

강널말뚝의 구조성능에 대한 실험적 연구

김진우¹ · 김태훈² · 김윤혁³ · 김영주⁴ · 박해용^{5*}

¹선임연구원, 한국건설생활환경시험연구원, 내진센터, ²연구원, 한국건설생활환경시험연구원, 내진센터,
³수석연구원, 한국건축구조연구원, ⁴대표이사, 한국건축구조연구원, ⁵조교수, 한밭대학교, 건축공학과

Experimental Study on Structural Performance of Hot-Rolled Steel Sheet Piles

Kim, Jin Woo¹, Kim, Tae Hoon², Kim, Yoon Hyeok³, Kim, Young Ju⁴, Park, Hae Yong^{5*}

¹Senior Researcher, Seismic Safety Center, Korea Conformity Laboratories, Cheongju, 28115, Korea

²Researcher, Seismic Safety Center, Korea Conformity Laboratories, Cheongju, 28115, Korea

³Principal Researcher, Korea Institute of Structural Engineering & Consulting, Busan, 46241, Korea

⁴CEO, Korea Institute of Structural Engineering & Consulting, Busan, 46241, Korea

⁵Assistant Professor, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

Abstract - In this study, the mechanical properties of bending tests in the strong axis direction and tensile tests of interlock were conducted for the purpose of to obtain the structural performance of sheet piles(U-shaped). In the bending test, local buckling occurred in the web in the central part after the entire bending behavior of the member in the specimen with stiffeners reinforced at the supporting and the loading part, and the strength was degraded. In the specimen without stiffener reinforcement, slippage behavior occurred due to out-of-plane direction. In the tensile test of joint, the strength was lowered by cracks in the interlocking joint, and the strength was about 7 % - 11 % compared to the tensile coupon test result.

Keywords - Retaining wall, Hot-rolled steel sheet piles, Bending behavior, Interlock, Tensile behavior

1. 서론

흙막이 공사는 굴착공사 주변지반의 응력해방에 따른 변형을 억제하여 주변 건축물의 침하와 균열, 매립시 설물의 파손을 방지하기 위해 가시설 구조체를 축조하는 건축 및 토목 전 분야에서 활용되는 범용성이 큰 공종이다. Park *et al.*^[1]은 사고 발생을 방지하기 위한 사전 조치가 이루어지고 있음에도 불구하고 사고가 잦으며 사고 시 재해율이 크다는 점을 지적하였다. 또한, 한국시설안전공단(Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, 2007)은 가시설물 공사 중 사고사례를 분석하

였으며, 구조체 불안정에 대한 고려가 필요하다는 결론을 제시하였다^[2]. 국내 흙막이 시설물에 대한 설계기준으로는 KDS 21 30 00^[3], 표준시방서로는 KCS 21 30 00^[4]이 있으며, 이들 설계기준과 표준시방서에서는 지반 조건 및 활동 전도 등에 대한 안전율, 지반종류에 따른 예상 수동토압과 흙막이벽의 형식에 따른 허용변위량 등을 정의하고 있다.

가시설 구조체로는 강널말뚝, 엄지말뚝, CIP 등이 사용되고 있으며, 본 연구에서 대상으로 하는 강널말뚝(U형)은 Fig. 1에서 나타낸 것과 같이 양단에 이음을 갖는 사다리꼴형의 중공단면으로 구성된다. Fig. 2와 같이 공사현장에서는 각 단면의 이음부를 단순끼움 형식으로 향타, 압입인발 공법 등으로 조립하여 구조체를 형성하며 다른 공법과 비교하여 시공이 간단한 특징이 있다. 이로 인해 해체 후 다른 가설공사에 재사용되는 경우가 많다. 또한, 토압에 대한 저항과 차수성을 동시에 확보할 수 있어 지하수위의 영향을 많이 받는 곳에서 사용이 가능한 특징도 있다^[5]. KS F 4604(열간압연강 널말뚝)^[6]에서는 사용

Note.-Discussion open until June 30, 2023. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 11, 2022; revised on November 18, 2022; approved on November 21, 2022.

Copyright © 2022 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-42-821-1121 Fax. +82-42-821-1590

E-mail. haeyong@hanbat.ac.kr

강종과 화학성분, 기계적 성질과 치수 및 허용오차를 정의하고 있다.

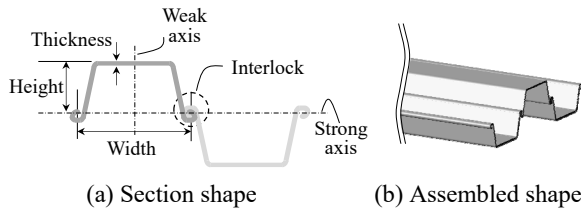


Fig. 1. Shape of steel sheet pile



Fig. 2. Application example at construction site

강널말뚝에 대한 연구사례로 Hong *et al.*^[7]은 인천국제공항에 설치된 강널말뚝에 대해 수평변위의 현장계측 결과를 바탕으로 지지형식에 따른 수평변위 분포, 지반의 안정수, 굴착저면지반의 강도 등을 조사하였다. Lee *et al.*^[8]은 횡토압을 받는 강널말뚝의 횡변위에 대해 수치해석을 이용하여 검토하였다. Yeo *et al.*^[9]은 강널말뚝의

형상(U형, box형, 직선형)과 이에 대한 시공사례를 소개하였다. 이와 같이 강널말뚝에 대한 연구는 시공사례, 해석적 검토 등에 그치고 있으며 실증적인 구조성능에 대한 연구사례는 미흡한 실정이다.

이에 대해 본 연구에서는 강널말뚝(U형)에 대한 구조성능을 파악하고 기초 지식을 얻는 것을 목적으로 강축방향에 대한 휨 실험을 수행하여 하중-변위 관계, 국부적으로 발생하는 변형도 추이 등의 휨 거동을 파악하였고 이음부에 대한 인장실험을 수행하여 보유강도에 대해 분석하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험체 형상

Table 1과 Fig. 3(a)에 휨 실험의 실험체 일람과 실험체 형상을 나타냈다. 실험체의 실험변수는 단면 내의 스티프너 보강 유무이며, 스티프너를 보강하지 않은 B-N 실험체의 단면형상은 강널말뚝(U형)으로 폭 400 mm, 높이 150 mm, 두께 13 mm이고 부재길이가 2,500 mm이다. 스티프너를 보강한 B-S 실험체는 B-N 실험체와 동일한 단면형상과 부재길이를 가지며, 가력에 의한 면외변형 방지를 위하여 Fig. 3(a)의 지점부와 가력부의 단면에 두께 12 mm의 SM355A 강재(용접구조용 압연강재)를 이용하여 강널말뚝의 내측에 필릿용접으로 접합하였다.

Table 1. Bending test specimens

Specimens	Width W (mm)	Height H (mm)	Thickness t (mm)	Length L (mm)	Stiffener
B-N	400	150	13.0	2,500 (Distance between supporting points: 2,000)	-
B-S					Stiffener reinforcement (support part and loading part)

Table 2. Tensile test specimens (for interlock)

Specimens	Width W (mm)	Height H (mm)	Thickness t^{***} (mm)	Total height H (mm)	Shape
T-D*	25.0	209.5	7.6	400	Dumbbell shape
T-C**					Continuous shape

*dumbbell shape same as coupon test specimen (3EA)

**specimens with a constant width (Overall shape is the same as that of the T-D specimen and there is no neck.; 3EA)

***one side height of specimen piece

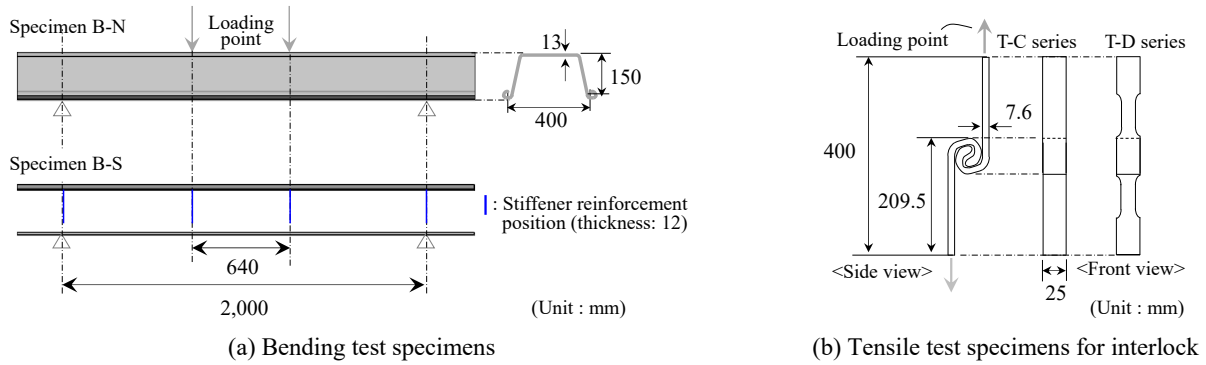


Fig. 3. Details of specimens

Table 3. Material properties

No.	Steel type	Measured thickness t (mm)	Yield strength σ_y (N/mm ²)	Tensile strength σ_u (N/mm ²)	Elongation at fracture EL (%)
1	SY300	12.7	389.6	585.4	30.0
2		12.7	371.5	592.2	37.0
3		12.7	398.1	587.4	33.2
Average	-	12.7	386.4	588.3	33.4

Table 2와 Fig. 3(b)에 이음부 인장시험의 실험체 일람과 실험체 형상을 나타냈다. 실험체는 강널말뚝의 웹 부위와 이음부가 연속되도록 채취하였으며, 실험체는 웹 부위의 너비형상에 대해 너비가 일정한 실험체와 아령형을 갖는 실험체로 구성된다. 웹 부위에 아령형 형상을 갖는 T-D 실험체는 실험체의 길이방향에 대해 후술하는 인장소재시험의 시험편 5호와 동일한 형상이다. 웹 부위의 너비가 일정한 T-C 실험체는 실험체의 길이방향에 대해 T-D 실험체의 물림부와 동일한 너비를 갖는 실험체이다. 이러한 형상에 대해 이음부가 단순끼움 형식으로 맞물려서 1개의 실험체로 구성되며, 각 실험체에 대해 3개의 실험체를 제작하였다.

2.2 재료적 성질

본 실험에 앞서 실험에 사용된 강재의 기계적 성질을 파악하기 위해 인장소재시험을 실시하였다. 실험체 제작을 위해 사용된 강재는 SY300(열간 압연강 널말뚝)으로 시험편은 KS B 0801^[10]에 따라 5호의 아령형 형상으로 Fig. 1의 웹 부위에서 채취한 3개의 시편을 제작하였다. Table 3에 실험체의 실험결과를 나타냈다. 표 중의 값은 각각의 평균값을 나타내고 항복응력 σ_y 는 0.2 % 오프셋 강도로 산출하였다. 결과적으로 인장시험결과는 KS F

4604^[6]에서 제시하는 항복강도, 인장강도, 연신률을 만족하였다.

2.3 실험체 설치 및 가력방법

Fig. 4에 각 실험에 대한 재하장치와 실험체의 설치개요를 나타냈다. 휨 실험은 2,500 mm의 부재길이를 갖는 실험체에 대해 2,000 mm의 지점 간 거리(양단 단순지지)로 실험체 중앙부에 최대모멘트 일정구간이 발생하도록 중력방향으로 2점 단순가력하여(하중 간 거리 640 mm), 실험체의 내력이 최대내력의 80% 이하로 저하될 때까지 가력하였다. 이음부의 인장시험은 일반적으로 수행하는 인장소재시험과 동일한 방법으로 수행하였다.

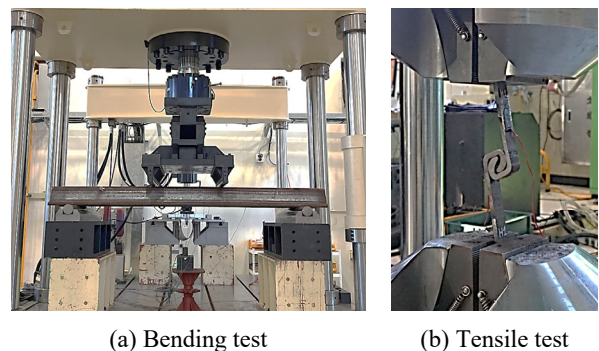


Fig. 4. Test set-up

3. 휨 실험결과 및 고찰

3.1 하중-변위 관계 및 파괴형식

Table 4에 휨항복강도의 실험값에 대해 다음 식으로 산출한 항복강도의 계산값과 비교하여 나타냈다.

$$M_y = \sigma_y \times S \quad (1)$$

Table 4. Comparison of yield moment

Specimens	eM_y (kN·m)	cM_y (kN·m)	M_c/M_y
B-S	280.5	233.4	1.202
B-N	288.0		1.234

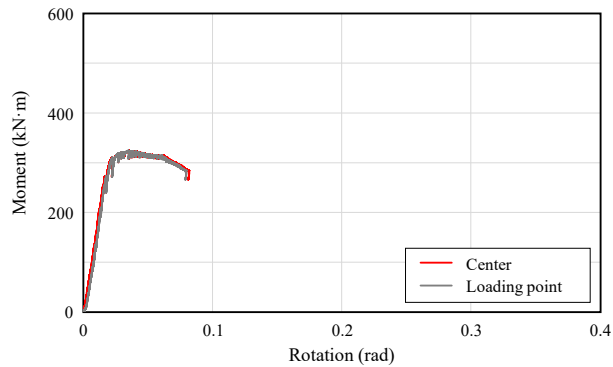
M_y : experimental value of yield moment, eM_y : calculated value of yield moment

여기서, σ_y 는 인장소재실험결과로부터 산출한 항복응력도, S 는 탄성단면계수를 나타내며 $604,000 \text{ mm}^3$ 를 적용하였다. 또한, 항복강도의 실험값은 실험체의 초기강성과 초기강성의 1/3 기울기를 갖는 직선을 하중-변위곡선의 접선에 y 축으로 평행이동시켜 초기강성의 연장선과의 교점으로 산출하였다^[11]. B-S 실험체, B-N 실험체의 항복강

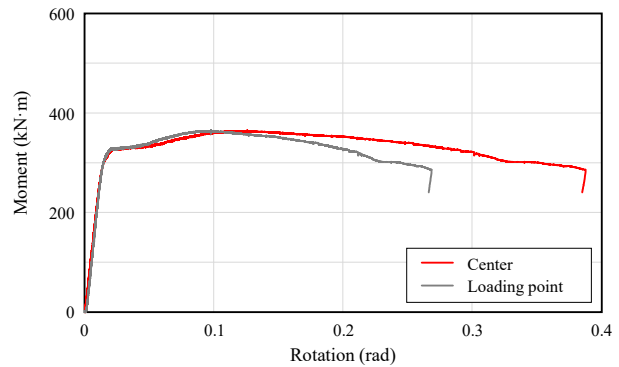
도의 실험값은 각각 280.5 kN·m, 288.0 kN·m로 유사한 값을 나타냈으며 식 (1)로 산정한 계산값을 20% 정도 상회하였다.

Fig. 5에 휨 실험의 하중-변위 관계로부터 산출한 모멘트-회전각 관계를 나타냈다. 그래프에서 회색과 흑색 실선은 각각 가력부와 실험체 중앙부에서 측정된 수직변위를 나타냈다. B-N 실험체와 B-S 실험체의 최대모멘트는 각각 324.8 kN·m, 366.0 kN·m로 B-S 실험체가 B-N 실험체보다 약 13% 정도 높은 내력을 나타냈다. B-N 실험체에서는 중앙부와 가력점의 변위가 거의 동등하게 발생하는 반면, B-S 실험체에서는 중앙부의 변위가 가력부의 변위보다 더 크게 발생하는 것이 확인되었다. B-N 실험체에서는 내력이 상승하는 구간에서 하중이 불안정하게 변화하는 경향을 나타내며, 부재에 발생하는 회전각이 B-S 실험체보다 현저하게 작게 발생하는 것이 확인되었다. 이는 실험체의 변형이 중앙에 집중하는 B-S 실험체와는 달리 B-N 실험체는 지점에서 강널말뚝의 접촉부위(저면부)에서 면외방향의 변위가 발생하면서 지점과 실험체 간의 미끌림 거동에 의한 것이며 이에 대한 경향은 다음의 파괴형식에서 확인할 수 있다.

Fig. 6에 각 실험체의 파괴형식을 나타냈다. B-S 실험

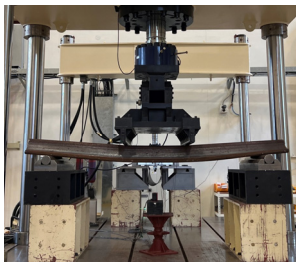


(a) Specimen B-N

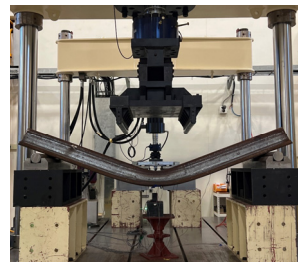


(b) Specimen B-S

Fig. 5. Moment-rotation relationship



(a) Specimen B-N



(b) Specimen B-S

Fig. 6. Failure mode for bending test

체는 부재의 전체 휨 거동 후 중앙부의 웨브에서 국부좌굴이 발생하여 내력이 저하하였으며, B-N 실험체는 앞서 기술한 바와 같이 부재의 항복 전에 내력 상승구간에서 지지부에서 면외방향의 변위가 발생하였으며 이 변위에 의한 미끄럼 거동이 최대내력 이후에도 지속되어 내력이 저하하였다. 이러한 내력저하의 추이는 다음으로 기술하는 변형도 분포를 통해 파악하도록 한다.

3.2 국부적으로 발생하는 변형도 추이

Fig. 7에 실험체 각 부위에 발생한 변형도 이력과 측정 부위를 나타냈다. 측정부위는 최대모멘트 일정구간인 실험체 중앙부이며 Fig. 7(a)는 웨브의 밑면, Fig. 7(b)는 플랜지의 안쪽면, Fig. 7(c)는 이음부의 밑면에 발생한 변형도이다. 그림에서 적색 파선은 강재의 항복변형도 0.002

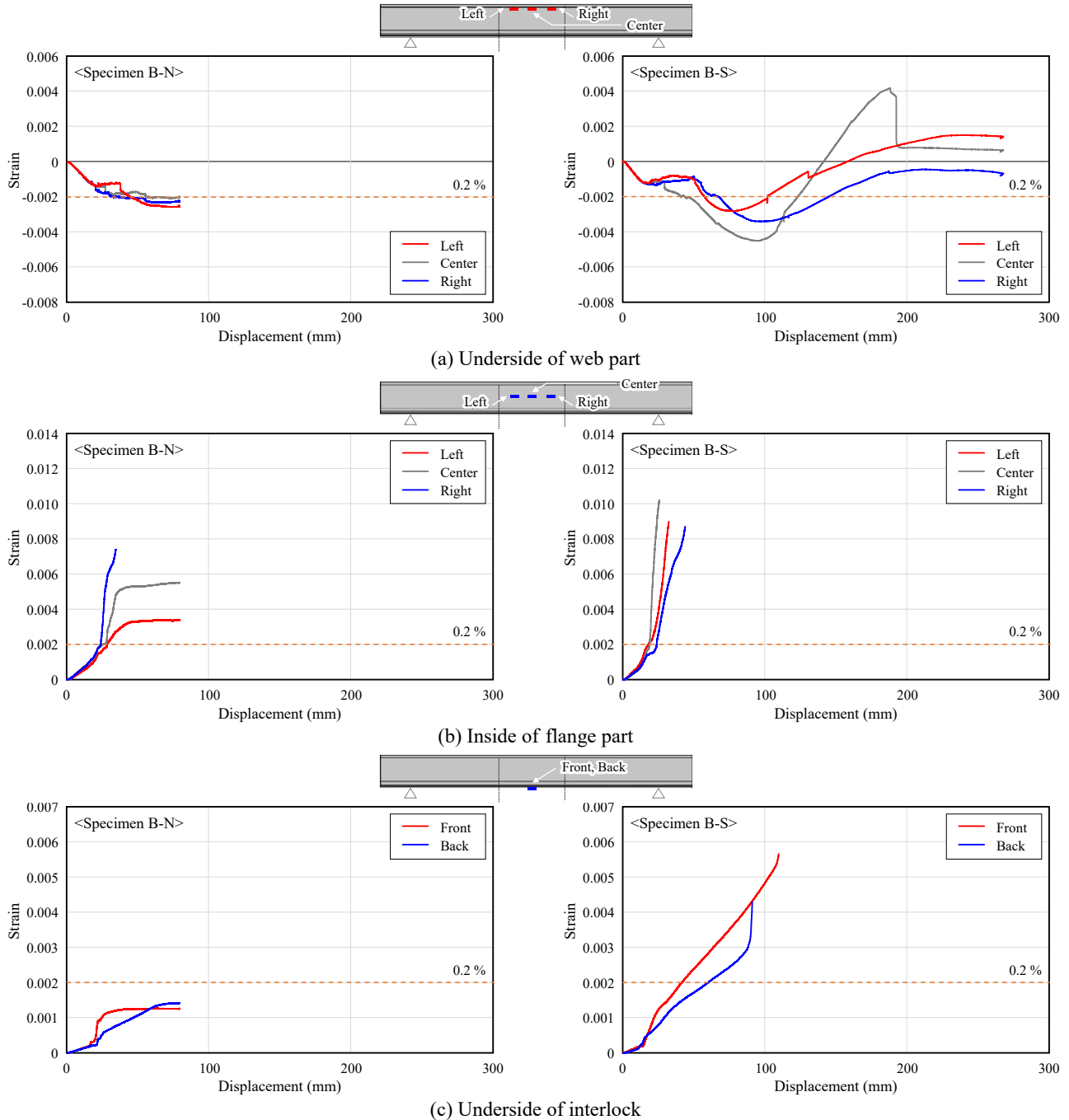


Fig. 7. Local strain history

를 나타낸다.

B-S 실험체의 웨브에서 측정된 변형도는 실험체 길이 방향의 정중앙에서 소성화가 진행되어 좌·우 부위로 확산되었으며(Fig. 7(a) 우측 참조), 플랜지에서는 실험체의 길이방향과 관계없이 거의 동일한 시점에서 소성화가 진행되었다(Fig. 7(a) 좌측 참조). 이는 전술한 바와 같이 부재의 전체 휨 거동 후 중앙부 웨브에서 국부좌굴로 인해 변형도 집중이 발생한 것으로 사료된다. 또한, 이음부에서도 소성화가 진행되었으며, 결과적으로 B-S 실험체의 소성화는 플랜지, 웨브, 이음부 순으로 진행되었다.

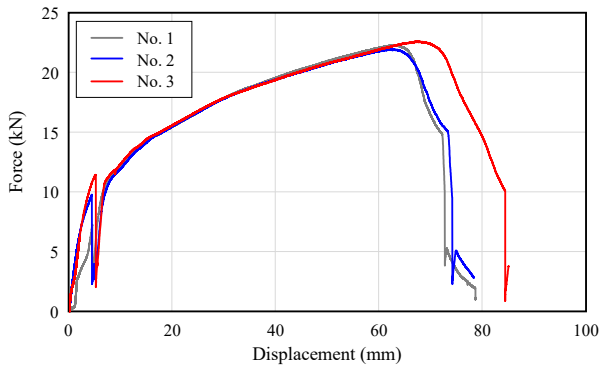
이에 반해 B-N 실험체에서는 B-S 실험체와 유사하게 플랜지의 소성화가 진행되어 웨브에서 소성화가 진행되었으나 소성화가 시작한 시점은 B-S 실험체보다 더 큰 변위에서 발생하였다. 웨브의 변형도 분포는 B-S 실험체보다 부재의 길이방향에 관계없이 유사한 변형도 추이를 나타낸다. 이음부의 변형도 추이는 재하종료시까지 항복 변형도를 하회하였다. 이 결과는 앞서 기술한 것과 같이

B-N 실험체는 지점부와 실험체 간의 미끄러짐 거동에 의해 단면양측 플랜지의 면외방향 변형으로 실험체의 중앙부에 변형도가 집중하지 않은 것을 나타낸다.

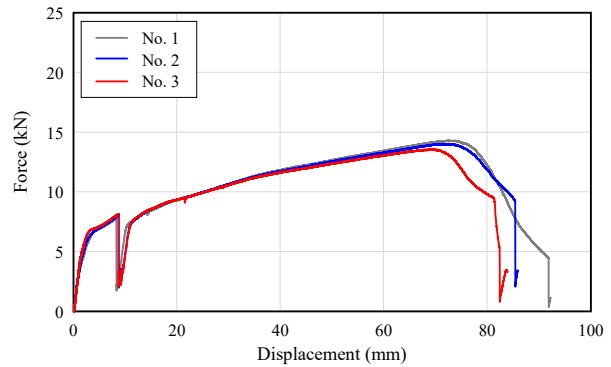
4. 이음부 인장실험결과 및 고찰

Fig. 8에 T-D, T-C 실험체의 하중-변위 관계를 나타냈다(각각 3개). 모든 실험체는 공통적으로 변위가 5 mm - 8 mm 정도에서 내력이 일시적으로 급격히 감소하며, 이후 변위가 증가함에 따라 내력이 안정되어가는 현상을 나타냈다. 이는 이음부의 미끄러짐(slippage)의 발생으로 인한 것이다. Fig. 9에 이러한 현상에 대한 메커니즘을 나타냈으며, 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 실험체 설치: 실험체를 시험기에 설치하면 단순히 움형식으로 맞물린 이음부의 회전에 의해 편평부가 하중중심선에 대해 기울기를 갖는다.



(a) Specimen T-D



(b) Specimen T-C

Fig. 8. Load-displacement relationship

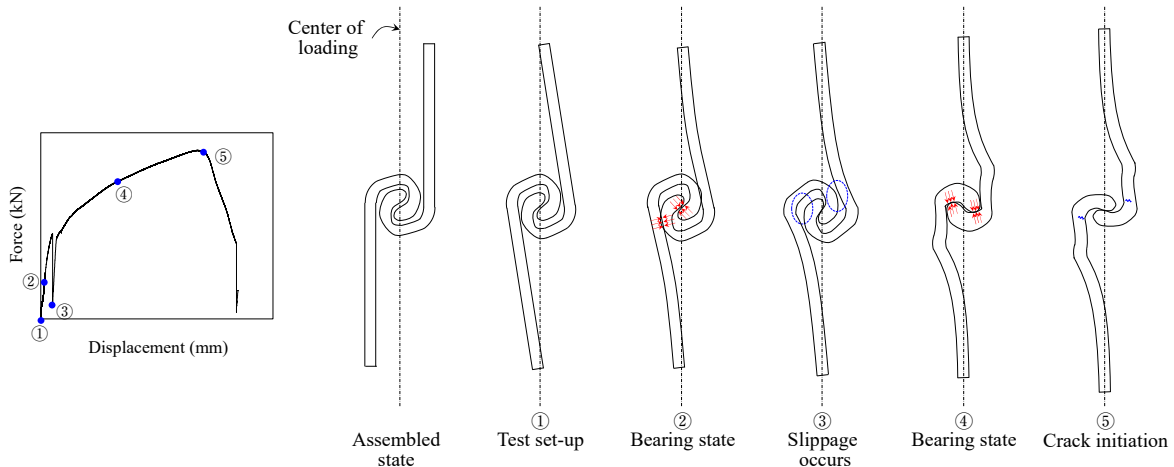


Fig. 9. Phenomenon of reincreasing strength

- (2) 지압상태: 실험체에 인장력이 작용하면 편평부의 휨변형과 함께 이음부에 국부적인 지압이 발생하여 내력이 상승한다.
- (3) 미끄러짐 발생: (2) 지압상태의 지압이 발생한 곳 (그림 중 청색 표시)에 미끄러짐이 발생하여 내력이 저하한다.
- (4) 지압상태: 실험체의 축방향 변위가 증가하여 이음부에 지압이 발생하여 내력이 다시 상승한다.
- (5) 균열발생: 이음부의 변형에 의해 내측에 균열이 발생하여 내력이 저하한다.

T-D, T-C 실험체의 최대내력은 각각 22 kN 정도, 14 kN 정도로 나타났다. 이러한 최대내력의 차이는 웹의 부위의 너비가 일정한 T-C 실험체는 이음부에 변형이 집중된 반면, 웹의 부위에 아령형 형상을 갖는 T-D 실험체는 이음부의 변형과 함께 실험체의 너비가 감소된 부위에도 변형이 발생하여 이 부위의 변형도 경화에 의해 내력이 상승한 것으로 사료된다.

Table 5에 2장의 인장소재실험에서 얻는 인장응력과 각 실험체의 최대응력을 비교하여 나타났다. 이음부 인장실험은 인장응력(인장소재실험결과)과 비교하여 T-D 실험체의 경우 약 11 %, T-C 실험체의 경우 약 7 %의 강도를 나타냈다. 이는 흙막이 공사에서 강널말뚝을 사용하는 경우 약축 방향의 휨 강도의 확보를 위해 형상개선 등의 적절한 고려가 필요하다는 것을 시사한다.

Table 5. Comparison with tensile coupon test

Specimens		σ_{max} (MPa)	$\sigma_{u,AVE}$ (MPa)	$\sigma_{max}/\sigma_{u,AVE}$
T-D	1	65.9	588.3	0.112
	2	66.2		0.113
	3	65.6		0.111
T-C	1	42.2		0.072
	2	42.2		0.072
	3	39.2		0.067

σ_{max} : experimental value of maximum stress, σ_u : tensile stress (coupon test)

5. 결론

본 연구에서는 강널말뚝(U형)에 대한 구조성능을 파악하고 기초 지식을 얻는 것을 목적으로 강축방향에 대

한 휨 실험과 이음부에 대한 인장실험을 수행하였다. 주요 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 휨 실험에서 가력부 및 지점부에 스티프너를 보강한 실험체(이후, 스티프너 보강 실험체)는 부재의 전체 휨 거동 후 중앙부의 웹에서 국부좌굴이 발생하여 내력이 저하하였다. 한편, 스티프너를 보강하지 않은 실험체(이후, 무보강 실험체)는 지점에서 강널말뚝의 접촉부위(저면부)가 면외방향의 변위가 발생하면서 지점과 실험체 간의 미끄러짐 거동이 발생하였으며 최대내력 이후에도 면외방향 변위가 계속되어 내력이 저하하였다.
- (2) 휨 실험에서 스티프너 보강실험체는 실험체 길이 방향에 대해 중앙부에 변형이 집중되었으며 플랜지, 웹, 이음부 순으로 소성화가 진행되었다. 무보강 실험체에서는 실험체 중앙부의 플랜지가 소성화가 진행되어 웹에서 소성화가 진행되었으나 소성화가 시작한 시점은 스티프너 보강실험체보다 더 큰 변위에서 발생하였으며, 이음부는 재하종료시까지 항복상태를 유지하였다.
- (3) 이음부 인장실험에서는 맞물림 이음부의 균열에 의해 내력이 저하하였으며 인장소재실험결과와 비교하여 약 7 % - 11 %의 강도를 나타냈다.

본 연구는 구조성능에 대한 실증적인 연구사례가 미흡한 강널말뚝 1본에 대한 기초적인 연구이며, 가설구조체의 안전성 확보를 위해 향후 강널말뚝을 직렬로 연결한 강축방향 휨성능, 약축방향 휨성능 등의 다양한 변수를 적용한 실험 및 해석의 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 RS-2022-00143417). 이에 감사드립니다.

참고문헌(References)

[1] Park, Y.G., Kim, T.O., Seo, Y.H., An, M.H., Oh, M.J., Yu, S.H., and Hong, Y.S. (2019) Current Status of Temporary Retaining Facilities and Examples of

- Collapse, *Geotechnical Engineering*, Korean Geotechnical Society, Vol.35, No.4, pp.50-67 (in Korean).
- [2] Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation (2007) *Technical Review Cases II: Retaining Wall and Excavation*, Korea (in Korean).
- [3] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2022) *Design Standard for Temporary Retaining Wall* (KDS 21 30 00: 2022), Korea (in Korean).
- [4] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2022) *Standard Specifications for Temporary Work of Retaining Wall* (KCS 21 30 00: 2022), Korea (in Korean).
- [5] Lee, K.-N. (2018) *The Parameter Analysis for Optimal Design of H-Pile/Plastic Sheet Pile Method*, Ph.D Dissertation, Chungnam National University, Korea (in Korean).
- [6] Korean Agency for Technology and Standards (2015) *Hot Rolled Steel Sheet Piles* (KS F 4604: 2015), Korea (in Korean).
- [7] Hong, W.-P., Kim, D.-U., and Song, Y.-S. (2005) The Stability of Excavated Soft Ground Supported by Sheet-Pile Walls, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, KGS, Vol.21, No.1, pp.5-14 (in Korean).
- [8] Lee, B.K., Jeong, J.S., Lee, M.S., and Oh, S.J. (1993) Theoretical Analysis for Behavior of Steel Sheet Pile, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.5, No.1, pp.207-213 (in Korean).
- [9] Yeo, B.C., Kim, G.I., Lee, M.S., and Lee, S. (1994) Characteristics and Construction Examples of Steel Piles, *Proceedings of Annual Conference of the Korean Society of Civil Engineers*, pp.345-348 (in Korean).
- [10] Korean Agency for Technology and Standards (2017) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0801: 2007), Korea (in Korean).
- [11] Oh, S.H., and Park, H.Y. (2020) Experimental Study About Flexural Strength of H-Shaped Compact Stud Column Under Varying Axial Load, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.5, pp.297-308 (in Korean).

요약: 본 연구에서는 강널말뚝(U형)에 대한 구조성능을 파악하고 기초 지식을 얻는 것을 목적으로 강축방향에 대한 휨 실험과 이음부에 대한 인장실험의 역학적 특성에 대해 검토하였다. 휨 실험에서는 가력부 및 지점부에 스티프너를 보강한 실험체는 부재의 전체 휨 거동 후 중앙부의 웹에서 국부좌굴이 발생하여 내력이 저하하였다. 스티프너를 보강하지 않는 실험체는 지점에서 면외방향 발생에 의해 미끌림 거동이 발생하였다. 이음부 인장실험에서는 맞물림 이음부의 균열에 의해 내력이 저하하였으며 인장소재실험결과와 비교하여 약 7% - 11%의 강도를 나타냈다.

핵심용어: 가시철 흙막이, 강널말뚝, 휨 거동, 이음부, 인장 거동
