

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する 実験的研究 (その3)

塩 井 幸 武*

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

Yukitake SHIOI*

Abstract

For the connection of pipe head to footing of steel pipe pile foundation, experimental and dimensional studies were performed to horizontal load and moment concerning to A method, following A and B methods to vertical load, written on the Vol. 3 and Vol. 4 of Bulletin of CEEI. As results, effects of embedded concrete in the pile top, less efficiency of conventional pile head cover, importance of reinforcement of footing surrounding pile head and so on are discussed. The behavior of A method is suitable to the limit state design method.

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 があることは参考文献 1 で述べたとおりである(図-1)。各々の特徴は同文献に記述したとおりである。

ここでは A 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。A 方法および B 方法によって固定した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 1 および 2 を参照されたい。

2. 実験 IV (水平力、曲げモーメント作用時の A 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概要を図-1 に示す。用いた鋼管は STK41, 径 267.4 mm, 肉

厚 9.3 mm である。それぞれの水平力、曲げモーメントに対する挙動を調べるために A 方法について天蓋の有無, 鋼管周面の付着の有無の項目に関する 3 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 の点の鋼管に水平力を載荷した。

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)である。フーチングコンクリートの圧縮強度は $\sigma_c = 225 \sim 237 \text{ kgf/cm}^2$ で、ヤング係数は $2.3 \sim 2.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であった。

2.3 方法 A の結果と考察

(1) 耐力と破壊形式

表-3 に水平載荷試験時のフーチング表面の

平成 9 年 10 月 15 日受理

* 構造工学研究所・教授

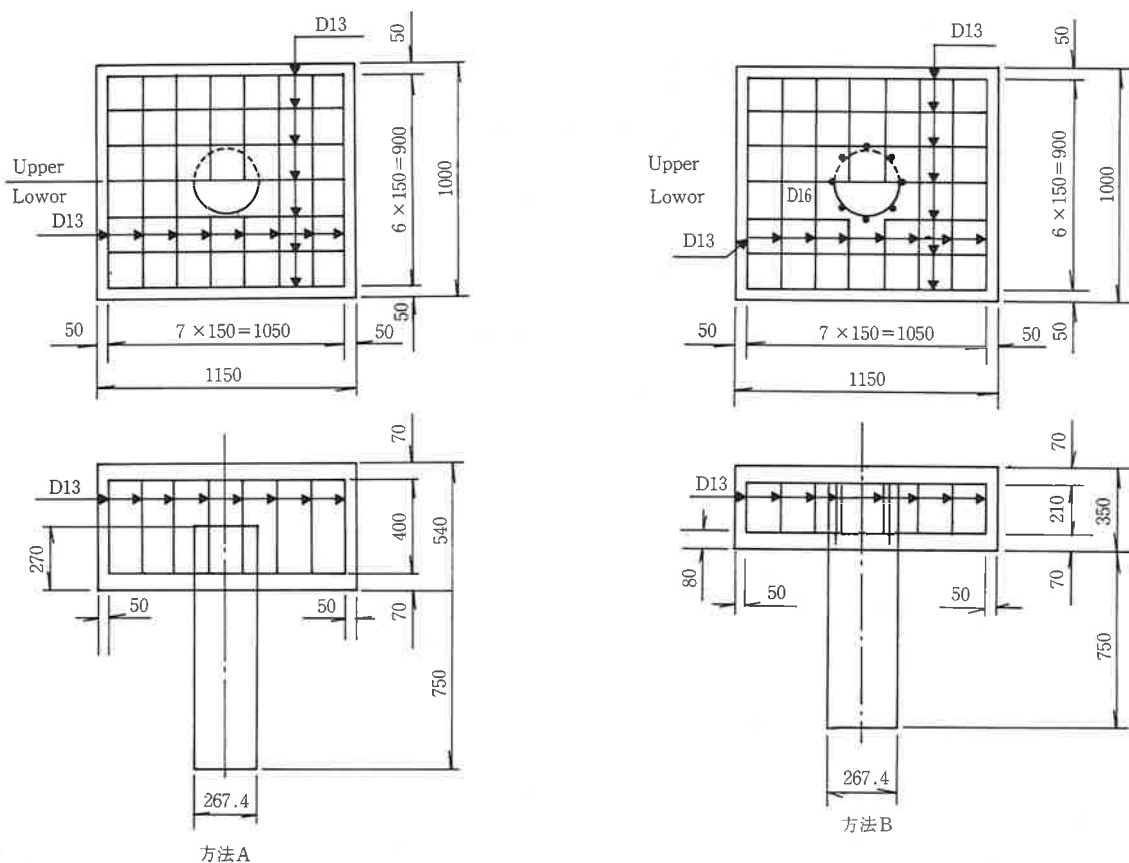


図-1 結合方法 A, B の概要

表-1 供試体の種類

結合方法		方法 A		
試験体 No.		A-1	A-2	A-3
天 蓋	有 無	○	-	-
くい周面付着	有 無	-	-	○
備 考		現 行	基 準	


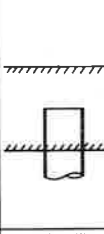
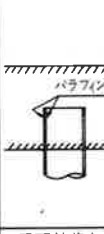
○：変化パラメーター：道路橋示方書による

ひびわれ発生荷重 H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 (表-3 の説明図の分類による), 変形曲線の急変部の荷重 H_6 , 最大耐力 H_{max} , 道路橋示方書³⁾ (以下, 道示という) の算定式による許容水平荷重 H_a を 3

供試体毎に示す。表中の () 内は最大荷重に対する載荷荷重の比率である。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

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究 (その3)

表-2 供試体の構造

試験体No.	A-1	A-2	A-3
構造			
適用	天蓋付き	基準	周面付着なし

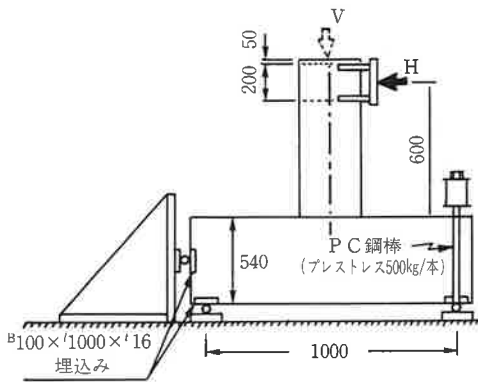


図-2 荷重方法

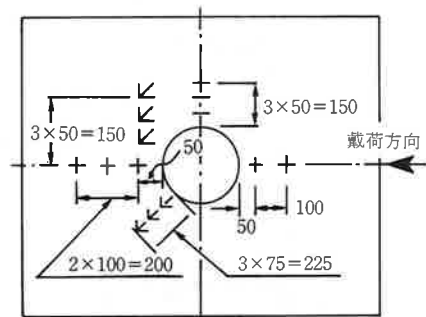


図-4 フーチング表面のゲージ位置

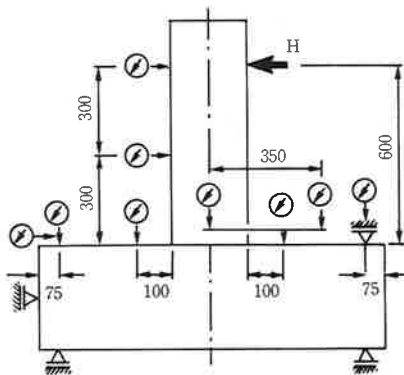


図-3 ダイヤルゲージ位置

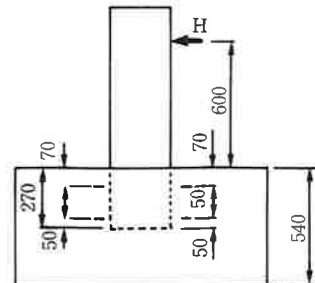
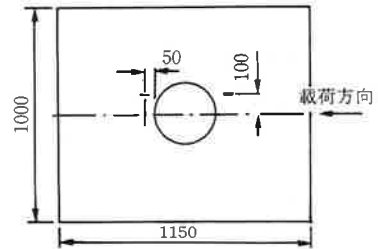


図-5 フーチングコンクリートのモールドゲージ位置

況を図-7~9に示す。

試験ではいずれの供試体もフーチングの亀裂破壊で終局状態を迎えている。最大耐力の観点からみるとA-2が $H=23.7$ tfまで耐え、A-1が $H=22.1$ tf、A-3が $H=13.2$ tfであった。これから天蓋は最大耐力の向上に貢献せず、内部空洞内へのはらみ出しや面内座屈が懸念され

る。これに対してA-2の中詰コンクリートの補剛効果と付着力が最大耐力に大きく影響していることが判明した。A-3はパラフィンでコンクリートとの間を縁切りしたので付着力の効果が発揮されず、回転角も大きくなっている。

A-1とA-2の差から天蓋の有無は水平耐力にほとんど影響を及ぼさず、むしろA-1では鋼管の内部への座屈の恐れが認められた。A-2の中詰コンクリートの補剛効果も含めて両者の関係は鉛直荷重の場合¹⁾と同様であることが判明した。また、A-3における鋼管とコンクリートの付着の除去は耐力の面でも変形の面でも大きな影響がみられ、中詰コンクリートの効果を証明するものとなった。

次に道路指示方書⁹⁾で算定される許容設計荷重 H_a と最初のひび割れ荷重 H_1 とはほぼ等しくなっており、示方書の算定モデルは妥当といえよう。

破壊の進行は図-7~9より鋼管とコンクリートの剝離による亀裂 H_1 、荷重直角方向の亀裂の発生 H_2 、背面方向への亀裂 H_3 、前面方向の亀裂 H_4 、杭前面のコンクリートの圧壊という過程をとっている。破壊の型式としてはA-2がフーチングの側方の引張亀裂破壊、A-3がフーチング

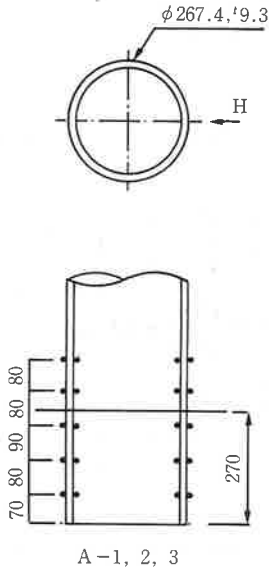
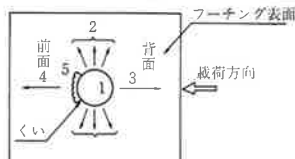


図-6 鋼管ゲージの位置

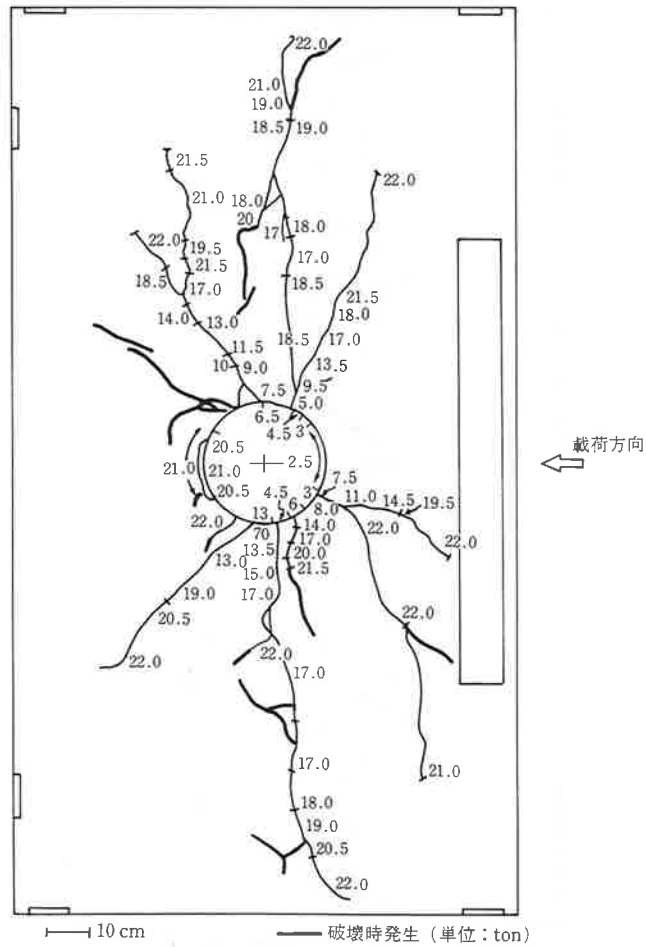
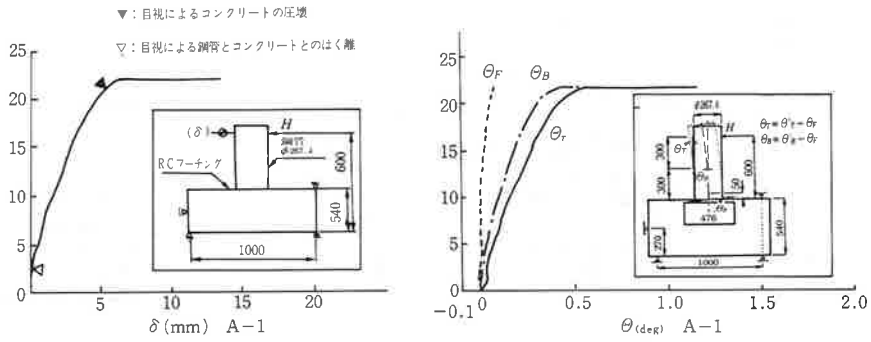
表-3 耐力一覧表

試験体 No.	目視によるひび割れ発生荷重 (t)					変形急進荷重 H_6 (t)	最大耐力 H_{max} (t)	許容設計荷重 H_a (t)
	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5			
A-1	2.5	5.0	7.5	—	21.0	21.0	22.1	2.6
	(11)	(23)	(34)		(9.5)	(9.5)		
A-2	2.5	5.0	—	—	18.5	16.0	23.7	
	(11)	(21)			(78)	(68)		
A-3	1.5	8.0	—	12.2	11.0	10.0	13.2	
	(11)	(61)		(92)	(83)	(76)		

発生ひび割れの分類

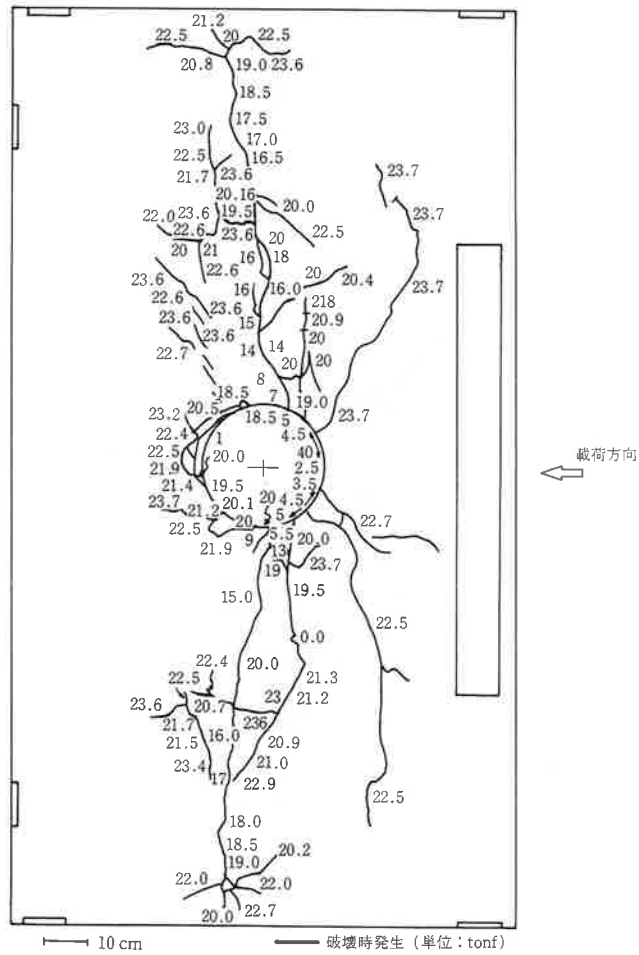
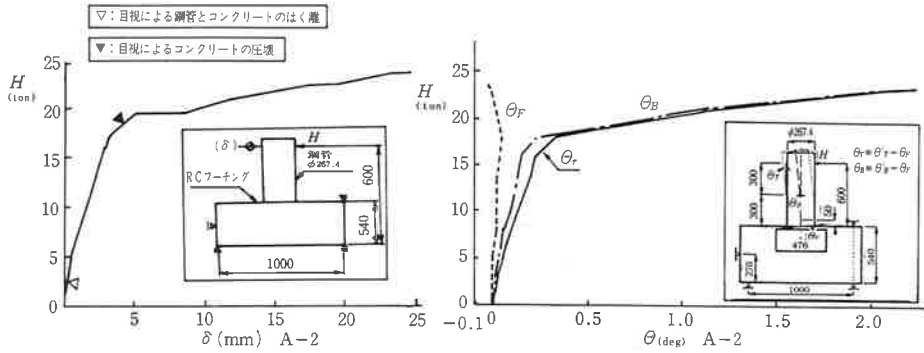


鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究（その3）



A-1 ($H_{max} = 22.1^{tonf}$)

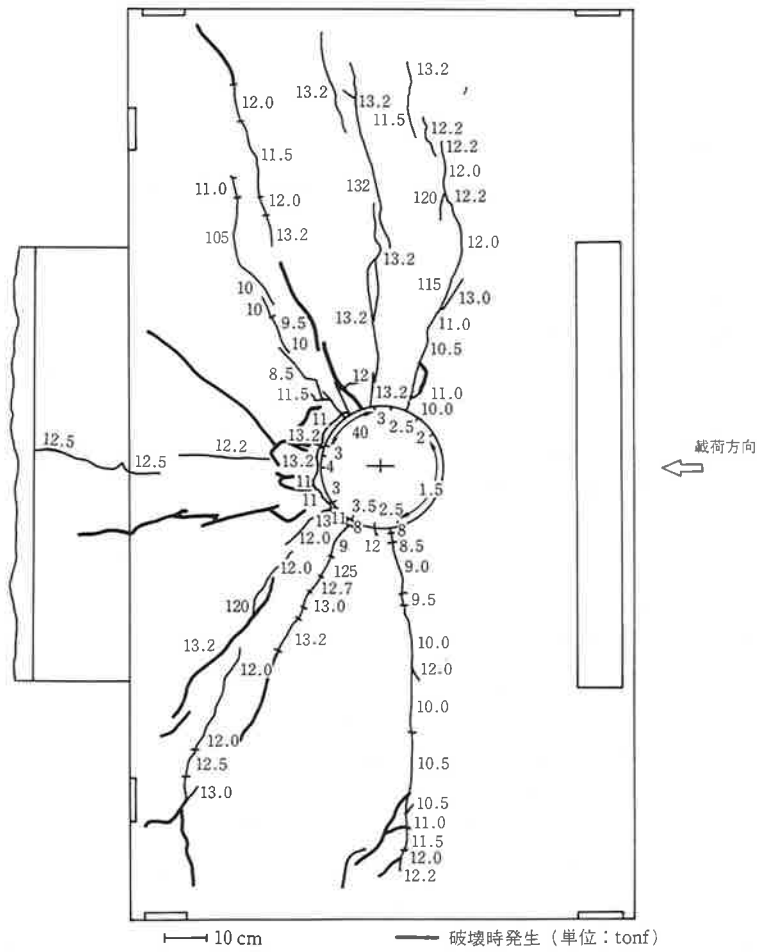
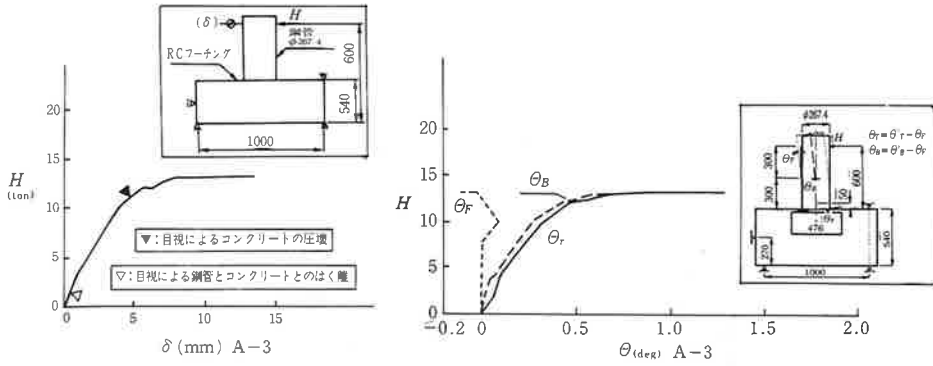
図-7 フーチング下面・側面ひび割れ発生状況



A-2 ($H_{max} = 23.7^{ton}$)

図-8 フーチング下面・側面ひび割れ発生状況

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究 (その3)



A-3 ($H_{max}=13.2\text{tonf}$)

図-9 フーチング下面・側面ひび割れ発生状況

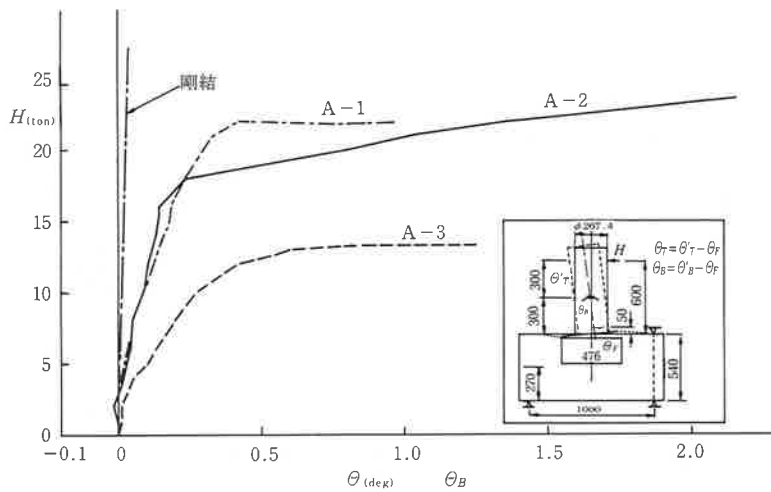


図-10 荷重と鋼管の回転角

前面の圧縮破壊, A-1 が両者の同時発生ということができる。

(2) 荷重—変形関係

図-7~9の右上に荷重とフーチングの回転変形 θ_F , フーチング面の鋼管基部の回転変形 θ_B , 荷重載荷点の鋼管の回転変形 θ_r の関係を示した。また, 水平荷重 H と θ_B の関係を図-10に示す。

鋼管基部の θ_B は杭頭の回転バネの根拠となる。いずれの供試体もひびわれ荷重 H_b の段階で θ_B の値が発生する。それ以前は杭頭剛結とみなされ, 杭とフーチングコンクリートの弾性係数から回転バネを算出すればよい。

θ_B の変曲点の荷重 H_b は A-1 で 21 tf, A-2 で 16 tf, A-3 で 10 tf である。A-1, A-3 は最大耐力 H_{max} と H_b の差は小さく, 回転角 θ も $1.0^\circ \sim 1.2^\circ$ 付近で破壊しているが, A-2 はさらに 8 tf にわたって変形して 2.2° 付近でフーチングの破壊を迎えている。すなわち, A-1, A-3 に対して倍近い変形性能 (フーチングの配筋に負うところも大きい) を有していることになり, 中埋コンクリートの効果が著しいことを示している。

また, A-1, A-3 は変形曲線の急変部以降は塑性領域となるが, A-2 はフーチングに引張亀裂

を生じて急変部を迎えた後もフーチングの鉄筋の伸びの範囲で変形を続けている。

(3) フーチングの応力

いずれの供試体も前面, 側面の差はあってもフーチングの破壊で終局状態を迎えている。フーチング表面における各荷重段階毎の応力の変化を図-11~13に示す。太線は圧縮応力を, 細線は引張力を表わす。

いずれの供試体も荷重の小さい段階では鋼管杭前面に圧縮応力と引張応力 (荷重直角方向) が表われ, 側面にも引張応力 (荷重方向) が生じている。図-14~16に鋼管杭のまわりの側面 S1, 背面 S2, 前面 S3 における応力の変化を示す。これらの値は試験時まで保存したテストピースの圧縮試験で得られたヤング係数を各ひずみ量に乗じて算出したものである。

鋼管杭近傍の S1, S2 の値はいずれも小さく, フーチングに生じた亀裂との関係は説明しにくい。早い段階で鋼管とコンクリートの付着が切れたことやゲージのまわりのコンクリートに亀裂が生じたことなどにより大きなひずみ量の伝達がなかったものと考えられる。しかし, A-2 の側方では荷重とともに引張応力が大きくなり, 図-8の亀裂との関係も理解できる。

図-16の S3 では, いずれも大きな圧縮応力が

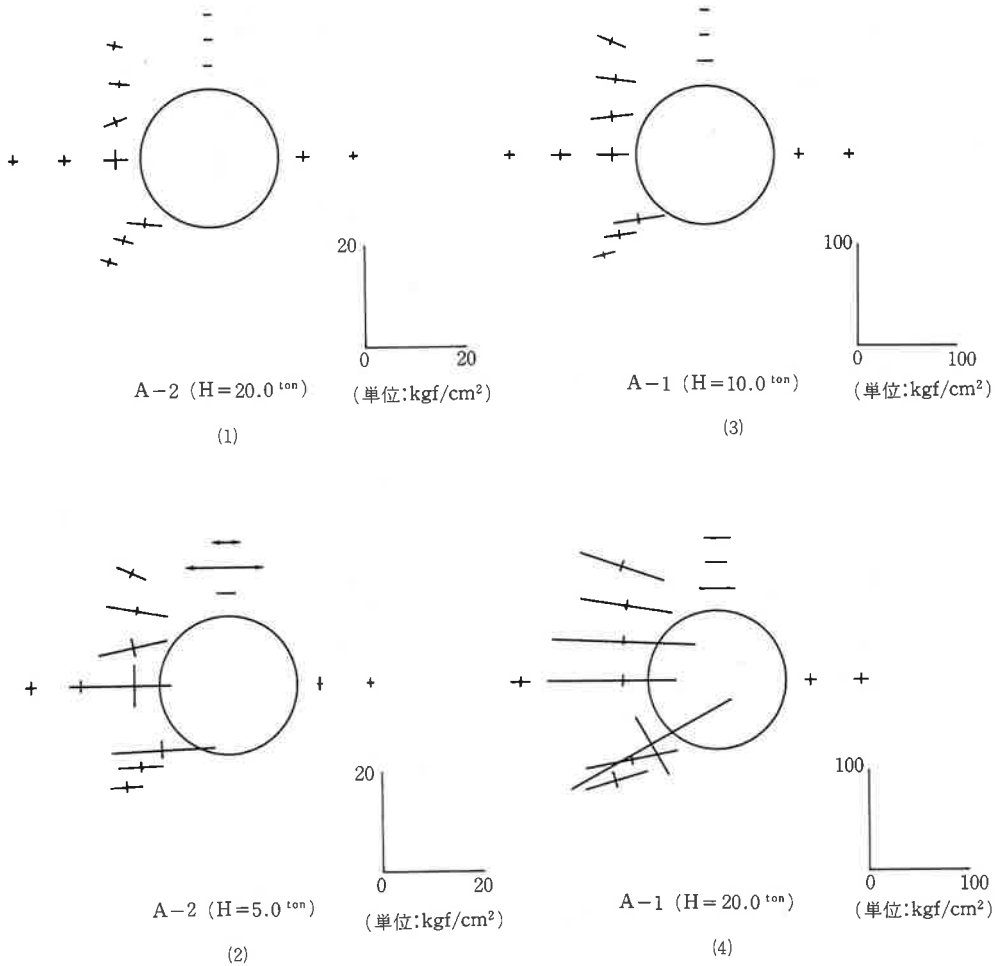


図-11 フーチング表面の主応力分布 (A-1)

みられる。A-1 ははじめは引張応力（背面側の鋼管とコンクリートが剝離し、中空である鋼管の側方への拡大で生じたと考えられる）であるが、水平力 6 tf 付近で圧縮応力となり、水平力が大きくなっても圧縮応力の値は相対的に小さい。A-2 は当初から圧縮応力であるが、水平力 18 tf 付近で最大値になった後はフーチングに亀裂が貫通したせい、水平力が増加しても圧縮応力の値は減少している。A-3 は鋼管とコンクリートの付着がないせい、当初から圧縮応力であるが、水平力に対する応力の増加率は高く、前面の圧壊で早い段階の破壊となっている。

次にフーチング内部の応力をモールドゲージで測定した結果を図-17～20 に示す。F1, F4 には大きな圧縮力が生じ、F2, F3 には小さいながら引張応力がみられる。

これらの測定結果から水平力とそれによるモーメントは主にフーチング内の F1, F4 の支圧で負担されていることが判明したが、A-1 については各支圧応力が小さいことから天蓋を介して杭頭端面の支圧応力による負担の割合が大きいことが推定される。

水平力 $H=10$ tf における F1, F4 の支圧応力 σ_F を表-4 に示す。鋼管とコンクリートの付着の

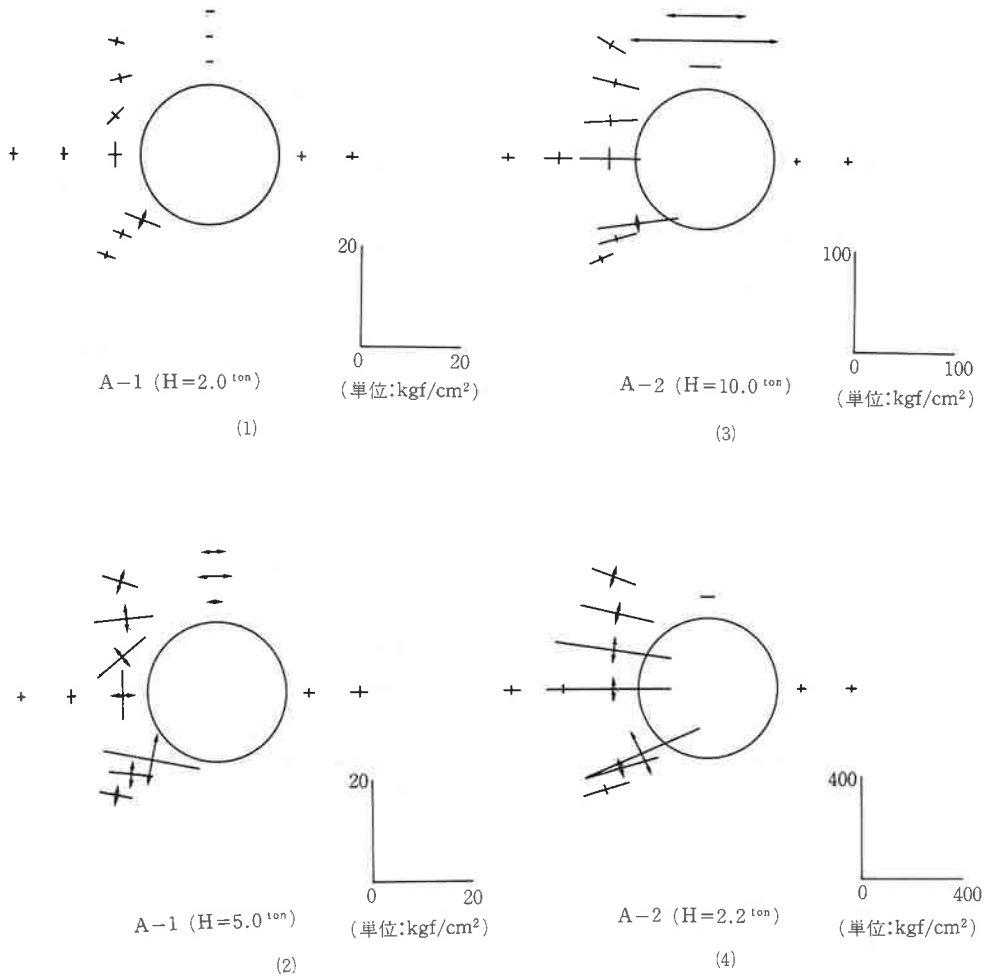


図-12 フーチング表面の主応力分布 (A-2)

ない A-3 の応力が大きいのはフーチング表面の応力の増加率が高いのと同じ理由である。しかし、F1 の値は中詰コンクリートの杭頭端面におけるせん断抵抗のために A-2 の値と近いものとなっている。

それに対して A-1 は水平力の増加とともに鋼管とコンクリートの付着が失われてコンクリートに囲まれた鋼管としての挙動となるために剛性が低く、従ってモーメントの伝達も少ないという結果になっている。しかし、鋼管の軸方向の高いバネ係数でモーメントの大部分は天蓋に伝達され、その端面でモーメントが負担さ

れていると推定される。

以上から水平力、モーメントに対するフーチング内の杭頭の支持機構は図-21 のとおりになると推定される。

(4) 鋼管の応力

水平力およびモーメントで鋼管本体に発生した応力の測定結果のうち、軸方向面内応力分布を図-22 に、円周方向面内応力分布を図-23 に示す。

軸方向応力の測定値はモーメントに対する計算値に近いものとなっている。しかし、圧縮側の値が引張側の値よりも大きくなっている。そ

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究 (その3)

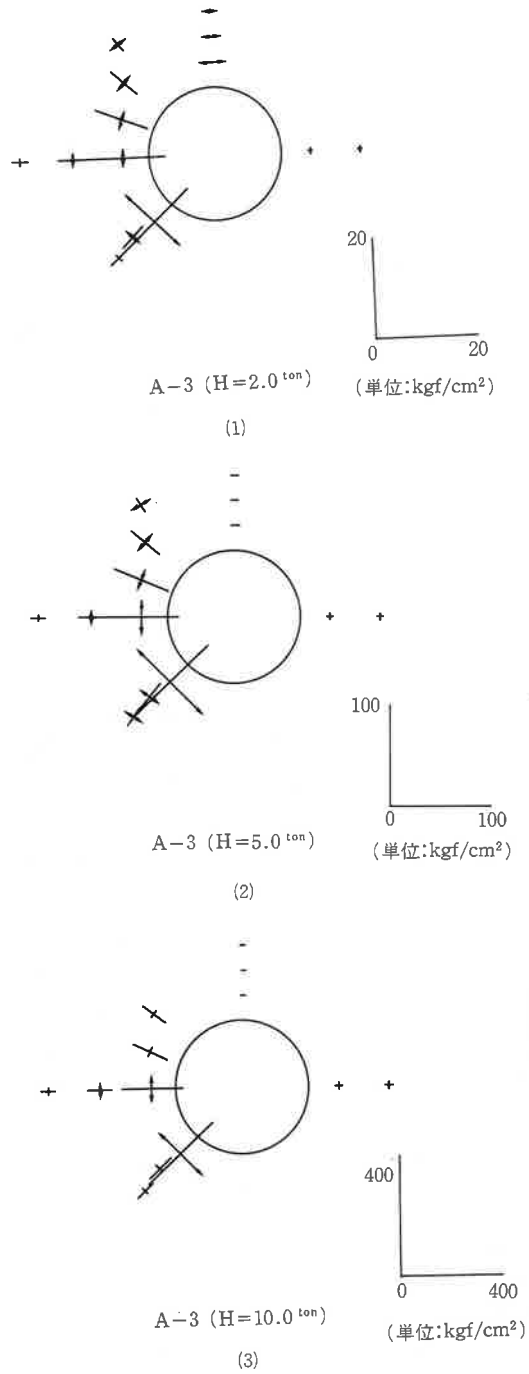


図-13 フーチング表面の主応力分布 (A-3)

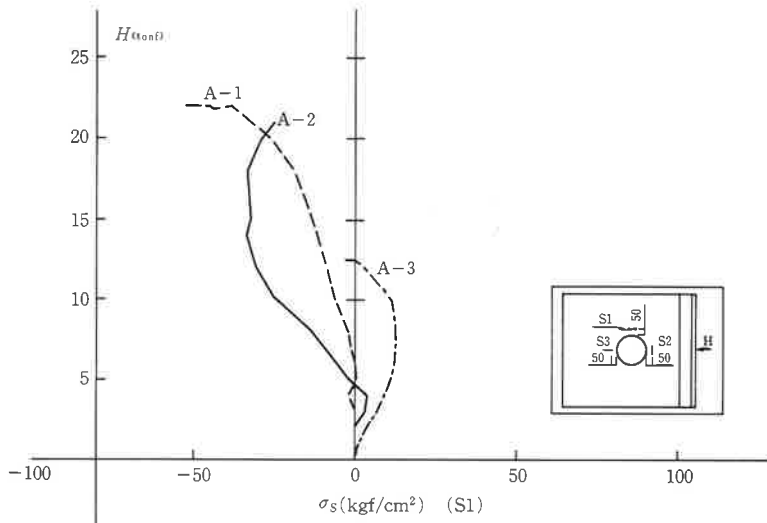


図-14 荷重とフーチング下面の応力

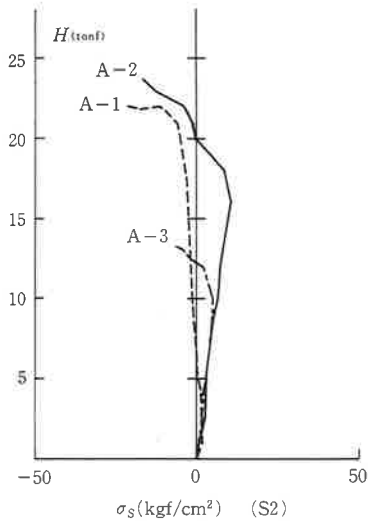


図-15 荷重とフーチング下面の応力

の理由は水平力の影響と考えられる。

また、最大応力の発現位置は A-1, A-2 においてはフーチング表面付近になっているが、付着を切っている A-3 はフーチング内部となっている。また、フーチング内部での鋼管の応力の低減傾向は A-2 が最も著しいが、引張側の応力は A-3 が顕著である。杭端部の拘束が小さいために抵抗モーメントはヒンジに近くなるので

急速に応力の値が低減するものと推定される。それに対して A-1 は天蓋部分の支圧抵抗により端部に比較的大きな抵抗モーメントが存在するために応力の低減は少ないと考えられる。

円周方向応力では A-2 の値が一貫して低く、付着のない A-3 の値が小さい荷重段階から増加している。A-1 は荷重の増加に伴い、圧縮側で増加しているが、引張側では変化がほとんどない。理由は荷重の増加によって鋼管とコンクリートの付着が切れるとともに前面コンクリートへの荷重伝達が主に鋼管単独となるために内側で補剛されない管壁のはらみ出し傾向が生じることによると考えられる。逆に引張側はコンクリートの支圧応力も僅少で軸方向引張力も小さいので円周方向のひずみは小さくなっていると推定される。

いずれの供試体の円周方向応力はフーチング表面付近で最大となっているのは曲げモーメントと囲りのコンクリートの拘束による影響と考えられる。

なお、フーチング内の鋼管の内外のひずみゲージから管壁に作用する曲げ応力も測定したが、測定値の差分が小さいことから本論文では取り上げないこととする。

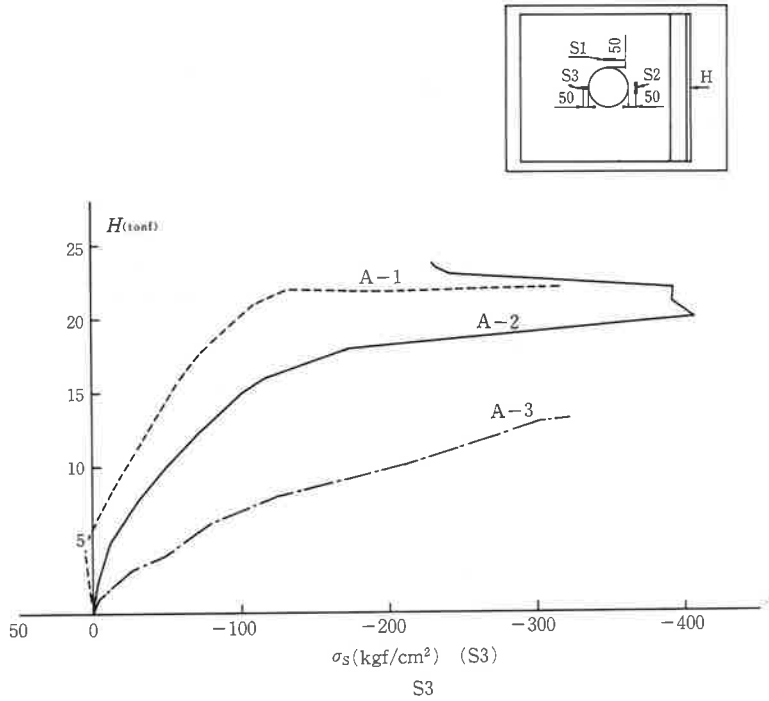


図-16 荷重とフーチング下面の応力

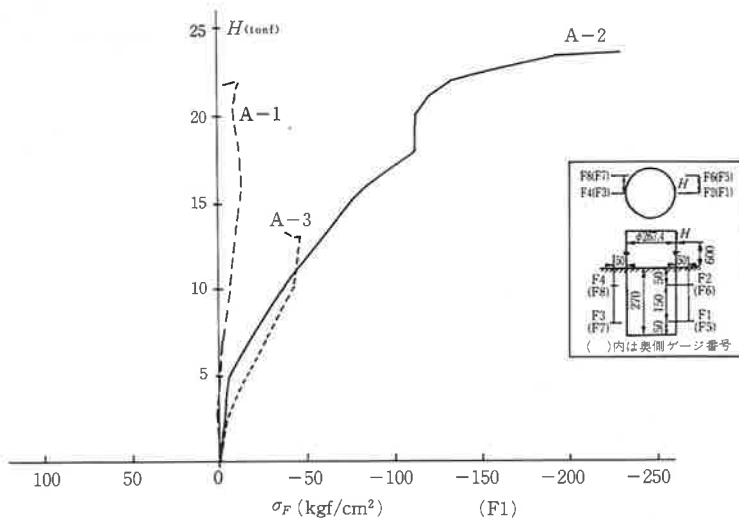


図-17 荷重とフーチングの支圧応力

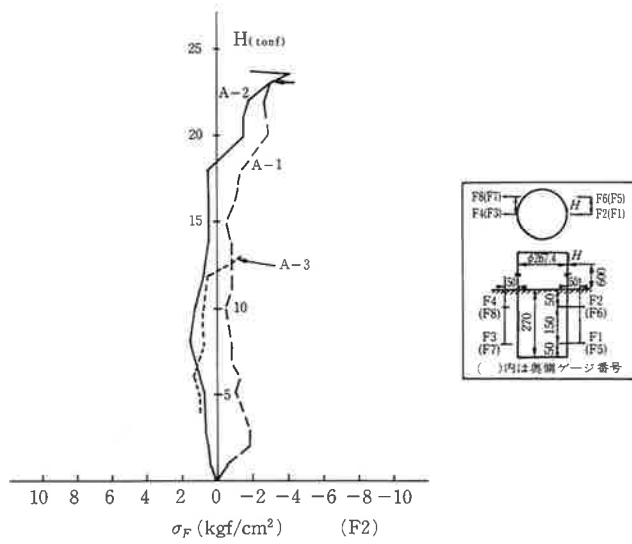


図-18 荷重とフーチングの支圧応力

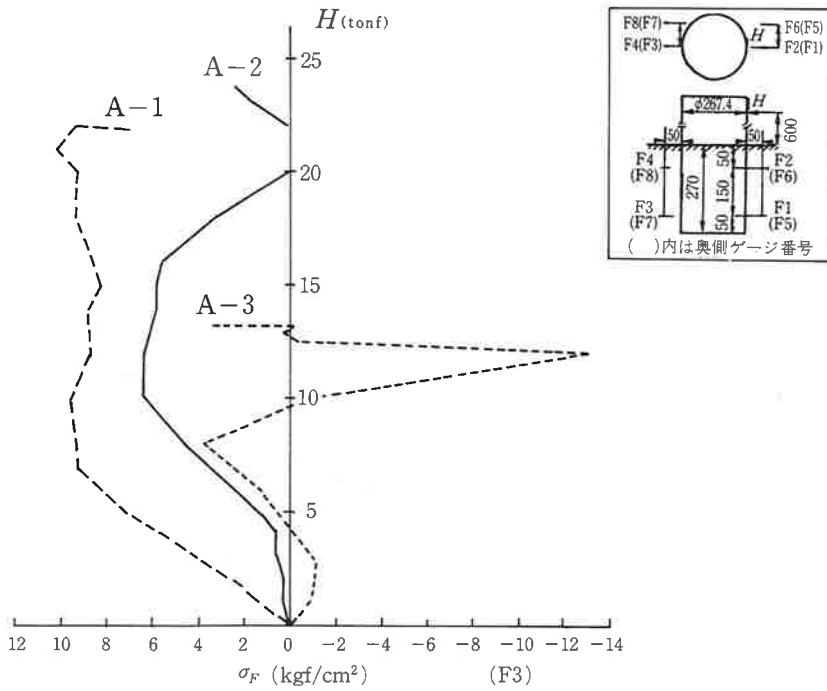


図-19 荷重とフーチングの支圧応力

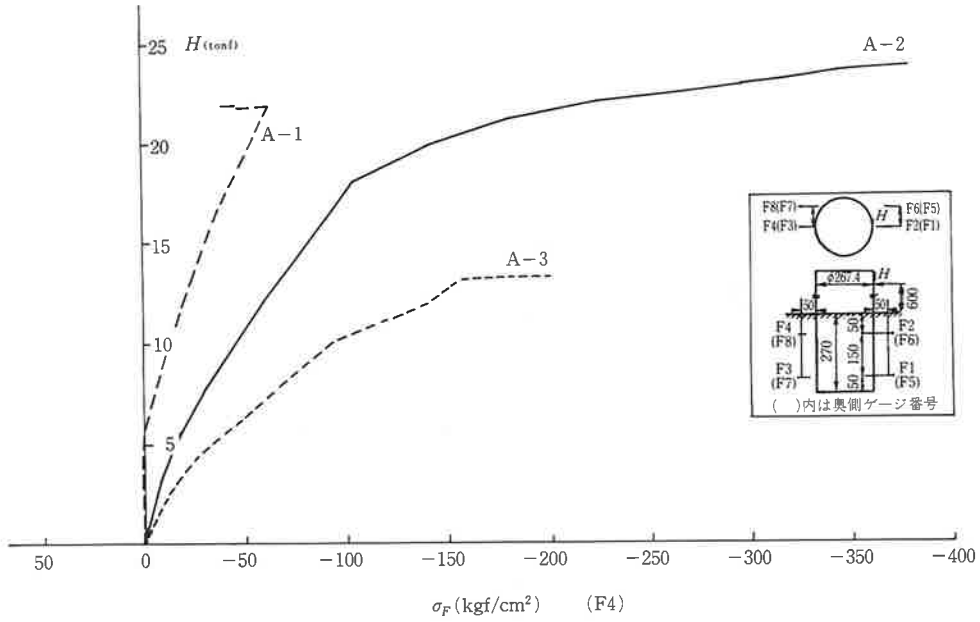


図-20 荷重とフーチングの支圧応力

表-4 $H=10t$ に対する支圧応力 σ_F

試験体	σ_{F1} (圧縮)	σ_{F4} (圧縮)
A-1	6	14
A-2	37	45
A-3	43	94

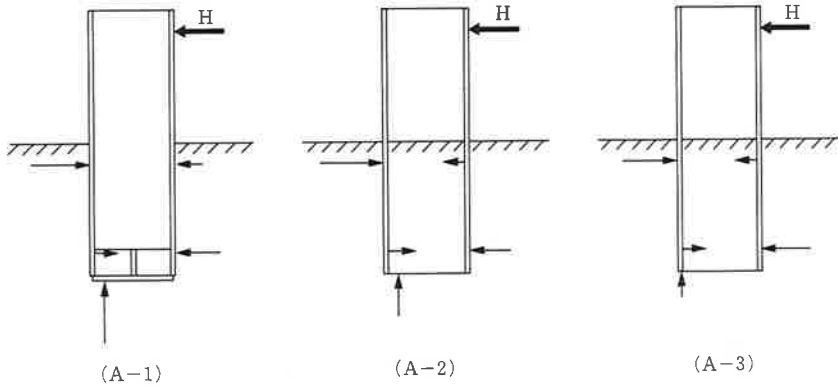
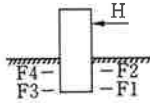


図-21 推定される支持機構

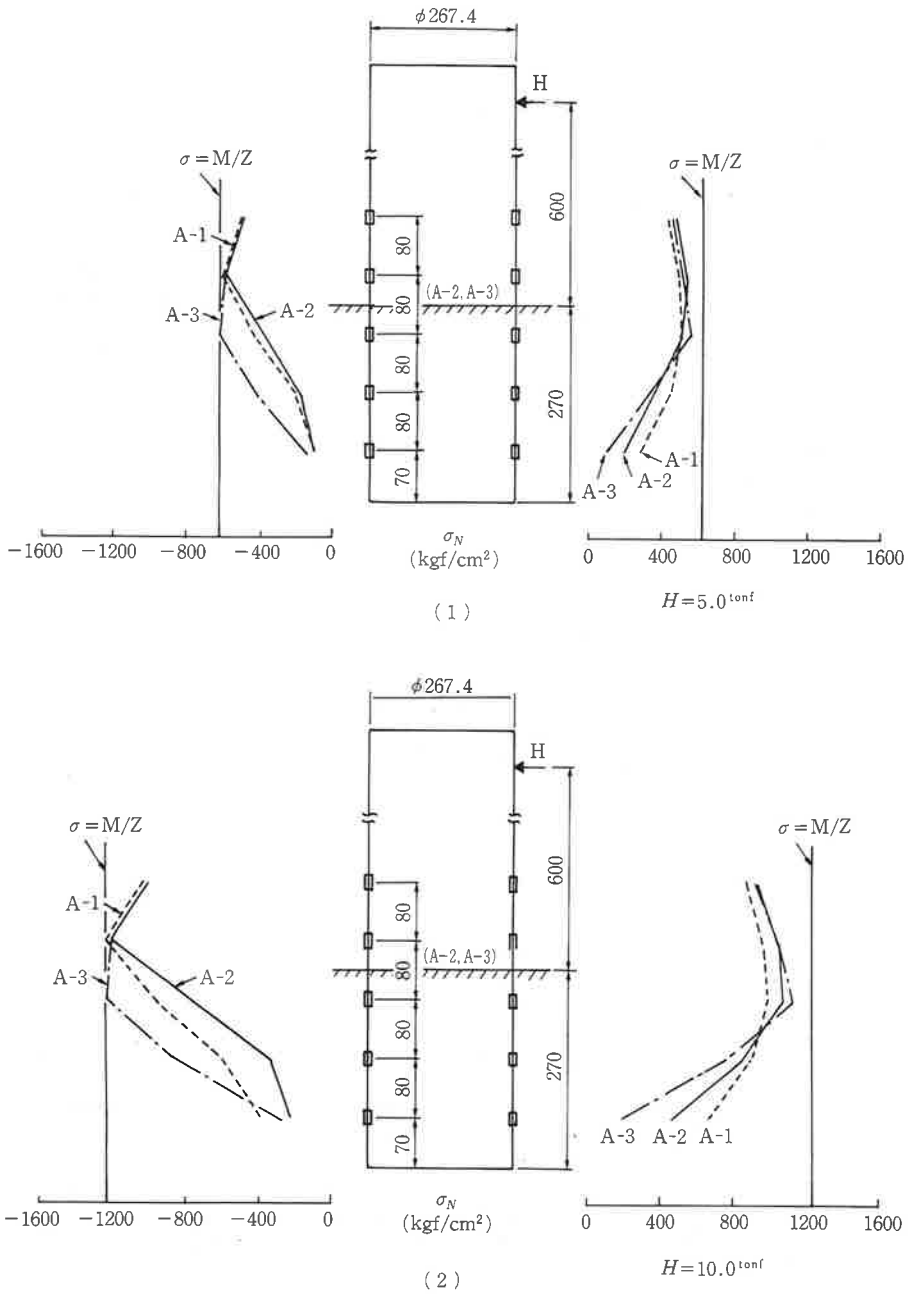


図-22-1 鋼管の軸方向面内応力分布

4. 結 論

鋼管杭基礎の A 方法による杭頭固定方法に

関する水平荷重およびそれによるモーメントに対する実験から次の点が明らかになった。

(1) 鉛直荷重の場合と同様に水平荷重に対

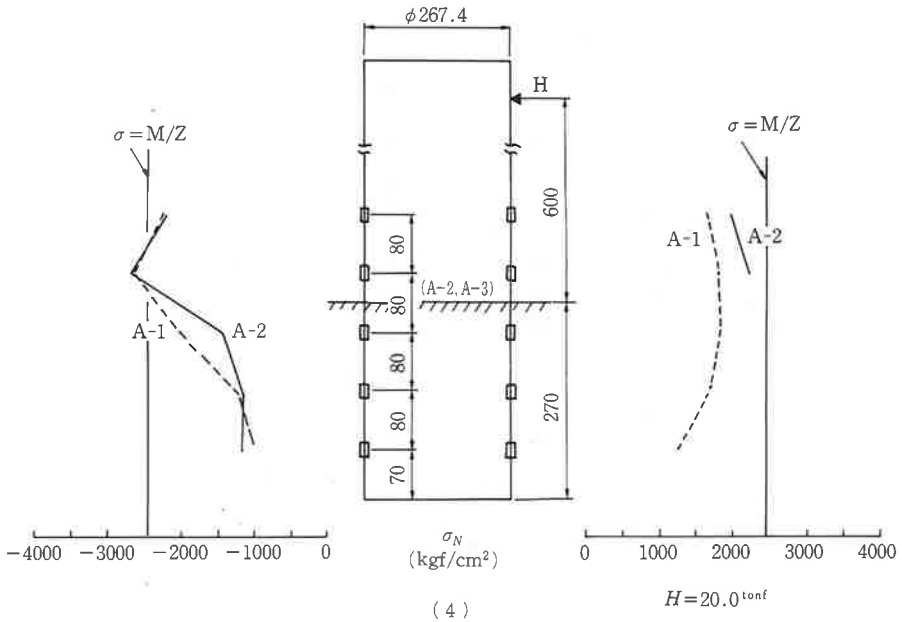
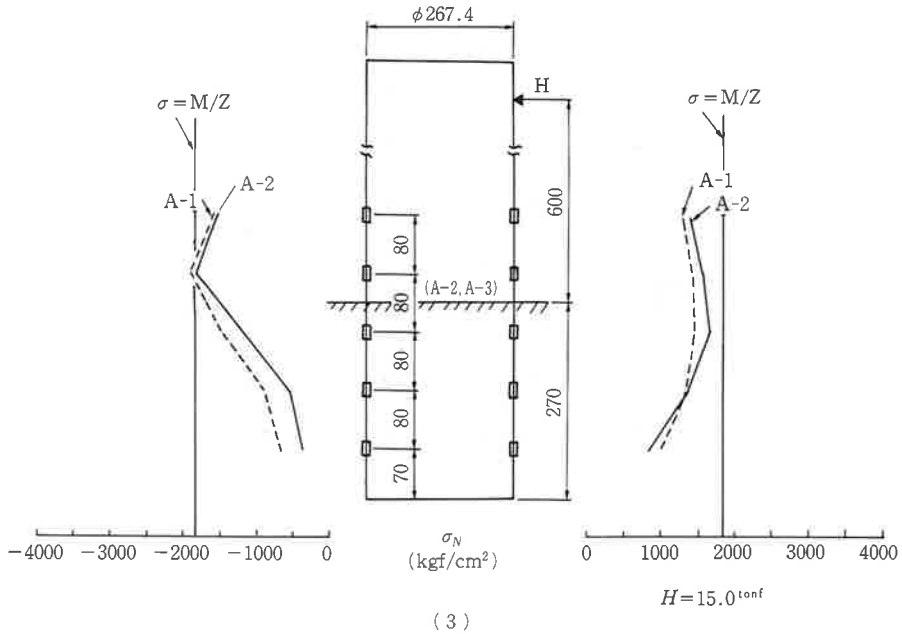


図-22-2 鋼管の軸方向面内応力分布

しても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は、せん断力の伝達に重要な役割を果たしている。

(2) 伝統的に用いられていた杭頭の天蓋の水平荷重に対する効果は中詰コンクリートと比べて相対的に小さいので、その必要性は認めら

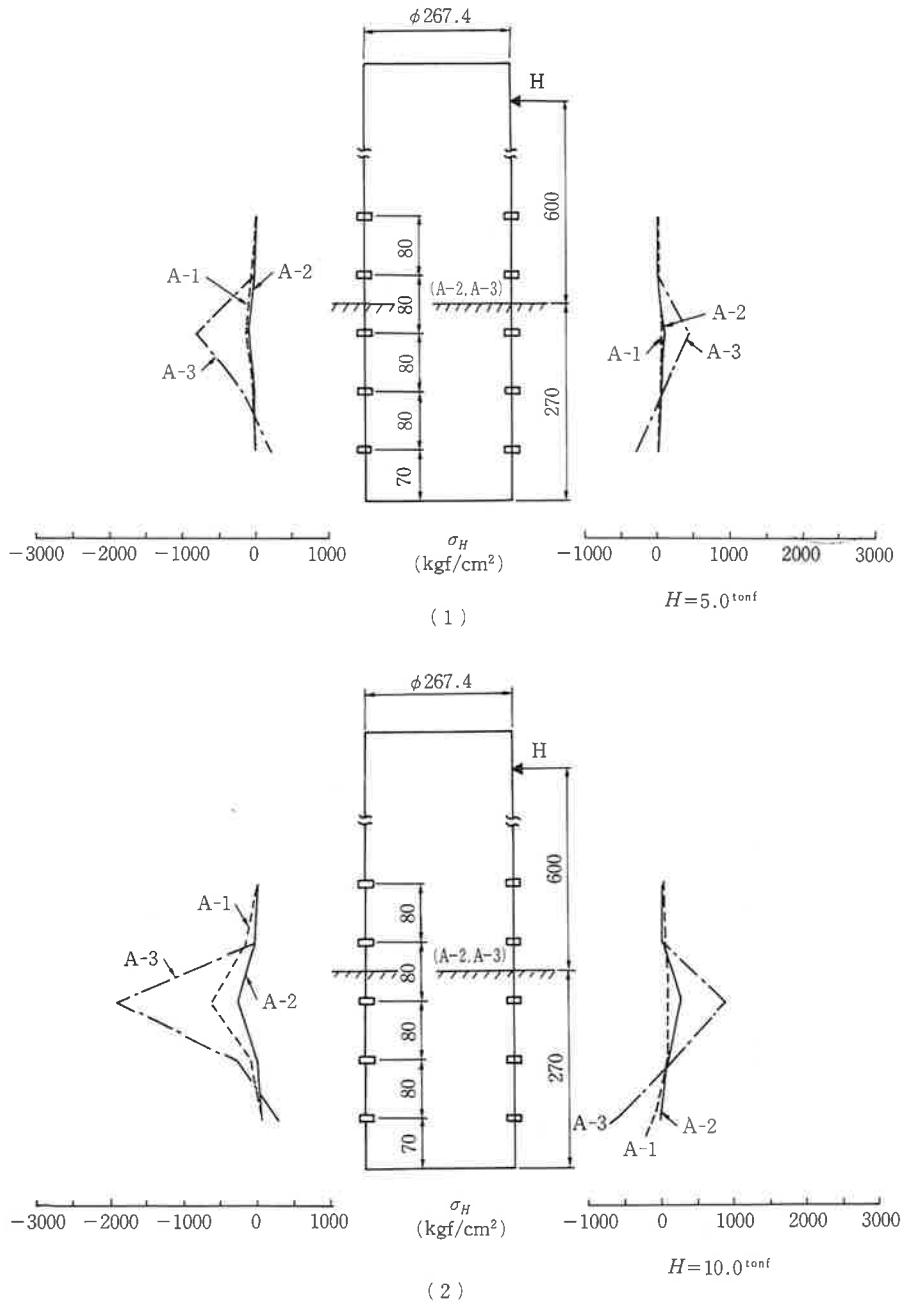


図-23-1 鋼管の周方向面内応力分布

れない。

(3) 水平荷重およびモーメントによる破壊は鋼管杭本体で生ずるものではなく、いずれも

フーチングの圧縮破壊、引張亀裂破壊であることから杭頭付近のフーチングの補強とともにフーチング自体のせん断、曲げに対する耐力の

鋼管杭基礎の杭頭固定法に関する実験的研究 (その3)

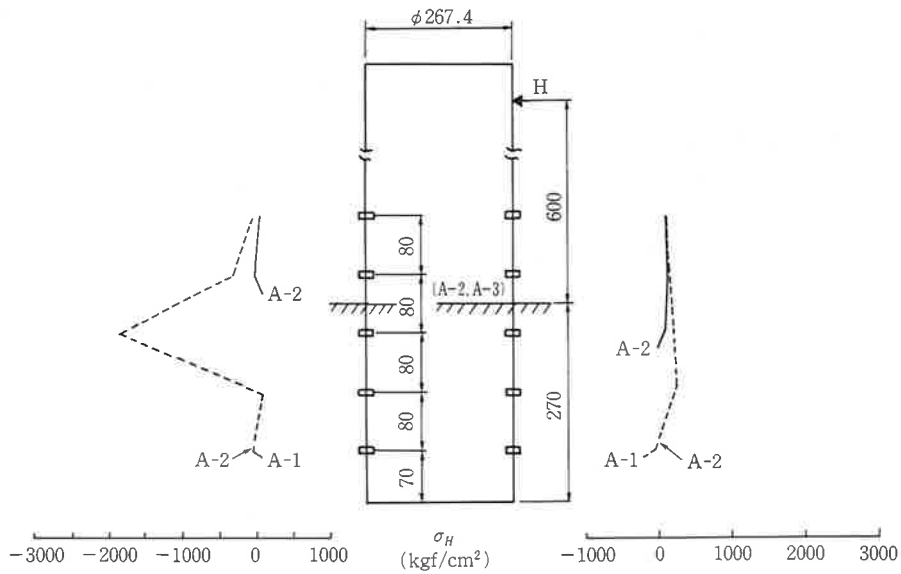
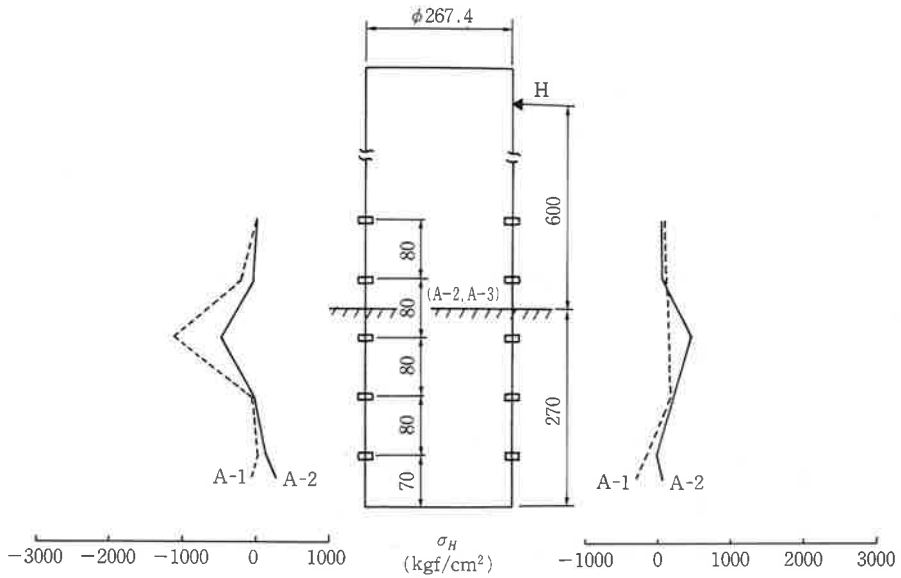


図-23-2 鋼管の周方向面内応力分布

強化が必要である。

(4) 水平荷重に対する杭頭の回転変形は亀裂の発生とともに拡大する。剛結の場合は杭と

フーチングの弾性係数から回転バネを算出できるが、許容設計荷重を越す領域から弾塑性の回転となる。中詰コンクリート等で鋼管が補剛さ

れているとフーチングの破壊まで変形を継続することができる。

(5) フーチングの表面のひずみは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はなりがたい。

(6) 鋼管杭に作用する水平力とモーメントはフーチングのコンクリートで負担されるが、鋼管杭とコンクリートの付着がないと円滑な伝達となされないので中詰コンクリートを用いて杭とフーチングの一体化を図ることが望ましい。

(7) フーチングのモーメントの負担は天蓋を用いた場合は端面の割合が大きくなるが、中詰コンクリートを用いた場合は周面の負担が大きく杭頭端部に向って円滑な低減が図られる。

(8) フーチングの水平力に対する支持機構は図-21 のようなものと考えられる。

(9) 鋼管杭に発生する応力は計算値に近似しており、最大値は最大曲げモーメントの位置と一致する。

(10) 鋼管に発生する応力の面からも中埋コンクリートの施工は円滑な曲げモーメントの伝達、端部までの応力の直線的な低減、円周方向の応力発生抑制などで利点が多い。

以上より A 方法で杭頭部を固定する場合は

中埋コンクリートの施工が望ましく、天蓋の利用は好ましくないことが判明した。

また、中埋コンクリートを利用した固定方法は変形特性、応力の円滑な伝達の観点からも望ましく、今後、採用されるであろう限界状態設計法になじみやすいものである。

更に、B 方法における水平力および曲げモーメントに対する試験の結果と考察は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構築部基礎研究室で行ったものであるが、まとめて発表する機会がなかったため、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) 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) 道路指示方書 IV 下部構造編, 日本道路協会, 1980年5月.