-	O.K	
	Relieving platform	$b/L=0.90$	3.43	98.27	O.K
		$b/L=0.75$	2.99	72.83	O.K
		$b/L=0.60$	2.59	49.71	O.K
		$b/L=0.45$	2.19	26.59	O.K
$b/L=0.30$	1.83	5.78	O.K		
9 m	Catilever	1.54	-	O.K	
	Relieving platform	$b/L=0.90$	3.10	105.30	O.K
		$b/L=0.75$	2.70	78.81	O.K
		$b/L=0.60$	2.31	52.98	O.K
		$b/L=0.45$	1.94	28.48	O.K
$b/L=0.30$	1.61	6.62	O.K		
10 m	Catilever	1.37	-	N.G	
	Relieving platform	$b/L=0.90$	2.95	115.33	O.K
		$b/L=0.75$	2.54	85.40	O.K
		$b/L=0.60$	2.13	55.47	O.K
		$b/L=0.45$	1.78	29.93	O.K
$b/L=0.30$	1.45	5.84	N.G		
11 m	Catilever	1.25	-	N.G	
	Relieving platform	$b/L=0.90$	2.77	121.60	O.K
		$b/L=0.75$	2.38	90.40	O.K
		$b/L=0.60$	2.00	60.00	O.K
		$b/L=0.45$	1.67	33.60	O.K
$b/L=0.30$	1.34	7.20	N.G		

뒷굽이 없는 상태에서 선반 길이가 짧을 경우 선반과 선반 상부 흙의 무게로 인한 옹벽 저만의 마찰저항력이 감소하는데, 이 감소량이 선반 설치로 인해 옹벽에 작용하는 활동력 감소량 보다 크기 때문에 기준 안전율을 만족하지 못한 것으로 판단된다.

또한 선반 길이에 따른 선반식 옹벽은 캔틸레버식 옹벽에 비해 평균 56.51%의 활동 안전율 증가를 기대할 수 있으며, 모든 옹벽고에서 선반 길이는 $b/L=0.90$ 일 때 활동에 대해 가장 안정한 것을 확인할 수 있다. 또한 옹벽고가 8m에서 11m로 갈수록 활동 안전율은 평균 2.61에서 평균 2.03으로 감소하지만, 옹벽고 11m에서 활동 안전율 증가율이 최대이고 짧은 선반($b/L=0.30$)을 제외하면 기준 안전율을 모두 만족하기 때문에 3.1.2절 (1)에서 언급하였듯이 높은 높이의 옹벽을 설계할 경우 캔틸레버식 옹벽보다는 활동 안정성 측면에서 유리하다고 할 수 있다.

(2) 전도 안정성

Table 8은 3.1.2절 (2)와 같이 수평토압 분포를 사용하여 옹벽의 전도에 대한 안정성 검토를 수행한 결과를 수치로 표현한 것이다. Table 8을 통해 캔틸레버식 옹벽의 결과는 3.1.2절 (2)와 동일하며, 선반식 옹벽은 옹벽고 8m, 9m, 10m에서 $b/L=0.30$ 인 경우 전도 안전율이 캔틸레버식 옹벽보다 감소하여 기준 안전율($F_s \geq 2.0$)을 만족하지 않고 있다. 또한 옹벽고 11m, $b/L=0.30$ 인 경우 전도 안전율이 1.46(증가율 약 2%)으로 캔틸레버식 옹벽보다 증가하지만 기준 안전율을 만족하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 선반식 옹벽의 선반 길이는 최소 $b/L=0.45$ 이상 확보하면 기준 안전율을 만족하며, 캔틸레버식 옹벽 대비 더 높은 높이의 옹벽 구조물을 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 선반 길이에 따른 선반식 옹벽은 캔틸레버식 옹벽에 비해 평균 약 122%의 전도 안전율 증가를 기대할

수 있고, 선반 길이는 $b/L=0.90$ 일 때 전도에 대해 가장 안정한 것을 확인할 수 있다. 또한 옹벽고가 8m에서 11m로 갈수록 전도 안전율은 평균 4.64에서 평균 3.56으로 감소하지만, 옹벽고 11m에서 전도 안전율 증가율이 최대이고 짧은 선반($b/L=0.30$)을 제외하면 기준 안전율을 모두 만족하기 때문에 3.1.2절 (2)에서 언급하였듯이 높은 높이의 옹벽을 설계할 경우 캔틸레버식 옹벽보다는 전도 안정성 측면에서 유리하다고 판단된다.

3.2.3 최적 선반 길이 결정

수평토압 감소효과와 활동 및 전도 안정성 검토에서 모두 선반은 긴 선반($b/L=0.90$)일 때 가장 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 선반 길이가 길어짐에 따라 옹벽 단면 크기는 커지기 때문에 이는 경제적으로 불리할 수 있기 때문에 선반 길이는 최소 길이 기준을 제시하는 것이 더 합리적일 것이다. 따라서 수평토압 감소효과, 활동 및 전도 안정성을 종합적으로 고려했을 때 선반의 최적 길이는 최소 $b/L=0.45$ 이상을 만족하는 것이 바람직하다고 판단된다.

Table 8. Comparison of increase rate of safety factor for overturning ($F_s \geq 2.0$)

Height of wall	Type of wall	Safety factor	Increase rate (%)	O.K / N.G	
8m	Catilever	2.41	-	O.K	
	Relieving platform	$b/L=0.90$	7.64	217.01	O.K
		$b/L=0.75$	5.89	144.40	O.K
		$b/L=0.60$	4.41	82.99	O.K
		$b/L=0.45$	3.13	29.88	O.K
		$b/L=0.30$	2.13	-11.62	O.K
9m	Catilever	1.99	-	N.G	
	Relieving platform	$b/L=0.90$	7.06	254.77	O.K
		$b/L=0.75$	5.38	170.35	O.K
		$b/L=0.60$	3.97	99.50	O.K
		$b/L=0.45$	2.77	39.20	O.K
		$b/L=0.30$	1.84	-7.54	N.G
10m	Catilever	1.69	-	N.G	
	Relieving platform	$b/L=0.90$	6.69	295.86	O.K
		$b/L=0.75$	5.14	204.14	O.K
		$b/L=0.60$	3.73	120.71	O.K
		$b/L=0.45$	2.57	52.07	O.K
		$b/L=0.30$	1.67	-1.18	N.G
11m	Catilever	1.43	-	N.G	
	Relieving platform	$b/L=0.90$	6.09	325.87	O.K
		$b/L=0.75$	4.62	223.08	O.K
		$b/L=0.60$	3.33	132.87	O.K
		$b/L=0.45$	2.30	60.84	O.K
		$b/L=0.30$	1.46	2.10	N.G

4. 결론

본 연구에서는 선반식 옹벽의 거동을 정량적으로 분석하여 최적 설계조건을 제시하기 위해 실단면 수치해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실단면 수치해석을 통해 파악한 선반식 옹벽과 캔틸레버식 옹벽의 수평토압 분포를 이용하여 선반식 옹벽의 최적 선반 위치를 평가하였다. 수평토압 감소효과, 활동 및 전도 안정성 검토를 종합적으로 고려할 때 선반의 최적 위치는 옹벽의 중심부($h/H=0.50$)가 적절한 것으로 나타났다.
- (2) 일정한 옹벽고(H)에서 선반 위치와 길이에 따른 수평토압 감소효과를 비교한 결과, 최적 선반 위치($h/H=0.50$)에서 긴 선반($b/L=0.90$)을 사용할 경우 선반식 옹벽은 캔틸레버식 옹벽에 비해 평균 약 38%의 수평토압 감소효과를 기대할 수 있다.
- (3) 선반식 옹벽의 선반이 최적 위치에 설치될 경우 최적 선반 길이는 수평토압 감소효과, 활동 및 전도 안정성 검토 결과 최소 $b/L=0.45$ 이상을 만족하는 것이 가장 적절한 것으로 나타났다.
- (4) 선반식 옹벽과 캔틸레버식 옹벽의 수평토압 감소효

과, 활동 및 전도 안정성 검토 결과, 선반식 옹벽은 옹벽고에 제한이 있는 캔틸레버식 옹벽의 단점을 극복할 수 있는 옹벽 구조물이라 판단된다.

- (5) 본 연구에서는 기존 연구에서 사용한 모델을 수정 및 확장하여 실단면 수치해석을 수행하였고, 선반식 옹벽의 최적 선반 위치 및 길이를 제안하였다. 하지만 수치해석 모델의 검증 및 연구결과의 신뢰성을 높이기 위한 실제 시공현장에서의 현장계측값과의 비교 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업인 ‘도심지 인프라에 기반한 인공지반 및 수직입체 지상공간 조성 기술 개발’과제의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

- Bell, F. G. (1987), *Ground Engineer's Reference Book*, Butterworths, London, pp.47/16-47/18.
- Das, B. M. (1995), *Principles of Foundation Engineering*, Sixth Edition, THOMSON, pp.60-120.
- Hunt, R. E. (1984), *Geotechnical Engineering Investigation Manual*, McGraw-Hill Book Company, p.305.
- Jumikis, A. R. (1964), *Mechanics of Soils*, D. Van Nostrand Company Inc, Princeton NJ.
- Kim, B. I., Yoo, W. K., Yang, M. R., and Park, Y. S. (2012), "Model Test Study on the Earth Pressure of the Retaining Wall with the Relieving Platform", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.32, No.1C, pp.27-35.
- Kim, B. I., Yoon, C. Y., Cho, W. J., and Kim, T. S. (2015), *Design of Geotechnical Structures*, CIR, Seoul, pp.15-55.
- Liu, F. and Lin, S. (2008), "Earth Pressure Calculation for Retaining Structure with Relieving Platform", *Port Engineering Technology*, Aug. 2008, Total 182, No.4.
- Moon, I. J. (2016), *Earth Pressure Characteristics of Retaining Wall with Relieving Platform Using Model Test and Numerical Analysis*, Ph.D. Thesis, Myongji University.
- Moon, I. J., Kim, B. I., and Yoo, W. K. (2014), "Numerical Analysis for Lateral Earth Pressure on Retaining Wall with Relieving Platform Backfilled with Jumoonjin Sand", *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.15, No.6, pp.3916-3922.
- Oh, J. (2001), *Development of An Expert System for Designing RC Retaining Walls*, Master's Thesis, Chonnam National University.
- Padhye, R. D. and Ullagaddi, P. B. (2005), *Retaining Wall with Shelves-A Review Study*, All India Seminars on Advances in Geotechnical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, pp.62-68.
- Paik, K. H. and Salgado, R. (2003), "Estimation of Active Earth Pressure against Rigid Retaining Walls Considering Arching Effects", *Geotechnique*, 53, No.7, pp.643-653.
- Ray Chaudhuri, P. (1973), "Design of Retaining Walls with Relieving Shelves", *IRC Journal*, Vol.35(2), pp.289-325.
- Schanz, T., Vermeer, P. A., and Bonnier, P. G. (1999), "The Hardening Soil Model: Formulation and Verification", *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, pp.281-296.
- Yang, M. R., Piao, M., Yoo, W. K., Kim, B. I., Park, C. Y., and Park, Y. S. (2011), "An Experimental Study on the Earth Pressure of the Retaining Wall with the Relieving Platform", *KGS Fall National Conference 2011*, pp.656-665.
- Yoo, W. K., Kim, B. I., Moon, I. J., and Park, Y. S. (2012), "Comparison of the Lateral Earth Pressure on the Retaining Wall with the Relieving Platform by Model Test and Numerical Analysis", *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.13, No.5, pp.2382-2389.

Received : September 6th, 2016
 Revised : September 23rd, 2016
 Accepted : October 4th, 2016