

저항강도 최적화에 기반한 케이블부재의 코드 캘리브레이션

Code-calibration of Cable Members using Optimization of Strength

이호현* · 이해성**

Lee, Ho Hyun · Lee, Hae Sung

기존의 케이블부재 대상 코드캘리브레이션은 실교량 모델의 비선형 신뢰도평가에 기반하여 이루어졌으며 실교량 모델에 기반한 결과의 특성상 일반화하기 어렵다는 한계가 있다. 이 연구에서는 기존 연구에서 제시한 케이블 부재의 한계상태식을 선형화 및 표준화한 후, 최적화 기법을 도입하여 보다 케이블 부재에 대해 보다 일반화된 코드캘리브레이션을 수행할 수 있는 방법을 제안하였으며 목표신뢰도지수와 하중-저항계수가 보장하는 신뢰도 지수를 비교하여 그 타당성을 검증하고자 하였다.

핵심어 : 한계상태설계법, 케이블부재, 선형화, 표준화, 최적화기반 코드캘리브레이션

1. 서론

기존의 케이블부재 대상 코드 캘리브레이션은 실제 케이블교량 모델의 비선형신뢰도 평가에 기반하여 이루어졌다(이해성 등, 2016). 일반부재의 경우, 선형 한계상태식을 총 공칭하중효과로 표준화한 뒤 신뢰도지수에 대한 최적화 기법을 적용하여 보다 일반화된 최적의 하중-저항계수를 산출하는 연구(Lee et al., 2017)가 이루어진 바 있으나 이해성 등(2016)의 방법에서 정의된 케이블 부재의 한계상태식은 비선형 함수이므로 이를 직접 적용할 수 없다. 따라서 케이블 장력을 근사하여 한계상태식을 선형화시킨 후 이를 다시 표준화시켜 케이블 부재에 대해서도 일반화된 최적의 하중-저항계수를 도출하기 위한 방법을 제안한다.

2. 한계상태식의 선형화 및 표준화

이해성 등(2016)의 연구에서는 케이블 부재의 한계상태식을 하중에 대한 비선형 함수로 정의하였으나 이 연구에서는 다음과 같이 선형화된 식으로 재정의 한다.

$$G = A_s f_u - T(q_{CB}, q_{GD}, q_{DW}, q_{LL}) \approx A_s f_u - T_{CB} - T_{GD} - T_{DW} - T_{LL} \quad (1)$$

여기서 A_s , f_u 는 각각 케이블부재의 단면적과 과단응력을 의미하며 q_i , T_i 는 각각 i 번째 하중과 그에 따른 장력을 의미한다. 아래첨자 CB , GD , DW 및 LL 는 각각 케이블 자중, 보강거더 자중, 포장하중 및 차량활하중을 의미한다. 각 성분별 장력은 해당하중이 재하된 경우와 재하되지 않은 경우에 대해 각각 해석하여 그 증분으로 정의하였으며 식(1)의 타당성을 MCS를 통해 검증하였다. 식(1)을 총 공칭장력으로 표준화(normalization)한 후 일반화된 경우에 대해 표현하기 위해 총 세 가지 하중비 변수를 정의하였다.

$$\xi = \frac{T_{CB} + T_{GD} + T_{DW}}{T_{CB} + T_{GD} + T_{DW} + T_{LL}}, \quad \eta = \frac{T_{CB} + T_{GD}}{T_{CB} + T_{GD} + T_{DW}}, \quad \chi = \frac{T_{CB}}{T_{CB} + T_{GD}} \quad (2)$$

* 학생회원 · 서울대학교 건설환경공학부 박사과정, 공학석사 (E-mail:hhlee07@snu.ac.kr) - 발표자

** 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사 (E-mail:chslee@snu.ac.kr)

3. 케이블 부재의 저항강도 최적화 기반 코드캘리브레이션

케이블 부재의 코드캘리브레이션을 위해서 현수교 주케이블 및 사장교 케이블에 대해 허용응력설계법 상의 설계안전율 2.5/2.2에 해당하는 신뢰도지수인 6.96과 5.77를 목표신뢰도지수로 설정하였다. 설정된 목표신뢰도를 만족하는 표준화된 저항강도를 계산하기 위해 역신뢰도해석 문제를 식(3)과 같이 정의하였으며 여기서 계산된 목표강도 \bar{S}_T 를 바탕으로 코드캘리브레이션을 위한 최적화 문제를 식(4)와 같이 정의한다.

$$\beta(\bar{S}_T(\phi, \gamma, \xi, \eta, \chi)) = \beta_T \tag{3}$$

$$\text{Min}_{\phi, \gamma} \Pi = \frac{1}{2} \int_{\xi_i}^{\xi_w} \int_{\eta_i}^{\eta_w} \int_{\chi_i}^{\chi_w} (\bar{S}_0(\phi, \gamma, \xi, \eta, \chi) - \bar{S}_T)^2 d\chi d\eta d\xi \tag{4}$$

여기서 $\beta(\bar{S}_T(\cdot))$ 와 β_T 는 각각 목표강도 \bar{S}_T 가 확보하는 신뢰도지수 및 목표신뢰도지수를 의미하며 ϕ , γ 는 각각 저항계수와 하중계수를 성분으로 하는 벡터를 의미한다. 각 하중비 변수의 적분구간은 실교량 케이블부재의 하중비 결과에 근거하여 설정하였으며 유일해 결정을 위한 구속조건은 현행기준의 케이블 저항계수값(0.525/0.600)으로 설정하였다. 최적화를 통해 계산한 하중-저항계수 및 신뢰도지수는 다음과 같다.

표 1. 현수교 주케이블의 하중-저항계수

ϕ	γ_{CB}	γ_{GD}	γ_{DW}	γ_{LL}
0.525	1.083	1.245	1.464	1.482

표 2. 사장교 케이블의 하중-저항계수

ϕ	γ_{DC}	γ_{DW}	γ_{LL}
0.600	1.181	1.489	1.501

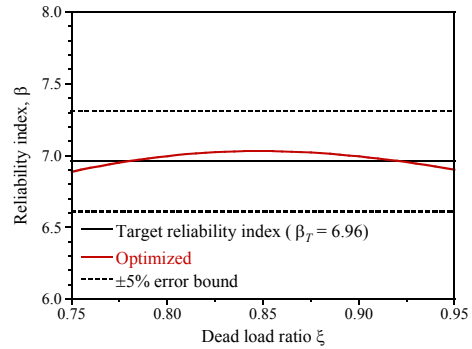


그림 1. 현수교 주케이블의 신뢰도지수(최적화)

4. 결론

케이블 부재의 한계상태식을 선형화 및 표준화한 후 최적화를 수행하는 코드캘리브레이션기법을 제안하였다. 또한, 제안된 방법에 따라 계산된 하중-저항계수가 확보하는 신뢰도지수와 목표신뢰도지수 사이의 오차가 5%미만으로 발생하여 제안된 기법이 충분히 타당한 결과를 도출하였음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 케이블교량글로벌연구단 제2세부과제(18SCIP-B119963-03)를 통한 연구비 지원으로 이루어졌습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 이해성, 김지현, 이호현, 이승한, 백인열 (2016). 도로교설계기준(한계상태설계법)-케이블교량편 Code Calibration, KBRC TRS-046, 교량설계핵심기술연구단
- Hae Sun Lee, Changhoon Bae and Ji Hyeon Kim (2017) "Assessment of Reliability Levels and Adjustment of Load-resistance Factors Using Optimization for Gravitational Load-governed Limit State of the AASHTO LRFD Bridge Design Specifications" KSCE Journal of Civil Engineering, (online published)