

세그멘탈 PSC박스거더교량의 시공간 계측모니터링을 통한 확률적 구조안전성 평가 및 제어 시스템

Safety Assessment and Behavior Control System using Monitoring
of Segmental PSC Box Girder Bridges during Construction

신재철* 조효남** 박경훈*** 배용일****
Shin, Jae-Chul Cho, Hyo-Nam Park, Kyung-Hoon Bae, Yong-Il

Abstract

In spite of the increasing construction of segmental PSC box girder bridges, the techniques associated with real-time monitoring, construction control and safety assessment during construction have been less developed compared with the construction techniques. Thus, the development of an integrated system including real-time measurement and monitoring, control and safety assessment system during construction is necessary for more safe and precise construction of the bridges.

This study presents a prototype integrated monitoring system for preventing abnormal behavior and accidents under construction stages, that consist of behavior control system for precise construction, reliability-based safety assessment system, and structural analysis.

Also, a prototype software system is developed on the basis of the proposed model. It is successfully applied to the Seo-Hae Grand Bridge built by FCM. The integrated system model and software system can be utilized for the safe and precise construction of segmental PSC bridges during construction.

keywords : segmental PSC box girder bridges, monitoring system, structural behavior control system, safety assessment system

* 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수

** 정희원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수

*** 한국건설기술연구원 연구원

**** (주)동일기술공사 사원

• 본 논문에 대한 토의를 2001년 9월 30일까지 학회도 보내 주시면 2002년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

최근 경부고속철도, 서해안고속도로 등 사회간접시설의 확충을 위한 국가적인 대역사가 진행 중에 있으며, 그중 가장 핵심적인 역할을 담당하는 교량구간의 상당부분이 PSC박스거터교로 계획, 설계 및 시공되고 있다. 이와 같이 주요 교량구조물에 PSC박스거터 형식의 채택이 증대되고 있는 실정에서 신행주대교, 팔당대교의 시공간 붕괴사례에서 알 수 있는 바와 같이 설계·시공단계에서 효율적인 시공 및 유지 관리를 위한 고려와 계획이 세워지지 않을 경우 심각한 사회·경제적인 문제가 야기될 수 있다.

구조물에 발생하는 예기치 않은 붕괴는 일반적으로 공용중보다 시공중에 발생한 확률이 높은 것으로 알려져 있으며, 특히 FCM에 의한 세그멘탈 PSC박스거터교의 경우 높은 정밀도를 요구하는 특수한 가설공법으로 다른 교량가설공법에 비해 시공간 구조거동이 복잡하고 각종 불확실성이 크기 때문에 합리적이고 과학적인 설계, 시공 및 유지관리가 요구된다. 선진국에서는 주요 구조물의 설계·시공·공용간에 있어 유지관리 개념을 적용하려는 노력이 전산화모니터링시스템의 도입을 통해 나타나고 있는 추세이며, 국내에서도 장대교량형식을 중심으로 유지관리에 관한 연구 및 시스템 구축사례가 보고되고 있으나 시공간 구조물의 경우 모니터링 및 분석평가, 제어 등에 대한 연구는 현재 고도로 발전된 해석·설계 및 건설공법 등 건설자제와 관련된 기술에 비하여 상당히 미흡한 실정이므로, 그 필요성에 대한 인식의 확대와 모니터링기법을 도입한 보다 신뢰도 있는 정밀시공 및 안전관리가 이루어져야 한다.

따라서 본 연구에서는 시공간 세그멘탈 PSC박스거터교량에 대해서 구조물의 이상거동을 파악하고 이를 통해 구조물의 거동을 분석·평가·제어하기 위하여 전산화 계측모니터링시스템, 신뢰성에 기초한 분석평가시스템 및 정밀한 시공을 위한 제어시스템 등과 같은 부시스템들을 모두 포함하는 세그멘탈 PSC박스거터교량의 계측모니터링·분석평가·제어 통합시스템 종합설계모형 및 시범소프트웨어시스템의 개발을 수행하였다.

2. 세그멘탈 PSC 박스거터교량의 시공간 전산화 계측모니터링

국내외에 걸쳐 구조물의 관리를 위한 다양한 계측 및 모니터링 관련연구와 시스템의 구축이 활발하게 진행되고 있으며, 계측관련 기술 및 기기 등은 전자·통신·메카트로닉스 기술 등의 급속한 발전으로 눈부신 변화를 보이고 있으나^{(1),(6)} 모니터링을 통한 구조물의 분석 및 상태평가기술은 이에 미치지 못하고 있는 실정이다. 따라서 시공간 교량의 안전과 정밀시공을 목적으로 한 계측모니터링 시스템의 구축에서는 분석 및 평가를 염두에 둔 계측시스템의 구성이 필요하다. 따라서 하드웨어적인 계측시스템보다는 세그멘탈 PSC박스거터교량의 가설공법의 특성에 따라 분석평가 및 제어를 위한 계측항목, 센서 및 계측기기의 선정, 설치 위치의 결정 및 계측방법을 제시하였다.

2.1 계측항목 및 계측위치의 선정

FCM에 의한 세그멘탈 PSC박스거터교량의 시공간 구조거동을 파악하여 안전성을 확보하고 거동제어를 수행하기 위해서 기존의 일반적인 계측위치에 대한 고찰 및 시공간의 가설공법별 거동특성의 분석, 구조해석 등을 통하여 계측목적에 따른 계측항목, 장치 및 위치를 Table 1^{(2),(13)}과 같이 결정하였다. Fig. 1⁽¹³⁾에는 계측센서의 배치위치를 나타내었으며 경제성을 고려하여 교량의 인전성평가를 위한 최적의 소요 개수와 위치 및 계측기기를 결정하고자 하였다. 시공간 교량의 경우 교통하중을 받지 않으며, 총구조수명중 상대적으로 단기간이므로 동적영향에서 자유로운 것으로 가정하여 정적계측만을 고려하였다.

2.2 계측모니터링 방법

가설중의 세그멘탈 PSC박스거터교량을 모니터링하고자 하는 경우 시공단계별로 구조물에서 발생하는 계측치의 특성이 상이하고 구조물의 대형화로 인하여 많은 양의 계측데이터가 발생되므로 구조거동을 보다 효과적으로 파악하기 위해서 계측항목별 데이터의 특

Table 1 세그멘탈 PSC박스거더교의 시공간 계속목적에 따른 계속항목

계측목적	계측항목	계측장치	설치부위
긴장력 및 손실량 측정	텐션의 상력	긴장력 측정계, 하중계	텐션내부, 철착구
불균형하중 측정	임시경봉의 장력	하중계(load cell)	지점부 임시경봉
주형의 전도안정성	교각의 경사	inclinometer	교각벽체 상단
사용성	간열	간열계이지	간열발생부위
온도측정 및 변형률 보정	박스 내외부온도	온도계	센서매치 부위
하중의 변형률 보정	하중의 변형	무용력계	센서매치 부위
풍하중측정, 안전성	풍향, 풍속	풍향풍속계	내측경간중앙부
휨응력 및 거동관리	휨응력	변형률계	중요단면
전단응력 판리	전단응력	Rosette gage	지점부에서 h/2 거리
처짐관리	캔틸레버 처짐	레벨, 연동관	세그먼트 측침
	침하량	침하계	교각 지지부
	가성차(F/T) 변위	변위계	F/T 프레임, 강봉

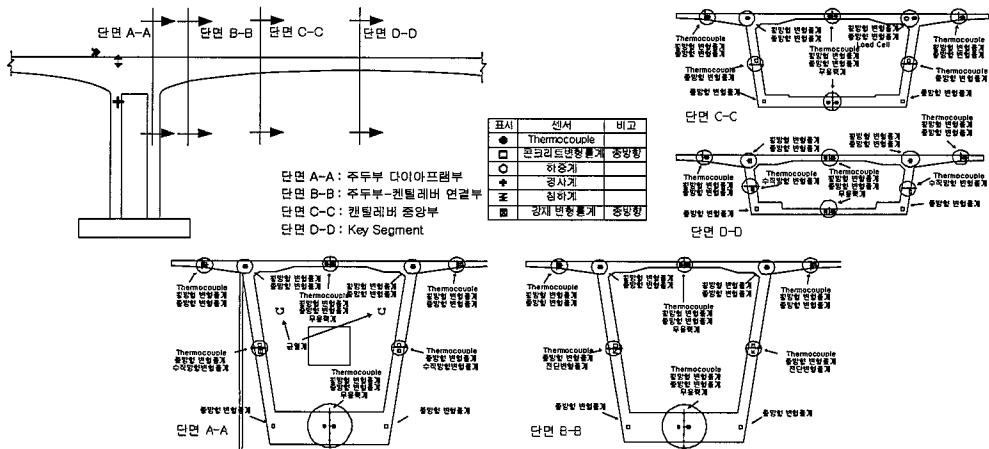


Fig. 1 FCM 교량 계측센서 배치도

정파 계측방법을 분석하여 Table 2^{(12),(13)}와 같은 모니터링 방법을 제시하였다.

3. 구조안전성 분석평가 및 제어

3.1 PSC박스거더교량의 시공간 안전성

본 논문에서는 FCM에 의한 세그멘탈 PSC박스거더교량의 안전성평가와 관련하여 제안된 한계상태모형에 대해서만 간략하게 기술하였고 시공간 구조안전성

과 관련된 보다 구체적인 내용은 별도의 논문^{(3),(6),(9)}에 기술되어있다.

3.1.1 PSC박스거더 단면의 강도한계상태모형

시공간 PSC박스거더의 안전도평가를 위한 휨 및 전단파괴에 대한 한계상태함수 $g(\cdot)$ 는 실용적으로 저항변수와 하중변수가 분리된 양함수(explicit function) 형태로 표현할 수 있으며, 이들 저항 및 하중의 크기를 확률변수로 취급하여 식(1)과 같이 정의할 수 있다^{(5),(6)}.

Table 2 계속항목별 모니터링 방법

계측항목	계측방법	제이/모니터링 방법
휨응력	변형률계, 콘크리트 무응력계를 사용하여 구조물에 응력이 발생하지 않을 때를 기준으로 센서의 저항값의 변화를 측정할 후 변형률로 환산하여 이를 하중에 의해 발생한 변형률로 계산한다.	일정한 시간간격의 계측치를 계측기에서 처리하고 이를 분석 컴퓨터로 자동적으로 전송, 저장시킨 후 디지털 신호처리 및 후처리 소프트웨어를 이용하여 응력으로 환산한다. 환산된 응력은 주기적으로 관리한계기준과 비교하여 이상거동 감지와 위험도를 파악할 수 있도록 하며 측정데이터는 단계별로 저장하여 응력이력 및 거동 분석에 적용될 수 있도록 한다.
전단응력	휨응력과 마찬가지로 Strain Rosette를 사용하여 3방향(0°, 45°, 90°)의 변형률을 측정할 후 환산공식을 이용하여 전단변형률을 계산한다.	
긴장력	긴장력측정계(tension measurement gage)를 사용하는 경우는 긴장대에 내설하고 하중계를 사용하는 경우는 처장단에 장착하여 프리스트레스의 도입시와 도입후 프리스트레스와 손실량을 측정한다. 만약 계측기에서 얻어지는 값이 변형률일 경우 이를 하중으로 환산한다.	도입시에 해석적으로 얻어진 긴장량과 실제 도입되는 힘을 비교함으로써 계속되지 않는 긴장대에서의 긴장량을 산정할 수 있도록 하고 도입 후에도 실시간으로 계속되는 프리스트레스를 시간에 따른 해석적인 손실량과 비교함으로써 장기 처짐을 예측할 수 있다.
치짐	변위차계(hydrostatic leveling system)을 이용하여 기준점과 계측지점의 수두차를 측정하거나 레벨을 이용하여 여러 지점에 측점을 선정하고 오차를 보정하여 처짐량을 선정한다. 여긴이 허락한다면 자동 처짐계측장치를 설치하여 시공중 치짐 및 장기치짐을 실시간으로 계속하는 방법을 적용할 수 있다.	변위차계나 레벨을 이용하는 경우 하중단계나 시공단계의 변경시, 즉 처짐량이 변화하리라고 예상되는 시기마다 처짐을 측정하여 컴퓨터에 직접 입력하는 방식을 취한다. 자동 처짐계측장치를 사용하는 경우 실시간으로 처짐데이터를 입력받아 모니터링하고 처짐관리에 적용한다.
교각경사	tiltmeter형 경사계나 inclinometer를 교각 상부에 부착하여 연직방향 기울기를 전기적 신호로 측정한다.	경사계의 경우 대부분 센서에서 계속값 자체를 디지털 신호로 전송하므로 일정한 시간간격을 가지고 주기적으로 모니터링한다.
균열	균열이 발생할 수 있는 부위에 코팅제를 바르고 육안조사나 편광기 등을 이용하여 균열의 발생을 감지하고, 균열이 발생하면 균열계를 설치하여 균열량을 계측하거나 음향탄상(acoustic emission) 기법을 적용하여 균열현상을 계속한다.	균열 발생부위에서 얻어지는 균열량을 실시간으로 계속하고 이를 저장하여 균열의 진전량을 모니터링한다. 만약 균열진전이 계속 증가하여 관리기준과 비교하여 구조적인 문제라고 판단되면 보수보강 등의 대책을 취할 수 있도록 한다.
온도	온도계를 매립한 부위에 대하여 콘크리트의 양생시와 경화후 시간이 경과함에 따라 계속부위별로 온도를 계속한다.	단면의 깊이 및 두께에 따른 온도차이, 그리고 태양광의 각도, 풍속 그리고 공기온도에 따른 응력변화 영향을 규명하여 해석에 고려한다.

$$g(\cdot) = S_R - \sum S_Q \quad (1)$$

여기서, S_R 은 실 휨강도 및 전단강도; $\sum S_Q$ 는 각종 시공간 하중에 의한 실 하중효과를 각각 나타낸다. S_R 은 각각 실 휨강도 $M_R = M_n N_M$ 과 실 전단강도 $V_R = V_n N_V$ 로 표현된다. 여기서, M_n, V_n 은 각각 공칭휨강도와 공칭전단강도; N_M, N_V 는 파괴모드별 보정계수로서 M_n, V_n 추정치에 관련된 편기와 모든 불확실량을 내포하는 랜덤변량을 각각 나타낸다. 시공중인 교량에 대한 안전도평가이므로 구조물은 노후되지 않은 것으로 가정하여 노후손상계수는 고려하지 않는다.

PSC박스단면의 공칭강도의 산정은 도로교표준시방서⁽⁴⁾ 제안식에 따라 산정하였으며, 전단강도는 수정압축장 이론(Modified Compression-Field Theory, MCFT)⁽¹¹⁾을 사용하여 산정하였다. 불확실성을 내포

하는 시공간 하중에 의한 실 하중효과는 하중에 대한 영향계수, 가설차하중에 의한 PSC박스단면의 응답비 및 보정계수를 고려하였으며, 응답비는 시공단계가 변함에 따라 가설차하중이 이동할 경우, 이동 선·후에 대하여 평가단면에서의 단면응력 세속치 변화량과 단면응력 해석치 변화량의 비로서 산정하였다.

3.1.2 연속형 PSC박스거터교량 가교각의 강도한계 상태모형

연속형 PSC박스거터교량의 가교각 중 가장 위험부분으로 판단되는 강재기둥부의 압축 및 휨강도에 대한 요소 극한한계상태를 모델링하여 식(2)와 같이 상관된 음함수(implicit function) 형태로 정의할 수 있다⁽⁶⁾.

$$g(\cdot) = 1 - \left(\frac{\sum P_S}{P_R} + \frac{\sum M_S}{M_R} \right) \quad (2)$$

여기서, $g(\cdot)$ 는 기교각의 강도한계상태모형; F_R , M_R 은 실 축방향 좌굴강도 및 휨강도; ΣF_S , ΣM_S 는 불균형모멘트를 유발하는 하중에 의한 실 하중효과를 나타낸다.

3.1.3 라멘형 PSC박스거더교량 교각의 강도한계상태모형

FCM에 의해 라멘식 PSC교량이 가설될 때 교각에는 각종 하중에 의한 축압축력과 함께 불균형모멘트가 동시에 작용하게 된다. 따라서 라멘식 교량에서의 교각은 축압축력과 휨모멘트를 동시에 받는 보-기둥 (beam-column)으로 모델링할 수 있으며, 신뢰성해석을 위하여 식(3)과 같은 압축과 휨을 동시에 받는 RC부재에 대한 한계상태함수를 적용하였다⁽³⁾.

$$g(\cdot) = \left[P_R^2 + \left(\frac{P_R \cdot e}{h} \right)^2 \right]^{1/2} - \left\{ (\Sigma P_S)^2 + \left[\frac{(\Sigma P_S) \cdot e}{h} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (3)$$

여기서, F_R 은 주어진 편심량 e 에 의한 RC기둥의 실 축방향 압축강도를 나타내는 랜덤변량; h 는 단면의 높이; ΣF_S 는 RC기둥에 작용하는 각종 하중들에 의한 실 하중효과를 나타내는 랜덤변량이다.

3.2 PSC박스거더교량의 구조거동 제어

FCM교량의 시공단계에서 실질적인 구조거동의 제어는 가설차(form traveler; F/T) 설치레벨의 조절을 통한 치짐거동의 제어이다⁽¹³⁾. 현실적으로 추가적인 텐던의 배치없이 PS강선에 의한 치짐제어는 불가능하다. 한 세그먼트의 콘크리트를 타설하기 전에 F/T의 레벨조절량과 같은 위치에서의 최종 레벨과의 차이를 예측하여 단계별 시공에 따라 발생하는 오차를 줄여가면서 최대한 목표선형과 근접하도록 하기 위하여 치짐경향에 근거한 오차예측방법을 제안하였다. 교량완성후 발생하는 장기치짐에 대한 발생원인 및 해석방법에 대한 연구가 진행중에 있으므로 본 논문의 시공간 치짐거동제어는 F/T조성을 통한 설계선형의 유

지에 국한하여 수행하였다.

3.2.1 치짐경향에 근거한 오차예측

기존 시공경험에 근거하여 치짐을 발생시키는 각각의 하중요인들에 의해 발생하는 구조물의 치짐거동 응답이 서로 다른 경향을 보인다고 가정하고, 전체 구조물에서 각각의 하중요소들의 치짐비($\nu^i = \delta_M^i / \delta_C^i =$ 측정치짐값/계산치짐값)에 대한 평균 및 표준편차를 구한다⁽¹³⁾. 이 값은 캔틸레버교량의 치짐오차경향에 대한 통계값으로서 새롭게 가설하는 캔틸레버교량의 예측오차보정량을 산정하는데 적용될 수 있다. 이러한 불확정량에서 실제 치짐오차제어에 적용될 수 있는 최확값인 평균치를 이용하여 캔틸레버교량에서 각각의 하중별 예측오차량을 구하여 이 수치들을 합한 값이 시공제어를 위한 예측오차보정량이 된다⁽⁷⁾.

3.2.2 구조거동제어 관리한계기준

1) 휨응력 관리한계기준

휨응력에 대한 관리기준은 구조물의 정밀시공을 위한 응력제어 관리한계와 안전시공을 위한 허용응력 관리한계로 구분하였다. 정해진 관리한계에 대하여 계측 데이터의 초과확률이 1/100 이상 발생하는 경우를 이상거동으로 가정하여 각각 식(4), (5)와 같이 설정하였다. 일반적으로 가설구조물의 신뢰도 β 는 1.5~2.5 내외로 결정되므로 초과확률이 1/100인 경우의 신뢰도 β 는 2.33이므로 적절한 것으로 판단된다.

$$P(X \leq \sigma_{bot}) \leq \frac{1}{100}, P(X \geq \sigma_{top}) \leq \frac{1}{100} \quad (4)$$

$$P(X \leq \sigma_{a-bot}) \leq \frac{1}{100}, P(X \geq \sigma_{a-top}) \leq \frac{1}{100} \quad (5)$$

여기서, σ_{bot} , σ_{top} 은 각각 하관리한계기준, 상관리한계기준이고 σ_{a-bot} , σ_{a-top} 은 시방서⁽⁴⁾에서 제시하는 콘크리트의 허용응력으로서 각각 $1.5\sqrt{\sigma_{ci}}$, $0.55\sigma_{ci}$ 이다.

2) 주형의 치짐 관리한계기준

PSC 캔틸레버교량 상부구조의 처짐관리를 위해서는 우선 시공중 캔틸레버의 오차보정을 위한 F/T 조정량에 관한 관리기준을 소정의 최종 종단계획고를 얻을 수 있도록 설정되어야 한다. 처짐제어를 위해 현장에서 발생한 오차량에 다음 단계에서 발생한 오차량을 예측한 예측오차보정량을 추가하여 F/T를 조정할 수 있다. 즉 단계별 F/T의 추가조정량은 오차보정량과 예측오차보정량의 합만큼 추가되며, 단계별 캠버각의 차이는 kink현상 방지를 위해 최대 0.003radian으로 정하였다⁽¹⁵⁾. 다음으로 처짐 정도관리를 위한 기준은 일반적으로 처짐량이 캔틸레버 길이에 따라 증가하므로 처짐해석결과의 최대처짐량을 참고하여 캔틸레버 선단부의 높이오차에 대해 캔틸레버의 길이 x 가 $0 < x < 30$ m일 경우 캔틸레버 선단부 높이오차는 10mm 이내, $x > 30$ m일 경우 캔틸레버 선단부 높이오차는 $0.5x$ mm 이내로 관리한계치를 설정하였다⁽¹⁴⁾.

3) 교각의 경사각 관리한계기준

교각의 경사에 대한 관리는 교각에 설치한 경사계로부터 획득한 데이터를 분석하여 교각의 이상거동을 감지하는 방법을 사용할 수 있다. 교각의 경사에 대한 허용치 또는 관리한계치는 교각의 과도한 균열 및 응력이 발생하지 않는 범위내에서 기존 시공된 교량의 계속자료를 해석을 통해 성해될 수 있다⁽²⁾.

4. 세그멘탈 PSC 박스거더교량의 모니터링 및 평가제어 통합시스템

본 논문은 세그멘탈 PSC박스거더교량의 시공간 구조물의 이상거동을 파악하고 이를 통하여 구조물의 거동을 분석·평가·제어할 수 있는 통합적인 시공간 계속모니터링, 안전도 분석·평가 및 구조거동 제어 종합시스템 소프트웨어를 개발함으로써 시공간 구조물의 성명시공과 지속적인 안전도를 확보하는 것이 목적이다. 이를 위해 세부적으로 제시된 각 시스템모형⁽⁷⁾을 통합하여 세그멘탈 PSC박스거더교에 대한 시공간 계속모니터링, 분석평가 및 제어시스템 종합모형을 구축하였다.

Fig. 2에 제시된 종합시스템모형은 크게 계속/모니

터링과 분석/평가/제어 부분으로 구분하였다. 계속모니터링시스템은 계속시스템과 모니터링시스템, 그리고 이 시스템을 연결하는 역할을 하는 실시간 데이터처리부로 나눌 수 있고, 분석/평가/제어부는 안전성평가시스템과 구조거동제어시스템, 그리고 구조해석시스템으로 나눌 수 있다. 또한 데이터의 입력 및 사용자의 명령을 받아들이는 전처리시스템과 모니터링결과를 화면, 문서, 파일로 출력해주는 후처리시스템, 그리고 시스템에서 발생하는 각종 자료들을 체계적으로 정리하고 관리하는 자료관리시스템으로 구성되어있다.

5. 통합시스템모형의 구축 및 응용

5.1 적용대상교량

본 연구에서 개발된 세그멘탈 PSC박스거더교량의 시공간 모니터링 및 안전성 평가 시스템은 서해대교 FCM 구간을 대상으로 하여 그 적용성을 고찰하였다. 예비항로부에 가설된 서해대교 FCM 구간은 총길이 500m ($85 + 2@165 + 85$), 폭원 31.4m ($2@15.7$)의 6차선으로 이루어져 있으며, 2주형 교각을 가진 연속 라멘형식의 교량으로 전체가 현장타설에 의하여 가설되었다⁽¹²⁾. 대상교량은 21단계의 캔틸레버 가설단계와 4단계의 키세그먼트 연결단계, 교면 마무리단계 등 총 26단계의 시공단계를 가지며, 상하행선 각각 6조의 가설차를 도입하여 6개의 캔틸레버가 동시에 시공되었다. 대상교량의 일반계획은 Fig. 3과 같다.

5.2 프로그램 구성 및 구축환경

개발된 프로그램은 종합시스템 모형 및 각 단위시스템 모형에 근거하여 구성하였으며, 기존의 계속된 데이터를 근거로 생성된 계속데이터와 전처리 시스템에서 입력된 자료를 기초로 자동생성되는 구조해석 데이터를 이용하여 모니터링을 통한 시공간 이상거동감지, 구조안전도 평가, 구조거동제어를 수행하고 이를 후처리 시스템에서 나타낼 수 있도록 하였다⁽⁵⁾. 시범소프트웨어는 Windows 환경하에서 사용할 수 있도록 개발하였으며, 사용된 프로그램의 MMI(Man Machine

Interface)로는 Visual Basic 5.0을 이용하여 MDI (Multi Document Interface)를 이용한 대화식으로 구축하였다. 신뢰성해석 및 랜덤함수의 발생에 필요한 수학적 함수는 IMSL을 이용한 Fortran90으로 구성

하였다. 구조해석을 위해서는 RM spaceframe⁽¹⁰⁾을 사용하였으며, 전체 시스템과의 인터페이스를 구성하여 시스템 내에서 입력데이터를 작성하고 출력데이터를 추출할 수 있도록 하였다.

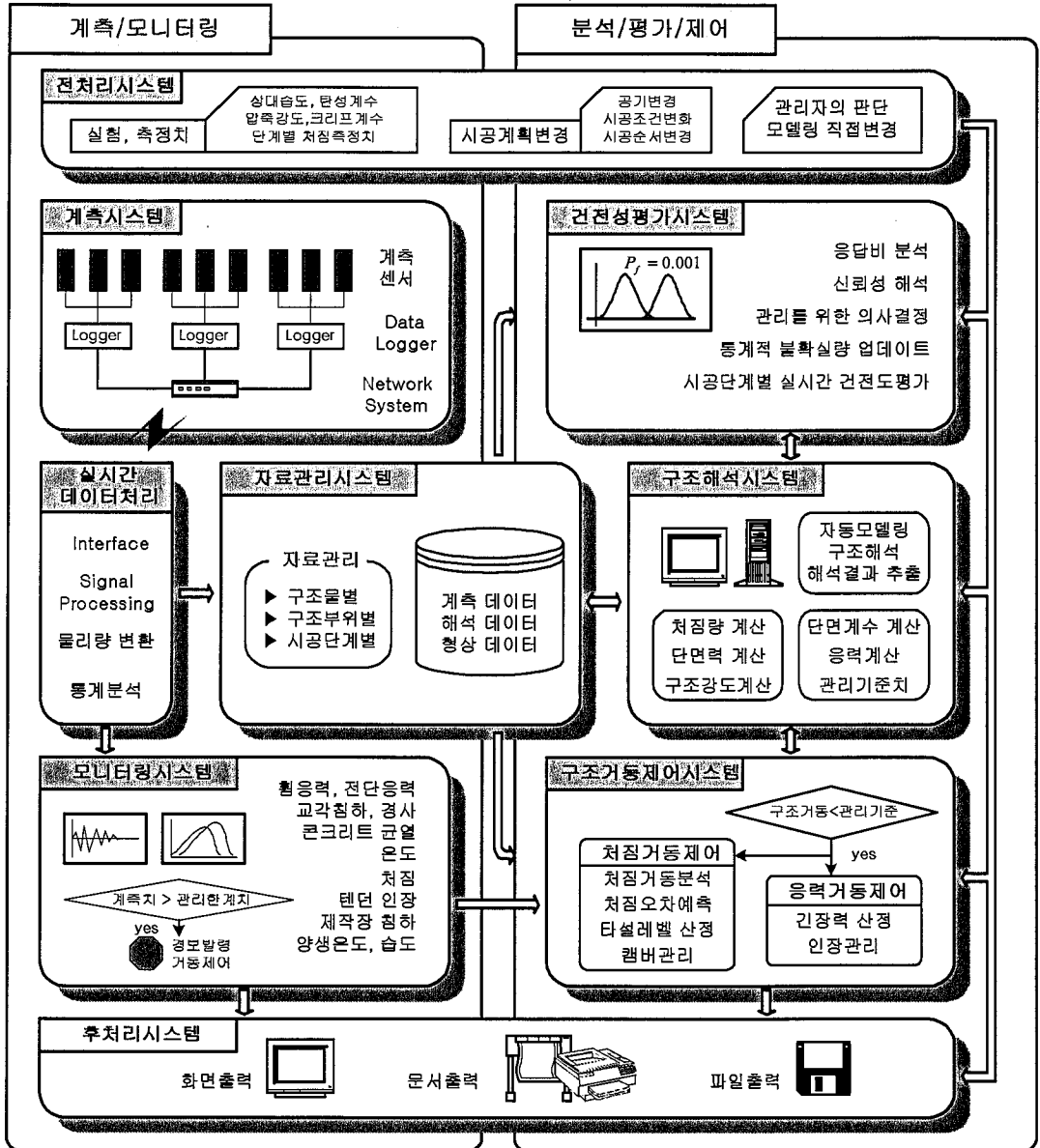


Fig. 2 모니터링, 안전성평가 및 제어 통합시스템 모형

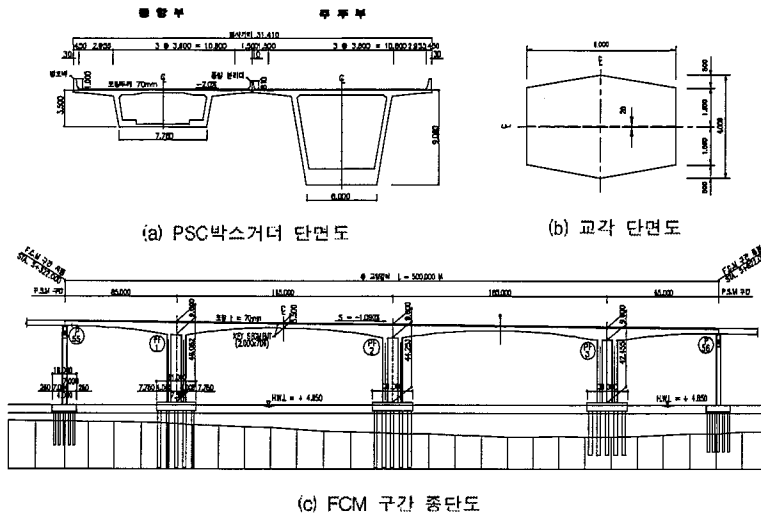


Fig. 3 대상교량의 일반제원

5.3 프로그램 실행결과 및 고찰

프로그램을 시작하게 되면 Fig. 4와 같은 화면이 실행되며, 여기서는 모니터링을 수행하고자 하는 대상교량을 선택하게 된다. 본 프로그램은 시범소프트웨어로서 그 대상교량을 서해대교 상행선과 하행선 FCM 적용구간을 대상으로 하였으나, 향후 각종 가설공법에 의해 시공되는 세그멘탈 PSC박스거더교량의 시공가 모니터링 및 안전성 평가를 수행할 수 있도록 확장이 가능하다.

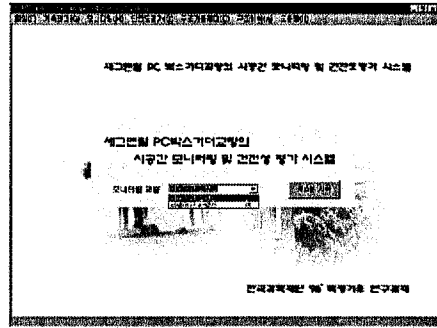


Fig. 4 시작화면

5.3.1 모니터링 시스템

Fig. 4에서의 시작화면에서 시스템 시작 버튼을 누르면 Fig. 5와 같은 모니터링 위치결정 화면이 실행된다. 대상센서가 선택되면 센서에서 실시간으로 전송되는 계측값의 추이와 실시간 계측치를 분석하여 얻어진 응력계어 관리기준과 허용응력 관리기준에 대한 한계수치를 보여주며, 그래프를 통해 해석치와 관리기준치를 비교할 수 있도록 하였다. Fig. 6의 실시간 모니터링 화면의 계측치는 Fig. 7과 같이 계측치 통계분석을 실행할 수 있다. 통계분석에서는 지정한 단계의 계측데이터에 대하여 최대응력, 평균응력, 변동계수를 계산하게 되며 이를 누적된 전체데이터의 최대응력, 평

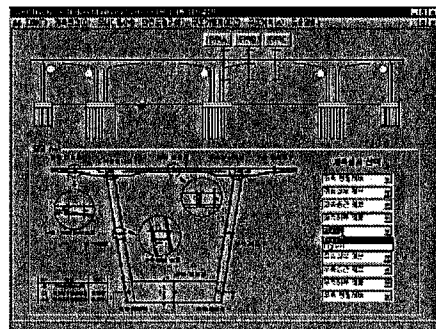


Fig. 5 모니터링 위치 결정

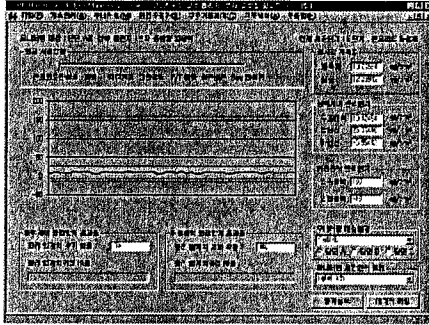


Fig. 6 실시간 모니터링

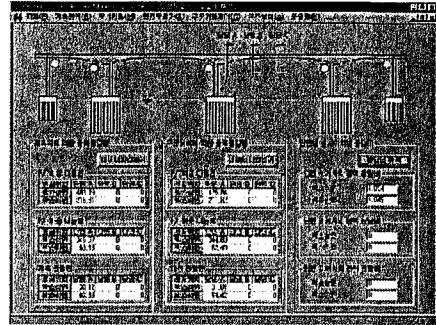


Fig. 8 응답비해석

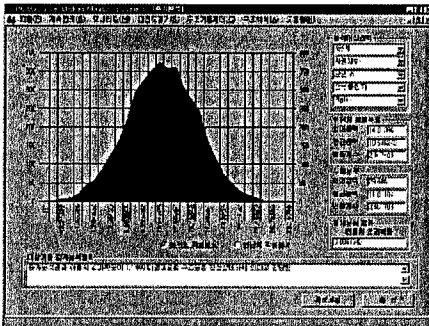


Fig. 7 계속치 통계분석

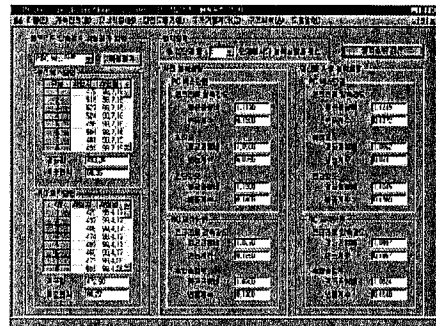


Fig. 9 불확실량 업데이트

균용력, 변동계수와 비교하여 통계분석을 실시하게 된다. 이러한 이상거동 감지는 분석에 지정된 단계가 현재 계속중인 데이터일 경우 실시간으로 입력될 때마다 계속 갱신하여 실행된다. 한편 모니터링되는 계속값이 허용응력 관리기준을 초과하는 경우, 화면에 경고창과 함께 경고음이 울리도록 하였으며 사용하는 원인분석이나 안전도평가 등을 수행하여 구조물의 실제적인 안전도를 판정하여야 한다.

5.3.2 안전도평가 시스템

안전도평가시스템은 모니터링시스템에서 구조물에 이상거동이 감지되었을 경우 또는 시공중에 관리자가 구조물의 실제적인 안전도를 알고자 할 경우 수행된다. 시스템에서 사용되는 안전도평가는 구조신뢰성이론에 근거하여 수행하였으며, 평가된 수치를 바탕으로 관리자가 수행해야 할 판단기준, 즉 의사결정기준을 제공할 수 있도록 구성하였다. 실제 대상교량의 안전

도 평가 결과 및 고찰은 별도의 논문에서 다루었다³⁾. 또한 안전도평가에 사용되는 각종 불확실량은 선행정보를 기존 연구결과에 기초하여 결정한 후, 현장에서의 결과를 베이지안 기법을 적용하여 기존 선행정보를 갱신하여 개별현장의 조건이나 전문가의 의견을 반영할 수 있도록 하였다. 안전도평가는 일정사공단계에서 전체단면의 평가(Fig. 10)와 일정단면에서 단계별 안전도평가(Fig. 11)를 수행할 수 있다.

5.3.3 구조거동 제어시스템

Fig. 12의 처짐관리는 F/T를 설치하여 조정하거나 처짐 및 캠버관리를 수행할 때, 구조물의 처짐상황을 파악하고자 할 때 사용된다. 또한 구조물의 현재 형상과 해석적인 처짐량을 비교하여 효율적인 처짐관리를 가능하게 하며, 구조물의 처짐거동이상을 모니터링할 수 있다. Fig. 13의 캠버관리도표는 기존의 시공현장에서 캠버 및 처짐관리시 사용되던 캠버트리를 워크시

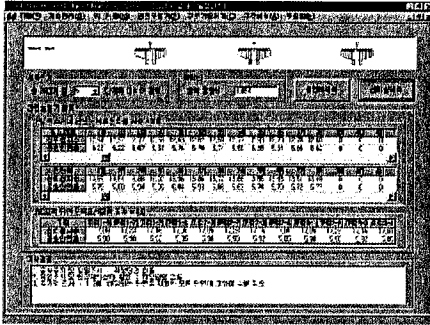


Fig. 10 일정단계에서의 안전도평가

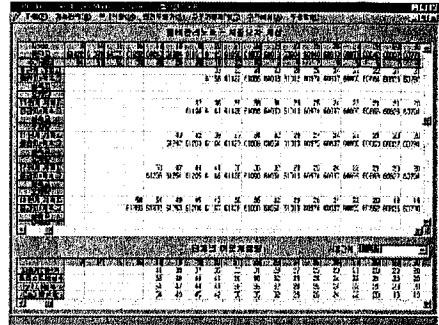


Fig. 13 리스크관리도표

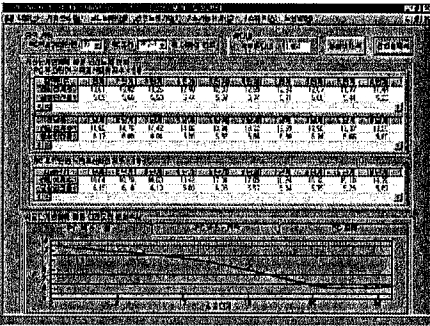


Fig. 11 일정단면에서의 안전도평가

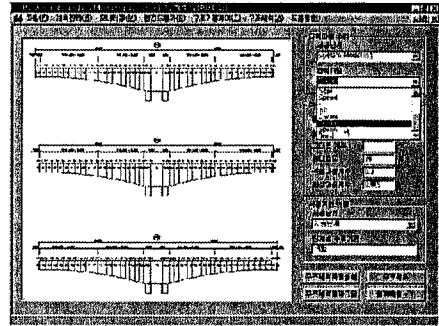


Fig. 14 입력데이터 자동생성

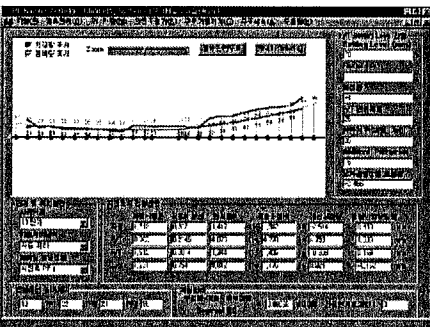


Fig. 12 치집관리

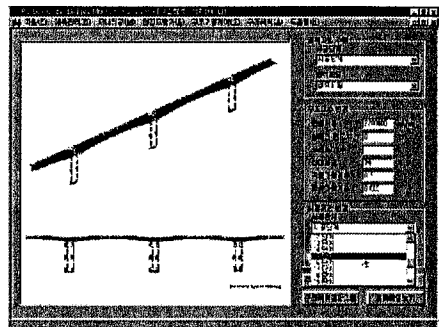


Fig. 15 전체구조물의 모델링

트 형태로 프로그램으로서 구현한 것으로 구조물의 현상태 치집추정량과 해석적으로 구해지는 치집값과 비교가 가능하도록 구성하였다.

5.3.4 구조해석 시스템

구축된 구조해석 시스템에서는 기본적으로 작성되어

진 시스템 입력데이터를 중심으로 시공단계별로 변경 가능한 입력데이터를 자동으로 생성하고 출력데이터를 추출할 있는 인터페이스를 사용하여 구조해석 프로그램을 제어하였다. 안전성평가나 구조거동제어, 모니터링 시스템에서 각종 해석 및 판단을 위한 기본자료로 쓰이게 되므로 개별 소프트웨어 자체로서보다는 각각

의 시스템과의 연계를 중심으로 구축되었다.

6. 요약 및 결론

국내의 계측모니터링시스템의 연구동향 및 실 구축 사례에 대한 고찰과 세그멘탈 PSC박스거더교량의 시공간 구조계의 특성분석 및 이론고찰을 바탕으로 세그멘탈 PSC박스거더교량의 안전하고 정밀한 시공을 위한 시공간 계측모니터링 및 안전성평가, 제어시스템 모형을 제안하였다. 또한 제안된 모델에 기초하여 서해대교의 FCM구간을 대상으로 계측모니터링 및 안전성평가, 제어 시범소프트웨어를 구축하였다. 적용된 안전도평가방법은 기존의 경험적, 직관적 방법에 의해 구조물의 안전도를 평가하는 방법에서 탈피하여 시공간 교량의 안전을 보다 정량적으로 엄밀하게 평가할 수 있는 합리적인 방법이며, 처짐거동제어를 위해 제안된 확률적 오차예측기법은 보다 실용적으로 시공중 처짐제어를 수행할 수 있다.

개발된 PSC박스거더교량의 시공간 계측모니터링, 안전성평가 및 제어시스템의 시범소프트웨어는 향후 실용성 검증을 통해 구조물의 안전·정밀시공을 위한 핵심 소프트웨어로서 활용될 수 있을 것이며 실교량의 시공간 전산화 유지관리시스템 소프트웨어의 기본틀로서 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 96특정기초연구과제(과제 번호 : 96-0601-05-(01-3)로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 조효남, 홍승호, 박경훈, 김옥현 (1999), "교량의 계측을 위한 네트워크 시스템 설계기법", 한국구조물진단학회 논문집, 제3권 제2호, pp.221~232.

2. 조효남 외 (1998), 근접시공시 기준교량의 안전관리를 위한 현장계측 모니터링 분석 시스템, 한국표준과학연구원.
3. 조효남, 주환중, 박경훈, 문경호 (2001), "FCM에 의한 라멘식 세그멘탈 PSC박스거더 교량의 신뢰성에 기초한 시공간 안전도평가", 한국구조물진단학회(계개 예정).
4. 건설교통부 (1996), 도로교표준시방서.
5. 조효남, 박경훈, 배용일, 문경호 (1999), "FCM공법에 의한 세그멘탈 PSC교량의 시공간 계측제어시스템 개발", 대한토목학회 학술발표 논문집, 제1권, pp.101-104.
6. 조효남, 최영민, 윤정원 (1997), "FCM공법에 의한 세그멘탈 PC 박스거더 교량의 신뢰성에 기초한 시공간 구조 안전도평가", 대한토목학회논문집, 17(1-5), pp.739-748.
7. 신재철 외 (1999), "세그멘탈 PC박스거더교량의 시공간 모니터링 및 건설성 평가 시스템 개발", 한국과학기술단 특정기초연구과제 보고서.
8. Norman M. Wereley (2000), "Smart Structures and Materials 2000 : Smart Structures and Integrated Systems." Proceedings of SPIE Volume: 3985.
9. Casas, J. R. (1997), "Reliability-based partial safety factors in cantilever construction of concrete bridges." Journal of Structural Engineering, ASCE, 123(3), pp.305-312.
10. TDV (1997), RM SPACEFRAME Manual Rev. 5.80. TDV.
11. Frank, J. V. and Michael P. C. (1986), "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear." ACI Journal, ACI, 83-22, pp.219-231.
12. 한국도로공사 (1995, 1996, 1997a), "특수교량의 계측시스템 구축과 시공법 개발 연구(II,III,IV)" 한국도로공사 도로연구소, 연구보고서, 1995~1997.
13. 배용일 (1999), "세그멘탈 PC박스거더교량의 통합 시공관리시스템 모형", 석사학위 논문, 한양대학교 대학원 토목·환경공학과, 1999.12.
14. 건설교통부 (1998), "PSC 장대교량의 정밀안전시공 및 유지관리를 위한 통합계측관리 시스템의 개발", 서울대학교 주관연구, (주)동부건설-(주)바루엔지니어링 협동연구, 연구보고서.
15. 대림산업(주) (1993), "강동대교 공사지".

(접수일자 : 2001년 4월 4일)