



국내 통계자료를 이용한 설계기준의 하중저항계수 검증

김지상^{1)*} · 김종호²⁾

¹⁾서경대학교 토목공학과 ²⁾㈜비엔지컨설턴트

Calibration of Load and Resistance Factors in KCI Code Based on Domestic Data

Jee-Sang Kim^{1)*} and Jong-Ho Kim²⁾

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Seokyeong University, Seoul 136-704, Korea

²⁾BNG Consultants Co. Ltd., Seongnam 463-825, Korea

ABSTRACT The load combinations in current KCI Design Code are determined with reference to those in ACI 318-05, which adopts the LRFD (load and resistance factor design) format. The load and resistance factors in LRFD format should be determined to meet the required levels of reliability index or probability of failure for various predetermined failure modes, which are also based on the statistical data reflecting locality and contemporary situation. However, the current KCI Design Code has been written utilizing foreign data, because of insufficiency in accrued data in Korea. This study considered the current safety levels of KCI Code based on published domestic data to evaluate appropriateness of the current KCI regulations. Based on the calibrated reliability index of the existing Code, the new resistance factors are suggested. The results presented in this paper can be considered as a basic research for establishment of unique design format for future Korean Codes.

Keywords : LRFD, KCI design code, reliability index, load factor, resistance factor

1. 서 론

구조 신뢰성 이론을 적용하여 구조물의 안전성을 합리적으로 평가하고 이를 설계 단계에서 고려하고자 하는 노력의 결과로, 최근 미국과 유럽을 비롯한 많은 나라에서 한계상태설계법(limit state design)에 기반을 둔 구조 신뢰성 이론을 이용하여, 하중 및 저항 성분들의 변동 특성을 고려한 부분안전계수(partial safety factors)에 의해 대부분의 설계기준들(ACI,¹⁾ ASSHTO,²⁾ CEB-FIB³⁾ 등)이 기술되고 있다. 이러한 설계법 중에 현재 미국 등 북미에서 주로 사용하고 있는 용어인 하중-저항계수 설계법(load and resistance factor design)은 1980년대 이후 Ellingwood 등⁴⁾ 과 Nowak 등⁵⁾의 연구 결과를 AISC (American Institute of Steel Construction)와 AASHTO에서 채택한 후 현재 많은 선진국에서 채택하고 있는 확률적 한계상태설계법의 한 형식이다. LRFD와 같은 한계상태설계법은 구조물이나 구조 부재가 설계시 예상한 구조적 강도 성능을 상실하거나 요구되는 기능을 더 이상 수행할 수 없는 상황에

도달했음을 의미하는 한계 상태 또는 파괴 모드에 대하여 구조 신뢰성 해석을 통해 구조물이 적절한 안전도를 확보할 수 있도록 하는 설계법이다. 또한 이 설계법은 하중계수 및 저항계수의 조합으로 이루어져 있고, 이 계수들의 선정은 대상 파괴 모드에 대하여 미리 규정된 파괴 확률(probability of failure) 또는 신뢰도 지수(reliability index)에 부합되도록 이루어져야한다. 이러한 LRFD의 안전계수 결정 과정은 하중 및 저항에 대한 통계적 특성 모델을 필요로 하는데, 국내의 현행 콘크리트 구조물의 시방서나 설계기준은 한계 상태 방정식의 하중과 저항 관련 부분 안전계수들의 결정을 외국의 연구 성과에 근거한 통계자료를 사용하고 있는 실정이다. 또한, 구조물에 대한 신뢰도 지수 또는 파괴 확률에 대한 명시적 제시가 없으며, 설계 기준 검증의 많은 부분이 경험적 또는 공학적 판단에 근거하고 있는 것으로 파악되었다. 따라서 이 연구에서는 LRFD의 합리적 국내 적용을 위하여 콘크리트 구조물의 안전도에 직접적인 영향을 미치는 다양한 구조 형식, 부재 종류 및 하중 조건 등 설계 변수들의 불확실성에 대한 현황 파악을 실시하고 국내의 연구 자료를 이용하여 각 설계 변수들의 통계적 특성에 대한 모델을 개발하였다. 개발된 모델을 적용하여 현행 설계기준에 내포된 신뢰도를 검정하고 이를 바탕으로 최적

*Corresponding author E-mail: zskim@skuniv.ac.kr

Received March 10, 2011, Revised May 6, 2011,

Accepted June 20, 2011

©2011 by Korea Concrete Institute

저항 계수와 목표 신뢰도 지수(target reliability index, β_T)를 제안하였다.

2. 신뢰성 이론에 의한 설계기준의 검증

2.1 하중저항계수설계법(LRFD)

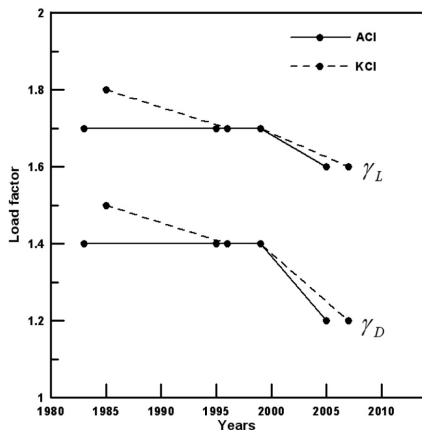
하중저항계수설계법은 구조 신뢰성 이론에 기초한 설계 방법으로 하중의 불확실성을 하중계수로, 저항의 불확실성을 저항계수로 표현하며, 일반적인 설계식은 식 (1)과 같다.

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i L_i \quad (1)$$

여기서, R_n 은 부재 공칭강도 또는 저항, L_i 는 설계하중, ϕ 는 저항계수(강도감소계수), γ_i 는 하중계수들이다. 현행 콘크리트구조설계기준에서 기본이 되는 고정하중(D)과 활하중(L)의 합으로 하중항을 표현하면 식 (1)은 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$\phi R_n \geq \gamma_D D_n + \gamma_L L_n \quad (2)$$

현재 선진 외국의 많은 설계기준들이 이 형식을 채택하고 있으며, 저항계수(ϕ)와 하중계수(γ_i)는 각 하중 조합에 대하여 구조물의 신뢰도가 목표 신뢰도와 같게 구조 신뢰성 이론에 의해 적절하면서도 균일한 안전도를 확보할 수 있도록 결정하여야 한다.⁶⁾ 따라서 국내 설계기준의 신뢰도 기반 한계상태설계법의 적용을 위해서 저항 및 하중 관련 통계 특성에 대한 연구 자료 축적과 이에 바탕을 둔 합리적인 신뢰성 해석 방법을 이용하여 현행 설계 기준의 신뢰도를 검증하는 것이 필요하다. Fig. 1은 국내 콘크리트구조설계기준의 저항계수 및 하중계수의 변화 추이를 ACI-318의 부분 안전계수들과 비교하여 나타낸 것으로 우리나라 설계기준의 사하중 및 활하중에 대한 하중계수는 ACI-318과 유사하게 감소하는 추세를 보이고 있으며, 저항계수의 경우 대체로 ACI-318의 값보다 작은 값으로 결정되고 있는 것으로 나타났다.



(a) Load factors

2.2 개선된 일계이차모멘트법(AFOSM)을 이용한 부분 안전계수의 산정

하중과 저항의 통계적 특성이 주어진 경우 목표 신뢰도 지수에 부합하도록 구조 신뢰성 이론을 이용하여 이루어지는 부분안전계수의 결정은 주로 Monte Carlo Simulation (MCS)방법이나 개선된 일계이차모멘트법(AFOSM)을 이용하는데, 이 연구에서는 AFOSM을 통해 신뢰성 해석을 수행하였다. 이 방법에서 작용 하중이나 저항을 X_i 로 표시하는 한계 상태 방정식 g 는 식 (3)과 같이 표현할 수 있고,

$$g = (X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3)$$

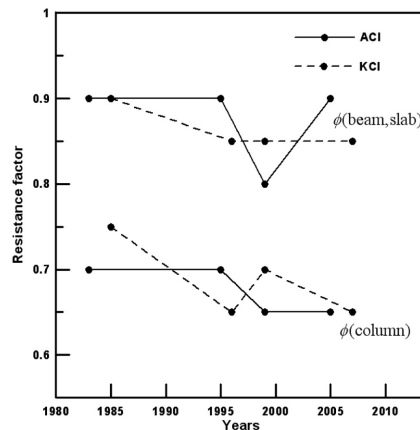
각 확률 변수가 모두 통계적으로 독립인 정규분포 확률 변수라면 설계점 $X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*$ 과 신뢰도 지수 β 는 식 (4), (5) 및 (6)이 동시에 만족되도록 반복 계산을 통해 구할 수 있다.

$$\alpha_i^* = \frac{\left(\frac{\partial g}{\partial X_i^*}\right) \sigma_{X_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i^*}\right)^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (4)$$

$$X_i^* = X_i - \alpha_i^* \beta_T \sigma_{X_i} \quad (5)$$

$$g = (X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (6)$$

여기서, $\left(\frac{\partial g}{\partial X_i^*}\right)$ 는 설계점에서 구한 한계 상태 방정식의 밀도함수 값이며, α_i^* 는 확률 변수 X_i 의 방향여현을 설계점에서 계산한 값이다. 이때 확률 변수가 정규분포를 따르지 않으면 원분포의 확률밀도함수값 및 누적 분포함수값이 설계점에서 등가정규분포의 확률밀도함수와 누적 분포함수의 값과 동일하도록 하는 등가정규분포의 평균과 표준편차로 변환하는 Rackwitz and Fiessler⁷⁾방법을 이



(b) Resistance factors

Fig. 1 Comparison of the load and resistance factors

용하여 목표 신뢰도 지수에 대응하는 부분안전계수를 구할 수 있다. 등가정규분포의 평균과 표준편차는 식 (7)과 (8)로 정의 할 수 있다.

$$\mu_{X_i}^e = x^* - \sigma_{X_i}^e [\Phi^{-1}(F_{X_i}(x^*))] \quad (7)$$

$$\sigma_{X_i}^e = \frac{1}{f_{X_i}(x^*)} \phi[\Phi^{-1}(F_{X_i}(x^*))] \quad (8)$$

2.3 하중 및 저항의 통계적 특성

철근콘크리트 구조 부재의 저항 능력은 사용 재료의 역학적 특성과 부재 단면 치수의 기하적 성질 등에 의한 불확실성을 반영하여 결정하여야 한다. 일반적으로 철근콘크리트 구조 부재의 확률적 특성을 분석하기 위해서는 방대한 통계 자료가 필요하며, 현장에서 발견되는 여러 가지 단면 형태 및 시공 오차를 반영할 수 있어야 하지만, 실질적으로 현장 조건을 고려한 많은 실험을 한다는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 이러한 직접 실험의 제한성을 피하며, 합리적인 결과를 얻을 수 있는 방법이 Monte Carlo simulation(MCS)기법이다. 이 연구에서는 신뢰성 해석을 위한 저항력 선정을 MCS기법을 사용한 연구 결과⁸⁾를 이용하여 다양한 설계 변수들을 고려하여 저항력을 분석하고 각 결과 값들의 평균값으로 철근콘크리트 구조 부재의 저항력의 확률 특성을 결정하였다.⁹⁾ 평균값을 대표값으로 결정한 이유는 MCS 방법을 통한 저항력 산정 방법에서 하위 5%에 대한 값들의 선형 정규화된 평균과 변동계수의 값으로 적정한 변동성이 고려되었다고 판단되었기 때문이며, 저항력의 확률 분포는 모두 정규 분포로 가정하였다. 또한 사용 재료에서 고강도 콘크리트의 사용이 늘고 있는 현재 국내 실정을 고려하기 위해 설계기준강도 40 MPa를 기준으로 보통 강도 콘크리트와 고강도 콘크리트를 나누어 분석하였다. 신뢰성 해석에 사용된 철근콘크리트 부재 저항력의 확률 특성은 Table 1에 정리되어 있다. 여기서, R 은 MCS를 통해 분석된 평균 저항력, R_n 은 설계기준에서 제시하는 공칭저항력을 나타내며, δ_R 은 변동계수이다. 또한, 신뢰성 해석에 필요한 하중 모형은 한국건설기술연구원에서 1989년 국내 구조설계 기준의 개발을 위한 연구의 기초 작업으로

Table 2 Statistical parameters for load models

Variables		Bias	COV	Distribution
L	Slab	0.872	0.244	Type-I
	Beam	1.038	0.239	
	Column	0.864	0.239	
D		1.050	0.100	Normal

조사·분석된 활하중의 자료를 사용하였으며,¹⁰⁾ 국내에서는 고정 하중에 대한 신뢰할 만한 확률 특성 모델에 대한 자료를 구할 수 없어 합리적인 것으로 평가되는 Ellingwood 등의 자료를 인용하였다.⁴⁾ 하중모형의 확률 특성은 Table 2에 정리되어 있으며, 이 자료를 이용하여 현행 콘크리트구조설계기준의 신뢰도 수준을 검증하고, 목표 신뢰도를 결정하였다.

3. 현행 콘크리트구조설계기준(2007)의 신뢰도 검증

신뢰성 이론을 통해 구조물의 안전도를 확률론적으로 평가하는 방법은 일반적으로 안전도를 평가하는 데 이용하는 통계적 정보의 성격에 따라 구분이 되는데, AASHTO와 ACI의 설계기준에서 참고하고 있는 Nowak 등¹¹⁾의 연구 결과에서는 각 확률변수의 평균과 분산을 이용하여 파괴확률에 대한 상대적인 신뢰도지수를 근사적으로 산정하는 방법을 사용하였다. 일반적으로 0.05 크기의 구간으로 보정되는 저항계수를 0.85, 0.90 및 0.95로 변화시켜 기존 설계기준의 안전도를 분석하고 이에 상응하는 목표 신뢰도지수를 통해 저항계수를 결정하였다. 이 연구에서는 설계기준 보정(code calibration)의 첫 번째 단계로 AFOSM방법을 이용하여 현행 콘크리트구조설계기준의 신뢰도를 분석하고 적정한 안전도를 유지하는 목표 신뢰도지수와 저항계수를 분석하였다. 현행 콘크리트구조설계기준에서 제시하고 있는 기본적인 소요강도와 설계강도의 관계는 식 (9)와 같다.

$$\phi R_n \geq 1.2D_n + 1.6L_n \quad (9)$$

여기서 ϕ 는 저항계수로서 철근콘크리트 부재의 종류와 파괴 형태에 따라 변화하는 값으로, 현행 우리나라 설계기준에서는 보와 슬래브 같은 휨 부재에서는 0.85를 띠

Table 1 Statistical parameters for resistance models

Structural member		Ordinary strength concrete		High strength concrete	
		R / R_n	δ_R	R / R_n	δ_R
Beam	$\rho = 0.563\rho_b, f_y = 300 \text{ MPa}$	1.146	0.086	1.127	0.082
	$\rho = 0.563\rho_b, f_y = 500 \text{ MPa}$	1.039	0.083	1.031	0.084
Slab	$\rho = 0.005, f_y = 300 \text{ MPa}$	1.189	0.109	1.201	0.115
	$\rho = 0.005, f_y = 500 \text{ MPa}$	1.054	0.107	1.065	0.111
Column	$f_y = 300 \text{ MPa}$	1.178	0.089	1.104	0.084
	$f_y = 500 \text{ MPa}$	1.128	0.083	1.084	0.083

철근 기둥에서는 0.65의 감소계수를 제시하고 있다.¹²⁾ 위의 식에서 첨자 n은 공칭강도와 공칭하중을 나타낸다. 저항 계수의 값을 0.85, 0.90, 0.95로 변화시키면서 Table 1의 저항 모형의 확률 특성과 Table 2의 하중 모형의 확률

특성 자료를 이용하여 분석한 내용을 활하중과 사하중의 비에 따라 신뢰도지수를 산정한 것을 정리한 것이 Tables 3, 4 및 5이다.

Table 3 Results of reliability indexes for beams

	Ordinary strength concrete						High strength concrete					
	$\rho = 0.563\rho_b, f_y = 300 \text{ MPa}$			$\rho = 0.563\rho_b, f_y = 500 \text{ MPa}$			$\rho = 0.563\rho_b, f_y = 300 \text{ MPa}$			$\rho = 0.563\rho_b, f_y = 500 \text{ MPa}$		
L_n	0.85*	0.90*	0.95*	0.85*	0.90*	0.95*	0.85*	0.90*	0.95*	0.85*	0.90*	0.95*
0.25	3.728	3.333	2.946	3.107	2.682	2.271	3.715	3.305	2.904	3.027	2.608	2.200
0.5	3.561	3.237	2.918	3.034	2.687	2.344	3.524	3.190	2.867	2.977	2.626	2.283
0.75	3.367	3.079	2.800	2.895	2.589	2.291	3.321	3.029	2.745	2.846	2.539	2.239
1	3.232	2.966	2.708	2.791	2.511	2.236	3.185	2.914	2.652	2.748	2.466	2.191
1.25	3.138	2.885	2.639	2.717	2.453	2.195	3.089	2.833	2.586	2.676	2.410	2.153
1.5	3.069	2.824	2.589	2.663	2.408	2.162	3.020	2.774	2.535	2.623	2.369	2.122
1.75	3.016	2.778	2.551	2.621	2.375	2.137	2.968	2.728	2.497	2.583	2.336	2.097
2	2.974	2.742	2.519	2.588	2.348	2.115	2.926	2.692	2.467	2.551	2.311	2.078
2.25	2.940	2.713	2.494	2.561	2.326	2.098	2.893	2.663	2.442	2.526	2.290	2.062
2.5	2.913	2.689	2.474	2.539	2.308	2.085	2.865	2.639	2.423	2.504	2.272	2.048

* Resistance factor

Table 4 Results of reliability indexes for slabs

	Ordinary strength concrete						High strength concrete					
	$\rho = 0.005, f_y = 300 \text{ MPa}$			$\rho = 0.005, f_y = 500 \text{ MPa}$			$\rho = 0.005, f_y = 300 \text{ MPa}$			$\rho = 0.005, f_y = 500 \text{ MPa}$		
L_n	0.85*	0.90*	0.95*	0.85*	0.90*	0.95*	0.85*	0.90*	0.95*	0.85*	0.90*	0.95*
0.25	3.607	3.298	2.995	2.984	2.645	2.316	3.507	3.216	2.876	2.960	2.635	2.318
0.5	3.719	3.440	3.169	3.155	2.854	2.559	3.648	3.381	3.119	3.143	2.848	2.564
0.75	3.659	3.405	3.160	3.140	2.870	2.607	3.617	3.370	3.131	3.140	2.875	2.616
1	3.591	3.352	3.122	3.102	2.851	2.608	3.563	3.330	3.105	3.107	2.860	2.620
1.25	3.537	3.309	3.088	3.067	2.829	2.597	3.516	3.292	3.076	3.076	2.840	2.613
1.5	3.494	3.273	3.060	3.038	2.808	2.586	3.478	3.261	3.052	3.049	2.822	2.603
1.75	3.460	3.244	3.037	3.015	2.792	2.576	3.448	3.235	3.032	3.027	2.806	2.593
2	3.434	3.221	3.019	2.996	2.777	2.567	3.423	3.214	3.015	3.009	2.793	2.584
2.25	3.412	3.202	3.003	2.981	2.766	2.559	3.402	3.197	3.000	2.994	2.781	2.577
2.5	3.393	3.187	2.990	2.967	2.756	2.552	3.385	3.182	2.989	2.982	2.772	2.571

*Resistance factor

Table 5 Results of reliability indexes for columns

	Ordinary strength concrete						High strength concrete					
	$f_y = 300 \text{ MPa}$			$f_y = 500 \text{ MPa}$			$f_y = 300 \text{ MPa}$			$f_y = 500 \text{ MPa}$		
L_n	0.65*	0.70*	0.75*	0.65*	0.70*	0.75*	0.65*	0.70*	0.75*	0.65*	0.70*	0.75*
0.25	5.717	5.306	4.908	5.734	5.288	4.856	5.567	5.119	4.683	5.497	5.042	4.598
0.5	5.433	5.070	4.725	5.348	4.970	4.610	5.219	4.840	4.480	5.146	4.763	4.400
0.75	5.157	4.823	4.509	5.050	4.706	4.382	4.937	4.593	4.269	4.866	4.520	4.194
1	4.976	4.659	4.362	4.862	4.538	4.233	4.757	4.433	4.128	4.687	4.362	4.057
1.25	4.851	4.545	4.260	4.734	4.422	4.132	4.634	4.323	4.032	4.567	4.255	3.963
1.5	4.760	4.463	4.186	4.642	4.340	4.058	4.546	4.244	3.962	4.480	4.178	3.894
1.75	4.692	4.401	4.130	4.573	4.278	4.002	4.479	4.184	3.909	4.415	4.119	3.843
2	4.638	4.352	4.086	4.520	4.230	3.959	4.428	4.138	3.869	4.364	4.073	3.803
2.25	4.595	4.313	4.051	4.477	4.191	3.924	4.386	4.101	3.835	4.323	4.037	3.771
2.5	4.560	4.281	4.022	4.442	4.159	3.896	4.353	4.070	3.808	4.290	4.007	3.744

*Resistance factor

3.1 보

보의 신뢰도지수는 콘크리트 압축강도의 차이보다는 철근의 공칭항복강도에 따라서 부재 안전도에 차이를 보이고 있다. 현행설계식에서 제시하고 있는 대로 저항계수가 0.85일 때 콘크리트 압축강도 수준과 상관없이 항복강도 300 MPa의 철근을 사용했을 경우 일반적인 활하중 대 사하중의 비($L_n/D_n=0.25\sim 2.5$) 범위에서 $\beta=2.865\sim 3.728$ 의 신뢰도를 유지하고 있으며, 항복강도 500 MPa의 철근을 사용했을 경우 $\beta=2.504\sim 3.107$ 의 범위 값으로 나타났다. 철근의 공칭항복강도와 상관없이 신뢰도지수의 전체 평균값은 2.95로 보편적으로 휨 부재 설계시에 고려되는 목표 신뢰도 $\beta_T=3.0$ ¹³⁾과 비슷한 수준으로, 이는 국내 연구 결과¹¹⁾의 철근콘크리트 보에 대한 결과인 $\beta=2.4$ 보다 높은 안전수준이다. Nowak¹¹⁾의 연구 결과에서는 목표 신뢰도지수를 3.5로 제시하였는데, 이것은 ACI 318-05의 저항계수가 0.90으로 현재 국내 콘크리트구조 설계기준의 휨 부재의 저항계수인 0.85와 비교하여 설계강도에 더 낮은 안전율을 주고 있기 때문에 현행 설계기준의 저항계수 0.85를 유지한다면 목표 신뢰도 3.0의 수준은 적절한 안전도를 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 보에서는 현행 설계기준의 강도감소계수(ϕ)인 0.85를 사용하는 것은 국내 통계자료의 상대적으로 낮은 신뢰도를 반영하더라도 현행설계식의 적절한 안전수준을 유지할 수 있는 값으로 확인되었다. 그러나, 공칭항복강도 500 MPa의 철근을 사용했을 경우 신뢰도 수준이 3.0보다 낮기 때문에 부재의 신뢰도 검증에 대한 통계적 데이터의 수집이 더 필요하다고 판단된다.

3.2 슬래브

슬래브에서는 일반적인 하중조건인 $L_n/D_n=0.5\sim 2.5$ 에서 분석된 저항모형에 따라 안전수준이 $\beta=2.967\sim 3.719$ 의 결과를 보이고 있어, 보와 같은 휨 부재인 슬래브 역시 목표 신뢰도지수 3.0보다 높은 안전수준으로 나타났다. 또한, 저항계수가 0.90일 때 신뢰도지수는 공칭항복강도 300 MPa의 철근을 사용했을 경우 신뢰도지수 $\beta=3.318\sim 3.440$ 의 범위값을 보였으며, 공칭항복강도 500 MPa의 철근을 사용했을 경우 신뢰도지수 $\beta=2.756\sim 2.854$ 의 범위 값으로 이것은 기존의 국내 연구 결과¹¹⁾의 $\beta=2.00$ 보다 안전한 수준을 나타내고, Nowak¹²⁾의 연구 결과에서 제시하고 있는 목표 신뢰도지수 2.5보다 높은 안전도를 나타낸다. 따라서, 슬래브에서는 현행 설계기준의 저항계수인 0.85를 유지하면서 목표신뢰도를 3.0으로 제시하였다.

3.3 기둥

기둥에서는 일반적인 하중조건($L_n/D_n=0.25\sim 1.25$)에서 보통 강도 콘크리트를 사용한 경우 $\beta=5.20$ 의 평균값을 보였으며, 고강도 콘크리트를 사용한 경우 $\beta=5.0$ 의 평

균값으로 외국의 연구 결과¹¹⁾와 비교할 때 보통 강도 콘크리트를 사용한 경우의 신뢰도 지수 $\beta=5.30$ 과 고강도 콘크리트를 사용한 경우의 신뢰도지수 $\beta=4.61$ 과 비슷하거나 높은 안전수준을 나타낸다. 기둥의 안전도가 다른 부재들에 비해서 높은 이유는 보의 파괴보다 기둥의 파괴를 피하려는 경향과 저항감소계수가 0.65로 다른 부재에 비해 높은 안전율을 주고 있기 때문인 것으로 판단된다. 보의 연구 결과와 다르게 기둥에서는 철근의 공칭항복강도 차이에 대한 안전도는 비슷한 수준으로 분석되었다. 또한, 저항계수 $\phi=0.70$ 로 선정하였을 때 기둥의 신뢰도지수는 $\beta=4.255\sim 5.306$ 의 범위로 분석되었는데, 이는 Nowak¹²⁾의 연구 결과인 목표 신뢰도지수 4.0보다 높은 안전수준으로 현행 콘크리트구조설계기준의 목표 신뢰도를 4.0으로 결정하여도 충분한 안전 측 설계로서 저항계수를 0.65에서 0.70으로 증가시킬 수 있는 것을 확인하였다.

4. 저항계수의 제안

현행 설계기준의 안전도 분석을 통하여 우리나라 설계기준에서 제시한 철근콘크리트구조부재의 목표 신뢰도지수를 결정하고 이를 바탕으로 목표 신뢰도에 부합하는 하중계수 및 저항계수를 결정할 수 있다. 이 결정 과정에서는 각 하중 조건의 발생 빈도에 대한 상대적 가중치(W_i)를 고려하여야 하며, 현행 설계식에서 구해지는 특성 저항력 R_f 와 실제 목표 신뢰도를 확보하기 위해 AFOSM 방법으로 계산된 특성 저항력 R_r 의 차이를 최소화 시켜야 된다. 따라서 식 (10)의 최소사승오차법을 통해 전체 누적오차 Δ 를 최소화 시키는 방법으로 저항계수와 하중계수를 결정하였다.⁴⁾

$$\Delta(\phi, \gamma_D, \gamma_L) = \sum_i (R_{ri} - R_{fi})^2 W_i \quad (10)$$

하중 조건에 대한 상대적 가중치에 대한 국내의 선행 연구 결과가 없기 때문에 Ellingwood등⁴⁾의 연구 결과를 참고하여 결정하였다. 하중조건에 따른 상대적 가중치는 Table 6에 정리하였으며, 활하중 대 사하중에 비례 따라 AFOSM 방법을 통해 구한 저항계수와 하중계수는 Fig. 2에 도시하였다. 각 하중 조건에서 목표 신뢰도지수에 대응하는 저항계수와 하중계수의 결정은 먼저 하중계수를 결정한 후 저항계수를 결정하는데 이는 저항계수를 먼저 결정한 후 하중계수를 구하게 되면 부재별로 다른 하중계수를 사용하게 되므로 불합리적이기 때문이다. 따라서 고정하중의 통계적 데이터가 없는 국내 실정을 반영하여 현행 설계식을 유지하기 위해 고정하중계수를 1.2로 고정하고 활하중의 하중계수를 1.6으로 보정하는 방법으로

Table 6 Weight factors for load conditions

L_n/D_n	0.25	0.50	1.00	1.50	2.00
W_i	10	45	30	10	5

Table 7 Cumulative error analysis according to the optimum coefficient

L_n/D_n	ϕ	γ_L	Δ	Optimum ϕ for $\gamma_D=1.2, \gamma_L=1.6$
Beam ($\beta_T=3$)				
0.25	0.88	1.53	0.3031	1.03
0.5	0.93	1.95	1.2993	0.85
1	0.96	2.11	0.0895	0.81
1.5	0.97	2.14	0.3135	0.81
2	0.98	2.16	0.3114	0.81
Slab ($\beta_T=3$)				
0.25	0.81	1.20	0.1126	1.08
0.5	0.88	1.58	6.0601	0.90
1	0.94	1.75	3.3996	0.86
1.5	0.96	1.79	0.7738	0.86
2	0.97	1.81	0.2822	0.86
Column ($\beta_T=4$)				
0.25	0.90	1.76	16.9054	0.82
0.5	0.97	2.22	46.8748	0.70
1	1.01	2.36	11.2676	0.68
1.5	1.02	2.39	1.8124	0.68
2	1.03	2.40	0.5132	0.68

저항계수를 산정하였다. 사용된 저항 모형의 통계적 특성은 보통 강도 콘크리트와 고강도 콘크리트를 사용한

것 중 낮은 안전 수준을 보인 것을 선택하였다. AFOSM 방법을 통해 분석된 하중계수 및 저항계수 값과 누적오차 값은 Table 7에 정리하였는데, 이에 따르면 슬래브에서는 목표 신뢰성지수 $\beta_T=3$ 에 대한 안전 수준에서 누적오차가 최소가 되는 저항계수는 0.86으로 분석되었다. 이것은 현행설계식의 신뢰도 분석에서의 결정된 값보다 0.01 정도 큰 값이다. 따라서 현행 설계식을 유지하는 하중계수의 조합에서 목표 신뢰도지수는 3.0으로 결정하였고, 저항계수는 0.85로 선정하였다. 보에서는 누적오차가 최소가 되는 최적 저항계수는 0.81로 분석되었다. 이것은 하중조건외의 가중치가 반영된 값이고 목표 신뢰성지수 $\beta_T=3$ 에 대응하는 값이다. 따라서 이 연구에서는 앞에서 분석된 현행설계식의 안전수준과 비교하여 목표 신뢰성지수 β_T 를 3.0으로 결정하고 저항계수를 0.85로 결정하였다. 이것은 슬래브와 같은 휨 부재인 보에 대해 설계의 일관성 및 간편성을 고려한 결과이다. 기둥에서는 누적오차가 최소가 되는 저항계수는 0.68로 분석되었다. 이것은 현행 설계기준의 0.65보다 0.03 큰 값으로 목표 신뢰성지수 $\beta_T=4$ 를 선정할 경우 적당한 안전 여유를 확보할 수 있다고 판단하여 저항계수를 최종적으로 0.70로 결정하였다. Table 8에는 이 연구에서 분석된 현행 설계식에 대한 목표 신뢰도지수와 저항계수의 값들을 정리한 것이다.

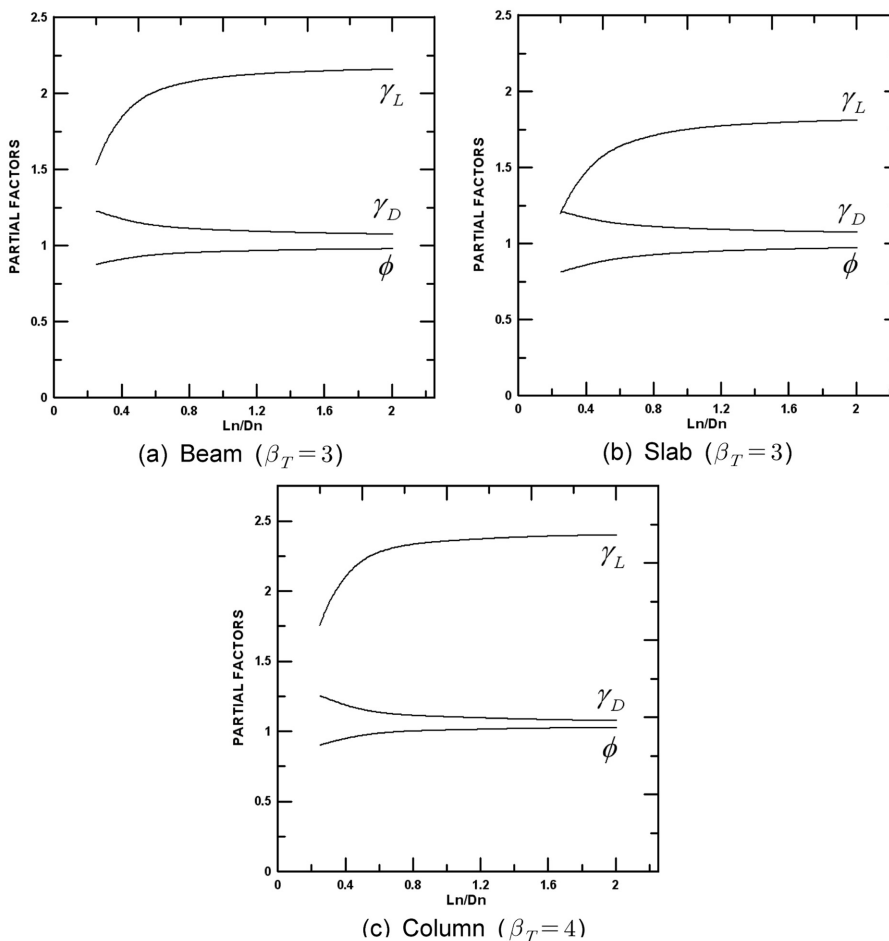


Fig. 2 The load and resistance factors for various target reliability index

5. 결 론

이 연구에서는 구조신뢰성 이론을 이용한 합리적인 설계기준의 안전수준 검증에 위하여 불확실성의 특성을 갖는 하중과 저항 모형에 대하여 국내의 연구 결과를 기초로 개발된 저항 모형을 이용하여 현행 콘크리트구조설계기준의 강도설계법의 신뢰도를 분석하였고, 현행설계식의 목표신뢰성 지수에 적합한 최적 저항계수를 제안하였다. 그 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 현행 콘크리트구조설계기준의 안전 수준은 보에서는 $\beta=2.95$, 슬래브에서는 $\beta=3.28$, 기둥에서는 $\beta=5.09$ 로 확인되었는데, 보와 슬래브는 일반적으로 휨 부재가 갖는 안전 수준인 $\beta=3.0$ 의 수준으로 현행설계식이 충분한 안전 수준을 확보하는 것으로 분석되었으며, 기둥의 안전 수준도 외국의 연구 결과와 비슷한 값을 갖는다.
- 2) 현행 콘크리트구조설계기준의 하중계수를 유지하는 경우 목표 신뢰도지수는 보와 슬래브에서는 $\beta_T=3.0$ 으로, 기둥에서는 $\beta_T=4.0$ 으로 확인되었으며, 이에 대응되는 저항계수는 보와 슬래브에서는 0.85, 기둥에서는 0.70이 적절한 값으로 산정되었다.
- 3) 다양한 하중 조건에 대하여 하중 발생 빈도의 차이를 고려한 가중치를 반영한 값을 이용하여 목표 신뢰도와 오차를 최소화 하는 방법으로 계산한 저항계수는 보, 슬래브 및 기둥에서는 각각 0.81, 0.86 및 0.68로 나타났다.
- 4) 이 연구에서 제시한 신뢰도 지수 및 저항계수는 국내 연구 자료를 바탕으로 수행된 신뢰성 해석을 통하여 얻어진 결과이므로 기존의 연구 결과에 비하여 보다 합리적이고 의미 있는 값으로 판단된다. 또한, 향후 관련 분야의 연구 성과가 축적되면 우리나라 고유의 저항계수 및 하중계수 개발 연구의 기초 자료로 활용이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 산하 한국건설교통기술평가원의

「성능중심의 건설기준 표준화 연구단」에 의해 수행되는 2006 건설교통R&D 정책 및 인프라 사업(06-기반구축-A-01)의 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. American Concrete Institute, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI318R-05), Framington Hills, American Concrete Institute, 2005, pp. 115~121.
2. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Washington, DC, 2006, pp. 5-23~5-24.
3. Comite Euro-International du Beton, CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford, London. 1993, pp. 17~30.
4. Ellingwood, B., et al., Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58. NBS SP 577, US Development of Commerce, 1980, pp. 85~93.
5. Nowak, A. S. and Lind, N. C., "Practical Bridge Code Calibration," *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol. 105, No. ST12, 1979, pp. 2497~2510.
6. 황의승, 백인열, "신뢰도기반 설계기준의 기본이론 및 설계일반," 학림사, 2006, pp. 35~37.
7. Rackwitz, R. and Fiessler, B., "Structural Reliability Under Combined Random Load Sequences," *Computer and Structures*, Vol. 9, 1978, pp. 489-494.
8. 김종호, "콘크리트구조설계기준의 신뢰도 검증," 석사학위논문, 서경대학교, 2011, pp. 20~36.
9. 한국콘크리트학회, 성능중심 콘크리트 구조설계기준개발, 한국콘크리트학회, 2011, pp. 16~28.
10. 김상호 등, 구조물의 신뢰성에 관한 연구-고정하중·적재하중 및 풍하중하에서의 RC 건물, 한국건설기술연구원 결과보고서, 한국건설기술연구원, 1989, pp. 110~125.
11. Nowak, Andrzej S. and Szerszen, Maria M., "Calibration of Design Code for Buildings(ACI 318): Part 2-Reliability Analysis and Resistance Factors," *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 3, 2003, pp. 383~391.
12. 한국콘크리트학회, 콘크리트 구조설계기준해설, 기문당, 2007, pp. 61~62.
13. 조효남, 지광습, 윤정현, 김이현, 최현호, 이광민, 이상윤, 신동완, 구조신뢰성공학, 구미서관, 2008, pp. 163~188.

요 약 2007년 개정된 콘크리트구조설계기준에서 제시하고 있는 강도설계법의 하중 조합은 ACI 318-05 기준의 하중저항계수설계법(LRFD)을 참고하여 작성된 것이다. LRFD는 하중계수와 저항계수의 조합으로 이루어져 있고, 이 계수들의 선정은 대상 파괴 모드에 대하여 미리 규정된 파괴 확률 또는 신뢰도 지수의 수준에 부합하여야 한다. 이 때 하중계수 및 저항계수의 결정은 대상 구조물의 지역적 및 시대적 특성을 반영할 수 있는 통계 자료에 기초한 구조 신뢰성 이론에 따라 이루어져야 한다. 그러나 현재 우리나라의 설계기준은 통계자료의 많은 부분을 외국의 연구 결과에 의존하고 있는 실정이다. 이를 개선하기 위하여 이 연구에서는 지금까지 국내에서 연구된 자료에 기초하여 현행 콘크리트 구조설계기준의 안전 수준을 분석하고 이에 따른 합리적인 목표 신뢰도 지수를 결정하였으며, 이를 바탕으로 국내 현실에 적합한 저항계수(강도감소계수)를 제안하였다. 이 연구의 결과는 향후 우리나라의 고유한 저항계수 및 하중계수를 개정할 때 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 하중저항계수설계법, 콘크리트구조설계기준, 신뢰도 지수, 하중계수, 저항계수