

港湾技研資料

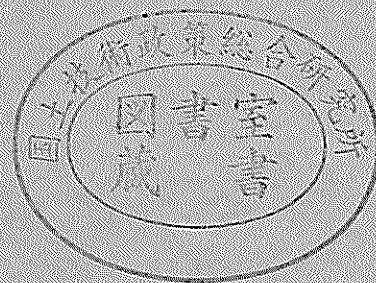
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 640 Mar. 1989

ループ状のアラミド繊維ロープを緊張材
としたPC梁の曲げ試験

山 本 邦 夫
大 即 信 明
浜 田 秀 則

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. はじめに	3
2. アラミド繊維ロープを緊張材としたPC梁の特徴	4
2. 1 アラミド繊維ロープの概要	4
2. 2 定着方法および施工方法の特徴	4
3. 実験の概要	5
3. 1 供試体の概要	5
3. 2 定着体の概要	9
3. 3 載荷方法および測定項目	10
4. 実験結果および考察	11
4. 1 曲げ性状に関する検討	11
4. 2 有効プレストレスの安定性に関する検討	16
5. 結論	19
6. おわりに	19
参考文献	19

Bending Characteristics of Prestressed Concrete Beams Stressed with Loops of Aramid Fiber Ropes

Kunio YAMAMOTO*

Nobuaki OTSUKI**

Hidenori HAMADA*

Synopsis

In this study, some bending characteristics were examined for prestressed concrete beams stressed with loops of Aramid fiber ropes connected by nonmetallic device. The objectives of this study are as follows :

- ① To develop a new nonmetallic devices for connecting the aramid fiber ropes using epoxy mortar.
- ② To evaluate the bending behavior of the prestressed concrete beams prestressed with Aramid fiber ropes.
- ③ To assure the stability of effective prestress of these beams.

The summary of the results is shown below :

- ① The connecting device developed in this study has good performance as the conventional metallic devices.
- ② The bending behaviors, such as ultimate load, ultimate deflection, and curvature, are similar to those of beams prestressed with steel bars.
- ③ The effective prestress of the beams is stable at least within 1 year.

Key words : Aramid Fiber, Prestressed Concrete, Bending Characteristic

* Member of Materials Laboratory, Structures Division

** Former Chief of Materials Laboratory, Structures Division
(Present Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology)

ループ状のアラミド繊維ロープを緊張材 とした PC 梁の曲げ試験

山本 邦夫 *
大 即 信 明 **
浜 田 秀 則 *

要 旨

著者らは、プレストレストコンクリート (PC) の緊張材の腐食対策として、従来の PC 鋼材の代替に新素材を用いた、まったく金属を用いない PC 部材を開発することを考え、その実用化を目的として種々の検討を行っている。本研究は、開発の基礎研究として、緊張材にループ (輪) 状アラミド繊維ロープを用い、さらに定着体としてエポキシ樹脂を主材料とした非金属定着体を用いた PC 梁の静的曲げ荷重試験を実施したものである。

研究の目的は、以下の3つとした。

- ① エポキシ樹脂を主材料とした非金属定着体の開発
- ② アラミド繊維ロープを緊張材とした PC 梁の曲げ性状の把握
- ③ アラミド繊維ロープを緊張材とした PC 梁の材令1年迄の有効プレストレスの安定性の把握

曲げ試験等による検討の結果、開発した非金属の定着体は従来の鉄製のものと同様の性能を有していること、アラミド繊維ロープを緊張材とした PC 梁の曲げ性状は従来の PC 鋼材を用いた場合と同様であること、および有効プレストレスは材令1年の範囲で安定していることが確認された。

キーワード：アラミド繊維、プレストレストコンクリート、曲げ特性

1. はじめに

プレストレストコンクリート (PC) は、鉄筋コンクリートに比較して多くの有利な点を有していることから、近年、種々の海洋構造物に適用されるようになってきた。しかしながら、その建設割合は必ずしも多くない。その理由の1つとして考えられるのが緊張材である PC 鋼材の腐食に対する懸念である。すなわち、PC 鋼材には常時、引張力が作用しており応力腐食が考えられること、また腐食により PC 鋼材が破断した場合、それが直接、構造物の崩壊につながる可能性が高いこと等である。このような PC 鋼材の腐食に対する策として、著者らは、従来の PC 鋼材、定着体の代替に新素材等の全く腐食しない材料を使用する方法を考え、その開発を目的とした種々の検討を行っている。この方法で製作した、金属を用いない PC 部材が開発されれば、海洋構造物への PC の適用

範囲がより一層広がり、耐久性の高い海洋構造物を建設することができるものと考えられる。

PC 用緊張材として適用可能と考えられる新素材には、ガラス繊維強化プラスチックロッド (GFRP)、炭素繊維強化プラスチックロッド (CFRP)、アラミド繊維強化プラスチックロッド (GFRP) 等のロッド状のものと、アラミド繊維ロープのようなロープ状のものがある。本研究では、従来の PC 鋼材の代替品としての利用のほか、曲げに対して自由であり、図-1に示すように陸上で製作した小型のエレメントを海上接合して大型浮体構造物とする際の連結材としての利用も考えられるロープ状のアラミド繊維ロープを研究の対象とした。

本研究は、このアラミド繊維ロープを緊張材として用いた、まったく金属を用いない PC 部材を開発するための基礎研究である。研究の目的は次の3点とした。

- (1) エポキシ樹脂を主材料とした非金属定着体の開

* 構造部 材料研究室

** 前構造部 材料研究室長 (現東京工業大学 工学部)

発

- (2) アラミド繊維ロープを緊張材とした PC 梁の曲げ性状の把握
- (3) アラミド繊維ロープを緊張材とした PC 梁の材令 1 年迄の有効プレストレスの安定性の把握

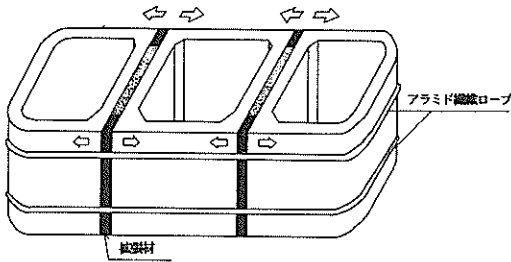


図-1 大型部材の連結方法の一例

2. アラミド繊維ロープを緊張材とした PC 梁の特徴

1. で述べた 3 つの目的のために、本研究ではアラミド繊維ロープを緊張材とした PC 梁を製作し、その静的曲げ載荷試験を実施した。本章では、緊張材として用いたアラミド繊維ロープの概要、PC 梁の特徴、およびプレストレスの導入方法について述べる。

2. 1 アラミド繊維ロープの概要

アラミド繊維とは、ナイロン等の通常の有機繊維と比べて、優れた引張強度と弾性係数を持つことを特徴とする繊維に対して、米国連邦商業委員会 (FTC) によって命名された属称名である。本研究で使用したアラミド繊維は、ケブラーアラミドと称されるもので、1972年に Dupont 社(米国)によって初めて紹介された繊維である。本研究で緊張材として用いたロープは、Dupont 社のケブラーアラミド(商品名ケブラー29)を直線状の繊維束にして、これをポリエチレンで被覆したロープであり、ICI 社(英国)で開発され、海外では、船舶、パイ等の係留ロープとして使用されているものである。

このロープは、高強度で、耐摩耗性、耐海水性に優れているが、一方、PC 用の緊張材としては、定着が難しい、リラクセーションが大きい、高価である(同引張力の PC 鋼棒の 15~20 倍)等の問題点がある。

2. 2 定着方法および施工方法の特徴

本研究では、金属を用いない PC 部材とするために、緊張材の定着体も非金属で製作することとした。そして、その主材料としてエポキシ樹脂を用いた。従来のポストテンション方式の緊張材の定着は、部材の端部で定着す

る方法がほとんどであるが、この場合、図-2 に示すように定着体には圧縮力が作用する。定着体の主材料としてエポキシ樹脂を用いた場合、定着体にかかった圧縮力および緊張材にかかった引張力によってエポキシ樹脂が割裂破壊を起こし、定着は困難であった。その対策として、著者らは従来の定着方法によらない方法を考案した。すなわち、図-3 に示すように、あらかじめアラミド繊維ロープをループ状に製作しておき、2 つのプレキャストブロックにロープをはさみ込み、ブロック間をジャッキにより押し拡げてロープに緊張力を導入する方法である。この場合、定着体には引張力のみ作用し、前述したようなエポキシ樹脂の割裂破壊は起こらなかった。さらに、図-4 に示すように、外力に対して、定着体のない方のロープが引張側、定着体のある方のロープが圧縮側となるよう供試体を設置すれば、過大な外力が作用した場合でも定着体には過大な引張力が作用しないため、定着体が構造的な弱点とならず、ロープの引張力を 100% 有効に使った設計ができる。現在開発されている新素材の定着体は、金属を素材としたものがほとんどであるが、金属を使用した場合でも緊張材の引張力を 100% 効かす

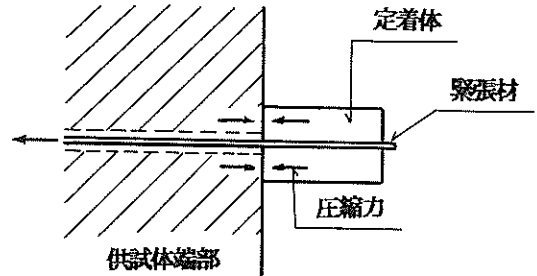


図-2 従来の定着方法

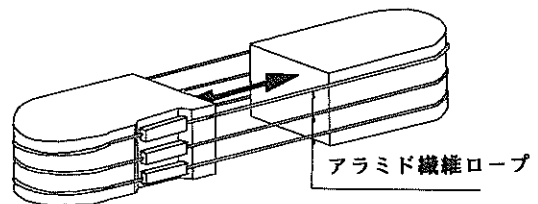


図-3 緊張材の定着

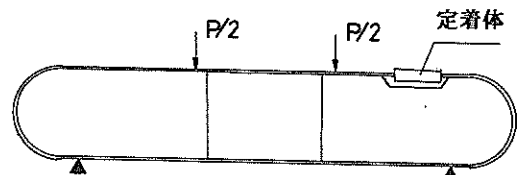


図-4 載荷方法

ことのできる定着体はなく、ほとんどが緊張材の理論強度の80~90%の強度で破断するものである。本研究で考案した定着方法は、緊張材の能力を有効に利用した方法といえる。

以上、本研究ではループ状としたアラミド繊維ロープを用いたことを述べたが、これにより供試体へのプレストレスの導入方法も従来の方法と異なる。以下、プレストレスの導入方法を図-5に従って示す。

イ) ループ状にしたアラミド繊維ロープを端部プレキャストコンクリートブロックの周囲に回す。

- ロ) 油圧ジャッキで端部ブロック間を所定の緊張力まで押し広げる。
 - ハ) ジャッキングの状態、ただちに①の箇所に超速硬コンクリートを打設する。
 - ニ) 超速硬コンクリートが所定の強度に達したら、油圧ジャッキの力を緩め、コンクリートにプレストレスを導入する。
 - ホ) ジャッキを取り去り、取り去った箇所(②)に無収縮コンクリートを打設する。
- 以上の方法で供試体にプレストレスを導入した。

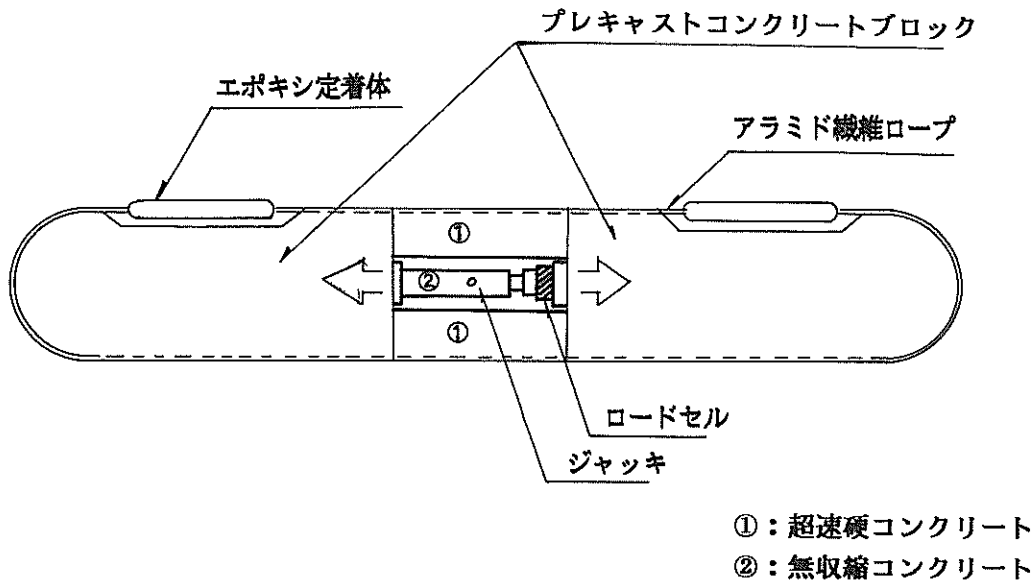


図-5 プレストレスの導入方法

3. 実験の概要

3.1 供試体の概要

供試体の一覧を表-1に示す。供試体は全部で6体製作し、有効プレストレスの安定性を検討するために、材令1ヵ月、6ヵ月、および12ヵ月において各々2体ずつ曲げ試験を実施した。供試体形状および配筋状況は、図-6に示す通りである。供試体は、断面30cm×43cm、長さ2.58mであり、4本のループ状アラミド繊維ロープによりコンクリートにプレストレスを与えた。導入緊張力は、1本のロープにつき12tf(上下ロープで各6tfずつ)で合計48tfとした。これにより、コンクリートには約59kgf/cm²のプレストレス量が導入された。また、コンクリート打継部の補強、せん断ひびわれの拘束等の目的で供試体にはスターラップおよび軸方向鉄筋を配置した。なお、緊張力導入時にロープの引張力により、プレ

キャストブロックの曲線部分のコンクリートがせん断破壊を起こす可能性があったため、曲線部分には半円形鋼板を取り付け、コンクリートを保護した。

使用材料およびその強度特性等について述べる。

表-1 供試体一覧

供試体名	実験材令	導入プレストレス量 (kgf/cm ²)
1-M-1	1ヵ月	59.26
1-M-2		
6-M-1	6ヵ月	
6-M-2		
12-M-1	12ヵ月	
12-M-2		

*超速硬コンクリート断面に対するプレストレス量

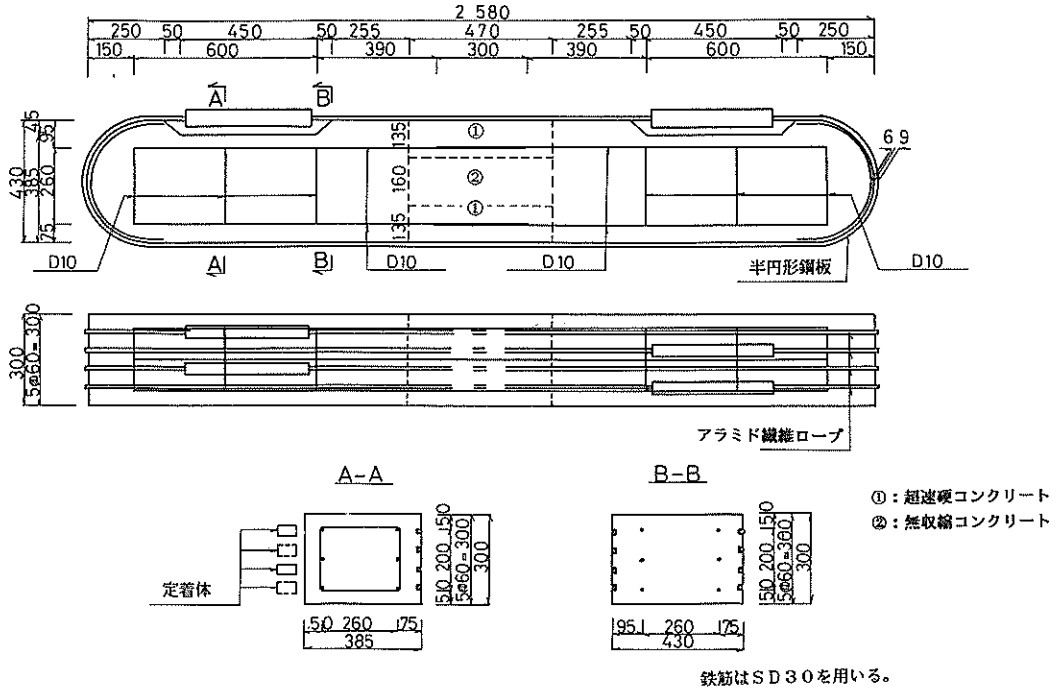


図-6 供試体形状および配筋状況

a) コンクリート用材料

コンクリートとして、早強コンクリート(端部プレキャストブロック)、超速硬コンクリート(図-6中①部)、無収縮コンクリート(図-6中②部)の3種類を用いた。それぞれの使用材料は以下の通りである。

①セメント

早強コンクリートのセメントとして早強ポルトランドセメントを使用した。超速硬コンクリートのセメントとしてジェットセメント(小野田セメント株式会社製)を使用した。また、無収縮コンクリートのセメントとして普通ポルトランドセメントを使用した。これらのセメン

トの試験成績を表-2に示す。

②細骨材

細骨材としては、3種類のコンクリートとも鬼怒川産川砂を用いた。試験成績および粒度曲線を表-3および図-7に示す。

③粗骨材

粗骨材としては、3種類のコンクリートとも鬼怒川産川砂利を用いた。試験成績および粒度曲線を表-4および図-7に示す。

④混和材料

表-2 セメントの試験成績

セメント種	比重	比表面積 (cm^2/g)	凝 結 *			圧 縮 強 度 (kgf/cm^2) *			
			水 量 (%)	始 発 (h-min)	終 結 (h-min)	1 日	3 日	7 日	28 日
早強ポルトランドセメント	3.13	4.25	29.8	2-16	3-18	145	261	359	465
超速硬セメント	3.03	5.78	29.4	0-09	0-15	224	275	376	480
普通ポルトランドセメント	3.16	3.27	27.3	2-31	3-29	—	149	252	418

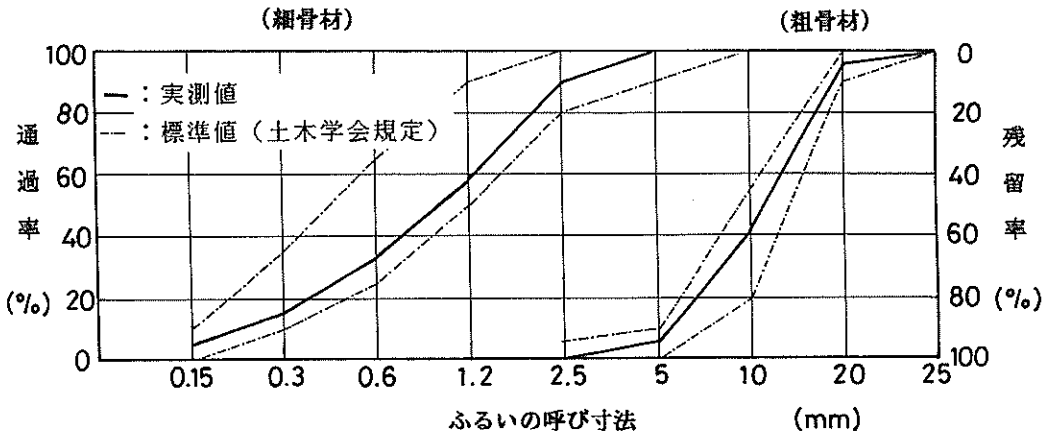
* JIS R 5201によるモルタルの凝結, 圧縮強度

表一 3 細骨材の試験成績

比重	吸水率 (%)	単位容積重量 (kg/m ³)	フルイ通過率 (%)						粗粒率
			5mm	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
2.57	1.62	1,720	100	90	59	33	15	5	2.98

表一 4 粗骨材の試験成績

比重	吸水率 (%)	単位容積重量 (kg/m ³)	フルイ通過率 (%)						粗粒率
			25mm	20	15	10	5	2.5	
2.66	0.81	1,570	100	95	80	41	6	0	6.58



図一 7 骨材の粒度曲線

早強コンクリートにおいては、減水剤としてNL-4000(ボゾリス物産株式会社製)を用い、AE剤としてボゾリスNo.202(同社製)を用いた。超速硬コンクリートにおいては、減水剤としてNL-4000を用い、硬化速度を調整するための硬化遅延剤としてジェットセッター

(小野田セメント株式会社製)を用いた。無収縮コンクリートにおいては、減水剤としてNL-4000を用い、AE剤としてボゾリスNo.202を用い、膨張材としてデンカタスコン(電気化学工業株式会社製)を用いた。デンカタスコンの物理試験結果を表一5に示す。

表一 5 膨張材の物理試験結果

コンシステンシー (秒)	ブリージング率 (%)	膨張収縮率 (%)			圧縮強度 (kgf/cm ²)			比重
		1日	3日	7日	3日	7日	28日	
8.6	0	+0.27	+0.27	+0.27	398	506	641	2.80

試験条件 1:1モルタル天然川砂FM 2.8使用 20℃80%RHで試験

b) コンクリートの配合および特性

3種類のコンクリートの示方配合を表-6に示す。また、コンクリートのスランブ、空気量、および材令28日圧縮強度の試験結果を表-7に示す。

c) コンクリートの養生

早強コンクリート（端部プレキャストブロック）は、打設から3時間後から温度40℃の蒸気養生を12時間行い、その後気中養生を行った。また、超速硬コンクリート、および無収縮コンクリートは、湿潤マットにより12

表-6 コンクリートの示方配合

	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)						
		W	C	G	S	Po	AE	T
早強	41	165	402	890	860	8.04	1.21	—
超速硬	32	130	406	1090	860	6.09	—	87
無収縮	49	170	261	907	876	2.88	0.86	—

Po: 減水剤 AE: AE剤 T: 膨張材

表-7 コンクリートの特性

コンクリート種類	供試体名	スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 σ_{28} (kgf/cm ²) *
早強 コンクリート	1-M-1~2	8.2	3.3	538
	6-M-1~2	6.9	4.2	541
	12-M-1~2	6.9	4.2	541
超速硬 コンクリート	1-M-1	13.2	1.4	639
	1-M-2	13.5	1.2	520
	6-M-1	13.5	1.3	651
	6-M-2	13.2	1.1	626
	12-M-1	13.0	1.2	674
	12-M-2	13.2	0.9	629
無収縮 コンクリート	1-M-1	9.8	4.9	414
	1-M-2	9.5	4.8	436
	6-M-1	9.5	4.9	453
	6-M-2	9.7	4.9	451
	12-M-1	10.0	5.0	304
	12-M-2	9.9	5.0	335

* $\phi 10 \times 20$ cm, 標準養生

時間湿潤養生を行い、その後気中養生を行った。

d) 鉄筋

スターラップ鉄筋および軸方向鉄筋として、SD30 A D10mmを使用した。その力学的性質を表-8に示す。

e) 緊張材

緊張材としてアラミド繊維ロープ ($\phi 13.5$ mm) を使用した。ロープの物性値を表-9に、応力-ひずみ曲線

表-8 鉄筋の強度特性

降伏点 (kgf/mm ²)	36.2
引張強さ (kgf/mm ²)	52.3
伸び (%)	22.4

表-9 アラミド繊維ロープの物性値

物性	アラミド繊維ロープ (ケブラー29)
ロープの直径 (mm)	13.5
繊維束の直径 (mm)	8.3
引張強度 σ_u (kgf/mm ²)	196
弾性係数 E (kgf/mm ²)	7,930
破断時の伸度 (%)	約2.5
その他	ロープの被覆材: ポリウレタン

を図-8に示す。応力とひずみの関係は、破断まで直線的である。なお繊維素材の強度特性は、定着体の定着方式による影響を受けられると思われる。表-9および図-8に示した強度特性値は、図-9に示す鉄製定着体(ICI社製)を使用した場合の値であるが、以下に述べるエポキシ定着体を用いた場合にもほぼ同等の値が得られた。

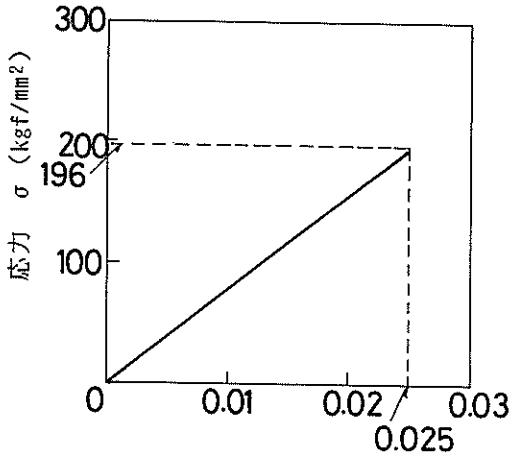


図-8 アラミド繊維ロープの応力-ひずみ曲線

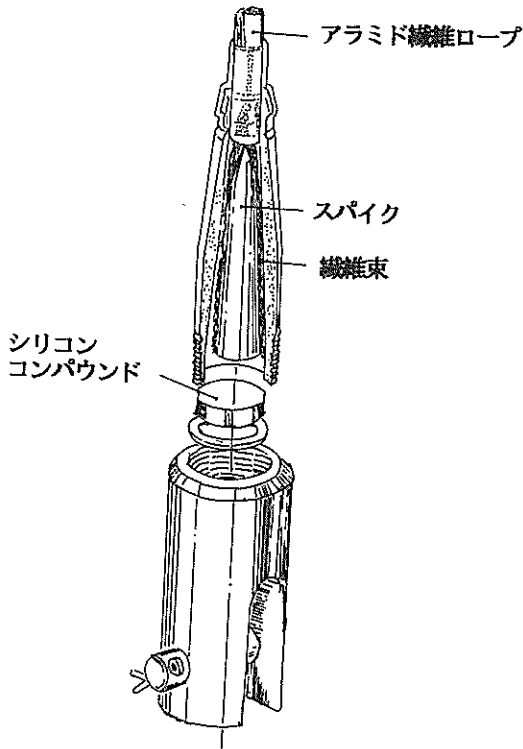


図-9 鉄製定着体

3. 2 定着体の概要

本研究で考案した非金属定着体(エポキシ定着体)の概要を述べる。

形状寸法、および内部構造は図-10、および図-11に示す通りである。定着体の断面は6cm×6cmで、長さ40cmである。定着体の長さ40cmは、ロープの引き抜

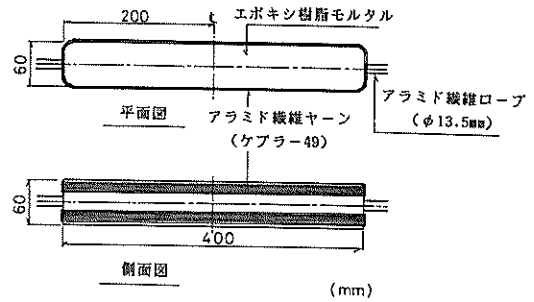


図-10 定着体の形状寸法

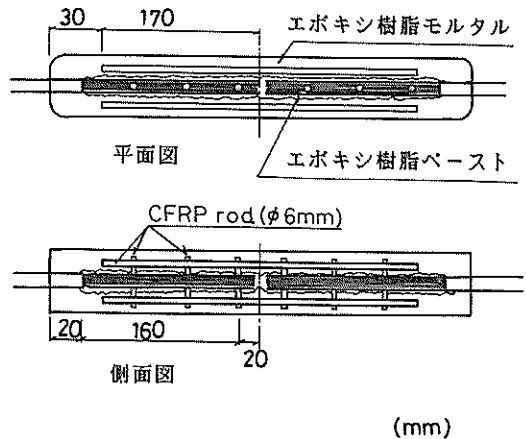


図-11 定着体の内部構造

き試験の結果より決定した。引き抜き試験結果を図-12に示す。本研究で用いた供試体の緊張材に導入された緊張力はロープ1本につき6tf程度であったが、図-12より、6tf程度の引張荷重レベルにおいては、定着体内の繊維に引張力が伝達されている距離は端部から20cm程度までであるため、それ以上定着体を長くしても無意味であることがわかる。本研究で用いた定着体では、その上限値20cmを採用した(両側にロープがあるので、定着体長さは40cmとなる)。

また、図-10、および図-11に示す通り、定着体内部には、軸方向および軸直角方向に炭素繊維強化プラスチック(CFRP)ロッドを配置し、定着体外周には、ア

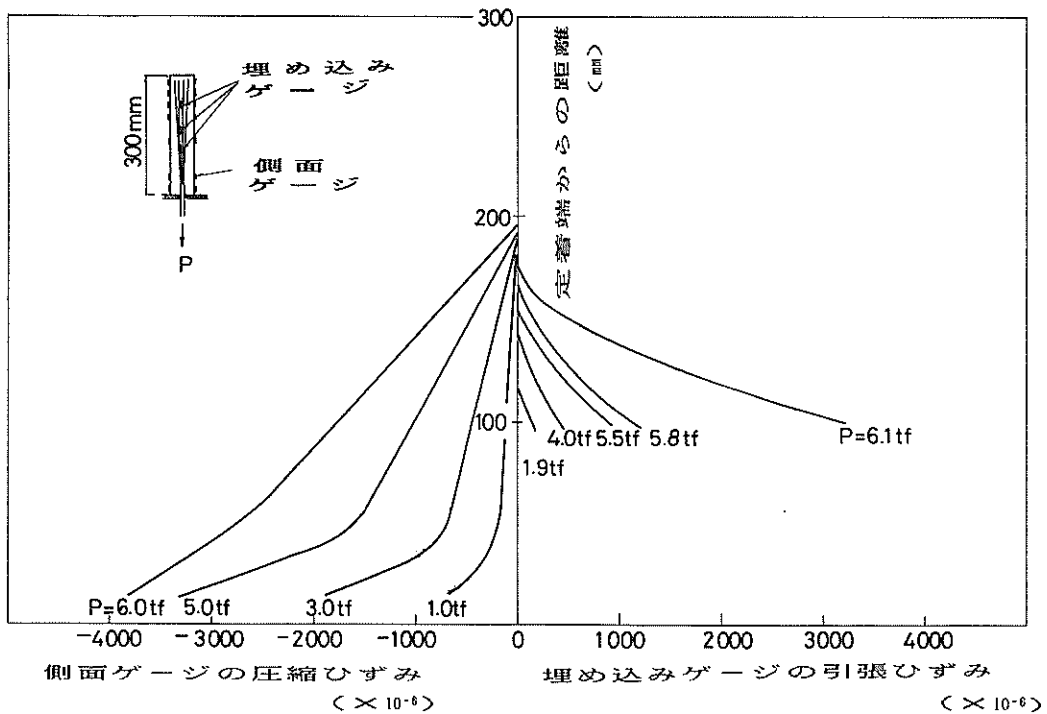


図-12 アラミド繊維ロープの定着長

アラミド繊維ヤーン（繊維糸）を巻きつけた。アラミド繊維ロープに作用する引張力は、軸直角方向のCFRPロッドによって定着体全体に伝え、定着体に伝わった引張力は、軸方向のCFRPロッドおよび定着体外周の繊維糸で分担するという構造である。CFRPロッドおよび繊維糸を配置しなかった定着体の最大引張力が約6tfであったのに対して、これらを配置した定着体の最大引張力は約10tfとなり、CFRPロッドおよび繊維糸の配置は十分な効果があることがわかった。

次に定着体の使用材料およびその強度特性を示す。

①エポキシ樹脂モルタル

エポキシ樹脂モルタルとして、トーホーダイト M482（東邦天然ガス株式会社製）：珪砂を1：5で混合したものをを用いた。その強度特性を表-10に示す。なお、使用した珪砂は4号：7号を1：1で混合したものである。

②エポキシ樹脂ペースト

エポキシ樹脂ペーストとして、トーホーダイト M482を用いた。その強度特性を表-10に示す。

③CFRPロッド

CFRPロッドとして、三菱化成株式会社製のピッチ系CFRPロッド（φ6mm）を用いた。その強度特性を表-11に示す。

④アラミド繊維ヤーン

アラミド繊維ヤーンとして、東レ株式会社製ケブラー49を用いた。その強度特性を表-12に示す。

次に定着体の製作手順を述べる。

- ① アラミド繊維ロープ端部から17cmまでのポリウレタン（被覆材）を取り去る。（写真-1）
- ② 剥き出しにした繊維束をエポキシ樹脂ペーストに含浸する。（写真-2）
- ③ エポキシ樹脂モルタルを定着体型枠の下半分に打設し、②の繊維束を挿入するための溝をつくっておく。溝に②の繊維束を挿入し、この時、図-11に示すようにCFRPロッドを埋め込む。（写真-3）
- ④ エポキシ樹脂モルタルを型枠の上半分にも打設し、そのまま24時間放置する。（写真-4）
- ⑤ 24時間経過後脱型し、定着体を成型した後、エポキシ樹脂ペーストに浸したアラミド繊維ヤーン（繊維糸）を定着体周囲に60回巻きつけ、定着体が完成する。（写真-5）

以上が定着体の製作手順である。

3. 3 載荷方法および測定項目

供試体への載荷は、図-13に示す通り支点間距離1.95mの3等分点載荷とした。載荷は2サイクルに分け

表-10 エポキシ樹脂の強度特性

	エポキシ樹脂 モルタル	エポキシ樹脂 ペースト
空気量 (%)	5.0	2.2
圧縮強度 (kgf/cm ²)	697	852
曲げ強度 (kgf/cm ²)	364	387

供試体 4×4×16cm、材令7日、20℃

表-11 CFRP ロッドの強度特性

直径 (mm)	6.0
繊維混入率 Vf (%)	64.7
マトリックス	熱硬化性エポキシ樹脂
破断強度 (kgf/cm ²)	147
弾性係数 (kgf/cm ²)	15,600

表-12 アラミド繊維ヤーンの強度特性

繊維	ケブラー49
破断強度 (kgf/mm ²)	280
弾性係数 (kgf/mm ²)	13,360

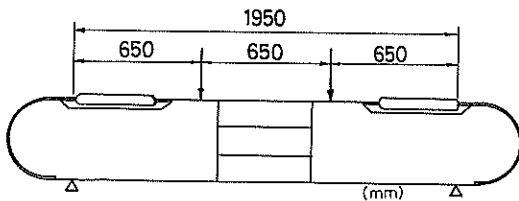


図-13 荷荷方法

て行った。第1サイクルで(ひびわれ発生荷重+5t)まで荷荷を行い、ひびわれ発生までの曲げ性状を観察、測定した。さらに、第2サイクルで供試体の破壊まで荷荷し、有効プレストレス、ひびわれ発生後の曲げ性状、および破壊状況を観察、測定した。測定項目は、破壊荷重および破壊状況、ひびわれ発生荷重およびひびわれ発生状況、たわみ、圧縮線コンクリートのひずみ、および

接合部(コンクリート打継ぎ面)のひびわれ幅とした。測定器の配置を図-14に示す。

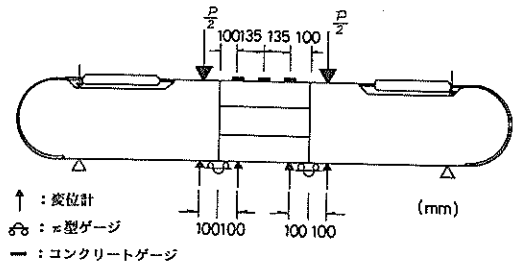


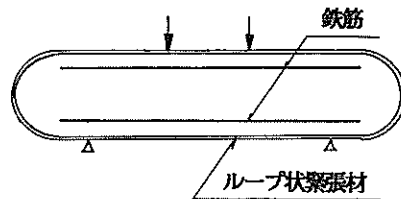
図-14 測定器の配置

4. 実験結果および考察

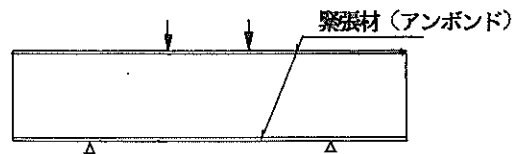
4.1 曲げ性状に関する検討

(1) 解析方法

本研究で曲げ試験を行った供試体は、図-15(a)に示すようにループ状の緊張材を有したアンボンドPC梁であり、さらに主鉄筋も配置されていた。そのため、ひびわれ発生後の曲げ性状の解析を厳密に行うことは困難であった。本研究では、ひびわれ発生前については弾性理論により解析を行ったが、ひびわれ発生後については図-15(b)に示すような鉄筋を有しないアンボンドPC梁と仮定して、著者が以前用いた方法(緊張材位置コンクリートの部材全長の伸び量は、緊張材の部材全長の伸び量に等しいという仮定を用いた比較的精度の良い方法)¹⁾によって計算し、計算より求めた中立軸、圧縮線コンクリートひずみを用いて鉄筋ひずみを算出して鉄筋



(a) 実際の供試体



(b) 解析で仮定した供試体

図-15 解析での仮定

による抵抗力を加えるという方法を採用した。鉄筋による抵抗力を後から加える方法は、厳密には若干の問題があるが、取り扱いが比較的容易であることから、この方法を採用した。この方法を用いて、破壊荷重、たわみ、圧縮緑コンクリートひずみ等を計算し、実験値との比較を行った。

また、破壊荷重の検討においては、緊張材とコンクリートとの間に付着があるボンド PC 梁と仮定し、土木学会

設計式を用いて計算を行って、実験値との比較を行った。

(2) 破壊状況および破壊荷重

供試体の破壊は、打継ぎ部分の圧縮緑コンクリートの圧縮破壊により起こった。破壊時においても、緊張材および定着体にはひびわれ、破断等の異常はみられなかった。

破壊荷重の実験値および計算値は表-13に示す通りである。実験値は、6体ともほぼ等しく、平均で53.3tfで

表-13 破壊荷重および最大荷重時曲率

供試体名	実験値 (tf)	計算値 [アンボンド] (tf)	計算値 [ボンド] (tf)	最大荷重時曲率 (実験値) ($\times 10^{-3} \text{cm}^{-1}$)
1-M-1	52.3	49.0 (1.07)	66.1 (0.79)	3.78
1-M-2	53.0	48.9 (1.08)	66.1 (0.80)	4.46
6-M-1	54.1	47.9 (1.13)	65.7 (0.82)	5.26
6-M-2	53.5	47.8 (1.12)	65.7 (0.81)	5.78
12-M-1	53.8	47.4 (1.13)	65.5 (0.82)	4.60
12-M-2	53.3	47.5 (1.12)	65.5 (0.81)	4.93
平均	53.3	48.1 (1.11)	65.8 (0.81)	4.80

() 内は実験値との比を表す

あった。表中の計算値 [アンボンド] は、(1) 解析方法で述べた方法で計算した値であり、また、計算値 [ボンド] は、緊張材とコンクリートとの間に付着があると仮定し、土木学会設計式²⁾を用いて計算した値である。破壊荷重の実験値は、アンボンド PC 梁とした計算値の1.1倍、ボンド PC 梁とした計算値の0.8倍であった。

アンボンド PC 梁の設計において、土木学会では、破壊荷重はボンド PC 梁として算出した破壊荷重の30%減としてよいとしている。本供試体の破壊荷重の実験値がボンド PC 梁とした計算値の0.8倍であったことより、ループ状アラミド繊維ロープを緊張材とした PC 梁の設計においても、土木学会のアンボンド PC 梁の破壊荷重算出手法の適用が可能であると考えられる。

また、一般に、PC 部材の変形について最も重要な事項は、終局状態で十分な変形を示すかどうかということであり、最大荷重時の曲率の検討は重要である。表-13には最大荷重作用時の曲率の実験値も示した。平均で $4.8 \times 10^{-3} \text{cm}^{-1}$ であった。また、アラミド繊維ロープとほぼ同等の引張力を有する PC 鋼棒 C 種 ($\phi 9.0 \text{mm}$) を緊張材として置き換えた PC 梁を想定し、曲率を算出した。計算の結果、最大荷重53.3tf作用時の曲率は $5.8 \times 10^{-3} \text{cm}^{-1}$ となった。アラミド繊維ロープを緊張材とした

PC 梁の実験値は、この計算値の約83%であったことから、アラミド繊維ロープを緊張材とした PC 梁は従来の PC 梁と同様にフレキシブルな部材であることが明らかとなった。

(3) ひびわれ状況およびひびわれ発生荷重

試験後の供試体のひびわれ状況 (No. 6-M-1) を図-16に示す。最初のひびわれは、打ち継ぎ部で発生し、荷重の増加にともないひびわれは上方に伸びていった。また、下段鉄筋の降伏後、せん断区間にもひびわれが発生した。

目視によるひびわれ発生荷重、および引張応力発生荷重の実験値を表-14に示す。表中の目視によるひびわれ発生荷重は、ひびわれが肉眼で確認された時の荷重であり、図-17(荷重-ひびわれ幅曲線)のA点に相当する。また、引張応力発生荷重(実験値)は、下縁コンクリートが引張となる時の荷重で、図-17のB点に相当する。引張応力発生荷重は、一般に荷重-たわみ曲線を用いて求める³⁾が、本研究で用いた供試体のように緊張材とコンクリートとの間に付着がない場合には、ひびわれ発生によるたわみ変化が明瞭に表われないため、本研究では、荷重-ひびわれ幅曲線を用いて求めた。

(4) 変位量に関する検討

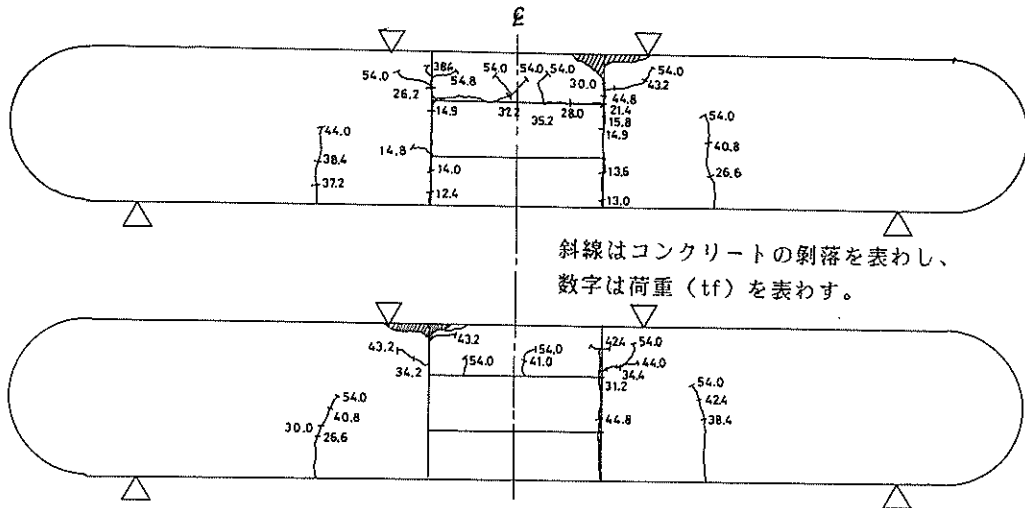


図-16 ひびわれ状況 (供試体 No.6-M-1)

表-14 ひびわれ発生荷重および引張応力発生荷重

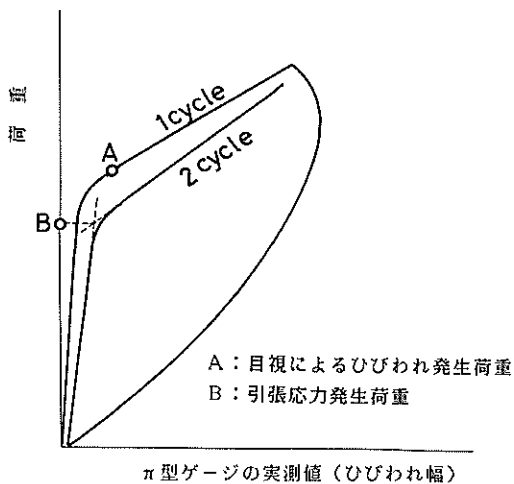
供試体名	目視によるひびわれ発生荷重 (実験値) (tf)	引張応力発生荷重 (実験値) (tf)	引張応力発生荷重 (計算値) (tf)
1-M-1	14.7	10.3	10.5
1-M-2	16.5	12.8	10.4
6-M-1	13.1	9.0	9.0
6-M-2	12.3	8.5	8.9
12-M-1	10.8	8.3	8.4
12-M-2	12.4	9.9	8.4

① たわみ量

図-18に、接合部 (打ち継ぎ部で図-18中の挿入図のA, B点) における荷重とたわみ量との関係を示す。実験値は、接合部A, Bから内側と外側へ10cmづつはずれた点4ヵ所に設置した4個の変位計より求めた測定値を平均し、平均値から支点の沈下量を差し引いた値である。図中、25tf程度で曲線の傾きが変化するのは、下段鉄筋が降伏するためである。また、図中には(1)解析方法で述べた方法を用いて算出した計算値も併せて示す。

② 圧縮線コンクリートひずみ

接合部およびスパン中央における荷重と圧縮線コンク



π型ゲージの実測値 (ひびわれ幅)
図-17 モデル化した荷重-ひびわれ幅曲線

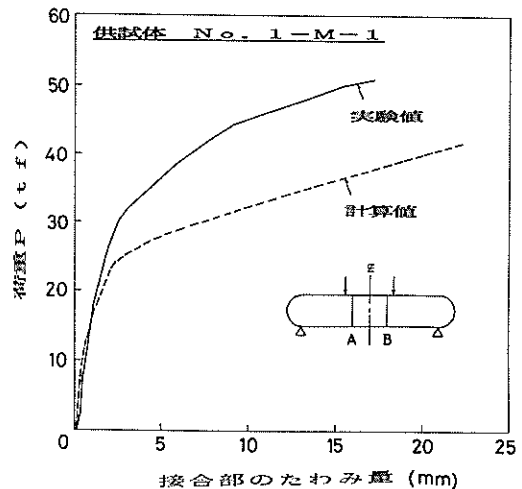
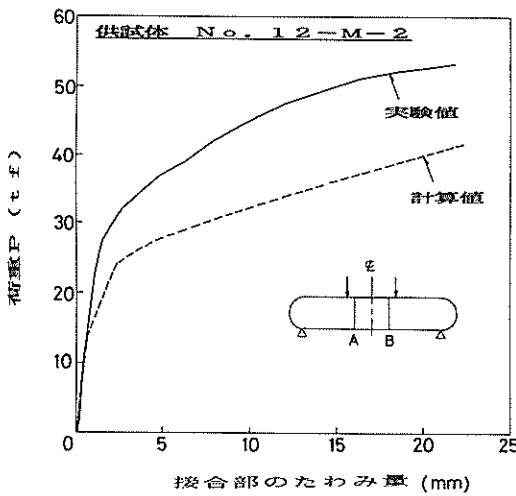
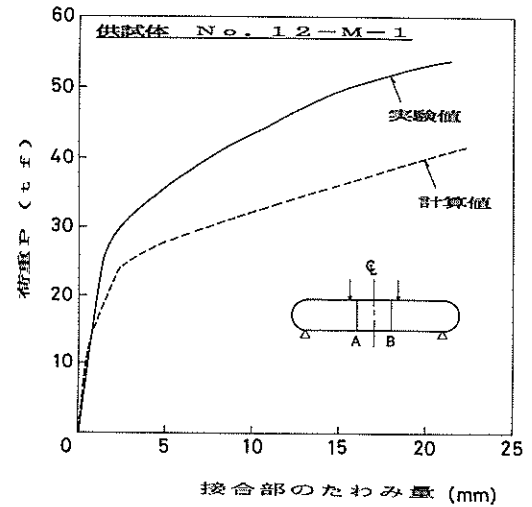
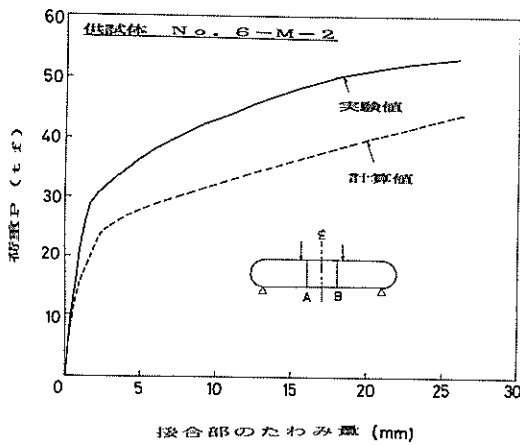
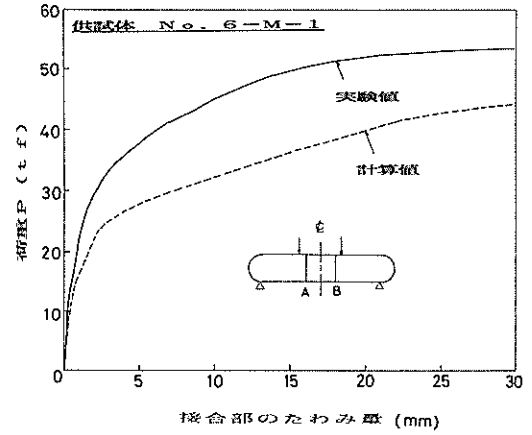
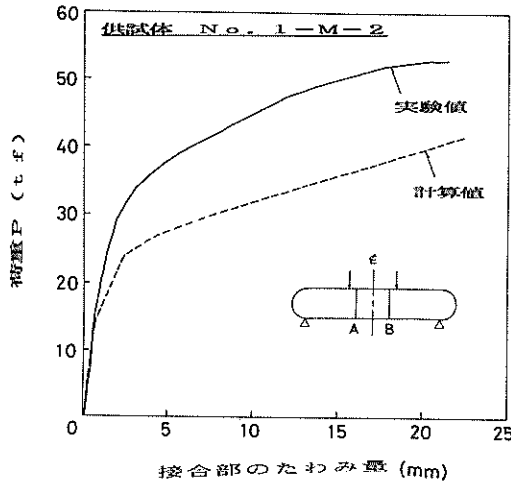


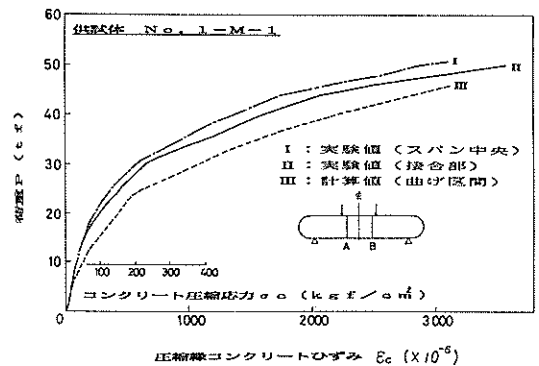
図-18 (a)~(f) 荷重-接合部のたわみ曲線



所の平均値である。また、図中には(1)解析方法で述べた方法を用いて算出した計算値も併せて示す。

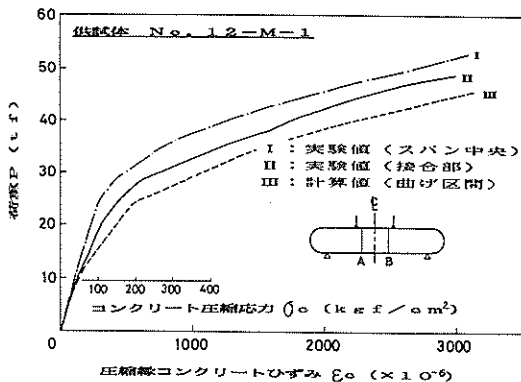
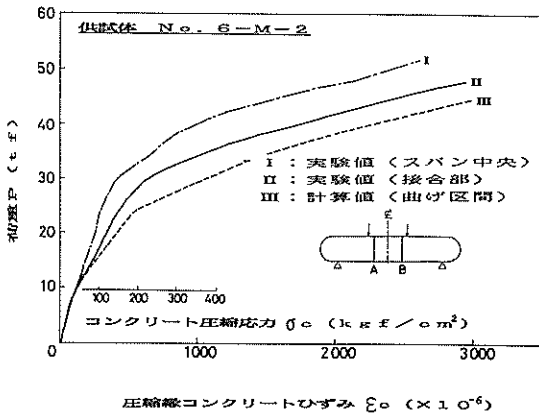
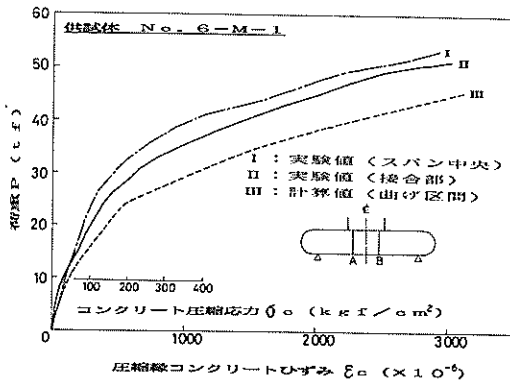
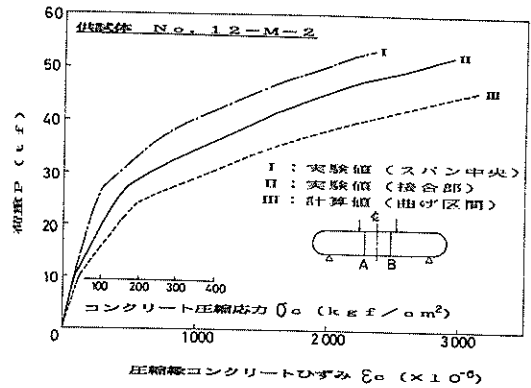
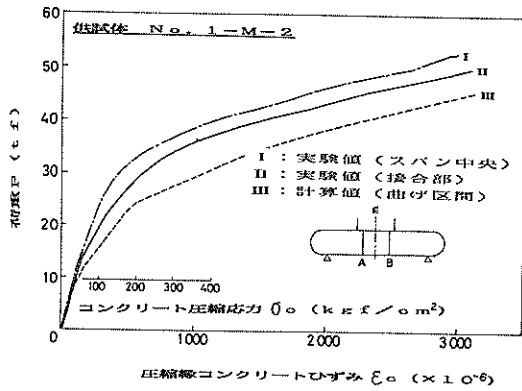
③ 接合部のひびわれ幅

接合部の下段緊張材位置のひびわれ幅と荷重との関係を図-20に示す。また、図中には計算値も併せて示す。計算値は次式を用いて算出した。



リートひずみ量との関係を図-19に示す。接合部のひずみ量は、接合部から内側へ10cm離れた点2カ所の平均値であり、スパン中央のひずみ量は、スパン中央点2カ

図-19 (a)~(f) 荷重-圧縮率コンクリートひずみ曲線



$$w = \sigma_{pc} / E_p \times L / 2$$

ここに、 σ_{pc} : 下段緊張材位置のコンクリートが引張状態となつてからの下段緊張材の応力度増加量 (計算値)

E_p : 緊張材の弾性係数

L : 部材長

この式は、ひびわれが2カ所の接合部に集中すると仮定し、接合部2カ所のひびわれ幅の合計が、下段緊張材位置のコンクリートの部材全長にわたる伸び変化量に等しいと仮定した式である。

④ 実験値と計算値との比較

たわみ量に関しては、実験値は計算値の4割程度となった。圧縮線コンクリートひずみに関しては、接合部の実験値は計算値の7~8割程度となり、スパン中央点の実験値は計算値の6割程度となった。また、ひびわれ

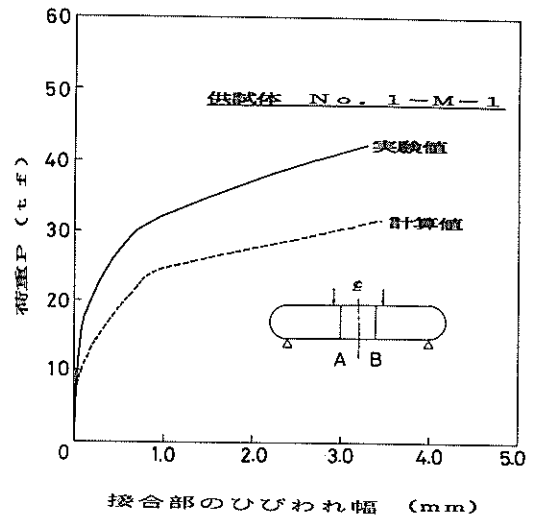
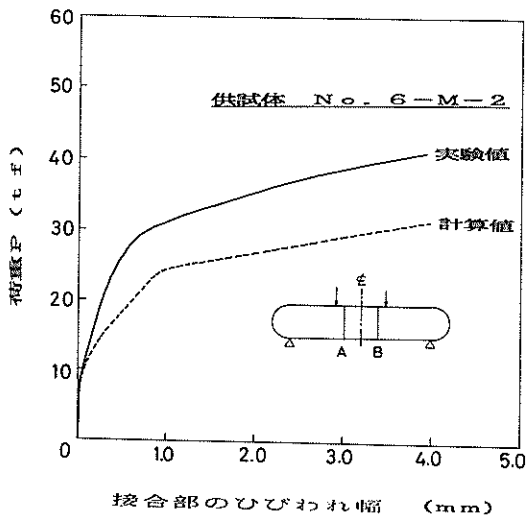
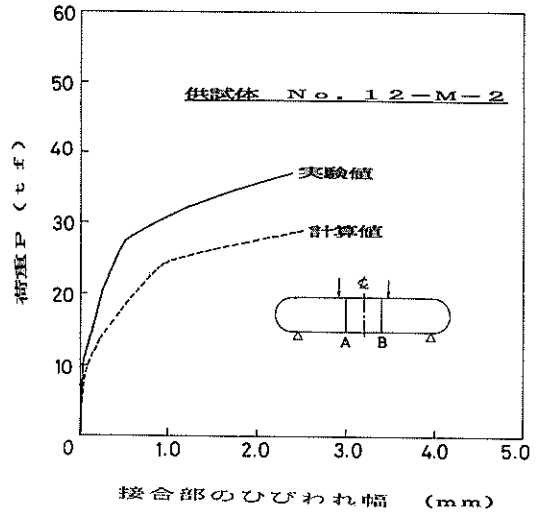
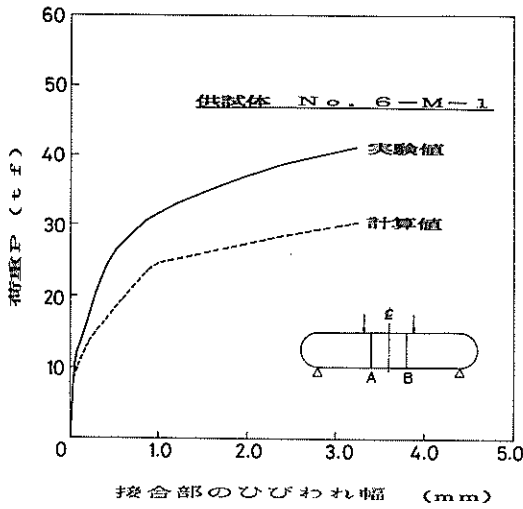
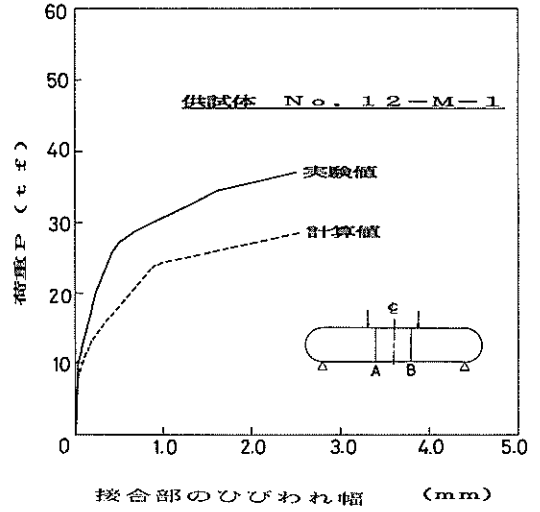
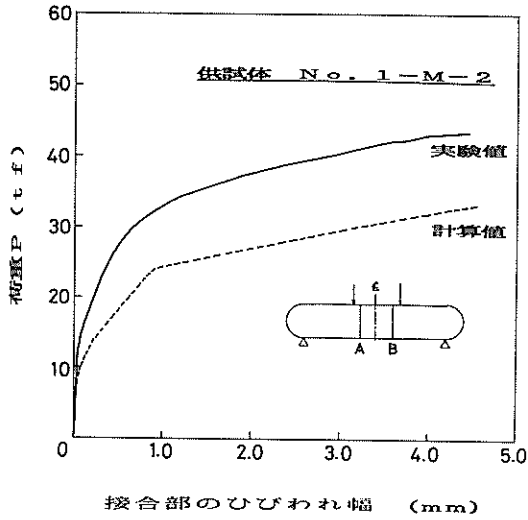


図-20 (a)~(f) 荷重-接合部のひびわれ幅曲線



幅に関しては、実験値は計算値の3～4割程度となった。たわみ量、コンクリートひずみ、およびひびわれ幅の実験値はいずれも計算値よりも小さくなっている。この確かな原因は不明であるが、次のようなこともその一因と考えられる。すなわち、計算方法として、(1)解析方法に示した方法(鉄筋を有しないアンボンドPC梁と仮定して計算を行い、後から鉄筋による抵抗力を加えるという方法)を用いたことである。これにより、計算値の方が大きく算定されたと考えられる。また、ひびわれ幅においては、接合部2ヵ所以外にもひびわれが発生したが、これを計算式では無視したことも、計算値が大きく算定された原因として考えられる。

4. 2 有効プレストレスの安定性に関する検討 (1) 緊張材の緊張力緩釈量

アラミド繊維ロープの緊張力緩和量は、予備試験を行って求めた。予備試験の状況を図-21に示す。2本のロープを2体のコンクリートブロックにはさみ、コンクリートブロック間を油圧ジャッキによって24tf（1本当り6tf）まで押し広げ、それからの緊張力の低下量を測定した。ロープ長は、2.95mであった。また、試験は、定着体としてエポキシ定着体を用いたロープ、および鉄製定着体を用いたロープの2種類について行い、測定時間は緊張から100時間（6,000分）とした。なお、試験は室温20℃の恒温恒湿室内で行った。

試験結果は図-22に示す通りで、100時間における緊張力緩和量はエポキシ定着体を用いた場合で25.2%、鉄製定着体を用いた場合で20.0%であった。なお、初期緊張力 P_i と破断強度 P_u との比 (P_i/P_u) は57%であった。

比較的大きな緩和量であったが、この値には以下の影響も含まれたものであると考えられる。

- ① ロープが曲線区間を有することの影響（曲線部の繊維が徐々に被覆材に喰い込んでいくことが考えられる。）

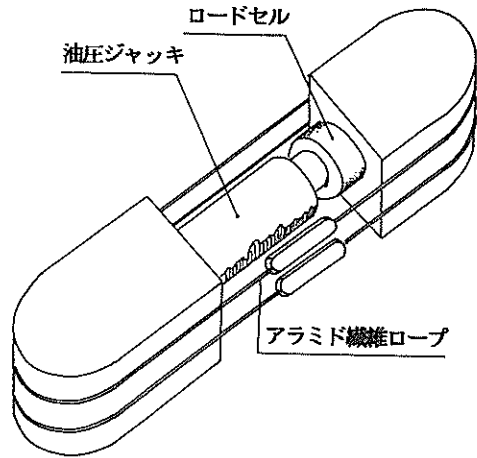


図-21 緊張力緩和量測定試験の状況

- ② 繊維の撓りが戻ることによる影響（ロープ内の繊維は直線状の束になっているが、いくらか撓りがある。持続荷重によりその撓りが徐々に戻っていくことが考えられる。）

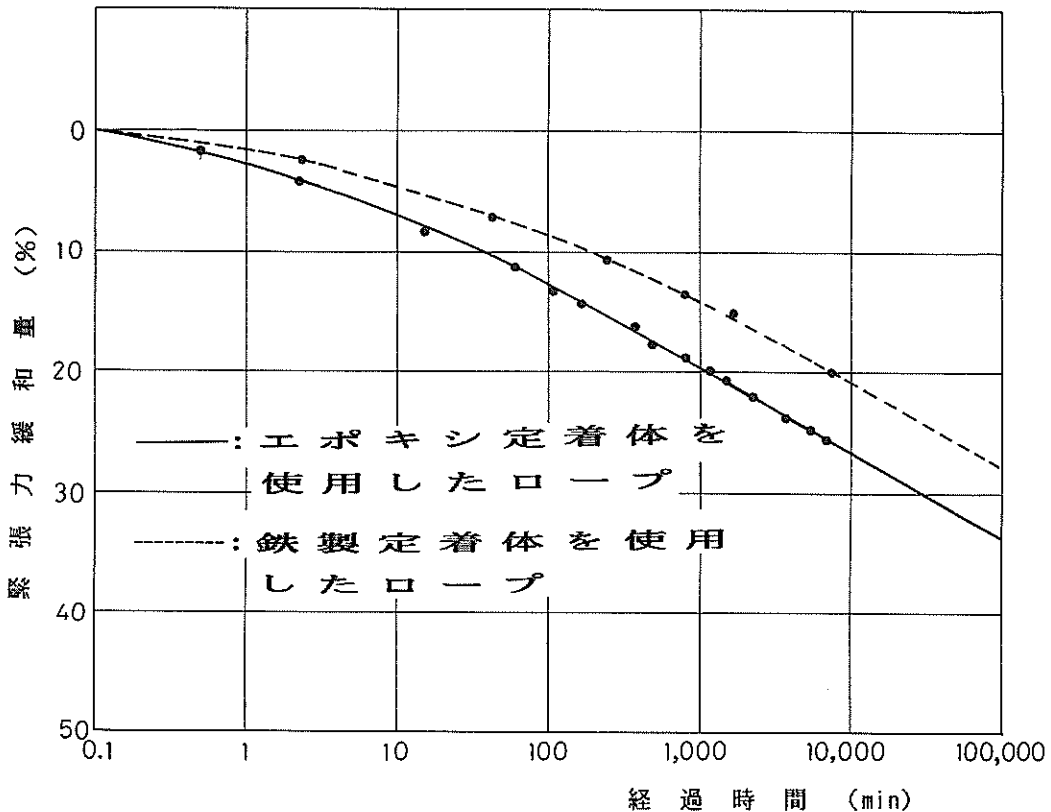


図-22 アラミド繊維ロープの応力緩和量

なお、予備試験に用いたコンクリートブロックの乾燥収縮およびクリープの影響は、緩和量にはほとんど効いてこない。

また、図-22にみられる通り、定着体としてエポキシ定着体を用いたロープの緩和量と、鉄製定着体を用いたロープの緩和量との間には5%程度の差がみられたが、これは定着体の影響であるとは断言できない。それは、鉄製定着体を用いたロープの試験においては、緩和量試験の前に一度24tまで緊張したため、この影響が考えられるからである。文献¹⁾によれば、本研究で用いた繊維と同じ繊維をエポキシ樹脂と複合させたAFRPロッドに関して、100時間リラクゼーション試験を実施したところ、初期荷重保持時間を0分としたものと、初期荷重保持時間を10分としたものとは後者のリラクゼーション率が4%小さいと報告されている。本試験においても、定着体の種類の影響というよりも、試験前の緊張の影響が大きいものと考えられる。

(2) 有効プレストレスの安定性

表-15に、供試体の有効プレストレスの実験値および計算値を示す。表中の計算値は、土木学会設計式²⁾を用いて算出した値である。一方、実験値は、曲げ試験で測定した下縁コンクリート引張応力発生荷重(表-14)より次式を用いて算出した値である。

$$\sigma_{ee} = P_{ct} \times L / W$$

ここに、 σ_{ee} : 有効プレストレス
 P_{ct} : 下縁コンクリート引張応力発生荷重
 L : スパンの1/2
 W : 断面係数

表-15 有効プレストレス量

供試体名	実験材令	実験値 (kgf/cm ²)	計算値 (kgf/cm ²)
1-M-1	1ヵ月	38.2	38.9
1-M-2		47.4	38.6
6-M-1	6ヵ月	33.4	33.5
6-M-2		31.5	33.0
12-M-1	12ヵ月	30.8	30.9
12-M-2		36.7	31.0

* 超速硬コンクリート断面における有効プレストレス量である。

材令1年における有効プレストレスの実験値 σ_{ee} は、平均で $\sigma_{ee} = 33 \text{ kgf/cm}^2$ であった。供試体は材令1年まで十分なプレストレス量を有していた。

また、図-23は、表-15をグラフ化したものである。横軸には材令を、縦軸には(有効プレストレス/初期導入プレストレス)の関係を示している。

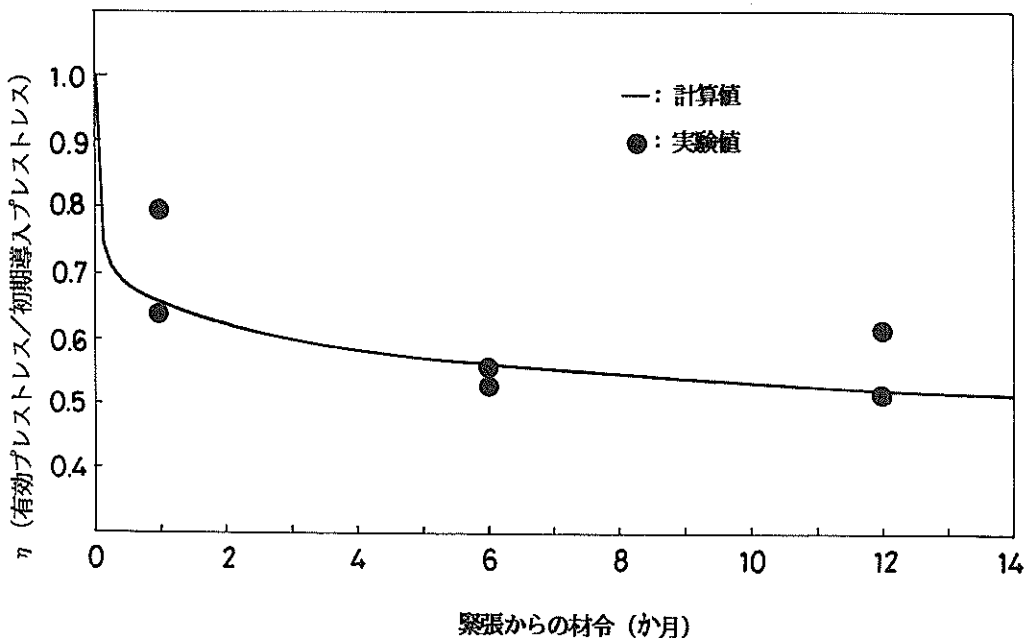


図-23 材令と η の関係

入プレストレス)をとっており、実線が計算値で、黒丸が実験値である。実験値は、計算値におおむね一致し、材令1年の範囲での供試体の有効プレストレスは安定しており、その値は土木学会設計式を用いて計算できることが確認された。

5. 結論

アラミド繊維ローブを緊張材としたPC梁の曲げ試験を実施し、得られた結論は、以下の通りである。

- ① 緊張力6tf程度に対応できる非金属定着体を開発した。
- ② 供試体の破壊は、圧縮縁コンクリートの圧縮破壊により起こった。破壊まで、定着体およびアラミド繊維ローブには変化がみられなかった。
- ③ 破壊荷重の実験値は、ボンドPC梁の計算値(土木学会設計式による)の約0.8倍であった。ループ状アラミド繊維ローブを緊張材としたPC梁を設計する場合、破壊荷重の算出には、土木学会のアンボンドPC梁の破壊荷重の算定方法(ボンドPC梁の30%減とする)の適用が可能であることがわかった。
- ④ 最大荷重時の曲率は $4.8 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$ 程度で、アラミド繊維ローブを緊張材としたPC梁は、従来のPC鋼棒を緊張材としたPC梁と同程度にフレキシブルな部材であることが明らかとなった。
- ⑤ 材令1年までの有効プレストレスの実験値は、土木学会設計式による計算値にほぼ一致し、材令1年の範囲での供試体の有効プレストレスは安定しており、その値は土木学会設計式で算定できることが確認された。

6. おわりに

金属を用いないPC部材を開発するための基礎研究として、アラミド繊維ローブを緊張材としたPC梁の静的曲げ試験を実施した。その結果、曲げ性状は従来のPC部材とほぼ同等であること、および材令1年の範囲での有効プレストレスは安定していることが確認され、曲げ部材として使用できそうな見通しを得ることができたが、実用化には種々の問題が残されている。素材について言えば、様々な条件(温度、初期荷重と破断荷重の比等)でのリラクゼーションの検討が必要であると考えられ、定着体について言えば、緊張力30tf以上に耐え得るものの開発が望まれる。また、部材についていえば、疲労およびせん断に対する検討も必要であると考えられる。さらに、建設コストに見合った使用方法も考えなければならない。これらの問題を解決するためには、調査

および試験をさらに推進する必要がある。

最後に、本研究の遂行にあたり、貴重な御助言をいただいた横井構造部長ならびに御助力をいただいた五洋建設株式会社大橋清一氏に深謝いたします。

(1988年11月28日受付)

参考文献

- 1) 大即信明, 山本邦夫, 浜田秀則: CFRP ロッドを緊張材としたアンボンドPC梁の曲げ性状, 港湾技術研究所報告, Vol. 27, No. 2, 1988.
- 2) コンクリート標準示方書設計編, 土木学会, p. 125, 1986.
- 3) 岡田清, 神山一: プレストレストコンクリートの設計, 国民科学社, pp. 117~118, 1974.
- 4) 高木兼士, 内藤英晴: FRP ロッドを用いたプレレストレストコンクリートの開発研究(その3), 五洋建設技術研究所年報 Vol. 16, pp. 109~114, 1987.
- 5) コンクリート標準示方書設計編, 土木学会, pp. 23~28, 1986.

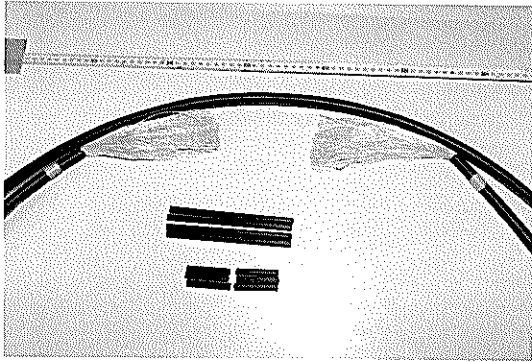


写真-1 アラミド繊維ロープの被覆材の除去

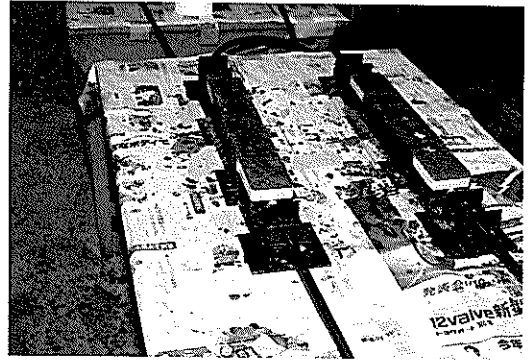


写真-4 エポキシ樹脂モルタル打設後の状況

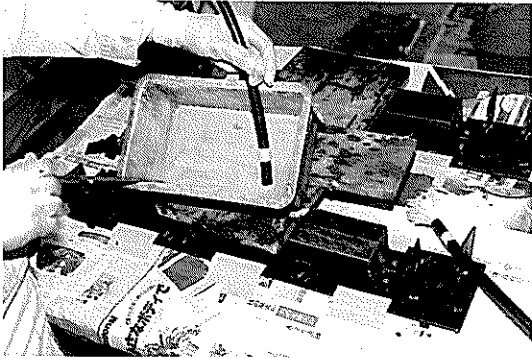


写真-2 エポキシ樹脂ペーストへの含浸

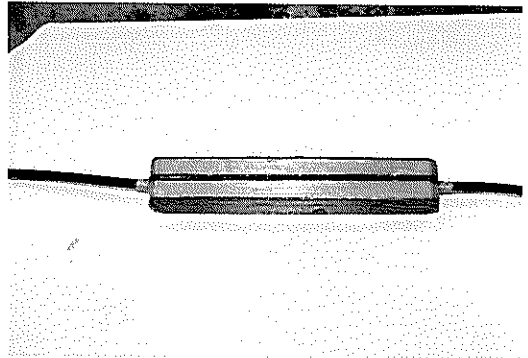


写真-5 アラミド繊維糸巻きつけ後の状況

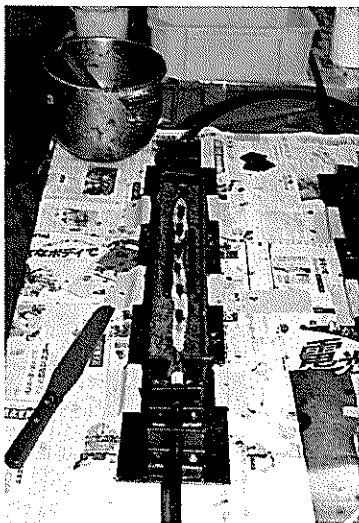


写真-3 繊維束およびCFRP ロッドの挿入状況

港湾技研資料 No. 640

1989・3

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

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