

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する 実験的研究 (その2)

塩 井 幸 武*

Experimental study on the pile head connection devices for steel pipe pile foundation (Part II)

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, concerning to B method following A method published on the Vol.3 of Bulletin of C.E.E.L. As results, importance of adhesion between pile skin and footing concrete, less efficiency of conventional pile head cover, necessity of reinforcement of footing for bending-shear rupture etc. were clarified.

Keywords: steel pipe pile, foundation, pile head connection.

1. はじめに

鋼管杭基礎の杭頭固定方法には方法Aと方法Bがあることは紀要第3巻¹⁾で述べたとおりである(図-1)。各々の特徴も前稿で既述したとおりである。

ここではB方法によって定着した場合の杭頭

の鉛直荷重に対する挙動を調べた結果をとりまとめ、B方法による定着方法の合理化について論じる。水平力による曲げモーメントに対する同方法による定着方法に関する試験研究の成果は次稿で論じることとする。

B方法に関する載荷試験は図-2のモデルに図-3に示す方法で鉛直荷重を作用させる。この

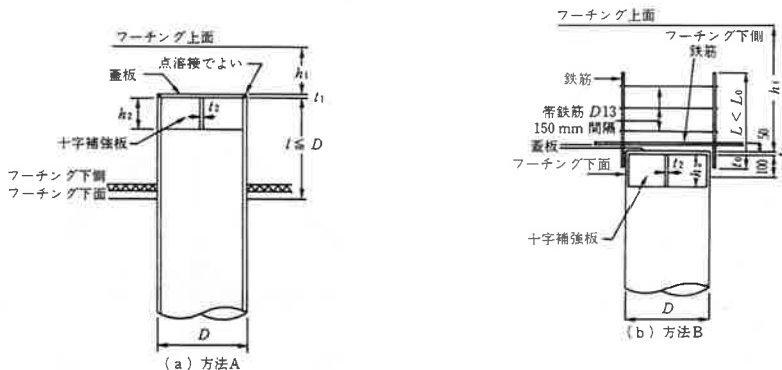


図-1 鋼管杭の杭頭結合法

平成8年10月18日受理

* 構造工学研究所・教授

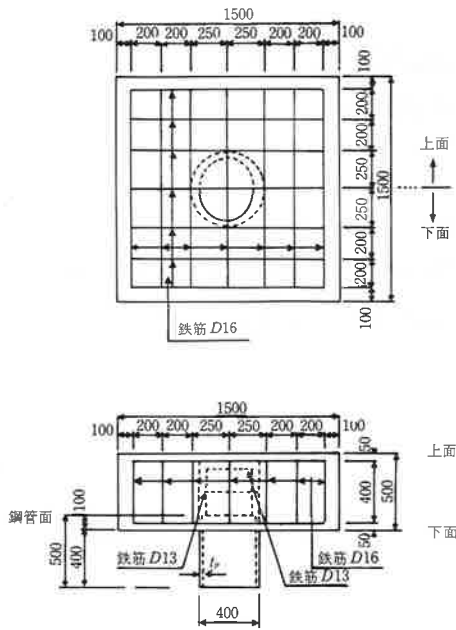


図-2 方法B

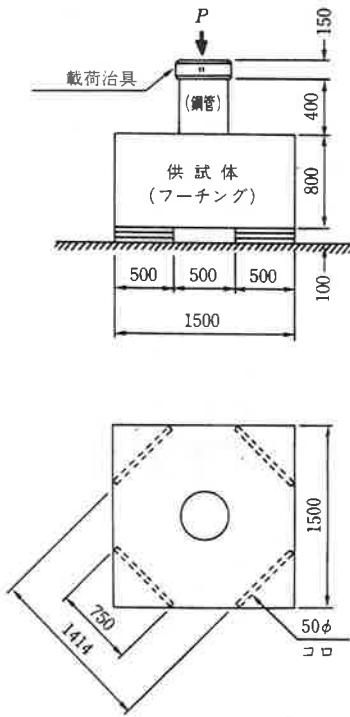


図-3 荷重方法

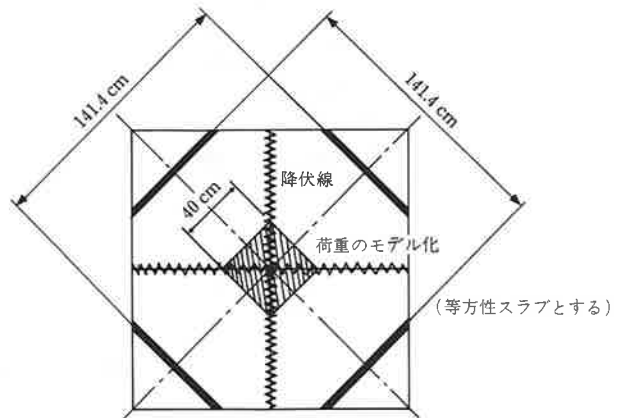


図-4 理論解析上のモデル

場合、A方法と異なり、図-2のフーチングの下面、図-3の上面に杭体から荷重が直接伝達される。フーチングの支承の状態から純粹のパンチングせん断になるとは限らず、曲げの影響も受けることになる。A方法の場合は杭頭が中立軸まで貫入しているのせん断破壊が発生しやすい状態にある。

そのために曲げせん断となる状況も想定されるために別途に図-4に示す計算モデルで弾性理論によるひびわれ発生荷重 P_{cc} 、降伏線理論による曲げ最大耐力 P_{uc} 、 Moe の実験式による押し抜きせん断耐力 V_{uc} を予め算出しておくこととした。 Moe の式は次のように表わされる²⁾³⁾。

$$V_{uc} = 3.97(1 - 0.075r/d) \cdot bd\sqrt{\sigma_{cu}} / (1 + 1.39bd\sqrt{\sigma_{cu}}/P_{uc}) \quad \dots \text{式1}$$

ここで r : 半径 (cm), $b=2\pi r$: 荷重周長 (cm), d : フーチング厚 (cm), σ_{cu} : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm^2), P_{uc} : 降伏線理論による曲げ耐力 ($\text{kgf}\cdot\text{cm}$)

フーチングの破壊の形態は曲げ破壊、曲げせん断破壊、せん断破壊に分けることができる(図-5)。それぞれの荷重 P と変形 δ の関係は図-6のように表われる。また、載荷荷重 P_u と前

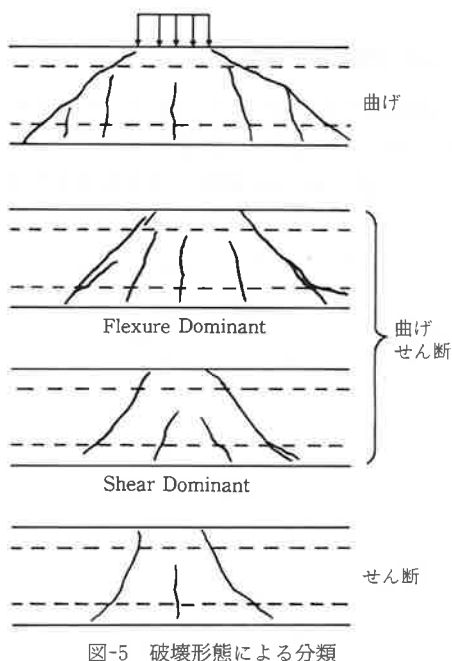


図-5 破壊形態による分類

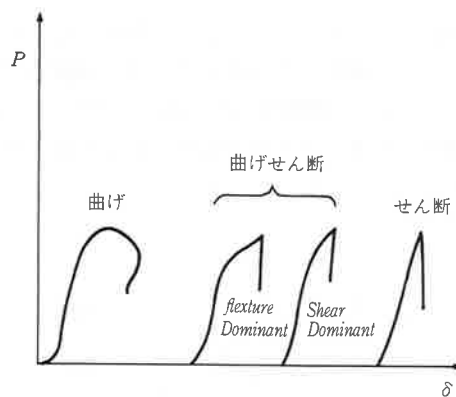


図-6 フーチングのP-δ曲線による分類

表-1 各耐力パラメーターによる分類

曲げ破壊	$0.5 \leq P_{uc} / V_{uc} \leq 1.0$	$1.0 \leq \frac{P_u}{P_{uc}}$
曲げせん断破壊	$1.0 \leq P_{uc} / V_{uc} \leq 2.0$	$0.5 \leq \frac{P_u}{P_{uc}} \leq 1.0$
せん断破壊	$2.0 \leq P_{uc} / V_{uc}$	$0.5 \leq \frac{P_u}{P_{uc}} \leq 0.8$

P_{uc} : 降伏線理論による曲げ耐力

V_{uc} : Moeの式による押し抜きせん断耐力

P_u : 実測最高荷重

述の各耐力 P_{uc} , V_{uc} との関係では表-1 のように分類することができる。

2. 実験 III

(B 方法による杭頭固定の挙動)

2.1 概要

B 方法はフーチングの配筋に影響を与えないように杭頭をフーチングの下端鉄筋網の下に止めて固定する方法である。最も多く採用されて

いる方法であるが、杭頭に鉄筋を溶接しなければならないという煩しさが課題となっている。

また、杭頭に天蓋を必要とするか否かも1つの課題となっている。その場合の形状、天蓋に作用する荷重も明らかになっていない。

ここでは杭頭のフーチング内への浅い埋込長

表-2 試験体の種類と耐力

試験体	鋼管肉厚 (mm)	天蓋厚 (mm)	目視によるひびわれ荷重 P_c (tf)	最大耐力 P_u (tf)	P_c/P_u	P_u/P_{uc}	備考
B 1	9.5	9	75	130	0.58	1.00	すべての試験体は杭両面の付着を有する。 $P_{cc}=60$ tf $P_{uc}=130$ tf $V_{uc}=139$ tf $P_{uc}/V_{uc}=0.935$
B 2	9.5	22	75	122	0.61	0.94	
B 3	9.5	32	75	125	0.60	0.96	
B 4	9.5	—	70	118	0.59	0.91	
B 5	6.4	—	70	130	0.54	1.00	
B 6	12.7	—	65	135	0.48	1.04	
B 7	14.3	—	85	115	0.74	0.88	

が鉛直荷重に対してどのように挙動するかを探るために鋼管の肉厚を変化させた試験体を準備した。また、鋼管(径400mm)の肉厚9.5mmを標準に天蓋の厚さを変化せしめて天蓋の効果を測定することとした(表-2)。

2.2 試験体と試験方法

試験体は表-2に示す7体で、形状や配筋は図-2のとおりである。載荷方法は図-3に示す方法で、4隅に50mm鉄筋による支承が配される

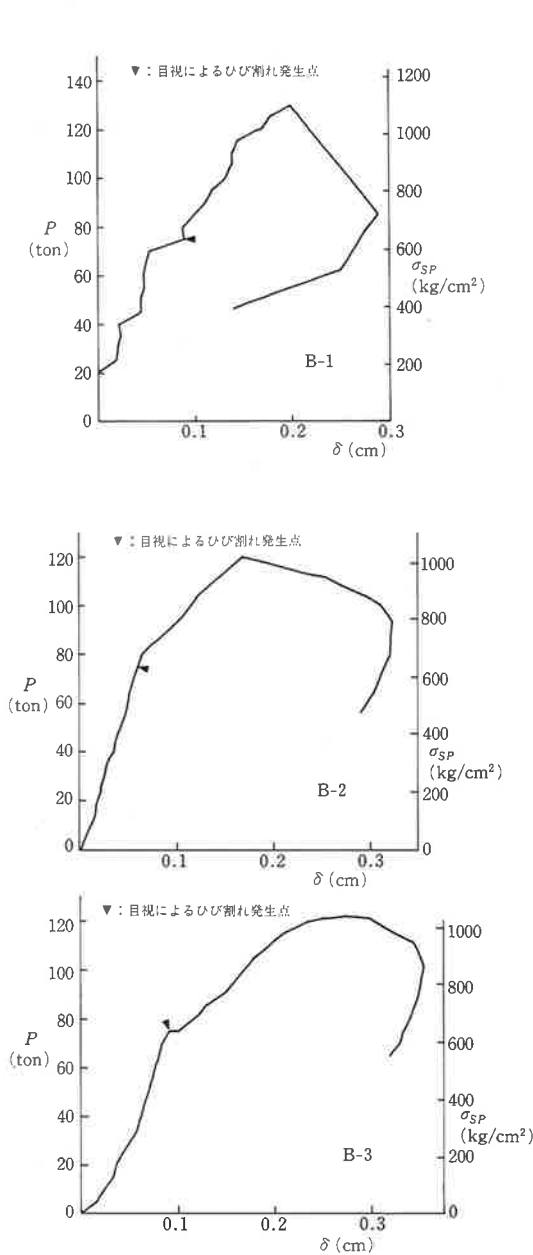


図-7(a) フーチングの荷重とたわみの関係

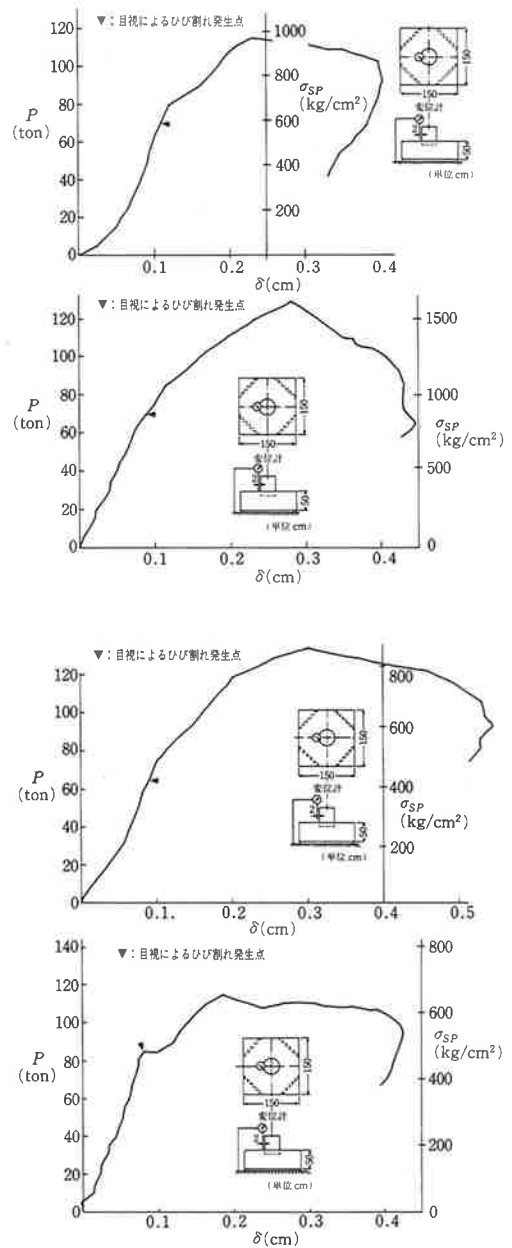
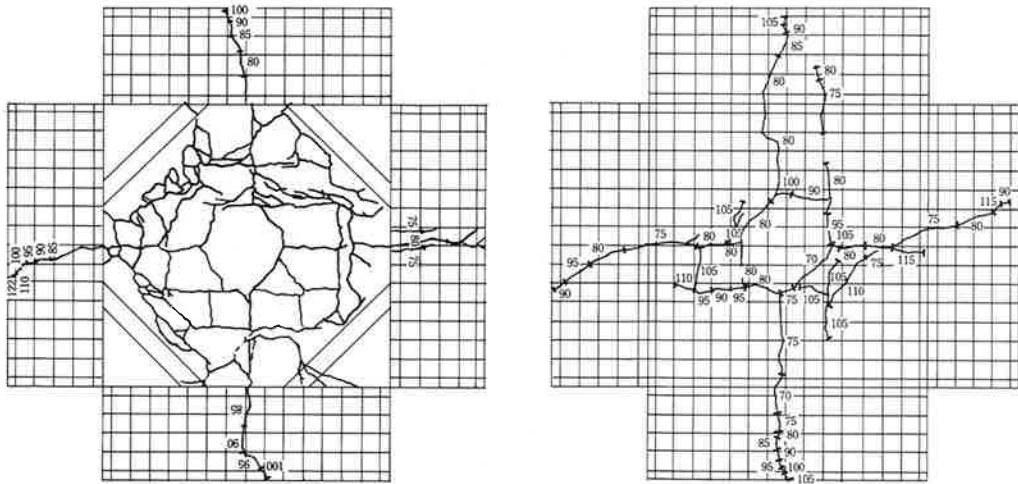


図-7(b) フーチングの荷重とたわみの関係



ひび割れ発生状況
B-2

ひび割れ発生状況
B-4

図-8 フーチングのひびわれ発生状況 (B2, B4)

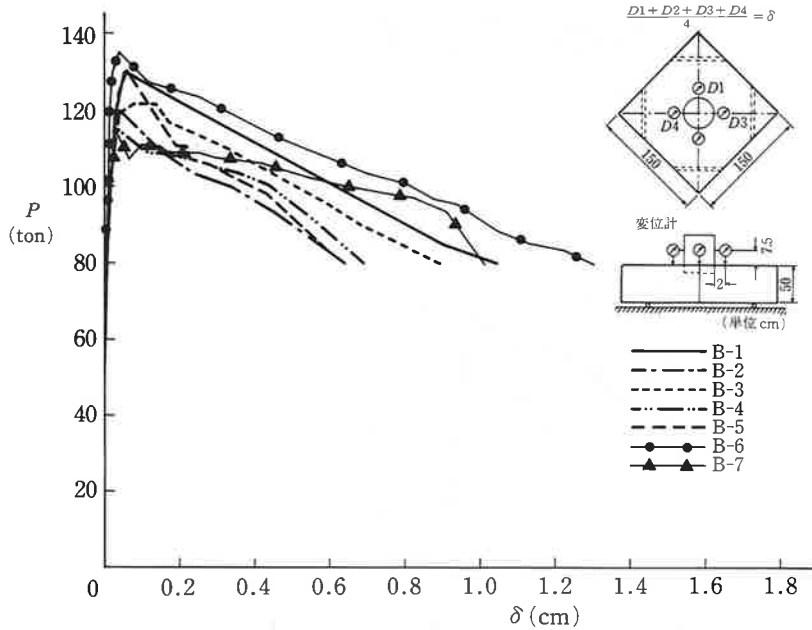


図-9 荷重と鋼管のフーチングへのめり込み量

ために4辺支持のスラブ(フーチング)の中央
載荷という評価もできる。

図-20~21にB1~B3の天蓋の形状とひずみ
ゲージの位置を示す。形状はA方法のものと同

じである。

試験では載荷荷重によるフーチングのたわ
み, 鋼管のフーチングコンクリートへのめり込
み量が測定される。杭体のひずみは図-14に示

す位置で B2, B4 について測定した。フーチング内の支圧の分布は図-11 に示す位置で B2, B5, B7 について測定した。

2.3 測定結果と考察

表-2 に鉛直荷重を作用させたときの各試験体のひびわれ発生時 (目視による) 荷重と最大

荷重を示す。両者の比は 0.48~0.74 に分布している。これに対する天蓋のないもののひびわれ発生荷重は 65~85 tf に分布しているが、天蓋のあるものは 70~75 tf に集中している。

図-7 に各試験体の荷重とたわみの関係を示す。ひびわれは 0.1 cm 付近のたわみで発生していることがわかる。最大荷重は 0.2~0.3 cm の

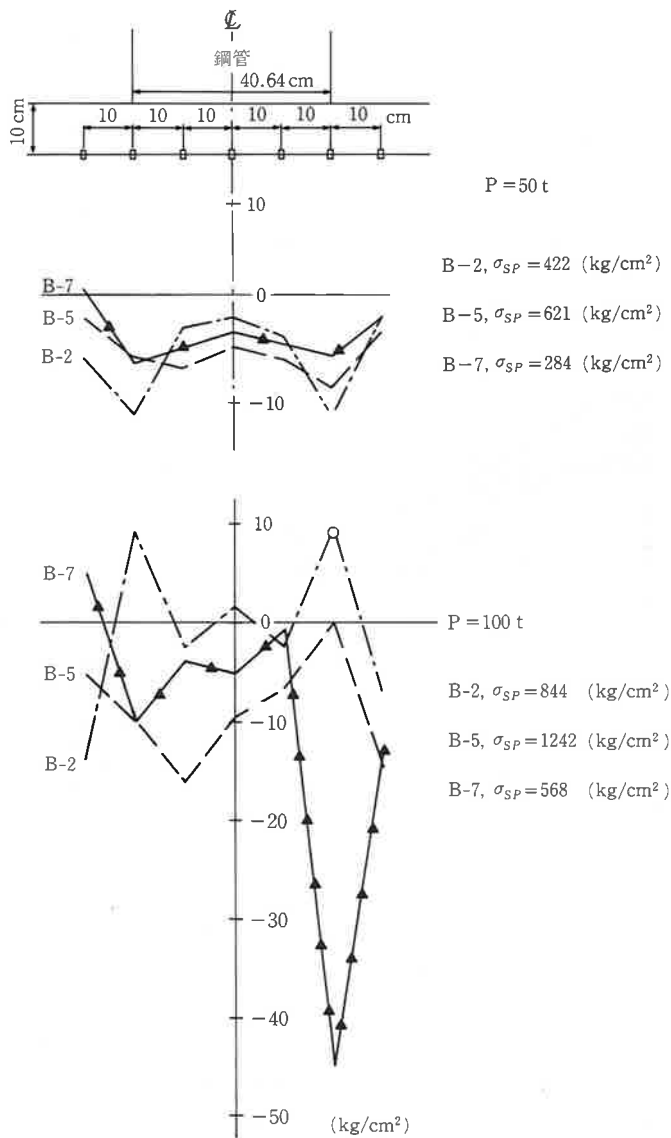


図-10 鋼管直上のフーチング支圧応力分布

たわみのときに現われているが、その後のたわみの挙動は天蓋のあるものと無いものでは大きく異なり、無いもののたわみは 0.4 cm を超えている。

なお、B5、B6 の鋼管については錆の発生がみられ、その影響のためか最大耐力が大き目の値となっている。このときのコンクリートの材料定数は表-3 のとおりである。

表-3 コンクリートの材料定数

区分	σ_{cc} (kg/cm ²)	σ_{ct} (kg/cm ²)	E_c (kg/cm ²)	ν_c
4週	204	21.8	220,900	0.193
9週	207	18.5	208,500	0.155
15週	213	21.5	210,000	0.159

フーチングのひびわれ発生状況については代表的なものとして B2 と B4 のものを図-8 に示す。天蓋のあるものはフーチング下面に発生した亀裂が全面に広がっているが、天蓋の無いものは杭円周に対応する亀裂(ひげ鉄筋の影響)と 4 側面の亀裂からなっている。

これらの結果からフーチングは支間 1414 mm、高さ 500 mm の 4 辺支持であるが、曲げ変形が卓越していると考えられる。A 結合(紀要第 3 巻)では高さ 800 mm のせいもあって、せん断破壊もしくは曲げせん断破壊がみられたが、B 結合の試験体では曲げせん断もしくは曲げ破壊である。

天蓋の有無はひびわれ発生荷重、最大荷重には顕著な差として表われていない。しかし、天蓋のないものは最大荷重到達後も耐力があり、0.4 mm 以上のたわみまでひびわれ発生荷重以上の荷重を負担している。これに対して天蓋のあるものは 0.3 mm 前後のたわみで荷重は低下している。天蓋の厚さの影響は明確に表われていないが、ひびわれの状況から荷重の分散に役立っていると考えられる。

図-9 は鋼管のフーチングへのめり込み量を荷重との関係で表わしたものである。いずれも 0.05 mm 程度のめり込み量で最大荷重に達した後はめり込み量の増大とともに荷重が低下している。その中で鋼管の肉厚の大きい B6、B7 のめり込み量が少ないが、天蓋の有無はほとんど関係していないことがわかる。また、天蓋の厚さの影響も表われていない。

このときのフーチングコンクリートの支圧応力を測定した結果を図-10 に示す。測定ゲージの位置は図-11 のとおりである。対象は天蓋(22 mm)のある B2、最も薄い肉厚(6.4 mm)の B5、最も厚い肉厚(14.3 mm)の B7 である。

図-10 より荷重 50 t(ひび発生以前)ではほぼ左右対称の支圧分布になっており、B2、B5、B7 の順となっている。B2 は天蓋があるために鋼管内部コンクリートからの応力分散がないために鋼管先端に応力が集中する。B5 は B7 の半分の肉厚であるが、内部コンクリートへの応力分散(付着による)がよく、先端の支圧応力は肉厚比

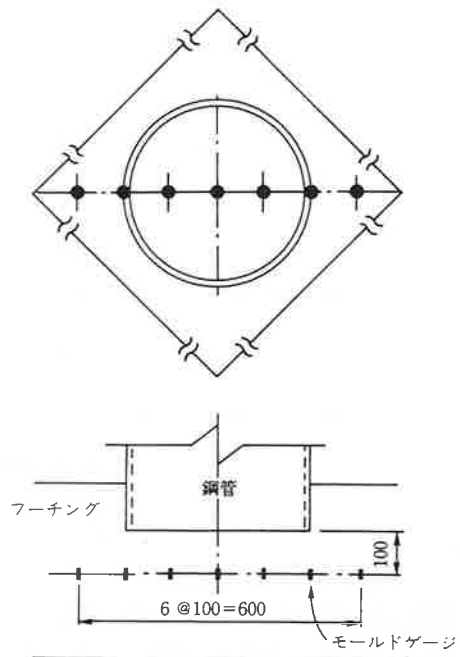


図-11 フーチングコンクリートのゲージ位置

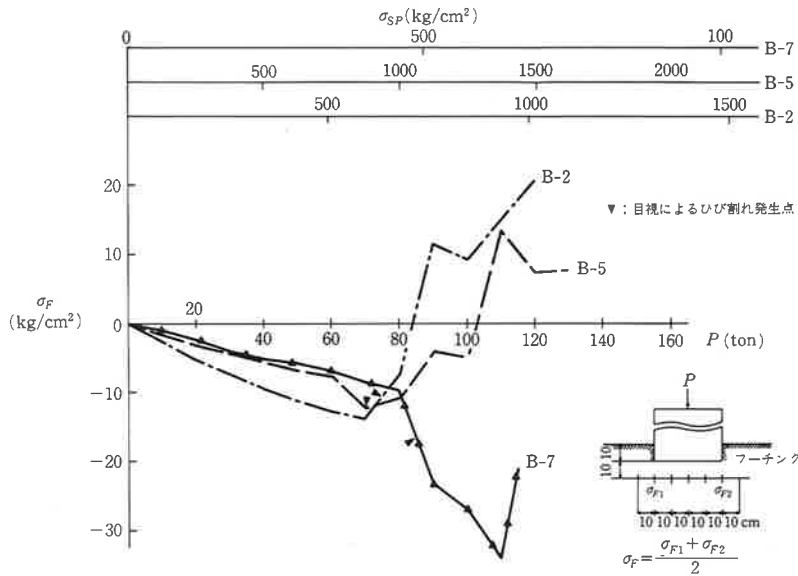


図-12 荷重と鋼管肉厚部直上のフーチング支圧応力

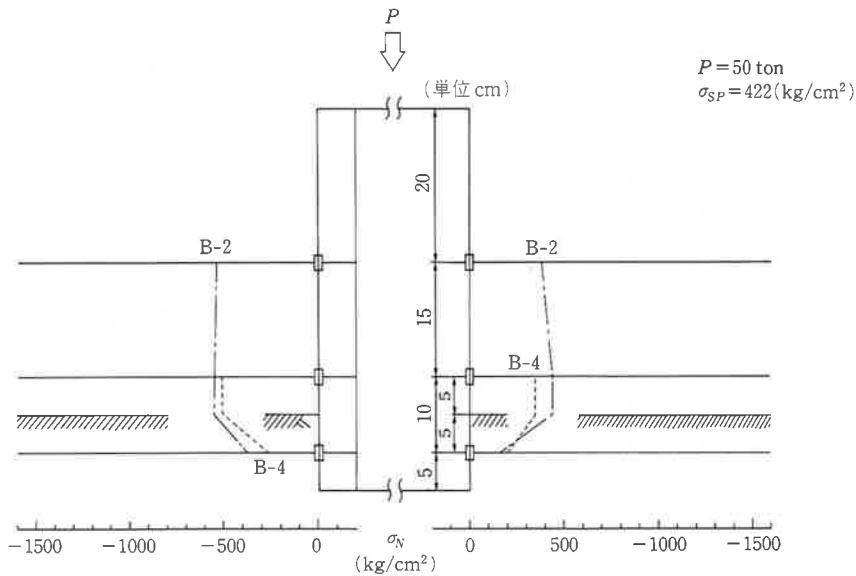


図-13 鋼管の軸方向面内応力分布

ほどではない。

荷重 100 t ではひびわれの影響で測定値は大きく乱れている。A 結合の場合と大きく異なっている。この中で B7 はアンバランスながらも

支圧の状態である。

図-12 に鋼管肉厚直下の左右の支圧応力の平均値を示す。B2, B5, B7 の傾向は変わらずひびわれ発生荷重の 70 t 付近までは荷重に応じて支

圧は大きくなる。ひびわれ発生後 B2, B5 は引張ひずみに転じているのは円周状のひびわれの発生によって応力がひげ鉄筋の方へ多く伝わったためと考えられる。

図-13 は鋼管のフーチングへの埋め込み長 10 cm の効果を B2 (天蓋 22 mm) と B4 (天蓋なしの標準タイプ) について測定したものである。測定ゲージの配置は図-14 のとおりである。

50 t 載荷時も 100 t 載荷時も同様の傾向にあるが、ひびわれ発生前の方が信頼性があると考えられるので 50 t 載荷時をとり上げる。B2 の母材の応力度が計算値より大きいのは天蓋円周上の支持条件が等しくないこと (ひげ鉄筋の位置?) によると考えられる。図-13 の右側の値は B2 の減少率が大きいことを示しているが、左側は B4 の方が大きいことを示している。支圧分布から推定すると左側の方が妥当と考えられるが、いずれにしても 10 cm の埋め込み長といえども応力の減少に大きな効果があることを示している。

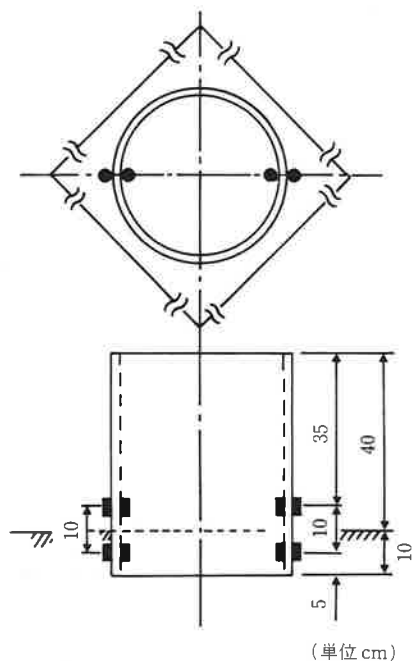


図-14 鋼管のストレインゲージの位置

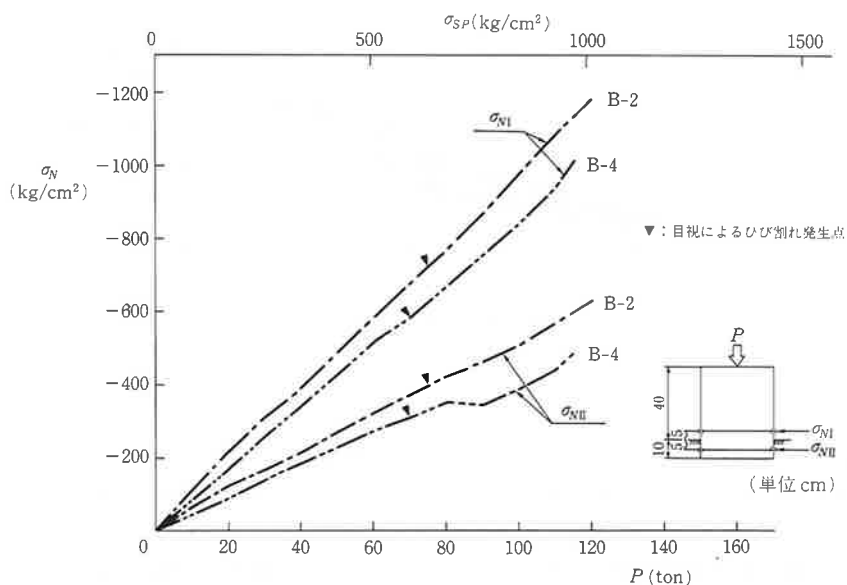


図-15 荷重と鋼管の軸方向面内応力 (σ_N)

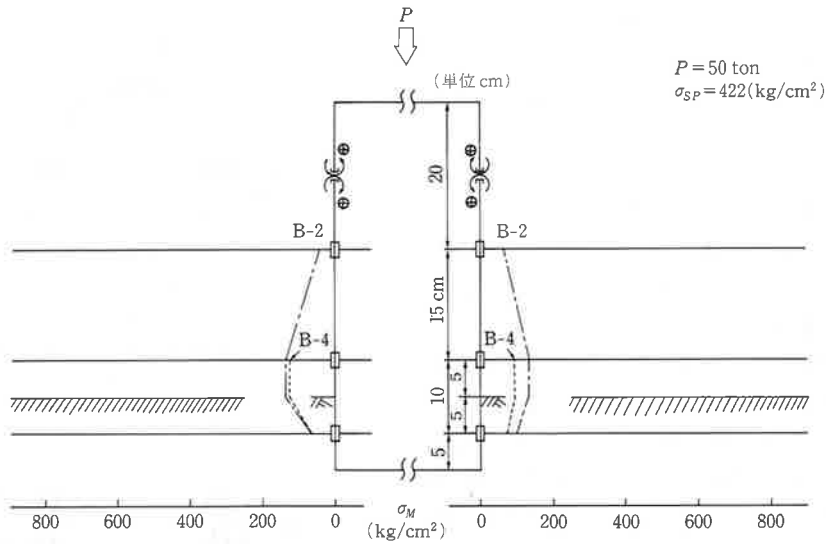


図-16 鋼管の軸方向面外曲げ応力分布

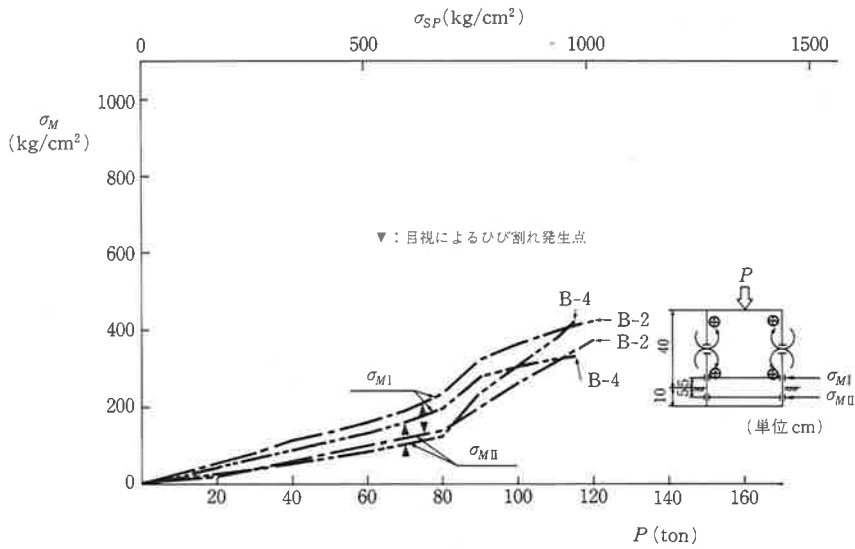


図-17 荷重と鋼管の軸方向面外曲げ応力 (σ_M)

図-15はB2, B4軸方向の応力ひずみを示している。 σ_{NI} ではB4はほぼ計算どおり($\sigma_N \approx \sigma_{sp}$)であるが、B2は σ_N の方が大きくなっている。埋め込み部の支持条件が等しくないためと考えられる。 σ_{NII} では同じ傾向があるものの周

面付着がよく効いている($\sigma_N < \sigma_{sp}$)結果となっている。応力の分散が効率よく行なわれていることが推定される。

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

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究

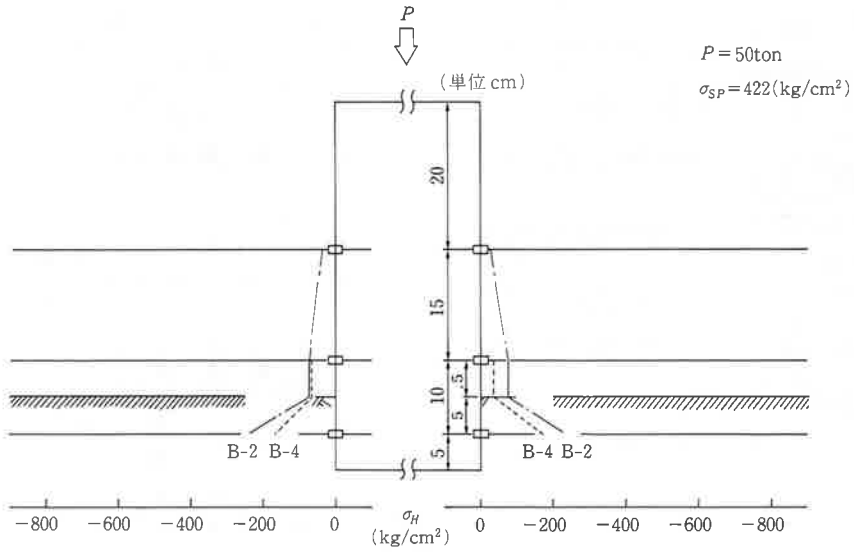


図-18 鋼管の周方向面内応力分布

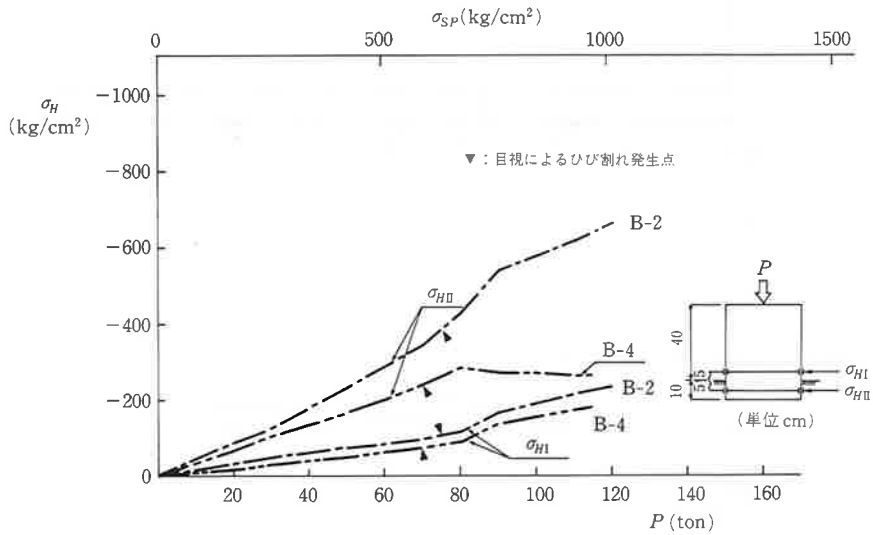


図-19 荷重と鋼管の周方向面内応力 (σ_H)

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、外側だけ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 からわずかに曲げモーメントが働いていることがわかる。10 cm という浅い埋め込み長のためであるが、曲げモーメントは B2 の方

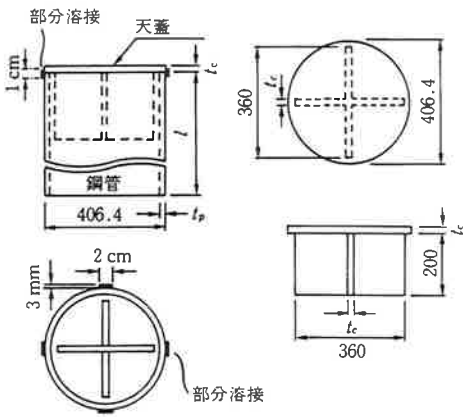


図-20 天蓋の形状

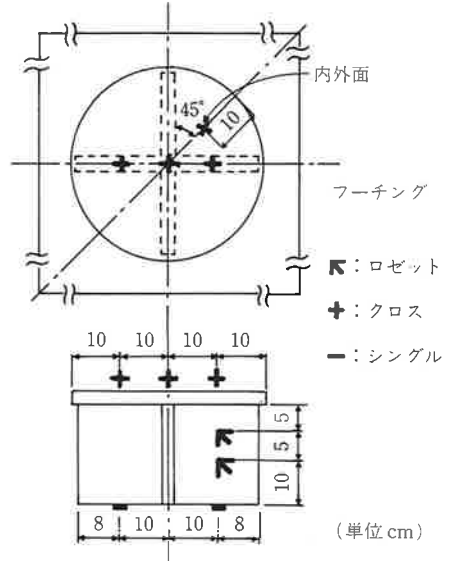


図-21 天蓋のひずみゲージの位置

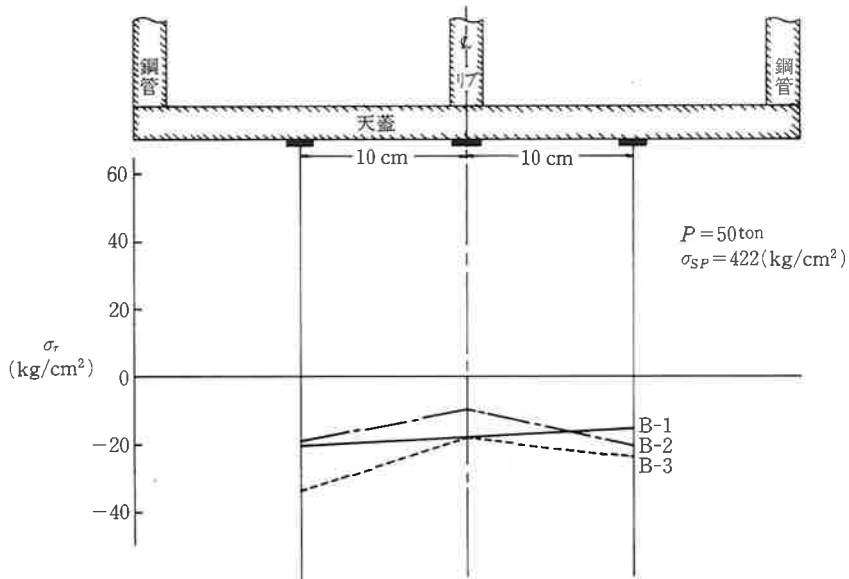


図-22 天蓋上面リブ直上半径方向応力 (σ_r) 分布

が大きく現われている。

この関係は図-17でも見ることができる。 σ_{MI} の方が σ_{MH} よりも大きいですが、その差は小さい。ひびわれ発生後、 σ_{MH} のB4の曲げモーメント

が大きくなりだした原因については不明である。

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

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究

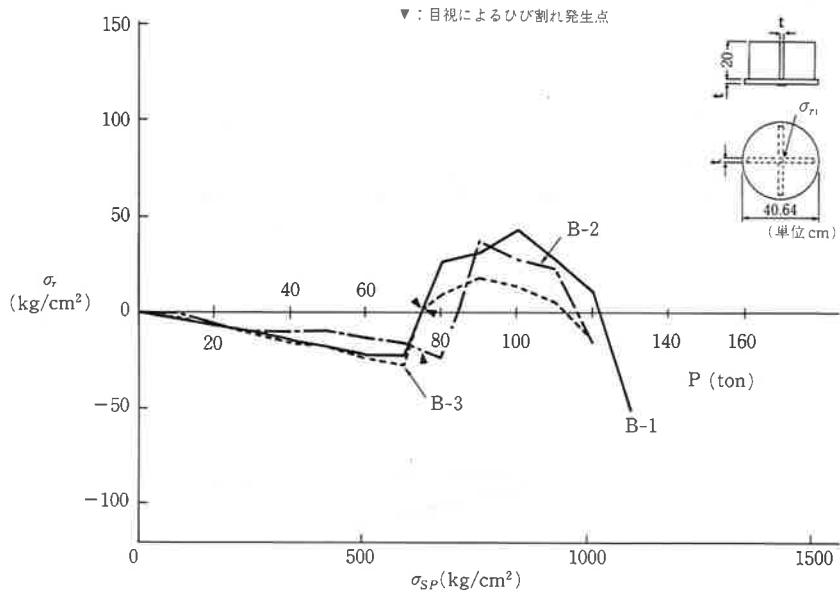


図-23 荷重と天蓋上面リブ直上半径方向応力 (σ_{r1})

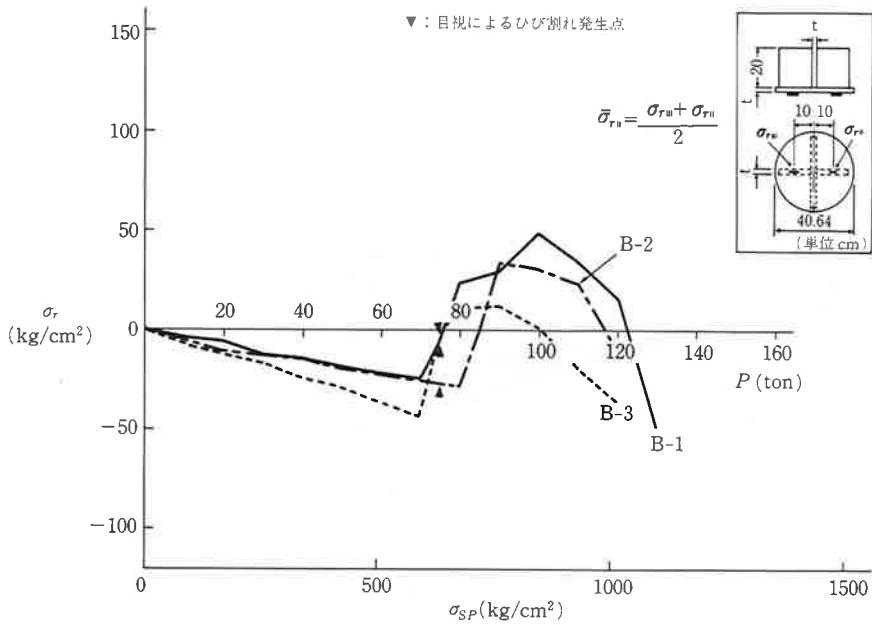


図-24 荷重と天蓋上面リブ直上半径方向応力 ($\bar{\sigma}_{rn}$)

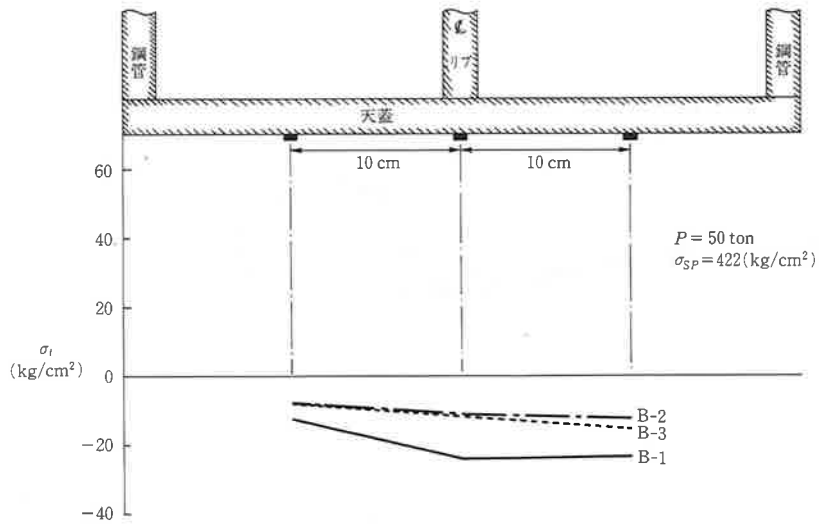


図-25 天蓋上面リブ直上周方向応力 (σ_t) 分布

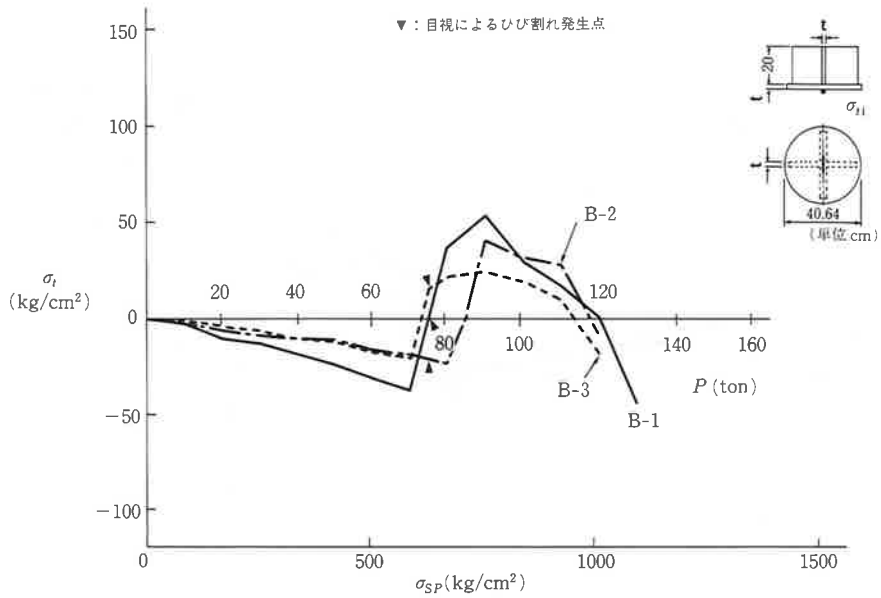


図-26 荷重と天蓋上面リブ直上周方向応力 (σ_{t1})

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究

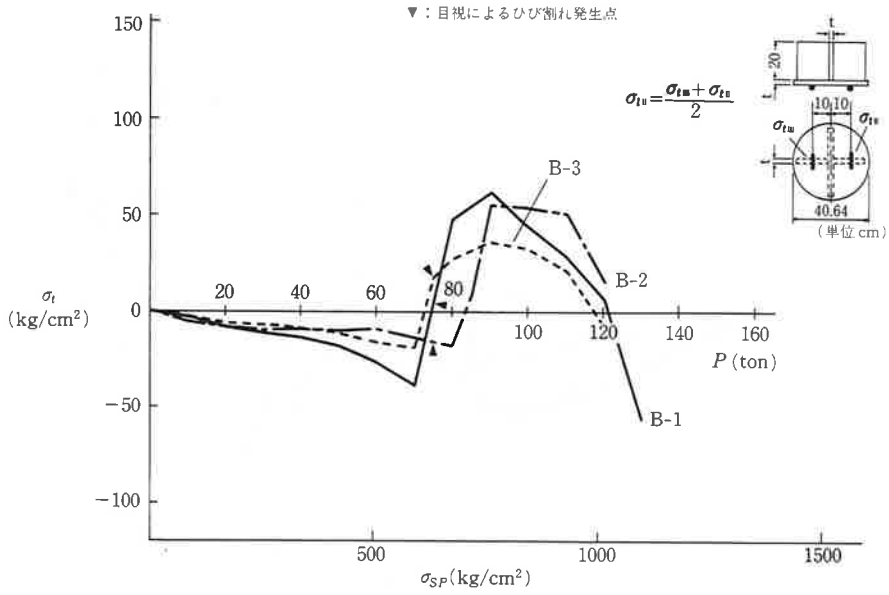


図-27 荷重と天蓋上面リブ直上周方向応力 (σ_{tl})

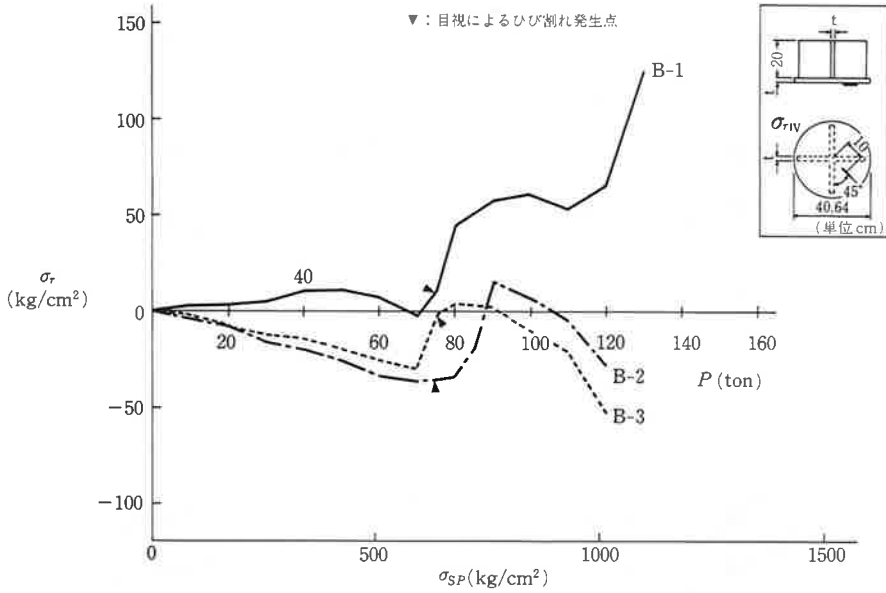


図-28 荷重と天蓋上面リブ間半径方向応力 (σ_{rIV})

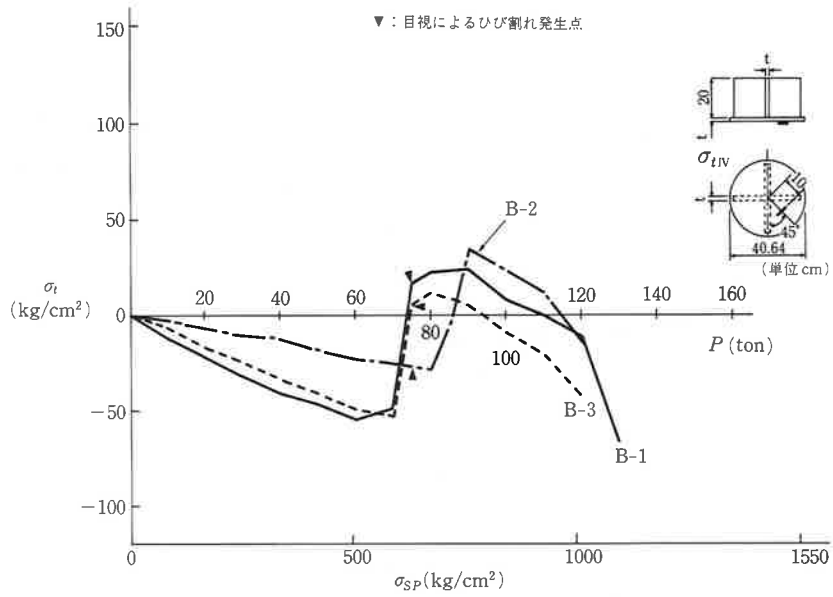


図-29 荷重と天蓋上面リブ間周方向応力 (σ_{trv})

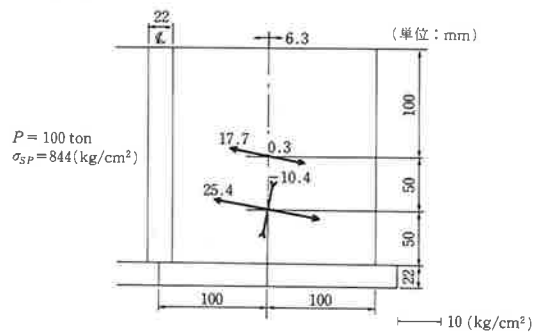
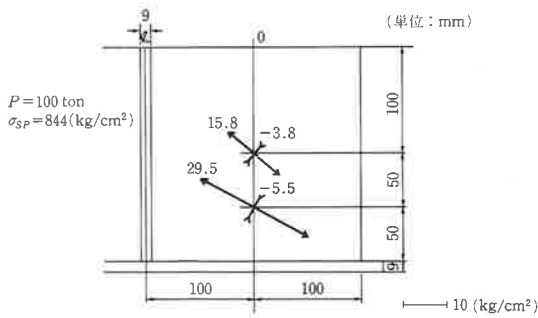
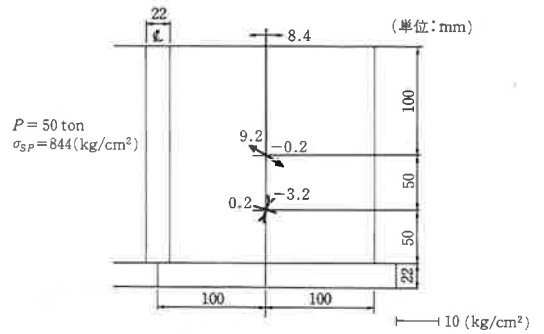
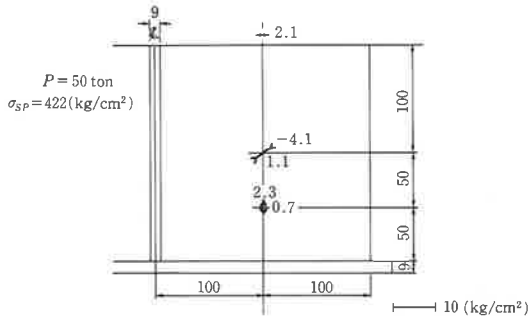


図-30 リブの主応力 (B-1)

図-31 リブの主応力 (B-2)

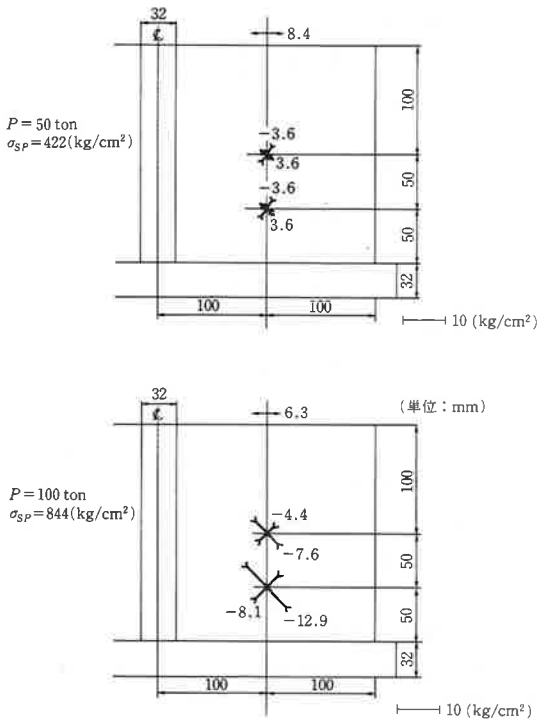


図-32 リブの主応力 (B-3)

ングの曲げ変形の影響を見るためのものである。

B2は明らかに外側への伸張がフーチングコンクリートに制限されて圧縮になっている。B4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B2ほどの圧縮にはなっていない。図-19でもひびわれ発生までは同じ動きを示しているが、B4は80t以降、周方向面内応力が増加していない。図-17の動きと呼応していると考えられるが、原因は不明である。

天蓋(図-20)には図-21のようにひずみゲージを取り付け、天蓋に発生する応力を測定した。

天蓋の上面で荷重50tのときに発生する半径方向の応力を図-22に示す。圧縮応力であるが小さな値である。荷重の増加にもとなう変化を示したものが図-23, 24である。ひびわれが発生すると引張応力に変化する。

周方向の応力分布を示したのが図-25であ

る。いずれも圧縮応力であるが、値は小さい。その荷重との関係を図26, 27に示す。やはり、ひびわれが発生すると引張側に変化する。

この間、天蓋の厚さの影響は小さく、全体の応力レベルが極めて小さいので天蓋の厚さの効果は現われていない。

次にリブとリブの中間の天蓋の上の応力を半径方向で示したのが図-28である。B1ははじめから引張側であるが、他は圧縮側である。これもひびわれ発生後は引張側へ動いている。さらに周方向の応力と荷重の関係を示したのが図-29である。最初はすべての天蓋は圧縮側であるが、ひびわれ発生によって引張側に変化する。いずれの測定値も絶対値が小さいために天蓋の厚さに影響するものとなっていない。

次にB1, B2, B3の天蓋のリブの応力を測定した結果が図-30~32である。ひびわれ発生後の100t載荷でも最大主応力は30kgf/cm²に至っていない。この中で、ひびわれ発生後の100t載荷時に大きな応力になるということは天蓋の反力の支点が端部すなわち鋼管の位置となるためと考えられる。ただし、B1, B2の最大主応力が引張であるのに対してB3のものが圧縮である点が注目される。

3. ま と め

本試験はB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) B方法の埋め込み長10cmでも管体とコンクリートとの付着や摩擦抵抗が発揮されている。

(2) B方法の破壊の形態は曲げせん断破壊もしくは曲げ破壊となっている。

(3) 天蓋を使用した場合と使用しない場合のひびわれ荷重、最大荷重にはほとんど差が認められない。しかし、最大荷重以降も天蓋のない方は荷重保持の点で優れている。

(4) 天蓋を用いた場合のフーチング下面のひ

びわれは亀甲状で、荷重の分散が図られているものと推定される。天蓋のない場合のフーチング下面のひびわれは鋼管の円周に沿った形状とそれから放射状の亀裂である。ひげ鉄筋の存在が影響しているものと考えられる。

(5) むり込み量については管体の肉厚の影響がみられるものの天蓋の有無の影響は明確にはみられない。

(6) フーチングコンクリートの支圧については天蓋のないものの方がバランスのよいものとなっている。その理由は埋め込み長の部分の付着によって荷重が分散されるためと考えられる。

(7) 埋め込み長 10 cm の効果は A 方法のように顕著ではないが、支圧応力の分布、埋め込み部先端の応力の低減、フーチング下面のひびわれ発生等に影響を与えている。

(8) 天蓋を用いることによって埋め込み部の管体の軸方向面外曲げモーメント、円周方向面内応力などが大きくなるが、その値そのものの絶対値は小さい。

(9) 天蓋はリブで補強されても支圧を受けるのはひびわれ発生荷重までで、その後は引張ひずみなどになり、効果が発揮されない。支圧応力も 40 kg/cm^2 以下である。

(10) 天蓋の補強リブ内に発生する応力は荷重の増加とともに大きくなり、最大 30 kg/cm^2 程度となる。これはひびわれ発生後、天蓋の支持点が鋼管円周上になるためと推定される。

以上より今後の B 方法による杭頭固定については次の方向で検討する必要がある。

(1) B 方法にあっても管体とコンクリートの付着は重要な要素であるからその機能を拡大させる方向で検討する。

(2) 破壊の形態が曲げせん断破壊となりやすいので曲げ補強筋とともにせん断補強筋を配置

する必要がある。

(3) 天蓋の有無は杭頭の必要要件とはならないことが判明したので廃止の方向で検討するべきである。

(4) ひげ鉄筋の存在は力学的挙動に多様に影響しているため廃止はむずかしい。しかし、取り付け方法などに課題があるのでその機能を実質的に代替できるものを考案するべきである。

(5) 鋼管の厚さはフーチングコンクリートの支圧応力には有効であるのでこの機能は温存しておいた方がよい。

以上で紀要第 3 巻と合せて鋼管杭の杭頭固定方法の A 方法、B 方法の鉛直荷重に対する知見をとりまとめることができた。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。

参考文献

- 1) 塩井幸武：鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究(その 1)、八戸工業大学構造工学研究所紀要第 3 巻、1996 年 2 月、pp. 23~44
- 2) Moe, J: Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs and Footings, Development Department Bulletin D47, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, April 1961
- 3) ACI-ASCE Committee 426: The Shear Strength of Reinforced Concrete Members, Proc. of ASCE, Jour. of Structural Div., Vol. 99, No. St 6, June 1973, pp. 1091-1197