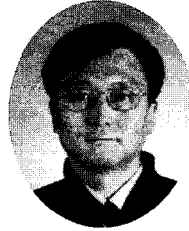


## 신촌교 상부공 설계 사례

- FCM 공법에 의한 PSC 박스 거더 형식 적용 -



최영환\*



박상일\*\*

### 1. 서 언

신촌교는 전주~함양 간 고속도로 노선 중 신촌~진안 구간에 가설된 교량으로서 최대 지간장 170m의 FCM(Free Cantilever Method)에 의한 PSC(Prestressed Concrete) 교량이며, 주요 제원은 <표 1>과 같다.

본 교량은 현재까지 국내에서 설계 및 시공된 같은 형식의 교량 중에서 최대의 지간을 갖고 있으며(현재 최대 지간장 165m, 서해대교 중 FCM 교량 구간), 기초로부터 교면까지 최대 높이가 104m에 달해 그 규모면에서 국내 최대 규모의 FCM 교량이라 할 수 있다. 특히 1,060m의 교량 전장에 있어서 상부 구조와 교각을 강결시켜 라멘 구조로 처리한 점은 국내 교량 설계 기술에 있어서 획기적인 발전이라 할 수 있다.

이러한 교량의 설계를 위하여 그동안 설계 시공되었던 국내의 FCM 교량의 경험 및 외국의 사례 등을

면밀히 조사 반영시켜 진일보한 교량 설계가 되도록 노력하였으며, 본고에서는 그 설계 내용을 요약하고자 한다.

표 1. 교량의 주요 제원

구 분	제 원	
위 치	전라북도 완주군 소양면 신촌리	
형식	상 부	P.S.C BOX 거더교(FCM)
	하 부	중공 양주 교각
	기 초	직접 기초, 현장 타설 말뚝 기초
연장	전주방향	$L = 93 + 5@170 + 117 = 1,060\text{m}$
	함양방향	$L = 113 + 5@170 + 97 = 1,060\text{m}$
폭원	전주방향	12.6m(2차로)
	함양방향	14.7m(3차로 : 오르막차로 포함)

### 2. 교량 형식 및 기하 형상 결정

#### 2.1 지간 및 상부 가설 방식 결정

\* 정회원, (주)동일기술공사 구조부 이사

\*\* 정회원, 한국도로공사 설계처 부장

교량의 형식 선정에는 경제성, 시공성, 구조적 안정성 및 미관 등이 일반적으로 고려되는 사항이다. 본 교량은 신촌리 구간 계곡부를 횡단하는 교량으로 지형 여건상 100 m에 달하는 고교각을 갖고 있어, 공사비와 미관 측면에서 볼 때 장지간으로 설정하는 것이 타당하다고 판단되었다. 지간이 교각 높이보다 작아질 경우 교량의 미관에 불리하게 되며, 120 m 지간으로부터 170 m 지간까지의 지간 변화에 따른 공사비를 검토한 결과 하부 공사비의 비율이 높은 관계로 지간이 짧을수록 전체 공사비가 증가되는 것으로 나타났다. 또한 하부에 통과되는 국도 등의 지장물을 감안하여 국내 최대의 170 m 지간을 택하게 되었다.

상기 지간과 비슷한 형식인 강상판 등의 다른 안도 고려해보았지만 고공에서의 가설에 따른 문제 및 경제성 등을 감안할 때 FCM에 의한 현장 타설 콘크리트 박스 거더 형식이 가장 타당하다고 판단되었다.

## 2.2 상부 구조의 형고

일반적으로 장지간의 FCM 교량의 형고는 지점부에서 1/16 ~ 1/18, 지간 중앙부에서 지간의 1/45 ~ 1/53을 취하고 있는 것으로 조사되었다. 신촌교에서는 지점부에서 지간의 1/17에 해당하는 10.0 m, 지간 중앙부에서 지간의 1/50에 해당하는 3.4 m를 취하여 일반적으로 적용되는 범위를 벗어나지 않도록 하였다. 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 적용토록 하였다.



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

그림 1. 교량 상부 구조의 형고

## 2.3 교각 형식

교각의 형식 결정에는 다음과 같은 사항들이 고려

되었다.

- 시공 중의 안정성
- 완공 후의 구조적 안정성
- 미관
- 유지 관리의 최소화

이와 같은 요인들을 복합적으로 검토한 결과, 종방향 변위에 의하여 교각에 발생하는 단면력을 최소화하고 시공 중 발생하는 불균형 모멘트에 의한 변형을 최소화하며, 유연성을 최대한 확보하기 위하여 중심 간격 10 m의 2-주 방식(twin-column)으로 채택하였으며, 교각 장치의 유지 관리 요인을 없애기 위해 상하부 강결 프레임 구조로 하였다. 가능한 한 전체 구조계를 프레임 형식으로 유도하기 위해서는 교각의 세장비가 커야 하므로, 각각의 교각은 교축 방향 두께 2 m의 중공 형식을 취하고 벽 두께는 50 cm로 하여 강성을 줄여 세장비를 크게 하였다.

이와 같이 하여 결정된 전체 구조 형식을 보면 <그림 2> 및 <그림 3>과 같다.

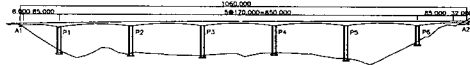


그림 2. 교량 종단면도, 교량 평면도

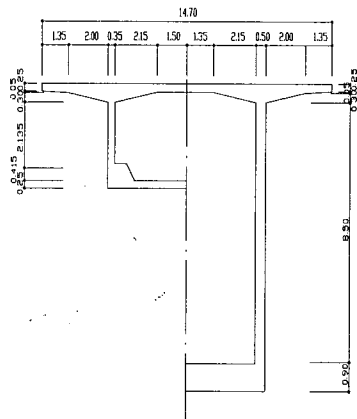


그림 3. 교량 횡단면도

### 3. 상세 설계

#### 3.1 개요

신촌교의 구조 설계는 다음과 같은 순서로 이루어졌다.

표 2 구조 설계 순서

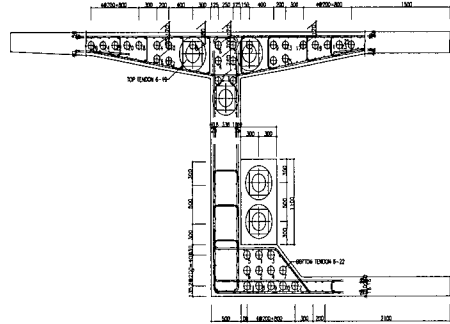
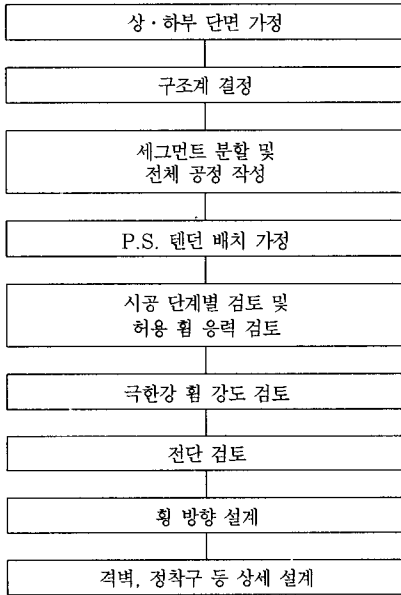


그림 4. 단면 내의 철근 및 텐던 배치

상기에서 결정된 단면 중 상부 바닥판 두께는 「도로교표준시방서」의 규정을 만족하며 상하 철근의 덮개, 철근 직경, 종횡 방향 프리스트레싱 강선의 배치를 고려한 최소 두께인 270 mm를 기본으로 하여 단면을 최소화하였다. 현치부의 두께는 텐던 정착구 설치를 위한 최소 두께를 확보하기 위하여 600 mm로 하였다. 하부 바닥판의 두께는 지간 중앙부에서 피복, 철근 및 종 방향 PC 강선 설치를 위한 최소 두께 250 mm로 하고 지점부에서는 압축력에 저항하기 위해 두께 950 mm로 하여 중앙부로부터의 거리에 비례하여 증가하도록 하였다.

#### 3.2 단면 결정

##### 3.2.1 상부 구조의 단면 상세 결정

상부 구조의 단면 상세는 다음과 같은 순서로 이루어진다.

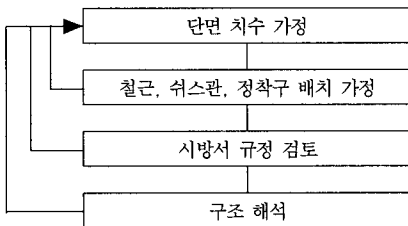


표 3. 단면 상세 결정 순서

위와 같이 하여 결정된 상부 구조의 단면은 <그림 3>에서 보여지는 바와 같으며 단면 내에 배치되는 쉬스관, 정착구 등을 고려하면 <그림 4>와 같다.

##### 3.2.2 교각 단면의 결정

교각의 단면은 시공의 안정성 및 완공 구조계의 구조적 요인 등을 고려하여 <그림 5>와 같이 결정하였다. 신촌교의 교각은 상단부터 기초까지 일정한 단면을 유지토록 하여 시공이 원활하게 하였으며 휨 방향 폭은 상부 구조의 폭보다 약간 크게 하여 안정감을 주는 모양을 택하였다.

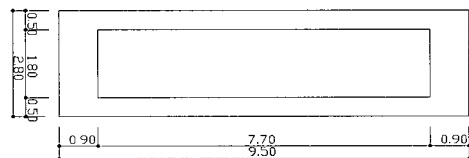


그림 5. 교각 단면

### 3.3 구조계 결정

신촌교와 같은 장경간 FCM 교량이 교차 장치를 갖는 경우, 4,000톤 정도의 수직 용량이 필요하게 되며 교차 장치의 교체시에는 이 하중 이상 들어 올려야 하는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 없애기 위하여 구조적으로 처리가 가능할 경우 상하부 강결 프레임으로 구조계를 구성하는 것이 바람직하다. 설계 초기 단계에서 <표 4>와 같은 2가지 구조계에 대한 내진 해석 및 길이 변화 등에 의한 교각 단면력을 비교하였다.

표 4. 구조계 비교

구분	교량 시스템 개요
6 FIXED	
4 FIXED	

두 구조계의 비교 결과 크리프, 건조 수축 및 온도 변화에 따른 단면력은 4점 고정식이 유리하나 지진 하중은 모든 교각을 강결시킬 때가 유리한 것으로 판단되어 전체 교각을 강결시키기로 하였다.

### 3.4 세그먼트 분할

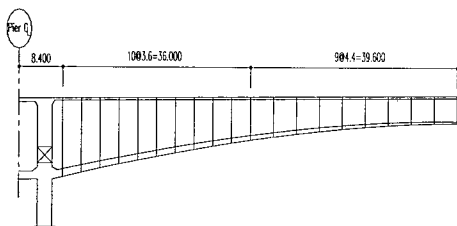


그림 6. 세그먼트 분할

세그먼트의 길이는 시공성을 감안하여 크게 두 종류로 나누어, 3.6 m 세그먼트와 4.4 m 세그먼트로 적

용하였다.

이는 세그먼트의 각 종류에서 최대 무게(약 180톤 내외)와 작업차 내에서의 팔 길이 효과, 전체 세그먼트의 갯수 등을 감안하여 결정하였다.

$$(3.6m \text{ Seg. 최대 무게} \sim 180\text{톤}) \times 3.6/2 = 324 \text{ t} \cdot \text{m}$$

$$(4.4m \text{ Seg. 최대 무게} \sim 130\text{톤}) \times 4.4/2 = 286 \text{ t} \cdot \text{m}$$

약 12% 정도의 차이로 작업차에 큰 무리를 주지 않는 것으로 판단된다.

### 3.5 공기 산정

FCM 교량은 장기간에 걸친 시공 과정에서 구조계가 변화하므로 이에 따른 크리프, 건조 수축의 영향이 설계에 반영되어야 한다. 따라서 설계시에 가능한 한 실제 상황에 맞는 공정이 예상되어야 한다. 신촌교의 설계시 가능한 실제 상황에 어긋나지 않도록 상대3교, 안양동교 등의 실제 시공 실적에 근거하여 다음과 같이 단위 공기를 잡고, 설계 공정에 반영하였으며 이에 의한 크리프, 건조 수축 해석이 수행되었다.

- 교 각 : 10일/seg(수직 상승 거푸집 사용)
- 주두부 : 120일/개소
- F/T 설치 해체 : 1.5개월/조
- 세그먼트 시공 : 15일/seg
- Key 세그먼트 : 30일/개소

### 3.6 종 방향 휨 해석 및 설계

종 방향 구조 해석에는 프리스트레스트 콘크리트 구조의 전용 해석 프로그램 RM Space 프레임을 사용하였다. 허용 응력 설계에 있어서 평상시, 즉 자중 상태에서는 가능한 한 모든 위치에서 압축 응력대에 있도록 하였으며 모든 사용 하중의 가장 불리한 하중 조합에 대하여 최대 휨 압축 응력  $146 \text{ kg/cm}^2$  (허용 압축 응력  $160 \text{ kg/cm}^2$ ), 최대 휨 인장 응력  $18.2 \text{ kg/cm}^2$  (허용 인장 응력  $30 \text{ kg/cm}^2$ )로 안전하게 설계하였다.

극한 휨 강도에 대하여 <표 5>와 같이 「도로교표준시방서」에 따른 하중 조합을 수행하여 최대 극한 모멘트에 대하여 검토되었다. 주요 부위의 극한강 검토 결과는 <표 6>과 같다.

표 5. 극한강 하중 조합

구 분	조합1	조합2	조합3	조합4	조합5	조합6	조합7
사 하중	1.30	1.30	1.30	1.30	1.25	1.25	1.30
프리스트 래싱 힘	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
크리프& 건조 수축	-	-	-	1.30	1.25	1.25	-
활 하중	215	-	1.30	1.30	-	1.25	-
풍 하중	-	1.30	0.65	-	1.25	0.63	-
지점 침하	-	-	-	1.30	1.25	1.25	-
온도 하중	-	-	-	1.30	1.25	1.25	-
지진 하중	-	-	-	-	-	-	1.30

표 6. 극한강 휨 강도 검토 결과 요약

(단위 : t·m)

구 분	정모멘트 부위		부모멘트 부위	
	최대 단면력	극한 저항 모멘트	최대 단면력	극한 저항 모멘트
상행선	18,978	30,484	150,665	167,736
하행선	17,409	28,123	160,016	222,500

### 3.7 전단 설계

전단 및 비틀림 설계는 「도로교표준시방서」에 준하여 수행되었다. 즉, 극한 하중에 대한 전단 설계를 수행하여 필요 철근량을 산정하였다. 그러나, FCM 교량에서는 자중의 효과가 지배적이므로 극한강 단면력에 대한 설계만 수행할 경우 상시에 전단 균열을 유발시킬 가능성이 있다. 따라서 사용 하중 상태에서의 주인장 응력을 검토하여, 균열 가능성이 있는 구간은 수직 강봉을 보강하도록 하였다. 이와 같이 강봉 보강이 요구되는 구간은 교량 시종점의 단부, 즉 형고 3.4 m 구간과 주두부로부터 7~16번째 세그먼트 구간이 해당되며  $\phi$  36 mm 강봉을 1 m 간격으로 배치하도록 하였다.

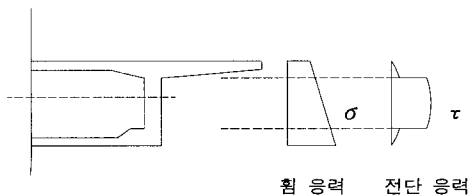


그림 7. 사용 하중 상태에서의 전단 검토

### 3.8 횡 방향 해석 및 설계

#### 3.8.1 적용 하중

횡 방향 설계에 작용되는 하중은 다음과 같다.

- 콘크리트 자중
- 2차 사 하중(포장, 난간 등)
- 횡 방향 긴장 효과
- 종 방향 텐던의 수직 분력(바닥 슬래브의 종 방향 텐던)
- 활 하중(DB-24 윤 하중)
- 온도 하중(상하연 온도차  $\pm 5$  °C)

#### 3.8.2 윤 하중 분포 폭의 산정

데크 슬래브를 복부 위치에 고정단을 가지며 슬래브의 두께에 따라 변단면을 가지는 유한 요소판으로 모델링하여 단면력을 산출한다.

판 해석에 의한 결과를 평면 보 해석 결과와 비교하여 영향계수를 계산하여 박스의 횡 방향 보 해석시 윤 하중을 영향계수로 감소시켜 재하하였다.

#### 3.8.3 구조 해석 및 설계

위와 같이 결정된 윤 하중과 기타 하중에 대하여 단위 폭을 갖는 프레임 구조로 횡 방향 해석을 수행하며, 이 때 산출한 단면력을 이용하여 횡 방향 긴장량 및 상·하부, 복부의 철근량을 결정한다.

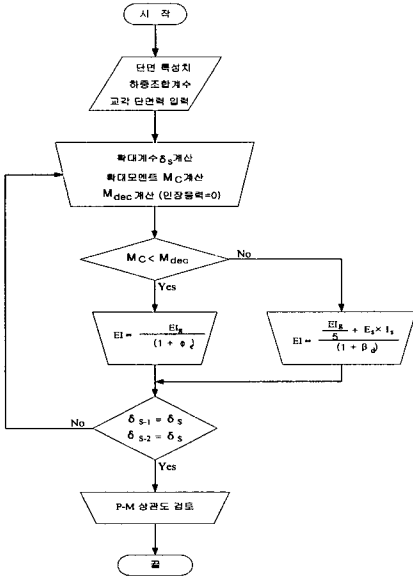
### 3.9 교각 설계

신촌교의 교각은 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 하였다. 이와 같은 교각 설계의 흐름은 <표 7>과 같다.

가장 불리한 하중 조합에 대한 교각 단면력은 <표 8>과 같으며 P-M 상관도를 통하여 얻은 철근 배치의 형태는 <그림 8>과 같다. 그림에서 보이는 바와 같이 2가지 기본 형태를 사용하여 경제적인 배근이 되도록 하였다.

또한 전체 교각이 라멘식으로 상부와 강결되어 있어 최외측 교각은 상시의 변형량이 커서 균열이 발생

표 7. 교각의 설계 흐름도



할 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 본 설계에서는 상시의 균열 폭을 면밀히 검토하여 허용 균열 폭 내에 들도록 설계에 반영하였다.

표 8. 교각의 단면력 요약

교각 하단	교각 1-1	교각 1-2	교각 2-1	교각 2-2	교각 3-1	교각 3-2
축력	6003.9	8742.3	7091.3	7860.9	10083.2	8356.1
확대 모멘트	17112.4	15765.3	10413.4	9052.2	6237.1	7156.3

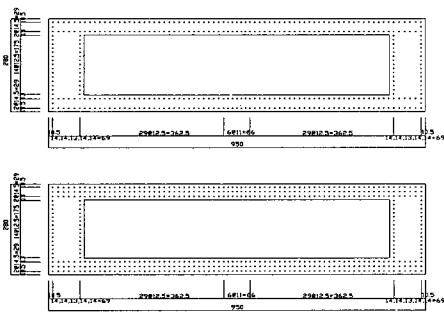
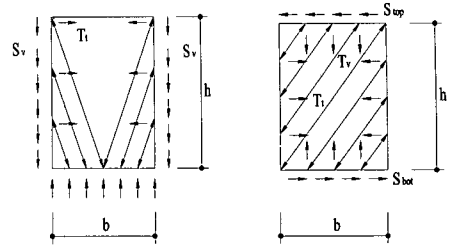


그림 8. 교각의 배근 형태

### 3.10 기타 상세 설계

신촌교의 설계에 있어서 격벽, 교각과 상부 구조의 연결부, 바닥 슬래브에 위치한 점검구 등과 같이 응력

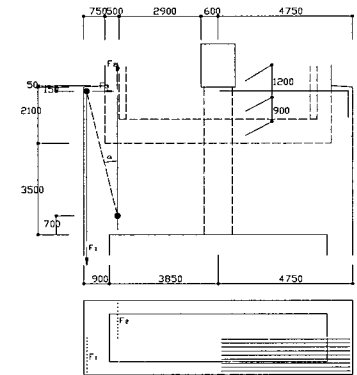
의 흐름이 원활하지 않은 부분은 Strut-Tie 모델을 적용하여 설계하였으며, FEM 해석을 통해 이를 검토하였다.



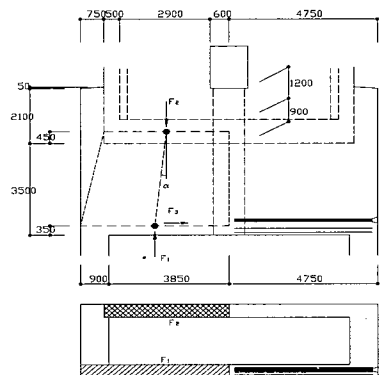
a) 전단에 대한 모델 b) 비틀림에 대한 모델

그림 9. 격벽 해석을 위한 Strut-Tie 모델

격벽은 전단 및 비틀림에 대한 Strut-Tie 모델을 위와 같이 구성하여 설계하였으며, 상부 구조와 교각의 연결부는 다음과 같은 추가 검토를 수행하였다.



a) 압축력의 전달에 대한 보강



b) 철근의 불연속에 따른 추가 보강

그림 10. 상부 구조 · 교각 연결부의 검토

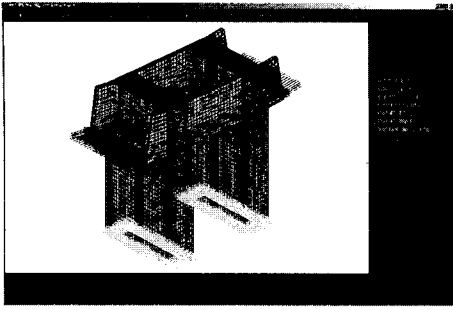


그림 11. 주두부에 대한 FEM 모델링

본고에서는 교대, 기초의 설계 등과 같은 일반적인 구조 설계 분야는 생략하기로 한다.

#### 4. 맺음말

신촌교의 설계에 있어서, 현재까지 설계된 FCM 교량과 비교할 때 다음과 같은 설계 기술의 발전 사항들을 보여준다.

- 1) 교각을 세장비가 큰 유연한 교각으로 설계함으로써 1 km에 달하는 전장을 라멘으로 처리하여 설계되었다.
- 2) 일반적으로 검토되지 않았던 전단 균열의 가능성 및 교각의 균열 제어 등을 설계에 반영하였다.

- 3) 격벽, 압축력이 큰 위치의 개구부, 교각과 상부 구조의 불연속 연결부 등과 같은 D-영역에 본격적으로 Strut-Tie 모델 해석 방식을 도입하였으며, 특별한 위치는 FEM 해석을 통해 검증토록 하였다.
- 4) 세장비가 100에 달하는 장주의 설계를 도입함으로써 미관 및 경제성에 유리한 설계가 될 수 있는 발판이 되었다.

또한 과거 국내 FCM 교량의 설계 및 시공 자료를 토대로 위와 같은 사항들이 반영되어 앞으로 특수 교량 설계 발전에 큰 도움이 될 것으로 보여진다. □

#### 참고문헌

1. 도로교표준시방서, 건설교통부, 1996
2. 콘크리트표준시방서, 건설교통부, 1996
3. STANDARD SPECIFICATION for Highway Bridges, AASHTO, 1996
4. 콘크리트 교량가설 특수공법 설계·시공·유지관리 지침, 건설교통부, 1995
5. Prestressed Concrete Bridge, Christian Menn
6. Prestressed Concrete Structures, Michael P. Collins
7. Modern Prestressed Concrete Highway Bridges Superstructures, James R. Libby