

철도용 사장교의 케이블 정착구조에 관한 형식별 FEM해석 연구

A Study on Stress Analysis of Cable Anchor System in Cable-Stayed Railway Bridge

공병승*
Kong, Byung Seung

박지호**
Park, Ji Ho

ABSTRACT

Since the 20th century, the business of railway was invaded by the invention of airplanes and vehicles in the field of the transportation of passenger and commercial products, however, in the 21st century, the fervent development of a high-speed railway made possible the huge capacity of transporting passengers and commercial freight, so the railway industry is facing a new era of railway revolution. The 200 years old railway tradition includes the history of railway bridges built in areas of river, valley and metropolitan region and in that, the number of constructions of railway bridges that is composed of cable-stayed bridges is increasing as one of the most optimal bridges considering the quality of materials and the span of continuous-welded long rail. Thanks to the minimized effects of the fixed load on the stiffening girder section by delivering the fixed load which is applied to the pylon with the composition of elastic supporting-points by using cables and the effective structural system that can throughly resist extra loads in addition to fixed load, the long-extended span of a bridge becomes possible. In this structural system, the load that is applied to the stiffening girder section forms a flow pattern and in the process of these load delivery, there will be a necessity to examine the concentration of stress occurred in the cable-anchor system of the cable.

1. 서론

철도의 역할은 20세기 이후 항공기와 자동차에게 여객 및 물류수송의 일부분을 잠식당했으나, 21세기에 들어 고속철도의 활발한 기술개발로 대규모의 인력과 화물수송이 가능하여 철도혁명의 시대를 맞이하고 있다. 이러한 철도 200여년의 역사에는 하천, 계곡, 도심구간을 통과하는 많은 철도교량의 역사가 포함되며, 그 중 장대레일을 이용한 교량의 경관 및 재료적 측면을 고려할 때 최적의 교량 형식중의 하나인 철도용 사장교가 도표1.의 예와 같이 가설되었거나, 가설이 증가하고 있는 추세이다. 이런 사장교는 케이블을 이용한 탄성지점의 구성으로 교량에 재하된 고정하중을 케이블을 통해 주탑에 전달시킴으로서 보강형 단면에서 고정하중에 의한 영향을 최소화하고 또한 효율적인 구조계를 형성, 고정하중 이외의 하중에 대해서도 적절하게 저항할 수 있게 구성되어 교량의 장대화를 가능케 한다. 이러한 구조계에서는 보강형단면에 작용하는 하중흐름을 갖게 되며, 이런 하중흐름의 과정에서 케이블 정착점에 응력집중을 유발하게 되어 이에 대한 검토가 요구된다.

*책임저자, 정회원, 동서대학교 토목공학과 부교수 공학박사
E-mail : kongbs@dongseo.ac.kr
Tel : 051)320-1821

** 비회원, 동서대학교 토목공학과 대학원 석사과정

도표 1. 세계의 철도용 사장교 현황

교 량 명 (Bridge name)	용도	재료	지간장	완 성	국 명
흡수문교 (Kapshuimun)	병용	복합	430m	1997	중국
岩黑島橋 (Iwakurojima)	병용	합성	420m	1988	일본
櫃石島橋 (Hitsuishijima)	병용	합성	420m	1988	일본
Parana de las Palmas Bridge	병용	강	330m	1978	아르헨티나
Parana Guazu Bridge	병용	강	330m	1978	아르헨티나
Erasmus Bridge	병용	강	284m	1996	네덜란드
Oberkassel Bridge	병용	강	258m	1973	독일
Sava River Bridge	철도	강	254m	1980	유고
Sky Train Bridge	철도	PC	340m	1988	캐나다
Uljanovsk (Volga River)	병용	강	407m	1993	러시아
小本川교	철도	PC		1978	일본
제1타마가와교	철도	PC	188	1996	일본
제2치쿠마가와교	철도	PC	133.9m	1997	일본
PO River 횡단교	철도	PC	400m	2006(준공예정)	이탈리아
Laibin Bridge	철도	PC	398m	1981	중국

본 연구에서는 아직 우리나라에서는 철도용 사장교가 가설되지 않았지만, 향후 가설될 미래지향적인 사장교의 경우에는, 도표2.의 사장교 케이블 정착부의 여러 형식 중 강바닥판교의 파이프형 케이블 정착부에 대한 국부 상세해석을 통하여 케이블 정착부에 대한 안전성을 검토하고, 정착부의 안전성 확보를 위한 보강방안을 제시하고, 합리적인 설계 및 시공이 이루어 질 수 있도록 하고자 한다.

도표 2. 케이블 정착부 형식별 특징

케이블 크 기	대단면의 케이블	소단면의 케이블			
	다수 스트랜드 케이블	단일 또는 소수 스트랜드 케이블		단일 스트랜드 케이블	
정착부 형 식	스프레이세들 + 앵커 거더형식	앵커 거더 형식	브라켓트 형식	파이프 앵커 형식	가세트 형식(Gusset)
정착부 형상					

2. Pipe형 케이블 정착구의 특징 및 문제점

2.1 Pipe형 케이블 정착구의 특징

본 연구목표로 설정한 케이블 정착구의 형식은 Pipe Anchor System으로 그 구조는 그림1.과 같이 주형 또는 중형의 복부판에 파이프를 설치하고 여기에 케이블을 정착한다. 케이블 정착방향이 복부판에 대해 각기 각도를 가진 경우 제작이 어려운 단점이 있다.

2.2 케이블 정착강관 제원 및 정착부 위치도

케이블 정착부 검토를 위해서 가장 큰 인장력을 받는 그림2.의 C1부분을 국부 상세해석하였다.

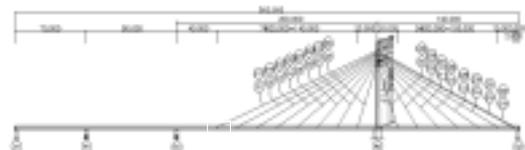


그림 2. 케이블 정착부 위치도

도표 3. 케이블 정착강관 제원

번호	길이[m]	내경[m]	두께[mm]	내경/두께	비고	번호	길이[m]	내경[m]	두께[mm]	내경/두께	비고
C1	7.395	323.9	32.0	5.06		C17	7.395	323.9	32.0	5.06	
C2	6.735	323.9	32.0	5.06		C18	6.735	323.9	32.0	5.06	
C3	6.066	323.9	32.0	5.06		C19	6.066	323.9	32.0	5.06	
C4	5.190	323.9	32.0	5.06		C20	5.190	323.9	32.0	5.06	
C5	4.534	323.9	32.0	5.06		C21	4.534	323.9	32.0	5.06	
C6	3.899	323.9	32.0	5.06		C22	3.899	323.9	32.0	5.06	
C7	3.338	244.5	32.0	3.82	N.G.	C23	3.338	244.5	32.0	3.82	N.G.
C8	2.921	244.5	32.0	3.82	N.G.	C24	2.921	244.5	32.0	3.82	N.G.
C9	3.024	244.5	32.0	3.82	N.G.	C25	3.024	244.5	32.0	3.82	N.G.
C10	3.439	244.5	32.0	3.82	N.G.	C26	3.440	244.5	32.0	3.82	N.G.
C11	3.996	273.0	32.0	4.27	N.G.	C27	3.996	273.0	32.0	4.27	N.G.
C12	4.611	323.9	32.0	5.06		C28	4.618	323.9	32.0	5.06	
C13	5.247	323.9	32.0	5.06		C29	5.267	323.9	32.0	5.06	
C14	5.880	323.9	32.0	5.06		C30	5.943	323.9	32.0	5.06	
C15	6.317	355.6	32.0	5.56		C31	6.393	355.6	32.0	5.56	
C16	6.275	368.0	32.0	5.75		C32	6.352	368.0	32.0	5.75	

2.3 정착 강관제에 대한 문제점

평판을 이용하여 강관을 제작하게 되면 곡률도입시 잔류응력이 발생하게 된다. 도표4.의 일본 도로교 시방서 II에서는 이러한 잔류응력에 의한 피해를 최소화하기 위해 관의 내측반경이 관두께의 5배 이상이 되도록 규정하고 있다. 도표3. 비교란에 나타나는 N.G.는 이러한 규정을 만족하지 못하여 보강방안이 요구되는 항목이다.

도표 4. 일본 도로교 시방서 II 1.6 H14.3(번역내용)

3) 주요부재에 있어서 냉간굽힘가공을 수행하는 경우, 내측반경은 관두께의 15배이상으로 하는 것이 바람직하다. 단, 강제 규격에서 충격시험이 규정되어 있는 강종으로 JIS Z2242에 규정하는 샤루피 충격시험의 결과가 표-해 1.6.2에 나타내는 조건을 만족하고, 또한 화학성분중의 전질소량이 0.006%를 넘지 않는 재료에 관해서는, 내측반경을 관두께의 7배이상 및 5배 이상으로 하여도 좋다.

표-해 1.6.2 샤루피 흡수에너지에 대한 냉간굽힘가공반경의 허용치

샤루피 흡수 에너지	냉간굽힘가공의 내측 반경	부기 기호
150이상	관두께의 7배이상	-7L, -7C
200이상	관두께의 5배이상	-5L, -5C

주)1번재의 숫자 : 최소굽힘반경의 관두께의 배율

2번재의 기호 : 굽힘가공방향(L : 최종압연 방향과 동일 방향, C : 최종압연방향과 직각방향)

강관정착구의 제작방법은 평판을 구부려 곡률을 도입하여 제작되는 방법일 것으로 판단된다.

일본 철강 제조업체의 예를 보면, 이와 같이 내경이 작은 강관의 제조 가능(일반적으로 이용되고 있는 기성 강관)한 관두께는 19mm 이하이며, 제조가 가능하더라도 용접의 신뢰성과 피로 강도에 대한 추가적인 검증이 실시되어야 한다.

즉, 원형관을 제작하는 과정에서 곡률도입을 위해 불가피하게 면외 방향의 물리적 힘이 도입되게 되므로, 이로부터 발생하는 문제점을 피하기 위해 기본적으로 강관형식의 사용을 피하는 것이 피로측면에서 유리하다고 할 수 있다.

3. 보강형 케이블 정착구의 FEM 해석

3.1 해석개요

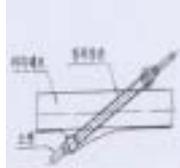
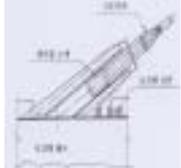
케이블 정착부 검토를 위해서 사장교 전체계를 모델링하는 것은 전체모델링 해석시 많은 노력과 시간이 필요하며, 해석결과의 분석 또한 어려움이 많다. 따라서 문제가 예상되는 부분만을 국부 상세해석하여 구조적 거동을 정확히 파악하는 것이 필요하다. 케이블 정착부 국부해석에서 어려운 점은 케이블 정착부가 여러 보강재들로 구성되어 있어서 실제와 가능한한 근접하도록 모델링을 하고 전체 구조물의 거동을 국부 상세모델에 적절히 반영할 수 있도록 경계조건을 설정하는 것이다. 여기서는 국내 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS/CIVIL을 이용하여 유한요소해석을 한 모델을 먼저 해석하여 각종 하중 및 설계제원을 결정하고, 동일한 모델을 범용 구조해석 프로그램인 LUSAS Ver. 13.6을 이용하여 FEM 해석을 실시하여 해석의 타당성을 검토하고 정착부의 안전성을 확보할 수 있는 최적의 구조상세를 제시하고자 한다.

3. 보강형 케이블 정착구의 FEM해석

3.1 해석개요

케이블 정착부 검토를 위해서 사장교 전체계를 모델링하는 것은 전체모델링 해석시 많은 노력과 시간이 필요하며, 해석결과의 분석 또한 어려움이 많다. 따라서 문제가 예상되는 부분만을 국부 상세해석하여 구조적 거동을 정확히 파악하는 것이 필요하다. 케이블 정착부 국부해석에서 어려운 점은 케이블 정착부가 여러 보강재들로 구성되어 있어서 실제와 가능한한 근접하도록 모델링을 하고 전체 구조물의 거동을 국부 상세모델에 적절히 반영할 수 있도록 경계조건을 설정하는 것이다. 여기서는 “완도대교 구조 및 수리계산서상에 케이블 정착부 구조해석”편의 국내 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS/CIVIL을 이용하여 유한요소해석을 한 모델을 먼저 해석하여 각종 하중 및 설계제원을 결정하고(마이더스아이티, 2001) 동일한 모델을 범용 구조해석 프로그램인 LUSAS Ver. 13.6을 이용하여 여러 정착구 모델의 FEM 해석을 실시하여 해석의 타당성을 검토하고 정착부의 안전성을 확보할 수 있는지 검토 분석 하고자 한다.

표 3. 정착부의 구조개요 및 형식

정착부 형식	Pipe 앵커 형식	Gusset 형식	Bracket 형식
구조 개요	-주형 또는 중형의 복부판에 파이프를 설치하고 여기에 케이블을 정착한다. 케이블 정착방향이 복부판에 대해 각도를 가진 경우 제작이 어렵다.	-주형 또는 중형의 복부판 상단에 가세트판을 설치하여 여기에 케이블을 정착 -소켓트 정착부는 핀 또는 파이프가 사용	-2면 케이블 형식에서 주형의 양측에 브라켓트를 설치해서 여기에 케이블을 정착
정착부 형상			

3.1.2 사용강재 두께

표 4. 사용강재 두께 및 강종

부재	보강형								
	상부 플랜지	하부 플랜지	웨브	U-Rib	상부 I-Rib	하부 I-Rib	웨브 I-Rib	다이아 프램	횡리브
두께(mm)	10, 14	12	12, 22	8	16	14	13	12, 16	12
사용강종	SM520	SM520	SM520	SM520	SM520	SM520	SM520	SM400	SM400

3.2 보강형 케이블 정착부 국부해석 결과

3.2.1 응력 분포도

발생한 응력은 “Maximum Distorsional Energy Density Criterion”을 적용한 Von-Mises Stress(유효응력)로 평가한다. Von-Mises Stress는 다음식과 같다.

$$\sigma_{eff} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (1)$$

여기서, σ_1 , σ_2 는 주축 1,2 방향의 주응력이다.

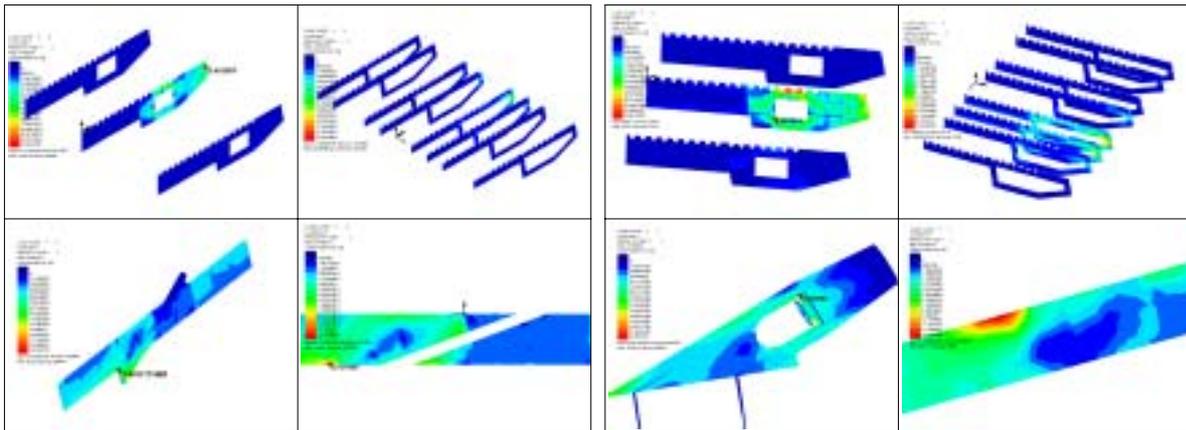


그림 3. Pipe 정착구의 응력

그림 4. Gusst 정착구의 응력

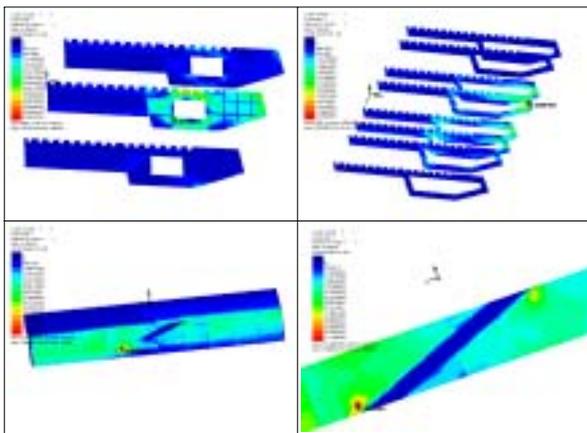


그림 5. Bracket 정착구의 응력

표 5. 형식별 정착구의 응력 비교

부재	Pipe 정착구 (단위:kgf/cm ²)	Gusst 정착구 (단위:kgf/cm ²)	Bracket 정착구 (단위:kgf/cm ²)
다이아 프램	1049.4	628.7	645.7
횡리브	1181.5	516.2	542.9
정착구	2108.6	2415.1	1488.6
웨브	1616	1430.0	1193.5

4. 결 과

(1) 구조해석을 확인한 결과, 각 부분마다의 응력의 위치는 변하였지만 대부분 비슷한 부분에서 응력 집중현상을 보였고, 정착구의 유효응력은 전부 허용응력을 만족하였다. 하지만 파이프 정착구의 문제점을 해결하는 방안으로 정착구의 교체를 제안하여 그에 따른 응력 변화를 검토하고 비교한 표 5. 에 의하면 다른 정착구의 응력들이 파이프 정착부에 비해 작은 응력이 발생함을 알 수 있다. 각각의 응력 집중 위치가 틀린것은 힘의 전달 경로에 따른 응력 분포가 다르기 때문인 것으로 사료 된다.

(2) 본 연구에서 파이프 정착부의 문제점에 대한 대안책으로 여러가지 형식의 정착구를 완도대교에 적용하여 FEM 해석한 결과 Pipe형 정착구 보다 다른 형식의 정착구가 응력분포에 더 유리하다는 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 Gusset 정착구의 경우 케이블 정착구 역시 원형으로 되어있다는 점이 제작상의 문제로 야기될 수 있을 것이다. Bracket 정착구의 경우 외측 웨브와의 연결을 강철 연결하여 완전 결합 조건으로 하였기 때문에 정착구의 부착성에 대한 문제점만을 제외하고 본다면 응력 분포에 가장 유리함을 알 수 있다.

참고문헌

1. Kanzuhiko Yamagishi and Yasuhiro Yano(1991), "A Study on the Fatigue of Ikuchi(生口)Bridge Steel Girder (Ikuchi(生口)橋 Steel Girder의 피로에 관한 검토)", (本四技報 Vol.15 No.57).
2. Endo et al, "Fatigue of Cable Anchor System of Cable- Stayed Bridge in a Large Scale"(대규모 사장교 Cable 정착구조의 피로).
3. 삼성중공업 주식회사(2002) "강바닥판교의 설계 및 시공성 향상방안 연구최종보고서".
4. (주)청석엔지니어링, 김재혁, 최인덕, 이원철(2005), "세계의 철도교", 구미서관.
5. 일본 도로교 시방서 II.
6. 조용우(2003), "강바닥판교의 최적 시스템을 위한 해석적 연구", 국민대학교 석사학위 논문.
7. 마이다스아이티(2001), "사장교의 케이블 정착부 국부해석 기술자료".
8. 건설교통부 익산 지방 국토관리청(2003). "군외~남창 도로확장공사 구조 및 수리계산서(V)".
9. 대한토목학회(2000), "특수교량기술세미나 논문집 현수교 및 사장교".