

軸力と水平力を受けるくいとフーチングの結合部における 応力伝達に関する研究

正会員 和田 章*
正会員 堀井 昌博**
正会員 武 秀彦***
正会員 塚本 正彰****

§1. 序

1978年の宮城県沖地震で一部の建築物のくい基礎の被害が報告されて以来¹⁾、くい基礎の耐震設計の必要性が改めて認識され、基礎構造の合理的な耐震設計法の確立をめざした研究が活発に行われてきた。

これらの研究は、(1) 基礎構造に作用する外力と応力に関するもの、(2) フーチングの耐力と応力伝達機構に関するもの、(3) くい体の耐力および変形性能に関するもの、など広範囲にわたっており、筆者らも(2)、(3)のテーマに重点をおいて研究を進めている。

本論では、このうちくいとフーチングの結合部における力の伝達機構を解明するために行った実験と解析について述べる。

この10年間に、くいとフーチングの結合部の力学的性質を調べるために多くの研究者によって実験が行われている。これらに関して発表されている代表的な論文を参考文献2~21に示す。

§2. 実験計画および結果

§1に述べたように、くいとフーチングの結合部に関する実験は数多く行われている。そのうち、筆者らが行った実験を次に示す。

- 1) 曲げ、せん断耐力の大きい外殻鋼管コンクリートくい(SCくい)を用いて、フーチングへのくいの埋め込み深さが復元力特性、破壊形式、フーチングの表面および内部のひずみ分布に与える影響を明らかにすることを目的とした実験(計10体)⁷⁾。
- 2) 外径30cmのPHCくいを用いて水平荷重時のフーチングの応力、ひずみ分布を確認し、結合部の応力伝達機構を明らかにすることを目的とした実験

(計3体、うち1体は円形断面のフーチング)¹¹⁾。

- 3) SCくいを用いて2)と同じ形状のフーチングの耐力、破壊状況を明らかにすることを目的とした実験(計2体)¹¹⁾。

上記2)のうちのフーチングが円形断面の試験体は§3以降で述べる解析との対応を目的として行ったものである。本報ではこの試験体について、実験計画および結果を述べる。

2.1 実験計画

【試験体形状】

図2-1に試験体の形状および配筋を示す。くいには外径30cmのPHCくいを用いた。フーチングの水平断面は円形とし、その外径を現行の「建築基礎構造設計規準・同解説」の最小規定寸法であるくい径の2.4倍に相当する72cmとした。試験体には基礎ばりを想定したスタブをフーチングに付けた。フーチングへのくいの埋め込み深さはくい径の長さ(30cm)とし、その中空部にはフーチング底面まで中詰めコンクリート(無筋)を打設した。くいの軸方向筋はフーチング内へ定着していない。

表2-1に試験体の材料試験結果を示す。

【加力装置および載荷形式】

図2-2に実験に用いた加力装置を示す。試験体は実際の基礎の状態とは天地を逆にし、スタブ部分をPC鋼棒とジャーナルジャッキを用いて反力フレームに固定した。軸力は、くい先端に支持くいとしての長期許容支持力に相当する35tonの一定圧縮軸力を作用させ、軸力加力装置はくい先端の水平変形に追随して滑らかに移動するようにした。水平力は、加力位置のくいの回転を拘束しないように考慮した加力治具を介してPC鋼棒からくいの中心軸上に伝え、片持ばり形式で載荷した。水平力の載荷は、一方向の繰り返し載荷とし、載荷のレベルをPHCくいの曲げびり割れ発生前の5.2tonとその倍の10.4tonの2段階とした。その後、破壊に至るまで一方向載荷を行った。

2.2 実験結果

本論文の一部は、昭和58年日本建築学会大会学術講演梗概集に発表済みである。

* 東京工業大学 助教授・工博

** (株)日建設計コンピューター部副部長

*** 清水建設(株)技術開発本部

**** 東京工業大学 大学院生(現鹿島建設(株)原子力設計部)
(昭和60年10月11日原稿受理)

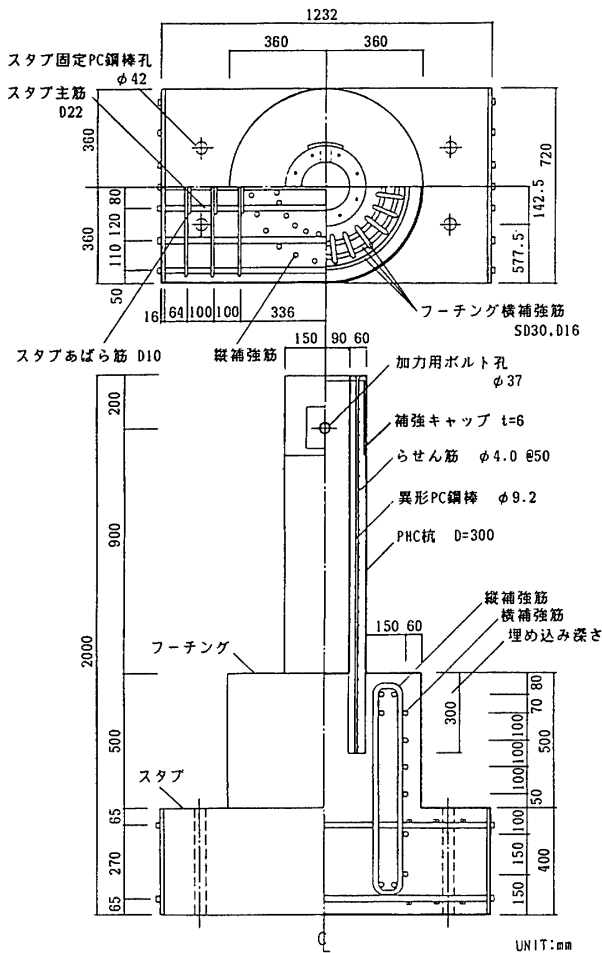


図2-1 試験体形状・配筋図

表2-1 材料試験結果

コンクリート	圧縮強度	引張強度
フーチング	241	20.8
杭	901	61.6
鉄筋	降伏点	引張強度
フーチング	3670	5260
杭軸方向筋	1400	1510
杭らせん筋	—	644

UNIT : kg/cm²

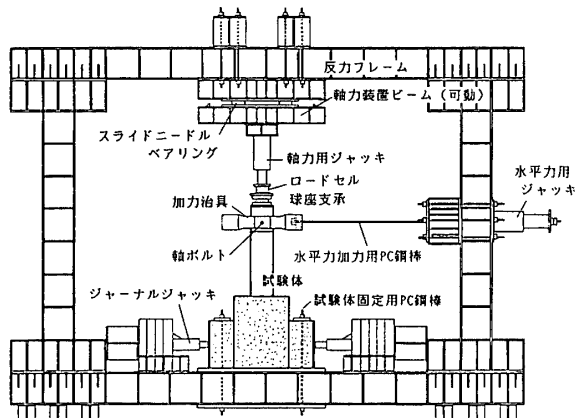


図2-2 加力装置図

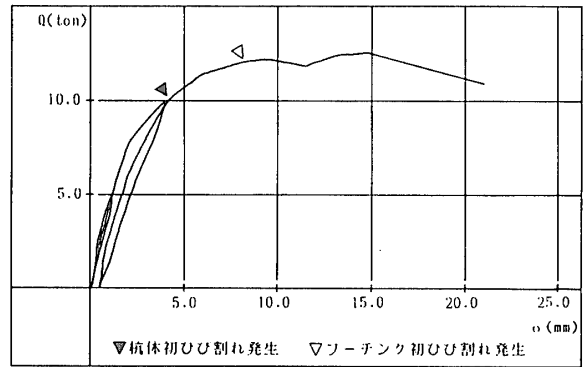


図2-3 荷重-変位曲線

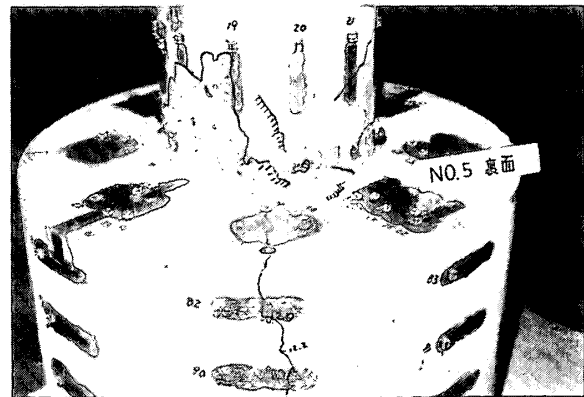


写真2-1

【荷重・変位関係およびひび割れ状況】

図2-3に水平力 Q と加力点の水平変位 δ の関係を示す。 $Q=12.2$ tonで最大荷重に達し、その後、くいとの結合部引張側の軸方向筋の定着破壊によって終局状態に至った。くいにはフーチング底面付近に $Q=10.0$ tonで初曲げひび割れが発生した。フーチングには $Q=12.0$ tonでくいが埋め込まれている部分から加力方向へ初ひび割れが発生し、さらに加力方向に対し $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$ 方向のひび割れが発生した(写真2-1)。

また、 $Q=8$ tonを超えたあたりから加力方向と反対側のくいとフーチング底面との境界面にすきまが生じていることが目視により確認された。

【フーチング内のコンクリートのひずみ分布】

図2-4に軸力 $N=35.0$ ton, 水平力 $Q=5.0, 10.0$ ton時のフーチング内部のモールドゲージのひずみ分布を示す(以下の図では引張ひずみを正とする)。図中で、くい側面に沿ったひずみ分布(A, B部)はフーチングの半径方向、くい頭部近傍のひずみ分布(C部)は鉛直方向のひずみであり、それぞれくいの材軸を通る加力面内の値である。くい側面のフーチング底面近傍のひずみは、加力方向側(A部)で大きな圧縮となっており、その反対側(B部)では小さな値を示している。また、くい頭部近傍のひずみ分布(C部)より、くい頭部でモーメントの伝達が行われていることがわかる。

【フーチング底面および側面の円周方向ひずみ分布】

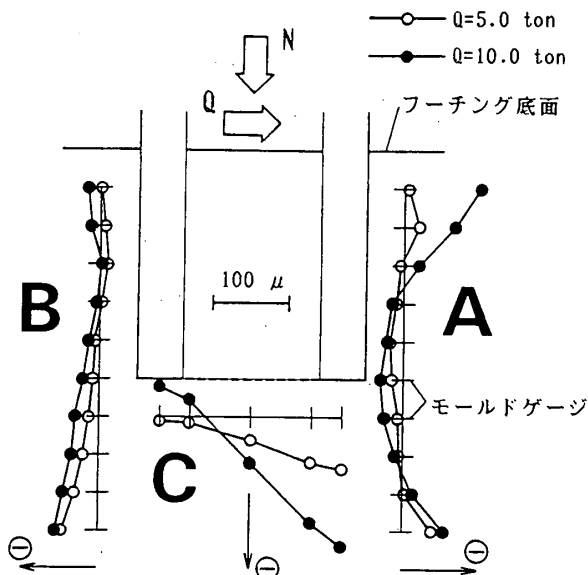


図2-4 フーチング内のコンクリートのひずみ分布

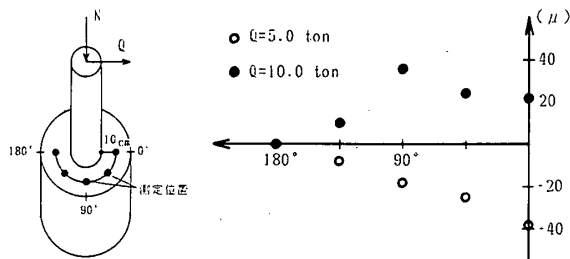


図2-5 フーチング底面の円周方向ひずみ分布

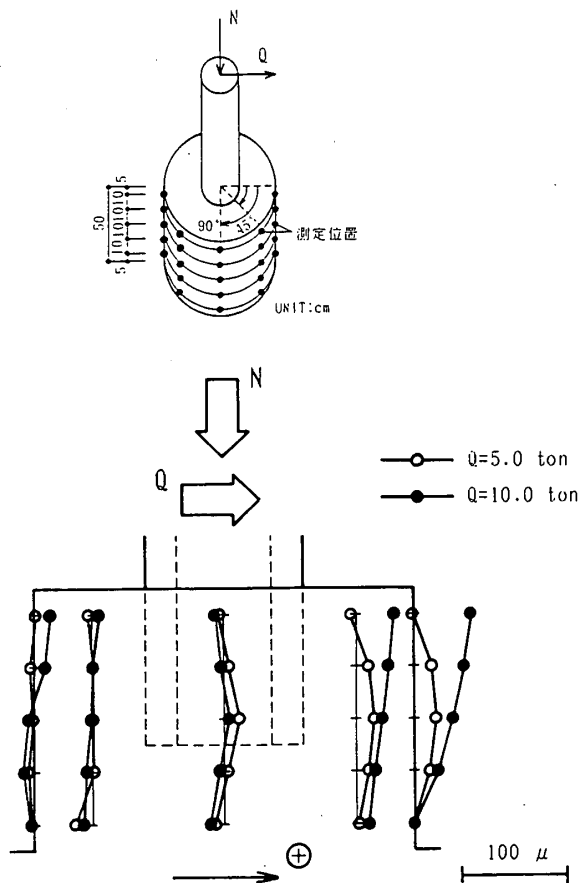


図2-6 フーチング側面の円周方向ひずみ分布

図2-5に $N = 35.0 \text{ ton}$, $Q = 5.0, 10.0 \text{ ton}$ 時のフーチング底面の円周方向のひずみ分布を示す。 $Q = 5.0 \text{ ton}$ では、加力方向に対し $0^\circ \sim 180^\circ$ にわたって圧縮ひずみを生じているが、 $Q = 10.0 \text{ ton}$ では引張ひずみとなり、加力方向に対して $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ のひずみが $135^\circ, 180^\circ$ に比べ大きな値を示している。

図2-6に $N = 35.0 \text{ ton}$, $Q = 5.0, 10.0 \text{ ton}$ 時のフーチング側面の円周方向ひずみ分布を示す。加力方向側の引張ひずみは、 $Q = 5.0 \text{ ton}$ ではフーチング底面から埋め込み深さ程度離れた部分で最大となっているが、 $Q = 10.0 \text{ ton}$ ではフーチング底面に最も近い部分で最大となっており、ひずみの分布に変化が見られる。 $Q = 10.0 \text{ ton}$ において加力方向側では、測定部分すべてで引張ひずみが生じている。また、ひずみの絶対値の大きさは、 $Q = 5.0, 10.0 \text{ ton}$ ともに加力方向側の方がその反対側よりも大きくなっており、外力に対して抵抗しているのは主にフーチングの加力方向側であることを示している。

§3. くいとフーチングの分離を考慮した解析法

実験結果によれば、すべての試験体において加力方向の反対側のくいとフーチングの境界面にはすきまが生じていた。また、フーチング内部についてみると、境界面近傍の境界面に垂直なひずみ成分は圧縮が支配的(図2-4のA部のフーチング底面近傍およびC部の加力方向側)で、引張は小さな値(図2-4のA部のくい頭付近およびB部)であった。

これらのことから、くいとフーチングの境界面では圧縮力だけが伝達され、引張力は伝達されず分離してしまうことを考慮しなければならないことが分かる。このような現象は、三次元の有限要素法を用い接触問題として取り扱うことによって解析可能となるが、接触・分離を考慮しつつ解析モデル全体を解析するためには非常に多次元の方程式を何度も解く収束計算が必要となる。本論文では軸対称有限要素法を用い、さらに接触・分離を考慮する必要のある点だけの方程式を用いて収束計算を行う実用的な解析法を提案する。

3.1 解析法の概要

本節では、くいとフーチングの境界面において圧縮力は伝達されるが引張力は生じず、すきまは生じるが重なり合いは生じないような条件を満たす解を求める解析法について述べる。この問題は、接触・分離状態が外力の大きさによっても変化するため、材料の性質を弾性として扱ったとしても非線形問題となり、以下に述べるような収束計算が必要となる。

本研究で扱っているモデルは、軸対称物体であり、幾何学的形状および材料特性が、3次元円筒座標系の θ 方向には変化せず(図3-1)、荷重のみが θ 方向に変化するとしている。本論ではフーリエ級数を用いた手法(応

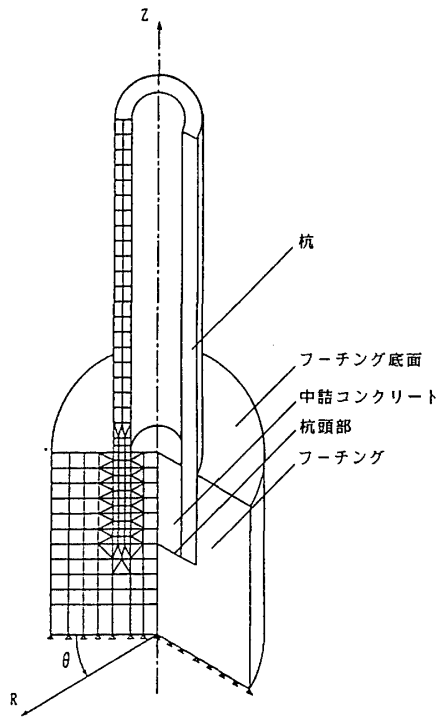


図 3-1 解析モデル

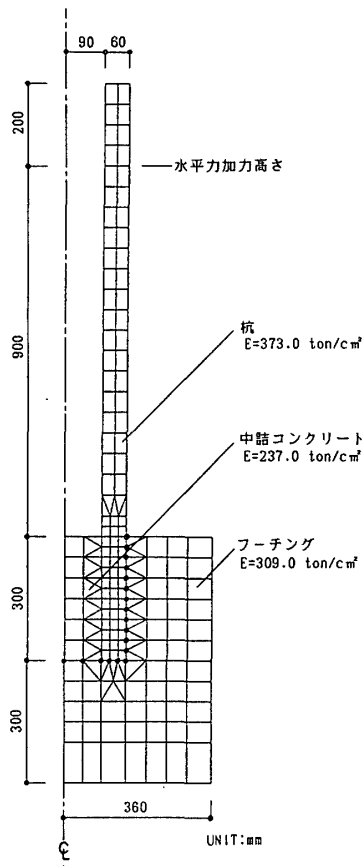


図 3-2 要素分割図

力, ひずみ, 変形が θ 方向に対して, $\sum a_n \cos n\theta$, $\sum b_n \sin n\theta$ の形で表され, それぞれのモード間で直交性が成り立つため, 各モードごとに計算を行った後, 合成する手法) を利用して, 非軸対称荷重の作用する軸対称物

体に対して有限要素法解析を行う。

図 3-2 に軸対称有限要素法を用いてこの問題を解析する場合の要素分割の一例を示す (このモデルは §4 解析結果で用いる)。本解析ではこの図のくいとフーチングの境界面上の●点で示した節点はくいとフーチングでそれぞれ独立としている。

本解析で用いた仮定条件を以下に示す。

- ① 鉄筋の影響はコンクリートの剛性に算入する。
- ② 材料は弾性体とする。
- ③ くいとフーチングの境界面で摩擦力は考慮しない。
- ④ 接触・分離の判定は, 加力面内の境界面上の節点でのみ行う (図 3-3)。
- ⑤ 境界面においてくい側面部では水平方向成分, くい頭部では鉛直方向成分の力および変位のみを考慮する (図 3-3)。
- ⑥ 接触している節点には圧縮力が作用する (図 3-4)。
- ⑦ 分離している節点には正の大きさの節点間距離が存在する (図 3-4)。

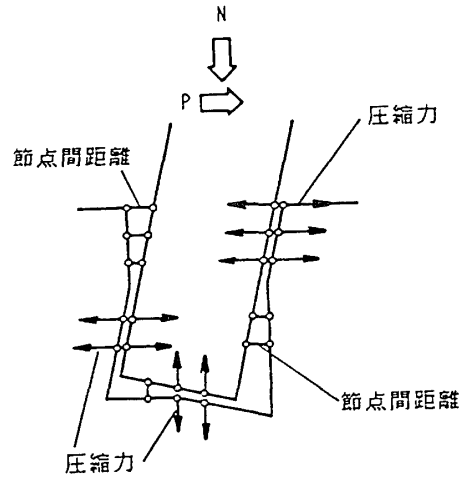


図 3-3 接触・分離モデル図

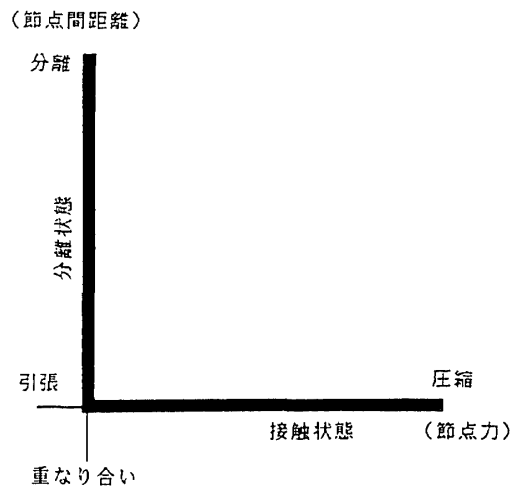


図 3-4 境界面上の節点における節点力と節点間距離の関係

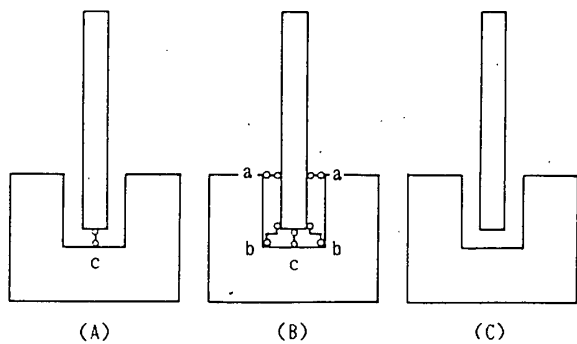
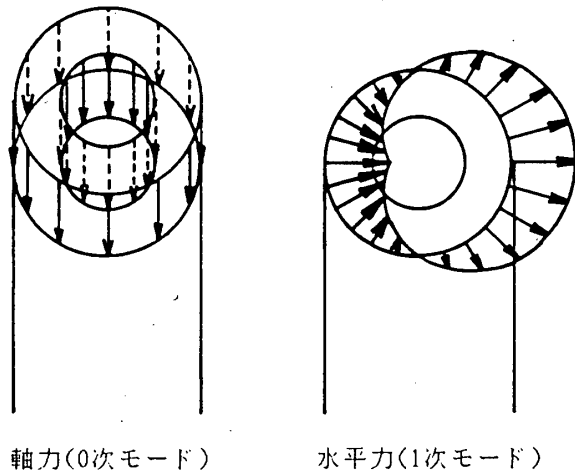


図3-5 解析モデル図



軸力(0次モード) 水平力(1次モード)
図3-6 0次, 1次モードの力

図3-2の●点で⑥, ⑦の仮定条件を満たす解析を行うために次の3つの解析モデルを考える(図3-5(A), (B), (C))。

(A)のモデルは境界面上の節点cでくいとフーチングの鉛直方向の変位が等しく(等置節点), その他の節点(非等置節点)ではくいとフーチングは互いに自由に動く。(B)のモデルは境界面上の節点a, bの水平方向, および節点cの鉛直方向の変位を等置したものである。(C)のモデルはくいとフーチングが完全に分離していると考えたものである。

ここで, (A)のモデルは, その応力, ひずみ, 変形が $n=0$ のフーリエ級数(0次モード)で表され, (B)のモデルは, 同じく1次モードで表される。(C)のモデルは, くいとフーチングの間に生じるすきまを解消するための剛体変位を表すためのモデルである。

図3-6に示すように軸力は0次モード, 水平力は1次モードのフーリエ級数を用いて表す。

まず, (A)のモデルに外力としての軸力 N , (B)のモデルに外力としての水平力 Q をそれぞれ作用させて解析を行い, 両者の境界面上の節点における節点力と節点間距離を加算する。この合成解では, 非等置節点において力の授受が行われずくいとフーチングが重なり合う(節点間距離が負)部分が生じ, 等置節点において引張

力が生じる部分がでてくるが, これらは仮定条件⑥, ⑦を満足しない。そこで, 非等置節点においてフーリエ級数で表された適切な分布荷重を, くいの外面とフーチングの内面に反対方向に作用させ, それによって生じるすきまを解消するための剛体変位を同時に与えることを考える。上記の仮定条件⑥, ⑦を満足するような分布荷重および剛体変位を求めることによりくいおよびフーチングの応力, ひずみ, 変形状態を得ることができる。

3.2 節点力と節点間距離の関係式

くいに外力が作用することによって, くいとフーチングとの節点間で伝達される円周上に分布する線荷重ベクトルおよびその間の節点間距離ベクトルをそれぞれ $\{P\}$, $\{D\}$ とおくと $\{P\}$, $\{D\}$ は (1), (2) 式で表すことができる。

$$\{P\} = \begin{Bmatrix} P_R \\ P_C \\ P_L \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

$$\{D\} = \begin{Bmatrix} D_R \\ D_C \\ D_L \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

添字の R, L, C はくいとフーチングの境界面の加力面内においてそれぞれ 0° , 180° 側, および材軸上の節点の値を表す(図3-7)。

$\{P_R\}$, $\{P_C\}$, $\{P_L\}$, $\{D_R\}$, $\{D_C\}$, $\{D_L\}$ は次のように表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} \{P_R\} &= \{N P_{0i}\} + \{Q P_{1i}\} + \{B P_{0i}\} + \{B P_{1i}\} \\ \{P_C\} &= \{N P_{0i}\} + \{Q P_{1i}\} + \{B P_{0i}\} + \{B P_{1i}\} \\ \{P_L\} &= \{N P_{0i}\} - \{Q P_{1i}\} + \{B P_{0i}\} - \{B P_{1i}\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \{D_R\} &= \{N D_{0i}\} + \{Q D_{1i}\} + \{B D_{0i}\} + \{B D_{1i}\} + \{R D\} \\ \{D_C\} &= \{N D_{0i}\} + \{Q D_{1i}\} + \{B D_{0i}\} + \{B D_{1i}\} + \{R D_C\} \\ \{D_L\} &= \{N D_{0i}\} - \{Q D_{1i}\} + \{B D_{0i}\} - \{B D_{1i}\} - \{R D\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

1) $\{N P_{0i}\}$, $\{N D_{0i}\}$ は, 図3-5(A)のモデルのくい先端に外力としての軸力 N を作用させたときに節点間に生じる節点力, 節点間距離を示すベクトルである。このモデルではc点だけが等置節点となっているため, $\{N P_{0i}\}$

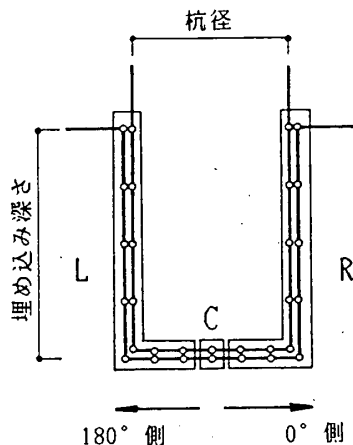


図3-7 境界部図

はc点で外力Nと等しくなり、その他の節点ではゼロとなる。 $\{N D_0\}$ はc点ではゼロとなり、その他の節点で値を持つ。

2) $\{q P_1\}$, $\{q D_1\}$ は、図3-5 (B) のモデルのくいに外力としての水平力Qを作用させたときに節点間に生じる節点力、節点間距離を示すベクトルである。このモデルでは、a, b, c点が等置節点であるため節点力の伝達はこの節点を通して行われ、その他の節点ではゼロとなる。 $\{q D_1\}$ は等置節点ではゼロとなり、その他の節点で値を持つ。また、同一節点の0°側と180°側で考えているため、0°側、180°側で1/2ずつの力を受け持つ(図3-8)。すなわち、0°側で考えると、

$$\{q P_1\} = \begin{Bmatrix} (Q+Q \cdot H/h)/2 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ -Q \cdot H/2h \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

3) $\{b P_0\}$, $\{b D_0\}$ は、くいとフーチングの接触・分離状態が未知であるため、図3-5 (A) のモデルの非等置節点のすべてに0次モードの単位線荷重をくい外面とフーチング内面に反対方向に作用させ、このとき節点間に生じる節点力、節点間距離を各節点で異なる未定係数倍することで得られるベクトルである。 $\{b P_0\}$ は節点に引張力が生じたときにこれを解除する節点力であり、節点cおよび荷重を作用させた節点でのみ値を持ち、その他の節点ではゼロとなる。 $\{b D_0\}$ は、c点ではゼロとなり、その他の節点で値を持つ。

未定係数ベクトルを $\{k_0\}$ とすると、 $\{b P_0\}$, $\{b D_0\}$ との関係は次のようになる。

$$\{b P_0\} = \frac{1}{2} \cdot [B R_0] \{k_0\}^{(E1)} \dots\dots\dots (6)$$

$$\{b D_0\} = [B C_0] \{k_0\} \dots\dots\dots (7)$$

4) $\{b P_1\}$, $\{b D_1\}$ は3)と同様に、図3-5 (B) のモデルの非等置節点のすべてに1次モードの単位線荷重をくい外面とフーチング内面に反対方向に作用させ、このとき節点間に生じる節点力、節点間距離を各節点で異なる

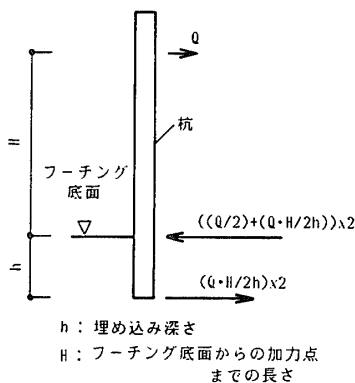


図3-8 力の分配

未定係数倍することで得られるベクトルである。 $\{b P_1\}$ は等置節点a, b, cおよび荷重を作用させた節点でのみ値を持ち、 $\{b D_1\}$ はa, b, c点ではゼロとなり、非等置節点でのみ値を持つ。

未定係数ベクトルを $\{k_1\}$ とすると、 $\{b P_1\}$, $\{b D_1\}$ との関係は次のようになる。

$$\{b P_1\} = [B R_1] \{k_1\} \dots\dots\dots (8)$$

$$\{b D_1\} = [B C_1] \{k_1\} \dots\dots\dots (9)$$

5) 図3-5 (A) のモデルで作用させる荷重によって (B) のモデルの等置節点の位置に節点間距離が生じるが、もしその節点が圧縮力を伝達する節点であるとすれば、この節点間距離はゼロでなければならない。 $\{r D\}$ は、このために必要なくい剛体変位(図3-5 (C) モデル)による節点間距離を示すベクトルである。そこで (B) のモデルの等置節点の節点間距離を未定係数とすれば、これを用いて $\{r D\}$ を表すことができる。未定係数ベクトルを $\{a\}$ とすると $\{r D\}$ は (10) 式によって表すことができる。

$$\{r D\} = [R C] \{a\} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $[R C]$ は等置節点に単位の節点間距離が生じたとき非等置節点に生じる節点間距離を表した影響係数をマトリックスとしたものである。

1)~5)を整理すると、(3), (4)式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \{P_R\} &= \{0\} + \{q P_1\} + \frac{1}{2} \cdot [B R_0] \{k_0\} + [B R_1] \{k_1\} \\ \{P_C\} &= N + 0 + [B R_{0c}] \{k_0\} + 0 \\ \{P_L\} &= \{0\} - \{q P_1\} + \frac{1}{2} \cdot [B R_0] \{k_0\} - [B R_1] \{k_1\} \end{aligned} \right\} \dots\dots (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \{D_R\} &= \{N D_0\} + \{q D_1\} + [B C_0] \{k_0\} + [B C_1] \{k_1\} + [R C] \{a\} \\ \{D_C\} &= 0 + 0 + 0 + 0 + [R C] \{a\} \\ \{D_L\} &= \{N D_0\} - \{q D_1\} + [B C_0] \{k_0\} - [B C_1] \{k_1\} - [R C] \{a\} \end{aligned} \right\} \dots\dots (12)$$

(11), (12)式を未定係数を含む項と定数項で分けると、節点力、節点間距離の関係式は次のように整理できる。

$$\{P\} = \{E P\} + [B R] \{k\} \dots\dots\dots (13)$$

$$\{D\} = \{E D\} + [B C] \{k\} \dots\dots\dots (14)$$

ここで、

$$\{E P\} = \begin{Bmatrix} q P_1 \\ N \\ -q P_1 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (15)$$

$$\{E D\} = \begin{Bmatrix} N D_0 + q D_1 \\ 0 + 0 \\ N D_0 - q D_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E D_R \\ 0 \\ E D_L \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

$$[B R] = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cdot B R_0 & B R_1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 \dots -1, -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} \cdot B R_0 & -B R_1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots (17)$$

$$[{}_B C] = \begin{bmatrix} {}_B C_0 & {}_B C_1 & {}_R C \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{1} \\ {}_B C_0 & -{}_B C_1 & -{}_R C \end{bmatrix} \dots\dots\dots (18)$$

$$|k| = \begin{Bmatrix} k_0 \\ k_1 \\ \alpha \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (19)$$

以上ですべての節点について節点力と節点間距離の関係式が得られた。

3.3 接触・分離状態の仮定とその判定

3.2 で得られた節点力と節点間距離の関係式を用いて未定係数 $|k|$ を求めればよいのであるが、それにはくいとフーチングの境界面での接触・分離状態を仮定する必要がある。

i 番の節点でくいとフーチングが接触していると仮定するとこの節点での節点間距離=0, すなわち (14) 式で $D_i=0$ となる。また j 番の節点ではくいとフーチングが分離していると仮定すると、この節点での節点力=0, すなわち (13) 式で $P_j=0$ となる。このことに着目すると、境界面の接触・分離状態を仮定することにより接触している節点では節点間距離=0, 分離している節点では節点力=0 となり、各節点で節点力または節点間距離の関係式のどちらかを選ぶことができる。ここで選んだ関係式は節点数個となり未定係数の個数と一致するのでこれらを連立方程式として解くことにより未定係数 $|k|$ が求まる。

ここで、仮定した接触・分離状態が 3.1 に示した仮定条件⑥, ⑦を満足しているかを判定しなければならない。

判定は求めた $|k|$ を (13), (14) 式に代入して $|D|$, $|P|$ を求めることにより行う。 $|D|$, $|P|$ が上記の条件を満足している場合には仮定した接触・分離状態が正解となる。条件を満足しない場合には、接触・分離状態の仮定が誤っていたことになるのでその条件を満足する解が求まるまで別の接触・分離状態を仮定し上述の手順を繰り返す。

この結果より、くいとフーチングの境界面における接触・分離状態が判明し、各節点に生じる 0 次モードと 1 次モードの節点力、節点間距離が $|k|$ より求められる。

3.4 くいとフーチングの応力、ひずみ、変形状態

くいおよびフーチングの応力、ひずみ、変形状態を求めるために以下の計算を行う。

まず、くいを除いたフーチングだけのモデルを考え、これに各節点の 0 次モード、1 次モードの節点力を作用させ、くいに外力が作用したときのフーチングの 0 次モード、1 次モードの解を得る。この変位と 0 次、1 次モードの節点間距離を用いることによって、境界面でのくいの変位を計算することができる。

次に、くいだけをフーチングから取り出したモデルを考え、このモデルに境界面上での変位を強制変位として与え、さらに外力を作用させて計算を行う。

フーチングの解とくいの解を重ねて表現することにより境界面の接触・分離状態を考慮した解を得ることができる。

§4. 解析結果

本節では、§2 の実験に用いた試験体について §3 に示した方法により解析を行い、その結果と実験結果との比較を行う。解析結果については、本解析のモデル（以後分離モデルと呼ぶ）を中心に述べるが、参考のためにくいとフーチングを完全に一体としたモデル（以後一体モデルと呼ぶ）についても示す。

【フーチング内のコンクリートのひずみ分布】

図 4-1 に、軸力 $N=35.0$ ton, 水平力 $Q=10.0$ ton 時の一体、分離モデルおよび実験結果のフーチング内のコンクリートのひずみ分布を示す²²⁾。図中で、くい側面に沿ったひずみ分布は図 3-1 における R 方向、くい頭部近傍のひずみ分布は Z 方向のひずみであり、それぞれくいの材軸を通る加力面内の値である。くい側面に沿った加力方向側 (A 部) のひずみ分布 (ϵ_R) は、いずれの解析モデルによる結果も実験結果と比較的よく一致している。これに対し、加力方向側の反対側 (B 部) のフーチング底面近傍では、一体モデルのひずみは大きな引張ひずみとなっており、実験結果と一致していない。境界面の分離を考慮した分離モデルでは、この部分に引張ひずみはほとんどなく、一体モデルに比べ実験結果とよく一致している。くい頭部近傍のひずみ分布 (ϵ_Z) についてみると、分離モデルの解は、一体モデルに比べ実験結果とよく一致している。

【フーチング底面および側面の円周方向ひずみ分布】

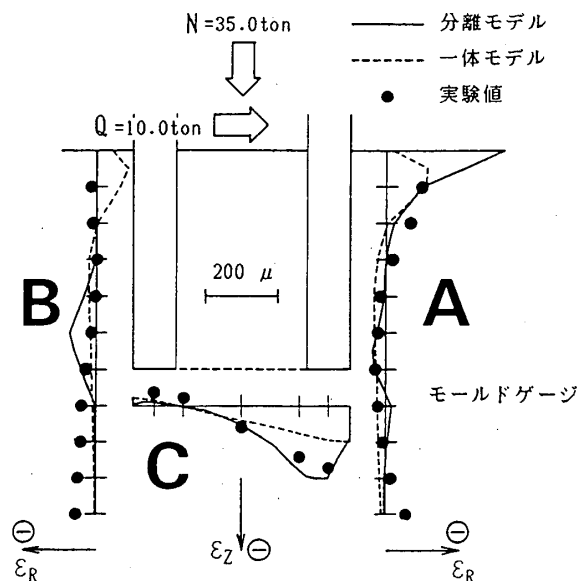


図 4-1 フーチング内のコンクリートのひずみ分布

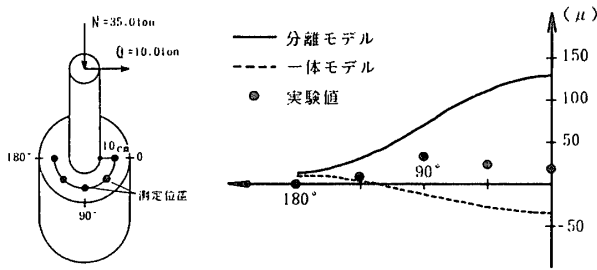


図4-2 フーチング底面の円周方向ひずみ分布

図4-2に、 $N=35.0\text{ ton}$ 、 $Q=10.0\text{ ton}$ 時の各解析モデルおよび実験結果のフーチング底面での円周方向のひずみ分布を示す。一体モデルでは、加力方向に対して $0^\circ\sim 180^\circ$ で引張および圧縮ひずみが生じているが、分離モデルでは引張ひずみだけが生じている。とくに、実験結果で引張ひずみが最大となった加力方向に対して 90° の位置において、一体モデルでは圧縮ひずみが生じているが、分離モデルではこの位置にも引張ひずみを生じており、一体モデルに比べて実験結果の傾向と対応している。

図4-3に、 $N=35.0\text{ ton}$ 、 $Q=10.0\text{ ton}$ 時の各解析モデルおよび実験結果のフーチング側面での円周方向ひずみ分布を示す。実験結果では、フーチング底面に近づくにつれ引張ひずみが増加し、加力方向側の方が反対側よりひずみの絶対値が大きくなる傾向が見られる。分離モ

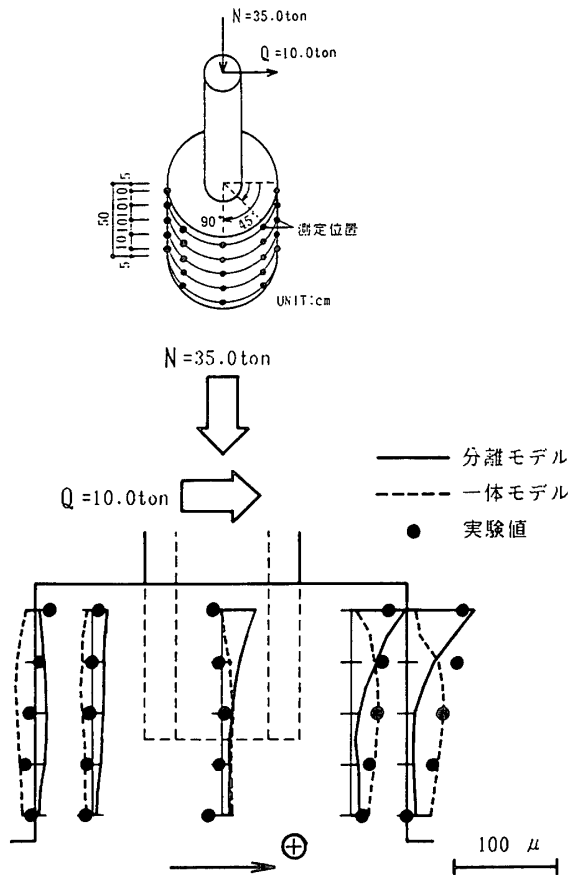


図4-3 フーチング側面の円周方向ひずみ分布

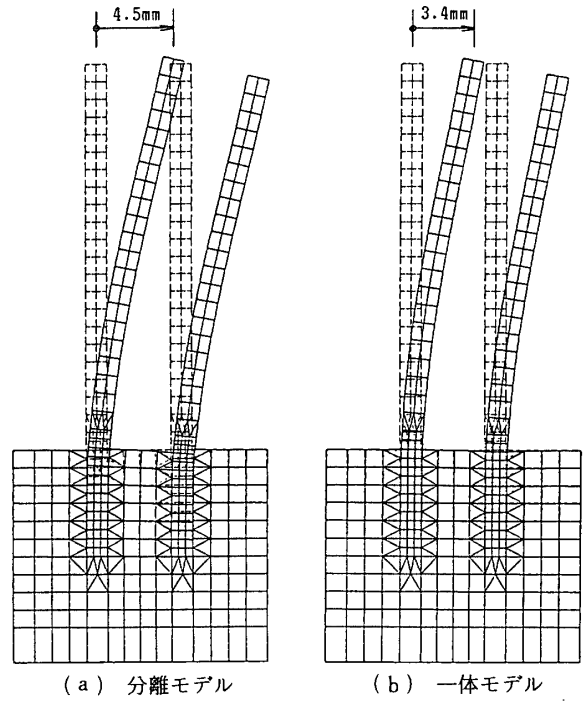


図4-4 変形図 ($N=35.0\text{ ton}$ 、 $Q=10.0\text{ ton}$ ：変形を50倍に拡大)

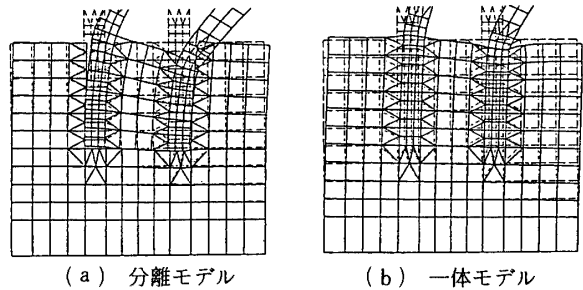


図4-5 フーチング部分変形図 ($N=35.0\text{ ton}$ 、 $Q=10.0\text{ ton}$ ：変形を250倍に拡大)

デルではこの傾向が表されているのに対し、一体モデルでは、特に加力方向側のフーチング底面近傍のひずみ分布が十分に再現されていない。

【くいとフーチングの変形状態】

図4-4 (a)、(b)に、 $N=35.0\text{ ton}$ 、 $Q=10.0\text{ ton}$ 時の各解析モデルのくいとフーチングの変形状態を示す。図4-5 (a)、(b)にフーチング部分の変形を拡大して示す。図4-4より、分離モデルの変形は、一体モデルに比べ大きな値を示している。図4-5で見ると、一体モデルでは、加力方向側のフーチング底面付近がくいによって内部に引き込まれその反対側が引き出されるような変形を示しフーチングの境界面全周で外力に抵抗する挙動を示している。これに対し、分離モデルでは、くいとフーチングの境界面に分離が生じており、フーチングの加力方向の反対側は加力方向側に比べ変形が少なく、主に加力方向側で外力に抵抗する挙動を示している。

§5. 結論

本論では、軸対称物体を対象に非軸対称現象として、

要素間の分離を考慮することができる簡便な解析法を提案した。本論に示した解析法は、接触・分離の判断を境界面上の節点の力と変位の関係のみを用いて行い、多数回行う必要がある収束計算の際の未知数を大幅に減らすことができることに特徴があり、くいとフーチング結合部に関する実験結果を比較的よく説明できていると思われる。しかし、くいとフーチングの境界面における摩擦力を考慮しておらず、また、応力集中が生じ弾性範囲を越えていると考えられる部分においても材料を弾性体と仮定しているなどの理由と思われるが、ひずみ分布等について定量的には一致していない部分もある。今後は以上の点を考慮して本解析法の改良を行うとともに、既往の実験結果をふまえ、より詳細なデータを得るために本法を用いてさらに解析を行い、くいのフーチングへの埋め込み深さ、軸力、アンカー筋の有無の影響を定量的に把握する必要があると考える。

謝 辞

本研究を進めていくにあたり終始御指導を戴いた東京工業大学教授黒正清治博士、同教授岸田英明博士に、深く感謝致します。終始適切な御助言および御協力を戴いた福井大学助教授林静雄博士、東京工業大学助手小林克巳博士、(株)日建設計構造設計主管木原碩美様に、感謝致します。実験に際しては、前田製管株式会社の御協力を戴きました。ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：1978年宮城県沖地震災害調査報告，昭和53年
- 2) 黒正清治，広沢雅也：鋼グイ研究委員会報告「鋼グイ」，土質工学会，昭和44年9月
- 3) PCくい技術委員会くい頭部接合方法小委員会：くい頭部の接合に関する実験について，プレストレストコンクリートVol.13, No.6, 昭和46年12月
- 4) 和田克哉：鋼管コンクリートくいの設計とくい頭結合部の試験，プレストレストコンクリートVol.18, No.1, 昭和51年2月
- 5) 大成建設：朝霞水路改築事業 くい頭埋め込み部耐力試験報告書，昭和53年7月
- 6) 日本住宅公団総合試験場：くい頭部の結合方法に関する開発研究，昭和53年
- 7) 黒正清治，和田 章，堀井昌博，斉藤征次，他：正負交番繰返し水平力を受けるくいと基礎の結合部に関する実験研究（その1~4），日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和56年9月，昭和59年10月
- 8) 福嶋孝之，中嶋康夫，山肩邦男，八尾真太郎，他：PCくい頭固定部の曲げ耐力性状に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和57年10月
- 9) 大和真一，高木 実：くい頭をフーチングに接合したSCくいの曲げ特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和57年10月
- 10) 山本稜威夫，太田 実，大西靖和：くい頭結合部の曲げ及び引抜き実験（その1~2），日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和57年10月

- 11) 黒正清治，和田 章，堀井昌博，斉藤征次，他：水平力を受けるくいと基礎の結合部に関する研究（その1~5），日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和58年9月，昭和59年10月
- 12) 山本稜威夫，太田 実，大西靖和：水平力と軸力を受けるくい頭結合部の終局耐力（その1~2），日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和58年9月
- 13) 杉村義広，中田慎介，川島俊一，阿部道彦：高強度プレストレストコンクリートくいの地震被害とその再現実験，日本建築学会論文報告集第340号，昭和59年6月
- 14) 大和真一，村上 浩，吉田 茂：くい頭を固定したコンクリートくいの軸力水平載荷試験による地震時の被害推定，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和59年10月
- 15) 才津敏治，阿部 功，可児幸彦：くいとフーチングの一結合方法の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和59年10月
- 16) 山本稜威夫，太田 実，大西靖和：水平力を受けるくい頭結合部の終局耐力，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和59年10月
- 17) 黒正清治，和田 章，堀井昌博，木原碩美，他：鋼製ソケットによるくい頭結合部に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和60年10月
- 18) 秋山 宏，棚橋秀光，加藤征宏，桐原英秋，他：水平力を受ける鋼管くい基礎接合部に関する実験（その1~5），日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和59年10月，昭和60年10月
- 19) 小谷俊介，吉田 茂，前原勝明，他：高強度PCくい（PHCくい）の水平載荷試験（その1~2），日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和60年10月
- 20) 山本稜威夫，太田 実：くい頭接合部に関する強度特性と破壊性状，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和60年10月
- 21) 杉村義広，藤沢正視，平出 務，平池正博，他：PHCくいのくい頭固定度と破壊耐力に関する実験的研究（その1~4），日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和60年10月

注

- 1) 軸対称有限要素法では，同心円上の線荷重（ p_0 ， p_1 ）を作用させると節点力ベクトル（ P_0 ， P_1 ）の値は，0次モードでは，

$$P_0 = \int_0^{2\pi} p_0 r d\theta = 2\pi r \cdot p_0 \quad (r: \text{同心円の半径})$$

となり，1次モードでは，

$$P_1 = \int_0^{2\pi} p_1 \cos^2 \theta r d\theta = \pi r \cdot p_1$$

となるので節点力ベクトルとして単位の値（=1）を用いて以下に式展開を行うので，0次モードの場合の線荷重の値は1/2であると考えなければならない。

- 2) 実験では $Q=10.0$ ton 時に初曲げひび割れが生じており，材料を弾性体とした解析仮定に反するようであるが，このひび割れは微小であり，載荷方式が静定なので，くいが弾性状態にあるとしてもくいからフーチングへの力の伝わり方はほとんど変わらないと考えた。また，水平力が大きいほど，くいとフーチングの結合部の分離が明確となりフーチングのひずみ分布の絶対値も大きな値となるため，実験結果と比較する上で，弾性範囲の最大値を $Q=10.0$ ton と考えて解析を行った。

SYNOPSIS

UDC : 624.155

STUDY OF THE STRESS TRANSFER MECHANISM IN THE PILE-FOOTING CONNECTION UNDER AXIAL AND LATERAL FORCES

by Dr. **AKIRA WADA**, Assoc. Prof. of Tokyo Institute of Technology, **MASAHIRO HORII**, Deputy Manager, Computer Department, Nikken Sekkei Ltd, Tokyo, **HIDEHIKO TAKE**, Architecture Design Department, Shimizu Construction Company, **MASAAKI TSUKAMOTO**, Architecture Design Department Kajima Corporation, Members of A. I. J.

Since it was disclosed that the piles and footings of some buildings in Japan were damaged by an earthquake in 1978, many studies on substructures have been made in order to establish a rational aseismic design method for substructures.

In this paper, we explain the method of an experiment and analysis made for researching the stress transfer mechanism in the pile-footing connection under axial and lateral forces, and show the effectiveness of the analytical method by comparing the results of analysis with those of the experiment.

In the analytical method shown in this paper, the pile-footing connection is modeled as an axisymmetrical structure, and is solved by using the Finite-Element-Method, considering points of contact and separation between the pile and footing in accordance with the results obtained from the experiment. We can reduce the number of unknown factors by using this method, because judgements about contact or separation conditions can be made by study just of the forces and displacements at the FEM mesh nodes on the boundary between pile and footing.