

## 新材料を用いた吊床版橋の建設とこれに伴う諸試験

国近 康彦\*1・村山 八洲雄\*2・持田 悟\*3・山本 徹\*4

### 1. はじめに

サザンヤードカントリークラブは茨城県水戸市の北東約 10 km の距離に位置する新たに造成されたゴルフ場である。ゴルフ場は変化の富んだコースが設計されており、林の中の谷間を渡る歩道橋には、景観上、吊床版橋が採用された（写真-1）。

橋長 54.5 m の吊床版橋は、長大橋の場合を想定してコンクリートにひびわれを許す考え方で設計された。そのため、耐久性確保の観点から、床版緊張材には FRP 製テンドンが使用された。また、グラウンドアンカー材にも永久アンカーとして耐久性の観点から FRP 製テンドンが使用された（図-1, 2）。



写真-1 完成後の吊床版橋

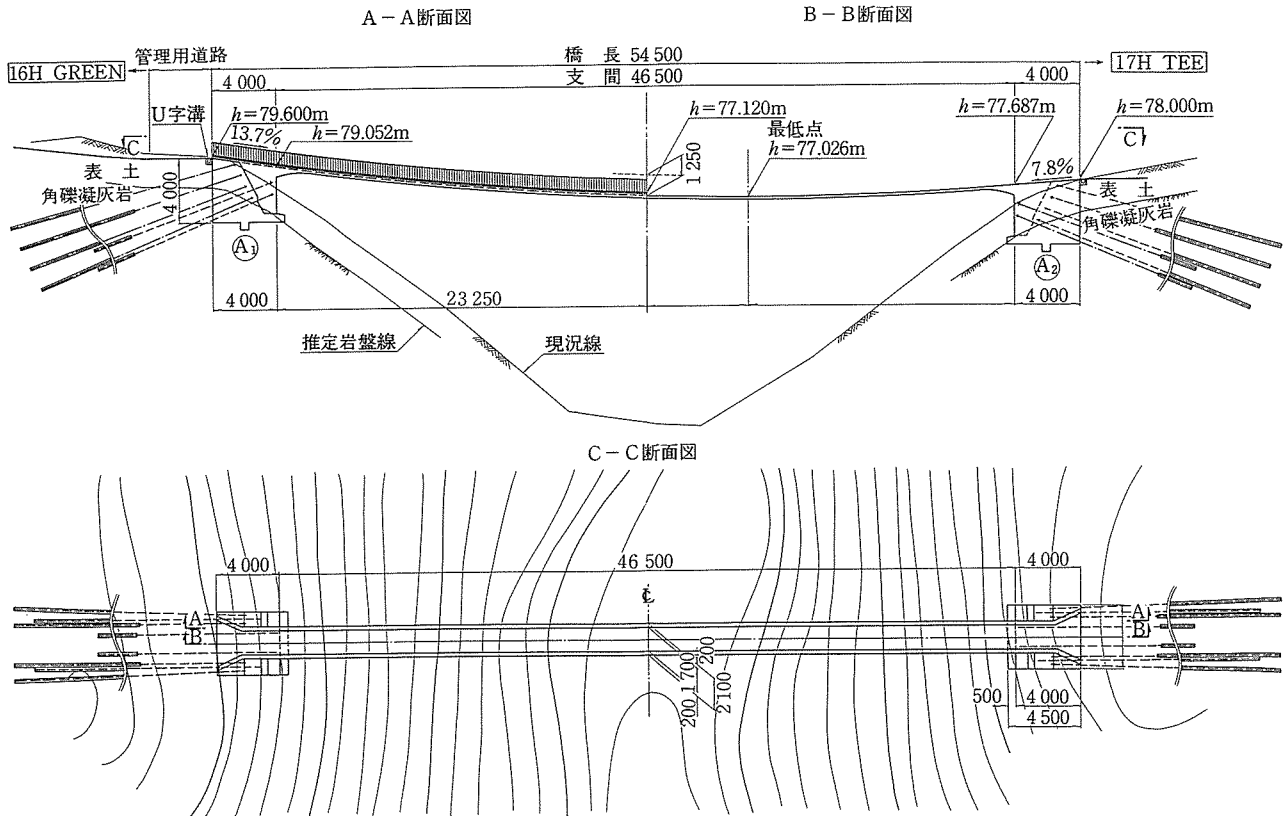


図-1 一般構造図

\*1 Yasuhiko KUNICHIKA : 鹿島建設(株)土木技術本部

\*2 Yasuo MURAYAMA : 鹿島建設(株)技術研究所

\*3 Satoru MOCHIDA : 鹿島建設(株)技術研究所

\*4 Tohru YAMAMOTO : 鹿島建設(株)土木設計本部

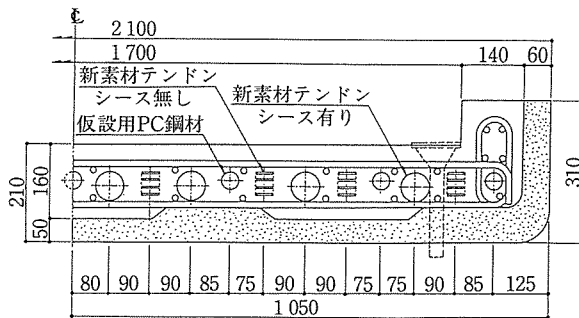


図-2 床版断面図

本報告では、この橋梁の建設とこれに関わる諸試験について概要を報告する。

#### ○橋 梁

橋 種：歩道橋  
 橋梁の形式：吊床版橋  
 橋 長：54.5 m  
 スパン長：46.5 m  
 幅 員：2.1 m  
 基本サグ量：1.25 m

○企 業 者：(株)サザンヤードカントリークラブ

○設計・施工：鹿島建設(株)

○設計条件

群集荷重：350 kgf/m<sup>2</sup>

温度変化：±15℃

○工 期：1990年5月～9月

○テンドンの使用量

吊り材：アラミド繊維FRP(繊維数40万)  
 7150 m

グラウンドアンカー：カーボン繊維FRP(65%  
 体積率)5400 m

## 2. 工事の概要

### 2.1 新材料の利用

吊床版橋の構造形式は、一般に谷の兩岸の橋台にテンドンを渡してこれを固定する。そして、コンクリートを打設し(場合によりさらに再緊張してプレストレスを導入し)、床版の剛性の向上と防錆を図っている。テンドンのサグによって生じる緊張力の上向き成分によって自重や静荷重および上載荷重に抵抗する構造になっている。張力が大きいので橋台の重量だけでは充分に抵抗できないため、斜杭やグラウンドアンカーで抵抗力を補っている。

したがってこの種のテンドンは、一般のPC部材に比べると、安全性の面で定着部の十分な耐力と大きな耐久性が要求されるという特徴を有している。近年、高強度かつ軽量で耐食性に優れた新材料が製造されるようになってきており、鋼製テンドンの代替品として注目され

てきている。著者らは、特に耐食性を活用するため、床版用テンドンとして帯板状のアラミドFRPを、またグラウンドアンカーのテンドンとして棒状のカーボンFRPの開発研究を、それぞれ日本アラミド(前)および三菱化成(株)と行ってきた。定着体の性能を含め種々の良好な結果を得たので、これらのFRP材による緊張工法を本橋に適用することにした。

### 2.2 設計と施工

吊床版橋では、一般のPC桁橋の場合に比べて自重に対する活荷重の比率が大きい。自重を支えるためサグ量に見合う緊張力が必要であるが、許容緊張力までの残りの緊張力で活荷重に対してプレストレスを導入すると、クリープや乾燥収縮に起因するプレストレスの減少量が大きい。この傾向は橋長の増大につれて著しくなる。そのため、本橋ではコンクリートの自重に対してはコンクリートは応力が生じないようにし、その後の上載荷重に対しては新材料を使用することを勘案してひびわれの発生を許容することとした。

施工は、鋼製ケーブルにプレキャストコンクリート製の埋めこらし型枠を吊り下げ、テンドンを配置した後、コンクリートを打設した。鋼製ケーブルは架設用で、架設時のFRP材の損傷に関してデータの蓄積が無かったため用いたものである。コンクリートの硬化後、鋼製ケーブルの緊張を解除しながら新材料のテンドンを緊張し、コンクリート自重を受け変えた。埋めこらし型枠を使用したのは、省力化のためであり、今後の長大橋梁の施工に適しているからである。

床版用のテンドンとしては、シースに入れるポストテンションタイプのほか、直接床版コンクリート中に埋め込むタイプも併用した。後者は前者と共同で上載荷重に対して抵抗するものである。なお、コンクリートには、床版の軽量化をはかるため、設計基準強度400 kgf/cm<sup>2</sup>の第1種軽量コンクリートを使用した。

グラウンドアンカーは、上部工の施工の進捗に伴い、施工時の地盤の許容地盤反力を超えないよう予め定められた施工段階で順次緊張定着した。

## 3. FRP テンドンに関する諸試験

### 3.1 床版用テンドン

#### (1) 使用材料

使用したテンドン素材は、日本アラミド社製の帯板状アラミド繊維である(写真-2)。形状が帯板状であるため表面積が大きく、かつ表面に凹凸処理が施してあるので、コンクリートとの付着強度が大きい。そのため、ポストテンションタイプでは定着具の長さが小さくてすみ、じか埋めタイプでは必要定着長が短くてすむ。また、コイル状に巻いて運搬できるという利点も有してい

◇工事報告◇

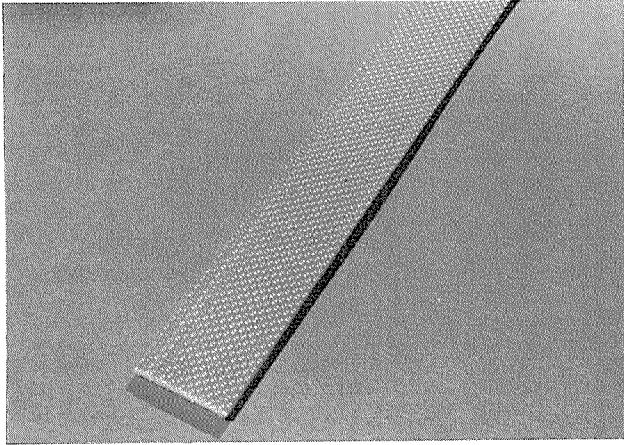


写真-2 帯板状アラミド繊維 FRP

表-1 アラミド繊維 FRP ロッドの諸元

タイプ	A	B	C
繊維数 (本)	10万	20万	40万
断面形状 (mm)	1.5×20	2.73×19.2	4.86×19.5
断面積 (mm <sup>2</sup> )	22.8	45.5	88.0
引張強さ ( $\frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$ )	136		
ヤング係数 ( $\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ )	5.1×10 <sup>5</sup>		
比重	1.25		

る。

母材の引張強さが3.1 tf (Aタイプ), 6.2 tf (Bタイプ), 12.0 tf (Cタイプ) の3種類があるが(表-1), 本橋梁では, Cタイプ8本を束ねて1 tendonとし, 合計16 tendonを使用した。Tendon素材に関しては既に耐久性試験を含めいろいろな材料試験が行われているが, ここでは省略する。

(2) 試験の概要

試験のフローを図-3に示す。本橋にはポストテンションタイプとじか埋めタイプの両方を併用している。そのため, 定着部試験としては, 開発したポストテンション定着具の耐力試験に加えプレテンション型定着具

験を行った。また, コンクリート中のTendonの基本的な性質を把握するため, PC部材の曲げ試験を行った。さらに, 床版にひびわれを許すことから, 部材中のTendonの疲労試験を, またサグ量に影響するひびわれ時の部材剛性の試験を行った。

(3) ポストテンション定着具の試験

試験に用いた定着具は実際と同じ形状寸法のもので, 写真-3および図-4に示すように支圧板を有する定着スリーブ(材質: SCM 435)を使用した。CタイプのTendon素材8本を1組として用い, 素材を相互に一定の間隔で保持してスリーブ内に設置したのち, 間隙に膨張性モルタルを充填した。

試験体は2本のスリーブとこれらに挟まれる長さ90 cmの一般部から成り, 2本のジャッキと反力フレーム

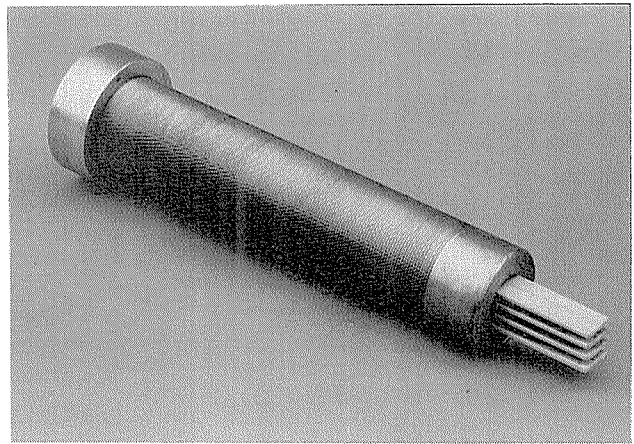


写真-3 床版用Tendonの定着具

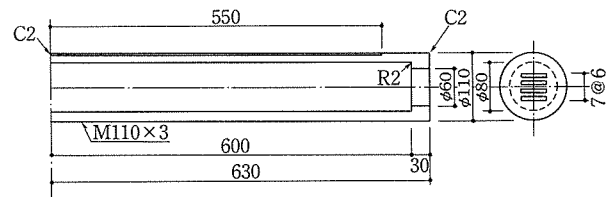


図-4 床版用Tendon定着具の諸元

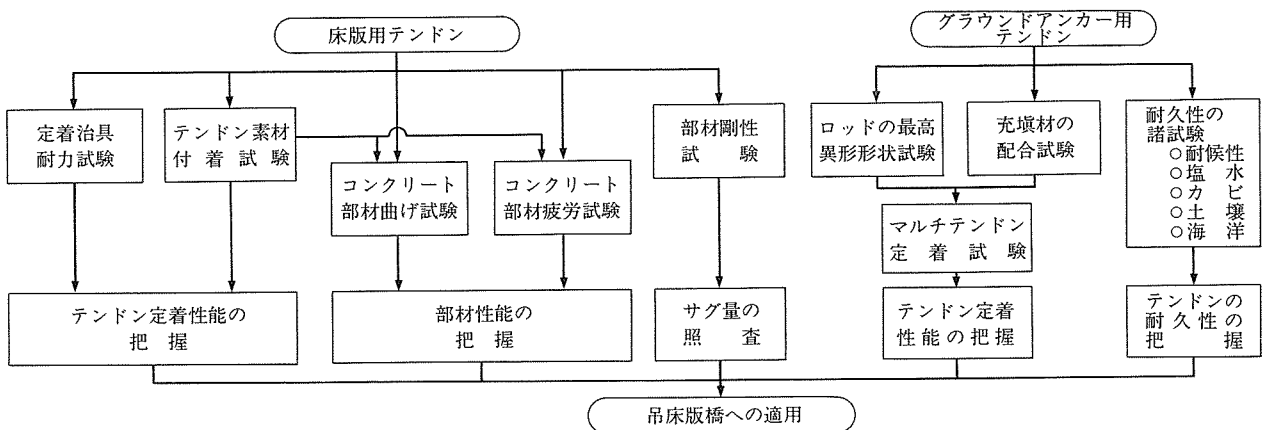


図-3 諸試験のフロー

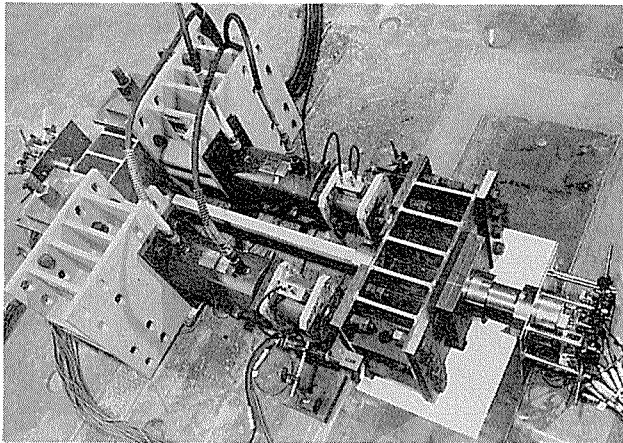


写真-4 定着部の耐力試験

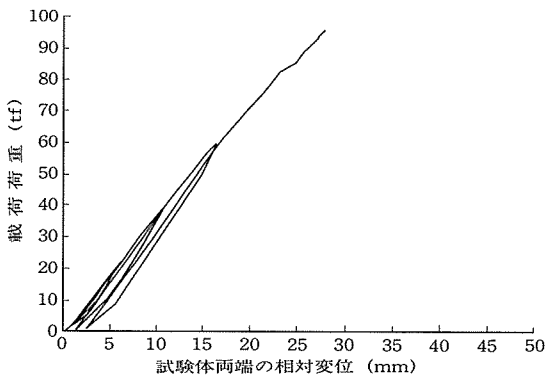


図-5 定着具-テンドン系の両引き試験結果

を用いて両引き試験を行った（写真-4）。

試験体の破壊は母材の破断により生じ、定着具には何ら異状は認められなかった。試験体3体の試験の結果はいずれも85 tf以上の耐力を示した（図-5）。定着部ではテンドンの微小な滑りを生じるが、この量は実橋での緊張力24 tf相当で1組あたり1~2 mmであり、引きしろ約200 mmに比べ無視できる大きさであった。完成後は、テンドン素材の付着強度が大きくシースのグラウトにより定着具以外での定着効果が大きいので、繰返し荷重が作用することはない。

（4） テンドン素材の定着長

本橋のじか埋めタイプのテンドンの定着長、および後述のPC部材試験体（プレテンション部材）の定着長を把握しておくため、テンドン素材のプレテンション定着試験を行った。

試験は、寸法が120×100×2 000 mmの普通骨材コンクリートの試験体に、予め緊張したAタイプの素材でプレストレスを導入し、コンクリートのひずみ分布をワイヤストレンゲージで測定することにより定着長を求めた。この方法による定着長は図-6からも分かるように6 cm前後と推定され、引抜き定着長と太さなかった。実橋に用いるCタイプの定着長はこの4倍、すな

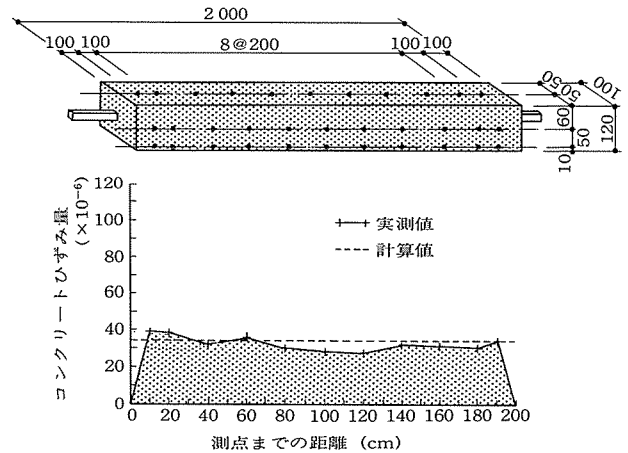


図-6 FRP ロッドの定着試験

わち24 cmに相当する。

（5） コンクリート部材の曲げ試験

このテンドン素材のコンクリートとの共同作用の性質を確認するため、部材試験を行った。試験体寸法は、450×300×5 400 mmで、普通骨材コンクリートとAタイプのテンドン素材を用いた。加力方法を写真-5に示す。

一例として、曲げ引張破壊モードを想定した補強材比0.43%で、プレストレスの導入量30.6 tf（コンクリート上縁応力度-6 kgf/cm<sup>2</sup>、下縁応力度52 kgf/cm<sup>2</sup>）の場合の荷重-変位曲線を図-7に示す。部材のひびわれ

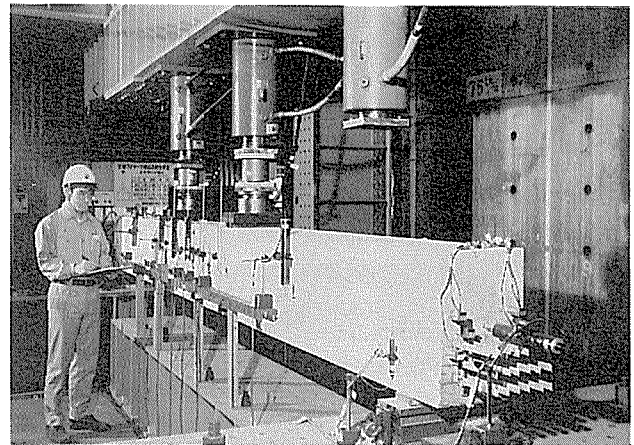


写真-5 PC部材の曲げ試験

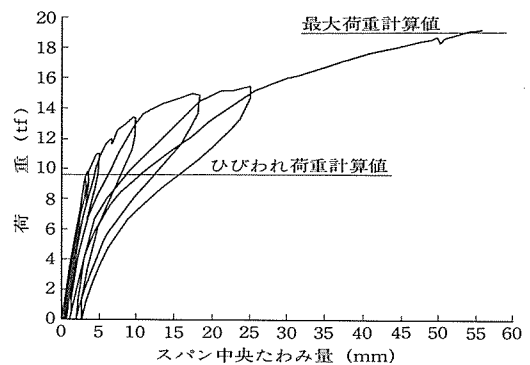


図-7 PC部材の曲げ試験結果

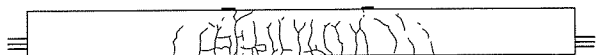


図-8 PC部材のひびわれ分布

荷重と最大荷重の計算値も併記したが、実験値と計算値はほぼ一致している。また、ひびわれは図-8に示すように比較的よく分散している。

これらのことから、部材の破壊が脆性的であることを除けば、従来の鋼製 tendon の場合と同様の考え方で複合部材としての設計ができることが確認された。

#### (6) 疲労試験

コンクリート部材中の tendon の疲労強度を調べるため、PC部材の曲げ疲労試験を行った。試験体寸法は、 $220 \times 170 \times 2500$  mm で、普通骨材コンクリートと A タイプの tendon 素材を用いた。補強材比 0.32% で、プレストレスの導入量は 5.0 tf (コンクリート上縁応力度  $-8 \text{ kgf/cm}^2$ , 下縁応力度  $34 \text{ kgf/cm}^2$ ) である。加力は写真-6に示す要領で行い、コンクリートのひびわれ荷重を超える変動荷重を加えた。

tendon の応力度が下限応力度  $5500 \text{ kgf/cm}^2$  (C タイプ 8本換算では 35 tf) のときは、上限応力度  $8800$

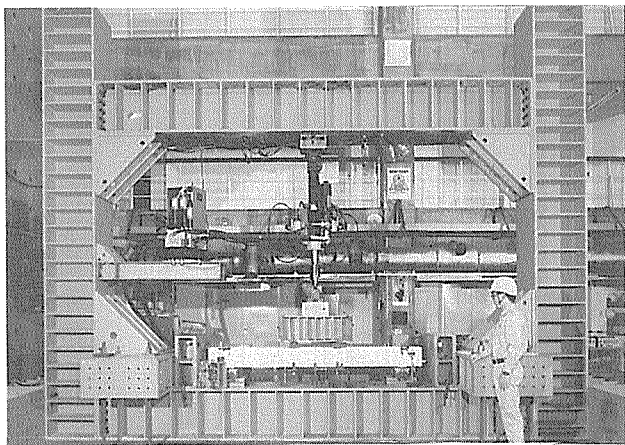


写真-6 PC部材による tendon の疲労試験

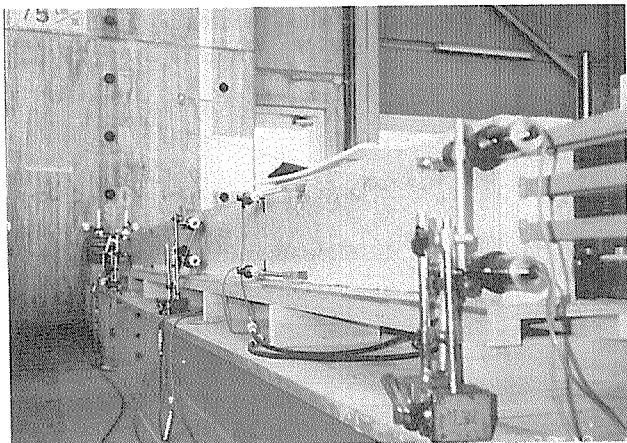


写真-7 コンクリート部材の軸剛性評価試験

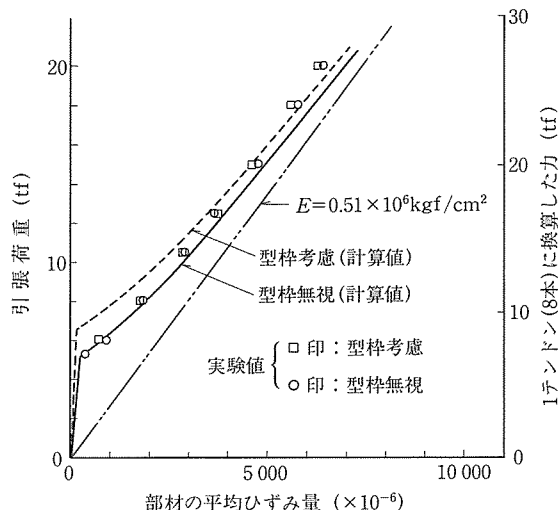


図-9 コンクリート部材の軸剛性試験結果

$\text{kgf/cm}^2$  (同, 58 tf) でも 400 万回以上の繰返しに耐えることが分かった。ここで、応力度は、プレストレスとひびわれの発生を考慮して荷重値から計算した。この結果から、本 tendon は PC 鋼材に劣らない疲労強度を有していることが分かった。

#### (7) ひびわれ部材の剛性試験

ひびわれ後の部材の軸剛性を調べるため、コンクリートと tendon からなる複合部材の両引き試験を行った (写真-7)。試験は、埋めころし型枠部分を無視した場合と型枠部および継ぎ目部を考慮した場合について行った。コンクリートには軽量コンクリートを、また、tendon 素材には C タイプを使用し、補強材比も実橋に合わせた。

荷重と部材の平均ひずみ量の実験結果を図-9に示す。図には、CEB-FIP による計算結果も併記した。埋めころし型枠の部分を無視したものについては、実験値と計算値は比較的よく一致している。型枠部分を考慮した部材の厚さの大きいものでは、tendon の埋設位置が部材図心位置と異なる影響で曲げひびわれが出やすいこともあり、剛性はさほど大きくならない。

### 3.2 グラウンドアンカーに関する試験

#### (1) 使用材料

使用した tendon 素材は、三菱化成社製のカーボン FRP で、断面形状が円形のロッド状のものである。引張強度が大きく、アルカリ、酸性、バクテリア、塩水による劣化がないため、防食処理が不要である。また、軽量であるので、作業性・安全性が向上するという利点を有している。

カーボン FRP ロッドの諸元を表-2に示す。

#### (2) 定着体の概念

図-10に示すように、充填材とスリーブを使用することにより、従来のクサビ定着に比べロッドに過大な圧

表-2 カーボン繊維 FRP ロッドの諸元

実 径	φ 8 mm
使用マトリックス	熱硬化性エポキシ樹脂
織 維 量	約 65%
引 張 強 度	約 184 kgf/mm <sup>2</sup>
引 張 弾 性 率	約 15×10 <sup>3</sup> kgf/mm <sup>2</sup>
重 量	約 77 gf/m
比 重	約 1.6
レラクセーション率	2~3% (20℃)
熱 膨 張 率	0.68×10 <sup>-6</sup> /℃

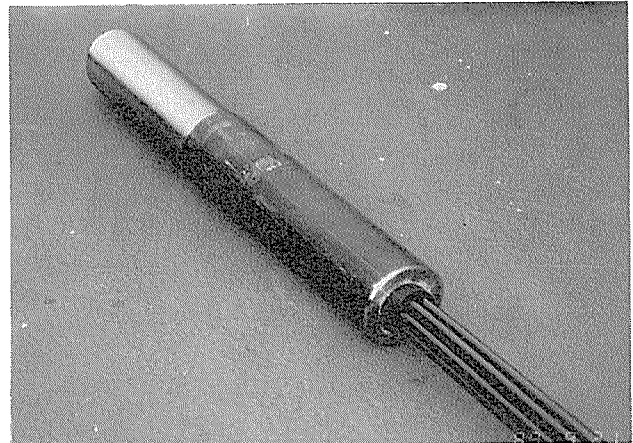


写真-8 グラウンドアンカー用テンドンの定着具

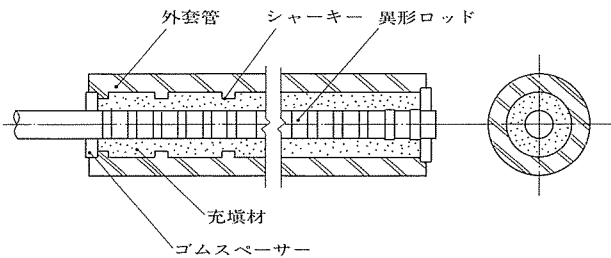


図-10 グラウンドアンカー用定着具の構造

縮応力を与えない定着方法を考案した。これは、定着部を異形に処理したロッドを、無収縮のセメント系モルタルで充填したスリーブで定着するものである。

(3) 試験の概要

ロッドは表面が滑らかな丸棒タイプであるので、いかに効率のよい定着具を製作するかが課題であった。そのため、定着具にはスリーブを使用することにしたが、ロッドの定着部での異形形状、充填モルタルの配合の相

違、およびテンドンの束ね方に関する試験を行った。

また耐久性を確認するため、テンドン素材の耐候性試験、塩水噴霧試験、カビ抵抗性試験、土壌埋設試験、および海洋暴露試験を行った。

ここでは、定着部の試験について述べる。

(4) ロッド定着部の最適異形形状の試験

定着効率のよいロッドの異形形状を求めため、各種形状の定着部を用いた引抜き試験を行った。形状は図-11に示すように節の幅・ピッチを変化させた5種類とした。試験対象とした定着長は、100 および 150 mm であり、図-12に示すように、他端は引き抜けないように 300 mm とした。

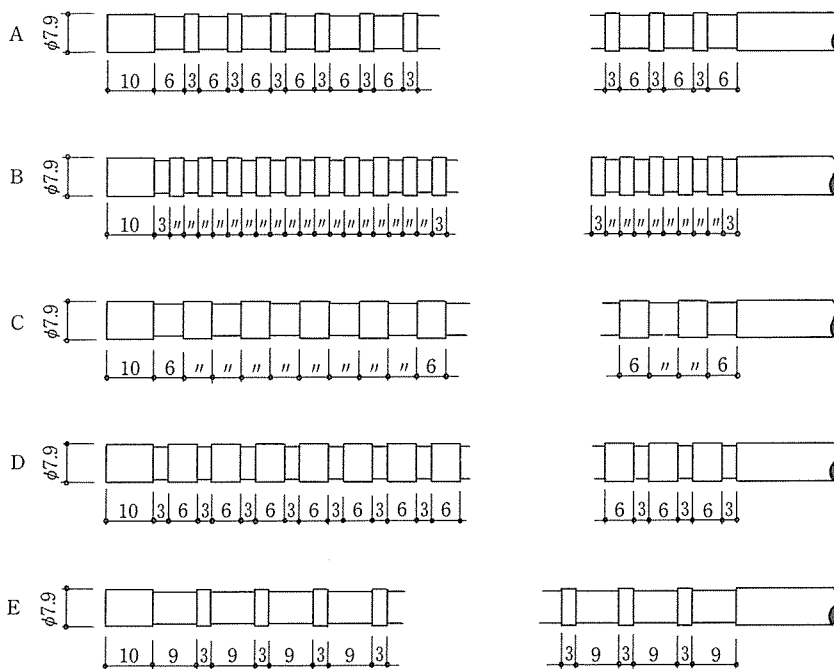


図-11 試験対象としたロッドの異形形状

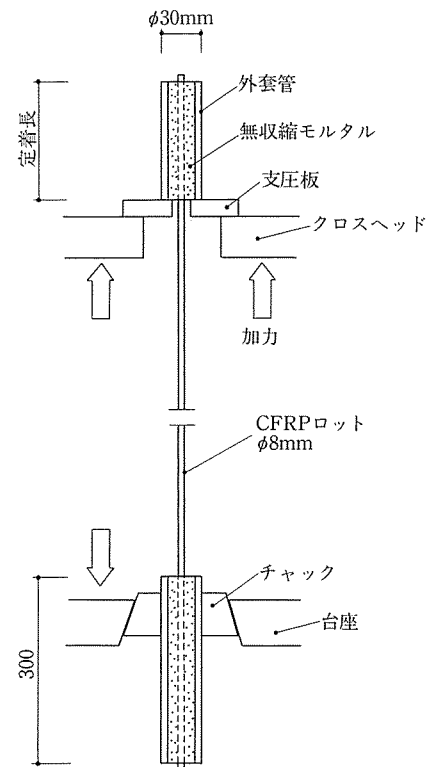


図-12 定着部試験方法

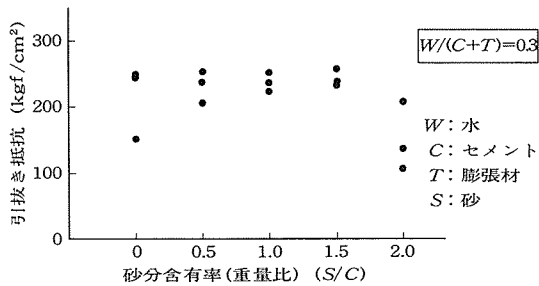


図-13 充填材の配合が定着に及ぼす影響

表-3 充填材の配合仕様 (重量比)

水・結合材比 $W/(C+T)$ (%)	砂含有率 $S/C$ (%)
30	100

W:水, C:セメント, T:膨張材, S:砂

定着長 150 mm では、A、B、C タイプはロッド破断まで耐力を保持することが分かった。さらに、A、B、C について定着長 100 mm として引抜き試験を行った結果、これらの引抜き抵抗に大きな差は認められなかった。以下の試験では、比較的大きな抵抗力を示した A タイプを使用することとした。

(5) 充填材の配合

スリーブ内に充填するモルタルの配合が引抜き耐力に及ぼす影響を把握するため試験を行った。異形状は A タイプに固定し、配合を変えて平均付着強度によって比較検討した。

試験結果を図-13 に示す。水・結合材比を 0.3 とした場合、砂含有率 (S/C) が 0 では引抜き抵抗値にばらつきが生じ、また、2.0 では充填性が低下するため引抜き抵抗も低下することが分かった。このため、充填材として適する砂含有率は、0.5~1.5 と考えられた。

なお、砂含有率を 1.0 として水・結合材比と引抜き抵抗の関係を調べた結果、水・結合材比が小さいほど、引抜き抵抗が増加することが分かった。

施工性能および定着性能を考慮し、充填材としては表-3 に示す配合を採用することとした。

(6) マルチテンドンの定着試験

ロッド本数の異なる 4 種類の定着体の試験を行った。ロッドが 3 本および 5 本タイプの試験結果から、束ね型よりも分散型が定着長を短くできることが明らかになったので、7 本および 9 本タイプでは分散型のみとした。

試験結果を図-14 に示す。ここで、定着効率は、切削に伴うロッドの断面欠損を考慮した 1 本あたりの破断荷重 8.96 tf を基準にした。試験結果から、ロッドが破断するタイプの定着能力を有する定着長と定着効率は、表-4 に示す値となる。なお、その後の試験の結果、9

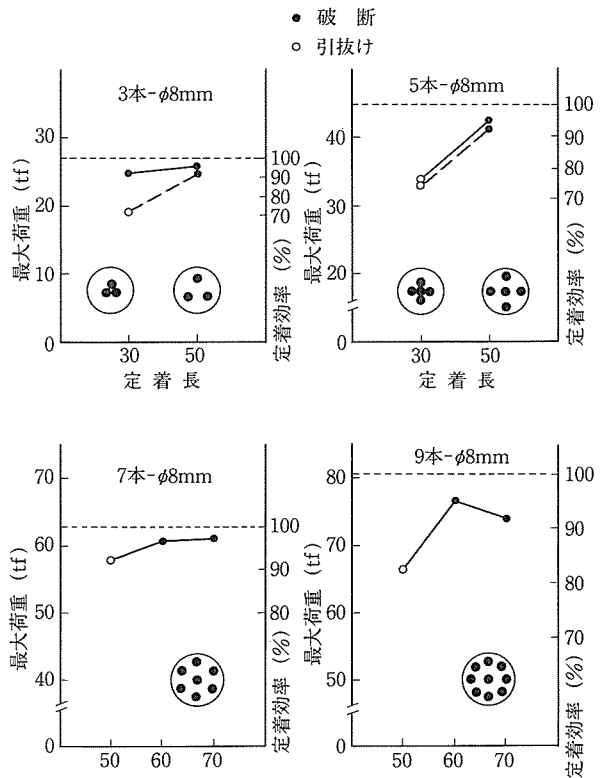


図-14 定着長と定着効率の関係

表-4 定着耐力試験結果

型 式	定着長 (mm)	破断荷重 (tf)	定着効率 (%)
3 本タイプ	300	25	93
5 本タイプ	500	42	94
7 本タイプ	600	61	97
9 本タイプ	600	76	94

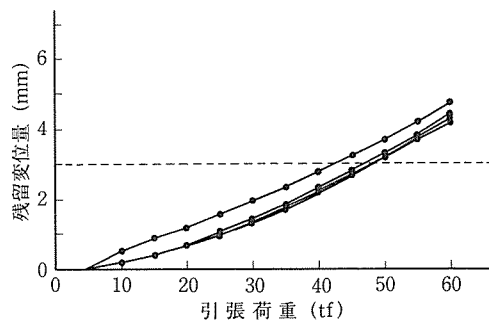


図-15 荷重と定着部残留変位

本タイプでは 80 tf 以上の耐力が得られている。

9 本タイプのマルチテンドンの載荷時における定着具からの抜けだし量を測定した。図-15 は、繰返し荷重の各ピーク荷重に対する残留変位を示す。これらの値は、実際の場合の緊張代に比べて無視できる程度の値である。

3.3 設計値との関係

以上の実験結果を踏まえて設計用値を設定したが、実

験値と設計値は以下のような関係になっている。

床版用テンダンの定着具に作用する最大荷重は緊張時の 24 tf であるが、定着具は 85 tf 以上の耐力があるので十分な耐力の余裕を有している。完成後の荷重に対しては、シース内にグラウトされており、テンダンの付着強度も大きくまた橋台上での定着長も大きいので、その後の荷重はほとんど定着部には伝達されないと考えられる。

自重と静荷重に対しては、1 テンダンあたり最大 28 tf の張力が発生するが、床版部の 1 テンダンあたりの耐力は 85 tf 以上であるので、3 の安全率を有している。これらの荷重に加え群集荷重  $350 \text{ kgf/cm}^2$  が作用する最も厳しい状態で発生する張力は 34 tf であるが、これに対しては安全率は 2.5 程度が確保されている。ただし、計算上安全側になるように、部材剛性は全断面有効時の値を使用した。この荷重に対しては、CEB-FIP の方法で部材剛性を計算し、サグ量を照査した。

なお、400 万回疲労強度は 1 テンダンあたり振幅 23 tf 以上であり、疲労に対して十分な安全性を有している。

グラウンドアンカーの導入緊張力は 40 tf とし、緊張直後の安全率は 2 を確保した。有効緊張力は 32 tf に設

定し、安全率 2.5 を確保した。テンダンには有効緊張力以上の張力をかけており、テンダンの剛性に比べて地盤側の剛性が十分大きいので、完成後の変動荷重によって生じるテンダンの付加張力ならびに変形量はわずかである。

#### 4. 緊張材の施工

##### 4.1 床版用テンダン

アラミド繊維 FRP のポストテンション用テンダンは、以下に示す要領で製作した。まず、帯板状 FRP を巻いて現場に搬入した後、検尺を行って設計の長さに切断した。次に、順次、写真-10 に示すスペーサと頭部キャップを取り付けながら、ロッドを 8 本束ね、同時にシースをつぎ足しながら片側から組み立てた。スペーサのピッチは、テンダンがシースに接しないように、また、ロッド自体の屈曲および頭部キャップ位置のコンクリートの支圧応力度を所定の値以下になるように、曲げ半径に応じて 0.3~0.4 m とした。

最後に、両端部にスリーブを取り付け、モルタルを充填した。

床版に直接埋めこんだタイプのテンダンは、スペーサ

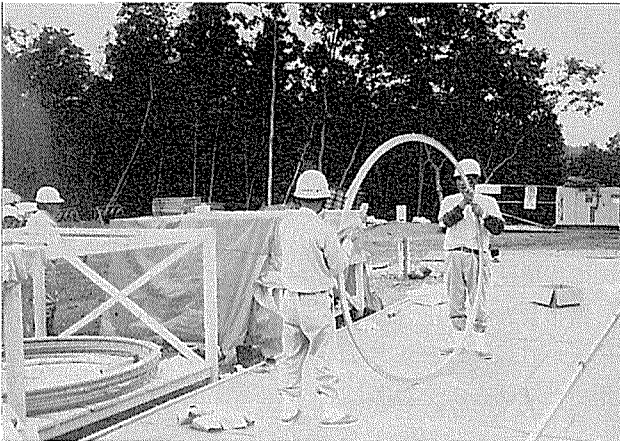


写真-9 搬入後のアラミド繊維 FRP ロッド

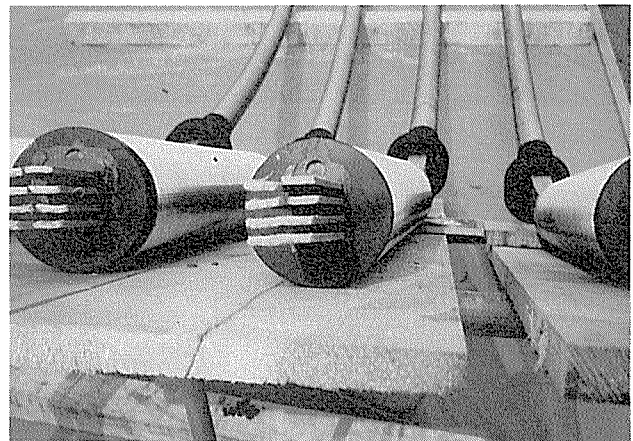


写真-11 ポストテンション定着具へのモルタル充填

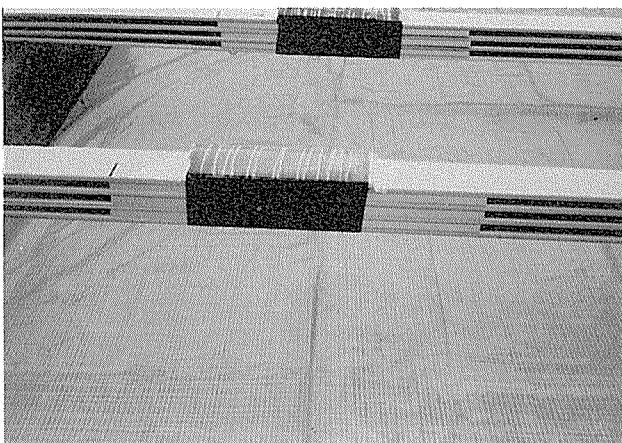


写真-10 ポストテンション用テンダンのスペーサ

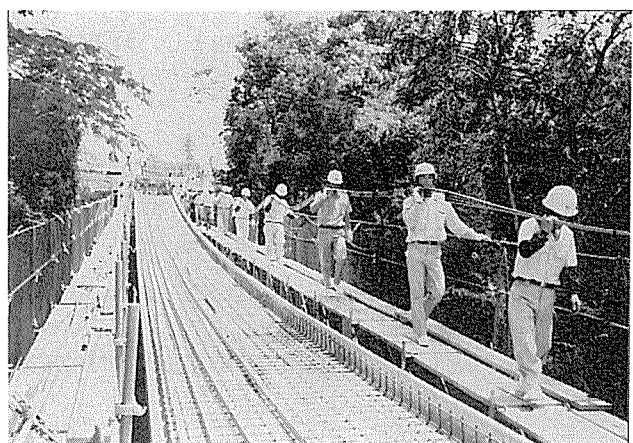


写真-12 床版用テンダンの設置





写真-13 搬入後のカーボン繊維 FRP ロッド

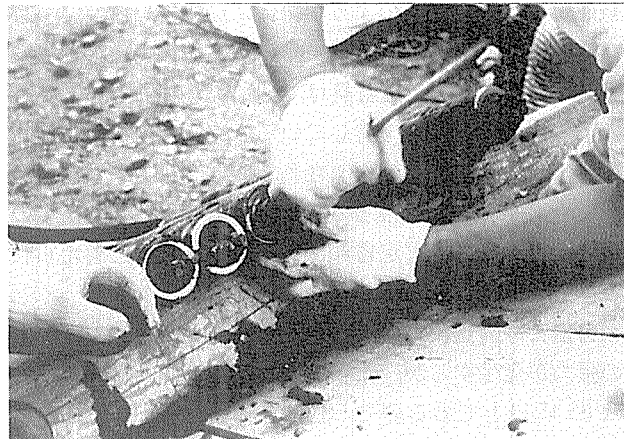


写真-15 グラウンドアンカー定着部のモルタル充填

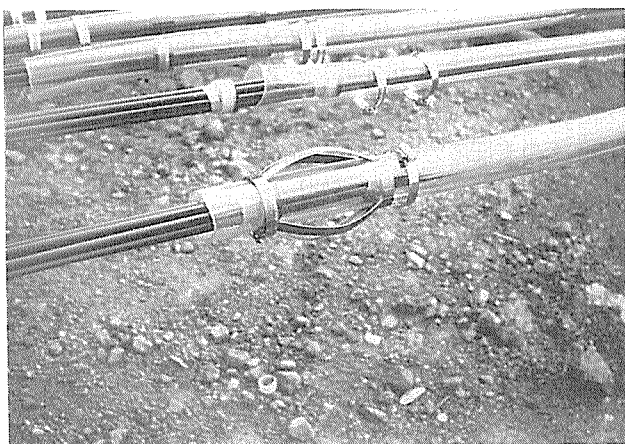


写真-14 グラウンドアンカーのスペーサ

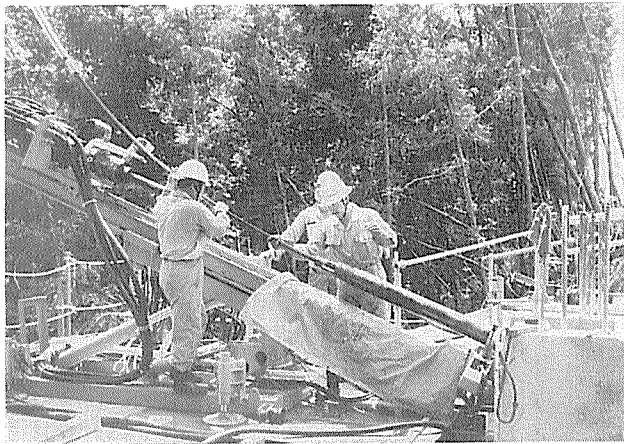


写真-16 グラウンドアンカーの挿入

の配置ピッチを 1.0 m 以下とし、コンクリートの打設圧等に対してもロッドの間隔が保持されるようにした。

ポストテンションタイプの頭部キャップには、減摩の目的でテフロンシートを取り付けたが、実績がないので緊張に先立って試験緊張を行った。試験緊張は、4 テンソンを選んで、片引きで合計 8 回行った。その結果、見掛けのヤング係数の平均値は  $4.9 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$  で、母材の値の  $5.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$  をやや下回った。また、摩擦係数の平均値は 0.13、標準偏差は 0.11 であった。本緊張の緊張管理は摩擦係数による方法とし、緊張試験結果をもとに  $2\sigma$  法により行ったが、すべてのテンソンが管理状態にあった。

#### 4.2 グラウンドアンカー

使用したカーボン繊維 FRP ロードは、設計の長さに切断し、定着部に異形加工を施したうえ、リールに巻いて現場に搬入した。

現場では、ロッドを 9 本束ね、スペーサ、シースを取り付けた後、緊張側と固定側にスリーブを取り付けて組

み立てた（写真-15）。削孔から緊張までの作業は従来工法と大きな変わりはないが、テンソンの重量が小さいので作業性は良好であった。

緊張管理は、圧力と伸びによる方法に従ったが、配置形状が直線のこともあり、実測値は母材のヤング係数を用いた関係とよく対応していた。

#### 5. あとがき

本橋は新材料を主テンソンとしたわが国初の本格的な橋梁である。そのため建設にあたっては、以上述べたような種々の実験データを基本にして設計と施工が行われた。その後、完成橋梁について振動実験を実施し、現在、長期的な諸計測を行っている。これまで得られている測定データによれば、本橋はほぼ設計に対応する挙動を示している。

これらの観測データは、また別の機会に報告したいと考えている。

【1990年11月24日受付】