

팔당대교 붕괴재해 원인분석 (II)

목 차

- 1 장 개 요
- 2 장 팔당대교현장조사
- 3 장 팔당대교 사고원인 규명을 위한 접근방법
- 4 장 가설강재동바리 구조의 정역학적 안전성 검토
- 5 장 상부구조의 동역학적 안전성(Aero-dynamic Stability) 검토
- 6 장 시공상태 및 작업여건에 의한 안전성 검토
- 7 장 팔당대교 사고원인 규명 및 분석
- 8 장 차후대책 공법 검토
- 9 장 종합결론

* 전호에서는 1장~7장을 수록하였고, 이번호에는 8장, 9장을 수록한다.

제 8 장 차후 대책방안 검토

향후 공사를 재개하여 보다 안정성이 높은 공사 방법을 검토하고 계획을 수립하여 지연된 공기를 만회할 수 있는 대책 방안을 모색하기 위해서는 보다 많은 변수가 작용된 돌풍에 의한 풍하중은 풍동 실험을 통하여 재검토할 것이 요망된다.

지형, 지질, 기상조건에 따른 바람의 영향을 면밀히 검토하여 대책을 수립함은 물론 한강의 수리, 수문학적 영향에 따른 공사기간의 조정과 사장교의 기본적 공법에 대하여 검토가 필요할 것으로 사료된다.

현장 공사관련자, 감독, 감리, 시공회사 및

기능인력들은 한번 실수한 공법인 가Bent에 의한 Deck가설공법을 재개시킨다면, 심리적 불안감은 물론 확실한 안전성이 보장되지 않는 상태에서 공사참여에는 어려움이 따를 것으로 예상된다.

보다 안전성이 보장되고 공기를 단축하며 경제적 타당성이 있는 대책방안 모색이 필요하다.

8-1. 지형 및 바람에 의한 조건검토

한강상류 계곡부에 위치한 본 현장은 지형적으로 바람의 여울을 일으키는 상습 돌풍지역으로 교량가설시 풍동 실험을 통하여 보다 안전한 공법을 채택하여야 하나 국내에서는 현실적으로 실험이 어렵다.

지난 200M 이상에서 Wind Tunner Test를 한다고 규정하고 있으나, 콘크리트교량이 아니고 강교이거나, 교량 가설중의 안전성을 검토하기 위하여서는 중앙지간 170M에서도 실험적 근거나 보다 안전성이 고려된 계수의 적용이 필요할 것으로 사료된다.

사고당일 풍속 $V=8.7\text{mm/sec}$ 에서도 가설중 교량이 붕괴되고 가옥 담장이 붕괴되며 흙먼지가 일어나는 돌풍이 발생하는 특수지역임을 충분히 감안하여야 한다.

서울 지역 기상관측소의 풍속 $V=8.7\text{m/sec}$ 에서도 본 교량지역은 풍속 $V=10\sim 20\text{m/sec}$ 정도에 달하며, 바람의 입계속도는 $V=12.8\sim 17.2\text{m/sec}$ 추정되어 교량 안전성에서 불안정한 상태가 되므로 보다 안전성이 고려된 계수의 검토적용이 요구되는 실정이다.(참조: 산업안전보건법 표준안전 작업지침서 노동부 고시

제85-11호 참조)

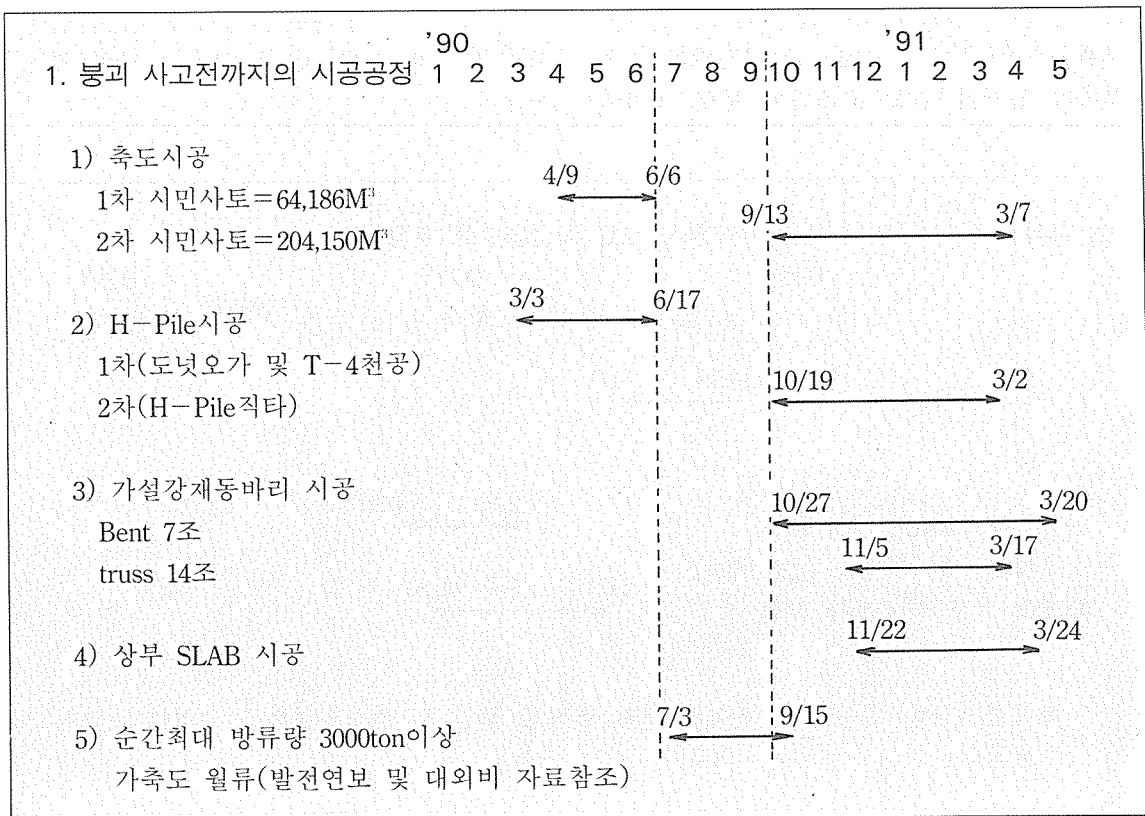
8-2. 수리수문학적 조건검토

팔당대교의 사장교 구간은 장지간이며 지형적, 계절적 영향을 많이 받을 수 있는 조건을 갖추고 있는 바, 이를 수리수문학적인 관점에서 살펴보면 다음과 같다.

상기표에서 보는 바와 같이 홍수유수기간에는 공사가 불가능하며 공사의 안전유지상 유속 및 수위를 고려한 흔적이 있으나, 풍향 풍속에 관하여는 고려한 대책방안을 찾을 수가 없었다.

팔당댐 하류 4km에 위치한 본 교량은 여울목으로서 유속이 매우 빠르고 수심이 깊어 지보공에 의한 사장교 공사가 어려운 지역이다.

STAGING을 위한 가축도공사, SHEET



PILE보호공사, 기초 Pile 보강공사 BENT STAGING조립설치공사, 상부 DECK PC 콘크리트공사, STAY Cable 긴장설치등의 복잡하고 장기간이 소요되는 공사로서, 계절적 홍수로 인한 팔당댐 방류 수위의 영향기간을 벗어나서 공사하여야 하는 어려움이 있다.

실제로 가축도시공, H-Pile 시공, BENT 및 TRUSS공사기간등을 종합 조사하면 공기공정 추진에 문제점이 있다.

상기 언급된 표와 같이 기 시공된 공기 공정 추진에는 홍수 유수기간(7-9월)에는 공사가 불가능하며, 이에 따라서 건기 기간에 작업을 진행하여야 하고, H-Pile시공, 가설강재 동바리 시공, 상부 Slab시공 등이 혹한기를 포함하고 있어 돌관작업에 따른 지보공 자체 구조의 무리한 공사로 판단된다.

본 팔당대교는 90년 1차(6/20) 홍수로 인하여 가축도 성토가 유실된 바가 있으며, 2차(9/11) 홍수시 구조계산상 안전하다고 판단된 강재동바리 유실 및 Ramp 강재동바리 기초 침하가 일어난 점을 고려하여 동일 공법에

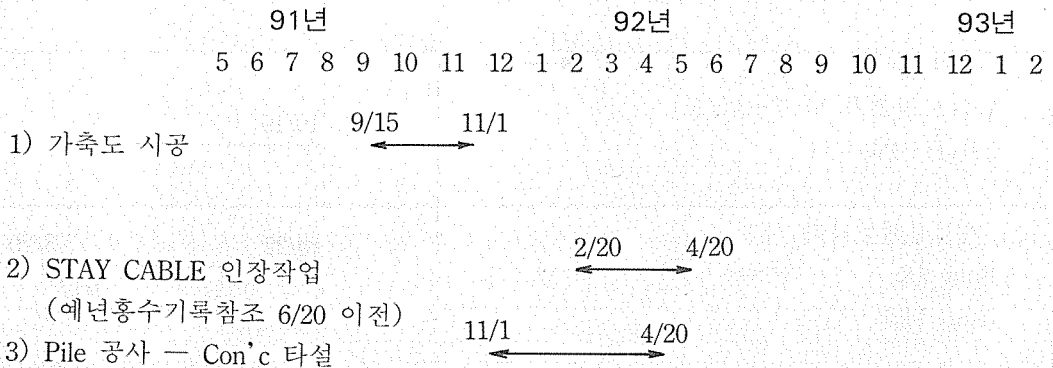
의한 재시공은 충분히 검토하여 대책을 모색하여야 한다고 판단된다.

따라서 상기와 같이 빠른 기간내 많은 공정이 이루어지고 이러한 일련의 공정들이 일사불란하게 이루어지지 않을 경우는 돌관작업 및 홍수기, 혹한기등 계절적 영향에 좌우되는 현상이 나타날 수 있으므로 최소한도로 계절적 영향을 적게 받을 수 있는 공법의 재검토가 요구된다고 판단된다.

Bent식 지보에 의한 공사추진에는 홍수기간과 계절적 영향을 검토한 공정 작업으로서 본공사 DECK CON'C 타설 및 PC 도입과 STAY Cable의 단계별 정착에는 너무나 복잡하므로 잠재위험성이 내재되어 있다.

작업가능 한강 수위를 EL (-) 12.00m으로 감안할 때 6월-9월 호우집중 기간의 순수작업 불가능 일수가 26일로 추정되었으나, 공사 대비의 준비 기간과 공사중단 후 재정비 복구기간을 감안한다면 본 공사가 돌관 작업에 의한 무리한 공정으로 추진될 수 밖에 없는 상태이다.

2. 따라서 동일 공법에 의한 재시공시 소요 작업일수를 추정하면



* 혹한기, 예상휴무일수, 홍수기 고려 공정표 작성 및 최소일정으로 고려한 무리한 공정임.

1. 한강하류부 流況

(1) 한강하류부 유량등급별 연간 유하일수¹⁾

유량등급(CMS)	대표유량(CMS)	유하일수(일)	누적유하일수(일)	유하시간(Sec)
8,000-9,500	8,750	2	2	172,800
6,000-8,000	7,000	2	4	172,800
4,000-6,000	5,000	2	6	172,800
2,000-4,000	3,000	9	15	777,600
1,000-2,000	1,500	31	46	2,678,400
500-1,000	750	58	104	5,011,200
300- 500	400	65	169	5,616,000
100- 300	200	137	306	11,836,900
100이하	70	59	365	5,097,600

년평균 갈수량(355/365)	:	47.349CMS
↳ 저수량(275/365)	:	141.558CMS
↳ 평수량(185/365)	:	262.151CMS
↳ 풍수량(95/365)	:	557.589CMS
↳ 고수량(2/365)	:	8.327.759CMS
↳ 평균유량	:	537.589CMS

(2) 한강하류부 유황도-별첨 그림 참조

2. 고안지점 수위

(1) 수위표 영점표고 : El. 8.795m

(2) 수위-유량 관계식

$$Q = 226.5648 H^{1.8369} \quad (H > 5.9m = El. 14.965m)$$

$$Q = 198.244 H^{1.91187} \quad (H < 5.9m)$$

3. 계산 및 결론

(1) 기본가정 :

- ① 한강하류부 유황곡선을 고안지점에 적용한다.
- ② 고안수위표 지점과 팔당대교 건설현장 사이의 수면경사는 1/3,856으로 한다.
- ③ 팔당대교 건설현장의 공사불가능 수위를 El. 12.0m로 한다.
- ④ 고안수위표 지점과 현장간의 수평거리는 약 2.1km이다.

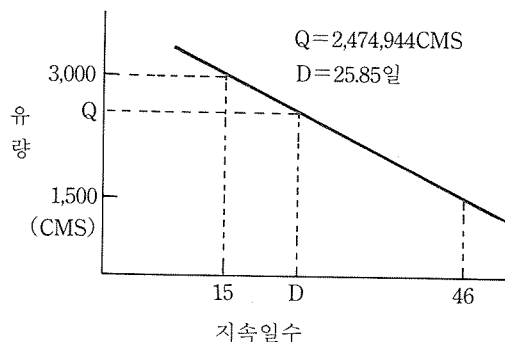
(2) 계산 :

- 위의 조건 ③에 해당하는 고안수위표 지점의 영점수위는 수평거리(2100m)와 조건 ②를 적용하면 약 12.54m이다. 즉, 고안수위표지점 영점수위가 El. 12.54m 이상이 되면 팔당대교 건설공사는 계속 할 수 없는 조건이 된다.

- 고안수위표지점 영점수위 12.54m때의 유량추정은 위의 식중에서 $H < 5.9m$ 인 조건의 식을 사용해야 한다.

$$\text{산정유량은 } Q = 198.244 \times (12.54 - 8.795)^{1.91187} = 2474.944 \text{CMS}$$

- 고안수위표 지점에서 유량이 2474.944 CMS이상 유지되는 유하일수는 한강하류부 유황도로부터 약 26일 임을 추정 (선형내삽법 사용) 할 수 있다.



(3) 결론

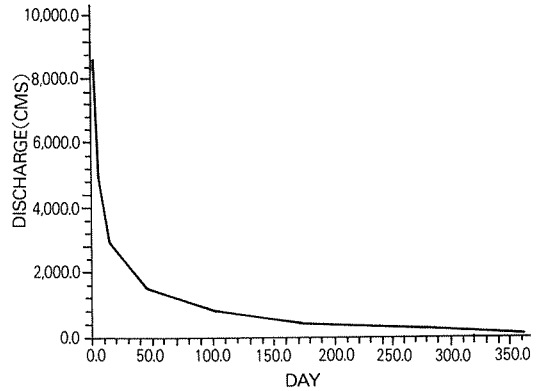
- ① 이상의 추정으로부터
순수 홍수위에 의한 공사불가능일수는 26일임을 알 수 있다.
- ② 우리나라의 호우특성인 6월-9월의 호우집중성과 발생빈도로 보아 이상에서의 한계수위 이상으로 발생할 회수는 년 평균 3회 이상일 것으로 추정되며, 공사가 불가능한 일수는 26일 이상의 훨씬 긴 기간일 것으로 추정됨.

4. 참고문헌

- 1) 한강종합개발 기본계획 보고서(부록), 서울특별시, 1983. 5. P.541
- 2) 한강홍수 예경보, 건설부 한강홍수통제

소, 1986. 12. P.373

- 3) 한국수문조사연보, 건설부, 1982. P.33
- 4) 한강하상변동조사보고서, 건설부, 1981. 12. (중단도 20-21면)
- 5) 팔당대교 가축도 시공 중단면도



사장교 가설공법 비교

상판재료	PRESTRESSING CONCRETE BOX GIRDER		STEEL DECK
	1안(FULL STAGING METHOD)	2안(FREE CANTILEVER METHOD)	3안(FREE CANTILEVER METHOD)
개 요	1. 원안고수	1. CABLE배열 원안고수 2. FORM TRAVELLER에 의한 CONCRETE 현장타설 3. 최장 FREE CANTILEVER 길이는 17.3M(DECK 13.0M, F/T 4.3M) 4. SEGMENT수 64개	1. CABLE배열 원안고수 2. DERRICK CRANE으로 공장 제작 PIECE를 인양조립 3. 제작 PIECE 수, 약 260개
문 제 점	1. 재해 재발우려 2. 우기에 대한 근본대책 없음. 3. 계절에 따른 무리한 공정 추진	1. 단면변경 불가피(외관상 기존 구조물과의 미관이 나쁨) 2. 공사기간 장기화 3. 현장설치 공종이 복잡하며 실질적 작업일수 부족	1. 원안과 유사단면 선정가능 (미관양호) 2. CONCRETE에 비해 품질관리 양호 3. 가설중 재해발생 가능성 현저하게 감소 4. CONCRETE FCM에 대해 공기 단축(공장제작과 현장설치 병행가능) 5. 공사비 증액 예산
공 기	1. 한건기내에 공사를 하여야 함. 약1년-2년	약 2년	약 1년
채 택	×	×	○

8-3. 대책 제시공법 비교분석

전항에서 언급한 바와 같이 사장교구간 상부 DECK는 모두 붕괴되어 있으며 주탑은 안전한 상태이며 변위나 파괴상태는 발견되지 않았다.

주탑사용은 가능하므로 본래 Cable Stayed Bridge설계 개념을 심분 활용하여 Free Cantilever Method에 의한 공법을 적용한 사장교의 재설치가 요망된다.

FCM 공법에 의한 강재 사장교의 필요성 검토 비교는 다음과 같으며, 우선 이 공법을 보다 안전성이 있는 공법으로 추천하는 바이다.

8-4. 고찰

사장교의 특성만을 고려한다면 FSM, FCM, ILM, MSM의 공법을 검토 채택하여야 하나, 본 교량은 기 설치된 접속교가 완료된 상태이며, 중간부 사장교 구간(L=340M)만 잔여 공사구간이 된다. 따라서 ILM 및 MSM에 의한 DECK 가설공법은 적용이 곤란한 상태이다.

FCM공법이 가설공법중 가장 좋은 방법이겠으나 정해진 STAY CABLE(Pylon당 24개)과 공사기간이 상당히 촉박된 상태이므로 Con'c Pc Box girder에 의한 FCM공법은 지양되어야 할 것으로 사료된다.

FCM공법중 강재에 의한 Segment등이(10M 미만) Stay Cable을 고려하여 DECK SEGMENT를 공장에서 제작하며 운반가설이 병행 진행될 수 있도록 하여 보다 안전이 높고 공기를 단축할 수 있는 강재에 의한 FCM 공법의 대책 방안을 모색하여야 할 것으로 사료된다.

접속교는 기 완성되어 있어 사장교 구간과의 이음부 처리가 강 구조로 하면 보다 용이하겠으며 강구조에 의한 사장교 건설은 국내 실적을 충분히 고려하여 채택하여야 할 것으로 사료된다.

제9장 종합결론

교량 붕괴 발생이후 현장조사 및 자료수집 검토를 바탕으로 사고의 원인을 규명하고 분석함으로써 차후 팔당대교의 완성을 위한 대책 방안을 모색코져 하는 본 진단보고서의 내용을 요약하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

9-1. 종합고찰

일반적으로 대형 교량은 양쪽 접속교만 FSM 공법으로 설계하고 수심이 깊은 중간 부위는 FCM공법으로 설계되는 것이 원칙이나 본 팔당대교는 전 구간이 FSM공법으로 설계되어 있다.

FSM으로 설계한 올림픽대교도 시공이 불가능하여 FCM공법으로 설계변경한 경험이 있음에도 불구하고 본 사장교 구간에 FSM공법을 강행함으로써 작년 90년 6월과 9월 장마에 유수로 인한 스테이징과 파일이 유실되는 피해를 입기도 하였다.

이에 따라 공정의 계절적인 제한과 공기단축상의 문제로 인한 작업촉진시, 동절기의 콘크리트 타설불가능, 작업기능도 약화, 혹한기 지형상 돌풍 상습지역에 따른 풍압을 고려하고, 강재지보공 이음새 공사등의 안전조치 미흡 등의 정밀시공상 문제점이 따르게 되었다.

또한, 공사기간중 기상이 쾌청하다는 보장도 없이 이론상으로 FSM이 가능하나, 현실에는 부적합한 상태인 결과로서 급변 붕괴 사고와 같은 경우가 발생하는 간접적인 요인이 작용될 수 있었다고 사료된다.

이 공사의 경우는 현재 시공되어 있는 접속교량 구조물과 연결방안을 고려하고 기상, 수리, 수문학적 영향, 공기단축, 시공의 편의성 등을 고려하여 실패했던 동일 공법을 재적용하여 동일한 사고 및 재해등을 당하지 않도록 하는 공법을 검토하여야 할 것이 요구된다.

9-2. 현황조사

1. 본 교량은 공사기간이 86년 5월-91년 12월이며, 88년 12월에 중앙설계심사위원회의 심의를 거쳤는데, 기술심의 과정에서 계획, 구조, 토질 및 기초, 안전, 품질관리 분야등의 지적사항에서

- FSM과 FCM공법을 정밀하게 비교검토
- 활하중이 한쪽 Span에 집중되었을 때 다른쪽의 Uplift의 재검토
- 지진 또는 강풍이 불 때 교량진동의 공진 현상조사와 교량의 종횡 방향 진동을 모두 검토하여야 함.
- 산업안전보건법에 의거 본 교량의 특성에 따른 별도 시방서를, 작성 재해예방책(안전작업지침포함)을 수립할 것.

기타 등등을 지적하였으나, 이의 조치결과 내용은 확인할 수 없었다.

2. 지형, 지질, 기상, 돌풍영향 장비 파괴상태, 가설지보공 상태, 설계 및 시공상태등은 전항에서 조사한 바와 같이 상습돌풍 지역으로 풍속 15m/sec 이상임을 추정할 수 있으며, 가설 Bent지보공의 연결부위가 미흡한 상태로 조사되었고, 가Bent설치 높이가 30m나 되는 Bent의 기둥을 중간보로 연결하는데 따른 구조적 결함등 돌풍등에 따른 외력에 의해 붕괴사고가 일어날 수 있는 조건임을 충분히 고려하여 대책방안이 모색 되었어야 한다.

3. 1986년 5월 착공하여 91년 12월 준공예정이던 본 교량의 공정지연 상태를 조사분석한 바는 아래와 같다.

Bent식 지보공의 공정추진 결과 가축도공, 기초Pile시공, Bent제작 설치, Truss제작 설치 상부 DECK 콘크리트 타설, Pc Con'c 긴장도입, STAY-Cable설치 등의 복잡한 공정이 계절적 영향과 한강 유수에 따른 수문학적영향, 기상영향에 따른 무리한 공정 추진이 진행되었으며, 붕괴사고 이후의 동일 공법에 의한 재시공시는 홍수 및 계절적 영향에 따라 보다

안전성 확보의 공정 계획 수립이 어려운 실정에 있었다.

9-3. 사고원인 분석 및 규명

1. 본 팔당대교는 지형적인 상습돌풍지역으로 붕괴사고 당시 풍속 15m/sec 이상임을 추정할 수 있으며(10-20m/sec 산안보, 노동부 고시 제85-11호 참조), 높이가 30m나 되는 Bent의 강재 지보공을 연결하는데 따른 구조적 결함으로 인한 수평력, 수직력, 동적하중 등의 외력하중에 대한 저항이 약화될 수 있다. 상판 Con'c 타설이 부분적(Segment별)으로 타설되어 있는 상태에서는 돌풍등에 따른 공기동력학적 외력에 의해 편심과 비틀림 변형이 일어나기 쉬운 상태로서 붕괴사고가 발생된 것으로 판단된다.

2. 또한 가설 Bent구조검토 결과 계상된 외력하중의 구조해석에 따른 정력학적 안전성에는 만족하는 것으로 판단된다.

기초 Pile과 Bent 구조의 접합부는 일반 Mild Bolt접합으로 연결상태가 미흡할 때 구조해석시 적용한 힌지지점(Hinge Support) 조건을 충족시키지 못할 경우 정역학적 및 동역학적으로 취약한 저항요소가 될 수도 있는 것으로 사료된다.

3. 가축도 외곽부는 Sheet Pile로 보강하였고, 가설 Bent가 붕괴된 후의 기초 Pile 상단부 조사결과 Pile의 변위는 발견되지 않았으며, Pile 변위로 인한 붕괴 사고가능성은 없었던 것으로 판단된다.

4. 파괴된 작업장비 B/H는 총길이 10.8m, 너비 2.9m이며, 강상류측으로 진행중인 상태에서 작업반경(뿔 길이 7m)내에 Bent 가설 강재 위치가 벗어나 있으며 파괴된 상태는 B/H상단에 상부 지보공 트러스빔이 얹혀 있는 상태등을 고려한 바, 포크레인 장비가 Bent에 충격을 가하여 가설 강재가 붕괴되었다고 추정하기는 어려운 것으로 사료된다. 건설중장비

관리 운영상의 작업안전 지침, 준수에 따른 문제점은 상존해 왔다.

5. 팔당대교 붕괴 당일(91. 3. 26일)은 이상 기상 상태에서 지형적 특성에 따른 바람의 여울현상 및 돌풍에 의해, 가설중에 있는 장대교가 공기의 소용돌이와 와류에 의해, 공기 동력학적 진동현상이 발생하게 되었고, 시공시 지보공 Bent 구조상단부와 교량상판 거푸집의 연결부의 취약한 원인요소들이 복합적으로 동시다발적으로 상승작용되어 붕괴 사고와 재해가 일어날 것으로 사료되나, 근본 붕괴원인은 공기의 소용돌이 또는 와류에 의한 진동(Vortex-induced Vibration)에 따른 것으로 판단된다.

9-4. 대책

사장교 건설기술은 강재사장교의 경험을 거쳐서 콘크리트 사장교로 발전하여가는 세계적 추세인 바, 우리나라에서도 강재 사장교는 여러개 건설한 경험이 있다.

콘크리트 사장교일 경우 콘크리트의 건조 수축에 의한 처짐이 각각 Segment마다 상이하므로 완공후 지속적인 STRAIN을 검측하여 Stay Cable의 응력을 조정해 주어야 한다. 현재 우리나라에서는 교량 유지 관리의 특별 전문기관이 없어 준공 후 콘크리트 사장교에 대한 계측관리가 제대로 이루어지지 않을 경우 심각한 문제점이 대두될 수도 있다.

장대교 건설에 있어서도 공기 동력학적 대책에 따른 풍동실험(Wind tunnel Test)을 하는 것이 바람직하며, 이에 상응하는 보다 안전성

이 고려된 계수의 적용이 필요할 것으로 사료된다.

전항에서 언급한 바와 같이 안전성 확보와 공기의 단축은 물론 콘크리트 사장교 STRAIN 측정의 어려운 실정등을 감안하여 FCM 공법에 의한 강재사장교를 가설하는 방안이 보다 바람직할 것으로 사료된다.

부 록

1. 참고문헌

- 1) Bridge Aerodynamics, Thomas Telford Limited, London, 1981
 - 2) Wind Loads on Bridge Structures, Zeller E., 1980
 - 3) American National standard Institute, 1982
 - 4) 한강종합개발 사업 팔당대교 건설실시 설계구조계산서(사장교) 경기도, 1986. 6
 - 5) Elements of Vibration Analysis, Meirovitch Leonard., McGraw-Hill, Inc., 1975
 - 6) Fluid Flow, Sabersky R.H., Acosta A.J., Hauptmann E.G., Macmillan Publishing Company, 1989
 - 7) User's Manual for M-Strudl, Computer Aided Structural Technology, 1986
 - 8) 건축토목 구조메뉴얼, 대우출판사, 1983
2. 정역학적, 동역학적 해석 Computer Output
3. 사장교 가설 기술 검토
4. 현장사진 (8)

