

복합소재 바닥판 교량의 현장적용과 재하시험

Field Application and Load Test of Composite Deck Bridge

이 성 우*
Lee, Sung Woo

김 제 인**
Kim, Je In

조 남 훈***
Jo, Nam Hoon

양 필 승****
Yang, Pil Seung

ABSTRACT

To substitute conventional reinforced-concrete bridge deck, glass composite precast bridge deck - Delta Deck™, which possesses advantages of light weight, high strength, corrosion resistance and durability, is developed for the DB24 truck load. Pultruded composite bridge deck is designed and fabricated. In this paper some field applications and field load test of developed composite deck bridge are presented.

1. 서 론

현재까지 교량의 바닥판은 주로 철근 콘크리트로 만들어져 왔으나 콘크리트의 열화와 철근의 부식으로 내구연한이 15~20년 정도로 현저히 감소되고, 열화된 바닥판의 교체비용과 공용시 유지관리비용이 현저히 증대되는 문제점이 있다. 경량·고내구성·고강도 특성의 복합소재 교량 바닥판은 이러한 문제를 근원적으로 해결할 수 있어 교량 바닥판의 새로운 대안으로 떠오르고 있다. 본 논문에서는 델타데크 복합소재 교량 바닥판의 현장 적용 현황을 기술하고 현장재하시험 및 구조해석을 실시하여 구조 안전성을 검증하였다.

2. 델타데크 복합소재 교량 바닥판의 특성

복합소재 바닥판 단면은 3셀 중공형태로 상부판, 하부판 및 복부판으로 구성되어 있으며, 고품질 대량생산에 적합한 인발성형(Pultrusion)공정으로 제작된다.⁽¹⁾ 그림 2.1에서는 델타데크 복합소재 바닥판의 단면 제원을 보여주고 있다.

교량의 성능개선 및 신설시 복합소재 교량 바닥판 ‘델타데크’를 사용하면, 차량통제기간을 최소화시켜 차량지체로 인한 에너지 비용을 현저히 절감하고 시민불편을 최소화시키며, 공기단축으로 공사비를 대폭 절감할 수 있을 뿐만 아니라 내부식, 고내구성 특성으로 인해 콘크리트 열화로 인한 문제점을 근원적으로 방지하고, 내구연한을 현저히 증대시킬 수 있어 수명기간 대비 실질 투자비용이 크게 감소한다. 그림 2.2에서는 ‘델타데크’가 설치된 콘크리트 거더교의 개요도를 보여주고 있다.

* 정회원 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수

** 정회원 · (주)국민씨아이 부사장

*** (주)국민씨아이 기술개발팀 차장

**** (주)국민씨아이 기술개발팀 대리

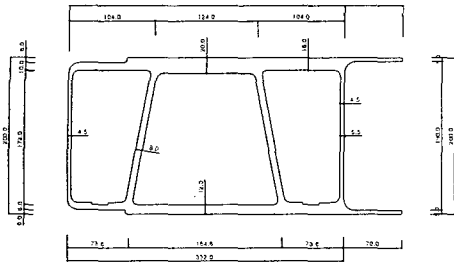


그림 2.1 복합소재 바닥판의 단면 제원

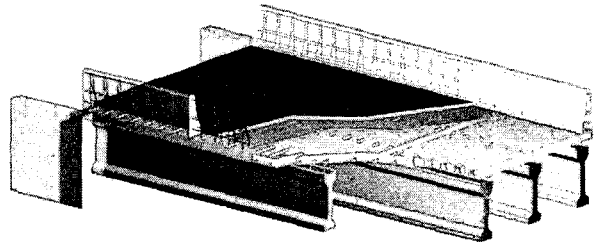


그림 2.2 '델타데크'가 설치된 콘크리트 거더교의 개요도

3. 델타데크의 구조성능시험

'델타데크'의 구조안전성 및 사용성의 실험적 검증을 위해 각종 구조성능시험을 수행하였다⁽²⁾. 3점 휨성능 시험을 실시한 결과, 최대 파괴하중이 42ton으로 등가관 해석에 의해 유효중 분포폭을 고려한 DB24하중에 대한 순수 휨내하율은 15로 설계 바닥판은 강도면에서 충분한 안전율을 보유하고 있는 것으로 평가되었다.

또한, 국부 피로영향을 평가하기 위해 DB24하중의 200만회 압축피로시험을 수행하였다. 시험결과, 200만회 반복하중 후에도 시험체에는 외관상 손상이 전혀 없었으며, 최대 발생응력이 부재의 파괴강도 대비 13이상의 안전율을 보유하여 우수한 내피로 성능을 입증하였다(사진 3.1참조).

합성형 교량의 거더-바닥판 연결부의 전단시험 결과, 전단 연결재의 항복강도 기준으로 설계 안전율을 4.0으로 결정하고 시험체의 항복기준 전단력으로부터 전단 연결재 1개의 허용전단력을 2.9tonf로 결정하였다.

반복적인 유효하중에 의한 내피로성능을 검증하기 위해 DB24하중의 200만회 휨피로 시험을 수행하였으며, 200만회 반복하중 후에 연결부 및 바닥판 손상없이 바닥판 강도대비 8.3, 전단연결재 항복강도 대비 3.3이상으로 충분한 내피로 성능을 보유하고 있는 것으로 평가되었다(사진 3.2참조).

'델타데크'의 교면 포장부는 바닥판 상면과 포장층과의 부착을 양호하게 할 수 있도록 아스콘 접착공법을 사용하였다. 포장전단시험 결과 한국도로공사에서 제시하고 있는 허용전단응력인 1.5kgf/cm²에 대해 16배 이상의 전단성능을 보유하고 있는 것으로 평가되었으며, 포장부착시험 결과 허용접착강도인 6kgf/cm²에 대해 약 20%이상 상회하는 부착성능을 보유하고 있는 것으로 평가되었다.

'델타데크'에 설치 시공되는 콘크리트 방호벽의 연결부 성능검증을 위해 방호벽과 바닥판간 연결부 성능 시험을 수행하였다. 시험결과, 방호벽의 휨내력 기준 수평하중인 13tonf 보다 큰 15tonf에서 연결부 손상이 발생하지 않았으며, 이때 계측된 바닥판의 최대 발생응력이 파괴강도 대비 10이상의 큰 안전율을 확보하고 있는 것으로 나타났다(사진 3.3참조).

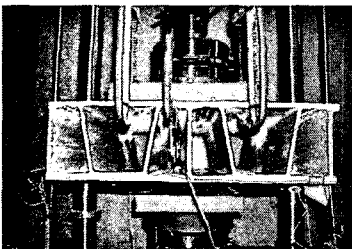


사진 3.1 압축피로시험

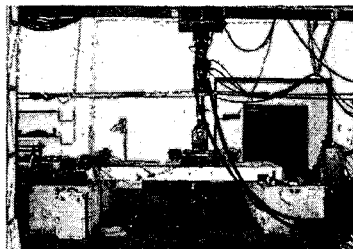


사진 3.2 휨피로시험

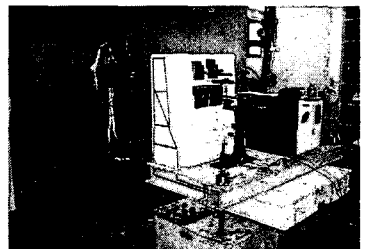


사진 3.3 방호벽 연결부 성능시험

4. 복합소재 교량 바닥판 현장적용 현황

복합소재 교량 바닥판 ‘델타데크’는 교량의 성능개선 및 신설시 기존 현장타설방식의 철근 콘크리트 바닥판을 대체하여 사용할 수 있으며, (주)국민씨아이에서는 국내 최초로 복합소재 프리캐스트 교량 바닥판 기술을 건설교통부 신기술 제374호로 지정받아 현장적용이 활발히 이루어지고 있다.⁽³⁾

<표 4.1>에는 현재까지 복합소재 교량 바닥판 ‘델타데크’를 이용한 시공 현황을 보여주고 있다.

<표 4.1> 복합소재 교량 바닥판 ‘델타데크’를 이용한 시공 현황

교량명	교량형식	교량연장(m)	교폭(m)	시공완료	비고
변천교	ST.빔교	8.0	3.0	2001년 5월	
형주교	ST.빔교	11.0	4.0	2003년 1월	부산-언양간 확장공사
개정교	ST.빔교	25.0	11.0	2005년 3월	국도 13호선
비우교	ST.빔교	44.5	9.0	2004년 6월	청계천 복원공사
평택항 진입교량	PSC빔교	70.0	11.9	2005년 4월	평택시 포승면
광양항 집입교량	ST.빔교	150.0	10.9	2004년 11월	전라남도 광양

4.1 형주교

경부고속도로 부산-언양간 고속도로 확장공사 제2공구 구간에 위치해 있는 형주교는 고속도로 확장공사용 우회도로 교량이다. 공장에서 제작한 복합소재 프리캐스트 바닥판을 현장에 운반하여 전단연결재를 이용하여 주형과 합성으로 시공하였으며 2시간만에 시공을 완료하였다. 사진 4.1~사진 4.3에는 형주교 시공 및 개통 후 사진을 보여주고 있다.

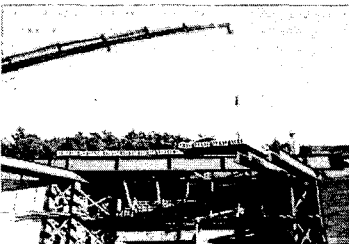


사진 4.1 형주교 시공 모습(1)



사진 4.2 형주교 시공 모습(II)



사진 4.3 형주교 개통 후 모습

4.2 개정교

국도 13호선에 위치한 개정교는 강주형 합성 교량으로 사각이 70°인 2차선 교량이다. 경량의 복합소재 바닥판을 사용하여 주형의 형고를 낮춤으로서 하천의 형하공간을 쉽게 확보하였다. 사진 4.4~사진 4.6에는 개정교 시공 및 개통 후 사진을 보여주고 있다.

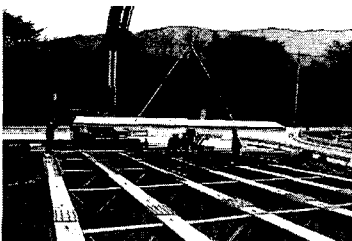


사진 4.4 개정교 시공 모습(1)

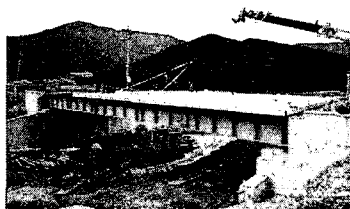


사진 4.5 개정교 시공 모습(II)



사진 4.6 개정교 개통 후 모습

4.3 평택항 진입교량

해양환경에 설치한 평택항 진입교량은 고강도, 내부식 특성의 복합소재 교량 바닥판을 사용함으로써 교량의 내구연한을 현격히 증대시키고, 경량으로 상부자중을 경감하여 교각기초 및 PSC 거더를 경제적으로 건설하였다. 사진 4.7~사진 4.9에는 평택항 진입교량의 시공사진을 보여주고 있다.

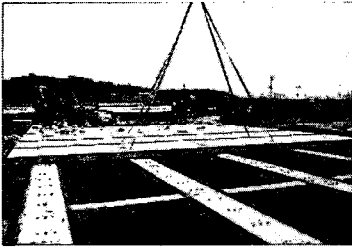


사진 4.7 평택항 진입교량 시공 모습(I)

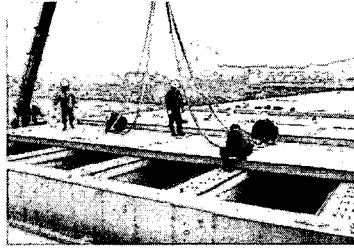


사진 4.8 평택항 진입교량 시공 모습(II)

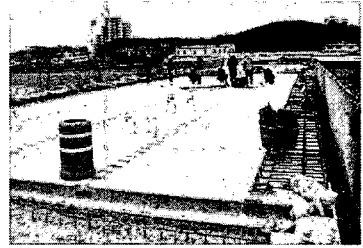


사진 4.9 평택항 진입교량 시공 모습(III)

4.4 비우당교

청계천 복원공사 3공구 구간에 시공한 비우당교는 아치교로 양쪽 보도부에 복합소재 바닥판을 설치하였다. 강재 내민보에 위치한 보도부는 경량의 '델타테크'를 설치함으로써 내민보의 형고를 줄여 자중을 줄이고 구조적 안전성을 확보할 수 있었으며, 도심지에서 신속하게 바닥판을 설치할 수 있었다. 사진 4.10~사진 4.12에는 비우당교의 시공 및 시공완료 후 사진을 보여주고 있다.

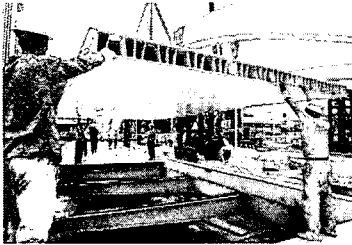


사진 4.10 비우당교 시공 모습(I)



사진 4.11 비우당교 시공 모습(II)

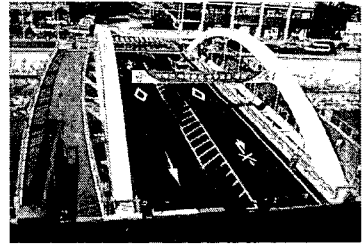


사진 4.12 비우당교 시공완료 모습

4.5 광양항 진입교량

광양항 진입교량은 2차선 강관형교로서 비합성으로 시공하였다. 광양항 진입교량은 해상에 설치하는 교량으로 경량·고강도의 '델타테크'를 설치함으로써 자중이 현저히 감소하여 해상 기초시공 비용을 절감하였다. 본 교량 설치 후 현장 정재하시험 및 동재하시험을 실시하여 구조안전성 및 사용성을 검증하였다. 사진 4.13~사진 4.15에는 광양항 진입교량의 시공 및 시공완료 후 사진을 보여주고 있다.

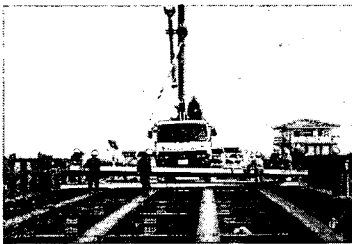


사진 4.13 광양항 진입교량 시공 모습(I)

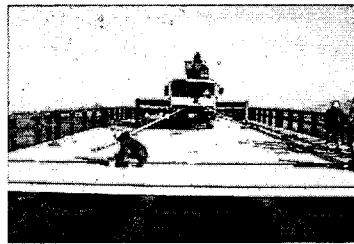


사진 4.14 광양항 진입교량 시공 모습(II)

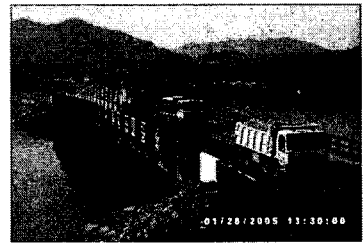


사진 4.15 광양항 진입교량 시공완료 모습

5. 유한요소해석 및 현장재하시험

5.1 유한요소해석

델타데크 복합소재 교량 바닥판의 구조안전성 및 사용성을 검증하기 위해 광양항 진입교량을 대상으로 유한요소해석 및 현장재하시험을 실시하였다.

유한요소해석에 사용된 프로그램은 복합소재 적층판 해석이 가능한 범용 해석프로그램인 COSMOS/M을 이용하였다. 복합소재 교량 바닥판은 SHELL1 요소를 사용하였으며, 강제 주형은 3차원 보요소를 이용하였다. 바닥판에 작용하는 하중과 변위를 주형에 전달하기 위하여 바닥판과 주형의 접합면에는 강결요소를 사용하여 모델링 하였다. 그림 5.1에는 해석대상 교량의 유한요소해석 모델 및 하중재하위치를 보여주고 있고, 그림 5.2에는 X방향 응력을 나타내고 있으며, 그림 5.3에는 복합소재 바닥판의 처짐을 나타내고 있다.

유한요소해석 결과 발생한 최대 휨응력은 복합소재 바닥판 중앙부(차량진행 직각방향, 강축)에서 68.5kgf/cm²로 나타났다. 유한요소해석에 의한 처짐은 DT1, DT2, DT3에서 각각 12.4mm, 13.0mm, 11.3mm가 발생하였으며, 실제 바닥판 순수 처짐(DT2-DT3)은 1.7mm가 발생하는 것으로 나타났다.

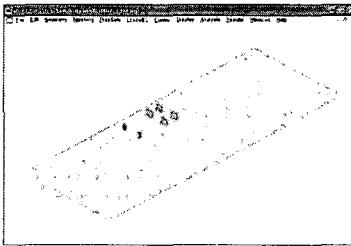


그림 5.1 모델링 및 하중재하

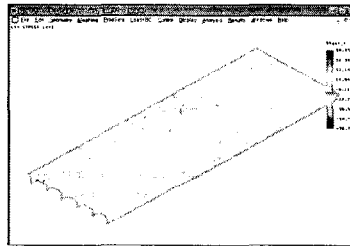


그림 5.2 X방향 응력결과

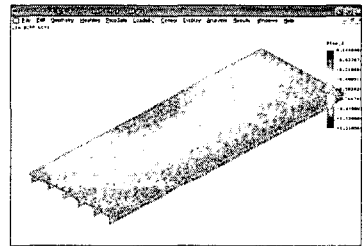


그림 5.3 처짐 결과

5.2 정재하시험

현장 재하시험시 복합소재 바닥판의 응력을 측정하기 위해 변형률 게이지를 부착하였으며, 거더1, 거더2, 바닥판 중앙부에 변위계를 설치하였다. 재하시험에 사용된 시험차량은 적재중량 15톤의 덤프트럭에 토사를 적재하였으며, 재하시험에 앞서 축중량을 측정 기록하였다.

<표 5.1>에는 현장 정재하시험결과 발생한 휨응력을 보여주고 있다. 현장 재하시험결과 발생한 최대 휨응력은 복합소재 바닥판 중앙부(차량진행 직각방향, 강축)에서 57 kgf/cm²로 나타났으며 동일 조건에 대하여 유한요소해석 결과 최대 휨 응력은 68.5kgf/cm²가 발생하였다. 현장재하시험 결과 복합소재 바닥판 허용인장응력대비 14.0, 유한요소해석 결과 11.7정도의 안전율을 확보하고 있는 것으로 평가되었다.

<표 5.2>에는 정재하시험 처짐 측정 결과를 보여주고 있다. 처짐 측정결과 경간 중앙부 바닥판에서 정적 최대처짐(환산)은 1.50mm로 나타났으며, 유한요소해석 결과값인 1.70mm보다 약 10%정도 작다. 현장재하시

<표 5.1> 정재하시험 및 구조해석 결과

센서번호	하중경우 위치	정재하시험 휨응력(kgf/cm ²)			구조해석 휨응력(kgf/cm ²)		
		1회측정	2회측정	3회측정	차량하중	DB24하중	사하중
L1	바닥판 중앙부(G1-G2사이)	57	41	55	68.5	145.9	2.3
L2	G2 주형 인접부(G1방향)	-15	-13	-15	-14.4	-38.6	1.8
L3	G2 주형 인접부(G3방향)	-20	-4	-23	-4.4	-16.3	0.7
L4	바닥판 중앙부(G2-G3사이)	53	35	56	62.9	136.5	3.0

험 및 유한요소해석 결과 도로교 표준시방서의 처짐기준(L/425)인 4.7mm보다 2.7이상의 안전율을 확보하고 있는 것으로 평가되었다.⁽⁴⁾ 현장재하시험 및 유한요소해석 결과 구조적인 안전성 및 사용성 모두를 충분히 만족시키는 것으로 평가되었다.

<표 5.2> 정재하시험 처짐 측정 결과

센서번호	하중경우 위치	처짐(mm)				비 고
		1회측정	2회측정	3회측정	구조해석결과	
DT1	G1주형 중앙부	5.1	5.2	5.1	12.4	처짐기준 4.7mm (2000 /425)
DT2	바닥판 중앙부	4.3	4.3	4.3	13.0	
DT3	G2주형 중앙부	2.8	2.8	2.8	11.3	
환산 처짐	바닥판 순수처짐 (DT2-DT3)[안전율]	1.49 [3.15]	1.48 [3.17]	1.50 [3.13]	1.70 [2.77]	
	DB24 환산 처짐 [안전율]	1.27 [3.70]	1.26 [3.73]	1.28 [3.67]	1.45 [3.24]	

5.3 동 재하시험

복합소재 바닥판 교량의 동적 특성을 분석하기 위해 동재하시험을 동시에 실시하였다. Crawl(5km/h 내외) 속도를 기준으로 하여 20km/h, 40km/h, 50km/h의 하중경우에 대해 실험을 수행하였다. 게이지는 정재하시험 시 사용하였던 변형율계와 변위계를 동일하게 사용하였으며 가속도계는 바닥판의 단부와 주형의 하부 플랜지에 설치하였다.

그림 5.4에는 50km/h주행시 측정된 바닥판의 변형율을 보여주고 있으며, 그림 5.5에는 주형 및 바닥판의 처짐 측정결과를 보여주고 있다. 동 재하시험 결과 바닥판의 최대 휨응력은 Crawl(≒5km/h)속도일 경우 31 kgf/cm²로 측정되었다. 부모멘트의 최대응력은 G2의 인접부에 40km/h 속도일 경우 -24 kgf/cm²로 측정되었다. 동재하시험결과 복합소재 바닥판이 허용응력대비 충분한 안전율을 보유하고 있는 것으로 나타났다. <표 5.3>에는 동재하시험결과 측정된 휨응력을 보여주고 있다.

동 재하시험 처짐 측정결과 바닥판의 순수 최대처짐은 경간 중앙부 바닥판에서 1.50mm로 가장 크게 발생 하였으며, 이는 도로교 표준시방서의 처짐한계(L/425)인 4.7mm에 비해 3.2정도의 안전율을 보유하고 있으며, 실험하중을 DB24하중으로 환산했을 경우 1.3mm의 처짐이 발생하며 3.7정도의 안전율을 보유하고 있는 것으로 나타났다. <표 5.4>에는 동재하시험결과 측정된 변위를 보여주고 있다.

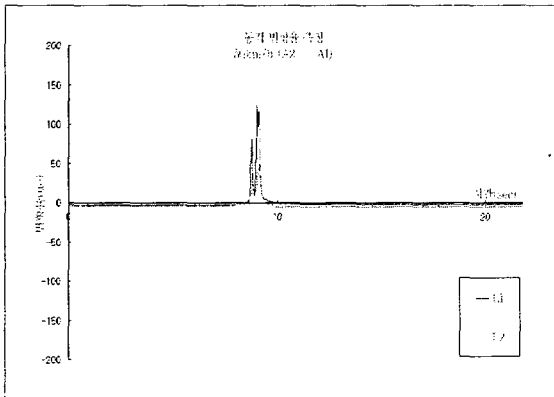


그림 5.4 동적 주행 (Max,50km/h)시 바닥판 변형율

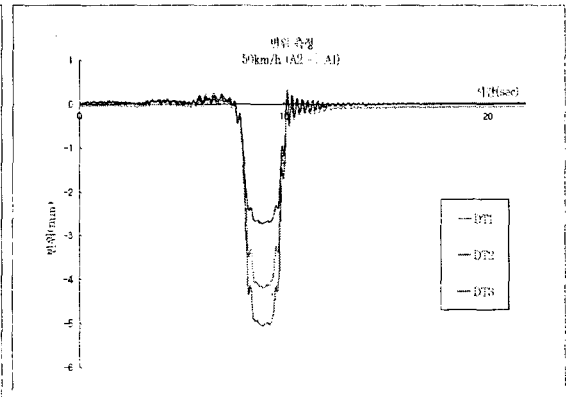


그림 5.5 동적 주행 (Max, 50km/h)시 주형 및 바닥판 변위량

<표 5.3> 동 재하시험 휨응력 결과

센서 번호	위치	하중경우	휨응력(kgf/cm ²)			
			Crawl	20km/h	40km/h	50km/h(Max)
L1	바닥판중앙부(G1-G2)		31	29	18	25
L2	G2 주형인접부(G1쪽)		6	7	17	10

<표 5.4> 동 재하시험 변위측정 결과

센서 번호	위치	하중경우	처짐(mm)				비고
			Crawl	20km/h	40km/h	50km/h	
DT1	G1 주형 중앙부		5.13	5.12	5.11	5.06	처짐 기준 4.7mm (2000/425)
DT2	바닥판 중앙부(G1-G2)		4.28	4.25	4.23	4.20	
DT3	G2 주형 중앙부		2.79	2.78	2.77	2.73	
환산 처짐	바닥판 순수 처짐 (DT2-DT3)[안전율]		1.49	1.47	1.46	1.47	
			[3.15]	[3.20]	[3.22]	[3.20]	
	DB24 환산 처짐 [안전율]		1.27	1.25	1.24	1.25	
			[3.70]	[3.76]	[3.79]	[3.76]	

동 재하시험시 교량에 부착한 가속도계를 이용하여 측정된 데이터를 FFT(Fast Fourier Transform)분석하여 대상교량의 고유진동수를 구하였다. 광양항 진입교량의 1모드 고유진동수는 4.1Hz로 나타났다. 고유진동수의 변화는 교량의 노후손상을 평가하는 수단으로 활용될 수 있으므로 측정된 초기 고유진동수를 유지관리 지표로 활용할 계획이다. 그림 5.6과 그림 5.7에는 바닥판과 주형의 FFT 분석결과를 보여주고 있다.

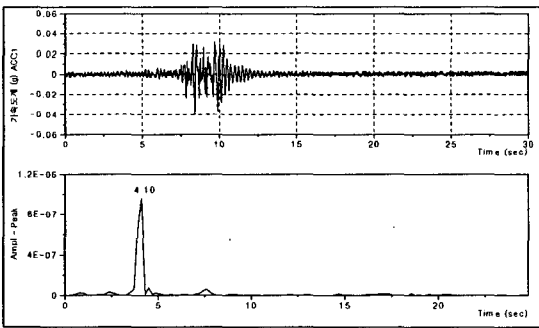


그림 5.6 50km/h 주행시 바닥판 FFT 분석 결과

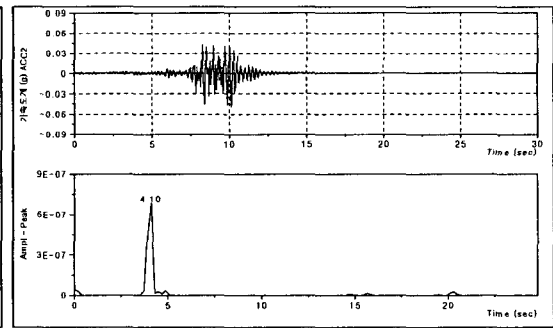


그림 5.7 50km/h 주행시 주형 FFT 분석 결과

5.4 내하력 평가

현장재하시험 결과 및 해석결과를 이용하여, 교량의 공용내하력을 허용응력 이론으로 산정하였다. 기본 내하력(P)은 현행 시방서의 방법에 따라 해석했을 때 교량이 감당할 수 있는 활하중의 크기를 설계하중(DB24)으로 나눈 값으로 하며 그 산정식은 다음과 같다.

$$P = 24 \frac{\sigma_a - \sigma_d}{\sigma_{24}}$$

여기서, P : 기본 내하력, σ_a : 강재의 허용응력, σ_d : 사하중에 의한 응력, σ_{24} : 충격계수를 포함한 DB24에 의한 계산 응력이다. 기본 내하력에 각 보정계수를 곱하여 공용내하력(P')을 산정하며, 공용내하력 산정식은 다음과 같다. 측정 대상 교량이 새로 건설된 교량임을 감안하여 응력 보정계수 K_s 를 제외한 다른 계수들은 모두 1.0으로 가정하였다.

$$P' = P \times K_s \quad (K_s = \frac{\sigma_{TA}(1+i_{TA})}{\sigma_{TM}(1+i_{TM})})$$

여기서, σ_{TA} : 시험트럭에 의한 계산응력(구조해석 결과 이용), σ_{TM} : 시험트럭에 의한 실측응력(재하시험 결과 이용), i_{TA} : 계산충격계수(시방서 충격계수), i_{TM} : 실측충격계수(재하시험 결과 이용)이다.

<표 5.5>에는 내하력 평가 결과를 보여주고 있으며, 공용내하력이 157.4로 계산되어 DB24대비 내하력인 공용내하력/DB24이 6.56으로 충분한 안전율을 보유하고 있는 것으로 평가되었다.

<표 5.5> 내하력 평가 결과

허용응력 (kgf/cm ²)	사하중 응력 (kgf/cm ²)	DB24 응력 (kgf/cm ²)	기본 내하력 (P)	응력 보정계수 (K _s)	공용내하력 (P' = P × K _s)	공용내하력/ DB24
800	2.27	145.9	131.2	1.2	157.4	6.56

6. 결 론

본 논문에서는 국내 최초로 개발된 복합소재 교량 바닥판인 '델타데크'의 현장적용 현황을 기술하고, 적용 교량에 대해 현장재하 시험 및 구조해석을 통해 충분한 사용성과 구조안전성을 검증하였다. 구조해석 및 현장재하시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 현장재하시험 결과 최대 휨응력은 57kgf/cm²으로 나타났으며, 복합소재 바닥판 허용응력대비 약 14.0의 안전율을 확보하여 충분한 구조안전성을 보유하고 있는 것으로 평가되었다. 최대처짐(순수 바닥판처짐)은 경간 중앙부 바닥판에서 1.50mm로 나타났으며, DB24 환산 처짐은 1.28mm로 도로교 표준시방서 처짐한계(L/425)인 4.7mm와 비교하여 약 3.6 정도의 안전율을 확보하고 있는 것으로 평가되었다.
2. 동 재하시험에 의한 가속도 측정결과를 F.F.T분석하여 교량의 고유진동수를 분석한 결과 4.1Hz로 나타났으며, 향후 유지관리지표로 활용할 계획이다. 내하력 평가 결과 공용내하력이 157.4로 계산되어 DB24대비 내하력인 공용내하력/DB24이 6.56으로 충분한 안전율을 보유하고 있는 것으로 평가되었다.
3. 구조해석 및 현장재하시험 결과 복합소재 바닥판 '델타데크'는 충분한 안전율을 보유하고 있어 향후 현장적용이 활발히 이루어질 수 있을 것으로 평가된다.

감사의 글

본 연구는 (주)국민세아이의 지원으로 연구하였으며 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이성우외, 신속시공·경량·고내구성 복합소재 교량 바닥판 산업화 연구, 건설교통부 연구보고서, 2003
2. 이성우, 김제인, 김병석, 배두병, 박성용, 인발성형 복합소재 교량 바닥판의 실험적 거동분석, 한국전산구조공학회 가을 학술발표회 논문집, 2003
3. 이성우, 박신전, 김병석, 정규상, 복합소재 교량 바닥판 '델타데크'의 구조적 특성과 현장적용, 한국전산구조공학회 봄 학술발표회 논문집, 2004
4. 대한토목학회, 도로교표준시방서(부록) 하중-저항계수 설계편, 1996