

5.15 1 本打ち杭の偏心に対する基礎のせん断設計

【よくある指摘事例】

1 本打ち杭の偏心に対する基礎のせん断設計について不明確な事例がある。

【関係法令等】

令第 38 条, 平成 19 年国交省告示 594 号第 1 第一号, 第二号

【指摘の趣旨】

柱軸力は基礎を介して杭へ伝達される。柱軸心と偏心した杭では、柱と杭の偏心によるせん断力とモーメントの処理が基礎の設計で必要となる。基礎の設計で考慮する杭偏心による杭反力は、図-1 に示す応力算定位置すなわち柱面と杭心の関係で決められている<sup>1)</sup>。柱と杭の重なりによってこのように基礎を介して伝達される柱軸力は低減されるものの、図-2 (a) のように伝達軸力は基礎のせん断力として設計されていることが多い。これに対し図-2 (b) のように「圧縮ストラット」の考え方に基づいたせん断設計を行う場合において不明確な事例がある。

以下では偏心基礎について、既往の文献などに基づいて圧縮ストラットの考え方とそれに基づく設計法について注意すべきポイントを提示する。

【解説】

1. 偏心基礎のモデル化

偏心軸力は、柱と偏心杭を結ぶ斜め方向の圧縮力となり、鉛直力と「圧縮ストラット(圧縮束)」と称する斜め圧縮力を釣り合わせるための水平力(曲げモーメント)をこの圧縮力と組み合わせて設計することが考えられる。この圧縮ストラットの設計法については、RC 規準<sup>1)</sup>の基礎の設計に記述がないということで、問題となる場合が多い。

偏心杭の基礎せん断設計では、偏心距離がせん断スパンであり、せん断スパンを基礎(梁)せいど割った「せん断スパン比」は小さくなるので、いわゆるディーブビームのせん断設計となる。すなわち、図-2(a) のような偏心による曲げモーメント  $M=Pa$  とせん断力  $Q=P$  による曲げせん断ではなく、図-2(b) のように、ストラット・タイ構造が形成されると考えることができる。国内外の設計規準におけるディーブビームのせん断設計では、せん断スパン比によって見かけのせん断耐力を増大させており、その増大率は圧縮ストラットモデルによって説明できる。ここでは、RC 規準など現行の設計法と大きく外れることのないように、大口径の 1 本打ち杭に限定して、柱杭偏心基礎のせん断設計への圧縮ストラットモデルの適用について解説する。

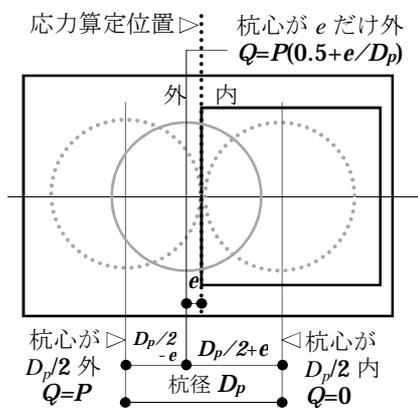


図-1 学会 RC 規準による基礎反力

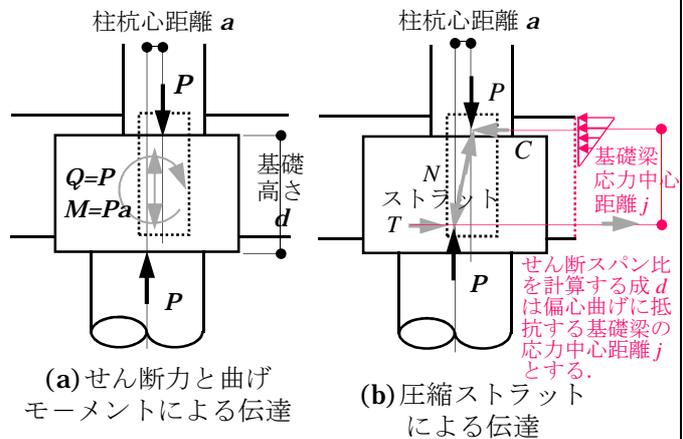


図-2 柱と杭が偏心する場合に基礎に働く力

## 2. ディープビームのせん断設計

せん断スパン比の小さなディープビームの破壊形態やせん断耐力については、柱脚やトンネル構造物を対象にして、土木工学分野では多くの実験的検討がなされており、せん断スパン比  $a/d$  が 1 以下では、圧縮力が主体となるため、せん断補強筋はほとんど効果を発揮しないとの報告もある。しかしながら、建築構造における告示や RC 規準に基づくせん断設計では、ストラット・タイモデルはまだ一般的ではない。以下では、まず土木などの各種構造設計規準におけるディープビームのせん断設計を比較する。ここではディープビーム効果として、いずれも、せん断スパン比によるせん断耐力の割り増しが行われているのでその根拠についても次節で解説する。

梁のせん断耐力はコンクリート負担分とせん断補強筋による負担分の加算であらわされる。ここで、後者のせん断補強筋についてはトラス理論が用いられる。前者のコンクリート負担分についてはせん断スパン比による割増が考慮されている。この割増はストラット圧縮モデルをせん断の形に表現するための便法である。各基準の耐力式は以下のようである。

### ACI Building Code

ACI 318-99 Deep Beam Design によれば、せん断スパン比  $a/d$  によるせん断耐力の割増は、

$$3.5 - 2.5(a/d) \quad (1)$$

で与えられ、2.5 以下と規定されている<sup>2)</sup>。この設計式は過小評価であるとして、Appendix A of the 2002 ACI Building Code には圧縮ストラットモデルの計算法が示されている<sup>3)</sup>。

### コンクリート標準示方書

土木学会のコンクリート標準示方書ではディープビームについて、せん断補強材を用いないせん断耐力式の中で、せん断スパン比による割増係数  $\beta_a$  が、

$$\beta_a = \frac{5}{1 + (a_v/d)^2} \quad (2)$$

と表される<sup>4)</sup>。この示方書では、せん断スパンとして荷重作用点から支承前面までの距離である  $a_v$  が用いられている。 $a_v/d=2$  で上式は 1.0、 $a_v/d=0.4$  で上式は 4.3 となる。

### 道路橋示方書

平成 24 年改定の国土交通省の道路橋示方書 V 耐震設計編 10.5 せん断耐力によればせん断スパン比  $a/d$  に対応させて次表のように割増係数  $C_{dc}$  を与えている<sup>5)</sup>。

表-1 せん断スパン比によるコンクリートの負担するせん断耐力の割増係数  $C_{dc}$

$a/d$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
$C_{dc}$	6.4	4.0	2.5	1.6	1.0

### 幸左の提案式

九州工業大学の幸左らは国内外で行われた梁部材実験データをまとめて  $a/d \leq 2.5$  のディープビーム部材のコンクリート負担部分を表すせん断耐力式を、割増係数  $C_{dc}$  を用いて提案している<sup>6)</sup>。

$$C_{dc} = \frac{10.3}{1 + (a/d)^2} \quad (3)$$

$a/d=2.5$  で 1.0 となるように補正すれば、 $a/d=0.4$  で 6.25 となる。

### 石橋の提案式

東日本 JR の石橋らはせん断スパン比が小さい  $0.95 \leq a/d \leq 2.0$  の壁式橋脚を模擬した RC 柱型試験体の水平加力試験結果のせん断耐力を提案し、そこで割増に該当する部分は支点前面から載荷前面までの距離を  $a_l$  として、次の係数で与えている<sup>7)</sup>。

$$\left(\frac{a_1}{d}\right)^{-1.166} \tag{4}$$

$a_1/d=2$  で 1.0 となるように補正すれば,  $a/d=0.4$  で 6.53 となる.

荒川終局 min 式

建築学会の RC 規準<sup>1)</sup>でせん断耐力を与える荒川式に含まれる  $M/Qd=a/d$  の部分を取り出すと, 終局せん断耐力 min のせん断スパン比に関わる係数は,

$$0.8\mu_u = 0.8 \times \frac{0.115}{a/d + 0.115} = \frac{0.092}{a/d + 0.115} \tag{5}$$

$a/d=3$  で 1.0 となるように補正すれば,  $a/d=0.4$  で 6.00 となる.

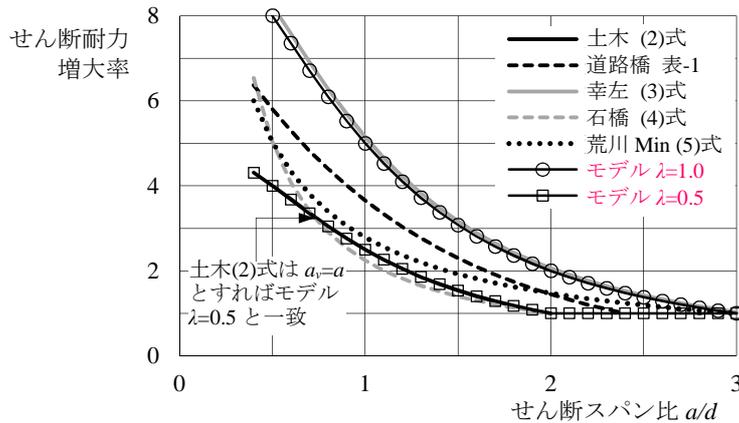


図-3 せん断スパン比によるせん断耐力の増大

以上の各規準式におけるせん断スパン比とせん断耐力の増大率の関係を図-3 にまとめる. 荒川式に基づく RC 規準せん断設計におけるせん断耐力の割増係数  $\alpha$  は

$$\alpha = \frac{4}{1 + M/Qd} = \frac{4}{1 + a/d}, \quad 1 \leq \alpha \leq 2 \tag{6}$$

と表わされるので, 整合するせん断スパン比は  $1 \leq a/d$  である. これはせん断スパン比が小さくなると, 圧縮ストラット効果が支配的になって, せん断設計におけるせん断抵抗機構が異なることを除外するためであると思われる. 荒川の実験データは  $a/d=0.4$  までであるので, 図-3 は  $0.4 \leq a/d$  を示している.

2. 圧縮ストラットモデル

図-4 のストラットモデルを考える. 上に示した規準式や実験式などからストラット断面は以下のように評価できる.

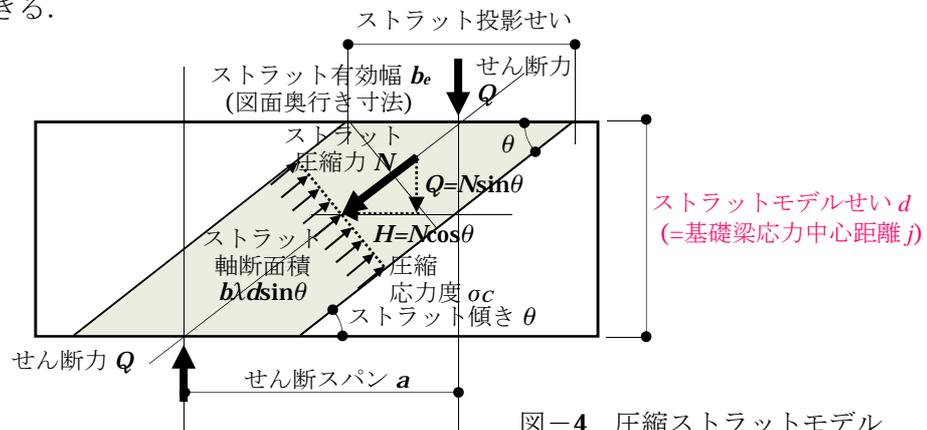


図-4 圧縮ストラットモデル

せん断スパンを  $a$ 、ストラットモデルせいを  $d$  とすればストラットの傾き  $\theta$  は

$$\sin \theta = \frac{d}{\sqrt{a^2 + d^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (a/d)^2}} \quad (7)$$

ストラットの水平投影せいを  $d_e$  を梁有効せいの  $\lambda$  倍であるとして  $d_e = \lambda d$  とし、有効幅を  $b_e$  とすれば、ストラットの軸断面積  $A_c$  は、

$$A_c = b_e d_e \sin \theta = b_e \lambda d \sin \theta = \frac{\lambda b_e d}{\sqrt{1 + (a/d)^2}} \quad (8)$$

終局時の圧縮軸応力度を  $\sigma_c$  とし、ストラット軸力  $N$  を鉛直方向のせん断力  $Q$  に置き換えると

$$Q = N \sin \theta = \sigma_c A_c \sin \theta = \sigma_c \lambda b_e d \sin^2 \theta = \frac{\sigma_c \lambda b_e d}{1 + (a/d)^2} \quad (9)$$

せん断スパン比の大きな(おおよそ  $a/d \geq 3$ ) 梁のせん断耐力を  $Q_0$  とすれば、終局のせん断応力度を  $\tau_u$  とし、図 2(b) のように  $j=d$  を用いれば、

$$Q_0 = \tau_u b j = 0.875 \tau_u b d \quad (10)$$

ここで  $b$  は梁幅を表わす。  $b = b_e$  とし、コンクリート強度を  $F_c$  とすれば、終局軸応力度  $\sigma_c = F_c$ 、終局せん断応力度はおおよそ  $\tau_u = F_c/10$  なので、

$$Q = \frac{\sigma_c \lambda b_e d}{1 + (a/d)^2} = \frac{F_c \lambda b_e d}{1 + (a/d)^2} = \frac{10 \lambda (F_c/10) b_e d}{1 + (a/d)^2} = \frac{10 \lambda}{1 + (a/d)^2} Q_0 \quad (11)$$

すなわちせん断スパン比  $a/d$  による見かけのせん断耐力の増大率は次式で与えられる。

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{10 \lambda}{1 + (a/d)^2} \quad (12)$$

以上は、コンクリート強度とせん断強度の関係を終局強度として、せん断耐力の増大率を導出したが、長期あるいは短期についても同様の考察が可能である。図-3 には、 $\lambda=0.5$  と  $1.0$  の計算結果をあわせて示している。圧縮ストラットの水平投影幅を梁せいの  $0.5$  倍 ( $\lambda=0.5$ ) とすれば、荒川の min 式にほぼ対応しており、さらに他の規準式と比較しても安全側の評価となることがわかる。したがって、 $\lambda=0.5$  を採用する。

土木分野でのディープビーム実験では梁に載荷板を設けている。実験によれば<sup>3)</sup> 圧縮ストラット幅は載荷板幅に対して、載荷板および支承板付近で  $1.6 \sim 2.1$  倍、ストラット中央付近では  $2.1 \sim 2.5$  倍と広がりを見せている。

ここで対象とする基礎梁に対する荷重は柱および杭であり、土木の実験載荷板と違って梁せいと大きく異なるので、 $1.6$  倍をそのまま採用することはできない。詳細は FEM 解析などで確認できるが、ここでは、圧縮ストラット断面寸法は以下のように仮定する。ただしストラットせい  $d_e$  は図-5 のように水平投影面寸法とする。ここで、ストラットせいは上述のように基礎梁応力中心距離の  $1/2$  であるが、確実な応力伝達を考慮してさらに柱せいおよび杭径以下とする。同様にストラット幅  $b_e$  はストラットがほぼ柱内に形成されることから柱幅とする。

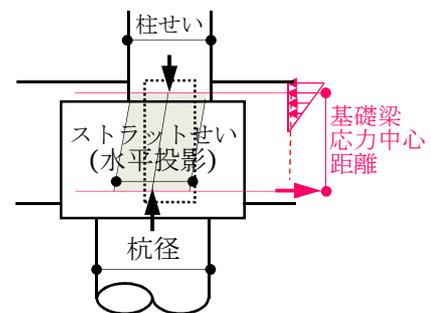


図-5 圧縮ストラット仮定断面

すなわち、

$$\begin{aligned} \text{ストラットせい } d_e &= (\text{基礎梁応力中心距離の } 1/2, \text{ 柱せい, 杭径) の最小値} \\ \text{ストラット幅 } b_e &= \text{柱幅} \end{aligned} \quad (13)$$

### 3. 圧縮ストラットの設計式

(12)式は、 $b_e j$ を断面積としてせん断設計をする場合の許容せん断耐力の増大率である。偏心基礎の断面設計では、この増大率を用いたせん断設計に代えてストラットの圧縮耐力を直接検定すればよい。ストラット軸力  $N$  は図-1 のような柱杭の重なりによる低減を考慮しない柱軸力  $P=Q$  を、次式のように傾き分による補正を行って、

$$N = \frac{P}{\sin \theta} = P \sqrt{1 + (a/d)^2} \quad (14)$$

この軸力に対してせい  $d_e \sin \theta$ 、幅  $b_e$  の断面を有する柱として、長期、短期の断面設計を行う。ここで、 $d_e, b_e$  は(13)式による。

また図-2(b)あるいは図-4 の軸力  $N$  の水平成分

$$H = N \cos \theta = \frac{P}{\tan \theta} = \frac{Pa}{d} \quad (15)$$

すなわち偏心モーメント  $M=Pa$  に対する基礎(基礎梁)の曲げ設計をあわせて行う。

設計のポイントを図-6 に示す。圧縮ストラットの設計では通常はコンクリートの圧縮強度のみで抵抗できることが多く、また柱筋が基礎梁内にも配筋されるため、ストラット方向の軸鉄筋は必要としない。多くの実験では、圧縮ストラットに沿うひび割れが報告されているが、偏心基礎では、基礎梁内の柱フープや基礎による拘束によってこのようなひび割れは防止できると考えられる。偏心曲げに対する配慮はこれまでの設計と変わらないが、特に基礎の回転を拘束できるように梁引張主筋を基礎内へ定着させる。なお、定着の詳細については2010年RC規準の第17条定着の解説に従う。

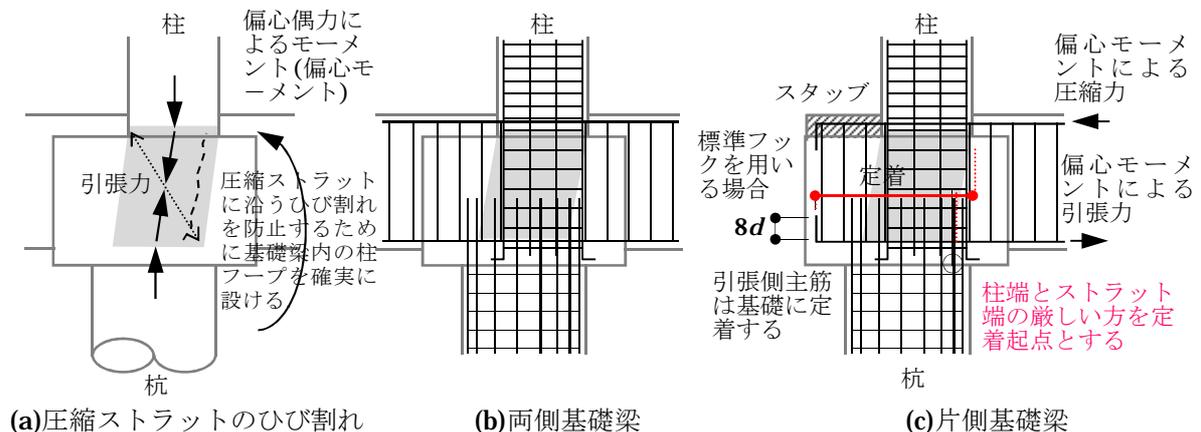


図-6 偏心基礎の配筋

### 4. 圧縮ストラット設計の留意点<sup>8)</sup>

(1) 圧縮ストラットモデルは引張りタイと合わせてストラットータイモデルと呼ばれ、荷重および支持条件もトラスとして閉じている。しかし、ここで示した杭偏心は片側載荷でタイに相当する機構が存在しないため、偏心による曲げモーメントに対する対処として、基礎梁の検討が付加されることはこれまでと同様である。

(2) ストラットせいの設定には(11)式において圧縮強度とせん断強度の関係を  $\tau_u = F_c/10$  と仮定

しているの、設計式には支圧強度ではなく許容圧縮応力度を用いる。

- (3) 図-3 によれば圧縮ストラットモデルは  $a/d$  が 1 以下でせん断モデルとの差が顕著であるが、偏心量  $a$  が大きくなると、圧縮束に沿ったひび割れや偏心曲げモーメントの処理等などの検討が必要なことや、現行の設計法との整合を考慮して、偏心量  $a$  は基礎有効せい  $d$  の 0.5 倍程度以下とする。いわゆるディープビームのアーチ効果として、既往のせん断設計を大きく変えるような使い方はしない。
- (4) 2 方向に偏心する場合は、図-7 のように柱心と杭心を結ぶ線を中心とするストラットを考える。偏心モーメントによる引張力は基礎梁の 2 方向に分解して配筋を決める。
- (5) 地震時に大きな引抜き力が作用する場合の柱と杭の偏心についても、図-8 のように軸力による力の伝達を考えることができる。柱と杭の鉄筋は鉛直・水平方向の力を負担伝達できるような配筋と定着が必要である。
- (6) 特に塔状比が 4 を超える建物は、市街地の狭い敷地で軟弱な地盤に計画されることが多く、大きな引抜き力に対して杭の引抜き抵抗で対処される。偏心基礎では柱外面と基礎外面が同面となることもあり、そのような場合には柱主筋が杭主筋から大きく外側にずれて配筋されることになるので、柱主筋と杭主筋の引抜き力の伝達が可能であることを確認する。

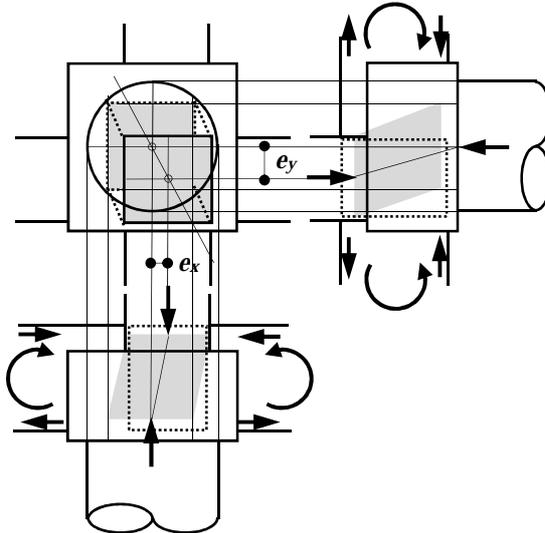


図-7 2方向偏心

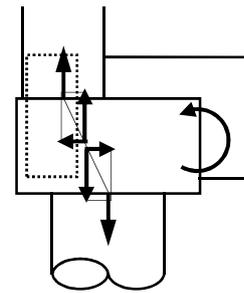


図-8 引抜きの場合

#### 【参考文献】

- 1) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010
- 2) Gerardo Aguilar, A. B. Matamoros, G. J. Parra-Montesinos, J. A. Ramirez and J. K. Wight, Experimental Evaluation of Design Procedures for Shear Strength of Deep Reinforced Concrete Beams, ACI Structural Journal, pp.539~548, 2002.
- 3) James K. Wight and G. J. Parra-Montesinos, Strut-and-Tie Model for Deep Beam Design - A practical exercise using Appendix A of the 2002 ACI Building Code, Concrete International, pp.63~70, 2003.
- 4) 土木学会, コンクリート標準示方書 設計編, 2002.
- 5) 道路橋示方書, IV下部構造編, pp.277~283, 2012.
- 6) 幸左賢二・脇山知美・西岡勉・小林寛, せん断スパン比に着目したディープビームの破壊形態に関する実験的研究, 土木学会論文集 E Vol. 62 No. 4, pp.798~814, 2006.
- 7) 関玲子・松本浩一・石橋忠良・小林将志, 鉄筋コンクリートディープビーム部材のせん断耐力に関する評価手法の研究, コンクリート工学論文集, 第23巻第2号, pp. 49~58, 2012
- 8) 安井信行・遠藤千尋・長瀬正, 大口径杭の偏心に対する基礎のせん断設計について, 日本建築学会大会梗概集 (関東), pp.579~580, 2015