

체계신뢰성방법에 기초한 강사장교의 안전도평가

System Reliability-Based Safety Assessment of Steel Cable-Stayed Bridges

조 호 남*
Cho, Hyo-Nam

임 종 권**
Lim, Jong-Kwon

박 경 훈***
Park, Kyung-Hoon

요 지

본 논문에서는 실용적 체계신뢰성에 기초한 강사장교의 안전도평가를 위한 체계적인 모형을 제안하였다. 공용중인 강사장교의 시스템 안전도평가를 위하여 요소신뢰성해석을 위한 케이블, 주형 그리고 주탑의 한계 상태모형과 각 요소들간의 조합파괴를 포함하는 주파괴경로를 정의할 수 있는 체계신뢰성해석 모형을 제안하였다. 요소신뢰성해석을 위한 수치해석기법으로는 AFOSM(Advanced First Order Second Moment) 방법을 사용하였고, 체계신뢰성해석을 위해서는 부분 ETA(partial Event Tree Analysis) 모형을 사용하였다. 제안된 방법의 타당성을 고찰하기 위하여 진도대교의 안전도 평가에 적용하였다. 부분 ETA모형을 사용한 체계신뢰성 평가 방법은 기존의 요소신뢰성 방법에 비해 구조물의 여유성을 충분히 반영하는 상당히 합리적이며 실제적인 결과를 보여주는 실용적인 방법으로 판단된다.

핵심용어 : 사장교, 안전도, 체계신뢰성, 부분 ETA(partial Event Tree Analysis)

Abstract

This paper is intended to propose a systematic model for practical system reliability-based safety assessment of steel cable-stayed bridges. The system reliability model that can identify dominant failure paths including combined failures of cables, deck, and pylons as well as the limit state models of cables, deck and pylons for element reliability analysis are suggested for system safety assessment of steel cable-stayed bridges in service. The AFOSM(Advanced First Order Second Moment) method as a numerical analysis technique is used for the element reliability analysis, and also a partial Event Tree Analysis (ETA) model is adopted for the system reliability analysis. 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. The system reliability method using the proposed partial ETA sufficiently reflects the system redundancy of the bridges and shows rational and practical results compared to the element reliability method.

Keywords : cable-stayed bridges, safety assessment, system reliability, partial Event Tree Analysis (ETA)

* 성회원·한양대학교 토목환경공학과, 교수

** 학생회원·한양대학교 토목공학과, 박사수료

*** 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 필요하다¹⁾. 본 논문은 체계신뢰성방법에 의한 사장교의 실용적인 안전도평가기법에 대하여 주로 다루었으며 내하력평가기법에 대해서는 동반논문²⁾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 여유성(redundancy)이 높은 장대교량에 대한 실용적인 안전도평가 기법은 찾아보기 힘든 실정이다. 본 연구에서는 이러한 방법 중 현재 실용적으로 적용 가능한 신뢰성방법에 의해 강사장교의 안전도평가 기법을 제안하고자 하였다.

체계신뢰성이론의 교량 적용사례는 다수 있으나 본 연구와 관련된 연구로는 Tabsh/Nowak³⁾의 단순 I형교의 교량상부구조 시스템파괴에 대한 안전도평가 연구의 예와 사장교의 설계와 관련한 Bruneau⁴⁾의 예 등을 들 수 있다. Bruneau는 본 연구와 상당히 유사한 접근을 하고 있는데

부분 ETA(Event Tree Analysis)기법과 메커니즘함수를 이용한 체계신뢰성방법에 의해 실제구조물이 아닌 단순한 예제구조물의 설계기법에 초점을 맞추어 연구하였다. 그러나 이 연구는 실제구조물에 적용할 수 있는 주형, 주탑, 케이블 등에 대한 구체적인 한계상태 모형을 제시하지 못한 한계가 있다.

본 연구에서는 강사장교의 신뢰성해석을 위하여 케이블 파괴에 대한 한계상태모형, 휨과 축력의 상호작용을 조합하여 고려한 주형 및 주탑의 파괴에 대한 한계상태모형과 주형 강상판의 국부좌굴에 대한 신뢰성해석 모델을 제시하였다. 주형, 주탑 및 다수의 케이블로 구성된 사장교의 경우 높은 여유성과 다양한 잠재적인 파괴모드를 가지고 있으므로 실제적인 보유안전도를 시스템수준에서 평가하기 위하여 요소수준의 신뢰성해석보다는 시스템 전체의 상태 및 파괴경로를 파악할 수 있는 체계신뢰성해석 방법이 적용되어야 한다. 이를 위해서 시스템 수준에서 구조물의 실제적인 보유안전도를 평가하기 위하여 구조요소의 파괴모형을 고려한 구조시스템의 지배적인 파괴경로를 고려할 수 있는 부분 ETA 모형을 제시하였다. 제시된 모형은 부재가 모두 강재로 이루어진 수정 팬 형식(modified fan system) 사장교에 대해서 이루어졌으나, 기타 다양한 재료 및 형식의 사장교에 대해서도 추가 연구가 수행될 것이다.

요소신뢰성해석을 위해서는 AFOSM(Advanced First Order Second Moment) 방법을 사용하고, 체계신뢰성해석을 위해 ETA방법에 대한 고찰을 바탕으로 부분 ETA 모형을 사용하였다. 이렇게 제안된 방법들은 강사장교의 안전성평가를 위한 대상으로 진도대교에 적용하여 그 타당성에 대한 고찰을 수행하였다.

물론 사장교와 같이 장경간 교량의 안전도는 바람, 지진 등의 동적효과를 고려하는 것이 중요하지만, 본 연구는 교통하중하에서 교량상부구조의 체계신뢰성에 기초한 안전성에 중점을 두고 수행되었으며, 이러한 하중효과를 고려한 전체교량시스템의 안전도는 계속적인 연구가 수행될 것이다.

2. 요소수준의 한계상태모형

본 연구의 목적이 교량의 유지관리를 위한 시스템 보유 안전도평가에 있기 때문에 사용성한계상태에 대해서는 고려하지 않고 실제적인 안전도평가에 필요한 케이블과 주형 및 주탑에 대한 강도한계상태모형만을 제시하였다. 또한 강상판의 국부좌굴에 대한 신뢰성해석을 위해서는 등가 그릴리지 구조해석방법을 신뢰성해석을 위해 사용하였다. 강상판 중 가장 위험단면에 대한 그릴리지 해석에서 경계조건은 2차원 전체 구조해석을 통해 두 다이아프램의 변위로부터 얻을 수 있으며, 신뢰성해석은 전체 및 국부적인 영향을 모두 고려하여 수행될 수 있다. 그러나 강상판의 요소 신뢰성 해석 수행결과 신뢰성이 매우 높게 나타나 본 논문에서는 구체적인 요소한계상태모형에 포함시키지 않았다.

2.1 케이블 파괴에 대한 한계상태모형

일반적으로 부재의 강도가 휨이나 축력 어느 하나만에 지배되는 경우, 한계상태방정식은 저항 R 과 고려하여야 하는 여러 하중효과 S 의 항으로 표현되는 식 (1)과 같은 선형한계상태방정식으로 표현할 수 있다.

$$g(\cdot) = R - \sum S_i \tag{1}$$

즉, 사장교의 케이블요소와 같이 축력(인장력)이 지배적인 부재의 인장파괴에 대한 한계상태방정식은 식 (2)와 같다.

$$g(\cdot) = P_{TR} - (P_{TD} + P_{TL}) \tag{2}$$

여기서, P_{TR} =실저항; P_{TD} , P_{TL} = 사하중과 활하중 각각에 의한 인장력을 나타낸다.

실저항은 노후손상계수 D_f 를 도입하여 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{TR} = P_n D_f N_p \tag{3}$$

여기서, P_n =공칭인장강도; D_f =노후손상계수; $N_p = MFPD = P_n$ 과 D_f 의 추정에 관련된 불확실량을 내포하는 랜덤변량이며, 이때 M =재료강도 관련 랜덤변량; F =제작시공 관련 랜덤변량; P =해석과 모델링 관련 랜덤변량; D =노후손상 추정 관련 랜덤변량을 나타낸다.

또한, 사하중과 활하중 각각에 의한 실인장력 P_{TD} , P_{TL} 은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{TD} = p_D D_n N_D \tag{4a}$$

$$P_{TL} = p_L L_n K_a (1 + i) N_L \tag{4b}$$

여기서, p_D , p_L =단위사하중 및 활하중에 의한 영향계수; D_n , L_n = 공칭 사하중 및 활하중 효과; N_D , $N_L = D_n$, L_n 의 추정에 관련된 불확실량 및 실제 하중효과에 대한 편기를 조정하기 위한 각각의 랜덤변량; K_a =응답비=측정인장응력/계산인장응력; i =케이블의 충격계수를 나타낸다.

2.2 주형 및 주탑에 대한 한계상태모형

사장교에 있어서 주형과 주탑은 일반적으로 휨과 축력을 동시에 고려할 수 있는 조합상관식에 기초하여 안전도를 평가하여야 보다 합리적이다. 본 연구에서는 이 경우의 한계상태방정식을 AA-SHTO LFRD 시방서⁷⁾나 우리나라 도로교표준시방서 하중저항계수설계편¹⁾의 축력과 휨의 조합하중에 대한 상관식에 기초하여 식 (5)와 같이 실용적으로 제시하였다.

$$g(\cdot) = 1 - \left(\frac{P_{CD} + P_{CL}}{P_{CR}} + C_m \frac{M_D + M_L}{M_{CR} \left(1 - \frac{P_{CD} + P_{CL}}{P_c} \right)} \right) \tag{5}$$

여기서, P_{CR} , M_{CR} =단면의 실좌굴강도 및 실저항 모멘트; P_c =Euler 좌굴강도; C_m =등가모멘트계수; P_{CD} , M_D =축력 및 모멘트에 대한 사하중 효과; P_{CL} , M_L =축력 및 모멘트에 대한 활하중 효과를 나타내며, 이때 P_{CR} , M_{CR} , P_{CD} , P_{CL} , M_D , M_L 등은 식 (3), (4)의 경우와 마찬가지로 각종 불확

실량에 대한 편기를 고려한 값이다. 제시된 활하중모형 (P_{CL} , M_L)과 저항모형 (P_{CR} , M_{CR})에서 압축과 휨성분을 구분하여 신중히 고려하여야 한다.

3. 체계신뢰성 모형

사장교는 주형, 주탑, 케이블 등의 여러 구조요소로 이루어진 복잡한 구조시스템을 형성하고 있기 때문에 매우 높은 여유성을 가지게 된다¹³⁾. 따라서 구조계 전체로서의 실질적인 안전도를 평가하기 위해서는 체계신뢰성해석을 수행하여야 하며¹⁵⁾, 이때 시스템붕괴를 형성하는 파괴모드 (failure mode)는 고차의 여유성으로 인하여 다른 구조 형식의 교량에 비하여 다양하다. 즉 구조물이 고차의 여유성을 가지고 있는 경우 어떤 단일 부재 또는 단면이 강도한계상태에 도달한 경우를 구조시스템 전체의 파괴로 보는 것이 아니라 여유성을 상실할 수 있는 단계에 이르기 위한 파괴 경로 (failure path)를 형성하는 몇몇 요소가 한계상태에 도달한 경우를 구조시스템 전체의 파괴 (system failure)로 보며, 체계신뢰성에 기초한 구조물의 안전도는 지배단면의 요소신뢰성해석에 의한 결과보다 높게 평가되는 것이 일반적이다^{13), 16), 24)}.

3.1 구조요소의 파괴모형

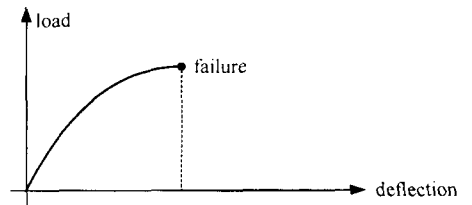
구조물의 체계신뢰성 해석에 있어서 잠재적인 파괴요소의 역학적 거동은 매우 중요하며, 하중-변위 특성에 따라 요소의 거동은 그림 1과 같이 이상적으로 완전연성 (perfectly ductile), 완전취성 (perfectly brittle), 및 반연성 (semi-ductile) 또는 반취성 (semi-brittle) 재료의 특성을 따르는 것으로 모델링할 수 있다²⁵⁾.

체계신뢰성해석 결과는 구조요소의 모델링에 있어서 이러한 재료의 특성을 어떻게 반영하느냐에 따라 크게 좌우될 수 있으므로 보다 합리적인 재료의 특성을 고려하는 것이 중요하다³⁾. 대부분의 일반적인 구조요소의 경우 실질적인 거동이 이상적으로 완전연성 또는 완전취성의 어느 한쪽에 해당된다고 보기는 어려우며 취성과 연성의

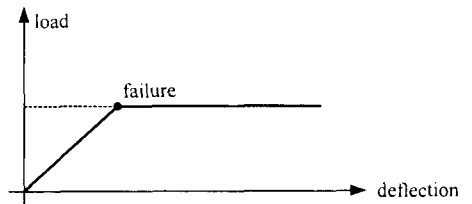
중간적인 특성을 지닌 것으로 보는 것이 합리적이다. 즉, 잔존강도비를 모수 $\gamma (=M_{residual}/M_{cr})$ 로 나타낸다면 완전취성요소의 경우 $\gamma=0$ 이며 완전연성요소는 $\gamma=1$ 이라 할 수 있으며 대부분의 요소는 그 사이값을 갖는다. 케이블요소의 경우 완전연성 또는 취성요소로 모델링할 수 있는데 일반적으로 사장교 케이블 강재의 소성변형은 소성붕괴메카니즘의 형성을 허용하기에 충분하지 않다¹³⁾. 따라서 케이블요소의 경우 완전취성요소로써 모델링하고 주형과 주탑의 경우 반연성 (반취성) 요소로 모델링한 혼합시스템 (mixed system)을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

3.2 구조시스템의 파괴모형

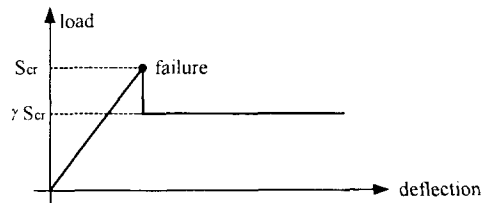
다양한 이론적 또는 실용적 접근방법이 시스템 파괴 (system failure) 또는 시스템 저항능력



(a) 완전 취성 요소



(b) 완전 연성 요소



(c) 반연성 (반취성) 요소

그림 1 재료의 성질에 따른 하중-변위 특성

(system resistance)을 모형화하기 위하여 제시되어 왔으나 본 연구에서는 비선형 구조해석이 필요 없으면서 체계신뢰성 문제에 있어서 실용적이고도 효과적으로 응용가능한 해석모형을 적용하였다. 즉, 사장교의 시스템 파괴상태는 파괴메카니즘을 형성하는 여러 가지 가능한 파괴경로중 어느 하나가 발생하는 것으로 정의할 수 있다. 이러한 시스템 파괴상태에 대한 시스템 모형화는 지배적인 파괴경로만을 고려한 부분 ETA(Event Tree Analysis) 모형으로 정식화할 수 있다³⁾.

일반적인 Event Tree의 구성은 그림 2에서 보여진 초기사건 E와 수많은 가능한 결과들 $C_{1,1}, \dots$ 로 이루어져 있으며, 특정결과는 초기사건에 따른 하위사건들에 좌우됨을 알 수 있다. 초기사건이 주어진 경우, 몇 개의 "첫번째 하위사건들"이 뒤따르게 되며, 이러한 하위사건들은 분명히 상호 독립적이다. 물론 Event Tree에서 각각의 경로들은 어떤 사건이 발생하였을 경우 야기되는 하위 사건들의 특정 결과를 나타낸다. 이때 각 경로는 상호 통계적으로 독립이라고 가정한다. 따라서 특정 경로의 발생과 관련된 확률은 그 경로에서 초기사건과 이어지는 하위사건들의 조건부 확률의 곱으로 단순히 표현가능하며, 예를 들면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다⁹⁾. 이와 같이 각 경로의 발생확률이 계산되면, 통계적 독립이라는 가정하에 각 경로 확률의 합으로써 전체시스템의 발생확률을 구할 수 있다.

$$P(C_{1,1} \dots | E) = P(E_{11}|E)P(E_{21}|E_{11}E) \dots P(E_{n1}|E_{11}E_{21} \dots E) \quad (6)$$

구조물의 경우에 한 구조요소 i 가 파괴위험요소라고 한다면, 요소 i 의 파괴를 가정함으로써

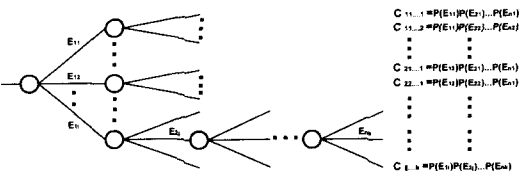


그림 2 ETA의 구성모형

구조물의 시스템은 변경된다. 만약 파괴요소가 연성요소라면 파괴요소의 내하력은 가상하중 (fictitious load)으로 더해지며 파괴요소가 취성요소라면 어떠한 가상하중도 더해지지 않는다. 가상하중은 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_i = \gamma_i R_i \quad (7)$$

여기서, R_i =파괴요소 i 의 내하력 ; γ_i =파괴요소 i 의 잔존강도비 ($0 < \gamma_i \leq 1$)를 나타낸다.

이때 변형된 구조물은 탄성적으로 해석되고, 신뢰성해석에 의한 새로운 신뢰성지수 β 값은 모든 잔존하는 파괴요소에 대해서 계산된다. 이 중 낮은 β 값을 갖는 파괴요소는 파괴요소 i 와 조합됨으로써 다수의 파괴요소의 조합이 이루어진다²⁵⁾.

교량 유지관리 또는 전산화 알고리즘의 개발시에 보다 실용적이고 해석시간이 단축될 수 있는 방법이 필요하므로 본 연구에서는 다음과 같은 구조시스템의 파괴모형 해석절차를 제안하였다. 사장교에 있어서 구조요소의 파괴 또는 소성힌지의 발생은 이전의 하중-저항 경로를 변경시키게 되고 나머지 구조요소 사이에 새로운 하중분포가 발생하게 된다. 각각의 경우에 교량은 적절하게 변경된 모델을 사용하여 재해석된다. 또한 해석의 실용성 및 효율성을 위해 Event Tree상의 경로를 따라 진행되는 절차는 하위사건을 고려한 체계신뢰도수준이 어떤 일정한 수준, 소위 목표신뢰도수준을 초과하게 된다면 비록 구조물의 완전한 파괴경로가 아직 발생하지 않았다 하더라도 실제적으로 더 이상의 신뢰성해석은 큰 의미가 없게 된다. 전산화를 위해서 이러한 해석단계의 조정을 위한 목표신뢰성지수를 설정하고 이 수준을 초과하면 해석을 멈추도록 한다.

4. 신뢰성해석

4.1 요소신뢰성해석

요소신뢰성 해석을 위한 알고리즘은 크게 나누어 해석적 방법 (analytical methods)과 시뮬레이션 방법 (simulation methods)으로 구분할 수 있

다. 본 연구에서는 해석적 방법으로서 발전된 형태의 FOSM(First Order Second Moment) 방법이라 할 수 있으며 랜덤변수의 추정평균과 분산 또는 공분산에 의해 근사적으로 표준화 공간에서 파괴역 경계면까지의 최소거리인 신뢰성지수 β 를 이용하여 신뢰도를 해석하는 소위 2차모멘트법인 개선된 1계 2차모멘트법(AFOSM ; Advanced First Order Second Moment)⁹⁾을 적용하였다.

4.2 체계신뢰성해석

많은 구성요소를 가진 복잡한 구조물은 정정구조물과는 달리 단 하나의 구성부재의 파괴로 인하여 구조물의 기능을 상실한다고 보기 어렵다. 따라서 실제 구조물이 가진 고차의 여유성을 합리적으로 고려하여야만 구조물의 실제적인 파괴에 대한 위험도를 알 수 있다. 즉, 부정정 구조계의 경우, 구조계를 구성하는 여러요소(부재, 연결부, 상세부위 등)의 점진적이고 축차적인 파괴로 정의할 수 있는 파괴모드 또는 붕괴모드가 무수히 많은 것으로 가정할 수 있고 각 붕괴모드 또는 파괴모드가 형성될 확률은 각기 다르다. 이러한 무수히 많은 잠재적인 파괴모드중 하나가 발생하면 그 구조물은 붕괴된다고 할 수 있으므로 구조계의 시스템 파괴에 대한 확률적 해석은 구성요소들의 파괴가 형성하는 모든 가능한 파괴모드 또는 기구(mechanism)의 발생사상을 Level III 또는 Level II 구조신뢰성 이론에 의해 확률적으로 해석하게 된다²⁾.

본 연구에서는 체계신뢰성해석의 실질적이며 효율적인 수치해석을 위해, 구조시스템의 모든 가능한 파괴경로를 전부 고려한 것이 아니라 요

소신뢰성 해석을 통하여 파괴확률이 높은 몇몇 지배단면을 선정하여 각 지배단면들의 파괴로 형성되는 파괴메카니즘을 지배적인 파괴경로로 고려한 부분 ETA(partial Event Tree Analysis) 모형으로 정식화하였다. 즉, 사장교의 시스템 파괴상태는 파괴메카니즘을 형성하는 여러 가지 가능한 파괴경로중 어느 하나가 발생하는 것으로 정의하고 시스템 파괴확률은 이러한 지배적인 파괴경로의 합집합으로 계산한다.

5. 적용에 및 고찰

5.1 적용대상교량

본 논문에서는 제안된 체계신뢰성해석에 의한 안전도평가를 위한 수치해석의 대상으로 강사장교인 진도대교를 선정하였다. 진도대교는 울돌목 해협을 가로질러 전남 해남과 진도를 연결하고 있는 1983년 준공된 우리나라 최초의 사장교이다. 진도대교는 폭 11.7m, 길이 484m의 강상자형 주형과 69m 높이의 강상자형 주탑 2개 그리고 68개의 락코일(locked coil) 형식의 케이블로 구성되어 있다. 교량은 설계활하중이 우리나라의 DB-18하중에 해당하는 AASHTO의 HS20-44하중인 2등교이며, 그림 3에 일반단면을 나타내었다.

진도대교는 본 연구진에 의해 외관조사, 비파괴시험, 정동적 재하시험 및 내하력평가 등 광범위한 정밀안전진단이 수행된 바 있다⁵⁾.

5.2 구조 모델링 및 해석

신뢰성해석을 위한 하중효과 산정을 위한 대상 구조물의 모델링은 2차원 프레임 모델을 사용하

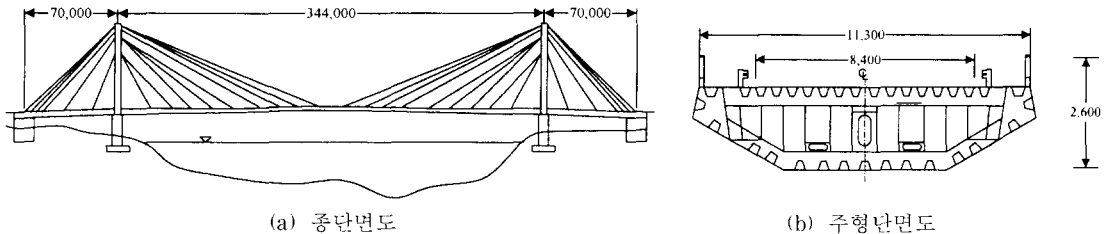


그림 3 대상교량(진도대교)의 단면제원

였다. 대상교량은 AASHTO HS20-44 하중으로서 DB-/DL-18 하중과 등가의 하중으로 설계된 교량이지만 현재의 교통상황을 고려하여 1등급 수준인 DL-24 하중에 대해 주로 검토하였고 비교를 위해 DL-18 하중에 대해서도 검토하였다. 영향선해석을 통해 선택된 단면의 최대응력이 발생할 수 있는 하중재하위치를 선정하고, 재하된 하중에 대한 단면력을 산정하였다.

5.3 신뢰성해석 및 안전도평가

요소신뢰성해석은 구조해석을 통해 산정된 단면저항 및 단면에 작용하는 하중효과와 이에 따른 저항·하중효과의 불확실성을 고려하여 실용적인 신뢰성해석 알고리즘인 Rackwitz-Fiessler²⁰⁾에 의한 AFOSM방법을 이용하여 수행하였다. 이렇게 계산된 신뢰성지수를 이용하여 Level 1, 2 각

단계에서의 구조요소의 파괴확률을 구하고 제안된 체계신뢰성해석 방법을 통해 시스템의 안전도를 평가하였다.

대상교량에 대한 주요단면의 요소수준의 신뢰성해석결과를 정리하여 시스템수준 신뢰성해석결과와 비교하여 표 1에 정리하였으며, 표 2에는 신뢰성해석에 적용된 통계적 불확실량을 나타내었다. 통계적 불확실량은 관련문헌^{19), 22)}에서 연구된 결과를 참조하여 산정하였다.

신뢰성해석시 고려한 단면은 그림 4(a)에 보는 바와 같이 구조해석결과 가장 하중효과가 크게 나타난 위험단면을 선정하였다. 선택된 단면의 초기 요소신뢰성해석에 의해 주형지점부의 신뢰성지수가 3.1로서 교통하중에 대해서 상대적으로 신뢰성이 가장 낮아 내하력 지배단면임을 알 수 있다[그림 4(b)]. 또한 체계신뢰성해석을 위해 주형지점부에 소성힌지를 도입한 후 재해석을

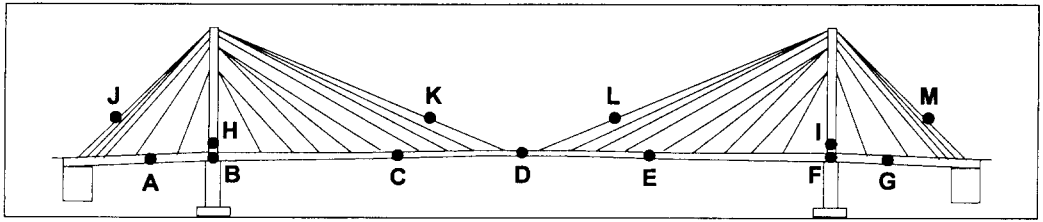
표 1 신뢰성 해석결과

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 (B, F)	휨모멘트 +축력	3.1 (4.2)			
주탑 하단 (H, I)		휨모멘트 +축력	6.3 (7.2)			
케이블 (J, M)		축력	6.3 (6.7)			

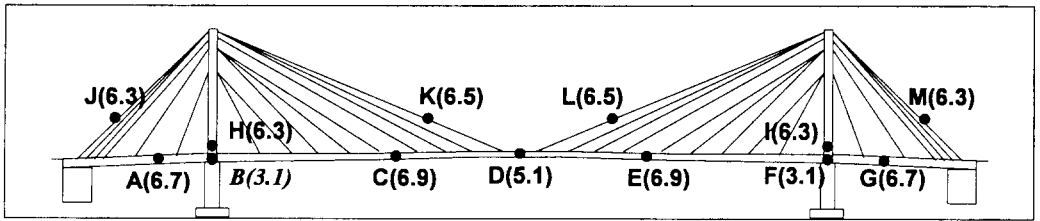
* 는 요소수준에서 가장 지배적인 단면의 해석결과
 [주] 제시된 수치는 도로교시방서의 설계차선하중 DL-24에 의한 값이며, 괄호안의 수치는 DL-18에 의한 값이다.

표 2 신뢰성 해석에 적용된 통계적 불확실량

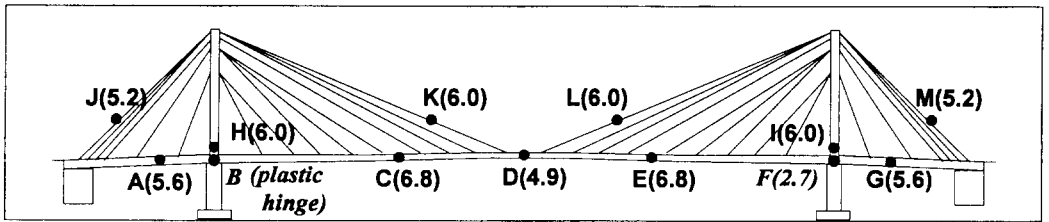
항 목	평균공칭비	변동계수	분포형	
저 항	휨 ²²⁾	1.10	0.13	Lognormal
	축력 ¹⁹⁾	1.08	0.15	Lognormal
	케이블요소의 인장 ¹⁹⁾	1.10	0.11	Lognormal
하중효과	사하중 ²²⁾	1.05	0.10	Normal
	활하중 ²²⁾	1.24	0.25	Lognormal



(a) 신뢰성해석 고려단면



(b) Level 1 : 정상상태에서의 요소신뢰성지수



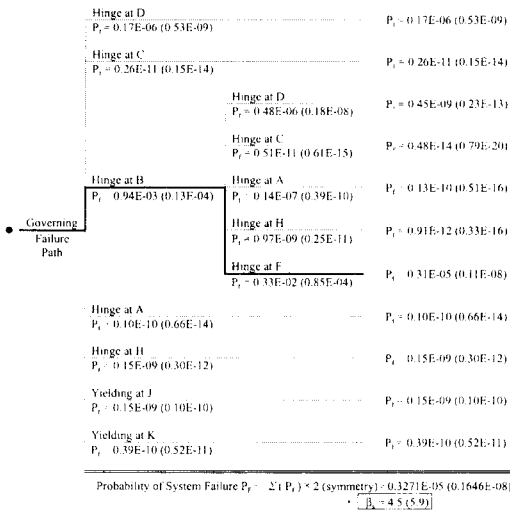
(c) Level 2 : B에서의 hinge발생에 따른 조건부 요소신뢰성지수

그림 4 단계별 신뢰성지수

통한 Level 2의 신뢰성해석 결과가 그림 4(c)에 나타나 있다.

그림 5는 체계신뢰성 해석을 위한 Level 2 (Level 1의 사건발생시 조건부 하위사건에 대한 신뢰성해석)까지의 부분 ETA 모델 및 해석결과를 보여주고 있다. 주형 B점의 힌지발생의 사건을 제외한 위험단면에 대해서는 추가적인 하위사건에 대한 신뢰성해석을 수행할 수 있으나 요소수준에서 이미 목표체계신뢰성수준 ($\beta_{ts}=3.5$)을 크게 초과하고 있어 더 이상의 해석은 불필요할뿐만 아니라, 해석결과 자체도 전체 체계신뢰성지수에 큰 영향을 주지않기 때문에 수행되지 않았다.

Level 2에 해당하는 주요 파괴경로만을 고려한 부분 ETA모델을 기초로 평가한 결과 체계신뢰성지수가 4.5로 요소수준에서 지배단면 신뢰성지수인 3.1보다 상당히 높은 결과를 보이고 있다. Level 2에서의 체계신뢰성해석 결과가 4.5로써 매우 높은 여유성을 지니고 있으며 목표체계신뢰성수준보다 크게 상회하므로 Level 3까지의 해석은 수행하지 않았다. 즉 Level 2에서도 구조물은 아직 붕괴메카니즘에 도달하지는 않았지만 목표 체계신뢰성지수를 이미 초과한 상태이므로 교량의 안전평가를 위해서 더 이상의 해석은 큰 의미가 없을 것으로 판단된다.



[주] 제시된 수치는 도로교시방서의 설계차선하중 DL-24에 의한 값이며, 관호안의 수치는 DL-18에 의한 값이다.

그림 5 체계신뢰성 해석을 위한 부분 ETA모델의 결과

살펴본 바와 같이 본 연구에서 제안하는 체계 신뢰성 해석방법은 구조물의 여유성이 고려된 상당히 합리적이며 실제적인 결과를 보여주는 것으로 판단된다. 또한, 외관조사와 현장실험결과에 따른 구조물 건전도에 대한 공학적 판단에 비추어 볼 때, 이러한 결과는 본 연구에서 제안하고 있는 체계신뢰성해석 방법이 실 구조물에 적용할 수 있는 합리적이며 실용적인 방법으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 공용중인 강사장교의 시스템보유안전도를 구하기 위하여 현재 실용적으로 적용 가능한 신뢰성해석기법을 사용하여 위험단면에 대한 요소 신뢰성과 부분 ETA를 이용한 체계신뢰성 해석 모형을 제안하였다.

2) 체계신뢰성해석을 위한 부분 ETA 모형은 복잡한 사장교의 시스템 파괴상태를 모형화하는데 유용하게 사용될 수 있으며, 사장교의 전산화 유지관리시스템을 위한 평가 모듈로써 적용 가능할 것으로 판단된다.

3) 본 연구에서 제안한 체계신뢰성해석 방법은 구조물의 여유성을 충분히 반영한 합리적인 결과를 얻을 수 있는 실용적인 방법으로 높은 여유성을 지닌 교량의 실제 보유안전도의 평가에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문의 연구내용은 한국과학재단 핵심전문 연구[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 기설교량의 신뢰성평가", 871-1301-007-2구조, 한국과학재단, 1989, p. 268.
3. 조효남, "교량상부구조의 실용적인 체계신뢰성 해석기법", 한국학술진흥재단, 1992.
4. 조효남, "대형교량의 유지관리를 위한 계속, 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 내하력평가", 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. Ang, A. H-S., and Bennett, R. M., "Formulations of structural system reliability," *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 112, No.11, 1986, pp.1135~1151.
9. Ang, A. H-S., and Tang, W. H., *Probability concepts in engineering planning and de-*

- sign: Vol I, II, John Wiley & Sons Inc., New York, 1984.
10. Bennett, R. M., "Reliability of nonlinear brittle structures," *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 112, No. 9, 1986, pp.2027~2040.
 11. 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.
 12. Bjerager, P., Reliability analysis of brittle structural systems, *Proc., 4th Int. Conf. on Struct. Safety and Reliability (ICOSSAR'85)*, ASCE, Vol I, 1985, pp.149~155.
 13. Bruneau, M., "Evaluation of system-reliability methods for cable-stayed bridge design," *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 118, No.4, 1992, pp.1106~1120.
 14. 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.
 15. 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.
 16. 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.
 17. 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 (APSSRA95)*, 1995, pp.140~147.
 18. Ditlevsen, O., and Bjerager, P., "Methods of structural system reliability," *Struct. Safety*, Vol. 3, 1986, pp.195~229.
 19. 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.
 20. Rackwitz, R., and Fiessler, B., "Structural reliability under combined random load sequences," *Computers & Structures*, Vol. 9, 1978, pp.489~494.
 21. Schueller, G. I., and Stix, R., "A critical appraisal of methods to determine failure probabilities," *Struct. Safety*, Vol. 4, No. 4, 1987, pp.293~309.
 22. 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.
 23. Shinozuka, M., "Basic analysis of structural safety," *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 109, No. 3, 1983, pp.721~740.
 24. Tabsh, S. W., and Nowak, A. S., "Reliability of highway girder bridges," *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 117, No. 8, 1991, pp. 2373~2388.
 25. Thoft-Christensen, P., and Murotsu, Y., *Applications of structural system reliability theory*. Springer-Verlag, Berlin, 1986, p. 343.

(접수일자 : 1998. 11. 6)