

프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조의 단면효율성 개선 방안

윤수로^{1,2} · 김상효^{3,4} · 하민균⁵ · 안진희^{6*}

¹박사과정, 연세대학교, 건설환경공학과, ²사원, ㈜브릿지테크놀로지, ³명예교수, 연세대학교, 건설환경공학과, ⁴대표, ㈜이노스텍, ⁵박사후 연구원, 경상국립대학교, 건설시스템공학과, ⁶교수, 경상국립대학교, 건설시스템공학과

Improvement Method of Section Efficiency for Prestressed H-Shaped Steel Composite Rahmen Structure

Yoon, Suro^{1,2}, Kim, Sang-Hyo^{3,4}, Ha, Min-Gyun⁵, Ahn, Jin-Hee^{6*}

¹Ph.D Student, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, Korea

²Staff, Bridge Technology Inc., Hanam, 12925, Korea

³Professor Emeritus, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, Korea

⁴CEO, Innostec Inc., Hanam, 12925, Korea

⁵Postdoctoral Researcher, Dept. of Civil and Infrastructure Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea

⁶Professor, Dept. of Civil and Infrastructure Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea

Abstract - In this study, a prestressed composite rahmen structure using H-shaped steel was proposed to improve the cross-sectional efficiency of rahmen structures. The cross-sectional efficiency of the H-shaped steel and shear connectors was analyzed to achieve this goal, and an appropriate cross-section for the rahmen structure was developed. The construction process for the prestressed composite rahmen structure using H-shaped steel was also developed. The proposed construction process was used to fabricate a structural specimen, and a loading test was conducted. Based on the loading test results, the load-resistant behavior of the prestressed composite rahmen structure using H-shaped steel was evaluated as the load increased. Additionally, the effect of prestressing was examined through structural analysis, and the load-resistant behavior was compared and evaluated against the loading test results.

Keywords - Composite rahmen structure, Prestressing, H-shaped steel, Loading test, Structural analysis

1. 서론

라멘교(Rahmen bridge)는 하천이나 도로를 횡단하기 위하여 많이 설치되고 있는 교량형식으로 거더와 하부구조의 접합부가 철근이나 강재로 강결되고, 강결된 연결부에 콘크리트 등을 타설하여 일체화된 구조를 구성하고 있다^{[1]-[3]}. 라멘교 중 강합성 라멘교는 일반적인 강합성 거더교와 달리 유지관리의 주요 요소인 교량받침과 신축이음의 생략되어 유지관리 및 구조적 장점을

가지고 있다^{[4],[5]}. 일반적으로 강합성 라멘교의 경우 거더 및 가로보 등의 부재에 H형강을 적용하여 시공하고 있으나, H형강이 적용된 강합성 라멘교의 경우, 배면 콘크리트나 교대 상부의 콘크리트에 균열이 발생하여 내구성이나 사용성이 떨어지는 문제가 나타날 수 있다^[6]. 따라서, H형강이 사용된 합성형 라멘구조의 단면효율성을 개선하여 적용가능한 시간장을 확대하고, 교대 상부 및 배면 콘크리트부의 균열을 억제하기 위한 방법 등이 고려될 필요가 있다.

합성형 구조의 단면효율성을 개선하기 위한 연구로는 U형 합성보, H형강으로 보강된 강-콘크리트 합성구조 등 다양한 합성형 구조를 제안하고 구조적 성능을 평가하는 연구들이 진행되었다^{[7]-[9]}. 합성형 라멘구조에 관한 연구는 RC 라멘교와 플레이트 거더교의 특성을 조합하여 합성형 라멘구조의 구조적 효율성을 향상시키고, PS 강봉에 긴장력을 도입하는 시공방법을 분

Note.-Discussion open until June 30, 2025. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 13, 2024; revised on November 28, 2024; approved on November 29, 2024.

Copyright © 2024 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-55-772-3293 Fax. +82-55-772-3209

E-mail. jahn@gnu.ac.kr

석하여 교량 단부의 구조적 효율성을 증가시키기 위한 연구가 진행되었으며^[10], PS 강봉으로 일체화된 교량의 거더-교대 접합부의 거동 및 일체화 성능을 검토하기 위하여 하중저항성능과 사용성을 평가하는 연구가 진행되었다^[11]. 또한, 하단힌지 강합성 라멘교에 대한 휨 실험으로 거더의 처짐과 교대벽체의 휨모멘트 분포와 구조적 거동을 검토하여 하단힌지 강합성 라멘교의 하중저항성능과 기초의 휨모멘트 감소효과를 확인하는 연구가 진행되었다^[12].

본 연구에서는 H형강이 사용된 합성형 라멘구조의 단면효율성을 개선하고, 교대 배면 콘크리트부의 균열 발생을 개선하기 위한 방법으로 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조를 제안하고, H형강과 전단연결판의 높이를 증가시켜 단면 효율성을 개선하는 방법을 분석하였다. 이를 위하여 현재 사용되고 있는 H형강과 전단연결판의 유효높이에 따른 합성형 라멘구조에 적용하였을 때 얻을 수 있는 단면효율성을 분석하여 적절한 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조의 단면을 분석하였다. 또한, 본 연구에서 분석된 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조에 대한 구조해석과 하중재하실험을 진행하여 프리스트레싱 도입 효과와 하중저항거동을 평가하였다.

2. 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조

2.1 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조 개요

합성형 라멘구조는 하단이음재를 벽체하단 힌지연결부로 적용하고, 상부거더인 프리플렉스 합성형 부재를 교대와 중앙 거더를 연결하는 강형에 얹는 방식을 이용하여 가설 및 모멘트 연결 후, 벽체와 강결하는 공법 등이 일반적으로 사용되고 있다^[13]. 이와 비교하여 본 연구에서 제안한 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조는 교대 배면 콘크리트부에 발생하는 균열을 억제하기 위하여 라멘교 시공과정을 고려하여 사전에 프리스트레스 효과를 도입한 구조형식이다. 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조는 거더를 H형강으로 공장 제작한 후 현장시공에 대한 공정을 최소화하여 합성형 라멘구조를 형성하고, 사전에 도입된 프리스트레싱력을 제거함으로 합성형 라멘구조에 프리스트레스 효과

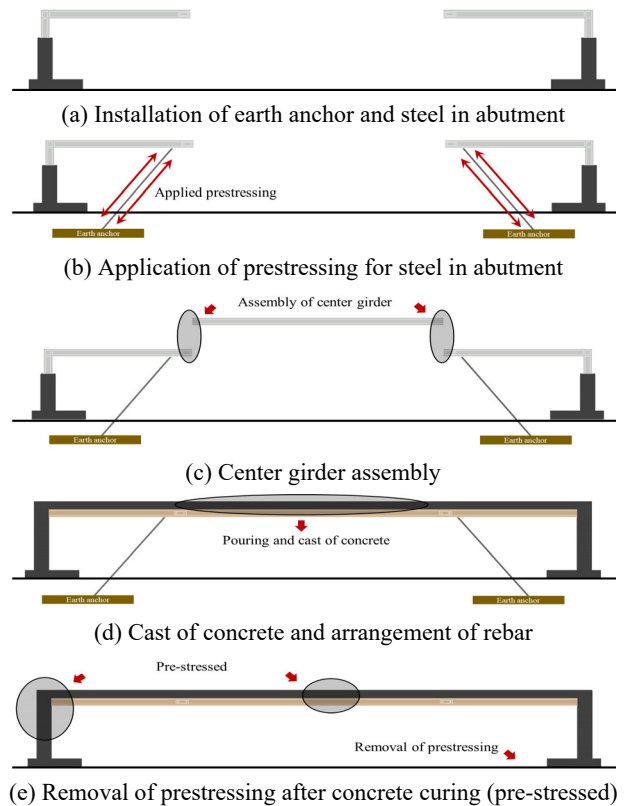


Fig. 1. Construction process of prestressing composite rahmen structure

를 도입하는 구조형식이다. 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조의 개념도는 Fig. 1과 같으며, 시공절차는 총 6단계로 구분된다. 시공절차는 ① 현장에서 교대부 및 강재와 어스앵커 정착부를 설치, ② 교대부 강재에 프리스트레싱 도입, ③ 중앙 거더 조립, ④ 교대부 상부 및 거더부에 철근을 배근하고 콘크리트 타설, ⑤ 콘크리트를 양생시킨 후 교대부 강재의 프리스트레싱 해제와 같은 단계로 시공이 진행된다. 시공단계에서 교대부 강재에 프리스트레싱을 도입하고, 교대부의 콘크리트를 타설 및 양생한 후 도입되었던 프리스트레싱을 해제하면, 교대 상부 및 배면 콘크리트에 초기 프리스트레싱이 도입되어, 사용 중 균열발생을 억제하는 효과가 나타난다. 또한, 라멘교 거더부에 발생한 프리스트레스로 거더부의 하중저항성능도 향상시킬 수 있다.

2.2 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조 적용 단면 검토

프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조의 거더

는 H형강으로 공장제작되며, H형강은 제작할 수 있는 최대 크기가 한정되어 있으므로, H형강을 적용한 합성형 라멘구조는 적용 지간장의 한계가 있을 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 라멘구조의 단면효율성과 시공효율을 증가시키기 위하여 H형강에 전단연결판을 용접하는 기존 작업 외의 추가적인 작업 없이 내하성능을 확보할 수 있는 방법을 검토하였다. 이를 위하여 상용 H형강의 최대 높이보다 더 높은 하중저항성능이 요구되는 경우, H형강의 적용범위를 확대하는 방법을 분석하였다. 또한, H형강에 Y형 perfobond rib형 전단연결재를 가지는 전단연결판을 일체화하여 동일 지간장에서 합성거더의 유효 높이를 증가시키는 방법과 동일 거더 높이에서 적용 지간장을 확대할 수 있는 방법을 분석하였다.

2.2.1 H형강 및 전단연결판 적용범위 검토

현재 상용되고 있는 H형강의 높이는 최대 900 mm이며, 구조물에 작용하는 하중에 따라 거더에 H900(900 × 300 × 16 × 28)를 적용하였을 경우에 비하여 더 높은 하중저항성능이 요구되는 경우가 있을 수 있다. 따라서, H형강에 전단연결판을 연결하여 합성거더의 유효 높이를 증가시킴으로써 강거더의 하중저항성능을 확보하는 방법을 분석하였다. Fig. 2와 Table 1은 H형강 중 최대 높이인 H900 보다 더 큰 하중저항성능을 확보할 수 있는 단면을 나타낸 것으로 H형강과 전단연결재의 크기(전단연결재의 높이를 I로 표시)에 따른 구조성능을 분석하였다. Table 1의 No. 1은 가장 일반적으로 많이 사용되는 H900형강이고, No. 2는 생산되는 최대 H900형강(918 × 303 × 19 × 37)이다. MPR은 단면 대비

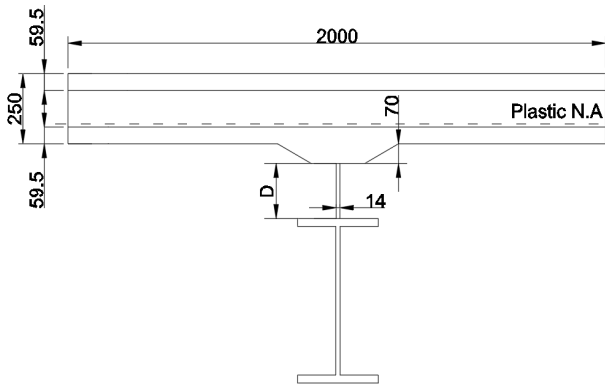


Fig. 2. Composite girder section with connector

Table 1. Details of composite girder with connector

No.	Spec.	P.N.A [mm]	Plastic moment [kN·m]	MPR	MSW	w [kg/m]
1	H900	180.8	7,607.1	1.00	31.30	243
2	Max H900	190.5	9,410.2	1.24	30.65	307
3	H900 + I200	190.5	9,989.6	1.31	37.70	265
4	H800 + I300	180.6	9,467.0	1.24	38.80	244
5	Max H800 + I300	190.5	10,592.9	1.39	38.66	274

소성모멘트 비를 의미하며, 소성모멘트는 도로교설계 기준 한계상태설계법을 참고하여 산정하였다^[14]. MSW는 철골 단위 중량(kg)당 소성모멘트(kN·m)를 의미한다. No. 3 단면은 No. 1 단면에 연결하는 전단연결판의 길이를 200 mm 늘려(I200으로 표기) 높이를 1,100 mm로 만든 것으로 H형강에 전단연결판을 적용한다면 용접량은 유지하면서 높이를 200 mm 늘려 거더의 내하성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. Table 1에 나타낸 것과 같이 No. 3 단면은 No. 1 단면에 비하여 소성모멘트는 31%, MSW는 20% 수준을 향상시킬 수 있는 것을 알 수 있다. No. 4 단면은 H800(800 × 300 × 14 × 26)의 H형강에 높이 300 mm의 전단연결판(I300으로 표기)을 적용하여 높이를 1,100 mm로 고려한 것이며, No. 5 단면은 최대 H800 형강(808 × 302 × 16 × 30)을 사용한 경우이다. 동일한 높이더라도 전단연결판(I)의 길이가 길수록 중립축과 H형강의 상부플랜지의 거리가 멀어져 소성모멘트도 커지고, MSW도 커지는 것을 알 수 있다. 하지만, 전단연결판의 높이를 너무 높게 고려하여 적용하는 경우, 구조에 좌굴이 발생하는 문제가 발생 할 수 있으므로, 적절한 H형강과 전단연결판의 크기를 고려하여 단면 검토를 통해 적당한 길이를 찾아 거더 단면으로 적용하는 것이 필요할 것이다.

2.2.2 합성거더 하중저항성능 향상 방법 분석

앞서 설명한 것과 같이 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조의 거더 높이를 증가시켜 하중저항성능을 향상시키고, 적용범위를 확장하는 방법 이외에도, 합성거더의 유효 높이를 동일하게 유지하면서 하중저항성능을 확보하는 방법으로 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조의 적용 지간장을 확대하는 방법도 고려할 수 있다. 또한, 합성거더 하부에 덮개판을 부착

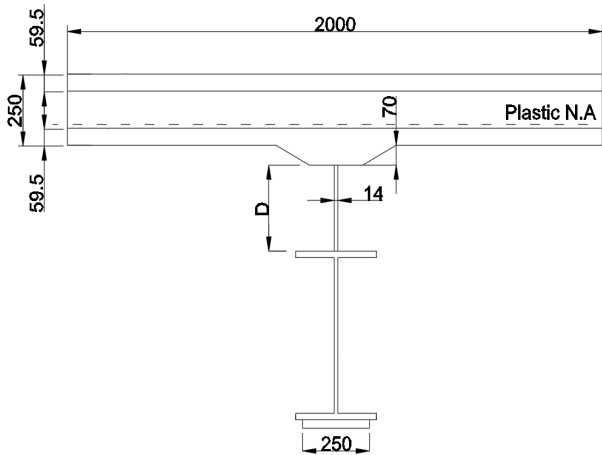


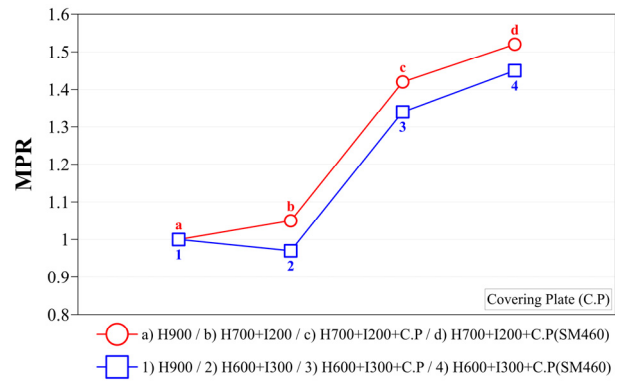
Fig. 3. Composite girder section with connector and covering plate

Table 2. Details of composite girder section with connector and covering plate

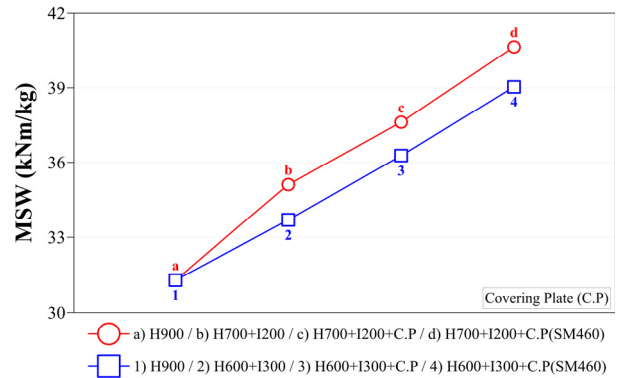
No.	Spec.	P.N.A [mm]	Plastic moment [kN·m]	MPR	MSW	w [kg/m]
1	H900	180.8	7,607.1	1.00	31.30	243
2	H700 + I200	175.3	7,984.8	1.05	33.69	237
3	H600 + I300	154.2	7,373.6	0.97	35.11	210
4	H700 + I200 + C.P	190.5	10,772.7	1.42	36.27	297
5	H600 + I300 + C.P	190.5	10,193.8	1.34	37.62	271
6	H700 + I200 + C.P	190.5	11,595.2	1.52	39.04	297
7	H600 + I300 + C.P	190.5	11,016.3	1.45	40.65	271
8	H500 + I200 + C.P	168.1	7,586.8	1.00	35.96	211

하는 방법도 고려할 수 있다. Fig. 3와 Table 2의 No. 2 – No. 7은 합성거더의 유효높이는 유지하면서 하중저항 성능을 향상시킨 단면들이다. 또한, No. 4 – No. 8은 너비 250 mm, 두께 30 mm의 덮개판(C.P)을 추가적으로 부착한 단면이며, No. 4와 No. 5는 H형강과 동일한 SM355 강종의 덮개판을 부착한 단면이고, No. 6과 No. 7은 SM460 강종의 덮개판을 부착한 단면이다.

Table 2의 단면 No. 1은 일반적인 H900 H형강이고, No. 2는 H700(700 × 300 × 15 × 28)에 I200을 붙여, 높이를 900 mm로 만든 경우이다. No. 3과 No. 5 단면은 H600(600 × 300 × 14 × 23)에 I300을 붙여 높이를 900 mm로 만든 경우이다. No. 1 단면에서 No. 2 단면, No. 3 단



(a) MPR (Plastic moment ratio)



(b) MSW (Plastic moment per kg)

Fig. 4. Comparison of MPR and MSW for same girder height

면이 되었을 때, 소성모멘트는 증가하지 않지만 MSW는 No. 2 단면은 8 % 증가, No. 3 단면은 12 % 증가하여 경제성이 향상된 것을 알 수 있다. 이에 추가적으로 거더 하부에 덮개판(C.P)을 부착한다면 소성모멘트를 더욱 향상시킬 수 있다(Table 2의 단면 No. 4와 No. 5). 추가적으로 부착하는 덮개판을 H형강보다 높은 강도의 강판을 부착한다면 일반 H900 형강 대비 No. 6 단면의 경우 52 %의 소성모멘트 향상, 25 %의 MSW 향상, No. 7 단면의 경우, 44 %의 소성모멘트 향상, 30 %의 MSW 향상을 만들어 낼 수 있다. Fig. 4는 같은 높이에서 단면의 변화에 따라 소성모멘트와 MSW를 그래프로 나타낸 것이다. 같은 높이에서 내하성능의 향상은 시간장의 한계를 확장할 수 있을 뿐만 아니라 경제성까지 확보할 수 있을 것이다.

거더 높이를 동일하게 유지하면서 하중저항성능을 확보하는 방법 이외에도 단면효율성을 증가시킬 수 있는 방법으로 시간장이 동일하다면 거더 높이를 축소시켜 교차공간을 확보할 수 있는 방법이 있다. Table 2의

No. 1과 No. 8 두 단면을 비교하는 경우, 소성모멘트는 유사한 수준이지만, 두 단면의 높이는 상대적으로 약 200 mm의 차이가 있다. 이와 같은 단면을 활용한다면, 거더의 높이는 17 % 낮아지면서 MSW는 15 % 증가하여 교하공간을 확보하고, 경제성을 향상시키는 두 가지 효과를 동시에 확보할 수도 있을 것으로 판단된다.

3. 프리스트레싱 효과 및 하중저항성능 평가

3.1 시험시공 및 하중재하실험

본 연구에서 제안하고 분석된 H형강 단면을 적용한 프리스트레싱 도입 합성형 라멘구조의 하중저항거동을 평가하기 위하여 구조해석 및 하중재하실험을 진행

하였다. 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조의 부재들은 프리스트레싱을 도입하고, 하중이 작용하였을 때 허용응력을 넘지 않는 최소 크기의 H형강을 고려하여 우각부 거더와 중앙부 거더의 크기를 결정하였으며, 구조실험체에 사용된 단면을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a) 단면은 구조실험체에서는 우각부에만 적용되었으며, Fig. 5(b) 단면은 중앙 거더부에 사용되었다(일반적인 라멘교는 우각부 단면이 중앙 거더부까지 동일하게 제작됨). Fig. 5에서 확인할 수 있는 것과 같이 두 단면은 높이는 비슷하지만, Fig. 5(b) 단면의 소성모멘트는 2,781.0 kN·m, MSW는 18.42이며, Fig. 5(a) 단면의 소성모멘트는 4,068.9 kN·m, MSW는 21.76으로 Fig. 5(b) 단면의 소성모멘트는 46% 높고 MSW는 18 % 높은 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 프리스트레싱 도입 합성형 라멘구조를 적용하여 교량을 시공한다면, 같은 높이에서 더 큰 단면의 효율성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

시험시공 및 하중재하 실험을 위한 거더의 H형강은 Table 3와 같이 H588 × 300 × 12 × 20 규격의 SM355A 강종을 사용하였으며, 항복강도는 385 MPa, 인장강도는 520 MPa으로 제작되었다. 우각부의 H형강은 H390 × 300 × 10 × 16 규격의 SM355A 강종을 사용하였으며, 항복강도는 399 MPa, 인장강도는 554 MPa으로 제작되었다. 우각부 철골에 활용된 T형강의 경우, H149 × 201 × 9 × 14 규격의 SS275 강종을 사용하였으며, 항

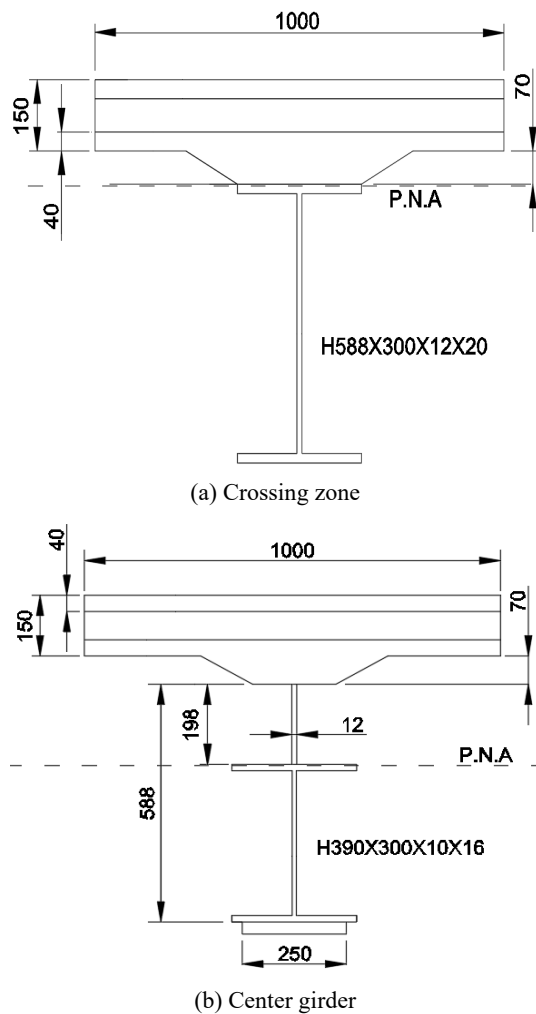


Fig. 5. Cross-section for loading test specimen

Table 3. Steel material properties for structural test and analysis

Standard	Grade	Yield strength [MPa]	Tensile strength [MPa]
H588 × 300 × 12 × 20	SM355A	385	520
H390 × 300 × 10 × 16	SM355A	399	554
T149 × 201 × 9 × 14	SS275	329	475

Table 4. Concrete material properties for structural test and analysis

Location	Compressive strength [MPa]
Foundation	35.9
Abutment	38.8
Slab	34.0

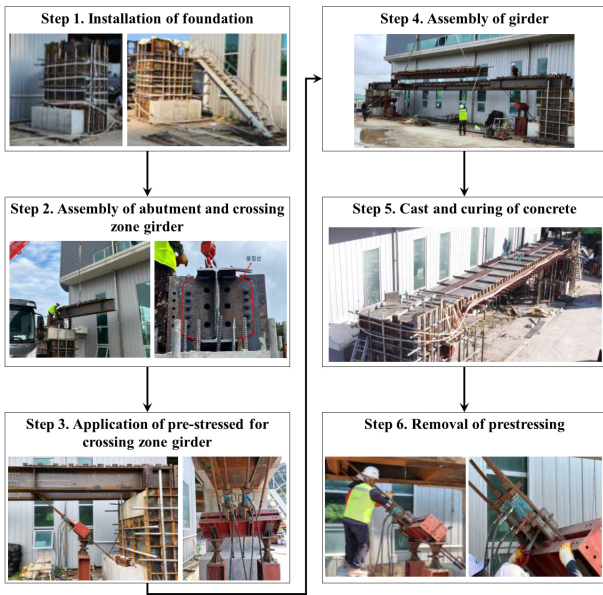


Fig. 6. Construction process of loading test specimen

복응력은 329 MPa, 인장강도는 475 MPa으로 제작되었다. 콘크리트의 경우 Table 4와 같이 교량의 기초, 교대, 슬래브에 대한 목표 압축강도를 35 MPa를 목표로 설계하였으며, 하중재하 실험체 콘크리트 압축강도의 경우, 기초는 38.9 MPa, 교대는 38.8 MPa, 슬래브는 34.0 MPa를 적용하였다.

하중재하실험에 활용된 구조 실험체는 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조의 설계 및 시공절차에 따라 제작하였으며, 실험체의 실제 제작 및 시공과정은 Fig. 6와 같다. 합성형 라멘구조에 적용되고 있는 시공 기술들은 이미 보편적으로 사용되고 있는 기술이므로, 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조에 대한 새로운 시공 절차를 개발하는 것이 아니라 기존 시공절차를 본 구조에도 적용할 수 있도록 변경한다면, 시공을 원활히 진행할 수 있을 것으로 판단하였다. 따라서, 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조에 대한 새로운 시공절차를 Fig. 6와 같이 마련하여 시공절차 검증을 위한 시험시공과 하중재하실험을 진행하였다. 또한, 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조는 콘크리트 타설 이후 양생되기 이전까지 H형강 연결부만으로 하중을 저항하여야 하므로, H형강 연결부를 설계 및 시공할 때에 주의가 필요하다. 이처럼 기존 합성형 라멘구조의 설계 및 시공절차와 차이가 있는 부분은 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조에 적절하게 적용

할 수 있도록 설계 및 시공절차를 수정 및 변경하여야 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3.2 프리스트레싱 도입 방법 및 하중재하

프리스트레싱 도입 방법은 구조실험체의 H형강으로 제작된 거더에 거더와 연결된 강봉, 기초에 연결된 강봉을 고정하고 유압잭을 활용하여 프리스트레싱을 도입하는 방식으로 진행되었다. 프리스트레싱을 도입하기 위한 강봉은 실제 교량 설치현장에서는 거더와 교대 근처의 지반에 고정하여야 하지만, 본 실험현장의 여건상 교대 주변 지반에 강봉을 고정하는 것이 아니라 구조실험체의 기초에 강봉을 고정하여 프리스트레싱을 도입하였다. 프리스트레싱은 최대 490 kN(50.0 tonf)까지 압력을 가할 수 있는 유압프레스를 활용하였으며, 직경 50 mm의 강봉에 프리스트레싱을 도입하였다. 각각당 100 kN의 프리스트레싱을 도입하였으며, 강봉을 정착하고, 콘크리트를 타설하는 과정에서 약간의 손실이 발생하였다. 프리스트레싱 도입강도 수준은 도로교설계기준에 설명되어 있는 기준을 적용하였으며, 구조실험체의 교대와 우각부의 허용응력을 초과하지 않는 수준의 강도로 결정하였다. 구조실험의 하중재하는 Fig. 7과 같이 총 58.8 kN(6.0 tonf)의 하중을 실험체 중앙부에 재하 하였으며, 하중이 14.7 kN(1.5 tonf)이 증가할 때마다 응력 및 변위를 계측하였다.



Fig. 7. Loading test

3.3 응력 및 변위 계측 위치

구조실험은 총 3단계로 나누어서 진행되었다. 1단계는 프리스트레싱을 도입하는 단계로, 우각부와 교대에 발생하는 변형률과 변위를 계측하였다(Loading test step-1). 2단계는 프리스트레싱이 도입된 상태에서 중앙 거더를 조립하고, 슬래브 콘크리트를 타설 및 양생

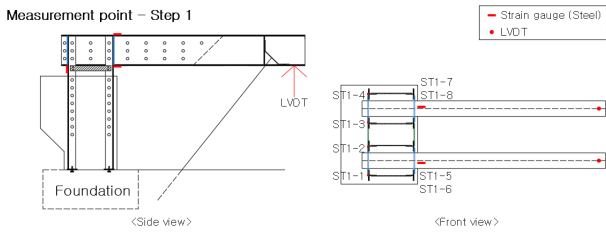
한 후 프리스트레싱을 제거할 때 발생하는 변형률과 변위를 계측하였다>Loading test step-2). 마지막으로 3단계는 구조실험체의 중앙 상부에 하중을 재하하는 단계로, 실험체에 일정 수준의 하중이 발생하였을 경우 발생하는 변형률과 변위를 계측하였다>Loading test step-3).

각 구조실험 단계별 변형률과 변위 계측 위치는 Fig. 8과 같으며, 1단계에서는 H형강 우각부 거더의 상부플랜지와 하부플랜지, 교대와 우각부 거더를 연결하는 부위의 복부판에 변형률 게이지를 설치하였으며, 우각부 거더의 끝부분에 변위계를 설치하여 프리스트레싱을 도입할 때 발생하는 변형률과 변위를 계측하였다. 2단계에서는 1단계 계측위치와 더불어 H형강 중앙 거더의 상부플랜지와 하부플랜지, 철근, 콘크리트 배면, 프리

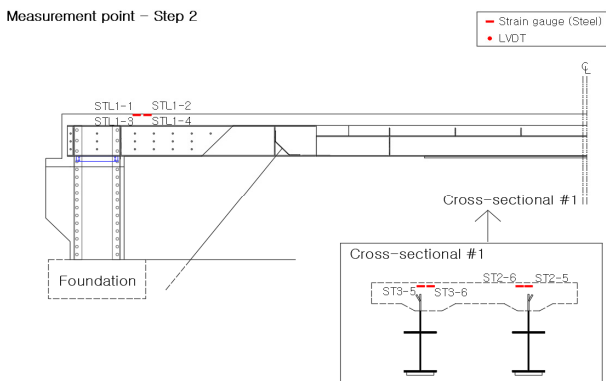
스트레싱을 도입하는 강선에 추가적으로 변형률 게이지를 설치하였으며, 우각부 거더의 변위계를 제거하고 구조실험체의 중앙에 변위계를 설치하여 프리스트레싱을 제거할 때 발생하는 변형률과 변위를 계측하였다. 3단계에서는 교대 뒷부분에 변형률 게이지를 추가적으로 부착하였으며, 변위계는 2단계와 마찬가지로 거더 중앙부에 설치하여 구조실험체 상부에 하중이 작용하는 경우 발생하는 변형률과 변위를 계측하였다. 본 연구의 구조실험에 사용된 실험체는 좌측과 우측이 서로 대칭으로 제작되었으므로, 실험체 좌측과 우측은 동일한 위치를 대상으로 응력과 변형률을 계측하였다.

3.4 시험시공 및 하중재하 실험 구조해석

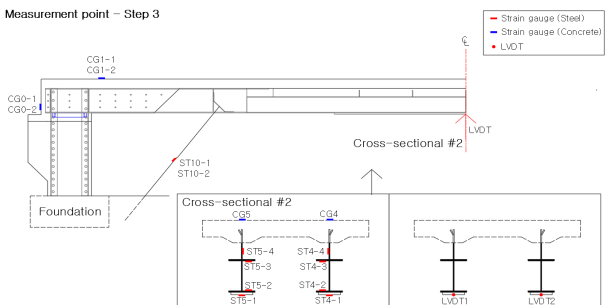
본 연구에서 진행된 하중재하실험 결과와 비교하여 프리스트레싱 도입 합성형 H형강 라멘구조의 하중저항거동을 비교 및 평가하기 위하여 구조해석을 진행하였다. 구조해석모델은 구조해석 프로그램인 MIDAS CIVIL을 활용하여 모델링하였으며, 3차원 솔리드 육면체 요소를 적용하였으며, 프리스트레싱을 도입을 위한 강봉은 Cable 요소로 모델링하였다^[15]. 구조해석모델의



(a) Loading test step 1. Application of prestressing



(b) Loading test step 2. Removal of prestressing



(c) Loading test step 3. Applied load on specimen

Fig. 8. Measurement point of stain and displacement

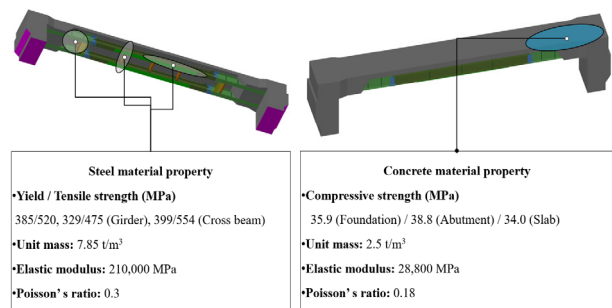


Fig. 9. Material properties for structural analysis

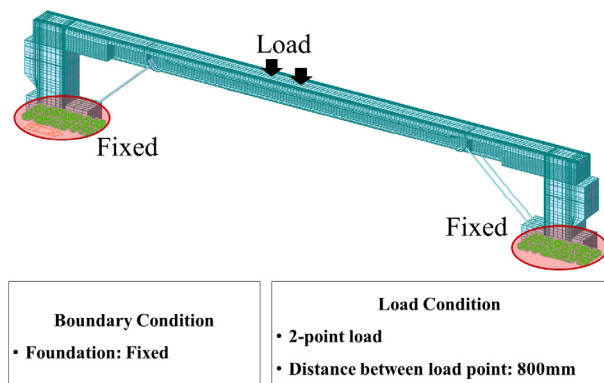


Fig. 10. Boundary and load condition

재료 물성치의 경우, Fig. 9에 나타난 것과 같이 강재와 콘크리트 모두 앞서 하중재하실험에 사용된 재료와 동일한 조건을 적용하였다. 또한, Fig. 10에 나타난 것과 같이 경계조건의 경우 기초 하면을 고정조건을 부여하였으며, 하중은 구조해석모델의 중앙부로부터 양쪽으로 400 mm씩 떨어진 지점에 2점재하방식을 적용하여 재하하였다. 구조해석 모델에 프리스트레싱을 도입하는 방법은 MIDAS CIVIL의 Pretension Load 방법을 활용하였으며, 실험과 동일한 수준의 프리스트레싱을 도입하였다^[15].

4. 하중재하 실험결과 분석

하중재하실험 결과의 분석 및 검증은 앞서 구분한 하중재하실험단계와 같이 총 3단계로 나뉘어 진행되었다. 또한, 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조의 하중저항거동을 평가하기 위하여 하중재하실험으로 발생한 응력 및 변위를 구조해석 결과와 비교하였다. 응력 및 변위를 구조해석 결과와 비교하기 위하여 실험 과정에서 설치한 변형률 게이지와 동일한 위치에 대한 응력과 변위를 구조해석 모델로부터 확인하였다. 좌측과 우측 실험체의 동일한 위치에 설치된 변형률 게이지와 변위계의 경우, 계측된 응력 및 변위는 계측된 값의 평균응력 및 변위를 계산하여 구조해석 결과와 비교하였다.

4.1 하중재하 실험 Step-1

하중재하실험 1단계는 교대를 설치하고, 프리스트레싱을 도입하는 단계로 거더당 98 kN(10 tonf)의 프리스트레싱을 도입할 때, 계측된 실험체의 응력 및 변위를 Fig. 11에 나타내었다. 구조실험체는 실제 시공될 교량의 형상은 그대로 반영되었지만, 실험체 제작 및 실험의 제약조건으로 인해 슬래브 두께와 거더의 크기 등을 일부 축소하였다. 따라서, 실험체의 거더 크기(H588)는 지점 거리(20 m)에 비하여 상대적으로 작은 사이즈로 제작되었다. 이로 인해, 실제 교량에서는 더 큰 프리스트레싱을 도입할 수 있지만, 실험체에서는 제한적으로 도입되었다. Fig. 11(a)에서 확인할 수 있는 것과 같이 프리스트레싱을 도입하는 단계에서 교대 T형강의 상

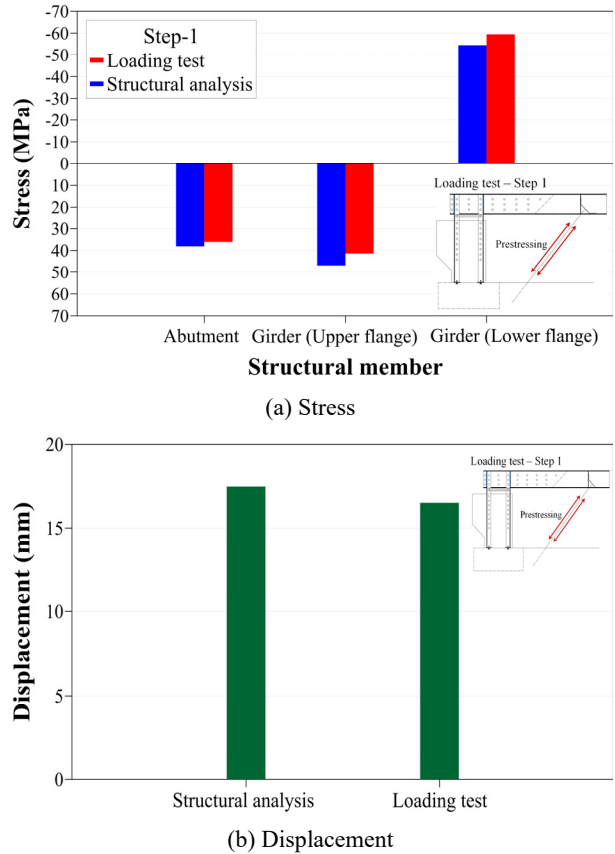


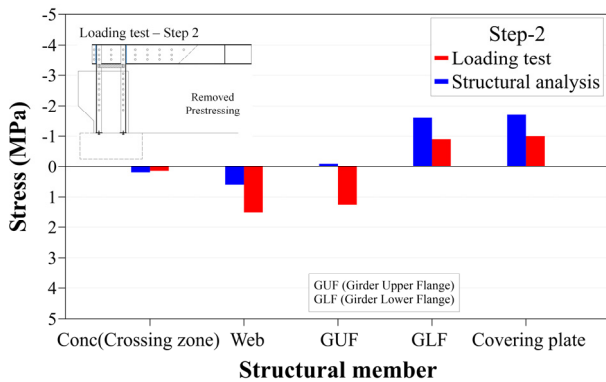
Fig. 11. Evaluation results of stress and displacement at loading test step-1

부플랜지에서는 약 36.1 MPa(변형률 게이지 ST1-1, ST1-2, ST1-3, ST1-4)의 인장응력이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 구조해석으로는 약 38.1 MPa의 인장응력이 발생하였다. 우각부 거더의 상부플랜지에서는 41.4 MPa(변형률 게이지 ST1-6, ST1-8)의 인장응력이 발생하였으며, 구조해석으로는 약 46.9 MPa의 인장응력이 발생하였다. 우각부 거더의 하부플랜지에서는 약 59.5 MPa(변형률 게이지 ST1-5, ST1-7)의 압축응력이 발생하였으며, 구조해석으로는 약 54.5 MPa의 압축응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 11(b)와 같이 프리스트레싱을 도입하는 과정에서 좌우 평균 16.3 mm의 처짐이 발생하였으며, 구조해석상으로는 17.5 mm의 처짐이 발생하였다.

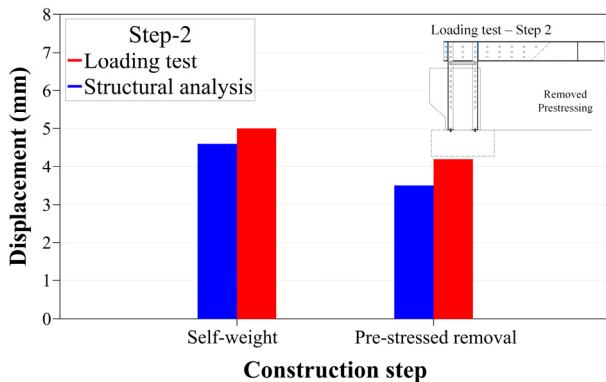
4.2 하중재하 실험 Step-2

하중재하실험의 2단계는 교대 및 우각부에 프리스트레싱을 도입한 상태에서 중앙부 거더를 설치하고, 슬래

브 철근 배근 및 콘크리트를 타설·양생 후 프리스트레싱을 해제하는 단계로 Fig. 12에 도입되었던 프리스트레싱을 해제할 때 계측된 구조실험체의 응력 및 변위를 구조해석 결과와 비교하여 나타내었다. Fig. 12(a)에 나타난 것과 같이 프리스트레싱이 해제되면서 거더 중앙부와 우각부 콘크리트 상면에 프리스트레스가 발생되는 것을 실험을 통하여 확인할 수 있다. 우각부 콘크리트 상부에서는 0.15 MPa(변형률 게이지 CG1-1, CG1-2)의 프리스트레스가 발생하였으며, 구조해석상으로는 0.2 MPa의 프리스트레스가 발생하였다. 중앙부 거더에서는 복부판(ST4-4, ST5-4), 상부플랜지(ST4-3, ST5-3)에서 각각 1.5 MPa, 1.3 MPa(인장)의 프리스트레스가 발생하였으며, 하부플랜지(변형률 게이지 ST4-2, ST5-2), 덮개판(변형률 게이지 ST4-1, ST5-1)에서 각각 0.9 MPa, 1.0 MPa(압축)의 프리스트레스가 발생하였다. 구조해석 결과와 실험 결과를 비교하는 경우, 최대 약 1.3 MPa 수준의 상대적인 차이가 상부플랜지에서 나타났으나,



(a) Stress



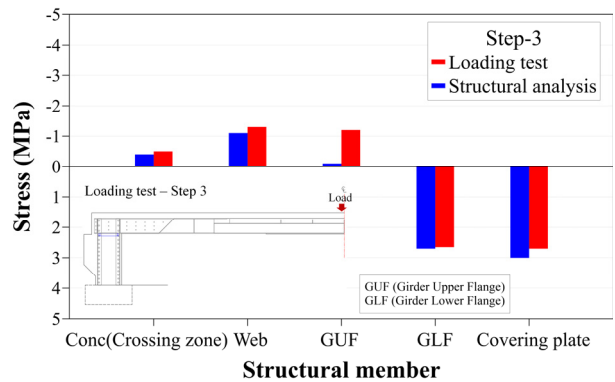
(b) Displacement

Fig. 12. Evaluation results of stress and displacement at loading test step-2

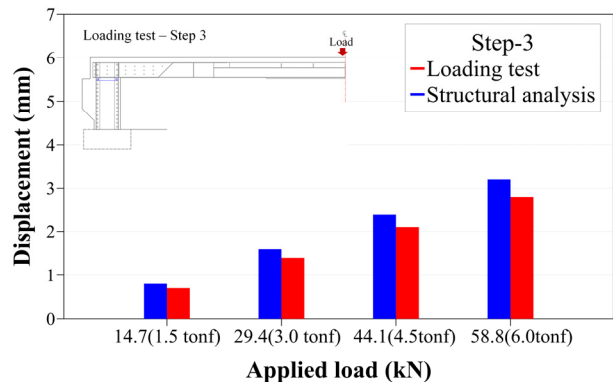
하중재하실험과 구조해석으로 발생한 프리스트레스 수준이 유사하게 평가되는 것을 확인할 수 있다. 변위의 경우, Fig. 12(b)에 나타난 것과 같이 구조해석상에서는 0.7 mm 정도 변위가 줄어들었으나, 프리스트레싱을 해제 후에는 프리스트레싱을 도입한 상태와 비교하여 구조실험체에 상향변위가 발생하여 변위가 0.4 mm 정도 줄어드는 것을 알 수 있다.

4.3 하중재하 실험 Step-3

프리스트레싱을 해제한 후 하중을 재하하였을 때, 프리스트레싱 도입 합성형 라멘구조가 적용된 교량이 어떠한 거동을 보이는지 평가하기 위하여 실험체에 하중을 재하한 후 응력 및 변위를 계측하였다. 하중은 구조실험체 중앙을 기준으로 양쪽으로 400 mm 떨어진 곳에 재하 하였다(하중 재하점 간 거리는 800 mm). 하중이 14.7 kN이 증가함에 따라 계측된 응력 결과는 Fig. 13(a)와 같으며, 구조실험체에 발생한 프리스트레스의 영향



(a) Stress



(b) Displacement

Fig. 13. Evaluation results of stress and displacement at loading test step-3

으로 하중이 발생함에 따라 우각부 콘크리트(변형률 게이지 CG1-1, CG1-2)에서는 0.5 MPa의 압축응력, 거더의 복부판, 상부플랜지(ST4-4, ST5-4)에서는 각각 1.3 MPa, 1.2 MPa의 압축응력, 하부플랜지(변형률 게이지 ST4-2, ST5-2), 뒷개판(변형률 게이지 ST4-1, ST5-1)에서는 2.7 MPa의 인장응력이 발생하였다. 또한, Fig. 13(b)에 나타낸 것과 같이 처짐은 하중이 14.7 kN(1.5 tonf)가 증가함에 따라 0.7 mm 증가하는 것을 알 수 있으며, 구조해석상으로는 하중이 14.7 kN(1.5 tonf)가 증가함에 따라 0.8 mm 증가하여 구조해석 결과와 유사한 수준의 처짐이 발생하는 것을 확인하였다.

하중재하실험 및 구조해석을 비교한 결과, 프리스트레싱을 해제한 이후 하중이 발생하였을 때, 구조실험체의 교대 상단이나 배면 콘크리트에 발생한 프리스트레싱의 영향으로 균열이 기존 강합성 라멘구조가 적용된 교량과 비교하여 상대적으로 적게 나타날 것을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 분석된 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조는 기존의 합성형 라멘구조와 비교하여 상대적으로 우수한 내구성 및 사용성을 가질 수 있을 것으로 판단할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 합성형 라멘구조의 단면효율성을 개선하기 위하여 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조를 제안하였으며, 구조해석 및 하중재하실험을 통하여 프리스트레싱 효과를 검증하고, 하중저항거동을 평가하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) H형강을 활용한 프리스트레싱 도입 합성형 라멘구조를 제안하였으며, H형강과 전단연결판이 적용된 단면을 H형강의 제원과 전단연결판의 크기에 따라 효율성을 분석하고, 적절한 프리스트레싱 도입 합성형 라멘구조 단면을 결정하였다.
- (2) 프리스트레싱 도입 합성형 라멘구조에 대한 적절한 설계 및 시공절차를 마련하였으며, 이에 따라 시험시공을 진행하였다. 시험시공 결과, 본 연구에서 제안된 설계 및 시공절차를 활용한다면, 프리스트레싱을 도입한 합성형 라멘구조의 설계 및 시공이 원활하게 진행될 수 있음을 확인하였다.

- (3) 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조를 적용한 구조실험체에 대한 하중재하실험 및 구조해석을 진행하였다. 구조해석 및 하중재하실험 결과로부터 초기 프리스트레싱 도입에 대한 효과를 확인하였으며, 교대 상부 및 배면 콘크리트, 거더 중앙부에 프리스트레싱을 발생시켜 사용성과 안전성을 확보할 수 있다는 것을 확인하였다.

본 연구에서 제시한 프리스트레싱을 도입한 합성형 라멘구조를 활용하여 라멘교를 설계 및 시공한다면, 거더 단면은 H형강의 적용범위를 확장할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 같은 높이의 단면일 경우 적용지간장을 확장하며, 같은 지간장의 경우 거더높이를 축소하여 교하공간을 확보할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2023년 현대건설(주) 기술공모전 과제의 지원을 받아 수행된 연구임 (T-24-00057)

참고문헌(References)

- [1] Hwang, W.S., Park, M.S., and Kim, Y.P. (2007) Strength Evaluation of Steel Box Beam-to-Column Connections with Axial Load, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.19, No.1, pp.117-127 (in Korean).
- [2] Shin, K.-S., and Han, H.-S. (2019) Behavior Analysis of IPM Bridge and Rahmen Bridge, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, KAIS, Vol.20, No.4, pp.597-605 (in Korean).
- [3] Park, S.-J., Kim, Y., Kim, I., Cho, S., Hong, N., and Kang, D.-H. (2020) Estimation of Optimal Opening Rate of Rahmen Bridge with Open Wall through Moment Analysis of Corner, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol.20, No.4, pp.173-184 (in Korean).
- [4] Cheon, J.U., Lee, S.H., and Kim, S.-H. (2020) Structural Stability of Multi-Functional Support for Rahmen Bridge, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.6, pp.417-426 (in Korean).

- [5] Jeong, Y.-J., Kim, S.-H., and Chun, J.-U. (2019) Buckling Stability of Rahmen Bridge Combined with Girder Lower Flange and Bearing, *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, KOSACS, Vol.10, No.4, pp.61-66 (in Korean).
- [6] Kim, W.-J., Jung, H.-H., and Lee, S.-Y. (2006) A Study on Crack Control of Early-Aged Reinforced Concrete Rahmen Bridge, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, COSEIK, Vol.19, No.1, pp.15-25 (in Korean).
- [7] Lee, J.H., Choi, I.R., Kim, D.K., and Jung, S.J. (2024) Experimental Study on the Flexural Performance of U-Shaped Composite Semi-Slim Floor Beams, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.36, No.2, pp.103-112 (in Korean).
- [8] Lee, K., Kim, D., Jeon, S., Noh, H., Heo, W., and Chun, S. (2023) Experimental Evaluation of Compressive Strength of Steel-Concrete Composite Column S-LFC Reinforced with H-Shapes in the Center of All Four Sides, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.35, No.5, pp.293-302 (in Korean).
- [9] Kim, J., Kim, D., and Lee, K. (2022) Seismic Performance Evaluation of Connection with New Inner Diaphragm between Steel Composite Column (POSCO-Column) and Built-up H-Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.34, No.6, pp.401-410 (in Korean).
- [10] Ahn, Y.-S., and Chung, J.-S. (2012) Experimental Study for Development of the Steel-Concrete Composite Rigid-Frame Bridge Integrated with PS Bar, *Journal of the Korean Society of Safety*, KOSOS, Vol.27, No.4, pp.50-61 (in Korean).
- [11] Lee, S.-Y., Ahn, Y.-S., Oh, M.-H., Chung, J.-S., and Yang, S.-D. (2012) An Experimental Study on the Girder-Abutment Connection for the Steel-Concrete Composite Rigid-Frame Bridge Integrated with PS Bars, *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, Vol.24, No.4, pp.453-463 (in Korean).
- [12] Choi, J.W., Jang, M.J., Cheon, J.U., and Yoon, S.J. (2015) An Experimental Study on the Structural Behavior of Steel-Concrete Composite Rahmen Bridge with Hinged End Supports, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.2, pp.195-205 (in Korean).
- [13] Ok, J.-H., and Yhim, S.-S. (2019) Behavior and Improvement of Construction Crack Occurred on Anchorage of PSC-Edge Girder Rahmen Bridge, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, KAIS, Vol.20, No.5, pp.569-576 (in Korean).
- [14] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016) *Korea Highway Bridge Design Code (Limit State Design Method)*, MOLIT (in Korean).
- [15] MIDAS Information Technology (2021) *Midas Civil On-Line Manual*, MIDAS IT.

요약: 본 연구에서는 라멘구조의 단면효율성을 개선하는 방법을 마련하기 위하여 H형강을 활용한 프리스트레싱 도입 합성형 라멘구조를 제안하였다. 이를 위하여 H형강과 전단연결판의 단면효율성 분석하여 적절한 라멘구조 단면을 개발하였으며, 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조의 시공절차를 마련하였다. 제안된 시공절차를 활용하여 구조실험체를 제작하고, 하중재하실험을 진행하였다. 하중재하실험 결과로부터 하중이 증가함에 따라 발생하는 프리스트레싱 도입 H형강 합성형 라멘구조의 하중저항거동을 평가하였다. 또한, 구조해석을 통하여 프리스트레싱의 효과를 검토하였으며, 하중저항거동을 하중재하실험 결과와 비교 및 평가하였다.

핵심용어: 합성형 라멘구조, 프리스트레싱, H형강, 하중재하실험, 구조해석
