

土 木 研 究 所 資 料

繊維強化構造材料の 歩道橋への利用可能性の検討

平成6年11月

建設省土木研究所
材料施工部化学研究室

Copyright © (1994) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

繊維強化構造材料の 歩道橋への利用可能性の検討

新材料開発研究官 片脇 清
化学研究室 室 長 坂本浩行
主任研究員 西崎 到
研 究 員 佐々木 敏

要 旨

繊維強化構造材料は、軽量性や優れた耐食性などの他の素材では得にくい特性をもつため、鋼やコンクリートに代わりうる新たな素材のひとつと考えられている。

本報告書では繊維強化構造材料の材質を調査し、土木構造物の例として歩道橋を取り上げ、その適用の可能性を検討したものである。

キーワード：繊維強化構造材料、複合材料、高分子材料、歩道橋、新素材、土木構造物、
利用可能性、橋梁形式選定

目 次

1. 調査の概要	
1.1 目 的	1
1.2 概 要	1
2. 繊維強化構造材料の種類と特性	
2.1 繊維強化複合材料の種類	2
2.2 繊維強化プラスチック引抜き成形材	10
2.3 繊維強化プラスチックケーブル	16
2.4 繊維強化プラスチック被覆材	18
2.5 繊維強化構造材料の結合方法	21
3. 繊維強化構造材料による歩道橋の形式選定	
3.1 歩道橋の機能と構造形式	28
3.2 桁橋・ラーメン橋と繊維強化構造材料	30
3.3 アーチ橋と繊維強化構造材料	32
3.4 吊橋・吊床版橋と繊維強化構造材料	34
3.5 斜張橋と繊維強化構造材料	36
3.6 その他の橋梁形式	37
4. 繊維強化構造材料による歩道橋のケーススタディ	
4.1 設計計画	38
4.2 トラフ斜張橋についての応力試計算	49
4.3 材料計算	57
4.4. 設計図	59
5. まとめ	65

1. 調査の概要

1. 1 目的

近年の技術開発に伴い、航空機や自動車などの分野においては鋼などに代わるチタン、プラスチック、ガラス、炭素繊維などが幅広く使用されてきており、建設分野でもこれらの新しい素材の導入が注目される様になってきた。

本調査では、繊維強化構造材料の種類や特性を整理した上で、当面最も実現性の高いと考えられる歩道橋に応用する際の技術的な可能性をさぐることを目的とした。

1. 2 概要

繊維強化構造物の可能性と技術課題を明らかにするために、各種の繊維強化構造物材料について既存の文献やメーカー資料を基に、それぞれの特性を整理した。次にケーススタディとして歩道橋を取り上げ、桁橋・アーチ橋・斜張橋・吊橋などへの繊維強化構造材料の適用について検討した。

さらに、繊維強化構造材料の特性を生かした支間長 40 m, 幅員 4 m 程度の歩道橋について設計し、一つのモデルケースについて一般図作成、応力計算および材料計算を行った。

2. 繊維強化構造材料の種類と特性

2. 1 繊維強化複合材料の種類

最も一般的な繊維強化複合材料は、マトリクスとして不飽和ポリエステルを使用し、補強材としてガラス繊維を使用している。そのため繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastics)と言え、ガラス繊維で強化されたものが最も一般的であるが、現在ではこの他、炭素繊維・アラミド繊維・ボロン繊維・炭化ケイ素繊維・アルミナ繊維・高密度ポリエチレン繊維などがあり、それぞれ特徴を持っている。マトリクスについてもエポキシ樹脂・ビニルエステル樹脂・フェノール樹脂などがあり、近年では熱可塑性樹脂としてポリエーテルエーテルケトン(PEEK)、ポリエーテルケトン(PEK)あるいは熱可塑性ポリイミド(PI)などが航空機産業などで利用されている。

(1) ガラス繊維強化プラスチック(Glass FRP)

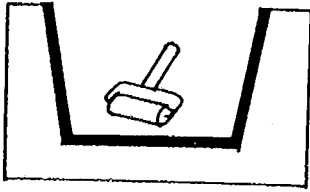
ガラス繊維強化プラスチックはFRPの主流を占めており、経済的な軽量・高強度構造材料として、多方面にわたる用途を開発してきた。特に生産の方法として、多品種少量生産から小品種多量生産に対応する各種成形法が開発され、船体のような巨大構造物から、数mmの微小部材に至るまで実用化されている。図-1はこれら成形法と主な用途を示したものである。

GFRPは繊維含有率を主な規準として、グレード分けされており、一般に繊維量が多いほど高い強度が得られ、母材によってその化学的性質が変わる。各材料の性質は、この他繊維の長さ、繊維と母材との接着状況、成形条件などの加工条件によって決まる。表-1は各成形法によるGFRPの一般的性質を示したものである。

ハンドレイアップ成型法 (H L U)

人力 (ローラー等) による成形方法

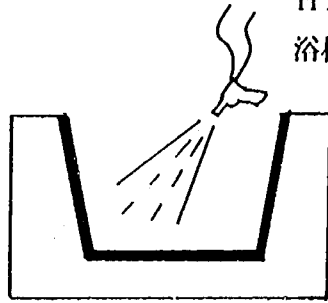
漁船、タンク、浄化槽等



スプレイアップ成型法 (S U)

H L Uの一部を機械化

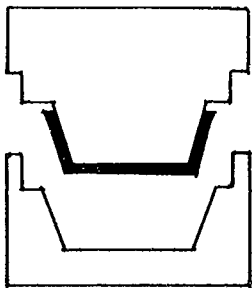
浴槽、容器、ボート等



コールドプレス成型法

簡易樹脂型による低温、低圧によるプレス成型法

タンク、容器等

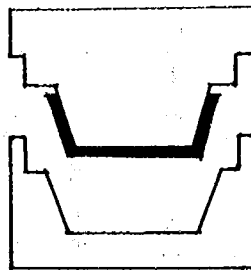


バルクモールドディングコンパウンド

(BMC) 成型法

加圧、加熱による成形。S M Cとは材料が異なり、強化材が短く量が比較的少なく、充填材が多い。

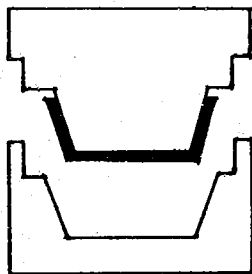
電気部品、自動車部品等



シートモールドディングコンパウンド (SMC) 成型法

油圧プレスに取り付けられた加熱金型に S M Cを投入し、徐々に型締めして加熱硬化後に型開きして成型品を取り出す成型法。

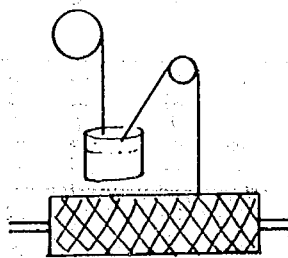
パネル、浴槽など



フィラメントワインディング (F W) 法

ワインディングパターンに、連続繊維をマトリックスを含浸させながら型の周囲に巻き付けて成形する。

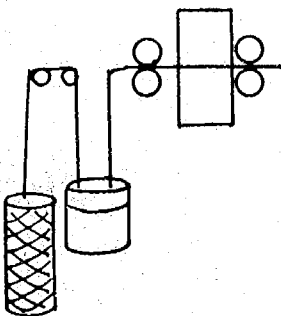
パイプ、タンク等



引抜成型法

強化繊維を平行に引き揃えたものにマトリックスを含浸させ、型に引き込んで型内で硬化させる方法。

パイプ、型材、チャンネル等



連続波平板成型法

フィルムの上にロービングを切断しながら堆積させ、さらにフィルムを被せて連続的に引き出しながら成形する。

波板、平板等

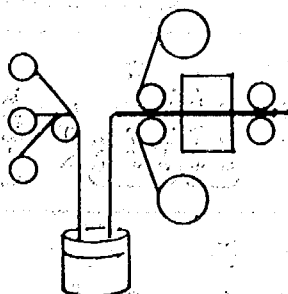


図-1 G F P Rの主な成型法と用途

表-1 (その1) 各成形法によるGFRPの一般的性質

材 料		ガラス基材	樹 脂	ガラス 含有率 (重量%)	比 重	引張強さ(1) (kg/mm ²)	引張弾性 係 数 (kg/mm ²)	伸び率 (%)	圧縮強さ(1) (kg/mm ²)	曲げ強さ(1) (kg/mm ²)	曲げ弾性係数 (kg/mm ²)
F R P	ハントレイア [®] 成形品	チョップマット	ポリエステル	30~40	1.4~1.8	7~14	560~1270	1.0~1.5	11~18	14~23	800~1300
		クロス	"	45~55	1.6~1.8	21~35	1050~3160	1.6~2.0	21~39	32~53	1400~2500
	スプレーア [®] 成形品	ロービング	"	30~40	1.4~1.6	6~13	560~1270	1.0~1.2	11~18	11~20	700~840
	アリアフォームマットタイ 成形品	ロービング チョップマット	"	30~50	1.5~1.7	7~17	560~1270	1.0~1.5	13~21	18~32	880~1300
	ブレミックス成形品 (BMCを含む)	ロービング チョップトースト ランド	ポリエステル エポキシ メタミン	10~45(5)	1.8~2.2	3.5~7	1050~1410	0.3~0.5	9~19	4~18	1100~1800
	ブリブレッグ成形品	クロス	フェノール シリコン	50~65	1.6~1.9	29~39	1050~3160	1.6~2.0	25~42	35~56	1800~1200
	SMC成形品	ロービング チョップトーマット	ポリエステル	29~36(5)	1.5~1.9	9~14	1050~1160	1.5~1.7	15~27	19~30	950~4250
	引抜き成形品	ロービング	ポリエステル エポキシ	50~80	1.6~2.2	56~130	2800~4200	1.6~2.5	21~49	70~130	2800~4900
	ファイメントウインディング 成形品	ロービング	"	60~90	1.7~2.3	56~180	2800~6300	1.6~2.8	35~53	70~190	3500~4900

(出典：旭硝子マテックス株式会社資料)

表-1 (その2) 各成形法によるGFRPの一般的性質

材 料		ガラス基材	樹 脂	衝撃強さ(2) (ft-lb/in)	ロックウェル かたさ	熱伝導率 (Kcal/ mh°C)	比 熱 (Kcal/ kg°C)	線膨張 係 数 (10 ⁻⁶ /°C)	熱変移 強度(3) (°C)	常用温度 限界(4) (°C)
F R P	ハントレイアツ成形品	チャツマツ	ポリエステル	5~25	H40~105	0.16~0.23	0.30~0.33	18~32	180~200	65~180
		クロス	"	20~30		0.23~0.28	0.26~0.28	7~11	180~200	65~180
	スプレツツ成形品	ロービング	"	5~15	H40~105	0.15~0.18	0.31~0.34	22~36	180~200	65~180
	プリフォーム・マツマツト・ダイ 成形品	ロービング チャツマツ	"	10~20	H40~105	0.16~0.22	0.30~0.33	18~32	180~200	65~200
	プレミックス成形品 (BMCを含む)	ロービング チャツマツ ラツト	ポリエステル エポキシ メラミン	1~25	H80~112(6) M90~99(7)	0.16~0.21	0.25~0.35	23~34	200~250	100~230
	プリプレグ成形品	クロス	フェノール シリコン	20~30	H80~112	0.24~0.28	0.25~0.28	7~11	180~200	65~250
	SMC成形品	ロービング チャツマツ	ポリエステル							
	引抜き成形品	ロービング	ポリエステル エポキシ	45~60	H80~112	0.24~0.28	0.23~0.25	5~14	160~190	65~260
	ファイメント・ライニング 成形品	ロービング	"	40~60	M98~120	0.24~0.28	0.23~0.25	4~11	180~200	100~260

(出典：旭硝子マテックス(株)社内資料)

表-1 (その3) 各種マトリックス樹脂の物性

種 類	密 度 (g/cm ³)	引 張 強 度 (kgf/mm ²) (MPa)	弾 性 率 (kgf/mm ²) (GPa)
不飽和ポリエステル	1.14~1.23	5~8 (59~78)	380~470 (3.5~4.6)
エポキシ	1.15~1.35	5~7 (49~57)	350 (3.1)
ビスマレイミド	1.29	5~6 (49~59)	360 (3.1)
ポリイミド	1.40	10 (98)	370 (3.6)
PEEK	1.30	16 (157)	400 (3.9)
PAI	1.38	12 (118)	370 (3.6)
ポリアミド	1.14	8 (78)	290 (2.8)

(出典：強化プラスチック協会「FRP入門」より)

(2) 炭素繊維強化プラスチック (Carbon FRP)

炭素繊維強化プラスチックは先進複合材料(Advanced Composite Materials)の中心的材料であり、軽量・高強度・高弾性率材料として、航空・宇宙分野で不可欠な構造材料である。

CFRPの強化材として使用する炭素繊維には、ポリアクリロニトリル(PAN)系と石油、石炭のピッチを原料としたピッチ系の2種類がある。繊維の力学的性質によって、高強度(HT)タイプ、高弾性率(HM)タイプ、および弾性率がこれらの中間にあるIMタイプがある。

ガラス繊維強化プラスチックの場合、比強度と比剛性の点で、従来の金属材料を飛躍的に越えることができないという欠点があったが、図-2に見るように、CFRPは金属や合金に比べて比強度・比剛性とも優れており、力学的特性を十分に発揮することが可能である。航空機分野において、例えばある戦術輸送機の構成材料として、炭素/エポキシの使用量は45%にも及んでいる。

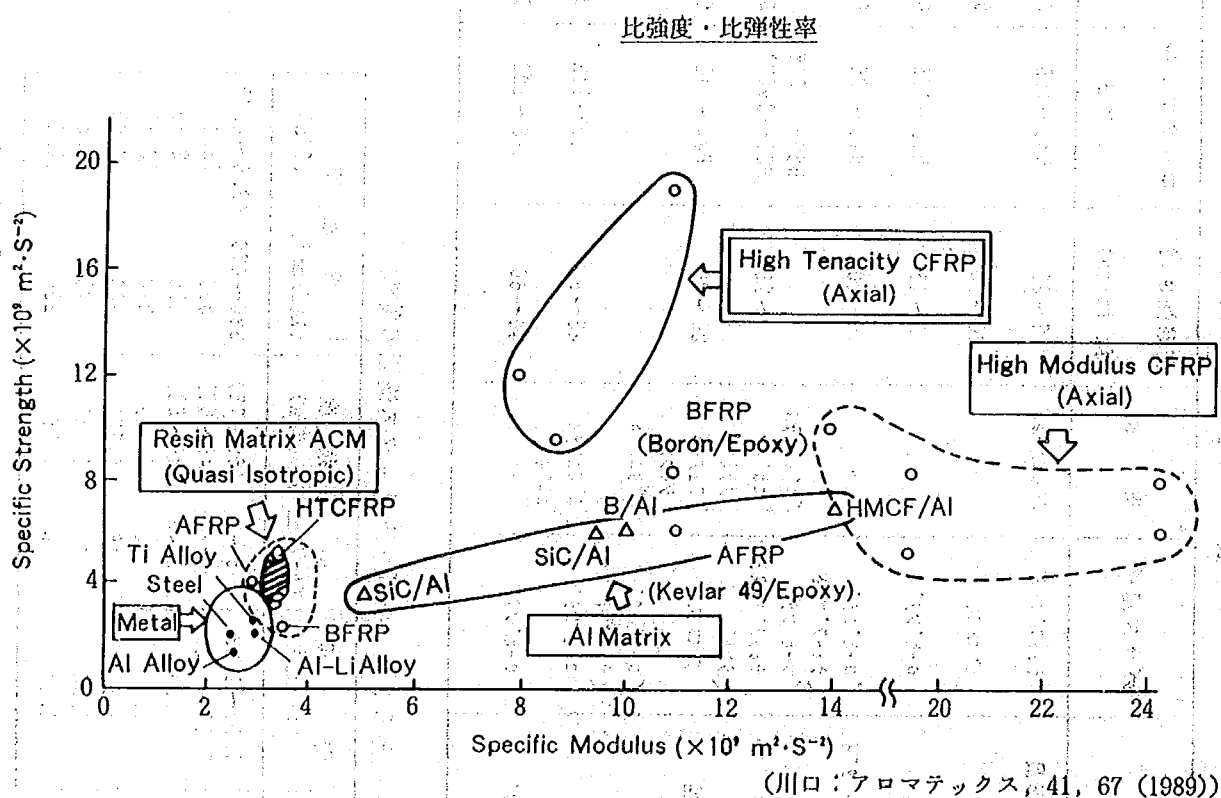


図-2 各種FRPの比強度・比弾性率

(3) アラミド繊維強化プラスチック (Aramid FRP)

アラミド繊維は芳香族ポリアミド繊維の略称であり、もともとタイヤコード(補強材)用に研究された有機系繊維である。繊維自体の密度が小さく、比強度が高い高じん性のFRPが期待できるが、この繊維の特性上、圧縮強度が低い短所がある。表-2に各種の繊維の特性を示す。

表-2 高強度繊維の種類と性能

材 質	商品名(メーカー)	比 重 (Mg/m^3)	強 度 (CP_s)	弾性率 (GP_s)	伸 度 (%)
アラミド繊維	ケブラー-29(DU Pont)	1.44	2.7	62	4.4
	ケブラー-49(DU Pont)	1.44	3.62	131	2.8
カーボン繊維	高強度糸	1.77	3.20	230	1.4
		1.82	7.04	294	2.4
	高弾性率糸	2.1	4.00	450	0.5
		2.1	4.00	650	0.4
ガラス繊維	E-ガラス	2.60	1.90	72	2.6
	S-2ガラス(T-ガラス)	2.49	3.59	87	4.1
ボロン繊維	タングステンコ7	2.49	3.52	400	0.9
	カーボンコ7	2.23	3.28	365	0.9
アルミナ繊維	ファイバー-FP	3.96	1.38	380	0.4
	住化ファイバー	3.2	2.60	350	1.0
シリコンカー バイド繊維	ホイスカー	3.2	2~4	480~830	~0.5
	CVD法	3.0~3.4	3.31	428	0.8
	ニカロソ	2.55	2.45~3.0	180~200	~1.4
スチール		7.86	2.28	210	1.3

(出典：化成コンポジット㈱ 社内資料)

(4) ハイブリッド繊維強化プラスチック (Hybrid FRP)

ハイブリッド繊維強化プラスチックは、ガラス繊維・炭素繊維・アラミド繊維のそれぞれ特性面の短所を補い合う複合材料であり、炭素繊維+ガラス繊維によるCF/AF・HFRPでは、ガラスFRPの弱点とされる鋼性の低さを改善し、等鋼性材料として大幅に軽量化されている。炭素繊維+アラミド繊維によるCF/AF・HFRPでは、耐衝撃性の向上があり、AFRPの圧縮強度が改善されている。

(5) 繊維強化熱可塑性プラスチック (FRTP: Fiber Reinforced Thermoplastics)

上述のFRPは母材としてエポキシ樹脂や不飽和ポリエステル樹脂など熱硬化性樹脂を使用しているが、熱可塑性樹脂をマトリクスとしたものをFRTPと呼んでいる。FRTPは成形加工するときの成形材料となるプレプレグの扱いが容易で、しかも生産性が優れている。射出成形品・プレス成形板などがある。

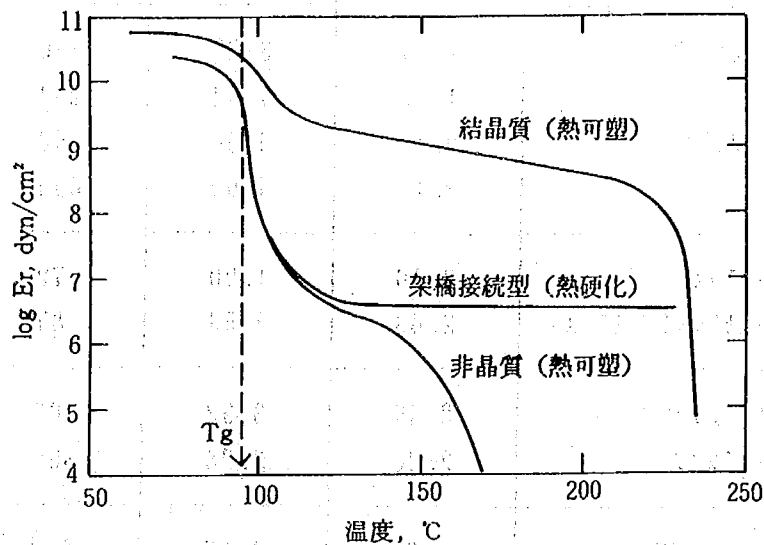


図-3 熱硬化性樹脂と熱可塑性樹脂

(ジョン・ウルフ編「材料科学入門」岩波書店より)

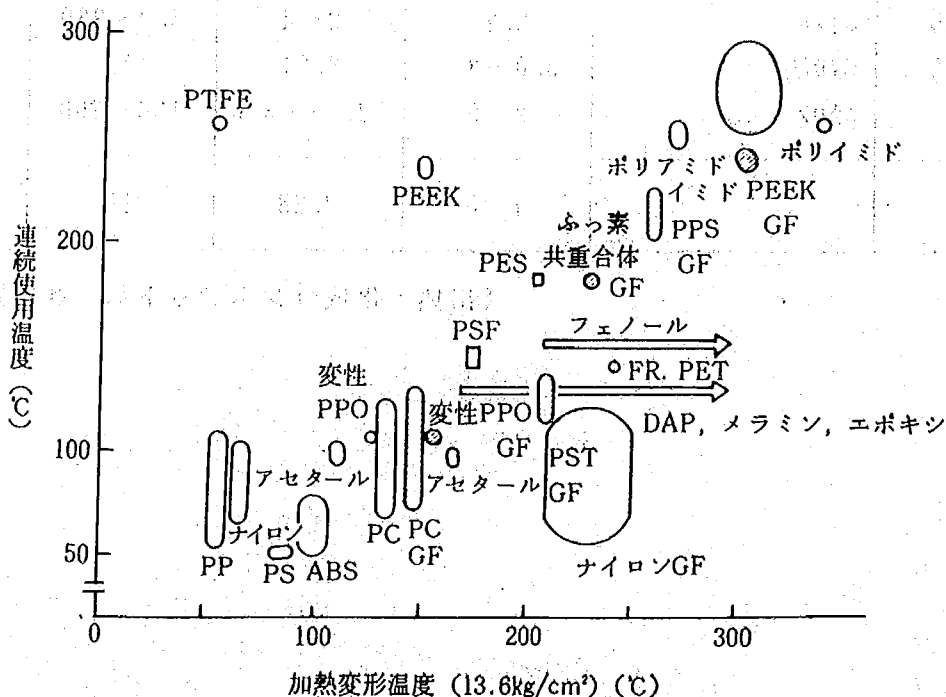


図-4 熱変形温度と連続使用温度

(今井：化学経済, 30, 2, 43(1983))

表-3 各種樹脂の耐環境性

熱可塑（エンジニアリングプラスチック）

	ABS	PA6	PA66	POM	PC	変性 PPE	PBT	GF- PET	PPS
軽量性	◎	○	○	△	○	◎	△	△	△
成形性	◎	○	△	○	△	○	○	△	△
成形収縮率	◎	○	○	○	◎	◎	◎	○	◎
吸水性	△	×	×	◎	◎	◎	◎	◎	◎
低温物性	○	○	○	○	◎	△	○	○	○
強靱性	○	◎	○	○	◎	○	○	△	△
耐クリープ性	△	△	△	◎	◎	○	○	○	◎
耐溶剤性	△	◎	◎	◎	×	△	◎	◎	◎
耐候性	×	△	△	×	○	○	○	◎	◎
難燃性	○	○	○	×	◎	○	○	○	◎
電気特性	○	△	△	◎	◎	◎	◎	◎	◎
耐摩擦磨耗性	△	○	○	○	△	△	○	○	◎

注) ABS アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン（非晶質）
 PA6 ナイロン6 熱硬化
 PA66 ナイロン66
 POM ポリオキシメチレン
 PC ポリカーボネート（非晶質）
 PPE ポリフェニレンエーテル（準非晶質）
 PBT ポリブチレンテレフタレート
 PPS ポリフェニレンサルファイド

凡例
 ◎ 特に優れる
 ○ 優れる
 △ あまり良好ではない
 × 劣る
 ・ 使用上の判断基準として必要項目については○以上のものを使うのが望ましい

熱硬化

樹脂名	無機酸	有機酸	酸化性質	アルカリ	有機溶剤
イソフタル酸系エポキシ樹脂（常温硬化）	○	○	○	×～△	△
ビスフェノールA系エポキシ樹脂（常温硬化）	◎	◎	◎	◎	×
ビスフェノールF系エポキシ樹脂（常温硬化）	◎	◎	◎	◎	◎
エポキシ樹脂（常温硬化）	○	○	×	◎	△
エポキシ樹脂（加熱硬化）	◎	◎	×	◎	○
フロン樹脂（常温硬化）	○～△	○～△	×	○～△	○～△
フロン樹脂（加熱硬化）	◎	◎	×	◎	◎

（化成コンポジット㈱ 社内資料）

2. 2 繊維強化プラスチック引抜き成形材

繊維強化プラスチックは、その母材および繊維の種類によって非常に多方面の用途に適用されることができ、一般的な建設用構造材料としての要求性能を考える場合、最も注目されるのが引き抜き成形材である。引き抜き成形材に特有な長所は以下のとおり

- ① 長さ（引き抜き）方向に連続した（理論的には無限長の）製品が得られる。
- ② 長さ方向の強度、剛性が特に優れている。
- ③ 相当複雑な断面形状の成形が可能。
- ④ 材料および成形コストが比較的安い。

などが挙げられる。

引き抜き成形に使用される原材料は、以下に示すようなものである。

繊維の形態

ロービング、トウ
マット
クロス など

樹脂配合物

樹脂
硬化剤
充填剤
着色剤など

繊維としてよく用いられているのは連続したフィラメントを均一に引き揃えて束ねたガラスロービング（Glass Roving）、カーボントウ（Carbon Tow）などであり、その代表的な繊維の特性値を表-4に示す。また図-5は引き抜き成形の概念図であり、成形は金型内での加熱重合によって行われる。図-6は標準的なガラスFRP引き抜き成形の形状、図-7特殊品形状の例である。表-5は一般的なE-ガラス繊維／ポリエステルによる引き抜き材の機械的特性を示している。

FRP引き抜き成形材の用途は多様にわたるものの、建築・土木分野において、その利用はこれまで構造材料としてではなく、主に付属物材料として使用されたに過ぎない。これは、これまで建築・土木分野においてFRPについてよく知られていなかったためと考えられる建設用構造材料として、FRP引き抜き成形材を取り扱った研究はほとんどないのが実情であるが、その長所から、高耐食性かつ軽量・高強度材料であり、工場生産による均質性に優れ、組立て施工が容易などが見込まれるため、FRP成形材は21世紀の建設用構造材料として大きく期待されよう。

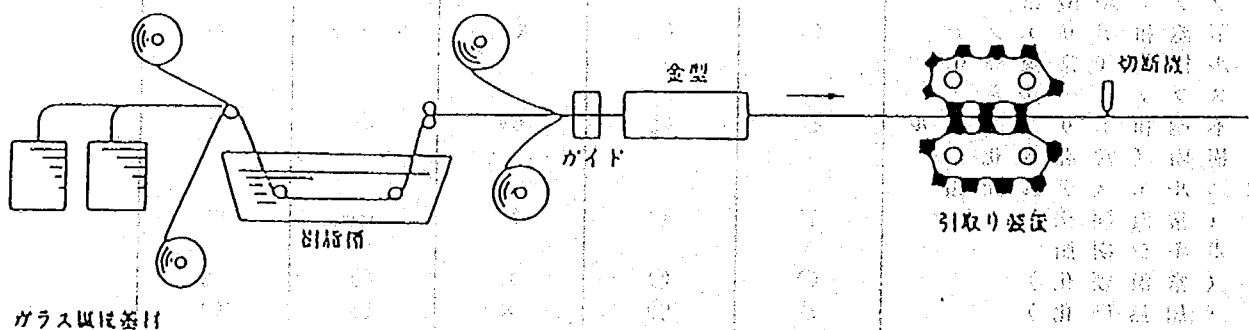


図-5 引き抜き成形法の概念図

(旭硝子マテックス編 パンフレット)

表-4 (その1) ロービング, トウの特性値

種 類	比重	引張り強さ	引張り弾性率	伸び
ガラスロービング E ガラス S、T ガラス	2.54	250 kg f/mm ²	7380 kg f/mm ²	4.0%
	2.49	470	8600	5.5
カーボントウ 高強度タイプ 高弾性タイプ	1.74	340	23000	1.4
	1.81	230	40000	0.5

(出典：化成コンポジット㈱ 社内資料)

表-4 (その2) FRP引抜き成形材構成材料の組合わせ (構成材料)

強化繊維	樹 脂
A 硝子ロービング	1 オルソフタル酸不飽和ポリエステル
B 硝子マット	2 イソフタル酸不飽和ポリエステル
C 炭素繊維トウ	3 ビニルエステル系不飽和ポリエステル
D 炭素繊維クロス	4 エポキシ樹脂
E アラミド繊維	5 フェノール樹脂

表-4 (その3) FRP引抜き成形材構成材料の組合わせ (構成材料)

AB + 1	一般的な製品
AB + 2	耐水性を要求するもの
AB + 3	耐食性を要求するもの
CD + 4	高強度、高弾性を要求するもの
E + 1	高強度を要求するもの
AB + 5	難燃性を要求するもの

(出典：旭硝子マテックス㈱ 社内資料)

表-5 (その1) FRP引抜き成形部材の標準形状寸法表

単位 mm

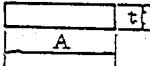
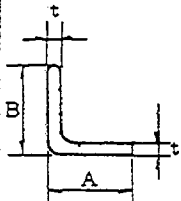
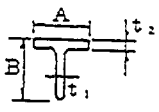
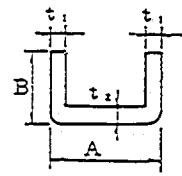
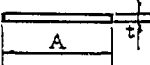
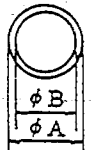
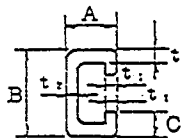
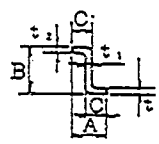
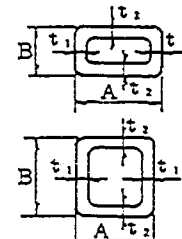
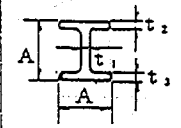
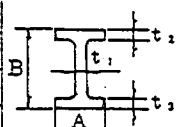
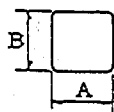
規 格				規 格					規 格								
フラットバー	品 種	A	t	アングル	品 種	A	B	t	T形	品 種	A	B	t1	t2			
	F25	25	5		L253	25	25	3		T30	30	30	3	3			
	F40	40	6		L254	26	25	4		T50	50	50	4	4			
	F50	50	8		L303	30	30	3		T60	60	60	5	5			
	F75	75	9		L304	30	30	4									
	F100	100	12		L403	40	40	3		U形 (チャンネル)	品 種	A	B	t1	t2		
	F160	160	16		L404	40	40	4		U30	30	24	4	3.5			
シート	品 種	A	t		L405	40	40	5		U40	40	20	4	3.5			
	FS105	100	0.5		L504	50	50	4		U45	45	20	5	4			
	FS110	100	1.0		L505	50	50	5		U50	50	25	5	4			
	FS120	100	2.0		L506	50	50	6		U60	60	30	5	4			
	FS225	200	2.5	L754	75	75	4	U75		75	35	6	5				
	FS403	400	3	L755	75	75	5	U100		100	50	6	6				
	FS630	600	3	L1008	100	100	8	U120		120	60	5	6				
ロッド (丸)	品 種	A		L1000	100	100	10			U150	150	75	8	8			
	R1.0	1.0		パイプ	Aタイプ (外径基準)		Bタイプ (内径基準)			C形	品 種	A	B	C	t1	t2	t3
	R2.0	2.0			品 種	外径×肉厚	品 種	内径×肉厚		C65	25	85	7	3.5	3.5	4	
	R2.5	2.5			A20	φ20×4 t	B50	φ50×4 t									
	R3.0	3.0			A30	φ30×4 t	B75	φ75×4 t									
	R3.5	3.5			A50	φ50×4 t	B100	φ100×4 t									
	R4.0	4.0			A60	φ60×4 t	B125	φ125×4 t									
	R4.5	4.5			A80	φ80×4 t	B130	φ130×4 t		Z形	品 種	A	B	C	t1	t2	t3
	R5.0	5.0			A100	φ100×4 t	B150	φ150×4 t		Z50	67.5	50	35	2.5	3	3	
	R5.5	5.5			A110	φ110×4 t	B175	φ175×6 t		Z75	67.5	75	35	2.5	3	3	
	R6	8.0			A170	φ170×6 t	B200	φ200×6 t		Z100	67.5	100	35	2.5	3	3	
	R8	8.0			A180	φ180×6 t											
	R10	10.0		H形 (ビーム)		A	t1	t2	t3		品 種	A	B	t1	t2		
	R12	12.0			H50	50	5	5	5		O25	40	25	3	3		
	R14	14.0			H100	100	7	7	7		O50	50	25	4	4		
	R16	16.0			H150	150	10	10	10		O60	60	30	4	4		
	R18	18.0									O50	50	50	4	4		
	R20	20.0			I形 (ビーム)	品 種	A	B	t1	t2	t3	O60	60	80	4	4	
	R30	30.0			I100	50	100	5	5	5	O75	75	75	5	5		
ロッド (角)	品 種	A	B		I150	100	150	7	7	7	O90	90	90	6	6		
	SB5	5	5		I200	150	200	10	10	10	O100	100	100	5	5		
	SB10	10	10		I250	150	250	8	10	10	O125	125	125	6	6		
	SB15	15	15								O250	250	250	12	12		
	SB20	20	20														

表-5 (その2) FRP引抜き成形部材の特性値 (案)

(S I 単位) (C G S 単位)

項 目	方向	単位	一 般 用					特 殊 用 (横方向の強度を上げたもの)		
			1 種	2 種	3 種	4 種	5 種	2 種	3 種	4 種
引 張 強 度	長さ方向 (S I)		1 4 7.1	1 9 6.1	2 4 5.2	2 9 4.2	3 4 3.2	1 9 6.1	2 4 5.2	2 9 4.2
		× M P a	以上	以上	以上	以上	以上	以上	以上	以上
	長さ方向 (C G S)		1 5 以上	2 0 以上	2 5 以上	3 0 以上	3 5 以上	2 0 以上	2 5 以上	3 0 以上
		× 1 0 ² kgf/cm ²								
	横 方 向 (S I)		5 8.8	5 8.8	4 9.0	2 9.4	2 9.4	9 8.1	7 8.5	5 8.8
		× M P a	以上	以上	以上	以上	以上	以上	以上	以上
	横 方 向 (C G S)		6 以上	6 以上	5 以上	3 以上	3 以上	1 0 以上	8 以上	6 以上
		× 1 0 ² kgf/cm ²								
引 張 弾 性 率	長さ方向 (S I)		9.8 1	1 4.2 2	1 8.3 2	2 3.0 5	2 7.4 6	1 4.2 2	1 8.6 3	2 3.0 5
		× G P a	以上	以上	以上	以上	以上	以上	以上	以上
	長さ方向 (C G S)		1 0 0 0	1 4 5 0	1 9 0 0	2 3 5 0	2 8 0 0	1 4 5 0	1 9 0 0	2 3 5 0
		× 1 0 ² kgf/cm ²	以上	以上	以上	以上	以上	以上	以上	以上
曲 げ 強 度	長さ方向 (S I)		2 4 5.2	2 9 4.2	3 4 3.2	3 9 2.2	4 4 1.3	2 9 4.2	3 4.3 2	3 9.2 2
		× M P a	以上	以上	以上	以上	以上	以上	以上	以上
	長さ方向 (C G S)		2 5 以上	3 0 以上	3 5 以上	4 0 以上	4 5 以上	3 0 以上	3 5 以上	4 0 以上
		× 1 0 ² kgf/cm ²								
	横 方 向 (S I)		9 8.1	9 8.1	6 8.6	4 9.0	4 9.0	1 1.8	9 8.1	7 8.4
		× M P a	以上	以上	以上	以上	以上	以上	以上	以上
	横 方 向 (C G S)		1 0 以上	1 0 以上	7 以上	5 以上	5 以上	1 2 以上	1 0 以上	8 以上
		× 1 0 ² kgf/cm ²								
曲 げ 弾 性 率	長さ方向 (S I)		1 1.7 6	1 3.7 3	1 5.6 9	1 7.6 5	1 9.6 1	1 3.7 3	1 5.6 9	1 7.6 5
		× G P a	以上	以上	以上	以上	以上	以上	以上	以上
	長さ方向 (C G S)		1 2 0 0	1 4 0 0	1 6 0 0	1 8 0 0	2 0 0 0	1 4 0 0	1 6 0 0	1 8 0 0
		× 1 0 ² kgf/cm ²	以上	以上	以上	以上	以上	以上	以上	以上

F R P引抜き成形材としてはこの他、炭素繊維／エポキシを使用したものがあり、ガラス繊維／ポリエステルの場合より高い弾性率、強度を得ることができるが、経済性の面で難点があり、その適用は次項のケーブル材料などの特殊な場合に限られるのではないかとと思われる。図-8はカーボンマットを用いた引抜き成形材の例であり、大型旅客飛行機の座席フロア支持部材として用いられている。

この他、炭素繊維を用いた成形材としては引抜き成形でなく、熱接着により織物を重ねて成形するプリフォーム材等も同じような目的で用いられている。

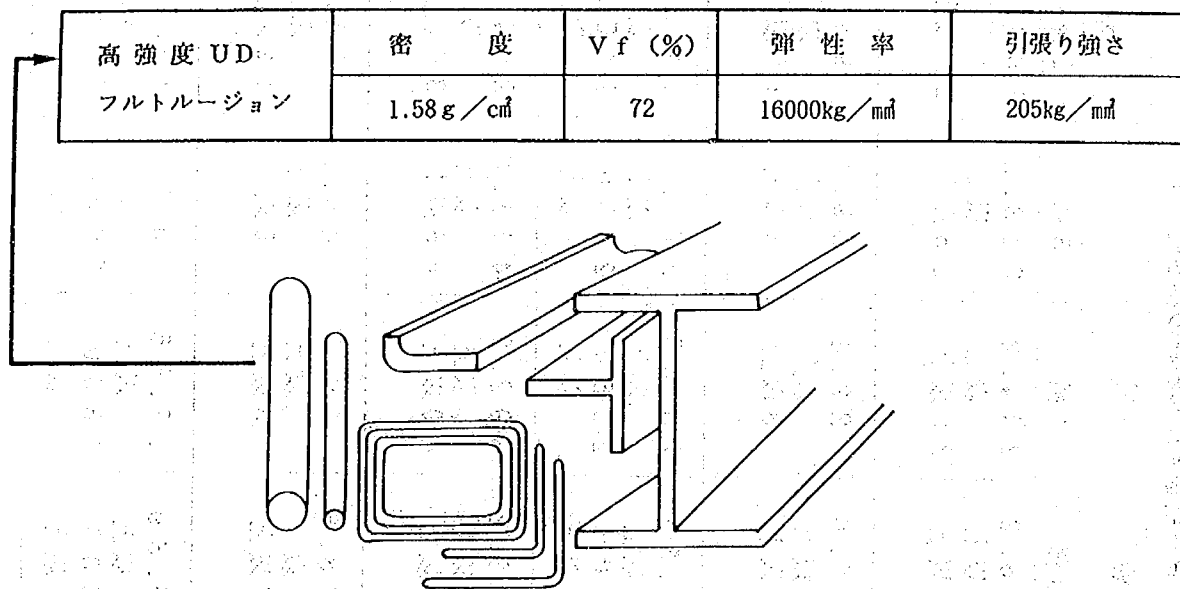


図-8 CFRP引抜き成形材の例

(小松化成㈱ パンフレット)

表-6 カarbonFRP引抜き材の仕様

タイプ	寸法 (mm)						断面積 (cm^2)	標準重量 (g/m)
	W	H	T ₁	T ₂	T ₃	R		
A	41.4	31.8	1.3	1.9	1.9	3.0	2.01	301
B	56.0	66.0	3.0	4.5	4.5	5.0	6.95	1,042
C	100.0	100.0	7.0	7.0	7.0	5.0	20.23	3,035

(出典：三菱化成㈱ パンフレット)

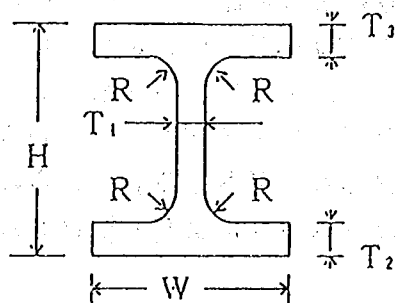


表-7 カarbonFRP引抜き材の標準物性

項 目	単 位	物 性 値
マトリックス	—	エポキシ樹脂
繊維含有率	%	50
引張強度	kgf/mm^2	115
引張弾性率	kgf/mm^2	9,000
曲げ強度	kgf/mm^2	85
曲げ弾性率	kgf/mm^2	4,600
比 重	—	1.5

(出典：三菱化成㈱ パンフレット)

2. 3 繊維強化プラスチックケーブル材

ここで繊維強化プラスチック緊張材とは、従来の高強度鋼によるPCケーブルもしくは吊りケーブル・斜張ケーブルに対応するものであり、高強度繊維として炭素繊維やアラミド繊維の利用が図られている。我が国においては、これまで主にプレストレストコンクリートの内部に配置するPC緊張材としての研究開発が進められ、実用化へ向けての設計・施工指針（案）が作成されている。また国外においては、斜張橋の主ケーブルとして繊維強化プラスチック緊張材が使用されるに至り、我が国においてもこの分野の研究が急務となっている。

FRP緊張材は、引抜き法によって作られる。これは熱硬化性樹脂（エポキシ）に含浸させた繊維を均一に引き伸ばしながらダイスで集束させ、加熱により硬化、成形させる方法である。

設計・施工指針（案）の中では、PAN系炭素繊維による細径ロッドをより合わせたより線をCFRP（Ⅰ）タイプ、ピッチ系炭素繊維によるロッドをCFRP（Ⅱ）タイプ、パラ系アラミド繊維による組紐状ロッドをAFRP（Ⅰ）タイプ、パラ系アラミド繊維をビニルエステル系樹脂でロッドにしたものをAFRP（Ⅱ）タイプと呼んでいる。AFRP（Ⅱ）タイプのものにはストレートロッドの他、異形ロッドもある。これらの繊維含有率はおおむね65%（Vf）である。なお、当初はガラス繊維による緊張材も研究対象とされていたが、指針（案）には含まれていない。

FRP緊張材の最大の問題点は、その定着法にある。FRP各材料は摩擦係数が鋼より小さく、従来の鋼材用の定着法をそのまま使用すると、効率が落ちるばあいがある。また、FRP使用の大きな目的のひとつである耐食性を得るためには、定着具自体もFRP材料とする必要がある。

これまでのところ、FRP定着具として開発されているのは図-9に示すようにナット定着方式としたものであり、材質はガラスFRPであり中にはモルタルを充填している。この様式はAFRP（Ⅱ）ケーブルの7φ6ロッドに用いられた経緯があり、保証破断荷重35.7tに対して0.59Pu=20.9tで使用されている。

また定着用膨脹材を利用し、膨脹圧を拘束する外筒管として、カーボンFRPを使用した実験もあり、今後の発展が期待される（資料-3 参照）。

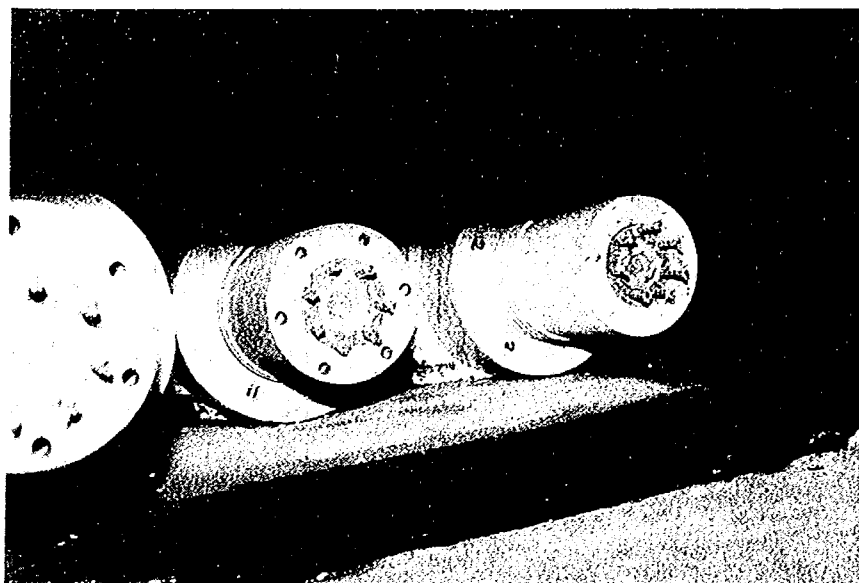


図-9 アラミドFRP緊張材FRP製定着部

表-8 FRPケーブルおよび鋼材の品質特性

FRPケーブルの種類 線材の性能項目				CFRPI		CFRPII		AFRPI		AFRPII		GFRP		PC鋼棒		PC鋼より線	
				炭素繊維		炭素繊維		アラミド繊維		アラミド繊維		ガラス繊維					
線材の性能項目	線材構成	ロッド、より線		より線 1×7 12.5φ	ロッド φ3	ロッド φ8	ロッド (組紐状) φ8	ロッド (組紐状) φ12	ストレートロッド 異形化ロッド φ6	異形化ロッド φ8	SBPR 95/110 φ9.2	SBPR 95/110 φ23.0	SWPRTA φ9.3	SWPRTA φ15.2			
		呼び径	mm	12.5	3	8	8	12	6	8	9.2	23	9.3	15.2			
		断面積	mm ²	76.0	7.1	49	50	90.5	28.3	50	66.5	415.5	51.61	138.7			
		マトリックス材		エポキシ系樹脂	熱硬化性エポキシ樹脂		エポキシ系樹脂		ビニルエステル系樹脂	エポキシ系樹脂	-		-				
		繊維含有率	%	64	65	65	65	65	65	62	-	-	-	-			
		重量	kg/m	0.151	0.014	0.08	0.060	0.12	0.036	0.13	0.52	3.26	0.405	1.101			
	引張特性	引張強度	kg/mm ²	191	155	157	128	128	180	150	110		175	165			
		弾性係数	kg/mm ²	14000	15000		6500		5400	4500	20000		20000				
		破断時伸度	%	1.6	1.21		2.2		3.3	2.6	5		3.5				
		純リラクセーション	%	3.5(30年推定値)	3.7(30年後推定値)		7		7-14	-	1.5		3.0				
		(初期荷重：材令)	Pu：hr	(0.8Pu:20°C)	-		(0.5～0.7Pu :100hr)		(0.6σu, 0.8σu 30年推定値)	-	-		-				
	温度特性	線膨張係数	/°C	0.6×10 ⁻⁶ 以下	0.68×10 ⁻⁶		-5.21×10 ⁻⁶		-5.7×10 ⁻⁶ (テクノーラ)	3×10 ⁻⁶	-		-				

出典：建設省土木研究所：PC橋の緊張材への新素材の利用に関する共同研究報告書（その2）1992.7 による引張特性については、定着具の改良、異形化等によって表値をさらに改善したものがある。

2. 4 繊維強化プラスチック被覆材

繊維強化プラスチック被覆材とは、高強度繊維ロービングやマット、クロスさらにはプリプレグシートを積層接着して既設構造物または新設構造物の被覆とするものであり、耐食性はもちろん、大幅な補強効果が期待できる。

F R P被覆材として、これまではガラス繊維によるロービングをエポキシ樹脂で接着したものが多く用いられていたが、近年では炭素繊維／エポキシによる被覆材も多く使われつつある。

カーボンクロスは、長手方向・横方向の繊維含有量を任意に選定することが可能であり、長手方向は無限長、横方向は1.5 m程度までの製造が可能である。土木・建設分野の炭素繊維としては、表-9に示すタイプのもものが多く用いられる。図-10は、コンクリート補強用CFRP被覆材の仕様の例である。表-10には強度特性等を示す。

表-9 炭素繊維の特性

タイプ	フィラメント数	引張強度 (kgf/mm ²)(MPa)		引張弾性率 (kgf/mm ²)(GPa)		伸び (%)	織 度 10×(g/100)	密度 g/cm ³
T300	1000	360	3530	24000	235	1.5	66	1.76
	3000	360	3530	23500	230	1.5	198	1.75
	6000	360	3530	23500	230	1.5	396	1.76
	12000	360	3530	23500	230	1.5	800	1.77
T300J	3000	430	4210	23500	230	1.8	198	1.78
	6000	430	4210	23500	230	1.8	396	1.78
	12000	430	4210	23500	230	1.8	800	1.78
T700S	12000	500	4900	23500	230	2.1	800	1.80

(出典：東レ㈱ パンフレット)

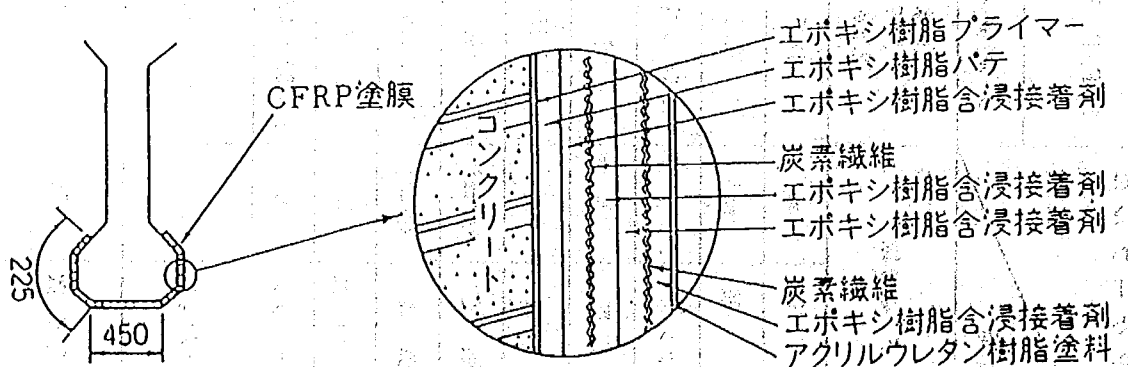


図-10 CFRP 2 積層ライニング塗装断面図

表-10 炭素繊維強化プラスチックの物性

炭素繊維0度積層材

積層板	F V (%)	～57	～58	～59	～61	～57
0°引張り	強度 (kg/mm ²)	216	226	226	224	221
	弾性率 (t/mm ²)	12.4	13.5	13.2	13.8	12.5
	最大歪 (%)	1.55	1.53	1.55	1.49	1.57
90°引張り	強度 (kg/mm ²)	5.1	5.3	5.8	5.5	5.8
	弾性率 (t/mm ²)	0.80	0.93	0.86	0.89	0.82
	最大歪 (%)	0.65	0.63	0.70	0.64	0.75
0°圧縮	強度 (kg/mm ²)	141	137	147	155	150
	弾性率 (t/mm ²)	11.9	12.7	15.4	13.1	11.7
0°曲げ	強度 (kg/mm ²)	161	172	149	166	146
	弾性率 (t/mm ²)	12.1	12.7	12.8	13.2	12.0
90°曲げ	強度 (kg/mm ²)	7.6		7.8	7.4	7.1
	弾性率 (t/mm ²)	0.82		0.86	0.91	0.80
層間せん断強度	(kg/mm ²)	9.9	10.1	10.1	10.5	9.4
±45°面内 せん断	強度 (kg/mm ²)			9.4	7.2	
	弾性率 (t/mm ²)			0.34	0.37	
1200衝撃強度	(kg・cm/cm ²)	92	102	94	90	89
<試験方法>						
引張り	:JIS K7073					
圧縮	:ASTM D695改					
曲げ	:JIS K7074					
層間せん断	:ASTM D2344					
面内せん断	:ASTM D3158					
1200衝撃強度	:KCC KM20					

ガラス繊維0度積層材

G	D	Eガラス	Tガラス
レジン		7714A	7714A
7714A FAW (g/m ²)		148	285
RC (%)		38.4	30.7
積層板	F V (%)	45～47	55～57
	CPT (mm)	0.130	0.206
0°引張り	強度 (kg/mm ²)	88.8	173
	弾性率 (t/mm ²)	3.72	5.05
	最大歪 (%)	2.42	-
	ポアソン比	0.33	0.29
0°圧縮	強度 (kg/mm ²)	102	108
	弾性率 (t/mm ²)	3.75	4.95
0°曲げ	強度 (kg/mm ²)	114	131
	弾性率 (t/mm ²)	3.52	4.81
90°曲げ	強度 (kg/mm ²)	6.0	9.3
	弾性率 (t/mm ²)	0.96	1.22
層間せん断強度 (kg/mm ²)		7.9	8.1
±45°面内 せん断	強度 (kg/mm ²)	-	8.80
	弾性率 (t/mm ²)	-	0.39
1200衝撃強度 (kg・cm/cm ²)		179	356
<試験方法>			
引張り		:JIS K7073	
圧縮		:KCC KM(ASTM 0695改)	
曲げ		:JIS K7074	
層間せん断		:ASTM D2344	
1200衝撃		:KCC KM20	

(出典：化成コンポジット㈱ 社内資料)

一方カーボンプリプレグシートは、炭素繊維に予めエポキシ樹脂を含浸させ、長手方向に引き揃えて繊維の直線性を保ちながらシート状にしたもので、シート幅は現在25～50cmのものが製造されている。通常プリプレグシートは一方向(Uni Directional)にのみ繊維を揃えたUDタイプであり、横方向補強は同じものを90°回転させて積層するしかないが、クロスの場合に比べ、均質な性能を期待することができる。

表-11は代表的なUDプリプレグシートの特性値である。

表-11 UDプリプレグシートの特性値

炭素繊維		
引張強度	35,000	kgf/cm ²
引張弾性率	2.4×10^6	kgf/cm ²
炭素繊維UDプリプレグ		
単位面積当たり 炭素繊維重量	300	g/m ²
シート厚み	Vf = 60%として 0.028	cm
シート幅	25, 33, 50	cm
樹脂含有率	10	%
引張強度	Vf = 60%として 21,000	kgf/cm ²
引張弾性率	Vf = 60%として 1.44×10^6	kgf/cm ²

(出典：化成コンポジット㈱ 社内資料)

2. 5 繊維強化構造材料の結合方法

F R P 構造材料の使用を考える場合、その結合方法の検討は非常に重要である。ここでは F R P 引抜き成形材の結合を中心に検討を行った。

(1) 結合の様式

引抜き成形材の結合様式を分類すると、図-11 の様に大別できる。図中の部材 A、B は、ともに引抜き成形材である場合と、B 部材が他の材料（例えば、鋼材など引抜き成形材以外のもの。F R P は引抜き成形材と同じとみなす）である場合とがある。図中の (b) の目板の材質も、引抜き成形材と同材質（引抜き成形材以外の F R P を含む）と他の材料の場合がある。引抜き成形材と結合する相手部材が金属製の場合は、目板も同じ金属製を用いるのが便利である。(c) の結合具の材質についても上記と同様、F R P と他材料とが考えられるが、その強度・加工性・生産性などの点で、多くの場合金属が用いられる。

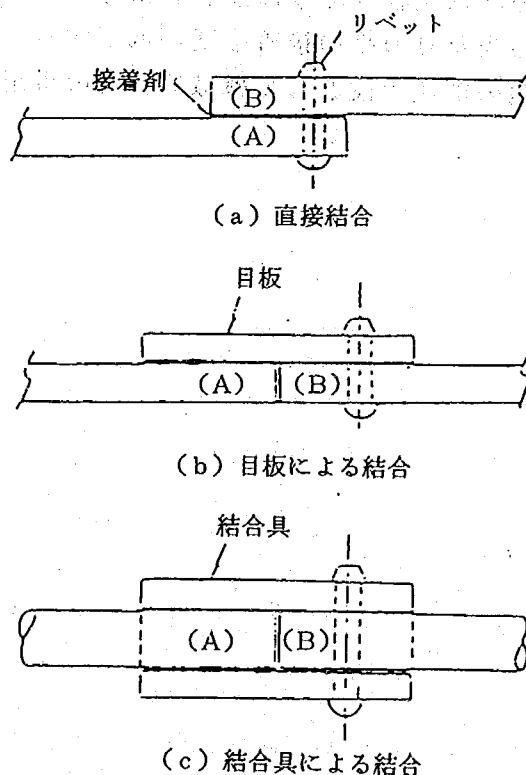


図-11 引抜き成形材の結合様式

(2) 結合の手段

結合の手段は接着と機械的結合とに大別される。

a. 接 着

接着剤は、適当なタック性を備えて作業性がよく、接着作業開始後接着効果の発現までの時間が短く、静的・動的接着強度・耐久性・耐環境性などの優れたものでなければならない。一般に耐環境性、特に耐薬品性は機械的結合に用いる金属材料より優れている。

引抜き成形材の接着には、これまで主として熱硬化性樹脂が使用されている。エポキシ樹脂、ポリエステル樹脂、変性アクリレート樹脂、ポリウレタンなどがある。この他、ホットメルト接着剤の利用の可能性もある。

図-12に、引抜き成形材に用いる接着剤の評価に適すると思われる各種試験方法の例を示す。これらの方法の中で、特に引張りせん断試験とクロスピール試験が代表的かつ有効である。表-12にそれらの測定結果の一例を示す。引抜き成形材の接着強度は、接着剤の特性以外に、被着面の下地処理・表面処理・プライマーの選択などにも左右されることに注意する必要がある。また、構造物の接着部の特性としては、単に静的な強度が大きいばかりでなく、使用温度の極限において十分な強度を保ち、予想される衝撃的荷重、繰返し荷重、熱応力などに十分に耐えうることが要求される。さらに、引抜き成形部材の強度に見合うように接着面積を大きくする場合には、接着面積の増大とともに単位面積当たりの平均接着強度が低下することにも留意しなければならない。このような問題の解決手段として機械的結合の併用も考えられる。

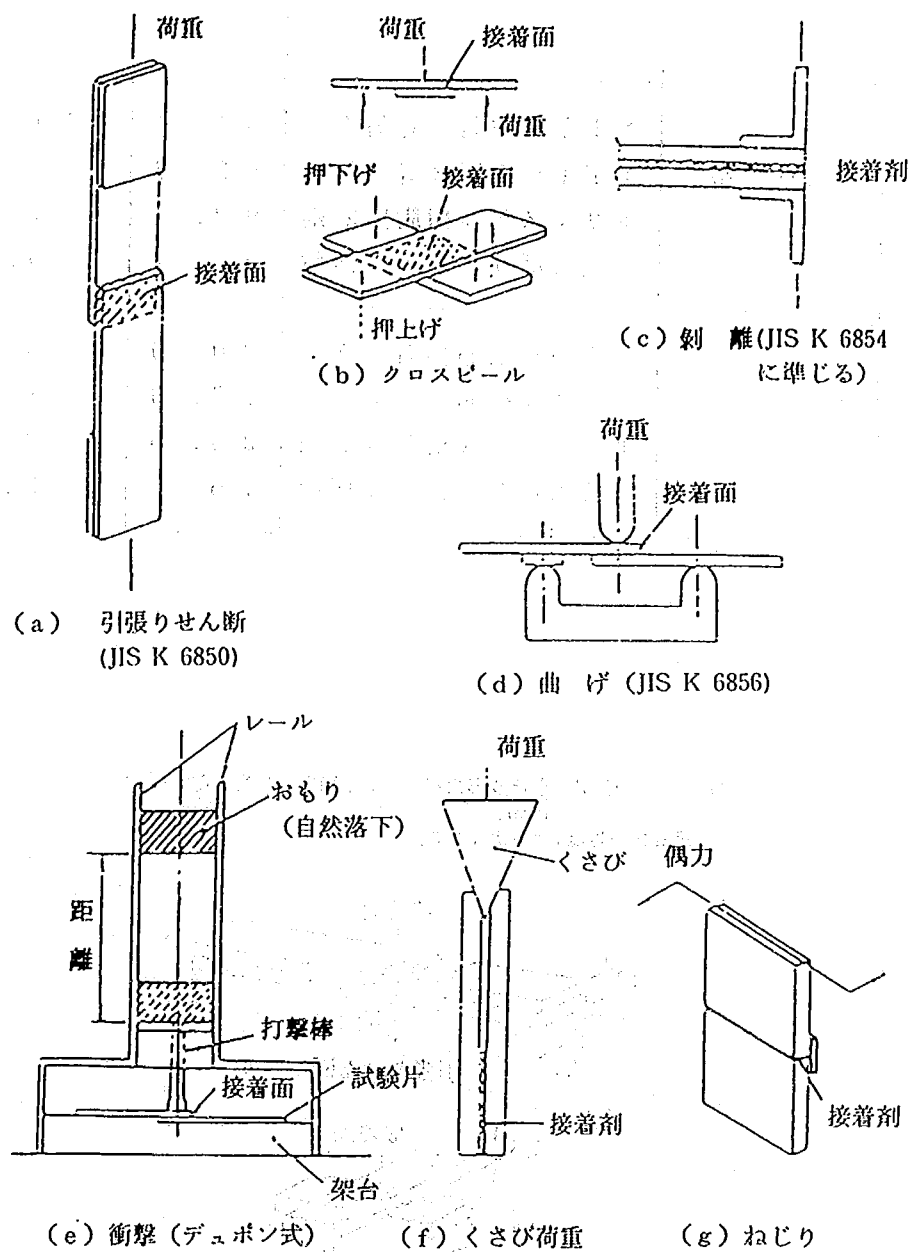


図-12 接着剤の各種試験方法

表-12 引抜き成形材品の接着強度の例

試験法	接 着 剤	7 日後の接着強度 (kg f/cm ²)	
		平 均 値	標 準 偏 差
引張りせん断	エポキシ樹脂接着剤 A	84.4	11.3
	エポキシ樹脂接着剤 B	42.3	6.5
	ポリエステル樹脂接着剤	92.4	7.9
	一般用ポリエステル樹脂	56.7	6.3
クロスピール	エポキシ樹脂接着剤 A	20.0	5.1
	エポキシ樹脂接着剤 B	13.6	1.4
	ポリエステル樹脂接着剤	24.5	2.8
	一般用ポリエステル樹脂	16.7	2.0

注) 試 験 片 : 引抜き成形パイプより切出した板 (幅25×厚さ6.5 mm).
接着面の処理 : サンドイニング.

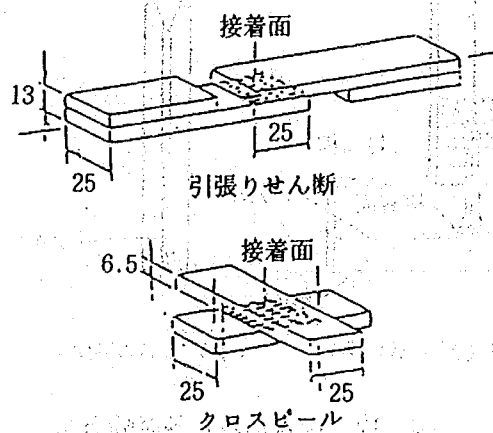


表-13 構造用接着剤

基 材		ナイロン- エポキシ	ビニル- フェノリック	変性ニトリル -エポキシ
接着剤商品名		FM-1000	FM-47	FM-123-2 PL-717B
硬 化 条 件	温度(°C)	168~175	165~175	105~120
	時間(分)	60	60	60~90
	圧力	0.35	14	0.17
	(kg/cm ²)			
最高使用温度		95°C	105°C	120°C
備 考		・はく離強さ大 ・MMM-A-132 タイプ1, クラス1	・せん断強さ中 ・MMM-A-132 タイプ1, クラス3	・低温硬化 ・MMM-A-132 タイプ1, クラス2

ニトリル- フェノリック	変性エポキシ- フェノリック	ポリイミド
PL-605-50	HT-424	FM-34B-18
177 3 7	165~195 60 0.28	280~290 90 0.28
177°C	260°C	370°C
・耐熱性中 ・ブレーキライニング用	・耐熱性大 ・MMM-A-132 タイプ3	・耐熱性大 ・MMM-A-132 タイプ4

表-14 構造用接着剤の種類の特性

表 各種接着剤の一般強度特性 (kg/cm²)⁽¹⁾

	S. C. A. (ハードロック)	エポキシ (室温硬化型)	シアノアクリ レート(エナメル)	水気性接着剤
引張せん断強度 (kg/cm ²)	230	197	160	232
圧 強 力 (kg/cm ²)	140	160	215	114
は くり 強 度 (kg/25mm)	12	0.5	0.5	4.5
耐 摩 強 度 (kgcm/cm ²)	20	2.8	2.0	2.2
熱 劣 化 (150°C× 1週間処理)	240	228	5.1 (1日)	114

表 米国連邦規格 MMM-A-132 (1965) の一部

(MIL-A-5090E, 1963の改正規格)

- Type I (-)55°C~(+82°C, 192時間)
 Class 1 高いTはくり強度
 Class 2 標準のTはくり強度
 Class 3 Tはくり強度を必要としないもの
 Type II (-)55°C~(+149°C, 192時間)
 Type III (-)55°C~(+149°C, 192時間)
 149°C~260°C, 10分
 Type IV (-)55°C~(+260°C, 192時間)

MMM-A-132, Type-Iの接着強度

せん断強度 (lb/in ² , psi), (kg/cm ²)			
	クラス-1	クラス-2	クラス-3
24±3°C	5,000 (360)	2,500 (180)	2,500 (180)
82±3°C, 10分	2,500 (180)	1,250 (90)	1,250 (90)
-55±3°C, 10分	5,000 (360)	2,500 (180)	2,500 (180)
Tはくり強度 (lb/in), (kg/25mm)			
24±3°C	50 (23)	15 (7)	—

表 市販テープ状、フィルム状航空機用接着剤の接
着強度(室温) (Bolger)⁽²⁾

接 着 剤	せん断強度 psi (kg/cm ²)	Tはくり強度 lb/in (kg/25mm)
ポリビニルホルマール/フェ ノリック	3,000~4,500 (210~315)	15~35 (7~16)
ニトリルゴム/フェノリック	3,000~4,500 (210~315)	15~60 (7~27)
ナイロン/エポキシ	5,500~7,200 (385~505)	80~130 (36~59)
ニトリルゴム/エポキシ	3,700~6,000 (260~420)	22~90 (10~41)
エポキシ/フェノリック	2,000~3,200 (140~225)	6~12 (3~5)

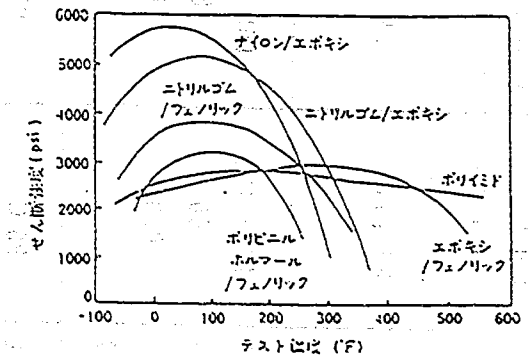


図 テープ状、フィルム状、溶液状航空機用接着剤の
温度特性(せん断強度) (Bolger)⁽²⁾

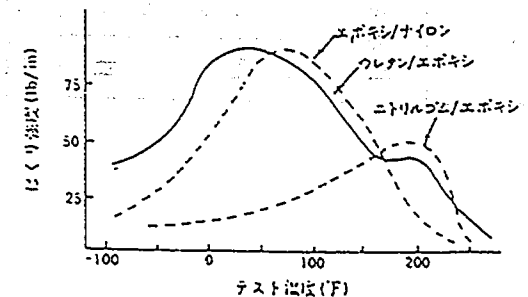


図: 航空機用接着剤の温度特性 (はくり強度)⁽²⁾

b. 機械的結合

機械的結合には、ボルトナット・リベット（ブラインドリベットを含む）・タッピングネジ（セルフタッピングスクリュー）・ピンなどを用いる。機械的結合は作業性が優れ、また従来金属部品の組立て作業との異和感が少ないという利点がある。

リベットを用いて機械的結合した引抜き成形部材を引張った場合の結合部の破壊の様式を図-13に模式的に示す。破壊の様式は、引抜き成形部材の寸法・厚さ・結合リベット（ボルト・ピンでもほぼ同様）の寸法、リベット穴の位置、部材及びリベットの強度などの設計変数の組合せによって変わる。

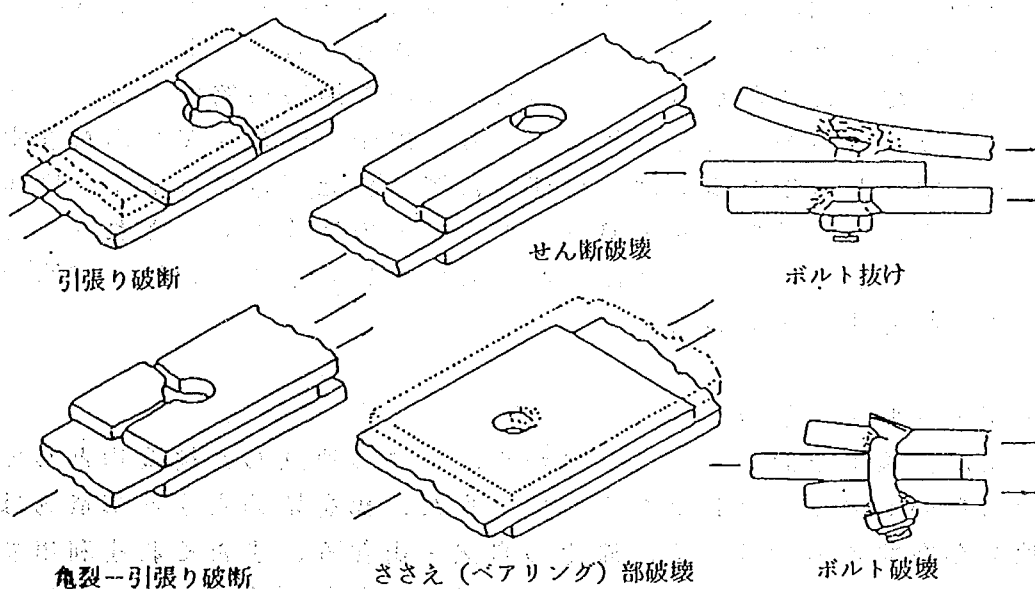


図-13 ボルト結合部に引張り力を加えた時の破壊の様式

3 繊維強化構造材料による歩道橋の形式選定

本章では、繊維強化構造材料による歩道橋に適した、形式の検討を行った。

3.1 歩道橋の機能と構造形式

3.1.1 歩道橋の機能

歩道橋に必要とされる機能は以下のとおりである。

(1) 導線の確保

「何かを跨いで反対側へ渡る」ことが、歩道橋に限らずすべての橋梁の第一の目的である。道路を渡るもの、鉄道を渡るもの、河川や海を渡るものなどがあるが、いずれの場合においても、単にそれらを渡るだけでなく、「スムーズに」かつ「安全に」人々を渡すことが要求される。

(2) 快適な空間

幅員が狭く、殺風景な橋よりも、ある程度広さがあって、形も洗練された橋の方が人々に渡ろうという気持ちを起こさせるものである。また、駅前や公園、住宅地などにかかる橋、商業ビルの間の連絡通路などは、人々が待ち合わせたり、散歩をしたり、語らったり、周囲の景色を楽しんだりする空間である。すなわち歩道橋には、物理的に渡る機能だけではなく、快適に渡る機能、さらには生活の空間・憩う空間としての機能も要求されることが多い。構造上の要求を満たすと同時に、利用者の使い勝手や快適性、空間デザインなどにも配慮すべきである。

(3) デザインおよび景観

橋梁は、橋上空間もさることながら、一つの独立した構造物としてのデザインも良いものでなければならない。また、橋を始めとする構造物は、それ単独で存在するのではなく、周囲の自然・街並み、またそれを利用する人や車などの存在と一緒に一つ一つの風景をかたちづくる。周辺環境をも含めた景観について配慮し、その場所に似合ったデザインをする必要がある。

3.1.2 歩道橋の特徴

道路橋や鉄道橋などと比較した場合、歩道橋にはそれらにはない特徴がある。以下にそれらをいくつか挙げる。

(1) 軽荷重・小規模である

渡るものが、人や自転車などに限定されるため、道路橋や鉄道橋に比べて荷重が小さく、小規模である。

(2) 平面・縦断線形が多様である

歩行者の導線は自動車や列車と違って任意であるため、曲線線形、折り返し、階段、スロープなど、平面・縦断とも多様な線形が考えられる。また、バルコニーなどを設置することによって幅員を変化させる場合もある。

(3) 多様な構造形式が考えられる

上の2つの結果として、構造形式の選択肢が豊富である。

(4) 多様な材料が用いられる

上の項目と関連して、鋼、コンクリート、石材、木材およびそれらの複合など、様々な材料が用いられている。

(5) 造形の自由度が高い

以上のことより、造形の自由度は道路橋や鉄道橋に比べて非常に高い。

(6) ヒューマンスケールの橋である

歩道橋は、人々がじかに手で触れ、またすぐ近くで見られる橋であることに配慮せねばならない。

表-15 歩道橋の一般的な構造形式と実績支間長

実績支間長(m)		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	200	300
構造形式													
橋	単純板桁橋	—————											
	連続板桁橋	—————											
	単純箱桁橋	—————											
	連続箱桁橋	—————											
	コンクリート橋	—————											
アーチ橋		—————											
ラーメン橋		—————											
斜張橋		—————											
吊橋		—————											

————— : 鋼橋 ————— : コンクリート橋

3.2 桁橋・ラーメン橋と繊維強化構造材料

いくつかある歩道橋の構造形式のうち代表的なものを取り上げ、それぞれの特徴、およびそれをFRPでつくる場合にFRPという材料の特性から留意すべき点について述べたい。

3.2.1 桁橋

桁橋は、橋梁形式の中でもっとも基本的なものであり、多く用いられる主構造形式である。桁橋は主桁支持条件によって単純桁橋と連続桁橋とに分けられる。またその断面形状には、板桁、箱桁、T桁、中空床版などがある(図-15)。トラスで桁を組む場合もある。

主桁のねじり剛性が小さい板桁橋は、直線橋に適する。一方、曲げ剛性・ねじり剛性が大きい箱桁橋は、長径間の橋や曲線橋に適した形式である。

FRPの特長を生かせる桁橋の例として、既設橋梁の横に併設する側道橋がある。FRPはきわめて軽量であるため、鋼やコンクリートによる側道橋では既設橋の構造がその重量を支えきれない場合にもFRPならば側道橋をかけることができる。

FRPで桁橋をつくる場合、FRPはヤング率が小さいので、主桁の剛性を上げるためには断面2次モーメントを大きくする必要がある。そのためには箱桁や中空断面、トラス構造あるいはトラフ構造などが有利となるが、例えば箱桁などを矩形断面の棒部材を積んだものを接合することによって構成する場合、断面が一つの箱として有効に働くためには、隣り合う棒部材同士が互いに滑らないことが必要である(図-16)。すなわち、並べた棒同士をいかに接合するかが重要な問題となる。棒部材同士の接合は、床版の橋軸直角方向の曲げに対しても重要である。また、支点部での応力伝達や断面形状の保持のために、横桁あるいはダイヤフラムは十分な剛性を持ち、かつウェブやフランジと確実に接合されなければならない。

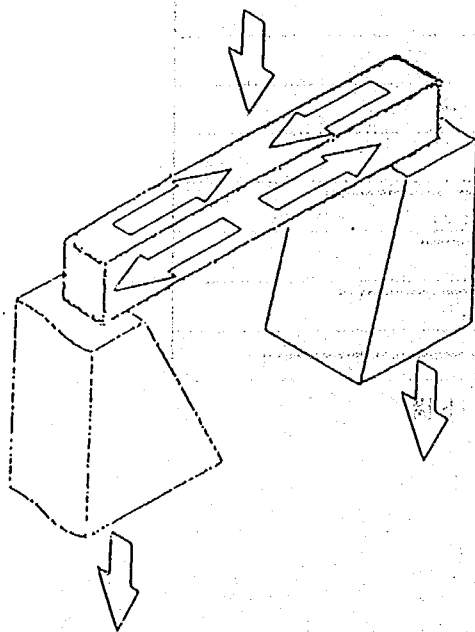


図-14 桁橋の力の流れ

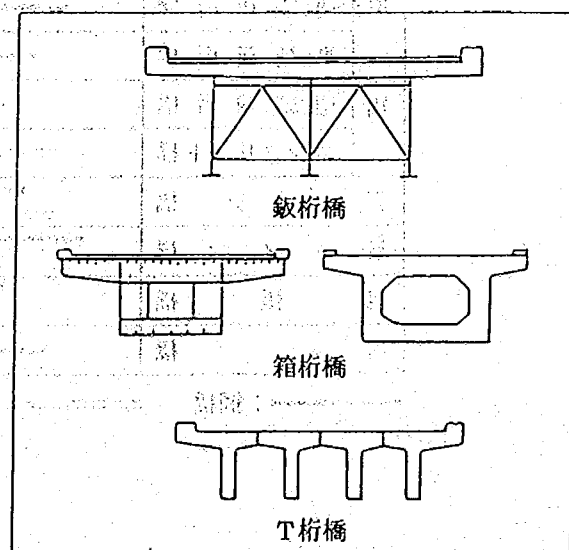


図-15 桁の断面形状の例

3.2.2 ラーメン橋

ラーメン橋は、桁と支柱が剛結された構造であり、接合部には軸力・曲げモーメント・せん断力が同時に作用する。

F R Pでラーメン橋をつくる場合、鋼橋同様に桁と支柱との接合部分を一体成形し、それを桁部材・支柱部材につなぐことになる。その際、接合部分が十分に剛性を持つように、加工（例えばダイヤフラムや横桁の処理）および桁部材・支柱部材との接合に注意せねばならない。また、桁部材には桁橋同様の注意が必要となろう。

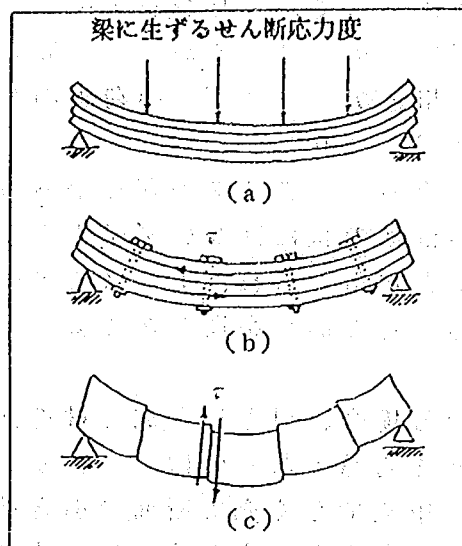


図-16 梁に生ずるせん断力

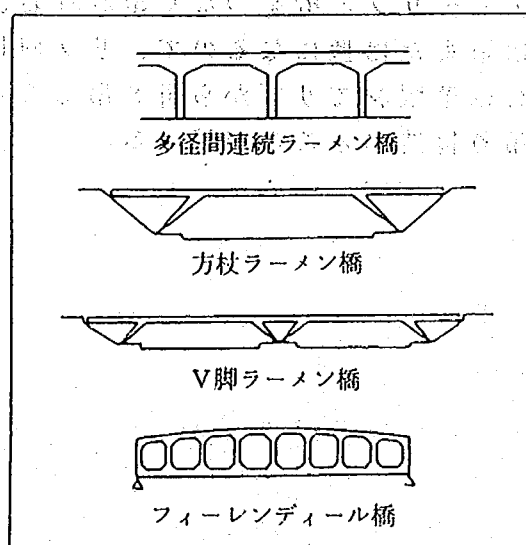


図-17 ラーメン橋の代表形式

3.3 アーチ橋と繊維強化構造材料

アーチは、石材・コンクリートなど、圧縮に強い材料に適した構造であり、ヨーロッパでは古くローマ帝国時代から組積造のアーチ橋がつくられていた。鉛直な荷重をアーチリブの軸圧縮力に変換して支持する構造であり、活荷重や地震の慣性力の影響が小さい場合には引張を全く生じさせないようにすることができるためである（図-18）。

アーチ橋の構造的な特徴には、先ほど述べたリブの軸圧縮によって荷重を支えることに加えて、アーチリブ端部での水平反力の存在がある。これを地盤からとるか、構造内部で処理するかによって、他碇式と自碇式（タイドアーチ）とに分けられる。また、ヒンジの数によって、3ヒンジアーチ（静定）、2ヒンジアーチ（1次不静定）、1ヒンジアーチ（2次不静定）、固定アーチ（3次不静定）がある（図-19）。また、桁とアートリブとの荷重の分担の度合によって、ランガー橋とローゼ橋がある（図-20）。

形態の上でも、アーチ橋はそのアーチリブの存在がもっとも大きな特徴である。この存在によって、アーチ橋は他の橋にはないダイナミックな印象を与える。リブは箱断面や円筒断面、版などが用いられ、トラスでアーチを組む場合もある。また、桁がアーチリブに対してどの高さを通るかによって、上路式・中路式・下路式に分かれる。

アーチリブにFRPを用いる場合、引き抜き成形材を並べてリブを構成することになるであろうが、このとき問題となるのはアーチリブの座屈である（図-21）。これを防ぐためには、中空でなく充実断面の引き抜き材を用いるのも一つではあるが、重量が増えるためあまり好ましくない。中空断面の引き抜き材に発泡性の樹脂（ポリウレタン等）を充填するのがよいと思われる（図-22）。こうすれば、軽量であるというFRPの利点をそれほど損なわずに、剛性を上げることが出来る。これは他の橋梁形式で柱部材をFRPでつくる場合にもあてはまる。

もう一つの留意点は、アーチリブと桁をつなぐ鉛直材およびその接合である。上路橋の場合には鉛直材は桁または壁になるので、リブ同様座屈に対する注意が必要である。下路橋の場合は緊張材でリブから桁を吊ることになるが、このときの留意点については後に吊り構造のところで述べる。

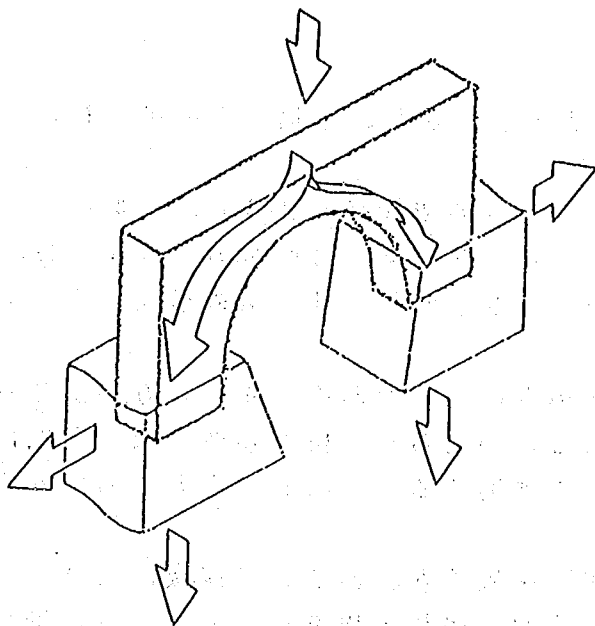


図-18 アーチ橋の力の流れ

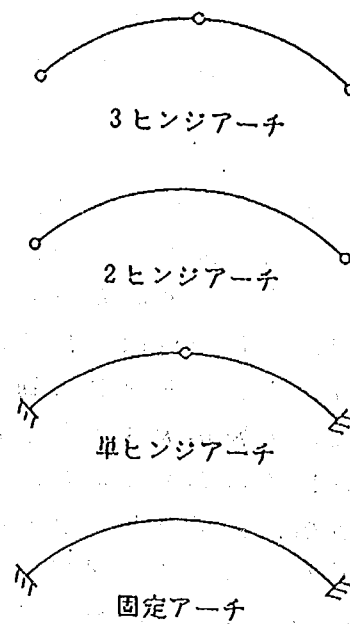


図-19 アーチとヒンジ

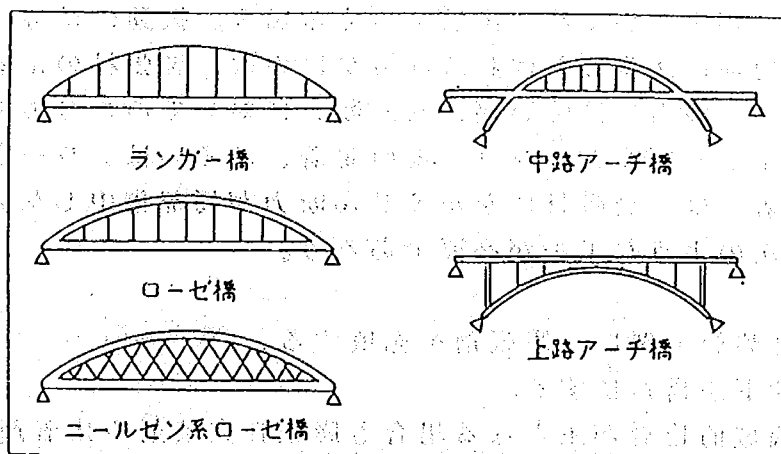


図-20 アーチ橋の代表形式

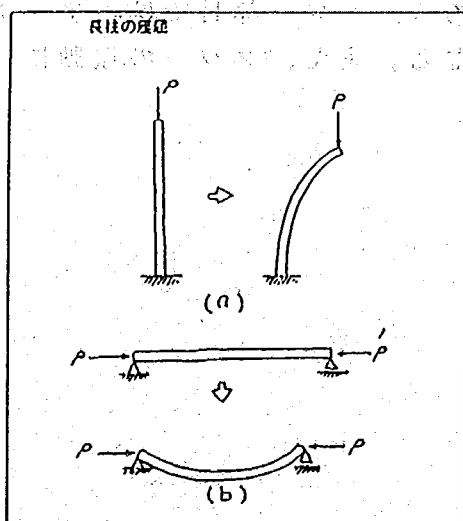


図-21 座屈

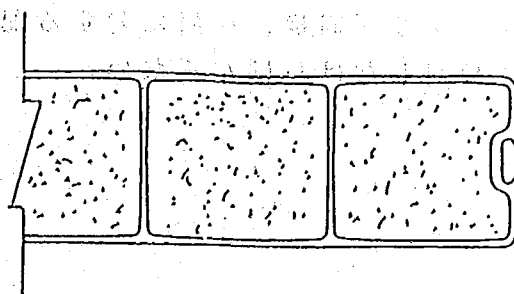


図-22 中空引抜き材に膨張材を充填

3.4 吊橋・吊床版橋と繊維強化構造材料

F R Pは繊維方向の引っ張り強度が高いため、斜張橋、吊橋などの吊り材に適している。

吊橋は支間に張ったケーブルが荷重を支えるもので（図-23）、一般にはハンガーによって桁がケーブルにつながれている。ケーブルは引張力のみを受け、全断面が有効に働く。その剛性はないものとみなされる。他の構造形式に比べてスパンが長くできるのが特長である。

撓度理論に基づけば、吊橋は桁の剛性が小さい（＝たわみやすい）方がより有利であり、まさにF R Pは適した材料であるといえるが、桁の剛性が低いと風による振動の影響が大きくなるため、トラスで補剛するか、断面を空力学的に安定した形状にする必要がある。

吊床版橋は、吊りケーブルの上に直接床版を置くか、あるいは床版に吊りケーブルを通したもので、渓谷などにかかる原始的な吊橋の構造をそのまま受け継いだものといえる。この形式は非常に振動しやすいので、大きな荷重がかかる鉄道橋や道路橋には不向きであるといえよう。

吊床版橋の上に桁を乗せたような上路吊橋という形式もあるが、やや特殊な例である。

F R Pはヤング率が小さいため、吊橋をつくる場合、振動には特に注意せねばならない。また、同様に注意しなければならないのは、緊張材の定着方法である。F R P緊張材は、軸引張力には強いが、せん断力に対してあまり強くない。したがって、吊橋での主ケーブルとハンガーとの定着、あるいはタワーと主ケーブル、桁とハンガーの定着では、緊張材にかかるせん断力が局部集中しないように定着する必要がある。次のような工夫が必要であろう。

- (1)主ケーブルを外装管で覆い、膨張剤を充填する。
- (2)タワー頂部はサドル構造にする。
- (3)端部定着は、機械的接合が主となる場合も膨張性充填剤や接着剤を併用する。

また、端部定着にソケット状のF R P部品を用いる場合、これも応力集中が起これらぬよう形状や定着方法を工夫する必要がある。タワー部材では、アーチ橋のアーチリブ同様、座屈に対する配慮が必要となる。また、タワーの振動についても検討しなければならない。

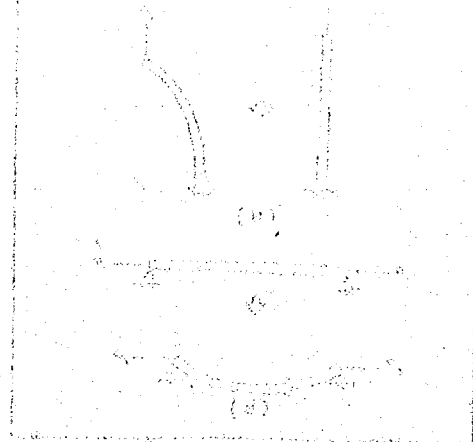
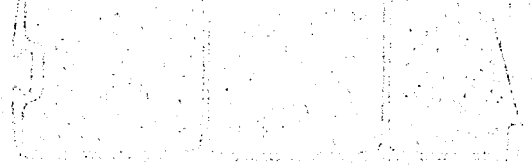
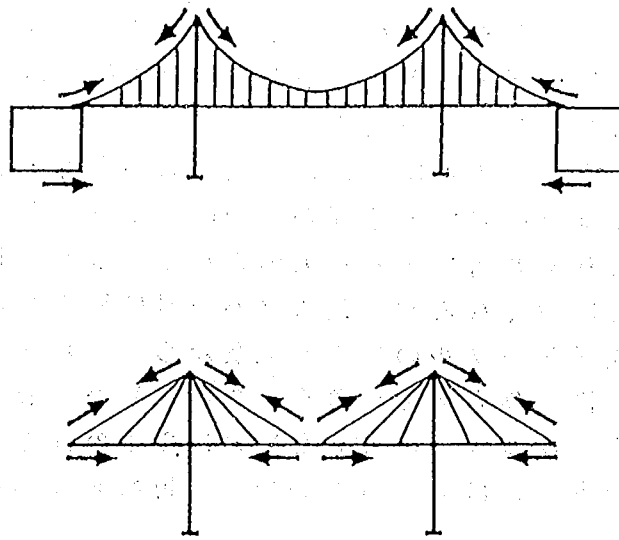


図13-10



図一23 吊橋と斜張橋の力の流れ

3.5 斜張橋と繊維強化構造材料

斜張橋は、タワーから斜めに張ったステイケーブルで桁を吊る構造であり、構造的には弾性床上の梁と考えることができる。吊橋ほどではないが長スパンが可能な構造形式である。ケーブルの張り方やタワー形状などの種類が豊富であり、形態の自由度が高い構造であるといえる。

斜張橋が吊橋と大きく異なる点は、桁に軸圧縮力が作用する点である（図－23）。このため、桁の座屈に対する強度が一つのポイントとなる。したがって桁の剛性は吊橋のそれよりも非常に大きなものとなる。結果として、吊橋と比べて風による振動に対しては強くなるが、最大スパン長は短くなる。

また、吊橋は他碇式（ケーブルの反力を地盤からとる）が一般的であるのに対し、斜張橋は自碇式（構造物自体でつり合っている）が一般的である。

F R P 斜張橋の場合、注意せねばならないのは以下の様な項目である。

特に桁の座屈は他の形式にはあまりないので、桁断面の処理には注意を要する。

(1) 緊張材の定着

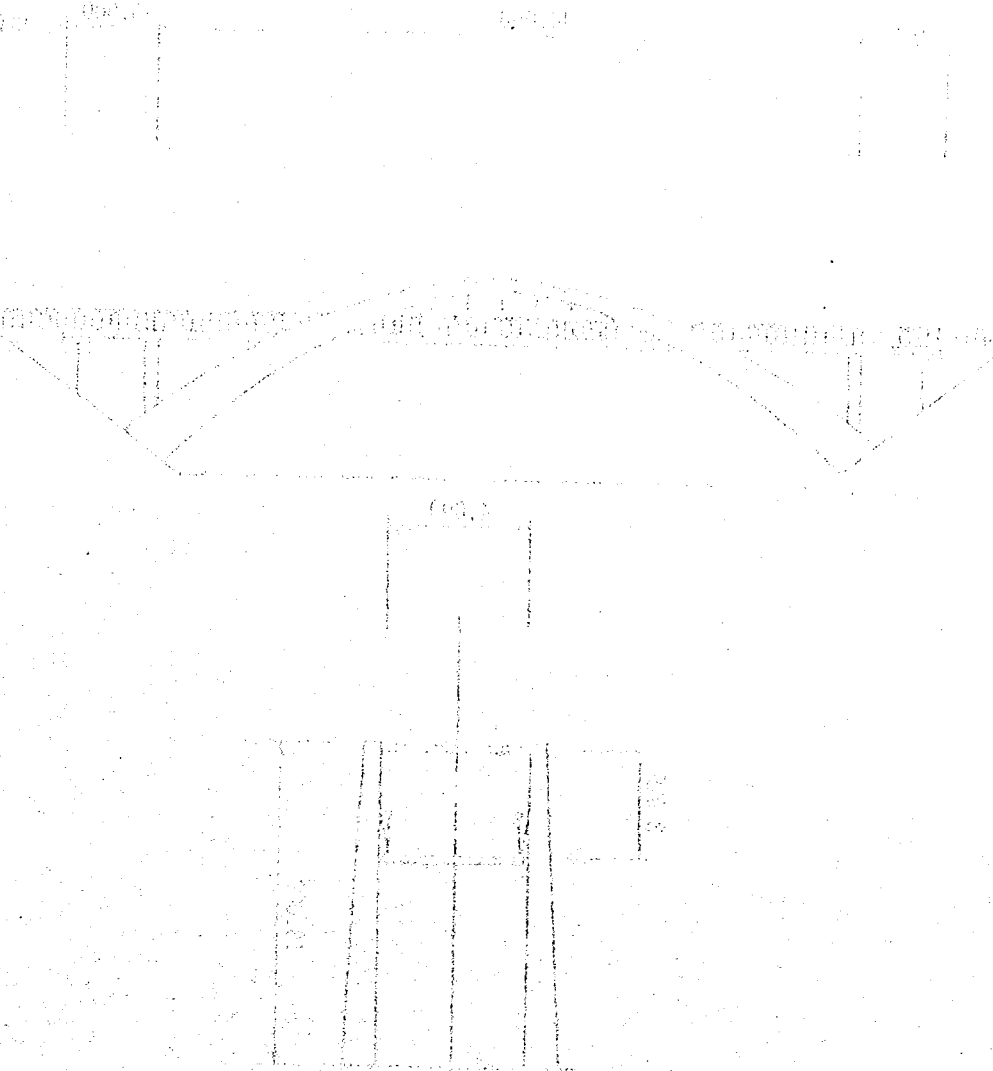
(2) タワーの座屈および振動

(3) 桁の座屈

3.6 その他の橋梁形式

アーチと吊橋とを組み合わせたサスペン・アーチと呼ばれるものなど、他にもいくつかの構造があり、FRPならではの形式の可能性もある。

例えば、FRP緊張材によるザイルネット状のものの上にクロス材を敷いた膜構造の歩道橋は、現時点ではFRPクロスはせん断に弱く、ヤング率も小さいため実現性は非常に低いが、これらの点が改善されれば非常にユニークなものができるであろう。



4. 繊維強化構造材料による歩道橋のケーススタディ

4.1 設計計画

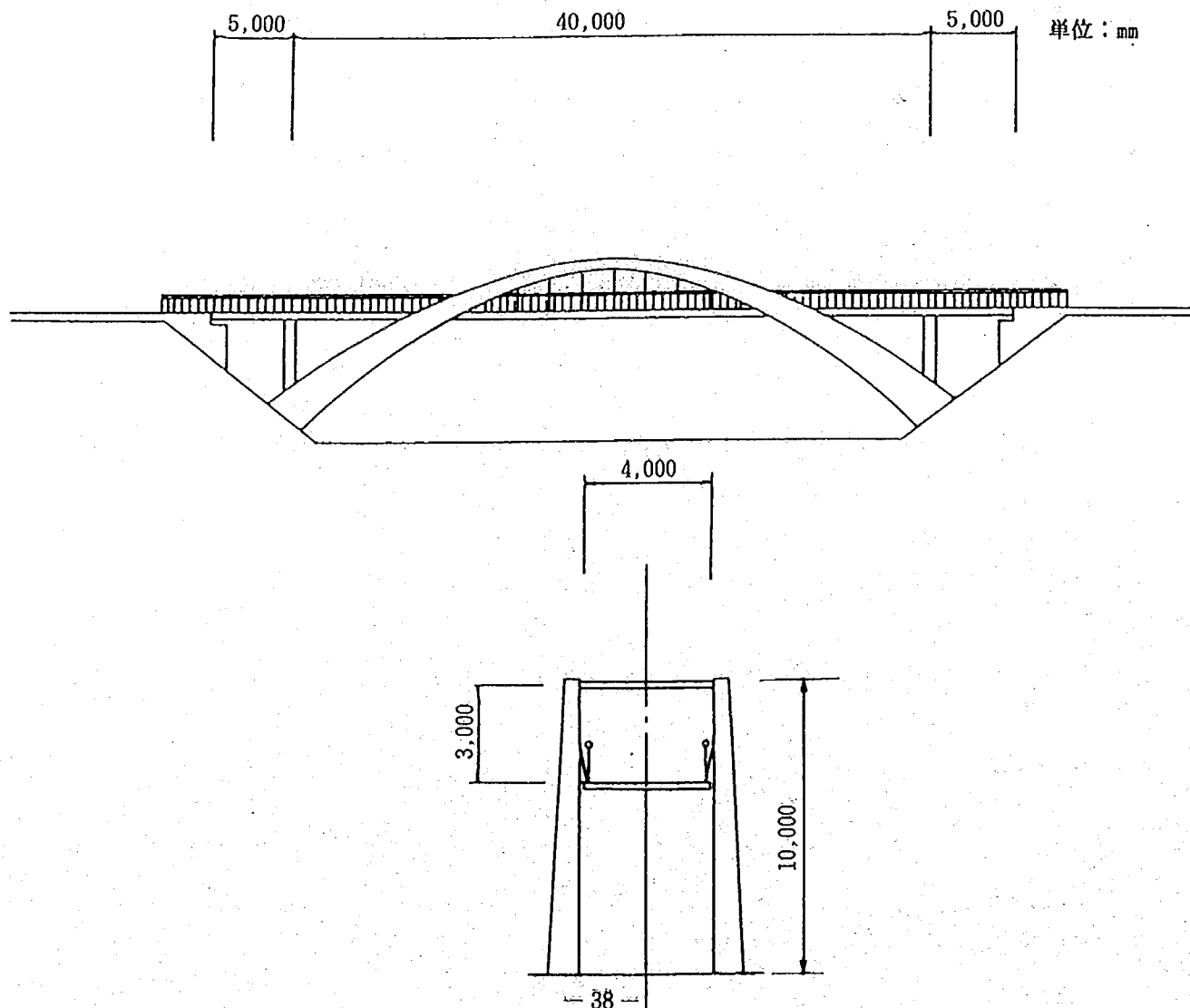
本章ではケーススタディとして幅員4m程度、最大支間40m、橋長約70mの架空の公園内河川上歩道橋を取り上げ、橋梁主桁・橋脚・タワーそれに吊りケーブルすべてをFRP材としたFRP歩道橋の計画を試みる。

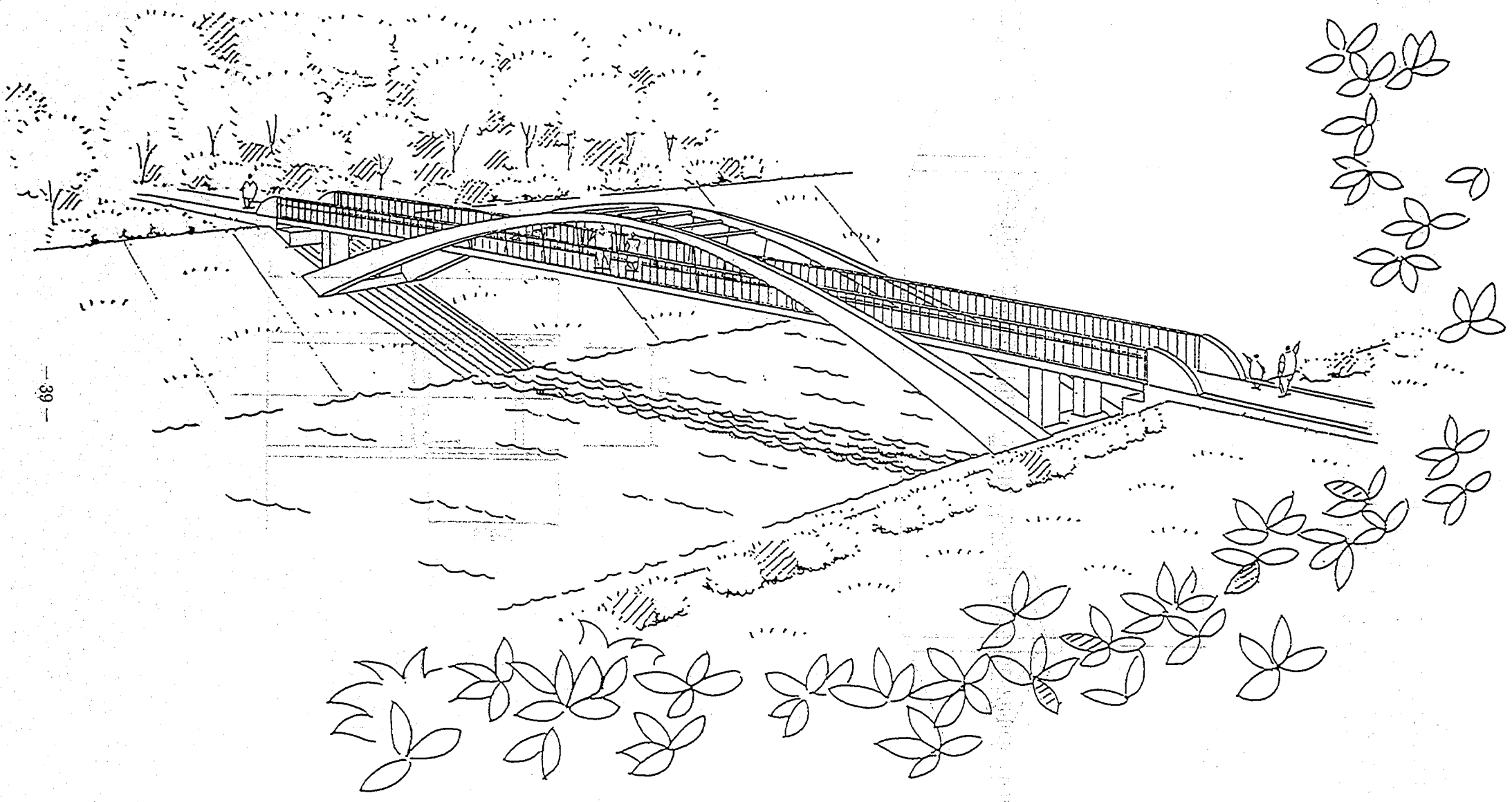
公園内河川を跨ぐ歩道橋としての機能および公園利用者の親しみやすさという観点から、以下の5形式について、その構造的機能・使用機能・美観の3点から、それぞれの断面構成および形状を検討した。

1. 中路アーチ橋
2. 斜張橋
3. トラフ斜張橋
4. 上路吊橋
5. 吊橋

(1) 中路アーチ橋

アーチ橋において、アーチは最も重要な構造部材であり、ここでは橋の両脇にやや低めのFRP中路アーチを配置した。アーチは主として圧縮力を受けるが、ガラスFRPの圧縮強度は十分コンクリートに対応できるため、製作は可能と考えられる。ただし、現在のところ安全率に関してFRP部材はコンクリートより不利であり、それだけ使用量が増すため、経済的に不利となる。吊り材および主桁についてはFRP部材で十分である。将来FRP部材の圧縮強度がさらに高まり、経時変化を見込んだ設計用安全率が2.0程度になれば経済的にも鋼やコンクリートに十分対抗できると思われる。

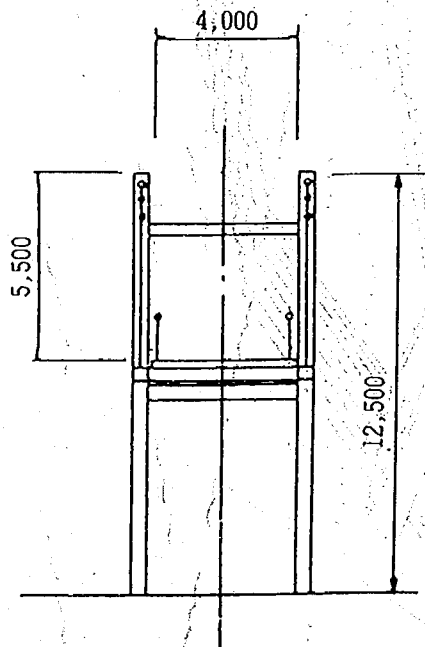
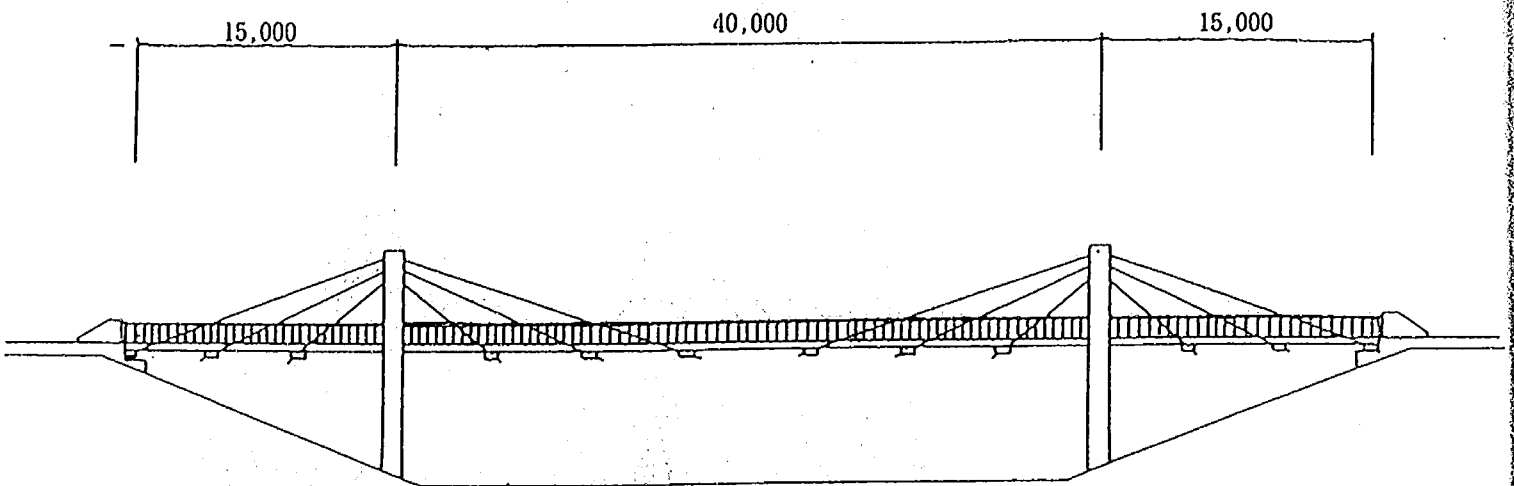


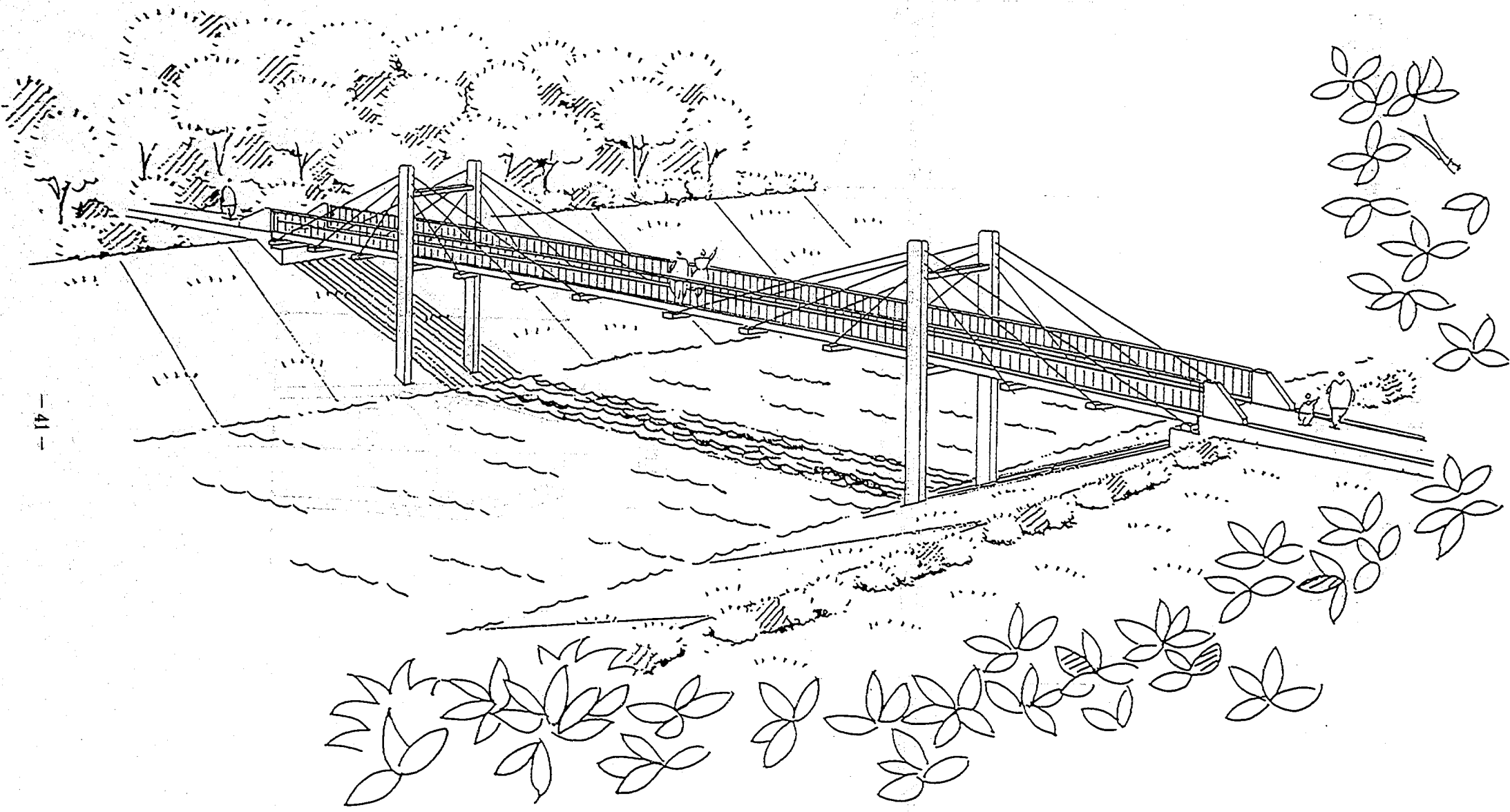


(2) 斜張橋

斜張橋は、斜張ケーブルの使用によって死荷重作用時のたわみおよび曲げモーメントをスパン中央部で最小に保つことが可能であり、また主桁の支持間隔も短くなるので、FRP橋として最適の形式であると思われる。ただし同じ形式は鋼でもコンクリートでも可能であり、FRP独特の形式とは言えない。

単位：mm

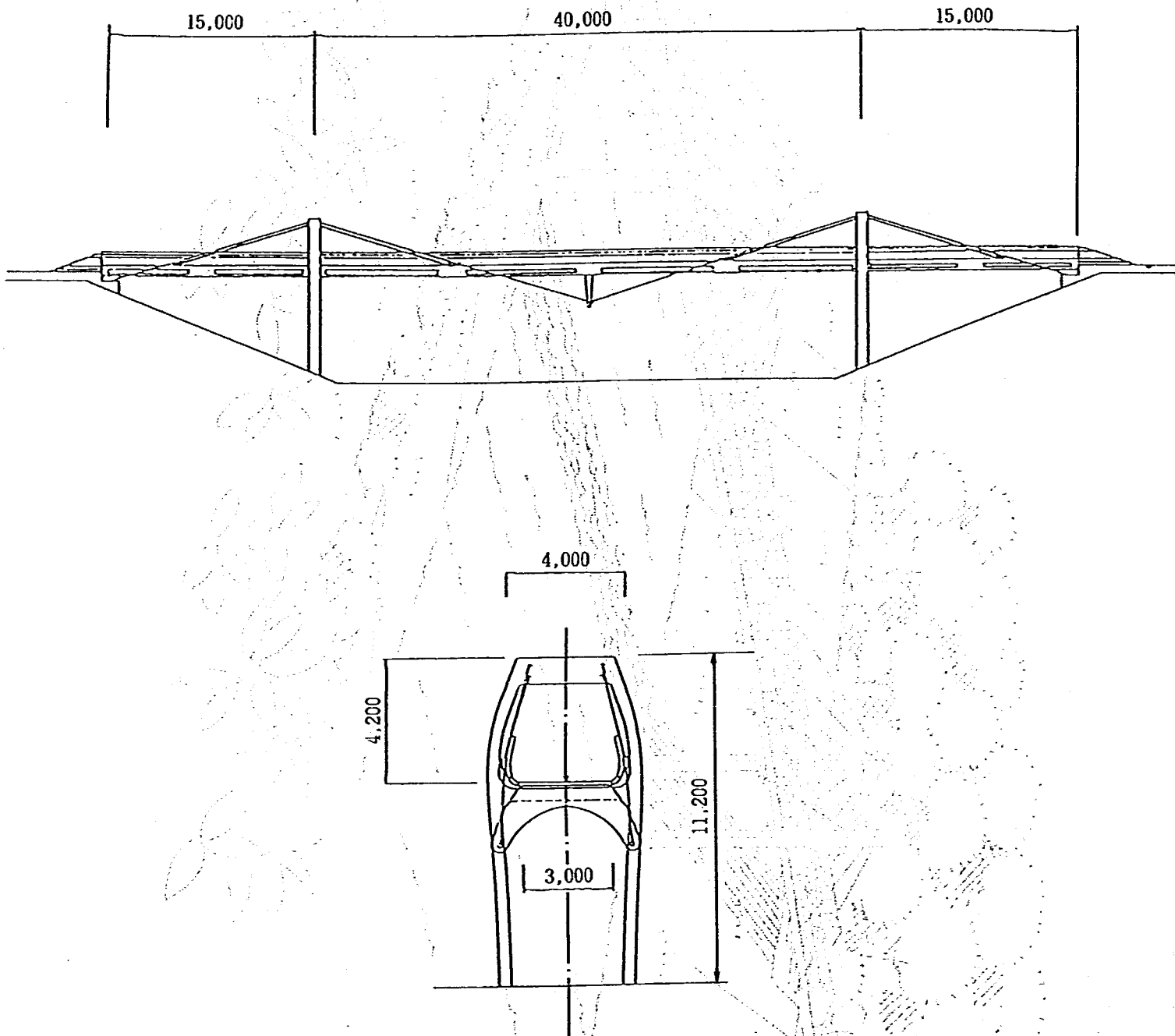


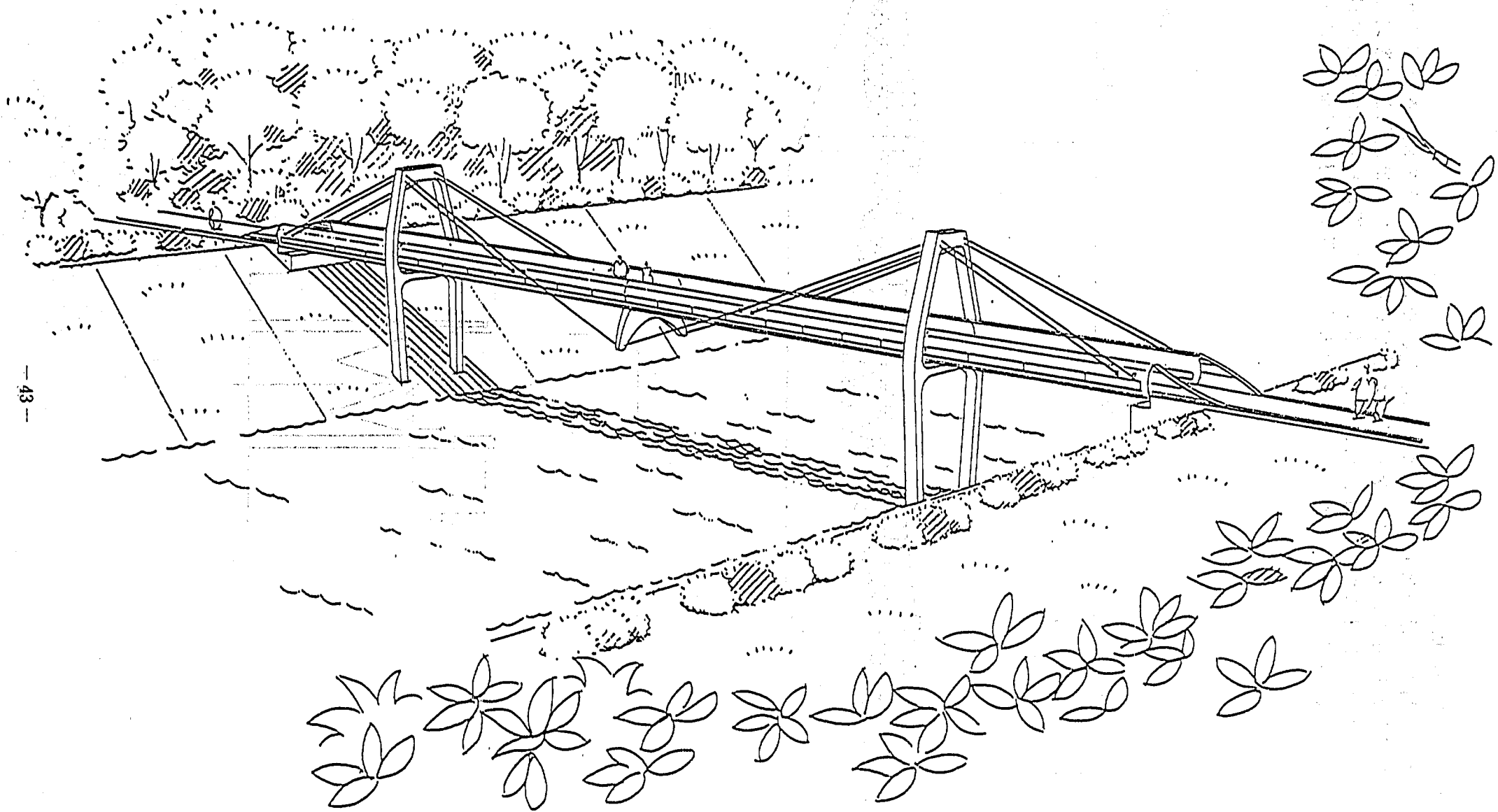


(3) トラフ斜張橋

この形式は、斜張橋に適したFRP部材の長所を受け継ぎ、さらにプラスチックとしての独自性を主桁に生かした構造である。トラフ断面の製作および設計はやや複雑となるが、ガラスFRPの引抜き成形法および電算機を用いた断面設計で十分対応できる。本実験ではトラフの剛性を生かし、カーボンFRPによる斜張ケーブルの数を減らしているのが特色である。

単位：mm

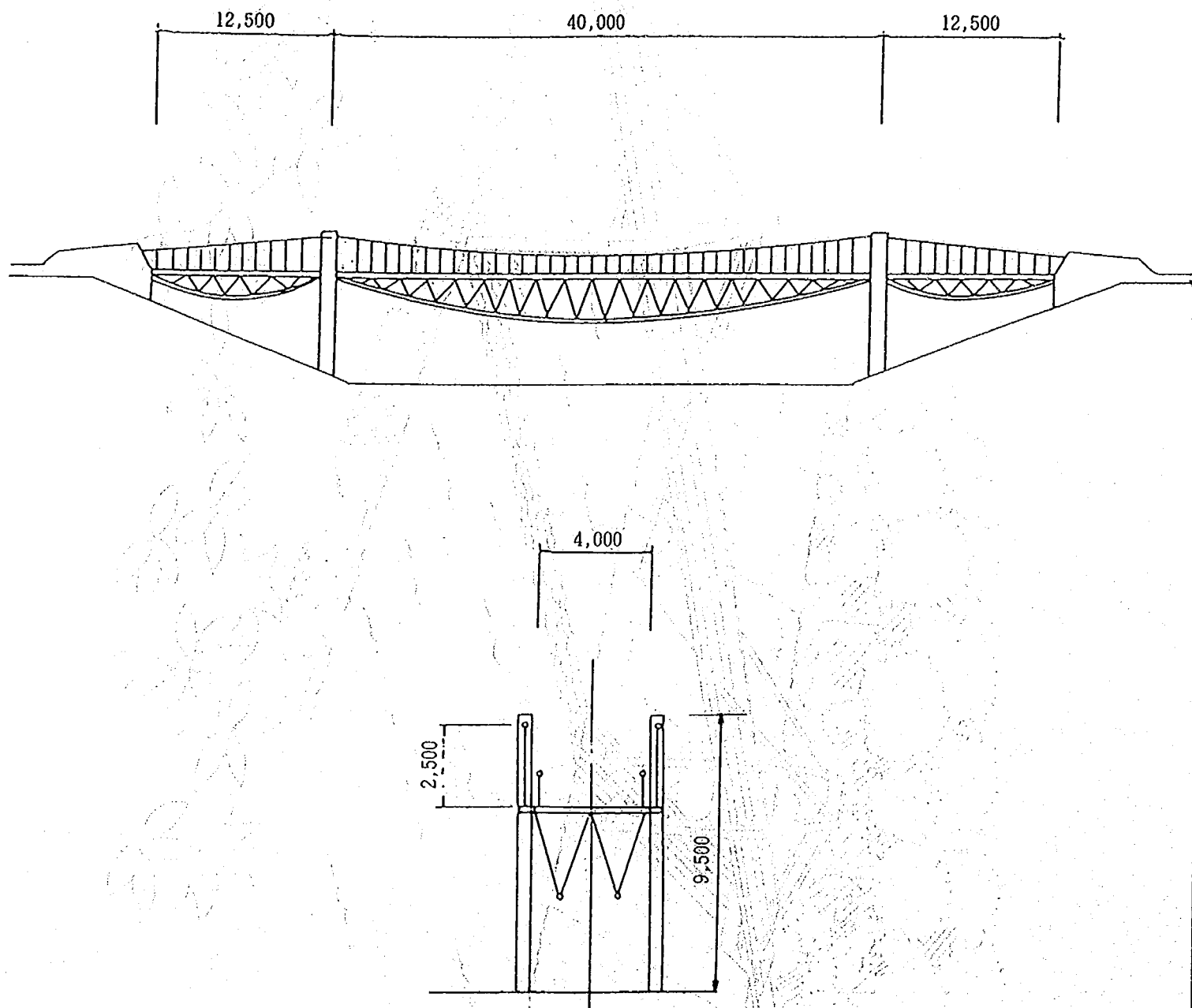


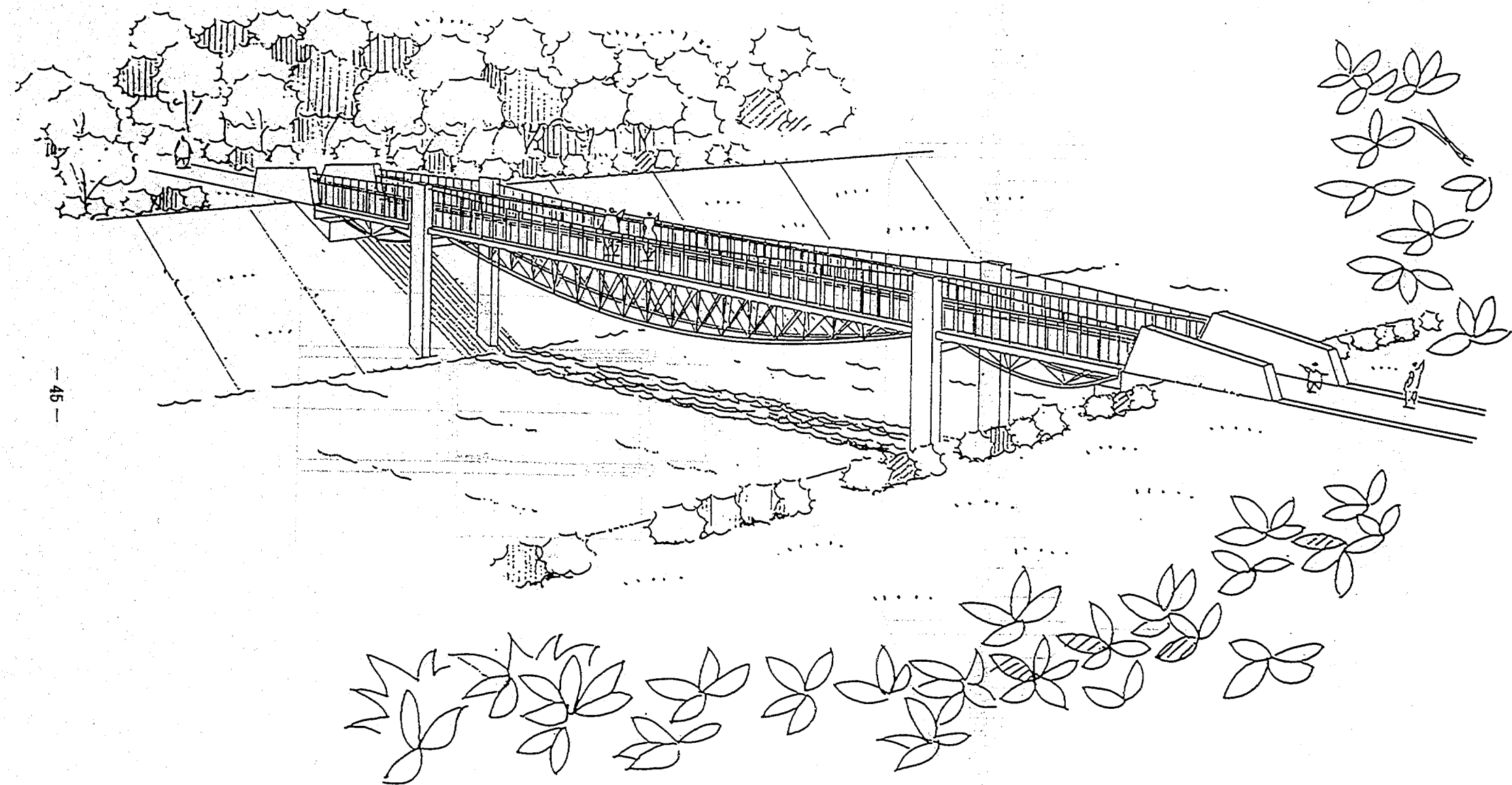


(4) 上路吊橋

ネット構造に近い吊りケーブルを配置し、その上にトラス部材を立てて床版を支持した構造であり、吊りケーブルおよび床版については理想的な形式であるが、トラス部材については、現在のところFRPの圧縮性状についての研究が乏しく、不安が残る。しかし、この方面の研究が進めば将来有望な形式である。

単位：mm

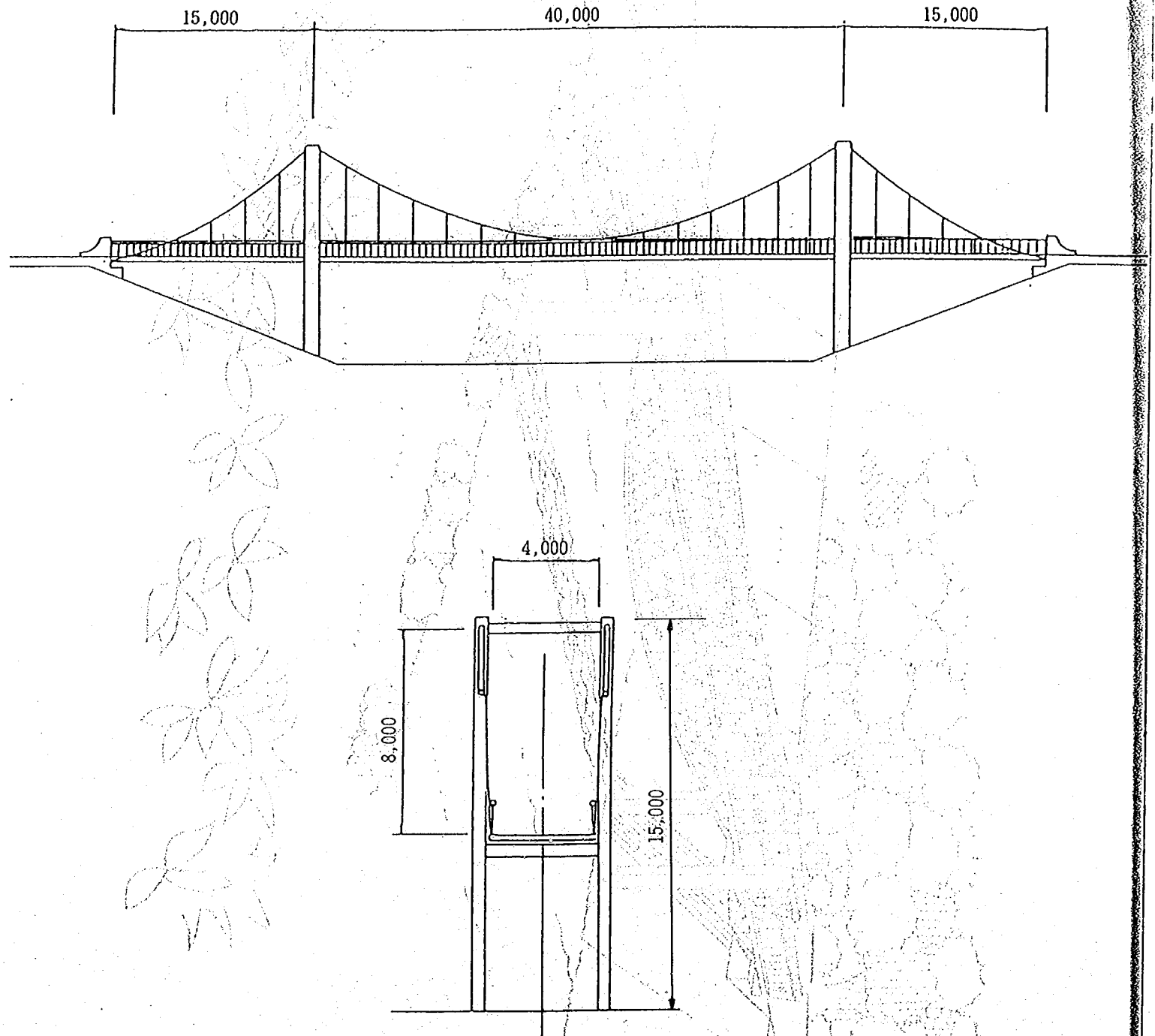


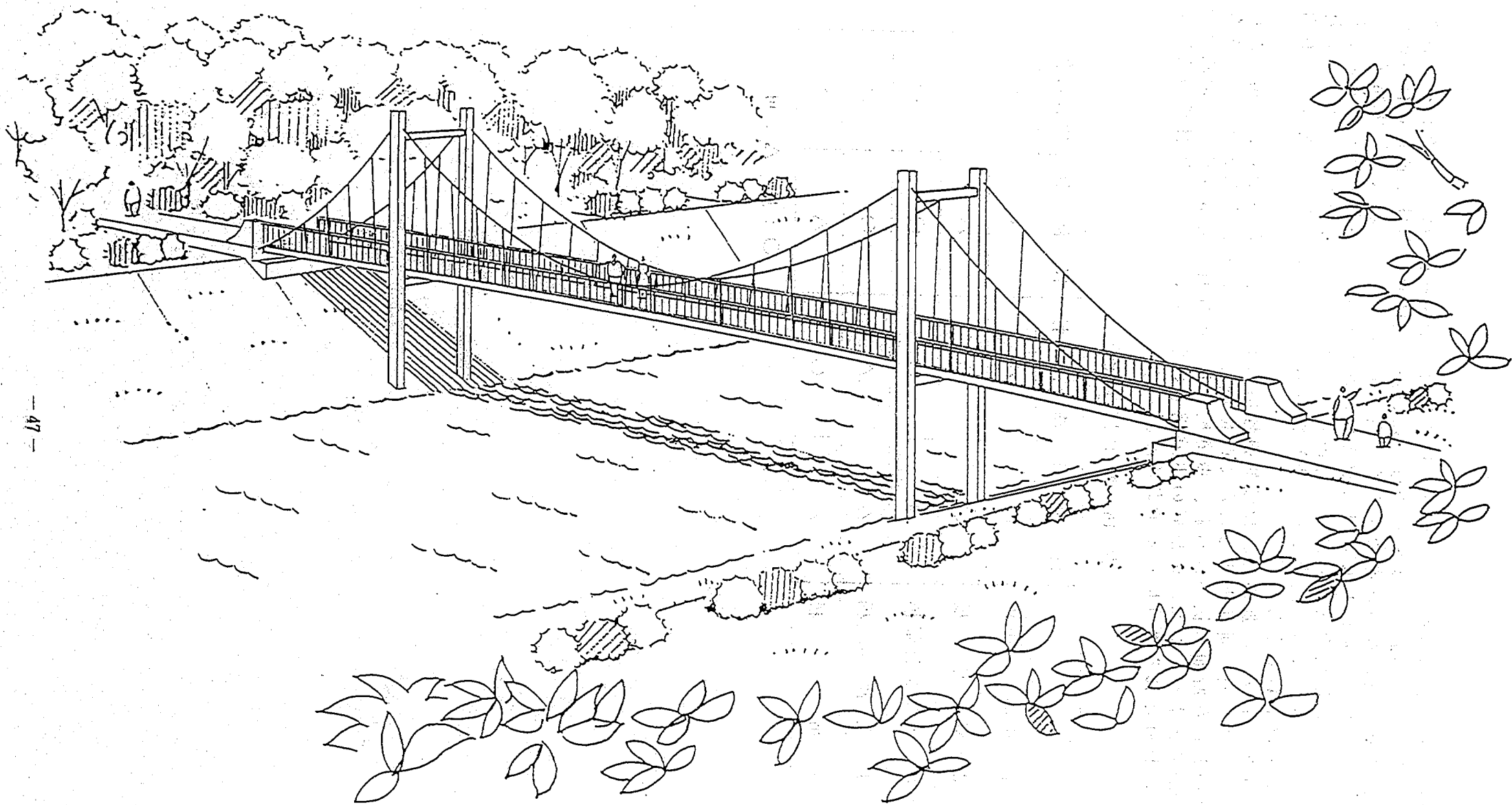


(5) 吊 橋

小・中規模の橋梁を吊橋とする発想は、今後推奨されるべきであり、興味をそそる構造であるが、吊橋の場合斜張橋よりも振動しやすく、それを回避するためには、より剛性の高い主桁形状の選定が必要である。この点から従来材料と比べ、剛性の低いFRPには不利となる。また、トラフ形状の主桁と吊橋との組み合わせなども、今後検討に値する。

単位：mm





今回検討した5つの形式は、個々の構造的機能や美観についてはそれぞれ特徴があり、どの形式が最適か優劣をつけがたいが、現時点におけるFRP材料の信頼性・施工性それに経済性を考慮すると表-16のようになる。(1)中路アーチ橋はアーチリブに多量のFRP材料が必要となり経済的に不利であると考えられる。(4)上路吊橋や(5)吊橋では吊りケーブルとハンガーもしくはトラス材との接合に問題が残る。以上から(2)斜張橋または(3)トラフ斜張橋が有力候補として浮上してくる。

特に(3)トラフ斜張橋は、比較的弾性率が小さく、たわみやすい主桁の剛性を、トラフ(U型)断面とすることで改良したものであり、またプラスチックならではの自由な断面形状が得られ、歩道橋としての独自性も併せ持った形式といえることができよう。なお、他形式の歩道橋も将来さらにFRP構造材料の研究が進めば、見直されるようになるであろう。

表-16 FRP歩道橋比較

	信 頼 性	施 工 性	経 済 性	総合評価
1. 中路アーチ橋	○	△	△	△
2. 斜 張 橋	○	○	△	○
3. トラフ斜張橋	○	△	○	○
4. 上 路 吊 橋	△	△	○	△
5. 吊 橋	△	○	△	△

○：良，△：可

4.2 トラフ斜張橋についての応力試算

前節で行った橋梁形式の検討結果から、本節ではトラフ斜張橋を例として選び、応力試算を行った。

(1) FRP 構造材料の選定

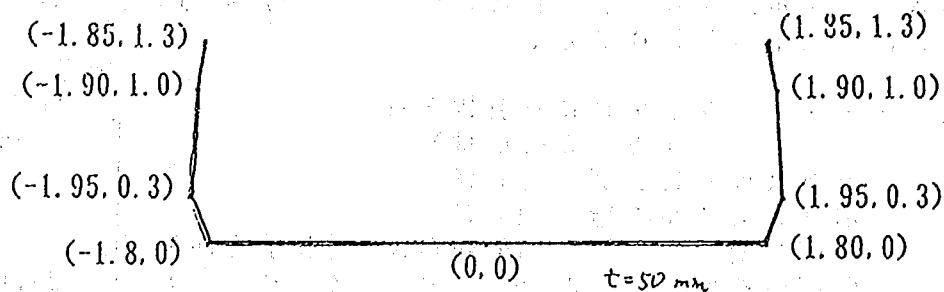
FRP 構造材料として、トラフ主桁およびタワーには、ガラス FRP 引抜き材を用い、斜張ケーブルにはカーボン FRP ケーブルを用いることとした。それぞれの主な物性は、以下のとおりである。

トラフ主桁 タワー		ガラス FRP 引抜き材 (表-5 の棒材)	参考 鋼構造用鋼 SM50Y
		ガラスロービング 55 %	
		ポリエステル樹脂 45 %	
		曲げ強度 70 kgf/mm ² (長手方向)	50
		曲げ弾性率 2,500 "	21,000
		圧縮強度 40 "	50
		せん断強度 38 "	36
		引張強度 60 "	50
		密度 1.8~1.9 g/ml	7.8
斜張ケーブル		カーボン FRP 緊張材 (CFRP II 改良タイプ)	P C 鋼より線 SWPR7A
		炭素繊維 65 %	
		エポキシ樹脂 35 %	
		引張強度 217 kgf/mm ²	175
		引張弾性率 15,000 "	20,000
		密度 1.6 g/ml	7.8

GFRP 引抜き材、FRP 緊張材とも、従来の鋼に対し、弾性率および密度に大きな違いがあるものの、強度に関してはほぼ同等であり、設計計算も従来通りの弾性理論を適用して行った。

①トラフ断面

予備計算であり、リブは無視する。(安全側)

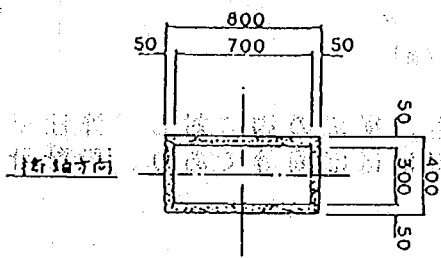


$$A = 0.30 \text{ m}^2$$

$$I = 0.0474 \text{ m}^4$$

$$E = 2500 \text{ kg/mm}^2$$

②タワー断面



$$A = 2 \times 0.110 \text{ m}^2 = 0.220 \text{ m}^2$$

$$I = 2 \times 0.0085 \text{ m}^4 = 0.017 \text{ m}^4$$

$$E = 2500 \text{ kg/mm}^2$$

③斜張ケーブル

長ケーブル 3φ8mm インデンティッド 引張荷重 30.0tf

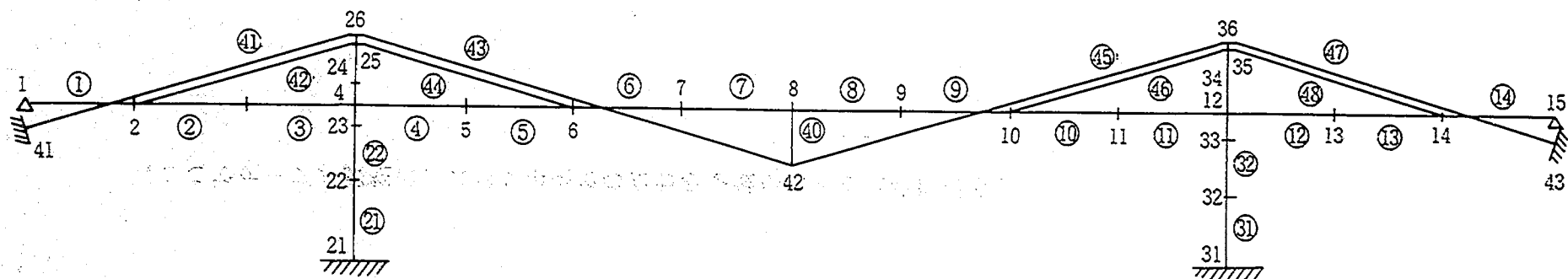
$$A = 138.83 \text{ mm}^2$$

短ケーブル 2φ8mm インデンティッド 引張荷重 20.0tf

$$A = 92.9 \text{ mm}^2$$

$$E = 15000 \text{ kg/mm}^2$$

(2) 構造システム

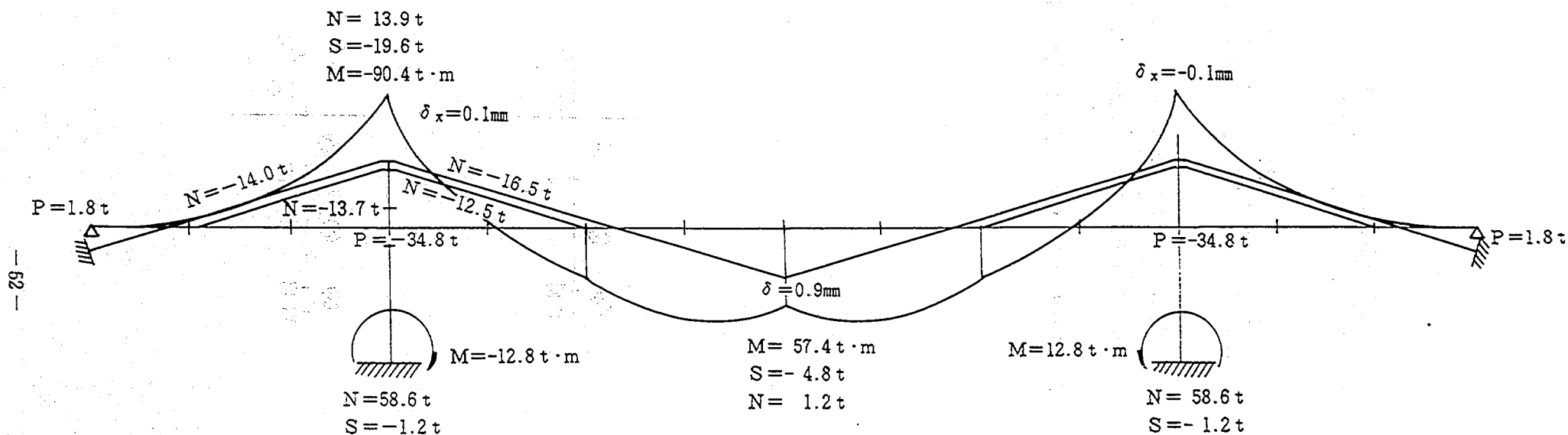


NODE-COORDINATES

No.	X	Y	Z
1	0.000	0.000	0.000
2	5.000	0.000	0.000
3	10.000	0.000	0.000
4	15.000	0.000	0.000
5	20.000	0.000	0.000
6	25.000	0.000	0.000
7	30.000	0.000	0.000
8	35.000	0.000	0.000
9	40.000	0.000	0.000
10	45.000	0.000	0.000
11	50.000	0.000	0.000
12	55.000	0.000	0.000
13	60.000	0.000	0.000
14	65.000	0.000	0.000
15	70.000	0.000	0.000
21	15.000	-7.000	0.000
22	15.000	-3.500	0.000
23	15.000	-1.000	0.000
24	15.000	1.000	0.000
25	15.000	2.900	0.000
26	15.000	3.300	0.000
31	55.000	-7.000	0.000
32	55.000	-3.500	0.000
33	55.000	-1.000	0.000
34	55.000	1.000	0.000
35	55.000	2.900	0.000
36	55.000	3.300	0.000
41	0.000	-1.300	0.000
42	35.000	-2.700	0.000
43	70.000	-1.300	0.000

(3) 断面力の計算

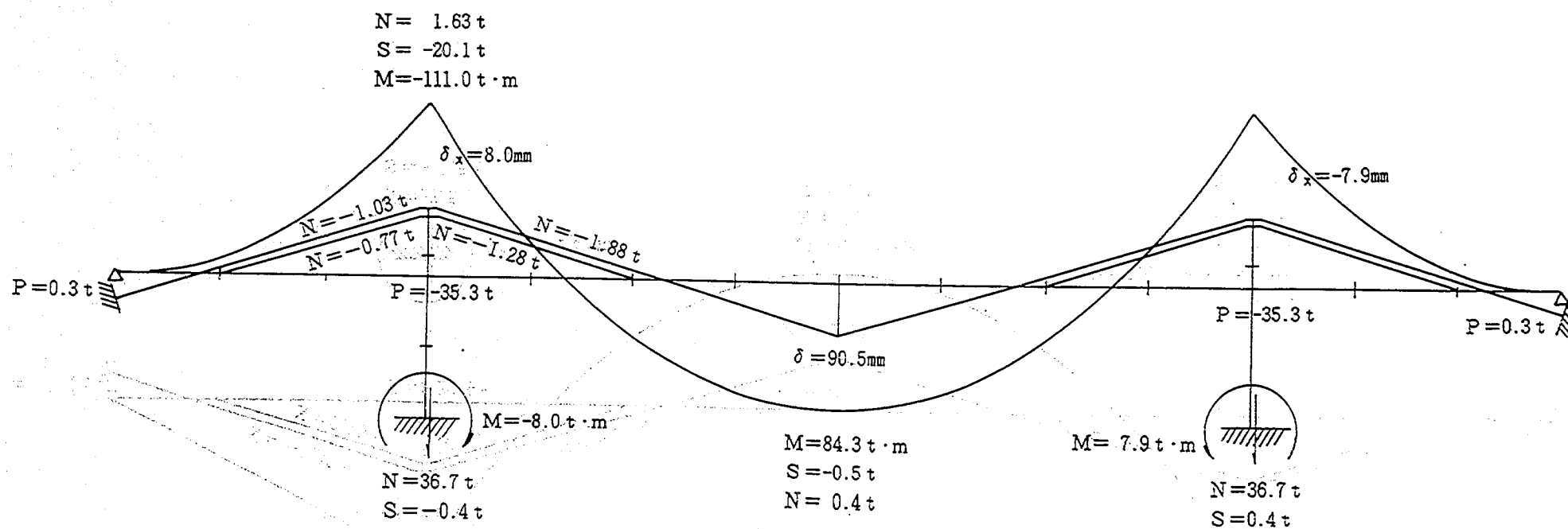
① Dead Load + Cable Adjustment



(ここでケーブル調整は、スパン中央でのたわみを最小にするために行う。)

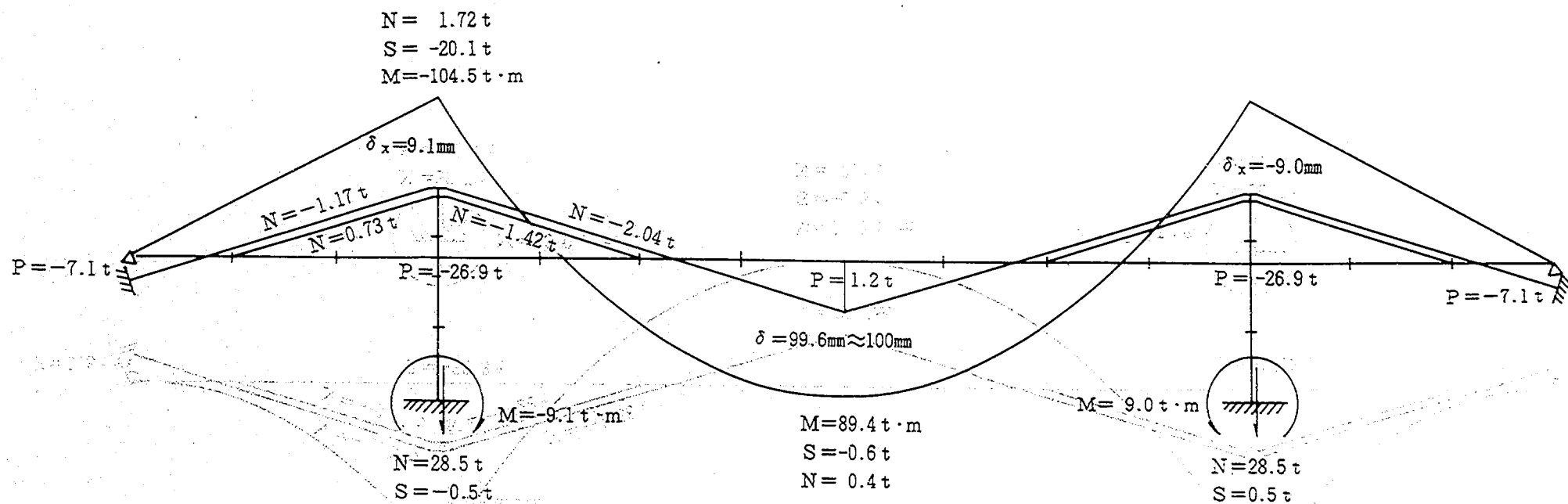
②Live Load Case 1

全面載荷 $p=0.35\text{t/m}^3 \times 3.0\text{m}=1.05\text{t/m}$



③Live Load Case 2

中央径間部載荷 $p=1.05\text{t/m}$



④ 最大・最小断面力の計算

トラフ主桁中央部

$$M_g + M_L = 57.4 + 89.4 = 146.8 \text{ t} \cdot \text{m}$$

$$N_g + N_L = 1.2 + 0.4 = 1.6 \text{ t}$$

トラフ主桁支店部

$$M_g + M_L = -90.4 + 111.0 = -20.4 \text{ t} \cdot \text{m}$$

$$N_g + N_L = 13.2 + 1.6 = 14.8 \text{ t}$$

タワー（2本）

$$M_g + M_L = -12.8 - 8.0 = -20.8 \text{ t} \cdot \text{m}$$

$$N_g + N_L = 58.6 + 36.7 = 95.3 \text{ t}$$

斜張ケーブル（長）

$$N_g + N_L = -16.5 - 2.0 = -18.5 \text{ t}$$

斜張ケーブル（短）

$$N_g + N_L = -12.5 - 1.4 = -13.9 \text{ t}$$

（1本）

$$-10.4 \text{ t} \cdot \text{m}$$

$$47.7 \text{ t}$$

$$-9.25 \text{ t}$$

$$-6.95 \text{ t}$$

(4) 応力照査

トラフ主桁中央部下線

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} \quad A = 0.30 \text{ m}^2$$

$$W^L = I / y_s = 0.0474 / 0.294 = 0.1612 \text{ m}^3$$

$$W^L = I / 1.006 = 0.0471 \text{ m}^3$$

$$\sigma_t = \frac{1.6}{0.3} - \frac{146.8}{0.1612} = 5.3 - 910.7 = -905.4 \text{ t/m}^2 \text{ (引張)}$$

$$\sigma_u = \frac{1.6}{0.3} - \frac{146.8}{0.0471} = 5.3 + 3116.8 = 3122.1 \text{ t/m}^2 \text{ (圧縮)}$$

$$= 3.12 \text{ kg/mm}^2$$

トラフ主桁支点部

$$\sigma_t = \frac{14.8}{0.3} + \frac{201.4}{0.1612} = 49.3 + 1249.4 = 1298.7 \text{ t/m}^2 \text{ (圧縮)}$$

$$\sigma_u = \frac{14.8}{0.3} + \frac{201.4}{0.0471} = 49.3 - 4276 = -4226.7 \text{ t/m}^2 \text{ (引張)}$$

$$= -4.23 \text{ kg/mm}^2$$

(圧縮強度 40 kg/mm², 引張強度 70 kg/mm²)

タワー基部

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} \quad A = 0.11 \text{ m}^2$$

$$W = 0.0085 / 0.20 = 0.0425 \text{ m}^3$$

$$\sigma = \frac{47.7}{0.11} \pm \frac{10.4}{0.0425} = 433.6 \pm 244.7 = +678.3 \text{ t/m}^2$$

$$+188.9 \text{ ''}$$

圧縮・引張とも 10 倍以上の安全あり。

斜張ケーブル (長)

$$\text{安全率 } \eta = \frac{30}{9.25} = 3.24$$

斜張ケーブル (短)

$$\text{安全率 } \eta = \frac{20}{6.95} = 2.88$$

4.3 材料計算

プラスチック単重：1.9t/m³

(1) 歩廊

$$\begin{aligned} \text{本体 } W &= (4.0 + 2 \times 1.30) \times 0.050 \times 70.0 \times 1900 \text{ kg m}^3 &= 43890 \text{ kg} \\ \text{リブ } W &= 0.100 \times 0.020 \times 70.0 \times 1900 \text{ kg m}^3 \times 19 \text{ 枚} &= 5050 \text{ kg} \\ \Sigma & &= 48940 \text{ kg} \end{aligned}$$

(2) タワー (正面面積：13.6m²)

$$\begin{aligned} \text{正面} &: 13.6 \text{ m}^2 \times 0.050 \times 2 \text{ 面} \times 1900 \text{ kg m}^3 &= 2584.0 \text{ kg} \\ \text{上梁上} &: 0.800 \times 3.300 \times 0.050 \times 1900 \text{ kg m}^3 &= 250.8 \text{ kg} \\ \text{〃 下} &: 0.800 \times 3.100 \times 0.050 \times 1900 \text{ kg m}^3 &= 235.6 \text{ kg} \\ \text{外側面} &: 0.800 \times 11.200 \times 0.050 \times 1900 \text{ kg m}^3 \times 2 \text{ 面} &= 1702.4 \text{ kg} \\ \text{内上側面} &: 0.800 \times 5.600 \times 0.050 \times 1900 \text{ kg m}^3 \times 2 \text{ 面} &= 851.2 \text{ kg} \\ \text{内下側面} &: 0.800 \times 8.200 \times 0.050 \times 1900 \text{ kg m}^3 \times 2 \text{ 面} &= 1246.4 \text{ kg} \\ &1 \text{ 基当り } \Sigma &= 6870.4 \text{ kg} \\ &2 \text{ 基当り } 2 \Sigma &= 13740.8 \text{ kg} \end{aligned}$$

(3) 中央部支材 (片面面積：3.03m²)

$$\begin{aligned} W &= 3.03 \times 0.300 \times 1900 \text{ kg m}^3 &= 1730 \text{ kg} \\ \text{ガラス FRP 重量合計} & &= 64410.8 \text{ kg} \end{aligned}$$

(4) ケーブル

① 短ケーブル：CFRP (Ⅱ) インテンシティット・ロッド 束 2φ8mm インテンシティット・

$$W = 4 \text{ 本} \times 10.10 \text{ m} \times 1.15 \times 0.154 \text{ kg f/m} = 7.15 \text{ kg}$$

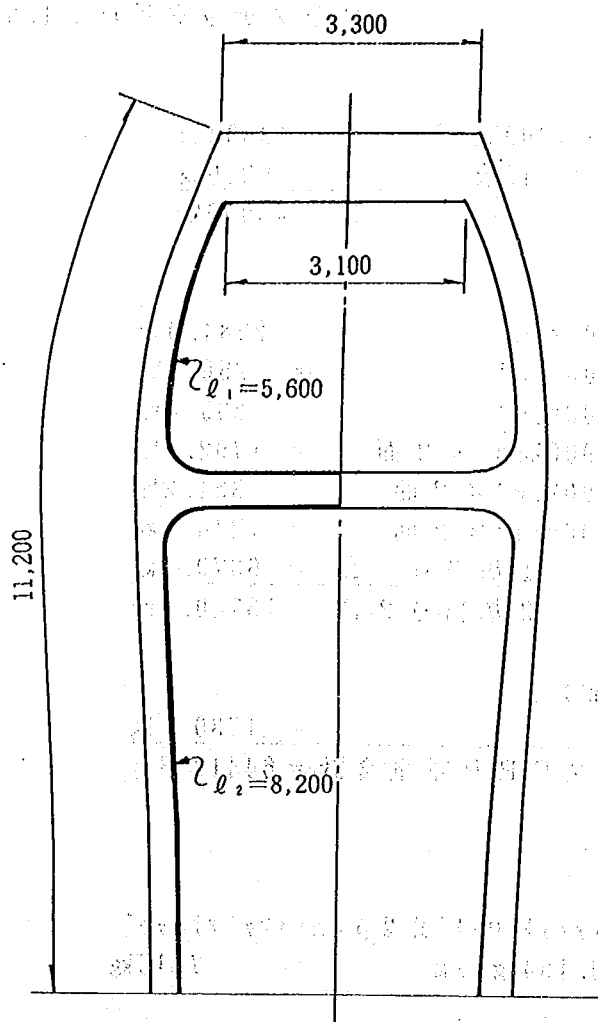
② 長ケーブル：CFRP (Ⅱ) インテンシティット・ロッド 束 3φ8mm インテンシティット・

$$W = 2 \text{ 本} \times 15.40 \text{ m} \times 1.15 \times 0.231 \text{ kg f/m} = 8.18 \text{ kg}$$

$$W = 2 \text{ 本} \times 20.60 \text{ m} \times 1.15 \times 0.231 \text{ kg f/m} = 10.94 \text{ kg}$$

$$\text{ケーブル重量 1 面} = 26.27 \text{ kg}$$

$$\text{〃 2 面} = 52.54 \text{ kg}$$



正面面積（プラニメータより）

$$A = 13.6 \text{ m}^2$$

プラスチック単重

$$W = 1.9 \text{ t/m}^2$$

$$\text{正 面} : 13.6 \text{ m}^2 \times 0.050 \times 2 \text{ 面} \times 1900 \text{ kg/m}^2 = 2584.0 \text{ kg}$$

$$\text{上梁上} : 0.800 \times 3.300 \times 0.050 \times 1900 \text{ kg/m}^2 = 250.8 \text{ kg}$$

$$\text{上梁下} : 0.800 \times 3.100 \times 0.050 \times 1900 \text{ kg/m}^2 = 235.6 \text{ kg}$$

$$\text{外側面} : 0.800 \times 11.200 \times 0.050 \times 1900 \text{ kg/m}^2 \times 2 \text{ 面} = 1702.4 \text{ kg}$$

$$l_1 \text{ 内上側面} : 0.800 \times 5.600 \times 0.050 \times 1900 \text{ kg/m}^2 \times 2 \text{ 面} = 851.2 \text{ kg}$$

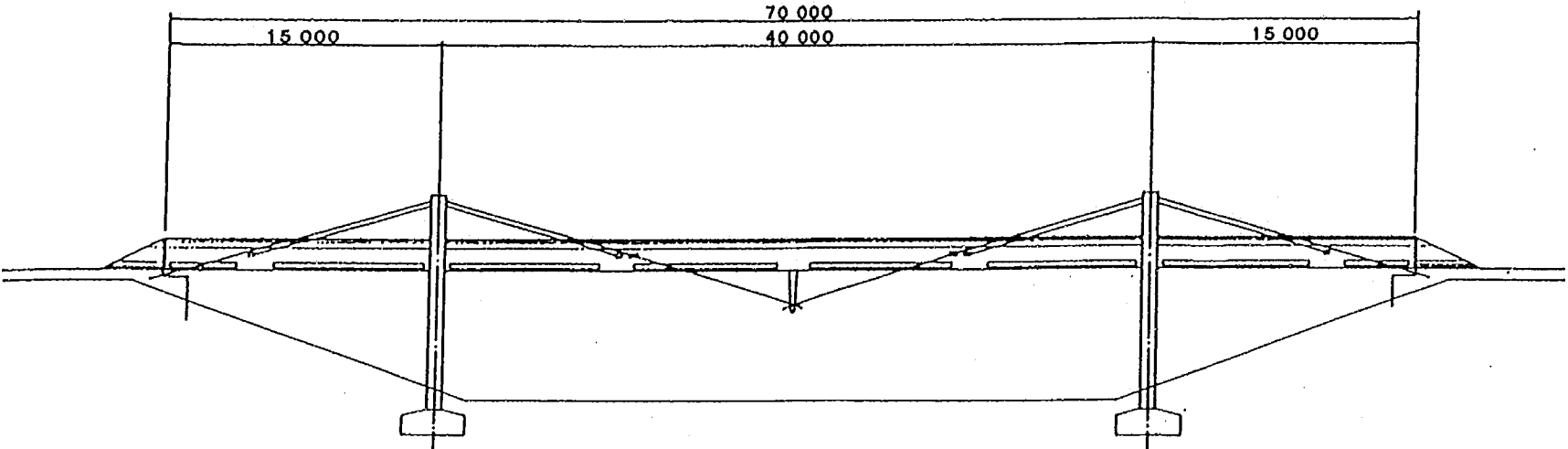
$$l_2 \text{ 内下側面} : 0.800 \times 8.200 \times 0.050 \times 1900 \text{ kg/m}^2 \times 2 \text{ 面} = 1246.4 \text{ kg}$$

$$1 \text{ 基当り} \quad \Sigma = 6870.4 \text{ kg}$$

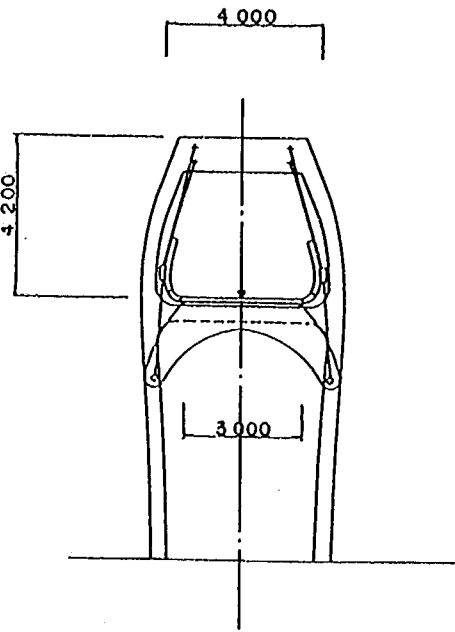
$$2 \text{ 基当り} \quad 2 \Sigma = 13740.8 \text{ kg}$$

全 体 一 般 図

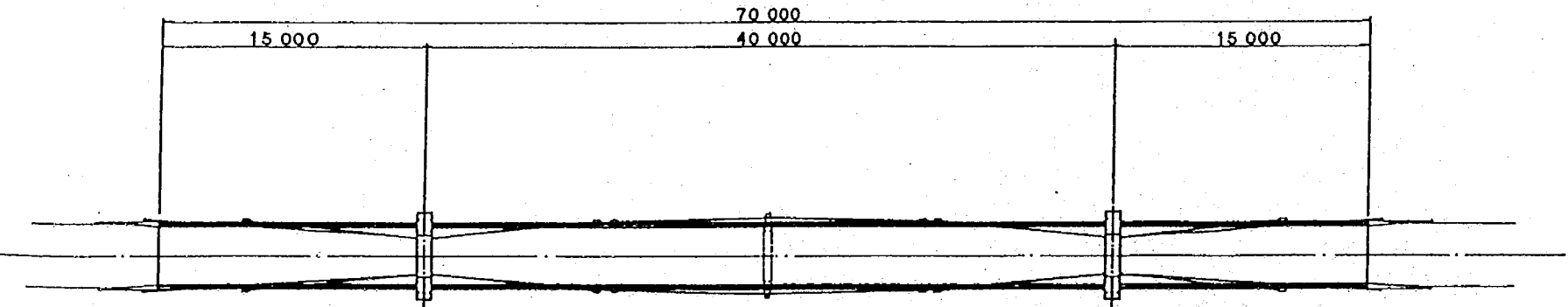
側 面 図



横 断 図

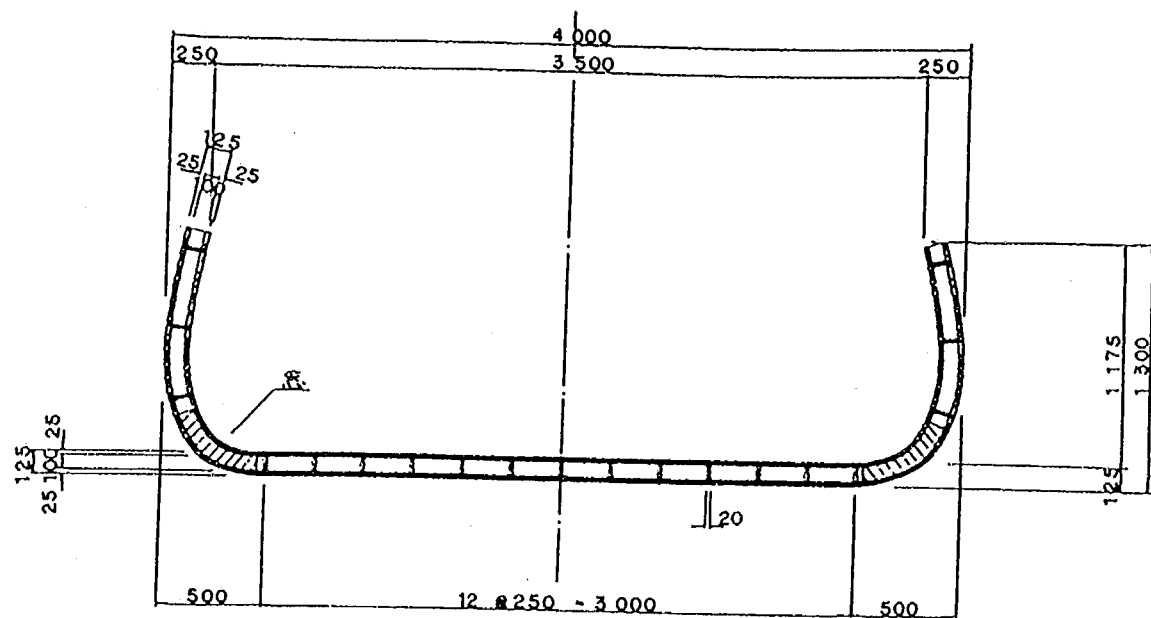


平 面 図

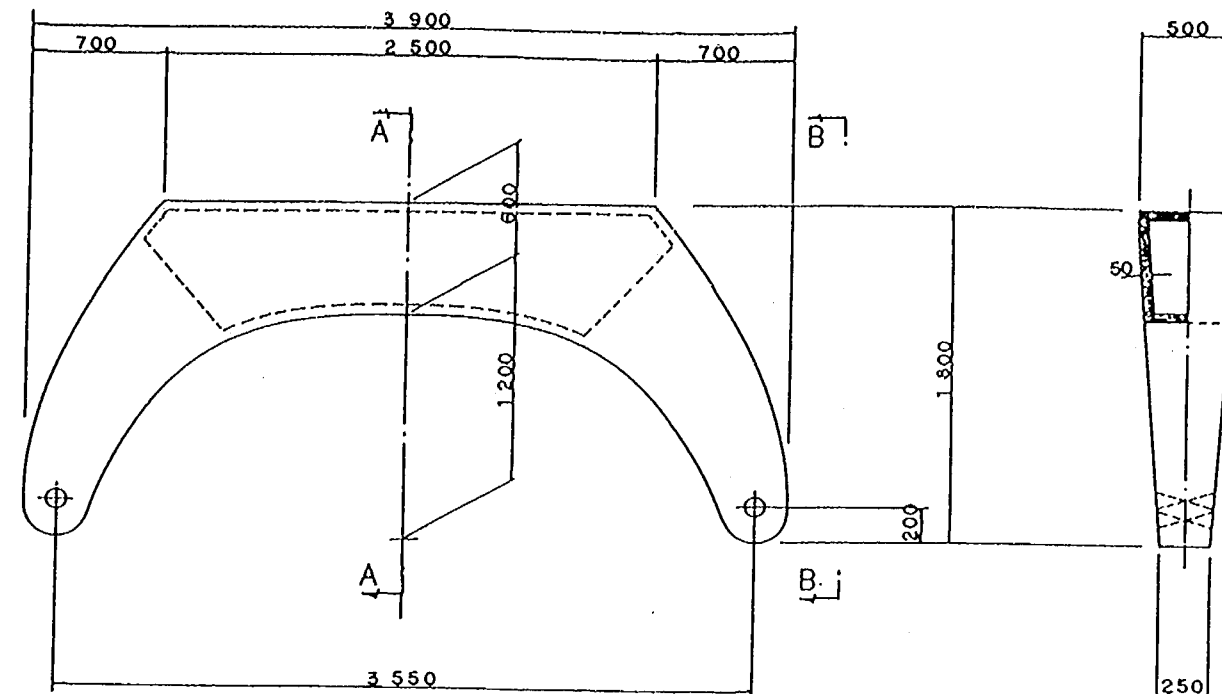


各部詳細図

歩廊部断面図



支材寸法図



A - A B - B

材 料 表

プラスチック単位：1.9 t/m³

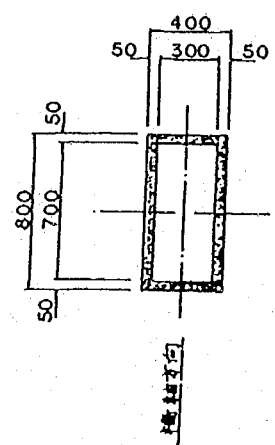
歩廊
 本体W = (4.0 + 2 × 1.30) × 0.050 × 70.0 × 1900kg/m³ = 43890kg
 リブW = 0.100 × 0.020 × 70.0 × 1900kg/m³ × 19m = 5050kg
 Σ = 48940kg

タワー (正面面積：13.6m²)
 正面：13.6m² × 0.050 × 2面 × 1900kg/m³ = 2584.0kg
 上梁上：0.080 × 3.300 × 0.050 × 1900kg/m³ = 250.8kg
 上梁下：0.080 × 3.100 × 0.050 × 1900kg/m³ = 235.6kg
 外側面：0.800 × 11.200 × 0.050 × 1900kg/m³ × 2面 = 1702.4kg
 内上側面：0.800 × 5.600 × 0.050 × 1900kg/m³ × 2面 = 851.2kg
 内下側面：0.800 × 8.200 × 0.050 × 1900kg/m³ × 2面 = 1246.4kg
 1基当り Σ = 6870.4kg
 2基当り 2Σ = 13740.8kg

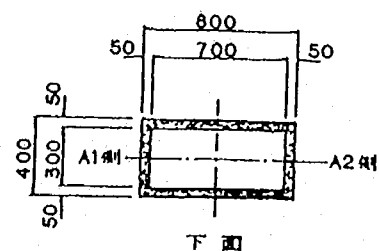
中央部支材 (片面面積：3.03m²)
 W = 3.03 × 0.030 × 1900kg/m³ = 1730 kg
 ガラスFRP重量合計 = 64,410.8kg

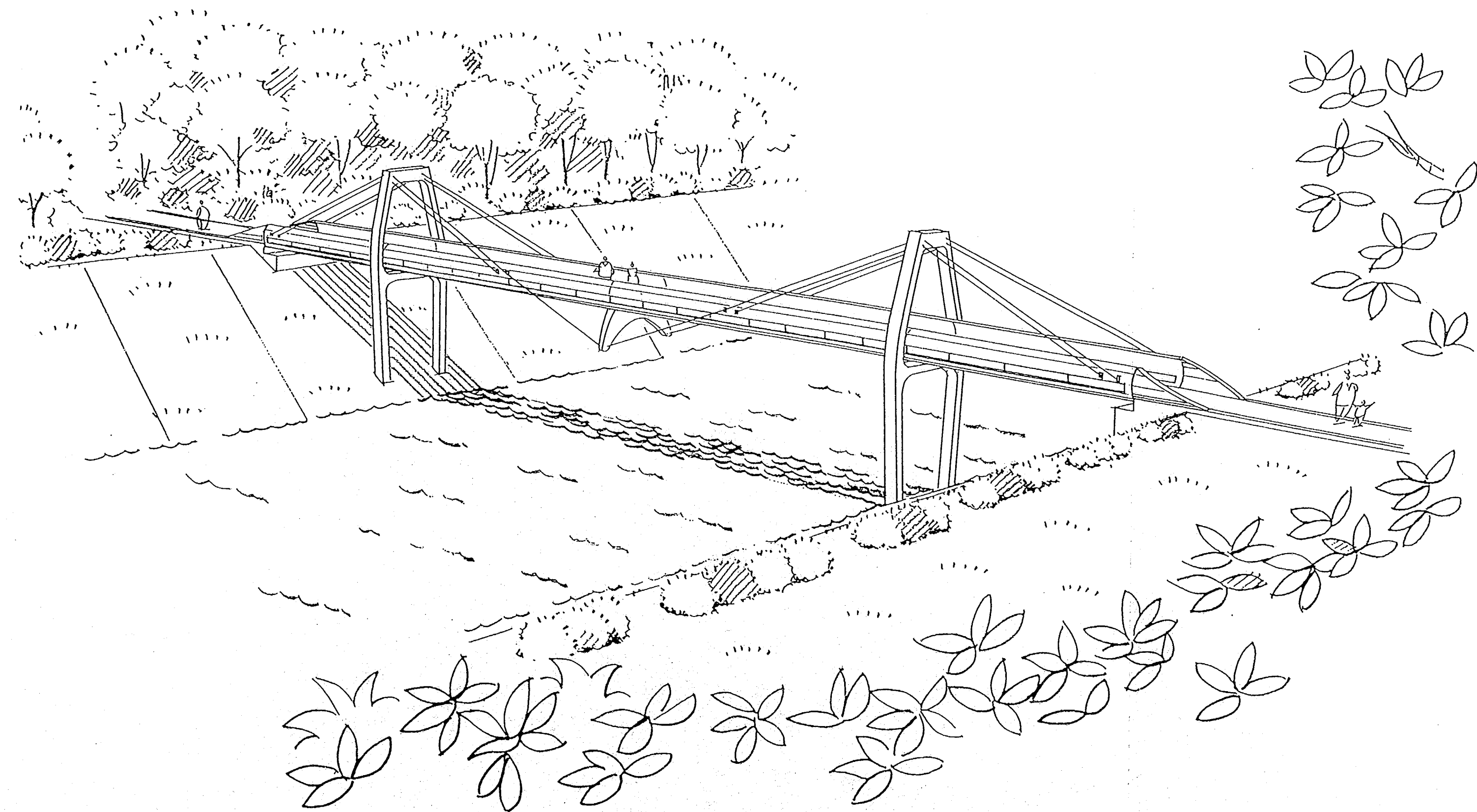
ケーブル
 短ケーブル：CFRP (Ⅱ) インデソティッドロッド束2φ8mmインディティット
 W = 4本 × 10.10m × 1.15 × 0.154kg f/m = 7.15kg
 長ケーブル：CFRP (Ⅱ) インデソティッドロッド束3φ8mmインディティット
 W = 2本 × 15.40m × 1.15 × 0.231kg f/m = 8.18kg
 W = 2本 × 20.60m × 1.15 × 0.231kg f/m = 10.94kg
 ケーブル重量1面 = 26.27kg
 ケーブル重量2面 = 52.54kg

タワー (柱) 断面図



タワー (梁) 断面図





5. まとめ

本報告書で実施した検討の結果、繊維強化構造材料による歩道橋は十分に実現可能であることが判った。

繊維強化構造材料の特性は表-17にまとめたとおりである。単位体積当りの重量が非常に小さいため大型クレーンは不要であり、耐食性・耐候性に優れている点は、大きなメリットとなる。また、繊維直角方向の強度が小さく、異方性がある点や、合成樹脂との複合材であるので弾性係数が小さい点は必ずしもメリットとは言いがたいが、この材料の特徴であり、この様な物性を生かした使い方を考えることが必要とされる。繊維強化構造材料を歩道橋をはじめとする土木構造物に用いることによるメリットは、表-18の様にまとめられる。

歩道橋への用途を考えたときの適用性は、表-19に示すとおりである。特に圧縮性状については不明の点が多いため、圧縮強度などの性能で余裕をもった設計が必要となる。また、繊維強化構造材料の土木構造物への適用の課題と対処について表-20の様にまとめた。

また、本報告書では経済性（コスト）についての検討は行わなかったが、これまでにFRPにより施工が行われた橋梁の例では、建設費は既存橋梁を十分に競合できる程度であることが報告されている。

表-17 繊維強化構造材料の特性

FRP構造材料の種類	構 成	適 用	特 徴
FRP引抜き成形材 ガラスFRP	ガラス繊維＋ 飽和ポリエステル樹脂	主桁・横桁・床版 ・橋脚・橋台	強度は鋼と同等であるが 、弾性係数が約 1/10
カーボンFRP	炭素繊維＋エポキシ樹脂	主構造部材の補強	強度は鋼の倍以上、弾性 係数は 2/4～3/4 である が高価。
FRP緊張材 アラミドFRP	アラミド繊維＋エポキシ orビニルエステル樹脂	主ケーブル、補助 引張材	強度は高強度鋼と同等で あるが、弾性係数は 約1/4
カーボンFRP	炭素繊維＋エポキシ樹脂	主ケーブル、補助 引張材	強度は高強度鋼と同等で あるが、弾性係数は約3/4 （将来的には高弾性材も 可能とされている）
FRP被覆材 カーボンクロス	炭素繊維＋エポキシ樹脂	主構造部材の補強	2方向の耐荷力増加が見 込めるが、施工に熟練要
カーボンプリプレグ	炭素繊維＋エポキシ樹脂	主構造部材の補強	1方向の耐荷力増加あり 、現在幅50cmまでしか ない。

表-18 繊維強化構造材料の長所

FRP構造材料の種類	材 料 の 特 性	設計・施工・管理上の利点
FRP引抜き成形材	任意の断面形状成形が可能。	デザインの自由度が大きくなり、快適性が向上。
	非常に軽量である($\gamma=1.8\sim1.9$)	小規模施工が可能。
	部材のプレキャスト化が容易。	施工能率向上。
	耐蝕性・耐候性に優れている。	維持管理労力の低減が図れる。
FRP緊張材	非常に軽量かつ高強度であり、高弾性・高強度繊維もすでに存在するので、近い将来高強度鋼より数段性能の良いケーブルの出現可能性大。	ケーブル施工が容易となり、安全性が高まる。
	耐蝕性・耐候性に優れている。	維持管理が楽であり、信頼性大。
FRP被覆材	非常に軽量かつ高強度である。	ほとんど重量増加がなく、耐力増加が見込める。
	被覆材として、高耐久性がある。	維持管理労力の低減が図れる。 既存構造物の補強に適している。

表-19 繊維強化構造材料による歩道橋の適用性について

構造形式	構造部材	主要構造材料	適用規模	備考
桁橋・ラーメン橋	主桁・横桁・床版	ガラスFRP 引抜き成形材	軽量が要求される 支間長10～40m 程 度の橋（地盤条件 が悪い場合や軽量 側道橋など）	弾性係数が小さいた め、たわみ制限より 主桁の大きさが決ま る。
アーチ橋	主桁・横桁・床版	ガラスFRP 引抜き成形材	支間長20～90m程 度の橋	FRP構造材料の圧 縮性状に関する研究 が乏しく、現時点で は安全確保のためア ーチリブをかなり圧 縮強度などの性能で 余裕をもった設計に する必要がある。
	アーチリブ・圧縮 鉛直材	ガラスFRP 引抜き成形材		
	引張鉛直材	カーボンFRP 緊張材		
斜張橋	主桁・横桁・床版	ガラスFRP 引抜き成形材	支間長30～100m程 度の橋 各構造形式の中 では最もFRP構造 材料が生かせる形 式である。	圧縮性状が不明のた め圧縮強度などの性 能で余裕をもった設 計が必要となる。主 ケーブルの定着構造 についてFRP定着 体の研究必要。
	タワー	ガラスFRP 引抜き成形材		
	主ケーブル	カーボンorア ラミドFRP 緊張材		
吊橋・吊床版橋	主桁・横桁・床版	ガラスFRP 引抜き成形材	支間長30～200m程 度の橋	主桁のたわみ制限お よびハンガ材との接 合のためには主ケー ブルの剛性を大にす る必要あり。タワー については圧縮性状 が不明のため圧縮強 度などの性能で余裕 をもった設計が必要 となる。
	タワー	ガラスFRP 引抜き成形材		
	主ケーブル・引張 ロープ	カーボン（or アラミド）F RP 緊張材		

表-20 繊維強化構造材料の課題と対処

FRP構造材料の種類	課 題	対 処
FRP引抜き成形材	・ 建設材料として、利用技術基準がない。 ・ 異方性であるため、引抜き直角方向の強度が小さく、また建設材料として引張強度の研究はほとんどない。 ・ 圧縮強度・せん断強度の研究が乏しい。 ・ 厳しい環境下での表層部の耐久性。 ・ 弾性率が小さい。 ・ 引抜き材の形状寸法が統一されておらず、現在のところ建設材料としての標準品がない。 ・ 部材の接合方法が未熟である。	・ 品質基準・利用技術基準の作成。 ・ 信頼性のある引張強度の確認（両方向）と使用限界状態での疲労試験。 ・ 圧縮・せん断に関する体系的な試験。 ・ 暴露促進試験と適正繊維及び樹脂の選定手法の確立。 ・ 弾性率向上への改善策。 ・ 大型化を含めた標準品の制定。 ・ 構造用接着剤の選定・開発および接合用型処理・機械的結合に関する研究。
FRP緊張材	・ 定着具の構造は鋼ケーブル用であり、FRPケーブル用のものは、開発段階である。 ・ 吊りケーブル・斜めケーブルとして設計・施工基準がない。 ・ ケーブルとハンガーの接合部 ・ 厳しい環境下での表層部の耐久性。	・ FRPケーブル用（FRP）定着具の開発。 ・ 設計・施工基準の作成。 ・ ケーブルの剛性向上のための工夫と接合方法。 ・ 暴露促進試験と適切な外套管の開発。
FRP被覆材	・ 被覆材の接着が面倒であり、接着（付着）効果の信頼性が不明である。 ・ 床版補強などについては被覆材に対する押抜きせん断が不明である。 ・ 表層部エポキシ樹脂の耐久性。 ・ 利用技術基準がない。	・ 接着方法の改善および接着面積と補強効果との関係についての研究。 ・ 押抜きせん断に関する研究および改良。 ・ より良い表層膜の開発。 ・ 利用技術基準の作成。
その他のFRP材料		・ FRPハニカム構造の建設部門への応用 ・ エンジニアリングプラスチックの付属物への応用。 ・ FRPとコンクリートの複合断面。 ・ FRPと鋼の複合断面。

あとがき

本報告書で、繊維強化構造材料の物性を検討した結果、土木構造物の構造材料として利用するのに十分な性能を備えていることが判った。繊維強化構造材料は、強度は鋼とほぼ同じであるが、弾性率が数分の1と低い。また重さも数分の1と軽い材料である。この材料の特徴をどのように生かしながら使うかが、今後の課題となろう。また、長期的な耐久性についても高い性能が期待されているが、不明の点が多いため、暴露試験を中心とした実験が必要とされている。

なお2章の、繊維強化構造材料の特性の整理にあたっては、数多くの文献やメーカー資料を参考とさせて頂いた。ここに記して謝意を表したい。

参考文献／図表の引用一覧

- 図－１ 武田薬品工業(株) ポリマールパンフレット
- 表－１（その１，２）旭硝子マテックス(株) 社内資料
- 表－１（その３）強化プラスチック協会 「FRP入門」
- 図－２ 川口：アロマテックス，４１，６７（１９８９）
- 表－２ 化成コンポジット(株) 社内資料
- 図－３ ジョンウルフ編「材料科学入門」岩波書店
- 図－４ 今井：化学経済，３０（２），４３（１９８３）
- 表－３ 化成コンポジット(株) 社内資料
- 表－４（その１）化成コンポジット(株) 社内資料
- 表－４（その２，３）旭硝子マテックス(株) 社内資料
- 図－５（その２，３）旭硝子マテックス(株) パンフレット
- 表－５（その１）強化プラスチック協会引抜成形部会標準化グループ資料
- 表－５（その２）強化プラスチック協会引抜成形部会標準化グループ資料
- 図－８ 小松化成(株) パンフレット
- 表－６ 三菱化成(株) パンフレット
- 表－７ 三菱化成(株) パンフレット
- 表－８ 土研共同研究報告書 １９９２．７（橋梁研究室）
- 表－９ 東レ(株)トレカ事業部 パンフレット
- 図－１０ 建設省酒田工事事務所「土木施工」１９９４．４月号
- 表－１０ 化成コンポジット(株) 社内資料
- 表－１１ 化成コンポジット(株) 社内資料
- 図－１１ 瀬川「引抜成形技術の進歩と用途の展開(10)プラスチックエージ 92/4
- 図－１２ 瀬川「引抜成形技術の進歩と用途の展開(10)プラスチックエージ 92/4
- 表－１２ 瀬川「引抜成形技術の進歩と用途の展開(10)プラスチックエージ 92/4
- 表－１３ 化成コンポジット(株) 社内資料
- 表－１４ 最新複合材料，技術総覧，編集委員会「最新複合材料・技術総覧」
産業技術サービスセンター

- 図 - 1 3 瀬川「引抜成形技術の進歩と用途の展開(10)プラスチックエージ」 92/4
- 表 - 1 5 関西道路研究会 人道橋の景観設計 鹿島出版会
道路橋調査研究委員会編 - その機能と美しさ -
- 図 - 1 4 David J. Brown BRIDGES MACMILLAN
- 図 - 1 5 関西道路研究会 人道橋の景観設計 鹿島出版会
道路橋調査研究委員会編 - その機能と美しさ -
- 図 - 1 6 星谷 勝 絵で考える構造力学 山海堂
(「土木施工」連載)
- 図 - 1 7 関西道路研究会 人道橋の景観設計 鹿島出版会
道路橋調査研究委員会編 - その機能と美しさ -
- 図 - 1 8 David J. Brown BRIDGES MACMILLAN
- 図 - 1 9 彦坂・崎山・大塚 辞解構造力学演習 共立出版
- 図 - 2 0 関西道路研究会 人道橋の景観設計 鹿島出版会
道路橋調査研究委員会編 - その機能と美しさ -
- 図 - 2 1 星谷 勝 絵で考える構造力学 山海堂 (「土木施工」連載)
- 図 - 2 2 星谷 勝 同上
- 図 - 2 3 土木学会 「構造デザイン」 土木学会
土木学会誌 1992年3月別冊増刊
- 参考文献
- ・ドイツの独創的なP C橋の系譜 上坂 康夫 プレストレスト・コンクリート Vol.35, No.2, p.34, Mar. 1993

繊維強化構造材料の
歩道橋への利用可能性の検討

I S S N 0386-5878
土木研究所資料第3291号
平成 6 年 11 月(1994)

片脇 清, 坂本浩行
西崎 到, 佐々木敏

要 旨

繊維強化構造材料は、軽量性や優れた耐食性などの他の素材では得にくい特性をもつため、鋼やコンクリートに代わりうる新たな素材のひとつと考えられている。

本報告書では繊維強化構造材料の材質を調査し、土木構造物の例として歩道橋を取り上げ、その適用の可能性を検討したものである。

キーワード：繊維強化構造材料、複合材料、高分子材料、歩道橋、新素材、土木構造物、
利用可能性、橋梁形式選定

郵便はがき

50円切手
をはって
下さい。

3 0 5 - □ □

茨城県つくば市大字旭一番地
建設省土木研究所
化学研究室 行

No. _____

土研資料第3291号

No. _____

配布先氏名

配布先住所



3

土木研究所資料第3291号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏名

印

土木研究所資料第3291号