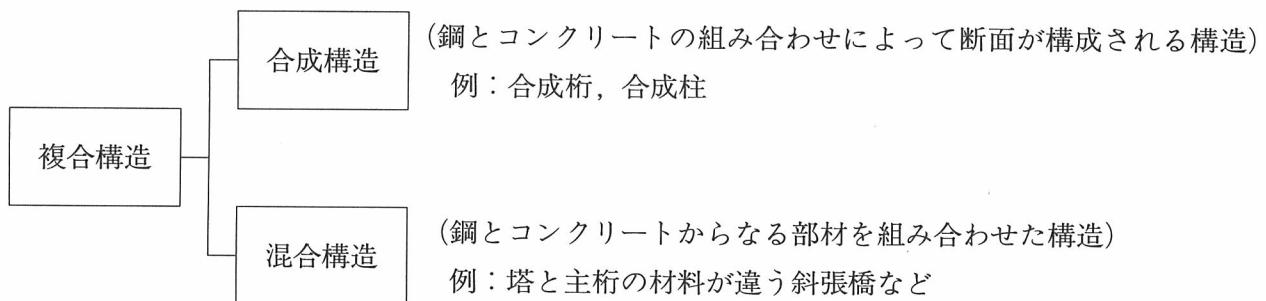


4. 複合斜張橋

4.1 概要

鋼とコンクリートからなる構造物は、従来いろいろな名称で呼ばれてきているが、最近では一応次のように整理されている¹⁾。



以上の定義に従い、主桁に鋼、塔にコンクリートを使用した斜張橋（混合構造）、側径間をコンクリート桁とし、主径間を鋼桁とする斜張橋（混合構造）、合成桁を使用した斜張橋（合成構造）などをすべて

表-4.1 複合斜張橋の分類

塔	桁	事例（年代、主径間長）
コンクリート	(主・側) 鋼桁	勝瀬橋(1960, 128m), Zárate-Brazo Largo橋(1977, 330m), 高梨大橋(1984, 100m), Farø橋(1985, 290m), 秩父橋(1985, 153m), 十勝中央大橋(1988, 250m)
	(主) 鋼桁 (側) コンクリート桁	George-Street橋(1964, 152m), Neckar橋(1966, 77m), Bybrua橋(1978, 185m), Düsseldorf-Flehe橋(1979, 368m), Tjörn橋(1981, 366m), Tampico 橋(1988, 360m)
	(主・側) 合成桁	Isles橋(1967, 105m), 大和橋(1974, 83m), Rande橋(1978, 400m), Alex Fraser橋(1986, 465m), Quincy橋(1987, 274m), 重陽大橋(工事中, 200m), Weirton-Steubenville橋(工事中, 250m), Houston-Ship Channel橋(工事中, 381m)
鋼	(主) 鋼桁 (側) コンクリート桁	Kurt-Schumacher橋(1971, 287m), 生口橋（工事中, 490m)
	(主・側) コンクリート桁	Neckar Center橋(歩道橋)
	(主・側) 合成桁	Büchenauer橋(1956, 59m), Paris-Masséna橋(1970, 161m), John O' Connell Memorial橋(1972, 137m), Heer Agimont橋(1972, 124m), Steyregger橋(1979, 161m), Adhamiyah橋(1984, 183m), 仲良い橋(1989, 65m), Karnali River橋(工事中, 325m), Second Hooghly橋(工事中, 457m)

て複合斜張橋と呼ぶ。これらの分類と事例を表-4.1に示す。

4.2 塔にコンクリートを使用する複合斜張橋

4.2.1 塔の構造

コンクリート塔の構造には RC と SRC とがあるが、引張応力発生領域に対し部分的に PC 構造とする場合もある。SRC は RC 断面では配筋が困難な場合に適用される。しかし、RC 構造とした場合でも、鉄筋組立て、型枠セット、ケーブル定着部セット用に鉄骨を配置する場合もある。わが国では RC の実施例として勝瀬橋、大和橋、十勝中央大橋、SRC の実施例として高梨大橋、秩父橋がある。一方、海外でも RC が主体であり、SRC の実施例はない。また PC 構造は、Quincy 橋、Weirton-Steubenville 橋などに使用例があるが、それ以外では次のような場合に一時的あるいは部分的な引張応力対策として使用されている。

- ① A 形塔の施工時に発生する曲げモーメントに対する一時的な使用（例：Düsseldorf-Flehe 橋）
- ② 門形塔の塔頂横梁（例：Rande 橋、Tjörn 橋）
- ③ A 形塔において常時引張力が作用する主桁直下の中間横梁（例：Farø 橋）
- ④ ケーブル定着部（例：Rande 橋）

4.2.2 塔の断面形状

塔の断面形状はほとんどが矩形であるが、Düsseldorf-Flehe 橋のように I 形断面のものもある。断面は大きく分けて、中空断面と充実断面の 2 種類がある。図-4.1 は、塔高と断面寸法との関係を示しているが、当然ながら小断面では充実断面が使用され、大断面になると中空断面が使用されている。中空断面の場合、壁厚は 600mm 程度である（Rande 橋、Alex Fraser 橋、Bybrua 橋）。中空部の内寸法は、作業性から 1m 程度が限界のようである（Bybrua 橋では 1050×2100 ）。十勝中央大橋の場合には、 $\phi 800$ の鋼管を中空部として設け、ケーブル定着部の検査および塔頂の航空障害灯や避雷針の維持管理のための検査路として役立てている。

4.2.3 塔におけるケーブル定着方法

コンクリート塔におけるケーブル定着では、当然のことながら、できるだけコンクリートに引張応力が発生しないような工夫がなされている。定着構造の例を図-4.2 に示す。図-4.2(a) は、塔柱の外側の壁を利用して定着するもので、ケーブルソケットからの反力は、コンクリート塔に圧縮応力となって伝達される（Rande 橋、高梨大橋、秩父橋）。図-4.2(b) のタイビーム方式は、塔柱の左右から入ってくるケーブル張力の水平成分を鋼製のタイビームにとらせ、鉛直成分を塔壁に伝達させるものである（Alex Fraser 橋）。図-4.2(c) の固定サドル方式は、原理的にはタイビーム方式と同じであるが、鉛直反力はサドル直下から伝達される（Düsseldorf-Flehe 橋、Tjörn 橋）。図-4.2(d) の可動サドル方式は、可動とすることにより塔の左右のケーブル張力差をなくし、張力差による塔基部の曲げモーメントを

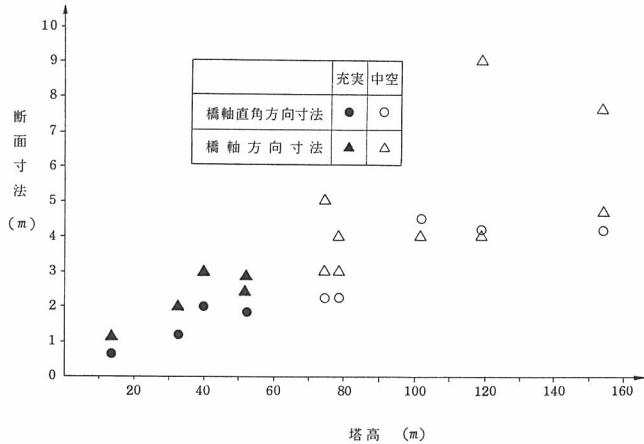


図-4.1 コンクリート塔の高さと断面寸法

小さくしたい場合に採用される。可動サドルにはロッカ方式（勝瀬橋、大和橋）とローラー方式（George-Street 橋）とがある。

上記以外にも、Farø 橋のように、鋼製定着桁をコンクリート塔柱間に挟み込み、定着桁のサイドプレートを通じて、ケーブル張力を RC 塔柱壁に伝達する方法などもある。

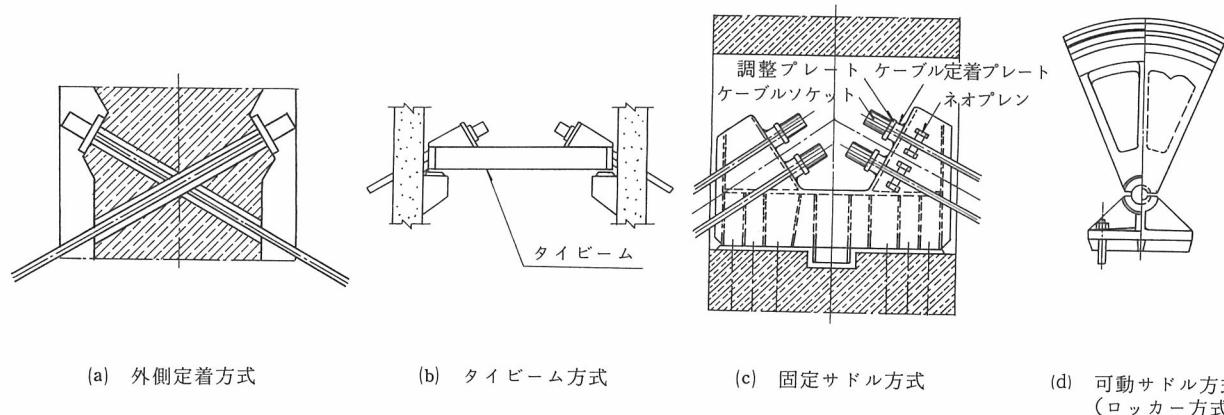


図-4.2 コンクリート塔へのケーブル定着方法

4.3 側径間をコンクリート桁とする複合斜張橋^{2~5)}

2章で述べたように、側径間桁は主径間桁に対しアンカーの役割をする。特に側径間が短い場合、側径間に働く上揚力が大きくなるので、側径間をコンクリート桁とするのが有利になることがある。

4.3.1 コンクリート桁の構造

側径間をコンクリート桁とする場合、RC 桁と PC 桁が考えられるが、RC 桁は Tjörn 橋で採用されているのみであり、その他はすべて PC 桁が用いられている。これは、Tjörn 橋の中間橋脚の間隔が最大32.6m であり、Kurt-Schumacher 橋の65m, Flehe 橋の60m, Bybrua 橋の44m, 生口橋の55m と比べた場合、かなり短くなっていることによるものと思われる。

4.3.2 鋼桁とコンクリート桁の接合部

ここでは、主径間の鋼桁と側径間のコンクリート桁の接合部について述べる。この接合部は鋼桁とコンクリート桁の応力を相互に円滑に伝達させる役目をするものであり、このような複合斜張橋においては特に重要な構造部分である。既往の接合方法を示すと図-4.3 のようになる。以下、鋼桁からコンクリート桁への力の伝達という観点から各種接合方法の特徴を述べる。

(1) メタルプレート方式（図-4.3(a)）

鋼桁の垂直応力度が、支圧板を介してコンクリート桁に伝達される方式である。これは吊橋主塔の底板の場合と同じ原理であり、反力を均等化するために一般に支圧板は厚くなる。架設時や地震時などの一時的な引張応力には、PC 鋼材によるプレストレスで対処する。また、せん断力は支圧板前面のスタッジベルで伝達される。図-4.4 に Kurt-Schumacher 橋の例を示す。接合位置は、主径間寄りの塔橋脚前縁と一致している。鋼桁および PC 桁とも同一の形状の 2 箱桁である。

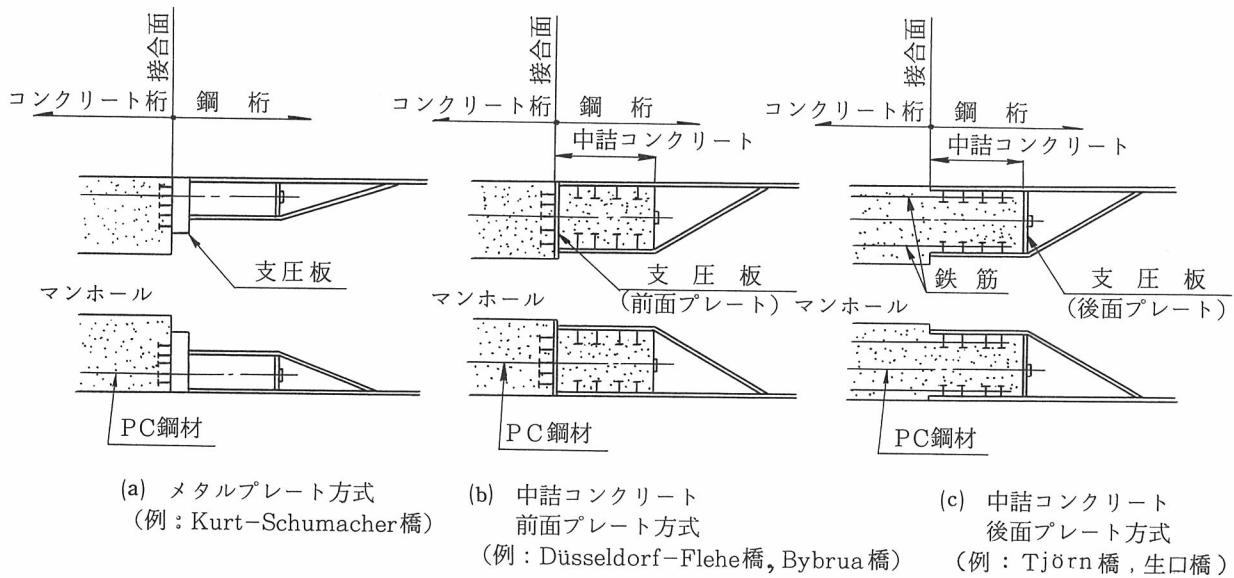


図-4.3 接合方法の種類

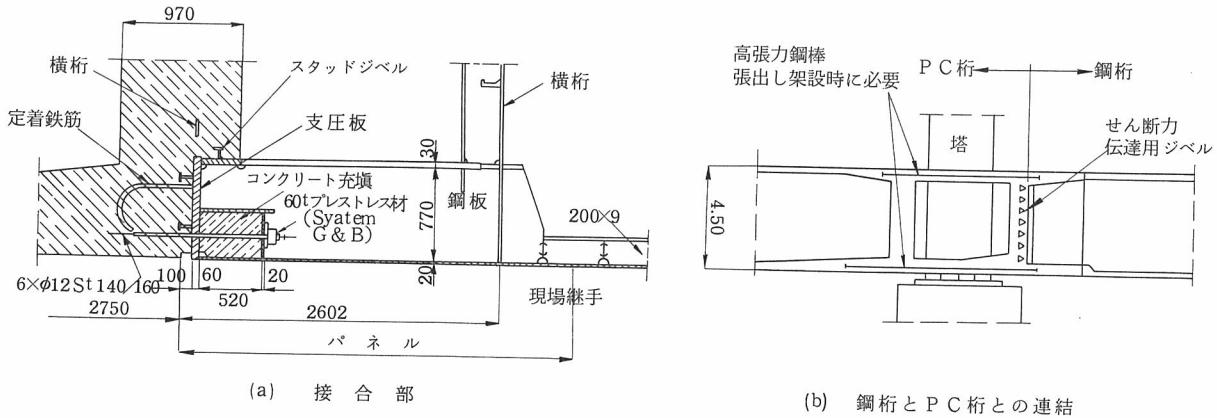


図-4.4 Kurt-Schumacher 橋の接合部

(2) 中詰コンクリート前面プレート方式 (図-4.3(b))

本方式では、鋼桁応力の一部をジベルを介して中詰コンクリートにも伝達することにより、支圧板

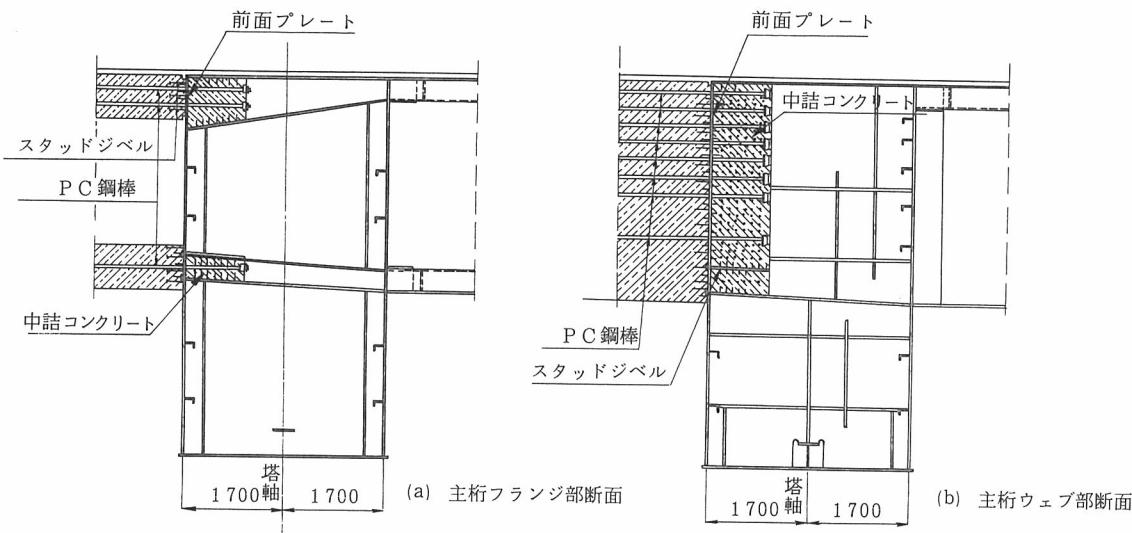


図-4.5 Düsseldorf-Flehe 橋の接合部

の応力はより均等化される。したがって、支圧板の板厚をメタルプレート方式よりも薄くすることができる。せん断力は支圧板前面のスタッドジベルで伝達される。図-4.5はDüsseldorf-Flehe橋の例であるが、接合部において、塔下部の鋼横ばりを介して間接的に両主桁を接合している。鋼桁は1箱桁、PC桁は2箱桁である。

(3) 中詰コンクリート後面プレート方式 (図-4.3(c))

本方式では、支圧板が後方に位置している。この構造の場合、鋼桁の垂直応力度が後方の支圧板およびジベルから伝達されるので、接合面においては鋼桁の応力は中詰コンクリートに伝達される。したがって、前面プレート方式よりもさらに中詰コンクリートの役割を大きくした形式といえよう。一方、せん断力は、主桁腹板部のジベルにより中詰部のコンクリートに伝達される。

図-4.6はTjörn橋の例であるが、接合位置は塔から側径間側に10mの位置である。鋼桁は1箱桁、RC桁は2つのT形はりからなり、断面形状が互いに異なるので、RC桁を接合位置から20mの区間に1箱桁に形状変更している。図-4.7は生口橋の例であるが、接合位置は図-4.7(a)に示すように塔より中央径間寄りに2.65mとしている。その選定理由として、接合位置の曲げモーメントが小さいこと、重いPC桁を塔で直接支持することの安定性をあげている。本橋も図-4.7(b)に示すように鋼桁(2箱桁)とコンクリート桁(1箱桁)の一般部の断面形状が異なる。そのため、図-4.7(c), (d)に示すように鋼桁を接合部で1箱桁としている。しかし、腹板の数は鋼桁とPC桁で異なっているので、支点上のPC横桁剛域部で応力伝達を行っている。なお、PC桁を3径間連続桁として完成させた後、鋼桁と接合するために、施工上図-4.7(a)のコンクリート充填用間詰部を設けている。

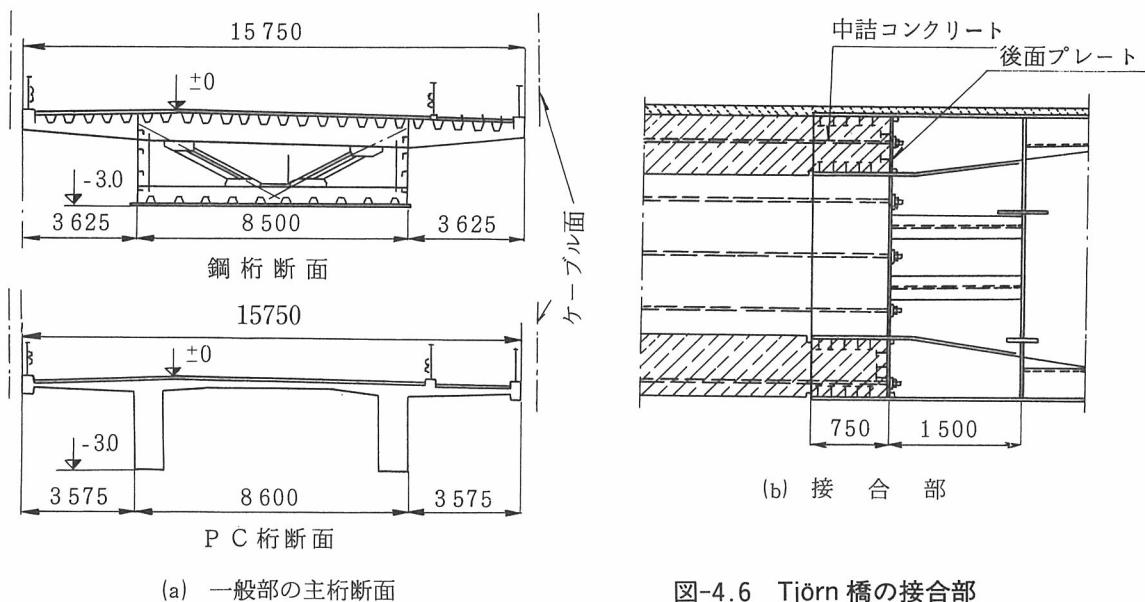


図-4.6 Tjörn橋の接合部

4.3.3 クリープ・乾燥収縮の影響

この形式の複合斜張橋は鋼桁とコンクリート桁とを混用するので、コンクリートのクリープ・乾燥収縮の影響を予め検討しておく必要がある。特に長大斜張橋ともなれば、架設工期も長くなるので、架設中に生じる分と閉合後に生じる分とを分けて検討する必要がある。

図-4.8はDüsseldorf-Flehe橋の主桁の断面力に対するクリープ・乾燥収縮の影響を示したものである。これから分かるように、クリープ・乾燥収縮の影響は塔位置において主桁の死・活荷重モーメントの16%程度生じている。

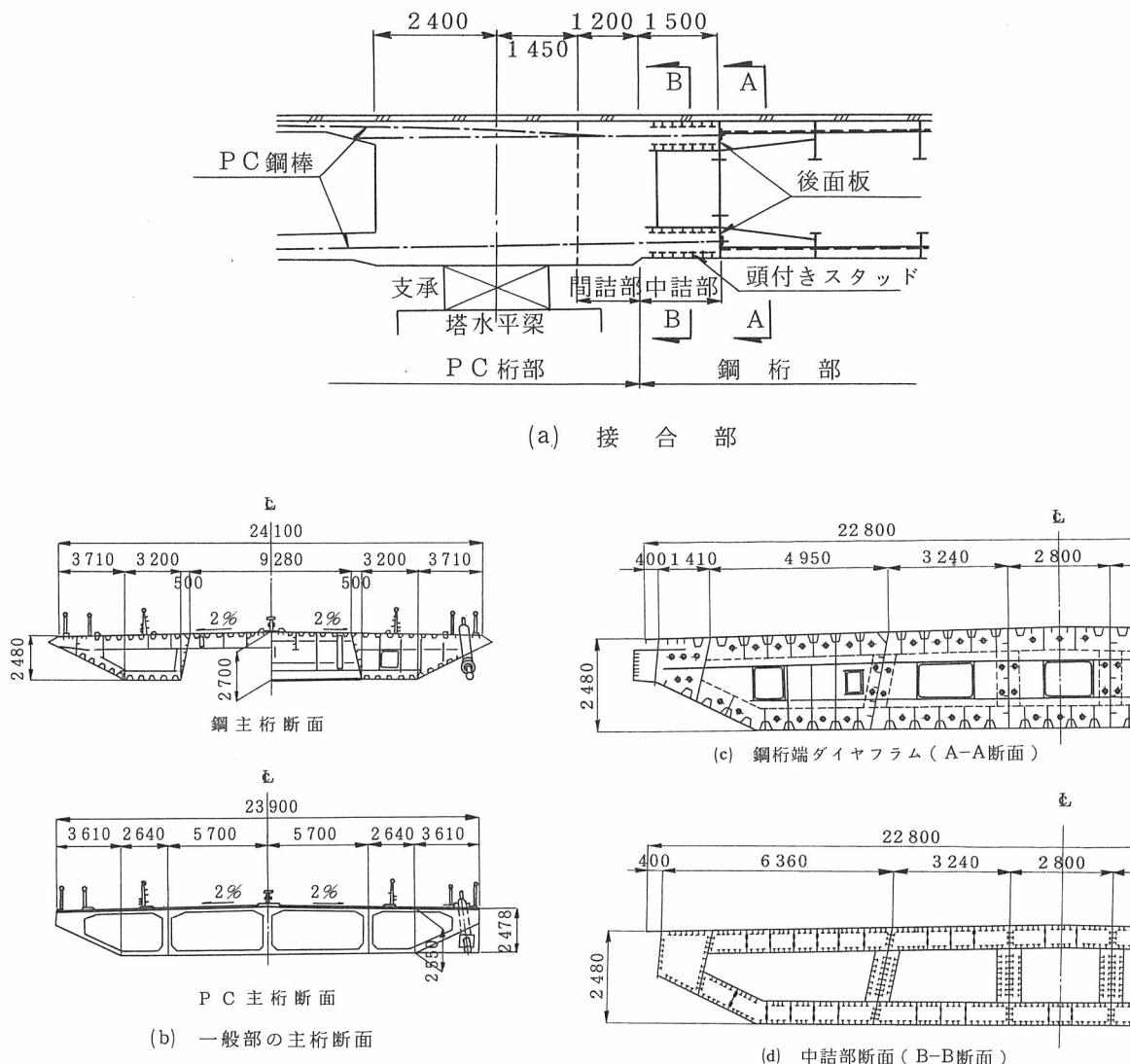


図-4.7 生口橋の接合部

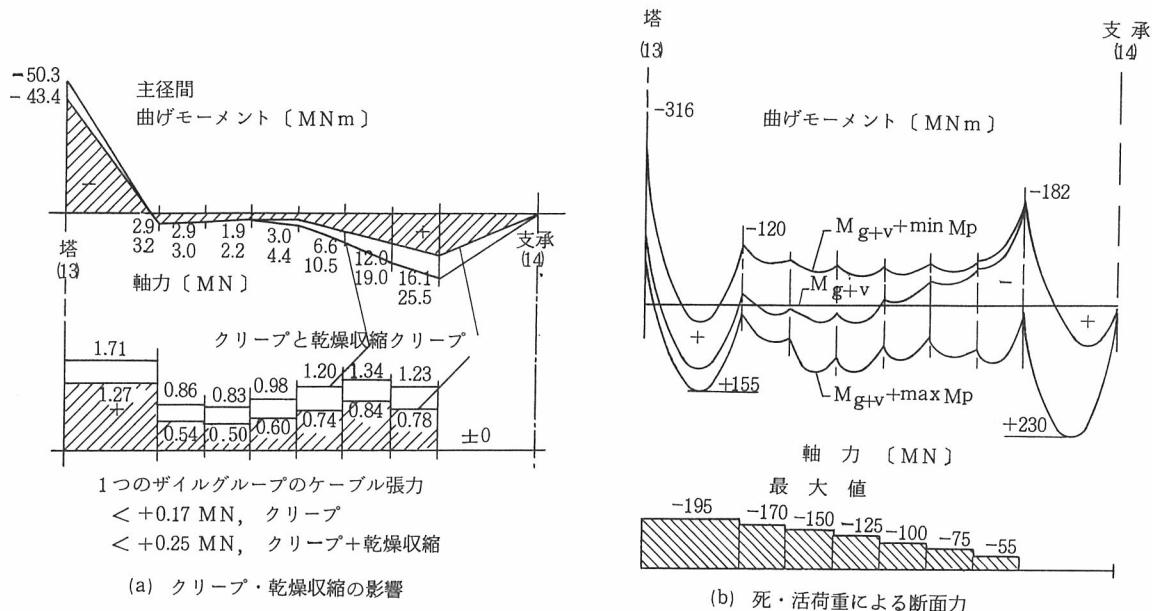


図-4.8 Düsseldorf-Flehe 橋におけるクリープ・乾燥収縮による断面力

図-4.9は生口橋におけるクリープ・乾燥収縮の主桁の鉛直変位および曲げモーメントへの影響を示している。中央径間の中央点変位量は約 230mm であり、塔位置の曲げモーメントは死・活荷重による曲げモーメントの約 1/4に相当する。しかし、鋼桁曲げモーメントへの影響は塔付近が顕著で、支間中央付近では非常に小さい。なおクリープが変位量に及ぼす影響と乾燥収縮が変位量に及ぼす影響はほぼ同程度となっている。

側径間の主桁にコンクリート桁を用いた複合斜張橋においては、ケーブル張力の水平成分によるクリープと乾燥収縮とにより主桁が短縮する。たとえば、生口橋においては、桁端で水平方向にほぼ50mm 程度の移動がある。この結果、ケーブルと塔を介して中央径間の主桁が下方にたわむことになる。

4.3.4 コンクリート桁におけるケーブルの定着方法

塔におけるケーブルの定着の場合、塔は左右のケーブルから引張力を受けるが、主桁の場合には一方向からの力であるので、引張力処理の問題は塔より少い。そのため、コンクリート桁におけるケーブル定着構造は、コンクリート桁を貫通した鋼管の後面でケーブルソケットを支圧定着させるだけでもよく、単純なものとなっている。ただし、支圧力に伴ってコンクリートには圧力と直角方向に割裂力が生じるので、鋼管のまわりに補強筋が必要となる（図-4.10(a)）。

割裂力の計算には Mörsh⁶⁾の式による計算法があるが、場合によっては FEM 解析により応力分布を確認している。割裂力に対する補強方法としては、スパイラル筋が一般的であるが、生口橋⁷⁾のように施工性からグリッド筋で補強する場合もある。支圧板は支圧に対して板厚が決定されるが、リブ付き鋼管を使用することにより板厚を薄くすることができる（図-4.10(b)）。

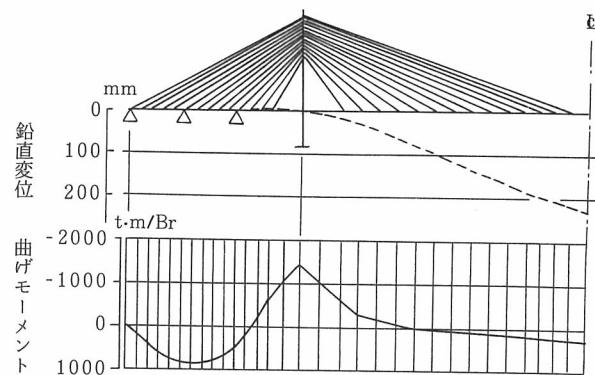
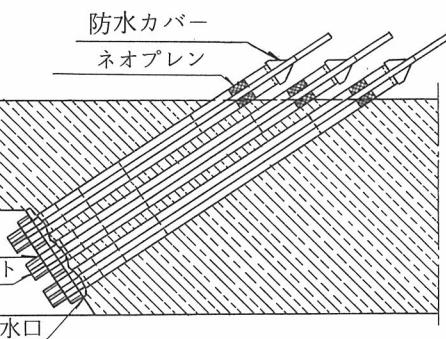
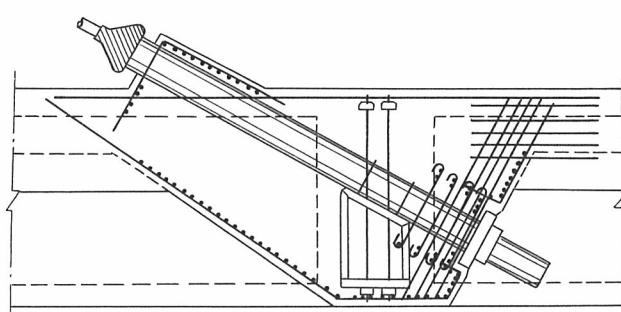


図-4.9 生口橋のクリープ・乾燥収縮の影響

(a) 生口橋の例



(b) Düsseldorf-Flehe橋の例

図-4.10 コンクリート桁におけるケーブル定着

4.4 合成桁を使用した複合斜張橋

この場合、鋼桁に合成される床版としては通常の RC 床版と合成鋼床版とがある。以下、それぞれの床版形式を有する合成桁複合斜張橋について述べる。

4.4.1 RC床版を使用する場合

海外では古くは Büchenauer 橋があり、わが国では大和橋の例がある。最近ではプレキャスト床版を使用したエッジビーム形式の Alex Fraser 橋や Quincy 橋などの例も見られる。このように RC 合成床版には、現場打ちのものとプレキャスト床版を用いるものとがある。プレキャスト床版は現場打ち床版と比較して、型わくや現場打ちがないことによる工期の短縮、クリープ・乾燥収縮の影響が小さいことなどのプラス面もあるが、プレキャスト床版間の継手構造に配慮を要すること、輸送費が割高になることなどのマイナス面もある。

RC合成床版を斜張橋に適用する場合、床版のひびわれに対し、設計・施工上の配慮が必要である。大和橋⁸⁾では合成桁の設計をプレストレスしない連続合成桁として行い、正の曲げモーメントに対しては合成断面で、負の曲げモーメントに対しては鋼断面で抵抗させており、またケーブルのプレストレスを利用して中間支点の負の曲げモーメントの低減を図っている。仲良い橋⁹⁾では塔部の中間支承を省いて中間支点の負の曲げモーメントの低減を図り、かつケーブル張力の調整を行って床版に圧縮応力を導入している。Alex Fraser 橋¹⁰⁾では、合成断面に対し床版の占める割合が大きく、図心を上方におくようにしてコンクリート床版に引張応力が発生しにくいようにしている(図-4.11)。またプレキャスト床版の敷設は鋼桁と合成しながら同時に行われた。

合成桁の場合、コンクリート床版のクリープ・乾燥収縮の影響は、床版内に引張応力を発生させる。仲良い橋では、クリープ・乾燥収縮により最大 26kgf/cm^2 の引張応力が発生すると計算されている。大和橋では、鋼桁に最大 307kgf/cm^2 の応力と最大 25mm のたわみが生じるが、ケーブルへの影響は小さいと報告されている⁸⁾。

4.4.2 合成鋼床版を使用する場合

合成鋼床版は、型わく代わりとしての鋼板上にコンクリートを打ち、ジベルにより一体化して床版とするものである。通常の RC 床版と比較して床版厚を薄くすることができ、死荷重の軽減が図れること、現場で型わくを別に作る必要がないので工期と安全性の面で有利であること、またコンクリート塊の落下の問題がないなどの長所がある。反面、鋼板上面の錆に対する維持塗装が必要であり、またジベルの疲労の問題がある。なお、現場打ち床版とプレキャスト床版とがあるが、現場打ちの場合には、コンクリート打設により鋼板に変形が生じるので縦リブ・横リブ等による補剛が必要となる。合成鋼床版の使用例としては Paris-Masséna 橋、Rande 橋、重陽大橋などがある。Rande 橋¹¹⁾は図-4.12 に示すように、コンクリートは厚さ 80mm で鋼板とスタッズジベルで合成されているが、コンクリートと合成することにより鋼床版の軽量化が図られていると見られる。また、縦リブの中心間隔は 835mm であり、通常の鋼床版の 600mm に比べて大きい。本橋のコンクリート床版打設は、鋼桁架設にやや遅れて行わ

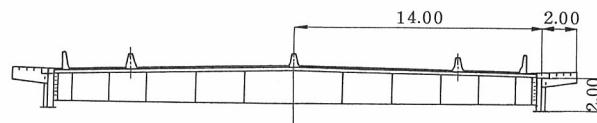


図-4.11 Alex Fraser 橋の主桁断面

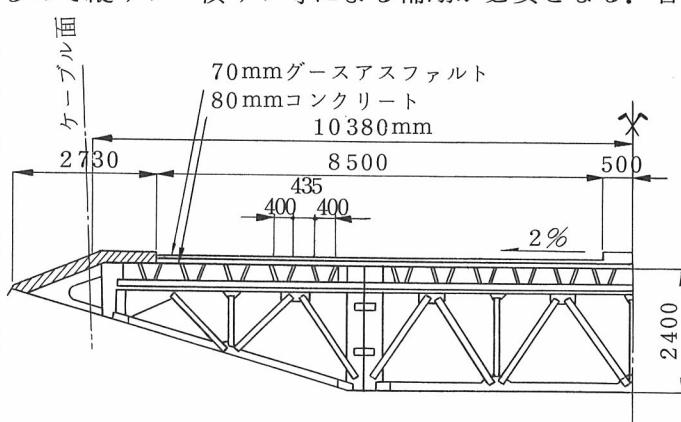


図-4.12 Rande 橋の主桁断面

れているが、その際ケーブル定着部では橋軸直角方向全長にわたってコンクリートに目地を設けており、ひびわれへの配慮がうかがえる。また本橋では、中間支点を設けないフローティング形式により、主桁に生じる負曲げモーメントの低減が図られている。また重陽大橋のコンクリートは厚さ80mmで、鋼床版とスタッドボルトで連結され、耐風安定性を増すための質量付加と活荷重に対する主桁作用に配慮がなされている。

参考文献

- 1) 前田：複合構造に関する研究の発展の歴史と動向，土木学会論文集，'84.4
- 2) 土木学会関西支部：複合斜張橋の設計法，'87.11
- 3) 若下：複合斜張橋，橋梁と基礎，'85.8
- 4) 海洋架橋調査会：生口橋主桁複合構造に関する調査研究報告書，'86.3
- 5) 多田，山岸：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，'89.9
- 6) 田島，成井，鈴木：P C 斜張橋の設計法，橋梁，'81.12
- 7) 山岸，森田，梶川：生口橋 P C 桁部の設計，プレストレスコンクリート技術協会第29回研究発表会，'89.11
- 8) 赤尾，栗田，加藤，松川，中西：大和橋の設計と施工，橋梁と基礎，'75.8
- 9) 志村，前田，橘，笹川：プレキャスト床版を用いた合成桁斜張橋について，土木学会第44回年次学術講演会，'89.10
- 10) P.R. Taylor : Annacis Cable Stayed Bridge, Canadian Structural Engineering Conference, '86
- 11) 成瀬：スペインの大型斜張橋，橋梁と基礎，'77.11