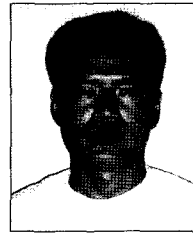


FRP피복 콘크리트 스트럿 부착 PSC 박스거더교의 실물거동평가

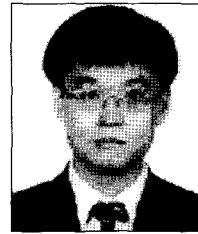
Practical Behavior of PSC Box Girder Bridge with FRP Concrete Struts



박종화*



김영민**



장인호***

*정회원 · 현대건설 기술개발원 부장
**현대건설 기술개발원 과장
***정회원 · 현대건설 기술개발원 차장

1. 서론

PSC 박스거더교는 장경간 거더에 주로 채택되는 경제적인 상부형식이나 광폭이 요구되는 단면에서는 캔틸레버 슬래브의 길이를 늘리는데 한계가 있기 때문에 필요이상의 박스단면이 요구되며, 이로 인해 상부중량이 커져서 내진성능이 불리하고, 과도한 하부 교각의 적용이 필요한 문제가 있다. 이러한 문제점을 극복하고 교량의 경제성 및 미관을 향상시키기 위해 인천대교 연결도로의 교량설계를 수행하면서 FRP피복 스트럿부착 PSC 박스거더교로 상부형식을 개발하였다. 상부형식을 결정하기 위해서 경제성, 구조 효율성, 내구성, 미관 등에 대한 전반적인 검토가 수행되었으며, 본 논문에서는 상부형식을 FRP피복 스트럿 부착 PSC Box로 선정함에 있어서 고려되었던 사항들에 대하여 구체적으로 소개하고, 교량형식의 장단점, 현장 성능검증 시험결과 및 향후 전망에 대해 제시하고자 한다.

2. 공사 개요

인천대교 연결도로공사는 인천 제2연육교와 신공항 고속도로의 교통량 분산, 인천국제공항의 산업 물동량의 원활한 수송도모, 인천경제자유구역 등 연도지역의 개발 촉

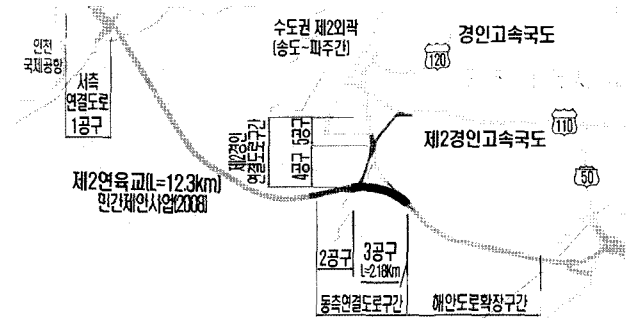


그림 1 공사구간 분할 평면도

진을 목표로 건설교통부와 한국도로공사에서 턴키로 발주한 공사이다. 이중 현대건설이 시공하게 될 구간은 전체 5개 공구중 제3공구로서 그림 1에서 보는 바와 같이 송도 JCT에서 송도 호수공원 및 근린공원을 통과하여 해안도로 IC에 이르는 총 연장 2,180m의 교량구간이다.

3. 스트럿 부착 PSC 박스거더 개발배경

교량이 시공되는 주위의 여건을 살펴보면 송도신도시의 호수공원 및 근린 공원을 가로지르게 되어 있어 송도 신도시 및 해상공원과 잘 어울릴 수 있도록 교량형식 결정시 경관 및 조형성 측면이 특별히 강조되었다.

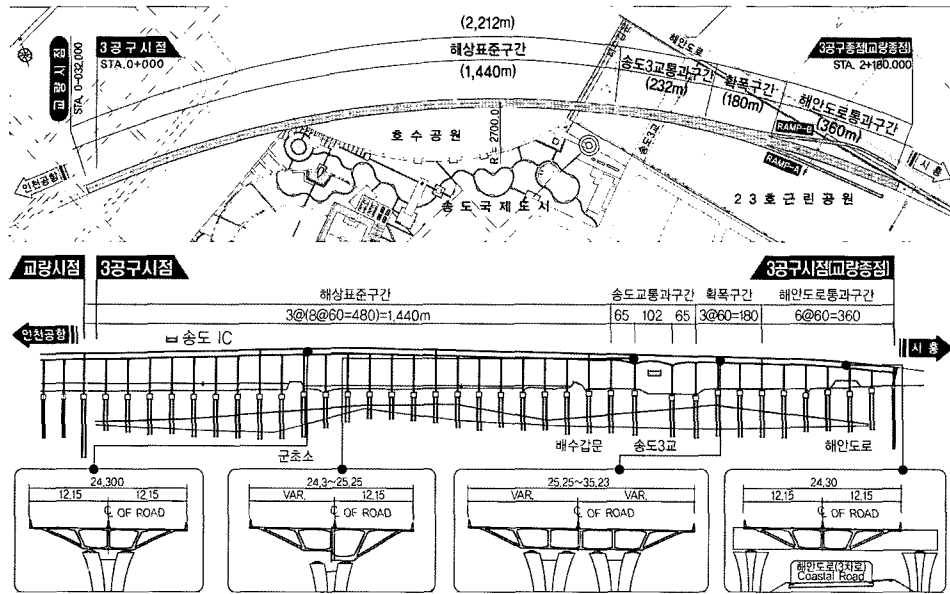


그림 2 공사구간 분할 종단면도

표 1 형식별 상·하부 단면 효율성 비교

상·하행 분리 단면	상·하행 일체 단면	스트럿 부착 단면
<ul style="list-style-type: none"> 상부단면적 : 15.855m² (1.0) 코핑단면적 : 58.450m² (1.0) 기둥단면적 : 28.000m² (1.0) 	<ul style="list-style-type: none"> 상부단면적 : 16.74m² (1.05) 코핑단면적 : 38.50m² (0.66) 기둥단면적 : 26.25m² (0.94) 	<ul style="list-style-type: none"> 상부단면적 : 14.50m² (0.91) 코핑단면적 : 23.88m² (0.41) 기둥단면적 : 14.31m² (0.51)

당초 기본 계획상의 교량형식은 상하행 분리형의 단순 PSC 박스거더로 구성되어 있고, 하부 교각도 2주식의 문형 교각으로 되어있어 상부단면이 일반거더교의 형태로 너무 단조롭고 복잡하며, 조명효과도 단순하며, 둔탁하고 무거운 상부의 영향에 기인하여 하부 기초 역시 경관을 살리는 점에 있어서 한계가 있었다.

우선 상하행 분리의 복잡한 상부배열을 단순화하기 위해 상하행일체형으로 교량형식을 검토하였으며, 같은 문제점들을 극복하고 현장여건과 가장 조화롭게 어울리는 교량의 형태를 검토한 결과 FRP 스트럿 부착 PSC박스거더교의 형태를 상부형식으로 개발하였다.

4. 구조상세 검토

4.1 상하행선 일체의 스트럿 부착 PSC Box Girder의 단면 효율성 검토

상하행 분리 및 일체인 일반 PSC Box단면과 스트럿 부착 단면과의 단면 효율성을 비교한 결과 표 1과 같이 상부 구조의 경량화(8%), 하부구조 축소(48%)의 효과가 있었으며, 이에 따른 내진성능 및 횡방향 효율성의 증가, 하부 개방감 향상에 의한 하부 공간이용 및 경관 개선의 효과를 꾀할 수 있었다.

표 2 재질별 스트럿 특징 비교

제1세대 콘크리트 스트럿	제2세대 강관 스트럿	제3세대 FRP피복 콘크리트 스트럿
<ul style="list-style-type: none"> • 콘크리트 외면으로 미관 불량 • 재도장이 없어 유지관리 용이 • 피복탈락으로 철근노출 발생 • 사례 : SCARDON고가교(프랑스) KOCHETAL교(독일) 	<ul style="list-style-type: none"> • 다양한 색 적용으로 미관 연출 • 재도장으로 유지관리 불리 • 연결부 용접으로 피로에 불리 • 사례 : MEAUX(프랑스) 芝川高架橋(일본) 	<ul style="list-style-type: none"> • 채색이 가능한 FRP 피복 적용 • 재도장이 필요없는 재질 • 콘크리트 탈락억제 효과 • 사례 : 内牧高架橋(일본)

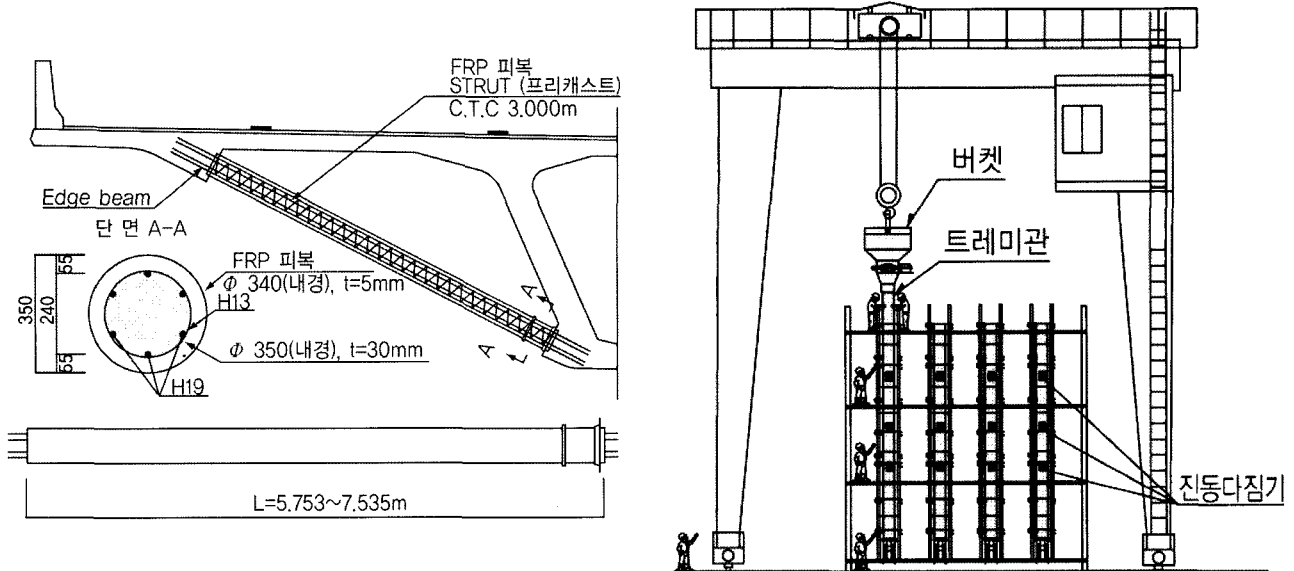


그림 3 스트럿 제작 상세

4.2 FRP 피복 스트럿구조의 특징

FRP 피복 스트럿구조는 콘크리트 스트럿의 미관불량, 강관스트럿의 부식, 유지관리의 어려움, 연결 용접부의 피로문제 등을 효과적으로 개선한 형태로서 채색이 가능한 FRP 피복을 적용함으로써 미관 향상 및 FRP 피복에 의한 부식방지, 내구성 증진을 확보할 수 있고, 현재 FRP 피복과 콘크리트 스트럿 사이의 부착에 대한 설계 기준, 검증이 미비한 관계로 설계에 반영하지는 못했으나 부가적인 보강재로서의 역할도 기대할 수 있다.

5. 스트럿 제작

스트럿 시공은 품질확보를 위해 공장에서 직접 제작하는 것으로 계획하였으며, 확실한 부착을 확보하기 위하여 스트럿 외면에 진동다짐기를 설치하고, 콘크리트 레이턴스를 고려하여 양쪽 5mm씩 여유롭게 제작, 양생 후 고속 세정기로 치핑하도록 계획하였다.

스트럿 제작순서는 표 3과 같다.

표 3 스트럿 제작 순서

순서	항목
①	FRP 피복관 불소도장후 도막보호 설비
②	FRP 피복관 철근망 삽입
③	저판에 강제거푸집 뚜껑 설치
④	정판에 강제거푸집 뚜껑 설치
⑤	콘크리트 타설(FRP 피복관 거푸집 대응)

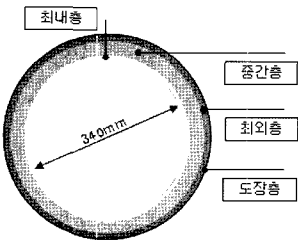
6. 실물재하시험

실물재하시험은 설계시 수행된 FEM해석 결과를 시공 전에 실제 실험을 통해 상호 결과를 비교함으로써 피로 및 파손에 대한 안전성을 검증하기 위해 수행하였다. 시험에 앞서 스트럿의 외피를 감싸고 있는 복합재료(FRP)의 제작을 위한 제작 기준 및 품질검증을 위한 시편시험을 수행 후 실물재하시험에 적용하였다.

6.1 FRP 스트럿 성능평가

FRP 스트럿은 지진하중과 같이 극한하중의 작용 시 붕

표 4 FRP관의 단면 구성

내 용				
구 조	기 능	두 겜	재 료	
	최내층	콘크리트 알칼리에 대한 FRP의 내화학성	0.5mm	에폭시 수지
	중간층	형상유지, 내력저항	3.0mm	유리섬유+에폭시 수지
	최외층	UV차단, 내후/내화성, 차후 보수/보강대비	1.5mm	UV차단포+유리섬유+에폭시 수지
	도장층	내후성, 미관	≥ 60 μ	볼소도장(유색)

피유발부재로 고려할 수 있는 구조로서 피복콘크리트의 박락을 방지하기 위하여 FRP 외형관이 부착되어 있으며, 외형관의 최대두께는 최적설계 결과 1.8mm이지만 안전측 시공을 위하여 3.0mm로 결정하였다.

6.2 FRP관의 인장실험

인장시편실험은 인장하중에 대한 복합재료의 탄성계수, 강도, 포아송비, 파단연신을 값 등을 구하는 실험으로 원주방향의 강도는 관이 콘크리트충진 복합재료 시편에서 콘크리트의 파괴 후 콘크리트를 구속하는 압력을 평가하는데 이용되며, FRP관의 횡방향 인장시편실험은 split-disk test 방법을 사용하였다.



그림 4 Split-disk 실험전경

실험 장치 중 관을 인장시키는 반원의 두 강관은 인장력을 충분히 발휘하게 하려고 FRP관의 곡률과 같도록 제작하였으며, 관의 파괴면을 예측할 수 있도록 각각의 반원 사이에 반지름보다 2.0mm씩 작게 제작하였고, 파괴 예측면에 원주방향으로 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다. 인장시편실험의 변위조건은 1.5mm/min으로 하였다.

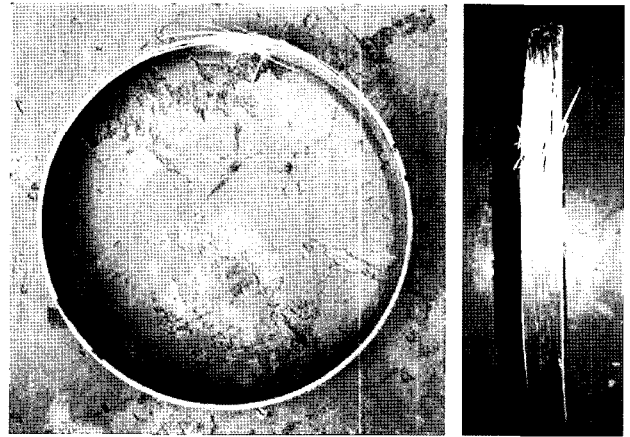


그림 5 인장시편의 파괴형상

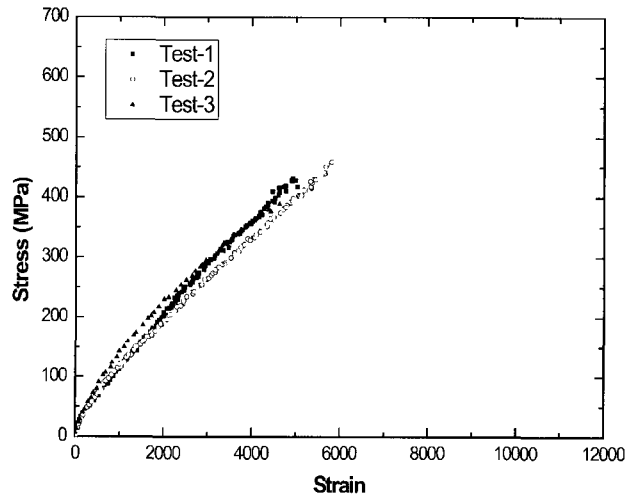


그림 6 인장시편의 응력-변형률 곡선

6.3 FRP관의 인장실험 결과

인장시험 결과 시험체의 파괴양상은 소성구간이 없이 탄성거동을 보이다가 섬유파단이 일시에 발생하는 취성파괴가 발생하였다. 인장강도는 586MPa, 인장탄성계수는 46GPa이며, 설계에 반영된 각각의 최소요구치인 370MPa, 30GPa를 만족하였다.

표 5 인장시편 실험결과

구분	파괴하중 (tonf)	파괴응력 (MPa)	평균파괴 변형률 (10^{-6})	탄성계수 (GPa)
시편 1	15.125	583.730	15,661	46.44
시편 2	15.033	576.745	14132	47.30
시편 3	15.560	596.964	15,566	43.05
평균	15.269	585.813	15,117	45.60
최소요구치	-	370	-	30.00

6.4 실물재하시험

철근콘크리트 충전 FRP 스트럿을 가진 PSC 박스거더에 대해 재하시험 전 대상구조물의 거동특성을 파악하고, 모형시험체 제원, 센서 부착위치 및 종류, 하중재하방법 및 위치, 재하장치 구성 및 설계 등 현장 실물 모형시험과 관련된 제반사항을 계획하였다. 실물 모형시험에 적용할 재하하중의 크기는 설계하중(DB-24)의 축중 및 재하방법을 고려하여 정하였다. 또한 모형시험체의 응답측정은 FRP 스트럿, 상부슬래브 및 엣지빔(edge beam)을 대상으로 하였으며 주요 부위에 대한 변위와 변형률을 측정하였다. 제반 여건을 고려하여 모형시험체의 길이는 5m로 계획하였으며, 스트럿은 양쪽에 2개씩 배치하였다. 해상표준구간

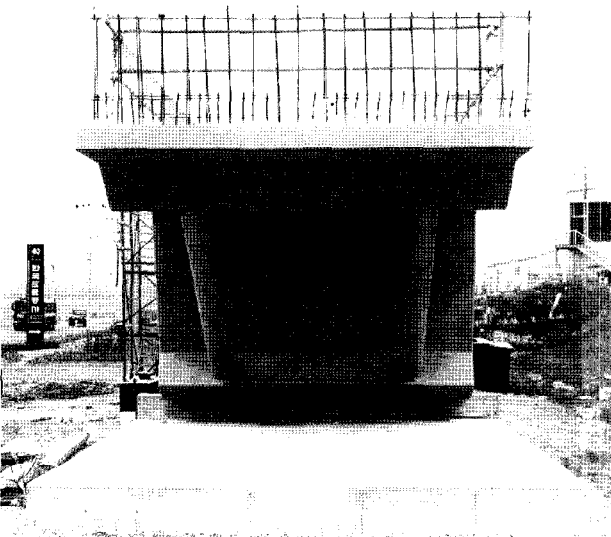
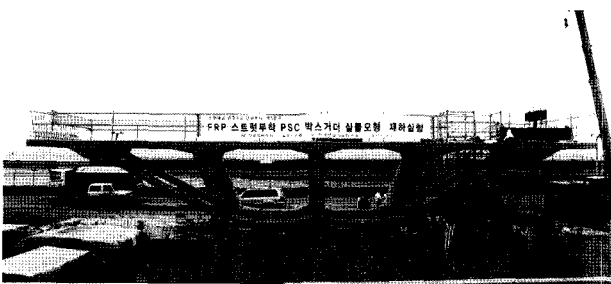


그림 7 모형시험체 전경

단면을 시험체 단면으로 선정하였으며, 모든 제원은 실제 교량과 동일하게 적용하였다.

FRP 스트럿을 가진 PSC 박스거더를 모형화한 시험체의 스트럿, 상부슬래브 및 엣지빔의 거동특성을 파악하기 위해 총 5가지의 하중경우를 정하였다.

표 6 하중경우별 주 검토대상 구조부재 및 거동

구분	주요 분석 내용	비고
LC 1	상부 슬래브의 교축 및 교축직각방향 거동	1점 재하
LC 2	엣지빔의 교축방향 거동	
LC 3	스트럿 본체의 압축 및 휨 거동	
LC 4	LC2와 LC3에 대응하는 차량 축하중 모사	2점 재하
LC 5		

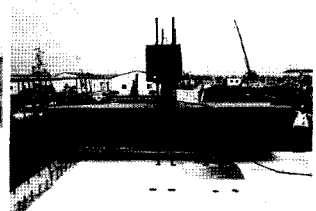
각 하중의 경우에 대하여 1축 및 2축으로 하중을 재하하였으며 실물모형시험 재하장치는 재하관, 유압잭, 가력지그 및 강봉, 앵커볼트, 반력상판 등으로 구성되었다. 재하하중은 모형교량의 거동을 조사하기 위하여 최대 등가설계하중의 약 2배에 해당하는 하중을 재하하중으로 계획하였다.

6.4.1 센서 종류 및 부착위치

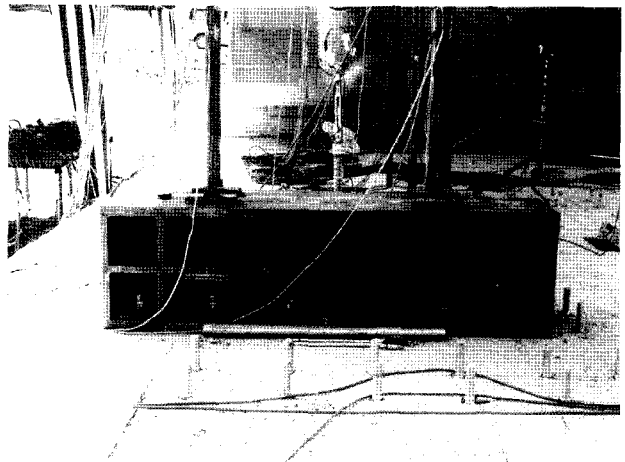
센서는 PSC 박스거더 상부슬래브, 엣지빔, FRP 스트럿 본체 및 정착부의 실거동특성을 충분히 반영할 수 있도록 강



(a) 1축 재하



(b) 2축 재하



(c) 반력상판측 가력지그

그림 8 하중재하 전경

재 및 콘크리트 변형률계와 변위계를 사용하여 하중재하위치에 따른 최대응답을 산출할 수 있는 위치에 부착하였으며, 이때 PSC 박스거더 상부슬래브 및 FRP 스트럿 내부에 부착하는 강제변형률계는 내부의 철근에 매입하여 부착하였다.

표 7 부착센서의 종류 및 수량

센서종류		수량(개)	비고	
강재 변형률계	상부슬래브	28	상부슬래브 상·하면에 부착 콘크리트 내부에 매립	
	스트럿	철근	18	콘크리트 내부에 매립
		FRP	54	FRP 스트럿 외부에 부착
콘크리트 변형률계	상부슬래브 하면	3	콘크리트 하면에 부착	
변위계	수직	19	콘크리트 상부슬래브 하면 FRP 스트럿 수직 변위 반력상관 수직변위	

6.4.2 하중 경우별 시험결과 분석

■ Load Case 1

LC1은 박스거더의 웨브에서부터 스트럿으로 지지되는 상부슬래브 콘크리트의 안전성을 평가하기 위하여 고려된 재하하중 위치이다.

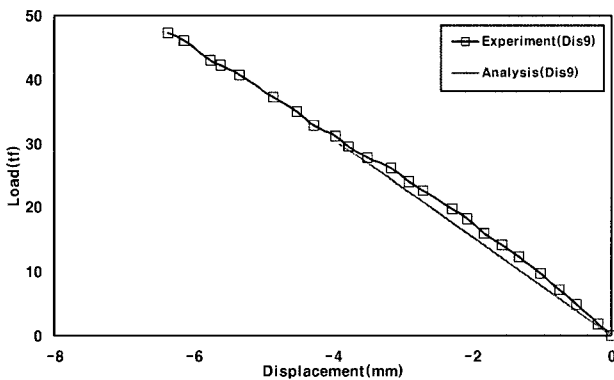


그림 9 상부슬래브의 하중-변위곡선

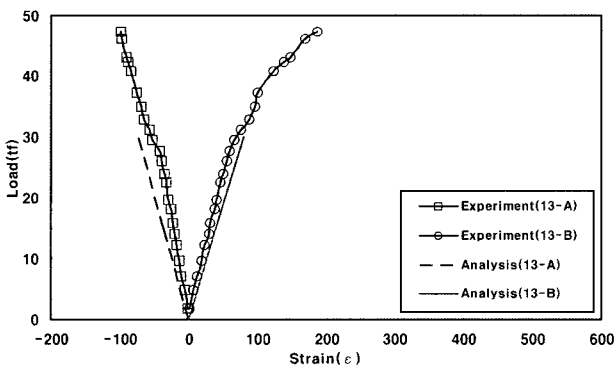


그림 10 상부슬래브 교축 직각방향의 하중-변형률

■ Load Case 2

LC2는 상부슬래브를 지지하고 있는 스트럿과 스트럿사이의 엷지빔 중앙부에 재하하였으며, 스트럿의 거동과 엷지빔의 교축방향 거동을 분석하기 위하여 고려된 재하하중 위치이다.

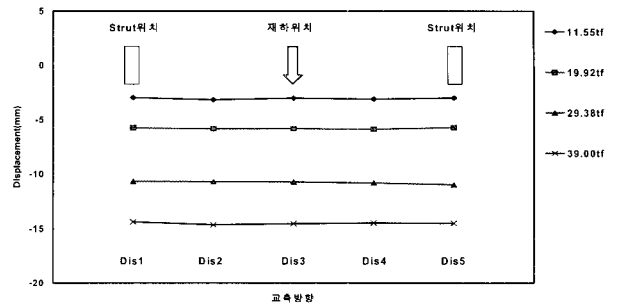


그림 11 재하시 엷지빔의 변위

■ Load Case 3

LC3은 상부슬래브를 지지하는 스트럿의 상부에 1점 하중을 재하하는 경우로서 스트럿의 안전성을 평가하기 위한 하중재하 위치이다.

FRP 스트럿을 가진 PSC 박스거더 교량의 안전성을 평가를 위하여 실물모형 현장 재하시험 수행하고, 재하시험과 유한요소해석 결과의 비교분석 내용은 다음과 같다.

- PSC 박스거더 및 FRP 스트럿은 설계하중 하에서 강도 및 사용성 측면에서 안전성을 확보하였다.
- FEM 해석결과는 전반적으로 시험결과에 근접한 결과를 나타내었으며, 실제 설계하중과 등가의 재하하중에 대해서 시험 및 해석에 의한 결과 모두 안전측의 결과를 나타내었다.
- 시험결과 상부 슬래브 콘크리트에서 슬래브 하면 철근의 변형률은 재하하중까지 선형거동을 나타내며, 설계하중에 의하여 슬래브 콘크리트에 최대내력이 발

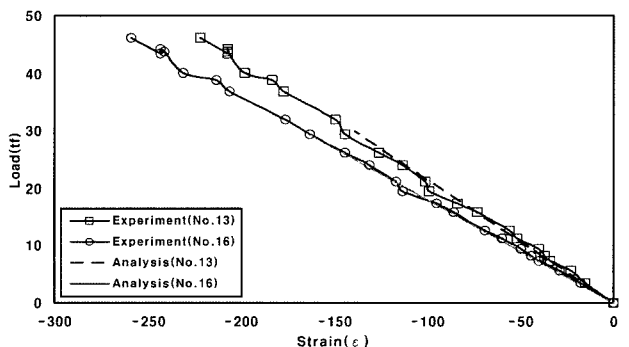


그림 12 스트럿 하부 하중-변형률

생하는 등가의 재하하중에 대하여 충분한 내하성능을 가지고 있는 것으로 판단된다.

- 옛지빔의 경우, 하중의 증가에 따라 옛지빔이 전체적으로 균일한 처짐을 나타내어 높은 강성을 지니고 있는 것으로 나타났다. 옛지빔 중앙부 하면에서는 상대적으로 큰 응력이 발생되나 등가설계하중 보다 큰 부근에 이르러야 균열응력을 초과하는 것으로 나타나므로 안전성을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

7. 결론 및 향후과제

FRP피복 스트럿 부착 PSC 박스거더교의 실물성능 재하 시험 및 수치해석 결과에 대한 비교분석 결과 충분히 안전한 거동을 확인하였으며, 예측치와 거의 일치하는 결과가 제시되었다. 결과적으로 FRP 스트럿 부착 단면은 구조효율성을 극대화하였고, 내구성 증진 및 미관개선에 탁월한

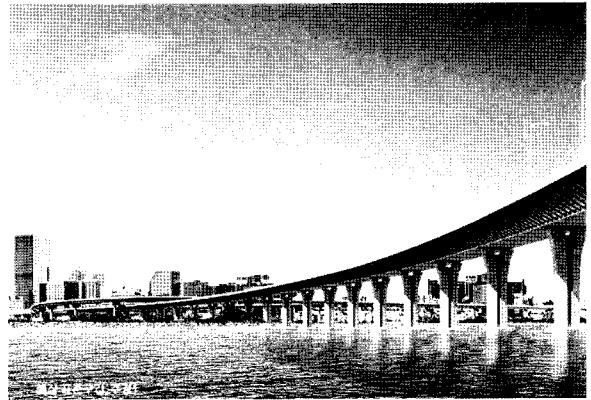


그림 13 교량 완공시 조감도

효과가 있는 단면이라 판단된다. 향후 FRP와 콘크리트 사이의 합성거동에 대한 심층적 연구를 계속 추진할 예정이며, 이러한 연구결과가 교량설계에 적용되면 상부교량 형식의 경쟁력 있는 대안으로서 자리매김할 수 있으리라 판단된다. 