

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 27 NO. 1 MAR. 1988

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第27巻 第1号 (Vol. 27, No. 1), 1988年3月 (Mar. 1988)

目 次 (CONTENTS)

1. 大水深混成堤の耐波安定性に関する研究 (第1報)
—台形型直立部に働く波力および滑動安定性—
.....谷本勝利・木村克俊・宮崎啓司..... 3
(Study on Stability of Deep Water Breakwaters against Waves
(1st Report)—Wave Forces on Upright Section of Trapezoidal
Shape and its Stability against Sliding—
.....Katsutoshi TANIMOTO, Katsutoshi KIMURA and Keiji MIYAZAKI)
2. 極値統計におけるプロットング公式ならびに推定値の信頼区間に関する数値的検討
.....合田良実.....31
(Numerical Investigations on Plotting Formulas and Confidence
Intervals of Return Values in Extreme Statistics.....Yoshimi GODA)
3. 一軸圧縮強度のばらつきとその要因について
.....土田 孝・小林正樹・山川 匠・平良 聡.....93
(Effect of Fissures on the Undrained Strength of Clay
..... Takashi TSUCHIDA, Masaki KOBAYASHI, Takumi YAMAKAWA
and Satoshi TAIRA)
4. 鉄筋コンクリート被覆による腐食鋼管杭の補修工の耐力特性
.....清宮 理・千葉照男・横井聡之... 125
(Mechanical Properties of Repaired Steel Pipe Pile Covered by Reinforced
Concrete Osamu KIYOMIYA, Teruo CHIBA, and Toshiyuki YOKOI)

4. 鉄筋コンクリート被覆による 腐食鋼管杭の補修工の耐力特性

清宮 理*・千葉照男**・横井聡之***

要 旨

海洋環境下に長期間置かれた栈橋の鋼管杭は、腐食が著しく進行して補修工を施す必要性に迫られている場合がある。腐食している箇所を鉄筋コンクリートで被覆し、失われた耐力を回復する方法が現在提案されている。この補修工の技術的な課題の一つとして、地震時、接岸時等の外力を受ける際の合成鋼管としての力学特性の把握と、設計法の整備とがある。この課題を解決するため鉄筋コンクリートで被覆した鋼管杭の曲げ載荷試験と押抜きせん断試験を行った。載荷試験により合成鋼管の破壊に至るまでの変形量、ひびわれの発生状況、鉄筋のひずみ量等を調べ、外力に対する補修工の抵抗機構を把握した。また、限界状態設計法により補修工の終局荷重（終局限界状態と関連）とひびわれ幅（使用限界状態と関連）を計算し、試験値との比較検討を行い設計法の適用性を調べたので報告する。

キーワード：腐食鋼管杭，補修工，合成梁，載荷試験

* 構造部 沈埋構造研究室長
** 構造部 沈埋構造研究室
*** 構造部長

4. Mechanical Properties of Repaired Steel Pipe Pile Covered by Reinforced Concrete

Osamu KIYOMIYA*, Teruo CHIBA**, Toshiyuki YOKOI***

Synopsis

Steel pipe piles in piled pier constructed in marine environment have been damaged bitterly by corrosion after long term. When the piled pier was designed, corrosion protection such as cathodic protection, thickness allowance against corrosion and so on was considered. Though such corrosion protection was adopted, progression of corrosion has been rapid rather than expectation. Damage of steel pipe pile is concentrated at splash zone. Some steel pipe piles are lack of strength which is necessary for external forces. Repair work is required to such piles. Some repair methods are proposed. Reinforced coverage is one of effective methods and has been used in some repair works. This repair method is a kind of composite member of steel pipe pile and reinforced concrete by studs. However design of this repair method is not established because the repair method is proposed in recently years and there is no similar structural mechanism to the repair method.

Bending loading test and push-off loading test are carried out to know the mechanical properties of the repair method due to the concrete coverage. Through loading tests, ultimate strength, crack development, deformation and so on of specimens are investigated. As a result of the loading tests, ultimate strength of the specimens related to collapse pattern is dominated by not only bending moment but shear force considered tied arch mechanism. Breaking of studs are not observed at the bending loading test when No. of studs is decided by procedure presented in this paper. Ultimate strength, crack width and so on of the repair work can be estimated by formulae due to limit state design method through comparison between test results and calculation ones.

Key Words: Corrosion Steel Pipe Pile, Repair, Composite Beam, Loading Test

* Chief of Subaqueous Tunnels and Pipe-lines Laboratory, Structures Division.

** Member of Subaqueous Tunnels and Pipe-lines Laboratory, Structures Division.

*** Director, Structures Division.

目 次

要 旨	125
1. まえがき	129
2. 研究の背景	129
2.1 鋼管杭の腐食の実態	129
2.2 補修工の概略	130
3. 鉄筋コンクリート被覆された鋼管杭の耐力の計算法	135
3.1 合成鋼管としての耐力	135
3.2 スタッドジベルのせん断耐力	138
3.3 ひびわれ幅	140
4. 載荷試験の対象と試験体の設定	141
5. 曲げ載荷試験	141
5.1 試験体の製作	141
5.2 試験方法	141
5.3 試験結果	145
5.4 計算値と試験値の比較	153
6. 押抜きせん断試験	155
6.1 試験体の製作	155
6.2 試験方法	159
6.3 試験結果	162
7. 結 論	164
あとがき	166
参考文献	166
付録 A 鋼管杭の腐食調査の結果	167
B 合成管の耐力の計算式の誘導	167
C 有限要素法によるスタッドジベルの解析	170
D 許容応力度法による試験結果の考察	172

1. まえがき

鋼材は、石材、コンクリート等と同様に港湾構造物の主要な構成材料である。昭和30年代ごろから、直杭式横棧橋、矢板式岸壁等の港湾構造物に鋼材が多く用いられるようになった。運輸省が昭和59年までに建設した港湾施設のうち530余りの施設で、鋼管杭、鋼矢板等として主要構成部分に鋼材が用いられている。海洋環境下に置かれる鋼材では、錆びの発生が当然予想され、設計時に腐食代として鋼材の板厚を設計外力より設定される板厚より厚くしたり、あるいは電気防食を施す等の対応を行ってきた。しかし、近年各地における腐食調査によると建設後長期間経た鋼材の一部では、干満帯を中心に腐食が、当初予想された以上に著しく進行している状況が判明した。特に腐食が著しく進行し、棧橋の上部工に変状をきたした施設では、施設の撤去及び再建設が行われている。しかし、現施設の利用頻度、将来の港湾整備計画、再建設と補修との工費比較等の状況を勘案したうえで、現施設に補修を施すことにより、今後とも十分に機能を保持でき利用可能な施設も多い。

ところで港湾鋼構造物を対象とした補修工に関しては、既に何種類かの工法が提案されているが、補修の問題が顕在化したのがごく最近でもあり、いずれの工法も十分な実績が乏しく、かつ設計・施工法も確立している状況ではなかった。補修対策の緊急性と重大性から、補修工法に関して潮沿岸開発技術研究センターでは、現有の情報を取りまとめ「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、棧橋に用いられている鋼管杭の補修工として、比較的施工実績の多い鉄筋コンクリート被覆工法を主に紹介している。鉄筋コンクリート被覆工法では、スタッドジベルを介して、鉄筋コンクリートと鋼管杭との合成構造をもって、腐食による板厚の減少に伴う強度低下を回復させる。この補修工の設計・施工法を一応このマニュアルで取りまとめたものの、補修工の強度、耐久性について十分な検討がなされておらず、残された課題も多い。これら課題のうち鋼管杭の腐食状況、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については、港湾技研資料、No. 593²⁾に取りまとめている。しかし曲げモーメントあるいは軸力を受けるときの鉄筋コンクリート被覆による補修工の力学特性については、まだ知見が十分でない。従来合成鋼管(杭やパイプライン)としての強度に関しては、いくつかの試験や解析がおこなわれているものの、鉄筋コンクリート被覆の範囲が全体の強度に及ぼす影響や、薄く被覆されたコンクリート柱のスタッドジベルの

せん断抵抗機構については、よく知られていない。そこで、鉄筋コンクリート被覆鋼管を対象に曲げ荷重試験及び押抜きせん断試験を行って、鉄筋コンクリート被覆鋼管杭の終局耐力、ひびわれ発生状況等の力学特性を検討した。

前述のマニュアルでは、許容応力度法を基に鉄筋コンクリートコンクリート被覆鋼管杭の耐力等の計算式を示している。しかし今後コンクリートの分野では、限界状態設計法で設計を行う趨勢にある。本報告でもこの趨勢を考えて限界状態設計法³⁾をもとに、鉄筋コンクリート被覆鋼管杭の耐力の計算式を整理し、計算値と試験値との比較を行い、計算式の適用性について検討を行った。許容応力度法に関しては付録において検討を行った。以上の検討結果について報告を行う。

2. 研究の背景

2.1 鋼管杭の腐食の実態

鋼管杭は昭和30年代後半頃から大量に棧橋やドルフィン等の港湾施設に使用され始めた。鋼管杭は、図-1に示す棧橋の基礎に用いられている。棧橋構造では、この種の型式が良く採用される。鋼管杭は、棧橋の上部工下端より海底地盤内まで位置している。海洋環境下での鋼管杭の使用に当たっては、陸上よりも腐食の進行が当然早いことが予想され腐食対策が講じられた。腐食対策としては、電気防食、コンクリート被覆、腐食代を見込む等を挙げることができる。これらの腐食対策については、当時実績も少なくその有効性について建設後も確認していく必要性があった。港湾鋼構造物の腐食の実態については、港湾技術研究所が中心となって腐食調査が、昭和42

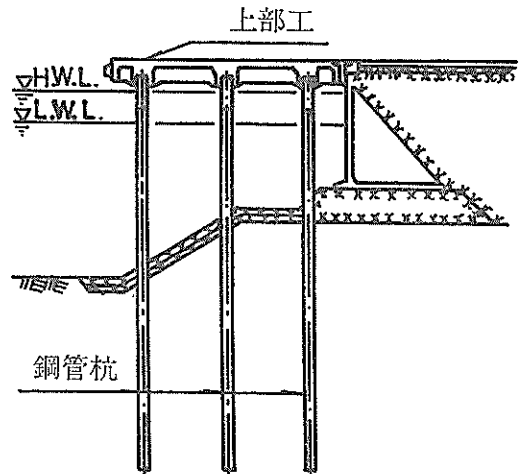


図-1 直杭式横棧橋

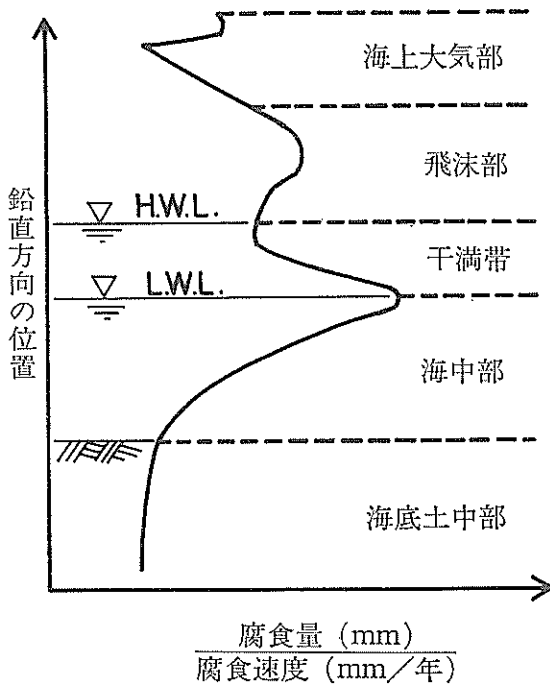


図-2 裸鋼管杭の腐食傾向

年より実施されてきている。腐食調査手法については、港湾技研資料 No. 501⁴⁾ に取りまとめられている。善及び阿部^{5)~6)}により長期間にわたる全国各地での鋼管杭に関する腐食調査が実施されてきている。この調査の結果によると、さまざまな腐食の形態が鋼管杭に見られ、腐食量も地域ごと、あるいは栈橋での位置ごとに異なっていた。

腐食量の測定は、超音波式探層厚み計、あるいは、鋼管杭より切出した鋼片の重量測定によって行われる。図-2に腐食調査から得られた、裸鋼管杭の腐食傾向の一例を示す。同図に示すように、H.W.L. から L.W.L. までの干満帯で腐食量が大きい。腐食速度 (mm/yr) は、腐食量を経過年数で除した値である。一部の鋼管杭では、当初の予想以上に腐食が進行している状況がみられた。腐食が著しい場合には、1mm/yr 程度にも達する場合がある。腐食がさほど進行していない場合が多いが、腐食が特に著しい場合には、鋼管杭に孔があくこともある。この状況を図-3 に示す。一方、海中中や地盤内では、腐食の進行は干満帯より遅い。海水中での腐食速度は、0.1~0.2mm/yr、地盤内では 0.03mm/yr 位とされている。これらの位置での腐食が問題になる例は少ない。このように、通常は、腐食が鋼管杭の干満帯位置に

集中する傾向がある。

2.2 補修工の概略

腐食が著しく進行していることが判明した場合には、なんらかの対策を考える必要がある。防食工では、腐食を今以上に極力進めないことを目的とする。一方、補修工では、腐食で劣化した鋼管杭の失われた強度を回復することが目的となる。補修工の採用の1つの目安は、腐食で板厚が薄くなった箇所、設計外力に対する発生応力度が許容応力度を超過するときである。また、今のまま腐食が進行して鋼管杭の板厚が、ごく近い将来に薄くなり発生応力度が、許容応力度に納まらない場合も補修工の必要性が検討される。港湾鋼構造物での補修工の手順は、以下のとおりである。

- ① 腐食調査
- ② 発生応力の算定⁹⁾
- ③ 健全度の評価
- ④ 補修工の選択
- ⑤ 補修工の設計
- ⑥ 補修工の施工
- ⑦ 保守管理

補修工を選定する場合、施設の現在及び将来の利用状況、施設の供用制限の可否、施設の重要度、補修工の工費、補修工の信頼性と耐久性、腐食の程度と範囲、現地での採用可能な工法等を考慮する。鋼管杭の腐食が著しく、鋼管杭の座屈等により栈橋上部工に著しい変状が生じている場合には、施設の更新が考えられる。補修工を施すことにより十分施設が使用できると、判断されたときには、どのような補修工を採用するか検討される。また、補修工も多数提案されている。

提案されている補修工について以下に概説する。補修工には、腐食した鋼管杭のその部分だけを補修する工法と、構造系全体で補修する工法に大きく分類される。工



図-3 鋼管杭の腐食状況

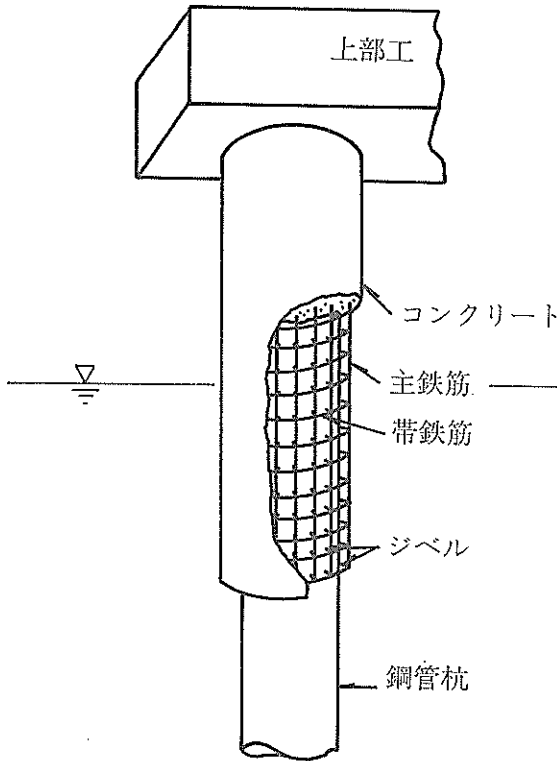


図-4 鉄筋コンクリート被覆工法

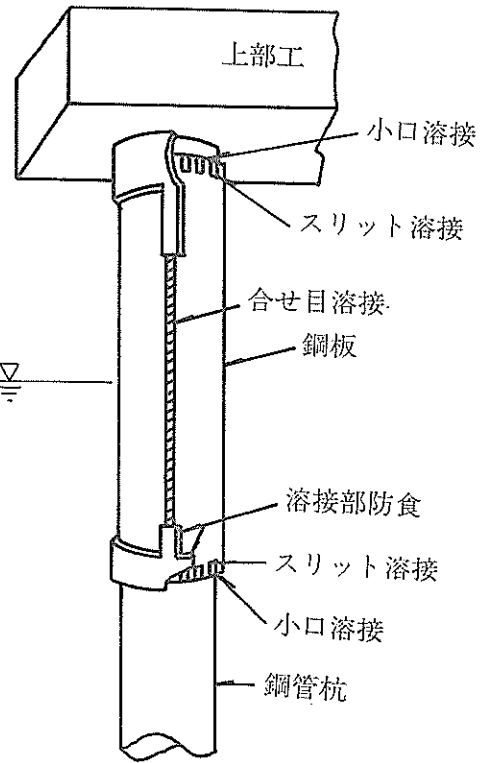


図-5 鋼板溶接工法

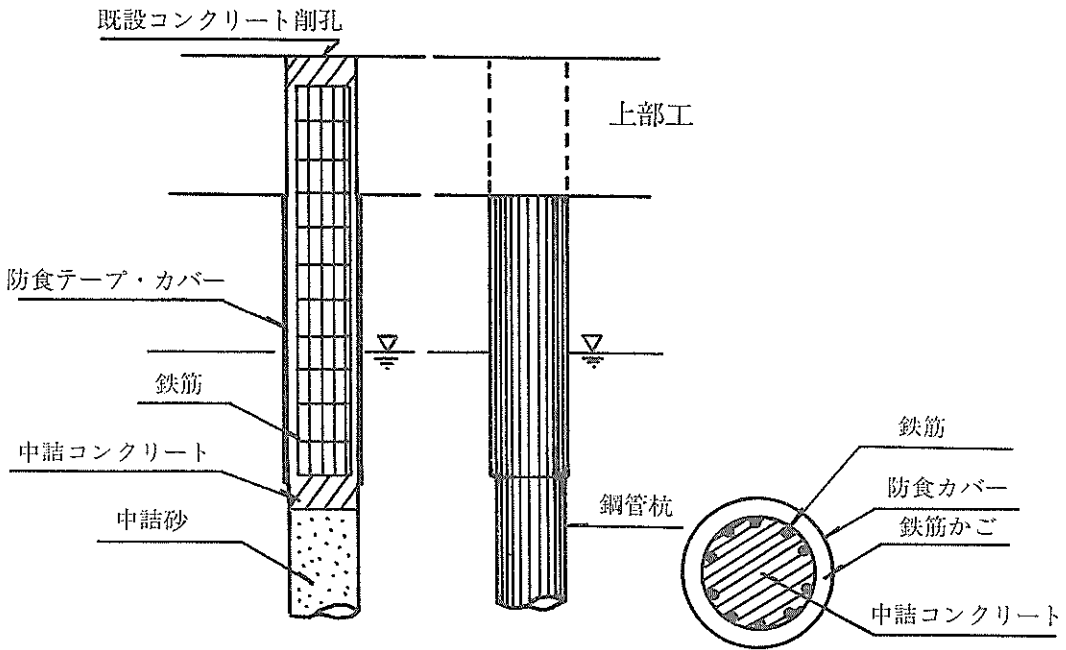


図-6 鉄筋コンクリート充填工法

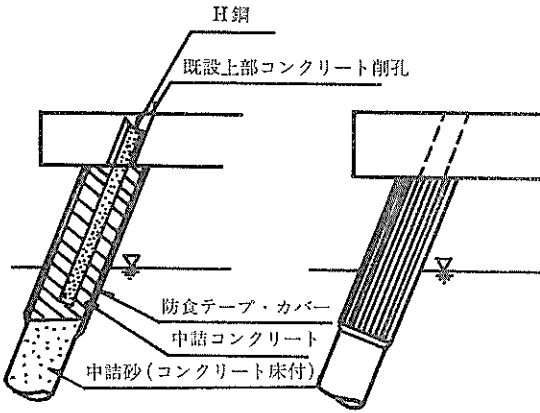


図-7 鉄骨コンクリート充填工法

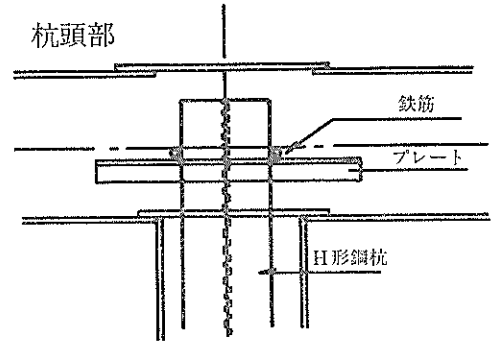


図-8 鋼杭充填工法

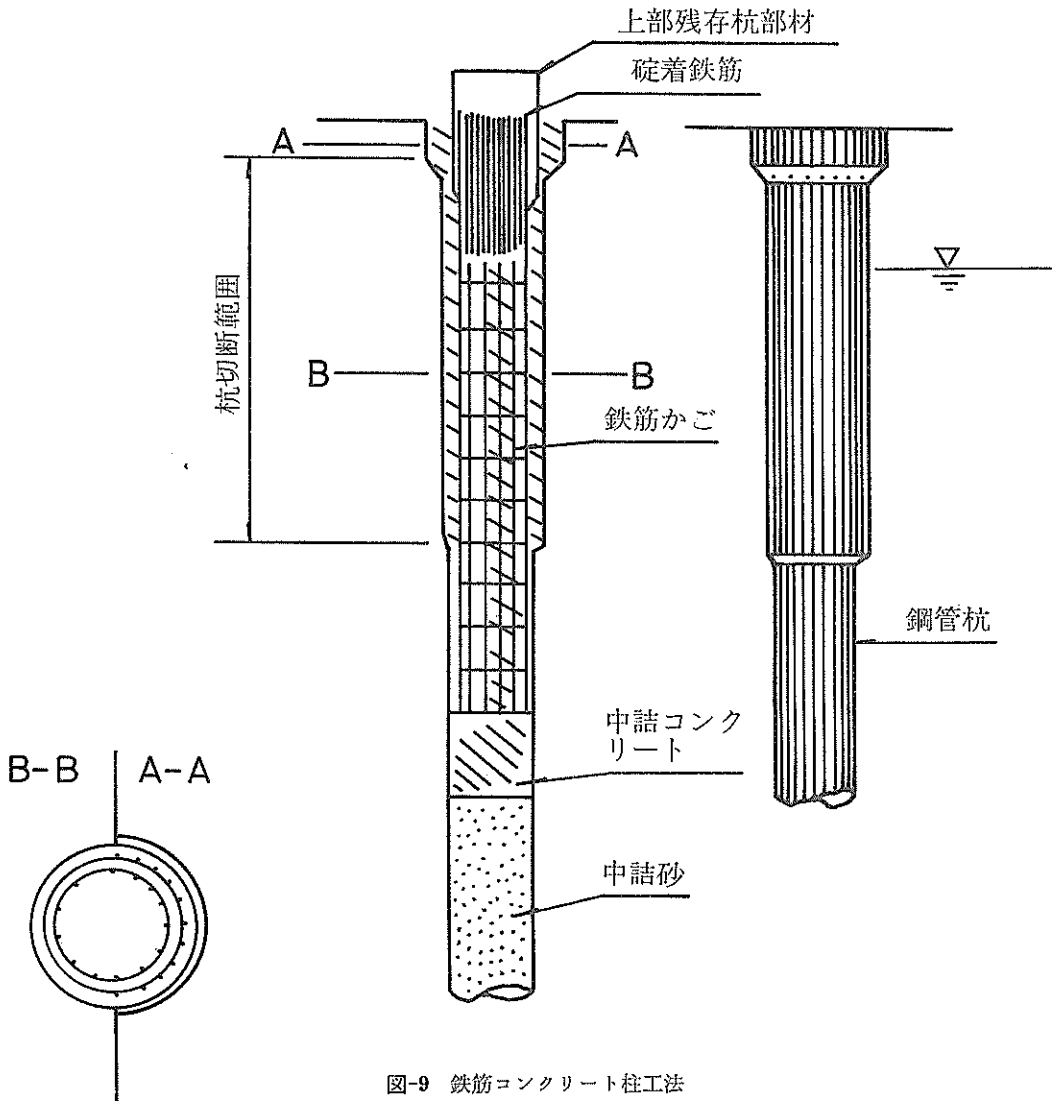


図-9 鉄筋コンクリート柱工法

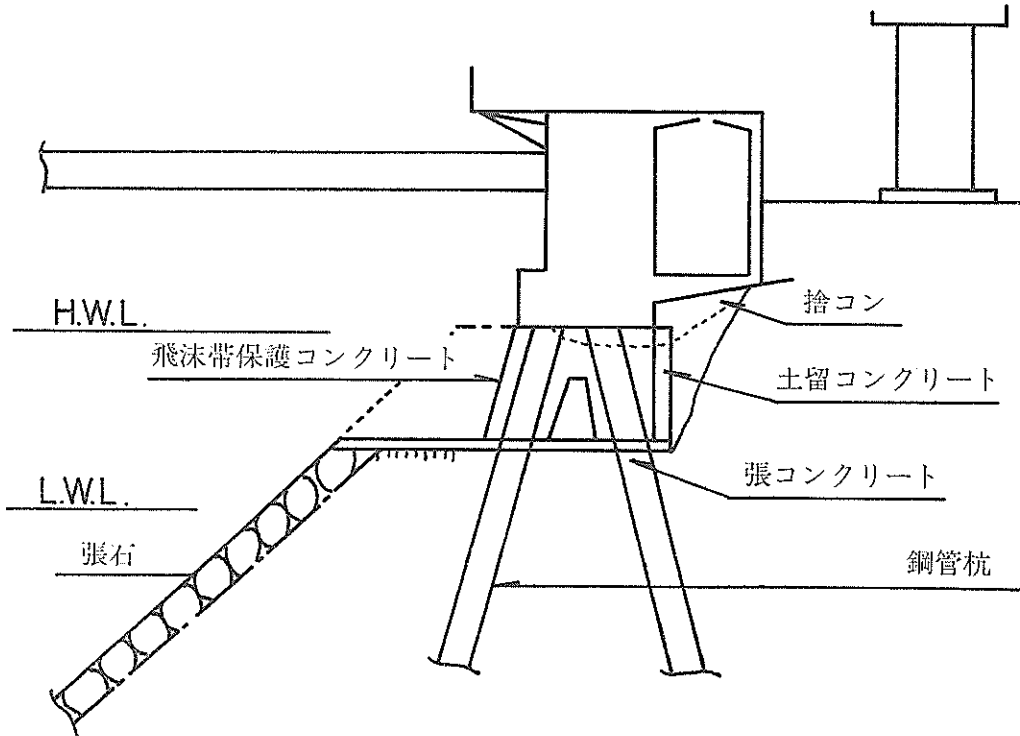


図-10 構造系補修工法（根固め補修工法）

法のいくつかを図-4～11に示す。横栈橋に使用される主な材料は、鋼材とコンクリートであり、補修工でもこの2種類の材料が中心となる。

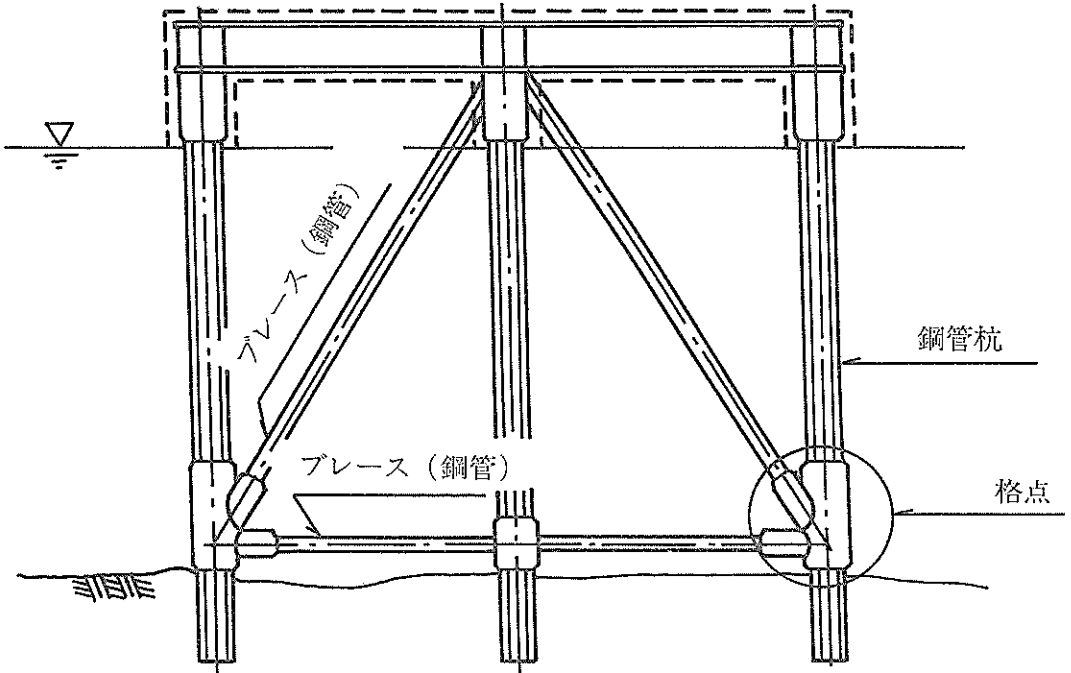
鋼管杭のみを補修する工法では、腐食部分を、鉄筋コンクリートで被覆（図-4）したり、鋼片を水中溶接で外側から補修（図-5）する。また、鋼管杭の中に鋼材（鉄筋やH鋼）を挿入してコンクリートで充填する工法（図-6～9）も考えられる。この場合には上部工に穴をあけて補修材料を上から挿入することになる。構造系全体を補修する工法（図-10、11）には、梁やブレーシング等を、既設の部材に新たに結合する工法、海底地盤を改良したり水深を浅くする工法等が考えられる。ただし腐食の進んだ箇所は、もちろんしかるべき対策を講じることとなる。

以上述べたとおり多数の補修工が提案されているが、現在実績として鉄筋コンクリート被覆による補修工が多い。本報告でもこの工法を対象に研究を行っている。次にこの工法を概説する。

図-12に鉄筋コンクリート被覆工法の概略を示す。補修工を施す部分の錆びや付着生物をケレン作業により取り除く。孔があいている箇所は、鋼板をもって塞ぐ。腐

食が著しく進行して板厚が薄くなり強度が期待できない箇所を挟んで鋼管杭の上部分及び下部分にスタッドジベルを打設する。スタッドジベルは、軸径が12～16mmのものが良く使われる。板厚が5mm以下の箇所では、鋼管杭の強度を見込まない。この理由としては、スタッドジベルの鋼管杭への溶接性が低下すること、および鋼管杭の局所的な座屈が危惧されるからである。図-13に示すようにスタッドジベル打設後、主鉄筋と帯鉄筋とを鋼管杭の周囲に配置する。型枠を鋼管杭の周辺に取り付けた後、コンクリートを型枠内に流し込む。コンクリートは、普通コンクリートあるいは水中コンクリートが用いられる。鉄筋コンクリート被覆の厚さは、15～25cm程度である。鉄筋の被りは7cm以上である。鉄筋コンクリート被覆の範囲は、腐食が著しい箇所を挟んで行われるが、普通上部工の下端からおおよそL.W.L.-2mまでである。完成した状況を図-14に示す。この工法では、スタッドジベルによって鋼管杭と鉄筋コンクリートの両者で、外力に抵抗するとともに両者間の力の伝達を多数のスタッドジベルでもって滑らかに行うことができる。補修工を施した箇所は、一種の合成鋼管とみな

ブレースに鋼管を用いる場合



ブレースにタイロッドを用いる場合

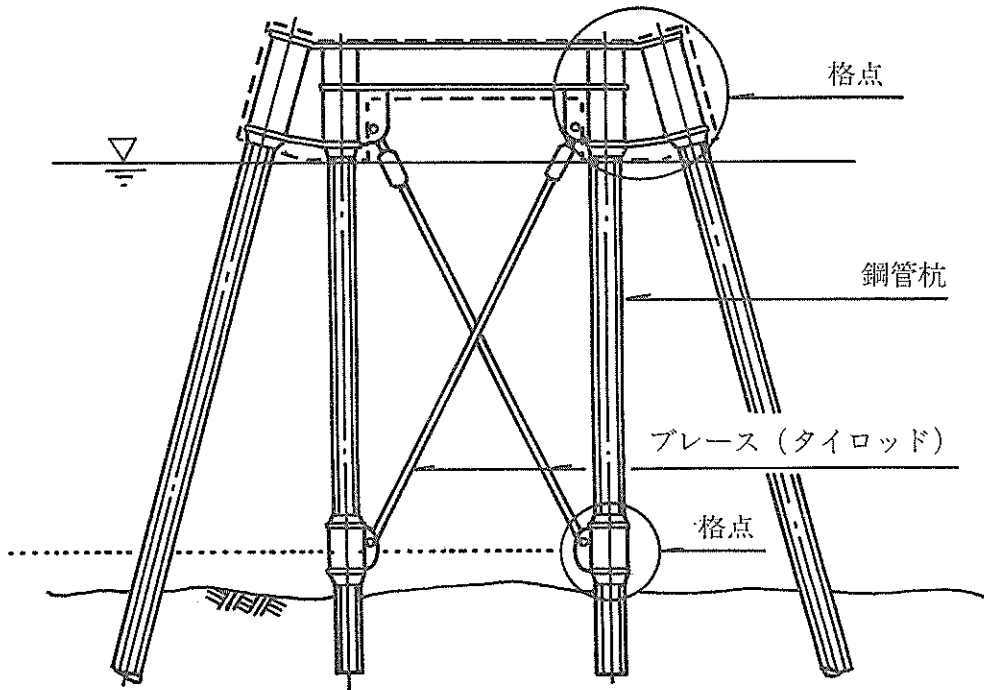


図-11 構造系補修工法（水中格点工法）

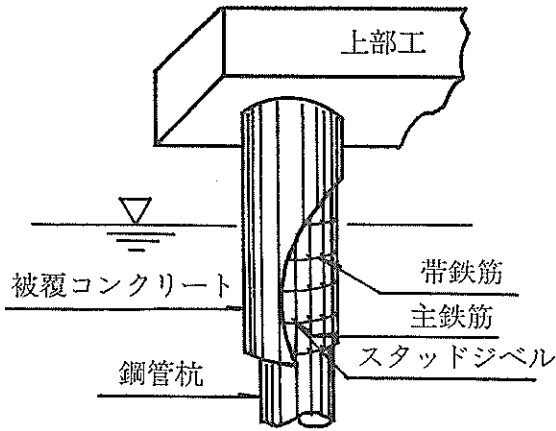


図-12 鉄筋コンクリート被覆工法の概略

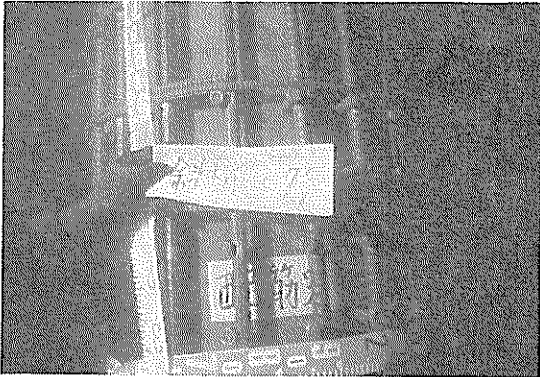


図-13 鉄筋コンクリート被覆工法のスタッドジベル及び配筋の状況



図-14 鉄筋コンクリート被覆工法の完成状況

すことができる。

3. 鉄筋コンクリート被覆された鋼管杭の耐力の計算法

3.1 合成鋼管としての耐力¹⁰⁾

(1) 抵抗曲げモーメントの計算

栈橋の鋼管杭には、地震時や接岸時等に頭部に水平方向から力を受けて曲げモーメントや軸力が生ずる。鉄筋コンクリートと鋼管杭を合成した合成鋼管の設計法は、許容応力度法により現在行われている^{11),12)}。ここでは、構成材料の非線形性を考えて得られる抵抗曲げモーメントの計算法を示す。この方法での計算上の仮定は、以下のとおりである。

- ① コンクリートの引張応力を無視し、ひずみは断面の中立軸からの距離に比例する。
- ② 鉄筋は、同じ断面積を持つ一様厚さの円環とみなす。
- ③ 腐食鋼管杭は、鉄筋と同様に円環としての扱いをする。鋼管杭と鉄筋コンクリートの剛性は、重ね合わせができるとする。ただし、スタッドジベルを打設していない箇所及び鋼管杭の板厚が5 mm以下の箇所では両者の剛性を重ね合わせできないと仮定して鋼管杭の剛性を無視する。
- ④ 破壊に至るまでのコンクリートと鉄筋両者の応力とひずみとの関係は、図-15 に示すように非線形とする。

図-16 に合成鋼管の断面と断面内のひずみ分布及び応力分布を示す。ここでは、鉄筋の一部が圧縮域に入っており、かつ引張域内の鉄筋の一部が降伏応力度を超えている場合について抵抗曲げモーメントの計算式を示す。

他の場合については、付録Bに示す。

まず、鉄筋に関して力の釣り合いと抵抗モーメントを求める。圧縮域内の任意の位置での鉄筋のひずみ $\epsilon_{s'}$ は、次式で得られる。

$$\epsilon_{s'} = \epsilon_c' \frac{r_s \cos \beta_s - r_0 \cos \alpha_0}{r_0(1 - \cos \alpha_0)} \quad (1)$$

ここで、 r_0 ；被覆コンクリート表面までの半径

r_s ；鉄筋位置までの半径

ϵ_c' ；コンクリートの終局ひずみ (0.0035)

α_0 ； r_0 が中立軸と交わる位置を表す角度(図-16参照)

β_s ；任意の鉄筋の位置を表す角度
($\beta_s \leq \alpha_s'$)

また、 r_s が中立軸と交わる位置を表す角度 α_s' は、次式で得られる。

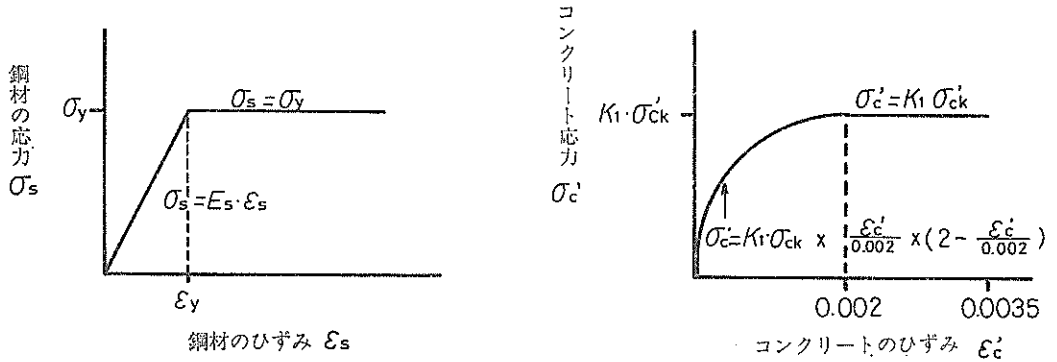


図-15 鋼材とコンクリートの応力ひずみの関係

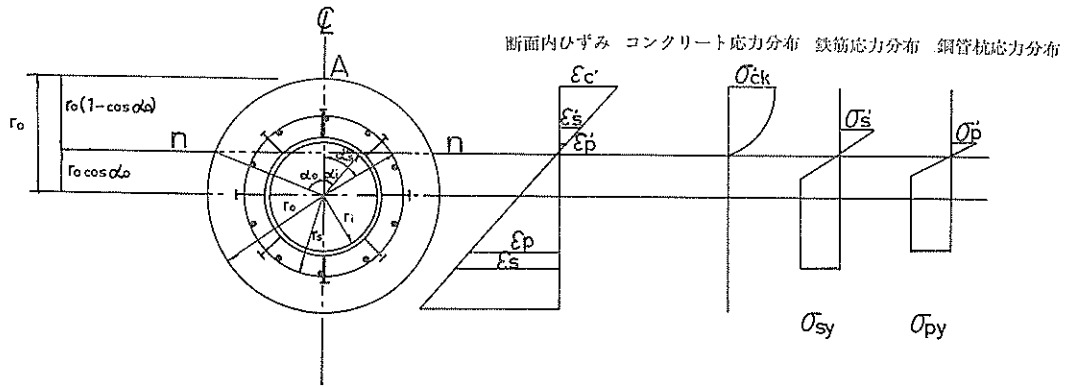


図-16 合成鋼管の断面内ひずみ分布及び応力分布

$$\alpha_s' = \cos^{-1}(r_0 \cos \alpha_0 / r_s) \quad (2)$$

鉄筋の圧縮力 T_b' は、次式で得られる。

$$T_b' = \frac{A_s E_s \varepsilon_c'}{\pi(1 - \cos \alpha_0) r_0} \times (r_s \sin \alpha_s' - r_0 \alpha_s' \cos \alpha_0) \quad (3)$$

ここで、 A_s ; 鉄筋の総断面積

E_s ; 鉄筋のヤング係数

同じく抵抗曲げモーメント M_b' は、次式で得られる。

$$M_b' = \frac{A_s E_s \varepsilon_c'}{\pi(1 - \cos \alpha_0) r_0} \times \{r_s^2(\alpha_s' + \sin \alpha_s' \cos \alpha_s') / 2 - 2r_s r_0 \sin \alpha_s' \cos \alpha_0 + r_0^2 \alpha_s'^2 \cos^2 \alpha_0\} \quad (4)$$

次に引張域内の鉄筋について考える。この域内の任意の位置での鉄筋のひずみ ε_x は、次式で得られる。

$$\varepsilon_x = \varepsilon_c' = \frac{r_0 \cos \alpha_0 - r_s \cos \beta_s}{r_0(1 - \cos \alpha_0)} \quad (5)$$

$$(\pi \leq \beta_s < \alpha_s')$$

鉄筋が降伏応力度を超える位置 y 及びこの位置を表す角度 α_s は、次式で得られる。

$$\left. \begin{aligned} y &= r_0 \{(1 - \cos \alpha_0) \varepsilon_y / \varepsilon_c'\} \\ y &\geq r_0 \cos \alpha_0 \\ \alpha_s &= \pi - \cos^{-1} \{(y - r_0 \cos \alpha_0) / r_s\} \\ y &< r_0 \cos \alpha_0 \\ \alpha_s &= \cos^{-1} \{(r_0 \cos \alpha_0 - y) / r_s\} \end{aligned} \right\} (6)$$

ここで、 ε_y ; 鉄筋の降伏ひずみ

したがって鉄筋の引張力 T_b は、弾性域 (T_1) と塑性域 (T_2) の両者を合計して次式で得られる。

$$T_b = T_1 + T_2 = \frac{A_s E_s \varepsilon_c'}{\pi(1 - \cos \alpha_0) r_0} \times \{r_0(\alpha_s - \alpha_s') \cos \alpha_0 - r_s(\sin \alpha_s - \sin \alpha_s')\} + A_s \sigma_{sy} (\pi - \alpha_s) / \pi \quad (7)$$

ここで、 σ_{sy} ; 鉄筋の降伏応力度

同じく抵抗曲げモーメント M_b も弾性域 (M_1) と塑

性域 (M_b) の両者を合計して次式で得られる。

$$M_b = M_1 + M_2 = \frac{A_s E_s \epsilon_c'}{\pi(1-\cos \alpha_0) r_0} [r_0^2 (\alpha_s - \alpha_s') \cos^2 \alpha_0 - 2r_0 r_s (\sin \alpha_s - \sin \alpha_s') \cos \alpha_0 + r_s^2 \{(\alpha_s - \alpha_s') + (\sin \alpha_s \cos \alpha_s - \sin \alpha_s' \cos \alpha_s)\} / 2] + A_s \sigma_{sy} \{r_0 (\pi - \alpha_s) \cos \alpha_0 + r_s \sin \alpha_s\} / \pi \quad (8)$$

鋼管杭に関しても鉄筋と同じ方法で引張力 T_b と抵抗曲げモーメント M_b を計算できる。鋼管杭についてはすべて引張域内にあるとする。(図-16で想定している中立軸とは異なる)

$$T_p = \frac{A_{sp} E_{sp} \epsilon_c'}{\pi(1-\cos \alpha_0) r_0} \{r_0 \alpha_p \cos \alpha_0 - r_i \sin \alpha_p\} + A_{sp} \sigma_{spp} (\pi - \alpha_p) / \pi \quad (9)$$

ここで, A_{sp} ; 鋼管杭の断面積

E_{sp} ; 鋼管杭のヤング率

σ_{spp} ; 鋼管杭の降伏応力度

r_i ; 鋼管杭までの半径

α_p ; 鋼管杭の応力が σ_{spp} と等しくなる位置を表す角度

$$M_p = M_1 + M_2 = \frac{A_{sp} E_{sp} \epsilon_c'}{\pi(1-\cos \alpha_0) r_0} [r_0^2 \alpha_p \cos^2 \alpha_0 - 2r_0 r_i \sin \alpha_p \cos \alpha_0 + r_i^2 \{\alpha_p + \sin \alpha_p \cos \alpha_p\} / 2] + A_{sp} \sigma_{spp} \{r_0 (\pi - \alpha_p) \cos \alpha_0 + r_i \sin \alpha_p\} / \pi \quad (10)$$

次にコンクリートの圧縮力と抵抗曲げモーメントについて述べる。圧縮域内の任意の位置でのコンクリートに与えられるひずみ ϵ_{cx}' は、次式で得られる。

$$\epsilon_{cx}' = \frac{\cos \beta_c - \cos \alpha_0}{1 - \cos \alpha_0} \epsilon_c' \quad (11)$$

ここで, β_c ; 任意のコンクリートの位置を表す角度

$$(\alpha_0 \leq \beta_c \leq 0)$$

コンクリートのひずみが 0.002 以下では、応力とひずみとの関係は、次式で得られる。

$$\sigma_{cx}' = k_1 \sigma_{ck} \epsilon_c' / \epsilon_{c1} \cdot \frac{\cos \beta_c - \cos \alpha_0}{1 - \cos \alpha_0} \left(2 - \epsilon_c' / \epsilon_{c1} \cdot \frac{\cos \beta_c - \cos \alpha_0}{1 - \cos \alpha_0} \right) \quad (12)$$

ここで, k_1 ; 係数 ($k_1 = 0.85$)

σ_{ck} ; コンクリートの設計基準強度

ϵ_c' ; コンクリートの破壊ひずみ (0.0035)

ϵ_{c1} ; コンクリートの降伏ひずみ (0.002)

α_{c1} ; コンクリートのひずみが ϵ_{c1} と等しくなる位置を表す角度

このひずみ域内でのコンクリートの圧縮力 T_{c1} は、次式で得られる。

$$T_{c1} = \frac{2r_0^2 k_1 \sigma_{ck} \epsilon_c'}{\epsilon_{c1} (1 - \cos \alpha_0)} \left[(\sin^3 \alpha_0 - \sin^3 \alpha_{c1}) / 3 \left\{ 2 + \frac{2\epsilon_c' \cos \alpha_0}{\epsilon_{c1} (1 - \cos \alpha_0)} \right\} - \left(\frac{\alpha_0 - \alpha_{c1}}{8} - \frac{\sin 4\alpha_0 - \sin 4\alpha_{c1}}{32} \right) \frac{\epsilon_c'}{\epsilon_{c1} (1 - \cos \alpha_0)} - \{ \alpha_0 - \alpha_{c1} - (\sin 2\alpha_0 - \sin 2\alpha_{c1}) / 2 \} \left\{ \cos \alpha_0 + \frac{\epsilon_c' \cos^2 \alpha_0}{2\epsilon_{c1} (1 - \cos \alpha_0)} \right\} \right] \quad (13)$$

また、コンクリートの抵抗曲げモーメント M_{c1} は、次式で得られる。

$$M_{c1} = \frac{2r_0^3 k_1 \sigma_{ck} \epsilon_c'}{\epsilon_{c1} (1 - \cos \alpha_0)} \left[\left\{ (\alpha_0 - \alpha_{c1}) / 8 - \frac{\sin 4\alpha_0 - \sin 4\alpha_{c1}}{32} \right\} \left\{ 2 + \frac{3\epsilon_c' \cos \alpha_0}{\epsilon_{c1} (1 - \cos \alpha_0)} \right\} - (\sin^3 \alpha_0 - \sin^3 \alpha_{c1}) / 3 \left\{ 4 \cos \alpha_0 + \frac{3\epsilon_c' + \cos^2 \alpha_0}{\epsilon_{c1} (1 - \cos \alpha_0)} \right\} + \{ (\alpha_0 - \alpha_{c1}) / 2 - (\sin 2\alpha_0 - \sin 2\alpha_{c1}) / 4 \} \left\{ 2 \cos^2 \alpha_0 + \frac{\epsilon_c' \cos^3 \alpha_0}{\epsilon_{c1} (1 - \cos \alpha_0)} \right\} - \{ (\sin^3 \alpha_0 \cos^2 \alpha_0 - \sin^3 \alpha_{c1} \cos^2 \alpha_{c1}) / 5 + 2(\sin^3 \alpha_0 - \sin^3 \alpha_{c1}) / 15 \} \left\{ \frac{\epsilon_c'}{\epsilon_{c1} (1 - \cos \alpha_0)} \right\} \right] \quad (14)$$

コンクリートのひずみが 0.002~0.0035 の範囲では、応力とひずみとの関係が次式で得られる。

$$\sigma_{cx}' = k_1 \sigma_{ck} \quad (15)$$

このひずみ域内でのコンクリートの圧縮力 T_{c2} は、次式で得られる。

$$T_{c2} = r_0^2 k_1 \sigma_{ck} \{ \alpha_{c1} - (\sin 2\alpha_{c1}) / 2 \} \quad (16)$$

また、コンクリートの抵抗曲げモーメント M_{c2} は、次式で得られる。

$$M_{c2} = 2r_0^3 k_1 \sigma_{ck} \left[(\sin^3 \alpha_{c1}) / 3 - \{ \alpha_{c1} / 2 - (\sin 2\alpha_{c1}) / 4 \} \cos \alpha_0 \right] \quad (17)$$

今考えている断面で力の釣り合いをとる。

$$T_{c1} + T_{c2} + T_b' = T_p + T_b \quad (18)$$

この力の釣り合いを満足する α_0 を試行的に求める。中立軸の位置が求めれば、合成鋼管の抵抗曲げモーメント M_{total} は、この軸回りのモーメントの和が次式で得られる。

$$M_{total} = M_p + M_b + M_b' + M_{c1} + M_{c2} \quad (19)$$

(2) セン断抵抗力の計算^{13),14)}

曲げひびわれが進行して、その先端が主応力線にそって徐々に傾斜し、斜めひびわれが発生する。斜めひびわれが発生すると、コンクリートが受け持つ斜め方向の引張力が開放される。この引張力を受け持つ鉄筋がなければ、梁部材は急激に破壊に至る。しかし、斜めひびわれが生じてコンクリートがトラス的あるいは、アーチ的な機構でコンクリートの圧縮部と引張鉄筋とで外力を保持することもできる。この場合には、アーチ部分のコンクリートが圧縮破壊すれば、梁部材が破壊に至る。梁がせん断破壊を生じる時のひびわれの状況を図-17に示す。限界状態設計法（土木学会、昭和61年制定）では、梁部材のせん断抵抗力（ V ）はトラス機構で受け持つせん断抵抗力（ V_{cd} ）とせん断補強鉄筋で受け持つせん断抵抗力（ V_{sd} ）の合計で算定する。トラス機構で受け持つせん断抵抗力 V は、次式で得られる。

$$V_{cd} = f_{vd} b w d / \gamma_b \quad (20)$$

ここで、 f_{vd} ；コンクリートのせん断強度の設計用値

$$f_{vd} = f_{v0d} (1 + \beta_a + \beta_p + \beta_n)$$

f_{v0d} ；コンクリートのみかけのせん断強度の特性値 $f_{v0d} = f_{vk} / \gamma_c$

f_{vk} ；コンクリートのみかけのせん断強度の設計用値 $f_{vk} = 0.94 f'_{ck}{}^{1/3}$

f'_{ck} ；コンクリートの圧縮強度の特性値

b_w ；部材腹部の幅

d ；部材断面の有効高さ

β_a ；有効高さに関する係数

$$\beta_a = (100/d)^{1/4} - 1 \geq 0 \quad (d: \text{cm})$$

β_p ；軸方向鉄筋比に関する係数

$$\beta_p = (100 p_w)^{1/2} - 1 \leq 0.73$$

p_w ；軸方向鉄筋比

β_n ；軸方向力に関する係数

$$\beta_n = M_0 / M_d \leq 1$$

M_0 ；断面内に引張応力を生ずる限界の曲げモーメント

M_d ；曲げモーメントの設計用値

γ_c ；コンクリートの材料係数

γ_b ；部材係数

せん断補強鉄筋で受け持つせん断抵抗力は、次式で得られる。

$$V_{yd} = A_w f_{wyd} z (\sin \alpha + \cos \alpha) / s / \gamma_b \quad (21)$$

ここで、 A_w ；一組のせん断補強鉄筋の断面積

f_{wyd} ；せん断補強鉄筋の降伏強度の設計用値

z ；圧縮合力の作用点から引張鉄筋断面の

図心までの距離 ($z = d/1.15$)

α ；せん断補強鉄筋と部材軸とのなす角度

s ；せん断補強鉄筋の間隔

したがって、梁部材のせん断抵抗力 V は、以下の式で得られる。

$$V = V_{cd} + V_{yd} \quad (22)$$

次にタイドアーチ的な機構でのせん断抵抗力について説明する。タイドアーチと考えた場合の力学モデルの概要を、図-18に示す。タイドアーチでの力の釣り合いは、次式で得られる。

$$V = C \sin \alpha \quad (23)$$

ここで、 C は水平方向の圧縮力、 V はせん断力をそれぞれ表す。ただし α は図-18に示すように $\alpha = \tan^{-1}(d/a)$ で求める。

C は、次式で得られる。

$$C = \nu \sigma'_c A \quad (24)$$

ここで、 σ'_c ；コンクリートの圧縮強度

ν ；コンクリートの圧縮強度にかんする管理供試体の低減係数 (≈ 0.7)

A ；圧縮域の面積

3.2 スタッドジベルのせん断耐力

鉄筋コンクリートと鋼管杭との合成は、スタッドジベル¹⁵⁾を介して行われる。スタッドジベルの概要を図-19に示す。スタッドジベルには、頭付きとネジ付きの2種類がある。スタッドジベルを鋼管杭に打設（溶接）する場合には、表-1に示す仕様で行う。スタッドジベルは軸径が12~16mm、高さが数~10cm程度のものが良く使われる。スタッドジベルは、鋼管杭軸線方向及び円周方向に等間隔に配置することを原則とする。スタッドジベルの打設に必要な鋼管杭の最小板厚は5mm以上、あるいは軸径の1/3以上としている。腐食が著しく進行している箇所では、スタッドジベルを打設しない。また、打設前には、ケレン作業を行い付着生物や錆びを良く落としておくのが良い。曲げと軸力を受ける補修工でのスタッドジベルの必要本数 (n) は次式により得られる。

$$N + 2M/r < Q \cdot n \quad (25)$$

ここで、 N ；鋼管杭に作用する軸力

M ；鋼管杭に作用する曲げモーメント

n ；スタッドジベルの本数

r ；鋼管杭の外縁半径

Q ；スタッドジベルの1本当りの許容せん断力

スタッドジベルの1本当りの許容せん断力は、押抜きせん断試験、疲労試験^{10)~18)}等により各方面で求められている。この許容せん断力は、コンクリートの強度や打

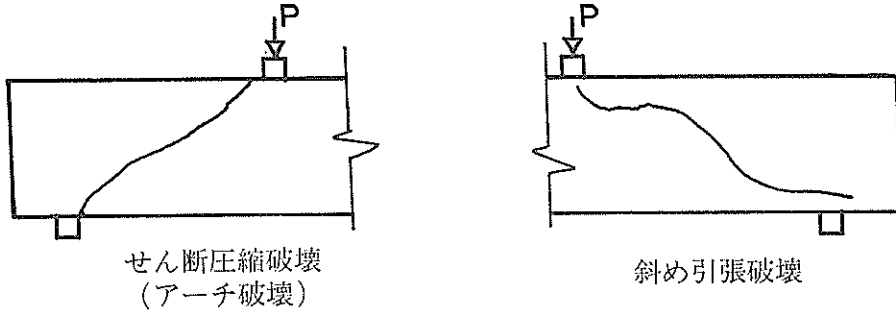


図-17 せん断破壊時のひびわれの状況

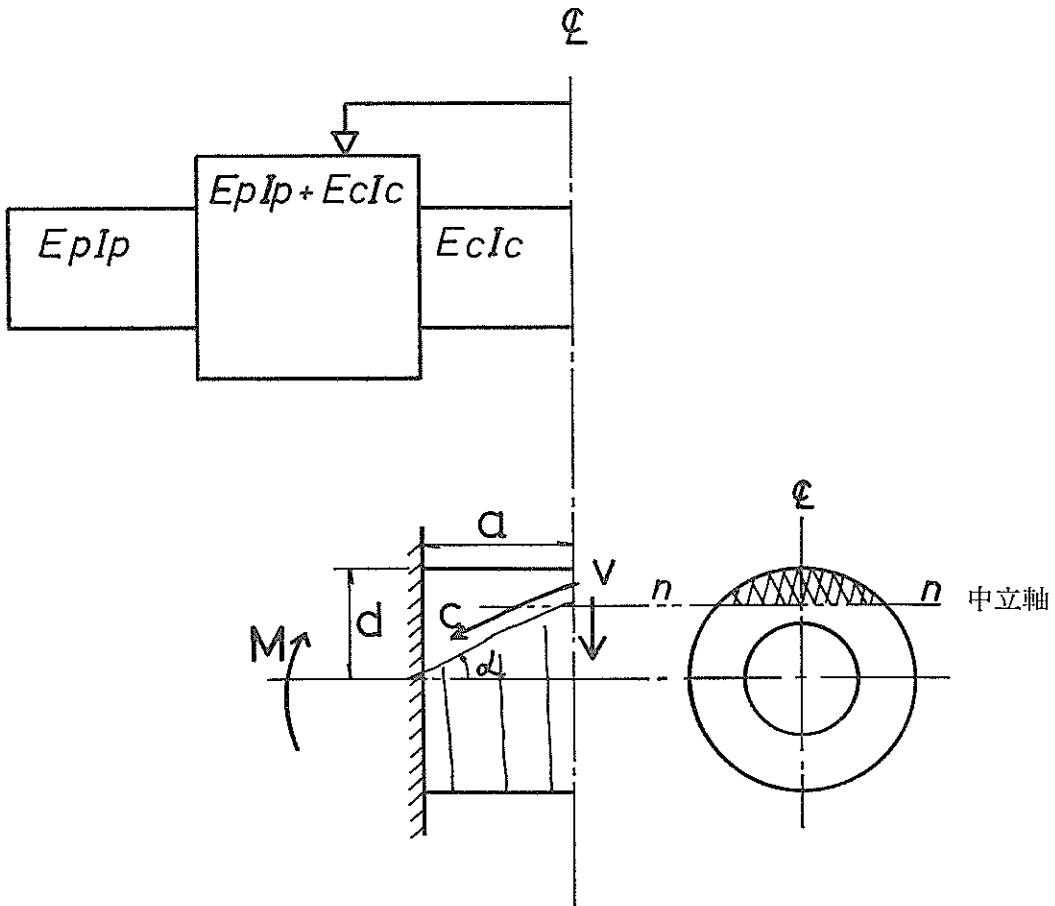


図-18 アーチの力学モデルの概要

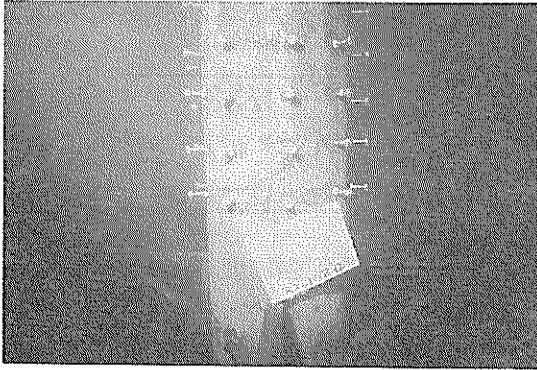


図-19 スタッヂベルの概要

表-1 スタッヂベルの打設（溶接）仕様

スタッヂベルの打設間隔		80mm以上
スタッヂベルの寸法	径	12~16mm
	長さ	50~200mm
母材条件	板厚	スタッヂベル径の1/3以上又は5mm以上
	表面仕上	約30φの範囲 2種ケレン

設方向、スタッヂベルの寸法や本数、配筋状態、外力の種類等によって異なると考えられる。橋梁の合成床版に用いられる場合のスタッヂベルの必要本数は、道路橋示方書・同解説に示される式で算定できる。今回の補修工では、道路橋のような荷重が作用しないこと及び被覆厚さの薄い鉄筋コンクリートの中に多数打設されることから、道路橋示方書・同解説の式をそのまま用いることには問題があると考えられる。そこで実際のスタッヂベルの打設状況に合わせ許容せん断力を設定する。

ここでは、鉄筋コンクリート被覆の合成鋼管の押抜きせん断試験の結果に基づいて以下の値を設定する。BS 5400, PART (5) (1979年)¹⁰⁾に示す一本当りの公称静的せん断強度は、コンクリートの強度とスタッヂベルの寸法によって設定される。たとえば、スタッヂベルの軸径が16mm、高さ75mm、コンクリートの設計基準強度が266kgf/cm²の場合の一本当り公称静的せん断力は、7.6tfである。

一本当りの許容せん断力は、安全率を3と設定するば約2.5tfとなる。スタッヂベルは、許容応力度法で設計を行う。

3.3 ひびわれ幅

補修工での鉄筋コンクリート被覆は、材料の耐久性に

関して、厳しい海洋環境下に置かれる。対象としている施設で補修後に何年間使用するかによってどの程度の耐久性を考えるかが決まるが、ここでは、少なくとも20~30年間は使用するとする。材料の耐久性を確保するためには、各種の方法が提案されている。ここでは、鉄筋コンクリート被覆の使用時のひびわれ幅を制限する方法を採用する。ただし、良質なコンクリートの使用、鉄筋のかぶりをすくなくとも7cm以上にする等の、通常の海洋コンクリートに求められる仕様は確保しているものとする。また、地震力、接岸力等の一時的な外力によるひびわれ幅は、ここでは考えない。曲げひびわれの発生するモーメント M_e は、次式で求められる。

$$M_e = \sigma_{ct} I_e / y \quad (26)$$

ここで、 I_e ；換算断面二次モーメント

$$I_e = I_e + n I_s = \pi (r_o^4 - r_i^4) / 4 + n A_s r_s^2 / 2$$

y ；図心から外縁までの距離

σ_{ct} ；コンクリートの曲げ引張強度

n ；コンクリートと鉄筋のヤング係数の比

異形鉄筋を用いた鉄筋コンクリートの耐久性の確保の一つの目安は、特に厳しい腐食性環境の場合、ひびわれ幅を0.0035c以下に押さえることである。ここでcは、かぶり厚さである。たとえば、かぶり厚さ7cmをとすると許容ひびわれ幅は、0.02cmとなる。このことにより耐久性に重要な要因となる鉄筋の錆びの発生を制限できると考えらる。ひびわれの発生要因としては、曲げ、せん断、軸力等の外力によるもの、鉄筋の腐食による膨張、コンクリートの乾燥収縮等がある。それぞれの要因に対して、ひびわれ幅を適正に評価できればよいが、現状では、それぞれの要因に対して十分な知見が得られてないこともあって、曲げによるひびわれ幅の制限のみを考えている。すなわちせん断、軸力等によるひびわれに関しては、今後の課題となっている。ところで曲げによるひびわれ幅は、鉄筋に生ずる応力度と密接な関係にあるので、鉄筋に与えられる応力度の増加量を制限すると考えても良い。ここでは、角田の提案する式によりひびわれ幅を評価する。

$$w = k_1 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \times (\sigma_{se} / E_s + \epsilon_{cs}') \quad (27)$$

ここで、 w ；ひびわれ幅

k_1 ；鉄筋の付着性状を表す定数 ($k_1 = 1.0$)

c ；鉄筋のかぶり厚さ

c_s ；鉄筋の中心間隔

ϕ ；鉄筋径（公称直径）

σ_{se} ；鉄筋応力度の増加量

ϵ_{cs}' ；コンクリートの乾燥収縮及びクリープによるひびわれ幅の増加するためのひずみ

量

4. 載荷試験の対象と試験体の設定

試験の対象とする鉄筋コンクリート被覆による補修工では、鋼管杭のある一部分で腐食が著しく進行し、その箇所にスタッドジベルが打設できない状態を設定する。また、この箇所では、板厚の減少が大きく鋼管杭の強度を見込めないとする。この箇所の両側では、鋼管杭の板厚がまだ十分あり、スタッドジベルが打設できると設定する。すなわち、鋼管杭の無い箇所を挟んで両側に鉄筋コンクリートを被覆する。ただし鋼管杭全体にわたっては被覆しない。被覆した箇所では、鋼管杭と鉄筋コンクリートとが一体、すなわち両者の剛性がスタッドジベルにより合成されているとする。腐食の激しい箇所では、鉄筋コンクリート被覆のみで、被覆部分で腐食の激しくない箇所では、鋼管杭と鉄筋コンクリートの両者でそれぞれ曲げモーメントに抵抗する。上部工から杭頭に作用する軸力は、スタッドジベルを介して杭底へ伝達されると考える。今回の研究では、鉄筋コンクリート被覆工法の力学特性の把握を目的としているが、補修工に作用する外力の内、曲げと軸力の二種類に大別してそれぞれについて載荷試験をおこなう。曲げ載荷試験については、鉄筋コンクリートと鋼管杭の合成部分と鉄筋コンクリートのみの部分で構成される梁を対象としている。一方、軸力については、鉄筋コンクリートと鋼管杭の合成部分のみを対象としている。この部分でのスタッドジベルの軸力に対する抵抗、すなわち、鋼管杭とコンクリートの境界面でのせん断抵抗を調べるため、押抜きせん断試験を行う。以上述べたとおり曲げと軸力とを別個に取扱う。

5. 曲げ載荷試験²⁰⁾

5.1 試験体の製作

(1) 試験体の構造

7体の試験体を対象に曲げ載荷試験を行う。試験体の概要を図-20に、一覧を表-2におのおの示す。試験体の全長は、3.50mである。鋼管杭の外径は、31.85cm、板厚は6.9mmで、材質がSTK41である。鋼管杭は、工場より出荷されたもので、海洋環境下に置かれておらず表面は腐食していない。鉄筋コンクリートの被覆厚さは約14cmで、試験体の外径が0.6mである。No.1の試験体は、鉄筋コンクリートのみ、No.7の試験体は、鋼管杭のみで、おのおのの材料だけの場合の力学特性を調べるためのものである。No.2からNo.6までの試験体は、鋼管杭と鉄筋コンクリートで製作されている。これらの

試験体では、中央の50cmの範囲に鋼管杭が存在していない。鉄筋コンクリートの被覆長さとスタッドジベルの本数が各試験体で異なっている。No.3の試験体は、片側が半分を被覆し、片方は、全部を被覆してある。今回の試験体のなかでは、一番現地の状況に類似している。No.4からNo.6までの試験体では中央部分のみが被覆されている。すなわち鋼管のみの部分、合成鋼管の部分および鉄筋コンクリートのみの部分の3部分で試験体が構成されている。鉄筋コンクリート内の配筋は、図-21に示すように主鉄筋と帯鉄筋とである。主鉄筋は材質がSD30A、D16である。主鉄筋の本数は、10本で円周方向に等間隔に配置してある。帯鉄筋は、材質がSD30A、D10で15cm間隔に鋼管軸方向に配置してある。スタッドジベルは、直径が16mm、高さが75mmで頭部にねじを切ってナットが取り付けられている。主鉄筋は、この頭部の下、帯鉄筋は脇に配置してある。鉄筋のかぶり厚さは約8cmである。コンクリートの打設は、現地の状況になるべく合せるように試験体を鉛直に立てて行う。型枠としては、鋼製型枠を用いて打設時に棒状バイブレーター等で振動を与えながらコンクリートを流し込む。

(2) 使用材料

用いるセメントは、普通ポルトランドセメントである。この試験成績結果を表-3に示す。粗骨材は、神奈川県中井産であり最大寸法が10mmである。この試験成績結果を表-4に示す。細骨材は、千葉県君津産である。表-5にコンクリートの配合を示す。コンクリートの設計基準強度は、240kgf/cm²、スランプは12cmである。混和剤として減水剤を使用する。鋼材の試験成績結果を表-6に示す。

5.2 試験方法

(1) 載荷方法

載荷試験の概要を、図-22に示す。載荷は対称2点載荷で静的に行う。支点間の距離は3mで、載荷点の距離が0.85mである。支点治具及び載荷治具は、90度の角度で試験体に接するようにする。すなわち1/4円の面を持つ治具である。この面に薄いゴム板を置いて試験体と治具とが良く接するようにする。載荷は、載荷桁と載荷治具の間に設置した容量100tfの油圧ジャッキにより行い、2ft刻みで単調増加させる。ただし、初期ひびわれ発生時及び鉄筋降伏時でいったん除荷する。鉄筋降伏時までは、このように荷重制御で載荷し、降伏後は変位制御で載荷を行う。変位制御では、降伏時の油圧ジャッキ位置での変位(δ_y)を基準にして $2\delta_y$ 、 $3\delta_y$ 、……のように載荷を行う。

(2) 計測方法

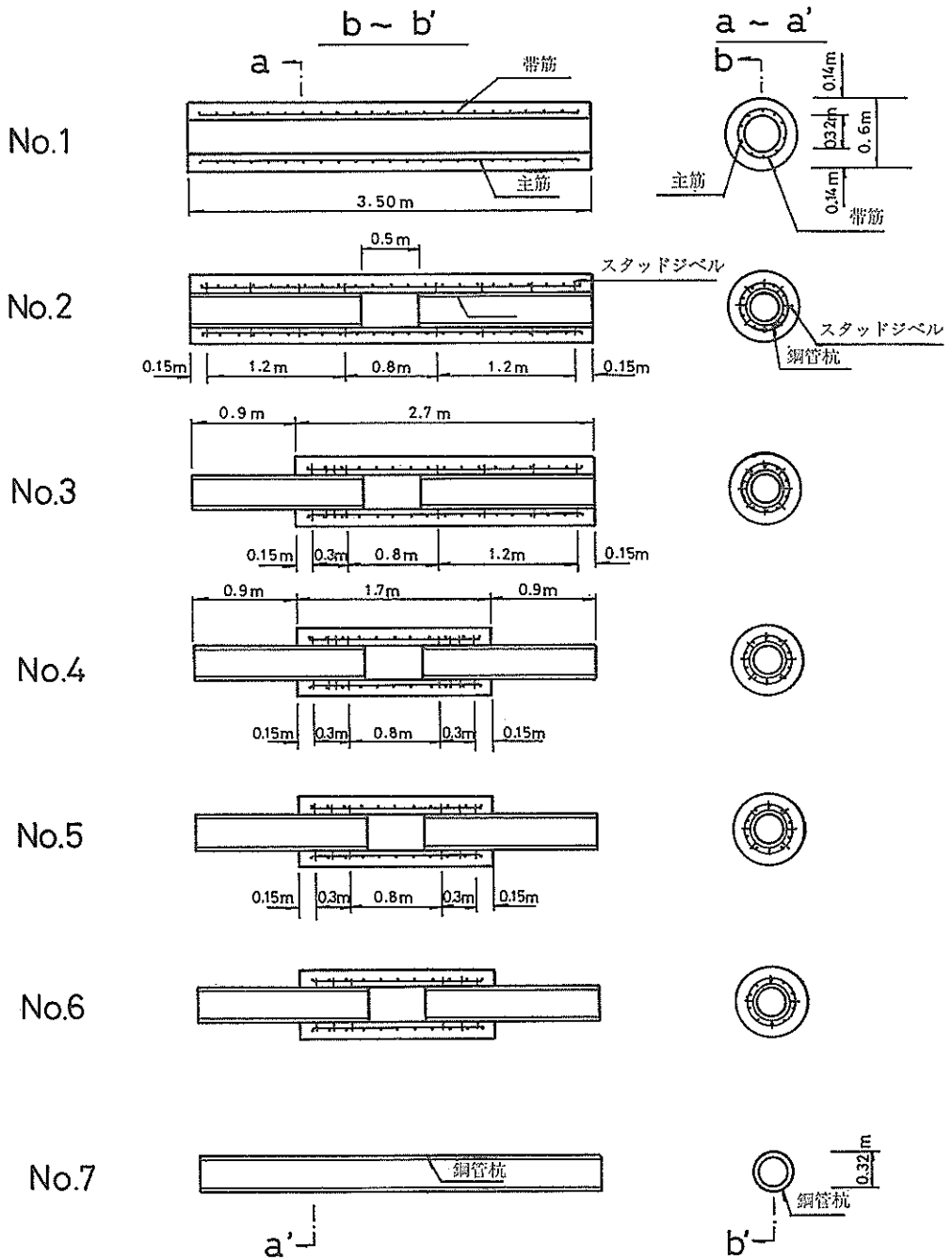


図-20 曲げ载荷試験体の概要

鉄筋コンクリート被覆による腐食鋼管杭の補修工の耐力特性

表-2 曲げ試験体の一覧

試験体名	鉄筋コンクリート被覆長	スタッドジベル本数 (片側)	鋼管杭の長さ	備 考
No. 1	3.5m	—	—	外径; 60cm, 内径; 31.9cm
No. 2	3.5m	32本 (8本×4)	1.5m×2本	鉄筋コンクリート被覆厚さ; 約14cm
No. 3	2.7m	32本 (8本×4)	1.5m×2本	主鉄筋; 10-D16 (SD30A)
No. 4	1.7m	32本 (8本×4)	1.5m×2本	帯鉄筋; D10 (SD30A)
No. 5	1.7m	24本 (8本×3)	1.5m×2本	鋼管杭; φ318.5mm, t=6.9mm (STK41)
No. 6	1.7m	12本 (4本×3)	1.5m×2本	
No. 7	—	—	3.5m×1本	スタッドジベル; SM16×70

表-3 使用セメントの試験成績結果

試験項目 種 類	比重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結			安定性	圧縮強さ (kgf/cm ²)				酸 化 マ グ ネ シ ウ ム (%)	三 酸 化 硫 黄 (%)	強 熱 減 量 (%)
			水 量 (%)	始 発 (h-min)	終 結 (h-min)		1 日	3 日	7 日	28 日			
普通セメント	3.15	3110	28.6	2-58	4-05	良	—	145	255	422	1.5	1.9	0.5
JIS R 5210	—	2500以上	—	60min 以上	10h 以下	良	—	70以上	150以上	300以上	5.0以下	3.0以下	3.0以下

表-4 使用粗骨材の試験成績結果

比 重		単位容量 重量 (kgf/m ³)	フルイ分け通過質量百分率(%)			粗骨率
表乾	絶乾		10 mm	5 mm	2.5mm	
2.65	2.63	1700	96	31	2	5.17

表-5 コンクリートの配合

設計基準 強度 (kgf/cm ²)	粗 骨 材 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空 気 量 (%)	水セメント 比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kgf/m ³)				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
240	10	12	4	53.0	46.5	162	306	851	979	3.06

表-6 鋼材の試験成績結果

種 類	(公称) 直 径	規格記号	降 伏 点 (kgf/cm ²)	引張り強さ (kgf/cm ²)	伸 び (%)
鋼 管 杭	φ 318.5mm	STK41	3800	4700	33.0
主 鉄 筋	D16	SD30A	3480	5320	27.4
帯 鉄 筋	D10	SD30A	3810	5580	23.4
スタッドジベル	φ 16	SM16	—	4030	17.2

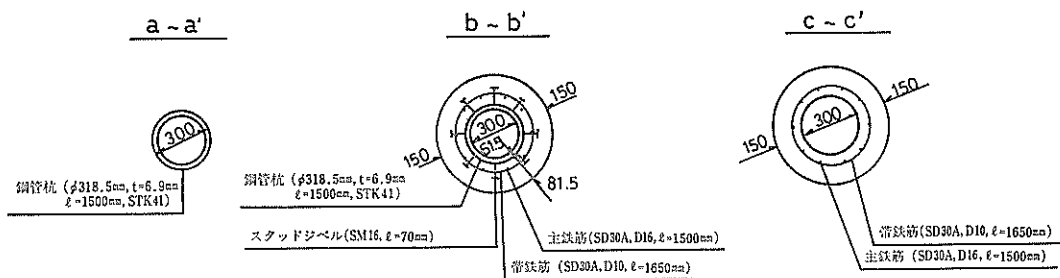
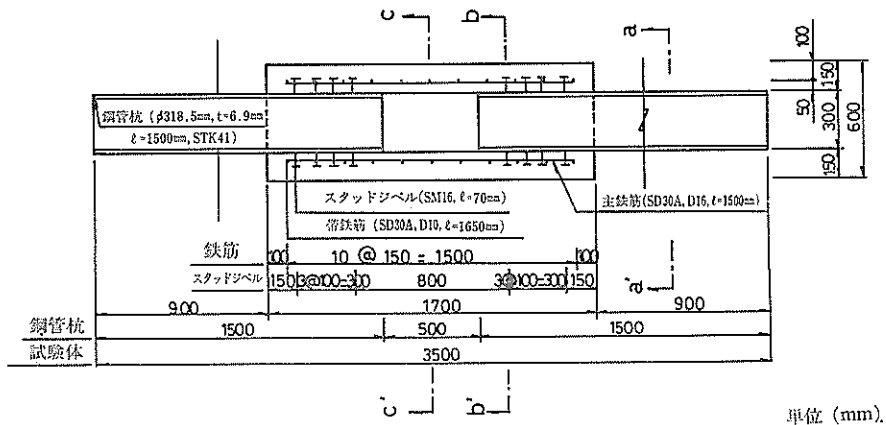


図-21 曲げ荷重試験体の配筋図 (No. 4)

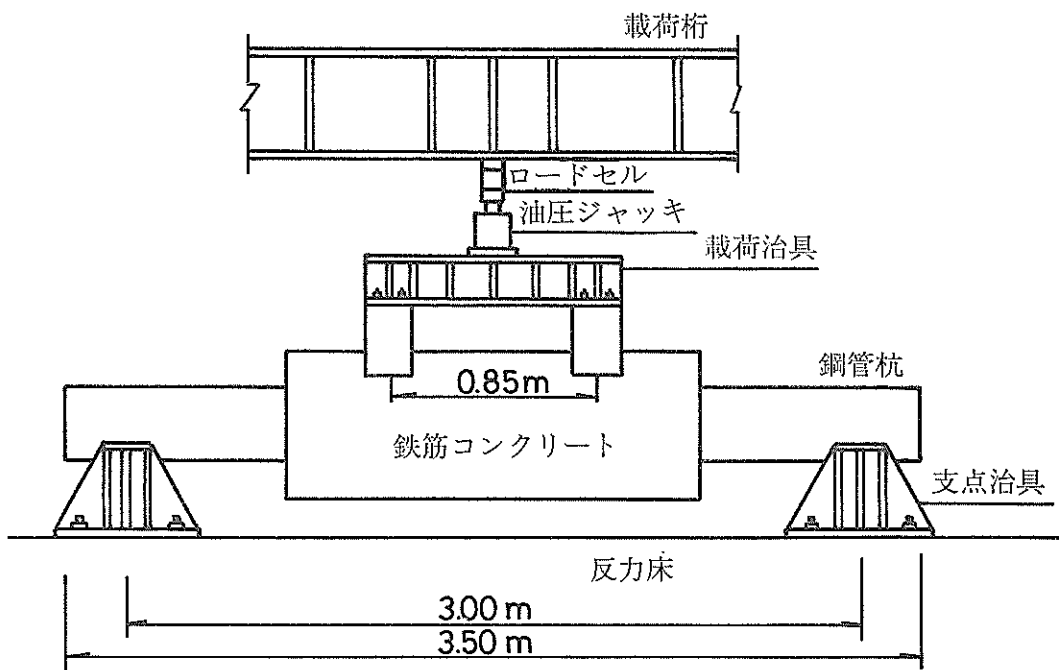
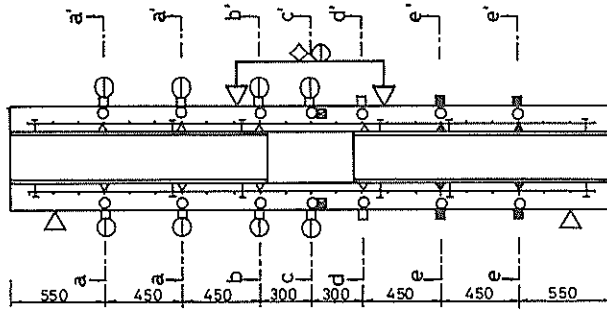


図-22 曲げ荷重試験の概要

鉄筋コンクリート被覆による腐食鋼管杭の補修工の耐力特性



測定機器名	記号	数量
鋼管杭	▲(一方向) △(二方向)	24
ひずみゲージ	□(一方向) ○(二方向)	34
変位計	◇	6
主鉄筋	○	32
変位計	⊕	9
ロードセル	◇	1

単位 (mm)

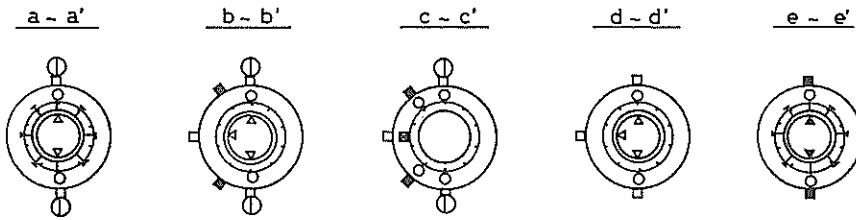


図-23 計測機器の配置図 (No. 2)

計測項目と方法は、以下のとおりである。

- ① 載荷荷重……油圧ジャッキに取り付けたロードセル
- ② 試験体の軸方向にそった鉛直変位量……変位計
- ③ 鋼管杭と鉄筋コンクリート被覆間の相対変位量……変位計
- ④ 鋼管杭、コンクリート及び鉄筋のひずみ量……ひずみゲージ
- ⑤ コンクリートのひびわれ幅…… π 型ゲージ

ひずみゲージ計測点数は、各試験体で異なるが、図-23に試験体番号No. 2 の場合を示す。このケースでは、鋼管杭に24枚、鉄筋に38枚、コンクリートに34枚のひずみゲージが貼付けられている。鋼管杭には長さ6 mm、鉄筋には長さ3 mm、コンクリートには長さ30mmのひずみゲージをそれぞれ用いる。変位計の個数は9個である。ひびわれ幅は、試験体の下端に取り付けた π 型ゲージ9個で計測を行う。 π 型ゲージの標点間隔は100mmである。載荷途中のひびわれの進展は、目視により観察を行い試験終了後にスケッチする。

5.3 試験結果

(1) 載荷荷重と変位の関係

曲げ載荷試験の結果を表-7に示す。また、各試験体の

表-7 曲げ載荷試験結果

試験体名	ひびわれ発生荷重	ひびわれ幅0.2mm 時の荷重	鉄筋降伏荷重	終局荷重
No. 1	10.12tf	11.92tf	29.57tf	54.16tf
No. 2	7.92tf	11.92tf	26.58tf	54.49tf
No. 3	4.99tf	14.12tf	24.24tf	47.63tf
No. 4	8.12tf	11.92tf	20.11tf	43.36tf
No. 5	10.05tf	12.12tf	22.11tf	44.10tf
No. 6	4.19tf	12.12tf	20.25tf	36.97tf
No. 7			*26.00tf	35.18tf

注) *印は、試験体No. 7の鋼管杭の降伏荷重を示す。

荷重と変位との関係を図-24に示す。

試験体No. 1 は鉄筋コンクリートのみ、No. 7 は鋼管杭のみの試験体である。終局荷重は油圧ジャッキで載荷中の最大荷重を、鉄筋降伏荷重は主鉄筋が降伏応力度を超えときの荷重、ひびわれ発生荷重はコンクリートに初めてひびわれが生じた荷重である。No. 1 での終局荷重は54.16tf、鉄筋降伏荷重は29.57tf、ひびわれ発生荷重は10.12tfであった。No. 2 は、試験体の中央の0.5mの範囲以外に鋼管杭が存在するが、終局荷重等に関して

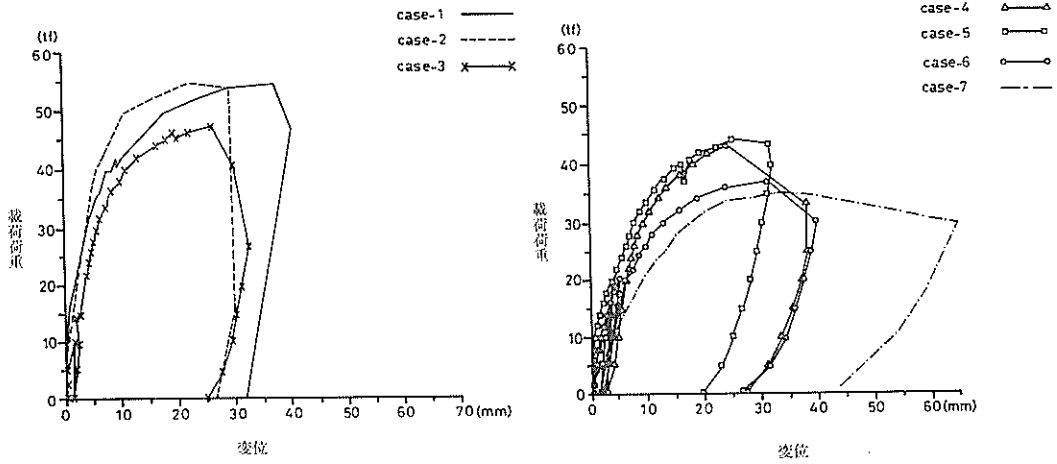


図-24 載荷荷重～変位

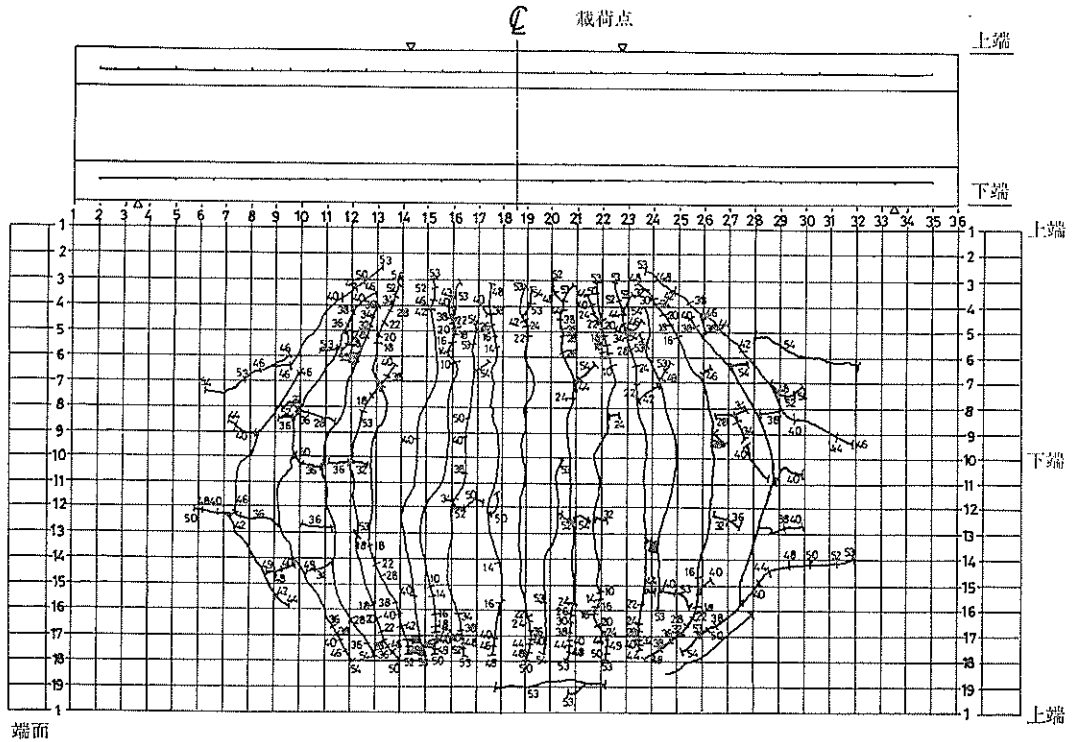


図-25 ひびわれの発生状況 (No. 1)

鉄筋コンクリート被覆による腐食鋼管杭の補修工の耐力特性

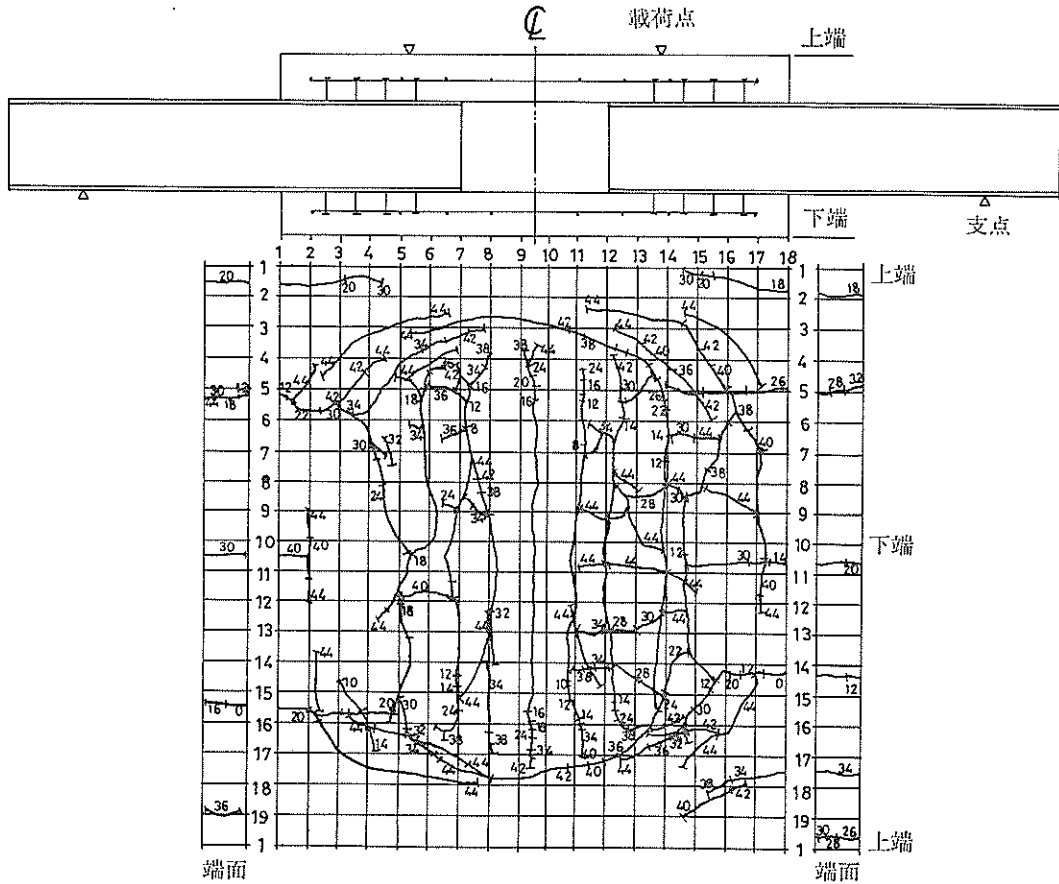


図-26 ひびわれの発生状況 (No. 4)

No. 1 の場合とほとんど大差がなかった。しかし、鉄筋コンクリートの被覆の範囲が狭くなると終局荷重等が低下した。No. 4, No. 5 及び No. 6 では、被覆範囲が同じでスタッドジベルの本数が異なっている。No. 4 では総計64本、No. 5 では、48本のスタッドジベルが打設されているが、終局荷重等に関して差はなかった。しかし、スタッドジベルの本数が24本の場合には、16%ほど終局荷重が低下した。No. 6 の鉄筋降伏荷重は、ほとんど No. 5, No. 6 と同じだったが、ひびわれ発生が4.19tf と小さい荷重で生じた。

図-24 に示す荷重と変位との関係では、鉄筋コンクリートを被覆した試験体では油圧ジャッキでの鉛直変位が20~30mmになると、載荷荷重が低下してきた。30mmを超えると載荷荷重はさらに急激に低下した。鋼管杭のみの試験体番号No. 7 では、載荷荷重が最大値になった後でも載荷荷重が、さほど低下せずに変位だけが増大し

た。

(2) ひびわれの発生状況と破壊型式

図-25 に No. 1 の試験体でのひびわれの発生状況を示す。この図では、コンクリート表面を展開してひびわれ図を書いてある。一個のますめの寸法は10cmで、縦軸の10番目の線が試験体の下端である。両側のますめは、鉄筋コンクリートの端面を展開して示している。ひびわれを示す線のそばの数値は、載荷荷重を示す。載荷を開始し荷重が10tfのとき、載荷点の下のコンクリート下端より曲げひびわれが発生した。載荷荷重が増加するに従って曲げひびわれは、上方へ向かって進展しひびわれの本数も増加した。ひびわれの間隔は、おおよそ10~15cmであった。載荷点の内側の鉄筋コンクリート部分では曲げひびわれが卓越したが、載荷点の外側では、40tfを過ぎたあたりから、斜め方向にせん断ひびわれが見られた。終局状態では、鉄筋コンクリートの中央上端でコ

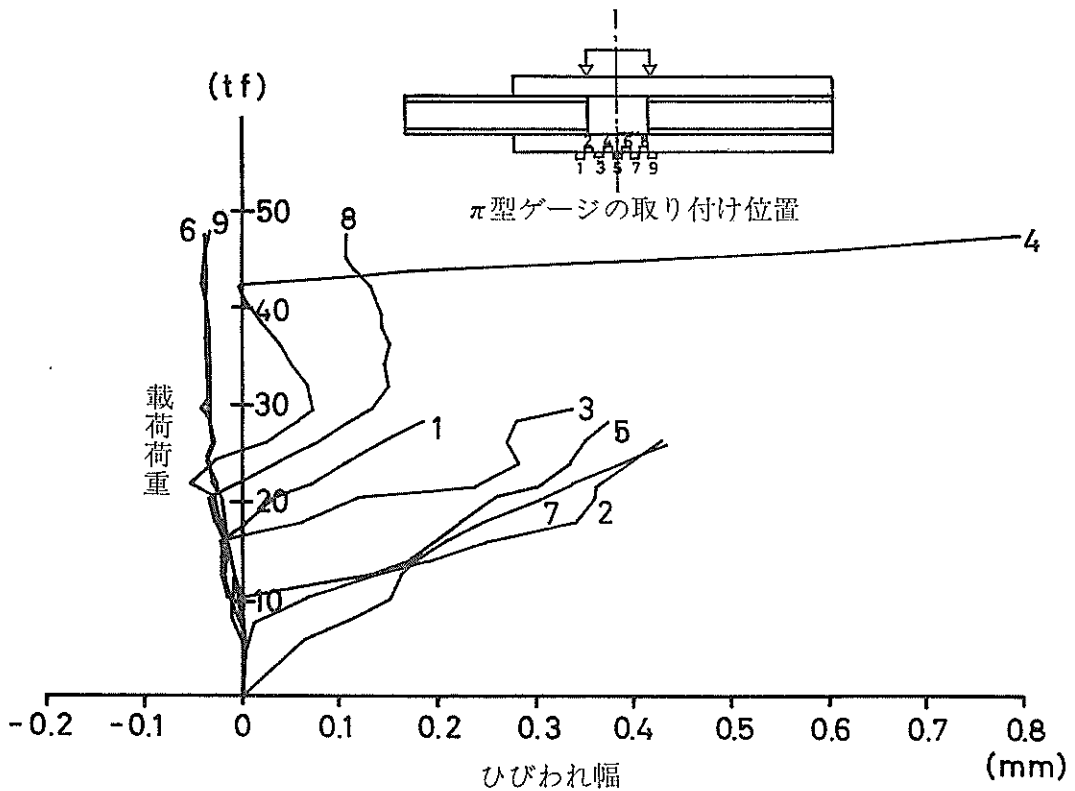


図-27 ひびわれ幅と載荷荷重 (No. 3)

ンクリートの圧縮破壊が見られた。典型的な曲げせん断破壊と言える。また、スタッドジベルの破壊や主鉄筋の破断は、見られなかった。

No. 2 の試験体では、No. 1 の試験体と同様に曲げせん断破壊によって破壊に至った。ただし、支点付近で鋼管杭軸方向に 2, 3 のひびわれが発生した。

図-26にNo. 4でのひびわれの発生状況を示す。載荷荷重 8tf で、鉄筋コンクリート内の鋼管杭の端部の下端に最初曲げひびわれが発生した。その後載荷荷重が12tfになると、鉄筋コンクリート端部の上端から約45度の位置に軸方向にひびわれが発生した。その位置で鉄筋コンクリートが鋼管杭より剝離した。載荷荷重が増加するに従って曲げひびわれが進行するとともに、せん断ひびわれ及び鋼管杭軸方向のひびわれも進展した。40tf を過ぎると、せん断ひびわれが、載荷点付近で顕著となり、被覆した鉄筋コンクリートが鋼管杭より剝離してきた。最終的には、コンクリートの圧壊が載荷点間で発生して試験体の破壊に至った。その際スタッドジベル、主鉄筋、鋼

管杭等の鋼材の破壊は、見られなかった。

No. 5, No. 6 のように鉄筋コンクリートが、一部の鋼管杭に被覆されているときは、No. 4 と同様にせん断破壊が終局時に卓越した。

図-27にNo. 3 の試験体でのひびわれ幅と載荷荷重との関係を示す。ひびわれ幅は、試験体の下端で鋼管杭軸方向に計測した。下端でのひびわれは、いずれも曲げひびわれであった。この試験体では、5tf のときにひびわれの発生が認められた。計測区間の80 cmでは、4本のひびわれが載荷荷重 20tfまでに発生した。ひびわれ幅はコンクリートの耐久性と関連するが、その目安を 0.02 cm と考えるとこの試験体では、12~13tf と小さな載荷荷重で、このひびわれ幅を持つひびわれが発生したことになる。他の試験体でも同様な載荷荷重でひびわれ幅が0.02 となった。

(3) ひずみ量と分布状況

図-28に試験体No. 3の鋼管杭、主鉄筋及びコンクリートのひずみ分布を示す。同図で上側の図は、試験体上端

鉄筋コンクリート被覆による腐食鋼管杭の補修工の耐力特性

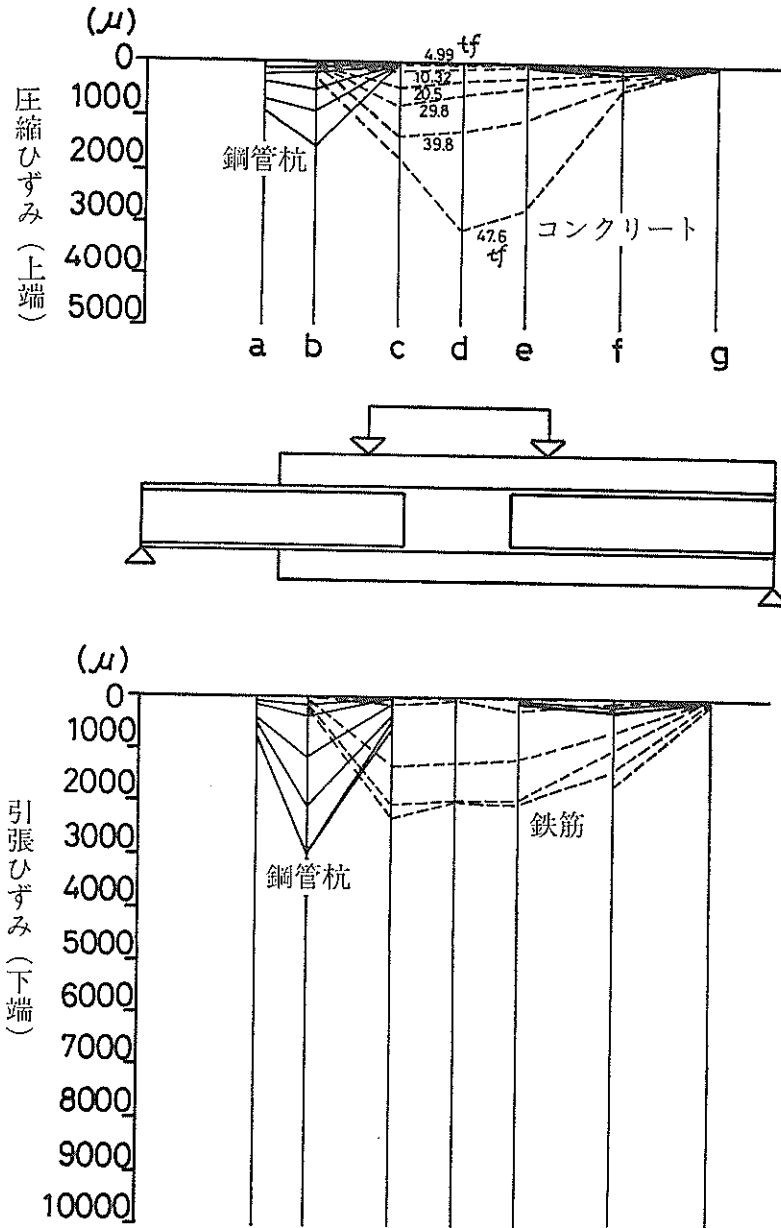


図-28 ひずみ分布 (No. 3)

の軸方向の鋼管杭とコンクリートとのひずみ分布であり、下側の図は、下端での鋼管杭と主鉄筋とのひずみ分布である。試験体の右半分では、鉄筋コンクリートが鋼管杭全体に被覆しているが、ひずみの値は、コンクリートの方が鋼管杭よりも大きく、主に鉄筋コンクリートで外力に抵抗していたことがわかる。試験体の左半分では、鉄筋コンクリートが鋼管杭の一部にしか被覆されていない

が、この部分の鋼管杭とコンクリートのひずみ量は、載荷荷重の増加とともに増し、両者で外力に抵抗したことがわかる。

図-28 に示す試験体のb点では、鋼管杭のひずみ量が大きかったが、コンクリートのひずみ量は非常に小さかった。c点では、逆に鋼管杭のひずみ量は小さく、コンクリートのひずみが大きかった。b点の周辺部分では、

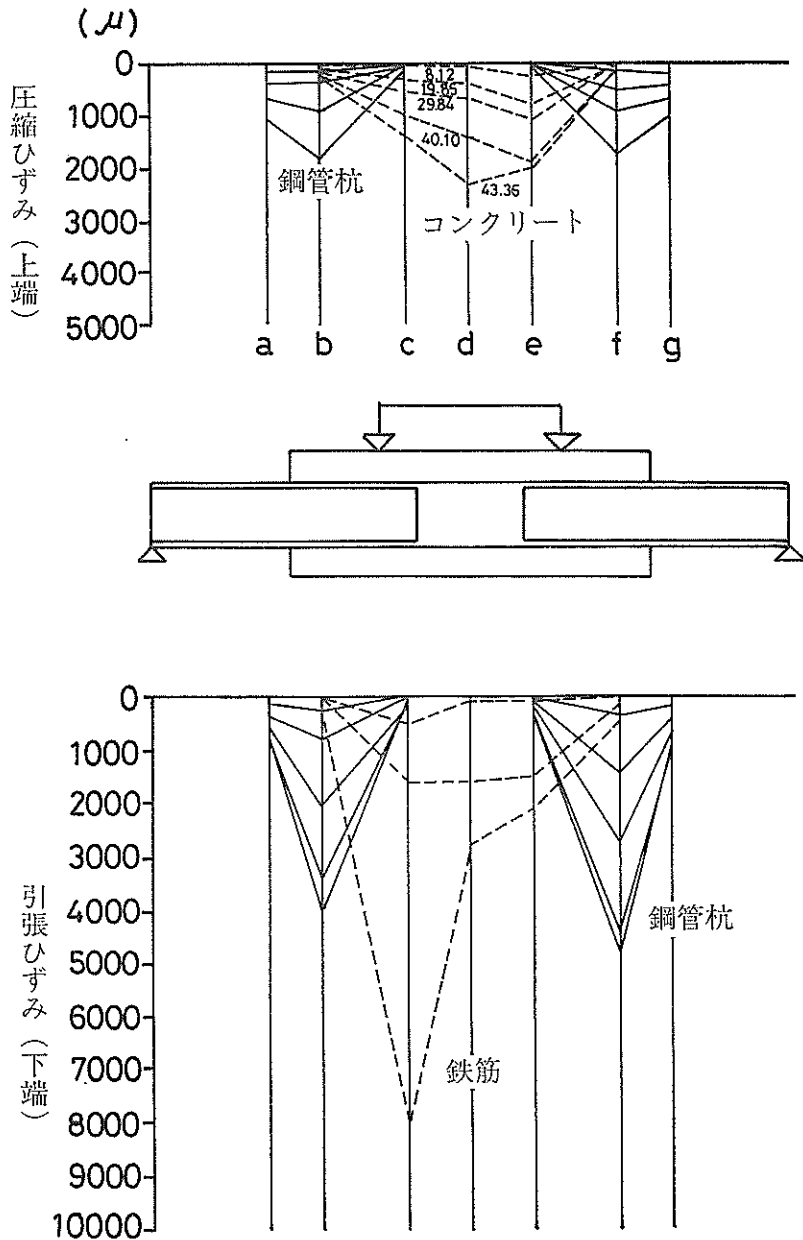


図-29 ひずみ分布 (No. 4)

スタッドジベルによって鋼管杭と鉄筋コンクリートとが合成され力の伝達が比較的滑らかに行われていたことがわかる。

No. 2 の試験体では、鉄筋コンクリートが鋼管杭全体に被覆されているが、この試験体では、鋼管杭よりも鉄筋コンクリートで主に外力に抵抗し、No. 3 の試験体で

の右半分と同じ傾向を示した。図-29にNo. 4の試験体での場合を示す。この試験体のひずみ性状は、No. 3 の試験体の左半分でのひずみの性状と類似していた。載荷荷重が 20tf を超えると主鉄筋のひずみ量は、降伏ひずみを超えた。

試験体断面でのひずみ量の分布から載荷試験中の中立

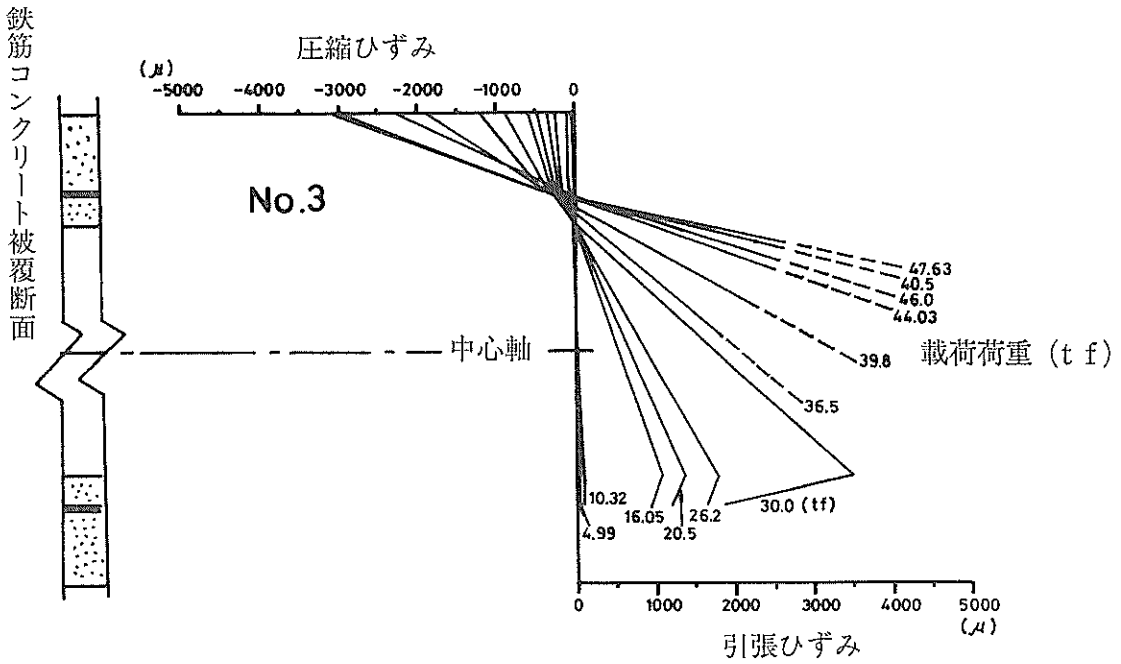


図-30 ひずみ分布と中立軸の位置

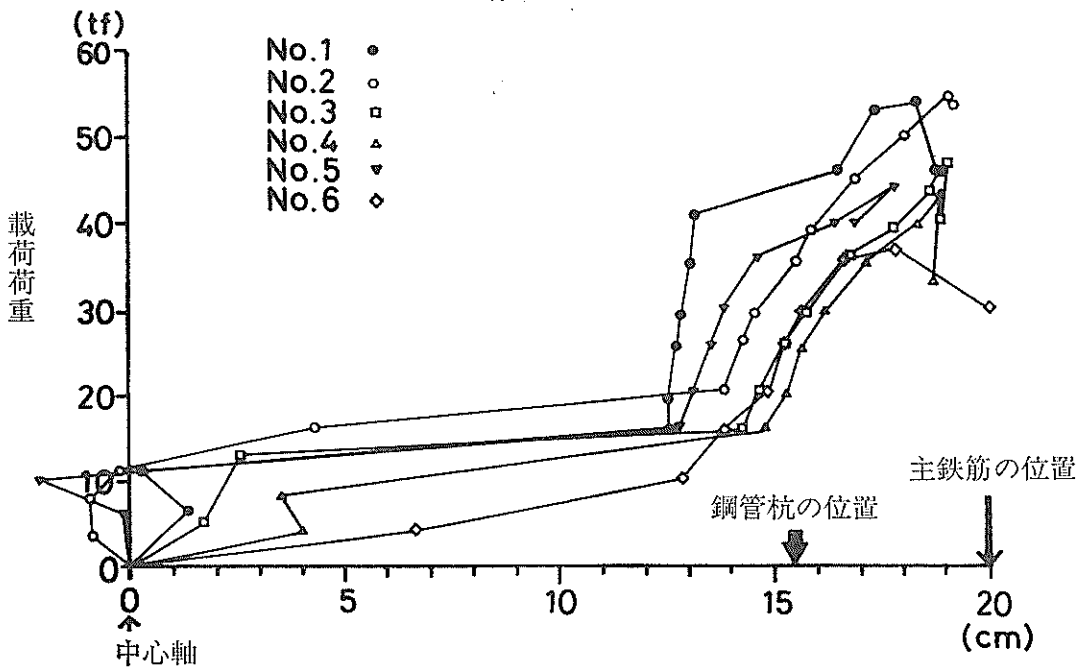


図-31 載荷荷重と中立軸の位置

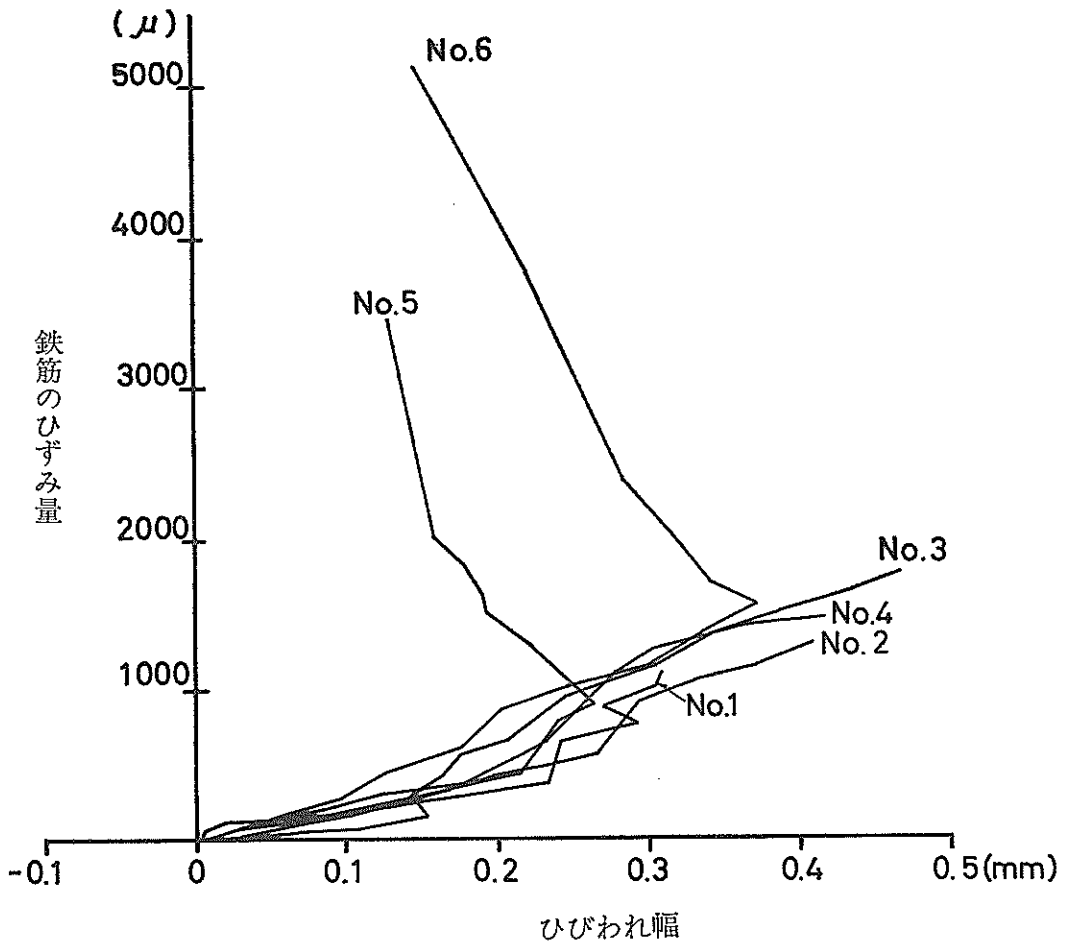


図-32 ひびわれ幅と鉄筋ひずみ量

軸の位置を知ることができる。図-30に No. 3 での中立軸の載荷中の位置を示す。ひびわれが発生するまでは、中立軸は試験体の中心軸にある。ひびわれが試験体下側に発生すると中立軸は、上側に移動した。載荷荷重が増加するに従ってさらに上側に中立軸が移動するが、終局付近では、試験体上端より10cmの所に中立軸があった。図-31に各試験体での中立軸の位置を示す。いずれの試験体でもひびわれが入ると中立軸は、中心軸より13~15cm上側の箇所へ移動した。さらに載荷荷重が増加すると、ひびわれの進行とともに上側へ移動し、中心軸よりほぼ19cmの箇所まで終局に至った。

図-32に各試験体のひびわれ幅と鉄筋のひずみ量との関係を示す。鉄筋のひずみ量は、試験体下端での載荷荷重ごとの最大値である。ひびわれの発生した位置に、ひ

ずみゲージがあるとは限らないので、必ずしも両者の関係を適切に表現してはいないが、一つの目安にはなる。各試験体で鉄筋のひずみ量が増加するに従って、ひびわれ幅も増加した。ひずみ量が約500μを超すと、ひびわれ幅が0.2mmを超した。ひびわれの発生位置の状況で一部のπ型ゲージでは、ひずみ量が増加したとき、ひびわれが閉じる場合もあったが、大抵の箇所のπ型ゲージでは、約2000μの範囲まで、ひずみ量に比例してひびわれ幅が増加した。

(4) 試験体の変形

図-33に No. 3 の試験体での試験体軸方向に沿った鉛直変位を示す。載荷点の間では、載荷荷重が小さい間は変位の分布が一様であったが、載荷荷重が大きくなり終局付近では、c点の鋼管杭と鉄筋コンクリートの境界で

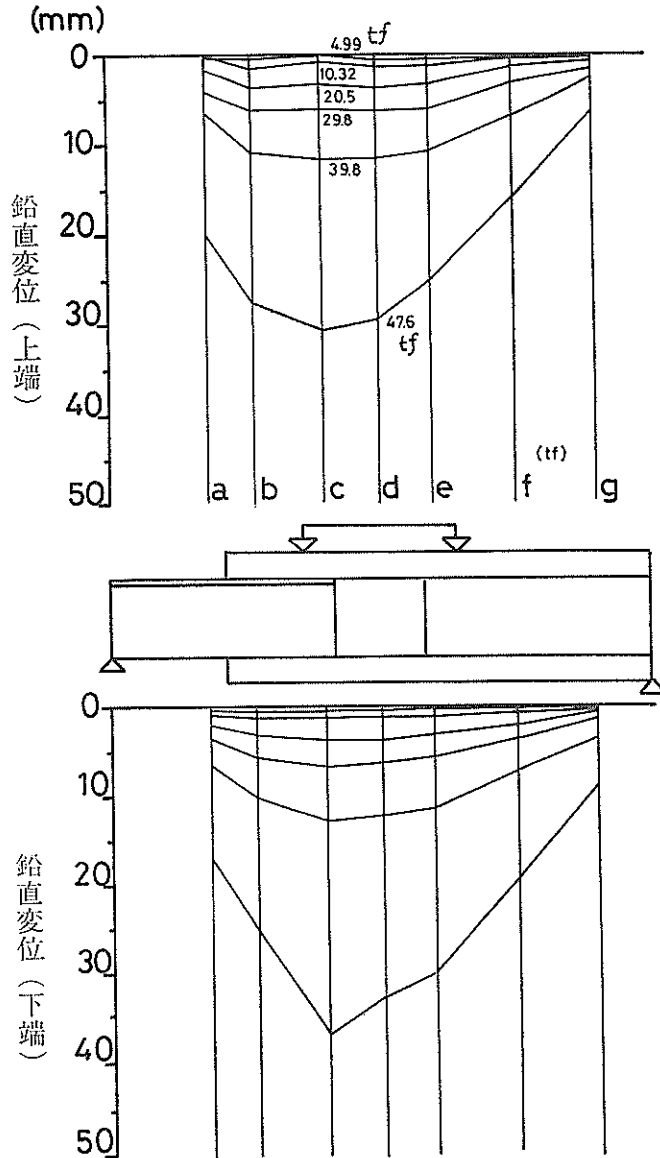


図-33 試験体軸直角方向の変位分布 (No. 3)

折れるような現象が見られた。

図-34に試験体No. 3~6の鉄筋コンクリートと鋼管杭との相対変位を示す。この変位は、図-33で示すa点に設置した変位計で計測したものである。試験体が終局に至るまで、スタッドジベルの破断や大変形は見られず、各試験体での最大の相対変位量は、1~3mmであった。スタッドジベルの本数が多いNo. 4の試験体では、載荷荷重が20tfまでほとんど相対変位が生じなかった。しか

し、スタッドジベルの本数が少なくなるに従って相対変位量は、載荷荷重が小さな段階から次第に大きくなった。この場合鋼管杭と鉄筋コンクリートとは、完全に合着されているとは言えない状態となった。

5.4 計算値と試験値の比較

表-8に3.で述べた計算方法で求められた計算値を示す。曲げモーメントに関して終局時の荷重は、30.0tf・mであり、表-8に同じく示す試験値と比較して式(19)で

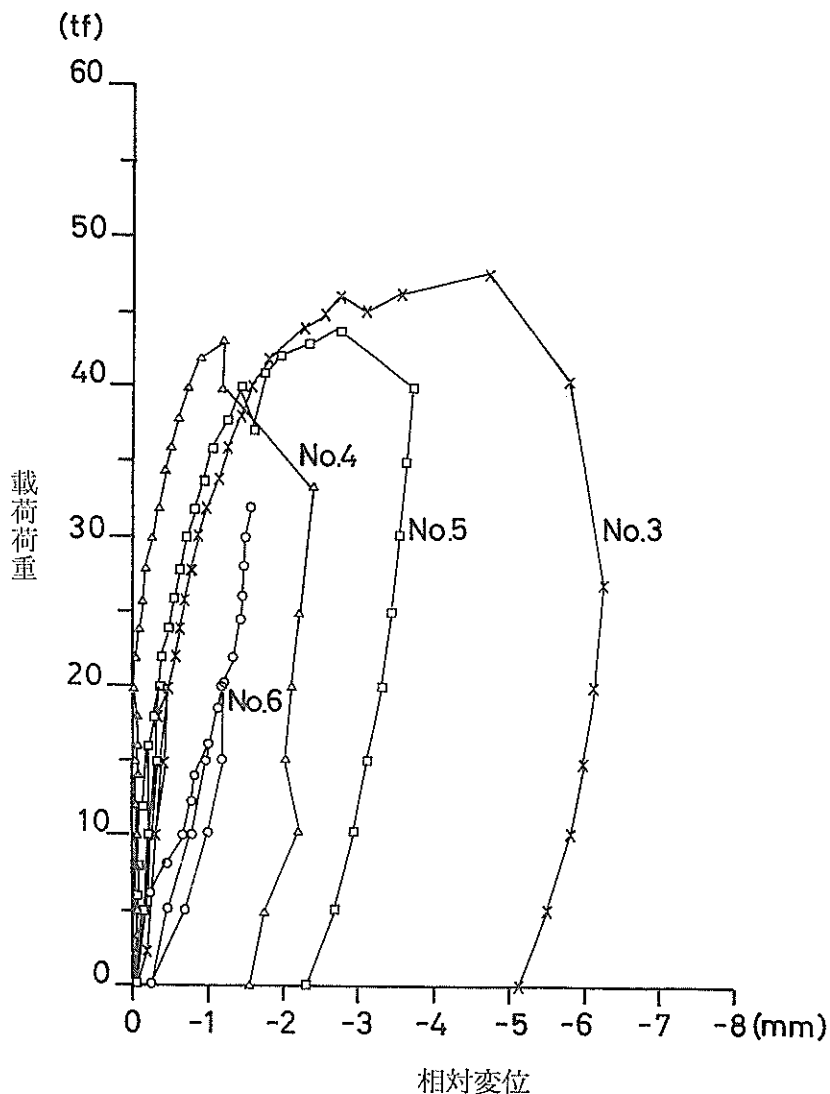


図-34 鋼管杭と鉄筋コンクリートの相対変位

表-8 曲げ載荷試験の試験値と計算値の比較

試験体名	ひびわれ発生荷重		鉄筋降伏荷重		終 局 荷 重		
	試験値	計算値	試 験 値	計 算 値	試験値	計算値 (曲げ)	計算値 (せん断)
No. 1	10.12tf	10.4tf	29.57tf	20.8tf	54.16tf	30.0tf	58.0tf
No. 2	7.92tf	10.4tf	26.58tf	20.8tf	54.49tf	30.0tf	58.0tf
No. 3	4.99tf	10.4tf	24.24tf	20.8tf	47.63tf	30.0tf	
No. 4	8.12tf	10.4tf	20.11tf	20.8tf	43.36tf	30.0tf	
No. 5	10.05tf	10.4tf	22.11tf	20.8tf	44.10tf	30.0tf	
No. 6	4.19tf	10.4tf	20.25tf	20.8tf	36.97tf	30.0tf	
No. 7	—	—	*26.0tf	*36.4tf	35.18tf	—	—

注) *印は、試験体No. 7の鋼管杭の降伏荷重を示す。

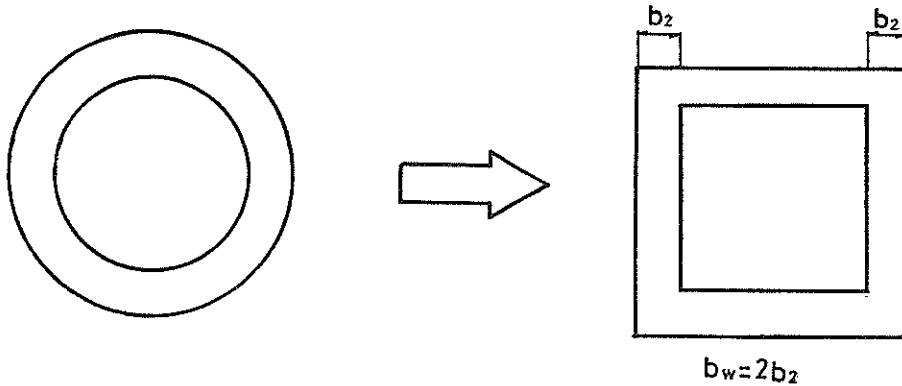


図-35 部材腹部幅の計算を行う際の等値面積換算方法の概要

求められる値よりかなり小さな値となった。これの原因とし、載荷試験では、試験体が曲げ破壊を生じた後でも、アーチ的な力学機構で更に外力に抵抗したからである。すなわち今回の試験では、曲げ耐力でなく、せん断耐力で計算値と試験値を比較しなければならないことを示している。鉄筋コンクリートの主鉄筋が降伏したときの計算値は、 20.8tf であり試験値とはほぼ同じであった。曲げが卓越している場合には、精度良く鉄筋に与えられる応力度を計算できることがわかる。式(26)から求められるひびわれ発生荷重の計算値は 10.4tf であり、No. 1 と No. 5 の試験体については、試験値と良く一致した。他の試験体では、試験値の方が計算値よりかなり小さな値であった。ただしこの計算では、コンクリートの曲げ引張強度を 27kgf/cm^2 とした。次にせん断耐力について検討する。式(22)で与えられるせん断耐力は、コンクリートのトラス機構で説明される。今回の試験体の断面は、円環であるので式(22)を適用する際、図-35に示すように断面積が円環と等価な面積を有する正方形の箱に置換する。せん断耐力の計算値は、載荷荷重にして 36.9tf であった。試験値よりも小さな値である。以上述べたとおり終局時の耐力を式(22)でも精度良く求められなかった。そこで試験時の破壊状況を再度検討する。図-36に試験体での力学的な状況を示す。曲げ破壊を生じたのは、同図のI部の鉄筋コンクリート部分だけである。II部は、曲げ破壊が生じていない。I部とII部とでは、I部の曲げ剛性がII部の約半分である。載荷試験では、曲げ破壊を生じた後にII部の試験体軸線方向にひびわれが生じて、その箇所よりせん断ひびわれが進展していった。これは、II部の剛性が高いことから、ここが一種のI部に対する固定点のような働きをしたと考える。I部

については、II部を固定とする両端固定の梁とみなすことができる。曲げ破壊が進行するに従って、I部の上縁にはコンクリートの圧縮域が生じる。曲げ破壊では、この圧縮域のひずみが 0.0035 に達すると圧壊が生じる。しかし、この圧縮域での力が斜めひびわれの進行とともに図-18に示したように、梁の軸線方向に新たな破壊機構、一種のアーチ機構¹⁴⁾ができる。

式(24)によりアーチ機構でのせん断耐力を求めると 58tf である。この値は、No. 1 と No. 2 の試験体に関してはほぼ試験値と等しい。ただし No. 3 から No. 6 までの試験体では、計算値の方が試験値よりも大きな値となった。計算の際、 α を 30 度、 A を 355cm^2 、 σ_c を 240kgf/cm^2 に設定した。このように、今回の載荷試験のコンクリート破壊状況(図-37参照)からアーチと仮定して式(24)を用いてせん断耐力を求めると計算値と試験値とが良く一致した。

図-38に鉄筋応力度とひびわれ幅との関係を示す。ひびわれ幅は、ほぼ鉄筋応力度と比例する。式(27)に示される角田式では、安全側にひびわれ幅を計算した。なお文献1に示される許容応力度法による計算値と試験値との比較については、付録Dに述べるが、ここではその主要な結果のみを述べる。鉄筋が降伏するまでは、計算値と実験値が曲げに関してよく一致し、終局までかなりの余裕を計算値が与えた。曲げひびわれについては、かなり危険側の値を計算式が与えることがわかり、計算式の適用について注意が必要である。

6. 押抜きせん断試験²¹⁾

6.1 試験体の製作

(1) 試験体の構造

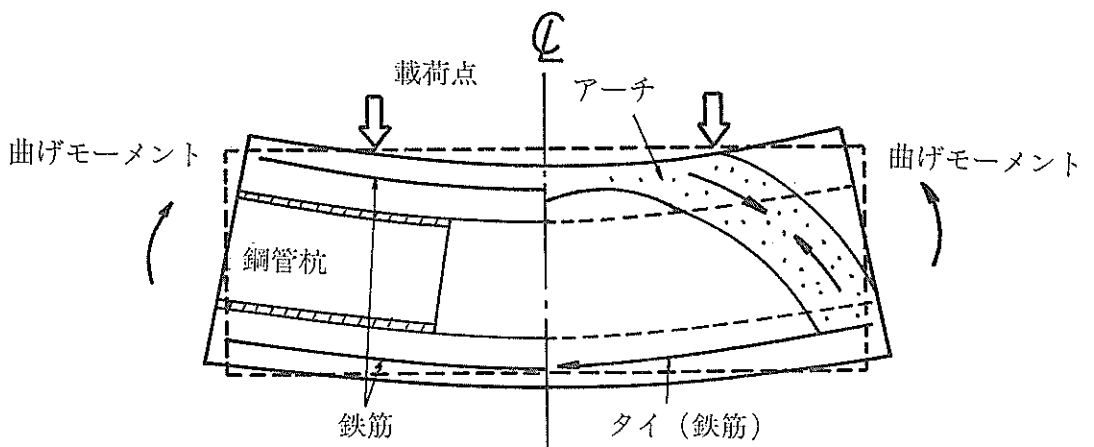
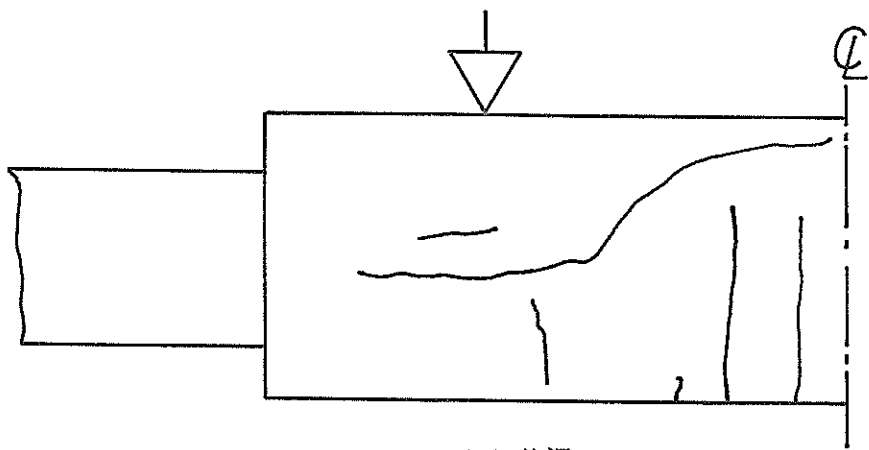
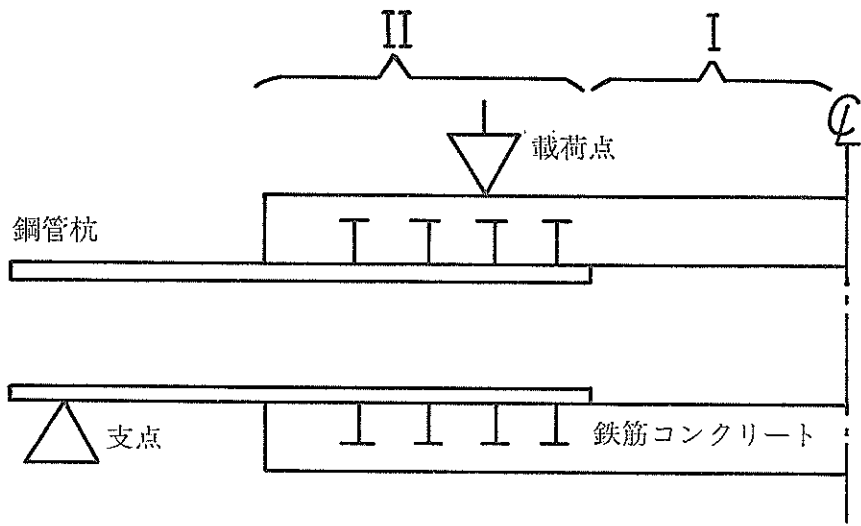


図-36 試験体の力学的状況

表-9 ひびわれ幅の試験値と計算値の比較

主鉄筋の径 (μ)	試験値 (mm)						計算値 (mm)	
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	角用式	補修マニュアル
250	0.027	0.048	0.154	0.035	0.061	0.047	0.049	0.025
500	0.058	0.081	0.142	0.077	0.121	0.131	0.099	0.051
750	0.093	0.130	0.164	0.132	0.163	0.176	0.148	0.076
1000	0.171	0.193	0.254	0.231	0.216	0.270	0.198	0.102
1250	0.264	0.249	0.344	0.302	0.280	0.344	0.247	0.127
1500	0.418	0.405	0.364	0.364	0.331	0.489	0.297	0.153

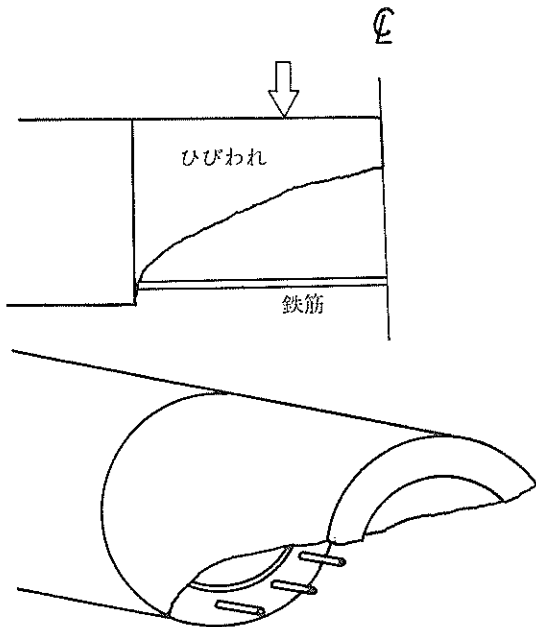


図-37 試験体の破壊状況

表-10 押抜きせん断試験体一覧

試験体名	スタッドの形状	スタッドの本数	帯鉄筋の有無	試験体の寸法
CASE-1	S M16×70	16本	無	外径 60cm
CASE-2	S M16×70	8本	無	内径 31.9cm
CASE-3	S M16×70	4本	無	高さ 65cm
CASE-4	S M16×40	8本	無	
CASE-5	S M12×70	8本	無	
CASE-6	S M12×40	8本	無	
CASE-7	S M16×70	8本	有	
CASE-8	S M12×70	8本	有	
CASE-9	S M16×70	24本	無	外径 100cm
CASE-10	S M16×70	12本	無	内径 70cm
CASE-11	S M12×70	12本	無	高さ 65cm
CASE-12	S M16×70	12本	有	

12体の試験体を対象に押抜きせん断試験を行う。試験体の概要を図-39に、一覧を表-10に示す。試験体は、鋼管と、被覆コンクリート及びこれら両者を合成するスタッドジベルから構成されている。試験体の高さは65cmである。ケース1からケース10までは、外径31.85cm、板厚10.3mm、高さ45cmの鋼管を用いる。ケース10からケース12までは、外径700mm、初期板厚12mm、高さ45cmである。外径700mmの鋼管は、海洋環境下に約20年置かれたもので、鋼管表面は、腐食が1~2mm進行している。試験体を製作する際には、錆び等を極力取り除く。

用いるスタッドジベルの種類は、ねじ付きの4種類で、S M16×70、S M16×40、S M12×70及びS M12×

40である。この記号の後部分の数字は、直径(mm)、高さ(mm)をそれぞれ表す。各試験体では、スタッドジベルの種類と本数とを表-10に示すように打設する。ケース7、8及び12の試験体では、コンクリート中に帯鉄筋及び軸方向鉄筋を配置する。その他のケースの試験体では、無筋コンクリートで鋼管を被覆する。鉄筋は、D10で材質がS D30Aである。帯鉄筋は、15cm間隔に4段に配置し、スタッドジベルの頭部が帯鉄筋内に入るように設置する。軸方向鉄筋は長さ45cmであるが、帯鉄筋を固定するためのもので本数が4本である。

コンクリートの被覆厚さは、約14cmであり、帯鉄筋のかぶり厚さは約8cmである。コンクリートは、普通コンクリートで試験体の上方から打設を行う。ケース10、

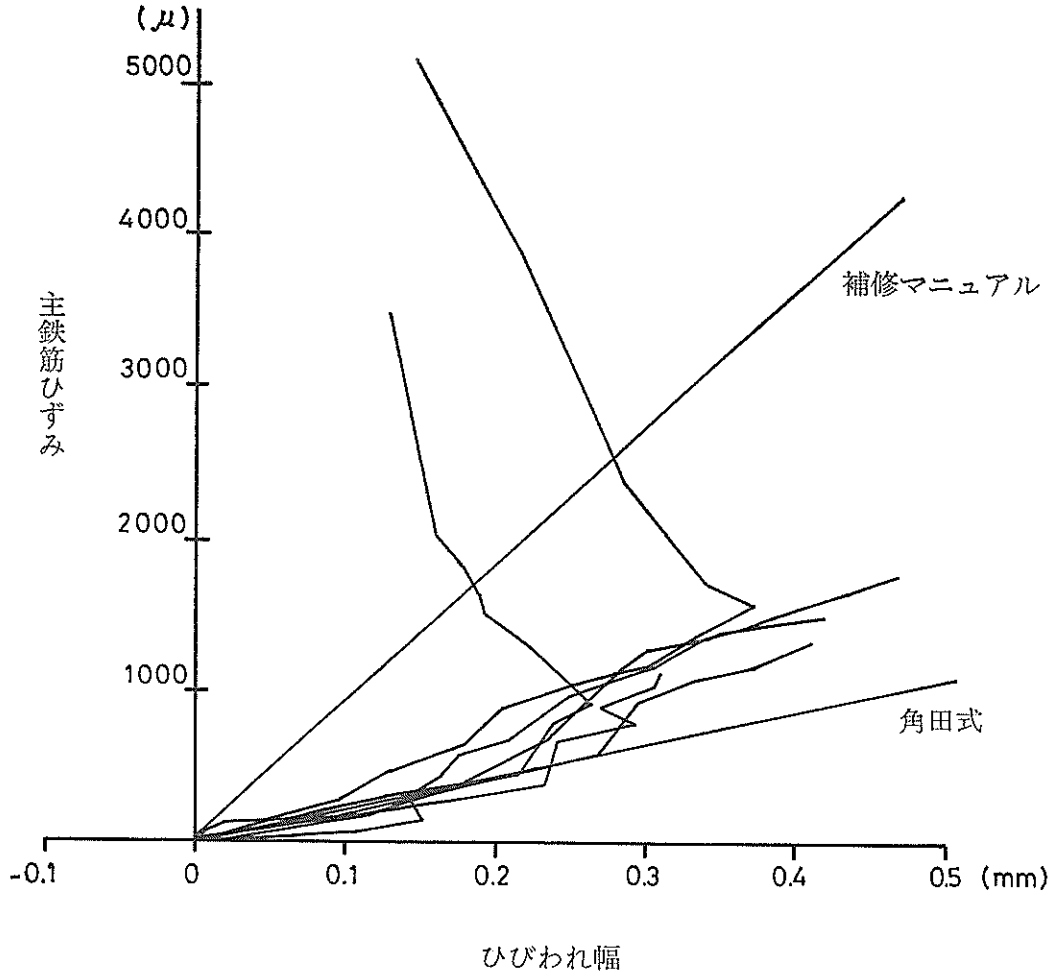


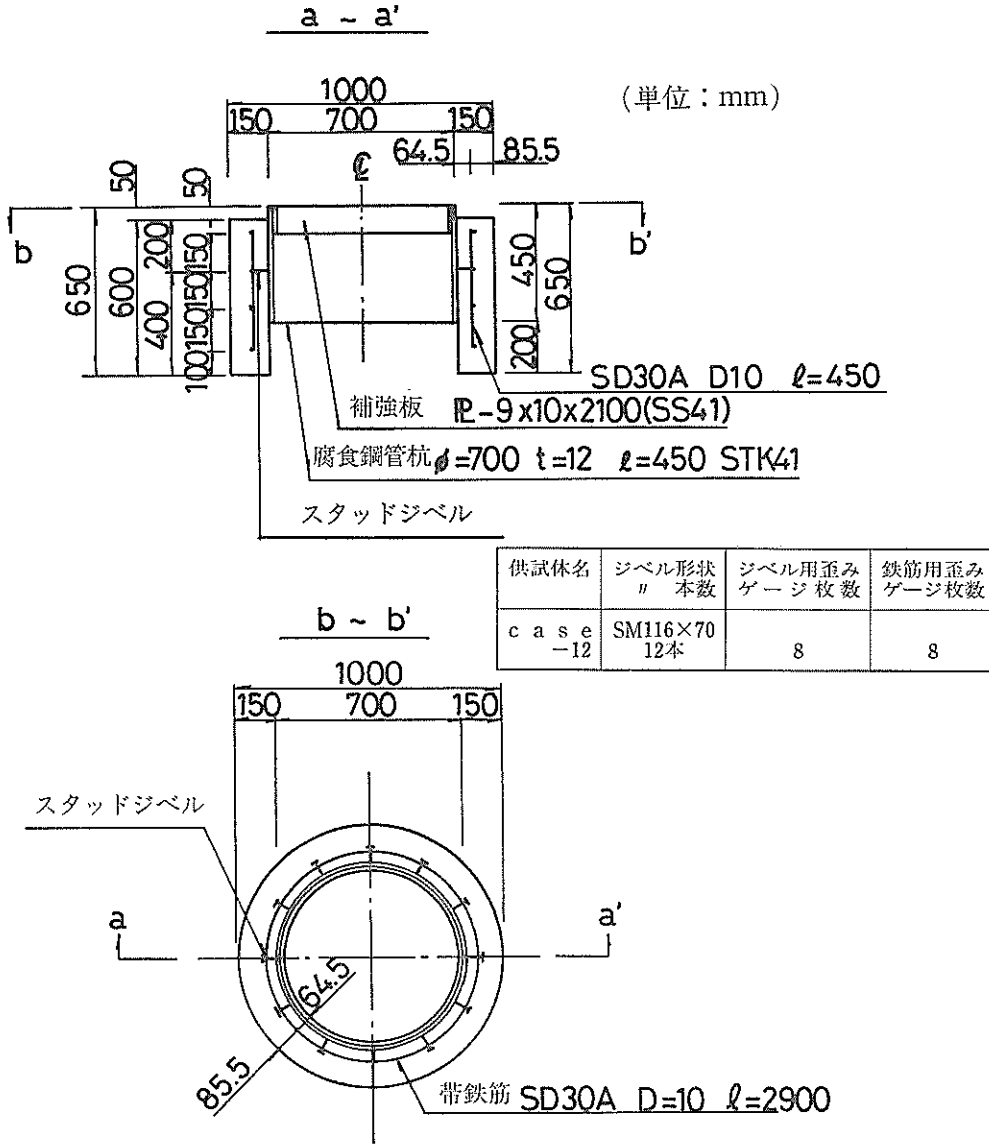
図-38 ひびわれ幅の試験値と計算値の比較

表-11 使用セメントの試験成績結果

試験項目 種類	比重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結			安定性	圧縮強さ (kgf/cm ²)				酸 化 マ グ ネ ム シ ム (%)	三 酸 化 硫 黄 (%)	強 熱 減 量 (%)
			水量 (%)	始 発 (h - min)	終 結 (h - min)		1 日	3 日	3 日	28 日			
普通セメント	3.15	3110	28.6	2-58	4-05	良	—	145	255	422	1.5	1.9	0.5
JIS R 5210	—	2500以上	—	60min 以上	10 h 以下	良	—	70以上	150以上	300以上	5.0以下	3.0以下	3.0以下

表-12 使用粗骨材の試験成績結果

比 重		単位容量 重量 (kgf/m ³)	フルイ分け通過質量参分率(%)			粗骨率
表乾	絶乾		10mm	5 mm	2.5mm	
2.65	2.63	1700	96	31	2	5.17



11, 及び12の試験体の上端は、荷重試験中に鋼管が座屈しないように鋼材で補強をする。

(2) 使用材料

使用材料用いるセメントは、普通ポルトランドセメントである。この試験成績結果を、表-11 に示す。粗骨材は、神奈川県中井産で最大寸法が10mmである。表-12 にこの試験成績結果を示す。細骨材は、千葉県君津産である。表-13 にコンクリートの配合を示す。設計基準強度は 240kgf/cm²、スランブは12cmである。混和材とし

て減水材を使用する。鋼材の試験成績結果を表-14 に示す。スタッドジベルの曲げ及び引張試験の結果については、参考文献 2 に示してある。

6.2 試験方法

(1) 荷重方法

荷重試験の概要を、図-40 に示す。試験体を同図に示すようにコンクリート面が反力床に接するように設置する。鋼管の上面に油圧ジャッキを設置する。使用するジャッキの容量は、100tf と200tf の二種類である。荷重荷

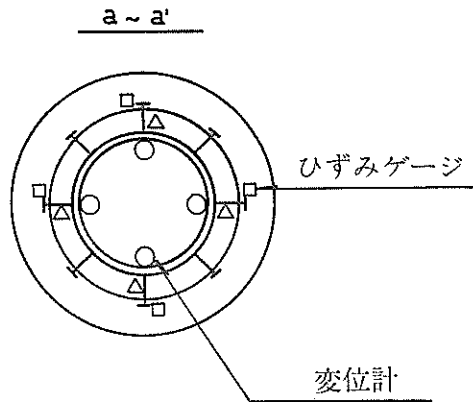
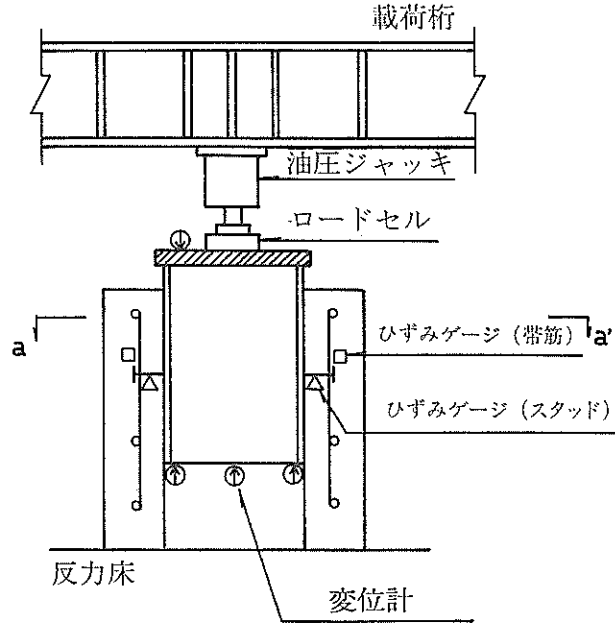


図-40 計測機器の配置及び押抜きせん断試験の概要

表-13 コンクリートの配合

設計基準 強度 (kgf/cm ²)	粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント 比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kgf/m ³)				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
240	10	12	4	53.0	46.5	162	306	851	979	3.06

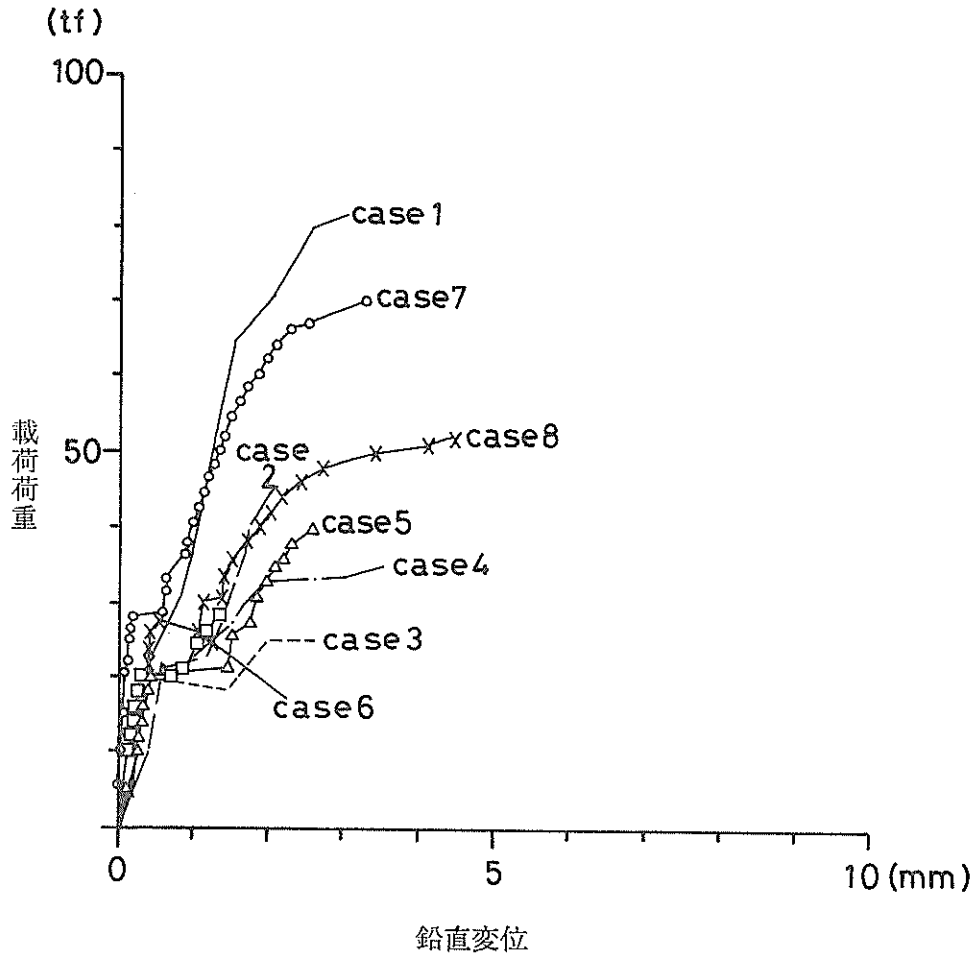


図-41 載荷荷重～変位 (case-1～8)

表-14 鋼材の試験成績結果

種類	(公称)直径	規格記号	降伏点 (kgf/cm ²)	引張り強さ (kgf/cm ²)	伸び (%)
鋼管杭	φ 318.5mm	S TK41	3200	4600	39.0
腐食鋼管杭	φ 700mm	S TK41	2890	4650	27.7
鉄筋	D10	S D30A	3810	5580	23.4
スタッドジベル	φ 12	SM12	—	6500	7.2
	φ 16	SM16	—	4820 (4030)	19.2 (17.2)

表-15 押抜きせん断試験結果

試験体名	終局耐力 (tf)	スタッド1本当りの耐力 (tf)	破壊型式
CASE-1	81.6	5.1	コンクリート破壊
CASE-2	46.4	5.8	スタッド切断
CASE-3	25.0	6.3	スタッド切断
CASE-4	34.5	4.3	コンクリート破壊
CASE-5	35.8	4.5	スタッド切断
CASE-6	28.3	3.5	コンクリート破壊
CASE-7	69.4	8.7	コンクリート破壊
CASE-8	52.0	6.5	コンクリート破壊
CASE-9	130.0	5.4	スタッド切断
CASE-10	69.4	5.8	スタッド切断
CASE-11	41.3	3.4	スタッド切断
CASE-12	83.8	7.0	コンクリート破壊

重は、2tf 刻みに単調増加し、試験体が破壊に至るまで載荷する。

(2) 計測方法

計測項目と方法は、以下のとおりである。

- ① 載荷荷重……油圧ジャッキに取り付けたロードセル
 - ② 試験体の鉛直変位量……変位計
 - ③ 鋼管と被覆コンクリート間の相対変位量……変位計
 - ④ 鋼管、帯鉄筋及びスタッドジベルのひずみ量……ひずみゲージ
 - ⑤ コンクリートのひびわれの発生状況……目視
- ひずみゲージ枚数は、各試験体で異なるが図-40にケース7の試験体での場合を示す。このケースでは、鋼管に8枚、帯鉄筋に8枚、スタッドジベルに8枚のひずみゲージが貼り付けられている。鋼管には、長さ6mm、帯鉄筋及びスタッドジベルには、長さ3mmのひずみゲージを用いる。変位計の個数は5個であり、油圧ジャッキ位置に1個、鋼管の下端に4個取り付けられている。押抜きせん断試験では、とくにひびわれ幅の計測を行わず、試験後にひびわれのスケッチを行う。

6.3 試験結果

(1) 載荷荷重と変位の関係

押抜き載荷試験の結果を表-15に示す。また、各試験体の荷重と油圧ジャッキ位置の鉛直変位との関係を図-41及び図-42に示す。スタッドジベルの本数が16本のケース1では、終局耐力が81.6tfであった。スタッドジベルの本数が少なくなるにつれて終局耐力は、小さくなった。ケース2ではケース1の半分、ケース3では1/4

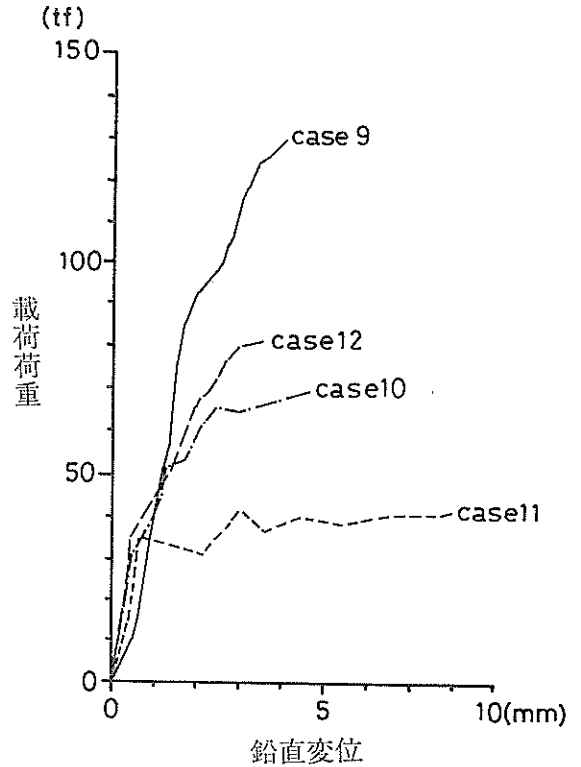


図-41 載荷荷重～変位 (case-9～12)

のスタッドジベルの本数であるが、終局耐力は、それぞれ56%、30%であった。スタッドジベル1本当りの耐力は、逆に本数が少なくなるにつれて大きくなった。すなわち、ケース1にくらべてケース3では、23%一本当りの耐力が大きかった。このことは、ケース9とケース10の間でも確認された。スタッドジベルを密に配置すると一本当りの耐力は、減ることに注意が必要である。ここで一本当りの耐力とは、終局耐力をスタッドジベルの本数で除した値である。また、通常のスタッドジベルの押抜きせん断試験によると今回用いたスタッドジベルの1本当りの耐力は、7～8tfである。今回の試験体のようにコンクリートを鋼管に被覆した場合は、この値よりも小さな値となった。

スタッドジベルの寸法が小さくなると終局耐力も小さかった。また、帯鉄筋が配置されていると、終局耐力は、大きくなった。ケース7とケース8とでは、帯鉄筋が配置されていると50%程終局耐力が帯鉄筋が無い場合より大きくなった。ケース12の場合では、23%大きくなった。このように帯鉄筋が有ると耐力は増加するが、この要因としてスタッドジベルと鉄筋がコンクリートの破

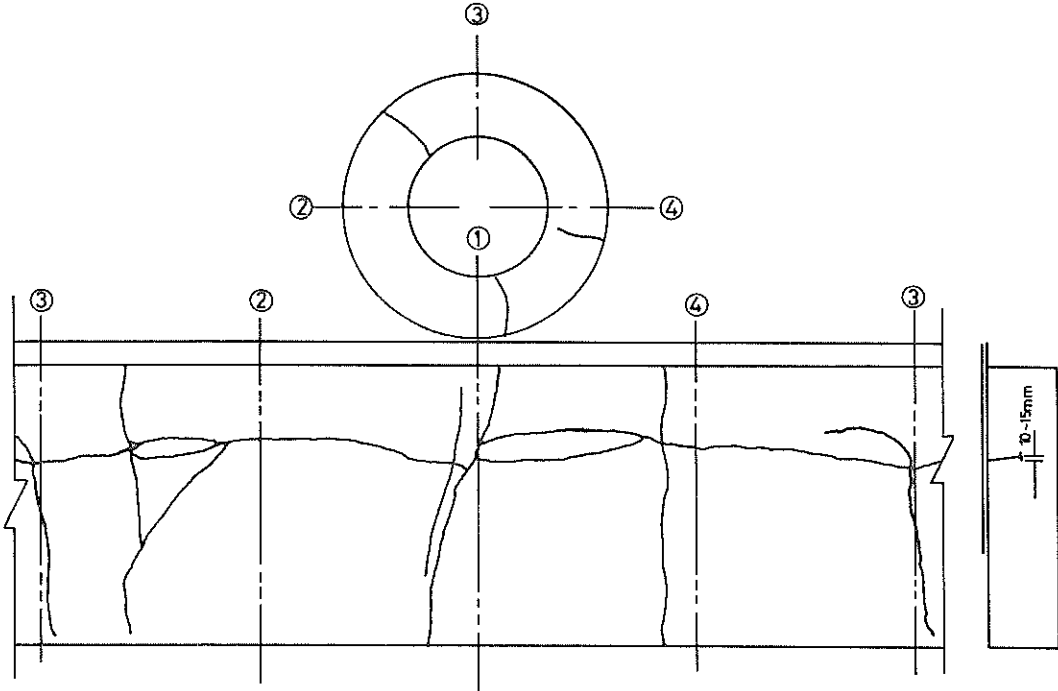


図-43 ひびわれの発生状況（ケース1）



図-44 試験後の試験体の状況（ケース1）

壊を拘束するからだと考えられる。すなわち帯鉄筋が有ると、コンクリートの変形を拘束し内部応力度を高める効果があるからである。この意味でも、帯鉄筋をスタッドジベルの頭部内に配置する必要がある。

(2) ひびわれの発生状況と破壊型式

最大載荷荷重付近での試験体の破壊型式は、大きく分類してコンクリートの破壊とスタッドジベルの切断との2種類に分けられた。図-43 にケース1でのコンクリー

トのひびわれの発生状況を示す。同図の下の図は、試験体側面を展開して、ひびわれを描いてある。また、上の図は試験体上面のひびわれを描いてある。この試験体では、上下方向に4本のひびわれが発生した。このひびわれは、被覆コンクリートの円周方向の引張力によって生じたと考えられる。また、終局に近づくときスタッドジベルの位置で試験体の横方向にもひびわれが発生した。スタッドジベルにより、コンクリートに引張とせん断力を与えたと考えられる。図-44 に載荷後の試験体の状況を示すが、コンクリートがひびわれによって幾つかのブロックに分割された。このケースでは、同図に示すようにスタッドジベルの切断が見られなかった。載荷試験後の目視による観察によるとスタッドジベルは、上方へ10～15mm頭部が向いていた。図-45 にケース2のひびわれの状況を示す。このケースでは、上下方向に3本のひびわれが貫通して破壊に至った。この試験体では、8本のスタッドジベルが配置されているが、そのうち5本がスタッドジベルの基部の溶接部で切断された。この状況を図-46 に示す。他の試験体でもほぼ以上の2通りのひびわれの発生状況に分類できた。スタッドジベルの本数が多い場合と帯鉄筋が配置されている場合では、試験体の上下方向のみならず、水平方向にもひびわれが発生する

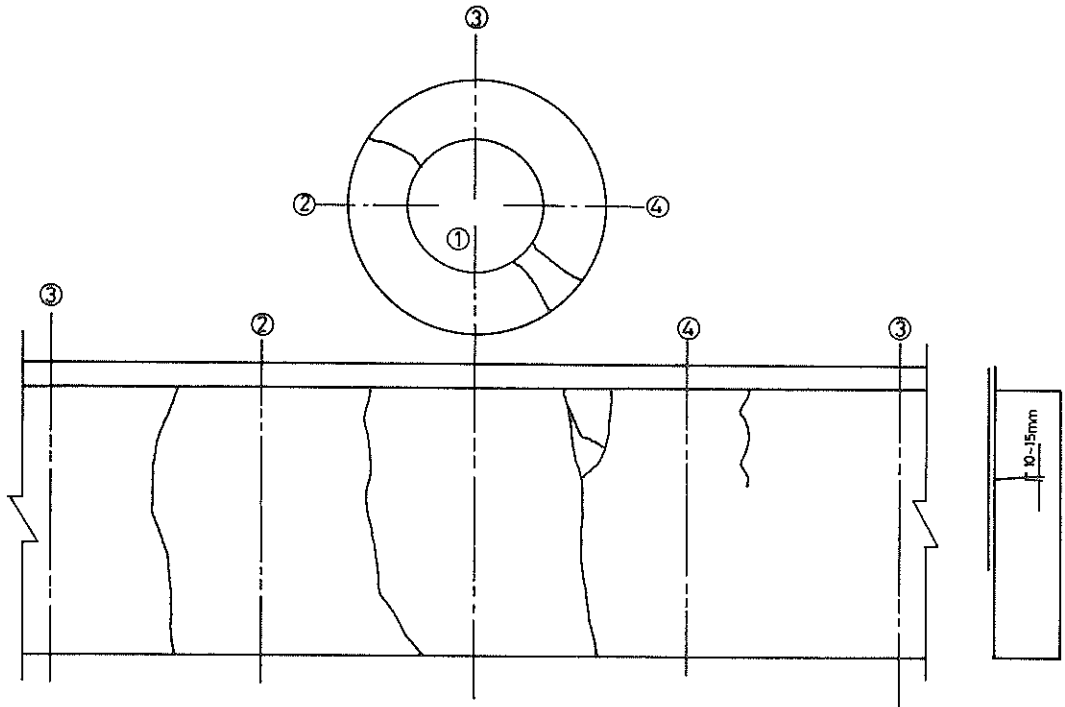


図-45 ひびわれの発生状況 (ケース2)

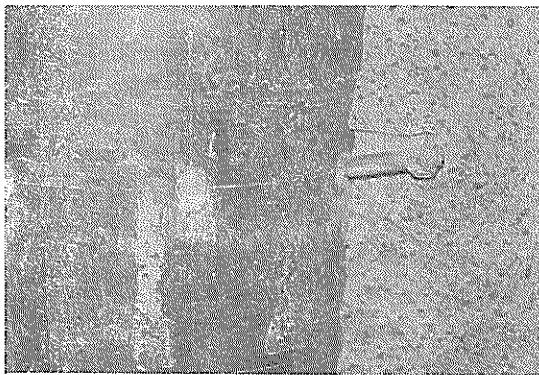


図-46 載荷後の試験体の状況 (ケース2)

傾向があった。

(3) 鋼材のひずみ量

図-47 に鋼管に生じたひずみ量を示す。左側の図は、スタッドジベル位置より上側に貼られたひずみゲージの、右側の図は下側に貼られたひずみゲージでのひずみ量をそれぞれ示す。載荷荷重が20tfまでは、スタッドジベルの上側と下側のひずみ量は、ほぼ同程度であった。

その後スタッドジベル位置より上側では、載荷荷重の増加に伴ってひずみ量も増加したが、下側では、数十 μ とほとんどひずみ量が発生しなかった。載荷荷重が小さいときは、主に鋼管とコンクリート間の付着によって上方(鋼管部分)から下方(コンクリート部分)に荷重が伝達したことを示している。載荷荷重が増加して両者間の付着が切れると、上方からの荷重が、主にスタッドジベルを介して鋼管からコンクリートへと伝達されたことを示している。

図-48 にスタッドジベルでのひずみ量を示す。ひずみゲージは、スタッドジベル本体の上側と下側に貼られている。鋼管とコンクリート間の付着が切れるまでの載荷荷重が小さいときには、スタッドジベルにほとんどひずみが発生しなかった。付着が切れるとスタッドジベルに大きな値のひずみが発生した。このひずみは、上側と下側のひずみの値がほぼ等しく符号が反対であるので、スタッドジベルには曲げが卓越していたことになる。

7. 結 論

腐食した鋼管杭に鉄筋コンクリートを被覆した補修工に関する曲げ載荷試験及び押抜きせん断試験を実施し、

鉄筋コンクリート被覆による腐食鋼管杭の補修工の耐力特性

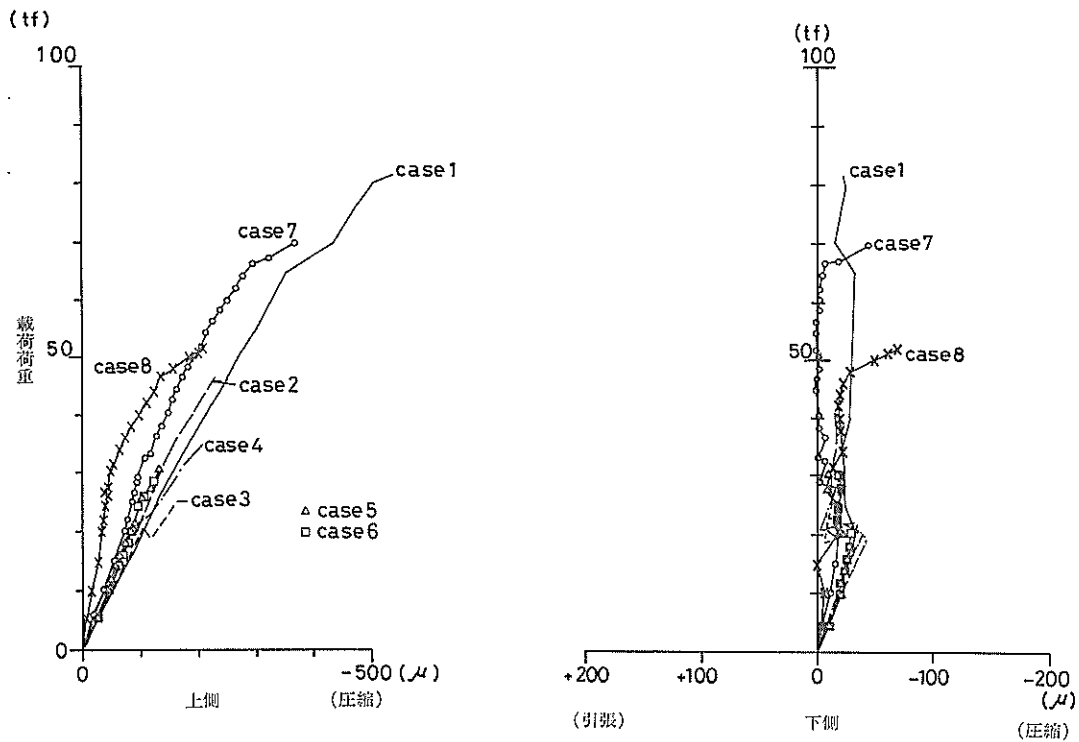


図-47 載荷荷重～鋼管ひずみ

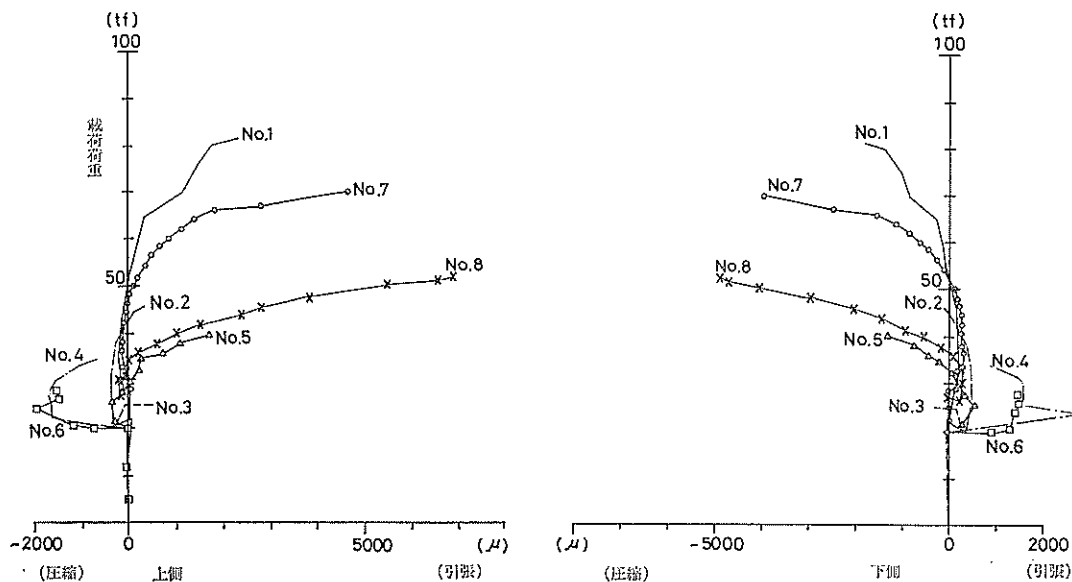


図-48 載荷荷重～スタッドジベルひずみ

この解析より以下の主要な結論を得た。

曲げ載荷試験に関する結論

- ① いずれの試験体でも、腐食により鋼管杭の強度を見込めないと仮定した鉄筋コンクリート部分で、コンクリートの圧壊で破壊に至った。スタッドジベルや鋼管杭での破壊は、見られなかった。
- ② 鉄筋コンクリート部分では、載荷直後に曲げひびわれが先行したが、載荷荷重が増加するに従ってせん断ひびわれが発生し始め、終局時にはアーチ的な力学機構に移行して、曲げせん断破壊に至った。
- ③ 鋼管杭全体に鉄筋コンクリートが被覆されている場合には、鉄筋コンクリートが主に外力に抵抗したが、被覆範囲が狭くなると鋼管杭と鉄筋コンクリートの両方で外力に抵抗し、かつ終局耐力も低下する。
- ④ スタッドジベルの本数が、片側24本（スタッドジベルのせん断強度の安全率を2）と片側32本（安全率3）とでは、両者の局耐終力にほとんど大差はなかった。しかし片側12本（安全率1）とすると、終局耐力は2割りほど低下するとともに鋼管杭と鉄筋コンクリート間の相対変位量も大きくなった。現行設計法でのスタッドジベルの所定本数を確保しておけば、鋼管杭と鉄筋コンクリートとの合成は十分確保できる。曲げのみを受ける場合には、更にスタッドジベルの本数を減らすことも可能と考える。
- ⑤ 鉄筋コンクリート部分の終局時の載荷荷重を限界状態設計法の曲げによる計算式で得られた値と試験値とを比較した。スタッドジベルの本数が多く、被覆長が長い場合、終局時の曲げに関する載荷荷重は、試験値の方が2倍ほど計算値よりも大きかった。せん断に関しては、限界状態設計法の計算式でも両者の一致をみず計算値の方が大きい値となった。試験でのせん断破壊の状況を考えて、アーチ的な力学モデルによって終局耐力を計算したところ終局時の載荷荷重の値をうまく説明できた。
- ⑥ 曲げひびわれに関しては、角田式による計算値が試験値と良く一致した。

押抜きせん断試験に関する結論

- ⑦ 試験体の破壊型式は、コンクリートの破壊とスタッドジベルの破壊とに大きく分類できた。スタッドジベルの本数が少ないとスタッドジベルの基部で切断が生じ、本数が多いとコンクリートが破壊する傾向が見られた。
- ⑧ スタッドジベルの本数が増加すれば、全体としてのせん断耐力は大きくなるが、逆に1本当りのせん

断耐力は小さくなる。

- ⑨ 鉄筋コンクリートを被覆した場合には、1本当りのせん断耐力に関して、通常の押抜きせん断試験で得られるせん断耐力よりも値が小さい。しかし、帯鉄筋をスタッドジベルの周囲に配置すると終局に至るせん断耐力は増加する。被覆コンクリートでも補強筋が配置されていれば、現行設計法でのスタッドジベルのせん断耐力を確保できると考えられる。

8. あとがき

鉄筋コンクリート被覆による補修工の設計施工に関しては、まだ十分な方法が整備されていない。今回言及できなかったが、腐食が棧橋の床版近くに発生して、スタッドジベルを打設できない場合、あるいは曲げと軸力とが同時に作用した場合等に関しては、今後の課題と言える。鉄筋コンクリート被覆による方法以外にも、有効な補修工が幾つか提案されており、これらに関しても設計施工法を今後整備して行く必要がある。設計法については、現在許容応力度法で行われているが今後限界状態設計法に順次移行していくことになる。今回提案した限界状態設計法による手法もまだ十分に完成したものではなく改良すべき点も多い。今後さらに検討を進めて実際の設計で十分に使用に耐えるものに整備していきたい。本報告もこの過渡的な時期での成果と御理解頂きたい。また、鋼管杭のみならず、港湾鋼構造物では、鋼矢板や鋼管矢板も用いられており、これらの補修工の設計施工法も今後更に検討する必要がある。

本報告を取りまとめるに当たり、横田 弘構造部主任研究官（複合構造担当）、昭和61年度研修生牛島 純氏（現・若築建設株式会社設計部）ならびに飯田典生氏（現・錦日本港湾コンサルタント第三技術部）には、曲げ載荷試験及び押抜きせん断試験の実施に多大なるご協力を賜りました。また、図面の作成に当たり、構造部沈埋構造研究室・松浦 淳君の手を煩わせました。ここに記して、深甚なる感謝の意を表します。

（1987年11月24日受付）

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) 清宮 理他3名：棧橋に用いられた鋼管杭の腐食状況と残存強度、港湾技研資料、No. 593、1987年、9月、29p
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編（昭和61年制定）、pp. 43~84
- 4) 石渡友夫他7名：港湾鋼構造物腐食評価手法について

て、港湾技研資料, No. 501, 1984年12月, 57p

- 5) 善 一章：海洋環境における鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策に関する研究，港湾技術研究所報告，第15巻，第3号，1976年，9月，pp.185~200
- 6) 善 一章・阿部正美：小松島港及び名古屋港における鋼管杭の腐食調査，港湾技研資料，No. 461, 1983年9月，40p
- 7) 善 一章・阿部正美：東京港及び小名浜港における鋼管杭の腐食調査，港湾技研資料，No. 190, 1974年6月，22p
- 8) 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6月，89p
- 9) 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，57p
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書 改訂資料（昭和61年制定）コンクリート・ライブラリー第61号，pp.152~224
- 11) 日本建築学会：鋼管コンクリート構造計算規準・同解説（1981改定版）pp.34~109
- 12) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（1987改定版）pp.157~180
- 13) 岡村 甫：コンクリート構造の限界状態設計法，共立出版，1978年7月，pp.70~88
- 14) 二羽淳一郎：FEM解析に基づくディープビームのせん断耐荷力算定式，第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集（JCI-5C），1987年10月，pp.119~126
- 15) スタッド協会：スタッド溶接，昭和57年，122p
- 16) 阿部英彦：鉄道用合成桁のずれ止めに関する試験的研究，鉄道技術研究所報告，No. 961（施設編第434号）1975年，3月pp.54~57
- 17) 平城弘一・栗田章光・赤尾親助：スタッドの押抜き挙動に及ぼす影響因子に関する基礎的研究，合成構造の活用に関するシンポジウム，1986年9月，pp.91~98
- 18) 松井繁之他3名：鋼・コンクリート合成床版におけるスタッドの設計に関する基礎的研究，合成構造の活用に関するシンポジウム，1986年9月，pp.99~106
- 19) Steel Concrete & Composite Bridges Part 5, Design of Composite Bridges, British Standards Institute, London (1979)
- 20) 清宮 理，横田 弘，千葉照男：鉄筋コンクリート被覆鋼管の耐力特性，合成構造の活用に関するシンポジウム，1986年9月，pp.171~176
- 21) 清宮 理・横田 弘・千葉照男：鉄筋コンクリート被覆鋼管でのスタッドジベルの押抜きせん断試験，昭和62年9月，土木学会第42回年次学術講演会，pp.170~171

表-A.1 板厚測定結果

測定位置	平均板厚	標準偏差
A	6.6mm	0.22mm
B	5.7mm	0.70mm
C	5.9mm	1.30mm
D	6.9mm	1.53mm
E	6.4mm	0.74mm
F	6.7mm	0.57mm
G	7.1mm	0.70mm
H	7.3mm	0.66mm
I	7.7mm	0.51mm
J	8.7mm	0.58mm
K	9.2mm	0.48mm
L	9.9mm	0.38mm
M	10.0mm	0.38mm

40年代前半にかけて建設された栈橋より採取した。栈橋全面の水深は，-11mで，栈橋天端は，+3.7mであった。H.W.L.とL.W.L.との潮位差は2mである。鋼管杭を切断した位置は，L.W.L.より上側80cmと海底面付近で切断した。鋼管杭の長さは，6.6mであった。残存板厚は，超音波式探傷厚み計を用いて行った。測定箇所を図-A.1に示す。±0.0(A)から-1.8m(J)までを20cm間隔に，-1.8m以深(J~N)を100cm間隔に測定を行った。各測定の位置は，上端よりA, B, C, ……Nと番号付けをした。また，各測定位置で鋼管杭の円周方向に16等分し，それぞれの箇所でも5回超音波式探傷厚み計で板厚を測定した。測定結果を表-A.1に示す。±0.0~-1.8mまで腐食の進行が激しく残存板厚は，5~7mmであった。これ以深は，腐食の進行は遅く残存板厚は8~10mmであった。この鋼管杭の腐食状況を図-A.1に示す。押抜きせん断試験の試験体は，この鋼管杭の下側部分から採取した。

付録B 合成管の耐力の計算式の誘導

合成管の耐力の計算式は，中立軸の位置によって異なる。本文では，中立軸が引張鉄筋と鋼管杭の間にある場合について示した。この他に中立軸が上縁から引張鉄筋の間にある場合，中空部分にある場合が考えられる。また軸力が作用した場合には，モーメントと軸力の両者を考慮して合成管の耐力を設定する必要がある。これらの場合すべてをここに示すことは紙面の都合でできない。そこでここでは，中立軸の位置が図-B.1に示すように中空部分に存在する場合のコンクリートに関する力とモ

付録A 鋼管杭の腐食調査の結果

本報告に使用した鋼管杭は，昭和30年代後半から昭和

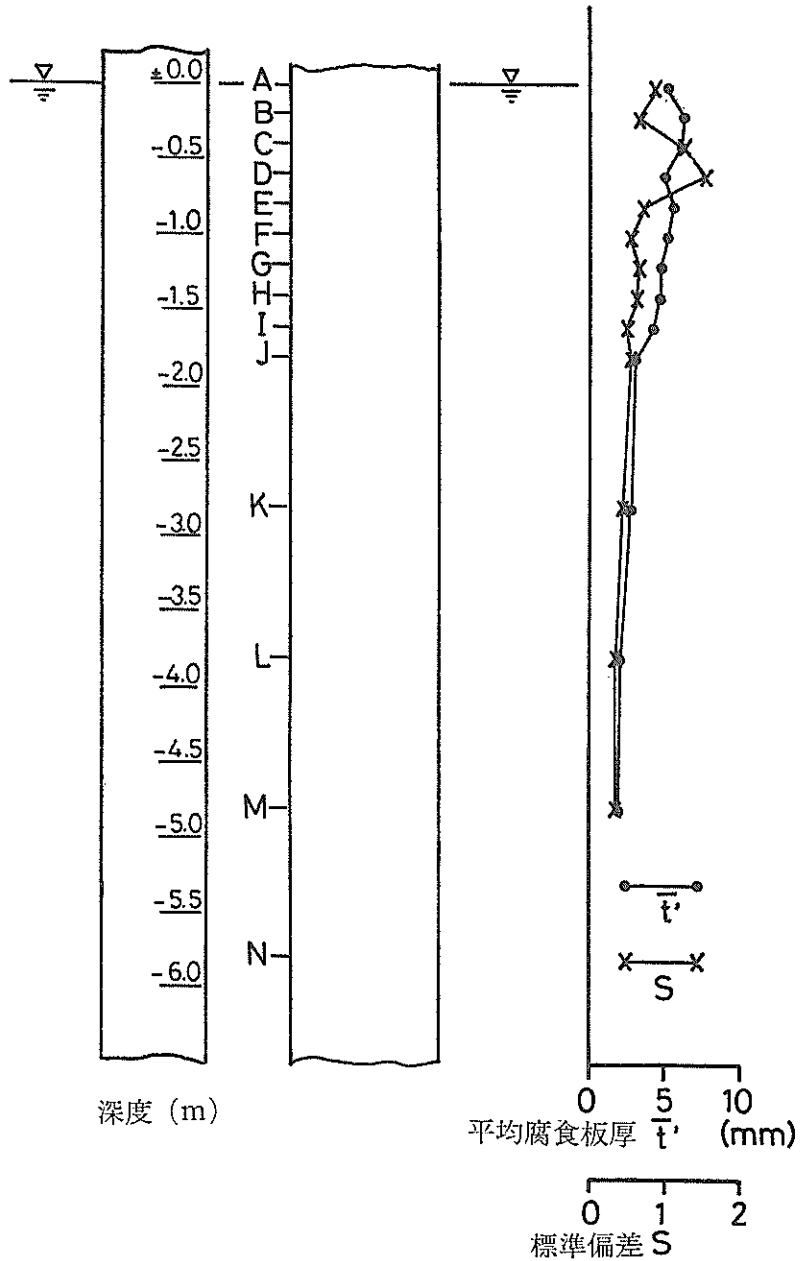


図-A.1 鋼管杭の板厚測定位置と測定結果

メントとを示す。鉄筋と鋼管杭に関しては、本文の式で積分区間を若干手直して容易に求めることができる。付録での記号の意味は本文と同じである。

圧縮域のコンクリートをC₁部分、C₂部分およびC₃部分に分割する。C₁部分は、コンクリートのひずみが

0.002までの範囲にある部分、C₂部分は同じくひずみが0.002~0.0035の範囲にある部分、C₃部分は、中空部分でコンクリートが無い部分である。おのおのの位置と試験体とのなす角度は以下のとおりである。

$$\alpha_{e1} = \cos^{-1}\{(y_e + r_0 \cos \alpha_0)/r_0\} \quad (B1)$$

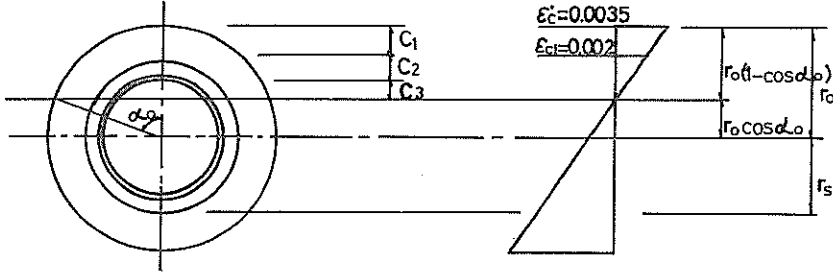


図-B.1 合成鋼管の断面内ひずみ分布

$$\alpha_{c2} = \cos^{-1}(r_i/r_0) \quad (B2)$$

$$\alpha_{c3} = \cos^{-1}(r_0 \cos \alpha_0/r_i) \quad (B3)$$

ここで、 α_{c2} ; r_0 を基に中空部分の位置を表す角度
 α_{c3} ; r_i を基に中立軸の位置を表す角度
 y_c : 中立軸からコンクリートのひずみが
 0.002となるまでの高さ $y_c = r_0(1 - \cos \alpha_0) \epsilon_{c1}/\epsilon_c'$

各部分の力は、以下のとおりである。

$$T_{c1} = \frac{2r_0^2 k_1 \sigma_{ck} \epsilon_c'}{\epsilon_{c1}(1 - \cos \alpha_0)} \left[\frac{\sin^3 \alpha_0 - \sin^3 \alpha_{c1}}{3} \left\{ 2 + \frac{2\epsilon_c' \cos \alpha_0}{\epsilon_{c1}(1 - \cos \alpha_0)} \right\} - \left\{ \frac{\alpha_0 - \alpha_{c1}}{8} - \frac{\sin 4 \alpha_0 - \sin 4 \alpha_{c1}}{32} \right\} \frac{\epsilon_c'}{\epsilon_{c1}(1 - \cos \alpha_0)} - \left\{ \alpha_0 - \alpha_{c1} - \frac{\sin 2 \alpha_0 - \sin 2 \alpha_{c1}}{2} \right\} \left\{ \cos \alpha_0 + \frac{\epsilon_c' \cos^2 \alpha_0}{2\epsilon_{c1}(1 - \cos \alpha_0)} \right\} \right] \quad (B4)$$

$$T_{c2} = r_0^2 k_1 \sigma_{ck} \{ \alpha_{c1} - (\sin 2 \alpha_{c1})/2 \} \quad (B5)$$

$$T_{c3} = \frac{2r_i^2 \epsilon_c' k_1 \sigma_{ck}}{\epsilon_{c1} r_0 (1 - \cos \alpha_0)} \left[\frac{\sin^3 \alpha_{c3}}{3} \left\{ 2r_i + \frac{2\epsilon_c' r_i \cos \alpha_0}{\epsilon_{c1}(1 - \cos \alpha_0)} \right\} + \left\{ \frac{\sin 2 \alpha_{c3}}{4} - \frac{\alpha_{c3}}{2} \right\} \left\{ 2r_0 \cos \alpha_0 + \frac{\epsilon_c' r_0 \cos^2 \alpha_0}{\epsilon_{c1}(1 - \cos \alpha_0)} \right\} + \left\{ \frac{\sin 4 \alpha_{c3}}{32} - \frac{\alpha_{c3}}{8} \right\} \frac{\epsilon_c' r_i^2}{\epsilon_{c1} r_0 (1 - \cos \alpha_0)} \right] \quad (B6)$$

考えている断面の力の合計は、以下の式で得られる。

$$T_0 = T_{c1} + T_{c2} - T_{c3} \quad (B7)$$

各部分の中立軸回りのモーメントは、以下のとおりである。

$$M_{c1} = \frac{2r_0^3 k_1 \sigma_{ck} \epsilon_c'}{\epsilon_{c1}(1 - \cos \alpha_0)} \left[\left\{ \frac{\alpha_0 - \alpha_{c1}}{8} - \frac{\sin 4 \alpha_0 - \sin 4 \alpha_{c1}}{32} \right\} \left\{ 2 + \frac{3\epsilon_c' \cos \alpha_0}{\epsilon_{c1}(1 - \cos \alpha_0)} \right\} - \frac{\sin^3 \alpha_0 - \sin^3 \alpha_{c1}}{3} \left\{ 4 \cos \alpha_0 + \frac{3\epsilon_c' \cos^2 \alpha_0}{\epsilon_{c1}(1 - \cos^2 \alpha_0)} \right\} + \left\{ \frac{\alpha_0 - \alpha_{c1}}{2} - \frac{\sin 2 \alpha_0 - \sin 2 \alpha_{c1}}{4} \right\} \left\{ 2 \cos^2 \alpha_0 + \frac{\epsilon_c' \cos^3 \alpha_0}{\epsilon_{c1}(1 - \cos \alpha_0)} \right\} - \left\{ (\sin^3 \alpha_0 \cos^2 \alpha_0 - \sin^3 \alpha_{c1} \cos^2 \alpha_{c1})/5 + \frac{2(\sin^3 \alpha_0 - \sin^3 \alpha_{c1})}{15} \right\} \left\{ \frac{\epsilon_c'}{\epsilon_{c1}(1 - \cos \alpha_0)} \right\} \right] \quad (B8)$$

$$M_{c2} = 2r_0^3 k_1 \sigma_{ck} \{ \sin^3 \alpha_{c1}/3 - (\alpha_{c1}/2 - \sin 2 \alpha_{c1}/4) \cos \alpha_0 \} \quad (B9)$$

$$M_{c3} = \frac{2r_i^2 \epsilon_c' k_1 \sigma_{ck}}{\epsilon_{c1} r_0 (1 - \cos \alpha_0)} \left[\left\{ \frac{\alpha_{c3}}{8} - \frac{\sin 4 \alpha_{c3}}{32} \right\} \left\{ 2r_i^2 + \frac{3\epsilon_c' r_i^2 \cos \alpha_0}{\epsilon_{c1}(1 - \cos \alpha_0)} \right\} - \frac{\sin^3 \alpha_{c3}}{3} \left\{ 4r_i r_0 \cos \alpha_0 + \frac{3r_i r_0 \cos^2 \alpha_0 \epsilon_c'}{\epsilon_{c1}(1 - \cos \alpha_0)} \right\} + \left\{ \frac{\alpha_{c3}}{2} - \frac{\sin 2 \alpha_{c3}}{4} \right\} \left\{ 2r_0^2 \cos^2 \alpha_0 + \frac{\epsilon_c' r_0^2 \cos^3 \alpha_0}{\epsilon_{c1}(1 - \cos \alpha_0)} \right\} - \left\{ \frac{\sin^3 \alpha_{c3} \cos^2 \alpha_{c3}}{5} + \frac{2 \sin^3 \alpha_{c3}}{15} \right\} \left\{ \frac{\epsilon_c' r_i^2}{\epsilon_{c1} r_0 (1 - \cos \alpha_0)} \right\} \right] \quad (B10)$$

コンクリートに関するモーメントの合計は、以下の式で得られる。

$$M_c = M_{c1} + M_{c2} - M_{c3} \quad (B11)$$

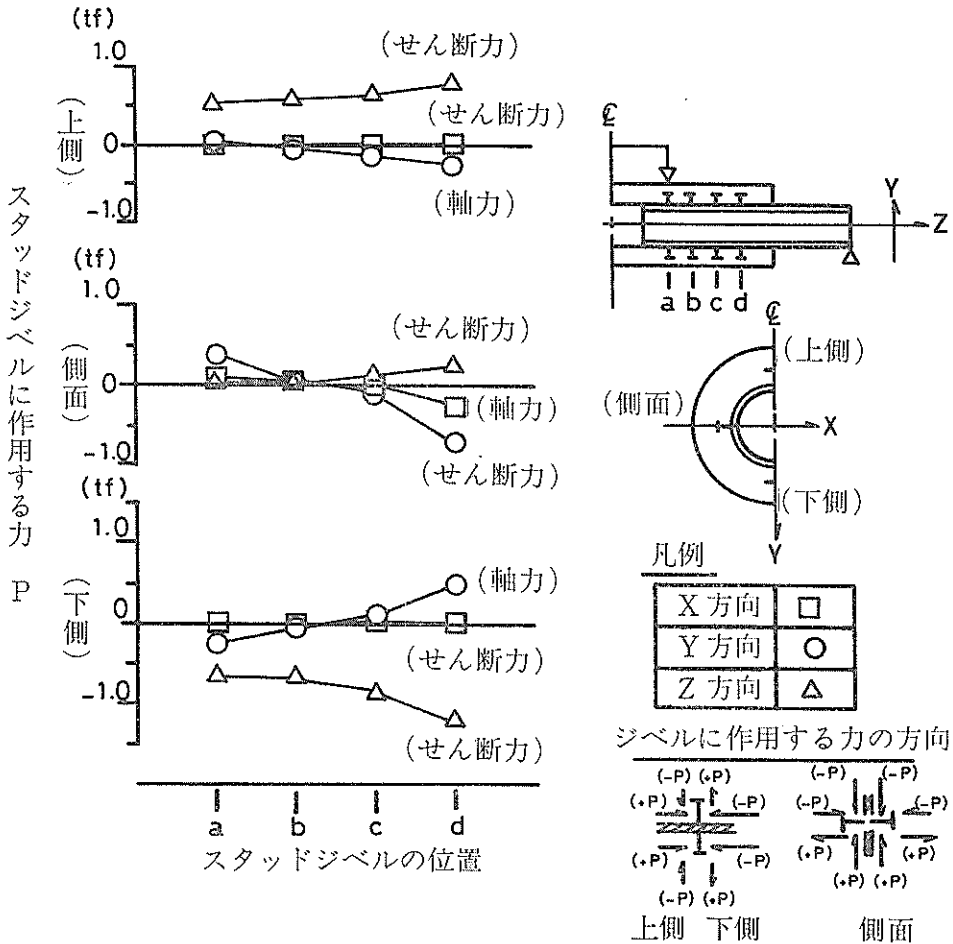
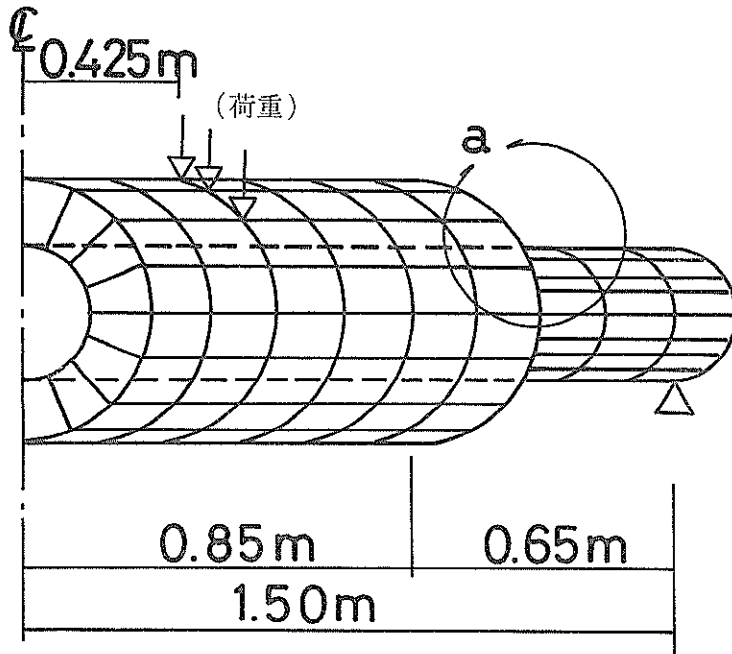


図-C.2 有限要素法より求めたスタッドジベルに作用する力 (No. 4)

付録C 有限要素法によるスタッドジベルの解析

今回の曲げ試験体のような構造部材では、各スタッドジベルに与えられるせん断力と引き抜き力を理論的に求めるのが困難である。そこで有限要素法により、これらの力を計算して、鉄筋コンクリートと鋼管杭と合成した部分でのスタッドジベルの挙動を調べた。図-C.1に試験体の有限要素モデルを示す。鉄筋コンクリートはブロック要素に、鋼管杭は板要素に、スタッドジベルはボンド要素にそれぞれ置換する。鉄筋コンクリートのヤング率は、 $2.7 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、鋼管杭のヤング率は、 $2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ に設定した。また、ボンド要素のばね定数は、せん断方向に $1.2 \times 10^5 \text{ kgf/cm}$ 、軸方向に 1.8×10^5

kgf/cm に設定した。板要素とブロック要素とは、スタッドジベルを介してのみ力の伝達が行われると仮定した。すなわち、両要素間での粘着力及び摩擦力の伝達は、計算モデルに考慮されていない。また、コンクリートのひびわれによる影響等の材料非線形性についても考慮していない。図-C.2に本文の表-2に示す No. 4の試験体でのスタッドジベルに作用する力の分布を示す。計算時の載荷荷重は、10tfであり、ほぼこの試験体の設計曲げモーメントを与える荷重である。合成部の上端でスタッドジベルに作用する力は、図中のa点で引き抜き力、d点で押抜き力であった。スタッドジベルの試験体沿いのせん断力は、上端で左から右に、下端で右から左の方向にほぼ一様であった。この図に示すように合成部分でせん断力及び引き抜き力の方向と値が各位置で異な



(a部詳細図)

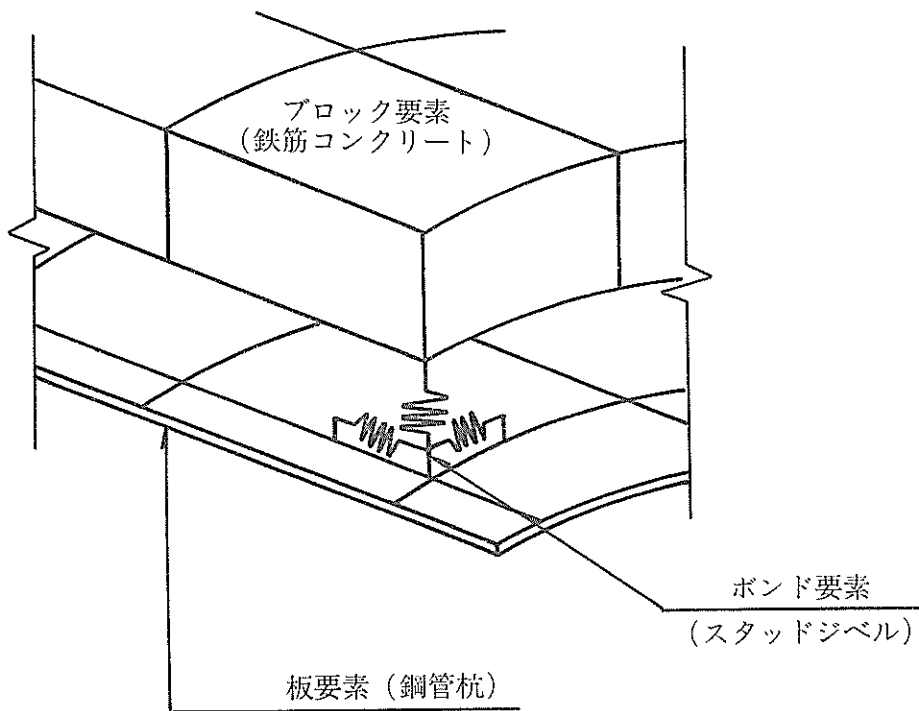


図-C.1 試験体の有限要素法モデル

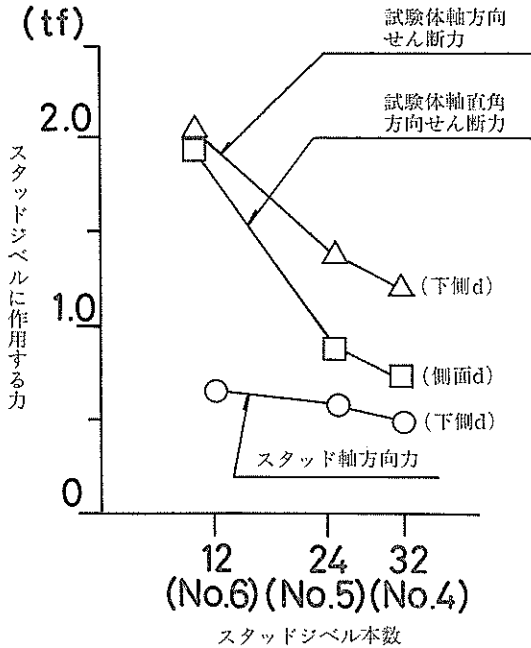


図-C.3 スタッドジベル本数とスタッドジベルに作用する力

った。図-C.3 にスタッドジベルの本数とスタッドジベルに作用するせん断力と軸力との関係を示す。スタッドジベルが少ないほど作用する力は大きくなる事がわかる。図-C.4 に各材料に与えられた応力度とその分布を示す。同図に今回得られた試験値も示してあるが、載荷荷重が小さい領域では、試験値と有限要素法による計算値とが良く合っていた。このように有限要素法でスタッドジベルに作用する力を荷重段階が低く、コンクリートにひびわれが生じていないときには精度良く計算できることがわかった。

付録D 許容応力度法による試験結果の考察

鉄筋コンクリート被覆による補修工は文献1に示される許容応力度法によって行われている。合成管の抵抗曲げモーメントは次式で得られる。

$$M_{RC} = \frac{\pi(1+n\bar{p}) - \alpha + 0.5\sin 2\alpha}{r_c/r + \cos \alpha} t_c r^2 \sigma_{ca} \quad (D1)$$

$$M_{RS} = \frac{\pi(1+n\bar{p}) - \alpha + 0.5\sin 2\alpha}{1 - \cos \alpha} t_c r^2 \sigma_{sa} / n \quad (D2)$$

$$M_R' = \min \{M_{RC}, M_{RS}\} \quad (D3)$$

ここで、 n ; 鉄筋とコンクリートのヤング係数の比

\bar{p} ; 鉄筋比

α ; 中立軸の位置を表す角度

t_c ; 被覆コンクリートの厚さ

r ; 被覆コンクリート中心までの半径

σ_{ca} ; コンクリートの許容圧縮応力度

σ_{sa} ; 鉄筋の許容引張応力度

r_c ; 被覆コンクリートの外縁半径

ここではコンクリートの許容圧縮応力度を 80kgf/cm²、鉄筋の許容引張強度を 1800kgf/cm²、同じく降伏応力度を 3500 kgf/cm² と設定する。今回の試験体での抵抗曲げモーメントに対応する載荷荷重は、9.9tf、鉄筋が降伏する載荷荷重は、19.3tf であった。表-7 に示した最大の載荷荷重と比較すると各試験体とも 5~6 倍許容応力度法による計算値よりも試験値の方が大きかった。また、鉄筋が降伏する載荷荷重では、試験値と計算値とがほぼ等しかった。曲げに対しては、かなり安全側の値を上記の式を与えることがわかる。文献1では、せん断耐力に対する計算式は示されていない。今回の試験体では、せん断による破壊が終局時に見られた。そこで文献11に示される以下の式によって試験体のせん断耐力 (S) を調べる。

$$S = b_j \{b' \cdot (\sigma_{ck}/10) / b + p_w \sigma_y\} \quad (D4)$$

ここで、 b ; 部材幅

b' ; 柱断面の有効幅

p_w ; せん断補強鉄筋比

j ; 被覆鉄筋コンクリート部分の応力中心間距離 (0.75 b)

σ_{ck} ; コンクリートの設計基準強度

σ_y ; せん断補強鉄筋の降伏応力度

この計算式から得られる試験体のせん断耐力は 47.9tf であった。スタッドジベルの本数の少ない No. 6 の試験体以外では比較的良く試験値と計算値とが一致した。次にひびわれ幅について調べる。文献1に示されるひびわれ幅の計算式を以下に示す。

$$w = 16c\sigma_s\phi D/E_s \quad (D5)$$

ここで、 c ; コンクリート付着強度に対する引張強度の比 (曲げ材下側の鉄筋 : $c=0.4$)

σ_s ; ひびわれ発生断面に対する鉄筋の発生応力度

ϕ ; ひびわれに関する鉄筋コンクリート部材面の係数 ($\phi=1.0$)

D ; 鉄筋の公称直径

E_s ; 鉄筋のヤング係数

いまひびわれ幅を 0.15mm とする。上記の式で得られる

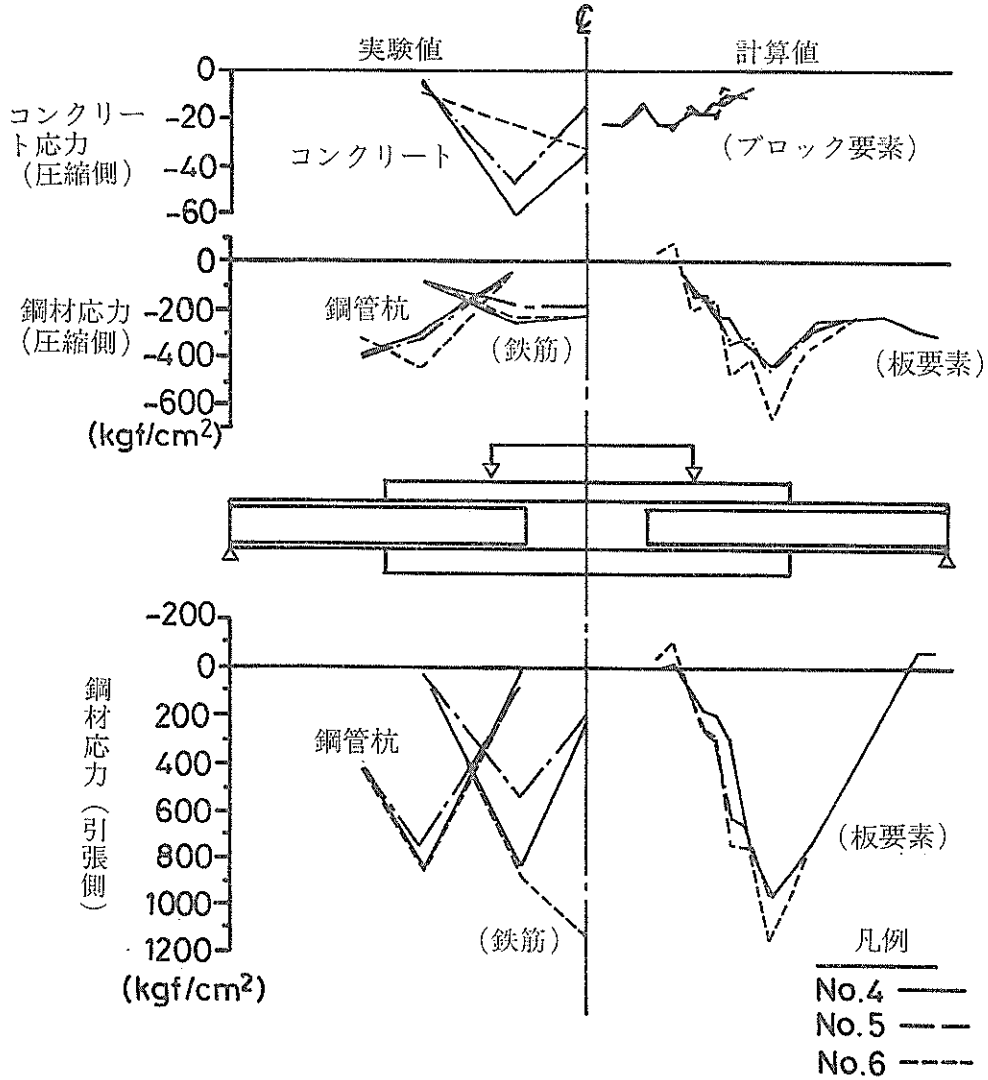


図-C.4 有限要素法の計算結果と試験値の比較

鉄筋応力度は、 3076 kgf/cm^2 である。この応力度から試験体への載荷荷重を計算すると 7 tf である。図-38 に示したひびわれ幅と鉄筋の応力度の関係からすると上記の

式ではかなり危険側のひびわれ幅を与えることがわかる。