

국내 최대지간을 갖는 F.C.M 교량의 하부구조 시공 사례

- Constructural Application of the Longest Span F.C.M Bridge Substructure in Korea -



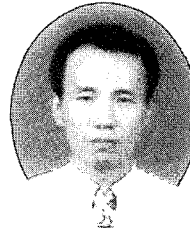
서영화*
Seo, Young Hwa



유지영**
Yu, Jee Yeung



김재모***
Kim, Jae Mo



채한수****
Chai, Han Su



금동화*****
Keum, Dong Hwa

1. 머리말

LG건설에서 시공하고 있는 익산 ~ 장수간 고속도로 제5공구 현장은 중부 서해안권에 입지한 군장광역권을 중심으로하여 개발된 서해안 고속도로, 호남고속도로 및 대전 ~ 통영간 고속도로 등 국토공간의 종방향 간선 도로망을 상호 연계함으로써 광양만 광역권, 대구·포항 광역권, 부산 광역권 등과의 연계 수송로 확보 및 물류 지원 체계의 효율성을 제고시키고, 연도지역 개발을 확보하기 위한 사업의 일환으로 건설 중에 있다.

당 현장은 총 연장 L = 3.41 km, 폭원 B = 23.4 m(4차선)으로 전북 완주군 소양면 신촌리를 시점으로 하여 전북 진안면 부귀면 세동리를 종점으로 하고 있다. 주요 구조물로는 신촌교(L = 1,060 m)와 만덕터널(L = 2,307 m)로 이루어져 있으며, 이중 신촌교는 최대 지간장 170 m의 F.C.M(Free Cantilever Method)에 의한 P.S.C Box(Prestressed Concrete

Box) 교량이며, 현재까지 국내에서 설계 및 시공된 같은 교량 중에서 최대의 지간(현재까지는 최대 지간장을 가진 F.C.M 교량은 LG건설에서 시공한 지간장 165 m의 서해대교 F.C.M 구간)을 갖고 있으며, 기초로부터 교면까지 최대 높이가 104 m에 달해 그 규모면에서 국내 최대규모의 F.C.M 교량이라 할 수 있다. 특히 1,060 m의 교량 전장에 있어서 상부구조와 교각을 강결시켜 라멘 구조로 처리되어 있다.

2. 신촌교 개요

현재 시공 중에 있는 신촌교의 교량제원은 다음과 같다.

- 형식 : 7경간 연속 P.S.C Box Girder Bridge(F.C.M)

· 연장

- 전주방향 : L = 93 + 5@170 + 117
= 1,060 m

- 함양방향 : L = 113 + 5@170 + 97
= 1,060 m

· 폭원 : 전주방향 - 12.6 m

함양방향 - 14.7 m

· 교각 구조형식 : 중공 양주 교각

· 교각높이

- 전주방향 : 최대 88.35 m,

최소 50.96 m(기초상단)

- 함양방향 : 최대 79.54 m,

최소 57.03 m(기초상단)

· 형고의 변화

- 교각지점부(H = 10.0 m)

- 중앙부(H = 3.4 m)

· 주두부 길이 : L = 16.8 m

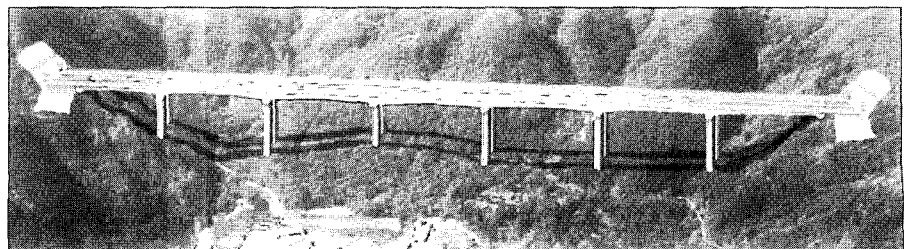


그림 1. 신촌교 전경

* LG건설 기술본부 본부장
** LG건설 기술본부 상무
*** LG건설 익산-장수 5공구 현장소장
**** LG건설 익산-장수 5공구현장 부장
***** LG건설 익산-장수 5공구현장 차장

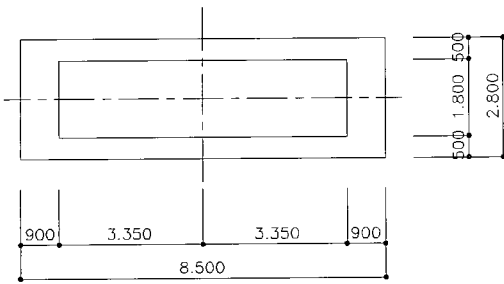


그림 2. 신촌교 교각 단면도

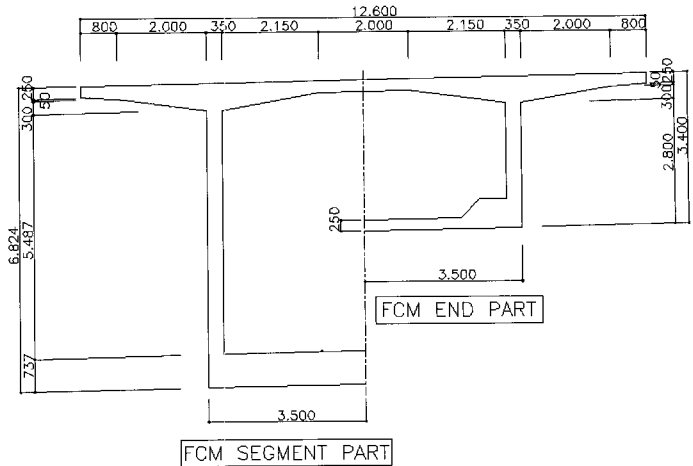


그림 3. 신촌교 횡단면도

- 세그먼트 분할
- $L = 10@3.6 + 9@4.4 = 75.6 \text{ m}$
- 기초형식 : 직접기초 5개 소,
현장타설말뚝 7개 소

3. 설계개요

3.1 교각설계

신촌교의 교각 단면은 안정성 및 완공 구조계의 구조적 요인 등을 고려하여 설계되었으며, 상단부터 기초까지 일정한 단면을 유지토록 하여 시공성을 고려하였다. 또한, 횡방향의 폭은 상부 구조의 폭보다 약간 크게 하여 안정감을 주는 모양을 택하였다.(그림 2)

교각의 형식선정에 있어서는 종방향 변위에 의하여 교각에 발생하는 단면력을 최소화하고 시공 중 발생하는 불균형 모멘트에 의한 변형을 최소화하며, 유연성을 최대한 확보하기 위하여 중심 간격 10m의 2-주(twin-column) 방식으로 채택하였으며, 교좌 장치의 유지 관리 요인을 제거하기 위하여 상하부를 강철 프레임 구조로 하였다. 또한 교각의 형고가 높아 세장비가 큰 장주에 해당되므로 시방서가 정하는 바와 같이 극한 단면력에 대하여 모멘트 확대법을 적용하여 산정하였다. 교축 방향 및 교축 직각 방향에 대하여 확대된 모멘트와 극한 축력을 교각의 P-M(축력-모멘트) 상관도에 대하여 검토하여 허용 범위를

만족하도록 설계하였다.

3.2 상부구조의 설계

3.2.1 상부구조의 형고

신촌교 상부구조의 형고는 지점부에서 지간의 1/17에 해당하는 10.0m, 지간 중앙부에서 지간의 1/50에 해당하는 3.4m로 하였으며, 지점부에서 중앙부로의 형고 변화는 국내에서 x^4 함수가 많이 적용되었으나, 바닥 슬래브의 텐던(tendon)에 의한 하향 분력을 최소화하는 데 초점을 맞추어 x^3 함수를 적용하여 설계되었다.

3.2.2 단면설계

상부구조 단면의 상부 바닥판의 두께는 상하 철근의 덮개, 철근 직경, 중형 방향 브레이싱 강선의 배치를 고려한 최소 두께인 270mm를 기본으로 하여 단면이 최소화 되도록 설계되었다.(그림 3)

현치부의 두께는 텐던 정착구 설치를 위한 최소 두께를 확보하기 위하여 600mm로, 하부 바닥판의 두께는 지간 중앙부에서 250mm로 하고 지점부에서는 압축력에 저항하기 위하여 두께를 950mm로 하여 중앙부의 거리에 비례하여 증가되도록 설계되었다.

3.2.3 세그먼트 분할

세그먼트의 분할은 공사기간, 필요 텐던의 단위와 개수, 거푸집 기중기(form

traveller)의 용량 등을 고려하여 3.6m 세그먼트와 4.4m 세그먼트로 분할하였다. 이때 세그먼트의 중량은 최소 약 103톤에서 최대 184톤 정도로서 작업차 내의 팔 길이 효과, 전체 세그먼트를 고려하여 설계되었다.

4. 기초시공 및 수화열 제어

신촌교는 특수장대교인 F.C.M 교량으로 직접기초나 깊은기초 모두 연암이상의 기반암층에 지지되도록 계획되어 있으며, 본 장에서는 현장타설 말뚝의 시공개요 및 기초시공시 수화열 제어를 위한 파이프 쿨링(pipe-cooling) 공법의 적용사례에 대하여 소개하고자 한다.

4.1 현장 타설 말뚝의 시공

신촌교의 현장타설 말뚝은 올케이싱(allcasing)을 이용한 R.C.D 공법을 채용하였다. 시공된 R.C.D 파일의 심도는 8.8m ~ 19.0m, $\phi 1,800 \text{ mm}$ 로 설계되어 있다. 현장타설 말뚝의 정확한 시공을 위하여 지표면에 철근과 실을 이용하여 격자형의 틀을 조성하였으며, 파일 압입시의 연직도 확보를 위하여 파일의 대각에 연직 측정기를 제작하여 설치하였다.

파일의 압입 완료 후 내부굴착을 수행하였으며, 일반적으로 토사구간의 경우 그랩(grab)을 이용하여 굴착하고, 풍화암 ~ 연



그림 4. R.C.D 파일 시공현황



그림 5. R.C.D 파일 정재하 시험

암(경암)까지는 진동기(oscillator)를 이용한 All Casing 공법과 R.C.D 공법을 병행하여 실시하였다.

모든 굴착완료 후 말뚝선단의 결합제거를 위하여 공내 이물질(slime) 제거를 시행하였으며, 철근망 거치 후 트레미관을 이용하여 콘크리트를 타설하였다. 트레미관을 이용한 수중타설 콘크리트의 경우 콘크리트 타설 상단의 이물질을 제거하기 위하여 0.5m를 추가타설 후 파쇄기(hand breaker)를 이용하여 두부정리를 실시하였으며(그림 4), 말뚝의 품질관리를 위하여 재하시험을 수행하였다.(그림 5)

4.2 매트기초의 수화열 제어

4.2.1 개요

신촌교의 경우 수화열에 의한 온도균열이 예상되는 부분은 20m × 20m × 3.5m의 기초부분과 교량의 상부구조중 주두부

에서 수화열에 의한 온도균열이 예상되며, 본교에서는 현재 시공중인 기초부분의 온도균열 저감사례에 대하여 소개하고자 한다.

4.2.2 콘크리트 배합

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(type I)를 사용하였으며, 잔골재는 조립률이 3.032인 강모래를 사용하였고, 굵은골재는 조립률이 6.575, 최대골재크기가 25mm인 채석을 사용하였다. 신촌교의 기초에 사용한 콘크리트는 설계기준강도는 270 kgf/cm²로 사용배합은 <표 1>과 같다.

4.2.3 콘크리트 타설관리

기초 타설을 위하여 2대의 콘크리트 펌프카를 이용하여, 연속적으로 타설을 수행하였으며, 콘크리트의 1회 치기 높이는 40 ~ 50cm, 낙하 높이는 60cm 이하로 하여 재료분리를 방지하였다. 또한 콘크리트 이어치기 허용시간은 콜드조인트가 발

생하지 않도록 2시간 이내로 하였다. 총 콘크리트 타설물량은 약 1,250 m³으로 타설 시간은 약 16시간이 소요되었다.

본 구조물의 온도균열 저감을 위하여 파이프쿨링 공법을 사용하였으며, <그림 6>에 보이는 바와 같이 냉각관의 수평 및 수직간격을 1m로 하여 배치하였다. 냉각관은 상하부에 각 3단을 설치하고 유입구와 유출구를 3개로 하여 펌프를 이용하여 냉각수를 강제로 순환할 수 있도록 냉각계통을 구성하였다.

4.2.4 수화열 해석 및 계측

신촌교의 기초 콘크리트 구조물에서 적용한 파이프쿨링 공법의 효과 및 균열발생예방을 위한 시공기준의 마련을 위하여 당사에서 개발한 수화열 전온해석 프로그램을 이용하여 해석을 수행하였다.

해석시 사용된 콘크리트 및 외기조건은 <표 2>와 같다.

표 1. 콘크리트 배합

호칭강도 (kg/cm ²)	굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	잔골재율 (%)	물-시멘트비 (%)	단위재료량(kg/cm ³)				
						물	시멘트	잔골재	굵은골재	혼화제
270	25	13	4.5	46	44.5	181	407	765	905	1.22

표 2. 해석에 사용된 물성치

최대상승온도	57.0	냉각수 대류계수	328.0 kcal/m ² · hr · °C	콘크리트 열전도율	2.3 kcal/m · hr · °C
반응속도	2.90	냉각수의 온도	19°C	콘크리트 선폽창계수	1.0 × 10 ⁻⁵
외기온도	19.0°C	냉각관의 직경	0.0254 m	콘크리트의 비열	0.275 kcal/kg · °C
열전달률	상면 7.00 kcal/m ² h°C	냉각수 단위중량	1000 kg/cm ³	냉각수 유입유량	0.8 m ³ /hr
	측면 4.50 kcal/m ² h°C	냉각수의 비열	1.0 kcal/kg · °C	냉각관의 단면적	0.0000 7979m ²
생 콘크리트의 온도	27°C	냉각수 열전도율	0.554 kcal/m · hr · °C		

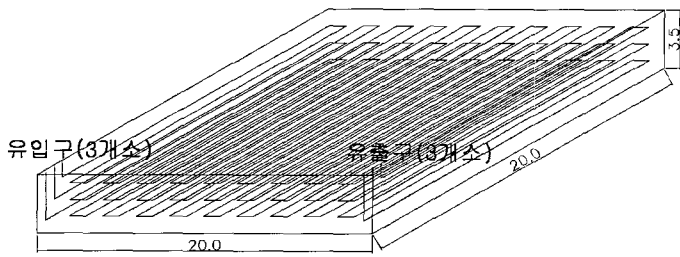


그림 6. 냉각관 배치현황

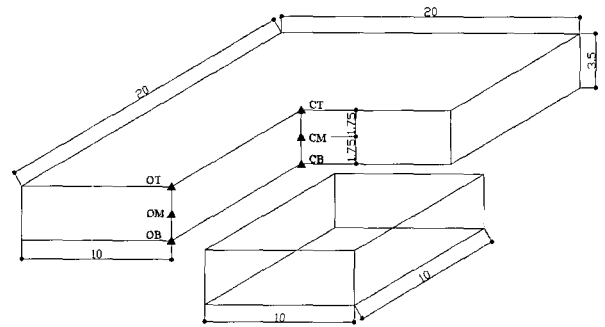


그림 7. 온도 계측 위치

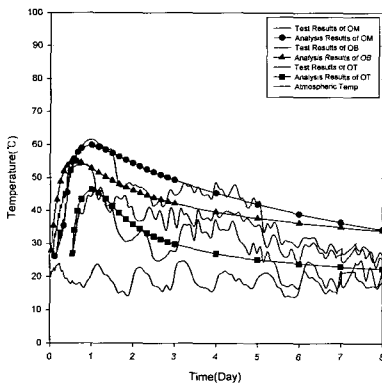


그림 8. 온도계측 및 해석결과(표면부)

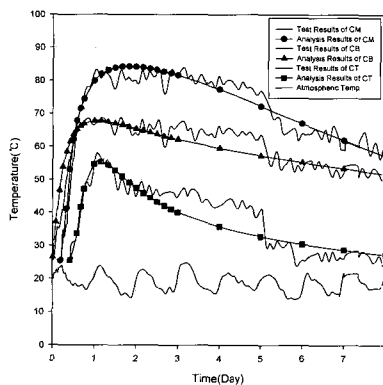


그림 9. 온도계측 및 해석결과(중심부)

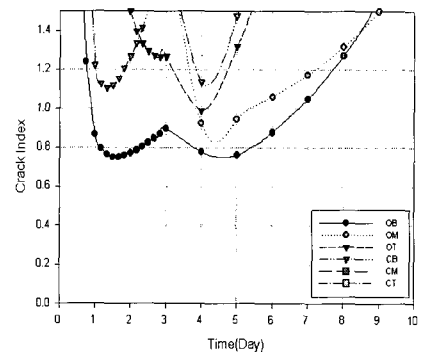


그림 10. 온도균열지수 산정 결과

일반적으로 수화열 해석시 콘크리트의 초기 타설시점을 기준으로 하여 수화열 및 온도응력에 대한 해석을 수행하는 것이 일반적이다. 그러나, 본 구조물의 경우 콘크리트의 전체 타설시간이 16시간 이상이 소요되는 것으로 예상되어, 해석시 구조물의 높이방향으로 3단으로 분리타설되는 것으로 모델링하여 타설시간 간격을 고려한 해석이 될 수 있도록 하였다.

또한, 프로그램의 해석결과의 정확성을 검증하기 위하여 <그림 7>과 같이 콘크리트 내부에 온도센서를 6곳에 설치하였으며, 유입수 및 유출수의 온도를 측정하기 위하여 4개의 온도센서를 설치하였다. 데이터의 측정은 타설후 3일간은 1시간 간격으로, 그 후에는 2시간 간격으로 실시하였으며, 측정은 타설일로부터 8일간 실시하였다. 온도 측정장비로는 Tokyo Sokki사의 TDS-303을 이용하여 측정을 수행하였다.

4.2.5 결과분석

수화열 측정결과 콘크리트의 최대온도

는 콘크리트 타설 후 약 1.5일 이내에 발생하였으며, 최대온도는 약 85°C로 측정되었다. <그림 9>는 구조물의 중심부의 온도변화를 나타내는 그래프로 온도균열 발생여부를 예상하기 위하여 실시한 유한요소해석 결과와 상당히 일치하였다. 또한 <그림 8>은 구조물의 외측에 위치한 온도센서의 측정결과로 해석결과와 상당부분이 일치하지만 약 5일 ~ 6일 사이에 거푸집을 제거한 이후의 해석결과는 약간의 차이가 있으며, 이것은 거푸집 제거후 외기대류조건의 갑작스러운 변경으로 인하여 표면부에서의 열발산 속도가 빨라졌기 때문으로 판단된다.

온도해석결과를 이용하여 온도응력 해석 및 균열지수를 산정한 결과는 <그림 10>과 같다. <그림 10>에서 보는 바와 같이 온도계측지점에서의 온도균열지수는 0.7 이상으로 「콘크리트 표준시방서」에서 제시하고 있는 구조물에 유해한 균열이 발생하지 않는 수준으로 품질관리가 가능한 것으로 판단되었다. 또한, 부분적으로 균열발생확

률이 높은 부분은 타설 초기의 콘크리트 표면부에서 인장응력이 크게 발생함을 확인할 수 있었으나, 시공 후 표면의 균열을 조사한 결과 구조적으로 문제가 발생하는 균열은 발생하지 않은 것으로 조사되었다.

5. 교각의 시공

신촌교의 교각은 Climbing Form을 이용한 콘크리트 타설공법으로 1 lot당 4 m 높이의 거푸집을 13 ~ 22 lot로 분할하여 타설하는 방법으로 시공이 진행되고 있다.<그림 11>

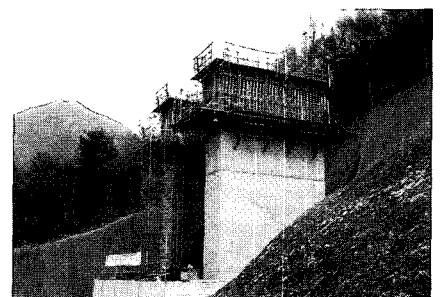
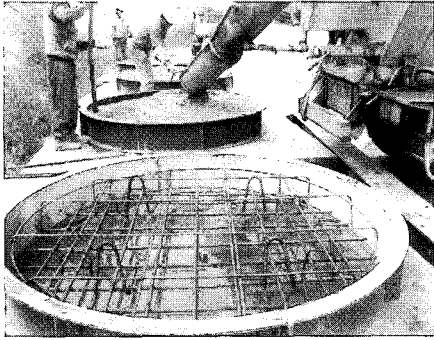
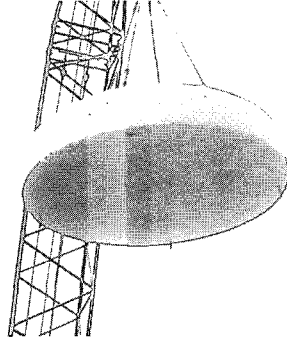


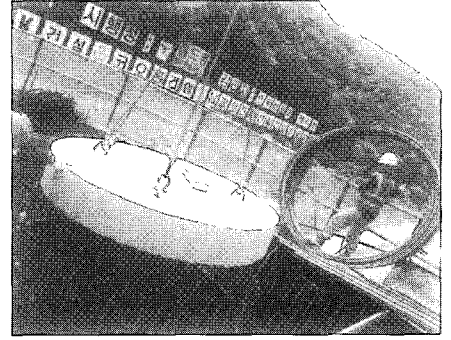
그림 11. Climbing Form 시공현황



지상작업



인양



거치

그림 12 프리캐스트 내공막이 시공순서

Climbing Form 공법은 1-lot 만큼 콘크리트 타설 후 양생시킨 다음에, 거푸집을 인력 체인블록이나 유압잭 및 전동모타 또는 가이드 레일 설치 방법을 이용하여 상방향으로 이동시켜 앵카볼트로 교각 구체에 고정 설치하는 방법이다.

특히, 당 현장의 경우 대부분의 교각이 고소교각으로 안전 및 품질에 관하여 철저하게 관리하고 있다.

6. 중공교각 내공막이

신촌교는 중공교각으로 주두부의 콘크리트 타설시 거푸집의 역할을 하는 내공막이를 설치하도록 되어 있으며, 본 현장에서는 당사에서 개발한 프리캐스트형 중공교각 내공막이를 적용할 예정이며, 이에 대한 개요는 다음과 같다.

6.1 기존의 시공방법

기존에 사용되었던 중공교각의 내공막이 시공법은 1998년도 도로공사 실무자료집에서 제시하고 있는 “합판거푸집 + ㄷ-형강”을 사용하는 것으로 하여 대부분의 중공교각 시공현장에서 사용하고 있다.

이러한 시공방법은 ㄷ-형강 및 ㄷ-형강을 소정의 위치에 설치하기 위한 Block-Out용 목재와 같은 가시설 자재들이 과다하게 소요되어 경제성 측면에서 바람직하지 않으며, ㄷ-형강 설치 등의 작업이

교각의 상단에서 이루어지는 관계로 작업자의 낙하위험과 작업공간의 협소로 인하여 시공성이 저하될 우려가 많은 것으로 파악되었다.

6.2 개선방법

신촌교의 경우 교각의 최대 높이가 79.54 m로 중공교각의 내공막이 시공시 고소교각에서의 작업이 불가피하여 시공성 및 작업자의 안전이 문제점으로 대두되고 있다. 따라서 상기사항의 개선방안으로 지상에서 철근 콘크리트로 제작된 프리캐스트 거푸집을 제작하여 한번에 거치할 수 있는 방안을 도입하게 되었다.

본 시공방법은 당사에서 2002년 현장 공중개선의 일환으로 개발되었으며, 현재 시공 중에 있는 경춘선 공구 현장에서 성공적으로 시험적용된 바 있으며, 특히 출원중에 있는 공법으로 향후 건설현장의 인력저감 및 안전확보를 위한 공법으로 자리잡을 수 있을 것으로 판단된다. 본 공법의 시공방법은 다음과 같다.

제작틀 제작 → 철근 배근 → 콘크리트 타설(양생 14일 이상) → 인양 → 거치(그림 12)

7. 맺음말

LG건설에서 시공하고 있는 국내 최장경간 F.C.M 교량인 신촌교는 서해대교

건설경험을 바탕으로 당시의 기술력을 최대한 발휘하여 보다 나은 고품질의 교량을 건설하기 위하여 노력을 경주하고 있다.

또한, 본사 기술본부와의 원활한 업무협조를 통하여 기술자료의 축적, 설계검증, 시공개선 등이 이루어지고 있으며, 현장의 체계적인 시공관리 및 품질관리를 통하여 안전하고 쾌적한 도로환경 제공은 물론, 작업자의 안전을 최우선으로 하고 노무인력 부족에 대비할 수 있는 요소기술의 발굴, 개발, 적용에 기술력을 집중하고 있다.

끝으로 현재 시공 중인 하부구조 이외에 상부가설시에 대한 설계, 시공, 시공단계별 거동에 대한 부분에 대하여서는 향후 충분한 기술적인 분석 및 검증을 통하여 다음 기회에 소개할 예정이다. □

참고문헌

1. 한국도로공사, “전주 ~ 함양간 고속도로 건설공사 실시설계 일반보고서(제5공구), 1994.
2. 최영환, 박상일, “신촌교 상부공 설계사례”, 콘크리트학회지, 제12권 3호, 2000. 5. pp.85~91.
3. 서영화, 남열우, 김건석, 심재홍, “파이프쿨링에 의한 교량기초의 온도균열 저감사례”, 안전진단학회 가을 학술발표회 논문집, 2002.
4. 양주경, 최영돈, 최고일, “수화열 계측 및 파이프쿨링 시공사례”, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 1994.