

論文

[2018] 高強度コンクリートを用いた RC 部材の耐力と耐力算定式

正会員 ○境 有紀（東京大学大学院）

遠藤 芳雄（東京大学大学院）

正会員 小谷 俊介（東京大学工学部）

正会員 青山 博之（東京大学工学部）

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物の高層化に伴い、圧縮強度 500kgf/cm^2 程度以上の高強度コンクリートの開発、実用化に対する要求が高まっている。しかしながら、高強度コンクリートおよび高強度コンクリートを用いた RC 部材の特性については不明な点が多く、これらの特性を積極的に生かした設計を行なうためには、高強度コンクリートを用いた RC 部材の耐力を的確に把握する必要がある。

そこで本研究では、普通強度コンクリートを用いた RC 部材について提案されている耐力算定式、あるいは高強度コンクリートについて提案されている応力-歪曲線のモデルを基にした解析と、過去に行なわれた高強度コンクリートを用いた RC 部材の実験結果を比較することによって、その適応性および修正すべき点について検討した。

なお、本研究で対象としたのは、梁と柱の曲げ耐力とせん断耐力で、各々についてひび割れ耐力、終局耐力について検討した。付着割れ耐力および壁、接合部については高強度コンクリートを用いた部材の実験がほとんどなく、本研究では対象外とした。

2. 検討に用いた実験の概要

検討に用いた試験体 [1]～[12]の概要を表 1 に示す。試験体はいずれも曲げモーメントとせん断力を作用させたもので、曲げ破壊したものが 75 体、せん断破壊したものが 91 体の計 166 体である。対象とした試験体は、形状は矩形断面、横補強方法はフープ、スパイラル、中段筋等の横補強筋のみを用いたものに限定した。また、コンクリート強度を普通強度から高強度まで変化させて実験を行なっているものについてはコンクリート強度による比較のため、普通強度の部材も検討対象とした。よってコンクリート強度は 155kgf/cm^2 から 994kgf/cm^2 の広範囲にわたっている。

3. 曲げひび割れ耐力

曲げひび割れ耐力は、表 1 (1) に示した実験の結果と菅野式[14] (式(1))による値との比較を行ない、実験値/計算値の分布を図 1 に示す。

$$M_c = 1.8 \sqrt{F_c} \cdot Z_e + ND/6$$

(1)

F_c : コンクリート強度、 Z_e : 断面係数、 N : 軸力、 D : せい

変動係数が 0.3 近くとばらつきが大きい、平均値が 1 を上回っているため、不合格率 (1.0 以

表 1 検討に用いた試験体の概要

(1) 曲げ破壊した試験体

文献No	部材	数	F_c	η	ρ_s
1	梁	4	270、994	—	0.38～1.18
2	"	13	194～796	—	0.75～1.68
3	"	25	211～774	—	0.00～1.37
4	柱	8	371～774	0.31～0.60	1.21～1.90
5	"	2	917、933	0.20	0.86
6	"	8	243～850	0.20～0.31	2.03
7	"	15	160～944	0.10～0.40	0.35～2.03

(2) せん断破壊した試験体

文献No	部材	数	F_c	η	$p_w \cdot \sigma_{wy}$
1	梁	6	908、939	—	0.0～80.7
8	"	24	155～886	—	0.0～41.0
9	"	18	208～549	—	0.0～146.0
10	"	6	288～446	—	0.0～57.1
4	"	10	407～840	—	24.0～98.6
5	柱	10	532～953	0.00～0.48	0.0～112.0
10	"	15	288～446	0.00～0.60	0.0～57.0
11	"	1	525	0.40	57.5
12	"	1	567	0.35	40.1

$\eta = N/BDF_c$ 、 N : 軸力、 B : 幅、 D : せい、 F_c : コンクリート強度

ρ_s : 横補強筋の体積比、

p_w : 横補強筋比、 σ_{wy} : 横補強筋降伏強度

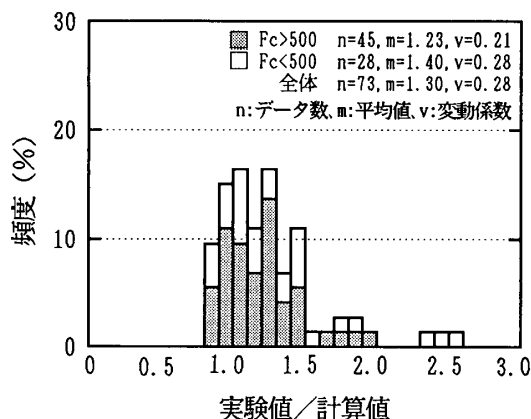


図1 実験値/計算値の分布（曲げび割れ耐力）

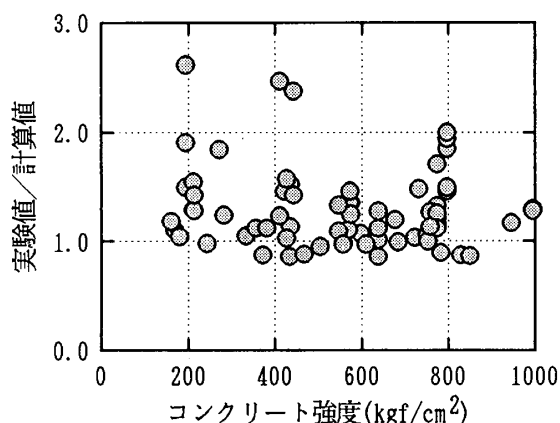


図2 実験値/計算値のコンクリート強度の影響（曲げび割れ耐力）

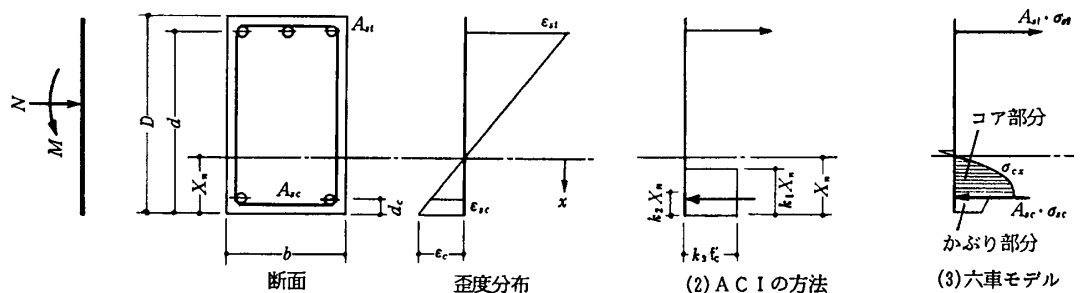
下となる率）は小さい。また、実験値と計算値の比のコンクリート強度に対する影響を見るために縦軸に実験値/計算値、横軸にコンクリート強度をとって図2に示す。これを見るとコンクリート強度による変化は見られず、式(1)が高強度コンクリートにも普通強度のコンクリートと同等の精度をもつことがわかる。

4. 曲げ終局耐力

曲げ終局耐力は、表1(1)に示した実験の結果と文献[15]に示された略算式（式(2)）による値、圧縮コンクリートの応力-歪関係にACIの応力ブロック、あるいは六車によるモデル[16][17]を適用し、平面保持を仮定した曲げ解析（図3）による値との比較を行なった。

$$\begin{aligned} \mu_u &= \{0.5ag \cdot s\sigma_y \cdot g_1 D + 0.024(1+g_1)(3.6-g_1) \cdot bD^2 F_c\} \left(\frac{N_{max} - N}{N_{max} - N_b} \right) \quad (N_{max} \geq N > N_b) \\ \mu_u &= 0.5ag \cdot s\sigma_y \cdot g_1 D + 0.5ND \left(1 - \frac{N}{bDF_c} \right) \quad (N_b \geq N \geq 0) \\ \mu_u &= 0.5ag \cdot s\sigma_y \cdot g_1 D + 0.5Ng_1 D \quad (0 > N \geq N_{min}) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 ag :主筋全断面積、 $s\sigma_y$:主筋強度、 N :軸力、 b :幅、 D :せい、 F_c :コンクリート強度、 g_1 :(引張、圧縮側の鉄筋の重心間距離/せい)、 $N_{max} = bDF_c + ag \cdot s\sigma_y$ 、 $N_b = 0.22(1+g_1)bDF_c$ 、 $N_{min} = -ag \cdot s\sigma_y$



コンクリートの引張応力は、ACIの方法では無視しているが、六車モデルを用いた曲げ解析においては、以下のように考慮している。
 $\sigma = \varepsilon E_c$ ($\varepsilon < \varepsilon_t$) 但、 $f_t = 1.8 \sqrt{f_c'}$ 、 $\varepsilon_t = f_t / E_c$

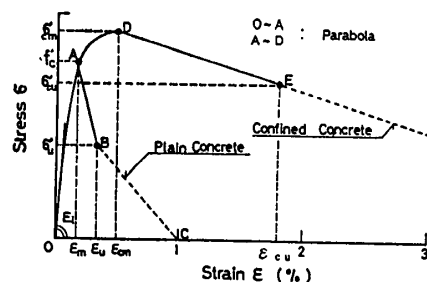
(2) ACIの方法

$$\begin{aligned} \varepsilon_u &= 0.003 \\ k_1 &= 0.85 \quad (f_c' \leq 280 \text{ kgf/cm}^2) \\ k_1 &= 0.85 - 0.05(f_c' - 280)/70 \quad (f_c' > 280 \text{ kgf/cm}^2) \\ k_2 &= k_1/2 \\ k_3 &= 0.85 \end{aligned}$$

(3) 六車モデル

$$\begin{aligned} \varepsilon_m &= 0.0013(1+f_c'/1000) \\ \varepsilon_u &= 0.00413(1-f_c'/2000) \\ \varepsilon_u &: \text{プレーンコンクリートの矩形応力ブロック係数 } k_1 k_2 \text{ の最大時歪} \\ \sigma_{cm} &= (1+43C_c) f_c' \\ \varepsilon_{cm} &= (1+231C_c) \varepsilon_m \\ \varepsilon_{cu} &= (1+361C_c) \varepsilon_u \\ \varepsilon_{cu} &: \text{横拘束コンクリートの矩形応力ブロック係数 } k_1 k_2 \text{ の最大時歪} \\ C_c &= \rho_s \sqrt{f_y/f_c'} (1-0.5 S/W) \\ \text{但、} \rho_s &: \text{横拘束筋の体積比} \\ f_y &: \text{横拘束筋降伏強度 (kgf/cm}^2\text{)} \\ S &: \text{横拘束筋の間隔 (cm)} \\ W &: \text{拘束コア断面最小寸法 (cm)} \end{aligned}$$

図3 曲げ解析の方法



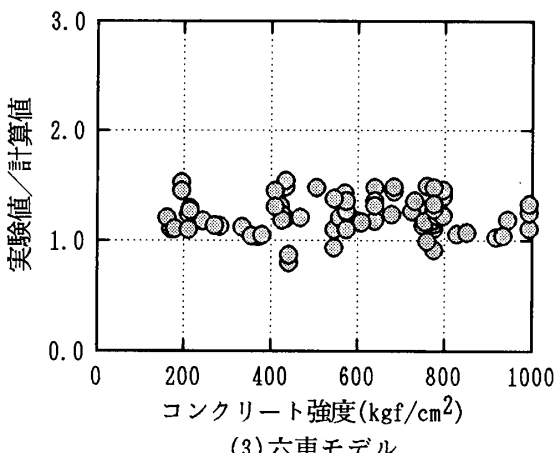
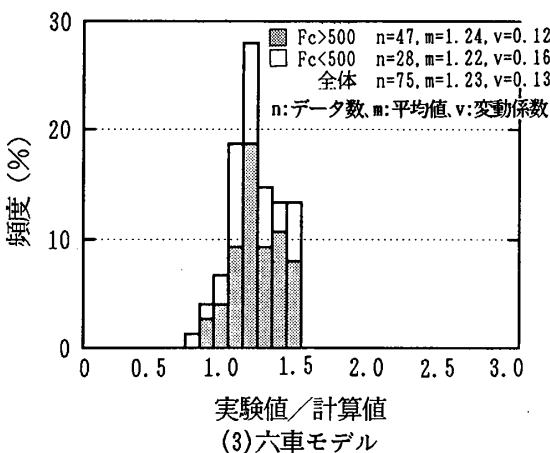
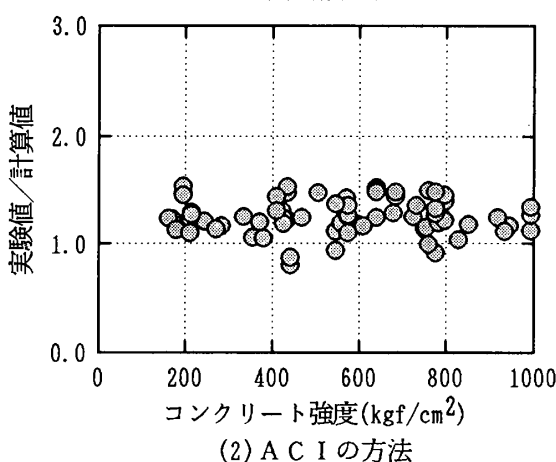
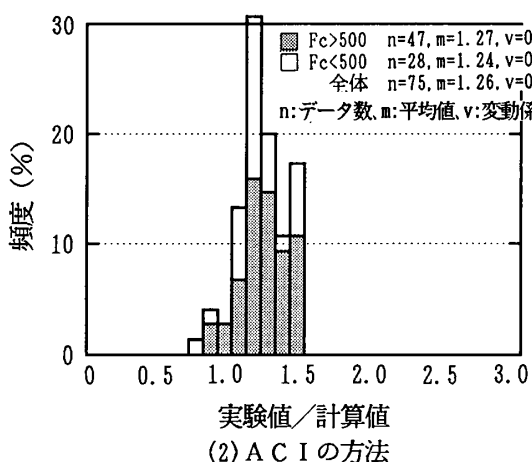
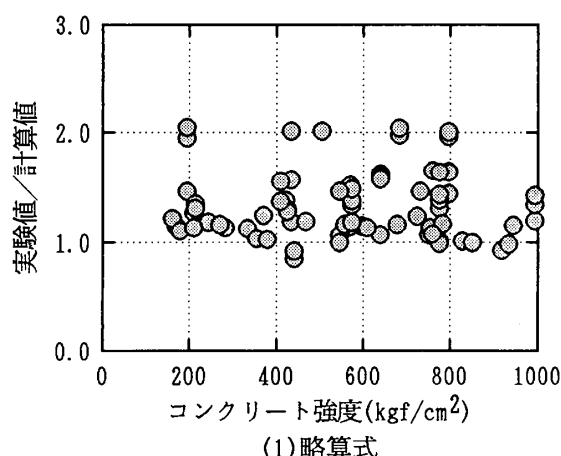
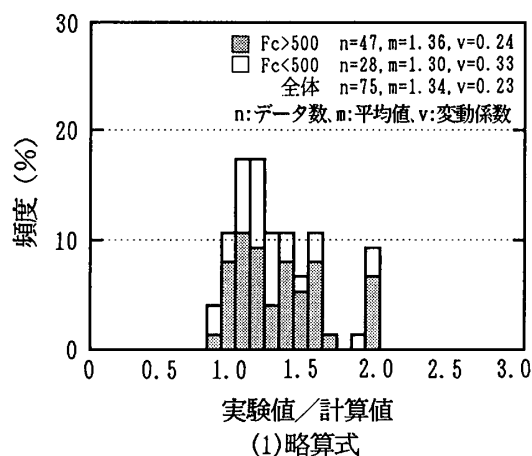


図4 実験値/計算値の分布 (曲げ終局耐力)

図5 実験値/計算値のコンクリート強度の影響 (曲げ終局耐力)

なお、コンクリートの初期剛性は、式(3) [13]を用いて算定した。

$$E_c = 10600 \sqrt{F_c} + 70000 \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad F_c: \text{コンクリート強度} \quad (3)$$

実験値/計算値の分布を3つの算定方法それぞれについて図4に示す。3つの中では略算式が最もばらつきが大きい。また、平均値は(1) 略算式 > (2) A C I の方法 > (3) 六車モデルの関係になっている。これは(3) (2) (1)の順に圧縮コンクリートの応力を大きく評価しているためである。いずれの場合についても平均値は1を越えているため、不合格率は小さい。

ここで、コアコンクリートの拘束効果を考慮した六車モデルによる解析によってもやや過小評価となったのは、曲げせん断を受ける部材の場合中心圧縮の状態と異なり、部材内に応力勾配が存在するため、圧壊領域のコンクリートを健全なコンクリートが拘束するためと考えられる。よって正

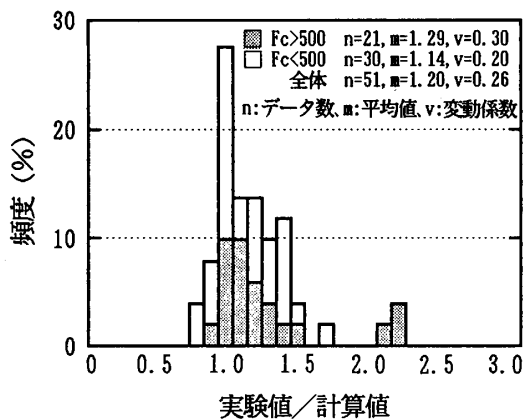


図6 実験値/計算値の分布 (せん断ひび割れ耐力)

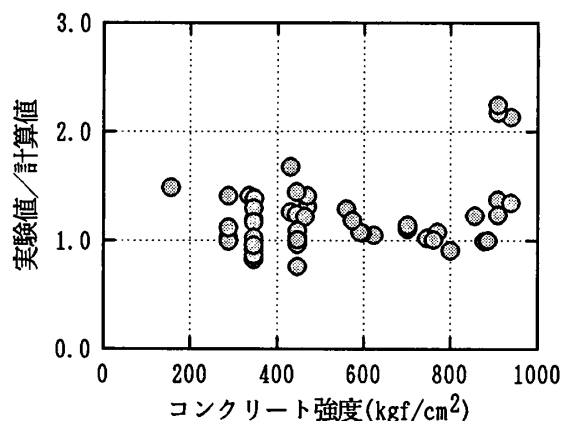


図7 実験値/計算値のコンクリート強度の影響 (せん断ひび割れ耐力)

確な曲げ耐力を評価するためにはこのような効果を考慮に入れたコンクリートの応力-歪曲線のモデル化が必要となる。

実験値と計算値の比のコンクリート強度に対する影響を見るために縦軸に実験値/計算値、横軸にコンクリート強度をとって各算定法について図5に示す。いずれの場合についてもコンクリート強度による変化は見られない。よって、高強度コンクリートにおいても平面保持を仮定した曲げ解析によって終局耐力が算定可能であることがわかる。

5. せん断ひび割れ耐力

せん断ひび割れ耐力は、表1(2)に示した実験の結果と大野・荒川式[18] (式(4))による値との比較を行なった。

$$Q_c = k_c \frac{0.085(F_c + 500)}{M/Qd + 1.70} b_j \quad (4)$$

ここで、 k_c :断面寸法による補正係数、 F_c :コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm^2)、 M/Qd :せん断スパン比、 b :幅 (cm)、 $j=7d/8$:応力中心距離常用値 (cm)、 d :有効せい (cm)

実験値/計算値の分布を図6に示す。変動係数は0.3近くとばらつきは大きい平均値が1より大きく不合格率は小さい。また、実験値と計算値の比のコンクリート強度に対する影響を見るために縦軸に実験値/計算値、横軸にコンクリート強度をとって図7に示す。コンクリート強度による変化は見られず、この式が高強度コンクリートにも適用できることを示している。

6. せん断終局耐力

せん断終局耐力は、表1(2)に示した実験の結果と修正荒川mean式[19] (式(5))、文献[20] (式(6))に示された式 (以下指針式と略す) による値との比較を行なった。なお、指針式の R_p の値は、荷重-変位関係が文献に明示してある試験体についてはこれに従い、そうでない試験体については、曲げ降伏以前にせん断破壊したものを $R_p=0$ 、曲げ降伏以後にせん断破壊したものを $R_p=1/100$ とした。

$$Q_u = \{k_u \cdot k_p \frac{0.115(F_c + 180)}{M/Qd + 0.12} + 2.7 \sqrt{p_w \cdot \sigma_y + 0.1 \sigma_o}\} b_j \quad (5)$$

ここで、 $\sigma_o = N/bd$, k_u :断面寸法による補正係数, k_p :引張鉄筋比による補正係数

$$Q_u = b \cdot j_t \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) b D \nu \sigma_B / 2 \quad (6)$$

ここで、 b :部材幅、 j_t :主筋中心間距離、 D :全せい、 L :内法長さ、 p_w :せん断補強筋比

ν :コンクリート圧縮強度の有効係数 $= (1.0 - 15R_p) \nu_o$ ($0 < R_p \leq 0.05$)

$= 0.25 \nu_o$ ($0.05 < R_p$)

ここで、 $\nu_o = 0.7 - \sigma_B / 2000$, ただし、 $p_w \sigma_{wy} > \nu \sigma_B / 2$ の時は $p_w \sigma_{wy} = \nu \sigma_B / 2$

$\cot \phi = \text{Min} \{2.0, j_t / (D \tan \theta), \sqrt{\nu \sigma_B / (p_w \sigma_{wy})} - 1.0\}$, ϕ :トラス機構のコンクリート圧縮束の角度

$\tan \theta = \{ \sqrt{[(L/D)^2 + 1]} - L/D \}$, $\beta = \{(1 + \cot^2 \phi) p_w \sigma_{wy}\} / (\nu \sigma_B)$

ただし、 $\sigma_{wy} > 25 \sigma_B$ の時は $\sigma_{wy} = 25 \sigma_B$

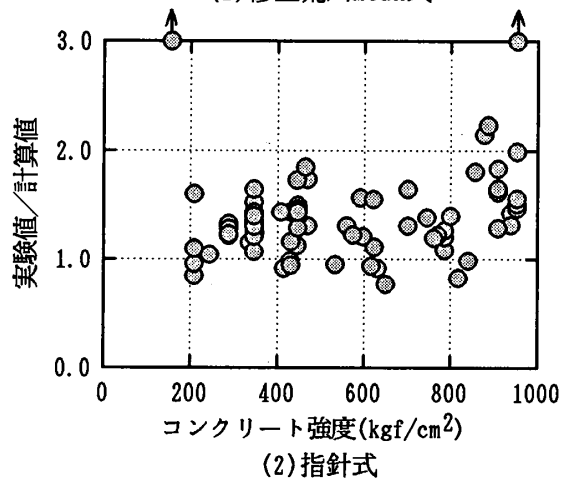
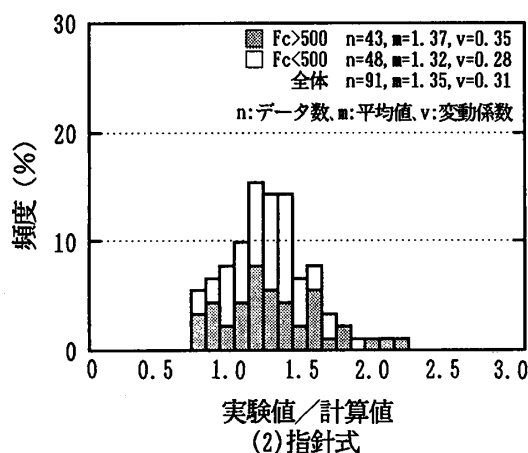
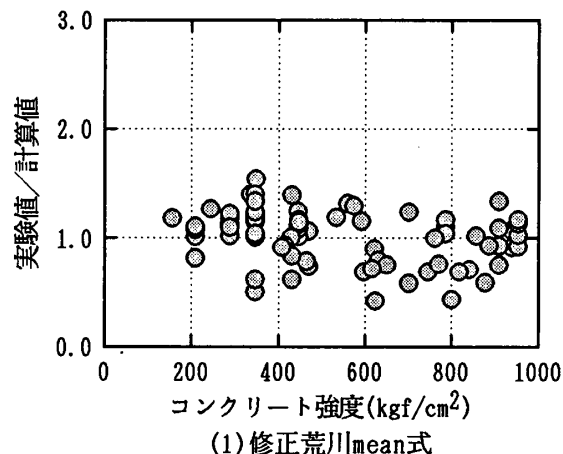
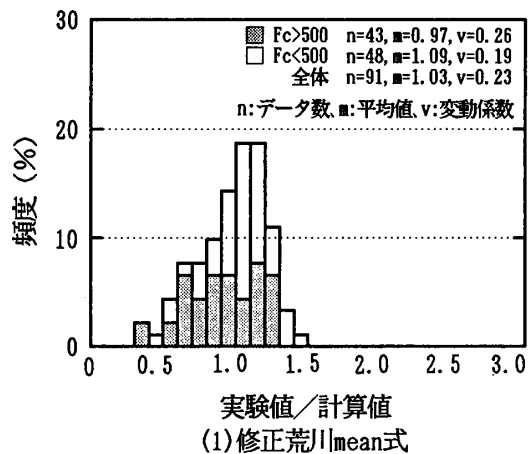


図8 実験値/計算値の分布 (せん断終局耐力)

図9 実験値/計算値のコンクリート強度の影響 (せん断終局耐力)

実験値/計算値の分布を2つの算定式それぞれについて図8に示す。曲げ終局耐力の場合と比較するとばらつきがかなり大きくなっている。また、修正荒川mean式はその平均がほぼ1であるのに対して、指針式は平均は1をかなり上回っており、ばらつきも更に大きくなっている。

実験値と計算値の比のコンクリート強度に対する影響を見るために縦軸に実験値/計算値、横軸にコンクリート強度をとって図9に示す。これを見ると、修正荒川mean式による場合はコンクリート強度が大きくなるにつれて実験値/計算値が若干小さくなる傾向がある一方、指針式によって算定した場合はコンクリート強度が大きくなるにつれて実験値/計算値が大きくなり高強度コンクリート側で小さめの評価となっていることがわかる。これは指針式で用いているコンクリートの有効係数 ν の見直しが必要であることを示している。

また、実験値と計算値の比の横補強筋量に対する影響についても同様な方法で考察した。その結果、指針式で算定した場合に横補強筋量が小さい領域 ($p_w \cdot \sigma_{wy} < 30 \text{ kgf/cm}^2$) で大きくなり、かなり過小評価となることがわかった (図10)。

7. まとめ

普通強度コンクリートを用いた部材について提案されている設計式あるいは高強度コンクリートにつ

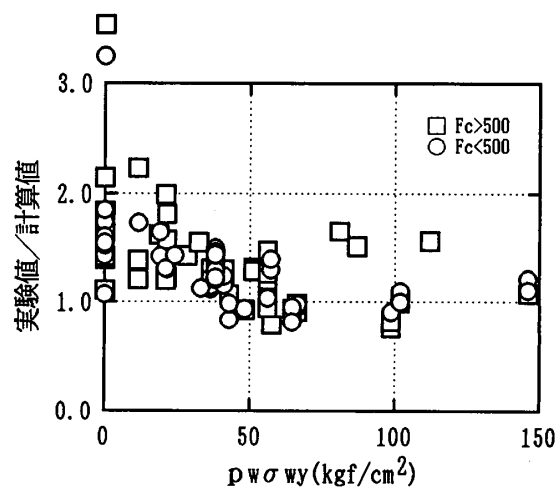


図10 実験値/計算値の横補強筋量の影響 (指針式)

いて提案されている応力-歪曲線のモデルを基に解析した値と、過去に行なわれた高強度コンクリートを用いた部材の実験結果を比較した結果、次のことがわかった。

- ① 普通強度のコンクリートのひび割れ耐力の設計式は、本研究が対象とした範囲の試験体については、ほぼ高強度コンクリートについても適用可能である。
- ② 高強度コンクリートにおいても平面保持を仮定した曲げ解析によって普通強度のコンクリートと同等の精度で曲げ終局耐力が算定可能である
- ② 中心圧縮試験の結果による拘束コンクリートの応力-歪曲線をもとに算定した曲げ終局耐力は、その応力状態の違いから曲げせん断実験の値よりもやや小さくなる。
- ④ 修正荒川mean式はコンクリート強度が大きくなるとせん断終局耐力をやや大きく、指針式はやや小さく評価する。
- ⑤ 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針に示されたせん断終局強度の算定式は、横補強筋量が少ない範囲では、過小評価となる。

参考文献

- [1] 田中伸幸、坂口昇他:超高強度鉄筋コンクリート造短スパン梁の曲げせん断耐力実験(その1)曲げ特性、(その2)せん断特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和62、pp. 67-70
- [2] 黒正清治、大平芳孝他:高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリートばりの曲げ変形性状に関する実験研究(その1)(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和51、pp. 1345-1348
- [3] 黒正清治、鄭憲秀他:高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリートばりの曲げ変形性状に関する実験研究(その3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和52、pp. 1609-1610
- [4] 菅野俊介、木村秀樹他:高強度横補強筋を用いた高強度コンクリート柱および梁の実験的研究、第10回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1988、pp. 227-232
- [5] 来田義弘、香田伸次他:超高強度鉄筋コンクリート造柱の曲げせん断試験、(その1)実験概要、(その2)曲げ特性、(その3)せん断特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、1988、pp. 697-702
- [6] 黒正清治、成田和彦他:高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱に関する実験研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和53、pp. 1711-1712
- [7] 黒正清治、鄭憲秀他:高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱に関する実験研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和55、pp. 1721-1722
- [8] 黒正清治、渡辺将夫他:高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材のせん断強度に関する実験研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和55、pp. 1503-1504
- [9] 黒正清治、小林克巳他:鉄筋コンクリートはりのせん断終局強度に及ぼすせん断補強量およびコンクリート強度の影響に関する実験研究、日本建築学会論報第373号、昭和62、pp. 83-91
- [10] 松崎育弘、福島稔他:高強度コンクリートを用いた柱及びはり部材のせん断耐力、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986、pp. 813-816
- [11] 町敏広他:超高層鉄筋コンクリート造集合住宅の耐震設計、(その3)構造部材実験に関する計画概要、(その4)実験結果及び考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、1987、pp. 311-314
- [12] 三浦宜明、田中伸幸他:高強度コンクリートを用いた柱・梁部材の実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、1987、pp. 619-620
- [13] Carrasquillo, Nilson, & Slate, : Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads, ACI J., Proc., Vol. 78, No. 3, May-June 1981, pp. 171-178
- [14] 菅野俊介:鉄筋コンクリート部材の復元力特性に関する実験的研究、1970
- [15] 日本建築学会:地震荷重と建築構造の耐震性、1976、pp. 126
- [16] 六車熙、渡辺史夫他:横拘束コンクリートの応力ひずみ曲線のモデル化、セメント技報年報34号、昭和55年、pp. 429-432
- [17] 六車熙、光枝良他:横補強による高強度コンクリートのじん性改善に関する研究、第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1983、pp. 317-320
- [18] 荒川卓:鉄筋コンクリートはりのせん断抵抗に関する研究(実験結果の総合)、日本建築学会論文報告集、第66号、1960、pp. 437-440
- [19] 広沢雅也、後藤哲郎:軸力をうける鉄筋コンクリート部材の強度とねばり(その1. 矩形断面をした耐力壁の実験結果)、日本建築学会大会学術講演梗概集、1971、pp. 817-818
- [20] 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針、1988