

CFT 트러스 거더 합성형교의 구조거동 평가

Evaluation of Structural Behaviour of a Composite CFT Truss Girder Bridge

정철헌* · 김혜지** · 송나영*** · 마항욱****

Chung, Chul-Hun · Kim, Hye-Ji · Song, Na-Young · Ma, Hyang-Wook

Abstract

This paper presents an experimental study on the structural behavior of composite CFT truss girder bridge with full depth precast panels. The length of span is 20,000 mm. The CFT truss girder is a tubular truss composed of chord members made of concrete-filled and hollow circular tubes. To determine fundamental structural characteristics such as the strength and deformation properties of composite CFT truss girder bridge, static and dynamic tests were conducted. The natural frequencies calculated by the FEM are in good agreement with experimental results obtained from dynamic test. Bracing have only a small effect on the natural frequencies of composite CFT truss girder bridge as indicated by the FEM results. The yield strength and deformation of the composite CFT truss girder bridges were investigated through a static bending test. Besides, the test results showed that uniform distribution of shear connectors can be applicable in composite CFT truss girder bridges.

Keywords : CFT(Concrete Filled Tubular), composite CFT truss girder bridge, natural frequency, bracing, yield strength

요 지

본 연구에서는 전두께 프리캐스트 바닥판을 적용한 CFT 트러스 거더 합성형교의 구조거동을 평가하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 모형교량의 지간장은 20 m이고, CFT 트러스 거더의 상현재와 하현재는 콘크리트 충전강관 단면이다. CFT 트러스 거더 합성형교의 구조특성을 평가하기 위해 정적 및 동적실험을 수행하였다. 실험 및 해석에 의해 산정된 고유진동수가 잘 일치함을 확인하였고, 해석결과에서 거더간에 설치되는 브레이싱은 CFT 트러스 거더 합성형교의 고유진동수에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 정적 휨 실험을 통해서 CFT 트러스 거더 합성형교의 항복강도 및 변형특성을 평가하였다. 또한, 실험결과를 통해서 프리캐스트 바닥판을 통한 등분포 전단연결재의 배치는 CFT 트러스 거더의 합성형교에 적용 가능함을 확인하였다.

핵심용어 : 콘크리트 충전강관, CFT 트러스 거더 합성형교, 고유진동수, 브레이싱, 항복강도

1. 서 론

국내 고속도로 및 일반국도상의 교량은 경간장이 50 m대인 교량이 가장 많고, 30~60 m 범위의 거더 교량도 비중이 크다. 따라서 중지간 교량에 대한 기술개발은 파급효과가 가장 클 것으로 예상된다. 중지간 교량에 있어서 하부구조 형식은 상부구조 형식에 크게 좌우되므로 상부구조의 합리적 설계가 중요하다. 지금까지 교량의 형식은 기술적 사항들에 대한 심층적 분석, 다각적인 해석 및 실험결과를 바탕으로 결정되기 보다는 주변 환경에 맞추어 강 박스거더나 콘크리트 박스거더, 플레이트 거더교 등으로 결정되는 경우가 대부분이었다. 이러한 상황은 중지간 교량의 형식적 편중을 초래하여 대부분의 교량들이 연장을 기준으로 설계되는 결과를 낳았고 이에 따른 구조적 비효율성을 유도하는 결과를 초래

하였다. 최근 연구가 진행되고 있는 CFT(Concrete Filled Tubular) 트러스 거더 형식은 이러한 문제점을 해결할 수 있는 하나의 방안이 될 수 있다.

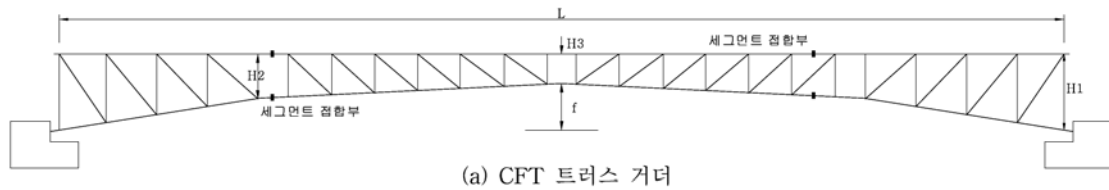
CFT 트러스 거더의 상현재와 하현재에는 콘크리트 충전강관 합성단면이 적용된다. 콘크리트 충전강관을 이용한 합성단면은 콘크리트와 강재 두 가지 재료의 장점을 효과적으로 이용하는 것이 가능하여 빌딩 등의 기둥부재로 많이 이용되었고, 최근 들어 교량분야에서 교각 및 거더 부재로 많은 관심을 받고 있다. CFT 트러스 부재를 거더에 적용시 내력 증대와 변형성능 향상, 소음 및 진동억제 등이 기대될 뿐만 아니라 경관성 및 투시성 향상이 가능하고, 일반적인 강교량 제작에 필요한 보강재의 수를 대폭적으로 감소시키는 것이 가능하여 제작 공정을 단순화 시킬 수 있다. 합성구조체인 콘크리트 충전강관(CFT)은 일반적인 강재 단면이나 철근콘

*정회원 · 교신저자 · 단국대학교 토목환경공학과 교수 (E-mail : chchung5@dankook.ac.kr)

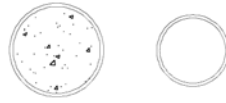
**단국대학교 토목환경공학과 석사과정 (E-mail : hyej3@dankook.ac.kr)

***정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 박사과정 (E-mail : allforny@dankook.ac.kr)

****(주)대우건설 기술연구팀 토목연구팀 주임연구원 (E-mail : mapil75@dwconst.co.kr)



(a) CFT 트러스 거더



(b) 상현재/하현재 및 수직재/사재

그림 1. CFT 트러스 거더 및 단면의 형상

크리트 단면에 비해서 높은 강도와 큰 강성을 가지며, 합성효과에 의해 역학적으로 우수한 휨 성능을 발휘됨이 여러 연구에서 입증된 바 있다(Lu, 1994; Wheeler, 2000; Elchalakani, 2001; Han, 2004; Gho, 2004; 정철현 등, 2007). 정철현 등(2009)은 바닥판이 합성되지 않은 아치형상의 하현재를 갖는 CFT 트러스 거더의 동적실험을 통해서 휨강성 및 동적특성을 평가하였으며, 정적실험(정철현 등, 2009)을 통해서 CFT 트러스 거더 및 세그먼트 접합부의 구조성능 등을 평가하였다. 송나영 등(2009)은 CFT 트러스 거더의 정적실험 및 비선형 유한요소해석을 통해서 f/L 비가 구조내력에 미치는 영향을 평가하고, 강관과 콘크리트의 상호 구속효과가 부재의 변형능력, 강성 및 내력을 향상시킴을 확인하였다.

이 논문에서는 CFT 트러스 거더에 대한 사전 연구(정철현 등, 2009; 송나영 등, 2009)를 토대로 아치형상 하현재의 f/L 비를 0.05로 결정하고, 바닥판과 합성된 합성형 교량에 대한 구조성능을 평가하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 지간길이가 20m인 1등교 수준의 CFT 트러스 거더 합성형교에 대한 동적 실험 및 해석을 수행하여 브레이싱이 고유진동수에 미치는 영향을 평가하였고, 정적실험을 통해서 충전단면인 상현재와 하현재, 중공단면인 수직재와 사재, 바닥판과의 합성단면에 대한 구조거동을 분석하였다. CFT 트러스 거더의 상현재와 하현재는 콘크리트 충전강관 합성단면으로 하고, 상대적으로 발생응력이 작은 수직재와 사재는 시공성 향상을 위해 중공강관 단면으로 구성하였다. 충전강관인 상현재는 바닥판과의 합성을 위해 직선부재로 구성하고 하현재는 단면의 효율을 극대화하기 위하여 아치형상을 갖는 부재로 배치하였다. 또한, 급속시공을 목적으로 바닥판은 전두게 프리캐스트 바닥판을 적용하였으며, CFT 트러스 거더는 교축방향의 3개의 세그먼트로 제작하여 조립식으로 가설하였다. CFT 트러스 거더는 세그먼트 단위로 제작하여 현장에서 조립식으로 시공하는 경우, 연결부가 존재하게 되는데, 사전 연구에서 구조성능이 검증된 연결방법을 적용하였다.

2. CFT 트러스 거더 합성형교의 제작

모형교량은 거더 중심간 거리가 3m인 2개의 CFT 트러스 거더로 구성되는 1등교 수준의 합성형교로 설계하였으며, CFT 트러스 거더는 크게 상현재, 하현재, 수직재, 사재 그리고 거더내 2개소의 세그먼트 이음부(3개의 세그먼트)로 구성된다. 1/2 지점 중앙부에 사재가 설치되는 것이 합리적이나

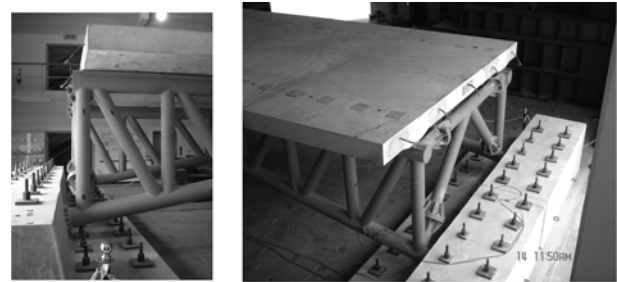


그림 2. 고정단 지점부의 형상

상현재와 하현재 사이 거리가 짧아 제작과정에서 설치가 어려워 수직재의 간격을 조정하고 사재를 생략하였다. 상현재와 하현재는 콘크리트 충전강관이고, 수직재와 사재는 중공강관이며, CFT 트러스 거더가 조립식으로 제작되기 때문에 상현재와 하현재에 이음부가 존재한다(그림 1 참조). 단순교로 시공하는 경우, CFT 트러스 거더의 지점부의 지지조건은 강결구조, 힌지롤러구조 및 양단핀구조 등이 가능하다. 강결구조와 양단 핀구조는 하현재에서 압축력이 지배하지만, 힌지롤러구조에서는 인장력이 지배적으로 발생하여 구조효율성이 저하된다. 모형교량의 양단지지조건은 강결구조인 고정단 지점(그림 2 참조)을 적용하였으며, 주요 단면치수는 표 1에 수록하였다. 그림 1에 나타난 거더의 경간(L)은 20m이며, 하현재의 f/L 비는 0.05이다. 강관에 사용된 강재는 STK400이고 충전 콘크리트의 설계강도는 35 MPa(실린더 측정 강도 38 MPa)이다. 바닥판은 설계강도가 45 MPa인 전두게 프리캐스트 바닥판으로 바닥판내에 설치된 전단포켓을 통해서 등간격으로 배치된 전단연결재를 CFT 트러스 거더 상현재에 접합하여 합성시켰다.

표 1. CFT 트러스 거더의 단면 치수

f/L 비		0.05
상현재 및 하현재	강관 외경(mm)	216.3
	강관 내경(mm)	200.3
	강관 두께(mm)	8.0
수직재 및 사재	강관 외경(mm)	165.2
	강관 내경(mm)	151.2
	강관 두께(mm)	7.0
H1 (mm)		1500
H2 (mm)		820
H3 (mm)		500

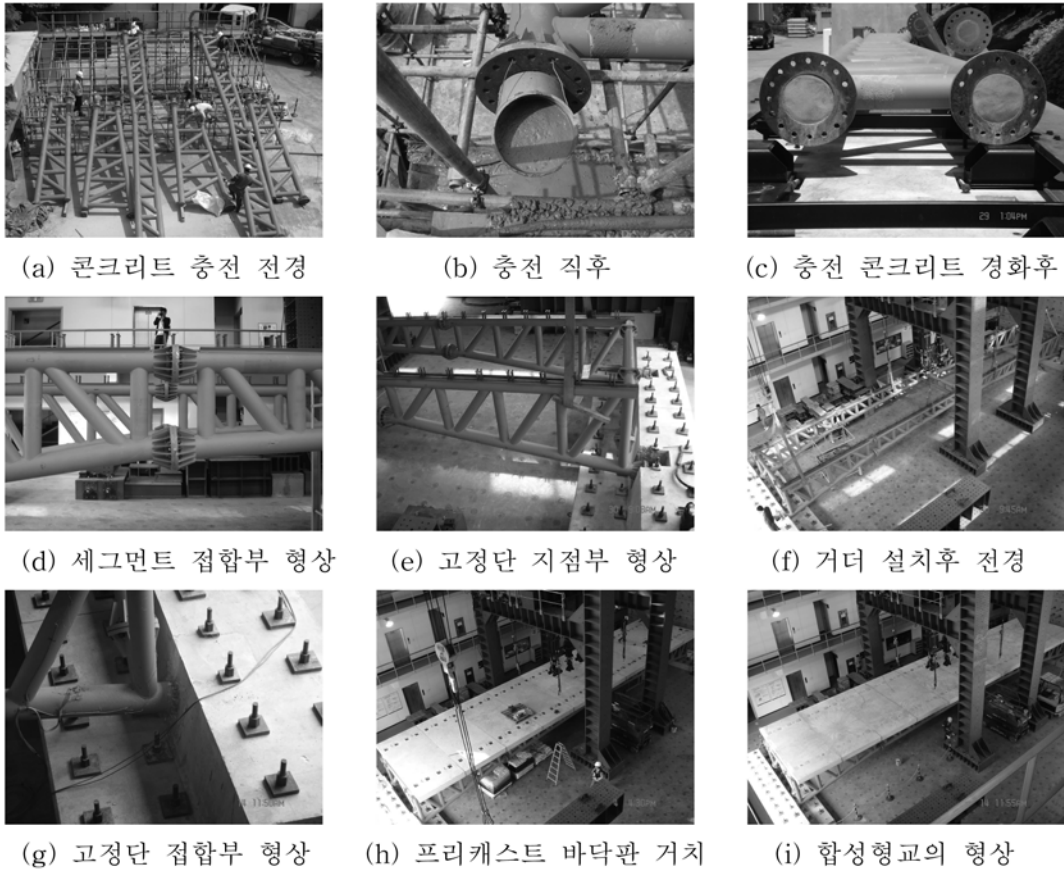


그림 3. CFT 트러스 거더 합성형교 제작과정

CFT 트러스 거더 합성형교의 제작과정을 간략히 요약하면 그림 3과 같다. 그림 3의 (a)~(c)는 각 세그먼트 거더에 콘크리트를 충전하고 경화가 완료된 전경이다. (d)는 세그먼트로 조립되는 CFT 트러스 거더의 접합부 형상이며, (e)는 2개의 CFT 트러스 거더를 브레이싱으로 연결한 후 고정단 콘크리트 블록에 거치시킨 전경이다. (f)는 거더 조립 후의 전경이고, (g)는 거더와 콘크리트 블록을 접합한 고정단 지점부의 형상이며, (h)는 거더 위에 프리캐스트 바닥판을 조립한 상태이다. (i)는 프리캐스트 바닥판의 일체성 확보를 위해 바닥판내에 교축방향으로 설치된 강선을 긴장한 후, 프리캐스트 이음부 및 전단포켓에 모르터를 타설함으로써 합성시킨 모형교량의 전체 형상이다.



그림 4. 위치별 브레이싱 형상

3. 자유진동 실험 및 해석

3.1 자유진동 실험 및 결과

이 실험에서는 2개의 CFT 트러스 거더로 구성되는 합성형 교량에 대한 자유진동실험을 수행하였다. 양단 지점부와 중앙 경간부에 총 3개의 중공단면 브레이싱을 설치하였으며, 그림 4에 위치별 브레이싱 형상을 나타내었다. 고유진동수를 측정하기 위한 동적실험은 타격 햄머(impact hammer)에 의해서 수행되었다. 연직 및 수평방향 진동을 측정하기 위해 지점부로부터 L/4, L/2, 3L/4 만큼 떨어진 총 6개소의 상현재에 가속도계를 부착하였다(그림 7 참조). 상현재에 부착된 가속도계의 전경은 그림 5와 같고, 타격 전경은 그림 6과 같다.

동적실험시 타격 햄머로 중앙 경간부를 연직 및 수평방향



그림 5. 가속도계 부착 전경



그림 6. 타격 전경

표 2. 자유진동실험에 의한 고유진동수

모드	고유진동수(Hz)	
	연직방향	수평방향
1차	7.251	8.789
2차	24.219	10.449

으로 각각 4회씩 타격하였다. 각 가속도계에서 측정된 가속도의 시간이력과 고유진동수를 그림 8에 나타내었으며, 측정된 CFT 트러스 거더 모형교량의 연직 및 수평방향 고유진동수는 표 2와 같다.

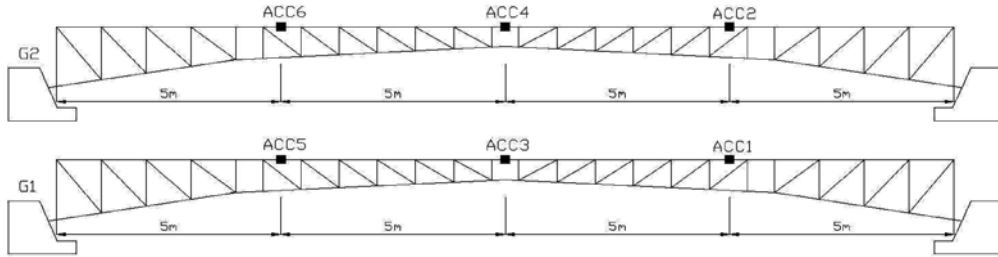
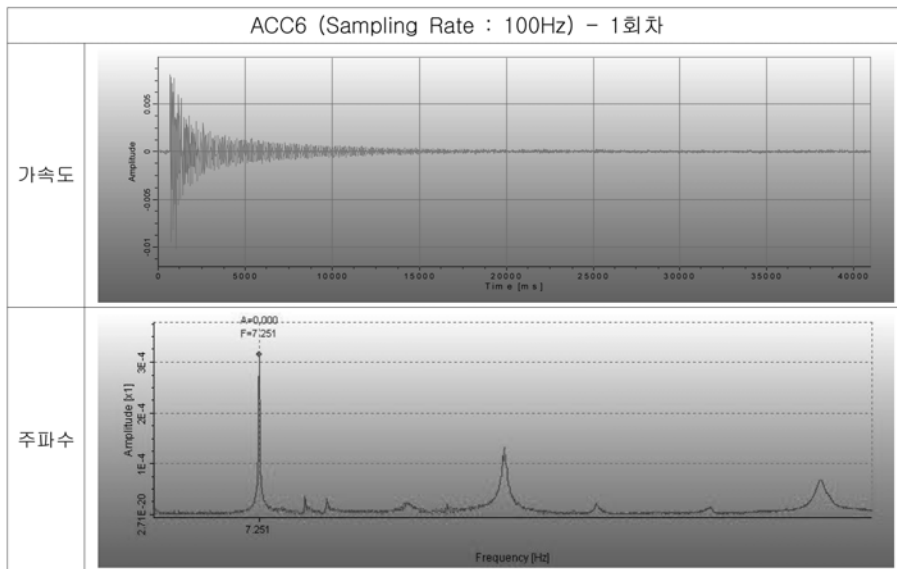
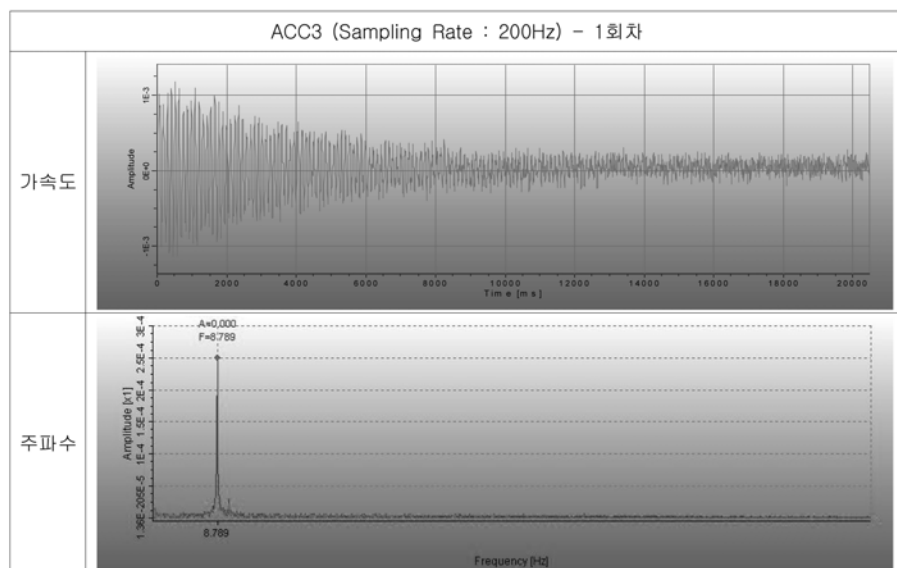


그림 7. 가속도계 부착위치



(a) 연직방향 가속도 및 고유진동수



(b) 수평방향 가속도 및 고유진동수

그림 8. 자유진동실험 결과

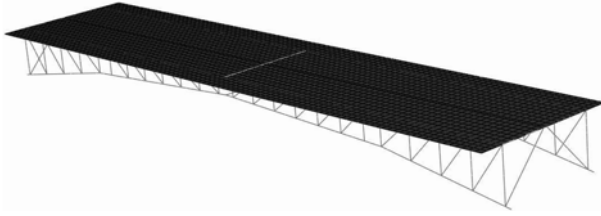


그림 9. 자유진동해석 모델 형상

3.2 자유진동 해석 및 결과

2개의 CFT 트러스 거더로 구성되는 합성형 모형교량의 자유진동해석을 수행하기 위해 구성된 3차원 보요소 유한요소 모델의 형상은 그림 9와 같다. CFT 합성단면을 3차원 보요소로 모델링하여 해석하기 위해서는 합성단면의 유효강성(E_s , I_s)이 요구되는데, 각 코드에 제시되어 있는 합성단면의 유효강성 산정식을 적용하여 탄성범위 내에서 CFT 합성단면의 구조성능을 평가하는 경우에는 코드별로 상당한 차이를 보인다. 정철현 등(2009)은 CFT 트러스 거더의 자유진동실험 및 해석을 통해 얻어진 고유진동수를 비교분석한 결과, ACI(2002)와 LRFD-AISC(2005)에 제시된 합성단면 유효강성 평가식을 적용한 경우의 해석결과가 실험결과에 가장 근접함을 확인하였다. 따라서 본 해석에서는 충전단면인 상현재와 하현재에 ACI 코드에 의해서 산정된 합성단면의 유효강성(표 3 참조)을 적용하였다.

자유진동해석시 CFT 트러스 거더에 설치되는 브레이싱의 위치, 개수 그리고 브레이싱 단면의 충전여부 등을 변수로 해석을 수행(표 4 참조)함으로써 브레이싱이 고유진동수에 미치는 영향을 분석하였다. 모든 해석 조건에서 양단 지점부에는 브레이싱을 설치하고, 경간 내부의 브레이싱은 설치 개수를 변수로 하여 해석을 수행하였다. 특히 해석조건 2는 실험이 수행된 CFT 트러스 거더 합성형 모형교량에 해당한다.

표 4에 나타난 각 해석 조건에 대해서 자유진동해석을 수행하여 산정된 고유진동수를 표 5에 정리하였다. 표 5에서 보면, CFT 트러스 거더 합성형교의 경간내에 설치되는 브레이싱 개수의 증가는 수평 및 연직방향 고유진동수에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 브레이싱에 콘크리트를 충전하는 경우와 충전하지 않은 경우는 고유진동수가 큰 차이를 보이지 않았다.

3.3 비교분석

모형교량 실험체인 CFT 트러스 거더 합성형교에는 브레이싱이 단부에 1개씩, 경간 중앙부에 1개 등 총 3개가 설치되었다. 모형교량에 대한 자유진동 실험 및 해석에서 측정된 고유진동수를 표 6에 비교하였다. 동적실험시 수평모드와 연직모드만을 측정하였으므로 해석에서 산정된 이외의 모드에 대한 고유진동수는 비교에서 제외하였다. 해석 및 실험결과

표 4. 자유진동해석시 브레이싱 설치조건에 따른 해석 조건

해석조건	브레이싱 단면형상	브레이싱 설치위치 및 개수	
		1	지점부
2	중공강관	지점부 + 중앙	3개
3		지점부 + 중앙 + L/4 지점	5개
4	충전강관	지점부	2개
5		지점부 + 중앙	3개
6		지점부 + 중앙 + L/4 지점	5개

표 5. 브레이싱 개수 및 충전 유·무에 따른 고유진동수(Hz)

모드	브레이싱 : 중공강관					
	해석조건 1		해석조건 2		해석조건 3	
	수평	연직	수평	연직	수평	연직
1차	9.1696	6.7443	9.1515	6.7185	9.1464	6.7041
2차	12.54	21.961	12.52	21.907	12.493	21.858
3차	28.835		28.808		28.815	
모드	브레이싱 : 충전강관					
	해석조건 4		해석조건 5		해석조건 6	
	수평	연직	수평	연직	수평	연직
1차	9.1024	6.8708	9.0675	6.7918	9.0469	6.7551
2차	13.627	23.977	13.399	23.507	13.327	23.36
3차	30.456		30.087		30.058	

표 6. 모형교량의 고유진동수(Hz)

모드	수평		연직	
	실험	해석	실험	해석
	1차	8.789	9.1515	7.251
2차	10.449	12.52	24.219	21.907

가 약 3.9~16.5%의 차이를 보이는데, 수평모드의 경우 브레이싱 접합부가 볼트연결부로 해석모델에서 강결로 모델하여 나타난 차이로 보인다. 수직모드의 경우 바닥판의 헌치부 부근이나 프리캐스트 베딩층 등을 단순화시켜 모델하고, 베딩층 형성을 위한 탄성재를 해석모델에서는 무시축모르터로 형성되는 베딩층에 포함시켜 모델링하면서 질량이 약간 과다하게 반영된 것이 큰 원인인 것으로 판단된다.

AASHTO(2002) 규정에서 다이아프램은 기하학적 단면형상을 유지하기 위해 거더 사이에 설치하는 횡방향 보강재로서 12m를 초과하는 지간의 최대 정모멘트 발생지점에 설치하도록 되어있다. 따라서 CFT 트러스 거더 합성형교의 거더 사이에 설치되는 브레이싱은 시공단계에서 발생할 수 있는 수평하중 및 세그먼트의 수를 고려하여 최소한의 설치개소를 결정하고, 시공성 향상을 위해 중공단면을 적용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

표 3. 충전강관 합성단면의 유효강성($f_{ck} = 35\text{MPa}$, $E_s = 2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$)

설계기준	단면상수	강재로 환산한 합성단면			콘크리트로 환산한 합성단면		
		I (mm^4)	E (N/mm^2)	A (mm^2)	I (mm^4)	E (N/mm^2)	A (mm^2)
ACI		38311814	199420	9174	306494514	24928	73391

4. CFT 트러스 거더 합성형교의 정적실험

4.1 측정내용 및 위치

정적실험에서는 거더의 주요 위치별 상현재, 하현재, 수직재, 사재에서의 하중증가에 따른 강재의 변형률 변화와 지점부 고정단 블록에 접합되는 하현재 단면내에서의 변형률을 측정하였다. 변위는 경간의 L/4와 L/2 지점의 수직처짐과 정적실험이 진행되는 동안 지점부 고정단 블록의 밀림현상을 확인하기 위해 교축방향 수평변위를 측정하였다. 또한, 바닥판과 거더의 합성효과를 평가하기 위해 바닥판과 CFT 트러스 거더 상현재 사이의 상대변위를 측정하였다. 정적실험시 측정항목은 강재의 변형률, 철근 변형률, 바닥판과 거더의 교축방향 상대변위, 처짐 등이며, 각 측정위치는 그림 10에 나타내었다. 실험체에 설치된 측정기기의 형상과 실험전경은 각각 그림 11과 12에 나타내었다.

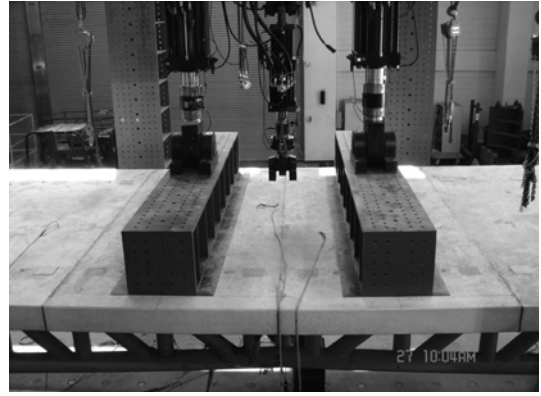


그림 12. 모형교량의 정적실험 전경

4.2 실험결과

4.2.1 하중-처짐 곡선

정적실험을 통해서 측정된 모형교량 거더 하단에서의 하중-처짐곡선은 그림 13과 같다. 모형교량은 거더의 충전 콘크리트가 강재의 국부좌굴을 억제하기 때문에 상당한 수준의 연성거동을 보일 것으로 판단되지만, 파괴시까지 실험을 수행하지 못하고 중단하였다. 그림 14는 모형교량의 지점부 고정단 블록에서 측정된 교축방향 수평변위로서 고정단 지점부가 약간 밀리는 현상이 발생하였으나, 단면내력에 영향을 미칠 정도의 수준은 아닌 것으로 판단된다. 그림 15는 바닥판과 CFT 트러스 거더 상현재 사이에서 측정된 바닥판과 거더간 교축방향 상대변위이다. 일반 단순교에서는 지점부에서 상대변위가 최대가 되는데, 본 CFT 트러스 거더 합성형

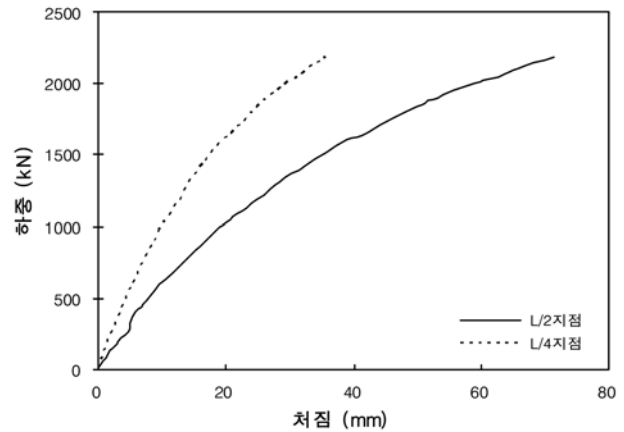


그림 13. 하중-처짐 곡선

모형교량에서는 지점부에서 상대변위가 거의 발생하지 않고 경간내에서 최대상대변위가 발생하였다. 그림 16은 CFT 트러스 거더는 보요소로 바닥판은 판요소로 모델링한 모형교

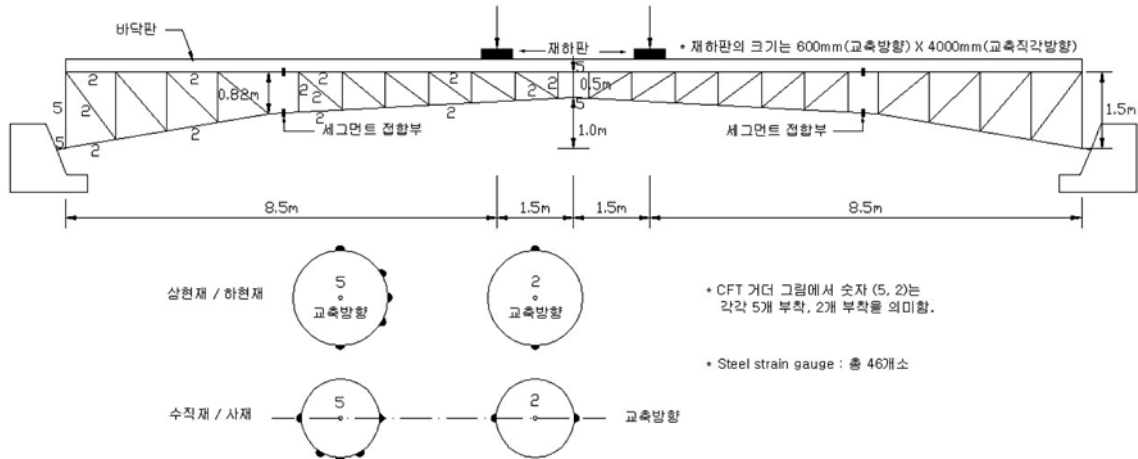
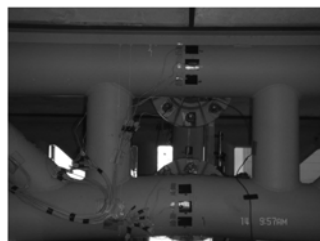


그림 10. 변형률 게이지 측정위치 및 측정개수



(a) 경간 중앙부 변위



(b) 경간 중앙부 거더 변형률



(c) 지점부 거더 변형률

그림 11. 측정 항목

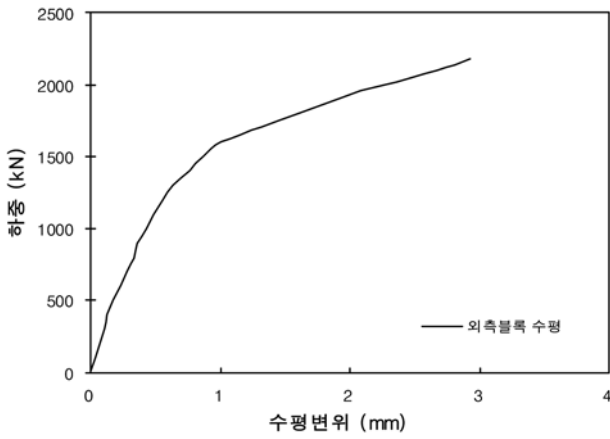


그림 14. 지점부의 수평변위

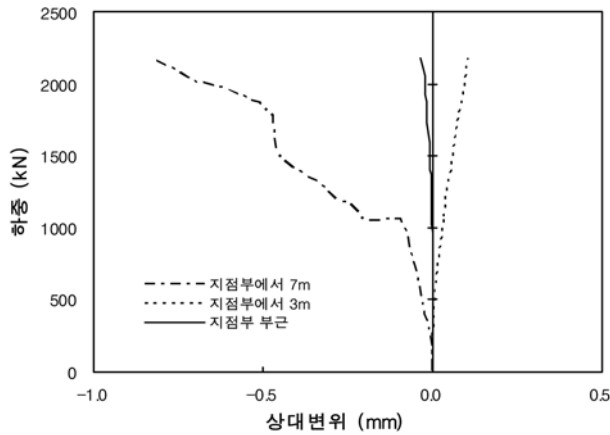


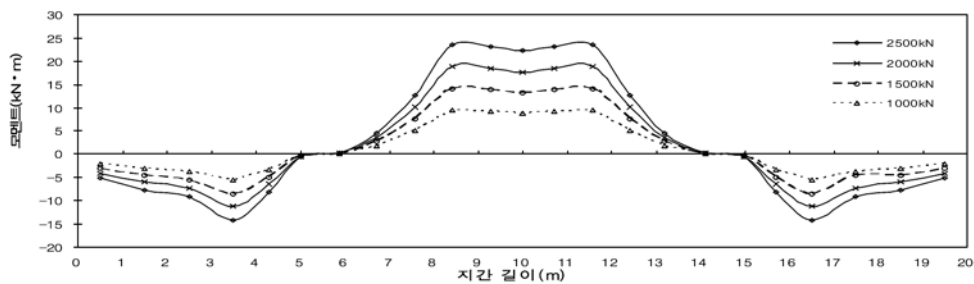
그림 15. 하중상대변위 곡선

량을 선형해석하여 얻은 상현재에서의 모멘트 및 전단력 분포이다. 해석시 작용하중은 실험에서 재하한 하중조건과 동일하게 적용하였다. 그림 16(a)에서 보면, 양단으로부터 약 5~6 m 떨어진 지점에서 모멘트 부호가 바뀌면서 중앙경간부에서 정모멘트가 발생한다. 그림 15에 나타난 상대변위 측정 지점인 단부, 단부에서 3 m, 7 m 떨어진 지점에 대응하는

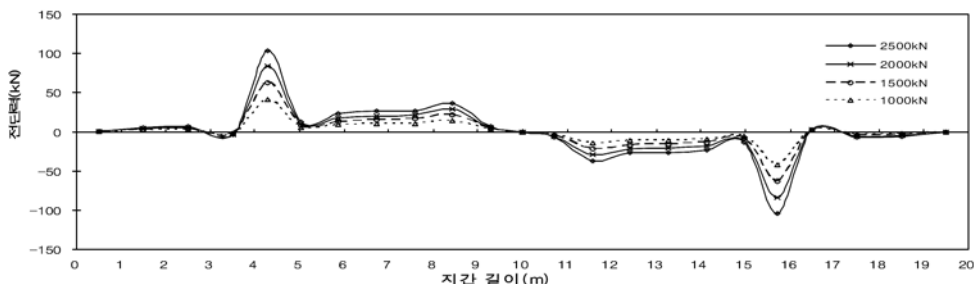
그림 16(b)에서의 전단력의 분포를 보면, 단부에서 7 m 떨어진 지점에서 전단력이 가장 크고, 3 m 떨어진 지점, 단부 순으로 나타나는데, 이는 그림 15에 나타난 각 위치별 상대변위 경향과 잘 일치한다. 그러나 바닥판과 거더의 교축방향 상대변위는 중앙부 거더 단면의 항복 이후에도 상당히 작은 수준인 것으로 보아 전단연결재가 충분한 강성을 발휘하여 CFT 트러스 거더 합성형 모형교량은 완전합성에 가까운 거동을 보이는 것으로 판단된다.

4.2.2 하중-변형률 곡선

그림 17은 지점부와 중앙 경간부에 설치된 브레이싱에서 측정된 변형률로서 상대적으로 바닥판의 강성이 크기 때문에 브레이싱에서 발생하는 변형률은 매우 낮은 수준이다. 따라서 CFT 트러스 거더와 바닥판이 합성된 이후에는 브레이싱의 구조적인 역할이 매우 낮은 것으로 판단된다. 그림 18은 CFT 트러스 거더 상현재의 상단과 하단에서 측정된 교축방향 변형률로서 경간 중앙부 부근을 제외하고 전반적으로 압축응력이 발생한다. 경간 중앙부 부근의 상현재에서 인장이 발생하므로 중립축은 바닥판내에 존재하며 정모멘트가 발생한다. 또한 나머지 구간에서는 압축이 발생하는 것으로 보아 부모멘트가 발생함을 알 수 있다. 그림 19는 상현재 상단 및 하단에서 측정된 지간위치별 변형률을 하중단계별로 나타낸 것으로서 지간내에서 부모멘트와 정모멘트가 변화하는 위치를 확인할 수 있다. 이는 그림 16에 나타난 해석결과와도 유사한 경향으로 이치형상의 하현재를 갖는 CFT 트러스 거더의 특성에 기인한다. 그림 20은 CFT 트러스 거더 하현재에서 측정된 변형률로서 상현재에서의 경향과 유사하지만, 부모멘트 영역에서는 항복수준의 압축변형률이 발생하고, 중앙경간부 하현재 하단에서는 항복수준을 초과하는 인장변형률이 발생하였다. 그림 21은 하현재 상단 및 하단에서 측정된 지간위치별 변형률을 하중단계별로 나타낸 것으로서 상현재에 비해서(그림 19 참조) 정모멘트 영역이 증가하는 경향을 보였다.



(a) 모멘트 분포



(b) 전단력 분포

그림 16. CFT 트러스 거더 상현재에서의 모멘트 및 전단력 분포

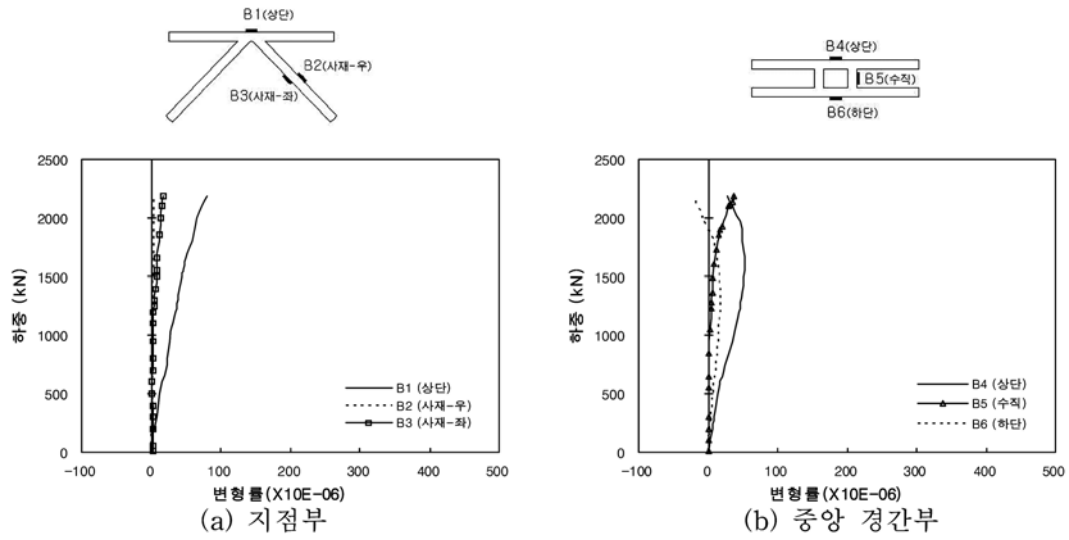


그림 17. 브레이싱의 하중-변형률 곡선

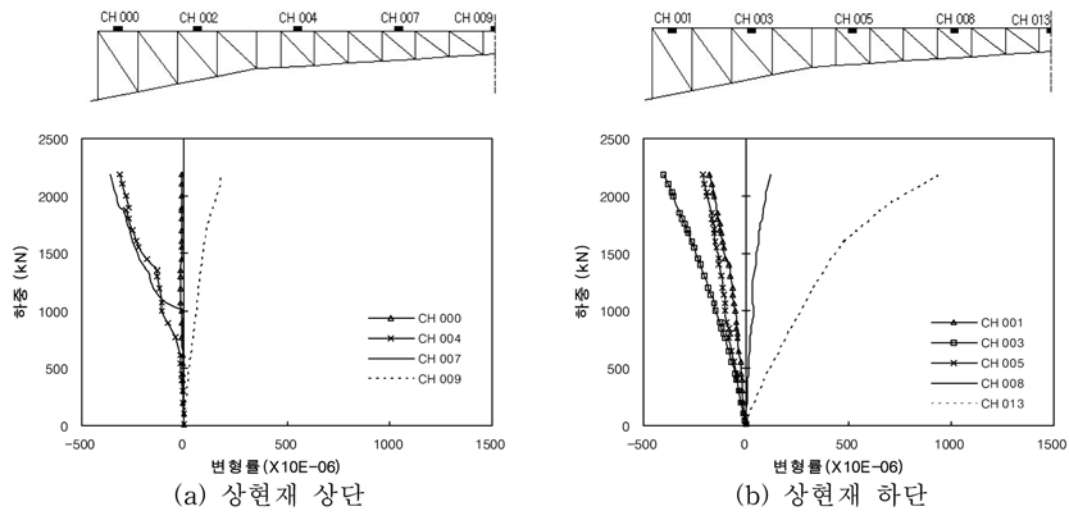


그림 18. 거더 상현재에서의 하중-변형률 곡선

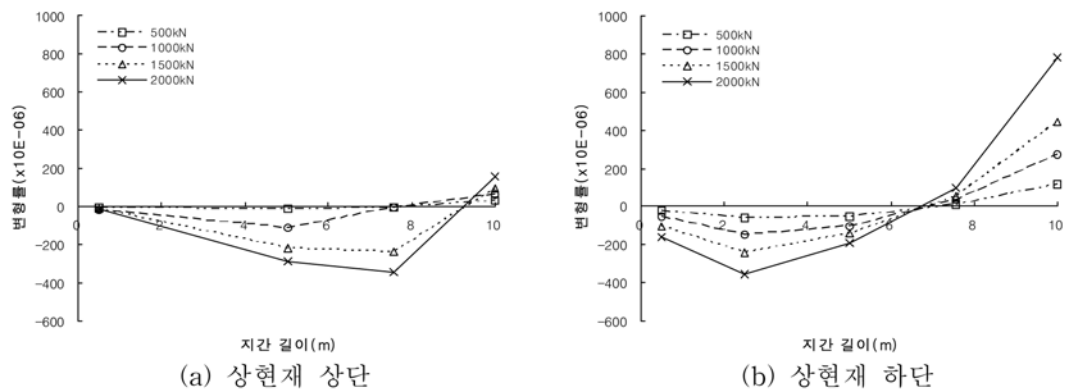
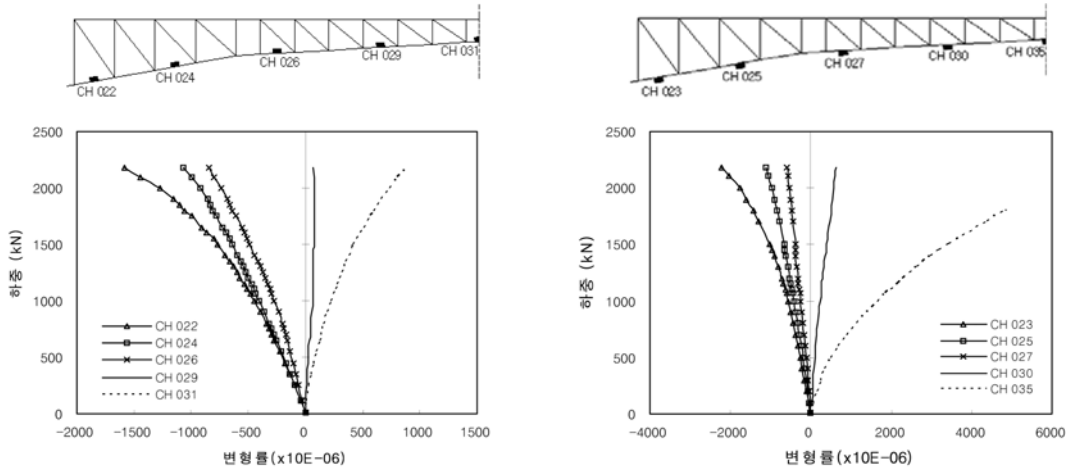


그림 19. 상현재의 지간내 변형률 분포

그림 22는 경간 L/2 지점 CFT 트러스 거더 단면에서 측정된 변형률로서 상현재와 하현재에 모두 인장응력이 발생하는 것으로 보아 바닥판과 CFT 트러스 거더의 합성단면에서 중립축은 바닥판내에 위치하는 것을 알 수 있다. 하현재에서는 최상단부를 제외한 단면에서 모두 항복수준을 초과하는 응력이 발생하였는데, 최초 항복이 발생하는 하현재 최하단부의 항복하중은 약 1108 kN이다. 이는 DB-24 설계활하중(450 kN)의 약 2.5배에 해당하는 하중수준이다.

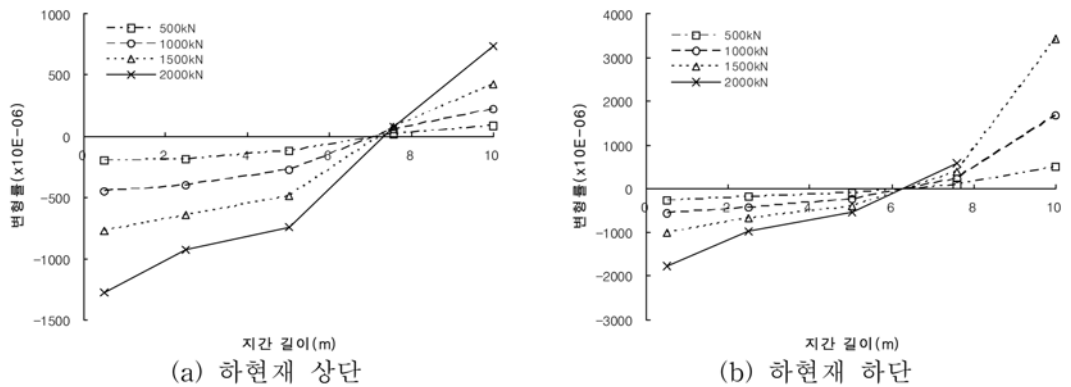
그림 23은 고정단 지점에 접합되는 하현재에서 측정된 단

면내 변형률로서 전체 단면에서 압축응력이 발생하는데, 최하단부에서 약 1803 kN일 때 항복이 시작되는 것으로 나타났다. 이는 약 1108 kN에서 항복이 발생하는 중앙 경간부 하현재 최하단부에 비해서 상대적으로 항복하중이 약 62% 정도 높은 수준이다. 바닥판이 합성되지 않은 단일 CFT 트러스 거더에서는 중앙 경간부보다 지점부 부근 하현재에서 먼저 항복이 발생하였는데(송나영 등, 2009), 모형교량의 CFT 트러스 합성 거더에서는 중앙 경간부에서 가장 먼저 항복이 발생하였다. 따라서 CFT 트러스 거더 합성단면 설계



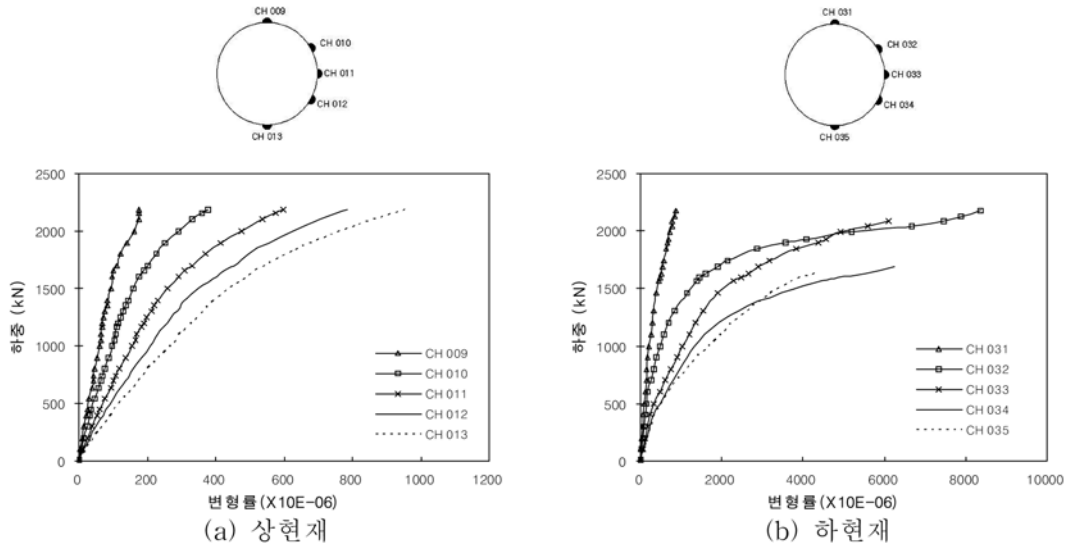
(a) 하현재 상단 (b) 하현재 하단

그림 20. 거더 하현재에서의 하중-변형률 곡선



(a) 하현재 상단 (b) 하현재 하단

그림 21. 하현재의 시간내 변형률 분포



(a) 상현재 (b) 하현재

그림 22. L/2 지점 CFT 단면의 하중-변형률 곡선

시 중앙 경간부에서 결정되는 단면은 고정단 부근에도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

그림 24는 지점부 부근에 위치한 중공단면인 수직재에서 측정된 단면내 하중-변형률 곡선으로 전반적으로 낮은 수준의 압축응력이 발생하였다.

그림 25는 L/2 경간 합성단면내에서의 하중-변형률 곡선으로서 바닥판 상부에 위치한 철근에서만 작은 수준의 압축응력이 발생하고, 나머지 위치에서는 모두 인장응력이 발

생하여 중립축이 바닥판내에 존재함을 확인할 수 있다. 하현재는 모든 단면에서 항복이 발생하고, 상현재 및 바닥판내 하단 철근에서는 항복응력보다 훨씬 낮은 수준의 인장이 발생하였다. 하중단계별 L/2 지점 단면내에서의 변형률 분포는 그림 26과 같다. 그림 26은 고정단 지점에 접합되는 하현재에서의 하중단계별 단면내 변형률 분포로서 L/2 지점 단면에 비해서 항복하중이 약 62% 정도 크게 나타났다.

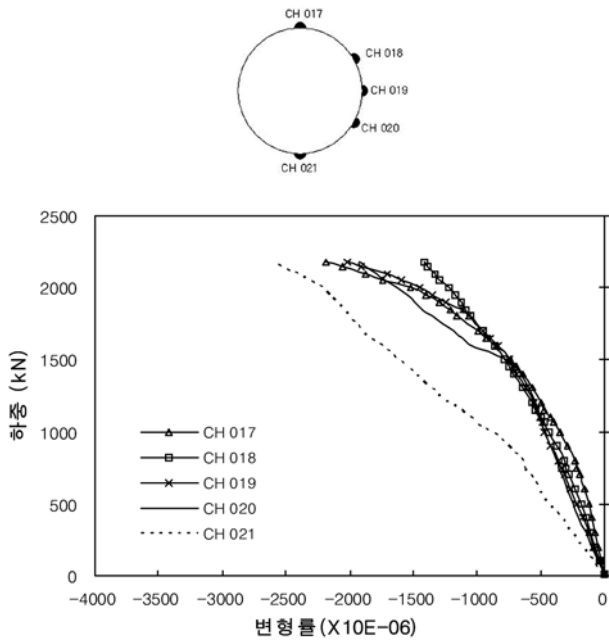


그림 23. 고정단 부근 하현재의 단면내 하중-변형률 곡선

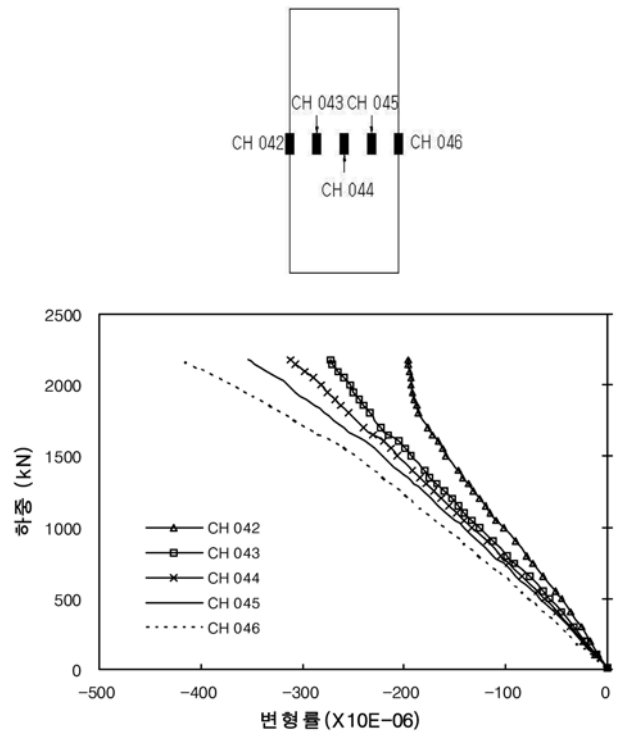
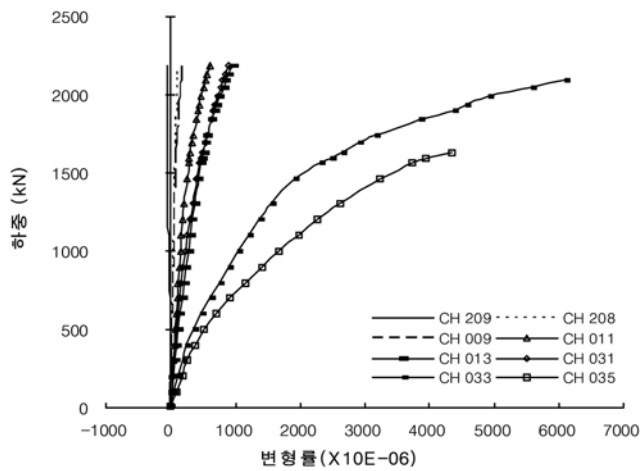


그림 24. 지점부 수직재 단면내 하중-변형률 곡선

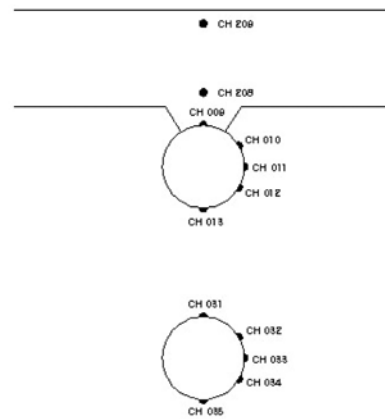
5. 결론

본 연구에서는 정적 및 동적실험을 통하여 조립식 공법으로 제작되는 CFT 트러스 거더 합성형교의 동적성능, 합성거더, 주요 구조부에서의 구조거동을 포함한 구조성능을 평가하였다. CFT 트러스 거더의 상현재와 아치형상을 갖는 하현

재는 콘크리트를 충전한 합성단면이며, 수직재와 사재는 중공단면으로 구성되었다. 동적 및 정적실험이 수행된 CFT 트러스 거더 합성형교에서 CFT 트러스 거더의 상현재와 하현재의 최소거리는 0.5 m이고, 아치형상을 갖는 하현재의 f/L

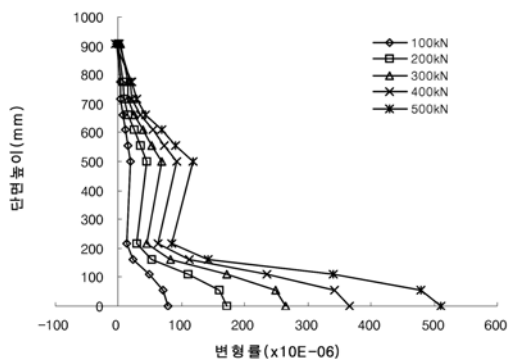


(a) 하중-변형률 곡선

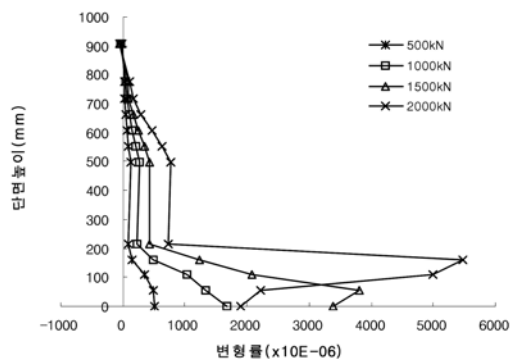


(b) 단면내 변형률 측정위치

그림 25. L/2 지점 단면내 하중-변형률 곡선



(a) 100~500 kN 하중 수준



(b) 500~2000 kN 하중 수준

그림 26. L/2 지점 단면내 변형률 분포

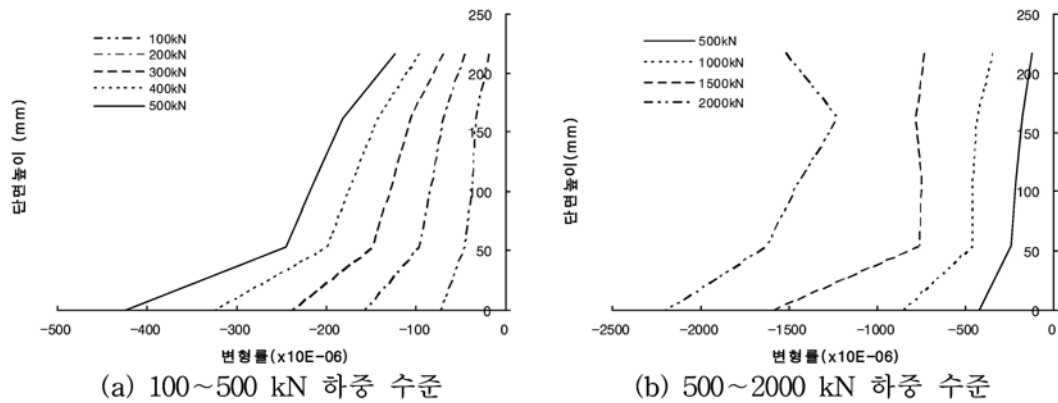


그림 27. 고정단 부근 하현재의 변형을 분포

비는 0.05이다. 정적 및 동적실험을 통해서 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

CFT 트러스 거더 합성형교의 거더 사이에 설치되는 브레이싱의 설치개수와 콘크리트 충전유·무는 고유진동수에 미치는 영향이 매우 작다. 또한, 강성이 큰 바닥판의 영향으로 지점부와 중앙 경간부에 설치된 브레이싱에 발생하는 변형률은 매우 낮은 수준이므로 CFT 트러스 거더와 바닥판이 합성된 이후에는 브레이싱의 구조적인 역할이 매우 낮은 것으로 판단된다. 따라서 시공단계에서 발생할 수 있는 수평하중 및 세그먼트의 크기를 고려하여 최소한의 설치개소를 결정하고, 시공성 향상을 위해 중공단면을 적용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

일반 단순교에서는 지점부에서 상대변위가 최대가 되는데, 본 CFT 트러스 거더 합성형 모형교량에서는 지점부에서 상대변위가 거의 발생하지 않고 경간내에서 최대상대변위가 발생하였다. 이는 해석 및 실험결과와 일치하는 경향이며, 상대변위는 항복 이후에도 작은 수준으로 프리캐스트 바닥판과 CFT 트러스 거더 합성단면은 완전합성에 가까운 거동을 보이는 것으로 나타났다.

경간 L/2 지점 CFT 트러스 거더 합성단면의 상현재와 하현재에서는 모두 인장응력이 발생하였고, 하현재에서는 최상단부를 제외한 단면에서 모두 항복수준을 초과하는 응력이 발생하였는데, 최초 항복이 발생하는 하현재 최하단부의 항복하중은 약 1108 kN 수준이다. 이는 DB-24 설계활하중의 약 2.5배에 해당하는 하중수준이다. 고정단 지점에 접합되는 하현재의 전 단면에서는 압축응력이 발생하는데, 최하단부에서 약 1803 kN일 때 항복이 시작되는 것으로 나타났다. 이는 약 1108 kN에서 항복이 발생하는 중앙 경간부 하현재 최하단부에 비해서 상대적으로 항복하중이 약 62% 정도 높은 수준이다. 바닥판이 합성되지 않은 단일 CFT 트러스 거더에서는 중앙 경간부보다 지점부 부근 하현재에서 먼저 항복이 발생하였는데, 모형교량의 CFT 트러스 합성 거더에서는 중앙 경간부에서 가장 먼저 항복이 발생하였다. 따라서 CFT 트러스 거더 합성단면 설계시 중앙 경간부에서 결정되는 단면은 고정단 부근에도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

수직재에서는 전반적으로 압축응력이 발생하고, 사재에서는 모두 인장응력이 발생하는데, 상현재와 하현재의 항복 이후에도 수직재와 사재에 발생하는 응력은 낮은 수준이다. 따

라서 CFT 트러스 거더 합성형교의 수직재와 사재는 중공단면으로 설계하는 것이 합리적이다.

향후 CFT 트러스 거더 합성형교의 실용화를 위해서는 중지를 갖는 단순교인 경우 지점부의 지지조건에 따른 영향, 연속교인 경우 온도하중이 CFT 단면 크기 및 내부지점부의 지지조건에 미치는 영향 등을 평가하여 설계상세를 결정하는 연구가 필요하며, 연속교의 내부지점부에 대한 실험적 검증도 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

대우건설기술연구소(2008) **조립식 충전강관 합성부재를 이용한 신형식 교량 공법 개발 연구(II)**, 연구보고서.

송나영, 정철현, 김영진(2009) 아치형상의 하현재를 갖는 CFT 트러스 거더의 재료 비선형 해석, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제29권 제6A호, pp. 625-639.

정철현, 송나영, 김인규, 진병무(2009) CFT 트러스 거더의 휨강성 및 진동특성, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제29권 제1A호, pp. 19-30.

정철현, 송나영, 마항욱, 오현철(2009) 아치형상의 하현재를 갖는 CFT 트러스 거더의 구조성능 평가, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제29권 제4A호, pp. 315-327.

AISC (2005) *Load and resistance factor design specification for structural steel buildings*, Chicago: American Institute of Steel Construction Inc., 13th ed.

American Concrete Institute (2002) *Building code requirements for reinforced concrete (ACI, 318-02) and Commentary (ACI 318R-02)*.

Elchalakani, M., Zhao, X.L., and Grzebieta, R.H. (2001) Concrete-filled circular steel tubes subjected to pure bending, *Journal of Constructional Steel Research*, 57, pp. 1141-1168.

Gho, W.M. and Liu, D. (2004) Flexural behaviour of high-strength rectangular concrete filled steel hollow sections. *Journal of Constructional Steel Research* 60, pp. 1681-1696.

Han, L.H. (2004) Flexural behaviour of concrete-filled steel tubes, *Journal of Constructional Steel Research*, 60, pp. 313-337.

Lu, Y.Q. and Kennedy, D.J.L. (1994) The flexural behaviour of concrete filled hollow structural sections. *Can. J. Civil Eng.* pp. 111-130.

Wheeler, A.T. (2000) Thin-walled steel tube filled with high strength concrete in bending, *Engineering Foundation Conferences, Composite Construction IV*, Vol. 2, Banff, Alberta, Canada.

(접수일: 2009.12.15/심사일: 2010.1.24/심사완료일: 2010.2.19)