

# 이상거동 변수 기반 고강도 강관 가시설 시스템의 구조 안정성

이진우\* · 노명현\*\* · 이상열\*\*\*

Lee, Jin-Woo\*, Noh, Myung-Hyun\*\*, Lee, Sang-Youl\*\*\*

## Structural Stability of Temporary Facility System using High-Strength Steel Pipes Based on Abnormal Behavior Parameters

### ABSTRACT

This study defined abnormal behaviors such as bending deformations or buckling behaviors occurred in high strength steel pipe strut system, and carried out a full-scale bending test for different connection types. A parametric study was carried out to gain an insight about structural performances considering abnormal behavior effects in high strength steel pipe strut system. Five abnormal behaviors were considered as undesirable deflections of strut structures, which are basic load combination, excessive excavation situations, impact loading effects, additional overburden loads, load combinations, and strut lengths. Subsequent simulation results present various influences of parameters on structural performances of the strut system. Based on the results, we propose methods to prevent unusual behaviors of pipe-type strut structures made of high strength steels.

**Key words** : High strength steel strut, Abnormal behavior, Three-dimensional analysis, Full-scale performance test

### 초 록

본 논문에서는 지반굴착 가시설 일부 현장에서 발생하고 있는 고강도 강관 버팀 보의 휨변형 또는 좌굴변형과 같은 이상 거동을 정의하고 강관 버팀보 구조의 연결부 변화에 따른 실험 휨 성능시험을 수행하였다. 또한, 수치적으로 분석 가능한 유발 인자들에 대한 이상 재현 시나리오 구성 후, 구조 해석 및 단면검토를 통하여 5개 하중조합 Case에 대한 변수 해석을 실시하였다. 5가지 이상거동 유발인자는 과굴착 심도, 충격하중, 추가 상재하중, 버팀 보 지간장 등으로 설정하여 3차원 구조해석을 수행하였으며, 2차원해석과 비교하였다. 수치해석 예제는 이상거동 변수를 고려하여 고강도 강관 버팀 보 가시설 시스템의 구조성능에 미치는 영향 및 이상거동 방지방안을 중심으로 상세 규명하였다.

**검색어** : 고강도 강관 버팀보, 이상거동, 3차원 해석, 실험 성능시험

## 1. 서론

전통적인 토목분야에서 강관 소재는 주로 기초말뚝, 철담, 지주, 가설 등바리 등에 제한적인 범위로 사용되어 왔다. 최근에는 고강도 강관재료 및 연결부의 다양한 접합상세 개발로 인해 주요 구조물 부재로서 교량의 주거더, 흙막이 가시설 현장의 버팀 보 등으로 확대 적용되고 있다. 특히, STKT 590(KS개정 기호 SHT 460)이상의 고강도 강관이 적용된 버팀 보 구조는 강축 및 약축의 구분이 없어 좌굴 및 비틀림에 유리한 구조단면을 가지며, 수평 및 수직 브레이싱이 필요 없어 공사비, 공사기간, 시공성 등이 기존의 H형강보다 상대적으로 유리함으로써 해외에서는 버팀 보 형식에 대부분 적용되고 있다(Jung et al., 2012; Na et al., 2008; Kim et al., 2017)

\* 서영엔지니어링 상무 (Seoyeong Engineering Co. · [jwlee@seoyoungeng.com](mailto:jwlee@seoyoungeng.com))

\*\* 중신회원·포스코 철강솔루션마케팅실 구조연구그룹 책임연구원 (POSCO · [mnoh@posco.com](mailto:mnoh@posco.com))

\*\*\* 중신회원·교신저자·안동대학교 토목공학과 부교수 (Corresponding Author · [Andong National University · lsy@anu.ac.kr](mailto:lsy@anu.ac.kr))

Received August 16, 2018/ revised November 4, 2018/ accepted December 5, 2018

일반적으로 굴착 폭 규모가 작은 현장들은 굴착 폭에 비해 버팀보의 세장비가 크지 않으며, 이음부 개소가 적으므로 기존의 H형강 버팀 보나 고강도 강관 버팀 보가 적용되어도 버팀 보의 휨좌굴 및 국부좌굴 등의 이상 변형으로 인한 가시설 시스템의 구조적인 안전성에 문제가 발생하지 않는 경우가 대부분이다. 호텔, 사옥, 오피스텔과 같은 대형 건축물 공사현장 및 지하철 공사현장의 경우 굴착심도가 20~30 m로 깊으며, 굴착폭은 50~60 m로서 지반 가시설 규모가 상당히 크므로, 고강도 강관 버팀 보가 필연적으로 적용되는데, H형강대비 공사비를 절감하여 경제성을 높이고, 중량도 작으며 브레이싱 재 없이 중간말뚝 간격을 넓혀 시공성을 향상시키고 있다(Park et al., 2012; Choi et al., 2007). 가시설 시스템구조에서 흙막이 벽체의 침하나 수평변위 등에 관한 연구 및 흙막이 벽체 시공법 관련 연구는 활발하게 수행되었다(Yang and Kimm 1997; Jeong et al., 2011; Kim et al., 2003). Kim 등은 또한, 점착력, 내부마찰각 및 변형계수 등 지반특성치에 관한 매개변수 연구를 수행하였다(Kim et al., 2013). 반면, 버팀 보 부재의 경우 강관, PHC 등 소재 자체개발에 관한 연구는 있었으나, 구조안전성 측면에서 2차적인 부재로 간주되고 최근에 개발된 고강도 소재이기에 현장에서 발생하는 강관 버팀 보의 이상 거동에 관한 연구는 미미한 실정이다(Lim et al., 2014).

본 연구에서는 고강도 강관 버팀 보의 이상 거동을 유발할 수 있는 인자를 결정하고 상세 분석하고 그 원인에 대하여 규명하고자 한다. 이러한 규명은 다양한 변수를 고려한 시뮬레이션 경향 분석을 통하여 가능하다(Choudhury and Sengupta, 2013; Yoo et al., 2010; Lee et al., 2018). 본 연구는 지반 가시설 시스템에 적용되고 있는 고강도 강관 버팀 보 구조 시스템을 대상으로 이상 거동 변수를 결정하고 휨 성능 시험 및 3차원 상세 비선형 유한요소 해석 및 주요 인자에 대한 변수해석을 실시하여 이상 거동 유발 인자에 대한 구조 안정성을 상세 평가하고자 한다.

## 2. 고강도 강관 버팀보의 휨 성능 시험

강관은 운반 등의 이유로 통관으로 설치하는 것은 난해하다. 즉, 이음부 내에서 강관은 서로 인장력을 전달할 수 없기 때문에 강관의 과도한 변형은 이음부의 성능저하 및 강관의 탈락을 유발할

수도 있다. 본 연구에서는 3차원 상세해석에 앞서 강관 버팀 보의 통관과 연결강관에 대한 휨 성능을 비교하고, 성능저하영향을 4.1절의 유한요소 해석에서 연결부 스프링강성으로 반영하고자 성능 시험을 실시하였다. 또한, 연결강관의 성능저하를 보강하기 위하여 Fig. 1과 같이 표준 연결 상세를 보완한 보강방안들을 수립하여 휨 성능평가 시험을 수행하였다. 압축하중 재하시험이 아닌 휨성능 시험을 수행한 이유는 수직하중에 의한 휨거동을 유발시켜서 강관의 과도 휨처짐을 크게 유도하여 이음부의 파괴거동을 모사하는 것이 실험적으로는 용이하였기 때문이다. 휨성능으로 산정한 이음부의 소성 변형 및 파괴 거동 결과는 등가의 간편 수치해석 모델링을 위한 비교-검증 데이터로 활용하고자 한다. 성능 시험용 STKT590 강관 규격은 KS D3777을 적용하였으며 상세내용은 Table 1과 같다. 표에서 H는 평관사이의 거리이고 D는 관의 바깥지름을 각각 의미한다.

### 2.1 통관과 연결부를 갖는 강관의 휨 성능시험 비교

통관과 표준 연결부를 갖는 강관의 휨 성능시험을 수행하였다. 강관의 직경은 406.4 mm, 두께는 7.0 mm, 길이는 6.0 m, 그리고 지점과 지점간의 거리는 5.0 m이다. 이러한 경우 대하여 통관과 길이 3.0 m 2개를 연결부(500 mm, 700 mm)로 체결한 시험체에 대하여 휨 재하시험을 실시하였다. 이때, 연결부의 볼트 체결력은 450.0 N·m 이상을 적용하였으며, 시험체 중심부로부터 0.9 m 떨어진 곳 양쪽에 압축하중 300 ton을 Fig. 1과 같이 재하하였다. Fig. 2는 시험 전후의 상세를 보여준다. 경계조건은 한자물러의 단순보 조건이며 계측위치는 최대처짐이 발생하는 강관의 중앙 하단부이다.

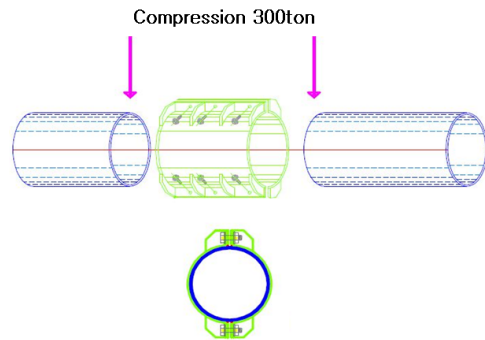


Fig. 1. Conceptual Diagram of Bending Experiment in Steel Pipe

Table 1. Mechanical Properties of STKT590 Pipes for the Experiment

Mechanical Property	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)		Planar ratio H	Tensile strength at welding part (MPa)
			11 <sup>th</sup> specimen 12 <sup>th</sup> specimen	5 <sup>th</sup> specimen		
			Vertical	Horizontal		
Welding method	Electric resistance welding, Arc welding				Electric resistance welding	Arc welding
Outer diameter	Outer diameter		> 40 mm		Outer diameter	> 350 mm
SHT460	590~740	≥ 460	≥ 20	≥ 16	3/4 D	590~740



Fig. 2. Bending Experiments of Steel Pipes

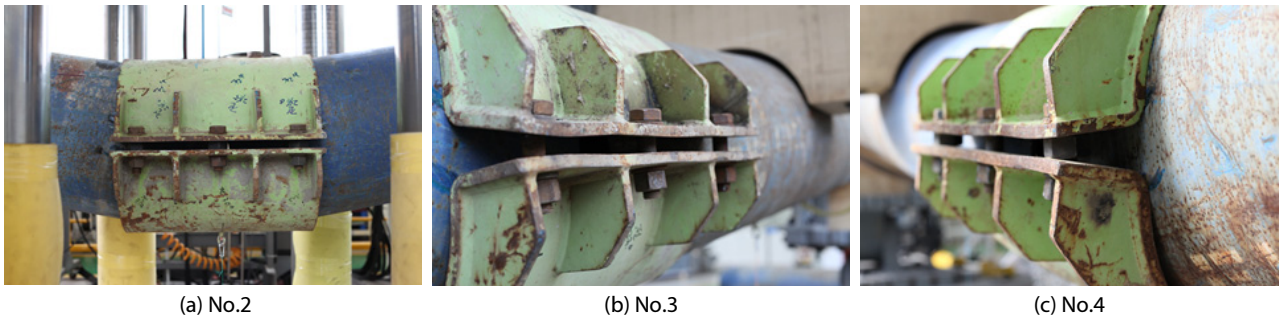


Fig. 3. Failure Behaviors at Connecting Parts

강관은 길이에 따라 좌굴의 영향을 받기 때문에 도로교설계기준에 제시된 세장비 100이하를 고려할 경우, 최대 14 m까지 그 길이가 허용되는데, 이 길이에 대한 최대 휨 응력은 142 MPa, 최대 휨모멘트는 123 kN·m, 허용 휨 응력은 350 MPa, 그리고 허용 휨모멘트는 302 kN·m로 계산되었다. 실험결과, 통관의 경우 600.0 kN·m의 휨모멘트에서 최대치를 보였으며, 이음부 길이 500 mm와 700 mm에 대한 최대휨모멘트는 각각 320.0 kN·m, 540.0 kN·m으로서 통관대비 약 53 %, 90 % 성능을 각각 나타냈다. 통관의 모멘트가 허용휨모멘트에 도달했을 때의 변위(34.0 mm)를 기준으로 평균 휨강성을 분석하면, 이음부 500 mm에 대한 평균 휨강성은 13.09 MN·m<sup>2</sup>로서 통관 대비 약 53 % 평균 휨강성을 보이고 있으며, 이음부 700 mm의 경우 81 % 평균 휨강성을 보이고 있다. 이러한 결과로부터 이음부를 사용하는 경우, 500 mm는 통관대비 성능이 매우 저하되므로 700 mm를 적용하는 것이 유리함을 알 수 있다. 각 경우에 대한 강관의 상세 모멘트-처짐 곡선은 유효요소 결과와 비교하기 위하여 4장 Fig. 8에 도시하였다.

## 2.2 표준 연결부를 보강한 강관의 휨 성능시험 비교

보강시스템 방안은 현재 연결부속에 보조구(너트) 체결, 볼트보

강, 보조구+볼트보강 방안으로 구분하여 통관대비 휨 성능평가를 수행하였다. 시험체 조건은 2.1절과 동일하게 실시하였다. 첫 번째 보강방안은 보조구(너트)를 체결 방안 (Case I)이며, 양면에 총 6개 설치하여 시험을 실시하였다. 두 번째 보강방안은 볼트와 강봉을 조합한 경우(Case II)이며, 세 번째 보강방안은 너트와 볼트를 동시에 보강하는 방안(Case III)이다. 볼트 2개소를 기본적으로 체결하고 너트를 설치하여 시험을 실시하였다.

Fig 3은 휨 시험 후 연결부에서의 파괴 형상을 보여준다. 전체적인 시험결과에서 볼트는 초기하중에 대한 변위억제 및 하중분담 효과가 있으며, 보조구는 연결부의 볼트 파괴에 대한 급격한 취성과 파괴를 방지하고 볼트에 전달하는 하중을 분담하는 역할을 하고 있음을 알 수 있었다. Table 2는 통관의 성능시험 및 연결부를 가진 강관의 성능시험 결과를 요약한 것이며, 변위 50 mm 및 100 mm에 대한 하중값과 최대하중이 작용할 때의 변위값과 그때의 하중값을 의미한다. 결과로부터, 보조구보다는 볼트 연결이, 볼트 연결 보다는 2가지를 조합한 보강방안이 휨 성능에서 유리함을 알 수 있다.

본 절에서는 통관과 표준 연결부 이음강관의 압축 및 휨 성능을 분석하였으며, 표준 연결부를 보강하는 여러 가지 방안들에 대한 시험을 실시하였다. 시험결과, 연결부의 휨 성능은 통관의 휨 성능에

Table 2. Comparison of Average P-Δ Values in All Tests (D406.4×7t)

	Pipe test(①) (No connection)	Standard connection	Nut 6EA connection	Bolt+Steel bar reinforcement	Nut+Bolt reinforcement
Displacement 50 mm (kN)	546.0	76.3 (14 % of ①)	102.0 (18.7 % of ①)	155.0 (28.4 % of ①)	167.0 (30.6 % of ①)
Displacement 100 mm (kN)	740.0	137.0	158.0	192.0	264.0
Max. Load (kN)	780.0	200.8	232.0	238.0	292.0
Displacement under Max. Load (mm)	137	321	372	239	123

50 % 미만으로 나타났다. 실제 현장에서는 자재의 운반 및 재활용 때문에 다수의 연결이음부가 발생하고 있다. 이러한 연결부는 강관의 성능을 저하시키는 요인임을 실험을 통해 알 수 있었다. 이러한 결과를 토대로 4장 3차원 유한요소 해석에서는 본 절 이음강관의 연결부 축 및 휨강성 시험결과를 비교하여 수치 해석의 경계조건으로 고려하였다.

### 3. 이상 거동 정의 및 수치 해석모델

#### 3.1 이상거동의 정의

본 연구에서는 버팀 보의 이상 거동을 정의하고 이상거동 사나리 오를 구성하여 구조해석에 필요한 해석변수를 결정하였다. 이상 거동을 정의하기 위한 버팀 보 변형에 대한 변위 값 관리기준은 기존의 시방기준에서는 별도로 정의되고 있지 않다. 흙막이 벽체의 경우는 굴착 깊이에 따른 최대 수평 변위량을 연구사례에서 관리 제한 값으로 설정하고 있는데, 토질조건에 따라 통상적으로 0.2-0.4 % 굴착 깊이(H)로 선정하고 있으며, 서울지하철 계측관리요령 개선에서도 안전(1/500·H), 주의(1/300·H), 위험(1/200·H)으로 분류해서 관리하고 있다. 하지만, 현장에서 이상 거동은 정확한 기준이 없기 때문에 버팀 보의 휨 변형 발생 값이 작업자들이 육안으로 확인할 수 있는 정도로 발생되었을 때, 시공자 및 시공감독자의 판단에 따라 이상 거동으로 분류되고 있다.

이상 거동의 정의는 현장측면에서와 설계측면에서 두 측면으로 정의하고자 한다. 먼저, 현장측면에서는 사례조사를 바탕으로 흙막이 벽체의 관리기준과 유사하게 굴착 폭(B)에 비례하여 면의 방향으로 발생한 상대변위 값(Δ)으로 정립하려고 한다. A 사례의 경우는 굴착 폭의 0.20-0.65 %, B 사례의 경우는 0.45-0.73 %, C 사례는 0.06-0.45 %가 발생하였는데, 모두 육안으로 관측 가능한 정도의 변위였다. 버팀 보 이상 거동에 대한 정의는 굴착 깊이, 중간말뚝간격 등을 고려하여 육안으로 인지가 가능하고 굴착 폭에 비례되는 점이 반영될 수 있도록 설정하였다. 따라서, 200 mm와 0.40 %·B 중 최소값 이상으로 버팀 보 변형이 발생한 상황을 이상 거동으로 가정하고자 한다.

$$\text{이상 거동}(\Delta, \text{mm}) = \text{Min. (200 mm, 0.40 \% \cdot B (굴착폭, 단위 m))} \quad (1)$$

또한, 설계측면에서 이상 거동은 발생응력이 허용응력을 초과하는 상황으로 정의하고자 한다. 이는 허용응력을 초과하여 응력이 발생하더라도 재료특성상 바로 휨 및 좌굴변형이 발생하지는 않지만, 이상 거동이 발생하는 신호가 될 수 있으므로 설계자나 현장관리자가 쉽게 판단할 수 있도록 하기 위함이다.

#### 3.2 수치해석 모델

기존의 굴착폭이 크며 고강도 강관 버팀 보가 적용된 현장사례를 조사한 결과, 지반조사자료 및 시공 상세도 자료가 정확한 A현장의 샘플단면을 수치해석 대상으로 선정하였다. Fig. 4는 수치해석을 위한 이상화된 반단면 모델을 보여준다. 대상 구조물은 Slurry wall (Thickness = 800 mm H = 30.00 m, 35 MPa)로 구성된 토류벽 구조물을 형성하여 강관 버팀 보 공법으로 지하하면서 굴착하였으며, 지보공에는 D406.4×7 및 12 t인 STKT 590 고강도

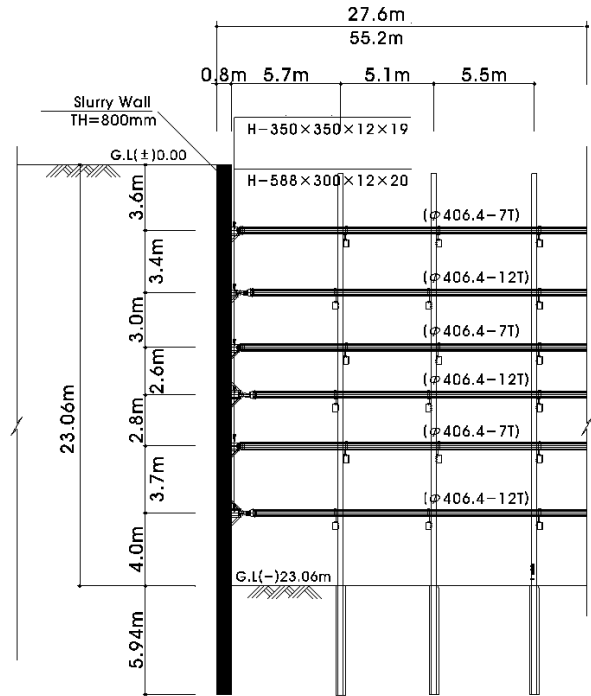


Fig. 4. Idealized Geometry of the Numerical Model



강재가 적용되었다. Fig. 4에서 굴착 깊이는 23.06 m, 강관 버팀보(지보공)의 수평간격은 2.8 m이며, 사보강재 수평간격 2 m이다.

### 3.3 이상거동 시나리오 구성

이상 거동 유발 가능 변수들에 대해 3차원 상세해석으로 정밀 분석을 실시하였다. 기존의 2차원 탄소성보 해석은 기준을 초과하는 응력이 발생할 때, 실제적인 좌굴모드형상을 3차원으로 확인할 수 없는 제약조건이 있다. 먼저 기본하중에 대해 검토하였으며, 이상 거동을 유발하는 과굴착, 충격하중, 추가 상재하중, 버팀보 시간장 등에 대한 비교 분석을 수행하였다. 기본하중조합은 모든 시공단계에 대한 수치해석 접근은 무의미하므로 최종 굴착단계인 굴착고 -23.06 m에 대해 수행하였다. 과굴착 case는 버팀보 6단이 시공되기 전인 5단 버팀보가 설치된 상태에서 최종 굴착면을 -22.06 m (Case II-1), -22.56 m (Case II-2), -23.06 m (Case II-3), -23.56 m (Case II-4)로 나누어 해석하였다. 충격하중 Case는 버팀보 시간 중앙에 면외방향으로 집중하중을 재하하였으며, 그 크기에 따라 85.0 kN (Case III-1), 127.5 kN (Case III-2), 170.0 kN (Case III-3)으로 분류하여 수행하였다. 상재하중은 기본하중에서 수평하중 5.0 kN/m<sup>2</sup> 재하했던 값을 10.0 kN/m<sup>2</sup> (Case IV-1), 20.0 kN/m<sup>2</sup> (Case IV-2)로 구분하였다. 버팀보 시간장 변수해석은 기본하중 시간장인 L = 5.7 m보다 작은 시간장 Case들로만 해석한 탄소성보 해석과 달리 세장비가 큰 장시간의 영향을 보기 위해, 6.84 m (Case V-1), 8.0 m (Case V-2), 9.6 m (Case V-3), 12.0 m (Case V-4)로 비교하였다(Table 3). 또한, 경향을 보기 위한 해석이므로 이음강관에 대해서만 수행하였다. 그리고, 버팀보 시간장 Case를 제외하고 모든 Case들에 대해 통관과 이음강관으로 비교 검토를 수행하였다.

## 4. 3차원 유한요소 구조해석

### 4.1 해석 모델링 및 검증

본 연구에서는 고등유한요소 해석 프로그램인 ANSYS (Lawrence, 2012)를 사용하여 버팀보의 3차원 유한요소 해석을 수행하였다. 3차원 해석을 위해서는 지반과 흙막이 벽체, 흙막이 벽체와 버팀보 사이의 경계조건을 설정해야 한다. 먼저, 지층별 특징을 고려하기 위하여 깊이에 따른 수평지반 반력계수를 적용하였다. 또한, 벽체의 Beam 요소와 강관의 Solid 요소를 결합하기 위해 MPC contact을 사용하였다. 벽체에는 Rotation free조건을 부여하여 하중이 작용하면 탄성체인 콘크리트가 휨 변형이 일어날 수 있도록 하였으며, 중간과일 및 벽체 하단에는 고정 경계조건을 통해서 지지력을 받을 수 있게 설정하였다. 버팀보의 비선형 거동을 고려하기 위해 통관의 경우, 비선형 해석을 위하여 Solid 요소를 사용하여 모델링 하였다. 연결부를 가진 강관의 경우 상대적으로 취약한 이음부 특성을 고려하기 위해 연결부분의 강성을 조절하였다. 동일한 Solid 요소를 대신하여 이음부는 Body beam 요소를 통한 connection을 설정하였다(Fig. 5 참조). 이음부 성능저하는 탄성계수(E)와 전단탄성계수(G)를 조절하여 고려하였는데, 재료의 비선형특성을 반영하기 위해 고강도인 STKT 590 강관 소재에 대한 KS 인장시험결과인 Table 4를 참고하여 항복강도를 선정하였다. 7 mm 강관의 경우 평균 580 MPa이상 확보하고 있다. ANSYS 프로그램에서 적용한 재료물성치는 질량 7,850 kg/m<sup>3</sup>, 탄성계수 210 GPa, 프아송비 0.3, 체적탄성계수 175 GPa, 전단탄성계수 80 GPa이다. 이에 대한 소성모델은 Bilinear isotropic hardening 모델을 적용하였으며 강종별로 도시하면 Fig. 6과 같다.

Table 3. Assumptions for Abnormal Behaviors Occurred at High-Strength Steel Strut Structures

Case	Load combination	Comment
I	Basic load combination: Dead load + Live load + Temperature effect (12 °C) + Soil pressure + Hydraulic pressure	Final excavation stage (Depth = 23.06 m)
II	Basic load combination + Excessive excavation ( II -1, II -2, II -3)	Before 6th strut setting
III	Basic load combination + Impact load ( III -1, III -2, III -3)	Impact load toward out-of-plane
IV	Basic load combination + Additional overburden load (IV -1, IV -2)	-
V	Basic load combination + strut length ( V -1, V -2, V -3, V -4, V -5)	-

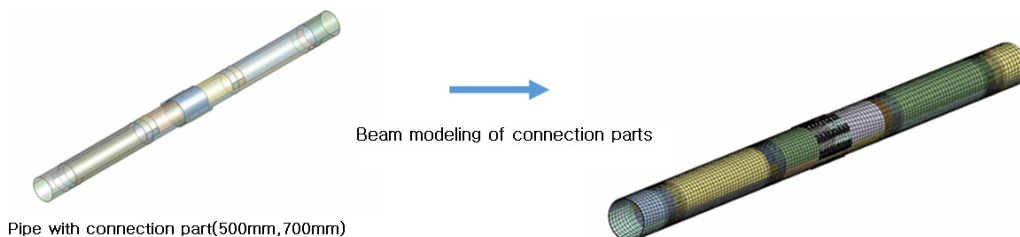


Fig. 5. Beam Model for Separated Struts

Table 4. Result of Tension Tests for STKT590

Test cases		Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
6.7 mm	1	589	626	29
	2	582	619	28
	3	592	628	28
	Ave.	587	624	28
11.7 mm	1	494	598	33
	2	485	595	34
	3	495	596	33
	Ave.	491	596	33

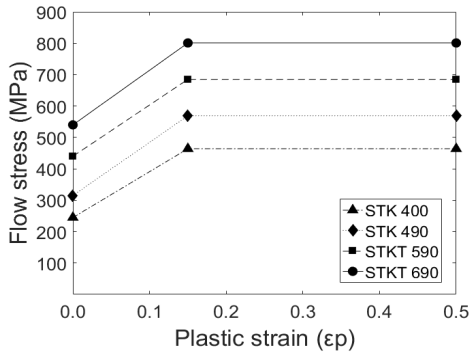


Fig. 6. Bilinear Isotropic Hardening of Separated Struts

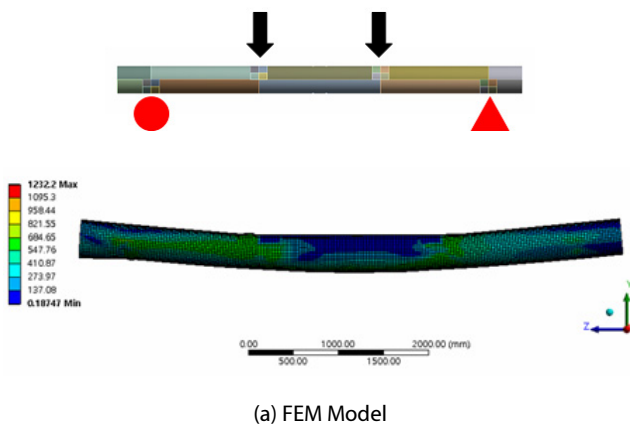
휨모멘트와 중앙변위 시험결과를 만족하도록 같은 강관제원, 시간, 하중 값으로 Fig. 7과 같이 단순보로 재하 실험을 수치해석 모델로 구현하여 반력을 통한 강관과 이음부 강관의 비선형 해석을 수행하였다. 이음부에서 사용한 Beam 요소에 적합한 스프링 값을 산정하기 위하여 Fig. 8(b)과 같이 이음강관의 시험결과에서 나타난 모멘트와 처짐곡선과 동일한 결과가 수치해석 결과값에서도 나오도록 반복해석을 통해 작은 재료 물성치를 적용함으로써 실제 실험에서 보였던 성능저하를 모사하였다. Fig. 8의 휨성능 실험에 의한 하중-변위 곡선에서 탄성영역인 직선 구간을 측정된 결과 34 mm 변위이하에서 탄성영역으로 판정되어 34 mm 변위를 횡강

성 측정기준으로 설정하였다. 보정모델을 적용한 해석결과, Figs. 8(a)와 (b)를 비교하면 실제 실험과 휨모멘트-변위 곡선이 유사하므로 연결부를 고려하기 위한 강성값이 적정함을 알 수 있다.

## 4.2 수치해석 예제

### 4.2.1 이상거동 변수 해석

Fig. 9는 기본하중 Case I의 최종굴착고인 23.06 m를 굴착한 시공13단계에서의 통관과 이음강관에 대하여 축방향(x), 연직방향(y), 면의 방향(z)에서의 변형을 보여준다. 이음강관이 통관에 비해 2.3배 정도 x 및 y방향에서 큰 값을 확인할 수 있다. Fig. 10은 버팀 보에 발생하는 최대 압축응력 및 휨응력을 보여준다. 특히, 통관의 휨응력은 2차원 해석과 유사한 값을 나타내고 있으며, 이음강관에서는 1.9배 더 큰 응력값을 확인할 수 있다. 압축응력의 경우는 2차원 해석값의 86 % 정도 수준을 나타내고 있다. 또한, 압축응력이 통관에 비해 이음강관이 낮은 이유는 축방향 강성의 저하로 인해 이음부가 휘는 변형이 발생하므로 상대적으로 축하중을 덜 받게 되는 것이 원인이라 판단된다. 같은 이유로 Table 5의 Case I과 같이 이음강관의 휨응력 발생값이 더 큰 것을 알 수 있다. 과굴착 Case는 6단 버팀 보가 시공되기 전 단계에서 최종 굴착면이 -22.06 m (CaseII-1), -22.56 m (CaseII-2), -23.06 m (CaseII-3), -23.56 m (CaseII-4)의 4가지 조건에 대하여 5단 버팀 보가



(a) FEM Model



(b) Real Bending Tests

Fig. 7. Model Calibration for Calculating the Equivalent Spring Stiffness

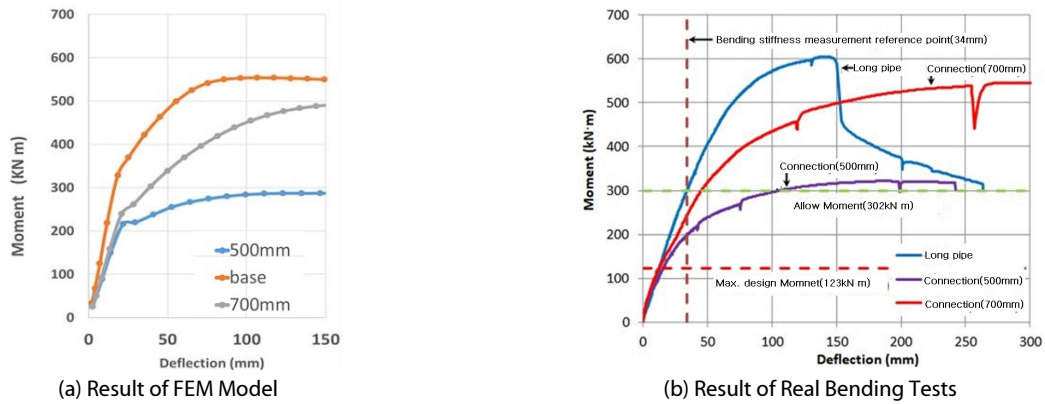


Fig. 8. Comparison between Calibrated FEM Model and Test Model

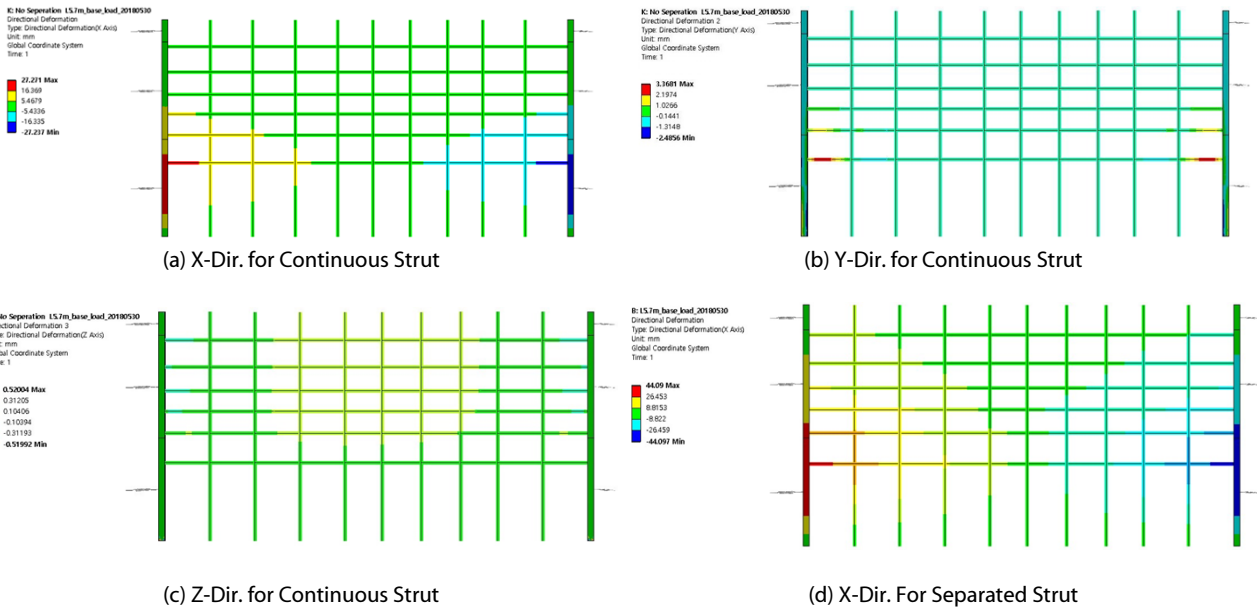


Fig. 9. Deformations of Basic Load Combination (Case I)

도입 등을 부담하고 있는 상태에 대한 해석이다. 해석결과 굴착고가 깊을수록 변위 및 응력값이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 또한, Figs. 11~12 및 Table 5에서와 같이 휨강성 저하된 이음강관의 경우 모든 Case에서 통관의 변형 1.1~1.3배, 휨응력은 1.9배 정도 증가하였으며, 축력은 60 % 정도로 감소하였다.

기본하중 조합과 비교할 경우 과굴착 심도가 증가할수록 버팀 보에 미치는 구조적인 영향으로 변위와 압축응력이 증가한다 (Table 5). 일례로 통관 축방향 변위의 경우 2.1~2.3배, 압축응력의 경우 1.4~1.5배 정도 증가하고 있다. 압축응력이 2배이상 크게 증가하였지만, 허용압축응력에 여유가 커서 면외방향의 휨좌굴변형과 같은 거동은 발생하지 않았다. 다만, 휨응력이 2차원 해석보다 의미있는 값으로 증가하여 이음강관의 경우 국부 좌굴변형 형상이 연직방향으로 나타나기도 하였다.

다음으로 작업시 발생할 수 있는 충격하중에(CaseIII) 대한 3차원 해석을 수행하였다. 최하단 6단 버팀 보 지간 중앙에 면의 방향으로 집중하중을 재하하였으며, 그 크기에 따라 85 kN (CaseIII-1), 127.5 kN (CaseIII-2), 170 kN (CaseIII-3)으로 나눠서 해석을 수행하였다. 해석결과 모든 Case에서 이음강관이 X변형의 2.7~3.1 배, Y변형 2.5~2.9배, Z변형 3.0~3.3배, 휨응력은 1.5배 정도 증가하였다. 특히, 면의 방향 변형은 2차원 해석에서는 고려하기 힘든 부분이었는데, 3차원 해석을 통해 매우 큰 변형값이 발생함을 알 수 있다. 통관의 경우 83.8~166.6 mm, 이음관의 경우 276.3~504.1 mm의 Z방향 변형이 발생하여 좌굴현상을 쉽게 알 수 있었다(Figs. 13~14, Table 6 참조). Table 6으로부터 기본하중 조합과 비교할 경우 면의 방향으로 z방향으로 변형값이 크게 발생하고, 그에 따라 휨응력이 크게 증가되었다. 따라서, 현장 시공 중에

이상거동 변수 기반 고강도 강관 가시설 시스템의 구조 안정성

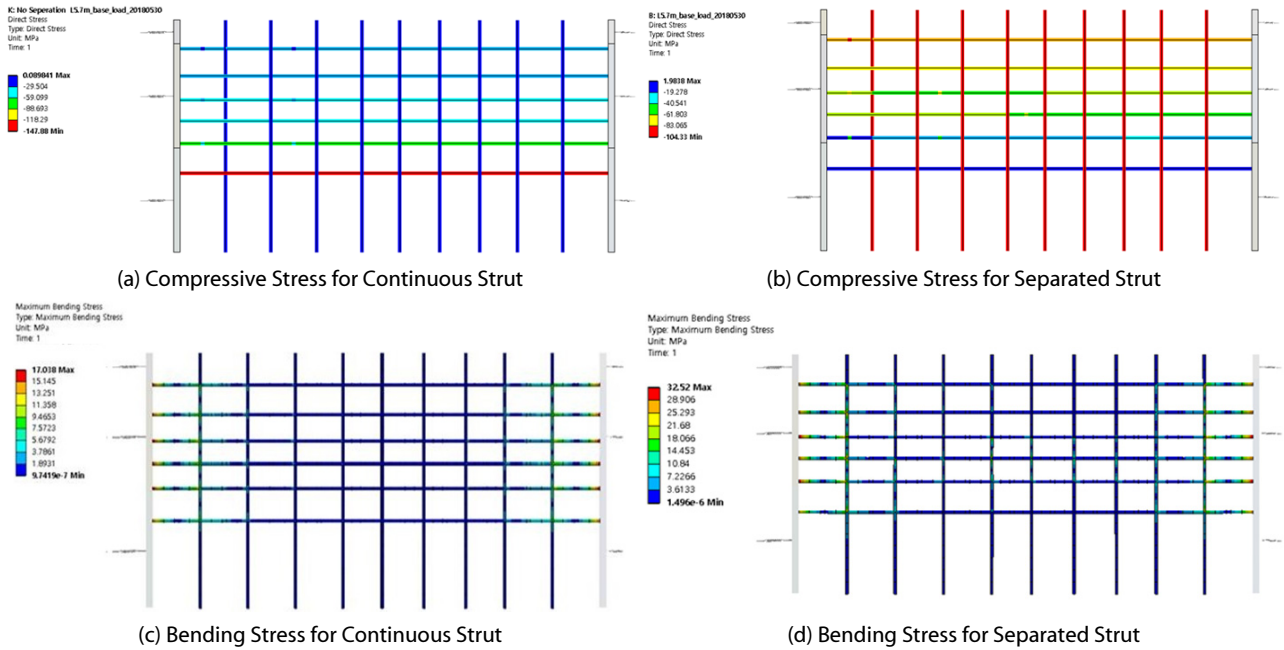


Fig. 10. Stresses of Basic Load Combination (Case I )

Table 5. Results for Cases I and II

Case	Displacements and Stresses		Continuous Strut		Separated Strut	
			Min	Max	Min	Max
I	Displacement (mm)	X-direction	-27.237	27.271	-44.097	44.090
		Y-direction	-2.486	3.368	-3.413	5.314
		Z-direction	-0.520	0.520	-0.797	2.801
	Compressive stress (MPa)		-147.880	0.090	-104.330	1.984
Bending stress (MPa)		-17.038	17.038	-32.520	32.520	
II-1	Displacement (mm)	X-direction	-57.672	57.712	-68.694	68.605
		Y-direction	-4.294	8.407	-4.705	15.328
		Z-direction	-0.002	0.002	-0.002	0.002
	Compressive stress (MPa)		-205.57	2.9298	-124.54	7.1114
Bending stress (MPa)		-17.738	17.738	-33.994	33.994	
II-2	Displacement (mm)	X-direction	-59.063	59.103	-79.087	78.784
		Y-direction	-4.4256	8.5912	-5.3652	18.213
		Z-direction	-0.002	0.002	-0.002	0.002
	Compressive stress (MPa)		-208.300	3.020	-128.900	8.3918
Bending stress (MPa)		-17.950	17.950	-34.441	34.441	
II-3	Displacement (mm)	X-direction	-60.300	60.341	-80.519	80.184
		Y-direction	-4.545	8.753	-5.494	18.597
		Z-direction	-0.002	0.002	-0.002	0.002
	Compressive stress (MPa)		-210.680	3.098	-129.56	8.564
Bending stress (MPa)		-18.127	18.127	-34.820	34.820	
II-4	Displacement (mm)	X-direction	-61.300	61.341	-81.693	81.315
		Y-direction	-4.644	8.882	-5.599	18.904
		Z-direction	-0.002	0.002	-0.002	0.002
	Compressive stress (MPa)		-212.550	3.159	-130.070	8.699
Bending stress (MPa)		-18.279	18.279	-35.144	35.144	



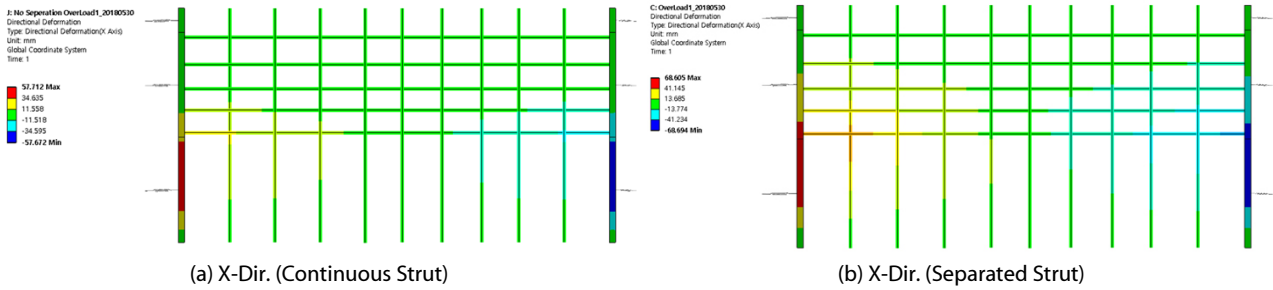


Fig. 11. Deformations of Over-Excavation Combination (Case II -1)

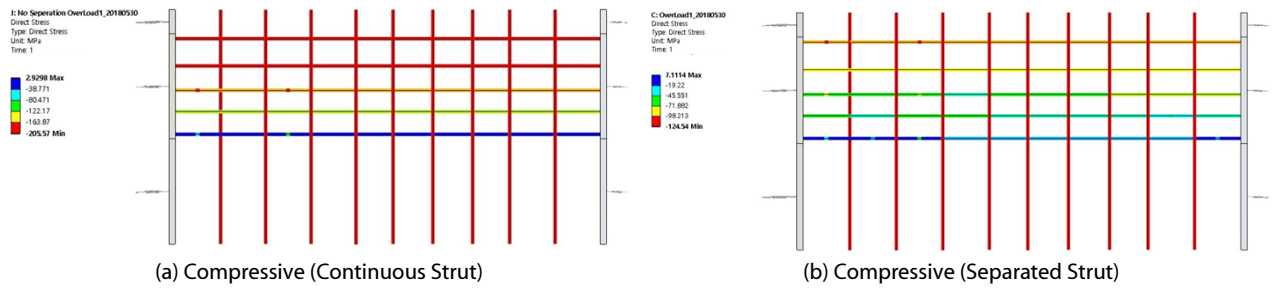


Fig. 12. Stresses of Over-Excavation Combination (Case II -1)

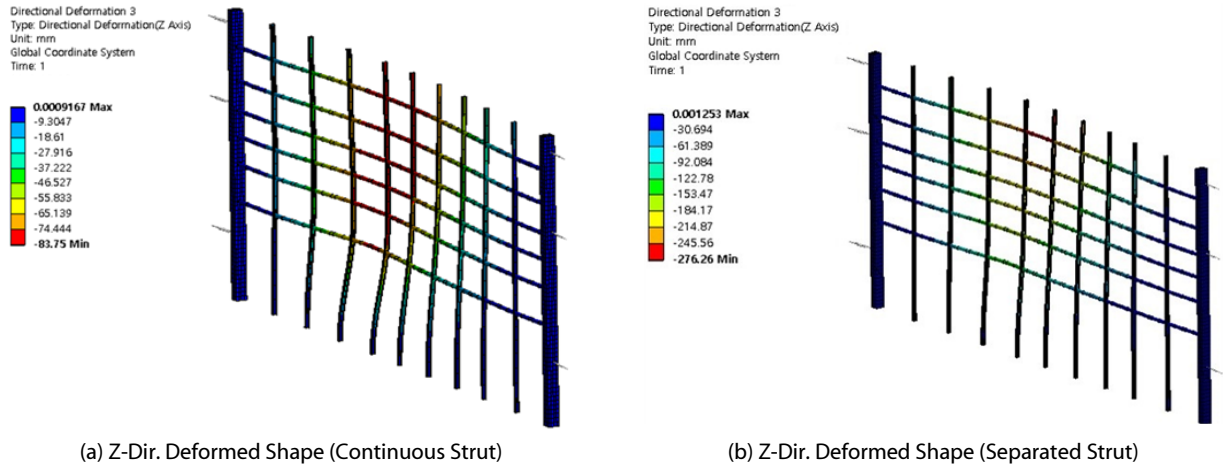


Fig. 13. Deformations of Impact Load Combination (Case III-1)

버팀 보에 가해지는 충격하중은 앞서 정의한 좌굴 휨변형과 같은 이상 거동의 원인임을 알 수 있다. Table 7은 Case IV인 상재하중에 대한 해석 결과를 요약한 것이다. 기본하중에서는 배면의 연직하중 10.0 kN/m<sup>2</sup>를 정지토압계수를 고려하여 수평하중 5.0 kN/m<sup>2</sup>를 재하하였다. 그 값을 할증하여 10.0 kN/m<sup>2</sup> (CaseV-1), 20.0 kN/m<sup>2</sup> (CaseIV-2)로 구분하였다. 해석결과 기본하중에 대비해서는 변위가 3%, 응력은 1% 정도 미소하게 증가하였다. 또한, 이음강관이 변형 1.6배 증가, 압축응력은 0.7배 감소함을 알 수 있다. 따라서 상재하중의 경우는 이상 거동 발생에 큰 영향을 주지 않는 것으로 분석되었다.

#### 4.2.2 최대응력 2차원해석결과 비교

본 절에서는 3차원 수치해석과 동일한 시공단계(과굴착 및 충격 하중)에서 탄소성보해석의 최대 압축응력 발생 값과 비교하였다. Fig. 15와 같이 전반적으로 3차원 해석결과 값이 상대적으로 작음을 알 수 있다. 과굴착 Case의 경우 3차원 해석값이 2차원 탄소성 보해석에 비해 굴착심에 따른 증가가 거의 없는데, 단순한 수동토압 하중으로 굴착심으로 고려했기 때문이라 판단된다. 이음강관의 응력은 앞서 언급한 대로 버팀보 반력이 증가되면서 압축시험결과에서와 같이 연결부 자체가 축력을 100% 전달하지 못하면서 미소한 휨변형이 발생하여 통관 값에 비해 작은 것으로 판단된다.

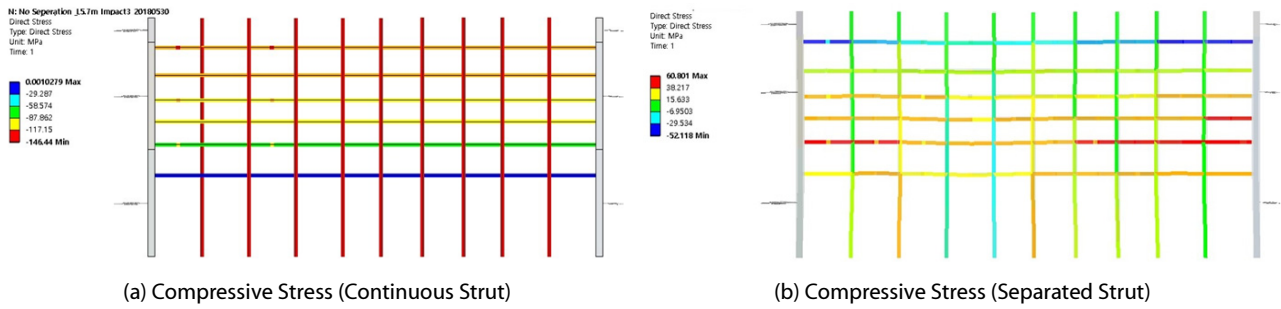


Fig. 14. Stresses of Impact Load Combination (Case III-3)

Table 6. Results for Case III

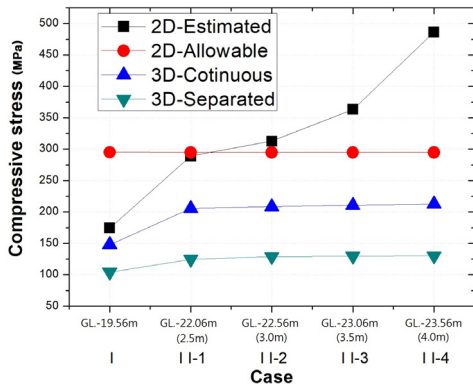
Case	Displacements and Stresses		Continuous Strut		Separated Strut	
			Min	Max	Min	Max
III-1	Displacement (mm)	X-direction	-3.422	3.366	-8.937	9.066
		Y-direction	-0.752	3.087	-2.068	7.790
		Z-direction	-83.750	0.001	-276.260	0.001
	Compressive stress (MPa)		-135.680	2.495	-42.595	0.000
	Bending stress (MPa)		-97.661	97.661	-147.380	147.380
III-2	Displacement (mm)	X-direction	-3.722	3.678	-10.580	10.626
		Y-direction	-1.119	3.341	-3.484	9.050
		Z-direction	-125.330	0.001	-395.170	0.001
	Compressive stress (MPa)		-146.980	0.001	-53.162	53.416
	Bending stress (MPa)		-146.290	146.290	-218.240	218.240
III-3	Displacement (mm)	X-direction	-4.138	4.112	-12.744	12.669
		Y-direction	-1.627	3.693	-5.573	10.726
		Z-direction	-166.560	0.001	-504.050	0.001
	Compressive stress (MPa)		-146.440	0.001	-52.118	60.801
	Bending stress (MPa)		-194.670	194.670	-293.050	293.050

Table 7. Results for Case IV

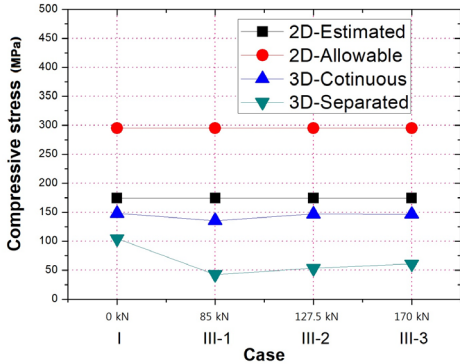
Case	Displacements and Stresses		Continuous Strut		Separated Strut	
			Min	Max	Min	Max
IV-1	Displacement (mm)	X-direction	-27.912	27.946	-45.904	45.906
		Y-direction	-2.546	3.437	-3.528	5.433
		Z-direction	-0.002	0.002	-0.002	0.002
	Compressive stress (MPa)		-151.880	0.075	-104.930	2.082
	Bending stress (MPa)		-28.587	28.621	-47.791	47.805
IV-	Displacement (mm)	X-direction	-2.606	3.505	-3.679	5.503
		Y-direction	-0.002	0.002	-0.002	0.002
		Z-direction	-155.880	0.061	-105.480	2.161
	Compressive stress (MPa)		-146.980	0.001	-53.162	53.416
	Bending stress (MPa)		-146.290	146.290	-218.240	218.240

충격하중의 경우 버팀 보 압축응력은 탄소성해석이나 3차원 통관 수치해석의 결과값이 거의 유사하였다. 다만, 모두 허용압축응력 값 이내이지만 z방향 변위형상에서 보듯이 휨응력이 크게 발생하게 되므로 조합응력측면에서 면의 방향으로 휨좌굴과 같은 이상 거동이 발생함을 알 수 있다. 2차원 탄소성보해석결과와 비교하면,

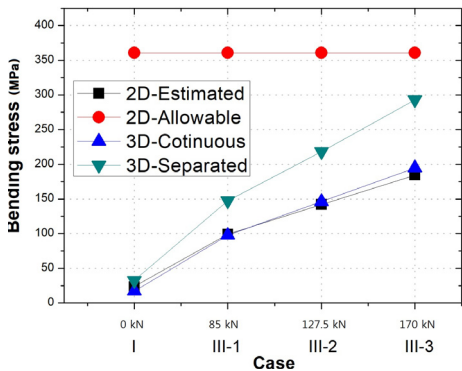
Fig. 15(c)와 같이 기본하중조합에서는 휨응력이 유사했으나, 충격 하중 Case에서는 가시설 구조체의 복합적 거동에 의해 더 큰 휨응력값이 발생하였다. 또한, 그림에서 제시한 허용응력기준치는 신 강재 사용을 기본으로 하여 설계기준에서 구한 값을 1.5배 할증하게 되므로 실제 현장에서는 더 작은 압축응력 상태에서도



(a) Compressive Stresses : Over-Excavation Cases



(b) Compressive Stresses : Impact Load Cases



(c) Bending Stresses : Impact Load Cases

Fig. 15. Stresses Comparison of 2-D and 3-D Analysis for Each Combinations

이상 변형이 발생할 수 있다.

버팀 보 지간장 변수해석은 이음강관 모델을 기본으로 6.84 m (Case V-1), 8.0 m (Case V-2), 9.6 m (Case V-3), 12.0 m (Case V-4)로 비교하였다. 해석결과 지간장이 증가할수록 축력이 증가하여 최대 18.6 MPa로서 약 1.2배 증가하였다. 축방향 변위의 경우 외력이 유사하므로 거의 유사함을 알 수 있다. 이러한 경향은 탄소성 보해석에서도 유사하게 나타났다. 다만, 굴착폭을 고정된 상태로 지간장 간격을 분할하였기 때문에, 일부 부등 간격으로 중간말뚝이 배치되어 지간장 증가에 따른 선형적인 결과 값은 도출하지 못하였

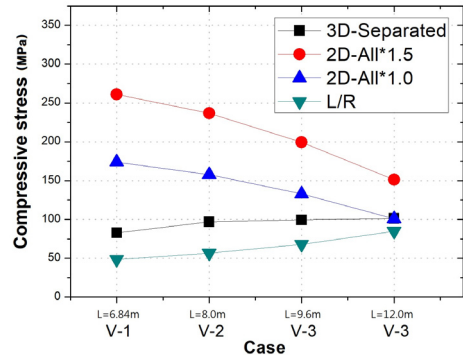


Fig. 16. Comparing Compressive Stresses of Various Strut Length (Case V)

다. 또한, 고강도 재료 특성상 장지간에 유리한 구조이므로, 지간장이 늘어나도 설계기준을 크게 벗어나지는 않고 있음을 알 수 있다. Fig. 16은 버팀 보 지간장 해석에서 압축응력 결과값을 세장비와 설계기준의 압축 허용응력값(100 % 및 150 %)과 비교한 것이다. 세장비가 증가할수록 발생 압축 응력값은 커지고 허용 압축응력값은 작아지는 것을 알 수 있다.

## 5. 요약 및 결론

본 논문에서는 지반굴착 가시설 일부 현장에서 발생하고 있는 고강도 강관 버팀 보의 휨변형 또는 좌굴변형과 같은 이상 거동을 정의하고 강관 버팀 보 구조의 연결부 변화에 따른 실험 휨 성능시험을 수행하였다. 또한, 수치적으로 분석 가능한 유발 인자들에 대한 이상 재현 시나리오 구성 후, 구조 해석 및 단면검토를 통하여 각 Case에 대한 성능평가를 실시하였다. 이상거동 유발인자는 과굴착 심도, 충격하중, 추가 상재하중, 버팀 보 지간장 등으로 설정하여 3차원 구조해석을 수행하였으며, 2차원해석과 비교하였다. 본 연구에서 수행한 고강도 강관 버팀 보 가시설 시스템의 구조성능평가를 위한 해석 결과 및 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 강관 버팀보의 연결부 변화에 따른 휨 성능 시험 결과, 보조구보다는 볼트연결이, 볼트연결보다는 2가지를 조합한 보강방안이 휨 성능에 대하여 유리하였다. 각종 보강방안들이 기존의 표준 연결부속보다는 휨 성능이 향상되었지만, 통관의 성능과 비교했을 때 변위 50 mm일 때의 하중 값이 18~30 % 수준으로 차이가 크게 나타났다. 종합적으로 강관 버팀 보상에 이음부 설치개소가 많다면 휨 성능이 저하되어 이상 거동을 유발할 수 있는 하나의 인자임을 알 수 있었다.
- (2) 3차원 유한요소해석 결과, 과굴착의 경우 기본하중에 비해 응력 및 변형이 크게 증가하였다. 또한, 면외방향으로 가해지는 충격하중의 경우 3차원 해석결과를 통해 보듯이 버팀 보에

큰 좌굴변형거동으로 이어짐을 알 수 있었다. 이음강관의 경우 면의 방향으로 276~574 mm 범위가 발생하였다. 따라서, 시공 현장에서는 이러한 작업시 충격하중이 발생하지 않도록 유의해야 한다. 상재하중의 경우 2차원 해석값과 유사하게 미소한 증가로 큰 영향은 없었다.

- (3) 고강도 강관 버팀 보의 실제 시간장 변수해석을 고려한 탄소성 보해석 및 3차원 유한요소해석결과에서도 12 m까지 시간을 늘렸을 경우, 안전율 1.0 정도로서 축력이 증가해도 고강도 강재가 가진 재료적인 압축성능으로 인해 설계기준을 만족하고 있음을 알 수 있었다. 다만, 일반적으로 해석 및 설계조건에서는 시간장이 중간말뚝에 정확히 고정되는 조건으로 검토하게 되나, 실제 현장에서는 시공오차 및 구속조건 등으로 해석적인 가정과 동일한 경계조건이 100 % 부합되기 어렵다. 따라서, 광폭현장의 장시간 버팀 보 계획시 X-브레이싱재 또는 종방향 받침보의 촘촘한 연결 등 적절한 강성의 단면계획이 실무적 관점에서 필요한 것으로 판단된다.
- (4) 현장에서 필연적으로 시공되는 강관 버팀 보 연결 이음부에 대한 성능저하현상을 시험결과 및 수치해석결과에서 확인할 수 있었다. 연결부를 갖는 이음강관의 휨성능이 통관에 비해 53 % 수준으로서 현저히 낮았고, 국부적인 변형에 영향을 주고 있었다. 따라서, 이음부 위치를 최대한 구속이 가능하도록 중간파일에 가까이 계획하거나, 설계단계에서 연결부로 인한 응력저감을 고려한 상세 설계기준의 보완이 요구된다. 또한, 이음부 보강방안에 대해 시공성 및 경제성의 실무적 관점을 통해 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구에서 제시한 고강도 강관 버팀보의 이상 거동인자별 해석 결과는 건설안전에 대한 사회적 기대치가 올라가는 현 시점에서 사전에 이상 거동을 방지하기 위한 설계단계에서 실무계획과 건설시장의 다양한 소재 확대 차원에서 고강도 강재의 적용을 위한 시공계획의 참고용으로 충분히 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 향후, 실제 가시설 현장에서 부재간의 접속부 경계조건(힌지, 고정, 스프링 등)과 지반상호작용을 고려한 수치해석 및 다양한 현장조건에서 계측시스템 활용을 통한 고강도 강관 버팀 보 부재에 발생하는 부재력과 변형에 대한 검증과 보완하는 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 (주)포스코의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## References

- Choi, M. G., Lee, J. S. and Song, C. Y. (2007). "Applicability of a steel pipe support system for a temporary braced cut." *Proc. of the KSCE Conf.*, KSCE, pp. 2724-2727 (in Korean).
- Choudhury, S. S., Deb, K. and Sengupta, A. (2013). "Estimation of design parameters for braced excavation: numerical study." *International Journal of Geomechanics*, Vol. 13, No. 3, pp. 234-247.
- Jeong, S. S. Kim, Y. H. and Kim, M. M. (2011). "Failure case study of tieback wall in urban area" *Intrnational Symposium on backwards problem in geotechnical engineering and monitoring of Geo-Construction*, pp. 1-7.
- Jung, S. I., Kang, B. M., Jeon, S. J. and Han, M. Y. (2012). "Study on design optimization for high strength steel pipe strut." *Proc. of the KSCE Conf.*, KSCE, pp. 519-522 (in Korean).
- Kent, L. L. (2012). "ANSYS Tutorial Release 14" Schroff Development co.
- Kim, K. L., Kim, Y. S. and Kim, S. S. (2013). "A study on securing safety through behavior analysis of earth retaining wall." *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 12, No. 4, December, 2013 pp. 11-19 (in Korean).
- Kim, S. Y., Whang, S. W., Lee, Y. D., Shin, Y. S. and Kim, G. H. (2017). "Comparison of high-strength steel pipe and H-shaped steel in the strut of a braced wall system." *Building Structures and Materials*, Vol. 16, No. 1, pp. 179-184.
- Kim, Y. M., Hong, C. P. and Jeong, Y. S. (2003). "Behavior of earth retaining walls for deep braced excavation and removal strut." *Proc. of the KSCE Conf.*, KSCE, pp. 3796-3799.
- Lee, J. W., Noh, M. H. and Lee, S. Y. (2018). "In-plane behaviors of high-strength steel pipe struts under abnormal behaviors." *Journal Korean Soc. Adv. Comp. Struc.*, Vol. 9, No. 2, pp. 64-71 (in Korean).
- Lim, S. H., Han, M. Y., Kim, S. B. and Jeon, S. J. (2014). "Buckling analysis of earth retaining support used by PHC Pile Struts." *Proc. of the KCI Spring Conf.*, KCI, pp. 1-2 (in Korean).
- Na, S. M., Lee, J. G. and Lee, Y. J. (2008). "A case study on high strength steel pipe strut in the domestic and foreign areas." *Korean Geotechnical Society Magazine*, Vol. 24, No. 3, pp. 34-43 (in Korean).
- Park, J. B., Park, Y. B., Shim, Y. J. and Im, H. S. (2012). "Development of a construction risk maintenance of the bracing-free type strut system." LHI, Land & Housing Institute (in Korean).
- Yang, G. S. and Kim, M. M. (1997). "Analysis of perimetrical ground settlement behavior for deep excavations in urban areas." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 13, No. 2, pp. 101-112 (in Korean).
- Yoo, C. S., Na, S. M., Lee, J. G. and Jang, D. W. (2010). "Numerical investigation on the behavior of braced excavation supported by steel pipe struts." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, No. 6, pp. 45-56 (in Korean).