

시공단계를 고려할 수 있는 프리스트레스트 콘크리트 교량 전용 거동해석 시스템

A Structural Behaviour Analysis System for Simulating the Construction Steps of Prestressed Concrete Bridges

안경한¹⁾, 김대영²⁾, 이환우³⁾, 김덕경⁴⁾,
An, Kyung-Han Kim, Dae-Young Lee, Hwan-Woo Kim, Duk-Kyung
김우중⁵⁾, 김철영⁶⁾
Kim, Woo-Jong Kim, Chul-Young

Abstract

프리스트레스트 콘크리트 교량은 콘크리트와 PS 강재의 역학적 장점들을 십분 활용하여 경제적인 단면 구성이 가능한 반면, 서로 다른 두 재료의 복합적인 특성들 즉, 콘크리트의 크리프 (creep), 건조수축 (shrinkage) 과 PS 강재의 이완 (relaxation) 등과 같이 시간에 따라 변화하는 인자들로 인하여 복잡한 구조적 거동을 보여 해석상 어려움이 따른다. 이와같은 복합거동은 시공순서와 시공방법에 의해 시공중의 구조계와 지지조건등이 변화하는 경우에는 더욱 복잡한 양상을 띄게 된다. 뿐만 아니라 박스 거더와 같은 박벽요소에서는 일반적인 보요소 (beam element)로는 나타낼 수 없는 뒹(warping)을 무시할 수 없으므로 뒹 자유도를 구현할 수 있는 특수한 기능의 구조해석용 프로그램의 개발이 절실히 요망된다. 그리고 시공단계별로 출력되는 많은 양의 수치결과들을 설계와 시공실무자에 지향된 형태로 조합, 변형시켜 그래픽 화면상에 나타내는 후처리 프로그램 (Post-processor) 기능도 구조해석용 프로그램의 개발 못지않게 중요하다. 본 연구의 목적은 삼성중합건설과 서울대 토목공학과가 공동으로 뒹(warping)자유도를 포함한 7개의 자유도를 갖는 3차원 보요소를 사용하여 PS 콘크리트의 재료적 특성인 크리프와 건조수축, 그리고 강재의 이완(relaxation)을 포함한 프리스트레싱력의 손실을 고려할 수 있고 시공 단계별 구조계의 변화 및 지지조건들의 다양한 변화를 효율적으로 모사할 수 있는 프로그램의 개발에 있다.

1. 서론

최근 들어 점차 증가하고있는 PS콘크리트 장대교량은 현장상황에 따라 여러 가설공법들중 적절한 방법에 의해 시공되고 있다. 장대교량의 건설은 다른 일반 건설구조와 마찬가지로 단번에 또는 단시간내에 최종 구조계가 이루어지지 않는다. 따라서 장시간의 가설기간 동안에 동일한 구조계를 갖지 않는 것이 보통이다. 특히 F.C.M (Free Cantilever Method) 으로 시공되는 교량의 경우는 시공중의 구조계 변화과정 (캔틸레버(정정)에서 연속(부정정)

으로), 지점조건의 다양한 변화와 함께 시공순서에 따라 달라지는 콘크리트의 시간의존적 재료특성 및 프리스트레싱력의 변화등을 유효하게 고려해야 할 필요성이 실무에서는 절실히 요구된다. 즉, 설계와 시공시에 일련의 시공단계에 따라 교량의 구조적 거동 변화를 추적하는 것이 필요하다. 그런데 현재 통용되고 있는 대부분의 범용 프로그램 (general purposed program) 들은 일정한 구조물의 체계에 단순히 어떤 하중의 영향만을 해석하게 되므로, 실제 시공중의 구조적인 거동 즉, 응력이나 처짐을 추적하기에는 부적합하다. 따라서 이와같은 시공단계를 모사할 수 있는 프로그램의 개발이 필요하게 된다.

본 연구는 기존의 연구결과들의 장점들을 바탕으로 PS 콘크리트 교량의 설계 및 시공중의 거동추적에 실용화 할 수 있는 새로운 교량전용 해석 시스템을 개발하는 데 그 목적이 있었으며 보다 실용적이고 실무 Engineering에 지향되도록 하였다. 본 개발 프로그램과 기존의 프로그램은 <표 1>과 같이 비교 정리 할 수 있고 주된 내용은 다음과 같다.

- 1) 삼성중합건설, 기술연구소, 소 장
- 2) 삼성중합건설, 기술연구소, 책임연구원
- 3) 삼성중합건설, 기술연구소, 선임연구원
- 4) 삼성중합건설, C I C 팀, 선임연구원
- 5) 삼우기술단, 이 사, 공학박사
- 6) 명지대학교, 토목공학과, 조교수

- 박스거더 단면의 뒹(Warping) 자유도를 구현할 수 있는 3차원 요소
- 콘크리트의 시간의존적 재료특성등에 의한 구조 변화 (크리이프, 건조수축, 프리스트레싱력의 손실 등)에 관한 고려
- 시공단계별 변화하는 구조계 및 다양한 지점조건 변화의 효과적인 추적
- 실무자를 지향한 후처리 기능 및 일부의 전처리 기능

2. 시공단계를 고려한 해석

2.1 정적 및 동적 해석

본 시스템은 단면 형상에 관계없이 3차원 해석이 가능하며 뒹을 포함한 7개의 자유도를 갖는 요소(beam element)를 사용하였다⁸⁾. 또한 콘크리트의 시간의존적 재료 특성치인 크리이프(creep)와 건조수축(shrinkage) 그리고 강재의 이완현상(relaxation)등으로 인한 프리스트레싱력의 손실등을 고려함에 있어 이들을 등가하중으로 치환하여 시간이 경과함에 따른 구조물의 거동 영향을 추적할 수 있도록 하였다. 크리이프와 건조수축을 반영하기 위해 도입된 모델은 ACI, CEB-FIP 그리고 BP2 모델이 있고 사용자가 이를 선택적으로 사용할 수 있으며 실험 데이터를 직접 사용할 수 있도록 되어있다.

시공중이나 시공후의 구조물에 대한 동적 해석은 동적특성치들을 구하기 위한 자유진동해석과 이동하는 집중하중, 지진하중¹⁰⁾ 그리고 임의의 시간함수하중(time function load)에 의한 강제진동을 해석한다.

2.2 시공단계 해석

<그림 1>과 같은 3연속 교량을 설계함에 있어 최근까지도 많은 경우가 시공과정의 철저한 고려없이 단순히 범용 구조해석 프로그램들을 사용하고

최종구조계의 구조적 모델링을 통하여 설계를 진행시켜왔다. 그러나 <그림 1>과 같은 간단한 구조계를 갖는 교량도 <그림 2>와 같이 시공중에 다양한 구조계와 지점조건 변화등이 존재한다. 또한 크리이프와 같은 콘크리트 재료의 시간의존적 특성치들은 적용하중의 시점에 따라 그 값들이 변하는 바 시공순서에 따라 tendon들의 긴장시점이 달라지는 실제의 시공상황은 시공과정의 고려없이 예측된 구조적 거동 해석치들과는 확연히 다르게된다. 아울러 설계자가 이러한 시공과정을 정확히 모사하고자 하더라도 기존의 범용 구조해석 프로그램으로는 효율성의 측면에서 그 한계가 있게된다.

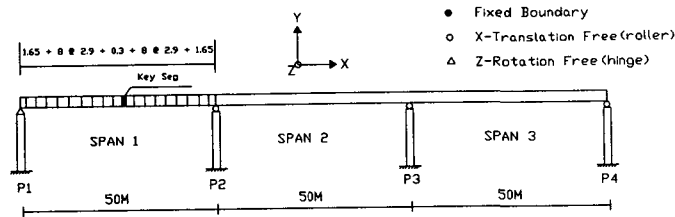
위와같은 상황은 비단 설계시에만 해당되는 것은 아니다. 장시간, 다시간의 장대교량 시공시에는 현장상황을 계속적으로 추적하여 설계시에 미처 고려치 못했거나 잘못 가정된 재료 및 하중 값들에 의한 구조적 변화 과정을 FEED-BACK 시켜야할 상황이 발생하게된다. 따라서 시공과정을 고려할 수 있고 P.S 콘크리트 구조의 재료 및 제반 특성치들을 효율적으로 고려할 수 있는 전용 시스템이 절실히 요구되는 것이 현실이다.

시공단계(construction step)를 고려하기 위해서는 시공 과정중 구조적으로 의미있는 공정 (construction unit work)을 선택하여 그 공정에 의한 구조물의 변화를 그 공정이 실시되는 시간과 순서등에 따라 효율적으로 모사 (simulation)할 수 있어야 하며 한번에 여러가지의 공정이 반영될 수 있어야 한다. 그리고 시간이 경과함에 따라 발생하는 크리이프(creep)와 건조수축(shrinkage)및 P.S 강재의 이완(relaxation)이 구조물의 각 요소에 미치는 영향등을 진행되는 공정에 따라 고려할 수 있어야 하며 이러한 일련의 영향에 대한 처리는 최소한의 입력을 통하여 수행될 수 있어야 한다.

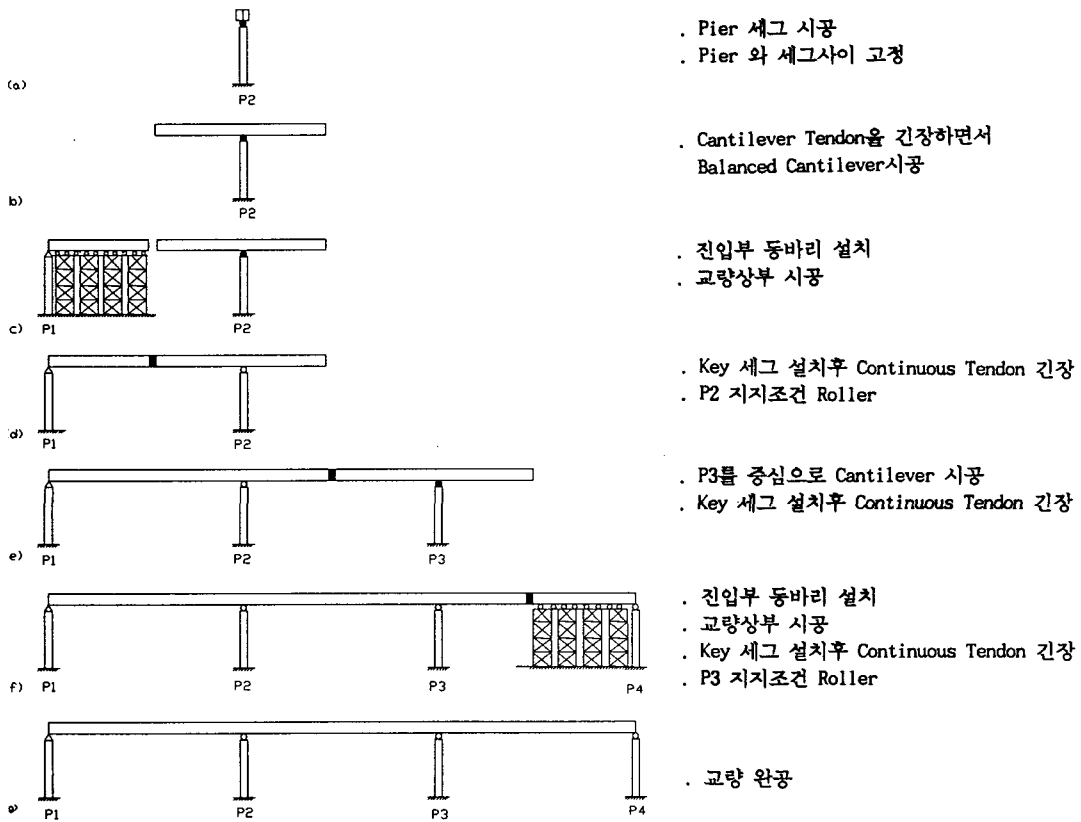
본 연구는 이러한 영향을 고려하기 위하여 각 공정에 해당하는 시공명령어(construction command)를

<표 1> 기존 프로그램과의 비교

프로그램 명	3차원 해석		추가 자유도		단면형상	시공단계 해석	기하학적 비선형 (재료의 비선형)	사용요소		비 고
	직선	곡선	뒹	찌그러짐				MAIN FRAME	STAY CABLE	
SIMPLA2 ¹⁾	0		0	0	제약없음	0		FOLDED PLATE		.
R M ²⁾	0	0			~	0	0	6 d.o.f	0	부분적 후처리
B C ³⁾	2차원				~	0		3 d.o.f	0	부분적 후처리
SEGAN ⁴⁾	0	0	0	0	1 CELL BOX	0		8 d.o.f		.
SFRAME ⁵⁾	2차원				제약없음	0		3 d.o.f		.
MAPBOX ⁶⁾	0	0	0	0	1 CELL BOX		0 (0)	8 d.o.f		.
SPCFRAME ⁷⁾	2차원				제약없음	0	0 (0)	3 d.o.f		.
D7 ⁸⁾	0	0	0		제약없음	0	0	7 d.o.f	0	.
본 시스템 (PSDARI) ⁹⁾	0	0	0		제약없음	0		7 d.o.f		지진하중, 부분침하, 고려 전, 후처리 포함



< 그림 1 > 3경간 연속교(Precast Segment 교량)



< 그림 2 > Balanced Cantilver 공법에 의한 시공과정

정의하고 각 시공명령어별로 하나의 해석단계를 가지는 거동 해석 프로그램을 개발하였다. 프리스트레스트 콘크리트 교량의 시공단계를 모사하기 위하여 정의된 시공 명령어 (construction command)들은 프로그램의 사용자 입력 데이터로 활용되며 시공순서에 따라 단순히 나열함으로써 구조물의 해석을 진행시킨다. 본 시스템의 각 시공명령어들에 대한 종류와 의미는 다음과 같다.

(1) TIME

이 명령어는 이후에 명기되는 시공명령어의 작용 시간을 정의하기 위해 사용되며 구조물 시공의 순서를 조절한다.

(2) ERECT

콘크리트 부재가 구조물의 일부분이 되도록 하는 명령어로 부재의 자중을 작용시키며 Erect될때의 콘크리트의 재령을 고려한다.

- (3) STRESS / REMOVE TENDON
PS강재를 긴장하거나 긴장된 PS강재를 제거한다.
- (4) LOAD
시공중에 작용하는 하중(Construction Load)을 구조물에 재하시킨다.
- (5) MOVE / REMOVE LOAD
재하된 시공하중(Construction Load)을 다른 곳으로 이동시키거나 제거한다.
- (6) SUPPORT
구조물에 구속조건을 부여한다.
- (7) CHANGE / REMOVE SUPPORT
구조물의 기존 구속조건을 변경시키거나 제거한다.
- (8) SETTLE SUPPORT
구조물의 지점부에 입력된 양만큼의 부등침하를 발생시킨다.
- (9) TEMPERATURE
구조물을 이루고 있는 부재 단면내에 부등온도 하중을 가한다.
- (10) CAMBER
현재 시공 상태에서의 필요한 Precamber량과 Casting Curve를 계산한다.

이러한 시공명령어 중 TIME 과 SUPPORT 는 구조물만 제어하고, 나머지 각각의 명령어는 구조물을 제어하는 동시에 해석을 수행하므로 이러한 명령어는 한 회의 비선형 해석을 의미한다. 그리고 명령어 CAMBER는 직전 단계 시공명령어까지의 계산결과를 바탕으로 Precamber량과 Casting Curve를 계산한다.

2.3 전, 후처리 기능(Pre, Post - Processor)

구조해석 프로그램에서의 전, 후처리 기능은 주처리 기능의 효율성을 결정짓는 중요한 요소가 되고있다. < PSDARI > 는 기존의 여러 프로그램과 비교해볼 때 월등히 우수한 후처리 기능과 단면 특성치의 입력 및 Check 기능을 갖는 일부의 전처리 기능을 갖추고 있다.

3. 시스템 설명

본 연구에서 개발된 PS 콘크리트 교량 거동 해석 시스템은 < 표 2>와 같은 환경에서 개발되었으며 전체 Configuration은 < 그림 3 >과 같으며 < 표 3 >은 본 시스템의 전처리, 주처리 시스템을 구성하는 6개의 모듈들에 대해 설명하고 있다.

구조물의 거동해석은 먼저 전처리 기능인 SECTN 을 실행시켜 사용자가 원시 데이터를 작성하는데 필요한 단면상수값들을 Graphic 화면상에서 입력 또는 확인한 후 나머지 다른 입력 데이터들을 작성한다. 이어서 주 처리 프로그램을 실행시키므로써 각 시공 단계에 대해 2.2절의 시공명령어에 따른 해석결과를 받아볼 수 있다. 해석결과는 < 그림 3>과 같이 Alpha-Numeric화일과 후처리 시스템 실행을 위한 데이터화일로 각각 생성된다. 여기서 사용자는 Alpha-Numeric화일의 결과들을 이용하여 구조계산서 등의 보고서를 직접 작성할 수 있으나 본 개발

< 표 2 > 본 연구의 개발 환경

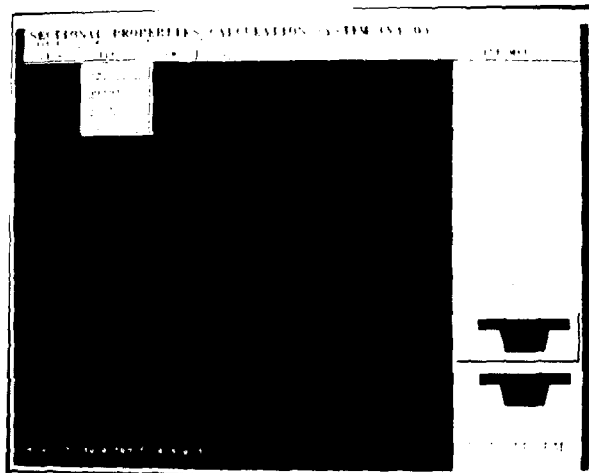
구 분	개 발 환 경
HARDWARE SYSTEM	<ul style="list-style-type: none"> • IBM Workstation RISC/6000 (M320) • 8 Bit 3d High-Performance Graphic Card • Mouse (3 Button) • HP Paintjet Printer
SOFTWARE SYSTEM	<ul style="list-style-type: none"> • Programming Language : <ul style="list-style-type: none"> - FORTRAN (Main-Processor) - C (Post-Processor) • OS : AIX (UNIX) • Compiler : xlf , xlc • Graphic Library : graphIGS V2.2 • Graphic Environment : X-Window + Xlib

< 표 3 > 전처리 및 주처리 시스템의 모듈

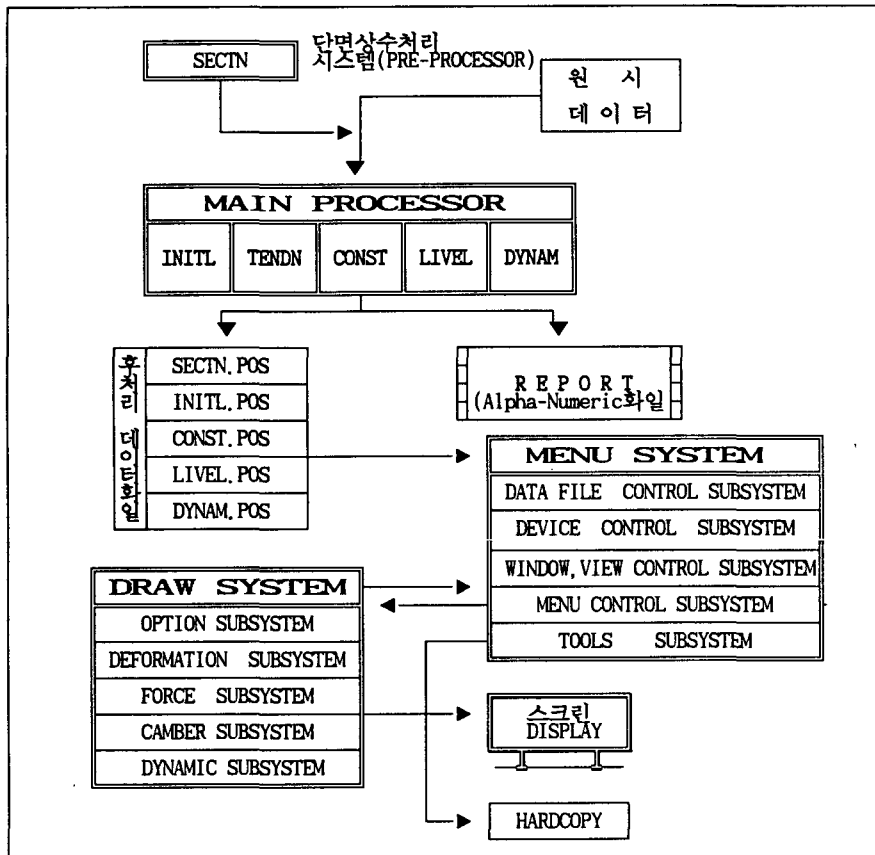
모 들	기 능
SECTN	구조물을 형성하는 부재의 단면 상수값을 계산
INITL	구조물의 기하학적 형상 및 재료성질 정의
TENDN	PC 강재의 기하학적 형상, 긴장에 필요한 자료의 입력 및 초기인장력의 산정
CONST	시공명령어 (Construction Command)에 따른 정적 선형 해석
LIVEL	임의의 시공단계를 완료한 상태에서의 활하중해석 및 하중조합
DYNAM	동적특성 및 강제진동해석

시스템의 그래픽 화면상에서 제공되는 후처리 기능을 활용하여 구조물의 해석 결과들을 쉽게 판독, 분석할 수 있으므로 이를위해 소요되는 많은 시간과 노력을 절감할 수 있다. 후처리 시스템은 주처리 시스템의 실행결과로 얻어지는 후처리 데이터화일들을 입력데이터로 하여 실무자의 Engineering 검토를 위한 다양한 정보들을 그래픽 화면상에서 제공하고 있다.

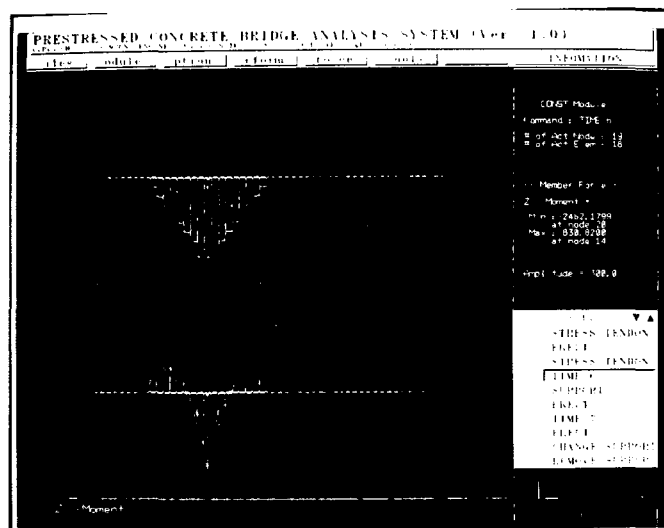
< 사진 1 >은 SECTN을 실행시키는 과정중의 한



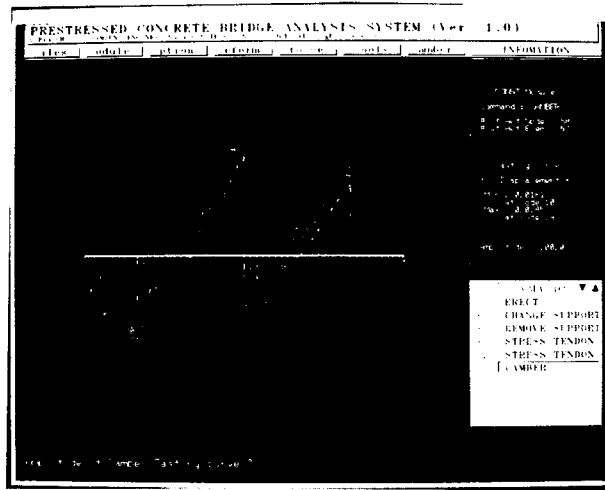
< 사진 1 > SECTN 모듈의 실행과정



< 그림 3 > 전체 시스템의 Configuration



< 사진 2 > 임의의 시공단계에서의 부재력



< 사진 3 > 예제의 Casting Curve

화면으로서 보는 바와 같이 SECTN에서 제공되는 6개의 단면을 이용하거나 임의의 단면 형상에 대하여도 사용자가 그래픽 화면상에서 직접 입력할 수 있다. < 사진 2 >는 < 그림 2.b >의 시공단계에서의 교량 상부구조들의 압축력과 Z축에 대한 모멘트를 예시한 것이며 < 사진 3 >은 < 그림 1 >의 교량 구조를 < 그림 2 >와 같은 시공단계로 건설하고자 할 때의 Casting Curve를 나타내고 있다.

4. 결 론

본 연구를 통해 PS 콘크리트 교량 설계 및 시공시에 구조 엔지니어가 시공과정을 모사할 수 있고 PS 콘크리트 교량의 시간의존적 변화 특성을 고려할 수 있는 거동해석용 시스템을 개발하였다. 본 시스템은 실무자의 사용성에 지향되도록 하중조합 기능, Camber Control을 위한 Casting Curve 생성기능등의 여러기능을 내포하고 있으며 프로그램 수행시의 DATA입력단계부터 수행결과 분석단계까지 전 과정을 본 시스템에서 부여한 일부 전처리 기능과 후 처리 기능을 이용하여 그래픽 화면상에서 사용자는 쉽게 확인, 분석이 가능하도록 하였다.

참고문헌

- 1) R.C. Brown, Jr., N.H. Burns, and J.E. Breen, *Computer Analysis of Segmentally Erected Precast Prestressed Box Girder Bridges*, research report no.121-124, Uni. of Texas at Austin, 1974
- 2) Technische Datenverarbeitung, RM-Spaceframe Manual, Technische Datenverarbeitung, Heinz Pircher und Partner, 1984
- 3) Europe Etudes Gecti, B.C. Bridge Construction Computer Program Manual, Europe Etudes Gecti, France, 1977
- 4) Van zyl, S.F. and Scordelis, A.C., *Analysis of Curved Prestressed Segmental Bridges*, Journal of the structural Division, ASCE, Vol.105, No. ST11, 1979
- 5) M.A. Ketchum, *Redistribution of stresses in segmentally erected prestressed concrete bridge*, U.C. BERKELY, UCB/SESM-86/07, 1986
- 6) Choudhury, D., *Analysis of Curved Nonprismatic Reinforced and Prestressed Concrete Box Girder Bridges*, U.C. Berkeley, UCB/SEMM-86/13, 1986
- 7) 강영진, SPCFRAME-computer program for nonlinear segmental analysis of planar prestressed concrete frames, U.C. BERKELY, UCB/SEMM-89/07, 1989
- 8) 김우중, 시공단계를 고려한 프리스트레스트 콘크리트 교량의 정적 및 동적 3차원 거동에 관한 연구, 공학박사학위논문, 서울대학교, 1990
- 9) 프리스트레스트 콘크리트 교량전용 거동해석 시스템 (PSDARI), 삼성중합건설, 1991
- 10) 김철영, 지진하중에 대한 사장교의 휨-비틀림해석, 공학박사학위논문, 서울대학교, 1989