

차량 통행하중에 대한 사장교의 신뢰성에 기초한 안전도 및 내하력평가
Reliability Based Assessment of Safety and Load Carrying Capacity
of Cable-Stayed Bridge under Vehicle Traffic Loads

조 효 남*
Cho, Hyo-Nam

이 승 재**
Lee, Seung-Jae

임 중 권***
Lim, Jong-Kwon

ABSTRACT

One of the main objectives of the study is to propose a practical but realistic limit state model considering combined effect of axial and bending load for reliability analysis and safety assessment of cable-stayed bridge under vehicle traffic loads.

This paper is intended to propose a new approach for the evaluation of reserved load carrying capacity of cable-stayed bridge under vehicle traffic loads in terms of equivalent strength, which may be defined as a bridge strength corresponding to the reliability index of the bridge. This can be derived from an inverse process based on the concept of FOSM form of reliability index.

AFOSM and IST methods are used for the reliability analysis of the proposed models. The proposed reliability model and methods are applied to the safety assessment of Jindo Bridge which is one of major two cable-stayed bridges in Korea.

1. 서 론

최근 국·내외적으로 해안, 도서지방 등의 개발로 인해 장대교량의 건설 및 기설 장대교량의 유지관리에 대한 관심이 증대되고 있는 실정이다. 장대교량의 안전도 및 내하력평가는 보수 및 보강대책을 수립한다는 관점에서 유지관리체계의 핵심이 되는 분야로서 그 분석 및 평가기법의 합리성과 결과의 신뢰도가 중요한 문제로 대두된다. 안전도의 분석 및 평가에 사용되어 왔던 재래적인 허용응력개념에 기초한 방법들은 안전도의 개념이 다분히 명목적이고 비현실적이기 때문에 기설 장대교량의 실제적인 안전도 및 내하력 평가방법이라고 보기 어렵다.

본 논문은 강사장교의 실제적인 보유안전도 및 내하력을 평가하기 위하여 휨과 축력을 모두 고려할 수 있는 한계상태모형을 제안하였다. 한편 신뢰성해석에 기초한 새로운 내하력평가 방법을 제안하였는데, 이는 신뢰성지수의 FOSM의 형태에서 유도된 등가내하력평가 방법으로서 보다 실제적이고 합리적인 보유내하력(P_n)과 내하율(RF)을 구하는 방법이다.

* 한양대학교 토목공학과 교수

** 한양대학교 생산공학연구소 선임연구원

*** 한양대학교 산업과학연구소 연구원

2. 사장교의 한계상태모형

2.1 한계상태방정식

2.1.1 모멘트나 축력만을 고려할 경우

일반적으로 부재의 강도가 휨이나 축력 어느 하나만에 지배되는 경우, 한계상태방정식은 저항 R 과 고려하여야 하는 여러 하중효과 S_i 의 항으로 표현되는 다음과 같은 선형한계상태방정식으로 표현할 수 있다.

$$g(\cdot) = R - \sum S_i \quad (1)$$

사장교 주형의 중앙부(주경간의 1/2단면)과 같이 휨이 지배적인 경우, 차량통행하중에 의한 한계상태방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$g(\cdot) = M_R - (M_D + M_L) \quad (2)$$

여기서, M_R = 실저항모멘트; M_D, M_L = 사하중과 활하중 각각에 의한 모멘트를 나타낸다. 한편 실저항 모멘트 M_R 은 노후손상계수 D_F 를 도입하여 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$M_R = M_n N_M D_F \quad (3)$$

여기서, M_n = 공칭모멘트; D_F = 노후손상계수; N_M = M_n 과 D_F 의 추정에 관련된 불확실량을 내포하는 랜덤변량(=MFDP); 이때, M =재료강도관련 랜덤변량; F =제작시공 관련 랜덤변량; P =해석과 모델링 관련 랜덤 변량; D = 노후손상 추정관련 랜덤변량 나타낸다. 또한, 사하중과 활하중 각각에 의한 모멘트 M_D, M_L 은 식 (4), (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_D = m_D D_n N_D \quad (4)$$

$$M_L = m_L L_n K N_L \quad (5)$$

여기서, m_D, m_L = 단위사하중 및 활하중에 의한 모멘트 영향계수; D_n, L_n = 공칭 사하중 및 활하중 모멘트; K = 응답비 = $K_s(1+i)$, 이때 K_s = 측정응력/계산응력; i = 충격계수 N_D, N_L = D_n, L_n 의 추정에 관련된 불확실량 및 실제하중효과에 대한 편기를 조정하기 위한 각각의 랜덤변량을 나타낸다.

한편, 사장교의 케이블과 같이 인장력만을 받는 경우의 인장강도 한계상태방정식도 위의 식 (2)~(5)와 유사하게 정의할 수 있다.

2.1.2 조합하중을 고려할 경우

사장교에 있어서 주형의 지점부, 주탑의 하단 등은 커다란 축력을 받기 때문에 이의 영향을 고려하여 휨과 축방향력을 동시에 받는 부재로서 안전도 및 내하력을 평가하여야 한다. 이 경우의 한계상태방정식은 축력과 휨의 조합하중에 대한 식 (6)과 같은 상관식으로 부터 유도할 수 있다.

$$\frac{P}{P_\sigma} + \frac{CM}{\left(1 - \frac{P}{P_\sigma}\right) M_\sigma} \leq 1.0 \quad (6)$$

여기서, P_σ, M_σ = 단면의 좌굴강도; P_e = Euler 좌굴강도; C = 등가모멘트계수; P, M = 단면력을 나타낸다. 이때 $a = C/(1 - P/P_e)$ 로 대치한 후 식 (6)을 다시 쓰면 식 (7)과 같이 된다.

$$\frac{P}{P_{cr}} + a \frac{M}{M_{cr}} \leq 1.0 \quad (7)$$

식 (7)의 양변에 M_{cr}/P 를 곱하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{M_{cr}}{P_{cr}} + a \frac{M}{P} \leq \frac{M_{cr}}{P} \quad (8)$$

이때, $\frac{M_{cr}}{P_{cr}} = e_{cr}$, $\frac{M}{P} = e$ 로 대치하면 식 (8)은 다음과 같이 M_{cr} 과 P 항으로 표현할 수 있다.

$$M_{cr} - P \cdot e_s \geq 0 \quad (9)$$

여기서, e_s = 등가편심거리로서 다음 식과 같다.

$$e_s = e_{cr} + ae \quad (10 a)$$

$$= \frac{M_{cr}}{P_{cr}} + \left[\frac{C}{\left(1 - \frac{P}{P_e}\right)} \right] \left(\frac{M}{P} \right) \quad (10 b)$$

따라서 식 (9)로부터 저항 및 하중 관련 랜덤변량인 M_{cr} , P_D , P_L 그리고 e_s 의 항으로 된 비선형일반한 계상태함수가 식 (11)과 같이 얻어진다.

$$g(\cdot) = M_{cr} - (P_D + P_L)e_s \quad (11)$$

여기서, $M_{cr} = M_{cm} N_M D_F$, 이때, M_{cm} = 시방서에서 제시한 규준식을 사용하여 구하여지는 공칭휨좌굴강도; P_D , P_L = 사하중 및 활하중 각각에 의한 압축력을 나타낸다. 또한, 압축력 P_D , P_L 및 등가편심거리 e_s 는 각각 랜덤변량으로서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_D = c_D P_{Dn} N_D \quad (12)$$

$$P_L = c_L P_{Ln} N_D \quad (13)$$

$$e_s = e_m N_e \quad (14)$$

여기서, P_{Dn} , P_{Ln} = 공칭사하중 및 활하중 각각에 의한 압축력; e_m = 공칭등가편심거리; N_D , N_L , N_e = P_D , P_L , e_m 을 추정하는데 있어서의 불확실량 및 실제효과에 대한 편기를 조정하기 위한 각각의 랜덤변량이다. 이때 N_e 는 e_s 가 식 (10 b)와 같이 매우 복잡한 형태로 표현되기 때문에 MCS(Monte Carlo Simulation)에 의해 수치적으로 평균 및 분산을 구하도록 하였다.

조합하중에 대한 상관식인 식 (6)은 음함수의 형태로서 시뮬레이션 방법인 MCS나 IST(Importance Sampling Technique) [Mechanics, 1989; Cho and Kim, 1991]등으로 엄밀한 신뢰성해석을 수행할 수도 있지만, 식(11)과 같이 표현하게 되면 휨만을 받는 부재와 같이 저항변수와 하중변수가 분리된 양함수 형태의 한계상태함수로되기 때문에 간편하고 효율적으로 안전도 및 내하력을 평가할 수 있게된다.

2.2 극한저항강도

사장교의 안전도 및 내하력을 평가하는데 있어서는 주탑 및 케이블에 대한 극한저항강도의 산정이 중요한 문제로 되는데, 본 논문에서는 케이블에 대해서는 항복강도를 사용하였고, 주형이나 주탑에 대해서는 식 (15)과 같은 좌굴강도식을 사용하였다 [Nakai and Yoo, 1988; Salmon and Johnson, 1990].

$$\sigma_{cr} = \begin{cases} \sigma_y & R \leq 0.5 \\ (1.5 - R)\sigma_y & 0.5 < R \leq 1.0 \\ (0.5/R^2)\sigma_y & R > 1.0 \end{cases} \quad (15)$$

여기서, σ_y = 항복강도; R = 감소계수 ($= \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 k_R}}$), 이때, b = 보강판의 전폭; t = 판의 두께; E = 탄성계수; μ = 포아송비; k_R = 좌굴계수 ($= 4n^2$); n = 보강재로 구분되는 패들의 수를 나타낸다.

2.3 통계적 불확실량

신뢰성해석에서는 저항 및 하중관련 랜덤변량들의 불확실량을 합리적으로 추정하는 것이 매우 중요한 문제이다. 따라서 통계적 불확실량에는 구조안전도에 영향을 미칠 수 있는 모든 것들이 포함되어야 하는데, 여기에는 표본자료의 통계적해석에 관한 변동량 뿐 아니라 모델링오차, 불확실한 정보로 인한 오차등이 있을 수 있다. 그러나 재료강도와 하중변수를 제외하고는 관련데이터의 부족으로 인하여 본 논문에서는 국내외의 관련문헌[Ellingwood and others, 1980; Shin and others, 1989]을 종합판단하여 통계적 불확실량을 추정하였으며 이를 표 1.에 정리하였다. 한편, 등가편심거리의 통계적 불확실량은 앞에서 언급한 바와 같이 하중 및 저항관련 통계적 불확실량을 기초로 MCS에 의해 추정하였다. 물론, 이러한 통계적 자료는 앞으로 저항 및 하중관련 조사, 연구가 발전되고 통계자료가 누적됨에 따라 수정, 보완될 수 있을 것으로 사료되며 따라서 표 1.에서 제시한 통계적 불확실량은 어디까지나 현단계에서 최선 추정치로서의 의미를 갖는다.

표 1. 통계적 불확실량

		평균공칭비	변동계수	분포형
저 항	휨	1.10	0.13	Lognormal
	축력(압축)	1.08	0.15	Lognormal
	축력(인장)	1.20	0.30	Lognormal
하중효과	사하중	1.05	0.10	Normal
	활하중	1.24	0.25	Lognormal
등가편심거리		1.10	0.2	Lognormal

3. 사장교의 신뢰성 및 안전도 평가

3.1 신뢰성평가

기설 사장교의 신뢰성평가는 대부분의 경우 저항 및 하중에 관련된 여러가지 불확실량에 대한 오차와 신뢰성해석 모델링 및 수치해석에 수반되는 오차 등으로 인하여 매우 복잡하고 어려운 문제이기 때문에 사장교에 대한 가장 효과적인 신뢰성 모델링은 근사적이면서도 실용적인 방법으로 개발되어야 할 것으로 사료된다. 한편, 사장교는 주형, 주탑케이블 등의 여러 구조요소로 이루어진 복잡한 구조시스템을 형성하고 있기 때문에 매우 높은 응용성을 가지게 된다[Moses and Fu, 1989; Cho and others, 1993]. 따라서 구조전체로서의 실질적인 안전도를 평가하기 위해서는 체계신뢰성해석을 수행해야 하지만 본 논문은 사장교 신뢰성해석의 기초연구로서 그 범위를 휨만을 고려하는 경우와 휨과 축력을 동시에 고려하는 경우에 대한 요소신뢰성해석에 국한하였다. 사장교의 체계신뢰성해석을 위한 효율적인 모델링에 관한 연구는 현재 진행중에 있다.

구조신뢰성은 파괴확률에 의해서 개념적으로 추정되고 수치적으로 평가될 수 있지만, 실제적으로는 구조요소나 시스템의 상대적인 보유안전율은 신뢰성지수 β 에 의해서 가장 잘 표현될 수 있다. 한편, 파괴확률 P_F 와 신뢰성지수 β 의 관계는 다음과 같다.

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_F) \quad (16)$$

여기서, P_F = 파괴확률; Φ^{-1} = 표준정규분포함수의 역함수를 나타낸다.

사장교의 신뢰성해석에는 다양한 수치해석방법이 사용될 수 있지만, 본 논문에서는 조합하중하의 사장교의 한계상태방정식을 양함수의 형태로 변환시켜서 가장 간편하고 실용적인 해석기법인 AFOSM 알

고리즘[Ellingwood, and others, 1980]을 사용하여 신뢰성해석을 수행하였다.

3.2 안전도평가

신뢰성해석을 통해 산출된 신뢰성지수 β 를 이용하면 공칭안전율 n' 를 식 (17) 같이 구할 수 있다.

$$n' = \frac{\gamma_s}{\gamma_R} \exp[\beta \sqrt{(V_R^2 + V_S^2)}] \quad (17)$$

여기서, $\gamma_R, \gamma_S =$ 저항 및 하중의 평균공칭비; $V_R, V_S =$ 저항 및 하중의 변동계수를 나타낸다. 이와 같이 산출된 공칭안전율은 허용응력설계법에서 사용하는 재료안전율과는 달리 하중과 저항의 불확실량과 구조물의 실제상태를 고려한 실질적 안전율로서 실무자가 이해하기 쉬운 구조안전도의 개념으로 사료된다.

4. 사장교의 내하력평가

4.1 표준식에 의한 방법

기존의 내하력평가 방법에는 허용응력법에 의한 WSR(Working Stress Rating)방법과 AASHTO에서 사용하는 LFR(Load Factor Rating) 방법 등이 있다[Ang and Cho, 1989]. 그러나 이들은 교량의 노후손상이나 실제적 구조거동을 제대로 반영하지 못하기 때문에 재래적인 방법으로 평가된 공칭하중이나 보유내하력은 노후손상된 교량의 실보유 내하력으로 간주하기 어렵다. 따라서 최근 Moses[1989] 및 본 연구자[Ang and Cho, 1989] 등은 기설교량의 노후손상상태, 교량의 실응답 및 불확실성을 명시적으로 포함시키므로써 실보유내하력을 합리적으로 평가할 수 있는 방법을 제안한 바 있는데 본 연구자에 의한 LRFR(Load and Resistance Factor Rating)방법을 식으로 나타내면 다음과 같다[Ang and Cho, 1989].

$$P_n = \frac{\phi' D_F R_n - \gamma_D' c_D D_n}{\gamma_L' c_L K} \quad (18)$$

$$RF = \frac{P_n}{P_r} \quad (19)$$

여기서, $P_n =$ 공용내하력; $P_r =$ 판정 차량하중; $\phi', \gamma_D', \gamma_L' =$ 각각 공칭저항, 사하중 및 활하중 관련안전계수; $c_D, c_L =$ 단위사하중 및 활하중에 의한 영향계수를 나타낸다.

한편, 안전계수 $\phi', \gamma_D', \gamma_L'$ 는 신뢰성이론에 근거하여 현행시방서의 안전수준을 점검한 후 공학적 판단하에 구조형식별로 보정(calibration)을 실시하여 결정되는 값이다. 본 논문에서는 강사장교의 하중 및 저항관련 안전계수를 강형교로 고려하여 결정하였다. 특히 케이블에 대해서는 현행 도로교시방서의 허용인장강도가 극한강도에 대해서 안전을 3을 확보하도록 하고 있는 점을 감안하여 목표신뢰성 지수 $\beta = 4.0$ 을 채택하여 저항관련 안전계수를 산정하였다. 내하력평가에 사용된 저항 및 하중관련 안전계수를 정리하면 표 2와 같다.

표 2. LRFR에서의 저항 및 하중관련 안전계수

구분	ϕ'	γ_D'	γ_L'
주형, 주탑	0.85	1.2	2.0
케이블	0.65		

4.2 신뢰성평가에 의한 방법

본 논문에서 장대사장교의 내하력을 보다 합리적으로 평가하기 위한 β -평가기준으로서 신뢰성평가에 기초한 새로운 내하력평가 방법을 제안하였다. 즉, 지금까지 교량의 내하력은 주로 표준식에 의하여

평가되어 왔으나 본 논문에서는 신뢰성지수의 FOSM의 형태에서 유도된 등가내하력평가 방법을 제안하였는데 이는 표준식을 사용하지 않고서도 신뢰성지수 β 를 이용하여 곧바로 교량의 보유내하력을 손쉽게 구할 수 있는 보다 실제적이고 합리적인 방법으로 사료된다.

먼저, 한계상태방정식이 선형인 경우에는 한계상태함수를 저항 R 과 하중효과 S 의 항으로 $g(\cdot) = R - S$ 로 변환시킨 다음, R 과 S 에 대한 1, 2차모멘트를 추정하면 목표신뢰성지수 β_0 에 대응하는 등가내하력 P_n 은 β 에 대한 FOSM 형태인 $\beta = \ln(\bar{R} / \bar{Q}) / \sqrt{\Omega_R^2 + \Omega_Q^2}$ 에서 $\bar{Q} = \bar{c}_D D_n + \bar{c}_L P_n$ 임을 유의하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_n = \frac{\bar{R}}{c_L} \text{EXP}(-\beta \sqrt{\Omega_R^2 + \Omega_Q^2}) - \frac{c_D}{c_L} D_n \quad (20)$$

여기서, \bar{R} = 평균저항; \bar{Q} = 평균하중효과; \bar{c}_D, \bar{c}_L = 각각 평균단위사하중 및 활하중효과; Ω_R, Ω_S = 각각 저항 및 하중의 변동계수를 나타낸다.

반면에 비선형이나, 상관형식 또는 음함수 형태의 일반한계상태방정식의 경우에는 교량의 보유내하력을 식 (20)과 같이 해석적으로는 구할 수 없기 때문에, 본 연구에서는 평가하중 대한 신뢰성지수 β 를 수치해석에 의하여 구하면, 특정한 목표신뢰성에 대응하는 교량의 등가내하력 P_n 을 FOSM모형의 Fitting Curve로 부터 평가하중과 목표신뢰성지수의 함수로서 직접 구할 수 있는 방법을 제안하였다. 즉, 본 연구에서는 등가내하력 P_n 을 지수함수의 Fitting Curve로 부터 구하는 방법을 제안한 것으로서 이를 수식으로 전개하기 위해서 식 (20)을 개념적으로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$P_n = Z_m \text{EXP}(-\beta \Omega) - \eta D_n \quad (21)$$

여기서, Z_m 은 평균저항(\bar{R} / \bar{c}_L), $\Omega (= \sqrt{\Omega_R^2 + \Omega_Q^2})$ 는 전체불확실량 그리고 η 는 평균 단위사하중 및 활하중 효과의 비($= \bar{c}_D / \bar{c}_L$)를 각각 개념적으로 내포하고 있는 매개변수이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 P_n 과 β 의 관계식은 식 (21)에 의하여 지수함수 형태로 표현됨을 알 수 있다. 미지의 매개변수 Z_m, Ω 는 상하 두개의 평가하중에 대응하는 신뢰성지수로서 두개의 평가점 (P_{R1}, β_1), (P_{R2}, β_2)를 식 (21)에 대입하므로써 얻어질 수 있다. 따라서 식 (21)은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{R1} = Z_m \text{EXP}(-\Omega \beta_1) - \eta D_n \quad (22a)$$

$$P_{R2} = Z_m \text{EXP}(-\Omega \beta_2) - \eta D_n \quad (22b)$$

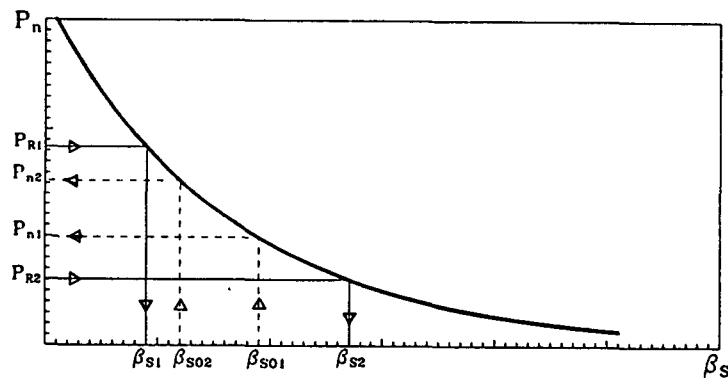


그림 1. β vs. P_n

이때 식 (22a)와 식 (22b)를 연립하여 풀면 $\Delta \beta = \beta_1 - \beta_2$ 라고 했을 때, 매개변수 Z_m, Ω 는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_m = \left[\frac{(P_{R2} + \eta D_n)^{\beta_1}}{(P_{R1} + \eta D_n)^{\beta_2}} \right]^{\frac{1}{\Delta \beta}} \quad (23)$$

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

최종적으로, 식(23)과 식(24)을 식(21)에 대입하여 정리하면 등가내하력 P_n 은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서, P_{R1}, P_{R2} = 평가하중(예를 들면, $P_{R1} = 18(\text{DL18 or DB18}), P_{R2} = 24(\text{DL24 or DB24})$); $\Delta \beta_1 = \beta_1 - \beta_o$; $\Delta \beta_2 = \beta_2 - \beta_o$, 여기서, β_1, β_2 =각각 두개의 평가하중 P_{R1}, P_{R2} 에 따른 신뢰성지수; β_o = 목표신뢰성지수를 나타낸다.

이와 같이 본 연구에서 제안하는 신뢰성평가에 기초한 사장교의 보유내하력 즉, 등가내하력 평가방법은 두개의 평가하중 각각에 대한 신뢰성지수만 구하게 되면 식 (25)를 곧바로 적용하거나 그림 1의 그래프에 의한 방법을 사용하여 공용내하율(SLR, 목표신뢰성지수 $\beta_{o1}=3.0$)과 최대과하중내하율(MOR, 목표신뢰성지수 $\beta_{o2}= 2.5$)에 대한 교량의 실제적인 보유내하력 P_n 을 손쉽게 구할 수 있게 되는 새로운 개념의 내하력평가 방법이다. 이 방법은 지금까지 표준식에만 의존하거나 상관식과 같이 표준식에 의해서는 추정할 수 없었던 교량의 내하력평가 문제에 모두 적용할 수 있는 매우 유용한 방법이라고 생각된다.

5. 적용예 및 고찰

5.1 대상교량

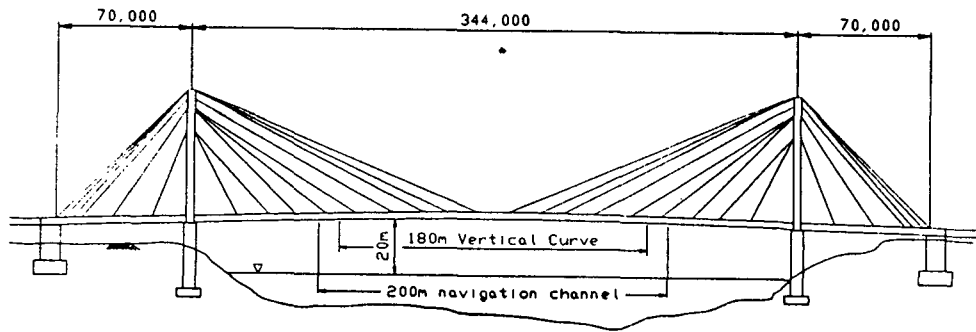
본 논문에서 수치해석의 대상으로 한 교량은 강사장교인 진도대교로서 울돌목해협을 가로질러 전남 해남과 진도를 연결하고 있는 우리나라 최초의 사장교이다. 진도대교는 폭 11.7m, 길이 484m의 강상자형 주형과 69m 높이의 강상자형 주탑 2개 그리고 68개의 locked coil type cable로 구성되어 있다. 교량은 설계활하중이 우리나라의 DB 18하중에 해당하는 AASHTO의 HS-20-44하중인 2등교이다. 표 2에는 진도대교의 일반사항에 대하여 정리하였으며 그림 2에는 진도대교의 단면제원을 수록하였다[건설부, 1993].

표 2. 진도대교의 일반사항

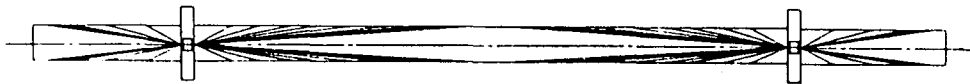
위 치	전남 해남군 문내면 학동리-진도군 군내면 녹진리
구조 형 식	3경간 연속 강상자형 사장교
연 장	70 + 344 + 70 = 484 m
교 폭	11.7m
설 계 하 중	AASHTO HS - 20 -44(DB-18)

5.2 최대단면력의 계산

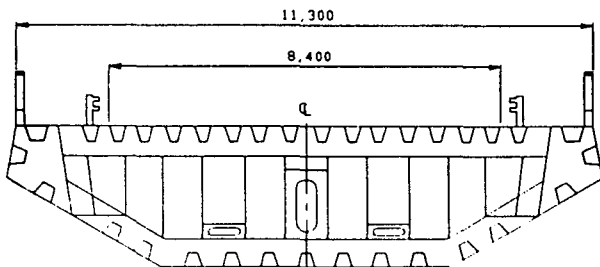
본 논문에서는 하중효과를 구하기 위한 구조해석으로서 2차원 평면해석을 수행하였다. 신뢰성해석 및 안전도평가를 위하여 주형중앙부 그리고 지점부, 주탑하단 및 최외측에 배치되어 있는 back stay No. 1 케이블에 대한 영향선을 작도하고 최대단면력을 일으키도록 활하중을 재하시켰다. 해석결과는 표 3과 같다.



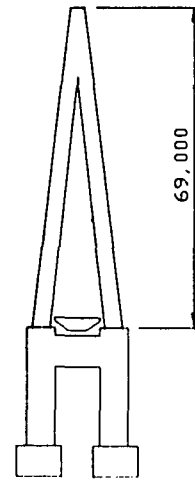
(a) 종단면도



(b) 평면도



(c) 단면도



(d) 주탑평면도

그림 2. 진도대교의 단면제원(단위; mm)

표 3. 최대단면력 계산결과

단면		M(t·m)		P(ton)	
		M_D	M_L	P_D	P_L
주형	중앙부	432.2	1173	6.02	-4
	지점부	-716.6	-1330	-1291	-397
주탑하단		197.7	-673	-2521	-649
back stay No.1				145.2	46.6

5.3 신뢰성 및 안전도평가

대상교량에 대한 주요부위의 휨, 인장, 휨 및 압축 한계상태에 대한 신뢰성을 해석하고 이에 대한 안전도평가 결과를 시방서안전율과 비교하여 제시하면 표 4와 같다. 우선 설계하중인 DB 18하중에 의한 신뢰성지수를 살펴보면 주형중양부의 신뢰성지수가 3.01로서 교통하중에 대해서는 상대적으로 신뢰성이 가장 낮은 단면임을 알 수 있었다. 또한 공칭안전율은 시방서안전율보다 약간씩 큰 값으로 평가되었는데 이는 대상교량인 진도대교가 현재 설계활하중에 대해서 충분한 안전도를 보유하고 있음을 나타내는 결과라고 판단된다. 한편, 외관조사와 현장실험결과에 따른 구조물 건전도에 대한 공학적 판단에 비추어 볼 때, 이러한 결과는 본 연구에서 제안하고 있는 신뢰성해석 및 이에 기초한 공칭안전율 평가방법의 합리성과 타당성을 입증하는 것이라고 사료된다.

표 4.신뢰성 및 안전도평가 결과

단면	지배적 한계상태	β_1 (DB18)	β_2 (DB24)	공칭안전율	시방서 안전율
주형중양부	휨	3.01	2.02	2.17	1.70
주형지점부	휨 + 압축	3.53	2.90	1.96	
주탑 하단	휨 + 압축	6.78	5.76	3.46	
케이블 #1	인장	4.22	3.91	3.47	3.00

5.4 내하력평가

표 5에는 기존의 규준식과 신뢰성평가에 기초한 내하력평가 결과를 비교하여 제시하였다. 우선 규준식에 의한 내하력평가에서 재래적 방법과 개선된 방법에 의한 결과를 비교하면 후자가 약간씩 낮게 평가됨을 알 수 있었으며, 허용응력에 기초한 방법(WSR)과 극한강도에 기초한 방법(LFR, LRFR)을 비교하여도 후자가 조금 더 낮게 평가됨을 알 수 있었다. 4가지 방법 모두 비슷한 결과를 주기 때문에 내하력평가 방법으로서 공히 사용될 수 있다고는 판단되나 노후손상계수 D_F , 응답비 K 등을 고려하는 개선된 방법, 그 중에서도 현대적인 LRFR방법이 이론상의 체계성 등을 볼 때 가장 합리적인 방법이라고 사료된다.

또한 본 논문에서 가장 중점적으로 다루고 있는 신뢰성평가에 기초한 등가내하력 평가결과와 LRFR 방법을 비교해 보면 내하율 RF가 주형중양부에 대하여 1.00과 1.03, 케이블에 대하여 1.23과 1.30 으로서 두 평가방법에 의한 내하력평가 결과가 LRFR이 약간 더 높게 되지만 거의 유사한 값을 나타냄을 알 수 있다. 이는 본 논문에서 제안하고 있는 등가내하력 평가방법이 규준식인 LRFR과는 달리 구조물의 실제 상태에 따라 추정된 β 에 대응하는 내하력을 직접 구할 수 있는 방법이라는 점을 고려하면 매우 합리적이고 타당한 내하력평가 방법임을 나타내는 결과라고 할 수 있다.

한편, 주형지점부 및 주탑하단의 경우처럼 조합하중을 받는 경우에는 규준식에 의하여 내하력을 평가하기는 어렵게 되고 신뢰성평가를 바탕으로 등가내하력 즉, 보유내하력을 산출할 수 있기 때문에, 본 논문에서 제안하고 있는 등가내하력 평가방법은 사장교와 같이 휨, 휨+압축 등 지배적 한계상태가 다양한 구조물에 효과적으로 사용할 수 있는 방법이라고 사료된다.

표 5. 내하력평가방법

검토방법	규준식에 의한 방법								신뢰성평가에 기초한 등가내하력 평가방법	
	재래적 방법				개선된 방법					
	WSR		LFR		WSR		LRFR		RF	P_n
RF	P_n	RF	P_n	RF	P_n	RF	P_n	RF	P_n	
주형(지간중양부)	1.51	DL-27.2	1.05	DL-18.9	1.34	DL-24.1	1.03	DL-18.5	1.00	DL18.0
주형(내접지점부)									1.28	DL23.0
주탑(하단)									2.43	DL43.8
Back stay No.1	1.90	DL-34.2	-	-	1.68	DL-30.2	1.30	DL-23.4	1.23	DL22.2

6. 결론

- 1) 본 논문에서는 차량통행하중에 의한 기설 사장교의 내하력 및 안전도를 평가함에 있어 기존의 재래적인 평가방법과는 달리 구조신뢰성을 도입한 보다 합리적이고 체계적인 방법을 제안하였다.
- 2) 본 논문에서는 사장교 주형의 지점부나 주탑하단과 같이 휨과 압축의 조합하중을 받는 경우에 대하여서도 한계상태방정식을 양함수적으로 표현하므로써 사장교의 신뢰성해석이 간편하게 수행할 수 있는 방법을 제안하였다.
- 3) 본 논문에서는 사장교의 보유안전율을 보다 실제적이고 합리적으로 평가하기 위하여 일반적인 비선형, 음함수적 한계상태에 대한 신뢰성지수를 FOSM 형태의 In-In 모델에 적합시킴으로써 등가내하력의 향으로 교량의 실 보유내하력을 평가할 수 있는 방법을 제안하였다.
- 4) 본 연구에서 제안한 조합하중에 대한 상관형 한계상태방정식의 실용적인 변환방법과 등가저항강도 평가방법은 노후손상된 사장교에 대한 실제적인 내하력평가에 매우 효율적으로 사용될 수 있다고 사료된다.

9. 참고문헌

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.

Cho, H. N. and Kim, I. S. (1991), "Importance Sampling Technique for the Practical System Reliability Analysis of Bridge," Proc. of the US-Korea-Japan Trilateral Seminar, Honolulu, pp. 87-100.

Cho, H. N., Lee, S. J. and Lim, J. K. (1993), "System Reliability - Based Evaluation of Bridge System Redundancy and Strength," The 2nd Korea - France Joint Seminar on Computational Mechanics in Structural Engineering, KOSEF, Seoul, Korea, Sep. 6-9, pp. 177~186.

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., June.

Melchers, R. E. (1989), "Importance Sampling in Structural System," Structural Safety, Vol.7, pp. 247-254.

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.

Nakai, H. and Yoo, C. H. (1988), "Analysis and Design of Curved Steel Bridges." McGraw-Hill Book Company.

Salmon, C. G. and Johnson, J. E. (1990), "Steel Structures," Harper & Row, Publisher, New York.

Shin, J. C., Cho, H. N. and Chang, D. I. (1989), "A Practical Reliability-Based Capacity Rating of Existing Road Bridges," Proc. of JSCE, No. 398/I-10, Vol. 5, No. 2, pp. 245s-254s, Oct.

건설부(1993), "진도대교 안전진단", 한국건설기술연구원, 한양대학교 산업과학연구소, 1993. 10.