

체계신뢰성방법에 기초한 강사장교의 내하력평가

System Reliability-Based Load-Carrying Capacity Evaluation of Steel Cable-Stayed Bridges

조 효 남*
Cho, Hyo-Nam

임 종 권**
Lim, Jong-Kwon

박 경 훈***
Park, Kyung-Hoon

요 지

본 논문은 교통하중에 대한 강사장교의 체계신뢰성에 기초한 체계적이며 실용적인 내하력평가 및 여유성평가 모형을 제안하였다. 교량 주형과 주탑의 조합상관 한계상태에 기초한 내하력평가를 위하여 개선된 조합상관식에 기초한 LRFR(Load and Resistance Factor Rating) 방법과 신뢰성에 기초한 시스템수준의 평가를 위해서 복표체계신뢰성지수의 향으로 표현되는 등가시스템저항강도에 의한 접근방법을 제안하였다. 또한 시스템의 여유성을 정의하기 위해서 체계신뢰성해석의 결과와 내하력평가 결과를 이용한 실제적인 시스템여유성 평가방법을 제안하였다. 제안된 방법의 타당성을 고찰하기 위하여 강사장교인 진도대교의 내하력 및 여유성평가에 적용하였다. 제안한 체계신뢰성에 기초한 평가방법은 기존의 요소신뢰성 방법에 비해 구조물의 여유성을 충분히 반영하는 상당히 합리적이며 실제적인 결과를 보여주는 실용적인 방법으로 판단된다.

핵심용어 : 사장교, 체계신뢰성, 내하력, 여유성

Abstract

This paper is intended to propose the models for system reliability-based load-carrying capacity and redundancy evaluation of steel cable-stayed bridges under vehicle traffic loads. An improved interaction LRFR (Load and Resistance Factor Rating) formula is suggested for the capacity rating of the bridge deck and pylons which are exposed both the compressive loads and the bending moments. And a systematic procedure is suggested for the evaluation of reliability-based system load-carrying capacity in terms of the equivalent bridge strength corresponding to some desirable target system reliability. For the evaluation of the system redundancy, the new practical definition for a system redundancy evaluation based on the results of system reliability analysis and system reliability-based load-carrying capacity evaluation is proposed. To demonstrate their rationality and applicability, the proposed models and approaches are applied to Jindo Bridge which is one of the major steel cable-stayed bridges in Korea. Based on the comparisons of the analysis results at the system level with those at the element level, the proposed system reliability method sufficiently reflects the system redundancy of the bridges and shows real reserve safety of the bridges.

Keywords : cable-stayed bridges, system reliability, load-carrying capacity, redundancy

* 정회원·한양대학교 토목환경공학과, 교수

** 학생회원·한양대학교 토목공학과, 박사후요

*** 학생회원·한양대학교 토목환경공학과, 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 1999년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1999년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 일련의 시공 및 공용간 교량 붕괴사고로 인하여 구조물 유지관리에 대한 인식과 중요성이 어느 때보다 높아지고 있다. 공용중인 교량뿐만 아니라 최근 시공중이거나 계획중인 사장교나 현수교와 같은 장대교량의 체계적인 유지관리를 위해서도 장대교량의 안전도 및 내하력에 대한 체계적인 분석평가기법이 요구된다. 특히 최근들어 중장대교량의 모니터링시스템 도입에 대한 연구 개발 노력이 활발히 이루어지고 있으며 이러한 시스템의 핵심 알고리즘으로서도 체계적인 안전도 및 내하력에 대한 분석평가기법이 필요하다. 본 논문은 체계신뢰성방법에 의한 사장교의 실용적인 내하력평가기법에 대해 주로 다루었으며 안전도평가기법에 대해서는 동반논문⁶⁾에서 제시하였다.

교량의 유지관리 및 보수보강에 대한 최적의 판단은 안전 및 경제적인 측면에서 뿐만 아니라 정치, 사회적인 측면에서도 매우 중요한 의사결정의 과정이며, 교량의 안전도 및 내하력평가는 유지보수대책의 수립을 위한 판단의 중요한 근거가 되는 유지관리체계의 핵심 분야이다. 이러한 교량의 안전도 및 내하력의 분석 및 평가를 위해서 신뢰성이론, 손상평가기법과 SI(System Identification), 인공신경망(Artificial Neural Network; ANN) 기법 등 다양한 방법의 적용이 시도되고 있으며 관련연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 그러나 아직 사장교와 같이 여유성이 높은 장대교량에 대한 실용적인 내하력평가기법은 찾아보기 힘들다. 본 연구에서는 이러한 방법 중 현재 실용적으로 적용 가능한 신뢰성방법에 의해 강사장교의 내하력평가기법을 제안하고자 하였다.

이를 위해 기존의 내하력평가방법에 대한 고찰과 LRFR(Load and Resistance Factor Rating) 규준식에 의한 내하력평가방법, 신뢰성지수의 FOSM(First Order Second Moment) 형태에서 유도된 등가내하력평가방법을 제시하였다. 또한 신뢰성지수를 이용한 확률적 시스템여용성 및 보

유안전도 평가방법과, 등가내하력을 이용한 실용적인 확정적 시스템여용성 및 보유강도의 평가방법에 대하여 고찰하였다.

제안된 강사장교의 내하력평가 및 여용성평가 방법의 적용을 위한 대상으로 진도대교를 선정하여 수치해석을 수행하였다.

2. 기존 내하력평가방법

교량의 내하력 분석 및 평가기법은 시대에 따른 구조물의 설계개념에 따라 변화되어 왔다. 최근 국내의 내하력평가방법은 재래적 허용응력법과 강도설계법을 혼용해서 사용하고 있고, 실제 내하력 평가기준이 되는 저항 및 하중계수는 반경험적으로 결정된 수치를 사용하고 있는 실정이다. 현재 선진국의 추세는 한계상태(하중-저항계수)설계 시방서로의 전환에 따라 교량의 내하력 평가도 한계상태 내하력에 기초를 두고 재래적인 방법 또는 확률적인 신뢰성방법에 의한 분석이 이루어지고 있다^{8), 20)}.

강교량의 내하력평가 기준식으로서의 재래적인 허용응력판정법은 일본에서 주로 강트러스교, 강관형교 등을 대상으로한 연구결과를 토대로 개발되었으며, 국내에서 최근까지 가장 보편적으로 사용되어 왔다. 미국 등 선진국의 경우 자국 교량에 대한 방대한 조사를 바탕으로 얻어진 통계 자료를 활용하여 외관조사와 신뢰성방법에 의한 구조해석만으로 거의 모든 교량의 내하력을 평가할 수 있는 방법을 개발하여 활용하고 있다⁸⁾.

최근 국내에서는 저차¹¹⁾에 의해 다양한 내하력 판정방법이 제안되어 왔다. 특히 강교량의 경우 허용응력판정법(Working Stress Rating; WSR)을 보다 합리적으로 개선한 허용응력판정법(Advanced WSR; AWSR), 조합하중의 효과를 고려할 수 있는 도로교표준시방서¹¹⁾의 허용응력 설계로부터 유도된 조합응력 판정법(Allowable stress-based Combined Stress Rating; ACSR) 및 한계상태에 기초한 조합응력판정법(Limit state-based Combined Stress Rating; LCSR) 등을 제안한 바 있다.

3. LRFR 규준식에 의한 내하력평가

구조물의 안전도는 확률·통계적인 방법에 기초하여 구조저항 및 하중관련 제반 불확실량을 합리적으로 추정하고 확률적인 개념과 방법에 따라 도출하여야 한다. 그러나 허용응력법에 기초를 두어온 기존의 내하력평가방법은 강도 및 하중의 불확실성에 대한 정보, 교량의 노후손상이나 실제적 구조거동 또는 여유성을 제대로 반영하지 못하기 때문에 이러한 방법으로 평가된 공칭하중이나 보유내하력은 노후손상된 교량의 실보유 내하력으로 간주하기 어렵다.

따라서 휨과 압축에 의한 조합하중의 영향은 기존의 휨 또는 전단 등 단일 파손모드에 대한 내하력평가방법에 의해서는 평가할 수 없으므로 사장교의 주탑 또는 주형 등과 같이 휨 뿐만 아니라 큰 축력을 받는 요소에 대한 엄밀한 내하력 평가를 위해서 축력과 휨의 조합하중의 영향을 고려한 AASHTO LRFD시방서⁷⁾와 도로교표준시방서¹⁾ 하중저항계수설계편의 조합상관식을 바탕으로 개선된 LRFR(improved Load and Resistance Factor Rating) 규준을 식(1)과 같이 제시하였다.

$P_n \geq 0.2\phi_c' P_n$ 일 경우

$$\frac{\gamma_d' P_d + \gamma_i' P_i K_{sc}(1+i)RF}{\phi_c' D_{Fc} P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{\gamma_d' M_d + \gamma_i' M_i K_{sb}(1+i)RF}{\phi_b' D_{Fb} M_n} \right) = 1 \quad (1a)$$

$P_n < 0.2\phi_c' P_n$ 일 경우

$$\frac{\gamma_d' P_d + \gamma_i' P_i K_{sc}(1+i)RF}{2\phi_c' D_{Fc} P_n} + \left(\frac{\gamma_d' M_d + \gamma_i' M_i K_{sb}(1+i)RF}{\phi_b' D_{Fb} M_n} \right) = 1 \quad (1b)$$

여기서, P_d , P_i =각각 사하중과 활하중효과로 인한 공칭압축력; P_{cr} =압축좌굴강도; M_d , M_i =

각각 사하중과 활하중효과로 인한 공칭휨모멘트; M_n =공칭휨강도; ϕ_c' , ϕ_b' =각각 압축과 휨에 대한 강도감소계수; γ_d' , γ_i' =각각 사하중과 활하중계수; K_{sc} , K_{sb} =각각 압축과 휨에 대한 응답비; i =활하중 충격계수; D_{Fc} , D_{Fb} =각각 압축과 휨에 대한 노후손상계수; RF (Rating Factor)=공용내하율= P_n/P_i 이며, P_i 와 P_n 는 각각 내하력과 공칭강도를 나타내며, RF 는 식(1a)와(1b)를 RF 에 대해 풀면 쉽게 결정할 수 있다.

한편, 안전계수 ϕ_c' , ϕ_b' , γ_d' , γ_i' 는 신뢰성이론에 근거하여 현행시방서의 안전수준을 점검한 후 공학적 판단하에 구조형식별로 보정(calibration)을 실시하여 결정되어야 한다. 그러나 휨이나 전단 등과 같이 단일 파괴모드에 대한 안전계수의 보정은 국내외적으로 어느 정도 수행되어 관련자료^{2), 16), 21)}가 있으나 조합하중을 받는 경우에 대한 연구는 거의 없는 실정이므로 본 논문에서는 사장교의 하중 및 저항관련 안전계수를 실용적으로 도로교표준시방서의 설계시 적용하고 있는 계수를 그대로 적용하였다. 향후 이 분야에 대한 연구결과가 축적되면 보다 개선된 안전계수를 사용할 수 있으리라 판단된다.

4. 신뢰성에 기초한 등가내하력평가

한 시스템으로서 노후화된 사장교의 보유내하력을 정확하게 예측하는 것은 구조물이 높은 여유성을 가지고 있고 상당히 열화 또는 노후손상되었을 경우 매우 어려운 문제이다. 본 논문에서는 사장교의 실제 보유내하력의 측정을 위하여 목표신뢰성에 대응하는 체계신뢰성의 개념적 FOSM형태의 적합곡선으로부터 유도된 등가시스템강도의 형태로 표현한 실용적이고 합리적인 접근방법을 제시하였다.

4.1 요소수준의 등가내하력평가

한계상태함수가 양함수(explicit function)의 형태, 즉 $g(\cdot) = R - \sum Q$ 의 형태로 표현되는 경우, 저항변수 R 과 하중효과변수 Q 에 대한 1, 2차 모멘트를 사용하여 유지관리를 위한 목표신

뢰성지수 β_0 에 대응하는 등가내하력 P_n 은 ln-ln 모델의 FOSM형태로부터 해석적으로 구할 수 있다¹³⁾. 반면에 한계상태함수가 음함수(implicit function)형태인 경우에는 R과 Q가 분리된 항으로 표현되지 않기 때문에 해석적인 방법으로는 등가내하력 P_n 을 유도할 수 없게 된다. 따라서 이와 같은 경우에 등가내하력 P_n 을 구하기 위해 FOSM모형의 적합곡선(fitting curve)으로부터 등가내하력 P_n 을 직접 구하는 방법이 본 논문의 저자에 의해 제안되어 강사장교¹³⁾, 항만구조물¹⁵⁾ 등의 내하력평가에 성공적으로 적용된 바 있다.

그림 1에는 한계상태함수가 음함수로 표현되는 경우에 등가내하력 P_n 을 추정하는 절차를 나타내었고, 구체적인 계산절차는 요소수준의 등가내하력 P_{ns} 와 시스템수준의 등가내하력 P_n 가 개념적으로 동일하기 때문에 여기서는 시스템수준의 등가내하력평가에 대해서만 기술하였다.

4.2 시스템수준의 등가내하력평가

등가내하력 평가방법은 요소수준에서는 단일 파괴모드가 아닌 조합상관식으로 검토해야 하는 구조요소나 시스템수준에서의 내하력평가에 더욱더 효과적으로 사용될 수 있다. 본 논문에서는

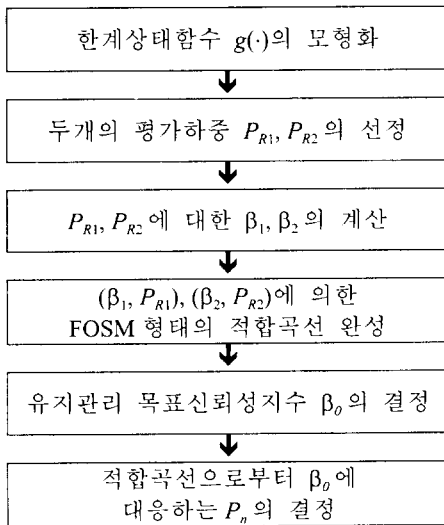


그림 1 등가내하력 P_n 의 추정절차

시스템으로서 사장교의 실제내하력의 평가를 위해 실질적이고 합리적인 접근방법을 제시하였다.

체계신뢰성지수 β_n 는 개념적으로 2차모멘트 신뢰성방법의 FOSM 형태인 ln-ln모형으로 식(2)와 같이 표현될 수 있다.

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

여기서, \bar{R}_s =시스템 평균공칭저항; \bar{Q}_s =시스템 평균하중효과; Ω_{R_s} , Ω_{Q_s} =각각 시스템 저항과 하중효과의 변동계수이며, 평균 시스템하중효과 \bar{Q}_s 는 시스템 평균 사하중과 활하중의 효과로 표현될 수 있다. 즉, $\bar{Q}_s = \bar{c}_{L_s} P_{ns} + \bar{c}_{D_s} D_n$ 이며 여기서 \bar{c}_{L_s} , \bar{c}_{D_s} 는 각각 단위시스템 평균 사하중과 활하중효과이고 D_n 는 공칭사하중효과이다.

식(2)를 \bar{Q}_s 에 대하여 풀면 식(3)과 같다.

$$\bar{Q}_s = \bar{R}_s \text{EXP}(-\beta_n \sqrt{\Omega_{R_s}^2 + \Omega_{Q_s}^2}) \quad (3)$$

한편 \bar{Q}_s 는 시스템 평균하중효과로서 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{Q}_s &= \bar{S}_{D_s} + \bar{S}_{L_s}(1+i) \\ &= c_{D_s} D_n \eta_D + c_{L_s} P_{ns} \eta_L (1+i) \end{aligned} \quad (4)$$

식(3)과 식(4)를 등치시키면 시스템수준에서의 등가내하력 P_{ns} 를 다음 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{ns} &= \frac{1}{c_{L_s} \eta_L (1+i)} [\bar{R}_s \text{EXP}(-\beta_n \sqrt{\Omega_{R_s}^2 + \Omega_{Q_s}^2}) - c_{D_s} D_n \eta_D] \\ &= \frac{1}{c_{L_s} \eta_L (1+i)} \bar{R}_s \text{EXP}(-\beta_n \sqrt{\Omega_{R_s}^2 + \Omega_{Q_s}^2}) \\ &\quad - \frac{c_{D_s} \eta_D}{c_{L_s} \eta_L} \frac{D_n}{(1+i)} \\ &= Z_m \text{EXP}(-\beta_n \Omega_s) - \eta_D D_n \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, Z_m =개념적으로 평균저항안전율(\bar{R}_s/\bar{c}_{L_s})을 나타내는 모수; Ω_s =시스템 불확실량(=

$\sqrt{\Omega_{R1}^2 + \Omega_{Dn}^2}$ 을 개념적으로 내포하고 있는 모수 ; $\eta_s = \bar{C}_{Dn} / \bar{C}_{Ls}$ = 단위시스템 평균사하중과 활하중효과를 나타낸다.

따라서 미지의 매개변수 Z_m 과 Ω_s 는 2개의 기지의 내하력 점 (P_{R1}, β_{s1}) , (P_{R2}, β_{s2}) 을 식(5)에 대입함으로써 구할 수 있다. 여기서, 신뢰성지수 β_{s1} 와 β_{s2} 는 각각 상한치와 하한치를 갖는 기준평가하중 P_{R1} 과 P_{R2} 에 의해서 얻어질 수 있다. 따라서 식(5)는 식(6)과 같이 표현된다.

$$P_{R1} = Z_m EXP(-\Omega_s \beta_{s1}) - \eta_s D_n \tag{6a}$$

$$P_{R2} = Z_m EXP(-\Omega_s \beta_{s2}) - \eta_s D_n \tag{6b}$$

그림 2에는 P_{ns} 와 β_s 사이의 관계가 지수함수 형태로 표현되는 것을 개념적으로 나타내고 있다.

식(6a)와 식(6b)를 식(5)에 대입하여 매개변수 Z_m 과 Ω_s 를 유도하여 정리하면 식(7), (8)과 같은 형태로 표현될 수 있다.

$$Z_m = \left[\frac{(P_{R2} + \eta_s D_n)^{\beta_{s1}}}{(P_{R1} + \eta_s D_n)^{\beta_{s2}}} \right]^{\frac{1}{\Delta\beta}} \tag{7}$$

$$\Omega_s = -\frac{1}{\Delta\beta} \ln \left(\frac{P_{R1} + \eta_s D_n}{P_{R2} + \eta_s D_n} \right) \tag{8}$$

여기서, $\Delta\beta = \beta_{s1} - \beta_{s2}$ 이다.

마지막으로, 식(7)과 식(8)을 식(5)에 대입하면 P_{ns} 는 식(9)와 같이 유도된다.

$$P_{ns} = \frac{(P_{R2} + \eta_s D_n)^{\beta_{s1} / \Delta\beta}}{(P_{R1} + \eta_s D_n)^{\beta_{s2} / \Delta\beta}} - \eta_s D_n \tag{9}$$

여기서, P_{ns} = 공칭등가시스템강도 ; P_{R1} , P_{R2} = 각각 임의의 상·하한 평가하중 ; $\Delta\beta_{s1} = \beta_{s1} - \beta_{sv}$; $\Delta\beta_{s2} = \beta_{s2} - \beta_{sv}$ 이며, 이때 β_{s1} , β_{s2} = 각각 두개의 평가하중 P_{R1} , P_{R2} 에 따른 체계신뢰성지수 ; β_{sv} = 시스템에 대한 유지관리 목표신뢰성지수를 나타낸다.

이와 같이 신뢰성지수에 기초한 등가내하력 평가방법은 두개의 평가하중 각각에 대한 신뢰성지수만 구하게 되면 식(9)를 곧바로 적용하거나 그림 2의 그래프에 의한 방법을 사용하여 유지관리 목표신뢰성지수에 대한 교량의 실제적인 보유내하력을 손쉽게 구할 수 있게 되는 새로운 개념의 내하력평가 방법이다. 이 방법은 지금까지 상관식과 같이 규준식에 의해서는 추정할 수 없었던 휨과 압축을 동시에 고려해야 하는 조합상관형식의 단면력에 지배를 받는 경우나 체계신뢰성 문제에 있어서 교량의 시스템 보유내하력평가에 모두 적용할 수 있는 매우 유용한 방법이라고 판단된다.

본 연구에서 제안된 체계신뢰성에 기초한 내하력 및 여유성평가를 위해서는 신뢰성해석이 필요한데, 합리적인 요소신뢰성과 체계신뢰성 해석방법에 의한 해석결과이면 어떠한 결과도 사용 가능하다. 본 논문에서는 본 연구진에 의해 사장교의 효율적인 체계신뢰성해석법을 제안한 본 연구의 동반논문⁶⁾에서 제시된 신뢰성모형과 해석방법을 사용하였다.

4.3 목표신뢰성지수의 설정

요구되는 일정한 신뢰성수준을 얻기 위하여 한계상태에 대한 목표신뢰성수준에 기초한 하중과 저항 변화값의 최적의 선택을 위한 시방서 보정 (code calibration) 절차가 NBS SP-577¹⁰⁾과 같은 몇몇 연구보고서에 설정되어 있다. 시방서 보정의 가장 중요한 단계는 각 한계상태에 대한 적절한 목표신뢰성지수의 선택이다. 본 논문의 목표신뢰성지수는 공용하중내하력평가 (Service Load Rating ; SLR)를 위해서는 3.0, 최대과하중내하

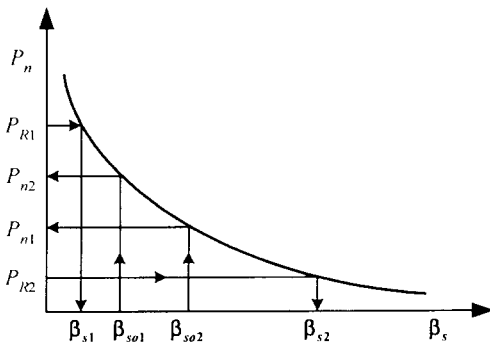


그림 2 P_n 과 β_s 의 관계

력평가(Maximum Overload Rating ; MOR)를 위해서는 2.0을 사용하였다²¹⁾.

이러한 유지관리를 위한 목표신뢰성지수는 일반적인 노후된 중소교량에 적용되어오던 것이다. 사장교와 같은 중요 구조물에 대해서는 설계시에 높은 목표신뢰성수준을 적용하였을 것으로 판단되나, 공용기간이 상당히 경과한 교량에 대한 유지관리를 위한 목표신뢰성지수의 설정이므로 제안된 값을 그대로 사용하였다.

5. 시스템 여유성평가

교량의 파괴는 초기 파괴후 여러가지 불확실한 손상 또는 파괴를 포함하는 다중파괴경로에 의해 발생한다. 따라서 시스템여용성을 정의하기 위해서는 초기파괴후 붕괴에 저항하는 교량의 극한 내하력의 추정을 요구한다. 지금까지 시스템의 여유성 또는 보유안전도의 추정을 위한 정의에 대한 다양한 접근법이 몇몇 연구자들^{17)~19)}에 의해 제안되었다. 이들 연구의 대부분은 구조시스템의 여유성을 신뢰성지수에 대한 비로서 정의하고 있는데 본 논문에서는 체계신뢰성지수로서 표현되는 확률적 시스템여용성과 보유안전도뿐만 아니라 내하력평가 결과를 이용한 확정적 시스템여용성과 보유강도에 대한 새로운 정의를 구조물의 시스템여용성과 보유안전도 및 보유강도의 추정에 적용하였다.

5.1 확률적 시스템여용성 및 보유안전도

본 연구에서는 체계신뢰성지수와 지배적인 파괴경로의 최초파괴요소의 신뢰성평가로부터 얻을 수 있는 초기파괴요소의 신뢰성지수의 비로써 확률적 시스템 여유성계수(*PSRF* ; Probabilistic System Redundancy Factor)를 식(10)과 같이 정의하였다.

$$PSRF = \beta_s / \beta_e \tag{10}$$

또한, 체계신뢰성지수와 요소신뢰성지수의 비로써 확률적 시스템 보유안전도계수(*PSReF* ;

Probabilistic System Reserve Factor)를 식(11)과 같이 정의하였다.

$$PSReF = \beta_s / \beta_e \tag{11}$$

여기서, β_s =체계신뢰성지수 ; β_e =초기파괴요소의 신뢰성지수 ; β_e =요소신뢰성지수를 나타낸다.

5.2 확정적 시스템여용성 및 보유강도

일단 등가시스템강도 P_{ns} 로 표현되는 극한 시스템 내하력이 식(9)로부터 얻어지면 확률적 추정값에 대응하는 시스템여용성과 잔존강도의 확정적 추정은 다음과 같이 정의된다.

확정적 시스템 여유성계수(*DSRF* ; Deterministic System Redundancy Factor)는 극한시스템내하력과 공칭초기파괴내하력의 비로서 식(12)와 같이 정의된다.

$$DSRF = P_{ns} / P_{ne} \tag{12}$$

확정적 시스템 보유안전도계수(*DSReF* ; Deterministic System Reserve Factor)는 극한시스템내하력과 공칭요소내하력의 비로서 식(13)과 같이 정의된다.

$$DSReF = P_{ns} / P_{ne} \tag{13}$$

여기서, P_{ns} =식(9)로부터 얻어지는 체계신뢰성지수에 대응하는 등가시스템강도로 표현되는 극한시스템내하력 ; P_{ne} =요소신뢰성지수에 대응하는 등가요소강도로 표현되는 공칭요소내하력 ; P_{ns} =초기파괴요소의 신뢰성지수에 대응하는 등가초기파괴강도로 표현되는 공칭초기파괴내하력을 나타낸다.

확정적 시스템여용성 및 보유강도와 관계되는 시스템여용성의 추정이 확률적 시스템여용성 및 보유강도보다 실무기술자에게 좀더 친숙할 것이다. 따라서 실제로 사용하는데 좀더 효과적일 것으로 판단된다.

6. 적용에 및 고찰

6.1 적용대상교량

본 논문에서는 제안된 내하력 및 여유성평가를 위한 수치해석의 대상으로 강사장교인 진도대교를 선정하였다. 그림 3에 진도대교의 일반단면을 나타내었으며, 본 연구진에 의해 외관조사, 비파괴시험, 정동적 재하시험 및 내하력평가 등 광범위한 정밀안전진단이 수행된 바 있다⁵⁾.

대상교량은 AASHTO HS20-44 하중으로서 DB-/DL-18 하중과 등가의 하중으로 설계된 교량이지만 현재의 교통상황을 고려하여 1등교 수준인 DL-24 하중에 대해 주로 검토하였고 비교를 위해 DL-18 하중에 대해서도 검토하였다.

적용대상교량에 대한 구조해석 및 신뢰성해석

결과는 본 연구의 동반논문⁶⁾의 결과를 그대로 사용하였으며 신뢰성해석결과는 표 1과 같다.

6.2 내하력평가 및 고찰

표 2에는 본 연구에서 제안한 시방서기준식에 기초한 조합상관식 및 신뢰성에 기초한 내하력평가 결과를 비교하여 제시하였다. 본 논문에서 가장 중점적으로 다루고 있는 체계신뢰성해석에 기초한 등가내하력 평가결과를 요소수준의 결과와 비교해 보면 요소수준에서의 내하율 RF 가 가장 지배적인 단면인 주형지점부에 대하여 각각 1.18, 1.03으로 체계신뢰성해석에 의한 결과인 1.36보다 다소 낮은 결과를 보여주고 있다. 이는 요소수준에서의 평가 결과가 구조물의 시스템 여유성을 반영하지 못하는데 그 이유가 있는 것으로 판단되며, 본 논문의 동반논문⁶⁾에서 볼 수 있는

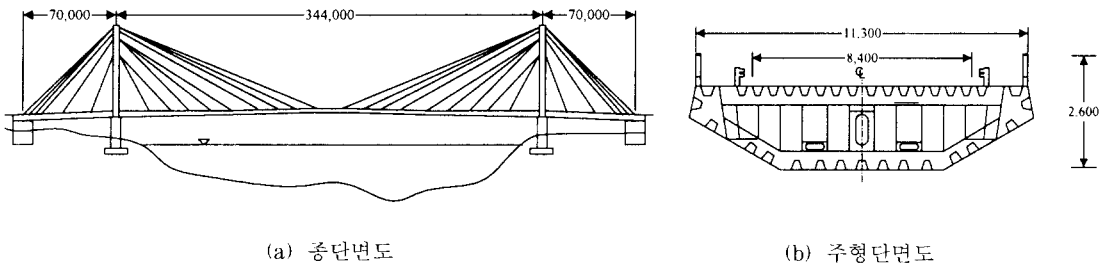


그림 3 대상교량(진도대교)의 단면제원

표 1 신뢰성 해석결과

지배 단면	파괴모드	요소신뢰성지수 β	신뢰성지수		
			요소 β	체계 β	초기 β
주형	중앙부	휨모멘트 + 축력 5.1 (6.1)	3.1* (4.2)	4.5 (5.9)	3.1 (4.2)
	주탑부 지점	휨모멘트 + 축력 3.1 (4.2)			
주탑 하단	휨모멘트 + 축력 6.3 (7.2)				
케이블	축력 6.3 (6.7)				

*는 요소수준에서 가장 지배적인 단면의 해석결과

[주] 제시된 수치는 도로교시방서의 설계 차선하중 DL-24에 의한 값이며, 팔호안의 수치는 DL-18에 의한 값이다.

표 2 내하력평가 결과

항목	요소수준						
	Codified (LRFR)			Non-codified			
	RF		P _{ns}	SLR (β _s =3.0)		MOR (β _{so} =2.0)	
				RF	P _{ns}	RF	P _{ns}
주형	중앙주	1.75 (2.33)	DL-42.0	1.83 (2.44)	DL-43.9	2.44 (3.25)	DL-58.6
주탑	지점부	1.18 (1.58)	DL-28.4	1.03 (1.37)	DL-24.6	1.33 (1.78)	DL-32.0
주탑		2.76 (3.69)	DL-66.4	2.87 (3.83)	DL-68.9	3.95 (5.27)	DL-94.9
항목	시스템수준 (Non-codified)						
전체 시스템	SLR (β _s =3.0) *			MOR (β _{so} =2.0) **			
	RF		P _{ns}	RF		P _{ns}	
	1.36 (1.82)			DL-32.7	1.67 (2.23)		DL-40.1
* SLR=Service Load Rating ** MOR=Maximum Overload Rating [주] 제시된 수치는 도로교시방서의 설계차선하중 DL-24에 의한 값이며, 팔호안의 수치는 DL-18에 의한 값이다.							

신뢰성지수의 추세와도 유사한 결과를 보여준다.

또한 요소수준에서도 조합상관식에 기초한 LRFR 기준식에 의한 내하력평가 결과와 등가 내하력 평가방법에 의한 결과를 서로 비교해 보면 유사한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 구조물의 실제 변수의 불확실성을 고려한 신뢰성 해석에 의해 추정된 β에 대응하는 내하력을 직접 구할 수 있다는 점에서 보다 합리적이고 타당한 방법이라 판단된다. 즉, 주형지점부 및 주탑하단의 경우처럼 조합하중을 받는 경우에는 기존의 기준식에 의하여 내하력을 평가하기는 어렵게 되고 신뢰성평가를 바탕으로 등가내하력 즉, 보유내하력을 산출할 수 있기 때문에, 본 논

문에서 제안하고 있는 등가내하력 평가방법은 축력, 휨+축력 등 지배적 한계상태가 다양한 경우는 물론이고 사장교와 같이 고차의 부정정성으로 인한 구조물의 여유성을 합리적으로 반영하고자 체계신뢰성 기법을 적용하는 경우의 내하력평가기법으로 더욱 효과적으로 사용할 수 있을 것이다.

6. 3 구조 시스템여용성 평가 및 고찰

시스템의 여용성은 적용대상교량에 대한 신뢰성평가 및 내하력평가에 기초하여 추정할 수 있으며, 그 결과를 표 3에 나타내었다. 표 1에서 요소신뢰성지수와 체계신뢰성지수 사이에 존재

표 3 시스템여용성과 보유안전도 및 보유강도

시스템 여용성의 평가	PSRF	PSReF	DSRF	DSReF
시스템 여용성계수	1.45 (1.41)	1.45 (1.41)	1.63	1.63
[주] 제시된 수치는 도로교시방서의 설계차선하중 DL-24에 의한 값이며, 팔호안의 수치는 DL-18에 의한 값이다.				

하는 차이 ($\Delta\beta = \beta - \beta = 1.4$)를 분명하게 관찰할 수 있는 것과 같이, 본 대상구조물은 *PSRF*와 *PSReF*의 경우 1.45, *DSRF*와 *DSReF*의 경우 1.63에 이르는 높은 확률적 그리고 확정적 시스템여용성과 보유안전도 및 보유강도를 가지고 있다는 것이다. 이는 사장교의 안전도와 내하력에 시스템여용성이 상당한 기여를 한다는 것을 명백하게 나타낸다.

이러한 시스템여용성계수가 실제적인 시스템 보유강도를 잘 반영하는 수치척도로서 여용성이 높은 교량의 실제 보유안전도와 보유강도를 추정하기 위해 활용될 수 있다는 것을 보여준다.

7. 결 론

본 논문의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 신뢰성해석에 기초한 등가내하력 평가방법은 목표신뢰성지수에 대한 교량의 실제적인 보유내하력을 손쉽게 구할 수 있는 내하력평가 방법으로서 보유내하력을 해석적으로는 구할 수 없는 경우, 또는 기준식에 의해서는 추정할 수 없는 교량의 내하력평가 문제에 적용할 수 있다.

2) 사장교의 실보유내하력을 추정하기 위해서는 시스템여용성의 평가가 필요하며 이를 위한 합리적이고 실용적인 평가방법을 제안하였다.

3) 본 연구에서 제안한 체계신뢰성해석에 기초한 내하력평가방법은 요소수준과 비교하여 구조물의 여용성을 합리적으로 추정할 수 있는 실용적인 방법으로 강사장교와 같이 높은 여용성을 지닌 교량의 실제 보유내하력의 평가에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문의 연구내용은 한국과학재단 핵심전문연구 [과제번호: 961-1203-011-2]의 연구지원에 의해 수행되었으며, 연구비를 지원하여준 한국과학재단에 진심으로 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, 도로교표준시방서, 1996.
2. 조효남, "체계신뢰성 방법에 기초한 도로교 설계기준 개발 및 시설교량의 신뢰성평가", 871-1301-007-2구조, 한국과학재단, 1989, p. 268.
3. 조효남, "교량상부구조의 실용적인 체계신뢰성 해석기법", 한국학술진흥재단, 1992.
4. 조효남, "대형교량의 유지관리를 위한 계측, 모니터링, 통제시스템 개발", 961-1203-011-2, 한국과학재단, 1998, p.32.
5. 조효남 외, "진도대교 안전진단", 건설부, 1993, p.223.
6. 조효남, 임종권, 박경훈, "체계신뢰성방법에 기초한 강사장교의 안전도평가", 한국전산구조공학회 논문집, 제11권, 제4호, 1998.
7. AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), *LRFD Bridge Design Specifications*, AASHTO, Washington, D.C, 1994.
8. AASHTO, Guide specifications for strength evaluation of existing steel and concrete bridges, AASHTO, Washington, D.C, 1989, p.23.
9. Ang, A. H-S., and Tang, W. H., *Probability concepts in engineering planning and design*: Vol I, II, John Wiley & Sons Inc., New York, 1984.
10. Bennett, R.M., Ang, A.H-S., and Goodpasture, D.W., Probabilistic safety assessment of redundant bridges, *Proc., 4th Int. Conf. on Struct. Safety and Reliability (ICOSSAR '85)*, ASCE, Vol. III, 1985, pp.205~211.
11. Cho, H. N., Bridge reliability experience in Korea, *Proc. of Workshop on Struct. Reliability in Bridge Eng.*, 1996, pp.115~126.
12. Cho, H. N., and Ang, A. H-S., Reliability assessment and reliability-based rating of existing road bridges, *Proc., 5th Int. Conf.*

- on *Struct. Safety and Reliability (ICOSSAR '89)*, ASCE, 1989, pp.2235~2238.
13. Cho, H. N., Lee, S. J., and Kang, K. K., "Assessment of system reliability and capacity-rating of composite steel box-girder highway bridges," *J. Struct. Mech. Earthquake Engrg.*, JSCE, Vol. 495, No. 1-28, 1994, pp.13~20.
 14. Cho, H. N., Lee, S. J., and Lim, J. K., System reliability-based evaluation of bridge system redundancy and strength, *Proc., The 2nd Korea-France Joint Seminar on Computational Mech. in Struc. Engrg.*, KOSEF, 1993, pp.177~186.
 15. Cho, H. N., Lim J. K., and Lee, W. K., Reliability-based safety assessment and berth-capacity rating of aged wharf structures, *Proc., Asian-Pacific Symp. on Struct. Reliability and its Applications(APSSRA 95)*, 1995, pp.140~147.
 16. Ellingwood, B., Galambos, T. V., MacGregor, J. C., and Cornell, C. A., "Development of a probability-based load criterion for the american national standard A58," National Bureau of Standard SP-577, Washington D.C., 1980, p.222.
 17. Frangopol, D. M., and Curley, J. P., "Effects of damage and redundancy on structural reliability." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 113, No. 7, 1987, pp.1533~1549.
 18. Frangopol, D. M., and Nakib, R., Redundancy evaluation of steel girder bridges, *Proc., 5th Int. Conf. on Struct. Safety and Reliability (ICOSSAR '89)*, ASCE, 1989, pp. 2172~2178.
 19. Fu, G., and Moses, F., Probabilistic concepts of redundancy and damage tolerability for structural system, *Proc., 5th Int. Conf. on Struct. Safety and Reliability (ICOSSAR '89)*, ASCE, 1989, pp.967~974.
 20. Moses, F., and Verma, D., "Load capacity evaluation of existing bridges," NCHRP report 301, TRB (Transportation Research Council), Washington, D.C, 1987, p.75.
 21. Shin, J. C., Cho, H. N., and Chang, D. I., "A practical reliability-based capacity rating of existing road bridges," *Proc., JSCE*, Vol. 5, No. 2, 1988, pp.245s~254s.
 22. Tabsh, S. W., and Nowak, A. S., "Reliability of highway girder bridges," *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 117, No. 8, 1991, pp. 2373~2388.
 23. Thoft-Christensen, P., and Murotsu, Y., *Applications of structural system reliability theory*. Springer-Verlag, Berlin, 1986, pp. 343.

(접수일자 : 1998. 11. 6)