

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する 実験的研究（その1）

塩 井 幸 武*

Experimental study on the pile head connection devices for steel pipe pile foundation

Yukitake SHIOI

Abstract

For the connection of pile head to footing of steel pipe pile foundation, experimental and dimensional studies were performed to vertical load. As results, less efficiency of conventional pile head cover, importance of punching shear on embedded pile head, fear of brittle rupture by shear, etc were clarified.

From the following studies on a conventional, a new and a SRC methods of the pile head connection to SRC slab against vertical load, each structural properties became clear and the new method was justified.

1 はじめに

鋼管杭基礎は支持力性状、変形性能に優れた特性を有する基礎形式である。

杭基礎の場合、鉛直力(押込力、引抜力)、水平力、曲げモーメントとも杭頭で最大値となる。そのために杭の寸法諸元など、杭の設計断面は杭頭の荷重条件に支配される。杭を設計するには杭頭の荷重条件とともに杭頭の拘束条件も支配的条件である。

杭頭の拘束条件とは杭とその上のフーチング(頂版)の固定条件のことである。すなわち、杭とフーチングが剛結されていると構造物に作用する荷重はフーチングを介して杭に鉛直力、水平力、曲げモーメントの形態をとって伝達される(図-1a)。

杭とフーチングがヒンジで結合されていると構造物に作用する荷重は杭には鉛直力と水平力だけで伝達される。現実には完全なヒンジ結合

とすることは不経済で、技術的にも困難であることから、杭頭で曲げモーメントを負担させないとして設計したものをヒンジ結合としている(図-1b)。

逆に剛結結合は形状の上では実現されているが、結合部におけるフーチングにしても杭にしても弾性体材料であるために曲げモーメントが作用すると回転変形を生じる。回転変形はフーチングと杭の弾性変形によるもので、モーメントに対する回転角は回転ばねで評価することができる。すなわち、剛結結合と言っても回転変形を生じているので完全な剛結とは言うことが

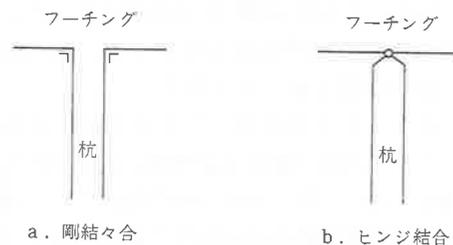


図-1 剛結結合とヒンジ結合のモデル

平成7年10月16日受理

* 構造工学研究所 教授

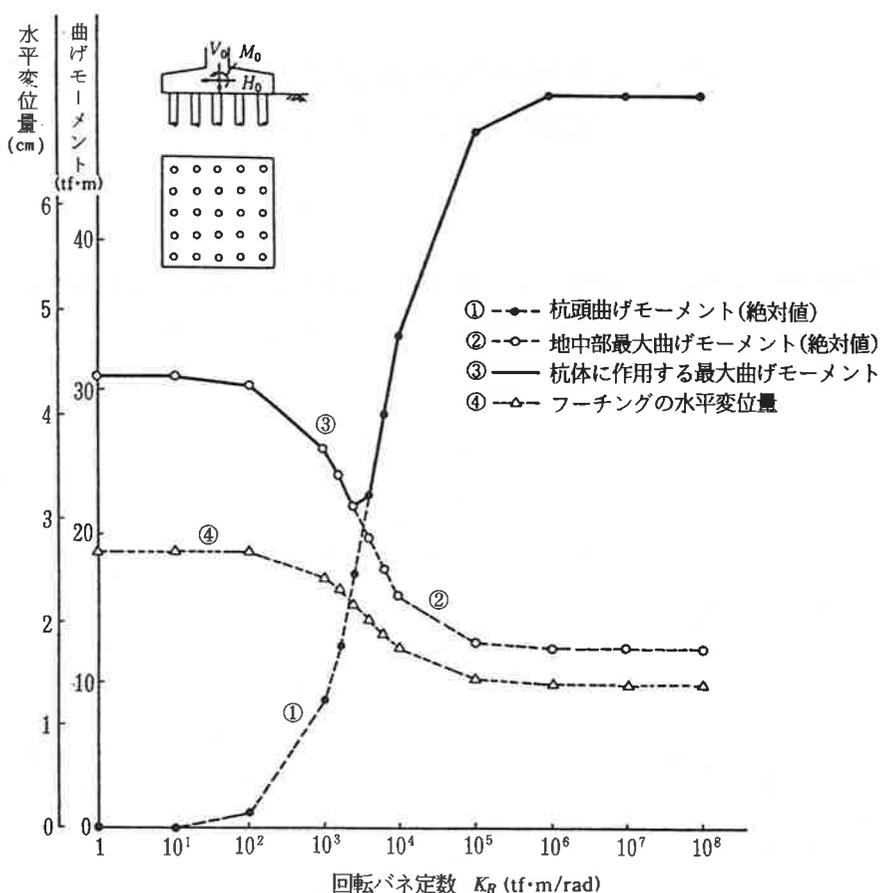


図-2 回転バネ定数と変位、曲げモーメントの関係

できない。

回転バネと伝達する曲げモーメント、そのときの水平変位量の関係は図-2のようになる。図中の曲線①は杭頭剛結(固定)とした場合の計算結果、曲線②は杭頭ヒンジとした場合の計算結果である。曲線③は曲線①、②の最大値をとったものである。曲線④は各曲げモーメントを生じる際の水平変位量を示している。曲線①、②の計算は表-1の方程式によった。

このような計算を成立させるためには杭とフーチングの間で各荷重が円滑に伝達されなくてはならない。そのための結合方法として通常は安全側の剛結結合法が採用される。図-3は鋼管杭の慣習的な杭頭結合方法である。A方法は

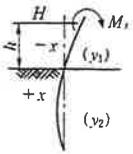
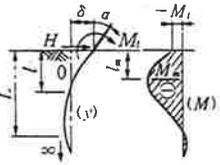
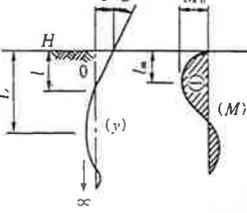
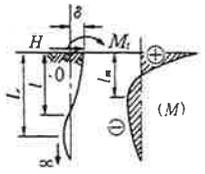
杭頭をフーチング内部まで貫入させて結合する方法である。B方法は杭頭をフーチングの下面の鉄筋の下に止めて杭頭のまわりにひげ鉄筋を溶接して定着させるものである。

前者の場合はフーチングの下面の鉄筋を切断もしくは亀甲状の配筋となる。曲げモーメントと水平力は杭体の貫入長で負担し、鉛直力は杭頭上のコンクリートの押抜きせん断(パンチングシア)抵抗で負担させる。

後者の場合はフーチングの配筋の障害にはならないが、ひげ鉄筋で鋼管の杭頭断面積に対応させることはできないのでひげ鉄筋の外側のコンクリート断面を有効断面積にとり込んで曲げモーメントや水平力に対応させる。鉛直力には

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究

表-1 杭軸直角方向と外力としてのモーメントに対する一般式

<p>たわみ曲線の微分方程式</p>	 <p>地上部分: $EI \frac{d^4 y_1}{dx^4} = 0$ 地中部分: $EI \frac{d^4 y_2}{dx^4} + \rho = 0$ $\rho = k_H D y_2$ H: 杭軸直角方向力 (kgf) M_t: 杭頭の外力としてのモーメント (kgf·cm) D: 杭径 (cm) E: 杭のヤング係数 (kgf/cm²) I: 杭の断面二次モーメント (cm⁴)</p>	<p>k_H: 水平方向地盤反力係数 (kgf/cm³) h: H, M_t の作用する地上高 (cm) $\beta = \sqrt[4]{k_H D / 4EI}$ (cm⁻¹) $h_0 = \frac{M_t}{H}$ (cm)</p>	
<p>杭の状態</p>	<p>上中に埋込まれた杭 ($h_0 = 0$)</p>		
<p>たわみ曲線 曲げモーメント図</p>	<p>イ) 基本形</p> 	<p>ロ) $M_t = 0$ の場合 ($h_0 = 0$)</p> 	<p>ハ) 杭頭が回転しない場合</p> 
<p>a たわみ曲線 y (cm)</p>	$y = \frac{H}{2EI\beta^3} e^{-\beta x} [(1 + \beta h_0) \cos \beta x - \beta h_0 \sin \beta x]$	$y = \frac{H}{2EI\beta^3} e^{-\beta x} \cos \beta x$	$y = \frac{H}{4EI\beta^3} e^{-\beta x} [\cos \beta x + \sin \beta x]$
<p>b 杭頭変化 δ (cm)</p>	$\delta = \frac{H}{2EI\beta^3} + \frac{M_t}{2EI\beta^2} = \frac{1 + \beta h_0}{2EI\beta^3} H$	$\delta = \frac{H}{2EI\beta^3}$	$\delta = \frac{H}{4EI\beta^3} = \frac{\beta H}{k_H D}$
<p>c 地表面変位 f (cm)</p>	$f = \delta$	$f = \delta$	$f = \delta$
<p>d 杭頭傾斜角 a (rad)</p>	$a = \frac{H}{2EI\beta^2} + \frac{M_t}{EI\beta} = \frac{1 + 2\beta h_0}{2EI\beta^2} H$	$a = \frac{H}{2EI\beta^2}$	$a = 0$
<p>e 杭各部の曲げ モーメント M (kgf·cm)</p>	$M = -\frac{H}{\beta} e^{\beta x} (\beta h_0 \cos \beta x + (1 + \beta h_0) \sin \beta x)$	$M = -\frac{H}{\beta} e^{-\beta x} \sin \beta x$	$M = -\frac{H}{2\beta} e^{-\beta x} (\sin \beta x - \cos \beta x)$
<p>f 杭各部のせん断力 S (kgf)</p>	$S = -H e^{-\beta x} [\cos \beta x - (1 + 2\beta h_0) \sin \beta x]$	$S = -H e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x)$	$S = -H e^{-\beta x} \cos \beta x$
<p>g 杭頭曲げ モーメント M_0 (kgf·cm)</p>	$M_0 = -M_t = -H h_0$	$M_0 = 0$	$M_0 = \frac{H}{2\beta}$
<p>h 地中部 l_m の点の 曲げモーメント M_m (kgf·cm)</p>	$M_m = -\frac{H}{2\beta} \sqrt{(1 + 2\beta h_0)^2 + 1} \exp(-\beta l_m)$	$M_m = -\frac{H}{\beta} e^{-\frac{\pi}{4}} \cdot \sin \frac{\pi}{4} = -0.3224 \frac{H}{\beta}$	$M_m = -\frac{H}{2\beta} e^{-\frac{\pi}{2}} = -0.2079 M_0$
<p>i l_m (cm)</p>	$l_m = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{1}{1 + 2\beta h_0}$	$l_m = \frac{\pi}{4\beta}$	$l_m = \frac{\pi}{2\beta}$
<p>j 第一不動点の 深さ l (cm)</p>	$l = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{1 + \beta h_0}{\beta h_0}$	$l = \frac{\pi}{2\beta}$	$l = \frac{3\pi}{4\beta}$
<p>k たわみ角 0 と なる深さ L (cm)</p>	$L = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} [-(1 + 2\beta h_0)]$	$L = \frac{3\pi}{4\beta}$	$L = \frac{\pi}{\beta}$

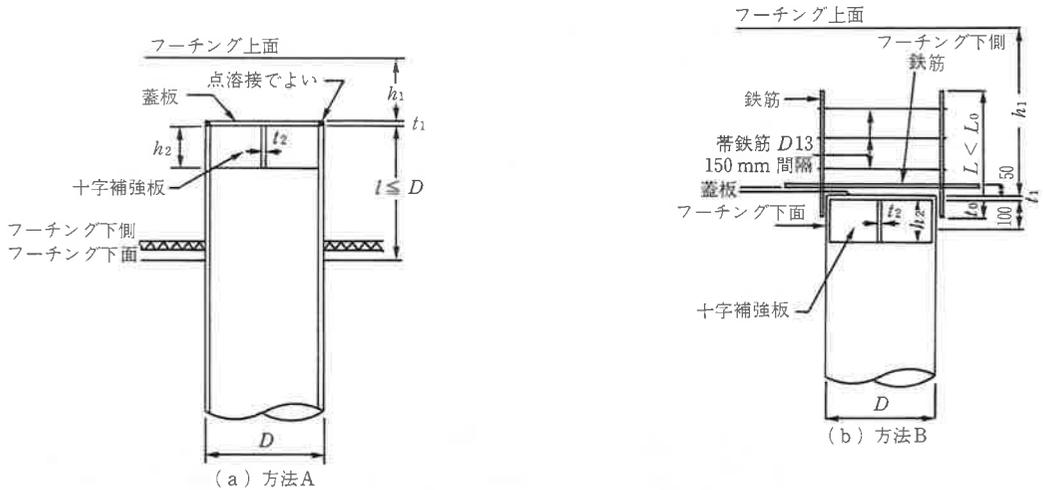


図-3 鋼管杭の杭頭結合法

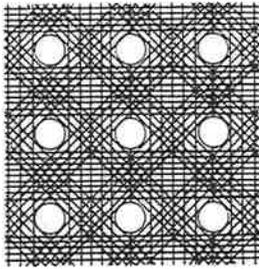


図-4 フーチングの亀甲状の配筋例

杭頭上のコンクリートの押抜きせん断抵抗で応じるが、有効厚が大きいこと、下面の鉄筋による分散効果のあることなどから問題になることは少ない。

ここでとり上げるのはA方法による定着方法の合理化である。特にフーチングが薄い場合(頂版)は杭頭上の有効厚が小さくなるために鉛直荷重による押抜きせん断応力が過大となり、設計が不能になることがある。曲げモーメントや水平力についても荷重が大きくなると亀甲状の配筋や切断した配筋では設計できなくなることもある(図-4)。

本論文では鉛直荷重に対するA方法による杭頭固定方法の合理化のための試験研究の結果

を論じる。水平力による曲げモーメントに対する同方法による試験研究の成果は次稿で論じることとする。

2 実験1 (A方法に杭頭固定の挙動)

2.1 概要

A方法による杭頭固定は図-3でもわかるように杭頭からフーチング上面までの間で杭頭の押込せん断に耐えられるコンクリートの厚さの確保がむずかしい場合が多い。また、多柱式基礎の頂版やカルバートボックスの下床版のように薄いフーチングにA方法による剛結をしたい場合は設計がますますむずかしいものとなる。

そこでA方法で杭頭を固定した場合の鉛直力に対するA方法の挙動を杭頭結合法の諸元を変化させて調べてみることにした。

2.2 試験体と試験方法

A方法による試験体は図-5に示す形状で製作した。試験体の諸元は表-2に示す7体とし、載荷方法は図-6に示す。A1, A6に用いる天蓋とは鋼管杭の頭部にかぶせる蓋で、図-7に示す

表-2 試験体の種類

	天蓋 $t=22$	鋼管肉厚 (t_p)	杭周面の 付着	備考
A1	有	9.5	有	杭体, 支圧ひずみ測定
A2	無	9.5	有	杭体ひずみ測定
A3	無	6.4	有	支圧ひずみ //
A4	無	12.7	有	
A5	無	14.3	有	支圧ひずみ測定
A6	有	9.5	無	杭体ひずみ //
A7	無	9.5	無	

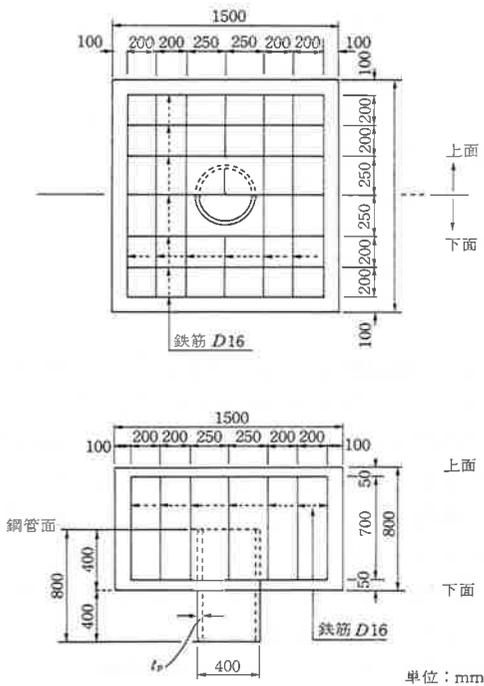


図-5 A方法による試験体

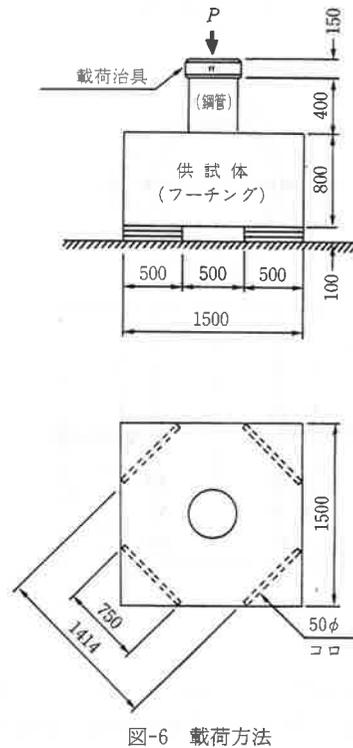


図-6 載荷方法

ものである。そのために A1, A6 は管内が中空となり、その他のものはフーチング下面までコンクリートで充填されている。

試験では載荷々重によるフーチングのたわみ、鋼管のフーチングのコンクリートへのめり込み量の他、杭体のひずみ量をフーチングへの埋込部分も含めて測定した(A1, A2, A6)。また、フーチングの中での支圧ひずみの分布を A1,

A3, A5 について測定した (図-8, 図-9 参照)。

2.3 測定結果と考察

図-10 は図-6 における鉛直荷重とフーチングのたわみの関係を A1~A7 の供試体についてとりまとめたものである。最大荷重は付着のあるもので 125~185 tf, 付着のないもので 115

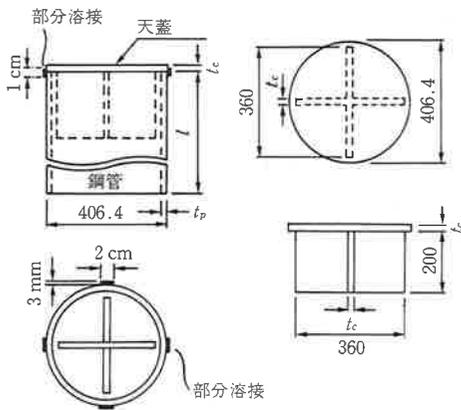


図-7 天蓋の形状

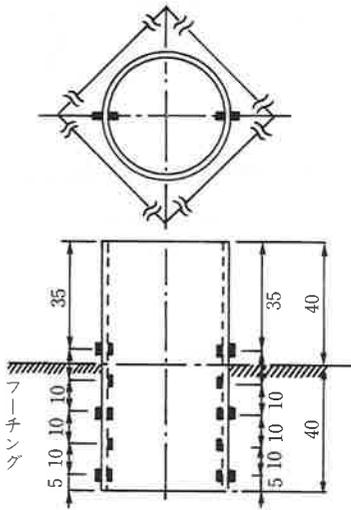


図-9 鋼管のストレインゲージの位置

～120 tf に分布している。フーチング上面におけるひびわれ発生時の荷重は付着のあるもののうちで A4 を除くと 110～130 tf に、付着のないもので 70～85 tf となっている。A4 は最大荷重もひびわれ荷重も大きい、最大荷重の後は急激に破壊している。

原因は鋼管の錆にあり、A1, A2, A6, A7 はほぼ新品で、A3, A5 は少し古く、A4 は全面に赤錆が生じているものであった。すなわち、A4 では鋼管の表面が粗く、コンクリートとの付着がよいためにフーチング全厚に荷重が分布して典型

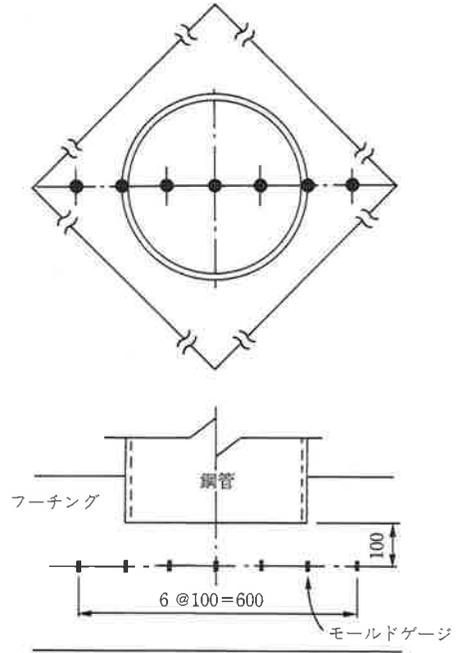


図-8 フーチングコンクリートのゲージ位置

的なせん断破壊を生じた。それに対して A6, A7 は低い荷重 (70～85 tf) の段階で降伏し、たわみは増加するが、荷重の方も漸増する。曲げ破壊と考えるとよい。A2, A3, A5 ははじめに曲げせん断亀裂を生じ、たわみの増加とともに曲げ破壊の形態となる。

A1 は曲げせん断で破壊しており、鋼管の付着の切れて天蓋に荷重が集中したこと (図-15) がその下のコンクリートのせん断破壊になったものと考えられる。それに対して A6 は早い段階 (70 tf) で曲げ降伏しているために圧縮側のコンクリートと鋼管表面との摩擦が生じるとともに天蓋が荷重分散の役割を果たして大きなたわみに至るまで耐えられたと考えられる。A7 は鋼管先端からのコンクリート厚が少ないために A6 と同じ現象を生じて鋼管先端がコンクリートにめり込むために早い段階で破壊に進んだものと考えられる。これらの関係は図-11 の鉛直荷重と鋼管のフーチングへのめり込み量の関係でも説明することができる。

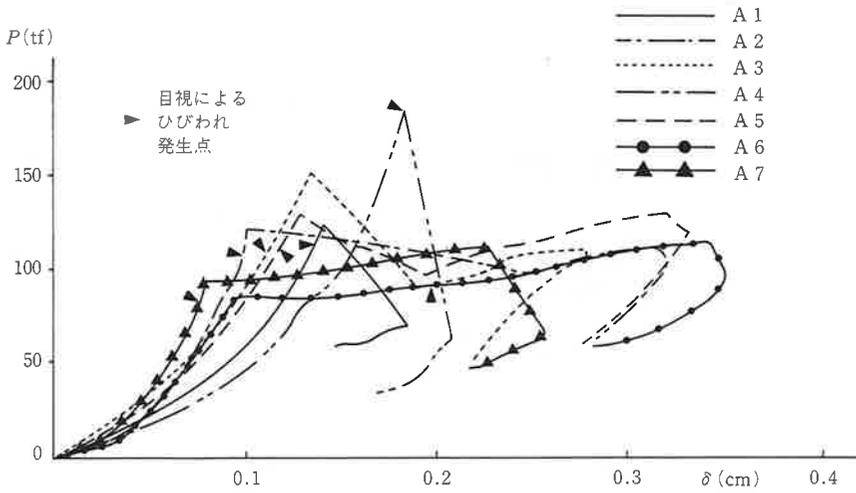


図-10 荷重とフーチングのたわみ

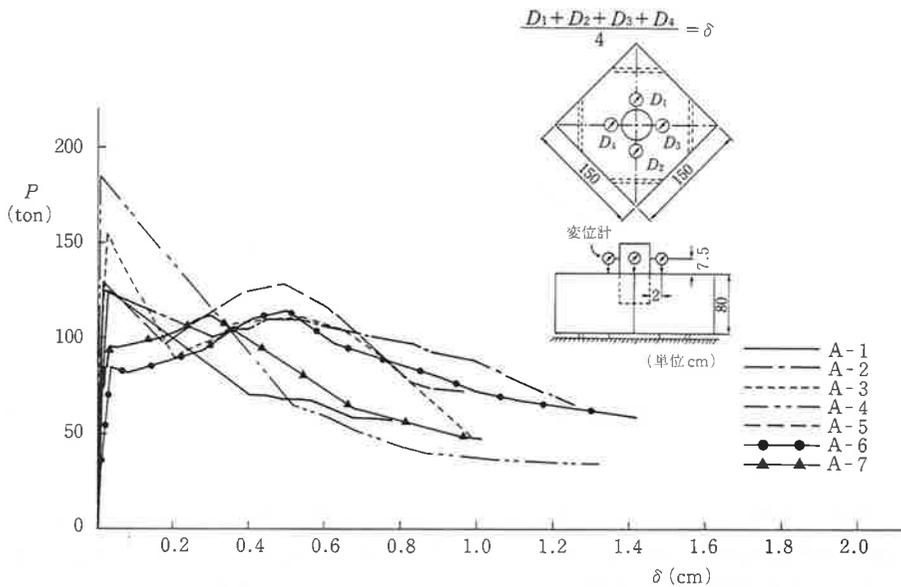


図-11 荷重と鋼管のフーチングへのめり込み量

図-11 は図-10 と類似する傾向をもつ。A3, A5, A2 は図-10 の最大荷重に応じためり込み量で、一旦荷重が下がっても打ち抜けるまでに一定の荷重を保持しながら大きなめり込み量に達している。A4, A1 は最大荷重から荷重を回復することなく、打ち抜かれている。A6, A7 は杭頭先端のコンクリートが降伏してから荷重の

増加がみられるが、A7 の方は早い段階で荷重が下がって打ち抜かれている。両者の荷重の増加はフーチングの圧縮領域の杭表面との摩擦によるとみられる。

図-12 は杭頭先端のコンクリートの支圧応力を肉厚の異なる A1 (9.5 mm), A3 (6.4 mm), A5 (14.3 mm) について測定した結果である。測

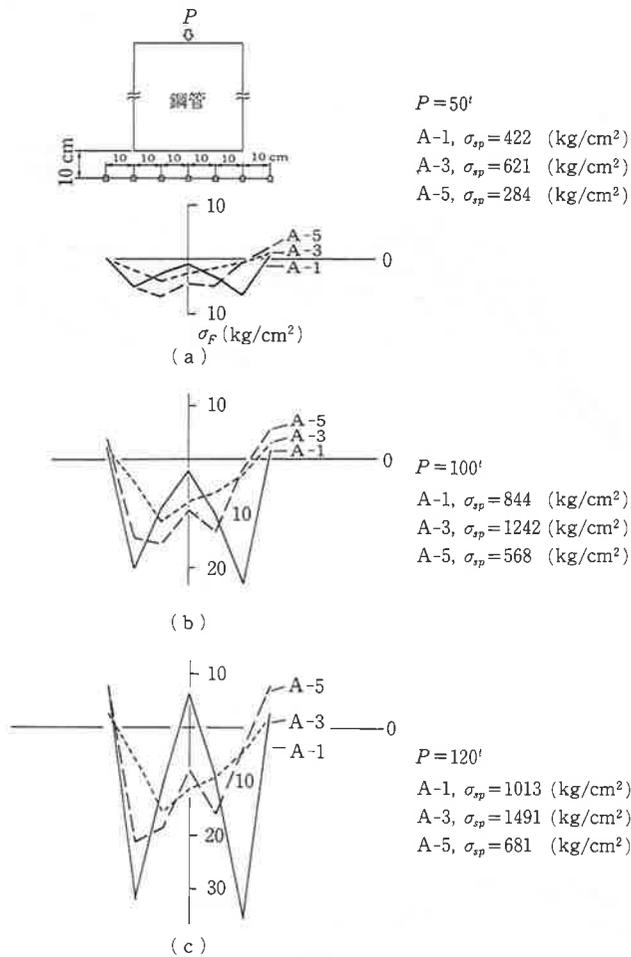


図-12 鋼管直上のフーチング支圧応力分布

定結果からは肉厚の影響はみられず、天蓋の有無の影響、鋼管の埋込部分の付着による荷重の分散、支圧応力の分布形状等の方が顕著である。これらより、天蓋やそのリブの効果に疑問を残す結果となった。図-13は3供試体の鋼管肉厚部直下の支圧応力（最大値となると予測していた）の鉛直荷重との関係を見たものである。同図からも肉厚の影響は見出せない。

図-14~19は鋼管の埋込部の応力を調べたものである。図-14は埋込深さに応じた軸方向の鋼管の応力を調べたものである。A1, A6は左右のバランスが悪く、A6の深さ35cmの片側の

ひずみの測定には失敗している。A6については計算値より大きな値がでており、天蓋の存在や面外曲げなどの影響を受けているものと推定される。

図-15はA1, A2の軸方向の応力ひずみを示している。図-14の結果と合せ、A2は埋込部の付着が効いている ($\sigma_{sp} > \sigma_{NIII}$) が、A1については小さな荷重段階でしか効いてはいない ($\sigma_{sp} \approx \sigma_{NIII}$) ことがわかる。A1については最大荷重時で1,000 kgf/cm²を超す応力度となり、支圧応力度も35 kg/cm² (図-12) になっていることから、フーチング下面の曲げ引張ひずみの影

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究

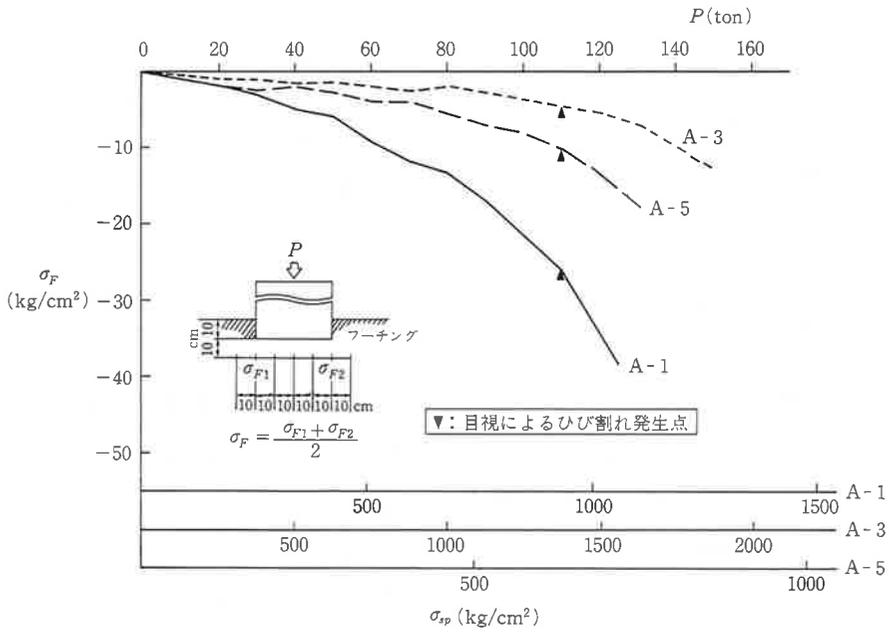


図-13 荷重と鋼管肉厚部直上のフーチング支圧応力

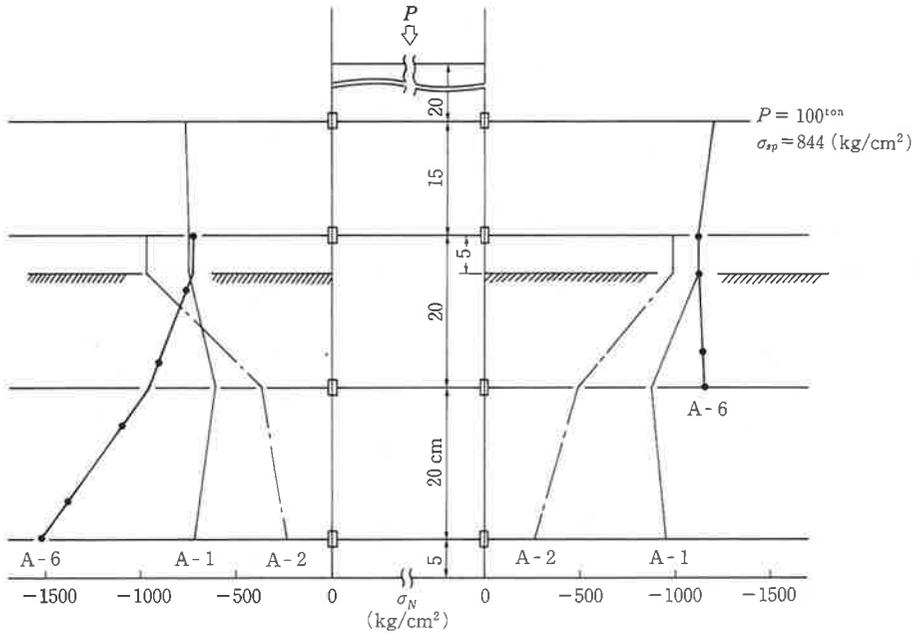


図-14 鋼管の軸方向面内応力分布

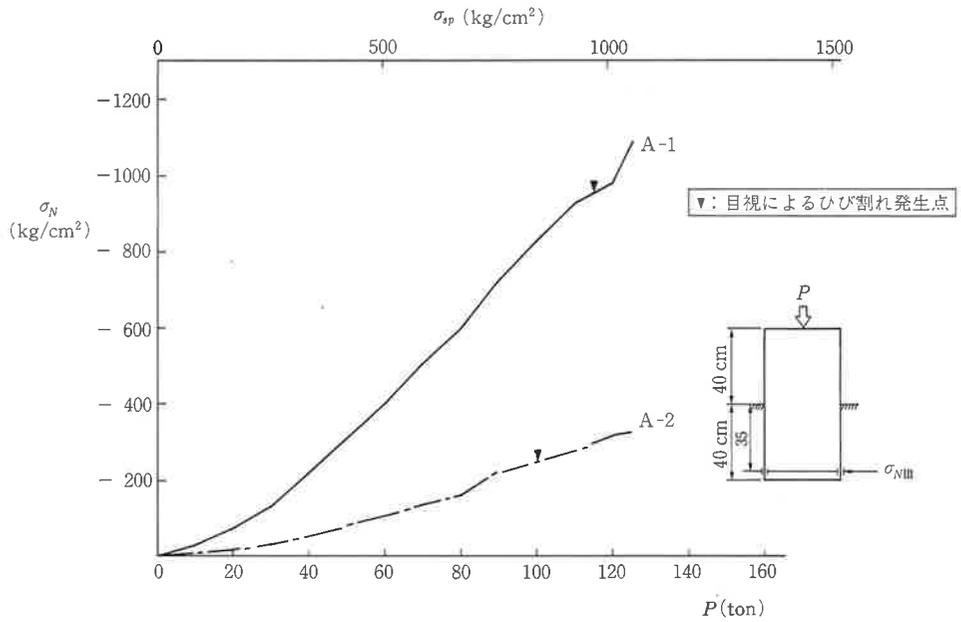


図-15 荷重と鋼管の軸方向面内応力 (σ_{NIII})

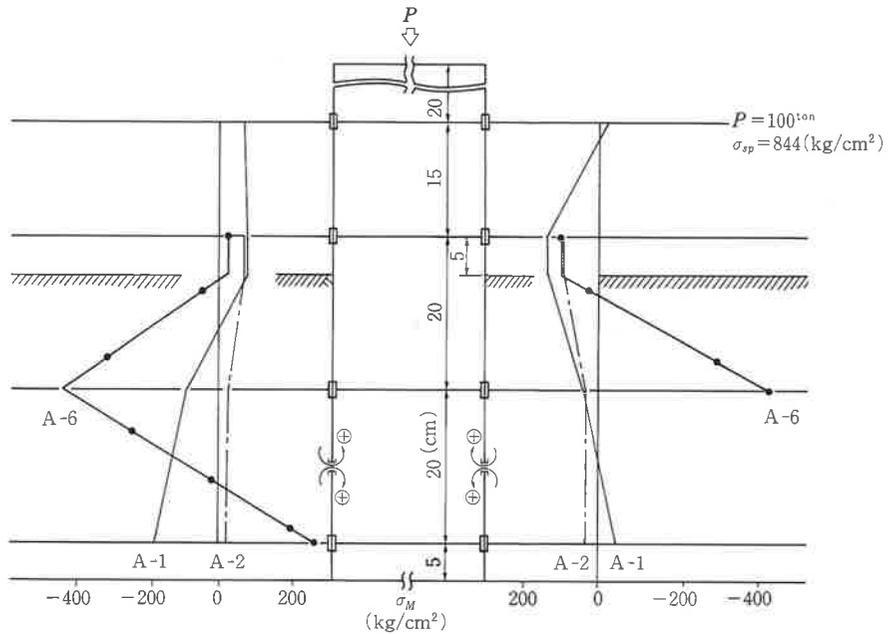


図-16 鋼管の軸方向面外曲げ応力分布

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究

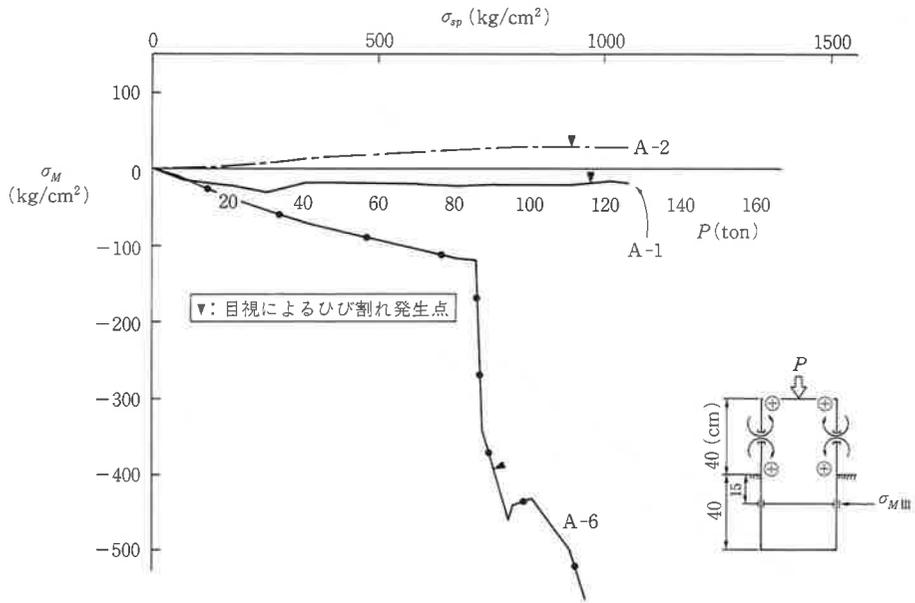


図-17 荷重と鋼管の軸方向面外曲げ応力 (σ_{MIII})

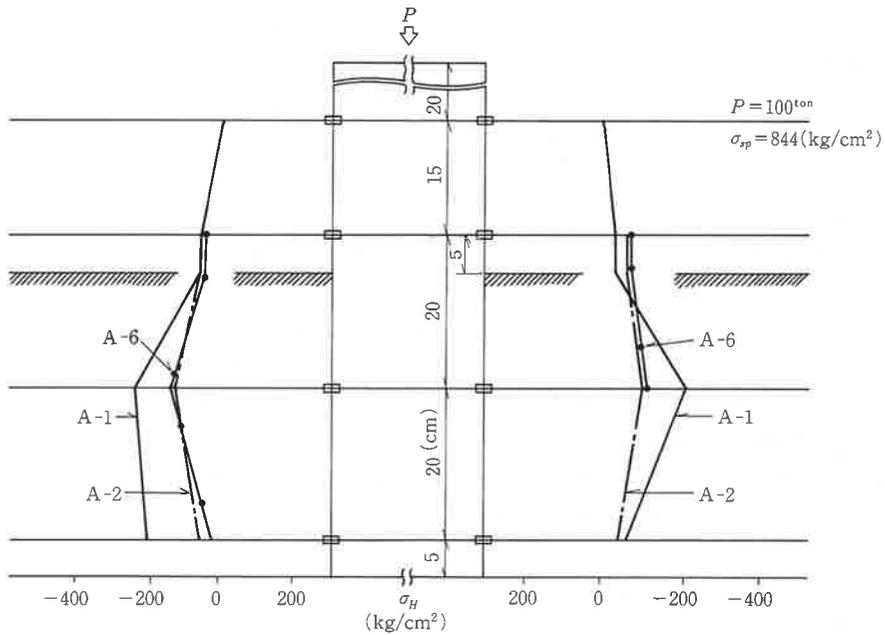


図-18 鋼管の周方向面内応力分布

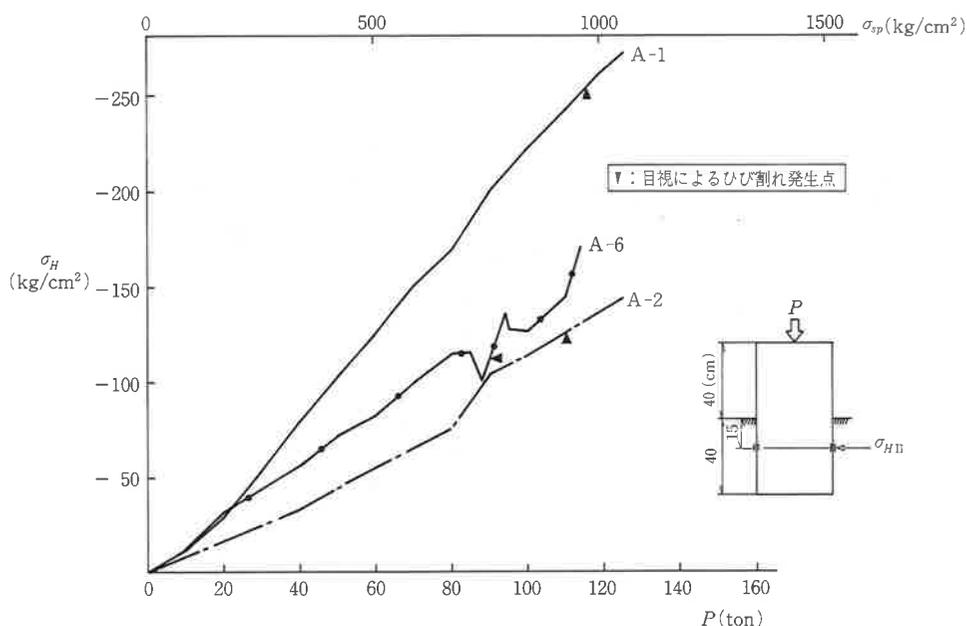


図-19 荷重と鋼管の周方向面内応力 (σ_{HIII})

響もあって破壊が一気に進行したものと推測される。

図-16は鋼管の肉厚の内外に取り付けたひずみ計から軸方向面外曲げ応力（内外面のひずみの差）の分布を調べたものである。すなわち、内外の付着力が等しければ鋼板に曲げ応力が作用しないが、外側のみの付着が有効であると鋼板の内外の応力差から曲げモーメントが発生する。

図-16も左右が等しくないが、A1, A6には曲げが働いていることがわかる。A1については曲げが小さいことと図-14,15から天蓋の上の中空部のために管体の付着が小さいと推定される。A2は付着が効いているために曲げも微小で、管体の付着力によって先端へ伝わる荷重は小さくなっている。A6は石験水で付着を切っているだけなのでフーチングの曲げモーメントの圧縮側で管体との間に摩擦が生じ、そのせん断抵抗力で鋼板に大きな曲げが生じている。先端部の曲げひずみの逆転はフーチングの支圧の影響すなわちフーチングのコンクリートの管内

へのめり込みの影響と推定される。

これらの現象は図-17のように整理すると一層、顕著になる。A1は初期の荷重による曲げのまま、A2は荷重の増大によって内外のひずみに微小な差が生じてくる。A6は下面のコンクリートの降伏によって急速に曲げが拡大する。それ以前のはフーチングの弾性変形によって生じた摩擦力に起因するものと推定される。

図-18は鋼管の円周方向の応力ひずみの分布である。鉛直荷重によるポアソン効果、フーチングの曲げ変形の影響をみるためのものである。

A1は明らかに外側への伸張がフーチングのコンクリートに制限されて圧縮となっている。A2は管体の内外のコンクリートの付着による拘束が効いてA1ほどの圧縮になっていない。A6はA2とほとんど同じ圧縮となっている。図-19のような整理をすると鉛直荷重の小さいうちはA1と同じような動きをしている。荷重が次第に大きくなるとA2に近づく。すなわち、

フーチング全体の曲げモーメントによって上部の圧縮側コンクリートが管体の伸張を防ぐ方向に働き、摩擦せん断抵抗が鉛直荷重がフーチング内に分散されたための現象と推定される。

2.4 まとめ

本試験は A 方法による杭頭固定をした場合の鉛直荷重に対する挙動を 7 つの供試体を用いて諸元別に調べたものである。その結果、次の点が判明した。

- (1) A 方法の場合、管体とコンクリートとの付着や摩擦抵抗が大きな役割を果す。
- (2) 従って天蓋の使用は効果が薄く、天蓋のリップの効果も疑問である。
- (3) 天蓋を用いた場合、管体とコンクリートとの付着が効いていると付着の切れるときに天蓋への急激な応力増加によって杭頭先端部のコンクリートの脆性的なせん断破壊を生じる恐れがある。
- (4) 天蓋を用いない場合は管体とコンクリートとの付着が切れた後も摩擦抵抗が効いて曲げ破壊へ移行することから大きなたわみ、めり込み量まで耐えることができる。いわゆるねばり強い構造となる。

(5) ただし、A4 のように管体とコンクリートの付着力が大きいと付着が切れたときに一気にせん断破壊する恐れもある。その場合は別途に補強筋を配置する必要がある。

(6) 管体とコンクリートとの付着のない場合は荷重が杭頭先端部に集中するために耐力が著しく低下する。

(7) その場合は天蓋等により荷重の分散を図れば変形性能は幾分向上する。

(8) A6, A7 でみられたフーチングの曲げによる管体部とコンクリートの摩擦による荷重分散効果は現実の杭基礎ではフーチングで同じような現象は生じないので期待することはできない。

3 実験 2 (SRC 構造における A 方法による杭頭固定方法)

3.1 概要

耐力が大きく、ねばり強い(靱性の高い) A 方法による杭頭固定方法を開発する必要がある。そのために実験 1 で得られた知見をもとに合理的で、簡便な結合構造を実験を通じて検討した。対象は A 方法に不利な部材厚の小さな

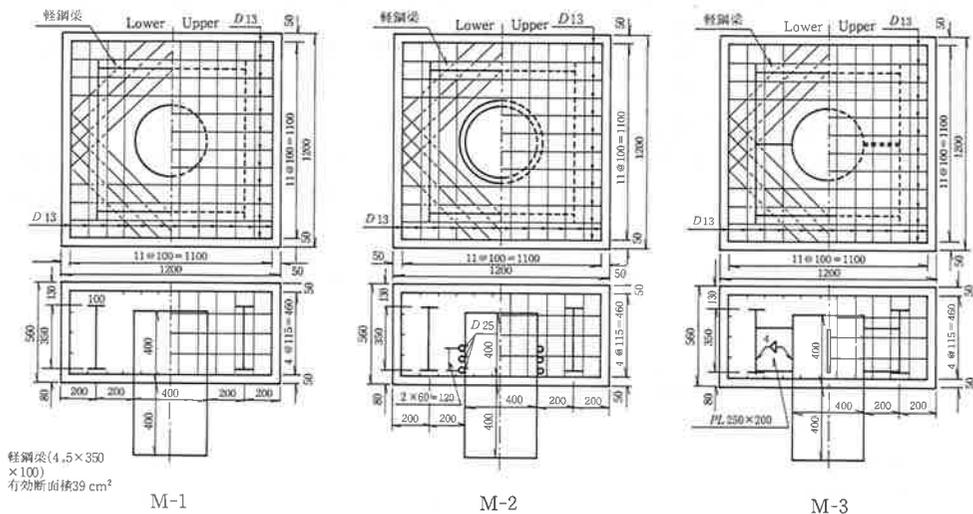


図-20 試験体の形状

フーチングまたは頂版を対象とする。杭頭には鉛直力だけでなく、水平力、曲げモーメントが作用するので頂版はSRC（鉄骨鉄筋コンクリート）構造とする。

ここではSRC構造の頂版（フーチング）とA方法による杭頭の結合方法に鉛直力を作用させた場合の挙動を調べることにした。

3.2 試験体と試験方法

供試体は図-20 に示す3体である。M-1は鋼

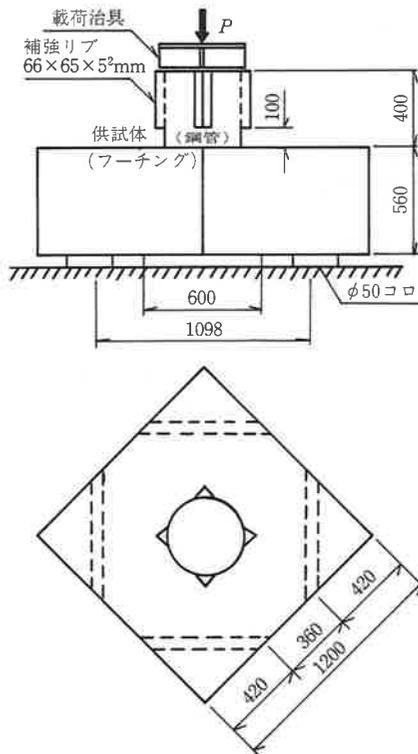


図-21 荷重方法

管（ $\phi 406, t6.4$ ）の埋込長を杭径とした従来型の固定方法である。M-2は実験1の成果を反映して埋込始端部から鉄筋（SD30, $\phi 25$ ）を鋼管に3段に溶接したもの（フープジベルと呼ぶ）である。さらに鋼管の頭部には籠鉄筋をかぶせてある。M-3は鉄骨桁に鋼管を鋼板（ $192 \times 250 \times 4.5$ ）で4方向から溶接結合したものである。

なお、頂版には軽鋼梁（ $H350 \times B100 \times t_w 9 \times t_f 4.5$ ）と異形鉄筋（SD30, $\phi 13$ ）が用いられている。

荷重方法は実験1と同様に図-21に示すとおりである。鋼管にはちょうちん座屈防止のリブを取り付けた。

試験では荷重々重によるフーチングのたわみ、鋼管のめり込み量、杭体のひずみ、フーチングの支圧応力、軽鋼梁の応力、ブラケットの応力を測定した。

3.3 測定結果と考察

荷重試験における荷重とフーチングのたわみの関係を図-22に示す。そのときの耐力の関係をもとめたのが表-3である。

鋼管が新しいために付着力が小さく、頂版が薄いためにM-1は105tfで、せん断破壊となった。破壊は管体とコンクリートとの付着が切れると同時に発生しており、実験1におけるAIの破壊と類似したものになっている。

M-2は3供試体の中で最大の荷重（302tf）となり、M-1の3倍、M-3の1.5倍である。破壊は曲げせん断破壊で、たわみ量は40mmに達している。荷重150tfで頂版上面に軽鋼梁に沿って亀裂の生じた現象はM-3の管体とコンクリートのはく離した現象に対応している。最

表-3 耐力一覧表

供試体	目視によるひび割れ発生荷重 (ton)	目視による鋼管とコンクリートのはく離荷重 (ton)	最大荷重 (ton)
M-1	60	105	105
M-2	80	260	302
M-3	100	150	195

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究

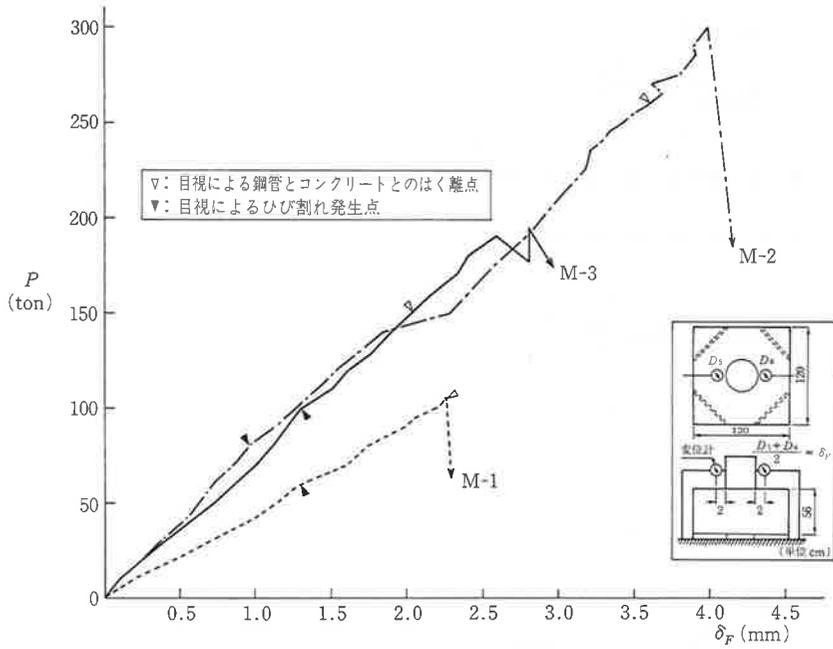


図-22 荷重とフーチングのたわみ

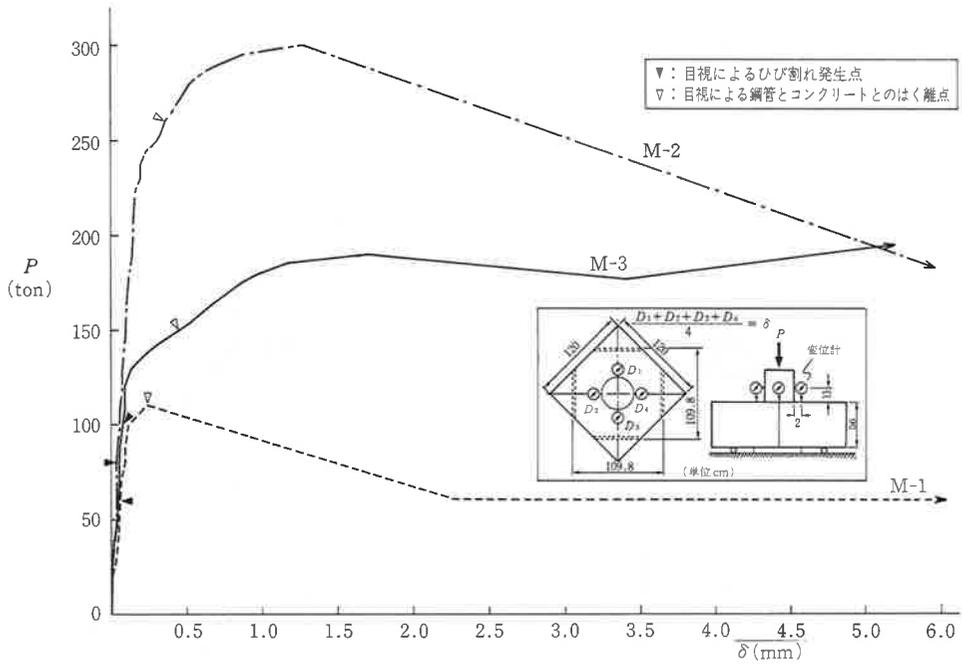
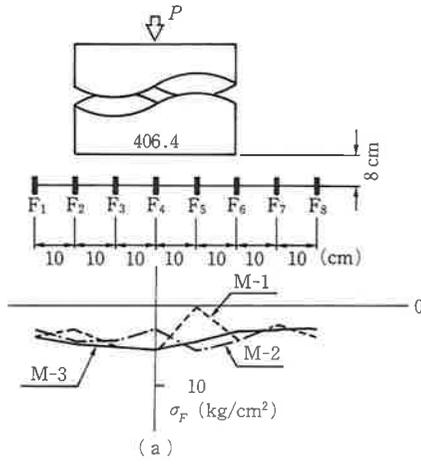
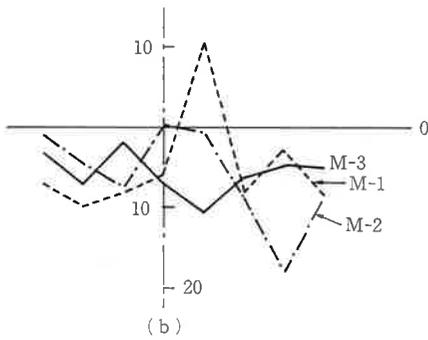


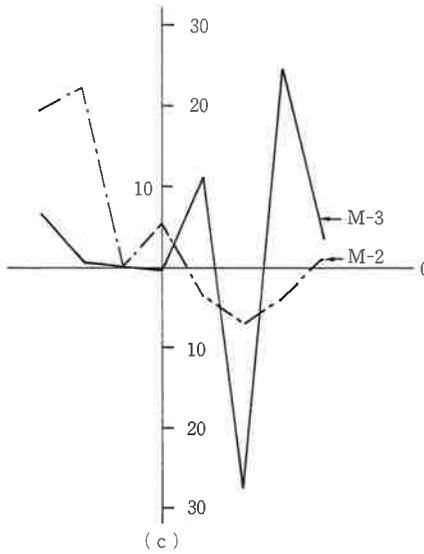
図-23 荷重と鋼管のフーチングへのめり込み



$P = 50^{ton}$
 $\sigma_{sp} = 622 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$



$P = 100^{ton}$
 $\sigma_{sp} = 1243 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$



$P = 150^{ton}$
 $\sigma_{sp} = 1865 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

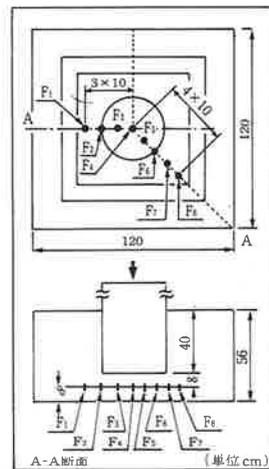


図-24 フーチングの支圧応力分布

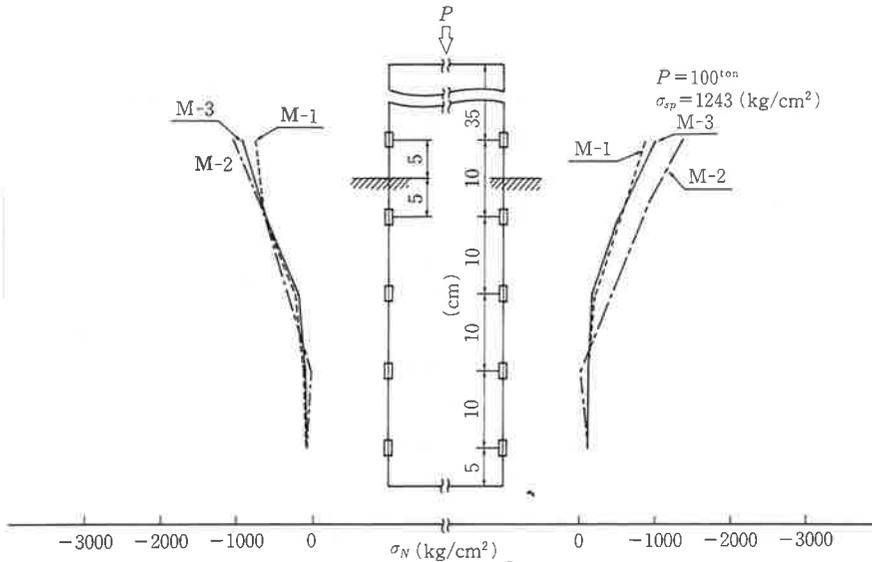


図-25 鋼管の軸方向面内応力分布

終的にはフープジベルから発したコンクリート内の亀裂が進行して破壊したと推定される。

M-3は典型的なSRC構造としたもので曲げ破壊している。最大荷重は195tfとなっているが、変形に対する追従性は極めてよく、実験1におけるA2, A3, A5のように変形の進行とともに再び耐荷力が上昇するという現象がみられた。この現象は当初のSRC構造としての限界ののちにブラケット鋼板と鋼管、軽鋼梁のラティス構造に移行して再び最大ピークを迎えたものと考えられる。

図-23は鋼管のフーチングコンクリートへのめり込み量を表わしているが、実験1と比べて大きな量となっている。M-1は管体とコンクリートの付着が切れたときにめり込み始めている。M-2, M-3は付着が切れはじめても耐荷力の上昇がみられ、最大荷重到達後もめり込みはゆるやかに進んでいる。特にM-3ははじめのピーク荷重から下がった後に再び最大の耐荷力に上昇する経過を示すものになっている。

図-24は杭頭先端のコンクリートの支圧応力を測定した結果である。小さな荷重では圧縮応

力になっているが、荷重が大きくなると全体が引張応力に移行して乱れた分布となる。大きな荷重で引張応力になるというのは頂版の曲げモーメントで下面が引張領域になっていることを示し、応力の乱れは多数の亀裂が生じているためと考えられる。M-1は105tfで破壊しているが、支圧応力の多くは圧縮側に留まっていることからせん断破壊の傾向が強くと、大きな荷重に対して脆弱な構造ということが出来る。

図-25は埋込深さに応じた軸方向の鋼管の応力を調べたものである。左右の応力の値が等しくないで偏心载荷ということが出来るが、応力の分布は理論どおりである。いずれも埋込部始端部の応力が高く、始端部でほとんどの荷重をコンクリートに伝達して、先端部には応力が発生していない。

M-2においてはこの傾向が更に顕著で、図-26に見るとおり杭材の破断強度に近い応力のほとんどを埋込長の始端部で吸収して先端には伝えられていない。

図-27は実験1でも測定した管体の内外の応力差から管体壁に作用している曲げモーメント

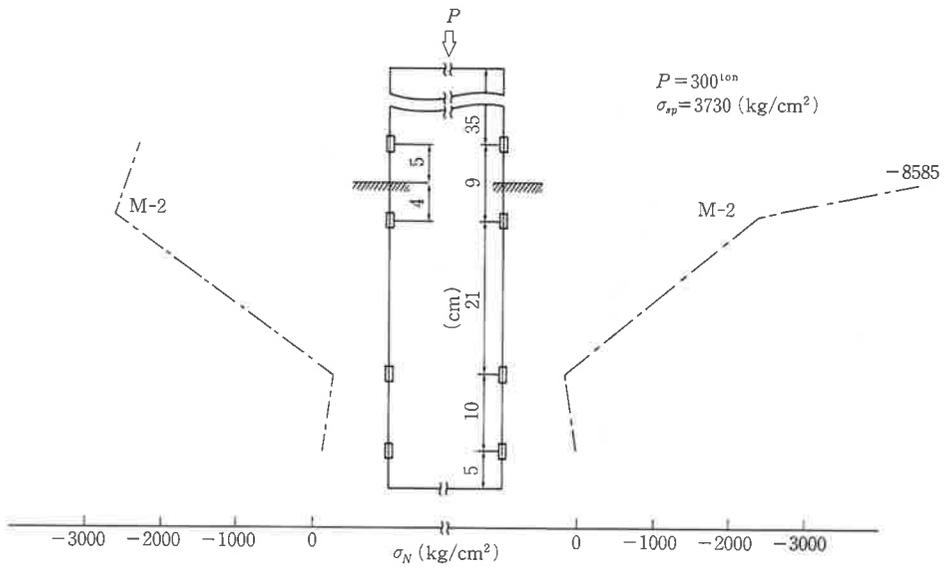


図-26 鋼管の軸方向面内応力分布

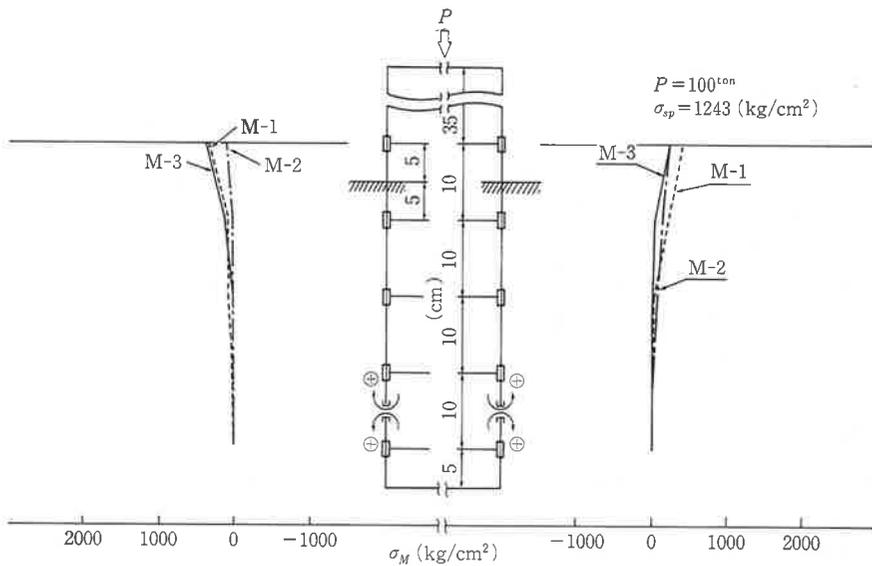


図-27 鋼管の軸方向面内応力分布

を推定するものである。これより M-1 では内外の応力差が比較的大きく、M-2 は小さな値となっている。全体的にはフープジベルやブラケット鋼板の影響による曲げモーメントは僅少

ということができる。

図-28 は鋼管の円周方向の応力ひずみの分布を示す。いずれも埋込長始端部の応力の最も大きい部分で圧縮となっている。これは頂版コン

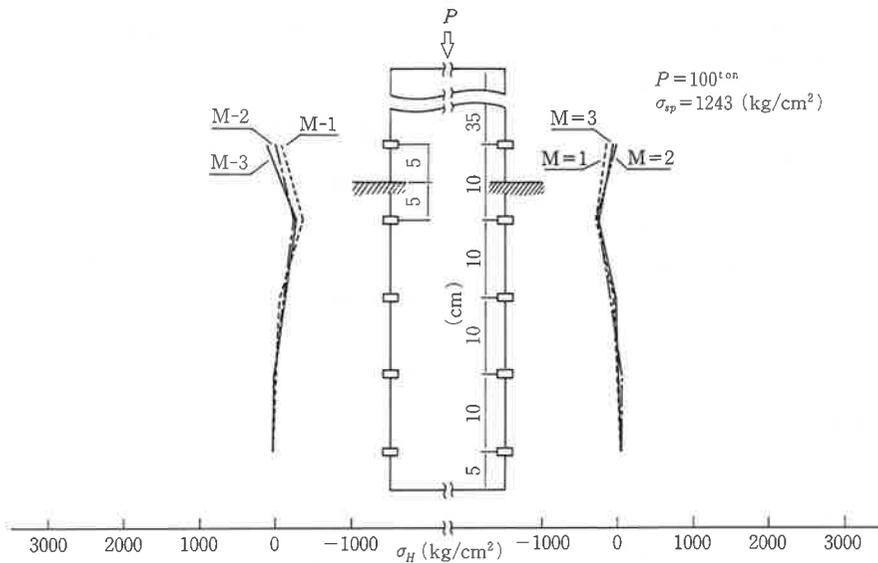


図-28 鋼管の周方向面内応力分布

クリートの拘束によるものとみられ、M-1, M-3, M-2 の順で影響を受けているが、応力の値は小さい。

図-29, 30 は軽鋼梁のフランジとウェブの応力の測定結果である。鉛直荷重 100 tf ではフランジの上面, 下面の応力度はいずれも 100 kgf/cm² 程度で軽鋼梁への力の伝達は小さいといえる。図-30 のウェブの応力も M-3 の最大荷重付近で、M-2 も 150 tf で変化のあった後であるが、応力度は許容応力度以下で全く健全といえる。この時点で鋼管のめり込み量は M-2 で 0.15 mm, M-3 で 1.5 mm となっているが、軽鋼梁への曲げモーメントの伝達は小さく、内側のコンクリートの中で破壊は進行しているとみられる。

図-31 は鋼管と軽鋼梁とを剛結するブラケット鋼板の応力である。ここでは明らかな塑性変形が生じており、最初の 190 tf で 2,173 kgf/cm² の応力が、荷重が一旦下がった時点で 6,023 kgf/cm², 最大荷重 195 tf で 9,674 kgf/cm² に相当するひずみが測定されている。これらの値からブラケットは塑性変形をしており、そのた

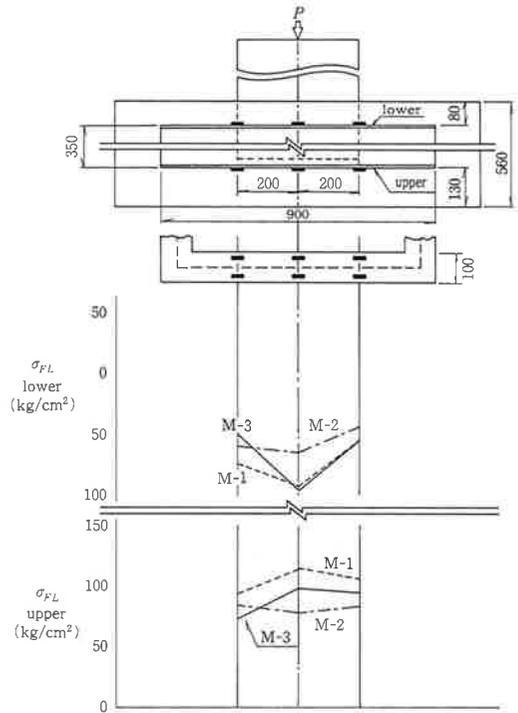


図-29 軽鋼梁フランジの応力分布 $P=100$ ton

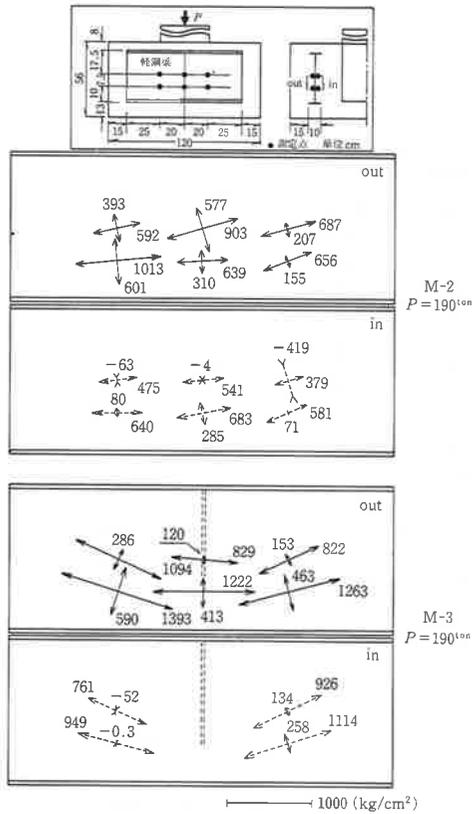


図-30 軽鋼梁ウェブの主応力分布

めに曲げモーメントは軽鋼梁に伝わりにくくなっていると考えられる。

3.4 まとめ

本試験は A 方式による杭頭固定方法として従来型 (M-1), 新提案型 (M-2), SRC 型 (M-3) の鉛直荷重に対する挙動を調べるものである。試験の結果, 次の点が判明した。

(1) 従来型は新しい鋼管, 薄い頂版厚という条件下であるが, 破壊の形態はせん断破壊で, 脆い挙動を示す。

(2) 新提案型は予想以上に大きな耐荷力を有し, 鋼材の破壊強度の近くまで耐えることがわかった。破壊の形態は曲げせん断破壊である。

(3) SRC 型では当初は新提案型と同じ挙動をとるが, 一旦ピークを過ぎると変形しながら構造がラテス桁となり, 最大荷重を迎えた。破壊形態は曲げ破壊で大きな変形性能を有する。

(4) 一連の試験で破壊現象はひびわれの発生時の荷重よりは鋼管とコンクリートのはく離時の荷重との関係が深い。

(5) SRC 型の鋼管, コンクリートのはく離時の荷重では M-2 の鉄骨構造に変化が現われて

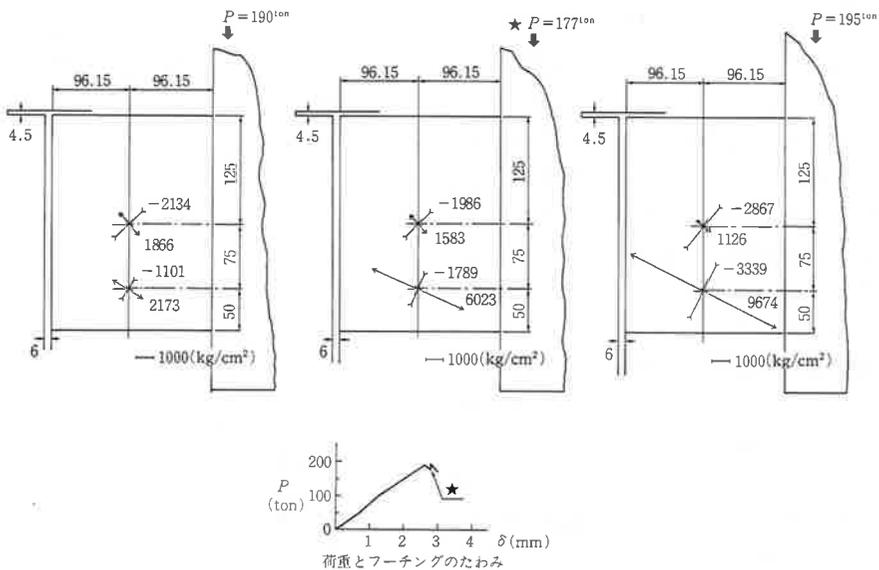


図-31 M-3におけるブラケットの主応力分布

いる。

(6) 実験2の変形量は実験1に比べてかなり大きな値となっている。

(7) 鋼管先端部では大きな荷重時には頂版に曲げモーメントで引張応力が発生するために支圧応力は必ずしも圧縮応力とはならない。

(8) フープジベル、ブラケット鋼版は鉛直荷重の分散に極めて有効である。それらが用いられる場合には鋼管の先端に荷重はほとんど伝わらない。

(9) フープジベルやブラケットの取付による面外曲げは極めて小さな値である。従ってフープジベルは内外に取り付ける必要性はない。

(10) 鋼管の両方向の圧縮ひずみが小さいので鋼管とコンクリートの付着状態はいずれのモデルでも良好と考えられる。

(11) SRC 頂版の軽鋼梁の応力は弾性範囲にあることから破壊は軽鋼梁で囲われた内部のコンクリートの中で発生しているものとみられる。

(12) SRC 型 (M-3) では最終的な破壊はブラケット鋼板の塑性変形によると考えられる。

4 結 論

鋼管杭基礎の A 方法による杭頭固定方法に関する2つの鉛直荷重に対する実験から次の点が明らかとなり、さらにこれらの成果から新しい固定方法を提案することができた。

(1) A 方法の場合、鉛直荷重に対してフーチング中の鋼管とコンクリートとの付着および摩擦抵抗によるせん断力の伝達が重要な役割を果す。

(2) 伝統的に用いられていた杭頭の天蓋は鉛直力の伝達に効果が薄く、管体とコンクリートの付着によるせん断力の伝達も減殺する。

また、天蓋のリブも期待されている補剛効果が発揮されにくく、支圧応力の分散にも貢献しているとは言いがたい。

(3) 管体とコンクリートの付着力が強い場

合、大きな荷重によって付着が切れるとせん断破壊へ移行する恐れがある。その場合、脆性的破壊となるので危険である。

(4) 脆性的破壊を防ぐにはパンチングシアに対する十分な厚さと適切な補強鉄筋が必要である。

(5) 従来方式の A 方法は頂版（フーチング）が薄い場合に脆性的なせん断破壊をする可能性が秘められていた。

(6) フープジベルと籠鉄筋を用いた新しい提案方式（図-32）は鋼管の破壊強度の近くまで耐えることができ、破壊も曲げせん断破壊となる。

(7) SRC 方式の場合の耐荷力は新提案方式に及ばないが、従来方式の2倍程度となり、変形性能に優れた挙動を示す。破壊は曲げ破壊となる。

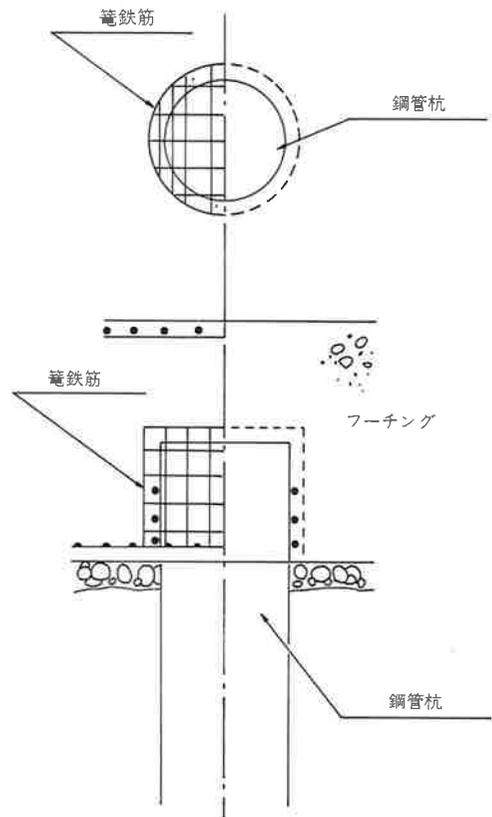


図-32 A 方法による杭頭結合方法と籠鉄筋

(8) フープジベル，ブラケットなどの取付は鉛直荷重のフーチングコンクリート内への分散に極めて有効である。その取付による管体への偏心曲げモーメントの影響は無視できるほど小さいので内側への取付や補強は不要である。

(9) SRC 頂版では鉄骨としての軽鋼梁への荷重の伝達は少なく，軽鋼梁の間のコンクリートの中で破壊が発生する傾向にある。

以上は鉛直荷重に対する試験からの知見であるが，更に水平荷重による曲げモーメントに対

する試験の結果と考察を次の機会に発表することとしたい。

本研究は筆者が建設省土木研究所構造橋梁部基礎研究室で行なったものであるが，まとめて発表する機会がなかったのでここに研究の骨子を取りまとめた次第である。

ここに本研究に御協力いただいた方々に深甚なる謝意を表わし，その御労苦の成果を世に役立ててまいりたいと考えている。