

강박스 사장교의 시공단계를 고려한 3D 상세 유한요소 해석

3-Dimensional FE Analysis of Construction Stages of The Cable-stayed Bridge with Steel-box Girder

이 태 열* 김 영 훈** 신 현 양*** 김 재 권****
Lee, Tae-Yeol Kim, Young-Hoon Shin, Hyun-Yang Kim, Jae-Kwon

Abstract

Rigorous FE(Finite Element) analyses of the cable-stayed bridge with steel-box girder, the main construction method of which is FCM (Free Cantilever Method), are presented in this paper. The analysis and the checking of design for a derrick crane under several loading conditions are performed using the software MIDAS/Civil and the beam elements are used to model the main structure. Among all the construction stages, special construction stages are chosen and considered to ensure the safety of segments of box girder. The stress analysis for lifting of a segment of box girder is performed using the software SAP2000 and the shell elements of which having 6 DOF(Degrees Of Freedom) per nodes are successfully used to model the segment of box girder for the purpose of capturing the detailed behaviors on the folded-plates in the segment. Finally, concluding remarks are given to improve a design of the derrick crane and the segment based on the results from this study.

1. 서 론

축력과 휨을 동시에 받는 부재인 주탑과 보강형, 인장력만을 받는 부재인 케이블을 하나의 구조시스템 내에서 적절히 결합시킨 교량형식이 사장교이다. 최근, 이와 같은 구조적 장점을 지닌 사장교는 교량의 장대화 추세에 힘입어 가격경쟁력을 확보하고, 그에 따라 국내·외적으로 널리 계획, 설계 및 시공되고 있다. 이러한 기존의 국내·외 사장교를 살펴보면 주탑을 기준으로 대칭으로 케이블을 배치하는 대칭사장교가 주류를 이루고 있으며, 좌우 대칭성을 활용하여 균형을 유지하며 점진적으로 시공해 나가는 Free-Cantilever 공법(이후 FCM)도 보편화되고 있다. 일팔가설공법과 비교하여 FCM 공법은 가설단계가 보다 세분화된다는 특징이 있으며 각 가설단계를 정확히 모사할 수 있는 시공단계별 해석을 위한 각종 수치해석기법도 함께 연구되어 왔다. 예를 들면, FCM 시공단계에 따른 콘크리트 재료의 시간의존적 거동을 정확히 예측하는 모델을 사용한 합성사장교의 해석⁽¹⁾, Extradosed PSC박스교의 해석⁽²⁾, PSC 세그먼트 박스거더의 최적설계⁽³⁾ 등 수치해석기법 및 해석코드의 개발에 관한 다양한 연구가 수행된 바 있다.

* 정회원·삼성물산 건설부문 토목기술팀 과장, 공학박사
** 삼성물산 건설부문 토목기술팀 대리, 공학석사
*** 삼성물산 건설부문 토목기술팀 부장, 공학박사
**** 삼성물산 건설부문 토목기술팀 상무, 공학박사, 기술사

상기한 바와 같은 해석코드를 개발하는 연구가 진행되어 왔던 한편, 최근에는 컴퓨터의 비약적인 발전에 힘입어 상용소프트웨어를 이용하여 실제 교량의 다양한 요소구조에 대한 3차원 정밀해석이 국내 기술자들에 의해서도 수행되고 있다. 그 예로, 현수교인 광안대교의 각종 주단강품의 응력해석⁽⁴⁾, 영종대교 교좌장치의 응력해석⁽⁵⁾ 등을 통하여 설계단계부터 유한요소의 상세해석 기법이 사용되었으며, 그 해석결과를 바탕으로하여 설계의 검증 또는 최적화 과정을 거쳐서 성공적으로 교량이 시공된 바 있다. 상기한 몇몇 3차원 상세 해석사례들에서는 입체요소(solid element)가 사용되었는데, 입체요소는 상대적으로 유한요소의 정식화과정이 간단하고 요소가 세분화될수록 해의 수렴성도 보장된다고 알려져 있다. 이러한 입체요소와는 달리 평판/셸 요소는 그 정식화 과정이 다소 복잡하고 고성능의 평판/셸요소를 개발하는 데에는 매우 다양한 이론들을 융·복합화할 필요가 있다는 것은 주지의 사실이다⁽⁶⁾. 특히, 유한요소를 개발하는 연구자들 사이에서는 절점당 6자유도(degree of freedom)를 가지는 고성능 셸요소의 개발은 아직도 많은 연구가 필요한 분야로 인식되고 있다. 왜냐하면, 보요소와의 연결에 제한없이 사용하기 위하여 절점당 6자유도를 가지면서도 곡면과 평면에 모두 사용가능한 다기능(versatile) 셸요소를 개발하기 위해서는 막잠김(membrane locking)현상과 같은 고질적인 난제들을 극복해야 하기 때문이다⁽⁷⁾. 셸요소를 사용하여 실제 구조물을 해석함에 있어서 통상적으로 많이 발생하는 모델링 상의 난점 및 이의 해결방안도 제안된 바 있듯이 셸요소를 이용하여 절판(folded-plate)구조를 해석할 때는 많은 주의가 필요하다⁽⁸⁾. 강사장교 보강형의 상세 모델링에도 셸요소를 적용할 경우, 사용되는 셸요소의 거동특성을 충분히 이해하고 해석을 수행할 필요가 있다. 따라서, 어떤 해석 소프트웨어를 선택하는가도 매우 중요하다.

한편, 국내의 경우 데리크레인(derrick crane)을 이용하여 FCM공법으로 가설되거나 가설 중인 사장교는 서해대교, 삼천포대교, 제2진도대교 정도로 데리크레인의 제작 및 운용 경험이 그리 많다고는 할 수 없으나, 몇몇 사장교의 가설경험을 바탕으로 점점더 합리적인 데리크레인의 설계가 이루어지고 있다⁽⁹⁾. 물론, 데리크레인은 사장교의 단면형상, 합성·비합성 여부, 격벽(Diaphragm)의 위치 등을 고려하여 세심하게 계획되어야 한다. 따라서, 상세한 구조해석을 통한 문제점 도출 및 해결방안 제시는 데리크레인의 계획단계부터 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 논문은 서론에 이어 전체 사장교의 시공단계별 해석결과를 발췌 인용하고, 대상교량의 시공에 적용하고자 계획중인 데리크레인에 대한 상세해석 및 검토, 데리크레인으로 인양되는 강박스 세그먼트의 상세 응력해석 사례를 차례로 제시한다. 강박스 세그먼트의 상세 응력해석에는 범용프로그램인 SAP2000을 이용하였는데, 그 이유는 1) 막잠김이 없을 것, 2) 전단잠김(shear locking)이 없을 것, 3) 수렴성이 좋을 것, 4) 절점당 6자유도를 지닐 것 등과 같은 고성능 셸요소가 지녀야할 여러가지 요구사항들을 만족하면서도 얇은 셸(thin shell)과 두꺼운 셸(thick shell)에 모두 이용할 수 있는 선택기능이 있고 국내·외적으로 많은 사용실적이 있어 신뢰할 수 있다고 판단했기 때문이다. 마지막으로 결론에서는 연구결과 도출된 여러가지 중요한 검토사항을 정리하여 제시하였다.

2. 전체구조의 시공단계별 해석

본 연구에서 대상으로 하는 교량은 주경간부가 200m로 구성되는 총 500m 길이의 비대칭 강사장

교이다. 경간 구성은 그림1에 나타냈으며 대상교량의 단면은 그림2에 제시하였다. 이와 같은 경간 구성은 국내최초 1주 2면식 비대칭 사장교로 기술적 독창성을 제공하고, 사장교와 거더교의 특성을 살려 효율적인 경간장 구성이 가능하다는 장점을 지니고 있다. 그러나, 대칭사장교의 경우와는 달리 주탑을 기준으로 양쪽에 대응되는 케이블의 장력이 시공중 뿐만 아니라 완공후에도 다르기 때문에 보다 면밀하고 정확한 시공단계별 구조계의 거동예측이 요구된다. 본 연구에서는 FCM가설을 가정한 시공단계별 거동 예측을 위하여 삼성물산 건설부문에서 개발한 PCCAP II⁽¹⁰⁾를 이용하여 해석을 수행하였고 MIDAS/Civil과 SAP2000 Nonlinear로 검증하였다.

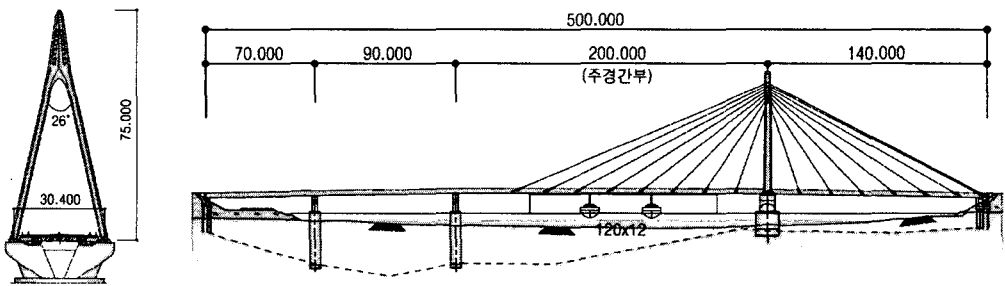


그림1. 대상교량 개요

거더에 사용된 강재, 주탑에 사용된 콘크리트, 케이블 등의 물성치와 모델링에 사용된 요소의 개수 등을 표1에 제시하였다. 그림2에 대상교량의 단면을 제시하였고, 그림3에는 전체교량을 프레임구조로 이상화한 모델을 도시하였다. 각각의 케이블 주탑과 거더에 정착되는 부분은 보요소의 중심축과의 이격거리를 고려하여 rigid link로 강결 조건을 부여하였다. 40여 단계로 세분화된 시공단계에 따른 모멘트를 그림5에 제시하였다.

표1. 전체계 모델링

항 목	내 용	비 고
사용 소프트웨어	PCCAP-II SAP2000 Nonlinear MIDAS/Civil	삼성물산 건설부문 개발 CSI개발 (버전 8.3.3) MIDASIT 개발 (버전 6.1.1)
강재의 물성치	탄성계수 = 2.04×10^7 tonf/m ² 포아송비 = 0.3	-
콘크리트의 물성치	탄성계수 = 2.53×10^6 tonf/m ² 포아송비 = 0.2	-
케이블의 물성치	탄성계수 = 2.00×10^7 tonf/m ²	-
케이블 요소 개수	32개	-
스프링 요소 개수	6개	-
보요소 개수	168개	-

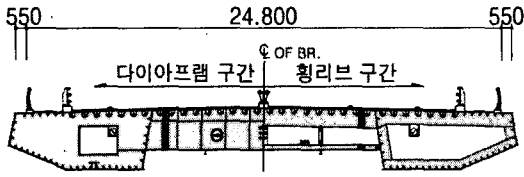


그림 2. 대상교량 단면

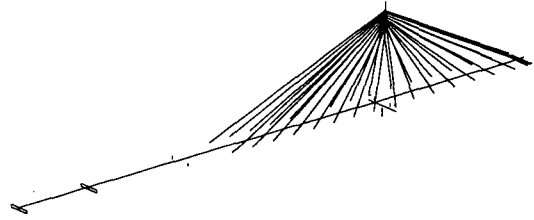


그림 3. 전체교량의 해석 모델

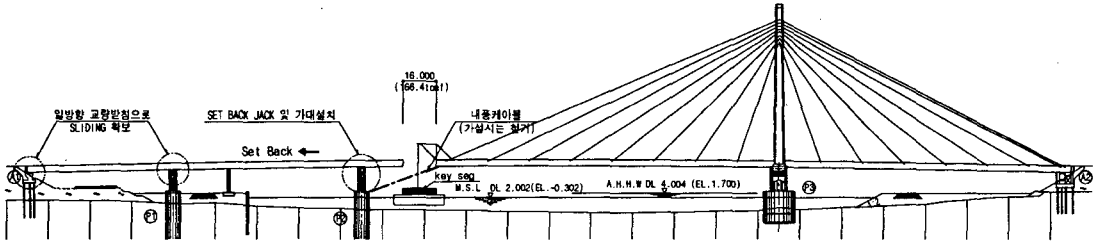


그림 4. FCM에 의한 가설

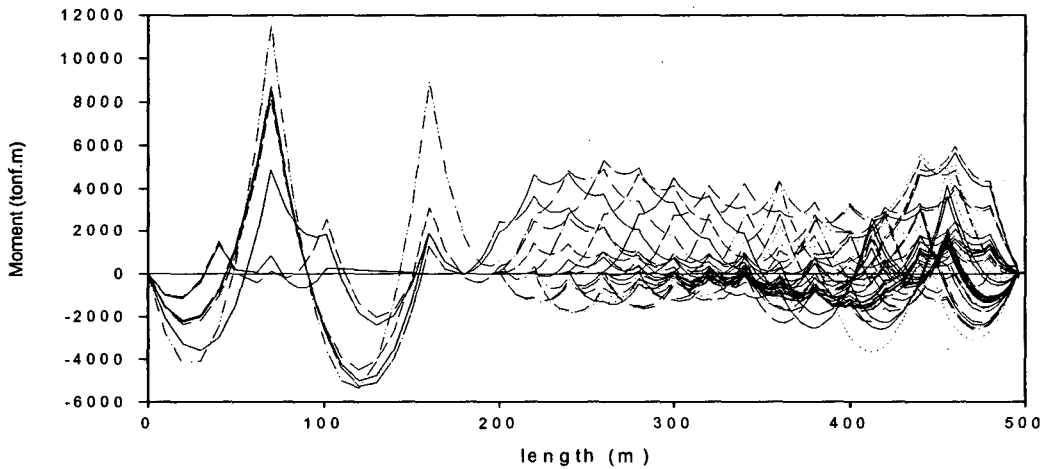


그림 5. 시공단계별 해석 결과 - 모멘트 (tonf · m)

3. 데릭크레인의 해석

사장교의 성공적인 설계·시공을 위해서는 2장에서 기술한 사장교 전체계의 시공단계별 해석뿐만 아니라 시공중에 사용되는 데릭크레인의 구조적 형태와 보강형에 전달되는 하중전달 양상을 면밀히 파악할 필요가 있다. 또한, 세그먼트 인양시 기설치된 세그먼트와의 원활한 접합 및 선형관리를 위하여 데릭크레인의 구조적 안전성과 하중에 의한 처짐상태 등에 대한 검토가 요구된다. 대상 교량에 사용 계획 중인 데릭크레인의 개략적인 형태는 그림6과 같다. 한국산업안전공단의 크레인 제작기준·안전기준 및 검사기준(1993)에 따라 수직정하중, 수직동하중, 수평동하중, 풍하중 등과 같은 다양한 하중을 고려하였으며, 하중재하 및 하중조합 등은 가설용 크레인 설계 사례를 참조하였다⁹⁾. 해석결

과 구조물이 가지는 하중조합에 의한 변위 및 응력상태는 각각 그림7, 그림8과 같으며 보강형에 전달되는 하중크기를 산정하여 2장에서 설명한 사장교 전체 구조계의 시공단계 해석 및 보강형의 안전성 검토에 적용하였다.

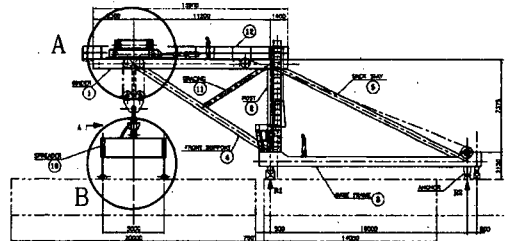
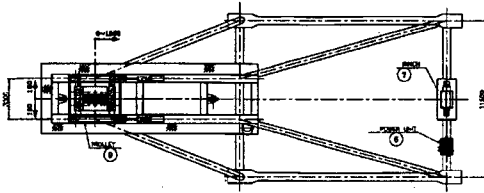


그림 6. 데릭크레인의 제원

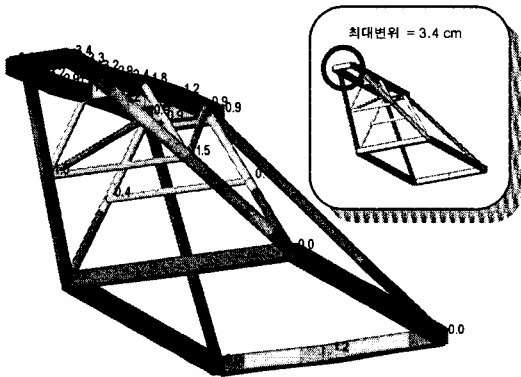


그림 7. 데릭크레인의 변위 (cm)

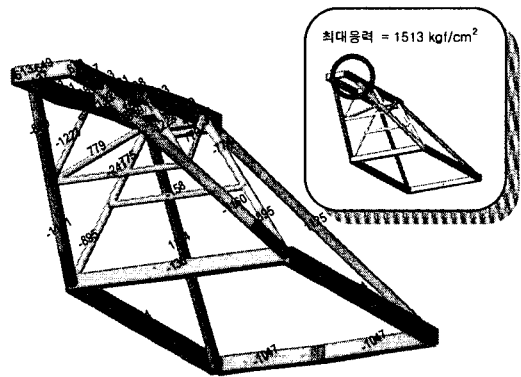


그림 8. 데릭크레인의 합성응력 (kgf/cm²)

4. 인양시 강박스 세그먼트의 응력해석

그림9는 데릭크레인으로 인양될 세그먼트의 주요 제원이다. 강판의 두께는 8mm부터 22mm까지 다양하게 사용되었다. FCM 공법에 의한 새로운 세그먼트의 가설(그림4 참조)은 기가설된 세그먼트상에 설치된 데릭크레인에서 내린 wire를 가설할 세그먼트에 설치된 lifting lug에 체결하여 인양함으로써 이루어진다. 그림6에 제시한 데릭크레인을 통한 인양계획에는 세그먼트에 lifting lug 4개소를 설치하도록 되어있다. 세그먼트 인양시 lifting lug 주위의 응력집중을 파악하기 위해서 그림9와 같이 대칭성을 고려하여 1/2만 셸요소로 모델링하여 해석을 수행하고, 설명의 편의상 그림11에 전체모델링을 제시하였다. 또한, 그림11 A부분의 이해를 돕기위하여 상판을 도시하지 않고 내부 리브(rib) 상세만을 표시하여 그림12에 제시하였다. 그림11 B부분과 같은 built-up방식의 정착부는 타타라대교에서 채택된 형식과 유사한 것으로서 본 교량에서도 검토를 수행 중에 있는 형식이다⁽¹¹⁾. 본 논문에서는 세그먼트의 인양에 따른 응력해석을 주로 논하고 있는데, 정착부의 중량을 정확히 외력으로 가한다면 그림11 B부분과 같은 정도의 상세 모델링은 요구되지 않는다. 그러나, 본 논문에서는 소개되지 않았지만 케이블 긴장에 따른 정착부의 응력집중에 대한 검토도 수행하였다. 따라서, 본 연구에서는 정착부가 상세히 모델링된 해석모델을 그대로 사용하였다. 보강형 자중을 가설 크레인에 전달하여 인양시

보강형의 안정을 유지하는 역할을 하는 스프레더(그림6 참조)는 그림10의 ABC와 같은 ‘T’형태의 강성이 매우 큰 보요소들로 모사하였다. 모델링에는 쉘요소 14,075개와 절점 12,917개가 사용되었으며 NEQ(Number of Equation)은 77,148이다. Lifting lug의 위치(그림10 D와 E)는 크로스빔과 내부 웹(web)이 교차하는 선상에 배치시켰다. 경계조건은 A점에 고정단 경계를 부여하고 세그먼트 자중에 의한 해석을 수행하였다. 이와같이 한 점만을 고정하여 해석을 수행하면 z방향 반력값과 세그먼트의 무게가 동일하게 되므로, 실제 세그먼트 무게와의 차이를 비교함으로써 모델링 상의 오류를 쉽게 찾을 수 있다. 또한, A점에서의 모멘트 반력 M_y 를 세그먼트의 무게로 나누면 세그먼트 중앙을 기준으로 한 무게중심의 위치가 계산된다. 본 연구에서는 무게중심 이격거리가 14.7cm로 계산되었다. 인양시 보강형의 수평을 유지하기 위해 전후좌우로 이동 가능한 skid방식의 수평 유지 장치를 계획하였고, 계산된 무게중심 이격거리를 충분히 고려할 수 있도록 하였다.

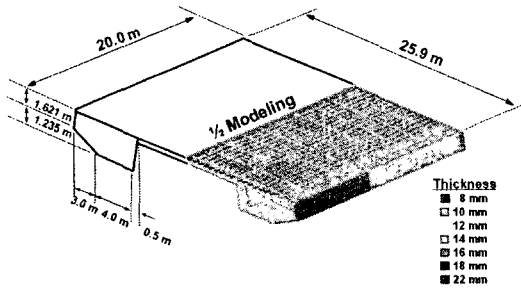


그림 9. 세그먼트의 제원

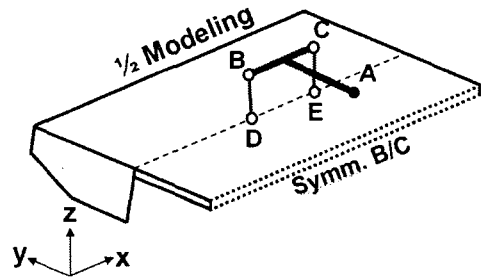


그림 10. 스프레더의 모델링

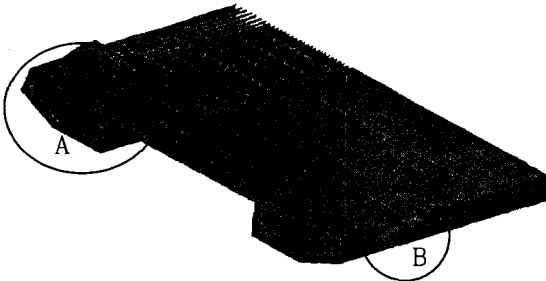


그림 11. 3차원 셸모델

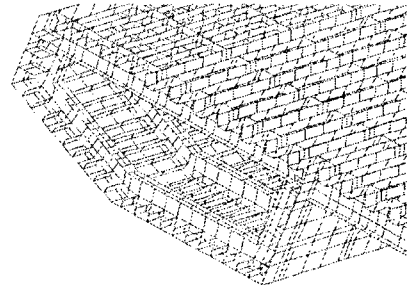


그림 12. 리브 상세

그림13은 인양시 발생한 변위의 contour를 도시한 것으로 간결한 표시를 위하여 상판, 하판, 외부 웹 등은 생략하였다. 그림14는 측면에서 봤을 때의 변형 현상과 변위 contour이다. 최외각 끝단의 최대처짐은 좌우 각각 4.95mm와 5.51mm로 계산되었다. 서로 상이한 처짐을 보이는 이유는 앞서 기술한 바와같이 무게중심이 14.7cm 정도 이격되어 있기 때문이다. 그림15는 lifting lug 주위의 von Mises응력의 contour를 도시한 것이다. 그림16은 lifting lug 주변을 확대하여 표시한 것이며 최대응력은 13.6 kgf/mm^2 가 발생하였고 허용응력 14 kgf/mm^2 이내에 존재함을 확인하였다.

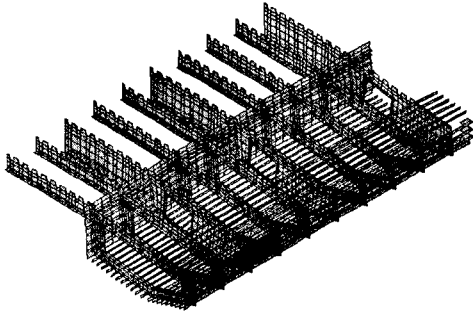


그림 13. 변위 contour (전체)

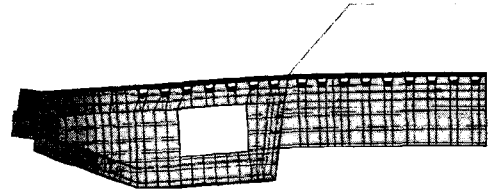


그림 14. 변위 contour (측면)

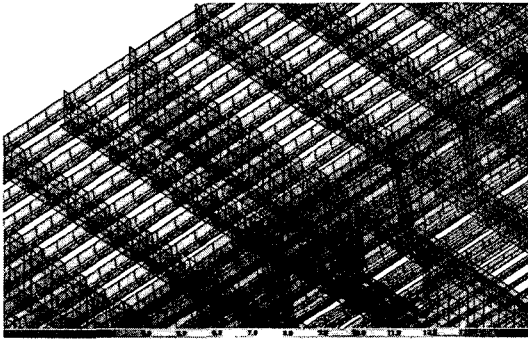


그림 15. 응력 contour (전체)

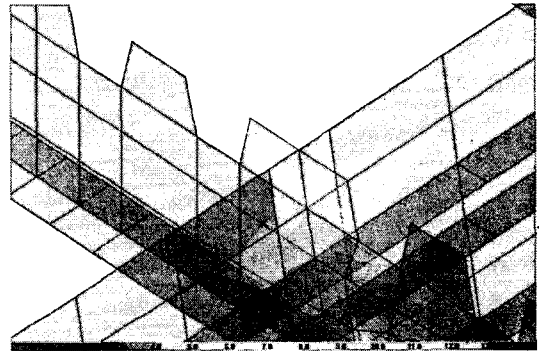


그림 16. 응력 contour (상세)

5. 결론

본 연구에서는 1주 2면식 비대칭 강사장교의 시공단계를 고려한 다양한 정밀해석을 수행하였다. 2장에서 제시한 바와 같이 통상적으로 사장교의 설계단계에서 수행되는 전체구조계의 시공단계별 해석을 수행하였을 뿐만 아니라, 3장과 4장에서는 데릭크레인을 이용한 가설을 가정하여 다양한 해석을 수행하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

데릭크레인의 기본 설계에 대한 사전 구조 검토 결과 크레인의 트롤리 위치(그림 6 A 부분)에서 허용응력을 18%정도 초과하는 것으로 고찰되었다. 또한 크레인 제작기준·안전기준 및 검사기준(1993) 규정에 의한 허용처짐은 크레인 거더부 길이의 1/800로 제한되어 있으나, 1.7/800의 처짐이 발생하여 70%의 허용처짐 초과가 발생하였다. 스프레더의 폭 (그림 6 B 부분)은 당초 5m로 계획이 되었으나, 크로스빔의 간격이 2m씩인 점을 감안하여 2m × 3 = 6m로 계획을 변경하고 이에 따른 인양시 세그먼트의 상세 응력해석을 수행하였다. 중량이 가장 많이 나가는 세그먼트를 선택하여 해석을 수행하고 허용응력의 97%정도 발생함을 확인하였다.

본 연구는 데릭크레인의 기본설계 단계에서 수행된 것으로 향후 구체화된 개선 설계안의 도출에 연구결과를 충분히 반영할 예정이며, 실제 세그먼트 별 시공 시에 데릭크레인으로 인해 발생할 수 있는 리스크를 사전에 제거할 수 있는 효과가 기대된다.

참고 문헌

1. 서주원, 박정일, 김남식, 심옥진, “합성형 사장교의 시공단계해석 및 시공관리 시스템 개발”, 한국전산구조공학회 가을 학술발표회 논문집, 1994, pp.95~102
2. 윤군진, 이완수, 이종신, 김성찬, “Extradosed PSC Box교의 시공단계해석”, 한국 콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, Vol.13, No.2, 2001, pp.347~354
3. 이성국, 박문호, 최창근, 연종호, “PSC 세그먼트 박스거더의 시공단계해석을 고려한 최적설계”, 대한토목학회 학술발표회, 2002, pp.484~487.
4. 최창근, 이태열, 노혁천, 김재철, “입체요소를 이용한 현수교 주단강품의 유한요소해석: 스트랜드 슈와 행어스켓”, 한국전산구조공학회 봄 학술발표회 논문집, 1998, pp.149~156
5. 최창근, 이태열, 김태완, 김재철, “입체요소를 이용한 가동받침과 고정받침의 유한요소해석”, 한국전산구조공학회 가을 학술발표회 논문집, 1998, pp.373~380
6. 최창근, 이태열, “Finite Element Method - An Effective Tool for Analysis of Shell”, 한국전산구조공학회 가을 학술발표회 논문집, 2003, pp.3~17
7. Chang-Koon Choi, Tae-Yeol Lee, “Efficient remedy for membrane locking of 4-node flat shell elements by non-conforming modes”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.55, No.12, 2002, pp.1463~1476
8. 최창근, 이태열, 이은진, “지하식 LNG 저장탱크의 개선된 유한요소해석모델”, 대한토목학회 논문집, Vol.22, No.5, 2002, pp.1175~1183
9. 조서경, 권효찬, 이제우, 김주영, “사장교 가설용 크레인 설계 및 제작”, 한국강구조학회지, Vol.16, No.4, 2002, pp.84~93
10. 이완수, 최호근, 남효승, “장대사장교 통합 해석 시스템(PCCAP II) 개발과 이를 이용한 협폭 사장교의 시공단계 해석”, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 2003, pp.750~755
11. Third Operation Bureau, THE TATARA BRIDGE - Design and Construction Technology for the World's Longest Cable-Stayed Bridge, Honshu-Shikoku Bridge Authority, 1999