

# 杭頭結合部の安全性評価方法に関する一考察

## A CONSIDERATION ON THE SAFETY CRITERIA AT PILE-HEAD JOINT

近田康夫\*・小堀為雄\*\*

By Yasuo CHIKATA and Tameo KOBORI

In this paper, the stress transfer mechanism at the pile head joint was studied by FEM. And the stress distribution modeled for safety check was also investigated. In the numerical analyses, debonding and slip on the interface between pile and footing were considered. And also, the effects of the interface friction, the axial load and the embedded concrete depth into pile on the stress transfer were investigated. Based on the results of the analyses, some proposals about the stress evaluation for safety check were made.

*Keywords* : pile-head joint, safety criteria, FEM

### 1. はじめに

構造物を構成する個々の要素をつなぐ結合部は、構造物の安全性を検討するうえできわめて重要な部位である。著者らは、これらの結合部の中で、特に、上部構造物と基礎構造物の結合部である杭頭部とフーチングとの結合部（以下杭頭結合部）に着目し、有限要素法を用いて、応力伝達機構等に関して解析を行ってきた<sup>1),2)</sup>。本論文は、これの結果を踏まえながら杭頭結合部の安全性評価方法について論ずるものである。

杭基礎における、杭頭結合部の設計、施工に関しては、駒田ら<sup>3)</sup>の研究をはじめとして多くの実験的な研究が行われてきた。それらの研究では、現行の示方書<sup>4)</sup>に規定されている設計方法の安全性の検討に重点が置かれている。また、杭頭結合部における応力伝達機構の解明を目的とした研究も行われている<sup>5)</sup>。これらの研究では、杭頭結合部の耐荷力に影響する因子として、杭周面の付着・摩擦、軸力の作用等が指摘されており、その成果の一部が杭基礎設計便覧において提案されている新しい設計方法に結実したといえる<sup>6)</sup>。この新しい杭頭結合部の

設計方法は、従来無視されていた杭とフーチングとの間の摩擦を考慮している点でより合理的なものとなったといえる。

一方、著者らは、杭頭結合部の応力伝達機構を把握し、かつその伝達機構を特徴づけるパラメーターを特定してより合理的な設計方法を確立する作業には、実験的研究とともに、数値計算によるパラメトリックスタディーが有効な手段の1つであるとの観点から、有限要素法を用いての解析を試みている<sup>1),2)</sup>。それらの結果からは、杭とフーチングとの間で剥離、滑動が生ずる場合には、その応力伝達機構が、剥離、滑動の発生する前と大きく異なり、杭周面の摩擦の大小が重要な因子となること、さらに、杭軸方向力、杭軸直角方向力の複合効果を考慮すべきであることが指摘されている。これらの中で、前者は実験により確かめられているが細かなメカニズムまでは解明されていない。また、後者に関しては、現行の示方書、さらには杭基礎設計便覧に示されている新設計方法の中でもほとんど検討されていない。

以上のような背景の下で、本研究では、有限要素法を用いて杭頭結合部の応力伝達機構を解析し、前の論文<sup>2)</sup>においてPC杭（Aタイプ結合方法）に関して杭周面での剥離、滑動の発生による応力伝達機構の変化のメカニズムの解明を試みたのを受けて、鋼管杭（Aタイプ）

\* 工修 金沢大学助手 工学部土木建設工学科  
(〒920 金沢市小立野 2-40-20)

\*\* 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (同上)

に関して、応力伝達に関する重要な因子であると考えられている杭周面摩擦、軸力、中詰めコンクリート深さの各因子の影響を検討する。これらの解析結果から、結合方法Aの応力伝達機構に関して考察する。

さらに、有限要素解析結果に基づいて、杭頭結合部の安全性評価方法に関して考察し、現行の示方書あるいは杭基礎設計便覧において応力照査に用いられている応力分布の仮定に検討を加え、若干の改良を提案するものである。

なお、杭頭結合部の設計方法としては、A, Bの2つの方法があるが<sup>4)</sup>、応力伝達機構が大きく異なるので、ここでは、方法Aのみを対象とする。

## 2. 杭頭結合部の有限要素解析

### (1) 解析手法

杭頭結合部は形状的には軸対称体としてモデル化することができるが、荷重条件は一般的に軸対称条件を満足しないので、厳密には、三次元解析が必要となる。しかし、データ作成の煩雑さや計算機容量の制約などから、プログラムは多少複雑になるものの、フーリエ級数を利用した“半解析的手法”<sup>7)</sup>が用いられることが多い。ここでも、この半解析的手法を採用する。

半解析的手法では、平衡方程式はフーリエ級数の直交性により、フーリエ調和次数ごとに分離され、結局、問題は、フーリエ次数ごとのフーリエ振幅に関する連立1次方程式を解くことに帰着する。また、有限要素分割は、一子午面（回転断面）に関してのみ行えばよいことになる。手法の詳細に関しては、文献<sup>7), 8)</sup>に譲ることとする。

作用荷重は後述するように、0次と1次の2調和成分で表現できるが、境界面での応力解放後の応力分布を表現する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、予備計算による検討の結果から0~4次の5調和成分を採用している。なお、以上の計算過程においては、杭-フーチング境界面での剥離、滑動の発生による応力伝達機構の変化に着目するため、ジョイント要素のみが非線形挙動をするものとし、ソリッド要素は線形弾性体として取り扱っている。

さらに、半解析的手法では、要素の物性値は円周方向に一定であることを要求されているので、一般のジョイント要素を用いた解析のように、剥離あるいは滑動の発生に対応して、ジョイント要素の接合剛性を減少させることはできない。なぜならば、円周上の一部分のみの剛性を変化させ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>9)</sup>）を用いることとした。

今回、鋼管杭に関する解析を行うにあたり、後述する

ように、より実際に近い挙動を表現できるように新しいジョイント要素を採用したので、PC杭に関して、この新しいジョイントモデルを用いて再解析し、PC杭、鋼管杭双方の杭頭結合方法Aにおける応力伝達機構の共通点、相違点を検討することにした。

解析対象モデルの一例をFig.1に示す。Fig.1は杭基礎設計便覧におけるPC杭基礎の杭頭結合部設計方法に基づいたものである。Fig.1に示す杭頭結合部は、結合方法Aとよばれるもので、杭を杭径だけフーチング内に埋め込み、これをもってモーメントに抵抗させる方法である。この方法と現行道路橋示方書との相違は、杭内の中詰めコンクリートの深さが杭径の1/2だけ大きく設定されていることである。鋼管杭に関しても同様のモデル図となる。杭、フーチングなどに与える諸物性値、荷重条件などの解析条件はTable 1, Table 2に示すとおりである。Table 2に示す作用荷重は、Fig.1中に示

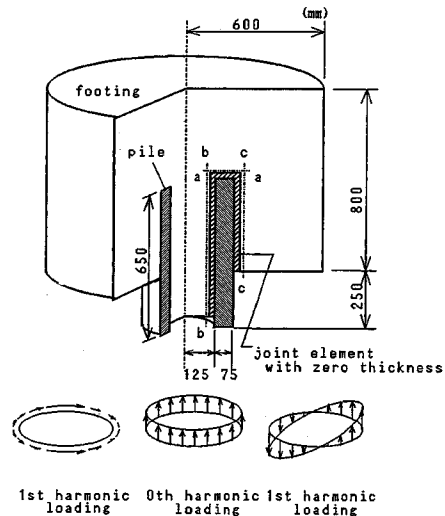


Fig.1 Pile head joint model for FEM analyses.

Table 1 Properties for finite element analyses.

	Footing	Pile*	Joint
$E_c$ (MPa)	$3.43 \times 10^4$	$3.43 \times 10^4$	—
$\nu_c$ (-)	0.17	0.17	—
$E_p$ (MPa)	—	$2.06 \times 10^5$	—
$\nu_p$ (-)	—	0.30	—
$k_s$ (MPa/m)	—	—	$7.5 \times 10^5$
$k_n$ (MPa/m)	—	—	$1.5 \times 10^5$
$k_\theta$ (MPa/m)	—	—	$7.5 \times 10^5$
C (MPa)	—	—	0.0
$\phi$ (°)	—	—	30

\*  $E_c, \nu_c$ : PC pile,  $E_p, \nu_p$ : Steel pile

Table 2 Loading condition.

Loading Case	H (MN)	V (MN)	M (MN·m)
LC-1C	$1.10 \times 10^{-1}$	$1.26 \times 10^{-2}$	$8.00 \times 10^{-2}$
LC-2C	$1.10 \times 10^{-1}$	0.00	$8.00 \times 10^{-2}$
LC-1S	$2.50 \times 10^{-2}$	$2.27 \times 10^{-1}$	$4.00 \times 10^{-2}$
LC-2S	$2.50 \times 10^{-2}$	0.00	$4.00 \times 10^{-2}$

LC-1C, 2C: for PC pile, LC-1S, 2S: for Steel pile

すように、軸力  $V$  は 0 次、水平力  $H$  およびモーメント  $M$  は 1 次の調和成分で表現される。

また、Fig. 1 や Table 1 に示すように、ここでは、杭頭とフーチングの境界面における剝離、滑動を表現するために、軸対称ジョイント要素を用いている。前論文<sup>2)</sup>では、子午面内での回転を考慮しないジョイント要素<sup>10)</sup>を採用したが、その後、より実際に近い挙動を表現できる回転を考慮したモデルを開発したので<sup>11)</sup>、これを用いることにした。この軸対称ジョイント要素は、Fig. 2 に示すように、4 節点より構成される。荷重が  $\theta=0$  子午面に対称であるとき、その変形モードをフーリエ次数  $m=1$  に対して図示すれば、Fig. 3 (a)~(d) のようである。Fig. 3 (c) は剝離モード、(a), (d) は滑動モードである。さらに、ここでは、ジョイント要素の子午面内での回転を考慮しており、その変形モードが、Fig. 3 (b) である。ジョイント要素の復元力特性としては、一般に行われるように<sup>12)</sup>、Fig. 4 に示すジョイント面垂直方向（剝離方向= $\eta$  方向）には引張り強度を有せず、圧縮応力下では線形挙動を示すものとする。また、ジョイント面に平行な方向（滑動方向= $\xi, \theta$  方向）には Mohr-Coulomb 型の降伏条件に従うものとする。なお、

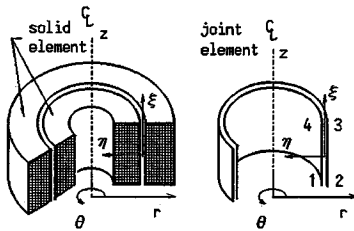


Fig. 2 Axisymmetric joint element.

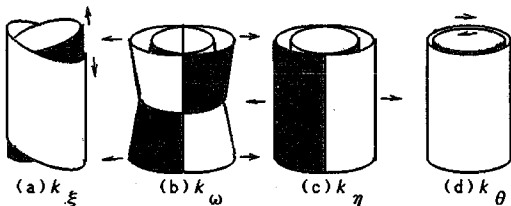
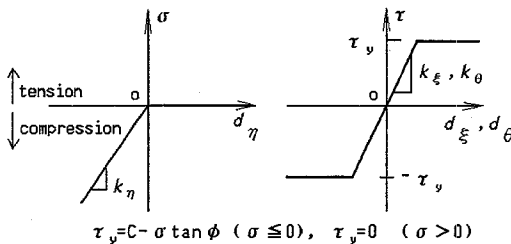


Fig. 3 Schematic deformation modes of axisymmetric joint element for Fourier order  $m=1$ .



$$\tau_y = C - \sigma \tan \phi \quad (\sigma \leq 0), \quad \tau_y = 0 \quad (\sigma > 0)$$

Fig. 4 Constitutive relationship of joint element.

剝離が生じた場合には、一切の力を伝達しないことにする。ただし、Fig. 4 中の  $C$  および  $\phi$  はそれぞれ粘着力および内部摩擦角である。

(2) 既存の実験結果に基づく検討

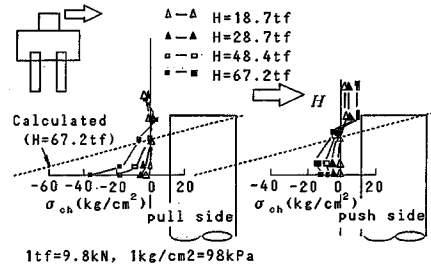
有限要素解析結果を検討する前に、既存の実験結果の中で、杭周辺のフーチングコンクリート内の応力分布が示されているものの例を取り上げ、その特徴を確認しておく。

Fig. 5 (a)<sup>13)</sup> は、実験ピットに設置した 4 本組杭模型に水平荷重を載荷した場合のフーチングコンクリート内の応力分布である。押し込み側は、有限要素解析では軸力が作用する荷重ケース (Table 2 の LC-1C, LC-1S)、引き抜き側は、軸力の作用しない荷重ケース (LC-2C, LC-2S) にそれぞれ対応する。応力分布の傾向は、水平支圧応力がフーチング下面近傍に集中し、そこで最大となること、押し込み側杭には、フーチング下面近傍で支圧応力の減少がみられることがわかる。

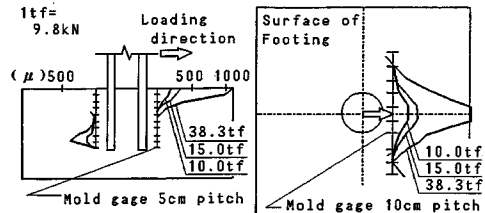
文献 14) にはコンクリートベースに杭を 1 本埋め込んだ模型による水平載荷実験の結果が、Fig. 5 (b), (c) のように示されている。(b) 図から、埋め込み部の回転中心は、ほぼ埋め込み部の中心となることが応力値の符号の反転位置よりわかる。また、(c) 図から杭によるフーチングコンクリートの支圧が一様ではなく、円周方向に減少する分布であることがわかる。

(3) 有限要素解析結果

Table 2 に示す荷重条件に対して、解析を行った結果の PC 杭に関するものの一部を Fig. 6 および Fig. 7 に示



(a) Horizontal stress in footing concrete<sup>13)</sup>



(b) Horizontal strain in footing concrete<sup>14)</sup> (c) Strain on the surface of footing<sup>14)</sup>

Fig. 5 Stress distribution at pile head (Experimental result).

す。これらの応力分布は、0次から4次までの5つのフーリエ成分で表現されている。Fig. 6 (a) には境界面近傍の水平支圧応力分布をジョイント要素を用いない線形解とともに示している。応力値は、後に示す Fig. 8 中の説明図のように、フーチングコンクリート内の、境界面に近いガウス積分点での値をプロットしている。

水平支圧応力は、フーチング下面に近い部分では、三角形分布をするが、杭頭頂部近傍ではほとんど応力は生じていない。これは、杭の埋め込み端部が三次元的な凹形状をしているため、杭の上面や側面 ( $\theta = \pi/2, 3\pi/2$  子午面) に回り込んだ形で支持されていると考えられる。また、5断面の応力の円周方向の分布を示した Fig. 6 (b) をみれば、Fig. 6 (a) と併せて、三次元的な応力の分布の様子がわかる。さらに、Fig. 7 から明らかなように、それぞれの応力成分の  $\theta$  方向の分布は、1次または2次の三角関数分布に近似できる。すなわち、この計算結果から、杭頭結合部の応力照査に用いる応力分布の仮定に

おける応力値  $\sigma_{ch}(=\sigma_r)$ ,  $\sigma_{co}(=\sigma_z)$ , が近似的には杭周方向 (円周方向) に余弦 (cosine) 分布することがわかる。また、円周方向の応力成分 ( $\sigma_\theta$ ) やせん断方向の応力成分についてもそれぞれ、 $\sigma_\theta$  は2次の余弦分布、 $\tau_{rz}$  は1次の余弦分布に近似できる。 $\tau_{r\theta}$ ,  $\tau_{z\theta}$  に関しては、2次の正弦 (sine) で近似できるが、近似精度は落ちる。注目されるのは、Fig. 5 (b) および Fig. 6 中に示す円周方向の応力  $\sigma_\theta$  の分布に関してで、黒正らの実験<sup>5)</sup>に示されているように、水平力の一部が杭側面へ回り込む口の字形ラーメン状の支持機構を呈することが数値計算からも確認できたことになる。

軸力が作用している場合を考えると、杭側面の水平支圧応力は、 $\sigma_r = a + b \cdot \cos \theta$  ( $a, b$ : 係数) のように、0次と1次の和の形で表現できることが、同様の計算から確認できた (荷重条件 LC-1C, LC-1S)。しかし、応力の再配分によるものと考えられるが、Fig. 6 (b) に示されるように、 $\theta = 0$  子午面における軸力の作用した

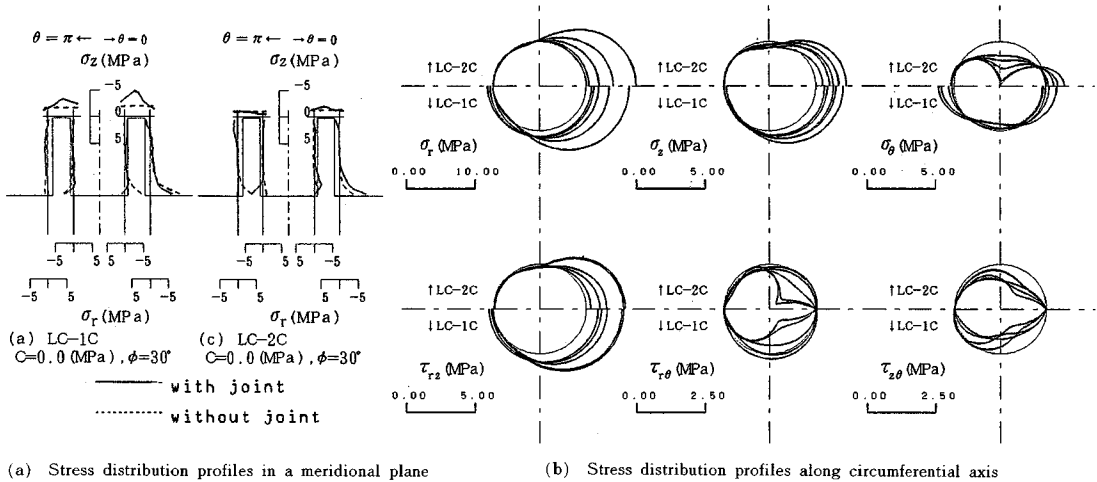


Fig. 6 Stress distribution profiles in the footing concrete.

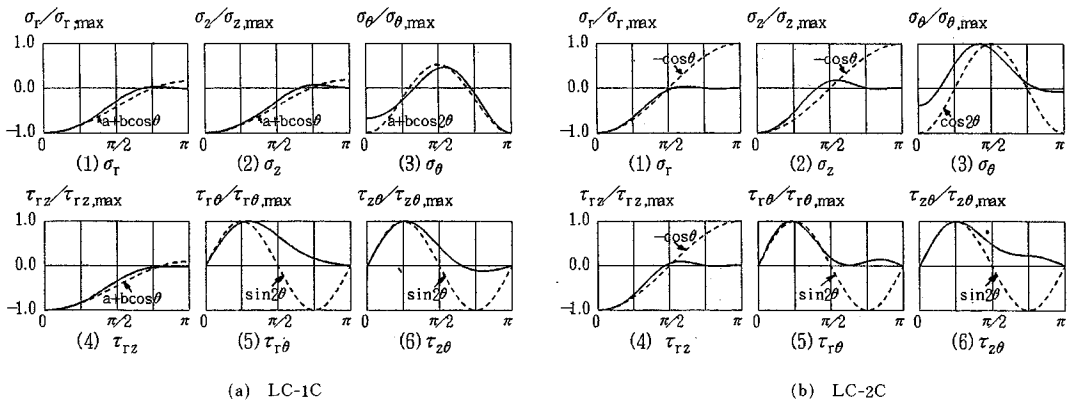


Fig. 7 Stress distribution profiles along circumferential axis.

応力値が、軸力の作用していない場合とほとんど同じか、むしろ若干小さな値となっており、軸力の作用の効果は、圧縮域が  $\theta = \pi/2$  を越えて広がることにより、摩擦が増加することにあるといえよう。したがって、安全性を検討するための最大水平支圧応力への寄与がほとんど認められないことを考えれば、水平方向の支圧応力に関する安全性照査に、ことさら軸力の影響を考慮する必要はないものと考えられよう。

以上の有限要素解析結果は、さきに示した既存の実験結果の傾向と一致しており、実際の現象をよく再現していることがわかる。すなわち、ここで採用した数値解析手法の妥当性が確認できたといえる。

(4) 応力伝達に影響する因子

既存の実験的研究の多くが、杭頭結合部の応力伝達機構に影響する重要な因子として、杭周面の摩擦の効果と、軸力の有無を指摘している。そこでここでは、杭周面の摩擦の影響、軸力の影響、さらに摩擦効果と杭の変形(特に鋼管杭の場合)に影響すると考えられる杭の中詰めコンクリートの深さに関して、有限要素解析を用いて考察する。この中詰めコンクリートの深さは、鋼管杭へのずれ止めの設置とともに、現行示方書の設計方法と杭基礎設計便覧に提案されている新しい杭頭結合部の設計方法が著しく異なる点の1つである。

計算結果を Fig. 8~Fig. 12 に示す。各図において、図 (a) と (b) あるいは (c) と (d) を比較すれば杭の周面摩擦の影響が、(a) と (c) あるいは (b) と (d) を比較すれば軸力の影響が考察できる。また、Fig. 8 と Fig. 9 を比較すれば、PC 杭の中詰めコンクリートの影響が、Fig. 10 と Fig. 11 を比較すれば、鋼管杭の中詰めコンクリートの影響が考察できる。なお、鋼管杭の場合杭周面にずれ止めを設けたモデル(杭基礎設計便覧の標準設計)を用いた計算結果を Fig. 12 に示している。さらに、各図では、比較のためにジョイント要素を用いない線形解を破線で、杭基礎設計便覧に従って計算した応力分布を一点鎖線で示してある。なお、各図の左に応力表示面を示してある。

いずれの図においても、破線で示した剥離、滑動のない状態と実線で示した剥離、滑動を考慮した結果を比較すると、引張り側 ( $\theta = \pi$  子午面) のフーチング下面近傍の応力が剥離の発生により伝達されなくなる様子がよくわかる。伝達されなくなった引張力は、杭周面の摩擦、あるいは杭頭頂部で受け持たれることになる。この応力伝達機構の変化に最も影響すると考えられる杭周面の摩擦の効果は、各図中に  $\blacktriangledown$  で示した杭頭頂部の支圧応力度に顕著に現われている。すなわち、杭周面摩擦が小さな場合、引張り側杭頭頂部と圧縮側フーチング下面近傍と

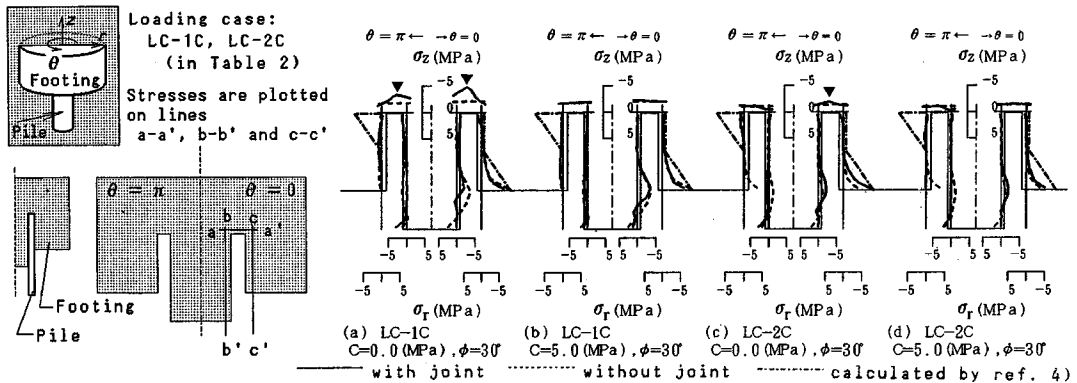


Fig. 8 Stress distribution profiles in a meridional plane (PC pile).

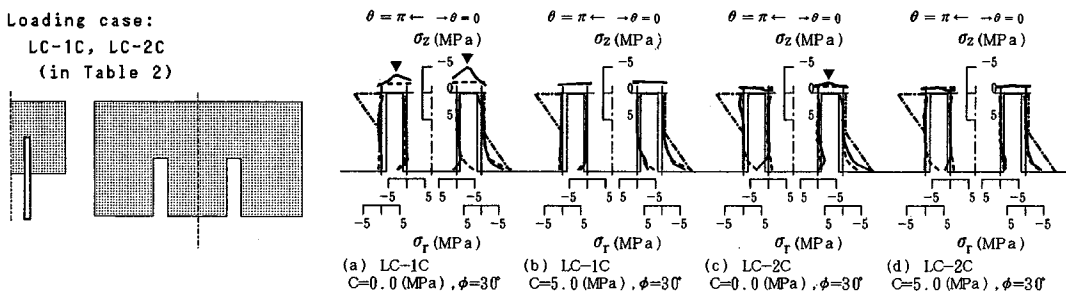


Fig. 9 Stress distribution profiles in a meridional plane (PC pile).

によるテコ支持機構を呈している。軸力が作用した場合の線形解（剥離、滑動が生じないか、あるいは生じる以前の場合）には、フーチング側面の水平支圧応力が、圧縮側へシフトするので、支圧応力が増し、現行設計による計算値を上回る場合もある（Fig. 8 (a), (b)），また、剥離、滑動を考慮した解（剥離、滑動が生じた場合）では、フーチング下面への応力集中の傾向がより顕著となり、前と同様に、現行設計による計算値を上回る場合がある（Fig. 8, 9 (c), Fig. 10~12）。

杭頭頂部の支圧応力（ $\sigma_z$ ）は、新しい設計方法<sup>6)</sup>において、支圧面積を杭の実断面積としたので設計計算値がかなり大きくなり、ここでの計算結果の各図では、作図範囲の外に出てしまっている。

軸力の影響は、杭周面摩擦の小さな場合に、▼で示した杭頭頂部の支圧応力度に顕著に現われている。しかし、先に述べたように、フーチング下面近傍の水平方向支圧応力の最大値にはあまり影響しない。先に Fig. 6 (b) に示したように、軸力が作用した場合杭周面で圧縮域が広がり、摩擦の寄与が大きくなり、結果的に応力の集中を妨げることから、実験で指摘されているフーチングのひびわれ発生までの耐力の増加等の効果をもたらすものと解釈できる。

中詰めコンクリート深さの影響は、応力分布では明瞭ではないが、Fig. 13 に示す変位図をみると、杭のフーチング下面付近での折れ曲がりや、杭の変位を抑制するうえで重要であることがわかる。ここでは紙面の都合で

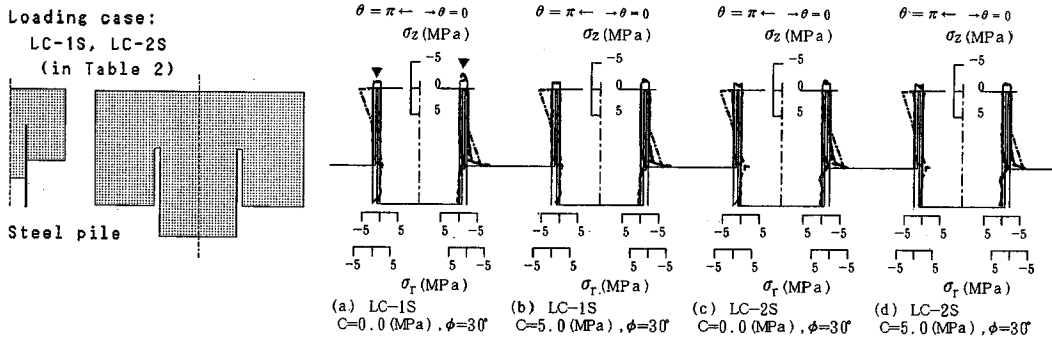


Fig. 10 Stress distribution profiles in a meridional plane (Steel pile).

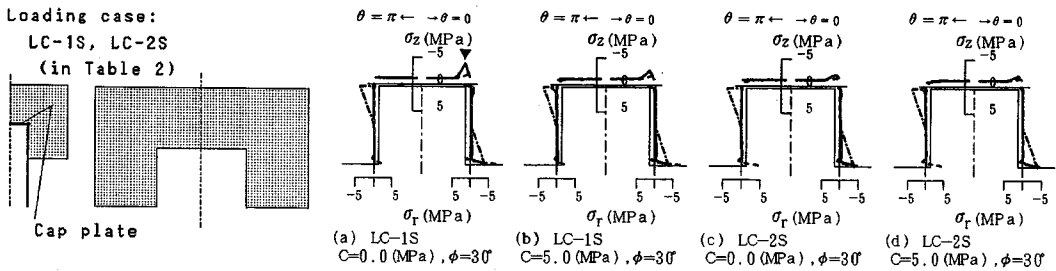


Fig. 11 Stress distribution profiles in a meridional plane (Steel pile).

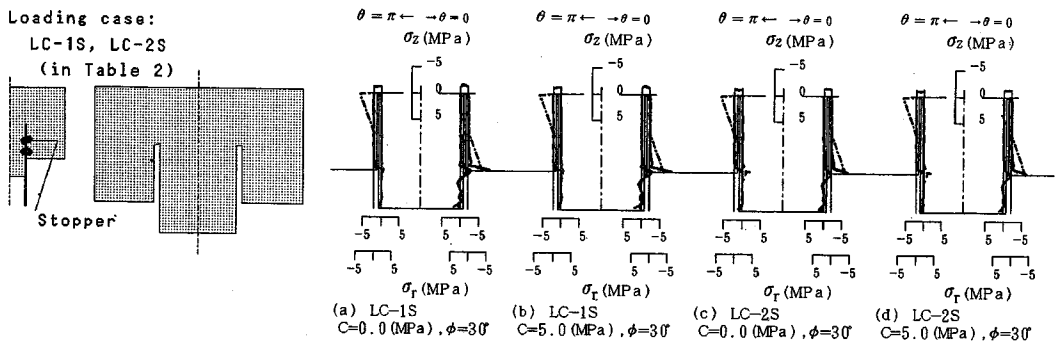


Fig. 12 Stress distribution profiles in a meridional plane (Steel pile).

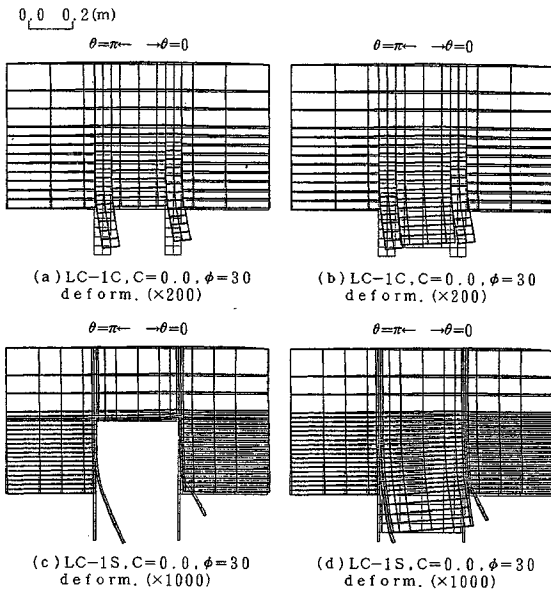


Fig. 13 Deformation of pile head joint.

示さないが、PC 杭で中詰めコンクリートのないモデルでの計算では、杭頭頂部のフーチングコンクリートの支圧応力の増加と、杭の変形の増大が認められる。そして、Fig. 8, 9 および Fig. 13 (a), (b) の比較から、両者でほとんど差がないことを考え合わせれば、必要以上に中詰め深さを大きくとる必要はなく、従来 PC 杭に対して行われていたように、フーチング下面までで十分であるといえる。

Fig. 10, 11 における  $\sigma_z$  の比較から、中詰めコンクリートの有効性が、また、同様に Fig. 10, 12 における  $\sigma_z$  の比較からずれ止めの効果が確認できる。しかし、鋼管杭に関しては、フーチング下面における水平支圧応力  $\sigma_r$  の FEM 解析値が、示方書あるいは杭基礎設計便覧の照査式による応力値をいずれの場合も超過している。これは、鋼管杭の剛性が PC 杭よりも大きいため、Fig. 8, 9(c) の傾向がより顕著に現われたものと思われる。

### 3. 杭頭結合部の安全性評価方法に関する考察

#### (1) 有限要素解析結果に基づく考察

前章で述べた有限要素解析の結果から、杭頭結合部の安全性評価方法に関して以下のように考察できる。

1) 経年変化により、杭とフーチングの間の付着が断たれることが予想されるので、剝離発生後の応力分布に着目すれば、水平方向フーチングコンクリート支圧応力は、圧縮側（たとえば Fig. 6 (a) では  $\theta=0$  子午面）のフーチング下面近傍に集中する。剝離、滑動の発生の結果、引張り側杭頭頂部と圧縮側フーチング下面近傍でテコ支持されるが、最大応力はフーチング下面に生ずる。

応力を指標にして安全性を評価する場合には、このフーチング下面での水平支圧応力度を用いるのが妥当と考えられる。

2) 杭周面の摩擦が小さな場合には、杭頭頂部の支圧応力が大きくなることから、鋼管杭に設けられているずれ止めは有効であるが、極端に大きな軸力が作用する場合を除いては、フーチング下面での応力の方が大きい。また、実験報告<sup>15)</sup>によれば、軸力が小さく、しかも鋼管杭を用いた場合、杭頭部にフーチングへの定着鉄筋を設けることは、杭の抜け出しを抑えることになるが、定着鉄筋のすべりと同時に杭が降伏する傾向がみられ<sup>14)</sup>、急激な支持機構の変化により、杭が降伏に至ると考えられる。したがって、地震などにより、剝離が生じ支持機構が急激に変化することを考えれば、定着鉄筋に依存せずに、杭の埋め込み深さを十分にとり、かつ杭周面の摩擦を増すことが有効と考えられ、この意味で杭基礎設計便覧の鋼管杭に関する方法は合理的なものといえる。

3) 杭頭結合部の最終耐力の評価を行うような場合には、フーチング下面近傍の破壊により、支持機構が変化していき、杭埋め込み部全体での破壊を考えることになり、軸力、水平力そしてモーメントの複合的な効果を考慮する必要がある。しかし、杭頭結合部の構造上からの重要性和、万一損傷や破壊が生じた場合にその修復が難しいことを考え合わせると、検討すべき限界状態としては使用限界を考えるのが妥当と考えられる。この観点に立てば、杭頭結合部の安全性の評価方法としては、最大支圧応力の生じるフーチング下面近傍に着目する方法が妥当と考えられる。

4) 鋼管杭は、フーチングに比較して剛性が大きい、肉厚が薄いため、フーチング下面付近で折れ曲がりが生じやすい (Fig. 13 (c), (d))。また、杭の剛性が大きいため、フーチング下面での水平支圧応力値も大きくなる傾向がある。さらに、一般的な強度のフーチングと中詰めコンクリートの打設の組合せにより破壊形式が杭の局部座屈となる場合の多いことが報告されているので、杭の局部座屈の考慮が検討項目として挙げられる。

5) PC 杭などのコンクリート系杭では、フーチングと剛性が近く、また肉厚も大きいので、座屈を考慮する必要はない。しかし杭体の設計のように、端部効果を見視した応力状態ではなく、フーチングからの反力などの集中力の作用があるため、フーチング下面近傍での応力集中を検討すべきであろう。

#### (2) 応力分布式に関する考察

前節までで、杭頭結合部で最も大きな支圧応力を受けるのは、水平力の作用方向のフーチング下面近傍であることがわかった。また、この水平方向支圧応力の分布は円周方向に三角関数で近似表現できることもわかった

が、この応力分布は、橋梁の支承部におけるロッカー・ピンによる支圧応力の考え方<sup>16)</sup>と関連付けて考えられる。すなわち、Fig. 14 (b) のように、水平支圧応力が円周方向に余弦 (cosine) 分布すると仮定することができよう。このような応力分布の仮定は、現行示方書あるいは杭基礎設計便覧における仮定、すなわち Fig. 14 (a) のように杭を角柱として力のつり合いを考えたものよりも、より実際に近いことは明らかであろう。

Fig. 14 (b) より、杭頭の回転中心を、埋め込み長さの 1/2 として、以下のような計算過程により、水平方向の最大支圧応力を求めることができる。

水平力  $H$  およびモーメント  $M$  に関して、それぞれ以下のようなつり合い式を考える。

$$H = 2 \int_0^l \int_0^{\pi/2} \sigma_H \cdot (\cos \theta)^2 \cdot (D/2) \cdot dz \cdot d\theta$$

$$= \pi \cdot D \cdot l \cdot \sigma_H / 4 \dots\dots\dots (1)$$

および、

$$M = 4 \int_0^{l/2} \int_0^{\pi/2} \{\sigma_M / (l/2)\} \cdot (\cos \theta)^2 \cdot (D/2) \cdot z^2 \cdot dz \cdot d\theta = \pi \cdot D \cdot l^2 \cdot \sigma_M / 24 \dots\dots\dots (2)$$

ただし、式中の諸変数はそれぞれ、 $H$ ：杭頭に作用する水平力、 $M$ ：杭頭に作用するモーメント、 $D$ ：杭径、 $l$ ：杭のフーチングへの埋め込み長さ、 $\sigma_H$ ： $H$  による最大水平方向支圧応力、 $\sigma_M$ ： $M$  による最大水平方向支圧応力である。

以上より、 $\sigma_H$  および  $\sigma_M$  を求めれば、水平方向の最大支圧応力  $\sigma_{ch}$  は、次式のようになる。

$$\sigma_{ch} = \sigma_H + \sigma_M = (4/\pi) \{H / (D \cdot l) + 6M / (D \cdot l^2)\} \dots\dots\dots (3)$$

式 (3) の右辺は、現行示方書および杭基礎設計便覧における値  $\{H / (D \cdot l) + 6M / (D \cdot l^2)\}$  の  $4/\pi = 1.27$  倍となっている。

また、支圧応力  $\sigma_r$  (圧縮) が作用すれば、当然摩擦力が働くことになるので、これを考慮してみると、円周方向、杭軸方向の杭とフーチングの間の摩擦係数をそれぞれ  $\mu_r$ 、 $\mu_z$  として、円周方向の摩擦力  $\tau_r$ 、杭軸方向の摩擦力  $\tau_z$  はそれぞれ、

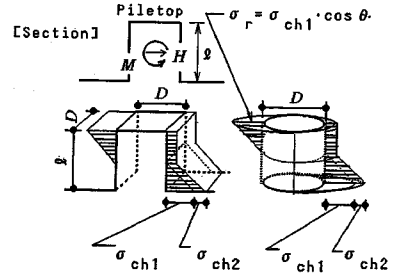
$$\tau_r = -\mu_r \cdot \sigma_r \cdot \sin \theta, \quad \tau_z = \mu_z \cdot \sigma_r \dots\dots\dots (4)$$

杭頭埋め込み部のの中心に関するこれらの摩擦力のモーメントは、対称性から水平力  $H$  の寄与が相殺されるので、式 (4) 中の  $\sigma_r$  は、

$$\sigma_r = \{\sigma_M / (l/2)\} \cdot \cos \theta \cdot z \quad (0 \leq z \leq l/2) \dots\dots\dots (5)$$

となり、 $\tau_r$  および  $\tau_z$  によるモーメントへの寄与はそれぞれ、

$$M\tau_r = 4 \int_0^{l/2} \int_0^{\pi/2} -\tau_r \cdot (D/2) \cdot z \cdot dz \cdot d\theta = \mu_r \cdot D \cdot l^2 \cdot \sigma_M / 6 \dots\dots\dots (6)$$



(a) Stress distribution (b) Stress distribution hypothesis presented in ref. (4)

Fig. 14 Stress distribution hypothesis at pile head connection.

および、

$$M\tau_z = 4 \int_0^{l/2} \int_0^{\pi/2} \tau_z \cdot (D/2) \cdot \cos \theta \cdot dz \cdot d\theta = \mu_z \cdot \pi \cdot D^2 \cdot l \cdot \sigma_M / 16 \dots\dots\dots (7)$$

となる。式 (2) の右辺に、摩擦力の寄与である式 (6)、(7) を加えることより、モーメントのつり合いは、

$$M = \pi \cdot D \cdot l^2 \cdot \sigma_M / 24 + M\tau_r + M\tau_z \dots\dots\dots (8)$$

これを  $\sigma_M$  について解いて、整理すれば、

$$\sigma_M = [8/12 \pi + 4 \mu_r + 3 \pi \cdot \mu_z \cdot (D/l)] \cdot 6M / (D \cdot l^2) = \sigma_{ch2} \dots\dots\dots (9)$$

上式で、 $\mu_r = \mu_z = 0$  とおけば、式 (2) を  $\sigma_M$  について解いた式に一致する。

同様にして、水平力  $H$  による摩擦を考慮した水平支圧応力成分は、

$$\tau_H = 2 \int_0^l \int_0^{\pi/2} -\mu_r \cdot \sigma_H \cdot \cos \theta \cdot (D/2) \cdot d\theta \cdot \sin \theta \cdot dz = \mu_z \cdot D \cdot l \cdot \sigma_H / 2 \dots\dots\dots (10)$$

したがって、

$$H = \pi \cdot D \cdot l \cdot \sigma_H / 4 + \tau_H \dots\dots\dots (11)$$

より、

$$\sigma_H = [4 / (\pi + 2 \mu_r)] \cdot H / (D \cdot l) = \sigma_{ch1} \dots\dots\dots (12)$$

以上より、杭周面における摩擦を考慮した水平方向のフーチング・コンクリートの支圧応力  $\sigma_{ch}$  は、式 (9) と式 (12) の和で与えられることになる。以上の議論では、支圧応力が有効に働く領域を  $\pm \pi/2$  としたが、実際には、コンクリートの乾燥収縮による杭とフーチング間の剥離の発生や、発生以後の経年変化などにより、有効支圧域が減少することが考えられるので、その有効支圧域を  $\pm \alpha$  とし、同様の計算をした結果、次式が得られる。

$$\sigma_{ch} = \sigma_H + \sigma_M = \frac{6M}{Dl^2} \cdot \frac{8}{[2(2\alpha + \sin 2\alpha) + 2\mu_r(1 - \cos 2\alpha) + 3\mu_z(D/l)(2\alpha + \sin 2\alpha)]} + \frac{H}{Dl} \cdot \frac{4}{2\alpha + \sin 2\alpha + \mu_r(1 - \cos \alpha)} \dots\dots\dots (13)$$



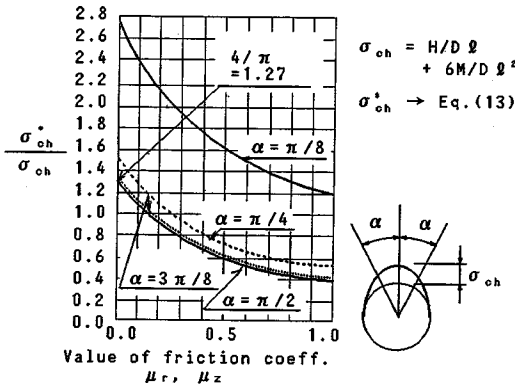


Fig.15 Maximum  $\sigma_{ch}$  vs.  $\mu_r, \mu_z$  with parameter  $\alpha$ .

この式 (13) に基づいて  $\alpha, \mu_r$  および  $\mu_z$  と  $\sigma_{ch}$  との関係を示すと、Fig. 15 が得られる。Fig. 15 は、杭周囲の摩擦係数  $\mu_r, \mu_z$  の値に対応する  $\sigma_{ch}$  の値を有効支圧域を表す角  $\alpha$  をパラメータにとって示している。なお、縦軸は Fig. 14 (b) に基づいた値  $\sigma_{ch}^*$  と、Fig. 14 (a) に基づいた示方書の計算式 (本論文では、式 (3) の右辺の係数の  $4/\pi$  を 1 としたもの) の値  $\sigma_{ch}$  との比で示してある。この図より、水平支圧応力の最大値は、杭周囲の摩擦の効果によって大きく減少することがわかり、また、有効支圧域を与える半角  $\alpha$  が  $\alpha \leq \pi/2$  の場合には、 $\alpha$  の減少に伴って最大水平支圧応力が急激に増加することも理解できる。フーチング・コンクリートの乾燥収縮などにより杭周囲の摩擦状態は、杭基礎設計便覧における鋼管杭のずれ止めのように摩擦構造を設けない限り、経年的に劣化すると考えるのが妥当であり、PC 杭の場合、杭周囲摩擦を重要視するよりも、境界面の接触条件の劣化による有効支圧域の減少の方がより重要な因子となるように思われる。

杭周囲での摩擦係数や、有効支圧域の経年変化の評価には、実験的な検討が必要となるが、式 (13) を用いることにより、FEM 解析結果が現行設計値を上回ることや、従来の実験では逆に現行設計値を下回ることの説明がより合理的に行えるものと考えられる。

このほかに、軸力が作用している場合、杭の半径方向への変形 (膨らみ) によって水平方向の支圧応力やせん断力が生じることも考えられるが、杭体自身の変形はそれほど大きくないと考えられるのでここでは考慮しないものとする。仮に、考慮しようとするならば、水平方向の支圧応力に対応した摩擦力と、その反力としての水平支圧応力を考えねばならず、結果的にきわめて複雑なつり合いを考えねばならない。さらに、杭の内外周における支持機構も考慮することも可能であろうが、ここでは、円柱体として杭を考えることにした。

すでに述べたように、杭頭結合部の応力照査において、

結果に直接的に影響する大きな水平支圧応力が生じるのは、フーチング下面近傍であることから、埋め込み上部で仮定した応力分布と傾向が異なるとはいえ、ここで提案した三次元的な応力分布式の妥当性がある程度示されたといえよう。

#### 4. 結 言

有限要素解析結果に基づいて、杭頭結合部の応力伝達機構の解析を行った。解析結果は、既存の実験報告結果の傾向をよく再現しており、その妥当性が確認できた。得られた知見をまとめると以下のようである。

- (1) フーチング下面近傍への応力集中が著しく、また応力値も大きいのでこの部位での水平支圧応力に着目した安全性評価は妥当である。
- (2) 杭周囲の摩擦は、杭頭頂部への応力集中を抑制し、軸力がその効果の促進因子となっている。
- (3) 中詰めコンクリートは杭の変形を抑制し、また、摩擦面積の増加にも効果がある。中詰め深さとしては、結合方法 A の場合、フーチング下面までで十分である。
- (4) 杭-フーチング境界面近傍の応力の分布は、杭周 (円周) 方向に三角関数で近似表現できる。ただし、 $\tau_{r\theta}, \tau_{z\theta}$  に関しては、近似精度がやや低くなる。
- (5) 上記 (4) に基づいて分布式 (式 (13)) を仮定した結果、杭周囲摩擦に加えて有効支圧域を考慮すべきであることが示された。

今回は、示方書などに倣ってフーチングコンクリートの支圧応力に着目した安全性評価に関して考察したが、本文中でも述べたように杭頭結合部での杭体に注目することも、検討すべきであると考えられる。また、杭頭部に補強鉄筋を設ける結合方法 B に関しても同様の検討が加えられるべきであろう。

謝 辞：本研究の数値計算にあたっては、田中恵一氏 (現・鹿島建設 (株)) の協力を得た。ここに、記して感謝の気持ちを表す次第である。また、数値計算は、金沢大学情報処理センター設置の FACOM M-360AP および M-760/10 を使用したことを付記する。

#### 参 考 文 献

- 1) 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/I-3, pp. 295~301, 1985.
- 2) 小堀為雄・近田康夫：剝離、滑動を考慮した杭頭結合部の応力伝達について、土木学会論文集, No. 374/I-6, pp. 583~592, 1986.
- 3) 駒田敬一・足立義雄：くい頭部とフーチングの結合部の試験について、昭和 48 年建設省技術研究会報文, 1973.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, 下部構造編, 丸善,

- 1980.
- 5) たとえば, 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.
  - 6) 日本道路協会: 杭基礎設計便覧, pp. 276~299, 丸善, 1986.
  - 7) Wilson, E. L. : Structural Analysis of Axi-symmetric Solids, J. A. I. A. A., Vol. 3, pp. 2269~2274, 1965.
  - 8) Zienkiewicz, O. C. (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.
  - 9) Zienkiewicz, O. C., Valliappan, S. and King, I. P. : Stress analysis of rock as a 'no tension' material, Geotechnique, Vol. 18, pp. 56~66, 1968.
  - 10) Kobori, T. and Chikata, Y. : An Axisymmetric Joint Element under Non-axisymmetric Loadings in Semi-analytical Finite Element Method, Proc. of JSCE, No. 368/I-5, pp. 57~64, 1986.
  - 11) 近田康夫・田中恵一・小堀為雄: 子午面内での回転を考慮した非軸対称荷重下の軸対称ジョイント要素, 構造工学論文集, Vol. 34A, pp. 25~30, 1988.
  - 12) たとえば, 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剝離と滑動, 土木学会論文報告集, No. 302, pp. 31~41, 1980.
  - 13) 駒田敬一・岡山義人: くい頭部とフーチングの結合に関する実験, 道路, pp. 37~41, 1980.
  - 14) 黒正清治ほか: 杭と基礎の結合部に関する実験研究 (その3), 建築学会大会学術講演梗概集, pp. 2327~2328, 1981.
  - 15) 建設省土木研究所, 構造橋梁部基礎研究室: 杭頭結合条件を考慮した橋梁杭基礎の設計法に関する研究, 土木研究所資料 No. 1874, 1982.
  - 16) 吉町太郎: 鋼橋の理論と計算 (改訂版), pp. 208~209, 石崎書店, 1972.

(1988. 8. 25・受付)