

論文

[2080] 高軸力を受ける鉄筋コンクリート造柱の強度と変形性能

正会員 小野 新 (日本大学理工学部)

正会員 安達 洋 (日本大学理工学部)

正会員 清水 泰 (東京都立大学工学部)

正会員 ○河野恒久 (日本大学大学院)

1. はじめに

高層の鉄筋コンクリート (以下RC) 造建物の最下層柱は、地震時の水平動や上下動に伴い軸力が大きく変化し、高い軸力にまで達する可能性がある指摘されている。しかしながら、この様な高い軸力を受ける柱の地震時の挙動に関する系統だった研究は少ないのが現状であり、そのような柱の性状を明らかにして行く必要があると考えられる。本報は過去に行われたRC造柱の代表的な実験資料を用い、それらの耐力と変形状について主に軸方向力をパラメータとして検討した結果をまとめたものである。

2. 実験資料

本報で用いた資料は、過去に行われたRC造柱の実験資料のうちの日本建築学会等に報告された試験体732体である。^{1) 2) 3)} これらの資料を加力計画や材料の種類等の構造因子により分類を行った。図1は載荷形式を示したもので、逆対称連続梁型(O)、単純梁型(S)、坪井型(T)、若林型(W)、建研型(K)の5種類に分類した。載荷形式は、S型が全体の約35%と最も多く次いでK型の25.8%、O型の23.6%と続く。加力方向は、正負両側加力が全体の約73%を占め、K型はすべて正負両側加力で5回以上の繰り返しを行っている。S型は、正側1方向と正負両側加力が同数程度で、加力回数も単調加力、5回以上、その中間と同数程度に混在している。

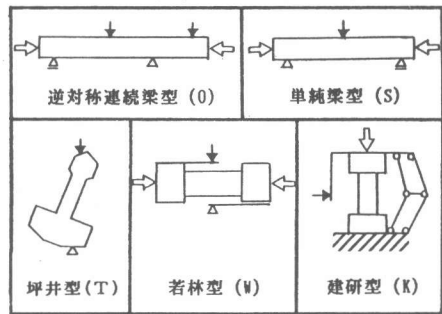


図1 載荷形式の分類

表1は断面形状の分類を示したもので、断面形や主筋の配置、せん断補強方法によって分類を行っている。せん断補強方法としては、通常のせん断補強型、スパイラル型、サブタイ型、溶接型がある。こ

れらを通常のせん断補強型の試験体とその他のものに分類を行った。形状1の試験体が全体の約73%と大部分を占め、次いで形状10の7.9%、形状14の4.9%、形状2の4.6%、形状5の4.0%と続いている。

図2は主要構造因子の頻度分布を示したもので、(a)の柱せい(D)は8~60cmに分布し、20cmと25cm前後の試験体が最も多い。また20cm未満の試験体が全体の約60%を占めスケールイフェクトの影響が考

表1 断面形状の分類

断面形		通常せん断補強型	特殊せん断補強型
矩形断面	特殊配筋	0	—
"	主筋一段配筋	1	10
"	主筋二段配筋	2	11
"	主筋円形配筋	3	12
円形断面	"	4	13
矩形断面	主筋一段、中間筋有り	5	14
"	主筋二段、中間筋有り	6	15

えられるが、これについての資料は少ない。

(b)のシアスパン比(M/QD)は0.5~4に分布し、1, 1.5, 2, 3 がそれぞれ全体の10~20%前後を占めている。(c)の引張り鉄筋比(P_t)は0.34%~4.27%に分布し、

1%前後の試験体が全体の約50%を占めている。主筋の降伏点強度(σ_y)は2800~5350kg/cm²に分布し、3000~4000kg/cm²に全体の約70%が含まれる。(d)のせん断補強筋比(P_w)は0~2.43%に分布し、全体の約70%は P_w が1%未満であり、せん断補強筋の無い試験体も全体の約10%程含まれている。せん断補強筋の降伏点強度(σ_{wy})は2140~6640kg/cm²に分布し、3000~4000kg/cm²に全体の約85%が含まれている。(e)のコンクリート強度(F_c)は124~

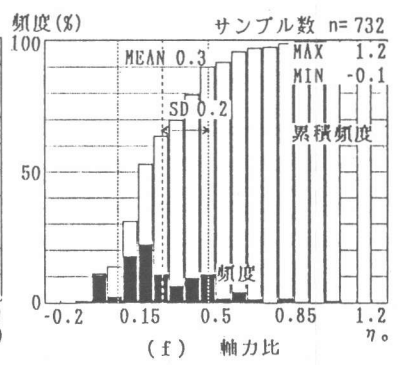
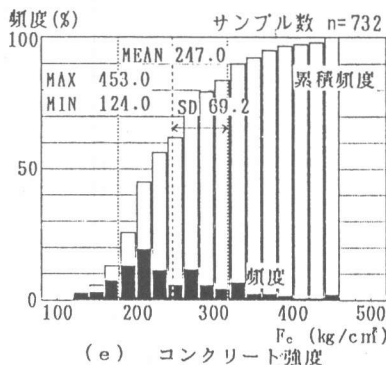
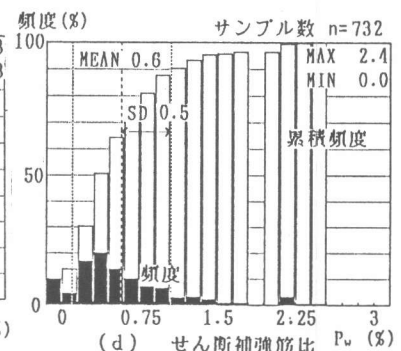
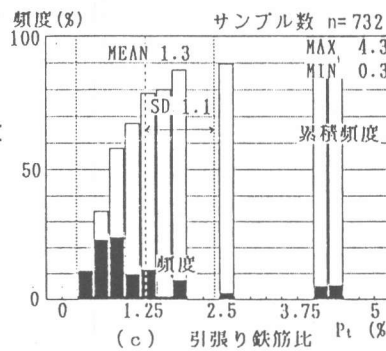
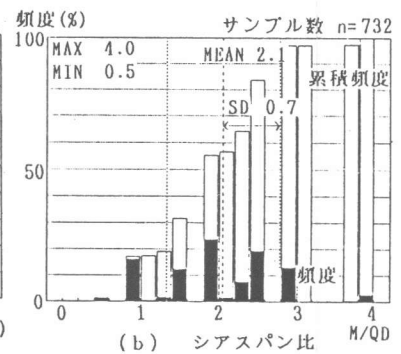
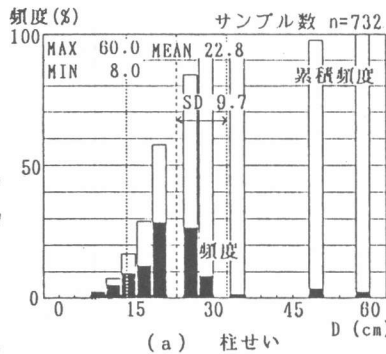


図2 主要構造因子の頻度分布

453kg/cm²に分布し、200kg/cm²以下が全体の約25%、300kg/cm²以上が約20%程含まれている。(f)の軸力比(η)は-0.11~1.2までしており、負側、即ち引張り軸力のデータが全体の約11%含まれ、また、0.4以上の軸力の高い範囲のデータも全体の約25%含まれている。

3. 破壊モード

3-1. 曲げ破壊

RC造実験資料732体の中から曲げ破壊したと思われるデータを選び、曲げ破壊に対する軸力の影響について検討する。曲げ破壊したと思われるデータを選ぶため、最大耐力実験値(tQ_m)及び(1)式による曲げ耐力計算値(cQ_{mu})⁵⁾、(2)式によるせん断耐力計算値(cQ_{su})⁶⁾を用いて、以下の条件で選定を行った。

- | | | |
|--------------------|-------------------------------|------------|
| ① $tQ_m < cQ_{su}$ | ② $cQ_{mu} < cQ_{su}$ | ⑤ 普通コンクリート |
| ③ $P_w \neq 0\%$ | ④ $F_c > 150 \text{ kg/cm}^2$ | |

本報で用いた耐力推定式

$$cQ_{mu} = \{0.8 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5 \cdot N \cdot D(1 - N/B \cdot D \cdot F_c)\} / A \quad (1)^{5)}$$

$$cQ_{su} = \{0.115k_u \cdot k_p(180 + F_c) / (M/QD + 0.12) + 2.7\sqrt{P_w \cdot \sigma_{wy} + 0.1\sigma_o}\} \cdot B \cdot (7d/8) \quad (2)^{6)}$$

$$k_p = 0.82 (P_t \cdot 100)^{0.23}$$

k_u : 断面寸法による補正係数

a_t : 引張鉄筋の断面積, B : 柱幅, d : 有効せい, A : シアスパン, N : 軸力

①の条件により、せん断破壊の可能性の高いと思われるデータを除外し、②の条件でその中から曲げ破壊を意図して設計された試験体のみを選び出す。

①の条件に②の条件を加えることで、より曲げ破壊の可能性の高いデータを選ぶことができると考えられる。また全データの中には、実際の構造物にそぐわない特殊なデータも含まれているため、①②の条件の他に③～⑤の条件を付け加えた。

図3に軸方向応力度(σ_o)と最大耐力時平均せん断応力度実験値($t\tau_m$)との関係を示す。図中の×印は $M/QD \leq 1$ 、○印は $1 < M/QD < 3$ 、□印は $3 \leq M/QD$ の試験体のデータを表している。 M/QD の大きさによって

$t\tau_m$ の値に違いがみられ、また σ_o が $t\tau_m$ に及ぼす影響も異なっている。 σ_o は負側も含め $-21.0 \sim 343.2 \text{ kg/cm}^2$ に分布しており、×印の M/QD の小さい試験体は σ_o の増加とともに $t\tau_m$ は直線的に上昇し、 σ_o が 300 kg/cm^2 (η で 1.0 相当) 以上では急激に低下している。

一方、□印の M/QD の大きな試験体は、 σ_o の増加による $t\tau_m$ の上昇は小さく、曲線的に上昇する傾向がみられる。○印の $1 < M/QD < 3$ の試験体は、 σ_o が $120 \sim 150 \text{ kg/cm}^2$ 付近 (η で 0.4～0.55 に相当) で $t\tau_m$ は最大となり、それ以上の範囲では減少する傾向がみられた。図4は $t\tau_m$ と $c\tau_{mu}$ (cQ_{mu}/BD) との比較を行ったもので、図中の記号は上記の記号分けと同様に M/QD の大きさを表している。変動係数 (COV) は 0.21 でややばらつきがみられるものの、 $\pm 20\%$ 以内に約 84% のデータが含まれ、平均値 (MEAN) 0.97 と全体的には良い適合性を示している。しかしながら、 $+20\%$ 以上に分布するデータも 51 体含まれている。なお、これらのデータは载荷形式が単純梁型で軸力を作用させたものが多く、実験装置の支点における摩擦力の影響で耐力が上昇した為と思われる。

1) また M/QD 別に比較すると M/QD の小さいものから順に変動係数は、0.53, 0.13, 0.09、 $\pm 20\%$ 以内に含ま

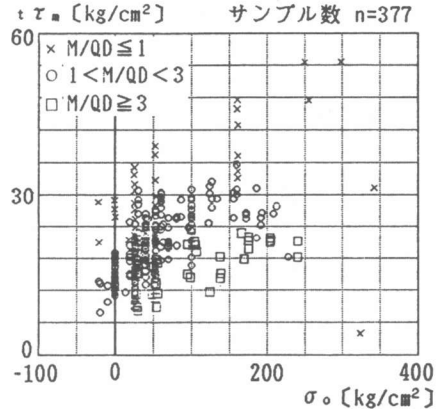


図3 軸方向応力度と最大耐力時平均せん断応力度との関係

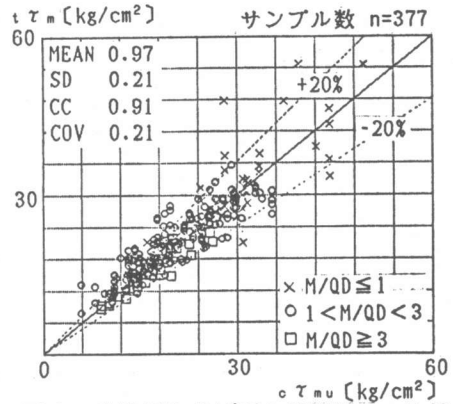


図4 実験値と曲げ耐力計算値との比較

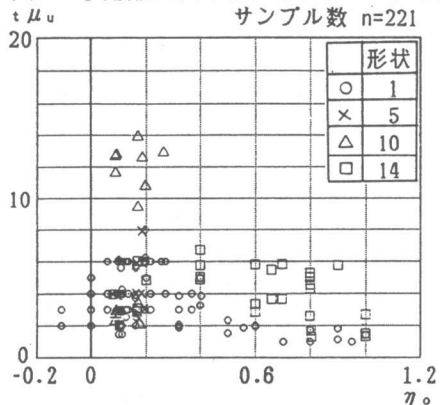


図5 塑性率と軸力比との関係

れるデータは78%, 82%, 98%と、計算値と実験値とはM/QDの大きなものほどばらつきが小さく適合性が良いという結果が得られている。

図5は η_o と塑性率($t\mu_u = \delta_u / \delta_y$)の関係を示したもので、○印は形状1、×印は形状5、△印は形状10、□印は形状14を表している。通常のせん断補強型の形状1のデータは、 η_o が大きくなるに従い $t\mu_u$ は低下し、 η_o が0.4以上の範囲では $t\mu_u$ は2より小さく、靱性能を期待することは難しいと思われる。これに対し特別なせん断補強型の場合、 η_o の小さい範囲だけでなく η_o が0.4以上の範囲においても、通常のせん断補強型に比べ $t\mu_u$ は大きく、靱性を保っている。この事から η_o の大きい範囲でも、せん断補強方法によっては靱性を確保する事が可能であることが分かる。

3-2. せん断破壊

曲げ破壊の場合と同様に、せん断破壊したと思われるデータを選び出す為以下の条件でデータの選定を行った。

- ① $tQ_m < cQ_{mu}$ ③ $P_w \neq 0\%$
- ② $cQ_{su} < cQ_{mu}$ ④ $F_c > 150 \text{ kg/cm}^2$
- ⑤ 普通コンクリート

①の条件により曲げ破壊の可能性の高いと思われるデータを除外し、②の条件でその中からせん断破壊を意図して設計された試験体を選び出す。①の条件に②の条件を加えることで、よりせん断破壊の可能性の高いデータを選ぶことができると考えられる。また、③～⑤の条件は曲げ破壊の場合と同様の理由で加えたものである。

図6に σ_o と $t\tau_m$ の関係を示す。 σ_o は $-21.0 \sim 242.9 \text{ kg/cm}^2$ の範囲に分布しており、 σ_o の増加とともに $t\tau_m$ は直線的に上昇する。この傾向はM/QDの小さいものほど大きく、データの得られている範囲では軸力の増加によって耐力は上昇傾向のままである。M/QD ≤ 1 の試験体の場合 σ_o と $t\tau_m$ の相関係数(CC)は0.79、M/QD=2の場合0.63、M/QD=3の場合0.26であった。なお断面形状等の他の因子のばらつきにより相関係数は変化し、例えば、M/QD ≤ 1 で断面形状1のみの場合、相関係数は0.92であり σ_o と $t\tau_m$ の相関が強いことが分かる。

図7は $t\tau_m$ と τ_{su} (cQ_{su}/BD)との比較を行ったもので、変動係数は0.20で $\pm 20\%$ 以内に含まれるデータは58.5%とややばらつきがみられる。また τ_{su} を $+20\%$ より越えるデータが57体と全体の38.4%含まれている。これは様々な原因が考えられるが、その中

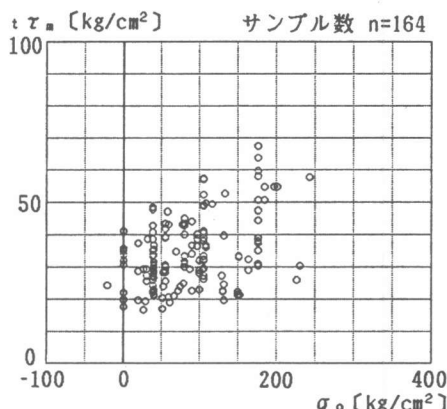


図6 軸方向応力度と最大耐力時平均せん断応力度との関係

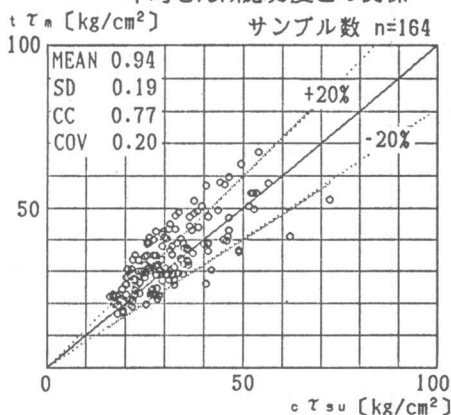


図7 実験値とせん断耐力計算値との比較

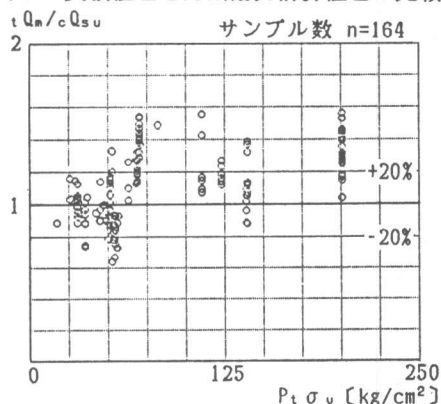


図8 主筋量の影響

でも特に図8に示した $P_t \sigma_y$ の影響が大きく、 $P_t \sigma_y$ が約60kg/cm²以上になると tQ_m は cQ_{su} を一定の割合だけ越えている。(2)式の cQ_{su} には P_t の影響が考慮されていることから、 σ_y の影響が大きいものと考えられる。 $P_t \sigma_y$ の影響があると思われるものを除き、M/QD別に $t\tau_m$ と $c\tau_{su}$ とを比較すると、M/QDが1以下、2, 3それぞれの試験体の場合、変動係数と±20%以内に含まれる割合はそれぞれ、(0.13,91%), (0.18,77%), (0.18,67%)とM/QDが大きいものほど適合性が悪いことが分かる。

図9は η_o と $t\mu_u$ の関係を示したもので、○印は形状1、△印は形状10、*印は形状12、□印は形状14を表している。通常のせん断補強型の形状1のデータは、 η_o の小さい範囲から $t\mu_u$ が2程度と小さく靱性に乏しい。特別なせん断補強型の場合も形状1に比べると $t\mu_u$ は大きいものの、曲げ破壊の場合に比べると小さく靱性に乏しい事が分かる。

3-3. 付着割裂破壊

ここでは文献4)により提案された付着割裂強度算定式を用い、付着割裂破壊の可能性のある試験体が曲げ破壊、せん断破壊に対しどのような位置にあるかを検討する。全資料 732体中以下の4つの条件を満足するデータを、表2に示すように cQ_{mu} 、 cQ_{su} を用い分類を行った。

- ① $P_w \neq 0\%$ ③ 普通コンクリート
- ② $F_c > 150 \text{ kg/cm}^2$ ④ 主筋一段配筋の試験体

①～③の条件はこれまでと共通するが、④は試験体の主筋に関する条件を統一する為に加えたものである。この結果、曲げ破壊と思われる場合の(B I)には 363体が該当し、この中で付着割裂破壊の可能性のある試験体は 6体であった。この 6体全てがM/QD=1の試験体であり、 tQ_m は cQ_{mu} を越え cQ_{su} に対し20%以内にすべて分布している。またせん断破壊と思われる場合の(S I)には132体が該当し、この中で付着割裂破壊の可能性のある試験体は54体であった。これらの試験体のM/QDは0.5～3.7に分布し、 cQ_{mu}/cQ_{su} が2以上のよりせん断破壊する可能性の高いものでは全試験体が該当した。 cQ_{mu}/cQ_{su} の値が大きい範囲では $P_t \sigma_y$ の量も大きく、主筋の量が付着割裂破壊の可能性に大きく関与していることがわかる。

表2に示した各場合のデータのうち、付着割裂破壊の可能性のある試験体の割合をまとめて表3に示す。これから分かるように、せん断破壊の可能性のある試験体は付着割裂の生じる可能性が高く、せん断破壊と付着割裂破壊の明確な分離は難しいと思われる。

4. 高軸力の影響

これまで破壊モードを曲げ破壊、せん

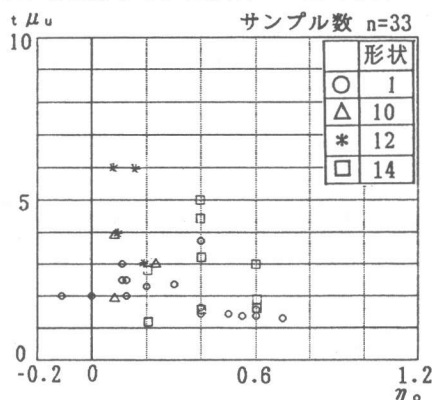


図9 塑性率と軸力比との関係

表2 破壊モードによるデータの分類

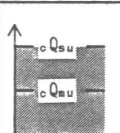
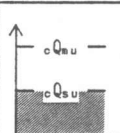
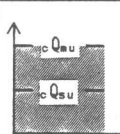
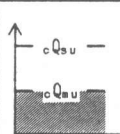
	I	II
B	 (B I)	 (B II)
S	 (S I)	 (S II)

表3 付着割裂破壊の発生割合

	I	II
B $tQ_m < cQ_{su}$	$\frac{6}{363}$ 体 (1.65%)	$\frac{11}{43}$ 体 (25.58%)
S $tQ_m < cQ_{su}$	$\frac{54}{132}$ 体 (40.91%)	$\frac{1}{148}$ 体 (0.01%)

断破壊及び付着割裂破壊に分け検討を行ったが、付着割裂破壊に関してはせん断破壊との区別が難しいため、曲げ破壊とせん断破壊のみに着目して資料を分類し、高軸力範囲に於けるRC造柱の耐力と靱性能について検討を行う。

上記の分類を tQ_m 及び(1)式の cQ_{mu} 、(2)式の cQ_{su} を用いて行ったが、この方法の場合軸力の高い範囲においては cQ_{su} に比べ cQ_{mu} が小さくなる試験体が多く、大半のデータで曲げ破壊型と判定されている。

全資料732体の中から、曲げ破壊と思われるデータの選定条件を満足し、試験体条件を統一するため通常のせん断補強型の試験体で、変形に関するデータの得られたものについて示す。横軸に η_o を、縦軸に tQ_m/cQ_{mu} を採って図10に示し、また同じデータについて η_o と $t\mu_u$ の関係を図11に示す。 η_o が0.4以上の高軸力の範囲においては、 tQ_m/cQ_{mu} は $\pm 20\%$ 以内におさまリ、耐力は良い一致を示している。しかし η_o が約0.7以上の特に軸力の高い範囲においては、 η_o が大きくなるに従って tQ_m が cQ_{mu} を上回る傾向があり、(1)式による耐力の推定には限界があることが分かる。

また、図11に示したように $t\mu_u$ は η_o が0.4付近から急激に低下し、高軸力の範囲においては靱性に乏しく極めて脆性的であることが分かる。このように、 η_o が0.4~0.7程度までの高軸力の範囲においては、耐力は曲げ耐力計算値と一致するものの、変形性状は軸力の低い範囲とは異なっており、破壊モードそのものが軸力の低い範囲とは異なっている可能性があり注意が必要である。

5. まとめ

以上、RC造柱実験資料732体を用い、軸力が耐力や変形性能に及ぼす影響について検討を行った。その結果、 η_o が0.4~0.7程度の高軸力の範囲では、曲げ耐力は実験値と計算値が良く一致するが、変形性状は靱性に乏しく極めて脆性的であった。これらの事項を考え合わせると破壊性状が高軸力の範囲では変化しており、極めて脆性的な傾向を持っていると考えられる。 η_o が0.7以上の特に軸力の高い範囲においては、耐力は実験値が計算値を上回る傾向があり、耐力の推定には限界があると考えられる。またM/QDによる軸力の影響の違いも見られ、M/QDの小さな試験体ほど軸力による耐力の上昇が大きい。

(参考文献)1) 広沢雅也：鉄筋コンクリート部材の強度と靱性、建築研究報告 No.76, 1977.3

2) 周小真、佐藤稔雄、小野新、清水泰：高軸力を受ける鉄筋コンクリート柱の強度と靱性、コンクリート工学年次講演会、1986, PP.505~508

3) 周小真、佐藤稔雄、小野新、清水泰：高軸力下での鉄筋コンクリート造短柱の耐震性能、コンクリート工学年次講演会、1987, PP.139~144

4) 森田司郎、藤井栄：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究、日本建築学会論文報告集、1982 PP.47~54, 1983 PP.45~52

5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造基準・同解説、1982

6) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能、1981

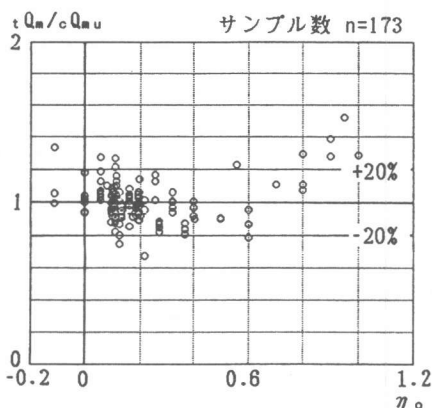


図10 曲げ耐力計算値の適合性と軸力比との関係

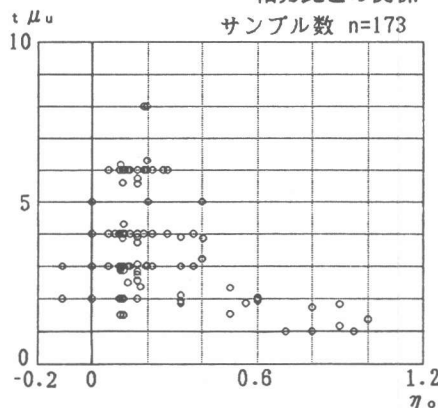


図11 塑性率と軸力比との関係