

〔設 計〕

上顔橋（鋼V脚ラーメン橋）の設計と施工

木 村 正¹⁾ 黒 田 岩 男³⁾

鷲 尾 修 一²⁾ 吉 村 文 達⁴⁾

V脚ラーメン橋は、脚とはりとをラーメン構造で一体化することにより、力学的有利性を与え、美観的にも、山岳地形に調和する直線美を生かしたダイナミックな構造美を有する橋梁形式である。しかし、我国においては、他の形式にくらべ、実施例の少ない形式でもある。したがって、設計・施工には、検討すべき技術的テーマも少なくない。

本稿は、今後、実施される同種の橋梁の設計、施工の際に、参考になればと考え、ここに、上顔橋（5径間連続V脚ラーメン橋）の設計、施工について報告するものである。

まえがき

本稿は、宮崎県の北部に位置する延岡市と西臼杵地域を結ぶ国道218号に、計画された「日之影バイパス」に、建設される長大橋梁の1つである。

架橋地点は、遠くに祖母山系を展望できる山の腹にあり、急峻な溪谷のある地形である。このような恵まれた自然景観に調和し、構造的な合理性をもつ橋梁形式として、種々の検討の結果、5径間連続V脚ラーメン橋が採用された。

現在、本橋は、橋面の仕上工の施工を進めており昭和59年12月に完成の予定である。

本稿では、この5径間連続V脚ラーメン橋の設計施工の概要を報告し、あわせて、設計・施工を進める上で実施した種々の検討事項について言及し、V

脚橋の特色を理解する上で、役立てればと考えている。



図一 1 架橋位置図



写真一 1 上顔橋

1)設計部大阪設計課主任

2) " 電算課係長

3)設計部大阪設計課

4) " 副課長

1. 工事概要

路線名	一般国道218号
工事名	国道218号橋梁整備工事 (上顔橋)
所在地	宮崎県西臼杵郡日之影町大字七折
企業者	宮崎県西臼杵支庁
橋格	1等橋 (TL-20)
形式	5径間連続鋼V脚ラーメン橋 単純合成鈹桁
橋長	190m
支間長	29.6+30.0+50.0+20.0+29.55, 29.2m
幅員	車道 7.25m 歩道 2.00m
総鋼重	780ton
使用鋼種	SM50Y, SS41
架設工法	ケーブルエレクトション斜吊工法, および自走クレーンステーキング*
工期	昭和58年10月~59年12月

2. 設計編

連続V脚ラーメン橋は、脚とはりを一体化したラーメン構造の中間支点の橋脚をV型に開くことから、一般の連続桁、 π 型ラーメン橋などとは、次のような力学的有利性がある。

- (i) 中間支点上負の曲げモーメントの低減
- (ii) 地震時水平力の分散化
- (iii) 伸縮装置部における伸縮量の低減

しかし、このようなV脚橋の構造特性を活かすに

は、種々の検討、確認が必要である。本橋では、下記の事項について、検討を加え設計を進めた。

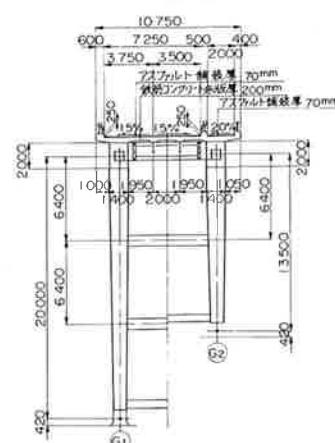
- (i) 構造がスレンダーとなることにより耐震性の確認が必要となる。
- (ii) 脚とはりとの隅角部の応力集中について、その構造と応力度照査
- (iii) アーチと類似した効果を有するラーメン橋であるので、その全体座屈について安全性の照査確認

以下に、本橋の設計概要と上記検討事項について述べる。

(1) 設計条件

形 式	5 径間連続 V 脚ラーメン橋		
縦断勾配	2.2%直線勾配		
横断勾配	車道	1.5%	直線屋根勾配
	歩道	2.0%	直線片勾配
舗 装	車道	アスファルト	t =70mm
	歩道	"	t =70mm
床 版	車道	鉄筋コンクリート	20cm

断面图


$$\delta c_k = 240 \text{ kg/cm}^2$$

設計震度

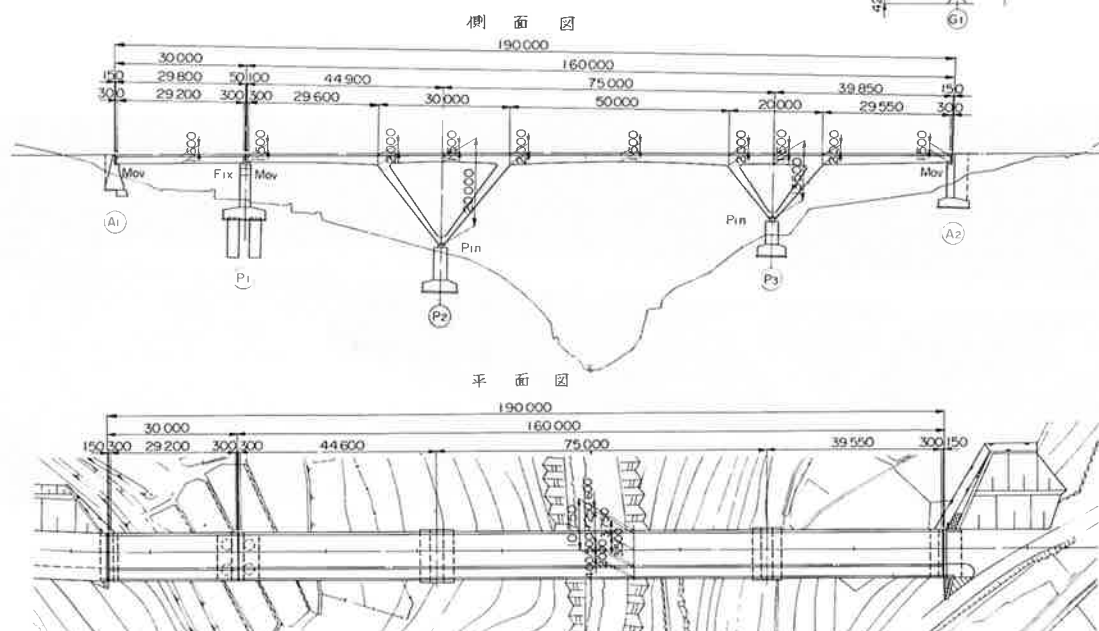
$$K_h = 0.15$$

温度
-10℃~50℃

適用示方書

道路橋示方書

(昭和55年 2 月)



圖—2 上顏橋一般圖

(2) 設計概要、諸元

1) 構造解析

本橋の構造解析にあたっては、面内、面外荷重による断面力の組合せ、抽出の便宜を図るため、立体解析を行った。

数値解析構造モデルを図-3に示す。

2) 断面力

主桁およびV脚の断面力を図-4に、表-1に橋軸方向移動量、表-2に反力を示す。中央径間主桁およびV脚は、アーチ構造と同様の挙動を示し、大きな軸圧縮力が作用する。したがって、これらの部材は、軸力および曲げモーメントを受ける部材としての補剛を行った。

また、活荷重たわみは、

$$\delta_{\max} = 50.8\text{mm (pt19)} < \delta_a$$

$$(\delta_a = L/500 = 150\text{mm})$$

であった。

表-1 橋軸方向移動量
(単位mm)

	移動量 (活+温)
P 1	63
A 2	55

表-2 反力表

(単位 ton)

反力点	鉛直反力 (常時)	水平反力(地震時・常時換算)	
		橋軸方向	橋軸直角方向
P 1	128	—	7.88
P 2	723	169	44.5
P 3	592	169	44.5
A 2	129	—	7.52

(3) 耐荷力設計

V脚部の設計は、道路橋示方書にしたがい有効座屈長を求め、許容圧縮応力度を算出し、部材断面を決定した。

しかし、本橋の場合、面外座屈長は、道示13.5.1を適用できるが、面内座屈長については、道示の規定が、ラーメンの水平座屈の場合の座屈長だけを定めているため、本橋のように、傾斜した柱の有効座屈長の算定には適用できない。

したがって、V脚の面内座屈に関して、厳密な座屈解析から、座屈荷重を算出し、

(i) V脚面内座屈長の算出

(ii) 全体座屈の安全率の照査

を行った。以下に、その概要を述べる。

1) 解析方法

解析にあたっては、固有値解析による線形座屈解析(座屈荷重、座屈モード)を行い、あわせて有限変位解析(荷重—変位曲線から座屈前後の挙動確認)からも座屈荷重の確認を行った。

2) 有効座屈長

V脚面内有効座屈長を求めるために、下記の事項に留意して解析を進めた。

(i) 解析構造系は、脚の他の部材による弾性支持の影響を評価するため、単柱部分モデル

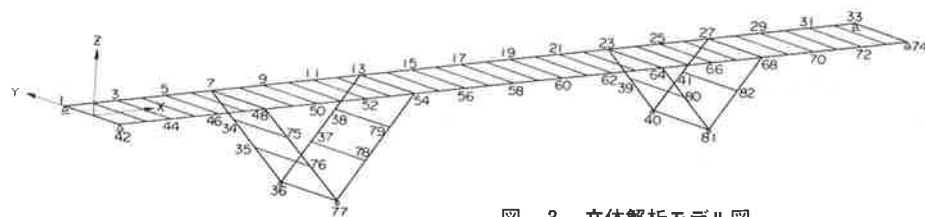


図-3 立体解析モデル図

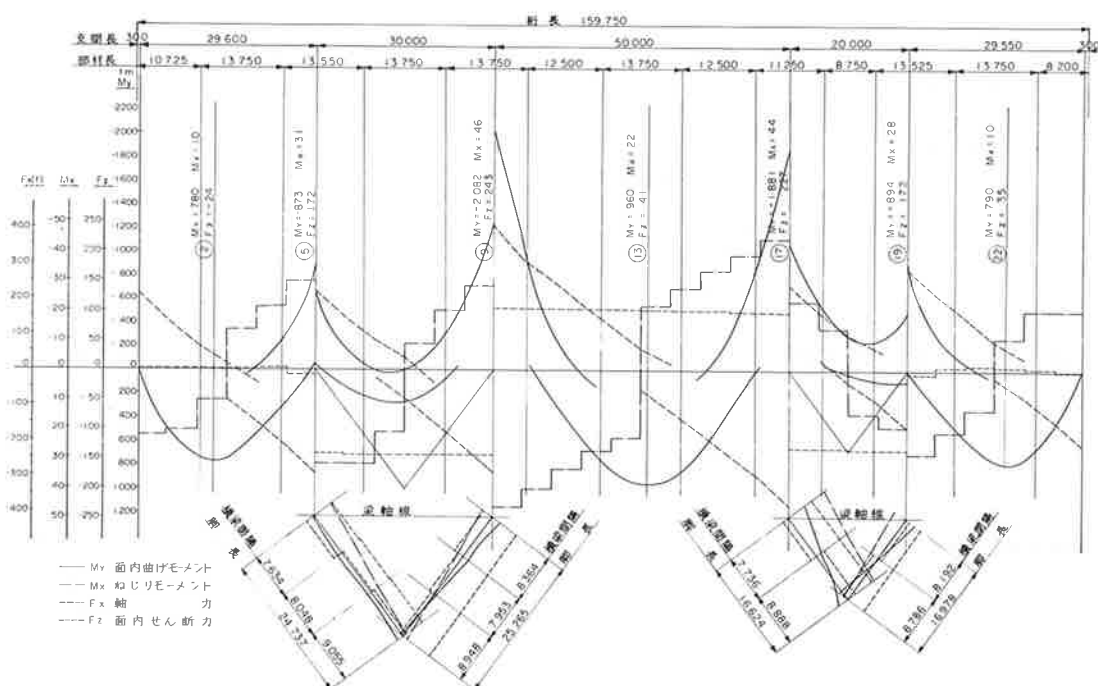


図-4 断面力図

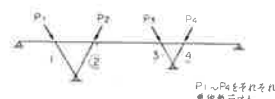


図-5 脚耐荷力算出用荷重状態図

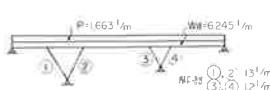


図-6 全体耐荷力算出用

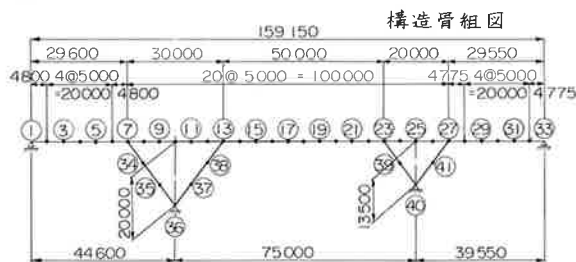


図-7 座屈解析モデル図

としないで、全体構造モデルとする。

- (ii) 荷重は、脚の応力状態を純圧縮に近い状態とするために、各脚に単独載荷する。

数値解析構造モデルを図-7に、載荷荷重状態を図-5に示す。

解析結果のうち脚②の結果を図-8～図-10に示す。図-8は、線形座屈解析、有限変位解析の荷重一変位の関係を示す。それぞれの解析結果から、部材座屈荷重(Pcr)は、表-3の通りとなる。

有効座屈長の計算

計算例として、脚②の場合を示す。

表-3から、部材座屈荷重

$$P_{cr} = 24200 \text{ ton} \dots\dots\dots (1)$$

両端ピンの中心圧縮柱のオイラー座屈荷重

$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \dots\dots\dots (2)$$

- (1)、(2)式から各座屈荷重強度が等しくなるように、有効座屈長 l_{ef} を定める。

$$l_{ef} = \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{P_{cr}}} = 20.762 \text{ m}$$

$$\therefore l_{ef} = 0.830 l_0 \quad (l_0 = 25.000 \text{ m})$$

したがって、脚部材の断面計算に用いる面内有効座屈長としては、安全率を見込み

$$l_{ef} = 1.5 l_0$$

とした。

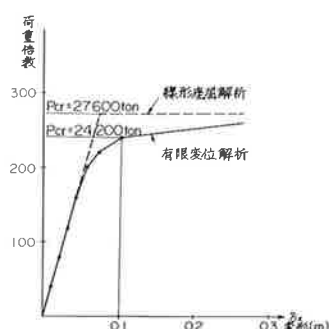


図-8 脚-2 部材座屈荷重-変位関係図 (有限変位解析時)

表-3 部材座屈荷重

	線形座屈解析	有限変位解析
Pcr	27,600	24,200



図-9 線形座屈解析による座屈モード図

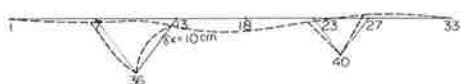


図-10 有限変位解析による全体変形図(Pcr=24 200ton 時)

3) 全体座屈耐力の照査

本橋は、アーチと類似した効果を有するラーメン橋であるので、橋全体の面内座屈耐力の確認を脚の部材座屈解析とは、別途に行った。

数値解析構造モデル、解析方法は、2) 有効座屈長の場合と同一とし、載荷荷重状態は、図-6に示すように設計荷重(活+死)を満載し、解析を行った。

解析結果を図-11～図-13に示す。

図-13は、線形座屈解析、有限変位解析の荷重一変位の関係を示す。それぞれ解析結果から、全体座屈荷重の荷重倍率(α)は、表-4の通りとなる。

したがって、本橋は、設計荷重(基準荷重)の

$\alpha = 25$ 倍の耐力があり、十分安全であることが確認された。

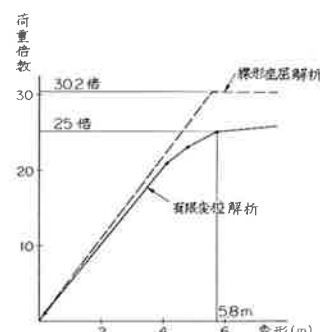


図-11 全体座屈荷重一変位関係図 (有限変位解析時)

表-4

Pcr/Pd	線形座屈解析	有限変位解析
Pcr/Pd	30.2	25.0



図-12 線形座屈モード図 (Pcr/Pd=30.2倍)

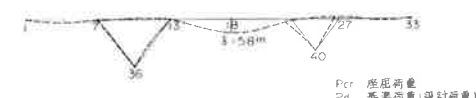


図-13 有限変位解析による全体変形図 (Pcr/Pd=25.0倍)

(4) 隅角部の設計

主桁とV脚との交差部は、応力集中が予想されるため、立体FEM解析により応力照査を行い、構造の安全性の確認を行った。

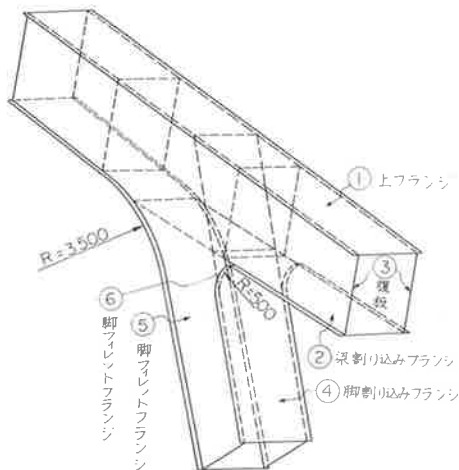
1) 形状

隅角部形状については、当社既報の研究資料から下記の点を考慮して、図-14の形状とした。

- 鈍角側下フランジ⑤は、直線状よりも湾曲フランジ(フィレットローアフランジ)を用いて、曲線形とする。
- フィレットローアフランジは、補強リブを設けて、曲面板であるがゆえのフランジ中央の面外剛性低下を補剛し、有効幅が減少しないようにする。
- 鋭角側脚フランジ④、はり下フランジ②は、直線状に交差させる構造とし、応力集中を

さけるために、円弧リブプレートを設置する。
このリブプレートには、フランジ⑥をつけて剛性を上げる。

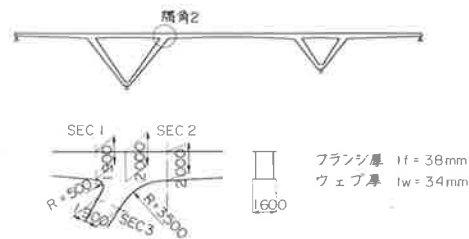
- iv) 鋭角側下フランジ④は、はり下フランジに沿って配置し、隅角部に割込みフランジとする。



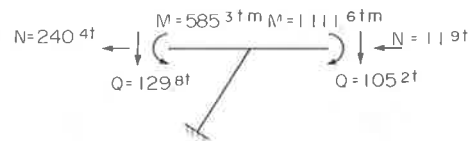
図一14 隅角部構造図

2) 立体FEM解析

数値解析モデルは、図一15に示す隅角部②を取り出した部分モデルとし、荷重は、全体構造解析からの設計断面力を、図一16に示すように載荷し、実際の構造系を反映させた。



図一15 隅角部-2 形状寸法図



図一16 部分構造 荷重載荷状態図

また、1)、ii)の補強リブの効果を確認するため、解析モデルは、

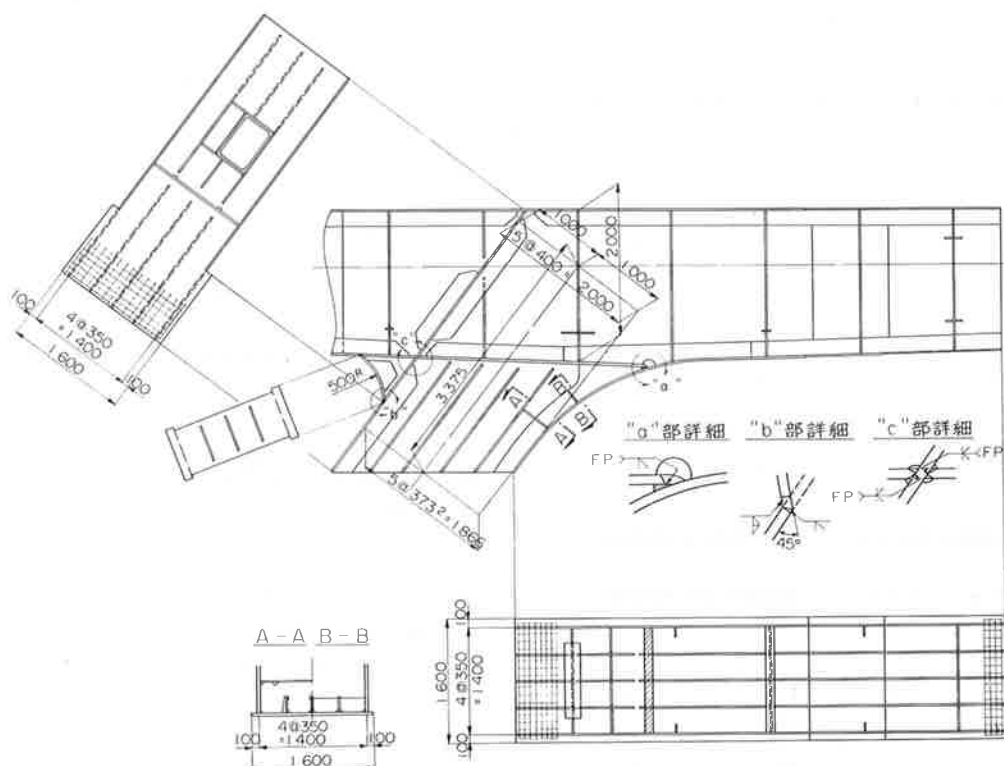
Case-1 縦、横リブを設けたモデル

Case-2 縦、横リブのないモデル

の2ケースを解析した。

両ケースの解析結果から、垂直応力度分布、主応力図を図一18～図一23に示す。

Case-1、2とも、図一18～図一20にみられるように①上フランジ、②はり割り込みフランジ、④脚割り込みフランジは、ほぼ一様な応力分布をしている。しかし、⑤、⑥のフィレットフランジは、図一21、22にみられるように、せん断おくれの現象が表われている。ただし、発生応力度は、表一4に示すよう



図一17 隅角部 構造詳細図

に許容応力度内におさまっている。

また、Case-1、2との有意差は、図-21、図-22の垂直応力度分布、表-4の有効幅比から、リブの設置によって、有効幅の増加に与える効果が、確認された。

このように、本橋の隅角部構造(図-17)が、応力集中に対して、合理的形状であり十分安全であることが、確認された。

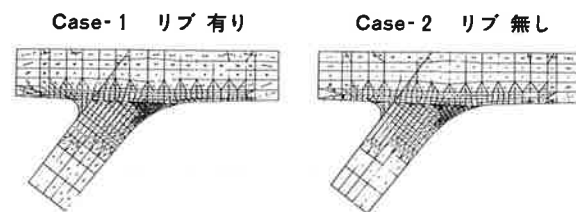


図-18 ウェブ ③ 主応力図

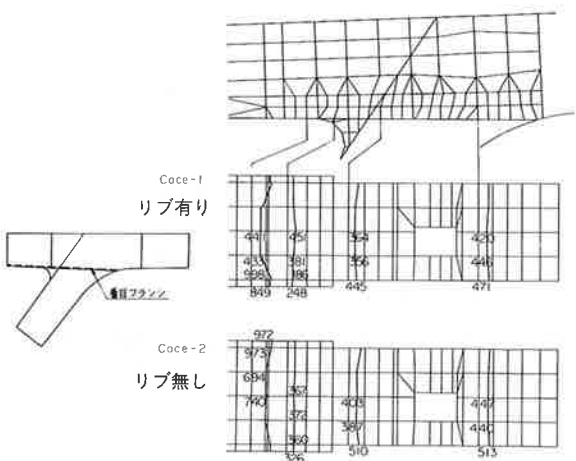


図-19 はり割り込みフランジ ② 垂直応力分布図

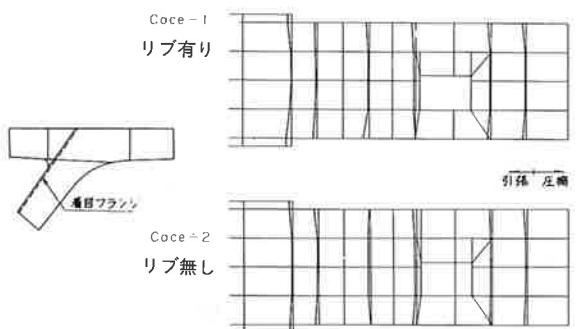


図-20 脚割り込みフランジ ④ 垂直応力分布図

表-4 フィレットフランジ 垂直応力度・有効幅比

		リブ無視	リブ考慮
⑤フランジ (側径間側)	δ	1,143kg/cm ²	584kg/cm ²
	B/Bo	13%	20%
⑥フランジ (中央径間側)	δ	1,428kg/cm ²	1,200kg/cm ²
	B/Bo	37%	56%

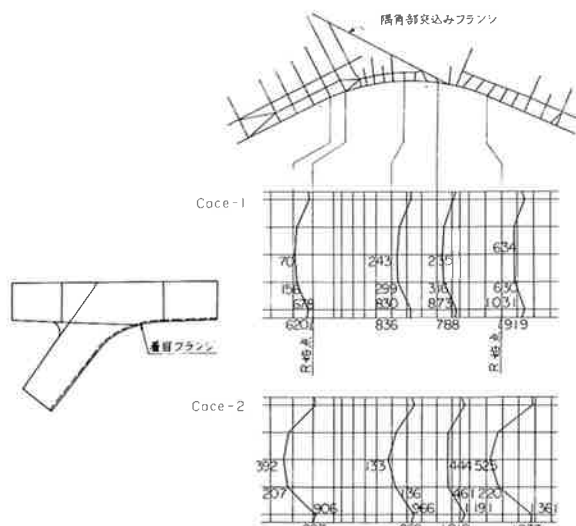


図-21 フィレットフランジ ⑤ 垂直応力分布図

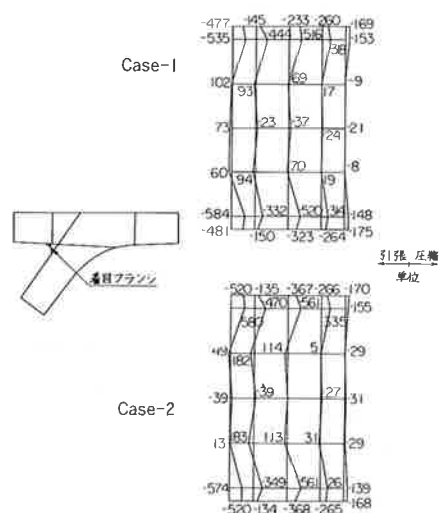


図-22 フィレットフランジ ⑥ 垂直応力分布図

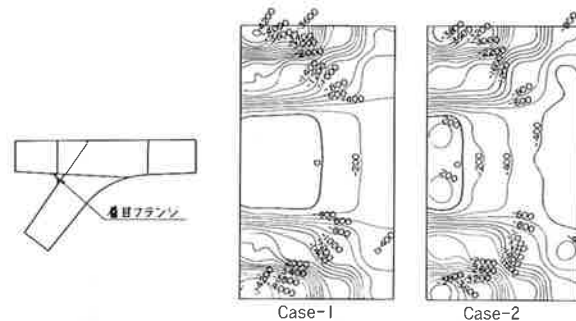


図-23 フィレットフランジ ⑥ 主応力コンター図

(3) 耐震設計

前述のように、V脚ラーメン橋は、その力学的有利性から断面(支間中央では高 $h=1.5\text{m}$)にスレンダーな構造が可能となる。本橋のような大規模な橋梁においては、スレンダーであることによる振動問題について十分検討しておく必要がある。

本橋では、振動問題として

(i) 歩行者に対する影響

(ii) 地震時の安全性

の検討を行った。

(a) 固有振動数および振動モード

変形法による動的解析プログラムにより、振動数

および振動モードを求めた。その結果を図-24に示す。

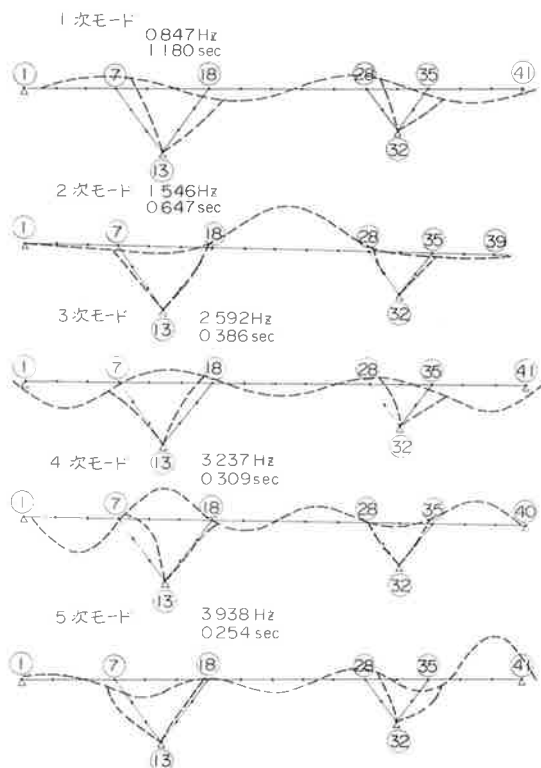


図-24 振動モード図

(b) 歩行者への影響

歩行者に対する振動問題は、歩行者の通行によって振動が発生し、利用者に不快感を与えるか否かにある。一般に、このような不快感は、歩行者の歩調と橋体の固有振動数が近い場合に発生しやすいと言われ、資料²⁾によれば、橋体のたわみ振動の固有振動数が、2 Hz前後(1.5~2.3Hz)にならないようにすることが必要であるとしている。

本橋のたわみ固有振動数は、0.847Hzであるので、特に歩行者に不快感を与える心配がないことが確認された。

(c) 地震時の断面力

静的耐震設計の他に、橋軸方向に地震力が作用した時の応答を、建設省土木研究所の平均応答スペクトルを用いて動的解析(入力加速度150gal, 減衰定数0.02)を行って、本橋の耐震性を確認した。その結果は、図-25に示すように、静的解析による断面力を超過する箇所はなく、各断面とも十分に安全であることが確認された。

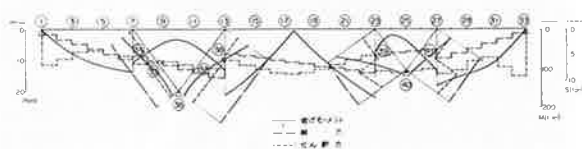


図-25 地震時モーメント図(動的解析)

3. 架設編

(1) 架設工法の概要

本橋の架橋地点は、前述のように谷底から橋面まで約50mの急峻なU字谷の地形である。この地形と構造形式とに適した工法として、複数の斜吊り索によるケーブルクレーン工法を採用した。なお側径間は、ケーブルクレーン・ベント工法とした。

次に、斜吊工法における架設要領図と施工工程を図-27、表-5に示す。

本橋の施工において特に留意すべき事項は、はり部材の閉合方法である。本橋では、中央径間及びV脚上部(三角部中央)の3ヶ所が、閉合部材となる。

閉合方法は、従来からよく用いられている形状管理による方法を採用した。

表-5 施工工程表

	昭和59年											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
ケーブル設備工												
輸送工												
架設工												
足場工												
高力ボルト工												
継手部塗装工												
床版・高欄工												
防水・舗装工												

1) 仮設備の概要

設備としては、斜吊索とケーブルクレーンのそれぞれに図-26に示す鉄塔を設置した。ケーブルアンカーとしては、コンクリートブロックを用いると一基当り160m³(4m×5m×8m)の大きさの基礎を設けなければならず、架設地の状態及び工事完了後の撤去等を考慮した結果、アースアンカー工法を用いた。また写真-2に示すようにケーブル調整装置(耐力80ton)を設置し、斜吊索バックスティ(全8本)を通じて部材を所定形状に管理できるようにした。

ケーブルクレーン鉄塔

斜吊用鉄塔

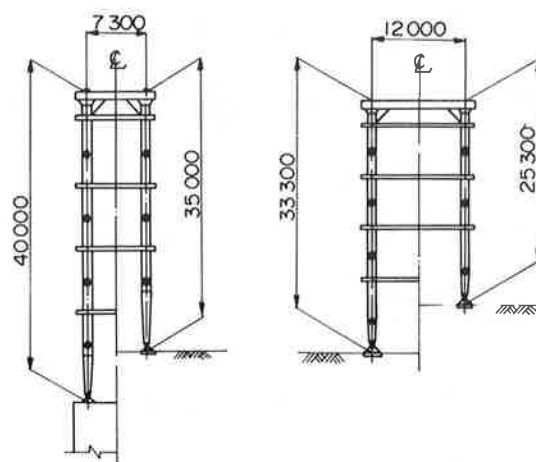


図-26 鉄塔設備図

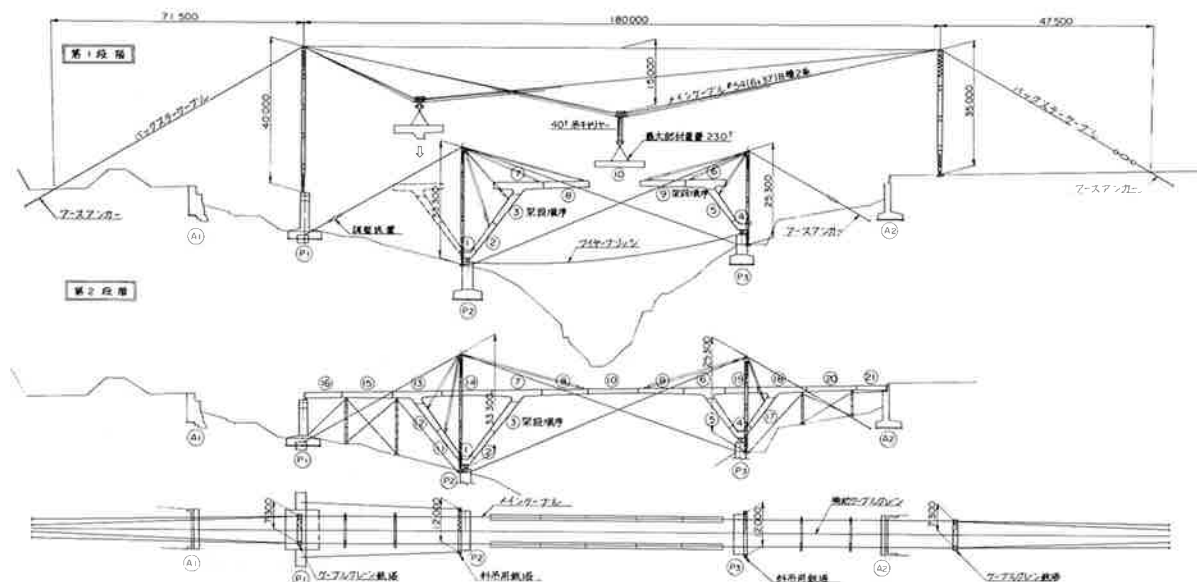


図-27 架設要領図



写真-2 ケーブル調整装置

表-6 支承据付フローチャート

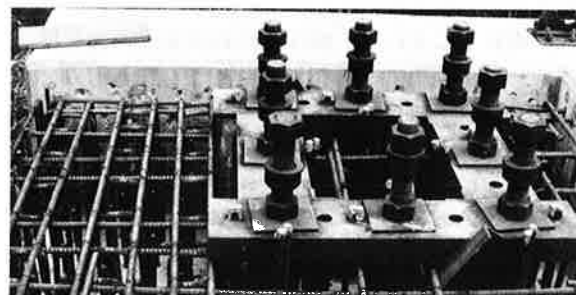
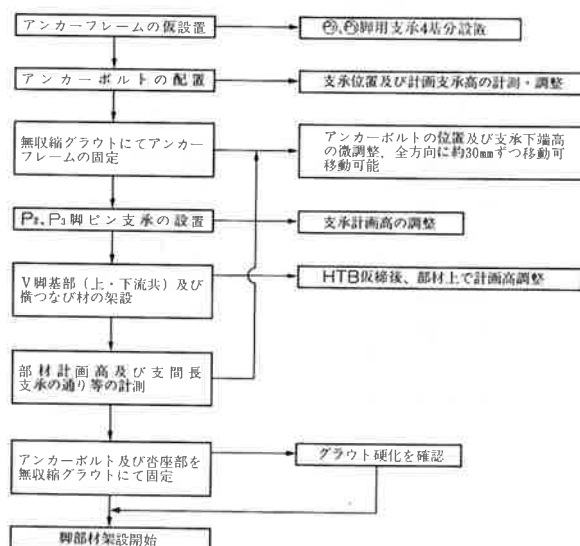


写真-3 支承アンカーフレーム



写真-4 V脚基部

b) 架設

架設は、図一29の架設順序図に示すように

- ① 脚部材の架設
- ② 中央径間の閉合
- ③ V脚上部の閉合
- ④ 側径間の張り出し架設

の順序で施工した。また形状管理は、(2)架設時の形状管理の項で詳述するように、各段階架設完了毎に、予め計算された架設系各段階毎の形状管理値に基づいて、計測を行い閉合作業を容易にする施工管理を実施した。

c) 高力ボルト締付け

本橋では、現場管理の確実性を高めるため高力ボルトは、全てトルシア型高力ボルトを用いた。またボルトの締付は、全部材架設完了後、本締めを行った。

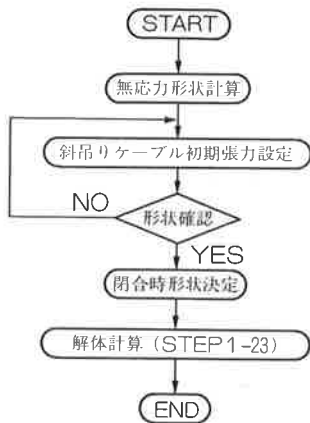
(2) 架設時の形状管理

一般に、形状管理による架設工法は、設計寸法どおりに製作し、工場仮組立て形状寸法を現場で再現できれば、構造物の応力分布は設計応力分布状態になるという考え方に基いている。

本施工法の斜吊り工法においても、閉合時に落とし込み部材がスムーズに閉合できるか否かは、この形状管理が重要となる。したがって本施工でも各架設段階の所定の形状を前もって計算で求め、現場施工時にこの所定の形状になるように、精度管理を実施した。本橋では、この架設形状計算にあたり当社所有の架設計算プログラム（大変形解析LARGE）を用いて、各架設段階の形状計算を行った。

以下に、その概要を述べる。

表一7 架設形状計算フロー図



1) 無応力形状の算出（製作キャンバー）

まず、閉合時に落とし込み部材がスムーズに閉合できるために、斜吊り状態での閉合直前の形状を算出する必要がある。

すなわち、閉合直前時に閉合ブロックが、落とし込めて、かつ、仮組時の製作キャンバーに近い形状を算出しなければならない。その準備として、この無応力形状が基本となる。

2) 斜吊りケーブル初期張力の設定

斜吊り状態での閉合時形状を、所定の形状にするため、斜吊りケーブルに初期軸力を導入し、鋼自重を載荷し無応力形状との照合を行う。

解析方法は、ケーブルの非線形性を考慮して大変形解析を行った。また、ケーブル初期軸力は、初期値として線形解析結果のケーブル張力を、大変形解析の初期軸力として入力し、形状確認できるまで繰り返し計算を行った。



(ton)

ケーブルNo.	①	②	③	④	⑤	⑥
最大軸力	51,253	26,586	15,779	18,307	36,514	26,881
発生ステップNo.	8	13	13	4	4	6
ケーブルNo.	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
最大軸力	21,991	20,814	26,336	41,299	25,064	45,033
発生ステップNo.	8	8	6	4	19	8

使用ケーブル断面①、⑫ JIS G 3525 $\phi 50(6 \times 24)$ 月種2条
②～⑪ " $\phi 35.5(6 \times 24)$ 月種4条

図一28 ケーブル軸力最大値表

3) 閉合時形状の決定

1)、2)の計算より形状確認した後に、閉合ブロック落とし込み時の桁端形状、間隔を架設時温度を考慮して、閉合時形状の設定を行う。そして、再び、1)、2)の計算を行い、ケーブルの初期張力の設定、形状確認を行い閉合時形状、各斜吊りケーブルの初期張力の決定を行う。また、この決定された閉合時形状は、次の解体計算の初期形状となる。

4) 解体計算

各架設段階の管理形状を算出するため、3)で決定した閉合時形状をもとに、実架設順序とは逆にステップ毎の部材を除去する「解体計算」を行った。図一29に、この解体計算のステップ図を示す。

(3) コンクリート床版の打設

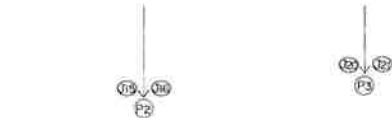
本橋のように大規模な橋梁では、床版コンクリート打設において、そのコンクリート体積(430m³)が大き過ぎて一度に打設できない。一般にこのような場合には、数回に分けて施工が行われている。しかし、打設方法によっては、すでに打ったコンクリートに過大な引張応力が発生し、床版に有害なクラックが発生する場合がある。

したがって、このようなクラックの発生を防止する床版コンクリートの打設計画の検討が必要となる。

以下に、本橋で実施した施工計画、検討の概要を述べる。

架設順序図

ステップ-0



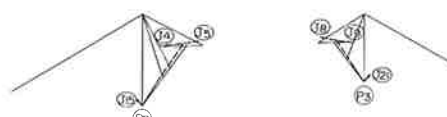
ステップ-1,2



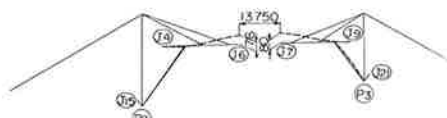
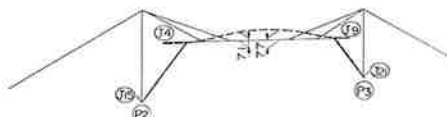
ステップ-3,4



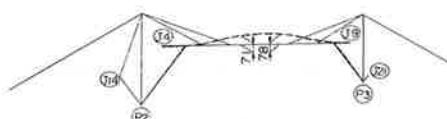
ステップ-5,6



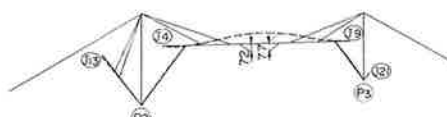
ステップ-7,8


 ステップ-8,9
(中央径間閉合)


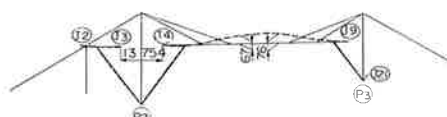
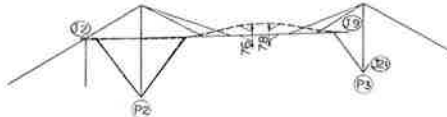
ステップ-10,11



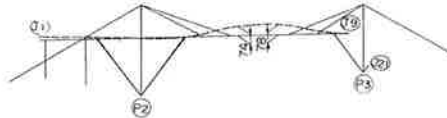
ステップ-12,13



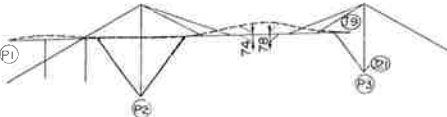
ステップ-14


 ステップ-15
(P2V脚閉合)


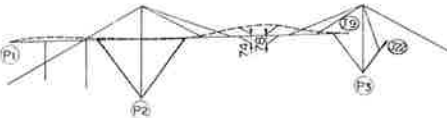
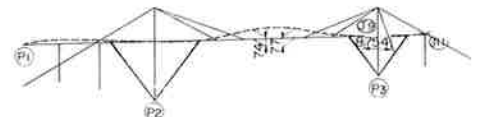
ステップ-16



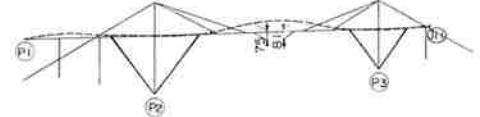
ステップ-17



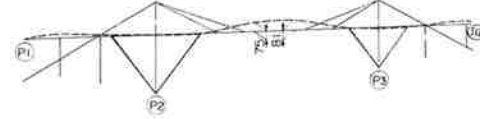
ステップ-18,19


 ステップ-20
(P3V脚閉合)


ステップ-21



ステップ-22



ステップ-23

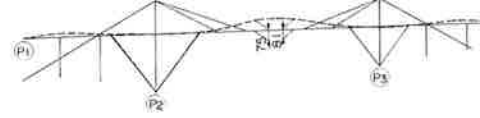

 ステップ
(架設材撤去時)

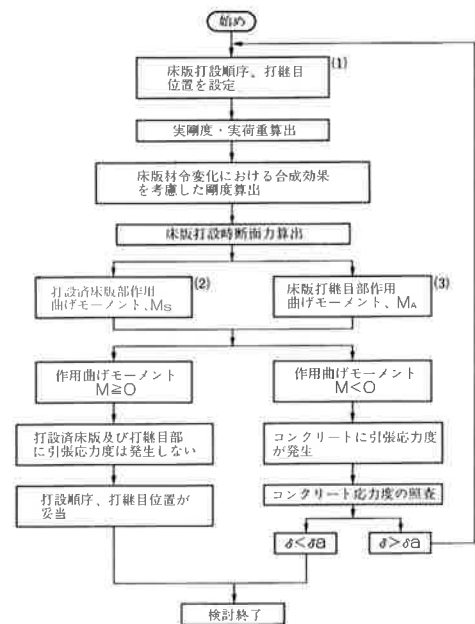

図-29 架設順序図(解体計算ステップ図)

1) 床版打設計画検討

床版打設に際し、打設計画が妥当かを検討するものである。検討方法としては、床版の合成効果を考慮して、コンクリートの引張応力度の照査を行う。

床版打設時の応力照査は、翌日に打設するコンクリート荷重による断面力を用いて、打設済のコンクリート断面応力度を照査した。また打継目については、床打設後の橋面死荷重(舗装、地震、高欄等)による断面力を用いて、打継目コンクリートの応力度を照査した。表-8に検討フローチャートを示す。

表-8 床版打設検討フロー図



(1): 設計時床版荷重による曲げモーメント図より求める

(2): Msは、翌日打設床版荷重による値

(3): Maは、床版打設後の死荷重による値

2) 打設順序

本橋の、打設コンクリート体積は、約430m³あり、山間部における打設能力及び5径間連続V脚ラーメン橋という形式を考慮し図-30に示す5分割施工とした。しかし、図-31に示すようにV脚上部は広範囲にわたり、負の曲げモーメントを受けている。この点が、通常が多径間連続桁と異なりV脚ラーメン橋の特有の性状であり、打設計画に留意すべきところである。したがって、本橋では1)打設計画検討にもとづき、第一日目両側よりコンクリートポンプ車にて同時に圧送して側径間及び中央径間の3ブロック(約190m³)を打設し、第2日目に残りのV脚上部2ブロック(約240m³)を打設した。山間部における1日の打設量とすれば、比較的多い方と思えるが、コンクリートの搬入計画を綿密に行い、打設に支障をきたさないようにした。

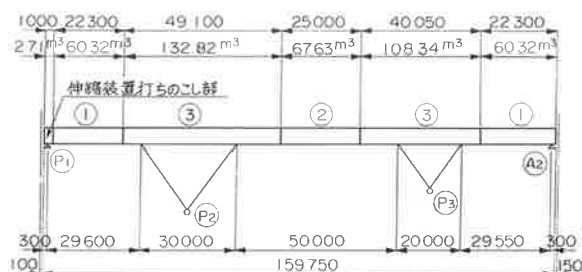


図-30 床版打設分割図

床版打設順序及び範囲

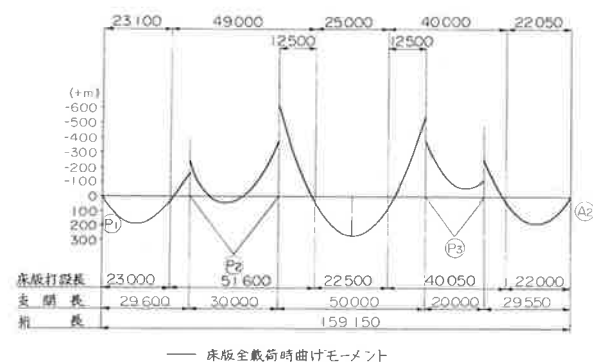


図-31 床版打設時曲げモーメント図

あとがき

V脚ラーメン橋は、今後の長大橋の計画にあたっては、大いに採用されるすぐれた橋梁形式であると思われる。

本橋が、今後計画される同種の橋梁の参考になれば幸いである。本橋の工事は現在架設を完了し、その後順調に進んでおり、昭和59年12月に竣工の予定である。これも本工事にあたって関係各位のご尽力の賜物であり、誌上をかりて深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中村、梶山、大西：鋼方杖ラーメン橋の隅角部形状の検討(橋梁と基礎82、7)
- 2) 立体横断施設技術基準・同解説(日本道路協会)