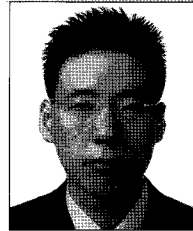
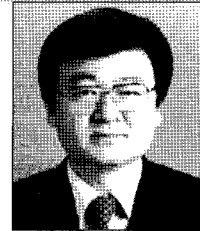


시공단계를 고려한 프리스트레스트 콘크리트 교량의 해석 및 설계 프로그램

Analysis and Design Program for Prestressed Concrete Bridges Considering Construction Stages



김 태 훈*



신 현 목**

* (주)대우건설 기술연구원 토목연구팀 선임연구원
 ** 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트 구조물은 초기에는 재료의 개발부족으로 인하여 실용화되지 못하였으나 고강도 콘크리트의 개발, PS 강재의 강도증가 및 질적 향상, 컴퓨터를 이용한 구조해석기술의 발전으로 인하여 오늘날 다양한 토목구조물에 사용되고 있으며, 프리스트레스트 콘크리트 교량은 대표적인 프리스트레스트 콘크리트 구조물이다.

프리스트레스트 콘크리트 교량의 건설은 날로 증가하고 있으며, 이를 해석하는 전용프로그램¹⁾도 현재 많이 개발되고 있는 추세이다. 그러나 대부분의 해석프로그램들은 역학적 거동을 예측하는 연구용 프로그램으로서, 해석 결과의 분석에 많은 노력이 소모되므로 실무자가 실용적으로 설계에 이용하기에는 적절하지 못하다. 또한 해석한 결과가 시방서^{2,3)}의 설계기준에 부합하지 않을 때 PS 강재량, PS 강재의 배치 그리고 콘크리트 단면 같은 초기의 입력 데이터를 자동적으로 수정하는 자동설계의 개념이 도입되어 있지 않아서 설계자가 수정한 데이터로 만족스런 결과가 나올 때까지 해석을 반복 수행하여야 하는 불편한 점이 있다. 따라서 시방서의 설계기준에 부합하는 응력검도 및 PS 강재량, PS 강재의 배치 그리고 콘크리트 단면의 수정에 의한 반복해석 등이 가능한 프로그램 개발이 요구된다. 또한 입력데이터 작성과 해석 결과의 분석이 편리하도록

전·후처리 기능이 포함된 프로그램 개발이 요구된다.

프리스트레스트 콘크리트 교량은 공법에 따라서 거동특성이 달라지기 때문에 시공단계를 고려한 해석을 해야만 정확한 거동을 추적할 수 있다. 시공중의 각 단계를 고려하기 위해서는 교량의 실제 시공중에 발생하는 여러 공정 중에서 구조적으로 의미가 있는 공정을 가능한 정확히 해석적으로 구현하여 그 공정이 구조물의 거동에 미치는 영향을 파악할 수 있어야 한다. 그리고 각 공정의 순서와 실시되는 시간을 고려해야 하고 동시에 진행되는 여러 공정도 고려해야 한다. 또한 콘크리트의 크리프, 건조수축, 그리고 PS 강재의 이완 등 시공중에 시간의 경과에 따라 발생하는 시간의존적인 변형들이 구조체에 미치는 영향도 고려해야만 한다.

이 연구의 목적은 프리스트레스트 콘크리트 교량의 시공단계별 해석과 자동화기법을 도입한 설계가 가능한 프로그램의 개발 및 전·후처리 기능이 포함된 사용자 중심의 프로그램(user-oriented program)을 개발하는 것이다.

2. 해석이론 및 시공단계 모사

이 연구에서는 프리스트레스트 콘크리트 교량의 해석을 위해서 그림 1과 같이 축대칭인 단면을 가지며 길이방향으로 단면의 변화가 없는 2차원 골조요소를 사용하였다.

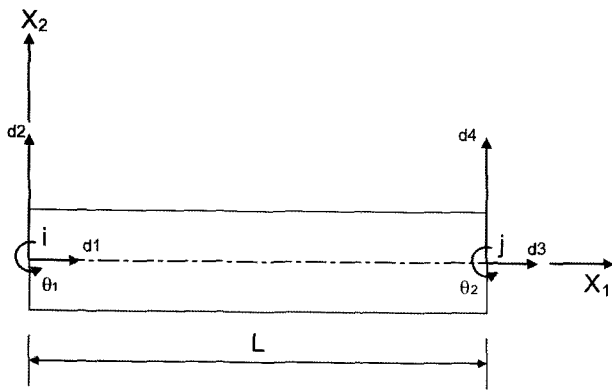


그림 1 Frame element

부재의 각 단위 절점은 X_1 방향변위, X_2 방향변위 및 회전변위의 3개의 자유도를 가지며, 구조물의 강도매트릭스는 직접강도법에 의해 구성된다. PS 강제요소는 골조요소의 양절점으로부터의 편심거리로 정의하며, X_1 - X_2 평면에서 X_1 축에 대한 2차 포물선 형상으로 가정하였다. 이때 콘크리트와 PS 강재는 완전하게 부착되어 일체로 작용하는 것으로 가정하였다.

콘크리트는 시간이 경과함에 따라 재료성질이 변하므로 특히 긴 경간의 프리스트레스트 콘크리트 교량에 있어서 구조물의 처짐 및 응력의 변화를 예측하는데 중요한 요소가 된다고 할 수 있다. 이러한 시간의존적 성질에는 크리프(creep), 건조수축(shrinkage), 강도증가(aging) 그리고 PS 강재의 이완현상이 있다.⁴⁾ 이 연구에서는 콘크리트 구조물의 장기거동 해석에 결정적인 영향을 미치는 크리프, 건조수축에 의한 변형을 서로 독립적인 항으로 구분하고 두 변형의 합으로 이루어진다고 가정하는 선형중첩법(linear superposition method)을 사용하였다. 선형중첩법을 이용하여 재령 t_0 일에 어떤 일정한 하중이 재하되었을 때 t 일에서의 총변형률 $\varepsilon(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_i(t_0) + \varepsilon_{cr}(t, t_0) + \varepsilon_{sh}(t, t_0) \quad (1)$$

여기서, $\varepsilon_i(t_0)$ 는 하중재하 즉시 발생하는 변형률, $\varepsilon_{cr}(t, t_0)$ 는 $t-t_0$ 일 동안 크리프에 의해 발생하는 변형률, $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$ 는 $t-t_0$ 일 동안 건조수축에 의해 발생하는 변형률이다. 이러한 시간에 따른 콘크리트의 특성을 ACI 209모델⁵⁾과 CEB/FIP 모델⁶⁾을 사용하여 나타내었다. PS 강재에 대해서는 마찰손실, 정착장치의 활동에 의한 손실, 그리고 이완현상 등을 고려하였다.

이 연구에서는 요소의 설치 및 제거, PS 강재의 긴장, 경계조건의 변화, 이동식 작업차를 포함한 가설장비의 설

치, 이동 및 제거 등과 같은 각각의 공정을 모사할 수 있는 부명령어(sub-command)를 이용하여 실제의 공정과정을 모사함으로써 시공단계를 고려한 프리스트레스트 콘크리트 교량의 해석을 수행할 수 있도록 하였다.

3. 사용자 중심의 해석 및 설계 프로그램

3.1 개발도구 및 사용자 환경

프로그램 개발시 플랫폼과 사용자 환경(interface)의 결정은 우선적으로 결정할 문제이다. 프로그램을 어떤 플랫폼에서 작동하도록 설계할 것인가의 문제는 프로그램 개발에서 가장 중요하며 먼저 결정할 사항이다. 따라서 플랫폼의 선정은 프로그램의 폭넓은 사용을 위해서 범용 플랫폼으로 선택하여야 하며 신중히 결정되어야 한다. 이 연구에서 개발한 NEO-PCBRG의 플랫폼은 MS Windows 계열이다. MS Windows 계열은 마이크로소프트사가 개발한 32비트 환경을 구현한 구동시스템(operating system)으로써, GUI(Graphic-User-Interface)⁷⁾를 기본적으로 지원하며, 무엇보다도 개인용 컴퓨터 시스템에 가장 많이 보급되어 있다는 장점을 갖고 있다. 이 연구에서는 사용자 중심의 프로그램(user-oriented program)의 특성을 고려한 측면에서 GUI 구현을 위해 여러 가지 제어기와 도구를 제공하며, 그래픽 사용자 환경을 충실하게 구현할 수 있는 최적의 언어인 마이크로소프트사의 Visual Basic⁸⁾과 컴퓨터언어 가운데서도 수치적 해석기의 개발이 용이한 Fortran을 NEO-PCBRG의 개발도구로 사용하였다.

3.2 NEO-PCBRG 프로그램

이 프로그램은 미국 California대학에서 FEM을 교육하기 위해 만들어진 유한요소해석용 범용 Program인 FEAP(Finite Element Analysis Program)⁹⁾을 근간으로 하여 프리스트레스트 콘크리트를 고려할 수 있도록 수정하여 개발하였다.

이 연구에서 개발한 NEO-PCBRG는 프리스트레스트 콘크리트 교량의 해석 및 설계를 효율적으로 처리할 수 있는 유한요소해석 프로그램으로서 구성은 크게 전처리 프로그램(pre-processor), 주 프로그램(main program) 및 후처리 프로그램(post-processor)으로 되어 있으며, Fortran과 Windows용 프로그램인 Visual-Basic을 이용하여 개발한 후 Module화 하였고, Windows 환경에서 Mouse를 이용한 간편한

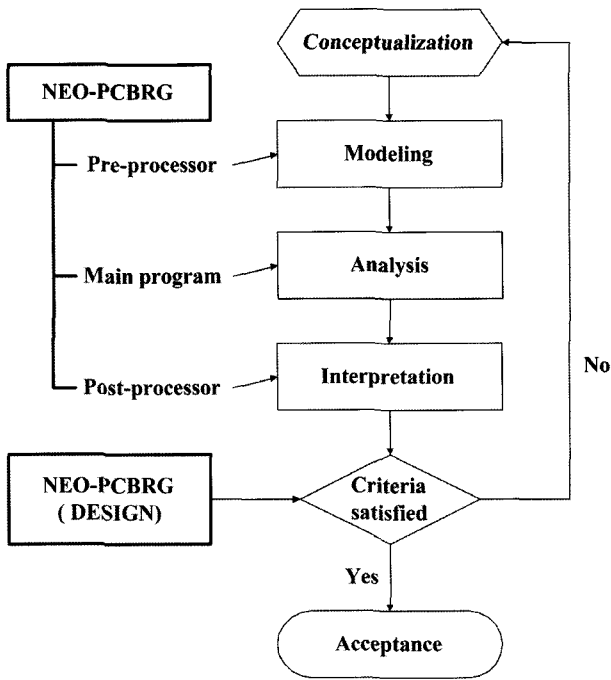


그림 2 Entire program procedure

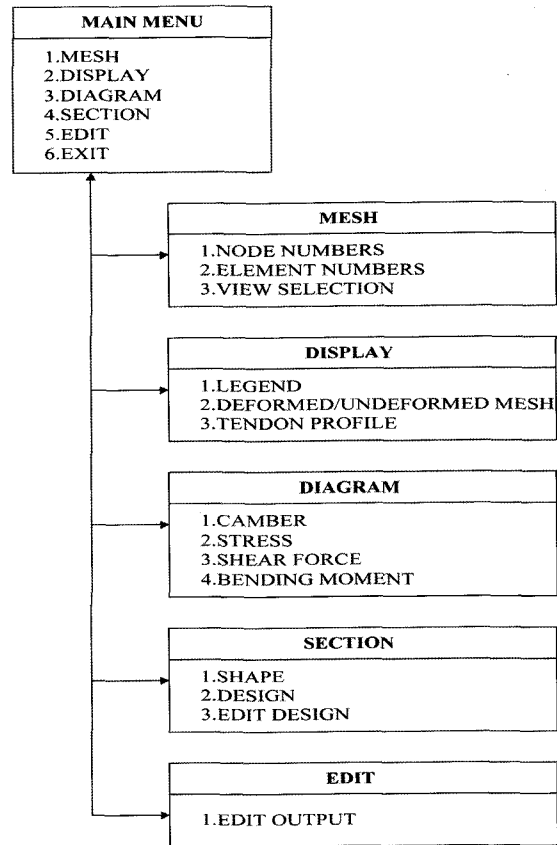


그림 4 Simplified schematic of post-processor program

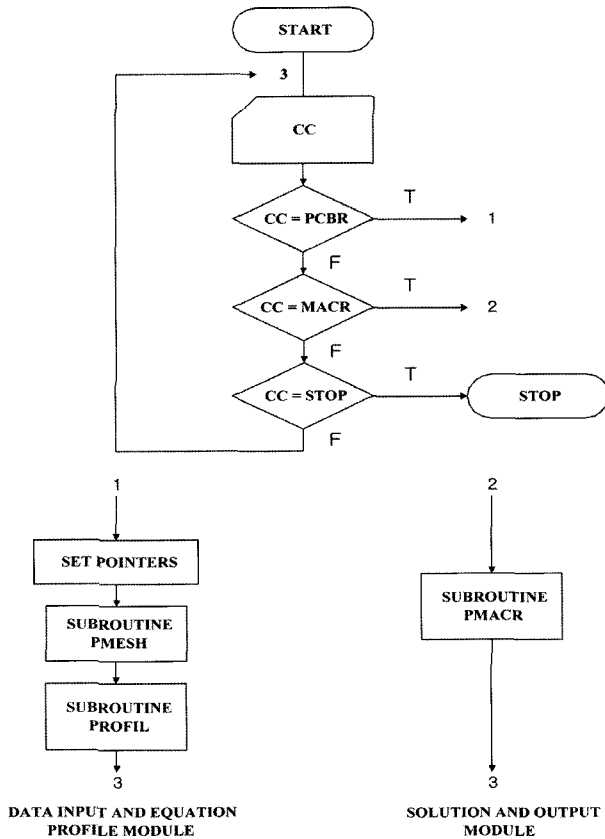


그림 3 Flowchart for control program procedures

메뉴선택에 의해서 유기적으로 상호작용을 하는 통합 시스템으로 개발되었다. 그림 2는 프로그램의 전체적인 순서도이다.

이 연구에서 개발된 NEO-PCBRG의 주 프로그램은 시공단계를 고려한 프리스트레스트 콘크리트 교량의 해석 및 설계를 위한 프로그램으로서 두 개의 기본적인 부분, 즉 데이터 입력과 해석 및 출력부로 나누어진다.

각 부분은 복잡한 알고리즘에 의해 구성되어 있는데, 기본적인 체계는 그림 3에서와 같은 논리조건식에 의해 Subroutine을 선택적으로 판단 처리하게 되어있다. 이 프로그램에서는 데이터 처리의 반복적인 작업이 줄어들도록 데이터 작성의 간편성을 추구하였고, 그림 3과 같이 Macro command를 Data file에 작성하여 수행하도록 하였다. 또한, 각각의 시공 단계를 모사할 수 있는 명령어들을 정의하여 실제 시공순서대로 입력함으로써 각 단계별 해석을 수행한다. 이 프로그램이 계산한 결과의 Out file은 Post-Processing을 위한 *.GRP File로 저장되는데, 이 *.GRP File로 도화처리를 하게 된다.

전처리 프로그램은 유한요소해석을 위한 유한요소망을 자동생성시키기 위한 프로그램이다. 유한요소해석에 있어서 유한요소망은 해석 대상문제에 따라서 다양한 모양으로 구성되며, 많은 수의 요소를 포함하므로 수작업으로 작성하는 것은 시간적으로나 경제적으로 매우 비효율적이다

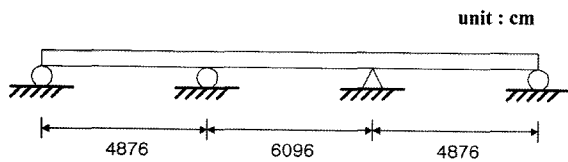
뿐만 아니라 작성과정에서의 입력실수로 발생한 오류의 수정작업에도 많은 시간과 노력이 소요되므로 전처리 프로그램을 이용한 요소망의 자동생성기능은 효율적인 유한요소해석을 위해서는 반드시 필요한 기능이다.

후처리 프로그램에서는 주 프로그램을 이용하여 얻어진 해석결과를 바탕으로 알고자 하는 정보를 그래픽으로 가시화 함으로써 유한요소해석에 의한 결과의 분석을 보다 효율적으로 할 수 있도록 하였다. 이 후처리 프로그램에서는 앞서 구조해석 프로그램에서 산출된 Graphic용 File을 바탕으로 이용자가 쉽게 해석결과를 평가할 수 있도록 응력도, 단면력도, 변형도, 설계결과 등을 도화처리한다. 이 후처리프로그램의 수행 Routine은 그림 4와 같다.

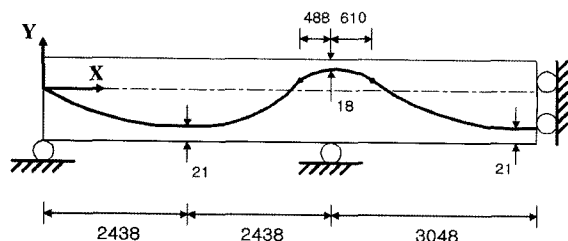
4. 해석 예

4.1 3경간 프리스트레스트 콘크리트 연속교교

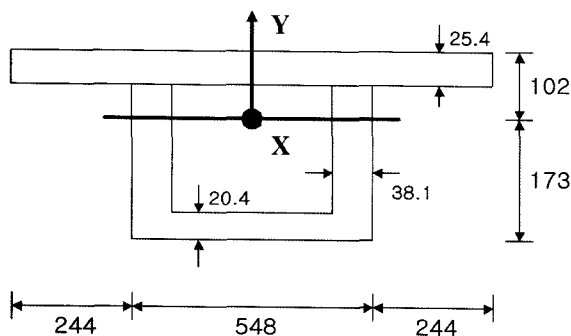
이 연구에서 개발된 프로그램의 해석결과의 검증 및 설계작업의 효율성을 보이기 위하여 3경간 프리스트레스트 콘크



(a) Structure Geometry



(b) Prestressing Tendon Profile



(c) Cross Section Profile

그림 5 Three span post-tensioned box girder bridge

리트 연속교인 CHOUDHURY교¹⁰⁾를 예제로 선택하였다.

이 연구에서 개발된 전처리프로그램을 사용하여 그림 5에 나온 예제의 입력데이터를 작성한 결과는 다음과 같다 (그림 6~8).

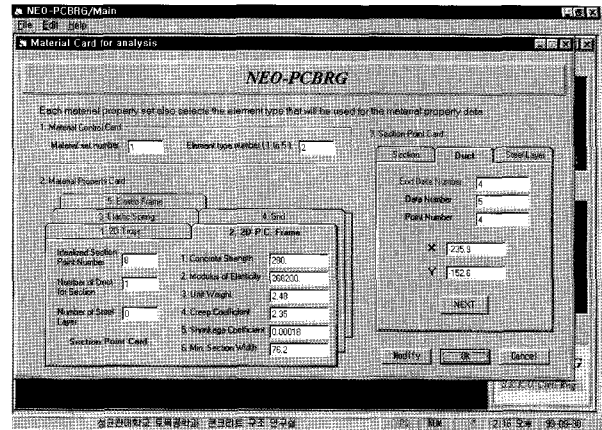


그림 6 Material card (Specify the material property)

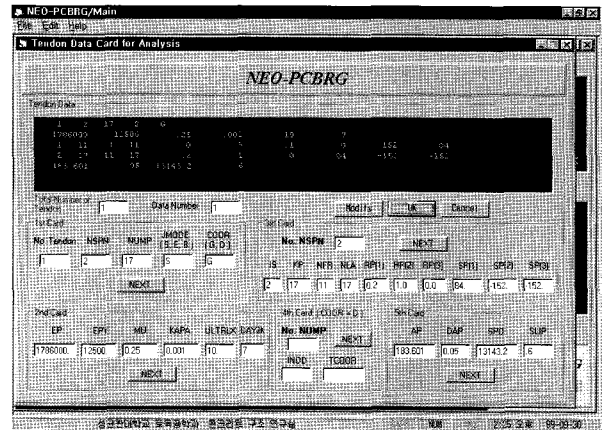


그림 7 Tendon data card (Specify the geometry and properties of tendon)

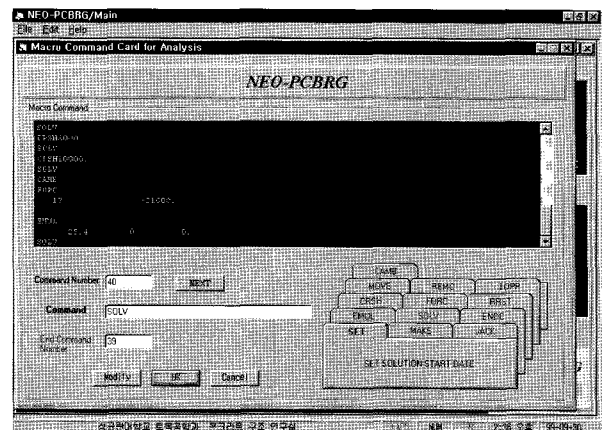


그림 8 Macro command card (Solve many type of problems, Describe the construction sequence operation)

전처리프로그램을 통해 입력을 마친 후 주 프로그램을 사용하여 해석의 결과를 얻는다. 해석의 결과는 검증의 위

해 SPCFRAME¹⁾의 결과와 비교 분석하였다. 그림 9와 그림 10은 사하중(Dead Load)에 의한 장기거동 해석의 처

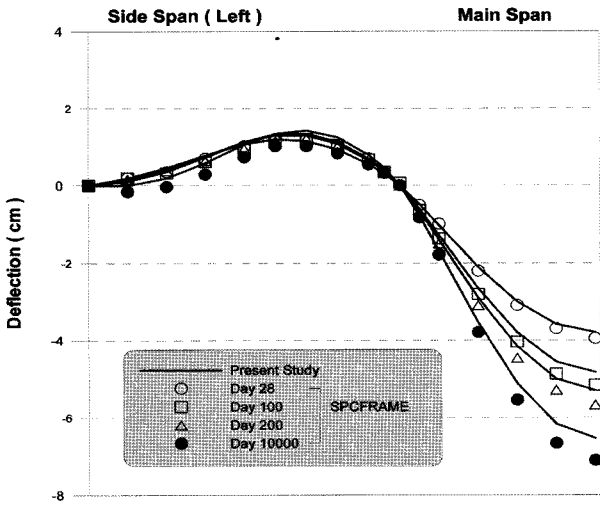


그림 9 Deflected shape for different times (without live load)

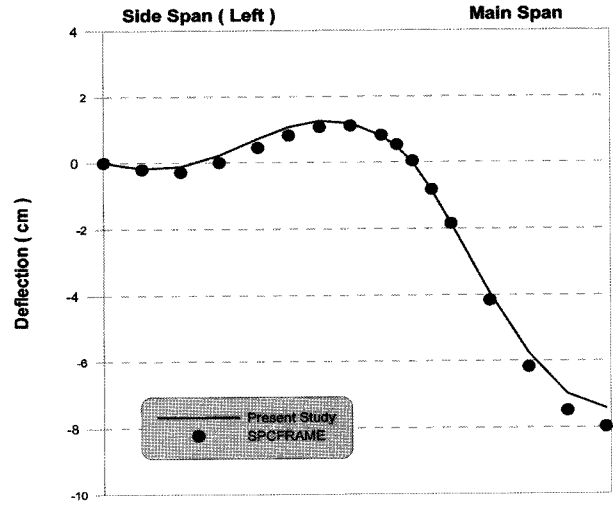


그림 10 Deflected shape of the case I

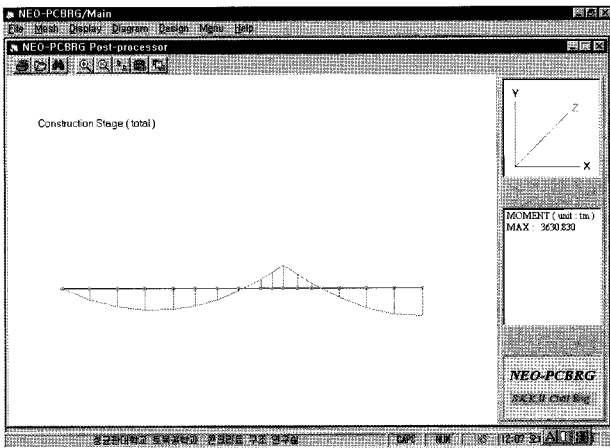


그림 11 Bending moment diagram at the construction stage

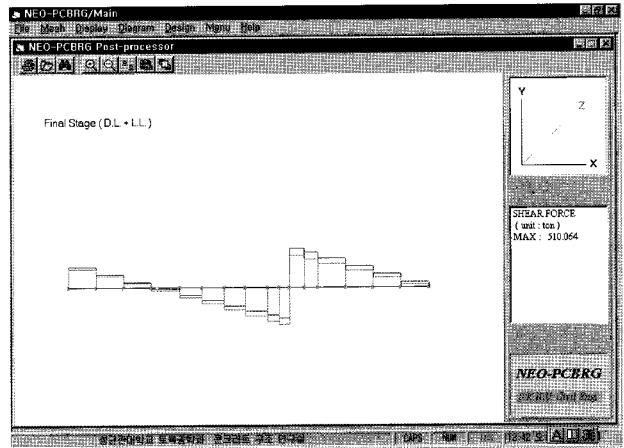


그림 12 Shear force diagram at the final stage (D.L. + LL.)

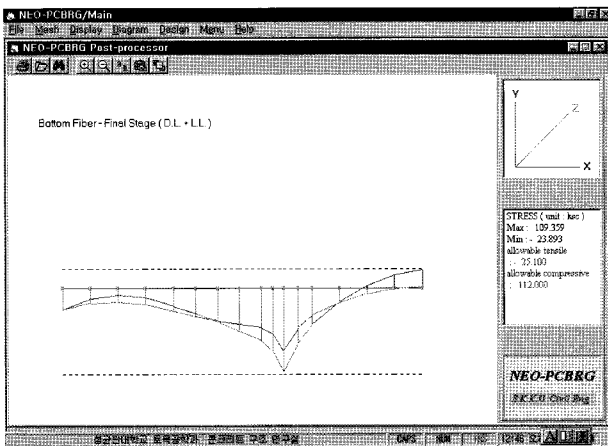


그림 13 Stress at the final stage

cho.DGN - 모상

STRESS CHECK DUE TO MAX. MOMENT UNDER CONSTRUCTION

MBR	NFR	SECT. AREA	SECT. MOD.	STRESS	CHECK
1	1	.54959E+05	top; .58342E+07	.40871E+02	(OK)
			btm; -.35722E+07	.36522E+02	(OK)
1	2	.54959E+05	top; .58342E+07	.41549E+02	(OK)
			btm; -.35722E+07	.35445E+02	(OK)
2	1	.54959E+05	top; .58342E+07	.42275E+02	(OK)
			btm; -.35722E+07	.36170E+02	(OK)
2	2	.54959E+05	top; .58342E+07	.40127E+02	(OK)
			btm; -.35722E+07	.39594E+02	(OK)
3	1	.54959E+05	top; .58342E+07	.40875E+02	(OK)
			btm; -.35722E+07	.40342E+02	(OK)
3	2	.54959E+05	top; .58342E+07	.36285E+02	(OK)
			btm; -.35722E+07	.47512E+02	(OK)
4	1	.54959E+05	top; .58342E+07	.37885E+02	(OK)
			btm; -.35722E+07	.40312E+02	(OK)
4	2	.54959E+05	top; .58342E+07	.30427E+02	(OK)
			btm; -.35722E+07	.58586E+02	(OK)

그림 14 Stress check list for design

침변화와 내부지점에 최대 부모멘트가 일어나도록 재하되는 경우의 처짐도이며, SPCFRAME의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

해석의 결과는 후처리프로그램을 통하여 다음과 같이 사용자가 시공단계별로 쉽게 확인할 수 있으며, 분석에 소요되었던 시간과 노력을 절감시킬 수 있을 것으로 판단된다(그림 11~14).

4.2 활하중 합성 거더교

이 연구에서 개발한 프로그램의 시공단계별 해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 2경간 연속 프리스트레스트 판형 교량의 실험결과¹¹⁾와 비교·분석하였다.

실험된 교량의 종방향 재원은 그림 15와 같고 단면의 형상은 그림 16과 같다. PS 강재의 긴장력은 panel이 타설된 후 7일째에 도입되었으며, 연속화는 panel의 재령 60일에 이루어졌다. Panel의 28일 압축강도 f_c 는 522.924 kgf/cm²이며 최종 크리프계수는 2.1, 최종 건조수축 변형률은 0.0006이다. 바닥판 슬래브의 28일 압축강도는 432.26 kgf/cm²이며 최종 크리프계수는 2.1, 최종 건조수축 변형률은 0.0009이다. PS 강재의 항복응력 f_y 는 18977.06 kgf/cm²이며, 초기 긴장력은 247tonf

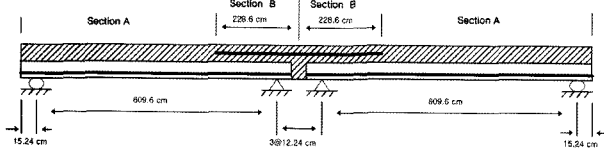


그림 15 Full-span prestressed concrete from panels

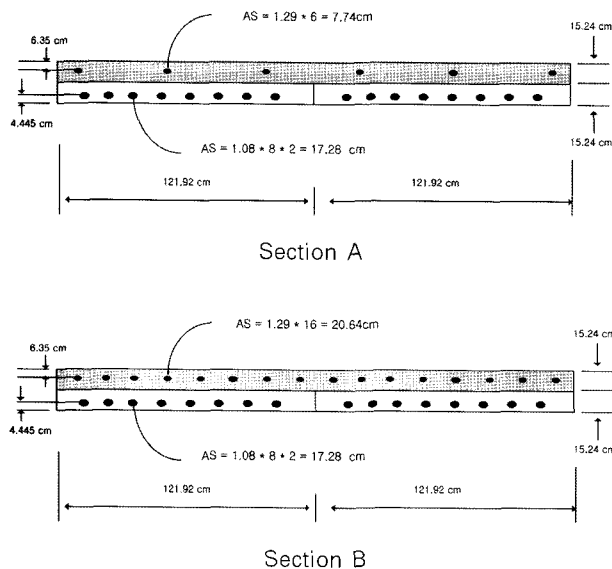


그림 16 Cross section

이다.

연속화된 활하중 합성 거더교에서 주로 고려할 사항은 거더, 현장타설 바닥판, 그리고 가로보의 타설 시기와 연속화 후의 경계조건의 변화 등이다. 프리스트레스트와 자중·활하중 등에 의한 크리프, 거더와 바닥판, 연결부 가로보의 재료적 특성, 그리고 재령의 차이로 인한 시간의존적 거동 특성을 포함한 시공단계별 해석을 효과적으로 구현하지 못하면 정확한 결과를 얻을 수 없다.

이 연구에서는 상부 바닥판의 균열에 의한 효과를 고려하기 위하여 근사적으로 바닥판 콘크리트를 임의의 층으로 분할해서 콘크리트의 인장강도를 초과한 층은 제외시키는 방법을 사용하였으며, 내측 연결 지점의 균열을 고려하지

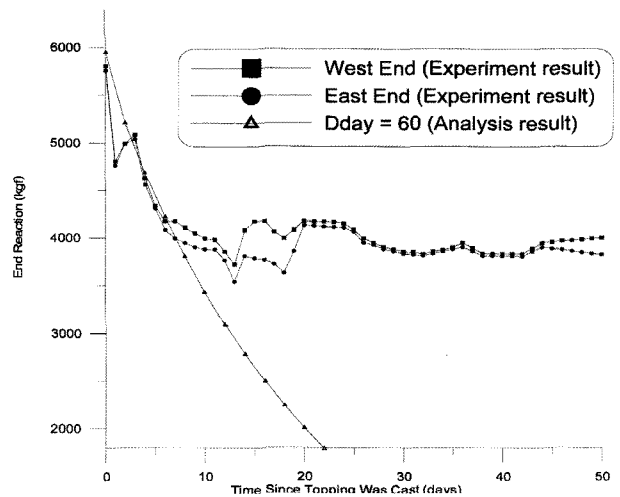


그림 17 End reaction (Ignore crack)

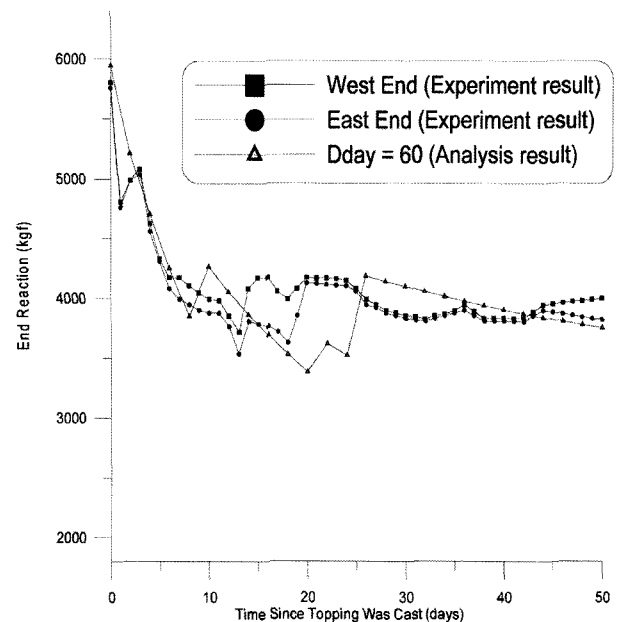


그림 18 End reaction (Include crack)

많은 해석결과와 균열을 고려했을 때의 해석결과를 그림 17과 그림 18에 나타내었다. 해석결과 거더와 슬래브의 재령 차이가 클 경우 내부 지점에서의 구속 모멘트로 인한 균열을 고려했을 때 보다 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결 론

이 연구에서는 시공단계를 고려한 프리스트레스트 콘크리트 교량의 해석 및 설계를 위한 사용자 중심의 프로그램인 NEO-PCBRG를 개발하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) NEO-PCBRG는 Visual-Basic을 이용하여 입력자료의 작성을 용이하게 하는 전처리 프로그램과 해석결과와 그래픽 처리를 통한 가시화 기능을 갖는 후처리 프로그램을 개발함으로써 GUI(Graphic-User-Interface) 기능을 통해 해석결과와 분석과 설계작업을 간편하게 할 수 있었다.
- 2) 프리스트레스트 콘크리트 교량의 시간의존적 특성인 크리프, 건조수축 등의 영향을 고려한 해석을 수행할 수 있으며, 부명령어(sub-command)를 이용하여 시공단계를 모사함으로써 여러 가지 다양한 가설공법을 고려한 해석을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 해석결과가 시방서의 설계기준에 부합하지 않을 때 PS 강재량, PS 강재의 배치 그리고 콘크리트 단면 등을 수정하여 반복 수행함으로써 만족하는 설계결과를 구하였다.
- 4) NEO-PCBRG를 이용하여 실무에의 적용성을 검토하는 과정을 통해서 타당성을 입증할 수 있었으며 올바른 적용방법에 관한 세부적인 적용지침을 제시하여 실무자가 현장문제에 보다 합리적으로 개발된

프로그램을 사용할 수 있도록 하였다.

참 고 문 헌

1. Kang, Y. J. (1989), "SPCFRAME-Computer Program for Nonlinear Segmental Analysis of Planar Prestressed Concrete Frames," University of California, Berkeley, UCB/SEMM-89/07.
2. 건설교통부(2005), 도로교설계기준.
3. 한국콘크리트학회(2003), 콘크리트구조설계기준.
4. Collins, M. P., and Mitchell, D. (1991), Prestressed Concrete Structures, Prentice-Hall Inc.
5. ACI Committee 209 (1992), Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI 209R-92.
6. Comite Euro International Du Beton (1993), CEB-FIP MODEL CODE (DESIGN CODE).
7. Stephens, R. (1998), Visual Basic Graphic Programming, John Wiley & Sons, Inc.
8. 이형배 (1996), 비주얼베이직 4, 사이버출판사.
9. Zienkiewicz, O. C., and Taylor, R. L. (1989), The Finite Element Method, Fourth Ed, McGraw-Hill Book Company.
10. Choudhury, D. (1986), "Analysis of Curved Nonprismatic Reinforced and Prestressed Concrete Box Girder Bridges," University of California, Berkeley, UCB/SEMM-86/13.
11. Peterman, J. R., and Ramirez, A. J. (1998), "Restraint Moment in Bridge with Full-Span Prestressed Concrete Form Panels," PCI Journal, pp 54-73. 