

2. 複合ラーメン橋の設計・施工

2-1. 複合ラーメン橋の概要

本資料における「複合ラーメン橋」とは、鋼上部構造と RC 下部構造（RC 橋脚もしくは橋台）を剛結した複合構造の橋梁である（写真 2-1-1・2-1-2，図 2-1-1）。



写真 2-1-1 複合ラーメン橋（全景写真）

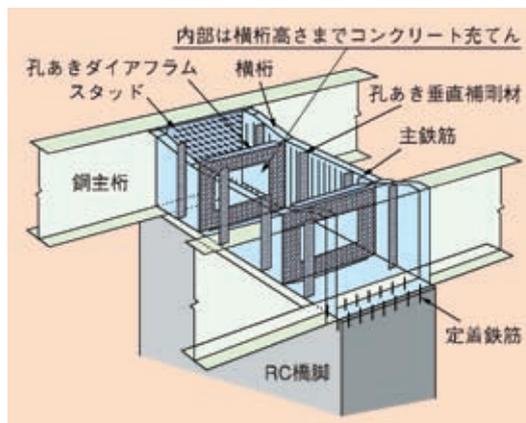


図 2-1-1 剛結構造概念図

複合ラーメン橋を採用することにより、支承を有する従来構造の橋に比べて以下の利点を有する。

- ①剛結支点部において支承を省略できるため、将来におけるメンテナンスの軽減が図れること。
- ②上・下部構造が一体となって地震力に抵抗するため、耐震性の向上が図れること。
- ③鈹桁橋の様な開断面構造であっても上部構造のねじり剛性が向上するため、長支間化が図れること。
- ④主桁たわみの抑制や騒音・振動の低減が図れること。

なお、最近では高速道路等の少数鈹桁橋においてある程度、標準的な形式が採用されつつあるものの、剛結部の設計手法・構造細目や架設方法等について必ずしも十分に確立されているとは言えず、計画橋梁毎に解析や実験による各種検証が行われているのが現状である。



写真 2-1-2 剛結部構造

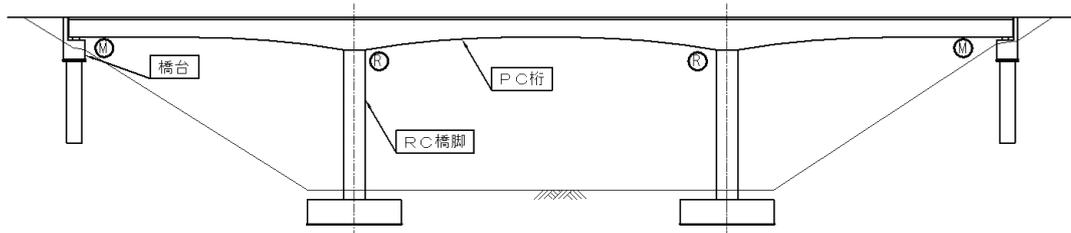
2-2. 複合ラーメン橋の特徴

2-2-1. 複合ラーメン橋の適用が有利となる事例

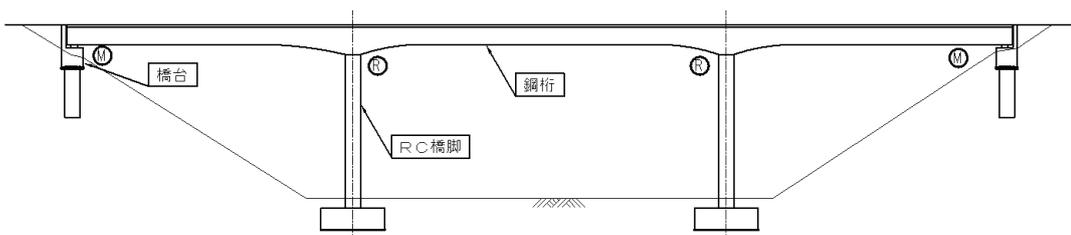
従来構造の橋と複合ラーメン橋の比較例を図 2-2-1～図 2-2-4 に示す。

図 2-2-1 は、山岳部等において比較的橋脚高が大きい場合の例である。当該条件においては、従来、移動作業車(ワーゲン)による張出し架設を用いた PC ラーメン箱桁橋が多く採用されてきた。この上部構造を鋼少数桁橋等の構造に置き換えることで、上部構造死荷重の軽量化を図り、下部工及び基礎工への負担を軽減するものである。実例としては、今別府川橋等が挙げられる。

◆PC ラーメン箱桁橋 (張出し架設)



◆複合ラーメン橋 (張出し架設)

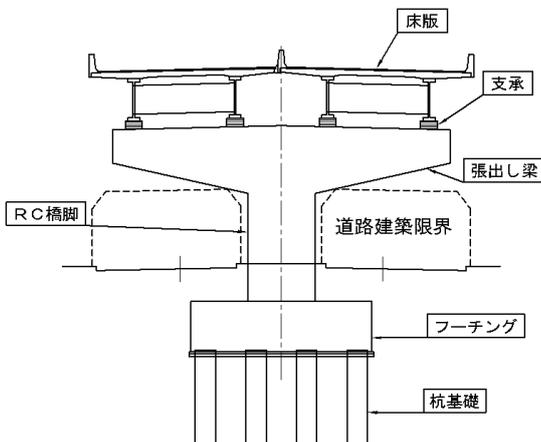


上部構造軽量化による下部構造の負担軽減

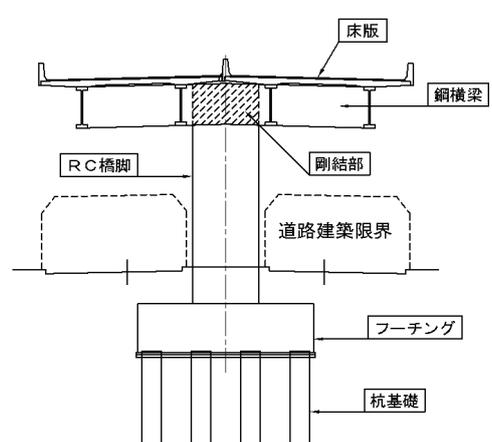
図 2-2-1 山岳部の橋梁における事例

図 2-2-2 は、都市部等の連続高架橋における例である。従来構造の橋では、支承を介して主桁を支持する橋脚の張出し梁が設置される。これに対し、複合ラーメン橋では、上部構造(支点上の鋼製横梁)と RC 橋脚柱を直接剛結することによって橋脚の張出し梁が省略され、高架下クリアランスに制約を受ける場合に有利となる。実例としては、東京外環自動車道の三郷東高架橋、谷口高架橋等が挙げられる。

◆支承を有する連続桁橋



◆横梁で剛結された複合ラーメン橋



桁下クリアランス確保

図 2-2-2 都市部の連続高架橋における事例

図 2-2-3 は、比較的軟弱な地盤上に設置される連続桁橋の例である。橋梁基礎周辺の地盤が軟らかい場所では、積層ゴム支承を用いて橋を長周期化すると、地盤と橋の共振を引き起こす可能性がある。また、橋梁基礎の周辺地盤が地震時に不安定となる場所では、基礎～地盤系に変形が集中し、免震支承が有効に機能しないことが考えられる。このように積層ゴム支承の適用が困難な条件下において、複合ラーメン橋は、有効な代替案の一つであるといえる。連続高架形式の複合ラーメン橋の実例としては、首都圏連絡中央自動車道の阿見高架橋、牛久高架橋等が挙げられる。

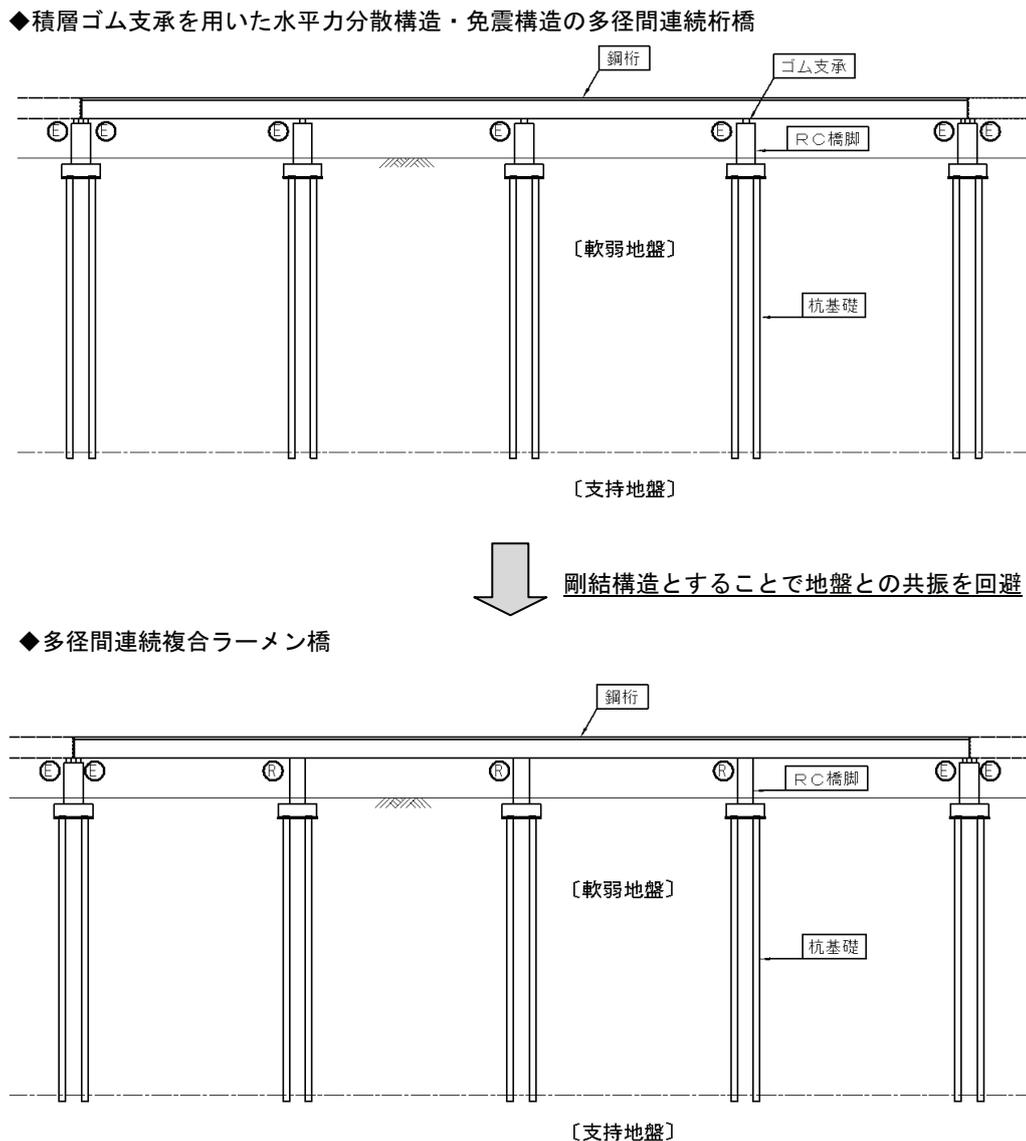


図 2-2-3 軟弱地盤に設けられる橋梁の事例

図 2-2-4 は、両端に橋台を有する中小支間の単径間橋梁の例である。鋼上部構造と両端橋台を剛結することにより、従来の単純桁橋において必要であった支承、伸縮装置、落橋防止構造を省略することができ、メンテナンスの軽減、耐震性の向上等が期待できる。単径間ポータルラーメン橋(インテグラルアバット)の実例としては、小銚岸川橋や色太第三橋等が挙げられる。また、連続桁橋において端支点の橋台部を剛結構造とした実例として観音沢川橋や上倉橋等が挙げられる。

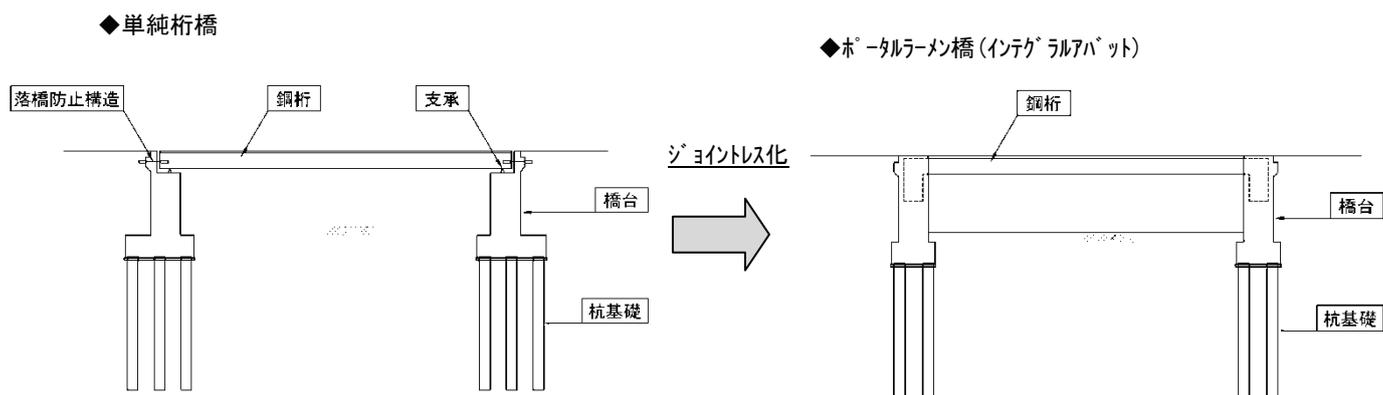


図 2-2-4 中小支間の単径間橋梁における事例

2-2-2. 複合ラーメン橋の適用が不利となる事例

前項 2-2-1 では、複合ラーメン橋が有利となる事例を挙げたが、一方で、以下に示す事例のとおり剛結構造の適用が構造上困難であったり、経済効果を期待できないケースも考えられるため、採用にあたっては十分な検討が必要である。

複合ラーメン橋の適用が不利となるものと考えられる事例を以下に示す。

①上部構造の支間長に対して橋脚高さが低く、かつ堅固な地盤に支持されている比較的剛な下部構造を有する橋梁において剛結構造を採用した場合、上部構造の温度変化の影響や地震時水平力によって、下部構造に卓越した断面力が発生することがある。

このような条件下の橋梁では、積層ゴム支承や免震支承等を用いて上部構造を軟らかく支持し、上部構造から下部構造に伝達される断面力を低減させることが考えられる。

なお、耐震設計の観点からできるだけ多径間連続桁構造とするのが望ましい。しかし、連続径間長が増大すれば、温度伸縮量や温度拘束力も大きくなり、上・下部構造部材への負荷が増えることから、構造上不合理とならないよう適切な径間位置で上部構造を分割し、桁端部には伸縮装置を設置する。

②地盤の圧密沈下等のために長期にわたり不等沈下の可能性がある橋梁において剛結構造を用いた場合、支点移動の影響によって大きな断面力が発生することがある。また、剛結構造では、上下部構造に損傷が生じた場合の補修措置も困難であることが予想される。

このような条件下の橋梁では、支点移動に対する補修措置（支承部のジャッキアップ等）が可能である支承を有する構造形式を選択することが考えられる。

また、鋼上部構造と RC 橋脚の剛結部では、主桁、横桁、ダイヤフラムと橋脚躯体の軸方向鉄筋が交錯することから、相互の鋼材が干渉しないこと及び、コンクリート充填作業を配慮して各部材の配置計画を行うことが重要である。

2-3. 鋼鈑桁と RC 橋脚の剛結構造の変遷

2-3-1. 概要

複合ラーメン橋の剛結部の設計は、各研究機関等により研究が進められ、NEXCO 各社（旧日本道路公団）の設計要領第二集等において設計方法が示されている状況にある。

鋼鈑桁と橋脚の剛結構造は、「阿古耶橋」に採用された PC 鋼材を用いて剛結を図る PC 定着形式に始まり、「伊予高架橋」、「岡豊橋」、「観音沢川橋」等に採用されたスタッドジベルを用いた鉄筋定着形式（RC 連結形式）を経て、「今別府川橋」、「虻木橋」、「鯉川高架橋」等の少数鈑桁で実積が増えつつある孔あき鋼板ジベル（PBL：Perfobond Leisten）を用いた鉄筋定着形式（RC 連結形式）が主流となっている。また、その他に SRC 構造を用いた「新神宮橋」等の事例がある。

2-3-2. PC 鋼材を用いた定着形式

本形式は、PC 鋼材を用いてプレストレスを導入することにより、鋼桁と橋脚が剛結されている構造である。特徴としては、橋脚剛結部において箱状の横桁を有し、横桁内に充填されたコンクリートに PC 鋼材が定着されている点にある。鋼桁と橋脚天端の間には、無収縮モルタルが打設され、接触面に開口が生じないように配慮がされている。

曲げモーメントによる引張力は、横桁ウェブのスタッドジベルから PC 鋼棒へ伝達され、橋脚コンクリートへ伝わる。一方、圧縮力と軸力は、主桁と横桁の下フランジ支圧により橋脚コンクリートへ伝わる。また、せん断力は、主桁と横桁ウェブのスタッドジベルにより橋脚コンクリートに伝達される構造である。

本形式は、構造の信頼性が高いものの、施工手順が複雑となることやコストが比較的高価となったことから、実橋に採用された例が少ない構造である。

2-3-3. スタッドジベルを用いた鉄筋定着形式

前述の PC 鋼材を用いた定着形式の施工面、コスト面に関する問題点を解決するために提案された定着形式である。本形式の特徴としては、主鉄筋を延長した RC 橋脚を主桁の上フランジ付近まで施工し、主桁と横桁に設置したスタッドジベルによりコンクリート橋脚と定着させ、剛結構造としている点にある。

曲げモーメントによる引張力は、横桁ウェブのスタッドジベルから橋脚主鉄筋へ伝わる。圧縮力と軸力は、主桁と横桁の下フランジのスタッドジベルにより橋脚コンクリートへ伝わる。また、せん断力は、主桁と横桁下フランジのスタッドジベルにより、橋脚へ伝達される構造である。

本形式は、従来の多主鈑桁および箱桁の剛結構造に比較的多く採用されている。しかし、主桁に配置されたスタッドジベルと橋脚主鉄筋の干渉により、若干施工性に劣る場合がある。

2-3-4. PBL を用いた鉄筋定着形式

孔あき鋼板ジベルは、鋼板にあけた円孔部内のコンクリートのせん断抵抗を耐荷力機構とする定着形式である。従来より鋼とコンクリートの力の伝達に多く用いられているスタッドジベルに比べ、施工性（下部工主鉄筋との干渉防止等）に優れ、疲労強度が高い特徴がある。また、本形式は、近年採用が増えている少数鈑桁に多く採用されている。応力の伝達機構は、前述のスタッドジベルを用いた構造と同様である。

表 2-3-1 に鈑桁橋における剛結構造の種類を示す。

また、本資料は、鈑桁橋を中心に記述しているが、参考として表 2-3-2 に箱桁橋における剛結構造の種類を示す。

表 2-3-1 鈑桁橋における剛結構造の種類

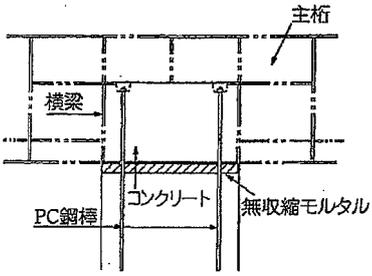
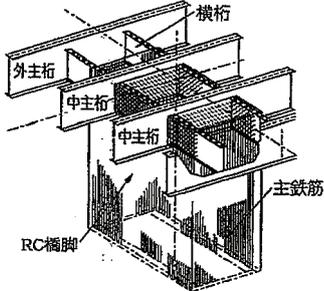
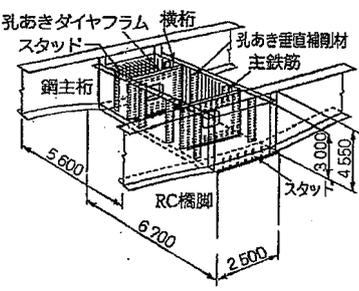
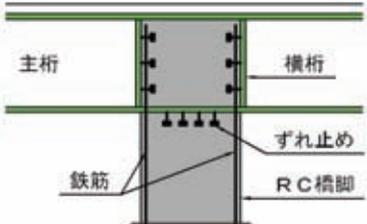
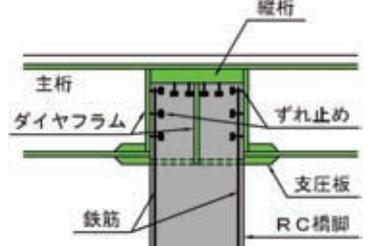
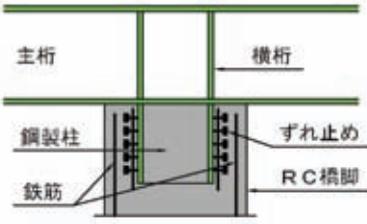
連結形式	剛結部構造	応力伝達機構
PC 鋼材を用いた剛結 (1991 年)		<p>鋼材の中間支点部に箱桁状の鋼製横桁を設け、この横桁内にコンクリートを充填し、PC 鋼材で RC 橋脚と充填コンクリートを緊結することで剛結する。</p> <p>実例) 阿古耶橋</p>
スタッドジベルを用いた剛結 (1995 年以降)		<p>RC 橋脚の柱部を主桁フランジ付近まで延長し、主桁及び鋼箱断面の横桁を RC 橋脚内に埋め込み、この部分の鋼部材に溶植したスタッドジベルにより剛結する。</p> <p>実例) 伊予高架橋，岡豊橋，観音沢川橋</p>
孔あき鋼板ジベルを用いた剛結 (2002 年以降)		<p>RC 橋脚を鋼主桁ウェブと横桁で囲む構造とし、横桁間に孔あきダイヤフラムと孔あき垂直補剛材を配置し、孔あき鋼板ジベルによって RC 橋脚と剛結する。</p> <p>実例) 今別府川橋，虻木橋，鯉川高架橋</p>

表 2-3-2 箱桁橋における剛結構造の種類

連結形式	剛結部構造	応力伝達機構
鉄筋定着形式		<p>コンクリート橋脚の鉄筋をそのまま鋼桁内部まで貫通させ、鋼桁内にコンクリートを充填し、鉄筋を定着させて剛結する。</p> <p>実例) 横浜青葉 I C Dランプ橋</p>
R C 連結 下フランジ支圧板形式		<p>コンクリート橋脚をそのまま鋼桁内部まで貫通させ、鋼桁内部をコンクリートで充填し、ずれ止め(スタッドジベルまたはPBL等)により剛結する。</p> <p>実例) 北千曲川橋(1期施工)</p>
鋼製柱形式		<p>鋼箱桁隅角部内部にコンクリートを充填し、鋼桁より下方に延ばした鋼製柱をRC橋脚内に埋め込み、鋼製柱外面に溶植したずれ止め(スタッドジベルまたはPBL等)により剛結する。</p> <p>実例) 川之江東 J C T Cランプ橋</p>

2-4. 剛結部の設計

2-4-1. 設計概要

複合ラーメン橋の剛結部は、鋼主桁、横桁及び横桁間に設置したダイヤフラムにより RC 橋脚を拘束し、応力を伝達する構造である。

複合ラーメン橋の設計は、支承を有する連続桁形式の橋と同様に骨組み構造解析により断面力を算出し、各部材に作用する断面力に対して安全性を照査する。橋梁全体の設計手順を図 2-4-1 に示す。

なお、本資料は、幅員 10m 程度の鋼桁形式と RC 橋脚との剛結構造形式を対象とする。

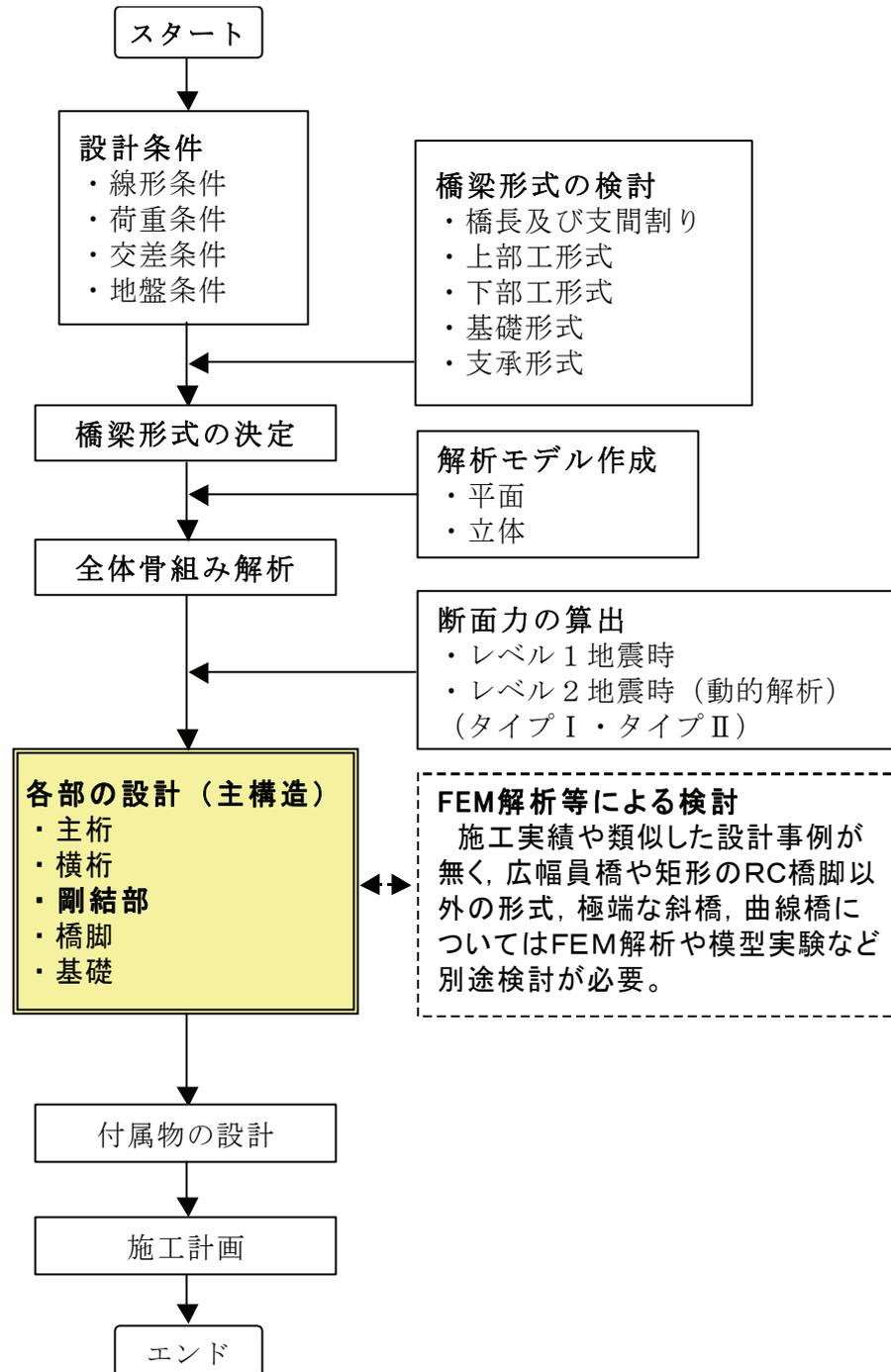


図 2-4-1 橋梁設計順序フロー

2-4-2. 剛結部の設計

(1) 設計に関する基本方針

複合ラーメン橋の耐震設計にあたっては、橋全体として十分な耐震性能を有することとする。

橋の耐震性能は、道路橋示方書・同解説（以下、道示という）に準拠し、橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動に対して健全性を損なうことなく、また、供用期間中に発生する確率は低い大きな強度をもつ地震動に対して限定された損傷に留めることとする。

また、複合ラーメン橋の設計は、一般に以下の項目を満たす設計が行われている。

- ・鋼上部工は、部材に発生する応力度が降伏点に達することのないようにする。
- ・RC 橋脚の柱上下端付近における塑性化は、橋としての機能回復性や車両走行性が確保される範囲内で許容するものとする。
- ・剛結部は、断面力を鋼上部工から RC 橋脚に伝達させる重要な部材であり、挙動が明確となっていない点もあるため、塑性化させないことを原則とする。

一般には、各荷重検討ケース（常時、L1・L2 地震時等）に応じた許容応力度の割増し係数（道示 II 3.1）を用いて設計が行われている。

(2) 設計に用いる断面力

構造解析は、支間割や橋脚高さ、地盤バネ等により断面力が大きく異なることから、上部工、下部工、基礎工を考慮した立体骨組み解析により行うのがよい。

構造解析上の剛結部は、図 2-4-2、図 2-4-3 のように下フランジ面より上を剛域とする。また、RC 橋脚の剛度はコンクリート全断面を有効としたものとし、コンクリートの圧縮強度によりヤング係数比は異なるが、断面力に与える影響は小さいことから、一定値（ $n=7$ ）が用いられている。

剛結部の設計に用いる断面力は、全体骨組み解析により求められた各部の値を用いる。

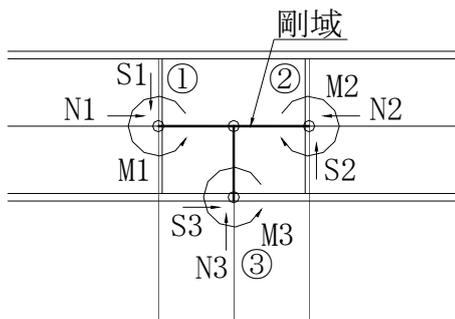


図 2-4-2 主桁の設計に用いる断面力

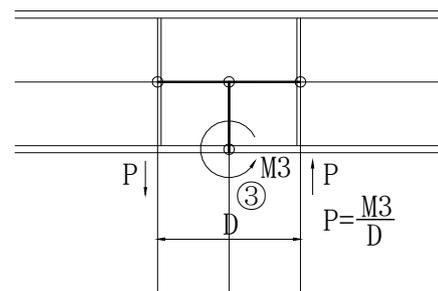


図 2-4-3 横桁に作用する断面力

(3) 各部材の設計

1) 主桁の設計

① 主桁の設計は、剛結部境界面（鋼桁仕口部及び RC 橋脚仕口部）に作用する断面力を用いて行う。異種部材の剛結部は接合方法により断面力の伝達機構が異なり、伝達機構が明確に解明されていないことから安全側の設計を行うことを基本とする。したがって、剛結部はコンクリートが充填されており合成効果が望めるが、鋼部材、コンクリート部材それぞれの単独断面として設計を行う。

② 剛結部の応力度は許容値以下とし、終局時の断面力も耐力以下とする。また、RC 橋脚仕口部の曲げモーメントによる付加せん断力も適切に考慮する。RC 橋脚仕口部の曲げモーメントによる付加せん断力について、以下の照査を行う。

$$\sigma \leq \sigma_a \quad \dots \dots \dots \quad \text{(式 2-4-1)}$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \leq \tau_a \quad \dots \dots \dots \quad \text{(式 2-4-2)}$$

ここに、

σ : N1, M1 及び N2, M2 によって作用する鋼主桁の垂直応力度

σ_a : 許容引張、曲げ圧縮応力度

τ_1 : S1 及び S2 によって作用する鋼主桁のせん断応力度 (=S1/Aw, S2/Aw)

τ_2 : M3 によって作用する付加せん断応力度 (=Q/Aw)

τ_a : 許容せん断応力度

Aw : 主桁ウェブの断面積

③ 剛結部における合成応力度の許容安全率は、コンクリートが充填されていることから道示に準拠して 1.2 とし、また、鋼材の局部座屈については考慮しない。

$$(\sigma / \sigma_a)^2 + (\tau / \tau_a)^2 \leq 1.2 \quad \dots \dots \dots \quad \text{(式 2-4-3)}$$

ここに、

σ : 曲げモーメントによる垂直応力度 (N/mm²)

τ : 曲げに伴うせん断応力度 (N/mm²)

σ_a : 許容引張応力度 (N/mm²)

τ_a : 許容せん断応力度 (N/mm²)

④ 剛結部材内にコンクリートを充填した場合のせん断遅れ現象は、FEM解析や実験等により特に問題ない大きさであることが解っている。ただし、実績のない剛結部構造を採用する場合は、せん断遅れの影響を適切な方法で検証し、影響の有無を確認して設計を行うものとする。

⑤ 実験によりスタッドジベルに生じる、乾燥収縮・クリープの応力値が少ないことが確認されており、設計計算に考慮しないこととしている。

2) 横桁の設計

- ① 横桁の剛結部の荷重伝達に寄与する割合や、力の流れが明確ではない部分が多いため、安全側に配慮した設計を行うことが望ましい。また、剛結部の横桁は、鋼-コンクリート間の荷重伝達を行うだけでなく、終局荷重時には RC 橋脚の帯鉄筋として、横桁間のダイヤフラムは中間帯鉄筋の役割を果たし、剛結部コンクリートの塑性化を防ぐものであることから、十分な剛性を必要とする。

横桁下フランジの配置は、剛結部の施工性を考慮し、剛結部の外側に配置するのが望ましい。下フランジを剛結部の内側に配置した場合には、下部工施行時の配筋精度に配慮し、貫通孔の大きさや配置にも配慮する必要がある。また、横桁面外の剛度（特に下フランジ近傍）を高める、剛結部内のコンクリートが圧壊し、外に膨らむのを抑える効果があることから、横桁下フランジは主桁ウェブに接合するのがよい。

横桁部の断面力算出時の支点条件として、設計計算値（主桁間隔を支間とした固定梁）、模型実験、FEM解析による比較が行われている。その結果、弾性範囲内では、設計計算値に対して実験から得られた発生応力度の方が小さく、降伏時では設計計算値、実験値及びFEM解析値はほぼ一致することが確認されている。

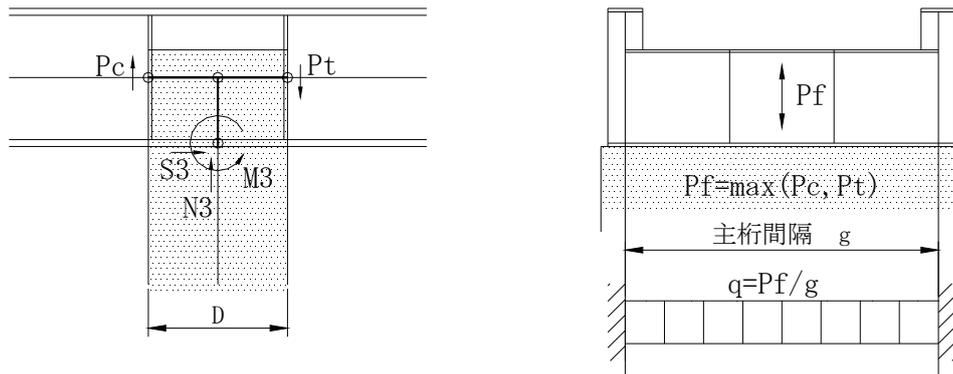


図 2-4-4 横桁への作用力

$$q = Pf/g \quad \dots \dots \dots \quad \text{(式 2-4-4)}$$

ここに、横桁の設計断面力 Pf

$$Pf = \max (Pc, Pt)$$

圧縮側の横桁に作用する断面力 Pc

$$Pc = (N3/2 + M3/D) / 2$$

引張側の横桁に作用する断面力 Pt

$$Pt = N3/2 - M3/D$$

- ② 横桁は、主桁ウェブと同様に、剛結部コンクリート打設時における側圧に対して照査しなければならない。コンクリート打設に対して作用する応力は小さいが、鋼製型枠として形状保持できるよう照査を行うこととする。

3) 橋脚の設計

- ① 剛結部近傍の橋脚の設計は、剛結仕口部に作用する断面力を用い、RC断面としての平面保持に基づいた断面計算により行う。また、曲げモーメントに対しては鉄筋で抵抗し、鉄筋の曲げ引張応力度にて照査し、コンクリートの支圧はコンクリートの圧縮応力度にて照査を行う。
- ② 橋脚の軸方向鉄筋は剛結部に十分な定着長をとり、確実に一体化させることを原則とする。道示に準じて、下式の定着長を確保する。

$$Lo1 = (\sigma_{sa} / 4 \tau_c) \cdot \phi \quad \dots \dots \dots \quad \text{(式 2-4-5)}$$

ここに、 σ_{sa} : 鉄筋の引張応力度 (N/mm²)

τ_c : コンクリートの許容付着応力度 (N/mm²)

ϕ : 鉄筋の直径

上記 $Lo1$ が確保できない場合には、鉄筋フックを設けることにより、 $Lo1$ の 2/3 以上としてもよい。(道示Ⅲ4.4.4) ただし、やむを得ず、桁高内に定着長を確保できない場合には、許容引張応力度に変えて、鉄筋の降伏応力度を用いた定着長としてもよい。

鋼2主鈹桁の剛結部構造は、RC橋脚を主桁・横桁で囲む構造としていることから、剛結部内では、基本的に帯鉄筋は不要として良い。また、横桁間に設けたダイヤフラムは、中間帯鉄筋の役割を果たしており、終局時においても十分な拘束効果を発揮すると考え、施工性を損なう剛結部内の帯鉄筋や中間拘束筋配置は行わなくても良い。

RC断面の初期降伏時や終局時に、主桁直下の応力集中部においては、必要に応じて支圧に対する補強筋の配置を検討するのがよい。また、防錆上の配慮から、主桁近傍の天端位置にひび割れ防止筋を配置するのがよい。

4) ずれ止めの種類・設計

- ① 剛結部内のずれ止めは、鋼-コンクリート間の付着や各々の力の伝達を適切に行うものでなければならない。鋼-コンクリート間の接合材としてその種類や配置を考えることが基本であり、孔あき鋼板ジベルまたはスタッドジベルを標準とする。また、下部工の施工精度に与える影響や、剛結部における配筋の合理化なども考慮することが必要である。設計の仮定において力の伝達を期待しないが、鋼とコンクリート間の付着を確保するために、必要に応じてずれ止めや溶接鉄筋を配置する場合がある。このようなずれ止めを配置することにより、剛結部の余剰耐力を高める効果も期待できる。しかし、この種のずれ止めは、鉄筋との取合いなどに配慮して、種類や配置を適切に決めることが必要である。
- ② 同一方向の力に抵抗させるずれ止めは、一種類とするのがよい。スタッドジベルと孔あき鋼板の特徴を表 2-4-1 に示す。力学的な違いは、スタッドジベルは柔なジベルであることに対して、孔あき鋼板は剛なジベルであり、剛性の異なる部材を一部材に配置した場合、鋼-コンクリート間の伝達力や最大耐力の予測が非常に困難となる。したがって、異種のずれ止めをやむを得ず混在させる場合には、各々の許容せん断力を足し合わせて算出してはならない。

表 2-4-1 スタッドと孔あき鋼板の比較

	スタッド	孔あき鋼板
破壊機構	スタッドの引張破断，またはスタッド周辺コンクリートの圧壊のいずれかで，破壊に至る。	孔内コンクリートのせん断破壊（せん断破壊で強度が決定されるように，鋼板厚，横方向鉄筋量を制限）
ずれ剛性	柔なジベル（約 200kN/mm）	剛なジベル（約 2000kN/mm）
ダクティリティ	スタッドの破断により決定され，約 15mm 程度の変形能は期待できる（○）	孔内コンクリートのせん断破壊面がコンクリートと接している限り（摩擦力）高いダクティリティを有する（○）
疲労強度	ビード形状が均一でないため，応力集中発生箇所となりやすく，疲労強度はやや劣る（△）	連続したすみ肉溶接部の疲労強度に依存するため，比較的疲労強度は高い（○）
工場製作性	特に問題なし。ただし，下向き溶接が必須条件（○）	補剛材と同様な製作方法であり，特に問題なし。ただし，NC加工の場合，最大板厚は 22mm 程度（○）
現場施工性	すべてのスタッドの間に主鉄筋が配置される場合，施工性に劣る。剛結部内帯鉄筋の配置は困難（△）	主鉄筋間に配置する孔あき鋼板は数カ所のみであることから，スタッドに比べてルーズとなる（○）

- ③ 剛結部のずれ止めの設計に用いる作用力は，各部材ごとに設定するものとする。
- ④ 一つの部材に配置された複数のずれ止めに発生するせん断力は，均等に分配されるものとしてよい。
- ⑤ 一つのずれ止めに作用するせん断力は，一つのずれ止めの許容せん断耐力以下でなければならない。一つの部材に配置された複数のずれ止めに作用するせん断力から，下記式より必要本数を算出してよい。

$$P \leq N_{req} \times Q_a \dots\dots\dots (式 2-4-6)$$

ここに， P：一部材が伝達するせん断力

Q_a：ずれ止めの許容せん断力

a. 孔あき鋼板ジベルの許容せん断力

下式は，孔径 70mm 程度の孔あき鋼板で，鋼板面に垂直方向の鉄筋（横方向拘束筋）を配置せず，かつ，コンクリートの打設方向を考慮した要素試験結果から導いたものであり，既往の研究結果からその安全性が確認されている。

$$Q_d = 0.3 \cdot d^2 \cdot \sigma_{ck} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式 2-4-7})$$

ここに、 σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度

d : 孔径

また、上式で示した許容せん断耐力 Q_d を得るための条件として、次式を満足するものとする。

鋼板のせん断破壊の照査

$$A_s \geq 0.63 \cdot d^2 \cdot \sigma_{ck} / \sigma_y \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式 2-4-8})$$

孔内コンクリートの支圧破壊の照査

$$d / t \leq 8.0 \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式 2-4-9})$$

ここに、 A_s : 孔間の鋼板断面積 ($= (d \cdot e) \cdot t$)

σ_y : 鋼板の降伏点

t : 鋼板厚

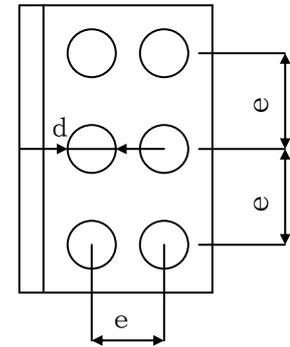


図 2-4-5 孔あき鋼板

b. スタッドジベルの許容せん断力

道示Ⅱ11.5.5 に従い、スタッドの許容せん断力、必要本数、ずれ止め間隔を決定することとする。

$$Q_a = 9.4 d^2 \sqrt{\sigma_{ck}} \quad (H/d \geq 5.5) \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式 2-4-10})$$

$$Q_a = 1.72 d^2 \sqrt{\sigma_{ck}} \quad (H/d < 5.5) \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式 2-4-11})$$

ここに、 Q_a : スタッドの許容せん断力 (N/本)

d : スタッドの軸径 (mm)

H : スタッドの全高 (mm)

σ_{ck} : 設計基準強度 (N/mm²)

2-4-3. 剛結部の応力伝達機構と設計方法の概要

剛結構造の構造形式の差異により応力の伝達方法が異なることから、鋼板桁及び箱桁形式と RC 橋脚との剛結構造の構造形式例と応力の伝達方法について、表 2-4-2、表 2-4-3 に示す。

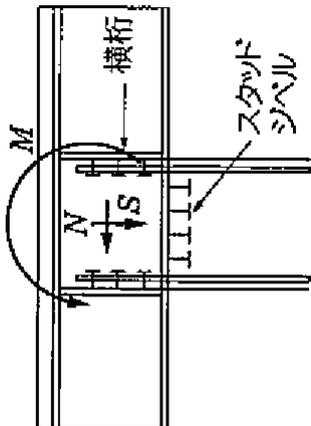
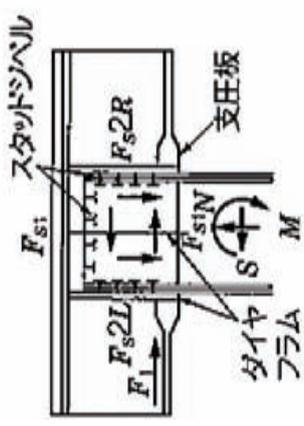
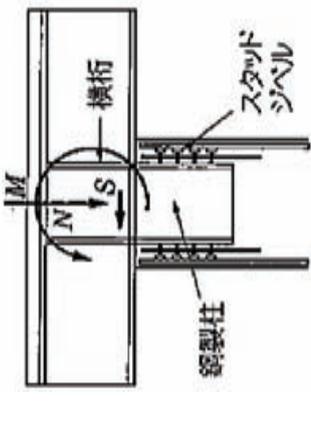
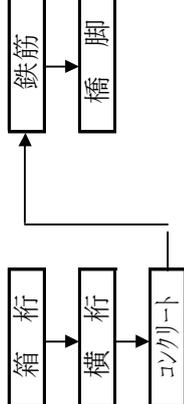
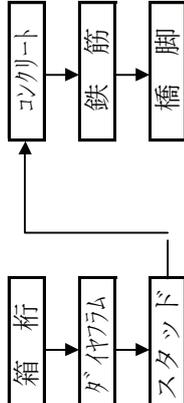
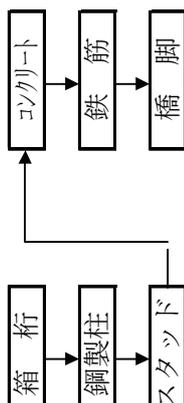
剛結部の定着方式は、桁形式についてはスタッドジベル及び孔あき鋼板ジベルについて、箱桁形式についてはスタッド形式について示す。

表 2-4-2 鋼鈹桁の剛結部の応力伝達機構

連結形式	P C 定着形式	鉄筋定着形式
伝達機構図		
伝達部材	P C 鋼棒	横 桁
伝達機構	<pre> graph TD A[鋼鈹桁] --> B[横 桁] B --> C[スタッド] C --> D[コンクリート] D --> E[PC鋼棒] E --> F[橋 脚] </pre>	<pre> graph TD A[鋼鈹桁] --> B[横 桁] B --> C[スタッド] C --> D[コンクリート] D --> E[鉄 筋] E --> F[橋 脚] </pre>
曲げモーメント (M)	①引張力 横桁腹板のスタッドから接合部コンクリートへ定着されたP C 鋼棒へ伝達 ②圧縮力 P C 鋼棒の緊張力による主桁と横桁の下フランジからの支圧力とした橋脚コンクリートへ伝達	①引張力 横桁に配置されたスタッドから剛結部コンクリートへ定着された主鉄筋へ伝達 ②圧縮力 主桁下フランジ、主桁及び横桁のスタッドから橋脚コンクリートへ伝達
軸力 (N)	曲げモーメント圧縮力と同様	主桁下フランジ、主桁及び横桁のスタッドから橋脚コンクリートに伝達
せん断力 (S)	主桁及び横桁腹板のスタッドから橋脚コンクリートへ伝達	主桁、横桁などのスタッドから橋脚橋脚コンクリートへ伝達

	軸力 (N)	曲げモーメント (M)	せん断力 (S)
伝達機構図			
伝達経路	経路 1 橋脚 → 下フランジ → 鋼桁	経路 2 橋脚 → コンクリート → 孔あきダイヤフラム → 横桁 → 主桁	引張力 橋脚 → 主鉄筋 → コンクリート → 孔あきダイヤフラム → 横桁 → 主桁
		圧縮力	橋脚 → 孔あきダイヤフラム → 横桁 → 主桁

表 2-4-3 鋼箱桁の剛結部の応力伝達機構

連結形式	鉄筋定着形式	下フランジ支圧形式	鋼製柱形式
伝達機構図			
伝達部材	横桁	主桁+ダイヤフラム	橋脚柱頭部
伝達機構			
曲げモーメント (M)	<p>①引張力 横桁から横桁内コンクリートに定着されたコンクリートに定着された主鉄筋へ伝達</p> <p>②圧縮力 主桁下フランジから橋脚コンクリートに支圧として伝達</p>	<p>①引張力 ダイヤフラム、横桁に設置されたスタッドから充填コンクリートに定着された主鉄筋へ伝達</p> <p>②圧縮力 主桁下フランジの支圧板から橋脚コンクリートに支圧として伝達</p>	<p>①引張力 鋼製柱部のスタッドから接合部コンクリートに定着された接合部コンクリートに主鉄筋へ伝達</p> <p>②圧縮力 鋼製柱部のスタッドからコンクリートへせん断力として伝達</p>
軸力 (N)	横桁下フランジから、直接コンクリートへ圧縮力として伝達	鋼製隔壁内のダイヤフラムのスタッドから橋脚コンクリートにせん断力として伝達	鋼製柱部のスタッドからコンクリートへせん断力として伝達
せん断力 (S)	下フランジ下面に設置されたスタッドから橋脚コンクリートにせん断力として伝達	支圧板及び縦桁のスタッドから橋脚コンクリートに伝達	鋼製柱部のスタッドからコンクリートへせん断力として伝達

2-5. 構造ディテールに配慮する事項

2-5-1. 剛結部の構造細目

複合ラーメン橋の剛結部の構造細目は、現地状況や計画橋梁毎の構造特性を踏まえ、施工性や維持管理性を配慮して設定する必要がある。ここでは、施工性、維持管理性を配慮した構造細目の例を挙げる。

- (1) 箱桁断面主桁等で剛結部が密閉される構造を用いた場合には、コンクリート打設孔・空気孔が設置される。その場合、断面欠損を考慮した設計となるので注意が必要である。

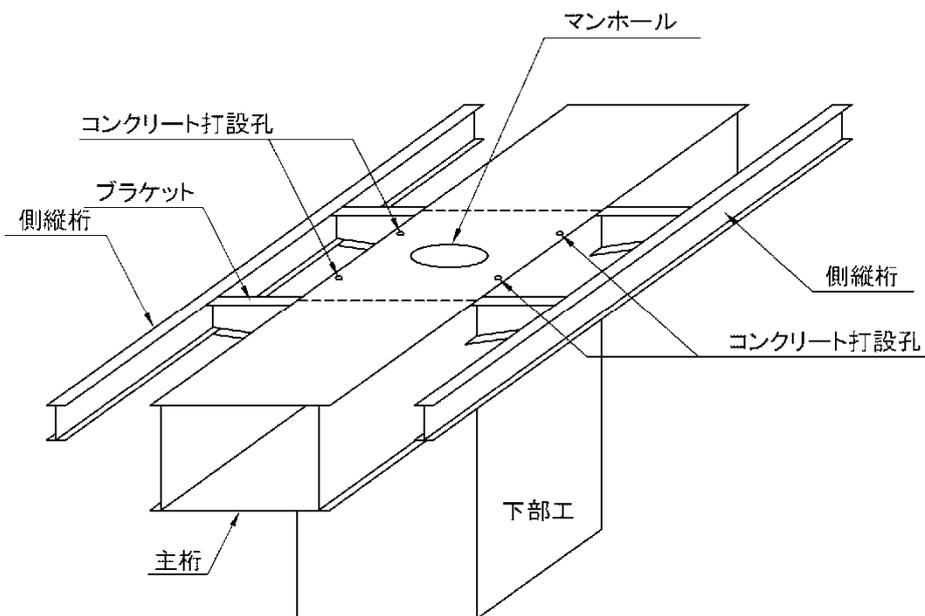


図 2-5-1 剛結部マンホールとコンクリート打設孔例

- (2) 鉄筋貫通孔の大きさは、剛結部に配置される鉄筋径に 20mm 程度余裕を見込んだ径を目安としている。また、鉄筋貫通孔を設置する場合には、打設孔・空気孔と同様に断面欠損を考慮した設計を行う必要がある。

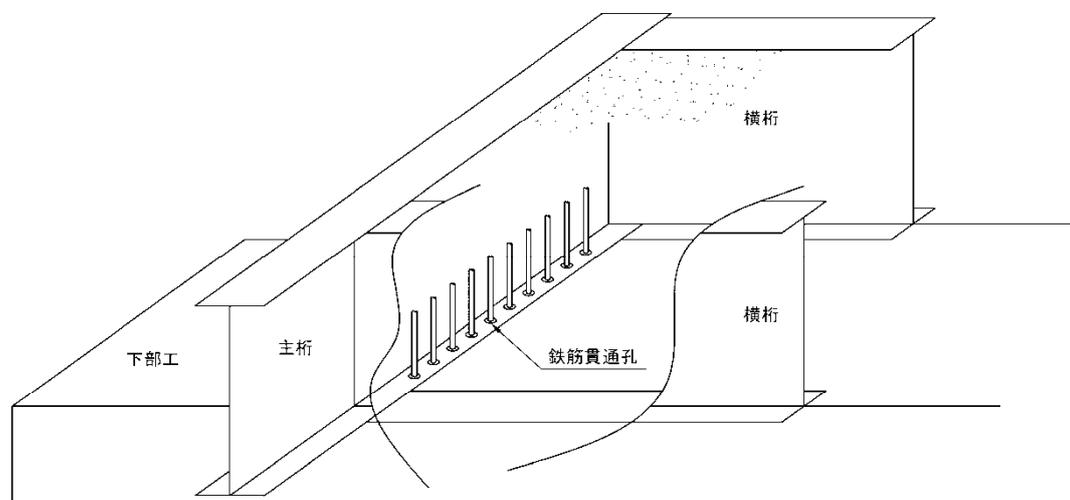


図 2-5-2 鉄筋貫通孔例

(3) 検査路等の設置例

検査路は剛結部で寸断されることなく、連続性が確保できる通路等を確保することが望まれる。

図 2-5-3 は、剛結部内に検査通路を確保している構造事例である。図 2-5-4 は、横桁高さを断面変化させることで、検査通路や床版移動型枠の施工性を確保した事例である。

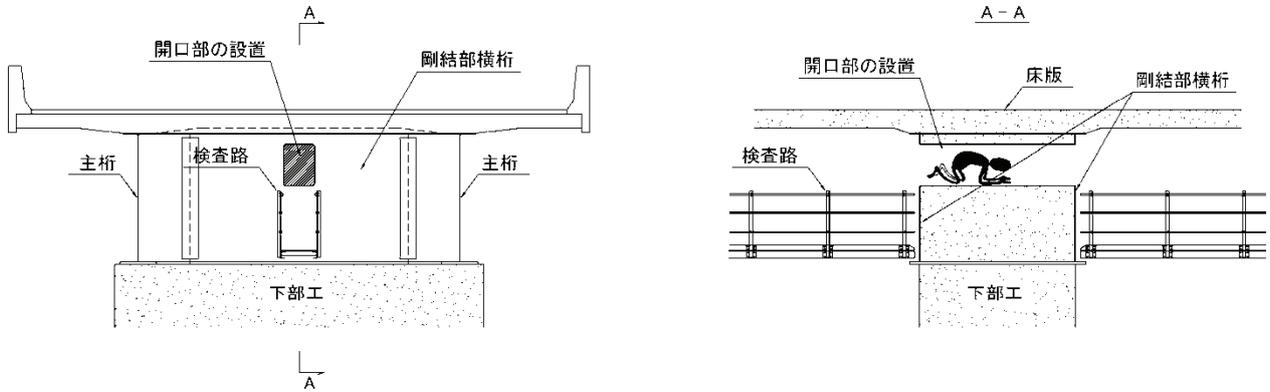


図 2-5-3 検査路事例（剛結部内に検査路を確保した事例）

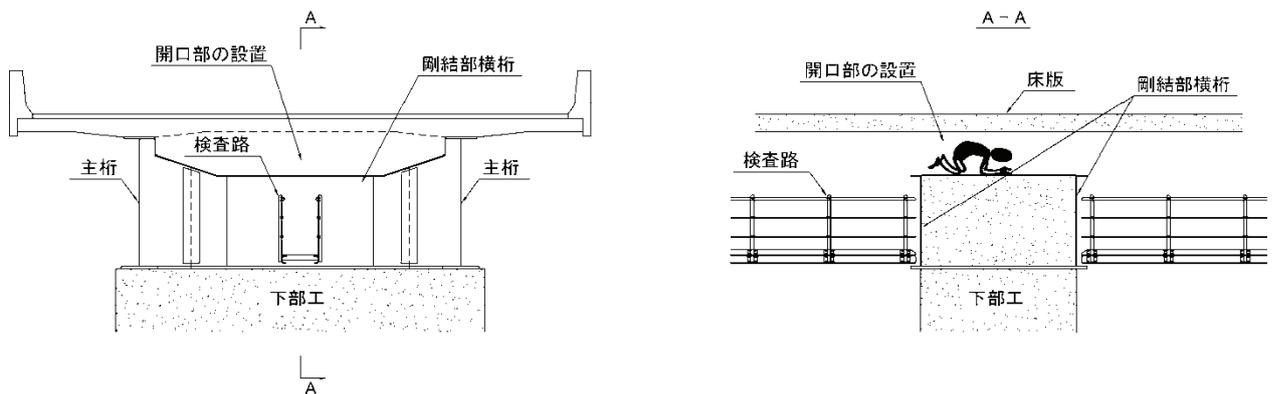
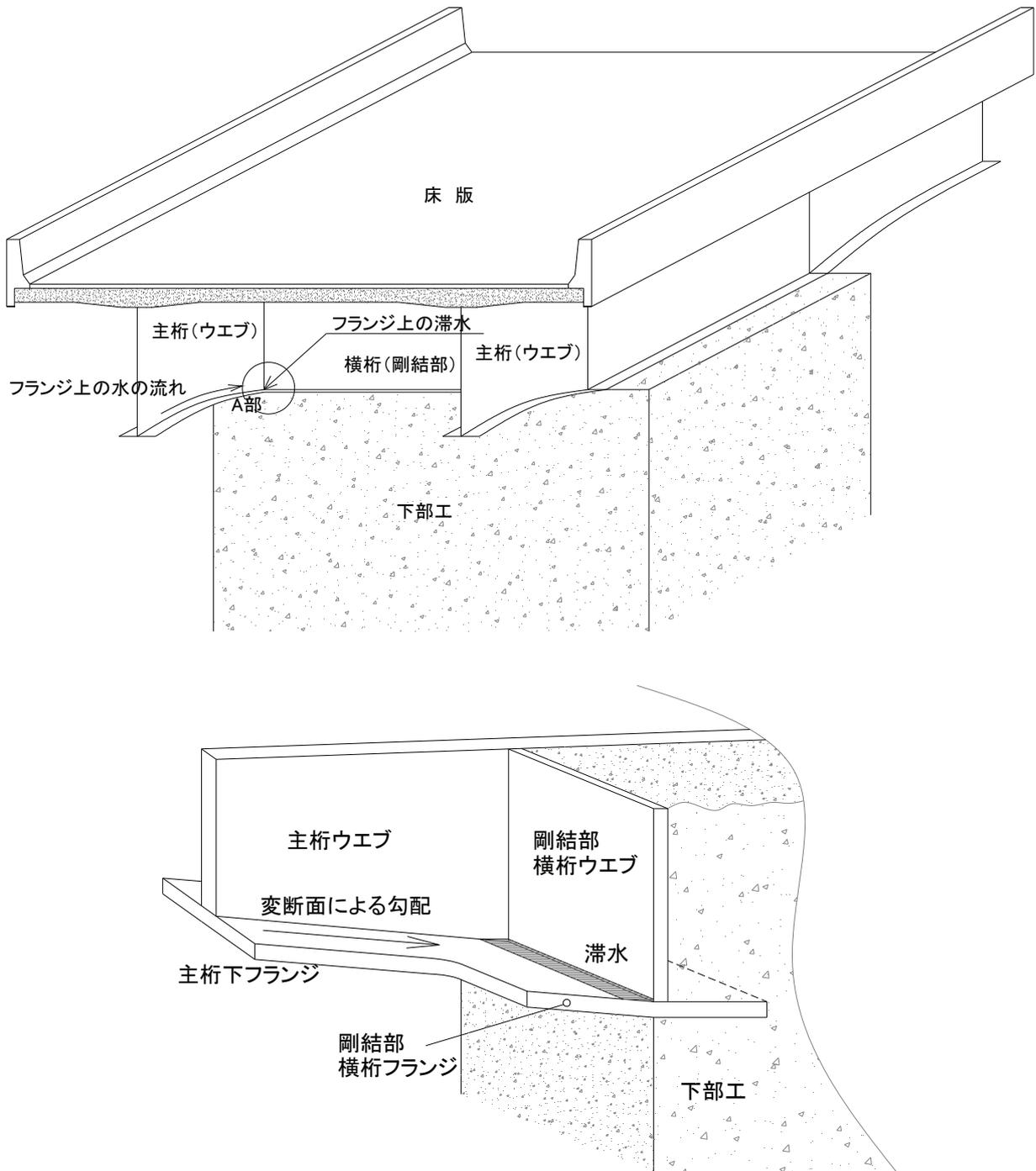


図 2-5-4 検査路事例（横桁を変断面として検査路・移動型枠のスペースを確保した事例）

2-5-2. 構造ディテールに配慮が望まれる事項

剛結部付近の滞水は、部材の損傷を誘発し、橋の耐久性低下の要因となることから、施工時及び供用後における適切な処置が望まれる。剛結部が耐用期間中、その機能を十分に発揮するためには、各部材のコーナー部分や鋼部材とコンクリートの境界面等の滞水を防ぐ構造とすることが重要である。

図 2-5-5 に変断面主桁を採用した場合の横桁フランジ上の滞水事例を示す。このような箇所では、施工中（特に床版打設前）の滞水処置が望まれる。



A 部イメージ図

図 2-5-5 剛結部の滞水事例

2-6. 複合ラーメン橋の施工

2-6-1. 上部工架設方法の選定

上部工の架設方法は、現場条件や架設する桁の種類および支間長などの橋梁規模を十分考慮し、桁と橋脚剛結部の施工を含め選定する必要がある。

複合ラーメン橋の架設工法は、現場条件に合わせて様々な架設工法が採用できる。架設工法の例として、一般的なトラッククレーンベント工法、桁下空間のクリアランスに制約を受ける場合に用いられる張出し架設工法（トラッククレーン、トラベラークレーン、トラベリングエレクションガントリー[TEG]クレーンなど）、一括架設工法、送り出し架設工法などがある。

トラッククレーンベント工法の場合は、剛結部の施工時期に関する自由度が大きく、剛結部のコンクリート打設時期が橋梁架設前後でも可能なため、架設精度管理が比較的容易である。ただし、ラーメン構造であるため、鋼桁の温度変化による伸縮に留意する必要がある。

張出し架設工法は、剛結部のコンクリート打設後に主桁を張出架設するのが一般的で、剛結部の設置精度が橋梁全体の施工精度に及ぼす影響が非常に大きい。張り出し架設が進捗するごとに誤差が蓄積されることから、最終併合ブロックの架設誤差吸収方法の検討が必要となる。従って、上部工製作前に下部工が完成している場合は、支間・橋長等の測量結果を部材製作に反映させることや、最終併合ブロックの両側ジョイント部の隙間を確保しておき、添接板をオーバーサイズもしくは、測量結果を反映した孔明けを行うなどで対応するなどの対策を予め講じておく必要がある。また、鋼桁閉合直前などの片持ち梁の状態では、たわみ量が大きくなる傾向にあり、たわみを調整および吸収するための対処が必要な場合がある。解析時の鋼桁剛性は実剛度を採用し、各ステップで載荷される、鋼重や仮設機材(トラベラークレーン、軌条、足場等)は、可能な限り詳細な数値を算出し計算に用いる。特に、トラベラークレーン荷重による影響は多大なことが予想されることから、計算時に想定した位置が現場施工時に正確に反映される様、クレーン位置が明記された架設ステップ図を用意しておくことが望ましい。

ここでは、トラッククレーン工法と TEG クレーン工法の架設状況写真を写真 2-6-1・2-6-2 に示すとともに、図 2-6-1 にトラベラークレーン工法による剛結部の架設ステップの一例を示す。



写真 2-6-1 トラッククレーン工法架設状況



写真 2-6-2 TEG クレーン工法架設状況

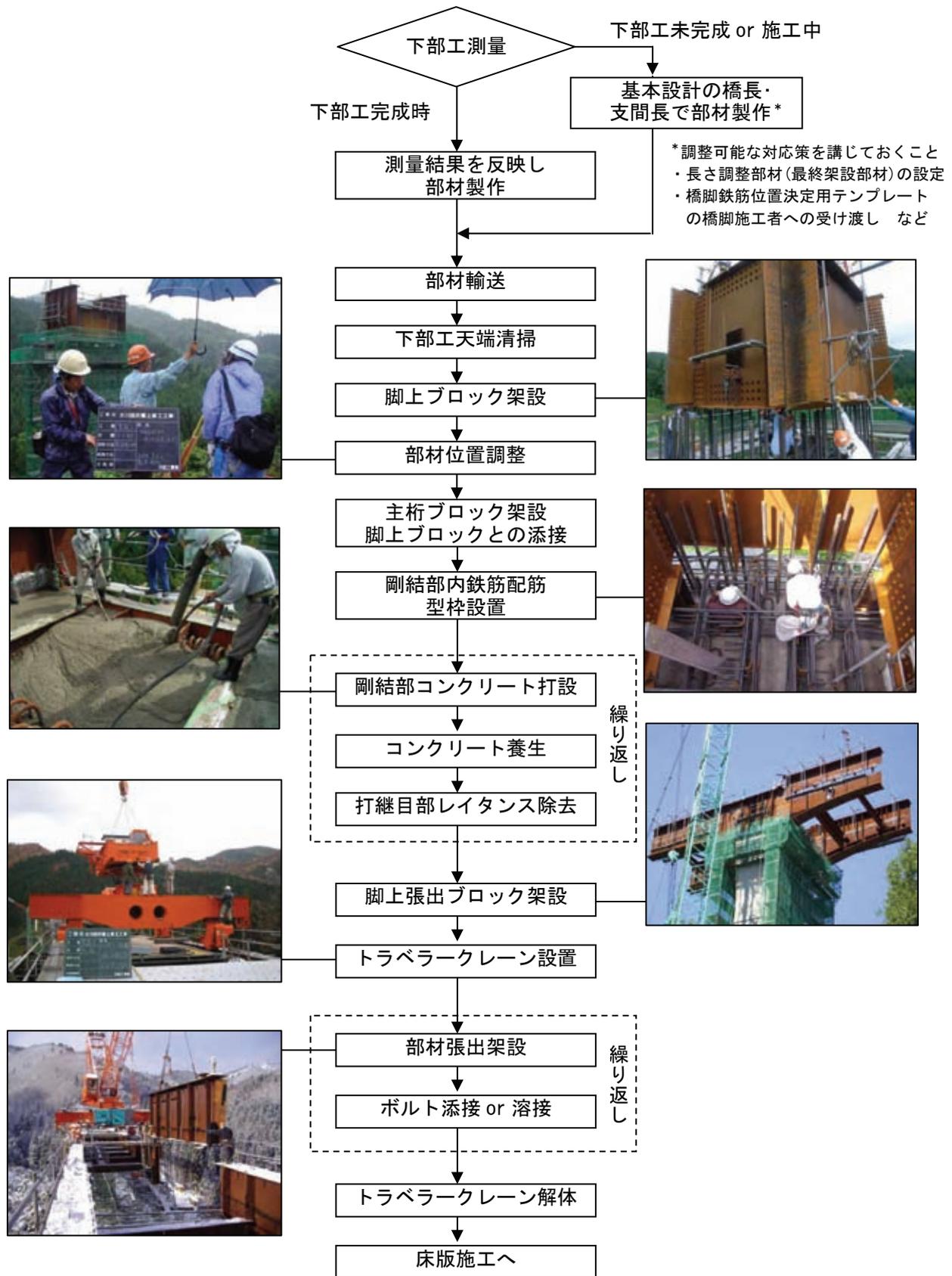


図 2-6-1 トラベラークレーン工法における剛結部架設ステップの一例

2-6-2. 仮受け設備

剛結部の桁架設にともない、接合部の桁を仮固定する仮受け設備については、架設順序や架設方法に合わせた荷重を考慮した計画を行うものとする。

ここでは、剛結部仮受け設備について幾つかの事例を挙げる。

(1) 鋼製架台

橋脚上に鋼製架台（ベント）を設置し、桁を仮固定する方法である。橋脚鉄筋と架台が干渉する可能性があるため、架台の位置決めにはそれらに留意する必要がある。



写真 2-6-3 架台事例

(2) 仮支承

支承構造の橋梁架設と同様に桁を架設して、桁架設完了後に剛結部コンクリート打設を行う架設工法が可能な場合に採用される。一般的な架設工法を採用できるが、支承は仮設用とし脚内部に埋殺しとなることが多く、剛結部としてのイニシャルコストの優位性が損なわれる可能性がある。



写真 2-6-4 仮支承事例

(3) 脚横のベントまたは橋脚ブラケット(斜ベント)

主に剛結部が横梁構造で架設時に不安定になる場合や、張出し架設で主桁断面が架設時の照査で決定する場合に用いられる。また、仮受け架台が脚内に残置できない場合にも用いられるが、ベントやブラケットなどの設備が必要となるため、架設工費が高くなる可能性がある。

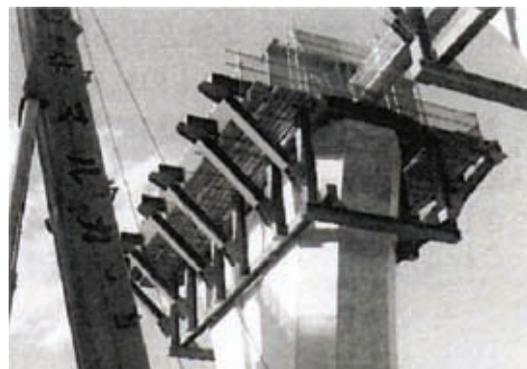


写真 2-6-5 斜ベント事例

(4) アンカーボルトによる固定

鋼製柱を用いた剛結部構造を採用した場合に用いられる仮受け設備で、架設用アンカーボルトにより桁を仮固定する方法である。



写真 2-6-6 アンカーボルトによる固定事例

2-6-3. 剛結部の橋脚鉄筋の配置

(1) 橋脚鉄筋の配置と精度

剛結部における鉄筋の配置と精度は、構造物全体の品質を左右する最も重要な項目であることから、鉄筋組立段階から位置や間隔の計測を行い、精度の高い配置に留意する。貫通鉄筋を有する剛結部の場合、下部工の許容施工誤差や鉄筋配置の許容誤差が大きいことから、RC橋脚施工時において、テンプレートを用いて配筋するなどの工夫が必要である。特に、鉄筋の重ね継手長の確保が難しく圧接や機械継手を採用する場合は、より鉄筋の施工精度に留意しなければならない。

また、現場での施工性を重視して、主桁と干渉する橋脚鉄筋を下フランジに貫通させない事例もある。この場合は、RC橋脚の上端部は鉄筋の欠損を考慮して設計を行うなど構造上の安全性を確認する必要がある。

(2) 橋脚鉄筋の現地計測

橋脚鉄筋については、上部工への鉄筋貫通構造の有無にかかわらず、剛結部の主桁・横桁に近接して鉄筋が配置されることから、現地での部材干渉問題を事前に回避するため現地計測を行った方がよい。特に剛結部ブロック内の鉄筋はD51と太径の採用が殆どであり、現場での鉄筋曲げ加工が困難であることから計測結果による剛結部構造への対応が必要となる。

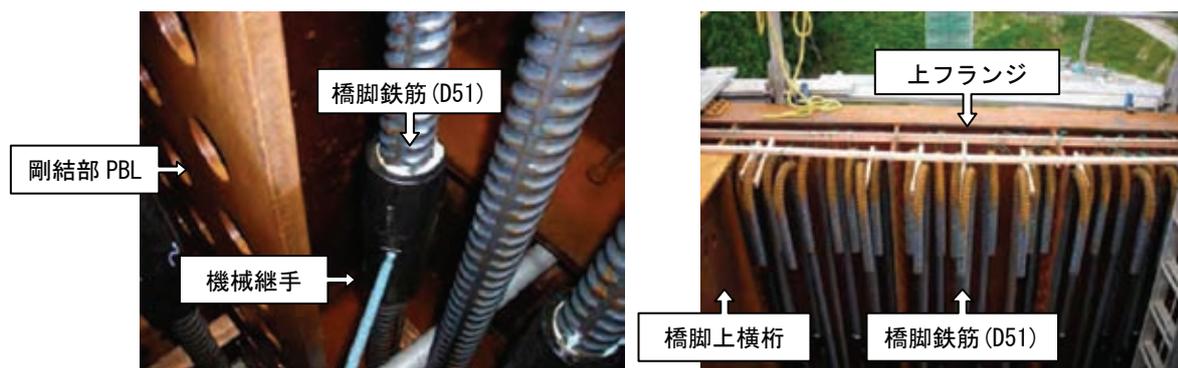


写真 2-6-7 剛結部鉄筋施工状況

2-6-4. 剛結部コンクリートの打設

剛結部は構造が複雑であることから、コンクリートの充填が十分に行われず、複合構造としての機能が果たされない懸念がある。従って、剛結部のコンクリート打設は、剛結部の構造や現場条件に見合った打設計画を行い、十分品質が確保できる打設方法を計画する必要がある。

ここでは、剛結部のコンクリート打設に関する主な留意点を挙げる。

(1) コンクリートの仕様

- ・剛結部のコンクリートの施工性を考慮して、バイブレーターの挿入が可能な場合でも、必要に応じて高性能AE減水剤等を使用するのが望ましい。
- ・バイブレーターの挿入が困難な場合は、自己充填性がありノンブリージングである高流動コンクリートの使用についても十分検討を行うものとする。なお、高流動コンクリートを採用した場合は、セメント量の多い富配合なコンクリートとなり、かつ剛結部はマスコンクリートのた

め、水和反応による発熱量が大きくひび割れの検討が必要となる。コンクリートのひび割れ防止検討としては、温度応力解析によるひび割れ指数⁷⁾により、適切な施工方法および養生方法を選定しておく。

- ・乾燥収縮によるひび割れやコンクリートと鋼桁等との空隙をなくすため、膨張材の使用も有効である。

(2) コンクリートの打設

- ・剛結部のコンクリート打設は、高所からの打設となることが多いため骨材分離や気泡の発生に留意するとともに、型枠に急速に圧力がかからないように時間当たりの打設量を調整するなどの注意を要する。
- ・下フランジ下面においては、ブリージング水による空隙が生じやすいため、下フランジ下面に沿って薄板の抜き差しによるスペーシングが有効である。
- ・密閉構造となるような剛結部構造におけるコンクリート打設作業では、コンクリートの締め固めが可能となるコンクリート打設孔、作業用孔および空気孔を設けるなどの構造的な配慮が必要である。
- ・狭隘部構造へのコンクリート充填確認のために、模型によるコンクリート充填性試験を行うことも有効である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I～V，2002. 3.
- 2) 東・中・西日本高速道路株式会社(NEXCO 東・中・西日本)：設計要領第二集橋梁建設編，2006. 4.
- 3) 日本橋梁建設協会：複合橋梁の概要，2007. 4.
- 4) 日本橋梁建設協会：複合ラーメン橋の今後の展望，平成 17 年度橋梁技術講習会，2006. 1.
- 5) 鋼橋技術研究会：設計部会報告書(複合構造 WG 報告書)，2006. 5.
- 6) 高速道路技術センター：鋼 2 主桁橋の剛結部に関する設計・施工指針(案)，2001. 3.
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2007. 3.
- 8) 日本橋梁建設協会：橋梁年鑑データベース「<http://www.jasbc.or.jp/>」