

# 콘크리트구조물의 성능설계를 위한 한계상태설계기준의 신뢰도 및 민감도 분석

## Reliability and Sensitivity Analysis of Limit State Design Code for Performance Design of Concrete Structures

백 인 열\*  
Paik, Inyeol

### 요 약

이 논문에서는 콘크리트구조물의 성능설계를 위한 하중조합의 구성과 이의 신뢰도수준을 정하는 과정을 제시한다. 설계기준의 작성 및 적용에 관하여 논리적인 개념을 제시하고 있는 Eurocode 의 하중조합에 관한 기본 원칙을 살펴보고, 국내 및 미국의 콘크리트구조물의 설계에서 적용하고 있는 하중조합을 분석하여 본다. 구조물 설계에 관한 안전율의 결정에 있어서 널리 사용되고 있는 통계 및 신뢰도에 기반한 분석을 통하여, 현행 하중조합을 사용하고 재료별 저항계수를 적용하는 경우에 제공하게 되는 신뢰도 수준을 살펴 본다. 철근콘크리트 보와 기둥의 예제를 이용하여 휨, 전단 및 축력에 관한 신뢰도 수준과 이에 영향을 미치는 설계변수들의 민감도분석을 수행한다.

**keywords** : 성능설계, 신뢰도, 민감도, 하중조합, 재료저항계수, 기둥의 신뢰도

### 1. 서 론

이 연구에서는 콘크리트구조물의 성능설계기준의 작성 및 적용에 있어서 중요한 사항의 하나인 하중조합의 구성과 하중조합의 계수를 검토하는 과정을 보인다. 먼저, Eurocode 및 설계 가이드에서 제시하고 있는 하중조합에 관한 기본 원칙을 검토한다. 이 과정을 통하여 현재 사용하고 있는 하중조합을 구성하고 있는 하중의 종류 및 하중조합계수를 분석할 수 있다. 현재 국내 콘크리트구조설계기준은 미국의 ASCE 하중기준에서 제시하고 있는 하중조합을 기본으로 채택하여, 콘크리트와 강을 합성한 합성구조물의 설계 시에 발생할 수 있는 하중조합 적용상의 모호함을 해소하는 목적도 가지고 있다.

콘크리트 구조물의 성능설계기준에서 채택할 하중조합 또한 합성구조의 설계를 염두에 두고 구성하여야 하므로, 현행 설계기준의 하중조합을 기본으로 적용함을 원칙으로 하고, 이에 대하여 통계 및 신뢰도에 기반한 분석을 수행하여 설계기준이 목표로 하고 있는 소정의 안전율을 만족시키는지의 여부를 분석한다.

성능설계기준에서 제시하는 재료별 저항계수를 적용하여 국내 시공현장의 재료강도에 대한 통계 특성을 이용한 신뢰도 분석을 수행한다. 철근콘크리트 보 및 기둥에 대하여, 휨 및 축력, 전단에 대한 신뢰도지수를 구하고, 신뢰도 지수에 미치는 설계변수의 민감도 분석을 수행하여 구조물의 설계에 영향을 미치는 설계변수의 중요도를 분석한다.

\* 정회원 • 경원대학교 토목환경공학과 교수 pinyeol@kyungwon.ac.kr

## 2. 설계 하중조합

구조물 설계기준의 주요한 기본개념에 관한 논리적인 설명이 가장 심도 있게 제시되어 있는 Eurocode에서는 부분안전계수를 이용한 설계를 위한 하중조합의 구성에 관하여 다음과 같이 기술하고 있다.

하중조합을 구성하는 하중의 종류를 상시하중(permanent action)  $P$ , 변동하중(variable action)  $Q$ , 우발하중(accidental action)  $A$ 로 구분한다. 변동성 하중의 조합에 있어서는 변동하중의 주하중과 부하중의 조합으로 이루어지며 부분안전계수를 곱하여 조합한다(Eurocode 2002).

내하성능 검증을 위한 기본하중조합은 하중의 종류별로 각각 적용되는 하중계수  $\gamma$ 를 곱하여 조합하게 되는데, 이 때, 변동하중의 부하중에는 식 (1)과 같이 조합계수  $\psi$ 를 추가로 곱하여 조합하게 된다.

$$U = \sum_i \gamma_{Pi} P_i + \gamma_{Q1} Q_1 + \sum_{j \geq 2} \psi_j \gamma_{Qj} Q_j \quad (1)$$

여기서,  $Q_1$ 은 변동하중의 주하중을 의미한다.

식 (1)에서 하중계수  $\gamma$ 는 하중의 기준값보다 예상을 초과하는 하중이 발생할 확률 및 구조해석의 단순화로 인하여 발생하는 초과 요인 등을 고려하는 계수이며, 조합계수  $\psi$ 는 조합에 의한 초과확률이 각 하중의 기준값의 초과확률과 대략 비슷한 수준이 되도록 감안하여 1 보다 작은 값으로 표현한 계수이다.

내하성능 검증을 위한 지진하중 등 우발하중을 포함하는 하중조합은, 아래 식 (2)와 같이, 계수를 곱하지 않은 상시하중과 우발하중을 조합하고, 조합계수를 곱한 부하중과 조합한다.

$$U = \sum_i P_i + A + \sum_j \psi_j Q_j \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 하중조합을 이루는 기본 원칙으로 삼아서 성능기준에서 적용할 하중조합을 하중종류로 구분하면 다음과 같다. 활하중  $L$ 이 이루는 기본 활하중조합은 식 (3)과 같으며, 여기에는, 구조물 자중을 포함하는 고정하중  $D$ , 수압  $F$ , 변형 유발 하중  $T$ 로 이루어진 상시하중 및 지붕활하중  $L_r$ , 적설하중  $S$ , 우수하중  $R$  중의 하나로 이루어진 부하중으로 구성된다(한국콘크리트학회 2007, ASCE 2006).

$$U = \underbrace{1.2(D+F+T) + 1.6(\alpha_H H_v + H_h)}_{\text{상시하중}} + \underbrace{1.6L}_{\text{주하중}} + \underbrace{0.5(L_r \text{ 또는 } S \text{ 또는 } R)}_{\text{부하중}} \quad (3)$$

식 (3)에서는 토압 및 지하수에 의한 영향을 수직성분  $H_v$ 와 수평성분  $H_h$ 로 구분하여 토피의 두께에 따라 연직하중을 보정할 수 있도록 하고 있다.

풍하중  $W$ 를 변동하중의 주하중으로 식 (1)을 적용하여 풍하중조합을 구성하면 식 (4)와 같다.

$$U = \underbrace{1.2D}_{\text{상시하중}} + \underbrace{1.3W}_{\text{주하중}} + \underbrace{1.0L + 0.5(L_r \text{ 또는 } S \text{ 또는 } R)}_{\text{부하중}} \quad (4)$$

참고로, 미국 하중기준에서는 풍하중계수로  $1.6W$ 를 택하고 있는데, 이는 풍하중의 크기  $W$ 에 1.0 보다 작은 방향성계수를 곱하여 감소된 값을 적용하기 때문이다. 국내에서는 감소시키지 않은  $W$ 를 사용하며, 따라서  $1.3W$ 를 하중조합으로 하는 경우와 실질적으로는 비슷한 수준이라고 할 수 있다(신현목 외 2007).

우발하중으로 분류되는 지진하중  $E$ 를 주하중으로 하는 하중조합으로 식 (5)와 같은 지진하중조합을 구성할 수 있다.

$$U = \frac{1.2D}{\text{상시하중}} + \frac{1.0E}{\text{주하중}} + \frac{1.0L+0.2S}{\text{부하중}} \quad (5)$$

### 3. 신뢰도 및 민감도 분석

콘크리트 보의 휨에 대하여 예를 들면, 내하성능 검증을 위한 한계상태함수  $g$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$g = R(f_{ck}, f_y, A_s, d) - D - L \quad (6)$$

여기서, 구조물의 저항을 나타내는  $R$ 을 구성하는 주요 설계변수는 콘크리트 설계기준 압축강도  $f_{ck}$ , 철근의 항복강도  $f_y$ , 철근 면적  $A_s$ , 단면의 유효깊이  $d$ 이다.

식 (6)과 같은 한계상태함수에 대한 신뢰도지수  $\beta$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다(Nowak 2000).

$$\beta = \frac{\{G\}^T \{z^*\}}{\sqrt{\{G\}^T \{G\}}} \quad (7)$$

또한, 민감도지수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\{\alpha\} = \frac{\{G\}}{\sqrt{\{G\}^T \{G\}}} \quad (8)$$

식 (7), (8)에서  $G_i$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$G_i = - \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial z_i} \right|_* = - \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_* \sigma_{x_i}^e \quad (9)$$

여기에서, 설계변수  $x$ 에 대한 표준화된 변수  $z$ 는 식(10)과 같이 정의된다.

$$z^* = \frac{x^* - \mu_x^e}{\sigma_x^e} \quad (10)$$

위 식에서  $\mu$ 는 평균,  $\sigma$  표준편차, 첨자 \*는 설계점에서의 값을 의미하며, 첨자  $e$ 는 정규분포로 치환한 값을 의미한다.

휨을 받는 보와 축력 및 휨을 받는 기둥을 예제로 하여 신뢰도분석을 수행한 결과를 도시하면 그림 1과 같다. 신뢰도분석에 적용한 하중조합은 기본 활하중조합이며, 재료저항계수로 콘크리트  $\phi_c = 0.65$ , 철근  $\phi_s = 0.9$ 를 적용하였다. 보의 전단강도는 변각트러스 식을 이용하였다. 그림 1은 총 작용하중에 대한 고정하중의 비율에 따라 작성한 것이다. 이 그림에서 보의 휨 및 전단에 대하여는 하중비율에 무관하게 약 3.5를 상회하는 신뢰도지수를 얻을 수 있다. 기둥에 관한 신뢰도지수는 이보다 큰 값을 얻으며, 순수 휨, 순수 축력, 전이구역 등 기둥의 파괴양상에 따라 신뢰도지수의 분포가 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 파괴양상에 따라 콘크리트와 철근이 미치는 중요도가 차이가 있기 때문이다. 표 1에는 보의 휨강도에 대한 설계변수의

민감도분석 결과를 나타내었으며, 구조물의 저항에는 철근 인장강도, 철근면적 및 유효깊이가 큰 영향을 미치고, 콘크리트의 압축강도는 상대적으로 영향이 미미함을 알 수 있다.

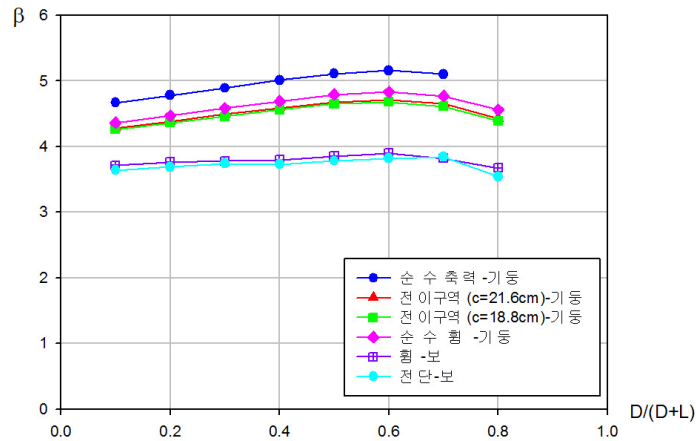


그림 1 활하중조합에 대한 신뢰도 분석

표 1 저항 및 하중 설계변수에 대한 민감도 분석

R				Q		
$f_{ck}$	$f_y$	$A_s$	d	$D_1$	$D_2$	L
-0.0087	-0.0948	-0.0845	-0.1790	0.2400	0.0728	0.9428

### 감사의 글

이 논문은 건설교통R&D정책·인프라사업 성능중심의 건설기준 표준화 과제('06~'11) 연구결과의 일부입니다. 연구 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

신현목, 백인열 (2007) 하중조합, 강도감소계수 및 모멘트 재분배, **콘크리트학회지**, 10(2), pp.20~24.  
 한국콘크리트학회 (2007) 콘크리트구조설계기준 및 해설.  
 Eurocode (2002) Designer's guide to EN 1990 : Basis of structural design, *Thomas Telford*, London.  
 ASCE (2006) Minimum design loads for buildings and other structures, SEI.  
 Nowak, A.S. and Collins, K.R. (2000) Reliability of structures, *McGraw-Hill*.