

## 신촌교(FCM)의 설계 및 시공

Design and Construction of Sinchon Bridge(FCM)



민만경\*

Man-Keang Min



이형재\*\*

Hyoung-Jae Lee



배성우\*\*\*

Seoung-Woo Bae



심재흥\*\*\*\*

Jae-Heung Shim



지현우\*\*\*\*\*

Hyun-Woo Jee

### 1. 머리말

익산-장수간 고속도로는 기 개발된 서해안 고속도로, 호남고속도로 및 대전-통영간 고속도로 등 국토공간의 종방향 간선도로망을 상호 연계함으로써 광양만 광역권, 대구·포항 광역권, 부산광역권 등과의 연계 수송로 확보 및 물류 지원 체계의 효율성을 제고시키고, 연도지역 개발을 확보하기 위한 사업의 일환으로 건설 중에 있으며, 2007년 완공을 목표로 공사가 순조롭게 진행되고 있다.

GS건설이 시공중인 제5공구 현장은 총 연장  $L = 3.41$  km, 폭원  $B = 23.4$  m(4차선)로 전북 완주군 소양면 신촌리를 시점으로 하여 전북 진안면 부귀면 새동리를 종점으로 하고 있다. 주요 구조물로는 신촌교( $L = 1,060$  m)와 만덕터널( $L = 2,307$  m)로 이루어져 있으며, 이중 신촌교는 최대 지간장 170m의 FCM(free cantilever method)에 의한 PSC 박스(prestressed concrete box)교량이다. 현재까지 국내에서 설계 및 시공된 동일 형식 최대 지간장을 가진 165m의 서해대교 FCM 구간보다 5m가 긴 최대지간장의 교량이며, 기초로부터 교면까지 최대 높이가 102m에 달해 그 규모면에서 국내 최대 규모라 할 수 있다. 상부와 하부구조의 연결은 1,060m의 교량 전장에 있어서 상부구조와 교각을 강결시켜 라멘구조로 처리되어 있다. 또한 GS건설에서는 여주~양평간 고속도로 제3공구에 광폭 3차선( $B = 24.7$  m, 최대 지간장 = 125.0 m, FCM)교량도 시공중에 있다.

신촌교는 현재 2007년 8월에 마지막 key segment를 타설

하고, 현재 교량 부속 시설물을 시공중에 있다.

### 2. 신촌교 개요

현재 시공중에 있는 신촌교의 교량 제원은 아래와 같다(그림 2 참조).

- 1) 형식 : 7경간 연속 PSC 박스거더 교량(FCM)



그림 1. 신촌교 전경

\* GS건설(주) 익산-장수간고속도로제5공구현장 현장소장 부장  
 \*\* GS건설(주) 익산-장수간고속도로제5공구 현장 부소장 차장  
 \*\*\* GS건설(주) 익산-장수간고속도로제5공구 현장 공사과장 과장  
 \*\*\*\* GS건설(주) 기술본부 토목구조팀 과장  
 \*\*\*\*\* 정희원, GS건설(주) 기술본부 토목구조팀 사원  
 hwjee@gsconst.co.kr

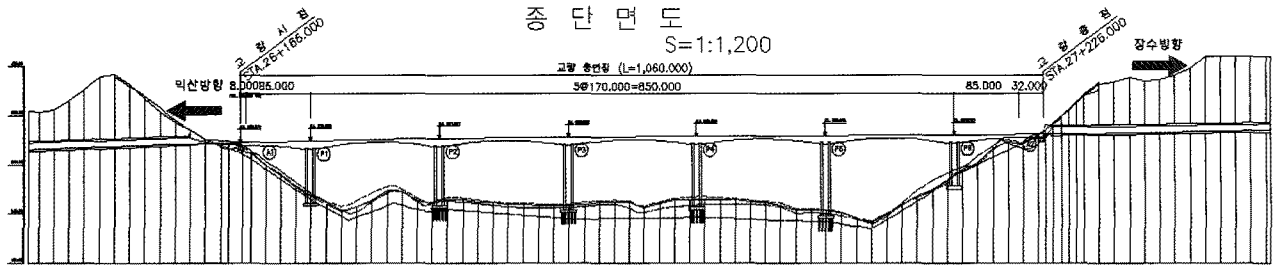


그림 2. 신촌교 종단면도

- 2) 연장  
 익산방향 :  $L = 93 + 5@170 + 117 = 1,060$  m  
 장수방향 :  $L = 113 + 5@170 + 97 = 1,060$  m
- 3) 폭원 : 익산방향 12.6 m / 장수방향 14.7 m
- 4) 교각 구조형식 : 중공 양주 교각
- 5) 교각높이  
 익산방향 - 최대 88.38 m, 최소 50.99 m(기초상단)  
 장수방향 - 최대 79.57 m, 최소 57.06 m(기초상단)
- 6) 형고의 변화 : 교각지점부(H=10.0m),  
 중앙부(H = 3.4m)
- 7) 주두부 길이 : L=16.8 m
- 8) 세그먼트 분할 :  $L=10@3.6 + 9@4.4 = 75.6$  m
- 9) 기초형식 : 직접기초 5개소, 현장타설말뚝 7개소

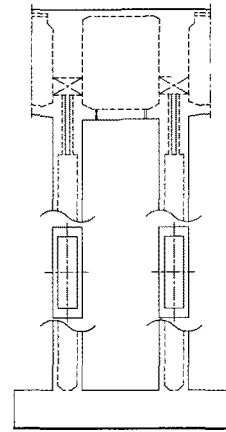


그림 3. 교각 형상

### 3. 설계 개요

#### 3.1 교각 설계

교각의 단면은 안정성 및 완공 구조계의 구조적 요인 등을 고려하여 설계되었으며, 상단부터 기초까지 일정한 단면을 유지토록 하여 시공성을 고려하였다.

교각의 형식 선정에 있어서는 종방향 변위에 의하여 교각에 발생하는 단면력을 최소화하고 시공 중 발생하는 불균형 모멘트에 의한 변형을 최소화하며, 유연성을 최대한 확보하기 위하여 중심 간격 10m의 2주 방식(twin-column)으로 채택하였으며(그림 3), 교좌 장치의 유지 관리 요인을 제거하기 위하여 상하부를 강결 프레임 구조로 설계하였다. 그러나, 라멘구조의 경우 상부구조와 하부구조가 강결되어 상부의 모멘트가 하부로 전달되는 부정정 구조로서, key segment 접합후 연결된 긴장사의 콘크리트 탄성수축, 크리프 및 건조수축 등의 소성수축으로 인하여 강결교각에 불균형 모멘트가 발생하여 설계에 불리한 영향을 주게 된다. 따라서, 이런 탄·소성수축변형에 의한 불균형 모멘트 및 변형을 보상하고 교량의 경제성 및 안전성을 확보하기 위하여 선보정공법을 적용하였다.

선보정공법은 크리프, 건조수축의 영향이 최소가 되는 교량 중앙 지점에서 시행하는 것이 일반적이다. 그러나 당 신촌교의 경우 <그림 4>의 모델링도와 같이 교각 P5의 길이가 타 교각에 비해 상대적으로 길어 크리프, 건조수축에 의한 모멘트가 P1에 비해 P6에 집중되는 것을 알 수 있다. 따라서 크리프, 건조수축에 의해 발생하는 P6에서의 모멘트를 저감하기 위해 선보정 하중의 적용 위치를 교량 중앙이 아닌 P6에서 가까운 P4-P5의 폐합 위치로 결정하였다. 선보정공법의 적용 전·후의 교각 하단 모멘트의 변화를 모멘트가 가장 큰 P6을 비교하여 보면 선보정 하중 도입 전후 약 30%의 모멘트 변화를 확인할 수 있었으며 해석 결과는 <표 1>과 같다.

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 대해

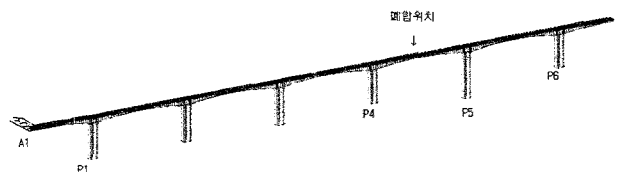


그림 4. 신촌교 해석 모델링

표 1. 선보정공법 도입 전후의 모멘트 비교

구분	선보정 하중 도입 전		선보정 하중 도입 후	
	Pier 1	Pier 6	Pier 1	Pier 6
장수 방향	133,080 kN.m	150,000 kN.m	123,210 kN.m	106,430 kN.m
익산 방향	135,400 kN.m	161,120 kN.m	113,140 kN.m	118,380 kN.m

여 확대된 모멘트와 극한 축력을 교각의 P-M(축력-모멘트) 상관도에 대하여 검토하여 허용 범위를 만족하도록 설계 하였다.

### 3.2 상부 구조의 설계

#### 3.2.1 상부 구조의 형고

신촌교 상부 구조의 형고는 지점부에서 지간의 1/17에 해당하는 10.0m, 지간 중앙부에서 지간의 1/50에 해당하는 3.4m로 하였으며, 지점부에서 중앙부로의 형고 변화는 국내에서  $x^{1.4}$ 함수가 많이 적용되었으나, 바닥 슬래브의 텐던(tendon)에 의한 하향 분력을 최소화하는 데 초점을 맞추어  $x^3$ 함수를 적용하여 설계하였다(그림 5).

#### 3.2.2 단면설계

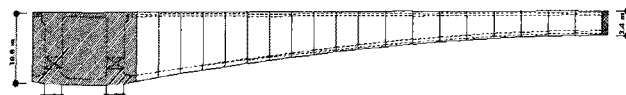
상부구조 단면의 바닥판 두께는 상하 철근의 덮개, 철근 직경, 종횡 방향 브레이싱 강선의 배치를 고려한 두께 275mm를 기본으로 하여 단면이 최소화 되도록 설계되었다(그림 6). 현치부의 두께는 텐던 정착구 설치를 위한 최소 두께를 확보하기 위하여 600mm로, 하부 바닥판의 두께는 지간 중앙부에서 250mm로 하고 지점부에서는 압축력에 저항하기 위하여 두께를 900mm로 하여 중앙부의 거리에 비례하여 증가되도록 설계되었다.

#### 3.2.3 세그먼트 분할

세그먼트의 분할은 공사기간, 필요 tendon의 단위와 개수, form traveller의 용량 등을 고려하여 3.6m 세그먼트와 4.4m 세그먼트로 분할하였다. 이때 세그먼트의 중량은 최소 약 103톤에서 최대 184톤 정도로서 작업차 내의 팔길이 효과, 전체 세그먼트를 고려하여 설계하였다.

## 4. 기초 시공 및 수화열 제어

신촌교는 특수장대교인 FCM 교량으로 직접기초나 말뚝기초 모두 연암 이상의 기반암층에 지지되도록 계획되어 있으며, 본 장에서는 기초 시공시 수화열 제어를 위한 pipe-cooling 공법의 적용 사례에 대하여 소개하고자 한다.



$$H = 3.4 + 1.3534 \times 10^{-3} \times x^2 - 3.3161 \times 10^{-6} \times x^3$$

그림 5. 형고의 변화

## 4.1 개요

신촌교의 경우 수화열에 의한 온도균열이 예상되는 부분은 20m×20m×3.5m의 기초 부분과 교량의 상부 구조중 주두부에서 수화열에 의한 온도균열이 예상되어 파이프쿨링에 의한 콘크리트 냉각을 실시하였다.

## 4.2 콘크리트 배합

시멘트는 보통포틀랜드시멘트(type I)를 사용하였으며, 잔골재는 조립률이 3.032인 강모래를 사용하였고, 굵은골재는 조립률이 6.575, 최대 골재 크기가 25mm인 쇄석을 사용하였다. 신촌교의 기초에 사용한 콘크리트는 설계기준강도는 27MPa로 사용 배합은 <표 2>와 같다.

## 4.3 콘크리트 타설 관리

기초 타설을 위하여 2대의 콘크리트 펌프카를 이용하여 연속적으로 타설을 수행하였으며, 콘크리트의 1회 치기 높이는 400~500mm, 낙하 높이는 600mm 이하로 하여 재료 분리를 방지하였다. 또한 콘크리트 이어치기 허용 시간은 쿨드조인트가 발생하지 않도록 2시간 이내로 하였다. 총 콘크리트 타설 물량은 약 1,400m<sup>3</sup>으로 타설 시간은 약 16시간이 소요되었다.

본 구조물의 온도균열 저감을 위하여 파이프쿨링공법을 사

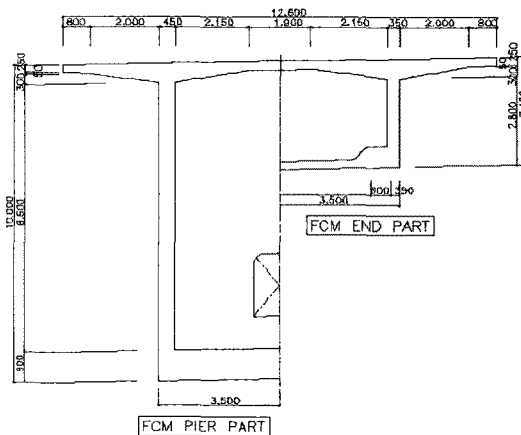


그림 6. 신촌교 횡단면도

표 2. 콘크리트 배합

호청강도 (MPa)	굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 (mm)	공기량 (%)	잔골재율 (%)	물시멘트비 (%)	단위재료량 (kg/cm <sup>3</sup> )				
						물	시멘트	잔골재	굵은골재	혼화제
27	25	130	4.5	46	44.5	181	407	765	905	1.22

용하였으며, 냉각관의 수평 및 수직간격을 1m로 하여 배치하였고, 냉각관은 상하부에 각 3단을 설치하여 펌프를 이용하여 냉각수를 강제로 순환할 수 있도록 냉각 계통을 구성하였다.

4.4 수화열 해석 및 계측

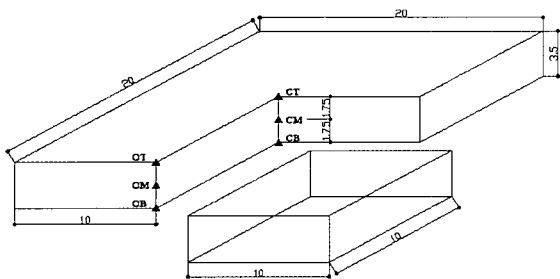


그림 7. 온도계측 위치

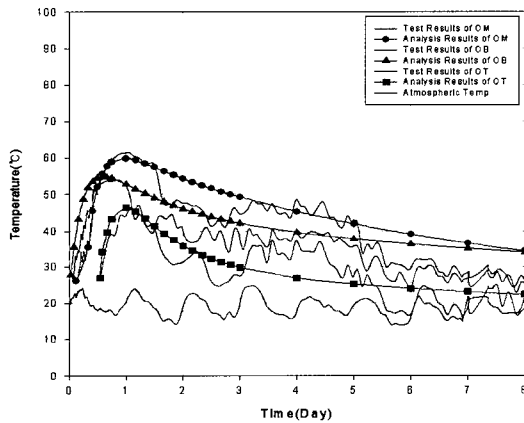


그림 8. 온도계측 및 해석 결과(표면부)

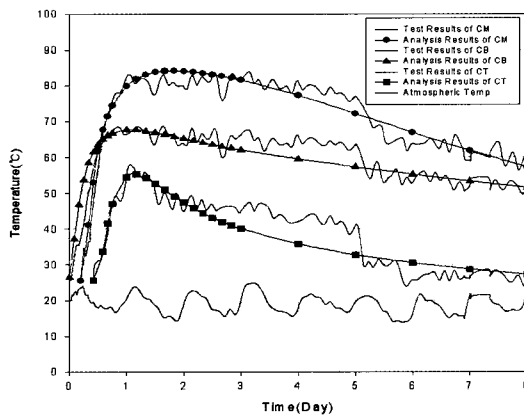


그림 9. 온도계측 및 해석 결과(중심부)

신촌교의 기초 콘크리트 구조물에서 적용한 파이프쿨링공법의 효과 및 균열발생 예방을 위한 시공 기준의 마련을 위하여 당사에서 개발한 수화열전용해석 프로그램(CONSA-HS)을 이용하여 해석을 수행하였다.

현장 계측은 콘크리트 내부에 온도센서를 6군데 설치하였으며, 유입수 및 유출수의 온도를 측정하기 위하여 4개의 온도센서를 설치하였다(그림 7). 수화열 해석 결과와 측정 결과를 비교하면 (그림 8, 9)와 같다.

5. 교각의 시공

신촌교의 교각은 climbing form을 이용한 콘크리트 타설공법으로 1 Lot당 4m 높이의 거푸집을 13 ~ 22 Lot로 분할하여 타설하는 방법으로 시공이 진행되고 있다(그림 10).

climbing form공법은 1 Lot 만큼 콘크리트 타설 후 양생시킨 다음에, 거푸집을 타워 크레인이나 유압잭 및 전동 모터 또는 가이드 레일 설치 방법을 이용하여 상부로 이동시켜 앵커볼트로 교각 구체에 고정 설치하는 방법이다.

특히, 당 현장의 경우 대부분의 교각이 고교각으로 거푸집의 설치, 콘크리트 타설, 해체, 이동의 전 과정에서 안전 및 품질을 최우선으로 하여 시공하였다. 또한 고교각에서 발생할 수 있는 추락사고의 방지를 위하여 중공교각 내부에 자재의 야적과 작업이 가능하도록 작업발판을 설치하여 작업 환경을 개선하였다(그림 11).

6. 상부공의 시공

6.1 주두부의 시공

6.1.1 주두부 가시설의 설치

FCM 교량의 주두부는 교량 상부 구조를 지지하여 하중을 하부구조에 전달하는 기능 이외에 시공시 발생하는 하중을 지지하는 중요한 구조물이다. 특히 주두부에서의 응력의 흐름이 복잡하여 설계에서 스트럿 타이 모델을 이용하였다.

주두부 가시설은 브라켓 지지 방식을 이용하였으며(그림 12), 강봉을 이용하여 브라켓을 고정하였다. 신촌교의 경우 고소작업이 이루어지는 이유로 인하여, 현장에서의 안전사고의 위험이 항상 상존하고, 작업 공간의 협소로 인하여 시공시 어

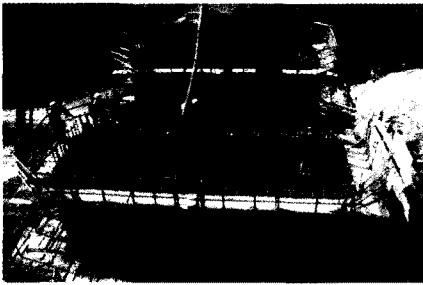


그림 10. 교각 시공 현황

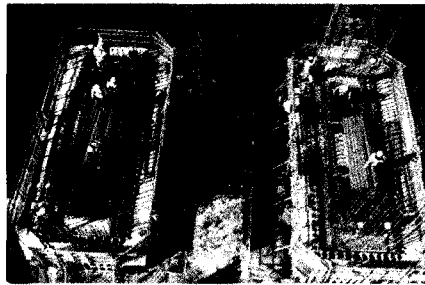


그림 11. 중공 교각부 작업 발판 설치

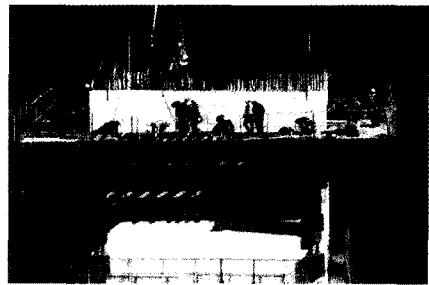


그림 12. 주두부 가시설 설치

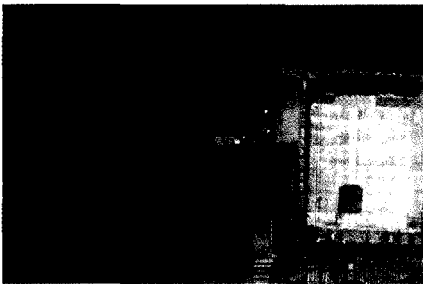


그림 13. 주두부 가시설 해체

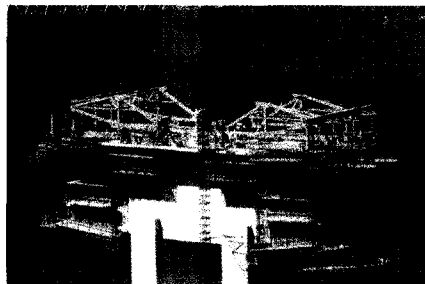


그림 14. Form traveller 설치 현황

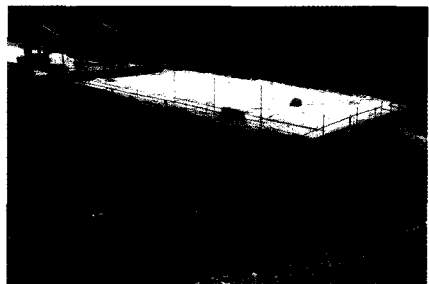


그림 15. 측경간부 full staging 시공 현황

려움이 발생할 가능성이 크기 때문에, 당 현장에서는 고소작업을 최소화하기 위하여 주두부 거푸집 설치시 지상에서 외부거푸집의 4개의 조각으로 분리한 후, 양중하여 설치하는 방안을 도입하였다(그림 13).

### 6.1.2 콘크리트 타설

바닥 슬래브와 격벽의 개구부 밑단을 1단계로 타설하고, 벽체 타설 후 상부슬래브를 타설하는 것으로 계획하였다. 또한, 콘크리트 타설시에는 압력관을 이용하여 교각 하단부에서 콘크리트를 압송하여 타설하는 방식을 채용하였다.

## 6.2 주경간 및 측경간부의 시공

주두부의 시공이 완료되면 form traveller를 설치하고 교량의 세그먼트를 순차적으로 시공하였다. 신촌교의 경우는 모두 3개조의 form traveller를 이용하여 주경간을 시공하였으며(그림 14), 측경간부의 경우는 full staging 공법을 이용하여 시공하였다(그림 15)

### 6.2.1 측경간부 교량 받침 설치

현장 타설 콘크리트에 의하여 가설된 FCM 교량의 경우, 측경간부의 받침부에서의 수축량이 설계기준에 의한 수축량보다 과다하게 발생되어 교량 받침부의 하자 요인으로 판단되는 경우가 있었다. 따라서 신촌교의 시공시 현장 배합 조건을 이용하여 콘크리트의 크리프 계수 및 건조수축률 시험을 행하였으

며, 그 결과 크리프 계수는 1.4배, 건조 수축률은 2.2배 큰 것으로 평가되었다. 따라서 본 시험값을 이용하여 상부구조의 캠버관리치의 산정 및 측경간부의 받침 설치시 이동량을 재계산한 결과 설계에 의한 허용이동량인  $\pm 325\text{ mm}$ 를 초과하는 것으로 판단되어, 측경간부에 설치되는 받침의 upper plate의 용량을  $\pm 800\text{ mm}$ 로 증가시켜 향후 발생 가능성이 있는 받침의 하자 요인을 제거하였다.

또한, 받침량 허용 이동량 변경에 따라 측경간 단부측으로 하중이 이동하게 되어 교량 단부의 손상 여부를 판단하기 위하여 3차원 FEM 국부해석을 수행하였으며, 추가적인 보강 없이도 안전한 것으로 해석되었다(그림 16).

### 6.2.2 Key-segment 타설 및 선보정공법의 적용

신촌교의 캔틸레버는 19 세그먼트로 구성되어 있으며, 19 세그먼트 시공 후 key-segment를 시공한다. 일반적으로 시공 전 캠버로 인한 레벨 차이를 해소하기 위하여 레버링 보를 설치하여 교량의 레벨을 맞춘다. 선보정공법이 시행되는 P4-P5 구간(그림 17) 있어서는 선보정 공법에 의하여 세그먼트에 발생하는 변형을 수용하기 위하여 레버링 보가 슬라이딩 될 수 있는 구조로 제작하여 설치하였으며, 선보정공법용 Jack을 지지하기 위한 가설 구조물을 설치하였다(그림 18, 19)

선보정공법의 적용을 위하여 Jacking시 사용 장비는 사용압력 600bar의 유압펌프 및 단동식 스쿠류 Jack(사용제한 200 ton)을 사용하였으며, Jack은 상부 단면의 4개소에 대칭으로 설치하고, 유압은 전체 Jack에 같은 압력이 작용하도록 시스템

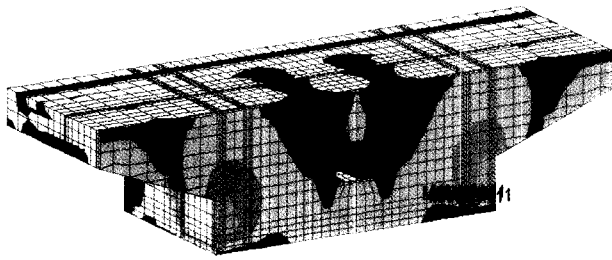


그림 16. 3차원 국부해석 결과(단부 다이어그램)

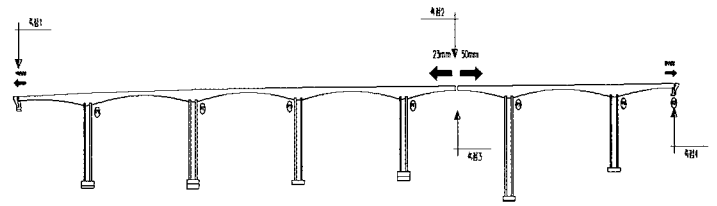


그림 17. 선보정력 작용 위치 및 개념도

을 구성하였다. 선보정공법 적용시 교량의 이동량을 측정하기 위하여 교대부에 변위량을 측정할 수 있는 측점을 설치하였으며(그림 20), key segment부에 전체 변위를 측정할 수 있도록 측점을 설치하였다. 하중은 100bar 씩 단계적으로 재하하였다.

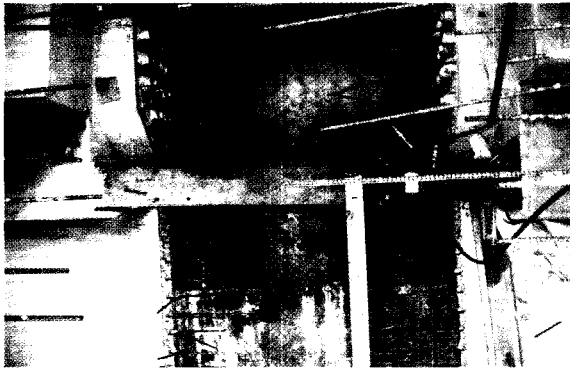


그림 18. Jack 설치 현황

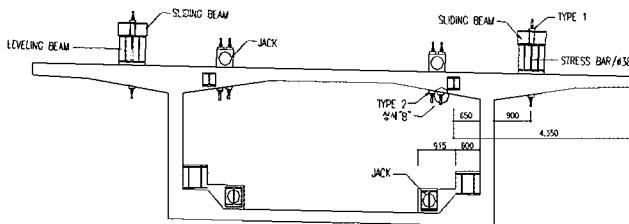


그림 19. 선보정공법 적용을 위한 가설 단면도

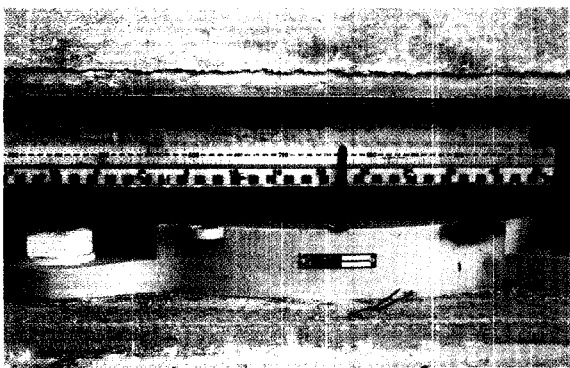


그림 20. 변위량 측정 현황

### 7. 맺음말

GS건설이 시공하고 있는 신촌교는 익산~장수간 고속도로에 시공되고 있는 장대교량으로서 국내 최장 경간의 FCM 교량이다. 본 공사는 설계에 있어서 콘크리트 장기적인 재료 특성에 의한 하중을 저감할 수 있도록 선보정공법을 적용함으로써 경제적인 교량설계의 방법을 제시하였으며, 시공에 있어서도 고소 작업에 따른 위험성을 가시설물의 개선을 통하여 기존의 시공 방법을 개선하였다.

현재 현장 공정은 2007년 12월을 목표로 하여 교량부대공사가 진행되고 있으며, 신촌교에 적용된 기술적인 내용들은 이후 유사한 건설 공사에 효과적으로 적용될 수 있기를 기대하며, 본 공사에 도움을 주신 많은 분들에게 감사의 말씀을 드립니다. □

### 참고문헌

1. 한국도로공사, "익산~포항간 고속도로 건설공사 실시설계 일반보고서(제5공구), 1994.
2. 최영환, 박상일, "신촌교 상부공 설계사례", 콘크리트학회지, 12권 3호, 2000, pp.85~91.
3. 서영화, 남열우, 김건석, 심재홍, "파이프쿨링에 의한 교량기초의 온도균열 저감 사례", 한국구조물진단학회 가을학술발표회 논문집, 2002.
4. 양주경, 최영돈, 최고일, "수화열 계측 및 파이프쿨링 시공사례", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 1994.
5. 최계식, 이상희, "켄틸레버 공법에 의한 PS Concrete 교량의 설계와 시공", 콘크리트학회지, 3권 2호, 2003, pp.35~45.
6. 김홍기, "강동대교 FCM 교량에 적용된 선보정공법", 콘크리트학회지, 15권 1호, 2003, pp.75~83.
7. 박종철, "서해대교 FCM교의 해석 및 시공", 콘크리트학회지, 11권 2호, 1999, pp.33~41.