

PC 박스거더교량의 해석 및 전후처리 시스템 개발연구

Analysis of the Segmentally Erected Prestressed Concrete Box-Girder Bridges and Pre & Post-Processing

오 병환*, 이 형준**, 이 명규**, 전 세진**, 박 철림***, 김 영진***, 임 선택***
Oh, B.H., Lee, H.J., Lee, M.G., Jeon, S.J., Park, C.L., Kim, Y.J., Lim, S.T.

ABSTRACT

In segmentally erected bridges, the structural systems are changed as the construction stages progress and redistribution of member forces occurs due to time dependent effects of concrete and relaxation of prestressing steel. Therefore, structural analysis is required at each construction stage.

In this study, nonlinear analysis program of the segmentally erected prestressed concrete box girder bridges is developed, taking into account nonlinearity of material and geometry, time dependent effect of concrete and relaxation of prestressing steel.

Pre & Post processors are also developed to raise the efficiency in making input file for the main program and analysis of the results produced by the main program.

1. 서론

최근들어 국토의 효율적 이용 및 경제산업 발전을 위해 고속도로와 도시고속순환도로 등이 활발히 건설됨에 따라 장대교량건설도 증가되고 있다. 이러한 장대교량은 구조물의 내구성, 경제성 및 유지관리의 용이성 때문에 주로 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량(prestressed concrete box girder bridges) 형태로 많이 건설되고 있다. 이러한 PC 박스거더 교량은 경간이 긴 장대교량이므로 주로 세그멘탈 공법으로 시공되고 있다. 따라서, 시공이 진행됨에 따라 구조계가 계속 바뀌기 때문에, 이에 대한 매 시공단계별 해석과 설계가 필요하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 PC 박스거더 교량의 시공단계별 거동을 합리적으로 예측할 수 있는 정적 및 동적해석 프로그램(DWPCBOX)을 개발하였고, 해석에 필요한 주요 입력자료를 효과적으로 작성할 수 있는 전처리 프로그램과 해석으로부터 얻은 방대한 양의 해석결과를 효율적으로 사용할 수 있는 후처리 프로그램을 개발하였다.

2. 시공단계의 모형화

캔틸레버시공, 전진가설법, 압출공법 등 세그멘탈 공법으로 건설되는 PC박스거더 교량을 시공단계별로 해석하기 위해서는 임의의 시간단계에서 구조물의 형상을 변화시킬수 있도록 해야하며, 이러한 형상변화에는 경계조건의 구속과 이완, 때때 요소의 추가 또는 제거, 긴장재에 대한 긴장 또는 이완, 작업차(traveler)의 이동 및 절점하중과 요소하중의 작용 또는 제거 등이 포함된다.

* 서울대학교 토목공학과 교수

** 서울대학교 토목공학과 대학원

*** (주)대우 건설기술연구소

2.1 뼈대요소의 설치와 제거

뼈대요소는 전체 평형방정식의 조합에서 이들 요소의 현 강성매트릭스, 사하중, 내력 및 시간의 존적 변형도가 고려되면 설치되고 고려되지 않는 경우에는 제거된다. 요소가 설치될 때 정적해석 시스템을 제공하기 위해서는 요소의 한 단이 구속된 절점이나 이미 다른 뼈대요소에 연결된 절점에 연결되어야 한다. 대부분의 경우에 이 절점은 전 단계의 작용하중에 의해 변위가 발생되어 있는 상태이므로 만약, 뼈대요소의 한 단이 이미 연결되어 있는 다른 뼈대요소의 한단에 연결되어 있지 않으면 이 절점의 변위는 첫번째 절점에 이미 존재하는 변위를 기초로 하여 초기화 한다. 이 초기화 작업에서 새로운 요소가 이미 변위가 발생한 절점과 연결되어 강체운동을 한다는 가정 하에 이들 변위들은 프로그램내에서 자동으로 수행된다.

절점 I에서의 누적변위를 $\delta X_I, \delta Y_I, \theta Z_I$ 라 하고, 새로운 절점 J의 초기변위를 $\delta X_J, \delta Y_J, \theta Z_J$ 라 하면 절점 J의 초기변위는 다음과 같다(그림 2.1)

$$\delta X_J = \delta X_I - (Y_J - Y_I) \cdot \theta Z_I$$

$$\delta Y_J = \delta Y_I - (X_J - X_I) \cdot \theta Z_I$$

$$\theta Z_J = \theta Z_I$$

여기서,

$\delta X_J, \delta Y_J, \theta Z_J$: 절점 J에서의 초기 변위

$\delta X_I, \delta Y_I, \theta Z_I$: 절점 I에서의 기지의 변위

X_I, Y_I : 절점 I의 전체좌표

X_J, Y_J : 절점 J의 전체좌표

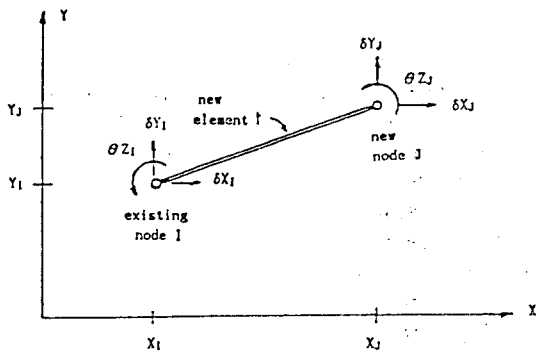


그림 2.1 절점변위의 초기화

세그먼트가 1개 이상이 되면, 모든 새로운 절점의 초기변위는 위에서와 같은 방법으로 생성된다.

2.2 프리스트레싱 텐던

프리스트레싱 텐던은 다음 단계의 전체 평형방정식 조합에서 텐던의 초기 힘의 영향을 고려함으로써 설치되고, 전체 평형방정식의 조합에서 텐던의 현 단계의 강도 매트릭스, 이완 변형도 등가하중과 현단계에서의 총 힘의 영향을 고려한다. 이것은 프리스트레싱을 가하는 동안에는 부착 안된 상태, 프리스트레싱이 끝난 후에는 완전부착된 텐던으로 모사한다.

프리스트레싱 텐던은 다음 단계의 전체 평형방정식의 조합에서 텐던의 강도와 내력의 영향을 무시함으로써 제거된다. 텐던 세그먼트의 초기 힘은 단기 힘의 손실과 프리스트레싱 과정의 영향을 고려하여 계산하고, 각 텐던은 한단 또는 양단에서 프리스트레싱을 가하며, 마찰과 정착부의 슬립에 의한 단기 힘의 손실은 프로그램에서 자동으로 계산된다.

2.3 이동식 거푸집의 제거와 설치

작업차는 다음 단계의 전체 평형방정식 조합에서 강성매트릭스, 사하중과 내부응력에 의한 영향을 고려함으로써 특정한 위치에 설치되고 이들의 영향을 고려하지 않음으로써 제거된다. 작업차는 현재의 위치에서 먼저 제거되고 새로운 위치에 자동적으로 이동하여 설치된다.

2.4 절점자유도

절점자유도는 이미 설치되어 있는 최소한 하나 이상의 뼈대요소 또는 거푸집 요소에 연결되어 있을 경우에 평형방정식에 고려된다. 뼈대나 거푸집 요소가 없이 절점에 부착될때 자유도는 무시된다.

하중과 변위는 현재 설치된 뼈대요소가 연결된 절점에만 작용하는데 이것은 구조물로부터 요소를 제거할 때 중요한 고려사항이다. 부착된 모든 뼈대요소와 거푸집요소의 제거에 의해 조합으로부터 제거되는 절점에 남아 있는 임의의 하중은 구조물에 저항할 수 없고, 요소의 제거 전에 구조물로부터 제거되어야 한다.

3. 합성층 구조

뼈대요소에서 각 재료들의 성질을 고려하기 위하여 그림 3.1과 같이 콘크리트와 철근의 층으로 구성된 합성층 구조를 사용한다.

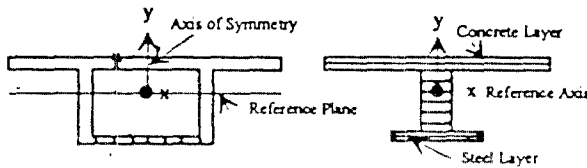
각 층의 단면적 및 기준면으로부터의 거리는 기하적 특성으로 규정하고, 단면에서 각 층은 일축 응력상태로 가정한다. 또한, 콘크리트와 철근은 완전부착된 것으로 가정하고, 내적 힘 벡터나 요소강도행렬을 계산하기 위한 적분은 다음과 같이 각 층별로 수행하여 합한다.

$$\int_V \phi \psi dV = \sum_{i=1}^{n_c} \int_V \phi \psi_i dV + \sum_{i=1}^{n_s} \int_V \phi \psi_i dV$$

여기서, ϕ : 형상함수(function of space)

ψ : 재료성질(E, σ etc)

n_c, n_s : 콘크리트 및 철근의 층 수



(a) Actual (b) Idealization

그림 3.1 뼈대요소의 합성층 구조

4. 전후처리 프로그램의 개발환경

전후처리 프로그램을 통해 얻고자 하는 사항을 구현하기 위해서는 우선적으로 원활한 그래픽의 지원이 있어야 한다. 그래픽 환경의 설정을 위한 시스템사양은 크게 하드웨어와 소프트웨어로 구분할 수 있다. 최근들어 개인용 컴퓨터(PC : personal computer)의 기능상의 발전으로 개인용 컴퓨터에서도 원활한 그래픽의 구현이 가능하게 되었고, 또한 많은 사용자가 개인용 컴퓨터에 익숙하므로 본 프로그램(DWPCBOX)은 PC에서의 사용을 목적으로 하였으며, 또한, 전후처리 프로그

램으로서의 기능을 향상시키기 위하여 이미 사용이 보편화 되어있는 WINDOWS환경에서 작동하도록 개발되었다.

WINDOWS환경의 몇몇 장점을 들면 다음과 같다.

- 1) 그래픽 사용자 인터페이스(graphical user interface)이므로 정보표현에 있어 시각적으로 풍부한 환경을 제공한다.
- 2) 멀티 태스킹(multi-tasking)을 통해 편리한 작업환경을 제공한다.
- 3) 입출력장치에 독립된 그래픽 인터페이스이다.

5. 전처리 프로그램

전처리 프로그램의 주요기능은 다음과 같다.

- ① 유한요소 모델링을 위한 절점에 관한 데이터를 생성 : 절점번호와 좌표를 직접 입력받거나 자동생성시킨후 화면상에 나타내 준다.(그림 5.1).

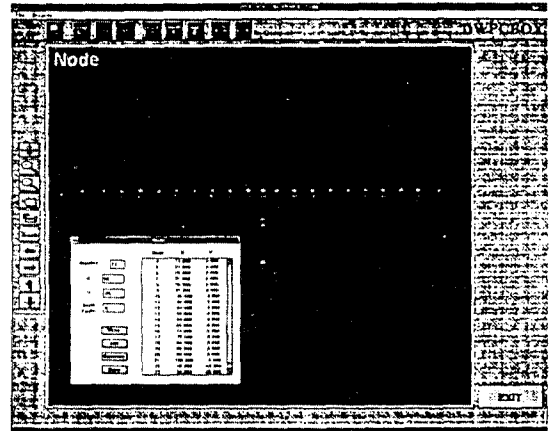


그림 5.1 절점의 생성

- ② 유한요소 모델링을 위한 요소에 관한 데이터를 생성 : 요소번호, 연결된 절점번호, 해당되는 단면번호를 직접 입력받거나 자동생성시킨 후 화면상에 뼈대요소나 종단면도를 나타내 준다.(그림 5.2)

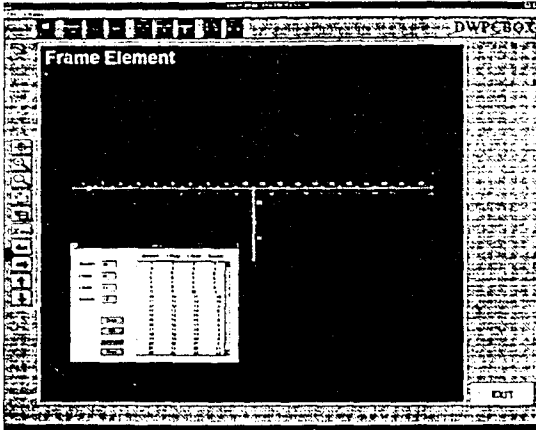


그림 5.2 요소의 생성

③ 세그먼트 모양의 정의와 층의 분할 : 세그먼트 모양을 정의하는 주요좌표와 나누고자 하는 층에 관한 데이터를 입력받아 각 층의 면적과 도심으로부터의 거리를 계산하고 화면상에 나타내 준다.(그림 5.3)

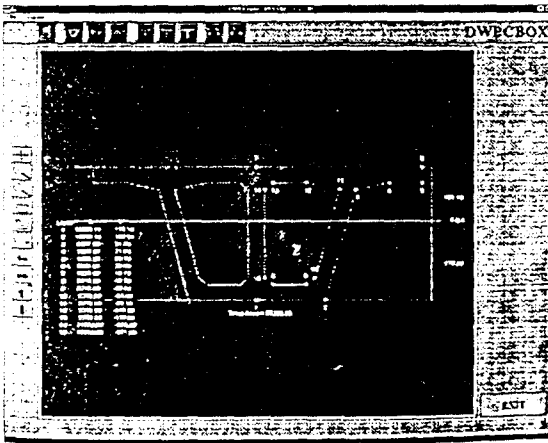


그림 5.3 층에 관한 데이터의 생성

6. 후처리 프로그램

후처리 프로그램의 주요기능은 다음과 같으며 전처리 프로그램과 같이 Pull-down메뉴, Tool bar, 또는 단축키를 통해 편리하게 조작할 수 있다.

- ① 모멘트도
- ② 전단력도
- ③ 축력도
- ④ 변형후 형상
- ⑤ 캠버
- ⑥ 텐던력
- ⑦ 텐던의 배치형상
- ⑧ 중단면도
- ⑨ 뼈대요소에 의한 유한요소 모델링
- ⑩ 콘크리트의 응력
- ⑪ 철근의 배치형상과 응력
- ⑫ 동적해석

- 고유진동수
- 고유형상(애니메이션)
- 지정된 절점에서의 시간이력에 따른 동적 변위

그 밖에 다음과 같은 기능이 있다.

- ① 요소번호, 절점번호, 구속조건 표시
- ② 화면의 이동, 확대, 축소, 문자크기변화 등 화면조작에 관한 기능
- ③ 프린팅

본 후처리프로그램의 가장 큰 특징은 위에서 나열한 기능을 각 시공단계별로 확인할 수 있다는 것이다.

Frame Element

Stage 21

196 Days

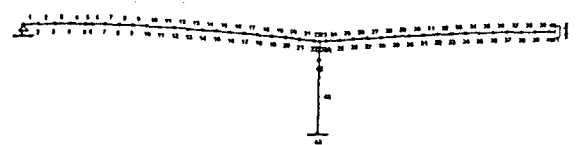


그림 6.1 뼈대요소에 의한 유한요소 모델링

Tendon Profile
Stage 21
196 Days

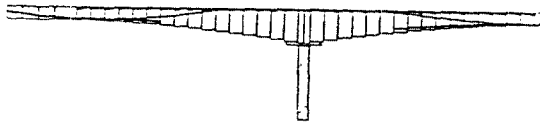
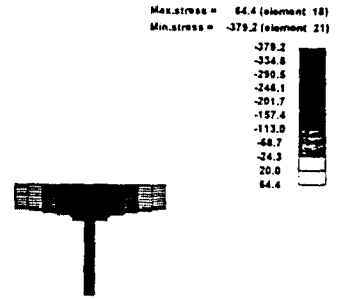


그림 6.2 텐던의 배치형상

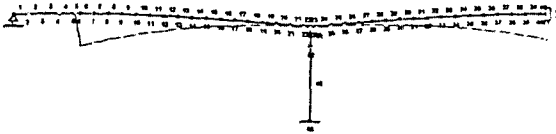
Concrete Stress
Stage 5
91 Days



(a) 91 Days(Stage 5)

Displacement
Stage 21
196 Days

Max.Y-Displ. = 1.883E-01 (node 8)
Min.Y-Displ. = -1.018E+01 (node 8)
Component = Y-Displ.



106
그림 6.3 변형후 형상

Concrete Stress
Stage 21
196 Days

Max.stress = -324.2 (element 41)
Min.stress = -1899.7 (element 22)

-1899.7
-1732.1
-1564.6
-1397.0
-1229.6
-1061.9
-894.4
-726.8
-559.3
-391.7
-224.2



(b) 196 Days(Stage 21)
그림 6.5 콘크리트의 응력

Total Moment
Stage 21
196 Days

Max.Moment = 9.417E+08 (element 40)
Min.Moment = -7.312E+09 (element 22)

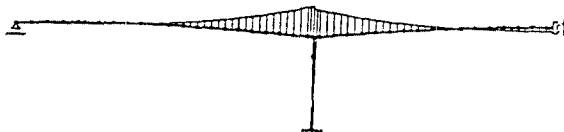


그림 6.4 모멘트도

Steel Stress
Stage 21
196 Days

Max.stress = -8773.9 (element 1)
Min.stress = -46401.0 (element 20)

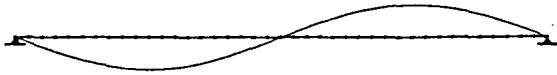
-46401.0
-42339.3
-38275.6
-34212.9
-30150.2
-26087.4
-22024.7
-17962.0
-13899.3
-9836.6
-5773.9



그림 6.6 철근의 배치형상과 응력

Mode shape
Stage 1
28 Days

Mode 2
Frequency = 89.2

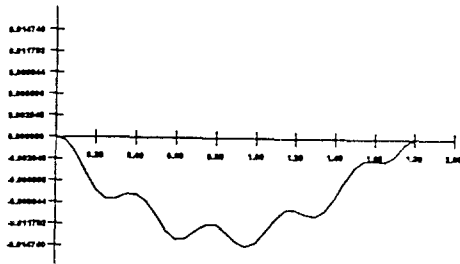


(a) 고유형상(2차모드)

Dynamic Response

Stage 1
23 Days

Node 21
Max.Depl. = 0.200E+00 (at time 0.50)
Min.Depl. = -1.474E-02 (at time 0.50)



(b) 시간에 따른 절점변위
그림 6.7 동적해석

7. 결론

본 연구에서는 교량의 재료비선형 및 기하비선형을 고려한 구조해석을 위하여 부재단면은 층상 구조를 갖는 평면뼈대요소로 정식화하였다. 시공 단계 해석을 위해 경계조건 및 하중의 변경과 뼈대요소의 설치 및 제거가 가능하도록하여 분할시공되는 교량의 모델에 유효하게 적용시킬 수 있게 하였으며, 시공단계와 사용하중단계에서의 구조물의 거동을 예측할 수 있을 뿐만아니라 단성, 균열, 비탄성 및 극한 영역을 고려한 해석도 가능하고 교량의 자유진동해석과 차량하중, 열차하중 및 지진하중을 받는 강제진동해석 등의 선형동적해석도

포함시켰다.

또한, 컴퓨터 사용자에게 익숙한 PC의 윈도우즈(Windows)환경하에서, 입력자료를 효율적으로 생성하고 입력된 자료의 오류를 검색할 수 있는 전처리 프로그램과 방대한 해석결과를 효과적으로 활용할 수 있는 후처리 프로그램을 개발하였다. 전처리 프로그램에서는 박스단면의 이상화 과정과 절점과 요소의 연속성을 검색할 수 있는 내용을 포함하고 있으며, 후처리 프로그램에서는 교량의 시공단계별 가설형상, 변형전후의 형상, 모멘트도, 전단력도, 축력도, 및 콘크리트와 철근의 응력도, PC강재의 배치도 및 긴장력도를 표현하며, 동적해석결과인 구조물의 고유형상과 동적응답을 표현한다.

참고문헌

1. Choudhury,D., "Analysis of Curved Nonprismatic Reinforced and Prestressed Concrete Box Girder Bridges", Report No. UCB/SEMM86/13, Dec., 1986
2. Young-Jin Kang, "Nonlinear Geometric, Material and Time Dependent Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Frames", Report No. UCB/SESM 77-1, Jan., 1977
3. Young-Jin Kang, "SPCFRAME - Computer Program for Nonlinear Segmental Analysis of Planar Prestressed Concrete Frames", Report No. UCB/SESM 89/07, Feb.1989
4. 강 영진, "콘크리트구조물의 시간의존성변형에 대한 해석", 대한토목학회 논문집, 제3권, 제4호 1983.12.
5. 강 영진, "철근콘크리트 평면뼈대구조물의 비선형해석", 대한토목학회 논문집, 제3권, 제4호, 1983.12
6. Petzold,C., 한수찬 역, "프로그래밍 윈도우즈 3.1", 3rd ed., 교학사
7. Heiny,L., 최희창 역, "볼랜드 C++을 이용한 윈도우 그래픽 프로그래밍", 동일출판사