

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

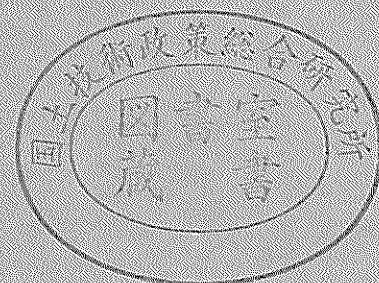
No. 593

Sept. 1987

栈橋に用いられた鋼管杭の腐食状況と残存強度

清	宮	理
千	葉	照
横	田	弘
阿	部	正
		美

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 鋼管杭の腐食状況	4
2.1 施設の概要	4
2.2 腐食状況の概要	4
2.3 残存板厚の測定	4
2.4 表面粗さの測定	6
3. 強度試験	13
3.1 引張り試験	13
3.2 リングの曲げ試験	14
3.3 鋼管杭の曲げ試験	18
3.4 スタッドジベルの溶接強度試験	23
4. 結 論	28
参考文献	29

棧橋に用いられた鋼管杭の腐食状況と残存強度

清 宮 理*
千 葉 照**
横 田 弘***
阿 部 正 美****

要 旨

腐食した鋼管杭の補修工法の設計・施工を実施する際、事前に鋼管杭の腐食状況と残存強度との関係を把握しておく必要がある。建設後 20 数年経た棧橋に用いられていた 27 本の鋼管杭を対象に腐食状況を超音波厚み計及び光マイクロ測定器を用いて調べた。この結果、L.W.L.付近では腐食が著しく進行しており板厚が薄くなるだけでなく鋼管表面の凹凸も大きいことが判明した。腐食した鋼管杭より切り出した試験片を用い、引張試験を行った所、鋼材の強度、伸びとも現在のJIS規格を満足していた。また鋼管杭を輪切りにした試験片（リング）による曲げ試験の結果によると腐食鋼管杭の剛性（EI）は、平均残存板厚によって評価して良いことが判明した。

補修工の一工法に鉄筋コンクリート被覆による工法があるが、この際スタッドジベルにより鉄筋コンクリートと鋼管杭とを合成させる。スタッドジベルの腐食鋼管杭への溶接性を引張り試験及び曲げ試験により調べた所、溶接部の板厚の 2 倍以下の軸径のスタッドジベルの場合、溶接部で破断せず、スタッドジベル本体で破壊した。

1. まえがき

港湾構造物の主要な構成材料は、コンクリート、鋼材及び石材である。昭和 30 年代頃から、棧橋や岸壁等の港湾構造物には鋼材が多く用いられるようになった。鋼材の高強度、材質の均一性、施工の容易性、低価格等の長所が採用の主な理由である。運輸省が建設した港湾施設のうち 530 余りの施設では、鋼管杭、鋼矢板等として鋼材が使用されている。

しかし、建設後長期間経た鋼管杭の一部では、海洋環境下で干満帯を中心に腐食が著しく進行している状況が発見された。施設の機能の保持や安全性の観点から問題が顕在化している。特に腐食が著しく進行し、棧橋の上部工が大きく沈下した施設では、施設の取壊しと再建設が行われている。しかし、現施設の利用状況、将来の港湾整備計画、再建設の費用等の周辺状況を勘案した上で、現施設に補修を施すことにより十分機能を保持できる施設も多い。

補修工法に関しては、既に何種類かの工法が提案され

ている。いずれの工法も実績が乏しく設計・施工法も確立している状況ではなかった。しかし事態の緊急性と重大性から、補修工法に関して、(財)沿岸開発技術研究センターが中心となって現有の情報をとりまとめ、港湾鋼構造物補修マニュアル¹⁾の発刊に至っている。このマニュアルでは、①補修工の基本的な考え方、②鋼構造物の腐食レベルの評価、③補修工法の設計・施工についてとりまとめている。補修工法としては、主に鉄筋コンクリート被覆工法と鋼板溶接工法が紹介されているが、現在のところは、鉄筋コンクリート被覆工法が良く採用されている。鉄筋コンクリート被覆工法では、腐食した鋼管杭にスタッドジベルを溶接し、鉄筋コンクリート柱と鋼管杭とを合成して失われた構造強度を回復させる。この補修工の強度や耐久性については十分な知見が得られておらず、残された課題も多い。ここでは、鋼管杭の腐食の状況（特に残存板厚）、鋼材の残存強度、及びスタッドジベルの腐食鋼管杭への溶接性能の把握に着目した。これらの情報は、補修工法の設計・施工時の基礎資料となるが、前述のとおり知見の集積は十分ではない。そこ

* 構造部 沈埋構造研究室長

** 構造部 沈埋構造研究室

*** 構造部 主任研究官（複合構造担当）

**** 構造部 主任研究官（防食担当）

でこれらの情報に関して、現地から採取した 27 本の腐食した鋼管杭を用いて調査・研究を行ったので、これらの結果について述べる。

2. 鋼管杭の腐食状況⁴⁾

2.1 施設の概要

本資料に使用した鋼管杭を採取した栈橋の概要を図-1に示す。同栈橋は、昭和30年代後半から昭和40年代前半にかけて建設され、建設後20年以上経過していた。

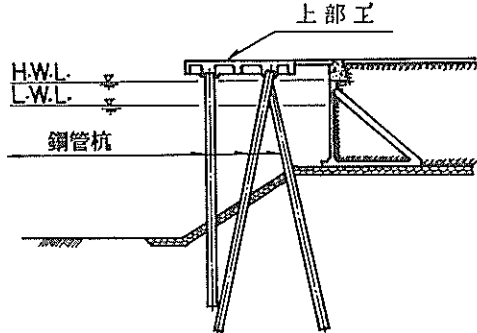


図-1 横栈橋の断面図

栈橋前面の水深は-11mで、栈橋天端は+3.7mであった。H.W.L.とL.W.L.の潮位差は2mである。最大対象船舶は、20,000 D.W.で接岸時及び地震時に上部工に作用する水平力に対して組杭で抵抗する構造となっていた。

鋼管杭は、外径700mm、初期板厚は9mmあるいは12mmで、材質がSTK41であった。鋼管杭の根入れ水深は、-16m~-20mであった。鋼管杭には、上部工から+1.0mまでコンクリートが中詰されていた。

2.2 腐食状況の概要

鋼管杭は、全長175m、幅9mの栈橋の下部工として用いられ、杭の列数が36列であった。このうち9列から鋼管杭を採取した。各列は一本の直杭と二本の斜杭の計3本の鋼管杭より構成されていた。採取した27本の鋼管杭の寸法等の諸元を表-1に示す。表中のAは、海側の最前列の鋼管杭(直杭)、Bは組杭の海側の鋼管杭、Cは組杭の陸側の鋼管杭を各々示している。

鋼管杭を切断した位置は、L.W.L.より上側数10cmと海底面付近で、杭長は4.55~7.20mの範囲である。

採取した鋼管杭には、L.W.L.付近にふじつぼ等の生物が付着しており、図-2に示すように腐食により板厚が薄くなり、局部的に孔があいているものも相当数あった。孔があいている鋼管杭では、鋼管杭の内部でさびこぶが多数できており、腐食が進行していた。ただし、孔が無い鋼管杭では、内部での腐食の進行がほとんどなく、

表-1 腐食鋼管杭の一覧

鋼管杭番号	初期板厚(mm)	切断面の高さ(m)	杭長(m)
1-A	12	L. W. L. + 0.72	7.15
1-B	12	L. W. L. + 0.80	5.60
1-C	12	L. W. L. + 0.74	4.60
2-A	12	L. W. L. + 0.75	7.20
2-B	12	L. W. L. + 0.64	5.40
2-C	12	L. W. L. + 0.62	4.50
3-A	12	L. W. L. + 0.63	6.65
3-B	12	L. W. L. + 0.77	5.40
3-C	12	L. W. L. + 0.76	4.55
4-A	12	L. W. L. + 0.79	6.60
4-B	12	L. W. L. + 0.70	5.30
4-C	12	L. W. L. + 0.74	4.80
5-A	9	L. W. L. + 0.82	6.80
5-B	9	L. W. L. + 0.80	5.40
5-C	9	L. W. L. + 0.64	4.75
6-A	9	L. W. L. + 0.61	6.95
6-B	9	L. W. L. + 0.77	5.55
6-C	9	L. W. L. + 0.67	4.95
7-A	9	L. W. L. + 0.80	6.30
7-B	9	L. W. L. + 0.72	5.60
7-C	9	L. W. L. + 0.62	5.05
8-A	9	L. W. L. + 0.14	6.15
8-B	9	L. W. L. + 0.75	5.60
8-C	9	L. W. L. + 0.71	5.10
9-A	9	L. W. L. + 0.62	5.66
9-B	9	L. W. L. + 0.68	5.80
9-C	9	L. W. L. + 0.57	5.10

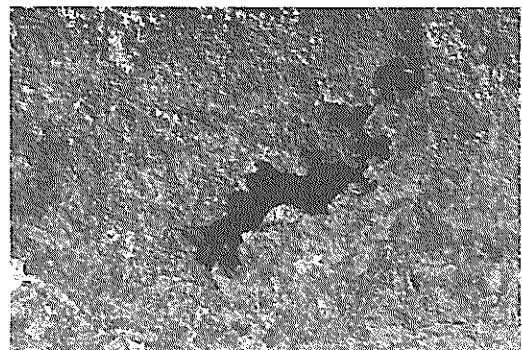


図-2 腐食孔の状況

黒さびの発生に限定されていた。

鋼管杭は、鋼板を円筒状に曲げ継目を溶接して製作されていた。また鋼管杭を溶接により継いでいた。さらに4-A及び5-Aの鋼管杭には継手部に補強板を溶接してあった。

これらの溶接部の一部では、図-3に示すように、溶接ビード部に腐食が集中している箇所がいくつかあった。

図-4は、7-A及び8-C鋼管杭の腐食状況を円周方向に展開して示してある。

2.3 残存板の測定^{5), 6)}

残存板厚の測定は、図-5に示す超音波厚み計を用いて行った。測定の対象とした鋼管杭は、表-1中の1-A, 2-A, 3-A, 4-A, 2-B, 及び5-Bの6

本である。測定箇所を図-6に示す。±0.0mから-1.8mまでを20cm間隔に、-1.8m以深を100cm間隔に測定を行った。各測定の深さは、上端よりA, B, ……Nと番号付けした。各測定深さで、鋼管杭の円周方向に16等分した各位置で測定を行った。鋼管杭の海側を1とし、時計回りに16と番号付けした。腐食鋼管杭の表面

に測定箇所のけがきを行い、周辺に付着している生物、錆等をジェットタガネで取除き、その後ディスクサンダーにより測定箇所の鋼材を平滑化した。1測定箇所当り、5回超音波厚み計で板厚を測定し、その箇所での残存板厚は、これら5回の測定値の平均値と設定した。

図-7に6本の鋼管杭の各測定深さでの16点の板厚測定値の平均腐食量と標準偏差の分布を示す。腐食量は、5-B以外の鋼管杭で、-1.6m以浅で、5~7mmと大きい値となっていた。

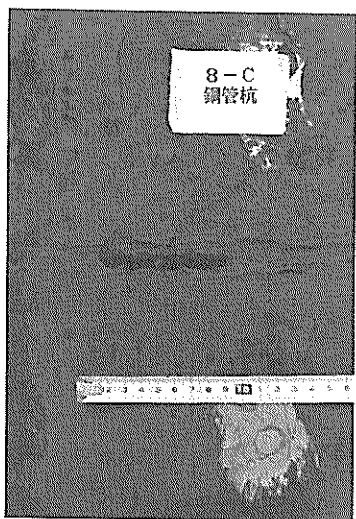


図-3 溶接部での腐食状況

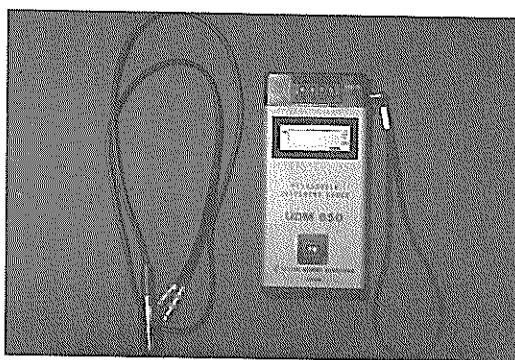


図-5 超音波厚み計

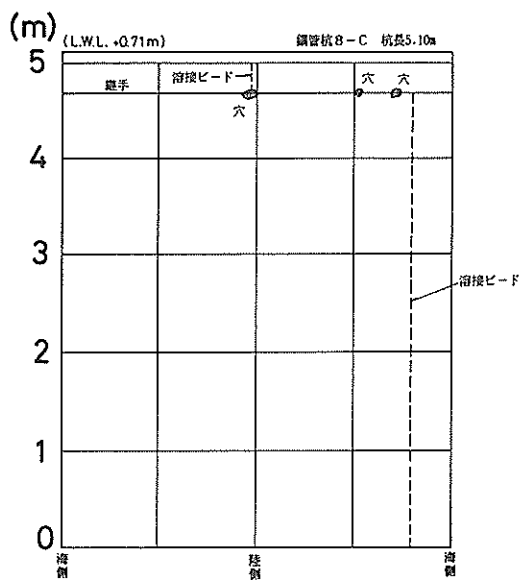
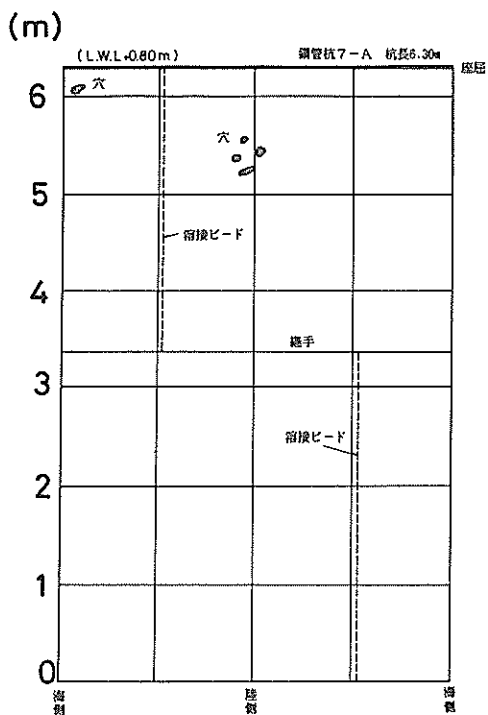


図-4 腐食状況の展開図

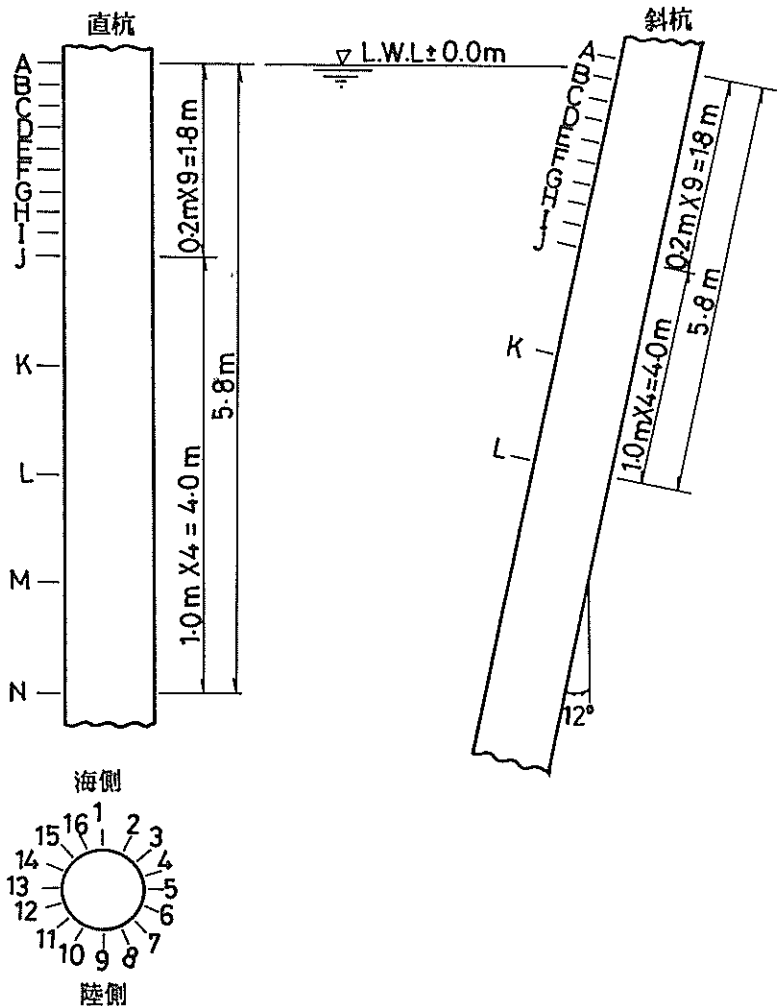


図-6 残存板厚の測定位置

建設後の経過年数から一年当りの平均腐食速度を推定すると、 $0.2 \sim 0.3 \text{ mm/年}$ であった。ただし孔のあいている箇所での平均腐食速度はこの値よりも大きいと推定される。また標準偏差の値も大きく、腐食量がある特定の測定深さで一様でなかったことが分かる。一方-2m以深では、腐食量は、2mm以下である。平均腐食速度も 0.1 mm/年 以下で腐食の進行が遅いことが分かる。また標準偏差も1.0mm以下であり、鋼管杭表面の凹凸が少なかった。

図-8に、腐食量と標準偏差との関係を示す。全般的な傾向として腐食量が大きくなると標準偏差の値は大きくなっている。このことは、腐食が進行するにしたがって、ある箇所全体が一様に腐食するのではなく、従来から指摘されているように、腐食により凹凸が鋼管杭表面

に生じることを示している。

図-9に1-Aの鋼管杭での各深さ毎の円周方向の腐食量の分布を示す。図中でA~Jの範囲では、円周方向に腐食量はかなり異なることが分る。この鋼管杭の例では、番号9付近の陸側の方が番号1付近の海側よりも腐食量が小さくなる傾向が見られた。他の鋼管杭では、必ずしも海側の方が腐食量大きいと断定は出来ないが、概して海側の方が腐食量大きい傾向が見受けられた。図中でK~Lの範囲では、円周方向に腐食量は、ほぼ同一と考えて良く、海側と陸側とで腐食量に大きな差はなかった。

2.4 表面粗さの測定

(1) 表面粗さ

2.3で述べた腐食量の状況は、超音波厚み計による測

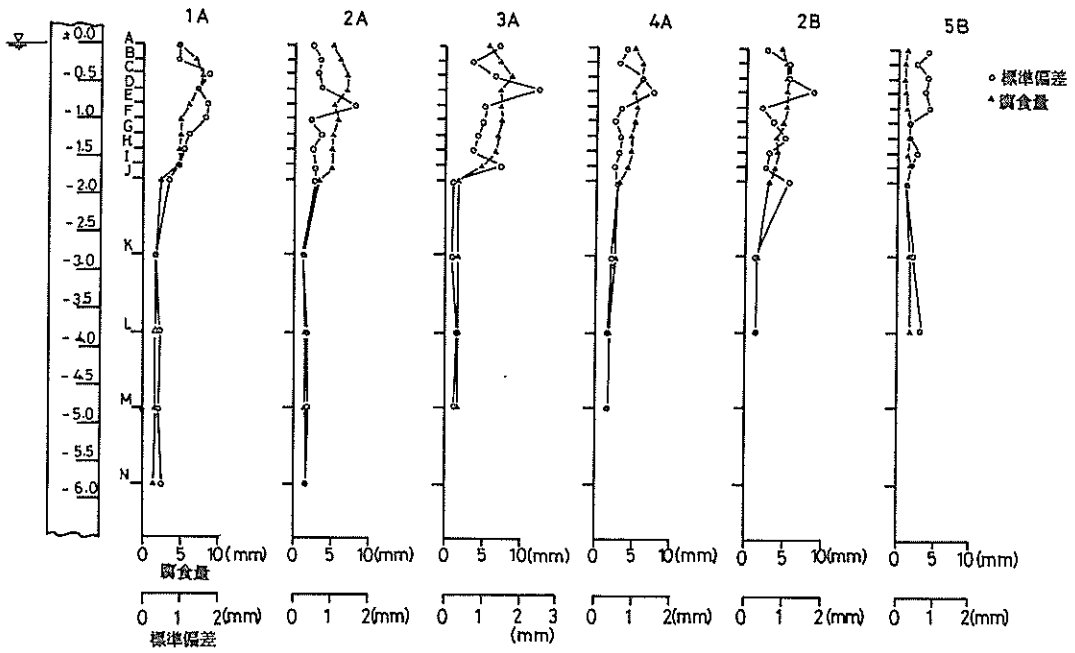


図-7 腐食量と標準偏差の分布

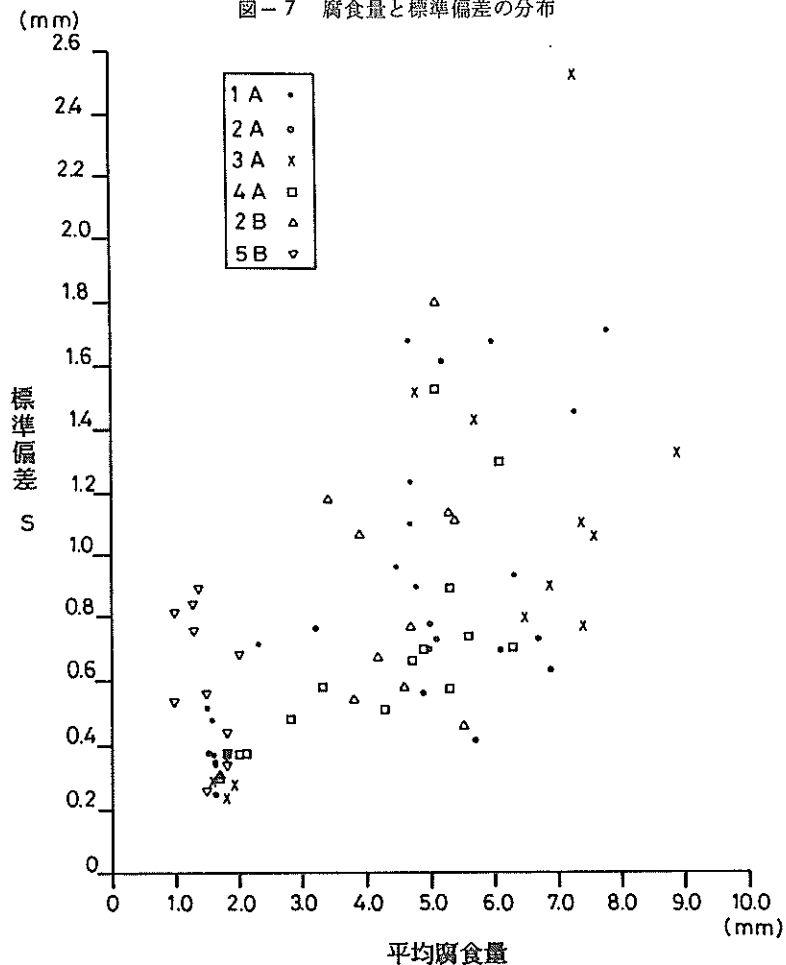
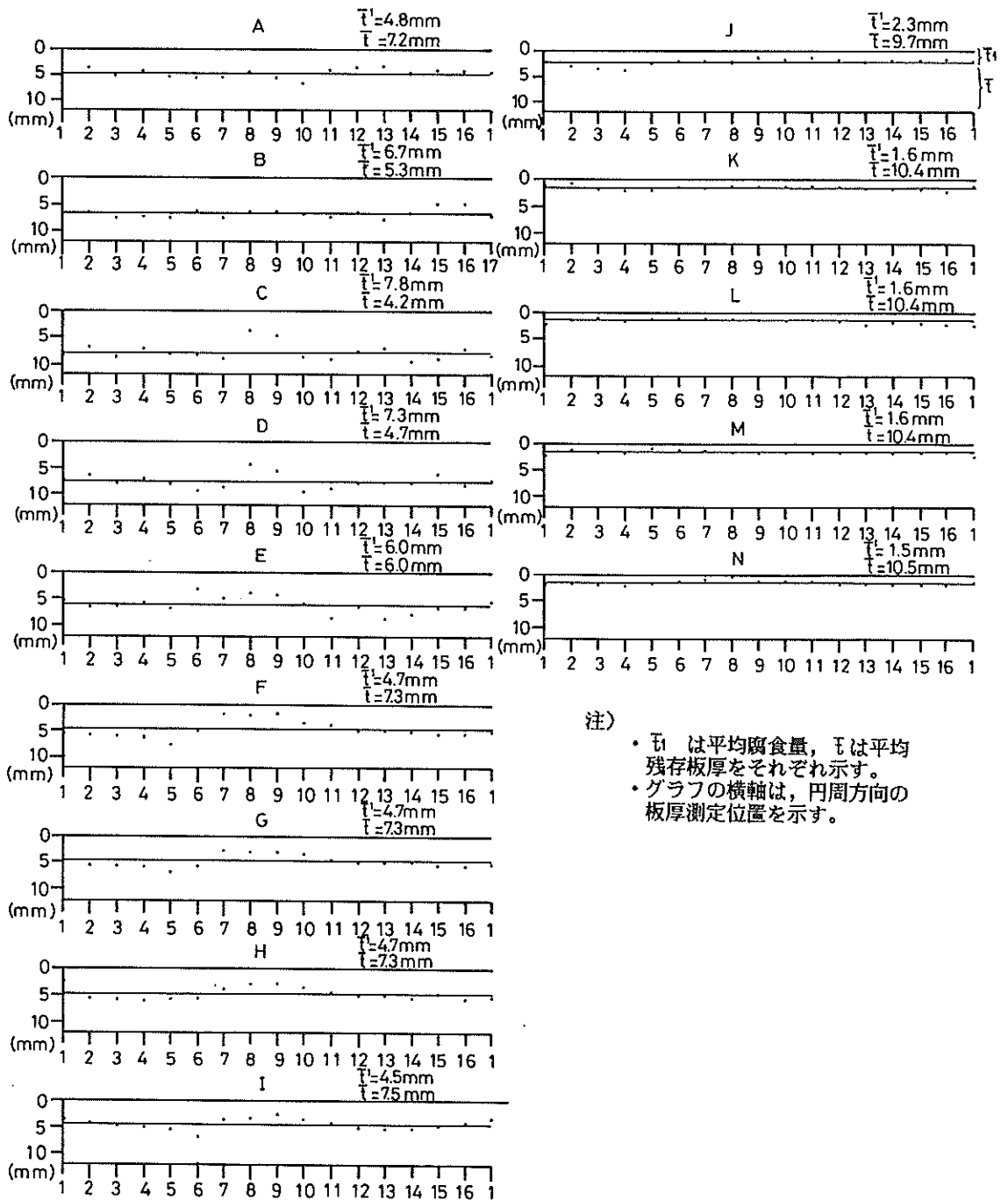


図-8 腐食量と標準偏差の関係 (超音波厚み計)



注)

- \bar{t} は平均腐食量, t は平均残存板厚をそれぞれ示す。
- グラフの横軸は、円周方向の板厚測定位置を示す。

図-9 円周方向の腐食量分布 (鋼管杭1-A)

定結果をもとにしている。腐食の概略を把握するには十分であるが、ここでは、光マイクロ測定器を用いて更に詳細な腐食状況を把握する。ここでは、鋼管杭の表面の腐食状況を表面粗さととらえて、整理を行う。

「JIS B 0601-1982 表面粗さの定義と表示」では、工業製品の表面粗さの程度を、中心線平均粗さ (R_a)、最大高さ (R_{max}) 及び十点平均粗さ (R_z) で表示している。

① 中心線平均粗さ (R_a)

図-10 に中心線平均粗さの概念を示す。鋼管杭の表

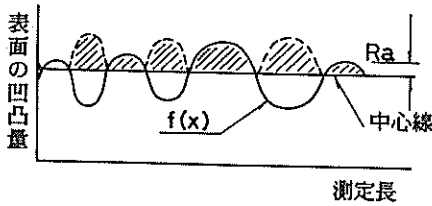


図-10 中心線平均粗さの概念

面の凹凸を曲線 $f(x)$ で表示する。曲線 $f(x)$ と中心線で囲まれる面積を測定長 (L) で除した値を中心線平均粗さとする。

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |f(x)| dx \quad (1)$$

なお中心線は、中心線より上側の山と下側の谷での、それぞれの面積の和が等しくなるように求める。

② 最大高さ (R_{max})

図-11 に最大高さ (R_{max}) の概念を示す。測定長内での山の最大値と谷の最小値との差を R_{max} とする。

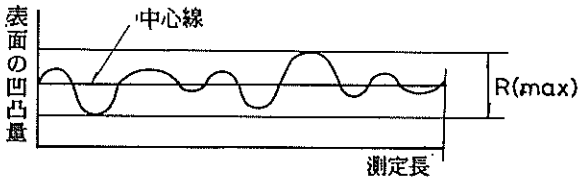


図-11 最大高さの概念

③ 十点平均粗さ (R_z)

図-12 に十点平均粗さ (R_z) の概念を示す。測定長内で、山の高さの大きい方から5個の値と谷の高さの小さい方から5個の値を取り出し次式で求める。

$$R_z = \frac{(h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5) - (h_6 + h_7 + h_8 + h_9 + h_{10})}{5} \quad (2)$$

次に粗さの平均的な大きさは、平均間隔 (S_m) 及び曲

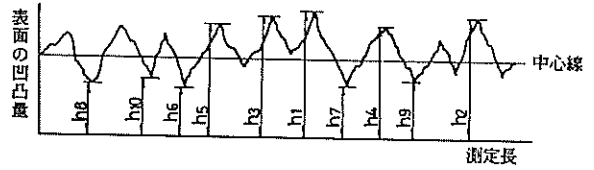


図-12 十点平均粗さの概念

線 $f(x)$ のパワースペクトルで最大値を与える長さで表示できる。

④ 平均間隔 (S_m)

図-13 に平均間隔 (S_m) の概念を示す。測定長の区間で中心線を横切る一波長分の長さ (S_{mi}) の平均値を平均間隔 (S_m) とする。

$$S_m = \frac{\sum_{i=1}^n S_{mi}}{n} \quad (3)$$

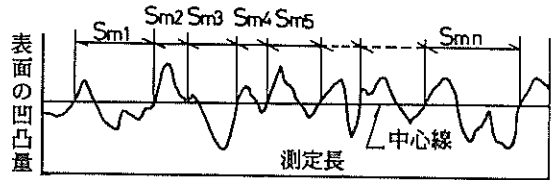


図-13 平均間隔の概念

⑤ パワースペクトル

曲線 $f(x)$ をフーリエ解析し、波長 (凹凸の長さ) 毎のパワースペクトルを計算し、最大のエネルギー密度を示す波長を平均的な凹凸の長さとする。

(2) 測定方法

表面粗さの測定は、図-14 に示す光マイクロ測定器を用いる方法で行った。光マイクロ測定器の原理は、以下のとおりである。レーザービームを照明レンズを通し、細く絞り物体に照射し、反射や散乱したレーザービームを光量検出素子で受ける。物体を移動すると、光の反射点も移動するが、この移動量と物体の凹凸とがほぼ比例することをを用いて、物体の凹凸量を電氣的に検出する。今回用いた光マイクロ測定器の測定容量は 5 mm、精度は $\pm 0.3\% \pm 10 \mu m$ である。この電氣量は、ペンレコーダーに波形として出力される。この波形をデジタル装置を用いて、デジタル化して腐食に関する統計量の計算に用いた。

図-15 に表面粗さ測定用の試験片の採取位置を示す。試験片の採取は、1-B、1-C、2-B、3-B及び5-Cの鋼管杭より各々3個ずつ行った。1個当りの試

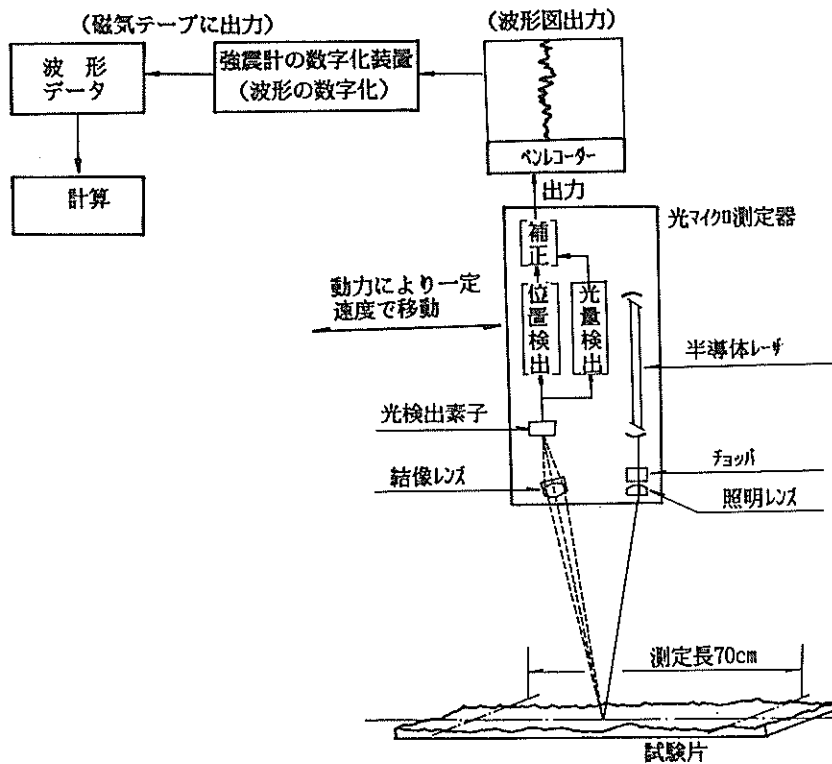


図-14 光マイクロによる測定手順

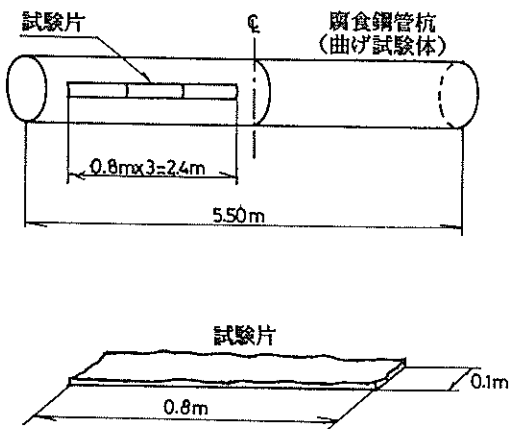


図-15 表面粗さの測定用の試験片

試験片の寸法は、長さが80cm、幅が10cmである。

試験片の板厚測定は、表面の粗さを考慮した平均残存板厚を求めるため、表面粗さの測定を行う始点と終点で超音波厚み計によって行った。光マイクロ測定器による測定長は約70cmで、測定間隔は0.3mmである。

次に測定データの補正について述べる。試験片は、鋼管杭よりガスで切断した。この際、試験片は、若干内側

に反った。また鋼管杭自体も、現地での採取等の時の外力によって若干変形していると考えられる。このように腐食による凹凸以外の試験片自体の変形の影響を取除くため、図-16に示すように腐食量のデータをフーリエ解析し、波長が100mm以上の成分を出来る限り除去し

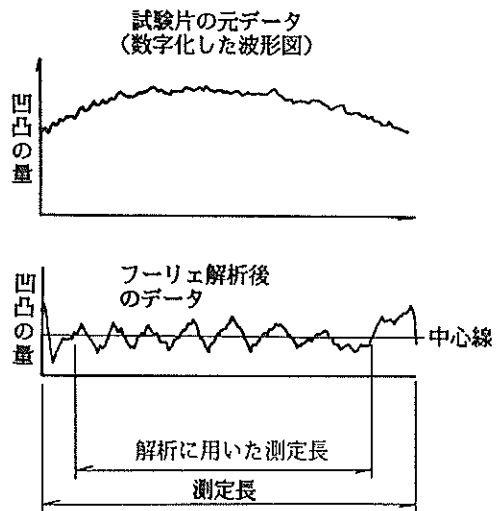


図-16 波形データ補正の概念

(3) 測定結果

た。また測定データを数値化するときに含まれる小さい波長の影響を排除するため、波長が0.5mm以下の成分も除去した。

(1)で示した統計量を求めて一覧にしたものを表-2に示す。また、図-17に1-Cの鋼管杭表面での凹凸の測定値を示す。1C-1の試験片の平均残存板厚は9.51

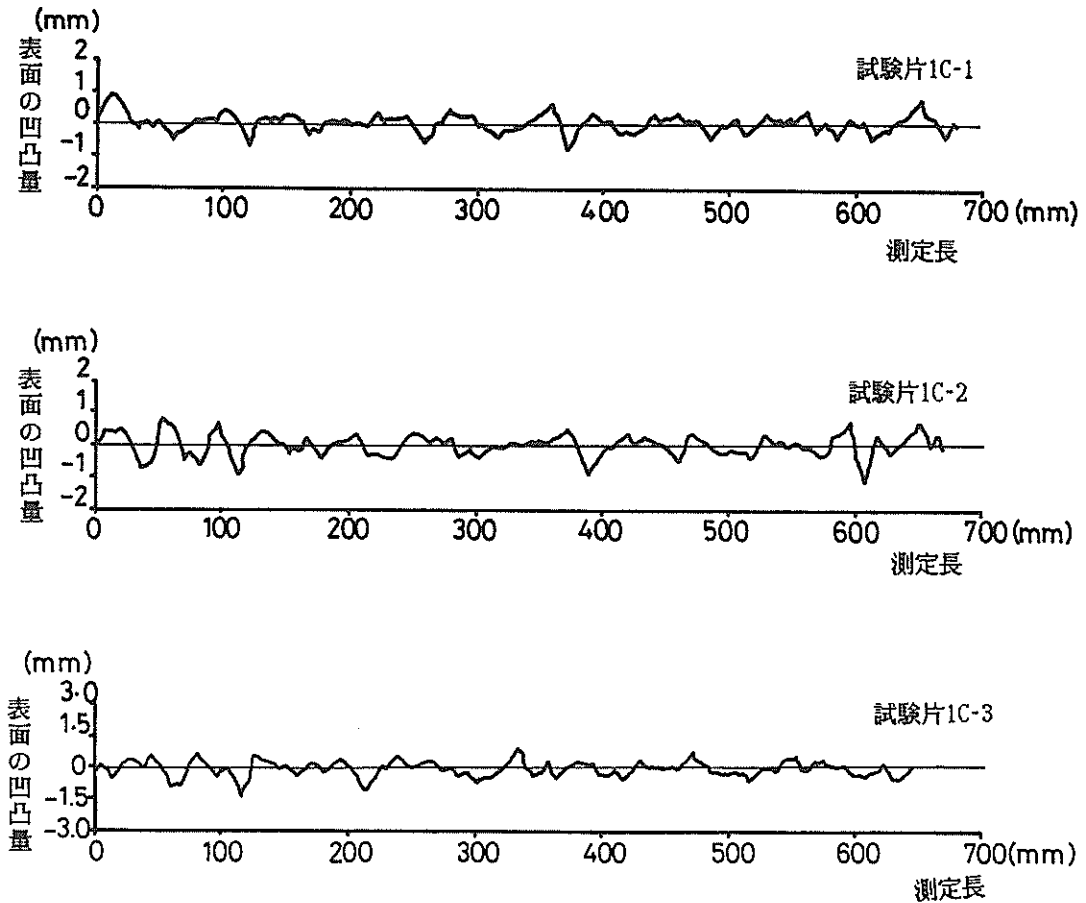


図-17 表面の凹凸測定値(波形データ補正後)

表-2 表面の凹凸の測定結果

(単位; mm)

試験片 番号	板厚測定結果		平均 板厚	有効 測定長	R_a	R_{max}	R_z	S_m	凹凸の 波長
	始点	終点							
1B-1	5.61	6.88	6.26	648.2	1.06	1.99	1.69	31.4	84.0
1B-2	5.80	5.40	5.59	658.6	1.39	2.82	1.88	35.2	68.0
1B-3	7.53	6.24	6.86	653.5	1.68	2.72	1.86	25.4	84.0
1C-1	9.88	9.16	9.51	649.6	0.84	1.62	1.16	34.8	57.0
1C-2	7.67	8.43	8.05	664.8	1.17	1.99	1.58	37.6	57.0
1C-3	7.38	7.72	7.55	641.8	1.37	2.35	1.71	34.2	48.0
2B-1	4.97	6.82	5.90	634.8	0.67	1.44	1.12	26.6	56.0
2B-2	6.10	8.45	7.27	638.0	0.91	1.77	1.44	35.8	86.0
2B-3	8.24	9.99	9.17	655.2	1.10	1.89	1.26	38.2	84.0
3B-1	6.23	6.78	6.51	636.3	0.99	2.27	1.53	27.8	86.0
3B-2	6.19	8.71	7.45	623.7	1.01	1.99	1.56	33.4	115.0
3B-3	9.73	10.35	10.04	640.6	0.71	1.31	0.75	38.4	84.0
5C-1	7.58	6.21	6.89	689.7	1.01	2.32	1.58	30.8	86.0
5C-2	5.66	6.86	6.25	625.8	0.63	1.24	0.86	35.6	86.0
5C-3	6.38	6.36	6.30	615.8	0.48	0.92	0.75	33.0	112.0

mm, 1C-2では, 8.05 mm, 1C-3では7.55 mmであった。凹凸の状況は, かなり不規則な状態であるが, 全体としては, 凹凸が一樣に分布していることがわかる。今回の試験片では, 局部的に腐食が進む, いわゆる孔食の現象は見られなかった。平均残存板厚が小さくなると凹凸の量も大きくなる傾向が見られた。

図-18 に中心線平均粗さと平均腐食量との関係を示す。ここで平均腐食量とは, 試験片での超音波厚み計による板厚測定から得られた平均的な腐食量を示している。

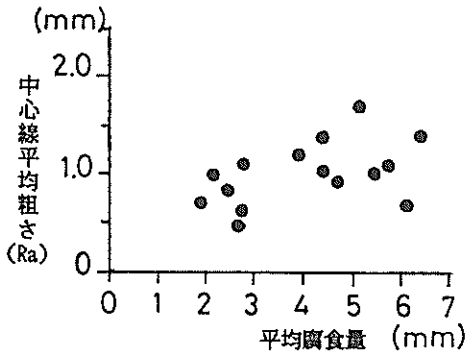


図-18 中心平均粗さと平均腐食量

同図に示す通り, 各試験片での中心線平均粗さは, 0.48 ~ 1.68mmの範囲にあり, 平均腐食量が大きくなるにしたがって中心線平均粗さの値も大きくなった。図-19 に最大高ささと平均腐食量との関係を示す。最大高ささは, 0.92 ~ 2.82mmの範囲にあり, 最大高ささと平均腐食量がほぼ比例関係にあった。前述したとおり, 孔食によって一箇所に集中腐食が生じているのは, 今回測定されなかった。

図-20 に十点平均粗さと平均腐食量との関係を示す。十点平均粗さは0.75~1.88mmの範囲内にあり, ほぼ中心

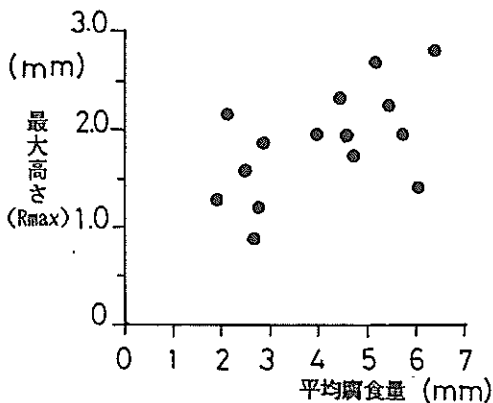


図-19 最大高ささと平均腐食量

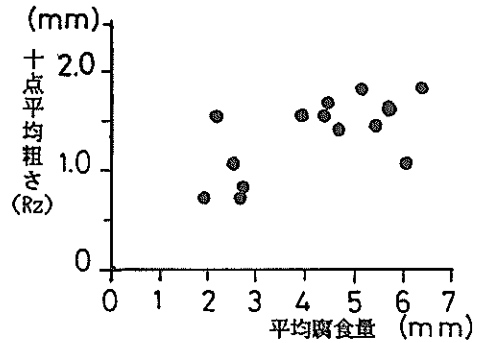


図-20 十点平均粗さと平均腐食量

線平均粗さと同程度の粗さの値を示していた。

以上の3種類の粗さの指標に示すように, 粗さの指標は, 平均腐食量とほぼ比例することがわかった。

図-21 には平均間隔と平均腐食量との関係を示す。平均間隔の範囲は, 25.4~38.4mmであり, 平均腐食量によらずほぼ一定の範囲にあった。このことは, 腐食量の進行にともなって凹凸量は, 増大していくが凹凸の長さ, は, さほど変化しないことを示している。

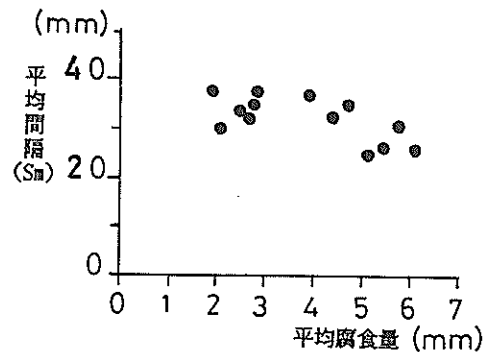


図-21 平均間隔と平均腐食量

図-22 に試験片の凹凸測定値のパワースペクトルを示す。図-17 に示した1-C鋼管杭の凹凸測定値のパワースペクトルは, 40~50mmの凹凸の波長が卓越しており, 20~30mmの凹凸の波長のエネルギー密度は, さほど大きい値でなかった。他の試験片の凹凸測定値のパワースペクトルでも50~100mmの凹凸の波長が卓越していた。すなわち, 腐食の凹凸には, 図-13 に示す平均間隔 (S_m) の手法で得られる20~30mmの波長の微細な凹凸以外にも大きい波長の凹凸が存在することがわかる。

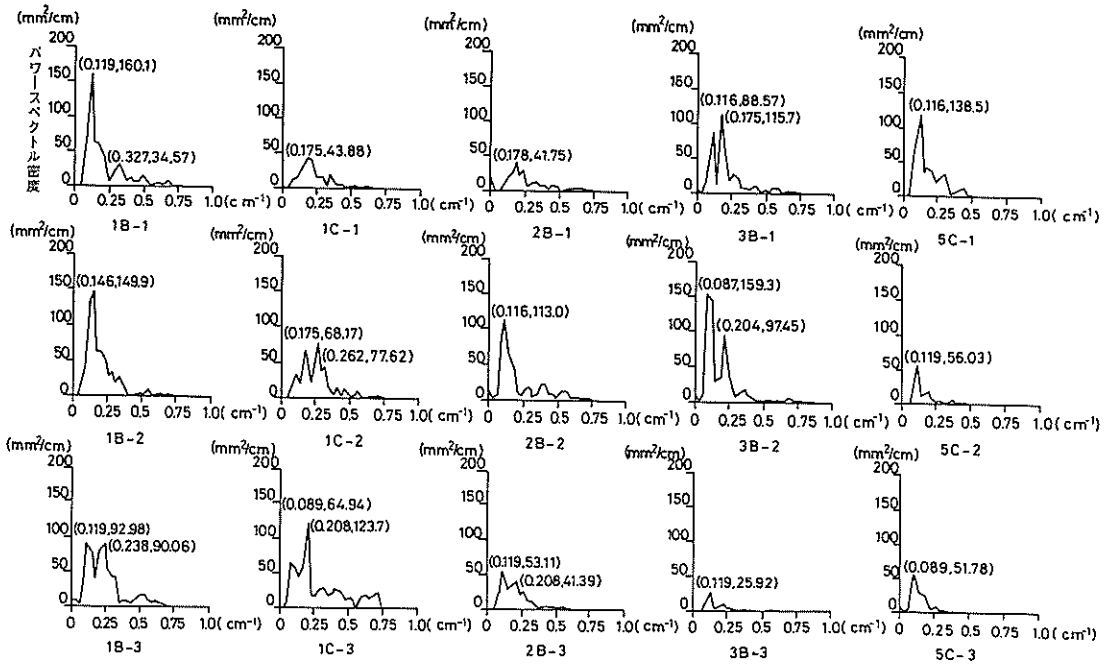


図-22 凹凸の波長

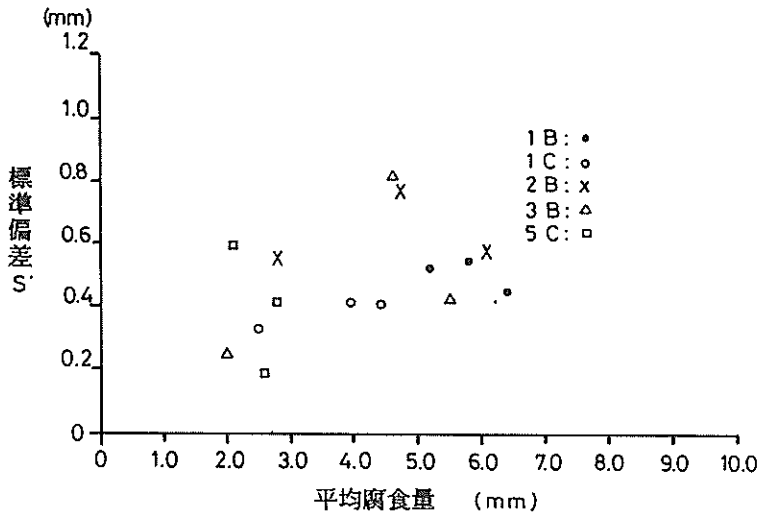


図-23 腐食量と標準偏差の関係 (光マイクロ測定器)

図-23 に光マイクロ測定器での測定から得られた平均腐食量と標準偏差の関係を示す。標準偏差は腐食量とほぼ比例関係にあった。図-8 では、超音波厚み計による標準偏差を示したが、図-23 に示す光マイクロ測定器による標準偏差と両者がほぼ同じ傾向を示していた。光マイクロ測定器による凹凸の測定の方が、超音波厚み計よりも精度良いと考えられるが、今回の測定では、両者の測定法に関して標準偏差で有意な差は見られなかった。

3. 強度試験⁷⁾

3.1 引張り試験

鋼管杭より 20 本の引張り試験用の試験片を採取した。引張り試験片は JIS Z 2201 1号で、平行部の長さが 225mm、幅 50mm、標点距離 200mm、肩部の半径 25mm である。試験片は、溶接箇所を避けて製作し、かつ試験片表面に腐食孔及び錆が残らないよう研磨を行っ

た。引張試験後の試験片の状況を図-24に示す。引張り試験の結果を表-3に示す。試験片の平均値の降伏応力は、 28.9 kgf/mm^2 、引張強度は 46.5 kgf/mm^2 及び伸びは 27.7% であった。鋼管杭の材質は、JIS G3444 STK 41 であり、JIS 規格値（降伏応力度 24 kgf/mm^2 以上、引張強度 41 kgf/mm^2 以上、伸び 23% 以上）をいずれも満足していた。



図-24 引張り試験片の破断状況

また引張試験片にひずみゲージを貼り、載荷時のひずみを計測した。この計測結果を基に得られた、引張試験片のヤング率は、約 $1.9 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比は、約 0.29 であった。

3.2 リングの曲げ試験

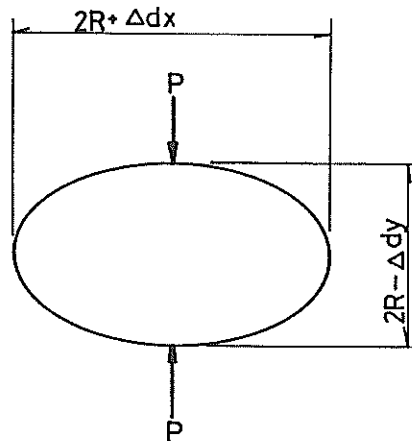
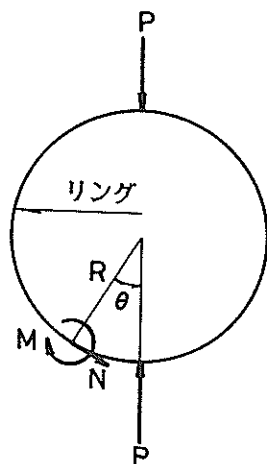


図-25 リングの曲げの概要

表-3 引張試験の結果

試験片番号	降伏応力 (kgf/mm^2)	引張強度 (kgf/mm^2)	のび (%)
A-1	30.4	50.4	23.9
A-2	31.8	50.6	21.4
A-3	32.1	49.9	23.8
A-4	29.6	49.2	33.2
A-5	30.7	50.4	27.6
A-6	29.8	42.3	37.5
A-7	29.6	43.5	26.1
A-8	28.3	42.9	32.0
A-9	27.4	43.5	30.5
A-10	25.4	41.3	31.6
B-1	30.2	50.6	28.1
B-2	28.7	50.3	29.8
B-3	30.7	50.2	20.1
B-4	29.5	48.7	25.9
B-5	30.3	51.4	21.5
B-6	27.4	41.6	30.8
B-7	28.0	43.5	28.9
B-8	26.6	43.1	24.5
B-9	26.3	43.3	25.9
B-10	26.0	42.3	31.7
平均	28.9	46.5	27.7

(1) リングの曲げ

均一な板厚の鋼管杭の断面性能 (EI , EA) は、容易に求まる。腐食が進行した鋼管杭では、板厚が場所毎に異なる。したがって、鋼管杭のある一横断面での断面性能を求める際、どの板厚を用いるのが良いのか不明である。そこで超音波厚み計による板厚測定により求められる、最大板厚、最小板厚等の指標のうち、どの板厚を用いるか、リングの曲げ試験によって調べた。

板厚が均一なリングに、相対する2点集中荷重が作用する場合の変形状況を図-25に示す。板厚がリングの半径よりかなり小さく、応力・ひずみが弾性範囲内にある場合のリングに与えられる曲げモーメント (M) と外径

の変化量 (Δd_θ) は、次式で求まる。

$$\left. \begin{aligned} M &= PR \left(0.3183 - \frac{1}{2} \sin \theta \right) \\ \Delta d_\theta &= -\frac{PR^3}{EI} \left(\frac{1}{2} \sin \theta + \frac{\pi - 2\theta}{4} \cos \theta - \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \right\} (4)$$

ここに

P : 載荷荷重

I : リングの断面二次モーメント ($I = \frac{b t^3}{12}$,

b : リングの幅, t : 板厚)

E : リングのヤング係数

R : リングの半径

また、図-25に示す直径の水平変化量 (Δd_x) 及び直径の鉛直変化量 (Δd_y) は次式で得られる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta d_x &= 0.137 \frac{PR^3}{EI} \quad (\theta = \pm \pi/2) \\ \Delta d_y &= -0.149 \frac{PR^3}{EI} \quad (\theta = 0, \pi) \end{aligned} \right\} (5)$$

載荷試験により載荷荷重 (P) と直径の鉛直変化量 (Δd_y) の関係を把握できれば、式(5)を用いてリングの断面二次モーメントを求め板厚を計算できる。

(2) 試験方法

リングは、図-26に示すように、鋼管杭の腐食の進行した部分 (L.W.L. ~ 1.4mの範囲) より、幅5cm毎にガスにより切断して製作した。製作本数は、

8本である。リングの端部は、グラインダーにより板幅が一様になるよう研磨を行った。

各リングの円周方向の16箇所超音波厚み計を用いて板厚測定を行った。超音波厚み計での板厚の測定では、各箇所5回ずつリングの外側と内側とから測定を行った。

図-27にリングの曲げ試験の概要を示す。リングには、油圧ジャッキで、約15kgf刻みで単調載荷を行った。リングの4箇所に変位計を取付け、リングの変形を測定するとともに、ひずみゲージ12枚をリングに貼り、ひずみ量の測定を行った。曲げ試験では、載荷荷重が増

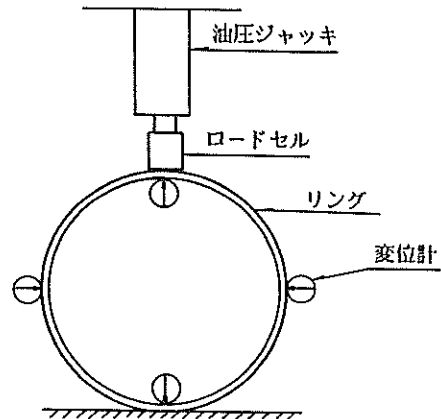


図-27 リングの曲げ試験状況

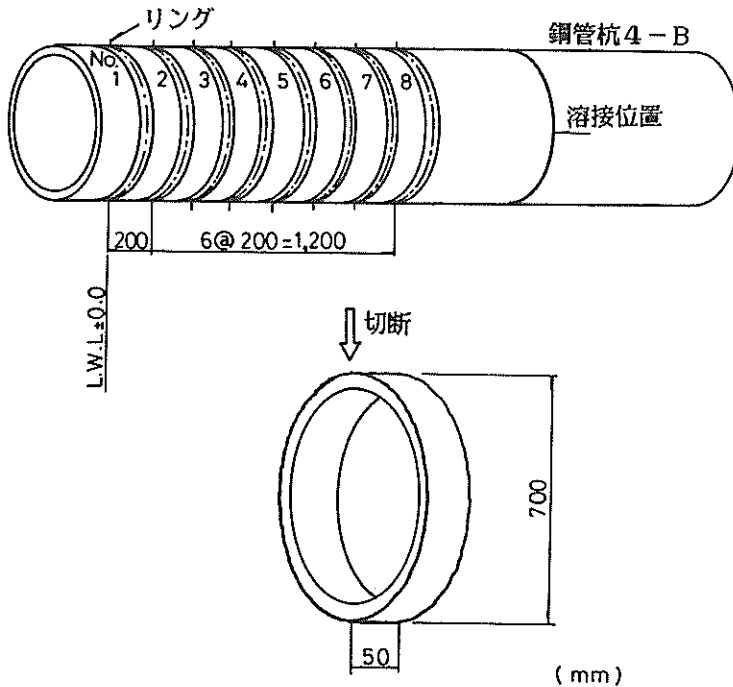


図-26 リング製作

加しない状態まで载荷を行った。

(3) 試験結果

表-4に、リングの平均残存板厚を示す。超音波厚み計の外側よりの測定と内側よりの測定では、平均残存板厚がほぼ同一であった。

表-4 リングの平均残存板厚測定結果

リング番号	超音波厚み計の測定結果	
	外側から測定	内側から測定
No. 1	4.85 mm	4.83 mm
No. 2	3.45 mm	3.44 mm
No. 3	4.14 mm	4.18 mm
No. 4	4.73 mm	4.71 mm
No. 5	4.96 mm	4.98 mm
No. 6	5.86 mm	5.88 mm
No. 7	6.19 mm	6.21 mm
No. 8	6.25 mm	6.21 mm

図-28にNo. 1~No. 4のリングでの試験結果を示す。直径の変化量は、鉛直方向 (Δd_y) である。载荷荷重が原点から10~30 kgfの範囲では、载荷荷重と直径の変位量とがほぼ直線的であった。

図中には、式(5)を用いて計算できる $P \sim \Delta d_y$ との関係を示している。三本の直線があるが、リングの板厚として、超音波厚み計で測定された、最大板厚、平均板厚及

び最小板厚により計測された $P \sim \Delta d_y$ の関係を各々示している。 $P / \Delta d_y$ から断面二次モーメントを計算しその後リングの板厚を求めることができる。

試験結果で载荷荷重の小さい範囲(弾性的挙動を示す範囲)では、試験結果から得られた $P / \Delta d_y$ は、最大板厚での $P / \Delta d_y$ と最小板厚での $P / \Delta d_y$ の範囲内にあることがわかる。わずかではあるが、試験結果の $P / \Delta d_y$ は平均板厚での $P / \Delta d_y$ よりも大きかった。

図-29に载荷荷重と直径の载荷方向の変化量 (Δd_y) との関係を示す。図中には、No. 1~No. 8のリングでの $P \sim \Delta d_y$ の関係と平均残存板厚での式(5)による $P \sim \Delta d_y$ との関係を示している。

式(4)を用いるとリングの $\theta = 0, \pm \pi/2$ 及び π の位置で鋼材が降伏応力度 ($\approx 2900 \text{ kgf/cm}^2$) に達する時の载荷荷重を求めることができる。リングには、ひずみゲージが貼付しており、 $\theta = 0, \pm \pi/2, \pi$ でのひずみ量が測定できる。このひずみ量をもとに、リングの降伏荷重を知ることができる。

図-30に、鋼材が降伏応力度に達する载荷荷重と平均残存板厚との関係を示す。

同図に示す通り、平均残存板厚をもとにリングの降伏荷重と、試験結果が比較的良い一致を示している。図-

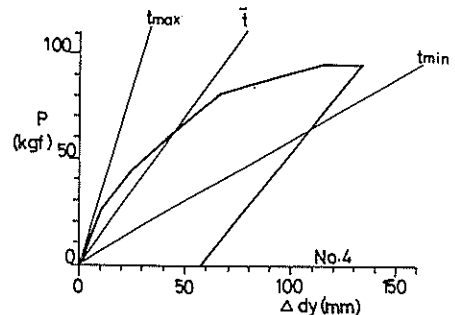
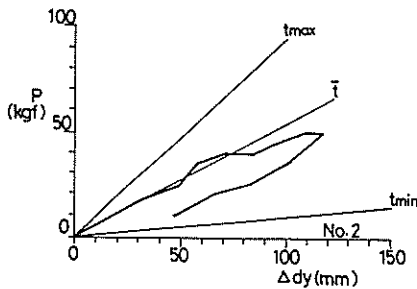
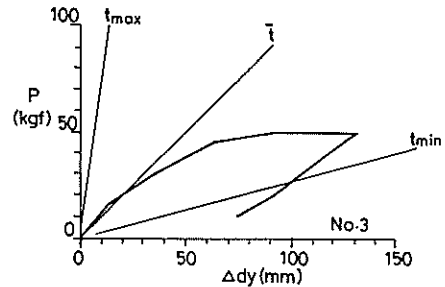
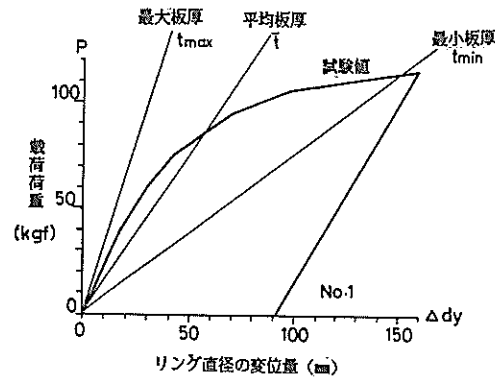


図-28 リングの曲げ試験結果

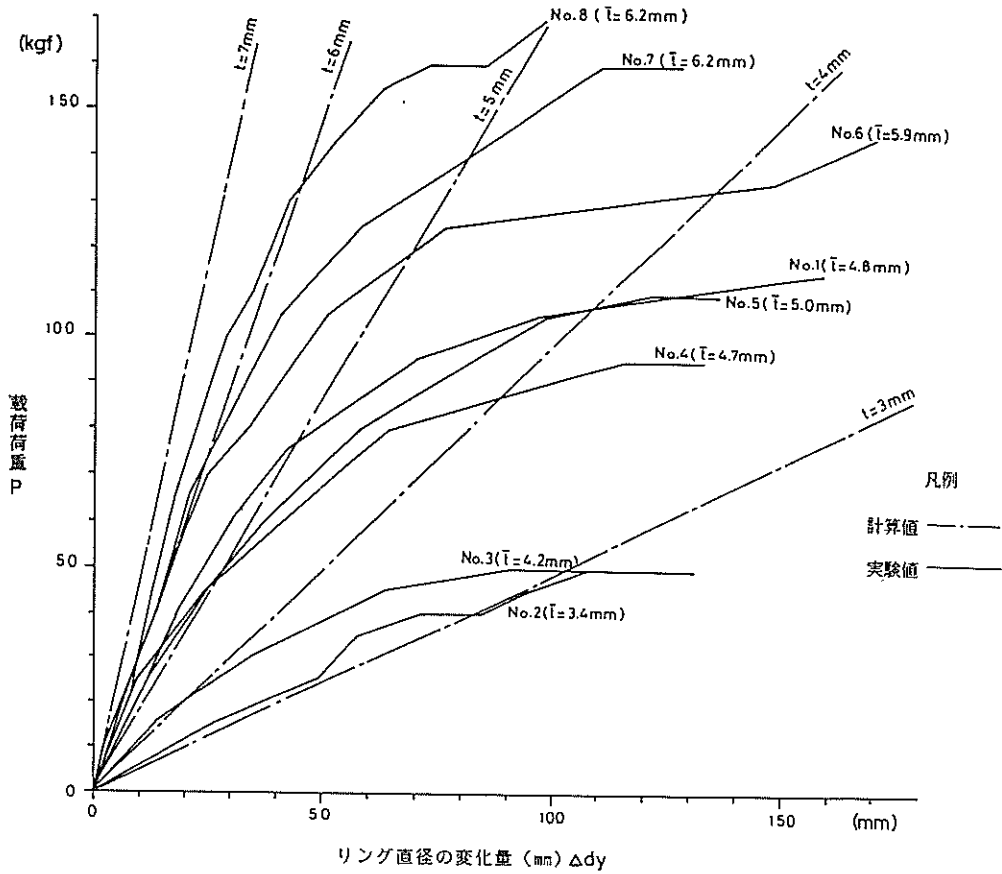


図-29 載荷荷重と Δd_y の関係

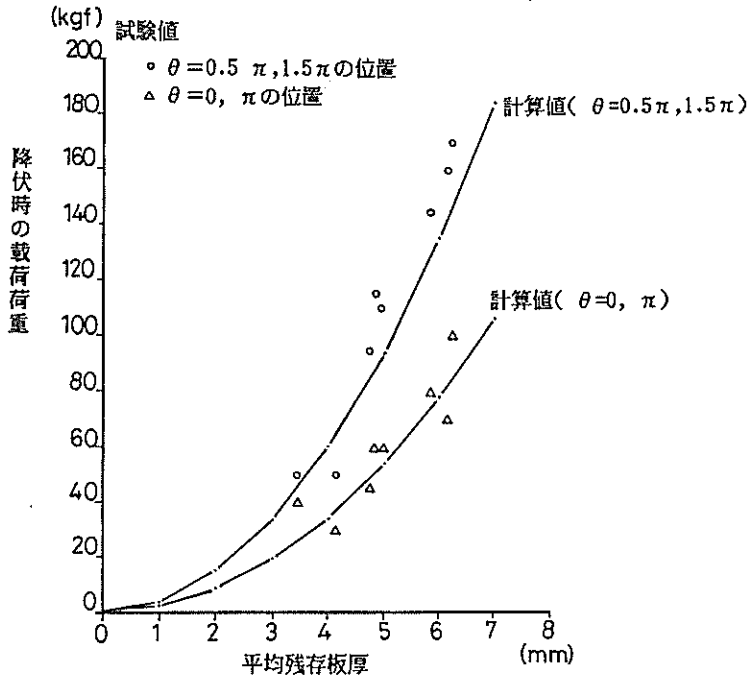


図-30 降伏時の載荷荷重と平均残存板厚

30 よりリングの降伏荷重も残存平均板厚を用いて計算して良いと考えられる。

3.3 鋼管杭の曲げ試験

(1) 鋼管杭の曲げ剛性の計算法

腐食した鋼管杭の曲げ剛性 (EI) を把握する目的で曲げ試験を行う。曲げ試験の結果より、3.2でのリングの曲げ試験の場合と同様に残存板厚の評価ができる。

板厚が均一な鋼管杭に、対称2点載荷によって中央部に曲げを与えた場合の、鋼管杭の取扱い方法として以下の3通りが考えられる。

- ① 鋼管杭を梁部材とみなす方法
- ② 鋼管杭の屈服から板厚を評価する方法
- ③ 鋼管杭を円筒シェルとみなす方法

① 鋼管杭を梁部材とみなす方法

鋼管杭を一本の梁部材に置換すると、対称2点載荷による中央部の載荷方向の変位量 (y_{max}) は、次式で与えることができる。

$$y_{max} = \frac{P l^2 a}{48} \left(3 - 4 \frac{a^2}{l^2} \right) \quad (6)$$

ここで

E : ヤング係数

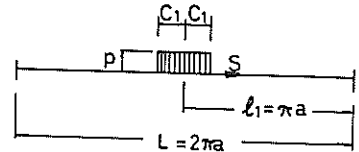
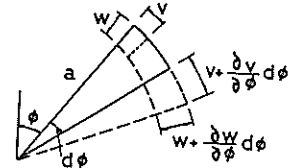
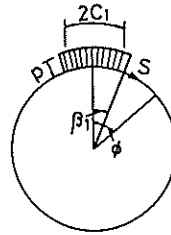
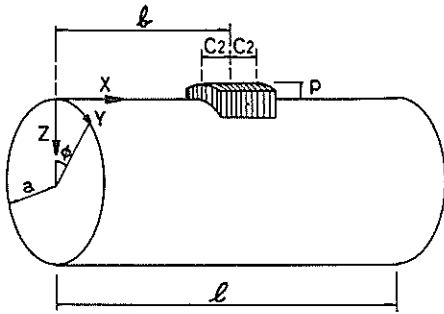


図-31 シェルの諸元

次式に示す。

$$\begin{aligned} & r^2 \omega + \frac{12(1-\nu^2)}{a^2 t^2} \cdot \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + \frac{1}{a^2} \left[2 \frac{\partial^6 \omega}{a^2 \partial \phi^6} + (6 + \nu \right. \\ & \left. - \nu^2) \frac{\partial^6 \omega}{a^2 \partial x^4 \partial \phi^2} + (7 + \nu) \frac{\partial^6 \omega}{a^4 \partial x^2 \partial \phi^4} \right] \\ & - \frac{1}{D} r^4 z = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$I : \text{断面二次モーメント} \left(I = \frac{\pi \{ R^4 - (R-t)^4 \}}{4} \right)$$

R : 外縁半径

t : 板厚

l : 支点間距離

a : 支点から載荷点までの距離

P : 全載荷荷重

載荷荷重 (P) と変位量 (y_{max}) との関係から、板厚 (t) を計算できる。

② 鋼管杭の屈服から板厚を評価する方法⁸⁾

鋼管杭が曲げを受けると、円形断面が扁平化し、断面二次モーメントが減少する。断面二次モーメントの減少により、曲げモーメントが大きくなりながらうちに鋼管杭が屈服する。そのときの鋼管杭に生ずる応力度を屈服応力 (σ_{max}) と呼び次式で与えられる。

$$\sigma_{max} = 0.346 E \frac{t}{R} \quad (7)$$

ここで

E : 鋼材のヤング係数

t : 板厚

R : 外縁半径

③ 鋼管杭を円筒シェルとみなす方法⁹⁾

P. P. Bilaard によるシェル理論を用いて応力解析を行う。図-31 にシェルの諸元を示す。シェルの基本式を

ここで

$$D = \frac{E t^3}{12(1-\nu^2)}$$

ν : ポアソン比

t : 板厚

a : 外縁半径

ここで、鉛直方向変位 (w) 及び荷重 (z) を以下のように

に設定する。

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \Sigma \Sigma \omega_{mn} \cos m\varphi \sin \frac{n\pi x}{l} \\ z &= \Sigma \Sigma z_{mn} \cos m\varphi \sin \frac{n\pi x}{l} \end{aligned} \right\} (9)$$

荷重を長方形の等分布荷重とすると z_{mn} は以下のよう
に表示できる。

$$\left. \begin{aligned} z_{mn} &= (-1)^{\frac{n-1}{2}} \cdot \frac{4\beta_1}{\pi^2} \cdot \frac{P}{n} \cdot \sin \frac{n\pi}{\alpha} \cdot \beta_2 \\ &\quad (m=0, n=1, 3, 5, \dots) \\ z_{mn} &= (-1)^{\frac{n-1}{2}} \frac{8}{\pi^2} \frac{P}{mn} \cdot \sin m\beta_1 \sin \frac{n\pi}{\alpha} \cdot \beta_2 \\ &\quad \left(\begin{array}{l} m=1, 2, 3, \dots \\ n=1, 3, 5, \dots \end{array} \right) \end{aligned} \right\} (10)$$

ここで

$$\begin{aligned} P &: \text{片側の荷重} \\ \alpha &= L/a \quad \beta_1 = C_1/a \\ \gamma &= a/t \quad \beta_2 = C_2/a \end{aligned}$$

式(9)、式(10)を式(8)に代入して変位を求める。
詳細な計算は、省略して結果のみを示す。

$$\left. \begin{aligned} \cdot \text{変位} \quad w &= \frac{l^4}{2D} \cdot \Sigma \Sigma \phi_{mn} \cdot z_{mn} \cos m\varphi \sin \frac{n\pi x}{l} \\ u &= \frac{l^4}{2D} \cdot \Sigma \Sigma \frac{\pi \alpha n (m^2 \alpha^2 - \nu \pi^2 n^2)}{(\pi^2 n^2 + \alpha^2 m^2)^2} \phi_{mn} \\ &\quad \times z_{mn} \cos m\varphi \cos \frac{n\pi x}{l} \\ v &= \frac{l^4}{2D} \cdot \Sigma \Sigma \frac{\alpha^2 m \{ (2+\nu) \pi^2 n^2 + \alpha^2 m^2 \}}{(\pi^2 n^2 + \alpha^2 m^2)^2} \\ &\quad \times \phi_{mn} \cdot z_{mn} \sin m\varphi \sin \frac{n\pi x}{l} \end{aligned} \right\} (11)$$

・軸力

$$\left. \begin{aligned} \text{軸方向} \quad N_z &= -6\pi^2 (1-\nu^2) \alpha^6 \gamma^2 a \Sigma \Sigma \frac{n^2 m^2}{(\pi^2 n^2 + \alpha^2 m^2)^2} \\ &\quad \times \phi_{mn} \cdot z_{mn} \cos m\varphi \sin \frac{n\pi x}{l} \\ \text{円周方向} \quad N_\varphi &= -6\pi^4 (1-\nu^2) \alpha^4 \gamma^2 a \cdot \Sigma \Sigma \frac{n^4}{(\pi^2 n^2 + \alpha^2 m^2)^2} \\ &\quad \times \phi_{mn} \cdot z_{mn} \cos m\varphi \sin \frac{n\pi x}{l} \end{aligned} \right\} (12)$$

・曲げモーメント

$$\left. \begin{aligned} \text{軸方向} \quad M_z &= \frac{1}{2} \alpha^4 a^2 \cdot \Sigma \Sigma \left\{ \frac{\pi^2 n^2}{\alpha^2} + \nu m^2 \right. \\ &\quad \left. - \frac{\nu \alpha^2 m^2 \{ (2+\nu) \pi^2 n^2 + \alpha^2 m^2 \}}{(\pi^2 n^2 + \alpha^2 m^2)^2} \right\} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} &\times \phi_{mn} \cdot z_{mn} \cos m\varphi \sin \frac{n\pi x}{l} \\ \text{円周方向} \quad M_\varphi &= \frac{1}{2} \cdot \alpha^4 a^2 \cdot \Sigma \Sigma \left\{ \frac{\nu \pi^2 n^2}{\alpha^2} + m^2 \right. \\ &\quad \left. - \frac{\alpha^2 m^2 \{ (2+\nu) \pi^2 n^2 + \alpha^2 m^2 \}}{(\pi^2 n^2 + \alpha^2 m^2)^2} \right\} \\ &\quad \times \phi_{mn} \cdot z_{mn} \cos m\varphi \sin \frac{n\pi x}{l} \end{aligned} \right\} (13)$$

ここで

$$\phi_{mn} = \frac{2(\pi^2 n^2 + \alpha^2 m^2)^2}{(\pi^2 n^2 + \alpha^2 m^2)^4 + 12(1-\nu^2)\pi^4 \alpha^4 \gamma^2 n^4 - \alpha^4 m^2} \cdot \frac{1}{(2\alpha^4 m^4 + (6+\nu-\nu^2)\pi^4 n^4 + (7+\nu)\pi^2 n^2 \alpha^2 m^2)} \quad (14)$$

・ひずみ

$$\left. \begin{aligned} \text{軸方向} \quad \epsilon_z &= \left\{ \frac{N_z}{t} \pm \frac{6M_z}{t^2} \right\} \\ \text{円周方向} \quad \epsilon_\varphi &= \left\{ \frac{N_\varphi}{t} \pm \frac{6M_\varphi}{t^2} \right\} \end{aligned} \right\} (15)$$

(2) 試験体の製作と載荷実験方法

曲げ試験用に製作した試験体は、5体である。二本の鋼管杭を突き合せて、一本の試験体に製作した。試験体の全長は5.5mである。鋼管杭で腐食の進行している部分を中央に位置するよう配置した。試験体の諸元を表-5に示す。

表-5 曲げ試験用試験体の諸元

試験体番号	初期板厚	鋼管杭の番号	残存平均板厚
No. 1	12 mm	1-A, 1-B	6.3 mm, 6.2 mm
No. 2	12 mm	1-C, 2-A	7.7 mm, 6.4 mm
No. 3	12 mm	2-B, 2-C	6.4 mm, 5.3 mm
No. 4	12 mm	3-B, 3-C	6.9 mm, 5.7 mm
No. 5	9 mm	5-B, 5-C	7.6 mm, 6.6 mm

図-32に試験の概要と計器の配置とを示す。曲げ試験では、支点間距離が5.0mで、載荷点間隔が85cmの対称2点載荷を行った。支点及び載荷点での治具は、120度の角度でもって鋼管杭に接しており、治具と試験体の間には、ゴムパッキングを挿入した。試験体の支点での回転は自由であるが水平方向の移動は拘束した。載荷は、2tf毎に破壊荷重まで増加した。

変位計は、図-32に示す試験体の4断面と油圧ジャッキ設置位置の計17箇所に取付けた。試験体の鉛直方向変位と水平方向変位の両者を試験体軸線沿いに測定した。ひずみゲージは、図-32に示す位置に貼付けた。試験体の軸方向に28点、円周方向に12点ひずみを測定した。

(3) 試験体の残存板厚
 5体の試験体を対象に超音波厚み計を用いて残存板厚の測定を行った。測定位置を図-33に示す。2本の鋼

管杭の片側で、軸線沿いにAからIまでの9箇所、各箇所でも円周方向に16箇所残存板厚の測定を行った。各試験体の平均残存板厚については、表-5に示してある。

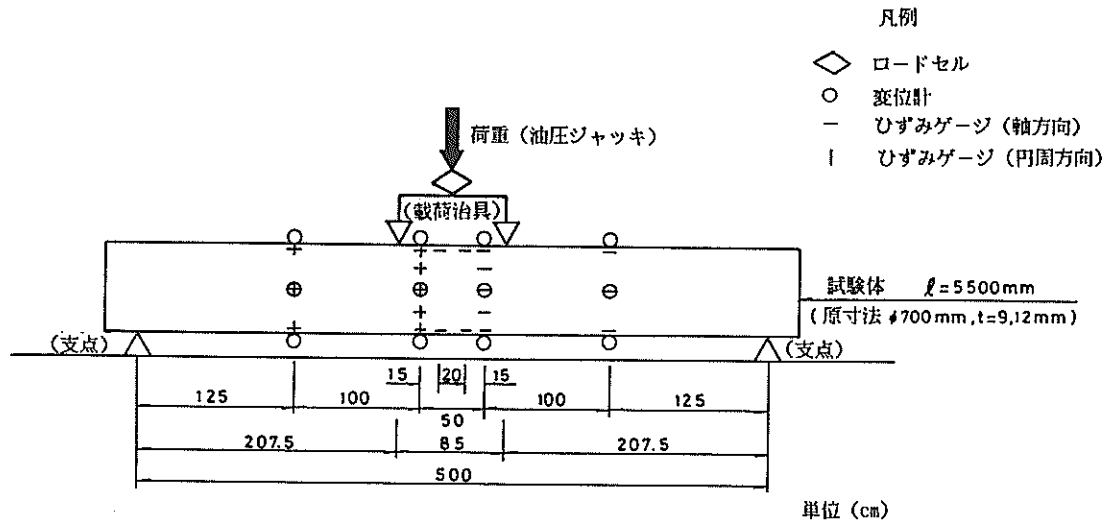


図-32 実験の概要と計器配置

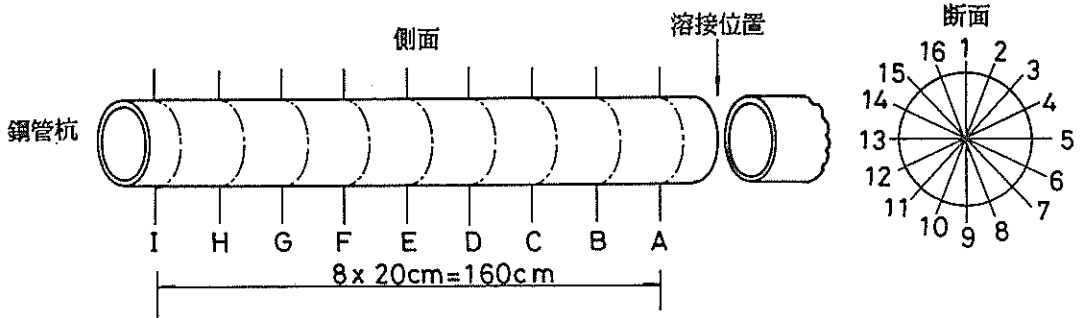


図-33 残存板厚の測定位置

図-34に各試験体での残存板厚の試験体軸線沿いの分布を示す。軸線沿いの残存板厚の分布は、図-34に示すように、かなり場所ごとにばらついている。No.1の試験体での測定結果を例に取上げて説明する。各断面で最大残存板厚は、7.5mm、最小残存板厚は、4.2mmである。平均残存板厚は、6.25mmである。図-35にNo.1試験体での全測定結果(144点)の残存板厚を頻度を示す。この図によると場所によっては残存板厚が2~3mmの箇所も存在することがわかる。

(4) 曲げ試験の結果

表-6に曲げ試験の結果の概要を示す。また図-36に曲げ試験で得られた載荷荷重と、鋼管杭中央部の上端での鉛直変位との関係を示す。各試験体とも最大の載荷

表-6 鋼管杭の曲げ試験結果の概要

試験体番号	最大荷重 (tf)	最大曲げモーメント (tf·m)	破壊状況
No.1	14.18	14.71	試験体中央部の上側での局部座屈
No.2	29.78	30.90	同上
No.3	21.46	22.26	同上
No.4	23.85	24.74	試験体中央部の上側での局部座屈及び片側支点部での偏平化
No.5	28.80	29.88	両側支点部での偏平化

荷重が30tf以内であった。破壊の形式としては、①載荷荷重の下方の鋼管杭上面での局部座屈、②支点部での鋼管杭の偏平化の進行の2種類に大きく分類できた。試

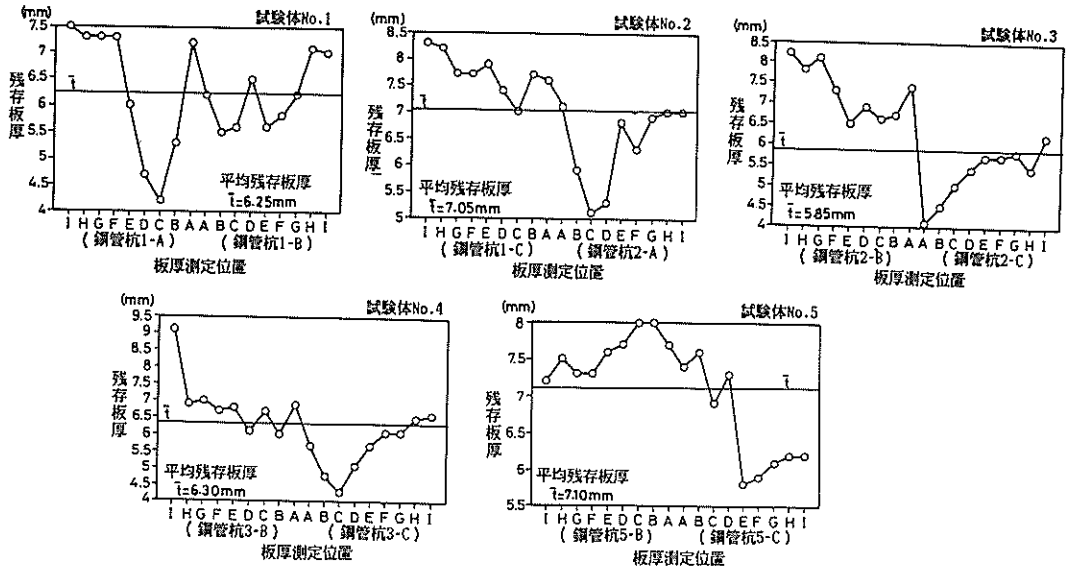


図-34 残存板厚の試験体軸沿いの分布

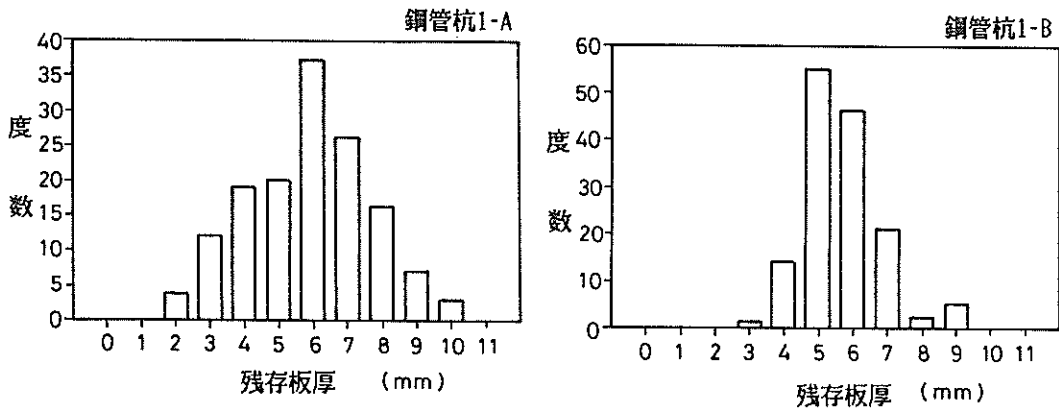


図-35 残存板厚の頻度(試験体No.1)

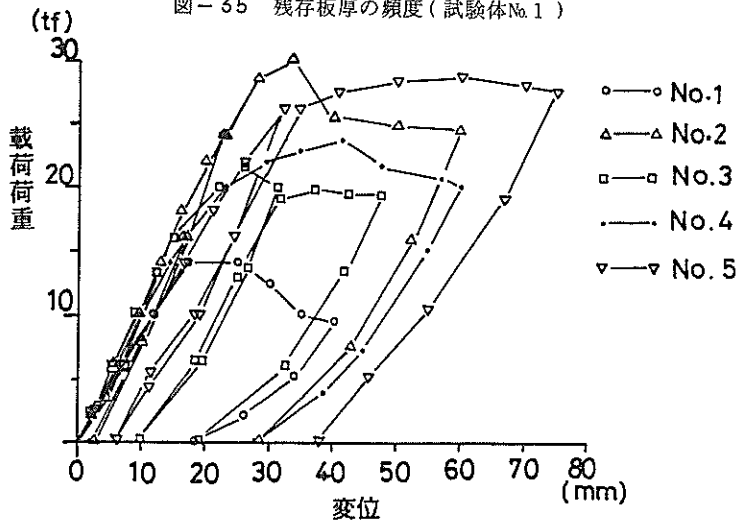


図-36 載荷荷重と変位曲線

験体番号, No. 1, No. 2 及び No. 3 では, 載荷治具の下方の鋼管杭の上面が局部座屈を生じ, 保有耐力が低下した。図-37 に示すように, 鋼管杭の上端での鉛直変位は, 載荷荷重が増加するにつれ, 大きい値となる。一方, 鋼管杭の下端での鉛直変位は, 載荷荷重が小さい場合上方向であり, その後載荷荷重が大きくなるにつれ下方向となった。また下端での鉛直変位は, 上端と比較してかなり小さい値であった。載荷中に, 載荷点付近の鋼管杭の断面は, 上端が扁平化した形状となっていることがわかる。一方, No. 4 及び No. 5 では, 支点部でのせん断力により鋼管杭の断面が扁平化し, 鋼管杭全体が下方向に変位した。今回, 支点部では, 断面の補強を行っておらず, 載荷治具付近での曲げによる鋼管杭の変形よりも支点部でのせん断による変形が No. 4 及び No. 5 試験体で先行した。

図-38 に No. 3 試験体での鋼管杭軸線沿いのひずみ分布を示す。鋼管杭の上端では圧縮ひずみが生じており, 載荷荷重が増加するにつれ, かなりのひずみ量が生じ, 座屈が生じた。一方, 鋼管杭の下端では, 引張りひずみが生じているが, 破壊に至っても生ずるひずみ量は, 数百マイクロと, 上端と比較しても小さい値であった。図-39 に, No. 3 試験体の中央部断面での軸ひずみ分布を示す。A 断面では, 載荷荷重が増加するにつれ, ひずみ量は増加するが, 鋼材の降伏ひずみまで達しなかった。中立軸の位置は, 鋼管杭の中心より若干上側であった。B 断面では, 鋼管杭の上端に, 大きな値の圧縮ひずみが生じていた。中立軸の位置も, 鋼管杭の中心より若干上

側であった。

図-40 に No. 3 試験体の中央部断面での円周方向ひずみの分布を示す。鋼管杭の上端及び側面では引張りひずみが, 下端及び上端より 45 度下向の位置では圧縮ひずみが生じていた。円周方向に関しても, 上端でのひずみ量が他の位置よりも大きなひずみ量を与えた。

(5) 計算値と実験値との比較

表-7 に, (2)に示した 3 通りの方法により評価した鋼管杭の平均的な板厚と実測での平均残存板厚を示す。

表-7 計算値による板厚の評価

試験体番号	実測値	梁部材	屈服荷重	円筒シェル論
No. 1	5.7 mm	0.8 mm	1.6 mm	5.2 mm
No. 2	6.7 mm	1.0 mm	1.7 mm	5.8 mm
No. 3	5.3 mm	1.0 mm	6.7 mm	5.8 mm
No. 4	5.7 mm	1.0 mm	5.8 mm	6.2 mm
No. 5	7.6 mm	0.8 mm	1.3 mm	5.4 mm

鋼管杭を 1 本の梁とみなした方法, 及び鋼管杭の屈服荷重より求める方法では, 実測での平均残存板厚よりもかなり小さい平均的な板厚を与えた。一方円筒シェル理論による方法では, 実測値と大差のない平均的な板厚を与えることがわかる。

図-41 及び図-42 には, 鋼管杭に与えられるひずみに関する実験値とシェル理論による計算値との比較を示す。

比較を行った荷重は, 10 tf である。局部的には, 計

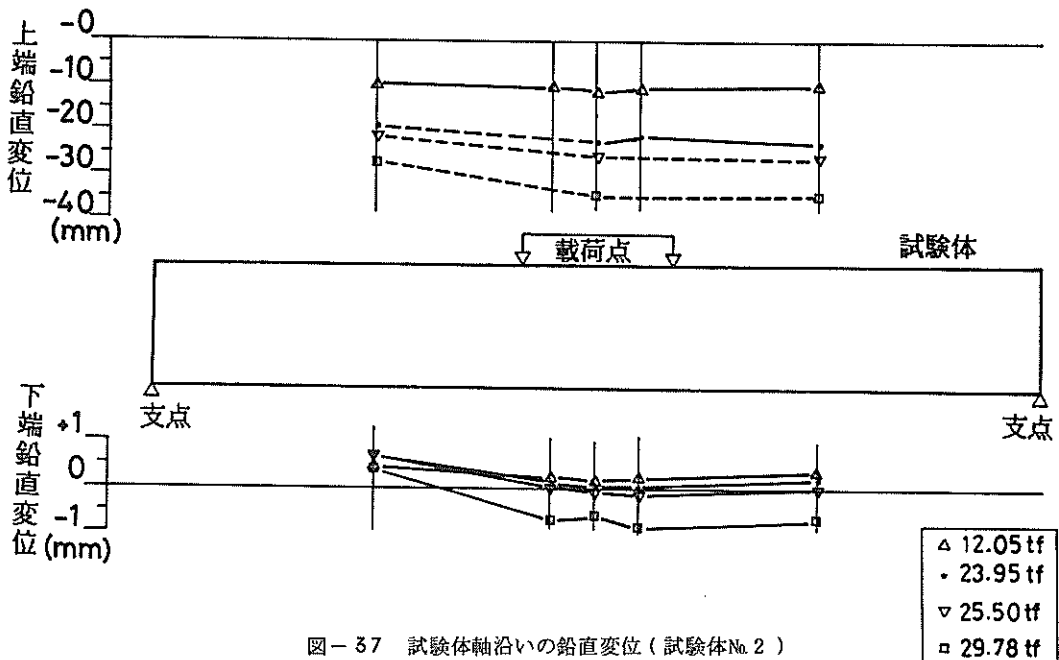


図-37 試験体軸沿いの鉛直変位 (試験体 No. 2)

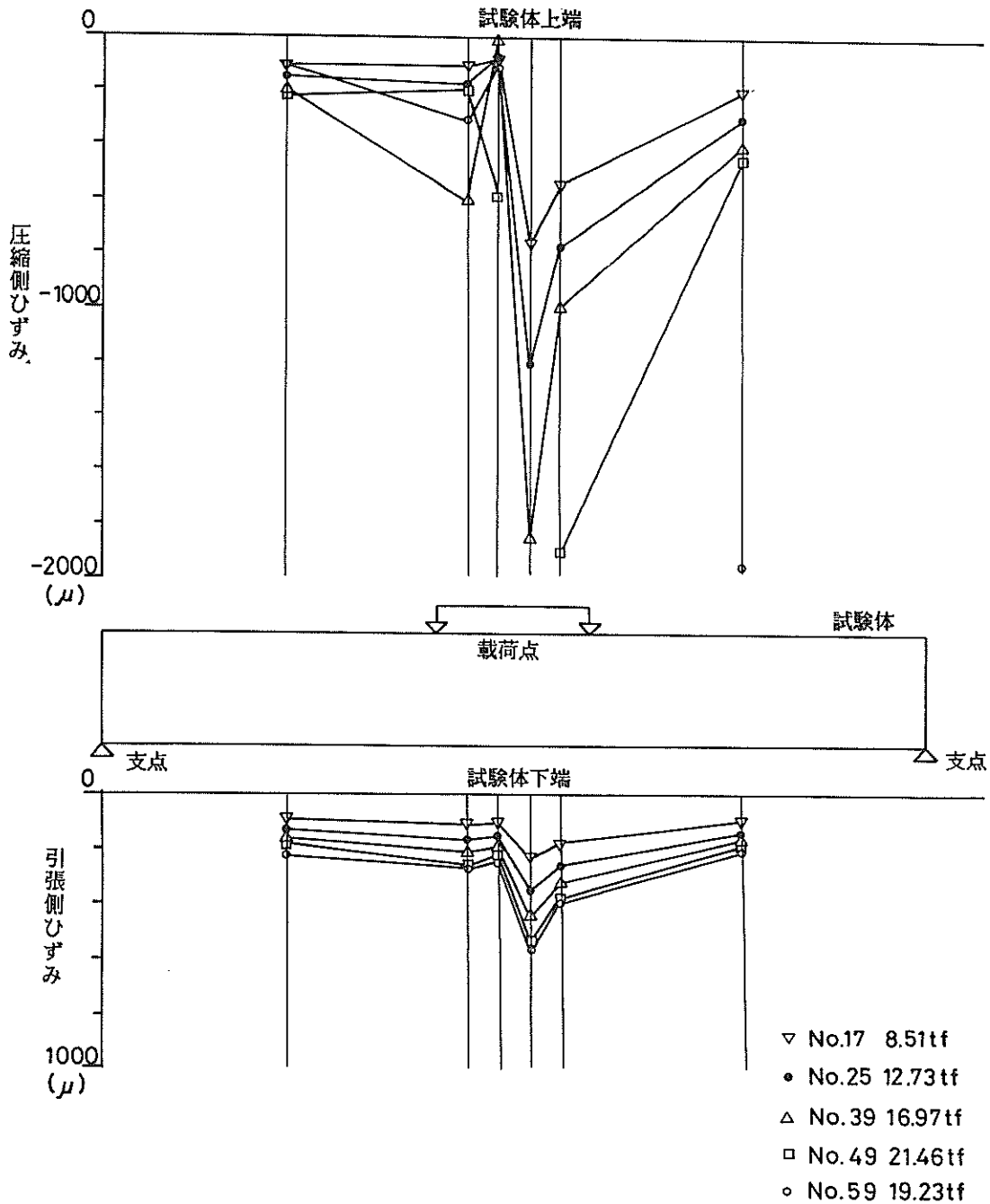


図-38 試験体軸線沿いの軸ひずみ

算値と実験値とが一致していないが、全体的な傾向は、両者がほぼ一致していると言え、円筒シェル理論により今回の曲げ試験中の鋼管杭のひずみの挙動を比較的良く説明できることが分った。

3.4 スタッヂベルの溶接強度試験¹⁰⁾

(1) スタッヂベルの溶接強度

耐力の低下した腐食鋼管杭の強度を回復する方法に鉄筋コンクリートを鋼管杭に被覆する方法がある。鋼管杭と鉄筋コンクリートとは、スタッヂベルによって合成

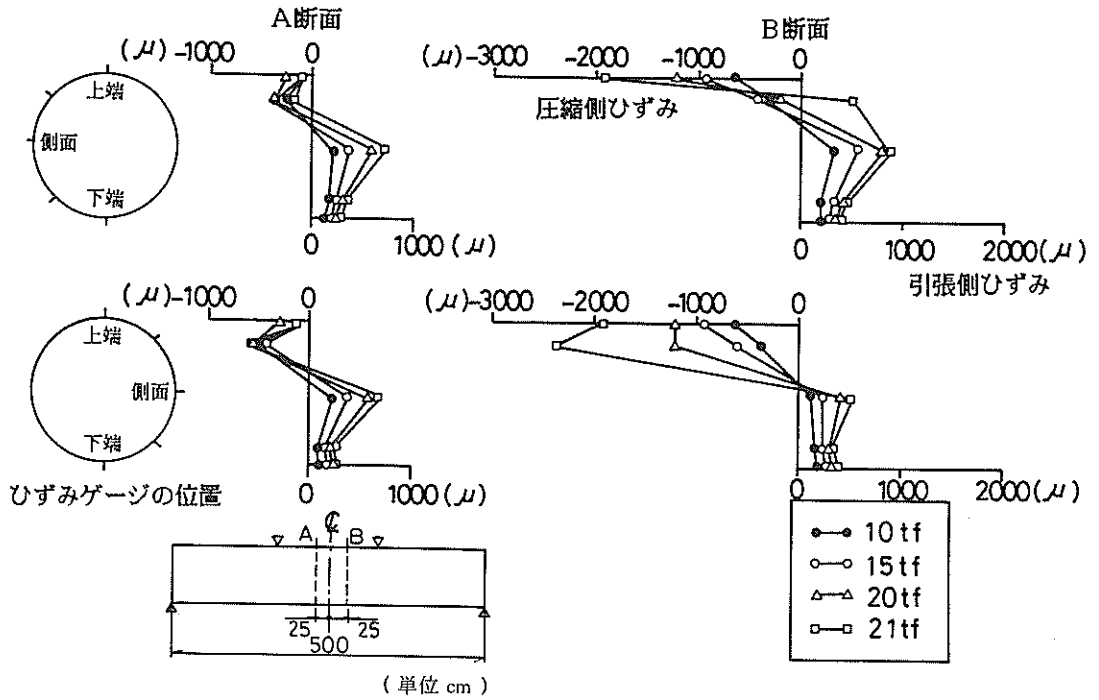


図-39 試験体中央部断面での軸ひずみ分布 (試験体No.3)

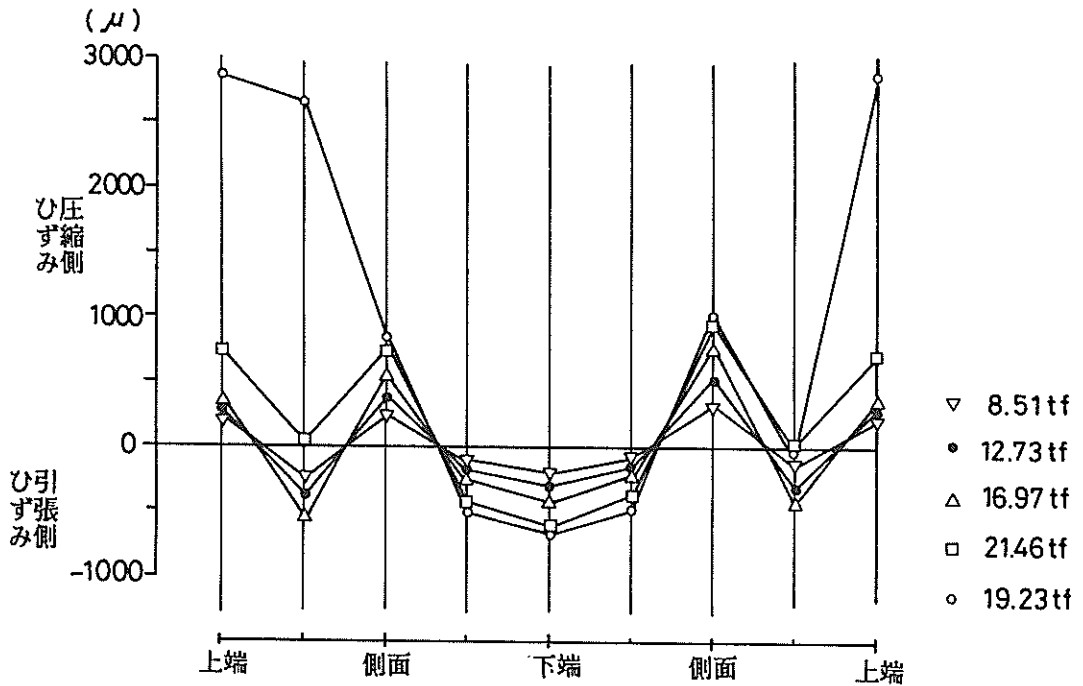


図-40 中央部断面での円周方向ひずみ分布 (試験体No.3)

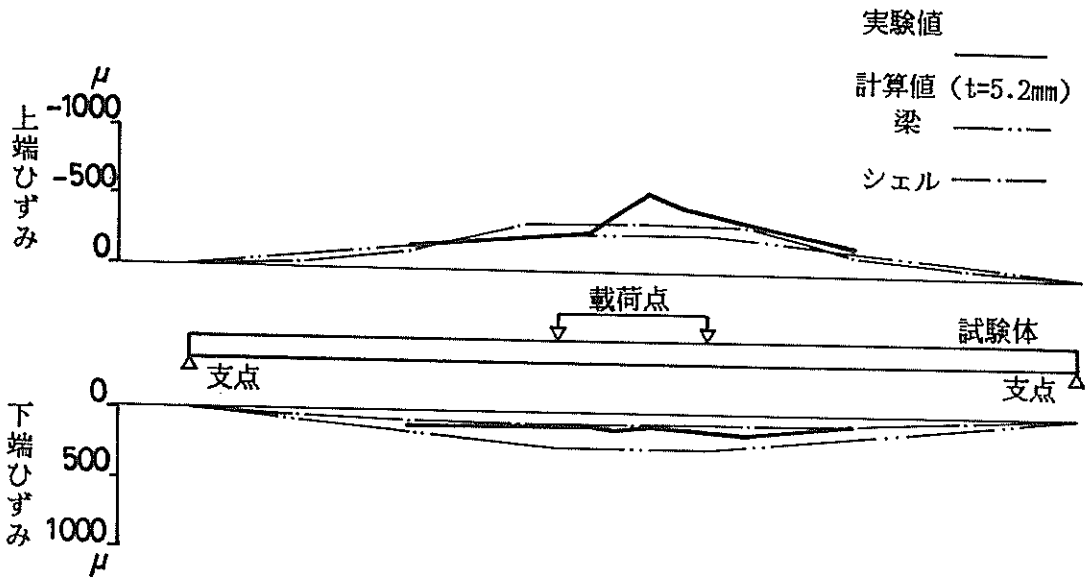


図-41 試験体軸沿いひずみの計算値と実験値との比較
(試験体No.1 荷重荷重 $P = 10 \text{ tf}$)

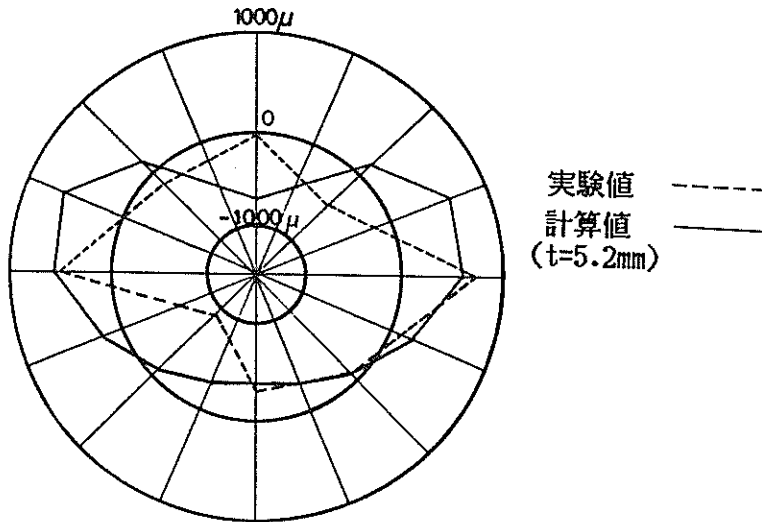


図-42 中央部断面での円周方向ひずみの計算値と実験値との比較
(試験体No.1 荷重荷重 $P = 10 \text{ tf}$)

を行う。スタッドジベルは、一種のボルトであり、補修工では、図-43に示すとおり、水中あるいは空中で、鋼管杭にスタッドガンを用いて溶接する。このスタッドジベルによって、鉄筋コンクリートと鋼管杭間とのせん断力及び引抜き力に抵抗する。スタッドジベルの設計では、鉄筋コンクリートの破壊とスタッドジベル自体の破壊の両者を考える必要がある。一般的に、軸径の大きいスタ

ッドジベルを用いれば、コンクリートとの破壊で、軸径の小さいスタッドジベルを用いれば、スタッドジベルの破壊が先行する。ところでスタッドジベルの強度として、スタッドジベル本体の強度、溶接部の強度及び鋼管杭の強度の3種類のうちの最小の強度を考える必要がある。とくに、腐食した鋼管杭でのスタッドジベルの溶接性については、不確実な要素が多い。そこで設計では、これ

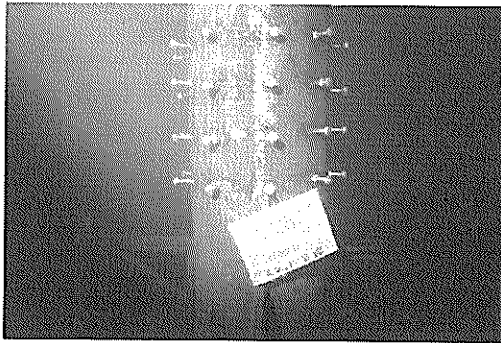


図-43 補修工でのスタッドジベル

ら3種類の強度のうち、室内試験で容易に結果が得られるスタッドジベル本体の強度を用いるのが良いと考える。ここでは、溶接部の板厚とスタッドジベルの溶接性との関係を調べるためにスタッドジベルの溶接強度について調べる。

(2) 試験方法

スタッドジベルの強度試験は、「日本建築学会 溶接工作規準」に基づいて実施した。引張り試験の概要を図-44に示す。腐食した鋼管杭から10cm四方に鋼材を

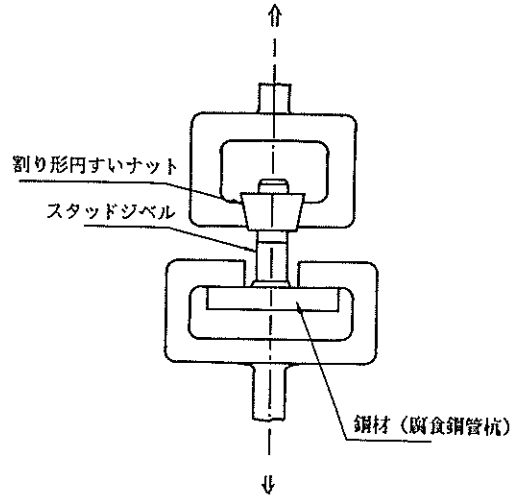


図-44 溶接したスタッドジベルの引張り試験

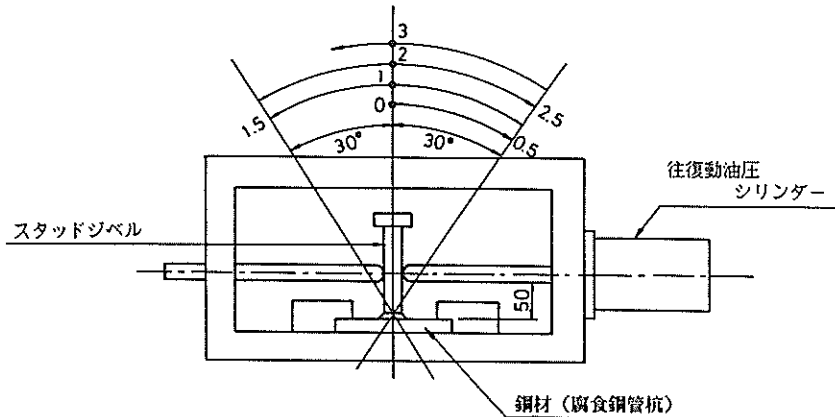


図-45 溶接したスタッドジベルの曲げ試験

表-8 スタッドジベルの引張試験結果

試験体番号	スタッド 径	スタッドの寸法 (mm)	溶接部 の板厚	スタッドの軸径		最大荷重	破壊状況	発生応力 (kgf/cm ²)	
				溶接部の板厚	溶接部の板厚			スタッド	鋼板
No. 1	12 mm	M12×210×100	5.3 mm	2.26	3.36 tf	鋼板よりはく離	3986	1682	
No. 2	12 mm	M12×210×100	5.1 mm	2.35	3.65 tf	鋼板よりはく離	4330	1898	
No. 3	12 mm	M12×40×12	8.5 mm	1.41	4.60 tf	スタッド軸部で破断	5457	1436	
No. 4	12 mm	M12×40×12	9.5 mm	1.26	4.60 tf	スタッド軸部で破断	5457	1284	
No. 5	12 mm	M12×210×100	9.3 mm	1.29	4.55 tf	スタッド軸部で破断	5397	1298	
No. 6	12 mm	M12×210×100	9.7 mm	1.24	4.60 tf	スタッド軸部で破断	5457	1258	
No. 7	16 mm	M16×75×40	6.3 mm	2.54	5.70 tf	鋼板よりはく離	3631	1800	
No. 8	16 mm	M16×75×40	6.3 mm	2.54	5.72 tf	鋼板よりはく離	3643	1806	
No. 9	16 mm	M16×40×12	9.7 mm	1.65	7.75 tf	スタッド軸部で破断	4936	1589	
No. 10	16 mm	M16×40×12	9.7 mm	1.65	7.70 tf	スタッド軸部で破断	4904	1579	
No. 11	16 mm	M16×75×40	9.8 mm	1.63	7.90 tf	スタッド軸部で破断	5032	1604	
No. 12	16 mm	M16×75×40	8.6 mm	1.86	7.85 tf	スタッド軸部で破断	5000	1816	

注) ・スタッドの有効断面積 M12 84.3 mm², M16 157 mm²

・鋼板の発生応力=(最大荷重) / {(スタッドの周長) × (溶接部の板厚)}

切り出し、スタッドジベルを溶接する。この正方形の鋼材とスタッドジベルとを引張って破断に至るまでの荷重を計測し、破壊形式を調べる。今回は、補修工に良く使われる、軸径12mmと16mmの2種類のねじ付きスタッドジベルを選定した。鋼材の溶接部の板厚として5mm～10mmのものを選定して、12個の試験体の製作を行った。

図-45にスタッドジベルの曲げ試験の概要を示す。引張り試験と同様に、切り出した鋼材にスタッドジベルを溶接する。最初にスタッドジベルを一方向に30度の角度まで曲げ、次に反対方向に30度の角度に曲げる。この手順を左右交互に連続して行う。曲げ破壊に至るまでの繰返し回数を計り、破壊状況を観察する。また荷重位置は、鋼材より5cmの高さである。製作した曲げ試験用の試験体は、8体である。

スタッドジベルのせん断試験については、続報で言及する予定である。

(3) 試験結果

スタッドジベルの引張り試験結果を表-8に示す。破壊に至るまでの最大荷重は、軸径が12mmのスタッドジベルで3.36～4.60tf、軸径が16mmのスタッドジベルで5.70～7.90tfであった。溶接部の板厚が5～6mmと

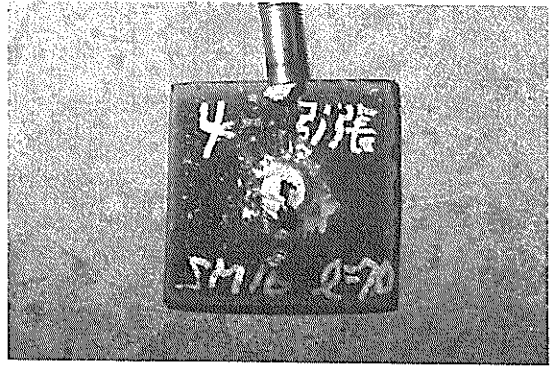


図-46 鋼材よりのスタッドジベルのはく離

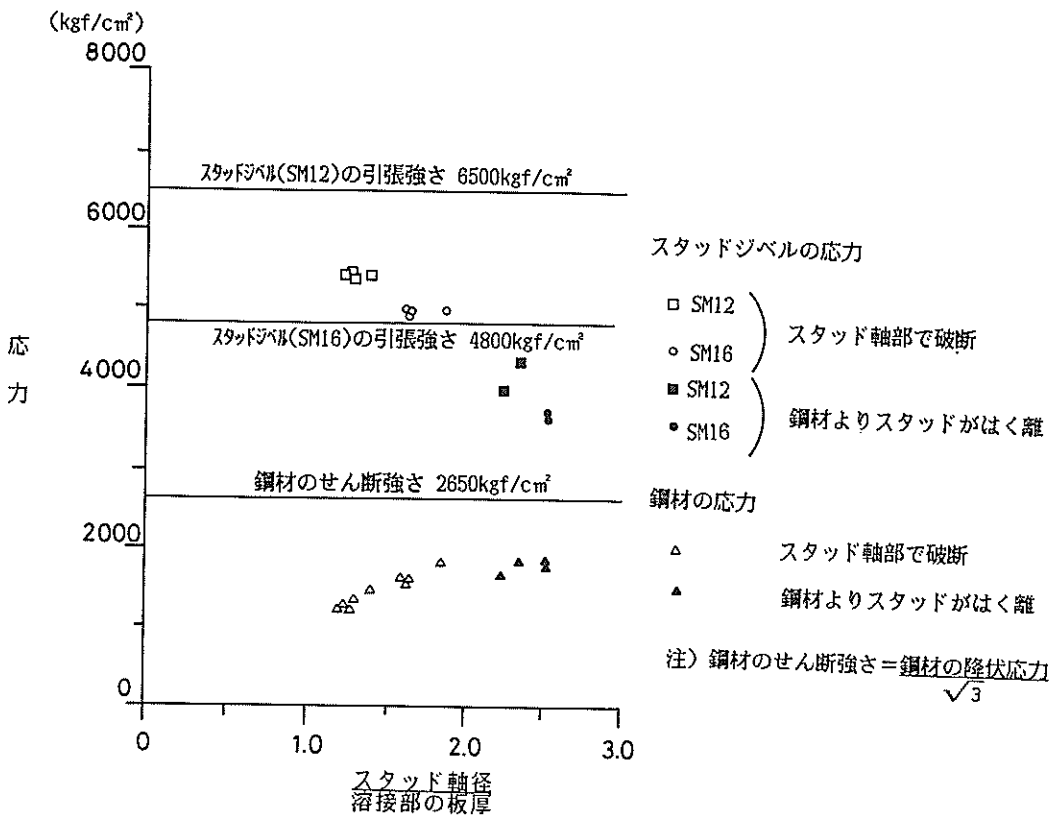


図-47 スタッドジベルの引張り試験結果

表一 9 スタッドジベルの曲げ試験結果

	軸径 (mm)	スタッドの寸法 (mm)	溶接部の板厚 (mm)	軸径		曲げ回数	破壊状態
				溶接部の板厚	溶接部の板厚		
1	12	M 12×210×100	6.1	1.97	2.5	スタッド軸部で破断	
2	12	M 12×210×100	6.2	1.94	3.0	スタッド軸部で破断	
3	12	M 12×210×100	9.7	1.24	3.5	スタッド軸部で破断	
4	12	M 12×210×100	9.7	1.24	3.5	スタッド軸部で破断	
5	16	M 16×75×40	5.8	2.76	2.5	スタッド軸部で破断	
6	16	M 16×70×15	6.2	2.58	2.5	スタッド軸部で破断	
7	16	M 16×70×15	8.5	1.88	2.0	スタッド軸部で破断	
8	16	M 16×70×15	9.5	1.68	2.5	スタッド軸部で破断	

薄い場合には、図一 46 に示すようにスタッドジベルが鋼材より、溶接部で鋼材よりはく離して破壊に至った。溶接部の板厚が、8~10mm と厚い場合には、スタッドジベル自体が引張り破壊を起こした。図一 47 に、スタッド軸径 / 溶接部の板厚と、スタッドジベルと鋼材に生じた応力度を整理した結果を示す。スタッドジベルの引張り強度は、ミルシートによると軸径 12mm が 6,500 kgf/cm²、軸径 16mm が 4,800 kgf/cm² であり、鋼材のせん断強さは、引張り試験の結果より 2,650 kgf/cm² と計算される。設計・施工時のことを考えると、スタッドジベルの溶接部での破断強度を採用することは望ましくない。すなわち、溶接部よりもスタッドジベル本体の引張り強度で設計を行うのが望ましい。この観点からすると、軸径が 12mm のスタッドジベルを用いる場合、溶接部の板厚が 5 mm 程度では、溶接部で破断してしまうおそれがある。したがって、溶接部の板厚として少なくとも 8 mm は必要と考えられる。図一 47 によると、スタッド軸径 / 溶接部の板厚の値が少なくとも 2 を越えないようにしておくことが望ましい。

表一 9 にスタッドジベルの曲げ試験の結果を示す。曲げ試験では、すべての試験体で曲げ回数が 2.0 ~ 3.5 回でスタッドの軸部で破壊に至った。スタッドジベルの引張り試験のときと異なり、溶接部の板厚の大小による破壊形式の相違が見られなかった。

4. 結 論

今回、現地より採取した腐食鋼管杭についての腐食調査と載荷実験より以下の主要な結論を得た。

①鋼管杭の腐食状況

鋼管杭の平均腐食量は、L.W.L. から -1.6m の範囲で 5 ~ 7 mm と相当腐食が進行した状況であった。それ以深は 2 mm 以下の平均腐食量であった。腐食の激しい箇所では、凹凸も激しく標準偏差が 1.0 ~ 1.5 mm であった。また凹凸の平均的な長さは 13 ~ 19 mm であった。また鋼管杭での溶接箇所には、集中腐食の傾向が見

られた。鋼管杭の一部には、腐食が進行し、孔があいている場合もあり、この場合鋼管杭の内部からも腐食が進行していた。孔があいてない場合には、内部での腐食は、小さかった。

②鋼食鋼管杭の残存強度

腐食鋼管杭より製作した試験片の引張り試験を行った結果、引張り強度及び伸びとも現在の JIS 規格の値を十分満足しており、強度の低下は見られなかった。

リングの曲げ試験の結果によると、リングの曲げ剛性 (EI) は、鋼管杭の平均残存板厚を用いて評価できることがわかった。腐食鋼管杭の曲げ試験では、試験体の中央での局部座屈あるいは、支点部での偏平化によって破壊に至った。円筒シェルとしての曲げ耐力の計算式から鋼管杭の終局の残存強度を推定することは、今回できなかった。しかし、鋼材が弾性的挙動を示す範囲では、鋼管杭のひずみ量に関して円筒シェル理論で実験結果を比較的良く説明できた。

③スタッドジベルの溶接性

スタッドジベルの引張り試験では、溶接部の板厚により破壊形式が異なる。溶接部の板厚がスタッド軸径の半分以下ではスタッドジベルが鋼管杭より引抜かれて破壊し、半分以上ではスタッドジベル軸部が切断して破壊に至った。曲げ試験では、溶接部の板厚によらず、スタッドジベル軸部で曲げ破壊を生じた。スタッドジベルを溶接する際には、少なくとも溶接部の板厚の 2 倍を超えない軸径のスタッドジベルを用いるとよい。このことにより設計時に鋼管杭の強度の検討をせずにスタッドジベル本体の強度の検討をすればよい。

(1987年6月18日受付)

謝 辞

光マイクロ測定器による粗さ調査には、土質部佐藤勝久滑走路研究室長及び滑走路研究室室員のご協力を得た。各種実験の実施及び図面、表の作成は、構造部沈埋構造研究室の松浦淳君の手に負う所が大である。ここに深甚

なる感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 沿岸開発技術研究センター，港湾鋼構造物補修マニュアル，昭和61年3月，pp. 3～105
- 2) 白石 修章：港湾鋼構造物の腐食を考慮した応力計算法について，港湾技研資料，No.524，1985年6月，pp. 3～34
- 3) 石渡 友夫他：港湾鋼構造物腐食評価手法について，港湾技研資料，No.501，1984年12月，57 p.
- 4) 善 一章：港湾における既設鋼構造物の腐食に関する研究，港湾技術研究所報告，第12巻，第1号 pp. 145～194
- 5) 善 一章：腐食，防食の計測，土木施工22巻4号 1981年3月，pp. 326～334
- 6) 善 一章，阿部 正美：港湾鋼構造物の腐食調査（昭和53～56年調査），港湾技研資料，No.413，1982年3月，pp. 4～14
- 7) 葉山 房夫：金属材料および試験法，コロナ社，昭和59年2月，pp. 156～169
- 8) 成瀬 泰雄：鋼管構造，森北出版，1971年10月，pp. 20～27
- 9) P.P. Bilaard : Stresses Form Loadings in Cylindrical Pressure Vessels, Transactions of A.S.M.E. Vol.77 Aug., 1955, pp. 805～816
- 10) スタッド協会：スタッド溶接，昭和57年，122p.

港湾技研資料 No.593

1987・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 東京プリント

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.