

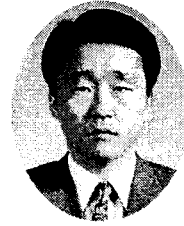
ILM 공법을 적용한 장폭(B=19.5m) 1Cell PSC Box Girder의 낙단대교 상부공 설계사례



김 용 훈*



김 씨 동**



정 승 훈**

1. 현황 설명

낙단대교는 설계·시공일괄 입찰(turn-key공사) 설계로 경북 상주시 낙동면 낙동리의 낙동강 상류와 국가지원 지방도로 33호선을 횡단하는 교량 구조물 공사로서 도계~낙동간 4차로 확장 및 포장공사의 일부구간이다.

그림 1과 같은 과업노선 총 연장 1.3km중 구조물로는 낙단대교 692m와 낙단IC교 45m로 구성되

어 있다.

낙단대교 T/K 설계는 구조안정성, 시공성, 경제성과 자연훼손, 공해발생 및 수질오염, 유지관리 등의 환경영향을 최소화할 수 있는 교량상부형식의 선정이 요구되었고 하부구조형식은 낙동강 수질오염 방지 및 하천 유수 장애의 최소화와 콘크리트 타설에 따른 수화열 영향을 최소화하기 위한 중공형 트랙형 단면이 필요하였다.

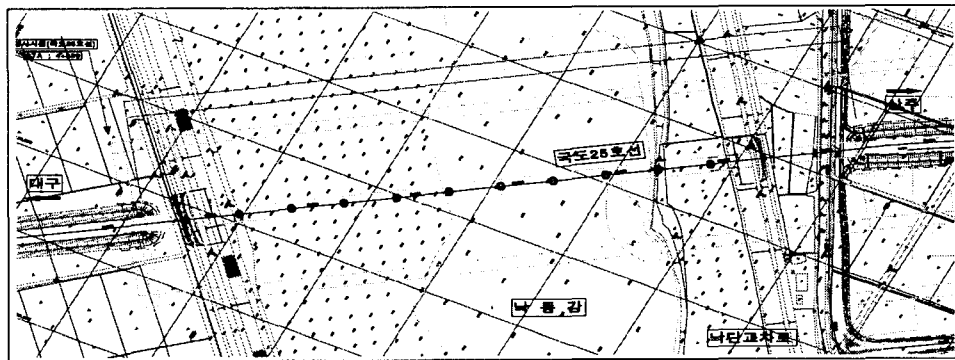


그림 1 낙단대교 가설공사 (T/K) 구간 노선

* (주) 동일기술공사 구조부, 전무·토목구조기술사
 ** 정희원·(주) 동일기술공사 구조부, 이사·토목구조기술사
 *** (주) 동일기술공사 구조부, 차장

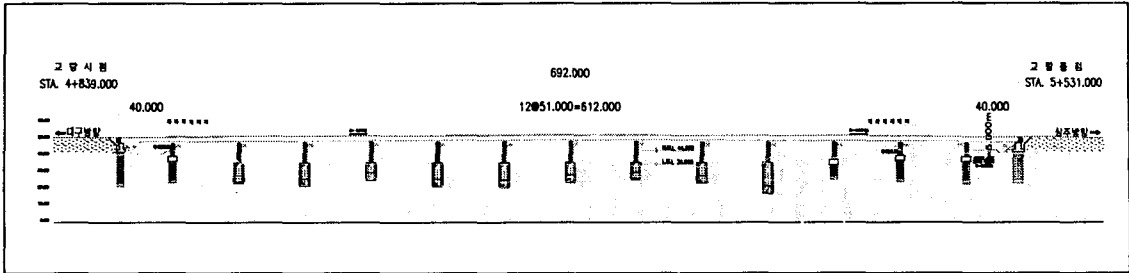


그림 2 종단면도

2. 교량계획

2.1 교량설계조건

- 도로규격 : 국도4차로 (B=19.0m)
- 설계활하중 : DB24, DL24
- 교량연장 : L=692m (40+12@51+40)
- 교량폭원구성 : B=19.5m
(2.5m(보도+방호벽)+7.0m(2차로 차도)+0.5m(중앙분리)+7.0m(2차로 차도)+2.5m(보도+방호벽))
- 교량선형 : 평면 - 직선
종단 - S=+0.8%~-0.8608%
- 구조형식
상부공 : PSC Box Girder(1Cell/ILM공법)
하부공 : 중공Y형 트랙형 (일주식) 교각
역T형 교대
- 기초공 : 우물통 기초, 강관말뚝 기초
- 교량받침 : 납면진 받침
(lead rubber bearing)

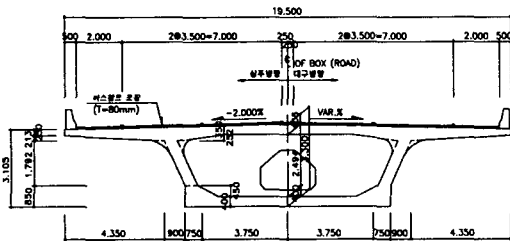


그림 3 표준 횡단면도

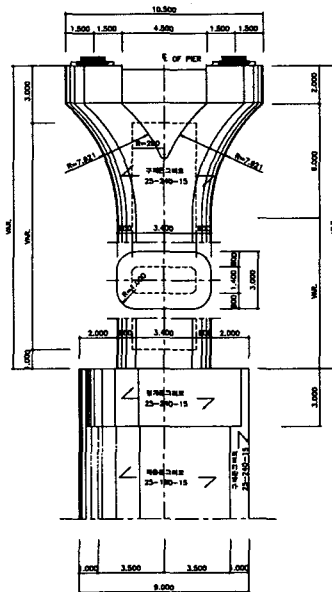


그림 4 교각 정면도

2.2 교량형식 선정

낙단대교의 교량형식 선정에는 가설위치의 현황파악, 관련자료 및 기준설정, 현황조사, 시공성 검토 등을 수행하여 교량 구조물 형식을 비교 검토한 후 최적 교량 형식을 선정하였다.

가설 교량의 교량형식 선정시의 주요 기본 방향은

- 1) 안정성, 시공성, 경제성 및 시공 후 기능성에 대한 균형 있는 계획
- 2) 주변 환경조건과의 조화 및 교량자체의 형상미 추구
- 3) 환경훼손, 공해발생 등의 환경영향 최소화

4) 운영 및 유지관리 비용절감 및 관리 편의성 도모

5) 시공 중 설계변경 요소 최소화

6) 낙동강 상수원 보호구역 수질오염 방지

7) 승차감 및 주행성을 위한 이음부의 최소화 등을 토대로 형식비교에 주력하였으며 상부구조 형식은 교량가설현황 및 위치에 적합성을 판단하기 위해 다양한 형태의 상부형식을 선택하여 형식별 비교안을 검토한 후 지형 및 낙동강 상류 횡단에 가장 적합한 PSC Box Girder (1Cell/ILM) 교로 선정하였으며, 본 교량의 특성인 장폭(B=19.5m)의 PSC Box Girder (1Cell/ILM)교는 2실(2Cell) PSC Box Girder에 비해 시공이 용이하고 교좌장치의 배치 및 시공중 편측 하중 증가에 따른 손상이 적고 공사기간 단축이 예상된다. 또한 교량 폭원 19.5m의 일실 PSC Box Girder교로는 국내에서 처음 설계 및 시공되며 설계 및 시공사례가 많은 해외사례를 검토하여 단면 및 문제점을 검토하였고, 표1은 본 교량 폭원과 유사한 해외시공사례를 조사·정리하였다.

표 1 1Cell PSC Box Girder교 해외 시공 사례

교량명	소재지	교량폭원 (m)	대표지간 (m)	형고 (m)	형고비	총연장 (m)
Necker Bridge Beihingen	Germany	18.500	60.000	3.30	1/18	301
Gailitz Bridge	THÖRL, AUSTRIA	22.450	50.000	4.50	1/11	481
Dal Bridge Avesta	Sweden	16.500	45.000	3.20	1/14	350

2.3 1Cell PSC Box Girder교의 특징


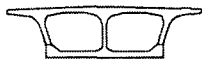
일반적으로 PSC Box Girder교의 설계는 교량 폭원에 따라서 다실(Multi-Cell) 또는 단실(1-Cell) 형태를 선정하게 되는데 현행 1등급 교량의 경우 3차로 이상의 PSC Box Girder교를 설계할 때 2-Cell 형태를 선호하여 왔다.

그 이유로는 교폭의 증가에 따른 1-Cell PSC Box Girder교의 상부 바닥판 slab의 단면 및 철근량의 증가에 따른 상부구조의 자중 증가와 교

좌장치 대형화, 내진 안정성 저하 등의 요인이 있다. 따라서 현행 2차로 미만의 교량 설계시는 단실 PSC Box Girder교 구조 형태를 유지하고 있지만 3차로 이상의 장폭 교량에서는 가급적 회피하고 있는 실정이었다. 그러나, 최근에 와서는 교좌장치의 다양화 및 고성능 면진받침 등의 국내 제작 및 시공이 가능하고 바닥판 slab의 단면 및 상부공 자중증가를 억제하기 위해 횡방향 tendon을 도입함에 따라 3차로 이상 장폭의 PSC Box Girder교 설계에 반영하기가 용이하게 되었다.

PSC Box Girder교에서 교량 폭원에 관계없이 1Cell과 2Cell의 특징을 비교하면 표2와 같이 나타낼 수 있다.

표 2 PSC Box Girder교의 1Cell과 2Cell의 특징비교

	1 Cell	2 Cell
단면		
특징	<ul style="list-style-type: none"> • 2-Shoe 사용에 따른 압출시공시 안정성 확보 가능 • 단면제작시 내·외부 거푸집 가설 및 해체에 따른 공기 단축가능 • 교폭확대에 따른 상부 slab 두께 증가 및 횡방향 tendon 배치 필요 • 상부구조 하중 감소에 따른 받침 및 하부구조 경제성 양호 • 복부의 두께가 커서 tendon 배치가 양호 미관 양호 	<ul style="list-style-type: none"> • 3-Shoe 사용에 따른 압출시공시 교좌장치 파손 우려 및 반력분배 예측 어려움. • 단면제작시 내·외부 거푸집 가설 및 해체에 따른 공기 다소 소요 • 교폭 확대시 중간 web 설치에 따른 slab 단면 감소 및 횡 tendon 배치 불필요(종방향 균열억제용 횡 tendon 배치시 설계과다 예상) • 상부구조 하중 증가와 중간 web 설치에 따른 받침수 및 하부구조 단면 증가

3. 상부구조 설계

3.1 표준 횡단면도 선정

ILM 공법을 도입한 교량의 효율적인 단면구성을 위해 도로교 표준시방서 규정, 해외설계

및 시공사례를 기초로 단면을 선정하였고, 교량 폭원이 크게 요구되는 1Cell 단면의 캔틸레버부 및 슬라브 바닥판에서 필요한 횡방향 tendon 배치시 종방향 tendon과의 간섭이 발생하지 않도록 단면을 그림 5에서 보는 바와 같이 결정하였으며 주형고의 선정은 ILM 공법의 특성상 L/15~L/17의 범위로서 본 교량의 표준 경간이 51m로 계획되어 약 L/16수준인 3.3m로 선정하였다.

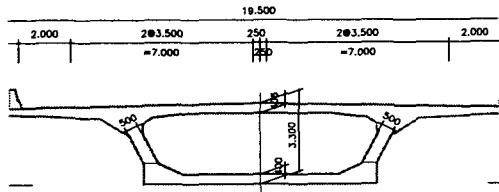
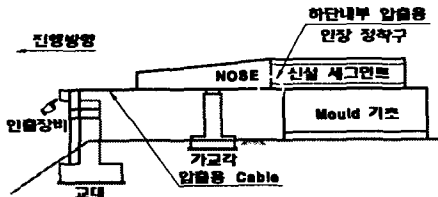
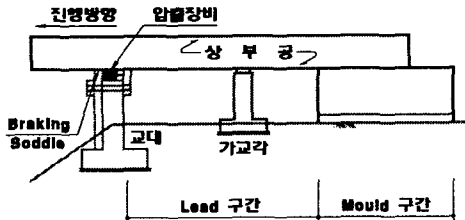


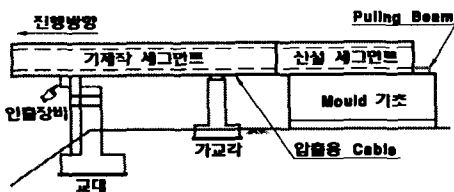
그림 5 상부구조 단면 구성



(a) 초기 1,2 Seg. 압출시 인장 정착구에 의한 Pulling



(b) 종점측 교대에서 Lifting & Pushing 방법으로 상향압출(전구간)



(c) 압출시 Pulling Beam에 의한 압출(Lifting+ Pulling 겸용)

그림 6 압출 인출 방법 순서도

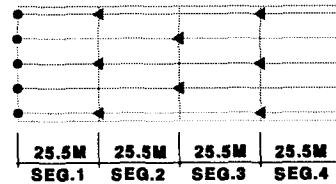
3.2 설계시 중점 검토 사항

1) 압출방식 검토

교량 폭원과 단면이 증가함에 따라 상부공의 자중이 커서 압출시공시 적절한 압출장치와 압출 방법을 검토하여 그림 6과 같은 단계로서 시공하도록 하였다.

2) 1차 tendon 배치 검토

3 cycle tendon 배치와 2 cycle tendon 배치를 비교 검토한 후 3 cycle tendon 배치가 본 교량에서 긴장력 손실이 약 10% 증가하여 2 cycle tendon으로 배치하였다.



3) 추진코 연결

상부단면 압출(launching)시 시공상황에 적절히 대처할 수 있고, 유격발생에 따른 재긴장이 가능하도록 콘크리트 타설 및 다짐이 강연성보다 강봉이 유리하다고 판단하여 추진코(steel nose) 연결에 강봉을 선정하여 가설계획 하였다.

4) 압출시 시공오차에 따른 지점침하 고려

시공중 발생하는 시공오차와 bearing level차를 고려하여 지점침하 10mm를 적용한 응력 검토 수행하였다.

5) 시공중 시공오차에 의한 전단검토

sliding bearing 설치 수준오차인 1mm와 콘크리트 Box 단면제작 오차 5mm의 허용오차를 고려하여 단면의 전단검토 수행하였다.

6) 압출시 복부하면의 국부하중에 의한 안정성 검토

압출시 받침반력에 의한 복부하중에서 발생하는 국부지압의 영향을 검토하였다.

7) 격벽부 상부 슬래브 검토

격벽부에 인접한 상부슬래브는 2방향 슬래브이므로 FEM 판해석을 통하여 중·횡방향 철근량을 산정하여 상부 슬래브에 배치하였다.

8) 중앙격벽 설치

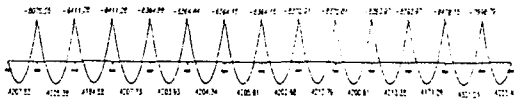
교량 폭원이 크에 따라 편측 하중재하에 따른 주형의 비틀림 발생 및 주형단면 압출시 돌발재해 상황에 대처하여 주형단면의 과응력이 발생하지 않도록 한 경간에 3개씩 중간격벽을 등간격 배치하였다.

3.3 교량 상부해석

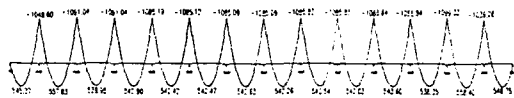
1) 종방향 구조해석

본 교량의 구조해석은 ILM 공법의 특성상 지점위치가 계속적으로 변하므로 압출단계별 구조안정성을 검토하여야 하며, 실제 구조물의 구조계를 이상화시킬 수 있는 해석용 program으로 합리적인 오스트리아 TDV사의 RM-SPACEFRAME을 사용하여 3D Bar Element로 모델링하여 구조해석을 수행하였으며 다음과 같은 단계를 모두 만족시키도록 설계하였다.

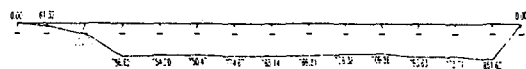
가) 압출단계에서 콘크리트 박스거더의 자중에 의한 모멘트



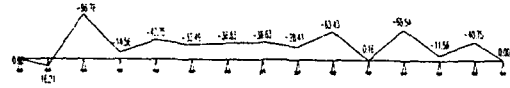
나) 2차 사하중(포장+방호벽 등)의 자중에 의한 모멘트



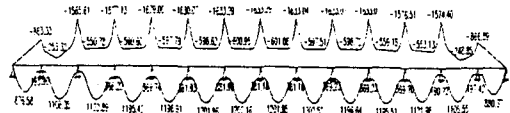
다) 프리스트레싱(1차+2차)에 의한 모멘트



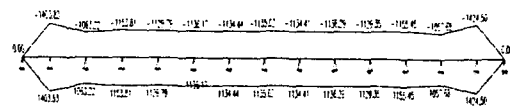
라) 콘크리트의 크리프 및 건조수축에 의한 모멘트



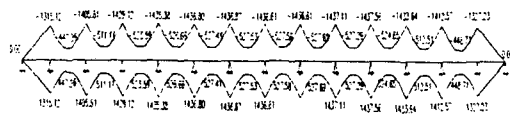
마) 차량하중(DL-24, DB-24)에 의한 최대, 최소 모멘트



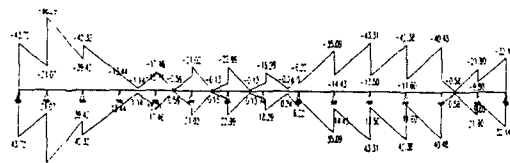
바) 온도하중에 의한 최대, 최소 모멘트



사) 지점침하(ΔS=10mm)에 의한 최대, 최소 모멘트



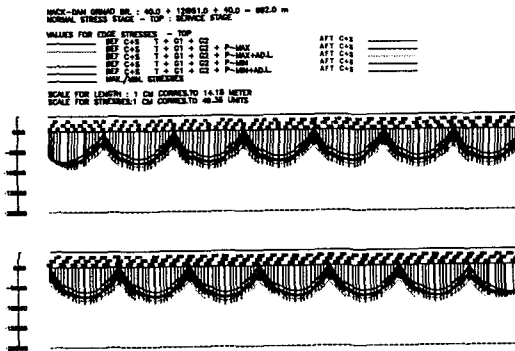
아) 상부구조에 작용하는 풍하중에 의한 최대, 최소 모멘트



이와 같은 하중에 의한 단면력을 조합하여 그림 7에서 보는 바와 같은 주형단면의 최종단계 상·하면 설계 응력을 얻을 수 있었으며, 수치상으로는 최대인장응력 $\sigma_t=5.6\text{kg/cm}^2$, 최대압축응력 $\sigma_b=-168.6\text{kg/cm}^2$ 으로 설계허용응력($\sigma_{ta}=34.5\text{kg/cm}^2$,

$\sigma_{ca} = -184.0 \text{ kg/cm}^2$ 이내의 만족되는 응력값으로 설계되었다.

① 상면의 응력도



② 하면의 응력도

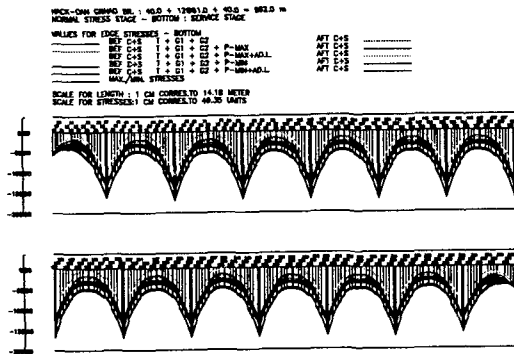
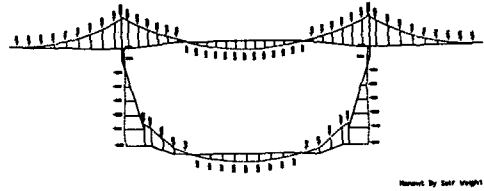


그림 7 최종단계의 상·하면 응력도

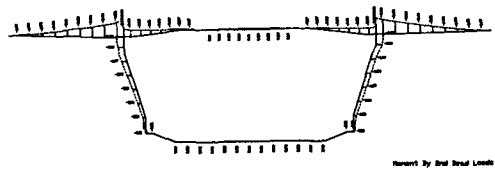
2) 횡방향 구조해석

횡방향 구조해석은 미국 EMRC사가 개발한 3차원 범용 Program인 NISA II를 이용하여 FEM 모델링하고 판해석 값을 구하여 Web 위치를 고정단으로 판단한 평면 보해석 값과 비교하였다. 이 값을 이용하여 윤하중 분포폭을 계산하여 2차원 횡방향 Frame 모델에 하중을 감소하여 적용시켜 다음과 같은 단계로 수행하고 최종단계의 하중조합에 의한 극한하중 최대, 최소 모멘트(그림 8)를 구하여 횡방향 단면 설계하였다.

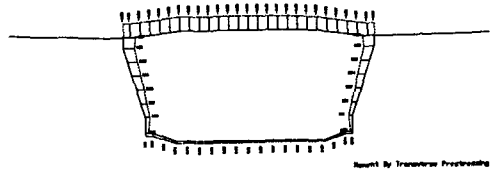
가) 자중에 의한 모멘트



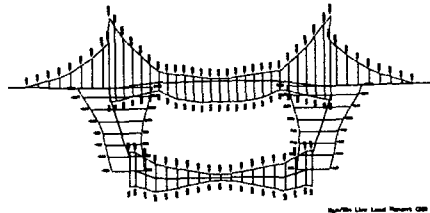
나) 2차 사하중에 의한 모멘트



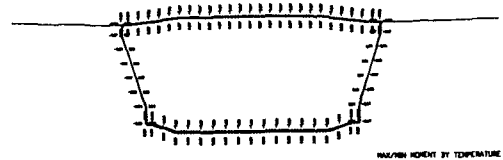
다) 횡방향 Tendon에 의한 모멘트



라) 활하중에 의한 최대, 최소 모멘트



마) 온도하중에 의한 최대, 최소 모멘트



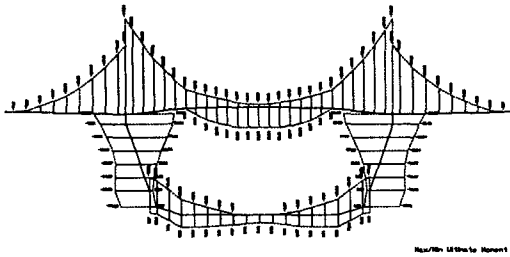


그림 8 극한하중 최대, 최소 모멘트

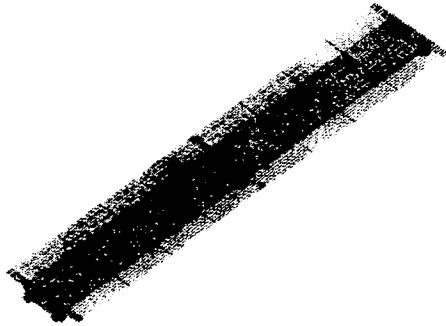
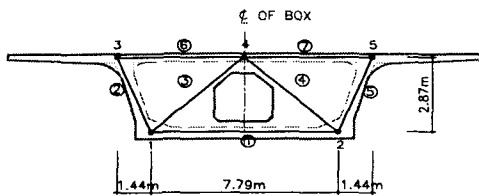


그림 9 2경간 연속의 3차원 모델링

중앙격벽설계는 2경간 연속의 3차원 모델링(그림 9)을 작성하여 횡방향 해석 입력 자료를 캔틸레버부 및 중간 슬래브에 하중재하시켜 해석하였으며 지점부의 diaphragm 해석은 SAP2000 프로그램을 이용한 FEM 모델을 수행하여 응력 vector와 contour를 기준으로 스트럿-타이모델을 선정하여 해석 및 설계를 수행하였다. (그림 10 참조)



(a) FEM 해석



(b) 스트럿-타이 해석

그림 10 격벽부 해석

3) 내진 구조해석

본 교량의 내진해석은 다점고정방식과 면진교좌장치를 비교 검토한 바 다점고정방식은 수평지진력 저항을 위한 특수 교좌장치가 필요하고 다점고정방법에 따른 부정정력 발생으로 인한 문제점이 제기되며 상부구조자중 과대에 따른 하부구조의 안정성 확보 및 미관을 고려하여 내진 저항성 확보에 최대 효과를 얻을 수 있는 면진 교좌장치(LRB)를 선정하여 설계 수행하였다.

4. 맺음말

교량 폭원이 큰 1Cell PSC Box Girder교는 국내에서는 시공사례가 거의 없어서 설계에서부터 시공까지 엄격하고도 정밀함이 요구되고 있다. 현재 본 낙단대교는 가설중인 교량으로 완공되는 시점까지 설계 및 시공문제점을 보완하여 좋은 교량 구조물로서 완공되어 교량설계 및 시공 향상에 이바지하기를 바라며 프리스트레스트 콘크리트 교량의 발전을 위하여 고강도 콘크리트의 연구개발 및 우수한 품질의 교좌장치가 개선과 개발되어 국내 교량설계 및 시공에 한걸음 발전되기를 기대한다.

참고 문헌

1. 도로교 표준시방서, 건설교통부, 1996
2. 콘크리트 표준시방서, 건설교통부, 1996
3. STANDARD SPECIFICATION for Highway Bridges, AASHTO, 1996
4. 콘크리트 교량가설 특수공법 설계·시공·유지관리 지침, 건설교통부, 1994
5. 이광민 "ILM 공법에 의한 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 설계" 콘크리트 학회지 VOL.8 NO.5, 한국 콘크리트 학회, 1996. 10