

複合ラーメン橋接合部の応力伝達機構と設計法への展開

Development of a New Stress-Transfer Mechanism and a New Design Method for Joints in Hybrid Rigid-Frame Bridges

佐藤 徹^{*1} 清水 功雄^{*2} 鳥越 弘行^{*3}
 Toru SATO Isao SHIMIZU Hiroyuki TORIGOE

Summary

We propose a new stress-transfer mechanism and a new design method for joints in hybrid rigid-frame structures. The new method is an application of the reinforced-concrete-truss model; thus it differs from the conventional design method. This allows the design of reliable and economical joints in a hybrid rigid-frame bridge and reduces bridge construction costs.

キーワード：複合ラーメン橋，接合部，設計法

1. はじめに

鋼上部工を鉄筋コンクリート橋脚あるいは橋台に剛結しラーメン構造とすれば、上部工の断面力の一部が橋脚に分担され、断面の縮小が図れること、支承および伸縮装置をなくすことができ、これらの損傷に起因する維持管理費用が低減されること、また走行性も改善されることなど、従来の橋梁に見られない数々の利点を生ずる。この種の構造で必要となる鋼部材とコンクリート部材の接合工法については、橋脚の軸鉄筋を延長し、鋼桁の上下フランジ、ウェブおよびスティフナで囲まれた接合部に打ち込んだコンクリートに定着するという構造の接合工法を提案し、載荷実験およびFEM解析による研究を重ねてきた^{1)~5)}。この結果、この種の接合工法における応力の伝達機構、スタッドシアコネクタの役割、上下フランジ、ウェブ、スティフナなどの接合部を構成する部材要素の荷重分担などがある程度明らかにすることができた^{6),7)}。これらの研究成果を基に、トラス理論によって接合部の終局せん断耐力を評価する設計法を提案し⁸⁾、この設計法に基づいた複合ラーメン鋼桁橋の構造設計⁹⁾などの成果もあげている。

複合ラーメン橋の利点が着目され、実施例が増えつつある現在、複合ラーメン構造の合理的設計法の確立へ向けて、問題点などを明確にしておく必要があることから、本報告では、筆者らの提案する接合部の応力伝達機構および応力伝達と耐荷機構から展開した設計法の考え方を

述べるとともに、今後の課題について整理する。

2. 設計における基本事項

(1) 接合部の構造

複合ラーメン橋の接合部構造は、実際の橋梁では上部工形式と橋脚断面形状によって多様な組合せとなることが考えられるが、最も基本的な構造として上部工はI桁、橋脚は壁式矩形断面の場合を想定する。横桁は耐荷機構上から橋脚外面に配置することが望ましいと考えており、接合部コンクリート打設時の型枠を兼用させる。接合部は橋脚の軸鉄筋を延長し、鋼桁の上下フランジ、ウェブおよびスティフナ（横桁）で囲まれた接合部に打ち込んだコンクリートに定着するもので、鋼桁がコンクリ

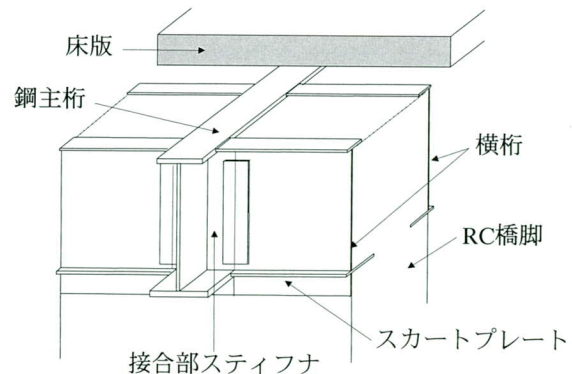


図-1 接合部の基本構造

*1 技術本部技術部技術開発課

*2 技術本部技術部長

*3 技術本部付参与

一トの変形を拘束することで一体化する接合方式である。想定した接合部構造の概要図を図-1に示す。

(2) 接合部の応力伝達機構

図-1に示した接合構造においては、橋脚に曲げモーメントが作用する場合、接合部にはコンクリートの圧縮応力（支圧応力）と鉄筋の引張応力として作用力が伝達される。上部工ではこの橋脚曲げモーメントと釣り合う曲げモーメントが生じており、鋼桁の回転変形がコンクリートの剛体回転を抑え、かつ反力を受けることになるため、支圧機構により接合部内コンクリートに圧縮ストラット（圧縮斜材）が形成される（図-2）。

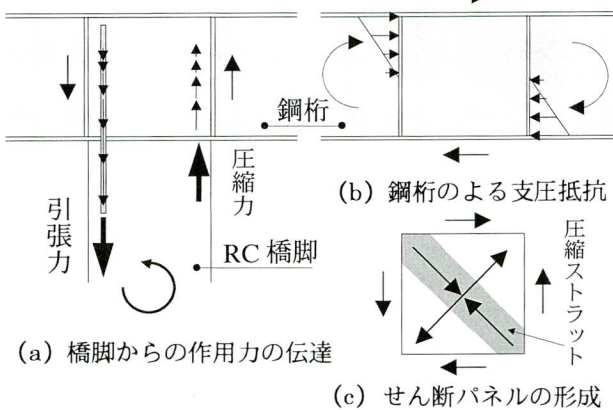


図-2 接合部の基本耐荷機構

圧縮ストラットは鉄筋コンクリートのせん断抵抗メカニズムにより、圧縮力と等価な応力場として表わしたものであり、ディープビームにみられるようなせん断破壊形式から、圧縮力が荷重点から支点に向かって直線的に流れるストラット構造の耐荷機構を想定したものである^{10),11)}。

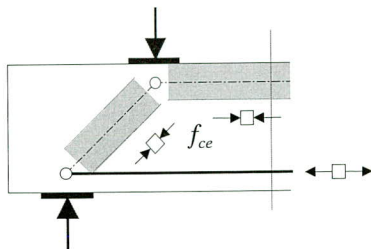


図-3 圧縮ストラットと圧縮斜材の例

複合ラーメン橋の接合部では圧縮ストラットの形成と同時に、これに直交する斜張力場も形成される。この斜引張応力はコンクリートとともに接合部パネルを構成する主桁ウェブが受け持ち、パネルのせん断変形を抑えることで接合部のコンクリートにひびわれを発生させるこ

となく、その結果接合部コンクリートに定着された主鉄筋に付着応力として伝達される。最終的に外力とコンクリートの圧縮応力、鋼材の引張応力によって接合部の釣合系が成立する。このような接合部の挙動に関して、耐荷機構をより単純なモデルで表わすため、トラス理論の考え方を導入することにした。トラス理論はせん断補強鉄筋を配置したはり部材の、斜めひびわれ発生後の耐荷機構をトラスでモデル化する考え方である¹²⁾。複合ラーメン構造接合部の、トラス理論による応力伝達経路モデルを図-4に示す。

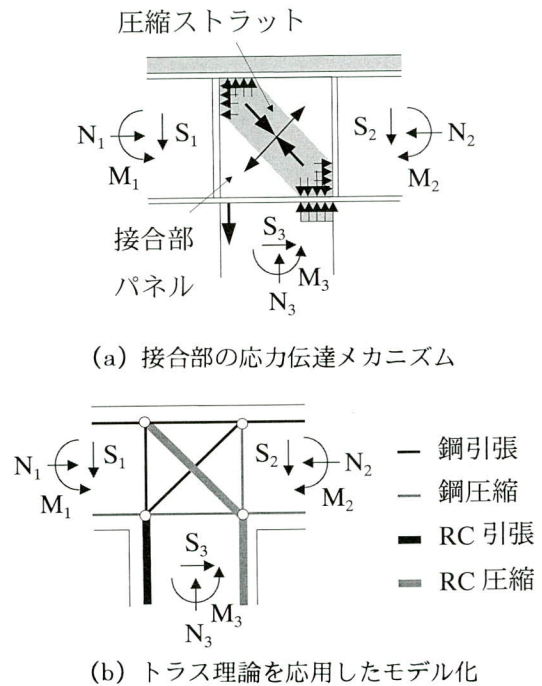


図-4 接合部の応力伝達機構

(3) 接合部の破壊形態と要求性能

接合部の設計において考慮すべき終局状態での破壊形態は、これまでに実施した実験研究においては以下のようなモードが確認されている。

①主鉄筋の定着破壊

鉄筋の定着長は、鉄筋の降伏応力度、鉄筋径とコンクリートの付着応力度との関係によって決定される。一般的には鉄筋応力、鉄筋径が大きければ定着長は長くなり、コンクリート圧縮強度とそれに伴う付着応力度が高い場合は、定着長を短くできる。しかしながら、付着応力度が高まることによって、逆に定着破壊が生じる恐れがあり、実際に定着ひびわれの発生が実験で確認されている（図-5, (b)）。接合部内で定着破壊を生じさせないためには十分な定着長を確保する必要があり、定着長算定

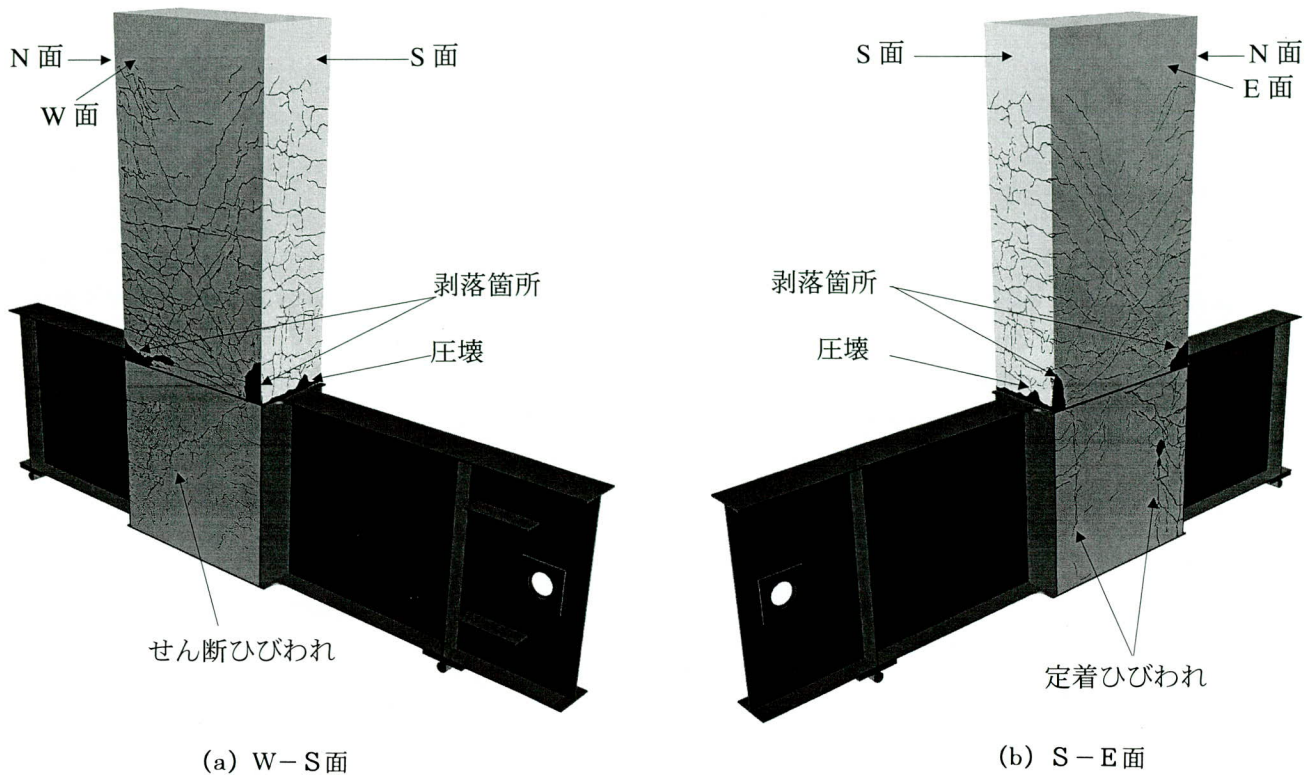


図-5 接合部のクラックパターン⁶⁾

位置の余裕長として橋脚有効高さの1/2程度を加算することで、設計的には安全側となるという知見が得られている⁶⁾。

②接合部のせん断破壊

接合部パネル内のコンクリートには、斜め方向のひびわれを生じることがある(図-5, (a))。これは接合部パネルの周囲に作用する曲げモーメントとせん断力によってせん断パネルが形成され(図-2, (c))、パネル内の引張主応力がコンクリートの引張強度に達したためと考えられる。接合部パネルでは、主桁ウェブがせん断補強鋼板として機能するため、せん断補強鉄筋を多量に配置したRC部材と同様の挙動となり、せん断補強鋼材が降伏する以前に斜め圧縮力によって、コンクリートが圧縮破壊を起こす場合があると考えられる¹²⁾。斜め圧縮破壊はコンクリートの破壊に起因するぜい性破壊であることから、実構造物においては、このような破壊は避けるように設計することが望ましい。

また、接合部パネル内の主桁ウェブは、コンクリートと一体化するために破壊は起こり難く、実験で破壊した例は今のところ確認されていない。現時点では接合部の終局状態が確認できておらず、耐荷機構が十分に解明されたといえる状況にはないが、コンクリートとともにトラス機構を形成するものとして、せん断耐荷力を評価する設計法を考えている。

③境界部コンクリートの圧壊

鋼桁下フランジ下面とコンクリート橋脚との接合境界部には、荷重載荷によってひびわれが生じ、最終的にはかぶりコンクリートが剥落するケースが多い(図-5)。境界部でのコンクリート圧壊は、主桁フランジ部に支圧応力が集中するために生じるもので、これを防止するためには支圧応力を広く分散させる必要があり、スカートプレートを設ける構造は効果的な対策の一つであると思われる。

④境界面の開口

鋼桁下フランジとコンクリート橋脚との境界面には、はじめにヘアークラックのような微細な隙間が生じ、柱部材の回転変形に伴って開口となっている。境界面での開口は雨水等の浸入によって鋼板および鉄筋の腐食が誘発される恐れがあり、耐久性を損なう原因となるため防止する必要がある。ただし、他の破壊モードとは異なり終局耐荷力に影響するとは考え難いため、ひびわれ幅の制御と同様に使用限界状態として取り扱い、開口の生じる恐れがある位置にはスタッドを設けるなどの対策が必要と思われる。

以上の内容をまとめ、予測される終局破壊形態と、対応する部材に要求される耐荷性能の関係として、次ページの表-2に整理する。

表-2 接合部の破壊形態と対応部材の耐荷性能

破壊形態		対応部材	要求性能
①	主鉄筋定着破壊	主鉄筋	定着長
②	接合部せん断破壊	コンクリート	せん断耐力
		鋼ウェブ	せん断耐力
③	境界部圧壊	橋脚 コンクリート	支圧耐力

3. 設計法の概説

(1) 設計フロー

接合部の照査に着目した場合の設計手順の考え方を、フローチャートとして下図に示す。

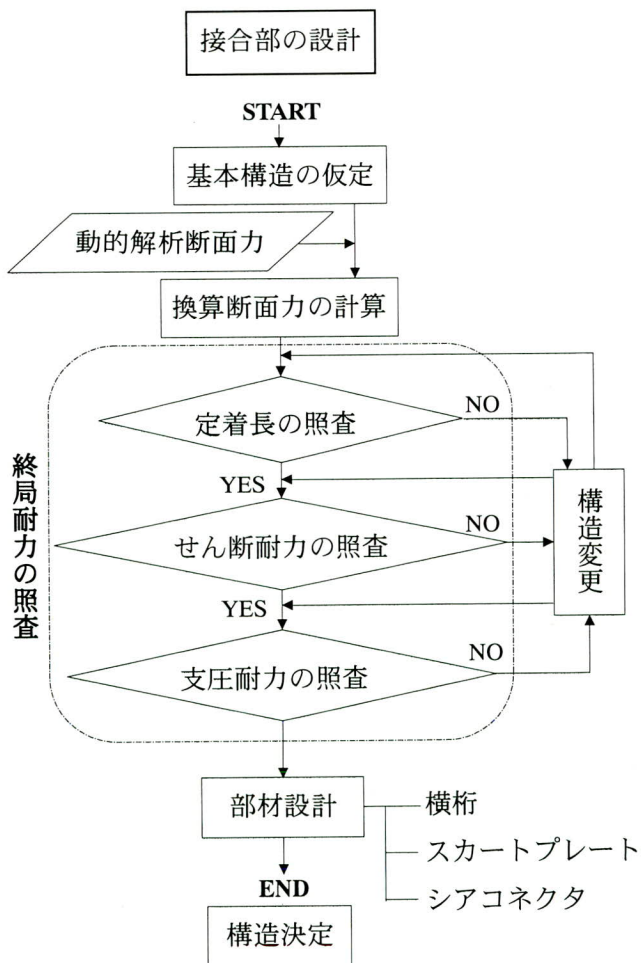


図-6 接合部設計フロー

(2) 終局耐力の照査方法

①主鉄筋定着長

橋脚主鉄筋の接合部内への定着長の計算方法は、日本道路公団の設計要領¹³⁾では道路橋示方書¹⁴⁾の考え方を基本としており、次式および図-7に示すように鉄筋許容応力度による基本定着長に、橋脚有効高さの1/2を合わせた定着長とすることを原則としている。

$$l_d = L_o + \frac{d}{2} = \frac{\sigma_{sa}}{4\tau_c} \phi + \frac{d}{2}$$

σ_{sa} : 鉄筋の許容応力度 (kgf/cm²)

τ_c : コンクリートの許容付着応力度 (kgf/cm²)

ϕ : 鉄筋の直径 (cm)

d : 橋脚の有効高 (cm)

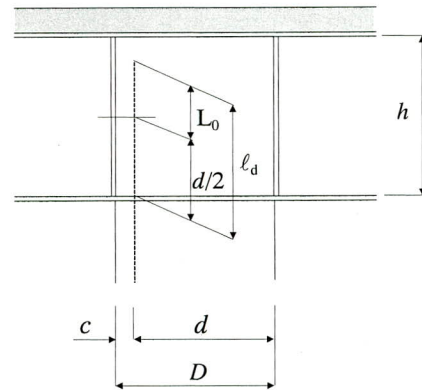


図-7 主鉄筋の定着長

しかしながら橋脚幅が大きい場合、主鉄筋に太径鉄筋を用いる場合、あるいは維持管理または床版施工上などから横桁高さが制限される場合など、この計算による必要定着長では接合部内に鉄筋を定着できないことが起こり得る。現在のところは未解決の課題であるが、応力伝達上の必要定着長の算定に関する検討を行い、実際の構造物に見合った定着長と構造について明らかにしたいと考えている。

②接合部のせん断耐力

接合部パネルでは斜め方向の応力場が形成され、せん断応力状態を呈する。接合部のトラス機構により、圧縮応力に対してはコンクリートの圧縮ストラットが、引張応力に対しては鋼材が抵抗し、コンクリートに圧縮破壊が生じない限り応力伝達機構は維持される。このような耐荷機構による場合の耐荷力評価方法は、鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案)¹⁵⁾に算定式が示されており、複合ラーメン橋の接合部にも適用できると考えら

れる。この方法によれば、せん断に対する終局限界状態についてのせん断耐力評価は、コンクリートとせん断補強鋼板の累加耐力としている。

$$V_u = V_{uc} + V_{us} \quad (\text{tf})$$

V_u : 接合部のせん断耐力 (tf)

V_{uc} : コンクリートのせん断耐力 (tf)

V_{us} : 鋼板のせん断耐力 (tf)

鋼コンクリートサンドイッチ構造の場合では、コンクリートの耐力は圧縮ストラットの圧壊耐力とコンクリートパネルの押し抜きせん断耐力のいずれか大きい方の値を用いることとしている。実験において接合部のコンクリートが破壊した例⁷⁾では、押し抜きせん断破壊が確認されており(図-8)、せん断補強鋼板である横桁がない場合は、棒部材として下式による耐力評価が妥当と思われる。

$$V_{uc} = f_{vud} \cdot b_w \cdot d \cdot \frac{1}{\gamma} \quad (\text{tf})$$

$$f_{vud} = 0.9 \sqrt[3]{f_{cd}} \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_{nk} \text{ or } 0.6 \sqrt{f_{cd}} \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_s$$

f_{cd} : コンクリート設計圧縮強度 (kgf/cm²)

b_w : 耐荷幅 (cm)

d : 有効高さ (cm)

$\beta_d, \beta_p, \beta_s$: コンクリート標準示方書¹⁶⁾による

γ : 部材係数

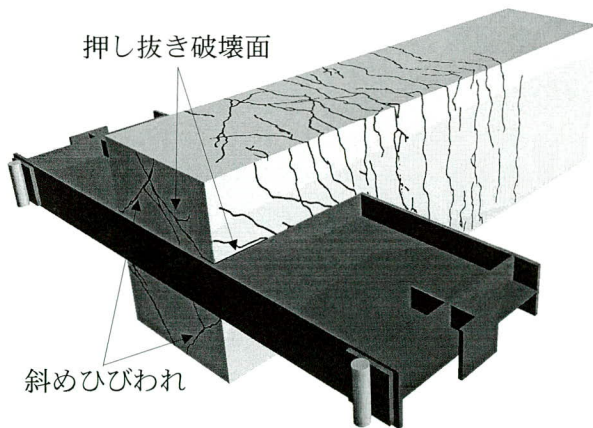


図-8 接合部の押し抜きせん断破壊

横桁を有する場合は、図-8のようなケースでも主桁フランジ幅内は健全であることから、フランジ幅を耐荷幅とした圧縮ストラットの圧縮破壊耐力までは十分期待できると考えている。この場合のコンクリートせん断耐力は、

$$f_{vud} = 4 \sqrt{f_{cd}} \text{ であるので、 } V_{uc} = 4 \sqrt{f_{cd}} \cdot b_w \cdot d \cdot \frac{1}{\gamma} \quad (\text{tf}) \text{ と}$$

なる。

このように、接合部コンクリートのせん断耐力は、横桁の有無、構造、さらには剛性に影響されると思われるため、現在もこれらの関係の解明へ向けた検討を行っている。

また、せん断補強鋼板のせん断耐力は、主桁ウェブ(部材軸方向のせん断補強鋼板)、横桁ウェブ(部材軸直角方向のせん断補強鋼板)および接合部内コンクリートのせん断補強鉄筋が有効と考えられる。横桁ウェブの効果に関しては、コンクリート耐力の評価方法との関連を含めて検討中であり、せん断補強鉄筋は施工性の観点からは極力配置しないこととしたい。現時点では主桁ウェブのみを有効とし、斜張力場理論によるせん断座屈耐荷力ではなく、von Misesの降伏条件によるせん断耐力評価¹⁶⁾による設計でも、十分に安全側であると考えている。

$$V_{uc} = f_{sr} \cdot d \cdot t_w \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\gamma} \quad (\text{tf})$$

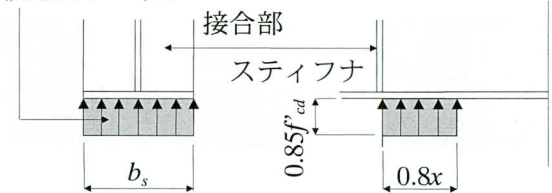
f_{sr} : せん断補強鋼板の降伏強度 (kgf/cm²)

t_w : せん断補強鋼板の材厚 (cm)

③境界部の支圧耐力

鋼桁と橋脚との境界部における圧壊に対しては、支圧応力が主桁フランジ幅に集中すると仮定して照査を行う。しかしながら、実際の支圧応力の分布幅に関しては、明らかになっている状況にはないため、橋脚の圧縮力を主桁フランジ幅に等価応力ブロックとして作用させる方法が、現時点では安全側の評価方法であろうと考えている。

等価応力ブロック



実際の支圧応力分布

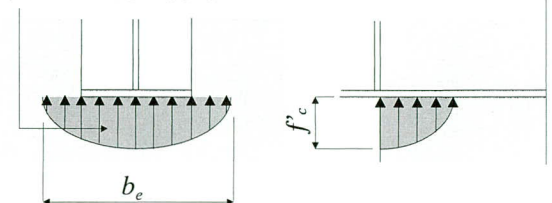


図-9 作用支圧応力の考え方

4. 接合部の有効幅

これまで述べてきた設計法の考え方は、横桁やスタッドを介さずに主桁からコンクリートへ直接的かつ短い経路でシンプルに応力が伝達されることを基本としており、主桁近傍のコンクリートが応力伝達上重要な役割を果たすと考えている。このような機構においては、コンクリートの耐荷幅の評価が重要な意味を持つことになるため、接合部コンクリートの耐荷メカニズムを明らかにすることが課題の一つである。実験では横桁がない場合、**図-8**に示したように鋼桁で囲まれた領域と囲まれていない領域の耐力差により、接合部コンクリートにせん断破壊が生じ耐力を失った例があるが、横桁を設けた供試体では接合部に致命的な破壊が生じたものはない。これは接合部を鋼板でせん断補強することにより耐荷幅が広がったためと考えられ、実験や解析でも主桁の近傍で応力伝達が集中的に行われている様子も確認されている。このような耐荷メカニズムの概念を模式的に表わたものが**図-10**であり、コンクリート橋脚を横桁で取り囲む構造を前提として、横桁構造の違いあるいは横桁剛性と耐荷幅との関係を有効幅として評価する試みを行っている。このような評価方法の確立により、更に接合部の合理的・経済的な設計に繋がるものと期待している。

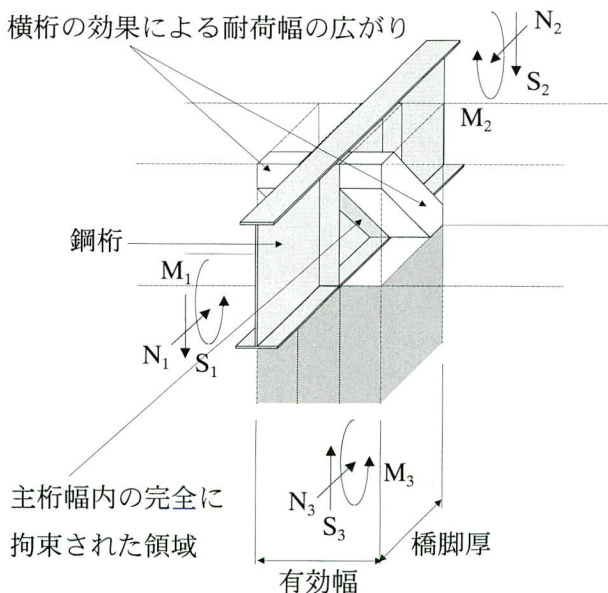


図-10 接合部有効幅の概念

5. おわりに

ここに紹介した複合ラーメン橋の接合部設計法は確立されたものではなく、実際の設計に当たっては更に検討を要す内容ではあるが、応力伝達機構から導かれた合理的な設計手法の一つであると考えている。今後の複合構造を検討する上で、この資料がお役に立つとともに、複合ラーメン構造の一層の発展につながれば幸いである。最後に、この研究にご指導いただいている埼玉大学の町田篤彦教授に、厚く御礼申し上げます。

＜参考文献＞

- 1) 清水, 鳥越: 鋼とRC橋脚の剛結構造に関する研究(第1報), 宮地技報 No.10, 1994
- 2) 清水, 鳥越: 鋼とRC橋脚の剛結構造に関する研究(第2報), 宮地技報 No.11, 1995
- 3) 佐藤, 清水, 鳥越: 鋼とRC橋脚の剛結構造に関する研究(第3報), 宮地技報 No.12, 1996
- 4) 佐藤, 清水, 鳥越: 鋼とRC橋脚の剛結構造に関する研究(第4報), 宮地技報 No.14, 1998
- 5) 清水, 佐藤: 鋼とRC橋脚の剛結構造に関する研究(第5報), 宮地技報 No.15, 1999
- 6) 杉山, Afifuddin, 町田, 佐藤: 鋼-コンクリート複合構造接合部の耐荷機構に関する研究, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.19, No.12, 1997年6月
- 7) 長谷, 井ヶ瀬, 清水, 他: 鋼桁とRC橋脚の剛結部応力伝達機構に関する実験的考察, 第4回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, 1999.11
- 8) 佐藤, 清水, 太田, 町田: 複合ラーメン橋の接合部設計法に関する一提案, 構造工学論文集 Vol.45A, 土木学会, 1999.3
- 9) 宮地鐵工所: 日本道路公団 東北支社 いわき工事事務所 常磐自動車道 浅見川橋(鋼上部工) 工事 鋼桁剛結部設計(案), 平成11年7月
- 10) 田辺, 桧貝, 梅原, 二羽: コンクリート構造, 6. せん断耐力と変形, 朝倉書店, 1985年
- 11) A. Muttoni, J. Schwartz, B. Thurlimann: Design of Concrete Structures with Stress Fields, Birkhauser, 1997
- 12) 町田, 関, 丸山, 桧貝: 鉄筋コンクリート工学, 第9章 せん断力を受ける部材, オーム社, 1997
- 13) 日本道路公団: 設計要領第二集 橋梁建設編 9章 複

合構造，平成10年7月

- 14) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋編，12章 ラーメン橋，平成 8年12月
- 15) 土木学会：鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針（案），平成4年12月
- 16) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕平成3年版，平成3年12月
- 17) 宮地鐵工所：複合ラーメン橋・設計資料（案），Vol.1 設計編，平成10年5月

1999.11.1 受付

グラビア写真説明

小谷温泉橋

一般県道川尻小谷糸魚川線は、地域の生活道路であるとともに、(国)148号と上信越高原国立公園や雨飾高原キャンプ場、小谷温泉などを結ぶ観光路線でもあります。

小谷温泉大橋は、この路線の中で中谷川に架かる橋梁であり、単純非合成钣桁+単純非合成曲線箱桁+3径間連続非合成曲線箱桁+2径間連続非合成曲線箱桁の4連から成ります。

この区間は、幅員が狭く、急勾配、急カーブが連続しており、自動車のすれ違いも困難なうえ、全国でも有数の豪雪地帯でもあります。その為、この路線の交通事情の改善が広く要望されておりました。

小谷温泉大橋は、この様な危険を解消し、安全でかつ快適な交通環境を整備することを目的に架設されたものです。

(山田)

ガイドウェイバス

ガイドウェイバスシステムは、「通常の平面バスと新交通システムの中間の交通需要に対応する」、「近年、交通渋滞の影響を受け、バス交通が失った都市公共交通としての機能を回復する」等の理由から考案された交通システムです。今回、名古屋市が計画をしているガイドウェイバスシステム志段味線は、東区大曾根駅（現名古屋ドーム最寄駅）～守山区志段味支所の11.3kmを結び、途中小幡緑地までを高架で、その先を平面走行するものです。そのため、使用されるバスは車輪部に格納式の案内装置が設置されており、高架、平面両方を走行できる事が大きな特徴です。

当社は、平成9年度に名鉄瀬戸線跨線部他（4径間連続箱桁橋）、また平成11年度に松川橋南交差点他（単純箱桁2橋）の計2工事に携わりました。

(原)