

腐食鋼管杭の鉄筋コンクリート被覆による補修対策工の耐力

MECHANICAL PROPERTIES OF REPAIRED STEEL PIPE PILE COVERED BY REINFORCED CONCRETE

清 宮 理*・横 井 聡**

By Osamu KIYOMIYA and Toshiyuki YOKOI

Steel pipe piles constructed in marine environment have been damaged bittely by corrosion after long term. Damage is concentrated in steel pipe pile 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 for corroded steel pipe pile. Repair method by reinforced concrete coverage is one of effective methods and used in some repair works. But design method of this repair work is not enough arranged. Bending loading test and push out loading test are carried out to know mechanical properties due to bending moment and axial force and to confirm applicability of a conventional design method. Through loading tests, ultimate strength, crack development, deformation and so on of test specimen are investigated.

Keywords : composite beam, loading test, repaired work, steel pipe pile

1. ま え が き

鋼材は、港湾構造物の主要な構成材料の1つである。昭和30年代頃から、栈橋、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。海水に直接接している鋼材では、さびの発生が当然予想される。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、建設後長期間経た鋼材の一部では、海洋環境下で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、腐食調査¹⁾から判明した。特に腐食が著しく進行し、栈橋の上部工に変状をきたした施設では、施設の取り壊しと再建設が行われている。しかし、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。

栈橋に用いられている鋼管杭の補修工として、鉄筋コンクリート被覆工法がある。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、鉄筋コンクリート柱と鋼管杭とを合成する。腐食による板厚の減少に伴う強度低下を回復させる。しかしこの補修工の強度、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。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、特に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、知見が十分でない。そこで、鉄筋コンクリート被覆鋼管を対象に曲げ載荷実験および押抜きせん断実験を別々に行って、鉄筋コンクリート被覆鋼管の終局耐力、ひびわれ発生状況等の力学特性を実験的に検討した。この検討結果について報告を行う。

2. 鋼管杭の腐食の実態

本報告で対象としている鋼管杭は図-1に示す栈橋の

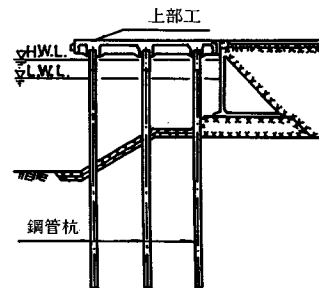
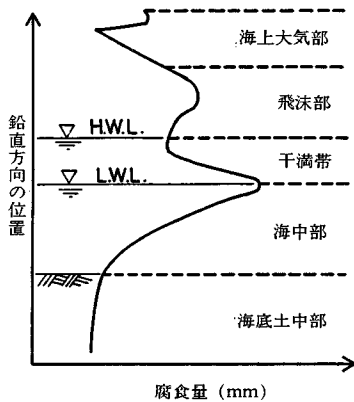


図-1 栈橋の構造

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所構造部構造強度研究室長（〒239 横浜市長瀬3-1-1）

** 正会員 工博 ビーエスコンクリート(株)常勤顧問(元・運輸省港湾技術研究所構造部構造部長)



図—2 腐食のパターン

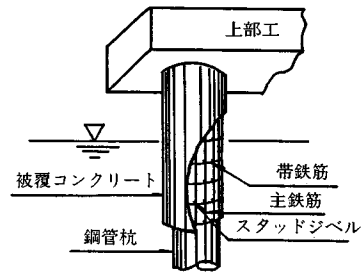
基礎に用いられる。鋼管杭は、栈橋上部の床版下端より海底地盤内まで位置している。港湾鋼構造物の腐食の実態については、港湾技術研究所が中心となって腐食調査¹⁾が、昭和42年より実施されてきている。長期間にわたる全国各地での鋼管杭に関する腐食調査の結果²⁾によると、さまざまな腐食の形態がみられ、腐食量も地域ごとあるいは、栈橋での位置ごとに異なっていた。

図—2に腐食調査から得られた、鋼管杭の腐食状態のパターンの例を示す。腐食量の測定は、超音波式探傷厚み計、あるいは、鋼管杭より切り出した鋼片の重量測定によって行われる。同図に示すように、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。一部の鋼管杭での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、1 mm/yr 程度にも達する場合がある。腐食の進行がさほどでもない場合が多いが、腐食が著しい場合には、鋼管杭に孔があく場合もある。一方海水中や地盤内では、腐食の進行は遅く海水中で0.1～0.2 mm/yr、地盤内で0.03 mm/yrとされている。腐食が問題になる例は、ここでは少ない。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にある。

3. 補修工の概略³⁾

補修工では、腐食で劣化した鋼管杭に対して失われた強度を、回復するのが目的となる。補修工の採用の1つの目安⁴⁾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



図—3 鉄筋コンクリート被覆工法の概略

- 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、施設の現在および将来の利用状況、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。いくつかの補修工が考えられるが、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について言及している。次にこの工法を概説する。

図—3に補修工の概略を示す。補修工を施す部分のさ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、孔を塞ぐ。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上部分およ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12～16 mmのものがよく使われる。板厚が5 mm以下の箇所では、鋼管杭の強度を見込まない。スタッドジベルの溶接性が落ちると局所的な座屈が危惧されるからである。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。コンクリートとしては、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。コンクリート被覆の厚さは、15～25 cm程度である。鉄筋の被りは、7 cm以上である。コンクリート被覆の範囲は、普通床版からおおよそL.W.L. - 2 mである。スタッドジベルによって鋼管杭と鉄筋コンクリートとを力学的に合成する。すなわち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すことができる。

4. 合成鋼管としての耐力

(1) 抵抗曲げモーメントの計算⁵⁾

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管の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。またコンクリートと鋼管は完全合成と仮定し、相対的なずれを計算上考慮しない。

② 鉄筋は同じ断面積をもつ一様厚さの管とみなす。

③ 腐食鋼管は、鉄筋と同等の扱いをする。鋼管と鉄筋コンクリートの剛性と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および鋼管杭の板厚が5 mm以下の箇所では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とも応力とひずみとの関係は非線形とする。

図—4に合成鋼管の断面と断面内のひずみ分布および応力分布を示す。ここでは鉄筋が一部コンクリートの圧縮域に入っており、かつコンクリートの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。

鉄筋の引張力 (T_s) は弾性域と塑性域の両者を合計して次式で得られる。

$$T_s = \frac{A_s E_s \epsilon'_c}{\pi (1 - \cos \alpha_0) r_0} \{ r_0 (\alpha_s - \alpha'_s) \cos \alpha_0 - r_s (\sin \alpha_s - \sin \alpha'_s) \} + A_s \sigma_{sy} (\pi - \alpha_s) / \pi \cdots (1)$$

ここで、 σ_{sy} ：鉄筋の降伏応力度、 A_s ：鉄筋の断面積、 E_s ：鉄筋のヤング率、 r_0 ：外縁までの半径、 α_0 ：中立軸と中央線のなす角度（他の記号は、図—4を参照）

曲げモーメント (M_s) も弾性域と塑性域の両者を合計して次式で得られる。

$$M_s = \frac{A_s E_s \epsilon'_c}{\pi (1 - \cos \alpha_0) r_0} \left[r_0^2 (\alpha_s - \alpha'_s) \cos^2 \alpha_0 - 2 r_0 r_s (\sin \alpha_s - \sin \alpha'_s) \cos \alpha_0 + r_s^2 (\alpha_s - \alpha'_s) + (\sin \alpha_s \cos \alpha_s - \sin \alpha'_s \cos \alpha'_s) / 2 \right] + A_s \sigma_{sy} \{ r_0 (\pi - \alpha_s) \cos \alpha_0 + r_s \sin \alpha_s \} / \pi \cdots (2)$$

鋼管杭に関しても鉄筋と同じ方法で引張力 (T_p) と

抵抗曲げモーメント (M_p) を計算できる。

コンクリートの圧縮力 (T_c) は、次式で得られる。

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

ここで、 k_1 ：係数 (ϵ_{c1} 等の記号は、図—4を参照)。

またコンクリートの抵抗曲げモーメント (M_c) は、次式で得られる。

$$M_c = \frac{2 r_0^2 k_1 \sigma_{ck} \epsilon'_c}{\epsilon_{c1} (1 - \cos \alpha_0)} \left[\left\{ (\alpha_0 - \alpha_{c1}) / 8 - \frac{\sin 4 \alpha - \sin 4 \alpha_{c1}}{32} \right\} \left\{ 2 + \frac{3 \epsilon'_c \cos \alpha_0}{\epsilon_{c1} (1 - \cos \alpha_0)} \right\} - (\sin^3 \alpha_0 - \sin^3 \alpha_{c1}) / 3 \left\{ 4 \cos \alpha_0 + \frac{3 \epsilon'_c + \cos^2 \alpha_0}{\epsilon_{c1} (1 - \cos \alpha_0)} \right\} + \left\{ (\alpha_0 - \alpha_{c1}) / 2 - (\sin 2 \alpha_0 - \sin 2 \alpha_{c1}) / 4 \right\} \left\{ 2 \cos^2 \alpha_0 + \frac{\epsilon'_c \cos^3 \alpha_0}{\epsilon_{c1} (1 - \cos \alpha_0)} \right\} - \left\{ (\sin^3 \alpha_0 \cos^2 \alpha_{c1}) / 5 + 2 (\sin^3 \alpha_0 - \sin^3 \alpha_{c1}) / 15 \right\} \left\{ \frac{\epsilon'_c}{\epsilon_{c1} (1 - \cos \alpha_0)} \right\} \right] + 2 r_0^2 k_1 \sigma_{ck} \left[(\sin^3 \alpha_{c1}) / 3 - \{ \alpha_{c1} / 2 - (\sin 2 \alpha_{c1}) / 4 \} \cos \alpha_0 \right] \cdots (4)$$

いま考えている断面で力のつり合いをとる。

$$T_c = T_s + T_p \cdots (5)$$

この力のつり合いを満足する α を試行的に求める。中立軸の位置が求まれば、この軸回りのモーメントの和が合成鋼管の抵抗曲げモーメント (M_t) となる。このモーメントは、次式で得られる。

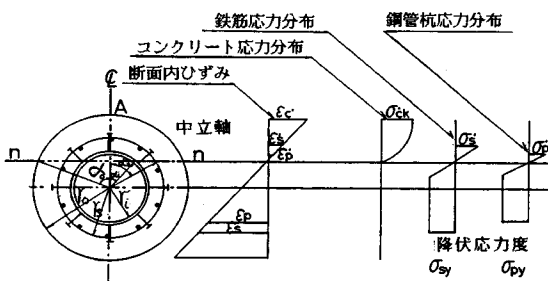
$$M_t = M_s + M_p + M_c \cdots (6)$$

(2) セン断耐力の計算

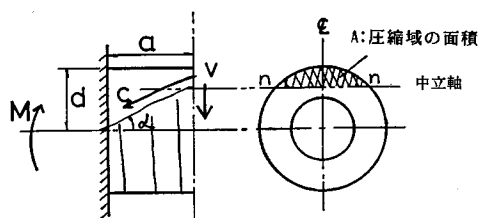
タイドアーチ的な機構でせん断抵抗力⁶⁾を求める。タイドアーチと考えた場合の力学モデルの概要を、図—5に示す。タイドアーチでの力のつり合いは、次式で得られる。

$$V = C \sin \alpha = \nu \sigma_c A \cdots (7)$$

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関する管理供試体の低減係数 (≈ 0.7)、 A ：コンクリートの圧縮域の面積。



図—4 合成鋼管の断面内ひずみと応力の分布



図—5 タイドアーチの力学モデル

(3) 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⁷⁾を介して行われる。スタッドジベルは、鋼管杭軸線方向および円周方向に等間隔に配置するのを原則としている。スタッドジベルの打設に必要な鋼管の最小板厚は、5 mm 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さびをよく落としておく。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³⁾により得られる。

$$N + 2M/r < Q \cdot n \dots\dots\dots (8)$$

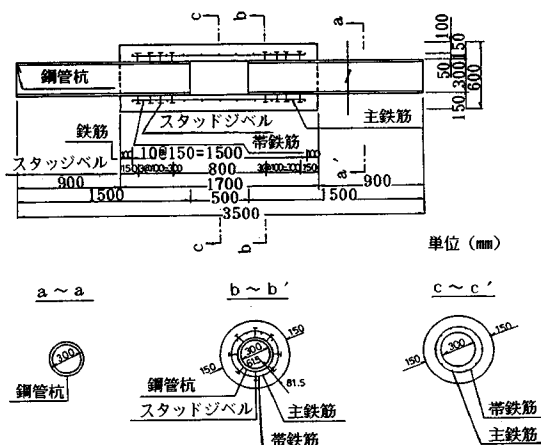
ここで、 N ：作用する軸力、 M ：作用する曲げモーメント、 n ：スタッドジベルの本数、 r ：鋼管杭の外径、 Q ：スタッドジベルの1本当たりの許容せん断力。

スタッドジベルの1本当たりの許容せん断力は、押抜きせん断試験、疲労試験等^{8),9)}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設方向、スタッドジベルの寸法や本数、配筋状態、外力の種類等によって異なると考えられる。スタッドジベルの押抜きせん断試験の結果に基づいてこの値を設定する。

5. 載荷試験

実際現象を忠実に再現するため補修工に作用する曲げと軸力を連成させ実験するのがよいがここでは2種類に大別してそれぞれについて載荷試験を行う。曲げ載荷試験については、鉄筋コンクリート被覆部分と鉄筋コンクリートのみの部分で構成されるはりを対象としている。一方、軸力については、鉄筋コンクリート被覆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。

ここでは、別々に検討するが、曲げ耐力で軸力を考慮するときは式(5)で軸力を加算して中立軸を求める。スタッドジベルの本数の設定では式(8)で両者を累加することにより安全側に本数を設定できる。



図—6 曲げ載荷試験体の概略 (No. 4 試験体)

表—1 曲げ載荷試験体の一覧

試験体名	鉄筋コンクリート被覆長さ	スタッドジベル本数 (片側)	鋼管杭の長さ
No. 1	3.5m		
No. 2	3.5m	32本 (8本×4)	1.5m×2本
No. 3	2.7m	32本 (8本×4)	1.5m×2本
No. 4	1.7m	32本 (8本×4)	1.5m×2本
No. 5	1.7m	24本 (8本×3)	1.5m×2本
No. 6	1.7m	12本 (4本×3)	1.5m×2本
No. 7		—列	3.5m×1本

(1) 曲げ載荷試験¹⁰⁾

a) 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—6に、一覧を表—1におのおの示す。試験体の全長は、3.50 m である。鋼管の外径は、31.85 cm、板厚は、6.9 mm であり材質はSTK 41 である。材料強度の試験値は、降伏強度が32~36 kgf/mm²、引張強度が46~51 kgf/mm² である。鋼管は腐食していないものを用いる。コンクリートの被覆厚さは、14 cm であるので試験体の外径は、約0.6 m 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、鋼管のみで製作されておりおのおの材料のみ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50 cmの範囲に鋼管が存在していない。ここでは腐食により鋼管の板厚が著しく薄くなり強度を期待できないと設定している。鉄筋コンクリートの被覆長さとはスタッドジベルの本数が各試験体で異なっている。鉄筋コンクリート内の配筋は、主鉄筋と帯鉄筋とである。主鉄筋は、材質がSD 30、直径が16 mm 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SD 30、直径が10 mm であり15 cm 間隔に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で頭部にねじが取り付けられている。主鉄筋は、この頭部の脇、帯鉄筋は内側に配置してある。No.4では、片側32本総計64本のスタッドジベルが打設されている。今回の試験体の設計で合成鋼管としての終局曲げ耐力を得るのに必要な本数である。No.5、No.6では、本数をNo.4より減らしてあり本数による終局耐力への影響を調べる。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わせるように試験体を鉛直に立てて行う。型枠としては、鋼製型枠を用い打設時にハンマー等で振動を与えながらコンクリートを流し込む。

用いるセメントは、普通ポルトランドセメントである。粗骨材は、神奈川県中井産であり最大寸法が10mmである。表—2にコンクリートの配合を示す。試験時のコンクリートの圧縮強度は、227~263 kgf/cm²である。

b) 試験方法

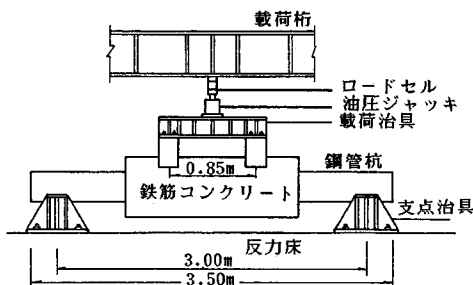
載荷試験の概要を、図—7に示す。載荷は2点載荷で静的に行う。支点間の距離は3mで、載荷点の距離は0.85mである。支点治具および載荷治具は、90度の角度で試験体に接するよう1/4円の面をもつ治具である。この面に薄いゴム板を置いてある。水平方向には特に拘束していない。載荷は、載荷桁と載荷治具の間に設置した容量100tfの油圧ジャッキにより行い、2tf刻みで単調増加させる。ただし、初期ひびわれ発生時および鉄筋降伏時でいったん除荷する。鉄筋降伏時までは、荷重制御で載荷し、降伏後は変位制御で載荷を行う。変位制御では、鉄筋降伏時の油圧ジャッキ位置での変位 (δ_y) を

表—2 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)	スランパ (cm)	空気量 (%)	水セメント 比 (%)	細骨材率 (%)
240	10	12	4	53.0	46.5

単位量 (kgf/m³)

水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
162	306	851	979	3.06



図—7 曲げ載荷試験の方法

基準にして $2\delta_y$, $3\delta_y$, ... のように載荷を行う。

計測項目と方法は、以下のとおりである。

- ① 載荷荷重…ロードセル (1台)
- ② 試験体の鉛直変位…変位計 (9台)
- ③ 鋼管と被覆コンクリート間の相対変位量…変位計 (1台)

鉄筋コンクリート部端面の鋼管上に設置して水平方向の相対変位量を計測する。

④ 鋼管、コンクリートおよび鉄筋のひずみ量…ひずみゲージ (おのおの24か所, 38か所, 34か所)

⑤ コンクリートのひびわれ幅… π 型ゲージ (9台)
ひびわれ幅は、試験体の下端で計測を行う。 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。

c) 試験結果

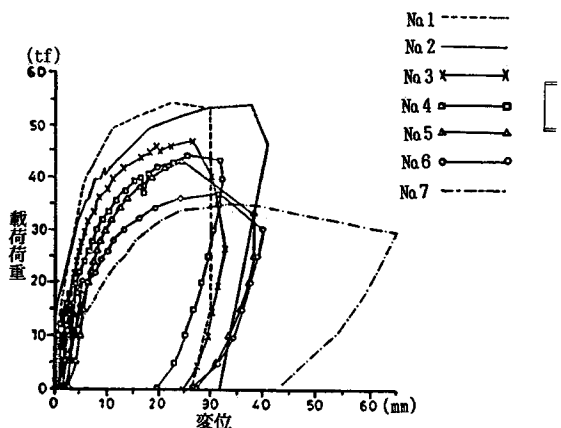
曲げ載荷試験の結果を、表—3に示す。また載荷荷重と油圧ジャッキ位置での鉛直変位との関係を、図—8に示す。

終局荷重は、ここでは、油圧ジャッキでの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たときの荷重、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、

表—3 曲げ載荷試験の結果

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。



図—8 荷重と変位の関係

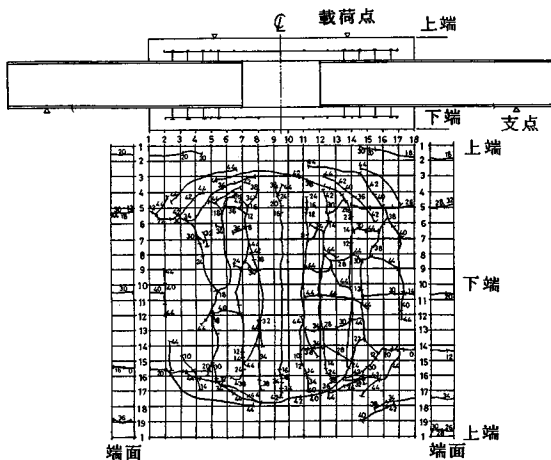


図-9 ひびわれの発生状況 (No.4 試験体)

54.16 tf, 鉄筋降伏荷重は, 29.57 tf, ひびわれ発生荷重は, 10.12 tf であった。No.2 は, 試験体の中央の 0.5 m の範囲以外に鋼管が存在するが, 終局荷重等に関して 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 および 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, No.4 と No.5 を比較した場合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総計 24 本の場合 (No.6) は, 16% ほど終局荷重が低下した。図-9 に No.4 でのひびわれの発生状況を示す。載荷荷重 8 tf で, 鉄筋コンクリート内の鋼管の端部位置の下端に曲げひびわれが発生した。その後載荷荷重が 12 tf 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, せん断ひびわれおよび鋼管軸方向のひびわれも進展した。40 tf 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, 鋼管等の鋼材の破壊は, みられなかった。

No.5, No.6 でも No.4 と同様にせん断破壊が卓越した。

ひびわれ幅は, 試験体の下端の鋼管軸方向に計測した。下端でのひびわれは, 曲げひびわれであった。この試験体では, 8 tf 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 20 tf までに発生した。ひびわれ幅は, コンクリートの耐久性

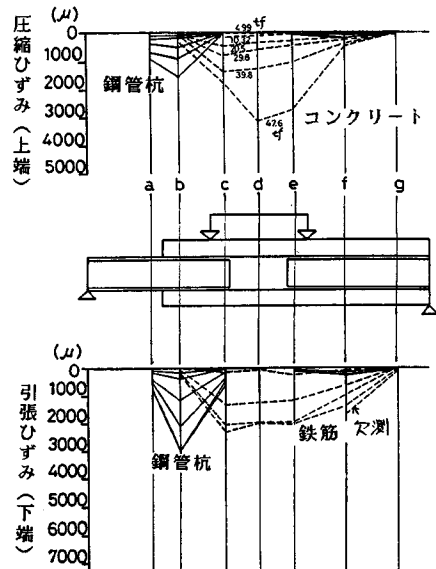
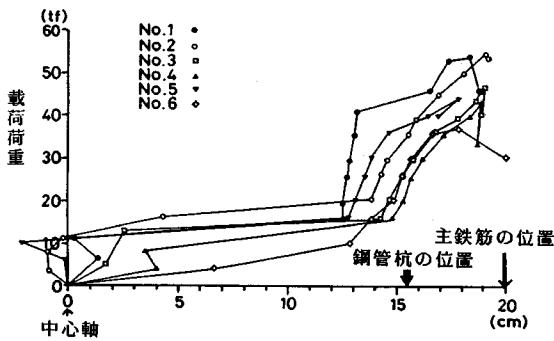


図-10 ひずみ分布 (No.3 試験体)

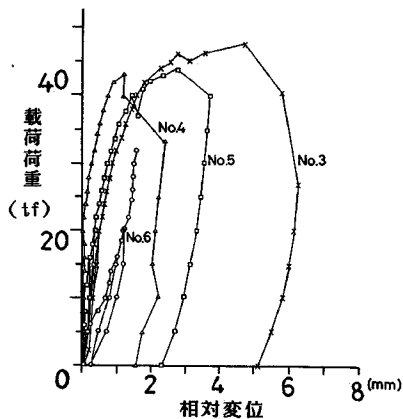
と関連するが, その目安³⁾を, 0.02 cm と考えるとこの試験体では, 12~13 tf と小さな載荷荷重で, ひびわれが発生した。他の試験体でも同様な載荷荷重でひびわれ幅が 0.02 cm となった。

図-10 に No.3 の試験体での鋼管, 主鉄筋およびコンクリートとのひびわれ分布を示す。同図で上側の図は, 試験体上端の軸方向の鋼管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, 鋼管の一部にしか被覆されていないが, この部分では, 鋼管とコンクリートともひずみ量は, 載荷とともに増加し両者で外力に抵抗したことがわかる。試験体の b 点では, 鋼管のひずみ量が大きく, 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。この部分では, スタッドジベルによって鋼管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。

試験体断面でのひずみ量の分布から載荷試験中の中立軸の位置を知ることができる。図-11 に各試験体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方に発生すると中立軸は, 上方に移動した。載荷荷重が増加するに従ってしだいに上方に中立軸は, 移動するが, 終局付近では, 試験体中心軸より 17~20 cm のと



図—11 載荷荷重と中立軸の位置

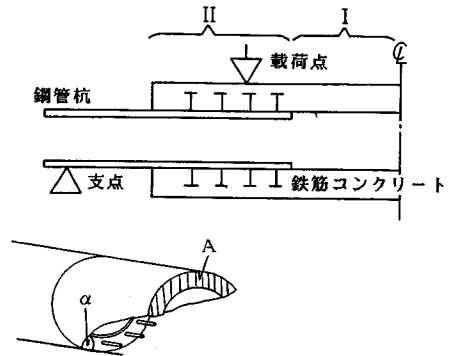


図—12 鋼管杭と鉄筋コンクリートとの相対変位

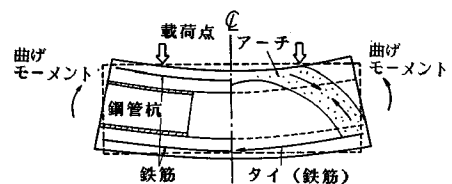
ころに中立軸があった。図—12に鉄筋コンクリートと鋼管との相対変位を示す。この変位は、図—10のa点に設置した変位計で計測したものである。ただしa点は鋼管の上端である。No.1およびNo.2の試験体では鉄筋コンクリート端部が支点より外側に位置しており相対変位はほとんど生じていないので図中に入れない。この相対変位量は、1～3 mmであった。スタッドジベルの本数が多いNo.4の試験体では、載荷荷重が20 tfまでほとんど相対変位は生じなかった。しかしスタッドジベルの本数が少なくなるに従って相対変位量は、載荷荷重が小さな段階から大きくなった。この場合鋼管と鉄筋コンクリートとがずれて完全に合成されているとはいえない状態となった。

d) 試験値と計算値との比較

4. で述べた計算方法で求めた主鉄筋が降伏したときの載荷荷重を求めると20.8 tfであり表—3に示すNo.4～No.6の試験体で試験結果と比較的に良く一致した。しかし計算されたコンクリートの圧壊時の終局荷重は、30.0 tfでありいずれの試験体でも試験値と比較してかなり小さな値となった。この原因として載荷試験では、試験体が曲げ破壊したあとでもアーチ的な力学機構でさ



図—13 試験体の状況



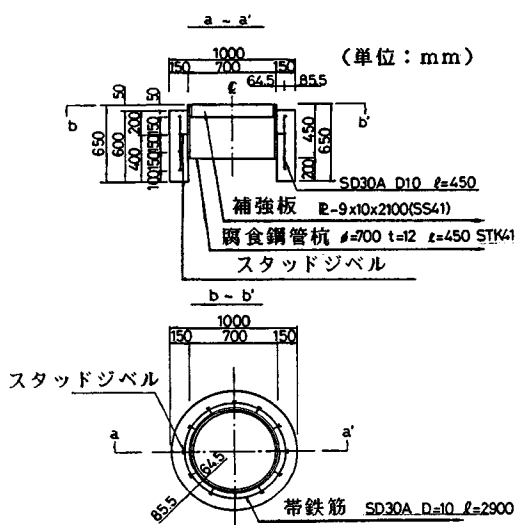
図—14 試験体の力学状況

らに外力に抵抗したからである。すなわちせん断耐力をもって両者の比較を行う必要がある。式 (7) でせん断耐力を求めると58 tfである。ただし計算の際、 α を30度、 A を355 cm²、 σ_c を240 kgf/cm²に載荷試験後の試験体の状況およびコンクリートの圧縮試験をもとに設定した。No.1とNo.2の試験体に関してはほぼ試験値と計算値とが等しいといえる。せん断破壊した原因を考察する。図—13に試験体の状況とコンクリートの破壊面を示す。破壊したのは、同図のⅠ部の鉄筋コンクリート部分だけである。Ⅱ部では破壊は、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。載荷試験では曲げびわれが生じた後に、斜方向にせん断びわれが進行した。これは、Ⅱ部の剛性が高いことからこの部分が一種のⅠ部に対する固定点のような働きをしたと考える。すなわちⅠ部については、Ⅱ部を固定とする両端固定ばりとみなすことができる。曲げ破壊では、コンクリートの圧縮域での圧壊によって破壊する。今回は、圧縮域での力が斜びわれの進行とともに図—14に示すようにはりの軸線方向も考慮した新たな破壊機構、一種のアーチ機構ができたと考える。

(2) 押抜きせん断試験

a) 試験体の構造

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—15に、一覧を表—4に示す。試験体は、鋼管と、被覆コンクリートおよ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65 cmである。ケース1からケース8までは、外径



図—15 押抜きせん断試験体の概略

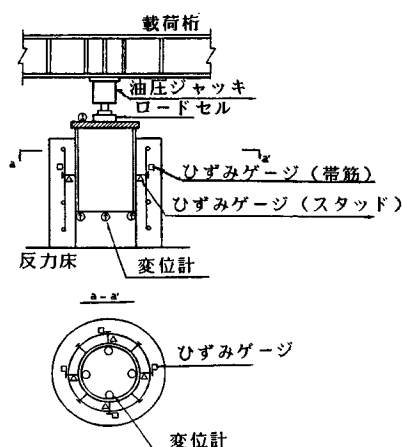
表—4 押抜きせん断試験体の一覧

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	SM16×70	16本	無	外径 60cm
CASE-2	SM16×70	8本	無	内径 31.9cm
CASE-3	SM16×70	4本	無	高さ 65cm
CASE-4	SM16×40	8本	無	
CASE-5	SM12×70	8本	無	
CASE-6	SM12×40	8本	無	
CASE-7	SM16×70	8本	有	
CASE-8	SM12×70	8本	有	
CASE-9	SM16×70	24本	無	外径 100cm
CASE-10	SM16×70	12本	無	内径 70cm
CASE-11	SM12×70	12本	無	高さ 65cm
CASE-12	SM16×70	12本	有	

31.85 mm, 板厚 6.9 mm, 高さ 45 cm の鋼管を用いる。ケース 9 からケース 12 までは、外径 700 mm, 初期板厚 12 mm, 高さ 45 cm である。この鋼管は、海洋環境下に約 20 年間置かれたもので、鋼管表面は、腐食が 1 ~ 2 mm 進行している。試験体を製作する際には、さび等を十分取り除く。

用いるスタッドジベルの種類は、ねじ付きの4種類で、SM 16×70、SM 16×40、SM 12×70 および SM 12×40 である。この記号の前の数字は直径 (mm)、後の数字は高さ (mm) をそれぞれ表わす。ケース7、8および12の試験体では、コンクリート内に帯鉄筋を配置する。これらのほか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。帯鉄筋の直径は、10 mm で材質はSD 30 である。帯鉄筋は、15 cm 間隔に配置し、スタッドジベルの頭部が帯鉄筋に接するように設置する。

コンクリートの被覆厚さは 15 cm であり、帯鉄筋の



図—16 押抜きせん断試験の概略と測定機器の配置

かぶり厚さは約8 cm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。試験時のコンクリートの圧縮強度は262~287 kgf/cm², 引張強度は13.6~21.8 kgf/cm²である。ケース10, 11, および12の試験体の上端は、載荷試験中に鋼管が座屈しないように鋼材で補強をする。用いるコンクリートは、前述した曲げ試験のときと同じである。

b) 試驗方法

載荷試験の概要を、図—16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の面にくるように設置する。試験体の上面に油圧ジャッキを設置する。このジャッキの容量は100 tfである。2 tf刻みに載荷荷重を試験体が破壊に至るまで単調増加させる。

計測項目と方法は、以下のとおりである。

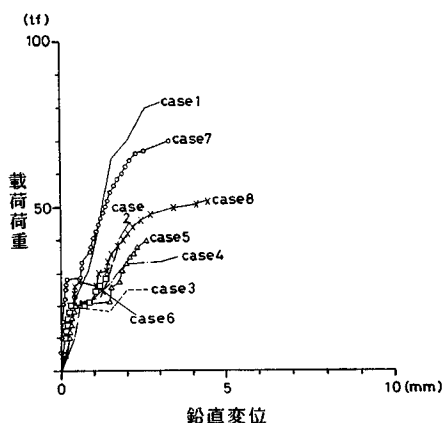
- ① 載荷荷重…ロードセル (1台)
- ② 試験体の鉛直変位量…変位計 (1台)
- ③ 鋼管と被覆コンクリート間の相対変位量…変位計 (4台)
- ④ 鋼管、帯鉄筋およびスタッドジベルのひずみ量…ひずみゲージ (おのおの8か所, 8か所, および8か所)
- ⑤ コンクリートのひびわれの発生状況…目視

c) 試驗結果

押抜き載荷試験の結果を表—5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—17に示す。油圧ジャッキ位置と鋼管下端での計5台の変位計での値は載荷中ほぼ同一であった。最大荷重付近での試験体の破壊形式は、大きく分けてコンクリートの破壊とスタッドジベルの切断に分類された。図—18にケース1でのコンクリートのひびわれの状況を示す。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り力によって生じたと考えられる。また終局に近づくとスタッ

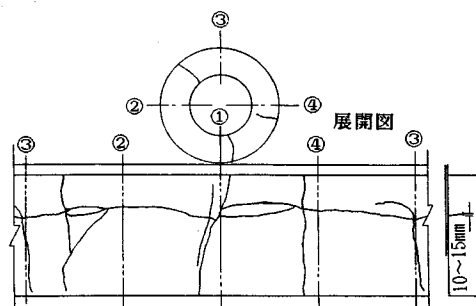
表—5 押抜きせん断試験の結果

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



図—17 載荷荷重と鉛直変位との関係

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。載荷試験後の観察によるとスタッドジベルは、上方に10～20 mm 頭部が動いた。ひびわれの発生状況は、他のケースでもほぼ同じであった。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81.6 tf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本当たりの耐力は、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に比べてケース3では、23%1本当たりの耐力が大きかった。スタッドジベルを密に配置すると1本当たりの耐力は、減ることに注意が必要である。1本当たり分担するコンクリートの範囲が本数が大きくなると重なるからと考える。通常のスタッドジベルの押抜きせん断試験¹¹⁾によると今回用いたスタッドジベルの1本当たりの耐力は、7～8 tfである。今回の試験体のようにコンクリートを鋼管杭に被覆した場合は、この値よりも小さな値となった。帯鉄筋が配置されていると、終局耐力は大きくなった。帯鉄筋が配置



図—18 ひびわれの状況 (ケース1)

されているケース7とケース8とでは50%ほど終局耐力が帯鉄筋がない場合ケース2とケース5よりもおのの大きくなった。帯鉄筋があると耐力は、増加するが、この要因としてスタッドジベルと鉄筋コンクリートの破壊を帯鉄筋が拘束するからだと考える。帯鉄筋の存在によりコンクリートの変形を拘束しコンクリートの内部応力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。

6. 結 論

(1) 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、鉄筋、鋼管杭での破壊はみられなかった。

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と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 スタッドジベルの本数が、片側24本と片側32本(現行設計法での本数)とでは、終局耐力は、ほとんど同じであった。しかし12本にすると終局耐力は、2割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も大きくなった。現行設計法でのスタッドジベルの本数を確保しておけば、鋼管杭と鉄筋コンクリートの合成は十分できる。曲げのみを受ける場合には、さらに本数を減らすことも可能である。

④ 終局曲げ耐力に関する計算値と、実験値とは、一致しなかった。試験での破壊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値とはほぼ一致した。

(2) 押抜きせん断試験に関する結論

⑤ 試験体の破壊形式は、コンクリートの破壊と、スタッドジベルの破壊とに大別できた。スタッドジベルの本数が少ないときは、スタッドジベルの基部での切断が生じ、本数が多いとコンクリートが破壊する傾向がみら

れた。

⑥ 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増加するが、逆に1本当たりのせん断耐力は減少する。

⑦ 鉄筋コンクリートを被覆した場合には、1本当たりのせん断耐力は、通常の押抜きせん断試験で得られるせん断耐力よりも小さい。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せん断耐力はしない場合より増加する。

参 考 文 献

- 1) 石渡友夫, ほか7名: 港湾鋼構造物腐食評価手法について, 港湾技研資料, No. 501, 57 p., 1984年12月.
- 2) 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, pp. 185~200, 1976年9月.
- 3) 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, pp. 3~105, 昭和61年3月.
- 4) 清宮 理, ほか3名: 栈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, 29 p., 1987年9月.
- 5) 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.
- 6) 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-5), pp. 119~126, 1987年10月.
- 7) スタッド協会: スタッド溶接, 122 p., 昭和57年.
- 8) 平城弘一, ほか2名: 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, pp. 91~98, 1986年9月.
- 9) 松井繁之, ほか3名: 鋼・コンクリート合成床版に於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, pp. 99~106, 1986年9月.
- 10) 清宮 理, ほか2名: 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, pp. 171~176, 1986年9月.
- 11) 阿部英彦: 鉄道用合成桁のずれ止めに関する実験的研究, 鉄道技術研究所報告, No. 961, pp. 38~63, 1975年3月.
(1988.11.30・受付)