

## 剝離，滑動を考慮した杭頭結合部の応力伝達について

### A FINITE ELEMENT ANALYSIS OF STRESS DISTRIBUTION WITH DEBONDING OR SLIP IN THE CONNECTION BETWEEN PILE HEAD AND FOOTING

小堀 為雄\*・近田 康夫\*\*

By Tameo KOBORI and Yasuo CHIKATA

In this paper, it was investigated that how the friction or cohesion on the interface between pile and footing effects on the stress distribution in the connection between pile-head and footing. The connection was idealized as an axisymmetric body subjected to non-axisymmetric loading, and semi-analytical procedure with Fourier representation was adopted. For modeling the debonding or slip on the interface, an axisymmetric joint element was adopted. The results of the investigations suggest that the friction and cohesion on the interface are significant factors for preventing from stress concentration at bottom of footing or at pile-top in the connection, and the combined effects of pile-head loadings on the stress distribution in the connection should be considered in the safety check formulas.

Keywords: FEM, pile head, stress distribution, debonding or slip

#### 1. はじめに

今日の土木構造物の設計においては、上部構造および下部構造のそれぞれに関して詳細な検討が加えられ、確率論に基づく信頼性解析の手法の導入も計られつつある。この場合、構造物全体としての信頼性、いわゆる system reliability を検討しようとするれば、構造物中に存在する結合構造における応力伝達機構や挙動特性の把握はきわめて重要な課題の1つであると考えられる。

杭基礎における杭頭部とフーチングとの結合部（杭頭結合部）は、上部工から伝えられる力を杭へ円滑に伝達するうえで、構造上きわめて重要な部位であるが、その応力伝達機構や極限状態の把握においては、いまだ不明な点が多いとされている<sup>1)</sup>。

現行の道路橋示方書・下部構造編<sup>2)</sup>においては、杭頭結合部の設計に関して2つの方法が規定されており、それらの妥当性を検討する実験的研究<sup>3)</sup>が行われるとともに、極限強度や応力伝達機構の解明への努力が、これも主として実験を通して行われてきた<sup>4)</sup>。

今日の一般的見解は、過去の実績からみても、現行示方書の規定は安全側の結果をもたらすものではあるが、現場においては、その施工に際しての煩雑さが問題として提起されており、設計方法や施工方法の簡素化が模索されている<sup>4)~6)</sup>。たとえば、福井ら<sup>3),4)</sup>は、鋼管杭の杭頭処理における十字リブ付きの蓋板が、その施工において煩雑さを伴うのみならず最終耐力的にも不利となることを実験結果より示唆している。また、これを受けて、浅沼ら<sup>6)</sup>は蓋板を用いる代わりに鋼管杭内周面にリブを溶接することにより摩擦を増大させる方法を検討している。さらに、現行の示方書の応力照査方法では、杭周面とフーチングとの間の付着や摩擦の効果は考慮されていない（付着の切れた状態を想定しているのではなく、付着は保持されていてもその効果を考慮しないと解すべき）が、榎並ら<sup>7)</sup>は、従来の実験結果が指摘している杭周面とフーチングとの間の付着が杭頭結合部の応力分布に与える影響がきわめて大きいことを考慮して、膨張コンクリートの中詰めすることにより経年的な乾燥収縮による杭周面における剝離の発生を防ぎ、設計に付着の効果を検討することへの積極的な示唆を行っている。そして、これらの成果に基づき、杭周面の摩擦抵抗を設計に取り込む方法が提案されるに至っている<sup>8)</sup>。

しかしながら、このような、現行の規定の簡素化や合

\* 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科  
(〒920 金沢市小立野 2-40-20)

\*\* 正会員 工修 金沢大学助手 工学部土木建設工学科  
(同上)

理化を考える場合には、それに伴う処理方法の変更効果や安全性照査方法の妥当性を検討しなければならない。その根拠として杭頭結合部における応力分布を的確に把握することが重要であり、従来の実験のみによる方法ではこの点に関して不十分であると考えられる。

小堀ら<sup>9),10)</sup>は、杭頭結合部の応力状態の把握には、実験的な検証とともに数値計算によるパラメトリック・スタディもまた有効な手段の1つであるとの考えから、杭周面での付着が保持される場合に関して、有限要素解析を行い、軸力、杭頭埋め込み長さおよび中詰めコンクリートの中詰め長さの杭頭結合部の応力分布に対する影響を検討している。これらの数値解析結果は付着が保持される場合には、現行示方書の応力照査方法にみられるように、鉛直力（鉛直方向）と水平力およびモーメント（水平方向）の影響を個別に検討するのではなく、個々の荷重効果の複合的な影響を考えることの必要性を示唆した。しかし、地震時のような大きな荷重、特に水平力が作用する場合や極限強度を考える場合、杭周面で剝離や滑動の発生の影響をも考慮しておくことの必要性は自明と考えられる。

以上のような背景のもとで、本報告では、軸対称体としてモデル化した杭頭結合部における杭周面での剝離および滑動現象を、軸対称ジョイント (joint) 要素を用いることにより表現し、剝離の発生に伴って、付着が保持されている状態から杭周辺の応力がどのように変化するか、その際、摩擦の効果はどの程度のものであるかという点に関して、有限要素法を用いて検討するものである。

## 2. 解析手法

### (1) 半解析的手法

杭頭結合部は、形状的には軸対称体としてモデル化できるが、作用する荷重は一般に軸対称条件に従わないので、厳密には3次元解析が必要となる。しかし、計算機の容量等の関係から、若干プログラムが複雑になるものの、Fourier級数を用いた半解析的手法を採用する方が実用的である。この半解析的手法の詳細は、文献11)、12)に譲り、ここではその要点のみを示す。

円筒座標系  $(r, z, \theta)$  において、荷重および変位が  $\theta = 0$  に関して対称である場合、変位  $\mathbf{u}$  および荷重  $\mathbf{f}$  はそれぞれ次式のように Fourier 級数表示できる。

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \mathbf{N}(r, z) \left( \mathbf{u}_0 + \sum_{m=1}^M \mathbf{C}_m \mathbf{u}_m \right) \dots \dots \dots (1)$$

$$\mathbf{f} = \begin{Bmatrix} f_r \\ f_z \\ f_\theta \end{Bmatrix} = \mathbf{f}_0 + \sum_{m=1}^M \mathbf{C}_m \mathbf{f}_m \dots \dots \dots (2)$$

$$\mathbf{C}_m = \text{diag} [\cos m\theta \quad \cos m\theta \quad \sin m\theta] \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $u, v, w$  および  $f_r, f_z, f_\theta$  はそれぞれ  $\mathbf{u}$  および  $\mathbf{f}$  の  $r, z, \theta$  方向成分であり、 $\mathbf{N}(r, z)$  は形状関数マトリックス、 $\mathbf{M}$  は荷重が十分な精度で表現できる項数である。

節点  $i$  に関する、変位-ひずみマトリックスの第  $m$  次調和成分  $\mathbf{B}_i^m$  は次式のようなである。

$$\mathbf{B}_i^m = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \cos m\theta & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \cos m\theta & 0 \\ \frac{N_i}{r} \cos m\theta & 0 & \frac{mN_i}{r} \cos m\theta \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \cos m\theta & \frac{\partial N_i}{\partial r} \cos m\theta & 0 \\ -\frac{mN_i}{r} \sin m\theta & 0 & \left( \frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{N_i}{r} \right) \sin m\theta \\ 0 & -\frac{mN_i}{r} \sin m\theta & \frac{\partial N_i}{\partial z} \sin m\theta \end{bmatrix} \dots \dots \dots (4)$$

要素剛性マトリックスの部分マトリックスの一般形は、 $\mathbf{D}$  を応力-ひずみマトリックスとして、

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{ij}^{lm} &= \int_{Vol} (\mathbf{B}_i^l)^T \mathbf{D} \mathbf{B}_j^m d(Vol) \\ &= \int_0^{2\pi} \int_{s(r,z)} (\mathbf{B}_i^l)^T \mathbf{D} \mathbf{B}_j^m r dr dz d\theta \\ &(l, m=0, 1, \dots, M) \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

となるが、三角関数の直交性により、

$$\mathbf{K}_{ij}^{lm} = 0 \quad \text{for } l \neq m \dots \dots \dots (6)$$

に注意すれば、平衡方程式は調和成分ごとに分離でき、次式のように表わせる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \mathbf{K}_m & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \mathbf{K}_M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_0 \\ \vdots \\ \mathbf{u}_m \\ \vdots \\ \mathbf{u}_M \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_0 \\ \vdots \\ \mathbf{f}_m \\ \vdots \\ \mathbf{f}_M \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (7)$$

結局、調和成分ごとに分離された Fourier 係数に関する  $M+1$  組の平衡方程式を解き、式(1)、(2)と同様にして有限 Fourier 級数の合成を行うことにより3次元解を得る。なお、0次調和成分に関しては、普通の軸対称問題を解くことになる。

### (2) 杭-フーチング境界面の表現

有限要素法において、不連続面を表現する一般的な方法の1つに 'joint 要素' とよばれる特殊要素を用いる方法がある。joint 要素は、種々のものが提案されているが、Goodmanら<sup>13)</sup>が提案したものの、もしくはそれを改良したものが用いられることが多い。

本文において対象としている、非軸対称荷重下の軸対称体としてモデル化された杭頭結合部の杭-フーチング境界面を表現するためには、半解析的手法に対応した

‘軸対称 joint 要素’が必要となる。これまでに、軸対称 joint 要素は、Gaboussi ら<sup>14)</sup>、Heuze ら<sup>15)</sup>、中井ら<sup>16)</sup>、Zienkiewicz ら<sup>17)</sup>、そして小堀ら<sup>18)</sup>により提案されている。これらのうち、前3者は軸対称問題を対象としたものであり、後2者は半解析的手法への適用を意図したものである。ここでは、プログラムへの組み込みが比較的容易な小堀らの提案した joint 要素を用いることにし、その概要を以下に示す。

軸対称 joint 要素は Fig.1 に示すように、2つの回転面 1—2 および 3—4 のペアにより構成される。要素中心  $(\bar{r}, \bar{z})$  において評価した要素合成マトリックスは、部材座標系  $(\xi, \eta, \theta)$  において次式のようになる。

$$K_m = \frac{\pi \bar{r} L}{4} \begin{bmatrix} k & k & -k & -k \\ k & k & -k & -k \\ -k & -k & k & k \\ -k & -k & k & k \end{bmatrix},$$

$$k = \begin{bmatrix} k_\xi & 0 & 0 \\ 0 & k_\eta & 0 \\ 0 & 0 & k_\theta \end{bmatrix}, \quad (m \geq 1)$$

$$\bar{r} = (r_1 + r_2 + r_3 + r_4)/4 \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 $k_\xi, k_\eta, k_\theta$  はそれぞれ部材座標系における  $\xi, \eta, \theta$  軸方向の単位長さ当たりの接合剛性であり、その次元は  $[F/L^2/L]$  である。 $\bar{r}$  および  $L$  は、それぞれ回転軸  $z$  から部材座標系中心までの距離および回転断面（子午面）内における joint 要素の長さである。また、Fourier 次数  $m=0$  に対しては、式 (8) のマトリックスの係数  $\pi \bar{r} L/4$  は  $\pi \bar{r} L/2$  に置き換えられる。

2つの回転面の相対的位置関係によって、joint 要素の挙動が表現され、たとえば、Fourier 次数  $m=1$  に対する変形モードは Fig.2 のようである（ただし、荷重は  $\theta=0$  子午面に関して対称であるとする）。Fig.2 (a), (c) は滑動モードであり、Fig.2 (b) は剥離モードである。

さて、joint 要素に与える構成関係としては、要素の法線方向に圧縮応力が作用する下で、Mohr-Coulomb 型の構成関係を採用するのが一般的であり<sup>14), 19)</sup>、ここでも、Fig.3 のように与える。なお、要素の法線方向に引張り応力が生じた場合には、剥離が発生したとみなし、応力は一切伝達されないものとする。

(3) 解析手順

解析手順は以下のように要約できる<sup>20)</sup>。

後述の解析例でも示すように、作用荷重は0次、および1次の調和成分で表現することができるが、境界面における応力解放のためには、より多くの調和成分を採用する必要がある。ここでは0~ $M$  次までの調和成分を採用したものと述べる。

- 1)  $M+1$  組の、調和次数ごとに分離された Fourier 係数に関する平衡方程式を解く(反復計算の最初は、

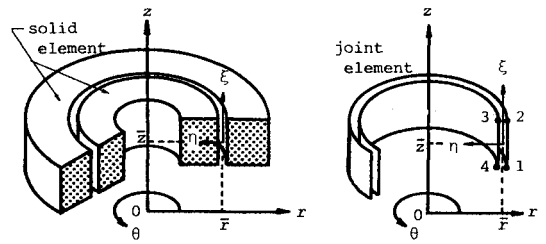


Fig.1 Axisymmetric joint element.

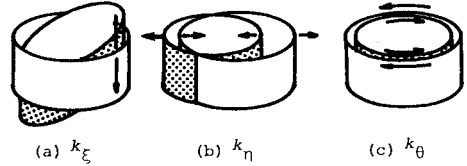


Fig.2 Schematic deformation modes of the joint element for harmonic order  $m=1$ .

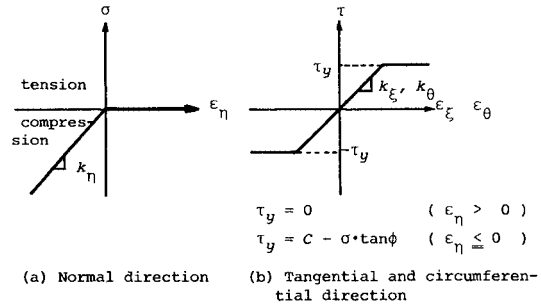


Fig.3 Constitutive relationship of the joint element.

作用荷重に対する線形計算であるので0次と1次の2組となる)。

- 2) 有限 Fourier 級数を合成し、変位、ひずみ、応力等を  $M+1$  以上の子午面 ( $0 \leq \theta \leq \pi$ ) に関して求め、前段階における値に加える。
- 3)  $M+1$  の子午面において、joint 要素に剥離あるいは滑動が生じているかどうかを調べる。もし、剥離あるいは滑動が生じている場合には、それに対応して応力を解放する。こうして、剥離あるいは滑動の発生に伴う応力解放後の joint 要素内応力の円周方向分布が得られる。
- 4) 応力を円周方向に Fourier 級数表示 (0~ $M$  次) し、応力解放に伴う不平衡力の Fourier 成分を得る。
- 5) いくつかの子午面において、次式を用いて収束判定を行う<sup>21)</sup>。

$$\|\bar{\sigma}^r / \bar{\sigma}_r\| < \epsilon \dots \dots \dots (9)$$

ここに、 $\bar{\sigma}^r, \bar{\sigma}_r$  はそれぞれ  $r$  回目の反復計算後の残差ベクトルのノルム (平均2乗ノルム)、作用荷重ベクトルのノルムであり、 $\epsilon$  は収束判定値であ

る。

6) 収束していない場合には、不平衡力を荷重として 1) へ戻り、収束するまで 1)~5) を繰り返す。

半解析的手法では、要素の物性は円周方向に一定であることを要求するので、一般の joint 要素を用いた場合のように、剝離が生じた後に要素剛性を 0 とすることはできない。なぜなら、非軸対称荷重が作用している場合、その応答もまた非軸対称となるため円周上の一部分のみで剛性を 0 とすることになるからである。したがって、ここでは、応力解放の方法として、初期剛性を変化させない応力伝達法 (stress transfer method)<sup>22)</sup> を用いることにした。

採用する Fourier 級数の項数  $M$  は、後述する解析ケース C-12 に対して、 $M=4$  (0 次~4 次) および  $M=8$  (0 次~8 次) とした計算を行った結果、両者はほぼ一致したので、 $M=4$  を採用した。

また、以下の解析においては、joint 要素のみが非線形挙動をするものとし、solid 要素は線形弾性体として取り扱っている。

### 3. 解析例

#### (1) 解析モデル

前章で述べた解析手順に従って、杭基礎の解析を行う。一般に、杭頭結合部には、軸力 (鉛直力)、軸直角方向力 (水平力) およびモーメント力が作用するが、これらの組合せにより、応力分布の傾向は大きく影響される。すなわち、杭基礎内における杭の位置の違いが、杭頭に作用する荷重条件を規定することになる。ここでは、解析対象として、文献 23) に示されている杭基礎の設計計算例を採用し、各杭列に分配される杭頭作用力をもって、解析における荷重条件 (荷重の組合せ) を与える。

解析対象とした杭基礎の概要を Fig. 4 に示す。また、各杭列の杭頭における杭頭反力を Table 1 に示す。杭列ごとに杭頭反力が求められているのは、杭基礎を 2 次元構造物として取り扱っているためである。

さて、道路橋示方書には杭頭結合方法として、方法 A、方法 B の 2 方法が規定されているが、ここでは、方法 A を採用した場合を想定した。方法 A は、杭を杭径分だけフーチング内に埋め込み、この埋め込み部をもって杭頭作用モーメントに抵抗させる方法である。

この杭頭結合部の有限要素解析モデルおよび有限要素分割を Fig. 5 に示す。図のモデルは、構造としては片持ちばりと等価であるが、片持ちばりの張り出し長さが大きい場合には解析精度の確保が難しいこと、さらに、ここでは結合部分に着目した解析が目的であることから、杭の張り出し長さを杭半径と等しくした。これに伴い、荷重の載荷は、杭先端断面に、杭頭作用モーメントに対

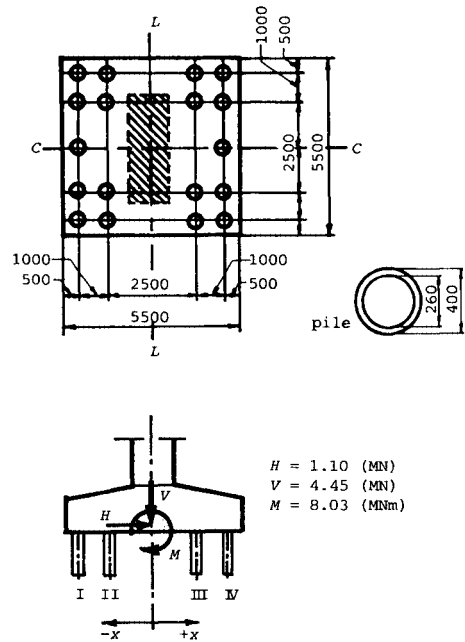


Fig. 4 Pile foundation for analysis<sup>23)</sup>.

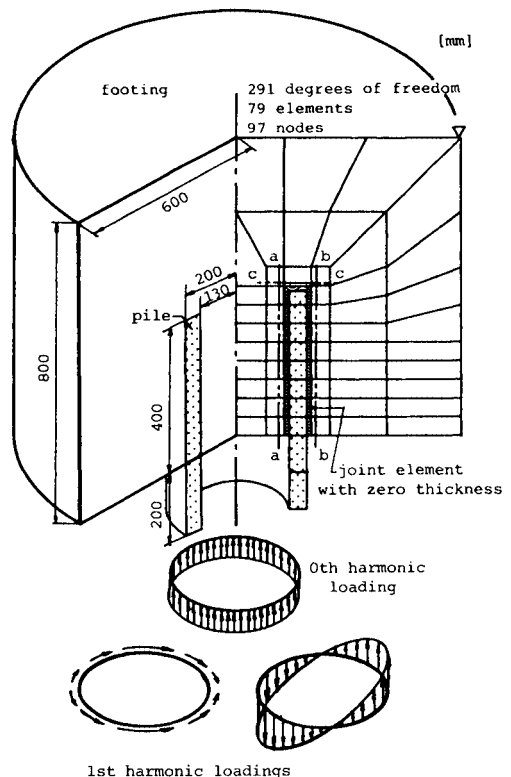


Fig. 5 Schematic model for analysis and its finite element mesh.

応した杭長の杭先端に水平力を作用させた場合に相当する断面力を作用させた。すなわち、Fig. 5 に示すように、軸力は荷重の 0 次調和成分で、水平力およびモーメントは 1 次調和成分で表現される。

解析において設定した諸物性値を Table 2 に示す。表中の joint 要素の接合剛性  $k_s, k_n, k_\theta$  の値は、文献 22) に基づき、joint 要素の要素剛性と、joint 要素に隣接する solid 要素の要素剛性がほぼ等しくなるように設定した。これを精度の面からみると、joint 要素を入れない線形解と、線形挙動のみを許した joint 要素を入れた場合の解とにおける変位の差、ここではフーチング下面の杭-フーチング境界面上の接点の変位差に着目すれば、後述の各解析ケースにおいて最大で約 15% とやや剛性が不足していることがわかった。しかし、応力分布の傾向や、剝離等の発生による応力伝達機構の変化をみるにはこの程度の精度でも十分であると判断したことに加えて、収束に要する反復計算回数等との関係から上記の値を用いることとした。接合剛性を大きくして解の精度の向上を計る場合には、プログラムにおいて、収束速度を上げるか、もしくは収束判定方法の検討をするなどの工夫が必要となるが、これに関しては別の機会に譲ることとする。

物性値以外の解析の諸条件を Table 3 に示す。表中の荷重ケース No. は、Table 1 中の最右列の杭頭反力 No. に対応している。各解析は、荷重ケースのおののに対して、杭周面の摩擦の状態、すなわち joint 要素の滑動に関する条件によりさらに 3 つの場合分けがされている。これらの 3 ケースは、以下のとおりである。

- 1)  $C=5.0 \text{ MPa}, \varphi=30^\circ$  : 杭周面の摩擦抵抗が大きく、滑動が生じない
- 2)  $C=0.0 \text{ MPa}, \varphi=0^\circ$  : 杭周面の摩擦抵抗がない
- 3)  $C=0.05 \text{ MPa}, \varphi=30^\circ$  : 1), 2) の中間

これらの条件のうち、1) に関しては、ここでの荷重条件下において結果的に滑動が生じないということである。なお、これらの粘着力  $C$  および内部摩擦角  $\varphi$  の値は、解析にあたって設定した仮定値であり、これらの値の妥当性等に関する検討は今後の課題としたい。しかし、値はともかくとして、実際の状態が 3) の条件で表現できることは想像に難くない。

Table 3 ではさらに、各荷重ケースに対して、3) の杭周面条件の下で、杭頭頂面での剝離を許す場合を考えている。これは、一般の施工において、杭頭頂部にアンカー鉄筋を設けてフーチングとの結合を補強していることから、他の解析ケースにおいては杭頭頂部での剝離をさせないのに対して、アンカー鉄筋による補強のない場合を想定したものである。

(2) 解析結果

Table 1 Reaction forces at pile head.

pile No.	V (MN)	H (MN)	M (MNm)	Loading case No.
I	$-6.27 \times 10^{-2}$	$6.08 \times 10^{-2}$	$3.63 \times 10^{-2}$	LC-1
II	$7.45 \times 10^{-2}$	$6.08 \times 10^{-2}$	$3.63 \times 10^{-2}$	LC-2
III	$4.19 \times 10^{-1}$	$6.08 \times 10^{-2}$	$3.63 \times 10^{-2}$	LC-3
IV	$5.57 \times 10^{-1}$	$6.08 \times 10^{-2}$	$3.63 \times 10^{-2}$	LC-4

Table 2 Material properties.

	Footing	Pile	Joint
E (MPa)	$3.43 \times 10^4$	$3.43 \times 10^4$	—
$\nu$ (—)	0.17	0.17	—
$k_\xi$ (MPa/m)	—	—	$7.50 \times 10^5$
$k_n$ (MPa/m)	—	—	$1.50 \times 10^6$
$k_\theta$ (MPa/m)	—	—	$7.50 \times 10^5$
C (MPa)	—	—	0.0 0.05 5.0
$\phi$ (°)	—	—	0 30

Table 3 Conditions of analyses.

case No. of analysis	strength constants of joint	debonding at pile top	loading case
C-11	$C=5.0, \varphi=30^\circ$	No	LC-1
C-12	$C=0.05, \varphi=30^\circ$	No	
C-13	$C=0.0, \varphi=0^\circ$	No	
C-14	$C=0.05, \varphi=30^\circ$	Yes	
C-21	$C=5.0, \varphi=30^\circ$	No	LC-2
C-22	$C=0.05, \varphi=30^\circ$	No	
C-23	$C=0.0, \varphi=0^\circ$	No	
C-24	$C=0.05, \varphi=30^\circ$	Yes	
C-31	$C=5.0, \varphi=30^\circ$	No	LC-3
C-32	$C=0.05, \varphi=30^\circ$	No	
C-33	$C=0.0, \varphi=0^\circ$	No	
C-34	$C=0.05, \varphi=30^\circ$	Yes	
C-41	$C=5.0, \varphi=30^\circ$	No	LC-4
C-42	$C=0.05, \varphi=30^\circ$	No	
C-43	$C=0.0, \varphi=0^\circ$	No	
C-44	$C=0.05, \varphi=30^\circ$	Yes	

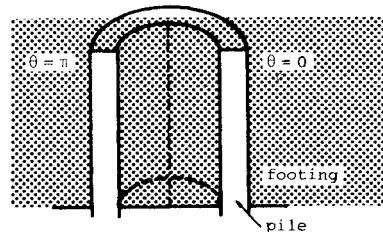


Fig. 6 Planes for draw stress distribution profiles.

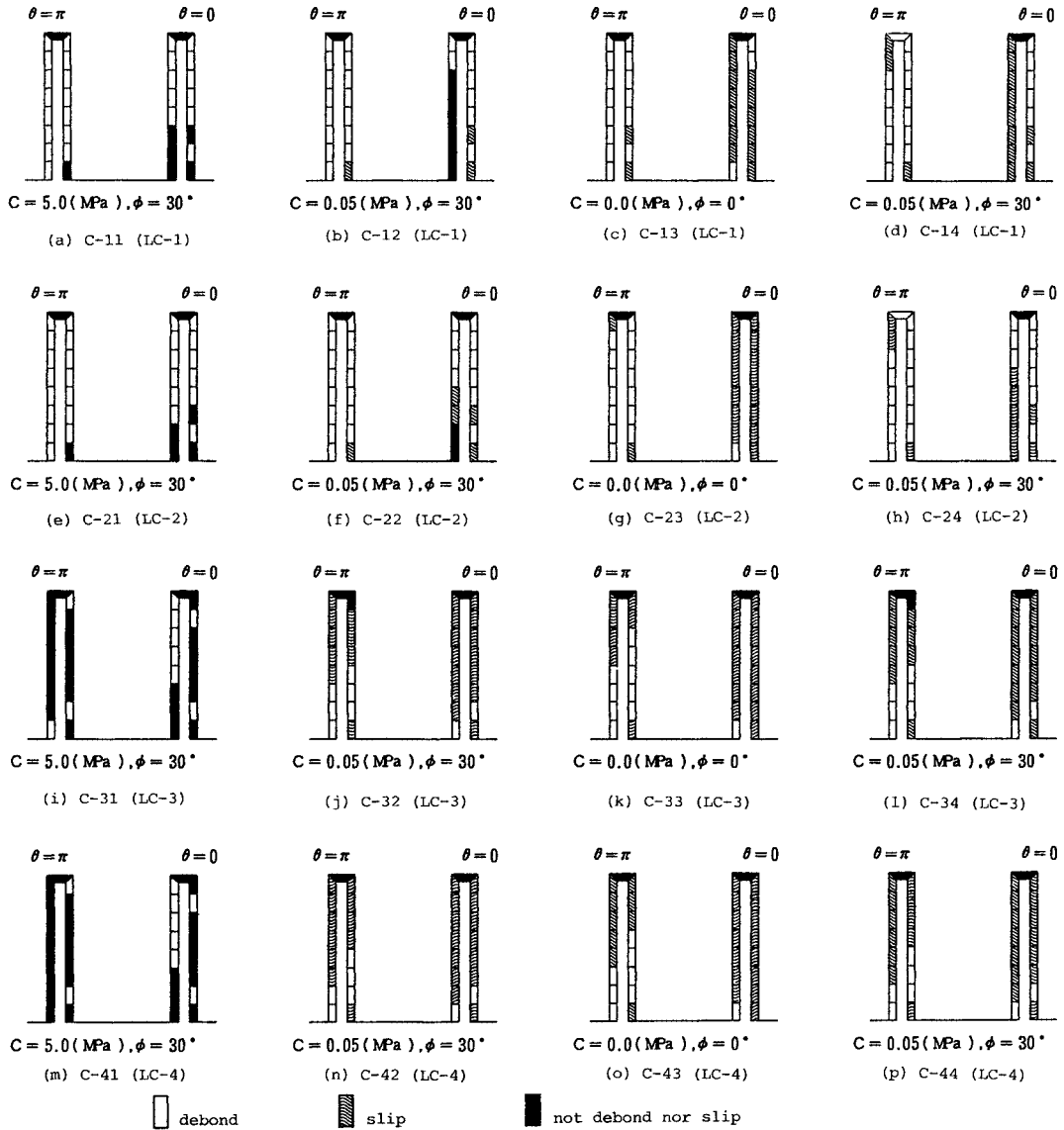


Fig. 7 Debonding or slipped joint elements in each case.

Fig. 6 に解析結果の応力分布を表示する部位の説明図を示す。応力値は、Gauss 積分点で評価していることから、joint 要素に隣接する solid 要素の、杭-フーチング境界面に近い Gauss 積分点を通る線分を座標軸として、応力分布を表示する。すなわち、Fig. 5 における杭外周面、杭内周面および杭頭頂面近傍の a-a、b-b、および c-c を軸線とする。また、応力値は、 $\theta=0$ 、 $\theta=\pi$  子午面に関して、軸線 a-a および b-b 上に  $\sigma_r$  を、c-c 上に  $\sigma_z$  を示し、これらがそれぞれ、杭の内、外周面および杭上面のフーチングコンクリート支圧応力を表わすことになる。

解析結果を Fig. 7 (a)~(p) および、Fig. 8 (a)~(p)

に示す。Fig. 7 (a)~(p) の各図には、joint 要素ごとの剥離、滑動の発生状況を、また Fig. 8 (a)~(p) の各図には、フーチングコンクリートの支圧応力分布を示す。Fig. 7 (a)~(p) の各図は、Fig. 8 (a)~(p) にそれぞれ対応している。(a)~(p) の各図には、Table 3 の解析ケース No. が付されている。また、Fig. 8 の各図には、比較のために、joint 要素を用いない線形解析の結果を破線で示している。なお、荷重ケース No. LC-3 および LC-4 の下では、比較的大きな軸力が作用しているため、杭上面に引張り応力が生じないことから、結果的に、杭頭頂面での剥離を許すか否かの条件設定は無意味となり、(j) と (l) および (n) と (p) の各図は同一の結果

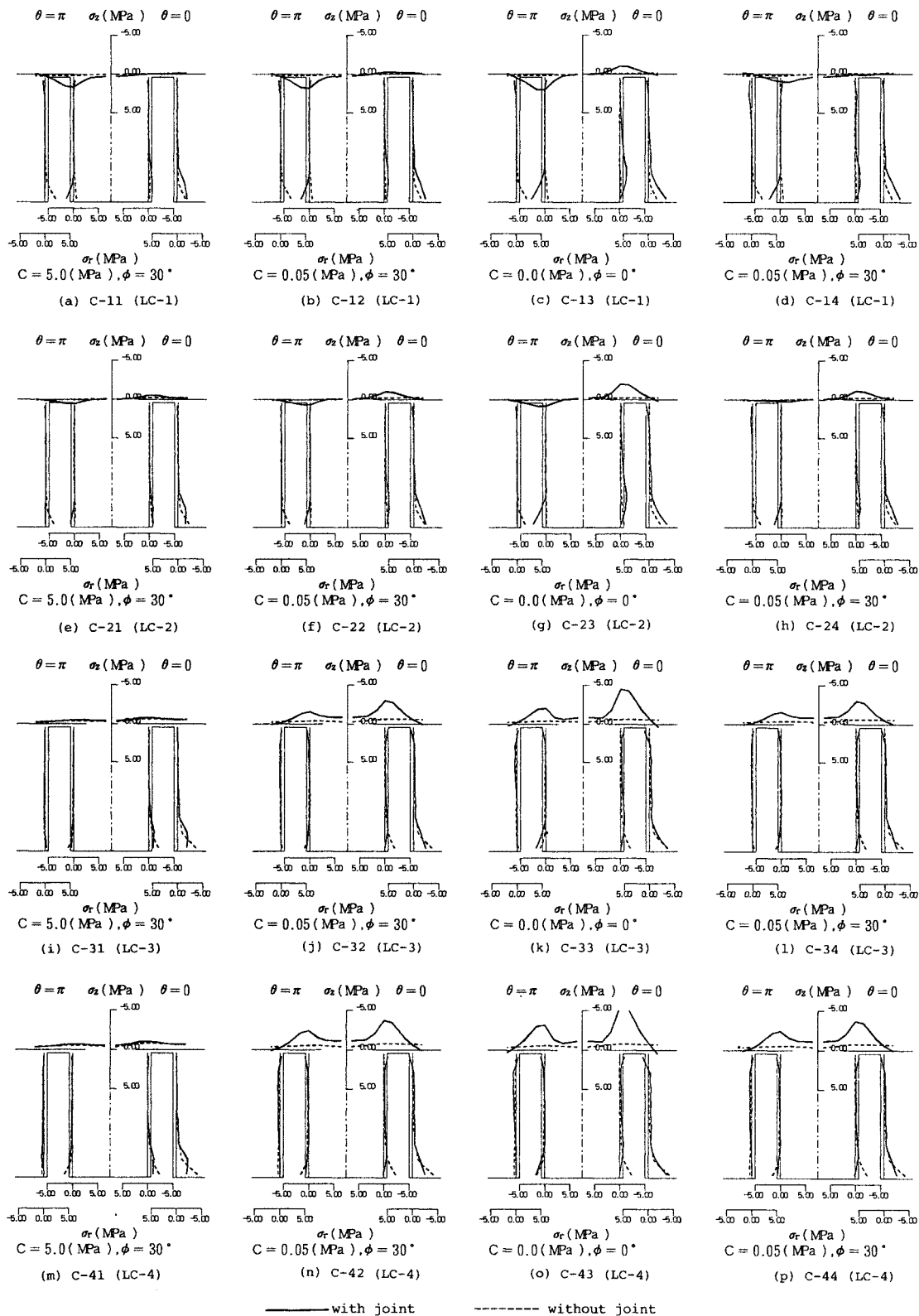


Fig. 8 Normal stress distribution profiles in footing concrete near the pile-footing interface.

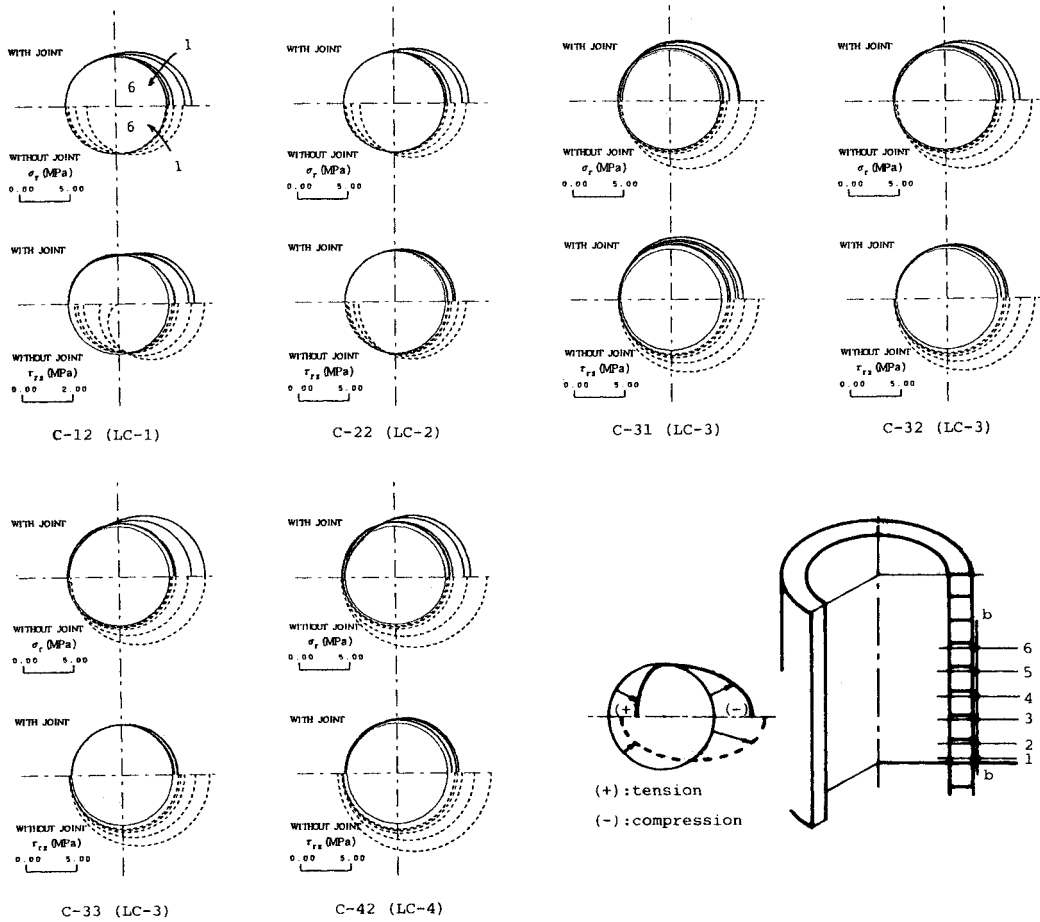


Fig. 9 Circumferential distribution profiles of normal and shear stress in footing concrete near the pile-footing interface.

を示している。(a)~(c), (e)~(g), (i)~(k) および (m)~(o) の各図では、右の方の図ほど杭周面の摩擦抵抗は少ない。また、4行、4列に並んだ図の、各行が、上から荷重ケース LC-1, LC-2, LC-3 および LC-4 に対応している。

また、Fig. 9 には、b-b 断面上のいくつかの点における  $\sigma_r$  および  $\tau_{rz}$  の円周方向分布を示している。Fig. 9 において、C-12, C-22, C-32 および C-42 をそれぞれ比較すれば軸力の影響が、一方、C-31, C-32 および C-33 をそれぞれ比較すれば杭周面の摩擦抵抗の影響が読み取れる。

Fig. 9 に対する考察は、ほとんど Figs. 7, 8 に対する考察と重複するので、以下では、Figs. 7, 8 に対する考察を述べる。以下の考察において、適宜 Fig. 8 中の図と対応する Fig. 9 の図を参照すれば、剥離、滑動の発生に伴う応力伝達機構の変化に対する理解の一助となろう。

さて、Fig. 8 の各図をみると、まず、 $\theta = \pi$  子午面の

杭周面において、剥離の発生しない場合に伝達されていた引張り応力 ( $\sigma_r$ ) が、剥離の発生によって伝達されなくなった様子が読み取れる。このことは、Fig. 7 の対応する各図の剥離の発生状況とも一致している。さらに、杭周面における摩擦抵抗が小さいほど、 $\theta = \pi$  子午面における剥離の発生に伴い、杭頭頂面（杭上面）のフーチングコンクリートの支圧応力 ( $\sigma_z$ ) が増加し、応力伝達が杭周面から、杭上面に移行する様子が読み取れる。

第 1 列の各図 ((a), (e), (i) および (m)) では、杭周面の摩擦抵抗が十分に大きく、滑動が生じないことから、圧縮側杭周面 ( $\theta = 0$  子午面) のフーチング下面近傍において、フーチングの巻き込み現象が読み取れ、joint 要素を用いない場合の解のように応力分布が三角形分布を呈することなく、平坦な分布となって、応力集中がいくぶん緩和されている。このフーチングの巻き込み現象は、黒正ら<sup>24)</sup>の実験においても認められている。

杭周面における摩擦抵抗が小さくなるほど、杭周面で



の応力伝達能力も小さくなることから、応力伝達の杭周面から杭上面への移行は顕著となるが、杭周面の摩擦抵抗が大きい場合にも、引き抜き力（軸方向）やごく小さな軸力の作用下（(a) および (e) 図）では  $\theta = \pi$  子午面における杭上部の引張り応力（ $\sigma_z$ ）は急増している。すなわち、joint 要素を用いない場合の解で杭上部に引張り応力が生じない程度の大きさの軸力が作用しているか否かが、杭周面の摩擦抵抗の大小とともに、剥離発生による応力伝達機構の変化に影響することがわかる。

また、杭周面の摩擦抵抗が小さく、かつ作用する軸力も小さい場合には、圧縮側杭周面（(b), (c), (f) および (g) 図）の  $\theta = 0$  子午面のフーチング下面近傍の支圧応力（ $\sigma_r$ ）が、剥離の発生によって joint 要素を用いない場合の解を上回っている。

以上のことから、杭周面において剥離が発生した場合には、応力伝達は、圧縮側杭周面下方と引張り側杭頭頂面を通して行われることになり、変則的なテコ支持機構を呈するといえる。また、杭周面の摩擦抵抗が小さく、したがって滑動が発生する場合には、この傾向が一層顕著になる。

次に、アンカー鉄筋による杭頭頂部の補強の効果を、杭頭頂面での剥離の有無によって間接的に検討してみる（(d), (h) 図）。(b) と (d) および (f) と (h) の各図の比較により、杭頭頂面での剥離の発生により、引張り側杭上面（ $\theta = \pi$  子午面）の引張り応力は減少し、圧縮側杭周面の下方の圧縮応力は増加する。ここで、 $\theta = \pi$  子午面における杭上部の引張り応力（ $\sigma_z$ ）が残っているのは、杭周面の摩擦効果の影響と考えられる。さらに、わずかではあるが、引張り側杭外周面上方での支圧応力（ $\sigma_r$ ）が増加し、テコ支持機構を示している。しかし、引張り側杭上部の  $\sigma_z$  の減少量をみれば、杭周面の摩擦による応力伝達の方が卓越していると考えられる。

杭周面の水平方向（ $r$  方向）応力（ $=\sigma_r$ ）分布に対する軸力（ $z$  方向）の影響はかなり大きく、軸力が増加するほど、応力分布が圧縮側へシフトしている。また、杭上部の鉛直方向（ $z$  方向）応力（ $=\sigma_z$ ）分布に対する水平力とモーメントの影響も、特に、軸力が小さい場合には無視できない。これらのことは、線形解においても同様である。結局、杭周面および杭上面の支圧応力への作用荷重の影響は、荷重の作用方向のみから考える。すなわち、杭周面に対しては水平力とモーメント、杭上面に関しては軸力の効果のみを考慮するのではなく、これらの複合効果を考慮すべきであることを示唆していると解釈できる。

#### 4. 結 言

杭-フーチング間における剥離および滑動を考慮した

有限要素解析により、杭頭結合部の応力伝達機構の解明を試みた。得られた結果を要約すれば以下のものである。

(1) 杭周面において剥離が生じた場合、応力の伝達は、圧縮側の杭周面と引張り側杭頭頂部が担うことになる。特に、杭頭頂面では、剥離の発生後にはフーチング支圧応力が著しく増加し、杭頭頂部におけるアンカー鉄筋補強の妥当性が数値解析においても確認できたといえる。

(2) 剥離発生後の圧縮側杭周面においては、杭周面の摩擦状態により、応力分布がかなり影響される。すなわち、摩擦抵抗が大きいほどフーチング下面での巻き込みによるフーチング支圧応力の平坦化が著しくなる。また、これにより、杭頭頂部の分担も軽減される。このことは、福井ら<sup>8)</sup>が提案している、杭周面における摩擦抵抗を考慮した設計方法の効果を示しているといえよう。

(3) しかし、剥離や滑動が発生した場合にも、発生していない場合<sup>10)</sup>と同様に杭周面のフーチング支圧応力への軸力の影響は顕著であり、また、杭頭頂部においても水平力やモーメントの影響は大きい。

現行の示方書における杭頭結合部の応力照査方法では、杭とフーチングの間の付着、摩擦を考慮しておらず、軸力に対しては杭上面の支圧で、水平力およびモーメントに対しては杭周面の支圧で抵抗すると仮定している。しかし、本解析結果からは、付着が保たれる場合（線形解）や杭周面の摩擦抵抗が大きい場合には、軸力が杭周面の支圧応力分布に、また水平力およびモーメントが杭上面の支圧応力分布に大きく影響することが示された。さらに、剥離が生じた場合にはこの傾向がより顕著になること、また杭周面の摩擦状態がこの複合的な応力伝達の重要な因子であることも示された。以上の結果からは、杭頭結合部の応力照査において、応力分布の仮定に、杭頭に作用する軸力、水平力およびモーメントの複合効果を、考慮すべきであることを示唆しているといえよう。

しかし、ここでの結果を応力照査方法に取り込むためには、より実際に近いモデルを用いての検討、たとえば、本研究では、杭頭頂部における剥離の有無で間接的にしか考慮しなかった鉄筋補強の効果の、鉄筋要素を用いての検討や、杭やフーチングの破壊も含めた挙動の解明などが、実験的検証とともに望まれる。

最後に、本研究の一部は、文部省科学研究補助金（奨励研究 A）によるものであること、また、数値計算は、金沢大学計算機センター設置の FACOM M-360 を使用したことを付記する。

#### 参 考 文 献

- 1) たとえば、駒田敬一・足立義雄・亀田勝信：くい頭部の応力伝達について、土木学会第 28 回年次学術講演会講演概要集、Ⅲ-99, pp.199~200, 1973.

- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ 下部構造編，pp. 308～315，丸善，1980。
- 3) たとえば，駒田敬一・足立義雄：くい頭部とフーチング結合部の試験について，昭和48年建設省技術研究会報文。
- 4) 福井次郎・塩井幸武・清水洋司：くい頭部の耐力に関する模型実験，土木学会第36回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-307，pp. 612～613，1981。
- 5) 福井次郎・浅沼秀弥・山本洋司：水平力に対するくい頭結合部の耐力に関する模型実験，土木学会第37回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-309，pp. 617～618，1982。
- 6) 浅沼秀弥・山本洋司・吉田 直：リブで補強した杭頭コンクリートの押し抜き実験，土木学会第38回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-313，pp. 625～626，1983。
- 7) 榎並 昭ほか：鋼管杭頭部の支圧及び付着に関する研究（その1～その6），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 2021～2032，1980。
- 8) 大志万和也・福井次郎：新しい鋼管杭の杭頭結合方法，土木技術資料，27-1，pp. 33～39，1985。
- 9) 小堀為雄・近田康夫：有限要素法による杭頭結合部の応力解析（中詰めコンクリートの影響について），土木学会中部支部研究発表会講演概要集，Ⅰ-10，pp. 20～21，1984。
- 10) 小堀為雄・近田康夫：杭基礎の杭頭結合部における応力分布について，土木学会論文集，No. 356(1-3)，pp. 295～301，1985。
- 11) Wilson, E. L. : Structural Analysis of Axi-Symmetric Solids, J. A. I. A. A., Vol. 3, pp. 2269～2274, 1965.
- 12) Zienkiewicz, O. C. 著，吉識・山田監訳：マトリックス有限要素法（3訂版），pp. 371～390，培風館，1984。
- 13) Goodman, E. L., Taylor, R. L. and Brekke, T. L. : A Model for Mechanics of Joint Rock, Proc. of ASCE, Vol. 94, SM 3, pp. 637～695, 1968.
- 14) Ghaboussi, J., Wilson, E. L. and Isenberg, J. : Finite Element for Rock Joints and Interfaces, Proc. of ASCE, Vol. 99, SM 10, pp. 833～849, 1973.
- 15) Heuze, F. E. and Barbour, T. G. : New Models for Rock Joints and Interfaces, Proc. of ASCE, Vol. 108, GT 5, pp. 757～776, 1982.
- 16) 佐々木松典・中井照夫：周面摩擦を考慮した杭の支持力問題の有限要素解析，土木学会第37回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-245，pp. 757～758，1982。
- 17) Winnicki, L. A. and Zienkiewicz, O. C. : Plastic or Visco-Plastic Behaviour of Axisymmetric Bodies Subjected to Non-Symmetric Loading—Semi-Analytical Finite Element Solution—, Int. Jour. for Numerical Method in Engineering, Vol. 14, pp. 1399～1412, 1979.
- 18) 小堀為雄・近田康夫：非軸対称荷重を受ける軸対称体の有限要素解析における不連続面の取り扱いについて，構造工学論文集，Vol. 31-A, pp. 245～250，1985。
- 19) 土岐憲三・佐藤忠信・三浦房紀：強震時における地盤と構造物の間の剥離と滑動，土木学会論文集，No. 302, pp. 31～41，1980。
- 20) Kobori, T. and Chikata, Y. : An Axisymmetric Joint Element under Non-axisymmetric Loading in Semi-analytical Finite Element Method, Proc. of JSCE, No. 368(1-5), pp. 32～39, 1986. 4.
- 21) Owen, D. R. J. and Hinton, E. : Finite Elements in Plasticity -theory and practice-, pp. 157～269, Pineridge Press, 1973.
- 22) Zienkiewicz, O. C., Valliapan, S. and King, P. : Stress Analysis of Rock as A 'No Tension' Material, Geotechnique, Vol. 18, pp. 56～66, 1968.
- 23) 浅間達雄ほか：くいおよびケーソン基礎の設計計算例，pp. 40～54，山海堂，1982。
- 24) 黒正清治ほか：水平力を受ける杭と基礎の結合部に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 2731～2738，1983。

(1986. 3. 22・受付)