

論文 材料強度および耐力評価式のばらつきがRC 部材耐力および破壊形式に及ぼす影響

江原 礼子*1・前田 匡樹*2・永井 覚*3

要旨: RC 造建物の破壊形式として、韌性に富む梁降伏型の全体降伏機構を確実に実現するために必要な設計条件を把握するために、部材耐力の不確定性について検討を行った。部材耐力がばらつく原因として、耐力評価式の精度及び材料強度のばらつきを考慮した。また、せん断・付着余裕度及び柱梁曲げ耐力比と、設計で想定していない破壊形式の生起確率との関係を検討し、生起確率が許容確率以下となるための条件を検討した。

キーワード: 部材耐力の不確定性, 材料強度・耐力評価式のばらつき, 破壊形式, 生起確率

1. はじめに

建物の耐震設計を行うに当たり地震時の振動エネルギーを十分に吸収するためには、せん断破壊や付着破壊に比べて比較的韌性に富む梁の曲げ降伏先行型の降伏機構が望ましいとされている。このような破壊形式を確実に実現させるために、日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建物の韌性保証型耐震設計指針(案)・同解説」¹⁾では、曲げ降伏ヒンジの発生を計画する部位の曲げ耐力を割り増した曲げ上限強度を設定し、各部材のせん断・付着耐力及びヒンジを計画しない部位の曲げ耐力がヒンジ部の曲げ上限強度を上回るように設計を行うこととしている。しかしながら、その結果として、計画した降伏機構がどの程度の安全性(確率)で実現されるか必ずしも明らかではなく、これまでにあまり検討されていない。

そこで本研究では、梁曲げ降伏先行型の全体降伏機構を確実に実現するために必要な設計条件を把握するために、梁・柱部材耐力の不確定性に着目し、曲げ・せん断・付着耐力のばらつきを定量化した。不確定性の原因として①材料強度のばらつき、②耐力評価式の精度を考慮することとした。

また、部材耐力の不確定性を考慮して、個々の部材及び骨組(柱・梁の節点)の破壊形式の信頼性(望ましくない破壊形式の生起確率)についてモン

テカルロ法を適用し、せん断・付着余裕度及び柱梁曲げ耐力比との関係を検討した。

2. 材料強度のばらつき

部材耐力がばらつく原因の一つである材料強度のばらつきについて、既往の文献^{1), 2)}の調査結果を参考に、鉄筋降伏強度及びコンクリート圧縮強度の実強度のばらつき(実強度/規格強度の平均値及び変動係数)を決定した。

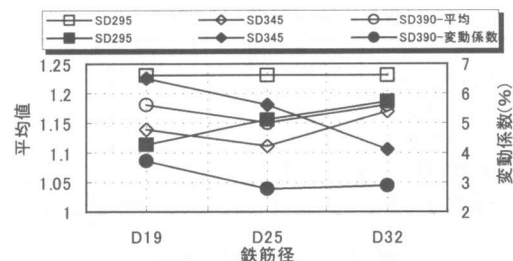


図-1 鉄筋実強度/規格強度

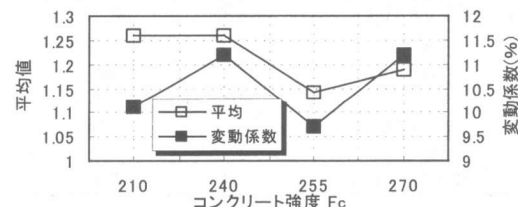


図-2 コンクリート実強度/設計規準強度

2.1 鉄筋強度

*1 横浜国立大学大学院 工学研究科 計画建設学専攻 (正会員)
 *2 横浜国立大学 助教授 工学部 建設学科 博士(工学) (正会員)
 *3 鹿島建設(株) 小堀研究室 修士(工学) (正会員)

鉄筋強度のばらつきは鉄筋径により若干の差異はあるが、概ね以下ようになる。図-1 に示すように鉄筋の実強度/規格降伏強度の平均値(図中白抜き)は 1.1~1.3 である。また、変動係数(図中黒塗り)は、SD295 及び SD345 で 5%程度、SD390 はやや低く 3%程度である。

2.2 コンクリート強度

コンクリート強度のばらつき(現場水中養生した場合)は設計基準強度 F_c により若干の差異はあるが、概ね以下ようになる。図-2 に示すように実強度/設計基準強度の平均値(図中白抜き)は、概ね 1.15~1.25 であり、変動係数(図中黒塗り)は 10%程度である。

2.3 検討に用いたばらつき

以上から、本研究 4.以降での検討に用いる材料強度は、表-1 のばらつき(実強度/規格強度の平均値、変動係数)を有する正規分布に従う確率変数と仮定する。また、本研究ではコンクリート強度の変動係数 V_{σ_B} を $V_{\sigma_B}=10\%$ (CASE1)と、比較のため、品質管理があまりされていない場合を想定した $V_{\sigma_B}=20\%$ (CASE2)の 2 種類を考慮する。

表-1 材料強度のばらつき

	平均値	変動係数(%)
鉄筋(SD295)	1.25	5
(SD345)	1.15	5
(SD390)	1.15	3
(SD490 以上)	1.1	3
コンクリート	1.25	10, 20

表-2 検討対象梁・柱断面

	梁部材	柱部材
断面 $b \times D$ (cm)	60 × 90	80 × 80
主筋	4+2-D35	16-D35
σ_y (MPa)	390	390
σ_B (MPa)	40	40
σ_{wy} (MPa)	785	785
M/QD	3	1.5
引張鉄筋比 p_t (%)	1.14	0.75

3. 検討対象部材断面

本研究で検討に用いる梁・柱部材断面は、韌性指針¹⁾に示される設計例建物を参考に、12階建てRC造建築物の中層階を想定した代表的な断面とした(図-3、表-2)。

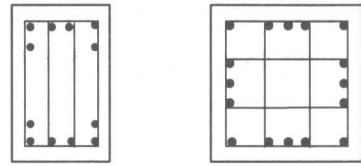


図-3 検討対象部材断面

4. 部材耐力のばらつき

部材耐力のばらつき(部材実耐力/規格材料強度を用いた計算値の平均値 μ_y 、変動係数 V_y)は、耐力評価式の精度に伴うばらつき(部材実耐力/材料実強度を用いた耐力の計算値の平均値 μ_{Nf} 、変動係数 V_{Nf})と材料強度のばらつきによる耐力のばらつき(材料実強度を用いた耐力の計算値/規格材料強度を用いた計算値の平均値 μ_f 、変動係数 V_f)が独立及び正規分布であると仮定すると、(1)式及び(2)式で評価できる³⁾。

$$\text{平均値} \quad \mu_y = \mu_{Nf} \cdot \mu_f \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{変動係数} \quad V_y^2 = V_{Nf}^2 + V_f^2 \dots\dots\dots (2)$$

検討に用いた耐力評価式は、(3)梁の曲げ終局耐力略算式、(4)柱の曲げ終局耐力略算式、(5)韌性指針¹⁾のせん断耐力評価式、(6)韌性指針¹⁾の付着破壊を考慮したせん断耐力評価式である。ただし、(5)式、(6)式中のコンクリート圧縮強度有効係数 ν は CEB 式($\nu = 3.68 \sigma_B^{-0.333}$)より算定する。

$$M_u = 0.9a_t \cdot \sigma_y \cdot d \dots\dots\dots (3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} M_u &= 0.8a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.4N \cdot D \quad (\eta < 0) \dots\dots\dots (4-1) \\ M_u &= 0.8a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5N \cdot D \{1 - N / (b \cdot D \cdot \sigma_B)\} \\ &\quad (0 \leq \eta \leq 0.4) \dots\dots\dots (4-2) \\ M_u &= 0.8a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.12b \cdot D^2 \cdot \sigma_B \quad (0.4 < \eta) \quad (4-3) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} V_u &= \mu \cdot P_{wc} \cdot \sigma_{wy} \cdot b_c \cdot j_c \\ &\quad + \{\nu \cdot \sigma_B - 5P_{wc} \cdot \sigma_{wy} / \lambda\} (b \cdot D / 2) \tan \theta \\ &\quad \dots\dots\dots (5-1) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} V_u &= (\lambda \cdot \nu \cdot \sigma_B + P_{wc} \cdot \sigma_{wy}) b_c \cdot j_c / 3 \dots\dots\dots (5-2) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} V_u &= \lambda \cdot \nu \cdot \sigma_B \cdot b_c \cdot j_c / 2 \dots\dots\dots (5-3) \end{aligned} \right.$$

ただし、 V_u は(5-1)、(5-2)、(5-3)式の最小値

$$\left\{ \begin{aligned} V_{bu} &= \sum (\tau_{bu} \cdot \psi) j_c \\ &\quad + \{\nu \cdot \sigma_B - 2.5 \sum (\tau_{bu} \cdot \psi) / \lambda \cdot b_c\} (b \cdot D / 2) \tan \theta \\ &\quad \dots\dots\dots (6-1) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} V_{bu} &= \lambda \cdot \nu \cdot \sigma_B \cdot b_c \cdot j_c / 2 \dots\dots\dots (6-2) \end{aligned} \right.$$