

케이블지지교량의 손상 및 보수·보강 사례 분석

김규선 | 한국시설안전공단 교량실 차장, 공학박사
이상철 | 한국시설안전공단 교량실 부장, 공학박사
김훈겸 | 한국시설안전공단 교량실 직원



케이블지교량의 손상 및 보수·보강 사례 분석

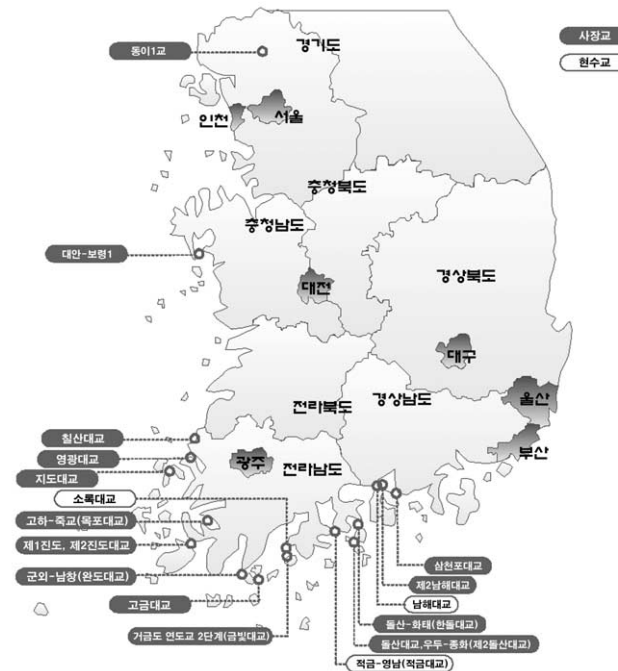
김규선 한국시설안전공단 교량실 차장, 공학박사
 이상철 한국시설안전공단 교량실 부장, 공학박사
 김훈겸 한국시설안전공단 교량실 직원

1. 서론

일반적으로 장대교량은 현수교와 사장교 형식으로 건설되어지며 이들 교량의 상부구조는 케이블과 주탑에 의해 지지되고 있다. 따라서 이와 같은 케이블지교량의 경우 교량 주요부재 특히 케이블에 결함이 발생하면 보수·보강이 매우 어려운 특수 구조물로서, 일반 교량형식에 비해 일상적인 유지관리가 매우 중요하다. 현재 국내 특수교 가설현황을 살펴보면 국도, 지방도, 고속도로 등에 12개소가 공용되고 있으며, 연육교 및 연도교의 증가로 향후 특수교량의 건설이 지속적으로 증가될 것으로 예상된다. 특히 아래 표에 나타난 바와 같이 향후 10년 이내에 국도상 특수교량이 서·남해권을 중심으로 집중적으로 가설될 것으로 예상됨으로 향후 케이블지교량의 유지관리업무가 교량 유지관리 분야에 중요한 업무가 될 것으로 예상된다.

〈공용, 건설, 가설계획을 고려한 국내 특수교 현황〉

구분	현재	2011년	2012년 이후
국도	남해대교외 4개소	소록대교외 6개소	제2남해대교외 6개소
타기관	지자체: 올림픽대교의 3개소 공공기관: 서해대교, 영흥대교 민자: 영종대교	지자체: 1개소 공공기관: 1개소 민자: 인천대교의 3개	지자체: 4개소 공공기관: 2개소 민자: 00개소
소계 / 누계	12개소	13개소 / 25개소	13개소 / 38개소 이상



〈공용, 건설 및 계획 중인 국도상 특수교 현황〉

특히 케이블지교량의 유지관리업무는 공학적인 판단(Engineering judgement)뿐만 아니라 유지관리 업무에 대한 경험이 매우 중요한 분야이다. 따라서 유사교량형식의 손상사례 및 보수·보강공사에 대한 사례수집을 토대로 유사한 유지관리업무는 벤치마킹(benchmarking)을 토대로 개선할 수 있으며 이는 향후 특수교의 유지관리업무에 있어서 중요한 데이터베이스가 될 수 있다. 따라서 본 고에서는 이러한 관점에서 국내·외 케이블지교량의 손상 및 보수·보강사례를 수집하여 향후 케이블지교량의 유지관리업무에 참고할 수 있도록 소개하고자 한다.

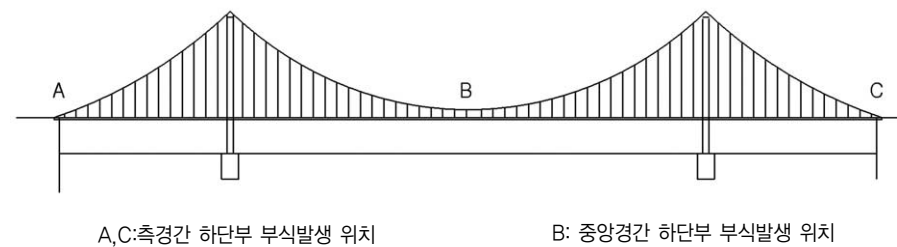
2. 국내 사례

2.1 현수교 손상사례

가. 현수교 주 케이블 소선의 부식

1) 현황

주케이블의 부식 및 파단에 관한 육안조사는 래핑와이어로 인해서 조사시기가 제한된다. 따라서 재랭핑을 실시하기전에 통상적으로 주케이블 소선에 대한 부식 발생 유무를 조사하며, 특히 췌기를 이용한 소선내부의 부식조사를 실시한다. 2004년 남해대교의 경우에는 래핑와이어의 재랭핑을 실시하기 전 주케이블의 외관조사를 실시하였으며, 그 결과 케이블 소선에서 일부 부식이 발견되었으며, 부식은 측경간 하단부와 중앙경간 하단부에서 주로 발생하였다. 아래 그림에 남해대교 케이블 소선의 부식 현황도를 나타내었다.

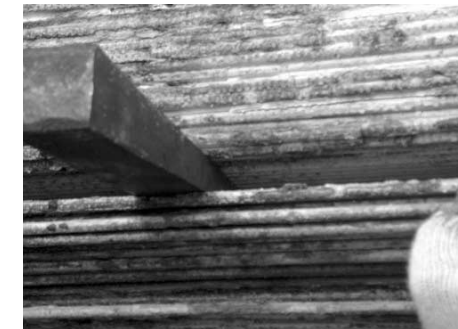


〈남해대교 케이블 소선의 부식 현황도〉



〈케이블 소선 부식 예〉

케이블 소선의 내부에도 부식으로 인한 손상이 일부 조사되었다.



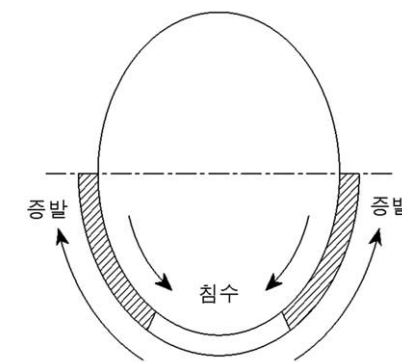
〈케이블 밴드부 케이블 내부〉

※ 케이블 강연선 췌기 조사

강연선의 내부검사는 포폴라와 건조한 떡갈나무 제품의 목재 췌기나 플라스틱 췌기를 박아서 강연선을 벌리는 방법으로 이루어지며 통상적으로 많이 사용되고 있다. 케이블의 규격과 부식의 정도에 따라서 케이블의 절반, 1/4 또는 자세한 검사를 위한 필요한 만큼의 단면에 췌기를 박는다.

2) 손상원인

통상적으로 현수교 주케이블은 케이블의 측면부에 비하여 하단부에서 부식이 더 많이 발견되었으며, 그 이유는 측면부의 수분은 증발이 잘 되지만 하단부는 스며든 수분이 고여 부식이 심하게 발생되기 때문이다.



〈케이블 소선의 부식 단면도〉

3) 보수방법

보수방법으로 케이블 래핑공사가 실시되었으며, 다음의 순서로 보수공사가 실시되었다.

① 작업발판(케트워크) 설치

먼저 양카리지 및 주탑에 Catwalk Wire를 연결하고 Catwalk Wire위에 Wire Mesh, Nylon Net, 바닥판 Pipe를 설치.



〈케트워크 설치〉

② 기존의 래핑와이어 해체 및 페이스트 제거

본 공사에서는 작업 인부 2인 1조가 기존의 래핑와이어 및 페이스트를 하루에 3Span 정도 해체 및 제거.



〈기존 래핑와이어 및 페이스트 제거〉

③ 케이블 녹 제거

작업 인부 2인 1조가 기존의 하루에 3Span 정도의 녹을 제거.



〈케이블 녹 제거〉

④ 징크 보수도장 및 페이스트 도포

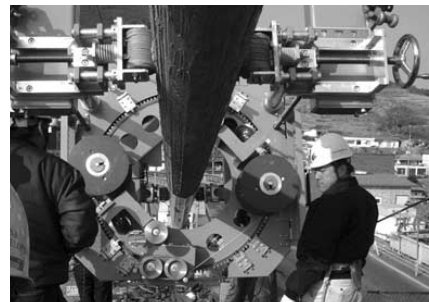
본 보수공사에서 한 Span당 평균 4통의 징크도료가 사용되었으며, 케이블 부식 방지 및 방수 목적으로 케이블 페이스트가 사용됨.



〈징크 보수도장 및 페이스트 도포〉

⑤ 케이블 재 래핑

케이블 래핑은 케이블을 보호하기 위하여 최신 경향의 S와이어 래핑으로 설계되었으며, 케이블기계 래핑은 본 공사의 용도로 신일본제철에서 제작되어 임대한 래핑 머신을 사용하였음.



〈일반부 기계 래핑〉



〈케이블 밴드 단부 손감기 래핑〉

⑥ 케이블 밴드 코킹

케이블 밴드 코킹은 케이블 밴드 단부 및 접합부로의 우수 유입 방지를 위한 것으로 부틸고무와 실리콘으로 설계되었으며, 작업원 2인 1조가 기존의 코킹 해체 및 부틸고무 삽입과 실리콘 시공을 하루에 평균 3개소 정도 수행.



〈실리콘 코킹〉



〈코킹전 우수유입 방지덮개 설치〉

⑦ 케이블 도장



〈하도 도장〉



〈중도 도장〉

나. 현수교 주 케이블의 단선

1) 현황

남해대교 주케이블의 래핑와이어를 교체한 후 실시한 주케이블의 육안점검 결과, 케이블 밴드 부근에 소선이 5가닥 단락된 것이 조사되었으며 단선된 부분은 케이블 밴드를 해체하고 케이블 내부를 검사하였다.



〈케이블 밴드 해체전〉



〈단선된 부분의 케이블 밴드 해체〉

단선 부분의 위치는 모두 같은 것이 특징이고 그 위치가 밴드 끝부분이다.

그 외에도 주케이블의 전수 조사결과 1~2개의 소선이 단선되어있는 구간이 4~5개소가 추가로 발견되었다.



〈케이블 밴드 해체 후〉



〈파단된 소선 단면〉

2) 손상원인

케이블 소선의 단면을 보면 부식이 일부 진행된 것으로 보아 최근에 단선된 것은 아니며 단선된 상태에서 래핑와이어를 해체하는 과정에서 단선이 발견된 것으로 사료된다.

3) 보수 방법

케이블 소선 단선부를 유압잭으로 coupler 압접이음하고 단선된 케이블소선은 압접이음으로

연결해도 기존의 케이블 소선과 같은 인장력을 도입하여 연결할 수 없으므로 구조적으로 역할을 할 수 없으나, 차후에 이러한 단선된 상황에 대한 이력을 관리하기 위하여 압접이음이 필요하다. 구조적으로는 주케이블의 안전율이 2.86이고 시공 편의를 위하여 14본이 추가로 시공되어 있어 케이블 소선수가 2114본이 되므로 소선의 단선이 문제는 되지 않으나 향후 주케이블 소선의 단선이 증가할 경우 구조물의 안전에 위협이 될 수 있으므로 체계적인 관리가 필요하다.

주케이블 소선의 보수는 케이블 밴드 하부 끝부분에서 단선된 소선의 경우 케이블 밴드 내부에 coupler 압접 이음을 둘 수 없기 때문에 케이블밴드 단부 양측 바깥에서 이음하기 위하여 케이블 소선이 단선된 부분에서 양측으로 어느 정도의 길이 만큼 케이블 소선을 절단했으며, 케이블밴드 상부측 소선 단선부를 유압잭으로 coupler 압접이음하고 이어진 소선을 처짐이 없도록 케이블밴드 하부에서 인력으로 당기고 고정한 후 케이블 밴드를 체결하였다.

케이블 밴드 체결 전에 케이블 밴드의 내부는 그라인드로 갈아서 케이블밴드 내부의 녹을 완전히 제거했으며, 조도가 균일하지 않은 케이블밴드 내부의 단부는 그라인딩으로 균일하게 라운딩 처리하였다. 그리고 케이블밴드 부분의 케이블은 청소, 녹 제거, 보수 도장을 하고 케이블밴드를 체결하였다.



〈케이블밴드 상부 소선 압접이음〉



〈케이블밴드 하부 소선 압접이음〉



〈케이블밴드 내부 녹 발생〉

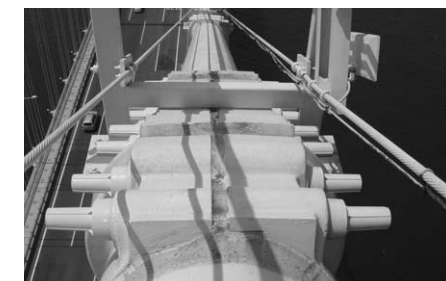


〈케이블밴드 내부 그라인딩〉

다. 현수교의 행어밴드 볼트 풀림

1) 현황

현수교에서 주케이블에 부착되어 있는 케이블밴드는 행어로프에 걸리는 인장력을 주케이블에 전달하는 매우 중요한 역할을 하는 부재로서 볼트의 축력에 의해 주케이블에 고정된다. 그러나 시간이 경과함에 따라 볼트에 도입된 축력은 주케이블 소선의 재배열 등으로 감소하며, 이로 인해 하중이나 진동 등의 원인으로 케이블밴드에 미끄러짐 현상이 발견되기도 한다. 대상교량은 타정식 현수교로서 준공 후 약 3년이 경과한 상태에서 케이블밴드의 볼트 체결력을 확인한 결과와 같이 설계축력(46tf)에 비해 평균 체결력이 최대 9.8%까지 낮은 것으로 조사되었다. 아래 사진에 케이블밴드 형식을 나타내었다.



〈케이블 밴드 형식〉

아래 표는 케이블밴드에 대한 점검부위와 점검내용을 기술한 것이다.

구분	점검부위	점검내용
CABLE BAND	<ul style="list-style-type: none"> - BAND 본체 - BAND BOLT - 코킹재 	<ul style="list-style-type: none"> - BAND의 어긋남, SLIP (회전, 이동) - BOLT CAP의 탈락, 손상 유무 - 코킹재의 균열이나 열화

행어밴드의 축력을 조사함으로써 행어밴드의 미끄러짐 가능성을 검토하는 것은 현수교의 유지관리에서 중요한 부분을 차지하게 된다. 정기적으로 행어밴드 볼트의 축력을 조사하고 재조임 시기를 결정해야 한다. 행어밴드 볼트의 축력 조사는 기본적으로 표본조사를 원칙으로 하며 적용될 수 있는 조사방법으로는 초음파법, 토크법, 전자식볼트 축력계 등 다양한 방법들을 활용하여 축력의 이완여부를 검토할 수 있다.

〈 케이블 밴드 형식 〉

SPAN	Band No	Bolt수량	최대축력 (t)	최소축력 (t)	평균축력 (t)	설계축력 미달볼트수량	비 고
계		416			46.6	194	설계축력 46ton (안전율= 3.0)
소계		208			46.0	94	
해양측	SB2-106	10	63.1	46.3	53.1	0	
	SB3-110	12	61.5	46.5	54.0	0	
	SB4-114	14	58.1	41.2	50.0	3	
	SB5-119	16	53.7	37.0	44.8	8	
	SB6-123	16	54.6	32.0	41.5	10	
	SB7-128	14	57.0	38.8	42.6	6	
	SB8-132	12	54.1	39.0	46.2	3	
	SB9-136	10	51.8	43.5	45.7	4	
	SB9-160	10	51.8	40.8	43.9	7	
	SB8-164	12	50.3	36.3	48.3	11	
	SB7-167	14	66.7	26.7	44.1	3	
	SB6-173	16	54.4	35.4	43.0	11	
	SB5-179	16	50.8	35.3	44.0	10	
	SB4-182	14	54.5	38.8	42.6	8	
	SB3-186	12	50.1	38.7	42.9	9	
	SB2-190	10	56.6	39.7	49.6	1	
소계		208			47.2	100	
육지측	BB2-106	10	57.1	43.2	55.0	1	
	BB3-110	12	55.6	37.4	52.6	4	
	BB4-114	14	51.3	35.0	47.1	9	
	BB5-119	16	55.5	34.7	46.0	8	
	BB6-123	16	53.2	33.0	48.4	6	
	BB7-128	14	53.5	34.0	47.5	12	
	BB8-132	12	54.3	40.4	46.7	6	
	BB9-136	10	53.4	37.5	48.0	4	
	BB9-160	10	53.8	29.3	45.3	5	
	BB8-164	12	56.2	41.0	48.0	2	
	BB7-167	14	53.7	34.6	48.7	4	
	BB6-173	16	50.2	33.3	42.7	7	
	BB5-179	16	56.1	34.0	42.9	10	
	BB4-182	14	52.8	33.0	43.0	11	
	BB3-186	12	50.4	35.9	42.4	9	
	BB2-190	10	57.1	40.8	50.7	3	

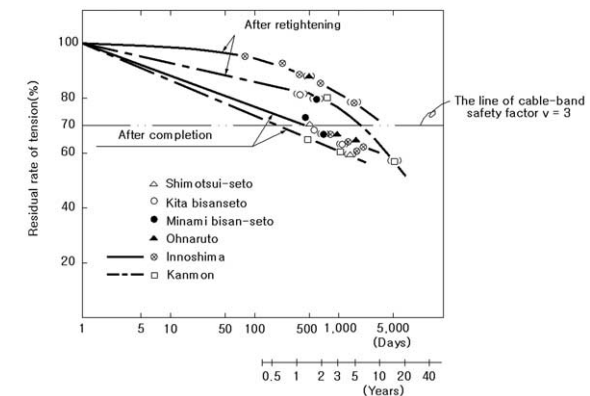
2) 자료분석

① 현행 설계기준

현재 도로교 설계기준에서는 케이블밴드의 안전율을 4.0을 표준으로 하고 힘의 감소요인에 대하여 검토하여 안전성이 확보될 경우 3.0까지 저하시킬 수 있는 것으로 규정하고 있다.

② 해외사례

현재 국내에서는 케이블 볼트 축력과 관련하여 축적된 자료가 부족한 실정이다. 일본에 위치한 6개의 현수교의 케이블밴드의 볼트축력에 대한 결과를 분석해 보면, 일반적으로 약 500일이 경과한 시점에서 25~35%정도가 감소하고, 1000일이 지난 시점에서는 약 30~40%정도가 감소하는 것으로 제시되었다.



〈 케이블밴드 볼트의 축력변화 분석결과(일본, 참고문헌) 〉

볼트의 축력손실은 초기 강선의 재정열과 강재의 릴렉сей션 때문이며 대변형이 발생하는 현수교의 구조적인 특성에 기인하는 것으로 알려져 있다. 통상적으로 준공 후 1.5~3년 이내에 재조임을 해야 하는 것으로 제시되고 있고, 안전율 기준은 3.0을 채택하고 있다.

3) 검토결론

대상교량의 케이블밴드 볼트의 축력감소 현황을 검토한 결과, 준공 후 약 3년이 경과한 시점에서 대상교량의 볼트체결력이 설계축력보다 최대 9.8% 정도 낮게 평가된 것은 현수교 특성상 시간의 경과에 따라 발생할 수 있는 일반적인 현상으로 평가되며, 향후 케이블밴드의 활동 위험성을 고려하여 볼트축력의 점검주기 및 재체결 유·무를 판단할 수 있는 볼트축력기준을 설정(안전율 기

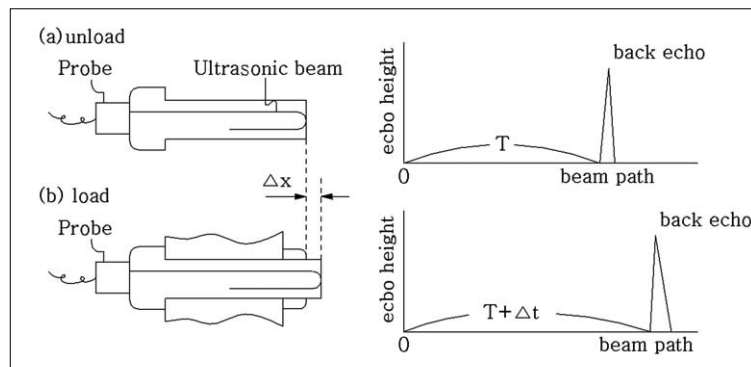
준으로 3.0을 권장)하여 운영하는 것이 유지관리 측면에서 바람직할 것으로 사료된다.

※ 케이블밴드 볼트의 축력검사 기타사례

케이블밴드 볼트와 같은 고장력볼트에 도입된 축력을 검사하는 방법에 대하여 현재까지 제시된 기법을 간단하게 요약하였으며, 특히 현재 영종대교에서 실시하고 있는 케이블밴드 볼트의 축력 관리기법에 대해서 소개하였다.

1) 초음파를 이용한 방법

- 방 법 : 초음파 축력계를 이용한 축력측정법은 초음파를 축력과 동일한 방향으로 전파시켜 무하중상태와 체결상태에서의 전파시간 변화로부터 축력을 측정하는 방법이다.
- 문제점 : 초음파 축력계에 의한 측정법은 정밀도 및 신뢰성이 높은 방법이지만 측정을 위한 볼트 양단의 평면가공 등, 측정상의 어려움이 있다.



2) 토크법

- 방 법 : Torque법은 토크렌치를 이용해 볼트의 축력을 조사하는 방법이다. 토크렌치를 이용해 볼트를 약간 풀었다가 다시 조일 때의 토크값으로 볼트의 축력을 추정한다.
- 특 징 : 간단한 측정법이지만 장기간 경과한 볼트접합부에서는 도장상태, 녹 등의 영향에 의해 볼트를 풀때의 토크값이 조일 때의 토크값보다 커지는 경향이 있어 신뢰성이 높지 않다. 또한 너트가 회전하기 시작하는 지점에서의 토크값을 정확히 검출할 필요가 있다. 축력과 토크의 관계는 다음의 식으로 나타낸다.

$$T = k \cdot d \cdot N$$

여기서, T: 토크(kg · m), k : 토크계수치, d : 볼트의 직경(mm), N : 볼트의 축력(kg)



〈행어밴드 볼트 토크측정시험 전경〉



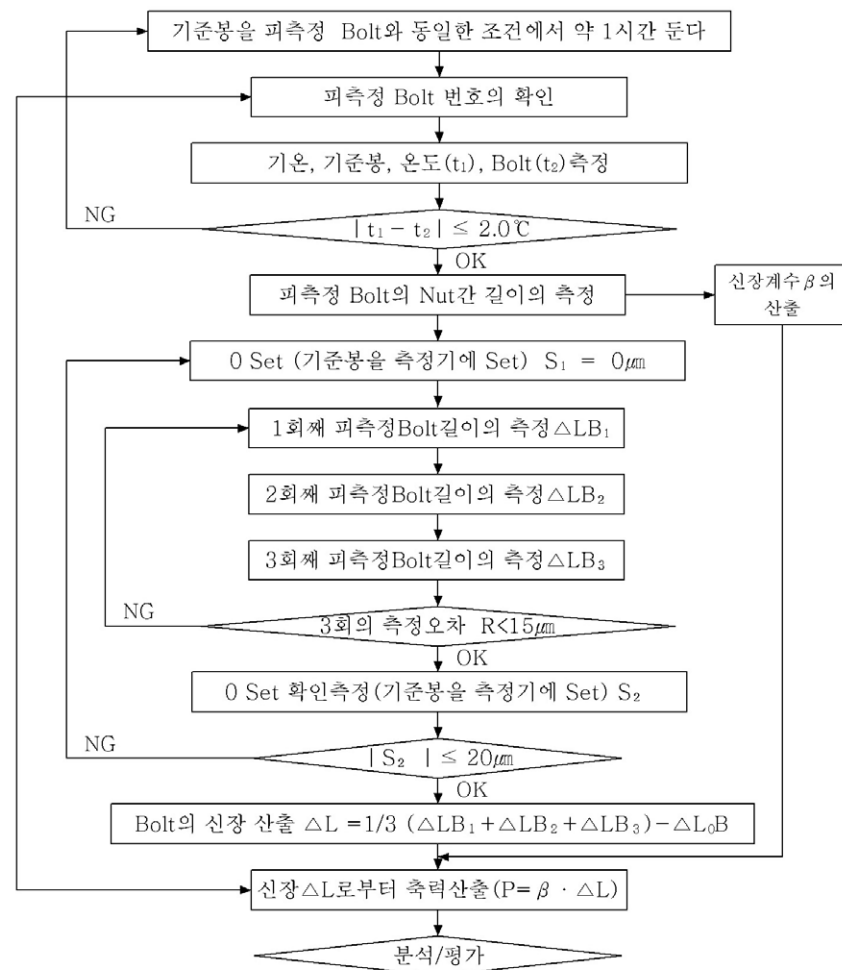
〈행어밴드 볼트 상태 양호〉

3) 전자식 볼트축력계 측정

- 방 법 : 볼트의 축력이 증가하면 공진주파수가 증가되는 특성을 이용하는 방법으로서 전자력으로 볼트의 두부에 연속적으로 변하는 진동을 발생시켜 볼트의 고유진동에 일치되는 공진주파수를 측정하여 축력을 구하는 방법이다. 일본에서 강교현장에 적용한 사례도 있고 현재 국도에도 도입되어 있는 장비다.
- 특 징 : ① 볼트 두부의 도장 등을 제거하지 않고 용이하게 측정가능
② 온도조건 등의 조건변화에 강함
③ 초음파방식과 달리 기름 등의 매질이 불필요

4) 케이블밴드 볼트의 길이측정을 이용한 볼트 축력관리

현수교 케이블밴드의 고장력볼트의 축력관리와 같이 소수의 고장력볼트의 관리에 적합한 방법으로 시공시 케이블밴드의 초기볼트길이를 측정하여 관리하고 있는 경우에 적용될 수 있는 방법이며 현재 영종대교와 광안대교의 케이블밴드 볼트 축력관리를 적용되는 방법이다. 구체적인 측정방법은 다음과 같다.



라. 래핑와이어의 손상

1) 현황

1995년 남해대교에 태풍이 작용한 이후 센터스테이 근처의 래핑와이어가 부분적으로 풀려진 것이 조사되었으며, 손상구간의 도장보수 이외에는 별다른 보수가 수행되지 않고 있다. 손상구간은 중앙단면 동쪽 주케이블 중심에서 남해쪽으로 약 1m 구간에 걸쳐 래핑와이어가 풀려져 있으며, 1996년 정밀안전진단 이후에는 별다른 진전이 나타나지 않는 것으로 조사되었다.

남해대교의 주케이블의 스트랜드는 주케이블 외부를 감고 있는 래핑와이어에 의해 보호를 받고 있는 구조로 되어 있어, 래핑와이어의 손상이 교량의 안전성이나 내하력 저하를 직접적으로 의미하는 것은 아니다. 그러나 래핑와이어의 손상을 방지할 경우 주케이블의 부식을 유발하여 케이블의 수명단축, 나아가 전체 교량의 수명을 단축하는 결과를 초래할 수 있다.



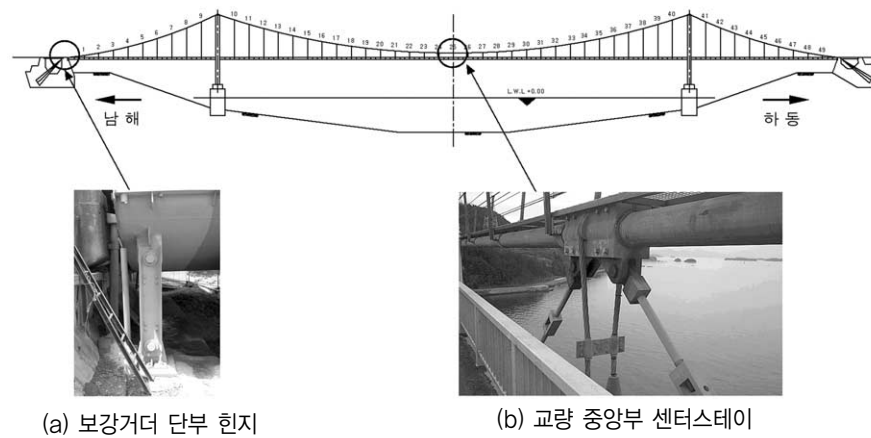
〈래핑와이어 풀림〉

2) 손상원인 분석

래핑와이어는 주케이블의 스퀴징(Squeezing)과 행어밴드의 설치이후에 시공하게 되며, 행어밴드 사이에 구간별로 시공된다. 따라서, 래핑와이어의 처음과 끝은 행어밴드의 틈에 삽입되어 고정된다.

본 교량의 유지관리 담당자의 증언에 의하면 최초의 풀림은 1995년 태풍이후에 발생한 것으로 알려졌다. 이 증언과 금번 정밀안전진단시 래핑와이어의 풀림상태를 조사한 결과에 의하면, 래핑와이어의 풀림원인은 태풍에 의해 발생한 주케이블과 보강거더의 상대이동이 보강거더 양단부의 힌지의 영향으로 교량 중앙의 센터스테이(Center stay)에서 집중되고, 이 집중된 힘이 중앙

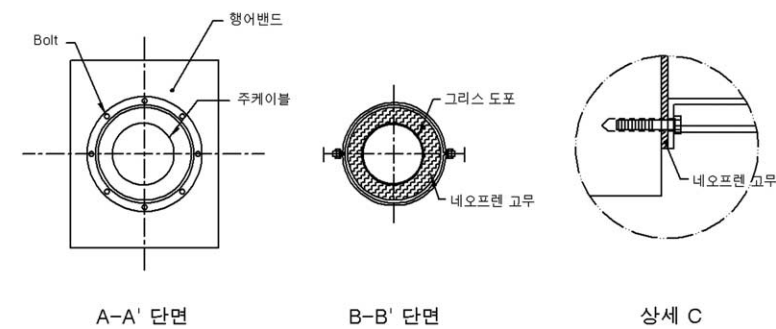
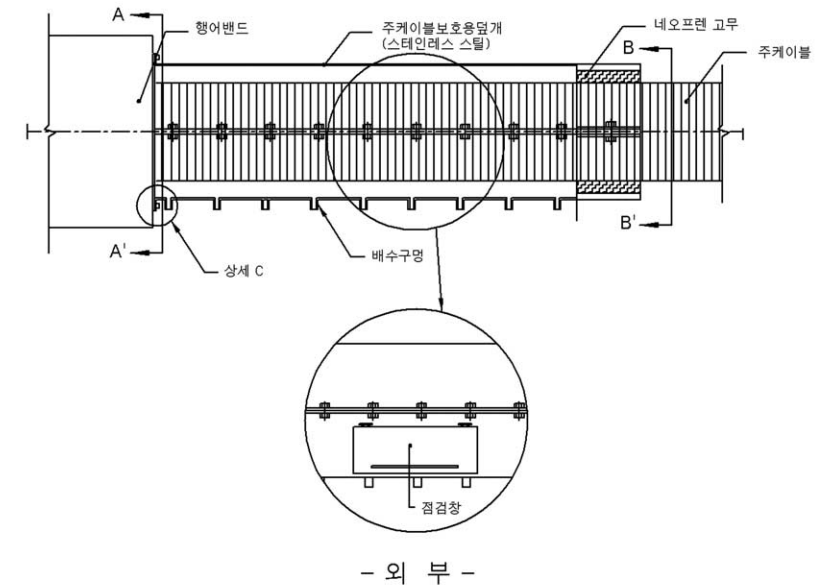
부 행어밴드의 미끄러짐을 유발하여 행어밴드에 삽입되어 있던 래핑와이어의 단부가 외부로 노출되어 풀린 것으로 추정되었다. 또한 1997년 유지관리 사무소에서 조사한 행어밴드의 조임상태 조사결과에 의하면, 대부분의 행어밴드의 볼트 체결력이 기준에 비하여 작은 것으로 조사되었으므로 행어밴드의 미끄러짐의 원인 중의 하나는 이와 같은 행어밴드의 볼트체결력의 감소인 것으로 추정되었다.



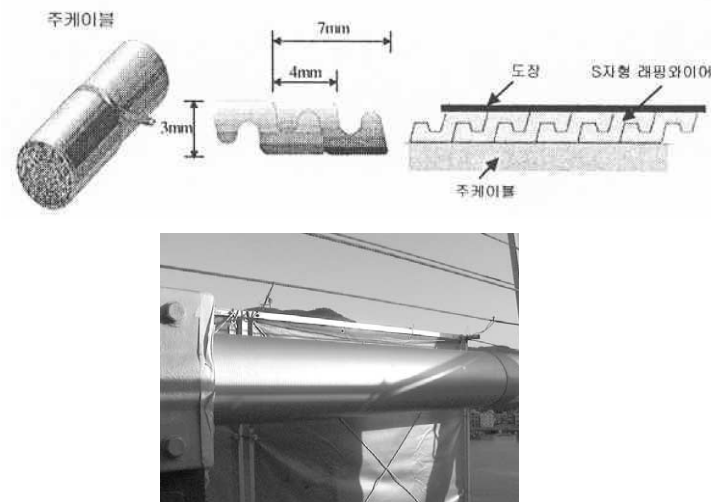
〈보강거더 단부의 힌지와 중앙부의 센터스테이〉

3) 보수방법

래핑와이어의 풀림은 주케이블의 안전성에 직접적으로 영향을 미치는 것은 아니며, 장기적으로 주케이블의 방식효과를 저하시켜 교량의 수명을 저하시키는 작용을 하므로, 2001년 정밀안전진단시 기 풀려져 있는 래핑와이어는 그대로 두면서 주케이블의 부식방지를 위한 보호커버를 제작하여 설치하도록 제안되었으나, 관리주체에서 행어케이블 교체 등 기타 보수공사와 병행하여 전구간의 래핑와이어 재래핑(Rewrapping)공사를 실시하도록 결정하였다. 래핑와이어는 영종대 교에 시공되어 방식성 등이 입증된 S자형 래핑와이어를 사용하여 보수가 수행되었다.



〈2001년 정밀안전진단시 제안된 래핑와이어 풀림부 보호커버 개요도〉

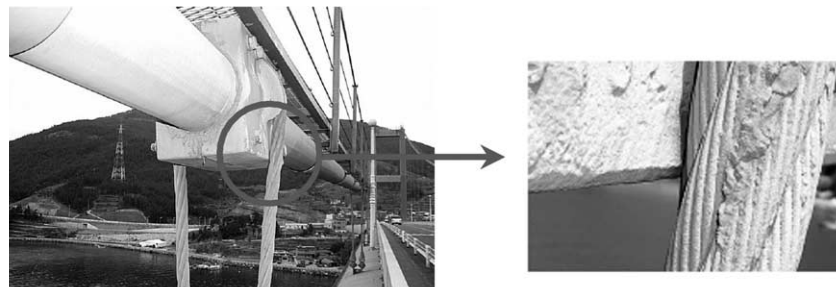


〈S자형 래핑와이어 및 센터스테이 재래핑후 전경〉

마. 행어밴드 회전부 재조정

1) 손상현황

2001년 정밀안전진단 및 전차 진단에서 실시한 남해대교 주케이블과 행어 및 행어밴드에 대한 외관조사 결과 총 98개의 행어밴드 중 23개에서 행어밴드가 행어와 직각으로 설치되지 않고 회전된 상태로 있는 것이 발견되었다. 이 중에서 3개소의 행어밴드에서는 회전한 행어밴드가 행어 케이블과 접촉하여 부식이 발생하였고, 일부 소선에서는 마찰에 의하여 단면이 마모되어 있는 것으로 조사되었다.



〈행어밴드와 행어케이블의 접촉부 부식 및 마모〉

2) 손상원인 분석

시공자료 분석에 의하면, 행어밴드의 회전은 공용 중에 발생한 것이 아니며, 시공시 일교차에 의한 온도신축으로 인하여 발생한 것으로 기록되어 있다. 행어밴드의 회전이 교량에 직접적인 영향을 미치지 않지만, 행어밴드와 행어가 접촉하여 부식이 발생한 개소는 향후 급작스런 파단이 발생할 수 있다.

3) 보수방법

행어밴드의 볼트를 풀고 행어케이블과 접촉하지 않도록 원래의 위치로 회전하기 위해서는 먼저 임시 가시설물을 설치하여 행어케이블이 현재 받고 있는 하중을 주케이블로 전달시킨 후 행어밴드를 해체하고 행어밴드의 방향을 재조정하여 조임을 실시하여야 한다.

보강거더를 지지하기 위한 임시 가시설물은 U형의 트러스 구조물을 제작하여 설치하는 방법과 보조케이블과 보조밴드를 사용하여 주케이블로 하중을 전달하는 방법이 있으며, U형의 트러스 구조물은 보강거더가 트러스 구조물일 경우에 적용한 사례가 있으나, 남해대교와 같이 유선형의 보강거더를 갖는 경우에는 보조케이블과 보조밴드를 사용하는 것이 효과적이다. 현재 행어밴드와 행어케이블이 접촉하여 부식 및 케이블 손상이 발생한 부위는 그림에 제시된 바와 같이 임시 행어밴드를 사용하여 기존케이블을 교체하였으며 행어밴드 교체전 기존 래핑와이어를 모두 풀고, 행어케이블 교체 후 재래핑을 실시하였다.

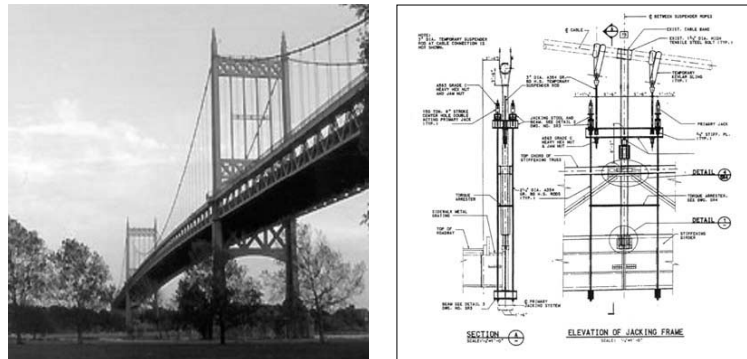


〈행어밴드 조정〉

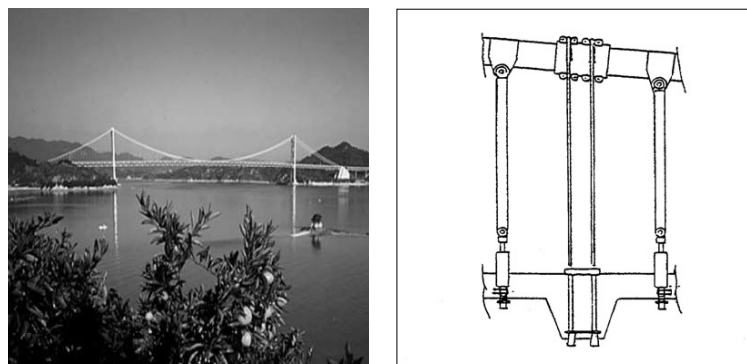
※ 행어로프 교체방법의 유사사례

행어로프의 교체방법은 1988년 Innoshima Bridge에서 케이블밴드를 개방하였을 때 임시 행어를 이용하여 보강거더 본체를 들어올리는 가벤트 공법과 1966년경에 George Washington Bridge에서 케이블 교체공사시 편방향에 행어로프의 하중을 맡기는 잭키빔 공법 등이 시도된 바 있다.

특히, Innoshima Bridge 사례에서는 행어로프 교체작업시 사용되는 잭(Jack)에 대하여 기존 행어로프 장력의 2배를 견딜 수 있는 잭킹압을 가져야 한다고 보았으며, 공용중인 교량의 보수특성으로 인하여 과다 소요될 수 있는 가시설비에 대해서도 경제성 있는 공법으로 충분하게 검토되어야 한다는 것을 확인할 수 있다.



〈Triborough Bridge(美國) 전경 및 행어로프 교체시공 방법〉



〈Innoshima Bridge(日本) 전경 및 행어로프 교체시공방법〉

바. 앵커블럭 내부 아이바 보수

1) 손상현황

남해대교의 주케이블에서 전달된 하중은 앵커블럭 내부의 아이바에 전달되며, 아이바는 콘크리트에 매설된 트러스 부재에 정착되어 앵커블럭의 자중에 의해 주케이블의 인장력에 저항하는 구조로 되어 있다. 외관조사시 남해쪽 앵커블럭 내부는 습기가 많은 것으로 조사되었으며, 이로 인해 아이바 하단부에 부식이 진행되고 있는 것으로 조사되었다. 또한 남해측 앵커블럭 내부에서는 아이바와 콘크리트 경계면으로 누수가 발생하고 있는 것으로 조사되었다.

기존의 유지관리로 아이바에는 도장이 되어 있으며, 부식방지를 위해 전자방식시스템이 아이바 각각에 설치되어 있다. 전자방식시스템 설치 이후의 부식진행여부는 판단할 수 없었으나, 도장하부에 부식이 많이 진행되었던 것으로 보아 별도의 보수가 필요한 것으로 판단되었다.



〈앵커블럭 내부 아이바의 부식 및 누수〉

2) 손상원인 분석

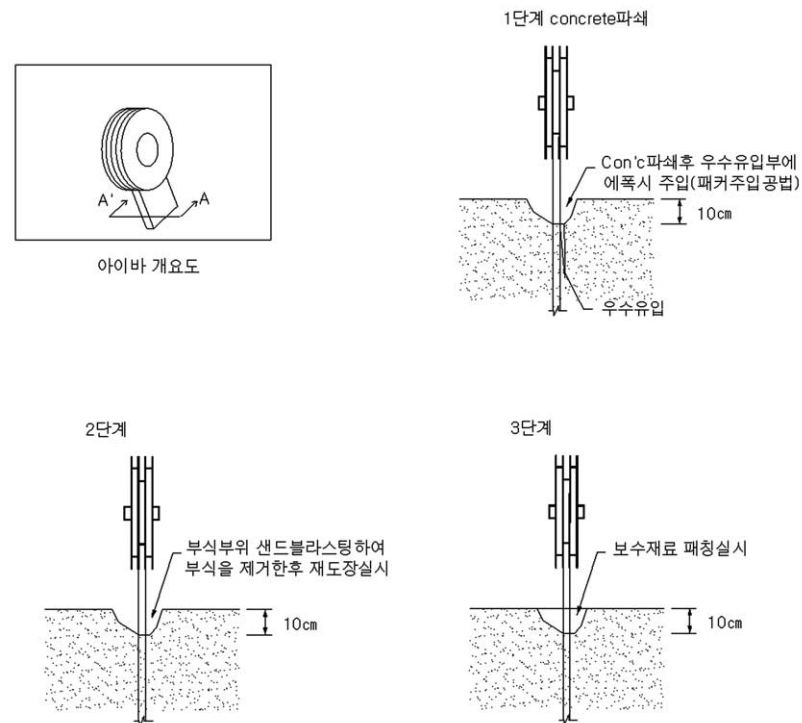
아이바의 부식은 앵커블럭 내부의 습기와 염분에 의한 것으로 추정되며, 앵커블럭 내부로의 누수는 앵커블럭 상부 판형교 이음부, 콘크리트 벽체의 균열 및 아이바와 콘크리트 경계면에서 발생하고 있는 것으로 조사되었다.

남해쪽 앵커블럭은 암반을 절취한 후 콘크리트를 타설하여 시공하였으며 아이바와 콘크리트 경계면을 통한 누수는 앵커블럭 배면의 지하수로 인해 발생하고 있는 것으로 검토되었다.

3) 보수방법

• 아이바와 콘크리트 경계면의 누수

아이바와 콘크리트 경계면의 누수는 앵커블럭 배면에 누수 방지를 위한 차단막을 설치하는 것이 가장 효과적인 것으로 판단되나, 앵커블럭 배면이 토사가 아닌 암반층이므로 차단막의 설치가 불가능하다. 따라서 아이바 주변의 콘크리트를 제거하고, 아이바와 콘크리트 경계면의 틈으로 에폭시수지를 고압의 패커주입에 의해 주입한 후 방식처리 및 콘크리트 타설로써 누수방지 및 부식제거를 실시하였다.

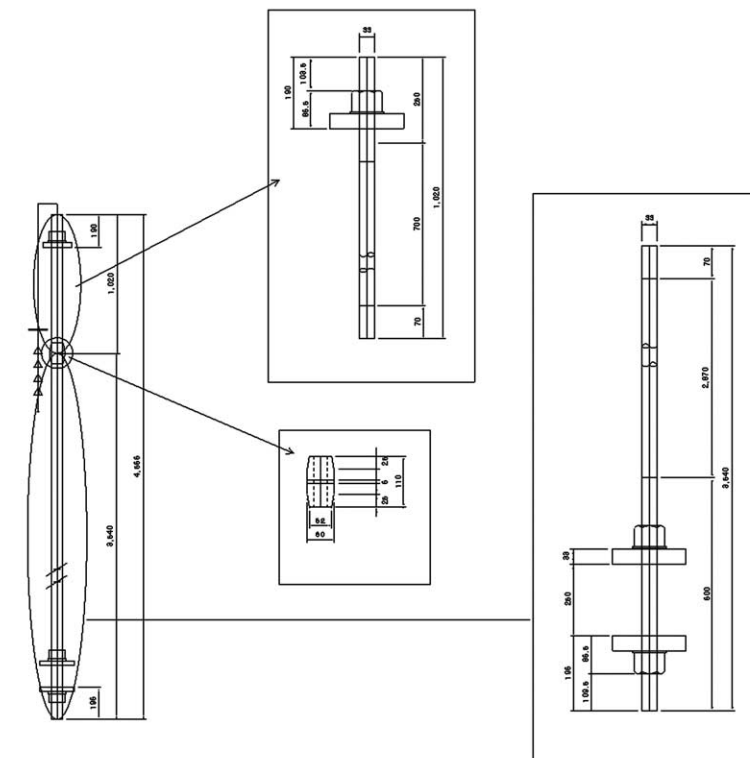


〈아이바 누수부 보수 개요도〉

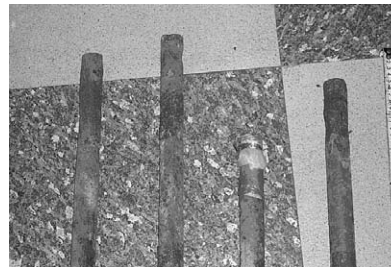
사. 현수교 PS앵커 파단

1) 현황

2001년 남해대교 정밀안전진단보고서에 따르면 주탑과 타워앵커와 기초를 연결하는 PS 앵커 강봉 40개 중 4개소가 파단된 것으로 조사되었으며 파단된 4개의 강봉들의 길이를 보면 760mm ~ 960mm 정도로 파단위치가 주탑기초의 콘크리트면에서 PS앵커바의 연결부(splice)의 상부 접촉면 사이에 있다는 사실을 확인하였다.



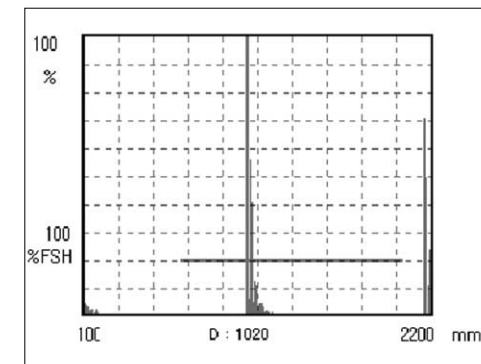
〈앵커용 PC 강봉의 단면형상〉



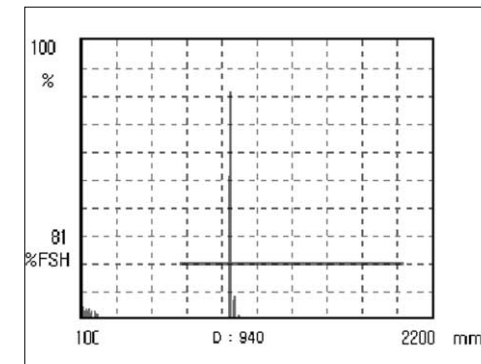
〈기존의 파단된 PS앵커 강봉〉



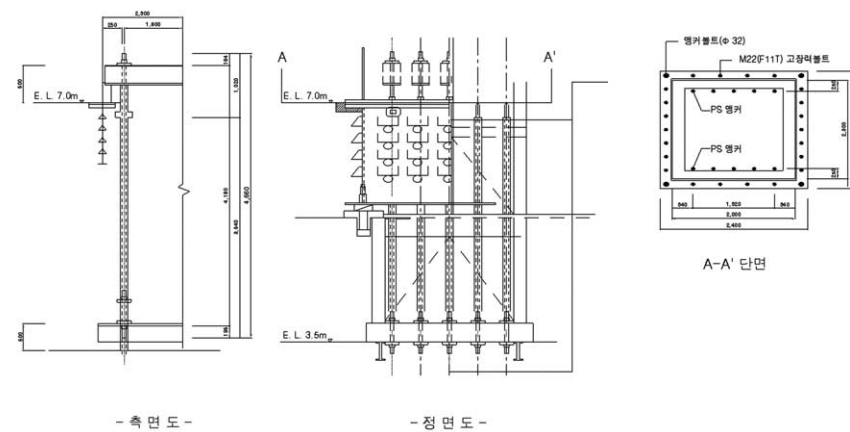
〈PS강봉의 파단〉



〈건전한 PS앵커바 저면의 반사파형(길이1020mm)〉



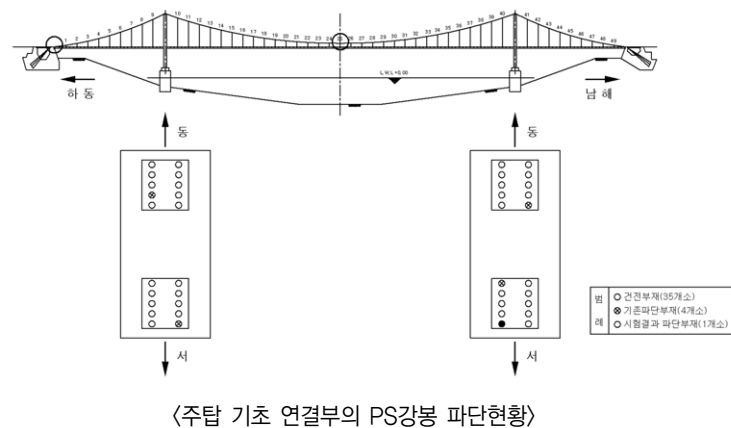
〈파단된 PS앵커바 저면의 반사파형(길이940mm)〉



〈주탑앵커부 상세도〉

또한, 판단되지 않은 PS앵커바 36개소에 대해서 초음파탐상시험을 실시한 결과 1개소를 제외한 35개소에서 동일한 반사파형을 획득하였다. 이 파형을 분석해보면 PS앵커바의 상부에서 첫 번째 반사파까지의 길이가 1020mm로 도면에서 상단과 연결부까지의 거리와 일치하며, 저면 반사파 이외에 결함 파형이 나타나지 않았으므로 건전한 것으로 평가되었다.

그러나, 나머지 1개소는 940mm에서 반사예코가 나타났으며 2회 저면반사 예코가 나타나지 않았다. 이것은 반사면이 가공된 매끈한 면이 아니라 균열 등에 의하여 반사면이 곡률이 졌거나 강봉의 축 방향에 수직이 아니라는 것을 의미한다. 그리고 1020mm위치에서 반사파가 전혀 나타나지 않은 것으로 보아 이 부재는 940mm위치에서 완전히 파단된 것으로 분석되었다.



※ 초음파탐상시험(UT: Ultrasonic Testing)

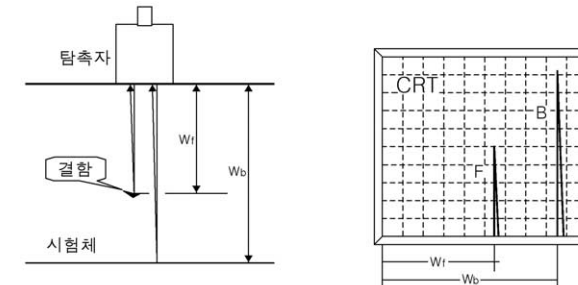
가청 주파수 이상의 주파수를 갖는 초음파(20000Hz이상)를 시험체 내에 전달하여 초음파 진행 경로 상에 존재하는 결함부로부터 반사하는 초음파 신호를 수신하여 탐상기 CRT 스크린상에서 에코파형을 확인함으로써 결함의 존재여부 및 결함정보를 알아내는 검사방법이다.

초음파법의 종류는 크게 수직법과 사각법으로 대별되며, 수직법은 탐촉자를 시험체에 접촉하여 시험체에 수직으로 초음파를 전파시켜 검사하는 방법으로 통상적으로 판재 및 봉재, 주·단강품 결함 검사와 부재의 부식두께 측정 등에 이용되며, 사각법은 시험체에 임의의 일정각으로 초음파를 전파시켜 검사하는 방법으로 주로 강구조물 용접부 검사에 적용된다.

초음파 탐상시험의 특성은 다음과 같다.

- 시험체가 두꺼워도 검사가 가능하다.
- 불연속의 위치를 정확히 알 수 있다.
- 검사결과를 바로 알 수 있다.
- 균열 등의 면상 결함의 검출에는 방사선투과검사보다 유리하다.
- 시험체 한면에서의 탐상이 가능하다.
- 결함의 종류 및 형상, 크기를 식별하기 어렵다.
- 금속 조직의 영향을 많이 받는다.
- 검사자의 기량에 의해 검사 결과가 영향을 받는다.
- 검사 결과의 기록보존이 어렵다

위의 PS 앵커 파단 조사를 위하여 수직법이 사용되었으며 수직법의 개요는 다음과 같다.



여기서 Wf: 결함부까지의 초음파 진행거리

Wb: 시험체 저면까지의 초음파 진행거리

F: 결함부에서 반사된 에코

B: 시험체 저면에서 반사된 에코

〈초음파탐상 시험 개요도〉

2) 손상원인 분석

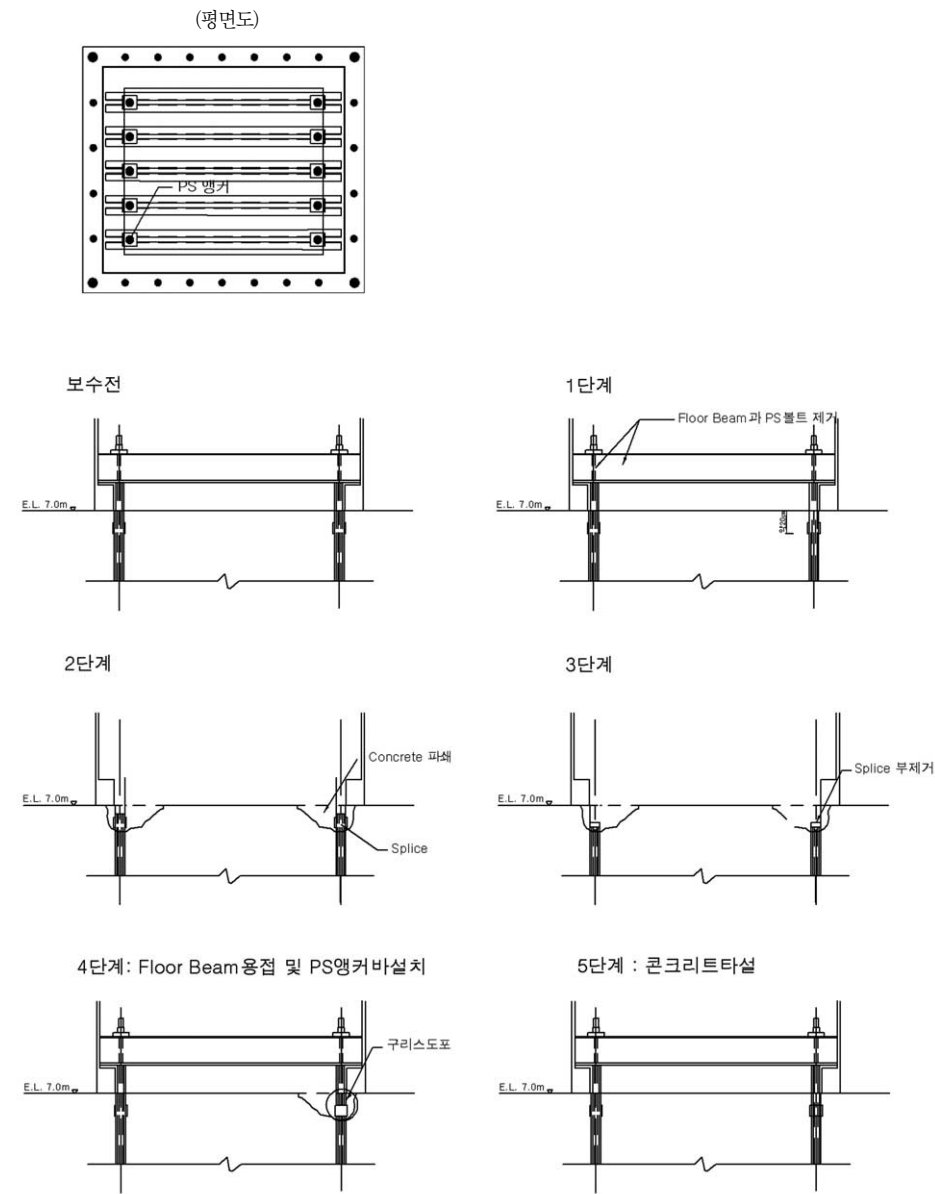
파단된 PS앵커볼트와 설치되어 있는 PS앵커볼트를 조사한 결과, 볼트표면이 부식이 진행되어 단면감소가 상당히 발생하여 있는 것으로 나타났으며, 파단부위에서 단면감소가 가장 심한 것으로 보아 파단의 원인은 부식으로 인한 단면감소인 것으로 추정되었다. 또한 볼트의 파단부위가 콘크리트 내부 스플라이스 경계면인 것을 고려하면 PS볼트의 나사부에 가해지는 프리스트레스로 인한 응력집중(stress concentration)도 파단의 원인으로 작용하였던 것으로 추정되었다.

3) 보수방법

PS앵커볼트의 설치 목적이 시공중 주탑의 셋백(Set back)에 저항하기 위한 것이지만, 풍하중 및 지진하중에 대한 주탑의 횡방향 저항력에 크게 기여하고 있는 것으로 판단되므로, PS앵커볼트를 설계대로 복구하도록 하였다.

기준에 파단된 PS앵커볼트가 4개이고, 2001년 정밀안전진단시 조사된 PS앵커볼트의 추가적인 파단이 1개소로 총 5개소의 볼트가 파단된 것으로 조사되었으나, 나머지 앵커볼트의 경우에도 부식으로 인해 단면손상이 상당히 진행된 것으로 확인되어 전체 PS앵커볼트를 교체하였다.

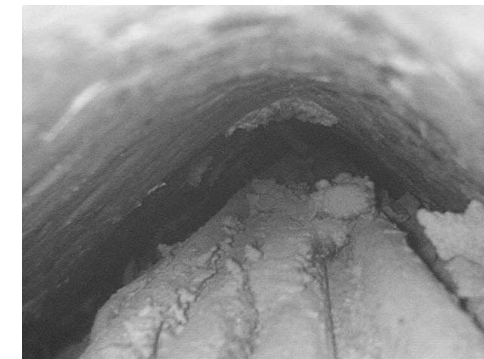
PS앵커볼트의 교체는 주탑의 안전을 위해 2개소(1줄)씩 교체하였다.



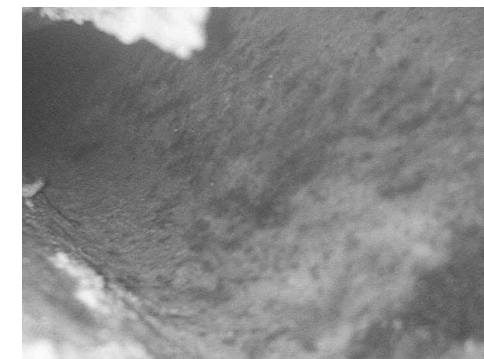
〈주탑하부 PS앵커볼트 보수개요도〉

아. 내시경을 활용한 새들 내부 주케이블 조사사례

남해대교 탐정새들의 경우 남해측 동측 탐정새들을 내시경을 이용하여 새들 내부의 주케이블 소선 및 덮개판의 부식상태를 조사하였다. 조사결과 덮개판 내부에는 부식이 일부 진행되고 있었으나 주케이블의 소선에는 부식이 발생하지 않은 것으로 나타났다. 남해측 동측 탐정새들의 경우 덮개판의 고정볼트 26개중 2개가 탈락되어 있었고 우수의 유입을 방지하기 위해서 실리콘으로 방수처리가 되어 있었다.



〈탐정새들 내부현황〉



〈탐정새들 덮개판의 부식〉

1) 앵커블럭 내부의 주케이블

남해대교 앵커블럭 내부의 서측 주케이블 중 1개의 소선이 단락된 사례가 발견되었으며, 단락 부위를 상세 조사한 결과 부식 및 단면감소의 흔적이 없고 끊어진 맞은 편 소선이 없는 것으로 보아 소선이 공용 중 절단된 것이 아니라 주케이블 시공단계에서 마지막 소선의 마무리 불량으로 판단되었다.



〈앵커블럭 내부의 주케이블 소선의 단락〉

2) 스프레이 새들

스프레이 새들의 경우 남해대교의 남해측과 하동측 모두 스프레이 새들 내부에 부분적으로 부식 진행이 발견되었으며, 새들과 접촉하고 있는 주케이블의 외부에도 부분적으로 부식이 발견되었다. 또한 새들을 고정시키고 있는 받침판과 볼트도 부분적으로 부식이 발견되었다.



〈스프레이 새들 내부의 부식〉



〈스프레이 새들의 받침판 볼트의 부식〉

내시경을 이용하여 육안으로 조사가 불가능한 스프레이 새들 내부의 주케이블 소선과 스프레이 새들 덮개판의 부식정도가 조사되었는데, 새들 내부의 주케이블에는 부분적으로 이물질로 오염된 부위가 다소 있었으며 덮개판의 내부는 대부분 부식이 진행되고 있었으나 내부 주케이블 소선의 경우에는 대체로 양호하였다.



〈주케이블 소선에 부착되어 있는 이물질〉



〈주케이블 소선에 부착되어 있는 이물질〉



〈스프레이 새들 덮개판 내부의 부식현황〉



〈새들 내부에 주케이블 소선의 부식으로 의심되는 부위〉

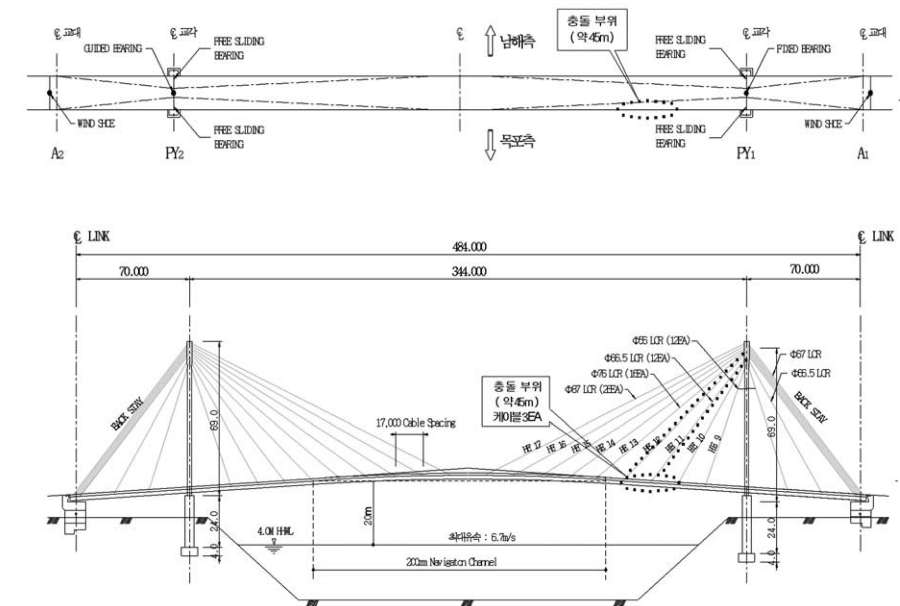
2.2 국내 사장교 손상사례

가. 바지선 충돌에 따른 사장교 거더 손상

1) 현황

바지선과 사장교 거더간의 충돌사고로 인해 거더 및 케이블의 손상이 발생하는 사고가 발생하였다. 충돌사고는 Jack pile 구조물을 바지선상에 적재하고 2대의 예인선을 활용하여 조류발전소 시공을 위한 물양장으로 예인 하던중 울돌목의 급한 조류에 밀려 보강형 거더 및 케이블 정착단 등에 충돌한 사고이다.

아래 그림에서 보는 바와 같이 급한 조류에 밀려 거더의 케이블 정착단 HE13-HE14 사이에 1차 충돌 후 반동 및 조류에 의하여 2차 충돌이 발생하고 바지선이 회전하면서 적재된 Jack Pile 구조물이 보강형 거더와 나란히 되었고 이 후 보강형 거더에 구조물 상단부가 걸려 있다가 바다로 추락하는 과정으로 사고가 진행되었다. 충돌사고 시 울돌목 조류의 속도는 대략 3.3m/s인 것으로 조사되었다.



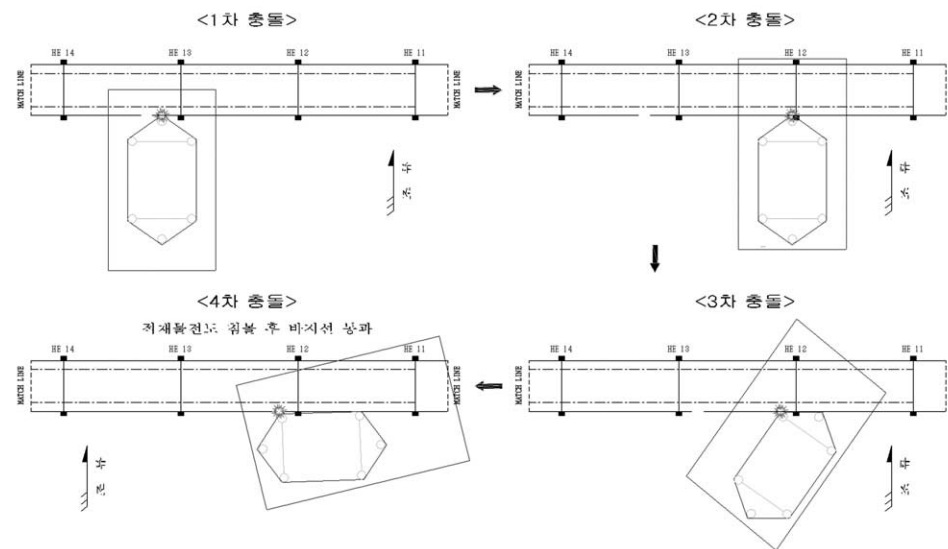
〈작업선(Jacket Barge) 충돌위치도 - 진도대교〉

금번 충돌사고를 야기한 시험조류발전소의 터빈설치용 Jack Pile 구조물은 규모가 16×36×40m이며 총중량이 750tonf에 이르는 거대구조물로 아래 그림과 같으며, 이 구조물을 육상에서 제작하여 바지선상에 적재한 후 발전소 시공위치로 운반도중 사고가 발생하였다.

형 식	Flat top Barge
Length(B.P)	85.0m
Breadth(MLD)	24.0m
Depth	5.3m
Draft(D.L.W.L)	4.0m
Deadweight	6,000tonf
Deck camber	200m/m
Ballast capacity	1,800tonf/hr



〈바지선 제원 및 Jack Pile 구조물 전경〉



〈충돌사고 개요〉

바지선에 의한 4차례의 충돌로 인해 대상교량에 발생한 주요 손상현황은 아래 표와 같다.

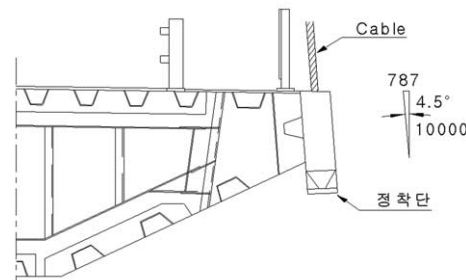
〈충돌에 의한 대상교량의 주요 손상현황〉

구 분	결 합 내 용
1) 보강거더 외부 -내풍시설파손 -충돌부 변형	  <p>HE11-13 내풍시설 파손</p> <p>1차 충돌부 변형</p>
2) 케이블정착단 -케이블정착단 3개소 손상 -정착단본체파손 -댐퍼파손 -너트밀림	  <p>너트 밀림 HE11: 19.88mm HE11: 13.49mm HE11: 26.79mm</p> <p>HE12 댐퍼 파손</p>
3) 케이블소켓 -너트손상 -케이블소켓나사산 부분 파손 -HE12 케이블격임(4.2°)	  <p>나사산 부분 파손</p> <p>1차 충돌부 변형</p>

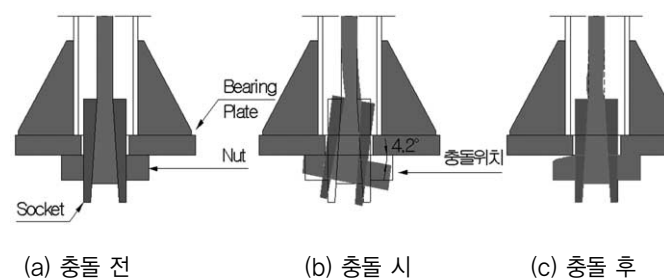
2) 안전성 검토

a) 케이블격임에 따른 HE12케이블의 안전성 검토

단계적으로 장력을 제거한 후 케이블 소켓을 조사한 결과 충돌한 방향인 수평방향으로 소켓과 케이블 중심축이 4.2°가 틀어진 것으로 나타났다. 이러한 케이블 격임 원인을 규명하고자 설계도면 등을 토대로 충돌 상황을 검토한 결과 도면상에서 보강형 거더 측면이 안쪽으로 4.5° 기울어져 있고 주탑과 보강형 거더의 정착단이 이루는 각이 4°임을 고려할 때 설계오류나 시공 시의 원인에 따라 수평방향으로 격임이 발생되었을 가능성은 적은 것으로 확인되었다.



〈보강형 거더 측면 케이블 정착단 설치 개요도〉



〈충돌에 의한 HE12 케이블 소켓 꺾임 개요도〉

상기한 내용을 고려하여 HE12 케이블 정착단 및 소켓에 대한 충돌 상황을 재검토했던 결과 충돌 시 발생된 충격력이 케이블 소켓 단부와 너트에 가해져 너트가 압착되면서 변형되는 과정에서 케이블 소켓이 현재와 같이 수평방향(교량 내측)으로 틀어지고 이로 인하여 케이블 소켓 본체에 비하여 강성이 월등히 적은 나사산 파손 및 케이블 꺾임이 발생된 것으로 판단된다. 또한 이러한 꺾임은 케이블의 중력방향 자연처짐과는 무관한 것으로 사료된다. 일반적으로 케이블은 중력방향 처짐에 의한 꺾임이 발생되지 않는다면 케이블 장력에 의한 인장응력만이 작용하는 것으로 보나 정착단 근처에서 케이블 꺾임이 발생한 경우는 국부적인 휨응력을 고려하여 케이블 응력을 결정하여야 한다. 즉, 현수교나 사장교에서 케이블 꺾임에 의한 국부적인 휨응력 산정에는 일반적으로 다음과 같은 Wyatt 이론식이 사용된다.

$$F_b = 2 \cdot \tan \theta \cdot \sqrt{F_c \cdot E} = 1,077 \text{ Mpa}$$

여기서, F_c : 케이블 장력에 의한 인장응력 ($= T/A_c = 967 \text{ kN} / 2,990 \text{ mm}^2 = 323 \text{ Mpa}$)

θ : 케이블 정착부 꺾임각 ($\tan \theta = 0.07343$)

E : 케이블 탄성계수 ($= 160 \text{ kN/mm}^2$)

그러므로, 꺾임이 발생한 케이블은 장력에 의한 인장응력과 국부적인 휨응력을 고려하여 안전

성을 검토하여야 한다. 즉, 다음의 식을 만족하여야 한다.

$$\begin{aligned} F &= F_c + F_b < F_a \\ &= 323 + 1,077 = 1,400 \text{ MPa} > 605 \text{ MPa} \end{aligned}$$

여기서, F : 케이블 응력

F_c : 장력에 의한 케이블 인장응력 (323 MPa)

F_b : 케이블 꺾임에 의한 국부적인 휨응력 (1,077 MPa)

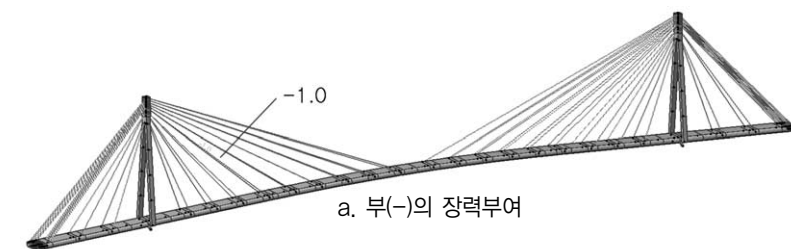
F_a : 케이블의 허용응력 ($= 0.45 \cdot P_u / A_c = 0.45 \cdot 4,022 \text{ kN} / 2,990 \text{ mm}^2 = 605 \text{ MPa}$)

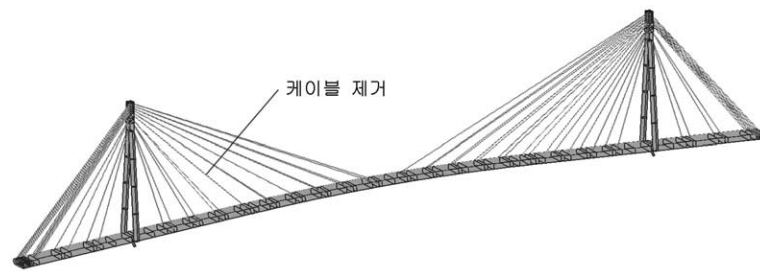
상기식은 케이블 꺾임에 의한 국부적인 휨응력 산정식은 1본의 원형 케이블에 대한 이론식으로 본 교량에서 적용된 록 코일 형식의 케이블에 적용하는데 다소 무리가 있다. 또한 이에 대한 연구 결과가 보고된 적이 없으므로 사장교에 채용된 PWS 강선에 대한 인장시험 결과 인용하면 국부적인 휨응력이 이론식의 40~50% 정도로 저감되고 실제 교량과의 오차, 안전성 등을 고려하여 Wyatt 이론식의 60%로 국부적인 휨응력을 산정하는 것이 일반적인 견해이다. 따라서 꺾임이 발생한 케이블 응력을 Wyatt 이론식으로 산정하여 보면 1,400 MPa이고 PWS 케이블 인장시험을 고려하면 969 MPa이 된다. 따라서, 케이블의 허용응력 605 MPa을 초과하므로 장기적인 유지관리 측면에서 피로 등에 대한 안전성을 고려할 때 케이블을 교체하는 것이 현실적으로 타당한 것으로 판단된다.

b) 케이블손상 후 거동평가

i) 해석모델

구조해석에 사용된 해석 프로그램은 범용 툴인 MIDAS/Civil을 사용하였으며 모델링 특징은 충돌에 의하여 케이블이 손상되었다고 가정하고 충돌에 의하여 장력이 각각 5tonf, 10tonf이 감소한 경우와 케이블이 완전 손상되어 장력이 없는 경우를 고려하여 해석을 실시하였다.





b. 케이블 제거모델
(손상 후 해석모델)

또한, HE12 케이블 장력이 감소된 상태를 나타내기 위하여 <그림 a>와 같이 음의 장력을 부여하였다. 이 경우 장력변화에 따른 케이블 유효탄성계수는 변하지 않는다고 가정하였으며 케이블 장력이 완전히 손실된 경우는 이러한 유효탄성계수를 기대할 수 없으므로 HE12 케이블을 제거한 모델이 구성되었다.

ii) 해석결과

HE12 케이블 손상정도 즉, 5%, 10%, 100%을 고려하여 해석을 수행한 결과 HE12가 지지하던 충돌부위의 휨모멘트가 다른 부분에 비하여 증가함을 알 수 있으나 이러한 변화의 정도는 경간중 양부나 지점부의 모멘트에 비하여 상대적으로 작기 때문에 구조물의 안전성에 영향을 미칠 정도는 아닌 것으로 확인되었다. 아래표에는 HE12 장력손실에 따른 인접 케이블 장력변화를 보이는 것으로 당연한 결과이지만 HE12의 장력은 재분배되어 가장 근접한 케이블인 HE11에 가장 큰 영향이 미치는 것으로 나타났다. 그러나 하나의 케이블 소실로 인해 발생하는 인접 케이블의 장력 재분배는 케이블의 허용하중(안전율)을 고려하여 볼 때 전체 케이블의 안전성에는 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다. 이러한 결과를 고찰하면 자중의 영향이 큰 장대교(사장교, 현수교 등)의 특성상 주하중에 대하여 큰 장력의 재분배가 일어나면 차량하중에 대해서는 해당 케이블(HE12)의 장력이 손실된다 하여도 의미있는 장력의 증가는 발생되지 않는다는 것을 보여주는 결과라 하겠다. 또한 해석결과 얻어진 거더의 발생응력은 모두 허용치 이하로 나타나 구조물의 안전성에는 문제가 없는 것으로 나타났다. 따라서 HE12 케이블의 장력 손실 시에도 전체구조물의 안전성은 유지되는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 비대칭적인 하중상태는 구조물의 대칭성이나 내구성에 문제를 야기할 소지가 크므로 이에 대한 적합한 조치가 필요하다.

<HE12 케이블 손상이 인접 케이블의 미치는 장력변화 정도 (단위:kN)>

하 중	손상도	HE11	HW11	HW12	HE13	HW13
기본하중 *	0%	847.4	838.4	1,029.8	1,232.7	1,237.8
	100%	1,009.6	934.2	1,124.4	1,326.5	1,380.7
차량하중 **	0%	311.5	311.5	316.2	400.0	400.0
	100%	359.4	339.2	344.6	444.0	425.9

* 자중+케이블 장력+보도 활하중 ** DL-18 2차선 영향선재하

<케이블 손상정도에 따른 보강형 거더의 응력 (단위 : Mpa)>

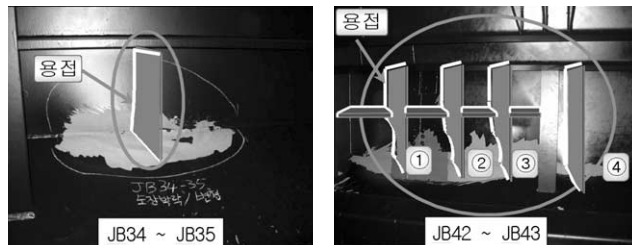
위치	손상도	f _c	f _{by}	f _{bz}	식 *	비고
지점부	0%	39.68	85.93	0.29	0.69	OK
	5%	39.68	86.06	0.23	0.69	OK
손상부	10%	39.68	86.18	0.17	0.70	OK
	100%	39.71	89.92	1.55	0.72	OK
	0%	29.77	32.35	0.82	0.35	OK
	5%	29.80	31.65	0.87	0.34	OK
	10%	29.83	30.96	0.93	0.34	OK
	100%	30.83	26.76	2.11	0.33	OK

$$* \frac{f_c}{f_{caz}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy} \left(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}}\right)} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao} \left(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}}\right)} \leq 1$$

3) 보수방안

a) 거더 내부

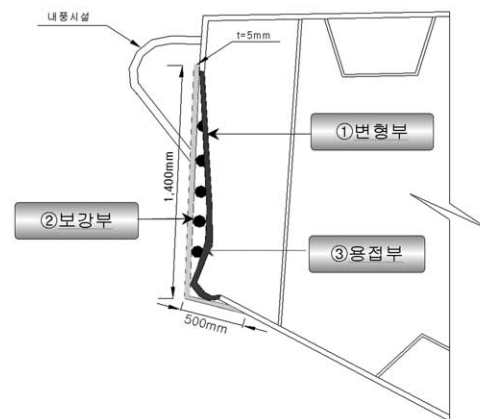
충돌사고로 인하여 변형과 부분적인 균열이 발생한 보강형 내부는 외관조사, 구조검토 및 비파괴조사 결과를 종합하면 구조안전성 측면에서 문제를 야기할 정도는 아니나 국부적인 충돌로 인하여 부재의 허용응력을 초과한 상태이고 측판과 경사판 사이의 필렛용접부 균열은 향후 반복적인 피로하중에 의하여 균열이 진전될 가능성이 있으므로 균열부에 대하여 그라인딩 또는 가우징 후 용접보수를 실시하고 변형이 발생된 부재는 하중에 의한 응력집중이 발생할 수 있으므로 수직·수평보강재를 설치하여 보강하는 조치방안이 제시되었다.



〈보강형 거더 내부 수직·수평보강재 설치 개요도〉

b) 거더 외부

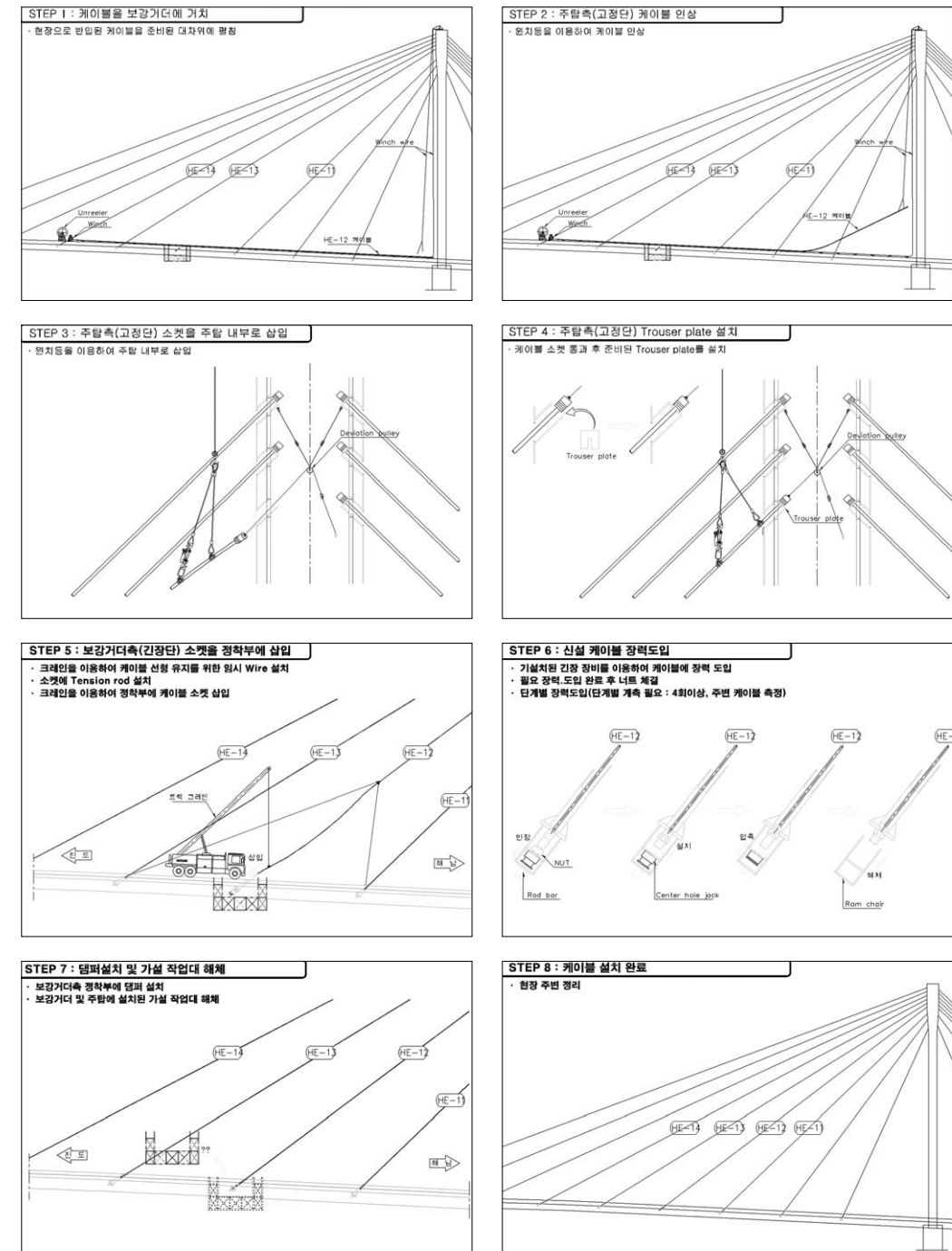
보강형 내부 수직·수평보강재 보강을 실시하여 특별한 보강은 필요치 않으나 관광지임을 고려하여 덧댐 강판을 설치하는 안이 제시되었고 변형되거나 파손된 내풍시설에 대해서도 사장교의 특성을 고려 충돌 전 상태로 원상복구토록 제안되었다.



〈거더 외부 덧댐 강판 설치개요도〉

c) 케이블 교체

케이블의 꺾임으로 인해 허용응력을 초과하여 잔류변형이 발생한 HE12 케이블은 교체가 필요한 것으로 제안되었다. 일반적으로 시공 중인 교량에 대한 케이블 설치공사는 공정별 장비 등이 준비되어 있으므로 순서에 따라 설치하면 되나 공용중인 교량 측, 여러 케이블들 중 하나를 교체하는 작업은 다른 케이블들의 간섭, 작업여건 불량 등으로 인하여 시공에 어려움이 있을 것으로 예상된다. 본 고에 제시된 케이블 교체공사 개요(우측그림 참조)는 보강공사 실시설계에서 제안된 내용을 정리하여 나타내었다

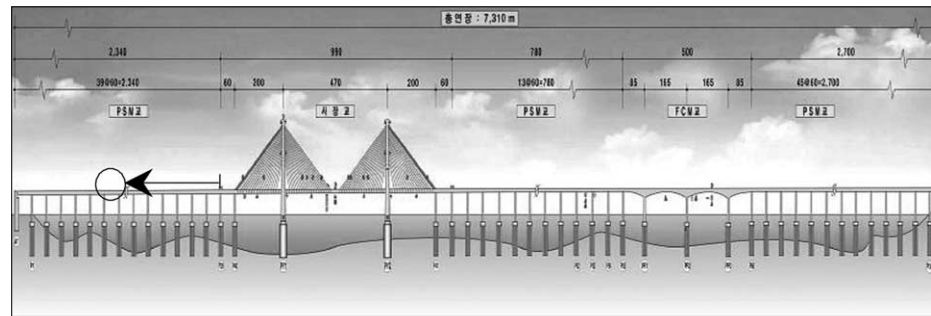


〈케이블 설치개요도〉

나. 화재에 의한 손상

1) 현황

2006년 10월 03일(화) 07:43분경 서해안고속도로 서해대교 서울방향 279K 지점에서 안개로 인한 시정악화와 과속운전으로 29중 충돌사고가 발생하였다. 이로 인해서 약 40분간 구조물상부에 화재가 발생하였다.



〈사고 위치〉



〈사고 직후 구조물 상부 전경〉

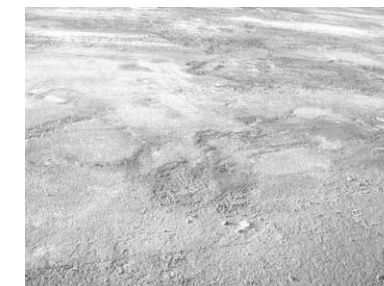
이 화재사고로 인하여 재하시험이 요구될 정도의 구조적인 손상은 발생하지 않았으므로 다음 표와 같은 항목의 조사가 이루어졌다.

〈부재별 화재조사항목〉

구 분	대상부재	조사항목
철근 콘크리트 부 재	중분대, 난간	- 육안관찰(균열, 박락, 폭열 등) - 콘크리트 변색정도 - 중성화 깊이 - 콘크리트 비파괴 압축강도
PSC 부재	PSM 상부 슬래브	- 육안관찰(균열) - 콘크리트 비파괴 압축강도
교면포장	교면포장	- 육안관찰

① 교면포장

이 교량의 교면포장은 SMA 포장으로 포장두께는 약 7.5cm 정도이다. 1, 2, 3차로 약 20m가 손상되었으며, 손상깊이는 최대 4cm 이내였다. 이 교량의 방수시스템은 슈트식이고 포장 손상 깊이가 방수층까지 다다르지 않았다. 아래 그림은 화재로 인한 교면 포장의 손상 현황을 보여주고 있다.



〈교면 포장 손상〉

② 콘크리트 방호벽(중앙분리대, 난간)

서해대교 화재로 가장 많은 손실을 입은 부분은 콘크리트 방호벽이며, 방호벽에는 약 3m간격으로 수축줄눈이 설치되어 있는데, 이 수축줄눈을 중심으로 폭열로 인한 콘크리트 피복이 탈락되었다. 폭열로 인한 박락면적은 약 6.5m²이고, 난간보다는 중앙분리대에서 화재가 심했다. 균열조사를 통해 볼 때 중앙분리대 일부 짧은 부위에 균열이 발생되어 있었지만, 대부분의 구간에서는 폭열로 인한 균열은 발견되지 않았다.



〈방호벽 손상〉

③ 상부슬래브

사고 후 손상된 포장면을 보수하기 위해 5cm 절삭하는 과정에서 포장면의 손상을 확인한 결과, 절삭한 포장면에서는 특별한 포장 손상은 발견되지 않은 것으로 조사되었다.

2) 손상 원인

2006년 10월 03일(화) 07:43분경 서해안고속도로 서해대교 서울방향 279K P27~P28 (PSM 구간) 지점에서 안개로 인한 시정악화와 과속운전으로 29중 충돌사고가 발생하였다. 이로 인해 서 약 40분간 구조물상부에 화재가 발생하여 증분대 방호벽 및 난간방호벽이 파손되었고 포장이 손상되었다.

3) 보수 방법

① 교면포장

교면포장은 1, 2, 3차로 약 20m가 손상되었으며, 손상깊이는 최대 4cm 정도였다. 5cm 절삭된 면을 통해 볼 때, 화재의 영향이 포장면 7.5cm 전체에 영향을 주지 않았으므로, 절삭 덧씌우기 포장을 통해 주행성을 확보하면 될 것으로 판단하였다.

② 방호벽

방호벽의 경우 박리 및 폭열, 콘크리트 강도의 저하, 중성화 등 화재 영향이 있었다. 변색상황, 콘크리트 강도, 폭열면적, 중성화 깊이 등을 종합적으로 분석할 때 수열온도는 300~500℃, 피해등급은 Ⅲ등급인 것으로 판단되었다. 이에 대한 적절한 보수 방안으로 취약화된 표면을 제거하고, 모르타르 단면 보수를 통해 기능 회복이 가능할 것으로 판단하였다.

③ 상부슬래브

포장면의 손상과 절삭면을 통해 볼 때, 화재의 영향은 상부 슬래브에 미치지 않은 것으로 판

단되었으며, 따라서, 상부 슬래브 콘크리트의 열화, PS강재와 철근의 연화현상은 없는 것으로 추정되었다. 슬래브 내부에서 실시한 외관조사와 비파괴시험에서도 화재의 영향은 확인되지 않았다.



〈절삭포장면〉



〈상부 슬래브(하단)조사〉

〈화재로 인한 구조물 보수대책〉

구 분	피 해 현 황	대 책 (보수현황)
교면포장	포장 손상	포장 손상층 절삭 후 재포장 (5cm 절삭 덧씌우기, 아스콘 포장)
방호벽	콘크리트 변색·균열 콘크리트 표층 박락 및 폭열 콘크리트 강도 저하, 중성화	취약화된 콘크리트 제거 후 단면보수 (모르타르 단면 복구, 중성화 및 열화 방지 도막 시공)
슬래브	해당사항 없음	해당사항 없음



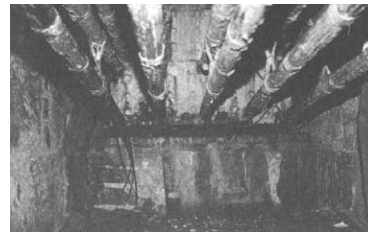
〈포장 보수 및 방호벽 보수〉

3. 국외사례

3.1 Brooklyn 교량

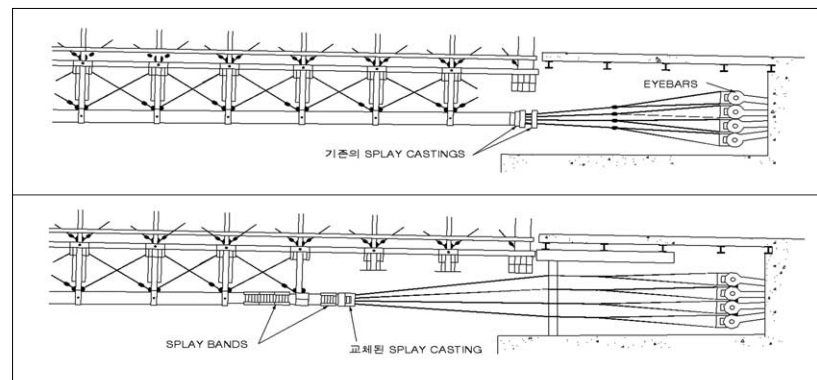
Brooklyn 교량은 세계에서 가장 유명한 현수교 중 하나이며 1883년 가설된 교량이다. 1979에 본 교량에 대한 정밀 조사가 이루어졌으며 조사 내용은 다음과 같다.

Wrapping Wire의 심각한 부식이 케이블 밴드의 아래 부분에서 발견되었다. 인접한 Wire와 밴드 내부 표면사이의 홈에 물이 고여 부식이 일어난 것이다. 또한 주케이블에서 아연 도금된 코팅이 벗겨지면서 부식이 생기고 Pitting을 야기하는 녹이 발견되었다. 앵커리지부의 조사결과 스트랜드 슈 뿐만 아니라 스트랜드 슈와 스프라이 밴드사이에 심각한 부식과 다수의 부서진 케이블이 발견되었다.



〈케이블 앵커리지부〉

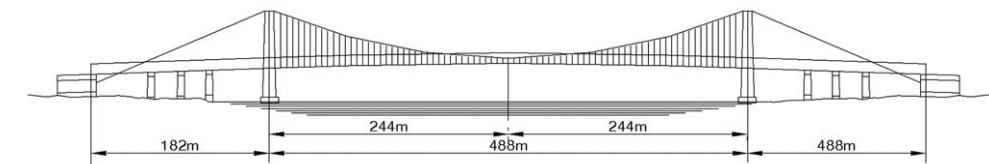
앵커리지부의 부식과 손상에 대한 대책으로 아래 그림과 같이 기존의 Splay casting을 새로운 Splay casting으로 교체하고 Safety bands를 설치하였다.



〈케이블 앵커리지부 교체〉

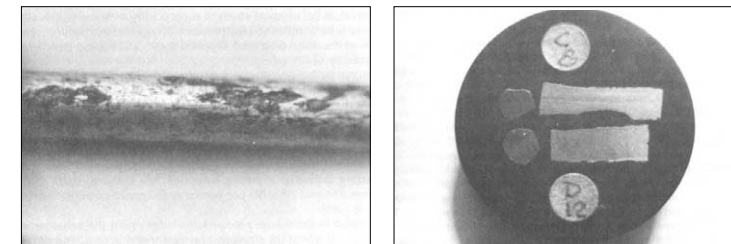
3.2 Williamsburg 교량

Williamsburg 교량은 1903년 East River에 가설된 현수교로서 주 경간은 488m이고 측 경간은 182m이다. 아래 그림은 Williamsburg 교량의 형상을 나타낸 것이다.



〈Williamsburg 교량〉

1980년에 교량 케이블에 대한 정밀 검사가 있었는데, 대부분의 주 케이블에 Pitting 상태가 발견되었다. 일반적으로 와이어에서 관찰된 Pitting은 깊이가 0.5mm보다 작았으나, 2mm를 초과하는 pitting도 발견되었다.



〈케이블의 손상〉

또한 앵커리지부를 조사한 결과, 스트랜드에 코팅된 두꺼운 그리스(grease)는 스트랜드 안쪽의 수분을 모으고 이런 수분에 의해서 결국 심각한 부식이 생긴 것을 확인하였다. 그리고 Splay casting의 안쪽에 있는 와이어를 조사한 결과, 다수의 케이블이 부식에 의하여 손상을 입었으며 그런 부식은 오래된 Splay casting의 가장자리에서 국부적으로 발생하였다.

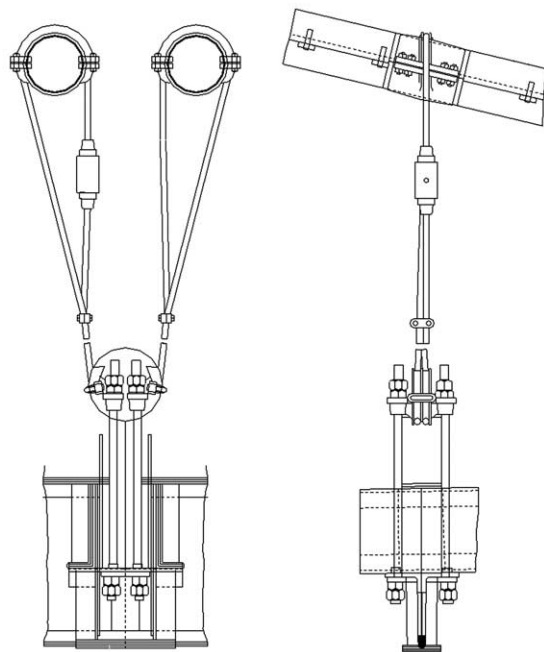


〈앵커리지부의 손상된 와이어〉



〈스트랜드의 두꺼운 그리스 코팅〉

한편 행어로프를 조사한 결과, Casting의 아래 부분에 있는 많은 로프에 심각한 부식이 발견되었다. 부식이 발견된 로프는 실험을 위해서 제거되었으며 제거된 로프는 새로운 로프로 대체되었다. 다음 그림은 대체전 행어로프의 형태를 나타내고 있다.



〈행어 로프〉

주케이블과 앵커리지 및 행어로프에서 발생한 위와 같은 손상 문제를 해결하기 위해서 케이블 wrapping, 케이블 밴드 casting, 행어 로프, 연결부위 등이 다른 재료로 대체되었으며, 앵커리지부의 앵커들이 청소되고 부식되거나 손상이 심한 와이어들은 새로운 와이어로 교체하였다.

3.3. Bear Mountain 교량



〈Bear mountain 교량〉

Bear mountain 교량은 1924년 준공되었으며 New York 북부의 Hudson강에 놓여있고 경간은 497m이다.

1991년에 케이블 와이어에 대한 정밀 조사가 실시되었는데 조사 목적은 케이블 와이어의 일반적 인 상태와 내하력에 대한 부식의 영향을 조사하는 것이었다. 검사결과 대체적으로 주 케이블 와이어 의 상태는 좋았으나 코팅이 벗겨진 부분에 부식을 관찰되었으며 앵커리지부에는 케이블 스트랜드 표면에 벗겨진 페인트 코팅이 발견되었다.

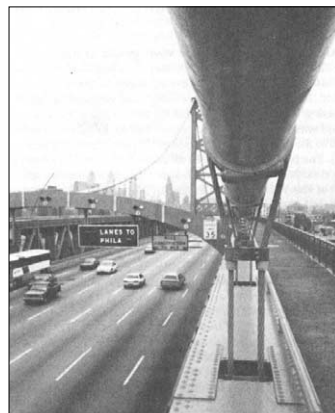


〈앵커리지부 케이블 스트랜드 코팅의 손상〉

3.4 Benjamin Franklin 교량

Benjamin Franklin 교량은 1926년에 가설되었으며 주 경간이 533.4m 그리고 두개의 측 경간이 218.4m인 현수교이다.

1970년도에 조사가 이루어졌으며 행어 단면의 심한 부식과 와이어의 손상이 발견되었으며 1974년 주 경간의 중앙부분의 로프가 새로운 로프로 대체되었다. 1976년에는 정밀 검사를 실시하였는데 육안으로 확인한 것 보다 더 많은 와이어의 손상이 소켓부에서 발견되었다. 1978년에서 1980년까지 약 2년 동안 7백만 달러의 비용을 들여 행어로프를 교체하였다.



〈행어 로프의 형상〉

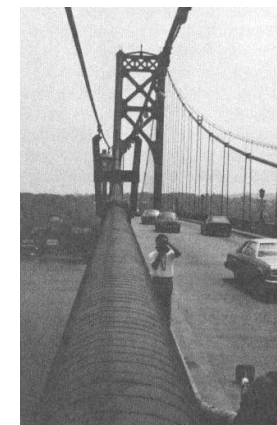
3.5. Mount Hope 교량

Mount hope 교량은 1929년에 가설되었으며, Narraganset Bay를 횡단하는 현수교로 주 경간 366m, 두 측경간이 154m이다.

1970년에 중앙경간 케이블이 처진 구간에서 심각한 와이어의 부식이 발견되었다. 원인은 Wrapping구조에 물이 침투하여 생긴 것이다. 많은 부식된 와이어가 새로 교체되었고 케이블의 일 부분이 플라스틱 커버로 코팅되었다.



〈Mount hope 교량의 형상〉

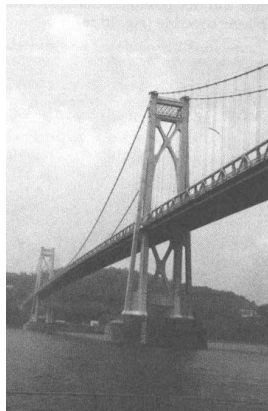


〈Warping의 형상〉

3.6. Mid-Hudson 교량

Mid-Hudson 교량은 1930년에 가설되었으며, Hudson River를 횡단하는 현수교로 교량 전체의 길이는 914.4m이다. 다음 그림은 Mid-Hudson 교량의 모습을 나타내고 있다.

케이블에 대한 조사가 1969년, 1987년, 1990-1991년에 실시되었으며, 국부적인 부식과 pitting 현상들이 발견되었다. 이런 현상들에 대한 보수로 와이어 wrapping을 제거하고 부식억제제를 사용했으며 새로운 wrapping와이어가 케이블에 사용되고 코팅이 되었다. 다음 그림은 케이블 보수에 대한 그림을 보여주고 있다.



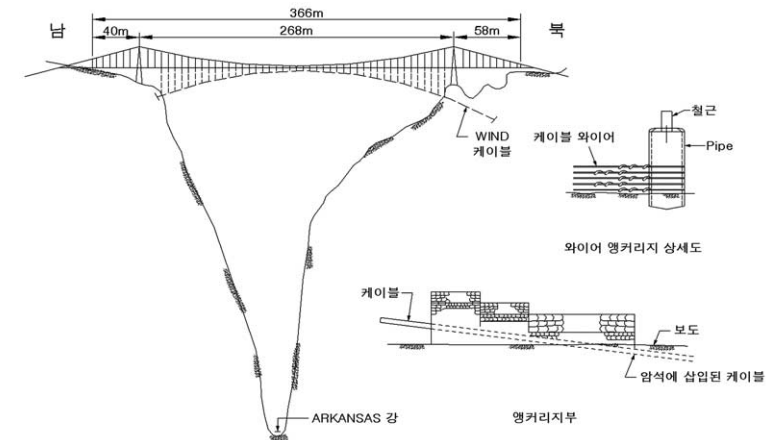
〈Mid-Hudson 교량〉



〈케이블 보수〉

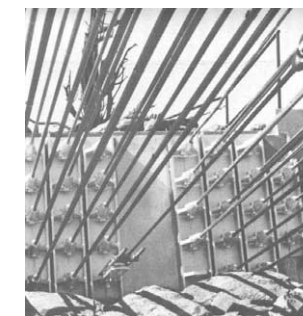
3.7. Royal Gorge 교량

Royal gorge 교량은 Arkansas River의 골짜기에 위치하며 높이가 321m이고 교대와 교대사이의 총길이는 366m이다. 아래 그림은 Royal gorge 교량의 모습을 나타내고 있다.



〈Royal gorge 교량〉

케이블에 대한 조사결과 부식이 발견되었으나 무시할 정도였고 대체적으로 양호한 상태였다. 또한 윈드 케이블 구조에서는 바람이 시간당 200km를 초과할 때 상당한 움직임을 보이는 것이 확인되었고 Suspend rods는 심한 손상이 확인되었다. 케이블의 상태는 양호하므로 앵커리지부 및 케이블 끝단을 새로 교체하였으며 Suspend rods는 현대식으로 교체되었다.



〈케이블 앵커리지 교체〉

한편 윈드 케이블 구조는 재설계 및 재시공 되었다. 기존의 윈드 케이블 구조가 비대칭이었기 때문에 재설계, 시공에서는 아래 그림과 같이 대칭으로 하였다.



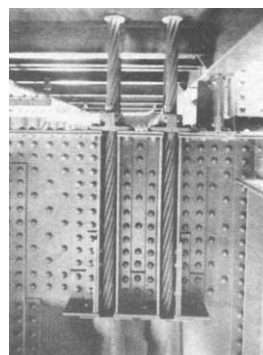
〈새로운 윈드 케이블 구조〉

3.8. George Washington 교량

George Washington 교량은 1931년에 가설되었으며, Hudson River에 위치한 교량으로 주 경간의 길이는 1,067m이고 측 경간은 198m와 186m이다.

1966년 Gould에 의하면, 592개의 Suspender가 조사되었는데 그 중 19개는 실험을 위해 제거되고 새로운 로프로 교체하였다. 또한 60개의 로프에 있는 와이어가 손상을 입었고 6개의 로프는 많은 양의 녹이 발견되었다.

Suspender에 대한 연결부 상세가 다음 그림에 나타나 있다.



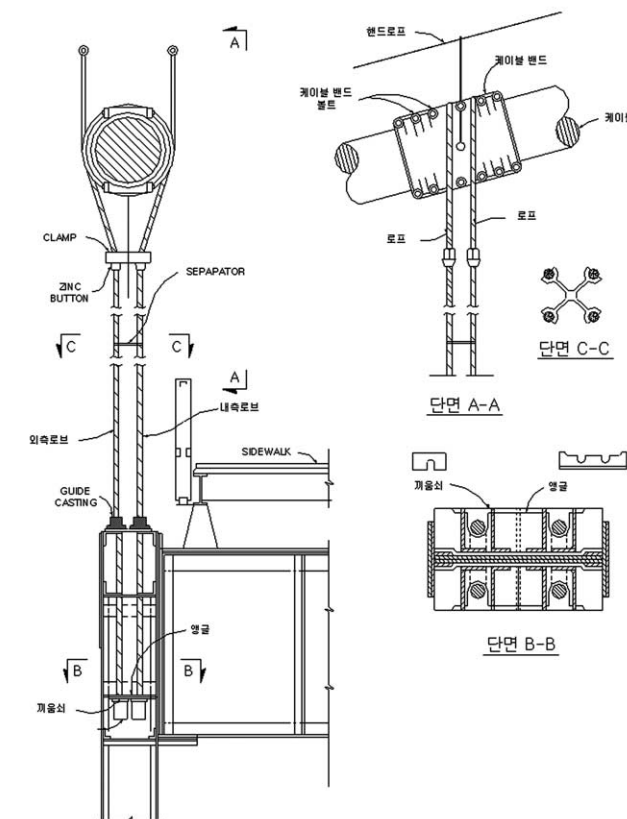
〈Suspender 연결 상세〉

1992년에 주케이블에 대한 조사결과, wrapping와이어는 양호한 상태였고, 외부 와이어에 수분이 발견되었다. 내부 와이어는 일반적으로 양호한 상태였다.

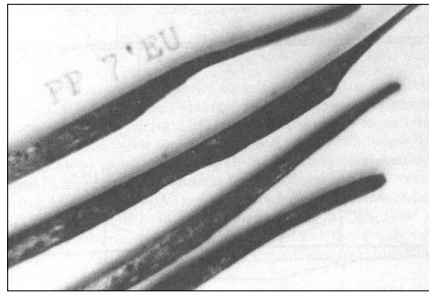
3.9. 금문교(Golden Gate Bridge)

금문교는 1937년에 San Francisco Bay에 가설된 현수교이며 주 경간의 길이가 1,280.2 m 이다.

1968년도의 진단에서는, 케이블 와이어의 상태를 직접적으로 관찰하기 위하여 항풍에 가장 많이 노출된 서쪽 케이블 와이어를 제거하기로 결정했다. 와이어 표면은 양호한 상태였고 부식 손상은 없었다. 케이블 하단에 약간의 침전물이 있었으나 심한 정도는 아니었다. 한편 Suspender 로프에서는 부식손상과 로프 소켓의 와이어가 끊어진 것이 발견되었다.



〈Suspender 로프 - Golden gate 교량〉



〈Suspender 와이어의 부식〉



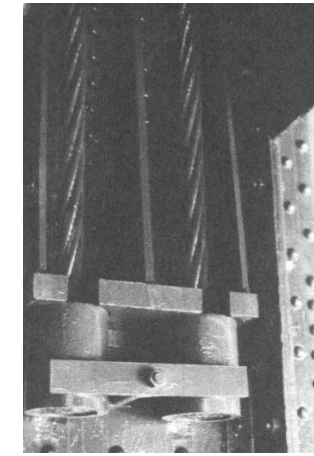
〈로프 소켓의 와이어 손상〉

또한, Suspender 연결부에서의 아래 그림과 같은 부식이 발견되었다.



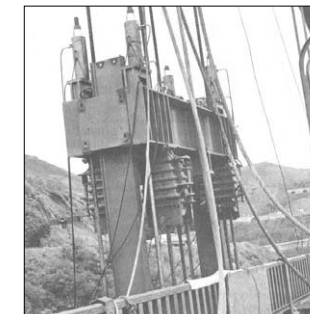
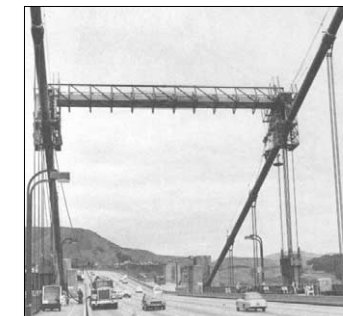
〈Suspender 연결부의 부식〉

1973년에 손상부재에 대한 실험이 실시되었고 1973-1976년 사이에 모든 Suspender 로프가 교체되었으며, 새로운 Suspender 연결 장치가 설치되었다.



〈새로운 Suspender 연결 장치〉

아래 그림들은 Suspender 교체 사진을 보여주고 있다.

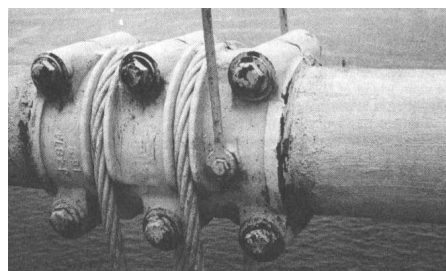


〈Suspender 교체〉

3.10 Newport 교량

Newport 교량은 1969년에 Narragansett Bay에 가설된 현수교이며 중앙 경간이 487.4 m, 측 경간이 209.4m이다.

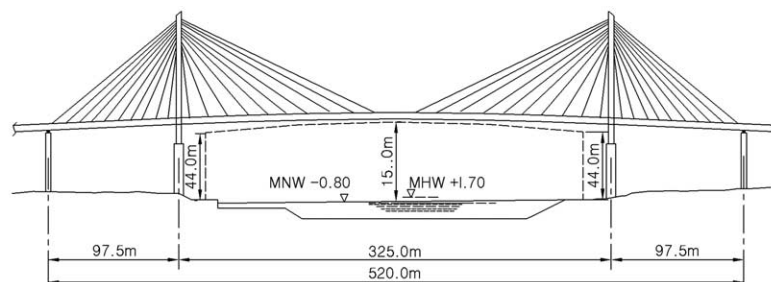
1990년 케이블에 대한 조사결과, 케이블 밴드의 일부에서 균열과 녹이 발견되었다. 아래 그림은 케이블 밴드에 생긴 녹을 보여주고 있다.



〈케이블 밴드에 생긴 녹〉

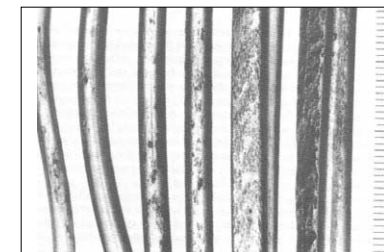
3.11 Kohlbrand 교량

Hamburg에 위치한 Kohlbrand 교량은 중앙 경간이 325m이고 전체 길이가 520m인 사장교이다. 아래 그림은 Kohlbrand 교량의 형상을 보여주고 있다.



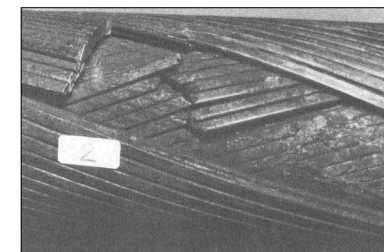
〈Kohlbrand 교량〉

1977년 7월의 조사에 따르면, 모든 케이블의 위 부분 소켓에서 와이어의 부식이 발견되었다. 손상된 와이어들은 1개를 제외하고 대부분 표면 부식에 국한되었다. 이와는 대조적으로 아래 소켓부에서는 심각한 부식이 발견되었다.



〈부식된 와이어〉

그리고, 스트랜드의 중심부까지 부식이 나타났고 와이어 표면의 수많은 손상이 발견되었다. 와이어의 손상과 균열형상을 아래 그림에 나타내었다.



〈손상된 와이어〉

또한, 소켓 제거 후 검사에서는 5개의 소켓부의 표면에 소켓 가장자리를 따라 이상한 끌 자국이 발견되었다. 그것은 소켓과 케이블의 접촉으로 생긴 손상으로 판단되었다. 1978년의 실험과 조사에 따르면, 염화물이 부식을 일으키고 표면 손상은 부식 피로의 전형적인 형태로 나타났다.



〈피로 파괴〉

위와 같은 문제를 해결하기 위하여 새로운 케이블의 와이어가 설치되었고, 추가적으로 진동 댐퍼도 설치되었다. 케이블 교체에 쓰인 비용은 약 6백만 달러였다.

〈국외 케이블지교량 관련 보수, 보강 사례 일람표〉

a) 케이블관련

교량명	교량형식	가설년도	보수·보강내역	손상원인 및 보수 목적
Brooklyn 교	현수교	1883	새들의 위치 이설	침입수 제거와 아이바, 와이어의 휨방지
			주케이블 일부 교체	부식
			행거로프 교체	부식
			앵커 내부 확폭	점검, 보수를 위함
			케이블의 내부조사	부식 정도 조사
			재래핑	부식
			케이블 밴드 행거로프의 일부 교체	부식
Williamsburg 교	현수교	1909	케이블 아이바의 부식에 의한 단면 손실, 소켓에 의한 스트랜드연결, rod와 앵커거더의 보강 교체	부식
Washington 교	현수교	1903	래핑 교체 그리스 주입 와이어 교체	부식
			와이어 샘플링 시험	부식, 강도저하 조사
			앵커부 와이어의 파단	부식
George Washington 교	현수교	1931	탐정 새들의 jacky up	하단대크 중실에 따른 행거로프의 늘어짐 조정
			밴드볼트 교체	크리프 혹은 부식
			행거와 보강거더의 연결부 보호	행거의 부식
Mackinac 교	현수교	1957	밴드볼트 교체	부식
Walt Whiteman 교 Benjamin Flankin 교	현수교 현수교	1957 1926	재래핑	유지관리의 일환
Delaware Memorial 교	현수교	1951	케이블 내부 조사, 조사부를 rubber로 래핑	부식상황 등의 조사
			구교의 행거 교체와 보강거더 연결부의 접촉 방지	접촉피로 (래핑)
Chesapeake Bay 교	현수교	1952	케이블의 내부 조사	부식상황 등의 조사
Angostura교	현수교	1967	앵커부 스트랜드에 녹발생	부식
Maracaibo교	사장교	1960	케이블 교체, 탐정에 새로운 새들 설치	부식, 케이블 교환을 쉽게 하기 위함
			새 케이블에 녹 발생	부식
San Francisco Oakland Bay 교	현수교	1936	케이블 내부 조사	부식점검
Golden gate 교	현수교	1937	행거로프 교체	부식

b) 보강거더관련

교량명	교량형식	가설년도	보수,보강내역	손상원인 및 보수 목적
Brooklyn 교	현수교	1883	보도부의 보수	부식
Manhattan 교	현수교	1909	보강 트러스의 보강	지하철의 편심재하
			주탑의 균열 보수	
			콘크리트 상판을 grating으로 교체 신축장치의 교체	
Williamsburg 교	현수교	1903	보강트러스 및 박스거더 보수, 도로의 보수 보강, 차도의 교체	부식
George Washington 교	현수교	1931	리벳을 고정력 고정력 볼트로 교체	부식
			RC상판을 강상판으로 교체	수명
			접속교 보수	
Mackinac 교	현수교	1957	접속교 대경구 가셋의 균열 보수	피로
Walt Whiteman 교	현수교	1957	교좌장치 교체	
			상판 교체	해수에 의한 부식
Benjamin Flankin 교	현수교	1926	RC상판을 강상판으로 교체	RC상판을 강상판으로 교체
Delaware Memorial 교	현수교	1952	종형의 베이스 플레이트와 소울 플레이트 교체	
			로커 받침의 청소 및 도장	
			1년 1회 물청소 신축장치의 보수	먼지쌓임
Chesapeake Bay 교	현수교	1952	콘크리트 상판을 프리캐스트 상판으로 교체	염해(동결방지제)
Angostura교	현수교	1967	교좌장치, 신축장치의 교환	마모
			보의 균열 보수	설계불량, 피로
			고장력볼트 교체	부식
Eads 교	아치교	1874	거더의 전면적인 보수	부식
			파이프, 아치의 보수	선박의 충돌
Carquinez교	트러스교	1927	아이바의 보강	재하능력의 강화
San Francisco Oakland Bay 교	현수교	1936	종형보강	재하능력의 강화
Golden gate 교	현수교	1937	콘크리트 상판을 강상판으로 교체	부식
			접속교의 확폭	교통량의 증가
			유지관리용의 작업통로 설치	

