

論文 SRC 構造非埋め込み形柱脚部のせん断挙動と終局耐力

貞末 和史^{*1}・藤原 大英^{*2}・南 宏一^{*3}

要旨：兵庫県南部地震で SRC 構造非埋め込み形柱脚に被害が生じたことが起因となり，震災後，一定引張軸力あるいは変動軸力を受ける柱脚部の力学特性に関する実験的な研究が行われた。これらの研究成果より，引張力と水平力を同時に受ける非埋め込み形柱脚は，柱と基礎梁の接合面で横すべりを生じやすいことが明らかとなったが，すべり破壊を生じる柱脚部の耐力評価に関しては十分に検討されていない。そこで，本研究では，非埋め込み形柱脚が一定軸力下でせん断力を受け，すべり破壊を生じる場合の実験を行い，終局せん断耐力評価について，既往の耐力評価式の妥当性を検討し，新たな耐力評価式を提案した。

キーワード：アンカーボルト，すべり破壊，終局せん断耐力

1. はじめに

SRC 構造非埋め込み形柱脚の耐震性能を明らかにするために，筆者らは兵庫県南部地震以後，一定引張軸力および変動軸力下において曲げ・せん断力を受けて曲げ破壊する柱脚部の力学特性を検討してきた¹⁾²⁾。これらの実験による柱脚部の挙動として，引張軸力下にある柱脚部は，曲げ破壊が卓越する場合でも，柱と基礎梁の接合面ですべりを生じることが明らかとなっている。この柱脚部のすべりは兵庫県南部地震による破壊状況でも観察されているが，柱脚部がすべりを生じることが柱の構造特性にどのような影響を与えるかについては十分に検討されていない。なお，本論文でいう柱脚部とは，SRC 柱の下部においてベースプレートが存在している部位を意味している。

非埋め込み形柱脚のせん断耐力式は，SRC 規準³⁾と SRC 耐震診断基準⁴⁾に示されているが，これらの耐力評価式の妥当性について，実験的に検討された研究はない。そこで本研究では，柱脚部においてすべり破壊を生じる破壊モードを想定し，柱のせん断スパンが極めて短く，曲げモーメントの影響が無視できるような載荷方

法による実験を行い，すべり破壊を生じる非埋め込み形柱脚の終局せん断耐力について検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体形状の例を図 - 1 に示す。いずれも基礎梁を RC，柱には充腹形 H 型鋼を基礎梁天端まで内蔵する非埋め込み形柱脚である。試験体の製作は基礎梁コンクリートを打設後，ベースプレートを溶接した柱鉄骨を所定の位置に設置し，ベースプレート下部に無収縮モルタルをグラウトした後，柱コンクリートを打設した。なお，基礎梁コンクリートは平打ちにより打設し，打設後の基礎梁上面は特に何も処理していない。ベースプレートは，アンカーボルトの引張力によって生じる曲げモーメントに対して，曲げ降伏しないように厚さ 35mm とした。柱主筋上端は，通し主筋を想定した 4 隅の主筋のみ試験体上部鋼板に溶接し，柱主筋下端は，基礎梁底部の鋼板にすべての主筋を溶接し，基礎梁からの抜け出しが生じないようにした。

試験体計画を表 - 1 に示す。実験変数は，柱

*1 福山大学 ハイテクリサーチセンター特別研究員 博士(工学) (正会員)

*2 福山大学大学院 工学研究科建築学専攻修士課程

*3 福山大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

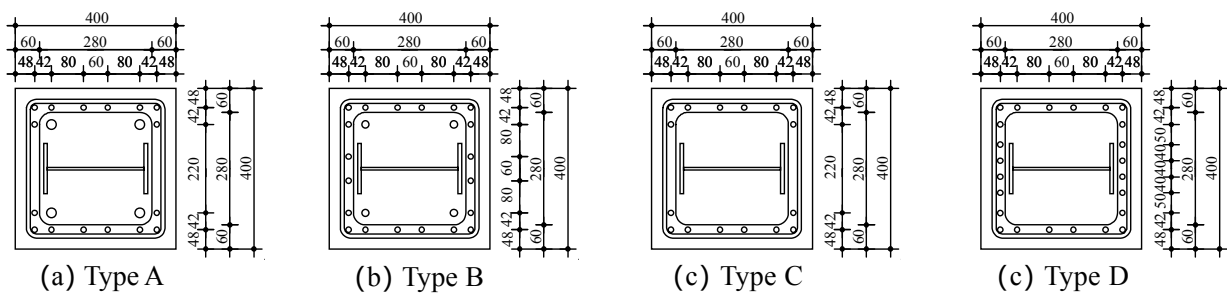


図 -2 試験体断面 単位 mm

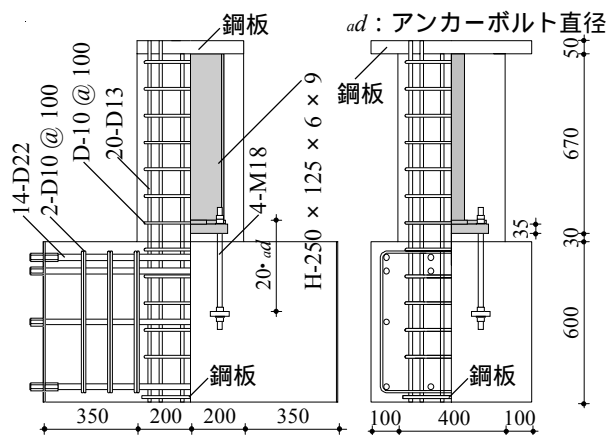


図 -1 試験体形状(T05B) 単位 mm

表 -1 試験体計画

試験体	断面構成	軸力	主筋	アンカーボルト
C10A	Type A	1000kN	16-D13(SD345)	4-M24(SS490)
C00A		0kN		
T05A		-500kN		
C00B	Type B	0kN	20-D13(SD345)	4-M18(SS490)
T05B		-500kN		
C10C		1000kN		
C00C	Type C	0kN	16-D13(SD345)	0
T05C		-500kN		
T05D		-500kN		

表 -2 鋼材の材料強度

使用箇所	降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	伸び (%)	ヤング係数 (N/mm^2)
D13 柱主筋	384	561	23.1	1.93×10^5
D10 帯筋	389	520	19.2	1.72×10^5
D22 基礎梁主筋	437	631	16.6	1.98×10^5
D10 あばら筋	976	1126	6.1	1.83×10^5
M24 アンカーボルト	345	541	27.3	1.95×10^5
M18 アンカーボルト	337	538	24.1	2.01×10^5
鉄骨	364	464	20.9	1.72×10^5

表 -3 コンクリートの材料強度

使用箇所	圧縮強度 (N/mm^2)	割裂強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (N/mm^2)
柱	34.6	2.50	2.71×10^4
基礎梁	47.6	3.31	3.46×10^4
グラウト	48.5	2.91	2.36×10^4

脚の断面構成と軸力の大きさであり、柱脚の断面構成は 4 タイプ計画した。断面構成を図 - 2 に示す。軸力は、圧縮軸力を正とし、軸力 $N = 1000\text{kN}, 0\text{kN}, -500\text{kN}$ の 3 種類とした。断面構成に関わらず圧縮軸力は 1000kN 、引張軸力は -500kN と統一しているため、引張耐力 N_{tu} のほぼ等しい Type A, Type B, Type D の引張軸力比 N/N_{tu} は 0.4 程度でほぼ等しい軸力比となるが、主筋量が少なく、アンカーボルトのない Type C の断面は $N/N_{tu} = 0.71$ と高引張力が作用する。材料強度を表 - 2, 表 - 3 にそれぞれ示す。

2.2 載荷方法

実験は図 - 3 に示す載荷装置を用いて、L 型載荷フレームに柱の回転を拘束するための鋼製ブロックを設け、水平力 Q の加力によって柱と基礎梁の接合面にせん断力を作用させる。載荷は、所定の一定軸力を導入後、柱脚部ベースプレート位置の水平変位 δ_{UB} を変位制御して、正負繰り返しの漸増水平載荷を行った。

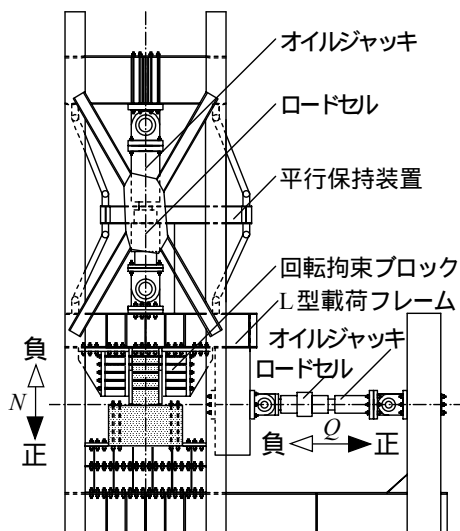


図 -3 載荷装置

3. 実験結果および考察

3.1 破壊性状

最終破壊状況の一例を写真 - 1 に示す。引張軸力を加えた試験体では、まず、引張軸力の載荷によって、柱にほぼ等間隔に水平方向のひび割れが発生し、水平力加力後のひび割れは、軸力の有無に関係なく、 δ_{UB} が 1mm 程度になると、柱脚部に斜めひび割れが発生し、その後、柱脚部の斜めひび割れは柱の上部へと進展した。

実験計画では図 - 4 に示すように直接せん断力がベースプレート下面位置に作用するように拘束板を用いたが、ベースプレート上部断面にも、直接せん断の位置から徐々に減少する形でせん断力は作用するため、ベースプレートより上部にも斜めひび割れが生じたものと思われる。

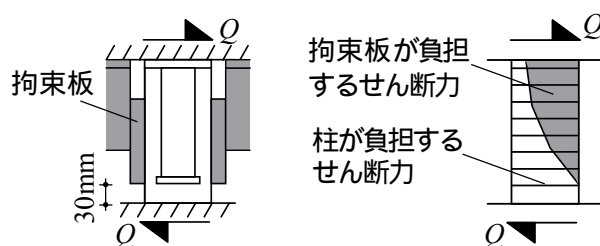


図 - 4 柱に作用するせん断力

最終破壊状況としては、いずれの試験体とも、柱脚部の損傷が大きく、鉄骨や帯筋は降伏していないことから判断して、部材の最大耐力は柱脚部の破壊によって決定されたものと思われる。

柱脚部のコンクリートが損傷を受ける領域が柱上部へと拡大した理由としては、主筋のダボ効果によって主筋がコンクリートを押し付ける支圧力の影響と、回転拘束ブロックの固定度不

足が原因となって生じた柱脚部のせん断変形領域の拡大の影響が考えられる。

3.2 変形状

各試験体の履歴曲線を図 - 5 に示す。図中に示した Q_U は SRC 規準に示される終局せん断力の計算値であり、いずれの試験体とも最大耐力は Q_U を上回っていることから、SRC 規準式で終局耐力を安全側に評価できることが確認された。しかしながら、実験値と計算値の差は大きく、これは SRC 規準式では、柱脚部のせん断力に対する抵抗要素として、主筋のせん断耐力を小さく評価していることが大きく影響している。以下に、実験変数の影響について述べる。

(1) 軸力の影響

軸力の違いによる比較をすると、軸力のない試験体に比べて、圧縮軸力下の試験体は最大耐力が大きく、履歴ループが膨らんでいる。一方、引張軸力下の試験体は、最大耐力が小さく、軸力のない試験体と同様に、履歴ループの痩せたスリップ型となっている。これらの最大耐力や履歴ループの形状は、ベースプレート下面とコンクリートの摩擦力の影響を大きく受けている。ベースプレートを取り囲む RC 部分のせん断力に対する抵抗機構としては、柱と基礎梁の接合面における骨材の噛み合わせによる抵抗力や主筋のダボ抵抗力が考えられる。

(2) 柱脚断面構成の影響

断面構成による比較をすると、軸力 0 および圧縮軸力下では Type A と Type C の試験体の最大耐力がほぼ等しいことから、部材が最大耐力に達する時に、アンカーボルトはせん断力に対

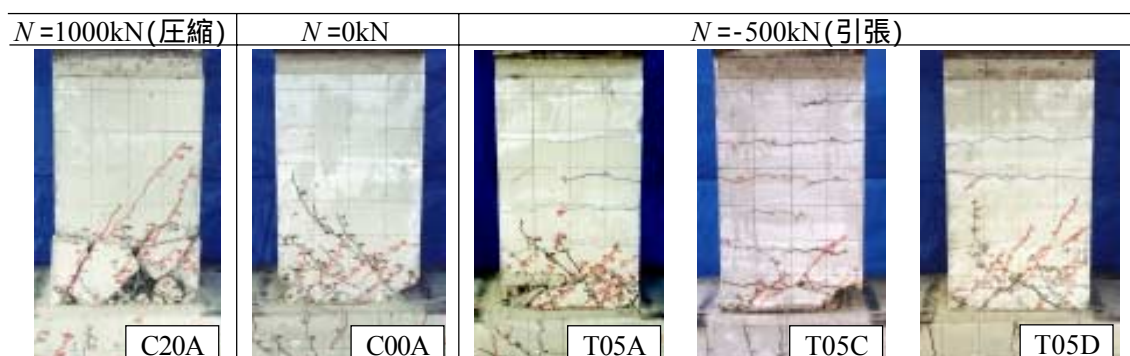


写真 - 1 最終破壊状況

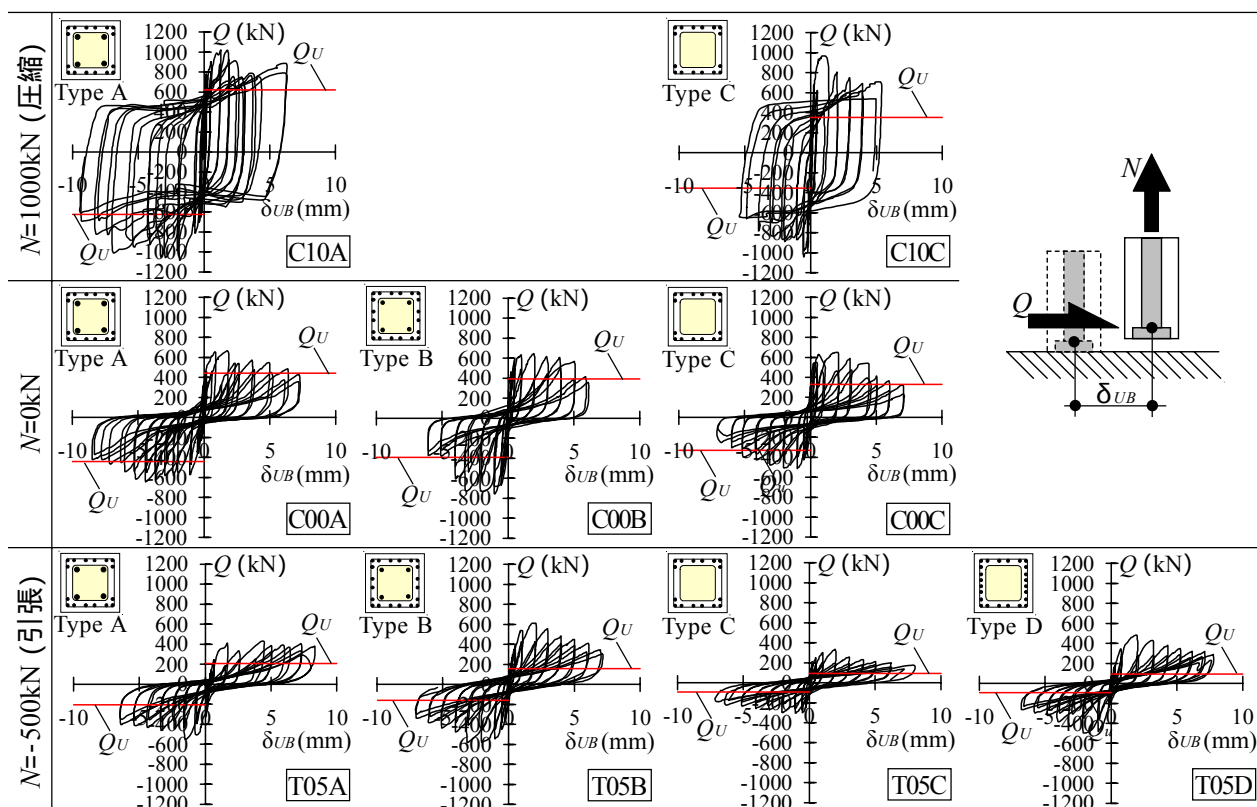


図 -5 荷重 - 変位関係

して十分に抵抗していないことが認められる。各試験体の最大耐力時の δ_{UB} はおおむね 1 ~ 3mm の範囲にあるが、本実験で用いた試験体では、ベースプレート孔とアンカーボルトのクリアランスは 2mm 程度とっており、鉄骨建て方時のベースプレートの位置によっては、柱脚部の水平ずれがある程度大きくならないと、ベースプレートとアンカーボルトが噛み合わない場合がある。ベースプレートとアンカーボルトが噛み合っていない時には、部材に作用するせん断力に対して、アンカーボルトは抵抗できない。しかしながら、アンカーボルトを有する試験体は、 δ_{UB} が大きくなってからアンカーボルトがせん断力に抵抗するため、最大耐力以降の耐力低下は小さい。なお、T05A と T05C を比較すると、引張軸力下ではアンカーボルトが引張力を負担するため主筋の軸力負担が軽減され、T05A は T05C より最大耐力が大きくなっている。

4. 終局せん断耐力の評価方法

4.1 既往の終局せん断耐力の評価式

非埋め込み形柱脚の終局せん断耐力については、SRC 規準と SRC 耐震診断基準に耐力評価式が示されている。図 - 6 に既往の耐力評価式による計算値と実験値の比較を示す。この図より、SRC 規準式 Q_{U1} は大きく安全側に、SRC 耐震診断基準式 Q_{U2} は危険側に実験値を評価する場合があり、いずれの評価式とも実験値との対応はよくないことがわかる。

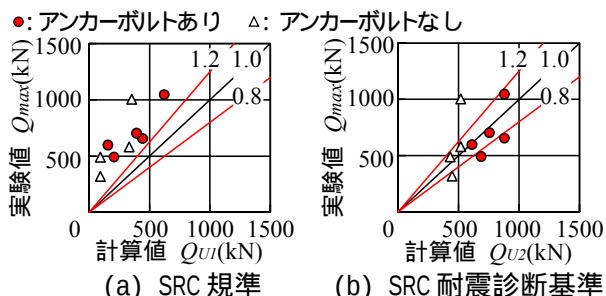


図 -6 既往の耐力評価式による計算値と実験値

4.2 提案する終局せん断耐力の評価式

既往の耐力評価式では、実験値と計算値の対応がよくないため、ここでは新たな終局せん断耐力の評価式を提案する。

終局せん断耐力 Q_U はベースプレートを取り囲む RC 部分のせん断抵抗力 rcQ_U 、ベースプレート下面とコンクリートの摩擦抵抗力 bQ_U 、アンカーボルトのせん断抵抗力 aQ_U の累加によって、式(1)で評価する。

$$Q_U = rcQ_U + bQ_U + \alpha \cdot aQ_U \quad (1)$$

ここに、 α はアンカーボルトのクリアランスの影響を考慮した aQ_U に対する低減係数である。

軸力 N に関しては、圧縮軸力を正とし、ベースプレートを取り囲む RC 部分の軸力 rcN 、ベースプレート下面コンクリートの軸力 bN 、アンカーボルトの軸力 aN の累加によって、式(2)および式(3)で評価する。

$$N = rcN + bN = mN + cN + bN \quad (N \geq 0) \quad (2)$$

$$N = rcN + aN = mN + aN \quad (N < 0) \quad (3)$$

ここに、 mN は主筋の軸力、 cN はベースプレートを取り囲むコンクリートの軸力である。

柱脚部各要素のせん断耐力 rcQ_U 、 bQ_U 、 aQ_U の評価方法と、柱脚部各要素が負担する軸力 rcN 、 bN 、 aN の算定方法を以下に示す。

(1) ベースプレートを取り囲む RC 部分のせん断抵抗力

rcQ_U は、RC 部材のパンチングシア耐力の下限値としてせん断耐力を評価している既存 RC 造耐震改修設計指針⁵⁾に示される式(4)を用いる。

$$rcQ_U = k_{min} \cdot \tau_0 \cdot rcA \quad (4)$$

$$k_{min} = 0.34 / (0.52 + L/D) \quad (5)$$

$$\tau_0 = \min(\tau_{01}, \tau_{02}) \quad (6)$$

$$\tau_{01} = 0.493 \cdot (rcN / rcA) + 0.254 \cdot \sigma_c \quad (7)$$

$$\tau_{02} = \left[\{16b^3 + 16b - 4 \cdot (5b^2 - 5)^{1/2}\} / \{(3b - (b^2 + 2)^{1/2}) \cdot (5 + 4b^2) - 1\} \cdot (rcN / rcA) + 2a \cdot \{b + (5b^2 + 5)^{1/2}\} / (5 + 4b^2) \right] \quad (8)$$

$$a = 0.249 \cdot \sigma_c \quad (9)$$

$$b = \{a / \sigma_t - \sigma_t / (4a)\} \quad (10)$$

ここに、 k_{min} は強度低減係数、 τ_0 はせん断応力度、 rcA はベースプレートを取り囲む部分の断面積(= $B \cdot D - b_B \cdot b_D$)、 L はせん断スパン、 B は柱幅、 D は柱せい、 b_B はベースプレート幅、 b_D はベースプレートせい、 σ_c はコンクリートの圧

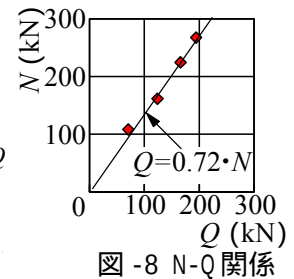
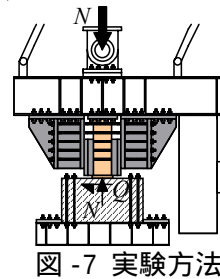
縮強度、 σ_t はコンクリートの引張強度である。

(2) ベースプレート下面とコンクリートの摩擦抵抗力

ベースプレート下面とコンクリートの摩擦抵抗力 bQ_U は、式(11)で評価する。

$$bQ_U = \mu \cdot bN \quad (11)$$

ここで、摩擦係数 μ は、図-7 に示すベースプレートとコンクリートの摩擦係数を調べるために行った実験の結果(図-8 参照)より、 $\mu = 0.72$ とする。



(3) アンカーボルトのせん断抵抗力

aQ_U は、文献⁶⁾に示される耐力式に、軸力の影響を考慮して、式(12)で評価する。

$$aQ_U = \min(aQ_1, aQ_2) \quad (12)$$

$$(aQ_1 / aQ_{SU})^2 + (aN / aN_{tu})^2 \leq 1 \quad (13)$$

$$aQ_{SU} = aA \cdot a \sigma_y / (3)^{1/2} \quad (14)$$

$$aN_{tu} = aA \cdot a \sigma_y \quad (15)$$

$$aQ_2 = 3 \cdot \sigma_c \cdot ad \cdot x_l \quad (16)$$

ここに、 aA はアンカーボルト断面積、 $a \sigma_y$ はアンカーボルト降伏強度、 x_l はダボ作用によってアンカーボルト断面の曲げモーメントが最大となる基礎梁上端からの深さである。

(4) 柱脚部各要素の軸力負担方法

柱脚部各要素の軸力負担に関して、圧縮軸力下では平面保持の仮定と材料の構成則および式(2)の釣り合い条件より各要素の軸力を求める。引張軸力下では、図-9 に示すように柱脚部ヒンジ領域 L_p で主筋が一様に伸び、アンカーボルトは定着長さ aL で一様に伸びると考え、主筋の伸び $m\delta$ とアンカーボルトの伸び $a\delta$ が等しいものとして変形の適合条件を仮定し、材料の構成則および式(3)の釣り合い条件より各要素の

軸力を求める。なお、 L_p の長さは、実験における軸力 - 軸方向変位と解析における軸力 - 軸方向変位が一致する長さとして、式(17)によって求めた。材料の構成則は線形とした。

$$L_p = 1.36 \cdot (N/N_{tu}) \cdot D \quad (17)$$

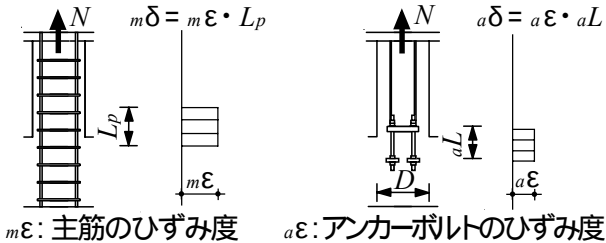


図 - 9 引張軸力下の鋼材のひずみ度分布の仮定

4.3 提案式と実験値の比較

軸力 - 終局せん断耐力相関関係を図 - 10 に示す。計算値は、SRC 規準による計算値 Q_{U1} 、SRC 耐震診断基準による計算値 Q_{U2} と提案式による計算値を示した。提案式による計算値は、 $\alpha = 1$ とした場合 Q_{U3} と $\alpha = 0$ とした場合 Q_{U4} を示した。

印は実験における最大値である。提案式によ

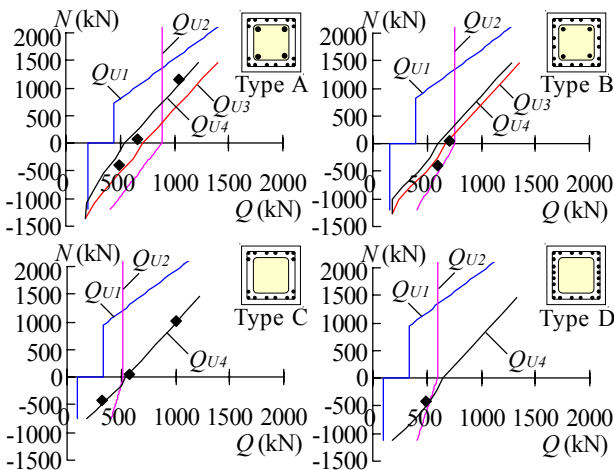


図 - 10 軸力 - せん断耐力相関関係

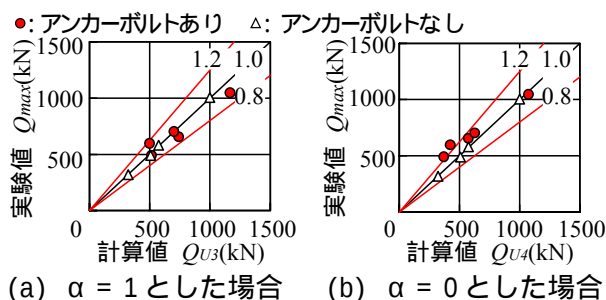


図 - 11 提案した評価式による計算値と実験値

る計算値と実験値の比較を図 - 11 に示す。

提案した評価式による計算値は、 $\alpha = 1$ とした場合には実験結果のほぼ平均値を与えているが、危険側の評価となる場合があり、 $\alpha = 0$ とした場合には実験結果の下限値を評価できることがわかる。したがって、アンカーボルトは引張力にのみ抵抗し、せん断力には抵抗しないと考えた、 Q_{U4} による計算方法が終局せん断耐力の評価式として適切であると思われる。

5. まとめ

一定軸力下でせん断力を受ける非埋め込み形柱脚が最大耐力に達する時に、アンカーボルトのせん断抵抗力は十分に期待できないことが明らかとなり、アンカーボルトは引張力にのみ抵抗すると考えて、本論文で提案した方法によって終局せん断耐力を評価した場合、計算値と実験値の対応は良好であり、実験結果の下限値を評価できることを示した。

参考文献

- 1) 貞末和史, 伊藤倫夫, 大庭秀治, 田中秀宣, 南宏一: 引張軸力下における SRC 構造非埋め込み形柱脚の耐震性能に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol.48B, pp.221 - 229, 2002.3
- 2) 貞末和史, 伊藤倫夫, 田中秀宣, 南宏一: 変動軸力を受ける SRC 構造非埋め込み形柱脚の弾塑性性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.3, pp.1051 - 1056, 2000.6
- 3) 日本建築学会: 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(第5版), pp.181 - 187, 2001.1
- 4) 日本建築防災協会: 既存鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準同解説, pp.50 - 51, 1997.12
- 5) 日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針同解説, pp.355 - 367, 2001.1
- 6) 秋山宏, 黒沢稔, 和国信之, 西村巧: 鋼構造埋込形式柱脚の強度と変形, 日本建築学会論文報告集, 第335号, No.3, pp.45 - 53, 1984.1