

論文 鉄筋コンクリート造建物の耐震信頼性評価

永井 覚^{*1}・前田 匡樹^{*2}

要旨: 鉄筋コンクリート造建物における信頼性理論による限界状態設計法構築のために、主に地震荷重を想定し、柱、梁、柱梁接合部、耐震壁における部材強度のばらつきの定量化を行い、荷重・耐力係数法により使用限界状態及び終局限界状態における部分安全係数を導いた。また、評価方法として、耐力の公称値に平均強度を用いることにより、材料強度の影響が少ない部分安全係数が得られ、より合理的な方法が示された。

キーワード: 鉄筋コンクリート造建物, 限界状態設計法, 耐震信頼性, 荷重耐力係数設計法

1. はじめに

ここ数年、構造物に要求される性能を明確にして設計を行う性能規定型構造設計法が注目されている。日本建築学会では、構造物の性能を合理的に扱う設計手法の一つとして限界状態設計法に着目し、昨年「建築物の限界状態設計法(案)」¹⁾(以降「限界指針」)が刊行された。

建築構造物では、これまでに鋼構造で荷重耐力係数法を採用した限界状態設計法²⁾が示されていたが、鉄筋コンクリート造では、「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針」³⁾(以降「靱性指針」)等のように、終局強度設計法を用いており、その耐震信頼性は必ずしも明確ではない。そこで、筆者らは、靱性指針を基本にして鉄筋コンクリート造建物の耐震信頼性評価を行い、主に地震荷重を想定した終局限界における限界状態設計法を検討してきた⁴⁾。

本研究の目的は、既検討で不足していた使用限界の評価と耐震壁についての評価を追加検討するとともに、より合理的な設計法を得るための検討を行うものである。

2. 耐震信頼性の評価方法及び評価項目

構造物の信頼性を二次モーメント法に基づいた部分安全係数を導き、その信頼性を評価する。一般に、荷重耐力係数法では、耐力 R 及び荷重

効果 S は、変動性や不確定性を有しているので、確率変数として取り扱い、設計式は式(1)として、全ての確率変数が対数正規分布を用いて近似すれば、耐力係数 ϕ 及び荷重係数 γ は式(2)及び式(3)として得られる¹⁾。本研究では、外力による荷重効果は限界指針に従うものとして耐力の評価を行う。

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_{si} S_{ni} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{1+V_R^2}} \exp(-\alpha_R \cdot \beta \cdot \sigma_{\ln R}) \frac{\bar{R}}{R_n} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1+V_S^2}} \exp(\alpha_S \cdot \beta \cdot \sigma_{\ln S}) \frac{\bar{S}}{S_n} \quad (3)$$

ϕ, γ : 耐力係数, 荷重係数
 \bar{R}_n, \bar{S}_n : 耐力及び荷重の公称値
 R, S : 耐力及び荷重の平均値
 V_R, V_S : 耐力及び荷重の変動係数
 $\sigma_{\ln R}, \sigma_{\ln S}$: 耐力及び荷重の対数標準偏差
 α_R, α_S : 耐力の分離係数
 β : 信頼性指標

また、評価項目は、限界指針と同様に終局限界と使用限界に対して表 1 の項目を考慮した。

3. 部材性能のばらつき

本研究では、部材耐力がばらつく要因として、①実構造物耐力と実験耐力の差異等に対する変動、②予測耐力に対する実験耐力の変動、③材料強度のばらつきによる変動を考慮し、これらを考慮した真の部材耐力のばらつきは、線形二

*1 鹿島建設(株) 技術研究所建築技術研究部 主任研究員 工修(正会員)

*2 東北大学大学院助教授 工学研究科都市・建築学専攻 博士(工学) (正会員)

表 1 評価項目一覧

限界状態	対象部材	評価項目	性能評価式	参考文献
終局	梁柱	曲げ終局強度	ACI 曲げ終局強度算定方法	靱性指針 ³⁾
		せん断終局強度	$V_{su} = \min[V_{su1}, V_{su2}, V_{su3}]$ $\begin{cases} V_{su1} = \mu p_w e \sigma_{wy} b e j_e + (v_{OB} - 5 p_w e \sigma_{wy} / \lambda) b D \tan \theta / 2 \\ V_{su2} = (\lambda v_{OB} + p_w e \sigma_{wy}) b e j_e / 3 \\ V_{su3} = \lambda v_{OB} b e j_e / 2 \end{cases}$	
		付着割裂によるせん断強度	$V_{bu} = \min[V_{bu1}, V_{bu2}]$ $\begin{cases} V_{bu1} = T x j_e + (v_{OB} - 2.5 T x / \lambda b e) b D \tan \theta / 2 \\ V_{bu2} = \lambda v_{OB} b e j_e / 2 \end{cases}$	
	接合部	せん断終局強度	$V_{ju} = \kappa \phi F_j b_j D_j$	
	耐震壁	曲げ終局強度	$M_u = a t \cdot \sigma_y \cdot L_w + 0.5 a_w \cdot \sigma_{wy} \cdot L_w + 0.5 N \cdot L_w$	
		せん断終局強度	$V_{su} = t_w \cdot l_w b \cdot p_s \cdot \sigma_{sy} \cdot \cot \phi + \tan \theta \cdot (1 - \beta) \cdot t_w \cdot l_w a \cdot v_{OB} / 2$	
使用	柱梁	曲げ降伏強度	$M_y = \{g I \cdot q + 0.5 \eta (1 - \eta)\} \cdot \sigma B B D$	RC 規準 ⁵⁾
		せん断ひび割れ強度	$V_c = \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_T \cdot \sigma_0} \cdot b D / \kappa$	靱性指針 ³⁾
	耐震壁	せん断ひび割れ強度	$V_c = \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_T \cdot \sigma_0} \cdot t_w l_w / \kappa_w$	

*性能評価式の記号は参考文献参照のこと

次モーメント法を用いて、平均値 \bar{R} を式(4)で、変動係数 V_R を式(5)で表せる。

$$\bar{R} = \bar{\psi}_s \cdot \bar{\psi}_p \cdot \bar{\psi}_m \cdot R_n \quad (4)$$

$$V_R = \sqrt{V_{\psi_s}^2 + V_{\psi_p}^2 + V_{\psi_m}^2} \quad (5)$$

$\bar{\psi}_s, \bar{\psi}_p, \bar{\psi}_m$: 上記①②③の平均値
 $V_{\psi_s}, V_{\psi_p}, V_{\psi_m}$: 上記①②③の変動係数

ここで、既検討⁴⁾では、耐力の公称値 R_n は、鉄筋強度に規格降伏強度を、コンクリート強度に設計基準強度を用いて算定した。しかし、評価された耐力係数は材料強度により変動する傾向があり、評価項目ごとに耐力係数を一つに定めることは不経済である。そこで、本研究では鉄筋・コンクリートの実強度/規格強度のばらつきとして文献 6)を参考に、表 6 に示す様に仮定し、その平均値を用いて表 1 に示す性能評価式の公称値を算定し、これを平均強度 R_{av} と定義する。

3.1 実構造物の耐力と実験耐力の差異

実構造物の耐力と実験耐力との差異におけるばらつきには、寸法効果などの様々な因子が影響すると考えられるが、現状では適切な資料が得られていない。そこで、文献 7)に準拠し、実構造物の耐力と実験耐力のばらつきを平均値

$\bar{\psi}_s = 1.00$ 、変動係数 $V_{\psi_s} = 0.05$ と仮定した。

3.2 予測耐力に対する実験耐力の変動

予測耐力に対する実験耐力の変動は(平均値 $\bar{\psi}_p$ 、変動係数 V_{ψ_p})、性能評価式の精度として得られるもので、評価項目ごとに表 2 に示す。

柱梁の曲げ降伏強度及び曲げ終局強度以外の評価式の精度は靱性指針に示される値を用いた。一方、柱梁の曲げ降伏及び曲げ終局強度は、建設省総プロ「NewRC」で調査された試験体⁸⁾と、それ以降実施された短スパン梁等の実験^{9)~31)}のうち、逆対称曲げせん断載荷され、曲げ降伏後に破壊した試験体(梁 156 体、柱 169 体の計 325 体)の実験結果を用いて性能評価式の精度を評価した。検討対象試験体の主因子の分布範囲は、コンクリート強度:20~135(N/mm²)、主筋降伏強度:261~977(N/mm²)、軸力比:-0.26~0.91、せん断スパン比:0.89~3.55 である。曲げ降伏強度実験値は文献 8)に示される等価降伏点の耐力値とし、曲げ終局強度実験値は実験時最大耐力とした。また、柱では、軸力比 0.5 を超えると曲げ終局強度の実験値/予測値が増大する傾向があること、また、引張軸力試験体が少ないことから、軸力比 0~0.5 までの試験体を用いた。