

제주 지역의 지반 특성을 고려한 흙막이벽의 측방토압 적용에 관한 연구 I -스트럿 공법 시공 사례-

A Study on the Application of Lateral Earth Pressure to Earth Retaining Wall Considering Ground Characteristics in Jeju I - Case of Strut Construction -

김도형¹, 이동욱^{2*}, 최희복³, 고권문⁴

Do-Hyeong Kim¹, Dong-Wook Lee^{2*}, Hee-Bok Choi³, Kwon-Moon Ko⁴

¹Member, The PhD Student, Dept. of Civil Engineering, Jeju National Univ., 102 Jejudaehak-Ro, Jeju 63243, Republic of Korea

²Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Jeju National Univ., 102 Jejudaehak-Ro, Jeju 63243, Republic of Korea

³Member, Professor, Dept. of Architectural Engineering, Jeju National Univ., 102 Jejudaehak-Ro, Jeju 63243, Republic of Korea

⁴Member, Deputy Director, Korea Rural Community Corporation, Jeju Regional Headquarter, 12 Seonsa-ro, Jeju 63318, Republic of Korea

ABSTRACT

This paper describes the comparative results of measured and predicted values for the horizontal displacement of earth retaining wall based on two field cases. In order to examine the application of lateral earth pressure to the earth retaining wall considering the typical ground characteristics (clinker layer) in Jeju. The prediction of the lateral earth pressure causing the horizontal displacement of the retaining wall was performed by elasto-plastic analysis using Rankine earth pressure, Terzaghi & Peck modified lateral earth pressure, and Tschebotarioff lateral earth pressure. As a result, it was confirmed that the maximum horizontal displacement predicted at site A was about 5 times larger than the measured value, and the ground with maximum horizontal displacement occurred by the prediction was found to be the clinker layer. In the case of site B, the predicted value was 4 to 7 times larger than the measured value. In addition, the ground with maximum horizontal displacement and the tendency of horizontal displacement were very different depending on the prediction method. This means that research on lateral earth pressure that can consider regional characteristics needs to be continued, because it is due to the multi-layered ground characteristics of the Jeju area in which bedrock layers and clinker layers are alternately distributed,

요 지

본 연구에서는 제주 지역의 대표적인 지반 특성(클링커층)을 고려한 흙막이벽의 측방토압 적용을 고찰하기 위해 2개의 현장 사례를 이용하여 수평변위에 대한 계측값과 예측값을 비교하였다. 흙막이벽의 수평변위 발생에 기인하는 측방토압 예측은 Rankine 토압, Terzaghi & Peck 수정측방토압, Tschebotarioff 측방토압을 이용하여 탄소성해석을 실시하였다. 그 결과, A현장에서 예측된 최대 수평변위는 계측값에 비하여 약 5배가 큰 것으로 확인되었으며, 예측에 의한 최대 수평변위 발생 지반은 클링커층으로 나타났다. 그리고 B현장의 경우에는 예측값이 계측값에 비하여 4배에서 최대 7배까지 크게 나타났으며, 최대 수평변위가 발생한 지반과 수평변위 발생 경향은 예측 방법에 따라 매우 다른 경향을 보였다. 이는 암반층과 클링커층이 교호되어 분포되는 제주 지역의 다층지반 특성에 기인한 것이라 판단되기 때문에, 지역 특성을 고려할 수 있는 측방토압에 관한 연구가 지속될 필요가 있음을 의미한다.

Keywords : Lateral earth pressure, Clinker layer, Earth retaining wall, Strut, Jeju island

Received 19 Apr. 2023, Revised 19 Jun. 2023, Accepted 19 Jun. 2023

*Corresponding author

Tel: +82-64-754-34580; Fax: +82-64-725-2519

E-mail address: dwlee@jejunu.ac.kr (D.W. Lee)

1. 서론

국내 대표적인 화산섬인 제주도는 상당 기간의 화산활동에 의해 현무암층이 기반암으로 이루어진 특성을 가지고 있다(Kim and Lee, 2019; Lee et al., 2019). 이와 같이 특수한 지질학적 특성을 가진 제주도에서의 구조물 시공을 위해서는 기초지반의 물리적 및 역학적 특성에 대하여 충분한 조사가 요구된다(Nam et al., 2008). 특히, 제주도는 현무암층 사이에 클링커층(clinker layer)으로 불리우고 있는 공극이 크고 암편이 조밀하지 않은 화산쇄설층 또는 공동과 같은 연약한 층상구조가 포함되어 있어 구조물 설계 및 시공에 이를 고려할 필요가 있다(Kim, 2006; Yoon et al., 2022).

Fig. 1과 같이, 클링커층은 화산활동에 의해 분출된 용암이 공기 또는 지표와 접하는 부분에서 급격한 냉각으로 인해 고결된 파쇄 암편 또는 암괴 형태가 지층으로 분포된 형태를 의미한다(Park et al., 2006).

최근, 제주 지역에서는 관광산업의 발달과 함께 다양한 도심지 건축 구조물의 시공이 활발하게 이루어짐에 따라, 지반 굴착 시공에 의한 흙막이벽의 적용이 증가하고 있다. 즉, 도심지에서의 지반 굴착은 대부분 주변의 구조물이나 지하 매설물 등에 근접하여 시공되기 때문에, 굴착 수행에 의한 주변 지반의 침하 및 변형, 인접 구조물의 균열과 같은 문제가 종종 발생하게 된다. 이를 사전에 예방하기 위해 흙막이 벽을 적용하게 되는데, 흙막이벽은 굴착 지반의 지층 조건 및 깊이, 흙막이벽의 강성, 지지시스템 등에 많은 영향을 받기 때문에, 굴착 배면 지반에서 발생하는 측방토압에 대하여 엄밀히 예측적용할 필요가 있다.

앞서 언급한 바와 같이, 제주도는 대부분 암반층 사이에 클링커층이 교호하여 분포되는 다층지반의 특성을 가지고 있다. 그러나 제주도의 지층 특성을 고려한 대부분의 연구들은 지반보강 및 지지력 확보, 지반진동 등의 측면에서 접근하고 있다(Kim and Lee, 2019; Lee et al., 2019; Yang

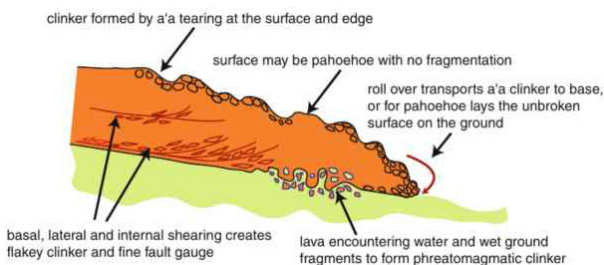


Fig. 1. Formation of clinker layer (Loock et al., 2010)

et al., 2013). 따라서 본 연구에서는 제주 지역의 대표적인 지반 특성인 클링커층이 존재하는 2개의 현장 사례를 이용하여 측방토압에 의한 스트럿 공법이 적용된 흙막이벽의 실측 수평변위와 경험적 방법에 의해 산정된 예측 수평변위를 비교하였다. 그리고 이를 바탕으로 클링커층이 존재하는 제주 지역의 다층지반에 스트럿 공법이 시공된 흙막이벽에 작용하는 측방토압 적용에 관하여 고찰하였다.

2. 흙막이벽에 작용하는 측방토압

흙막이벽의 배면 지반에서 작용하는 측방토압은 벽체의 변위 및 지반조건에 의해 다르게 나타난다. 특히, 옹벽에 작용하는 주동토압 분포와 비교하여 흙막이벽에 작용하는 측방토압은 다른 형태를 보이기 때문에(Lambe and Whitman, 1979; Das, 1984), 많은 연구자들이 지반 굴착 현장의 계측결과를 이용하여 설계에 요구되는 경험적 측방토압 산정 방법을 제시한 바 있으며, 본 연구에서는 흙막이벽의 변형 특성을 고려하여 연성벽체에 작용하는 대표적인 측방토압 분포에 대하여 기술하였다.

먼저, Terzaghi는 다양한 원인에 의한 흙막이벽의 변형에 있어서 Rankine 또는 Coulomb의 토압이론을 적용하는 것이 어렵다고 판단하여 측방토압의 추정이 필요하다고 하였다. 이를 통해, Terzaghi and Peck(1948)은 굴착현장에서 버팀보로 지지된 흙막이벽에 작용하는 토압을 바탕으로 지반 조건에 따른 토압 분포도를 Fig. 2와 같이 제안하였다. 그리고 다양한 현장에서 버팀보에 대한 반력을 토대로 Fig. 3과 같은 수정토압분포도를 제안하였다(Terzaghi and Peck, 1967).

Tschebotarioff(1973)가 제안한 사질토 지반의 측방토압 분포는 Terzaghi and Peck(1948)가 제안한 토압분포와

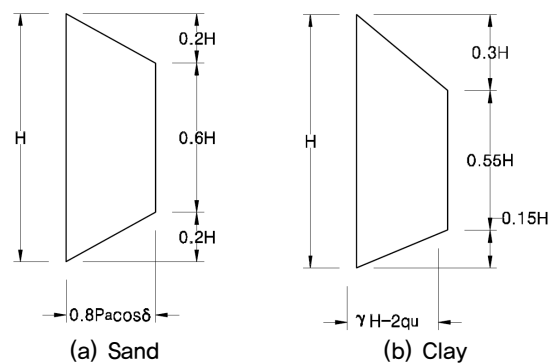


Fig. 2. Lateral earth pressure distribution by Terzaghi and Peck(1948)

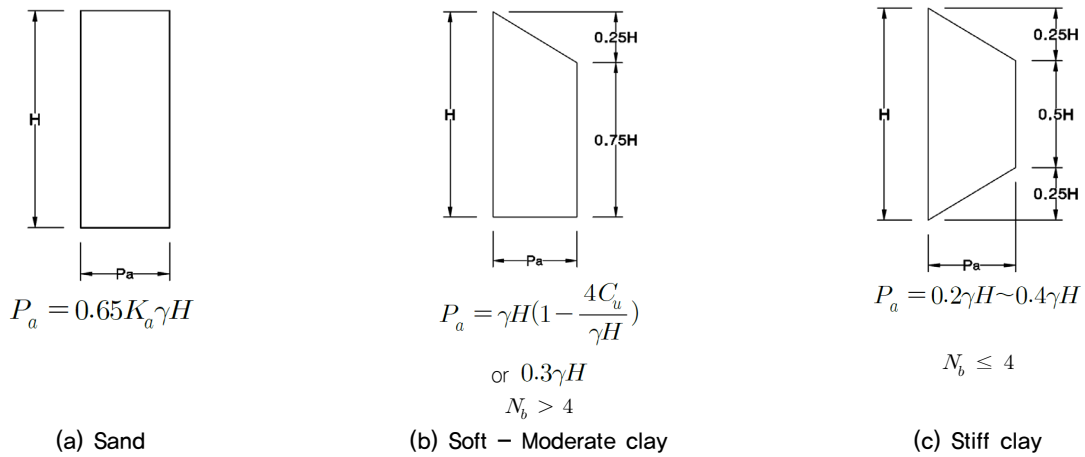


Fig. 3. Modified lateral earth pressure distribution by Terzaghi and Peck (1967)

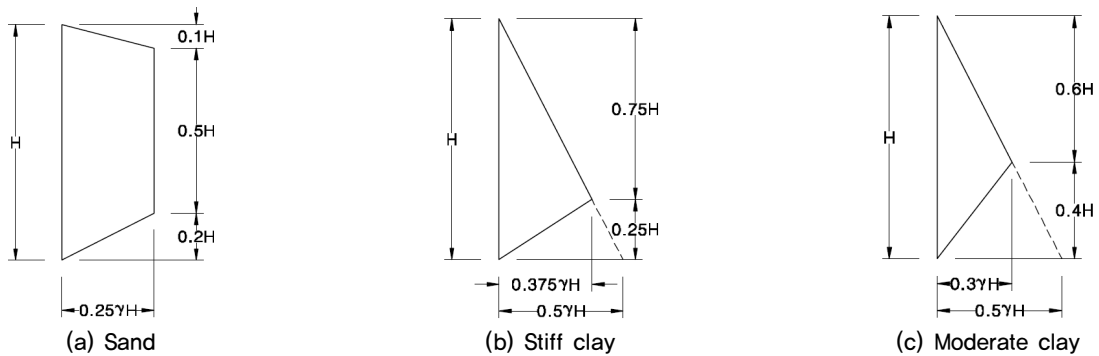


Fig. 4. Lateral earth pressure distribution by Tschebotarioff (1973)

비교하여 큰 차이가 없지만 충분한 안전율을 갖는 특성을 보인다. 그러나 Terzaghi and Peck(1948)이 제안한 점토지반의 토압분포가 얇은 굴착깊이에서는 매우 과다하게 산정된다고 하여 삼각형분포로 제한한 바 있다(Fig. 4).

그 외에도 국내에서 Hong and Yun(1995)은 암반을 포함하고 있는 다층지반을 대상으로 앵커로 지지된 흙막이벽에 작용하는 측방토압 분포를 토사지반과 암반지반으로 구분하여 제한한 바 있다.

이에 본 연구에서는 스트럿 공법이 적용된 흙막이벽의 실측 수평변위와 비교를 위하여 Rankine 토압이론과 함께, Terzaghi & Peck과 Tschebotarioff가 제안한 경험적 토압 산정방법을 적용하였다.

3. 현장계측 사례를 이용한 스트럿으로 지지된 흙막이벽의 수평변위 평가

3.1 현장 개요

전술한 바와 같이, 본 연구에서는 스트럿 지지 흙막이벽

이 시공된 2개의 현장을 대상으로 수평변위에 대하여 현장계측 결과와 경험적 예측방법에 의한 결과를 비교하였다. 각각의 현장 특성은 다음과 같다.

먼저, A현장은 지하 1층 및 지상 3층의 건축 구조물 시공 현장으로, 최종 굴착깊이는 5.0m이다. 흙막이벽은 1.5m의 근입깊이로 H파일(300×200×9×14)과 토류판(T=60mm)으로 시공되었으며, 1단의 스트럿(300×300×10×15)으로 지지하였다. Fig. 5(a)와 같이, 지층구조는 퇴적층, 연암층, 클링커층, 보통암층의 순으로 나타나고 있으며, 퇴적층의 일부 사이에서는 다른 지층과 비교하여 상대적으로 다소 느슨한 상태를 보였다.

B현장은 지하 3층 및 지상 10층의 건축 구조물 시공 현장이고, 최종 굴착깊이는 12.5m이다. 흙막이벽은 2.0m의 근입깊이로 A현장과 동일한 크기의 H파일과 토류판으로 시공되었으며, 3단의 스트럿(300×300×10×15)으로 지지하였다. 지층구조는 퇴적층, 연암층, 클링커층, 풍화암층, 클링커층, 보통암층, 경암층으로 나타났으며, 퇴적층은 매우 느슨한 상태를 보였다. 그리고 클링커층도 일부를 제외하면 다소 느슨한 상태인 것으로 확인되었다(Fig. 5(b)).

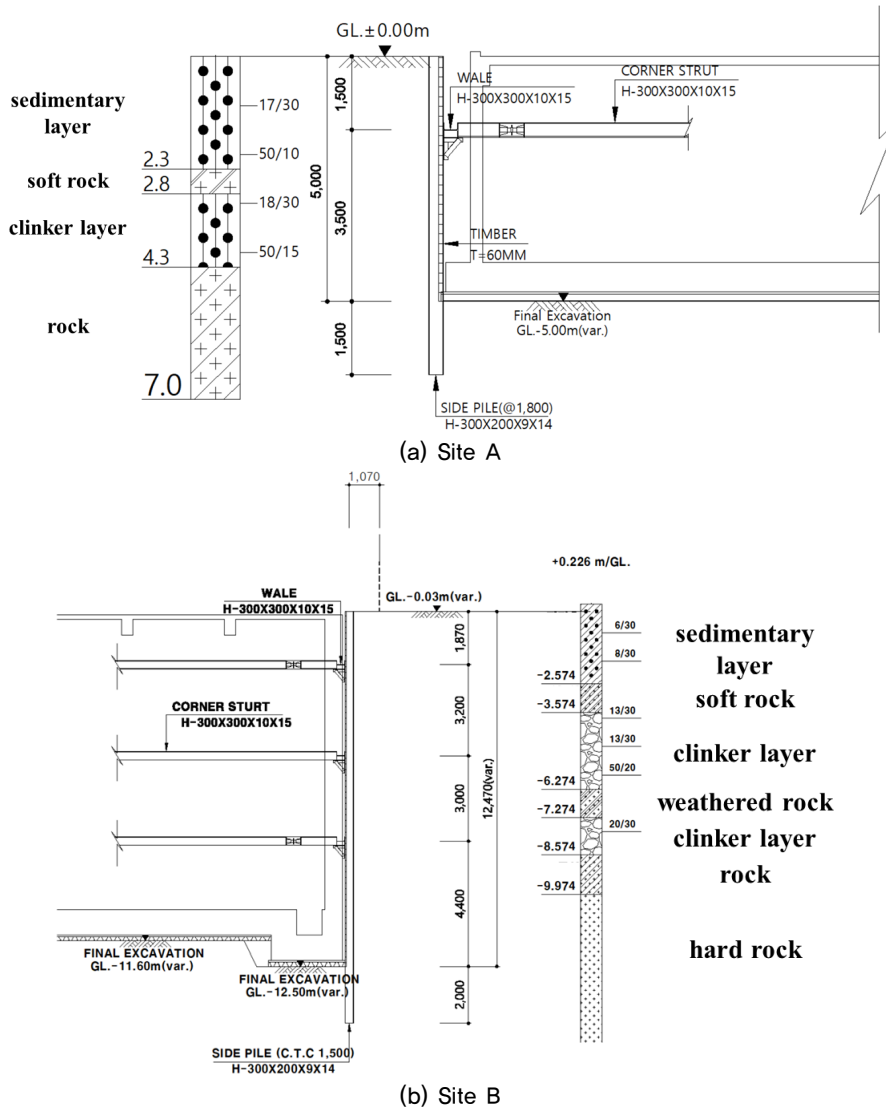


Fig. 5. Soil layer and retaining wall construction in field cases

3.2 현장계측 결과

Fig. 6은 최종굴착단계에서 흙막이벽의 수평변위를 나타낸 것이다.

A현장의 경우, 상부 퇴적층(G.L(-)1.0m)에서 2.2mm로 가장 크게 발생하였으며, 암반층 사이에 분포한 클링커층에서의 수평변위는 암반층에서의 수평변위와 유사한 것으로 확인되었다. B현장의 경우에도 상부 퇴적층(G.L(-)1.87m)에서 3.1mm로 가장 큰 수평변위가 발생하였으며, 암반층 사이에 분포한 클링커층에서의 수평변위 또한 암반층과 유사하였다.

현장계측 결과로부터 제주 지역의 특수한 지층 구성 요소인 클링커층에 대한 지반 굴착 시 수평변위는 생성 특성(파쇄 암편 또는 암괴 형태)에 기인해 지층 사이의 암반에

서 발생하는 수평변위와 유사한 것을 알 수 있었다.

3.3 수평변위 예측 및 비교

흙막이벽의 실측된 수평변위와 경험적 측방토압 산정 방법에 의해 예측된 수평변위를 비교하기 위해 GeoX 프로그램으로 탄소성해석에 의한 예측 수평변위를 산정하였다. 이때, 예측 수평변위는 Rankine 토압과 경험적 측방토압 산정식(Terzaghi & Peck 수정측방토압, Tschebotarioff 측방토압)을 적용하였다.

해석모델은 Fig. 7에서 보는 바와 같으며, 해석에 적용된 지반정수는 지반조사에 의해 확인된 N값을 이용하여 추정하였다. 그리고 퇴적층 및 클링커층에 대한 지반반력 계수는 후쿠오카 방법으로 추정하여 적용하였다. Table 1

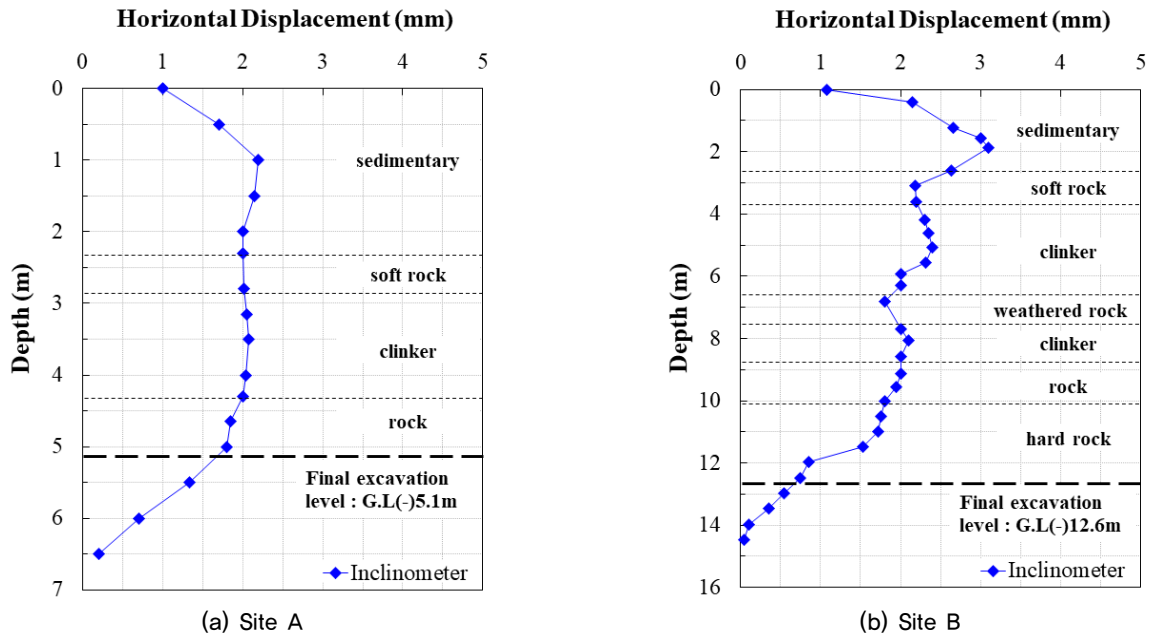


Fig. 6. Field measurement results

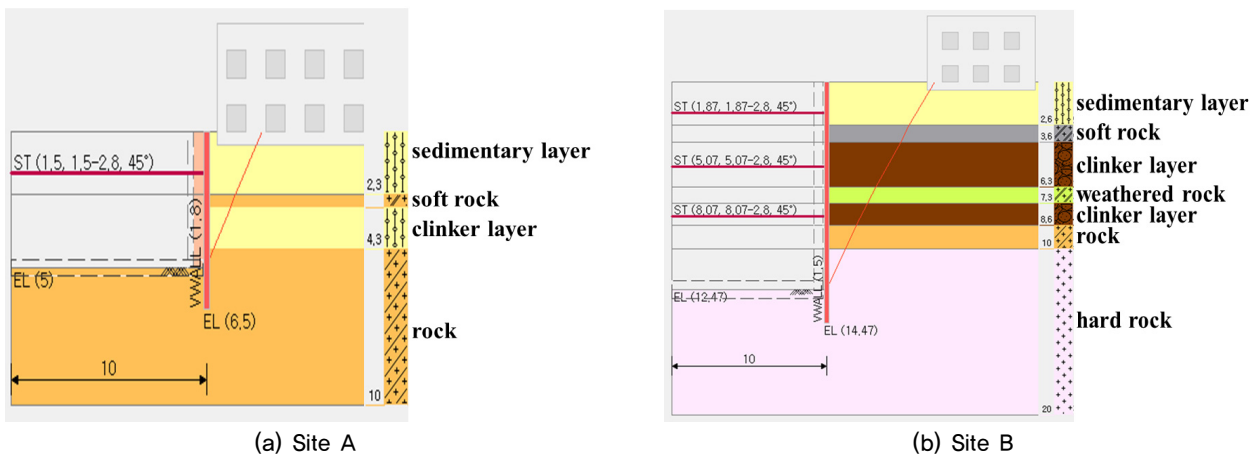
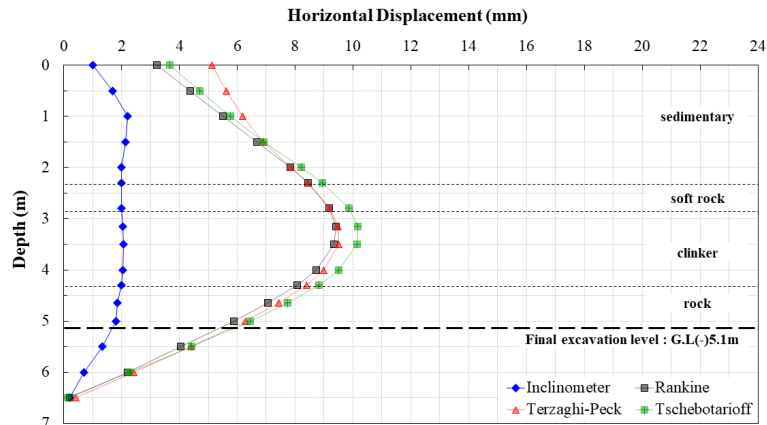


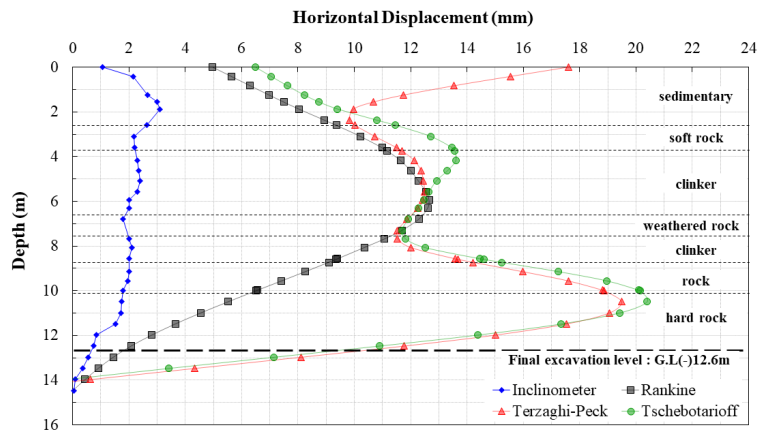
Fig. 7. Analysis model

Table 1. Soil properties for analysis

Classification		Depth (m)	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (tf/m ²)	Internal friction angle (°)	Coefficient of horizontal subgrade reaction (tf/m ³)
Site A	sedimentary layer	2,3	1,8	0	29,3	2183
	soft rock	2,8	2,3	5	35,0	4500
	clinker layer	4,3	1,8	0,5	29,7	2234
	rock	7	2,5	10	38,0	6000
Site B	sedimentary layer	2,6	1,8	0	24,2	1523
	soft rock	3,6	2,3	5	35,0	4500
	clinker layer	6,3	1,8	0	27,5	1958
	weathered rock	7,3	2,2	3	33,0	4000
	clinker layer	8,6	1,8	0	30,5	2332
	rock	10	2,5	10	38,0	6000
	hard rock	20	2,5	10	38,0	6000



(a) Site A



(b) Site B

Fig. 8. Comparison of measured and predicted values for horizontal displacement

은 해석에 적용된 지반정수를 요약한 것이다.

각 현장에서의 흙막이벽 수평변위에 대한 실측결과와 예측결과를 Fig. 8과 같이 비교하였다.

A현장에 대한 예측 수평변위의 경우, Rankine 토압, Terzaghi & Peck 수정측방토압, Tschebotarioff 측방토압에 의해 산정된 최대 수평변위는 다소 차이는 있지만 클링커층에서 약 8.5mm~10mm 수준인 것으로 평가되었다. 그리고 각각의 예측 수평변위 및 경향은 유사한 것을 알 수 있었다.

예측 수평변위를 실측된 수평변위와 비교한 결과, 퇴적층에서의 수평변위 발생 경향은 유사한 형태를 보였지만, 실측값이 퇴적층 이하의 지층조건에서 수렴하다 감소하는 경향을 나타낸 것에 비하여, 모든 예측값은 클링커층까지 수평변위가 증가하다 감소하는 것으로 확인되었다. 즉, 지층 중간에 형성된 연암층과 클링커층이 교호하여 분포되고 있는 구간부터는 실측값과 예측값이 큰 차이를 보였는데, 최대 수평변위 발생 지층과 함께 그 크기도 실측값에 비해 예측값이 약 5배 정도 크게 나타났다. 이는 암반층

사이에 분포된 클링커층의 경우, 화산분출 시 분출된 고온의 용암이 지표를 흐르면서 고결되어 암반을 형성하는 과정에서 지표면 또는 공기와 접하는 위치에서 급격하게 냉각되면서 암반층과 연결되어 나타난 결과로 판단되었다. 즉, 클링커층은 암반층과 유사한 토압 분포 특성을 가지고 있어 실측값이 예측값에 비해 상대적으로 매우 작게 발생된 것으로 평가되었다.

B현장에 대한 예측 수평변위의 경우, Rankine 토압이 적용된 예측값은 A현장과 같이 유사한 형태의 변위 양상을 보인 반면에, Terzaghi & Peck 수정측방토압, Tschebotarioff 측방토압에 의해 산정된 예측값은 매우 다른 경향을 나타냈다. 그리고 최대 수평변위는 실측값이 퇴적층에서 약 3mm 정도였으나, Rankine 토압에 의한 최대 수평변위는 상부 클링커층에서 약 12.5mm(실측값의 약 4배)로 해석되었고, Terzaghi & Peck 수정측방토압 및 Tschebotarioff 측방토압에 의한 예측값은 하부 암반 지층에서 약 19.5mm~20.5mm의 최대 수평변위(실측값의 약 7배)가 발생하였다. 이와 같이 불규칙적인 수평변위 예측값의 원인으로 클

링커층이 지층 중간에 분포되어 있는 지반 특성에 기인한 것으로 판단되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 제주 지역의 대표적인 지반 특성인 클링커층이 존재하는 다층지반에 스트럿으로 시공된 2개의 흙막이벽 현장 사례를 바탕으로 실측 수평변위와 경험적 방법에 의해 산정된 예측 수평변위를 비교하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 모든 현장 사례에 있어서, 암반층과 클링커층이 교호하여 분포되고 있는 구간에서의 수평변위 발생 형태가 실측값과 많은 차이를 보였다. 특히 현장 계측 결과로부터 퇴적층에서 최대 수평변위가 발생한 반면에, 예측값의 경우에는 A현장과 B현장이 각각 클링커층 또는 클링커층 하부 암반에서 최대 수평변위가 발생하였다.
- (2) A현장의 최대 수평변위 예측값은 실측값에 비하여 약 5배가 큰 것으로 분석되었으며, B현장의 경우에는 실측값이 예측값에 비하여 4배에서 최대 7배까지 크게 평가되는 것으로 나타났다. 이와 같이 수평변위에 대한 예측 결과가 불규칙적으로 나타난 원인으로 클링커층의 생성 원인과 함께 지층 중간에 분포되어 있는 지반 특성에 기인한 것으로 판단되었다.
- (3) 따라서, 암반층과 클링커층이 교호되어 분포되는 제주 지역의 다층지반에 흙막이벽을 적용하는 경우, 구조물의 변형 예측을 위해 주로 적용하는 Rankine 토압 이론 또는 경험적 측방토압 산정 방법(Terzaghi & Peck 수정측방토압, Tschebotarioff 측방토압 등)을 적용하는 것은 합리적이지 않은 방법이라 판단되기 때문에, 제주 지역의 다층지반 특성을 고려할 수 있는 측방토압 산정 방법에 대한 연구가 지속될 필요가 있다.

Acknowledgement

This work was supported by the research grant of Jeju National University in 2021.

References

1. Das, B. M. (1984), *Principles of Foundation Engineering*, 3th Ed., PWS Publishing, pp.423-425.
2. Hong, W. P. and Yun, J. M. (1995), "Lateral Earth Pressures Acting on Anchored Retention Walls for Underground Excavation", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.11, No.1, pp.63-77. (in Korean)
3. Kim, J. H. (2006), *A study on the mechanical characteristics and the strength in Pyoseonri basalt*, Thesis, Cheju National University. (in Korean)
4. Kim, S. H. and Lee, D. W. (2019), "Analysis of Ground Vibration Characteristics by Test Blasting in Southern Region of Jeju", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.39, No.3, pp.419-429. (in Korean)
5. Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1979), *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, pp.185-188.
6. Lee, K., Shin, H., Jung, H., Kim, D., Ryu, Y. and Kim D. (2019), "Evaluation of Shallow Foundation Behavior on Basalt Rock Layers With Clinker and Sediment Layers Reinforced Using Cement Grouting", *Journal of the Korean Geosynthetic Society*, Vol.18, No.3, pp.33-44. (in Korean)
7. Loock, S., van Wyk de Vries, B. and Henot, J.-M. (2010), "Clinker formation in basaltic and trachybasaltic lava flows", *Bull. Balcanol.*, Vol.72, pp.859-870.
8. Nam, J. M., Yun, J. M., Song, Y. S. Kim, J. H. (2008), "Analysis of Engineering Properties to Basalt in Cheju island", *Journal of the Korean Geosynthetic Society*, Vol.7, No.1, pp.13-21. (in Korean)
9. Park, K. H., Ahn, J. S., Ki, W. S. and Park, W. B. (2006), *Jeju Island Geological Travel*, KIGMR(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources). (in Korean)
10. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1948), *Soil Mechanics in Engineering practice*, 1st Ed., John Wiley and Sons, New York, pp.345-352.
11. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967), *Soil Mechanics in Engineering practice*, 2nd Ed., John Wiley and Sons, New York, pp.394-413.
12. Tschebotarioff, G. P. (1973). *Foundations, Retaining and Earth Structure*, McGraw-Hill, New York, pp.415-457.
13. Yang, K. H., Seo, S. D., Cho, Y. S. and Park, J. J. (2013), "Numerical Analysis of Offshore Wind Turbine Foundation Considering Properties of Soft layer in Jeju", *Journal of the Korean Geosynthetic Society*, Vol.12, No.4, pp.45-56. (in Korean)
14. Yoon, B. J., Park, S. Y. and Lee, S. J. (2022), "A Study on the Geotechnical Characteristics of Jeju Area Using Field Tests", *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol.18, No.4, pp.769-777. (in Korean)