격점구조형식에 따른 복합트러스교의 비틀림 거동 해석

최지훈¹⁾ · 정광희²⁾ · 김태균¹⁾ · 이상원¹⁾ · 김장호^{1)*}

¹⁾연세대학교 사회환경시스템공학부 ²⁾현대건설(주) 연구개발본부

Analysis Evaluation of Torsional Behavior of Hybrid Truss Bridge according to Connection Systems

Ji-Hun Choi,¹⁾ Kwang-Hoe Jung,²⁾ Tae-Kyun Kim,¹⁾ Sang-Won Lee,¹⁾ and Jang-Ho Jay Kim^{1)*}

¹⁾School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-794, Korea

²⁾Research and Development Division of Hyundai Engineering and Construction, Young-In 110-920, Korea

ABSTRACT Hybrid Truss Bridge (HTB) uses steel truss webs instead of concrete webs in prestressed box girder bridges, which is becoming popular due to its structural benefits such as relatively light self-weight and good aesthetics appearance. Since the core technology of this bridge is the connection system between concrete slabs and steel truss members, several connection systems were proposed and experimentally evaluated. Also, the selected joint system was applied to the real bridge design and construction. The research was performed on the connection system, since it can affect the global behavior of this bridge such as flexural and fatigue behaviors as well as the local behavior around the connection region. The evaluation study showed that HTB applied to a curved bridge or an eccentrically loaded bridge had a weak torsional capacity compared to an ordinary PSC box girder bridge due to the open cross-sectional characteristic of HTB. Therefore, three types of girders with different joint system between truss web member and concrete slab were tested for their torsional capacity. In this study, the three different types of HTB girders under torsional loading were simulated using FEM analysis to investigate the torsional behavior of HTB girders more in detail. The results are discussed in detail in the paper.

Keywords : hybrid truss bridge (HTB), torsional behavior, connection system, FEM analysis

1. 서 론

복합트러스 교량은 프리스트레스 박스교량에서 콘크리트 복부를 강관 트러스로 대체한 교량을 의미한다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 콘크리트 복부를 상대적으로 가벼운 강관 트러스로 대체하여 콘크리트로 설계된 경우에 야기되는 불필요한 단면증가와 자중증가를 예방할 수 있고, 교량 상부구조의 자중이 약 20% 절감되어 지간을 늘릴 수 있을 뿐만 아니라 하부구조도 축소시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 복부 개방구조로 경관성이 매우 우수하여 주변환경과 잘 조화를 이루기 때문에, 최근 들어 도심지에 미관을 고려한 교량이나 내륙 하천을 횡단하는 중지간(40~60 m) 교량으로 많이 적용되고 있다.¹⁻³⁾

이러한 구조적, 경관적 장점을 지닌 복합트러스교의

핵심기술은 강관트러스와 콘크리트 슬래브를 연결하는 격점구조에 있다. 지금까지 여러가지 격점구조들이 개발되어 실험적 검증을 통해서 실교량에 적용해 오고 있다.⁴⁻⁷⁾ 이러한 격점구조는 격점부 국부적인 거동뿐만 아니라 복합트러스 거더의 휨 및 피로 등 전체적인 거동을 좌우하기 때문에 이에 대한 연구가 계속 진행되고 있다.⁸⁻¹²⁾

한편, 복합트러스 교량의 복부 개방구조는 프리스트레스 박스교량에 비해 비틀림 성능을 저하시키는 단점을 가지고 있어 편심하중을 받는 교량이나 곡선교 등에는 아직까지 적용된 사례가 없다. 따라서 복합트러스교보다 널리 사용되기 위해서는 비틀림 거동에 대한 정확한 분석이 필요한 상황이다.

정광희 등(2013)은 기존 연구를 통해 복합트러스교에 대한 비틀림 모멘트 산정식을 계산하고 실험적 연구를 통해 격점구조별 비틀림 성능을 분석하였다.¹³⁾ Fig. 2의 복부파형강관 교량과 같이 종방향 단면이 일정하지 않은 복합 트러스교는 비틀림모멘트를 계산함에 있어, 일정한 간격으로 배치된 복부 트러스 부재를 연속된 복부로 환산하고, 상·하 콘크리트 슬래브와 복부로 둘러싸인 폐단

*Corresponding author E-mail : jjhkim@yonsei.ac.kr

Received December 10, 2012, Revised October 24, 2013,

Accepted December 30, 2013

©2014 by Korea Concrete Institute

Fig. 1 HTB (hybrid truss bridge)

Fig. 2 Box girder bridge with corrugated steel web

(a) Side view

(b) Sectional view

Fig. 3 Dimension calculated by using converted thickness of plate

면을 갖는 하나의 보로서 계산하여 비틀림 모멘트에 의한 단면력을 계산하였다. 콘크리트 복부와 등가인 복부 트러스 부재의 환산 판두께는 식 (1)과 Fig. 3(a)와 (b)를 이용한다.¹⁴⁾

$$t^* = \frac{E_c}{G_c} \left(\frac{ah}{\frac{d^3}{n_e A_{sd}} + \frac{a^3}{3} \left(\frac{1}{A_{cu}} + \frac{1}{A_{cl}} \right)} \right) \quad (1)$$

여기서, t^* 는 강트러스재를 교축방향으로 연속하는 콘크리트 웨브로 환산한 판두께, E_c 는 콘크리트 탄성계수, G_c 는 콘크리트 전단탄성계수, a 는 콘크리트 상판과 강트러스재의 격점간 수평거리의 1/2 거리, h 는 비틀림저항 폐단면의 높이, d 는 강재 트러스의 길이, n_e 는 강과 콘크리트의 탄성계수비(E_s/E_c), E_s 는 강트러스재의 영계수, A_{sd} 는 강트러스재의 단면적, A_{cu} 와 A_{cl} 은 각각 외측의 강트러스재와 콘크리트 상·하부상판 결합부의 세로보 단면적을 나타낸다.

식 (1)은 비틀림 거동에 의해 외측의 강트러스로부터 전달되는 비틀림 전단력이 강재 트러스와 콘크리트 상판 결합부의 세로보를 매개로 하여, 전단류로서 콘크리트 상판에 전달된다는 거동을 기본으로 하여 폐단면 이론에 적용하기 위해 유도된 식이다. 따라서 EHT가 가지고 있는 현치부분의 차이로 인하여 A_{cu} 와 A_{cl} 의 차이에 따라 t^* 값이 변화되었다.

이론식에 의해 구해진 결과는 Table 1과 같으며, 결과적으로 EHT는 콘크리트 복부의 현치로 인해 저항단면적과 환산 판두께가 증가하였으며, 현치가 없는 FHT, GHT는 그 값이 서로 동일하였다.

Table 1 Equivalent plate thickness (t_b)

Index	a (mm)	Truss angle (degree)	d (mm)	t_d (mm)	A_{cu} (mm ²)	A_{cl} (mm ²)	t_b (mm)
EHT	450	62.1	962	190	50000	50000	13.0
FHT	450	64.2	1034	150	45000	45000	11.5
GHT	450	64.2	1034	150	45000	45000	11.5

Table 2 Maximum moment and load

Index		EHT	FHT	GHT
Torsional moment	① Calculated moment (kN·m)	1361	1305	1305
	② Measured moment (kN·m)	1398	1074	1092
Load	① Calculated ultimate load (kN)	454	435	435
	② Measured max. load (kN)	466	358	364
② / ①		1.03	0.83	0.84

따라서, 종방향으로 개구부를 갖는 복합트러스교에서도 비틀림 저항단면적에 의해 비틀림 성능이 결정되며, 격점부가 다르더라도 저항단면이 같으면 거의 같은 거동을 보임을 알 수 있다.

이에 이 연구에서는 Table 2와 같이 기존 비틀림 실험을 통해 확인된 3가지 실험체를 유한요소해석을 통해 비틀림 거동을 검증하고 분석하고자 한다.

2. 비선형 해석 구성모델

이 연구에서는 구조실험결과를 예측하고 구조적 거동을 분석하기 위해 3-D 정밀해석을 수행하였다. 해석프로그램은 비선형 상세 전용 해석프로그램인 MIDAS FEA를 사용하였으며, 사용재료에 대한 비선형 거동을 고려하여 격점구조 형식에 따른 구조실험체에 대한 정밀해석을 수행하였다.

2.1 콘크리트 구성모델

콘크리트의 재료적인 비선형 거동을 적절하게 나타내기 위해서는 적합한 소성모델이 필요하다. 이 연구에서는 콘크리트에 전변형을 균열모델(total strain crack)을 사용하여 비선형 해석을 수행하였다. Fig. 4와 같이 균열 축을 취급하는 방법에 따라 고정균열모델(fixed crack model) 및 회전균열모델(rotating crack model)로 구분되는 두 가지 방법을 제공한다. 고정균열모델은 균열축이 한번 결정되면 변화하지 않는 것으로 가정하는 방법이며, 회전균열모델은 주변형률의 변화에 따라 균열방향이 계속해서 회전한다고 가정하는 방법이다. 회전균열모델은 이전의 균열 상태를 기억할 필요가 없으므로 알고리즘이 비교적 단순하며 수렴성도 좋다. 이러한 장점으로 인하여 회전균열모델은 철근콘크리트 구조물의 비선형 해석 방법으로 오랫동안 사용되어 왔다.^{15,16)}

전변형을 균열모델의 압축모델은 압축 응력하의 콘크리트가 횡방향 구속이 되면, 등방성 응력(isotropic stress)들이 증가하고, 이로 인하여 강도(strength)와 연성(ductility)이 증가하게 된다. 이러한 등방성 응력의 영향을 반영하기 위해 압축 응력-변형을 관계가 적절히 수정되어야 한다. 이 연구에서는 Fig. 5와 같이 압축부에 사용 가능한 경화-연화(hardening-softening)곡선인 Thorenfeldt의 경화곡선을 사용하였으며 구성식은 식 (2)와 같다.¹⁷⁾

$$f = -f_p \frac{\alpha_i}{\alpha_p} \left(\frac{n}{n-1 + \left(\frac{\alpha_i}{\alpha_p} \right)^{nk}} \right) \quad (2)$$

여기서,

$$n = 0.80 + \frac{f_{cc}}{17}, \quad k = \begin{cases} 1 & 0 > \alpha > \alpha_p \\ 0.67 + \frac{f_{cc}}{62} & \alpha \leq \alpha_p \end{cases}$$

(a) Fixed crack model

(b) Rotating crack model

Fig. 4 Crack models

Fig. 5 Thorenfeldt compression curve

Fig. 6 Brittle tension curve

전변형을 균열모델에서 제공하는 인장거동 모델 중 이 연구에서는 인장강도를 초과하면 더 이상 인장응력 증가가 없고, 저항응력이 0이 되는 모델인 취성모델(brittle model)을 적용하였으며 Fig. 6과 같이 표현된다.

3. 해석대상 구조

3.1 해석대상 구조의 재료특성

비선형 구조해석에는 실제 구조물에서의 격점구조에 따른 비틀림 거동을 확인하기 위하여 구조실험체에 적용된 동일한 강도를 사용하였다. 탄성계수는 콘크리트에 대한 추정식으로 계산한 값을 적용하였다. 구조실험체의 구조해석을 위해 프로그램에 적용된 상세 재료특성은 Table 3에 나타내었다.

3.2 해석모델

비선형 해석 프로그램 MIDAS FEA를 이용한 구조해석에는 제작에서부터 실제 실험조건과 동일하게 설정하여 해석을 수행하였다. 각 실험체의 주요 제원은 Table 4에서 보는 바와 같이 3가지 실험체의 높이와 폭은 모두 1000 mm로 정사각형 단면으로 제작되었으며, 실험체의 길이도 4300 mm로 동일하다. 상·하부 콘크리트 슬래브 두께도 150 mm로 동일하지만, EHT 실험체만 100 mm 높이의 콘크리트 현치를 두었다. 또한 하중재하 및 실험체 고정을 위해 양단 800 mm길이의 콘크리트 블록을 설치하였으며, 중간 2700 mm길이 안에 서로 다른 격점구조를 가진 모두 3쌍의 트러스를 각각 배치하였다. 적용된 유한요소법은 실험체를 각각의 형상을 갖는 요소로 나누어 해석을 하게 되는데, 이 연구에서는 콘크리트 및 복부 트러스 부재를 모델링 하기 위해 Fig. 7과 같은 8절점, 6절점 입체요소를 이용하여 Table 5~7과 같이 3차원 모델링 하였다.

또한, 철근은 bar element를 사용하여 모델링 하였다. Fig. 8과 같이 bar element는 solid 안에서 모델링이 가능

Table 3 Material properties

Index	Concrete	Steel truss / plate	Rebar
Material	OPC	SS400	SD400
Strength (MPa)	$f_{ck} = 40$	$f_y = 240$	$f_y = 400$
Elastic modulus (MPa)	31618	2.0×10^5	2.0×10^5
Weight density (kN/m^3)	24.5	76.9	76.9
Poisson's ratio	0.18	0.26	0.3

Table 4 Specimen dimensions (unit: mm)

Index	Width	Height	Length	Slab thickness	Hunch height
EHT	1000	1000	4300	150	100
FHT	1000	1000	4300	150	-
GHT	1000	1000	4300	150	-

Table 5 EHT 3-D modeling

Index	Modeling
Steel truss
Reinforcement and steel truss
EHT modeling

Table 6 FHT 3-D modeling

Index	Modeling
Steel truss
Reinforcement and steel truss
FHT modeling

Table 7 GHT 3-D modeling

Index	Modeling
Steel truss
Reinforcement and steel truss
GHT modeling

Fig. 7 Solid element types

Fig. 8 Bar element modeling

하며, bar의 전체길이는 몇 개의 입자로 나누어져 고려되고 location point들이 유한요소모델 안에서의 입자들의 위치를 결정한다. 철근의 파괴기준은 von Mises의 파괴기준을 적용하여 해석하였다.

3.3 하중 및 경계조건

대상 구조물에 대한 비틀림 해석을 위해 Fig. 9와 같이 하중과 경계조건을 적용하여 해석을 진행하였다. 하중조건은 실제 실험 시 가력빔을 이용하여 비틀림 하중을 재하 하였으나 해석 시 순수 비틀림 하중을 적용하기 위한 방법으로 Fig. 9와 같이 회전축을 중심으로 4개의 면에 동일한 하중을 주어 비틀림 하중이 작용할 수 있도록 설정하였다. 외부하중은 100 kN의 크기로 최종 파괴단계까지 재하하여 모델링하였고, 경계조건은 실험 시 4개의 앵커바를 이용해 완전히 고정된 실험체의 우측 단부를 해석 모델링의 상·하단부 Surface 전체를 고정단으로 두었으며, EHT의 매입형 강관 트러스, FHT의 종방향 플랜지 플레이트, GHT의 종방향 플랜지 플레이트와 거세트판, 이 세가지 복부 트러스 모델과 콘크리트 상·하 슬래브의 경계면 거동모델을 경계면요소로 적용하지 않고 일체거동을 한다고 가정하였다.

4. 해석 결과

4.1 하중-변위

실험체의 회전단부에 설치한 LVDT 2 위치의 하중 재하에 따른 변위 결과를 Fig. 10과 같이 나타내었다. 세 실험체 모두 약 1500 kN 이전까지는 탄성구간으로 비슷한

(a) LVDT

(b) Boundary condition

Fig. 9 LVDT locations and boundary conditions

Fig. 10 Load-displacement analytical results

비틀림 거동을 나타내었으나, 1500 kN 이후에는 FHT와 GHT는 변위가 증가하면서 비틀림이 저하되었다. EHT는 FHT, GHT에 비해 변위증가 폭이 크지 않았으며 상대적으로 다른 두 실험체에 비해 비틀림 하중에 효과적으로 작용하였다. 최대하중은 Table 8에서 보는 바와 같이 EHT가 2800 kN로 계산된 극한하중과 거의 유사하여 세 실험체 중 가장 높았으며, FHT와 GHT는 2600 kN으로 거의 동일한 거동을 보이며 계산된 극한하중 값에 거의 도달

Table 8 FEM analysis results

Index	Ultimate load (kN)	P_u (kN)	Δu (mm)
EHT	2721	2800	16.95
FHT	2611	2600	24.99
GHT	2611	2600	25.73

하였음을 확인할 수 있었다. 변위는 EHT가 16.95 mm로 가장 적었으며, FHT는 24.99 mm, GHT가 25.73 mm로 거의 유사한 변형을 나타내었다.

4.2 사재에 작용하는 von Mises 응력

Fig. 11은 하중단계별로 복부 트러스 6쌍의 하중 재하에 따른 von Mises 응력을 나타낸 것이다. EHT 사재는 1600 kN 이후부터 SS400 강재의 허용응력인 140 MPa를 넘어서기 시작하였으며, 최대 비틀림 하중 2800 kN이 작용할 때 항복응력인 240 MPa를 넘어서 최대 252.8 MPa가 작용하는 것으로 나타났다. FHT는 1600 kN 이후부터 강재의 허용응력인 140 MPa를 넘어서 최대 비틀림 하중 2600 kN이 작용할 때 최대 264.26 MPa가 작용하였다. GHT는 1200 kN 이후부터 강재의 허용응력을 넘어서 최대 2600 kN이 작용할 때 최대 298.86 MPa가 작용하였다. 세 실험체 모두 SS400 강재의 허용응력을 넘어서지만 최대 비틀림 하중이 작용하였을 때 EHT가 FHT, GHT보다는 비틀림 응력에 있어 더 좋은 성능을 보이며, FHT와 비교해 보았을 때 거의 유사한 응력이 전달된 것으로 나타났다. EHT의 경우 비틀림 하중을 주로 콘크리트 슬래브에서 저항하고 있으며, FHT는 연속된 종방향 플랜지 플레이트가 트러스로 전달되는 응력을 분산시켜 작용하였을 것으로 판단된다. 반면 불연속적인 플랜지 플레이트로 이루어진 GHT의 경우 슬래브에 전달되는 하중이 트러스로 곧바로 전달되는 것으로 판단할 수 있다. 유한요소 해석을 통한 세 실험체 구조모델의 응력분포를 Fig. 12에 나타내었다.

4.3 균열양상

Fig. 13~15는 격점구조별 비틀림 실험체의 유한요소 해석에 대한 균열형상을 나타낸 것이다. MIDAS FEA에서는 균열이 발생한 지점을 원형의 디스크 형태로 표시하며, 디스크의 면방향은 균열의 방향, 디스크의 개수에 따라 균열발생정도를 결과로 나타낸다. EHT 실험체의 경우 700 kN 하중 재하 시 하부 슬래브 현치와 격점구조가 매입되어 있는 경계면에서 초기균열이 발생하였으며, 약 1200 kN 이후부터 상부슬래브를 통해 균열이 진전되는 것을 알 수 있었다. 균열 진전은 약 45° 우측 상향으로 균열이 발생되었으며, 콘크리트 슬래브의 현치로 인해 비틀림을 슬래브에서 저항하여 균열이 나타난 것을

볼 수 있었다. FHT와 GHT의 경우 EHT와 동일하게 약 45° 우측 상향으로 균열이 발생되었으며, 초기균열은 500 kN에 나타나 하중 재하 900 kN 이상부터 상부슬래브의 균열이 진전되어 1100 kN부터 급격한 균열이 진전되기 시작하였다. 반면 EHT의 경우 최대 하중에 이르기까지 급격한 균열진전 없이 서서히 균열이 진행되는 것으로 나타났다. 세 실험체 모두 격점구조와 슬래브의 경계면을 중심으로 균열이 집중되는 것을 볼 수 있었으며, 이는

(a) EHT

(b) FHT

(c) GHT

Fig. 11 Load-stress analytical results

Fig. 12 von Mises stresses

Fig. 13 EHT crack patterns

Fig. 14 FHT crack patterns

Fig. 15 GHT crack patterns

비틀림 하중이 격점부의 구조형식에 따라 얼마나 효과적으로 저항하는지를 판단해 볼 수 있었으며, 이와 같은 결과로 볼 때 사용성 측면에서 EHT가 FHT와 GHT보다 유리할 것으로 판단된다.

5. 실험연구와의 비교

Table 2의 비틀림 실험결과와 하중, 실험 및 해석에서 측정된 균열하중 및 최대하중을 Table 9에 나타내었다. 실험 시 하중 조건은 좌측 단부에 강봉을 삽입하여 회전축 역할을 하도록 설치하고 가력빔을 결합하여 비틀림 하중이 전달되게 하였으나, 해석에 반영된 하중조건은 실험체 회전 축 단부에 직접 하중이 전달되게 하여 비틀림을 받게 하였다. 해석 결과 최대하중은 EHT가 2800 kN, FHT와 GHT가 2600 kN이었으며, 가력빔에 재하한 실험 시 최대하중은 EHT가 466 kN, FHT가 358 kN, GHT가 364 kN 이었다. 따라서 실험 시 결과와 해석 결과의 비교를 위해서는 가력빔에 따른 비틀림 모멘트에 대한 하중을 고려할 필요가 있다. 따라서 가력빔(3.0 m)에 해당하는 길이를 고려하여 계산한 결과, Table 9와 Fig. 16과 같이 EHT는 453.58 kN, FHT와 GHT는 435.12 kN의 하중을 받는 것으로 나타났다. 이를 토대로 해석상의 하중을 반영한 결과는 ③과 같이 나타낼 수 있다. 세 실험체 모두 이론 결과와 해석 결과가 근소한 차이를 보이며 거의 동일한 값을 나타내고 있다. EHT의 경우 실험과 해석 결과 모두 이론식에 의해 계산된 결과값에 도달하였

지만, FHT와 GHT의 경우 실험 결과가 이론과 해석 결과와 비교하여 약 80% 수준의 비틀림 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 다만, 실험 결과와 해석 결과가 다소 차이가 발생하는 것은 EHT 실험체의 초기 설치 시 정확한 설치가 이루어지지 않아 실험 결과의 기울기 또한 상이하게 나타난 것으로 보이며, FHT와 GHT의 실험 시 가력빔이 하중을 견디지 못해 손상되어 예측한 하중에 도달하지 못한 것으로 판단된다. 또한, 실험 시 하중을 ± 50 kN씩 증가시키며 하중재하를 반복해 잔류변형이 발생하였지만 이 그래프는 최종하중까지 재하 한 결과만 출력하여 나타낸 것으로 해석 결과의 곡선과 다소 차이가 있지만 전체적인 거동이나 처짐의 기울기는 거의 유사한 것으로 알 수 있다. 또한 구조해석 시 복부 트러스 강재의 플레이트에 부착된 스티드를 별도로 모델링하지 않았고, 콘크리트 슬래브와 복부 트러스 강재의 경계면 거동모델을 슬래브와 강재가 일체거동을 한다고 가정하여 해석을 수행하였으므로 실험 결과와 해석 결과에 약 15%정도 차이가 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 17은 사재 트러스의 응력을 비교한 그래프이다. 실험과 해석 모두 FHT와 GHT는 응력발생이 거의 유사하게 나타났으며, EHT의 경우 실험결과는 실험체의 현치의 영향으로 인하여 슬래브가 응력을 주로 부담한 것으로 확인되었으나, 해석 시 경계조건을 현치와 사재 트러스를 일체거동한다고 가정하여 해석을 수행하였기에 응력부담을 더 많이 받은 것으로 판단된다.

기존의 실험 결과와 이 연구의 해석 결과를 비교하여 판단한 결과 EHT가 FHT, GHT에 비해 비틀림 강성이 우수한 것으로 나타났으며, 최대하중 또한 가장 크게 나타났다. 이는 콘크리트 슬래브에 현치가 있는 EHT가 현치가 없는 FHT, GHT에 비해 비틀림 하중에 더 효과적으로 저항하는 것으로 판단할 수 있다. 종합해 보면 현지형 매입형 격점구조인 EHT가 FHT와 GHT에 비해 강성과 사용성 측면에서 최적의 성능을 보이는 것으로 판단할 수 있다.

Table 9 FEM analysis results

Index	① Calculated ultimate load	② Measured max. load	③ Analyzed max. load
EHT	453.58	466.00	467.18
FHT	435.12	358.00	433.17
GHT	435.12	364.00	433.17

Fig. 16 Load-displacement results

6. 결 론

이 연구에서는 복합트러스교의 격점구조에 따른 비틀림 성능을 유한요소해석을 통해 검증하였다.

- 1) 격점구조별 실험체에 대한 비틀림 성능을 유한요소 해석을 통해 검증한 결과, 수치학적으로 계산된 비틀림 하중과의 정확도는 99.74%로 구조해석 검증이 이루어졌으며, 각 실험체의 저항단면에 의해 비틀림 모멘트가 좌우됨을 알 수 있었다. 따라서, 100 mm의 현치가 포함된 현지 매립형 구조 EHT가 FHT나 GHT에 비해서 최대하중은 가장 크고 변위도 작아 비틀림에 효과적인 것으로 나타났다.
- 2) 유한요소 해석 결과 세 실험체 모두 복부 트러스 강재의 항복응력범위를 벗어나 응력이 전달되었다.

(a) EHT

(b) FHT

(c) GHT

Fig. 17 Load-stress results of test and FEM analysis

또한, 헌치가 있는 EHT와 연속된 종방향 플랜지 플레이트가 있는 FHT의 경우, 불연속적인 거세트판으

로 이루어진 GHT보다 좀 더 효과적인 것을 보여주고 있다. 이는 경계조건 선정 시 강재, 슬래브가 일체거동을 하는 것으로 설정하였기 때문에 실험 결과와 비교하여 약 20%의 차이를 보이고 있는 것으로 확인되었다.

- 3) 사재응력, 균열하중 등의 거동 역시 실험 결과와 비교하여 크게 다르지 않음을 알 수 있었으며, 결과를 통해 사용성 측면에서도 EHT가 더 유리하다고 판단된다.
- 4) EHT 실험체의 변위 변화가 다른 격점구조의 형태가 완전한 고정도, 완전한 힌지형태도 아니며, 또한 해석 시 경계조건이나 실험적 환경요인 등에 발생된 것으로 보인다. 따라서, 차후 연구에는 이러한 요인들을 보완할 필요성이 있다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(NRF, No. 2012-0005218), (No. 2011-0030040)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Hiroo, M., Masato, Y., Yohei, T., and Kosuke, F., "Design of the Kinokawa Viaduct Composite Truss Bridge," *Proceedings of the 1st FIB Congress*, Osaka, Japan, Composite Structures, 2002, pp. 371-380.
2. Keiichi, A., Yuhei, T., Hideki, N., Yasuhiro, U. Toshiake, K., and Takashi, Y., "Design and Construction of Sarutagawa Bridge and Tomoegawa Bridge," *Journal of Prestressed Concrete*, Japan, Vol. 50, No. 3, 2005, pp. 5-11.
3. Hiroyuki, F., Akio, S., Hiroshi, S., Shoichi, U., Yoko, K., and Tadayuki, N., *Design and Construction of Shitsumi Ohashi Bridge*, Bridge and Foundation, pp. 5-11.
4. Miwa, H., Nagasawa, T., Yoda, T., Suzuki, T., and Kumagai, Y., "Experimental Study on the Mechanical Behavior of Panel Joints in PC Hybrid Truss Bridges," *Journal of Structural Engineering, JSCE*, Vol. 44A, 1998, pp. 1475-1484.
5. Takashi, T., Akio, S., Tadayuki, N., and Shinji, M., "Experimental Study on a Joint in Prestressed Concrete Bridge with Steel Truss Web," *Proceedings of the 1st FIB Congress*, Osaka, Japan, Composite Structures, 2002, pp. 347-352.
6. Shim, C. S., Park, J. S., and Kim, K. S., "An Experimental Study on Joint Structures of Composite Truss Bridges," *Journal of Korean Society of Steel Construction, KSSC*, 2007, Vol. 19, No. 3, pp. 303-312.
7. Shim, C. S., Park, J. S., Chung, C. H., and Kim, K. S., "Design and Experiments on Connection of Composite Truss Bridges," *Proceedings of 6th International Conference*

- Steel and Aluminium Structures*, Oxford, 2007, pp. 963-970.
8. Jung, K. H., Kim K. S., Chung, C. H., and Shim, C. S., "An Experimental Study on the Horizontal Shear Strength of Composite Truss Joint According to the Structural Connection System," *Civil Expo 2007*, Korean Society of Civil Engineers, Daegu, 2007, pp. 130-133.
 9. Jung, K. H., Kim K. S., and Chung, W. S., "Flexural Behavior of Prestressed Concrete Hybrid Girder with Steel Webs," *Proceedings of 4th International Conference on the Conceptual Approach to Structural Design*, Venice, Italy, 2007, pp. 297-305.
 10. Jung, K., Yi, J., and Kim, J. J., "Structural Safety of the Newly Developed Connection System of the Prestressed Concrete Hybrid Girder with Truss Web Section," *Proceedings of 8th Short and Medium Bridge Conference*, CSCE, Niagara Falls, Canada, 2010, pp. 210(1-8).
 11. Jung, K., Yi, J., and Kim, J. J., "Structural Safety and Serviceability Evaluations of Prestressed Concrete Hybrid Bridge Girders with Corrugated or Steel Truss Web Members," *Engineering Structures*, Vol. 32, Issue 12, 2010, pp. 3866-3878. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.08.029>)
 12. Jung, K. H., Yi, J. W., Lee, S. H., Kim, J. H. J., "Fatigue Capacity Evaluation of Hinge Type Connection System for a Hybrid Truss Bridge," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 3, 2011, pp. 303-310. (doi:<http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2011.23.3.303>)
 13. Jung, K. H., Lee, S. H., Yi, J. W., Choi, J. H., and Kim, J. H. J., "Torsional Behavior of Hybrid Truss Bridge according to Connection Systems," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 25, No. 1, 2013, pp. 63-72. (doi:<http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2013.25.1.063>)
 14. Prestressed Concrete Technology Association (社團法人プレストレストコンクリート技術協會), *Composite Bridge Design and Construction Standards (複合橋設計施工規準)*, Kibodang(技報堂), 2005, pp. 125-156.
 15. Midas Information Technology Co., Ltd., *Midas User's Manual, Analysis and Algorithm*, 2008, Korea, pp. 109-267.
 16. Vecchio, F. J. and Collins, M. P., "The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected Shear," *ACI Journal*, Title No. 83-22, 1986, pp. 219-231.
 17. Thorenfeldt, E., Tomaszewicz, A., and Jenson, J. J., "Mechanical Properties of High-Strength Concrete and Applications in Design," In *Proc. Symp. Utilization of High-Strength Concrete*, Tapir, 1987.

요 약 복합트러스교는 프리스트레스 박스거더교의 복부를 강재 트러스로 대체한 교량으로 자중이 경감되는 구조적 장점과 복부 개방구조로 인한 경관성이 매우 우수하여 최근 들어 많이 사용되고 있다. 이러한 복합트러스교의 핵심기술은 강재 트러스와 콘크리트 슬래브를 연결하는 격점구조이며 지금까지 여러가지 격점구조들이 개발되어 실험적 검증을 통해서 실교량에 적용해 오고 있다. 이러한 격점구조는 격점부 국부적인 거동뿐만 아니라 복합트러스 거더의 휨 및 피로 등 전체적인 거동을 좌우하기 때문에 이에 대한 연구가 계속 진행되고 있다. 한편, 복합트러스 교량의 복부 개방구조는 프리스트레스 박스교량에 비해 비틀림 성능을 저하시키는 단점을 가지고 있어 편심하중을 받는 교량이나 곡선교 등에는 아직까지 적용된 사례가 없다. 따라서 복합트러스교가 보다 널리 사용되기 위해서는 비틀림 거동에 대한 정확한 분석이 필요한 상황이다. 기존 연구에서는 복합트러스교의 격점구조형식에 따른 비틀림 거동 특성을 알아보기 위해서 3가지 형태의 박스형 복합트러스 실험체를 제작하여 그 거동을 분석하였다. 이에 이 연구에서는 기존연구를 바탕으로 유한요소 해석프로그램을 이용하여 실험체를 모델링하고 시뮬레이션을 통해 그 거동을 분석하여 해석적으로 검증해 보았다.

핵심용어 : 복합트러스교, 비틀림 거동, 격점구조, 유한요소해석