

論文・報告

複合斜張橋・生口橋主桁接合部の設計・施工

Design and Construction of Steel to Concrete Joints of Main Girder
in Hybrid Cable-Stayed Girder Bridge松井 邦夫*
Kunio MATSUI梶川 靖治**
Yasuharu KAJIKAWA森谷 久吉***
Hisayoshi MORIYA岩崎 祐次****
Yuhji IWASAKI新井 伸博*****
Nobuhiro ARAI木本 輝幸*****
Teruyuki KIMOTO

IKUCHI-BRIDGE is a hybrid cable-stayed girder bridge which is now under construction in ONOMICHI-IMABARI route of the HONSHU-SHIKOKU Bridge Project. The main girder is a steel-concrete mixed structure which is consisted of a steel girder for a center span with 490 meter long and prestressed concrete (PC) girders for both side spans. The steel girder was rigidly jointed to the PC girder over an entire section near at the supports of the tower.

The fundamental design concepts and the constructive features on steel to concrete joints in IKUCHI-BRIDGE as the first case of the hybrid cable-stayed bridges in Japan, are reported herein.

Keyword: hybrid cable-stayed bridge, steel-concrete mixed structure, steel to concrete joint

1. まえがき

本州四国連絡橋の生口橋は、本州と四国を結ぶ三つのルートの中で最も西側の尾道～今治ルート(別名、西瀬戸自動車道)の中にあって、因島西岸と生口島東岸に挟まれた長さ約2.5 km、幅約0.5 kmの水路状の海峡の南部を横断する橋梁である。当初の計画段階では、3径間PC桁橋、5径間連続PC斜張橋、ニールセン系ローゼ桁橋、単径間補剛箱桁吊橋、複合構造斜張橋の各種橋梁形式について比較検討されたが、最終的に、地形条件、平面線形、工費、橋梁の全体剛性などの面から混合主桁を有する複合斜張橋形式が採用された。^{1), 2), 3)}

この橋の最大の特徴は、中央径間部を鋼箱桁とし側径間部をプレストレストコンクリート(PC)箱桁とする混合主桁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る。このような複合斜張橋は、国内では最初のものであり、国外でも数が少なく、斜張橋の規模(中央径間長490 m)としても世界最大級のものである。

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PC桁との接合部について、最終詳細設計

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が海上部、両側径間PC桁各150 mが陸上部であり、さらに、両側径間部が各々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。

側径間部のタワーを除く端橋脚と二つの中間橋脚はすべて杭基礎上に構築されたRC製橋脚である。これらの橋脚上には1基当たり3個のゴム支承が配置され、また、タワーの水平梁上には鋳鋼製の2個の水平可動沓と1組の耐震ラテラル沓がセットされ、さらに、両端橋脚部には水平自由移動を制限するための鋼角ストッパーがセットされる。主桁はこれらの沓により鉛直および水平方向にバネ支持され、地震時には地震力が各橋脚に分散するいわゆる分散弾性固定方式と呼ばれる耐震固定法が採用された。

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2.7 mの鋼床版2主桁箱桁で、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、図-(c)に示すPC桁断面は鋼桁と同一の桁

*川田建設(株)東京支店工事部長 **川田建設(株)工事本部開発部次長 ***川田建設(株)工事本部技術部技術二課課長
****川田工業(株)技術本部技術部設計一課課長 *****川田建設(株)大阪支店工事部工務課 *****川田工業(株)技術本部技術部設計一課

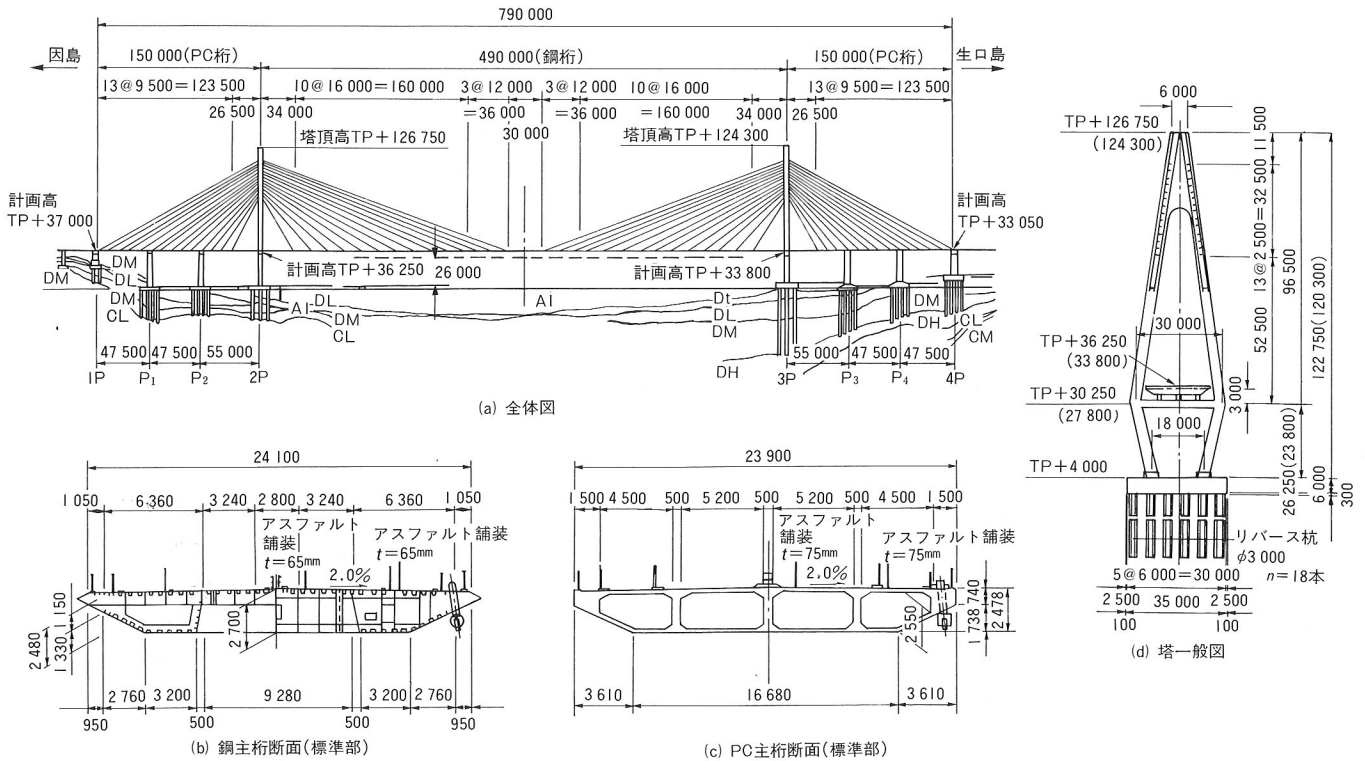


図-1 生口橋一般図

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。

塔はRC製と鋼製とが比較されたが、支持地盤の状態が良くないため下部工との関係で鋼製とされた。また、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-(d)のような下絞りA形塔とされた。

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 $\phi 7$ 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、中央径間側がHiAmアンカー、側径間側がNSソケットにより定着される。

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1,200 mmの間詰め部のコンクリート(図-3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カ所当たり3本 $\times 27T15.2$ 、導入張力1本当たり約500 t)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。

3. 接合部の設計

(1) 接合位置と基本構造の選定

異種材料からなる混合主桁の接合部は、剛性が急変する力学的不連続点であり、応力集中の発生など構造上の弱点となりやすい。このため、主桁に作用する軸方向力、曲げモーメントおよびせん断力などの断面力を鋼桁とコンクリート桁との間でスムーズに伝達できるような位置および構造としなければならない。

そこで、まず主桁の最適な接合位置を決めるために接合面の位置を変化させ、表-1に示す4ケースについて比較・検討した結果、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「ケース1」を採用することにした。このケース1は、塔中間水平梁上の鉛直支承でPC桁を支持し、これより中央径間側2,650 mmの位置に接合面を設ける案である。

次に、接合部の構造形式は、既設の外国の複合斜張橋の例などを参考に表-2に示す四つの案に絞り込み、これらの中から、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

表-1 接合位置の検討ケース

ケース	接 合 位 置
1	
2	
3	
4	

→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, 第4案の部分接合中詰めコンクリート方式を選定した。この方式は, 鋼桁端部を全断面にわたってPC横桁に接合する(全面接合)のではなく, 断面の周縁およびウェブ部分をマルチ・セル構造とし, これらのセル部だけをPC横桁に連結するものである。なお, 鋼桁連結部の剛性確保のためセル内には無収縮コンクリートが充填される。

さらに, このときの支圧板の配置については, 前面プレート形式と後面プレート形式とが比較され, 1セルを取り出した部分モデル供試体についての静的圧縮試験な

らびに平面および立体モデルについてのFEM解析などを実施することにより, 構造特性, 製作・施工性, 力の伝達性などの相違を明らかにした上で, 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, ずれ止めの効果が大であるなどの理由から後者が採用された。

接合部構造の概要を図-2に, また, 接合部縦断面についての詳細を図-3に示す。PC桁はその横桁部が塔水平梁上で2個の鋼製可動鉛直支承により支持され, この支承中心線から2,650 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1,500 mmの位置にはPC鋼材定着用支圧板を兼ねた鋼桁ダイヤフラム(これを後面プレートまたは後面板と呼ぶ)があり, この間が鋼セル中詰めコンクリート部で応力伝達域となっている。鋼桁は, その先応力分散域としての補強部からさらに一般部へと続いている。PC桁と鋼桁とは両者間の応力伝達をより確実にするため接合位置で互いに300 mmラップさせ, 中詰めコンクリートと横桁コンクリートとは連続一体化させている。写真-1に鋼桁接合部端面の中詰めコンクリート打設前の状況を示す。

(2) 接合部の施工順序に対する検討

主としてスパン割りの制約から中央径間鋼桁を吊り上げるためのアンカーとして側径間PC桁を利用することになるが, 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。ところで, 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, PC3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, PC3径間を完成・自立させた後鋼桁接合ブロックとの間詰

表-2 接合部構造案

第 1 案 (全面接合メタルプレート案)	第 2 案 (全面接合中詰めコンクリート案)	第 3 案 (部分接合メタルプレート案)	第 4 案 (部分接合中詰めコンクリート案)
鋼桁部の力をコンクリート横桁全体に伝達するため, 鋼桁部に隔壁を設けて格子構造とし, さらに前面に支圧板を取り付ける。	鋼桁部の力をコンクリート横桁全体に伝達するため, 鋼桁端部全断面に中詰めコンクリートを打設する。	鋼桁部の力をコンクリート横桁に伝達するため, 鋼桁端面のフランジ部およびウェブ部に極厚支圧板を取り付ける。	鋼桁部の力をコンクリート横桁に伝達するため, 鋼桁端部のフランジ部およびウェブ部に中詰めコンクリートを打設する。

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桁のクリープ・乾燥収縮あるいは形状管理など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。

(3) 応力伝達機構と設計上の考え方

a) 軸方向圧縮力

接合部における鋼桁からPC桁への軸方向圧縮力の伝達機構は、鋼桁一般部に作用する力が鋼桁補強部で分散され、それらが中詰めコンクリート部の多数の鋼セルにおいて①后面板 ②ずれ止め ③鋼板とコンクリート間の付着・摩擦——という三つの応力伝達要素により、鋼板から中詰めコンクリートに伝達され、最終的にPC横桁に伝えられる。特に、後面プレート方式の場合にはプレストレス力に加え作用圧縮力により中詰めコンクリートが

圧縮され、ポアソン効果による横膨張のため、鋼板とコンクリート間の接触摩擦が大きくなる。そこで、鋼セルについての載荷実験およびそれに対するFEM解析結果に基づき各伝達要素の分担率を算出したところ、付着・摩擦、後面板、ずれ止めに対しそれぞれ45～55%、35～45%および5～15%となった。

しかるに、本設計では、付着力・摩擦力は不確定要因が大きいことおよび結果的に安全側となることなどから、付着・摩擦を無視して①と②のみで力を伝達するものとする考えにすることにした。

b) 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①PC鋼材 ②ずれ止め 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PC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、RC断面で抵抗するものとする考えにすることにした。

c) セン断力

せん断力の鋼桁から中詰めコンクリートへの伝達要素としては、①ずれ止め ②鋼板とコンクリートとの付着・摩擦——の二つがあるが、軸方向力の場合と同様に②を無視し、全て①のずれ止めによりせん断力が伝達される

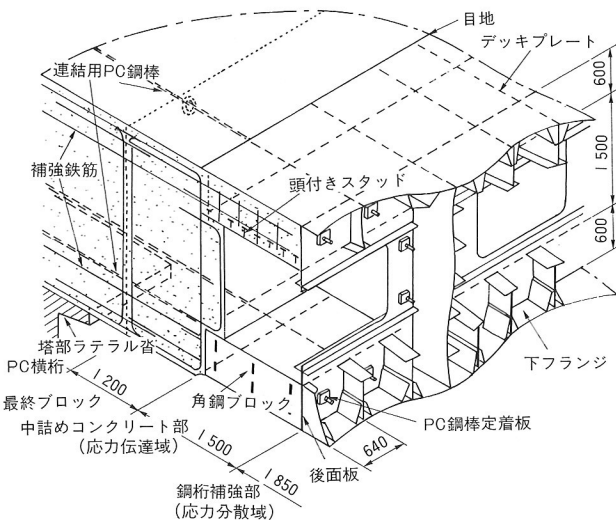


図-2 混合主桁接合部の構造

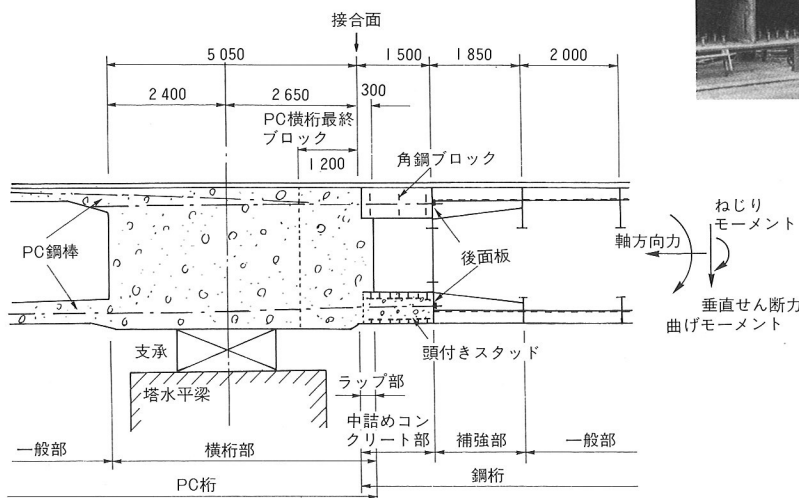


図-3 接合部の縦断面

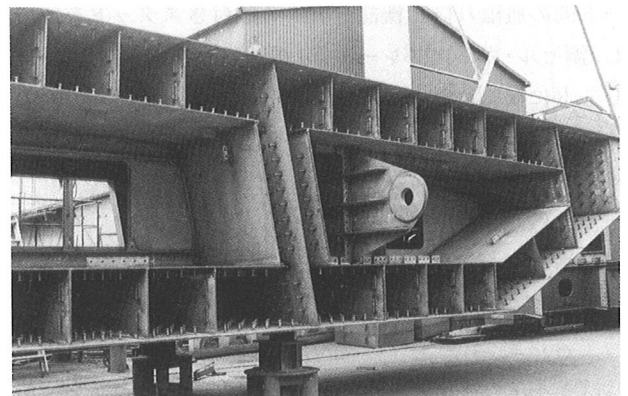


写真-1 鋼桁接合ブロック端面

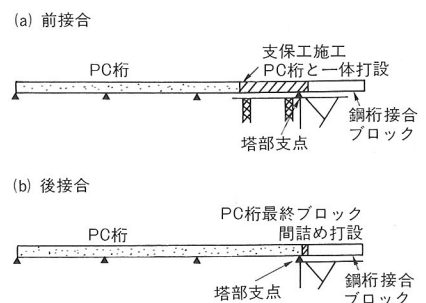
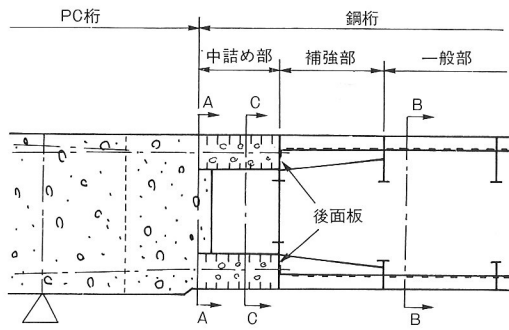
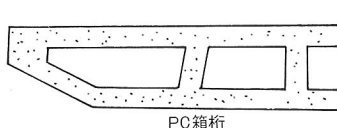


図-4 施工順序の比較



(a) A-A断面

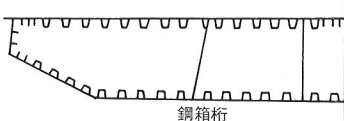
PC桁断面



PC箱桁

(b) B-B断面

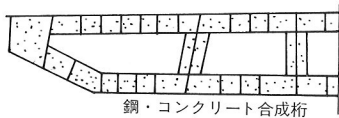
鋼桁断面



鋼箱桁

(c) C-C断面

複合断面



鋼・コンクリート合成桁

図-7 応力度照査断面

b) 後面板

中詰めコンクリート部の立体FEM解析によれば、図-8に示すように、後面板からコンクリートへの力の伝達の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がわかった。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

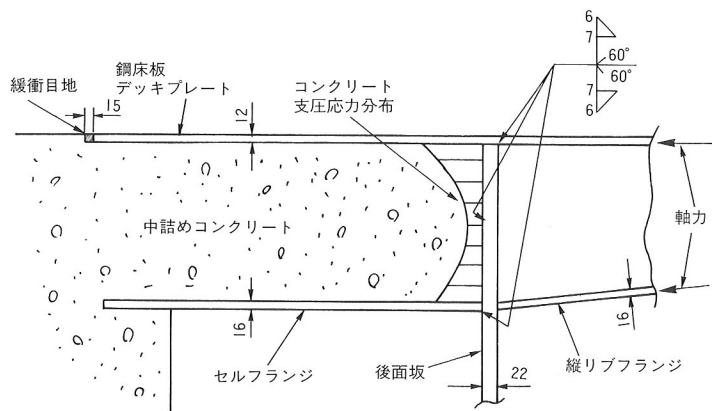


図-8 後面板からの応力伝達

表-4 応力度照査における適用規定

断面	着目位置 (図-7)	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	道示-III 2.4	道示-III 2.5	道示-III 2.6
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-5 接合部断面の作用応力度

(引張りを正とする)

着目断面位置		上縁(kg/cm ²)		下縁(kg/cm ²)	
		作用 応力度	許容 応力度	作用 応力度	許容 応力度
PC桁断面	2 P 側	-7.2	0	-71.3	-140
	3 P 側	-9.3		-69.5	
鋼桁断面	2 P 側	133	1 400 (SS41)	-1 589	-2 100 (SM50Y)
	3 P 側	85		-1 550	
複合断面	鋼桁	2 P 側	1 400 (SS41)	-393	-2 100 (SM50Y)
		3 P 側		-379	
	中詰め コン クリート	2 P 側	0	-56.7	-140
		3 P 側		-55.4	

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。

c) 接合面の鉄筋補強

PC横桁には鋼桁の上下セル部から圧縮力が集中的に作用するため、その接合面付近には図-9に示すような局部的な引張応力度が生じる。①はフランジ部背面に生じる割裂応力であり、②は上下フランジ間すなわち横桁前面部に生じる割裂応力である。2次元FEM解析によりこれらの局部応力分布を求め、これに基づき①に対しD19 ctc 250 mm, ②に対しD16 ctc 125 mmの補強鉄筋を配置することにした。

d) 接合面のせん断抵抗

鋼桁部あるいはPC桁部はそれぞれ現行の道示第II編

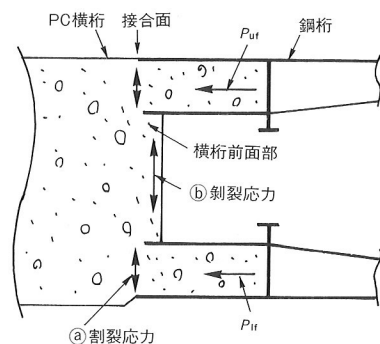


図-9 接合部の局部応力

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されるものと考えられる。

本接合構造の場合、せん断力に対しクリティカルとなる断面は中詰め部とPC横桁との境界面(いわゆる「接合面」、図-3参照)であると考えられる。これについて、設計では以下の二つの考え方によることにした。

① 曲げに伴うせん断

図-10 (a)のように中詰めウェブ厚(600 mm)を有する仮想PC梁を想定し、道示-III 2.5を適用することにより、曲げに伴うせん断力に対する通常のトラス理論に基づきPC横桁内に配置すべき必要スターラップ量を算出した。

② 直接せん断

接合面における直接せん断に対する抵抗について、以下の3種類の考え方によりそれぞれ安全性を確認した。

i) 接合面における桁断面の直接せん断抵抗

直接せん断に対する桁の有効断面として、腹部セルの中詰めコンクリートのウェブとフランジの一部とを考える。

ii) プレストレス力による摩擦抵抗

中詰めコンクリート全断面に摩擦力が作用すると考える。

iii) 横桁前面部の直接せん断抵抗

横桁前面の鋼桁側に突出したコンクリート部分をいわゆるせん断キーと考える。

i)については、図-10 (b)のように境界面に直接せん断力が作用すると考えた場合、中詰めウェブ内のコンクリートだけでなく、上下フランジのコンクリートの一部もせん断に抵抗できるものと考え、この面を垂直に横切る必要鉄筋量を算定することにした。なお、上下フランジの一部も有効と考えたのは、これらの厚みが桁高に比べ比較的大きいことによるためであり、立体FEM解析結果に基づき直接せん断に対する有効断面を算出した。この断面についての応力照査では、設計荷重時および終局荷重時についてそれぞれ許容値を満足するという結果が得られた。

また、ii)およびiii)についても照査した結果、いずれも十分安全であることが確認できた。

4. 接合部の施工

(1) 接合部のブロック長

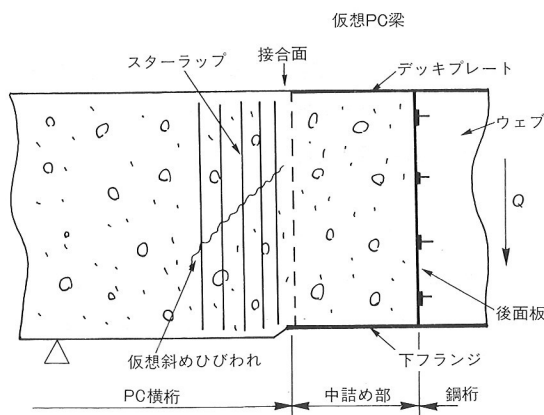
施工順序を後接合とすることから、最終的にPC桁と鋼桁接合ブロックとの間に間詰めコンクリートを施工しなければならないが、その重要性から考えて、単なる「間詰め」ではなくPC桁の「最終ブロック」と見なすことにし、その長さは次のような要件から施工が確実にできる最小値として1200 mmとした。

① 鉄筋の継手長

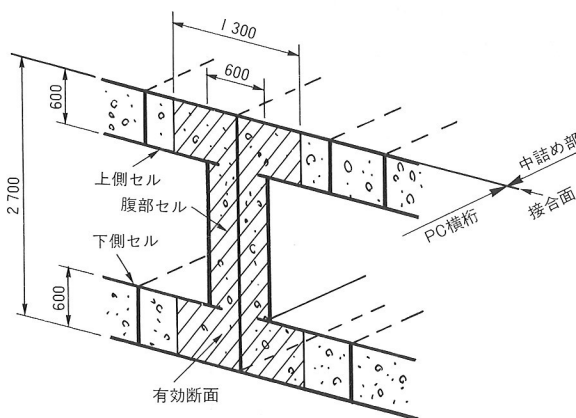
PC桁側および鋼セル中詰めコンクリート側からそれぞれ突き出した軸方向鉄筋の重ね継手において密着結束かつ千鳥配置できるためには、D16の軸方向鉄筋に対し重ね継手長および継手ずらし長としてそれぞれ400 mm程度必要であることから、接合部の長さは最小1200 mmが要求される。

② ブロック内での作業性

PC横桁端板型枠の脱型、コンクリート打継ぎ目の表面処理(チップング)、軸方向PC鋼棒のカップリングおよび緊張・定着ならびに横方向PC鋼棒の配置などの作業では、作業員がブロックの中に入り込む必要があり、例えば緊張用ジャッキの長さが約700 mmであることから、最小の作業スペースとしてやはり1200 mm程度必要となる。



(a) 曲げに伴うせん断に対する補強



(b) 直接せん断に対する有効断面

図-10 接合部のせん断抵抗

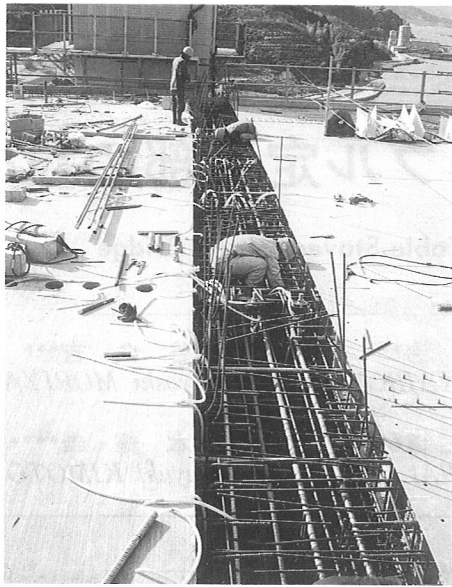


写真-2 接合部最終ブロックにおける配筋状況

写真-2に示すように、実作業では1200mmの施工幅の中で、橋軸方向に鉄筋およびPC鋼棒さらにはマンホール用型枠が貫通していたため、特に横方向PC鋼棒の配置作業に手間取り、所要工程を大幅に超過する結果となった。

(2) 接合部のコンクリート

鋼桁接合ブロックは、予め鋼桁製作工場において鋼セル内に中詰めコンクリートを充填した後、現地に搬入・設置された。この時の中詰めコンクリートは、普通セメントに無収縮混和材を混入したスランプ値21cmのものを使用し、接合ブロックを90°建て起こした状態で鋼セル開口部からコンクリートを投入する鉛直打設によった。

また、最終ブロックの間詰めコンクリートについては、橋体部と同じ $\sigma_{ck}=400 \text{ kg/cm}^2$ のものと無収縮性コンクリートについて比較・検討したが、接合部も張り出し施工における閉合ブロックと同様であると考え、前者を採用した。このコンクリートの打設に際し、スランプ値8cmとしてPC桁一般部とほぼ同様な管理を行ったが、特に、打設速度についてはコンクリートの充填を確実にするよう締固め作業を優先させた。

(3) 付帯工

a) 緩衝目地

軸力作用時の鋼床版デッキプレート先端の応力集中を緩和するためおよび接触面からの雨水の侵入を防ぐために、図-8に示すように、接合ブロック前面のデッキプレートとPC桁コンクリートとが接する箇所にいわゆる緩衝目地を設けた。目地部には、鋼板端面をプライマー処理した後、予めコンクリート側に設けたV字形溝に1液性のシリコン系シール材を充填した。

b) PC鋼棒の防錆対策

鋼セル内には連結のためのPC鋼棒が多数配置されて

おり、その大部分は鋼桁補強部側で緊張・定着作業を行った(図-2参照)。最終的に、支圧板から露出するPC鋼棒ネジ部およびナットの防錆対策として、溶融亜鉛メッキを施した鋼製キャップをカバーとして取り付け、その内部にセメントペーストをグラウトした。

5. あとがき

混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・摩擦の役割とその適切な評価方法、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。

本工事の設計・施工に当たり本州四国連絡橋公団第三建設局向島工事事務所の方々にご指導いただいた。また、設計段階では財海洋架橋調査会の「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)において委員の方々より適切かつ有意義な御助言を多数賜った。最後に、関係各位に対し深甚の謝意を表すとともに、本報告が今後出現する複合構造物あるいは混合構造物の設計・施工の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) M. Ohashi, J. Tajima, M. Yamashita and K. Mori : Design of Complex Cable-Stayed Bridge, Proceedings of International Conference on Cable-Stayed Bridges, Bangkok, pp.694~710, Nov.,1987.
- 2) 森 邦久：(6.5生口橋の設計), 鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン, 土木学会, pp.189~199, 1989年3月.
- 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—, 土木学会第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.359~364, 1989年9月.
- 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, pp.48~52, 1989年1月.