

# 다단 긴장 엄지말뚝 활용 무지보 자립식 흙막이 공법의 적용성 검증에 관한 연구

마호성<sup>1</sup> · 조광일<sup>2\*</sup> · 김재형<sup>3</sup> · 박병진<sup>4</sup>

<sup>1</sup>교수, 호서대학교, 토목공학과, <sup>2</sup>기술개발팀장, 태한, <sup>3</sup>석사과정, 호서대학교, 토목공학과, <sup>4</sup>차장, 한국농어촌공사, 품질안전시험센터

## A Study on Self-Supported Earth Retaining Wall Using Steel Soldier Piles with Stepwise Prestressing

Mha, Ho-Seong<sup>1</sup>, Cho, Kwang-II<sup>2\*</sup>, Kim, Jae-Hyung<sup>3</sup>, Park, Byung-Jin<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Professor, Dept. of Civil Engineering, Hoseo University, Asan, 31499, Korea

<sup>2</sup>R&D Team Leader, Taekhan Inc., Uiwang, 16006, Korea

<sup>3</sup>Graduate Student(Master's Course), Dept. of Civil Engineering, Hoseo University, Asan, 31499, Korea

<sup>4</sup>Deputy Director, Quality & Safety Testing Center, Korea Rural Community Corporation, Naju, 58327, Korea

**Abstract** - Self-supporting retaining wall systems without any prestressing are not only inexpensive, but also efficient in excavation speed and providing space. It also has problems such as the excavation depth limited to 3 m to 4 m in the normal soil as well as large horizontal displacements caused by resisting earth pressure in the form of a cantilever. Various construction methods have been developed and applied to the site to improve these problems, but more improvements are demanded due to the construction cost increment and structural problems. Specification designs of both overall structures and detailed parts are prepared and corresponding experiments and structural analysis are conducted for those self-supporting earth retaining wall using steel soldier piles with stepwise prestressing. Vigorous numerical analysis has been performed for those systems with steel soldier piles made with various section types. It is found that the excavation height can be increased by up to about 2 times compared to that obtained by the existing method, The horizontal displacement and pile man-hours are found to be reduced by 10 % to 20 % compared to those from using the existing symmetric H sections. The amounts of prestressing import and loss are examined by conducting the real size experimental tests and comparative structural analysis. It is also noticed that each component has sufficient load capacity.

**Keywords** - Retaining wall, Soldier pile, Stepwise prestressing, H-beam, Structural analysis

### 1. 서론

국내 건축, 토목, 플랜트 등 구조물 건설 시 지하공사가 있는 경우 흙막이 가시설은 필수적이다. 2013년부터 시장규모가 지속적으로 증가함에 따라 흙막이 붕괴 사고로 인한 피해 또한 급격히 증가하고 있으며 흙막이 구

조에 대한 안전성이 대두되고 있다. 또한, 최근 빠르게 도시화가 진행됨에 따라 인접 구조물과 대지점용 등의 문제로 지보공 적용은 제한적이며, 더불어 지보공 적용을 최소화하기 위한 공법개발이 요구되고 있다.

이에 따라 미비하였던 흙막이 구조에 관한 연구의 필요성이 대두하여 기업과 연구자들이 다음과 같은 연구를 진행하였다. You *et al.*<sup>[1]</sup>은 기존 공법의 문제점들을 개선하기 위해 엄지말뚝을 이용한 공법을 개발하고자 하였다. Sim *et al.*<sup>[2]</sup>은 2열 H파일을 이용한 자립식 흙막이 공법(SSR, self-supported retaining wall)을 현장 적용하여 거동을 분석하였다. Part *et al.*<sup>[3]</sup>은 SSR 등 2열 자립식 흙막이 공법과 프리스트레싱 공법 등 개선된 자립식 흙막이 공법의 적용사례를 연구하여 안정성을 검토하였다.

Note.-Discussion open until August 31, 2023. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 28, 2022; revised on January 27, 2023; approved on January 27, 2023.

Copyright © 2023 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-70-8844-0640 Fax. +82-2-6280-0641

E-mail. kwangcho222@gmail.com

Kim<sup>[4]</sup>은 내부 지보재를 제거하고 브레이싱을 이용한 자립식 흠막이 공법(RSB)의 개발연구를 수행하였다. Kim *et al.*<sup>[5]</sup>은 ACT Pile을 이용한 흠막이 벽체의 설계와 시공사례를 소개하였다. Yun *et al.*<sup>[6]</sup>은 강관버팀보를 이용한 흠막이 가시설 모듈화 방안을 제시하였다.

기존 흠막이 공법 중에서 캔틸레버 공법이 가장 저렴할 뿐만 아니라 굴착속도, 공간확보 측면에서 유리하나 캔틸레버 형태로 토압을 저항하여 수평변위가 크게 발생하여 굴착심도가 3 m - 4 m로 제한되는 문제가 있다. 이를 개선하여 전열과 후열에 얽지말뚝을 배치하여 강성을 증대시켜 굴착심도를 증가시킬 수 있는 2열식 흠막이 공법과 얽지말뚝에 프리스트레싱을 도입한 프리스트레싱 공법 등이 개발되었다. 하지만 추가 천공에 따른 공사비 증대 및 좌굴장, 배부름 현상 등과 같은 구조적 문제로 인해 널리 활용되지 못하고 있는 실정인어서 추가적인 연구개발이 시급한 상태이다.

이 연구에서는 얽지말뚝에 다단으로 프리스트레싱을 도입함으로써 지반 상부의 수동변위 발생을 최소화하면서도 토압에 의한 모멘트가 크게 작용하는 근입부에서는 프리스트레싱을 최대화하는 무지보 자립식 흠막이 공법의 적용성을 분석하고자 한다. 또한, RH형강과 비대칭 BH형강 단면 형상에 따른 흠막이의 거동을 비교하고자 한다.

## 2. 다단 긴장 얽지말뚝의 구조 및 설계

기존 프리스트레싱 공법은 얽지말뚝에 프리스트레싱을 도입함으로써 기존의 얽지말뚝보다 깊은 굴착 깊이를 얻을 수 있다. 얽지말뚝에 균등한 프리스트레싱을 도입하는 기존의 프리스트레싱 공법은 최대변위를 제어할 수 있다는 효과가 있다. 하지만 흠막이벽 상단보다 굴착 깊이가 중간 부분에서 더 큰 변위가 발생하는 배부름 현상이 일어나 주변 지반에 침하를 일으키며 배부름 현상으로 인한 깊은 위치의 흠막이변위는 더 큰 지반 침하 영향 범위를 만든다는 연구사례<sup>[7]</sup>가 있으며 이러한 지반 침하 모식도를 Fig. 1에 나타냈다.

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 이 연구에서 제안하는 공법은 얽지말뚝에 다단으로 긴장력을 도입하여 전 구간에서 동일한 프리스트레싱을 주는 기존 프리스트레싱 공법의 문제점이었던 배부름 현상을 구간별 차등 프리

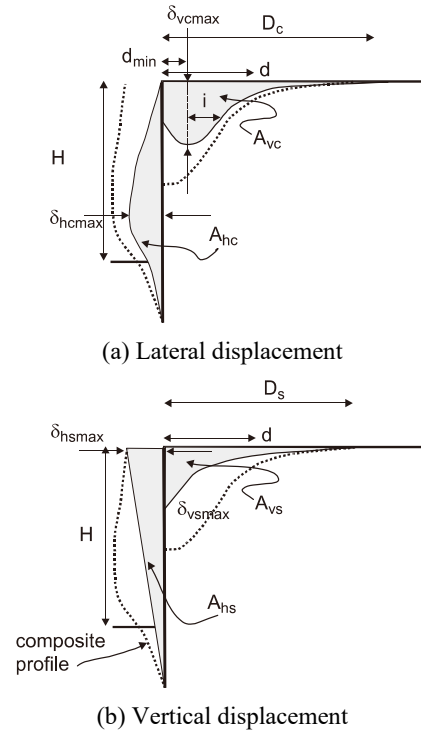


Fig. 1. Lateral and vertical displacement due to wall deflection<sup>[7]</sup>

스트레싱을 줌으로써 불필요한 부분에 가해지는 프리스트레싱을 감소시켰다. 또한, 최대모멘트가 발생하는 위치에서 프리스트레싱을 극대화하여 해소하였다. 다단 긴장 얽지말뚝을 사전 설계하기 위하여 흠막이 벽체와 배면 및 굴착면의 토체를 보-스프링 구조 모형화하여 흠막이 벽체의 거동을 파악하는 계산 시트를 작성하였으며, 이를 통한 자립식 흠막이의 거동을 분석하여 Fig. 2에 나타냈다.

Fig. 2(a)는 얽지말뚝에 프리스트레싱을 가하지 않는 기존 캔틸레버 공법을 적용하였을 때 발생하는 수평변위와 모멘트를 나타낸 그래프이며, Fig. 2(b)는 기존 프리스트레싱 공법을 적용하였을 때 발생하는 수평변위와 모멘트를 나타낸 그래프이다. 프리스트레싱을 적용하여 수평변위와 모멘트의 감소 효과를 보이고 있으나 균등한 프리스트레싱을 적용하여 불필요한 구간까지 프리스트레싱이 적용되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 2(c)에서 차등적인 프리스트레싱을 도입한 제안공법을 적용할 때 수평변위와 모멘트를 확인할 수 있다. 또한, 차등적인 프리스트레싱 도입으로 불필요한 구간에 프리스트레싱을 가하지 않으며 효과적으로 모멘트를 저감시키는 것을 확인할 수 있다.

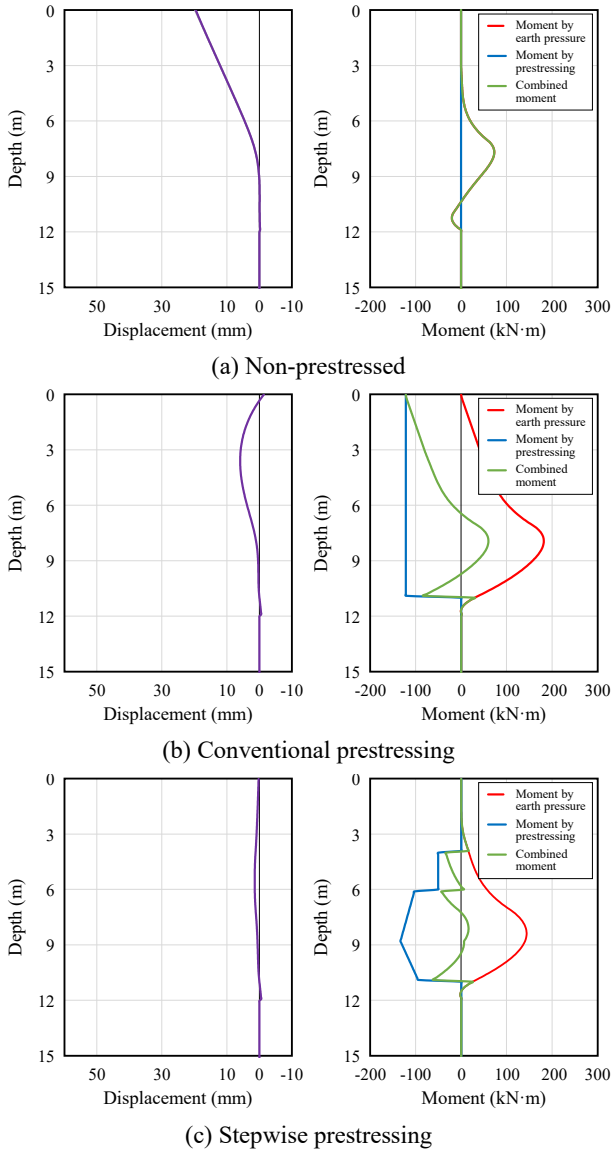


Fig. 2. Comparison of displacement and moment for various soldier pile methods

이 연구에서 소개하고자 하는 다단 긴장 엄지말뚝은 엄지말뚝, 강연선(steel wire), 고정 측 정착구(dead anchor), 강연선 앵커(SLA, spring-loaded anchor), 긴장 측 정착구(live anchor), 새들(saddle), 이동식 반력대(reaction bed), 편향부재(deviator)로 구성되어 있다. 강연선은 긴장 측 정착구를 지나 새들을 회전하여 고정 측 정착구에 정착된다. 천공 후에 엄지말뚝을 삽입하고 속채움을 한다. 그 후, 이동식 반력대를 이용하여 강연선당  $P$ 의 힘으로 긴장하면, Fig. 3에서 보이는 바와 같이 상부 이동식 반력대에서 인장 측 정착구까지의 구간에서는 긴장력이 도입되지 않는다. 인장 측 정착구 이하에서 고정 측

정착구 부분까지는 두 가닥의 강연선으로부터  $2P$ 의 긴장력이 작용하며, 고정 측 정착구 이하에서 새들 구간까지는 네 가닥의 강연선으로부터  $4P$ 의 긴장력이 도입된다. 강연선 앵커의 외피는 인장 측 정착구에 고정설치되며, 긴장력 도입시 썩기가 빠지지 않도록 스프링에 의해 구속되어 인장 측 정착구부터 긴장력 도입이 가능하다.

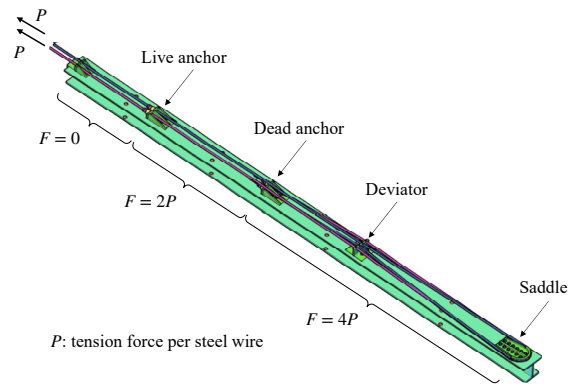


Fig. 3. Concept of soldier pile with stepwise prestressing

다단 긴장 엄지말뚝의 상세 부품들로는 이동식 반력대와 정착구, 편향부재, 새들이 있다. 이동식 반력대는 지반에 근입된 H형강 말뚝의 단부에 설치하여 유압잭의 하중을 받아주는 역할을 한다. 정착구는 이동식 반력대와 강연선 정착을 위한 SLA에 작용하는 힘을 말뚝에 전달한다. SLA는 정착 썩기 단부에 스프링을 설치하여 이격된 거리에서 인장력으로 긴장을 하여도 정착이 가능한 장치이다. 편향부재는 강연선의 편심을 극대화함으로써 최대모멘트가 도입되도록 하는 장치이다. 마지막으로 새들은 한 가닥의 강연선으로 말뚝에 2배의 힘을 도입하도록 강선을 감을 수 있도록 말뚝에 설치된다. 이를 Fig. 4에 나타냈다.

이동식 반력대(Fig. 4(a))는 엄지말뚝 단부에 설치하여 유압잭을 이용하여 강연선에 긴장력을 도입하며 유압잭의 하중을 받아주는 역할을 한다. 이 반력대는 긴장 작업 중에만 사용하고 긴장이 완료된 후에 제거하여 계속 재활용할 수 있다. 정착구는 인장 측 정착구(Fig. 4(b))와 고정 측 정착구(Fig. 4(c))가 있으며 인장 측 정착구는 SLA를 이용하여 강연선을 고정시켜 긴장력을 도입한다. 고정 측 정착구는 새들을 회전하여 편향부재를 거처온 강연선을 고정시키는 역할을 한다. 정착구는 6개의 볼트에 의해 엄지말뚝 본체에 고정된다. 편향부재(Fig. 4(d))는 편심을 극대화시켜 최대모멘트를 발생시키는 역할을 한

다. 인장 측 정착구로부터 온 강연선 두 가닥과 새들을 회전하여 고정 측 정착구로 향하는 강연선 두 가닥 총 네 가닥의 강연선이 작용하는 부재다. 또한, 엄지말뚝 축방향의 힘에 저항하지 않으므로 위치 고정을 위한 4개의 볼트만을 사용하였다. 새들은 인장 측 정착구로부터 온 두 가닥의 강연선을 회전시켜 고정 측 정착구로 보내며 총 4P의 긴장력을 도입시켜 강연선으로 말뚝에 2배의 힘을 도입하도록 한다. 새들(Fig. 4(e))은 엄지말뚝의 하부에 위치하여 2개의 강연선이 통과하게 되어 높은 축방향력에 저항하여야 하므로 12개의 볼트를 설치하였다.

엄지말뚝은 기존 캔틸레버 공법에 사용하던 RH형강(rolled H-beam)을 적용하여도 구조적인 문제는 발생하지 않는다. 하지만 기존 RH형강 대비 동일한 천공경에서 단면적을 증가시킬 수 있으며 RH형강과 동일한 단면적으로 단면2차모멘트를 증가시켜 기존 대비 단면계수 증가 및 근입부 토압 증가 효과를 얻을 수 있는 비대칭 BH형강(built-up H-beam)을 적용하여 수평변위를 감소시키는 효과를 얻을 수 있다. 이러한 엄지말뚝 단면의 변화에 따른 효과는 이후의 분석에서 나타냈다.

### 3. 다단 긴장 엄지말뚝의 적용성 분석

기존 캔틸레버 공법의 엄지말뚝과 프리스트레싱을 적용한 엄지말뚝을 동일한 파일 간격을 기준으로 하여 SUNEX<sup>[8]</sup>를 이용해 해석, 비교했다.

### 3.1 기존 및 프리스트레싱 적용 엄지말뚝의 거동 비교

기존 캔틸레버 공법 엄지말뚝은 3 m - 4 m 가량의 얇은 굴착 깊이를 가졌으나 엄지말뚝에 프리스트레싱을 도입하여 굴착 깊이를 증가시켰다. Table 1에 나타난 지반 조건으로 지하수위 3.3 m, 상재 하중 13 kN/m<sup>2</sup>, 12 m 길이의 엄지말뚝을 고려하였으며 이를 SUNEX ver W7.11을 이용하여 분석하였다. 파일 간격은 기존 캔틸레버 공법 엄지말뚝과 프리스트레싱을 적용한 엄지말뚝 모두 1.8 m를 기준으로 Fig. 5와 같이 모델링하였고, 토압에 의한 하중은 Rankine 토압을 고려하였다.

각 경우에 대해 굴착 깊이 변화에 따른 최대 수평변위를 분석하였으며, 이를 허용 최대 수평변위 기준(굴착 깊이/500)<sup>[9]</sup>과 비교하여 최대 굴착 깊이를 도출하였다. 최대 수평변위 기준은 강성 흠막이벽, 보통 흠막이벽, 연성 흠막이벽 등의 기준을 참고하여 가장 낮은 관리기준인 굴착 깊이/500을 최대 수평변위 기준으로 설정하였다. 해석 결과, Fig. 6에서 나타난 바와 같이 두 경우 모두 굴착 깊이가 증가할수록 수평변위가 증가하는 경향을 나타냈다. 또한, 기존 캔틸레버 공법 엄지말뚝은 최대 3.5 m 굴착이 가능한 것에 비해 프리스트레싱을 적용한 엄지말뚝은 최대 7 m 굴착이 가능한 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라 앞에 가정한 설계 조건에서는 엄지말뚝에 프리스트레싱을 적용함으로써 기존 캔틸레버 공법 엄지말뚝에 비해 굴착심도를 2배가량 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

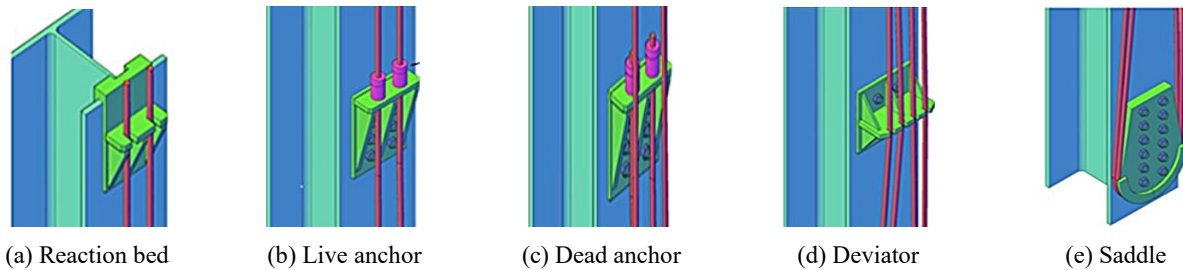


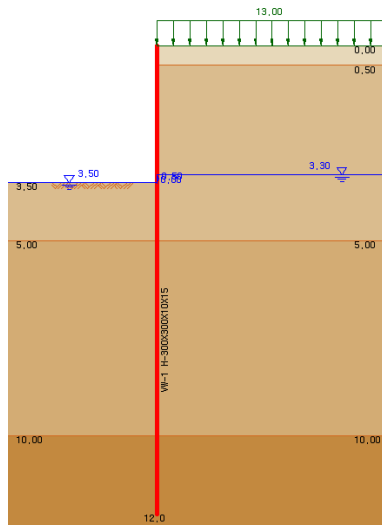
Fig. 4. Detail of soldier pile components for stepwise prestressing

Table 1. Soil condition for analysis

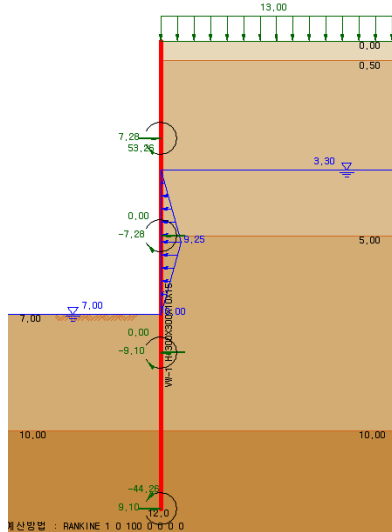
No.	Soil layer	Depth (m)	$\gamma_i$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sub}$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (kN/m <sup>2</sup> )	$\Phi$ (deg.)	$K_s$ (kN/m <sup>3</sup> )
1	Colluvial soil	0.5	17	8	0	20	15,000
2	Weathered granite soil	5.0	19	10	15	25	20,000
3	Weathered granite rock	15.0	21	12	20	30	30,000

### 3.2 대칭 및 비대칭 단면 얽지말뚝의 거동 비교

다단 긴장 얽지말뚝에 적용된 기존 RH형강 얽지말뚝과 비대칭 BH 형강 얽지말뚝의 수평변위를 비교하기 위하여 Table 2와 같은 조건의 얽지말뚝 단면을 가정하였다. RH형강과 비대칭 BH형강이 거의 동등한 단면적을 가지고 있으나, 비대칭 BH형강의 단면2차모멘트는 기존 RH형강 대비 약 21 % 크다. 이러한 조건의 얽지말뚝에 Table 1의 조건과 동일한 붕적토, 풍화토, 풍화암으로 구성된 지반에 6.0 m 깊이의 굴착을 수행하는 것으로 가정하였다. RH형강 및 비대칭 BH형강의 단면을 적용한 경우에 대하여 해석을 진행하였으며 해석모델은 Fig. 7에 나타났다.



(a) Non-prestressed



(b) Stepwise prestressing

Fig. 5. Analysis model for comparison of non-prestressing and stepwise prestressing method (pile spacing: 1.8 m)

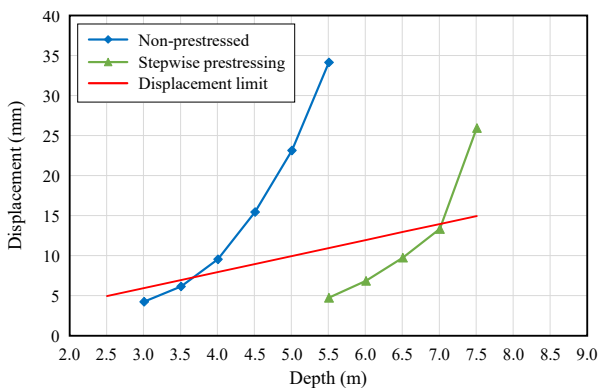


Fig. 6. Maximum excavation depth according to displacement limit

Table 2. Section properties of RH and BH pile

Specimen	Section shape	Area (mm <sup>2</sup> )	Second moment of area (mm <sup>4</sup> )	Neutral axis
RH-300 ×300 ×10×15		11,988	204,000,000	150 mm from bottom
BH-325 ×350/250 ×8 ×14/19		11,986	246,371,042	163 mm from bottom

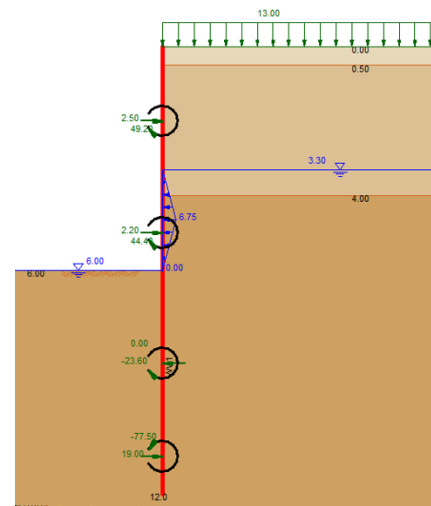


Fig. 7. Analysis model for comparison of RH and BH pile



해석 결과, Fig. 8(a)에서 보이는 바와 같이 기존 RH형강이 적용된 다단 긴장 엄지말뚝의 수평변위는 6.7 mm 였으나 비대칭 BH형강을 적용한 다단 긴장 엄지말뚝의 수평변위는 5.6 mm로 나타났다. 즉, BH형강 적용 시 약 16%의 변위 감소 효과가 있었다.

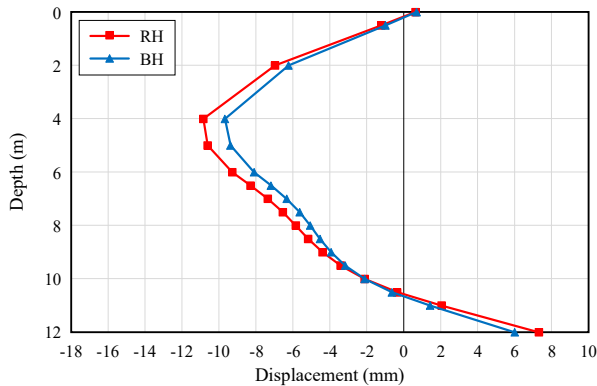
추가적으로, 파일 간격을 변화시켜 해석을 수행함으로써 허용 최대 수평변위를 만족하는 최대 파일 간격을 도출하였다. Fig. 8(b)에 나타난 바와 같이, 굴착 깊이 7 m를 기준으로 기존 RH형강의 최대 파일 간격은 1.8 m지만 비대칭 BH형강은 최대 파일 간격이 2 m이다. 기존 H형강을 사용하였을 때 대비 비대칭 BH형강을 사용하였을 때 0.2 m의 최대 파일 간격 차이를 얻을 수 있으며 파일 공수 10% - 20%를 감소시킬 수 있다. 즉, 비대칭 BH형강은 기존 RH형강 대비 수평변위 감소 효과를 나

타내므로, 이를 활용하여 최대 파일 간격을 넓힘으로써 파일 공수를 절감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

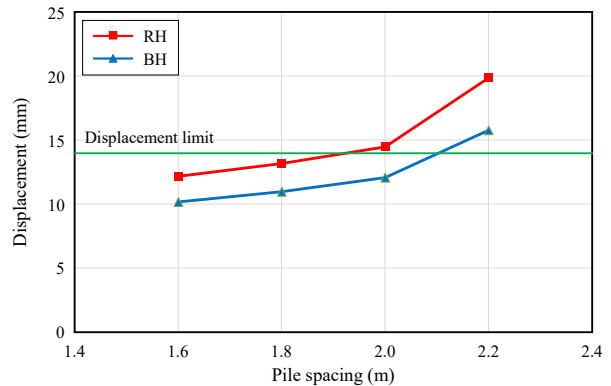
#### 4. 다단 긴장 엄지말뚝의 실험 평가 및 구조해석

##### 4.1 다단 긴장 엄지말뚝 긴장력 도입 실험

우선 다단 긴장 엄지말뚝에 비대칭 BH형강을 적용하여 치짐 및 응력, 변형률과 하중의 손실량 등의 거동을 분석하기 위한 실험을 실시하였다. Fig. 9(a)과 같이 엄지말뚝은 길이 8 m, 높이 300 mm, 굴착면 폭 250 mm, 배면 폭 350 mm의 비대칭 BH형강을 적용하였으며 파단 강도 250 kN의 직경 15.2 mm 7연선(SWPC 7AN)<sup>[10]</sup> 2개소를 긴장시켰다. 계측 장비로는 변형률계 20개, 변



(a) Horizontal displacement



(b) Maximum pile spacing (excavation depth: 7 m)

Fig. 8. Horizontal displacement and maximum pile spacing

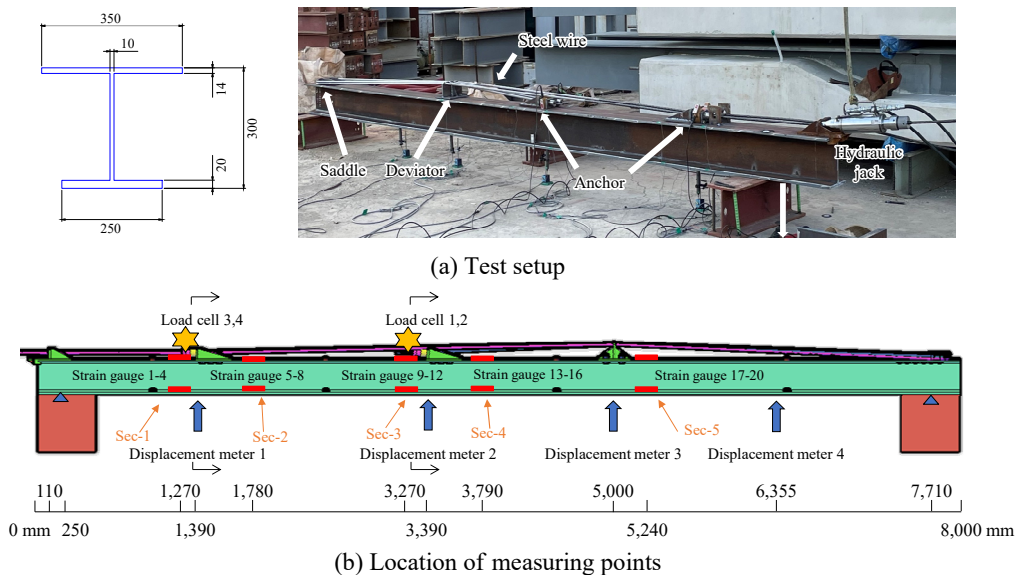


Fig. 9. Test setup and measuring points (Unit: mm)

위계 4개, 로드 셀 4개를 설치하여 계측하였다. 로드 셀 1·2는 고정 측 정착구에 설치하였고 로드 셀 3·4는 인장 측 정착구에 설치하였다. 각 계측장치의 위치는 Fig. 9(b)에 나타났다.

먼저 강연선이 120 kN씩 긴장하여 총 240 kN, 강연선이 네 가닥인 4P 구간에서는 480 kN의 긴장력이 도입되었을 시 부재에 발생하는 모멘트를 산정함으로써 엄지말뚝의 최대 변위는 15 mm가 되는 것으로 산정할 수 있다. 실험 계측 결과 하중 520 kN(강선당 130 kN 긴장)에서 Fig. 10에서와 같이 13 mm의 변위가 발생하며 계산 값 15 mm와 유사한 변위가 발생한 것을 확인하였다. 또한 Fig. 11을 통해 강선 두 가닥이 배치된 2P 구간 대비 강선 네 가닥이 배치된 4P 구간의 2배의 하현 변형률이 발생하여 각각 2P 및 4P의 긴장력이 도입되는 것을 확인할 수 있었다.

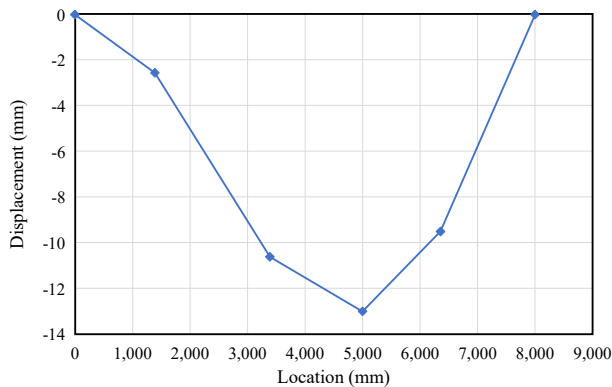


Fig. 10. Displacement measurement result (applied load: 130 kN per steel wire)

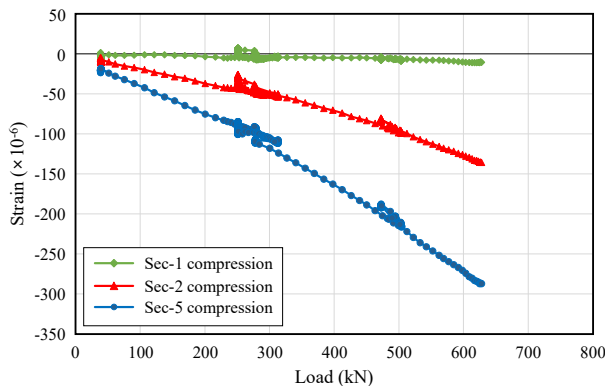


Fig. 11. History of strain on lower flange during the prestressing test

한편, Fig. 12에 나타낸 바와 같이 고정 측 정착구에서는 150 kN 긴장 중 약 30 kN의 마찰손실이 발생하였으

며, 정착 후 추가 손실은 없었다. 인장 측 정착구에서는 150 kN 긴장 중 손실이 없었으나, 정착 후 약 30 kN의 정착손실이 발생하여 각 120 kN의 최종 긴장력이 도입되었음을 확인할 수 있었다. 향후 일정한 크기(120 kN - 130 kN)의 긴장력 도입을 가정하여 다단 긴장 엄지말뚝의 설계가 수행될 것이므로, 실제 현장에서는 이 실험을 통해 파악된 손실량을 고려하여 설계보다 높은 긴장력(130 kN - 160 kN)을 도입하는 작업이 필요할 것으로 판단된다.

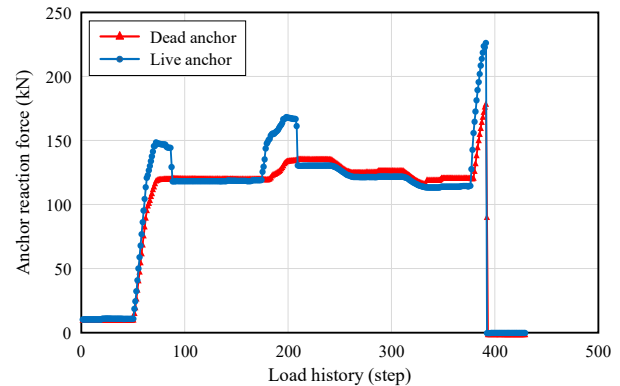


Fig. 12. History of applied tension force during the prestressing test

#### 4.2 다단 긴장 엄지말뚝 해석

실험을 통하여 얻은 엄지말뚝의 거동을 확인하기 위해 구조전산해석을 실시하였다. 엄지말뚝의 해석은 MIDAS Civil을 이용하여 진행하였으며 실험 제원과 동일한 길이 8 m, 높이 300 mm, 굴착면 폭 250 mm, 배면 폭 350 mm의 비대칭 BH형강을 적용하였다. 엄지말뚝의 양 끝단에 각각 힌지와 롤러의 경계조건을 부여하였다. 상세 부품은 강성이 아주 높은 강체로 설정하여 긴장력이 작용하는 점에 위의 실험을 통해 알아낸 강연선당 150 kN의 긴장력 도입 시 손실량 30 kN을 제외한 120 kN의 하중을 재하하였다. 또한, 2P 구간에서는 240 kN, 4P 구간에는 480 kN의 긴장력을 분력으로 나눠 하중으로 적용하였다. 여기에서, 실험 시 변형률계와 변위계가 설치된 변형률계와 변위계가 설치된 위치를 고려하여 총 12개의 절점을 적용하였다.

Fig. 13에는 해석모델과 응력 분포 분석결과를 나타냈다. 최대 변위가 발생하며 최대 응력이 발생할 것으로 예상되는 5,000 mm 근처 5,240 mm 지점의 하부플랜지에서의 응력을 비교하였으며 실험을 통해 얻은 5,240 mm

지점 하부플랜지의 변형률을 이용하여 구한 응력값과 MIDAS<sup>[11]</sup>를 이용한 전산해석을 통하여 얻은 5,240 mm 구간의 응력값이 각각 41.1 MPa과 40.2 MPa로 근사한 수치를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

### 4.3 다단 긴장 엄지말뚝 구성품 상세해석

다단 긴장 엄지말뚝의 구성품 중 높은 하중이 작용하는 반력대, 정착구, 새들에 대해 ABAQUS<sup>[12]</sup>를 이용하여 3차원 정밀해석을 실시하였으며 효율성을 위해 Fig. 14 과 같이 각 구성품의 형상을 반영한 1/2 모델링을 수행하여 해석하였다. 1/2 모델의 대칭면에는 면대칭 경계조건을 부여하고 각 볼트 홀에 고정 경계조건을 부여하였다. 반력대와 정착구 해석에서는 긴장력이 전달되는 면에 하중을 가하였고, 새들 해석에서는 케이블 당 최대 하중

200 kN의 가력을 가하여 Fig. 15과 같이 모델링하여 해석하였다.

각 해석에서는 재료 및 기하 비선형을 고려하였으며 반력대와 정착구에는 SM275 강재를 적용하였고, 새들에는 GCD450 강재를 적용하였다. 해석 결과 설계 하중을 작용시켰을 때 Fig. 16과 같이 각 부재들이 항복 응력 수준(SM275: 275 MPa, GCD450: 355 MPa)을 초과하지 않았다. Fig. 17과 같이 극한하중 상태에서는 항복 응력 수준을 초과하지만, 최대 인장강도(SM275: 400 MPa, GCD450: 450 MPa)를 초과하지 않았다. 또한, 국부적으로 응력이 과도하게 집중되는 현상이 나타나지 않았다. Fig. 18에서 보이는 바와 같이 설계 하중 이상의 하중까지도 선형 거동이 나타났으며, 하중 가력 위치의 변위도 1 mm 미만으로 매우 작게 나타나 각 구성품은 충분한 내하력을 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

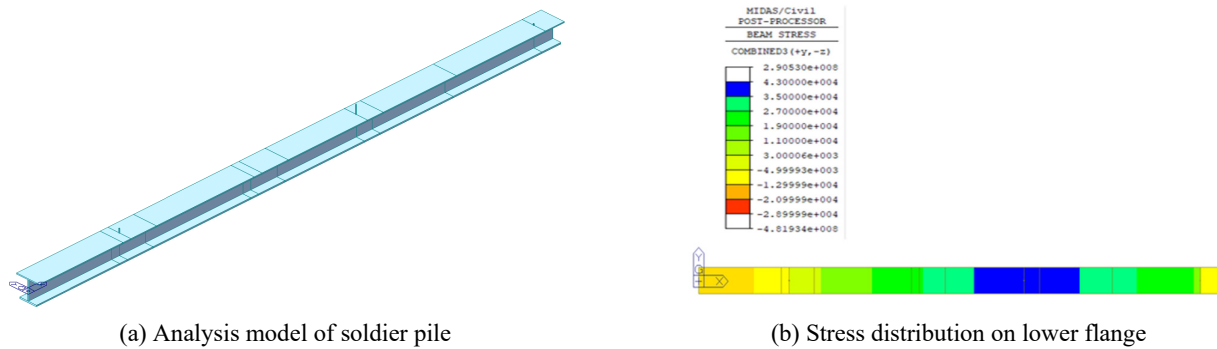


Fig. 13. Analysis model and stress distribution of soldier pile

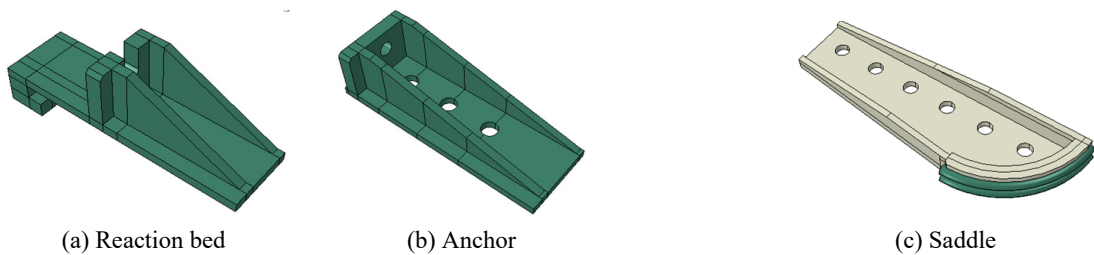


Fig. 14. 3D model of each component for stepwise prestressing method

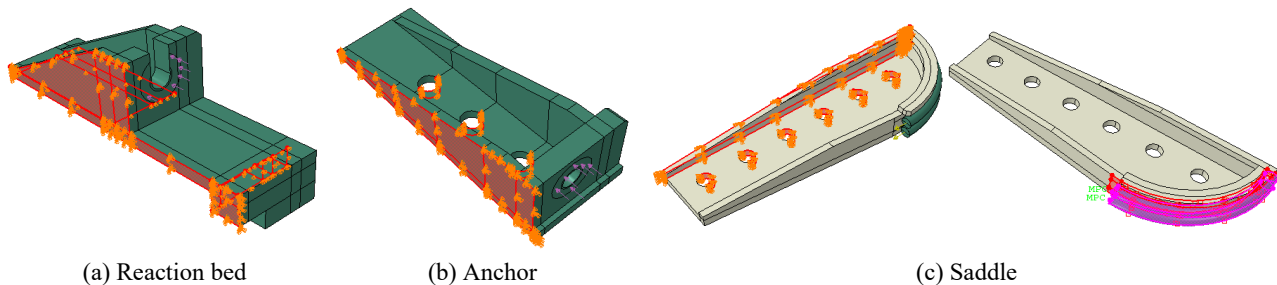


Fig. 15. Boundary conditions, contact conditions and loads



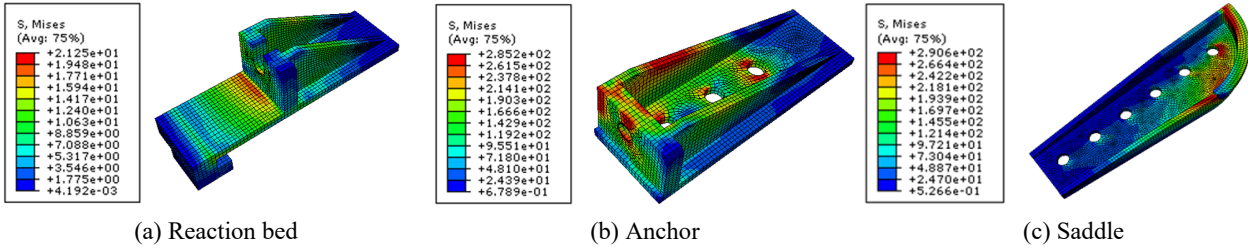


Fig. 16. Stress distribution of each component under design load

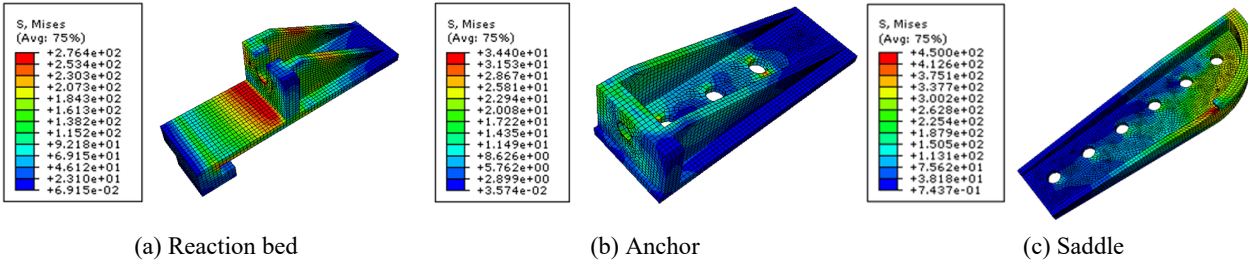


Fig. 17. Stress distribution of each component under maximum load

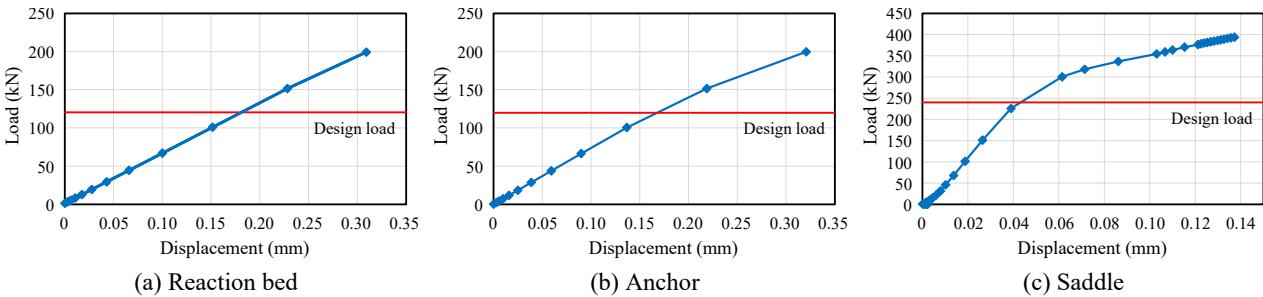


Fig. 18. Load-displacement curve of analyses for each component

### 5. 결론

엄지말뚝에 프리스트레싱을 가하지 않는 기존 캔틸레버 공법은 수평변위가 크게 발생하여 굴착심도가 제한적인 문제점이 있었으며 이를 개선하기 위하여 엄지말뚝에 프리스트레싱을 적용한 프리스트레싱 공법이 개발되었다. 이 연구에서는 흙막이 해석프로그램을 이용하여 기존 캔틸레버 공법 엄지말뚝과 프리스트레싱을 적용한 엄지말뚝의 굴착심도를 1.8 m의 동일한 파일 간격과 지반조건을 통해 비교하였으며, 다만 긴장 엄지말뚝의 실험결과와 전산해석결과를 비교검토하고 3D 해석을 통해 상세 부품들의 내하력을 검토하였다. 그 결과를 요약하면 아래와 같다.

- (1) 해석 결과, 프리스트레싱을 적용한 엄지말뚝의 굴착심도를 최대 약 2배 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 또한, 동등한 단면적을 가지는 기존 RH

형강과 비대칭 BH형강의 동일한 굴착심도에 대한 해석을 통하여 비대칭 BH형강 적용 시 기존 RH형강 대비 수평변위가 약 16 % 감소하였으며 최대 파일 간격의 증가로 파일 공수를 약 10 % - 20 % 절감할 수 있음을 확인하였다.

- (2) 변위, 변형률, 응력 등의 저충분석을 위한 실험을 통해 강연선 당 150 kN의 하중을 재하 시 정착구에서의 마찰손실 및 정착손실로 인한 30 kN의 하중 손실량을 확인하였다. 구조전산해석결과와 비교검토를 통해 최대 변위가 발생하며 최대 응력이 발생할 것으로 예상되는 지점의 응력이 유사하게 나타나 해석 및 실험의 정합성을 확인하였다.
- (3) 상세 부품들에 대한 3D 모델링 해석 결과 설계 하중 적용 시 건전한 응력 분포를 보이며 최대 하중 적용 시에도 재료의 탄성 영역을 벗어나지 않고 선형 거동을 보이므로 충분한 내하력을 지니고 있음을 확인하였다.

이러한 결과들을 통하여 다단 긴장 얽지말뚝을 이용한 자립식 공법이 기존의 캔틸레버 공법이 지니고 있던 낮은 굴착심도의 문제점과 전 구간에 균일한 프리스트레싱을 적용하는 기존 프리스트레싱 공법이 지니고 있던 배부름 현상과 같은 구조적 문제점을 구간별 차등 프리스트레싱을 가함으로써 해소할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 추가적인 연구를 통해 기술의 검증 및 적용 확대가 가능할 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업(과제번호: 21CTAP-C163670-01)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌(Reference)

[1] You, J.O., Shin, M.S., Yang, Y.H., Baek, S.K., and Sim, J.U. (2005) Application of New Excavation Method Using Stabilizing Piles, *Proceedings of the Annual Conference of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, pp.5351-5354 (in Korean).

[2] Sim, J.U., Park, K.B., Son, S.G., and Kim, S.I. (2009) A Study on the Behaviour Analysis and Construction Method of the Self-Supported Earth Retaining Wall (SSR) Using Landslide Stabilizing Piles, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, KGS, Vol.25, No.1, pp.41-54 (in Korean)

[3] Park, S.J., Jun, S.Y., Yang, H.J., and Kim, H.S. (2018) Application of Advanced Self-Supported Retaining Wall System, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.66, No.6, pp.38-41 (in

Korean).

[4] Kim, J.-G. (2019) A Study on the Self-Contained Earth Retaining Wall Method Using Bracing, *Journal of Digital Convergence*, The Society of Digital Policy and Management, Vol.17, No.3, pp.205-213 (in Korean).

[5] Kim, D., Han, S., Choi, W., and Yom, K. (2018) The Design and Construction Case of Retaining Wall Using ACT PILE(CFT type Pile), *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.30, No.3, pp.48-53 (in Korean).

[6] Yun, J.N, Yun, J.S., Hwang, C.S., and Bae, J. (2020) Modular Device for Temporary Earth Retaining Wall Applied Steel Strut, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.3, pp.37-44 (in Korean).

[7] Boone, S.J., and Westland, J. (2005) Estimating Displacements Associated with Deep Excavations, *Proceedings of the 5th International Conference of TC28 of the ISSMGE*, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Netherlands, pp.817-822,

[8] Geo Group ENG (2011) *SUNEX Manual* (13th Ed. for Ver w6.10), Korea (in Korean).

[9] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2021) *Ground Measurement in Construction* (KCS 11 10 15: 2021), Korea (in Korean).

[10] Korean Agency for Technology and Standards (2019) *Uncoated Stress-Relieved Steel Wires and Strands for Prestressed Concrete* (KS D 7002: 2019), Korea (in Korean).

[11] MIDAS Information Technology (2021) *MIDAS Civil On-Line Manual*, Korea, (in Korean).

[12] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2013) *Abaqus Analysis User's Guide*, DSS, USA.

---

**요 약**: 프리스트레싱을 도입하지 않는 기존의 얽지말뚝 자립식 공법은 저렴할 뿐만 아니라, 굴착속도, 공간확보 측면에서 유리하나 캔틸레버 형태로 토압에 저항하여 수평변위가 크게 발생할 수 있고 국내의 일반적인 토체에서의 굴착심도가 3 m - 4 m로 제한적이었다. 이러한 문제를 개선하기 위해 여러 가지 공법이 개발되어 현장에 적용되고 있으나 공사비 증대 및 구조적 문제로 인해 여전히 개선의 여지를 가지고 있는 상황이다. 본 연구에서는 문제점을 개선하기 위해 얽지말뚝에 다단으로 프리스트레스를 도입한 다단 긴장 얽지말뚝 활용 무지보 자립식 흠막이 공법의 전체적인 구조 및 상세 부품 등의 사양 설계와 실험, 구조해석과 얽지말뚝의 단면 형상에 따른 전산구조해석을 실시하였다. 해석 결과, 기존 공법 대비 굴착 깊이를 최대 약 2배까지 증가시킬 수 있음을 확인하였고, 비대칭 H형 단면을 사용할 경우, 기존의 대칭 H형 단면 사용 시에 비해 수평변위 및 파일 공수를 약 10% - 20% 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 또한 실험 실험과 비교해석을 통해 프리스트레싱 도입량 및 손실량을 파악하고 가력 증 거동을 확인하였으며, 상세해석을 통해 각 구성품이 충분한 내하력을 가지고 있음을 확인하였다.

**핵심용어**: 흠막이벽, 얽지말뚝, 다단 긴장, H형강, 구조해석