

PC장대교량의 정밀안전시공을 위한 시공계측관리시스템의 개발에 관한 연구

A Study on Development of Monitoring System for Precise
Construction of Large Scale Prestressed Concrete Bridges

오병환*
Oh, Byung Hwan

김의성**
Kim, Eui Sung

최인혁***
Choi, In Hyuck

양인환****
Yang, In Hwan

Abstract

Recently, the prestressed concrete long-span bridges are increasingly built at various locations in the world. The mechanical and structural behavior of prestressed concrete bridges is very complex because of nonlinear and time-dependent material behavior and sequential change of structural system due to stepwise construction. These factors may cause construction errors with respect to design value and monitoring system is needed to minimize or to protect construction errors.

This study presents the basic development of monitoring system for precise construction of large scale prestressed concrete bridges.

1. 서 론

최근들어 기간산업의 확충과 산업의 급속한 발전으로 구조적인 안전성, 사용성, 내구성, 경제성, 유지관리의 측면에서 유리한 PC박스거더교량의 건설이 증가하고 있는 실정이다. PC장대교량은 그 건설공법도 다양하며 시공단계별로 구조계가 계속 바뀌는 특징을 가지고 있다. 즉, 각 건설공법에 따라 시공단계별로 구조계가 변화하여 정밀안전 시공을 위해서는 시공시 각 시공단계마다 계측을 실시하여 설계당시 해석하여 얻은 설계값을 수정보완하여야 한다. 이를 위해서는 시공단계에 따라

* 정호원, 서울대학교 토목공학과 교수, 공학박사

** 정호원, 동부건설기술연구소 소장, 공학박사

*** 정호원, 동부건설기술연구소 선임연구원, 공학박사

**** 정호원, 서울대학교 토목공학과 대학원 박사과정

변하는 구조계를 실질적으로 고려하여 정밀하게 재해석하는 과정이 필요하다. 각 시공단계에서 발생하는 오차를 방지하거나 가능한 한 최소화시키기 위해서는 강선의 긴장량, 교량상부구조의 처짐, 응력 및 온도 등의 시공관리 항목에 대한 방대한 자료를 신속하고 양호한 정밀도로 계측할 수 있는 자동계측 시스템과 여기서 얻어진 계측자료를 실시간으로 획득하여 미리 정해진 관리항목의 최적조정량을 산출할 수 있는 보정시스템을 구축하여 시공 허용치의 범위내에서 교량의 시공곡선 및 형상을 확보하고 구조물의 완성후에도 사용성 및 안전도 확보를 위해 지속적인 유지관리와 계측이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 PC장대교량의 정밀안전시공을 위한 시공계측관리시스템을 개발하고자 하며, 그 기본적인 연구를 수행하였다.

2. 시공관리 계측시스템

2.1 시공관리시스템의 구성

본 연구에서 개발하고자하는 시공관리시스템은 크게 PC박스거더교량의 시공단계 해석시스템, 시공오차의 분석 및 보정제어시스템, 그리고 전·후처리 시스템 등으로 구성한다.

PC박스거더교량의 시공단계 해석시스템에서는 뼈대요소(콘크리트 주형) 및 케이블 요소(PS강재)를 사용하여 교량을 모델링한다. 교량의 시공단계에 따른 순차적인 변화양상을 파악하며 시간의 경과에 따른 콘크리트 부재의 강도증진효과, 크리프 및 건조수축등의 시간의존적 해석을 수행한다. PS강선의 긴장등에 의한 단면력의 변화, 가설 임시부재의 설치 등에 따른 지점조건의 변화, 작업기구의 이동 등에 따른 각종 시공하중의 변화 등도 고려한다. 시공오차 제어시스템은 크게 시공단계에 따른 교량의 주요부위 계측 및 해석, 원인 분석, 예측 및 보정의 4단계를 거쳐 수행한다. 계측 및 해석에서는 주형의 처짐, 교각의 변형 등 기하 형상과 긴장재의 프리스트레스 힘, 온도 등을 측정하고 구조 해석을 통해 계측값과의 오차량을 산정한다. 원인 분석에서는 이러한 오차 발생의 요인을 산출한다. 원인 분석을 근거로 각 자료값의 보정 계수를 구하여 시공시 및 시공 후의 오차와 편차를 예측한다. 전·후처리 시스템에서는 컴퓨터그래픽을 이용하여 방대한 양의 출력자료를 일목요연하게 도시하며 또한 보다 효율적이고 편리한 입력자료 구성방식을 지원하고자 한다. 또한 시공단계별 해석뿐만 아니라 계측자료와 해석자료와의 비교도 도시한다.

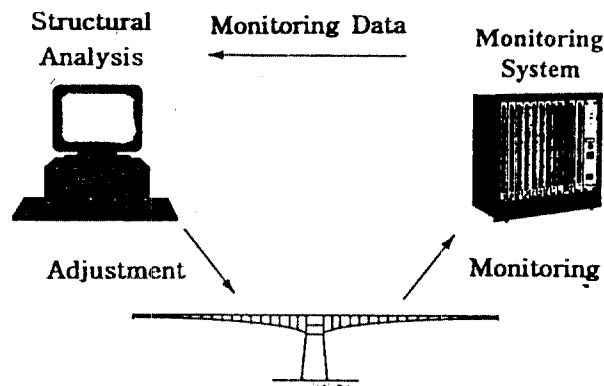


Fig.1 시공단계 해석 및 계측을 통한 시공관리

2.2 시공단계 해석시스템

PC박스거더교량의 주형의 응력은 시공이 진행됨에 따라 변하게 되므로 이러한 응력의 변화를 시공단계에 따라 추적해 나갈수 있도록 한다. 특히 PC박스거더교량의 시공에 있어서 캔틸레버공법 (Free Cantilever Method)은 교각의 주두부를 중심으로 양측으로 교량의 각 세그먼트 (segment)를 순차적으로 시공하면서 진행하는데, 이러한 공법은 시공중이나 시공후의 구조계가 변화하게 되며, 시공중에도 가교각의 설치나 임시 긴장재(또는, 임시강봉)등의 설치로 구조계가 수시로 변화하게 된다(Fig. 2).

또한, 콘크리트의 특성인 건조수축, 크리프 및 PS강재의 릴락세이션 등이 시간이 경과함에 따라 발생하여 처짐의 변화와 응력의 재분배 현상을 유발시키므로 전체적인 구조물의 거동은 매우 복잡한 현상을 나타낸다. 이러한 구조물의 거동은 각 시공단계와 콘크리트의 시간의존적 성질인 크리프와 건조수축 및 PS강재의 시간의존적 성질인 릴락세이션 영향을 동시에 고려해야 예상할 수 있다. 따라서, 시공단계를 고려한 해석을 수행하기 위해서는 콘크리트 및 PS강재의 거동특성을 이해하고 이를 프로그램화하여 시간에 따른 시공단계마다 적절한 해석결과를 얻을 수 있도록 하는 작업이 선행되어야 한다. 즉, 시공단계에 따라 변하는 구조계를 실질적으로 고려하여 정밀하게 재해석할 수 있는 시공단계해석 시스템을 구축한다.

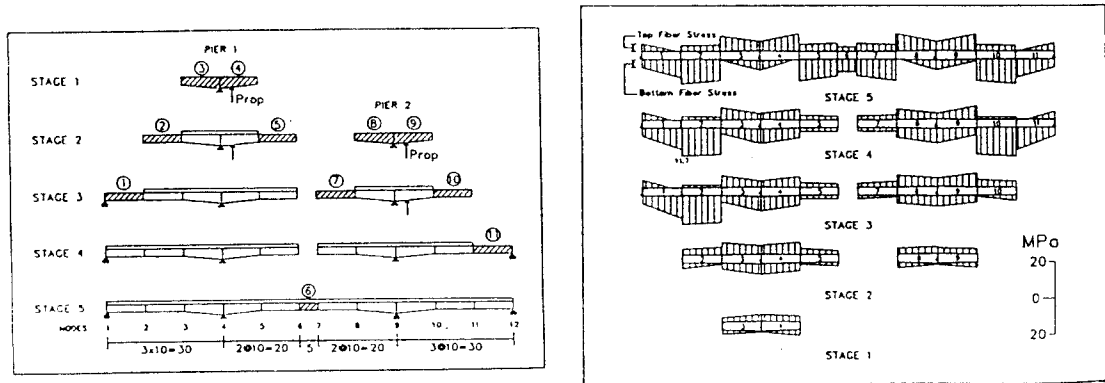


Fig.2 PC박스거더교량의 가설과정 및 응력변화

2.3 시공오차 제어시스템

발생오차를 최소한으로 제어하고 변화하는 시공조건에 적극적으로 대처하기 위해 시공오차 제어시스템의 개발이 필요하며, 시공오차제어시스템은 시공단계 해석시스템을 기초로 하여 시공오차의 원인 분석, 구조물의 거동예측을 가능토록 구성한다. 예를 들면, 교량 상부구조의 처짐오차를 완전히 제거하기 위해 보정량을 산정할 경우 프리스트레스힘에 지나친 오차를 발생시킬 수가 있다. 또한, 프리스트레스힘의 보정을 수행할 때 오차를 완전히 제거하기 위해 보정을 가해 주면 처짐에서 더 큰 오차가 발생할 수 있다. 따라서, 처짐보정시스템의 경우는 주형의 처짐과 긴장재의 프리스트레스힘에서 모든 발생오차를 균등하게 줄여 최소화할 수 있는 최적의 보정량을 계산한다. 특히, 주형의 솟음관리는 실

측치와 계획치(설계계산치)를 비교하여 계획 교면높이를 확보할 수 있는가를 검토하여, 필요에 따라 계획숫음량을 수정하거나 보정하는 것이다. 숫음관리시 각 시공단계를 정확하게 모형화하고 해석하여 계획치를 산출하고 이를 관리의 기준으로 하도록 한다.

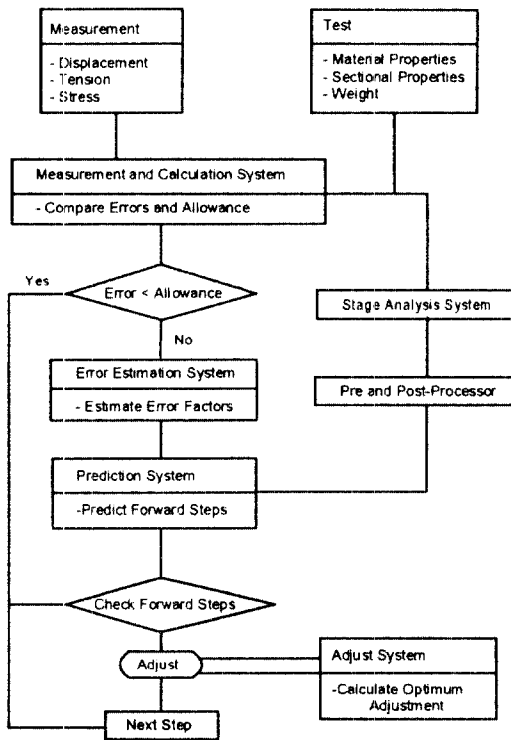


Fig.3 시공오차 제어시스템

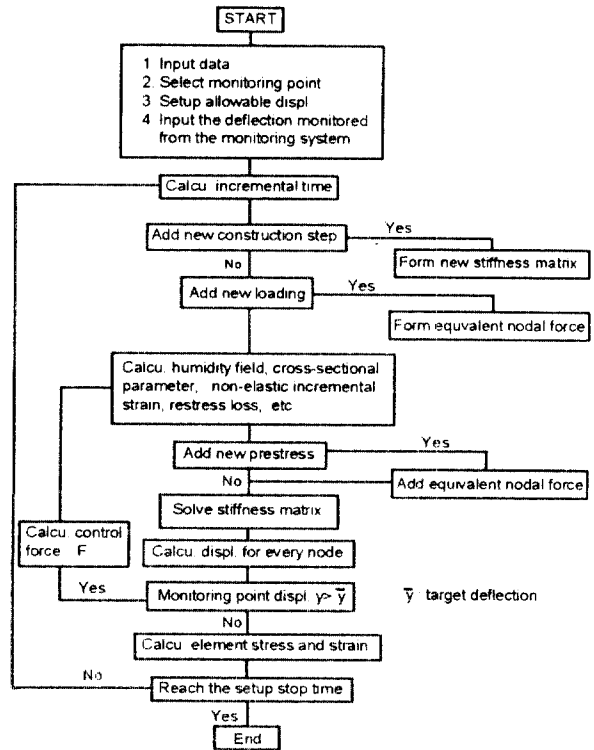


Fig.4 처짐제어 수행과정

2.4 시공오차의 보정

여러가지 원인들에 의해 발생한 오차를 균등하게 분배되도록 하여 국부적인 오차의 누적을 방지하도록 한다. 이를 위해 각 보정량의 가중치를 달리하여 시공목적에 따라 오차의 분포를 조절할 수 있도록 한다. 오차 보정시에 구조물 변위가 크지 않아 선형성을 가정할 수 있다면, 다음의 행렬식을 이용하여 오차의 보정량과 구조물응답 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{R\} = \{A\}\{C\} \quad (1)$$

여기서, $\{C\}$: 보정성분(오차기여도 벡터)

$\{R\}$: 보정에 따른 구조물 응답의 변화량으로, 시공상 예측하여 오차를 조절해야 할 목적치. 긴장재의 프리스트레스 힘, 처짐, 교각의 수평변위, 경우에 따라 구조물의 응력, 지점의 반력을 적용할 수 있다.

$\{A\}$: 영향행렬

식 (1)의 행렬식을 풀어 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \vdots \\ \gamma_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2m} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서, m : 보정성분의 수

n : 현장에서의 계측변량의 수

a_{ij} : 영향행렬의 성분으로써, j번째 보정성분의 단위변화에 대한 i번째 측정점에서의 응답 변화량 위의 영향행렬은 보정성분의 단위변화에 대한 구조물의 응답으로, 구조물의 응답으로는 긴장재의 프리스트레스 힘, 주형의 처짐, 주형의 모멘트 등 주요 계측항목을 선택할 수 있다.

보정량을 최적화하기 위한 기법은 여러 가지 있으나, 본 연구에서는 잔류오차를 최소화하고 각 변수마다 오차가 균등하게 분포하도록 하기 위해 최소자승법(least square method)을 이용한다. 실구조물과 목표치간의 편차를 {D}, 보정후 잔류오차량을 {E}라 하며, 이들의 각 성분을 각 성분을 d_i, e_i 라 할때 잔류오차의 제곱의 합을 목적함수로 취하면 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} \phi &= \sum_{i=1}^n e_i^2 \\ &= \sum_{i=1}^n \left(d_i - \sum_{j=1}^m a_{ij} c_j \right)^2 \\ &= \sum_{i=1}^n \left[d_i^2 - 2d_i \sum_{j=1}^m a_{ij} c_j + \left(\sum_{j=1}^m a_{ij} c_j \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (3)$$

목적함수 ϕ 를 최소화시키기 위하여 변량 c에 대하여 편미분을 취하여 다음과 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial c_k} &= 0, \quad k = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{i=1}^n a_{ik} \sum_{j=1}^m a_{ij} c_j &= \sum_{i=1}^n a_{ik} d_i \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)를 $k=1, 2, 3, \dots, m$ 에 대해 나타내어 이를 행렬식의 형태로 표시할 수 있다.

$$[A]^t [A] \{C\} = [A]^t \{D\} \quad (5)$$

식 (5)로 부터 보정량 {C}를 구할 수 있다.

$$\{C\} = ([A]^t [A])^{-1} [A]^t \{D\} \quad (6)$$

3. 결 론

본 연구에서는 교량의 시공중 계측을 통한 시공관리 가설 후 공용기간 동안 적절한 안전성 및 사용성 확보를 위하여 계측을 통한 PC장대교량의 시공계측관리시스템을 개발하고자 한다. 먼저, 통합 계측관리 시스템을 구성하기 위한 일환으로 시공중 정밀시공에 사용할 시공계측시스템의 기본골격을 구성하였으며, 이는 시공단계 해석시스템, 시공오차의 분석 및 보정을 위한 최적화기법 등으로 구성하였

다. 즉, 시공공정에 따른 교량의 해석 및 시간의존적 거동을 수행하기 위한 시공단계해석시스템, 시공 오차의 분석 및 보정을 위한 최적화 기법 및 오차원인 분석 등의 유기적인 구성을 수행하였다.

본 논문에서는 우선 일차적으로 PC교량 계측의 전반적인 구축과정을 논하고, 향후 각 단계별 이론 개발 및 계측시스템에 대하여 연속적으로 발표하고자 한다.

● 참고문헌 ●

1. Walter Podolny Jr. and Jean M. Muller, "Construction and Design of Prestressed Concrete Segmental Bridges", 1982.
2. Jacques Mathivat, "The Cantilever Construction of Prestressed Concrete Bridges", John Wiley & Sons, 1979.
3. R. Favre and I. Markey, "Long-Term Monitoring of Bridge Deformation", A.S.Nowak(ed.), Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation, pp85-100, Kluwer Academic Publishers, 1990.
4. Bruno Massicotte and Andre Picard, "Monitoring of a Prestressed Segmental Box Girder Bridge During Strengthening", PCI Journal, May-June, 1994.
5. "Investigation of the Parrotts Ferry Bridge, New Melons Lake, California", TY Lin International, April, 1990
6. Mazurek D. F. and Dewolf J. T.(1990), "Experimental Study of Bridge Monitoring Technique", Journal of Structural Engineering, Vol. 116, No. 9, September, 1990, pp. 2532-2549.
7. Anderson E. Y. and Pedersen L.(1994), "Structural Monitoring of the Great Belt East Bridge", Strait Crossings 94, Rotterdam, ISBN, pp. 189-195.