

재료저항계수와 부재저항계수를 적용한 콘크리트 성능설계의 신뢰도기반 계수보정

Reliability-based calibration for performance-based design of concrete structures with material and member resistance factors

백 인 열¹⁾ 신 수 봉²⁾ 방 대 재³⁾
Paik, In Yeol Shin, Soo Bong Bang, Dae Jae

ABSTRACT

Recently, most of the international design code for concrete structures are trying to develop performance-based design specification with the limit state concept. To accomplish this object, it is necessary to define required performance and to measure the performance level of structure. The reliability index is one of the most attractive indexes to express the level of performance. In this paper, prestressed concrete beam is designed following member resistance factor and material resistance factor format and the reliability indexes are obtained and compared for different sets of resistance factors. Compatible sets of safety factors could be calibrated for given level of target reliability index applying the similar method presented in this paper.

요 약

현재 국제적인 콘크리트설계기준의 동향은 한계상태의 개념을 기본으로 하여 구조물에 요구되는 성능을 중심으로 새로이 한계상태를 정의하려는 노력이 진행되고 있다. 이를 위해서는 구조물의 요구성능을 정의하고 성능수준에 대한 만족도를 측정하는 등의 과제를 해결해야 하는 문제가 놓여있다. 성능을 만족하는 정도를 나타낼 수 있는 지수로는 현재 신뢰도지수가 가장 주목받고 있다. 이 논문에서는 PSC beam을 대상으로 단면력저항계수 및 재료저항계수 체계로 설계를 시행한 후, 여러가지의 서로 다른 저항계수 세트에 대한 신뢰도지수를 각각 구하여 값을 비교하였다. 향후 주어진 목표신뢰도 수준에 부합하는 저항계수 조합을 산정하는 기초 자료로 사용할 수 있다.

-
- 1) 정회원, 경원대학교 토목환경공학과 부교수
 - 2) 정회원, 인하대학교 토목공학과 교수
 - 3) 학생회원, 경원대학교 토목환경공학과 석사졸업

1. 서론

신진국 콘크리트 구조설계기준의 동향을 분석해 보면, 거의 모든 기준이 한계상태설계법을 기본으로 하고 있으며, 최근에는 이러한 한계상태의 개념을 기본으로 하여 구조물에 요구되는 성능을 중심으로 새로이 한계상태를 정의하려는 노력이 진행되고 있다. 이를 위해서는 먼저 구조물의 요구성능을 정의하고 통계변수로 이루어진 성능수준에 대한 만족도를 측정하는 등의 과제를 해결해야 하는 문제가 놓여있다. 요구되는 성능을 만족하는 정도를 나타낼 수 있는 지수로는 현재 신뢰도기반 설계기준에서 사용하고 있는 신뢰도지수가 가장 주목받고 있다. 신뢰도지수는 확률에 근거하고 있으므로, 성능한계상태별로 정의된 성능요구수준을 만족하는 정도를 나타내는 지표로 매우 적합하게 사용할 수 있다. 이 논문에서는 PSC beam을 대상으로 단면력저항계수 및 재료저항계수 체계로 설계를 시행한 후 각각의 경우에 대한 신뢰도 지수를 비교해본다.

2. PSC Beam 소요강도 및 통계값

이 논문에서는 지간이 20~40m, 거더 간격이 2.1m인 PSC 빔교를 대상교량으로 선정하였으며, 거더 단면의 제원은 백인열 등(2005)에서 사용한 단면과 동일하다. 교량에 가해지는 하중으로는 고정하중과 현행 도로교설계기준(2005)의 DB-24 활하중만을 고려하여 식 (1)과 같은 현행 도로교 하중조합과 식 (2)와 같은 AASHTO LRFD 설계기준에 대한 하중조합에 대하여 구조해석을 수행하였다.

$$U = 1.3D + 2.15L \quad (1)$$

$$U = 1.25D_{1,2} + 1.50D_3 + 1.75L \quad (2)$$

신뢰도 분석의 과정으로서 외력에 의한 계수하중과 동일한 설계저항강도로부터 공칭 휨강도를 재계산하여 신뢰도 분석을 수행하게 된다. 현재 신진국 주요 설계기준의 저항계수 적용 체계는 식 (3)과 같이 현행 도로교설계기준과 미국의 ACI 및 AASHTO LRFD에서 사용하는 단면의 공칭 저항 능력에 단면력저항계수 ϕ 를 적용하는 체계와 식 (4)와 같이 Eurocode에서 사용하는 재료부분안전계수 γ_m 을 적용하는 체계로 나눌 수 있다.

$$R_d = \phi R(X_{k,i}) \quad (3)$$

$$R_d = R \left(\frac{X_{k,i}}{\gamma_{m,i}} \right) \quad (4)$$

신뢰도 분석을 수행하기 위해서 이 연구에서는 백인열 등(2007)에서 사용한 바와 동일한 값을 사용하였는데, 재료의 통계자료는 국내에서 수집된 자료를 바탕으로 통계 처리하여 사용하였고, 그 이외의

표 1 지간별 설계소요강도(M_u)

지간	M_{d1}	M_{d2}	M_{d3}	M_{L+i}	현행 도로교 하중계수 소요강도 M_u	LRFD 하중계수 소요강도 M_u
20m	653.8	901.8	116.3	1243.9	4848.0	4295.9
25m	1118.8	1367.6	185.2	1648.1	7016.4	6269.9
30m	1938.7	1951.2	270.0	2043.7	9801.7	8843.8
35m	3157.4	2621.4	370.8	2431.5	13222.1	12034.8
40m	4867.0	3411.7	487.5	2816.2	17450.9	16007.9

통계자료는 Nowak(2000)의 통계자료를 사용하였으며, 하중에 대한 통계자료는 Nowak(1999)이 수행한 AASHTO LRFD 교량 설계기준의 보정연구에서 사용한 값을 적용하였다.

3. 신뢰도 분석

하중-저항계수법으로 설계된 PSC Beam 교량의 신뢰도 분석을 위한 한계상태함수 방정식은 단면의 공칭저항강도와 외력에 의해 단면에 작용하는 단면력의 차이로 정의되며, 저항에 대한 확률 분포는 로그정규분포로 가정하였고 하중에 대한 확률분포는 정규분포로 가정하여 일반적으로 널리 사용되는 선형신뢰도 해석방법인 Rackwitz-Fiessler 방법으로 신뢰도 지수를 산정하여 그림 1-4에 나타내었다. 저항계수의 적용 형태에 대하여 단면의 공칭 저항 능력에 단면력 저항계수 ϕ 를 적용하는 현행 도로교 설계기준($1.3D_{1,2,3} + 2.15L$, $\phi = 0.85$)과 LRFD 설계기준($1.25D_{1,2} + 1.50D_3 + 1.75L$, $\phi = 0.75$)에 대한 신뢰도 산정 결과, 현행 도로교 설계기준의 신뢰도 지수 $\beta = 6.87 \sim 7.24$ 이며, LRFD 설계기준에 대한 신뢰도 지수 $\beta = 3.96 \sim 4.19$ 로 현행 도로교 설계기준의 신뢰도 지수가 매우 높게 산정되었으며, 저항계수의 적용 형태가 재료 저항계수를 적용하는 Euro code에 대한 신뢰도 산정 결과, 현행 도로교 설계기준과 유사한 $\gamma_c = 1.5$, $\gamma_s = 1.15$ 인 경우에 대해 현행 도로교 하중계수를 적용한 경우의 신뢰도 지수 $\beta = 6.68 \sim 7.03$

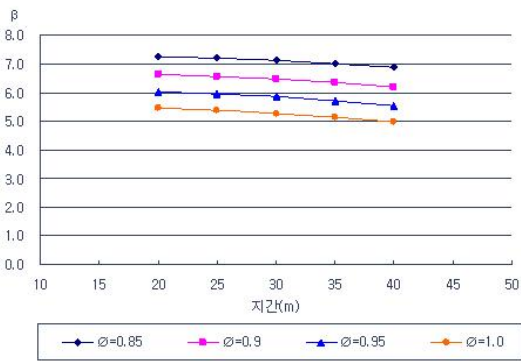


그림 1 현행 도로교 하중계수에 대한 단면력 저항계수 체계의 신뢰도 지수

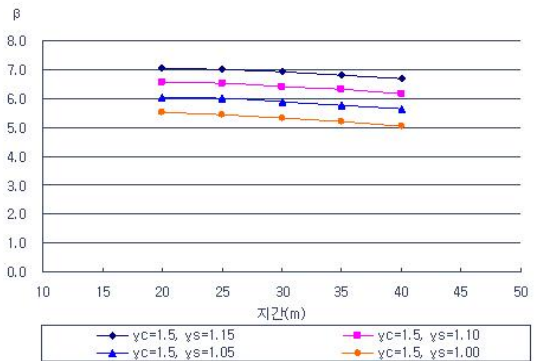


그림 2 현행 도로교 하중계수에 대한 재료 저항계수 체계의 신뢰도 지수

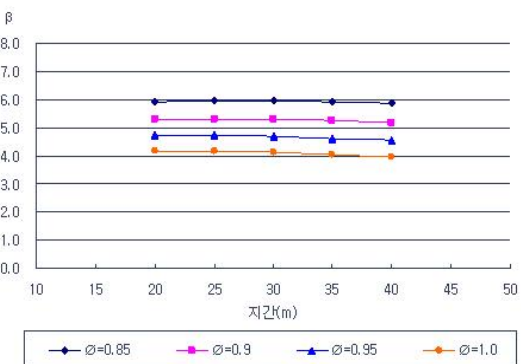


그림 3 LRFD 하중계수에 대한 단면력 저항계수 체계의 신뢰도 지수

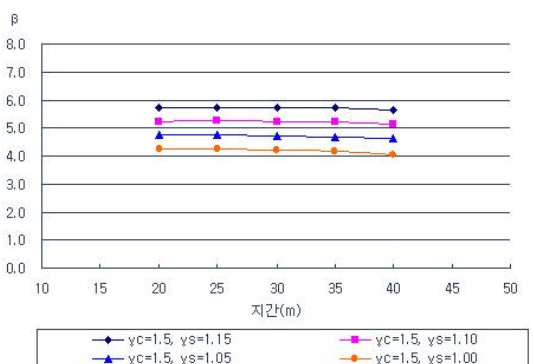


그림 4 LRFD 하중계수에 대한 재료 저항계수 체계의 신뢰도 지수

이며, 등가 단면력 저항계수가 LRFD 설계기준과 유사한 $\gamma_c = 1.5$, $\gamma_s = 1.0$ 인 경우에 대해 LRFD 하중 계수를 적용한 경우의 신뢰도 지수 $\beta = 4.06 \sim 4.24$ 이다.

4. 결 론

현재 대부분 선진국의 구조설계기준은 한계상태설계법을 기본으로 하고 있으며, 이러한 한계상태의 개념을 기본으로 하여, 보다 종합적이며 상호 연관적인 설계를 목표로 하는 성능중심 설계 개념을 개발하는 과정에 있다. 요구되는 성능을 만족하는 정도를 나타낼 수 있는 지수로는 현재 신뢰도기반 설계기준에서 사용하고 있는 신뢰도지수가 가장 주목받고 있다. 신뢰도를 기반으로 설계기준의 부분안전 계수를 보정하는 예제를 통하여, 향후 각기 다른 조합의 하중계수들과 재료 저항계수 및 단면력 저항 계수 조합들을 사용하는 경우에 대한 신뢰도 지수 값을 구하여, 목표신뢰도 성능수준을 만족하도록 안전 계수를 보정하는 연구를 수행하고 있다.

감사의 글

이 연구는 (사)한국콘크리트학회 성능중심설계기준표준화연구단과 서울대학교 교량설계핵심기술연구단을 통한 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업 지원금에 의하여 이루어졌으며 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부, 도로교 설계기준, 2005.
2. 백인열, 황의승, 황철성, 김기준, “프리스트레스트 콘크리트 거더 교량의 강도한계 상태에 대한 신뢰도 분석”, 대한토목학회 정기 학술대회 논문집, 2005.
3. 백인열, 김대중, 방대재, “PSC Beam 교량의 휨강도 및 전단강도에 대한 신뢰도 분석”, 한국콘크리트학회 정기 학술대회 논문집, 2007.
4. Eurocode (EN 1992): Design of Concrete Structures
5. AASHTO, "LRFD Bridge Design Specifications," American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA., 2004.
6. Nowak, A. S. and Collins, K. R., Reliability of structures, McGraw-Hill, 2000.
7. Nowak, A. S., Calibration of LRFD Bridge Design Code, Report 368, NCHRP, 1999.