

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究（その4）

塩 井 幸 武*

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

Yukitake SHIOI*

Abstract

For the connection of pile head with a footing of steel pipe pile foundation, experimental and dimensional studies were performed to horizontal load and moment concerning B method, after A method in the year before last.

As results, it is proved that B method also is excellent as same as A method for the pile head connection. Especially it is emphasized that an embedded pile head in the footing is very effective to loads even if it is short, and anchored bars welded at pile head and embedded in filled concrete in the pile make a strong connection and control the behavior of pile head.

This paper is the last one of a series of loading test on pile head.

Keywords : steel pipe pile, foundation, pile head connection

1. はじめに

鋼管杭基礎の杭頭固定法には A 方法と B 方法があることは参考文献 1 で述べたとおりである(図-1)。それぞれの特徴は同文献によられたい。

ここでは参考文献 3 に引き続き、B 方法により固定した杭頭モデルに水平力、曲げモーメントを作用させたときの挙動について調べた結果をとりまとめた。B 方法による杭頭に鉛直力が作用した場合の挙動については参考文献 2 を参照されたい。

2. 実験 V（水平力、曲げモーメント作用時の B 方法による杭頭固定部の挙動）

2.1 試験体

A 方法、B 方法による杭頭固定の試験体の概

要を図-1 に示す。A 方法はフーチングの中に杭頭を杭径以長の長さで固定するものである。B 方法は杭頭をフーチングの下端鉄筋の直下に留めて、杭頭にひげ鉄筋を溶接して固定するものである。従って、A 方法の場合のフーチングは B 方法に比べて厚いものとなる。

用いた鋼管は STK41、径 267.4 mm、肉厚 9.3 mm である。鉄筋は径 16 mm の異形鉄筋 (SD30) である。

水平力、曲げモーメントに対する挙動を調べるために天蓋の有無、ひげ筋の本数、取付け角度、鉛直荷重の有無、杭頭中詰コンクリートの有無、リング筋（杭頭のまわりに配置するリング状の径 13 mm、SD30 の異形鉄筋）の有無の項目に関する 11 体の供試体を準備した(表-1)。それぞれの構造の概略を表-2 に示す。

2.2 試験方法

供試体は図-2 に示す方法で上下を逆としてフーチングより 600 mm の位置で鋼管側面に

平成 10 年 10 月 16 日受理

* 構造工学研究所・教授

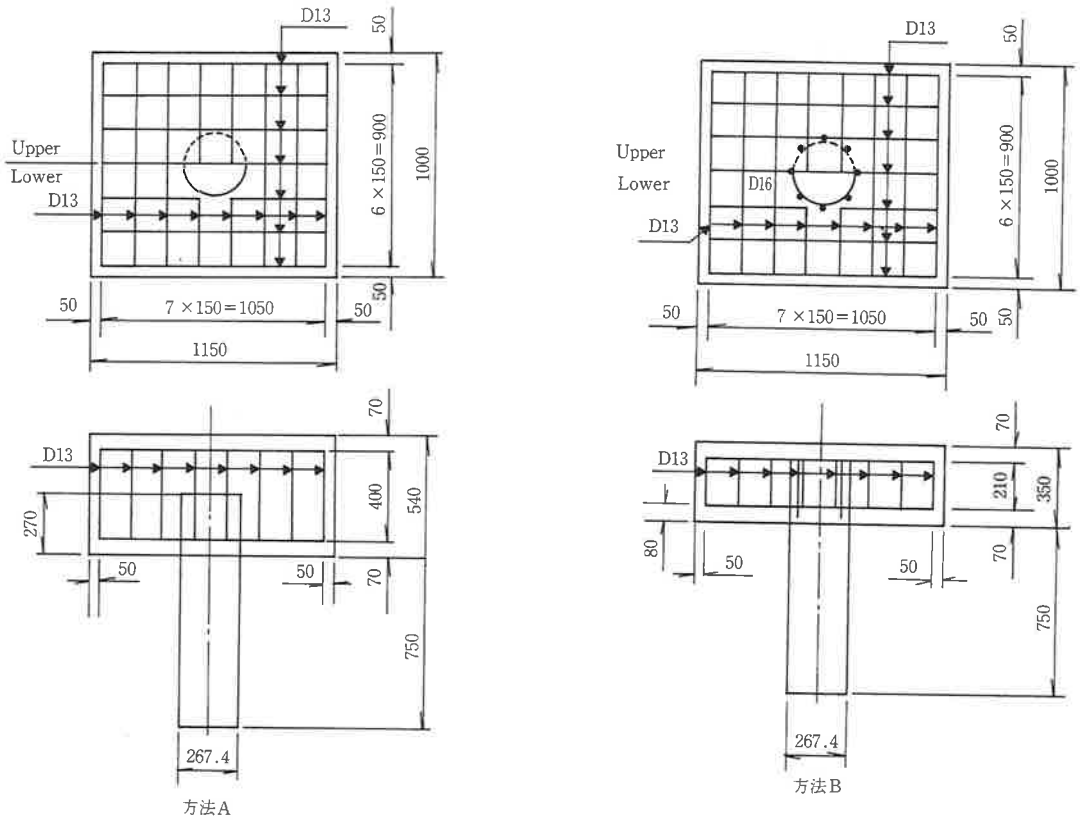


図-1 結合方法 A, B の概要

表-1 各パラメータの構造

試験体No.	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	B-4
構造							
適用	天蓋付き	基準	周面付着なし	天蓋付き	基準(ひげ筋8本)	ひげ筋なし	ひげ筋4本
試験体No.	B-5	B-6	B-7	B-8	B-9	B-10	B-11
構造							
適用	$\psi = 45^\circ$	$V = 5_{\text{mm}}$	中筋1D	周面付着なし	リング筋付き	非溶接型(かご筋差込み)	非溶接型(鉄筋差込み)

表-2 試験体の種類

結合方法	方法 A			方法 B										
	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-8	B-9	B-10	B-11
試験体 No.														
ひげ筋本数	0本					○							○	
ひげ筋 ψ	4本						○							
ひげ度	8本													
ひ角	0°													
ひ角	45°							○						
鉛直荷重	無													
鉛直荷重	圧縮 $V=5^{tont}$								○					
中詰コンクリート	コーティング下面													
リング筋	1D												○	○
リング筋	0本													
リング筋	2本													
天蓋	有													
天蓋	無													
くい周面付着	有													
くい周面付着	無													
備考	現行	基準		現行	基準									
														ひげ筋: 鉄筋の差込み
														ひげ筋: かく鉄筋の埋込み

○: 変化パラメータ, —: 標準

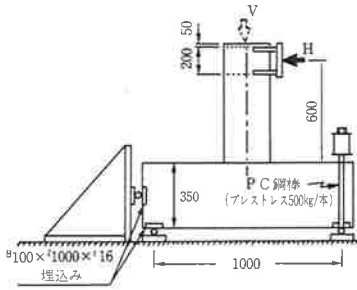


図-2 荷重方法

水平力を与えた。供試体 B-6 には鉛直力も同時に荷重した。

測定項目はフーチングと鋼管のたわみ量(図-3)、フーチング下面のひずみ量(図-4)、フーチングコンクリートの支圧ひずみ量(図-5)、鋼管のひずみ量(図-6)、ひげ鉄筋のひずみ量(図-7)、リング鉄筋のひずみ量(図-8)、フーチング表面のひびわれ状況である。

なお、フーチングコンクリートの圧縮強度は

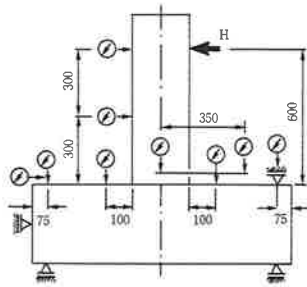


図-3 ダイアルゲージ位置

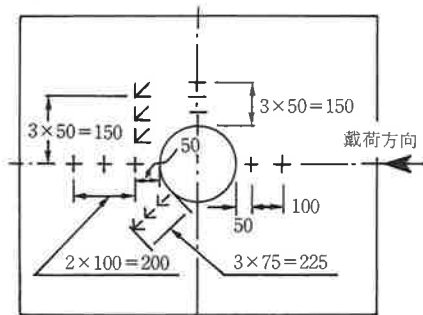
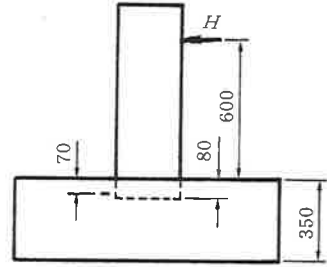
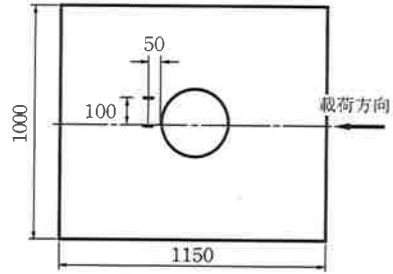


図-4 フーチング表面のゲージ位置



方法B

図-5 フーチングコンクリートのモールドゲージ位置

$\sigma_c = 225 \sim 237 \text{ kgf/cm}^2$ で、ヤング係数は $2.3 \sim 2.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であった。

3. B方法の試験結果と考察

3.1 耐力と破壊形式

表-3 に水平荷重試験時のフーチング表面のひびわれ発生荷重 H_1, H_2, H_3, H_5 (表-3の説明図の分類による), 荷重変形曲線の急変部の荷重 H_6 , 最大耐力 H_{max} , 引張側ひげ鉄筋の降伏荷重を 11 供試体について示す。表中の () 内は最大荷重に対する荷重々重の比率で, [] 内は標準型の B-2 の最大耐力に対する各供試体の最大耐力の比率である。

なお、A 方法でみられた荷重方向のフーチング前面のひびわれがいずれの供試体でも観察されていないために H_4 は記載されていない。

荷重と鋼管およびフーチングの回転角, 荷重と鋼管載荷点のたわみ, フーチング表面と側面のひびわれ発生状況を図-9~19 に示す。

試験ではいずれの供試体もフーチングの亀裂

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究 (その4)

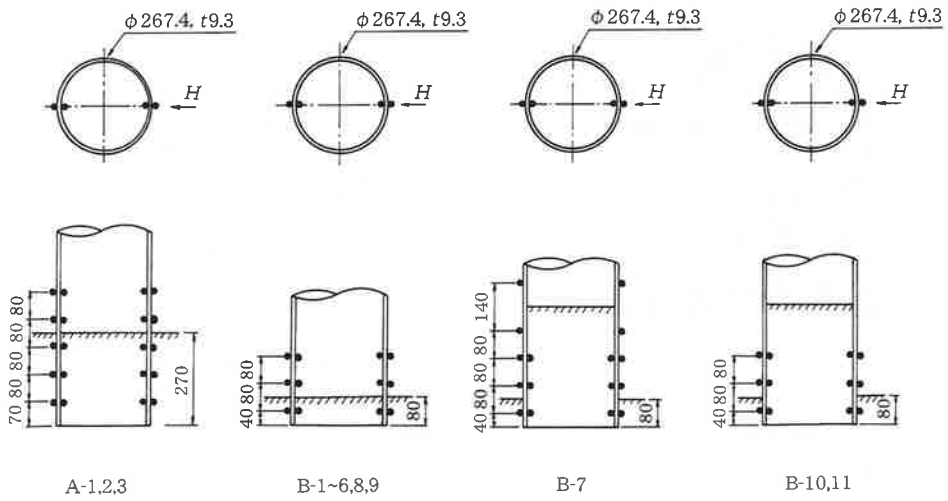


図-6 鋼管ゲージ位置

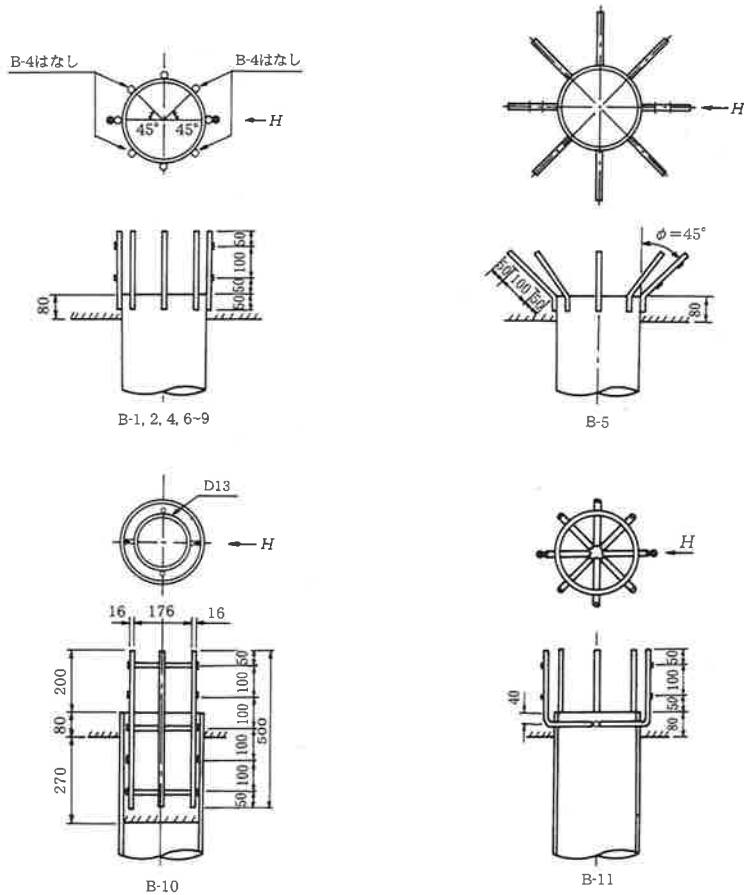


図-7 ひげ筋ゲージ位置

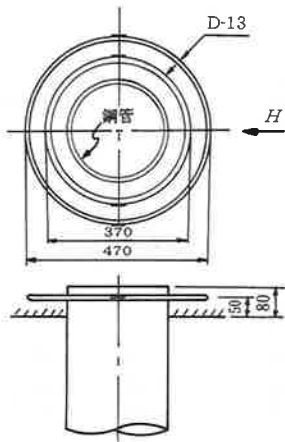


図-8 リング筋ゲージ位置

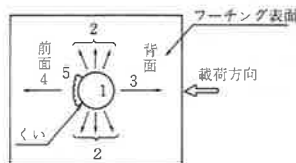
破壊で終局状態を迎えている。このうち、B-2、B-8は最終状態に至る直前で鋼管本体の前面側に座屈現象が現われはじめたが、フーチング側面のひびわれが進行しており、破壊はフーチングで発生した。

最大耐力の比較にあたり11体の供試体を2つのカテゴリーに分けることとする、1つはひげ鉄筋の効果を調べるためのシリーズで、B-2(ひげ筋8本)、B-3(ひげ筋なし)、B-4(ひげ筋4本)、B-5(ひげ筋8本、 $\psi=45^\circ$)、B-10(ひげ筋4本、内側に建込型)、B-11(ひげ筋8本、外側に建込型)の6体である。他方は杭頭部のフーチングへの定着構造の影響を調べるシリー

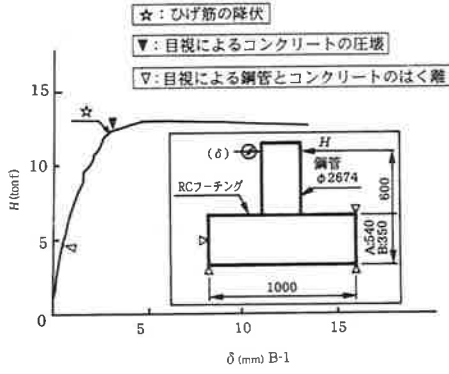
表-3 耐力一覧表

	目視によるひび割れ発生荷重 (tf)				変形急進荷重 H_6 (tf)	最大耐力 H_{max} (tf)	引張側ひげ筋 の降伏荷重 (tf)
	$H_{(1)}$	$H_{(2)}$	$H_{(3)}$	$H_{(5)}$			
B-1	4.7 (36)	5.2 (40)	8.8 (68)	12.5 (96)	12.5 (96)	13.0 [0.93]	12.3 (95)
B-2	6.1 (44)	6.1 (44)	11.2 (80)	13.9 (99)	12.0 (86)	14.0 [1.00]	11.0 (79)
B-3	0.8 (15)	3.0 (55)	4.0 (73)	不明	3.0 (55)	5.5 [0.39]	
B-4	3.5 (36)	3.8 (40)	6.8 (71)	不明	8.0 (83)	9.6 [0.69]	8.3 (86)
B-5	4.0 (36)	4.5 (40)	5.5 (49)	11.2 (100)	8.0 (71)	11.2 [0.80]	不明
B-6	7.1 (47)	7.1 (47)	13.8 (91)	11.5 (76)	13.2 (87)	15.1 [1.08]	14.5 (96)
B-7	4.0 (29)	5.5 (40)	10.5 (77)	13.3 (98)	10.5 (77)	13.6 [0.97]	13.2 (97)
B-8	3.0 (19)	5.5 (34)	6.0 (37)	15.8 (98)	12.3 (76)	16.2 [1.16]	12.2 (75)
B-9	3.5 (24)	4.5 (30)	9.5 (64)	14.7 (99)	13.0 (88)	14.8 [1.06]	12.6 (85)
B-10	2.5 (24)	4.5 (43)	10.3 (99)	10.2 (98)	9.4 (90)	10.4 [0.74]	10.0 (96)
B-11	2.5 (21)	4.5 (38)	6.5 (54)	10.5 (88)	10.0 (83)	12.0 [0.86]	11.6 (97)

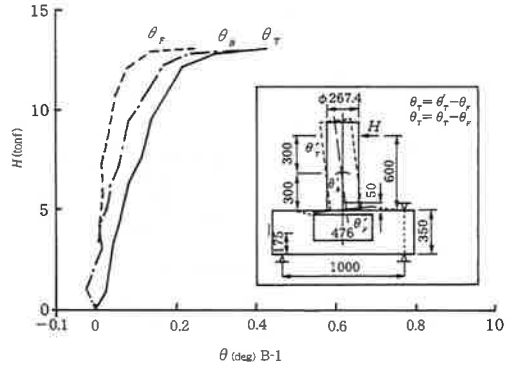
発生ひび割れの
分類



鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究 (その4)



荷重と鋼管載荷点のたわみ



荷重と鋼管およびフーチングの回転角

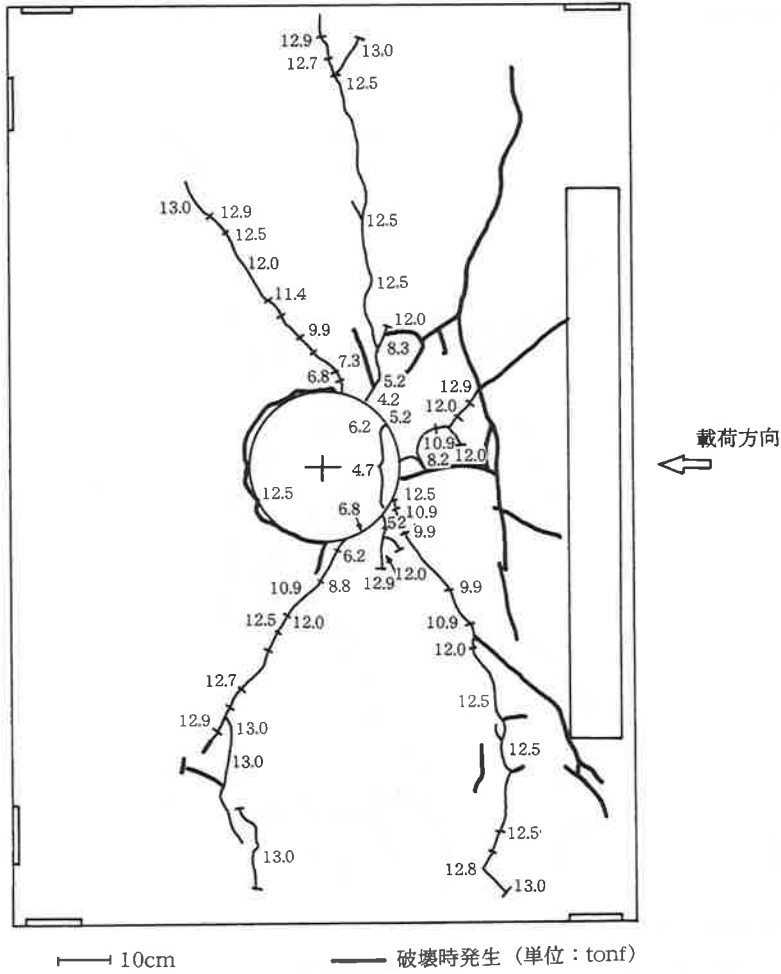
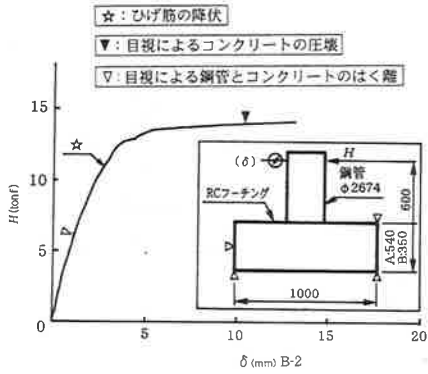
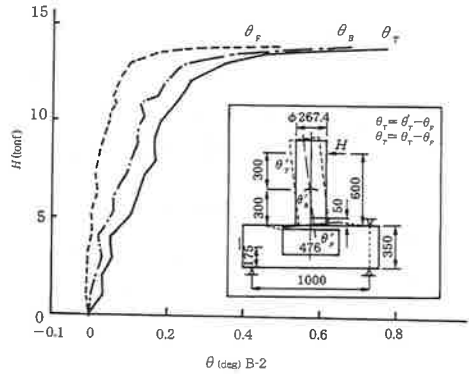


図-9 フーチング下面・側面ひび割れ発生状況 (B-1)



荷重と鋼管載荷点のたわみ



荷重と鋼管およびフーチングの回転角

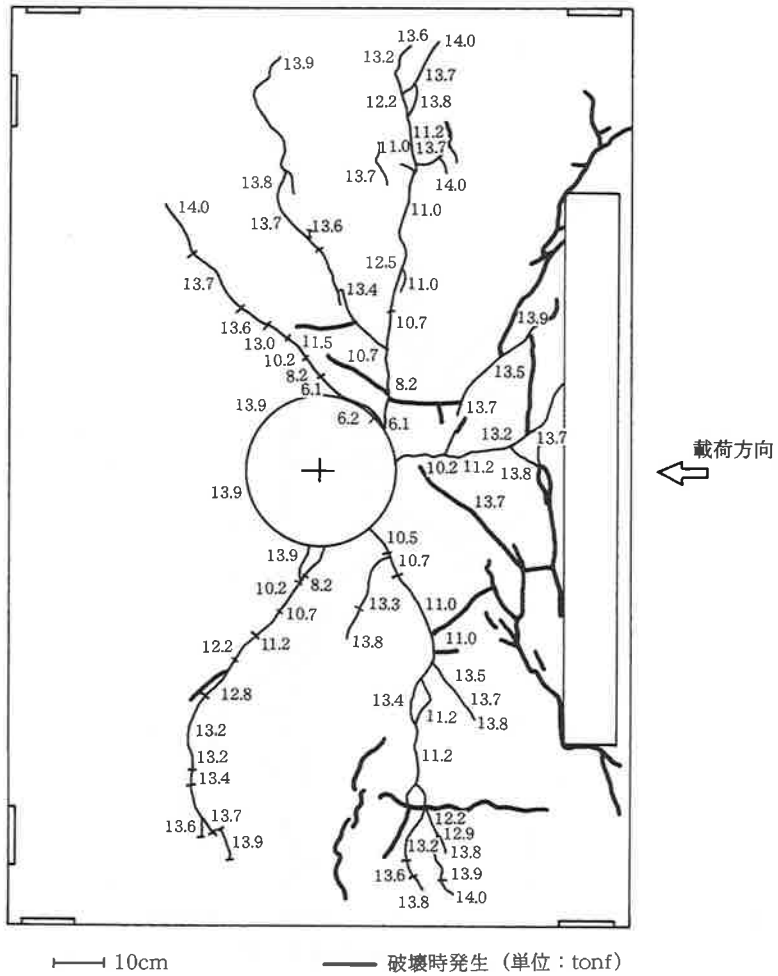
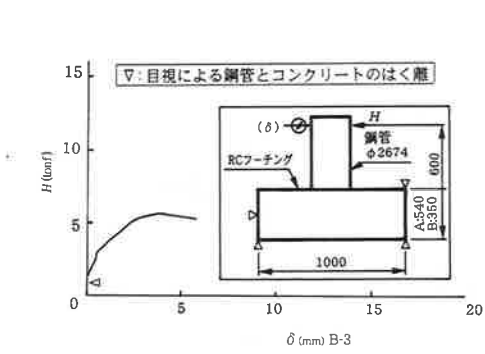
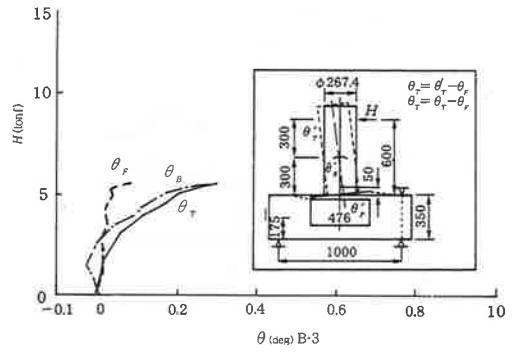


図-10 フーチング下面・側面ひび割れ発生状況 (B-2)

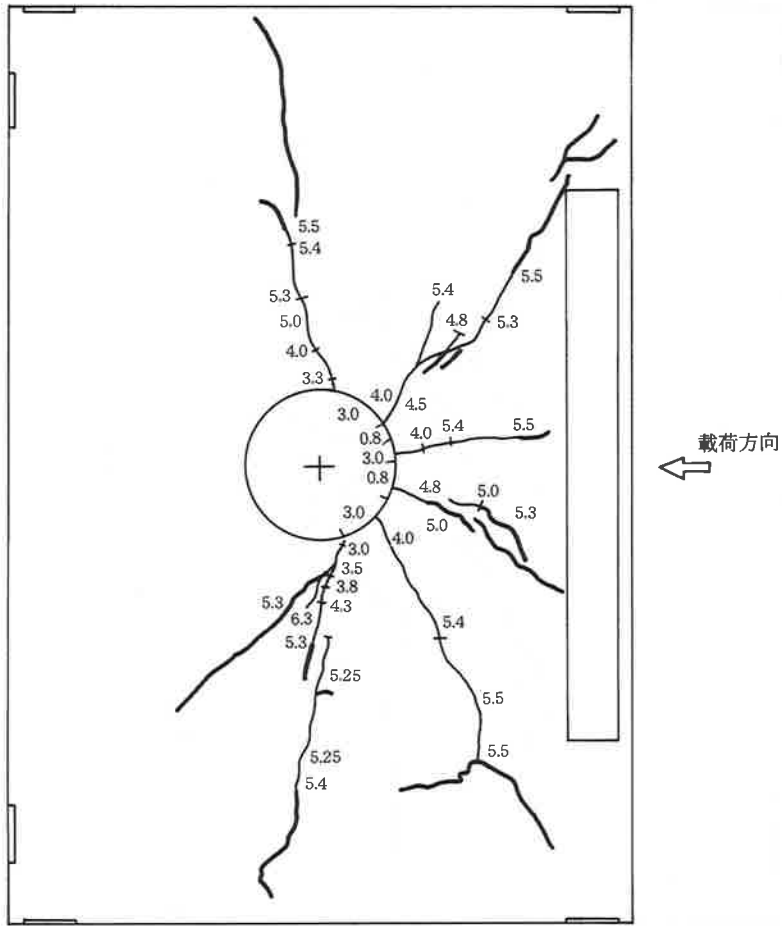
鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究 (その4)



荷重と鋼管載荷点のたわみ



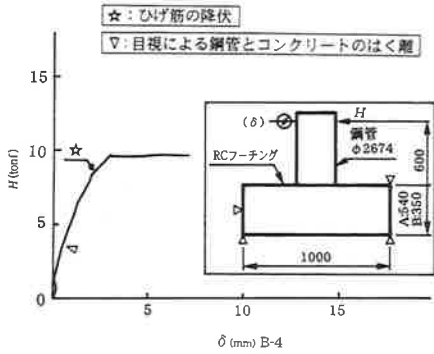
荷重と鋼管およびフーチングの回転角



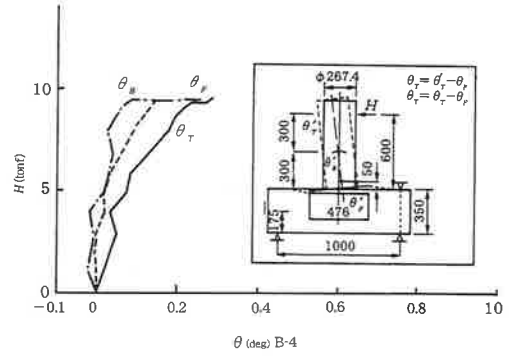
10cm

破壊時発生 (単位: tonf)

図-11 フーチング下面・側面ひび割れ発生状況 (B-3)



荷重と鋼管載荷点のたわみ



荷重と鋼管およびフーチングの回転角

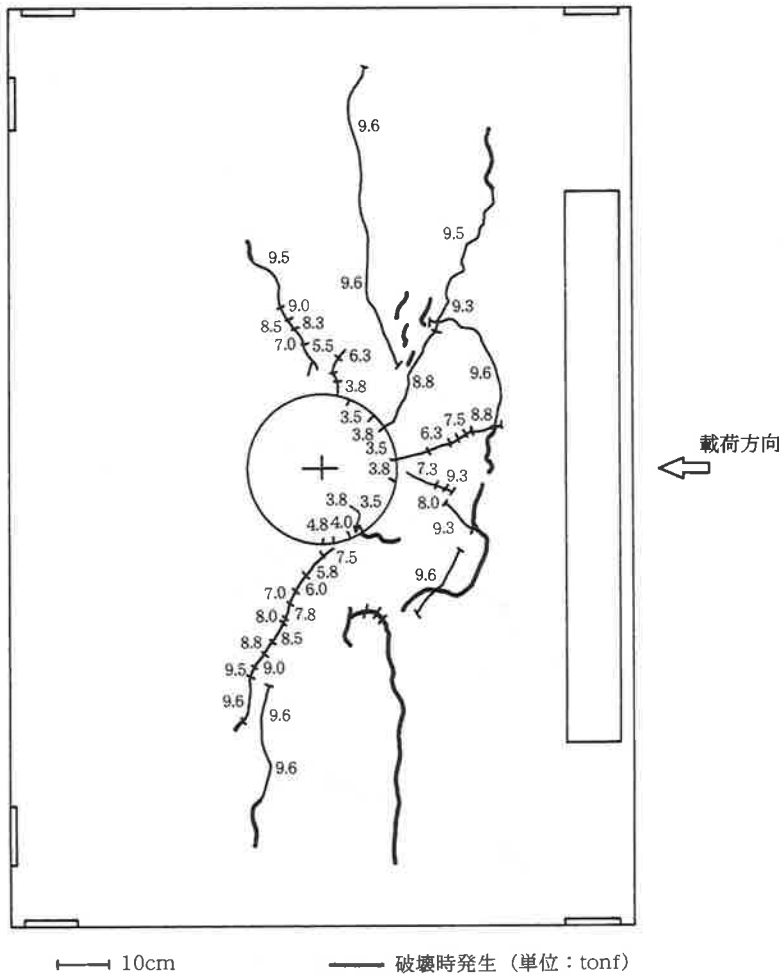
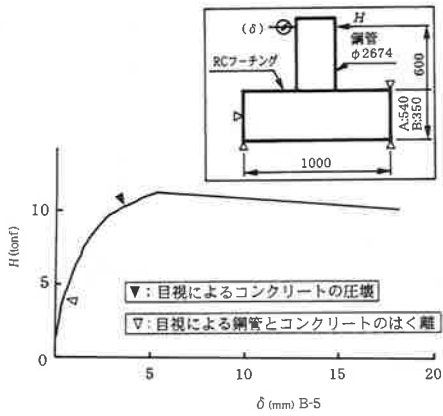
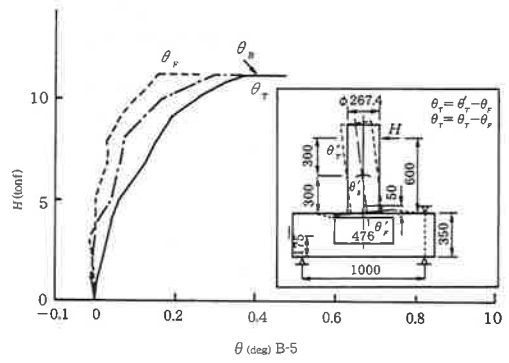


図-12 フーチング下面・側面ひび割れ発生状況 (B-4)

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究 (その4)



荷重と鋼管載荷点のたわみ



荷重と鋼管およびフーチングの回転角

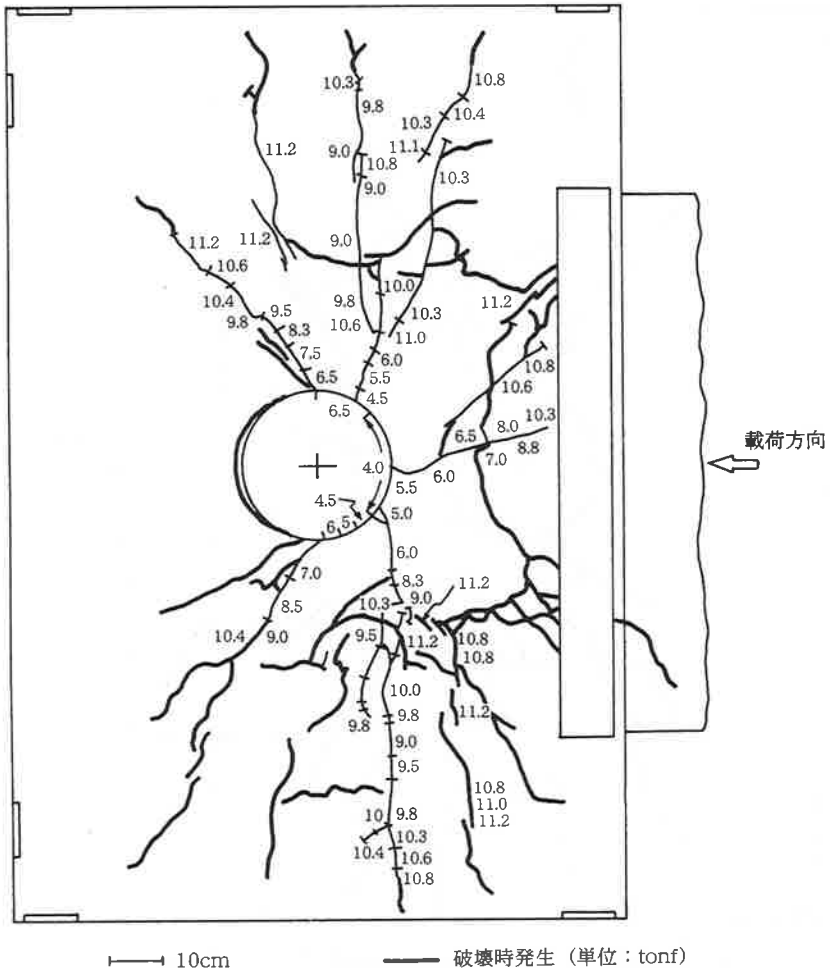
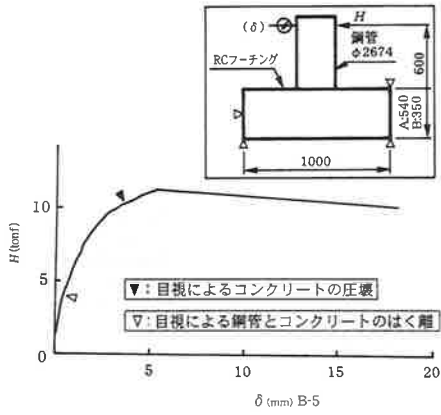
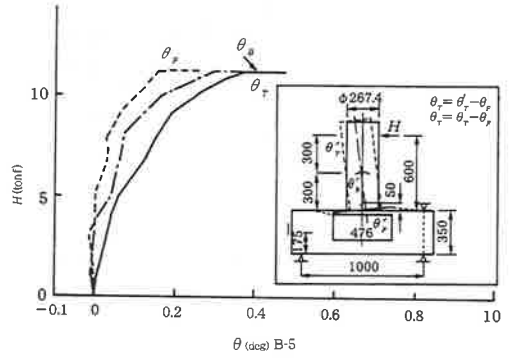


図-13 フーチング下面・側面ひび割れ発生状況 (B-5)



荷重と鋼管載荷点のたわみ



荷重と鋼管およびフーチングの回転角

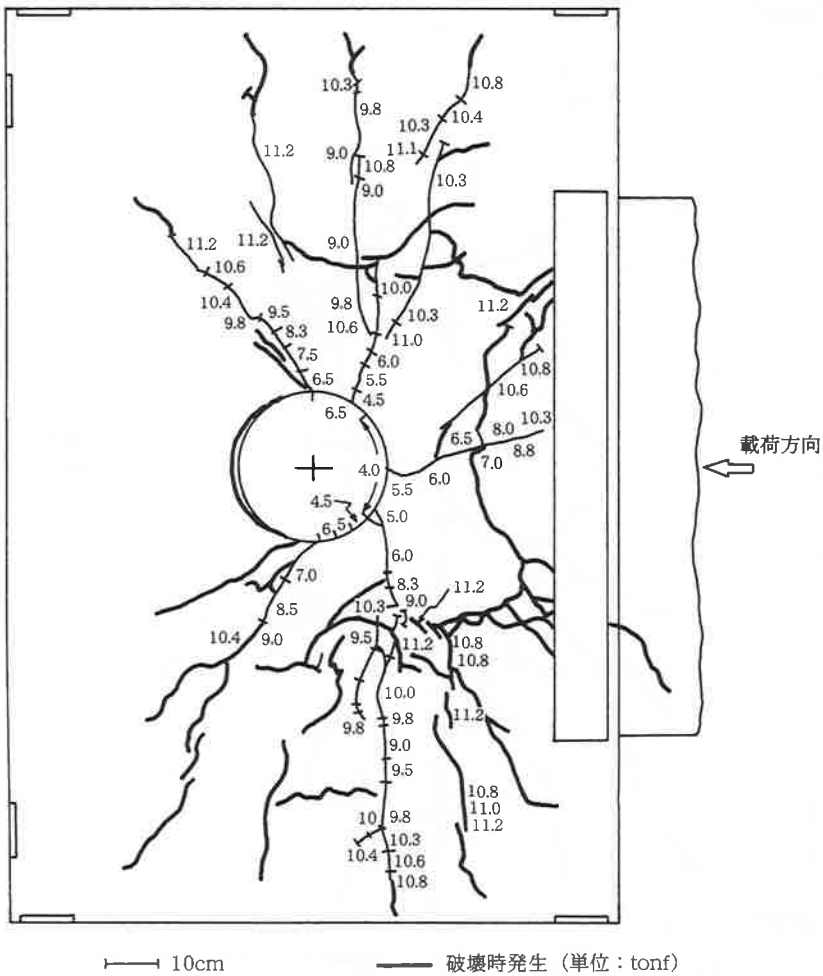
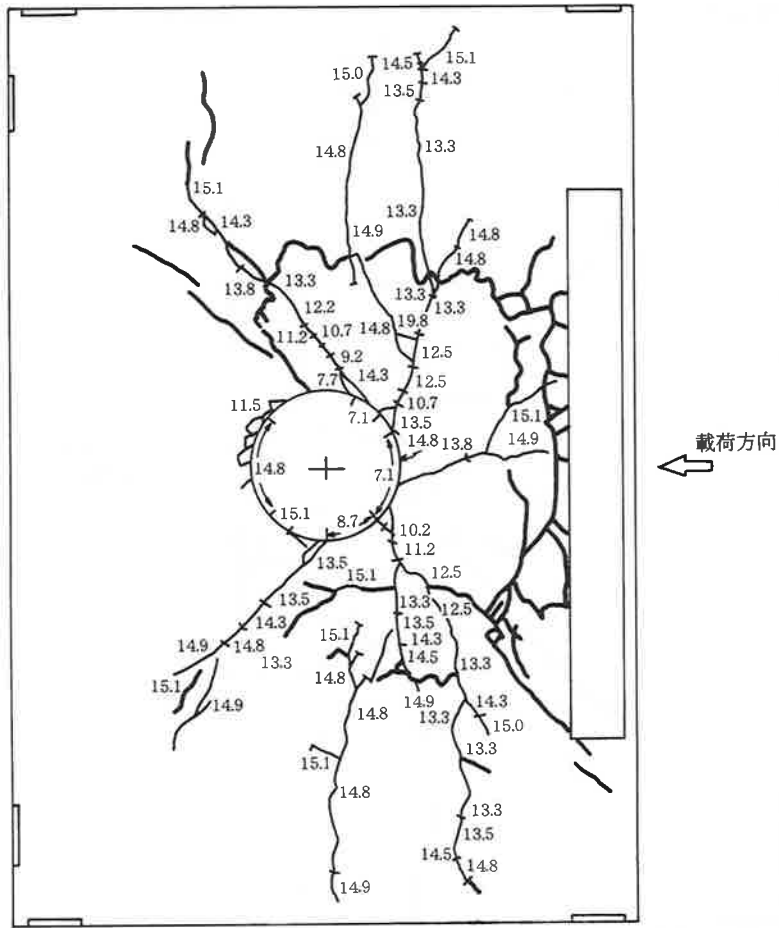
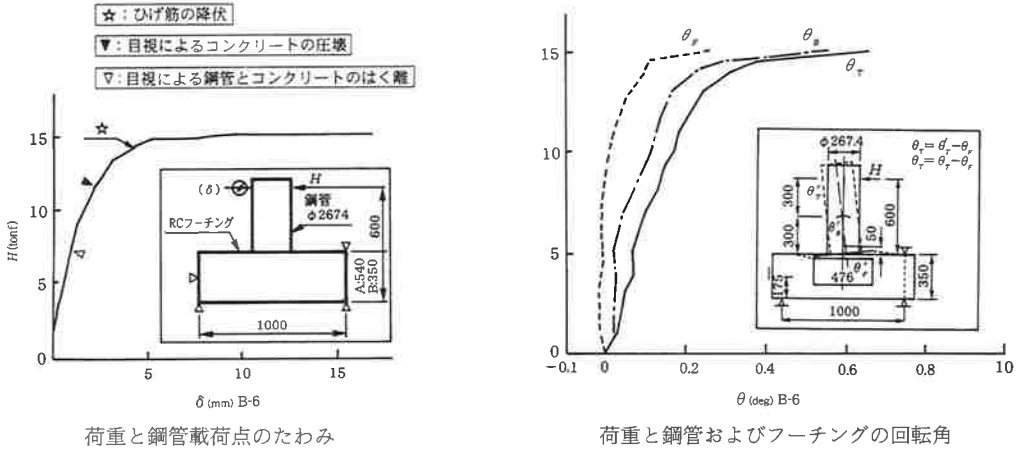


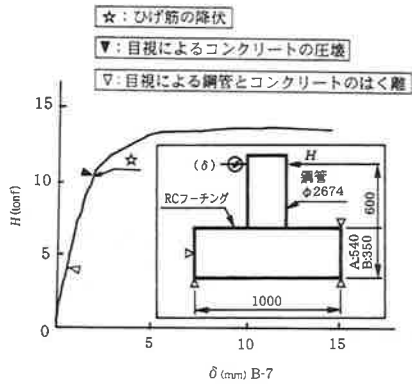
図-13 フーチング下面・側面ひび割れ発生状況 (B-5)

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究 (その4)

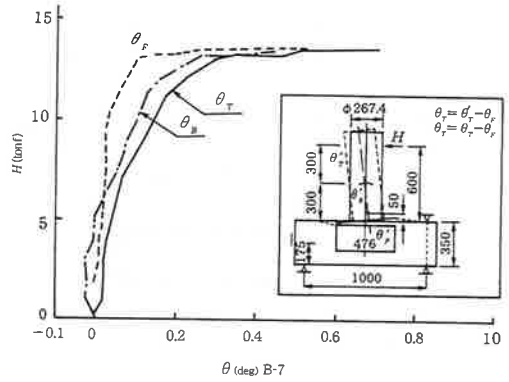


10cm 破壊時発生 (単位: tonf)

図-14 フーチング下面・側面ひび割れ発生状況 (B-6)



荷重と鋼管載荷点のたわみ



荷重と鋼管およびフーチングの回転角

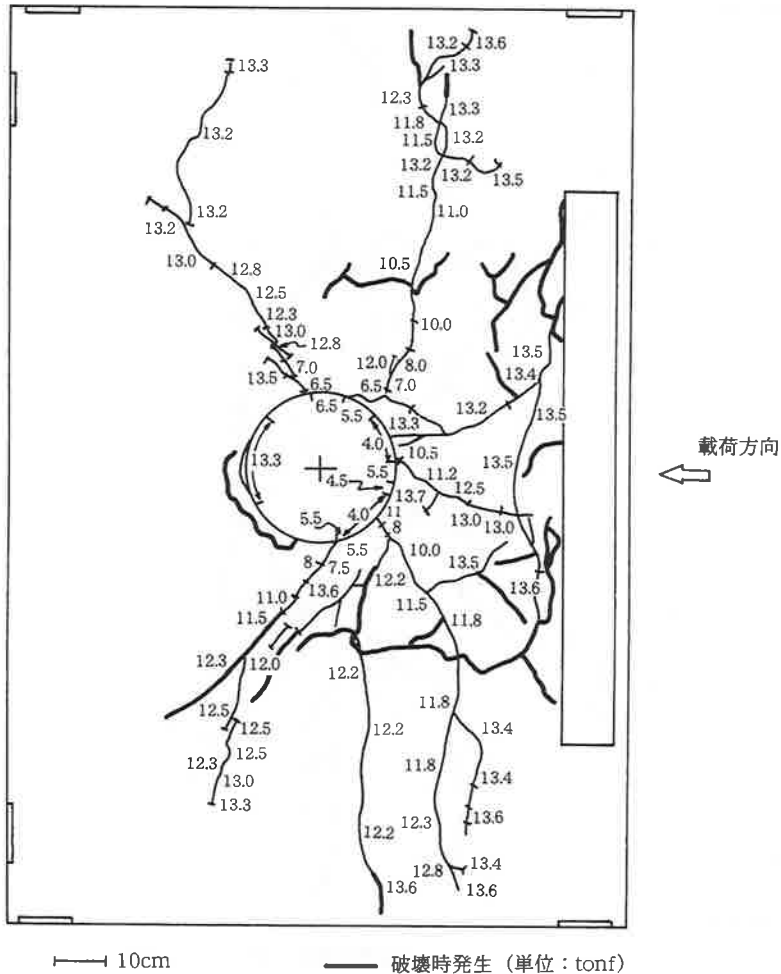
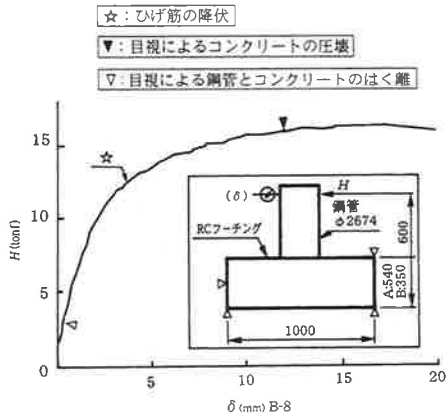
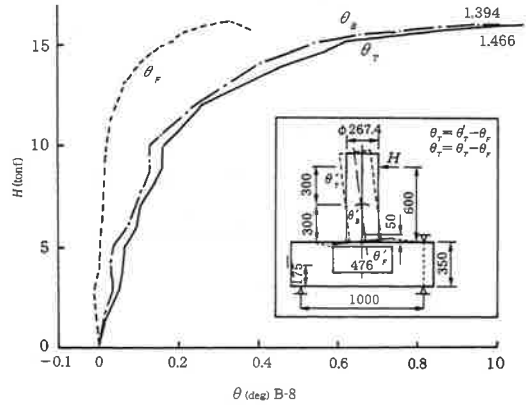


図-15 フーチング下面・側面ひび割れ発生状況 (B-7)

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究 (その4)



荷重と鋼管載荷点のたわみ



荷重と鋼管およびフーチングの回転角

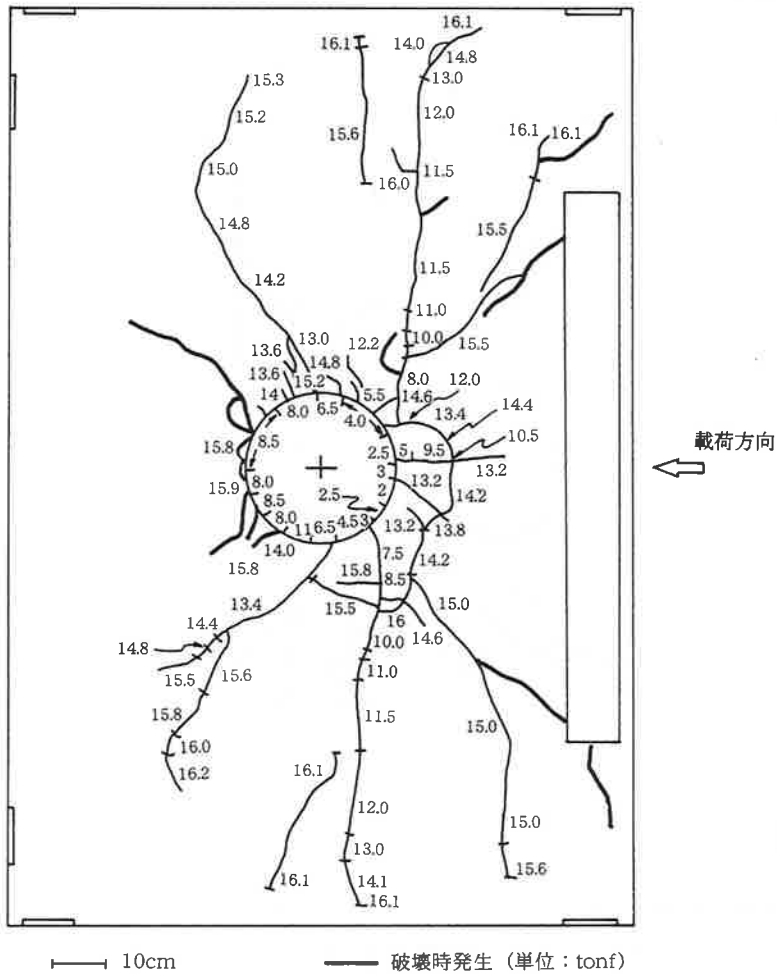
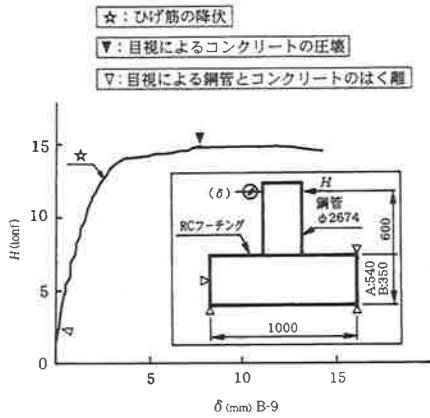
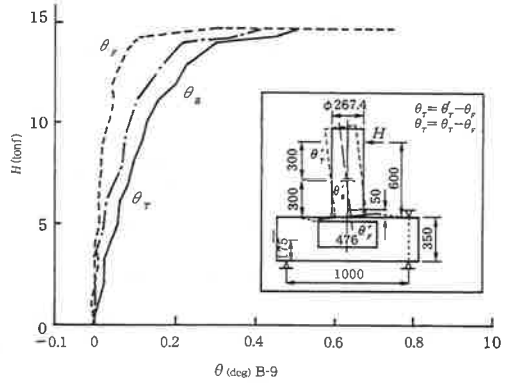


図-16 フーチング下面・側面ひび割れ発生状況 (B-8)



荷重と鋼管載荷点のたわみ



荷重と鋼管およびフーチングの回転角

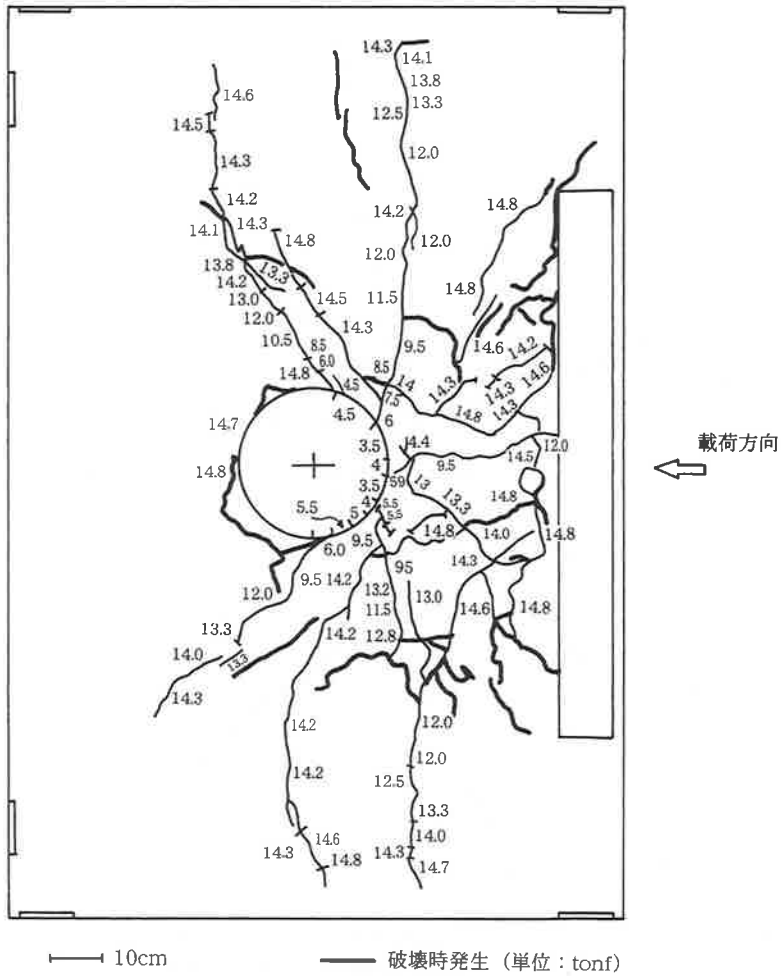
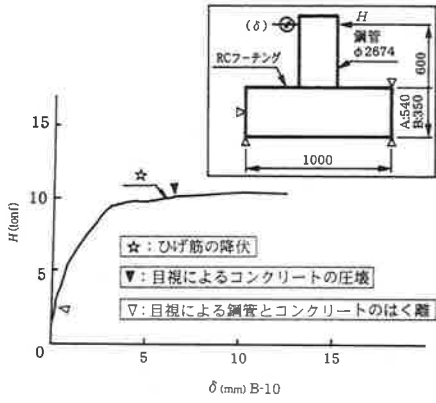
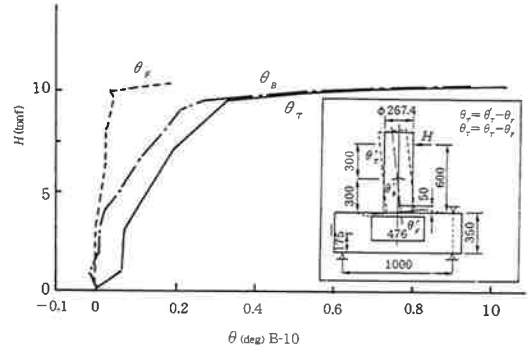


図-17 フーチング下面・側面ひび割れ発生状況 (B-9)

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究 (その4)



荷重と鋼管載荷点のたわみ



荷重と鋼管およびフーチングの回転角

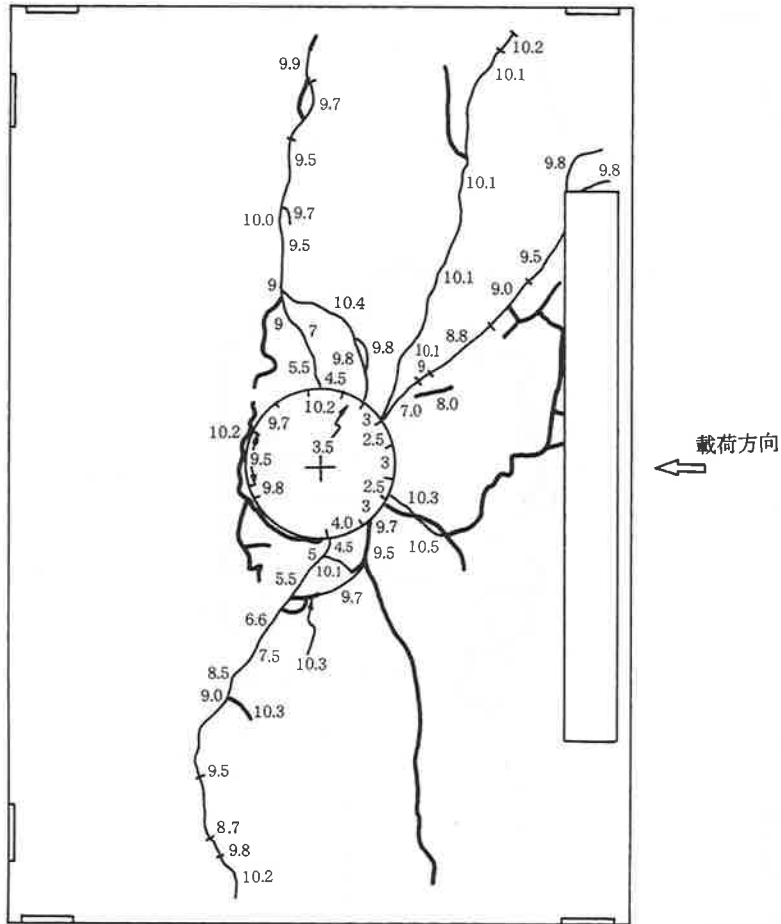
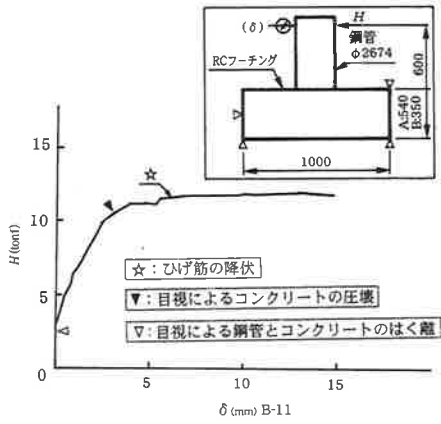
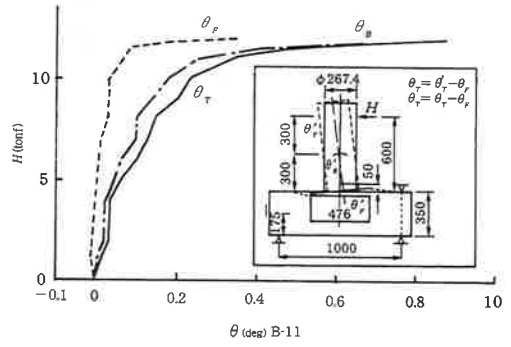


図-18 フーチング下面・側面ひび割れ発生状況 (B-10)



荷重と鋼管載荷点のたわみ



荷重と鋼管およびフーチングの回転角

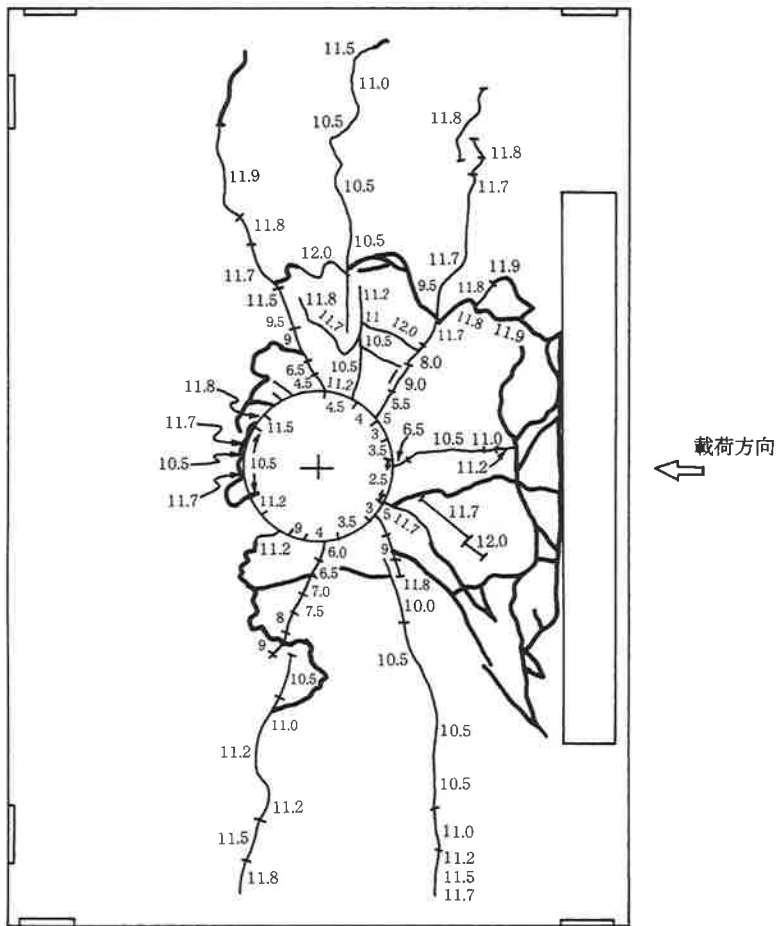


図-19 フーチング下面・側面ひび割れ発生状況 (B-11)

ズで、B-1（天蓋付き）、B-2（フーチング底面までの中詰コンクリート、標準型）、B-6(5tfの上載荷重)、B-7（フーチング下面より1Dの中詰コンクリート）、B-8(周面付着なし)、B-9(鋼管のまわりにリング配筋)の6体である。

ひげ鉄筋シリーズでは標準型のB-2の最大耐力の値が最大で、ひげ筋の本数の効果は明らかである。ひげ筋を45°方向に折り曲げたもの(B-5)は直立のもの(B-2)に比べて80%となっている。また、ひげ筋を溶接せずに鋼管の内側、外側に建て込んだもの(B-10、B-11)は70～85%程度となっている。

定着構造シリーズでは鋼管とフーチングコンクリートの付着をパラフィンで切ったB-8が最大の値を示した。フーチングへの埋込部分の表面コンクリートが水平力および曲げモーメントに対して全面にわたって均等に抵抗した効果と考えられる。唯一、前面コンクリートの破損まで耐力は漸増している。A方法の周面付着のないA-3供試体の破壊が前面コンクリートの破損で発生していることにも符合する。ひげ鉄筋による抵抗が先行して前面コンクリートの抵抗は変形が進行してから発揮されたものと推論できる。

また、リング筋の配置(B-9)も耐力の向上に貢献することが判明した。上載荷重の存在(B-6)も曲げ耐力の向上に有効なのは理論どおりである。

一方、天蓋の存在(B-1)は軸力の場合と同様に曲げ耐力にも効力の乏しいことが検証された。中詰コンクリートの存在(B-7)は鋼管杭本体の杭頭の曲げ耐力に貢献すると考えられるが、フーチングとの定着部の局所的な曲げ耐力には効果が発揮されていない。

一連の試験の中で注目されるのがB-3（ひげ鉄筋なし）の供試体である。ひげ鉄筋の定着がないために荷重の初期段階で転倒すると考えられたが、最終的にはフーチングの破壊で最大荷重となった。フーチングの配筋がA方法と共通のものにしたためにフーチングで亀裂発生が早

かったものの、鋼管の7cmの埋込長とかぶりコンクリートの付着応力、せん断抵抗が計算値以上に大きく発現したと推論できる。この事実からも杭頭のフーチング内への埋込長の確保が設計計算で定まる構造に更なる大きな安全性を付与すると考えられる。

次に破壊の形態からB方法の特徴を述べる。

ほとんどの供試体で初期のひびわれは鋼管の背面とフーチングのコンクリートの剝離という形態で発生している。次に鋼管から荷重側に放射状の亀裂が生じているが、特に荷重方向と直角方向の亀裂の発生が著しい。これは前述のとおり、フーチングの配筋がA方法と共通としたために初期の荷重に対して鋼管の周りのフーチングの曲げ抵抗が確保できなかったためと考えられる。

B-2、B-8では前面に座屈の徴候がみられたが、いずれもフーチングの曲げ破壊で最大耐力となっている。ここで発生した曲げ破壊は鋼管の曲げ回転と浮き上り防止アンカーとの間のこじ上げるようなテコ作用(図-20)によるものである。すなわち、鋼管端部の回転角とひげ鉄筋に囲まれた仮想鉄筋コンクリート柱によってフーチング内に生じる曲げモーメントによるものである。A-3の破壊形態(フーチング前面の破壊)と対照的な形態であることが注目される。

以上の結果、次のような挙動が確認できた。

(1) ひげ鉄筋の本数は定着部の曲げ抵抗モーメントを増大せしめる。ただし、必ずしも本数

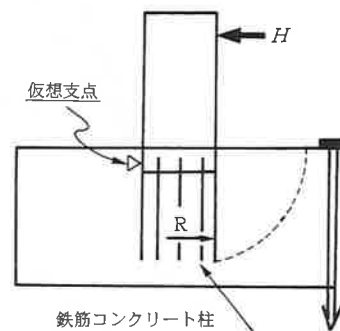


図-20 鉄筋コンクリート柱のテコ作用

に比例するものではない。

(2) ひげ鉄筋は鋼管に溶接しなくても中詰コンクリートの中に定着したもので、鋼管の外側に配筋したもので8割程度の曲げ抵抗モーメントが確保される。

(3) 中詰コンクリートは定着部の曲げ抵抗モーメントの増大には貢献しない。

(4) 杭頭のフーチング内への埋込長は短くとも曲げ抵抗モーメントの増大に大きな効果が認められる。

(5) 天蓋は曲げモーメントに対しても効果が乏しく、用いない方が大きな抵抗力が得られる。

(6) 杭頭周囲のリング補強筋は曲げ抵抗モーメントの増大に貢献し、フーチング内への応力の拡散に効果を発揮している。

(7) 上載荷重は曲げ抵抗モーメントの増大に寄与している。

(8) ひげ鉄筋は折り曲げるよりは垂直に取付けた方が耐荷力の増大に効果的である。

(9) 埋込部の付着の有無は本試験では無い方が終局で大きな曲げ抵抗を示したが、腐食等の観点からは付着は確保しておいた方がよい。

(10) 本試験では載荷荷重によってフーチング

にテコ作用が働き、配筋やフーチング厚の面で十分な曲げ剛性が確保されなかった懸念がある。しかし、B-9(リング筋配置)の挙動から判断してその影響は局部的に限定され、全体的な挙動は一般性のあるものと判断される。

3.2 荷重と変形の関係

一連の試験(図-9~19)で得られたフーチング接触面の回転角 θ_F 、鋼管基部の回転角 θ_B と荷重の関係を、ひげ鉄筋シリーズならびに定着構造シリーズのそれぞれについて示したのが図-21、図-22である。

図-21より鋼管の回転角 θ_B は図-9~19に示すひびわれ発生時とフーチング接触面の回転角 θ_F の降状点で大きく変化している。ひびわれ発生によって回転角 θ_B はひげ鉄筋の弾性変形の支配を受けて挙動している。ひげ鉄筋の降状に相当する回転角 θ_F の降状で θ_B も降伏状態となる。その時点は表-3の H_6 、図-9~19でB-3、B-9を除く、載荷側フーチングの円周方向のひびわれ発生時に相当する。

B-3はひげ鉄筋のない供試体で、そのフーチング接触面の回転角 θ_F は鋼管とフーチングそ

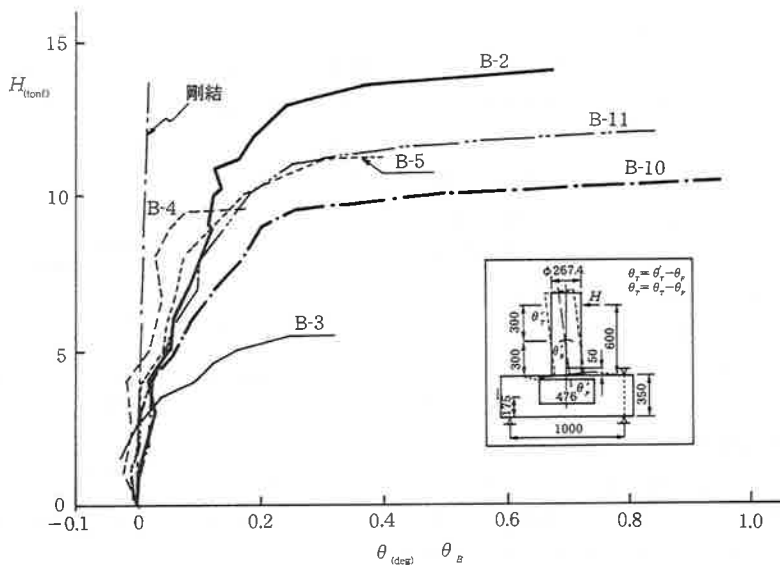


図-21 荷重とフーチングの回転角 (1)

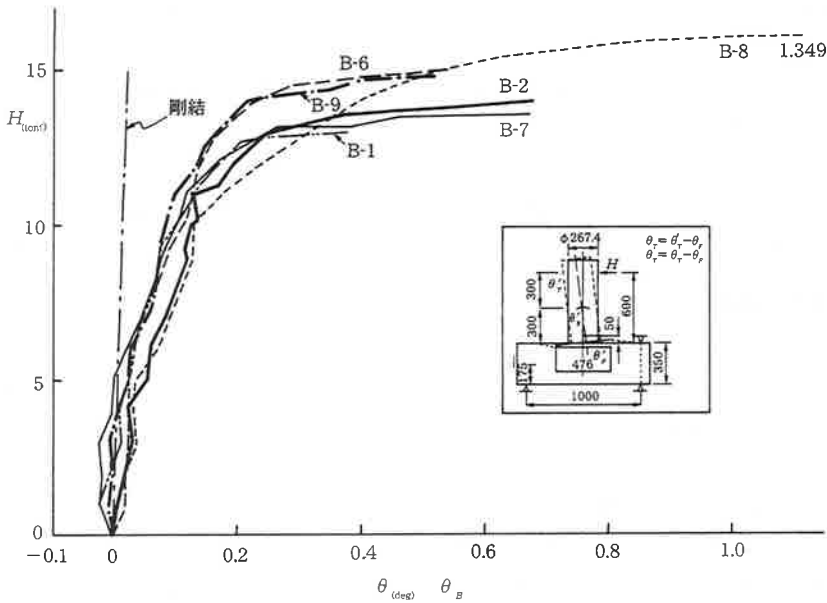


図-22 荷重と鋼管の回転角 (2)

れぞれの弾性係数に基づく回転変形を示す。ひげ鉄筋の少ない B-4 の回転変形も小さな値に留まっている。ひげ鉄筋を溶接しない B-10, B-11 の θ_B は大きな回転角度まで追従しており、ヒンジに近い挙動になったとみられる。B-3 と比較すると中詰コンクリートと鉄筋の存在のために大きな曲げ抵抗モーメントと変形性能が確保されたことがわかる。

図-22 より定着構造シリーズの鋼管の回転角 θ_B はひげ鉄筋シリーズと同様にフーチングのひびわれ発生時と回転角 θ_F の降伏点で大きく変化している。その他の回転角と荷重の関係はひげ鉄筋シリーズと同様である。

鋼管とコンクリートの付着のない B-8 の回転角 θ_B は著しく大きく、ヒンジに近い挙動を示している。図-16 にみるとおり鋼管前面に亀裂を生じるほどの回転変形までフーチングが曲げモーメントに耐えたことになる。

回転変形に対しては上載荷重 (B-7)、リング筋の配置 (B-9)、中詰コンクリート (B-6) の貢献はほとんどみられない。天蓋を用いたもの (B-1) は他と比べて変形性能の点でも劣ってい

る。

全体を通じて B 方法が剛結の状態を維持できるのはひびわれ発生以前で、コンクリートが引張応力を負担している範囲内であることが図-21, 22 よりわかる。

以上の結果を要約すると次のようになる。

- (1) 杭頭定着部はひびわれ発生以前は弾性挙動を示し、剛結構造と評価してもよい。
- (2) ひびわれ発生後はひげ鉄筋の伸びに支配され、ひげ鉄筋の降伏で回転変形も降伏状態となる。
- (3) 回転変形の降伏状態は定着構造によって異なる。標準型の B-2 は比較的よい挙動を示している。それより大きな曲げ抵抗と変形性能を示す B-8 (付着なし) は耐久性の点で課題を残す。
- (4) 一般論でひげ鉄筋の本数、断面積の大きい程、曲げ抵抗、変形性能もよい。
- (5) 中詰コンクリート、リング配筋、上載荷重は変形性能の向上に寄与するところは少ない。
- (6) 天蓋は回転変形の面でも好ましくない。

(7) ひげ鉄筋のないものは回転変形の面でも最小の挙動となる。

(8) 中詰コンクリートを施工して鉄筋を建て込むと曲げ抵抗, 変形性能も著しく向上し, ヒンジ構造に近づく。

(9) フーチング面での回転変形は曲げ抵抗モーメントと比例する関係がみられる。

3.3 フーチングの応力

載荷時のフーチング下面のコンクリート表面に発生するひずみの分布の代表的なものを図-23~25に示す。ロゼットゲージ(3方向ゲージ)で測定したもので, 図-23はB-1からB-11までの供試体の中でB-3, B-10を除く供試体の代表としてB-2のひずみ分布を示す。他の供試体も荷重とひずみの関係はB-2とほぼ同様の経過を示している。最初に荷重載荷方向の圧縮側には軸方向, 軸直角方向に圧縮ひずみが発生する。同時に引張側では軸直角方向に引張ひずみが発生して次第に発達する。軸方向のひずみは軸直角方向の引張ひずみの影響のために圧縮ひずみとなっている。荷重の増大とともに鋼管側面(荷重載荷方向の直角方向)で引張ひずみが増大する。荷重載荷方向の圧縮側の圧縮ひずみは縮小して引張側の圧縮, 引張ひずみはほぼ現状維持となる。最終的に側面, 引張側に亀裂が生じてゲージによる測定が不能となる。

一連の挙動から3.1耐力と破壊形式で既述のフーチング内のひげ鉄筋に囲まれた仮想鉄筋コンクリート柱によって鋼管背面がこじ上げられるようなテコ作用によるモーメントが発生したものと推定される。すなわち, 荷重載荷方向の引張側(鋼管の背面)は軸方向の引張ひずみが発達するはずであるが, 実際にはこじ上げモーメントによって載荷方向の直角方向の引張ひずみが卓越し, 載荷方向のひずみは従属して発生したものと考えられる。

図-24はひげ鉄筋のないB-3のフーチング表面のひずみと荷重の関係である。フーチングに発生するひずみは初期はすべて圧縮ひずみであ

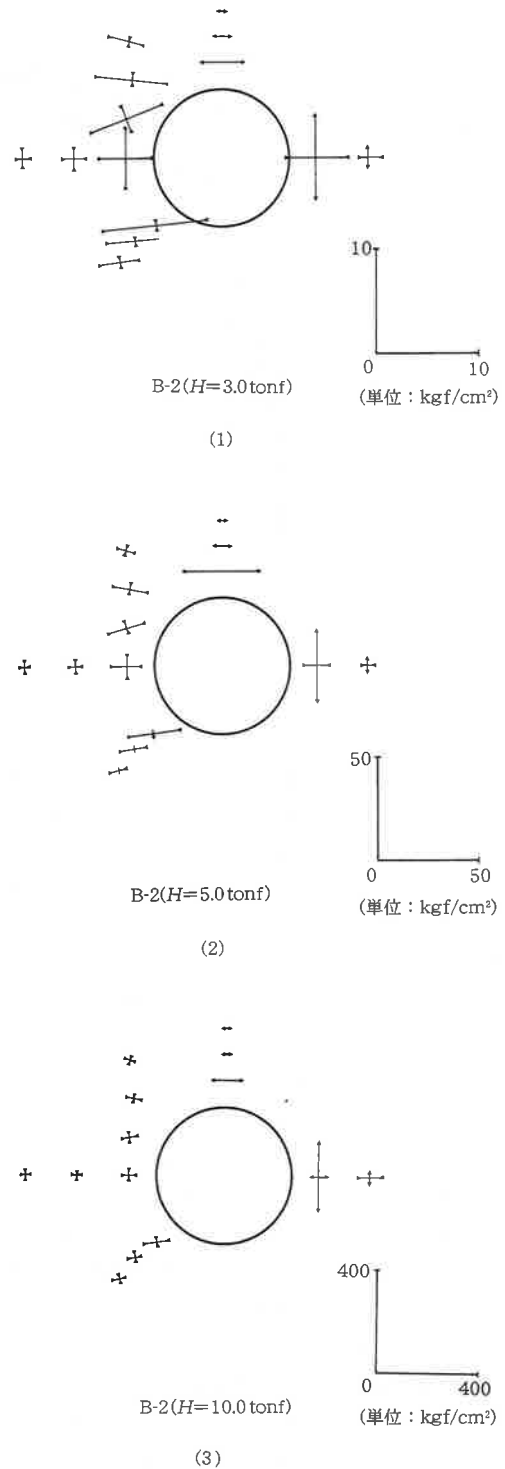


図-23 フーチング下面の主応力分布 (B-2)

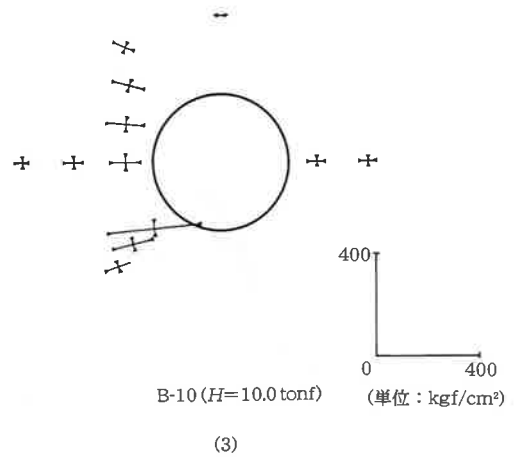
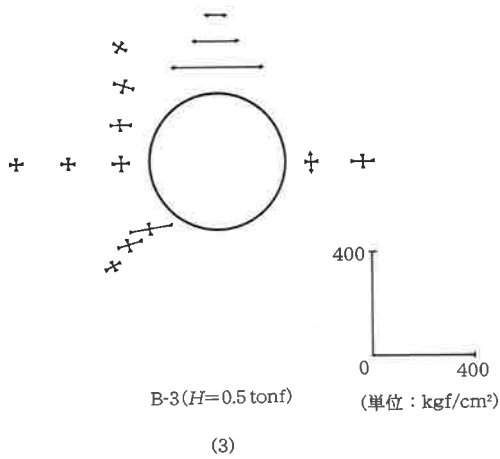
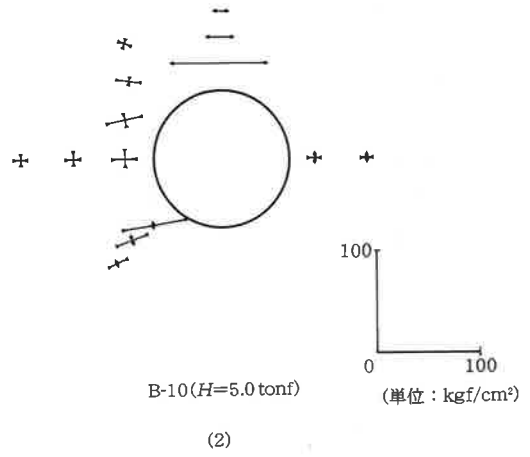
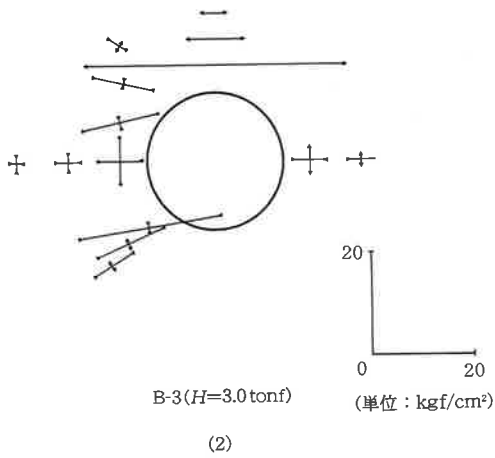
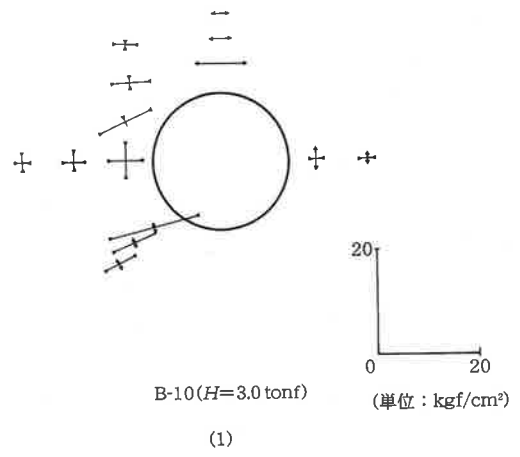
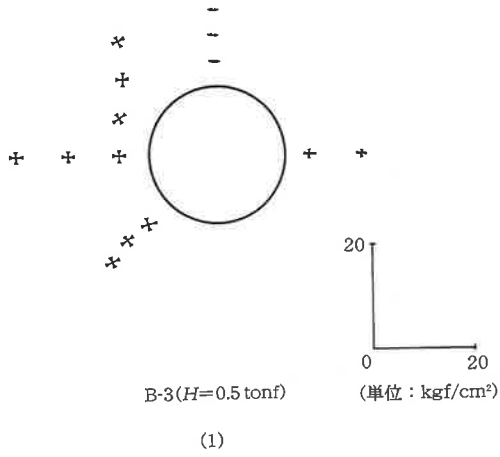


図-24 フーチング下面の主応力分布 (B-3)

図-25 フーチング下面の主応力分布 (B-10)

るが、水平力3tfの段階でB-2と同じ傾向になるものの、側面の引張ひずみが非常に大きいものとなる。側面の引張ひずみが先行し、背面の軸直角方向のひずみが追従する。

B-3はひげ鉄筋を有しないので作用する回転モーメントで側面に大きな引張ひずみ、軸方向圧縮側には大きな圧縮ひずみを生じている。回転モーメントによるフーチングの湾曲を生じる載荷側の支点では両端で固定した梁が浮き上りを拘束している。そのために湾曲時に固定梁の両端の固定点の影響でフーチングに軸直角方向の曲げが派生したものと考えられる。軸方向では鋼管とコンクリートの間が剝離しているにもかかわらず圧縮ひずみとなっているのは直角方向の曲げモーメントによる引張ひずみの影響と考えられる。

図-25はB-10のフーチングのひずみを示す。基本的にはB-2と同様であるが、鋼管背面のひずみの小さいことが注目される。鋼管の内側にひげ鉄筋を配置しているためにテコ作用によるこじりモーメント抵抗が小さくなるからと考え

られる。

鋼管の側面、背面、前面におけるフーチングのひずみと荷重の関係についてひげ鉄筋シリーズの供試体で比較したものが図-26~28である。定着構造シリーズの供試体で比較したものが図-29~31である。

図-26, 27の引張ひずみは、ゲージ付近の亀裂の影響を受けるので荷重とひずみの関係の比較に用いるには適切でない。それでも、亀裂のない5tf以下の載荷時のS1の値はひげ鉄筋の少ないものの方が大きい。S2のB-10の値は亀裂に囲われたゲージのあるブロックの内部ひずみを表わしている。図-28は圧縮ひずみであるために最大荷重時まで測定されているが、いずれも破壊ひずみには達していない。

図-29, 30は引張ひずみで、各供試体とも同じような挙動を示している。一般にコンクリートの引張ひずみを超えているが、B-7, B-8のS2はゲージのあるブロックの内部ひずみを示すに留まったと推定される。図-31は圧縮ひずみを示す。B-8は鋼管前面コンクリートの圧壊の影

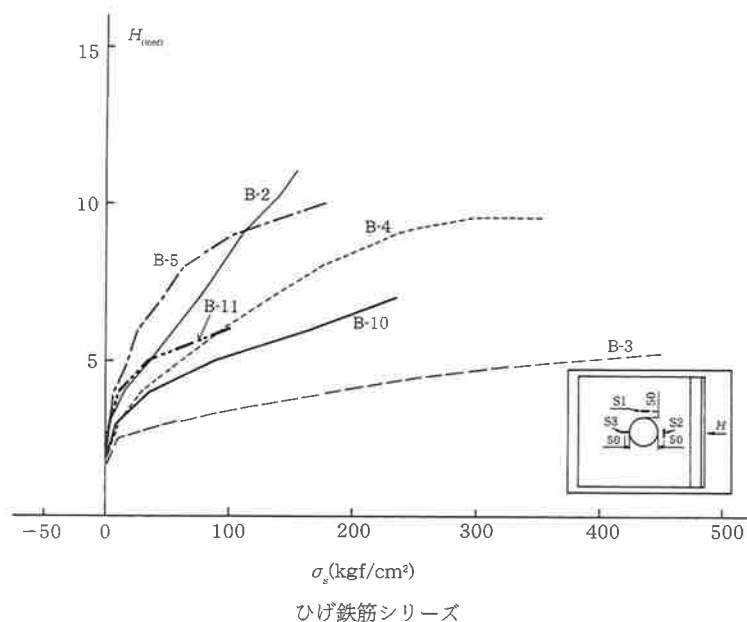


図-26 荷重とフーチング下面の応力 (S1)

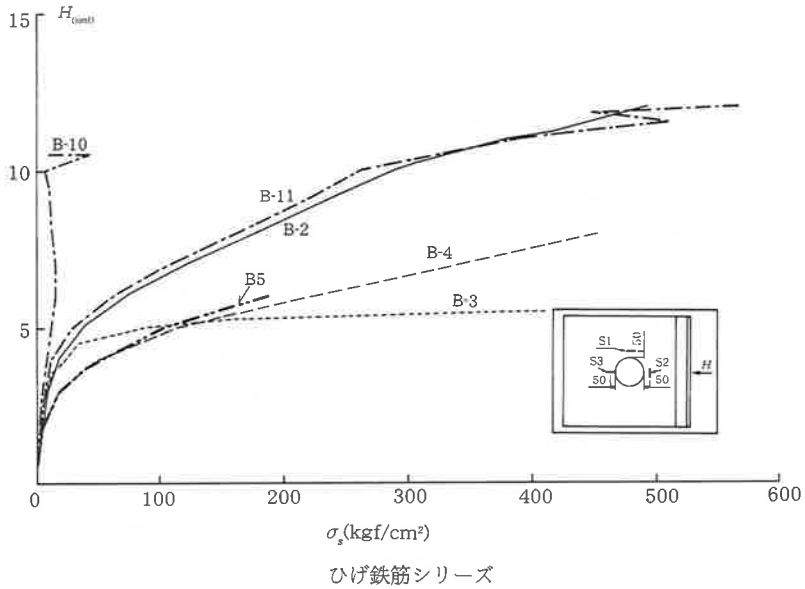


図-27 荷重とフーチング下面の応力 (S2)

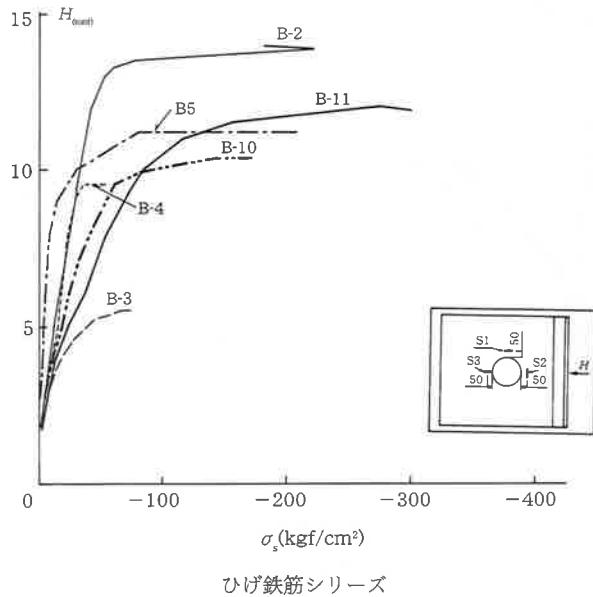
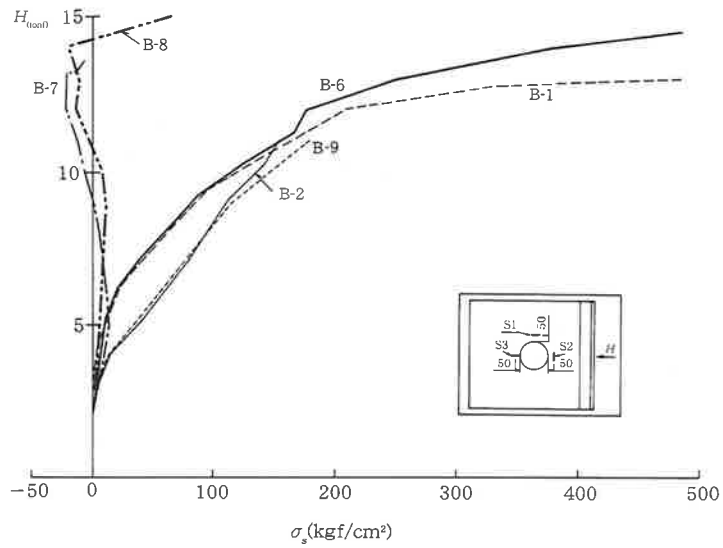


図-28 荷重とフーチング下面の応力 (S3)

響を受けているものと推定される。

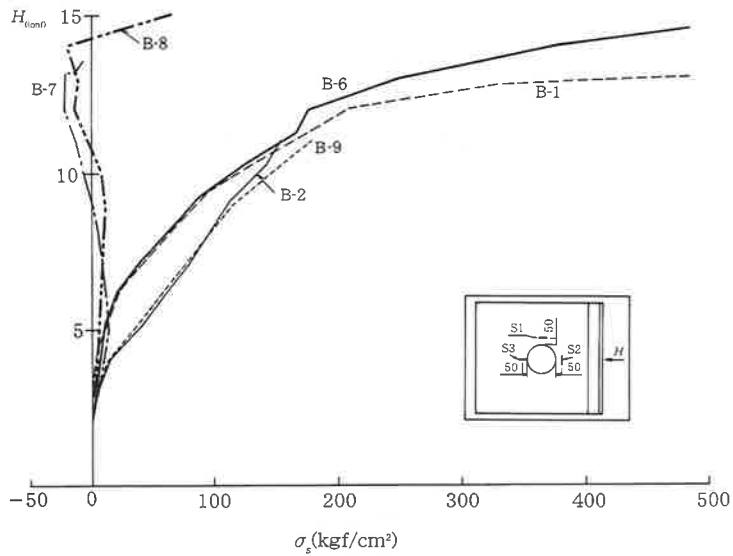
一般にひげ鉄筋とフーチングの結合がよく、その影響で鋼管に作用する水平力と回転モーメントはフーチングに大きな曲げモーメントを発生

せしめている。フーチング表面のひずみはコンクリートの引張ひずみを超す値となり、フーチングの曲げ変形（曲率？）を表現するものとなっている。



定着構造シリーズ

図-29 荷重とフーチング下面の応力 (S1)



定着シリーズ

図-30 荷重とフーチング下面の応力 (S2)

フーチングの表面のひずみは非常に大きな値となっているが、フーチング内部(表面より70mm)の点でのひずみ即ち支圧応力は図-32, 33にみるとおり、B-8を除くと通常のコンクリー

トの許容応力度の範囲内にある。

図-32ではひげ鉄筋の本数の少ないB-4, B-10の支圧応力の大きいこと、45°に折り曲げて杭頭上のコンクリート面積の多いB-5の値が

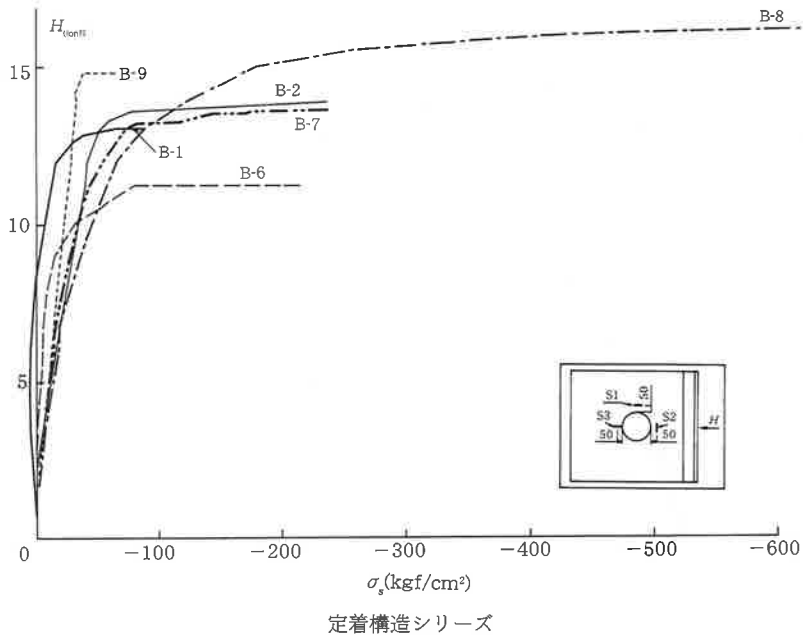


図-31 荷重とフーチング下面の応力 (S3)

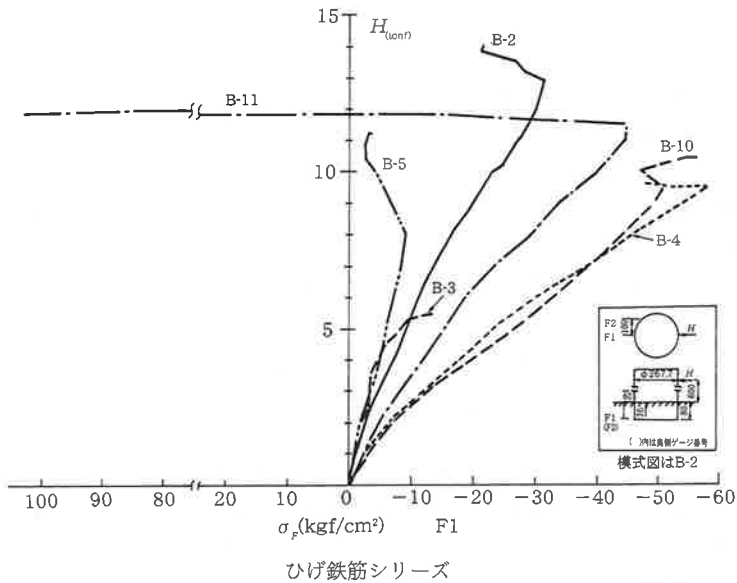


図-32 荷重とフーチングの支圧応力 (F₁)

小さいことなどが注目される。B-33 では付着のない B-8 の値が大きく、中詰コンクリートのある B-7 の値が小さい以外はほぼ同じような挙

動を示している。

フーチングの表面ひずみ、支圧応力の測定値についてはわかりにくいものが多いが、次のよ

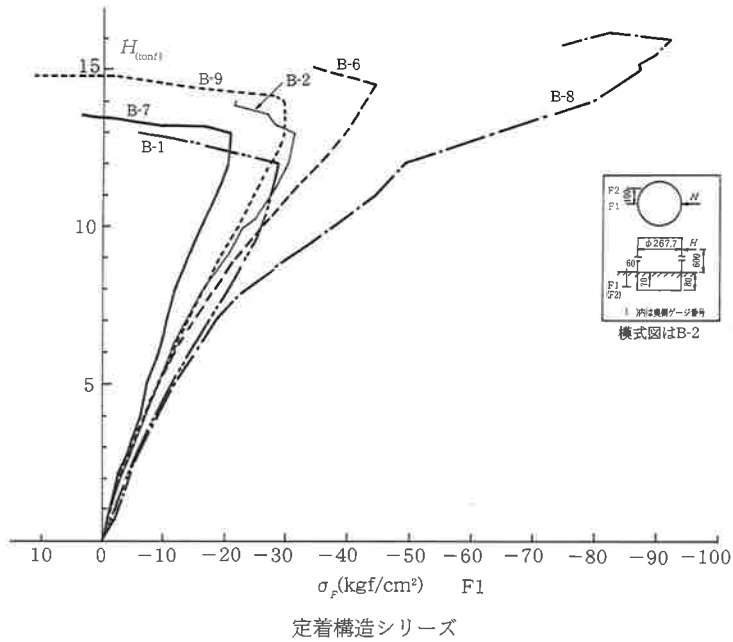


図-33 荷重とフーチングの支圧応力 (F₁)

うな推定ができる。

(1) フーチングには大きな曲げモーメントが発生し、主にそれは載荷方向の負の曲げモーメントと鋼管背面での直角方向の負の曲げモーメントである。結果的に鋼管のまわりに放射状の亀裂が生じて破壊した。

(2) 一連の挙動からひげ鉄筋とフーチングコンクリートとは合成作用が強く、仮想鉄筋コンクリート杭として評価できる。

(3) 鋼管のフーチングへの浅い埋込長でも、ある程度の水平力、回転モーメントに耐えることができる。付着力の影響が大きい。

(4) フーチング表面のひずみ(縁ひずみ)は通常のコンクリートの引張ひずみの数倍に達する値となるが、フーチング内部の支圧応力は許容応力度内に納まる程度である。

(5) ひげ鉄筋の本数はフーチングに発生するひずみに大きな影響を与える。一方、天蓋、中詰コンクリート、リング筋等の影響は小さい。

3.4 ひげ筋のひずみ

杭頭に溶接された径 16 mm のひげ鉄筋のひずみと載荷荷重との関係を B-3 を除く B-1 から B-11 の供試体について示したのが図-34~43 である。ひげ鉄筋の総断面積は鋼管の 78 cm² に対して 16 cm², 8 cm² である。

B-5, B-10 を除く供試体では鋼管の背面(引張側)のひげ鉄筋が最大荷重時に降伏点を超えている。最大荷重時にフーチングの破壊で終局状態を迎えているが、鋼管のひげ鉄筋も降伏していることから急激に回転角が増大してフーチングの破壊に結びついたことが判明した。それに対して鋼管の前面(圧縮側)のひげ鉄筋の応力は B-8 を除いて許容応力度内に留まり、回転角の増大で僅かに圧縮ひずみも増加している。これらの関係をまとめて表示したのが図-44 である。この中でひげ鉄筋 4 本の B-4 も最大荷重は小さいものの引張、圧縮ひずみ共、特別に大きい値ではないことからフーチングの破壊は鋼管の杭頭部の回転によって発生したものと推定

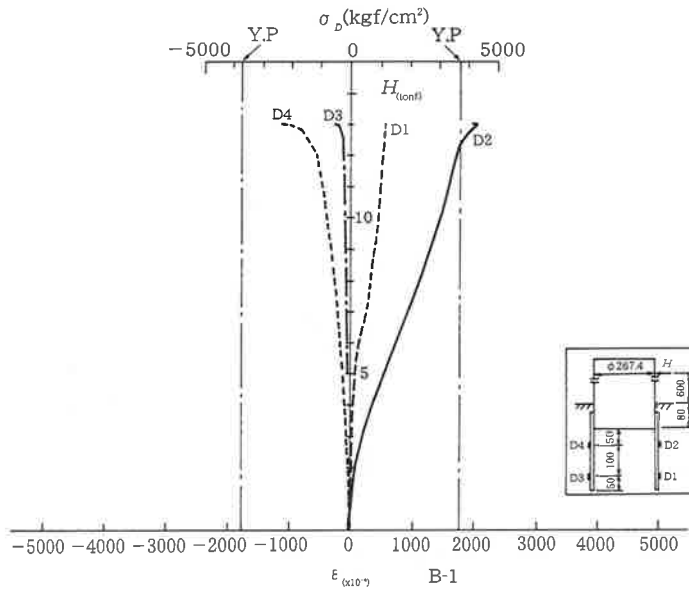


図-34 荷重とひげ筋のひずみ (B-1)

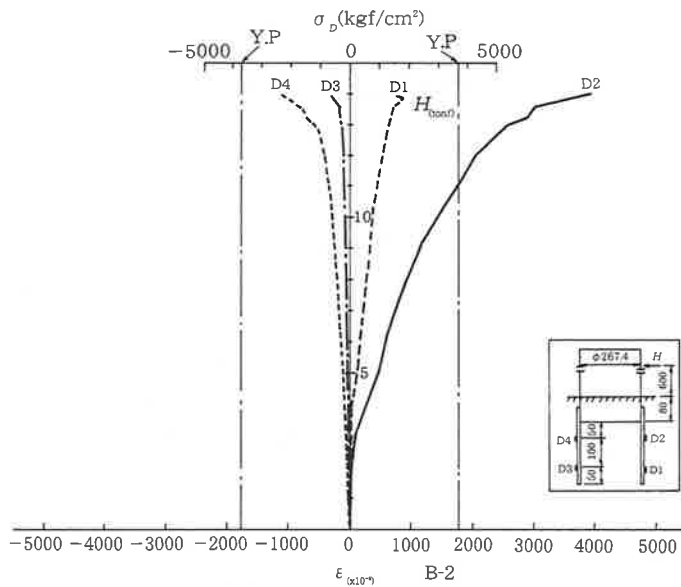


図-35 荷重とひげ筋のひずみ (B-2)

される。

B-5 (図-37) はひげ鉄筋を 45° 方向に折り曲げたものである。小さい荷重段階では根元に近い D2 の値は引張側にあるが、荷重の増大とと

もに圧縮側に移行している。それとともにその先端の D1 の引張ひずみが増大しているが、いずれのひずみも降伏点に達しない。しかし、D2 の値が圧縮側へ移行したことはテコ作用

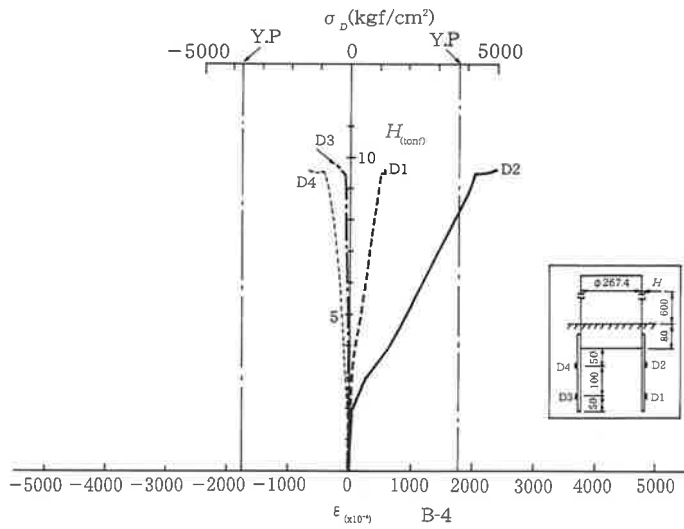


図-36 荷重とひげ筋のひずみ (B-4)

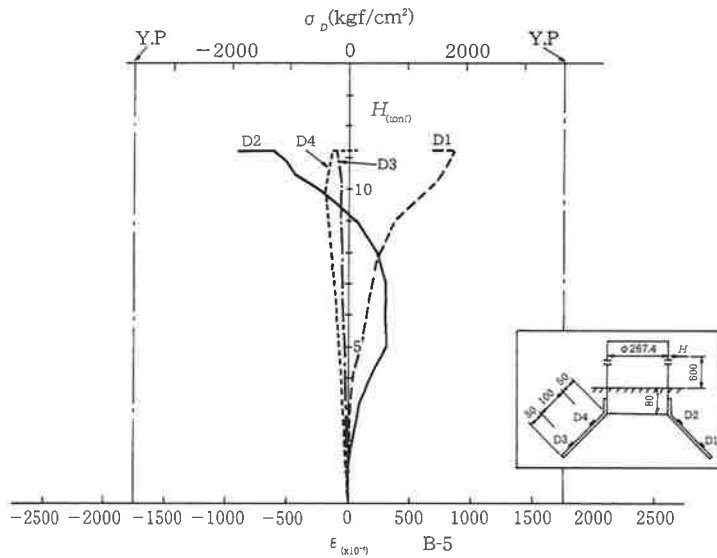


図-37 荷重とひげ筋のひずみ (B-5)

によるこじりモーメントが発生し、軸直角方向の曲げモーメントのポアソン効果の影響を強く受けていることを示している。フーチングのひびわれの進行状況、回転角の進み方なども共通する現象と考えられる。

B-10 (図-42) のひげ鉄筋は鋼管に溶接されずに中詰コンクリートの中に定着されている。最

大荷重時の最大ひずみは鋼管頂部付近のD3、D7に表われている。いずれの値も降伏点に達することはないものの、フーチングのひびわれは放射状に発生して鋼管の回転角も大きな値となっている。それよりひげ鉄筋は中詰コンクリートと鋼管がフーチングに対して一体として挙動するのに貢献してB-3の約2倍、B-4より

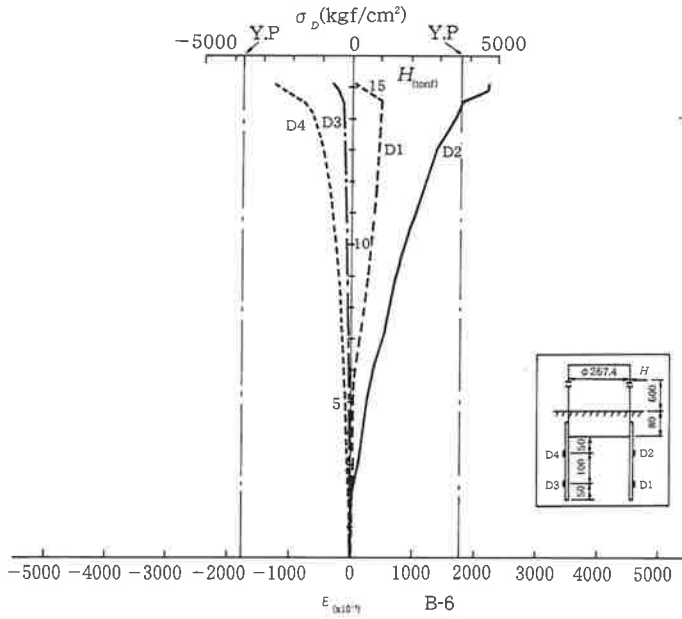


図-38 荷重とひげ筋のひずみ (B-6)

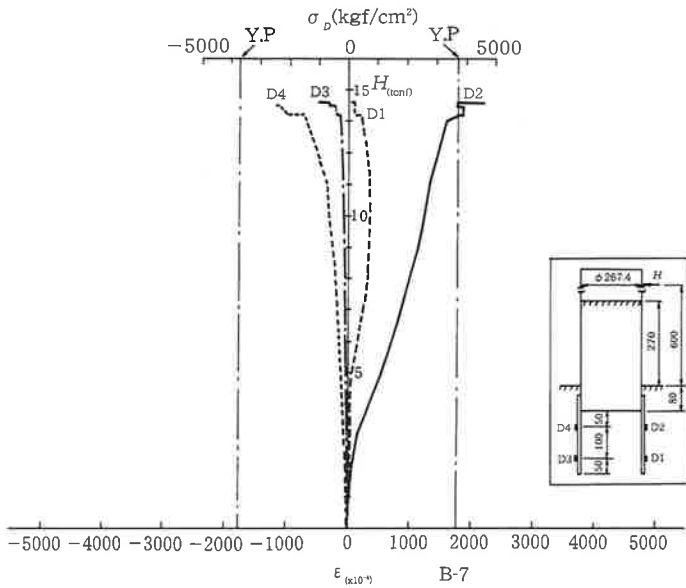


図-39 荷重とひげ筋のひずみ (B-7)

大きな耐力を発揮せしめた。

全体を通じてひげ鉄筋のひずみは鋼管に近い点で最大値となり、先端のひずみから判断して

定着長は 13ϕ で確保されていると考えられる。また、鋼管の断面積に対する鉄筋の断面積が $10\sim 20\%$ 程度であるにもかかわらず、仮想鉄

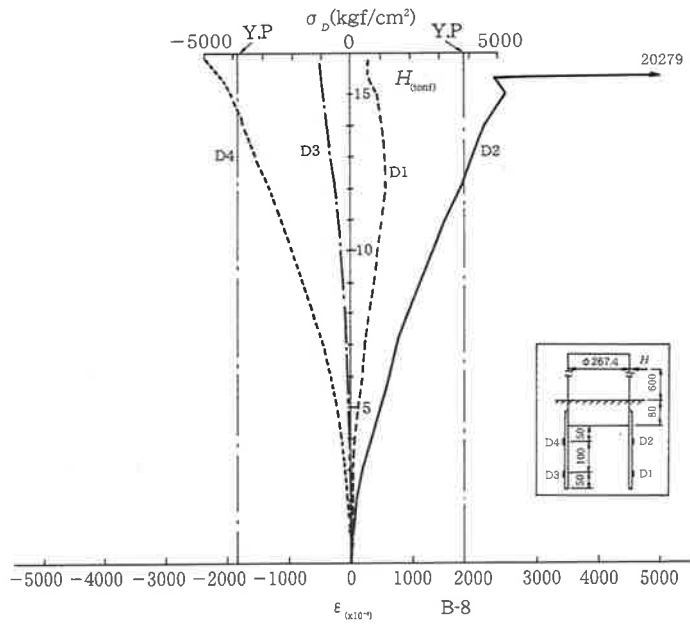


図-40 荷重とひげ筋のひずみ (B-8)

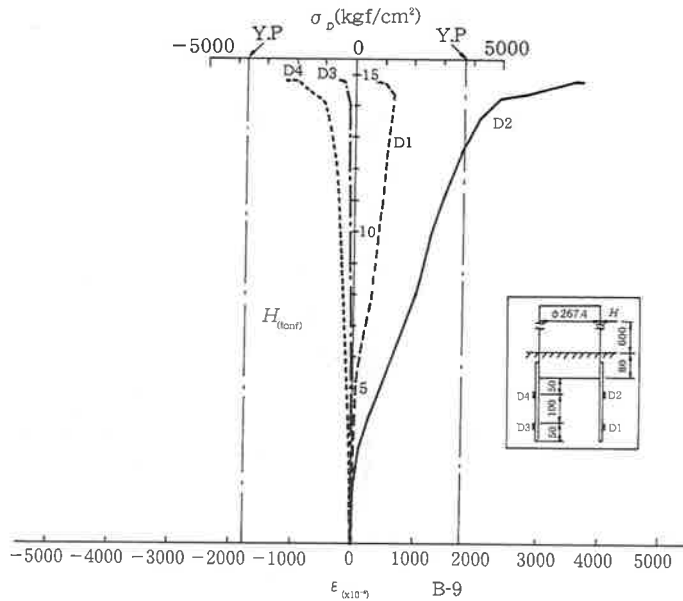


図-41 荷重とひげ筋のひずみ (B-9)

筋コンクリート柱として十分な効果を発揮したとも考えられる。

また、8 cm ではあるが、鋼管のフーチングへ

の埋込長の効果も無視できない。圧縮側のひげ鉄筋で降伏点に達したのは B-8 のみで、他は最大荷重到達以前の値が 1,000 kgf/cm² 付近に留

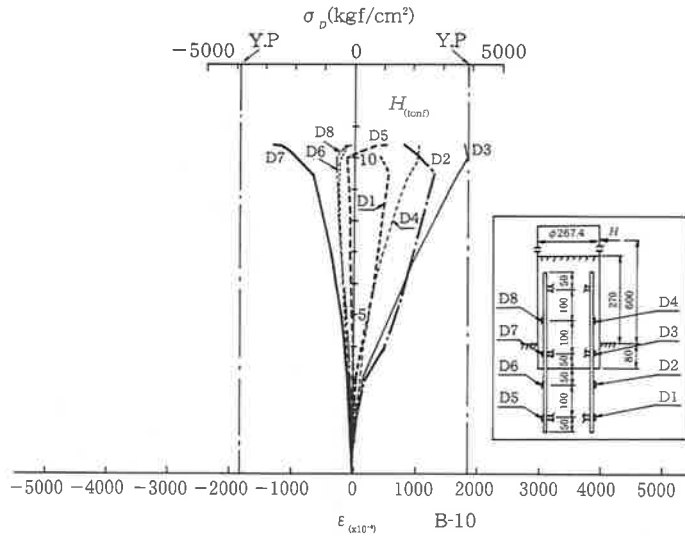


図-42 荷重とひげ筋のひずみ (B-10)

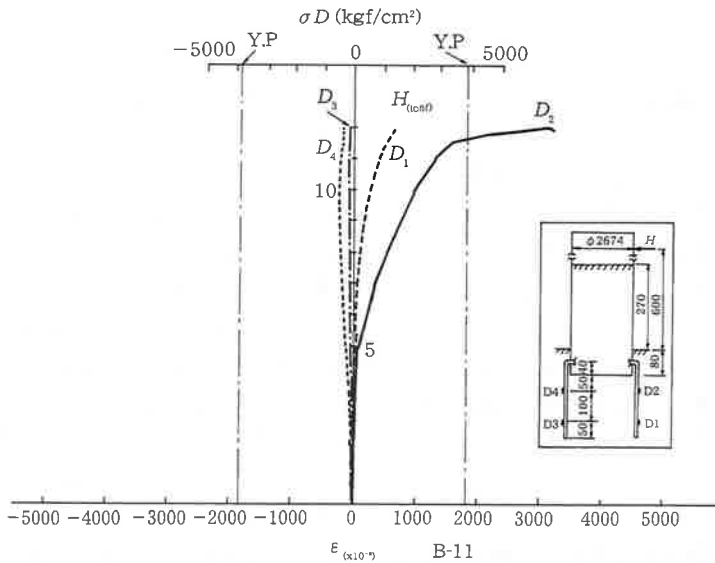


図-43 荷重とひげ筋のひずみ (B-11)

まっている。特に B-4, B-5, B-11 の値は小さく、B-3, B-4 では鋼管とコンクリートの付着が最大時でも確保されている。

以上から次のようなことが判明した。

(1) フーチングの破壊は鋼管の回転変形に起因するが、その際にひげ鉄筋は必ずしも降伏し

ていない。ひげ鉄筋の鋼管断面積に対する割合は 10~20% であるが、仮想鉄筋コンクリート柱としてフーチングの曲げ抵抗、鋼管の曲げ剛性に対応できるものとなっている。

(2) ひげ鉄筋を 45° に折り曲げる必要性は低いが、鉄筋の応力を小さくする効果は認められ

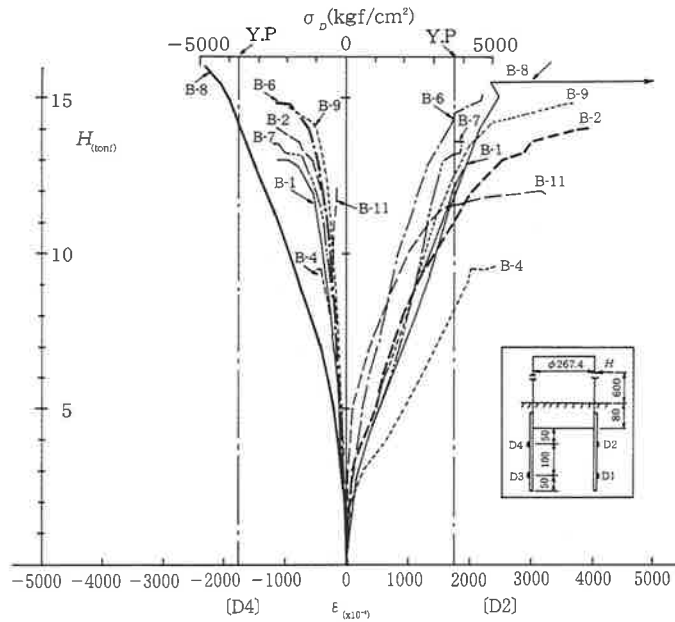


図-44 荷重とひげ筋のひずみ (総括)

る。引張側の鉄筋は複雑な挙動を示すので定着に要注意である。

(3) 中詰コンクリートに定着する方法は鋼管に溶接したものと差がなく、有効と考えられる。

(4) ひげ鉄筋の定着長は鉄筋コンクリートの技術基準で示されている値としなくてもよいと考えられる。

(5) 鋼管のフーチングへの埋込長は水平力、回転モーメントに対して有効であるため、浅くとも確保すべきである。

3.5 鋼管の応力

載荷試験時の鋼管本体に発生した軸方向応力とひげ鉄筋の応力の関係を図-45～48に、鋼管の円周方向の応力（ポアソン効果によるものも含む）を図-49～52に示す。

図-45はひげ鉄筋の効果を、図-46は定着構造による相違を、図-47は上載荷重、付着の影響を、図-48は中詰コンクリートにひげ鉄筋を定着したときの鋼管の応力をみるものである。

全体を通じて杭頭の降伏は引張側のひげ鉄筋

で発生する傾向にあるものの、鋼管の圧縮応力も計算値より大きくなっている。最大値はフーチングに近い点で発生しているが、いずれも降伏点より小さい値である。それに対して鋼管の引張ひずみは計算値より小さく、圧縮側のひげ鉄筋の応力はさらに小さい値となっている。

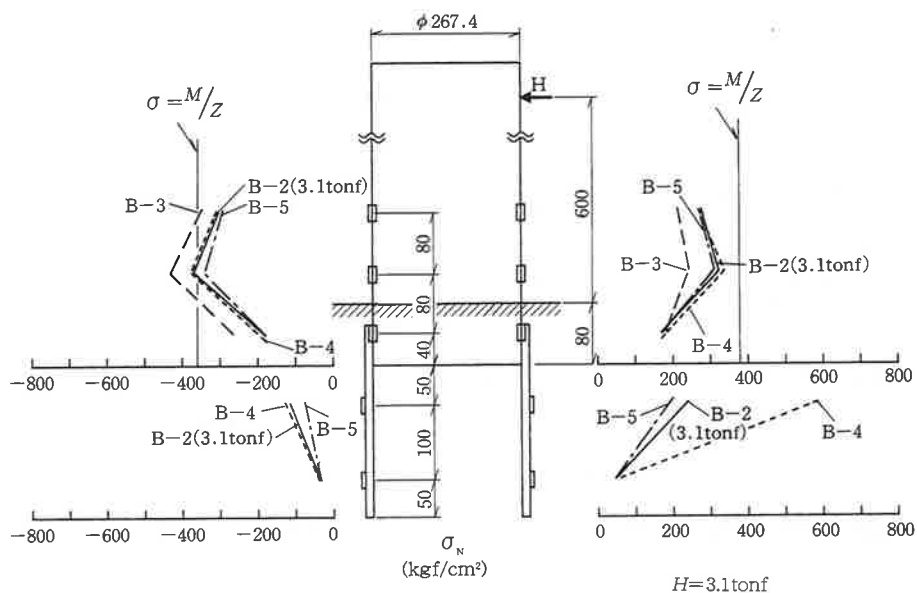
ひげ鉄筋のないB-3は圧縮応力が計算値以上になっている一方、抵抗の期待できない引張応力も400 kgf/cm²の値となっている。埋込部の曲げ抵抗としては大きな値である。

中詰コンクリートを施したB-7、B-10、B-11の値は小さい荷重段階では計算値より小さいが、終局状態では引張応力が他のものと同様となり、付着がなくなったことを示している。

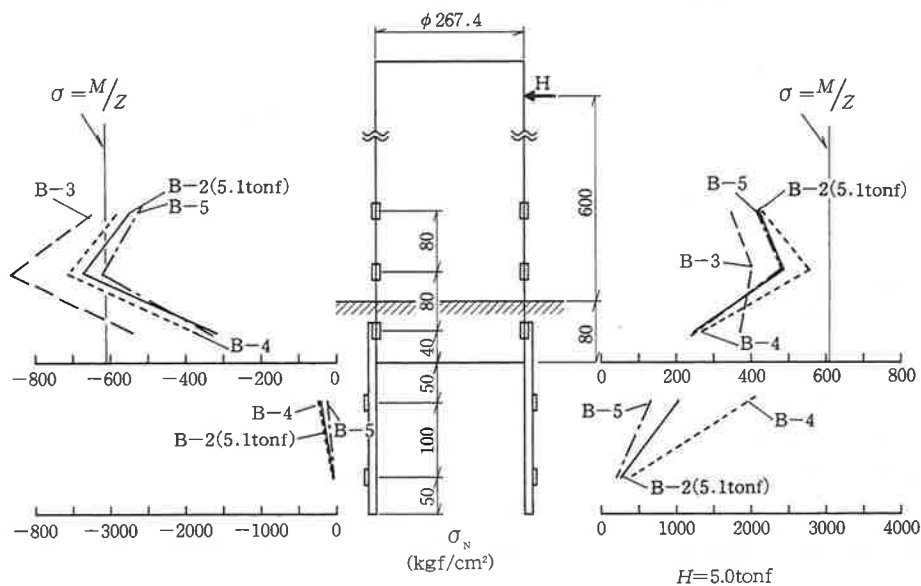
埋込部の付着のないB-8の鋼管の応力は他の供試体と同様であるために終局状態はひげ鉄筋の数とひずみ量によるところとなる。

周方向の応力はいずれも許容応力度の範囲内にあり、問題になることはない。

周方向応力の最大値はフーチング内の鋼管に発生しており、ひげ鉄筋からの拘束の影響を受



(1)



(2)

図-45 鋼管の軸方向面内応力分布とひげ筋の軸方向応力分布 (ひげ鉄筋)

けている。ひげ鉄筋の拘束のない B-3, B-10, B-11 にあつては圧縮応力が小さく、フーチングに近い点が最大値となっている。

付着のない B-8 は圧縮側で大きな応力とな

り、荷重が集中していることがわかる。

以上より次のような点を指摘することができる。

(1) 鋼管本体のひずみで終局状態を迎える可

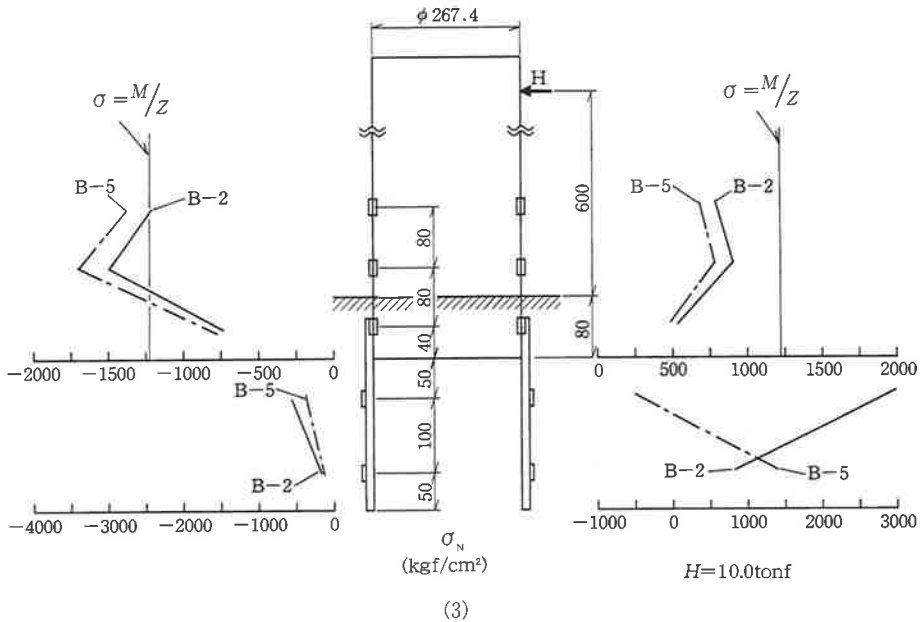


図-45 鋼管の軸方向面内応力分布とひげ鉄筋の軸方向応力分布 (ひげ鉄筋)

能性は低く、ひげ鉄筋の伸びの影響の方が大きい。

(2) 鋼管の応力の最大値はフーチング直近に生じるので少しでも杭頭の埋込長を確保しておいた方がよい。

(3) 圧縮応力が計算値より大きく、引張応力が小さいのは載荷した水平力の存在によると考えられる。

(4) 8 cm の埋込長でもある程度 (約 40%) の抵抗モーメントが発揮される。逆に埋込長がないとひげ鉄筋の負担が急増する。

(5) 中詰コンクリートは荷重の小さい段階では効果的であるが、荷重が大きくなると効果が減退する。

(6) 周方向応力は小さく、軸方向応力の半分程度であるが、最大値の発生位置はフーチングへの埋込部となる。

(7) 付着のないものは周方向応力でも大きな値が発生する。

3.6 リング筋応力

杭頭のモーメントへの補強、荷重分散などを目的に配置するリング筋の応力を B-9 で測定した。リング筋は鋼管の外側に二重に配置し、それぞれについて 2 箇所まで応力を測定してその平均値を図-53 に示す。

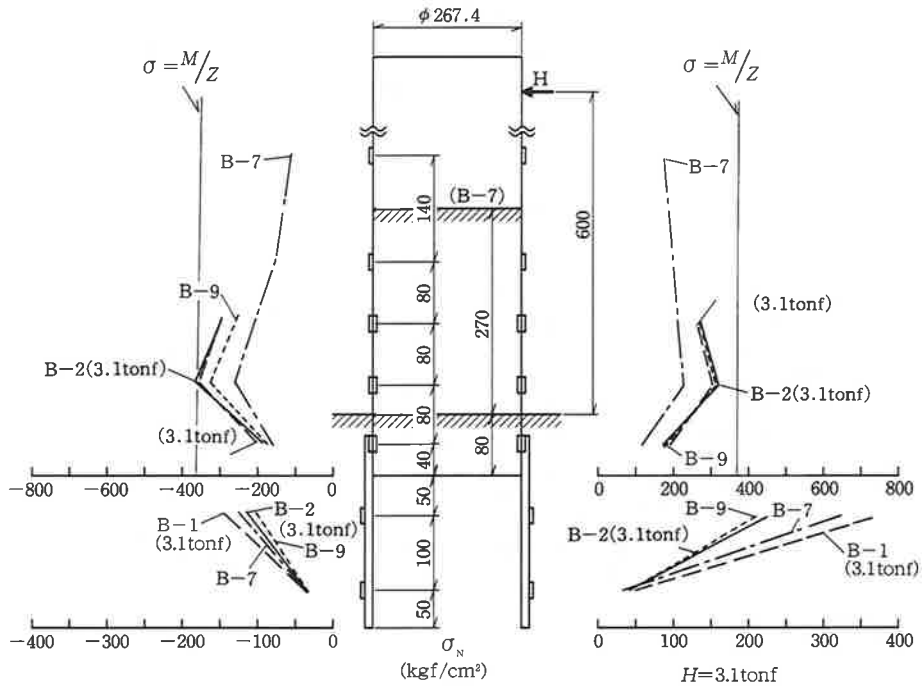
同図より次のことが推定される。

(1) 荷重応力曲線は 5.5 tf と 12.5 tf 付近に変曲点がある。5.5 tf は表-3 の鋼管側面のひびわれ荷重、12.5 tf はひげ鉄筋の降伏荷重に相当する。すなわち、5.5 tf 以降はフーチングの配力鉄筋の欠落部分を補う形で機能し、12.5 tf 以降は鋼管の回転変形を拘束するために機能したと考えられる。

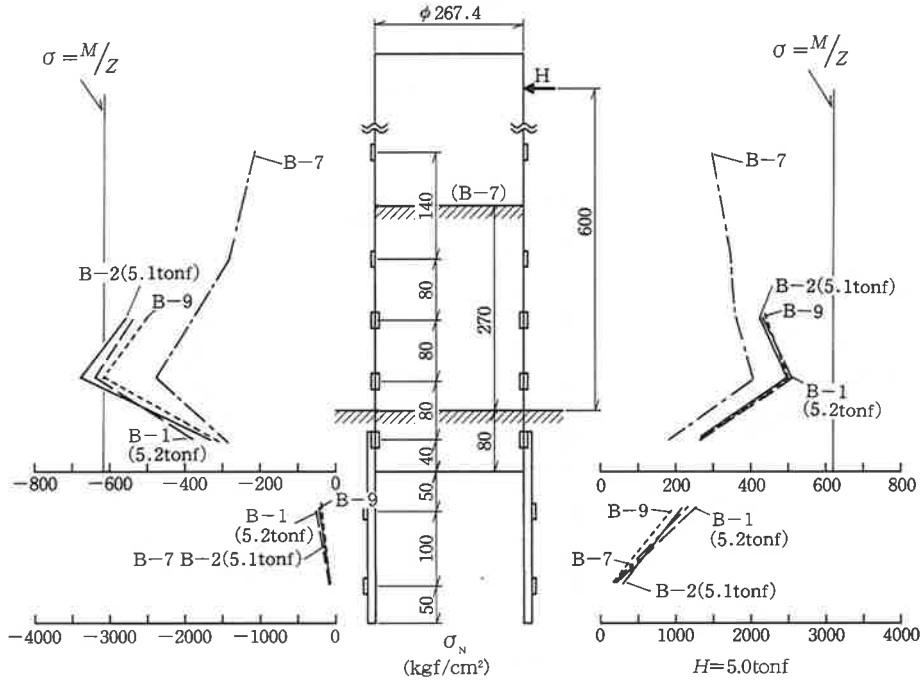
(2) 内側と外側のリングでは内側の方が早目に効いて外側は変形が大きくなってから効果を発揮している。

(3) 両方ともフーチングが破壊するまで有効に働いている。

(4) フーチングの亀裂の発生状況からリング



(1)



(2)

図-46 鋼管の軸方向面内応力分布とひげ筋の軸方向応力分布 (定着構造)

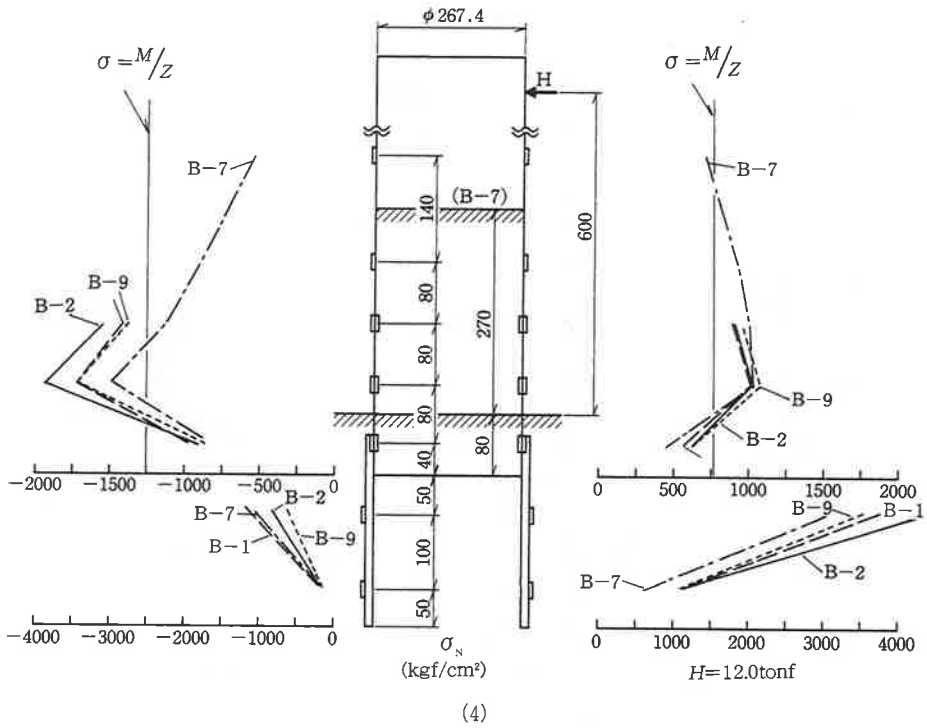
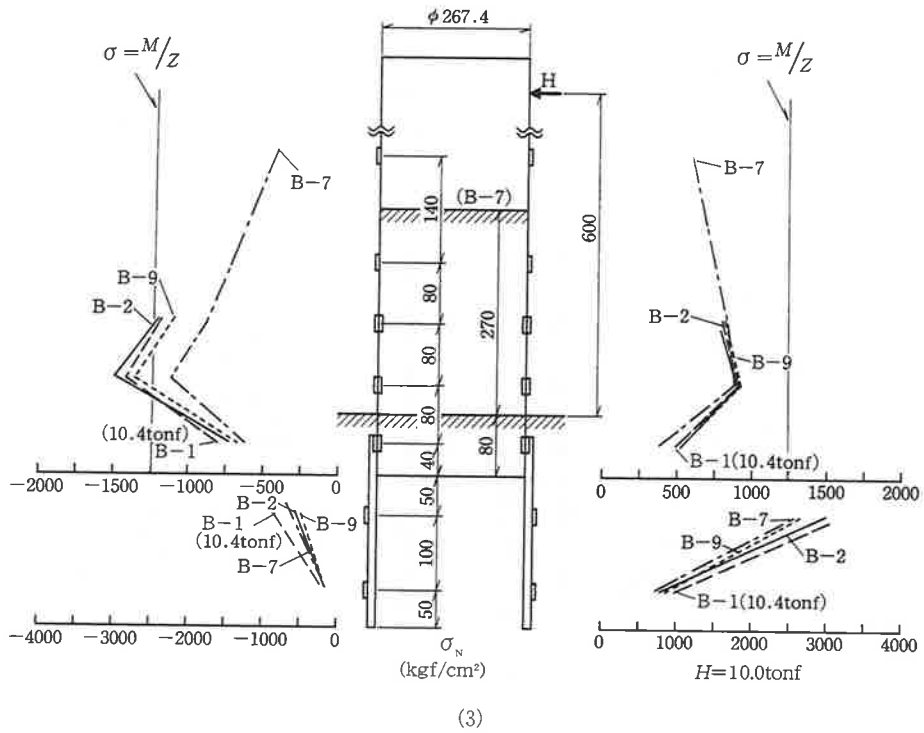


図-46 鋼管の軸方向面内応力分布とひげ筋の軸方向応力分布 (定着構造)

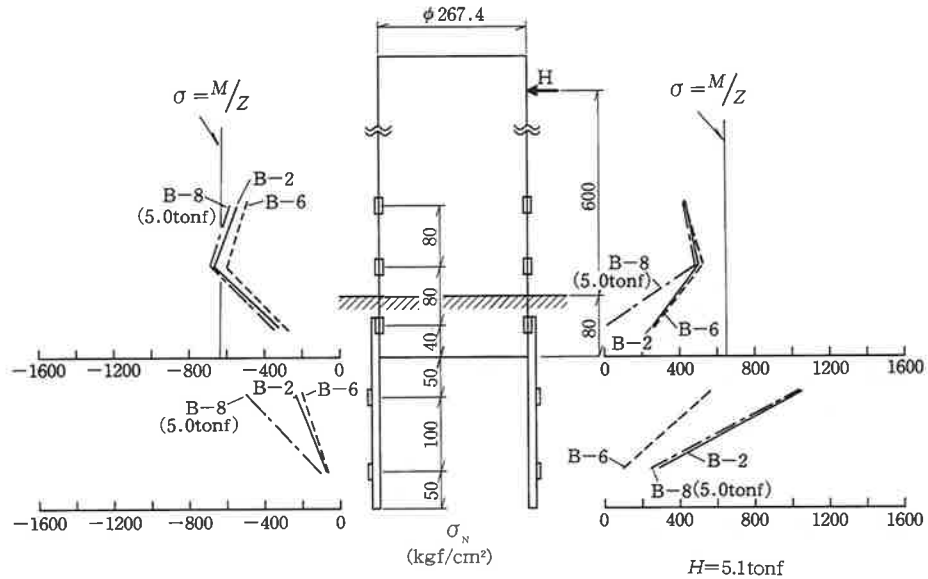
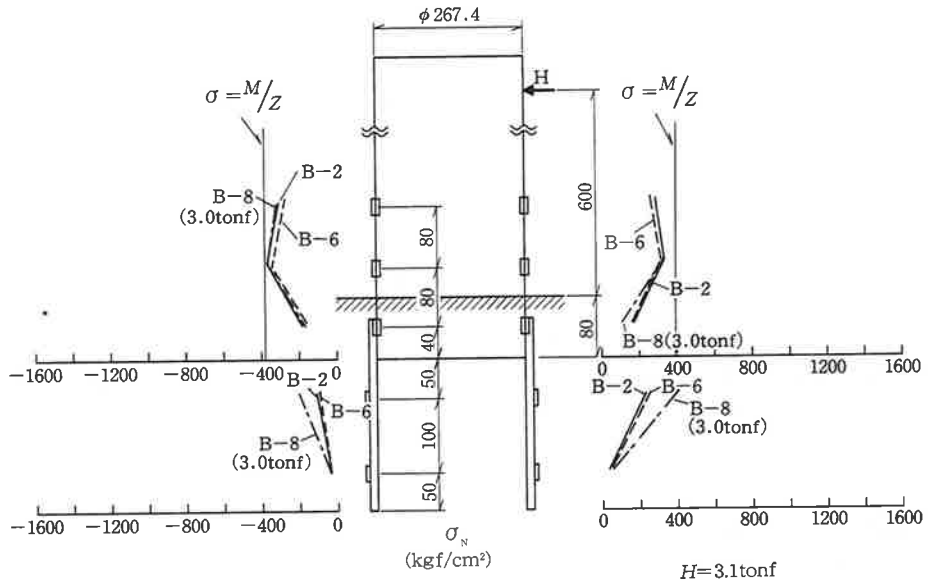


図-47 鋼管の軸方向面内応力分布とひげ筋の軸方向応力分布 (上載荷重, 付着)

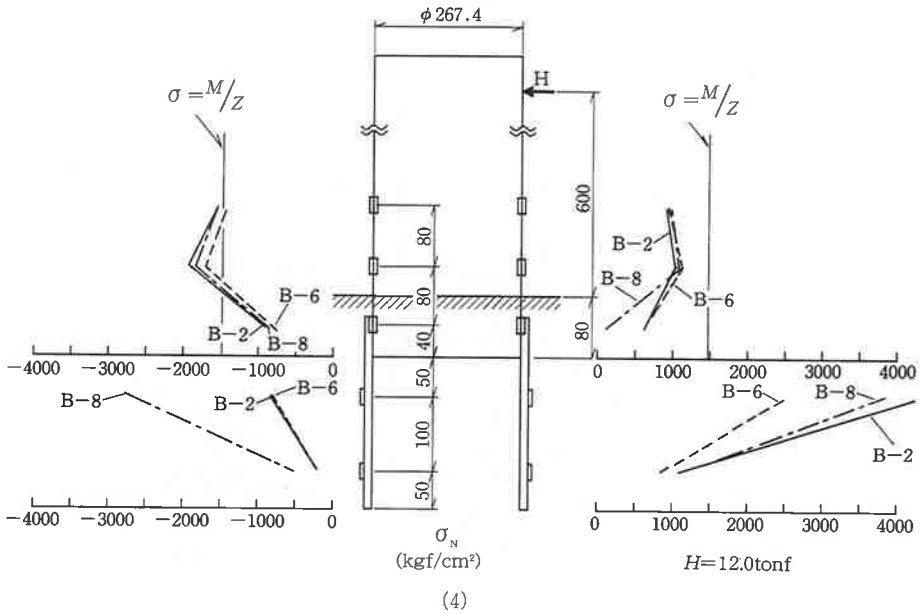
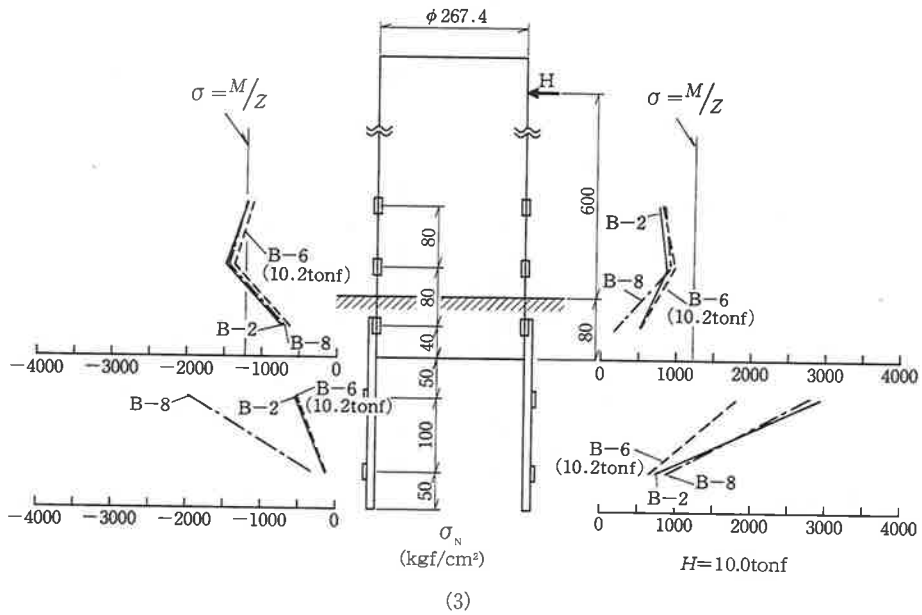
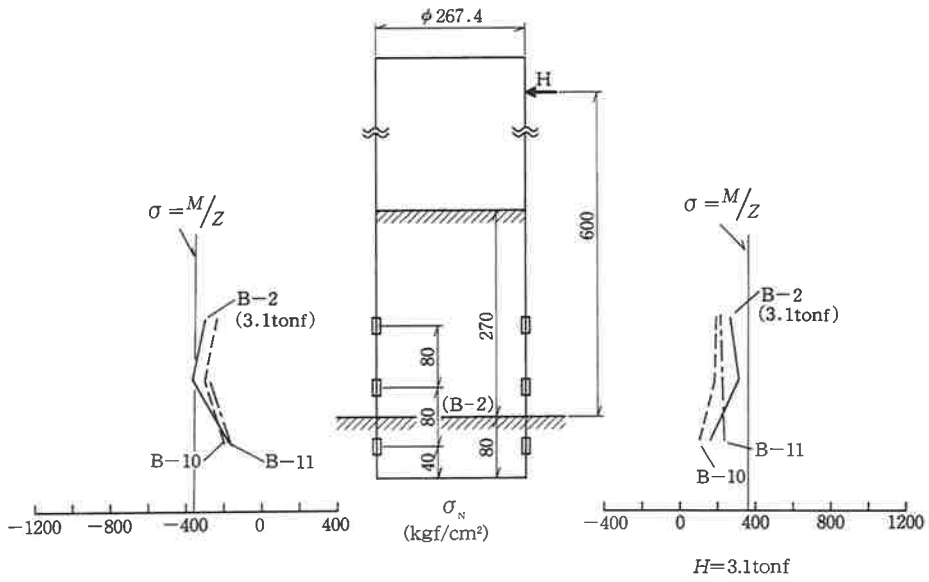
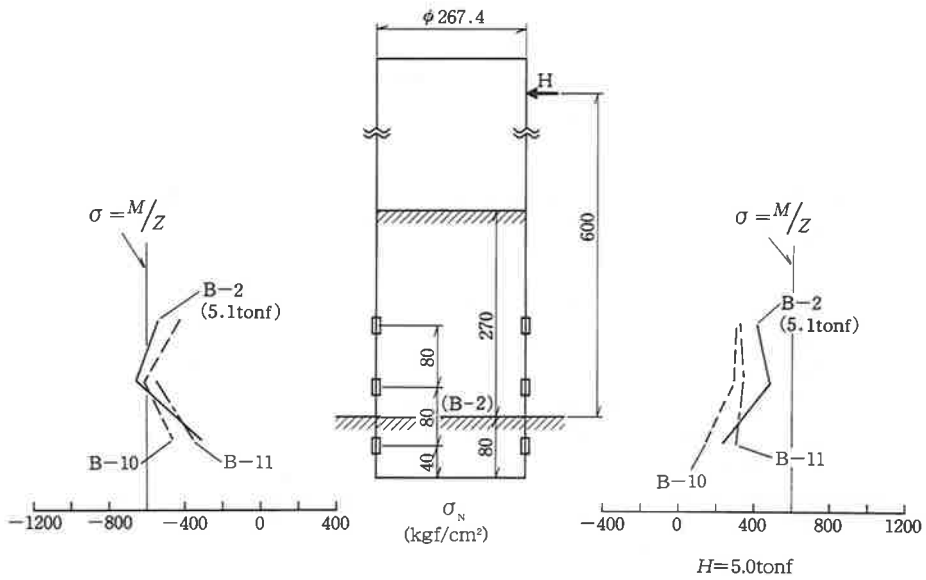


図-47 鋼管の軸方向面内応力分布とひげ筋の軸方向応力分布 (上載荷重, 付着)



(1)



(2)

図-48 鋼管の軸方向面内応力分布 (中詰コンクリート)

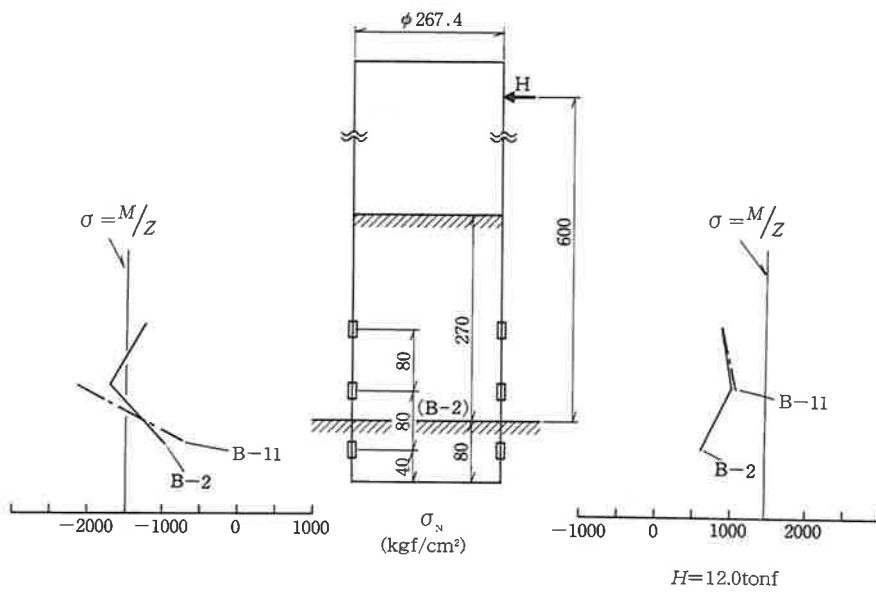
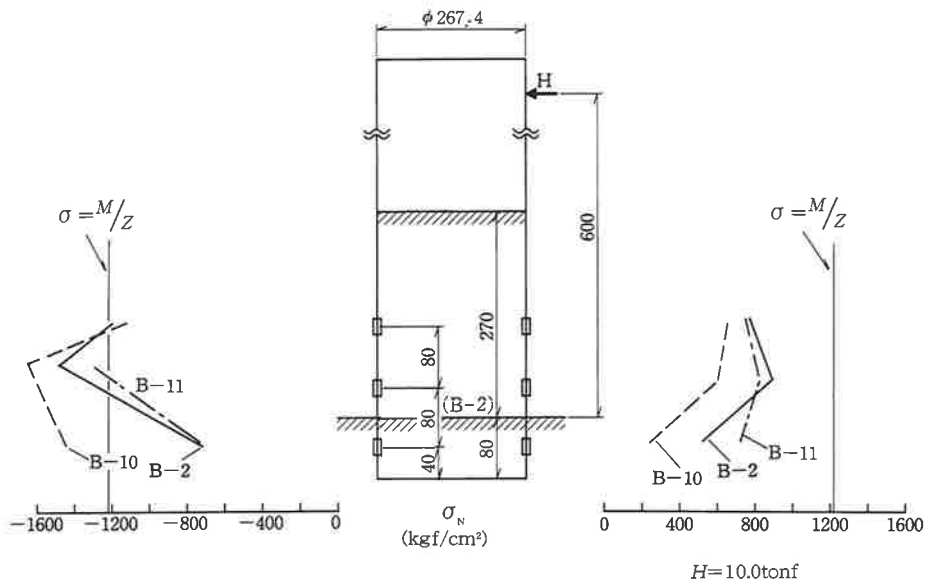
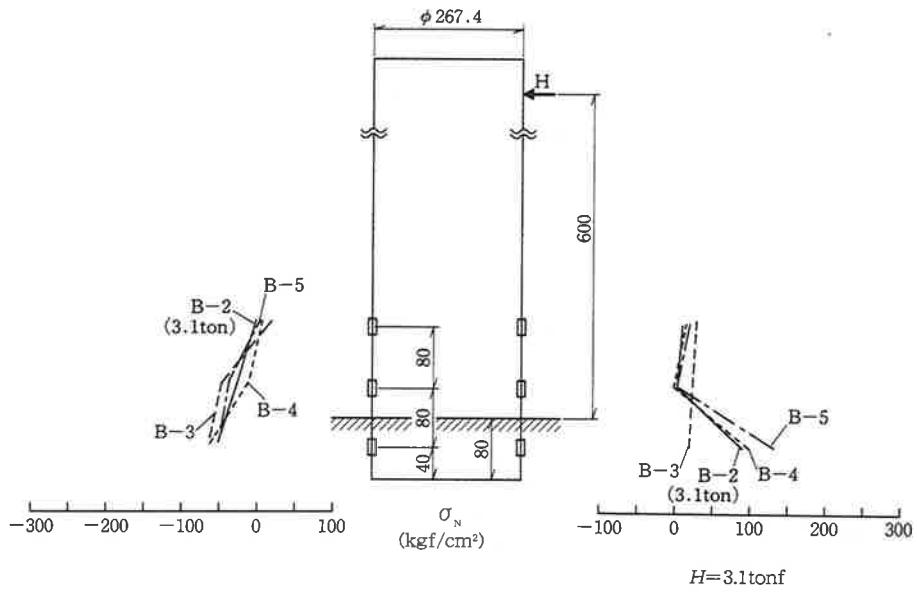
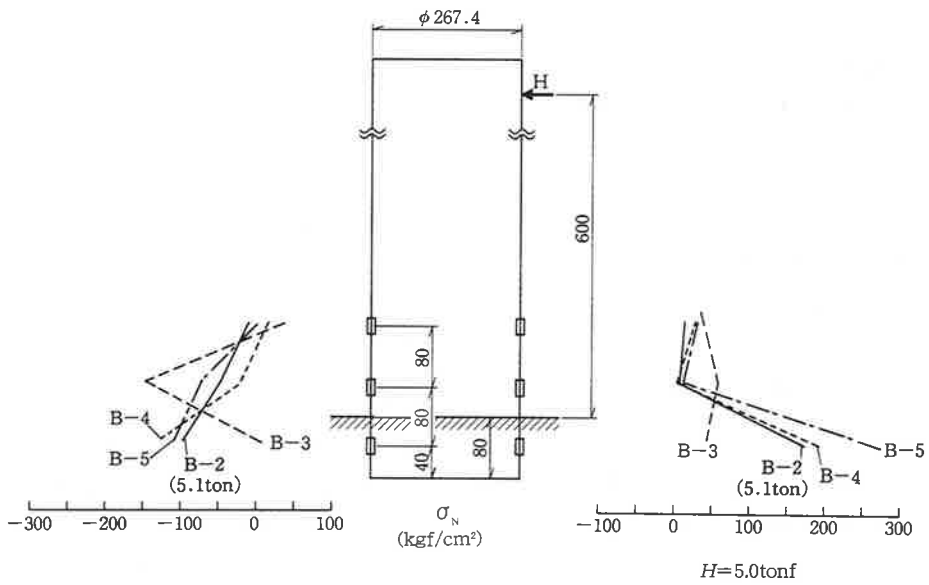


図-48 鋼管の軸方向面内応力分布 (中詰コンクリート)



(1)



(2)

図-49 鋼管の周方向面内応力分布 (ひげ鉄筋)

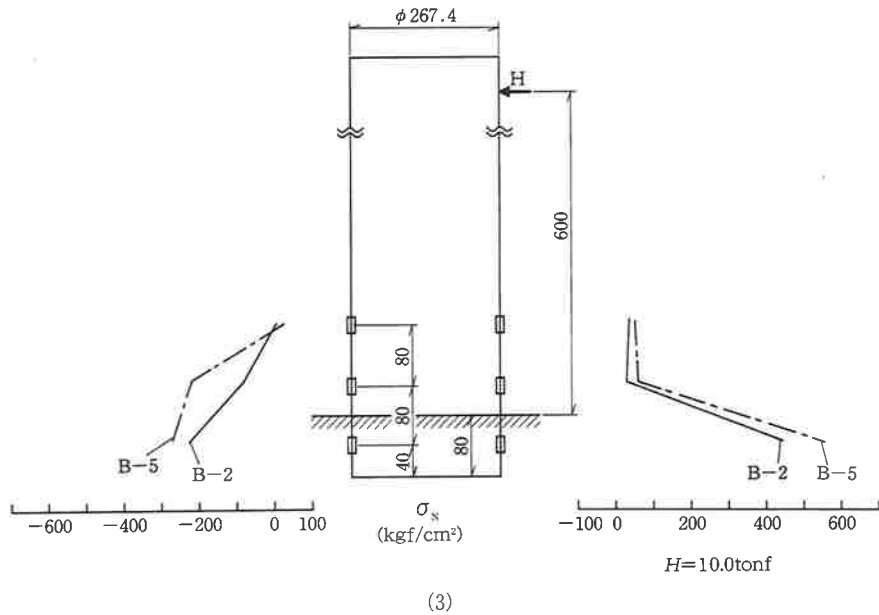


図-49 鋼管の周方向面内応力分布 (ひげ鉄筋)

筋の荷重分散効果は発揮されたと考えられる。

(5) リング筋でフーチングの配筋を補っても最大荷重、フーチングの破壊形態は他の供試体と大差のないことから、A方法と同じ配筋としたことによるフーチングの配筋の欠落部分は試験全体に大きな影響は支えなかったと考えられる。

4. 結 論

鋼管杭基礎のB方法による杭頭固定方法に関する水平荷重およびそれによる回転モーメントに対する一連の実験から次の点が明らかになった。

(1) B方法では鋼管のフーチングへの埋込長は短い、A方法同様に水平荷重、回転モーメントに対して埋込部分の付着および摩擦抵抗は杭頭拘束に重要な役割を果している。

(2) 伝統的に用いられていた杭頭の天蓋の必

要性は乏しく、浅くともフーチングと一体打ちの中詰コンクリートで鋼管との付着を確保した方がよい。

(3) 水平荷重および回転モーメントによる破壊は杭頭固定部よりフーチングの曲げ破壊であったことから杭頭付近のフーチングの補強は当然のことながらフーチング自体のせん断、曲げ耐力の強化が必要である。

本試験における配筋の欠陥の試験結果に及ぼす影響は少ないと考えられる。

(4) ひげ鉄筋がなく、埋込長8cm程度のもので破壊はフーチングの曲げ破壊で終局を迎えたことから埋込長は重要である。

逆に埋込長がなければ回転モーメントに対するひげ鉄筋の負担が大きくなり、耐荷力が低下する。

(5) フーチングの表面のひずみは極めて大きな値に達するが、亀裂の影響を受けやすく、亀裂の発生過程を追跡するものにならない。

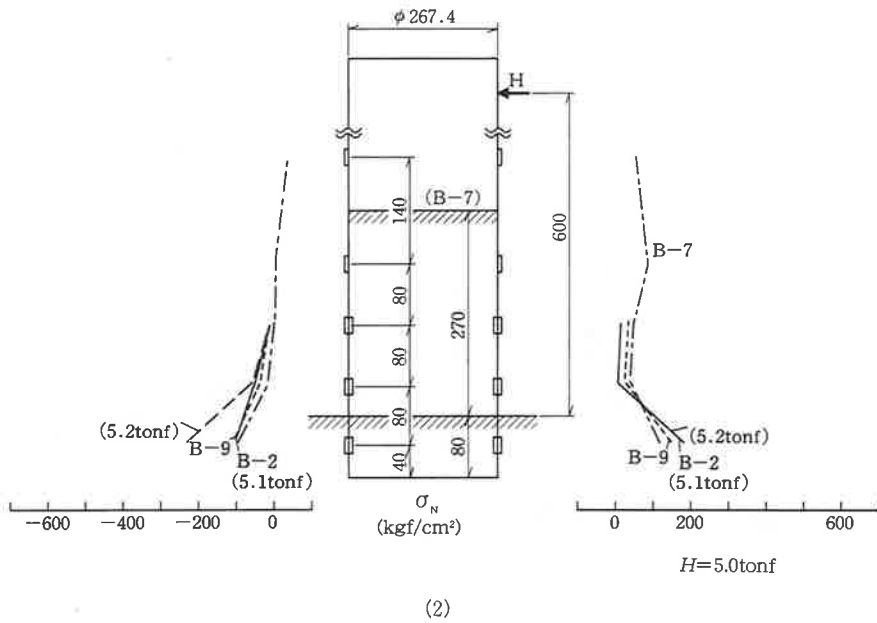
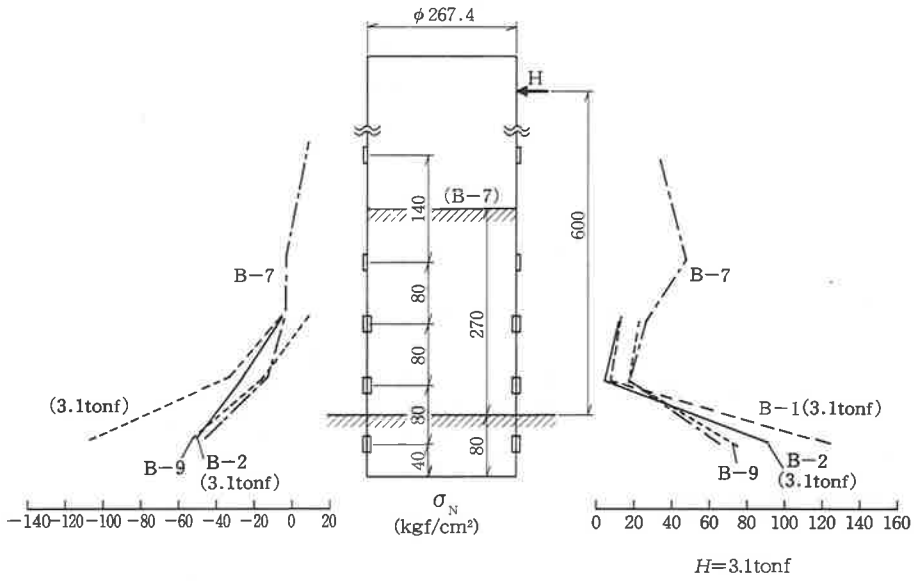


図-50 鋼管の周方向面内応力分布 (定着構造)

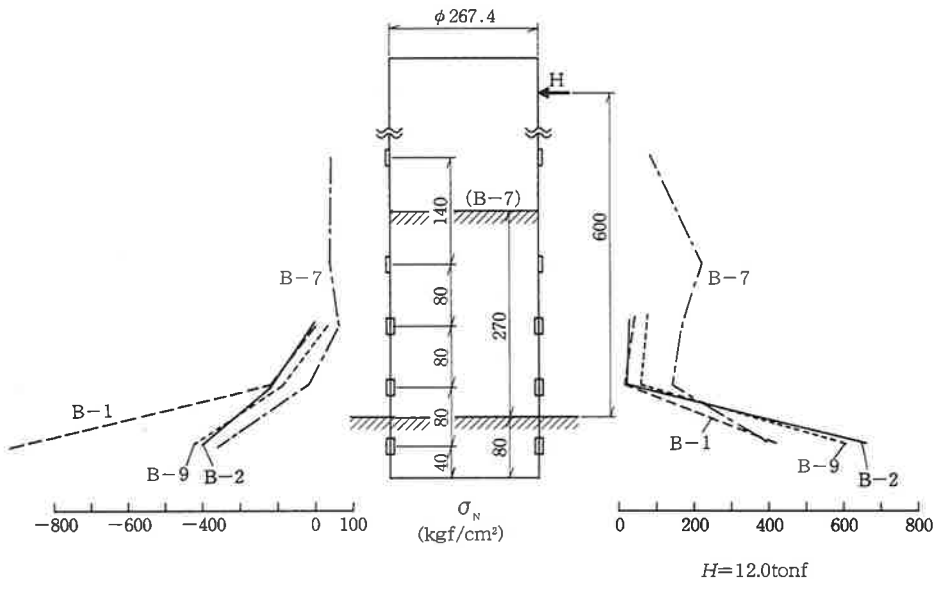
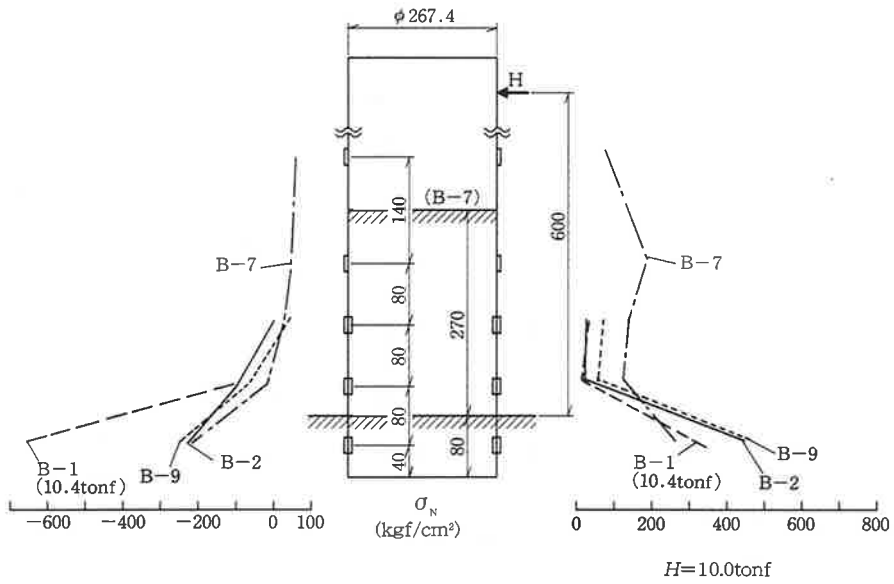


図-50 鋼管の周方向面内応力分布 (定着構造)

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究 (その4)

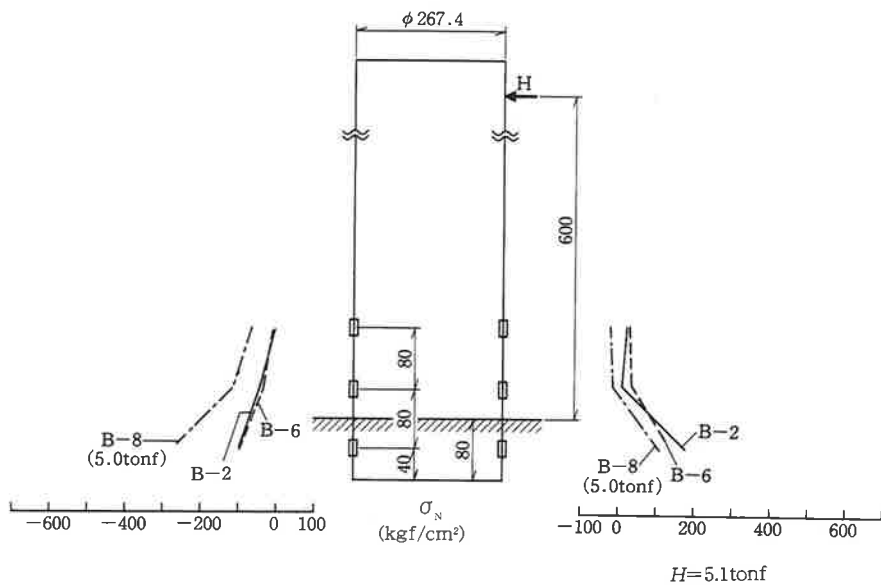
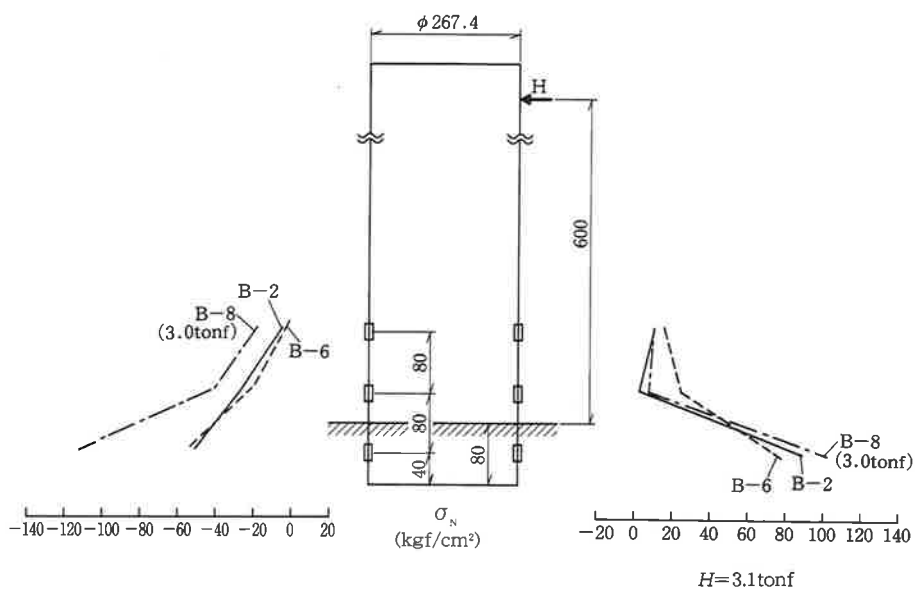
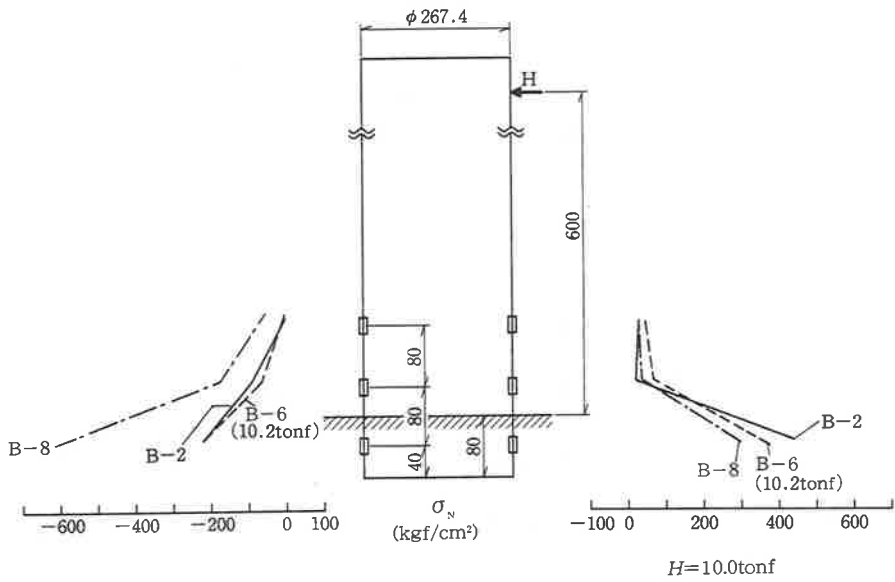
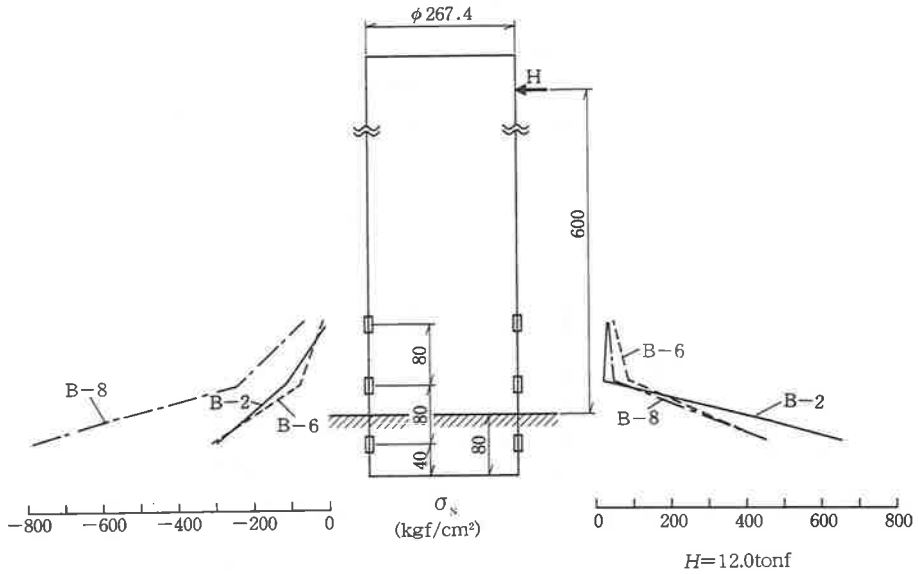


図-51 鋼管の周方向面内応力分布 (上載荷重, 付着)



(3)



(4)

図-51 鋼管の周方向面内応力分布 (上載荷重, 付着)

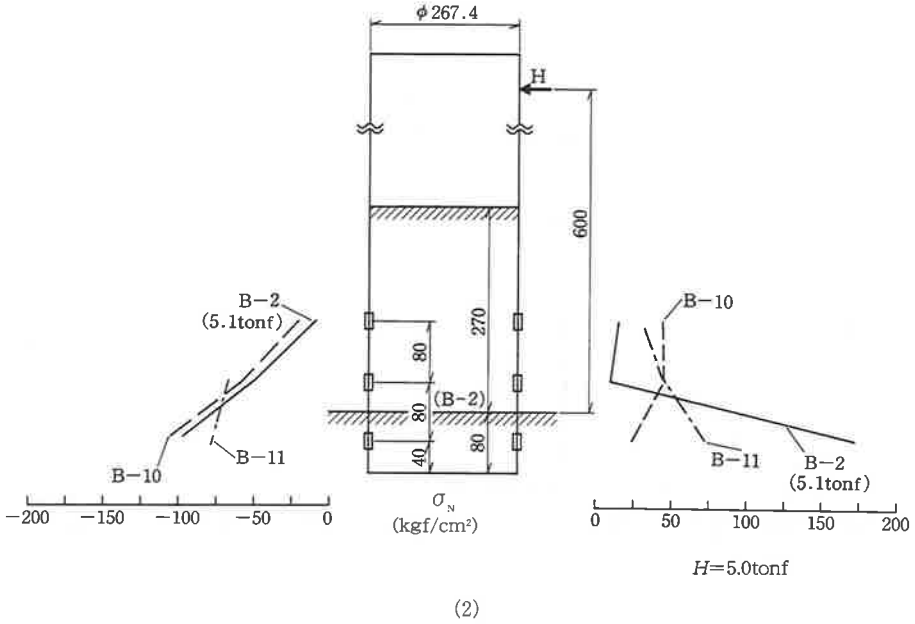
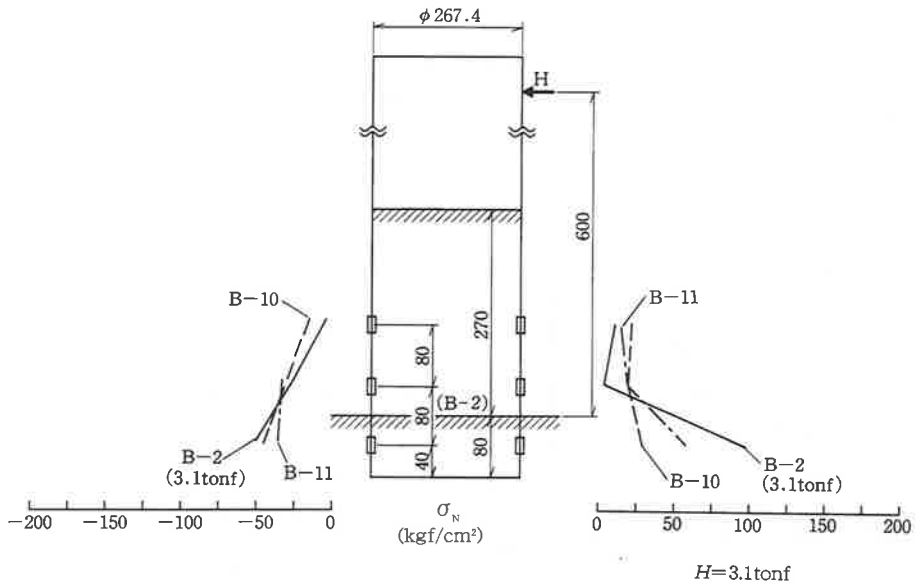
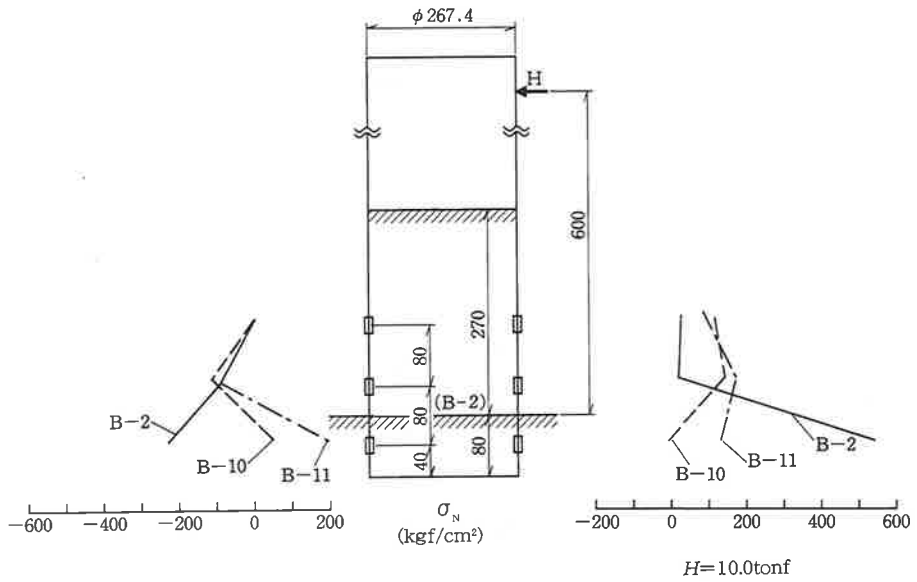
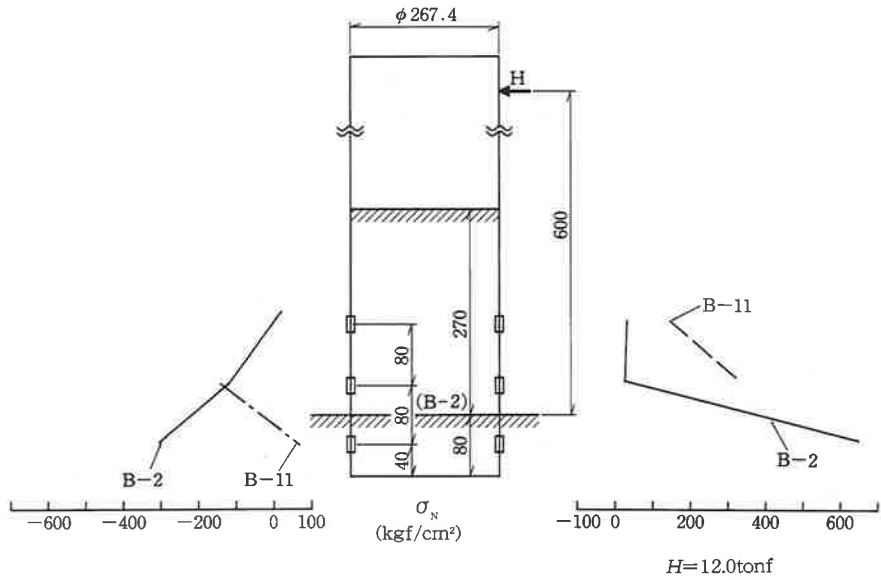


図-52 鋼管の周方向面内応力分布 (中詰コンクリート)



(3)



(4)

図-52 鋼管の周方向面内応力分布 (中詰コンクリート)

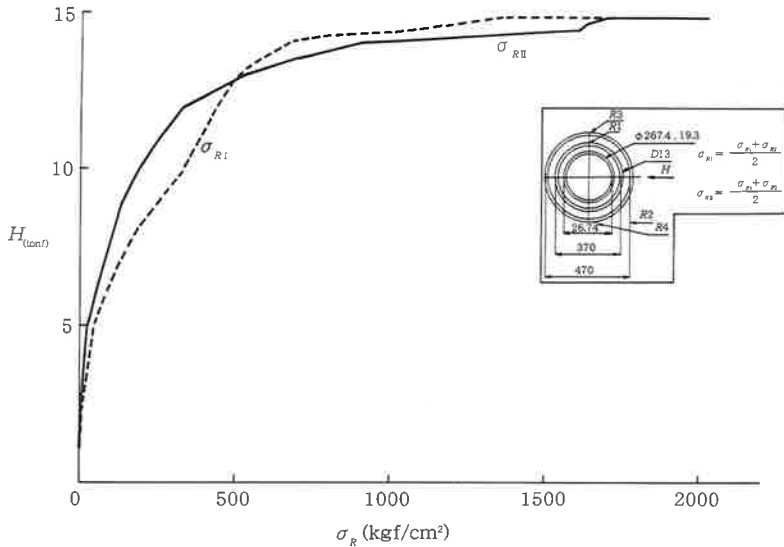


図-53 荷重とリング筋の応力

ただし、フーチング内部の支圧応力は常識的な値で、許容応力度以内に納まる。

(6) ひげ鉄筋は本数、断面積が多いほど、大きな荷重に耐え、変形性能も良くなるが、必ずしも比例関係ではない。

鋼管の回転変形はひげ鉄筋に支配される傾向にあり、ひげ鉄筋の降伏で回転変形も降伏する。

(7) ひげ鉄筋は鋼管に溶接しなくても中詰コンクリートに定着することによって同様の耐荷力を発揮する。

(8) ひげ鉄筋の断面積は鋼管の10~20%程度であってもフーチングコンクリートと合成され、仮想鉄筋コンクリート柱としてフーチング内部で機能し、終局的にはヒンジのような挙動を示す。

(9) ひげ鉄筋は軸方向に伸した方が大きな耐荷力を得られるが、45°に折り曲げると耐荷力は劣るものの鉄筋の応力は低減する。

(10) 上載荷重の存在はB方法の場合には有利である。

(11) 中詰コンクリート、リング筋は耐荷力の向上に対する感度は鈍いが、副次的な効果は大きい。

(12) リング筋は鋼管の周囲の補強、荷重分散等に効果を発揮するので配置が望ましい。

(13) 鋼管杭に発生する軸方向応力は計算値と近似し、最大値の発生位置も一致するが、周方向の応力は小さいもののフーチングコンクリートの部分で発生している。

(14) B方法も道路橋示方書の要求する要件を満し、合理的な杭頭固定方法であることが立証された。

5. あとがき

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に在籍したときに実施した載荷試験の結果をまとめて考察を加えたものである。

膨大なデータを整理して解析するために多大な時間と労力を必要とした。平成7年度から平成10年度まで4部に分けてとりまとめた。一応、これで試験の全体を概観することができるので、現行の道路橋示方書に疑問を持つ人々の参考にしていただけるものと考えている。

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し、その御労苦の成果を今後共、世の中に役立てていくつもりである。

参考文献

- 1) 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) 鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究
(その2), 八戸工業大学構造工学研究所紀要第
4巻, 1997年2月, pp.1-18
- 3) 鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究
(その3), 八戸工業大学構造工学研究所紀要第
5巻, 1998年2月, pp.19-38
- 4) 道路橋示方書 IV 下部構造編, 日本道路協会,
1980年5月