

Extradosed PSC교의 설계

: 국도대체우회도로(둔덕~주삼) 건설공사 "평여 2교" 설계사례

- Design for Extradosed PSC Bridge -



유웅석*



최영태**



김동근***



최세훈****



조정식*****

1. 서 론

서해대교, 영종대교 및 영흥대교 등 일련의 케이블을 이용한 장대교량의 성공적인 건설은 우리나라의 교량설계 및 시공기술에 있어 새로운 전환점을 맞이하는 계기가 되었다. 이러한 추이에 맞추어 최근의 교량설계는 사하중의 경감, 형(거더)의 경량화, 시공성, 경제성 및 유지관리 향상을 도모하며, 특히 지역적 특성에 맞는 이미지를 부각한 랜드마크(landmark)의 기능 및 주변환경과의 조화면에 많은 주안점을 부여한다. 그러나 교량형식 선정시 경험에 의해 기입증된 안정성 및 경제성을 확보한 형식으로 설계자의 사고가 제약되기 때문에 신기술, 새로운 형식의 교량이 우리나라에 도입되기 어려운 실정이다. 특히 장경간이라고 할 수 있는 100 ~ 200 m에 적합한 교량 형식에 대한 실적자료가 취약한 관계로 단지 상징성이나 경관의 의미만으로 경제성이 없는 사장교가 적용될 수

있고, 경간을 조정하여 100 m 이내의 중·소경간을 계획, 교차 대상물의 기능유지에 제약을 주거나 하부공사비의 증대 등 또 다른 문제점이 부각될 수 있다.

따라서 PSC 거더교 및 상자형교 형식의 중·소경간 교량과 사장교나 현수교 형식의 장대 경간 사이에 적용될 수 있는 효율적인 교량형식이 요구되었고, 이에 적합한 형식으로써 원활한 구조적 연속성을 갖고 형교와 사장교의 장점을 공유한 복합적 특성을 갖는 새로운 형식의 교량인 Extradosed PSC교가 개발되었다.

PSC 형교는 PS 강제 편심량이 거더의 상·하연 이내로 제한되어 있어 장시간 채택시 형교의 증가로 인한 중량화로 제한이 뒤따르게 된다. 그러나 형 유효높이 이상으로 PS 강재를 외부로 편심시킨 Extradosed PSC교는 일반 형교에 비해 자중 및 PS 강제 소요량이 작아 경제적이며, 사장교에 비해 사재의 응력변동이 작고 주탑 높이를 현저하게 낮출 수 있어 100 ~ 200 m에 적합한 신개념의 교량 형식이다.

본고에서는 Extradosed PSC교의 개념 및 특징을 소개하고, 당사에서 시공중인 국내 최초의 Extradosed PSC교인 평여 2교

(국도대체우회도로(둔덕 ~ 주삼) 건설공사)의 설계과정을 간략히 기술하고자 한다.

2. Extradosed교의 개념

종래 콘크리트 속에 긴장재를 배치하여 프리스트레스를 도입하는, 이른바 내적 프리스트레싱(internal prestressing)은 대다수의 PSC 구조 교량에 사용되는 방법으로 긴장재의 편심을 단면내에서 처리해야 하므로 장경간 적용시 사하중 및 형교의 증가 등으로 인해 그 적용에 한계가 있어왔다. 이러한 단점을 개선하고자 긴장재를 단면 밖으로 연장하는 외적 프리스트레싱(external prestressing)의 개념을 이용하는 방법이 연구되었고 그 일환으로 1988년 프랑스의 Jacques Mathivat에 의해 “~을 개량하기 위해 요소를 첨가한 교량”이라는 의미의 Extradosed교가 소개되었다.

경관측면에서의 Extradosed교는 형상 개념도인 <그림 1>에서 나타나듯이, 상징성이 적은 형교와 상징성을 크게 강조하는 사장교의 중간적 특성으로 적당한 상징성과 균형미가 조화를 이루고, 구조적인 측면에서는(<그림 2> 참조) 주형과 외부 케이

* SK건설 토목사업본부장

** SK건설 토목사업본부 상무이사

*** SK건설 토목기술팀장

**** SK건설 토목기술팀 부장

***** SK건설 토목기술팀 과장

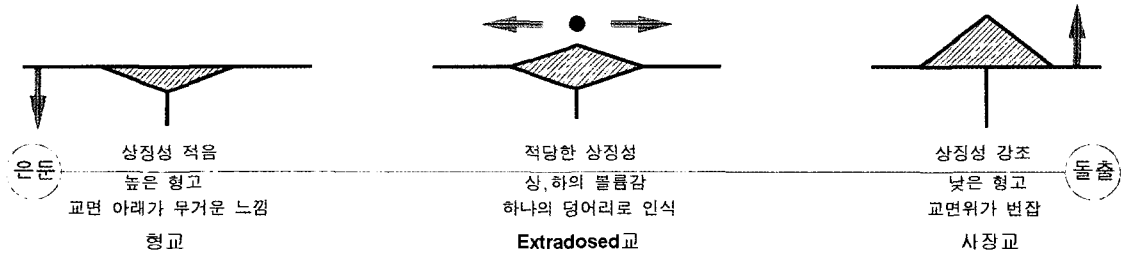


그림 1. Extradosed교의 형상 개념도

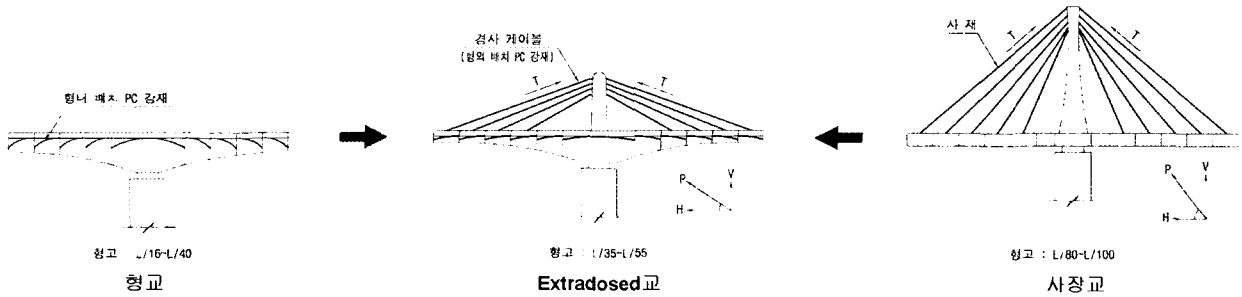


그림 2. Extradosed교의 구조 개념도

블(이하 사재)의 기능분담에 있어 사장교는 대부분의 하중을 사재가 부담하는 반면, Extradosed교는 주형과 사재가 공동으로 분담하는 형식으로 특히, 지점부의 거동을 개선하기 위한 목적으로 사재가 사용됨으로서 낮은 주탑과 적용이 가능해 사재의 연직 하중 분담률을 크게 줄일 수 있다.

3. Extradosed교의 특징

3.1 형고

Extradosed PSC교는 단면력에 대하

여 주형의 강성으로 저항하고 사재에 의한 대편심 모멘트를 도입, 거동을 개선하는 구조 형식이므로 주형이 사재에 지지되어 주형에 최소 필요량의 강도만을 부여하는 사장교와는 개념이 다르다. 따라서 형고비 (형고/중앙지간장)가 지점부 1/30 ~ 1/35, 중앙부 1/50 ~ 1/60 정도로 PSC 형교의 1/15 ~ 1/17에 비해서는 상당히 낮게 되어 있는 반면 지간장에 관계없이 형고 2.0 ~ 2.5 m를 채택하는 사장교에 비하면 약간 높아 <그림 3>과 <그림 4>와 같이 형교와 사장교의 중간 특성을 보인다. 이러한 특성으로 인해 상부구조 가설

시 이동 작업차의 시공 설비를 그다지 크게 할 필요가 없고, 통상의 캔틸레버 공법과 동일한 관리방법으로 시공할 수 있는 장점이 있다. <그림 4>에서 환산 지간장이란 함은 3경간 이상의 교량에서는 최대지간장, 2경간 이하의 교량에서는 주경간장을 1.8배하여 3경간으로 환산한 것을 말한다.

<그림 5>는 최근까지 일본에서 건설된 Extradosed교에 대한 자료를 바탕으로 환산지간장 대비 콘크리트 물량을 표시한 것으로 지간 100 ~ 200 m 적용에 콘크리트량이 약 $1.00 \text{ m}^3/\text{m}^2$ 로 설계됨을 알 수

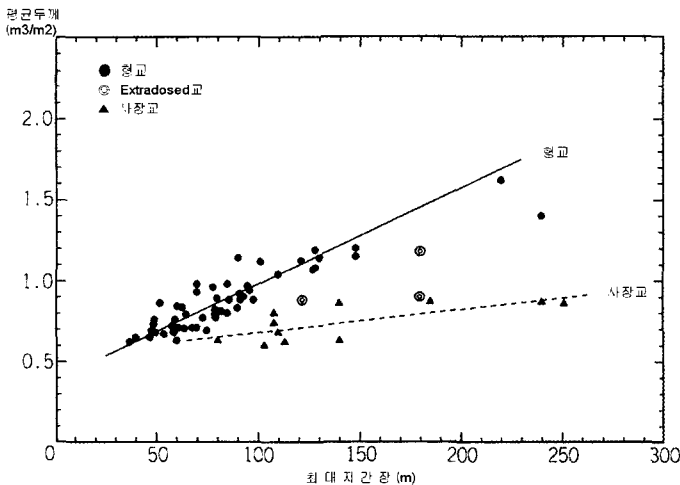


그림 3. 최대 지간장과 주형 콘크리트 평균두께

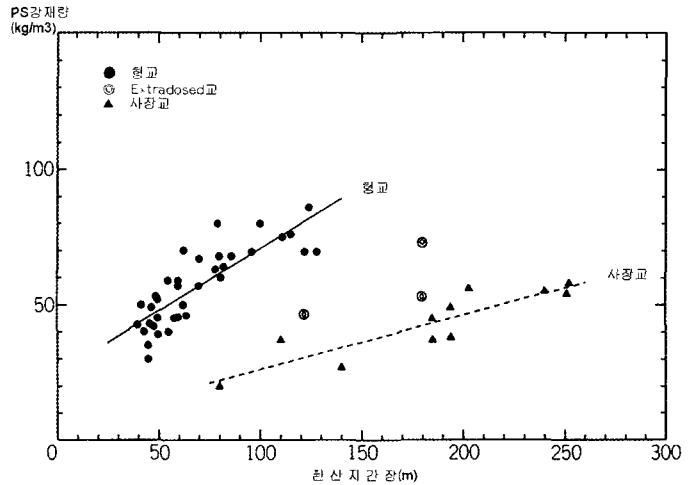


그림 4. 환산 지간장과 PS 강재량

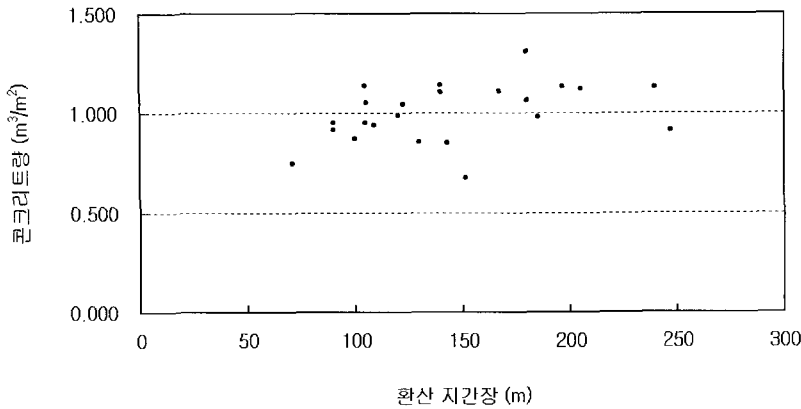


그림 5. 환산 시간장과 단위면적당 콘크리트량의 관계

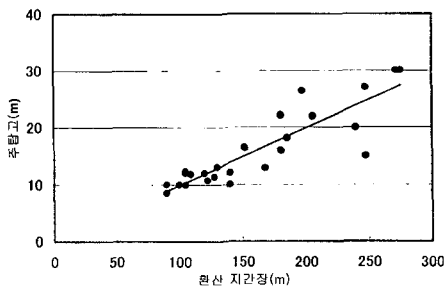


그림 6. Extradosed교의 주탑고

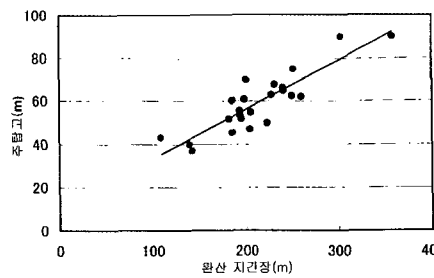


그림 7. 사장교의 주탑고

있다. FCM 공법을 적용한 지간 40 ~ 60 m의 PSC 상자형 연속교가 평균 1.00 m³/m² 정도인 것을 감안할 때, <그림 5>는 Extradosed교의 특성을 잘 나타내어 준다고 할 수 있다.

3.2 주탑

Extradosed PSC교의 주탑고비(주탑고/중앙지간장)는 1/8 ~ 1/12로 사장교에 비해 현저히 낮다. 이는 주형을 거치하기 위해 탄성지점의 의미를 갖는 사장교와는 달리 주형에 프리스트레스를 주기 위해 유효 편심 높이만큼만 주탑을 계획하는 Extradosed PSC교의 구조적 차이에 기인한다. (<그림 6 ~ 그림 7> 참조)

이러한 낮은 주탑고로 인하여,

- 사재 장력의 연직 성분이 작아 활하중에 의한 응력변동이 사장교에 비해 작아져 피로에 큰 영향을 안 받으며, 주탑의 축력도 작아 좌굴 방지를 위한 가로보의 배치가 필요없다. 가로보의 배치는 유지 관리 면에서도 차도 상공에서의 고공작업이 필요 없으므로 큰 이점이 될 수 있다.

- 복잡하기 쉬운 주탑이 단순화됨에 따라 시공성이 향상된다.

- 사재의 각이 작아 그라우팅 주입을 일괄로 행할 수 있다.

- 주탑이 경량화됨으로써 내진성이 향상된다.

주탑에서의 사재 정착은 낮은 주탑고로 인해 주탑정부에 여러단의 사재를 모아 고정하는 것은 어렵기 때문에 일반적으로 새들을 통한 관통고정방식을 취하여 케이블을 연속화 시킨다.

새들구조는 복잡하기 쉬운 주탑구조를 단순화하여 시공성을 향상시키고, 사재 간

격(정착 간격)을 작게할 수 있어 높이가 낮은 주탑이지만 사재의 편심량을 크게 확보할 수 있는 장점이 있다. 다만, 시공 및 공용중 좌우 사재 장력차로 인한 사재의 미끄러짐을 방지하기 위해 장력전달 메커니즘이 요구되는데, 일반적으로 이중관(내·외관)을 사용하여 사재는 내관과 그라우팅으로 부착시킨 후, 내관을 고정시키는 방법 등을 사용한다. (<그림 8> 참조)

3.3 사재의 응력변동과 안전율

Extradosed PSC교와 사장교는 사재에 의해 보강된 교량이라는 점에서 같은 형식으로 볼 수 있지만 사재의 안전율을 각각 1.67(0.6 f_{pu})과 2.5(0.4 f_{pu})로 제한한다는 큰 차이가 있다. 여기서, f_{pu}는 강재의 극한인장강도를 의미한다.

사장교는 사·활하중비, 활하중 응력의 발생빈도, 2차응력의 영향 및 응력의 불균일성 등을 고려하여 안전 확보 차원에서 높은 안전율을 요구하는데 비해, Extradosed PSC교는 사장교와 비교해 활하중에 따른 사재의 응력변동이 작아 낮은 안전율의 적용이 가능하다. 사재의 응력변동은 주형의 강성, 지점 조건 및 주탑 높이의 영향을 받는데 Extradosed PSC교는 주탑이 낮아 사재의 연직 성분 신장량이 작으며, 주형의 강성이 커서 사재의 하중분담률이 작기 때문에 사재의 응력변동이 작게 된다.

일본에서 실제 시공되어진 교량을 대상으로 조사한 결과를 보면 Extradosed PSC교 사재의 연직하중분담률($\beta =$ 사재

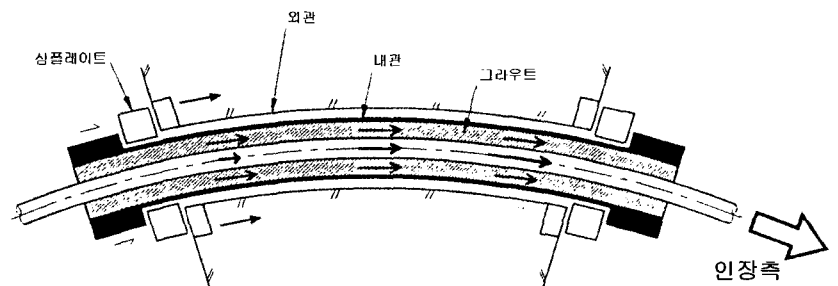


그림 8. 내관과의 부착에 의한 장력차 전달 메커니즘

표 1. Extradosed PSC교와 사장교의 비교

구 분	Extradosed PSC교		사장교	
	중간 지점부	중앙부	중간 지점부	중앙부
형고/지간장	1/30 ~ 1/35	1/50 ~ 1/60	1/80 ~ 1/100	
주탑고/지간장	1/8 ~ 1/12		1/3 ~ 1/5	
사재	허용응력	0.6 f_{pu}		0.4 f_{pu}
	역할	•연직 반력을 일으키지 않고 대편심에 의하여 주형의 수평방향 프리스트레싱만을 일으킴 •주형의 보강재 역할		•주형에 대하여 탄성지점의 역할을 하여 연직 반력을 일으킴 •주형이 보강재 역할을 하며 주부재는 사재임
	피로	•활하중에 대한 응력변동이 매우 작아 문제시 않됨 •사재의 응력변동량 5 kg/mm ² 이내		•응력변동이 커서 문제시 됨 •사재의 응력변동량 10 kg/mm ² 이상
	시공	•시공중에 사재장력 조정이 불필요 •사재 재긴장에 의한 주형의 응력 및 변위 개선이 어려움		•시공중에 사재장력 조정이 필요 •사재 재긴장에 의한 주형의 응력 및 변위 개선이 용이
주탑 정착방법	관통 고정 방식		분리 고정 방식	
격벽	주형이 광폭이거나 일변 지지인 경우 하중분배를 고려한 격벽 설치		각 사재에 설치	

주) 본고에서 논하는 사장교는 PC 사장교이며, 지간장은 최대 지간장을 의미함.

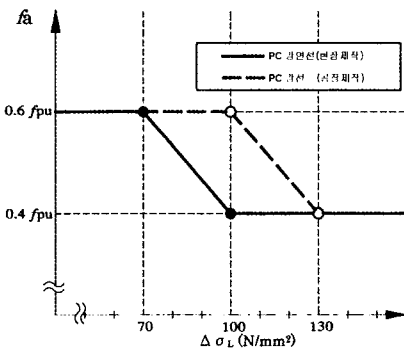


그림 9. 사재의 응력변동에 따른 허용응력

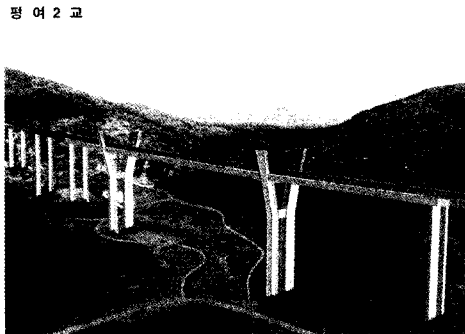


그림 10. 평여 2교 조감도

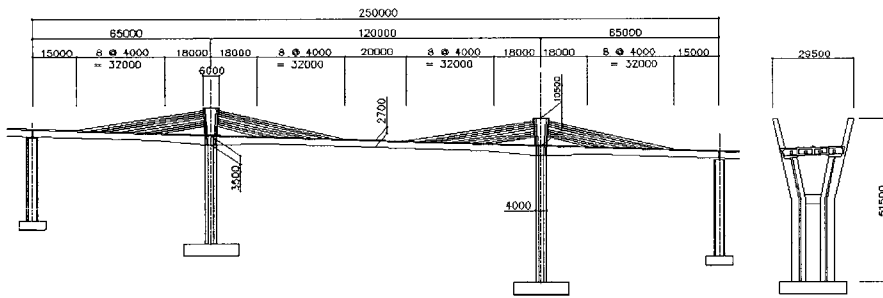


그림 11. 평여 2교 일반도

의 분담하중/전체 연직하중, %)은 약 30%, 응력변동은 약 5 kgf/mm² 나타났으며, 이 값을 두 형식의 교량을 구분하는 지표(parameter)로 사용한다. 특히 응력변동은 CEB-FIP의 스트랜드 피로한계치인 8 kgf/mm² 보다 작고, K. K. Ryals 등이 추천한 피로 제한치 7 kgf/mm²를 만족한다. 이를 근거로 하여 사재의 허용응력을 설정하는 방법으로 <그림 9>와 같은 판단식이 제시되었으며 이는 현재까지

건설된 사장교의 사재 안전율에 부합되며 Extradosed PSC교 적용에도 적합하다고 사료된다. 따라서 Extradosed교를 계획할 시에는 언급한 여러 사항들에 대해 면밀히 검토한 후 사재의 허용응력을 설계자 임의로 결정하는 것이지, 무조건 어떤 기준값을 따르는 것은 아니다.

이상과 같은 Extradosed PSC교의 특징을 사장교와 비교하여 정리하면 <표 1>과 같다.

4. 평여 2교의 설계

4.1 공사 개요

평여 2교는 여수-순천-전주를 잇는 구간선도로 구축의 일환으로 여수시에서 건설 중인 국도대체우회도로(둔덕 ~ 주삼) 건설공사에 적용된 우리나라 최초의 Extradosed PSC교로서 <그림 10>과 <그림 11>에 그 조감도와 일반도를 도시하였다.

평여 2교는 주경간장이 120 m, 측경간장이 65 m인 교장 250 m(65.0 + 120.0 + 65.0)의 3경간 연속교 형식으로 그 주된 특징은 <표 2>와 같다. 상부구조는 교각과 강결 일체로 되어 있고, 직선 및 곡선의 평면선형에 제약을 받지 않으며 고(高)교각에 따른 시공성 향상을 위해 FCM 가설공법으로 계획하였다. 또한 케이블의 배치는 2면 지지형식이며 선형 특성상 발생할 수 있는 무아레 간섭(주기적인 무늬가 겹쳐서 원래의 주기보다 큰 무늬를 만드는 현상, 무아레(moire))는 프랑스 말로 '물결무늬' 방지하기 위해 하프형식을 채택하였다. 교량의 하부구조는 벽식 교각을 피하여 개방감을 느낄 수 있

표 2 공사 개요

교량형식	3경간 연속 Extradosed PSC교
교량등급	1등급교
교 장 폭 원	250 m (= 65 m + 120 m + 65 m) 23.5 m (왕복 4차로)
평면선형	직선 + Clothoid + R870 m
중단구배	s = -3.37 %

표 3. 사용재료 및 수량

구분	사양	단위	수량	
주형	콘크리트	$f_{ck} = 400 \text{ kgf/cm}^2$	m^3	5,757
	PS 강선	SWPC 7B - 15.2 mm	tonf	191
		SWPC 19 - 21.8 mm	tonf	28
	철근	$f_v = 4000 \text{ kgf/cm}^2$	tonf	923
주탑	콘크리트	$f_{ck} = 400 \text{ kgf/cm}^2$	m^3	329
	철근	$f_v = 4000 \text{ kgf/cm}^2$	tonf	68
사재	PS 강선	SWPC 7B - 15.2 mm	tonf	74

표 4. PSC 상자형교와 Extradosed PSC교의 PS 강재량 비교

구분	바닥판 단위면적당 PS 강재량 (tonf/m ²)	콘크리트 단위체적당 PS 강재량 (tonf/m ³)
PSC 상자형교	0.083	0.061
Extradosed교	내부강재	0.037
	사재포함시	0.050

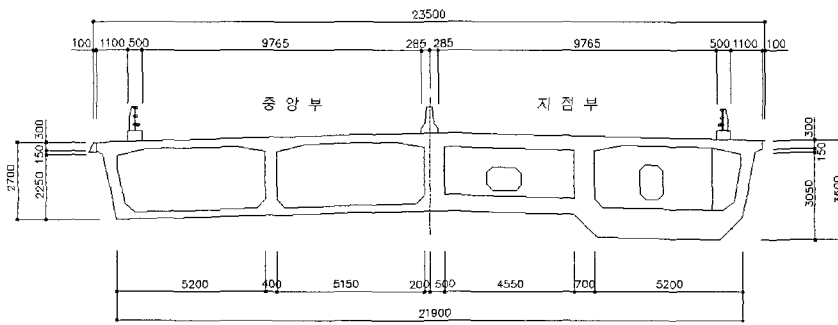


그림 12. 주형단면도

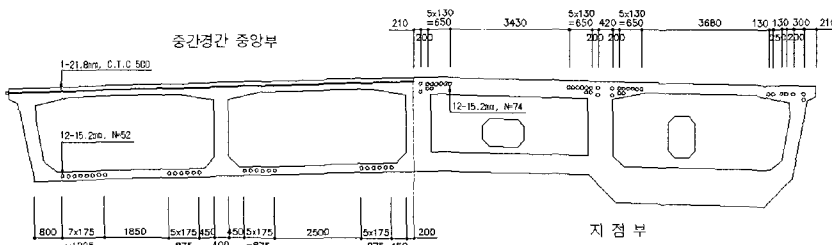


그림 13. 내부강선 배치도

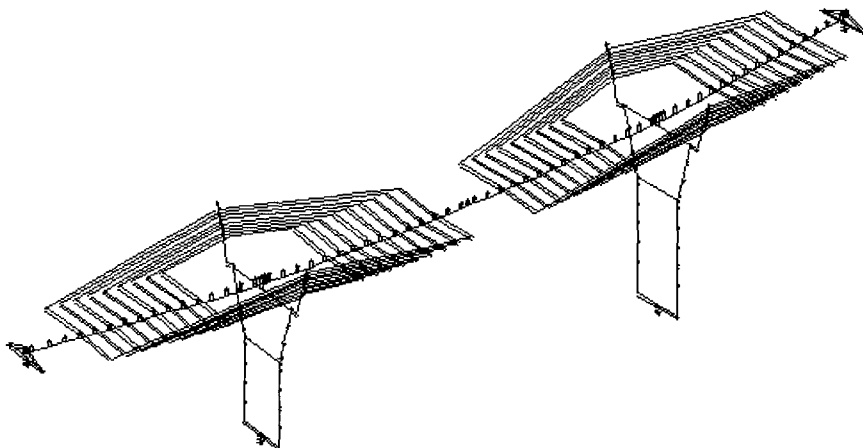


그림 14. 3D 골조해석 모델

는 Y형 2주식 라멘형식을 채용하였으며, 기초는 경암층에 지지되는 직접기초로 설계하였다. <표 3>에는 사용재료 및 수량을 정리하였다.

4.2 설계 개요

4.2.1 주형

주형의 단면은 일반 PSC 상자형교와 같은 형식으로 계획되었다. 형고는 지점부 3.5m, 중간 중앙부 2.7m로 형고비 각각 1/34과 1/44로써 일반 PSC 상자형교 형식과 비교했을 때 지점부에서 절반 정도의 값을 취하는 것을 알 수 있으며, 내부 지간장은 일반적으로 적용되는 제한치가 6m임을 감안하여 5.15m로 계획, 총 4실(cell)의 형식을 채택하였다.

주형의 PS 강선 배치 계획은 <그림 13>과 같다. 캔틸레버 강선은 SWPC 7B 15.2 mm × 12EA - 74본, 연속화 강선은 SWPC 7B 15.2 mm × 12EA - 52본, 횡방향 강선은 SWPC19 21.8 mm × 1EA를 500 mm 간격으로 배치하였다. 횡방향 강선의 간격은 본교량의 상부 플랜지에 캔틸레버부가 배제되어 있는 것을 감안하여 일반 PSC 상자형교에 비해 조밀하게 배치를 하였다. 사용 PS 강재량을 「콘크리트 교량 가설 특수공법 설계·시공·유지관리 지침」의 FCM 공법을 적용한 일반 PSC 상자형교의 평균치와 비교하면 <표 4>와 같다.

주형의 설계는 2차원 모델을 통한 초기 치 해석, 평면선형을 고려한 3차원 모델을 이용한 검증 및 시공단계해석을 통해 수행하였다. 또한 전체계 FEM 해석을 하여 횡형(격벽)에 작용하는 응력분포, 사재장력 유효전달범위, 주두부 및 주탑부 국부 응력 및 주형 각 웨브의 전단력 분담률 등을 검토하였다. (<그림 14, 15> 참조)

(1) 주형의 응력 검토

설계하중 작용시 주형의 휨모멘트도는 <그림 16>와 같다. 그림에서와 같이 사재가 탄성지점 역할을 하는 사장교와는 달리

Extradosed PSC교의 휨모멘트는 일반 형교와 같은 양상임을 알 수 있다.

전사하중시(全死荷重時: 고정하중 + 프리스트레스력 + 사재조정력 + 크리프 + 건조수축)에는 콘크리트의 인장응력 발생을 허용하지 않았으며, 주형 휨모멘트 및 사재 장력이 주형의 강성변화에 민감하지 않다는 점 등을 고려하여 공용중 활하중에 대해서는 허용 휨인장응력($f_{ta} = 32 \text{ kgf/cm}^2$) 이내로 제한하는 partial prestressed 구조로 설계하였다.

주형의 응력 검토는 2D 완성계해석, 3D 완성계 및 시공단계 해석 등에 대해 모두 검토하여 구조물의 안전성을 확인하였다. <그림 17>은 3D 해석을 통한 하중 조합 「주하중 + 주하중에 해당하는 특수 하중 + 온도 + 풍하중」에 대한 상·하연 응력의 최대·최소값을 도시한 것이다.

주두부에서 주형의 외측 셀(cell)은 교각에 직접 지지되어 있지만 내측 셀은 간접 지지되어 있어 골조해석을 통하여 정확한 응력상태를 파악하기는 곤란하다. 따라서 FEM 상세해석을 통해 주두부의 정확한 응력분포와 국부적인 응력집중 여부를 아래 5가지 하중조합에 대하여 검토를 실시하였다.

- i) 자중 + 프리스트레스 + 케이블 조정 하중 + 교면하중
- ii) 자중 + 프리스트레스 + 케이블 조정 하중 + 교면하중 + 활하중 편측재하
- iii) 자중 + 프리스트레스 + 케이블 조정 하중 + 교면하중 + 활하중 양측재하
- iv) 자중 + 프리스트레스 + 케이블 조정 하중 + 교면하중 + 지진하중(교축방향)
- v) 자중 + 프리스트레스 + 케이블 조정 하중 + 교면하중 + 지진하중(교축직각방향)

주두부에 배치된 곡선형상의 횡방향 강선은 등가하중(equivalent load)으로 치환하였고, 지진하중에 대하여서는 다중모드 스펙트럼 해석에 의한 결과를 모델에

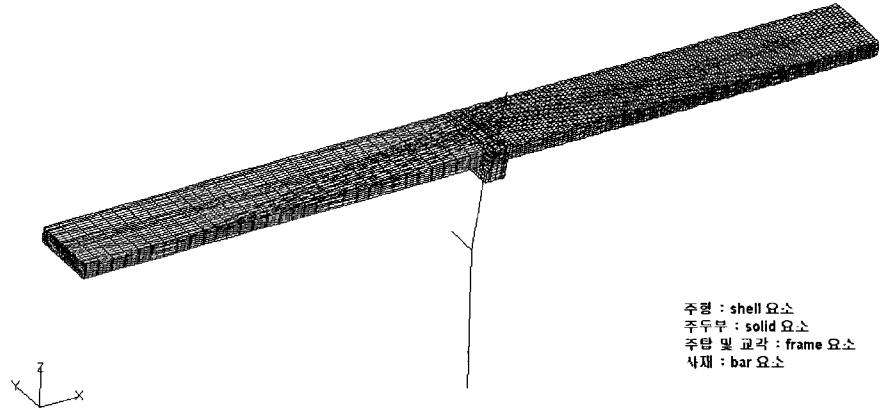


그림 15. FEM 해석 모델

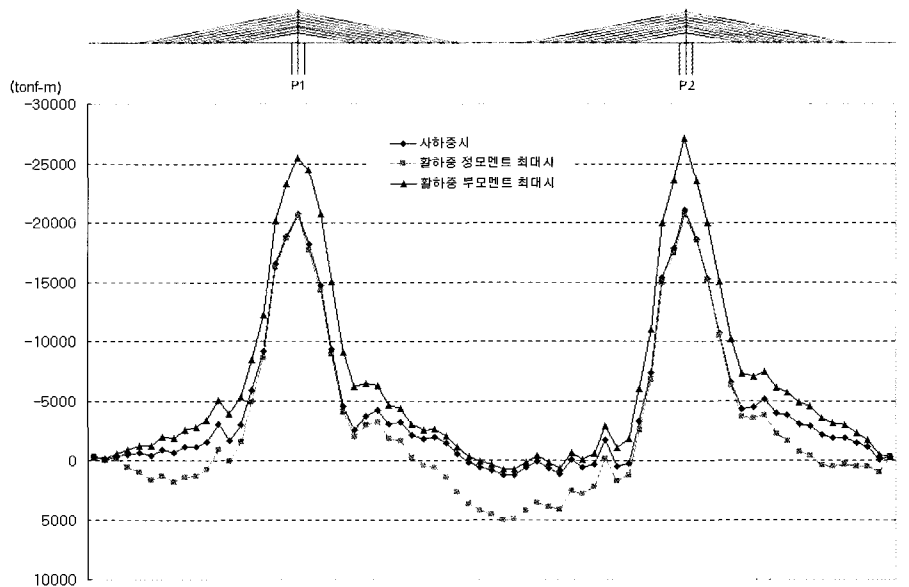


그림 16. 하중별 주형의 휨모멘트도

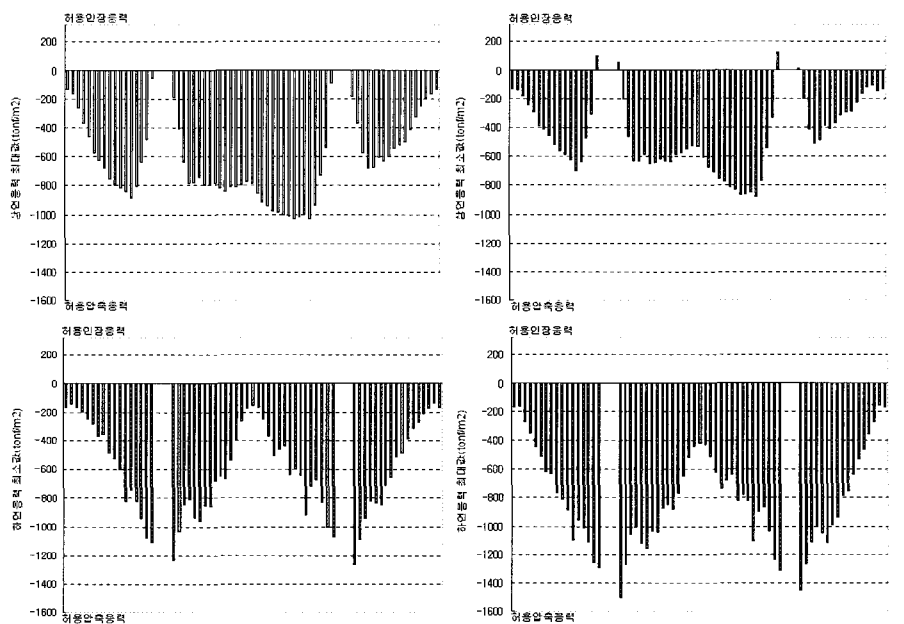


그림 17. 주하중 + 주하중에 해당하는 특수하중 + 온도 + 풍하중에 대한 응력의 최대·최소값

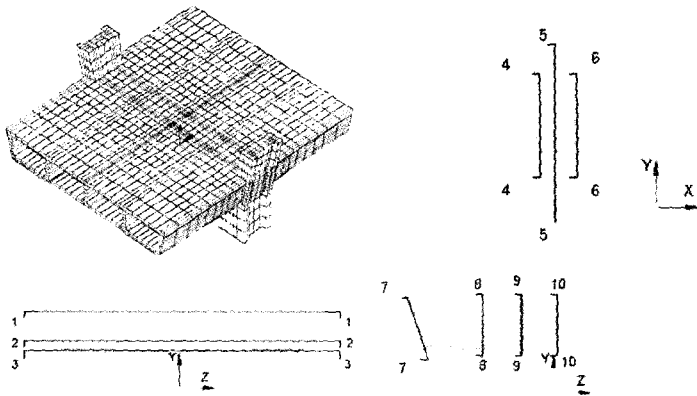


그림 18. 주두부 FEM 모델 및 응력 검토 단면

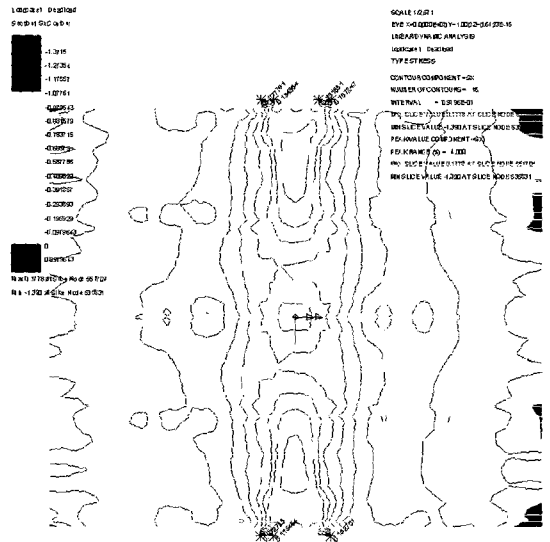


그림 19. 단면 1-1의 교축방향응력(Sx)

직접 적용할 수 없어 각 방향 관성력에 탄성진동응답계수(Cs)를 적용한 값을 사용하였다. 수직응력, 전단응력 및 주응력에 대하여 (그림 18)과 같이 총 10개의 단면에 대한 검토를 수행한 결과, 일부 국부적인 초과응력이 발생하였으나 주두부의 매우 국소한 부위(주탑과의 경계부)에 한정되어 있고 응력구배가 매우 심한 것을 감안하여 전체적인 구조물의 안정성과는 직결할 수 없다고 판단하였다. 그 이외의 모든 검토 단면에서의 응력은 허용응력을 만

족시켰다.

사재는 4m 간격으로 설치 되어있으나, 각 정착부에 일률적으로 사재정착 횡형(격벽)을 설치하지 않고 12m에 한 개씩 설치하였다. 일반적으로 Extradosed교에서는 일면 주탑 형식이거나 주형이 광폭인 경우를 제외하고는 사재정착부에 횡형을 설치하지 않으나, 하중분배를 원활히 하고 주형의 변형을 방지할 목적으로 횡형을 설치하였으며, 횡형의 영향에 의한 주형의 횡방향 거동 파악을 위해 별도의 FEM 해석을 수행,

안전성을 확인하였다. ((그림 20) 참조)

(2) 사재 장력의 전달상태

(그림 21)은 사재 장력에 대한 축방향 응력분포를 나타낸다. 응력의 전달 상태는 사재 장력 작용위치의 다음 사재 위치(L = 4.0)에서는 차이를 보이지만 사재 2개가 떨어진 위치에서부터는 주형의 전단면이 대체로 균등한 응력상태가 되는 것을 확인할 수 있다. 이를 근거로 사재 장력의 연직방향 성분은(전단력 및 모멘트) 작용점부터, 수평방향 성분은(축력) 힘이 전달되는 각도를 45°로 가정하여 유효한 단면까지의 거리를 11m로 결정, 설계에 반영하였다. 기존의 도로교 표준시방서에는 규정한 내부 프리스트레스힘의 전달각도인 $\tan\beta = 2/3$, 즉 33°와 비교한 결과는 최대 3 kgf/cm²의 미소한 응력 차이를 나타내었다.

(3) 웨브의 전단력 분담률

주형은 4실(cell) 상자형으로 2개의 외측웨브와 3개의 내측웨브로 구성되어 있다. 일반적으로, 전단력에 대한 검토는 각 웨브가 힘을 균등 분배한다는 가정하에 응력을 산정하나, 본 교량은 횡형(격벽)이 부분적으로 설치되어 있고 사재가 정착되어 있는 점을 감안하여 별도로 FEM 해석을 수행하여 정확한 전단력의 분담률을 산정하였다.

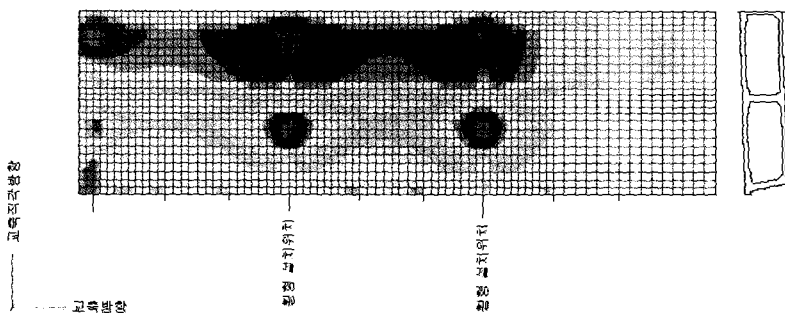


그림 20. 주형 상부 슬래브의 교축직각방향 응력

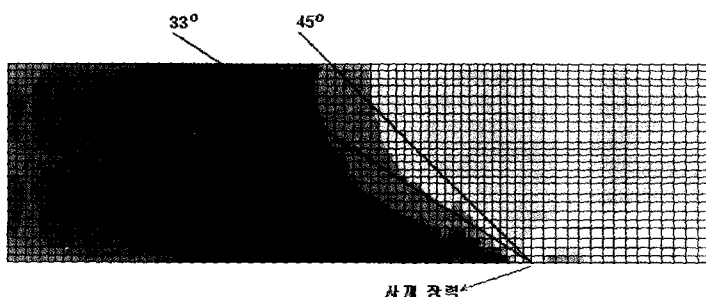


그림 21. 사재장력에 의한 응력분포

표 5. 웨브의 전단분담률

사재 위치	웨브	분담률			할증계수 k
		외측웨브		내측웨브	
		71, 75	72, 74	73	
S	L	0.827	1.213	0.920	1.09
	R	1.073	1.037	0.781	1.03
S1 - S2		1.080	1.038	0.764	1.03
S _i	L	1.097	1.023	0.760	1.04
	R	0.894	1.094	1.023	1.04
S2 - S3		0.811	1.144	1.089	1.06
S _i	L	0.776	1.171	1.106	1.07
	R	1.078	0.966	0.911	1.03
S3 - S4		1.081	0.968	0.901	1.03
S _i	L	1.085	0.973	0.884	1.03
	R	1.355	0.788	0.713	1.14
S4 - S5		1.385	0.773	0.684	1.15
S _i	L	1.419	0.749	0.663	1.17
	R	0.963	1.024	1.027	1.01
S5 - S6		0.827	1.113	1.121	1.05
S _i	L	0.786	1.144	1.141	1.06
	R	1.168	0.889	0.885	1.07
S6 - S7		1.179	0.889	0.865	1.07
S _i	L	1.199	0.882	0.837	1.08
	R	1.522	0.667	0.623	1.21
S7 - S8		1.578	0.634	0.579	1.23
S _i	L	1.650	0.586	0.528	1.26
	R	0.860	1.072	1.136	1.05
S8 - S9		0.758	1.134	1.217	1.09
S _i	L	0.654	1.202	1.289	1.12
	R	1.198	0.848	0.908	1.08

〈표 5〉와 같이 FEM 해석을 통해 각 웨브의 하중 분담률을 구한 후 할증계수(k)를 산정하여 설계에 반영하였다. 할증계수 산정은 분담률 중 최대값만 실제 분담률로 하고, 나머지 웨브의 분담률은 1.0으로 가정하여 결정하였다. 사하중 및 설계하중 작용시의 분담률을 전부 고려하였으며, 이를 근거로 평여 2교는 전단력 할증계수 1.25를 적용하였다.

4.2.2 주탑

주탑에서의 사재 정착방법은 〈그림 22〉와 같은 새들 시스템을 채용한 관통고정방식을 적용하였다. 새들부의 좌우에 생기는 사재장력차를 주탑에 전달시키는 메커니즘은 내관의 고정방법에 따라 여러 형식으로 분류되나 본 교량은 내외관을 강관으로 사용하여 내관과 외관과의 마찰력에 의해 저항하는 전단기 방식을 채택하였다.

경사진 주탑은 장력차에 의한 교축방향

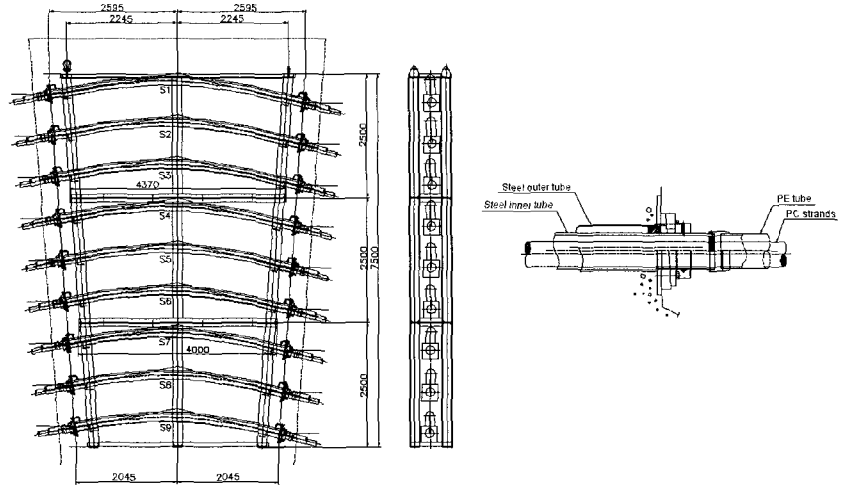


그림 22. 새들 프레임 및 상세

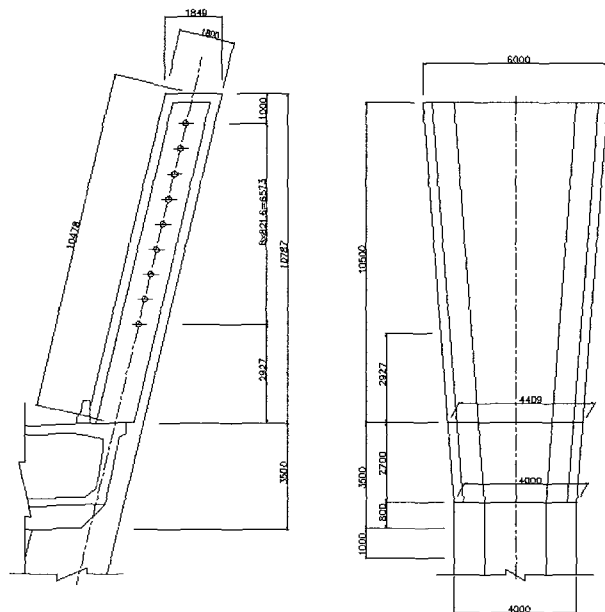


그림 23. 주탑 상세도

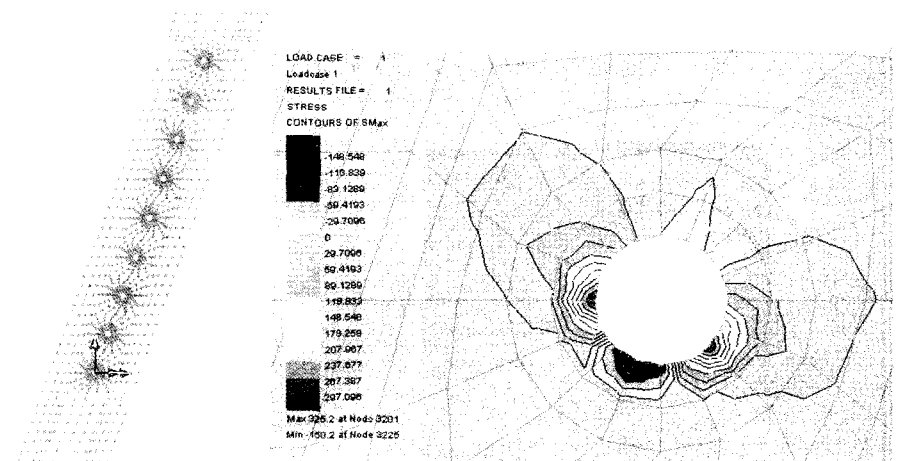


그림 24. 주탑부 FEM 해석결과(Plane Stress Model)

휨과 선형조건에서 발생하는 양쪽 사재장력에 의한 교축직각방향 분력 등을 고려하여 2축 휨을 받는 압축부재로 설계하였다. 기본설계시에는 PS 강선을 도입한 구조로 설계하였으나 시공성을 고려하여 보완설계시 PS 강봉으로 대체하였다.

주탑 설계시 가장 유의할 점은 새들부의 사재는 주형에 설치되는 내부 강선에 비해 용량이 크고 상대적으로 곡률반경이 작기 때문에 새들 중심방향으로 커다란 복압력(腹壓力)이 발생한다는 점이다. 이러한 복압력에 의한 주탑의 상세해석은 일반적으로 2D plane stress 모델을 이용하고 사재 작용력이 아닌 사재 허용력($0.6 f_{pu}$)에 대하여 응력검토를 시행한다.

$$\text{복압력}(p) = \frac{\text{사재 허용력}(T_a)}{\text{사재 곡률반경}(R)}$$

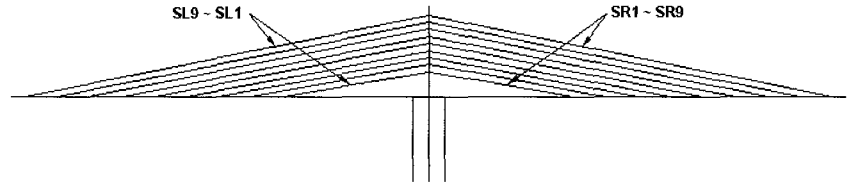
검토 결과 일부 국부적인 응력이 허용인장 응력을 약간 상회하는 경우가 나타나 125 mm 피치(pitch)의 나선철근으로 보강하였다. (〈그림 24〉 참조)

4.2.3 사재

사재의 허용응력은 활하중에 의한 응력 변동폭 등을 고려하여 $0.6 f_{pu}$ 로 하였고, 단면 검토를 위한 설계 장력은 전사하중시 사재당 362.5 tonf로 하였다. 이는 강연선 극한강도(f_{pu})의 약 50%로써 활하중 등의 추가하중을 고려하여 10%의 여유를 갖도록 했으며, 적용한 사재의 제원은 SWPC 7B 15.2 mm × 27EA이다.

〈표 6〉은 단면 검토를 위한 사재 조정장력값을 보여주며, 〈표 7〉은 활하중에 의한 사재의 응력 변동량을 나타낸 것으로 최대 응력 변동폭이 3.8 kgf/mm^2 으로 사재의 허용응력 설정이 타당함을 알 수 있다.

시공단계 해석시에는 가설시 발생하는 지지(장비, 작업등)하중 및 우연하중 등을 고려하여 긴장력을 $0.55 f_{pu}$ 로 조정하였다. 사재 조정장력 변경에 따른 시공단계별 사재장력의 변화는 〈표 8〉에 나타난 것과 같



단위 : tonf · m

표 6. 사재 조정장력값

사재	차중	Prestress	CR&SH	교면하중	조정장력	설계장력
SL1	43.554	-26.551	-5.685	5.918	345.264	362.500
SR1	59.747	-33.079	-4.970	8.160	332.632	362.500
SL2	46.947	-27.569	-5.369	6.397	342.093	362.500
SR2	64.854	-35.497	-4.541	8.872	328.811	362.500
SL3	49.471	-28.154	-5.138	6.758	339.563	362.500
SR3	68.778	-37.571	-4.205	9.424	326.074	362.500
SL4	51.076	-28.285	-4.997	6.994	337.712	362.500
SR4	71.356	-39.180	-3.982	9.791	324.516	362.500
SL5	51.767	-28.132	-4.921	7.105	336.681	362.500
SR5	72.477	-40.135	-3.871	9.956	324.253	362.500
SL6	51.624	-27.765	-4.898	7.101	336.438	362.500
SR6	72.146	-40.964	-3.870	9.921	325.267	362.500
SL7	50.770	-27.210	-4.922	6.999	336.863	362.500
SR7	70.433	-41.113	-3.976	9.694	327.462	362.500
SL8	49.341	-26.407	-4.999	6.817	337.749	362.500
SR8	67.486	-40.704	-4.196	9.287	330.627	362.500
SL9	47.493	-25.319	-5.132	6.575	338.883	362.500
SR9	63.275	-39.710	-4.530	8.719	334.746	362.500

표 7. 활하중에 의한 사재 응력 변동폭

사재	설계장력	활하중(tonf)		응력(kgf/mm ²)			응력 변동폭(kgf/mm ²)
		최대시	최소시	전사하중시	최대시	최소시	
SL1	362.50	6.6	-0.2	96.798	98.561	96.745	1.8
SR1	362.50	11.8	-1.7	96.798	99.949	96.344	3.6
SL2	362.50	6.6	-0.1	96.798	98.561	96.772	1.8
SR2	362.50	12.5	-1.6	96.798	100.136	96.371	3.8
SL3	362.50	6.5	0.0	96.798	98.534	96.798	1.7
SR3	362.50	12.8	-1.5	96.798	100.216	96.398	3.8
SL4	362.50	6.4	0.0	96.798	98.507	96.798	1.7
SR4	362.50	13.0	-1.4	96.798	100.270	96.424	3.8
SL5	362.50	6.2	0.0	96.798	98.454	96.798	1.7
SR5	362.50	12.9	-1.4	96.798	100.243	96.424	3.8
SL6	362.50	6.1	-0.1	96.798	98.427	96.772	1.7
SR6	362.50	12.7	-1.5	96.798	100.190	96.398	3.8
SL7	362.50	6.2	-0.4	96.798	98.454	96.692	1.8
SR7	362.50	12.4	-1.6	96.798	100.109	96.371	3.7
SL8	362.50	6.5	-1.0	96.798	98.534	96.531	2.0
SR8	362.50	11.9	-1.6	96.798	99.976	96.371	3.6
SL9	362.50	7.1	-1.9	96.798	98.694	96.291	2.4
SR9	362.50	11.2	-1.6	96.798	99.789	96.371	3.4

이 초기치 해석대비 ±3%로 사재장력의 상향 조정에 따른 단면력의 변화는 미미한 것으로 나타났으며, 또한 시공중 최대/최소 장력은 설계장력의 ±10% 이내로서

사재의 장력변동량이 사장교와 비교했을 때 상당히 작다는 것을 알 수 있었다. 〈그림 24〉는 시공 및 완성시의 각 사재의 최종 장력값을 나타내고 있다.

표 8. 시공단계별 사재장력(P4 교각 내측)

사재시공 번호단계	사재시공																		
	SL9	SL8	SL7	SL6	SL5	SL4	SL3	SL2	SL1	SR1	SR2	SR3	SR4	SR5	SR6	SR7	SR8	SR9	
사재1									374.4	374.4									
사재 2								375.9	373.7	373.2	375.2								
사재 3							378.5	377.7	375.1	374.7	377.1	377.8							
사재 4						383.1	381.4	380.1	376.9	376.7	379.6	380.8	382.4						
사재 5					388.6	389.3	386.8	384.5	380.5	380.4	384.2	386.2	388.7	387.9					
사재 6				390.0	397.2	397.0	393.4	390.1	385.1	385.0	389.8	393.0	396.5	396.6	389.3				
사재 7			395.3	398.7	404.9	403.7	399.1	394.8	388.8	388.8	394.6	398.7	403.2	404.4	398.1	394.6			
사재 8		393.3	399.6	402.5	408.2	406.4	401.1	396.2	389.7	389.8	396.1	400.9	406.0	407.7	401.9	398.9	392.6		
사재 9	400.7	365.9	373.7	378.2	385.5	385.4	381.9	378.6	373.7	377.5	381.3	383.7	386.6	386.2	378.5	373.7	365.6	356.2	
Key Seg 폐합	378.7	343.4	350.8	355.4	363.1	363.7	361.3	359.3	355.5	356.5	355.9	354.6	354.3	351.6	342.1	336.1	327.6	318.3	
교면하중	375.5	340.5	348.4	353.2	361.1	361.7	359.1	356.8	352.6	362.0	362.0	360.8	360.2	356.9	346.5	339.3	329.4	318.4	

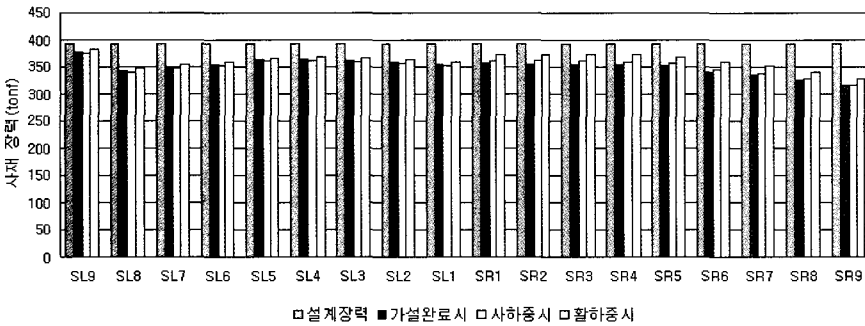


그림 25. 하중별 사재 장력

5. 결론

평여 2교는 국내지형여건에 부합되고 중장경간 기간에 적용될 수 있는 새로운 형식의 케이블 교량인 Extradosed PSC 교로서 사장교와 비교해 케이블의 하중분담이 작고 낮은 주탑으로 인해 활하중에 의한 응력변동이 작은 장점을 가지고 있다. 여타의 케이블 교량 형식과 비교할 때 외관이 사장교와 유사하여 구조물의 미관 측면에서도 손색이 없으며, 주행자의 시야 확보 및 주행유도성에서는 더 높은 안정감을 부여해 준다.

국내에 처음 도입되는 교량형식인 관계로 외국사와 공동으로 설계를 진행하였지만, 구조물의 상세 해석은 기술력 정착의 일환으로 학계와 공동으로 수행하여 만족할 만한 성과를 이루어 내었다.

Extradosed PSC교의 설계는 기존 PSC 상자형교의 설계과정과 대부분 유사하여 이 부분에서 높은 기술력을 보유하고 있는 국내 기술력으로도 충분히 수행이 가능하다고 사료된다. 다만, 작은 곡률을 갖는 대용량 PS 강선을 적용한 새들부에 대한 국내 실적예가 없고, 케이블 교량 설계시 강도설계법 적용에 따른 하중조합 및 하중계수에 대한 명확한 규정이 국내 시방서에 제시되지 않아 외국 사례를 따를 수밖에 없었던 점이 다소 아쉽다.

간략하게나마 설계과정 및 유의점들을 본고에 정리하였으며, 향후 시공시 발생할 수 있는 문제점 및 대책 등에 대해서는 사례연구를 통하여 검토하고 있다. 시공 완료후 본고에서는 미비하였던 시공단계 해석과 Extradosed교의 시간 의존적 거동에 대해서 논의할 기회를 가질 예정

이다. □

참고문헌

1. "도로교 설계 기준", 사단법인 한국도로교협회, 2000.
2. 신현목, "새로운 형식의 PC교", 대한토목학회지, 1993. 10, pp.3~5.
3. 콘크리트 교량 가설 특수공법 설계·시공·유지관리 지침, 건설부, 1994.
2. "도로교 표준시방서", 사단법인 대한토목학회, 1996.
4. 小野寺 勇, 相樂 和俊, 木水 隆夫, 松井 保幸, 春日 昭夫, "小田原港橋の施工", 橋梁と基礎, 1994. 7, pp.2~6.
5. 城野 嘉明, 小野寺 勇, 中道 淳, 塩田 良一, "西湘バイパス・世界初のエクストラード로드 PC橋, 小田原港橋の設計と施工", 橋梁, 1994. 5, pp.2~10.
6. 山崎 淳, 山縣 敬一, 春日 昭夫, "斜材により補強されたコンクリート橋の構造特性", 橋梁と基礎, 1995. 12, pp.33~38.
7. 中川 洋三, 能登谷 英樹, "衝原橋の計劃の設計", 橋梁, 1996. 4, pp.32~39.
8. 特輯/大偏心 ケーブル PC橋, プレストレストコンクリート, 1997.
9. 岡 米男, 能登谷 英樹, 中川 洋三, 春日 昭夫, "衝原橋の床版の設計", 橋梁と基礎, 1997. 9, pp.18~22.
10. "PC 斜張橋・エクストラード로드橋 設計施工規準(案)", 社団法人 プレストレストコンクリート 技術協會, 2000.