

FCM에 의한 라멘식 세그멘탈 PSC박스거더 교량의 신뢰성에 기초한 시공간 구조안전도평가

Reliability-Based Assessment of Structural Safety of Rigid-Frame-Typed
Segmental PSC Box Girder Bridges Erected by the FCM during Construction

조효남* 주환중** 박결촌*** 문경호****
Cho, Hyo-Nam Joo, Hwan-Joong Park, Kyung-Hoon Moon, Kyung-Ho

Abstract

In this paper, a limit state model based on the analysis of structural behavior of segmental prestressed concrete box girder bridges and reliability-based safety assessment method are proposed for the bridges erected by free cantilever method. Strength limit state models for prestressed concrete box girder and rigid-frame type columns are developed for a structural safety assessment during construction. Based on the proposed limit state models, the reliability of the bridge is evaluated by using the Advanced First Order Second Moment method. The proposed model and method are applied to the Seo-Hae Grand Bridge built by FCM in order to verify its effectiveness in the safety assessment during construction of the kind of bridges. The sensitivity analyses of the main parameters are also performed in order to identify the important factors that need to be controlled for the safety of the bridges during construction.

keywords : FCM, Structural Safety, Reliability, Bridge during Construction, Sensitivity Analysis

1. 서 론

최근 사회기반시설 확충과 일환으로서 경부고속철

도, 서해안-영동고속도로, 도시고속화도로 등 대규모
철도-도로의 건설공사가 활발히 진행되고 있으며 이
들의 상당부분이 교량으로 구성되어 있다.

* 성희원, 한양대학교 토목-환경공학과 교수

** (주)교량과 고속철도 대표이사

*** 한국건설기술연구원 연구원

**** (주)교량과 고속철도 사원

E-mail : paul@kict.co.kr 016-475-5451

• 본 논문에 대한 보려를 2002년 7월 31일까지 학회로 보내
주시면 2002년 7월호에 보려권자를 게재하겠습니다.

이러한 교량은 가설시 주변환경의 제약조건을 극복하고 기존 교통흐름에 미치는 영향을 최소화하기 위해 여러 가지 특수한 시공방법이 적용되고 있다. 그 중 세그멘탈 PSC박스거더교량은 단일 박스단면으로서 가설이나 공용중 비틀림모멘트에 대한 강성이 크고 단면의 구조적 효율성이 뛰어나며, 경제성과 미관이 우수하여 국내외에 걸쳐 중·강대 콘크리트 교량으로서 많은 곳에서 채택·건설되고 있다. 세그멘탈 PSC박스거더교는 가설공법의 특성상 단절적, 점진적 시공에 따른 각 시공단계의 구조기능이 복잡할 뿐만 아니라 제반 하중과 재료강도의 평가에 있어 공용중보다 시공중에 더욱 큰 불확실성이 내재되므로 시공중 안전에 더욱 유의하여야 한다. 그럼에도 불구하고 세그멘탈 PSC박스거더교량의 시공중 구조안전도는 현장에서의 육안관찰이나 현장기록자의 경험에 의존한 정성적 판단에 그치고 있어 구조물이 실제 보유하고 있는 안전도를 합리적으로 평가하지 못하고 있다. 따라서 객관적 근거에 의해 획득한 실시간 계측데이터를 이용하여 시공중 구조물의 실제적인 구조안전도를 합리적이고 실용적으로 도출하여 정량적으로 제시할 수 있는 평가방법에 대한 연구가 필요한 실정이다.

Casas와 로프냐 등은 FCM으로 시공되는 연속교형식 PSC박스거더교량의 가설시 구조안전도평가에 대한 연구를 확립된 접근방법을 이용하여 수행한 바 있다.^{21,16)} 그러나 연속교형식 PSC박스거더교량은 시공중 안전성과 공용중 사용성 및 유지관리에 문제가 있어 최근에는 라멘교형식으로 주로 시공되고 있는 실정이다. 이에 대한 시공중 구조안전도평가 방법의 정립이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 FCM으로 시공되는 라멘식 PSC박스거더교량의 시공중 구조안전도에 대한 교활을 바탕으로 시공중 주요 파괴모드인 PSC박스거더와 라멘식교각에 대한 강도한계상태모형을 제안하고, 제안된 한계상태모형을 바탕으로 사례대교 FCM구간에 대한 안전도평가를 수행하여 타당성 및 실용성을 검증하고자 하였다. 또한 제안된 한계상태모형에서 고려되어야 하는 저항강도와 하중효과의 변동에 따른 신뢰성지수 β 의 민감도분석을 통해 시공중 구조안전도에 주변 영향을 미치는 변수를 파악하여 시공중 분석사고를 미연에 방지하고 경제적이면서 정밀한 시공을 도모하는데 기여하고자 한다.

2. FCM에 의한 PSC박스거더교량의 시공중 구조계

2.1 FCM에 의한 라멘식 PSC박스거더교량

FCM에 의한 PSC박스거더교량의 워싱후 구조형식은 대표적으로 상·하부 구조를 일치화시킨 라멘교 형식(Fig. 1(a), 이후 라멘식이라 칭함)과 2경간이상의 연속거더가 교각과 교대위에 설치된 교각장치로 지지되는 연속거더교 형식(Fig. 1(b), 이후 연속식으로 칭함)으로 분류할 수 있다.

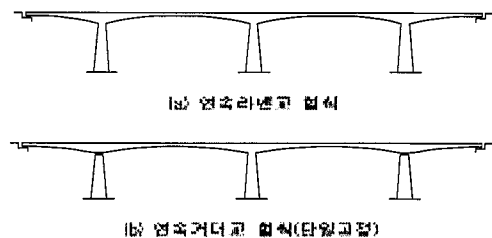


Fig. 1 세그멘탈 PSC박스거더교량의 구조형식

이중 라멘식 PSC박스거더교량은 교각과 상부거더를 일체로 시공하므로 교각상에 별도의 교각장치가 필요치 않으며 연속구조인 경우 신축이유장차가 적어져 수형성이 양호하고 유지관리가 용이하며 경제적이다. 또한 상부시공중에 발생하는 불균형모멘트에 대비한 뱀도의 가시설치를 설치하지 않고도 시공중 안정성에서 연속식에 비해 양호하다. 다경간 라멘식교량은 콘크리트의 크리프 및 건조수축, 프리스트레스, 온도변화의 영향 등에 의한 거더의 신축량이 크고 교각의 변형량도 크기 때문에 연성이 큰 높은 교각을 갖는 교량구조에 적합하다. 일반적으로 2수형 또는 단수형 연성교각이 사용되며, 두 형식 모두 안전성과 좌굴에 대한 주의가 요한다.

한편 상부구조물의 신축을 허용하지 않음에 따라 부가적인 응력이 발생하여 해석 및 설계가 복잡해지게 되지만 최근 설계기법의 발달로 큰 문제가 되지는 않고 있다. 이러한 이유로 인해 근래에는 연속식보다는 라멘식이 많이 채택되어 건설되고 있으므로

이에 대한 시공간 구조안전도 평가방법의 정립이 요구된다.

2.2 시공간 하중 및 구조특성

FCM으로 가설되는 라멘식 PSC박스기둥교량의 시공간 구조체는 완성체와는 달리 매우 복잡한 하중의 영향을 받게 된다. 세그먼트의 자중, 각 단계별로 이동하는 가설차(form traveller: F/T)하중, 시공수평층 발생할 수 있는 가설장비하중(폼트레서, 펌프, 강선, 철근 등의 소규모 기자재 및 한강작업원), PS강선에 의한 긴장력, 크리프와 건조수축에 의한 변형, 세그먼트 및 교각에 작용하는 풍하중, 온도변형 등이 복합적으로 작용된다. 또한 세그먼트별로 콘크리트의 재량이 다르므로 크리프 및 건조수축의 영향을 크게 받는다. 한편 가설차와 세그먼트 자중 등의 하중이 원격시 고려된 하중과 다르거나 풍하중이나 우발적하중 등의 불확실한 하중으로 불균형한 하중상태가 생길 우려가 있다. 즉, 캔틸레버 내력이 가설되므로 시공단계에 의해 교각 수두부에 발생하는 불균형모멘트가 세그먼트의 순차적 시공에 따라 증가할 수 있으므로 비록 연속기둥교 형식이 비록했으나 전도부재는 구조물 전체의 안전을 저해하는 가장 위험한 불안정 요소로 작용하게 된다.

이렇게 가설작업 중 발생가능한 불균형하중상태에 대한 안전성을 확보하기 위하여 도로교표준시방서³⁾에서는 FCM에 의한 세그먼트 PSC박스기둥교량의 설계시 양쪽 캔틸레버 중 한쪽 세그먼트가 먼저 타설되는 경우에 한쪽 캔틸레버에 거더자중의 2%를 합성시킨 하중을 작용시키고, 가설작업에 의해 캔틸레버 양단에 발생할 수 있는 시공중 불포화하중의 오차를 고려하기 위하여 양단에 각각 50kg/m^2 , 25kg/m^2 의 하중을 부가적으로 작용시키며, 풍하중에 의한 상향력 25kg/cm^2 을 고려하도록 하고 있다. 그러나 이러한 추가하중 및 박스기둥, 교각 처항강도의 산정에는 많은 불확실성을 내포하고 있을 뿐만 아니라 불균형모멘트에 대한 교각 자체의 강성이 취약할 수 있으므로 시공단계별 구조안전성검토가 이루어져야 한다.

3. 신뢰성에 기초한 안전도평가모형

PSC박스기둥교의 신뢰성평가는 지함 및 하중과 관련된 여러 가지 불확실량에 대한 오차와 신뢰성해석 모델링 및 수치해석에 수반되는 오차 등으로 안하여 복잡하고 어려운 문제이다. 따라서 PSC박스기둥교량에 대한 신뢰성 모델링은 근사적이면서도 실용적인 방법으로 개발되어야 한다. 본 논문에서는 최근 전월민도가 높아 시공단계에서의 안전도 검토가 절실히 요구되고 있는 FCM에 의한 라멘식 PSC박스기둥교량의 시공단계에서 적용가능한 실용적이고 합리적인 구조안전도평가 모형을 PSC박스기둥교 라멘식 교각에 대하여 제안하였다. 시공간 구조체에 대한 안전도평가이므로 사용실행제상태에 대해서는 고려하지 않고, 극한강도한계상태에 대해서만 고려하였다.

3.1 PSC박스기둥교의 한계상태모형

현장타설에 의해 상부구조를 단계별로 가설하는 라멘식 PSC박스기둥교량의 시공중 구조체는 경정체를 이루게 되며, 주시더자중, 가설차하중, 가설장비하중, 풍하중, 프리스트레스, 크리프 및 건조수축, 온도하중, 지진하중, 지점침하 등 다양한 하중에 의하여 구조부재가 전란적으로 된, 전단 및 비틀림을 받게 된다. 본 논문은 PSC박스기둥교량의 시공간 극한내하력에 초점을 맞추고 있으므로 현재상태모형을 극한한계상태로 모델링하였으며, PSC박스기둥교의 주요파괴모드인 휨 및 전단파괴에 대하여 고려하였다.

시공간 PSC박스기둥교의 안전도평가를 위한 휨 및 전단파괴에 대한 한계상태함수 $g(\cdot)$ 는 실용적으로 지함 변수와 하중변수가 분리된 양함수 형태로 표현할 수 있으며, 이들 지함 및 하중의 크기를 확률변수로 취급하여 식(1)과 같이 정의할 수 있다.⁴⁾

$$g(\cdot) = S_F - \sum S_G \quad (1)$$

여기서, S_F 는 실 휨강도 및 전단강도, $\sum S_G$ 는 각종 시공간 하중에 의한 실 하중효과를 각각 나타낸다.

S_b 은 각각 실 휨강도 M_R 과 실 전단강도 V_R 로 표현되며, 식(2)-식(3)과 같이 정의할 수 있다.

$$M_R = M_u N_M \quad (2)$$

$$V_R = V_u N_V \quad (3)$$

여기서, M_u , V_u 은 각각 공칭휨강도와 공칭전단강도; N_M , N_V 는 파괴모드별 보정계수로서 M_u , V_u 추정치에 관련된 전기적 모든 불확실량을 대표하는 랜덤변량을 각각 나타낸다. 시공중인 교각에 대한 안전도평가가 이므로 구조물은 노후되지 않은 것으로 가정하여 노후 손상계수는 고려하지 않는다.

PSC박스단면의 공칭강도의 산정은 도로교표준시방서²¹⁾ 제415조에 따라 산정하였으며, 전단강도는 수정압축강 이론을 사용하여 산정하였다. ΣS_b 는 각종 시공간 하중에 의한 실 하중효과를 나타내며, 본 논문에서는 주시터하중에 의한 실 휨모멘트 및 전단력 S_{G0} , 한쪽 쉘탈레미부에 하중의 2%에 해당하는 사하중을 추가로 작용시켰을 때 발생하는 실 휨모멘트 및 전단력 S_{G2} , 가설차하중에 의한 실 휨모멘트 및 전단력 S_{F1} , 가설강비하중에 의한 실 휨모멘트 및 전단력 S_{G3} , 크리프와 건조수축변형에 의한 실 휨모멘트 및 전단력 S_{C1} , 연락방향 풍하중에 의한 실 휨모멘트 및 전단력 S_{W1} , 프리스트레스 긴장력에 의한 실 휨모멘트 및 전단력 S_{P1} 에 대해서 확률변수로 모델링하여 식(4)와 같이 정의하였다.

이러한 불확실성을 대표하는 시공간 하중에 의한 실 하중효과는 하중에 대한 영향계수, 가설차하중에 의한 PSC박스단면의 응답비 및 보정계수를 고려하였으며, 응답비 K_b 는 시공단계가 변함에 따라 가설차하중이 이동할 경우, 이동 전·후에 대하여 평가단면에서의 단면용량 계측치 변화량과 단면용량 해석치 변화량의 비로서 산정하였다.

$$\Sigma S_b = S_{G0} + S_{G2} + S_{F1} + S_{G2} + S_{C1} + S_{W1} + S_{P1} \quad (4)$$

3.2 리멘식 교각의 한계상태모형

FCM에 의해 리멘식 PSC교각이 가설될 때 교각에는 각종 하중에 의한 축압축력과 함께 불균형모멘트가 동시에 작용하게 된다. 따라서 리멘식 교각에서의 교각은 축압축력과 휨모멘트를 동시에 받는 보-기둥으로 모델링할 수 있으며, 신뢰성분석을 위하여 식(5)와 같은 압축과 휨을 동시에 받는 RC주체에 대한 한계상태 함수를 적용하였다.^{10),11),12)}

$$g(\cdot) = \left\{ P_R^2 + \left(\frac{M_R}{h} \right)^2 \right\}^{1/2} - \left\{ (\Sigma P_S)^2 + \left(\frac{\Sigma M_S}{h} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

여기서, P_R 은 수직인 편심량 e 에 의한 실 축방향 압축강도를 나타내는 랜덤변량; M_R 은 실 축방향 압축강도 P_R 과 편심량 e 의 곱으로 정의되는 휨모멘트 ($M_R = P_R \cdot e$); ΣP_S 는 각종 하중들에 의한 실 하중효과를 나타내는 랜덤변량; ΣM_S 는 실 하중효과와 ΣP_S 와 편심량 e 의 곱으로 정의되는 하중모멘트 ($\Sigma M_S = P_S \cdot e$); h 는 단면의 높이를 각각 나타낸다.

식(5)의 한계상태방정식은 하중정도를 가정함으로써 일정한 편심을 가지며, 저항과 하중효과를 분리해서 다룰 수 있다. 따라서 평가하고자 하는 하중단계 및 단면에서 편심량 e 의 가능 최대치를 고려하여 축방향지향 P_R 과 각종 시공간 하중에 의해 교각에 작용되는 실 하중효과와 ΣP_S 를 정한 후, 저항모멘트 M_R 과 하중모멘트 ΣM_S 를 계산하였다. P_R 과 ΣP_S 는 박스기둥의 M_R , V_R 과 ΣS_b 와 같은 방법으로 계산할 수 있다.

3.3 통계적 불확실량

구조신뢰성 방법에서는 저항 및 하중관련 랜덤변량들의 불확실량을 합리적으로 추정하는 것이 매우 중요한 문제이다. 신뢰성분석에 사용되는 불확실량에는 구조안전도에 영향을 미칠 수 있는 모든 것들을 포함하

(85+2@165+85). 폭은 31.4m(2@15.7)의 6차선으로 이루어져 있으며, 2수평 교각을 가진 연속라면형식의 교량으로 선형가항타설이 의하여 건설되었다. 대상교량은 21단계의 킨틸러바 가설단계와 4단계의 키서그먼트 덤핑단계, 교면 파루리단계 등 총 26단계의 시공단계를 가지며, 상하행선 각각 6교와 가설차량 도입하여 6개의 킨틸러바가 동시에 현장타설되었다. 대상교량의 일반계획은 Fig. 2와 같다.

4.2 구조해석

FCM에 의한 PSC박스기둥교량은 시공중에 구조계가 계속 변화하기 때문에 각 단계별로 안전검토를 수행하여야 하며, 시공중의 상황을 최대한 유사하게 모델링하기 위해 각 단계별로 고려되는 하중을 기본적으로 정의하여야 한다.

실제 시공사와 구조분석 설계시에 예측했던 것과는 다른 거동을 나타내게 된다. 이것은 주로 콘크리트의 강도발현에 따른 탄성계수의 증가, 공기저항에 의한 세그먼트별 콘크리트와 제형차이, 크리프, 건조수축 및 덤핑세이션 가설차와 차이, 온도 및 습도차이, 시공오차에 의한 강형 및 자중오차, 잘못된 예측에 의한 실하중오차 등에 의해 유발된다. 이러한 오차를 최소화시켜 정밀하고 안전한 시공을 위해서는 설계시 가정된 각종 계수와 시공기간이 설계와 무함되도록 하여야 한다. 따라서 시공현장에서와 계속 및 시험을 통해 계산된 구조모수와 변경된 시공기간이 구조해석 과정에 고려되어야 한다.

본 논문에서는 이러한 조건들을 구조해석에 반영하기 위하여 시공단계별 해석 및 시간의존성 거동의 고려가 가능한 상용패키지(FEM Spaceframe)를 사용하여 구조해석을 수행하였다.¹³⁾ 일반적으로 시해대교와 같은 단일 박스기둥은 교축직각방향의 강성이 크고 하중면내 작용이 크기 때문에 선형적인 안전도 평가를 위해서 선 단면을 하나의 비로 모델링하였으며, 2수평라면형식의 교각까지 일반 프레임 요소를 사용하여 모델링하였다. Fig. 3에 구조해석 모델링을 나타내었다.

4.3 안전도평가

대상교량인 시해대교의 시공중 구조안전도평가를 위하여 앞서 제안된 각 지체모드에 대한 한계상태모형을 적용하였다. 각 교각과 박스기둥의 킨틸러바는 유사한 하중 및 저항을 갖게 되므로 대표적으로 Fig. 4에 보인 2번교각(PF-2)과 교각 상부 박스기둥의 왼쪽 킨틸러바 부분에 대해서만 시공중 안전도를 평가하였다. Fig. 4에서 단면번호의 숫자는 단면번호를 나타낸다. 하중변수의 응답비 K_d 및 교각 저항변수의 시공중 손상계수 D_r 는 실제 및 시공재료와 한계계속점과 등을 바탕으로 하여 합리적으로 평가하여야 한다. 시해대교의 시공중 응답비는 1보다 높 것으로 예상되나 응답비 상정을 위해 필요한 시험 및 계측이 수행되지 않았기 때문에 응답비는 1로 가정하였으며, 대상교량은 선형되는 교량이므로 교각 저항변수와 손상계수도 1로 가정하였다.

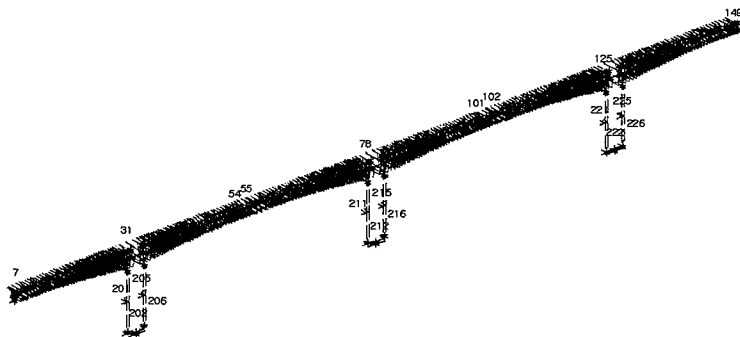


Fig. 3 구조해석 모델링

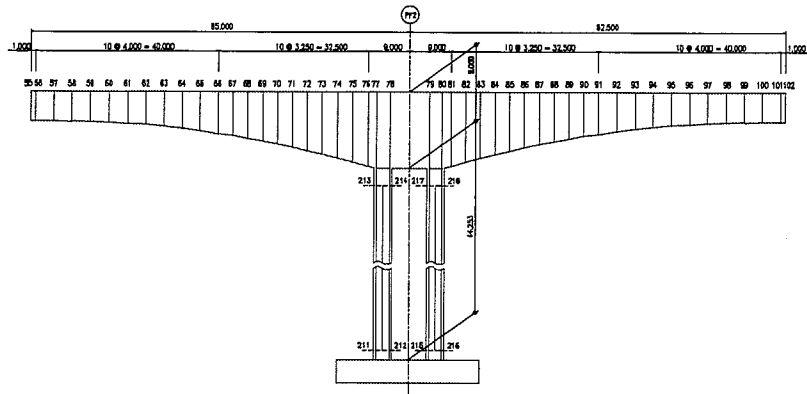


Fig. 4. 시공관 안전도 평가 대상 구조물

시공중인 박스거터와 라멘의 교각의 안전도평가는 컨틸레버와 길이가 가장 길게 되어 휨모멘트가 상대적으로 높 것으로 판단되는 키제그먼트 포함 직선 시공단계, 즉 21단계에서 선단면에 대하여 수행하였다. 신뢰성해석은 실용적인 신뢰성해석방법으로 평가받고 있는 APOSV 방법을 사용하였다.³⁴⁾ 신뢰성해석을 통해 신뢰성지수 β 를 구하였고, β 의 파도적 개념으로서 구조물의 실강도와 최대작용외력의 비로 정의되는 공칭 안전율을 n' 과 함께 구하였다. 공칭안전율은 신뢰성해석을 통해 구해진 β 와 중앙안전율의 관계로부터 저항과 하중관련 불확실량의 함수로 구성되며, 개념상 저항 및 하중 불확실량을 통하여 구조물의 설계상태를 고려할 수 있기 때문에 허용응력법에 의해 계산되는 지리적인 안전율보다 더욱 실제적인 구조안전도의 개념이다.⁴¹⁾

Table 2와 Fig. 5에는 21단계 시공단계에서 박스 거터의 휨모멘트와 선단에 대한 신뢰성해석 결과를 나타내었다. 휨모멘트에 대한 β 는 교각 주두부인 단면 77에서 4.87로 최소가 되며, 선단에 대해서는 주두부와 첫번째 세그먼트의 결합부인 단면 76에서 5.48로 가장 작은 값을 나타내고 있다. 전체적으로 휨모멘트에 대한 β 는 4.87~8.24(n' 는 1.88~2.10), 선단에 대한 β 는 5.48~6.87(n' 는 2.41~2.98)의 값을 나타내고 있다. 휨모멘트의 강도는 주로 단면강자량의 의존하게 되므로 RCM에 의한 PSC박스거터교량과 같이 강재량이 단면에 따라 변화하는 경우 단면에 따

라 β 의 변동폭이 커지게 되는 것으로 판단되며, 콘크리트와 선단철근의 함수로 구성되는 선단강도는 휨강도에 비해 비교적 일정한 강도를 가지게 되므로 변동성이 그다지 크지 않은 것으로 판단된다.

Table 2. PSC박스거터의 휨모멘트 및 선단에 대한 신뢰성 해석 결과

단면	휨모멘트		선단	
	β	n'	β	n'
78	4.92	1.90	6.87	2.98
77	4.87	1.88	6.68	2.78
76	5.28	2.00	5.48	2.40
75	5.29	2.00	5.52	2.41
74	5.36	2.02	5.54	2.41
73	5.47	2.04	5.58	2.41
72	5.56	2.06	5.49	2.41
71	5.65	2.07	5.51	2.41
70	5.78	2.10	5.54	2.42
69	5.67	2.05	5.89	2.59
68	5.63	2.03	5.91	2.59
67	5.60	2.01	5.94	2.60
66	5.54	1.98	6.00	2.67
65	5.65	2.00	6.06	2.69
64	5.75	2.00	6.09	2.63
63	5.86	2.00	6.17	2.65
62	6.01	1.99	6.27	2.67
61	6.04	1.97	6.38	2.69
60	6.33	1.98	6.41	2.66
59	6.98	1.99	6.59	2.72
58	7.90	2.02	6.75	2.68
57	8.24	2.09	6.82	2.76

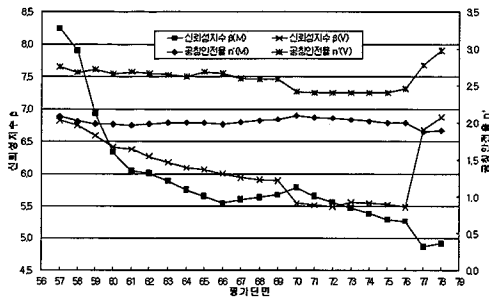


Fig. 5 PSC박스거더의 신뢰성해석 결과(21단계)

일반적인 구조물에서의 목표신뢰성지수 β_0 가 3.5임을 감안하면 전반적으로 안전도 수준이 상당히 높은 것으로 판단된다. 이러한 시공중 안전도 결과는 키세그먼트 결합에 따른 구조개변화와 개통후 설계하중 도입에 따라 원천히 다른 양상을 보이게 될 것이다.

Table 3에는 21번째 시공단계에서 라멘의 교각의 신뢰성해석 결과를 나타내었다. 선단면에 걸쳐 라멘의 교각의 β 는 4.83~4.99로 충분한 안전한 것으로 판단되며, 이것은 라멘의 PSC박스거더교량의 특성상 선단면에서 가설될 때 발생되는 불균형모멘트와 교각이 저항해야 함으로 교각의 강성을 크게 설계하기 때문인 것으로 판단된다. 키세그먼트 연결후 구조제가 변하여 불균형모멘트가 제거된다면 공동관 활하중이 제거되어도 한계보다 높은 신뢰성을 보일 것이다.

시공단계에 따른 단면별 안전도의 변화 추이를 관찰하기 위하여 구조해석을 통해 최대하중 작용단면을 구한 후 각각의 단면에 대하여 선 시공단계에서 신뢰성 해석을 수행하였다. Table 4와 Fig. 6에는 각 피크모드의 최대하중 작용단면에서 모든 시공단계에 대한 신뢰성해석 결과를 나타내었다. 박스거더와 필파피는 77번 단면, 박스거더와 선단차비는 76번 단면, 교각에 대해서는 212번 단면에 대하여 신뢰성평가를 수행하였으며, 교각의 경우 현재상태모형에서의 하중항 ($P^2 + (M/h)^2$)이 최대인 단면을 최대하중 작용단면으로 정하였다.

Fig. 6에서 박스거더 선단과 교각의 경우 시공단계에 따른 변동폭이 그다지 크지 않으나, 박스거더 필모멘트의 경우에는 β 의 변동폭이 4.87~13.25(공칭한

신율 n' 은 1.88~5.03)로 시공단계에 따라 크게 변하고 있음은 볼 수 있다.

Table 3 라멘식 교각의 신뢰성해석 결과

단면	211	212	215	216
β	4.83	4.89	4.99	4.97
n'	2.50	2.66	2.93	2.84

Table 4 PSC박스거더교의 서공단계별 신뢰성해석 결과

시공 단계	박스거더				교각 (단면212)	
	필모멘트 (단면77)		선단 (단면76)		β	n'
	β	n'	β	n'		
1	13.25	5.03	7.09	3.11	5.38	2.97
2	13.22	5.01	7.03	3.06	5.37	2.96
3	13.06	4.95	6.97	3.06	5.34	2.94
4	12.86	4.91	6.86	3.05	5.31	2.92
5	12.70	4.87	6.79	3.05	5.28	2.91
6	12.58	4.82	6.71	3.03	5.25	2.89
7	12.22	4.78	6.62	3.00	5.23	2.87
8	11.92	4.70	6.54	2.97	5.20	2.86
9	11.59	4.52	6.46	2.93	5.18	2.85
10	11.22	4.33	6.36	2.90	5.16	2.84
11	10.84	4.15	6.30	2.86	5.14	2.83
12	10.34	3.92	6.21	2.82	5.11	2.82
13	9.81	3.68	6.13	2.77	5.08	2.80
14	9.25	3.44	6.04	2.73	5.06	2.78
15	8.66	3.18	5.96	2.69	5.03	2.77
16	8.05	2.93	5.88	2.65	5.01	2.75
17	7.42	2.69	5.80	2.61	4.98	2.73
18	6.79	2.47	5.72	2.57	4.96	2.71
19	6.15	2.26	5.64	2.53	4.93	2.69
20	5.51	2.06	5.56	2.49	4.91	2.67
21	4.87	1.88	5.48	2.46	4.89	2.66

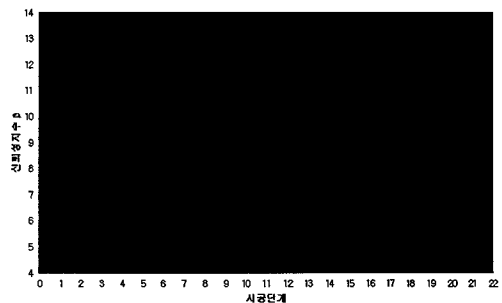


Fig. 6 시공단계에 따른 각 피크모드의 신뢰성해석 결과

단면의 저항강도는 시공단계의 선선에 따라 변화하는 PSC강선 긴장력과 가설치하중에 의한 영향을 많이 받게 된다. 박스기둥 선단 및 교각의 경우 이로 인한 영향이 상대적으로 작음에 비해 미소하중으로 시공단계에 따른 신뢰성해석 결과의 변동폭이 작은 것으로 판단된다. 그러나 박스기둥 필모멘트의 경우에는 시공단계가 선행될수록 긴장력과 권회량의 곱으로 표현되는 2차모멘트와 1차모멘트 상정온 위한 모멘트관 길이가 증가함에 따라 전체 하중모멘트가 포괄형태로 증가하게 되며, 이로 인해 시공단계가 선행될수록 박스기둥 필모멘트의 신뢰성해석 결과의 변동폭이 크게 나타나는 것으로 판단된다.

4.4 민감도분석

각 하중모드의 저항 및 하중에 포함된 랜덤변량 중 시공간 구조물의 안전도에 지배적인 영향을 주는 변수를 검토하기 위하여 민감도분석을 수행하였다. 안전도 평가 결과 각 파괴모드에서의 지배적인 시공단계는 모든 경우에 21단계였으며, 지배단면은 박스기둥 필모멘트의 경우 단면 77, 박스기둥 선단의 경우 단면 76, 교각의 경우 단면 211이었다. 선택된 시공단계 및 단면에 대하여 각 랜덤변량의 변동계수를 안전도평가시 사용한 값을 중심으로 $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ 씩 변화시켜, 그에 따른 신뢰성지수 β 의 변화를 그래프로 나타내었다.

Fig. 7-9의 민감도분석 결과를 보면, Fig. 7과 같이 박스기둥과 필모멘트의 경우 단면저항 및 수직저항 등의 변동성이 β 에 민감하게 작용하고 있으며, Fig. 8 박스기둥의 선단 및 Fig. 9 라멘의 교각의 경우에는 단면저항의 변화만이 β 값의 변화에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 라멘의 PSC박스기둥교량은 시공단계에서 선행력에 큰 영향을 미치는 재료강도의 확보가 우선적으로 고려되어야 하며, 박스기둥에 작용하는 불균형모멘트가 최소화 되도록 하여야 한다. 시공시 기둥자중의 변동성은 미소하며, 가설차, 가설장비 하중 등 추가적으로 박스기둥에 재하되는 하중 또한 자체반에 의한 영향은 미소하지만 기둥 자중과의 중첩으로 인해 발생하는 불균형모멘트에 의해 박스기둥의 구조적 안전에 문제가 발생될 수 있으므로 엄격한 품질 및 공정의 관리가 요구된다.

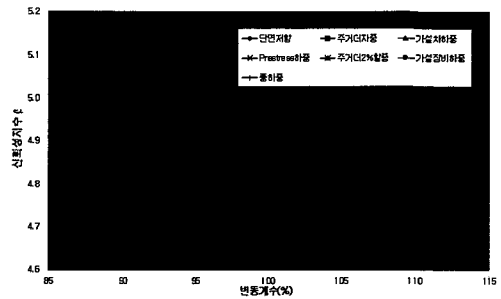


Fig. 7 PSC박스기둥의 필모멘트에 대한 민감도분석 결과

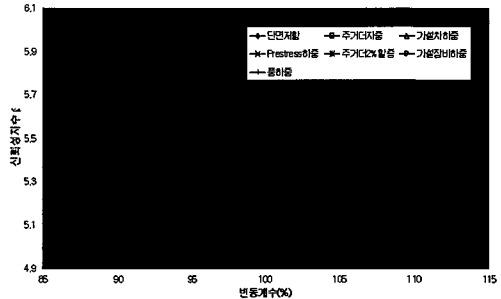


Fig. 8 PSC박스기둥의 선단에 대한 민감도분석 결과

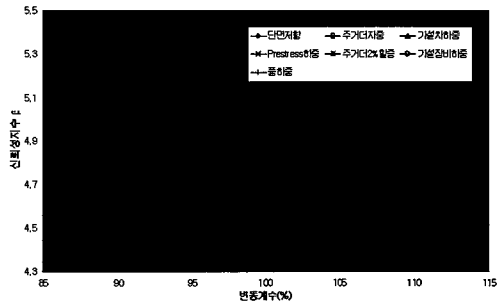


Fig. 9 라멘식 교각에 대한 민감도분석 결과

5. 요약 및 결론

본 논문에서는 세그멘탈 PSC교량의 대표적 가설방범 중 하나인 FCM으로 시공되는 라멘식 PSC박스기둥교량의 시공간 불확실하고 방치 및 경제적이고 정밀한 시공을 도모하기 위한 저속관리시스템의 핵심부분으로서 신뢰성에 기초한 구조안전도평가방법을 정립하고자 하였다.¹⁾

FCM에 의한 라멘식 PSC박스기둥교량의 시공장 구조안전도평가를 위해 박스기둥과 라멘식 교각에 대한 실용적인 구조설계형 해치모형과 가법을 제안하였으며, 제안된 구조안전도평가방법을 실제 교량에 적용하여 타당성 및 실용성을 검토하였다.

제안된 구조안전도평가방법을 적용함으로써 한강기슭지의 경회곡 댐단에 주로 의존하여 정성적으로 평가되어오던 시공장 PSC박스기둥교량과 구조안전도분해 후 실용적인 방법으로 정량적으로 평가할 수 있다. 대량교량에 대한 시공장 구조안전도평가 결과, 신뢰성지수가 충분히 높은 값을 나타내고 있어 구조적 안전에는 문제가 없는 것으로 판단된다. 민감도분석 결과 PSC박스기둥과 필모멘트 및 선단과 라멘식 교각 모두 단면처상의 변동성에 민감하며, 박스기둥의 필모멘트에 대한 안전성은 서해 자중에도 영향을 받는 것으로 분석되었다. 따라서 시공중 구조적 안전을 위해서는 재료강도의 확보와 박스기둥에 작용하는 불균형 모멘트의 최소화가 요구된다.

제안된 구조안전도평가 모형 및 방법은 실제 교량에 실용적으로 적용 가능한 것으로 판단되며, 차후 중요 구조물의 시공중 구조안전도평가시스템 구축을 위한 기초연구로서 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 96복합기초연구과제(과제번호: 96-0601-05-01-3)로 수행되었으며, 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. 한국과학기술재단, "새그랜달 PSC박스기둥교량에 시공장 모니터링 및 건설성 평가 시스템 개발," 한국과학기술단 복합기초연구과제 보고서, 1999.
2. 조효남, 최영민, 윤정철, "FCM방법에 의한 새그랜달 PSC 박스기둥 교량의 신뢰성에 기초한 시공장 구조안전도평가," 대한토목학회논문집, 17(1-5), 1997, pp.739-748.
3. 건설교통부, 도로교표준시방서, 1996.
4. 이승재, 고속철도 교량의 전신과 유지관리를 위한 신뢰성에 기초한 건설성평가 모형, 한양대학교 공학박사학위논문, 1994.

5. 조효남, 신재철, 이승재, "신뢰성에 기초한 승전철법역 대용집계기준," 대한토목학회논문집, 14(5), 1994, pp.1043-1053.
6. 조효남, 민성주, "철근콘크리트기둥의 신뢰성 설계기준에 관한 연구," 대한토목학회논문집, 3(1), 1983, pp.25-33.
7. 신재철, 조효남, 박경춘, 배용일, "새그랜달 PSC교량의 시공장 계속모니터링을 통한 확률적 구조안전성 평가 및 제어시스템," 한국구조물진단학회 논문집, 제5권 3호, 2001, pp.191-201.
8. Edingwood, B. R., Galambos, T. V., MacGregor, J. G. and Cornell, C. A., Development of a Probability-Based Load Criterion for American National Standard A58, NBS Special Pub.577, 1980.
9. Tabsh, S. W. and Nowak, A. S., "Reliability of highway girder bridges," Journal of Structural Engineering, ASCE, 117(8), 1991, pp.2372-2388.
10. Nowak, A. S., "Development of bridge load model for LRFD code," Proceeding of the Structures Congress '93, Structural Engineering in Natural Hazards Mitigation, Irvine, California, 1993, pp.1011-1016.
11. Edingwood, B. R., "Statistical analysis of RC beam-column interaction," Journal of the Structural Division, ASCE, 103(7), 1977, pp.1377-1388.
12. Dintz, S. M. C. and Frangopol, D. M., "Reliability bases for high-strength concrete columns," Journal of Structural Engineering, ASCE, 123(10), 1997, pp.1375-1381.
13. TDV, RM SPACEFRAME MANUAL Rev. 5.80, TDV, 1997.
14. Rackwitz, H. and Fleischer, B., "Structural reliability under combined random load sequences," Computers and Structures, Elsevier, Vol.9, 1978, pp.489-494.
15. Casas, J. R., "Reliability-based partial safety factors in cantilever construction of concrete bridges," Journal of Structural Engineering, ASCE, 123(13), 1997, pp.305-312.

(접수일자 : 2001년 6월 5일)