

수치해석을 이용한 시공방법에 따른 판넬식 옹벽의 거동 분석에 관한 연구

Numerical Approach to Evaluate the Behavior of Concrete Panel Considering Construction Method

강 준 희¹⁾ · 반 호 기[†]

Junhee Kang · Hoki Ban

Received: October 19th, 2022; Revised: October 24th, 2022; Accepted: November 9th, 2022

ABSTRACT : This paper analyze the precast panel retaining wall's safety factor changes based on the numerical analysis using PLAXIS 2D software. Numerical analysis conditions include construction method, nail and panel fixing method, backfill material compaction conditions, rainfall conditions. The classification according to the construction method of the precast panel retaining wall includes the top-down and bottom-up methods. The difference between the top-down and bottom-up methods is the presence or absence backfill material and the ground excavation method. The top-down method involves vertically excavating the ground and attaching the panel using mortar, but in the bottom-up method, the ground is vertically excavated and harden the backfill material. As a result of numerical analysis, the top-down method secured a higher safety factor in all cases except the rainfall conditions.

Keywords : Numerical analysis, Precast concrete panel, Top-down, Bottom-up

요 지 : 본 논문은 Top-down 방식과 Bottom-up 방식으로 시공된 프리캐스트 판넬식 옹벽의 안전율 변화를 PLAXIS 2D 소프트웨어를 사용하여 수치해석하였다. 수치해석 조건은 시공방법, 네일 및 판넬의 고정방법, 뒤채움재 다짐상태, 강우조건 등이 있다. Top-down 방식과 Bottom-up 방식의 차이점은 뒤채움재의 유무와 지반굴착의 방식으로, Top-down 방식은 지반을 수직으로 굴착한 뒤 시공하나 Bottom-up 방식은 지반을 경사를 주어 굴착한 뒤 모르타르 및 뒤채움재를 이용하여 판넬을 부착한다. 수치해석 결과 Top-down 방식은 Bottom-up 방식과 비교하였을 때, 우기를 제외한 모든 경우에 더 높은 안전율을 확보하였다. Top-down 방식의 우기 시 안전율을 저하는 Top-down 방식으로 시공 시 프리캐스트 판넬을 부착하기 위해 사용한 모르타르가 주된 원인이 된 것으로 판단하였다.

주요어 : 수치해석, 판넬식 옹벽, Top-down, Bottom-up

1. 서 론

우리나라는 국토의 64.5% 가량이 산지로 구성되어 있다. 이런 이유로 토목공사 부지 확보를 위한 경사면 절취가 많이 발생한다. 사면 절취를 통해 만들어진 인공사면은 평지와 달리 토공량, 공사비, 주변 환경훼손 등의 문제가 다수 발생한다. 인공사면은 또한 절취에 의한 안정성이 감소한 상태이기에 옹벽을 통한 보강이 주로 이루어진다. 과거 주로 사용되던 옹벽은 콘크리트 옹벽으로 공사 기간이 상대적으로 길며, 현장타설로 인한 콘크리트 품질 저하와 원지반 과다 절취 같은 문제점이 있다. 판넬식 옹벽은 공장에서 사전에 제작한 판넬을 다른 교착제 없이 조립을 통해 설치할 수 있어 공기 단축과 인력 소요 감소를 통한 공사비를 낮출 수 있다. 또한 콘크리트 옹벽과 달리 굴착량이 적어

주변 환경에 미치는 영향을 최소화할 수 있다. Jang & Chung (2019)은 판넬식 옹벽에 균열방지 슬리브를 매설한 뒤 실내 시험을 수행하였다. 해석 결과 보강재를 사용할 시 전반적 강도 증가와 균열 억제가 가능함을 확인하였다. Min et al. (2016)은 Top-down 방식을 적용한 옹벽의 현장시험 및 수치해석을 수행하였다. 해석 결과 Top-down 방식이 Bottom-up 방식보다 큰 안정성을 확보할 수 있음을 확인하였다. Shin et al.(2016)은 Top-down 방식으로 시공한 판넬식 옹벽을 현장시험을 통해 분석하였다. 해석 결과 수평 변위 발생량과 지보재 모두 안전율 기준을 만족함을 확인하였다. Kim et al.(2006)은 어스볼트를 사용한 압축토 옹벽과 쏘일 네일링 시스템을 비교·분석하였다. Kwon et al.(2020)은 원지반 부착식 판넬 옹벽을 현장시험 및 수치해석을 통해 분석하였다. 수치해석 결과 Top-down 방식의 최종단계 변위량이

1) Master's Dgree, Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University

† Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University (Corresponding Author : hban@kangwon.ac.kr)

Bottom-up 방식 보다 낮게 나왔음을 보고하였다. Shin(2017)은 원지반 부착식 판넬옹벽에 대한 안정성을 한 현장시험과 수치해석을 통해 분석하였다. 해석 결과 Top-down 방식이 충분한 안정성 확보가 가능함을 확인하였다. Kim(2013)은 이형철근을 대체할 수 있는 가압식 강관네일을 이용한 판넬식 옹벽의 보강 방법에 대한 분석을 수행하였다. 분석 결과 가압식 주입 방법이 더 큰 안정성을 확보할 수 있음을 확인하였다. Hastuty & Prambudi(2020)는 자연사면과 옹벽의 안전율 차이를 수치해석을 통해 분석하였다. 수치해석 결과 옹벽 설치 후 안전율은 자연 상태 사면보다 높게 나왔다. Mortezaee et al.(2016)은 수치해석 프로그램인 PLAXIS와 ETABS의 구조해석 결과를 비교·분석하였다. 해석 결과 휨 모멘트는 최대 0.03%, 최대 전단응력은 0.02% 정도의 차이를 보여 PLAXIS가 건축 구조물과 토양 구조 분석 수행에 적합함을 확인하였다. Babaei(2016)는 추운 지역에서 쏘일 네일이 동결 및 해동으로 인한 영향을 ABAQUS를 통해 분석하였다. 벽체 표면의 단열재는 지표면의 동결 저항에 큰 영향을 주지 못하며 수평토압 감소를 위해선 벽체 내부에 절연 시스템을 구축하는 것이 효율적이라 보고하였다. Shiu & Chang(2006)은 쏘일 네일의 경사, 길이, 휨강성의 구조체에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과 구조체의 하단에 설치된 쏘일 네일은 수평변위를 감소시키는 효과가 있음을 보고하였다. Rawat & Gupta(2016)는 한계평형해석법과 유한요소해석법을 통해 사면 안정해석을 수행하였다. 그 결과 유한요소해석법을 통한 안전율 보다 한계평형해석법에 의한 안전율이 더 높은 값을 보인다고 보고하였다. Fawaz et al.(2014)은 굴착작업 과정 중 발생한 산사태의 원인을 수치해석 모델링을 통해 분석하였고, 산사태의 원인이 지반 내 함수량 증가에 의한 것으로 보고하였다. 위와 같이 수치해석을 통한 사면과 옹벽의 분석은 많이 수행되었다. 본 연구에서는 PLAXIS 2D 프로그램을 이용하여, 시공방식에 따른 뒤채움재의 다짐 상태, 네일과 판넬의

체결방식, 강우조건 차이에 따른 안전율 변화를 비교·분석하였다.

2. 해석대상

2.1 해석대상 조건

수치해석을 위한 모델링은 PLAXIS 2D 프로그램을 사용하였다. Fig. 1은 본 해석에 사용된 수치해석 모델로 Fig. 1(a)는 굴착 전 원지반을 Fig. 1(b)는 시공이 완료된 지반의 안전율 영향을 고찰하기 위해 모델링하였다. Fig. 1(a)에서 나타낸바와 같이 사면을 구성하고 있는 지반은 상부로부터 붕적층, 풍화암, 연암으로 구성하였다. 옹벽의 경우 상부로부터 2개 단에는 1.5m의 3개 판넬과 0.2m의 기초 블록을 설치하여 이용하여 총 4.7m 크기의 옹벽을 설치하였고, 최하단 단에는 1.5m 판넬 4개와 0.2m 기초 블록을 설치하여 총 6.2m 크기의 옹벽을 설치하였다. 또한 우기 시 극한 상태를 묘사하기 위해 배수공은 설치하지 않았으며 보강재는 기존 판넬식 옹벽에 주로 사용되던 SD400, D29 규격의 네일을 사용하였다. 네일의 길이는 비탈면 예상활동면의 범위를 고려하여 8m로 결정하였다.

2.2 시공방식 모사

판넬식 옹벽은 시공 방식에 따라 Top-down 방식과 Bottom-up 방식으로 나눌 수 있다. Fig. 2는 Top-down 방식으로 Fig. 2(a)과 같이 시공 편의성을 위한 0.5m 가량의 여유 폭을 주어 2m 굴착 한 뒤 Fig. 1(b)와 같이 판넬을 부착한다. 그 후 굴착과 판넬 부착을 반복해가며 시공한다. 시공 완료 시 모습은 Fig. 2(d)와 같이 묘사하였다. Bottom-up 방식은 Fig. 3(a)와 같이 1:0.3 경사를 주어 굴착 후 판넬을 설치한 뒤 뒤채움재를 메운다. 최종적으로 Fig. 3(b)과 같이 묘사하였다.

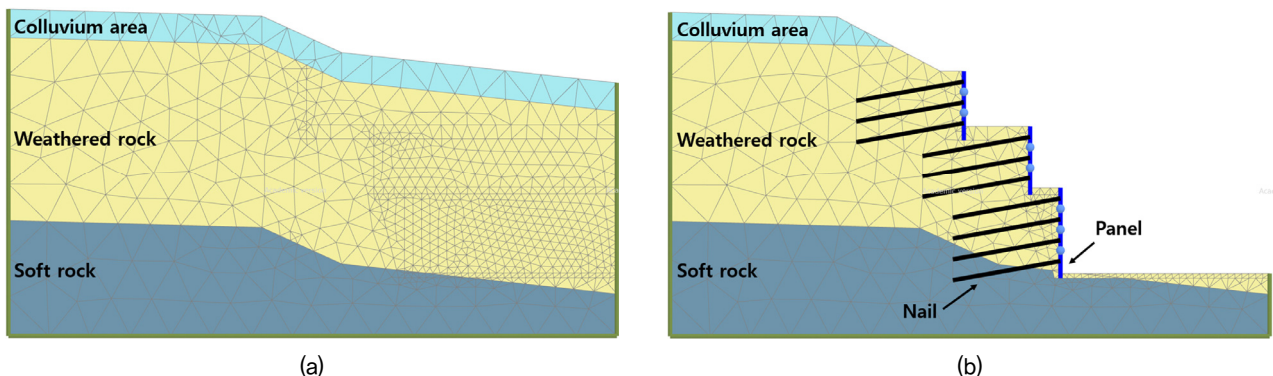


Fig. 1. Modeled schematic representation of slope

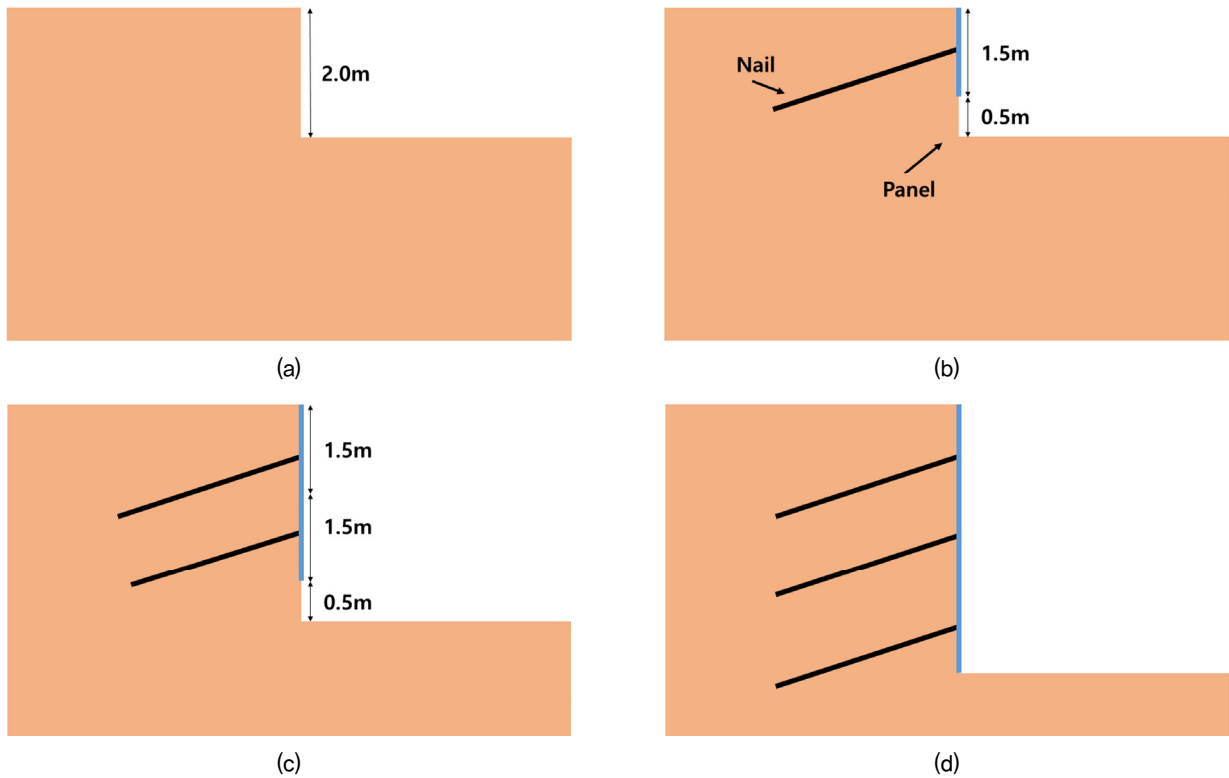


Fig. 2. Top-down method construction stage

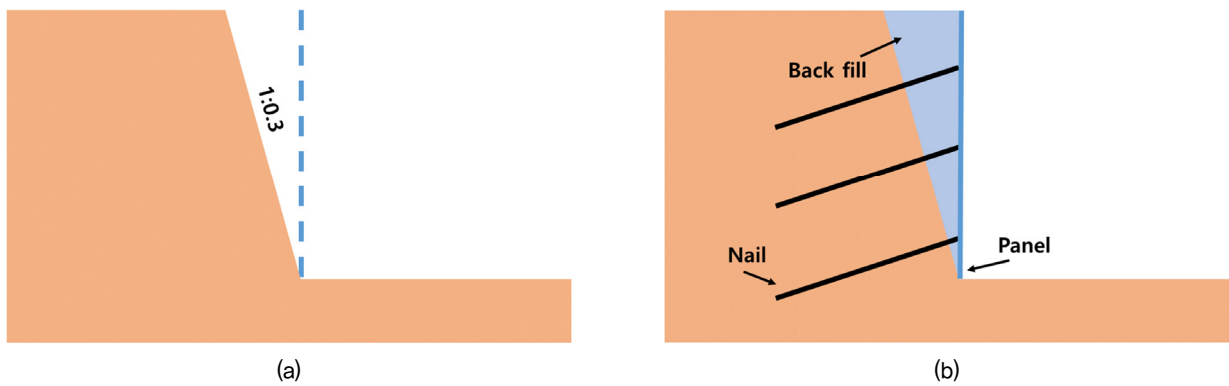


Fig. 3. Bottom-up method construction stage

3. 수치해석

3.1 수치해석 조건

수치해석은 PLAXIS 2D를 사용해 안전율을 분석하였다.

지반 및 모르타르의 물성치는 Table 1, 판넬의 물성치는 Table 2에 정리하였다. 각 케이스별 해석 조건은 Table 3과 같다. 다짐상태에 따른 차이는 다짐이 불량한 경우 Table 1의 뒤채움재를 다짐이 양호한 경우 원지반 토량을 사용한 것으로 모사하였다. 강우조건에 따른 차이는 우기 시 지하

Table 1. Properties of soil and mortar used in numerical model

	Unit weight (kN/m^3)	Cohesion (kPa)	Friction angle ($^\circ$)	Modulus of deformation (kPa)	Poisson's ratio	Coefficient of permeability (mm/hr)
Colluvium	20	15	35	50,000	0.33	2.16E-02
Weathered rock	20	30	31	2,00,000	0.31	7.02E-05
Soft rock	23	400	32	500,000	0.27	4.97E-06
Back fill	14	20	12	30,000	0.33	-
Mortar	25	-	-	22,100,000	0.1	4.17E-09

Table 2. Properties of concrete panel used in numerical model

	Normal stiffness (kN/m)	Flexural rigidity ($kN/m^2/m$)
Panel	58,500,000	10,970,000

Table 3. Design conditions

	Construction method	Compaction	Hinge point	Rainfall condition
Case 1	Bottom-up	Fine	Free	Dry season
Case 2	Bottom-up	Poor	Free	Dry season
Case 3	Bottom-up	Fine	Fixed	Dry season
Case 4	Bottom-up	Fine	Free	Wet season
Case 5	Top-down	Fine	Free	Dry season
Case 6	Top-down	Fine	Fixed	Dry season
Case 7	Top-down	Fine	Free	Wet season

수위가 지표면 까지 위치하며 건기 시 지하수위를 고려하지 않았다. 우기 시 사면의 극한 상태를 묘사하기 위해 배수공을 설치하지 않았으며, Fig. 4의 울진지역의 재현시간 100년 빈도 동안의 지속시간별 강우강도(IDF)를 Table 4에 정리하였으며 이를 참고하여 12.74mm/hr 강우가 24시간 동안 지속된다고 가정한 뒤 침투해석을 실시하였다.

3.2 수치해석 조건 및 물성치

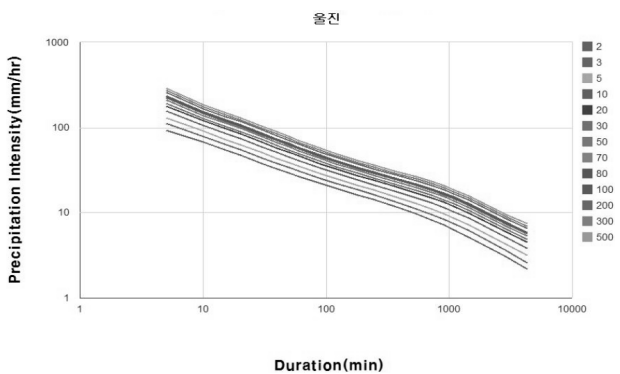


Fig. 4. Intensity duration Frequency (IDF) curve of Uljin county

Table 4. Intensity duration Frequency (IDF)

Duration	Intensity duration Frequency	
	m/sec	mm/hr
6hr	7.08E-06	25.47
12hr	5.26E-06	18.91
18hr	4.23E-06	15.24
24hr	3.54E-06	12.74

3.3 수치해석 결과

수치해석은 시공 단계별 안전율을 정리하고 최종 시공단계에서 안전율 차이를 비교·분석하였다. 비교는 다짐상태의

영향, Bottom-up 방식의 체결에 따른 안전율 영향, Top-down 방식의 체결에 따른 안전율 영향, 체결 방식이 고정단일 때 Bottom-up 방식과 Top-down 방식의 비교, 체결 방식이 자유단일 때 Bottom-up 방식과 Top-down 방식의 비교, 강우 조건에 따른 건기와 우기 시 안전율 차이, 총 6개로 이루어져 있다. 수치해석한 안전율 비교 그래프의 X축은 시공단계를 Y축은 안전율을 나타낸다. Top-down 방식의 경우 1개 소단의 판별 설치가 완료된 경우를 시공단계 1이 완료된 것으로 파악하였다.

3.3.1 다짐상태의 안전율 영향(Case 1 vs. Case 2)

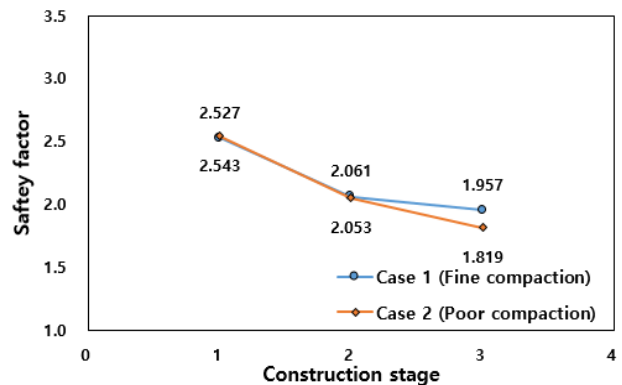


Fig. 5. Changes in safety factor by construction stage (Case 1 vs. Case 2)

본 비교에서는 다짐이 양호한 경우(Case 1)와 불량한 경우(Case 2)를 비교·분석하였다. 시공단계 1~2에서는 다짐이 불량한 경우에도 큰 안전율 차이를 보이지 않았으나 시공이 완료된 시공단계 3에서는 약 7.05%의 안전율 차이를 보였다. 이를 통해 다짐 불량률이 안전율에 큰 영향을 줄 수 있음을 확인하였다.

3.3.2 Bottom-up 방식의 체결에 따른 안전을 영향 (Case 1 vs. Case 3)

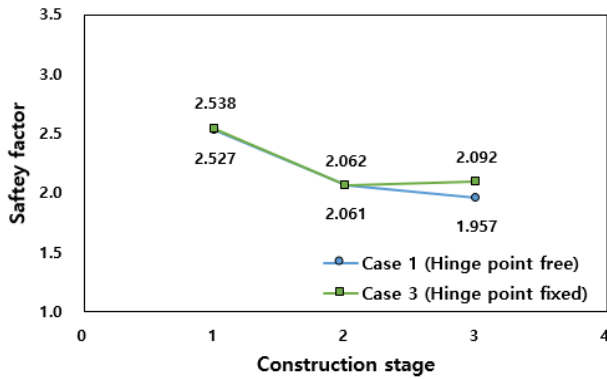


Fig. 6. Changes in safety factor by construction stage (Case 1 vs. Case 3)

본 비교에서는 Bottom-up 방식으로 시공하였을 때, 네일과 판넬이 자유단일 경우(Case 1)와 고정단일 경우(Case 3)를 비교·분석하였다. 시공단계 1~2에서는 고정단으로 시공하였을 경우 약간 높은 안전율을 보였으나 유의미한 차이를 보이지 않았다. 시공이 완료된 시공단계 3에서 안전율 차이는 약 6.45%로 고정단일 때 0.135 더 큰 안전율을 보였다. 이를 통해 네일과 판넬의 체결이 고정단일 경우 더 큰 안전율을 보임을 확인하였다.

3.3.3 Top-down 방식의 체결에 따른 안전을 영향 (Case 5 vs. Case 6)

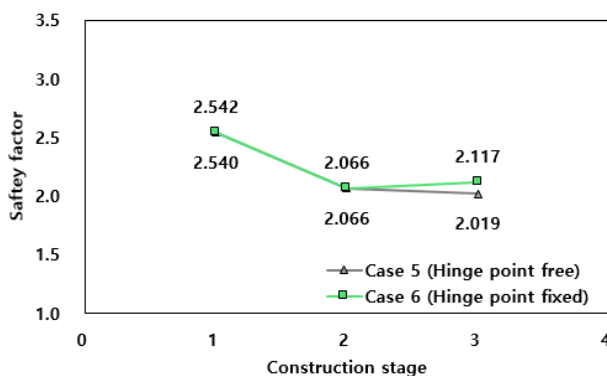


Fig. 7. Changes in safety factor by construction stage (Case 5 vs. Case 6)

본 비교에서는 Top-down 방식으로 시공하였을 때, 네일과 판넬이 자유단일 경우(Case 5)와 고정단일 경우(Case 6)를 비교·분석하였다. 시공단계 1~2에서는 고정단과 자유단 모두 유의미한 차이를 보이지 않았다. 시공이 완료된 시공단계 3에서 안전율 차이는 약 4.63%로 고정단일 때 0.098 더 큰 안전율을 보였다. 이를 통해 Bottom-up 방식과 마찬가지로

네일과 판넬의 체결이 고정단일 경우 더 큰 안전율을 보임을 확인하였다.

3.3.4 고정단의 시공 방식별 안전을 영향 (Case 3 vs. Case 6)

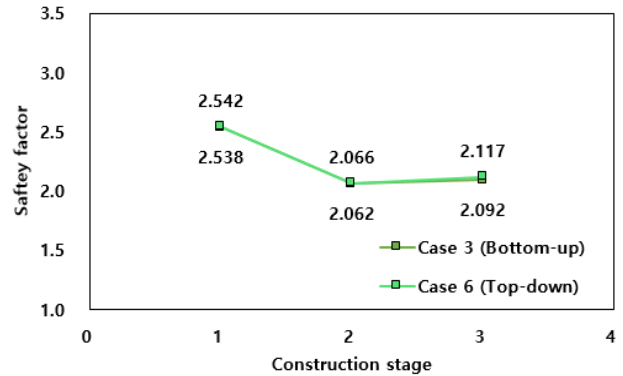


Fig. 8. Changes in safety factor by construction stage (Case 3 vs. Case 6)

본 비교에서는 네일과 판넬의 체결이 고정단인 경우 Bottom-up 방식(Case 3)과 Top-down 방식(Case 6)의 안전율을 비교·분석하였다. 시공단계 1~3 모두 Top-down 방식으로 시공하였을 때 안전율이 더 크게 나타났으며 최종 시공단계 3에서 안전율 차이는 약 1.18% 정도로 Top-down 방식이 0.025 더 크게 나타났다. 이를 통해 판넬의 체결이 고정단일 경우 Top-down 방식이 더 큰 안전율을 보임을 확인하였다.

3.3.5 자유단의 시공 방식별 안전을 영향 (Case 1 vs. Case 5)

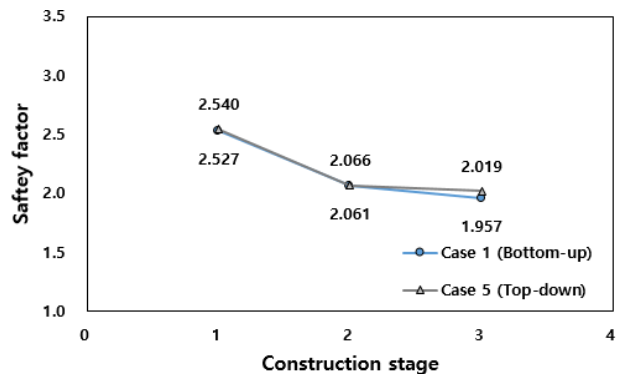


Fig. 9. Changes in safety factor by construction stage (Case 1 vs. Case 5)

본 비교에서는 네일과 판넬의 체결이 자유단인 경우 Bottom-up 방식(Case 1)과 Top-down 방식(Case 5)의 안전율을 비교·분석하였다. 시공단계 1~3 모두 Top-down 방식으로 시공하였을 때 안전율이 더 크게 나타났으며 최종 시공단계 3에서

안전율 차이는 약 3.07% 정도 Top-down 방식이 0.062 더 크게 나타났다. 이를 통해 판넬의 체결이 자유단일 경우에도 Top-down 방식이 더 큰 안전율을 확보할 수 있음을 확인하였다.

3.3.6 강우조건에 따른 안전율 변화

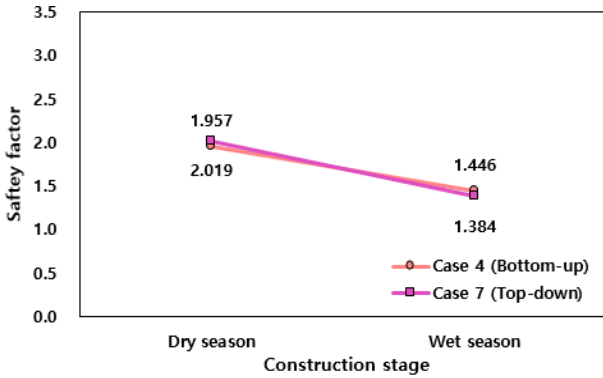


Fig. 10. Changes in safety factor before and after the wet season

본 비교에서는 건기(Case 1, 5)와 우기(Case 4, 7)의 안전율을 변화를 비교·분석하였다. Bottom-up 방식의 건기(Case 1)과 우기(Case 4)를 비교하였을 때 안전율 차이는 0.511, Top-down 방식일 때 건기(Case 1)과 우기(Case 4)의 안전율 차이는 0.548이다. 두 방식 모두 건기와 비교하였을 때 약 30% 가량의 안전율 하락이 발생하였으며 Top-down 방식(Case 4)과 Bottom-up 방식(Case 7)을 비교하였을 때 Top-down 방식이 약 4.29% 낮은 안전율을 보였다. 이것은 Top-down 방식 시공 시 원지반과 판넬을 부착하기 위해 사용한 모르타르가 불투수층을 형성하여 발생한 것으로 판단하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 시공방식(Bottom-up, Top-down), 뒤채움재의 다짐상태, 네일과 판넬의 체결방식, 강우조건에 따른 안전율 변화를 비교·분석하였으며, 결론은 다음과 같다.

- (1) 다짐 불량은 안전율 저하의 주된 원인이 될 수 있으며, 다짐이 불필요한 Top-down 방식이 더 안전한 시공 방식이라 판단하였다.
- (2) Top-down 방식이 고정단과 자유단 모두 Bottom-up 방식보다 더 큰 안전율을 보였다. 또한 네일과 판넬의 체결 방식은 고정단일 때 더 큰 안전율을 보였다.
- (3) 강우조건에 따른 안전율 변화를 분석하였을 때 Top-down 방식이 더 낮은 안전율을 보였다. 이는 Top-down 방식

으로 시공 시 판넬 부착을 위해 사용한 모르타르가 우기 시 안전율을 감소시키는 요인으로 작용한 것으로 판단하였다. Top-down 방식의 우기 시 안전율 저하 문제는 배수공법을 통해 해결해야 할 것으로 보인다.

- (4) 시공방식과 해석 조건 변화에 따른 안전율 차이를 비교·분석하였다. 그 결과 Top-down 방식이 우기를 제외한 모든 경우에서 더 큰 안전율을 확보할 수 있는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R1A2C1101883).

References

1. Babaei, M. (2016), "Finite element analysis of freezing effect on soil nail wall", Ryerson University.
2. Fawaz, A., Farah, E. and Hagechehade, F. (2014), "Slope stability analysis using numerical modelling", American Journal of Civil Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 60~67.
3. Hastuty, I. P. and Prambudi, R. (2020), "Analysis of slope stability by the planning of cantilever retaining wall reinforcement using the application of Plaxis (case study: substation Panyabungan sta 0+ 060)", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 851, No. 1, pp. 012021.
4. Jang, S. H. and Chung, J. S. (2019), "Concrete-panel retaining wall anti-crack sleeve inserted, Concrete-Panel Retaining Wall anti-crack sleeve inserted", The Journal of the Convergence on Culture Technology, Vol. 5, No. 3, pp. 345~349.
5. Kim, H. J. (2013), "Analysis of Reinforcement Mechanism of Precast Panel Retaining Wall Method Using pressure-injected grouting Stell Pipe Nailing", Chungnam National University.
6. Kim, H. T., Lee, H. J., Kim, J. M., Ryu, J. W. and Sung, N. Y. (2006), "Behavioral characteristics of prestressed earth method reinforced with earth bolt", Korean Geotechnical Society, pp. 662~669.
7. Kwon, Y. K., Min, K. N., Hwang, Y. C., Ban, H. K. and Lee, M. J. (2020), "Evaluation of field application of precast concrete-panel retaining wall attached to in-situ ground using field test and numerical analysis", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 36, No. 12, pp. 99~106.
8. Min, K. N., Lee, J. W., Lee, J. K., Kang, I. K. and Ahn, T. B. (2016), "Field application of a precast concrete-panel retaining wall adhered to in-situ ground", The Korean Society of Engineering Geology, Vol. 26, No. 1, pp. 51~61.
9. Mortezaee, M. and Akhtarpoor, A. (2016), "Validation of the structural analysis by PLAXIS 2D geotechnical software", Geo-China 2016, pp. 25~32.

10. Rawat, S. and Gupta, A. K. (2016), "Analysis of a nailed soil slope using limit equilibrium and finite element methods", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 1~23.
11. Shin, Y. C. (2017), "Development of environment-friendly panel type retaining wall capable of vertical adhesion to in-situ ground and its characteristics", Woosong University.
12. Shin, Y. C., Min, K. N., Kim, J. H. and Ahn, T. B. (2016), "Behavior Characteristics of Precast Concrete-Panel Retaining Wall Adhered to In-situ Ground through Large Scaled Load Test", *Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 17, No. 11, pp. 45~53.
13. Shiu, Y. K. and Chang, G. W. K. (2006), "Effects of inclination, length pattern and bending stiffness of soil nails on behaviour of nailed structures", Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department.