

部分 및 組合抵抗係數形式에 의한 鐵筋콘크리트構造의 信賴性 計基準

Reliability-based Design Criteria for Reinforced Concrete Structures
Based on Partial and Combined Resistance Factor Formats

吳 炳 煥* · 李 成 魯**
Oh, Byung Hwan · Lee, Seong Lo

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. To this end, the reliability levels of our existing design code for concrete structures are first evaluated and the target reliabilities are determined. the new code formats are evolved from these target reliabilities. The present study indicates that the proposed formats exhibit relatively-uniform reliability and reasonably take into account the different material characteristics of concrete and steel in concrete structures.

要 旨

사회에서 일어나는 대부분의 문제에는 안전성과 경제성 및 사용성사이에 균형을 이루어야 할 필요성이 존재한다. 이것은 특히 구조물을 설계할 때에 직접적으로 적용되는 말이며 구조물이 갖추어야 할 세가지 기본요건이 바로 이 안전성과 사용성 그리고 경제성인 것이다. 기존의 설계기준은 구조해석의 기본이론과 실제적인 경험이 복합된 설계기준으로서 하중과 강도의 불확실성을 합리적으로 고려하지 못하여 왔고, 구조의 신뢰성개념을 고려하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 좀더 합리적인 안전성과 신뢰성을 확보하기 위하여 구조신뢰이론에 토대를 둔 진보된 설계기준을 제시하고, 부분 및 조합저

* 正會員 · 서울大學校 工科大學 副教授, 土木工學科

** 正會員 · 서울大學校 大學院 博士課程, 土木工學科

항계수기법을 고안하였다. 이를 위하여 우리나라의 기존 콘크리트설계기준의 신뢰수준을 평가하고 이 결과로부터 合理的인 목표신뢰성지수를 결정하였으며, 이로부터 신뢰성이론에 근거한 새로운 설계기준을 도출하였다. 본 연구에서 유도된 部分 및 組合抵抗係數를 이용한 설계양식은 콘크리트와 철근의 구조재료특성을 효율적으로 고려하고 있어 전체저항계수를 이용한 설계양식보다 합리성을 보여주고 있으며 진보된 설계기준임을 보여주고 있다.

1. 序 論

사회에서 일어나는 대부분의 문제에는 안전성과 경제성 및 사용성사이에 균형을 이루어야 할 필요성이 존재한다. 이것은 특히 구조물을 설계할때에 직접적으로 해당되는 사항이다. 구조물을 設計함에 있어 하나의 기본 문제점은 복잡한 변화성을 많이 가지고 있는 실제세계를 이상화한다는 사실로서, 특히 구조물에 작용하는 하중과 부재의 저항은 많은 변동성을 가지고 있다. 따라서 구조물의 設計와 解析의 기준이 되는 설계기준은 이러한 불확실성을 합리적으로 고려하여야 하며 이러한 불확실성으로부터 오는 영향을 분석하여 설계기준에 포함시켜야 한다. 기존의 설계기준은 구조해석의 기본이론과 실제적 경험이 복합된 설계기준으로서, 하중과 강도의 불확실성을 합리적으로 고려하지 못하는 면이 있고 구조의 신뢰성개념을 고려하지 못하고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기위하여 세계 각 선진국에서는 이미 그들의 설계기준에 확률과 신뢰성이론을 연구하여 도입하는 단계에 이르고 있다.

우리나라에서도 구조신뢰이론에 토대를 둔 새로운 설계기준의 개발이 요구되고 있으며, 이에 부응하기위하여 최근들어 신뢰성해석과 설계연구가 활기를 띄고 있다.

따라서, 본 연구에서는 구조신뢰이론에 토대를 둔 진보된 설계기준을 개발하고, 철근 및 콘크리트 구조재료의 특성을 효율적으로 고려할 수 있는 부분 및 조합저항계수기법을 고안하는 것을 주 목적으로 하였다. 이를 위하여 우리나라의 기존 콘크리트설계기준의 신뢰수준을 평가하고 이 結果로부터 合理的인 목표신뢰성지수를 결정하여 신뢰성이론에 근거한 새로운 설계기준을 개발하고자 한다. 저항계수의 형태는 전체저항계수기법 이외에 부분저항계수 및 조합저항계수기법을 유도하고자 한다.

2. 信賴性理論

구조물의 신뢰성해석이론은 그 개발순서와 해석양식에 따라 몇가지로 분류된다.

2.1. 荷重-抵抗係數技法

하중-저항계수설계(Load-Resistance Factor Design : LRFD)양식은 이미 콘크리트 설계기준에 부분적으로 도입되어 있는 형태로서, 실제의 하중에 하중계수를 곱하고, 실제의 저항에 저항계수를 곱하여 안전성이 유지되도록 설계하는 기법인데, 기존의 설계기준은 저항 및 하중계수들이 반 경험적으로 결정되어 확률에 의한 신뢰성개념을 적절히 고려하지 못하고 있다.

2.2. 第二모멘트技法

제2모멘트技法(First-Order Second Moment ; FOSM)은 각 하중변수와 저항변수에 대하여 각 변수의 평균과 분산만을 이용하여 설계양식을 결정하는 방법으로 한계상태방정식의 파괴기준 설정에서부터 표준편차 즉, 좌표변환방법 그리고 선형근사화방법에 따라 평균2차모멘트법과 불변2차모멘트법, 근사확률분포법등으로 구분할 수 있다. 제2모멘트技法은 設計基準에 도입할 수 있는 가장 실용적인 방법으로 本 研究에서는 이 방법을 이용하여 신뢰성해석을 수행하였다.

2.3. 全確率分布技法

전확률분포기법은 좀더 실제에 가까운 신뢰성해석을 하기 위하여 각 변수의 실제확률분포(full probabilistic distribution)를 이용하는 기법으로, 시간에 따른 하중변화를 효과적으로 모델할 수 있는 적절한 하중조합법을 필요로 한다. 이 방법은 각 변수의 실제확률분포를 정확히 알기 어렵다는 문제를 가지고 있다.

2.4. 추계학적 기법

실제적으로 하중과 저항은 구조부재의 위치와 시간에따라 변화는 추계변수로서 이들을 고려하여

해석하는 기법이다. 이것은 구조물의 안전확률을 다차원의 추계변수로 처리하여야 하므로 복잡한 해석절차를 포함하고 있고, 따라서 실제 설계에 도입하기에는 많은 어려움이 있다.

$$ACI318-83 \quad (4)$$

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

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

3. 既存設計基準의 信賴性評價

3.1 概 要

신뢰성이론에 근거한 합리적인 설계기준을 도출하기 위해서는 지금까지 사용하여온 기존설계기준의 신뢰성평가가 필요하다. 본 연구에서는 미국의 콘크리트시방서 ACI318-83⁽¹⁾, ANSI-1982⁽²⁾, 그리고 지금까지 사용하여온 우리나라의 기존 콘크리트시방서(KS-1982)⁽³⁾에 대하여 하중조합별로 신뢰성수준을 평가하여 목표신뢰성지수를 결정하기 위한 기본자료로 이용하고자 한다.

3.2 信賴性評價 및 節次

(1) 荷重組合

본 연구에서는 기존설계기준들의 신뢰성수준을 평가하기 위하여 다음의 하중조합을 고려하기로 한다.

① 死荷重과 活荷重의 組合

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 死荷重과 活荷重 및 風荷重의 組合

구조물에 작용하는 하중은 시간에 따라 변화하며, 여러개의 하중이 구조물에 작용할 경우에는 각각의 하중이 동시에 최대치에 도달할 확률이 극히 적다는 것은 잘 알려진 사실이다. 따라서 설계하중을 조합하는 가장 합리적인 방법은 한가지 하중이 최대치일 때 다른 하중은 임의시점하중(arbitrary point-in-time load)을 갖는 것으로 생각하는 것이다^(5, 6, 25). 즉 사하중과 활하중 및 풍하중(D+L+W) 조합의 경우 전체하중효과 Q는 (D+L_{apt}+W_{max})와 (D+L_{max}+L_{apt}) 조합을 고려하며, 目標信賴性指數는 이들 각각에서 구한 신뢰성지수의 평균으로 定한다. 여기서 L_{apt}와 W_{apt}는 임의시점 활하중과 풍하중을 의미한다. 본 연구에서 고려하는 설계기준의 형태는 다음과 같다.

$$\phi R_n = 0.75(1.4D + 1.7L + 1.7W) :$$

(2) 信賴性 評價節次

上記에서 서술한 각 설계기준의 신뢰성을 평가하기 위한 이론적 절차를 요약하여 정리하면 다음과 같다^(5, 6, 25).

① Step 1 : 上記式 (1)~(6)과 같은 기존설계기준의 형식을 설정한다.

② Step 2 : 저항 및 하중변수의 평균과 분산등을 입력한다(3.3節 참조).

③ Step 3 : 活荷重(L)을 死荷重(D)의 함수로 표현한다. 또한 평균저항(R)을 사하중(D)의 함수로 표현한다.

④ Step 4 : 모든변수(R, D, L)의 최초설계점을 평균값으로 취한다.

⑤ Step 5 : 비정규분포변수 L에 대한 등가정규분포(equivalent normal distribution)의 평균과 표준편차를 구한다.

⑥ Step 6 : 신뢰성지수 β를 구한다.

⑦ Step 7 : 방향여현 α_R, α_L, α_W를 계산한다.

⑧ Step 8 : 새로운 파괴점(failure point)을 계산한다.

⑨ Step 9 : 방향여현과 신뢰성지수 β값이 일정해 질때까지 Step 5~Step 8을 반복수행한다.

3.3 不確實量의 算定

(1) 抵抗變數의 不確實量

各設計基準의 신뢰성을 평가하기 위하여 필요한 저항변수의 불확실량을 산정하기 위하여 국내외의 자료를 분석하였으며, 국내에서는 실제 철근 콘크리트 구조부재에 대한 불확실량 산정자료가 없는 실정이고 강도실험자료만이 존재하여 이것과 Ellingwood⁽⁶⁾이 여러 자료로부터 도출한 저항자료를 참고로 하여 저항변수의 불확실량을 산정하였으며 대표적인 경우에 대한 불확실량이 表 1에 요약되어 있다.

(2) 荷重變數의 不確實量

하중에 대한 불확실량은 많은 자료를 포괄적으로 분석하여 제시한 미표준국(NBS)의 자료⁽⁶⁾를 이용하여 산정하였다.

表 1. 抵抗變數의 不確實量

Action	Member Types	Details	\bar{R}/R_o	V_R	
Flexure	Beams, $\sigma_y=3000$ $f'_c=350 \text{ kg/cm}^2$	$\rho=0.35 \rho_b$	1.14	0.14	
	Beams, $\sigma_y=4000$ $f'_c=350 \text{ kg/cm}^2$	$\rho=0.31 \rho_b$ $\rho=0.57 \rho_b$	1.09 1.05	0.11 0.11	
Shear	Beams ($\rho_w=0.006$)	No Stirrups	0.93	0.21	
		Minimum Stirrups	1.00	0.19	
		$\rho_v \sigma_y=11 \text{ kg/cm}^2$	1.09	0.17	
Bending + Compression	Short Column	압축 파괴	$f'_c=350 \text{ kg/cm}^2$	0.95	0.14
		인장 파괴	$f'_c=240 \text{ kg/cm}^2$	1.05	0.12
	Long Column	압축 파괴	$f'_c=350 \text{ kg/cm}^2$	1.10	0.17
		인장 파괴	$f'_c=350 \text{ kg/cm}^2$	0.95	0.12

① 死荷重

사하중의 자료는 비교적 잘 분석되어 있어 평균과 공치비(\bar{D}/D_o)는 1.05, 분산계수 V_D 는 0.1로 취하였다(6, 16~19).

② 活荷重

구조물에 작용하는 활하중은 특정기간동안 비교적 일정하게 작용하는 임의 시점활하중 L_{apt} 와 구조물 수명기간 50년내에 작용하는 최대활하중으로 구분할 수 있다. 본 研究에서는 ANSI A58.1-1982에 근거하여 50년 활하중의 평균-공치비와 임의시점활하중 L_{apt} 의 평균-공치비를 구하였다(6, 25).

$$\frac{\bar{L}}{L_n} = \frac{0.25 + 4.57/\sqrt{A_t}}{1 - \min[0.0086A_T; 0.60; 0.23(1 + D_n/L_o)]} \quad (7)$$

여기서, A_n 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 임의시점활하중의 평균-공치비는 다음과 같다.

$$\frac{\bar{L}_{apt}}{L_n} = \frac{0.24}{1 - \min[0.0086A_T; 0.60; 0.23(1 + D_n/L_o)]} \quad (8)$$

L_{apt} 의 불확실량은 영향면적이 증가함에 따라 감소하는 영향을 가진다(6, 25).

③ 風荷重

풍하중의 평균-공치비는 미표준국의 자료에 따라 $\bar{W}/W_n=0.78$, 분산계수 $V_w=0.37$ 로 선정하였다.

3. 4 信頼性評價結果

앞의 3. 2 節에서 서술한 하중조합에 대하여 신뢰성평가절차에 따라 기존설계 기준들의 신뢰성을 평가하였으며, 이 결과를 그림으로 도시한 것이 그림 1과 그림 2이다. 그림 1은 (D+L)하중조합에 대한 결과이고, 그림 2는 (D+L+W)의 하중조합

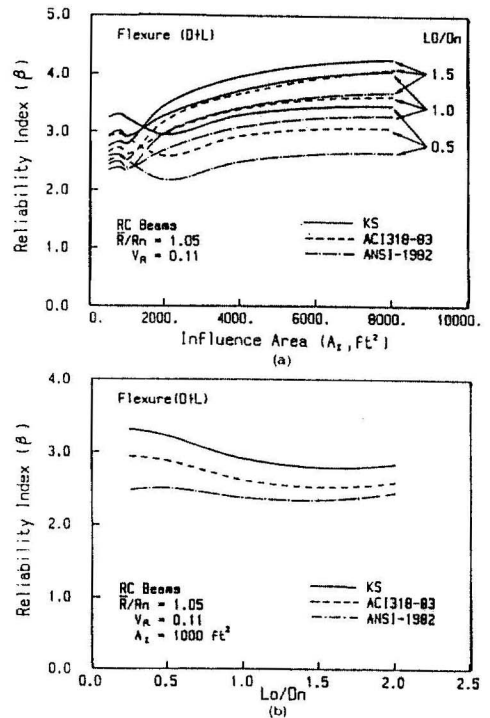


그림 1. 철근콘크리트 휨부재의 신뢰성지수(D+L).

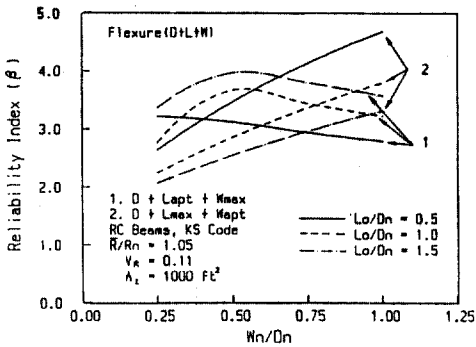


그림 2. 철근콘크리트 휨부재의 신뢰성지수(D+L+W).

에 대한 결과이다. 신뢰성지수는 활하중과 사하중의 비 및 영향면적의 함수로서 활하중과 사하중의 비는 보통 0.25~2.0 범위에 있고 영향면적 A_n 는 부재의 종류에 따라 다르다. 이 그림 1과 2에서 보는 바와 같이 우리나라의 기존설계기준의 신뢰성이 제일 높고 다음이 ACI 318-83⁽¹⁾, 그리고 ANSI-1982⁽²⁾의 순으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 우리나라의 시공수준과 품질관리정도에 비추어 볼 때 적절한 것으로 사료되고 있다. 이러한 신뢰성평가가 휨을 받는 부재뿐만이 아니라 전단을 받는 부재 그리고 휨과 압축을 받는 부재에 대하여 모두 수행되었다. 여기서는 논문의 분량제한으로 대표적인 경우만 도시하였다.

3.5 目標信賴性指數의 選定

前節에서 기존설계기준들에 대한 신뢰성평가작

업을 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 表 2에 요약되어 있다. 여기서, 가중치의 적용은 Ellingwood⁽⁶⁾등이 제안한 결과로서 하중비 L_n/D_n 이 0.25일 때 가중치 $P_1=0.10$, $L_n/D_n=0.50$ 일 때 $P_1=0.45$, $L_n/D_n=1.0$ 일 때 $P_1=0.30$, $L_n/D_n=1.5$ 일 때 $P_1=0.10$, $L_n/D_n=2.0$ 일 때 $P_1=0.05$ 이다. (D+L+W)하중조합의 경우에는 (D+L_{apt}+W_{max})하중조합과 (D+L_{max}+W_{apt})에서 구한 평균치로부터 목표신뢰성지수를 선정하였다.

4. 荷重係數 및 全體抵抗係數의 導出

앞의 2장에서 서술한 하중저항계수방법에 의한 신뢰성설계기준은 대상구조물의 안전성을 확보하기 위하여 적절한 목표신뢰성지수 β 를 결정하고 이를 기준으로 저항계수와 하중계수를 산정하는 과정으로 본장에서는 각 설계기준에 따라 전체저항계수와 부분하중계수를 산정하고 5장에서는 부분 및 조합저항계수형식에 의한 저항계수를 결정하고자 한다.

4.1 死荷重과 活荷重

일반적으로 하중계수의 최적치는 목표신뢰성지수와 제안된 하중 및 저항계수와의 연관성을 포함

表 2. 목표신뢰성 지수 β (D+L)

Action	Member Types	Details	ACI 318-83	ANSI 1982	KS 1982	
Flexure	Beams	$\sigma_y = 3000$ $f_c' = 350 \text{ kg/cm}^2$	$\rho = 0.35 \rho_b$	3.033	2.765	3.284
		$\sigma_y = 4000$ $f_c' = 350 \text{ kg/cm}^2$	$\rho = 0.31 \rho_b$	3.396	3.054	3.719
			$\rho = 0.57 \rho_b$	3.205	2.885	3.536
		Shear	Beams	No Stirrups	3.240	3.346
Minimum Stirrups	2.108			2.321	2.304	
$\rho_s \sigma_y = 11 \text{ kg/cm}^2$	2.613			2.835	2.816	
Bending + Compression	Short Column	압 축 파 괴	나선철근기둥	3.116	2.601	3.367
		인 장 파 괴	$\phi = 0.7$	4.178	3.686	4.430
	Long Column	압 축 파 괴	나선철근기둥	3.079	2.718	3.257
		인 장 파 괴	$\phi = 0.7$	3.798	3.251	4.072

하는 함수로 정의하고 이런 함수를 최소화하는 하중계수를 산정함으로써 구할 수 있다. 이와같이 정의된 함수는 다음과 같다.

$$I(\phi, r_i) = \sum_i P_i (R_{ni}^* - R_{ni})^2 \quad (9)$$

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 $R_n = (r_D D_n + r_L L_n) / \phi R$ 로 표시된다. P_i 는 하중비에 따른 가중치로서 3.4節에서 이미 설명하였다.

하중 및 저항계수를 구하기 위하여 가장 대표적인 경우로서 RC보의 통계치가 $\bar{R}/R_n = 1.14$, $V_R = 0.14$ 이고^(6, 25), 목표신뢰성 지수 β 가 우리나라 시방서에 기준하여 구한 3.284일 때 (D+L)하중조합하에서 휨을 받는 경우에 대한 하중 및 저항계수들은 表 3과 같다. 表 3은 하중비에 따라 가중치를 적용하여 하중 및 저항계수 r_D , r_L , ϕ 를 구한 뒤, 이 중에서 사하중계수 r_D 를 평균값 1.1로 정한 후 ϕ , r_L 을 구한다. 또한 $r_D = 1.1$ 은 실제 사용하기에는 너무 낮은 수준으로 평가되므로^(6, 25) 현실적으로 적절한 $r_D = 1.2$ 를 확정된 후 式 (9)를 최소화하는 ϕ 와 r_L 을 구한다. 이렇게 하여 얻어진 $r_D = 1.2$, $r_L = 1.6$ 을 확정된 후 ϕ 를 구하여 최종적으로 r_D 와 r_L 및 ϕ 를 정하게 된다. 이러한 일련의 과정으로부터 나온 결과가 表 3이다.

4.2 死荷重, 活荷重 및 風荷重

上記의 사하중과 활하중 조합의 경우와 마찬가지로

지 요령으로 휨을 받는 철근콘크리트 부재에 대하여 계산된 결과가 表 4이다. 휨을 받는 경우뿐만 아니라 전단 및 휨과 압축을 받는 부재에 대한 종합 결과가 제5장에서 함께 요약되어 설명된다.

5. 部分抵抗係數 및 組合抵抗係數形式의 考案

5.1 概 要

앞의 제4장에서 다룬 것은 저항을 하나의 계수가 담당하는 전체저항계수형식이었다. 그러나 철근콘크리트는 콘크리트와 철근의 복합체이므로 콘크리트와 철근을 분리하여 그 材料特性을 고려하는 것이 합리적이라고 할 수 있다.

全體抵抗係數形式은 식의 간결함때문에 일반적으로 사용되나, 철근과 콘크리트의 서로 다른 거동과 특성에 의한 영향을 반영하지 못한다는 결점을 가지고 있다. 따라서, 이와 같은 결점을 보완하는 설계형식으로 부분저항계수형식이나 조합저항계수형식을 유도하여 고안하는 것이 바람직하다.

部分抵抗係數形式은 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. 여기서 h_e 와 d_e 는 안전성평가를 할 목적으로 공칭차원 h_n 과 d_n 에서 변동되는 양을 감소시킨 차원이다. 결국 설계저항은 아래 식과 같은 형태를 띄게 된다.

$$R^* = R(f_y^*, f_c^*, h^*, d^*) \quad (10)$$

위의 부분저항계수형식은 저항의 개별특성에 따른

表 3. (D+L) 하중조합하에서의 각 경우별 하중 및 저항계수

Design Code	β	가중치 적용			$r_D = 1.1$		$r_D = 1.2$		$r_D = 1.2, r_L = 1.6$
		r_D	r_L	ϕ	r_L	ϕ	r_L	ϕ	ϕ
KS	3.284	1.11	1.48	0.70	1.47	0.68	1.60	0.74	0.74
ACI	3.033	1.11	1.46	0.74	1.50	0.73	1.64	0.80	0.79
ANSI	2.765	1.11	1.43	0.78	1.53	0.79	1.67	0.86	0.84

表 4. (D+L+W) 하중조합하에서의 각 경우별 하중 및 저항계수

Design Code	β	가중치 적용				$r_D = 1.1$			$r_D = 1.2$			$r_D = 1.2, r_W = 1.3$	
		r_D	r_L	r_W	ϕ	r_L	r_W	ϕ	r_L	r_W	ϕ	r_L	ϕ
KS	3.264	1.1	0.49	1.22	0.72	0.53	1.24	0.70	0.58	1.36	0.77	0.57	0.75
ACI	3.037	1.1	0.48	1.20	0.75	0.53	1.26	0.75	0.57	1.37	0.81	0.56	0.80
ANSI	2.944	1.1	0.48	1.19	0.77	0.52	1.26	0.76	0.57	1.38	0.83	0.56	0.81

고유변동성을 고려하게 되고 이들 개별측면의 비중이 변함에 따라 좀더 합리적인 신뢰성지수를 주게 된다. 이 部分抵抗係數形式은 재료의 특성을合理的으로 고려할 수 있는 장점이 있지만, 構造物의 파괴모드(failure mode)의 영향은 고려하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 이 파괴모드의 영향까지도 합리적으로 고려할 수 있도록 조합저항계수형식을 유도하였다.

이 조합저항계수형식은 다음과 같이 表示할 수 있다.

$$R^* = \phi \bar{R}(\phi_s \bar{f}_s, \phi_c \bar{f}_c) \quad (11)$$

5.2 部分抵抗係數形式

신뢰성설계기준을 도출하는 일반적인 과정은 다음과 같이 요약될 수 있다. 우선, 설계기준이 적용될 대상 구조에 대한 한계상태함수를 정의하고, 이에 따른 기존 설계기준의 신뢰성지수를 구하며, 이 계산된 신뢰성지수들로부터 목표신뢰성지수 β_0 를 선정한다. 그 다음 단계가 새로운 설계기준형식을 정하여, 목표신뢰성에 부합되는 새로운 저항계수 또는 부분저항계수를 결정하는 것이다.

前節의 式 (9)에서와 같은 요령으로 부분저항계수들은 실제 신뢰성지수 β 와 목표신뢰성계수 β_0 와의 차이 제곱에 대한 합이 최소화가 되도록 계산하여 도출된다. 즉,

$$I(\phi_s, \phi_c, d_e) = \sum_{i=1}^n w_i \{ \beta_i(\phi_s, \phi_c, d_e) - \beta_0 \}^2 \quad (12)$$

여기서 w_i 는 i 번째와 관련된 가중치이고, d_e 는 유효깊이의 변동성을 고려한 차원계수, $\beta(\phi_s, \phi_c, d_e)$ 는 부분저항계수 ϕ_s, ϕ_c, d_e 를 이용하여 설계된 i 번째의 구조물의 신뢰성지수이다. 본 절에서는 철근콘크리트부재가 휨을 받는 경우, 전단을 받는 경우 및 휨과 압축을 함께 받는 경우에 대하여 부분저항계수 설계형식을 유도하였다.

(1) 휨(Flexure)

사하중과 활하중의 작용하에서 휨을 받는 철근콘크리트보의 경우 각 설계기준마다 다음과 같은 식에 따라 설계된다.

$$0.9A_s f_y d [1 - 0.59A_s f_y / (f_c' b d)] \geq 1.5D_n + 1.8L_n : \quad (13)$$

KS-1982

$$0.9A_s f_y d [1 - 0.59A_s f_y / (f_c' b d)] \geq 1.4D_n + 1.7L_n : \quad (14)$$

ACI 318-83

$$0.85A_s f_y d [1 - 0.59A_s f_y / (f_c' b d)] \geq 1.2D_n + 1.6L_n : \quad (15)$$

ANSI-1982

본 研究에서 고안한 부분저항계수형식은 다음과 같다.

$$A_s(\phi_s f_y)(d - d_e) [1 - 0.59A_s(\phi_s f_y) / \{ (\phi_c f_c')(d - d_e)b \}] \geq 1.2D_n + 1.6L_n \quad (16)$$

여기서, 사하중계수 1.2와 활하중계수 1.6은 前章에서 구해진 하중계수이다. 상기의 설계양식에 따라 대표적인 철근콘크리트 부재에 대해 式 (12)에 따라 신뢰성을 검정하였으며, 式 (12)를 최소화되게 하는 부분저항계수를 구하였다. 이 결과는 表 5에 요약되어 있다.

(2) 剪斷(Shear)

전단을 받는 철근콘크리트보의 단면은 각 설계기준마다 다음 식에 따라 설계된다.

$$0.85(0.53\sqrt{f_c'} + \rho_s f_y) b d \geq 1.5D_n + 1.8L_n : \quad (17)$$

KS-1982

$$0.85(0.53\sqrt{f_c'} + \rho_s f_y) b d \geq 1.4D_n + 1.7L_n : \quad (18)$$

ACI 318-83

$$0.70(0.53\sqrt{f_c'} + \rho_s f_y) b d \geq 1.2D_n + 1.6L_n : \quad (19)$$

ANSI-1982

$$[0.53\phi_c \sqrt{f_c'} + \rho_s \phi_s f_y] b (d - d_e) \geq 1.2D_n + 1.6L_n : \quad (20)$$

部分抵抗係數形式

휨의 경우와 마찬가지로 상기의 한계상태함수식으로부터 부분저항계수를 구하였으며 이 결과가 表 5에 함께 요약되어 있다.

(3) 휨과 압축을 함께 받는 경우

기둥에서는 순수 중심축하중을 받는 경우와 편심하중을 받는 경우로 구분하여 생각하며, 중심축하중을 받는 경우의 한계상태방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$g(X) = B(0.85f_c' A_c + 2A_s f_y) - D - L \quad (21)$$

여기서, B는 모델편기이다. 고정편심 $e = M/P$ 에서 압축과 휨의 조합하중에 대한 한계상태함수는 다음과 같이 표시된다.

$$g(X) = B \left[P^2 + \left(\frac{P e'}{h} \right)^2 \right]^{1/2} - \left[(D+L)^2 + \left\{ \frac{(D+L)e'}{h} \right\}^2 \right]^{1/2} \quad (22)$$

여기서, e' = 인장철근의 중심에서 측정된 작용축하중의 편심거리이고, P = 단면의 축하중 능력이다.

表 5. 各 設計技法에 의한 저항계수

Action	Code	전체저항계수 ϕ	부분저항계수			조합저항계수				
			ϕ_s	ϕ_c	d_e	ϕ	ϕ_s	ϕ_c	d_e	
Flexure	KS	0.75	0.85	0.65	0.50"	0.95	0.90	0.65	0.25"	
	ACI	0.80	0.85	0.70	0.50"	0.95	0.90	0.70	0.50"	
	ANSI	0.85	0.90	0.70	0.25"	0.95	0.95	0.80	0.50"	
Shear	KS	0.65	0.75	0.60	0.50"	0.85	0.90	0.60	0.25"	
	ACI	0.70	0.85	0.60	0.25"	0.85	0.90	0.65	0.50"	
	ANSI	0.70	0.85	0.60	0.25"	0.85	0.90	0.65	0.50"	
Flexure + Compression	Tied	KS	0.60	0.70	0.60	0.25"	0.75	0.90	0.60	0.0"
		ACI	0.65	0.75	0.70	0.50"	0.80	0.90	0.60	0.50"
		ANSI	0.65	0.75	0.60	0.25"	0.80	0.90	0.60	0.25"
	Spiral	KS	0.65	0.75	0.60	0.25"	0.80	0.90	0.60	0.50"
		ACI	0.70	0.80	0.60	0.50"	0.85	0.90	0.60	0.50"
		ANSI	0.70	0.80	0.60	0.25"	0.85	0.90	0.60	0.25"

(註 : 1 inch = 2.54 cm)

기둥에서도 활하중과 사하중비 및 편심비 e/h 에 따라 상기식을 이용하여 신뢰성해석을 하고, 휨의 경우와 마찬가지로 부분저항계수를 구하며, 이렇게 하여 구해진 결과가 表 5에 요약되어 있다.

5.3 組合抵抗係數形式

앞절에서와 마찬가지로 휨, 전단, 휨과 압축을 함께 받는 경우에 대하여 각 설계기준별로 式 (11)의 조합저항계수형식에 따라 신뢰성해석에 의한 조합저항계수를 구하였다. 이렇게 구해진 조합저항계수들이 앞장에서 구한 전체저항계수 및 부분저항계수와 함께 表 5에 요약되어 있다.

表 5에는 부재의 단면치수에 대한 변동성을 고려하기 위하여 차원계수 d_e 를 사용한 경우에 대한 부분저항계수와 조합저항계수가 수록되어 있으나 실제 설계시에 사용하기에는 복잡성을 내포하고 있다. 따라서 실제설계의 단순화를 유지하면서 합리적인 신뢰성을 확보할 수 있도록 차원계수 d_e 를 0으로 한 경우에 대한 최소화 계산을 다시 하였으며, 우리나라 설계기준에 적합한 계산 결과가 表 6에 요약되어 있다. 그림 3과 4는 본 논문에서 유도된 전체저항계수, 부분저항계수 및 조합저항계수형식에 따른 우리나라 설계기준의 신뢰성수준을 보여주고 있다. 이 그림에서 보듯이 세가지 설계형식이 비교적 균일한 신뢰성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

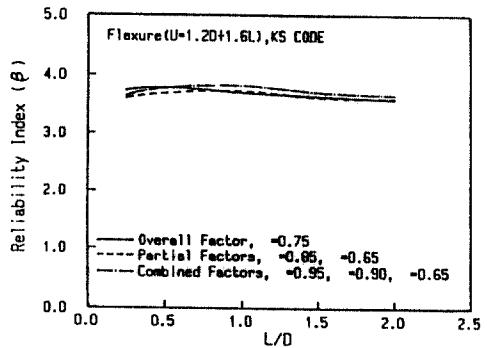


그림 3. 휨을 받는 경우 본 연구에서 제안된 각 설계형식의 신뢰성 수준

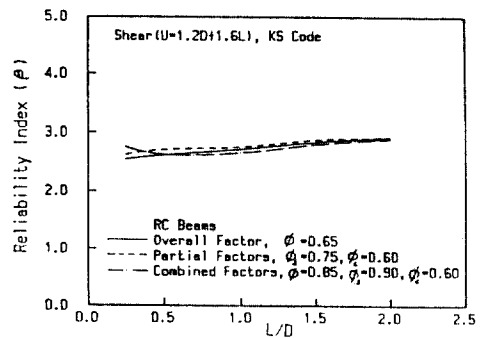


그림 4. 전단을 받는 경우 본 연구에서 제안된 각 설계형식의 신뢰성 수준.

表 6. 우리나라기준에 적합한 저항계수($\alpha=0$)

Action	전체저항계수 ϕ	부분저항계수		조합저항계수		
		ϕ_s	ϕ_c	ϕ	ϕ_s	ϕ_c
Flexure	0.75	0.85	0.65	0.95	0.90	0.65
Shear	0.65	0.75	0.60	0.85	0.90	0.60
Flexure + Compression	Tied	0.60	0.70	0.60	0.75	0.90
	Spiral	0.65	0.75	0.60	0.80	0.90

6. 各 設計基準의 比較評價

지금까지 본 논문에서는 신뢰성이론에 근거한 합리적인 하중계수 및 저항계수를 유도하였다. 이제 본 장에서는 본 논문에서 제안된 설계기준과 기존 설계기준들의 신뢰성을 비교검토하고자 한다. 먼저 사하중과 활하중 조합의 경우에 대하여 신뢰성을 비교하기 위하여 고려된 설계기준들의 형식은 다음과 같다.

- (1) KS-1982 : $\phi R_n = 1.5D + 1.8L$
- (2) Proposed Format : $\phi R_n = 1.2D + 1.6L$
- (3) ACI 318-83 : $\phi R_n = 1.4D + 1.7L$
- (4) KS-1988 : $\phi R_n = 1.2D + 1.8L$
- (5) MacGregor(ANSI) : $\phi R_n = 1.2D + 1.6L$

上記의 각 설계형식들에 대한 각 하중형태에서의 저항계수들(ϕ)이 表 7에 요약되어 있다. 그림 5는 휨을 받는 철근 콘크리트 부재의 신뢰성수준을 각 설계기준 별로 비교한 것으로서, 본 연구에서 제안된 설계기준은 기존의 우리나라 설계기준(KS-1982)의 신뢰성과 유사하고, ACI기준이 그 다음이며, 최근에 개정된 우리나라 설계기준(KS-1988)의 신뢰성은 미국의 ACI 설계기준보다도 신뢰성이 약간 낮은 것으로 나타나고 있다. 이것은 우리나라의 품질관리나 시공정도에 비추어 볼 때, 본 연구에서 제안된 바와 같이 좀더 높은 신뢰성이 바람직한

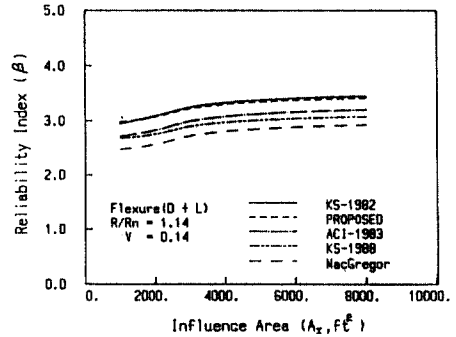


그림 5. 휨에 대한 각 설계기준의 신뢰성 수준비교

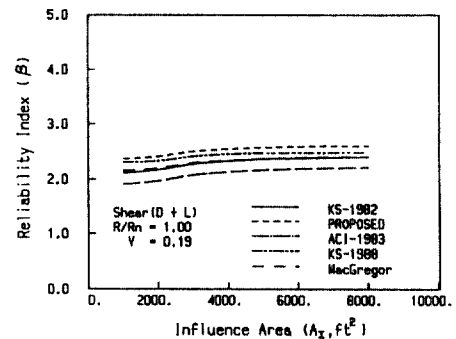


그림 6. 전단에 대한 각 설계기준의 신뢰성 수준비교.

표 7. 각 설계기준에 대한 저항 계수

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

것으로 사료되고 있다. 또한 그림 6은 전단을 받는 부재에 대한 신뢰성 수준을 비교 검토한 것으로서 기존의 우리나라 설계기준(KS-1982)과 ACI설계기준은 전단에 대한 신뢰성수준이 본 연구에서 제안된 설계기준보다 약간 낮음을 보여주고 있다. 이것은 최근에 발표된 MacGregor의 연구결과에서도 지적된 바로서 현행의 기준들이 전단에 대해 과소한 안전율을 가지고 있음을 말해주고 있다. 즉 전단과파괴의 취성과 취약성을 합리적으로 고려하기 위하여 신뢰성수준을 높일 필요가 있음을 지적하고 있다.

사하중과 활하중 및 풍하중 조합의 경우에도 각 설계기준 별로 신뢰성수준을 비교검토한 결과 상기와 유사한 경향을 나타내었다.

7. 결 론

본 연구에서는 하중 및 저항의 불확실성을 합리적으로 고려할 수 있도록 구조신뢰성이론에 근거한 콘크리트 설계기준을 제시하고자 하였으며 이를 위해 포괄적인 기초연구를 수행하였다. 본 연구에서는 특히 콘크리트와 철근의 재료특성을 고려할 수 있도록 부분저항계수 및 조합저항계수 형식을 유도하여 제시하였으며, 본 연구에서 얻어진 결론을 요약하여 기술하면 다음과 같다.

(1) 기존의 철근콘크리트 설계기준들의 신뢰성 수준을 평가하였으며, 그 결과 신뢰상수준이 각 경우에 따라 2.5-4.0 범위에 있으며, 한계상태함수와 영향면적에 따라 변한다.

(2) 기존의 설계양식인 전체저항계수 형식을 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.

(5) 본 연구에서 유도된 설계기준의 신뢰성을 기존의 각 설계기준들과 비교 검토하였으며, 그 결과 제안된 설계기준의 신뢰성은 기존설계기준과 비교하였을 때 적절한 것으로 판단되었다.

謝 辭

本論文은 1988년도 과학기술처연구지원에 의하여 연구되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

參 考 文 獻

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. Ang, A. H.-S., "Structural Risk Analysis and Reliability-Based Design," *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 100, No. ST9, Proc. Paper 10777, Sept. 1974, pp.1755-1769.
4. Ang, A. H.-S. and Cornell, C. A., "Reliability Bases of Structural Safety and Design," *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 100, No. ST9, Sept. 1974, pp.1755-1769.
5. CIRIS, "Rationalisation of Safety and Serviceability Factors in Structural Codes," *CIRIA Report 63*, Construction Industry Research & Information Association, London, UK, 1977.
6. Ellingwood, B., Galambos, T. V., MacGregor, J. C., and Cornell, C. A., "Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standards A58", National Bureau of Standards, Washington, D. C., June 1980.
7. 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.
8. Ellingwood, B., "Reliability of Current Reinforced Concrete Designs," *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 105, No. ST4, April 1979, pp.699-712.
9. Ellingwood, B., MacGregor, J. G., Galambos, T. V., and Cornell, C. A., "Probability Based Load Criteria : Load Factors and Load Combinations," *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 108, No. ST5, May 1982, pp.978-997.

10. Freudenthal, A. M., "Safety and the Probability of Structural Failure," *Transactions, ASCE*, Vol. 121, 1956, pp.1334-1397.
11. Galambos, T. V., Ellingwood, B., MacGregor, J. G., and Cornell, C. A., "Probability Based Load Criteria : Assessment of Current Design Practices," *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 108, No. ST5, May 1982, pp.959-977.
12. Hasofer, A. M. and Lind, N. C., "Exact and Invariant Second-Moment Code Format," *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. No. EM1, Feb. 1974, pp.111-121.
13. Hanes, R. M., "Second-Moment Reliability Analysis of Reinforced Concrete Slabs," Ph. D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Purdue University, Aug. 1978.
14. Israel, M., Ellingwood, B., and Corotis, R., "Reliability-Based Code Formulations for Reinforced Concrete Buildings," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 113, No. 10, Oct. 1987.
15. MacGregor, J. G., "Load and Resistance Factors For Concrete Design," *ACI Journal, Proceedings* V. 80, No. 4, July-Aug. 1983, pp.279-287.
16. MacGregor, J. G., Mirza, S. A., and Ellingwood, B., "Statistical Analysis of Resistance of Reinforced and Prestressed Concrete Members," *ACI Journal, Proceedings* V. 80, No. 3, May-June 1983, pp.167-176.
17. Mirza, S. A., Hatzinikolas, M., MacGregor, J. C., "Statistical Descriptions of Strength of Concrete," *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 105, No. ST6, June 1979, pp.1021-1037.
18. Mirza, S. A., MacGregor, J. G., "Variability of Mechanical Properties of Reinforcing Bars," *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 105, May 1979, pp.921-937.
19. Mirza, S. A., MacGregor, J. G., "Variations in Dimensions of Reinforced Concrete Members," *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 105, No. ST4, April 1979, pp.751-766.
20. Muaz, S. M. H., "Load and Resistance Factor Design of Reinforced Concrete Slabs," Ph. D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, Dec. 1982.
21. 건설부, "콘크리트 표준시방서," 1982, 건설부.
22. 조태승, "철근콘크리트 슬래브에 대한 신뢰성 설계기준에 관한 연구", 공학박사논문, 서울대학교, 1986.
23. 조효남, 장동일, 신재철, "확률 이론에 기초한 철근콘크리트 강도설계기준," *대한토목학회논문집*, 제6권 제4호, 1986년 12월, pp.53-60.
24. 조효남, "철근콘크리트 도로교 상부구조의 신뢰성설계기준에 관한 연구," *대한토목학회논문집*, 제2권 제3호, 1982년 9월, pp.87-89.
25. 오병환, "확률신뢰성 이론에 의한 구조물의 합리적 해석 기법과 신뢰성 설계기준(I)" 과학기술처 보고서, 1989.
26. 오병환, "콘크리트 피로강도 및 피로신뢰성 해석에 관한 이론 및 실험연구," *대한토목학회논문집*, 제5권 제4호, 1985년 12월, pp.113-119.
27. 오병환, "콘크리트 휨 피로 수명의 확률분포," *대한토목학회논문집*, 제6권 제2호, 1986년 6월.

(接受 : 1990. 1. 24)