

Extradosed PSC Box 교의 시공단계해석

Construction Stage Analysis of Extradosed PSC Box Bridges

윤군진^{*} 이완수^{**} 이종신^{***} 김성찬^{****}
Yun, Gun Jin Lee Wan, Su Lee, Jong Sin Kim, Sung Chan

Abstracts

Extradosed PSC Box bridges, newly emerging type of structures in construction market, have a characteristic in that external tendons are used for strengthening PSC Box girder like stay cables in cable stayed bridges. In this study, a series of constructions stage analysis procedure, including initial shape analysis, backward analysis and forward analysis, have been performed in order to investigate long-term behavior of extradosed PSC box bridges, using PCCAP—a computer program for time-dependent stage analysis of PSC cable stayed bridges. CEB-FIP 1978 model was used for the consideration of time-dependent effect of concrete material. Showing the validity of the analysis results with RM SPACE FRAME, it has been confirmed that time-dependent effects become less consequential as the stiffness of girder becomes larger.

Keywords : Extradosed PSC Box bridges, Construction Stage Analysis, Long-term behavior

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 국내에서도 Extradosed PSC Box교가 본격적으로 계획중에 있다. Extradosed PSC Box교는 기존의 PSC Box교의 내부 tendon을 외부로 돌출시켜 사장교의 케이블과 같이 거더를 지지하므로써 거더의 강성을 줄일 수 있는 장점을 지니고 있다. 이러한 점에서 Extradosed 교는 구조적으로 사장교와 매우 유사하다. 그러나 기존 연구결과에 의하면 Extradosed 교의 케이블은 사장교의 케이블에 비하여 활하중 분담비가 작아 피로성능도 우수하다고 보고된 바있다. 이러한 구조적 장점으로 볼 때 Extradosed 교는 사장교와 거더교의 중간에 위치하는 교량으로서 앞으로 더욱 발전 가능한 최신 교량 형식이다.

일반적으로 Extradosed 교는 PSC Box교 또는 사장교와 마찬가지로 Free Cantilever 공법(이후 FCM)으로 가설되는 것으로 보편화되어 있다. FCM 공법에서 장경간 교량일수록 시공중 구조물은 더욱 불안정하기 때문에 시공단계해석을 통한 응력검토는 설계단면을 결정하는데 결정적인 역할을 한다. 또한 시공중 형상관리 오차의 누적은 완공후 설계형상에 회복 불가능한 치명적인 악영향을 미치기 때

* 삼성물산(주) 건설기술연구소 전임연구원, 토목구조기술사

** 삼성물산(주) 건설기술연구소 수석연구원, 공학박사

*** 서영기술단 차장

**** 서영기술단 차장, 토목구조기술사

문에 시공단계해석을 통한 정확한 관리치의 산정과 계측을 통한 오차보정은 FCM 교의 시공에 있어 중요한 위치를 차지한다. Extradosed 교의 외부 tendon은 가설중 지지부재로서의 역할 뿐만아니라 일부의 사하중과 활하중을 분담하기 때문에 사장교의 케이블과 같은 역할을 수행한다. 따라서 외부 tendon에 도입되는 장력은 일반 Girder 교의 내부 tendon의 장력에 비해 시공중 형상변화에 미치는 영향은 더욱 크다. 또한 PSC Box 교는 콘크리트의 재료적 특성-크리프와 건조수축-과 tendon 장력의 시간에 따른 변화 등 시간의존적 거동효과로 전체 구조 거동에 큰 영향을 받게 된다. 따라서 Extradosed PSC Box 교의 시공단계해석은 다양한 공정의 수치적 모사와 콘크리트와 tendon의 시간의존적 거동효과를 고려하는 동시에 시공단계별 시공관리치-설치 솟음량(Camber)-를 산정할 수 있어야 한다. 더욱이 국내에서는 아직까지 Extradosed 교에 대한 설계기준이 부재한 상황이기 때문에 다양한 실험적 및 수치적 구조 검토가 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 개선된 시공단계해석법을 통해 Extradosed PSC Box교의 시공단계해석을 수행하고 각 구조부재의 시간의존적 거동효과와 구조특성에 관한 연구를 수행하였다. 첫째, 개선된 시공단계 해석법과 해석절차를 제안하고 둘째, Extradosed PSC Box 교의 초기형상해석, 역해석(Backward Analysis) 및 시간의존적 순차해석(Forward Analysis)에 걸친 일련의 시공단계해석과 해석결과에 대해 검토하였다. 또한 교량전용 프로그램인 RM SPACE FRAME과도 해석 결과를 비교하여 본 프로그램의 타당성을 검증하였다.

2. 시공단계해석을 위한 비선형 해석

시공단계해석을 위해서는 시공중 부재의 설치 및 제거, 케이블의 긴장 및 제거, 지점조건의 추가 및 변화 그리고 가설하중의 재하 등 모든 공정을 시공순서에 따라 수치 모델에 반영할 수 있어야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 삼성건설기술연구소에서 개발된 프리스트레스트 콘크리트 사장교 전용 해석 프로그램(PCCAP)[2]을 이용하여 새로운 부재 설치 및 제거 알고리즘과 시공단계별 솟음량 계산을 위한 알고리즘을 추가하여 개선하였다.

2.1 유한 요소(Finite Element)

본 논문에서는 뒀-비틀을 고려한 3차원 보요소와 탄성현수선 요소를 사용하였다. 3차원 보요소는 전단중심과 도심이 일치하지 않는 비대칭 단면을 갖는 요소로 절점당 뒀변형을 포함한 7개의 자유도를 가지고 있어 비틀과 뒀변형의 연계를 고려할 수 있다. 외부 Tendon의 모델링을 위한 요소는 정식화 과정은 복잡하지만 케이블 새그에 의한 비선형 거동을 정확하게 모사하는 탄성현수선 요소를 사용하였다. 이들 유한 요소에 대한 정식화 과정과 강성도 행렬은 참고문헌[3]에 상세히 나와 있으므로 본 논문에서는 생략하였다.

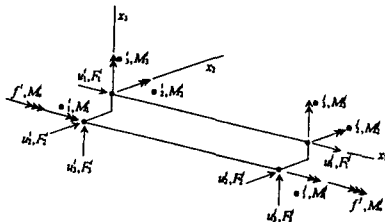


그림 1 3차원 보요소

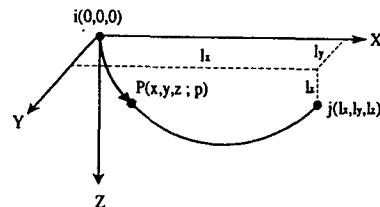


그림 2 탄성현수선 케이블 요소

2.2 부재의 추가 및 제거

비선형 해석을 위한 유한 요소 정식화는 Updated Lagrangian Formulation에 근거하였다. 증분평

형방정식을 풀어 구해진 변형량을 이용하여 새로운 형상을 구성하고 계산된 물리량-부재내력 및 비보존력 성분-들을 새로운 형상으로 변환하여 강성도 행렬을 재구성한다.

$$K_T \Delta U = F_n - R_{n-1} \quad (1)$$

$$R_{n-1} = \sum \int_V B^T \sigma_{n-1} \cdot dV \quad (2)$$

위의 식 (1)은 n번째 시공단계를 나타내는 증분 평형방정식을 나타낸다. 위식에서 K_T 는 현재까지 추가된 요소의 전체 접선 강성도행렬을 나타낸다. F_n 은 총 외력벡터를 나타낸다. R_{n-1} 은 전단계에서 계산된 부재내력 벡터를 나타낸다. 부재가 추가될 때 해당 부재의 자중과 부재내 존재하는 프리스트레스트 내력을 각각 F_n 과 R_{n-1} 에 추가하여 고려한다. 부재가 제거될 때는 이와는 반대로 자중과 존재하는 부재 내력을 F_n 과 R_{n-1} 로부터 제거한다.

2.3 시공단계해석 절차

Extradosed PSC Box교의 시간의존적 효과를 고려한 해석은 가설공정이 이루어 지는 시간영역을 유한개의 구간으로 나누어 각 구간내에 정의된 시공명령어에 따라 이루어진다. 각 시간 구간내 모든 시공명령어가 종료되면 전단계와의 시간차이에 의해 콘크리트의 크리프 및 건조수축, 강재의 이완 그리고 구조물의 탄성수축 및 2차 변형에 의한 tendon 긴장력의 손실량 등을 계산하며 시간의존해석을 수행하게 된다. 본 연구에서 크리프 및 건조수축의 영향은 CEB-FIP 1978년도 모델을 사용하여 고려하였다.

그림 3은 Extradosed PSC Box교의 시공단계해석을 위한 절차를 나타낸다. Extradosed 교의 시공단계해석은 최초로 초기평형상태를 결정하는 것으로부터 시작하게 된다. Extradosed 교의 외부 tendon 장력변화는 거더의 휨모멘트 변화에 민감한 영향을 미치기 때문에 초기형상[1]을 설계형상과 근사하게 결정하는 것은 시공단계해석을 위해 해결 해야할 첫 번째 문제이다.

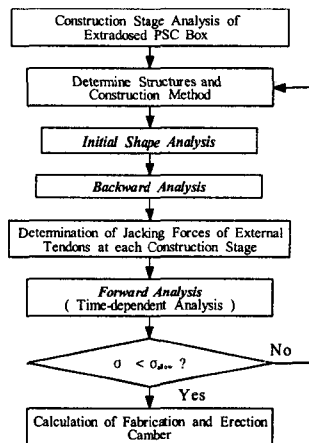


그림 3 시공단계해석 절차

초기형상해석의 정확성은 추후 계산될 제작 및 설치 Camber의 크기에 직접적인 영향을 미치기 때문에 가능한 정밀하게 결정되어야 한다. 초기형상이 결정되면 Extradosed 교의 시공단계해석은 역해석과 순차해석 두가지로 나누어진다. 역해석은 완공상태로부터 시공순서와 역순으로 부재를 하나 하나 해체해 가면서 해석하는 일명 해체해석을 말한다. 역해석은 시공단계별 사재의 도입장력을 계산하기 위해 실시된다. 그러나 콘크리트 교량의 역해석은 시간의 개념을 고려할 수 없기 때문에 역해석에

서 구해진 사재의 장력은 실제 시공시의 도입장력과는 어느 정도 오차를 나타낸다. 이러한 오차는 단계별로 누적되어 계산되는 콘크리트의 크리프, 건조수축, 강재의 Relaxation 등의 시간의존적 거동효과와 기하 비선형성에 의해 시공 단계별로 구성되는 강성도 변화의 차이에 의해 발생할 수 있다. 그 다음 단계로 역해석으로부터 구해진 단계별 도입 장력을 이용하여 콘크리트의 시간의존적 거동을 포함하여 실제 시공순서와 동일하게 순차해석을 실시하게 된다. 그 결과 시공단계별 또는 완공시 부재의 응력이 설계조건에서 크게 벗어나지 않는다면 시공단계해석을 종료한다. 하지만 순차해석 결과 완공형상 및 단계별 응력이 설계조건을 만족시키지 못한다면 초기형상에서의 설계장력을 재조정하거나 설계를 변경하여 반복적으로 역해석과 순차해석을 재실시한다.

2.4 제작 및 설치 Camber의 계산

순차해석이 종료되면 각 시공단계별 부재의 설치 Camber와 제작 Camber를 계산한다. 이 값들은 시공중 예측의 기준이 되는 값들로서 시공중 발생할 수 있는 오차를 보정할 수 있게 한다. 다음 그림 4는 제작 Camber와 설치 Camber의 계산방법을 나타낸다. 제작 Camber는 시간의존효과를 고려한 순차해석결과 최종변위의 역의 값으로 구한다. 설치 Camber는 각 시공단계별 부재가 가설된 후 변형이 발생되어 부재가 위치하는 좌표로서 제작 Camber에서 순차해석의 해당 시공단계 변위량을 뺀 값으로 구한다.

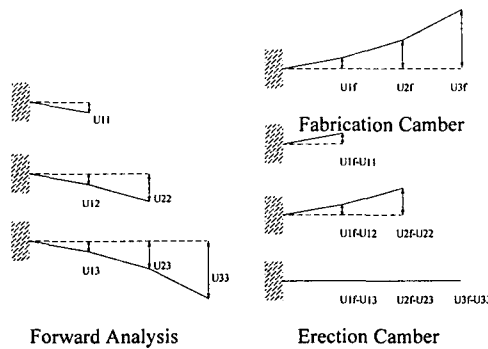


그림 4 제작 및 설계 Camber 계산

3. Extradosed PSC Box교의 구조계획 및 시공순서

해석 교량은 3경간 연속교(65+115+65=245m)로서 주탑높이 11m, 교폭 31.8m이고 교하폭원 200m의 경안전을 횡단하는 바 하적저해율을 감안 1주식 교각으로 계획하고 또한 Extradosed교의 사재피로응력 저감 등의 목적으로 라멘식 구조를 채택하였다.

지점부 와 경간 중앙부의 주형높이는 각각 3.8m, 3.0m로 최대경간길이에 대해 1/30, 1/38정도로 하였다. 또한 광폭의 교량임을 감안해 사재장력의 원활한 횡분배를 위해 횡거더를 중심 대 중심 16m 간격으로 설치하였다.

사재정착은 saddle 구조에 대한 국내 연구가 미흡한 점을 고려해 교차정착 방식이 적용되었으며 사재의 동적 내풍 안정성 확보 측면에서 주형측과 주탑측 2개소에 고감쇠 고무댐퍼를 부착하는 것으로 계획하였다. 또한 본 가설지역이 상습 안개지역임을 감안해 사재는 Epoxy 코팅, 시멘트 그라우팅, HDPE의 3중 방식으로 처리하였다. 다음 표 1은 본 Extradosed 교의 사용재료 및 설계조건을 나타낸다.

표 1 사용재료

콘 크 리 트	철 근
<ul style="list-style-type: none"> • 설계기준 강도 : $f_{ck} = 39.2\text{MPa}$ • P.S 도입시 콘크리트 강도 : $f_{ci}' = 29.4\text{MPa}$ • 즉시 손실후 콘크리트 허용응력 <ul style="list-style-type: none"> - 허용압축응력 : $f_{ca}' = 16.2\text{MPa}$ - 허용인장응력 : $f_{ta} = 1.4\text{MPa}$ • 장기 손실후 콘크리트 허용응력 <ul style="list-style-type: none"> - 허용압축응력 : $f_{ca} = 15.7\text{MPa}$ - 허용인장응력 : $f_{ta} = 3.1\text{MPa}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • 항복강도 : $f_y = 392.0\text{MPa}$ • 허용인장응력 <ul style="list-style-type: none"> - $f_{sa} = 176.4\text{MPa}$ (일반적인 부재)
외부 Tendon	내부 Tendon
<ul style="list-style-type: none"> • 사용강재 : SWPC 7B $\phi 15.2\text{mm}$ 7연선 • 허용인장응력 : $f_{pu} = 1862\text{MPa}$ • 허용항복응력 : $f_{py} = 1568\text{MPa}$ • 사용 Tendon 단위 <ul style="list-style-type: none"> - 외측 Tendon : $\phi 0.6''-27\text{EA}$ ($P_1=0.45P_u$) - 중간측 Tendon : $\phi 0.6''-27\text{EA}$ ($P_2=0.50P_u$) - 내측 Tendon : $\phi 0.6''-27\text{EA}$ ($P_3=0.55P_u$) 	<ul style="list-style-type: none"> • 사용강재 : SWPC 7B $\phi 15.2\text{mm}$ 7연선 • 허용인장응력 : $f_{pu} = 1862\text{MPa}$ • 허용항복응력 : $f_{py} = 1568\text{MPa}$ • 사용 Tendon 단위 <ul style="list-style-type: none"> - Top Tendon : $\phi 0.6''-22\text{EA}$ ($P_1=0.72P_u$) - Bot Tendon : $\phi 0.6''-22\text{EA}$ ($P_2=0.70P_u$) - 횡방향 Tendon : $\phi 0.6''-5\text{EA}$ ($P_3=0.70P_u$)

시공은 F.C.M 공법을 적용하였고 기초 및 교각기둥 시공 소요일수 60일, 주두부 시공 90일, 각 Seg. 시공 20일, Key Seg. 시공 30일로 하여 단계별 해석을 수행하였다.

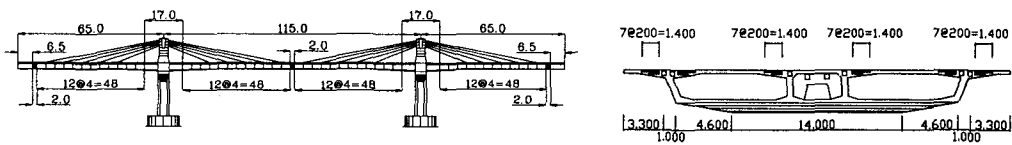


그림 5 구조제원

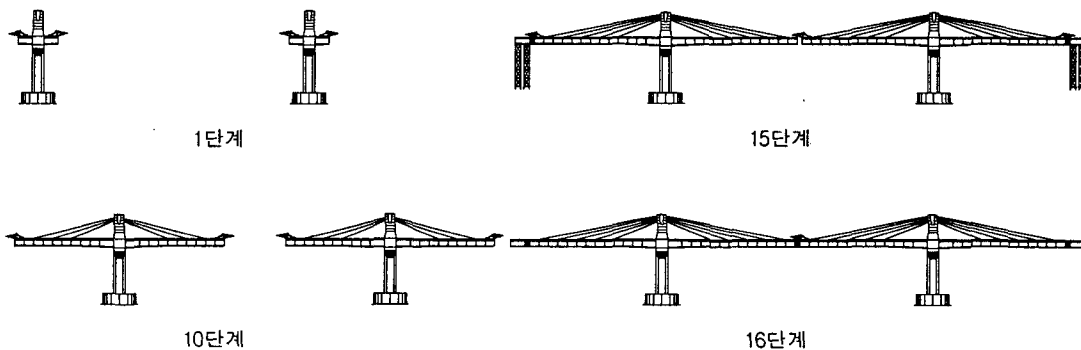


그림 6 시공순서

4 해석결과 검토

본 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 PSC 교량 전용 해석프로그램인 RM SPACE FRAME 의 해석 결과와 비교하였다. 완공후 크리프와 건조수축이 완료되는 10000 days가 지난 후 거더의 상연응력을 비교하였다. 비교결과 대체로 잘 일치하는 것으로 나타났다.

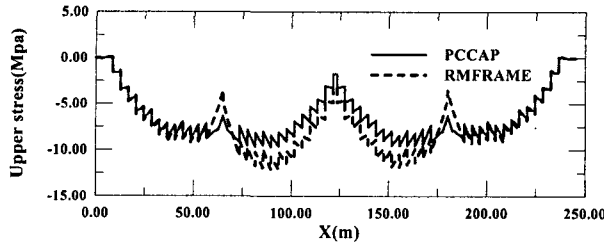
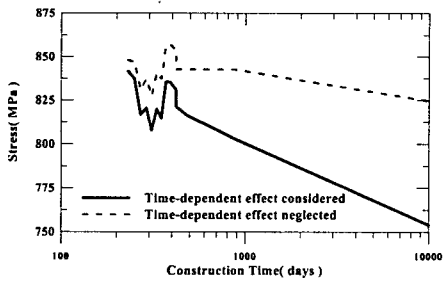


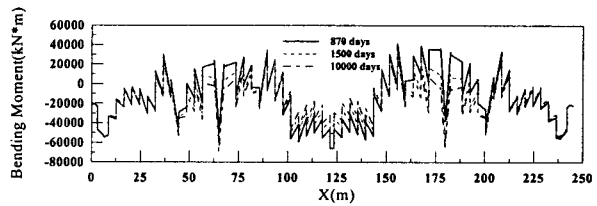
그림 7 해석결과의 검증

4.1 시공단계해석

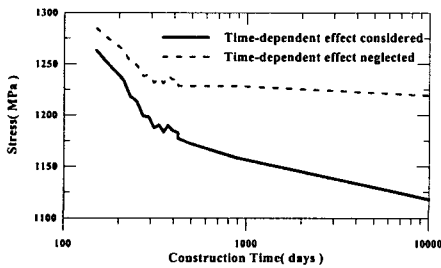
초기형상은 외부 tendon의 장력범위가 파단강도의 45%에서 55%사이의 값이 되는 동시에 각 절점에서의 변위오차가 최소가 되도록 기하 비선형성을 고려한 일괄해석을 통해 구성하였다. 그 결과 변위오차가 1.3×10^{-4} (변위오차/경간장) 내에 들어오는 초기형상을 구할 수 있었다. 거더와 내부 tendon 그리고 외부 tendon의 크리프와 건조수축 등에 의한 시간의존적 효과의 영향을 알아 보기 위하여 시간의존적 효과를 고려한 순차해석에 의해 부재력 재분배현상을 검토하였다.



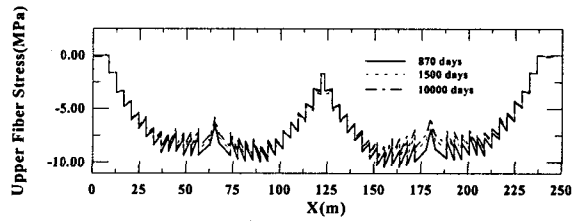
(a) 외부 tendon의 응력변화



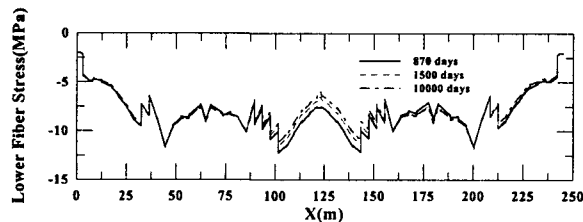
(c) 휨모멘트의 변화



(b) 내부 tendon의 응력변화



(d) 거더 상연응력의 변화

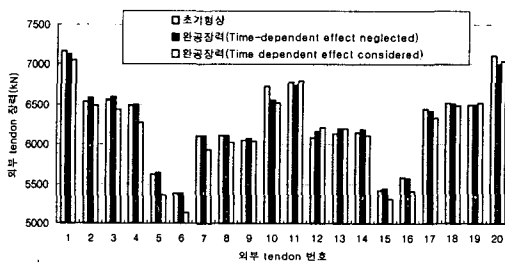


(e) 거더 하연응력의 변화

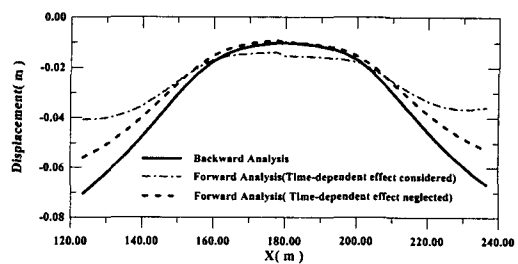
그림 8. 시간에 따른 Tendon 응력, 거더 휨모멘트 및 응력의 변화

그림 8의 (a)와 (b)는 시간의 경과에 따라 시간의존적 효과를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 외부 tendon과 내부 tendon의 응력변화를 각각 나타낸다. 내부 및 외부 tendon 모두 10000 days가 지난후 시간의존적 효과를 고려한 경우의 응력은 그렇지 않은 경우의 응력에 비해 약 10% 감소하는 결과를 나타냈다. 특이한 사항으로서 시간경과에 따라 완공시(870 days) 내부 tendon의 응력은 8.3% 감소하는 반면 외부 tendon은 4.6% 감소하였다. 내부 tendon의 장력 손실이 더 큰 것은 마찰 및 정착 단활동과 같은 즉시손실 뿐만 아니라 강재의 이완과 2차변형에 의한 손실 등이 추가로 고려되었기 때문이라고 사료된다. 이에 대해서는 향후 실험적 연구를 통한 검증이 필요할 것으로 사료된다. 그림 8의 (c), (d), (e)에서 시간의 경과에 따라 응력재분배는 지점부와 중앙경간 중심부에 더욱 집중되는 것으로 알 수 있다. 외부 tendon의 정착부는 지점부의 역할을 하기 때문에 크리프 및 건조수축에 의한 영향이 작은 것으로 판단된다.

역해석 및 순차해석에 의한 시공단계해석과 일괄해석의 결과를 비교하기 위하여 외부 tendon의 장력과 캔틸레버 최대 장출시 역해석과 순차해석의 처짐결과를 그림 9에 나타내었다. 콘크리트의 재령이 증가함에 따라 외부 tendon의 장력은 일괄해석에 의한 초기해석 결과와 시간의존적 효과를 무시한 순차해석 결과와 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다. 그림 9의 (b)와 같이 역해석결과는 시간의존적 효과를 무시했기 때문에 크리프 및 건조수축을 무시한 순차해석결과와 더 유사하게 나타났다.



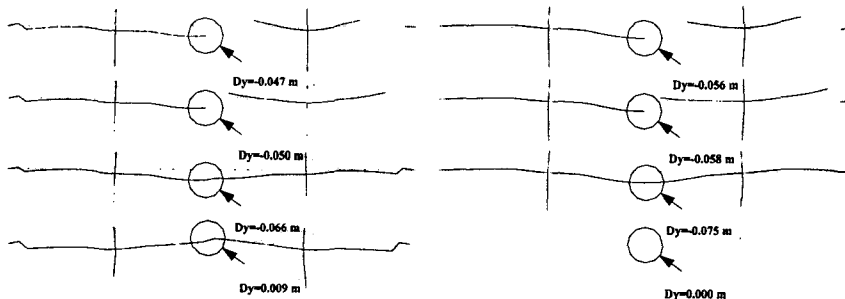
(a) 외부 tendon의 장력비교



(b) 역해석과 순차해석의 처짐비교

그림 9 초기형상해석과 시공단계해석의 결과 비교

다음 그림 10은 시공 단계별 처짐과 단계별 설치 Camber를 나타낸다. 시공단계별 설치 Camber는 프로그램내에서 자동계산되어 출력된다. 최종 단계에서 설치 Camber는 설계형상과 정확히 일치하게 된다. 하지만 실제 시공중 예측 불가능한 오차가 발생할 수 있으므로 계측을 통한 보정과 구조검토가 필요하다.



(a) 순차해석 변위

(b) 시공단계별 설치 Camber

그림 10 순차해석 결과 및 설치 Camber

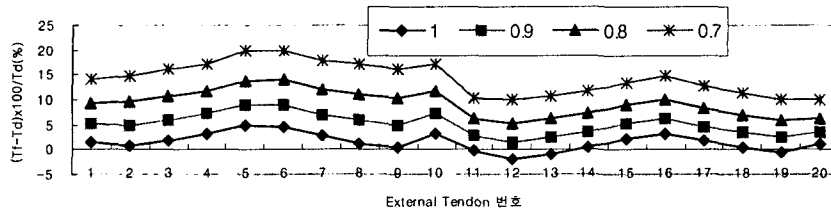


그림 11 부재강성비에 따른 외부 tendon 장력오차율

그림 11은 교각과 거더의 강성비에 따라 외부 tendon의 초기해석 장력과 순차해석 장력의 오차율을 나타낸다. 강성비가 작아질수록 사장교의 특징을 더욱 크게 나타나게 된다. Td는 초기형상해석에 의한 장력을 나타내고 Tf는 순차해석에 의한 완공시 장력을 나타낸다. Td와 Tf의 차이가 클수록 제작 Camber가 증가하기 때문에 이에 따른 가설오차가 더욱 커지게 되므로 더욱 정밀한 시공이 요구된다고 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 Extradosed PSC Box교의 시공단계해석과 Camber 산정을 위한 절차를 제안하고 시공단계해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 첫째, 시공단계해석 결과에 따르면 외부 tendon이 정착되지 않은 Extradosed PSC Box 교의 중앙경간 중심부와 지점부는 콘크리트의 시간의존적 효과에 의한 영향을 크게 받는 것으로 판단된다. 더욱이 외부 tendon은 내부 tendon에 비해 장력 손실이 적고 크리프 및 건조수축 변형이 완료된 시점에서는 지점부의 역할을 하기 때문에 무엇보다 효과적인 구조요소로 판단된다. 둘째, 거더의 강성이 줄어들수록 초기형상해석과 시공단계해석의 장력 차이가 크게 나타나 제작 Camber가 증가하게 된다. 따라서 Extradosed 교가 사장교에 가까워 질수록 더욱 정밀한 시공이 필요하게 됨을 알 수 있었다. 본 논문에서 제안된 프로그램은 앞으로 실무에 더욱 유용할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 윤근진, 이완수(2001), 사장교의 정적 비선형 해석과 초기형상결정해석, 대한토목학회 논문집, 제21권, 제 I-A호, pp. 165-177.
2. 삼성건설(1995), 프리스트레스트 콘크리트 사장교의 해석 시스템 개발, 연구보고서, 기연-95001, 삼성건설(주) 기술연구소, Seoul, Korea
3. 이명재(1998), 초기평형상태를 이용한 현수교의 시공단계 해석 및 시공오차 관리, 박사학위논문, 서울대학교
4. 최창근(1992), 유한요소해석, 집문당, Seoul, Korea.