

首都高速道路横浜羽田空港線大師 PC 橋補強工事について

阿 保 進*
桑 原 晴 雄**

1. 概 要

本補強工事は、PC 主桁に生じたひびわれをアウトサイドケーブルによる追加プレストレスにより補強を行ったものである。

この橋梁は、首都高速道路横浜羽田空港線が多摩川を渡る部分であり、その右岸側に架設されたものである(図-1)。昭和 43 年に供用を始めてから約 10 年経過しており、現在 1 日の交通量は約 8 万台である。

橋梁の構造寸法は図-2 のとおりであり、大師ランプへの分岐線をも持っている。構造形式は架設位置が洪水河川上であり、湯水期施工であったため、工期短縮を図りプレキャスト桁と現場打ち部との併用構造となっており、中央橋脚より張出した箱桁の両側にプレキャスト合成 T 桁を現場打ち部にて連結している 2 径間連続 T 形ラーメン橋である。

この橋梁の右岸側径間 ($P_0 \sim P_1$) の現場打継部分に、多数のひびわれが発生しているのが認められ、調査検討が行われた。この結果、打継目部のひびわれの補強を行うこととなったが、その方法は、高速道路の一般通行車

両の通行を妨げず安全に行わなければならない、そのうえに、既在の桁を損傷しないこと、また補強のために付加される重量を少なくすることが要求され、条件は非常に厳しいものとなった。

補強方法について、種々比較検討の結果、連結部に、桁外に配置した PC ケーブルによって、追加プレストレスを導入する方法を採用し、PC ケーブルの定着は、主桁の両側に鋼製ブラケットを取付け、エポキシ樹脂コンクリートを介して PC 鋼棒によって横締めし、主桁に取付ける方法とした。エポキシ樹脂をこのように使用した実績は今までになく、定着強度の信頼性、材料の施工性に関する資料が十分でないため、施工に先立ち、本橋の補強工事に即した模型実験を実施して、施工性、耐荷力の検討を行い、その結果を参考にして設計施工を行った。

2. ひびわれの原因調査

ひびわれの発生が認められたのは、右岸側の径間 ($P_0 \sim P_1$) における箱桁と T 桁を連結した部分(以下連結部)のみであり、上流側の桁 (G_1 桁) ほど多く発生してお

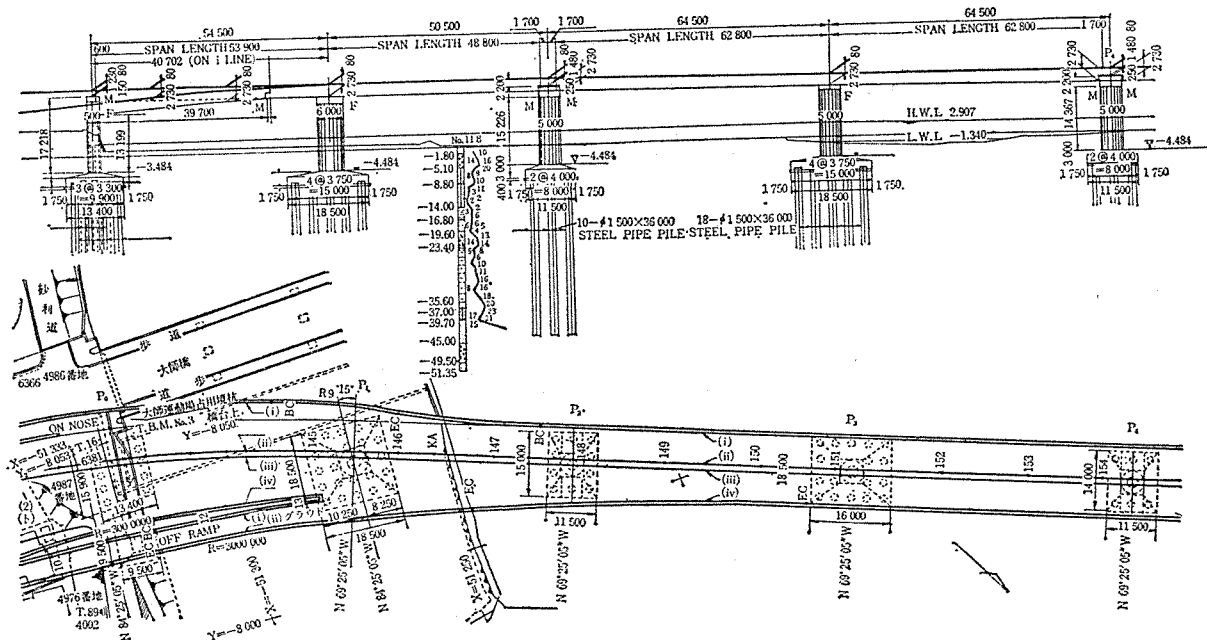


図-1 一般図

* 首都高速道路公団湾岸線建設局設計工事第 2 課課長補佐
** 住友建設(株)土木部橋梁設計課主任

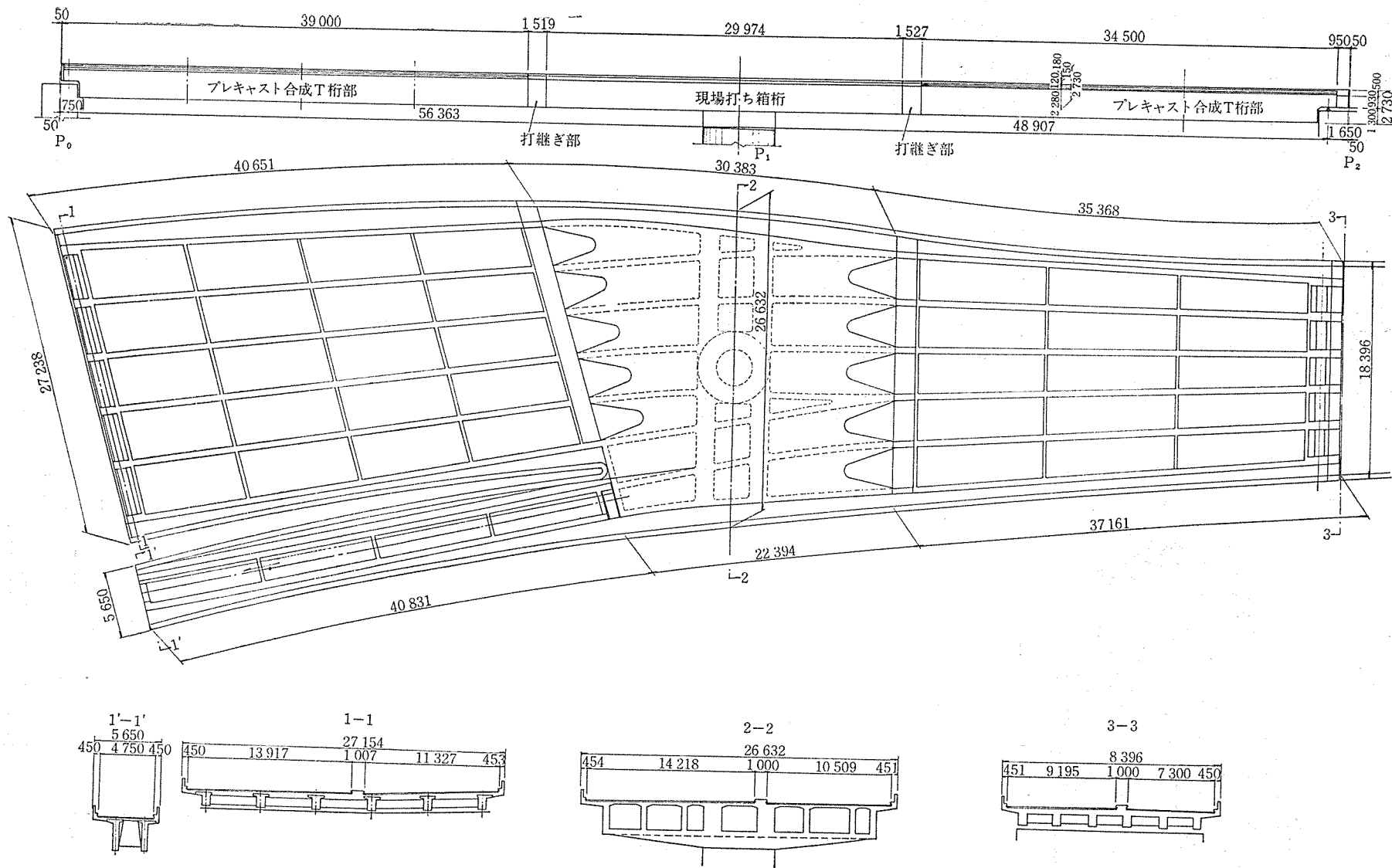


図-2 構造寸法図

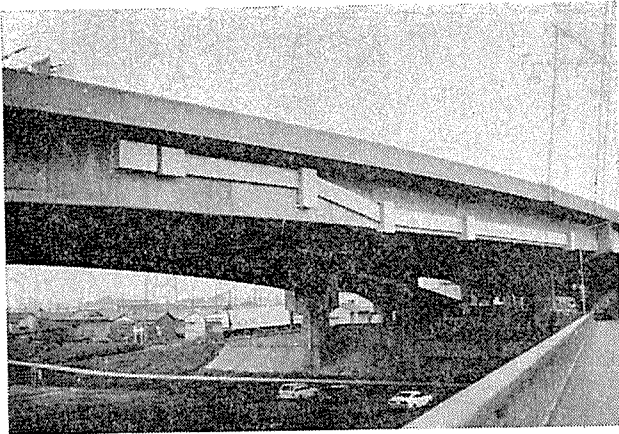


写真-1 完成全景

り、 G_3 桁までの連結部にひびわれが認められた。プレストレストコンクリート構造物におけるひびわれの発生は、いくつかの要因が作用しており、特定の原因を導くことが困難な場合が多い。本橋においても橋脚の沈下等いくつか考えられるが、この中で主要な原因の一つとして、平面形状が複雑であることに起因する実応力と設計応力との差によるものが考えられる。図-2 に示すような平面形状において、 $G_1 \sim G_5$ 桁の桁長の変化による影響、桁が曲線となっている影響、中央橋脚が円形の一本橋脚となっている影響等を十分に考慮して解析を行うことができなかったためである。これは、本橋の設計当時は電子計算機による構造解析が実用化されていず、複雑な構造形式の解析ができなかったことも、一つの要因であるといえる。今回、本橋について電子計算機を用いて詳細に解析を行った結果、箱桁と I 桁の連結部において、ひびわれの原因となり得る過大な曲げ応力度の発生し得ることが示された。また、ひびわれの状態調査の結果も図-3 に示すように、桁下縁付近の鉛直方向のひびわれと桁腹部の約 45° 方向に傾斜したひびわれが認めら

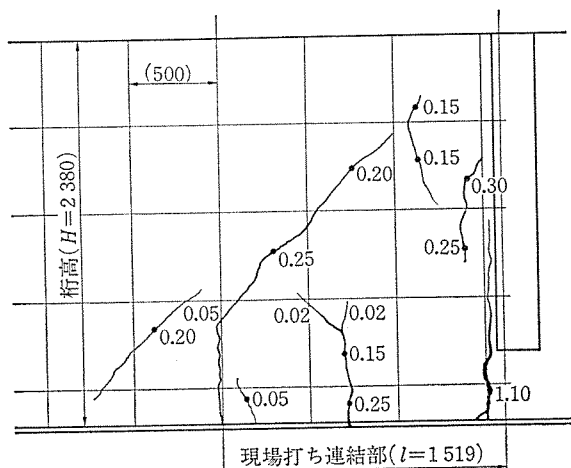


図-3 ひびわれ状態調査 (G_2 桁連結部)

れており、大きな曲げモーメントとせん断力による曲げせん断ひびわれの傾向を示している。

3. 補強方法の比較検討

ひびわれの生じた連結部の補強方法は大きく分けて次の二つの方向が考えられた。

- 1) 連結部の桁にプレストレスを追加導入することによって、桁下縁に圧縮応力を導入し、作用荷重による曲げモーメントに対しても、大きな引張応力が発生しないようにする方法
 - 2) ひびわれの発生した桁に鋼板もしくは鋼桁を取付けることによって、ひびわれ変形の進行を防ぐ方法
- 前者の方法は直接ひびわれの原因を取除くこととなるが、プレストレスの追加導入のために二次応力が発生する。また、ケーブル定着部には過大な応力が生じることのないように十分考慮する必要がある。

後者の方法では、補強によって付加される重量を小さくするならば、二次的な応力は問題とならないが鋼板または鋼桁をコンクリート桁に定着する際に、多量のアンカーボルトを必要とする。このための穿孔によって、コンクリート桁に有害な損傷を与えることが考えられる。また、補強後の応力状態について不明確な点が多いといえる。

以上、二つの方法について、いくつかの具体的な検討を行った結果、プレストレスを追加導入する方法を採用することとし、さらに表-1 に示すような案について詳細な検討を行った。

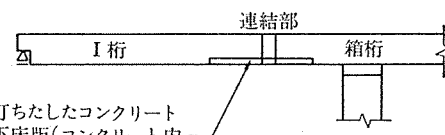
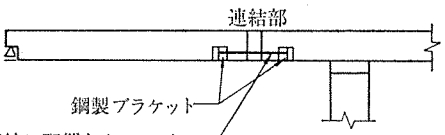
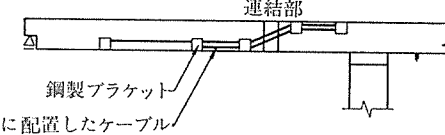
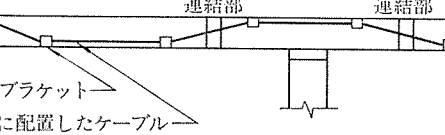
プレストレスを追加導入する方法として4案の検討を行った結果、第3案によって補強を行うこととし、付加重量を少なくするため、ケーブルの定着は鋼製ブラケットを用いた。ケーブルの配置はプレストレスを追加導入することによって、発生する二次応力をできる限り少なくするよう検討した。

4. 補強工事の設計と実験

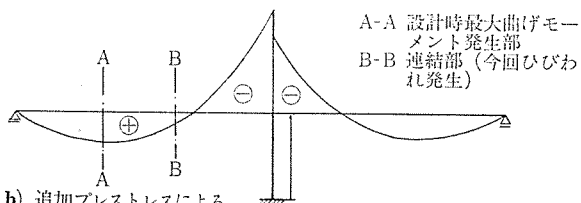
4.1 ケーブルの配置

本橋を再検討した結果では、 $G_1 \sim G_5$ 桁の連結部に大きな引張応力が発生しており、主桁にプレストレスを追加導入することによって、これを補強する場合は、主桁下側にケーブルを配置し、主桁下縁に圧縮応力を導入することが望ましい。しかし、構造系が不静定であるために変形が拘束され、プレストレス導入によって二次応力が発生し、二次的な曲げモーメントが図-4 のように生じる。そして、この追加プレストレスによって主桁に導入した応力は、二次モーメントによって相殺されて補強の効果が少なくなる。また、設計荷重による正の曲げモー

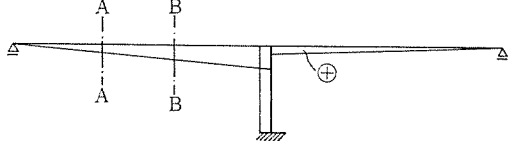
表一 補強方法の比較

補強方法の概要と問題点	
<p>第1案</p>  <p>打ちたしたコンクリート 下床版(コンクリート内 追加 PC 鋼材配置)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○箱桁部から連結部をこえて I 桁部までコンクリートを打ちたして箱桁とする。 ○PC 鋼材は打ちたしたコンクリート内に配置し、コンクリート硬化後、張力を導入して桁下縁に圧縮応力を与える。 ○付加重量が大きく、他の断面で応力度が過大となる。 ○桁コンクリートと打ちたしたコンクリートとの一体化に問題がある。
<p>第2案</p>  <p>鋼製ブラケット 桁外に配置したケーブル</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○連結部の両側に鋼製ブラケットを取付け、桁外に配置した PC 鋼材に緊張力を導入し、桁下縁に圧縮応力を与える。 ○付加重量は最も小さい。 ○連結部の両側はケーブルが多く定着されており、大きな反力をとらせるブラケットの取付けが困難である。 ○補強用 PC 鋼材の緊張によって二次モーメントが発生し、I 桁部に過大な応力が生じる。
<p>第3案</p>  <p>鋼製ブラケット 桁外に配置したケーブル</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○PC 鋼材を桁外に配置し、中央支点付近および I 桁部で分散して定着ブラケットを取付ける。 ○PC 鋼材に緊張力を導入し、連結部桁下縁に圧縮応力を与えると同時に、I 桁部断面にもプレストレスを追加して補強する。 ○付加重量が比較的少ない。 ○補強用ケーブル量、ブラケット数が増える。
<p>第4案</p>  <p>鋼製ブラケット 桁外に配置したケーブル</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○T ラーメンの両側径間を通じてプレストレスを追加導入する。 ○PC 鋼材は鋼製ブラケットによって定着し、中央支点横桁を貫通して主桁外に配置する。 ○二次モーメントの発生が少なく、構造系全体を補強することができる。 ○中央支点横桁にケーブル配置のため、穿孔することが困難である。

a) 設計荷重モーメント図



b) 追加プレストレスによる二次モーメント図



図一 設計荷重および追加プレストレスによるモーメント図

メントが最大となっている、I 桁部中央付近に正の曲げモーメントを追加することになる。このため、ケーブルの偏心量を少なくすると、補強に必要なプレストレス量が多くなり桁圧縮縁(上縁)で許容応力度以上の圧縮応力が発生することとなる。以上のことを検討した結果ケーブル配置は、二次モーメントを極力少なく、かつ連結部の補強効果が大きくなるように図一5 に示すように決定した。

ケーブルは G₁ 桁から G₂ 桁までの両側に各5本ずつ

配置し、各々のケーブルの導入緊張力は 30t/本とした。形状は二次モーメントの発生を抑えるため連結部から箱桁部にかけて曲げ上げ、中央橋脚まで桁上側に配置する。I 桁側ではケーブルは2か所に分散して定着するものとし、5本のうち3本は連結部に近い横桁付近で定着し、残り2本は追加プレストレスによって発生する二次モーメントに対してI 桁中央部を補強するために端支点寄りの横桁付近にブラケットを取付けて定着するものとした。補強プレストレス導入前後のI 桁中央部および連

表一2 補修前後の応力度比較 (kg/m²)

		プレキャスト桁中央 (A~A)		連結部 (B~B)	
		上縁	下縁	上縁	下縁
設計死荷重時		112.2	38.7	50.5	-20.4
設計活荷重時	max	133.2	-27.7	61.6	-44.1
	min	110.1	47.3	45.2	-9.1
補修による	付加荷重	1.5	-4.7	0.8	-1.6
	プレストレス	2.0	24.4	-3.5	48.2
	プレストレスによる二次応力	2.1	-6.7	6.8	-14.5
	応力合計	5.6	13.0	4.1	32.1
補修後死荷重		117.8	51.7	54.6	11.7
" 活荷重	max	138.8	-14.7	65.7	-12.0
	min	115.7	60.3	49.3	23.0

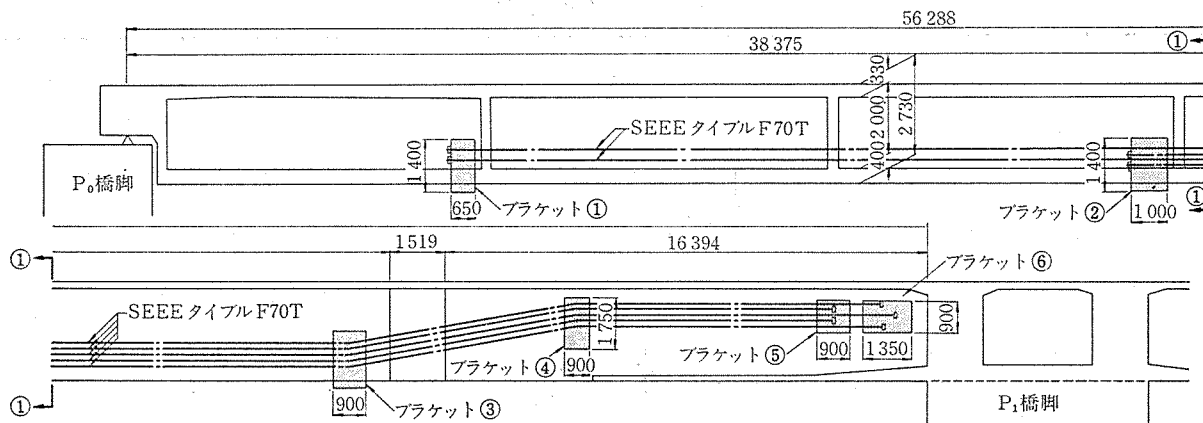


図-5 ケーブル配置図

結部の応力度の比較を表-2 に示す。

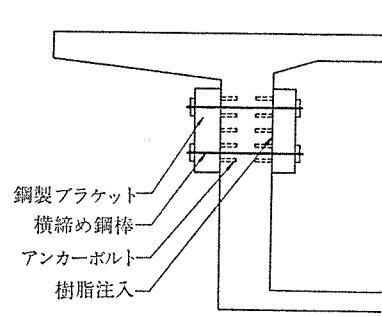
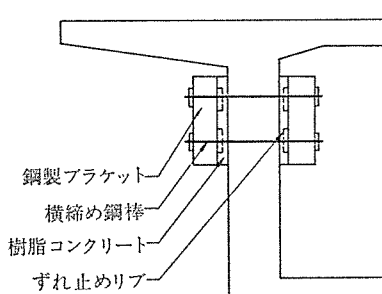
ケーブルはアウトサイドケーブルとなるため防食に対する配慮が必要となり、特に定着部は経年後においても腐食等による悪影響がないことが要求される。このことからケーブルは SEEE タイプ F70T (テトン樹脂被覆鋼より線) を用い、ナットは二重にかけ、さらに防食テープで被覆した。ケーブルの導入緊張力 30t/本に対し、1 ランク上のケーブルを使用したのは、後々の再緊張の生じた場合に備えたものである。

4.2 ケーブル取付け用ブラケットの設計

ケーブルを定着するためのブラケットは鋼材によって製作し、コンクリート桁に取付けるものとするがコンク

リート桁の損傷を極力さけ、桁に生じる応力集中を少なくし、かつ、確実にケーブルの張力をコンクリート桁に伝えることが必要とされた。この方法として表-3 に示す2案が検討され、その結果第2案を採用することとした。この案についても樹脂コンクリートのかわりに無収縮モルタル等の使用も考えられたがエポキシ樹脂はコンクリートに比べ付着強度および引張強度ははるかに大きいこと、また、無収縮コンクリートを用いた場合にはコンクリート部の厚さが薄く、位置的にも打設作業が制限され、完全なコンクリートを打設することが困難であると考えられた。樹脂コンクリートの場合も、骨材を混合して練り混ぜたエポキシ樹脂を鋼製ブラケットの上側か

表-3 ケーブル定着用ブラケット取付け方法の比較

	ブラケット取付け方法の概要	利点と問題点
第1案	 <ul style="list-style-type: none"> ○鋼製ブラケットを、桁コンクリートに埋込んだアンカーボルト・横締め鋼棒で取付け、間にエポキシ樹脂を注入する。 ○アンカーボルトは樹脂注入によって固定する。 ○ケーブルの引張力はアンカーボルトのせん断抵抗力で桁コンクリートに伝える。 	<ul style="list-style-type: none"> ○この方法に類似した方法で、桁・床版の補強を行った実績がある。 ○桁が曲線状になっているため、ブラケットを桁側面に密着するように製作することが困難である。 ○アンカーボルトを埋込むために多くの穿孔が必要となり、桁に損傷を与える可能性が強い。 ○アンカーボルト付近のコンクリートに応力の集中が生じる。
第2案	 <ul style="list-style-type: none"> ○鋼製ブラケットを樹脂コンクリートを介して桁コンクリートに取付ける。 ○ブラケットにはずれ止めリブを取付け、樹脂コンクリートと一体とする。 ○樹脂コンクリートと桁コンクリートは、PC 鋼棒によって導入した横締め応力と接着力によって一体とする。 	<ul style="list-style-type: none"> ○穿孔の量が少なく、桁コンクリートに与える損傷が少ない。 ○応力の集中が少ない。 ○このような方法の施工実績がなく、樹脂コンクリートの特性に不明な点が多い。 ○取付け面に作用する偶力が大きくなる。

ら打設することは困難であると判断し、骨材を先に投入し、エポキシ樹脂をポンプで注入するプレパクドコンクリート法とすることとした。

ブラケットは図-6 に示すようにケーブル引張力と横締め力との作用を受け、取付け面にはせん断と偶力とを受ける。これらの力に対しては、樹脂コンクリートの接着力および横締め緊張力の作用によって、ケーブルの引張力コンクリート桁に伝達するのであるが、ブラケットの取付け面と平行方向の力に対する終局耐力（以下ブラケットのせん断耐力）に関する資料がないため、実物に近い模型を作成し、その耐荷力試験および施工性の試験を行った。

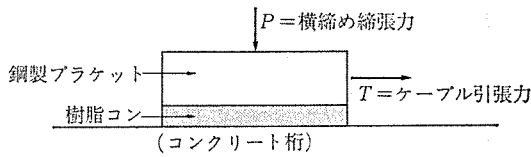


図-6 鋼製ブラケットに作用する力

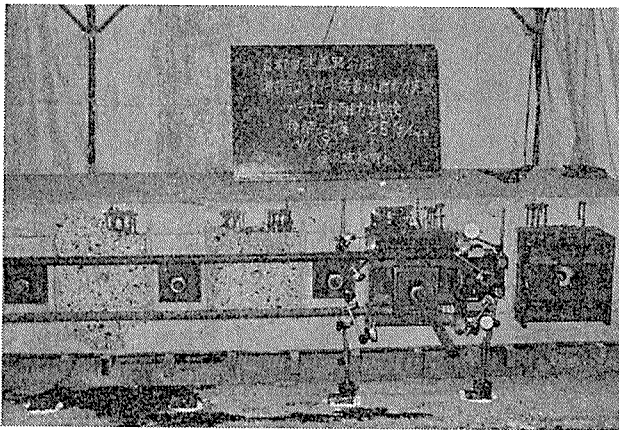


写真-2 ブラケット耐力試験

耐荷力試験の結果は図-7 に示すとおりであり、横締め力が0で樹脂コンクリートのみのせん断は約 11 kg/cm² であるが、横締め応力度を増していくと、ほぼ一次的にブラケットのせん断終局耐力が増えていく結果となり、次の関係式が得られた。

$$T/A = 9.5 + P/A \tan 27.5^\circ \dots \dots \dots (1)$$

T : ケーブルの引張力 (kg)

A : ブラケット取付け面の面積 (cm²)

P : 横締め緊張力 (kg)

したがって、ブラケットの取付け面積を大きくとることが耐力の増加に対して有効と考えられるが、作業空間および施工性等を考慮して、その寸法形状は表-4、図-8 のとおりとなった。また、この時の各々の定着ブラケットにおけるケーブル緊張力 (t)、横締め力 (P) およびブラケットのせん断応力度 (τ) の関係も表-4 に示す

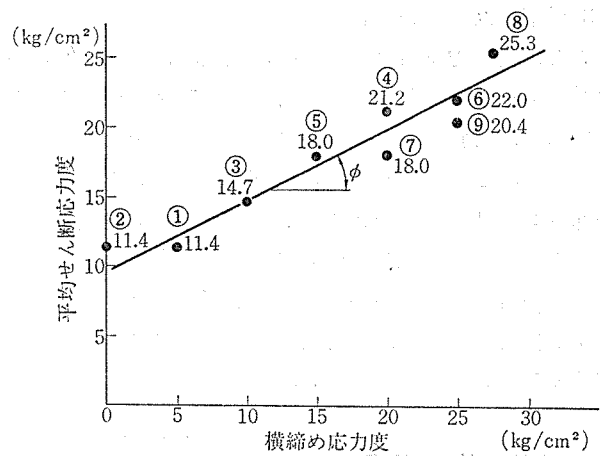


図-7 横締め応力度-平均せん断応力度の関係

表-4 ブラケットにおける作用力関係

ブラケット番号	①	②	⑤	⑥
アウトケーブル定着本数 n	2 本	3	2	3
アウトケーブル張力 T = n × 30t	60 t	90	60	90
ブラケット面積 A	(0.65 × 1.25) 0.813 m ²	(1.0 × 1.25) 1.250	(0.9 × 0.9) 0.810	(1.35 × 0.9) 1.215
ブラケット取付け面に作用する平均せん断応力 τ = T/A	7.4 kg/cm ²	7.2	7.4	7.4
横締め鋼棒本数 n'	6 本	9	6	9
横締め鋼棒張力 P = n' × 45	270 t	405	270	405
ブラケット取付け面に作用する平均圧縮応力 σ = P/A	33.2 kg/cm ²	32.4	33.3	33.3
横締め鋼棒断面積 A _T = n' × 7.893cm ²	47.4 cm ²	71.0	47.4	71.0
鋼棒にケーブル張力が作用した時のせん断耐力 τ' = T/A _P	1266 kg/cm ²	1268	1266	1218

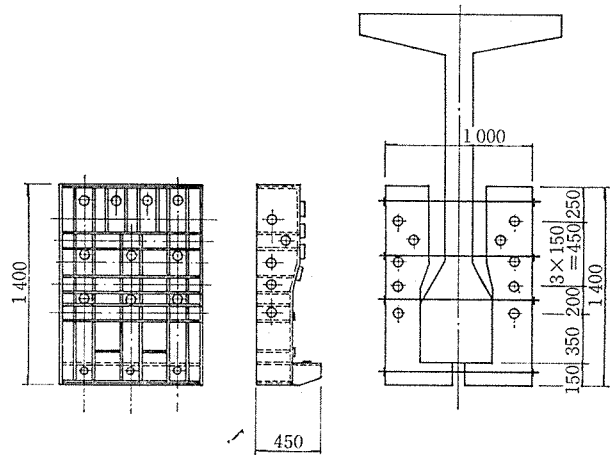


図-8 鋼製ブラケット詳細図

とおりであり、τ = 7.2 ~ 7.4 kg/cm² の値は (1) 式から得られるブラケットのせん断終局応力度 25 kg/cm² の

1/3 以下となっている。

また、耐荷力試験を行った時の破壊状況は図-9 に示すが、すべてブラケットを取付けたコンクリート内で生じており、樹脂コンクリートは、なんら損傷を受けていなかった。しかし、破壊面の一部は樹脂コンクリートと普通コンクリートとの接着面から 2~5 mm 程度、普通コンクリート側で生じ、樹脂コンクリートにセメントモルタルが付着しているが粗骨材が樹脂コンクリートモルタルが付着しているが粗骨材が樹脂コンクリートに付着するまでにいたってはいない。

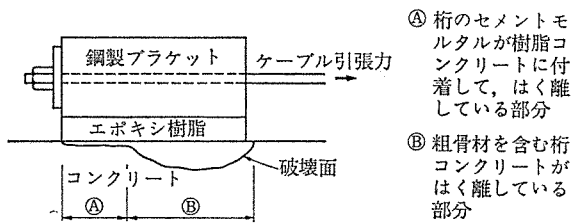


図-9 破壊性状の一般的傾向

ブラケット横締め緊張力が樹脂コンクリートのクリープにより減少し、ブラケットのせん断耐力がダウンすることが予想されたので、その確認試験を行った。横締め鋼棒の緊張力は1日経過後、約 3~5% 減少しその後 30 日で約 4~6% の減少となった。この減少量は一般的なコンクリートにおけるクリープに比べ早期に生じていることから、樹脂コンクリートによるものが支配的であると考えられる。実橋の場合においても、樹脂コンクリートのクリープおよび鋼材のレラクセーションによる緊張力の減少が考えられるが、主桁および樹脂コンクリートの厚さおよび鋼棒の長さが試験体とほぼ同じ大きさであることから、減少量は同程度と判断し、これらによる張力減少を防ぐ目的から、横締め鋼棒は一次緊張を行い、数日経過後二次緊張を行うこととした。

また、施工性の試験は片面を透明アクリル板とした型枠をつくり、骨材の粒径を変えた場合について、施工性の試験を行ったものである。樹脂の注入は型枠内に骨材



写真-3 ブラケット破壊状況

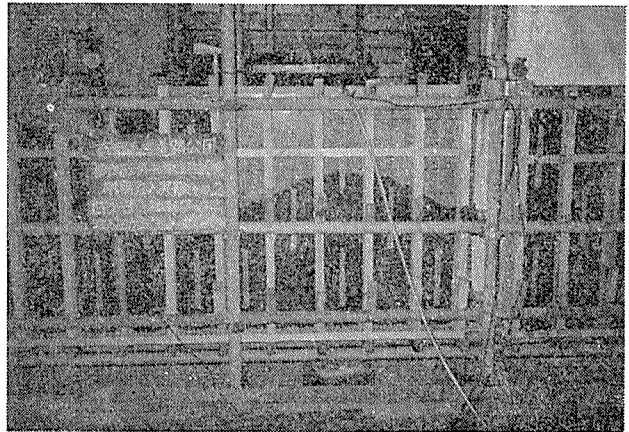
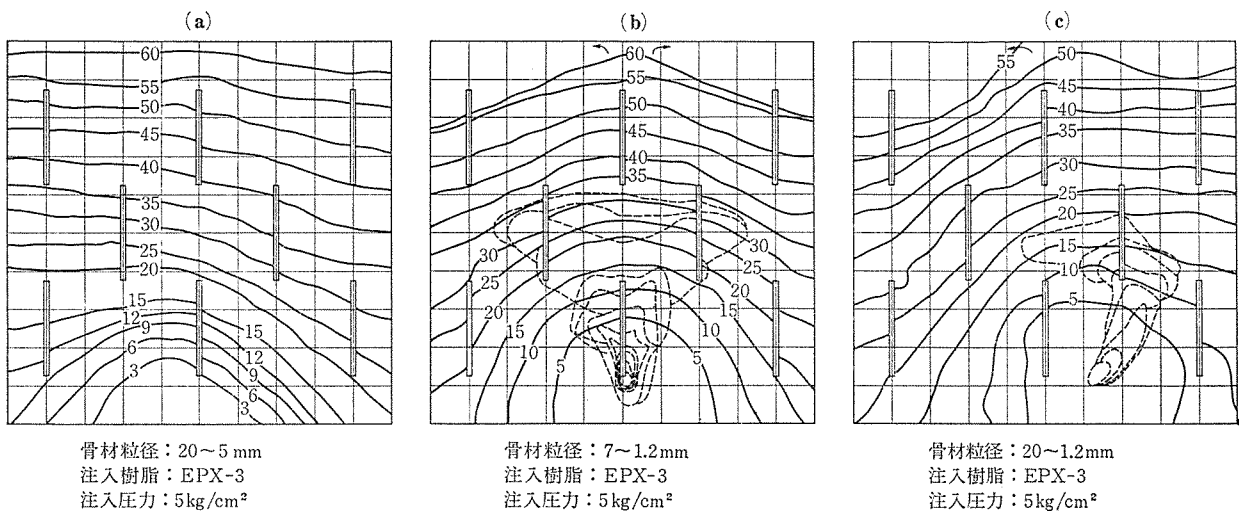


写真-4 樹脂注入試験



注：図内数字は注入開始後の時間（分）
図内点線部は骨材が押し分けられ、樹脂のみとなった部分

図-10 樹脂の注入状態

を投入後、底部まで埋込んだ注入パイプを通じ、ポンプを用いて行った。この注入状態を図-10に示す。

このように、骨材の粒径の範囲を三つに分けて行ったのであるが、粒径 5 mm 以下の骨材を用いた場合（粒径 7~1.2mm, 20~1.2 mm）は、浸透面が傾斜した状態が続き、また注入孔付近で樹脂だけの部分かなりの範囲に生じた。一方、粒径 5 mm 以上の骨材を用いた場合（粒径 20~5 mm），このような状態は生じなかった。

以上により本工事は 20~5 mm の骨材を使用し、注入圧 5kg/cm² 程度で注入を行うこととした。

5. 補強工事の施工

施工は前記の施工性の試験等を基に図-11に示す手順によって進められた。このうち特に注目される部分を列記すると次のようである。

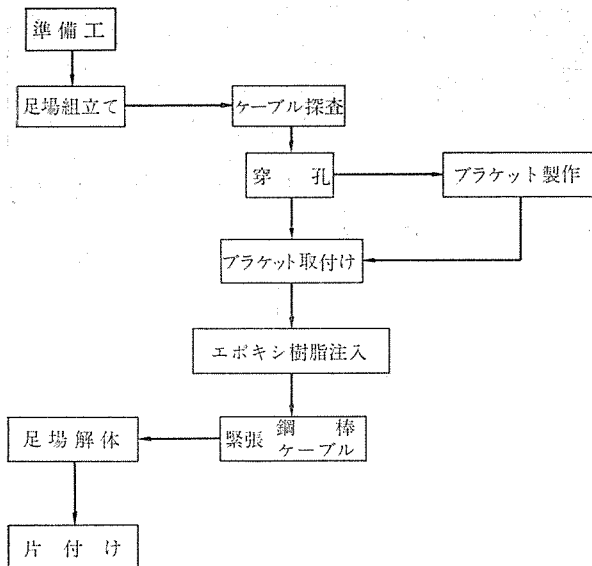


図-11 施工手順

(1) ケーブル探査と穿孔

ケーブル定着用ブラケットは PC 鋼棒によって取付けられるものであり、主桁に PC 鋼棒取付け用の穿孔を行わなければならない。

穿孔はダイヤモンドドリル φ50 mm によって行うものとしたが、穿孔位置付近の主桁内には多数の PC ケーブルが配置されている。もし穿孔位置が PC ケーブル位置と重なった場合、ダイヤモンドドリルで穿孔中にケーブルを切断する可能性が生じる。このため本橋の竣工図面より PC ケーブル位置を推定し、さらに穿孔位置にケーブルが通過していないことを確認するための探査を行った。

探査の方法は、主桁の X 線撮影による方法を試みたが、穿孔位置の主桁厚は 0.2~0.5 m であり、主桁厚 0.2 m

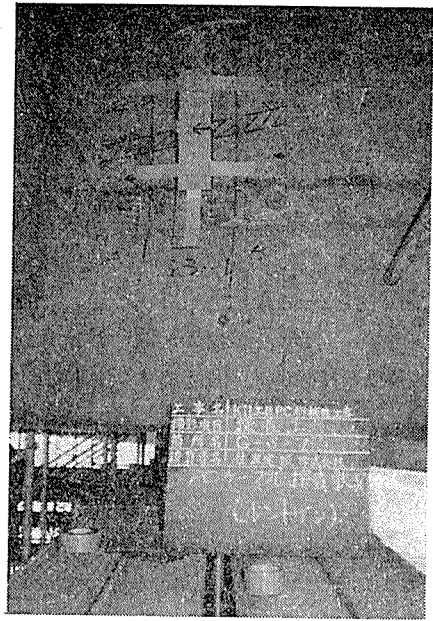


写真-5 主桁レントゲン探査

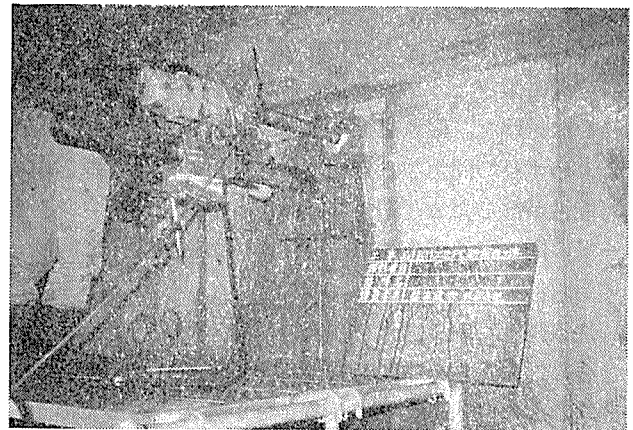


写真-6 主桁穿孔

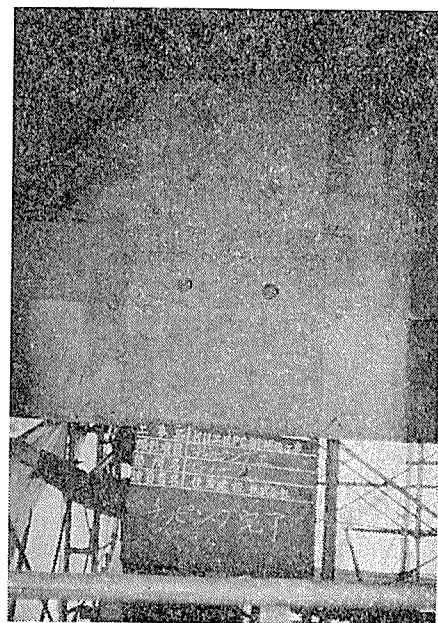


写真-7 穿孔完了

報 告

の位置では正確にケーブル位置を示すことができたが、主桁厚 0.5m の所ではケーブル位置を探ることができなかった。このため、ダイヤモンドドリルによる穿孔に先立ち、鋼材を傷つけるほどの力のないハンマードリルによって、予備穿孔を行い、穿孔位置にケーブルが配置されていないことを確認した後、本穿孔を行った。この方法により穿孔は、主桁内ケーブルを傷つけることなく行うことができた。

(2) ブラケットの製作および取付け

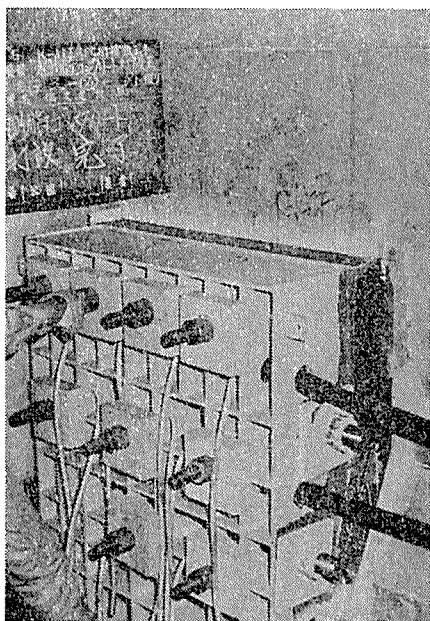
ブラケットの形状寸法、横締め本数、位置は基本的には決定していたが、横締め位置は、主桁内のケーブルをさけて配置しなければならないため、穿孔後実測し、これに合わせて最終決定を行った。

ブラケットの取付けは、1個当り 0.5~0.6t とかなり重量があり、また取付けも正確に行わなければならないので、主桁上方にアンカーを取付け、これより吊下げて仮固定を行った。

(3) プレパクト樹脂コンクリートの施工

エポキシ樹脂の注入に先立ち、鋼製ブラケットを所定の位置に固定し、ブラケットとコンクリート桁の間に型枠を取付けた。注入直後のエポキシ樹脂は流動性が高く、わずかの間隙からも流出して骨材の間に空隙を作る可能性があるため、型枠とブラケットおよび桁コンクリートの間はパテ状のエポキシ樹脂によって完全に密閉してから注入を行った。

注入圧は実験の結果をもとに 5kg/cm^2 として行うこととし、また注入中に電動ポンプが故障して中断した場合、あとの注入が困難になることが考えられるため予備

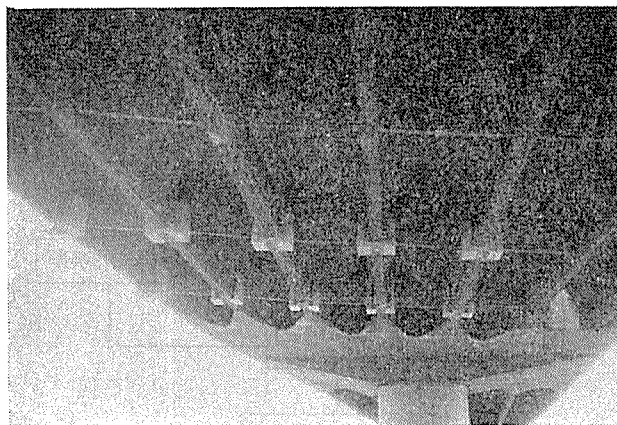


写真一8 樹脂注入完了

ポンプを準備した。未硬化のエポキシ樹脂は温度によって粘性が大きく異なり、実験によって 5°C 程度以下になると注入は非常に困難となり、また強度の発現が遅れるため、注入時期は極寒期をさけ日中の気温が上昇する時間帯に行った。また夜間においても気温は 5°C 以下になることがないように保温養生を行った。

(4) 緊 張

横締め鋼棒は、前記のように、一次緊張を行い、数日後二次緊張を行い、緊張力の再確認、初期の樹脂コンクリートのクリープ、および鋼材のレラクセーションによる張力の減少を防いだ。またケーブルの緊張は、緊張作業中主桁に悪影響を与えないよう、緊張手順を決定し、主桁に補強プレストレスを導入した。



写真一9 補強完了

6. あとがき

プレストレスコンクリート構造物における補強工事は、一般に、非常に複雑な要素を含んでいるケースが多く、本橋の場合は、さらに、供用中の道路橋であり、その交通を止めることなく施工を行うという、大きな条件があり、より一層ときびしいものとなった。本橋に採用された補強方法は、本橋の状況および制約を考慮したうえで、考えられる最良の方法を検討し実施したものである。したがって、他のケースについて直接的に参考にはならないかもしれないが、しかし、本橋の補強を行うために、採用した新しい方法および材料に関する考えなどが何らかの参考になれば幸いである。種々の試験結果および施工に関する詳細の報告は、首都高速道路公団「技報」12号を参照されたい。最後に、本橋の補強工事についての設計および施工に関し、多くの技術者の協力があったことを記し、その方々に感謝の意を表します。

【昭和 55 年 1 月 18 日受付】