

## PSC-Box Girder 철도교량의 휨모멘트에 대한 신뢰도 분석

## Flexural Reliability Assessment of PSC-Box Girder Rail Bridge

정우리나라\*†, 김기현\*, 여인호\*, 오주한\*\*

Urinara Jeong\*†, Ki Hyun Kim\*, Inho Yeo\*, Ju Han Oh\*\*

**Abstract** Current railway bridge design standards consist of ultimate strength design method and working stress design method. Design standard for roadway bridges was amended to reflect limit state design method. It should be performed to estimate reliability indexes of existing railway bridges prior to setting up a proper target reliability index in order to introduce the reliability based limit state design method to design practice. In this paper, the reliability assessment is carried out for 40m-span simply supported PSC-Box girder railway bridge. In the assessment, the flexural resistance and the fixed-load effect were obtained by using the existing statistical values from previous research. The live-load effect utilized statistical values obtained from field measurement.

**Keywords** : Limit state design method, Railway bridge, Reliability analysis, Coefficient of variation

**초 록** 현재 철도교량설계 관련 기준은 강도설계법과 허용응력설계법으로 되어 있다. 도로교 등의 설계기준들을 살펴보면 한계상태설계법을 반영하도록 개정된 상태이다. 철도교량 또한 한계상태설계법을 반영하기 위한 절차를 진행 중이며, 한계상태설계법 도입 시 목표 신뢰도수준을 결정하기 위하여 기존 실교량의 신뢰도수준 평가가 선행되어야 한다. 본 논문은 40m 단순교, PSC-Box 거더 철도교량을 대상으로 신뢰도 분석을 수행하였다. 교량의 휨강도와 고정하중에 대해 기존 문헌을 참고하여 변동성을 반영하였으며, 통행이 빈번한 울산-부산 구간의 경부고속선 여객실차의 현장계측 하중자료를 활용하였다.

**주요어** : 한계상태설계법, 철도교량, 신뢰도 분석, 변동계수

## 1. 서 론

철도교 설계기준은 별도로 제정되어 있지 않고 철도설계기준(노반편)[1]의 제8장 교량 일반사항, 제9장 강교 및 강합성교, 제10장 콘크리트교, 그리고 제11장에 교량 하부 및 기초 등으로 몇 개의 장에 기술되어 있으며, 기존의 설계법인 강도설계법과 허용응력설계법을 기본으로 하고 있다. 반면 도로교 설계기준은 별도의 설계기준이 존재하고 한계상태설계법(도로설계기준, 2012[2])을 반영하여 2015년부터 본격적으로 적용되고 있다. 철도교량 또한 한계상태설계법을 반영하기 위한 절차를 진행 중이며, 한계상태설계법 도입 시 목표 신

† 교신저자: 한국철도기술연구원 고속철도연구본부(xtra6@krri.re.kr)

\* 한국철도기술연구원 고속철도연구본부

\*\* 한국철도시설공단 KR연구원

뢰도수준을 결정하기 위하여 기존 설교량의 신뢰도수준 평가가 선행되어야 한다.

$$g = R - Q = M_R - (M_D + M_L) \tag{1}$$

일반적으로 식(1)과 같이 한계상태방정식(g)에서 구조물의 재료 특성에 따른 저항(R)의 확률분포는 도로교 설계기준 개정 시 선행연구자들의 확보된 값을 활용할 수 있으며, 하중효과(Q)의 확률분포 중 철도하중에 기인하는 하중효과는 이 연구를 통해 확보하였다.

## 2. 교량 제원

본 논문에서 분석한 철도교량은 지간 40m로 철도교로써 자주 사용되는 형식중 하나인 PSC-Box 단순교 형식으로 경부고속선의 임기2교가를 대상으로 하였다. 횡단면과 치수는 Fig. 1와 같고 강선 및 콘크리트의 재료특성은 Table 1과 같다. 신뢰도 분석을 위해 변동계수와 확률분포의 종류를 Table 1에 함께 나타내었다. 변동계수는 해외 문헌자료[6,7,8]의 값을 적용하였다.

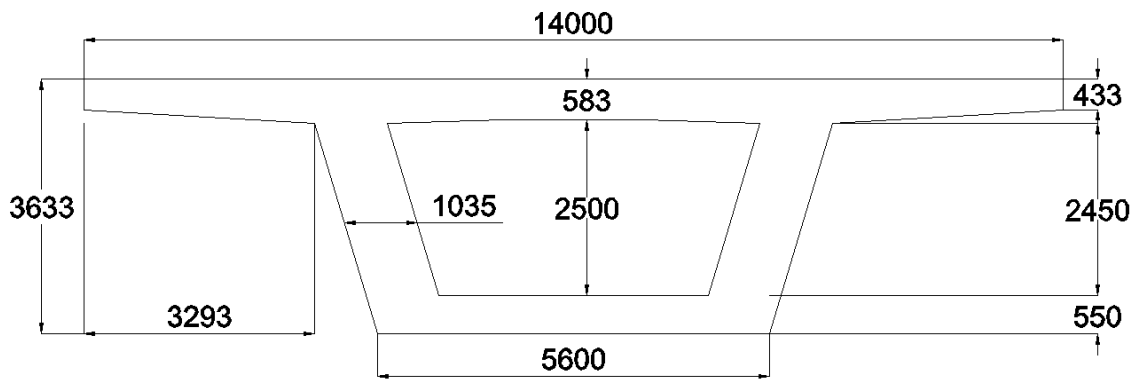


Fig. 1 Dimention of PSC-Box girder

Table 1. Statistical information for material properties

Statistical information	Tendon						Concrete	
	Area, $A_p$	Elastic modulus, $E_p$	Yield stress, $f_{py}$	Ultimate strength, $f_{pu}$	Yield strain, $e_{py}$	Ultimate strain, $e_{pu}$	Compressive strength, $f_{ck}$	Elastic modulus, $E_c$
Mean [5]	52820 mm <sup>2</sup>	200 GPa	1570 MPa	1860 MPa	0.01	0.052	40 MPa	38 GPa
Coefficient of variation	0.0125 [6]	0.06 [7]	0.025 [6,8]	0.025 [6,8]	0.01	0.01	0.15 [6]	0.15
Type of distribution	Normal [6]	Normal [7]	Normal [6,8]	Normal [6,8]	Normal	Normal	Normal [6]	Normal

### 3. 신뢰도 분석

#### 3.1 휨강도 통계특성

휨강도 분포의 통계특성을 얻기 위하여 1,000개 단면을 추출한 후 단면의 휨강도를 계산하였다. PSC 보 유효깊이의 변동계수 0.025(Nowak et al.(2003)[8])를 고려하여 Fig. 1에 나타낸 각 단면치수에 대하여 변동계수 0.025의 정규분포를 적용하였으며, 재료특성에 대해서는 Table 1에 나타낸 통계정보를 사용하였다. 거더 단면의 휨강도는 다음 식으로 계산된다.

$$M_R = A_p f_{ps} (d_p - \frac{a}{2}) \quad (3)$$

여기서  $f_{ps}$ 는 파괴 시 텐던의 응력,  $d_p$ 는 거더 상단에서 텐던 도심까지의 거리,  $a$ 는 등가사각형 응력 블럭의 깊이이다. 콘크리트의 압축력과 텐던의 인장력이 평형이 되는 중립축을 시산법으로 결정한 후 단면의 휨강도를 결정한다.

Fig. 2는 거더 단면 1,000개에 대한 휨강도의 히스토그램 결과를 보인 것이다.

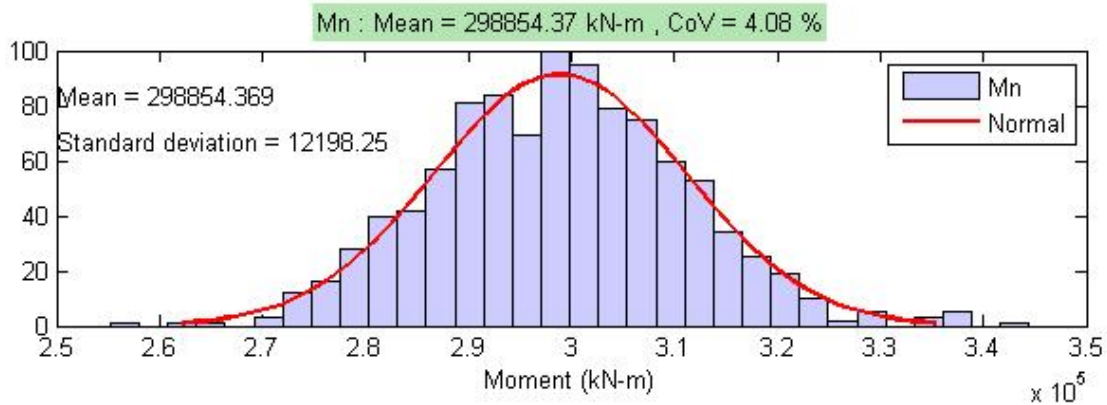


Fig. 2 Distribution of flexural strength

#### 3.2 고정하중 통계특성

고정하중에 의한 단순교 중앙점 정모멘트의 평균은 58,714.6kN-m로 계산되었다.

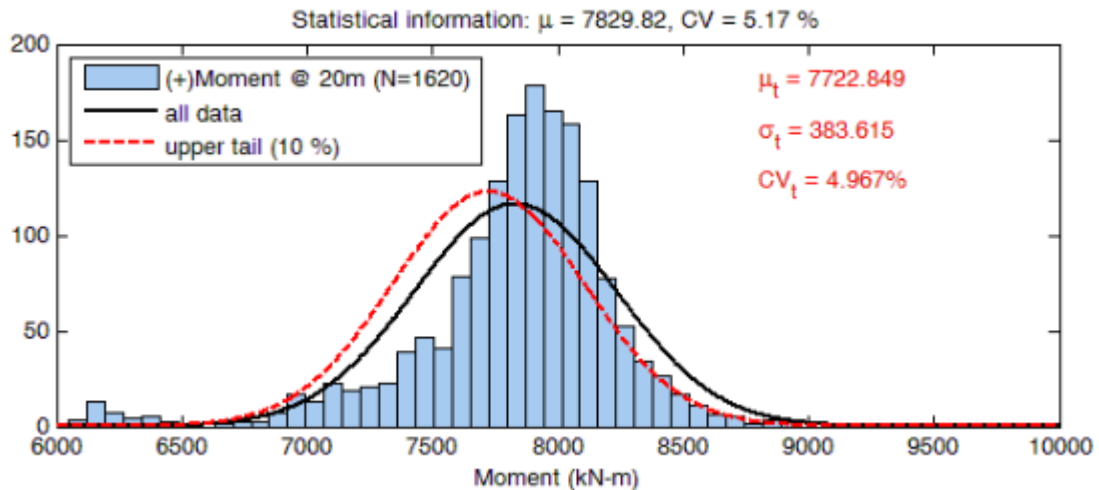
하중 종류별 변동계수는 Table 2의 자료를 활용하였는데, Table 2에서 D1은 강재나 프리스트레스트 콘크리트 같은 공장 제작 부재, D2는 현장타설 콘크리트 부재의 자중, D3는 아스팔트 같은 포장재의 자중에 대한 자료이다. 본 연구에서는 현장타설 콘크리트 부재의 자중에 대한 D2 조건의 변동계수를 적용하였으며, 이에 따라 해당 교량의 고정하중에 대한 변동계수는 25%로 계산되었다. 고정하중에 대해서는 정규분포를 가정하여 신뢰도지수를 산정하였다.

**Table 2.** Statistical data for the types of fixed load[9]

Item	Coefficient of variation	Type of distribution
Fixed load D1	0.08	Normal
Fixed load D2	0.25	Normal
Fixed load D3	0.25	Normal

### 3.3 열차하중 통계특성

본 논문에서는 경부고속선 울산~부산 구간에서 1개월 이상의 기간 동안 약 1,620 편성의 모든 통행열차의 윤중을 계측하였다. 교량의 동적 거동을 포함하는 윤중 측정값에 대하여 영향선 해석을 통해 단순보 중앙점의 휨모멘트를 계산하였다. Fig 3은 계산된 휨모멘트의 분포를 보인 것이다. 신뢰도지수에 영향을 주는 단면력은 그림의 상위부분이며, 이에 따라 본 연구에서는 히스토그램의 상위부분을 잘 표현하는 정규분포를 계산하여 신뢰도지수 계산에 이용하였다. 이를 고려하면 작용하는 열차하중의 평균과 변동계수는 각각 7722.849 kN-m 와 4.967%로 계산된다.



**Fig. 3** Distribution of moment caused by train axle load

### 3.4 신뢰도지수 산정

식(2)의 각 항목에 대하여 이전 절에서 결정된 통계특성을 정리하여 Table 3에 나타내었다.

추가적으로 4,5열에 대하여 휨강도와 열차하중의 변동성에 변화를 주어 신뢰도를 분석하였다.

**Table 3.** Statistical information used for reliability analysis and reliability index for the girder

Flexural strength	Moment from fixed load	Moment from live load	Reliability index	Failure probability
Mean = 298,854.37kN-m	Mean = 58,714.6kN-m	Mean = 7722.849kN-m		
Coefficient of variation = 4.07%	Coefficient of variation = 25%	Coefficient of variation = 4.967%	12.1893	$1.7716 \times 10^{-32}$ %
Coefficient of variation = 10%	Coefficient of variation = 25%	Coefficient of variation = 30%	6.9636	$1.6586 \times 10^{-10}$ %
Coefficient of variation = 4.07%	Coefficient of variation = 25%	Coefficient of variation = 30%	12.1028	$5.1055 \times 10^{-32}$ %

#### 4. 결 론

Table 3에 보인 바와 같이 고정하중 모멘트나 활하중 모멘트에 비하여 휨강도가 충분히 큰 것으로 해석되었으며 계산된 신뢰도 지수는 12.1893에 이르므로, 대상 교량은 강도한계에 대하여 충분히 안전한 것으로 판단된다. 신뢰도지수가 큰 경우는 그에 대응하는 파괴확률이 매우 작는데, 이런 경우 Table 3과 같이 한계상태방정식 각 인자의 평균이나 변동성의 작은 변화에도 신뢰도지수의 변화폭이 크게된다. 따라서 정확한 신뢰도지수 및 파괴확률 산정을 위해서는 신뢰성 있는 통계특성의 확보가 매우 중요하다. 향후 타 형식 교량에 대하여 신뢰도 수준을 얻고, 기존 설계기준이 제공하는 신뢰도 수준을 평가한다. 최종적으로는 신뢰도 기반 설계기준에 필요한 목표신뢰도지수를 이용하여 하중계수와 저항계수를 결정할 수 있을 것이다.

#### 후 기

본 논문은 국토교통부 철도기술연구사업(과제번호: 15RTRP-B067919-03)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] Korea Rail Network Authority (2013) *Railroad Design Standard*, KRNA, ISBN 978-89-97477-12-8 93530.
- [2] Ministry of Land, Infrastructure and Transportation (2012) *Road Bridge Design Standard (Limit State Design method)*, Korea Road & Transportation Association.
- [3] prEN 1991 (1991) *Eurocode 1: Actions on structures-Part2: Traffic loads on bridges*, European Committee for Standardization, Brussels.
- [4] A. Haldar, S. Mahadevan (2000), *Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design*, John Wiley & Sons New York/Chichester, UK, 2000.
- [5] Korea Rail Network Authority (2011) *Design Report for Joong-ang Corridor*, KRNA, Book Number 117311C01-210-041.

- [6] B. Ellingwood, T.V. Galambos, J.G. MacGregor, C.A. Cornell (1980) Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58, NBS Special Publication 577, Washington, DC: National Bureau of Standards.
- [7] S.W. Tabsh, A.S. Nowak (1991) Reliability of Highway Girder Bridges, *Journal of Structural Engineering*, 117(8), pp. 2372-2388.
- [8] A.S. Nowak, M.M. Szerszen (2003) Calibration of Design Code for Buildings (ACI 318): Part 1 & Part 2, V.100, No. 3.
- [9] E.S. Hwang, I. Paik (2007) Basic Theory of Reliability and Reliability-Based Design Code, Korea Bridge Design & Engineering Research Center, Korea, 103.
- [10] D.K. Shin, C.Y. Kim, I. Paik (2006) Reliability Analysis of Composite Girder Designed by LRFD Method for Positive Flexure, *Journal of the Korean Society of Civil engineers*, 26(3A), pp. 539-546.
- [11] I.Paik, H.J. Sang (2011) Reliability Analysis of Concrete Road Bridge Designed with Different Resistance Factor Format, *Journal of the Korean Society of Road Engineering*, 13(2), pp. 147-157.

(한국철도학회 정기학술대회 Full Paper -Template 작성일: 2015.02.17)