

複合斜張橋 サンマリブリッジの計画と設計

山下 幹夫*

1. まえがき

サンマリブリッジは図-1に示すように静岡県浜名郡新居町中郷地区にあり、町道中手ヶ谷道路と浜名湖競艇場内を通る町道新居12号線を連絡する道路に架橋される橋である。この橋は橋長260 mで、複合斜張橋で計画された主橋梁部 ($L=200$ m) と、PC 2径間連続中空床版橋の副橋梁部 ($L=60$ m) から構成されている。

主橋梁である2径間連続非対称複合斜張橋の径間割りは長径間が145 m、短径間が55 mとしている。これは、長径間側となる部分には浜名湖の準用河川に指定された大正川があり、諸制約条件から、下部工の設置が不可能であったため、非対称構造とした。

本文はこの主橋梁である2径間連続非対称複合斜張橋の計画と上部工事設計について報告する。

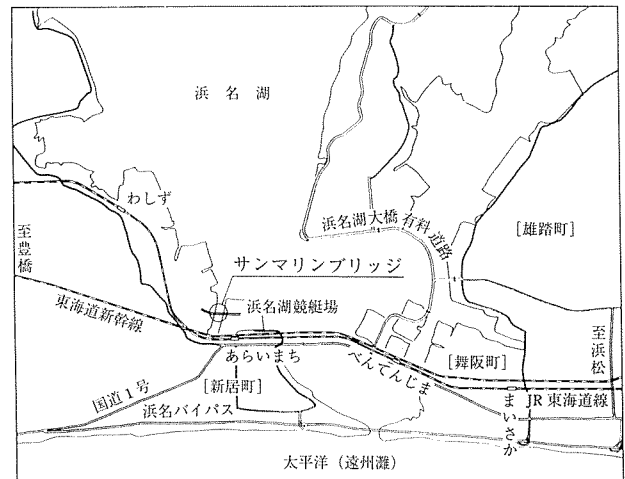


図-1 架橋位置図



写真-1 橋梁完成予想写真



* Mikio YAMASHITA
開発コンサルタント(株)
技術部

2. 全体計画概要

2.1 道路計画

道路計画を実施するにあたり、基本的な事項について示せば以下のとおりである。

- 1) 道路規格：第4種第3級
- 2) 設計速度：40 km/h
- 3) 道路構成：車道2車線 自歩道3.5 m
- 4) 縦断勾配：最大6%

これらの事項から設定した平面線形計画と縦断線形計画を図-2に示す。

2.2 橋梁計画

本橋梁計画における特色の一つは全体形状の設定であろう。本橋は2径間の非対称構造としているが、この基本コンセプトは橋梁を含めた路線計画デザインコンペによって、採用されたものである。いいかえれば、橋梁単

独ではなく、河川条件や道路計画での諸制約を含めた総合的な計画を前提として、低桁高構造で、かつ、シンボリックな橋が望まれたものである。橋梁の一般図を図-3、また、完成予想図を写真-1に示すが、本橋梁計画での主要点を以下に列記する。

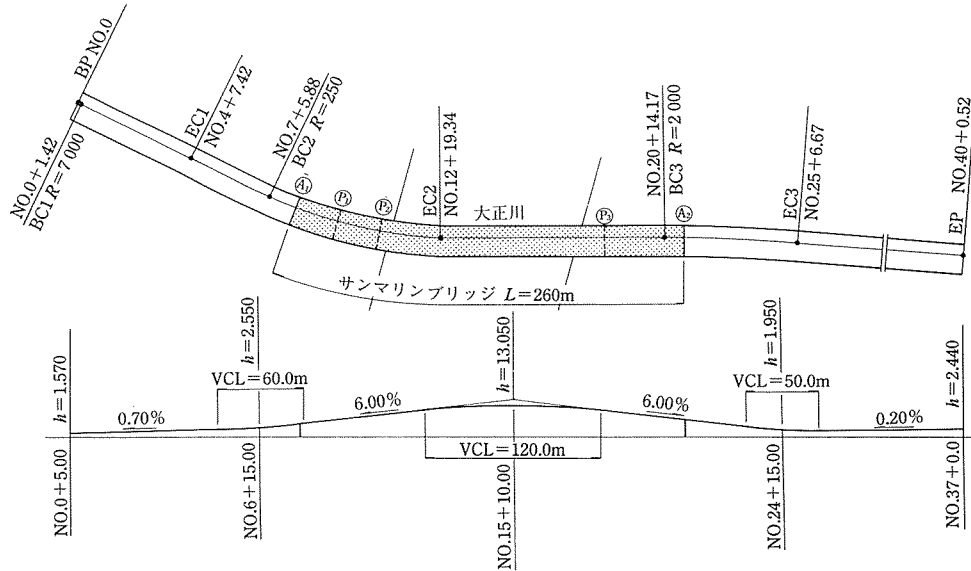
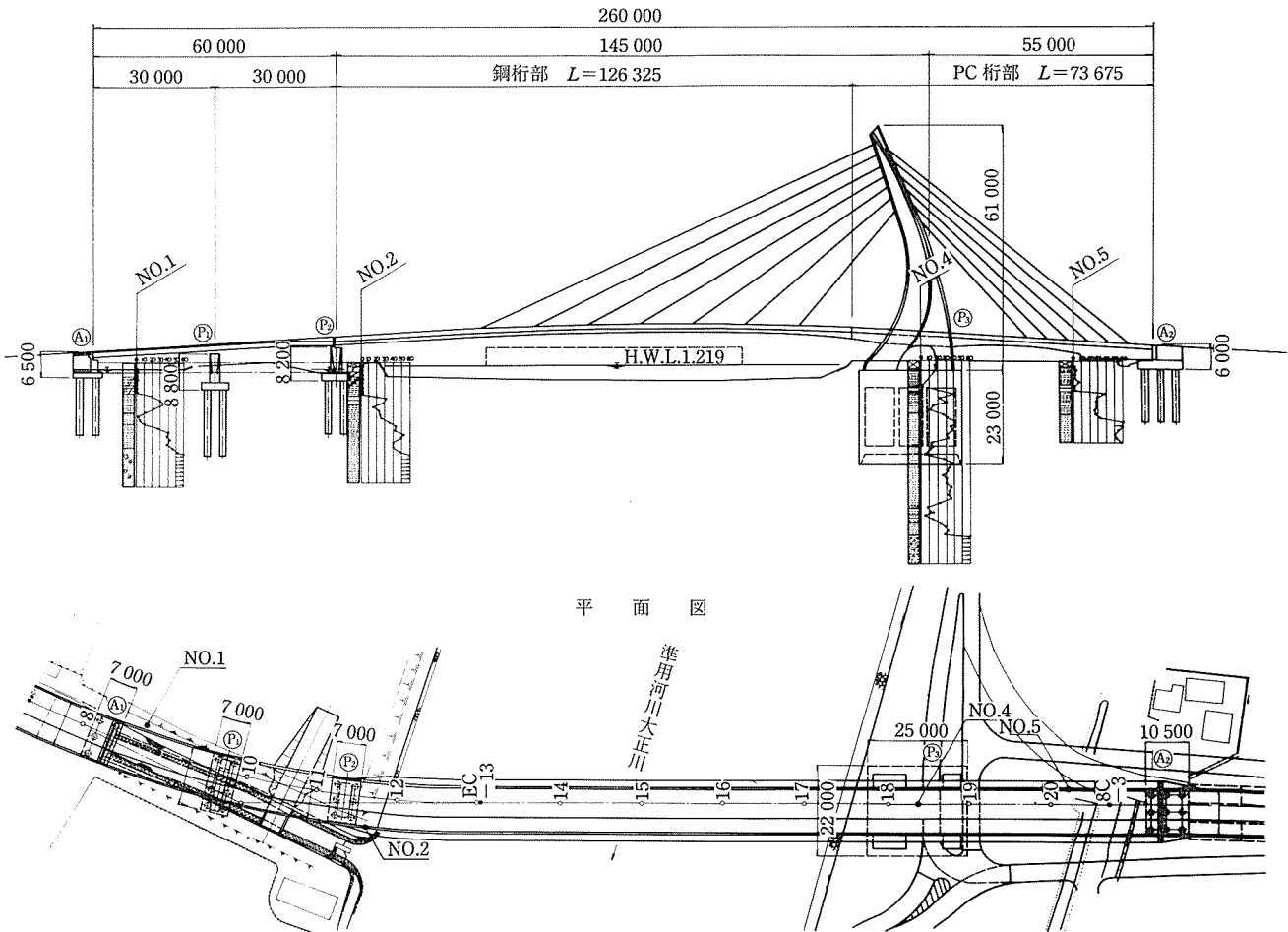


図-2 道路計画平面、縦断面

側面図



平面図

図-3(1) 橋梁一般図(側面図, 平面図)

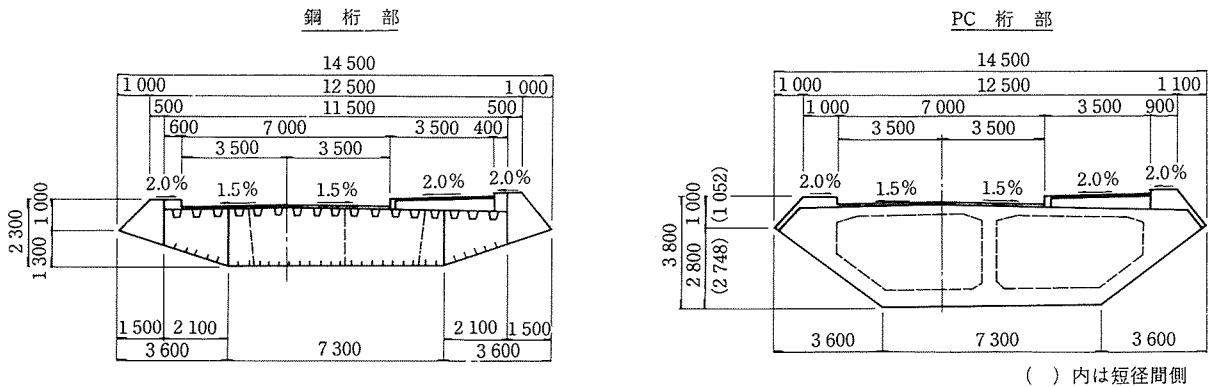


図-3(2) 橋梁一般図(主桁断面図)

- ① 河川部は大型の架設機材が使用できないので、桁は陸上部より、張出し架設を行う。
- ② 架橋地点付近には浜松航空基地があり、高度制約があるため、塔の高さは地盤から 60 m 以内とする。
- ③ 橋梁区間は工費節減のため、できるだけ短くする。
- ④ 浜名湖に隣接する場所に架橋されるので、地域のもつイメージと合致する全体形状を考え、かつ、構造的合理性も兼ね備えた計画・造形を行う。

その結果、低桁高で張出し架設が可能な斜張橋形式を選定し、かつ、河川部の桁は死荷重の軽い鋼床版箱桁とし、陸上部ではアンバランスな径間割りの対処として、PC箱桁とする複合構造を用いて橋長の低減に努めた。

また、塔高の制約から、斜材の効率などを考慮し、最

外縁ケーブルの吊り位置を桁端部より、32.5 m とし、塔を前傾させて、鋼箱桁の軸方向力の低減と吊り効率を確保することとした。これらの事柄から、塔は曲線を用いた形で、橋脚位置の桁下部で 4 本の柱となる図-4 に示すような形状とした。くわえて、長径間側の斜材段数は 7 段、短径間側は 6 段と変えている点も、本橋梁での特徴の一つである。

3. 設計概要

3.1 基本設計条件

- 1) 構造形式：2 径間連続複合斜張橋
- 2) 橋 格：一等橋
- 3) 活 荷 重：TL-20
- 4) 支 間 長：144.3 m + 54.3 m
- 5) 幅 員：全幅員 14.50 m (有効幅員 10.50 m)
- 6) 縦断勾配：道路計画により $i=6.0\%$
- 7) 横断勾配：車道部 1.5% 自歩道部 2.0%
- 8) 斜 角： 90°
- 9) 舗 装 厚：車道部 80 mm 自歩道部 30 mm
- 10) 主桁形式：長径間 鋼床版 3 室箱桁形式
短径間 PC 2 室箱桁
- 11) 主塔形式：A 形形式・PRC 構造
- 12) 基礎形式：場所打ちコンクリート杭 $\phi 1\,500$ mm
(A_1 橋台, P_1 橋脚, P_2 橋脚, A_2 橋台)
ケーソン基礎 (P_3 橋脚)
- 13) 設計水平震度：橋 軸 方 向 $K_h=0.30$
橋軸直角方向 $K_h=0.28$

3.2 主要使用材料

- 1) コンクリート：

使用場所	強度 σ_{ck} (kgf/cm ²)
主 桁	400
主 塔	400
P_3 橋 脚	400
地覆部等	240

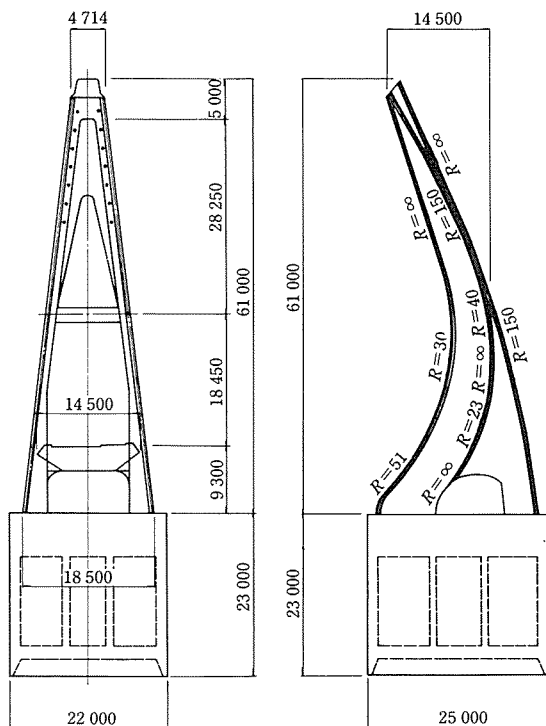


図-4 主塔構造図

- 2) 鉄筋 : SD 345
- 3) 鋼材 : 構造用鋼材
SS 400, SM 400, SM 490 Y
接合用鋼材 S 10 T
- 4) PC 鋼材 :

使用場所	材料規格
主桁縦締め	SBPR 930/1180 φ32 mm
主塔縦締め	
柱頭部横桁横締め	
桁端部横桁横締め	
床版横締め	SWPR 1 12 φ7 mm
斜材定着横桁横締め	SWPR 7 12 T 12.4 mm

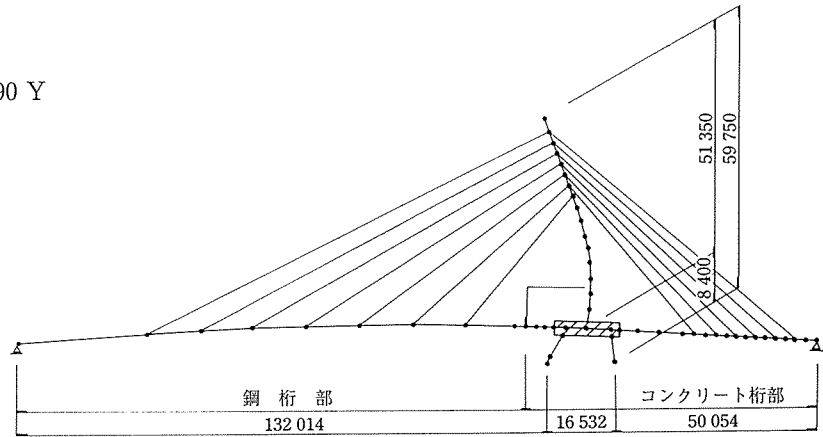


図-5 主方向解析モデル図

- 5) 斜材 : SWPR 7 B 19 φ15.2 mm ~ 48 φ15.2 mm

3.3 構造解析

設計断面力を算定する構造解析において、主方向となる橋軸方向は構造系全体を2次元の骨組モデルとした。

モデル化にあたり、主桁部は縦断勾配を考慮したが、主桁と主塔部が重なる範囲は剛域として扱っている。また、主塔は軸線の一つとし、各断面部の図芯を結び軸線とした。これにより、塔の軸線は本来、曲線となるが解析上は細分化した直線としてモデル化を行った。

P₃ 橋脚は主桁より4本の柱(壁)で支える構造であるため、この部分は部材の図芯を軸線としてモデル化した。これらの解析モデルは図-5に示す。

橋軸直角方向の解析では3次元骨組モデルを用い、静的な断面力と、動的解析での断面力を比較し、大きな断面力を設計断面力として設計を行った。

図-6に設計荷重作用時の最大と最小の曲げモーメント分布図を示す。また、図-7には主塔部の応力状態図を示す。

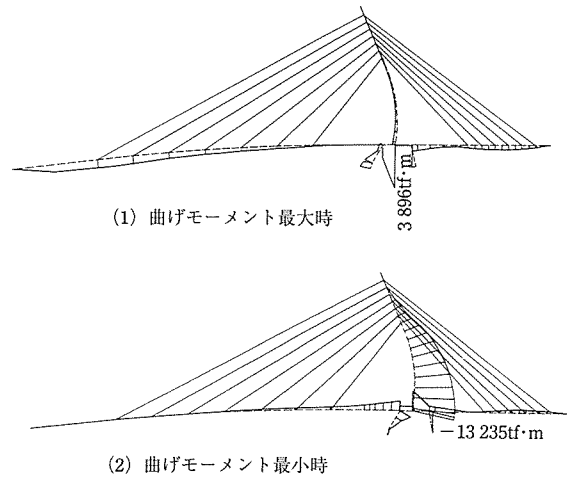


図-6 設計荷重作用時曲げモーメント図

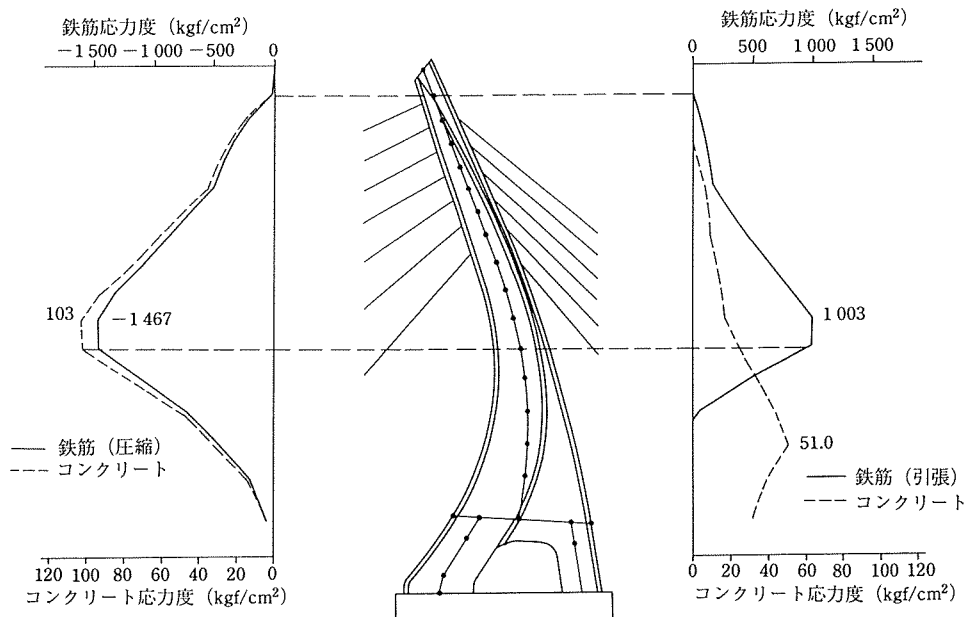


図-7 主塔応力状態図(最大値分布図)

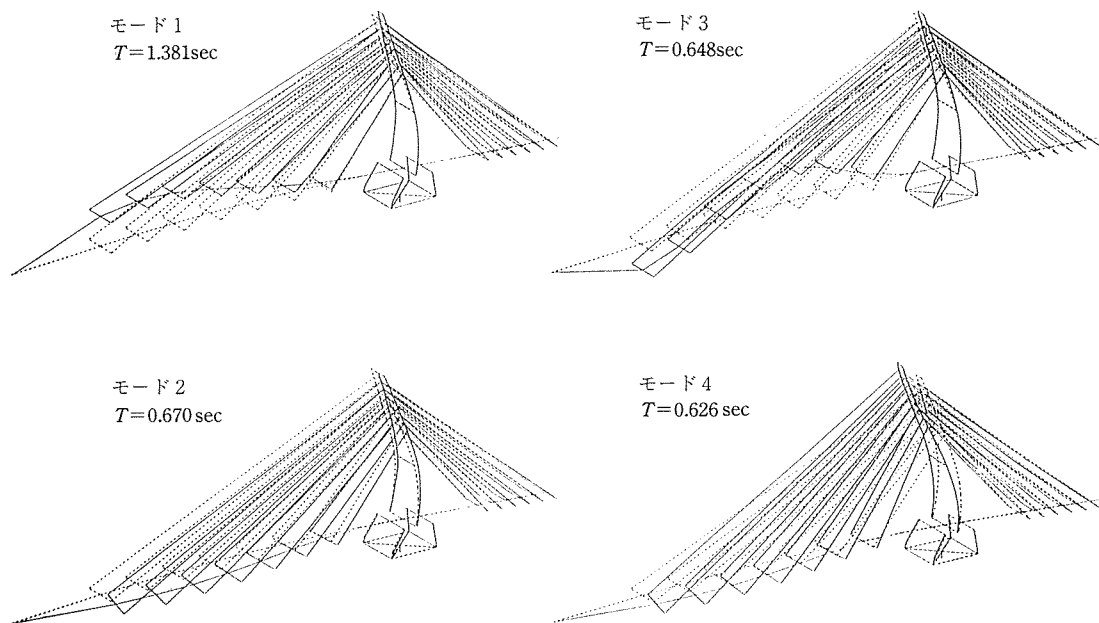


図-8 主要振動モード図

3.4 耐震安定性と耐風安定性

耐震安定性に関しては、橋軸直角方向の解析で述べたように、静的な設計震度による地震荷重による断面力算定と動的解析を実施して、発生断面力の大きな値にて設計を行った。また、動的解析では、3次元モデルによる応答スペクトル法による解析を行った。このときの、入力した加速度応答スペクトルは道路橋示方書V耐震設計編に示された、Ⅲ種地盤の標準加速度値である。この動的解析の主要振動モードを図-8に示す。

耐風安定性については、道路橋耐風設計便覧の要領に従い、『ねじり発散振動』、『たわみ発散振動』、『渦励振』の照査を行った。その結果、渦励振の発生が懸念されたが、桁の断面図に示すような断面形状とフェアリングを設置することで対処できるものと判断した。

4. 接合部の設計

4.1 基本思想

4.1.1 接合方式

複合斜張橋の一種に、主桁の途中で鋼桁とPC桁を接続した構造形式がある。この形式の複合斜張橋の施工実績は国内では生口橋のみであるが、諸外国では8橋が施工されている。

鋼桁とPC桁の接合部での接合方式は以下の3方式に大別される。

- ① 中詰めコンクリート前面プレート方式
- ② 中詰めコンクリート後面プレート方式
- ③ メタルプレート方式

上記の各接合形式に対して、本橋では、その適用性を

比較検討し、接合方法を選定することとした。

メタルプレート方式の場合には、接合部で桁の剛性が急変すること、応力伝達機構に不明確な点があること、また、応力分布を均等化するために支圧板が厚くなること等の点から、基本的には中詰めコンクリートによる接合とした。

つぎに、前面と後面のプレートについては、前面プレート方式の場合には中詰めコンクリートと横桁コンクリートの間に支圧板が配置される構造であるが、後面プレート方式の場合には支圧板で仕切られないため、連続一体化できること。そのため、後面プレート方式の方が中詰めコンクリートへの応力集中が少なく、応力伝達がスムーズであるなどの理由から、本橋においては中詰めコンクリート後面プレート方式を採用することとした。

4.1.2 力の伝達メカニズムと設計法

中詰めコンクリート後面プレート方式による接合部の構造概念図を図-9に示す。

鋼桁部に作用する各種断面力は鋼桁一般部から鋼桁補強部で分散を図りながら鋼桁から中詰めコンクリートを通じてPC桁へ伝達される。

中詰めコンクリート部への応力伝達には、後面プレート（以下、支圧板とする）、ずれ止め、鋼桁とコンクリート間の付着・摩擦の3つの要素があるが、これらの軸圧縮力、軸引張力、せん断力のそれぞれに対する伝達機構は異なる。設計にあたり、力の伝達は後面の支圧板およびずれ止めで行うこととし、鋼桁とコンクリートとの摩擦による力の伝達は不確定な要素が大きく、定量的な把握が困難であることなどから余裕耐力とみなした。

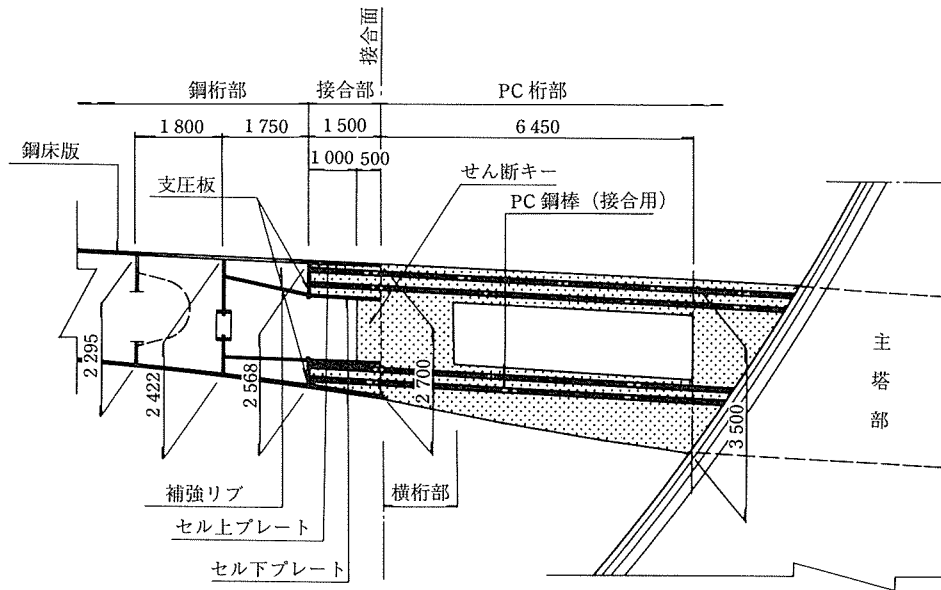


図-9 接合部の構造概念図

以下に、設計として配慮した、応力伝達機構を記す。

1) 軸圧縮力の伝達

軸圧縮力は後面の支圧板とずれ止めにより伝達することとし、荷重分担率を 65 : 35 とした。ずれ止め選定にあたり、セルの上下プレートには肌離れ防止効果のある頭付きスタッドを、セル側板には製作性を考慮し、かつ、ずれ止め効果の大きい角鋼ジベルを配置した。

2) 軸引張力の伝達

原則として完成時にはフルプレストレス状態となるよう、プレストレス力を導入するが、架設時の一時的に作用する引張力に対しては、ずれ止めにより抵抗することとした。

3) せん断力の伝達

せん断力はセル側板に配したずれ止めにより伝達する。そのため、セル側板には軸方向と鉛直方向の2方向のせん断力に対するずれ止め効果のある頭付きスタッドを配置した。

4.2 設計断面力と設計結果

4.2.1 設計断面力

接合部の設計断面力を、全体系の構造解析により求めた (3.3 節参照)。

設計荷重の組合せに対する接合部の主桁断面力を表-1 に示す。設計荷重作用時の荷重組合せは死荷重時、活荷重載荷時、活荷重載荷 + 温度変化時、地震時とし

表-1 接合部発生断面力および応力度

荷重組合せ	発生断面力			発生縁応力度	
	軸方向力 (tf)	せん断力 (tf)	曲げモーメント (tf・m)	上縁応力度 (kgf/cm ²)	下縁応力度 (kgf/cm ²)
死荷重時 (クリープ開始直前)	5 511	61	1 531	36	9
死荷重時 (クリープ終了時)	4 879	29	974	29	12
活荷重載荷時 (曲げモーメント最大時)	4 880	29	993	29	12
活荷重載荷時 (曲げモーメント最小時)	5 294	-62	-661	18	30
活荷重載荷時 (せん断力最大時)	5 182	38	617	27	17
活荷重載荷時 (せん断力最小時)	5 026	-86	-87	21	23
活荷重載荷 + 温度変化時 (曲げモーメント最大時)	5 045	31	1 166	31	11
活荷重載荷 + 温度変化時 (曲げモーメント最小時)	5 257	-74	-986	15	33
活荷重載荷 + 温度変化時 (せん断力最大時)	5 295	-56	-598	18	29
活荷重載荷 + 温度変化時 (せん断力最小時)	5 421	-78	-876	17	32
地震時 (地震方向; P ₂ →A ₂)	5 234	52	1 354	33	10
地震時 (地震方向; A ₂ →P ₂)	4 524	6	592	24	14

荷重組合せ	面外せん断力 (tf)	ねじりモーメント (tf・m)
橋軸直角方向地震力による発生断面力	-218	-5 364

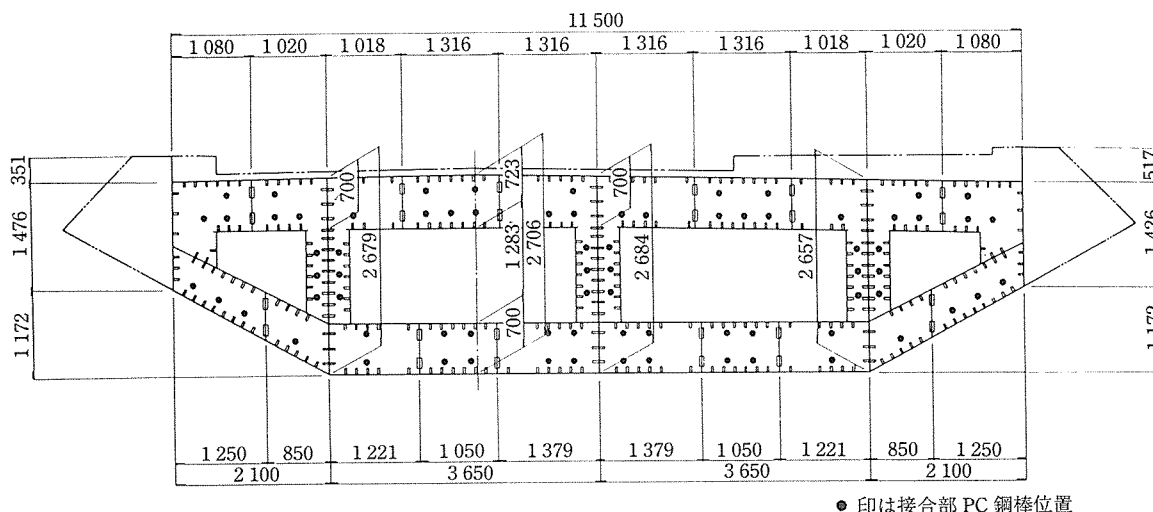


図-10 接合部構造図

た。

また、終局荷重作用時の荷重組合せは、以下とした。

$$1.3 \cdot D + 2.5 \cdot (L+I) + P + S + SH + CR + E$$

$$1.0 \cdot (D+L+I) + P + S + SH + CR + E$$

$$1.7 \cdot D + 1.7 \cdot (L+I) + P + S + SH + CR + E$$

$$1.3 \cdot (D+EQ) + P + S + SH + CR + E$$

$$1.0 \cdot D + 1.3 \cdot EQ + P + S + SH + CR + E$$

ここに、 D ；死荷重

$L+I$ ；活荷重および衝撃

EQ ；地震の影響

P ；プレストレス力の不静定分

S ；斜材調整力

SH ；乾燥収縮

CR ；クリープ

E ；リラクセーション

4.2.2 接合部位置および構造

剛性が変化する接合部は構造上の弱点となりやすく、曲げモーメント、せん断力が極力小さい位置に設けるほうが有利となる。本橋では、断面力状態と施工性を考慮して、柱頭部前面から長径間側に 6.45 m の位置とした。

この接合部の構造図を図-10 に示す。

4.2.3 設計結果

1) 接合部の基本寸法

セルの高さは、製作性や PC 鋼材配置、ずれ止め配置、応力分散の必要面積などを考慮して 70 cm とした。また、セルの長さは、支圧板からずれ止めを通じて力が中詰めコンクリート全体に一樣に伝達されること、必要なずれ止めが配置できること、セル高さが 70 cm であることなどから 150 cm とした。

セルの幅は、コンクリート打設作業の作業性、ウェブ間隔、添接板間隔などを考慮して、幅員を 10 分割した

ので、平均幅が 115 cm 程度となっている。

2) 鋼桁部の応力分散効果

支圧板背面の鋼桁補強部は、鋼床版および下フランジの力を一樣な力に分散させて支圧板に円滑に伝達するとともに、断面剛性の急変を避けるために補強リブを設けた。補強リブの長さ、配置間隔は応力分散効果や、鋼桁一般部の横リブ間隔を考慮して決定した。

3) 支圧板、鋼材の板厚

支圧板の板厚は、中詰めコンクリートからの支圧反力をせん断力としてセルに伝達するとともに、PC 鋼材を定着することによる有害な変形が生じないよう $t=22$ mm とした。

鋼材の板厚は、鋼床版あるいは下フランジに作用する軸圧縮力の 1/2 がセル上下プレートに作用するとして検討を行うとともに、道路橋示方書Ⅱ 9.6 項によりスタッドを熔植する鋼板の最小板厚を 10 mm としていることから、 $t=10$ mm とした。

4) 中詰めコンクリートの曲げモーメントと軸方向力に対する応力度照査

中詰めコンクリート前面の複合断面における縁応力度を算定し、応力度照査を行った。ただし、断面諸値の算定に鋼材は考慮しないものとし、通常の PC 部材と同様に中詰めコンクリートの全断面を有効とみなした。なお、ここでは、設計荷重作用時に対する照査結果について述べ、終局荷重作用時に対する照査は「8) 中詰めコンクリート部への鉄筋配置」の検討の項で記す。

照査断面における PC 桁の断面性能を表-2 に、縁応

表-2 照査断面の断面諸値

断面積 A	22.865 m ²
断面 2 次モーメント I	15.411 m ⁴
断面係数 (上縁側) z_o	12.779 m ³
断面係数 (上縁側) z_u	10.247 m ³

力度を算定した結果を表-1に示すが、結果をまとめると以下のとおりである。

- ① すべての荷重組合せで、引張応力度は生じない。
- ② 圧縮応力度は許容値 ($\sigma_{ca}=133 \text{ kgf/cm}^2$) を満たしている。
- 5) 中詰めコンクリートのせん断およびねじりに対する応力度照査

中詰めコンクリートに対して、平均せん断応力度、ねじりモーメントによるせん断応力度、斜め引張応力度に対する応力度照査を行った。その結果を表-3に示す。照査断面は、前項と同様の断面とし、照査手法は通常のPC部材に準じた。

表-3 せん断およびねじりに対する照査結果

応力度照査項目	ケース ¹⁾	発生応力度 (kgf/cm ²)	許容応力度 (kgf/cm ²)
平均せん断応力度	設計荷重作用時	1.8	5.5
	終局荷重作用時	7.8	53
ねじりモーメントによるせん断応力度	設計荷重作用時	19.5 ²⁾	5.5
	終局荷重作用時	25.4	53
斜引張応力度	ねじりなし	0.1	10
	ねじりあり	7.4	13

注1) ねじりなし；ねじりモーメントによるせん断力を考慮しない場合
ねじりあり；ねじりモーメントによるせん断力を考慮する場合
注2) 許容応力度を超えているため、道路橋示方書Ⅲに従い、ねじりモーメントに対する鉄筋を配置した。

6) ずれ止め配置・本数の検討

全体系解析により求めた断面力からずれ止め作用力を算出し、ずれ止めの配置を決定した。その際、接合部の作用力の35%がずれ止めに作用するものとし、代表的な1セルについての検討結果を示す。

なお、ずれ止めの種類としては頭付きスタッド ($\phi 22 \times 100$ ；許容せん断力 $Q_a=2\,420 \text{ kgf/本}$) および角鋼ブロック ($28 \times 28 \times 150$ ； $Q_a=8\,400 \text{ kgf/本}$) を用いた。

① スラブ部ずれ止めの照査

1セルあたりの作用力 P は、全体系解析により得られた曲げモーメントおよび軸方向力より $P=40.9 \text{ tf}$ である。上側セルへの作用力が下側セルへの作用力よりも大きいので、上側セルについて検討した。その結果、表-4に示す必要本数を配置した。

表-4 スラブ部のずれ止めの配置本数 (1セルあたり)

配置する部位	ずれ止めの種類	配置本数 (本)
セル上プレート	スタッド	42
側板	角鋼ブロック	6
セル下プレート	スタッド	42

② ウェブ部のずれ止めの照査

曲げと軸力によるずれ止めのせん断力 Q_s 、せん断によるずれ止めのせん断力 Q_p 、および合成せん断力 $Q_m =$

$\sqrt{Q_s^2 + Q_p^2}$ に対する照査を行った。

曲げと軸力に対し1段あたりのスタッドとして14本を配置するときの Q_p は、692 kgf/本、また、せん断力に抵抗するスタッドとして728本を配置するときの Q_s は、118 kgf/本であった。この値から、合成せん断力としては $Q_m=702 \text{ kgf/本}$ と算定され、いずれの状態でも、許容値 ($Q_a=2\,420 \text{ kgf/本}$) を満足していた。

7) PC鋼材配置の検討

接合部において、完成時に生ずる引張力に対してはプレストレス力に対処するため、PC鋼棒を配置することとした。この本数の算定については表-5のとおり施工中には引張応力度の発生を許すが、完成時にはフルプレストレスとなるように、PC鋼棒 (SBPR 95/120 $\phi 32 \text{ mm}$) を76本配置した。鋼棒配置は、図-10中に示している。

表-5 接合部のPC鋼材配置本数の検討

	発生緑応力度	
	上緑側 σ_o (kgf/cm ²)	下緑側 σ_u (kgf/cm ²)
施工中 (橋面工施工直前) プレストレス力を除く	27	-22
プレストレス力 (PC鋼棒76本)	17	17
施工中計	44	-5
静荷重による増分	-8	14
完成時計	36	9

8) 中詰めコンクリート部への鉄筋配置の検討

中詰めコンクリートの曲げ耐力を確保するとともに、中詰めコンクリートと後打ちされる横桁コンクリートの一体化を図るために、セル内に橋軸方向の補強鉄筋を配置した。

セル内では鋼棒とずれ止めによりコンクリートの変形が拘束されており、これによる耐力向上が考えられるが、ここでは鋼棒を抵抗部材として評価せずに曲げ耐力の検討を行い、十分な安全率を有するように鉄筋量の検討を行った。なお、PC鋼材も抵抗部材として考慮した。

照査結果は表-6に示すが、結果としては、補強鉄筋として D 19 @ 250 mm をセルに配置した。

くわえて、接合部断面全体のせん断耐力を増すため、ウェブ部のセルにも鉛直方向に鉄筋を配置することとした。

表-6 接合部の終局荷重作用時の曲げに対する照査

作用モーメントの方向	M_d (tf·m)	M_u (tf·m)	安全率 M_u/M_d
下緑側引張	1 489	9 591	6.4
下緑側圧縮	4 781	12 554	2.6

9) 接合面のずれおよびせん断キーに対する照査

中詰めコンクリートと横桁コンクリートの境界面（接合面）に作用するせん断力に対し、摩擦力および鉄筋のせん断抵抗により十分な安全率を有していることを確認した。

また、上下のセル間に設ける横桁コンクリートのせん断キーについても、付け根部のせん断応力度の照査を行い、十分な安全率を有していることを確認した。

4.2.4 構造細目

1) 鋼桁とコンクリート桁接合部分におけるコンクリートの剝離対策

鋼桁表面とPC桁表面を同一平面内で接合する場合、鋼桁の先端が直接PC桁と接触することでPC桁部表面で局部的圧壊が生じコンクリート表面の剝離等を生じる恐れがある。そこで、鋼桁先端部に目地を設け、シーリング材にて充填することとした。

2) 中詰めコンクリート部分のPC鋼棒保護管

セル内にPC鋼棒が配置されるが、通常のワインディングシースではセル内での形状保持が困難である。そのため、シースに代わり一般構造用鋼管（外径60.5mm）を用いるとし、溶融亜鉛メッキを施すことでコンクリートとの付着を期待することとした。

5. あとがき

本文はサンマリブリッジの主橋梁である複合斜張橋の計画および、設計概要と、鋼桁部とPC桁部の接合部の設計について記した。

本橋の設計では、これらの事項以外にも多くの報告したい点もあるが、これらは再度、機会がありましたら報告したいと思う。

本橋の架橋工事も順調に進捗し、12月末現在、下部

工はおおむね完成し、主橋梁部では主塔の施工が始まり、また、副橋梁部では上部工の中空床版橋の施工を行っている。架橋場所である工事現場は東海道新幹線から近く、よく見える所にあり、完成後には夜間のライトアップなどを行い、浜名湖競艇場のランドマークとして、地域のシンボル化をはかる計画である。くわえて、主塔部分は曲線を多用した形状であることや、鋼桁との接合工事は接合鋼桁を所定の位置にセットして、中詰めコンクリートを打設するなど、施工の繁雑かつ、困難なことは設計者の立場から容易に想像できるので、今後の工事の安全と無事竣工を迎えることを祈るものである。

最後に、本橋梁の計画と設計、ならびに施工について深いご理解を賜りました企業者である浜名湖競艇企業団をはじめ、新居町などの関係各位に誌上をおかりして、謝辞を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 土木学会，鋼・コンクリート合成構造小委員会：鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン，1989
- 2) 若下藤紀，椎名陽一，白石 薫：複合構造桁の継手材として用いるスタッドジベルのバネ定数について，土木学会第45回年次学術講演会講演概要集，1990
- 3) 多田和夫，山岸一彦：生口橋の設計・施工—主として接合部について—，第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，1989
- 4) 森 邦久，帆足博明，木村一也：生口橋接合部実験報告，本四技報，VOL. 13，NO. 49，1989
- 5) 多田和夫，山岸一彦，西本 聡，矢野保広：生口橋上部工の設計（上，下），橋梁と基礎，1990. 7，9
- 6) 鋼橋技術研究会：複合構造接合部研究部会平成3年度研究報告書，1992
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅱ鋼橋編，同・Ⅲコンクリート橋編，同・Ⅴ耐震設計編，1990. 2
- 8) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧，1991. 7

【1994年12月16日受付】