

土木分野における複合構造の発展

池田 尚治*

概要 複合構造は一般に鋼要素とコンクリート要素との複合が一般的であるが新素材である炭素繊維シート等も構成要素として用いられるようになってきた。鋼要素とコンクリート要素との複合の効果は、それぞれの長所の組み合わせによる補完、合成作用、架設上の有用性、急速施工、および補修補強への有用性などがある。土木分野の場合には複合構造の橋りょうへの適用が大いに進んでいる。中でも上部構造への適用は波形鋼板ウェブを持つ複合PC橋や支間中央部分を鋼要素として長大支間を合理的に形成する構造などが注目すべき複合構造の例と言える。プレストレスによりコンクリート中の鋼材の複合性能が大幅に向上することについても認識する必要がある。炭素繊維シート貼り付けによるコンクリート構造の耐震補強方法も大型橋りょうに適用されるようになってきた。

キーワード 複合構造、複合効果、複合方法、波形鋼板、炭素繊維シート、橋りょう、プレストレス

1.はじめに

複合構造とは、鋼とコンクリートとを複合した構造のことを指すのが一般である。ただし、広く用いられている鉄筋コンクリートはこの場合、コンクリートサイドに位置付けられ、鋼要素と鉄筋コンクリートとの複合という形で複合化が進められているのが常である。

鋼構造およびコンクリート構造はそれぞれ近年大きく発展してきているが、それぞれの長所を組み合わせて形成する複合構造は、構造形式としての新しい形式を誕生させることができあり、その特徴を發揮する機会が大いにあるものと考えられる^{1)~4)}。

現在、複合構造物として注目されるものの例としては、支間の中央部分を鋼断面としたフランスの斜張橋であるノルマンディ橋、ウェブを鋼波板としたPC橋であるJH東海北陸自動車道の本谷橋、およびウェブを鋼トラスとしたPC橋であるフランスのプロネ橋などが挙げられる。また、現在建設が進められている第二名神高速道路の木曽三川橋は複合エクストラドーズド長大橋として世界的に関心を持たれている。

材料的には新素材である炭素繊維シートが構造物の耐震補強などに用いられるようになっており、複合構造にも新材料が登場してきた。鋼材やコンクリートも高強度化や高性能化が図られており、炭素繊維シートなどの新材料の出現により複合構造は今後一層大きく発展するものと思われる。ここでは、複合構造の特徴と現在注目されている複合形式に焦点をあてて、その発展の状況を述べることとする。

2. 複合構造の特徴

著者は、複合構造の有用性を評価する項目として表

* いけだ・しょうじ／横浜国立大学教授 工学部 建設学科（正会員）

-1に示す複合効果の分類について提案してきた³⁾。この分類はそれぞれが全く独立したものではないが、効果の卓越したものを項目として表わしている。種々の形式の複合構造物はこの分類のいくつかの効果を取り入れてその構造物の建設条件における最適なものとして採用されることとなる。

さて、表-1の分類について若干の説明を加えてみよう。

分類1：コンクリートは引張力に弱いが圧縮力に対しては強く、一方、鋼は引張力には強いが圧縮力には座屈しやすい性質がある。また、鋼は鍛やすいつが、コンクリートはこれに比べて相対的に耐久的である。剛性についてもコンクリートは大断面とすれば有利であるが、鋼は棒状や板状の場合には不利である。しかし、鋼はじん性の点でコンクリートより格段に優れている。ただし、材料費としては鋼は高価である。このようにそれぞれが持つ長所を組み合わせてそれぞれの短所を補完することにより、鋼とコンクリートとの組み合わせによる複合効果を発揮することができる。鉄筋コンクリートやプレストレスコンクリートは最も基本的な例と言えるが、鉄骨鉄筋コンクリートや充てん钢管柱などもこの効果を活

表-1 複合効果の分類

No.	分類	備考
1	長所の組合せによる補完	強度、剛性、じん性、耐久性、耐火性
2	合成作用	断面二次モーメント
3	鋼部材の架設への適用	支保工、架設工
4	鋼部材の架設と軸体への適用	支保工と軸体要素
5	急速施工	工期の条件
6	重量の低減、重量のつりあい	コンクリートと鋼との置換え
7	高品質化	じん性、拘束効果
8	補修、補強	劣化の回復、耐震補強

用したものである。

分類2：平面保持の仮定を保ちながら鋼要素とコンクリート要素との結合を図るもので、合成効果により断面二次モーメントの大幅な増加を期待するものである。鉄筋コンクリートは鉄筋自身の断面二次モーメントは零であるが、これと圧縮側コンクリートとの合成効果によって断面を構成している。鋼コンクリート合せた形式はこの分類の代表的な例である。

分類3：鋼部材は取扱いや組立てが容易であるので、架設材として極めて優れている。これらの鋼部材はそのままコンクリート中に埋め込むが、構造本体には設計計算上考慮しない。なぜなら、構造本体に考慮すればその品質や性能および応力度のレベルが本体構造の仕様を満たさなければならないからである。コンクリートアーチ橋の架設に用いられる鉄骨は多くの場合この例に該当している。

分類4：架設に用いた鋼部材を本体構造の要素としても用いるものである。鉄骨鉄筋コンクリートの鉄骨は多くの場合これに該当している。

分類5：工期に制約がある場合や急速施工が求められている場合に複合構造にすると経済的に満足な結果が得られることが多い。したがって、このような場合には全体的な経済性を考えると複合構造が最も有利となる場合が多いと思われる。

分類6：鋼構造は軽量であり、これに対してコンクリート構造は重量が大きい。したがって長径間の構造には一般に鋼構造が有利である。また、斜張橋などで支間の関係でけたの一部の重量を小さくする必要があることもある。このような場合にはノルマンディ橋のような混合構造の採用が適切となる。

また、ウェブのみを鋼板とし、フランジ部をコンクリートとしてウェブの重量を軽減する複合PC構造もこの分類に含まれる。

分類7：充てん鋼管柱や鋼板で巻き立てた鉄筋コンクリート柱はじん性に富んでおり、粘り強い構造である。

このように、複合化によって部材や構造物の品質を高めることが可能である。

分類8：鋼構造物の補修や補強にはコンクリートの充てんや巻立てなどが極めて有効である。また、コンクリート部材の補修や補強には鋼材が広く用いられている。炭素繊維シートの巻立てによるコンクリートの補強は新しい複合化と言える。

以上に述べた複合効果は、広い意味での最適な経済性と合理性とに結び付いて初めて実際に採用されることになるのである。図-1に複合構造が有利な場合の概念図を示したが、この場合には建設条件によって優位性が現われると考えるべきで、常にこのようなことになるとは限らないのである。例えば、場合によっては鋼構造が最も有利になることもあり得るのであり、複合構造が常に有利になるわけではないことに留意する必要がある。

プレストレストコンクリート構造の場合には外ケーブル技術が確立されてきたことが、複合化への大きな発展となって現われたものと思われ、コニャック橋、モープレ橋、ロアズ橋、および最近の本谷橋などの複合形式の橋りょうが登場してきたのである。これらは当面は分類6の効果が主要な特徴であるが、将来は分類4、分類5、および分類7などの複合効果へと発展するものと思われる。

次に複合の手段について考えてみる。複合には断面の複合化と部材軸方向の複合化とに大きく分けられる。断

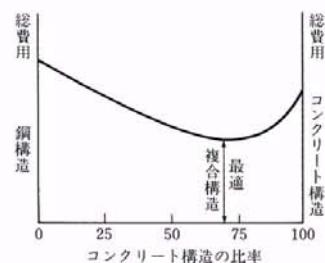


図-1 複合構造が有利な場合の概念図

Progress of Hybrid Structures in Civil Engineering

By Shoji Ikeda

Concrete Journal, pp. 3~8, Vol. 36, No. 10, Oct. 1998

Synopsis Hybrid structures generally consist of steel elements and concrete elements. However, carbon fiber sheets have become useful elements as new materials in addition to former two elements. The effects of hybridity are such as compensation of characteristics, superposing, composite effect, advantage in erection, quick construction, adaptability in retrofit, etc. Big progress can be seen in the construction of bridges by applying hybrid structure. Especially, remarkable examples are prestressed concrete bridges having corrugated steel webs and bridges having steel elements in the central part of the main span to reduce dead weight. The potential effect of prestressing to the composite construction should be clearly recognized. The seismic retrofit of concrete piers by using carbon fiber sheets has been realized in long span bridge structures.

Keywords : Hybrid structure, Hybrid effect, Hybrid method, Corrugated steel web, Carbon fiber sheet, Bridge, Prestress

面の複合化は従来よりシャーコネクターとしてスタッドや鋼ブロック、鉄筋などを鋼の接合面に溶接して用いてきたが鋼材とコンクリートとの付着や鋼リブなどによるずれ止め効果も考慮されてきた。しかしながら、最近必ずしも上に述べた方法のみが複合方法でないことが明らかになってきた。それはプレストレスの効果を適用することが改めて考え出されたことによる。従来は、複合構造は鋼要素と鉄筋コンクリートとの複合が主であったために、完全な複合化を図る場合には十分なシャーコネクターの存在が必要だったのである。しかしながらコンクリートにプレストレスが導入されている場合には、鋼材の配置状況に応じてプレストレスによる複合効果を期待できる。これらのことを見在化するために表-2に複合化の方法について示すこととした。

表-2は、応力の伝達を必要とする複合方法についてその複合が行われる面、複合方法、および複合機構について分類を試みたものである。すなわち、部材断面の複合化は一般にシャーコネクター等によって行われるがこの場合の複合面は部材の軸方向に沿った面、例えばコンクリートフランジと鋼材ウェブの境界面は部材軸に沿って連続的にずれ止め機構を用いて一体化される。この複合方法には鋼面の突起、付着、接着、および摩擦などの複合方法がある。ここで、摩擦は接合面に直角方向の圧縮応力が作用するときに働くもので、プレストレスなどの圧縮応力が有効である。プレストレスが断面全体に作用している場合、コンクリートにはひび割れが生じないのでコンクリートに埋め込まれた鋼材の複合は鋼材の応力変動が相当に小さくなるために極めて有利な状態となる。波形鋼板ウェブを直接コンクリートフランジ中に埋め込んで複合化する工法は、プレストレスの作用のもとではじめて可能なのである。なお、断面の複合化は、これら表-2に示した複合方法のいくつかが組み合わされても用いられることが多い。

一方、部材軸方向の複合化は一般に断面の遷移区間を設けて徐々に軸方向の力が伝達できるようにすることによって複合が可能である。すなわち、部材軸方向の複合化に関しては部材同志を接続することとなるが複合面としては必ずしも部材端面のみでなく、部材軸方向に沿っ

た面を用いて徐々に遷移区間で応力の伝達を行う方法が用いられる。この場合、表-2の分類で考えるなら、複合面は部材軸に沿った面と部材端面とが共に用いられて複合が行われることが多い。当然のことながら、部材同志の接合にはプレストレスの効果は極めて大きく、既に複合斜張橋のけた同志の接続にはPC部材側からのPC鋼材が鋼げた側に打込まれたコンクリートを経由して定着されている。

3. 最近の複合構造の橋りょう

(1) ノルマンディ橋

フランスのセーヌ河の河口近くに1995年1月に完成したノルマンディ橋は世界最大支間の斜張橋で、その形式は鋼とコンクリートとを巧みに組み合わせた複合構造である(写真-1)。

ノルマンディ橋は全長2141mの橋りょうであって、その中央部分が支間856mを有する2面吊りの複合斜張橋である⁴⁾。中央支間のうちの624mが鋼床版箱げたであり、その他の部分はコンクリートげたであって、コンクリートげたの経済性と長大な中央径間の重量とバランスすることを考慮して複合構造が採用されたのである。また、主塔の斜材定着部位は鋼構造であり、その剛性確保のために鉛直な鋼柱の橋軸直角方向の左右にプレキャストコンクリートセグメントが取り付けられて主塔断面を構成する。したがって、主塔も複合構造である。鋼げた部分とコンクリートげた部分の単位m当たりの重量はそれぞれ橋面工を含めて45tfおよび13tfであって、この重量差が巧みに活用されているのである。両側の側径間はそれぞれの橋台部分から押出し工法によって架設されたが、その勾配が6%であったため水平方向と鉛直方向とを交互にジャッキングする方式が採用された。

ノルマンディ橋は我が国の本四架橋の多々羅大橋が完成するまで世界一の斜張橋の支間を誇るものである。

(2) ドール橋

ドール橋(Dole Bridge)はフランスのジュラ地方のドール市を流れるドゥブ川に架かる道路橋であり、ウェブに波形鋼板を持つ7径間連続の複合橋である(写真-2)。



写真-1 ノルマンディ橋（フランス）

表-2 複合方法の分類

複合面	複合方法	機 構	備 考
部材軸方向に沿った面	シャーコネクター	ずれ止め	スタッジベル等
	鋼面の突起	ずれ止め	異形加工、横構等
	付着	界面の結合	セメントの硬化
	接着	接着剤	エポキシ樹脂
	摩擦	プレストレス	PC鋼材の緊張
部材端面	摩擦	プレストレス	PC鋼材の緊張
	接着	接着剤	エポキシ樹脂
	シャーコネクター	ずれ止め	鉛直ずれに対処

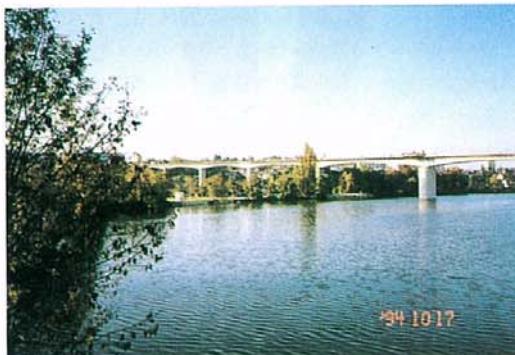


写真-2 ドール橋 (フランス)

この橋の特徴は変断面箱げたの波形鋼板ウェブ構造を現場打ちコンクリートによって片持張出し施工したことであって、もちろん世界で初めての試みである。全長は496 m であって中央部の5径間の支間が80 m の大型橋りょうである。幅員は3車線と両側歩道を持つ14.5 m である。縦断勾配は3.5% である。けた高は支点上で5.5 m、支間中央で2.5 m である。波形鋼板ウェブの厚さは、一般部、支点付近、およびデビエーター部分でそれぞれ8 mm, 10 mm, および12 mm である。波の形は幅が22 cm で折曲げ間隔が43 cm である。波形鋼板と上下フランジのコンクリートとを組み合わせた断面はウェブが軸力に抵抗しないので、プレストレスに対する断面の効率が極めて優れている。なお、波形鋼板ウェブの上下には鋼フランジが溶接されており、これにシャーベクタが溶接されてコンクリートフランジと一体化されている。

波形鋼板の各セグメントごとの接合は現場溶接であり、その作業は上下のコンクリートの打込みと緊張および型枠の移動後に行われた。これによって、1週間に片側2セグメントの施工が可能となった。各セグメントの長さは3.2 m であり、橋脚上のセグメントは全コンクリート製で、その長さは4 m である。

なお、鋼ウェブを波板とすると、ウェブのせん断座屈強度が著しく高くなるのでスティフナーが不要なこと、これによる溶接ひずみが生じないので外観が優れること、などの特徴を有している。すでにこの種の橋りょうは、コニャック橋、モーブレ橋、アステリクス橋がフランスで実現しており、我が国でも新開橋(新潟県)、銀山御幸橋(秋田県)が完成し、引き続いてこの種の橋りょうでは世界最大支間となった日本道路公団の本谷橋が新しい複合方法を採用して完成した。

(3) 本谷橋

本谷橋は、橋長198.2 m、支間割44 m+97.2 m+56 m の3径間連続の変断面を有する波形鋼板ウェブ複合PCラーメン橋である(写真-3)。施工は現場打ちコンクリートを用いた片持張出し式工法とし、波形鋼板ウェ



写真-3 本谷橋

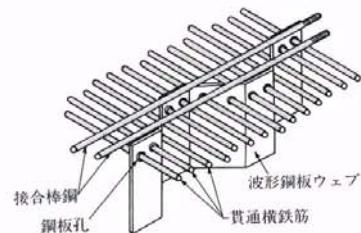


図-2 接合部構造

ブと上下コンクリート床版との接合は著者の提案による図-2の接合棒鋼と貫通横鉄筋による埋込み方式が採用された^{5)~6)}。ウェブの現場での接合はハイテンボルトによる一面接合とした。この橋りょうは1998年に無事完成し、長大橋の複合化が一步前進することとなつた⁷⁾。また、この橋りょうの完成を機にこの形式の橋りょうの採用がいくつかの工事で検討されている。なお、プレキャストセグメント工法への波形鋼板ウェブ構造の検討も進められている。なお、本谷橋の幅員は10.5 m である。

(4) プロネ橋

ウェブに鋼トラス部材を用いた複合トラス橋がフランスのプローニュ地方に完成し、注目を集めている。プロネ橋(Boulonnais橋)(写真-4)は高速道路A16の高架橋でQuehen橋(橋長474 m), Herquelingue橋



写真-4 プロネ橋 (フランス)

(橋長 259 m) および Echinghen 橋 (橋長 1 288 m) の 3 橋からなる。Echinghen 橋の中央部分は支間 110 m が 5 径間もある長大支間の橋りょうとなっている。幅員は 19.24 m である。これらの橋りょうには長さ 4 m のプレキャストセグメントが全面的に採用され、大胆な外ケーブルの採用とともに画期的な構造形式となっている。鋼トラス材は直径 32.4 cm~35.6 cm の钢管でコンクリートとの定着は端プレート部分で鉄筋をねじ止めし、これをコンクリート中に定着する方式としている。

この橋りょうは丘陵地帯に小さな村落のある地域の上空を高い位置で通過する構造物であるが、ウェブがトラス構造で透けているので目障りでなく軽快な印象を与えてくれる。複合トラス形式はこのような地域の高架橋に適したものであることがこのプロネ橋を見たときの第一の印象であった。

我が国でも現在この複合トラス形式の橋りょうが日本道路公団の静岡建設局と高知県の四万十川架橋で計画されている。

(5) 木曽三川橋

第二名神高速道路が木曽川および揖斐川の河口部を横断するところで現在大規模な複合構造形式の橋りょうが建設中である。経済性、施工性等からこの橋りょうに対し複合連続エクストラドーズド形式で、かつ、大規模なプレキャストセグメントを用いる工法が採用された。また、下部工は钢管矢板基礎に支持された鉄筋コンクリート版であり、これも複合構造の一形である⁷⁾。

木曽川橋は全長 1 145 m であり、支間 275 m が 3 連で側径間が両サイドにそれぞれ 160 m の支間を持つ 5 径間連続の橋りょうである。また、揖斐川橋は全長 1 397 m であり、支間 272 m が 4 連で側径間が両サイドにそれぞれ約 155 m の支間を持つ 6 径間連続の橋りょうである。いずれの橋りょうも塔近傍の約 170 m 部分をプレキャストセグメントによって構成される PC 構造とし、支間中央部分約 100 m を鋼げた構造とする複合構造である。塔の高さは上床版面から約 30 m であって斜張橋の場合の約半分程度の高さである。塔はも



写真-5 木曽三川橋の実大試作プレキャストセグメント



写真-6 東名高速道路酒匂川橋りょうにおける炭素繊維貼り付け工事

ちろんコンクリート構造である。プレキャストセグメントの大きさは上床版の幅員が 33 m、支点上げた高 7 m、橋軸方向長さ 5 m の 3 セル箱断面であって最大重量約 400 トンの超大型のものである。写真-5 にヤードで試験的に製作した実大セグメントを示す。この橋りょうは世界的に見ても最も先駆的な構造であるため日本道路公団では上部構造に関して著者を委員長とする検討委員会を組織し、その中に fib 会長の Dr. Virlogeux および fib 幹部の Prof. Strasky を特別委員に加えて設計施工上の問題について種々の審議を行っている。1998 年 9 月に最初のプレキャストセグメントが橋脚上に据え付けられ、2001 年には竣工の予定である。

(6) 炭素繊維シートによる耐震補強

炭素繊維シートは軽量で取扱いが容易であり、かつ、鋼材以上に高強度であるために鉄筋コンクリート構造物の表面に貼り付けて複合させることにより耐震補強材料として極めて優れたものである。

東名高速道路の酒匂川橋りょうは橋脚の直径が 7 m、高さが約 60 m の中空円断面鉄筋コンクリート橋脚を持つ長大連続トラス橋であり、この橋脚の耐震補強には種々比較検討の結果、炭素繊維シートによる補強を行うことが決定された⁸⁾。補強設計に際しては模型供試体を用いた実験を行い、これに基づいて補強方法が定められた。補強に用いた炭素繊維の量は約 15 トンであり、目付量が 300 g/m² のものを最大で 12 層エポキシ樹脂で貼り付けた。この橋りょうは我が国の最も重要な幹線道路の動脈を構成する構造物であり、この耐震性が炭素繊維シートによる複合化の補強によって確保されたことの意義は極めて大きいと言える。なお、この橋脚は、架設用の鉄骨が躯体中に用いられているので橋脚自体が複合構造である。

写真-6 に補強工事中の酒匂川橋りょうの状況を示す。

4. おわりに

fib 会長の Dr. Virlogeux は「橋りょうエンジニアが鋼とコンクリートに分かれていた時代は終わりつつある」と述べているが⁹⁾、今後は発想を豊かに持ち耐久的で合理的な構造物を材料の特性を生かしながら、また、発展させながら構築していくことが肝要である。炭素繊維シートなどの新素材の積極的な適用も考えるのがよいと思われる。

参考文献

- 1) 池田尚治：鋼コンクリート合成構造の発展の動向と展望、土木学会論文集、No. 414, V-12, pp. 15~22, 1990.2
- 2) 池田尚治：土木分野における合成構造、複合構造の現状、コンクリート工学、Vol. 29, No. 6, pp. 4~12, 日本コンクリート工学協会、1991.6
- 3) 池田尚治：土木分野における複合構造、プレストレストコンクリート、Vol. 37, No. 2, pp. 16~19, PC 技術協会, 1995.3
- 4) 岩田恵一郎：複合構造、橋梁と基礎、Vol. 31, No. 8, pp. 23~29, 建設図書, 1997.8
- 5) 山口恒太・山口隆裕・池田尚治：波形鋼板ウェブを用いた複合プレストレストコンクリート桁の力学的挙動に関する研究、コンクリート工学論文集、Vol. 8, No. 1, pp. 27~41, 日本コンクリート工学協会, 1997.1
- 6) 田島潤・山口隆裕・池田尚治：波形鋼板ウェブを有する PC 構造の複合機構に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 19, No. 2, pp. 1203~1208, 日本コンクリート工学協会, 1997年
- 7) 小川篤生・寺田典生：JH 日本道路公団における複合橋梁、橋梁と基礎、Vol. 31, No. 8, pp. 48~55, 建設図書, 1997.8
- 8) 長田光司・大川征治・西 浩嗣・池田尚治：炭素繊維シートを用いた中空円断面コンクリート橋脚の補強について、土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部、pp. 622~623, 1997.9
- 9) Virlogeux, Michel：複合橋梁、橋梁と基礎、Vol. 31, No. 8, pp. 30~47, 建設図書（春日昭夫訳）1997.8