

鉄筋コンクリート部材の耐力評価

EVALUATION OF THE STRENGTH OF THE REINFORCED CONCRETE MEMBERS

佐藤 勉* 寺田年夫* 宮本 征夫*

BY TSUTOMU SATOU, TOSHIO TERADA AND YUKIO MIYAMOTO

The design method stipulated in the current design code for concrete structures is going to be revised from Allowable Stress Design Method to Limit State Design Method. In the new design code, the values of safety factors are not yet specified. In this study, the authors propose to evaluate the design uncertainty (variation of material strength, dimensional error, and uncertainty in calculation) and the design strength (flexural capacity and shear capacity) of the reinforced concrete members.

1. はじめに

コンクリート鉄道構造物の設計法は限界状態設計法へ移行する予定で検討が進められている。限界状態設計法では、終局・使用・疲労の各限界状態の照査方法をいかに合理的に決定するかが、構造物の安全性、経済性に大きな影響を与えることとなる。終局限界状態の検討においては、構造物の破壊に対する安全性が確保されているかを照査するのであるが、このためには、荷重、材料強度、施工精度、構造解析等における設計施工上の不確定要因を合理的にかつ定量的に評価し、構造物の安全性を客観的に取り扱えるようにすることが必要であると考えられる。こうした研究に対しては、既に文献1)等に見られるような安全性の定量的評価に基づいた検討も行われつつある。本研究は、こうした試みの一環として、耐力評価に関する不確定要因の実態調査を行うとともに、実構造物レベルでの鉄筋コンクリート部材の曲げおよびせん断耐力の算定精度について、検討考察した結果を報告するものである。

2. 不確定要因の調査

(1) 材料強度

コンクリートの圧縮強度および鋼材引張降伏強度に関する調査データを表1と表2に示す。

表1に示したデータは、昭和53,54年度において国鉄の工事に用いられたレデーミクストコンクリートを対象に、実態調査して得られた標準養生供試体の圧縮強度の平均値と標準偏差である²⁾。

表2に示した異形鉄筋(SD35)の引張降伏強度のデータもコンクリートと同様に、昭和53,54年度に鉄筋の

* (財)鉄道総合技術研究所 線路構造研究室 (〒185 国分寺市光町2-8-38)

ミルシートによる調査を行った結果より得られた引張降伏強度の平均値と標準偏差である³⁾。なお、ここで得られたデータは、正規分布と仮定して統計量を扱うものとした。

(2) 部材断面の形状寸法

部材断面の実測寸法と設計寸法との比較を表3、4に示す。データは、供用中の3タイプ(標準, 異径間, 壁式)の鉄道ラーメン高架橋30橋におけるはりの幅, 柱の幅とスラブ下面およびはり下面の鉄筋のかぶりについて実態調査し, 設計寸法との差を整理したものである。

図1, 2にはりの幅と柱の幅の各データのヒストグラムおよび平均値と標準偏差を基に求めた正規分布図も合わせて示した。表および図より, 部材の寸法誤差については, (実測値-設計値)の平均値および標準偏差とも比較的小さいことがわかる。一方, 鉄筋かぶりについては, 平均かぶり厚さは設計寸法より大きめであり, また部材寸法精度に比べて標準偏差が大きいようである。

3. 耐力算定式の評価方法

本研究では, 耐力算定式の評価を, 曲げ耐力とせん断耐力について以下の方法により行うこととした。

(1) 曲げモーメントのみを受ける部材の曲げ耐力算定式と評価方法

曲げ耐力に関しては図3に示す単鉄筋く形断面を検討対象として, 耐力算定式およびその平均値と標準偏差の算定式は, 以下に示す方法で求めるものとする。すなわち, 単鉄筋く形断面の曲げ耐力算定式は式(1)を用い, 曲げ耐力の算定値の平均値および標準偏差は耐力算定式に含まれる不確定要因を評価することによって求めることとする。ただし, 式(1)では曲げ終局耐力時に引張鉄筋が降伏するものと仮定している。

$$M_u = A_s \sigma_{sy} \left(d - \frac{A_s \sigma_{sy}}{1.7 \sigma_{cu} b} \right) \quad (1)$$

ここに, M_u : 曲げ耐力

σ_{sy} : 鉄筋の降伏強度

σ_{cu} : コンクリートの圧縮強度

表1 コンクリートの圧縮強度のデータ

コンクリートの設計基準強度 (MPa)	データ数	平均値 (MPa)	標準偏差 (MPa)	変動係数
20.6	1065	26.3	1.84	0.070
23.5	2023	29.4	1.96	0.067
26.5	2565	32.7	1.87	0.057
39.2	1005	50.4	3.02	0.060

表2 鉄筋 (SD35) の引張降伏強度のデータ

鉄筋径別	データ数	平均値 (MPa)	標準偏差 (MPa)	変動係数
D13	3767	390	16.5	0.042
D16	3533	391	18.2	0.047
D19	3110	388	17.3	0.044
D29	2329	389	19.3	0.050
D32	3120	386	19.2	0.050
計	15959	389	18.0	0.046

表3 部材寸法精度 (実測値-設計値) データ

部位名	データ数	平均値 (mm)	標準偏差 (mm)
はりの幅	66	4.8	5.4
柱の幅	453	2.4	3.4

表4 鉄筋かぶり (実測値-設計値) データ

部位名	データ数	平均値 (mm)	標準偏差 (mm)
スラブ下面	86	5.4	8.6
はり下面	72	19.1	11.0

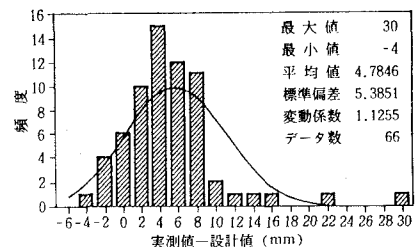


図1 はりの幅の寸法誤差

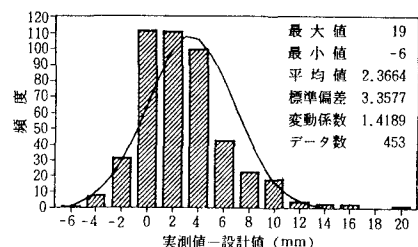


図2 柱の幅の寸法誤差

b : 部材腹部の幅

d : 有効高さ

A_s : 引張鉄筋の断面積

ここで, σ_{sy} , σ_{cu} , b , d および A_s をそれぞれ確率変数 X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 とすれば, 式(1)は式(2)と表すことができる。

$$M_u = g(\sigma_{sy}, \sigma_{cu}, b, d, A_s) = g(X_1, X_2, \dots, X_5) \quad (2)$$

式(2)を確率変数に関してテーラー展開して, 1次の項で打ち切ると式(3)となる。

$$M_u \approx g(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_5) + \sum_{i=1}^5 \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\bar{X}_i} \cdot (X_i - \bar{X}_i) \quad (3)$$

式(3)より, M_u の平均値 $\bar{M}_u$ と標準偏差 C_{Mu} は, 式(4), (5)のように表すことができる。

$$\bar{M}_u = g(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_5) \quad (4)$$

$$C_{Mu} = \sqrt{\sum_{i=1}^5 \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\bar{X}_i}^2 \cdot C_{X_i}^2} \quad (5)$$

ただし, $\left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\bar{X}_i}$ の記号は, 関数 $g(X_1, X_2, \dots, X_5)$ の X_i

に関する偏微分を求めて, $\bar{X} = (\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_5)$ を代入することによって得られる値である。また, $\bar{X}_i$, C_{X_i} は各確率変数の平均値, 標準偏差である。

(2) 軸方向力を受ける部材の曲げ耐力算定式と評価方法

軸方向力と曲げモーメントを同時に受ける部材の耐力評価は, 耐力の算出過程が複雑であるため, (1)による方法にはよらず, モンテカルロシミュレーション法を用いるものとした。算出方法は, 図4のフローチャートに示す方法のように, 軸方向力を設定し, 曲げ耐力の算出を繰返し行い, 平均値と標準偏差を求めるものとした。

(3) セン断耐力算定式と評価方法

せん断耐力については, 文献4)および土木学会制定のコンクリート標準示方書に定められている耐力算定式(式(6))をもとに, 耐力算定値の平均値, 標準偏差を求めるものとした。なお, V_{cd} の算定式は実験式であることから, 式の算定誤差を文献4)に基づいて考慮するものとした。

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} = 19.1 \alpha \sigma_{cu}^{1/3} \beta_p \beta_d b d + \frac{A_w \sigma_{sy} d}{1.15 s} \quad (6)$$

$$\beta_p = \left(\frac{100 A_s}{b d} \right)^{1/3}, \quad \beta_d = \left(\frac{100}{d} \right)^{1/4}$$

ここに, V_{yd} : セン断耐力

V_{cd} : セン断補強鉄筋を有しないはりのせん断耐力

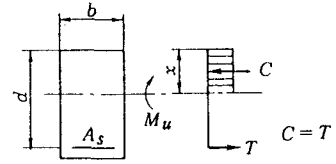


図3 曲げ耐力検討断面

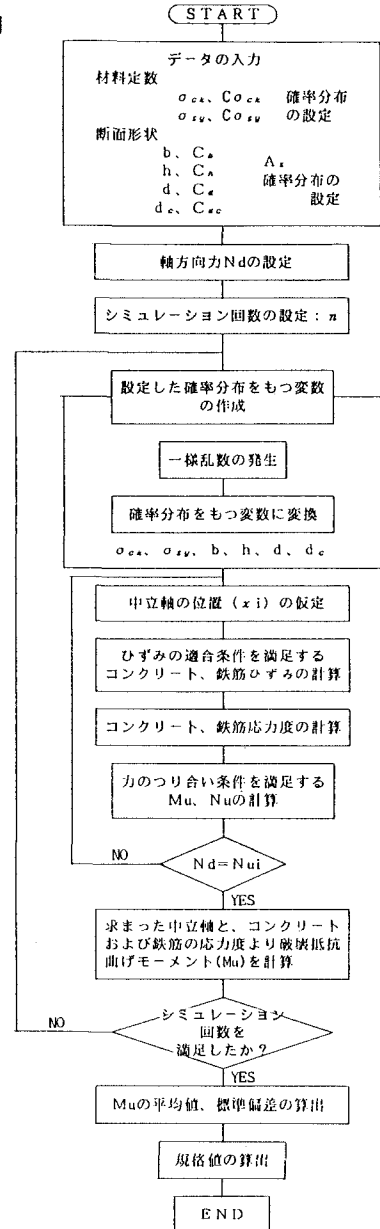


図4 軸方向力を受ける部材の曲げ耐力算定フロー

V_{sd} : スターラップにより受持たれるせん断耐力

α : せん断補強鉄筋を有しないはりのせん断耐力
の実験値と計算値との算定の誤差を考慮する

ための変数 (変動係数とし
て 9.2% を考慮する⁴⁾)

d : 有効高さ (cm)

A_s : 引張鋼材の断面積

A_w : 区間 s におけるスターラッ
プの断面積

σ_{sy} : スターラップの降伏強度

s : スターラップの配置間隔

ここで, α , σ_{cu} , b , d , A_s , A_w ,
 σ_{sy} および s をそれぞれ確率変数 X_1 , X_2 ,
 X_3 , X_4 , X_5 , X_6 , X_7 , X_8 とすれ
ば, 式 (6) は式 (7) と表すことができる。

$$V_{yd} = g(\alpha, \sigma_{cu}, b, d, A_s, A_w, \sigma_{sy}, s) \\ = g(X_1, X_2, \dots, X_8) \quad (7)$$

V_{yd} の平均値 $\bar{V}_{yd}$ と標準偏差 $C_{V_{yd}}$ は, 軸
方向力のない曲げ耐力と同様に式 (8), (9)
により求まる。

$$\bar{V}_{yd} = g(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_8) \quad (8)$$

$$C_{V_{yd}} = \sqrt{\sum_{i=1}^8 \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)^2 \cdot C_{\bar{X}_i}^2} \quad (9)$$

4. 耐力算定値の評価

(1) 曲げモーメントのみを受ける部材の曲 げ耐力の算定値の評価

単鉄筋く形断面のはりを対象に検討した結果を示す。
検討ケースとして, 鉄筋比 0.1~3.0%, 有効高さ 40~120
cm のく形断面部材の曲げ耐力算定値の平均値, 変動係数
を算出した。曲げ耐力の平均値, 標準偏差は, 3.(1)に
示した方法により求めるものとし, 各変数の平均値と標
準偏差は 2.(1), (2) を参考にして, 表 5 のように仮定
するとともに, 有効高さについては, 表 4 のはり下面に
おけるかぶりの測定データを計算に考慮することとした。なお, 変数は, すべて正規分布と仮定している。
また, 表 6 には, 曲げ耐力の設計用値を求める場合に用いたコンクリートと鋼材の材料強度の規格値, 材料
係数および部材係数の値を示した。

以上の仮定に基づいて得られた曲げ耐力の平均値/設計値と鉄筋比の関係を図 5 に, 曲げ耐力の変動係数
と鉄筋比の関係を図 6 に示す。図 5, 6 より, 鉄筋比が大きくなるほど, 有効高さが高いほど平均値/設計
値が大きくなることが認められる。鉄筋比が大きくなるに従い平均値/設計値も大きくなるのは, 安全係数

表 5 軸方向力を受けないはり部材の
検討変数の平均値, 標準偏差

	単位	平均値	標準偏差
鉄筋の引張降伏強度 σ_{sy}	MPa	386.0	19.2
コンクリートの圧縮強度 σ_{cu}	MPa	32.7	1.87
部材腹部の幅 b	cm	50	0.5
公称有効高さ d	cm	40, 60, 80,	1.0
鉄筋量 A_s (鉄筋比換算値)	cm ² (%)	6~180 (0.1~3.0)	0

表 6 曲げ耐力検討用の材料強度の規格値,
材料係数および部材係数

	規格値または係数值
鉄筋の引張降伏強度の規格値 σ_{yk}	343.2 MPa
コンクリートの設計基準強度 σ_{ck}	26.48 MPa
鉄筋の材料係数 γ_s	1.0
コンクリートの材料係数 γ_c	1.3
部材係数 γ_b	1.15

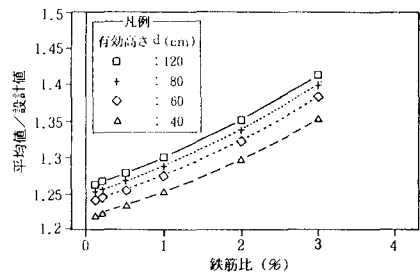


図 5 鉄筋比と曲げ耐力の平均値/設計値の関係

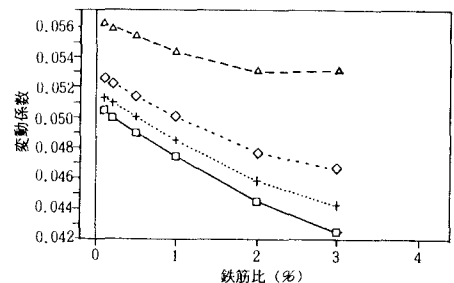


図 6 鉄筋比と曲げ耐力の変動係数の関係

を考慮することにより生じた鉄筋とコンクリート強度比の違いによるものである。また、有効高さが高くなるに従い平均値／設計値が大きくなり、変動係数が小さくなるのは、部材寸法および配筋誤差の影響が有効高さが高くなると小さくなるためであると考えられる。

(2) 軸方向力と曲げモーメントを受ける柱
部材の耐力算定値の評価

柱の耐力は3.(2)に示した算出手順により計算を行うこととした。

計算例として、表7による条件で軸方向力を0～1000tfまで200tf間隔で6段階に変化させたときの曲げ耐力の平均値／設計値および変動係数を求めた。なお、シミュレーション回数は1万回とした。シミュレーション回数については、4.(1)による方法とシミュレーション結果を比較し、計算値がほぼ一致することを確認して1万回とすることとした。

計算結果を図7に示す。図7より、曲げ耐力の平均値／設計値は軸方向力の大きさにより変化し、軸方向力が大きくなるに従い、増加傾向となる。これは、4.(1)と同様な理由によるものである。

(3) セン断耐力の統計量の評価

せん断耐力はスターラップを配置した単鉄筋く形断面のはりを対象に検討した結果を示す。

表8 セン断耐力検討用の変数の平均値、標準偏差

	単位	平均値	標準偏差
鉄筋の引張降伏強度 σ_{sy}	MPa	386.0	19.2
コンクリートの圧縮強度 σ_{cu}	MPa	32.7	1.87
部材腹部の幅 b	cm	50	0.5
有効高さ d	cm	60	1.0
引張鉄筋断面積 A_s	cm ²	30.0	0
スターラップの断面積 A_w	cm ²	2.534	0
スターラップの配置間隔 s	cm	15, 30, 45, 60, ∞	1.0

表9 セン断耐力検討用の材料強度の規格値、
材料係数および部材係数

規格値または係数值		
鉄筋の引張降伏強度の規格値 σ_{yk}		
343.2 MPa		
コンクリートの設計基準強度 σ_{ck}		
26.48 MPa		
コンクリートの材料係数 γ_c		
1.3		
鉄筋の材料係数 γ_s		
1.0		
部材 係数	コンクリート	γ_{bc}
	鉄筋	γ_{bs}
1.3		
1.15		

表7 柱部材検討における変数の平均値、標準偏差

	単位	平均値	標準偏差
鉄筋の引張降伏強度 σ_{sy}	MPa	386.0	19.2
コンクリートの圧縮強度 σ_{cu}	MPa	32.7	1.87
部材高さ、幅	cm	80	0.5
鉄筋のかぶり	cm	6	1.0
圧縮、引張鉄筋比	%	1.0	0

注) 材料強度の規格値、材料係数および部材係数は表6と同じにしている。

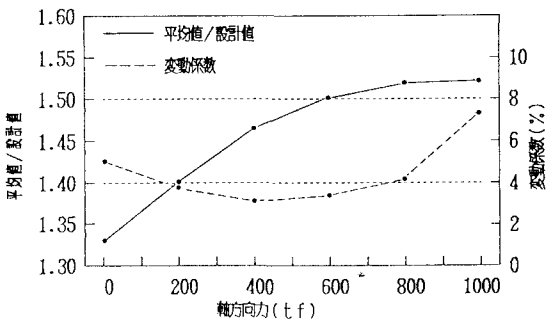


図7 軸方向力と曲げ耐力の平均値／設計値および変動係数の関係

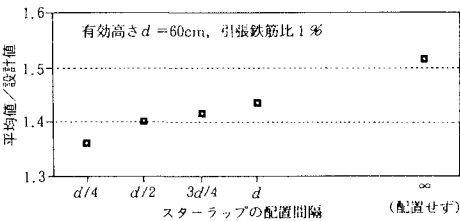


図8 スターラップの配置間隔とせん断耐力の平均値／設計値の関係

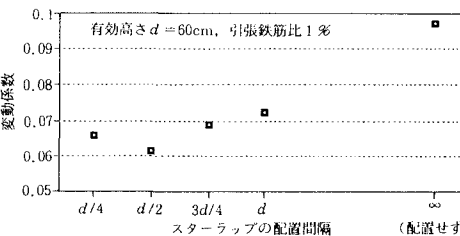


図9 スターラップの配置間隔とせん断耐力の変動係数の関係

スターラップの配置間隔を $d/4$, $d/2$, $3d/4$, d および配置しない場合のせん断耐力に

着目して、せん断耐力算定式の平均値と変動係数を算出した。せん断耐力の平均値、標準偏差は3.(3)に示した方法により求めるものとし、各確率変数の平均値と標準偏差は、表8のように仮定した。なお、変数はすべて正規分布と仮定している。また、材料強度の規格値、材料係数および部材係数を表9に示した。

以上の仮定に基づいて得られたスターラップの配置間隔とせん断耐力の平均値／設計値との関係を図8に、スターラップの配置間隔とせん断耐力の変動係数との関係を図9に示す。図8より、スターラップの配置間隔が小さいほど、つまりせん断補強鉄筋量が多いほど、平均値／設計値の値が小さくなっていることが認められる。また、図9からは、スターラップを配置した場合の変動係数が配置しない場合に比べて小さい値になっている。これは、スターラップを配置しないコンクリート部材のせん断耐力の評価は、算定式自体の不確定要因が大きいことによるものである。

5. まとめ

本研究において明かとなった主な点を以下にまとめて示す。

- (1) 耐力評価において必要な、材料強度、部材寸法精度等に関する調査データを示した。
- (2) 曲げ耐力算定式において、鉄筋比が大きいほど、また有効高さが高いほど、耐力の平均値／設計値は大きくなる。また、変動係数は有効高さ d が小さいと大きくなり、 $d=40\text{cm}$ の場合で6%程度になる。
- (3) 軸方向力を受ける部材に対する耐力算定値の評価方法として、モンテカルロシミュレーション法を用いた場合、4.(2)に示す結果となった。
- (4) せん断補強鉄筋を配置しない場合のせん断耐力算定式の変動係数は、約10%程度となる。これは耐力算定式と実験データとの変動が大きく影響しているためである。
- (5) 耐力の算定精度に関して、実態調査等に基づき、本文で示す方法で評価することができる。

6. おわりに

本研究では、耐力算定式の算定精度の評価方法の一例を示した。今後、コンクリート構造物の設計において用いる安全係数を合理的に定めるためには、こうした検討の他にもまだ解決しなければならない問題も多い。特に、荷重作用の評価方法、また、不静定構造物のようにシステムとしての破壊に関する評価などは検討しておく必要があると考えられる。

最後に、本研究を進めるに当たりデータの収集整理に御協力をいただいた(株)福山コンサルタントの丸山、中野両氏に感謝致します。

参考文献

- 1) B.Ellingwood, T.V.Galambos, J.G.MacGregor and C.A.Cornell: Development of a Probability-Based Criterion for American National Standard A58, NBS Special Publication, No.577, 1980
- 2) 石橋, 千田, 山崎: 生コンおよび鉄筋の品質の現状, セメント・コンクリート, NO.418, 1981.Dec.
- 3) 土木学会: コンクリート構造の限界状態設計指針(案), コンクリートライブラリー52号
- 4) 二羽, 山田, 横沢, 岡村: せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集 第372号 V-5, 1986.8

(1989年10月2日受付)