

報 告

[2013] 生口橋主桁接合部の設計について

山 岸 一 彦 (本四公団向島工事事務所)

西 本 聡 (本四公団向島工事事務所)

正会員 ○梶 川 靖 治 (川田建設 大阪支店)

森 田 雄 三 (住友建設 広島支店)

1. はじめに

現在建設中の本州四国連絡橋の一つである生口橋の最大の特徴は、その主桁が中央径間部を鋼箱桁とし両側径間部をプレストレストコンクリート (P C) 箱桁とする、いわゆる「混合構造」となっていることである。これは、架設地点の地形条件より幾何学的にアンバランスな径間割りとなり側径間側に負反力が生じることから、これを打ち消すべく構造的にバランスをとるよう本構造形式が採用されたものであり、国内初の本格的複合斜張橋となっている。

ここでは、生口橋の全体構造の概要ならびに本橋を特徴づける鋼桁とP C桁との接合部について設計における基本的な考え方および設計・施工上の特色などを紹介する。

2. 全体構造の概要

図-1に生口橋の一般図を示す。図-(a)において、全長 790 m のうち中央径間鋼桁 490 m は海上部、両側径間P C桁各 150 m は陸上部であり、さらに側径間部は各々3径間連続桁となっているので、本橋は実質的には7径間連続の斜張橋である。標準部の鋼桁断面は、図-(b)に示すように、鋼重がほぼ最小となる桁高約 2.7m の鋼床版2主箱桁で、耐風安定性、レーダーによる電波障害の低減を考慮した断面形状である。また、P C桁断面は鋼桁と同一の桁高とした4室逆台形箱桁であり、3径間状態で斜ケーブル無しに自立できる断面となっている。

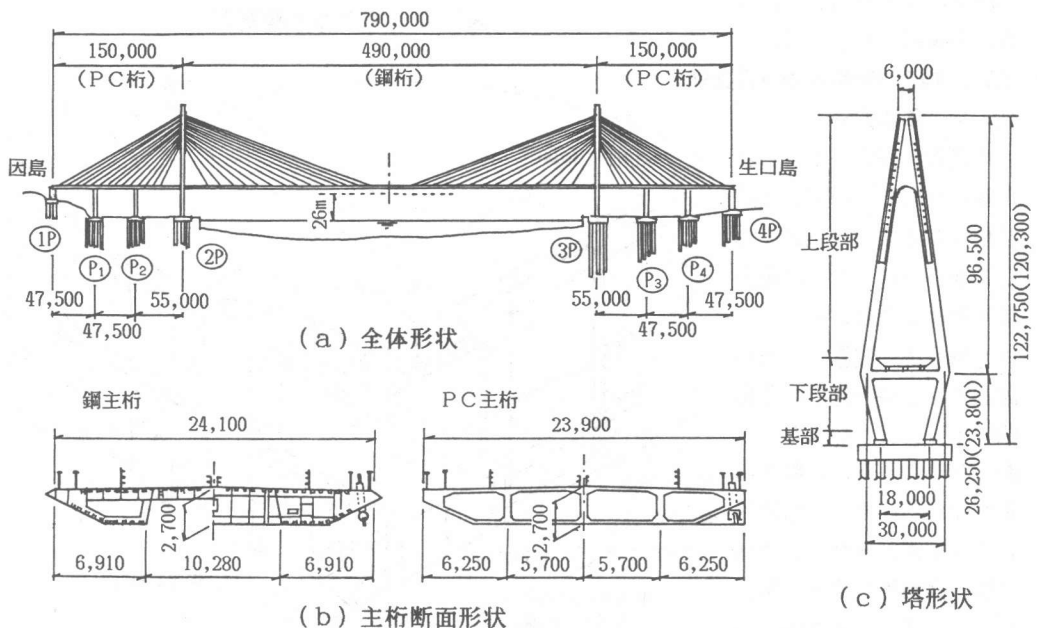


図-1 生口橋一般図

塔は鋼製であり、その形状は鋼重、基礎寸法、耐風安定性、面内剛性などの点で総合的に優れた図-(c)のような下絞りA形塔である。斜ケーブル形状はファン形式マルチケーブル(14段)2面吊りとし、ケーブルにはパラレルワイヤストランド(亜鉛メッキ鋼線、素線径 $\phi 7\text{mm}$)の表面をポリエチレン加工したノングラウトタイプのものを用いることにした。

上部工の全体施工順序は概略次のとおりである。まず、両側径間部について張出し施工および支保工施工を併用してPC3径間を自立状態で完成させるものとし、その間に、基部、下段部(水平梁部)、上段部(ケーブル定着部)に三分割して製作した塔を起重機船によりブロック架設して自立させておく。次に、塔に取り付けた斜ベント上に鋼桁の第1ブロック(接合ブロック)を設置し、すでに完成しているPC桁端断面と接合ブロックとの間に残された1200mmの間詰め部をコンクリート(図-2中に示すPC横桁最終ブロック)を打設し、連結用PC鋼棒を緊張することによりPC桁と鋼桁とを一体化する。このあと、直下吊り工法により引き上げた鋼桁ブロックに斜ケーブルを引き込み定着しながら中央径間部を張出し架設していくとともに、これに合わせてPC桁のケーブル定着横桁の横締めPC鋼線(1カ所当り3本 $\times 27\text{T}15$ 、2、導入張力1本当り約500t)を順次緊張していく。最後に、既設桁をセットバックさせて最終ブロックを落とし込み、鋼桁中央部を閉合する。

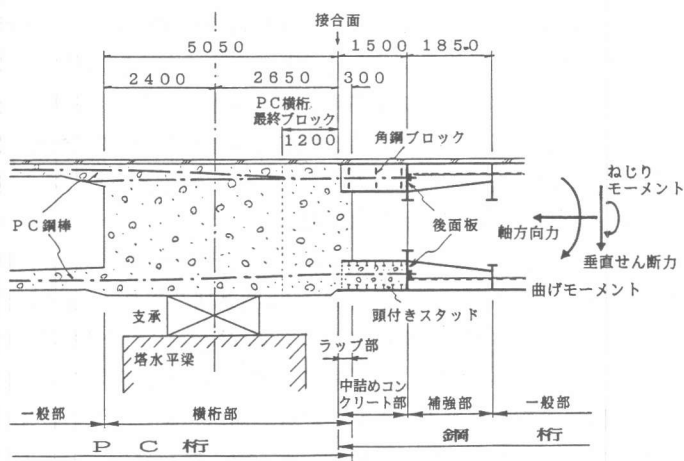


図-2 接合部の縦断面

3. 接合部の設計

3.1 基本方針

本設計に先立って行われた基本検討および実施設計成果などより、以下のような基本方針のもとに詳細設計を進めることにした。

a) 接合部の位置 実施設計では、接合部での作用曲げモーメントおよびせん断力が小さく、接合部の構造が比較的簡単で、構造的にも安定感があり、かつ施工性、経済性に優れた構造として、塔中間水平梁上の鉛直支承でPC桁を受ける

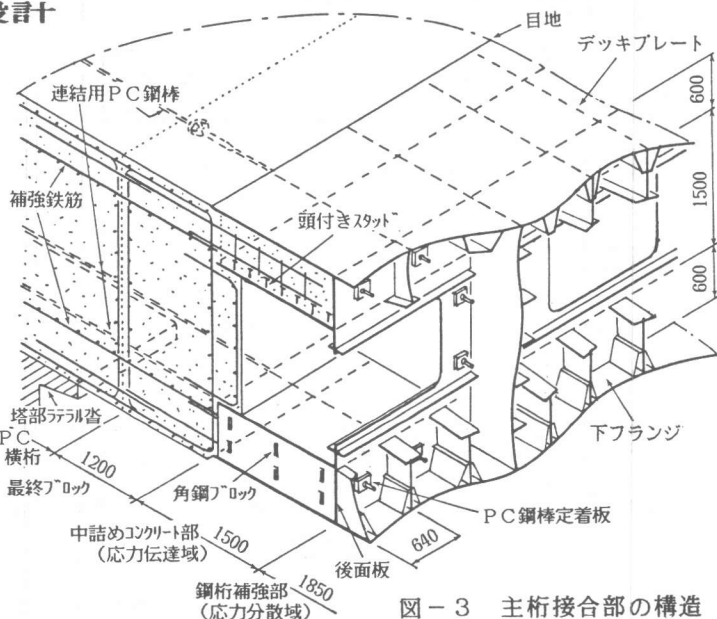


図-3 主桁接合部の構造

案が採用されていた。詳細設計では、さらに接合部のより確実な施工を期待すべく設計・施工面より検討した結果、接合面の位置を支承中心より中央径間鋼桁側に 2650 mm とすることにした。図-2 に接合部の縦断面とともに各部の名称を示す。

b) 接合部の構造形式 接合部の構造形式は、各種構造案の中から、構造的合理性（全面接合 → 部分接合）、力学的合理性（剛性急変 → 剛性漸変）、応力の伝達性（応力集中 → 応力分散）、鋼桁の製作性（極厚支圧板 → 中詰めコンクリート）などの点で優位であるとして、断面の周縁部を多数のセル構造とした「部分接合中詰めコンクリート案」が採用された。また、その中で支圧板の位置については、前面プレートと後面プレート形式とが比較され、中詰めコンクリートと PC 横桁コンクリートとが連続一体化する、支圧板前面の応力集中が小さい、ずれ止めに対するコンクリートの打ち込み方向の影響がないなどの理由から後者が採用された。図-3 に接合部構造の詳細を模式的に示す。

c) 接合部の応力状態 接合部におけるコンクリートの応力状態について、中詰めコンクリートに生じる引張応力は PC 鋼材によるプレストレスで対処するものとし、完成時（常時）には、いわゆるフルプレストレスの状態となるようにする。

d) 接合部の施工順序 鋼桁と PC 桁とを連結一体化して連続梁構造とするため、両者は最終完成時にはもちろん上部工施工時から変形などに関し相互に影響を及ぼし合うことになるが、両者を連続一体化する方法として、図-4 に示す二つが考えられる。図-(a)の「前接合」とは、PC 3 径間完成直前に支保工上で PC 桁と鋼桁接合ブロックとを一体に施工するものであり、図-(b)の「後接合」とは、PC 3 径間を完成・自立させた後鋼桁接合ブロックとの間詰めコンクリートを打設し両者を結合する方法である。前接合では PC 桁の形状管理における不測の変動量による影響が直接鋼桁側に及び、その後の鋼桁張出し架設時においてこれらの影響を吸収していくのが困難であると考えられたため、ここでは鋼桁の形状管理への影響が最も少ない方法として後接合を採用することにした。

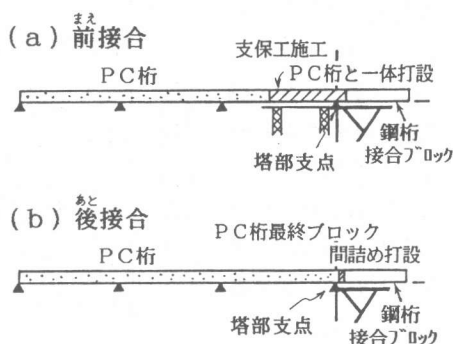


図-4 施工順序の比較

上記 a) ~ d) の基本方針に基づき接合部についての設計の流れを示したものが図-5 である。

なお、接合部の設計は、原則的に側径間 PC 桁部あるいは中央径間鋼桁部に対する設計法と同様、許容応力度設計法によるものとし、道路橋示方書（以下、「道示」と略す）-Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編（昭和55年2月）および 道示-Ⅲコンクリート橋編（昭和53年1月）の該当規定を適用することとした。

3.2 構造形式および基本寸法

図-2 の接合部断面の構造について、PC 横桁を塔水平梁上の支承で受け、支承中心線から 2650 mm の位置が鋼桁先端のいわゆる接合面であり、この面から 1500 mm の位置には連結 PC 鋼材定着用支圧板

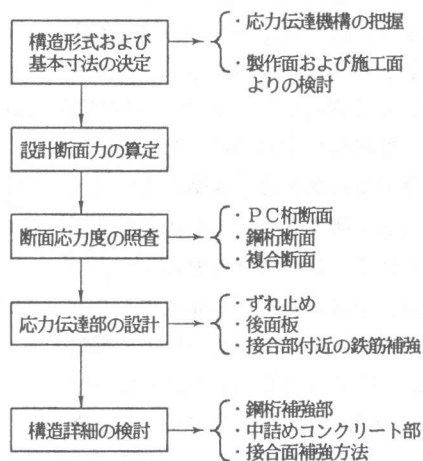


図-5 接合部設計フローチャート

(1) 応力伝達機構と設計上の考え方

2) 軸方向引張力 鋼桁に作用する軸方向引張力の中詰めコンクリートへの伝達要素としては ①P
C鋼材、②ずれ止め および ③鋼板とコンクリートとの付着・摩擦 の三つが考えられる。この
接合位置では斜張橋固有の軸圧縮力が卓越するため作用引張力が小さいこともあり、その大部分
をP C鋼材で抵抗するものとし、これを越える部分については ③ を無視して ② のずれ止めの
みにて鋼セルから中詰めコンクリートに伝達され、R C断面で抵抗するものと考えことにした。

Technical drawing of a bridge deck cross-section. The drawing shows a wide, flat deck with a central rectangular cutout. The deck is supported by a central vertical web (腹板) and two side webs (縦シャイベ). The top and bottom surfaces are reinforced with steel plates (鋼床版) and PC reinforcement bars (PC 鋼棒). Dimensions are provided in millimeters (mm). The total width is 11400 mm. The total height is 2480 mm. The deck thickness is 1150 mm. The central cutout has a width of 4950 mm and a height of 1330 mm. The side webs have a width of 3240 mm. The bottom reinforcement bars have a diameter of 32 mm (PC 鋼棒 (φ32)). The side webs are reinforced with vertical reinforcement bars (縦シャイベ). The deck is reinforced with steel plates (鋼床版) and PC reinforcement bars (PC 鋼棒). The drawing also shows the spacing of the reinforcement bars (300 mm) and the width of the reinforcement bars (2760 mm). The drawing includes labels for the steel plate (鋼床版), PC reinforcement bar (PC 鋼棒 (φ32)), web (腹板), and vertical reinforcement bar (縦シャイベ).

図-6 鋼桁のセル割り

(2) 各部基本寸法などの決定根拠

[illegible]

図-7 ずれ止め配置

必要なずれ止め量（本数）が配置できることなどを考慮して 1500 mm とした。

2) ずれ止めの選定 図-7に示すように、鋼床版、斜フランジ、下フランジおよび鋼セル・フランジプレート部には、鋼板とコンクリート間の肌離れ防止機能を有する頭付きスタッドを使用し、鋼セル・ウェブプレート部は隣接セルの中詰めコンクリートにはさまれるため、肌離れは問題とならないので、セル内の溶接作業の面から高さの低い角鋼ブロックを使用することにした。

3) PC鋼材の選定と配置 鋼桁とコンクリート桁とを結合するためのPC鋼材としては、PC桁の主鋼材がPC鋼棒であるためこれに合わせて $\phi 32$ mm鋼棒（SBPR 95/120）を合計74本用いることにした（図-6参照）。

3. 3 主桁の設計断面力と応力度

(1) 設計断面力

接合部の設計断面力は、原則として全体解析から得られた塔支点上の値を用いた。

(2) 照査断面と適用規定

接合部の応力度照査は図-8に示すように「PC桁部」「鋼桁部」および「複合部」の3断面について行い、これらの断面に対する応力度照査項目と適用規定との関係を表-1に示す。

(3) 作用応力度

作用応力度の一例として、完成時/常時の面内曲げモーメント最小時（ M_{zmin} 時）における値を表-2に示す。

3. 4 応力伝達部の設計

(1) ずれ止め

鋼セル内のずれ止めは、図-7のようにスタッドとブロックとを用い、弾力的な応力伝達を仮定して、セル内各4面のずれ止め剛度（ずれ定数）が等しくなるようにずれ止めを配置することにした。

付着・摩擦を無視した系での軸方向圧縮力に対する后面板とずれ止めとの分担割合を2次元FEM解析により求めたところ、ずれ止めの分担率は、后面板厚 $t = 19 \sim 25$ mm に対し、頭付きスタッド（ $\phi 22$ mm, 3本 $\times$ 7列の場合）の時 35 %、角鋼ブロック（ $28 \times 28 \times 150$ mm）の時 50 %

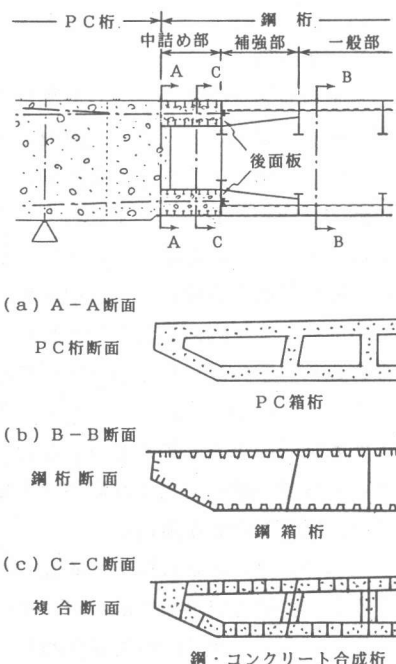


図-8 応力度照査断面

表-1 応力度照査における適用規定

断面	着目位置 (図-8)	曲げモーメントと軸力に対する 応力度照査	曲げ破壊安全度 又は降伏に対する 安全度の照査	せん断力	ねじり モーメント
PC桁断面	A-A	道示-III 2.4節	道示-III 2.4節	道示-III 2.5節	道示-III 2.6節
鋼桁断面	B-B	道示-II	—	道示-II 8章プレート ガーダー	道示-II 8章プレート ガーダー
複合断面	C-C	道示-II 9章 合成桁	道示-II 9.3.2	—	—

表-2 接合部断面の作用応力度 (kgf/cm²)

着目断面位置		上 縁		下 縁	
		作用応力度	許容応力度	作用応力度	許容応力度
PC桁断面	2P 側	-7.2	0	-71.3	-140
	3P 側	-9.3		-69.5	
鋼桁断面	2P 側	133	1400 (SS41)	-1589	-2100 (SM50Y)
	3P 側	85		-1550	
複合断面	鋼桁	2P側	1400 (SS41)	-393	-2100 (SM50Y)
		3P側		-379	
	中詰め コンクリート	2P側	0	-56.7	-140
		3P側		-55.4	

(PC桁断面と複合断面については連結用プレートも含む。引張りを正とする。)

であった。

(2) 後面板

中詰めコンクリート部の立体FEM解析によれば、図-9に示すように、後面板からコンクリートへの力の伝達は後面板周縁のごく局部的な領域において、主としてせん断作用によっていることが明らかとなった。また、周縁部の後面板前面では中詰めコンクリートに局部的な支圧応力の集中が生じることが確認され、その度合いは後面板厚に左右されることわかった。

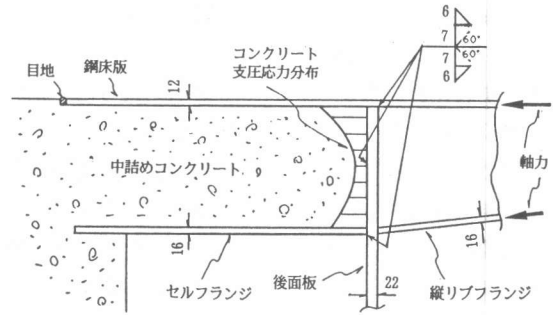


図-9 後面板からの応力伝達

したがって、設計ではこれらを考慮に入れて後面板厚を 22 mmとし、溶接条件も図示のように設定した。なお、この応力集中に対し、セル内のコンクリートは周辺を拘束された3軸圧縮効果により見掛け上強度が上がることからほぼ問題とならないものと考えた。

(3) 接合部のせん断抵抗

鋼桁部あるいはPC桁部はそれぞれ現行の 道示 第Ⅱ編 あるいは 第Ⅲ編 に従ってせん断に対する応力度照査が可能であるが、複合部についてはせん断に対する抵抗断面の考え方が明確でないことから、今回は照査を見合わせた。ただし、複合部は鋼桁断面の中にコンクリートが充填されている構造であることから、鋼桁に対するせん断照査が満足されれば、複合部についても自動的に満足するものと考えられる。

3.5 接合部の施工

施工順序を後接合とすることから、最終的にPC桁と鋼桁接合ブロックとの間に間詰めコンクリートを施工しなければならないが、その重要性から考えて、単なる「間詰め」ではなくPC桁の「最終ブロック」と見なし、一般部と同じコンクリートを用いその幅を 1200 mm とすることにした。

また、鋼セル内の中詰めコンクリートは無収縮混和材を混入したものとし、複合部の応力伝達機構あるいは伝達部の特性などを考慮した結果、鋼桁製作工場で接合ブロックを90°建て起こし、鋼セル開口部からコンクリートを投入する鉛直打設とした。

4. おわりに

複合主桁の接合部に関し、その位置、構造形式、ディテールなどについてはほぼ合理的な設計ができたと言えるが、細かくはさらに検討の余地のある点も残されている。例えば、中詰めコンクリート部の応力伝達に果たす鋼・コンクリート間の付着・摩擦の役割と適切な評価方法、あるいは複合桁としてのせん断・ねじりに対する抵抗断面の考え方などであり、これらについては現時点ではほとんど資料がなく、今後の基礎的な研究を含めて、より一層の検討を要する問題と考えられる。

わが国初の本格的複合斜張橋ということで、その設計に際し、生口橋主桁複合構造に関する調査研究委員会（委員長 田島二郎埼玉大学教授）の委員ならびに他の多くの方々より多数の適切な有意義な御助言を賜った。関係各位に対し深甚の謝意を表します。

なお、最終詳細設計は下記の四つの生口橋関連共同企業体が合同で行ったものである。JV名を記して設計担当各位に謝意を表します。

生口橋鋼桁製作（その1）：日立造船㈱・川田工業㈱・トピー工業㈱

同上（その2）：瀧上工業㈱・日本橋梁㈱・㈱春本鐵工所

生口橋PC上部工（その1）工事：住友建設㈱・和エンテコンクリート㈱・㈱銭高組

同上（その2）工事：川田建設㈱・ピー・エス・コンクリート㈱・富士ピー・エス・コンクリート㈱