

合成構造の力学特性と設計法

一樹 久允*

はじめに

土木の分野において合成構造は、鉄筋コンクリート (RC) 構造に比べてコンパクトな断面での設計が可能な鉄骨鉄筋コンクリート (SRC) や、道路橋における合成桁等が古くから使われてきている。

合成構造の開発は、複数の材料をそれぞれの材料の長所を生かし短所を補うように組み合わせることにより、個々の材料を単独に用いるものより合理的な構造物としようとする目的で展開されてきている。また、組み合わせることにより、それぞれの長所をより以上に活かすことも可能で、「良いものをより安く、より速く」というニーズが高まってきている今日、注目度の高い構造形式である。

これまでも各機関で合成構造に関する研究が行われ、少なからずの例が実用化されている。しかしながら、その性能の良さの割には十分な評価を受けているとはいえない。それは、これまでは合成構造としての性能に関する研究が単発的であり系統立てた整理がされていなかったこと、さらにそのために設計基準の整備が遅れていた関係で、必要にせまられて合成構造を採用した場合でも保守的な設計法を取らざるをえず、性能が結果に反映されていないケースが多かったことによる。

昭和 61 年に改定された土木学会のコンクリート標準示方書に、SRC の設計法に関する規定が盛り込まれ、



* Hisanobu ICHIMASU
首都高速道路公団
工務部 次長

さらに土木学会から鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン (以下ガイドライン) が刊行され、鋼・コンクリート合成構造については合理的な設計が行える下地が整ってきている。以下に、合成構造の中で鋼・コンクリート合成構造を中心に、その力学的特性、設計法の概要について述べる。

1. 概要

土木の分野における合成構造は、桁・梁部材、柱部材、版部材等に広く応用されている。

合成構造の形式としては、鉄骨を鉄筋コンクリートで囲む鉄骨鉄筋コンクリート構造、円形、または角形の鋼管の中にコンクリートを充填したコンクリート充填鋼管、鋼板で鉄筋コンクリート版をはさみ込んだサンドイッチ構造、あるいは版の片面に鋼板を取り付けた構造等がある。これらの合成構造の部材としての力学的特性は、形状・寸法、構造詳細等によって異なるばかりでなく、鋼材とコンクリートとの付着の程度によって影響を受ける。さらに、コンクリートで鋼材を囲むことによる、鋼材の座屈防止効果や、コンクリート充填鋼管等のように鋼板によってコンクリートを取り囲む形式のものは、鋼板によるコンクリートの変形拘束によるコンクリートの変形・強度特性の向上という付加的効果も期待される。

一般的には付着・一体化の程度に応じて、完全合成型の挙動を示すものから、鋼材部分とコンクリート部分が個々に作用する、累加型の挙動を示すものがある (図-1 参照)。

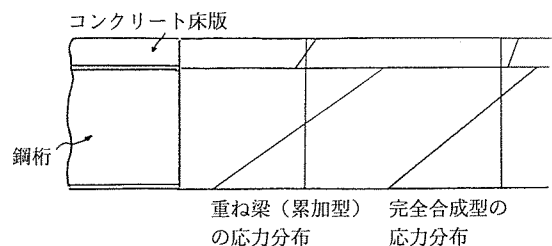


図-1 累加型と合成型の応力分布 (鋼桁+RC 床版の例)

2. 一体化の方法

鋼とコンクリートの合成は、接着、摩擦および機械的作用によるいわゆる「付着」によって行われる。鋼の平板上にコンクリートを打設しただけでも、接着作用によりある程度の合成効果は期待することができるが、合成をより完全にするためには鋼板に突起を設けたり、スタッドや棒鋼・形鋼を加工した「ずれ止め」を取り付けて機械的作用による付着をもたせるような工夫が必要である（図-2参照）。


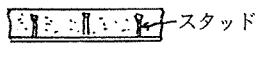
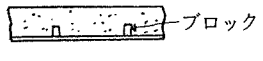

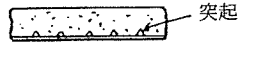
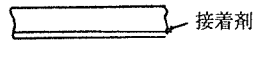

ずれ止めの方式	ずれ止め材	概要図
機械的ずれ止め	加工棒鋼	 加工棒鋼
	スタッド	 スタッド
	鋼製ブロック	 ブロック
付着	平滑	
	突起	 突起
接着	接着剤	 接着剤
摩擦	ボルト軸力	 ボルト

図-2 ずれ止めの種類

さらに昨今では、コンクリートとの合成構造に用いることを目的とした、表面にコンクリートとの付着効果が高めるための突起を設けた鋼板、リブを付けた鋼管、フランジに突起を付けた形鋼等が生産されるようになってきている。このような素材を有効に利用することにより、効率的に一体化をはかることが可能になってきている。

(1) 機械的なずれ止め

機械的なずれ止めは、鋼とコンクリートの接触面に働くせん断力を、ずれ止め全面の止圧力として受ける「剛なずれ止め」と、ずれ止めが変形しながらコンクリートにせん断力を伝達したり、鉄筋のコンクリートとの付着力により生じる引張力によりせん断力を支える「柔なずれ止め」がある。

「剛なずれ止め」は、ずれ止めの剛性が大きく、コンクリートの支圧応力は一様分布に近くなる。このタイプのずれ止めは、終局荷重時にはずれ止めとしての機能が急激に低下する懸念がある。

「柔なずれ止め」は、コンクリートの支圧応力の分布

は一様でなく、ずれ止めに曲げ応力が生じる。このタイプのずれ止めは、ずれ止めとしての性能は前者に劣るが、前者のように、ずれ止めとしての機能が終局荷重時に急激に低下する懸念は少ない。

「剛なずれ止め」としては、形鋼（L形鋼、T形鋼、溝形鋼等）を利用したものや、鋼板を加工したもの等があり、「柔なずれ止め」としては、形鋼、スタッド、あるいは棒鋼を加工したもの等がある。

(2) 付着による一体化

コンクリートの中に埋め込まれた平鋼の付着は、周囲のコンクリートとの粘着力と平鋼との間の摩擦力とによる。このほかに、鋼材表面の凹凸による付着効果も考えられるが、この量はあまり大きなものではないとされている。

平鋼とコンクリートの付着強度は丸鋼の場合と同様で、コンクリート強度、かぶり、コンクリートの打込み方向等の影響を受ける。しかし形状的に、丸鋼よりブリーディングの影響を受けやすいため、付着強度は丸鋼にくらべて小さいと考えられている。

突起付き鋼板および縞鋼板の付着特性は、突起の機械的抵抗により大幅に改善される。図-3、図-4に縞鋼板の付着特性試験の結果を示す。

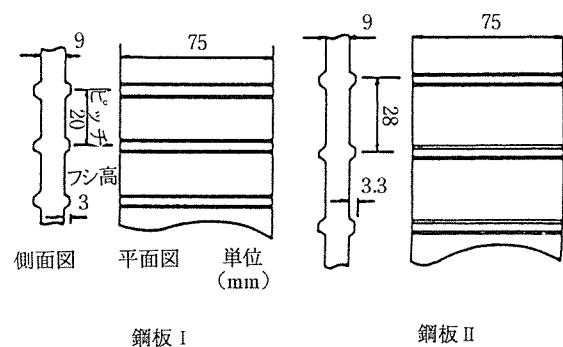
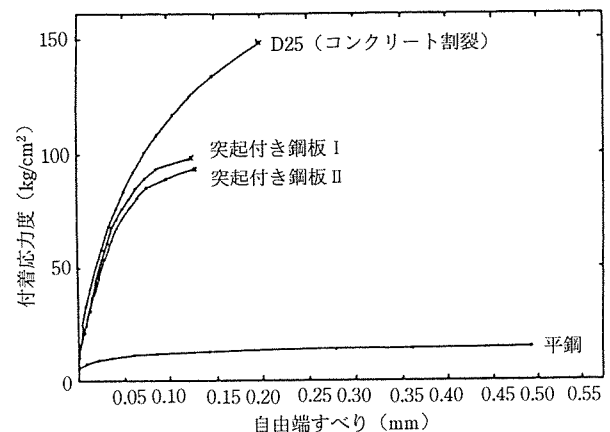


図-3 各種突起つき鋼材の引抜き試験の結果⁵⁾

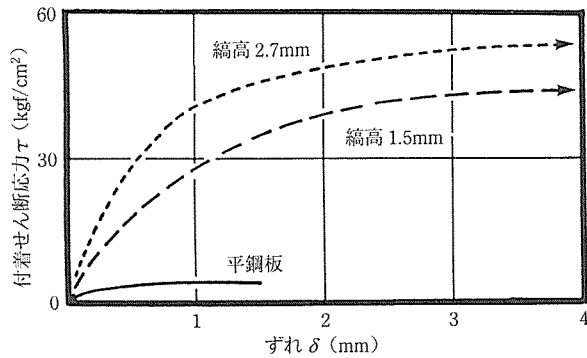


図-4 押抜きせん断試験による縞鋼板と平鋼板の付着特性の比較⁶⁾

(3) 接着による一体化

形鋼、スタッド、加工鉄筋等による機械的なずれ止めが点的であるのに対して、接着による接合は、接触面全体で一体化することが可能である。鋼とコンクリートの接着にはエポキシ系接着剤が使われる。

この方法は、接着効果が正常に作用している時は十分な一体効果を期待することができる。しかし、「はがれ」に対する信頼性に不安があり、他のずれ止めと併用するのが適当であろう。

(4) 摩擦による一体化

鋼材とコンクリートのプレキャスト部材を一体化する方法として研究が進められている。高力ボルト、PC 鋼材の利用が考えられる。鋼材の軸力による支圧力によって生ずる摩擦力により接合するものである。この方法では、コンクリートのクリープ、乾燥収縮等による軸力の変化の評価が課題である。

3. 各種合成構造の力学的特性

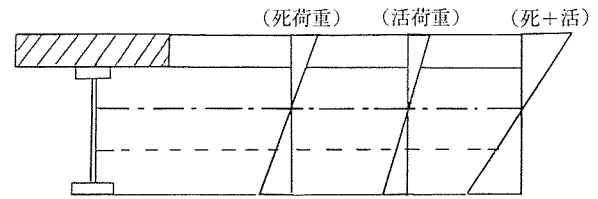
3.1 桁構造

鋼とコンクリートの合成構造として、道路橋に古くから広く使われている「合成桁」がある。

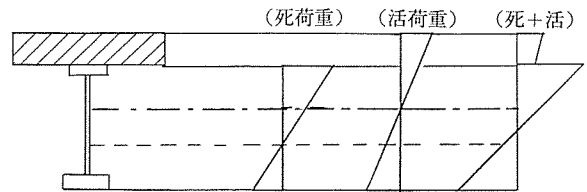
合成桁は、鉄筋コンクリート床版との一体化を確保するために、鋼桁の上フランジにスタッド等のズレ止めを十分に配置し、コンクリートに圧縮力を分担させる構造である。いいかえれば、鋼桁の上フランジの一部を RC 床版に兼用させる形式のものである。

合成桁は、荷重を作用させる時期によって、活荷重合成桁と死活荷重合成桁に分けられる。活荷重合成桁は、架設された合成桁に支保工を用いずに床版コンクリートを打設するもので、合成構造として作用するのは、床版コンクリートを打設後に加わる橋面荷重等の死荷重と活荷重に対してのみである。

死活荷重合成桁は、鋼桁を支保工によって支えて床版コンクリートを打設し、コンクリートが硬化してから支保工を撤去するもので、死荷重に対しても合成断面とし



(a) 死・活荷重合成桁のひずみ分布



(b) 活荷重合成桁のひずみ分布

図-5 合成桁のひずみ分布

て作用する (図-5 参照)。一般に合成桁としての性能は、鋼桁断面のプロポーシオンによって、「コンパクト断面」と「ノンコンパクト断面」に分類される。

コンパクト断面は鋼桁断面に曲げモーメントが作用したときに、全塑性モーメントが発揮されるまで、フランジやウェブに局部座屈の起こらないような「ずんぐり」した断面のもので、ノンコンパクト断面は局部座屈によって全塑性モーメントが発揮できない「スレンダー」な断面のものをいう。

また、Eurocode 4 では次の 4 つのクラスに分類している。

クラス 1: 塑性ヒンジにおいて、モーメントの再配分が起こるに十分な塑性回転能力を持つ断面。

クラス 2: コンパクト断面で、塑性モーメントに達するが、鋼桁の局部座屈やコンクリートの圧壊によって限られた塑性回転能力しか持たない断面。

クラス 3: 鋼桁断面の圧縮フランジは降伏するが、局部座屈によって塑性モーメントに達しない断面。

クラス 4: スレンダーな断面で、鋼桁断面の圧縮フランジは降伏せず、局部座屈によって破壊にいたる断面。

桁形式の合成構造として H 形鋼を用いた SRC 構造が従来から用いられてきた。SRC は、鉄骨とコンクリート間の付着を考慮しない累加方式の設計法が用いられる。文献⁵⁾ではより合理的な構造とするために、突起付き H 形鋼を用いた埋込み合成梁の繰返し曲げ試験の結果を報告している。ここでは、突起付き H 形鋼を用いたものは通常の H 形鋼を用いたものより高い曲げ

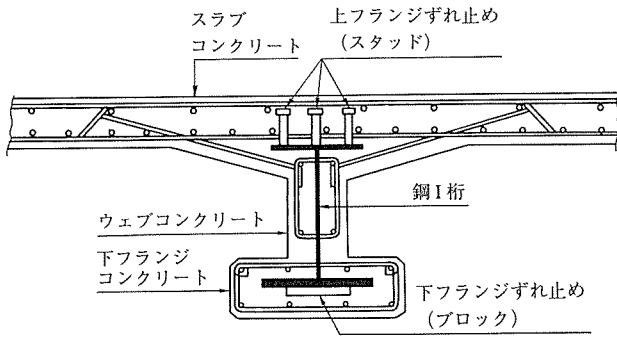


図-6 プレベーム合成桁の断面図

耐力を有することを確認している。

このほかに、桁形式の合成構造として、I断面の鋼桁の曲げ変形を利用してコンクリートにプレストレスを導入する「プレベーム合成桁」がある。この形式は図-6に示すように鋼桁全体が鉄筋コンクリートに埋め込まれており、上下のフランジにズレ止めを設けて合成されている。プレストレスの導入は、あらかじめ反りを与えて製作された鋼桁に、反りを戻す形で荷重をかけた状態でコンクリートを打設し、荷重を開放することにより行う。これによりフランジを囲むコンクリートに圧縮応力の導入がはかれ、活荷重により引張力の作用する部分のコンクリートも利用することが可能となる。

3.2 柱構造

わが国の構造物、とりわけ橋脚のような柱部材には耐震性が要求される。耐震設計上望ましい構造は、軽量で十分な耐荷力と変形性能をもつものである。特に都市内の道路、鉄道などの高架橋では、橋脚の設置条件から断面寸法に制約を受ける場合が多い。このようなケースでは、鋼構造並みのコンパクトな断面で、十分な耐荷力とじん性を期待できる鋼・コンクリート合成柱は有利な構造形式であるといえる。

鋼・コンクリート合成柱には、円形または矩形断面の鋼管にコンクリートを充填したタイプのもの、形鋼(HまたはI等)をコンクリート中に埋め込んだタイプのものに分けられる。一般に、前者は鋼柱の座屈特性を改善する目的での研究で、鋼構造の設計法からのアプローチがなされている。また後者は、SRCの範疇に属するものといえる。

正方形断面の鋼管にコンクリートを充填して、鋼柱の圧縮・曲げ耐荷力の実験結果を報告している文献¹⁴⁾に以下の結果が報告されている。

- ① 合成柱はコンクリートの充填により、鋼断面柱よりかなりの強度増加が見られる。
- ② 合成柱は鋼断面柱より剛性が高く、変形性能も大きい。
- ③ コンクリート充填による局部座屈発生に対する効

果はあまり期待できないが、局部座屈発生後の強度増加に対して著しい効果を持つ。

- ④ スタッドジベルで一体化をはかることによって、若干の強度の増加が見られた。
- ⑤ 充填コンクリートは、鋼板との自然付着によって十分な合成効果が期待でき、鋼柱の曲げ抵抗の防止に効果を発揮する。

このように鋼管は、コンクリートを充填することにより耐力の向上がはかれる。文献⁶⁾では、内面に縞状の突起を設けた鋼管にコンクリートを充填した合成鋼管の曲げ性能について報告している。ここでは、従来から市販されている突起の高さが1.5mmの縞鋼板を使用したもの(OBD)のほかに、あたらしく開発された突起の高さが3.0mmのもの(FBD)について、普通鋼管と比較している。

これによると、複合鋼管の弾性範囲内での曲げ耐力は、鋼管のみの場合の1.2倍程度に向上する。さらに降伏耐力、終極耐力はそれぞれ1.3倍、1.5倍に向上する。また縞の突起高さが3.0mmのもの(FBD)が最も耐力が高い(図-7参照)。

一般に、合成柱の断面耐力は鋼、コンクリートの単独部材耐力を単純累加したものより大きくなる(図-8参照)。また合成柱の断面耐力曲線として、ガイドラインに紹介されているDIN 18806で使用されているものを図-9に示す。

M_{el} : 鋼管引張縁応力度1400kgf/cm²時の曲げモーメント
 M_{yi} : 鋼管の残留引張ひずみが0.2%のオフセット荷重時の曲げモーメント
 M_{max} : 最大抵抗曲げモーメント

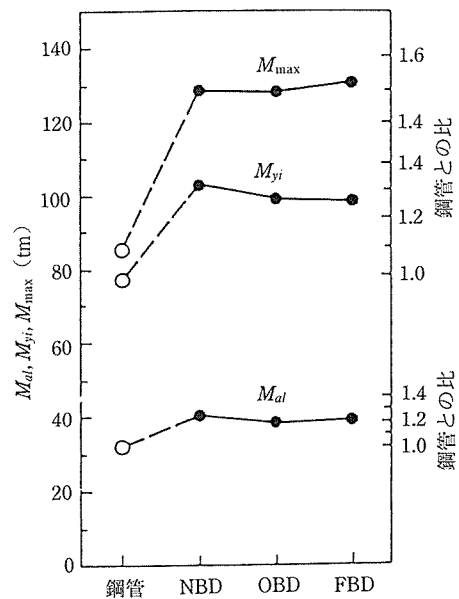


図-7 複合杭および鋼管杭の曲げ耐力⁶⁾

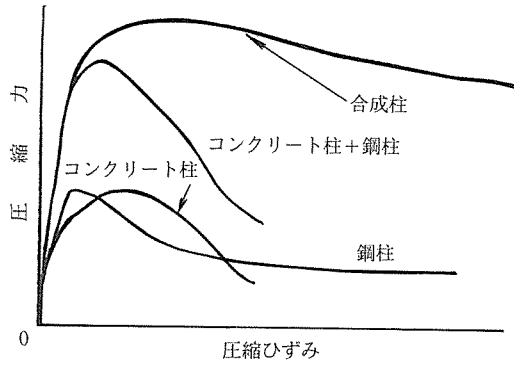


図-8 正方形断面合成柱の圧縮力とひずみの関係⁹⁾

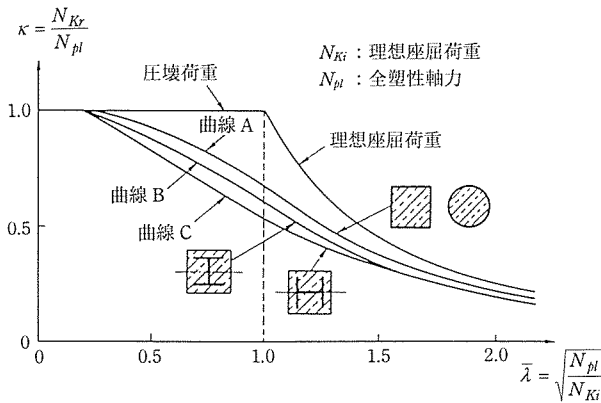


図-9 DIN 18806 での耐荷力曲線^{1), 12)}

3.3 板構造

板形式の合成構造は一般に合成板と呼ばれている。鋼・コンクリートの合成板としては、形鋼をコンクリート中に埋め込む「コンクリート埋込み型合成板」、鋼板をコンクリートと一体化する「鋼板・コンクリート合成板」等がある。鋼板・コンクリート合成板は両側に鋼板を配置する形式と（「サンドイッチ構造」と呼ばれる）、片側に配置する形式（「オープンサンドイッチ構造」と呼ばれる）とがある。鋼板とコンクリートの一体化は、形鋼、タッド、棒鋼等を加工したずれ止めを適切な間隔に配置して行う。

この構造において部材表面に配置される鋼板は、設計上は RC 構造における鉄筋に換算して評価されるが、表面全体で連続的に付着している鉄筋と異なり、断続的に配置されたずれ止めによって力の伝達が行われるため平面保持の仮定が成り立たず、曲げ耐力が鉄筋コンクリートの計算法で推定するものより小さくなる場合がある。圧縮側の鋼板は、圧縮部のコンクリートの変形拘束効果を持ち、強度、変形性能の向上に役立つ。

この形式の合成構造のせん断耐荷性能は、部材内部の骨組構造によって異なるので注意が必要である。

鋼板が圧縮側にある場合、圧縮部のコンクリートが鋼板で拘束されるため変形性能は向上する。

設計法は、弾性板理論による応力・変形解析に基づいて行うのが一般的である。リブのない鋼板を用いた場合は等方性板理論が、1方向または2方向にリブを持つ鋼板を用いた場合には直交異方性板理論が適用される。

設計は、鉄筋コンクリートの設計に準じて行うことができる。この場合、使用状態では、鋼板とコンクリートは完全に合成されていると考えてよい。終局限界状態での照査においては、ずれ止めの性能を考慮して行う必要がある。たとえずれ止めが不完全な場合には、ずれの影響を鋼とコンクリートの弾性係数比等の断面定数を調整して評価する方法が用いられる。

ずれ止めの設計において考慮する力は、鋼板とコンクリート板の間に働く「ずれ」によるせん断力と、両者の剥離によって生ずる引張力である。一般に板構造の場合は、ずれによるせん断力が支配的である。

終局耐力は、曲げ破壊、せん断破壊、押抜きせん断破壊のほか、鋼板とコンクリートの付着が切れることによって生じるせん断付着破壊について照査する必要がある。

① 曲げ強度

曲げ応力を受ける合成板の挙動は RC 板と同様であるが、合成板では引張鋼材量が終局釣合い鋼材量を超えている場合が多く、破壊はコンクリートの終局ひずみによって支配され塑性ヒンジの形成が不完全で、RC 板の終局耐力に広く用いられる降伏線理論の適用はできない。

② せん断強度

せん断力に対する耐荷機構は、合成板の構造によって大きく異なる。RC 板に鋼板を取り付けたタイプのは RC 部材的な挙動をする。また、フルウェブの鋼板や形鋼を鉄筋と併用して用いたものでは、鋼材としてのせん断力の負担を期待できる構造も可能である。

③ せん断付着破壊

RC 部材では、せん断付着破壊は太径鉄筋等を用いて、定着が不完全な場合に見られる破壊状態である。合成板の場合には、せん断付着強度は鋼板表面の形状とずれ止めの方式によって決まってくるが、挙動が複雑で理論的に解析することは困難である。この問題に関しては多くの研究がなされており、鋼材の表面に設けた突起の効果、ずれ止めの挙動などが徐々に明らかにされてきている。

④ 押抜きせん断強度

合成板の押抜きせん断強度は板厚、鉄筋量、鋼材量と配置方法、ずれ止めの強度等によって影響されるが、一般に単純な RC 板に比べて十分に大きいといえる。設計法はまだ確立されていないため、正確な強度を求めるためには実験によって確認する必要がある。

⑤ 疲労強度

合成板においては、その形式によっては疲労強度は照査が必要である。鉄道橋や道路橋の床版等繰り返し荷重を受ける合成板では特に重要である。疲労強度が問題となる部位は補強材あるいは骨組材として用いる鋼材の穴空き部、鋼板のずれ止め溶接部等である。

おわりに

以上に概要を述べたように、合成構造に関する研究と実用化は着実に進められている。合成構造の範疇に含まれる構造物は、材料の組合せ、構造形式、さらに構造詳細等を含めると極めて多様であって、一つの枠の中に納めるのは不可能であろう。したがって、ここで「合成構造の力学特性と設計法」というタイトルを付けていても、紹介している範囲は合成構造のほんの一部にすぎない。

例えば材料についても、炭素繊維やガラス繊維等の新素材の活用、鋼材についても合成構造用の新たな製品の開発も活発に進められており、その範囲はますます広がってきている。

合成構造のなかでも、鋼とコンクリートの組合せによるものは広く応用されてきている。これは、設計法の基本的な考え方が、土木学会のコンクリート標準示方書の鉄骨鉄筋コンクリートの条項に示され、具体的な設計法についてもガイドラインとして整理されたことに負うところが大きい。とはいえ、実際の合成構造の設計では、すべてが基準に従って機械的に進められるわけではなく、関連する文献、あるいは実験などに十分な検討を要する部分が多々ある。

今後、合成構造の活用をより一層進めるには、汎用性の高い構造形式について未解決の部分を埋めて、順次規準化を進めてゆくことが必要であろう。

参 考 文 献

- 1) 土木学会編 構造工学シリーズ3 鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン, 1989年3月
- 2) 土木学会構造工学委員会・鋼・コンクリート合成構造研究小委員会編 合成構造用鋼材の利用に関する調査研究, 1993年3月
- 3) 土木学会 コンクリート標準示方書, 1986年
- 4) 道路協会 コンクリート道路橋設計便覧, 1994年2月
- 5) 三浦 尚, 佐野 正, 佐藤政勝: 異形鉄骨を用いた鉄骨コンクリート部材の性状に関する研究, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, 1984年
- 6) 佐藤, 加藤, 三好: 縞鋼管にコンクリートを充填した合成鋼管の力学特性, 第3回コンクリート工学年次講演会論文集, 1981年
- 7) EUEROCODE No. 4, Common Unified Rules for Composite Steel and Concrete Structure, The Commision of the European Communities 1983年
- 8) 佐藤, 石渡: 異形H形鋼を用いたSC梁の終局耐力および疲労特性, 第27回構造工学シンポジウム
- 9) 松井千秋: 合成構造の設計法と問題点, コンクリート工学, 1989年12月
- 10) 三浦 尚: 鉄骨鉄筋コンクリート構造の耐久性(その2), 鋼とコンクリートの合成構造に関する調査研究報告書, 土木学会, 1984年3月
- 11) 三浦 尚: 鉄骨鉄筋コンクリート構造の耐久性(その3), 鋼とコンクリートの合成構造に関する調査研究報告書, 土木学会, 1985年3月
- 12) DIN 18806 Teil 1, Tragfähigkeit von Verbundstutzen, Berechnung und Bemessung, 1984年
- 13) 中井 博, 吉川 紀, 古田秀博: 軸方向圧縮力と曲げを受ける長方形断面合成柱の耐荷力解析, 土木学会論文集第374号, 1986年10月
- 14) 中井 博, 吉川 紀, 中村一平, 袴田文雄, 寺田博昌: 合成柱(充填式)圧縮・曲げ耐荷力および付着力に関する基礎実験, 橋梁と基礎, 1985年6月
- 15) 佐藤, 加藤, 近藤, 山中: 条溝突起付きH形鋼を用いた鉄骨コンクリート部材の構特性とその応用, 川崎製鉄技報, Vol. 12, No. 4, 1980年
- 16) 上田多門, 塩屋俊幸: 鋼・コンクリート系サンドイッチ構造, コンクリート工学, 1992年5月

【1995年1月27日受付】