

하중저항계수설계법(LRFD)으로 설계된 강합성 거더의 휨에 대한 신뢰도해석

Reliability Analysis of Composite Girder Designed by LRFD Method for Positive Flexure

신동구* · 김천용** · 백인열***

Shin, Dong-Ku · Kim, Cheon-Yong · Paik, In-Yeol

Abstract

The reliability analysis of simply-supported composite plate girder and box girder bridges under positive flexure is performed. The bridges are designed based on the AASHTO-LRFD specification. A performance function for flexural failure is expressed as a function of such random variables as flexural resistance of composite section and design moments due to permanent load and live load. For the flexural resistance, the statistical parameters obtained by analyzing over 16,000 samples of domestic structural steel products are used. Several different values of statistical parameters with the bias factor in the range of 0.95-1.05 and the coefficient of variation in the range of 0.15-0.25 are used for the live-load moment. Due to the lack of available domestic measured data on the dead load moment, the same values of statistical properties used in the calibration of AASHTO-LRFD are applied. The reliability indices for the composite plate girder and box girder bridges with various span lengths are calculated by applying the Rackwitz-Fiessler technique.

Keywords : flexural resistance, composite section, reliability index, LRFD method

요 지

국내 LRFD 도로교설계규정을 정립하기 위한 기초 자료를 제공하기 위하여 단경간 플레이트 거더 및 박스 거더 합성단면을 하중저항계수설계법으로 설계하고 설계된 단면의 휨에 대한 신뢰도해석을 수행하였다. 신뢰도해석에서 휨저항강도는 최근 국내에서 생산된 16,000여 구조용 강재 표본의 항복강도 통계적 특성이 반영된 강합성단면의 휨저항강도 통계를 이용하였다. 활하중에 의한 작용모멘트 통계는 고정된 값을 사용하지 않고 편심계수 0.95-1.05를, 변동계수는 0.15-0.25로 가정하였다. 강 거더 자중, 콘크리트 바닥판 자중, 포장면 자중 등에 의한 고정하중 모멘트 통계 값은 AASHTO 보정자료를 사용하였다. Rackwitz-Fiessler 법으로 신뢰도해석을 수행하고 시간별, 강거더 형식별, 활하중 모멘트의 불확실성 정도별로 신뢰도지수 계산 결과를 제시하였다.

핵심용어 : 휨강도, 합성단면, 신뢰도지수, 하중저항계수설계법

1. 서 론

현재 우리나라 도로교설계기준(건설교통부 2005)의 강교편은 허용응력 설계법에 기초하고 있으나, 허용응력 설계법은 구조물에 작용하는 하중의 불확실성이나 또는 구조물의 설계, 재료의 강도 및 시공과정 등에서 발생하는 불확실성을 고려하지 않고 재료의 허용응력만을 고려한 설계법이다. 반면, 하중 및 재료 등의 공칭값에 대한 실제값의 변동성으로 인하여 발생하는 불확실성을 통계분석 및 신뢰도분석을 통하여 고려한 하중저항계수 설계법(LRFD)을 구조물설계에 적용시키는 경우, 균일한 안전성을 확보한 설계가 가능할 뿐만 아니라,

불합리한 요소설계기준을 합리화시킴으로써 사용재료를 줄이면서도 시공성과 유지관리에도 유리한 경제적이고 합리적인 교량설계가 가능해진다. 세계 주요 설계기준인 AASHTO-LRFD(2004), Eurocode(1991), CSA(2000), BS(1985) 등에서는 최근 기존의 허용응력법에 근거한 설계기준을 신뢰도이론에 기초한 하중저항계수 설계법으로 대체하였다. 우리나라의 경우도 설계 엔지니어링의 국내의 경쟁력 확보를 위해서는 국제 표준화된 신뢰도 기반 LRFD 설계기준에 의한 설계기술의 확보가 필수적임을 인식하고 국내 LRFD 설계규정을 정립하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

우리나라 고유의 LRFD 설계규정을 정립하기 위해서는 국

*정희원 · 명지대학교 토목환경공학과 교수(E-mail: dkshin@mju.ac.kr)

**정희원 · 명지대학교 토목공학과 석사과정(E-mail: 007sostem@hanmail.net)

***정희원 · 경원대학교 토목환경공학과 부교수(E-mail: pinyeol@kyungwon.ac.kr)

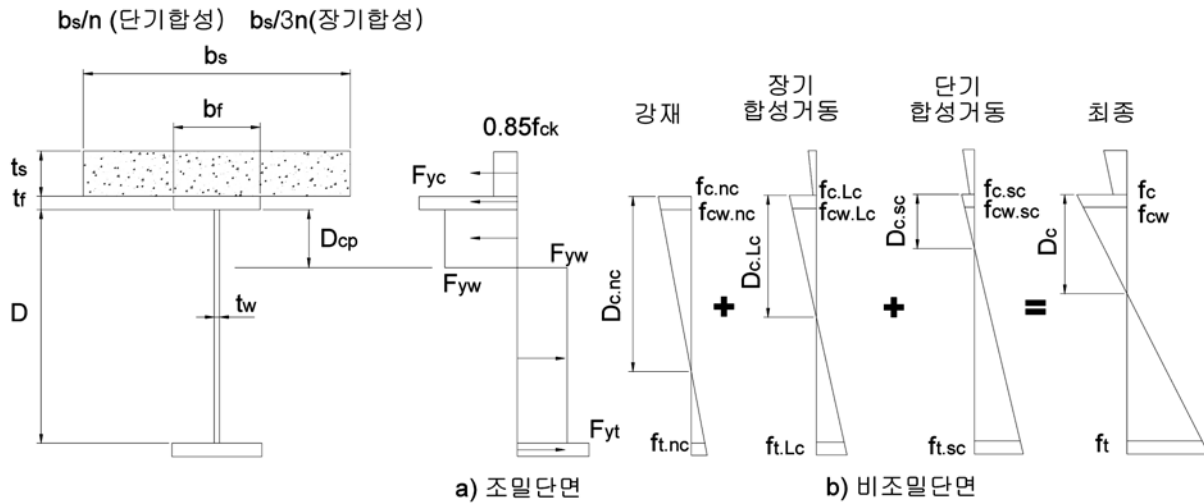


그림 1. 조밀단면과 비조밀단면의 휨강도

내 하중통계에 근거한 하중계수와 국내 강재나 콘크리트의 재료특성 및 시공성 등에 근거한 저항계수를 결정하는 것이 필수적이다. 아울러, 이들 하중계수 및 저항계수는 교량의 수명동안 교량구조물의 파괴확률을 나타내는 목표신뢰도지수(target reliability index)와 밀접한 통계적 관계를 갖고 있다. LRFD 설계기준에서 하중 및 저항에 대한 설계계수를 결정하기 전에 목표신뢰도지수를 정하고 신뢰도이론에 기초한 보정(calibration) 과정을 거쳐 이들 계수를 정하는 것이 보편적이다. 적정 수준의 목표신뢰도지수를 결정하기 위해서는 LRFD 설계기준으로 교량을 설계하고 설계된 교량에 대한 하중 및 재료의 통계적 특성을 고려한 신뢰도분석이 선행되어야 한다.

본 연구의 목적은 국내 LRFD 도로교설계규정에 필수적인 저항계수와 하중계수 및 목표신뢰도지수를 결정할 때 활용될 수 있는 강합성 거더교에 대한 신뢰도분석 기초 자료를 제공하기 위한 것이다. 본 논문에서는 LRFD 합성단면 강거더 설계의 기본 개념을 기술하고, 플레이트 거더 및 박스 거더 합성단면 설계과정과 설계결과를 제시하였다. 정모멘트를 받는 강합성 거더 단면의 신뢰도지수를 산정하기 위하여 하중저항계수설계법으로 설계된 단면에 대하여 최근 국내에서 생산된 16,000여 구조용 강재 표본의 항복강도 통계적 특성이 반영된 휨저항강도의 통계 자료를 이용하여 Rackwitz-Fiessler법으로 신뢰도해석을 수행하였다. 강합성 플레이트 거더교 및 박스 거더교 설계시 설계활하중은 현행 도로교설계기준의 DB-24 및 DL-24하중을 적용하였으며 시간 길이는 30 m, 40 m, 50 m, 60 m를 고려하였다. 신뢰도 해석 시 활하중에 대한 통계적 특성은 매개변수로 처리하였으며, 고정하중에 의한 작용모멘트는 비교적 국가간 차이가 작을 것으로 판단되어 AASHTO-LRFD 보정 시 사용한 통계치를 적용하였다.

2. LRFD 강합성 거더 설계

2.1 설계 기본 개념

강도한계상태에서 정모멘트를 받는 강합성단면 휨부재는 콘크리트 단면이 먼저 파괴되지 않고 강재 거더의 항복으로 시

작되는 연성과괴를 유도하여 충분한 여유성을 갖도록 규정하고 있다. 연성확보를 위하여 AASHTO-LRFD(2004)에서는 설계단면이 다음 연성요구조건을 만족하도록 규정하고 있다.

$$D_p/D' \leq 5 \quad (1)$$

여기서, D_p =소성모멘트 상태에서 바닥판상부에서 중립축까지 거리;

$$D' = \beta \left(\frac{d + t_s + t_h}{7.5} \right); \beta = 0.9$$

($F_y = 185 \text{ MPa}$); $\beta = 0.7 (F_y = 257 \text{ MPa 이상})$; d =복부판 높이; t_s =콘크리트 바닥판 두께; t_h =콘크리트 헌치 두께; F_y =강재 항복강도를 나타낸다. 식 (1)로 표현된 연성요구조건은 다양한 강종 및 단면형상을 갖는 합성단면에 대한 수 많은 구조 시험 및 수치 시뮬레이션 결과에 근거하여 결정된 것이다 (Ansourian 1982; Mans 등 2001; Yakei 등 2005).

LRFD 설계법에 의한 거더 설계시에는 그림 1과 같이 단면의 조밀성(compactness) 여부에 따라 다른 설계개념을 적용한다. 조밀단면의 경우에는 단면을 구성하는 모든 부재가 항복을 일으킬 때까지 강거더 요소의 좌굴이 발생되지 않아 그림 1(a)와 같은 항복상태에 대한 소성모멘트를 산정하여 설계해야 한다. 반면에, 비조밀단면의 경우에는 그림 1(b)와 같이 강거더가 탄성영역에 있을 때를 기준으로 공칭휨강도를 계산하여 설계한다. 그 이유는 모든 부재가 항복에 도달하기 전에 단면 구성요소의 세장비에 따라 플랜지의 국부좌굴(local flange buckling), 복부판의 횡-비틀좌굴(lateral torsional buckling)이나 복부판의 휨좌굴(web bend buckling)이 발생할 수 있으므로 좌굴에 의한 하중저감계수(load shedding factor)를 고려하도록 규정한 것이다(Wollmann 2004).

2.2 설계 세부규정

합성단면 강거더를 설계하기 위해서는 고정하중 및 활하중에 대한 하중해석을 통하여 하중효과를 산정하고 단면의 휨저항강도와 비교해야 한다. 휨저항강도는 단면계수, 단면 조밀성 여부를 검토하고 단면소성모멘트와 항복모멘트 등을 계산하여 산정된다. 여기에서는 정모멘트를 받는 플레이트 거더 및 박스 거더 단면 설계과정을 간략히 기술하였다. 아래

에서 길이에 대한 기본 단위는 mm, 하중은 N, 응력은 MPa이다.

2.2.1 하중해석

교량에 작용하는 고정하중으로는 바닥판 및 강재자중(DC1), 방호벽 및 중앙분리대(DC2), 포장하중(DW)을 고려하였다. 활하중(LL)으로는 현 도로교설계기준의 DB-24 트럭 하중 및 DL-24 차선하중을 적용하여 하중해석을 수행하였다. 하중해석시 사용된 설계계수로는 활하중의 교축 직각 방향 위치에 따라 거더에 분배되는 정도를 나타내는 하중분배계수(DF), 활하중 충격정도를 나타내는 동적충격계수(IM), 연성도, 여유성 및 공용중 중요도를 고려한 하중보정계수(η)가 있다.

I형 거더의 하중분배계수는 내측 및 외측 거더에 따라 다른 방법으로 산정하도록 규정하고 있다. 내측 거더에 대한 활하중 분배계수는 1차선 재하시에는 아래 식 (2a)를 이용하여 구하며, 2차선 또는 그 이상 차선 재하인 경우에는 식 (2b)를 이용하여 구하고 식 (2a)와 (2b)로 구한 것 가운데 큰 값을 적용하도록 규정하고 있다.

$$DF = 0.06 + \left(\frac{S}{4300}\right)^{0.4} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.3} \left(\frac{K_g}{L t_s^3}\right)^{0.1} \quad (2a)$$

$$DF = 0.075 + \left(\frac{S}{4300}\right)^{0.6} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.2} \left(\frac{K_g}{L t_s^3}\right)^{0.1} \quad (2b)$$

윗 식에서 S=한 차선 폭; L=지간; t_s =콘크리트 바닥판 두께; $K_g=n(1+Ae_g^2)$; n=탄성계수비; I=합성전 단면2차모멘트; e_g =중립축으로부터 바닥판 중심까지 거리를 나타낸다.

반면 I형 거더의 외측 거더 분배계수 계산에는 내측 거더와 같이 1차선, 2차선 또는 그 이상 차선에 재하된 경우를 고려되나 후술하는 특별해석으로 구하는 방법도 적용된다. 1차선 재하시는 내부지점에서 지지되는 부재가 힌지라고 가정함으로써 다른 지점의 반력을 계산하는 Lever rule을 적용하여 구한 값에 동시재하계수(m)를 곱하여 구한다. 2차선 또는 그 이상 재하인 경우는 아래 식 (3)를 이용하여 구한다.

$$DF = eDF_m \quad (3)$$

여기서, DF_m 는 내측 거더에서 결정된 분배계수; $e=0.77+d_e/2800$; d_e =외측 거더 중심과 최 외측 차량하중 작용점까지 거리이다. 특별 해석으로 구하는 방법은 아래 식 (4)로 규정하고 있다.

$$R = \frac{N_L}{N_b} + \frac{X_{ert} \sum_{i=1}^{N_b} x_i^2}{\sum_{i=1}^{N_b} x_i^2} \times m \quad (4)$$

여기서, R=외측 거더 반력; N_L =고려중인 설계차선수; N_b =거더수; X_{ert} =바닥판 중심으로부터 외측 거더 중심까지 거리; x_i =바닥판 중심으로부터 거더 중심까지 거리; e =바닥판 중심으로부터 차량 하중 중심까지 거리를 나타낸다. 외측 거더의 경우도 내측 거더와 같이 위에서 언급한 방법으로 구한 값 가운데 큰 값을 외측 거더 하중분배계수로 정해야 한다. 여러 개의 거더를 동일한 치수로 설계하는 경우에는 내측 및

외측 하중분배계수 중 큰 값을 최종적인 하중분배계수로 선택하여 거더 설계시 사용해야 한다.

박스 거더의 경우 내측이나 외측 거더에 대한 별도의 구별 없이 아래 식을 적용하여 활하중 하중분배계수를 구한다.

$$DF = 0.05 + 0.85 \frac{N_L}{N_b} + \frac{0.425}{N_L}, \quad 0.5 \leq N_L/N_b \leq 1.5 \quad (5)$$

동적 충격계수(IM)는 강도한계상태를 기준으로 33%를 사용하였으며, 하중보정계수(η)는 강도한계상태의 경우 연성도($\eta_D=0.95$), 여유성($\eta_R=0.95$), 공용중 중요도($\eta_I=1.05$)를 사용하여 $\eta = \eta_D \eta_R \eta_I < 0.95$ 가 되도록 적용한다.

앞에서 구한 여러 설계계수를 고려하여 고정하중 및 활하중에 의한 작용모멘트(M_w)를 아래의 강도한계상태-I 및 강도한계상태-IV의 하중조합에 대하여 산정한다.

$$\text{강도한계상태-I} = 1.25DC + 1.5DW + 1.75(LL+IM) \quad (6a)$$

$$\text{강도한계상태-IV} = 1.5(DC + DW) \quad (6b)$$

2.2.2 단면계수 및 소성모멘트 산정

콘크리트 바닥판 타설 직후 시공단계에서 교량의 휨저항강도를 구하기 위해 합성전 단면계수와 바닥판 콘크리트의 양생이 완료된 합성후 단기 및 장기거동에 대한 단면계수의 산정이 필요하다. 단기합성거동은 탄성계수비 n으로 장기거동은 3n으로 가정하여 콘크리트에 대한 환산단면을 구한다. 단면계수를 산정하기 위한 단면 유효폭(b_{eff})은 내측 거더와 외측 거더에 대한 유효폭으로 구분되며 내측거더 유효폭은 다음 식으로 구하고,

$$b_{eff} = \text{Min}\{L/4, 12t_s + b_{eff}/2, S\} \quad (7a)$$

외측 거더의 유효폭은 아래 식으로부터 구한다.

$$b_{eff} = \text{Min}\{L/8, 6t_s + b_{eff}/4, \text{켄틸레머부 폭}\} + \text{내측거더 유효폭}/2 \quad (7b)$$

식 (7a-b)에서 L은 고정하중에 의한 모멘트 변곡점간 거리, b_i 는 상부플랜지 폭, S는 거더 중심간 간격을 나타낸다. 플레이트 거더의 경우에는 외측거더의 유효폭을, 박스 거더의 경우 내측 및 외측거더의 유효폭을 합한 값을 유효폭으로 사용하여 단면계수를 산정하였다.

단면소성모멘트는 그림 2에서 단면을 구성하는 강거더와 바닥판 철근이 완전항복 상태에 도달했을 때 단면이 받는 모멘트이다. 합성단면의 강재가 완전 항복했을 때 하부플랜지에 작용하는 힘(P_t), 복부판에 작용하는 힘(P_w), 상부플랜지에 작용하는 힘(P_c), 바닥판에 작용하는 힘(P_s), 상부철근에 작용하는 힘(P_{rt}), 하부철근에 작용하는 힘(P_{rb})을 아래 식으로부터 구한 후 작용력에 대한 평형조건을 이용하여 정 모멘트 구간의 소성중립축(PNA) 위치와 소성모멘트(M_p)를 구한다.

$$\begin{aligned} P_t &= F_y b_t t_t; P_w = F_{yw} D t_w; P_c = F_{yc} b_c t_c \\ P_s &= 0.85 f_{ck} b_s t_s; P_{rt} = F_{yr} A_{rt}; P_{rb} = F_{yr} A_{rb} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, 작용력과 각종 치수는 그림 2에 나타낸 바와 같으며, F_{yt} , F_{yc} 및 F_{yw} 는 각각 인장플랜지, 압축플랜지 및 철근의 항복강도를, f_{ck} 은 바닥판 콘크리트의 압축강도를, A_{rt} 및 A_{rb} 는 상부 및 하부철근 단면적을 각각 나타낸다.

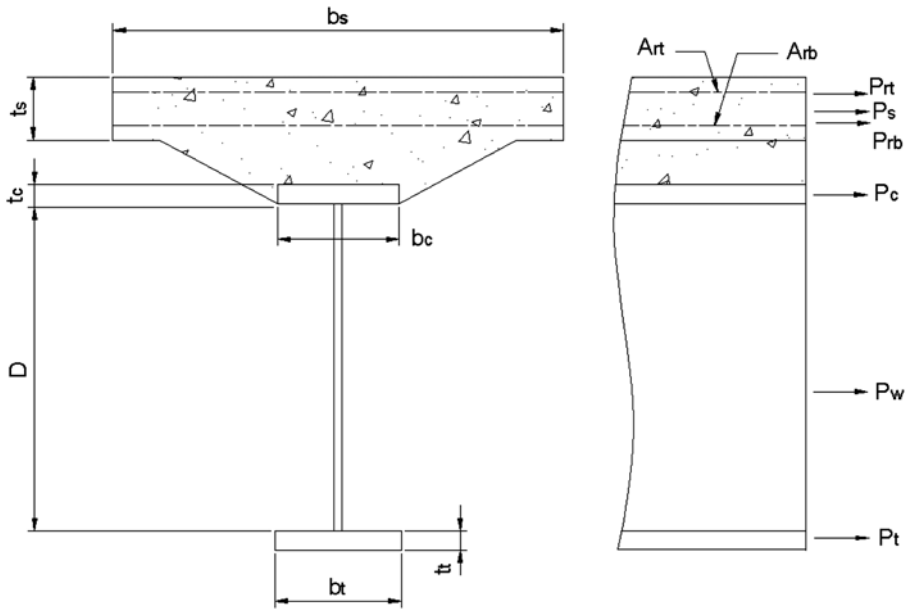


그림 2. 소성모멘트하 합성단면 및 작용력

2.2.3 강도한계상태 검토

합성단면의 휨에 대한 검토는 단면에 작용하는 설계모멘트 (M_u)와 단면의 저항모멘트(M_r)를 아래 식으로 비교하여 검토한다.

$$M_u < \phi_f M_r (= M_r) \quad (9)$$

윗 식에서 ϕ_f 는 휨에 대한 저항계수, M_r 은 공칭휨강도이다. 설계모멘트는 강도한계상태-I과 강도한계상태-IV에 대해 식 (6a-b)로 구한 값 가운데 큰 값이며 여기에 아래 식과 같이 하중보정계수(η)를 곱하여 구한다.

$$M_u = \eta \sum \gamma_i M_i \quad (10)$$

설계단면에 대해서는 우선 복부판 세장비 및 연성요구조건을 검토해야 하며 복부판 세장비는 아래 식을 만족해야 한다.

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (11)$$

여기서, D_{cp} 는 소성모멘트하 압축을 받는 복부판의 높이를

나타낸다. 한편 복부판 연성요구조건은 식 (1)의 규정을 만족해야 한다.

설계단면의 휨저항강도는 단면의 조밀성 여부에 따라 다르게 검토하도록 규정하고 있으며 조밀단면에서의 공칭휨강도는 아래 식으로 구한다.

$$D_p \leq D' \text{ 인 경우: } M_n = M_p \quad (12a)$$

$D' < D_p \leq 5D'$ 인 경우:

$$M_n = \frac{5M_p - 0.85M_y}{4} + \frac{0.85M_y - M_p}{4} + \left(\frac{D_p}{D'}\right) \quad (12b)$$

윗 식에서 $M_y = F_y S$ 이며, S 는 단기합성단면의 단면계수이다. 비조밀단면의 경우에는 압축플랜지의 국부좌굴, 복부판의 횡비틀좌굴이나 복부판의 휨좌굴에 대한 검토가 필요하며 이 때는 공칭강도를 감소시키는 하중저감계수 R_b 를 고려해야 한다.

2.2.4 단면 설계 결과

이상에서 기술한 LRFD 설계규정을 적용하여 설계된 교량의 휨저항강도에 대한 신뢰도지수 산정을 위하여 그림 3에

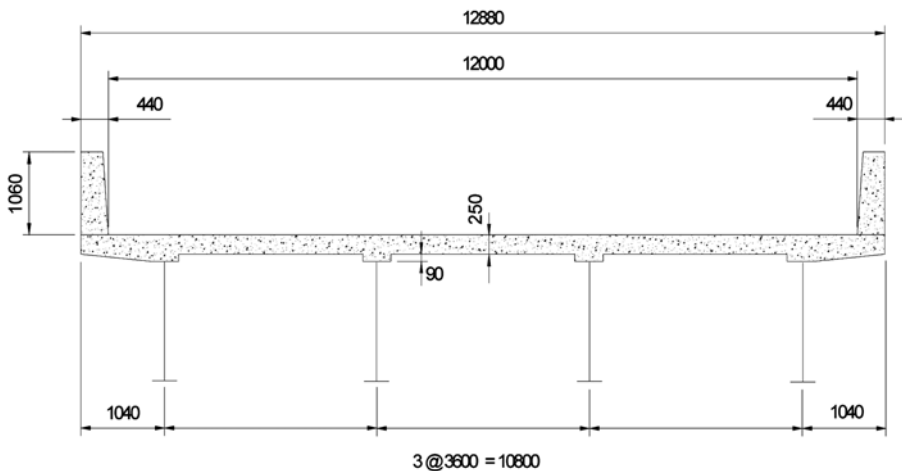


그림 3. I-형 거더교 단면 (단위: mm)

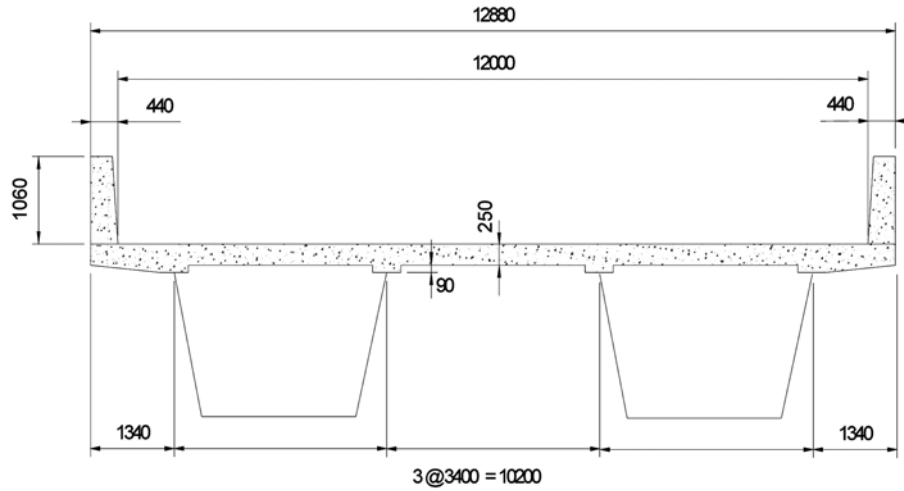


그림 4. 박스 거더교 단면 (단위: mm)

표 1. 사용재료 물리 상수

강재	강종	SM 520-TMC
	f_y	360 MPa
콘크리트	Mass density	7850 kg/mm ³
	f_{ck}	30 MPa
철근	Mass density	2400 kg/mm ³
	f_y	400 MPa
아스팔트	두께	80mm
	Mass density	2300kg/mm ³

보인 강합성 I형 거더교 단면과 그림 4와 같은 개구제형 박스 거더교 단면을 설계하였다. 설계대상 교량은 단경간교로 가정하였으며 지간 길이는 30 m, 40 m, 50 m 및 60 m를 고려하였다. 설계변수는 강거더 상부플랜지, 복부판 및 하부플랜지의 치수이다. 표 1에 요약한 바와 같이 강재는 SM520-TMC 강을 사용하였으며, 콘크리트 바닥판은 두께 250 mm이고 압축강도는 30 MPa로 가정하였다. 그림 3 및 그림 4에 나타난 바와 같이 교폭은 12,000 mm로 3차선 도로이며, 플레이트 거더교의 경우에는 4개의 I-형 거더와 박스 거더교의 경우에는 2개의 개구제형 박스로 구성된 것으로 가정하였다.

표 2에 지간별 강거더에 대한 설계결과를 요약하였다. 단

면설계 결과, 모든 단면은 조밀단면으로 설계되었으며 거더 복부판의 종방향 수평보강재를 설치할 필요가 없는 설계가 가능한 것으로 검토되었다. 설계된 단면의 휨저항강도와 함께 작용모멘트를 표 3에 요약하였으며 설계모멘트는 강도한계상태-I의 경우가 설계를 지배하는 것으로 계산되었다. 표 3에서 M_r 은 휨저항강도, M_{DG} 는 거더 자중에 의한 작용모멘트, M_{SLAB} 는 바닥판 자중에 의한 작용모멘트, M_{DW} 는 두께 80 mm의 포장에 의한 작용모멘트 및 M_{LL+IM} 은 충격을 포함한 활하중에 의한 작용모멘트를 나타낸다. 표 3에 나타난 바와 같이 설계된 단면들은 휨저항모멘트와 강도한계상태-I에서 작용모멘트비가 1.0을 약간 초과하고 있으므로 설계규정에 매우 근접한 설계이다. 이는 아래에 기술하는 신뢰도해석 시에 LRFD 설계규정대로 설계된 단면의 신뢰도지수를 산정하기 위하여 M_r/M_{iL} 를 1.0에 근접하게 설계하였기 때문이다.

3. 신뢰도해석

정모멘트를 받는 하중저항계수법으로 설계된 단경간 강합성 거더교에 대하여 강재의 휨저항강도 통계치를 이용하여 신뢰도해석을 수행하고 신뢰도지수를 산정하였다. 휨 파괴에 대한 한계상태함수(performance function)는 아래와 같이 확률변수 M_r , M_{DG} , M_{SLAB} , M_{DW} 및 M_{LL+IM} 로 표현된다.

표 2. 지간별 단면설계 결과

거더 형식	지간 (m)	바닥판 두께 (mm)	상부플랜지		복부판		하부플랜지	
			폭 (mm)	두께 (mm)	높이 (mm)	두께 (mm)	폭 (mm)	두께 (mm)
I Girder	30	250.0	295.8	15.0	1170	15.3	375.0	22.3
	40	250.0	295.8	25.2	1593	15.0	350.0	29.0
	50	250.0	300.0	48.0	1800	22.4	375.0	36.5
	60	250.0	350.0	45.0	2162	29.0	375.0	42.5
Box Girder	30	250.0	100.0	16.0	1040	10.0	2895.5	9.8
	40	250.0	100.0	16.0	1140	15.4	2847.0	14.6
	50	250.0	120.0	17.0	1540	17.0	2653.0	15.9
	60	250.0	120.0	18.0	1840	20.0	2507.5	18.8

표 3. 휨저항강도 및 작용 모멘트 ($\times 10^9$ N-mm)

거더 형식	지간 (m)	M_r	작용 모멘트						M_r/M_u
			M_{DG}	M_{SLAB}	M_{DW}	M_{LL+IM}	강도한계 상태-I	강도한계 상태-IV	
I Girder	30	10.17	0.27	2.71	0.61	3.46	10.16	5.12	1.001
	40	15.91	0.64	4.65	1.08	4.83	15.85	9.08	1.004
	50	24.69	1.60	7.61	1.69	6.72	24.51	15.53	1.007
	60	35.75	3.43	10.73	2.43	9.28	35.69	23.65	1.002
Box Girder	30	18.94	0.45	6.59	1.17	5.35	18.91	11.69	1.002
	40	30.22	1.23	11.28	2.08	7.46	30.21	20.79	1.000
	50	45.09	2.38	17.18	3.24	10.40	45.01	32.48	1.002
	60	63.92	4.33	24.83	4.67	14.35	63.88	46.78	1.001

$$g = M_r - (M_{DG} + M_{SLAB} + M_{DW} + M_{LL+IM}) \quad (13)$$

상태함수 g 가 음의 값을 갖는 경우는 휨저항강도가 작용 모멘트보다 작으므로 단면의 휨파괴를 의미한다.

표 4에는 상태함수에 사용된 5개의 확률변수에 대한 편심 계수(λ)와 변동계수(δ) 통계 자료를 요약하였다. 휨저항강도 (M_r)의 경우 신동구 등(2005)이 국내 생산된 강재의 항복강도 통계를 이용하여 강합성단면을 비선형소성해석으로 편심 계수 1.16과 변동계수 0.05로 계산한 바 있다. 이 통계치는 재료(material) 자체의 항복강도에 대한 통계만을 고려하여 구한 값(λ_M 과 δ_M)이다. 표 4에 나타난 휨저항강도의 편심계수 및 변동계수는 여기에 AASHTO-LRFD(Nowak 1999)에서 적용한 제작(fabrication) 오차에 기인한 통계적 불확실성 $\lambda_F=1.0$ 과 $\delta_F=0.05$ 및 계산(profession) 오차에 의한 불확실성 $\lambda_P=1.02$ 와 $\delta_P=0.06$ 을 추가로 반영하여 구한 값이다. AASHTO-LRFD 보정 시 합성단면의 휨저항강도 편심계수는 1.12로 변동계수는 0.10을 적용하였다. 국내 강재에 근거하여 계산된 편심계수가 1.18로 AASHTO-LRFD 보정값 보다 큰 이유는 국산 강재의 항복강도 편심계수 평균이 1.20으로 상당히 크기 때문이다. 표 4에서 영구 고정하중(M_{DG}

표 4. 확률변수의 통계 특성

확률변수	λ	δ	분포함수
M_r	1.18	0.093	Lognormal
M_{DG}	1.03	0.08	Normal
M_{SLAB}	1.05	0.10	Normal
M_{DW}	1.00	0.25	Normal
M_{LL+IM}	0.95~1.05	0.15~0.25	Normal

M_{SLAB} , M_{DW})에 대한 통계 값은 국내 자료가 부족하고 국가 간 차이가 상대적으로 작을 것으로 판단되어 AASHTO-LRFD 보정자료를 사용하였으며, 활하중(M_{LL+IM})에 대해서는 편심계수 0.95-1.05를, 변동계수는 0.15-0.25를 고려하였다. AASHTO-LRFD에서는 활하중에 대해 편심계수 1.0과 변동계수 0.18을 적용하여 신뢰도해석을 수행한 바 있다.

위의 통계자료와 표 3에서 구한 각각의 모멘트를 휨파괴 한계상태식 (13)에 적용하여 Rackwitz-Fissler 법으로 신뢰도 지수 β 를 구하였다. 이때 휨저항강도(M_r)는 대수정규분포를 나타내고 있기 때문에 등가 정규분포(equivalent normals) 표준편차(σ_R^e)와 평균(μ_R^e)을 다음 식으로부터 구해야 한다.

표 5. 정모멘트부 휨파괴에 대한 신뢰도지수

지간 (m)	형식	I-Girder			Box-Girder		
	$\lambda_{M_{LL+IM}}$ $\delta_{M_{LL+IM}}$	0.95	1.00	1.05	0.95	1.00	1.05
30	0.15	4.45	4.22	4.00	4.18	4.00	3.82
	0.20	4.08	3.86	3.64	3.93	3.75	3.57
	0.25	3.74	3.52	3.31	3.68	3.49	3.32
40	0.15	4.33	4.13	3.93	4.02	3.87	3.72
	0.20	4.03	3.83	3.63	3.84	3.68	3.52
	0.25	3.74	3.54	3.35	3.64	3.48	3.32
50	0.15	4.22	4.05	3.87	3.95	3.81	3.67
	0.20	3.98	3.80	3.62	3.79	3.65	3.50
	0.25	3.73	3.54	3.37	3.62	3.47	3.32
60	0.15	4.18	4.01	3.85	3.96	3.82	3.68
	0.20	3.96	3.79	3.62	3.80	3.66	3.52
	0.25	3.73	3.55	3.38	3.63	3.48	3.34

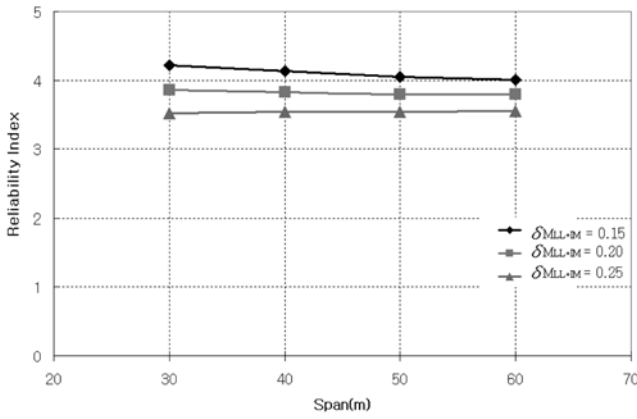


그림 5. 강합성 플레이트 거더교의 휨에 대한 신뢰도지수($\lambda_{MLL+IM} = 1.0$)

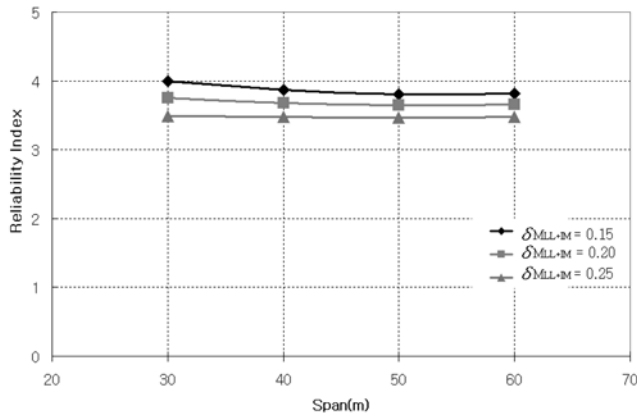


그림 6. 강합성 박스 거더교의 휨에 대한 신뢰도지수($\lambda_{MLL+IM} = 1.0$)

$$\sigma_R^e = R^* \zeta_R \quad (14a)$$

$$\mu_R^e = R^* (1 - \ln R^* + \lambda_R) \quad (14b)$$

여기서 $R^* = \mu_R$ 로 가정하였으며 $\zeta_R^2 = \ln \left(1 + \frac{\sigma_R^2}{\mu_R^2} \right)$, $\lambda_R = \ln \mu_R - \zeta_R^2 / 2$ 이다.

표 2와 같이 설계된 플레이트 거더 및 박스 거더 합성단면의 휨에 대한 신뢰도해석을 수행하고 지간별 및 활하중 통계특성치에 따라 산정된 신뢰도지수를 표 5에 요약하였다. 표 5에서 플레이트 거더의 경우에는 신뢰도지수가 3.31-4.45, 박스 거더의 경우에는 3.32-4.18 범위의 값으로 산정되었으며 계산된 신뢰도지수는 단면형식에 따라 차이가 작은 것으로 분석할 수 있다. AASHTO-LRFD의 경우에는 신뢰도지수가 3.5 내외로 계산된 바 있다. 그림 5와 그림 6에는 $\lambda_{MLL+IM}=1$ 인 경우에 대한 강합성 플레이트 거더교 및 박스 거더교의 경간별 신뢰도지수를 각각 나타내었다. 이들 그림으로부터 활하중에 대한 불확실성의 정도를 나타내는 λ_{MLL+IM} 와 δ_{MLL+IM} 가 동일할 경우, 교량 경간별로 거의 일정한 수준의 신뢰도지수가 계산되었음을 관찰할 수 있다. 아울러, 활하중으로 인한 작용모멘트의 불확실성 정도가 클수록 신뢰도지수는 감소하는 것으로 분석되었다.

4. 결 론

국내 LRFD 도로교설계규정을 정립하기 위한 기초 자료를 제공하기 위하여 단경간 플레이트 거더 및 박스 거더 합성

단면을 하중저항계수설계법으로 설계하고 설계된 단면의 휨에 대한 신뢰도해석을 Rackwitz-Fiessler 법으로 수행하였다. 신뢰도지수 계산시 휨저항강도는 국내 생산된 강재의 항복강도 통계적 특성이 반영된 강합성단면의 휨저항강도 통계를 이용하였다. 활하중에 의한 작용모멘트는 편심계수 0.95-1.05를, 변동계수는 0.15-0.25를 고려하였으며, 강거더, 콘크리트 바닥판, 포장 등에 의한 영구고정하중 모멘트 통계 값은 국내 자료가 부족한 현실을 감안하고 국가간 차이가 상대적으로 작을 것이라고 판단되어 AASHTO-LRFD 보정자료를 사용하였다.

강합성 플레이트 거더 및 박스거더의 신뢰도지수는 각각 3.31-4.45 및 3.32-4.18 범위의 값으로 산정되었으며, 신뢰도지수는 단면형식에 따라 차이가 작은 것으로 분석되었다. 활하중 모멘트에 대한 불확실성의 정도를 나타내는 λ_{MLL+IM} 와 δ_{MLL+IM} 가 동일할 경우, 교량 경간별로 거의 일정한 수준의 신뢰도지수가 계산되었다. 아울러, 활하중으로 인한 작용모멘트의 불확실성 정도가 클수록 신뢰도지수는 감소하는 것으로 분석되었다. 추후 활하중 및 고정하중에 대한 국내 통계 자료가 보완되면 국내 하중 특성이 충분히 반영된 이들 측정 통계자료를 적용한 신뢰도해석을 수행해야 될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다. 아울러, 강재자료에 적극 협조해주신 POSCO 토목 수요개발팀과 INI Steel 수요개발팀 관계자 여러분께도 깊이 감사드립니다.

참고문헌

신동구, 권태형, 김천용, 이창렬(2005) 정모멘트를 받는 강합성단면 휨저항의 통계적 특성 분석, **대한토목학회 2005년 학술발표회**.

건설교통부(2005) **도로교설계기준**, 한국도로교통협회.

AASHTO (2004) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.

Ansourian, P. (1982) Plastic rotation of composite beams, *Journal of Structures Div., ASCE*, Vol. 108, No. 3, pp. 643-659.

BS5400 (1985) Steel, concrete and composite bridges, Part 2 Specification for Loads, British Standards Institution, London, United Kingdom.

CAN/CAS-S6-00 (2000) Canadian highway bridge design code, CSA International, Toronto, Ontario, Canada.

Mans, P, Yakel, A. J., and Azizinamini, A. (2001) Full scale testing of composite plate girders constructed using 485 MPa high performance steel, *Journal of Bridge Engineering, ASCE*, Vol. 6, No. 6, pp. 598-604.

Nowak, A.S. (1999) Calibration of LRFD bridge design code, Report 368, Transportation Research Board, National Academy Press, Washington, D.C.

prEN 1994-2 (1994) Eurocode 4: design of composite steel and concrete structures-part2: rules for bridges, European Committee for Standardization, Brussels.

Wollmann, G. P. (2004) Steel girder design per AASHTO LRFD Specifications(Part2), *Journal of Bridge Engineering, ASCE*, Vol. 9, No. 4, pp. 375-381.

Wollmann, G.P. (2004) Steel girder design per AASHTO LRFD Specifications(Part1), *Journal of Bridge Engineering, ASCE*, Vol. 9, No. 4, pp. 364-374.

Yakel, A.J. and Azizinamini, A. (2005) Improved moment strength prediction of composite steel plate girders in positive bending,

Journal of Bridge Engineering, ASCE, Vol. 10, No. 1, pp. 28-38.

(접수일:2006.2.23/심사일:2006.4.3/심사완료일:2006.4.3)