

역지말뚝의 배치에 따른 흠막이의 수평변위 억제효과와 고속철도의 속도와의 상관성 분석

Analysis of the Correlation between the velocity speed of High-Speed Railways and the Suppressing Effect of lateral Displacement of retaining wall according to the Arrangement of Stabilizing Piles

손수원¹, 임종철², 서민수³, 홍석우^{4*}

Su-Won Son¹, Jong-Chul Im², Min-Su Seo³, Seok-Woo Hong^{4*}

¹Member, Associate Researcher, Seismic Simulation Test Center, Pusan National Univ., 2 Busandaehak-Ro, 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

²Member, Emeritus Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National Univ., 2 Busandaehak-Ro, 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

³Member, Ph.D., Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National Univ., 2 Busandaehak-Ro, 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

⁴Member, Professor, Department of Civil Engineering, Dong-Eui Univ., 176 Eomgwangno, Busanjin-gu, Busan 47340, Republic of Korea

ABSTRACT

In urban areas, structures are installed deep underground in the lower part of the structure to utilize space. Therefore, a retaining wall is used to prevent earth pressure from the ground when constructing a structure. Due to the development of construction technology, retaining wall applied to excavation work are used to prevent danger such as falling rocks and landslides in temporary facilities when construction or retaining walls are installed. In general, the application of a retaining wall to a temporary facility during the embankment construction is the case of expanding an existing roads or railways. Therefore, it is necessary to study the retaining wall applied to the embankment construction such as the double-track site of the high-speed railway. In this study, two types of common one row H-pile retaining wall and two types of IER retaining wall were analyzed, and the stability of the retaining wall applied to the construction of double-track of the high-speed railway was analyzed. The earth retaining wall is a construction method that combines forced pile applied to the stabilization of the slope with the wall of the earth retaining wall. As a result of the analysis, the IER retaining wall had maximum lateral displacement of 19.0% compared to the type with H-pile installed only in the front while dynamic load was applied. In addition, the slower the speed of high-speed railway, the more displacement occurred, and the results show that more caution is needed when designing the ground in low-speed sections.

요 지

도시지역에서는 공간 활용을 위해 구조물 하부 깊은 지하까지 구조물을 설치하고 있다. 그래서 구조물 건설 시, 지반에서 발생하는 토압을 방지하기 위해서 흠막이를 활용하고 있다. 굴착공사에 적용되던 흠막이가 건설기술의 발전으로 인해서 성토 공사나 옹벽 설치시에 가시철 낙석이나 산사태와 같은 위험 방지용으로도 이용되고 있다. 일반적으로 성토공사시 가시철 흠막이를 적용하는 경우는 기존에 존재하는 도로나 철도를 확장하는 경우이다. 그러므로 고속철도의 복선화 현상과 같은 성토공사에 적용되는 흠막이에 관한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 일반적인 1열 H-pile 흠막이와 지주식 흠막이 2종류에 대해 수치해석

Received 26 Jan. 2021, Revised 29 Jan. 2021, Accepted 29 Jan. 2021

*Corresponding author

Tel: +82-51-890-1632; Fax: +82-0505-182-6889

E-mail address: hongswoo@deu.ac.kr (S. W. Hong)

을 하였으며, 고속철도의 단선지역에 성토하여 복선화하는 공사에 적용된 흠막이의 안정성을 분석하였다. 지주식 흠막이는 사면안정에 적용되는 역지 말뚝(이하 배면지주)을 흠막이 벽체(이하 전면지주)에 경사지게 결합한 공법이다. 분석결과, 지주식 공법은 동적하중이 적용되는 동안, 전면에만 H-pile이 설치된 타입에 비해 수평변위가 최대 19.0%만 발생하였다. 또한, 고속철의 운행속도가 느릴수록 변위가 많이 발생하였으며, 이 결과는 운행속도가 저속인 구간에서의 지반 설계시 더욱 주의가 필요하다는 것을 보여준다.

Keywords : Retaining wall, High-speed railway, slope stabilization, embankment construction, excavation work

1. 서론

좁은 도심지의 건설 구조물은 공간 활용을 위해 구조물 하부 깊은 지하까지 이용하고 있다. 그래서 구조물건설 시, 지반에서 발생하는 토압을 방지하기 위해서 흠막이를 활용하고 있다. 이런 흠막이에 관한 연구는 지반굴착 시에 흠막이 벽체에 작용하는 토압과 지반 거동, 인접구조물에 미치는 영향 등에 관한 연구가 주로 수행되었다. 그중에서 Bowles(1988)는 굴착단계별 연성 벽체의 변형과 토압분포를 제시하였다. 그리고 굴착에 따라 주변 지반의 변형과 구조물의 영향에 관한 연구는 이론적 방법(Caspe, 1966)과 계측결과를 이용하는 방법(Peck, 1969, Mana and Clough, 1981), 유한요소해석(Finite Element Method, FEM)의 해석결과를 이용하는 방법(Fry and Rumsey, 1983), 경험에 의한 방법(Bauer, 1984; Clough and O'Rourke, 1990) 등의 연구가 진행되어, 많은 검토 방법이 제안되었다.

이처럼 굴착공사에 적용되던 흠막이가 건설기술의 발전으로 인해서 성토 공사의 토압 방지를 위해서나 사면에 옹벽 설치공사 시에 가시설 낙석이나 산사태와 같은 위험을 방지하기 위해 이용되고 있다. 성토 공사의 경우, 공사기간이 긴 경우가 대부분이지만 설계 시에는 흠막이에 대한 정적인 검토만 진행하고 동적인 검토는 진행하지 않는 경우가 대부분이다. 일반적으로 성토공사시 가시설 흠막이를 적용하는 경우는 기존에 존재하는 도로나 철도를 확장하는 경우이다. 그러므로 고속철도의 복선화 현장과 같은 성토공사에 적용되는 흠막이에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 고속철도의 단선지역에 성토하여 복선화하는 공사에 적용된 흠막이의 안정성을 분석하고자 한다. 일반적으로 성토 공사에 적용되는 흠막이는 H-pile과 토류벽으로 구성된 1열 H-pile 흠막이가 주를 이루고 있는데 안정성을 증대시키기 위해서 지반앵커나 경사버팀보(Raker)와 같은 보조공법을 복합적으로 적용한다. 그러나 현장의 여건상 보조공법을 적용하지 못 하는 경우가 많아

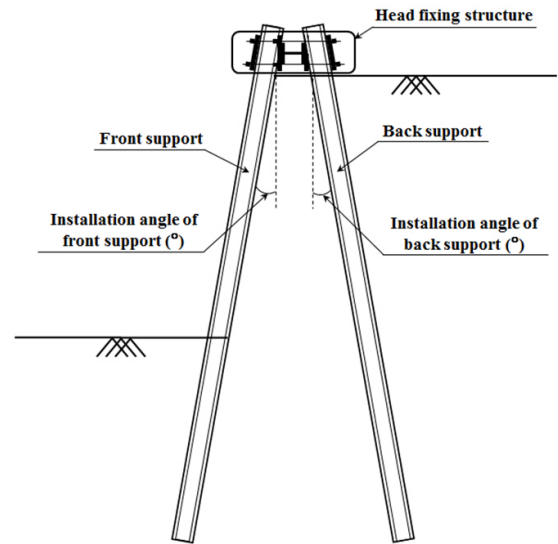


Fig. 1. Basic structure of the Inclined Earth Retaining method

대안 공법을 사용해야 하는 경우도 있다. 본 연구에는 일반적인 1열 H-pile 흠막이와 지주식 흠막이 2종류를 이용하였다. 지주식 흠막이는 Fig. 1처럼 사면안정에 적용되는 역지 말뚝(이하 배면지주)을 흠막이 벽체(이하 전면지주)에 경사지게 결합한 공법으로, 기존 1열 흠막이의 안정성을 확보하지 못할 경우에 대안 공법으로 말뚝의 배치를 조정하여 강성을 증가시키는 방법(Inclined Earth Retaining, 이하 IER 공법으로 명명)을 적용할 수 있을 것으로 판단하였다. 본 논문에서는 다양한 고속철도의 속도에 따른 1열 H-pile 흠막이와 IER 공법 전면지주의 변위와 지반의 거동의 비교분석을 통해 배면지주의 설치 시의 수평 변위의 억제 효과를 분석하고자 한다.

2. 2차원 유한요소해석

2차원 동적 수치해석에 적용한 프로그램은 PLAXSI 2D이다. 해석에 적용된 현장의 상태는 기존에 있는 철도를 고속철도가 운행 가능한 철로로 변경하면서 상, 하행선을 나누어서 다시 선로를 조정하는 현장으로 현행 이용 중인

선로 옆에 성토한 다음에 기존 선을 성토부로 옮긴 이후에 기존 선로 위치에 성토하여 복선화하는 현상이다.

본 연구에 적용된 현장 상황은 성토 시에 안정성을 확보하기 위해서 흙막이를 적용하기 위한 경우로 흙막이 공법 중에서 시공 전에 IER(Inclined Earth Retaining)공법의 안정성을 확인하고자 고속철도의 속도에 의한 변형 정도를 분석하였다.

최근에는 유한요소해석의 프로그램이 컴퓨터의 발달로 3차원 해석이 가능한 것이 많으나, 본 연구에서는 2차원 해석을 진행하였다. 그 이유는 Jeong et al.(2016), Lee et al.(2018), Faheem et al.(2003)과 Faheem et al.(2004) 등의 연구 결과에서 현장 계측결과와 2, 3차원 유한요소해석 결과를 비교한 연구에서 직선화된 구조물의 변형은 2차원이나 3차원에서 차이가 없고, 높지 않은 흙막이의 경우에는 현장 계측결과가 2차원인 경우에 더 비슷하게 나타나는 연구도 있었다. 그리고 아직은 실제 설계 시에 2차원 해석을 진행하여 지반의 안정이나 구조물의 안정성을 분

석하는 경우가 대부분이라 본 연구에서는 2차원 유한요소 해석을 진행하였다.

2.1 해석조건

해석조건은 IER을 기준으로 하여, 흙막이 10m당 H-Pile의 개수에 따른 비교 분석을 위해서, Table 1과 같은 총 4가지로 결정하였다. Fig. 2는 10m 당 H-pile의 설치 모습과 개수를 나타낸 것이다.

2.2 해석 단면 및 하중

Fig. 3은 해석 단면을 나타내는 것으로 지반은 매립층을 암버력으로 치환하여 연암층과 암버력, 성토층으로 구분하였다. 성토층에 선로와 침목 등의 상재하중으로 50 kN/m^2 를 적용하였으며, 고속철도의 운행하중은 동적하중으로 속도에 따라 변화를 줘서 적용하였다. 운행되고 있는 고속

Table 1. The conditions of numerical analysis

Type	Test name ¹	Angle of front support (°)	Angle of back support (°)	Interval of front support (m)	Interval of back support (m)	The number of H-Pile per 10 m
A	D-F2-B2-10	5	5	2	2	10
B	S-F1-10	5	-	1	-	10
C	D-F4-B4-5	5	5	4	4	5
D	S-F2-5	5	-	2	-	5

¹Description of test name: S(Single support) - F(Front support) 2(Interval of front support (m)) - (The number of H-Pile per 10 m); D(Dual support) - F(Front support) 2(Interval of front support (m)) - B(Back support) 2(Interval of back support (m)) - 10(The number of H-Pile per 10 m)

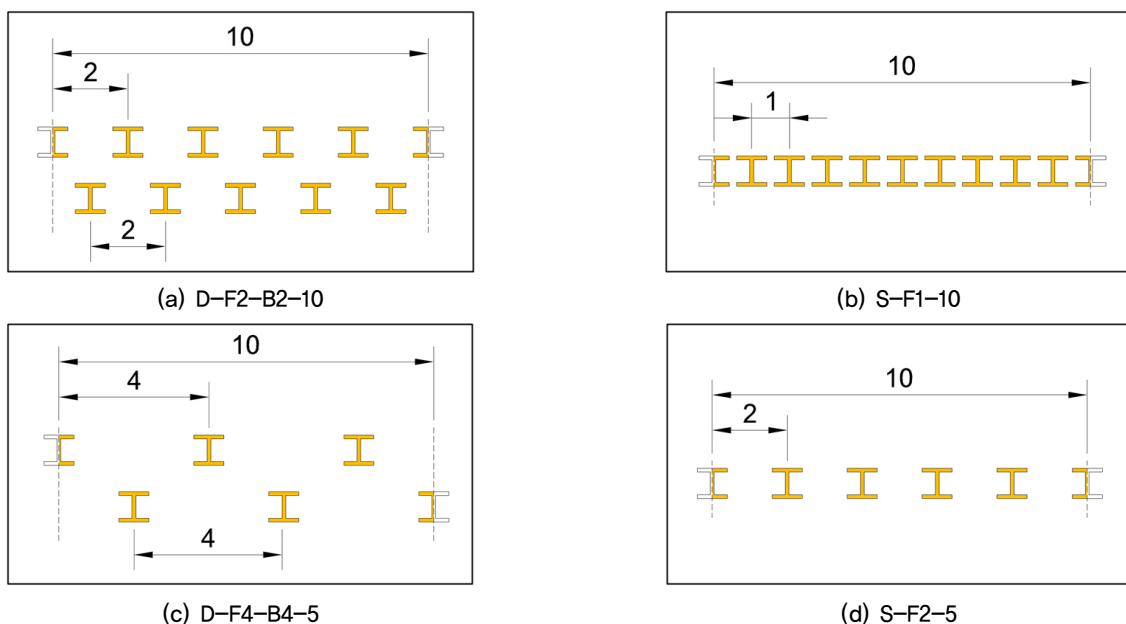


Fig. 2. Analysis condition (unit: m)

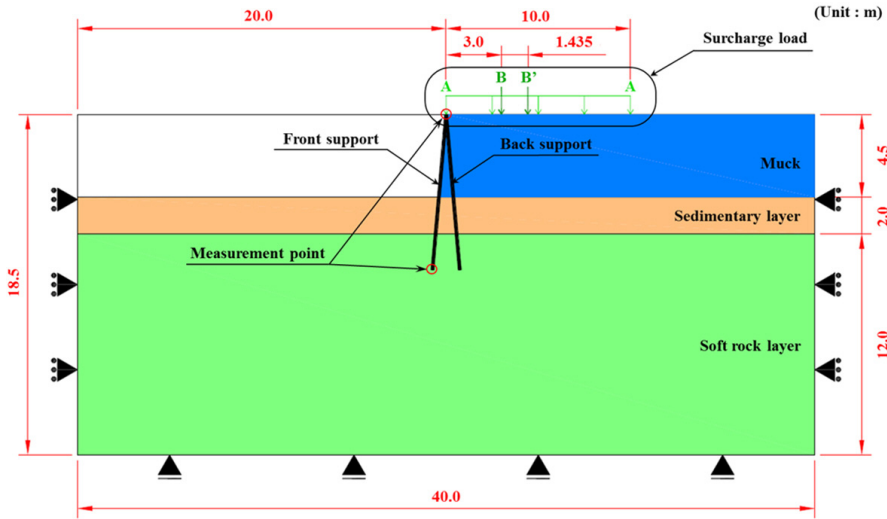


Fig. 3. Cross-section for numerical analysis (unit: m)

철의 속도를 고려하여 100km/h, 250km/h, 400km/h 의 운행속도에 대한 하중을 적용하였다. 고속철이 움직이면서 고속철의 바퀴가 지반에 적용되는 것을 차량의 운행하중으로 보았으며, Fig. 4에 나타내었다.

2.3 해석 정수

해석에 사용한 지반 정수는 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였으며, 현장의 실제 지반보고서(Korea Rail Network Authority, 2010)에 의한 토질시험 결과를 토대로 제시된 값을 사용하였다. 그 결과는 Table 2에 정리하였다.

그리고 H-pile의 제원은 현장실험과 같은 $300 \times 300 \times 10 \times 15$ (mm)로 하였으며, 해석 시 지주는 Linear elastic 모델을 적용하고 축강성 EA(axial stiffness)와 휨강성 EI(bending stiffness)는 식 (1)과 식 (2)를 사용하여 값을 산정하여 적용하였다(여기서 강재의 탄성계수(E_s)는 210,000 MPa).

Table 3는 설치 간격(c.t.c)에 따라 해석에 적용한 H-Pile의 설계정수를 나타낸다.

$$EA = E_s \times A / c.t.c \quad (1)$$

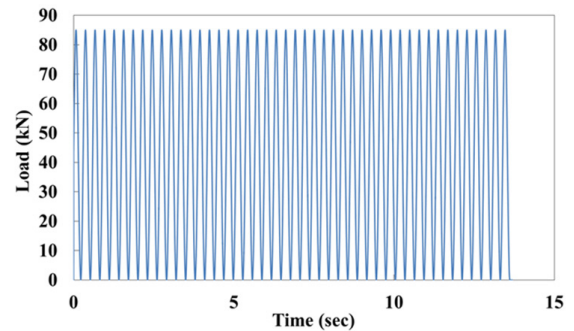
$$EI = E_s \times I_x / c.t.c \quad (2)$$

여기서, E_s : 강재의 탄성계수(kPa)

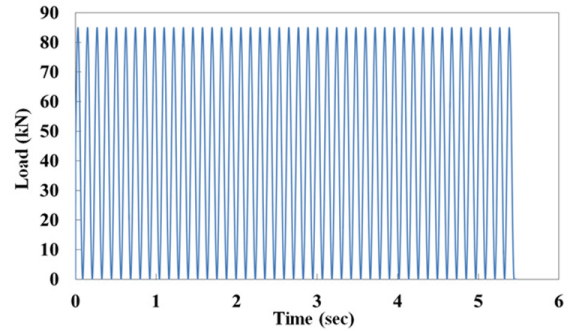
A : 강재의 단면적(m^2)

I_x : 강재의 단면2차모멘트(m^4)

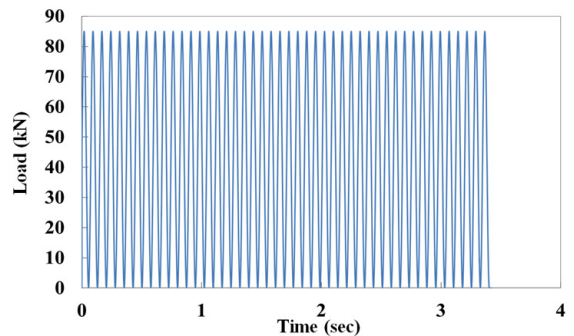
c.t.c : 강재의 설치 간격(m)



(a) 100 km/h



(b) 250 km/h



(c) 400 km/h

Fig. 4. Load Graph according to the velocity speed of a high-speed railway

Table 2. Applied geotechnical parameters (Mohr–Coulomb model)

Soil layers	γ_s (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν	ϕ	c (kN/m ²)
Soft rock layer	23,0	4,000,000	0,24	30	500
Muck layer	21,3	5,000	0,30	37	0,2

Table 3. H-pile parameters (Linear elastic model)

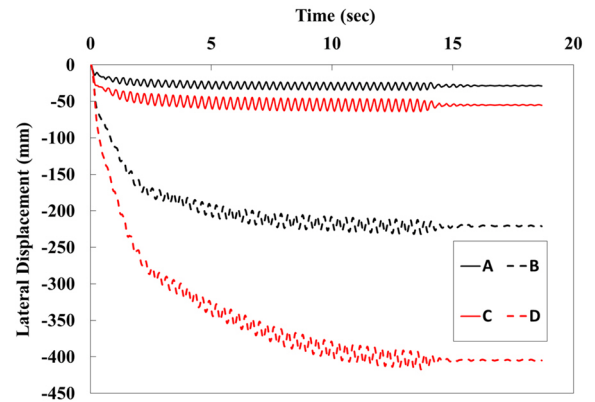
c,t,c (m)	EA (kN/m)	EI (kN·m ² /m)
1	2515800	42840
2	1257900	21420
4	628950	10710

3. 수치해석 결과 및 분석

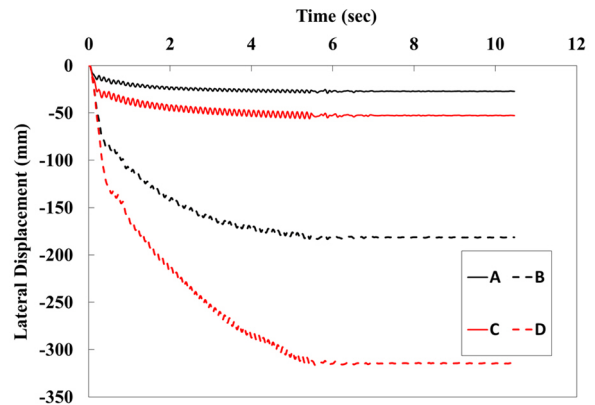
해석결과는 최종성토 시까지 발생한 변위는 시공변위로 보고 동적하중을 가하는 동안(즉, 고속철도가 지나가는 동안)에 발생하는 변위만을 사용하였다. 변위해석결과는 속도별, 해석조건별로 최대변위와 최종 수렴하는 값으로 나누어 정리하였다. Fig. 5는 속도 100km/h, 250km/h, 400km/h에 따른 옹벽 상부에서의 수평변위를 나타내고 있다. 그리고 Table 4와 Fig. 6은 발생한 최대 수평변위를 정리한 것이고, Table 5와 Fig. 7은 발생하는 수평변위의 최종 수렴 값을 나타내고 있다. 전체적으로 A,C type의 IER 공법이 B,D type의 일반적인 H-pile 흠막이 보다 더 적은 수평변위가 발생하였으며, 지반을 지지하는데 있어 더 안정적인 것을 알 수 있다. A,C type의 IER 공법은 속도가 증가할수록 점차적으로 감소폭이 크지만 B,D type의 일반적인 흠막이 공법은 속도가 증가할수록 감소폭이 작아진다. 이는 속도가 증가할수록 IER 공법이 수평변위 억제 효과를 발휘한다고 볼 수 있다.

3가지 속도에 따른 결과를 종합적으로 비교했을 때, 속도 100km/h일 때 가장 많은 변위가 발생하는 것으로 나타났다. 즉, 고속철이 느린 속도일수록 고속철의 하중이 지반에 장시간 동안 작용하면서 지반에 더 많은 변위를 발생시키는 영향을 준 것으로 생각된다. 그러므로 기차역 근처와 같이 느린 속도로 운행하는 구간의 지반 관련 설계시 이에 대한 고려가 선행되어야 하며, 이 결과는 특이한 것으로 추후 실물시험이 수행되어야 하며 여러 각도로 검증이 이루어져야 한다고 판단된다.

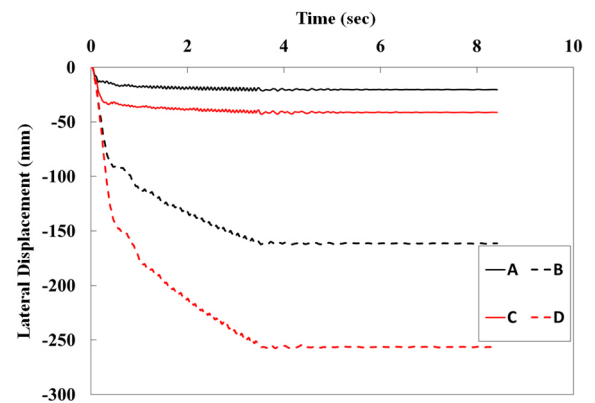
동일한 H-pile 설치 개수를 가진 조건에서 설치 형태에 따른 변위 발생 정도의 차이를 비교하여 IER 공법의 배면 지주의 변위억제효과를 확인하였다. Table 6은 타입 A, C



(a) 100 km/h



(b) 250 km/h



(c) 400 km/h

Fig. 5. Lateral displacement at the top of the retaining wall

의 최대 변위를 기준으로 해서, 동일한 H-pile일 적용된 타입 B, D와 상대적인 변위비를 이용하여 나타낸 것이다. Fig. 8은 10m 당 H-pile의 설치 개수별로 수평변위비를 그래프로 나타낸 것으로 Fig. 8(a)는 10개, Fig. (b)는 5개를

Table 4. Maximum lateral displacement

Maximum lateral displacement (mm)				
Velocity (km/h)	Type A	Type B	Type C	Type D
100	34,57	232,10	64,00	417,29
250	29,16	183,19	56,07	316,38
400	21,59	162,38	42,90	257,46

Table 5. Final convergence value of lateral displacement

Final convergence value of lateral displacement (mm)				
Velocity (km/h)	Type A	Type B	Type C	Type D
100	28,91	221,30	55,42	404,96
250	27,20	181,35	52,73	314,33
400	20,38	161,35	41,20	256,19

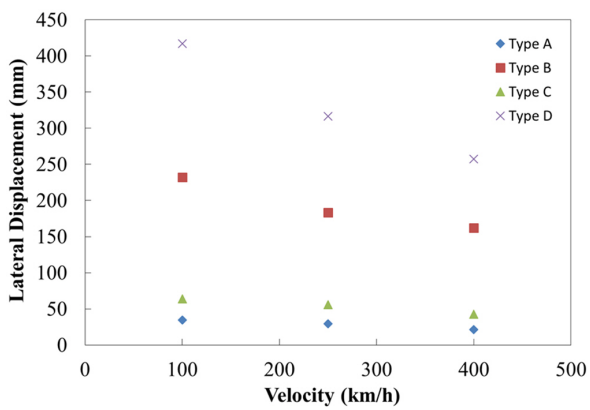


Fig. 6. Maximum Lateral displacement at the top of the retaining wall

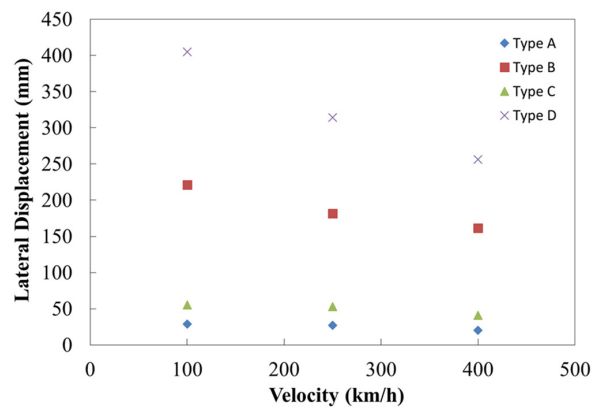
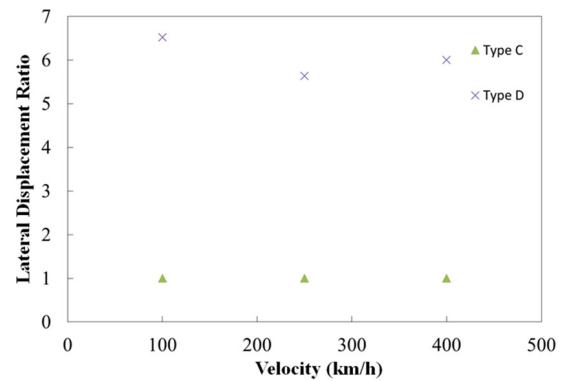
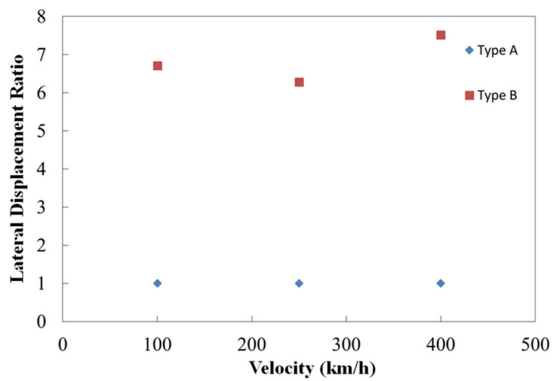


Fig. 7. Final convergence value of Lateral displacement at the top of the retaining wall

Table 6. Maximum lateral displacement ratio

Maximum lateral displacement ratio				
Velocity (km/h)	Type A	Type B	Type C	Type D
100	1,00	6,71	1,00	6,52
250	1,00	6,28	1,00	5,64
400	1,00	7,52	1,00	6,00



(a) The number of H-Plie per 10m : 10

(b) at the top of the retaining wall : 5

Fig. 8. Maximum lateral displacement ratio at the top of the retaining wall

Table 7. Maximum lateral displacement ratio based on type D

Maximum lateral displacement ratio				
Velocity (km/h)	Type A	Type B	Type C	Type D
100	0,08	0,56	0,15	1,00
250	0,09	0,58	0,18	1,00
400	0,08	0,63	0,17	1,00

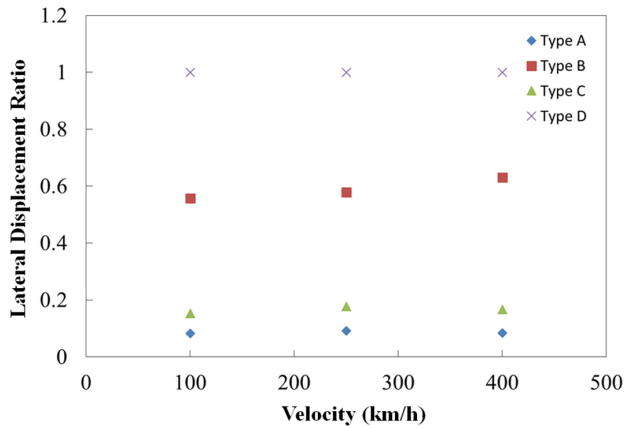


Fig. 9. Maximum lateral displacement ratio at the top of the retaining wall (based on type D)

나타내었다. 결과를 보면, IER 공법보다 전면에만 설치한 경우에 최대 7.52배에서 최소 5.26배 더 많은 변위가 발생하는 것으로 분석되었다. C 타입보다 10m당 H-pile의 개수가 더 많은 A 타입이 수평변위 저감의 비율적인 측면에서 보았을 때, H-pile의 개수가 많을수록 수평변위 억제효과가 더 크다는 것을 알 수 있다.

마지막으로 H-pile 설치 개수에 따라 변위의 발생하는 정도를 분석하기 위해서 해석결과 중에서 변위가 가장 많이 발생한 타입 D를 기준으로 하여 다른 타입의 수평변위가 어느 정도 감소하는 지를 분석하였다. Table 7과 Fig. 9는 타입 D를 기준으로 타입별로 수평변위비를 나타내는 것이다. 결과로 보면, 설치 개수는 2배이고 동일한 형태인 타입 B는 최소 56%~63% 정도 수평변위가 발생하는 것으로 분석되었다. 그리고 설치개수는 같으나 배치가 IER 공법인 타입 C는 15~18% 정도만 수평변위가 발생하는 것으로 분석되었으며, 설치개수가 2배이면서 IER 공법으로 지그재그 배치된 타입 A는 거의 8%만 수평변위가 발생하는 것을 분석되었다. 이 결과를 보면 동일한 개수에서도 배치가 지그재그로 배치될 경우 적은 수평변위만 발생하는 것으로 분석되었다. 이를 통해 동일한 물량의 파일을 사용하더라도 파일의 배치에 따라 그 효과가 확연히 차이가 나는 것을 알 수 있다.

4. 결론

흙막이의 배치에 따른 성토 공사 적용 시의 고속철도의 운행속도에 따른 수평변위 억제효과와의 상관관계를 분석하기 위해 동적 수치해석을 수행하였으며, 결론은 다음과 같다.

- (1) 다양한 속도에 따른 옹벽에서의 수평변위 분석결과, 고속철의 운행속도가 느릴수록 변위가 많이 발생하였으며, 이 결과는 운행속도가 저속인 구간에서의 지반 설계시 더욱 주의가 필요하다는 것을 보여준다. IER 공법은 속도가 증가할수록 일반적인 흙막이 공법과 비교하여 변위발생 감소 폭이 작아지는 결과를 보였으며, 이는 속도가 증가할수록 IER 공법이 수평변위 억제 효과를 발휘한다고 볼 수 있다.
- (2) IER 공법은 동적하중이 적용되는 동안, 전면에만 동일 물량의 H-pile이 설치된 타입에 비해 수평변위가 최대 19.0%에서 최소 13.3%만 발생하였다. 배면지주 설치 시에 안정적으로 변위가 발생하는 정도는 속도에 따라 최대 변위차가 거의 없는 것으로 분석되었으며, 변위가 안정적으로 관리됨을 확인하였다.
- (3) 본 연구에서는 3가지 케이스의 속도에 대한 수평변위 억제효과에 대해서만 다루었다. 하지만 향후 좀 더 케이스를 세분화하여 분석을 수행할 필요가 있다. 또한, H-pile의 개수가 많을수록 당연히 수평변위 억제효과가 더 크겠지만, 경제적인 측면을 고려하여 최적의 H-pile 사용량을 제시할 예정이다. 경제성과 시공성을 만족하는 효과적인 IER 공법의 조건 분석과 속도별 변위거동특성의 분석을 통한 흙막이 공법의 안정성 분석을 위한 연구가 후속되어야 한다.

Acknowledgement

This work was supported by Dong-eui University Grant. (202003540001)

References

1. Bauer, G. E. (1984), "Movements associated with the construction of a deep excavation", *Proc. of the 3th International Conf. on Ground Movements and Structures*, Cardiff, pp.694-701.
2. Bowles, J. E. (1988) *Foundation Analysis and Design*. 4th Edition, McGraw Hill.
3. Caspe, M. S. (1966). "Surface settlement adjacent to braced open cuts", *Journal of Soil Mechanics & Foundations Division*, Vol.92, No.4, pp.51-59.
4. Clough, G. W. and O'Rourke. T. D. (1990), "Construction induced movements of in situ walls". *Proceedings of Design and Performance of Earth Retaining Structures*, Vol.25, pp.439-470.
5. Faheem, H., Cai, F. and Ugai, K. (2004), "Three-dimensional base stability of rectangular excavations in soft soils using FEM", *Computers and Geotechnics*, Vol.31, No.2, pp.67-74.
6. Faheem, H., Cai, F., Ugai, K. and Hagiwara, T. (2003), "Two-dimensional base stability of excavations in soft soils using FEM", *Computers and Geotechnics*, Vol.30, No.2, pp.141-163.
7. Fry, R. H. and Rumsey, P. B. (1983) "Prediction and control of ground movement associated with trench excavation", *Water Pollution Control*, Vol.82, No.2, pp.151-163.
8. Jeong, S. S., Sim, J. U. and Lee, S. J. (2016), "A Study on the Rational Application of 3D Numerical Analysis for Anchored Earth Retaining Wall", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.4, pp.29-39. (in Korean)
9. Korea Rail Network Authority. (2010), *Soil Survey Report of Detailed Design in the Daegu Line; Korea Rail Network Authority: Daejeon, Korea*, pp.56. (In Korean)
10. Lee, J. H., Oh, D. W., Kong, S. M., Jung, H. S. and Lee, Y. J. (2018), "Investigation of Behaviours of Wall and Adjacent Ground Considering Shape of Geosynthetic Retaining Wall", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.17, No.1, pp.95-109. (in Korean)
11. Mana, A. I. and Clough, G. W. (1981), "Prediction of movements for braced cuts in clay", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.107, No.6, pp.759-777.
12. Peck, R. B. (1969), "Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics", *Geotechnique*, Vol.19, No.2, pp.171-187.