2. ケーブル系橋梁の構造と設計法

2.1 ケーブルの種類とその材料特性

橋梁用に用いるケーブルの選定に当たって設計者は，その引張強度，ヤング係数，疲労強度，防食性などの基本的特性に加えて，架設時の取り扱い性や経済性を考慮し選定する必要がある．

ここでは，現在橋梁用に用いられているケーブルの基本的特性について紹介する．

2.1.1 ケーブルの種類とその基本特性

現在橋梁に用いられているケーブルを分類[1),2),3)]すると，**図-2.1.1** のようになる．

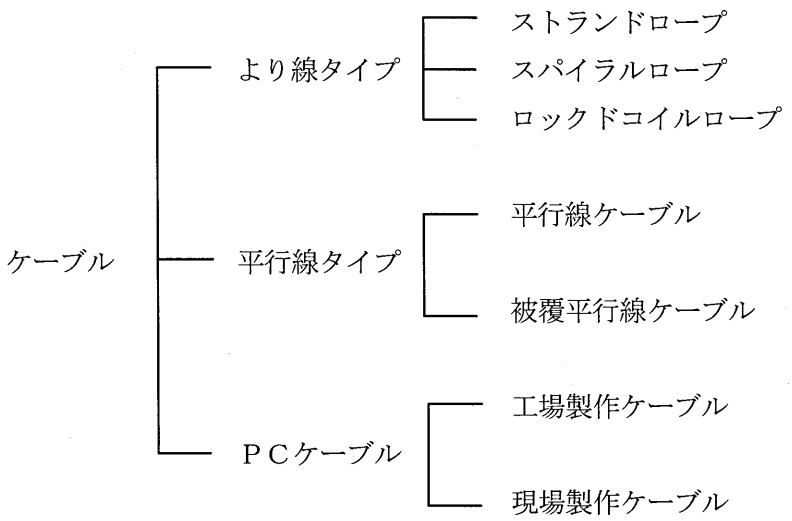


図-2.1.1 ケーブルの分類

(1) より線ケーブル

より線ケーブルは，2000 年に「構造用ワイヤーロープ」(JIS G 3549) [3)]として JIS 化され，その中で「共心形ストランドロープ」と「CFRC(Center Fit Rope Core)形ストランドロープ」の 2 つのタイプのストランドロープ，スパイラルロープ，およびロックドコイルロープの 3 つのグループに分類されている．またロープ径は ϕ 9mm から ϕ 100mm まで 1～2.5mm 刻みに設定されている．強度的にも亜鉛めっき鋼線（素線）の強度により 3 種類の強度区分が設定されており，広いバリエーションの中からケーブルが選定される．

より線タイプのケーブルは，素線をより合わせて製造することにより，柔軟性に富み取り扱い性が良いが，**表-2.1.1** に示すように，より合わせによる強度低下が生じる特徴を持っている．

ストランドロープは，素線を数本～数十本より合わせたストランドを，さらに複数本より合わせて製造されており，現在用いられているケーブルの中で最もフレキシブルで取り扱い性がよい．

スパイラルロープは，19～217 本の素線をより合わせたストランドの状態でケーブルとして使用される．柔軟性は，ストランドロープより落ちるが，同一径のより線タイプのケーブルの中で最も高強度である．

ロックドコイルロープはスパイラルロープの外層に，Z 線，T 線と呼ばれる異形断面の素線を配置することにより，表面が平滑でありまたロープ内部への雨水など腐食因子の進入が抑制され防食性に富んでいる．

表-2.1.1　より合わせによる強度効率の概要 [4)]

ケーブルの種類	より効率※
共心形ストランドロープ	0.87
CFRC 形ストランドロープ	0.83
スパイラルロープ	0.88
ロックドコイルロープ	0.90

※より効率＝ケーブルの破断荷重／構成する素線の集合破断荷重の合計

(2) 平行線ケーブル

平行線タイプのケーブルは，日本鋼構造協会の「構造用ケーブル材料規格」[1)]において「平行線ケーブル」と「被覆平行線ケーブル」とに分類されている．

まず，「平行線ケーブル」は，PWS（Parallel Wire Strand）とも呼ばれ，直径約 5mm の亜鉛めっき鋼線を平行に束ね合わせて製作される．その断面は**表-2.1.2** に示されるように，六角形状を成し，ケーブルの機械的性質は素線のそれをそのまま用いることができる．用途としては，過去に斜張橋のケーブル斜材として用いられた例も有るが，最近では長大吊橋のメインケーブルとしての利用が主流である．

次に「被覆平行線ケーブル」は，PWC（Parallel Wire Cable）とも呼ばれる．このケーブルは，主に直径 7mm の亜鉛めっき鋼線を平行に束ね合わせ，取扱い性向上を目的に，その機械的性質を損なわない範囲の角度（**図-2.1.2** 参照）でより，さらにその上から防食のためにポリエチレン等で被覆されている．PWS 同様，機械的性質は素線のそれをそのまま用いることができる．用途としては，斜張橋のケーブル斜材やアーチ橋のハンガーが主流であるが，最近では長大吊橋のハンガーロープやケーブルトラスト橋の張弦材として用いられるようになってきている．

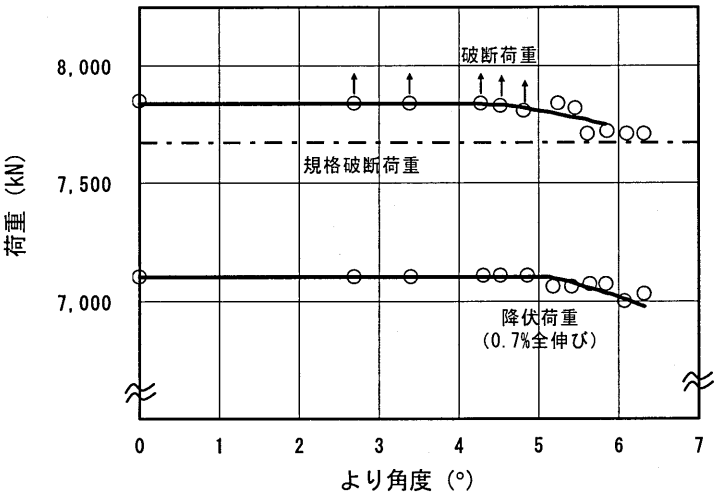


図-2.1.2 より角度と破断荷重および降伏荷重 [5)]

(3) PC ケーブル

JIS G 3536[6)]の PC 鋼より線を 7 本もしくは 19 本の多重よりにしてポリエチレンで被覆した工場製作ケーブルと，被覆された PC 鋼より線を複数本束ねて外套管に挿入する現場製作ケーブルとがある．

工場製作ケーブルは，斜張橋のケーブル斜材やアーチ橋のハンガー，補強用外ケーブル [7)]，落橋

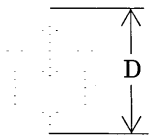
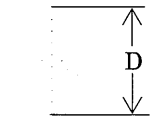
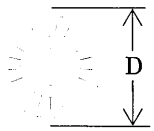
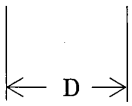
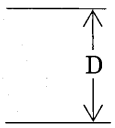
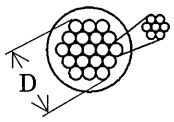
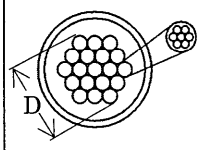
防止構造の連結ケーブル[8]などで使用されている．このケーブルの破断荷重は 260kN～5,000kN である．

現場製作ケーブルは，PC 斜張橋のケーブル斜材や外ケーブル構造[9]などで使用実績があり，破断荷重は，5,000kN～33,000kN である．

PC 鋼より線の引張強度さは，7 本より線 A 種で 1,720N/mm², 7 本より線 B 種で 1,860N/mm², 19 本より線で 1,820～1,850N/mm² がある．

ケーブルの基本材料特性をまとめたものを表-2.1.2 に示す．

表-2.1.2　ケーブルの種類と基本特性

種類		断面形状例	主な特性					主な使用例
			径 (D) mm	破断荷重 kN	弾性係数 kN/mm²	ｸﾘｰﾌﾟ特性 %	防食方法	
より線タイプ	構造用 ｽﾄﾗﾝﾄﾞﾛｰﾌﾟ		φ9 ～ φ80	52.2 ～ 4,730	137	0.025	亜鉛めっき (被　覆)	長大吊橋ﾊﾝｶﾞｰ 小規模吊橋ﾒｲﾝｹｰﾌﾞﾙ 小規模吊橋ﾊﾝｶﾞｰ
	構造用 ｽﾊﾟｲﾗﾙﾛｰﾌﾟ		φ14 ～ φ100	161 ～ 8,730	157	0.015	亜鉛めっき (被　覆)	斜張橋ｹｰﾌﾞﾙ斜材 ｱｰﾁ橋ﾊﾝｶﾞｰ 小規模吊橋ﾒｲﾝｹｰﾌﾞﾙ
	構造用 ﾛｯｸﾄﾞｺｲﾙﾛｰﾌﾟ		φ34 ～ φ100	1,020 ～ 8,010	157	0.015	亜鉛めっき (被　覆)	斜張橋ｹｰﾌﾞﾙ斜材 ｱｰﾁ橋ﾊﾝｶﾞｰ 小規模吊橋ﾒｲﾝｹｰﾌﾞﾙ
平行線タイプ	平行線 ストランド		φ25 ～ φ71.5	586 ～ 5,345	196	0.007	亜鉛めっき ラッピング 塗　装	長大吊橋ﾒｲﾝｹｰﾌﾞﾙ
	被覆平行線 ケーブル		φ21 ～ φ169	423 ～ 30,100	196	0.007	亜鉛めっき 被　覆	斜張橋ｹｰﾌﾞﾙ斜材 ｱｰﾁ橋ﾊﾝｶﾞｰ 長大吊橋ﾊﾝｶﾞｰ
PC ケーブル	工場製作 ケーブル		φ15.2 ～ φ76	261 ～ 4,959	190	0.007	亜鉛めっき 被　覆	斜張橋ﾒｹｰﾌﾞﾙ斜材 ｱｰﾁ橋ﾊﾝｶﾞｰ 落橋防止構造
	現場製作 ケーブル		φ116 ～ φ286	4,959 ～ 33,147	186	0.007	亜鉛めっき 外 套 管	斜張橋ｹｰﾌﾞﾙ斜材

防食方法の（　）内はオプション

2.1.2　ケーブル端末の構造

ケーブルは，ケーブル本体そのままでは主桁（補鋼桁を含む）や主塔（斜張橋等の塔も含む）へ定着することができない．定着のためにはケーブルの端末に適切な金具を取付ける必要がある．ケーブル端末金具の外形寸法は，主桁および主塔の定着構造体との取り合いを決定するのに重要であるだけでなく，内部でのケーブル本体の定着構造によりケーブルの疲労特性が異なる．ケーブルについて疲労設計を行う必要がある場合，ソケット内部の定着構造により端末金具を選定することになる場合もある．

ケーブル端末金具は，大きく分類すると，圧縮止め，ソケット止め，および，くさび止めに分類できる．

(1) 圧縮止め

圧縮止めは，ロープの端末を折り返しアルミ製のクランプで圧縮するアイ圧縮止めタイプ（**図-2.1.3**）と，金具端部を筒状にしてケーブル端部を差込み，その部分をプレス加工するスウェージタイプの２つがある．

アイ圧縮止めタイプは，構造用ストランドロープにのみ適用が可能である．スウェージタイプには，オープン，クローズ，および，ネジエンドの 3 つのタイプの形状があり（**図-2.1.4**），構造用ストランドロープ，ならびに 1×7，1×19，および，1×37 までの細径のスパイラルロープに適用可能である．

圧縮止めタイプは，その形状を非常にコンパクトにすることが可能であり，主に疲労を考慮しない人道橋や建築構造物の分野で使用されている．

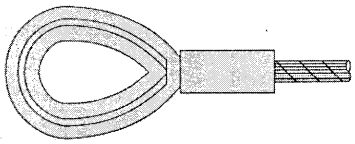
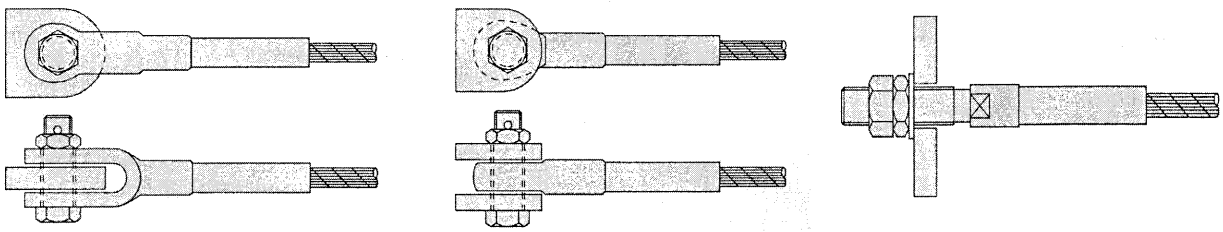


図-2.1.3　アイ圧縮止めタイプの形状



(a) オープンタイプ　　(b) クローズタイプ　　(c) ネジエンドタイプ

図-2.1.4　スウェージタイプの形状

PC 鋼より線を 7 本もしくは 19 本より合わせた工場製作タイプの PC ケーブルについてもスウェージタイプの端末金具が採用されており（**図-2.1.5**），主に PC 橋の外ケーブルや落橋防止用ケーブルとして使用されている．

また，このタイプの PC ケーブルでは 200 万回の繰り返し引張疲労に対して，150～200kN/mm^2 の疲労強度を有しており斜張橋のケーブル斜材やアーチ橋のハンガーとしても採用されてきている．

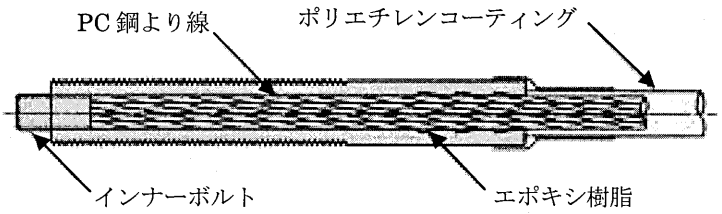


図-2.1.5　工場製作タイプPCケーブルの端末金具例

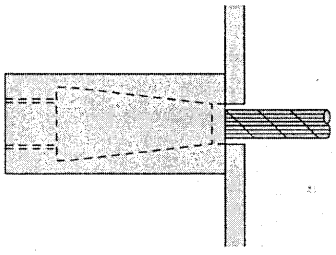
(2) ソケット止め

ソケット止めは，橋梁用ケーブルの端末金具として，最も一般的に用いられている．

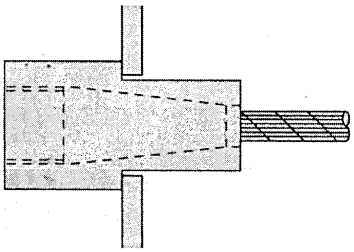
外形の形状では，**図-2.1.6**に示すように，最も一般的な前面支圧タイプ，支圧部をソケット中央部に設けた背面支圧タイプ，ソケット本体外周にネジ加工をほどこして定着ナットを取り付けることによりソケット本体で長さ調整機能を設けたナット定着タイプがある．それらは，さまざまなケーブル系橋梁に広く使用されている．

ピンガセットの定着構造に用いる代表的なものには，オープンタイプのソケットや2本のアイロッドを介してソケットを定着させるブリッジタイプがある．オープンタイプは長大吊橋のハンガーロープに，ブリッジタイプは人道吊橋のメインケーブルの定着に用いられている．

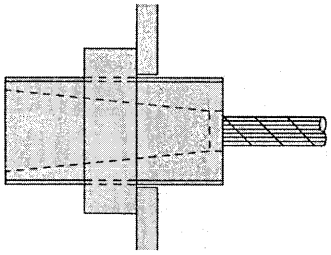
他にも，ソケットを通過させるのに十分な内径の定着鋼管を設置できない場合などには，ソケット背面に取り付けたロッドを介して定着するロッド定着タイプがある．これは大きな定着構造体を設置することが難しいアーチ橋に採用された実績がある．



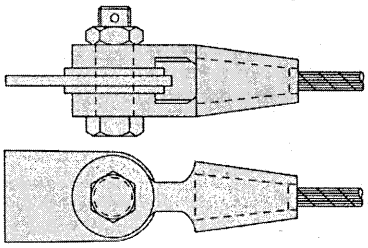
(a) 前面支圧タイプ



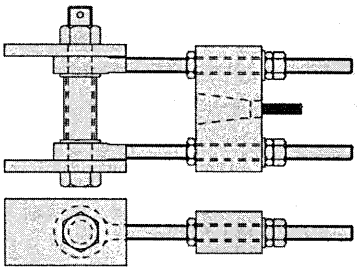
(b) 背面支圧タイプ



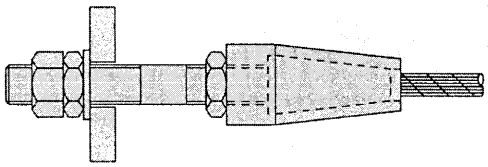
(c) ナット定着タイプ



(d) オープンタイプ



(e) ブリッジタイプ



(f) ロッド定着タイプ

図-2.1.6　ソケットの形状例

ケーブル端末のためのソケットの内部構造としては，**図-2.1.7** に示す「亜鉛銅合金鋳込み」と「新定着法」に分けることができる．

「亜鉛銅合金鋳込み」とは最も一般的な端末加工の一つで，平行線ケーブルやより線タイプのケーブル等ほぼ全てのケーブルに適用することができる．ソケット内部で茶筅状に素線をばらした後，鋳込み材を充填し定着する．鋳込み材には亜鉛 98%銅 2%の亜鉛銅合金を用いるのが主流である．

静的には 100%の定着効率が得られ，200 万回の繰り返し引張疲労に対して，150～200kN/mm^2 の疲労強度を有しており，疲労強度等級 [10]は，**表-2.1.3** および**図-2.1.8** に示すように，平行線ケーブルへの適用で“K2”，ロープ（より線タイプ）への適用で“K3”とされている．

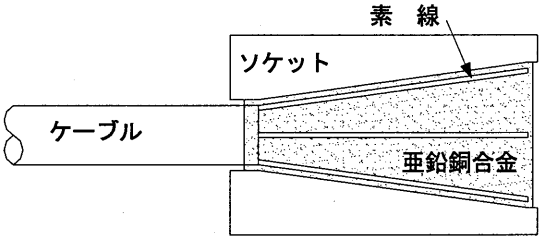
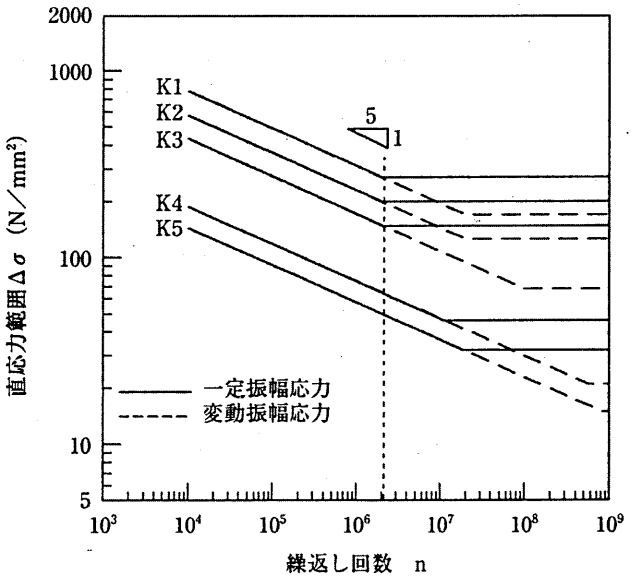


図-2.1.7　亜鉛銅合金鋳込みソケットの構造

表-2.1.3　直応力を受けるケーブルおよび高力ボルトの疲労強度等級 [10]

継手の種類		強度等級 $\Delta\sigma_f$ (N/mm^2)	備考
1.ｹｰﾌﾞﾙ本体	(1)平行線	K1 (270)	1.(1)
	(2)ロープ	K2 (200)	1.(2)
2.ｹｰﾌﾞﾙ定着部	(1)平行線新定着法	K1 (270)	
	(2)平行線亜鉛鋳込み	K2 (200)	2
	(3)ロープ亜鉛鋳込み	K3 (150)	
3.高力ﾎﾞﾙﾄ	(1)転造	K4　(65)	3
	(2)切削	K5　(50)	



注)2.(1)新定着法とはｹｰﾌﾞﾙ本体と同程度の疲労強度を有する定着部構造をいう。

図-2.1.8　直応力を受けるケーブル及び高力ボルトの疲労設計曲線 [10]

一方，「新定着法」とは，ケーブルメーカーが個々に開発･実用化している端末加工方法であり，**図-2.1.9～図-2.1.11** に示すように，「亜鉛銅合金＋樹脂」ソケット，「鋼球＋樹脂」ソケット，「ボタンヘッド＋樹脂」ソケットなどがある．これらは 200 万回の繰り返し引張疲労に対して，200～300kN/mm^2 の疲労強度を有しており，疲労強度等級[10]は“K1”に分類されている．

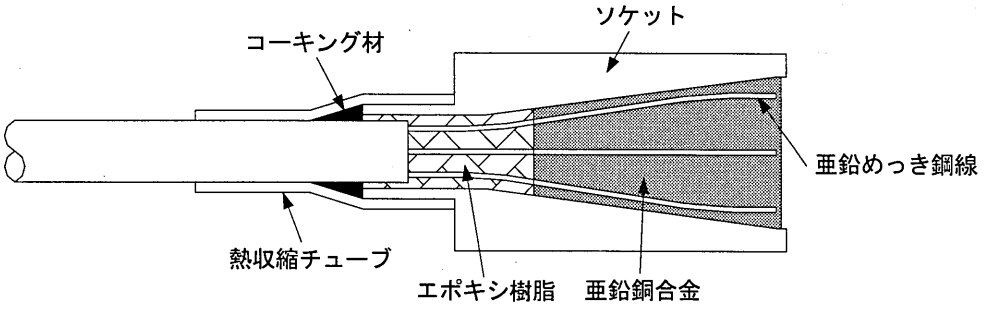


図-2.1.9　亜鉛銅合金＋樹脂ソケット（NS ソケット）の構造イメージ図

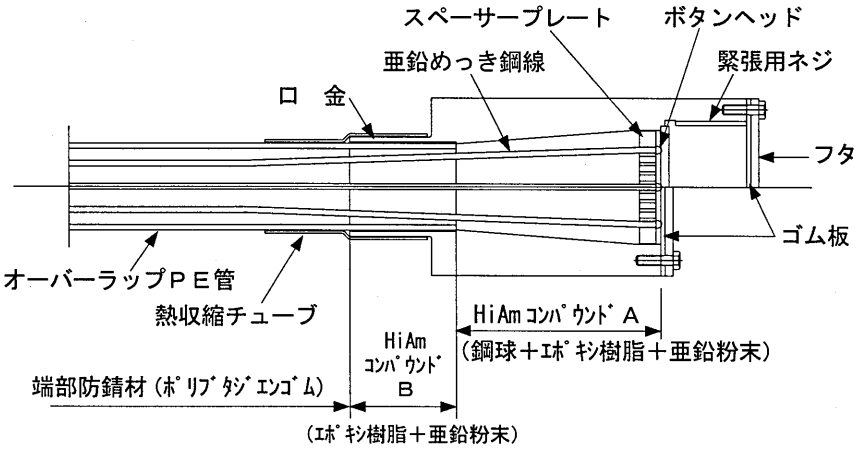


図-2.1.10　鋼球＋樹脂ソケット（Hi-Am アンカー）の構造イメージ図

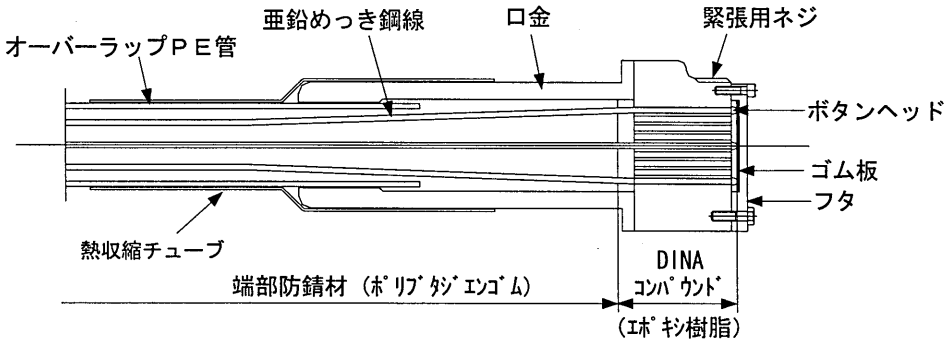
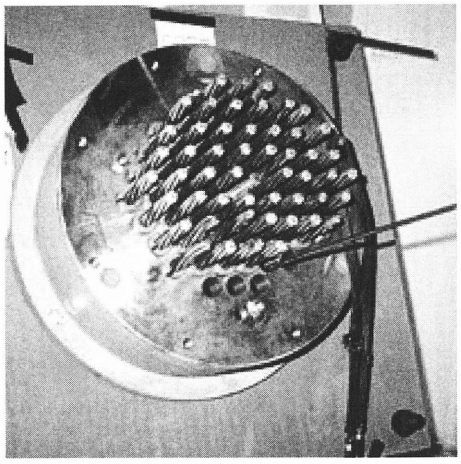


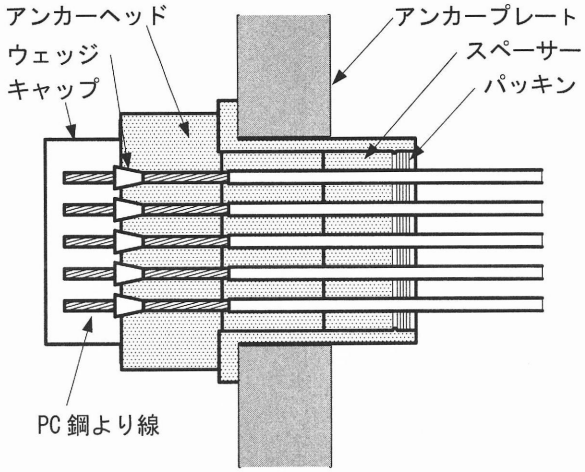
図-2.1.11　ボタンヘッド＋樹脂ソケット（DINA アンカー）の構造イメージ図

(3) くさび止め（図-2.1.12 参照）

くさび止めタイプの端末は，現地製作タイプのＰＣケーブルに用いられる．現地で PC ストランドを１本ずつ所定の位置にセットされたアンカーブヘッドに通線していき，個々にはくさび（ウェッジ）にて仮定着する．その後にアンカーヘッド全体を引張って所定の張力を導入する．現場製作ケーブルの場合，PC 斜張橋における一般的な設計疲労強度は 200N/mm[11]である．



(a) ケーブル端末の写真



(b) 縦断面図

図-2.1.12　くさび定着の構造

2.1.3　ケーブル端末の設計例

ケーブル端末設計は，各ケーブルメーカーの実験データーを基に行われているのがほとんどである．しかし，その中で亜鉛銅合金鋳込みタイプのソケットについては，その設計法[12]が一般化されている．ここでは，亜鉛銅合金鋳込みタイプのソケットについて，その設計例を紹介する．

(1) 亜鉛銅合金鋳込みソケット

1) 構造

亜鉛銅合金鋳込みソケットにおいては，ケーブルに負荷される張力はソケット内の素線の付着力により鋳込み金属である亜鉛銅合金に伝えられる．亜鉛銅合金はソケット内部で円錐形に鋳込まれており，**図-2.1.13** に示すように，亜鉛銅合金に伝えられたケーブル張力はソケット本体を押し広げるように働く．このようにケーブルに負荷された張力はソケットに伝えられ，主桁や主塔の定着構造体に伝達される．

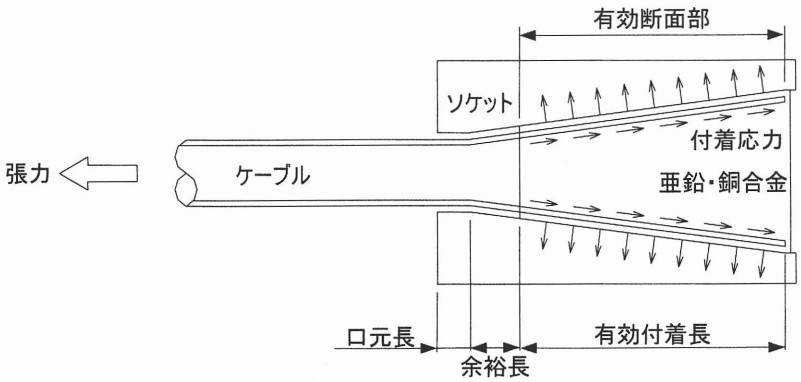


図-2.1.13　亜鉛銅合金鋳込みソケットの応力伝達模式図

2) 設計手法

亜鉛銅合金鋳込みソケットでは，前項に示したような応力の流れから下記の強度が必要となる．

① 素線が亜鉛銅合金から引き抜けることのない付着強度

素線が亜鉛銅合金から抜け出すことなく定着するためには，**式（2.1.1）**を満足する有効付着長が必要となる．ここで素線と合金との付着強度は18N/mm²が一般的に用いられている．

$$L_c \geqq \frac{\sigma_u d}{4\tau} \tag{2.1.1}$$

ここで，

L_c ：亜鉛銅合金の有効円錐部の長さ(mm)
σ_u ：素線の引張強さ(N/mm²)
d ：素線の直径(mm)
τ ：素線と亜鉛銅合金の付着強度(N/mm²)

② 亜鉛銅合金が受ける圧縮強度に対して抜け出すことのないクリープ強度

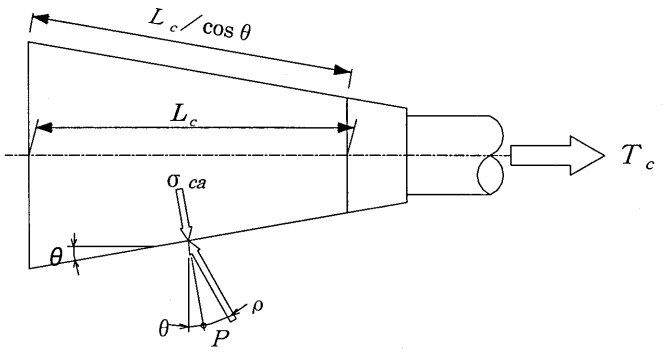
ソケット内で亜鉛銅合金の受ける圧縮応力 σ_c は，**図-2.1.14** に示す力のつり合い条件から，**式（2.1.2）**で求める．ここで，亜鉛銅合金の受ける圧縮応力は，亜鉛銅合金のクリープ変形を考慮し39～44 N/mm²以下としている．

また，ソケットの円錐部の傾斜角度については6°～8°の範囲が一般的に用いられている．

$$\sigma_c = \frac{T_c \cos\rho \cos\theta}{\pi D_m L_c \sin(\theta+\rho)} \leqq \sigma_{ca} \tag{2.1.2}$$

ここで

σ_{ca} ：クリープを考慮した亜鉛銅合金の許容圧縮応力度(N/mm²)
T_c ：ケーブルに作用する持続荷重(N)
ρ ：ソケット内面と亜鉛銅合金との摩擦角（°）
（摩擦係数を0.2とすると，$\rho = \tan^{-1}(0.2) = 11.3°$）
θ ：ソケット円錐面の傾斜角（°）
D_m ：亜鉛銅合金の有効円錐部の平均直径(mm)
L_c ：亜鉛銅合金の有効円錐部の長さ(mm)



$\sigma_c = P\cos\rho$
$T_c = P\sin(\theta+\rho)A_e$
$A_e = D_m \pi L_c / \cos\theta$:
亜鉛銅合金の有効表面積

図-2.1.14 ソケット内の力のつり合い

③ 亜鉛銅合金から受けるフープ力に対してのソケット本体の強度

ソケット本体は，亜鉛銅合金の圧縮応力に抵抗するフープ応力とケーブル張力による軸方向の応力（前面支圧ソケットの場合は圧縮応力，オープンソケットの場合は引張応力）とを受ける．フー

プ応力 σ_r は式（2.1.3）で，軸方向応力 σ_t は式（2.1.4）で求める．ソケット本体の強度は，両者に対して十分な強度を有するとともに，式（2.1.5）の 2 軸応力照査に対しても十分な強度を有することが必要である．

フープ応力：

$$\sigma_r = \sigma_c \frac{1 + (D_i / D_o)^2}{1 - (D_i / D_o)^2} \leqq \sigma_{ayu} \tag{2.1.3}$$

軸方向応力：

$$\sigma_t = \frac{4T_n}{\pi (D_o^2 - D_i^2)} \leqq \sigma_{ayu} \tag{2.1.4}$$

2 軸応力　：

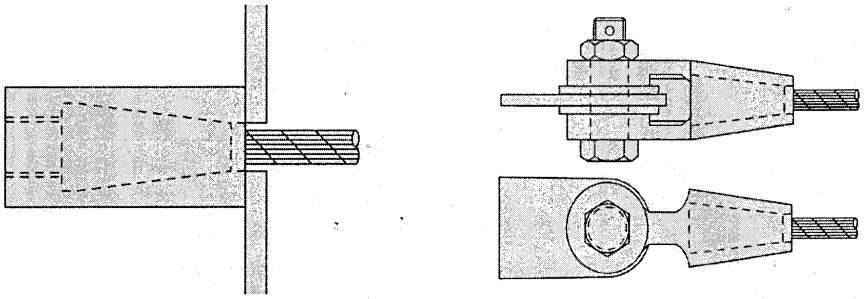
$$\left(\frac{\sigma_r}{\sigma_{ayu}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_{ayu}}\right)\left(\frac{\sigma_t}{\sigma_{ayu}}\right) + \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_{ayu}}\right)^2 \leqq 1.2 \tag{2.1.5}$$

ここで

D_o　：ソケットの照査断面外径(mm)
D_i　：ソケットの照査断面内径(mm)
T_n　：照査断面に作用する軸方向荷重(N)
σ_{ayu}　：ソケット材の照査応力度(N/mm²)（許容応力度，降伏点，引張強度等）
σ_c　：亜鉛銅合金の圧縮応力度(N/mm²)（**図-2.1.14**，式(2.1.2)参照）

④ ソケットの連結部（連結構造）の強度

ソケットと構造体との連結方法には，さまざまな形態がある．大きく分類すると連結構造に関しては，**図-2.1.15** に示すように，支圧方式（前面支圧ソケット）とピン定着方式（オープンソケット）とに分類できる．



(a) 前面支圧ソケット　　(b) オープンソケット

図-2.1.15　支圧方式とピン定着方式の代表例

⑤支圧ソケットの支圧応力

支圧ソケットの場合，ケーブル張力をソケットが構造体と接触する面積（支圧面積）で除した応力に対して十分な支圧強度を有していなければならない．支圧応力 σ_b は式（2.1.6）で算出・照査する．

$$\sigma_b = \frac{T}{A_b} \leqq \sigma_{ayu} \tag{2.1.6}$$

ここで

T ：ケーブル張力(N)
A_b ：構造体との支圧面積（mm²）

オープンソケットの場合，ケーブルの張力に対してアイバーリング部およびピンが以下に示す強度を有していることが必要である．

⑥アイバーリングの引張応力度

道路橋示方書[13]では，アイバーリングの応力集中を考慮して，**図-2.1.16** に示す断面$A-A$では，計算上必要な純断面積の 135%以上，断面$B-B$では，計算上必要な断面の 100%以上が必要として，それぞれ**式（2.1.7)**，および**式（2.1.8)** により算出･照査する．

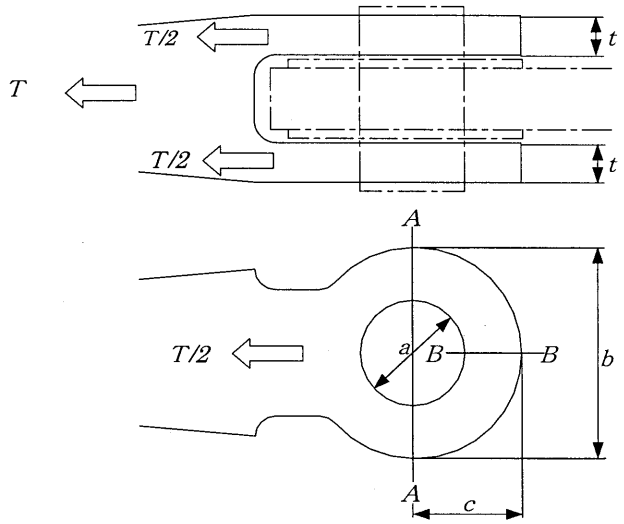


図-2.1.16 アイバーリングのアイ部の応力照査位置

$$A-A\text{断面}: \quad \sigma = \frac{1.35T}{2(b-a)t} \leqq \sigma_{ayu} \tag{2.1.7}$$

$$B-B\text{断面}: \quad \sigma = \frac{T}{2(c-a/2)t} \leqq \sigma_{ayu} \tag{2.1.8}$$

ここで

t ：アイバーリングの板厚(mm)
a ：アイバーリングのピン孔径(mm)
b ：アイバーリングの幅(mm)
c ：アイバーリングのピン孔センターから先端部までの長さ(mm)

⑦アイバーリングの支圧応力度

アイバーリングの支圧応力度σ_bは，$r_2/r_1 \leqq 1.02$ （**図-2.1.9** 参照）を基本とし，次式により算出・照査する．

$$\sigma_b = 1.56\frac{T}{2d_p t} \leqq \sigma_{ayu} \tag{2.1.9}$$

ここで

d_p　：ピンの直径(mm)
r_1　：ピンの半径(mm)
r_2　：ピン孔の半径(mm)

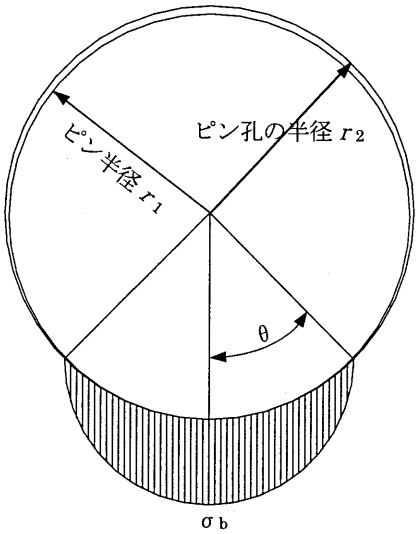


図-2.1.17　アイバーリングのピン孔の支圧応力度分布

⑧アイバーリングのせん断応力度

アイバーリングの端抜けに対し，せん断応力度 τ は**式(2.1.10)**により算出・照査する．

$$\tau = \frac{T}{4(c - a/2)t} \leqq \tau_{ayu} \tag{2.1.10}$$

ここで

τ_{ayu}　：ソケット材の照査せん断応力度(N/mm²)
（許容せん断応力度，降伏せん断強度，せん断強度等）

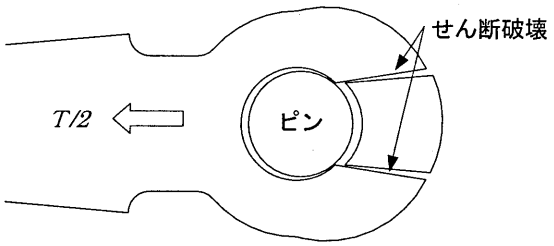


図-2.1.18　アイバーリングのせん断破壊イメージ図

⑨ピンの曲げ応力

ピンの曲げ応力度 σ は，一般的に，**式(2.1.11)**の用いて算出・照査する．

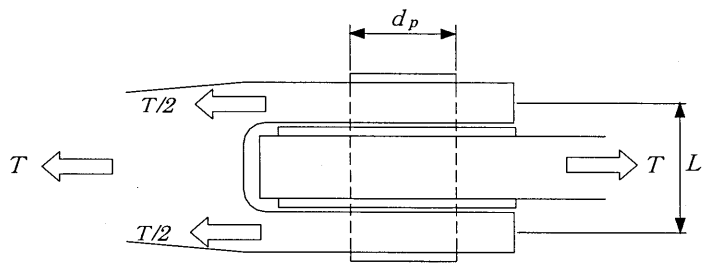


図-2.1.19 ピン部分の構造

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{32TL}{4\pi d_p^3} \leqq \sigma_{ayu} \tag{2.1.11}$$

ここで,

M ：ピンに作用する曲げモーメント(N·mm) $(M = TL/4)$
W ：ピンの断面係数(mm³) $(W = \pi d_p^3)$
L ：曲げ支点間距離(mm)

⑩ピンのせん断応力

ピンに発生するせん断応力度は式（2.1.12）により算出する.

$$\tau = \frac{T}{2A_p} \leqq \tau_{ayu} \tag{2.1.12}$$

ここで,

A_p ：ピンの断面積(mm²) $(A_p = \pi d_p^2/4)$

ピンの許容応力度について，道路橋示方書[14]では，一般的にボルト孔を設けることや，切欠きつくることがなく応力集中の起こる心配がないこと等を考慮し，許容せん断応力度を大きく定めている．また，許容曲げ応力度についても，支持幅（t）が比較的大きい場合，**図-2.1.19** のように支間 L で計算した曲げ応力度よりも実際の応力度は小さいことから許容曲げ応力度を約 40%増しとしている.

3）実際の設計例

実際にケーブル端末金具を設計するに当たっては，その強度をケーブルに対してどのように設定するかにより端末金具の必要とされる寸法が変わってくる．設計に当たっては，以下に示すような設定ケースが考えられる.

ケース① ： ケーブルの破断強度 ≦ 端末金具の破断強度
ケース② ： ケーブルの許容強度 ≦ 端末金具の許容強度
ケース③ ： ケーブルの作用応力 ≦ 端末金具の許容強度

表-2.1.4 には，端末金具に使用される主な材料の許容応力度と引張強度との比，また**表-2.1.5** には，ケーブルの各安全率による許容荷重と破断荷重との比を示している．端末金具の許容応力度と引張強度との比は約 0.31～0.37 に対し，ケーブルの許容荷重と破断荷重との比は 0.25～0.40 と異なっている.

ケース①で設計された端末金具は，ケーブルの破断まで端末金具が破損することはい．しかし，安全率 2.5 で使用されるケーブルに対してなど，安全率と金具材質との組み合わせによっては，ケーブルの使用範囲で端末金具が許容応力度を超えることとなる．逆に安全率 4.0 で使用されるケーブルに対して，端末金具に作用する応力度は，許容応力度の 75%程度までの使用応力となり，不経済となる．

ケース②で設計された場合，安全率 2.5 のケーブルに対して，ケーブル破断＜端末金具の破断，安全率 3.0 のケーブルに対して，ケーブル破断≒端末金具の破断，安全率 3.5，および 4.0 のケーブルに対しては，ケーブル破断＞端末金具の破断となる．この場合，ケーブルの破断試験を行った場合，ケーブルより先に端末金具が破損する場合があり注意が必要である．

ケース③の場合，ケーブルの作用応力に対して設計されるので経済的な設計となるが，ケース②と同様ケーブルが破断に至らない前に端末金具が破損することがある．

設計者は，以上を踏まえ，どのような条件で設計するか十分に検討する必要がある．

表-2.1.4　端末金具材料の引張強度と許容応力度との比

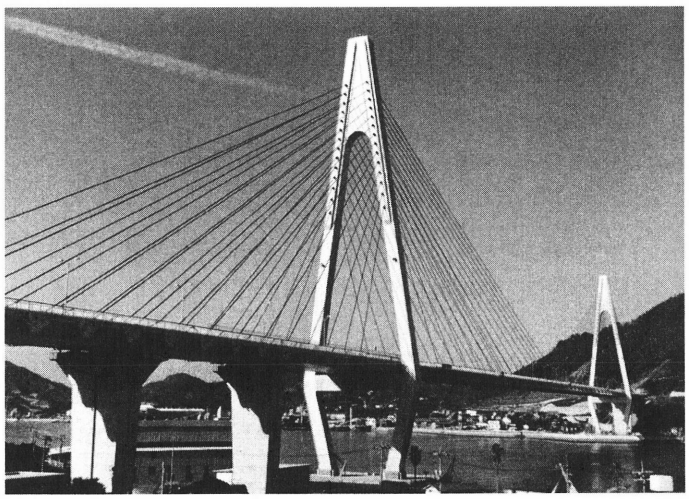
材質	許容応力度 σ_a	降伏点 σ_y	引張強度 σ_u	σ_a / σ_u
S35CN	190	305	510	0.373
S45CN	210	345	570	0.368
SC450	140	225	450	0.311
SC480W	170	275	480	0.354
SCMn1A	170	275	540	0.315
SCMn2A	190	345	590	0.322

表-2.1.5　各安全率による破断荷重と許容荷重との比

ケーブル安全率 f_s	許容荷重／破断荷重
f_s=2.5	0.400
f_s=3.0	0.333
f_s=3.5	0.286
f_s=4.0	0.250

ケーブル系橋梁の写真館

生口橋
（広島県尾道市）



2.2 ケーブルを用いた構造例とその特徴

2.2.1 橋梁におけるケーブルの使用例

橋梁でケーブルが使用されている箇所としては，①吊橋，斜張橋，アーチ橋などの吊材，②桁橋における曲げモーメントの低減部材（外ケーブルなど），③部材断面に圧縮応力を導入するPCケーブル（PC桁，連続合成桁の中間支点部），④上記②と③の両方の機能を利用した斜版橋やエクストラドーズド橋のケーブル，⑤引張力が作用する支承，落橋防止構造の連結部材，および制振部材，⑥架設部材の支持および運搬のためのケーブルなどがある．その使用例を整理すると，**表-2.2.1**に示すとおりである．いずれの場合も高い引張強度を利用して，①「吊る」，②「支える」，③「連結する」，④「補強する」，⑤「運搬する」などの役割を果している．

表-2.2.1 橋梁におけるケーブルの使用例

分類	用途・役割	適用橋梁・箇所
吊構造	橋梁の主要部材として桁を吊る，桁および塔を支える，桁をぶら下げる，等の役割を分担する．	吊橋
		斜張橋
		アーチ橋
		斜板橋
		エクストラドーズド橋
		ケーブルトラスト橋
		張弦橋
		吊床版橋
		新形式橋梁
PC構造	コンクリート部材にプレストレス力を導入し，引張応力にも抵抗できるようにする．	PC桁
		PC床版
		PC梁
連結構造	部材間にプレストレス力を導入し，引張応力にも抵抗できるようにする．	連結桁結合部
		混合桁結合部
支承部材	負反力が作用する支点部で引張力に抵抗する．	負反力支承
		転倒防止部材
耐震部材	地震力を分担・伝達する． 弾性拘束ケーブル支承として用いて橋梁を長周期構造とし，免震化を図る．	落橋防止装置の連結材
		センターステイ
		水平支承
耐風部材	風荷重を分担する． 風による振動を低減する．	ストームケーブル
		防振ケーブル
		塔バックステイ
架設部材	架設時に橋梁本体を支持する． 架設部材等を運搬する． 架設時の足場・安全設備の部材として使用する．	直吊工法
		斜吊工法
		直下吊上げ工法
		引出し・横取り工法
		キャットウォーク
補強部材	プレストレスを導入し，既設部材の応力を低減・分担する．	外ケーブル
		張弦桁
		桁連結
その他	車輌の逸脱を防止する．	防護柵

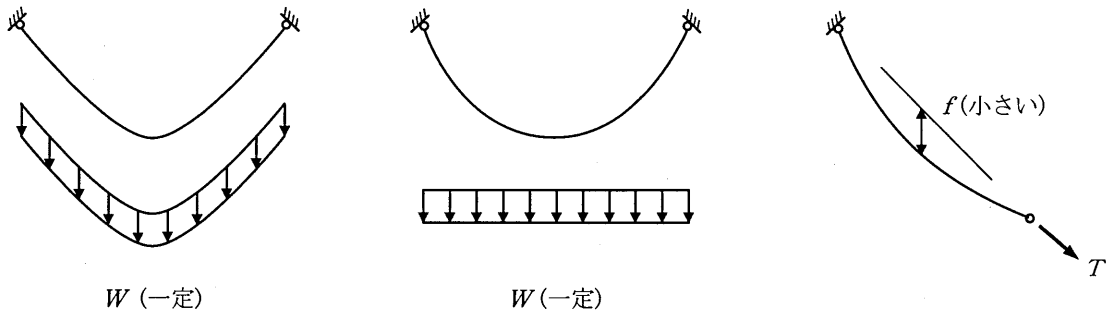
2.2.2 吊構造およびケーブルの設計

(1) ケーブル形状

ケーブルは曲げに対して柔軟に変形することから，**図-2.2.1(a)**に示すように，水平方向または斜方向に吊られたとき，ケーブルの形状はカテナリー(懸垂線)となる．また，吊橋のメインケーブ

ルのようにケーブルに作用する荷重が水平方向にほぼ一定と見なせる場合(**図-2.2.1(b)**を参照)や斜張橋のケーブルのようにケーブル自重による張力がケーブル全張力に比べて十分に小さい場合には，ケーブルの形状は放物線で仮定できる．さらに，ケーブル長に比べケーブル張力が大きく，サグ量が小さい場合(**図-2.2.1(c)**を参照)や鉛直方向に取付られているケーブル(吊材)は，ロッド部材(棒部材)として取扱われている．

したがって，構造解析ではケーブル張力が十分に大きい場合にはロッド部材にモデル化されている場合が多い(吊橋のメインケーブルはハンガー定着間を1つの部材としている)．また，架設時のようにケーブル張力が大きく変動する場合や長大斜張橋の上段ケーブルのようにサグの影響が無視できない場合には，ケーブルの形状を放物線と見なして，サグの影響を考慮した釣合い式が採用されている．**表-2.2.2**には，ケーブルに関する諸量の算出式を示す．



(a) ケーブル部材方向に荷重一定　(b) 水平方向に荷重一定　(c) ケーブルのサグ量が小さい場合

図-2.2.1 ケーブルに作用する荷重とケーブルの形状

(2) 設計荷重

吊構造およびケーブルの設計では，荷重に関して以下の点が考慮されている．

① 死荷重(D)：吊構造に用いられるケーブルや吊材は，死荷重とケーブルのプレストレス力とを同時に考慮して，解析される．また，架設時の応力が大きくなる場合や完成時の応力状態を決定する上で架設時の構造系(以下，架設系という)を考慮しなければならない場合が多い．

② プレストレス力(PS)：PC桁では応力状態に応じて，適切なPCケーブルの配置，適切な本数等と共に適切なプレストレス力が決定される．

② 活荷重(L)：吊構造では影響線を用いて算出した最大または最小断面力で部材断面が決定されている．しかし，実働活荷重モデルによるシミュレーション解析結果と比較すると，影響線解析による断面力が過大となる場合がある．

③ 衝撃(I)：吊構造の設計では，衝撃係数は部材別に設定されていることが多い．長大吊橋のメインケーブルおよび補剛桁では，衝撃は考慮されていない．また，車両走行による動的応答解析により衝撃係数が設定されている例もある．

④ 温度変化(T)：吊構造では，温度昇降，部材内の温度差の他，部材間の温度差が考慮される場合がある．

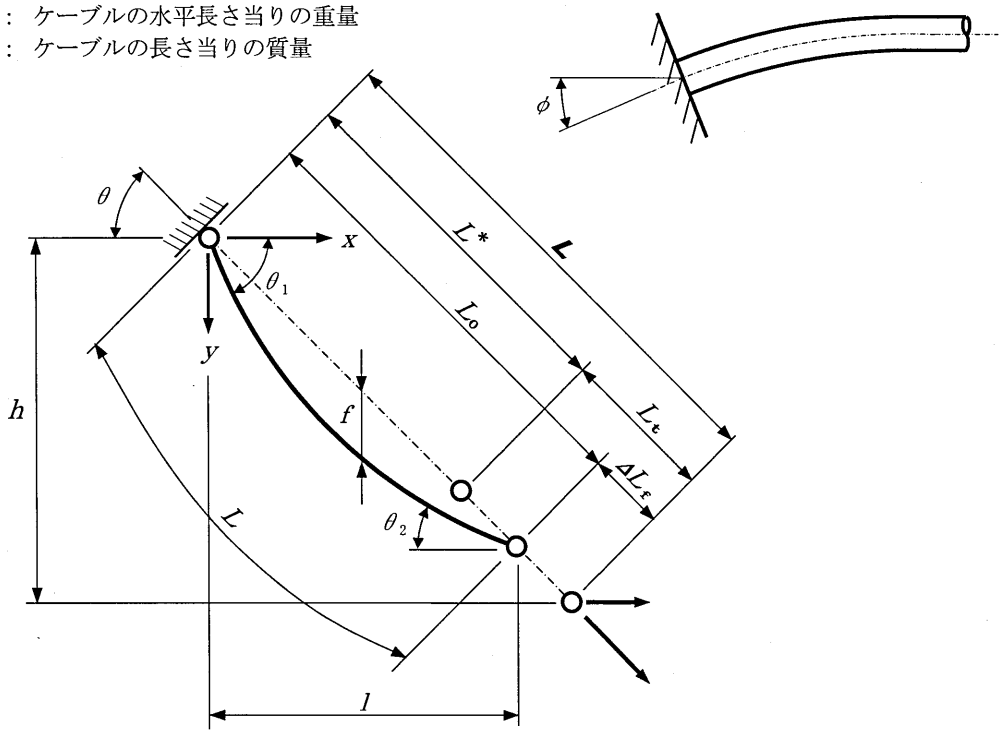
⑤ 風荷重(W)：吊構造は一般に撓度性に富み，振動しやすいし易い．このため，静的な風荷重による影響の他，風による動的な挙動に対する安定性を風洞実験等で確認されている．

表-2.2.2 ケーブルに関する諸値の算出式

項目		記号	算出式	備考
ケーブルの形状	縦距	y	$ax(l-x)+bx$	ケーブル形状：放物線 $a=f/l$ $b=h/l$
	勾配	θ_1	$al+b$	
		θ_2	$-al+b$	
ケーブルの張力		H	$wl^2/(8f)$	$w=\gamma/\cos\theta$
		T	$wl^2/(8f\cdot\cos\theta)$	
ケーブルの応力	引張応力	σ_t	T/A_c	平均値
	曲げ応力	σ_b	$2\phi\sqrt{E\sigma_t}$	$\phi=2f\cos\theta/L_o$
ケーブルの長さ	ケーブル長	L	$l(1+8/3\,n^2-32/5\,n^4)/\cos\theta$	$n=f\cos\theta/l$
	無応力長	L^*	$L_o+\Delta L_f-\Delta L_t=L-\sigma_t L_o/E_c$	$\Delta L_t=\sigma_t L_o/E_c$ $L=L_o+\Delta L_f$
ケーブルの見かけの弾性係数		E_f	$\dfrac{E_c}{1+\gamma^2 l^2 E_c/(12\sigma^3)}$	――
ケーブルの固有振動数		ν_i	$(i/2L_o)\sqrt{T/\rho}$	i = 1,2,3 ‥‥

【記号の説明】

E_c ： ケーブルの弾性係数
A_c ： ケーブルの断面積
γ ： ケーブルの単位体積重量
w ： ケーブルの水平長さ当りの重量
ρ ： ケーブルの長さ当りの質量



⑥ 地震荷重(EQ)：兵庫県南部地震を契機に，道路橋示方書が改訂され，マグニチュード 7 級の内陸直下型やプレート境界型の地震動(レベル 2 地震動)とそれに対する耐震性能を照査することが規定された．吊構造のような複雑な橋梁では動的解析による耐震性能照査が必要となる．

⑦ 製作・架設誤差(ER・E)：ケーブル張力の誤差として，設計張力の 5～10%が見込まれている場合が多い．

(3) 斜張橋のケーブルプレストレスの設定

完成時($D+PS$)：死荷重状態のケーブル張力を自由に設定できることが，斜張橋の利点の 1 つである．一般に，死荷重状態($D+PS$)での断面力，反力，およびケーブル張力は，死荷重(D)とプレストレス力(PS)とによるものに分けられている．しかし，これはあくまでも計算上のプレストレス量である．すなわち，完成系モデルに死荷重を載荷させた時の断面力等を D とし，完成状態で部材断面力等が最適となるように考えたものが $D+PS$ となる．プレストレス量およびそれによる断面力等を PS とすると，これらの値は $PS=(D+PS)-D$ で算出できる．

鋼斜張橋で一般的に用いられるケーブル張力($D+PS$)の設定条件を以下の(ｉ)～(ｖ)に示す．また，ケーブル張力の設定フローの例を**図-2.2.2** に示す．

(ｉ) 塔に曲げモーメントを生じさせない．

(ii) 主桁の曲げモーメントを均一かつ最小にする．

(iii) マルチケーブルでは，隣合うケーブルの張力差を小さくする．

(iv) 混合桁の場合，その連結部の曲げモーメントをできるだけ小さくする．

(ｖ) 桁閉合時における閉合部材端の曲げモーメント M を $M \fallingdotseq 0$ としておく．

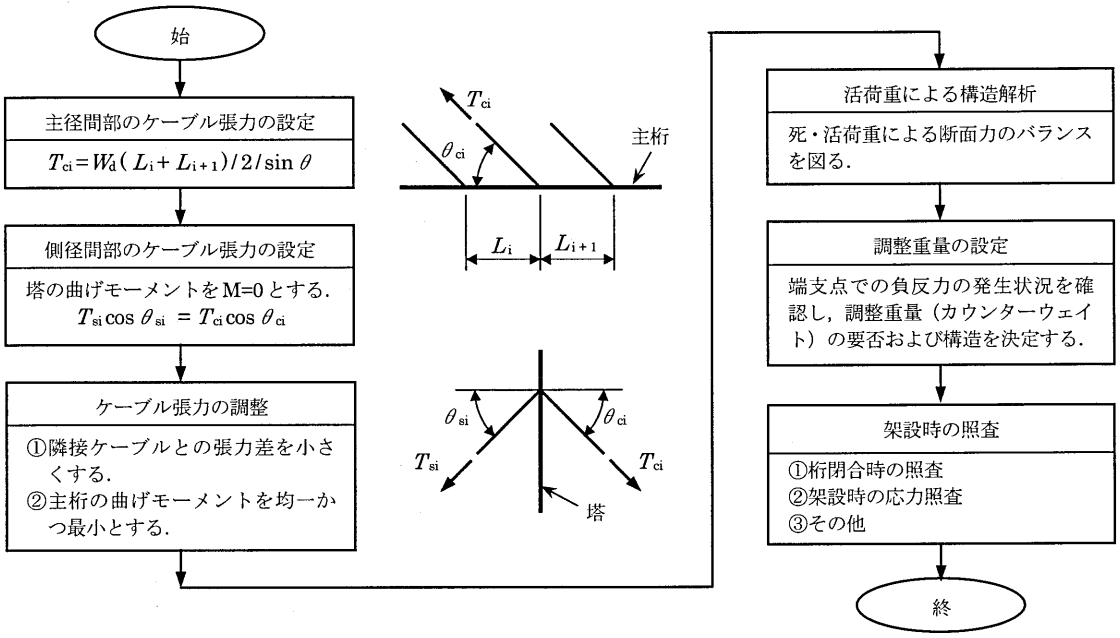


図-2.2.2 完成時($D+PS$)のケーブル張力の設定フロー図

(4) 架設誤差とケーブル張力の管理 [1)]

架設誤差は架設管理基準となる許容誤差の基本となるものであり，まず架設管理方針を明確にしておく必要がある．一般に，吊構造形式橋梁の管理方針としては，つぎの 3 通りが考えられる．

① 桁の架設キャンバーを計画値に合わせる（「形状管理法」と略称する）．

② ケーブル張力を計画値に合わせる（「応力管理法」と略称する）．

③ 部材寸法の検査記録に従い，忠実に組立ててゆく（「部材管理法」と略称する）．

「形状管理法」とは，橋面を計画どおりの縦断勾配にすることを第一の目的としており，部材応力が多少犠牲にされる可能性がある．したがって，架設時・完成時ともに，主要部分の応力度および安全性の照査を行っておくことが肝要である．

「応力管理法」とは，吊構造の特長をより活かすため，ケーブルの応力を計画値に合わせる方法である．この場合，計画高と差が生じたとき，どのように処理するか，また応力の計測精度が問題となる．

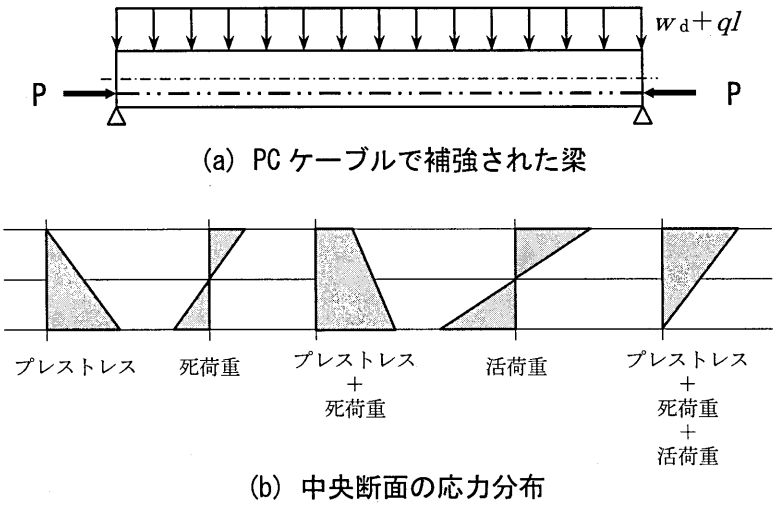
「部材管理法」とは，施工中の架設荷重や構造部材間および部材内の温度差などを適確に把握することはむずかしいことから，部材寸法の検査記録に従い忠実に施工する方法である．そこで，全ての部材は架設前の精度向上につとめることが大切であり，製作誤差は調整シム等により補正される．

したがって，吊構造の形式や基本構造系等を考慮の上，詳細な施工計画に合わせて架設管理方針を明確にするとともにそれに応じた許容誤差を設定し，架設時の安全性ならびに架設誤差の影響を確認しておかなければならない．ケーブルの用途（使用箇所）によっては，製作・架設誤差によるケーブル張力の変動が大きくなる場合があるため，製作・架設の管理値と設計で見込む誤差荷重を適切に設定する必要がある．例えば，管理値が厳しすぎると現場作業が大変となりコスト高の要因となるため，設計で見込む誤差荷重を大きくして，管理値に余裕を持たせるのも１つの方法である．

2.2.3 PC構造および混合構造におけるケーブルの役割と配置

(1) PC構造

RC 部材は大きな圧縮耐荷力に抵抗できるが，引張力に対しては弱く，コンクリートの引張強度は圧縮強度の 1/10~1/13 程度と小さいため，引張応力が発生する箇所に鉄筋を配置して引張力を分担させている．しかし，荷重状態や使用箇所により発生する引張応力のレベルは異なるが，乾燥収縮・クリープ，活荷重などの荷重によりひび割れが発生することがある．そのため，大きな引張応力が発生する部材では，**図-2.2.3** に示すように，予めケーブルにプレストレス力を与え，圧縮力を導入することにより，引張力にも抵抗できる PC 部材が用いられている．また，PC ケーブルは，**図-2.2.4** に示すように，使用される部位によりケーブル配置が工夫されている．



(a) PC ケーブルで補強された梁

(b) 中央断面の応力分布

図-2.2.3 プレストレス力による圧縮応力の導入とその効果

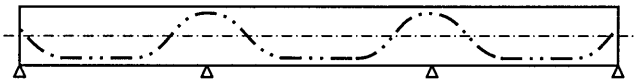
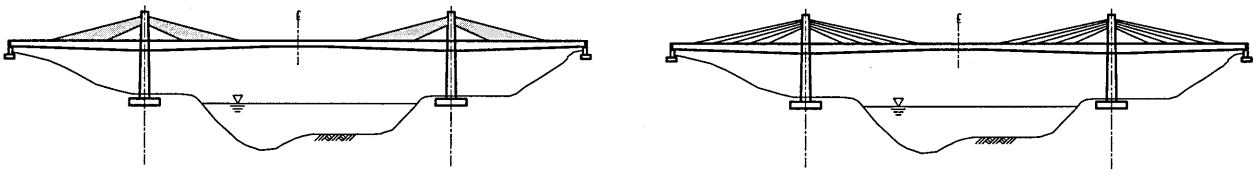


図-2.2.4 連続桁の PC ケーブルの配置

(2) エクストラドーズド橋

PC 桁橋では，支間長が長くなると自重の増大が著しく，橋脚・基礎も大きくなる．このため，鋼橋に比べ ①桁高が高くなり桁下空間が確保できなくなる場合がある，②耐震性の低下，③PC 鋼材量の増大，④コスト増，⑤重量感・圧迫感が増す，などの点で不利となる．そこで，支間長 100～200 m の PC 橋梁では，主桁にプレストレス力と大きな偏心曲げモーメントを作用できる，**図-2.2.5** に示すような斜版橋やエクストラドーズド橋などの大偏心ケーブル PC 橋が採用されている．斜版橋は，クリープ・収縮の影響が大きくかつ不明確であり，地震時の慣性力が大きくなること，斜版の施工が困難であること，走行者に圧迫感を与えること，などの理由で採用例は少ない．これに対して，エクストラドーズド橋は，支間長 100 ~ 200 m の範囲では，PC 桁橋に比べコンクリート量および PC 鋼材量が少なくでき，上記①～⑤の改善が可能である．また，PC 斜張橋に比べて塔高が低いことから，塔やケーブルの材料が少なくでき，施工性も向上する．さらに，斜張橋とは一味異なる景観美を創作できるなどの利点がある．これらのことから，最近，エクストラドーズド橋の採用が多くなっている．



(a) 斜版橋　　(b) エクストラドーズド橋

図-2.2.5 大偏心ケーブル PC 橋

(3) 混合桁連結部の構造

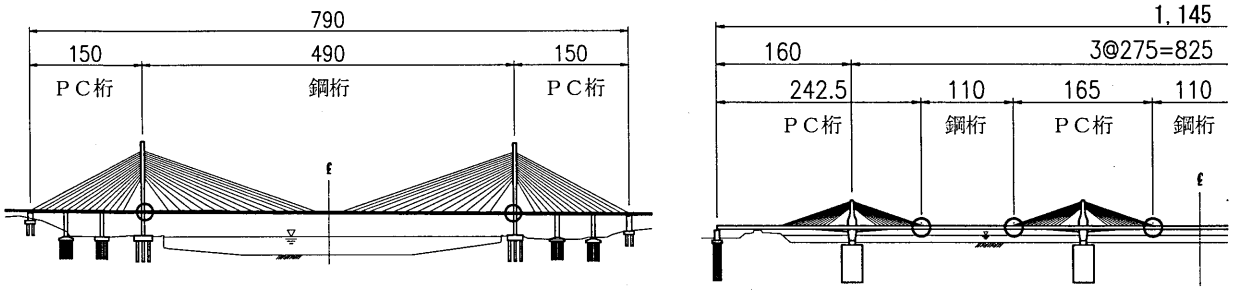
PC 桁と鋼桁とを連結した混合桁では，その連結部を PC ケーブルで連結し，引張力に抵抗できるように PC ケーブルにプレストレス力が導入されている．混合桁が採用された橋梁の実施例を**図-2.2.6** に示す．

これらの橋梁では，PC 桁と鋼桁間の連結部（**図-2.2.6(c)**，**(d)** を参照）に引張応力が発生しないように，断面内に PC ケーブルを配置して，プレストレス力が導入されている．

2.2.4　吊構造およびケーブルの耐風設計

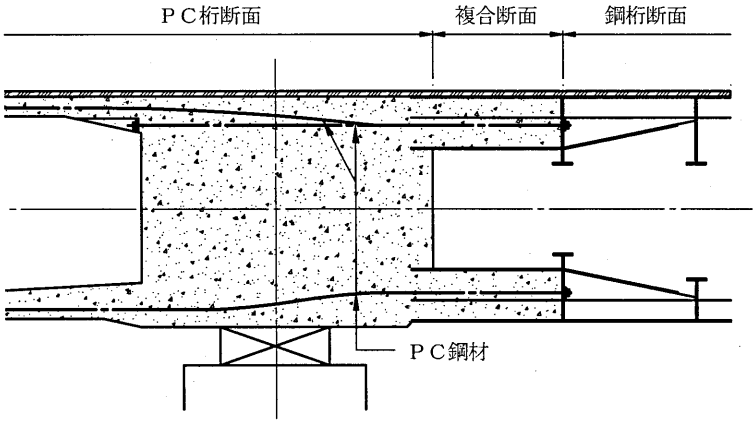
(1) 吊構造の耐風設計

一般に，吊橋，斜張橋，アーチ橋などの吊構造は橋梁全体の剛性が小さいため，風により振動し易く，静的作用の他，動的作用に対する設計も重要となる．風による振動現象としては，**図-2.2.7** や**表-2.2.3** に示す種類がある．これらの振動対策として主桁や塔部材には，**図-2.2.8** に示すような空力対策断面や風により揺れ難いトラス断面が採用されている．

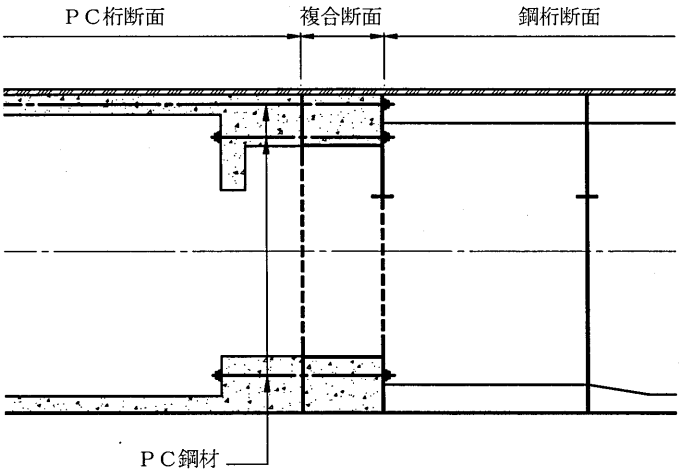


○：連結部，（寸法単位：m）

(a) 生口橋（斜張橋）橋梁　　(b) 木曽川橋（エクストラドーズド橋）



(c) 生口橋の連結部構造 [2)]



(d) 木曽川橋の連結部構造 [3)]

図-2.2.6 混合桁を用いた橋梁の実施例とその連結部構造

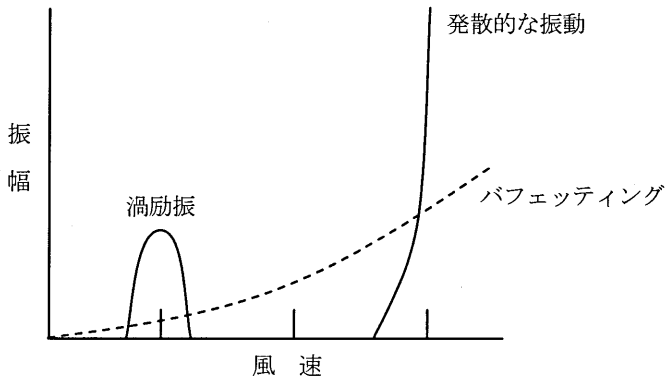


図-2.2.7　風による振動現象の概念図 [4)]

表-2.2.3 空力現象の分類

空力現象 / 項目	振動モード		振幅	メカニズム
	曲げ	ねじれ		
①渦励振	○	○	限定振動	強制 or 自励
②バフェッティング	○	○		強　制
③ギャロッピング	○		発散振動	自　励
④ねじれフラッター		○		
⑤曲げねじれフラッター	○			

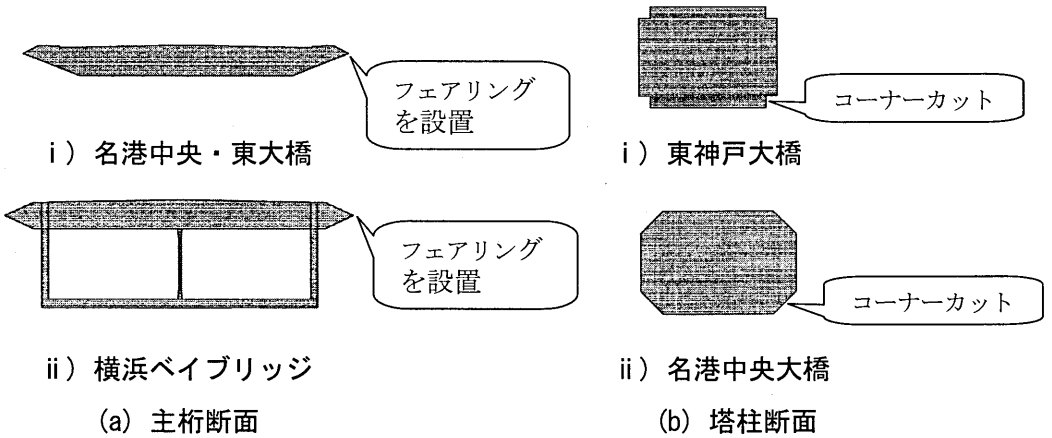


図-2.2.8 空力対策断面の例 [5),6),7)]

(2) ケーブルの振動

風によるケーブルの振動現象としては，つぎのようなものがある．

① カルマン渦による渦励振

② 六角形断面ケーブルにおけるギャロッピング

③ 並列ケーブルにおけるウェイクギャロッピング

④ レインバイブレーション

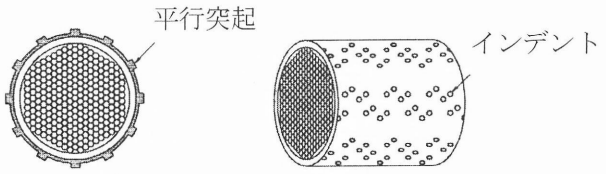
⑤ 塔からの剥離渦によるウェイクレゾナンス

これらの振動により，ケーブルの定着部では大きな曲げ応力が発生し，ケーブルの疲労が問題と

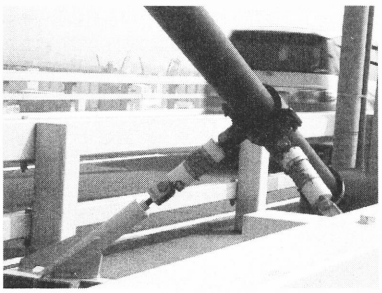
なる場合や発散的な振動が生じる場合がある．このようなケーブルの振動問題に対して，疲労強度等から許容振幅 δ_a を設定して，風によるケーブルの振幅 δ が許容振幅以下（$\delta \leqq \delta_a$）となるように，**表-2.2.4** および**写真-2.2.1** に示すような制振対策が実施されている[7),8),9)]．

表-2.2.4 ケーブルの制振対策例

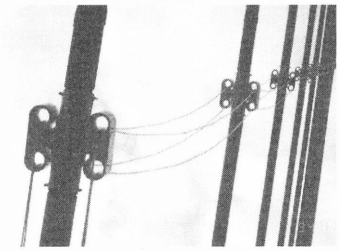
制振対策	実施橋梁	振動現象
ステンレスワイヤ（ケーブル間に設置）	・名港西大橋	レインバイブレーション
スペーサー＋ステンレスワイヤ（ケーブル間に設置）	・櫃石島・岩黒島橋　・呼子大橋	レインバイブレーション ウェイクギャロピング
オイルダンパー	・荒津大橋　・天保山大橋	レインバイブレーション
粘性ダンパー	・幸魂橋	ウェイクギャロピング
	・東名足柄橋	レインバイブレーション
空力対策断面	・東神戸大橋	渦励振，レインバイブレーション
	・多々羅大橋	渦励振，レインバイブレーション



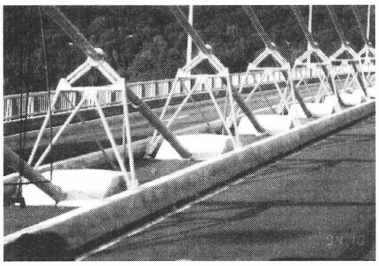
(a) ケーブルの空力対策断面



(b) ダンパーによる制振対策



(c) ワイヤによる制振対策



(d) 端部拘束による制振対策

写真-2.2.1 ケーブルの防振対策例

2.2.5 吊構造の耐震設計

吊構造の橋軸方向の支持方法に着目すると，吊橋の補剛桁は各支点ですべて可動となっている．下路アーチ橋では，1 点固定支持が多く採用されている．斜張橋では，橋梁の規模，立地条件，および構造条件により種々な固定方法が採用されている．長大斜張橋では，**図-2.2.9** に示すような検討フローに基づき，地震力の分散・軽減，温度変化による影響の低減，支持装置，固定脚の構造等について検討され，**表-2.2.5** に示すように，各橋梁の諸条件に合った，合理的かつ経済的な耐震固定方法が選定されている[4),7),9)]．**図-2.2.10** には，各橋梁で採用されている橋軸方向支持装置の例を示す[2),5),7),10)]．

ところで，兵庫県南部地震を契機に道路橋示方書[11]が大きく改訂され，マグニチュード 7 級の内陸直下型やプレート境界型の地震動（レベル 2 地震動）とそれらに対する耐震性能の照査方法が規定された．吊構造では，このレベル 2 地震動による変位量がかなり大きくなるため，地震力の低減対策と合わせて，変位制御対策が重要な課題となっている．

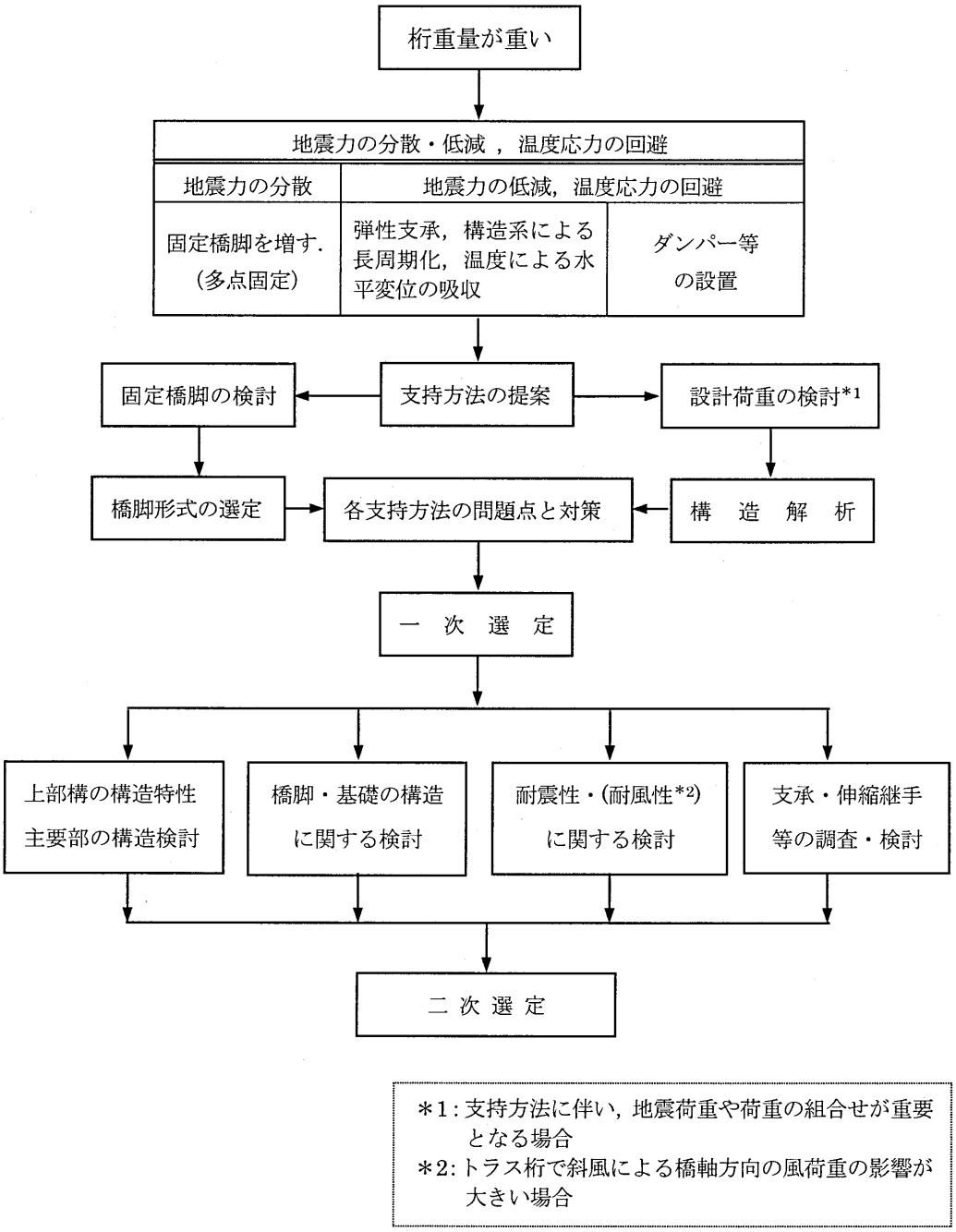


図-2.2.9 地震時の橋軸方向支持方法の検討フロー

表-2.2.5 耐震固定方法（橋軸方向の支持方法）

耐震固定方法		橋軸方向の支持条件	備考
①1点固定		M F M M	・末広大橋　・豊里大橋 ・六甲大橋　・かもめ大橋 ・大和川橋梁
②多点固定	塔部固定	M F F M	・天保山大橋 ・サラーテブラゾラーゴ (Zārate-Brazolargo) 橋 ［塔部にダンパーを設置］
	端部固定	F M M F	・サンナザール (St.Nazaire) 橋
③弾性固定	塔部固定	M B B M	・名港トリトン ・鶴見つばさ大橋
	端部固定	B M M B	・パスコケネビック (Pasco-Kennewick) 橋 ・櫃石島橋・岩黒島橋 ・生口橋　・多々羅大橋
④オールフリー		M M M M	・フィードリッヒエルベ (Friedrich Ebert) 橋 ・ランデ (Rande) 橋 ・横浜ベイブリッジ　・東神戸大橋

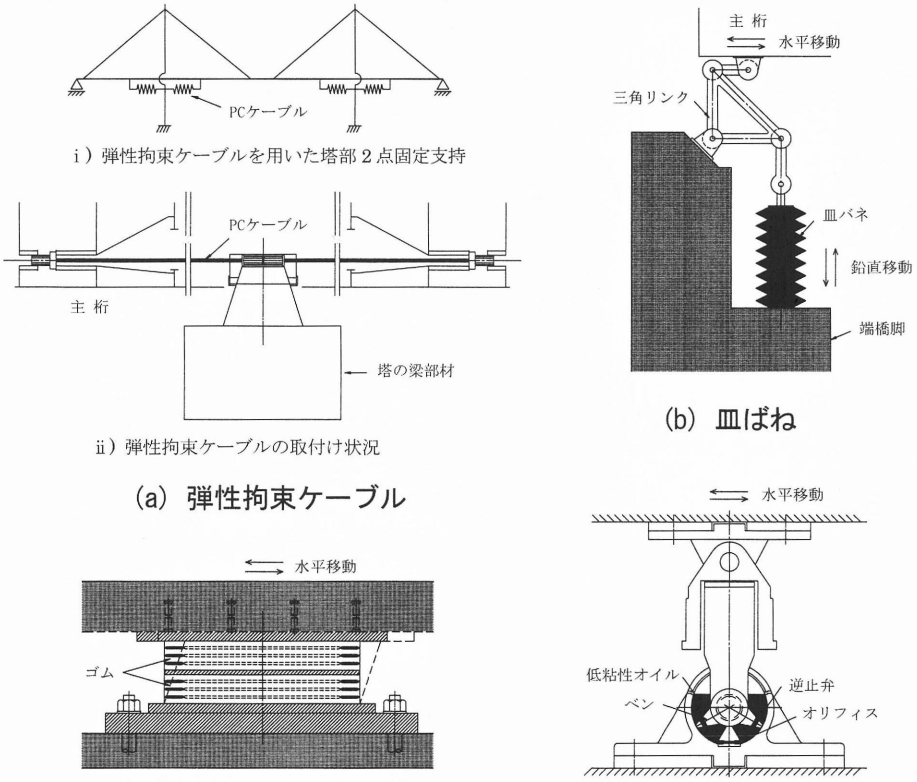
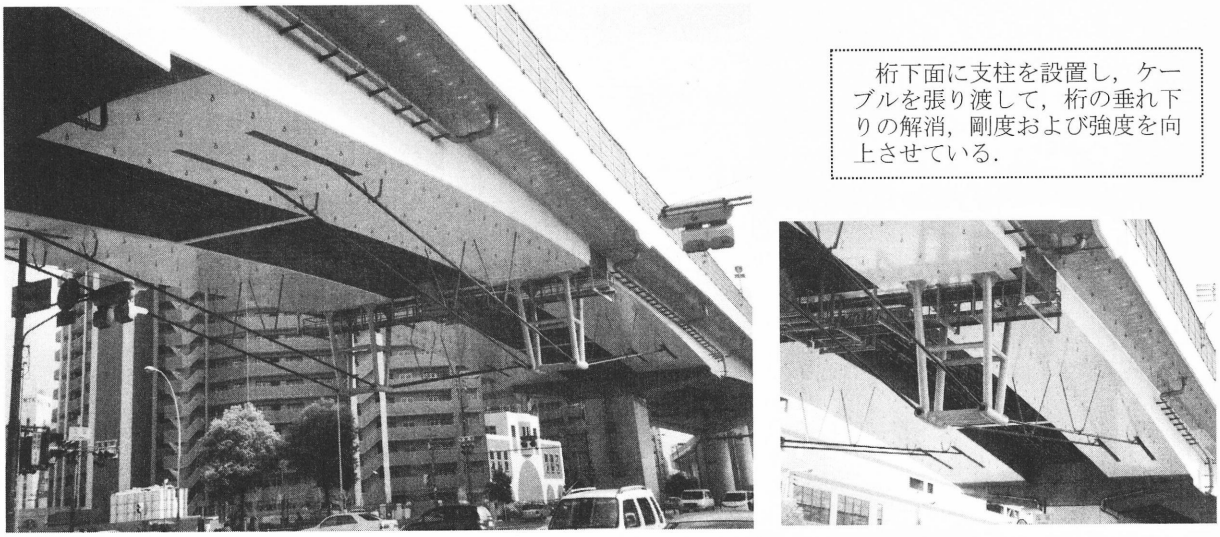


図-2.2.10 橋軸方向の支持装置の例

2.2.6　ケーブルを利用した既設橋の補強例

交通量や車両重量の増大に伴い，平成 2 年(1990 年)の道路橋示方書[12]において活荷重強度が改訂された．これに伴う補強，いわゆるB活荷重対応，およびクリープによるPC桁の垂れ下り回復・抑止対策の実施例を**写真-2.2.2** に示す．これらの橋梁では，完成後コンクリート部のクリープなどにより設計時より大きなたわみが発生したため，その垂下り量を回復させ，活荷重の増大に対する桁剛性・強度を向上させる工法である．なお，垂下り量を減少させる効果はあまり期待できない．

(a) 3 径間切断合成桁橋

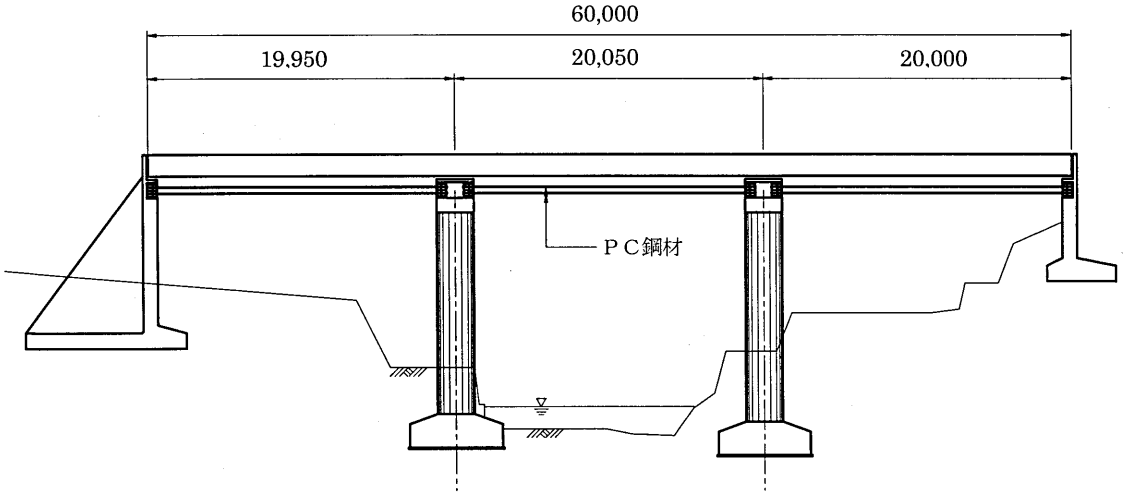


(b) PC 3 径間連続有ヒンジラーメン橋[13]

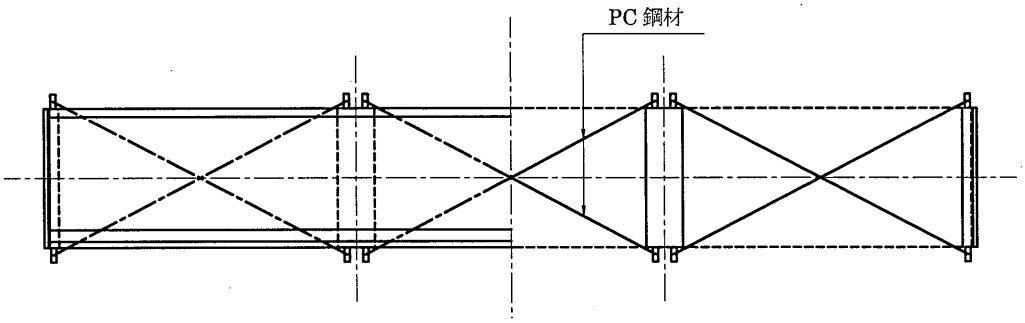
写真-2.2.2 外ケーブルを利用した補強対策の実施例

また，耐震補強対策として，**図-2.2.11** に示すように，橋脚天端をケーブルで繋ぐ工法が採用されている例がある[14]．この工法では，ケーブルで地震力の一部を負担させることにより，既設橋脚および基礎の耐震性能の向上を図っている．したがって，橋脚が河川内に位置する場合など，地形条件や交差条件等から橋脚や基礎の補強工事が困難な箇所では，有効な補強対策となる．また，谷

間部に架設される高橋脚を有する高架橋では，**図-2.2.12** に示すように，地震力をケーブルで分担させ，高橋脚とその基礎とをコンパクトな構造とすることも可能である．これにより，耐震性能を確保し経済性を図るとともに，景観面では橋脚形状を設定する際の自由度が高められるなどの利点が考えられる．



(a) 側面図（寸法単位：mm）



(b) 平面図

図-2.2.11 ケーブルによる耐震補強対策の例

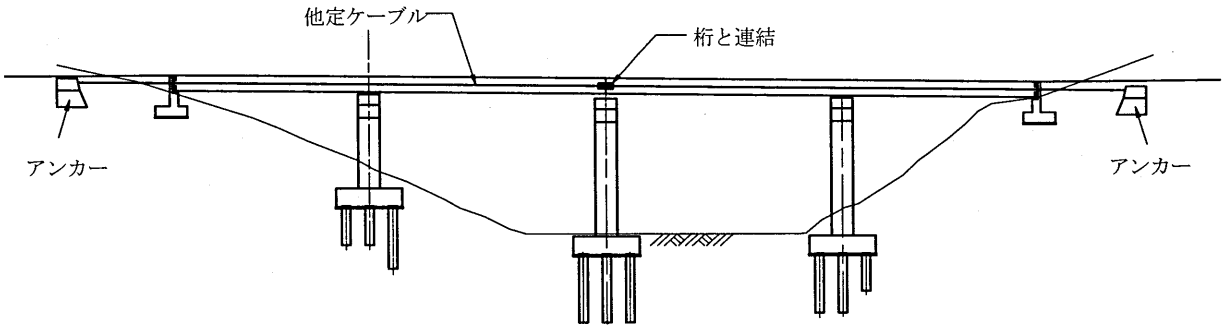


図-2.2.12 高橋脚を有する高架橋の他定ケーブルによる耐震対策の例

2.3　ケーブルの定着構造の種類

ケーブルの定着構造は，ケーブルに作用する張力を，主桁，主塔，およびアーチリブまたはアンカーにスムーズに伝達できる構造でなくてはならない．ここでは，主に斜張橋に用いられるケーブルの定着構造について紹介している．しかし，吊橋やアーチ橋でも同様な定着構造が選定されている．

2.3.1　鋼橋

(1) 主桁のケーブル定着構造

主桁へのケーブルの定着構造を決定するためには，ケーブルの本数とその配列，主桁や補強プレートの寸法・配列，ケーブルソケットの形状，ケーブルの張力，および張力の導入方法といった多くの要因を考慮し設計する必要がある．**図-2.3.1** に示すように大きく分けて以下の 5 種類のタイプがある．

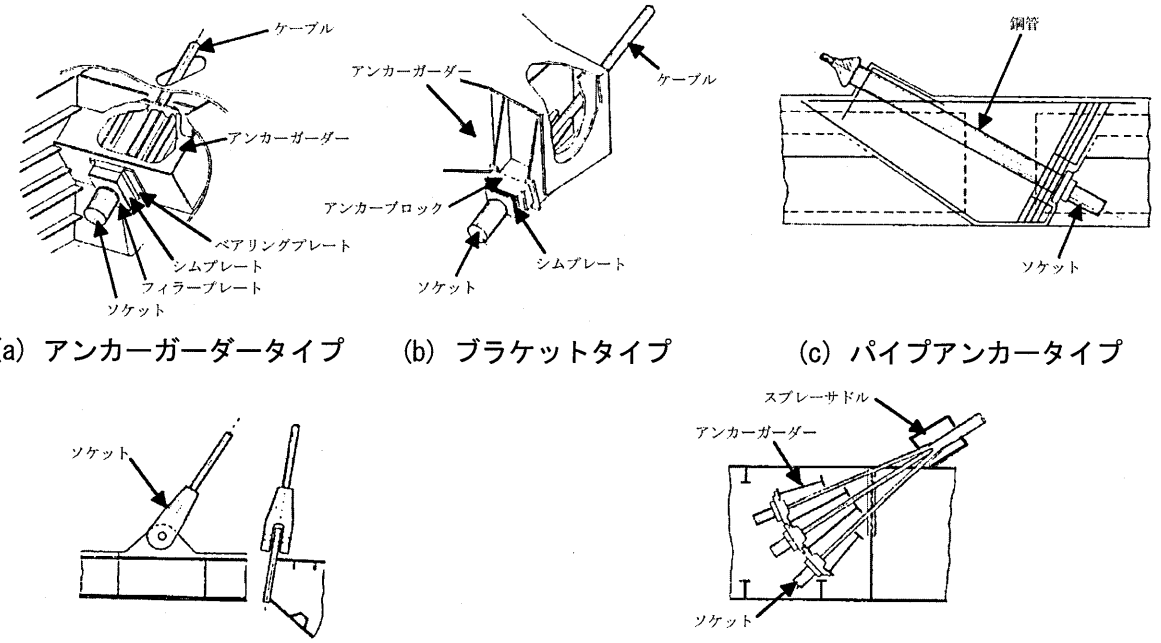
①アンカーガーダータイプでは，アンカーガーダーを主桁に溶接または高力ボルトを用いて設置し，そこにケーブルを定着させる．

②アンカーガーダータイプが桁内部に定着構造部を設けるのに対し，ブラケットタイプでは，桁からブラケットを張り出して，ケーブルを定着させる．

③パイプアンカータイプでは，アンカーガーダーの代わりに定着鋼管を主桁に溶接してケーブルを定着させる．

④ガセットプレートタイプでは，主桁よりガセットプレートを張り出し，ケーブルをピン定着させる．

⑤スプレーサドル＋アンカーガーダータイプは，多数のストランドを束ね合わせたケーブルを定着するのに用いる方法で，束ね合わせられているストランドをスプレーサドルから分割し，ストランドごとにアンカーガーダーに定着する．長大吊橋のメインケーブルのアンカーへの定着にも同様な方法が用いられている．



(a) アンカーガーダータイプ　(b) ブラケットタイプ　(c) パイプアンカータイプ

(d) ガセットプレートタイプ　(e) スプレーサドル＋アンカーガーダータイプ

図-2.3.1　主桁のケーブル定着構造の例

(2) 主塔のケーブル定着構造

主塔へのケーブルの定着の設計においても，ケーブルの本数・配列，ソケットの形状，塔の形状，ケーブルの引き込み方法などの要因を考慮しなければならない．**図-2.3.2** に示すように，6 種類の定着構造がある．

①サドルタイプは，ケーブルソケットを塔内の補強梁の上に設置された U 字形状のサドルにケーブルソケットを定着する方法で比較的シンプルな構造である．

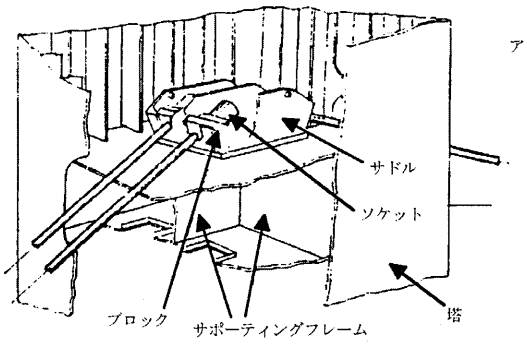
②アンカーガーダータイプは，塔壁の間にアンカーガーダーを設置し，その上にケーブルソケットを定着する．

③ベアリングプレートタイプは，塔壁または補強壁に直接設置されたベアリングプレートにケーブルソケットを定着する方法で，塔壁に直接ケーブルの荷重が伝達される．

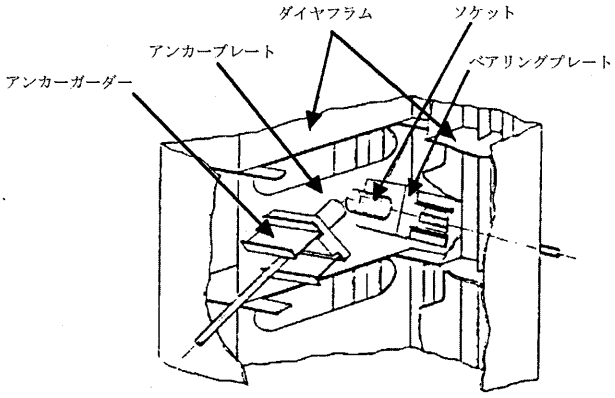
④パイプアンカータイプは，主にプレストレスコンクリート製の塔に対して用いられる方法で，コンクリートに埋め込まれた定着鋼管にケーブルを通し定着させる．

⑤ピンタイプの定着は，ソケットピンの寸法が大きくなるため，これらのハンドリングのためのスペースについても考慮が必要である．

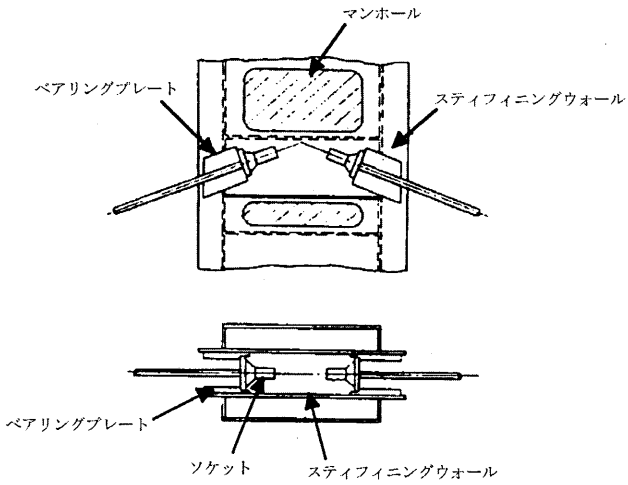
⑥多数のストランドを束ね合わせた大容量のケーブルに対しては，ケーブルは塔上に設置されたサドル上に連続的に定着される．この方法は，吊橋や初期のケーブル本数の少ない斜張橋に用いられている．



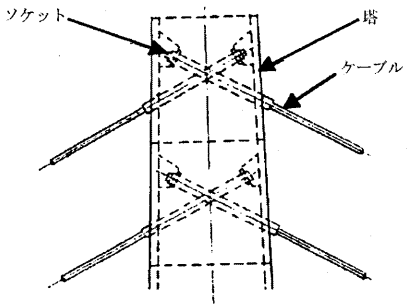
(a) サドルタイプ



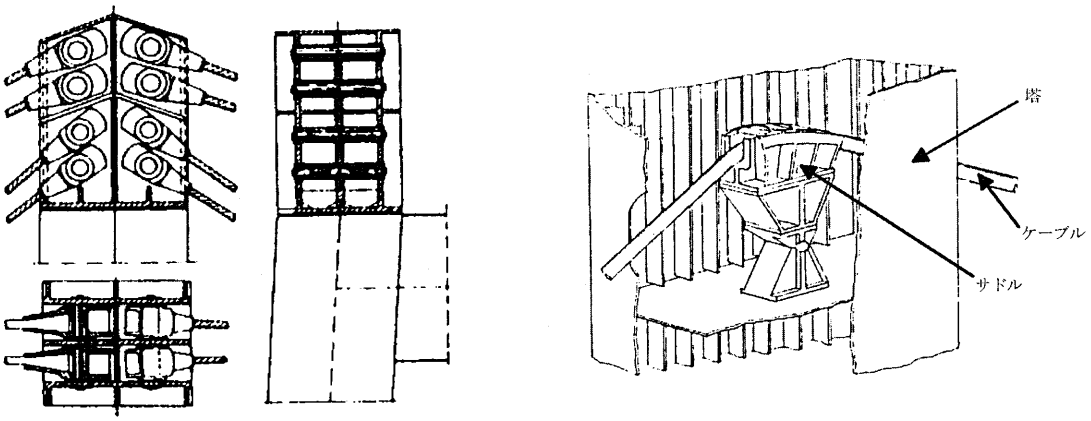
(b) アンカーガーダータイプ



(c) ベアリングプレートタイプ



(d) パイプアンカータイプ



(e) ピンタイプ　　(f) サドルタイプ
(多数本束ね合わせた大容量のケーブル)

図-2.3.2　主塔のケーブル定着構造の例

(3) その他のケーブル定着構造

既に 2.3.1(1)～(2)で記した定着構造は主に道路橋に用いられているケーブルの定着構造について述べた．しかし，小規模の人道橋では，耐荷力の小さい細ケーブルを用いていることから，上記と異なったタイプ，あるいは上記に述べた構造を組み合わせたものがある．また建築の分野では，そのデザイン的要素から特殊な定着構造を用いているものがある．

図-2.3.2 には，小規模の人道吊橋のメインケーブルの定着に多く用いられている方法を示している．アンカーより張り出されたプレートに調整ロッドをピン定着し，ロッドにソケットを固定する．長さ調整代を大きく取れること，および張力導入をソケット前面側で行えるといった利点がある．

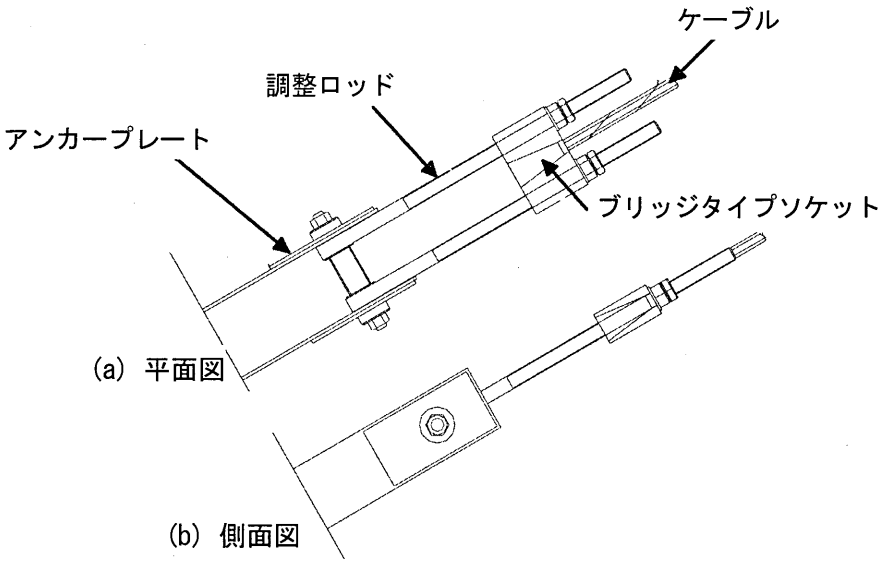
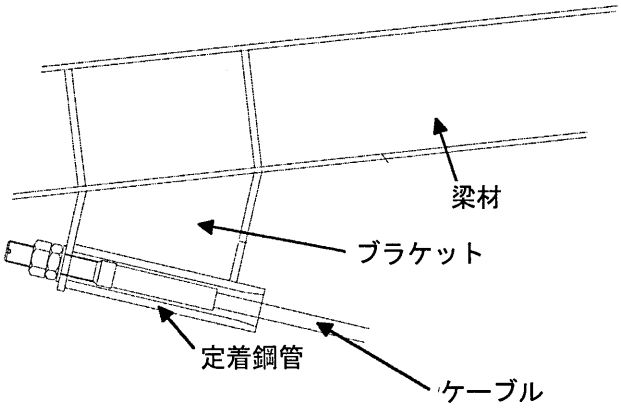


図-2.3.3　小規模人道橋の細ケーブル用定着構造の例

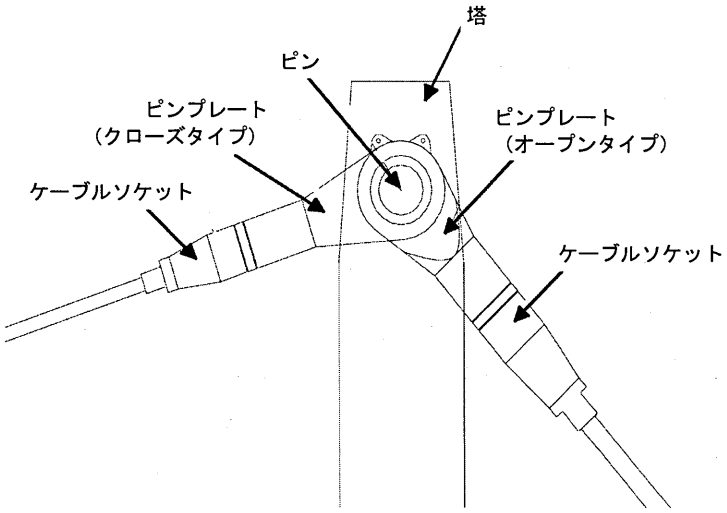
図-2.3.4(a)には，建築の張弦梁構造でよく用いられているケーブルの定着構造を示す．定着鋼管を溶接したブラケットを梁材に取付け，定着鋼管にケーブルを定着させる構造で，ブラケットタイプとパイプアンカータイプの複合型といえる．

図-2.3.4(b)に示す定着構造では，左右からのケーブルにそれぞれオープンタイプ・クローズタイプのピンプレートを取付け，1つのピンで左右のケーブルを塔に定着させている．

ケーブルの定着構造には，いくつかの基本的構造とその組み合わせにより様々な構造形式が考えられる．いずれの場合においても，先にも述べたように，ケーブル，桁，塔などの配置や張力の導入方法，架設におけるケーブルのハンドリング方法など様々な要因を十分考慮し，ケーブルに負荷される張力をスムーズに伝達できる構造が必要とされる．



(a) ブラケットタイプとパイプタイプの複合型



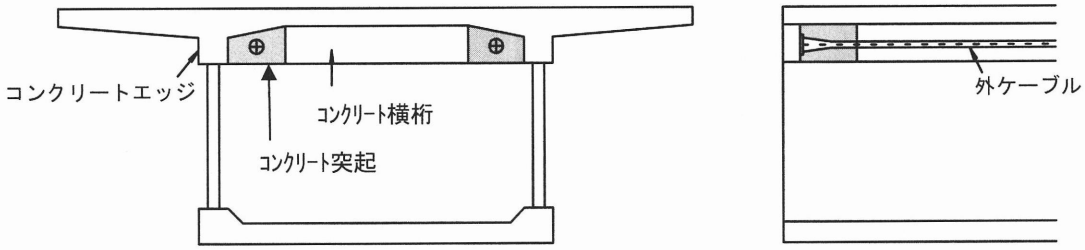
(b) 左右のケーブルを1つのピンで定着している構造

図-2.3.4 建築におけるケーブル定着構造の例

2.3.2 PC橋

PC橋のケーブル定着構造としては，箱桁内の外ケーブルや大偏心ケーブル構造における外ケーブルの定着構造，およびエクストラドーズド橋や斜張橋における斜材ケーブルの主桁および塔における定着構造に大きく分類される．

箱断面構造や複合トラス構造に用いられる外ケーブルや大偏心ケーブル構造における外ケーブルの定着構造において，一般的に，外ケーブルは，支点上横桁や柱頭部横桁に定着される場合が多い．しかし，張出し工法における張出しケーブルでは，箱断面構造等の場合，コンクリート床版に突起を設けて定着されたり，鋼製横桁に定着される．コンクリートの突起定着構造の例を**図-2.3.5**および**写真-2.3.1**に示し，鋼製横桁の定着構造の例を**図-2.3.6**に示す[1),3)]．



(a) 断面図　　(b) 側面図

図-2.3.5　コンクリート桁のケーブル定着構造の例

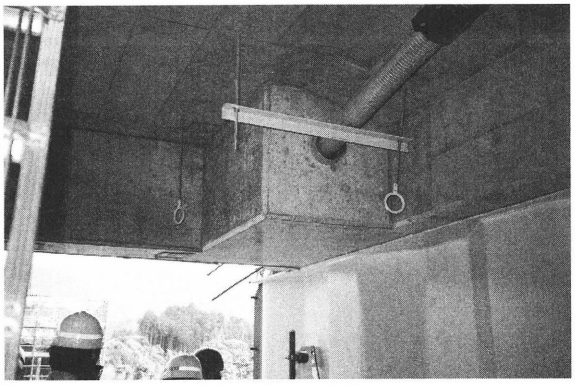
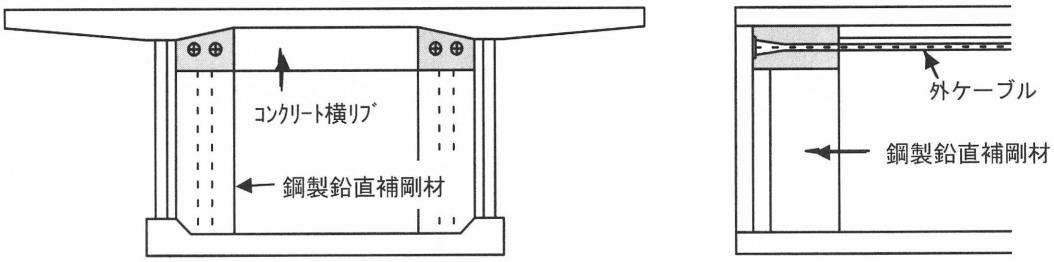


写真-2.3.1　コンクリート桁のケーブル定着構造の例



(a) 断面図　　(b) 側面図

図-2.3.6　鋼製横桁の定着構造の例

コンクリートウェブ構造のエクストラドーズド橋や斜張橋では，一般的にコンクリート構造のケーブル定着構造が採用されている．しかしながら，波形鋼板ウェブ PC 箱桁橋のような合成構造においては，ケーブル定着構造の選定にあたり，軽量化や定着される部位での力の伝達挙動を考慮した構造検討が必要となる．

エクストラドーズド橋や斜張橋では，斜ケーブルの定着に特徴がある．斜張橋では，斜ケーブルの定着は，基本的に主桁側と塔側とで定着されるのが一般的である．しかしながら，斜ケーブルの配置角度が小さいエクストラドーズド橋では，塔側で連続的にケーブルを偏向配置できるため，経済性を考慮して主塔側でケーブルを偏向し，主桁側でケーブルを定着するのが一般的である．特に複合構造の定着構造については，近年，上部構造の軽量化や部材のシンプル化を図るため鋼製の定

着構造が採用される場合が多い．ケーブル定着構造の計画に必要な着目点は，①ケーブルの鉛直分力を適切に波形鋼板ウェブに伝達する構造，②主桁のねじり剛性を補剛し，ゆがみ変形を防止できる構造，③波形鋼板とコンクリートとの接合部に不具合を生じない構造，および④合理的で施工性に優れた構造とすることである．

上記を考慮したエクストラドーズド橋の定着構造の例を**図-2.3.7**に示す[4),5)]．本構造採用のコンセプトは，ケーブルの鉛直分力を適切に波形鋼板ウェブに伝達する構造とすると同時に，主桁自重の低減を図れる構造とすることなどである．

また，斜張橋に採用された定着構造の例を**図-2.3.8**に示す[6)]．

塔でのケーブル定着構造については，一般的に**表-2.3.1**に示す構造が採用されている[2)]．

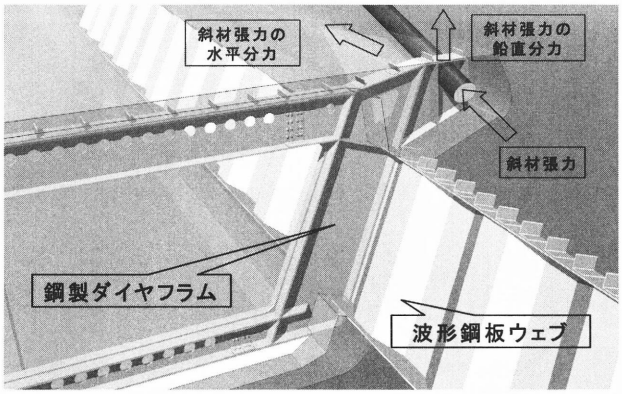


図-2.3.7　エクストラドーズド橋のケーブル定着部の鳥例図

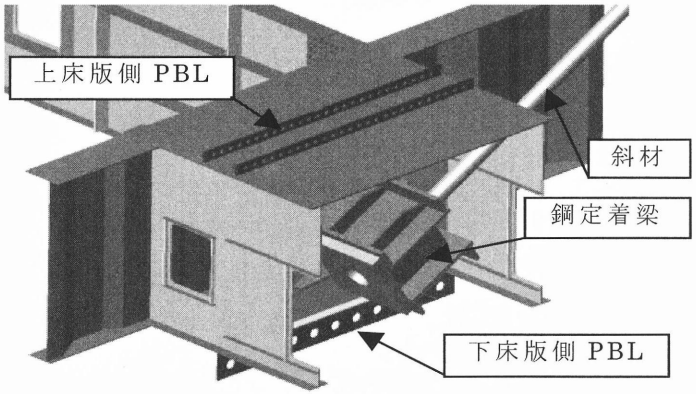
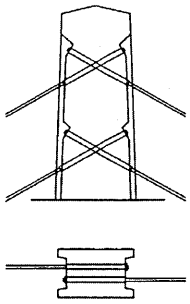
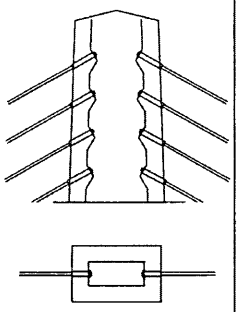
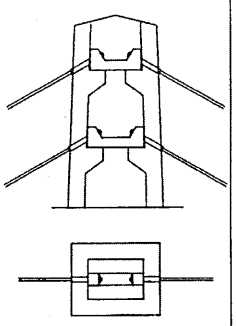
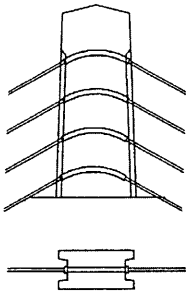
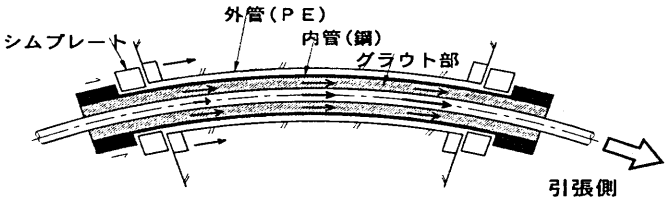


図-2.3.8　PC 斜張橋のケーブル定着部の鳥例図

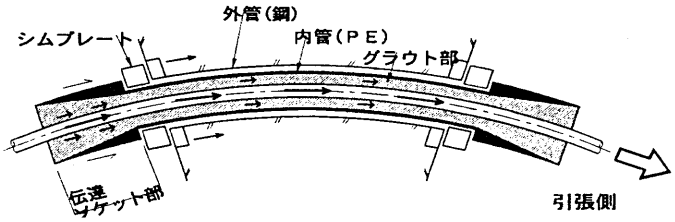
表-2.3.1　塔でのケーブルの定着構造

固定方式	分離固定方式			貫通固定方式
名称	クロス定着	セパレート定着	連結定着	サドル定着
側面図・断面図				
構造	・充実断面として斜材を交差定着する ・施工実績が多い ・ねじりに対する配慮が必要	・中空断面として斜材を交差定着させない ・相互に定着された斜材張力に対しＰＣ鋼材や鋼殻で補強 ・斜材定着間距離を小さくできる ・斜材定着部の点検が容易	・中空断面として斜材を交差定着させない ・相互に定着された斜材張力に対し鋼製のはりで対応 ・断面が大きくなる ・斜材定着部の点検が容易	・充実断面として斜材を貫通させて配置 ・塔出口部等で左右の斜材張力差を固定 ・斜材定着間距離を小さくできる ・斜材の最小曲げ半径により部材幅が制約される

特にエクストラドーズド橋で採用される貫通固定方式(サドル定着)では，その固定方式の機構によって**図-2.3.9**および**図-2.3.10**に示す４種類に分類される[2)].

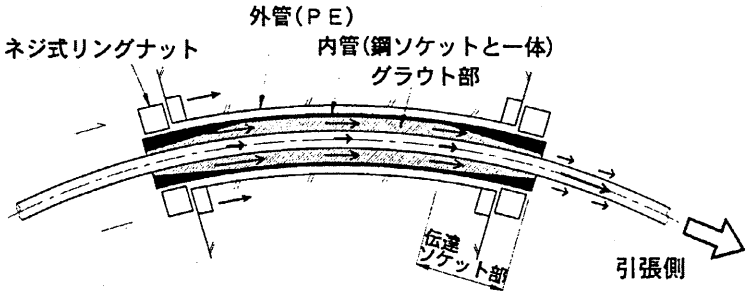


(a) 内管部材との付着による張力差伝達機構(例 1)

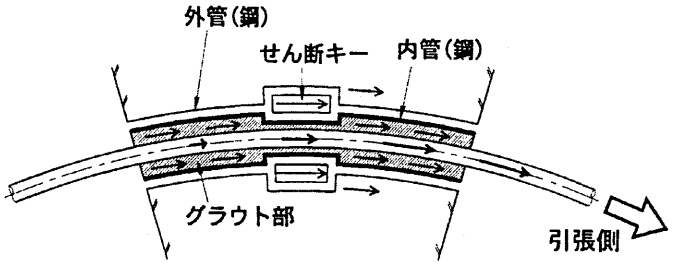


(b) 圧縮側ソケット部材との付着および拘束による張力差伝達機構(例 2)

図-2.3.9　サドル定着方式(その 1)



(a) 引張側ソケット部材との付着による張力差伝達機構(例 3)



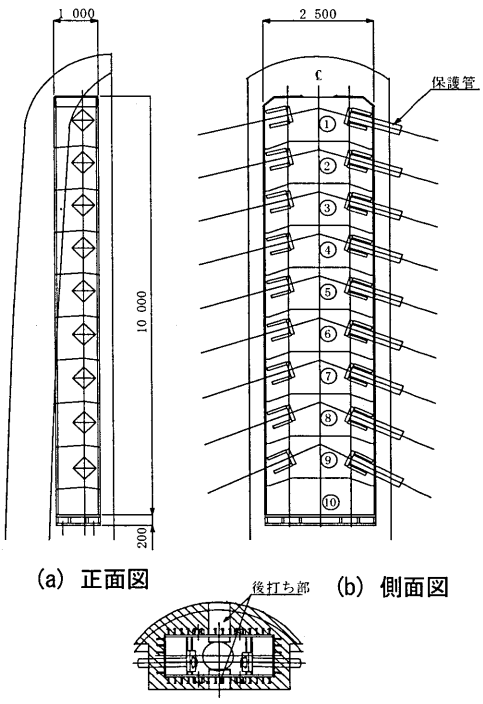
(b) せん断キーおよび定着ブロックによる張力差伝達機構(例 4)

図-2.3.10 サドル定着方式(その 2)

エクストラドーズド橋における分離固定方式のセパレート定着断面で，鋼殻構造をコンクリートで巻き立てる合成構造を採用した例を**図-2.3.11** に示す[4]．

鋼殻の寸法は，定着体寸法および維持管理用の作業スペースを考慮し，2.5m×1.0m としている．また，鋼殻は各定着部で 10 個に分割されたユニット構造としている．これにコンクリートを巻立てることにより，ケーブルの鉛直分力は鋼殻・コンクリートの合成構造で，水平分力は鋼部材にて受け持つ構造としている．また，従来の現場溶接接合を省略するために，鋼殻ユニット間の応力の伝達はメタルタッチを通じて行う構造としている．各ユニット重量も揚重機能力を考慮し，重量を 50kN 以下に設定されている．

鋼殻ユニットは，メタルタッチで積み重ねるため，各ユニット間には製作精度に起因するすきまが生じる．したがって，製作精度を最大 0.5mm と設定し，すきまが生じた状態でケーブル張力が作用した際の挙動を非線形 FEM モデルにより確認を行っている．

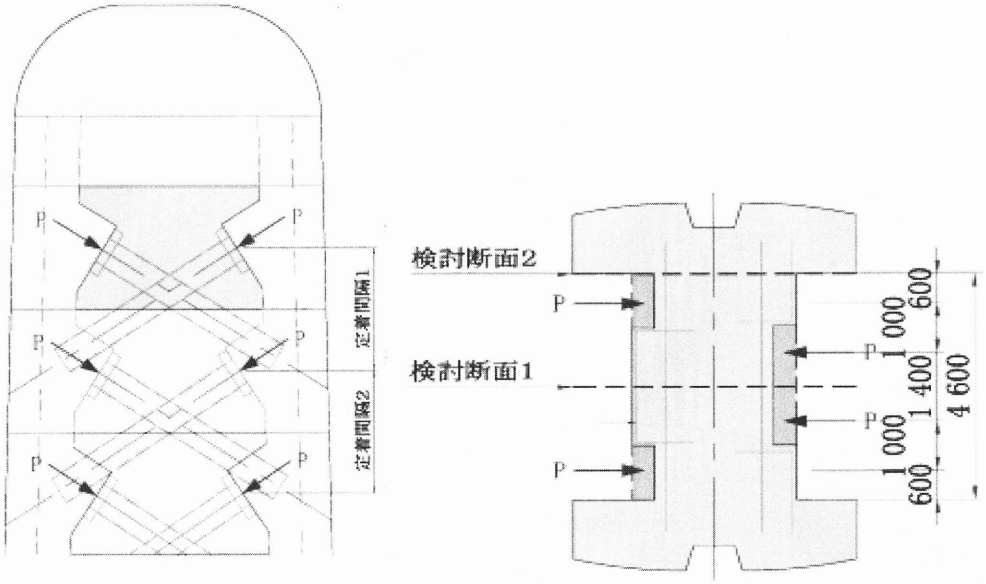


(a) 正面図 (b) 側面図

(c) 平面図

図-2.3.11 鋼殻構造の例(寸法単位:mm)

また，斜張橋に鋼殻構造を採用した例を**図 2.3.12** に示す[6),7)]．本構造採用において，斜材定着部支圧板の押し抜きせん断や，中央径間側と側径間側から来る並列ケーブルの定着間隔の違いから生じる曲げに対する補強方法などが検討されている．その結果，交差圧縮定着構造が採用され，斜材定着部の外側に化粧パネルを設けることにより維持管理用の検査路を確保する構造とされている．この構造により，押し抜きせん断耐荷力向上のための斜材ケーシングパイプのリブ補強や曲げ補強としてのプレグラウト鋼材の配置が必要となった．しかし，特厚鋼板による斜材定着装置が一切不要となり，工期的にも通常のブロック施工でできた．さらに，斜材の耐風安定性，特にウェイクフラッター対策として，並列ケーブルの水平斜材間隔の広い方を風況が厳しいと予想される河川上となる中央径間側とし，狭い側を側径間側とするなどの工夫が凝らされている．



(a) 側面図　　(b) 断面図(寸法単位:mm)

図-2.3.12　鋼殻構造の例

ケーブル系橋梁の写真館

岩黒島橋
(香川県坂出市)

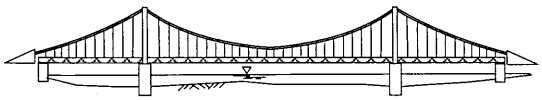
2.4 ケーブル系橋梁の構造形式とその設計法

2.4.1 鋼橋

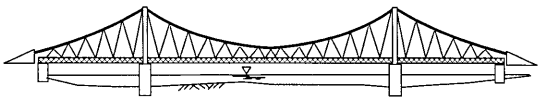
(1) ケーブル系橋梁の構造形式

ケーブルは引張にしか抵抗できない構造部材である．しかし，その引張力に抵抗する際，全断面が有効断面として働くため，構造部材としては最も効率の良い部材とも言える．また，ケーブルを緊張することによって，ケーブル構造全体の剛性を高めることが可能になる．そのため，ケーブルを用いることによって，構造の軽量化が可能となり，より長い支間の橋梁が実現できるようになった．さらに，比較的多様で複雑な荷重分布に対しても柔軟に適用できるケーブル構造の性質を生かして，近年，デザイン性の高い橋梁の実績が増えてきている．ケーブル吊り構造はその優美な景観，およびその軽やかな優雅さから，これら橋梁の従来の適用範囲とされていた中・長支間の橋梁のみならず，デザイン性が要求される中・小支間の橋梁および歩道橋などにもよく使われるようになってきている．

一般的にはケーブル系橋梁の代表的な構造形式として，以下に示す吊橋，斜張橋，ニールセン橋などのような構造形式が挙げられる[1]．

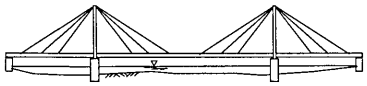


i）鉛直ハンガー吊橋

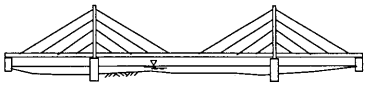


ii）斜ハンガー吊橋

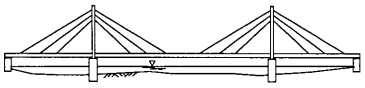
(a) 吊橋



i）放射型

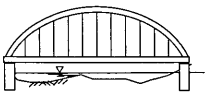


ii）ハープ型

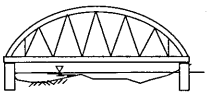


iii）ファン型

(b) 斜張橋

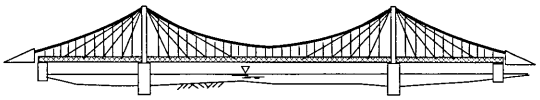


i）ローゼ橋



ii）ニールセンローゼ橋

(c) ローゼ橋・ニールセン橋



(d) その他（斜張吊橋）

図-2.4.1 ケーブル系橋梁の代表的な構造形式

図-2.4.1(a)～(d)に示すとおり，橋梁のケーブルは，垂直，斜め，時には，水平方向に配置され，ケーブルの張り方は，様々である．橋梁の横断方向においても，主桁断面の吊り方は，最も古典的な垂直吊で対称な配置から，最近の設計・施工技術および解析法の進歩とともに，傾斜吊の非対称な配置の断面まで実現が可能になってきた．橋梁の断面方向におけるケーブル配置の概要を**図-2.4.2**に示す．

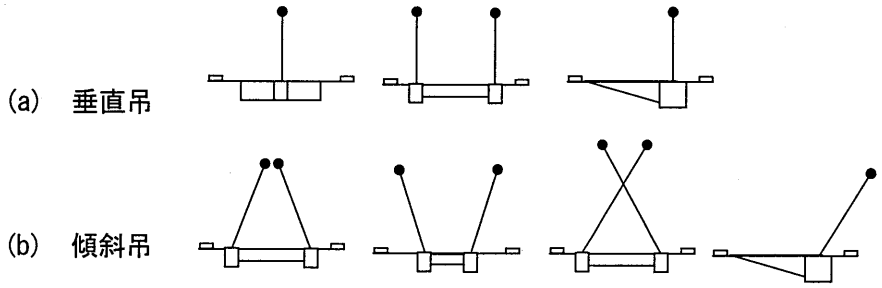


図-2.4.2　横断方向のケーブル配置

縦断・横断方向のケーブル配置を考慮すると，これらの組合せは無限に広がる．橋梁の設計者において，ケーブル系橋梁は想像力を刺激する自由度の高い，多様・多彩な構造形式を可能にする構造である反面，それは新しい挑戦でもある．

(2) ケーブル系橋梁の設計法

ケーブル系橋梁は，形態が多様で設計の自由度が大きいため，基本計画から詳細設計までの間に検討される項目が通常の桁橋などに比べて非常に多い．断面形状を決定するにも，静的設計に加えて，耐風安定性および耐震性などの動的な性状も考慮しなければならない．また，設計断面の算出や部材設計の際に，架設条件を考慮しなければならないことなど，非常に広範な検討が必要となる．

図-2.4.3 には，ケーブル系橋梁の設計の標準的な手順および検討項目を示す．

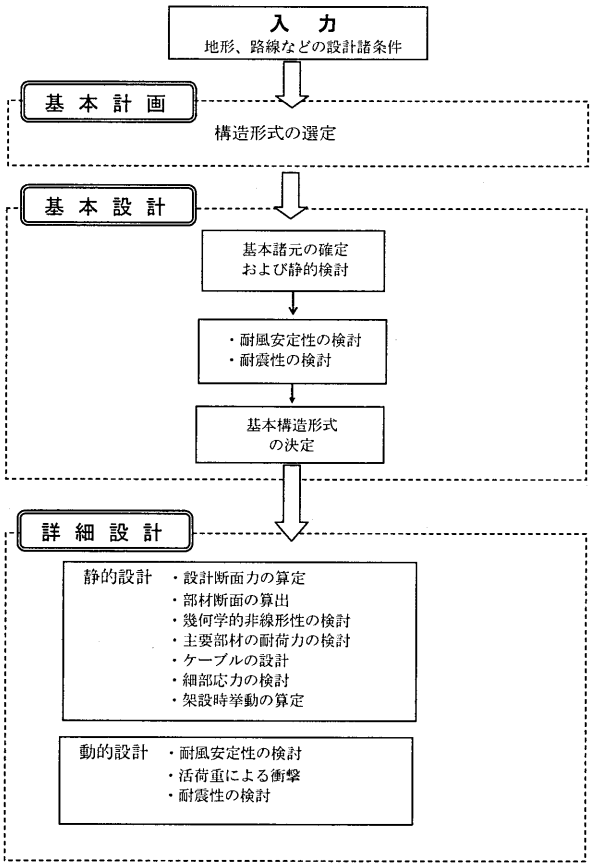


図-2.4.3　ケーブル系橋梁の設計の標準的な手順および検討項目

図-2.4.3 に示す手順の中での検討事項は，橋梁の規模，重要度などに見合ったレベルでの検討を行う必要がある．例えば，比較的長い支間の斜張橋の場合，塔・主桁・ケーブルの架設方法，主桁の閉合方法などの架設条件を考慮して，**図-2.4.3** の標準的な手順を展開すると，**図-2.4.4** のような設計手順[2]および検討項目が必要になると思われる．図に示すとおり，場合によっては，設計時のパラメータを確定・確認する際，載荷試験，風洞実験などによる検討が必要となる．

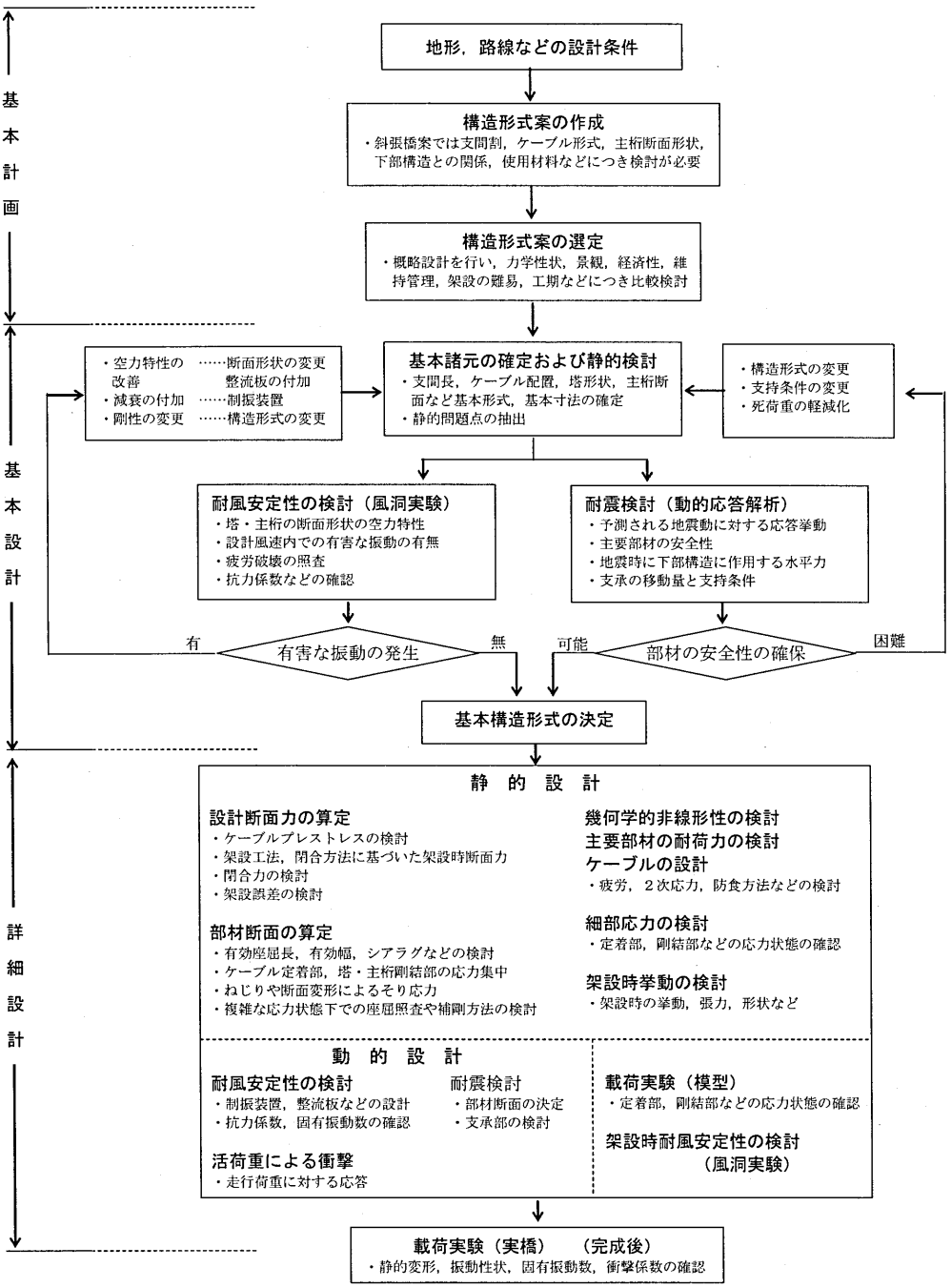


図-2.4.4 斜張橋の設計手順および検討項目[2]

2.4.2　PC 橋

ここでは，PC 橋にケーブルがどのように使用されているかという観点から，構造的特徴を明確にし，それらの設計法についても簡単に触れている．

(1) 構造形式

ケーブル系橋梁としての PC 橋では，「1.2　ケーブル系橋梁の歴史と現状」でも触れたが，**図-1.2.3** に示したように，大きく分けて，ケーブルの配置場所，つまり桁の中にケーブルが配置されたものと桁の外にケーブルが配置されたもとに大別できる [1]．

ケーブルが桁の中に配置された橋梁構造としては，一般的に等断面や変断面の桁高を有する箱桁構造であり，**図-2.4.5** に示すように，その箱断面の中に外ケーブルとして PC ケーブルが配置された構造である．一方，桁の外に配置された橋梁構造としては，外ケーブルが桁の上方に配置された場合と下方に配置された場合とでは力学的特徴が大きく異なる．桁の上方に配置された場合は，PC ケーブルの配置角度や力学特性により，構造的にエクストラドーズド PC 橋と PC 斜張橋とに分類される [1]．

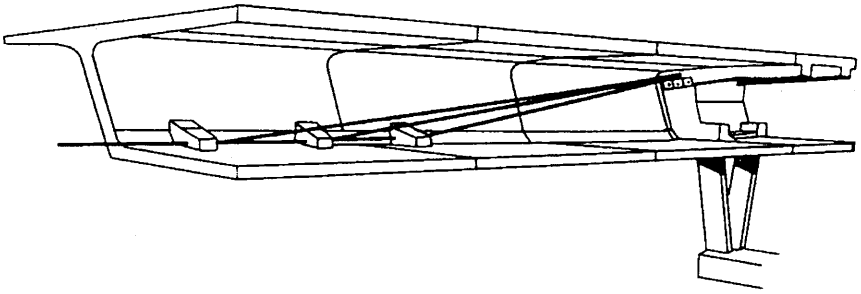


図-2.4.5　外ケーブルの配置

両者の構造特性，つまり支間長と桁高との関係を調べるとよくわかる．なぜなら，ケーブルの角度によって，つまり，**図-2.4.6** に示すように，桁の水平軸に対するケーブルの角度が大きくなれば，張力の鉛直成分が大きくなり，プレストレスとなる張力の水平成分が小さく，構造的に PC 斜張橋の挙動となる．

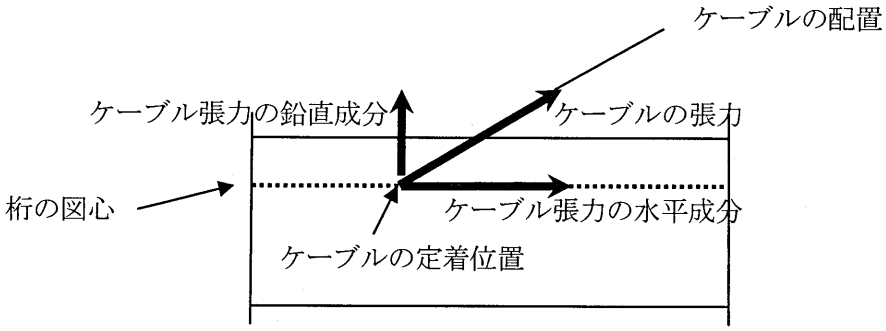
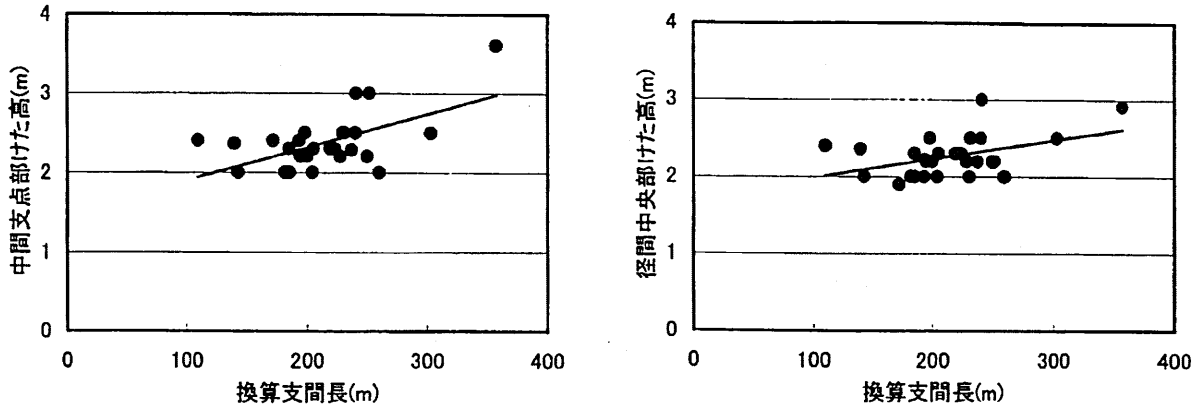


図-2.4.6　ケーブルの角度と張力成分との関係

この場合，ケーブルの定着位置で間接支持的な構造となるため，桁に作用する曲げモーメントは

支間長に対して小さくなり，一般的に桁高を小さくすることができる．しかし，変動荷重(活荷重等)によるケーブルの張力変動が大きくなる特徴を有する．一方，ケーブルの角度が小さくなれば，張力の鉛直成分が逆に小さくなり，プレストレスとなる張力の水平成分が大きくなることから，構造的にエクストラドーズドPC橋の挙動となる．この場合，プレストレスの効果が大きくなり，斜張橋とは逆に，ケーブルの鉛直成分により吊り上げようとする力が小さくなるため，桁に作用する曲げモーメントは斜張橋に比べ大きくなることから，斜張橋のように桁高を小さくすることができないが，変動荷重(活荷重等)によるケーブルの張力変動を小さくすることができる特徴を有する．エクストラドーズドPC橋の場合には，一般的にケーブルは塔を介して連続している場合が多く，偏心した外ケーブルの一種と考えられる．このように，一般的には，ケーブルの配置形状によって，斜張橋とエクストラドーズドPC橋を区別しており，力学特性上，明確な区別ができないのが現状である．

斜張橋とエクストラドーズドPC橋とを区別するために，支間長と桁高との関係を調べる[2]．斜張橋の桁高は，ケーブルの配置範囲や配置間隔等を考慮して決定されるが，一般的にケーブル本数が多くなるほど桁高を小さくすることができる．これまでの実績に基づいて桁高と換算支間長(以下で定義する)の関係を整理すると，**図-2.4.7**のとおりとなる．換算支間長とは，3径間以下の橋梁では最大支間長を示し，2径間以下の橋梁では主径間長を1.8倍して3径間に換算した支間長を示す[2]．しかし，PC桁橋やエクストラドーズドPC橋と異なり，マルチケーブルタイプのPC斜張橋では，桁高が単純に支間長には比例しない．

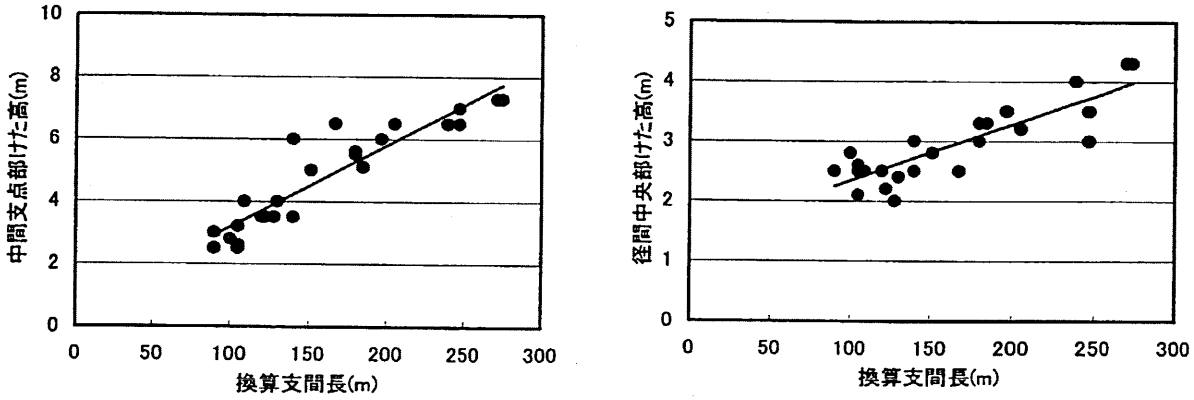


(a) 中間支点部　　(b) 径間中央部

図-2.4.7　PC斜張橋の支間長と桁高との関係

一方，エクストラドーズドPC橋では，**図-2.4.8**に示すように，PC桁橋と同様に換算支間長と桁高との関係はほぼ比例関係にある．これまでの実績では，中間支点上の桁高は $L/35$～$L/45$ で，支間中央部では $L/50$～$L/60$ である．

また，塔の高さの観点から整理すると，PC斜張橋およびエクストラドーズドPC橋とも，換算支間長と塔高に比例関係が見られ，これまでの実績によると，PC斜張橋では，**図-2.4.9**に示すように H/L=1/30～1/5程度で，一方，エクストラドーズドPC橋では，**図-2.4.10**に示すように H/L=1/8～1/15程度の関係にある[2]．



(a) 中間支点部　　(b) 径間中央部

図-2.4.8　エクストラドーズド PC 橋の支間長と桁高との関係

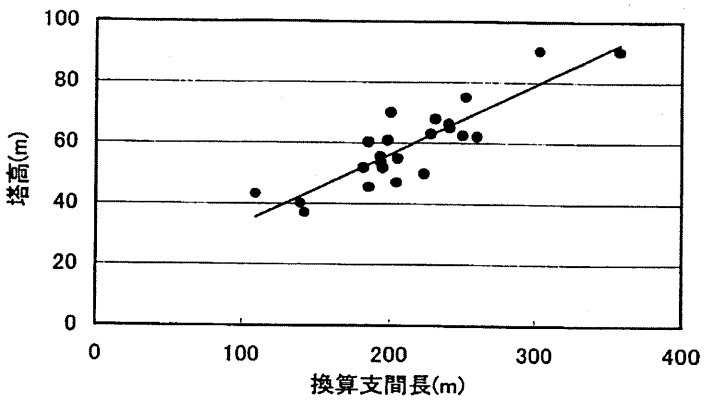


図-2.4.9　PC 斜張橋の支間長と塔高との関係

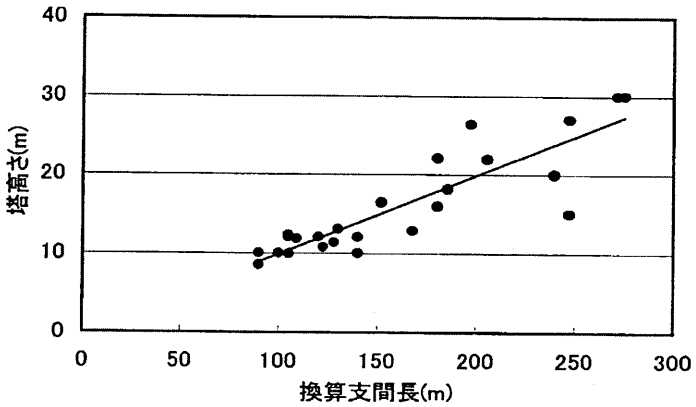


図-2.4.10　エクストラドーズド PC 橋の支間長と塔高との関係

このように，ばらつきはあるものの，支間長と桁高との関係，および支間長と塔高との関係で分類すると，PC 斜長橋とエクストラドーズド PC 橋とは明確に分類することができる．

また，ケーブルを桁の下方に配置した橋梁構造としては，大偏心ケーブル構造がある．一般的な桁構造では，桁が箱断面や中空床版断面で，ケーブルをコンクリート部材内に配置したり外ケーブルとしてケーブルをコンクリート部材外に配置し，桁全体にプレストレスを与える構造である．基本的には，ケーブルは箱断面内に配置されている．一方，大偏心ケーブル構造は，ケーブルが完全にコンクリート断面外に配置されており，基本的には，圧縮側をコンクリートが負担し，引張り側

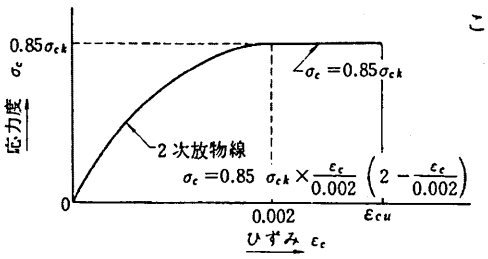
をPCケーブルのみで負担させる構造であり，自重を軽減できるなど合理的な構造である．しかし，一方では箱断面に比べ剛性が低下し変形が大きくなるなどの特徴も有する．したがって，道路橋に適用する場合には，橋梁全体の剛性を向上させるため，桁剛性の向上やケーブルの偏心量を大きくするなどの対応が必要とされる．

(2) 設計法

橋梁の設計では，限界状態で表現するならば，基本的に使用限界状態，および終局限界状態において，構造全体やそれを構成する各部材が安全であるよう設計することが基本である．

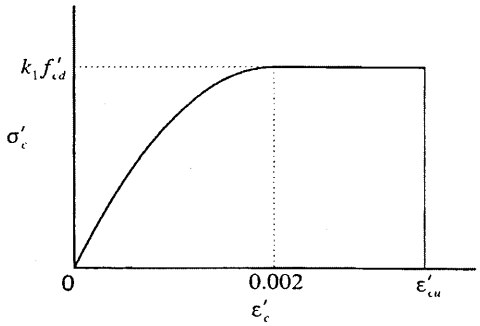
現在，PC橋梁の設計では，許容応力度設計法および限界状態設計法が併用されている[3),4)]．構造解析では，弾性理論を用いた骨組解析が一般的である．最近では，弾性理論による有限要素解析を用いて，断面力あるいは直接的に応力度を計算し，部材の安全性を照査している例もある．安全性を照査する状態として，許容応力度設計法でいう設計荷重作用時，あるいは限界状態設計法でいう使用限界状態では，微小変形理論に基づき，断面に作用するひずみは線形状態とし，コンクリートおよびPC鋼材については応力度を算出して，許容値と比較することで安全性が照査されている．この場合，ケーブルの安全性については，疲労に対する安全性の照査のみを行う．これについては，後述する**4.1.2**を参照．一方，限界状態設計法でいう終局限界状態では，基本的に断面破壊に対する照査を行うが，この場合には，一般的に単純塑性理論が用いられている．

単純塑性理論では，コンクリートの圧縮ひずみに対し，道路橋示方書[3)]の考え方と土木学会によるコンクリート標準示方書[4)]とでは，若干考え方が異なっている．参考までに，両者の桁断面の破壊抵抗値となる終局曲げモーメントを計算するためのコンクリートの応力ーひずみ曲線を，それぞれ**図-2.4.11**および**図-2.4.12**に示す．



ここに，
σ_{ck} ：コンクリートの設計基準強度 (N/mm^2)
σ_c ：コンクリートの応力度 (N/mm^2)
ε_c ：コンクリートのひずみ
ε_{cu} ：コンクリートの終局ひずみ

図-2.4.11 道路橋示方書によるコンクリートの応力ーひずみ曲線



$k_1 = 1 - 0.003 f'_{ck} \quad \leq 0.85$

$\varepsilon'_{cu} = \dfrac{155 - f'_{ck}}{30000} \quad 0.0025 \leq \varepsilon'_{cu} \leq 0.0035$

ここで，f'_{ck} の単位は N/mm^2

曲線部の応力ひずみ式

$$\sigma'_c = k_1 f'_{cd} \times \frac{\varepsilon'_c}{0.002} \times \left(2 - \frac{\varepsilon'_c}{0.002}\right)$$

図-2.4.12 コンクリート標準示方書によるコンクリートの応力ーひずみ曲線

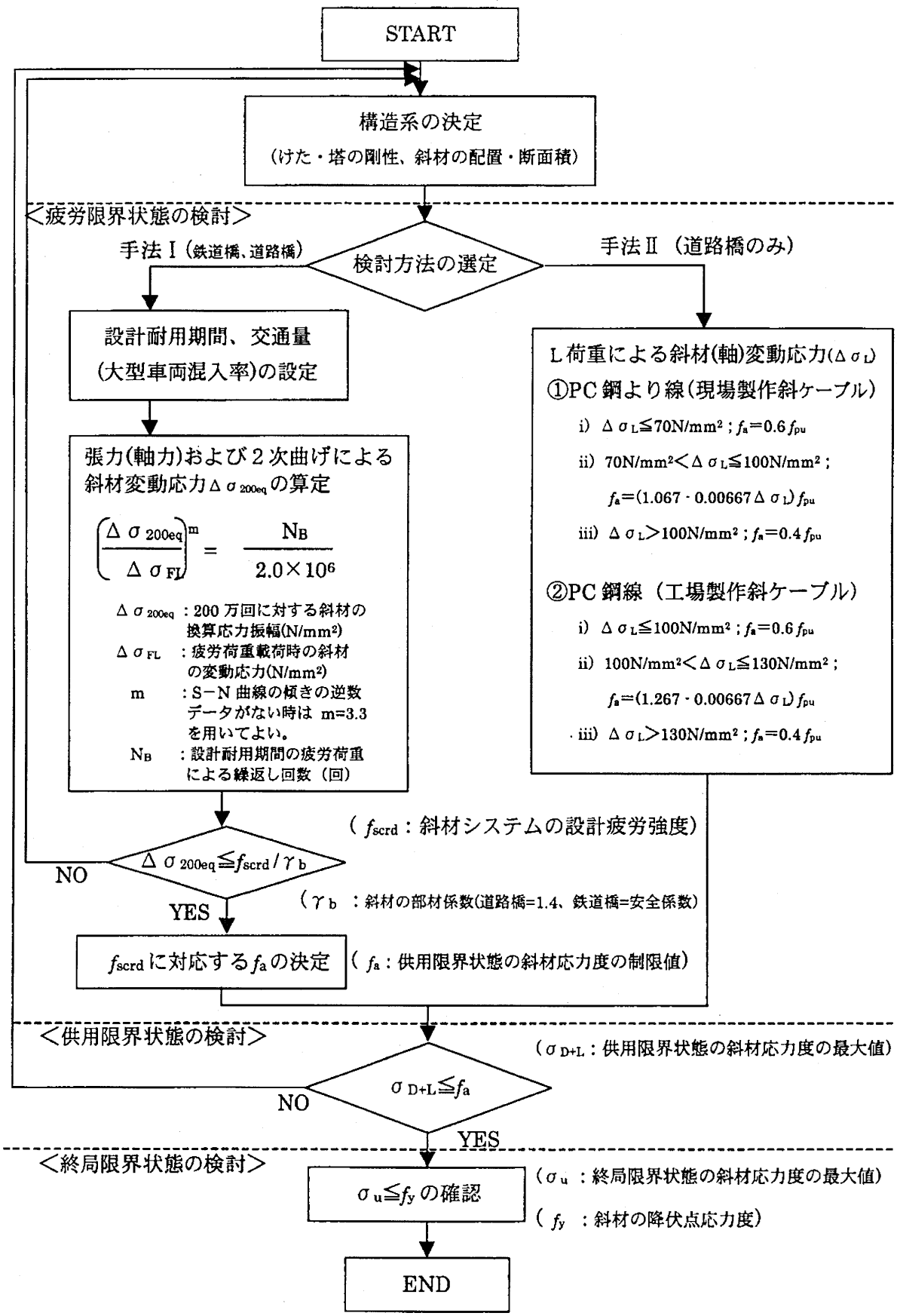


図-2.4.13　斜材ケーブルの設計フロー[2)]

この差は，両者の荷重係数と部分安全係数の考え方の相違による．さらに，最近では，コンピュータの発達に伴い，ケーブルもモデル化した立体 FEM 解析による非線形解析で安全性の照査を行う事例が増えている．

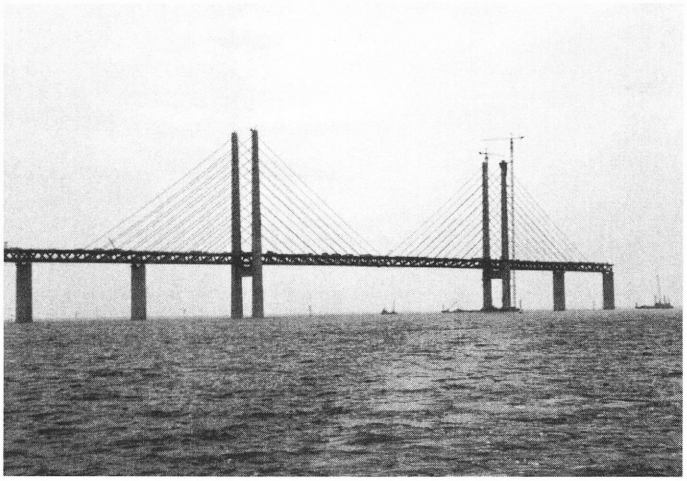
参考までに斜材ケーブルの設計フローを，**図-2.4.13** に示す[2]．

他の橋梁の部材設計と大きく異なるのが，先ず斜材の疲労設計を最初に行う点である．これは，斜材が高いレベルでの変動応力を受ける部材であることから，限界状態のうち，先ず，疲労限界状態の安全性の照査を行うことにより，斜材が受ける変動応力のレベルに応じて，使用限界状態の制限値を規定しようとするものである．

斜材の設計方法に限界状態設計法を適用して合理的な設計思想を取り入れようとする大きな要因には，コンクリート斜張橋の斜材の安全率が，道路橋示方書Ⅲ・コンクリート橋編[3]において規定された当時の安全率と比較して，斜材振動に対する制振技術や防錆技術が発達したこと，ならびにエクストラドーズド橋の出現により，斜材の安全率に対する考え方を見直す必要がでてきたこと等がある．また，斜材の安全率を一義的に定めるのではなく，主桁や塔の部材と同様に，変動応力が大きな斜材(部材)とそうでない斜材(部材)とで，安全率を合理的・経済的に変えられることも要因である[2]．

ケーブル系橋梁の写真館

オーレスンド橋
（デンマーク～スウェーデン）



オリムピック橋
（韓国ソウル市）

2.5　ケーブル系橋梁の構造形式とその架設工法

2.5.1　鋼橋

ケーブルを用いた鋼橋の架設方法は，橋梁形式およびケーブル形状によりそれぞれ異なる．しかし，適用される工法には大きく分けて，以下のようなものがある．

① 吊橋；ステージング工法，キャットウォーク工法，およびケーブルクレーン工法

② 斜張橋；ステージング工法，斜吊り張出し（片持ち）工法，ケーブルクレーン工法，吊りケーブル工法，および送出し（押出し）工法

③ アーチ橋(ニールセン系)；ステージング工法，ケーブル斜吊り工法，およびケーブル直吊り工法

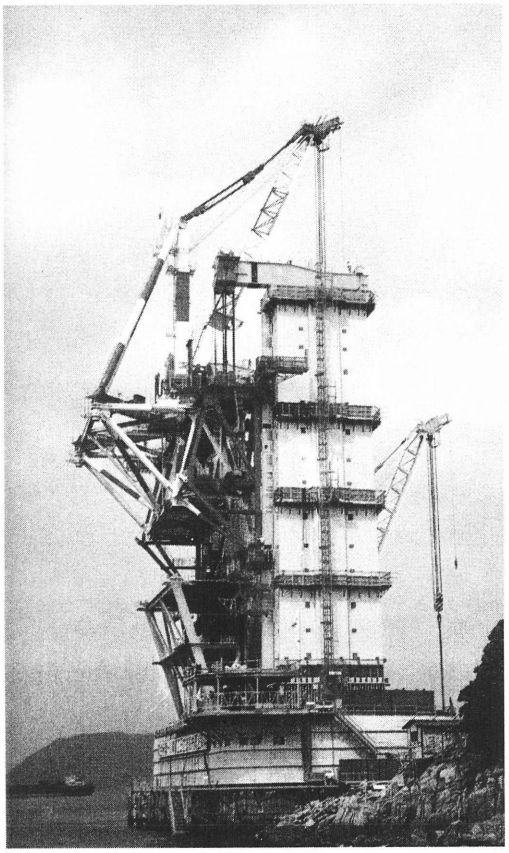
④ ケーブルシステム橋梁；ステージング工法，およびフリーハング工法

(1) 吊橋

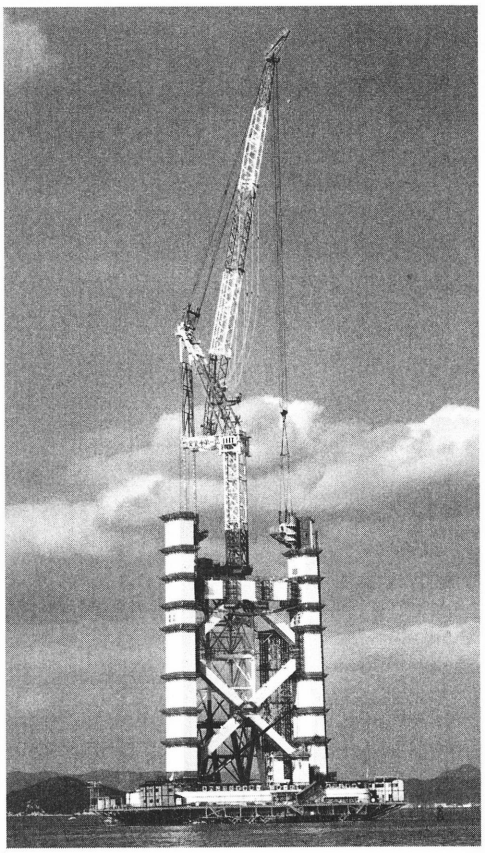
吊橋の架設は，主塔とアンカレイジとの基礎の工事後，主塔を架設，主ケーブル工事を行い，吊材の吊り下げ，および補剛桁・床版の架設という手順で行われる．

1) 主塔

架設方法は，使用クレーンで分類されるが，移動式クレーンで施工できる大きさや場所では，それらを用いて積み上げていくのが一般的である．海上部となる本州四国連絡橋を始めとする長大吊橋の主塔は，主塔基部をフローティングクレーンで架設し，それより上部をクリーパークレーンあるいはタワークレーンを用いて架設される（**写真-2.5.1** 参照）．



(a) クリーパークレーン（北備讃瀬戸大橋の例）[6]

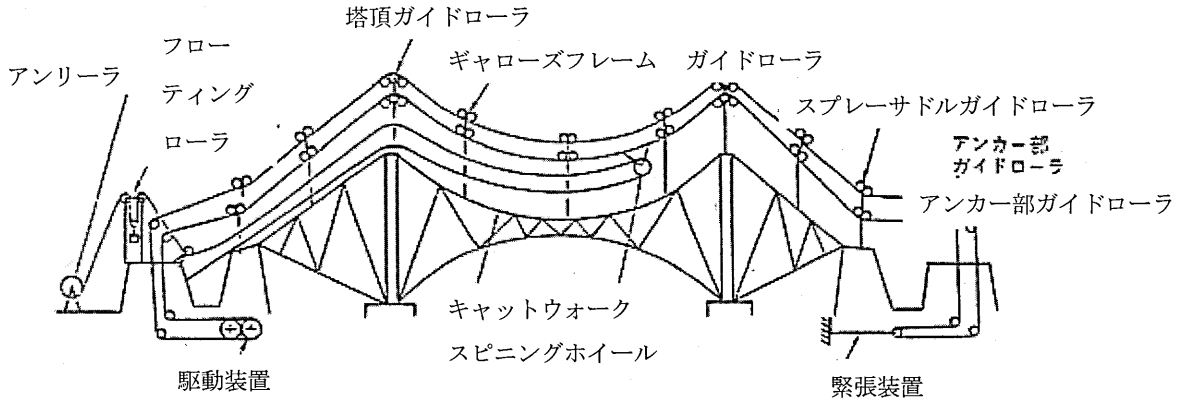


(b) タワークレーン（明石海峡大橋の例）[7]

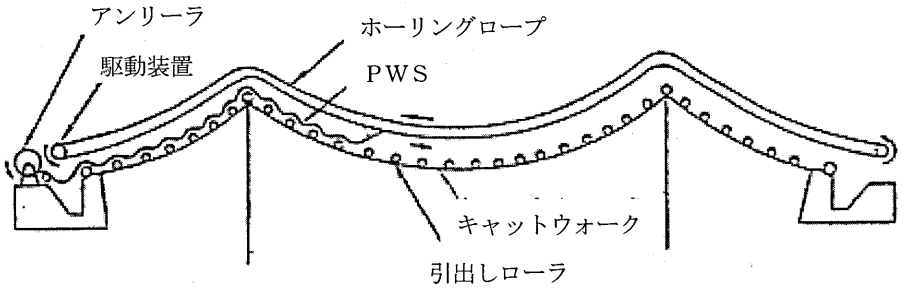
写真-2.5.1 主塔の架設工法

2) 主ケーブル

近年の長大吊橋では，大部分が平行線ケーブルを使用し，その架設工法にはキャットウォークを用いるエアスピニング (AS) 工法，およびプレハブストランド (PS) 工法がある (**図-2.5.1** 参照)．諸外国の長大吊橋では AS 工法が主流であるが，国内では PS 工法が主流である．これは，架設途中における耐風性の問題，現場作業の工期短縮に対する考え方の相違などが主たる理由である．



(a) エアスピニング (AS) 工法



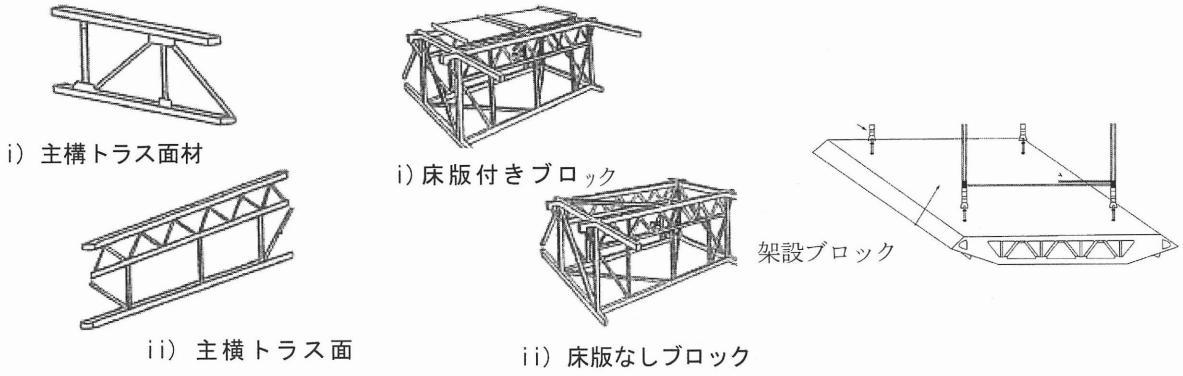
(b) プレハブストランド（ＰＳ）工法

図-2.5.1 キャットウォークを用いたケーブル架設工法 [1)]

3) 補剛桁

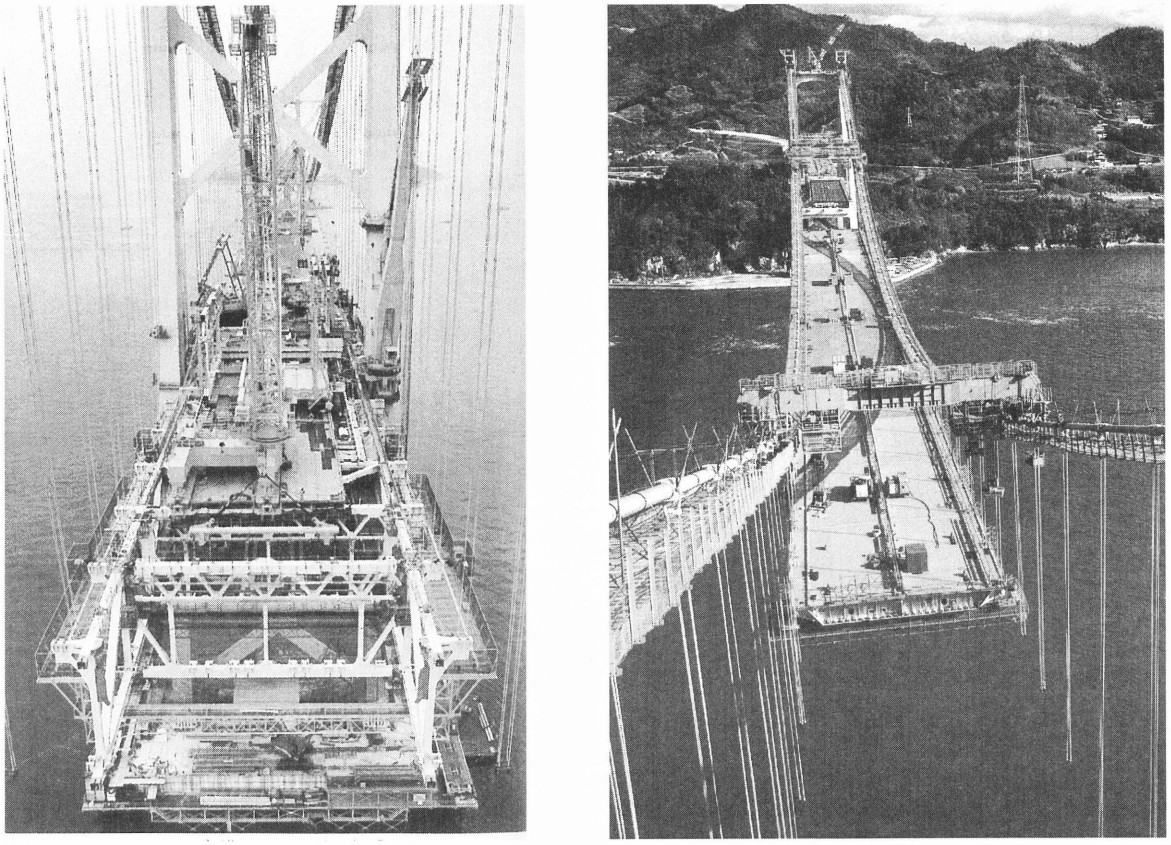
補剛桁の架設工法は，橋梁本体の構造特性，架設単位および架設機材によって分類される．それらの組み合わせは，工期，工費，および架橋地点の海象・気象条件から決定される．補剛桁の構造には，鈑桁，トラス，および箱桁構造がある．**図-2.5.2** に示すように，架設単位としては，単材と面材およびブロックがあり，架設単位によっても工法を分類することができる．前者 2 つの工法はトラス構造に，箱桁はブロック工法で架設されている．

また，架設機材は，トラベラークレーン，リフティングクレーン，フローティングクレーン，およびケーブルクレーンに分類される．さらに，架橋地点が陸上の場合ステージング工法が用いられ，海象・気象条件から，海面が使用できない場合には張出し工法，使用できる場合には直下吊上げ工法が採用されることが多い [2)] (**写真-2.5.2** 参照)．



(a)面材架設工法　　(b)ブロック架設工法（トラス）　　(c)ブロック架設工法（箱桁）

図-2.5.2 補剛桁架設単位による工法の分類



(a)張出し架設工法（南備讃瀬戸大橋の例）　　(b)直下吊上げ架設工法（伯方・大島大橋の例）

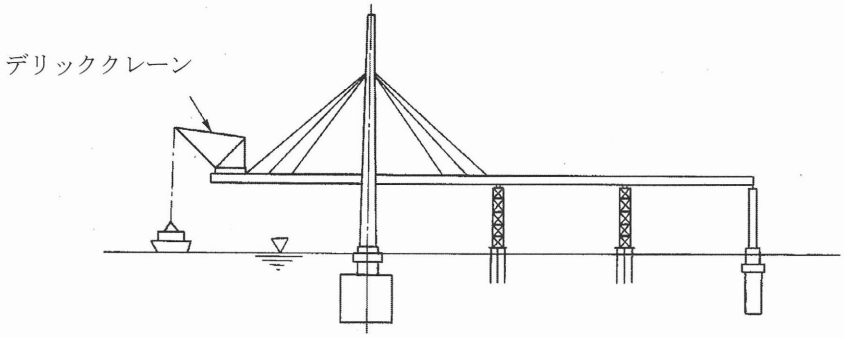
写真-2.5.2 補剛桁架設条件による工法

(2) 斜張橋

1) 斜張橋全体の架設方法

ケーブルを用いた斜張橋の架設工法も，一般橋梁のケーブルエレクションの斜吊り工法と同じ原理[3]である．一般に斜吊り工法では，鉄塔頂部から張った斜吊り索で橋体を支持するように，斜張橋では，塔からケーブルを斜め吊りし，ケーブルで補剛桁を支持しつつ，順次，橋上クレーン等により張り出し架設していく．斜張橋の大部分が，**図-2.5.3** および**図-2.5.4** に示すように，それぞれ片持ち工法およびバランシング張出し工法を採用している．これら２つの工法の共通点は，ベン

ト等により仮支持せずに，順次，張り出しながら架設することであり，桁下空間が高く，ベント設備の設置が困難，もしくは制限される場合に採用される．架橋地点の多くが，**写真-2.5.3** に示すように，海上部，あるいは河川部であることがこれらの工法選択の大きな要因である．吊橋と同様な条件下で架設されるが，近年では，①橋梁本体の品質の向上，②複合(鋼・コンクリート)斜張橋の開発，③大型架設機材(クレーン，ジャッキ)の開発，④コンピューターの性能向上による解析精度の向上などにより，吊橋の領域と考えられた範囲にまで斜張橋が適用されることもある．



(a) 片持ち工法　　(b) ステージング工法

図-2.5.3　片持ち工法とステージング工法の併用工法

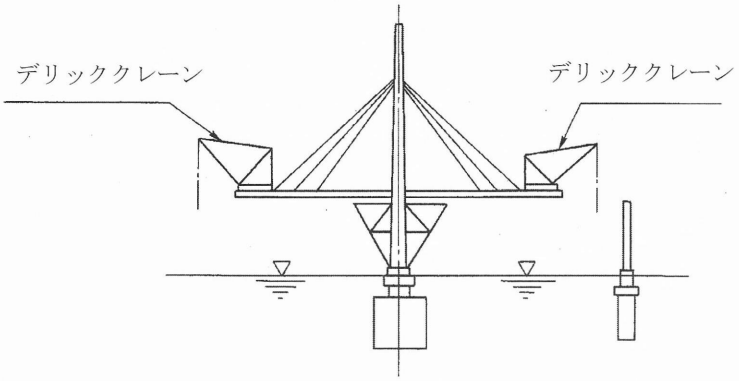


図-2.5.4　バランシング張出し工法

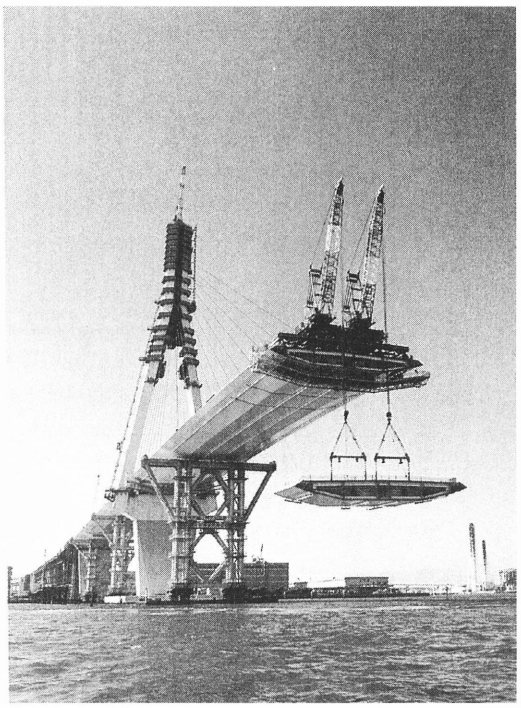


写真-2.5.3　中央径間補剛桁の架設（鶴見つばさ橋の例） [3)]

2) 斜張橋のケーブル架設

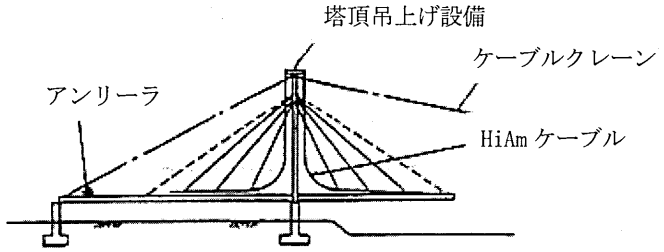
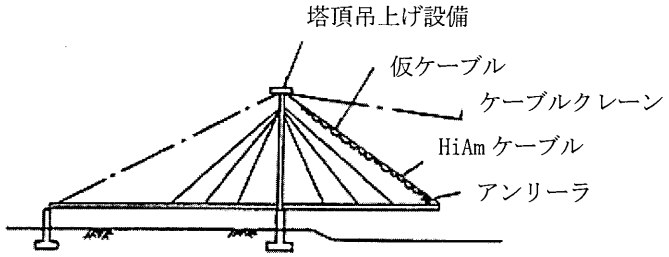
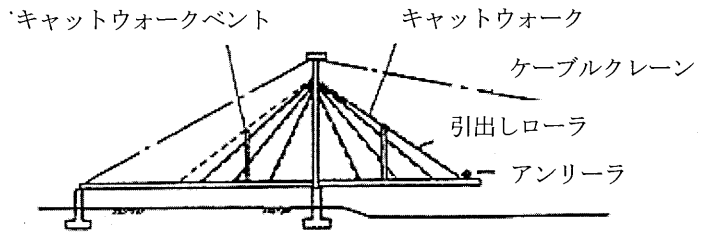
ケーブルには，**2.1** で示したように細いロープやロッドのようなものから，長大吊橋の主ケーブルのものまで様々な種類がある．特に定着部が長くなるか，あるいは径が太くなる場合には，単一のロープでなく，現地での組立てが必要となるものも多い．この点に着目して架設方法をまとめると，**表-2.5.1** のようになる．

① 直接引込み，あるいは吊上げ設備による架設工法；吊橋，斜張橋，アーチ橋，その他

② 仮ケーブル（ガイドロープあるいはパイプ）による吊上げ工法；斜張橋

③ キャットウォーク工法；吊橋，斜張橋

表-2.5.1 斜張橋のケーブル架設の種類

	案①　塔頂部吊上げ設備による吊上げ工
架設概要図	
概　要	橋面上に展開したケーブルを塔頂吊上げ設備により塔側を吊上げ，塔側，主桁側の順にソケットを引き込み定着架設される．
	案②　仮ケーブルによる吊上げ工法
架設概要図	
概　要	リールに巻かれたケーブルを仮ケーブルのローラーハンガーで吊下げながら塔側へ展開し，塔側，主桁側の順にソケットを引き込み定着架設される． 主桁側の定着は，案①と同様，テンションロッドとセンターホールジャッキが使用される．
	案③　キャットウォーク工法
架設概要図	
概　要	ケーブル１段毎にキャットウォークを架設し，その上に引出しローラーを設置する． ケーブルは，引出しローラー上を塔側に展開し，塔側，主桁側の順にソケットを引き込み定着される．塔側の定着は，案①と同様，テンションロッドとセンターホールジャッキを使用して行われる．

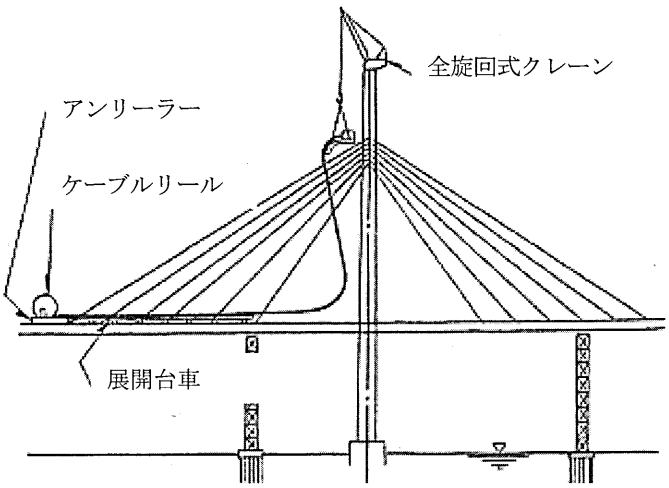
また，斜張橋のケーブルは，架設の作業内容により，次の３段階に分けられる．

i)ケーブルの張り渡し作業：**図-2.5.5(a)**に示すように，塔頂のクレーン，橋上のクレーン，あるいはキャットウォーク上のウィンチなどの機材により，ケーブルを展開し，塔と桁間に張り渡し，引き込み装置などでケーブルを定着させる作業

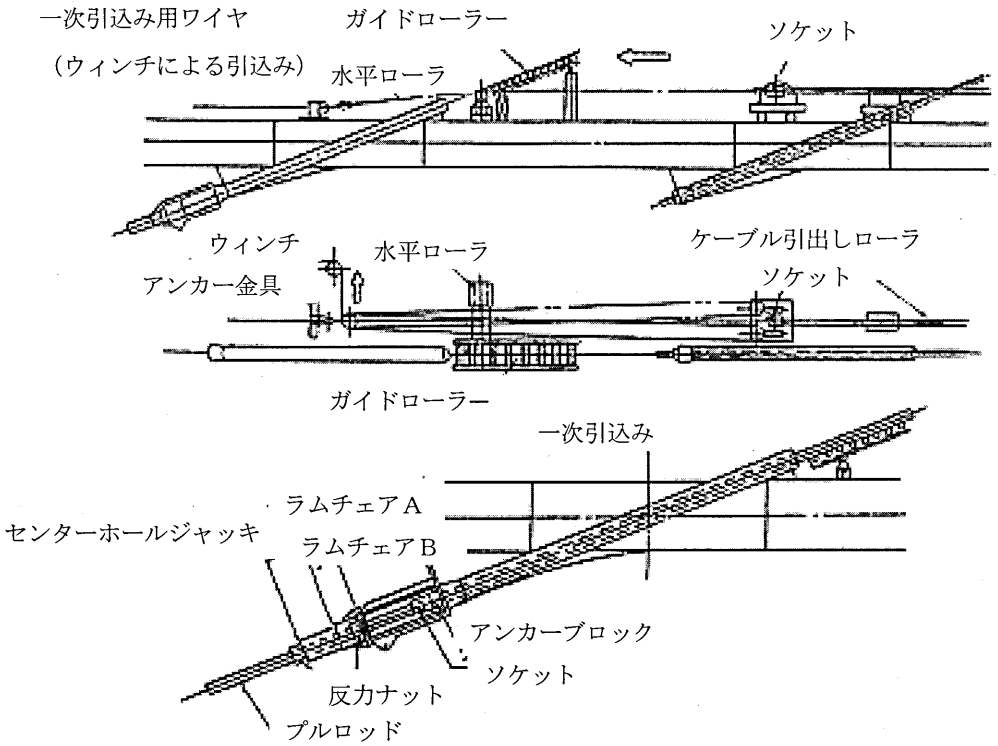
ii)張力導入作業：**図-2.5.5(b)**のようにジャッキを用いて定着したケーブルの長さを調整して張力を導入，あるいは主桁やサドルをジャッキアップして張力を導入する作業

iii)防食作業：段数の少ないケーブル形式では，ケーブルが大断面になる場合がある．このような場合には，吊橋と同様にスクィズした後，ラッピングが行われる．現在のマルチケーブルタイプで

は，防食の不要なケーブルが使用されることが多い．



(a) ケーブル張り渡し作業



(b) 張力導入作業

図-2.5.5 斜張橋のケーブル架設作業

(3) アーチ橋

ケーブルを用いたアーチ橋であるニールセンローゼ橋，およびそれに類する橋梁について述べる．

これらのアーチ橋の中には，ベント工法を採用しているものもある．これは桁下空間に制約のない架橋地点であることが多い．あるいは一括架設工法を採用している橋梁も数橋あり，フローティングクレーン，台船等の大型機材の進入可能な河川，および海上部では，現場施工の省力化，およ

び工期短縮のために，この工法が採用される．また，この形式の橋梁は，支間が大きくなるとケーブルエレクション工法を採用することが多い．これについては，**2.5.3** に詳述している．

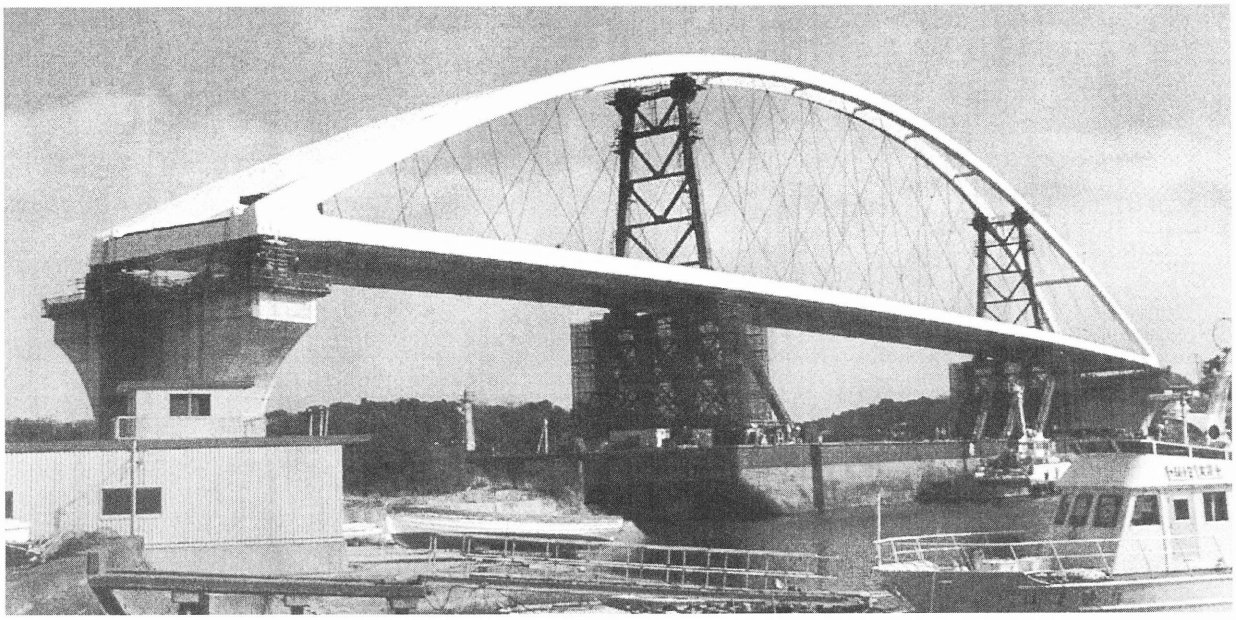


写真-2.5.4　台船による一括架設（浜寺大橋）の例

(4) その他のケーブルを用いた橋梁の架設方法

上記以外のケーブルを用いた橋梁としては，以下のようにケーブルシステム橋梁，吊床版橋，ケーブルトラスト橋，および斜張吊橋などいろいろなタイプが提案されている[4]．

① ケーブルシステム橋梁は，一般的にケーブルを立体的に連結し，プレストレスを導入したケーブルシステムとして外力に抵抗するように設計された橋梁である．また，構造特性から歩道橋に採用されることが多い．

② 吊床版橋は，PC 吊床版橋と鋼製主桁吊床版橋とに分類される．ケーブルトラスト橋は，桁を下方からケーブルで支えた橋である．

③ ケーブルトラスト橋は，まず桁をベントなどにより支持し架設した後に下方からケーブルで支える架設方法が用いられることが多い．

④ 斜張吊橋[5]という斜張橋と吊橋のミックスした形式の橋がある．この形式の橋では，主ケーブルや斜吊りケーブルを利用して架設が可能であり，今後長大橋への適用が期待されている．

ケーブルシステム橋梁や吊床版橋は，両岸のケーブルアンカレイジ間に張り渡された主ケーブルを用いて橋の床版を構築することができ，橋梁下の条件に左右されずに架設できる利点がある．

2.5.2 PC 橋

PC 橋の場合，ケーブル系橋梁の架設方法およびケーブルを用いた架設工法に関しては，一般的に以下の方法が採用されている．

① 箱桁の張出し架設に箱断面の内・外に設置するケーブルを用いた架設工法

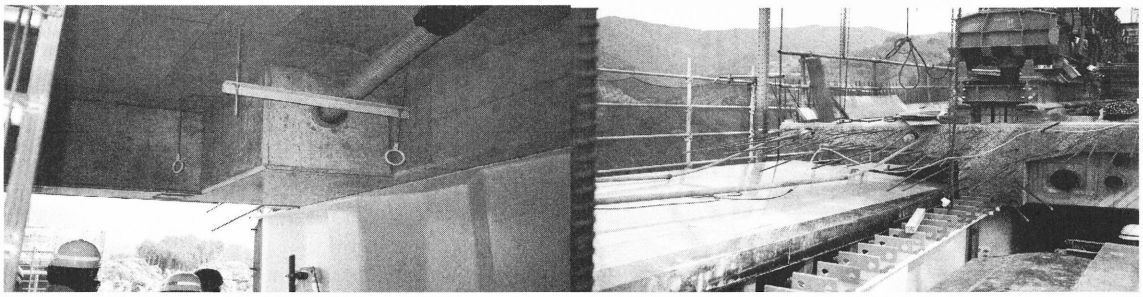
② 張出し架設用にステイケーブル(本設ケーブルを代用)用いた張出し架設工法

③ ピロンを併用した張出し，あるいは押出し架設工法

④ 本設ケーブルを架設に併用した架設工法

ここでは，ケーブルを架設に有効活用した施工事例について簡単に紹介する．

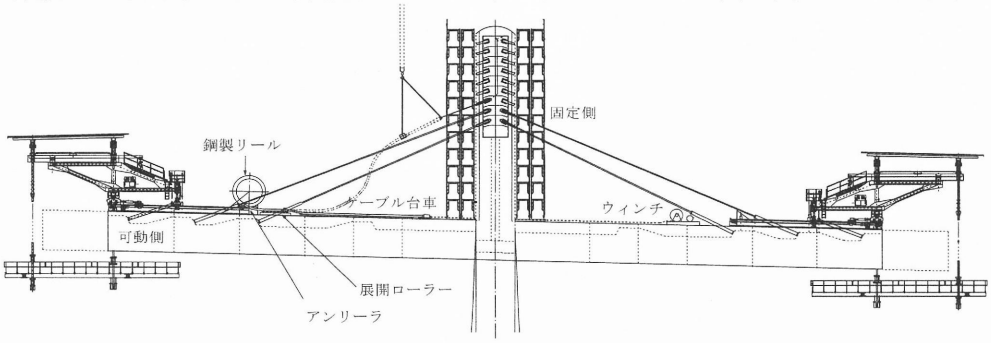
まず，箱桁の張出し架設工法に外ケーブルを活用し，そのケーブルを本設ケーブルにも用いた施工例を，**写真-2.5.5** に示す．同**写真(a)**は，箱断面内部から，コンクリートウェブの打ち下ろし部に外ケーブルが定着されている状況を示している．また，同**写真(b)**は，同**写真(a)**の状況を張出し側の外側から見た状況である[1]．



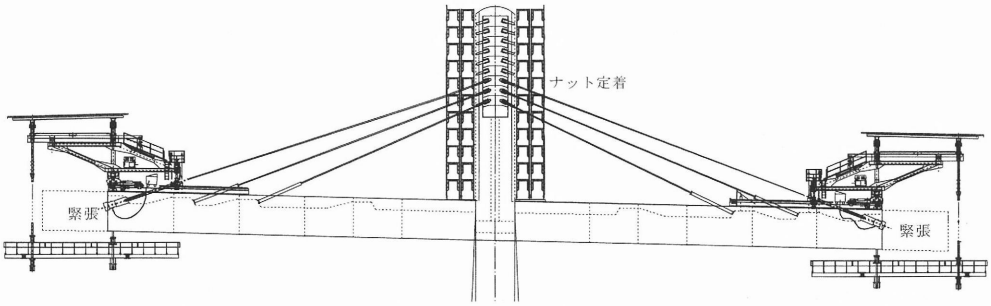
(a) ケーブル定着部　　(b) 張出し状況

写真-2.5.5 外ケーブルを用いた PC 箱桁の張出し架設の例

張出し架設にステイケーブル(本設ケーブルを代用)を用いた施工例を**図-2.5.6** に示す[2]．



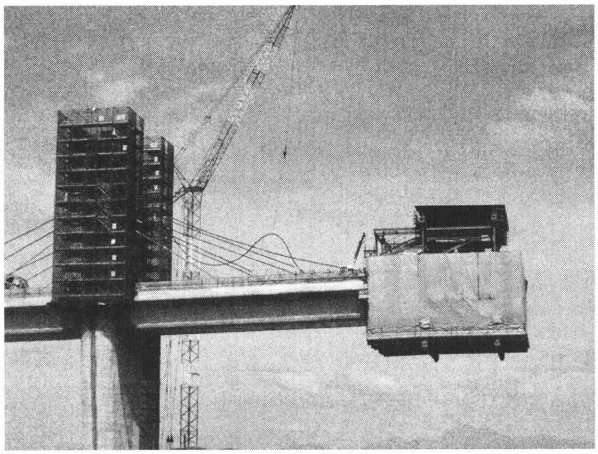
(a) ケーブル引込み状況



(b) 緊張・定着状況

図-2.5.6 張出し架設にステイケーブル(本設ケーブルを代用)を用いた架設方法の例

本工法は図に示すとおり，本設ケーブルを張出し架設に用いるもので，スレンダーな桁断面の曲げモーメントの軽減を図ることが大きな目的である．本架設工法の事例を，それぞれ**写真-2.5.6**および**写真-2.5.7**に示す[2),3)]．



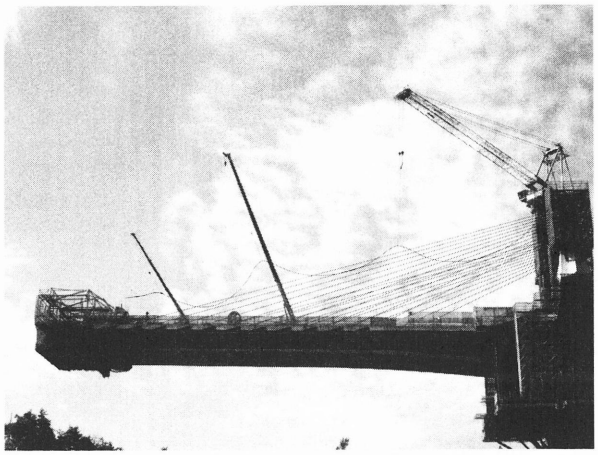


写真-2.5.6　張出し架設状況（日見夢大橋の例）　　**写真-2.5.7　張出し架設状況（栗東橋の例）**

また，ピロンを利用した架設工法の事例として，波形鋼板ウェブ PC 箱桁橋の押出し架設工法を紹介する．通常の押出し工法では，主桁先端部に軽量な鋼製の架設用手延べ桁を取りつけ，施工中の張出し時の断面力を低減する．しかし，この工法では，主桁断面を活用するという方針のため，**図-2.5.7**に示すように，先端3ブロックの上床版コンクリートを施工せず，鋼床版として補強・軽量化したものを手述べ桁の代わりとし，さらに第5ブロック上床版上にピロン柱を立て，斜吊りケーブルによって先端手延べ部を補強する斜吊り併用押出し工法となっている（**写真-2.5.8**，**写真-2.5.9**参照）[4)]．

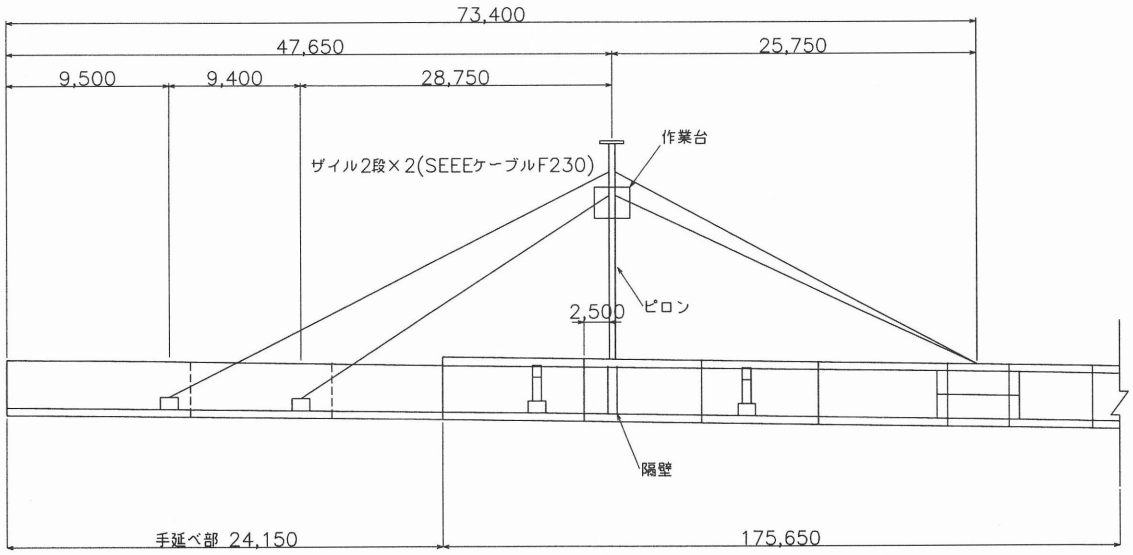


図-2.5.7　ケーブル配置図（寸法単位：mm）

さらに，吊り床版構造や大偏心ケーブル構造では，その本設ケーブルを利用して架設される．その一例を，それぞれ**図-2.5.8**および**写真-2.5.10**に示す．本例は，吊り床版構造を用いた複合トラスの例である[5)]．

写真-2.5.8 手延べ斜吊り併用押出し工法の架設時全景

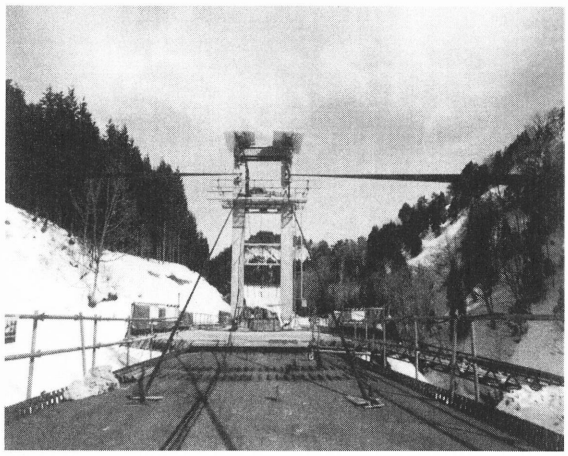


写真-2.5.9 手延べ斜吊り併用押出し工法の架設ケーブル配置状況

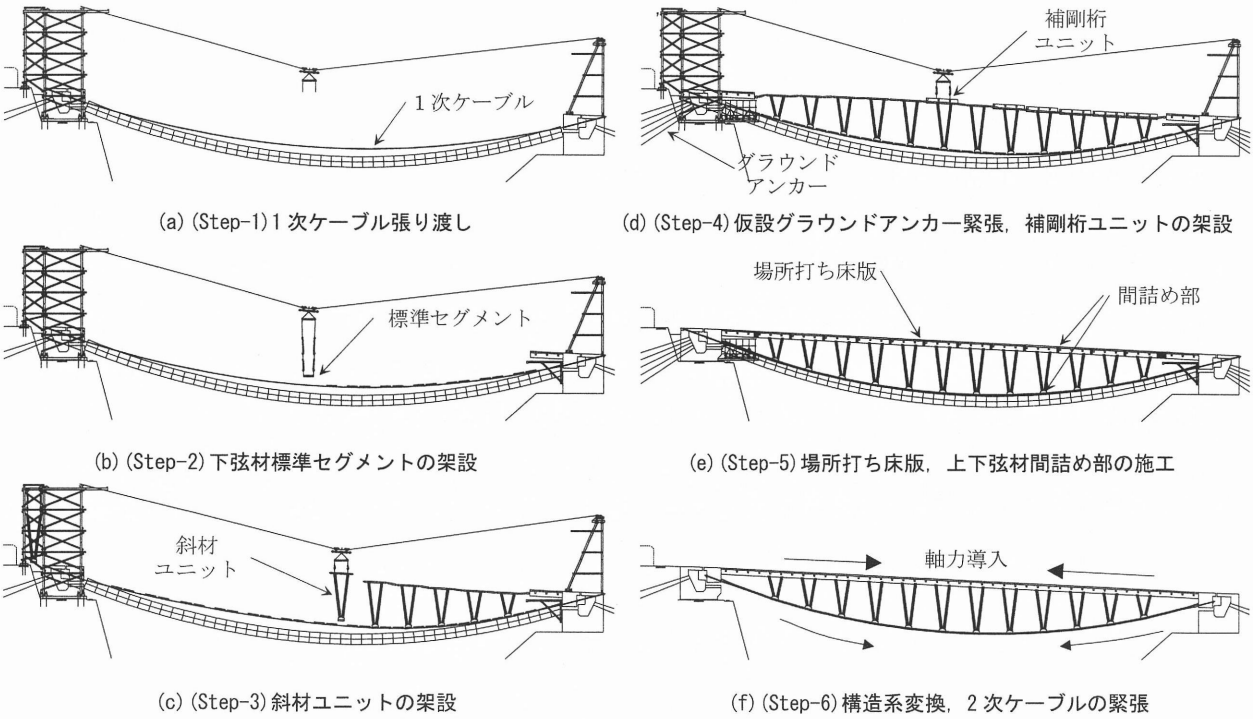


図-2.5.8 吊り床版構造の架設要領の例

斜材ユニットの架設状況を**写真-2.5.10**に示す.

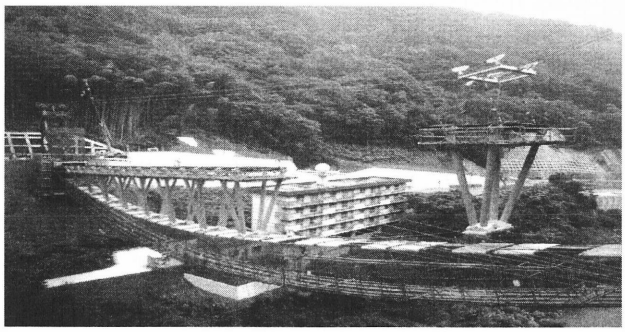


写真-2.5.10 吊り床版橋の斜材ユニットの架設状況の例

2.5.3　ケーブルを用いた架設工法

ケーブルエレクション工法は，鉄塔から張り渡したケーブルで橋体を支持して架設する工法である．架橋地点が高い渓谷や，河川などで桁下空間が利用できず，また，移動式クレーンの進入やベントの設置が困難な場所で，しかも両岸に鉄塔，アンカーの設置が可能な場合に採用される工法である．本工法は，斜吊り工法と直吊り工法との２種類があり，ケーブルクレーンを用いて架設するのが一般的である．橋脚位置で架設時の水平力を負担できない場合など特殊な場合は，斜直併用工法も使われるが，施工管理が難しく設備が過大となる問題がある[1)]．

適用される橋種は，アーチ系橋梁，トラス橋，方杖ラーメン橋などが多く，その構造形式によって，斜吊り工法と直吊り工法とに使い分けされる．両工法の基本的な違いは，①アーチ支点に水平力が作用するか否か，②アーチ部材に曲げ軸力が作用するか否か，③吊荷重を，アーチのみとするか全鋼重とするかといった橋体の力学特性から選定される．

これらの工法は鉄塔基礎，アンカー等の事前工事が必要であり，周辺環境への配慮，工事中の鉄塔転倒防止等の安全対策に十分注意を払う必要がある．一般的な工法であるベント工法と比較して，難度が高く事故の発生率も高い．したがって，このような工法を選択する際には過去の事故例なども熟知していることが必要である．それぞれの工法の概要および事故例を以下に示す．

(1) 斜吊り工法

斜吊り工法は，鉄塔の頂部より斜めに張った斜吊り索で直接橋体を吊る工法であり，アーチ系橋梁の中・上路式ローゼ，および方杖ラーメン橋に多く用いられる．架設順序は，アーチ部を中央に向かって張り出し架設して閉合した後，斜吊りケーブルを解放するのが一般的である．しかし，構造および設計条件によっては全体を斜吊りする場合もある（**図-2.5.9** 参照）．

斜吊り方式には，１点吊りと多点吊り方式がある．前者は，斜吊りしたケーブルを順に盛り替えて架設先端の１点のみを斜吊りする方法であり，設備が少なく構造系が単純になる利点がある．しかし，太い径となり盛り替え作業が難しくなる場合もある．これに対して後者は，全部のケーブルにより斜吊りする方式であり，それぞれのケーブルは比較的細くなるが，全体としては，設備が増え，張力管理が複雑になるといった問題点もある．

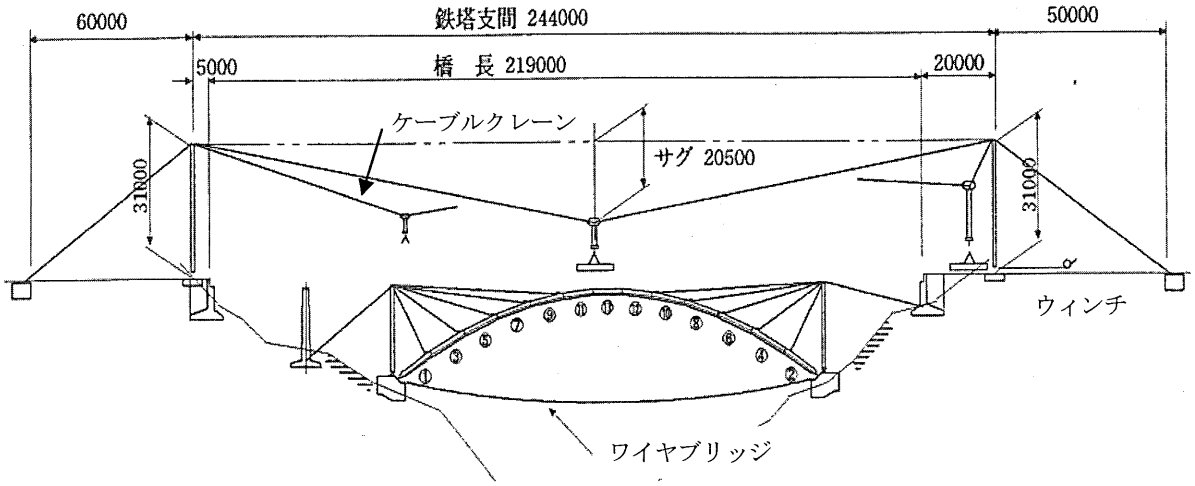


図-2.5.9 斜吊り工法によるアーチ橋の架設（多点吊り）（寸法単位:mm）

(2) 直吊り工法

直吊り工法は，**図-2.5.10** に示すように，橋台の後方に設備した鉄塔間に張り渡した主ケーブルから吊ケーブルを懸垂させ，橋体を鉛直方向に支持しながら組立てる工法であり，下路式ランガー橋やトラス橋に多く用いられている．

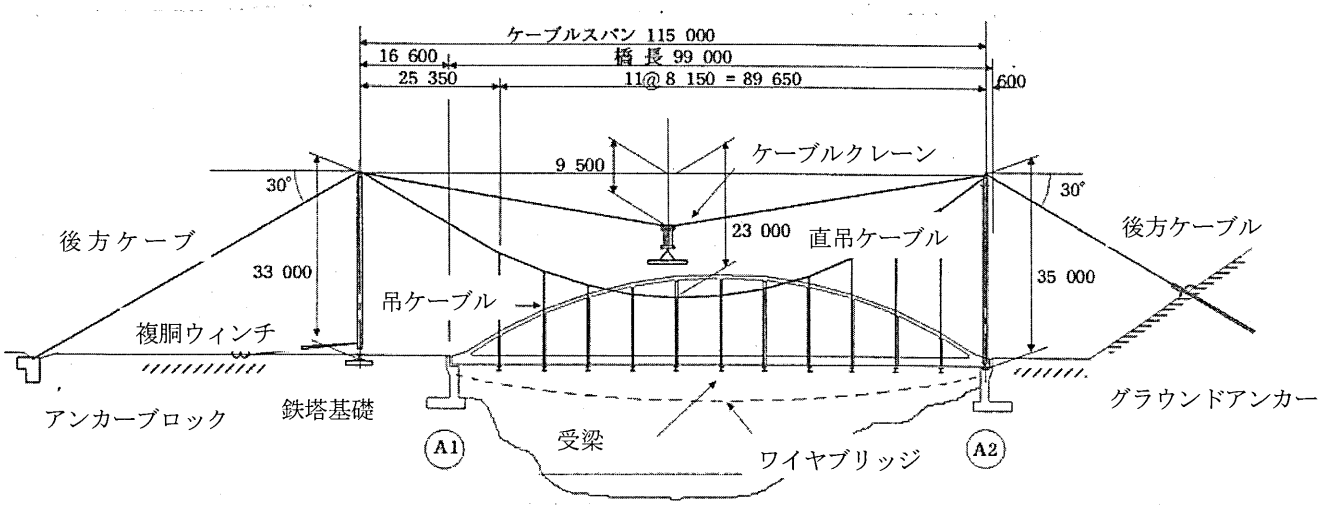


図-2.5.10 直吊り工法によるアーチ橋の架設（寸法単位:mm）

(3) 事故例

ケーブルエレクション斜吊り工法で架設中のアーチ橋の事故として，2 つの例を紹介する．また，直吊り工法によるトラス橋の事故として，S 橋を記す[2)]．

1) R 橋

この橋は，上路式鋼アーチ橋の支間長 90m のアーチリブを 9 ブロックに分け，斜めに張ったケーブルで支えながら谷の両側から張り出す「ケーブルエレクション斜吊り工法」で架設されていた（**図-2.5.11** 参照）．

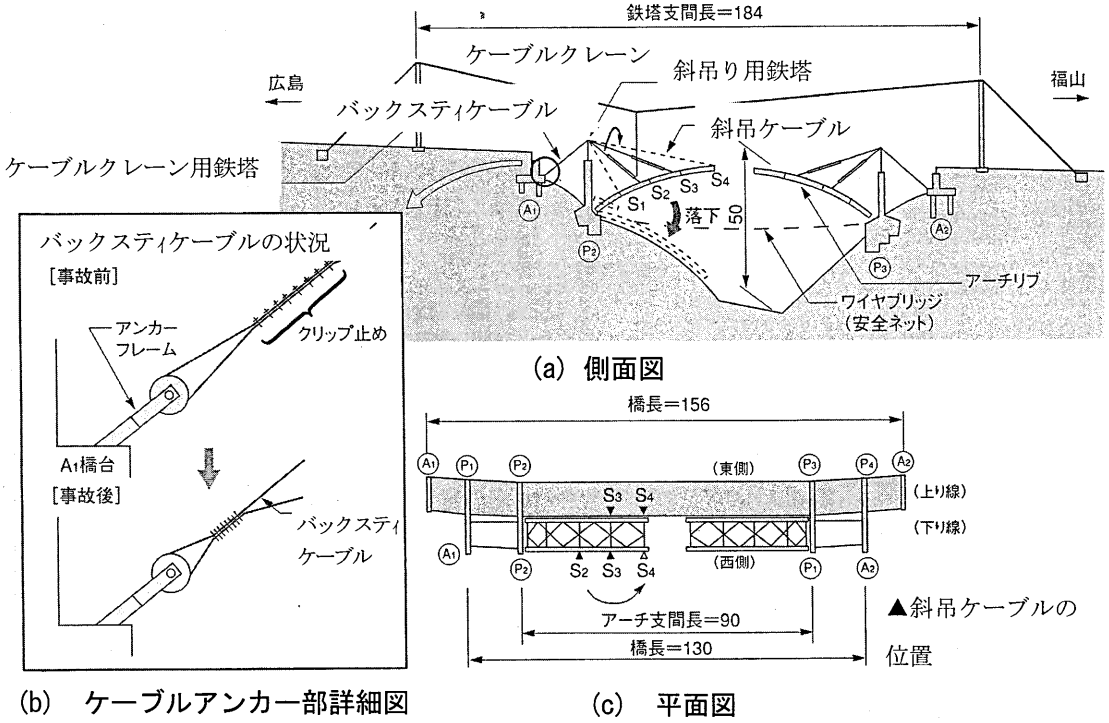


図-2.5.11 斜吊り工法によるアーチ橋の事故例(1)（寸法単位:m）[2)]

事故当時，両側からそれぞれ 4 ブロック分張り出した所であり，中央の 1 ブロックを残した状態で長さ 41m，重さ約 1,000kN の片側 4 ブロックが落下し，橋上で作業していた 3 人が重傷を負った．事故原因は，アーチを吊下げる鉄塔を支えていたバックスティケーブルが伸びて，鉄塔が傾いたためとされる．作業員が手動で行ったケーブルのクリップを十分に締付けなかったことから，直径 50mm のケーブルを固定するクリップがスリップした．それに伴い，鉄塔が谷側に傾き，橋脚に埋め込んでいたアンカーボルトが破断し，アーチが落ちた．工事関係者がクリップの状態を定期的にチェックするなどの安全管理を十分に行っていなかった点に過失があったとされる．

2) U 橋

U 橋は，長さ 198m で，幅 10.7m の下路式鋼ニールセンローゼ橋（鋼重約 11,600kN）であり，ケーブルエレクション斜吊り工法により川の両側に建てた 2 つの鉄塔からそれぞれ斜めに張り渡したケーブルでアーチリブを吊下げながら，アーチを張り出していた(**図-2.5.12** 参照)．事故当日は，アーチ閉合の準備作業が行われていた．その時，片側のアーチリブが落下し，先端にいた作業員 1 人が，アーチリブもろとも約 75m 下に転落して死亡した．

事故は，閉合を控えて鉄塔の傾きを修正する際に，ケーブルを鉄塔の後方へ引き込む作業を行い，必要以上に引き過ぎたことが原因とされる．ケーブルを引き込み過ぎたために鉄塔の耐荷力以上の力がかかり，高さ 55m の鉄塔が根元の部分から折れた．それに伴って，アーチリブが落下した．ケーブルを必要以上に強く引っ張ることになった理由として，ケーブルの滑車がケーブル方向に設置されていなかったため十分に回転しなかったことなどの原因が指摘されている．

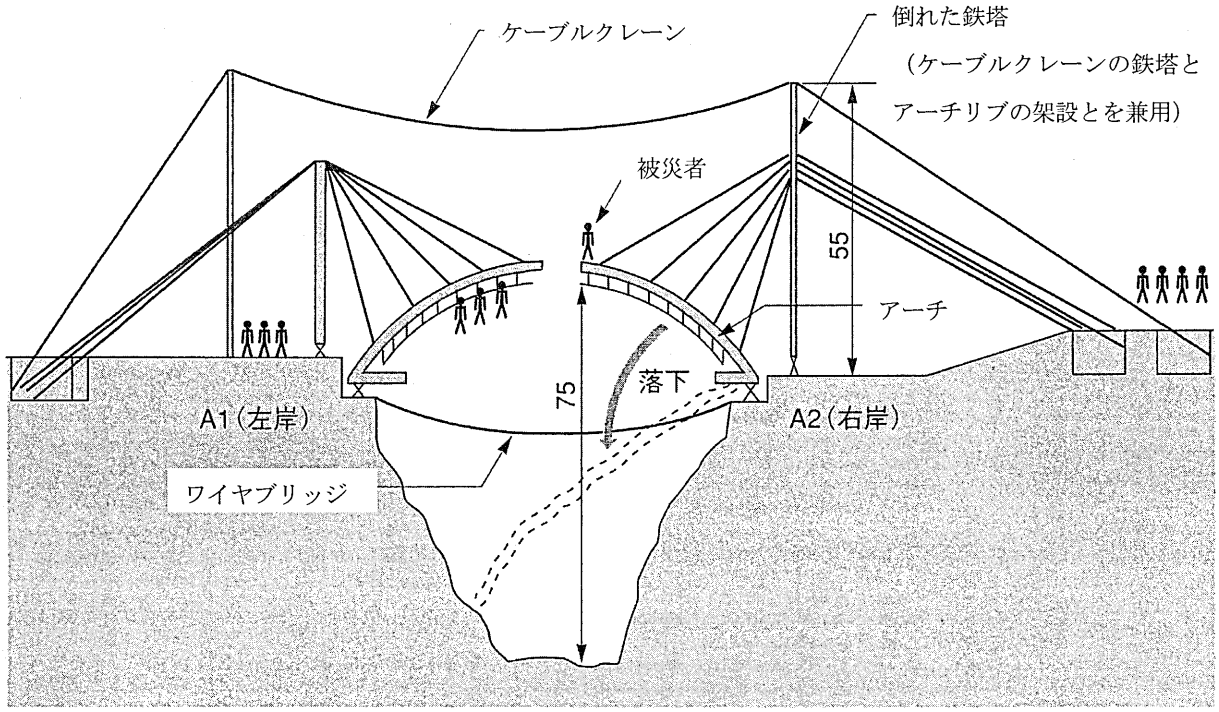


図-2.5.12 斜吊り工法によるアーチ橋の事故例(2)（寸法単位:m） [2)]

3) S橋

S橋は，3径間の鋼橋であり，中央径間77.1mの単純トラス桁をケーブルクレーンによる直吊り工法で架設していた．トラス桁は，幅6.75m，高さ9.5m，および重さ2,100kNであった．

桁の閉合は間近で，最後の上弦材を桁中央に落し込むだけであった．事故当日は，自重で垂れ下がるため，ケーブルを張り渡した鉄塔をそれぞれ背後に傾けて，落し込む位置の間隔を広げていた．一方の鉄塔を傾け終わり，もう片方の鉄塔を傾けている最中に，突然，ケーブルを鉄塔頂部に繋ぎ止めていたクリップから下流側のケーブルが外れて桁が落下した．桁上にいた作業員4人が，橋桁とともに転落，3人が重軽傷を負い，1人が行方不明になった[2)]．

事故検証によるとケーブルが作業中に切断した形跡はなく，クリップに損傷もなかった．このため，ケーブルがクリップからすり抜けたと推定された．現場責任者が，ケーブルを鉄塔に固定するクリップの点検や締め直しを行わず，危険を防止する業務上の注意事項を怠ったことが原因とされた．

参考文献

(2.1)

1) 日本鋼構造協会：JSSCテクニカルレポート，No.29，構造用ケーブル材料規格JSSⅡ　03(構造用ストランドロープ)，04(構造用スパイラルロープ)，05(構造用ロックドコイルロープ)，06(平行線ストランド)，11(被覆平行線ストランド)，1994.10.
2) 日本建築学会：ケーブル構造設計指針・同解説，p.8，1994.6.
3) 日本規格協会：JISハンドブック，鉄鋼Ⅱ，pp1190-1204，2005.1.
4) 日本建築学会：ケーブル構造設計指針・同解説，p.2，1994.6.
5) 日本鋼構造協会：J構造用ケーブル材料規格，p. 64，1994.10.
6) 日本規格協会：JISハンドブック，鉄鋼Ⅱ，pp1130-1134，2005.1.
7) 土木学会：コンクリートライブラリー95，コンクリート構造物の補強指針（案），pp.13-15，1999.9
8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説　Ⅴ耐震設計編，p.274，2002.3.
9) 南　浩郎，小野　武，瀬戸　清，尾鍋　卓巳：那智勝浦道路木ノ川高架橋の施工，橋梁と基礎，Vol.38，No.1，pp.13-19，2004.1
10) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，p.13-21，2002.3.
11) プレストレストコンクリート技術協会：ＰＣ斜張橋・エクストラドーズド橋設計施工規準（案），p.160，200.11.
12) 平井　敦：鋼橋Ⅲ，p.315，技報堂，1967.
13) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋偏，p.228，2002.3.
14) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋偏，p.147-148，2002.3.

(2.2)

1) 阪神高速道路公団：天保山大橋工事誌，1992.
2) 本州四国連絡橋公団：生口橋工事誌，1993.
3) 中須　誠，伊藤正人，谷中　慎，前田晴人：木曽川橋・揖斐川橋複合構造接合部の設計と施工，プレストレストコンクリート，Vol.42，No.1，pp.37～44，2000.
4) 土木学会・鋼構造委員会・鋼構造進歩調査小委員会（編）：鋼斜張橋－技術とその変遷－，鋼構造シリーズ 5，

土木学会, 1990.

5) 日本道路公団：伊勢湾岸道路工事誌, 1998.

6) 首都高速道路公団：横浜ベイブリッジ工事誌, 1991.

7) 阪神高速道路公団：東神戸大橋工事誌, 1994.

8) 藤原　亨，真辺保仁，山口和範：多々羅大橋ケーブルの制振対策，橋梁と基礎，Vol.33，No.5，pp.16～19，1999.

9) Ito, M., et al.(Eds.) : Recent Developments and their Future, Proceedings of the Cable-Stayed Bridges Seminar, Yokohama, Japan, Elsevier Science Publishers, 1991.

10) 土木学会・本州四国連絡橋・鋼上部構造研究小委員会：本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書－櫃石島・岩黒島斜張橋に関する検討－, 1980.

11) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，丸善, 2002.

12) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, I 共通編・II 鋼橋編，丸善, 1990.

13) 鈴木　威，若槻晃右，真鍋英規，西　弘：喜連瓜破高架橋の補強検討および施工－下弦ケーブルを用いた有ヒンジラーメン橋のたわみ回復補強－，プレストレストコンクリート，Vol.46，No.5，pp.45～54，2004.

14) 三井祐二，平川吉幸，宮原裕二，中原　晋：ＰＣ＆ＰＡ工法施工報告－瀬石谷橋橋脚耐震補強工事－，プレストレストコンクリート，Vol.47，No.1，pp.34～40，2005.

(2.3)

1) 波形鋼板ウェブ合成構造研究会：波形鋼板ウェブ PC 橋計画マニュアル(案)，1998.

2) プレストレストコンクリート技術協会：PC 斜張橋・エクストラドーズド橋設計施工規準(案)，2000.

3) 今泉安雄，中村和典，藤木義博，三浦泰博：張り出し架設工法による全外ケーブル方式波形鋼板ウェブ PC 橋の設計・施工－東九州自動車道 前谷橋－, プレストレストコンクリート, Vol.43, No.3, pp.42-48, 2001.3.

4) 佐川信之，酒井松男，岡澤祐三，益子博志，春日昭夫，田添耕治：日見橋（仮称）の設計と施工，橋梁と基礎，Vol.37，No.6，pp.2-10，2003.6.

5) 中園明広，福原寛光，西田朋仁郎，須田　隆：第二名神高速道路栗東橋の施工，橋梁と基礎，Vol.38，No.10，pp.5-11，2004.10.

6) 上東　泰，忽那幸浩，垂水祐二，山本　徹，奥山　元：矢作川橋の上部構造の設計，橋梁と基礎，Vol.39，No.2，pp.17-25，2005.2.

7) 上東　泰，宮本健次，山本　徹，広瀬　毅，中村　譲，笠原　等，長沼　清，大谷　満：矢作川橋の上部構造の施工，橋梁と基礎，Vol.39，No.2，pp.35-45，2005.2.

(2.4.1)

1) Gimsing, N.J. : Cable Supported Bridges Concept and Design, John Wiley & Sons, 1983.

2) 土木学会：鋼構造シリーズ５，斜張橋―技術とその変遷―，pp.1-21，1990.9.

(2.4.2)

1) 新たな展開を示す PC 構造，プレストレストコンクリート，1991.

2) PC 斜張橋・エクストラドーズド橋　設計施工基準（案），プレストレストコンクリート，2000.

3) 道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編，日本道路協会，2002.

4) コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，土木学会，2002.

(2.5.1)

1) 川田忠樹：現代の吊橋，理工図書，1987.12.

2) 土木学会：鋼構造シリーズ４　吊橋・技術とその変遷，土木学会，1990.5
3) 土木学会：鋼構造シリーズ５　鋼斜張橋・技術とその変遷，土木学会，1990.5.
4) 土木学会：鋼構造シリーズ11　ケーブルスペース構造の基礎と応用，丸善，1999.10.
5) 川上 洵，大浦 隆：なぎさ・ブリッジ（鯵ヶ沢人道橋），土木学会誌，Vol.88，No.2. pp.40～42.2003.2.
6) 本州四国連絡橋公団：瀬戸大橋上部工工事写真集，海洋架橋調査会，1988.8.
7) 川重・住重・NKK・三井・川田共同企業体：明石海峡大橋３Ｐ主塔工事記録写真集，1994.10.

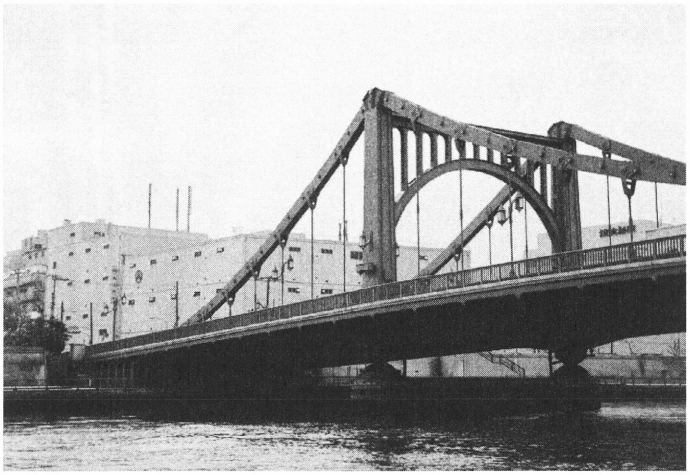
(2.5.2)

1) 今泉安雄，中村和典，藤木義博，三浦泰博：張り出し架設工法による全外ケーブル方式波形鋼板ウェブ PC 橋の設計・施工－東九州自動車道 前谷橋－，プレストレストコンクリート，Vol.43，No.3，pp.42-48，2001. 3.
2) 佐川信之，酒井松男，岡澤祐三，益子博志，春日昭夫，田添耕治：日見橋（仮称）の設計と施工，橋梁と基礎，Vol.37，No.6，pp.2-10，2003. 6.
3) 中園明広，福原寛光，西田朋仁郎，須田隆：第二名神高速道路栗東橋の施工，橋梁と基礎，Vol.38，No.10，pp.5-11，2004.10.
4) 石黒　亙，村田嘉宏，須合孝雄：松の木７号橋（銀山御幸橋）の設計と施工，プレストレスとコンクリート，Vol.38，No.5，pp.5～pp.14，1996.5.
5) 乗常晃男，山崎和彦，石原光浩，齋藤謙一，桑野昌晴：青雲橋の設計と施工－吊構造を利用した架設工法による単径間 PC 複合トラス橋－，橋梁と基礎，Vol.39，No.4，pp.5～11，2005.4.

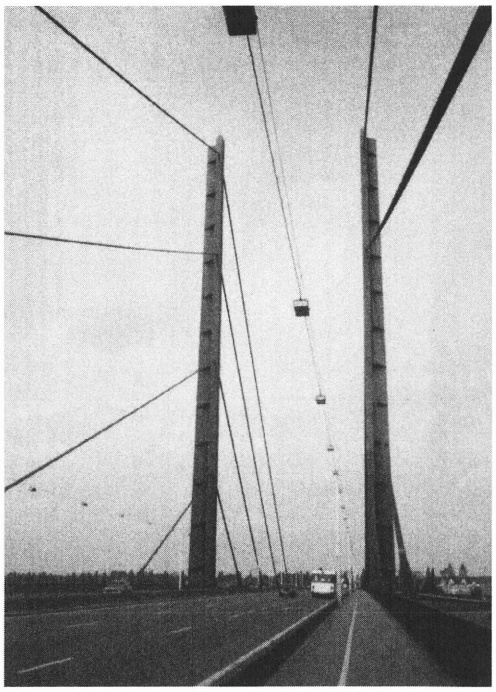
(2.5.3)

1) 日本橋梁建設協会：工法別架設計算例題集　ケーブルエレクション，1998.9.
2) 日経ＢＰ社：建設事故，2000.4.

ケーブル系橋梁の写真館



清洲橋（東京都）



クニー橋
（ドイツ　デュッセルドルフ）