

論文 ブレースが偏心して取り付く露出柱脚における RC 基礎立上部の側方破壊挙動に関する一考察

浅田 勇人^{*1}・吉敷 祥一^{*2}・山田 哲^{*3}

要旨：引張ブレースが取り付く露出柱脚の繰返し載荷実験を行い、ブレースの偏心の有無が側方破壊挙動に及ぼす影響について考察を行った。ブレースが偏心して取り付く試験体は側方破壊耐力および最大耐力ともに、偏心のない試験体に比べて低下する結果となった。側方破壊耐力を各種合成構造設計指針の評価式をもとに、ブレースの偏心に伴うアンカーボルトに生じるせん断力の偏りを考慮して評価すれば、実験値を安全側に評価することができた。また、CCD法に基づく評価式についても実験値を良好に評価できることを確認した。さらに、最大耐力についても、既報の提案式を元に、評価できる可能性を示した。

キーワード：アンカーボルト、鉄骨部材、露出柱脚、RC基礎立上部、側方破壊、偏心

1. はじめに

既存屋内運動場や倉庫に代表される低層鉄骨造ブレース構造物では、非構造部材の納まりや、ブレース取り付け側の剛性に配慮して、図-1に示すようにブレースをH型断面柱のフランジに取り付けるディテールがみられる¹⁾。この場合ブレースが平面方向に偏心して取り付くことで、柱脚にはブレース軸力に伴う偏心曲げモーメントが生じる。その結果露出柱脚の場合では、ベースプレートを固定するアンカーボルトが均等にせん断力を負担できなくなる。特にアンカーボルトが鉄筋コンクリート基礎立上部に存在すると、アンカーボルトの縁端距離の不足、ブレース軸力に伴う過大なせん断力によって、側方破壊に至る可能性が考えられるが、この側方破壊へ及ぼす偏心の影響は我が国の設計指針¹⁾において明確に示されていない。

本研究では、側方破壊耐力に及ぼす偏心の影響を評価する第一段階として、ブレースの偏心の有無が、側方破壊に至る柱脚のせん断抵抗挙動に及ぼす影響について周辺鉄筋の影響を含めて考察を行う。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は引張ブレースが取り付く代表的な中低層ブレース構造での柱脚部を想定したものである。実験パラメータはブレース材軸の偏心とアンカーボルト周辺の配筋方法である。試験体は表-1に示す3体である。表中には材料特性も併せて示す。試験体形状を図-2に示す。試験体は柱とベースプレート(以下、B.PL)及びブレースを模したジャッキが取り付くガセットプレート(以下、G.PL)からなる鉄骨部と、立上部と基礎梁からなる鉄筋

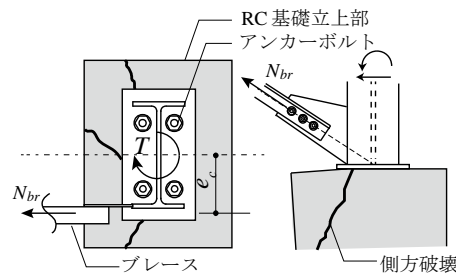


図-1 ブレースが偏在するRC基礎立上部

コンクリート基礎部によって構成する。柱断面はH-200x200x8x12である。B.PLは顕著な塑性化が生じないようにPL-40x350x420とし、隅角部にそれぞれ一本ずつ計4本のアンカーボルトによってRC基礎に固定した。実際の露出型柱脚のせん断抵抗はアンカーボルトのせん断抵抗とベースモルタル間の摩擦抵抗による累加抵抗²⁾となるが、本研究ではアンカーボルトのせん断抵抗を柱脚のせん断抵抗要素として抽出できるようにベースプレート下面とRC基礎立上部との間にテフロンシートを挿入して摩擦抵抗をなるべく軽減した。

ブレースの取り付け位置とアンカーボルトの配置を図-3に示す。G.PLはブレース材軸が偏心しない場合には柱弱軸ウェブ中央に取り付くため、柱ウェブの面外剛性を確保するために、G.PL背面をスチフナによって補剛した。一方、ブレース材軸が偏心する場合は柱フランジに取り付き、柱図心とG.PLの偏心距離 e_c は96mmとなる。試験体の配筋は図-2のとおり、通常的基础立上部の配筋を施したもの(以下、配筋試験体)と、立上部の配筋を主筋以外配筋しないもの(以下、無筋試験体)の2種類とした。本実験ではいずれの試験体も側方破壊に至ることを想定しているが、側方破壊耐力に最も影響を

*1 神戸大学 工学研究科建築学専攻 助教 博士(工学) (正会員)

*2 東京工業大学 建築物理研究センター 助教 博士(工学) (非会員)

*3 東京工業大学 建築物理研究センター 准教授 博士(工学) (非会員)

表-1 試験体一覧

| 試験体 | アンカーボルトの配置*1 | | | | ブレース材軸 偏心距離 e_c [mm] | アンカーボルト | | 配筋状況 |
|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------------------|------------|-------|--------|
| | c_1 [mm] | c_2 [mm] | s_1 [mm] | s_2 [mm] | | 軸径 [mm] | 鋼種 | |
| T-1.0 | 160 | 240 | 160 | 320 | 0 | 23 | PC 鋼棒 | 通常配筋*1 |
| T-1.0_U.R. | | | | | 無筋*1 | | | |
| T-1.0_E.C. | | | | | 通常配筋*1 | | | |

*1: 図-2を参照
 *2: 材料試験結果
 コンクリート圧縮強度: 32.2[N/mm²]
 ヤング係数: 2.43×10⁴[N/mm²]
 柱フランジ(SS400): 285[N/mm²]
 柱ウェブ(SS400): 288[N/mm²]
 立上部主筋 D19(SD345): 393[N/mm²]
 横補強筋 D10(SD295): 344[N/mm²]
 (鉄骨および鉄筋は降伏点の値を示す)

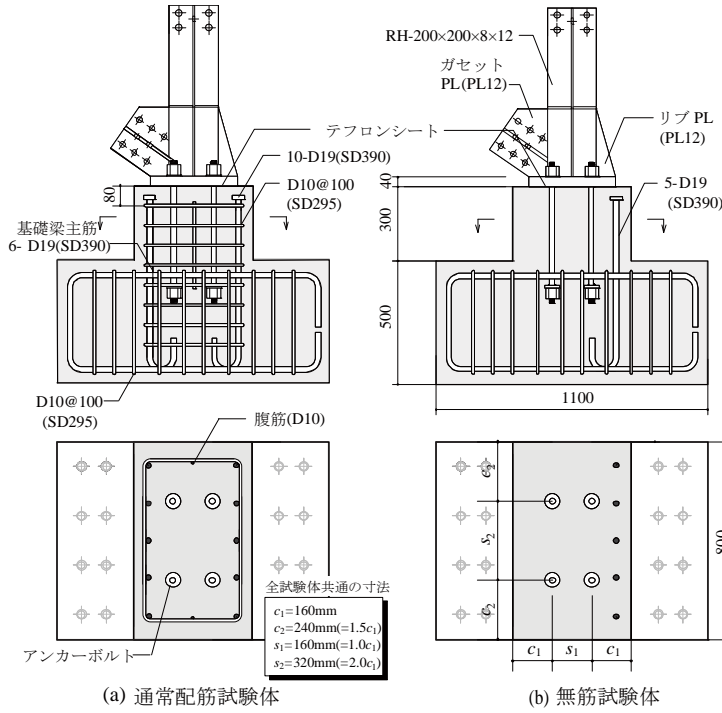


図-2 試験体形状

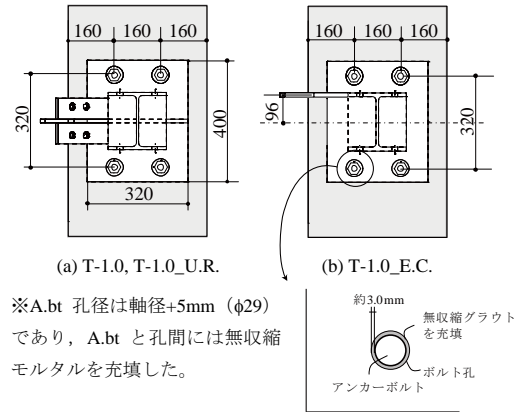


図-3 G.P.L. アンカーボルトの配置

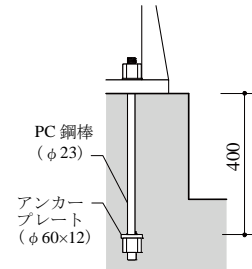


図-4 アンカーボルトの埋込み状況

及ぼすアンカーボルトの縁端距離については、全試験体ともに加力方向の立上部自由端までの端あき距離 c_1 は 160mm、加力直交方向のアンカーボルト間距離 s_2 は 320mm(端あき距離の 2 倍)、加力方向のアンカーボルト間距離 s_1 は、端あきと同等とし 160mm とした。

アンカーボルトの埋込み状況を図-4 に示す。アンカーボルトの埋込み長さ l_e は基礎梁上端筋より深く埋設するために 400mm とし、軸径 d は 23mm とした。また、アンカーボルトの材質は側方破壊を伴うせん断抵抗能力を議論するためにコンクリートの側方破壊に先行して塑性化が著しく進展しないように PC 鋼棒(SBPR1080/1130) とした。なお、図-3 に示すように全ての試験体で初期載荷時のボルト孔クリアランスによるすべりやせん断力の偏りをなるべく無くするためにアンカーボルトとボルト孔の間にはグラウトを充填した。

2.2 セットアップと計測

セットアップを図-5 に示す。試験体は鉄筋コンクリート基礎梁の上面と側面をそれぞれ PC 鋼棒とスクリュー

ージャッキを用いて反力フレームに固定し、柱上端及び柱脚ガセットプレート接合部を油圧ジャッキに接続した。本実験では柱脚周りの外力を明確に把握できるように、柱に与える軸力およびせん断力、ブレース軸力を個別のジャッキによって制御した。載荷は柱軸力 N_c を $N_c=0.1N_y=182kN$ (N_y : 柱の降伏軸力) として一定に保ち、柱回転角 θ_c に従って柱に強制変形を与え、その柱回転角 θ_c に応じたブレース軸力 N_{br} を与えた。柱回転角 θ_c の基準値は、想定したブレースの降伏軸変形時の柱回転角 θ_c である 1/400 とし、 $\pm 1/200$, $\pm 1/100$ でそれぞれ 1 回ずつ繰り返す。一度除荷した後、柱脚水平変位 $cb\delta_h$ が 20mm 程度に到達するまで正方向に柱回転角に比例してブレース軸力を単調に与えた。このとき、ブレースの復元力を再現するジャッキは降伏軸力を 200kN とした引張ブレースを想定し、圧縮軸力を負担しない図-6 に示すスリプ型の履歴則に従い制御した。なお、本実験の試験体はいずれも柱軸力とブレースの鉛直成分が相殺し、柱脚に引張力がほとんど生じない実験条件となっている。

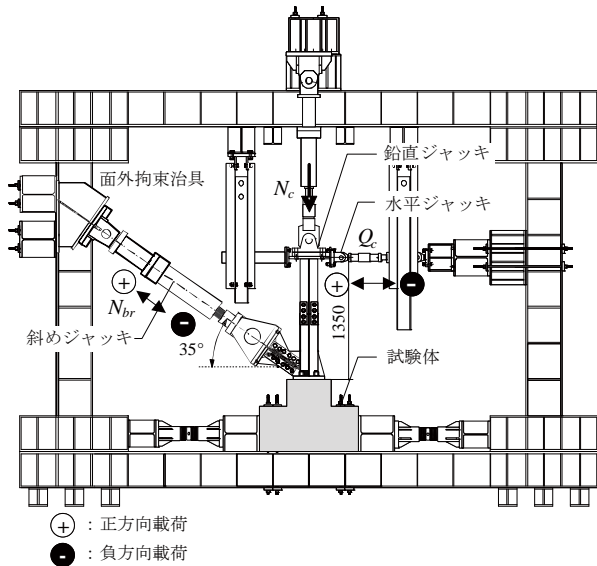


図-5 セットアップ

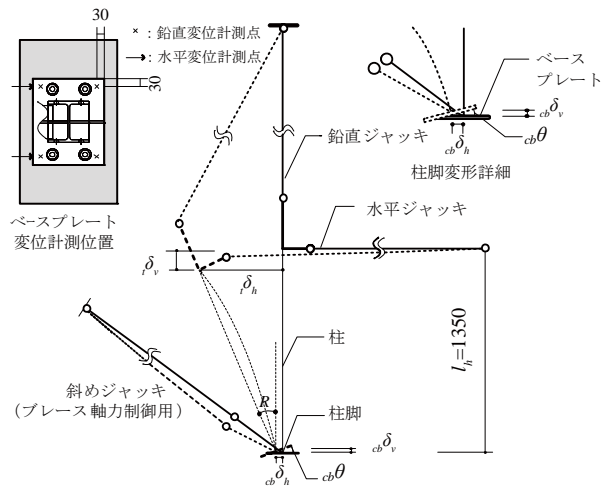


図-7 試験体の変形概念図と変位計測

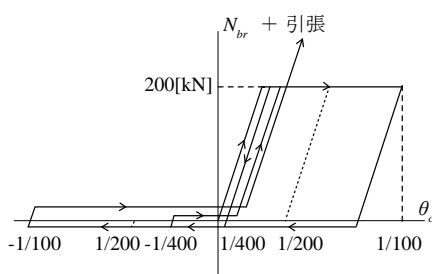


図-6 ブレース軸力 N_{br} の制御則

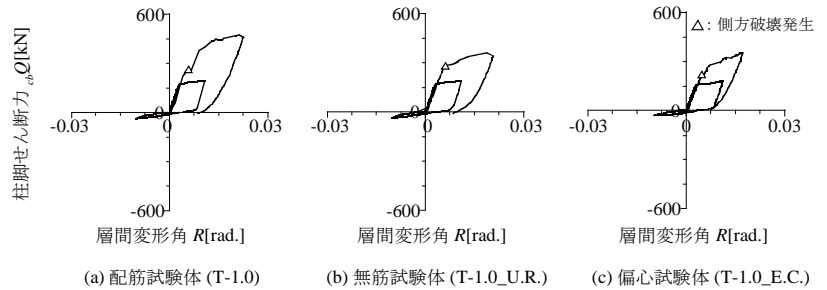


図-8 柱脚せん断力ー層間変形角関係

試験体の変形概念図を図-7 に示す。各点変位は試験体の基礎梁からの相対変位として計測した。本実験における柱回転角 θ_c は以下の式(1)によって算出した。

$$\theta_c = \frac{t \delta_h - cb \delta_h}{l_h - t \delta_v - cb \delta_v} \quad (1)$$

3. 実験結果

3.1 全体挙動

柱脚せん断力と柱脚の水平変位を含む層間変形角関係を図-8 に示す。いずれの試験体も側方破壊が生じたあとも、耐力は上昇し続けている。試験体の最大耐力を比較すると、配筋試験体は無筋試験体に比べて大きく、ブレースが偏心して取り付く試験体(以下、偏心試験体)は配筋を施しているにもかかわらず、無筋試験体とほぼ同程度となっている。

3.2 側方破壊時までのせん断抵抗挙動

(1) 荷重ー変形関係と破壊性状

ここではまず、側方破壊時までの挙動とその耐力について検討する。柱脚水平変位 $cb \delta_h = 3\text{mm}$ 時までの柱脚せん断力 $cb Q$ ー柱脚水平変位 $cb \delta_h$ 関係を図-9 に示す。また、載荷終了時の鉄筋コンクリート基礎のひびわれ状況を図-10 に示す。いずれも水平変位 $cb \delta_h = 2\text{mm}$ 程度で、図-10 に示すとおり加力方向に対して前方となるアンカー

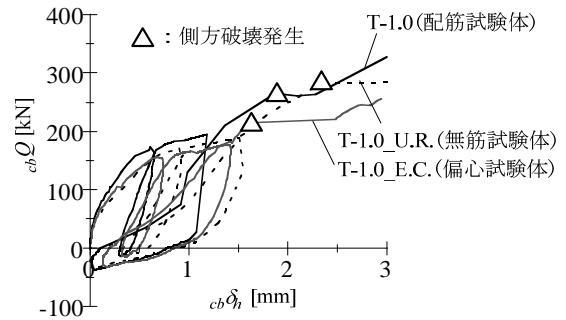


図-9 柱脚せん断力ー柱脚水平変位関係 (水平変位 3mm 時まで)

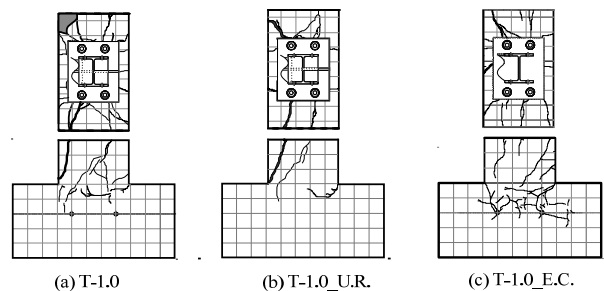


図-10 ひびわれ状況 (載荷終了時)

ボルト（以下、前方のアンカーボルト）を起点に斜めひびわれが発生し、側方破壊に至った。なお、側方破壊時までは、立上部下端においてわずかな曲げひびわれが確認されたものの、それ以外のひびわれは見られなかった。無筋試験体を含めて側方破壊後は、若干スリップするような挙動を呈するが、大きな劣化勾配が生じずに耐力は上昇している。

(2) 側方破壊耐力の評価方法

まず、各試験体の側方破壊耐力について検討する。側方破壊時のせん断耐力は各種合成構造設計指針に示される評価式(指針式)と CCD 法に基づく評価式³⁾(以下、CCD 式)を元にして算出することにする。前方のアンカーボルト群が側方破壊に至る場合の前方のアンカーボルト群のせん断力 q_{ce} は、指針式と CCD 式に基づき、それぞれ式(2)、式(3)で表せる。

$$A_{U-c} q_{ce} = 0.31 \sqrt{\sigma_B} \cdot A_c \quad (2)$$

ここで、 A_c : 前方のアンカーボルト群の有効投影面積(アンカーボルト間距離 $s_2 \geq 2c_1$ のとき、 $A_c = \pi \cdot c_1^2$) (図-11(a)参照)

$$CCD-c q_{ce} = 3.0 \cdot \frac{A_{cc}}{A_{cc0}} \cdot \Psi_s \cdot \Psi_h \cdot \Psi_e \cdot d^\alpha \cdot l_e^\beta \sqrt{\sigma_B} \cdot c_1^{1.5} \quad (3)$$

ここで、 $\alpha = 0.1 \cdot (l_e / c_1)^{0.5}$ $\beta = 0.1 \cdot (d / c_1)^{0.2}$

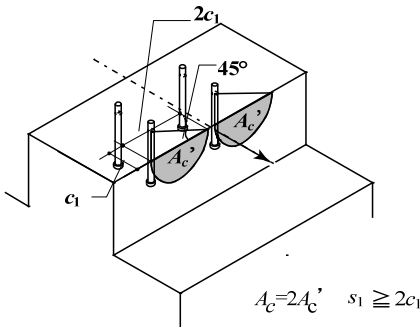
$\Psi_s = 0.7 + 0.3 \cdot c_2 / (1.5 \cdot c_1) \leq 1$ (縁あき距離による補正係数)，

$\Psi_h = 1.5(c_1 / h)^{1.5} \geq 1$ (立上部高さによる補正係数)

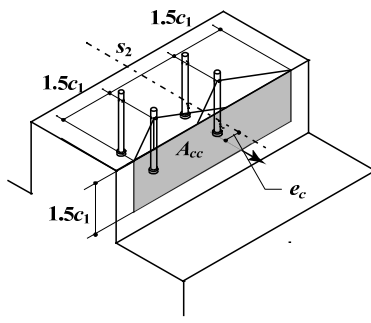
$\Psi_e = 1 / (2e_c / 3c_1) \geq 1$ (偏心による補正係数)

σ_B : コンクリート圧縮強度、 l_e : 埋込み長さ、 d : アンカーボルト軸径、 A_{cc0} : アンカーボルト 1 本が縁あき距離及び群効果の影響を無視した端あき距離で決まる有効投影面積(=4.5 c_1^2)、 h : 立上部の高さ、 A_{cc} : 縁あき距離やアンカーボルトの群効果を考慮した有効投影面積である。(図-11(b)参照)

ここで、図-13 に示す側方破壊時および側方破壊後の無筋試験体と偏心試験体の各アンカーボルトに生じた曲率分布を確認する。曲率はアンカーボルトに貼付した歪ゲージを用いて算出したものである。側方破壊時にはブレース材軸の偏心がない無筋試験体は前方および後方のアンカーボルトの曲率分布はほぼ同等であり、4 本のアンカーボルトがほぼ均等にせん断力を負担していることが確認できる。一方、偏心試験体では、ブレース材軸とアンカーボルト群の図心に偏心があることから、柱脚には偏心曲げモーメントが作用する。そのためブレース材軸に近いアンカーボルト群の負担せん断力が、遠方のアンカーボルトに比べて大きくなっている。一方、各アンカーボルト群の前方および後方のアンカーボルトに生じた曲率分布は、偏心が生じた場合でも、側方破壊時にはほぼ同等となっている。以上の結果を踏まえ、偏心がない試験体の場合では、側方破壊時に全アンカーボルトが均等にせん断力を負担しているの、側方破壊時の柱脚



(a) 指針式における想定破壊面



(b) CCD式における想定破壊面

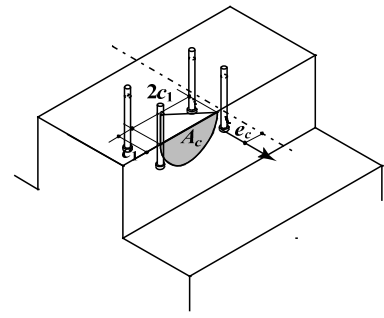


図-12 修正した指針式の破壊面

図-11 各評価式における想定破壊面

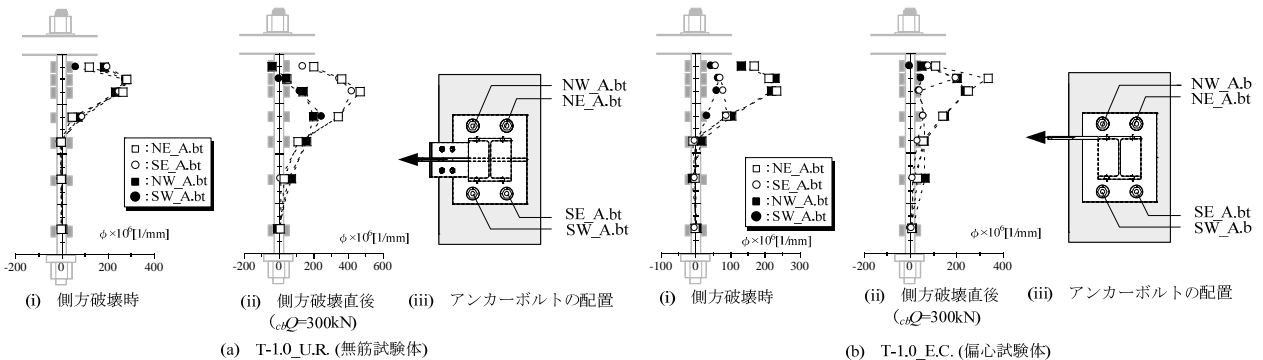


図-13 アンカーボルトに生じた曲率分布

表一 側方破壊耐力の計算値と実験値の比較

| 試験体 | ${}_{c}Q_{ce}$ [kN] | ${}_{AIJ}Q_{ce}$ [kN] | ${}_{CCD}Q_{ce}$ [kN] | ${}_{c}Q_{ce}/{}_{AIJ}Q_{ce}$ | ${}_{c}Q_{ce}/{}_{CCD}Q_{ce}$ |
|------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| T-1.0 | 265 | 283 | 283 | 0.94 | 0.94 |
| T-1.0_U.R. | 283 | | | 1.00 | 1.00 |
| T-1.0_E.C. | 212 | (177) | 206 | 0.75 (1.19) | 1.02 |

*1：アンカーボルト4本分のせん断降伏耐力は1139[kN]である。

*2：括弧内に示した側方破壊時の柱脚せん断力は、式(5)によって算出したものである

せん断力の計算値 ${}_{c}Q_{ce}$ は、以下の式で表せる。

$${}_{c}Q_{ce} = \frac{N}{n} \cdot {}_{c}q_{ce} \quad (4)$$

ここで、 N ：アンカーボルトの総本数、 n ：前方アンカーボルト群の本数である。本実験の柱脚せん断力の計算値 ${}_{c}Q_{ce}$ は、総本数が4本であり、前方アンカーボルトが2本となるので前方アンカーボルト群の ${}_{c}q_{ce}$ の2倍となる。

偏心試験体の場合では、ブレース材軸近傍のアンカーボルト群が遠方のアンカーボルト群に比べて負担せん断力が大きくなるため、ブレース材軸近傍のアンカーボルト群が先に側方破壊に至る。従って指針式の場合では図-12に示す破壊面を想定する。このときの偏心曲げモーメントに因る各アンカーボルトの負担力の偏りを考慮した柱脚せん断力は以下の式で表せる。なお、CCD法では、偏心の影響は、補正係数として評価するので、破壊面の修正は行わず、式(4)に従って柱脚せん断力を算出することになる。

$${}_{c}Q_{ce} = \left\{ \frac{2s_1}{s_1 + 2e_c} \right\} \frac{N^*}{n^*} \cdot {}_{c}q_{ce} \quad (5)$$

ここで、 N^* ：ブレース材軸近傍のアンカーボルト群の総本数、 n^* ：ブレース材軸近傍の前方アンカーボルト群の本数である。

(3) 実験値と計算値の比較

側方破壊時の柱脚せん断力の実験値と計算値を比較したものを表-2に示す。偏心試験体については、偏心の影響を考慮せず、4本のアンカーボルトが均等にせん断力を負担した場合の計算値と偏心による影響を考慮した場合(括弧内の値)の両方の計算値を示す。

CCD式は、偏心の有無にかかわらず、いずれも良好に評価できている。指針式は、偏心の影響を考慮せずに評価すると、実験値を大幅に過大評価する。一方、偏心を考慮して評価する場合は、若干過小評価する結果となるが、概ね評価できていると言える。

3.3 側方破壊後のせん断抵抗挙動

載荷終了(${}_{cb}\delta_h=20\text{mm}$)時までの柱脚せん断力 ${}_{cb}Q$ -柱

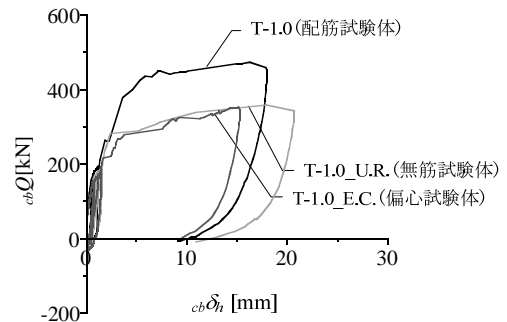


図-14 柱脚せん断力-柱脚水平変位関係

脚水平変位 ${}_{cb}\delta_h$ 関係を図-14に示す。いずれの試験体も側方破壊後も安定した耐力上昇が見られる。また、配筋試験体の最大耐力は、無筋試験体に比べて40%程度大きくなっている。これは既報⁴⁾で示したように後方のアンカーボルト群自体の耐力が側方破壊耐力に比べて十分に大きかったことに加え、加力方向に対して後方となるアンカーボルトと基礎梁間でストラットを形成して得られた抵抗と、図-15に示す有効抵抗領域内の横補強筋の加力方向に対して平行となる鉄筋(以下、平行鉄筋)の抵抗があったためと考える。従って、偏心がない試験体の側方破壊後のせん断耐力は、後方アンカーボルトとコンクリートの局所的なせん断抵抗と有効抵抗領域内の平行鉄筋の抵抗の累加強度として次式で評価することができる。

$${}_{c}Q_u = \min\{{}_{c}Q_{cu1}, {}_{c}Q_{cu2}\} + \sum_r a_r \cdot r \cdot \sigma_y \quad (6)$$

ここで、

$${}_{c}Q_{cu1} = 0.5 \cdot n_b \cdot A \sqrt{\sigma_B \cdot E_c} \quad (\text{コンクリートの支圧破壊}) \quad (7)$$

$${}_{c}Q_{cu2} = n_b \cdot A_b \cdot \sigma_u \quad (\text{アンカーボルトの破断}) \quad (8)$$

n ：曲げ引張側のアンカーボルトの本数、 ${}_bA$ ：アンカーボルトの軸部断面積、 ${}_b\sigma_u$ ：アンカーボルトの引張強さ、 E_c ：コンクリートのヤング係数、 σ_B ：コンクリート圧縮強度、 $\sum_r a_r \cdot r \cdot \sigma_y$ ：有効抵抗領域内の平行部鉄筋の降伏軸力である。アンカーボルト近傍の破壊状況を写真-1に示す。試験体は、側方破壊後もストラットを形成して耐力を保持できたことで、最終的にコンクリートの支圧破壊に至ったことが伺える。なお、式(6)の計算値も支圧破壊によって決まっている。一方、偏心試験体は通常の配筋を施したにもかかわらず、その最大耐力はほぼ無筋試験体と同程度である。ここで、最大耐力時に平行鉄筋に生じた軸力を図-16に示す。軸力は歪ゲージの値と材料試験に基づいて求めたものである。配筋試験体および偏心試験体ではほぼ同等の軸力が平行鉄筋に作用しており、その軸力はほぼ有効抵抗領域内の鉄筋の降伏軸力の総和 $\sum_r a_r \cdot r \cdot \sigma_y$ に相当するものとなっている。すなわち、偏心試験体が配筋試験体に比べて耐力が低下したのは、後方



写真-1 アンカーボルト近傍の破壊状況

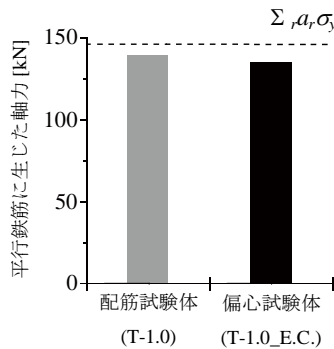


図-16 平行鉄筋に生じた軸力 (最大耐力時)

アンカーボルトとコンクリートの局所的なせん断抵抗が低下したことに因ると推察される。従って、ブレース近傍の後方アンカーボルトが先行して破壊に至ると考え、式(5)と同様に最大耐力時の柱脚せん断力を以下の式を用いて求める。

$${}_c Q_{cu}^* = \left(\frac{2s_1}{s_1 + 2e_c} \right) \cdot \min\{{}_c Q_{cu1}, {}_c Q_{cu2}\} + \sum_r a_r \sigma_y \quad (9)$$

以上のように求めた偏心試験体および他の2体の最大耐力の計算値と実験値の対応を図-16に示す。偏心試験体の最大耐力も偏心に伴うせん断力の偏りを考慮することで、実験結果を良好評価できている。本実験では、いずれも後方アンカーボルトの支圧破壊によって最大耐力が決定しているが、アンカーボルトの破断に至る場合には、最大耐力時における遠方アンカーボルトのせん断力の負担率が異なるとも考えられる。破壊形式の異なる場合の最大耐力の評価は今後の課題である。

4. まとめ

ブレースが偏心して取り付け付露出柱脚の繰り返し載荷実験を行い、ブレースの偏心がRC基礎立上部の側方破壊挙動に及ぼす影響について考察した。以下に得られた結果を示す。

- (1) ブレースが偏心して取り付け付くと、ブレースの偏心がない場合に比べて、アンカーボルトに作用するせん断力に偏りが生じるため、側方破壊耐力および最大耐力ともに低下する。
- (2) 側方破壊耐力は、ブレースの偏心の有無にかかわらず、

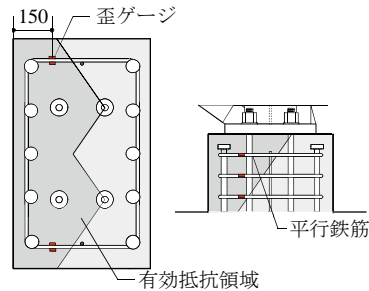


図-15 有効抵抗領域内の鉄筋と歪ゲージ貼付位置

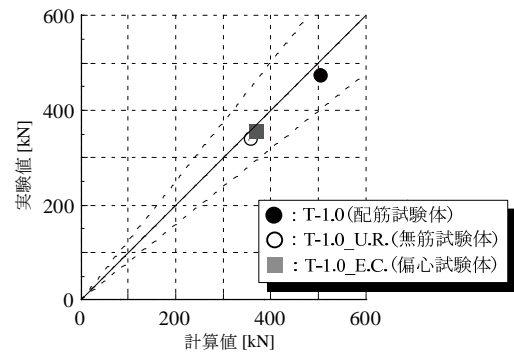


図-17 最大耐力の実験値と計算値の対応

ず、CCD式によって、良好に評価することができる。一方、指針式では偏心の影響を無視して評価すると過大評価するが、ブレースの偏心に伴うアンカーボルトの負担せん断力の偏りを考慮して評価すれば、安全側に評価できることを確認した。

- (3) 最大耐力時においても、既報の提案式をもとに、アンカーボルトに作用する負担せん断力を考慮して評価することができる可能性を示した。

本研究では、柱脚に大きな引張軸力が作用しない条件で実験を行ったが、ブレースが取り付け付場合には、柱からの曲げモーメントのみならず、大きな引張軸力が作用することが考えられる。このような場合における側方破壊挙動の解明も今後の課題とする。

参考文献

- 1) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，2010
- 2) 秋山 宏他：鋼構造露出型柱脚のせん断耐力—アンカーボルト，シアプレートのせん断抵抗—，日本建築学会論文報告集，No.338，1985.4
- 3) Hofmann, J. : Tragverhalten und Bemessung von Befestigungen unter beliebiger Querbelastung in ungerissenem Beton, 2004 (in German)
- 4) 浅田 勇人他：鉄筋コンクリート基礎立上部に設置した引張ブレース付露出型柱脚のせん断抵抗能力，日本建築学会構造系論文集，NO.665，pp.1347-1356，2011.7
- 5) 井上 一朗：頭付きスタッドの現状と展望，コンクリート工学，Vol.34，No.4，pp.7-14，1996