

土 木 研 究 所 資 料

コンクリート部材の接合に関する試験調査

——柱の差込み接合の解析および実験——

昭和51年 2 月

建設省土木研究所
地質化学部コンクリート研究室

要 旨

コンクリート構造物をプレキャスト部材を用いて施工する場合、部材相互の接合、基礎への部材の定着の設計・施工を確実にこなうことがきわめて重要となる。

この調査は、プレキャスト橋脚をフーチングに差込んで定着する方式を対象として、適切な差込み深さを明らかにするために解析的および実験的な検討を行なったものである。調査の結果、このような差込み接合の差込み深さは部材断面寸法程度とするのが合理的であり、設計には従来くいとフーチングとの結合の設計に用いられている簡易計算を適用しうることがたしかめられた。

昭和51年2月

コンクリート研究室長 太 田 実

主任研究員 小 林 茂 敏

沼 田 建 次

目 次

1. 序 言	1
2. 調査の目的	2
3. 応力解析による検討	2
3.1 計算式の概要	3
3.2 解析内容	5
3.3 解析結果および考察	6
4. 供試体による載荷実験	11
4.1 実験方法	11
(1) 供試体	11
(2) 載荷方法	11
(3) 測定方法	11
1) ひずみ測定	11
2) 変位測定	14
3) ひびわれ測定	14
4.2 実験結果	14
4.3 実験結果の考察	25
(1) 耐 力	25
(2) 変 位	26
(3) 鉄筋のひずみ	26
(4) ひびわれと破壊の性状	26
5. 結 言	28

コンクリート部材の接合に関する試験調査

一柱の差込み接合の解析および実験

1. 序 言

コンクリート構造物をプレキャスト部材を用いて施工する場合には、運搬可能な構造部材の大きさには限度があり、いくつかの部材を現場で接合して構造物を完成しなければならない。したがって構造物のプレキャスト施工においては、部材の接合工法が非常に重要になってくる。

コンクリート部材の接合には、つぎのような各種の工法が用いられている。

- (1) プレキャスト部材端から鉄筋を出しておいてこれを継ぎ、場所打ちコンクリートを充てんする(図-1-A)。

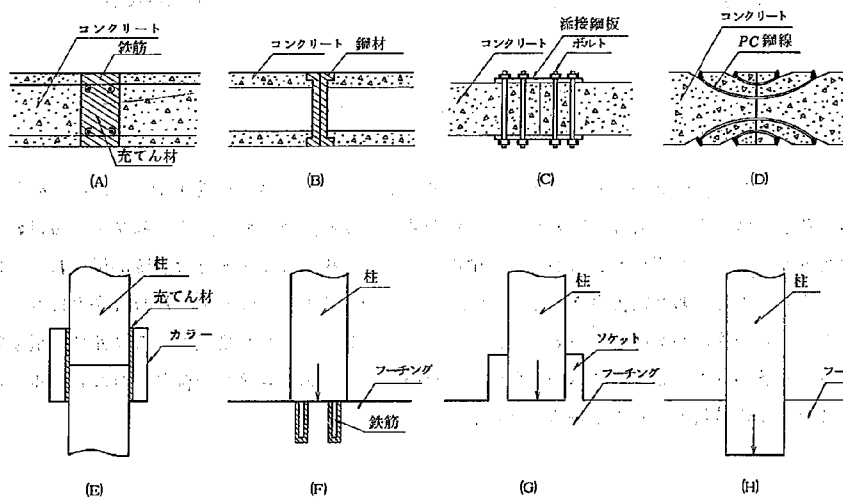


図-1 各種の接合形式

- (2) プレキャスト部材に鋼材を埋込んでおき、この鋼材相互を溶接またはボルトで接合する(図-1-B)。
- (3) 部材接合部に添接鋼板を当ててボルトを接合する(図-1-C)。
- (4) 部材間に空間を作っておき、モルタルまたはコンクリートをはさんだ後プレストレスを与える。
- (5) 部材間に接着材を塗り、プレストレスを与える(図-1-D)。
- (6) 柱と柱の接合にカラーを用いる(図-1-E)。
- (7) フーチングに鉄筋を差込んで柱を定着する(図-1-F)。
- (8) フーチングにソケットを作っておいて、柱を差込む(図-1-G)。

(9) フーチングの穴に柱を差込む(図-1-H)。

これらの工法のうちで、プレストレスを用いる工法は比較的完全なものが期待できるが、製作、寸法精度に厳重な管理が要求される。また図-1-A, E, F, G, Hに示す鉄筋コンクリート構造としての工法は施工が非常に簡単であるが、設計にあたっては現場打ちコンクリートの付着性、鉄筋の定着性等を十分に配慮しなければならないむずかしさがある。

図-2に示すような方法で柱をフーチングまたは梁に接合すれば、橋脚の製作工程を著しく簡略化できるところから、この工法は外国ではすでにかなり実用化されているが、わが国ではまだ施工例も少なく、設計方法も確立されていない。そこで、この工法に着目してその合理的な設計法を明らかにするための調査を行なうこととした。

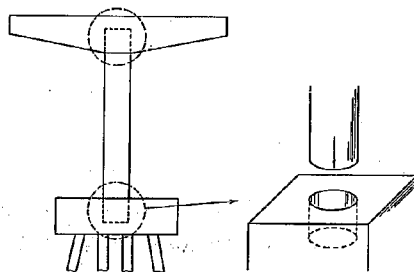


図-2 柱の差込み接合

2. 調査目的

基礎(フーチング)にあらかじめ設けておいた穴の中にプレキャスト柱を差込んで接合を行なう場合、差込み深さをどのように定めればよいかが問題となる。すなわち、差込み深さが浅ければ施工は容易で、フーチングの厚さも小さくて済むが、あまり浅すぎると十分な強度が得られず、変形も大きくなることが容易に推察される。逆に、差込み深さを大きくすると、接合は完全になっても、施工性、経済性が問題になると考えられる。そこで接合部の強度が満足される範囲で、最小限どの程度の差込み深さを必要とするかについて、解析および実験の両面から検討を行ない、差込み深さについての基礎的な資料を得ることとした。

3. 応力解析による検討

基礎部分(フーチング)を半無限弾性体と仮定すれば、その表面に作用する集中荷重によって内部に生ずる応力分布はBoussinesqueやCerrutiによる解法を用いて求めることができる。すなわち、柱からの伝達力によるフーチング表面の応力分布を仮定すれば、数値積分によりフーチング内部に生ずる応力分布を求めることが可能である。ただし、この方法は柱に比べてフーチングが半無限体とみなしうるほど充分に大きい場合にしか適用できない。さらに汎用性の高い方法としては、有限要素法(FEM)の適用が考えられる。従来行なわれてきたFEMでこれを3次元問題として計算しようとすれば、ある程度の精度を確保するためには計算費用が莫大となる。円柱と円型フーチングを扱う場合には、軸対称問題として2次元FEMで計算できるので計算量は少なくなるが、

この場合は荷重も軸対称でなければならず、柱の軸力による応力解析にしか適用できなかった。しかし、最近、荷重が軸対称でなくても、構造物が軸対称であれば解析可能なFEM解法が開発され、原子力発電所の圧力容器の耐震解析¹⁾等に利用されている。この方法は、図-3に示すような形状の物体に曲げやせん断力が働く場合の応力解析も2次元計算と同じ労力で解けるという非常にユニークなものである。差込み継手部の応力解析には、この方法を適用することとした。

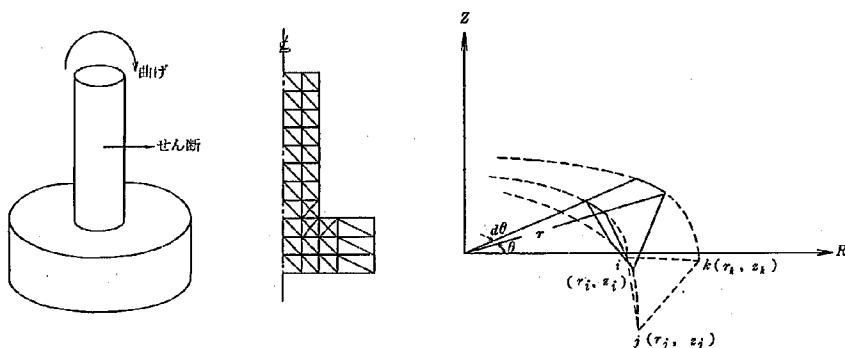


図-3 FEM解析モデル

3.1 計算式の概要

非軸対称荷重の場合の軸対称FEM計算の考え方の基本をのべると、つぎのようである。

回転体に回転方向に $\sin$, $\cos$ 分布する荷重があるとき、その荷重によって生ずる変位、応力も同じ周期と位相の波形をなす。回転方向に任意の形の荷重分布をなす場合には、これをフーリエ展開により三角級数の和として表わすことができる。したがって計算手順としては、ある波形における剛性マトリックスを求めて解を得ることを何回か反復し、最後に全部の解を位相のずれを考えながら加え合わせるということになる。しかし、曲げやせん断による荷重は、単純な $\cos$ のみの関数で表わせるので、計算反復は一回で済む。

図-3のような三角形要素の場合について計算に必要なマトリックス成分のみを示すとつぎのようである。

$$r \{F\}_n = [K]_n \{d\}_n$$

ここに、 r : リング要素の回転半径

$\{F\}_n$, $\{d\}_n$: $\cos n\theta$ の周期で分布する荷重および変位

$[K]_n$: 三角形要素の剛性マトリックス (9×9) で、次式で示される。

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ \text{対} & K_{22} & K_{23} \\ & \text{称} & K_{33} \end{bmatrix}$$

$K_{11} \sim K_{33}$ は各々 (3×3) のマトリックスで、展開次数 n , 積分項 $J_1 \sim J_6$, ヤング係数および

びせん断係数，頂点座標で定まる行ベクトル α ， β ， γ ，を用いて，つぎのように表わされる。

$$\begin{aligned}
 K_{11} &= I_1 \{ (E_{11} + 2E_{12} + E_{22} + n^2 G_{55}) \beta^T \beta + G_{44} \gamma^T \gamma \} + (E_{12} + E_{22} + n^2 G_{55}) \\
 &\quad \{ I_2 (\alpha^T \beta + \beta^T \alpha) + I_3 (\beta^T \gamma + \gamma^T \beta) \} + (E_{22} + n^2 G_{55}) \{ I_4 \alpha^T \alpha + I_5 (\alpha^T \gamma + \gamma^T \alpha) \\
 &\quad + I_6 \gamma^T \gamma \} \\
 K_{12} &= n \{ I_1 (E_{12} + E_{22}) \beta^T \beta + (E_{12} + E_{22} + G_{55}) (I_2 \beta^T \alpha + I_3 \beta^T \gamma) + E_{22} (I_2 \alpha^T \beta + \\
 &\quad I_3 \gamma^T \beta) + (E_{22} + G_{55}) \{ I_4 \alpha^T \alpha + I_5 (\alpha^T \gamma + \gamma^T \alpha) + I_6 \gamma^T \gamma \} \} \\
 K_{13} &= I_1 \{ (E_{13} + E_{23}) \beta^T \gamma + G_{44} \gamma^T \beta \} + E_{23} (I_2 \alpha^T \gamma + I_3 \gamma^T \gamma) \\
 K_{22} &= I_1 (n^2 E_{22} \beta^T \beta + G_{66} \gamma^T \gamma) + n^2 E_{22} \{ I_2 (\alpha^T \beta + \beta^T \alpha) + I_3 (\beta^T \gamma + \gamma^T \beta) \} + \\
 &\quad (n^2 E_{22} + G_{55}) \{ I_4 \alpha^T \alpha + I_5 (\alpha^T \gamma + \gamma^T \alpha) + I_6 \gamma^T \gamma \} \\
 K_{23} &= n \{ I_1 (E_{23} \beta^T \gamma - G_{66} \gamma^T \beta) - G_{66} (I_2 \gamma^T \alpha + I_3 \gamma^T \gamma) + E_{23} (I_2 \alpha^T \gamma + I_3 \gamma^T \gamma) \} \\
 K_{33} &= I_1 \{ E_{33} \gamma^T \gamma + (G_{44} + n^2 G_{66}) \beta^T \beta \} + n^2 G_{66} \{ I_2 (\alpha^T \beta + \beta^T \alpha) + I_3 (\beta^T \gamma + \gamma^T \beta) \} \\
 &\quad + n^2 G_{66} \{ I_4 \alpha^T \alpha + I_5 (\alpha^T \gamma + \gamma^T \alpha) + I_6 \gamma^T \gamma \}
 \end{aligned}$$

ここに，積分項 $I_1 \sim I_6$ は，

$$I_1 = \iint_{\Delta} r dr dz = \bar{r} A$$

$$I_2 = \iint_{\Delta} dr dz = A$$

$$I_3 = \iint_{\Delta} z dr dz = \bar{z} A$$

$$I_4 = \iint_{\Delta} \frac{1}{r} dr dz = \frac{1}{\bar{r}} A$$

$$I_5 = \iint_{\Delta} \frac{z}{r} dr dz = \frac{\bar{z}}{\bar{r}} A$$

$$I_6 = \iint_{\Delta} \frac{z^2}{r} dr dz = \frac{1}{3\bar{r}} \left\{ \left(\frac{z_i + z_j}{2} \right)^2 + \left(\frac{z_j + z_k}{2} \right)^2 + \left(\frac{z_k + z_i}{2} \right)^2 \right\} A$$

ただし， $\bar{r} = \frac{1}{3} (r_i + r_j + r_k)$

$\bar{z} = \frac{1}{3} (z_i + z_j + z_k)$

r : 節点の半径方向座標

z : 節点の高さ方向座標

A : 要素の面積

Δ は r, z 面での積分の範囲が三角形要素の面積であることを示す。

ヤング係数およびせん断係数は $[\sigma] = [D][\varepsilon]$ における $[D]$ の各成分で、つぎに示すものである。

$$[D] = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & E_{22} & E_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & 対 & & G_{44} & 0 & 0 \\ & & & & G_{55} & 0 \\ & & & 称 & & G_{66} \end{bmatrix} \quad (6 \times 6)$$

また、行ベクトル α, β, γ は各々 (3×1) のマトリックスで、つぎの式で表わされる。

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_i & z_i \\ & 1 & r_j & z_j \\ & & 1 & r_k & z_k \end{bmatrix}^{-1}$$

なお、前記 $K_{11} \sim K_{33}$ の式中における添字 T は転置行列を表わす。

つぎに、変位からひずみを求める場合には、

$$[\varepsilon] = [E][d]_n$$

ただし、 $[d]_n$ は1要素の変位で $(u_i, u_j, u_k, v_i, v_j, v_k, w_i, w_j, w_k)$ の順に並んでいるものとする。 $[\varepsilon]$ は (1×6) のマトリックスである。

$$E = \begin{bmatrix} \beta \cos n\theta & 0 & 0 \\ \frac{1}{r} a \cos n\theta & \frac{1}{r} a \cos n\theta & 0 \\ 0 & 0 & r \cos n\theta \\ r \cos n\theta & 0 & \beta \cos n\theta \\ -\frac{n}{r} a \sin n\theta & (\beta - \frac{a}{r}) \sin n\theta & 0 \\ 0 & r \sin n\theta & -\frac{n}{r} a \sin n\theta \end{bmatrix} \quad (6 \times 9)$$

ここで、 $a = [\alpha + \beta r + \gamma z] \quad (1 \times 3)$

ひずみから応力を求める場合には、

$$[\sigma] = [D][\varepsilon] \quad ([\sigma] \text{は } (1 \times 9))$$

以上の計算式を用いて計算を実行する場合には、1要素3節点の3次元FEM計算と考えればよい。

3.2 解析内容

単位幅を有する柱(2次元計算であるから図-4のような壁と考えるのが適当かもしれないが)に単位の曲げモーメントが作用した場合に、フーチング内に生ずる応力を2次元計算で求めた。要

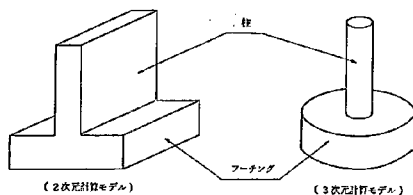


図-4 FEM解析モデル

要素分割は図-5のように行ない、材質についてはコンクリートは本来、非弾性的な材質を有する材料であり、かつ鉄筋の配置等により、均一な物体と言ひ難いのであるが、一様な弾性体と仮定し、ヤング係数は $0.15 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ポアソン比は $\frac{1}{6}$ とした。境界条件は、フーチングは地中にあるものと考えて、底面では水平・鉛直方向とも固定で回転だけを許し、側面は水平方向のみ固定で鉛直方向変位および回転を許すものとした。荷重は、柱の縁維応力度($\sigma_{\max}$)が 100 kg/cm^2 になるように純曲げモーメントを柱に与えた。

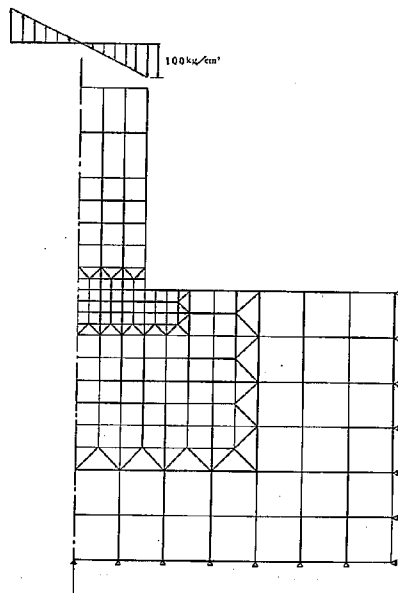


図-5 FEM解析の要素分割

つぎに、図-4のような円型の柱とフーチングを考へて3次元計算を同様に行なつた。

3.3 解析結果および考察

2次元計算から求められたフーチング内部の応力を各断面について示すと図-6のようである。同図より、つぎのことがいえる。

- (1) 柱からの力はフーチング内部では、かなり急速に減少していく。柱からの曲げモーメントによって生ずる鉛直方向応力は、柱の内部で最大値が1であるとすれば、柱の太さの $\frac{1}{3}$ の深さの位置では約30%に、柱の太さと同じ深さの位置では10%以下に減少する。
- (2) 曲げによってフーチング表面に近い部分に非常に大きな水平応力が生ずる。その大きさは柱の鉛直方向最大応力の約30%で、引張り側には水平方向にも引張応力が生じ、圧縮側には水平方向にも圧縮応力が生じる。
- (3) この水平応力は深さと共に急激に減少し、柱を延長した位置では、柱の太さの約 $\frac{1}{4}$ の深さにおいて、ほぼ0となる。
- (4) 柱の延長線上におけるせん断応力度も、フーチング表面付近では柱の鉛直応力度の最大値の20%程度であるが、太さの約 $\frac{1}{2}$ だけフーチング内部に入ると、ほとんど0となる。

図-7は、せん断応力度の水平方向断面についての分布を示す。

図-8は、柱の引張り側に大きな水平引張応力が生ずるのに対して、柱をフーチングに差込む場合には鉄筋が連続していないので、柱とフーチングの境目にはひびわれが生ずるものと想定して、

応力分布の変化を調べたものである。最初に引張応力が生じた区間（図-8のAの区間）だけひびわれが生ずると仮定して計算すると、ひびわれの終端にまた引張応力が生じてしまう。このような計算を反復してひびわれの位置をBの位置まで進行させると、引張応力はほとんど生じなくなる。また図-9は同じ計算において鉛直応力の変化をプロットしたものである。これらの図からつぎのようなことがわかる。

- (1) 引張り側にひびわれが生ずる場合、その深さは柱の太さの $\frac{1}{2}$ 程度の深さまでである。
- (2) 引張り側にひびわれができると、圧縮側の水平応力はひびわれができない場合に比べて50%程度増加するが、圧縮応力の生じている区域にはあまり変化がない。
- (3) 柱の引張り側の鉛直応力は、ひびわれが入るとあまり減少しないでフーチングの下の方に伝わってゆくようになるが、他の部分の応力度は、ひびわれが入らないとして求めた場合とほとんど変わらない。

つぎに3次元計算による内部応力分布を図-10に示す。これを2次元計算の結果と比較すると、応力分布の傾向は2次元計算の結果と同じであるが、応力が減少してゆく割合がいっそう早く、かつ応力の最大値も2次元計算の場合よりも小さい。例えば柱の最大圧縮応力度が同じになるような曲げを加えたとき、柱の太さの $\frac{1}{3}$ の深さでの鉛直方向応力度は2次元計算の結果に比べて約15%減、フーチング表面付近の水平方向応力度およびせん断応力度は、それぞれ約35%および約20%減となっている。したがって、2次元計算による結果を設計に用いたとしても安全側になるものと考えられる。これらの計算結果から考えて、柱のフーチング内への差込み深さは、軸力の大きさにもよるが、柱の太さ程度の深さとするれば充分と考えられる。

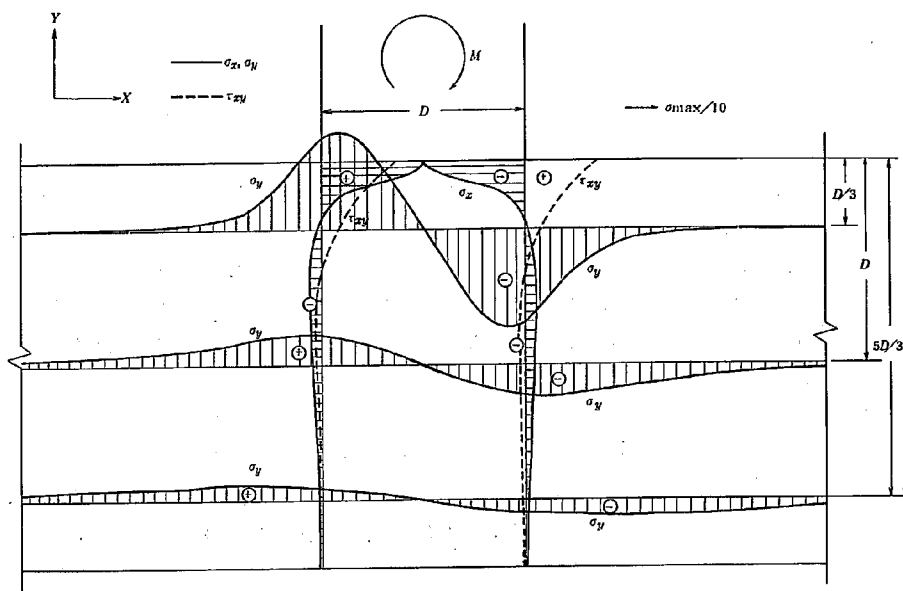


図-6 フーチング基礎の内部応力分布 (2次元計算)

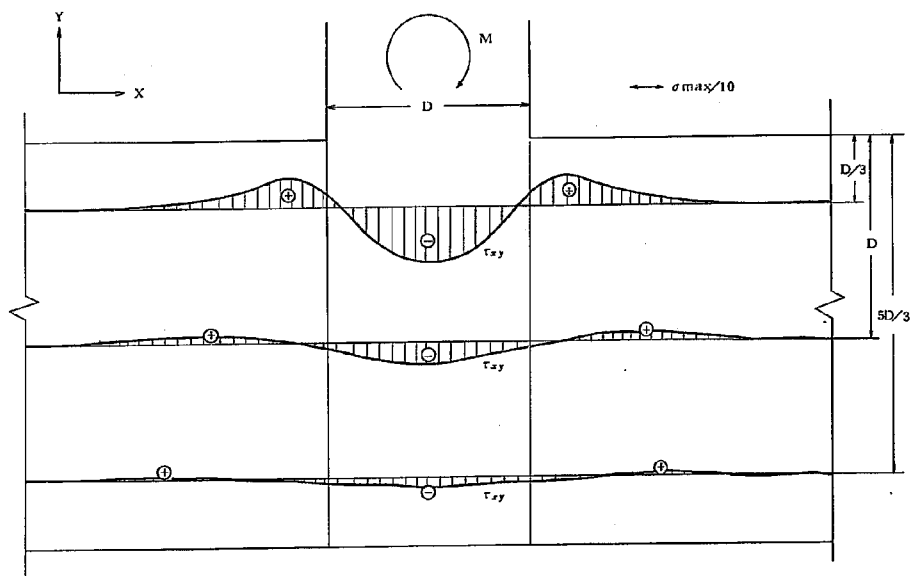


図-7 フーチング基礎のせん断応力分布 (2次元計算)

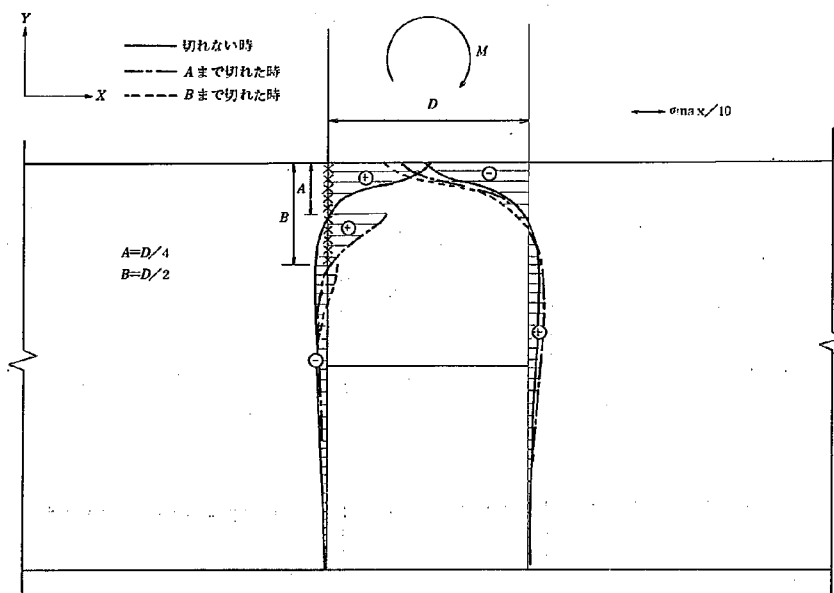


図-8 ひびわれの進行による σ_x の変化 (2次元計算)

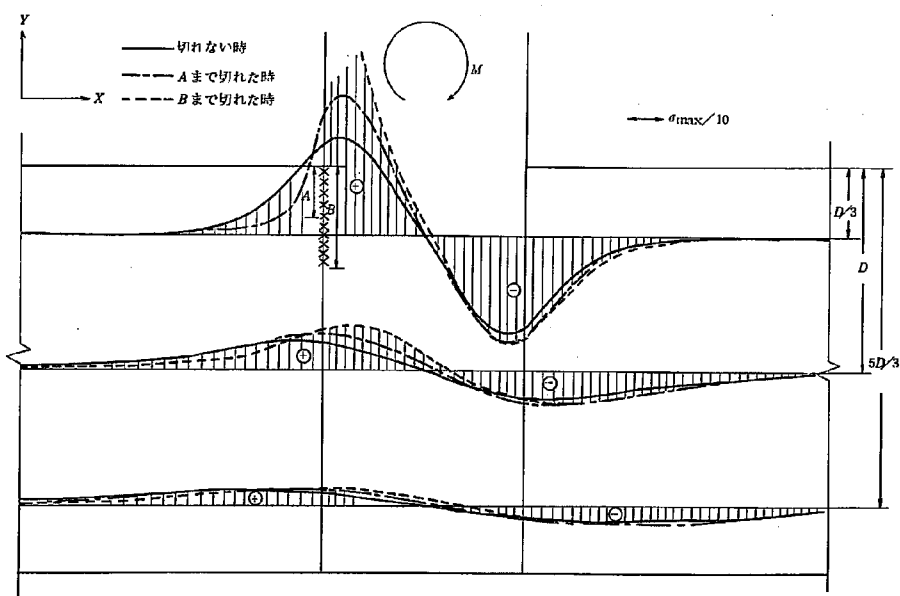


図-9 ひびわれの進行による σ_y の変化 (2次元計算)

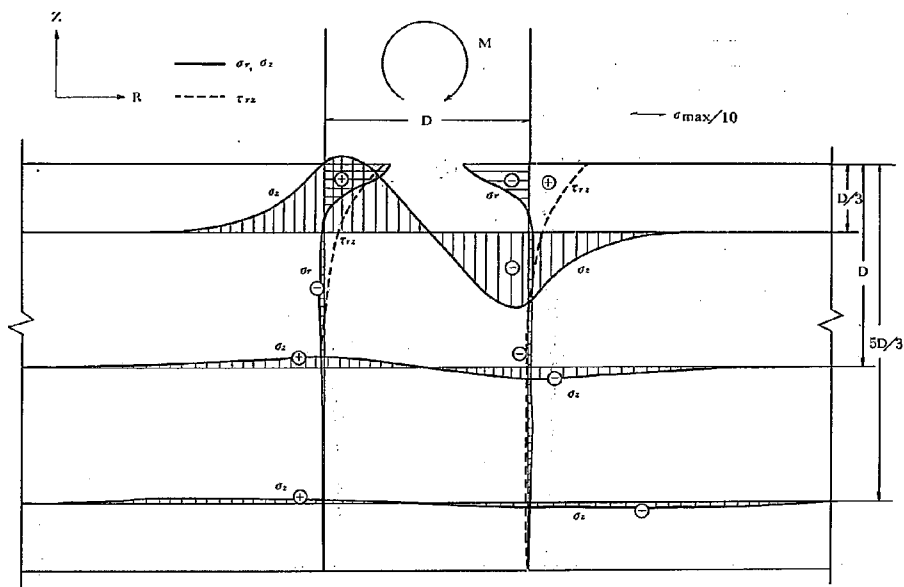


図-10 フーチング基礎の内部応力分布 (3次元計算)

4. 供試体による載荷実験

3. に述べたような解析による検討を行なった結果、差込み接合における応力分布の傾向および適正な差込み深さについて、一応の目安を得たが、これを実験的に検証するために、フーチングと柱とを組合せた供試体により、差込み深さを種々変化させて静的繰返し載荷実験を行ない、接合部の耐力、変形等の検討を行なった。

4.1 実験方法

(1) 供試体

供試体の諸元および配筋状態は図-11のとおりである。コンクリートは表-1に示す配合とし、すべての供試体を同一バッチのコンクリートを用いて製作した。鉄筋は異形棒鋼SD30を用いた。

フーチングの柱の差込みは、マーチングの差込み穴にあらかじめ所定の差込み深さまでモルタルを打ってから柱を差込み、その後、柱とフーチングとのすき間にモルタルを充てんする方法で行なった。差込み深さは12.5cm、25cm、37.5cmの3種類とし、25cmのものについては、フーチングと柱との付着性を高めるために、両者の差込み部分のコンクリート表面に凹凸をつけておいた。なお、柱とフーチングとのすき間にはストレーンゲージを埋込んだ。

表-1 コンクリートの配合表

粗骨材の 最大方法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント O	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
20	10±2.5	4±1	56	45	162	290	810	1020	0.725

(2) 載荷方法

図-12に示すように、供試体のフーチング部を載荷フレームにアンカーボルトで固定し、フーチング表面より100cm隔てた柱部分に上下両方向から交互に載荷した。なお、載荷点にはテフロン支承を使用した。

載荷は、ロードセルで載荷荷重を検出しながら、±2t、±4t、および±6tの繰返し載荷を行ない、それ以後は載荷点の変位量(ダイヤルゲージ)で制御しながら繰返し荷重を加え、変位量が50mmになるまでこれを継続した。

(3) 測定方法

1) ひずみ測定

FEMによる計算結果と比較するために、柱の差込み部分の周りにモルタルを充てんする際に、図-13に示すようにワイヤストレーンゲージをモルタル棒に貼付したものを埋込んでひずみの測定

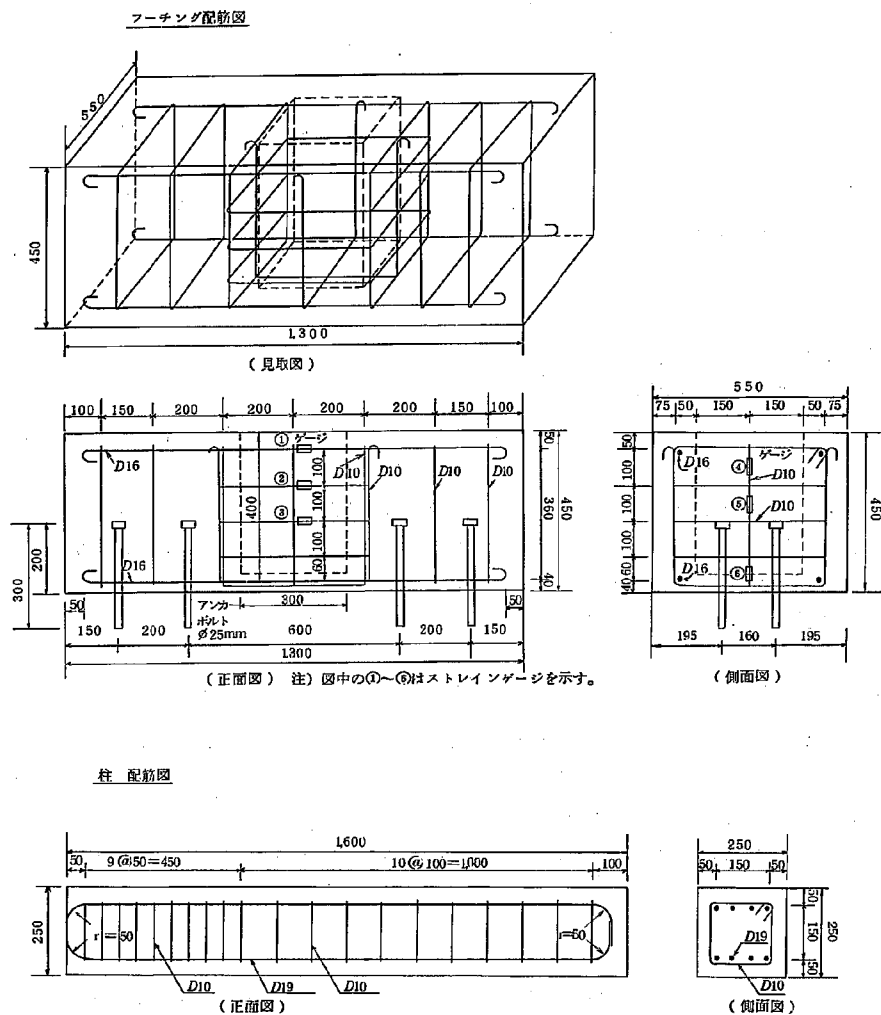


図-11 供試体の構造概要

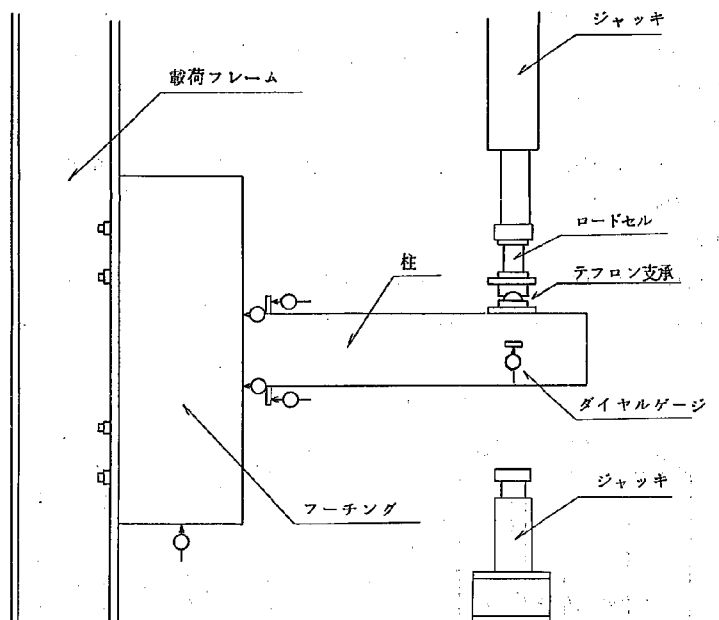


図-12 荷重方法

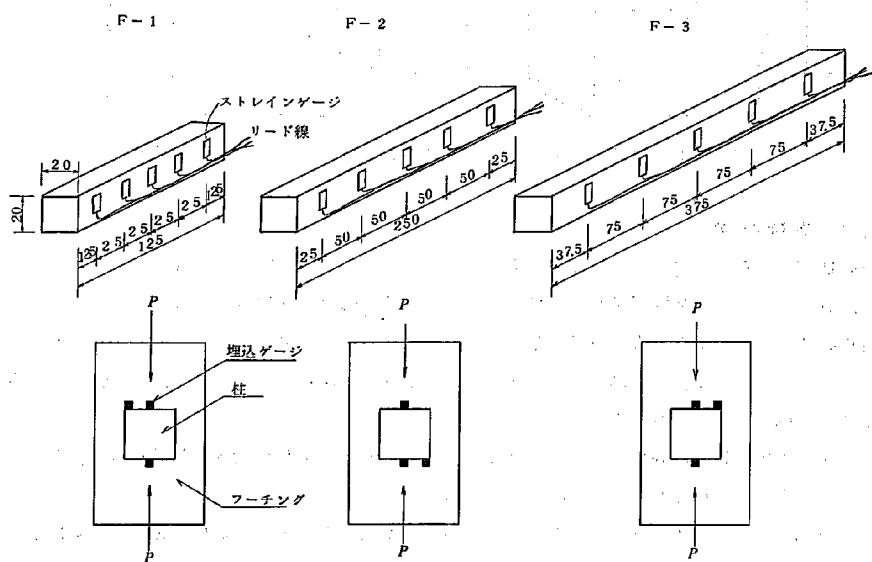


図-13 埋込みゲージと埋込み位置

を行なった。また、フーチング内の鉄筋には図-11に示すような位置にワイヤストレーンゲージを埋込んでおき、そのひずみを測定した。マーチング表面には、図-14に示す位置にワイヤストレーンゲージを貼付した。なお、フーチングの側面に設けたロゼットゲージは、主応力の変化を見ることを意図したものである。

2) 変位測定

図-12に示す位置にダイヤルゲージを配置して、載荷時の柱の変位量、回転角、フーチングからの抜け出し量を測定した。

3) ひびわれ測定

ひびわれの進行程度は写真によって記録するとともに、図-14に示す位置に設けたコンタクトゲージにより、柱およびフーチングにおけるひびわれ幅を測定した。

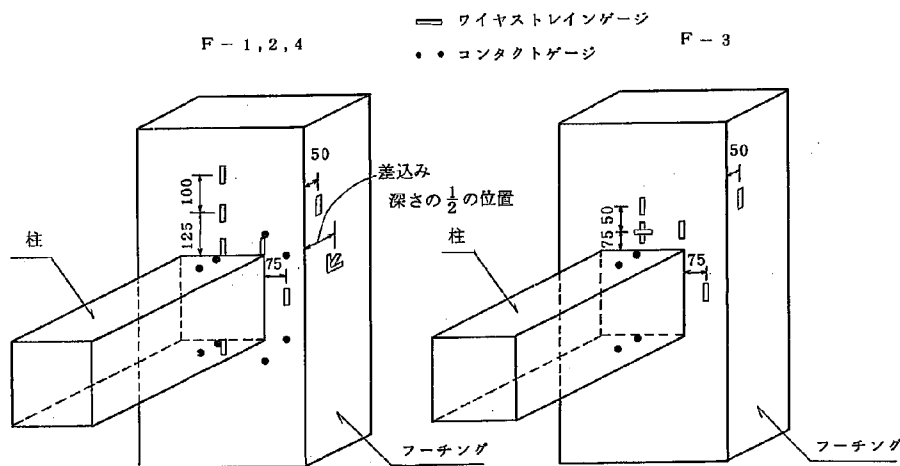


図-14 ワイヤストレーンゲージおよびコンタクトゲージの位置

4.2 実験結果

供試体に用いたコンクリートおよび鉄筋の強度試験結果をそれぞれ表-2および表-3に示す。なお、コンクリートの強度は試験時の材令によって各供試体で多少異なっている。

各供試体について実測された荷重と載荷点における変位量との関係を表-4～表-7および図-15～図-18に示す。また図-15～図-18における各繰返し載荷ごとの最大変位量の包絡線を示すと、図-19のようである。

フーチング内の鉄筋に貼付したストレーンゲージにより測定された鉄筋のひずみの、各繰返し載荷ごとの最大値の包絡線を示すと、図-20～図-23のようである。

差込み部のモルタル中に埋込んだゲージについては不備な点が多く、充分な資料が得られなかった。また、フーチング表面のストレーンゲージによるひずみや、ダイヤルゲージで測定した変位についても注目すべき結果が得られなかった。したがって、これらの資料の取録は省略した。

表-2 コンクリートの強度試験結果

供試体番号	差込み深さ (cm)	差込み深さと 柱の太さの比	試験時のコンクリート強度 (kg/cm ²)			平均 (kg/cm ²)
F-1	12.5	0.5	299	298	300	299
F-2	25.0	1.0	282	282	297	287
F-3	37.5	1.5	277	283	289	283
F-4	25.0	1.0	312	323	302	312

* 付着性を向上させたもの。

表-3 鉄筋の強度試験結果 (SD30)

呼び名	降伏点 (kg/cm ²)	引張強さ (kg/cm ²)
D10	3,603	5,187
D16	3,615	5,387
D19	3,078	5,396

表-4 荷重～変位関係 (F-1)

P (ton)	$\delta (10^{-2} \text{mm})$	P	δ
0	0	-0.5	-803
0.5	26	0	-314
1.0	69	0	-5
1.5	137	0.2	395
1.8	417	0.4	794
1.5	412	0.5	994
1.0	367	0.5	1194
0	229	0.5	1394
-0.5	97	0.5	1494
-1.0	-58	0	1435
-1.5	-202	-0.3	1197
-2.0	-421	-0.4	797
-1.0	-341	-0.5	-3
0	-15	-0.6	-402
1.0	292	-0.9	-802
1.5	833	-1.1	-1001
1.4	990	-1.2	-1201
0	820	-1.1	-1401
-0.5	397	-1.1	-1501
-1.0	-1	-0.1	-1204
-1.7	-399	0	1296
-1.8	-598	0.1	1496
-1.8	-799	0.1	1995
-1.9	-999	0	2495

表-5 荷重～変位関係 (F-3)

P (ton)	$\delta (10^{-2} \text{mm})$	P	δ	P	δ	P	δ	P	δ	P	δ	P	δ	P	δ
0	0	-2.0	-136	-5.0	-548	-5.6	-735	4.5	1510	2.5	535	-6.7	-1953	6.5	2625
0.5	23	-2.5	-194	-5.5	-604	-6.0	-810	1.9	1123	3.7	919	-6.7	-2052	4.7	2431
1.0	57	-3.0	-254	-6.0	-690	-6.3	-895	0.2	738	4.9	1303	-6.8	-2152	3.4	2237
1.5	109	-3.5	-316	-5.0	-629	-6.6	-981	0	640	5.5	1491	-6.7	-2252	2.4	2043
2.0	174	-4.0	-384	-4.0	-529	-6.8	-1072	-0.2	542	6.0	1680	-6.9	-2351	1.0	1656
1.0	114	-3.0	-302	-2.0	-317	-6.7	-1170	-0.9	155	6.1	1775	-5.8	-2254	0	1240
0	37	-2.0	-223	0	27	-6.8	-1267	-1.9	-207	6.2	1871	-4.4	-2060	-0.4	878
-0.5	-2	-1.0	-124	1.5	356	-6.9	-1365	-3.1	-542	6.3	1968	-3.1	-1866	-0.9	491
-1.0	-36	0	-3	2.6	526	-5.6	-1266	-4.1	-815	6.4	2065	-1.4	-1491	-1.6	120
-1.5	-86	2.0	263	3.7	691	-4.0	-1073	-5.3	-1076	6.5	2162	-0.4	-1120	-2.3	230
-2.0	-144	3.0	371	5.1	868	-2.7	-880	-6.1	-1265	5.2	2062	0	-810	-3.0	-536
-1.0	-85	4.0	485	5.6	952	-1.5	-695	-6.5	-1461	3.8	1869	0.6	-556	-3.5	-785
0	-1	4.5	563	6.1	1034	-0.1	-354	-6.6	-1559	2.6	1674	1.2	-245	-4.1	-1080
1.0	91	5.0	664	6.4	1117	0	-294	-6.7	-1658	0.9	1288	2.0	105	-4.9	-1470
2.0	182	5.5	788	6.6	1204	0.6	9	-6.8	-1756	0	960	2.4	488	-5.7	-1862
2.5	236	6.0	942	6.6	1293	1.7	285	-6.9	-1855	-0.6	511	3.7	876	-6.1	-2058
3.0	305	5.0	894	5.3	1184	2.8	602	-4.9	-1661	-1.4	133	4.6	1265	-6.4	-2255
3.5	378	4.0	788	3.7	991	4.6	978	-3.5	-1468	-2.3	-219	5.5	1651	-6.6	-2453
4.0	462	2.0	543	1.1	604	5.4	1154	-1.4	-1092	-3.1	-539	5.8	1844	-6.7	-2552
3.0	401	0	233	0	373	6.0	1338	-0.3	-772	-3.8	-819	6.0	2039	-6.7	-2651
2.0	305	-2.0	-162	-0.4	217	6.1	1431	0	-595	-4.4	-1086	6.1	2235	-6.8	-2750
1.0	201	-3.0	-279	-1.8	-157	6.2	1525	0.2	-411	-5.7	-1465	6.2	2333	-6.8	-2849
0	89	-4.0	-397	-3.8	-456	6.4	1618	0.8	-102	-6.2	-1659	6.3	2430	-5.1	-2655
-1.0	-36	-4.5	-458	-4.9	-604	6.4	1712	1.4	185	-6.6	-1855	6.4	2528	-3.9	-2461

表-5 荷重~変位関係 (F-3)

P	δ	P	δ	P	δ	P	δ	P	δ	P	δ
-2.9	-2.267	1.0	2.037	-1.9	-2.477	0	1.956	0	-1.874	2.8	3.200
-1.4	-1.890	0	1.568	-0.8	-2.223	-0.2	1.643	0.3	-1.505	4.5	3.587
-0.5	-1.580	-0.3	1.259	-0.3	-1.910	-0.5	1.251	0.5	-1.114	6.1	3.972
0	-1.210	-0.6	868	0	-1.527	-0.8	864	0.9	-728	6.8	4.166
0.2	-978	-1.0	483	0.3	-1.042	-1.1	477	1.3	-343	6.9	4.362
0.5	-625	-1.6	109	0.7	-681	-1.6	98	1.9	47	7.0	4.561
1.0	-286	-2.3	-250	1.2	-322	-2.2	-267	2.5	437	5.4	4.367
1.7	80	-2.8	-572	1.8	65	-2.8	-593	3.1	827	3.4	3.978
2.5	466	-3.2	-815	2.5	451	-3.3	-901	3.7	1,220	1.8	3.589
3.5	853	-3.8	-1,086	3.2	849	-3.7	-1,170	4.2	1,612	0.6	3.199
4.2	1,244	-4.4	-1,474	3.9	1,230	-4.2	-1,478	4.8	2,005	0	2.819
5.0	1,635	-5.1	-1,867	4.5	1,622	-4.9	-1,370	5.3	2,397	0	2.788
5.7	2,026	-5.8	-2,260	5.1	2,014	-5.4	-2,264	5.8	2,791		
6.0	2,221	-6.1	-2,457	5.7	2,406	-6.0	-2,659	6.3	3,185		
6.2	2,418	-6.4	-2,654	6.2	2,798	-6.5	-3,055	6.6	3,580		
6.4	2,614	-6.6	-2,851	6.4	2,995	-6.7	-3,253	6.8	3,778		
6.5	2,712	-6.7	-2,950	6.5	3,193	-6.8	-3,452	6.8	3,976		
6.5	2,811	-6.7	-3,049	6.6	3,390	-7.0	-3,650	6.9	4,075		
6.6	2,908	-6.8	-3,149	6.7	3,489	-7.0	-3,849	5.9	3,978		
6.7	3,006	-6.8	-3,248	6.8	3,588	-5.4	-3,653	3.7	3,588		
6.7	2,106	-6.9	-3,348	5.1	3,394	-4.4	-3,457	2.0	3,200		
5.6	2,008	-5.8	-3,251	4.0	3,200	-2.6	-3,070	0.8	2,810		
4.3	2,814	-4.6	-3,056	2.2	2,811	-1.8	-2,692	0	2,342		
2.4	2,425	-3.6	-2,861	0.9	2,423	-0.5	-2,385	1.4	2,812		

表-6 荷重~変位関係(F-2)

P(ton)	$\delta(10^{-2})$	P	δ	P	δ	P	δ	P	δ	P	δ	P	δ	P	δ	P	δ
0	0	-2.0	-197	-3.7	-806	-3.8	-1.023	0.5	1.081	4.9	1.848	-5.4	-2.508	0	1.919	0.1	870
0.5	27	-2.5	-313	-4.0	-900	-4.1	-1.123	0	918	5.1	1.945	-4.4	-2.410	-0.4	1.479	0.1	470
1.0	63	-3.0	-457	-4.3	-994	-4.4	-1.212	-0.4	695	5.3	2.041	-3.1	-2.215	-0.6	1.083	0.1	70
1.5	120	-3.5	-561	-2.4	-797	-4.6	-1.307	-0.5	299	5.4	2.137	-2.0	-2.021	-0.6	685	0.2	329
2.0	183	-4.0	-750	-1.1	-585	-4.9	-1.403	-0.6	96	5.4	2.334	0.8	-1.641	-0.6	286	0.4	724
1.0	123	-3.0	-685	-0.4	-425	-5.1	-1.498	-1.2	487	5.5	2.330	0.1	-1.254	-0.6	113	0.8	1112
0	43	-2.0	-564	0	-259	-3.9	-1.400	-2.4	865	4.3	2.227	0	-1.185	-0.8	511	1.3	1492
-0.5	2	-1.0	-411	0.1	29	-2.5	-1.206	-3.5	1.238	3.0	2.042	0.3	-863	-1.3	901	1.9	1870
-1.0	42	0	-123	1.2	352	-1.4	-1.018	-4.3	1.521	1.9	1.850	0.4	-466	-2.0	1.288	2.6	2259
-1.5	83	0.2	-25	3.0	723	-0.1	-638	-4.6	1.615	0.4	1.467	0.5	-68	-2.7	1.670	3.1	2651
-2.0	136	0.7	169	3.9	913	0	-609	-4.9	1.710	0	1.317	0.7	328	-3.3	2.053	3.3	2847
-1.0	78	1.6	355	4.2	1.006	0.3	-441	-5.1	1.805	-0.4	1.080	1.0	714	-3.8	2.440	3.5	3044
0	8	2.6	540	4.5	1.098	0.4	42	-5.3	1.902	-0.6	675	1.7	1.092	-4.1	2.635	3.4	3243
1.0	102	3.6	728	4.8	1.191	1.1	342	-5.5	1.998	-0.6	288	2.4	1.467	-4.2	2.732	3.3	3343
2.0	193	3.9	818	4.9	1.283	2.2	714	-3.7	1.802	-0.7	110	3.3	1.853	-4.3	2.830	3.3	
2.5	250	4.2	916	5.1	1.377	3.6	1.088	-2.5	1.609	-1.0	504	4.1	2.243	-4.3	2.830	3.2	
3.0	342	2.2	722	3.9	1.278	4.6	1.375	-0.8	1.232	-1.7	891	4.4	2.438	-4.4	3.028	3.1	
3.5	394	1.0	530	2.5	1.087	4.9	1.470	0	926	-2.6	1.270	4.5	2.536	-2.8	2.832	1.9	
3.8	705	0	329	1.3	897	5.1	1.564	0.4	451	-3.5	1.647	4.6	2.634	-1.8	2.638	1.1	
3.0	680	-0.3	144	0	630	5.3	1.658	0.4	51	-4.5	2.025	4.6	2.733	-1.1	2.449	0.4	
2.0	559	-0.5	54	-0.5	319	5.4	1.752	0.9	338	-4.8	2.116	4.7	2.832	-0.3	2.065	0	
1.0	421	-1.1	-246	-0.6	79	5.6	1.847	1.6	711	-5.0	2.214	2.9	2.641	0	1.860		
0	250	-1.9	-434	-1.7	463	3.8	1.654	2.7	1.081	-5.2	2.311	1.8	2.449	0	1.670		
-1.0	28	-2.8	-621	-3.1	837	2.5	1.462	3.7	1.462	-5.3	2.411	0.8	2.257	0.1	1.270		

表-7 荷重~変位関係 (F-4)

P (ton)	$\delta (10^{-2} \text{mm})$	P	δ	P	δ	P	δ	P	δ	P	δ	P	δ
0	0	-2.5	-193	-6.0	-1.295	-5.9	-1.598	-2.4	-842	0.4	1.925	2.4	1.934
0.5	25	-3.0	-270	-5.0	-1.251	-6.3	-1.795	-3.6	-1.228	0	1.748	2.9	2.326
1.0	58	-3.5	-378	-4.0	-1.135	-6.6	-1.992	-5.0	-1.612	-0.4	1.135	3.2	2.720
1.5	104	-4.0	-506	-2.0	-840	-3.3	-1.600	-6.0	-2.002	-0.5	736	3.2	2.918
2.0	162	-3.0	-443	0	-205	-1.4	-1.207	-6.4	-2.200	-0.6	337	3.2	3.117
1.0	103	-2.0	-348	0.3	-11	-0.5	-812	-6.7	-2.400	-0.8	-61	3.2	3.317
0	31	0	-48	1.5	376	0	-325	-6.7	-2.500	-1.2	-458	3.1	3.417
-0.5	0	2.0	232	3.2	752	0.3	-18	-5.4	-2.403	-1.7	-854	2.2	3.321
-1.0	-34	3.0	346	4.2	942	0.7	378	-3.0	-2.008	-2.4	-1.246	0.6	2.932
-1.5	-73	4.0	465	5.1	1.133	1.6	764	-1.4	-1.613	-3.2	-1.637	0	2.538
-2.0	-128	4.5	551	5.8	1.324	2.8	1.195	-0.6	-1.218	-4.0	-2.028		
-1.0	-74	5.0	687	6.2	1.517	4.2	1.521	0	-550	-4.8	-2.420		
0	-2	5.5	895	6.4	1.711	5.4	1.908	0.2	-23	-5.1	-2.618		
1.0	84	6.0	1.153	6.3	1.905	5.8	2.102	0.5	372	-5.2	-2.817		
2.0	168	5.0	1.120	3.2	1.518	5.9	2.299	1.0	766	-5.4	-3.016		
2.5	229	4.0	1.004	1.4	1.130	6.0	2.397	1.8	1.152	-3.6	-2.818		
3.0	299	2.0	702	0	682	4.7	2.301	2.7	1.533	-1.7	-2.424		
3.5	368	0	292	-0.5	347	2.4	1.913	3.8	2.116	0.7	-2.029		
4.0	448	-2.0	-233	-0.9	-50	0.9	1.524	4.6	2.306	0	-813		
3.0	384	-3.0	-428	-1.7	-442	0	1.134	5.0	2.501	0.3	-13		
2.0	285	-4.0	-627	-3.1	-829	-0.4	739	5.1	2.699	0.5	364		
0	71	-4.5	-740	-4.0	-1.019	-0.6	341	5.2	2.896	0.8	760		
-1.0	-32	-5.0	-886	-4.8	-1.210	0.9	-57	3.5	2.696	1.3	1.153		
-1.2	-127	-5.5	-1.063	-5.4	-1.402	-1.4	-4452	1.5	2.315	1.8	1.545		

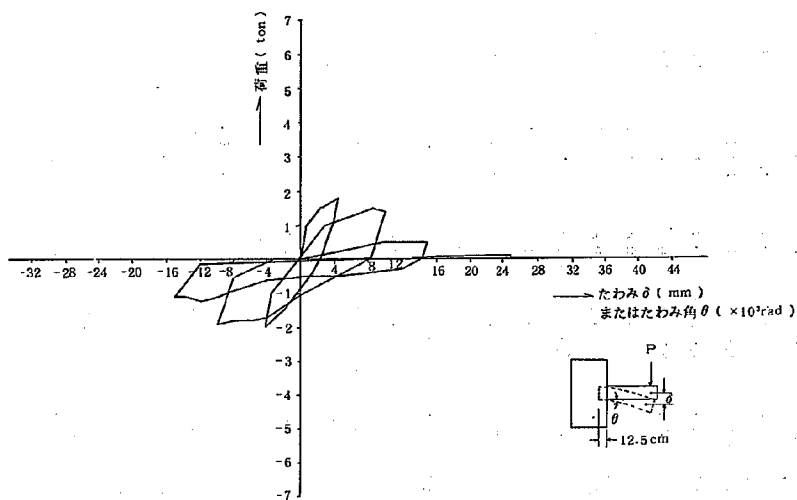


図-15 荷重～変位図 (F-1)

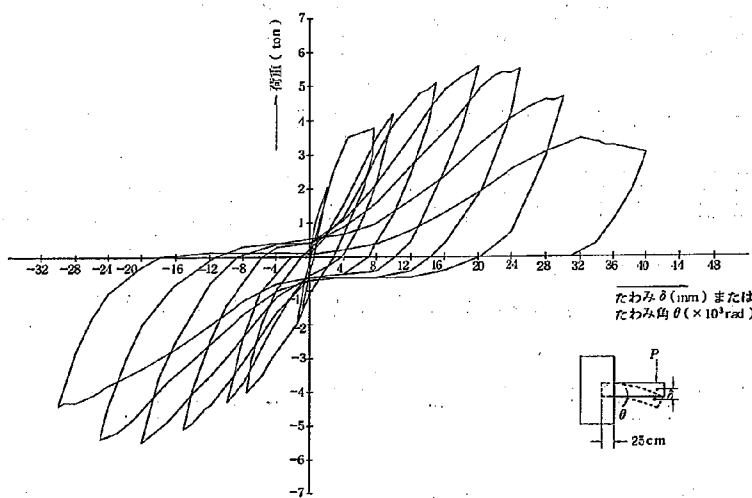


図-16 荷重～変位図 (F-2)

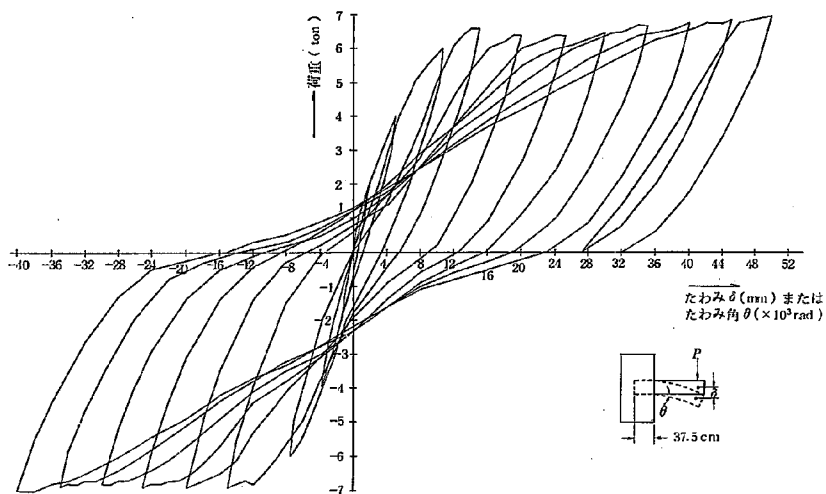


図-17 荷重～変位図 (F-3)

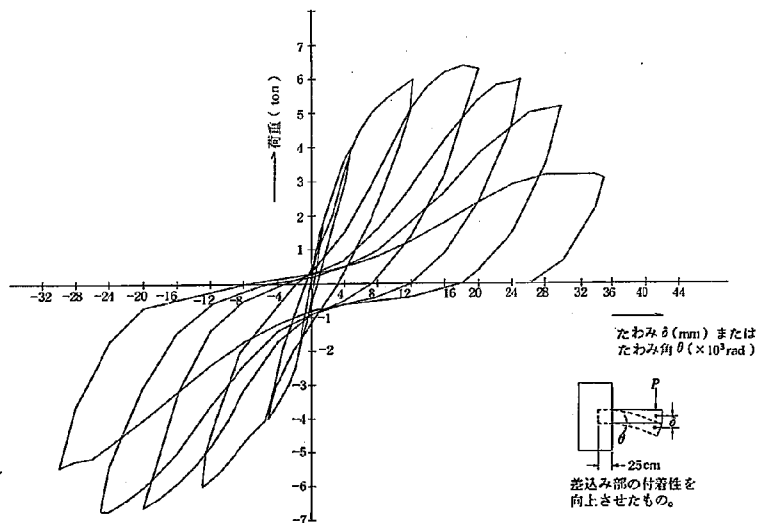


図-18 荷重～変位図 (F-4)

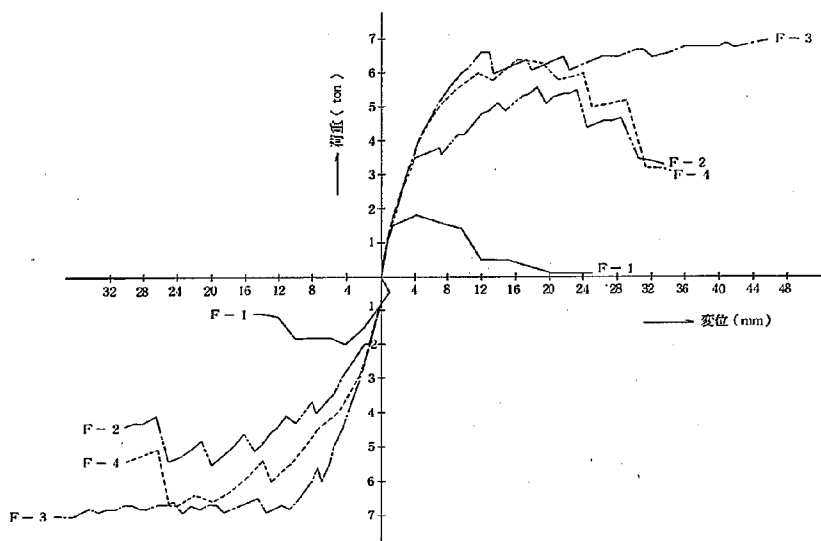


図-19 各繰返し載荷ごとの載荷点の最大変位の包絡線

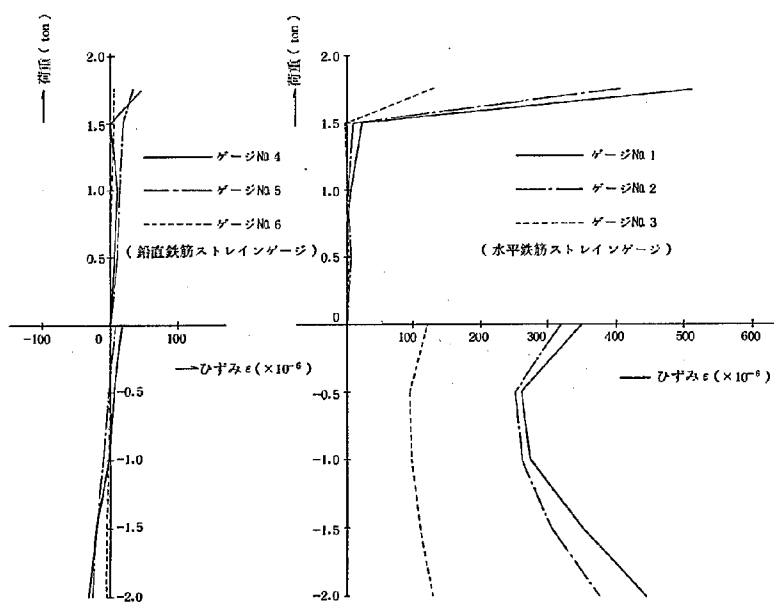


図-20 フーチング内鉄筋の各繰返し載荷ごとの最大ひずみの包絡線 (F-1)

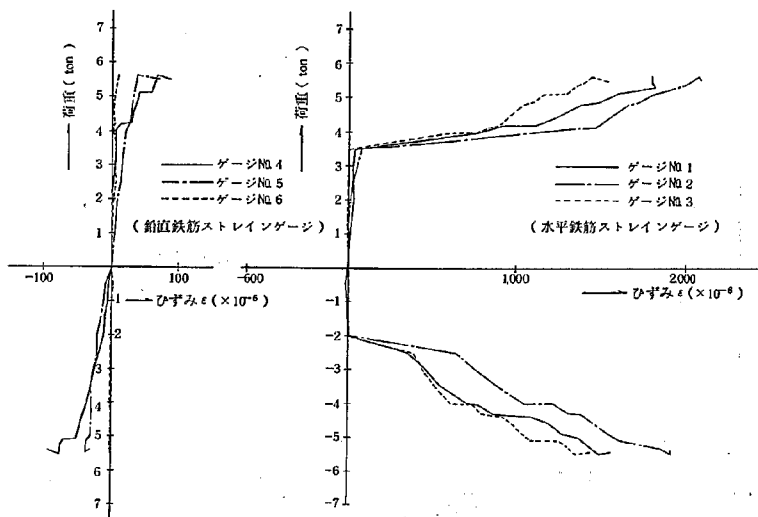


図- 21 フーチング内鉄筋の各繰返し载荷ごとの最大ひずみの包絡線 (F-2)

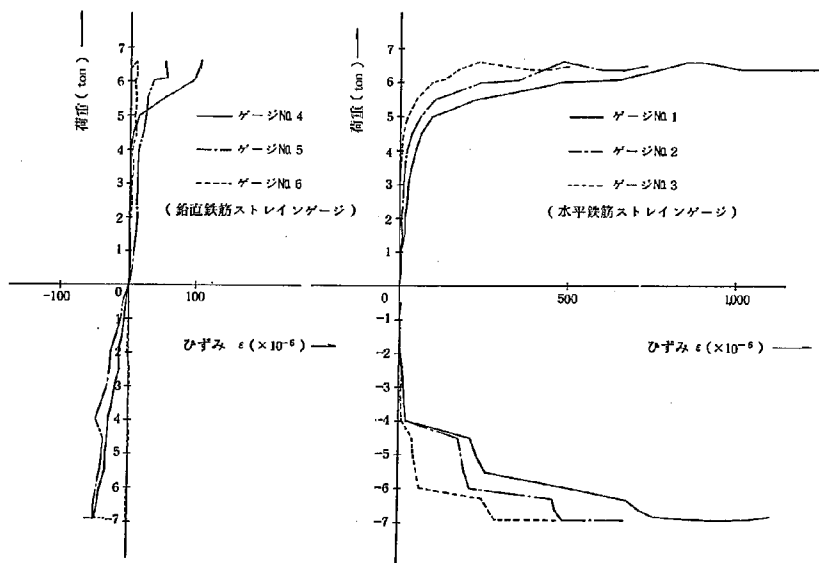


図- 22 フーチング内鉄筋の各繰返し载荷ごとの最大ひずみの包絡線 (F-3)

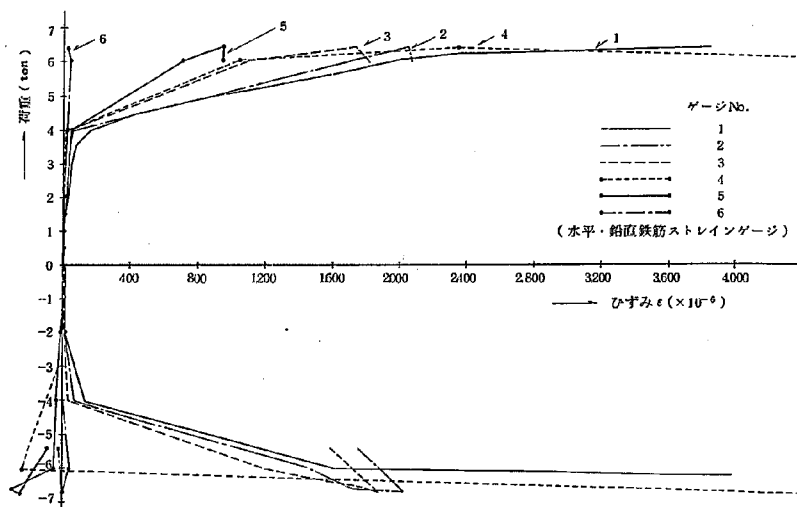


図-23 フーチング内鉄筋の各繰返し载荷ごとの最大ひずみの包絡線 (F-4)

4.3 実験結果の考察

(1) 耐力

FEMによる計算結果を勘案のうえ、今回の実験供試体の理論耐力を簡易に求める方法について検討した結果、従来くい頭部とフーチングとの結合の設計に用いられている計算方式²⁾が今回の場合に適用できると考えられたので、この計算式と実験値を比較してみた。

計算式は次のようである(図-24参照)。

$$\sigma_{c1} = \frac{H}{d \cdot \ell}$$

$$\sigma_{c2} = \frac{6M}{d \cdot \ell^2}$$

$$\sigma_{c1} + \sigma_{c2} \leq \sigma_{ca}$$

ただし、 $M = H \cdot L$

σ_{ca} : コンクリートの許容圧縮応力度

上式の σ_{ca} に、一体コンクリートの圧縮強度をそのまま代入して耐力(H)を計算した値を、実験値とともに表-8に示す。同表から明らかなように、F-1、F-2、およびF-4については実験値は簡易計算値とかなりよく一致している。F-3の実験値が計算値よりかなり小さいのは、差込み部のコンクリートの圧壊が起る前に柱の破壊が生じたためである。ちなみに、柱の終局強度理論による計算耐力は6.03tである。F-1、F-2、およびF-4は、すべて差込み部の圧壊によって破壊に至った。なお、F-4は差込み部の付着性を向上させたもので、同じ差込み深さのF-2に比べ耐力は15%増となっている。

以上により、今回実験を行なったような差込み接合部の耐力は、従来くい頭部とフーチングとの結合の設計に用いられてきた計算方式によって推定しても、実用上充分であるといえよう。なお、フーチング中に差込まれた柱の部分には、曲げモーメントのために大きなせん断力が生じるので、スターラップで充分に補強しておく必要がある。

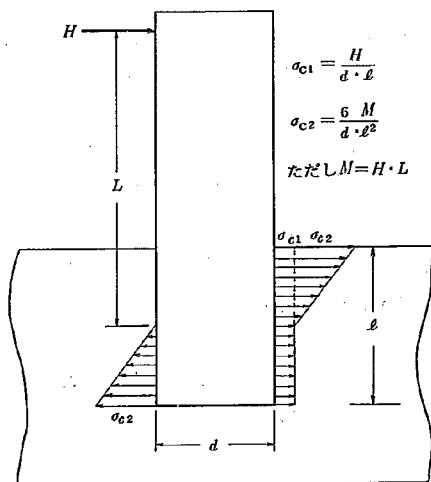


図-24 くいとフーチングの接合の設計における応力分布の仮定

表-8 接合部の耐力の比較

供試体番号	差込み深さ (cm)	差込み深さと柱 の太さとの比	コンクリート強度 (kg/cm ²)	耐力(H)t	
				実験値	計算値
F-1	12.5	0.5	299	1.76	1.80
F-2	25.0	1.0	287	5.60	6.41
F-3	37.5	1.5	283	6.64	13.27
※ F-4	25.0	1.0	312	6.44	6.96

※ 付着性を向上させたもの。

(2) 変位

図-19にみられるように、各供試体ともフーチングの側面にひびわれが入ると急激に変位が増加している。しかし、ひびわれが入るまでは、各供試体ともほぼ同様な変形状態を示しており、変形を少なくするにはフーチングにひびわれが生じないように、水平鉄筋によって充分補強することが必要と思われる。

(3) 鉄筋のひずみ

図-20～図-22にみられるように、フーチングの水平方向鉄筋のひずみはフーチングの側面にひびわれが入ると急激に増加しているのに対して、フーチングの鉛直方向鉄筋はひびわれ後もひずみはほとんど変化していない。このことから、ひびわれが入ったのちはほとんど水平方向鉄筋のみで荷重を負担することがわかる。これに対して、図-23より明らかなように、差込み部の付着力を向上させたものは、ひびわれが入ると、水平・鉛直両方向鉄筋ともにひずみが増していることから、荷重に対して鉛直方向鉄筋の作用も充分期待できる。よって、付着力を向上させて鉛直方向鉄筋に荷重を分担させたものは、水平方向鉄筋の応力を緩和させることでフーチングの側面のひびわれの発生を遅らせることができ、差込み部のコンクリートの圧壊に至るまでの耐力を増大させることができると思われる。

(4) ひびわれと破壊の性状

フーチングのひびわれは、写真-1に示すようにフーチング上面の柱の付け根部よりフーチングの側面まで放射状に発生し、荷重の増加とともにフーチングの深部に進行する。フーチングの側面のひびわれについては、くい頭部とフーチングとの結合の設計に用いられている計算方式によって計算した場合、斜め引張ひびわれが生ずるものと考えられたが、フーチングの側面に貼ったロゼットゲージから得られた主応力の変化や、ひびわれがほぼ鉛直方向に入っていることなどから、水平方向の引張応力によって生じたものと思われる。

コンクリートの圧壊状況は、写真-2のようである。なお、付着性を向上させたF-4は、写真-3に示すように破壊は広範囲にわたっている。写真-4は柱の差込み部分の破壊状況である。

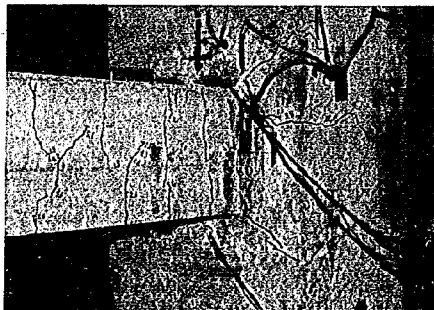


写真-1 フーチングのひびわれ状況

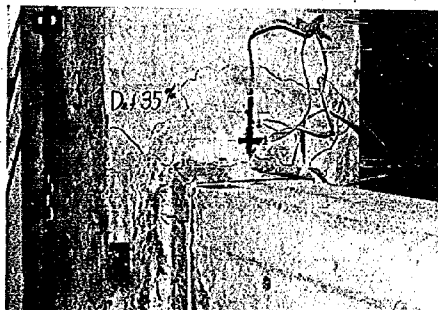


写真-2 フーチングの圧壊状況

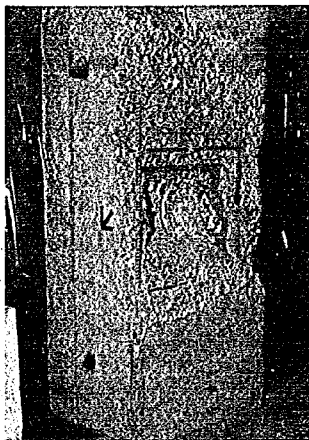


写真-3 F-4のフーチングの破壊状況

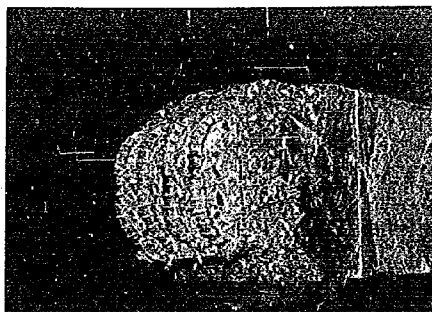


写真-4 F-4の柱の差込み部の破壊状況

5. 結 言

今回行ったFEMによる計算や供試体による実験の結果から、柱とフーチングとの接合部の構造細目等を明らかにするには、まだ不十分な点が多い。今回の供試体による実験では、柱に加える外力は水平力のみとしたが、実際の構造物ではある程度の軸方向力も同時に作用しているため、フーチングの破壊性状は今回の実験で得られたものとは若干異なったものになると思われる。

柱とフーチングとの接合部には、今回はモルタルを充てんしたが、ほかに充てん材として膨張モルタルや樹脂系材料を用いる方法も考えられるし、また、接合形式としてはほかに柱とフーチングの鉄筋を一部露出させておいて重ね継手として接合し、柱の鉄筋の力をフーチングの鉄筋に直接伝達させる方法などが考えられる。いずれの方法でも、柱が完全にフーチングに接合させて一体となった場合、FEMの計算結果から明かなように、柱からの力はフーチング内で急速に減少するため、不完全な接合の場合に比べ接合部の柱とフーチングの配筋状態は相当異なってくると思われる。したがって、今後はこれらの接合方法についてもさらに実験的な検討を行ない、接合部の合理的な設計法についてさらに追究する必要があるだろう。

参 考 文 献

- 1) 川股重也：“Finite Element Methodによる回転体の非軸対称問題の解析”，コンピュータ使用によるマトリックス構造解析，日本鋼構造協会
- 2) 足立義雄：“くいとフーチング結合部の剛性”，土木技術資料Vol.16，No.10，土木研究会，1974