

현장시험 및 수치해석 분석을 통한 원지반 부착식 판넬옹벽의 현장 적용성 평가

Evaluation of Field Application of Precast Concrete-panel Retaining Wall attached to In-Situ Ground Using Field Test and Numerical Analysis

권 용 규 ¹	Kwon, Yong Kyu	민 경 남 ²	Min, Kyoung-nam
황 영 철 ³	Hwang, Young-cheol	반 호 기 ⁴	Ban, Hoki
이 민 재 ⁵	Lee, Minjae		

Abstract

Man-made slope is inevitable to make a new road, which may result in environmental problems as well as collapse of slope. To prevent these problems, various methods such as geogrid reinforced retaining wall, precast concrete-panel retaining wall, and so on, have been introduced and developed. Among these methods, this paper presents the evaluation of field application of precast concrete-panel retaining wall attached to in-situ ground (so called top-down) compared to the conventional construction method of precast concrete-panel retaining wall (so called bottom-up) through the field test and numerical analysis. As a result, the safety factor of both methods in final stage is similar, however, top-down method guarantees the slope stability during the construction compared to bottom-up method.

요 지

우리나라는 산지가 많은 지형적인 특성으로 교통의 편리를 위해 산지를 절취하여 변형시키는 공사가 매년 증가하고 있다. 특히 산지를 절취하여 변형시킬 경우 자연재해로 인한 사면 붕괴, 환경문제 등의 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하고자 판넬식 옹벽, 보강토 옹벽 등의 다양한 보강공법이 있다. 하지만 Bottom-up 방식의 경우 경사굴착으로 인한 추가 토공처리가 필요하며 되메움과 다짐불량에 의한 안정성 저하 등의 문제점을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 Bottom-up 방식의 문제점을 해결하기 위해 Top-down 방식에 대해 현장 적용시험 및 수치해석을 통해 안정성 분석을 수행하였으며, 대표단면을 선정하여 Bottom-up 방식과 Top-down 방식에 대해 안정성 비교분석하였다.

Keywords : Field test, Numerical analysis, Precast concrete-panel, Slope stability

1 정회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Student, Dept. of Civil Engrg., Chungnam National Univ.)

2 정회원, 세종 E&C 사장 (Member, CEO, Sejong E&C., Tel: +82-41-942-6264, knmin4183@naver.com, Corresponding author, 교신저자)

3 정회원, 상지대학교 스마트건설공학과 정교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Sangji Univ.)

4 정회원, 강원대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Kangwon National Univ.)

5 비회원, 충남대학교 토목공학과 정교수 (Prof., Dept. of Civil Engrg., Chungnam National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2021년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

우리나라는 산지가 많은 지형적인 특성으로 교통의 편리를 위해 산지를 절취하여 변형시키는 공사가 매년 증가하고 있다. 특히 산지를 절취하여 변형시킬 경우 자연재해로 인한 사면붕괴, 환경문제 등의 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하고자 판넬식 옹벽, 보강토 옹벽 등 다양한 보강공법이 있다(Choi, 2013). Kim et al. (2006)는 Earth bolt로 보강된 옹벽에 대해 현장계측 및 수치해석분석을 수행하였으며, 쏘일네일링 방식과 비교하여 안정성이 향상됨을 보고하였다. Hong et al.(2016)은 붕괴가 발생한 보강토 옹벽에 대해 가시철을 설치하고 파손된 옹벽을 제거 후 블록식 보강토 옹벽으로 재시공하여 붕괴가 발생한 옹벽을 복구 방안을 제시하였다. Won et al.(2020)는 기존 피해 보강토 옹벽에 쏘일네일링과 보강콘크리트(RC) 전면 벽체를 보강하는 방안과 기존 피해보강토 옹벽을 제거하고 재시공하는 방안에 대해 Plaxis 2D 프로그램을 이용하여 안정성검토를 수행하였다. 그 결과 기존 피해 보강토 옹벽에 쏘일네일링과 보강콘크리트 전면 벽체를 보강하는 방안의 전체사면 안전율이 기존 피해보강토 옹벽을 제거하고 재시공하는 방안보다 안정적으로 나타났으며, 결과를 통해 기존 피해 보강토 옹벽을 보강하는 방안을 제시하였다. Min et al.(2016)는 원지반 부착식 옹벽 공법에 대해 실내시험, 현장시험, 수치해석을 수행하였으며, 안정성을 확보하는 것으로 보고하였다. Kang et al.(2009)은 조립식 쏘일네일링 공법을 활용하여 노후석축 및 콘크리트 옹벽 보강하였으며, 한계평형법으로 쏘일네일링 벽체에 작용하는 최대 단면력 및 수평변위를 해석한 결과 시공 완료 후 최대 수평변위는 20mm로 확인되었으며, 이는 벽체 높이의 0.25%로 조립식 Soil Nail 벽체의 허용수평변위 이내에 있는 것으로 보고하였다. Shin et al.(2016)는 대형재하시험을 통해 원지반 부착식 패널옹벽의 거동특성을 분석하였으며, 실제 시공 시 중앙부 패널에 대한 계측 및 시공관리가 중요함을 밝혔다. Kang et al. (2008)은 대형파괴재하시험을 통해 콘크리트 패널의 강

성에 의한 구속효과를 확인하였다. 현재 판넬식 옹벽의 시공방식은 Bottom-up 방식으로 1개 소단(약 5m)에 옹벽을 설치하기 위해 1:0.05 정도의 기울기로 굴착 후 옹벽을 시공하는 방식으로 경사굴착으로 인해 추가 토공 처리가 필요하며 되메움과 다짐불량에 의한 안정성 저하 등의 문제점을 지니고 있다(Han et al., 2005; Kim et al., 2006).

따라서 본 연구는 기존 시공방식의 문제점인 원지반 과다절취 등의 문제를 해결하기 원지반 부착식 판넬옹벽(Top-down방식)에 대해 현장 적용시험 및 범용 수치해석 프로그램인 Plaxis 2D를 이용하여 안정성 분석을 수행하였으며, 대표단면을 선정하여 Bottom-up방식과 Top-down방식에 대해 안전성 비교분석을 하였다.

2. 현장시험

2.1 예비해석을 통한 재하하중결정

원지반 부착식 판넬옹벽(Top-down방식)의 현장 적용성을 평가하기 위해 현장시험을 수행하였다. 현장시험은 지반조사와 지반 물성시험, 예비해석을 통한 재하하중결정, 현장시공, 계측 순으로 수행되었다. 지반조사 결과 지반 상부로부터 붕적토, 풍화토, 풍화암으로 구성되어 있으며, 지반 물성시험 결과와 참고문헌을 참고하여 Fig. 1과 같이 예비해석을 수행하였다. 예비해석은 하중재하에 대한 안정성을 확인하기 위한 단계로 범용 수

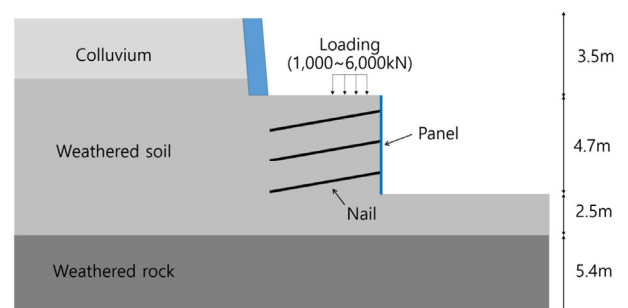


Fig. 1. Cross-sectional diagram for the field test

Table 1. Physical properties used for simulations

Division	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Poisson's ratio	Modulus of deformation (kPa)
Colluvium	18	10	30	0.35	15,400
Weathered soil	19	10	30	0.30	70,000 80,000
Weathered rock	20	30	32	0.30	200,000

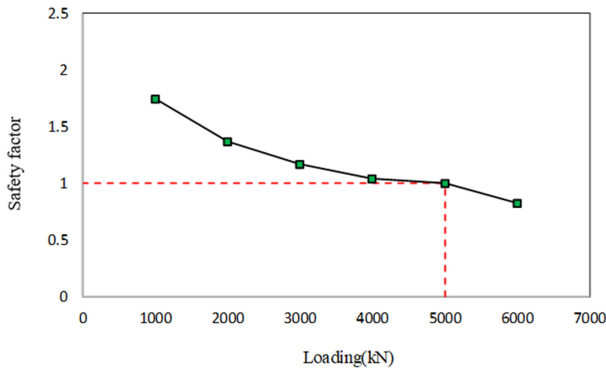


Fig. 2. Preliminary numerical analysis for field test

치해석 프로그램인 Plaxis 2D를 이용하여 옹벽 파괴(안전율 1.0)에 근접한 최대 재하하중을 산정하였다. 이때 해석에 사용된 물성치는 Table 1과 같다. 현장시험을 수행하기 위한 예비해석결과는 Fig. 2에 나타냈으며, 그림에서 보듯이 재하하중 5,000kN에서 안전율 1.0으로 최소한의 안정성을 확보하는 것으로 평가되어 현장시험시 재하시험장치의 재하하중을 5,000kN로 결정하였다.

2.2 현장시험

현장시험 시공에 적용된 옹벽은 1.5x1.5m 규격의 원

지반 부착식 판넬 24장을 사용하여 폭 12m, 높이 4.7m로 시공하였다. 지보재의 경우 기존 판넬식 옹벽에서 사용되는 SD400, D29 규격의 이형철근을 사용하였으며, 비탈면 예상활동면의 범위를 고려하여 6m로 적용하였다. 현장시험 시공은 실제 시공방법과 동일한 형태로 Fig. 3과 같이 수행하였다. 옹벽 및 네일 설치를 위해 Fig. 3(a)와 같이 2m 굴착하였으며, 이는 시공여유를 위하여 판넬의 높이(1.5m) 보다 0.5m 더 굴착 하였다. 굴착 후 Fig. 3(b)와 같이 판넬과 네일을 설치하였으며, Fig. 3(c)와 같이 Fig. 3(a)와 (b)를 반복적으로 수행하였다. 최종적으로 완공된 모습은 Fig. 3(d)와 같다. 예비해석을 통해 결정한 재하하중 5,000kN을 모사하기 위해 재하시험장치는 5,000kN까지 재하할 수 있도록 5,000kN 용량의 유압잭을 2개를 옹벽 상부에 설치하였으며, 시공 단계별 거동특성을 파악하기 위해 판넬 및 네일에는 지중경사계, 토압계, 원지반 침하계, 하중계, 변형률계 등을 부착하였다.

2.3 현장시험 결과 및 수치해석 분석

현장시험 결과 하중에 따른 변위는 Fig. 4의 Field test (점으로 표시)와 같다. 그림을 보듯이 하중이 증가함에

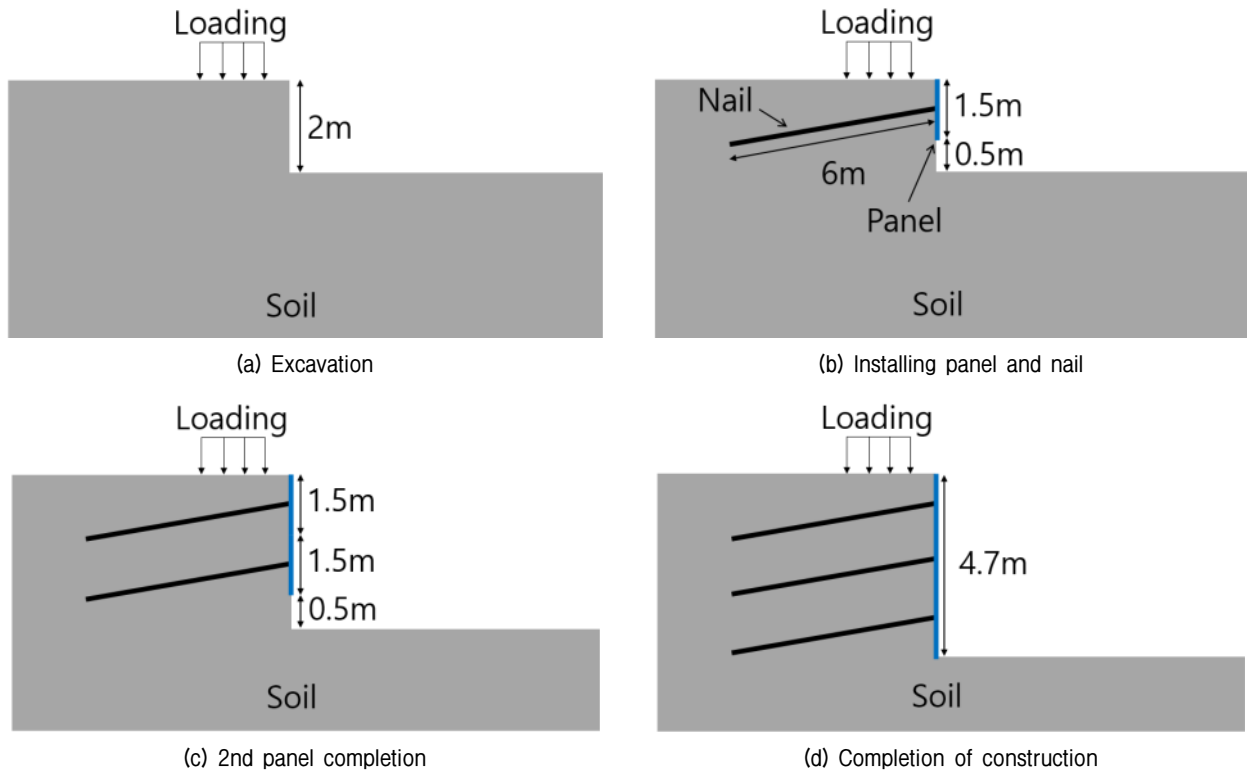


Fig. 3. Construction stage (Top-down)

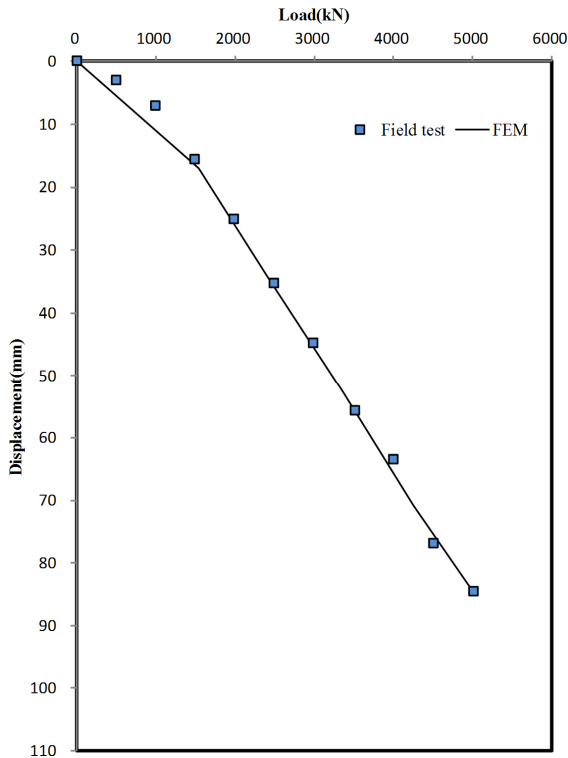


Fig. 4. Load-displacement curve (Field test vs. FEM)

따라 변위가 증가하였다. 특히 재하하중 5,000kN에서는 84.50mm의 변형을 보였으나 지반의 항복점은 나타나지 않았다. 현장시험 결과의 안정성분석을 위해 Plaxis 2D를 이용하여 수치해석을 수행하였으며, 해석에 사용된 물성치는 Table 1과 동일하게 사용하였다. Fig. 4는 현장에서 얻은 하중에 따른 변위값과 수치해석결과를 비교하였다. 그림에서 보듯이 현장시험 계측값과 수치해석값이 거의 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 하중에 따른 전체 변위량을 contour로 나타냈으며, 그림에서 보듯이 하중이 증가 할수록 파괴면의 형상이 뚜렷이 보이는 걸 알 수 있으며, 구체적인 수치는 하중이 1000kN인 경우 20.0mm, 2000kN인 경우 40.8mm, 3000kN인 경우 75.1mm, 4000kN인 경우 148.9mm, 5000kN인 경우 403.3mm, 6000kN인 경우 594.8mm의 변화량을 보였다.

3. 수치해석을 통한 기존 시공방식과 원지반 부착식 판넬옹벽 방식의 안정성 비교분석

3.1 수치해석

일반적으로 Bottom방식의 경우 Fig. 6(a)와 같이 소단에 옹벽을 설치하기 위해 1:0.05 정도의 기울기로 굴착 후 Fig. 6(b)와 같이 옹벽 및 네일을 설치한다. Top-down 방식의 경우 Fig. 7(a)과 같이 판넬의 높이(1.5m) 보다 약간의 시공여유를 두기 위해 2m 굴착을 먼저 실시한다. 굴착 후 Fig. 7(b)와 같이 판넬과 네일을 설치하였으며, Fig. 7(c)과 같이 top-down 방식으로 Fig. 7(a)와 (b)를 반복적으로 수행하여, Fig. 7(d)와 같이 최종적으로 한 개의 소단 설치를 완성하게 된다.

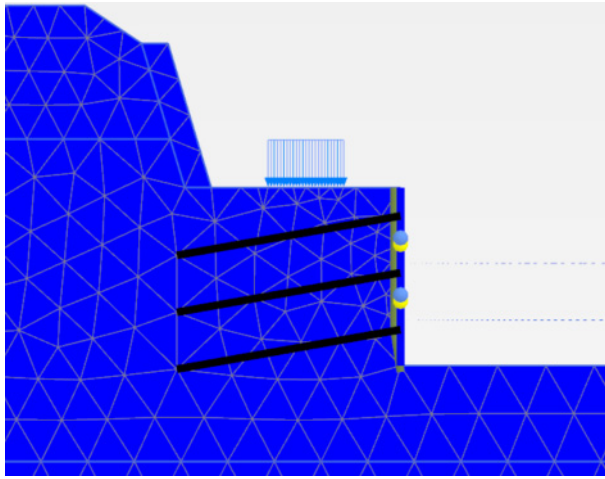
기존 시공방식(Bottom-up)과 원지반 부착식 판넬옹벽 방식(Top-down)의 안정성 비교분석을 위해 Fig. 8과 같이 대표단면을 선정하였다. Fig. 8(a)는 Bottom-up 방식으로 하나의 소단을 선 굴착 후 판넬과 네일이 설치되어 있는 모습이며 Fig. 8(b)는 Top-down 방식으로 판넬의 높이보다 시공여유 높이까지 선 굴착후 판넬과 네일이 설치되어 있는 모습을 보여주고 있다. 대표단면을 구성하고 있는 지반은 상부로 부터 붕적토, 미고결퇴적암(풍화암), 풍화토, 풍화암으로 구성이 되어있으며, 수치해석에 사용된 지반물성은 Table 2와 같다. 옹벽의 경우 1.5x1.5m 규격의 판넬식 옹벽으로 지보재는 판넬식 옹벽 시공 시 일반적으로 사용 중인 SD400, D32 규격을 적용하였다.

3.2 수치해석 결과

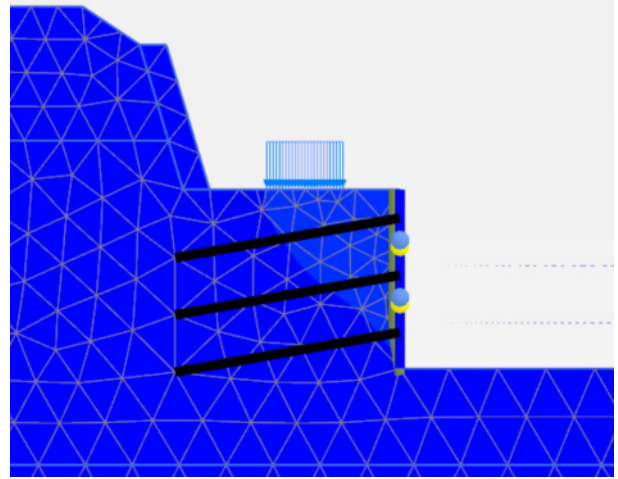
수치해석 결과는 Fig. 9, 10, 11에 나타내었다. Fig. 9는 시공단계별 안전율을 나타냈으며, 그림을 보듯이 Bottom-up방식의 최종 안전율은 1.474이며, Top-down방식의 최종 안전율은 1.482로 비슷한 결과를 보여주고 있다. 하

Table 2. Physical properties used for simulations (Bottom-up vs. Top-down)

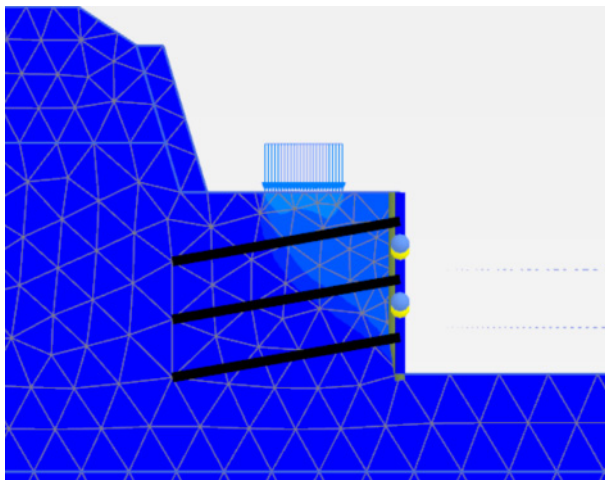
Ground type	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Poisson's ratio	Modulus of deformation (kPa)
Colluvium	20	15	35	0.33	50,000
Unconsolidated sedimentary rock (Weathered rock)	20	45	30	0.3	200,000
Weathered soil	19	20	30	0.3	70,000
Weathered rock	20	30	31	0.31	200,000



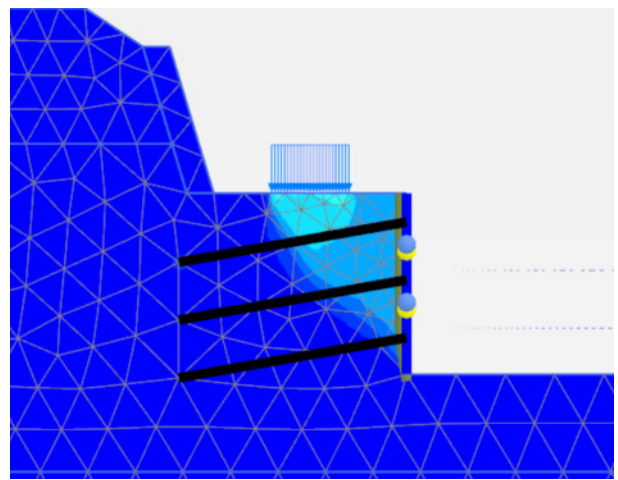
(a) 1000kN : 20.0mm



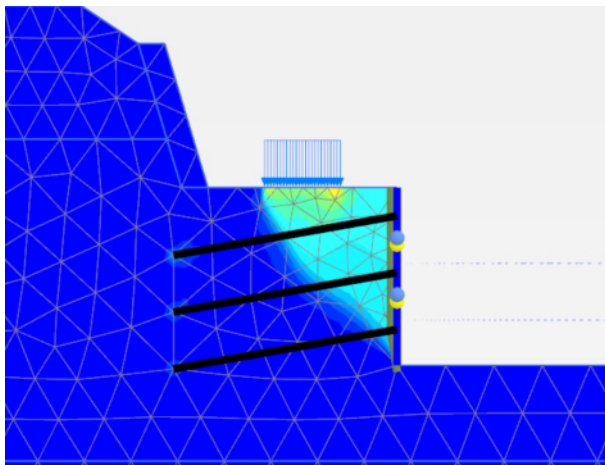
(b) 2000kN : 40.8mm



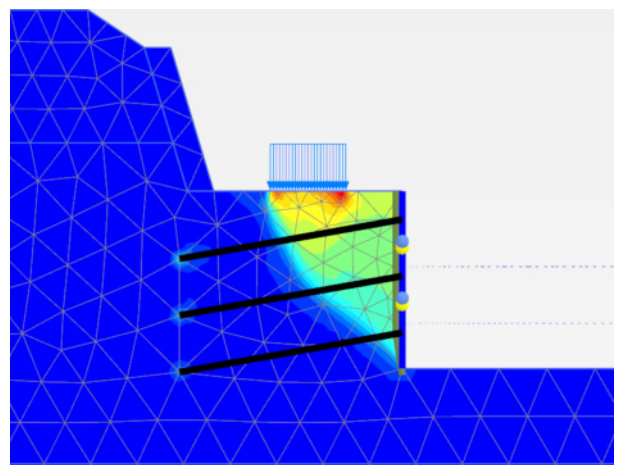
(c) 3000kN : 75.1mm



(d) 4000kN : 148.9mm



(e) 5000kN : 403.3mm



(f) 6000kN : 594.8mm

Fig. 5. Deformation contour with respect to loading

지반 시공 중 안전율은 Top-down방식이 Bottom-up 방식에 비해 크게 나타났으며, 이는 Top-down방식이 Bottom-up방식보다 시공 중 안전율을 담보할 수 있다고 볼 수 있다. Fig. 10은 시공단계별 변위량을 나타냈으며, 그림을

보듯이 Bottom-up방식의 최종 변위량은 36.83mm이며, Top-down방식의 최종 변위량 26.843mm로 Top-down방식으로 시공 시 변위량이 9.987mm 낮게 나오는 결과를 알 수 있다. Fig. 11은 두 시공방법에 대하여 시공

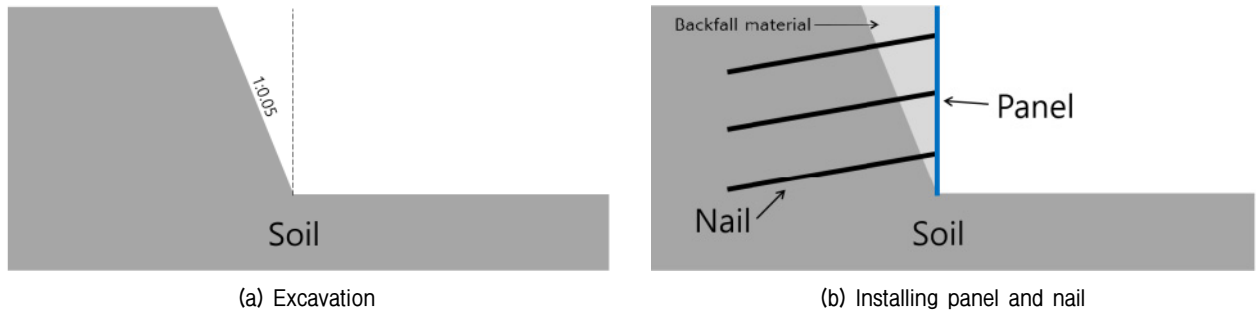


Fig. 6. Construction stage (Bottom-up)

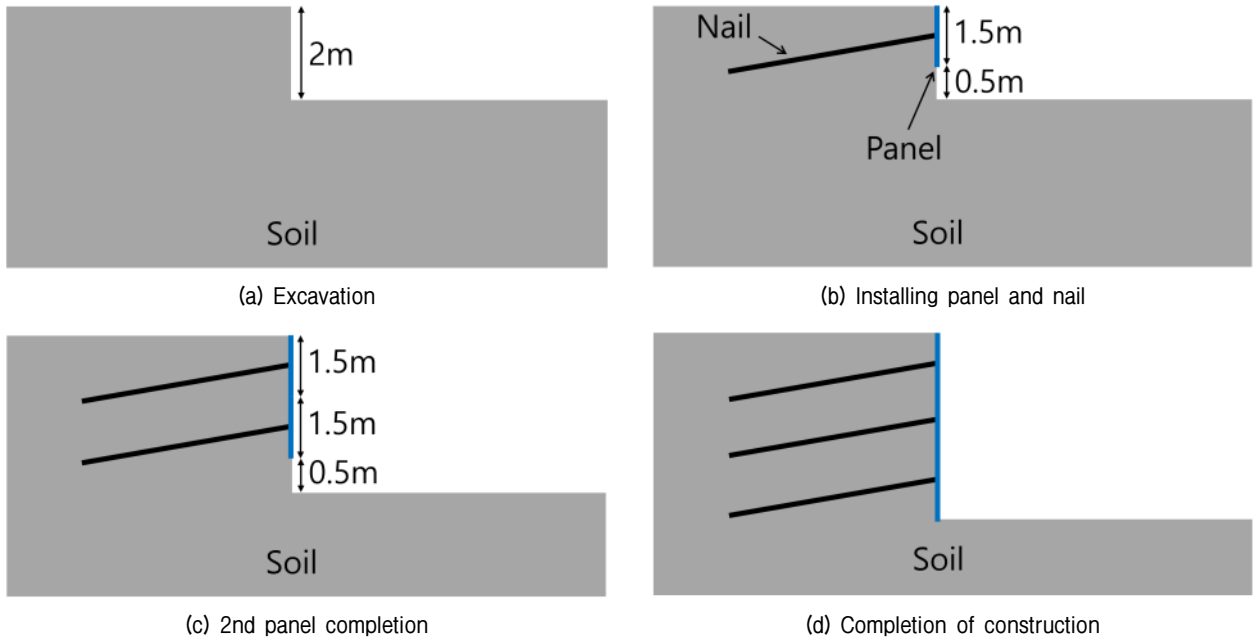


Fig. 7. Construction stage (Top-down)

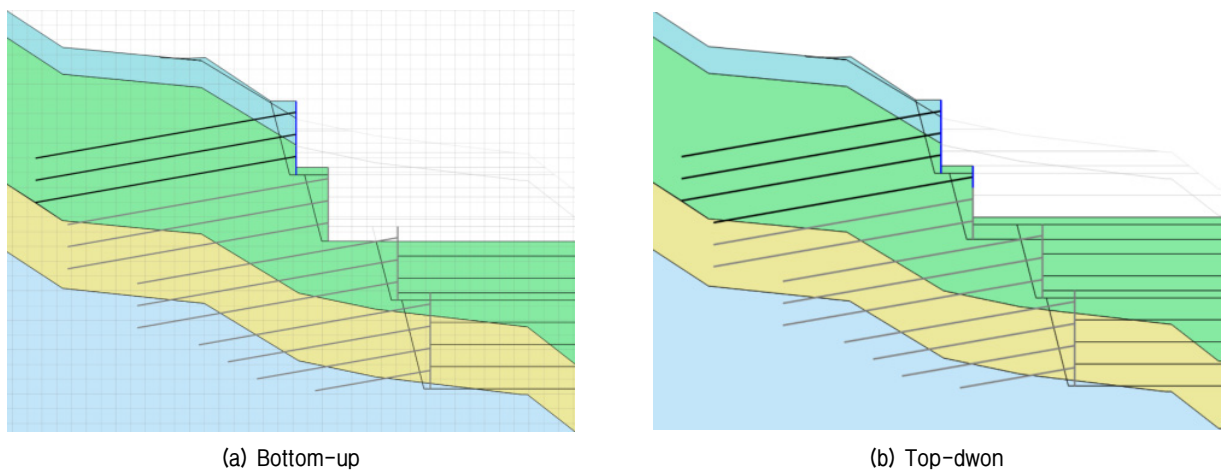


Fig. 8. Cross-sectional diagram (Bottom-up vs. Top-down)

최종단계의 사면의 전체변위(total displacement)나타낸 것으로 Bottom-up 방식의 연직변위의 변위(u_y)는 42.78 mm로 Top-down방식의 연직변위(u_y)인 42.79mm 보다 0.01mm 낮게 나타났다. 하지만 수평변위(u_x)와 변위

크기($|u|$)의 경우는 Bottom-up 방식이 Top-down방식 보다 각각 40.74mm, 41.45mm 높게 나타났다. 따라서 Bottom-up 방식의 경우 Top-down방식보다 많은 변형이 발생하였음을 알 수 있다.



Fig. 9. Safety factor (Bottom-up vs. Top-down)

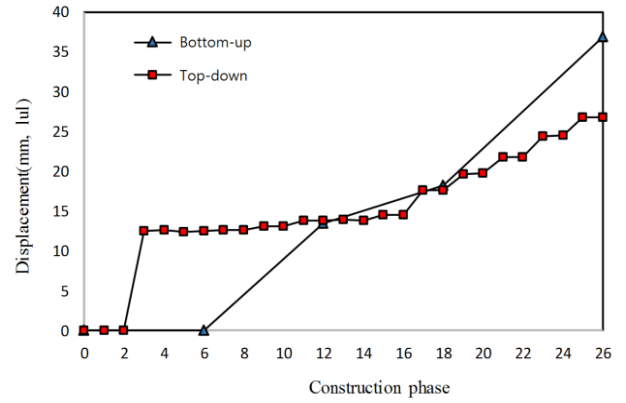
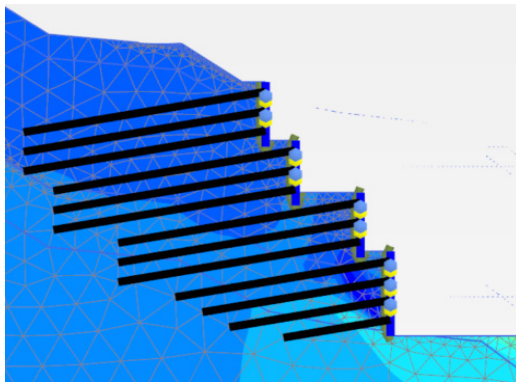
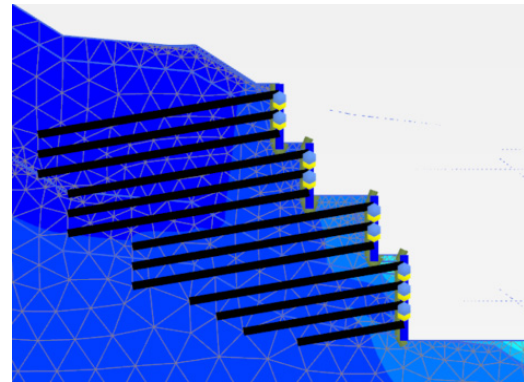


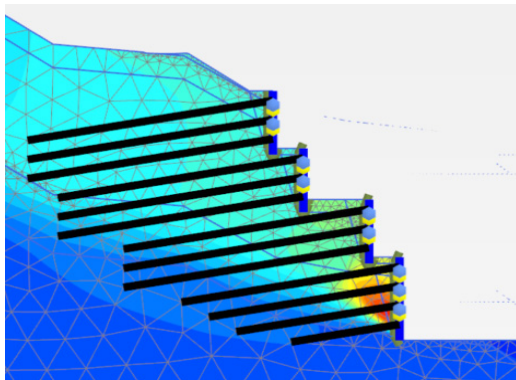
Fig. 10. Displacement (Bottom-up vs. Top-down)



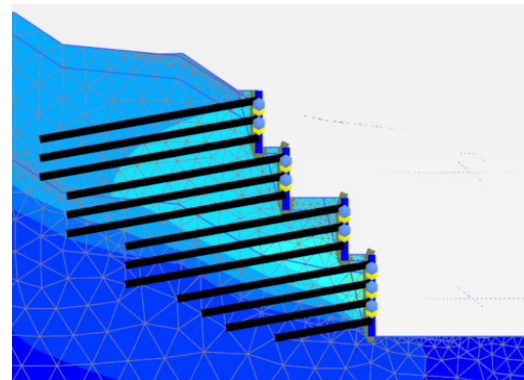
(a) Bottom-up (u_y : 42.78mm)



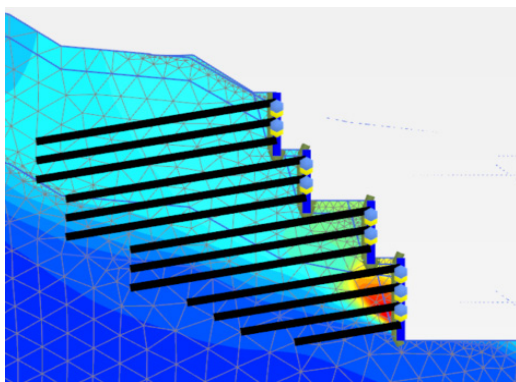
(b) Top-down (u_y : 42.79mm)



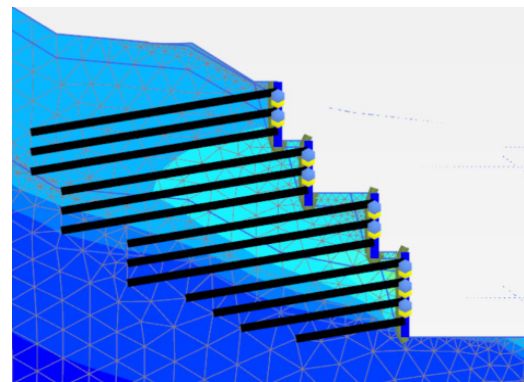
(c) Bottom-up (u_x : 95.10mm)



(d) Top-down (u_x : 54.36mm)



(e) Bottom-up ($|u|$: 95.92mm)



(f) Top-down ($|u|$: 54.47mm)

Fig. 11. Total deformations (Bottom-up vs. Top-down)

4. 결 론

본 연구는 기존 시공방식의 문제점인 원지반 과다절취 등의 문제를 해결하기 원지반 부착식 판넬옹벽에 대해 현장 적용시험을 수행하고 그 결과를 범용 수치해석 프로그램인 Plaxis 2D를 이용하여 안정성 분석을 수행하였다. 또한 대표단면을 선정하여 기존의 방식(Bottom-up)과 원지반 부착식 판넬옹벽 방식(Top-down)의 안전성 비교분석을 하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 예비해석을 수행하여 현장시험 시 하중재하를 5,000 kN으로 결정하여 현장시험을 수행하였다. 현장시험 결과 재하하중 5,000kN에서는 84.50mm의 변형을 보였으나 지반의 항복점은 나타나지 않았다. 수치해석을 통해 안정성 분석결과 지반 변형이 현장시험과 비슷한 양상을 보였으나, 재하하중 5,000kN에서는 변위량이 84.43mm로 현장시험과 0.07mm의 차이를 보였다. 하지만 0.07mm는 미세한 차이로 수치해석 결과 원지반 부착식 판넬옹벽의 경우 안정성에 문제가 없는 것으로 판단된다.
- (2) 현장시험에서 발생한 전체 변위와 수치해석을 비교한 결과 매우 유사하게 나타났으며, 이는 5000kN의 하중을 적용했을 경우 사면의 안전성에 문제가 없음을 알 수 있다.
- (3) Bottom-up 방식과 Top-down 방식의 안정성검토를 위해 수치해석을 수행한 결과 Bottom-up 방식의 안전율은 1.474이며, Top-down 방식의 안전율은 1.482로 비슷하게 나옴을 확인하였다. 하지만 시공 중에는 Top-down 방식의 안전율이 높게 나타났으며, 이는 시공중에 발생할 수 있는 위험적인 측면에서 Top-down 방식이 Bottom-up 방식에 비해 안전성을 담보할 수 있음을 알 수 있다.
- (4) Bottom-up 방식과 Top-down 방식의 변위량을 비교했을 때 Bottom-up의 경우 최종단계에서 급격한 변위증가량을 보이는 반면 Top-down 방식의 경우는 일정한 변위량에서 수렴됨을 알 수 있다. 변위량 또한 Top-down 방식이 Bottom-up에 비해 작게 나옴을 알 수 있다.
- (5) 따라서 기존방식(Bottom-up)에 비해 현장부착식 방식(Top-down)방식의 시공이 시공 중의 사면에 대한 안전성을 보다 담보할 수 있다고 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(비탈면 대상 조사·점검 개선 및 보강시설 노후화 대응 기술 개발, 20SCIP-C151408-02)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Choi, S. H. (2013), A Study on the Stability Analysis of Earth Reinforcement Walls Constructed in the Cutting Faces, Ph. D. Thesis, University of Hongik.
2. Han, J., Cho, S., Jeong, S., Lee, K., and Kim, J. (2005), Case Study on the Countermeasure Methods and Collapsed Sources of Segmental Retaining Wall Considering Site Conditions, *Korean Geosynthetic Society*, Vol.4, No.3, pp.35-43..
3. Hong, G., You, S., Yun, J., Park, J., and Lee, K. (2016), A Case Study on Collapses and Restoration of Retaining Wall with Vegetated Concrete Block, *Journal of Korea Geosynthetics Society*, Vol.15, No.4, pp.105-115.
4. Kang, I., Ryu, J., Kim, H., and Kwon, Y. (2009), Reinforcement of Dilapidated Masonry and Concrete Retaining Walls Using Prefabricated Soil Nailing System, *Korean Geo-Environmental Society*, Vol.2009, No.4, pp.324-329.
5. Kang, I., Kwon, Y., Park, S. Y., Ki, M., and Kim, H. (2008), Behavior Analysis of Assembling Soil Nailed Walls Through Large Scaled Load Test, *Journal of the Korean GeoEnvironmental Society*, Vol.9, No.4, pp.23-36.
6. Kim, B., Yool, W., Kim, K., and Lee, B. (2006), A Case Study on Collapsed Geosynthetic Reinforced Segmental Retaining Wall, *Journal of the Korea Academia-Industrial*, Vol.14, No.4, pp.2006~2011.
7. Kim, H., Lee, H., Kim, J., Ryu, J., and Sung, N. (2006), Behavioral Characteristics of Prestressed Earth Method Reinforced with Earth Bolt, *KGS Spring Conference, Korean Geotechnical Society*, pp. 662-669.
8. Min, K., Lee, J., Lee, J., Kang, I., and Ahn, T. (2016), Field Application of a Precast Concrete-panel Retaining Wall Adhered to In-situ Ground, *The Journal of Engineering Geology*, Vol.26, No.1, pp.51-61.
9. Shin, Y., Min, K., Kim, J., and Ahn, T. (2016), Behavior Characteristics of Precast Concrete-panel Retaining Wall Adhered to In-situ Ground Through Large Scaled Load Test, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.17, No.11, pp.45-53.
10. Won, M., Langcuyan, C. P., Choi, J., and Ha, Y. (2020), A Case Study on the Reinforcement of Existing Damaged Geogrid Reinforced Soil Wall Using Numerical Analyses, *Korean Geosynthetics Society*, Vol.19, Issue.1, pp.75-82.

Received : December 8th, 2020

Revised : December 14th, 2020

Accepted : December 14th, 2020