

폐단면 강박스거더교의 LRFD 설계와 신뢰성수준 평가

LRFD Design and Reliability Level Estimation of a Steel Closed-Box Girder Bridge

허 정 원* 윤 동 건*
Huh, Jungwon Yun, Dong-Geon

요 지

현재 국내에서 이루어지는 대부분의 강교량 설계는 종전의 결정론적인 안전율을 사용하는 허용응력설계법에 기초하고 있다. 그러나 국제적인 경향은 확률, 통계 및 신뢰성공학의 개념에 기반을 둔 합리적이고 경제적인 설계가 가능한 한계상태설계법이 설계법의 표준으로서 보편화되고 있는 실정이다. 이 논문에서는 강교량 설계기술의 국제적 경쟁력 확보를 위해 국내 환경여건과 지역적 특성이 고려된 강교량의 하중저항계수설계법 제정을 위한 기초연구의 일환으로, 특히 사용빈도가 상대적으로 높은 폐단면 강박스거더교에 대하여 AASHTO-LRFD 규정을 적용한 시험설계를 수행하였다. 다양한 단면변화에 따른 시험설계로부터 폐단면 강박스거더교의 LRFD 설계시 고려해야 하는 제반문제에 대하여 고찰하였으며, 계산의 효율성 확보와 오류방지를 위하여 Excel-기반 설계검토 프로그램을 개발하여 시험설계에 적용하였다. 또한 LRFD 설계 단면의 신뢰성해석을 통하여 대상교량의 정량적인 안전도수준을 평가하고 실제 적용된 목표 신뢰도지수가 만족되는지를 확인함으로써 이 연구에서 적용된 절차와 방법의 타당성을 검증하였다.

핵심용어 : 한계상태설계법, 하중저항계수설계법, 폐단면 강박스거더교, 신뢰성해석

Abstract

Most of the steel bridges in Korea are being currently designed by the allowable stress design method that uses the conventional deterministic factors of safety. However the limit state design based on the concept of probability, statistics and reliability engineering is becoming very popular as a global standard design method, leading the rational and economic bridge design. As part of the fundamental research to establish the load and resistance factor design(LRFD) of steel bridges considering domestic environmental conditions and regional characteristics, an experimental design is conducted by applying AASHTO-LRFD specification especially to a steel closed-box girder, which occupies relatively a large portion of steel bridges in Korea. Throughout the experimental design according to various sectional changes, some of the issues to be considered in the LRFD design of a composite steel closed-box girder bridge are examined. In this process, an Excel-based design verification program is developed for easy computation and prevention of errors. Quantitative reliability levels of the bridge sections designed by LRFD are also estimated using a reliability analysis method, and compared with the target reliability indexes applied in the LRFD design to verify the validity of the procedure and methodology used in this study.

Keywords : limit state design, LRFD, steel closed-box girder bridge, reliability estimation

1. 서 론

근래 교량·고층빌딩 등의 사회기반시설물은 설계·시공 기술의 발전과 건설 신소재의 개발에 따라 대형화와 복합화가 진행되고 있다. 이러한 시대의 흐름에 부응하여 교량의 설계법 또한 확률, 통계 및 신뢰성공학의 개념에 기초하여 경제적이고

합리적인 설계가 가능한 한계상태설계법(LSD: Limit State Design)이 국제표준으로 자리 잡고 있다. 특히 유럽연합(Eurocode), 미국(AASHTO), 캐나다(OHBDC) 등의 기술 선진국에서는 종전의 결정론적인 안전율을 사용하는 허용응력설계법(ASD: Allowable Stress Design)에서 하중 및 저항의 공칭 값에 대한 실제 값의 변동성으로 인한 불확실성을 정

† 책임저자, 중신회원·전남대학교 건설·환경공학부 부교수
Tel: 061-659-3247 ; Fax: 061-659-3329
E-mail: jwonhuh@chonnam.ac.kr

* 평산에스아이(주) 설계팀

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

량적으로 고려할 수 있는 대표적 한계상태설계법인 하중저항 계수설계법(LRFD: Load and Resistance Factor Design)으로의 전환이 이루어졌다. 국제표준화기구(ISO)와 건설관련 설계기준(ISO 2394) 역시 신뢰성기반 설계법을 채택하였다. 특히 미국은 2007년 이후 교량설계 시 하중저항계수설계법의 사용이 의무화되었다. 이에 반해 현재까지 우리나라 도로교설계기준(건설교통부, 2005)의 강교편은 여전히 허용응력설계법을 사용하고 있는 실정이다. 교량설계기술의 국제적인 경쟁력 확보를 위해서는 국내 환경여건과 지역적 특성을 고려한 교량의 하중저항계수설계법 제정이 시급하고 절대적이며, 이에 대한 사회적 합의가 이루어져 교량설계핵심연구단과 기초구조물 LRFD설계 연구팀 등에 의해 관련분야의 연구가 최근 활발히 진행되고 있다(이성철, 2002; 신동구 등, 2007; 2008; 한국건설기술연구원, 2008; 박재현 등, 2008). 그러나 강교량 LRFD 설계 및 신뢰성분석과 관련된 거의 모든 선행연구(이성철, 2002; 신동구 등, 2007; 2008)는 플레이트 거더 및 개구체형 박스거더 교량에 대한 것으로, 저자들이 인지하는 바로는 폐단면 강박스거더교에 대한 연구사례는 전무한 실정이다.

이에 본 논문은 국내 강교량 형식 중 상대적으로 높은 비중을 차지하고 있는 폐단면 강박스거더교의 허용응력설계법의 실제 설계사례에 대하여 미국 AASHTO(2004)의 하중저항계수설계법을 적용한 시험설계를 통하여 그 적용성을 평가하고 발생 가능한 실무적 문제점을 파악하여 국내 하중저항 계수설계법 기준개발을 위한 기초자료를 제공하고자 하였다. 또한 허용응력설계법에 비해 경제적이고 효율적인 단면도출 가능여부를 판단하기 위해 강박스거더의 형고와 폭을 변화시킨 9가지 Case에 대하여 LRFD 규정을 적용한 단면검토를 수행하였다. 그리고 교량의 주요단면에 대한 하중 및 저항과 관련된 설계변수들의 불확실성과 변동성을 고려한 신뢰성해석을 수행하여, 대상교량의 정량적인 안전도 수준이 설계단계에서 목표한 신뢰도 수준과 부합하는지를 확인함으로써 이 논문에서 적용한 하중저항계수설계법과 신뢰성분석의 절차와 방법을 검증하였다.

2. 하중저항계수설계법(LRFD)

2.1 하중저항계수설계법의 기본 개념

하중저항계수설계법의 기본개념은 한계상태설계법(LSD)에 근거한다. 한계상태설계란 구조신뢰성 이론을 이용한 정량적인 분석을 통하여 한계상태를 벗어날 가능성이 적정한 수준 이내가 되도록 설계식을 결정하여 설계하는 방법이다.

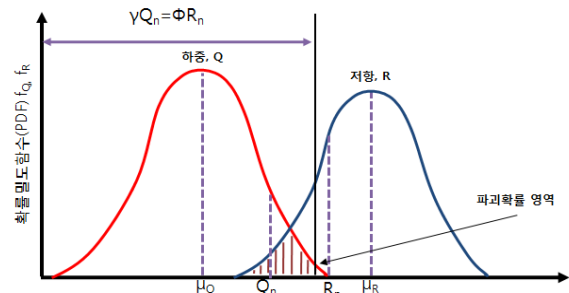


그림 1 하중과 저항의 확률밀도함수와 파괴확률

한계상태는 구조부재가 파괴 또는 파괴에 가까운 상태로 되어 내하력(성능)을 완전히 상실한 상태인 강도한계상태(strength limit state)와 처짐·균열·진동 등이 과도하게 발생하여 정상적인 사용상태의 필요조건을 만족하지 못하게 된 상태인 사용한계상태(service limit state)로 크게 분류한다. 하중저항계수설계법은 그림 1에 개념적으로 도시된바와 같이 각종 한계상태에 대한 안전수준이 구조형식, 부재종류 및 하중조건에 대해 일관성을 유지하기 위하여 다양한 하중조합에서 고려되는 설계하중별로 적절한 하중계수와 또한 부재의 공칭저항성능에 대한 적절한 저항계수를 적용하는 식 (1)의 다중 하중조합 설계식을 사용한다.

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i Q_{ni} \quad (1)$$

여기서, ϕ 는 저항계수, R_n 은 공칭저항, γ_i 는 고려하는 하중조합에서 i 번째 하중성분에 대한 하중계수, Q_{ni} 는 고려하는 하중조합에서 i 번째 하중성분에 대한 공칭하중이다.

저항계수 ϕ 는 부재의 공칭저항성능 R_n 보다 실제 저항성능이 낮을 가능성을 반영한 1 이하의 값을 가지며, 저항성능의 불확실성 및 변동성이 커질수록 작은 값을 갖는다. 하중계수 γ_i 는 공칭하중효과 Q_{ni} 의 변동성을 반영하여 결정되며 조합되는 하중들 중에서 주요하중에 대한 하중계수는 1 이상이 되며, 하중의 변동성이 커질수록 구조물의 공용 중에 발생할 최대하중이 설계하중을 초과할 가능성이 커지게 되므로 큰 하중계수가 사용된다. 저항계수 ϕ 는 독립적으로 결정되는 것이 아니라, 구조신뢰성 방법에 의해 요구되는 목표신뢰도/안전수준을 갖도록 보정(calibration)을 통하여 하중계수 γ_i 와 상호보완적으로 결정된다.

2.2 강박스거더교의 LRFD 설계 규정

하중저항계수설계법에 의한 강교량의 설계는 주요 점검사항과 경제성 및 미관을 적절히 고려하면서 시공성, 안전성

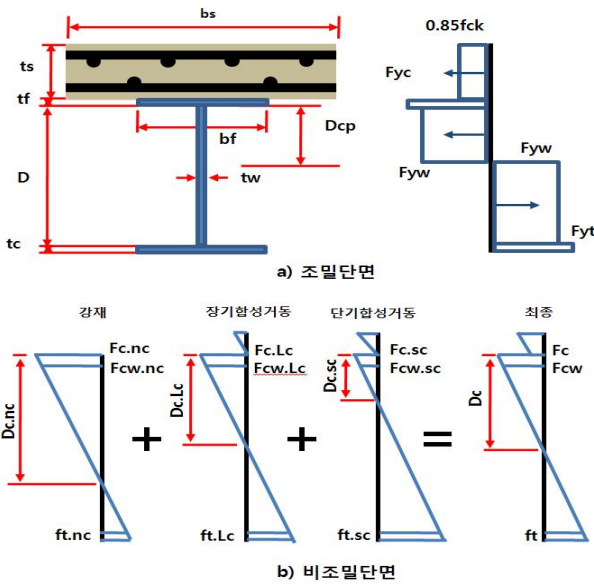


그림 2 조밀단면과 비조밀단면의 휨강도

및 사용성의 목표를 달성할 수 있도록 규정된 한계상태에 대하여 면밀히 검토하여야 한다. 강박스거더교는 한국과 일본에서 많이 사용되고 있는 폐단면 강박스거더교와 미국과 유럽에서 많이 사용하는 개구제형 강박스거더교의 두 가지 형식으로 크게 분류할 수 있다. 이 논문에서는 국내에서 큰 비중을 차지하고 있는 폐단면 강박스거더교 형식을 대상으로 하였으며, 2004년 발간된 AASHTO-LRFD 규정을 적용하였다.

폐단면 강박스거더교 단면의 휨 설계는 근본적으로 플레이트 거더교의 경우와 같이 그림 2에 도시된 단면의 조밀성(compactness) 여부에 따라 조밀단면과 비조밀단면으로 구분하여 각기 다른 검토절차를 따른다. 즉, 조밀단면의 경우 단면을 구성하는 모든 부재가 항복을 일으킬 때까지 강거더 요소의 좌굴이 발생하지 않으므로 항복상태에 대한 소성모멘트를 산정하여 설계하지만, 비조밀단면의 경우는 강거더가 탄성영역에 있을 때를 기준으로 공칭휨강도를 계산하여 설계한다. AASHTO-LRFD에서는 강도한계상태, 사용한계상태 및 피로한계상태에 대한 규정을 만족하도록 요구하고 있으며, 보다 상세한 내용을 아래에 기술하였다.

2.2.1 강도한계상태(strength limit state)

강도한계상태는 교량이 내구연한 동안 경험할 것으로 예상되는 통계적으로 규정된 중요한 하중조합에 대하여 충분한 강도와 안전성을 확보하기 위한 기준이다. 전술한바와 같이 AASHTO-LRFD규정에서는 단면의 조밀성 여부에 따라 다른 설계개념을 적용한다. 조밀단면에 대한 규정과 적용방법은 기존 문헌(신동구 등, 2006; AASHTO-LRFD, 2004)

에 상세히 기술되어 있으며, 이 논문에서 고려한 폐단면 강박스거더교의 휨 설계사례에서는 복부단면의 세장비가 아래 식 (2)를 만족하지 못하는 비조밀단면이므로 여기서는 이에 대한 규정과 적용방법 위주로 기술하였다.

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

여기서, D_{cp} 는 소성모멘트하 압축을 받는 복부판의 높이, t_w 는 복부판의 두께, E 는 강재의 탄성계수, F_{yc} 는 압축플랜지의 최소항복강도를 나타낸다.

비조밀단면의 경우 단면 구성요소의 세장비에 따라 플랜지의 국부좌굴(local flange buckling), 복부판의 횡-비틀좌굴(lateral torsional buckling) 또는 복부판의 휨좌굴(web bend buckling)이 발생할 수 있으므로 좌굴에 의한 플랜지 응력의 감소효과를 고려하여 검토하여야 한다. 상자형 단면의 압축 공칭휨강도는 플랜지의 세장비계수 λ_f 의 값에 따라 아래 식 (3)~(5) 중 하나로부터 공칭휨강도를 산정한다. 폐단면 강박스거더의 압축플랜지 공칭휨강도 검토규정에서 비보강상태와 보강상태에 따른 특별한 구분은 없으나 보강상태에서는 보강재 개수 n 에 따라 판좌굴계수 k 를 식 (6) 또는 (7)에 의해 구한 값으로 사용하여야 하며, 인장플랜지 공칭휨강도는 식 (8)로부터 구한다.

$$\lambda_f \leq R_1 \sqrt{\frac{kE}{F_{yc}}} \text{ 일 때, } F_{nc} = R_b R_h F_{yc} \Delta \quad (3)$$

$$R_1 \sqrt{\frac{kE}{F_{yc}}} \leq \lambda_f \leq R_2 \sqrt{\frac{kE}{F_{yc}}} \text{ 일 때,}$$

$$F_{nc} = R_b R_h F_{yc} \left[\Delta - \left(\Delta - \frac{F_{yr}}{R_h F_{yc}} \right) \left\{ 1 - \sin \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{R_2 - (b_{fc}/t_{fc}) \sqrt{F_{yc}/kE}}{R_2 - R_1} \right) \right] \right\} \right] \quad (4)$$

$$\lambda_f \geq R_2 \sqrt{\frac{kE}{F_{yc}}} \text{ 일 때, } F_{nc} = \frac{0.9ER_b k}{(b_{fc}/t_{fc})} - \frac{R_b f_v^2 k}{0.9Ek_s^2} \left(\frac{b_{fc}}{t_{fc}} \right)^2 \quad (5)$$

$$n = 1 \text{ 일 때 } k = (8I_s/wt_{fc}^3)^{1/3} \quad (6)$$

$$n = 2 \text{ 일 때 } k = (0.894I_s/wt_{fc}^3)^{1/3} \quad (7)$$

여기서, $2 \leq k \leq 4$ 를 만족하여야 한다.

$$F_{nt} = R_h F_{yt} \Delta \quad (8)$$

여기서, R_b 는 하중분담계수(load shedding factor), R_h 는 복합계수(hybrid factor), Δ 는 플랜지에서 최대 응력을 위

한 감소계수, I_s 는 보강재의 단면 2차모멘트, $R_1\sqrt{kE/F_{yc}}$ 는 조밀단면한계, $R_2\sqrt{kE/F_{yc}}$ 는 비조밀단면한계, t 는 보강재의 두께, w 는 수평 보강재간의 압축플랜지 폭과 복부로부터 가장 가까운 수평보강재의 거리 중 큰 값의 폭, b_{ft} 와 b_{fc} 는 각각 인장 및 압축 플랜지의 전체 폭, t_{ft} 와 t_{fc} 는 인장 및 압축 플랜지의 두께, 그리고 f_v 는 박스형 주형에서 플랜지의 최대 비틀 전단응력이다.

박스형 단면의 복부판 공칭전단강도는 복부판의 보강 및 비보강에 따라 각각 계산하여야 한다. 식 (9)는 비보강된 복부판의 공칭전단강도를 산정하는 공식이다.

$$V_n = V_{cr} = CV_p \tag{9}$$

여기서, V_n 은 공칭전단강도, V_{cr} 은 전단좌굴강도, V_p 는 소성전단강도, C 는 전단좌굴응력 대 전단항복강도의 비이다.

보강된 복부판의 공칭전단강도는 $2dt_w/(b_{ft}t_{fc} + b_{ft}t_{ft}) \leq 2.5$ 일 때 식 (10)을 사용하며, 그 외에는 식 (11)을 사용하여 상자형 단면의 복부판 공칭전단강도를 계산한다.

$$V_n = V_p \left[C + \frac{0.87(1-C)}{\sqrt{1+(d_0/D)^2}} \right] \tag{10}$$

$$V_n = V_p \left[C + \frac{0.87(1-C)}{(\sqrt{1+(d_0/D)^2} + (d_0/D))} \right] \tag{11}$$

여기서, D 와 d_0 는 복부판 깊이와 수직보강재 간격이다.

2.2.2 사용한계상태(service limit state)

사용한계상태는 일상적인 사용조건에서 처짐, 균열, 진동, 영구변형 등이 과도하여 사용성에 문제가 발생하지 않도록 하기위한 한계상태로서 AASHTO-LRFD(2004)에서는 아래와 같이 복부판과 상부 및 하부 플랜지의 휨강도 검토기준을 규정하고 있다. 식 (12)는 복부판의 휨강도 검토기준으로 영구처짐에 대한 요구조건이다.

$$f_c \leq 0.9Ek / (D/t_w)^2 \tag{12}$$

여기서, f_c 는 설계하중에 의한 압축플랜지의 응력, k 는 $9 / (D_c/D)^2$, D 는 복부판의 깊이, D_c 는 압축을 받는 복부판의 깊이, t_w 는 복부판의 두께이다.

합성단면의 상부와 하부플랜지에 대한 휨강도 검토 기준은 아래의 식 (13)에 따른다.

$$f_f \leq 0.95R_n F_{yf} \tag{13}$$

2.2.3 피로한계상태 (fatigue limit state)

피로한계상태는 설계수명동안 반복하중 하에서 교량부재의 파단을 유발하는 균열의 성장을 제한하는 한계상태로서 AASHTO-LRFD에서는 식 (14)와 같이 구조상세 범주와 반복회수에 따른 허용피로응력범위를 규정하고 있다.

$$(\Delta F)_n = \left(\frac{A}{N} \right)^{1/3} \geq \frac{1}{2} (\Delta F)_{TH} \tag{14}$$

여기서, $(\Delta F)_n$ 은 공칭피로강도, A 는 구조상세 범주 상수, N 은 $365(75)n(ADTT)_{SL}$, $(ADTT)_{SL}$ 은 한 차선 당 $ADTT$ (일평균트럭교통량), n 은 트럭 한대 통과시 발생하는 응력범위의 반복회수, $(\Delta F)_{TH}$ 는 일정진폭피로한계 값이다.

3. 하중저항설계법에 의한 시험설계 및 적용 결과

3.1 시험설계 대상교량의 일반사항

강합성 상자형 거더 교량은 단면의 형상에 따라 크게 개구체형과 폐단면형으로 구분할 수 있다. 이 논문에서 고려하는 교량은 그림 3과 같이 상부와 하부 플랜지가 폐합되어 있는 형식으로, 각각의 플랜지에는 좌굴에 의한 영향을 고려하기 위해 종방향 수평보강재를 적용하였으므로 설계 시 상부와 하부 플랜지의 종방향 수평보강재에 대한 규정을 만족하여야 한다. 폐단면 강박스거더교를 설계하기 위해서는 고정하중 및 활하중에 대한 하중해석을 통하여 하중효과를 각각의 한계상태별로 산정하여 검토하여야 한다. 시험설계 대상교량은 허용응력설계법으로 설계되어 양 측경간이 각 40.1m, 중앙경간이 50m인 3경간 연속 강합성 상자형 거더교로서 그림 3과 같이 주형은 폭(B) 2.5m, 높이(H) 2.5m의 2주형 폐단면 강합성박스거더 형식을 가진다.

기준단면의 설계조건으로 복부판 두께가 12mm, 정모멘트 구간에서 상·하부 플랜지 두께가 모두 12mm 그리고 부모멘

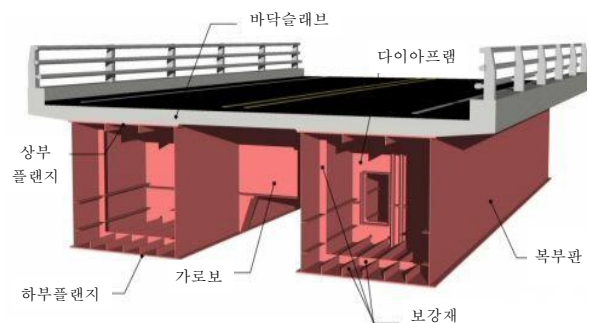


그림 3 폐단면 강박스거더교

트 구간에서는 각기 16mm와 18mm이다. 압축 및 인장 플랜지의 종방향 수평보강재는 각각 5개와 2개를 플랜지에 배치하며, 강제 주부재는 SM490과 부부재는 SM400을 사용하였다. 활하중에 대한 기준은 현재 도로교시방서에서 사용하고 있는 DB-24하중과 DL-24하중을 적용하였다.

3.2 하중저항계수설계법에 의한 시험설계

폐단면 강박스거더교에 하중저항계수설계법을 적용하기 위하여 2장에서 제시한 하중저항계수설계법의 설계 규정에 따라 대상교량의 기준단면을 포함하여 강박스거더의 형고와 폭을 변화시킨 총 9가지 Case에 대한 시험설계를 실시하였다. 이는 허용응력설계법에 의한 기준 설계단면과의 비교를 통하여 하중저항계수설계법의 적용에 따른 경제적이고 효율적인 단면도출 가능 여부와 그 정도를 판별하고, 하중 및 저항 관련 설계변수들의 불확실성과 변동성을 고려한 신뢰성해석을 수행하여 Case별 정량적 안전도 수준을 평가하기 위함이다. 한편 하중저항계수설계법을 각각의 Case에 적용하는 과정에서 발생 가능한 계산상의 오류를 방지하고 반복되는 설계 계산 작업의 효율성을 극대화하기 위하여 Excel 기반 하중저항계수설계법의 설계검토 프로그램을 개발하였으며, 이를 사용하여 아래의 표 1에서 제시된 9가지 Case에 대한 시험설계를 수행하였다.

표 1 정/부모멘트 구간의 시험설계 단면치수(mm)

Case No.	단면구성					
	복부판		상부플랜지		하부플랜지	
	높이	두께(정/부)	폭	두께(정/부)	폭	두께(정/부)
1	2500	12/12	2500	12/16	2500	12/18
2		12/12	2300	12/16	2300	12/18
3		12/12	2100	12/16	2100	12/18
4	2300	12/12	2500	12/16	2500	12/18
5		12/12	2300	12/16	2300	12/18
6	2100	12/12	2100	12/16	2100	12/18
7		12/12	2500	12/16	2500	12/18
8		12/12	2300	12/16	2300	12/18
9		12/12	2100	12/16	2100	12/18

3.3 하중저항계수설계법 적용 결과 검토

이 논문에서는 설계하중에 따른 휨강도에 대한 공칭휨강도의 비를 활용도로 정의하였으며, 활용도가 1.0이하이면 설계조건을 충족하는 것을 의미한다. 활용도에 대한 상대적인 개념으로 여유도는 1.0에서 활용도를 뺀 값인 (1.0-활용도)로 정의하였다. 허용응력설계법에 의한 결과는 항복에 대한 안

기준단면 여유도 검토

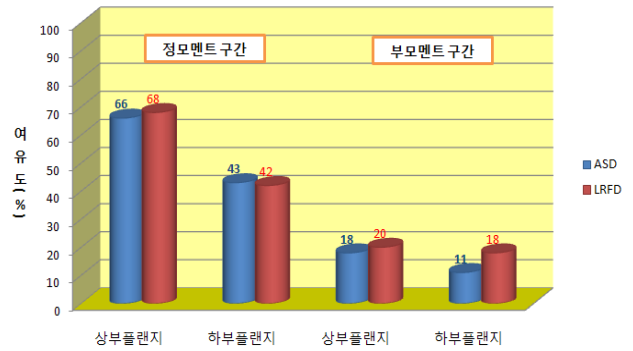


표 2 LRFD 적용에 의한 기준단면 설계검토 결과

설계항목	Case 1(H2.5m, B2.5m)		
	검토 내용	활용도(여유도)	
정모멘트 구간	강도한계상태 (MPa)	상부 플랜지(휨)	0.32(0.68)
		하부 플랜지(휨)	0.58(0.42)
	피로한계상태 (MPa, N)	휨모멘트 하 복부판	0.41(0.59)
		전단력 하 복부판	0.57(0.43)
사용한계상태 (mm)	외측 경간 처짐	0.29(0.71)	
	내측 경간 처짐	0.32(0.68)	
부모멘트 구간	강도한계상태 (MPa)	상부 플랜지(휨)	0.80(0.20)
		하부 플랜지(휨)	0.82(0.18)
	피로한계상태 (MPa, N)	휨모멘트 하 복부판	0.15(0.85)
		전단력 하 복부판	0.89(0.11)
사용한계상태 (mm)	외측 경간 처짐	0.29(0.71)	
	내측 경간 처짐	0.32(0.68)	

전도 검사 항목의 결과로서 고정하중에 1.3배 활하중에 2.15배를 적용한 하중조합에 대하여 작용응력이 강재의 항복응력을 초과하는지를 검토하였다. 그리고 하중저항계수설계법에 의한 결과는 강도한계상태로서 DC1(슬래브하중)과 DC2(방호벽하중)에 1.25배, DW(포장하중)에 1.5배, 그리고 LL(활하중)+IM(충격하중)에 1.75배를 적용함으로써 차량 통행을 고려한 기본하중 조합인 STRENGTH-I에 대하여 작용응력이 공칭휨강도를 초과하는지를 검토 한 결과이다.

그림 4와 표 2에 허용응력설계법과 하중저항계수설계법 적용에 의한 기준단면의 설계검토 결과를 제시하였다. 그림 4에 나타난 기준단면에 대한 허용응력설계법과 하중저항계수설계법에 의한 여유도를 살펴보면, 정모멘트 구간이 부모멘트 구간보다 상대적으로 상당히 높은 여유도 값을 갖는다. 이는 단부에 비해 상대적으로 적은 모멘트가 발생하는 경간의 중앙부에도 유사한 치수의 단면을 적용함으로써 초래된 과다설계에 기인한다. 또한 부모멘트 구간의 상부 및 하부플랜지에서 하중저항계수법에 의한 여유도가 허용응력설계법에 비해 각각 2% 및 7% 더 높게 나타났으며, 이는 하중저항계수설계법의 적용으로 보다 경제적인 단면설계가 가능함을 직

표 3 Case별 강도한계상태에 대한 여유도

Case No.	검토결과(여유도)			
	정모멘트 구간		부모멘트 구간	
	상부플랜지	하부플랜지	상부플랜지	하부플랜지
1	0.68	0.42	0.20	0.18
2	0.66	0.39	0.13	0.27
3	0.64	0.36	0.07	0.37
4	0.63	0.33	0.11	0.09
5	0.64	0.34	0.07	0.21
6	0.62	0.30	0.01	0.32
7	0.63	0.32	0.05	0.02
8	0.61	0.28	-0.01	0.15
9	0.59	0.23	-0.07	0.27

접적으로 보여주고 있다. 표 2에서 부모멘트 구간의 피로한계상태에 대한 여유도가 0.11로 가장 작은 값을 나타내어 세 한계상태 중 지배적인 한계상태로 판단되며, 정모멘트 구간에서 상부플랜지는 다른 플랜지의 여유도에 비하여 그 정도가 큰 것으로 확인되었다.

허용응력설계법에 의해 설계된 기준단면에 비해 경제적이고 효율적인 단면의 도출 가능 여부와 그 정도를 판단하기 위하여 강박스거더의 형고와 폭을 변화시킨 9가지 Case에 하중저항계수설계법을 적용한 강도한계상태에 대한 여유도를 표 3에 요약하였다. 모든 Case의 단면 중 2개(Case 8, Case 9)의 단면에서 강도한계상태에 대한 여유도가 각기 -0.01, -0.07로 산정되어 검토 항목을 만족하지 못하는 반면, 이 둘을 제외하고 기준단면에 비해 경제적인 나머지 모든 경우(Case 2~7)에서는 여유도를 확보하고 있어 설계기준을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 Case 7이 종합적인 여유도가 가장 작게 산정되어 설계휨강도와 공칭휨강도의 비로 정의되는 활용도가 가장 높은 경제적이고 효율적 단면으로 확인되었다. 이상과 같이 하중저항계수설계법은 기존 허용응력설계법에 비해 보다 경제적인 단면의 도출이 가능한 합리적이고 경제적인 설계법으로 판단된다.

4. 폐단면 강박스거더교의 신뢰성평가

4.1 한계상태함수 및 확률변수의 통계특성

대상교량의 각 Case별 폐단면 강박스거더교의 거더에 대하여 강재의 휨 저항모멘트 및 하중효과에 의한 휨모멘트의 통계특성치와 일차신뢰도법(FORM: First Order Reliability Method)을 이용한 신뢰성해석을 수행하였다. 또한 신뢰성평가는 항상 미리 결정된 성능기준인 한계상태함수에 대하여 수행한다(허정원 등, 2006). 이 논문에서는 강도한계상태만을 고려하였으며, 강박스거더 교량 단면의 휨 파괴에 대한 한계상

표 4 확률변수의 통계특성치

확률변수	편향계수 평균(μ_λ)	변동계수(δ_λ)	분포형태
λ_r	1.12	0.10	Lognormal
λ_{DG}	1.03	0.08	Normal
λ_S	1.05	0.10	Normal
λ_{DW}	1.00	0.25	Normal
λ_{LL+IM}	1.15(1.0-1.2)	0.18	Normal

태함수는 식 (15)로 표현된다.

$$g(X) = M_r - (M_{DG} + M_S + M_{DW} + M_{LL+IM}) \quad (15)$$

여기서, M_r 은 휨저항강도를 나타내며, M_{DG} , M_S , M_{DW} 및 M_{LL+IM} 는 각각 거더하중, 슬래브하중, 포장하중 및 활하중에 의한 작용모멘트이다. $M_r = \mu_{M_r} = \lambda_r M_{r_n}$, $M_{DG} = \mu_{M_{DG}} = \lambda_{DG} M_{DG_n}$, $M_S = \mu_{M_S} = \lambda_S M_{S_n}$, $M_{DW} = \mu_{M_{DW}} = \lambda_{DW} M_{DW_n}$, $M_{LL+IM} = \mu_{M_{LL+IM}} = \lambda_{LL+IM} M_{LL+IM_n}$ 이고, μ 는 각 항목에 대한 평균 값 그리고 아래 첨자 n 은 공칭(nominal) 값을 나타낸다. 그러므로 식 (15)는 다음 식 (16)의 최종적인 한계상태함수로 표현될 수 있다.

$$g(X) = \lambda_r M_{r_n} - (\lambda_{DG} M_{DG_n} + \lambda_S M_{S_n} + \lambda_{DW} M_{DW_n} + \lambda_{LL+IM} M_{LL+IM_n}) \quad (16)$$

여기서, λ 는 확률변수로 고려하는 편향계수이다.

신뢰성해석에 사용한 확률변수인 각 편향계수의 평균 값(μ_λ), 변동계수(δ_λ) 및 분포형태는 AASHTO-LRFD에서 적용한 보정자료(Nowak, 1999)를 준용하였으며, 표 4에 한계상태함수에서 고려한 확률변수인 다섯 개의 편향계수에 대한 평균 값(μ_λ), 변동계수(δ_λ) 및 분포형태를 요약하였다.

4.2 신뢰성해석 방법

신뢰성해석 기법은 일반적으로 Level I, Level II 그리고 Level III의 3가지 종류로 분류한다. Level I 기법은 부분안전계수(partial safety factor)에 의해 확률론적 안전성을 간접적으로 평가하며, 각 하중별 안전계수를 목표 신뢰도지수의 함수형태로 표현한다. 확률변수의 평균과 분산 그리고 분포형태를 이용하여 신뢰도지수를 근사적으로 산정하는 Level II 기법에는 MVFOSM(Mean Value First Order Second Moment Method), FORM(Rackwitz 등, 1978) 그리고 SORM(Second Order Reliability Method) 등이 있다(허정원, 2003). 마지막으로 Level III 기법은 많은 횡수의 임

의로 발생시킨 변수들의 값들을 이용한 한계상태함수의 평가로부터 파괴여부를 판정하여 누적하는 시물레이션기법인 MCS(Monte Carlo simulation)기법이 대표적이다. 이 논문에서는 Level II 방법 중 FORM을 적용하였으며, 핵심적인 내용을 아래에 간략하게 기술하였다.

FORM은 원래 한계상태함수, $g(\mathbf{X}) = 0$ 을 표준정규변량의 한계상태함수 $g(\mathbf{X}') = g(X'_1, X'_2, \dots, X'_n) = 0$ 으로 변환한 후, 전형적인 최적화과정인 식 (17)을 수행하기 위해 Lagrange 승수기법 등을 이용한 반복법을 적용하여 일반화된 안전지수 (generalized safety index)인 β 로 표현되는 원점에서 $g(\mathbf{X}')$ 까지의 최소거리를 구하는 방법이다.

$$d = \beta = \sqrt{(X'_1)^2 + (X'_2)^2 + \dots + (X'_n)^2} = \sqrt{\mathbf{X}'^T \mathbf{X}'} \quad (17)$$

여기서, X'_i 는 평균값이 영(零)이고 단위표준편차를 가지는 확률변수로 다음 식 (18)과 같이 무상관 표준화 정규변량으로 정의된다.

$$X'_i = (X_i - \mu_{X_i}^N) / \sigma_{X_i}^N \quad (18)$$

여기서, $\mu_{X_i}^N$ 와 $\sigma_{X_i}^N$ 는 등가표준편차와 등가평균으로 설계점 (design point)에 대해 비정규 확률변수의 누적분포함수와 확률밀도함수를 각각 등가의 정규분포변수와 등치시켜 확률변수의 분포정보를 고려하기 위해 Rackwitz 등(1978)은 아래와 같이 제안하였다.

$$\sigma_{X_i}^N = \frac{\phi\{\Phi^{-1}[F_i(X_i^*)]\}}{F_i(X_i^*)} \quad (19)$$

$$\mu_{X_i}^N = X_i^* - \Phi^{-1}[F_i(X_i^*)] \sigma_{X_i}^N \quad (20)$$

여기서, f_i 와 F_i 는 각기 비정규분포 확률변수 X_i 의 확률밀도 함수와 누적분포함수이며, ϕ 와 Φ 는 표준정규분포 변수의 확률밀도함수와 누적분포함수이다. 일차신뢰도법에서 파괴확률은 식 (17)에서 구해진 신뢰도 지수 β 와 $P_f \approx \Phi(-\beta)$ 의 상관식을 이용하여 근사적으로 계산되며, 원점으로부터 최단거리인 파괴면 위의 점(X_1^* , X_2^* , ..., X_n^*)을 설계점 또는 검증점(checking point)으로 표기한다.

신뢰성평가를 용이하고 원활하게 수행하기 위해 이상에서 설명한 반복 알고리즘 기법인 FORM에 기초하여 이 논문 제1저자의 주도하에 개발된 컴퓨터 프로그램인 "FORMRA (허정원 등, 2008)"를 신뢰성해석에 사용하였다.

4.3 신뢰성해석 결과

전술한바와 같이 하중저항계수설계법에 의해 검토된 기준 단면을 포함한 총 9개 Case의 시험설계 단면에 대하여 식 (16)의 한계상태함수, 표 4에 제시된 확률변수의 통계특성치, 그리고 FORM-기반 프로그램을 이용하여 신뢰성해석을 수행하였으며 이로부터 산정된 각각의 신뢰도지수(β)를 표 5에 제시하였다.

표 5의 신뢰성해석 결과를 살펴보면, 우선 기준단면(Case 1)에서 부모멘트 구간의 압축 및 인장플랜지의 강도한계상태에 대한 신뢰도지수 β 는 각기 5.26과 5.45로서 AASHTO-LRFD(2004)에서 제시한 목표신뢰도지수 3.5를 초과하는 설계단면으로 충분한 안전성이 확보된 것으로 판단된다. 한편 FORM에 의한 기준단면의 정모멘트 구간에서 인장플랜지의 신뢰도지수 β 는 7.94로 파괴 가능성이 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 앞서 하중저항계수설계법에 의한 여유도 평가에서 정모멘트 구간에서의 여유도가 부모멘트 구간에 비해 상당히 크게 산정된 결과와 전반적으로 일치한다. 또한 9가지 Case의 단면 중 시험설계에서 일부 검토 항목을 만족하지 못했던 Case 8과 9에 대한 신뢰도지수가 각기 3.77과 3.26으로 나타났다. 강도한계상태에 대한 여유도가 -0.07로 산정된 Case 9의 경우는 이 논문에서 적용한 교량부재의 휨에 대한 목표 신뢰도지수인 3.5에 미치지 못하는 것으로 충분히 예측된 결과이다. 한편 Case 8의 신뢰도지수로 산정된 3.77은 목표 신뢰도지수인 3.5를 초과하는데, 이는 설계검토에서 산정된 -0.01의 여유도가 거의 경계치에 가깝고 신뢰성분석에서 고려한 확률변수의 통계오차 및 수치해석상의 계산오차에 기인한 것으로 사료된다. 나머지 7가지의 단면들의 신뢰도지수는 모두 목표 신뢰도지수를 만족하는 결과를 얻었다.

부모멘트 구간의 압축플랜지에 대한 신뢰성해석 결과를 살펴보면, 기준단면에서 플랜지의 폭이 줄어들어 따라 신뢰도

표 5 각 Case별 신뢰도지수(β)

Case No.	신뢰도지수(β)			
	정모멘트 구간		부모멘트 구간	
	상부플랜지 (압축플랜지)	하부플랜지 (인장플랜지)	상부플랜지 (인장플랜지)	하부플랜지 (압축플랜지)
1	12.87	7.94	5.45	5.26
2	12.57	7.86	4.99	6.48
3	12.39	7.38	4.47	7.78
4	12.10	7.09	5.11	4.65
5	12.23	7.17	4.41	5.87
6	11.74	6.66	3.87	7.16
7	12.00	6.88	4.21	4.00
8	11.52	6.38	3.77	5.22
9	11.09	5.90	3.26	6.50

표 6 부모멘트 구간의 확률변수 민감도지수(Case 1과 7)

확률변수		기준단면(Case 1)		최적단면(Case 7)	
		상부플랜지	하부플랜지	상부플랜지	하부플랜지
신뢰성지수		5.45	5.26	4.21	4.00
민감도지수(γ)	λ_r	-0.8376	-0.8297	-0.8293	-0.8184
	λ_{DG}	+0.2276	+0.2150	+0.2429	+0.2266
	λ_S	+0.1601	+0.1513	+0.1614	+0.1506
	λ_{DW}	+0.1032	+0.1081	+0.1056	+0.1122
	λ_{LL+IM}	+0.4586	+0.4805	+0.4648	+0.4936

지수가 상대적으로 크게 증가한다. 이는 AASHTO- LRFD 에서 규정된 압축부재의 공칭압축강도가 부재의 세장비와 구성판의 폭-두께비에 따라 결정되며, 세장비와 폭-두께비는 압축플랜지의 수평보강재 유무와 그리고 보강이 되었다면 수평보강재의 개수와 간격에 의하여 영향을 받기 때문이다.

또한 각 확률변수의 신뢰도지수(또는 파괴확률)에 대한 정량적 영향 정도를 파악하기 위하여 기준단면(Case 1)과 9가지 중 설계조건을 충족하는 가장 경제적인 단면(Case 7)에 대하여, FORM으로부터 직접 산정된 각 확률변수의 민감도지수(γ)를 표 6에 제시하였다.

표 6에서 고려한 모든 경우에서 단면의 안전성에 영향을 크게 미치는, 즉 높은 민감도를 갖는 확률변수는 저항모멘트, 충격하중을 고려한 활하중, 거더하중, 슬래브하중 및 포장하중에 의한 작용모멘트의 순으로 확인되었다. 비록 저항모멘트 편향계수의 변동계수가 상대적으로 다른 확률변수에 비해 작지만 민감도는 더 크게 나타나는데, 이는 강도한계상태에서 저항모멘트 공칭 값의 크기가 지배적이기 때문인 것으로 판단된다. 이상과 같은 확률변수의 민감도 파악을 위해서 이 논문에서 적용한 FORM은 추가적인 민감도분석이 필요치 않다는 장점을 갖고 있다.

5. 결 론

이 논문에서는 국내 설계기술의 국제적 경쟁력 확보를 위하여 구조신뢰성 이론에 바탕을 둔 합리적 설계법인 하중저항계수설계법을 국내 강교량 건설에 있어 비중이 큰 폐단면 강박스거더교에 적용하여 설계절차를 확립하였고, 신뢰성해석에 의한 신뢰성수준을 평가함으로써 설계된 교량 단면의 정량적 안전성을 검토하였다.

하중저항계수설계법의 적용을 위하여 AASHTO-LRFD (2004) 규정을 적용하여 시험설계를 한 기준단면을 포함한 9가지 Case에 대한 여유도 평가 결과로부터 하중저항계수설계법이 기존의 허용응력설계법에 비해 보다 경제적이고 균등한 안전도를 갖는 설계단면의 도출이 가능한 합리적이고 경

제적인 설계법으로 확인되었다. 또한 하중저항계수설계법에 의하여 설계된 교량 단면의 신뢰성해석 결과, 9가지 Case의 단면 중 기준단면(Case 1)에서는 부모멘트 구간의 압축 및 인장플랜지의 강도한계상태에 대한 신뢰도지수 β 가 각기 5.26과 5.45로서 목표 신뢰도지수 3.5를 초과하여 과도한 안전성이 확보된 것으로 판단되며, 보다 경제적인 단면들(Case 2~7)의 신뢰도지수는 예상한바와 같이 모두 목표 신뢰도지수를 만족하는 결과를 얻었다. 이는 경제적인 단면선정을 위하여 하중저항계수설계법을 적용한 시험설계 결과와 시험설계 단면의 신뢰도수준 평가를 위한 신뢰성해석 결과가 서로 부합하는 것으로 이 논문에서 제시된 절차와 방법의 타당성을 입증하였다.

한편 하중저항계수설계법을 적용하기 위하여 준용한 AASHTO-LRFD(2004) 규정은 국내 폐단면 강박스거더교 형식에 일부 적합하지 않는 부분을 포함하고 있어, 국내의 지역적인 설계 환경여건과 강교량 형식에 맞는 국내 하중저항계수설계법의 제정이 시급하다고 사료된다. 이로부터 궁극적으로는 목표 신뢰도지수에 수렴하는 안전하고 경제적인 강교량 설계를 구현함으로써 강교량 설계기준의 국제화 및 관련기술에 대한 선진화가 이루어질 것이다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 전남대학교 교수 연구역량강화사업 지원에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

건설교통부 (2005) 도로교설계기준 2005, 한국도로교통협회.
 박재현, 허정원, 김명모, 광기석 (2008) LRFD 설계를 위한 국내 항타강관말뚝의 저항계수 산정, 대한토목학회 논문집, 28(6C), pp.367~377.
 신동구, 노준식, 조은영 (2008) LRFD법으로 설계된 단경간 및 연속경간 강함성플레이트거더 및 박스거더의 휨에 대한 신뢰도해석, 한국강구조학회 논문집, 20(1), pp.183~193.
 신동구, 박영석 (2007) LRFD 설계법에 의한 강함성 박스거더 교 설계예제집, 교량설계핵심기술연구단.
 이성철 (2002) 강판형교의 하중-저항계수설계(LRFD) 예, 한국강구조공학회 학회지, 14(1), pp.37~48.
 조효남, 김상효, 김승억, 길홍배 (1999) 도로교의 하중-저항계수 설계법, 한국전산구조공학회 기술강습회, 제21회, pp.3~50.
 한국건설기술연구원 (2008) LRFD 기초구조물 설계를 위한 저항계수 결정 연구, 국토해양부 R&D/05기반구조A14-01,

한국건설기술연구원, 경기도 고양시, p.295.

허정원 (2003) 실제 구조물의 유한요소 신뢰성해석을 위한 복합 알고리즘, 한국토목학회 논문집, 23(6A), pp.1321~1329.

허정원, 광기석, 정문경, 이주형, 박재현 (2008) FORMRA, 프로그램등록번호 2008-01-123-007604, 컴퓨터프로그램보호위원회.

허정원, Haldar, A. (2006) 실제 구조계의 유한요소법에 기초한 지진 신뢰성해석, 한국전산구조공학회 논문집, pp.171~185.

AASHTO-LRFD (2004) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications Third Edition.*

FHWA (2003) LRFD Design Example for Steel Girder Superstructure Bridge, FHWA NHI-04-042, National

Highway Institute Washington D.C.

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

Rackwitz, R., Fiessler, B. (1978) Structural Reliability Under Combined Random Load Sequences, *Journal of Computers and Structures*, 9, pp.489~494.

- 논문접수일 2010년 2월 8일
- 논문심사일 2010년 2월 26일
- 게재확정일 2010년 3월 30일