

R.C. 박스거더교의 체계신뢰성 해석 및 안전도 평가

Assessment of System Reliability and Capacity-Rating of Concrete Box-Girder Highway Bridges

조효남*

신재철**

Cho, Hyo Nam Sin, Jae Cheol

요 약

본 연구는 RC 박스거더교 상부구조의 체계신뢰성 해석과 체계신뢰성에 기초한 내하력 평가를 위한 실용적이고 실제적인 신뢰성 모델 및 방법을 제안하였다.

시스템으로서 교량의 보유내하력을 정확히 예측한다는 것은, 특히 교량이 높은 여유성을 갖고 있고 열화손상이 심각한 경우에는 더욱 어려운 문제이다. 본 연구는 교량의 체계신뢰성에 상응하는 교량시스템강도로서 정의될 수 있는 등가의 시스템강도의 향으로 교량의 보유내하력을 평가하는 새로운 접근 방법을 제안하였다. 즉, 이 방법은 체계신뢰성지수의 FOSM(First Order Second Moment) 형태에서 유도된 등가시스템저항강도로서 보다 실제적이고 합리적인 극한시스템저항강도 평가방법이다.

본 연구에서 제안된 RC박스거더교를 위한 강도한계상태모형은 휨 및 전단강도에 기초하였다. 그리고 박스거더 상부구조의 체계신뢰성 문제는 주요 파괴 메카니즘이나 각거더의 한계파괴상태에 기초한 FMA(Failure Mode Approach)로 부터 획득한 직-병렬 혼합모델로서 정식화하였다. 제안된 모형의 신뢰성해석에는 AFOSM(Advanced First Order Second Moment)과 IST(Importance Sampling Technique)시뮬레이션 알고리즘을 사용하였다.

Abstract

This paper develops practical and realistic reliability models and methods for the evaluation of system reliability and system reliability-based rating of R.C box-girder bridge superstructures.

The precise prediction of reserved carrying capacity of bridge as a system is extremely difficult especially when the bridges are highly redundant and significantly deteriorated or damaged. This paper proposes a new approach for the evaluation of reserved system carrying capacity of bridges in terms of equivalent system-strength, which may be defined as a bridge system-strength corresponding to the system reliability of the bridge. This can be derived from an inverse process based on the concept of FOSM(First Order Second Moment) form of system reliability index.

The strength limit state models for R.C box-girder bridges suggested in the paper are based on the basic bending and shear strength. And the system reliability problem of box-grider superstructure is formulated as parallel-series models obtained from the FMA(Failure Mode Approach) based on major failure mechanisms or critical failure states of each girder. AFOSM(Ad-

* 한양대학교 토목환경공학과 교수

** 충남대학교 토목공학과 조교수

• 본 논문에 대한 토의를 1995년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 1995년 10월호에 토의회담을 게재하겠습니다.

vanced First Order Second Moment) and IST(Importance Sampling Technique) simulation algorithm are used for the reliability analysis of the proposed models.

Keywords : interactive limit state function, system reliability, equivalent system-strength

1. 서 론

R.C. 박스거더교는 상판이나 격벽으로 인하여 횡방향 하중분배, 여유성(Redundancy)이 우수하며 또한 편심하중에 대해 효과적으로 저항할 수 있음은 잘 알려진 사실이다. 따라서, 고차의 여유성을 가진 교량상부구조의 보유내하력을 합리적으로 예측하기 위해서는 시스템 성능과 체계신뢰성에 기초한 내하력 및 안전도평가가 매우 중요하다.

최근에, 요소수준보다는 시스템수준의 신뢰성이 강조되면서 단순거더교량에 대한 실제적인 체계신뢰성모델 및 방법이 제안된 바 있다^(1,7,9). 또한 본 연구자를 통하여 신뢰성에 기초한 안전도 및 내하력 평가에 대한 실제적인 접근이 이루어진 바 있다^(2,13).

본 논문은 기설 RC 박스거더교의 체계신뢰성 평가를 위한 실제적이고 합리적인 체계신뢰성 모델 및 방법을 제안하고 체계신뢰성에 기초한 내하력 평가방법을 제안하며 노후손상된 기설 RC 박스거더교에 적용하므로써 제안된 체계신뢰성해석 모델 및 방법의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 신뢰성 해석

2.1 한계상태모형

2.1.1 요소한계상태모형

본 논문에서 제안한 RC박스거더교의 강도한계 상태모형은 휨 및 전단강도에 기초하여 설정하였다.

즉, 거더교량에 대한 선형강도한계상태함수는 휨 또는 전단파괴에 대하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$g(\cdot) = S_R - (S_D + S_L) \quad (1)$$

여기서, S_R =실공칭강도, S_D , S_L =실 작용 사하중 및 활하중에 의한 효과이다. 이때, 실저항 S_R 은 모멘트와 전단력 각각에 대하여 M_R 과 V_R 로 표현하는데 각각은 파괴모드별 보정계수와 노후손상 계수를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_R = M_n N_M D_{F_M} \quad (2)$$

$$V_R = V_n N_V D_{F_V} \quad (3)$$

여기서, M_n , V_n =공칭 휨강도, 전단강도, D_{F_M} , D_{F_V} = M_n , V_n 에 대한 노후손상계수, N_M , N_V =파괴 모드별 보정계수로서 M_n , V_n 및 D_{F_M} , D_{F_V} 의 추정 에 관련된 편기와 모든 불확실량을 내포하는 변량을 나타낸다.

또한, 실 작용 사하중 및 활하중에 의한 효과 S_D , S_L 은 모멘트와 전단력 각각에 대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_D = m_D D_n N_{D_M} \quad (4)$$

$$V_D = v_D D_n N_{D_V} \quad (5)$$

$$M_L = m_L L_n K_{S_M} (1 + i_M) N_{L_M} \quad (6)$$

$$V_L = v_L L_n K_{S_V} (1 + i_V) N_{L_V} \quad (7)$$

여기서, M_D , M_L , V_D , V_L =사하중 및 활하중에 의한 작용 모멘트 및 전단력 효과, m_D , v_D , m_L , v_L =사하중과 활하중에 대한 휨모멘트, 전단력의 영향계수, D_n , L_n =공칭사하중 및 활하중, K_{S_M} , K_{S_V} =휨모멘트 및 전단력에 대한 응답비, i_M , i_V =휨모멘트 및 전단력에 대한 충격계수, N_{D_M} , N_{D_V} , N_{L_M} , N_{L_V} = D_n , L_n 을 추정하는 데 있어서의 불확실량 및 실제하중효과에 대한 편기를 조정하기 위한 보정계수로 표현할 수 있다.

2.1.2 시스템 한계상태모형

박스거더교의 복합적 파괴기구에 기초한 체계

신뢰성해석을 위해서는 다음과 같은 한계상태방정식을 사용하였다.

$$g_i(\cdot) = \sum C_{ij} S_{R_{ij}} - \sum (b_{D_{ik}} S_{D_{ik}} + b_{L_{ik}} S_{L_{ik}}) \quad (8)$$

여기서, $S_{R_{ij}}$ = i 번째 파괴기구에서의 j 번째 파괴 단면의 실저항모멘트, $S_{D_{ik}}, S_{L_{ik}}$ = i 번째 파괴기구의 k 번째의 작용하중효과, $C_{ij}, b_{D_{ik}}, b_{L_{ik}}$ =붕괴모드를 정의하는 계수를 나타낸다.

한편, 신뢰성모델은 요소파괴특성이 취성인지 연성인지에 따라 좌우되는데, 실제의 거동은 완전 취성도 완전연성도 아닌 반취성 또는 반연성이기 때문에 본 연구에서는 RC 요소의 파괴를 잔존강도를 가진 반취성 또는 반연성으로 가정하였다. 전술한 저항 및 하중효과의 기본랜덤변량의 모든 불확실량은 주로 문헌^(5,13)의 자료로부터 획득하였다.

2.1.3 불확실량

구조신뢰성 방법에서는 저항 및 하중관련 변량들의 불확실량을 합리적으로 추정하는 것이 매우 중요하며, 노후손상교량의 안전도해석에 사용되는 불확실량에는 구조안전도에 영향을 끼칠 수 있는 모든 변수를 포함해야 하고 표본자료와 통계적 해석변동량 뿐 아니라 추정오차 또는 모델링오차, 불확실한 정보로 인한 오차 등도 포함되어야 한다. 본 논문에서는 국내외의 관련문헌을 종합판단하여 통계적 불확실량으로 사용하였으며 Table 1에 나타내었다. 물론 이러한 저항 및 하중관련 각종 통계자료는 앞으로 연구가 계속 수행되고 통계적인 자료가 누적됨에 따라 수정, 보완되어져야 할 것이다

Table 1 Statistical uncertainties

		mean-nominal ratio	Cov.	Distribution Type
Resistance	Moment	1.12	0.16	lognormal
	Shear	1.09	0.17	lognormal
Load	Dead	1.05	0.10	lognormal
	Live	1.24	0.25	lognormal

2.2 해석기법

구조신뢰성은 개념적으로는 파괴확률 P_F 로 추정하거나 수치적으로 평가할 수 있다. 그러나 실제적으로 구조물의 요소나 시스템의 상대적인 여유안전율은 신뢰성지수 β 에 의해 가장 적절하게 나타내어질 수 있다. 즉,

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_F) \quad (9)$$

여기서, P_F =파괴확률, Φ^{-1} =표준정규분포함수의 역함수이다. 교량의 신뢰성해석을 위해서는 다양한 수치적 방법을 사용할 수 있지만 본 논문에서는 요소신뢰성해석을 위해서는 등가정규변환과 Hasofer-Lind's 반복 알고리즘을 통합한 AFOSM 알고리즘⁽⁵⁾을 사용하였으며 체계신뢰성해석을 위해서는 본 연구자에 의해 개발된 IST(Importance Sampling Technique)알고리즘⁽⁴⁾을 사용하였다.

시스템파괴확률 $P_{F(sys)} (= \int_x I[X][f(x)/h(x)]$)의 FMA(Failure Mode Approach)를 계산하기 위해 IST알고리즘은 다음과 같은 중요도 표본식에 기초하였다.

$$h(x) = \sum P_i h_i(x) \quad (10)$$

$$p_i(x) = \frac{f_i(x^*)}{\sum f_i(x^*)} \quad (11)$$

여기서 x =기본확률변량, x^* =최확파괴(MLF, Maximum Likelihood Failure)점, $I[X]$ =지시함수, $f(x)$ = x 의 결합확률밀도함수, $h(x)$ =조합밀도함수의 형태로 제안된 표본 밀도함수, P_i = i 번째 파괴모드에서의 i 번째 표본밀도함수 $h(x)$ 에 대한 가중치 또는 확률이다. x 의 보다 중요한 영역에 보다 많은 표본을 취할 수 있는 $h(x)$ 를 도입하면 $P_{F(sys)}$ 의 계산에 상당한 기여를 할 수 있다.

3. 내하력평가

3.1 기준식에 의한 방법

3.1 기준식에 의한 방법

일반적인 LRFD 기준은 특정한 목표신뢰성지수에 대응하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_n = \frac{\phi' D_F R_n - \gamma'_{DC} D_n}{\gamma'_{LC} K} \quad (12)$$

$$RF = \frac{P_n}{P_r} \quad (13)$$

여기서, P_n =공칭하중내하력, P_r =표준설계하중, R_n =시방서에 규정된 공칭강도, c_D , c_L =단위사하중 및 활하중 효과에 대한 영향계수이다.

3.2 등가내하력 추정방법

3.2.1 요소수준

한계상태함수가 양함수(explicit function)의 형태, 즉, $g(\cdot) = R - \Sigma Q$ 의 형태로 표현되는 경우에는 R과 Q에 대한 1, 2차 모멘트를 사용하여 목표신뢰성지수 β_0 에 대응하는 등가내하력 P_n 를 식 (14)와 같은 ln-ln모델의 FOSM형태로부터 해석적으로 구할 수 있다.

$$\beta_e = \frac{\ln\left(\frac{\bar{R}_e}{\bar{Q}_e}\right)}{\sqrt{\Omega_{R_e}^2 + \Omega_{Q_e}^2}} \quad (14)$$

식 (14)를 \bar{Q}_e 에 대하여 풀면 다음과 같다.

$$\bar{Q}_e = \bar{R}_e \exp(-\beta_e \sqrt{\Omega_{R_e}^2 + \Omega_{Q_e}^2}) \quad (15)$$

한편 \bar{Q}_e 는 평균하중효과로서, 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \bar{Q}_e &= \bar{S}_{D_e} + \bar{S}_{L_e}(1+i) \\ &= c_{D_e} D_n \eta_D + c_{L_e} P_n \eta_L (1+i) \end{aligned} \quad (16)$$

식 (15)와 식 (16)을 등치시키면 요소수준의 등가내하력 P_n 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_n &= \frac{1}{c_{L_e} \eta_L (1+i)} [\bar{R}_e \exp(-\beta_e \sqrt{\Omega_{R_e}^2 + \Omega_{Q_e}^2}) - c_{D_e} D_n \eta_D] \\ &= \frac{1}{c_{L_e} \eta_L (1+i)} \bar{R}_e \exp(-\beta_e \sqrt{\Omega_{R_e}^2 + \Omega_{Q_e}^2}) - \frac{c_{D_e}}{c_{L_e}} \frac{\eta_D}{\eta_L} \frac{D_n}{(1+i)} \end{aligned} \quad (17)$$

반면에 한계상태함수가 음함수(implicit function)형태인 경우에는 저항변수 R과 하중효과변수 Q가 분리된 항으로 표현되지 않기 때문에 식 (17)과 같이 등가내하력 P_n 을 해석적으로 구할 수 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 경우에 등가내하력 P_n 을 손쉽게 구할 수 있는 방법을 제안하였다. 이 방법은 임의의 두개의 평가하중(rating load)에 대한 신뢰성지수 β 를 수치해석에 의해 구하여 FOSM모형의 적합곡선(fitting curve)을 구하게 되면 이 곡선으로부터 목표신뢰성지수 β_0 에 대응하는 등가내하력 P_n 을 곧바로 구할 수 있으며, 이는 목표신뢰성지수 β_0 에 대응하는 교량의 실 보유내하력을 추정할 수 있는 새로운 방법이다.

Fig. 1에는 한계상태함수가 음함수로 평가되는

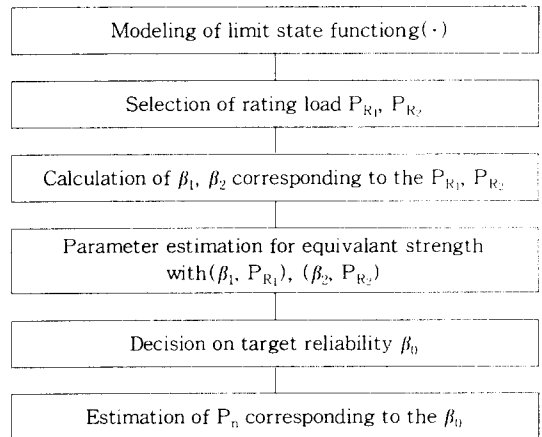


Fig. 1 Procedure of estimation of P_n

경우에 등가내하력 P_{nk} 를 구하는 절차를 도해적으로 나타내었다. P_{nk} 를 구하는 구체적 계산절차는 시스템 수준의 등가내하력 P_n 의 계산절차와 개념적으로 동일하므로 수식의 전개는 다음절에서 상술하겠다.

3.2.2 시스템수준

등가내하력 평가방법은 시스템수준의 내하력평가에 더욱 효과적으로 사용될 수 있다. 체계신뢰성지수 β_s 는 ln-ln모델의 FOSM 형태인 식 (18)의 형태로 개념적으로 표현할 수 있다.

$$\beta_s \cong \frac{\ln(\bar{R}_s / \bar{Q}_s)}{\sqrt{\Omega_{R_s}^2 + \Omega_{Q_s}^2}} \quad (18)$$

여기서, \bar{R}_s =시스템 평균공칭저항, \bar{Q}_s =시스템 평균하중효과이며, 식 (18)을 \bar{Q}_s 에 대하여 풀면 다음과 같다.

$$\bar{Q}_s = \bar{R}_s \exp(-\beta_s \sqrt{\Omega_{R_s}^2 + \Omega_{Q_s}^2}) \quad (19)$$

한편 \bar{Q}_s 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \bar{Q}_s &= \bar{S}_{D_s} + \bar{S}_{L_s}(1+i) \\ &= c_{D_s} D_n \eta_D + c_{L_s} P_n \eta_L (1+i) \end{aligned} \quad (20)$$

식 (19)와 식 (20)을 등치시키면 시스템수준의 등가내하력 P_{nk} 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{nk} &= \frac{1}{c_{L_s} \eta_L (1+i)} \\ &\quad \bar{R}_s \exp(-\beta_s \sqrt{\Omega_{R_s}^2 + \Omega_{Q_s}^2}) \\ &\quad - \frac{c_{D_s} \eta_D}{c_{L_s} \eta_L} \frac{D_n}{(1+i)} \\ &= Z_m \exp(-\beta_s \Omega_s) - \rho_s D_n \end{aligned} \quad (21)$$

여기서, $Z_m = \bar{R}_s / [c_{L_s} \eta_L (1+i)]$ 로 표현되는 시스템 평균공칭을 나타내는 모수, $\Omega_s = \sqrt{\Omega_{D_s}^2 + \Omega_{L_s}^2}$ 로 표현되는 시스템 불확실량을 개념적으로 내포하고 있는 모수, $\rho_s = (c_{D_s} \eta_D) / [c_{L_s} \eta_L (1+i)]$ 이다. Fig.

2에는 P_{nk} 와 β_s 의 관계가 식 (21)과 같이 지수함수 형태로 표현되는 것을 나타내고 있다.

미지의 매개변수 Z_m 과 Ω_s 는 2개의 기지의 내하력 점(P_{R1} , β_{S1})을 식 (21)에 대입하므로서 구할 수 있다. 여기서, β_{S1} 과 β_{S2} 는 각각 상한치와 하한치를 갖는 평가하중 P_{R1} 과 P_{R2} 에 의해서 얻어질 수 있다. 따라서 식 (21)은 다음과 같이 표현된다.

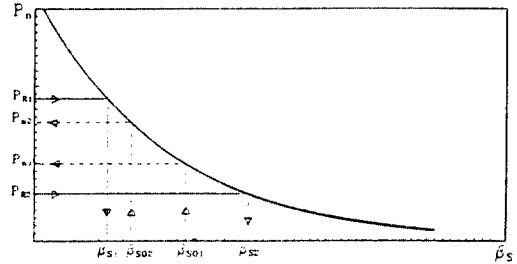


Fig. 2 β_s vs. P_{nk}

$$P_{R1} = Z_m \exp(-\beta_{S1} \Omega_s) - \rho_s D_n \quad (22a)$$

$$P_{R2} = Z_m \exp(-\beta_{S2} \Omega_s) - \rho_s D_n \quad (22b)$$

식 (22a)와 (22b)를 식 (21)에 대입시켜 매개변수 Z_m 과 Ω_s 를 유도하여 정리하면 다음과 같은 형태로 표현될 수 있다.

$$Z_m = \left[\frac{(P_{R2} + \rho_s D_n)^{\beta_{S1}}}{(P_{R1} + \rho_s D_n)^{\beta_{S2}}} \right]^{\frac{1}{\Delta\beta}} \quad (23)$$

$$\Omega_s = -\frac{1}{\Delta\beta} \ln \left(\frac{P_{R1} + \rho_s D_n}{P_{R2} + \rho_s D_n} \right) \quad (24)$$

여기서, $\Delta\beta = \beta_{S1} - \beta_{S2}$. 식 (23)과 (24)를 식 (21)에 대입하여 정리하면, P_{nk} 는 다음과 같이 전개된다.

$$P_{nk} = \frac{(P_{R2} + \rho_s D_n)^{\Delta\beta_1 / \Delta\beta}}{(P_{R1} + \rho_s D_n)^{\Delta\beta_2 / \Delta\beta}} - \rho_s D_n \quad (25)$$

여기서, P_{R1} , P_{R2} =임의의 상·하한 평가하중

$$\Delta\beta_1 = \beta_{S1} - \beta_{S0}$$

$$\Delta\beta_2 = \beta_{S2} - \beta_{S0}$$

이때, β_{S1} , β_{S2} =각각 P_{R1} 과 P_{R2} 에 대한 체계신뢰

성지수, β_{s0} =시스템에 대한 목표신뢰성지수 이상과 같이 체계신뢰성지수에 기초한 내하력평가 방법은 상·하한 평가하중에 의한 체계신뢰성지수 β_{s0} 만 구하게 되면 실질적인 시스템의 등가내하력을 식 (25)을 사용하거나 Fig. 2를 사용하여 손쉽게 구할 수 있는 매우 효과적인 방법이다.

4. 시스템 여유성 및 보유안전율

상자형교와 같이 고차의 여유성을 가지는 구조물에 대해서는, 단 한개의 부재나 요소의 파괴가 전체 구조물의 파괴를 유발하는 것이 아니며 따라서 구조물의 등가내하력은 일반적으로 최초 부재의 파괴하중보다 더 크다. 시스템 여유성도 한 요소의 초기 파괴후에 파괴에 저항할 수 있는 시스템 보유저항강도로서 부정정성(Indeterminacy)의 정도 뿐만 아니라 개별 부재의 후파괴거동, 부재강도 및 하중, 부재강도 사이의 상호관계, 각 부재의 신뢰성수준에 따라 좌우된다. 그러므로 구조 여유성은 일반적으로 어떤 한 구조 부재의 부분적 또는 전체적인 파괴가 이루어진 경우, 구조물이 시스템 자체로서 파괴에 저항할 수 있는 능력, 즉 시스템으로서의 보유안전율 및 저항강도의 정도를 나타내는 척도로서 정의될 수 있다⁽¹⁾.

4.1 확률적방법

교량의 붕괴는 초기파괴 후에 여러가지 중간과정을 통해 종국파괴에 이르기까지 다양한 파괴경로를 거쳐 일어난다. 따라서 시스템 여유성은 한 요소의 초기 파괴후 구조물이 종국파괴에 저항할 수 있는 극한저항강도로서 이의 합리적 평가가 관건이 되는데 본 연구에서는 체계신뢰성 해석결과를 사용하여 기설교량의 시스템 여유성 또는 보유안전율을 확률적으로 표현하였다. 시스템 여유성 또는 보유안전율을 표현하기 위한 몇가지 방법이 몇몇 연구자들^(6,11)들에 의해 제안된 바 있으나, 본 연구에서는 신뢰성지수에 의하여 시스템 여유성과 보유안전율을 다음과 같이 정의하였다.

$$PSRF = \beta_s / \beta_e \quad (26a)$$

$$PSReF = \beta_s / \beta_e \quad (26b)$$

여기서, PSRF(Probabilistic System Redundancy Factor)=확률적 시스템 여유성 계수, PSReF(Probabilistic System Reserve Factor)=확률적시스템 보유저항강도 계수, β_s =체계신뢰성지수, β_e =초기파괴요소의 체계신뢰성지수, β_e =요소신뢰성지수이다.

4.2 확정적 방법

등가시스템저항강도 P_{ns} 의 향으로 극한시스템저항강도가 구해지면 확정적 시스템 여유성 및 보유저항강도는 상술한 확률적 방법과 마찬가지로 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$DSRF = P_{ns} / P_{ni} \quad (27a)$$

$$DSReF = P_{ns} / P_{ne} \quad (27b)$$

여기서, DSRF(Deterministic System Redundancy Factor)=확정적 시스템 여유성 계수, DSReF (Deterministic System Reserve Factor)확정적 시스템 보유저항강도 계수, P_{ns} =체계신뢰성지수에 상응하는 극한공칭시스템저항강도, P_{ne} =요소신뢰성지수에 상응하는 요소의 공칭저항강도, P_{ni} =초기파괴요소의 신뢰성지수에 상응하는 초기파괴의 공칭저항강도이다.

5. 적용에 및 고찰

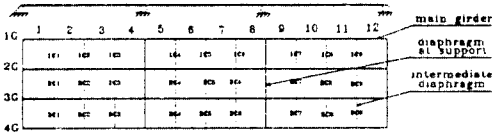
5.1 3경간 연속교

5.1.1 대상교량

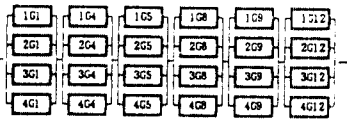
기설 RC 박스기다교의 체계신뢰성에 기초한 내하력평가를 위한 체계신뢰성 모델 및 방법을 Fig. 3에서 보는 바와 같이 하동과 다압의 국도 2호선 상에 위치한 섬진강을 가로지르는 3연속 RC박스기다교인 섬진교에 대해 적용하였다. 이 교량은 공용기간이 7년 밖에 되지 않았음에도 불구하고 설계상의 오류와 시공불량 등으로 인하여 Fig. 4에서 보는 바와 같이 박스의 전단면에 걸쳐 심각한 전단균열이 발생하여 열화손상이 심각했던 교

량으로서 최근 교체시공중이다.

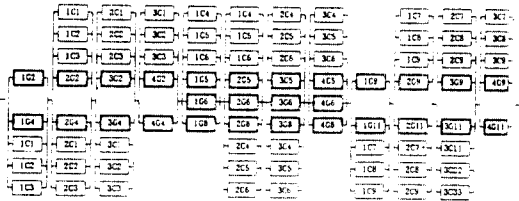
이 교량에 대해서는 본 연구자에 의해 체계적인 외관조사, 비파괴시험 및 정 동적 재하시험을 통한 광범위한 안전진단이 수행된 바 있는데 측정데이터 및 내하력 평가자료를 교량의 일반사항과 함께 Table 2에 정리하였다.



(a) Model for system reliability



(b) System modelling based on shear failure mode



(c) System modelling based on bending failure mode (Sys 3)

Fig. 3 System reliability analysis model

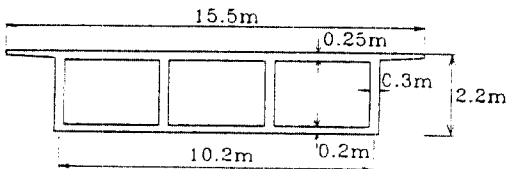


Fig. 4 Cross section

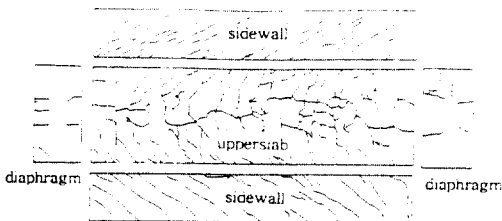


Fig. 5 Crack sketch

Table 2 Rating data of sumjin bridge

Type	Continuous R.C. Box girder with 3 span+ Continuous Steel Box-girder with 4 span+ Continuous R.C. Box girder with 3 span (3@34 + 4@54 + 3@34)
Design load	DB 24
Web space	3.4m
σ_{ck}	180kg/cm ²
E_c	150000kg/cm ²
σ_y	4000kg/cm ²
E_s	2040000kg/cm ²
$\sigma_{test} / \sigma_{cal}$	0.77
i	0.23
D_i	0.70

이때 손상계수는 휨에 대한 것으로서 구조물의 강성이 고유진동수의 자승에 비례한다는 것에 착안하여 다음과 같이 구하였다.

$$D_F = \frac{f_D^2}{f_1^2}$$

여기서, f_D = 손상구조물의 고유진동수

f_1 = 무손상구조물의 고유진동수

5.1.2 신뢰성 해석

(1) 시스템 모델링

기설교량의 신뢰성평가는 대부분의 경우 여러 가지 불확실량, 신뢰성 해석 및 수치해석에 관련된 오차 등으로 인하여 매우 어려운 문제이기 때문에 신뢰성 모델링은 교량의 안전도를 평가하기 위한 근사적이면서도 실용적인 방법으로 개발되는 것이 바람직하다. 가로보, 보강재, 격벽 그리고 상판 등을 포함하는 교차의 여유성을 가지는 교량의 상부구조는 어느 한개의 요소 및 부재가 파괴된다하더라도 전체 시스템이 파괴되는 경우는 극히 드물며, 따라서 교량의 시스템 파괴확률은 분명히 요소 파괴확률과는 다르게 된다.

기설교량 상부구조의 시스템파괴는 시스템 한계상태로서 정의될 수 있는데 이때 시스템파괴 또는 시스템저항은 이론이나 실제적인 방법에 기초하여 다양하게 표현할 수 있다.

본 논문에서는 RC 박스거더교의 상부구조 시스템모델링을 주요파괴기구에 기초한 FMA(Failure Mode Approach)로부터 얻어진 직-병렬 혼합모델로서 정식화하였다. 즉 휨파괴모드의 경우,

Fig. 1에서 보는 바와 같이, 각 거더의 시스템파괴 상태는 상판과 격벽의 효과를 고려하거나 고려하지 않은 상태에서 주요거더의 붕괴기구로서 가정하였으며, 전단파괴모드의 경우 시스템파괴상태는 지점부 단면에 있어서 웹전체의 전단파괴로서 정의하였다. 또한 요소신뢰성수준에서 각 거더의 하중효과는 RC박스거더교의 격자모텔의 선형탄성해석으로부터 구하였다.

(2) 해석결과

섬진교의 체계신뢰성 해석결과를 요소신뢰성 해석결과와 비교하여 Table 2에 요약하여 나타내었다. 요소신뢰성지수와 체계신뢰성지수를 서로 비교해 보면, 전단강도한계상태의 경우 요소신뢰성지수와 체계신뢰성지수가 각각 1.34와 1.80, 휨의 경우 각각 2.46과 3.00~5.88로서, 예상했던 바와 같이, 요소신뢰성지수와 체계신뢰성지수와는 상당한 차이가 남을 확인할 수 있었다.

Table 3 Reliability of Sumjin bridge

Shear / Bending		Reliability index (β)	
Shear	Initial Failure Element Reliability	1.30	
	Element Reliability	1.34	
	System Reliability	1.80	
Bending	Initial Failure Element Reliability	2.43	
	element reliability	2.46	
	System Reliability	Sys. 1*	3.00
		Sys. 2**	3.11
		Sys. 3***	5.88

더우기, 격벽의 효과를 고려한 파괴기구[* 거더 1개 파괴시 시스템파괴(격벽, 상판 미고려), ** 인접거더 2개 파괴시 시스템파괴(격벽, 상판 미고려), *** 거더 1개 파괴시 시스템파괴(격벽, 상판 고려)]에 기초한 체계신뢰성지수는 system 3의 5.88로서 격벽을 무시한 체계신뢰성모델링(대략 3.0~3.11) 보다 매우 높은 결과를 얻었는데 이는 상판과 격벽이 시스템 안전율에 상당한 기여를 하고 있음을 나타내는 것이다.

5.1.3 내하력평가

본 연구에서는 허용응력법 및 하중저항계수법

에 의한 재래적 또는 개선된 방법으로 내하력평가를 실시하였다. 개선된 하중저항계수법에 의한 내하율 RF와 공용내하력 P_n 의 평가식을 정리하면 다음과 같다.

$$RF = \frac{P_n}{P_L} = \frac{\phi D_F R_n - \gamma_D D_n}{\gamma_L L_n K_S (1+i)} \quad (28)$$

$$P_n = P_L \times RF \quad (29)$$

여기서, R_n =무순상단면의 실강도에 의한 추정공칭강도, D_n =사하중 모멘트, L_n =설계활하중 모멘트, P_L =평가하중, D_F =손상계수, K_S =응답비, i =충격계수를 나타낸다.

이때, ϕ , γ_D , γ_L 등은 저항 및 하중관련 안전도수들로서 본 과업에서는 실용성을 고려하여 현행 도로교시방서의 안전규정에 따라 $\phi_f=0.85$, $\phi_v=0.70$, $\gamma_D=1.3$, $\gamma_L=2.15$ 를 그대로 사용하였다.

한편 전술한 통상적인 내하력평가 방법 이외에 최근에 구조물의 실안전도 평가에 합리적이고 실제적인 방법으로 평가받고 있는 신뢰성지수 β 및 공칭안전율 n' 에 의한 안전도평가도 아울러 수행하였다. 신뢰성지수 β 의 해석알고리즘은 저항 및 하중변수의 확률분포형을 그대로 해석에 포함시킬 수 있는 등가 정규분포변환법을 사용하였다. 또한, 신뢰성지수 β 를 이용하여 구조물의 실제적인 공칭안전율 n' 는 다음과 같이 유도된다.

$$n' = \frac{R'}{S} = \frac{\eta_S}{\eta_R} \exp[\beta \sqrt{V_R^2 + V_S^2}] \quad (30)$$

여기서, η_R , η_S : 각각 저항과 하중의 평균공칭비, V_R , V_S : 각각 저항과 하중의 변동계수이다.

우선 대상교량의 요소수준에 대한 저항강도 평가결과를 Table 4에 정리하였다. 재래적인 WSR에 의한 내하력 평가결과, 휨강도한계상태의 경우 RF가 -0.49로서 신뢰성에 기초한 LRFR (RF=0.85)이나 재래적인 LFR 방법(RF=1.31) 보다 다소 낮은 결과를 나타내고 있다.

Table 5에서는 등가시스템저항강도 평가개념의 검증을 위하여 이를 요소의 내하력평가에 적용한 등가요소저항강도 및 LRFR 내하력 평가결과를 비교, 정리하였다. Table에서 보는 바와 같이,

Table 4 Capacity rating at element level

Codified Capacity Rating		Bending		Shear	
		$P_{ne}(t)$	RF	$P_{ne}(t)$	RF
LRFR	SLR	36.7	0.85		-0.10
	MOR	59.2	1.37		
WSR			-0.49		
LFR (AASHTO)	IR*	56.6	1.31	40.6	0.94
	OR**	94.2	2.18	67.8	1.57

* Inventory Rating
 ** Operating Rating

SLR에 대해 LRFR과 등가요소저항강도가 각각 RF가 0.85, 0.68로서 두 평가방법에 의한 결과가 거의 유사함을 알 수 있는데 이는 본 논문에서 제안한 등가저항강도 평가방법이 매우 합리적임을 나타내는 것이다.

Table 6에는 등가 요소/시스템 저항강도 평가 결과를 제시하였다. Table에서 보는 바와 같이, SLR에 대해 등가 요소/시스템 저항강도 평가방법에 의한 결과가 각각 RF가 0.68, 1.00으로서 두 평가방법에 의한 결과가 상당히 다를 수 있는데 이는 대상교량과 같이 교차의 여유성을 가지는 RC 박스기터교의 경우에는 시스템수준에서 평가된 교량의 보유저항강도가 요소수준에서 평가된 것보다는 상당히 차이가 있음을 의미하는 것이다.

이러한 비교 고찰을 통해서, 교차의 여유성을 가지는 교량에 대해서는 시스템 수준으로 평가된 교량의 저항강도가 요소수준에서 평가된 것과는 분명히 다르며 따라서 본 논문에서 새로이 제안하고 있는 체계신뢰성에 기초하여 유도한 등가시스템저항강도 평가방법이 기설교량의 실제적인 시스템 여유성과 보유내하력의 평가에 성공적으로 적용할 수 있는 매우 합리적인 방법임을 알 수 있다.

Table 5 Codified(LRFR) vs. Equivalent element strength

Codified /Equivalent element strength		Bending		Shear	
		P_{ne} , P_{ns}	RF	P_{ne} , P_{ns}	RF
Codified (LRFR)	SLR	36.7	0.85		-0.10
	MOR	59.2	1.37		
Equivalent element strength	SLR	29.3	0.68	4.9	0.11
	MOR	41.1	0.97	9.5	0.22

Table 6 Equivalent element/ system strength

Equivalent element /system resistance		Sunmjin Brg. (R.C. box)				
		Bending		Shear		
		P_{ne} , P_{ns}	RF	P_{ne} , P_{ns}	RF	
Element reliabilitybased	SLR	29.3	0.68	4.9	0.11	
	MOR	41.1	0.97	9.5	0.22	
System reliabilitybased		SLR	43.2	1.00	16.1	0.37
		MOR	85.7	1.98	24.3	0.56

5.1.4 시스템여용성

체계신뢰성에 기초한 시스템 여유성 및 교량의 보유안전율/저항강도의 평가결과를 Table 7에 정리하였다. 확률적 및 확정적 시스템 여유성 및 보유안전율/저항강도에 있어서 PSReF/PSRF, DSReF/DSRF가 각각 1.21~2.98의 넓은 범위에 걸쳐 나타났다. 이것은 상판, 가로보, 격벽 그리고 기타 2차부재 등이 시스템 여유성에 상당히 기여하고 있음을 분명히 보여주는 결과이다. 그러므로 본 논문의 적용교량과 같이 교차의 여유성을 가지는 교량에 대해서는 실보유안전율 및 내하력을 평가하는데 있어 체계신뢰성에 기초한 방법이 필수적임을 나타내는 것이다.

Table 7 System redundancy & reserve safety/ strength

System redundancy / reserve safety /strength	Definition	Bending	Shear
PSRF	β_s / β_1	1.23	1.38
PSReF	β_s / β_e	1.21	1.34
DSRF	P_{ns} / P_{tu}	2.98	2.57
DSReF	P_{ns} / P_{uc}	2.99	2.56

5.2 단순교

5.2.1 대상교량

대상교량은 전라남도 화순군 남면에 소재하고 있는 사수2교로서 1989년에 준공된 총연장 230m의 5경간 교량이다. 중앙 3경간의 상부구조 형식은 연속 PC박스기터, 양쪽 1경간씩은 단순 RC박스기터로 구성되어 있으며, 현재 RC박스기터 구간이 상·하부 슬래브 및 복부 전면에 걸쳐 전단 및 휨 균열이 심하게 발생되어 있는 상태이다.

사수2교의 일반도 및 단면제원은 Fig 6에 나타내었으며 일반사항 및 내하력평가 자료를 실측대

이타를 기준으로 Table 8에 정리하였다.

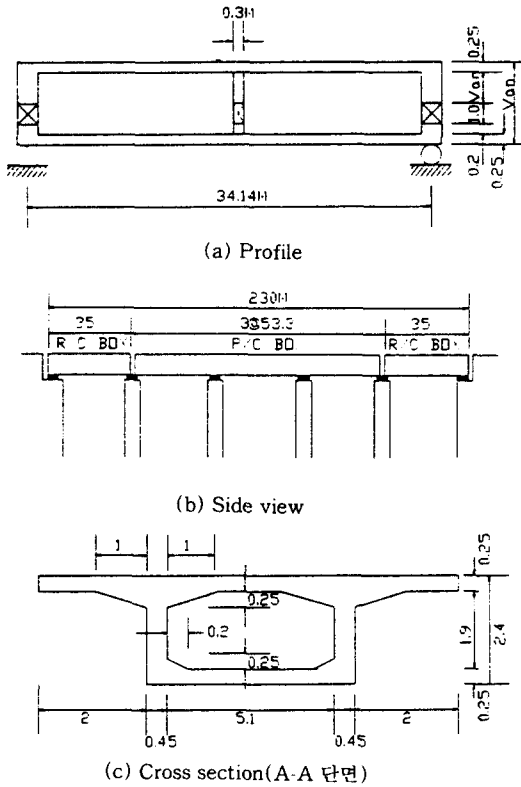


Fig. 6 Sasu 2nd bridge

Table 8 Rating data of Sasu 2nd bridge

Type	Simple R.C. Box girder+ Continuous P.C. Box girder with 3 span+Simple R.C. Box girder (35m+3@53.+35m)	
Design load	DB-24	
σ_{ck}	270kg/cm ²	
E_c	246475kg/cm ²	
σ_y	3600kg/cm ²	
E_s	2040000kg/cm ²	
$\sigma_{test}/\sigma_{cal}$	0.95	
k	moment	0.82
	shear	1.0
i	measure	0.305
	code	0.30
D_F	moment	0.74
	shear	0.8

사수2교의 손상계수의 추정은 휨에 대하여는 휨

전교와 같은 방법으로 구하였으며 전단에 대해서는 박스의 복부에 전단균열이 심각하기 때문에 근사적으로 전단철근에 의해서만 전단력이 부담된다고 가정하여 다음과 같은 식으로 구하였다.

$$D_F = \frac{S_s}{S_n} \quad (31)$$

여기서, S_s =전단철근만의 전단강도, S_n =전단면 유효 전단강도이다.

5.2.2 신뢰성해석

사수2교에 대한 신뢰성지수 β 의 해석알고리즘은 AFOSM을 사용하여 구하였으며 다음과 같다.

Table 9 Results of reliability analysis & safety assessment

Safety assessment	bending		shear	
	Reserve	Required	Reserve	Required
reliability index β	3.13	3.0	1.75	3.5
nominal safety factor n'	1.82	1.75	1.67	2.2

5.2.3 내하력평가

Table 10, 11에는 정·동적 재하시험을 통하여 획득한 손상계수, 응답비, 충격계수의 값을 정리하였으며 Table 3, 4에는 내하력 및 안전도평가 결과를 정리하였다.

하중저항계수법에 의한 평가결과를 살펴보면 재래적 방법에서는 휨에 대하여 $RF=0.72$, 전단에 대하여 $RF=0.53$ 정도로 평가되고 있으나 개선된 방법에서는 휨에 대하여 $RF=1.0$, 전단에 대하여 $RF=0.39$ 로서 전자에 비해서 휨에 대해서는 다소 크고 전단에 대해서는 다소 작게 평가되고 있음을 알 수 있다. 이는 현재의 균열상황을 살펴보면 중앙부 복부하단에는 미세 휨균열이 발달해 있기는 하나 아직 휨 내하력은 충분히 보유하고 있는 상태인 반면, 전단균열은 폭 0.5mm 정도로서 복부전체에 걸쳐 발달되어 콘크리트의 전단강도는 완전히 상실되어 있는 상태로서 전단철근만에 의해서 전단강도가 유지되고 있는 상태인 점을

감안할 때, 개선된 방법에 의한 평가결과가 실상황에 좀더 부합되는 결과를 주고 있는 것으로 사료된다.

한편 안전도평가 결과를 살펴보면 휨에 대하여, $n'=1.82$ 로서 현행 도로교시방서⁽¹⁵⁾에서 제시하고 있는 목표신뢰성지수 β_0 와 공칭안전율 n_0' 를 조금씩 상회하므로써 휨에 대해서는 어느정도 안전도를 보유하고 있는 것으로 판단된다. 반면에 전단에 대한 안전도평가 결과를 살펴보면 β 와 n' 모두 β_0 및 n_0' 에 훨씬 못미침으로서 현재 안전상의 심각한 문제를 내포하고 있는 것으로 판단된다.

Table 10 Traditional capacity rating

Method	Bending		Shear	
	RF	$P_n(t)$	RF	$P_n(t)$
WSR	0.89	38.4	0.48	18.1
LRFR	0.72	31.1	0.53	22.9

Table 11 Advanced capacity rating

Method	Advanced			
	Bending		Shear	
	RF	$P_n(t)$	RF	$P_n(t)$
WSR	0.3	12.96	0.08	3.5
LRFR	1.0	43.2	0.39	16.8

6. 결 론

본 논문의 연구결과로 부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 본 논문에서는 기설 R.C. 박스거더교에 대해 휨과 전단을 모두 고려할 수 있는 실용적인 체계신뢰성 해석모형과 해석기법 그리고 체계신뢰성에 기초한 안전도 및 내하력 평가방법을 제안하였다.

2. R.C. 박스거더교에 있어서 상판 및 격벽 등으로 인한 높은 여유성으로 인해 체계신뢰성지수와 요소신뢰성지수 사이에는 상당한 차이가 남을 확인할 수 있었으며, 따라서 기설 R.C. 박스거더교의 실제적인 시스템 안전율 및 시스템 내하력평가에 이러한 여유성에 대한 고려가 매우 중요함을 알 수 있었다.

3. 본 논문에서 제안한 체계신뢰성에 기초한 내하력 평가방법은 노후손상된 R.C. 박스거더교량

의 보수 및 복구, 유지관리에 대한 최적의 결정사항을 위한 실제적인 내하력평가에 있어 매우 효율적으로 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단의 공모과제 연구비지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Ang, A. H-S. and Bennett, R. M.(1986). "Formulations of Structural System Reliability." Jour. of structural Eng., ASCE, Vol. 112, No. 11, Nov., pp. 1135-1151.
2. Ang, A. H-S. and Cho, H. N.(1989). "Reliability Assessment and Reliability Based Rating of Existing Road Bridges." 5th International Conference on Structural Safety and Reliability(ICOSSAR '89), San Francisco, Calif., USA, pp. 2235-2238.
3. Cho, H. N., Lee, S. J. and Kang, K. K. (1992). "Assessment of System Reliability and Capacity-Rating of Composite Steel Box-Girder Highway Bridges." 2nd Japan-Korea Joint Seminar on Steel Bridges, Tokyo, Japan, July 20-21, pp. 243-254.
4. Cho, H. N. and Kim, I. S.(1991), "Importance Sampling Technique for the Practical System Reliability Analysis of Bridge." Proceedings of the US-Korea- Japan Trilateral Seminar, Honolulu, pp. 87-100.
5. Ellingwood, B., Galambos, T. V., MacGregor, J. C. and Cornell, C. A. (1980). "Development of a Probability-Based Load Criterion for the American National Standard A58," National Bureau of Standard SP-577, Washington D. C.
6. Frangopol, D. M. and Curley, J. P.(1987). "Effects of Damage and Redundancy on Structural Reliability," Jour. of Structural

- Eng., ASCE, Vol. 113, No. 7, July, pp. 1533-1549.
7. Frangopol, D. M. and Nakib, R.(1989). "Redundancy Evaluation of Steel Girder Bridges." 5th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR '89), San Francisco, Calif., USA, pp. 2172-2178.
 8. Kritzler, R. W. and Mohammadi(1992). "Probabilistic Evaluation of Redundancy of Bridge Structures." 6th ASCE Specialty Conf. on Probabilistic Mechanics and Structural and Geotechnical Reliability, Denver, Colorado, July 8-10, pp. 156-159.
 9. Melchers, R. E.(1989). "Importance Sampling in Structural System." Structural Safety, Vol. 7, pp. 247-254.
 10. Moses, F.(1982). "System Reliability Developments in Structural Engineering." Structural Safety, Vol. 1, pp. 3-13.
 11. Moses, F. and Fu, G.(1989). "Probabilistic Concepts of Redundancy and Damage Tolerability." 5th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR '89), San Francisco, Calif., USA, pp. 967-974.
 12. Nowak, A. S. and Tabsh, S. W.(1991). "Reliability of Highway Girder Bridge." Jour. of Structural Eng., ASCE, Vol. 117, No. 8, pp. 2372-2388
 13. Shin, J. C., Cho, H-N. and Chang, D. I. (1989). "A Practical Reliability-Based Capacity Rating of Existing Road Bridges." Jour. of Structural Eng., JSCE, Vol. 5, No. 2, pp. 245-254.
 14. 대한토목학회, "사수2교(RC 상자형 구간) 구조 안전진단", 1993, 12.
 15. 건설부, "도로교표준시방서", 1992.

(접수일자 : 1995. 4. 28)