

철근콘크리트 설계기준의 신뢰성평가와 신뢰성 설계기준에 관한 연구

Reliability Evaluation of Existing Codes and Realistic Reliability-Based Design for Reinforced Concrete Structures

오 병 환* 최 호 근**
Oh, Byung Hwan Choi, Ho Keun

Abstract

There is the need to balance safety, economy and serviceability in all phases of society problems. This is especially true in structural code formulation, where a framework is established by which practicing structural engineers can be assured of designing structures that reasonably meet the above three objectives. The existing design codes, which are generally based on the structural theory and certain engineering experience, do not realistically consider the uncertainties of loads and resistances and the basic reliability concepts. The purpose of the present study is therefore to develop the realistic reliability-based design criteria to secure adequate safety and reliability, and to derive the models for partial and combined resistance factor formats.

1. 서론

본 연구에서는 구조신뢰이론에 토대를 둔 진보된 설계기준을 개발하고, 철근및 콘크리트 구조재료의 특성을 효율적으로 고려할수있는 부분및 조합저항계수가법을 고안하는 것을 주 목적으로 하였다. 이를 위하여 우리나라의 기존 콘크리트 설계기준의 신뢰수준을 평가하고 이 결과로부터 합리적인 목표신뢰성지수를 결정하여 신뢰성이론에 근거한 새로운 설계기준을 개발하고자 한다. 저항계수의 형태는 전체저항계수기법 이외에 부분저항계수 및 조합저항계수기법을 유도하고자 한다.

2. 불확실량의 산정

(1) 저항변수의 불확실량

각 설계기준의 신뢰성을 평가하기 위하여 필요한 저항변수의 불확실량을 산정하기 위하여 국내외의 자료를 분석하였으며, 국내에서는 실제 철근콘크리트 구조부재에 대한 불확실량 산정자료가 없는 실정이고 강도실험자료만이 존재하여 이것과 Ellingwood의 여러 자료로부터 도출한 저항자료를 참고로 하여 저항변수의 불확실량을 산정하였으며 대표적인 경우에 대한 불확실량이 표1에 요약되어 있다.

(2) 하중변수의 불확실량

하중에 대한 불확실량은 많은 자료를 포괄적으로 분석하여 제시한 미표준국 (NBS)의 자료와 국내자료를 이용하여 산정하였다.

① 사하중

사하중의 자료는 비교적 잘 분석되어 있어 평균과 공칭비 (\bar{D}/D_n)는 1.05, 분산계수 V_D 는 0.1로 취하였다.

② 활하중

구조물에 작용하는 활하중은 특정기간동안 비교적 일정하게 작용하는 임의 시점활하중 L_{apt} 와 구조물 수명기간 50년내에 작용하는 최대활하중으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 ANSI A58.1-1982에 근거하여 50년 활하중의 평균-공칭비와 임의시점 활하중 L_{apt} 의 평균-공칭비를 구하였다.

$$\frac{L_{ap}}{L_n} = \frac{0.25 + 4.57 \sqrt{A_1}}{1 - \min[0.0056A_1; 0.60; 0.23(1 - \sqrt{A_1})]}$$

여기서, A_1 는 영향면적 (influence area)으로서 보에서는 $2A_T$, 슬래브에서는 A_T , 기둥에서는 $4A_T$ 이며, A_T 는 하중이 영향을 미치게 되는 공판면적 (tributary area)이다. 또한 임의시점 활하중의 평균-공칭비는 다음과 같다.

$$\frac{L_{ap}}{L_n} = \frac{0.24}{1 - \min[0.0056A_1; 0.60; 0.23(1 - \sqrt{A_1})]}$$

L_{apt} 의 불확실량은 영향면적이 증가함에 따라 감소하는 영향을 가진다.

*고려대학교 공학부 1학년 1학기 교무실 근무자

**고려대학교 공학부 1학년 1학기 연구원

表 1. 抵抗變數의 不確實量

Action	Member Types	Details	R R _s	V _s	
Flexure	Beams, α = 3000	f _c ' = 350 kg/cm ²	ρ = 0.35 α _s	1.14	0.14
		f _c ' = 350 kg/cm ²	ρ = 0.31 α _s	1.09	0.11
	Beams, α = 4000	f _c ' = 350 kg/cm ²	ρ = 0.57 α _s	1.05	0.11
Shear	Beams (α _s = 0.006)	No Stirrups		0.93	0.21
		Minimum Stirrups		1.00	0.19
		ρ _s α _s = 11 kg/cm ²		1.09	0.17
Bending	Short	압축 파괴	f _c ' = 350 kg/cm ²	0.95	0.14
	Column	인장 파괴	f _c ' = 240 kg/cm ²	1.05	0.12
Compression	Long	압축 파괴	f _c ' = 350 kg/cm ²	1.10	0.17
	Column	인장 파괴	f _c ' = 350 kg/cm ²	0.95	0.12

③ 풍하중

풍하중의 평균-공칭비는 미표준국의 자료에 따라 W/W_n = 0.78, 분산계수 V_w = 0.37로 선정하였다.

3. 기준설계기준의 신뢰성평가

3.1 개요

신뢰성이론에 근거한 합리적인 설계기준을 도출하기 위해서는 지금까지 사용하여온 기준 설계기준의 신뢰성평가가 필요하다. 본 연구에서는 미국의 콘크리트시방서 ACI318-83, ANSI-1982, 그리고 지금까지 사용하여온 우리나라의 기준 콘크리트시방서 (KS-1982)에 대하여 하중조합별로 신뢰성수준을 평가하여 목표신뢰성지수를 결정하기 위한 기본자료로 이용하고자 한다.

3.2 신뢰성평가

(1) 하중조합

본 연구에서는 기준 설계기준들의 신뢰성수준을 평가하기 위하여 다음의 하중조합을 고려하기로 한다.

① 사하중과 활하중의 조합

여기서 고려하는 각 설계기준의 형태는 다음과 같다.

$$\phi R_n = 1.4 D_n + 1.7 L_n : ACI318-83 \quad (1)$$

$$\phi R_n = 1.2 D_n + 1.6 L_n : ANSI-1982 \quad (2)$$

$$\phi R_n = 1.5 D_n + 1.8 L_n : KS-1982 \quad (3)$$

② 사하중과 활하중 및 풍하중의 조합

사하중과 활하중 및 풍하중 (D + L + W) 조합의 경우 전체하중효과 Q는 (D + L_{apt} + W_{max})와 (D + L_{max} + W_{apt}) 조합을 고려하며, 목표신뢰성지수는 이들 각각에서 구한 신뢰성지수의 평균으로 정한다. 여기서 L_{apt}와 W_{apt}는 임의시점 활하중과 풍하중을 의미한다. 본 연구에서 고려하는 설계기준의 형태는 다음과 같다.

$$\phi R_n = 0.75(1.4D + 1.7L + 1.7W) : ACI318-83 \quad (4)$$

$$\phi R_n = 1.2D + 1.3W + 0.5L : ANSI-1982 \quad (5)$$

$$\phi R_n = 0.75(1.5D + 1.8L + 1.8W) : KS-1982 \quad (6)$$

3.3 신뢰성평가결과

앞의 3.2절에서 서술한 하중조합에 대하여 신뢰성평가절차에 따라 기준설계 기준들의 신뢰성을 평가하였으며, 이 결과를 그림으로 도시한 것이 그림1과 그림2이다. 그림1은 (D + L) 하중조합에 대한 결과이고, 그림2는 (D + L + W)의 하중조합에 대한 결과이다. 신뢰성지수는 활하중과 사하중의 비 및 영향면적의 함수로서 활하중과 사하중의 비는 보통 0.25-2.0 범위에 있고 영향면적 A_T는 부재의 종류에 따라 다르다. 이 그림1과 2에서 보는 바와 같이 우리나라의 기준 설계기준의 신뢰성이 제일 높고 다음이 ACI318-83, 그리고 ANSI-1982의 순으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 우리나라의 시공수준과 품질관리정도에 비추어 볼때 적절한 것으로 사료되고 있다. 이러한 신뢰성평가가 힘을 받는 부재뿐만 아니라 전단을 받는 부재 그리고 휨과 압축을 받는 부재에 대하여 모두 수행되었다. 여기서는 논문의 분량제한으로 대표적인 경우만 도시하였다.

3.4 목표신뢰성지수의 선정

전절에서 기준설계기준들에 대한 신뢰성평가작업을 수행하였으며, 이제 이들 결과로부터 각 설계 상황에 관계없이 비교적 일정한 신뢰수준을 유지할 수 있도록 목표신뢰성지수를 결정하여야 한다. 목표신뢰성지수의 선정은 활하중과 사하중의 비 (L/D)에 따른 가중평균을 적용하여 구하고 이들을 각 영향면적에 따라 평균하여 구하며 이렇게하여 구한 대표적인 결과가 표2에 요약되어 있다. 여기서, 가중치의 적용은 Ellingwood 등이 제안한 결과로서 하중비 L_n/D_n이 0.25일때 가중치 P_j=0.10, L_n/D_n이 0.50일때 P_j=0.45, L_n/D_n이 1.0일때 P_j=0.3, L_n/D_n이 1.5일때 P_j=0.10, L_n/D_n이 2.0일때 P_j=0.05이다. (D + L + W)하중조합의 경우에는 (D + L_{apt} + W_{max}) 하중조합과 (D + L_{max} + W_{apt})에서 구한 평균치로부터 목표신뢰성지수를 선정하였다.

4. 하중계수 및 전체저항계수의 도출

하중저항계수방법에 의한 신뢰성설계기준은 대상 구조물의 안전성을 확보하기 위하여 적절한 목표신뢰성지수 β₀를 결정하고 이를 기준으로 저항계수와 하중계수를 산정하는 과정으로 본장에서는 각 설계기준에 따라 전체저항계수와 부분하중계수

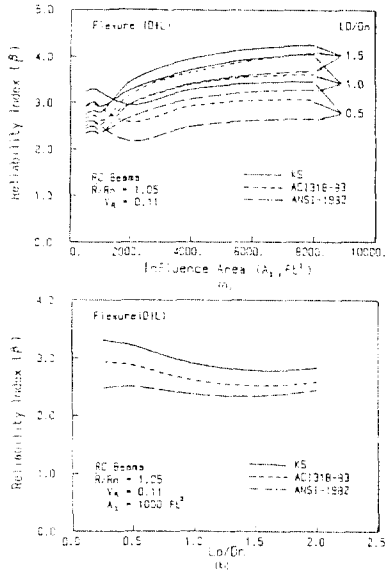


그림 1 철근콘크리트 휨부재의 신뢰성지수(D+L).

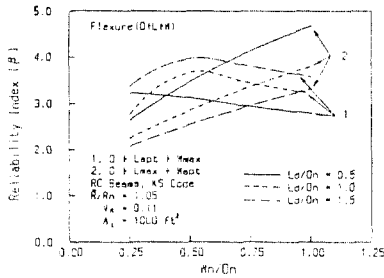


그림 2 철근콘크리트 휨부재의 신뢰성지수(D+L+W).

표 2 목표신뢰성 지수 β(D+L)

Action	Member Types	Details	ACI 318-83	ANSI 1992	KS 1982
Flexure	Beams	$\sigma_c = 3000$ $f'_c = 350 \text{ kg/cm}^2$ $\rho = 0.35 \rho$	3.033	2.765	3.284
		$\sigma_c = 4000$ $\rho = 0.31 \rho$	3.356	3.054	3.719
		$f'_c = 380 \text{ kg/cm}^2$ $\rho = 0.57 \rho$	3.205	2.885	3.536
Shear	Beams	No Stirrups	3.240	3.316	3.337
		Minimum Stirrups	2.108	2.321	2.304
		$\sigma_c = 11 \text{ kg/cm}^2$	2.613	2.835	2.816
Bending	Short Column	압축 파괴 나선철근거동	3.118	2.601	3.267
	Column	인장 파괴	4.178	3.686	4.130
Compression	Long Column	압축 파괴 나선철근거동	3.079	2.718	3.257
	Column	인장 파괴	3.798	3.251	4.072

를 산정하고 5장에서는 부분 및 조합저항계수형식에 의한 저항계수를 결정하고자 한다.

4.1 사하중과 활하중

일반적으로 하중계수의 최적치는 목표신뢰성지수와 제안된 하중 및 저항계수와 연관성을 포함하는 함수로 정의하고 이런 함수를 최소화하는 하중계수를 산정함으로서 구할 수 있다. 이와같이 정의된 함수는 다음과 같다.

$$f(\gamma, \gamma) = \sum P_i(R_{n_i}^* - R_n)^2 \quad (7)$$

여기서, R_n^* 는 선정된 목표신뢰성지수에 준하여 각 설계상황에서 구한 하중계수로부터 계산된 공칭저항치이고, R_n 은 각 설계상황에 대해 일정한 하중계수와 저항계수로 나타내는 설계식에서의 공칭저항치로서 $R_n = (\gamma_D D_n + \gamma_L L_n) / \phi$ 로 표시된다.

하중 및 저항계수를 구하기 위하여 $\gamma_D=1.2$ 를 확정 한 후 식 (7)을 최소화하는 γ_D 와 γ_L 을 구한다. 이렇게 하여 얻어진 $\gamma_L=1.2$, $\gamma_D=1.6$ 을 확정 한 후 ϕ 를 구하여 최종적으로 γ_D 와 γ_L 및 ϕ 를 정하게 된다. 이러한 일련의 과정으로부터 나온 결과가 표3이다.

표 3 (D+L) 하중조합하에서의 각 경우별 하중 및 저항계수

Design Code	β	$\gamma_D=1.2$		$\gamma_D=1.2, \gamma_L=1.6$	
		γ_D	ϕ	γ_D	ϕ
KS	3.284	1.60	0.74	0.74	
ACI	3.033	1.64	0.80	0.79	
ANSI	2.765	1.67	0.86	0.84	

4.2 사하중, 활하중 및 풍하중

상기의 사하중과 활하중 조합의 경우와 마찬가지로 요령으로 힘을 받는 철근콘크리트 부재에 대하여 계산된 결과가 표4이다.

표 4 (D+L+W) 하중조합하에서의 각 경우별 하중 및 저항계수

Design Code	β	$\gamma_D=1.2$		$\gamma_D=1.2, \gamma_W=1.3$	
		γ_D	γ_W	ϕ	ϕ
KS	3.284	0.58	1.36	0.77	0.75
ACI	3.037	0.57	1.37	0.81	0.80
ANSI	2.944	0.57	1.38	0.83	0.81

5. 부분저항계수 및 조합저항계수형식의 고안

5.1 개요

앞의 4장에서 다룬것은 저항을 하나의 계수가 담당하는 전체저항계수형식이었다. 그러나 철근 콘크리트와 철근을 분리하여 그 재료특성을 고려하는 것이 합리적이라고 할 수 있다. 이와 같은 결점을 보완하는 설계형식으로 부분저항계수형식이나 조합저항계수형식을 유도하여 고안하는 것이 바람직하다.

5.2 부분저항계수형식

부분저항계수형식은 저항축의 기본 변수들의 평균에 부분저항계수를 적용하는 설계형식이다. 예를 들면, $f_y^* = \phi_s f_y$, $f_c^* = \phi_c f_c$, $h^* = (h_n - h_e)$, $d^* = (d_n - d_e)$ 로 둔다. 결국 설계저항은 아래 식과 같은 형태를 띠게 된다.

$$R^* = R(\phi_s^* f_y^*, \phi_c^* f_c^*, h^*, d^*) \quad (8)$$

전절의 식 (7)에서와 같은 요령으로 부분저항계수들은 실제 신뢰성지수 β_1 와 목표신뢰성계수 β_0 와의 차이 제곱에 대한 합이 최소화가 되도록 계산하여 도출된다. 즉,

$$f(\phi_s, \phi_c, d) = \sum_{i=1}^n w_i (\beta_1(\phi_s, \phi_c, d) - \beta_0)^2 \quad (9)$$

5.3 조합저항계수형식

파괴모드의 영향까지도 합리적으로 고려할 수 있도록 조합저항계수형식을 유도하였다. 이 조합저항계수형식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$R^* = \phi R(\phi_s \bar{\phi}_s, \phi_c \bar{\phi}_c) \quad (10)$$

앞절에서와 마찬가지로 휨, 전단, 휨과 압축을 함께 받는 경우에 대하여 각 설계기준별도 식 (10)의 조합저항계수형식에 따라 신뢰성해석에 의한 조합저항계수를 구하였다. 실제설계의 단순화를 유지하면서 합리적인 신뢰성을 확보할 수 있도록 차원계수 ϕ_e 를 0으로 한 경우에 대한 최소화계산 결과가 표5에 요약되어 있다.

6. 각 설계기준의 비교평가

지금까지 본 논문에서는 신뢰성이론에 근거한 합리적인 하중계수 및 저항계수를 유도하였다. 먼저 사하중과 활하중 조합의 경우에 대하여 신뢰성을 비교하기 위하여 고려된 설계기준들의 형식은 다음과 같다.

$$(1) \text{ KS-1982} \quad : \phi R_n = 1.5D + 1.8L$$

$$(2) \text{ Proposed Format} \quad : \phi R_n = 1.2D + 1.6L$$

$$(3) \text{ ACI 318-83} \quad : \phi R_n = 1.4D + 1.7L$$

$$(4) \text{ KS-1988} \quad : \phi R_n = 1.2D + 1.8L$$

$$(5) \text{ MacGregor(ANSI)} \quad : \phi R_n = 1.2D + 1.6L$$

상기의 각 설계형식들에 대한 각 하중형태에서의 저항계수들(ϕ)이 표6에 요약되어 있다.

7. 결론

본 연구에서는 하중 및 저항의 불확실성을 합리적으로 고려할 수 있도록 구조신뢰성이론에 근거한 콘크리트 설계기준을 제시하고자 하였으며 결론을 요약하여 기술하면 다음과 같다.

- (1) 기존의 철근콘크리트 설계기준들의 신뢰성수준을 평가하였으며, 그 결과 신뢰성수준이 각 경우에 따라 2.5~4.0 범위에 있으며, 한계상태합수와 영향면적에 따라 변한다.
- (2) 기존의 설계양식인 전체저항계수형식을 위하여 하중과 강도의 불확실성을 고려한 합리적인 하중계수와 저항계수를 도출하였다.
- (3) 콘크리트와 철근 등 각 건설재료의 특성과 변동성을 고려할 수 있는 부분저항계수 형식을 고안하였으며, 또한 이 형식의 단점을 보완하고 모델링과 파괴모드의 영향을 합리적으로 고려할 수 있는 조합저항계수 형식을 고안하여 각 형식에 대한 저항계수를 유도하여 제시하였다.
- (4) 기존의 설계기준(KS-1982)은 휨, 휨과 압축을 받는 경우에는 부재의 신뢰성이 적절하게 산정되어 있는 것으로 나타났으나 전단에 대한 규정들은 부적절한 것으로 나타나 이를 합리적으로 고려하였다.

참고문헌

1. ACI 318-83, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete", American Concrete Institute, Detroit, 1983.
2. ANSI A58.1, "Building Code Requirements for Minimum Design Loads for Building and Other Structures," American National Standard Institute, New York, 1982.
3. Ellingwood, B., "Reliability of Basis of Load and Resistance Factor for Reinforced Concrete Design," National Bureau of Standards Building Science Series 110, National Bureau of Standards, Washington, D.C., 1978.
4. 조태승, "철근콘크리트 슬래브에 대한 신뢰성 설계기준에 관한 연구," 공학박사논문, 서울대학교, 1986.

표 5. 우리나라기준에 적합한 저항계수($d=0$)

Action	전체저항계수		부분저항계수		조합저항계수		
	ϕ	ϕ_s	ϕ_c	ϕ	ϕ_s	ϕ_c	
Flexure	0.75	0.85	0.85	0.85	0.90	0.85	
Shear	0.55	0.75	0.60	0.85	0.90	0.60	
Flexure - Compression	Tied	0.60	0.70	0.60	0.75	0.90	0.60
	Spiral	0.65	0.75	0.60	0.80	0.90	0.60

표 6. 각 설계기준에 대한 저항 계수

Cases		KS-1982	Proposed	ACI 318-83	KS-1988	ANSI-1982	
Flexure		0.80	0.75	0.90	0.85	0.85	
Shear		0.85	0.65	0.65	0.70	0.70	
Flexure	Axial Tension	0.90	0.75	0.90	0.85	0.85	
	Axial Compression	Spiral	0.75	0.65	0.75	0.70	0.70
Compression	Compression	Tied	0.70	0.60	0.70	0.65	0.65