

외부추가강선을 이용한 원효대교의 성능개선공사 Load Capability Enhancement Project of Wonhyo Bridge Using External PS Tendons



유 성 근*



이 재 혁**



김 중 화***

1. 서 언

최근 관심이 고조되고 있는 구조물 안전진단의 궁극적 목적은 정확한 진단의 결과에 따른 합리적인 유지관리 대책수립 및 보수, 보강으로 구조물의 수명을 연장하고 최대의 안전성을 유지하는데 있다고 할 수 있다. 보수, 보강의 기본개념은 원구조물의 수준의 내구성 확보에 있다. 이러한 목표를 이루기 위한 보수, 보강의 설계 및 시공작업은 구조물의 현상태에 대한 정확한 이해를 기본으로 계획이 수립된다. 그러나 특히 기존구조물의 손상이 존재하는 경우는 원설계자의 의도와 다른 구조거동을 하고 있는 경우가 대부분의 경우이므로 보수 및 보강의 설계, 시공은 고도의 기술과 정밀시공을 요구하게 된다. 많은 구조물중 교량의 보수 및 보강은 구조물의 관련기술 사항의 고려이외에

도 교통소통의 장애로 발생하는 사회적, 경제적인 측면까지도 고려하여야 하는 매우 어려운 작업이다.

현재 한강상의 사용중인 교량중 1978년 착공되어 1981년에 준공된 원효대교는 교각으로부터 이동식기푸집(form traveller)을 이용하여 스패를 시공해 나가는 Free Cantilever공법이 적용된 콘크리트교이다. 원효대교는 설계시 예측된 camber량을 초과하는 처짐이 중앙 힌지부에 발생되어 교량을 초과하는 처짐이 중앙의 힌지부에 발생되어 교대되는 교통량과 트럭의 대형화등으로 교량내하력 증대의 필요성이 제안되었고 이에 건설당시 설계기준 1등급 교량인 DB(L)-18에서 현재 도로교시방서에서 정의된 1등급인 DB(L)-24로 내하력을 증가시킴과 동시에 힌지부에 발생한 처짐을 교정하여 사용자들에게 최대의 안정성과 편리한 교통서비스를 제공하기 위하여 원효대교 성능개선공사를 1994년 1월부터 수행하게 되었다.

따라서 본 특집기사는 원효대교 성능개선공사

* 동아건설산업(주) 기술연구소 선임연구원, 공학박사
** 동아건설산업(주) 기술연구소 연구원
*** 동아건설산업(주) 원효대교 현장소장

의 방법으로 채택된 박스내부의 앵커볼록과 추가 외부 PS텐던을 사용하는 국내 최초의 대형 PC박스거더 교량의 성능개선공법에 대하여 설명하고 앞으로 이와 유사한 FCM교량에 내하력의 증진을 위하여 적용될 수 있는 보강법을 소개하고자 한다.

2. 개 요

2.1 DYWIDAG 공법

DYWIDAG공법을 간략히 소개하면 Dywidag은 1865년 서독의 Dyckerhorff와 Widmann에 의해 설립된 Dyckerhorff & Widmann A.G 건설회사의 약자로서 프리스트레싱교량의 시공에 있어서 지보공 없이 이동식 거푸집(form traveller)을 이용하여 각 지간의 segment를 한 구간씩 점진 시공하는 Free Cantilever 시공 방법으로 통칭 DYWIDAG 공법으로 알려져 있다. DYWIDAG사는 특히 2차대전 이후 서독의 재건복구사업에 힘입어 광범위하고 새로운 시공법을 마련하여 오늘날 세계적인 장대교 시공법의 발전에 많은 기여를 하였다.

공법의 적용사례로는 worms소재 라인교(서독, 1954년, 주경간장 208m) 및 최장 스패 241m의 koror-bobelthuap교(Guam)는 DYWIDAG 공법의 팔목할 만한 업적이고 미국에서도 최초로 pine valley creek교를 FCM공법으로 캘리포니아에 건설한 이래 미국과 캐나다에 수많은 장경간 콘크리트교량이 DYWIDAG공법에 의해 이루어졌다.

국내의 경우는 이 공법은 1978년 최초로 원효대교에 적용되었으며 이후 상진대교, 청풍대교(1985), 강동대교(1989) 등에 적용되었다. 이러한 이동식 거푸집을 이용한 공법은 현재의 유사형식 교량의 설계 및 시공법의 발전에 많은 기여를 하였으며 교량공사 뿐만 아니라 원자력발전소 및 종합운동장건설등 여러방면의 건설공사에까지 이용하게 되었다.

FCM공법은 40여년전 서독에서 처음 적용되었으며 그 공법의 우수성을 세계적으로 인정을 받고 있는 시공법으로 현재의 장대교량 건설시 많이 적용되는 ILM, MSSM, FSM 등의 공법으로 불가

한 장지간교량 건설을 허탄한 지형에서도 지보공 없이 건설할 수 있는 시공상의 이점과 경제성을 인정받고 있다.

2.2 원효대교 형식 및 단면제원

1981년 10월 준공된 원효대교는 동아건설산업(주)에 의하여 건설되었으며 교량형식은 2연 Box Girder교로 DYWIDAG 강봉을 이용한 FCM공법이 적용되었다. 양쪽 교대의 지간은 60m이며 나머지 지간은 10@100m로 총교량길이는 1,120m이다. 또한 교폭은 20m이며 시공당시 1통교인 DB(L)-18로 설계되었다. 그림 1의 원효대교는 앞서 소개된 바와 같이 지보공 없이 이동식 거푸집을 이용하여 한 구간씩 점진 시공되며(그림 2) 스패와 스패의 중앙 연결부에 그림 3과 같은 Bearing Pad를 이용하여 한지부를 연결한 활철 라아멘 형식 구조이다.

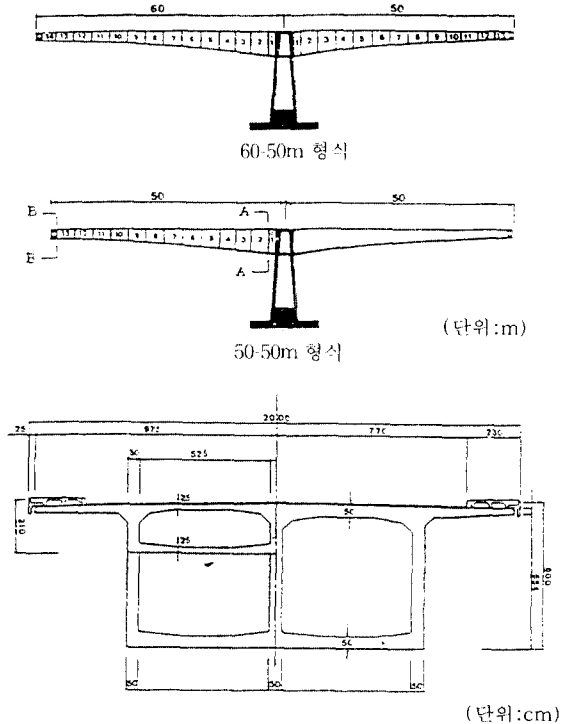


그림 1 원효대교의 종단면도 및 횡단면도

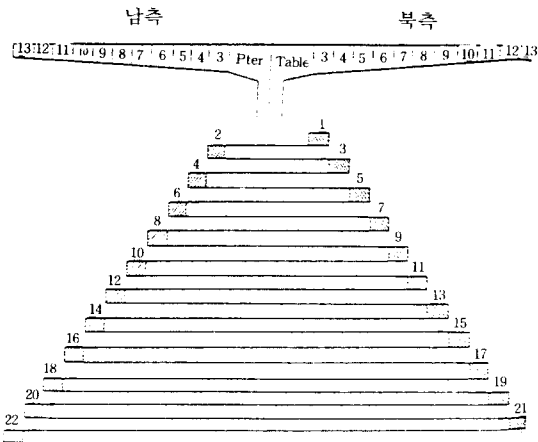


그림 2 시공시 콘크리트 타설진행순서

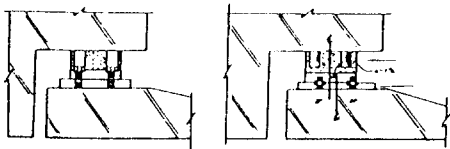
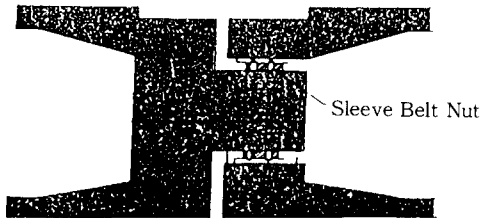


그림 3 힌지부의 Bearing pad

3. 원호대교 성능개선공사

3.1 목적 및 보수전 상태

원호대교의 성능개선공사는 현재 서울시의 늘어나는 교통량과 차량의 대형화 및 설계 당시 고려된 크리프 및 건조수축의 예상치 보다 크게 발생하여 이로 인한 프리스트레싱 손실의 증대로 발생한 장기 처짐에 의한 중앙의 힌지부의 단차로 인한 충격증대 및 주행성 불량을 개선하여 안전하고 쾌적한 교통서비스를 제공하는데 있었다. 따라서 설계당시의 DL-18에서 현재 1등교 교량인 DL-24

로 내하력을 증진시키는 보강 설계가 실시되었다. 성능개선공사를 수행하지 않고 현재 통행되는 차량하중을 DL-24로 가정한 구조계산을 실시한 결과, 발생하는 최대 상부인장응력은 28.4kg/cm^2 이며 최대 압축응력은 131.6kg/cm^2 이었다. 이 값은 원호대교의 콘크리트 설계강도 400kg/cm^2 (Cube 강도 : Cylinder 강도 환산계수=0.8)을 고려한 허용인장응력 $\sigma_{ta}=1.5\sqrt{\sigma_{ck}}=26.8\text{kg/cm}^2$ 를 초과하며, 허용 압축응력은 $\sigma_{ca}=0.4\sigma_{ck}=128\text{kg/cm}^2$ 으로서 역시 DB(L)-24하중은 이 값을 초과한다. 현재의 원호대교를 보강 없이 균열이 발생한 부위를 epoxy로만 충전만 한다면 계속되는 중앙부 한지부 처짐으로 인한 충격증대로 구조물의 손상초래, 내구성 감소 및 강성이 저하되며 현재 남아있는 크리프 및 건조수축, 릴렉세이션 등에 의해서 추가적으로 약 2.6cm정도 더 처질 것으로 예상되었다. 다음의 표 1은 각 지간에서 측정된 성능개선공사전 처짐량의 측정결과이다.

표 1 보강전의 처짐량

계획평균시공캠버량 : 15cm

힌지번호 (여의도측부터)	힌지위치	시공캠버량 (cm)	측정처짐량 (cm)	총처짐량 (cm)
힌지 1	교각 1~2	4	20	24
힌지 2	교각 2~3	12	12.5	24.5
힌지 3	교각 3~4	11	15.5	26.5
힌지 4	교각 4~5	14	7	21
힌지 5	교각 5~6	17	5.5	22.5
힌지 6	교각 6~7	14	6	20
힌지 7	교각 7~8	12	11.5	23.5
힌지 8	교각 8~9	12	9.5	21
힌지 9	교각 9~10	12	10.5	22.5
힌지 10	교각 10~11	10	14	24
평균값		11.8	11.2	23.0

또한 보강공사를 실시하지 않고, 경간 중앙부의 처짐으로 인한 충격을 완화, 즉 평탄성을 회복시키기 위하여 추가 덧씌움 공사를 실시할 경우, 이로 인해 발생하는 최대 인장응력은 37.9kg/cm^2 이며 최대 압축응력은 143.3kg/cm^2 로 구조적으로 불안정한 상태가 되어 보수전의 상태보다 더 악화되는 것으로 파악되었다. 이러한 허용응력을 초과

하는 문제는 극한 안전도까지의 문제를 유발시키게 되며 차량통행의 제한이 필요한 상태까지 이르게 되므로 적절한 보강공법을 채택하여 성능개선공사가 수행되어야 함이 결정되었다.

3.2 성능개선방안

성능개선방안은 지간 중앙부의 처짐교정, 내구성 보완, 교통통제 및 보강공사의 난이도 등을 고

려함과 동시에 현교량의 상태점검을 토대로 5개안에 대한 비교분석을 실시하여 보강공법을 선정하였다. 다음의 표 2는 보수, 보강을 위하여 고려된 성능개선방안들이며 이중 제1안을 채택하여 원효대교 성능개선공법을 시공하였다. 제1안의 내용을 개략적으로 살펴보면 교각을 중심으로 양쪽 힌지부의 벽체를 이용하여 앵커블록을 설치하여 (그림 4) 이곳에 텐던 12개를 설치하여 추가프리스트레싱을 도입하는 방법이다. (그림 5, 6)

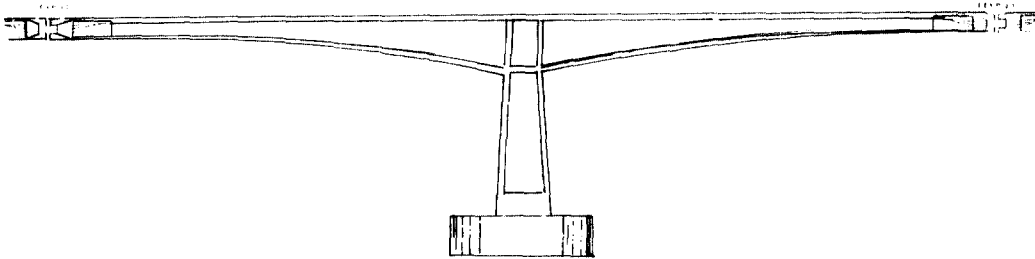


그림 4 성능개선공사 종단면도

표 2 성능개선방안

안	제 1 안(선택)	제 2 안	제 3 안	제 4 안
형식	BOX 내부에 추가 TENDON설치	지간중앙에 교각설치	EXTRAPOSED CABLE	TEMPORARY STAYED CABLE
개	▶BOX 내부에 추가 TENDON설치	▶경간 중앙에 교각을 설치하여 추가처짐방지	▶긴장재를 BOX밖으로 내서 교각지점부위에 설치한 주탑정점에서 DEVIATOR에 의해 CABLE의 방향을 바꾸어 다음 경간으로 연속시켜 정착시킴	▶주탑을 교면 밖에 설치하여 STAY CABLE을 SIDE WEB에 설치한 ANCHOR BLOCK에 정착시킴
요	▶정착위치는 교각을 중심으로 양쪽 힌지부에 ANCHOR블록을 설치	▶교각을 설치하면서 구조물에 상향력을 도입할 수도 있음	▶주탑의 높이가 $H=L/15$ 로 연직반력을 일으키지 않으며 주형에 수평방향 PS를 도입	▶주형에 큰 연직반력이 발생
	▶TENDON은 상부슬래브 하단에 설치	▶교각설치후 포장층 덧씌움으로 교면 EL조정		
	▶처짐교정 가능예측량 4.9cm			
	▶일부처짐교정은 아스팔트덧씌움으로 보정			
장	▶공사 간편	▶공사비 고가	▶공사비 고가	▶주탑공사비 고가
단	▶공사비 저렴	▶현재교량미관손상	▶처짐교정가능	▶처짐교정 효과가 가장 큼
점	▶현재교량형식 그대로 유지됨	▶구조계가 바뀌면서 모멘트의 재분배 효과로 하부슬래브의 구조적 불안정	▶경간 중앙부의 바닥 슬래브에 인장응력발생으로 보강필요	▶각 경간별 처짐교정량이 상이한 관계로 구조적 불안정 초래
	▶교량보강공법으로 가장 보편적인 공법	▶힌지부의 하부에 활하중에 의한 인장 응력발생으로 보강필요	▶기존 캔틸레버부의 별도 보강필요	▶교량상관의 내구성 보강가능
	▶ANCHOR BLOCK을 설치하기 위한 기존 구조물의 강봉 및 철근조사가 어려움			▶교량의 구조계가 바뀔

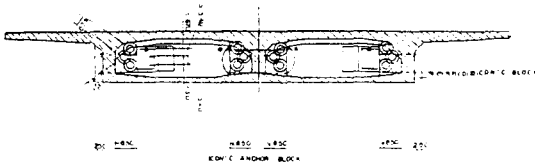


그림 5 성능개선공사 횡단면도(힌지부)

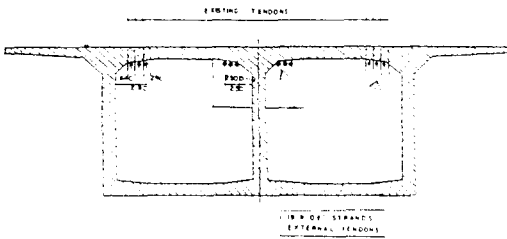


그림 6 성능개선공사 횡단면도(교각부)

3.3 설계기준 및 시공공정

원효대교 성능개선공사시 적용된 재료의 설계 기준은 아래의 표 3과 같다.

성능개선공사의 공정개요를 순차적으로 나타내며 아래의 표 4와 같다. 또한 그림 7, 8, 9는 추가되는 앵커블럭의 종단면도 및 횡단면도이다.

보강공사 공정중 벽체의 기존에 매설되어 있는 수직강봉의 위치를 파악하기 위하여 비파괴 검사를 실시하여 정확한 위치를 파악한 후 공사중 파손이 없도록 만전을 기하였다. 비파괴 검사는 기존벽체의 두께가 50cm이기 때문에 X선을 이용한

표 3 재료의 설계기준

	콘크리트		strand	PS 텐던	PS 강봉	사용철근
	기존의 콘크리트	앵커블럭 콘크리트		$\phi=15.3\text{mm}$ 이상	$\phi=36\text{mm}$	
σ_{ck} (kg/cm ²)	320	450	$(\sigma_{pu}/\sigma_{ps})$ (kg/mm ²)	(190/160)	(125/110)	4000 kg/cm ²
E_c (kg/cm ²)	320,000	358,000	E_s	2.0E6	2.05E6	2.04E6
허용 휨 압축응력	128kg/cm ² (=0.4 σ_{ck})		P_i (초기 긴장력)	375t	95t	
허용 휨 인장인력	26.8kg/cm ² (=1.5 $\sqrt{\sigma_{ck}}$)					
균열응력	36kg/cm ² (=2.0 $\sqrt{\sigma_{ck}}$)					

표 4 성능개선공사의 공정

순서	작업내용
1	WEB 비파괴검사
2	WEB 천공
3	WEB CHIPPING
4	철근, 쉬스관 조립
5	ANCHOR BLOCK 거푸집 설치
6	콘크리트 타설
7	횡방향 강봉 설치
8	횡방향 강봉 인장
9	횡방향 강봉 GROUT 실시
10	종방향 TENDON 설치
11	종방향 TENDON 인장
12	종방향 TENDON GROUT 실시
13	아스팔트 노면보정

검사만이 적용 가능한 유일한 방법이었다. 추가 강선에 긴장력 도입을 위한 고정점의 역할을 하는 앵커블럭은 벽체와의 마찰력의 지지개념(그림

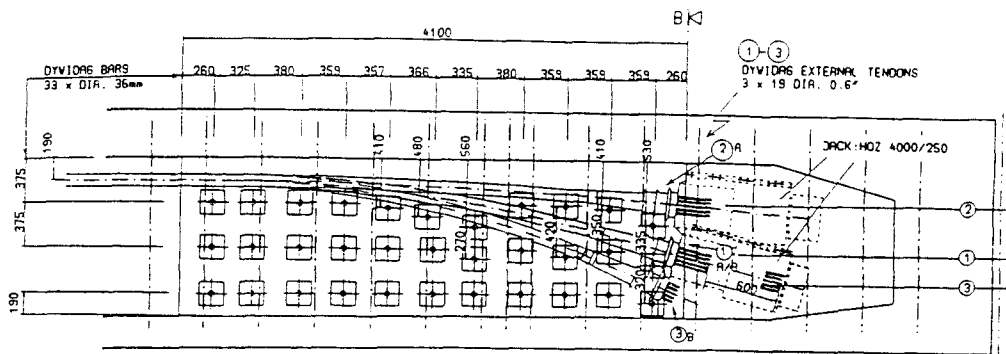


그림 7 앵커블럭의 종단면도

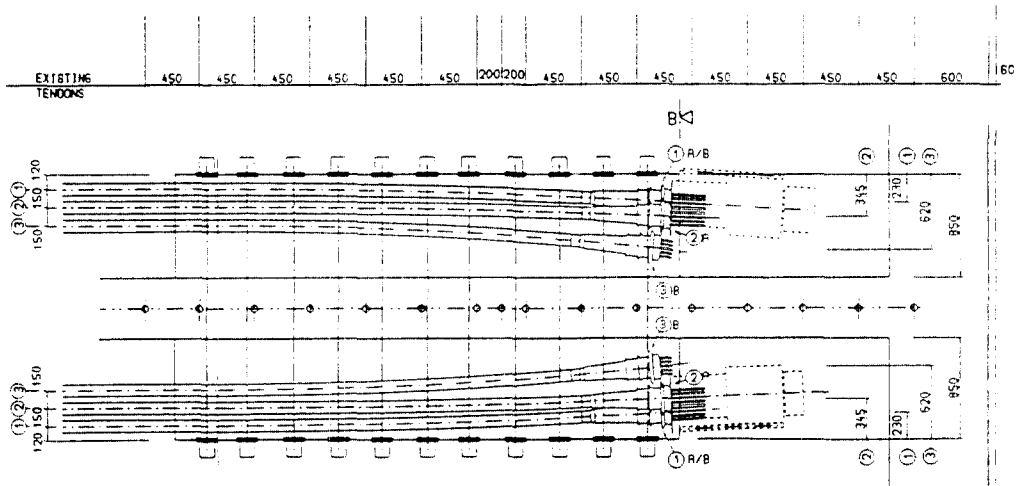


그림 8 앵커블록의 평면도

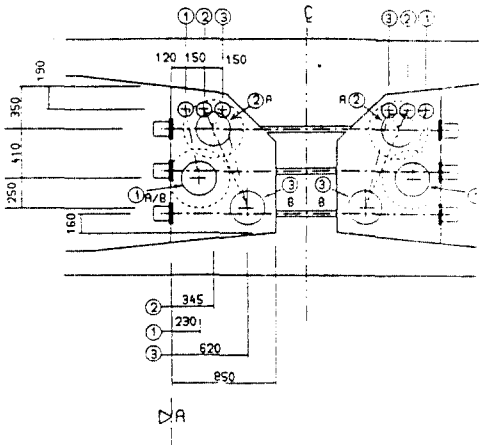


그림 9 앵커블록의 횡단면도

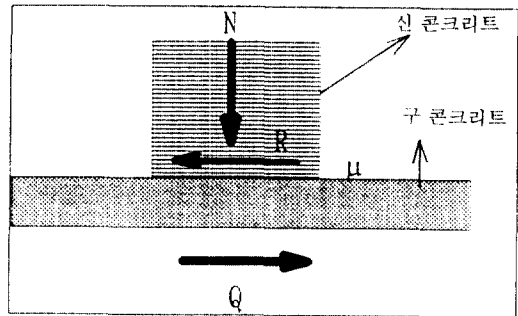


그림 10 앵커블록과 벽체와의 미찰설계 개념

긴장순서(열)	11	3	4	5	6	1	7	8	9	2	10
텐던번호	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23
긴장순서	31	7	12	13	18	1	19	24	25	6	30
텐던번호	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12
긴장순서	32	8	11	14	17	2	20	23	26	5	29
텐던번호	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
긴장순서	33	9	10	15	16	3	21	22	27	4	28

그림 11 앵커블록의 횡강봉 긴장순서

10)으로 설계되었으므로 이탈 및 슬리핑 방지를 위하여 횡방향으로 33개의 Dywidag 강봉을 사용하여 프리스트레싱을 도입하였다. 이때 확실한 마찰력의 확보를 위하여 Chipping을 기존벽체에 실시하였으며, 정확한 마찰계수의 파악을 위하여 현장 모형 실험을 실시하는 확인작업을 실시하였다. 횡방향 강봉의 위치 및 긴장 순서는 그림 11과 같으며 그림 12는 실제 시공된 앵커블록의 모습이며, 그림 13은 모형마찰실험용 앵커블록의 모습이다.



그림 12 앵커블록의 전경

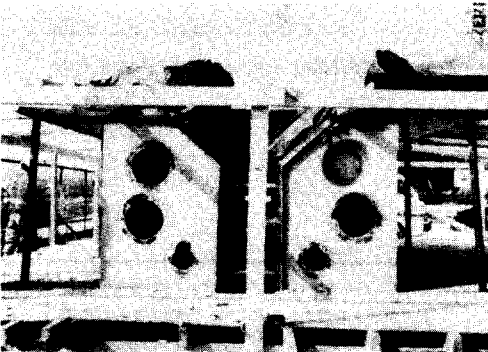


그림 13 모형 실험용 앵커블록

3.4 보강공사후 응력검토 및 처짐

원효대교 성능개선공사의 확인 작업을 위하여 공사전과 공사후 재하시험을 통하여 개선여부의 확인을 실시하였으며, 보강공사후 박스기더 상부와 하부의 응력은 아래에 나타낸 표 5와 같다. 추

가 긴장력에 따른 솟음량 4.94cm와 보강공사시 설치된 힌지부의 4개의 앵커블록과 텐던 및 추가포장의 사하중으로 인해 발생하는 처짐 2.2cm를 고려해 본다면 보강공사 완료후 솟음량은 약 2.7cm 정도가 되는 것으로 판단되었으며 또한 향후 발생될 장기 추가 처짐을 고려하면 보강공사후 장기손실 및 재료성질에 의한 처짐은 약 2.3cm로 예상되므로 최종변형은 상향 처짐으로 약 0.4cm가 된다. 이는 온도에 의한 계산 처짐량 약 3cm와 활하중에 의한 처짐량 3cm에 비하면 대단히 미소한 값으로 무시할 정도이다. 따라서 보강공사후 예상되는 최후 처짐 상태는 매우 양호할 것으로 판단된다. 추가로 처짐 계측을 위하여 Hydrostatic Leveling Systems(HLS)을 설치하여 추후 교량의 유지관리에 도움이 될 수 있도록 하였다.

표 5 힌지부에서 발생하는 응력 $A=11.68m^2$ $W_{top}=7.65m^3$
 $W_{bottom}=5.35m^3$

하 중	축력	뒤틀모멘트	$\sigma_1(kg/cm^2)$	$\sigma_2(kg/cm^2)$
기존 프리스트레싱 합계	-1400.0		-16.5	-16.5
	-525.0			
			812.0	-2.7
추가 프리스트레싱	-4256.4		-36.4	-36.4
		79.7	-1.0	1.5
1) 손실전 프리스트레싱 합계			-56.6	-47.5
2) 프리스트레싱 손실 (기존 32%+추가 20%)			13.6	11.0
3) 1차 사하중		-233.1	3.1	-4.4
4) 2차 사하중(5.62t/m)		-44.0	0.6	-0.8
5) 추가사하중 · 아스팔트 덧씌움 · 정착부 및 덧씌움 콘크리트 · Tendon 중량 · 보도부 조정콘크리트			-27.3	
			-17.6	
			0	
			-6.9	
		-51.8	0.7	-1.0
6) 활하중				
a) DB-24 하중		259.0		
b) DL-24 등분포하중		-211.1		
c) DL-24 집중하중		-72.0		
d) 보도하중(1.53t/m)		-74.9		
$\Sigma(a+d)$ or $(b+c+d)$		-358.0	4.7	-6.7
7) 지점부등침하		-5.7	0.1	-0.1
1)+2)+3)+4)+7)			-39.3	-41.9
1)+2)+3)+4)+5)+7)			-38.6	-42.9
1)+2)+3)+4)+5)+6)+7)			-33.9	-49.6


4. 결 론

앞서 언급한 바와 같이 구조물의 보수, 보강법은 구조물의 형식, 손상정도, 보강정도 등의 여러 가지 측면을 고려하여 결정하여야 하며, 이와같이 결정된 보수, 보강방법의 시공시에는 정밀한 시공과 엄격한 품질관리를 요구하게 된다. 원효대교의 성능개선공사는 추가 강선을 사용하여 다음과 같은 보강공사의 목적을 달성하였다.

1) 교량의 공용하중 증대

2) 중앙 힌지부의 처짐보정으로 충격에 대한 교량의 내구성 증대

3) 공공구조물에 대한 이용자들의 불안의식 해소

최초로 시공되는 형식의 보강법을 사용한 원효대교 성능개선공사를 통하여 습득된 기술적인 사항은 추후 본 학회의 지면을 통하여 소개하도록 하겠으며 끝으로 여러 어려움 끝에 무사히 공사를 마칠 수 있었음을 서술시, 한국종합기술개발공사의 관계자 여러분께 지면을 통하여 감사드립니다. 

콘크리트학회 전문서적 보급안내

철근콘크리트 구조설계매뉴얼(신간)

■한국콘크리트학회 편

본서는 극한강도 설계공식에 근거하여 도표와 설계예제를 작성하였으며, 그림을 이용하여 설계를 쉽고 빠르게 할 수 있고 또, 설계과정에서 반복되는 계산을 함축하여 계산과정을 단축시켜 설계실무에 편리하도록 집필되어 있다.

- A4 · 3권 / 총가 37,000원(회원 10% 할인), 우송시 송료 2,700원 별도부담
- 제1권 : 보 · 브라켓 · 기초의 설계
- 제2권 : 기둥 · 벽체의 설계
- 제3권 : 슬래브의 설계

콘크리트구조물의 비파괴검사 및 안전진단(신간) - 제2회 기술강좌 교재 보정판 -

■한국콘크리트학회 편

이 책은 건설현장 기술자들이 유용하게 활용할 수 있는 비파괴시험의 관련 원리 및 적용방법에 대한 최신 기술은 물론, 건축 · 토목공사용 콘크리트구조물의 안전진단 및 유지관리 · 보수방법과 콘크리트의 내구성 향상과 관련 시험방법에 관한 내용을 이해하기 쉽게 상세히 기술하고 있다.

- B5 · 408면 / 定價 17,000원(회원 10% 할인), 우송시 송료 2,100원 별도부담

최신 콘크리트공학

■한국콘크리트학회 편

이 책은 콘크리트 기본 구성재료의 특성 및 요건 등을 분석하고, 이들 구성재료를 이용한 배합설계, 굳지 않은 콘크리트의 기본성질, 혼합, 운반 및 타설과정의 특기사항, 양생, 콘크리트의 시험, 품질관리, 내구성 뿐만 아니라 최근에 개발되고 있는 새로운 콘크리트의 제조 및 제반 특성에 이르기까지 포괄적인 내용을 실고 있다.

- B5 · 682면 / 定價 15,000원(회원 10% 할인), 우송시 송료 2,100원 별도부담