

[招待報告]

鋼・コンクリート合成構造の特性と複合構造への展開

正会員 池田尚治 (横浜国立大学)

1. はじめに

「コンクリート工学」誌1983年12月号には特集として「コンクリートと合成構造」が編集された。また、同誌の1989年10月号からは、講座として「合成構造の設計法と問題点」が掲載されている。これらの内容には、合成構造についての各著者の種々の角度からの概念や方向性が示されており誠に貴重な資料である。コンクリート工学にとっての合成構造の位置付けは当然のことながら時代とともに変化するものであり、現時点での合成構造に対する取組方は1983年当時とは若干異なっている点もあると思われる。土木学会においては土木学会誌に合成構造に関する概況報告を行った後、1986年9月と1989年9月にそれぞれ「合成構造の活用に関するシンポジウム」を開催し、また、1989年3月には「鋼コンクリート合成構造の設計ガイドライン」を刊行した。

コンクリートはその脆性さ故に鋼材等の補強材なしでは構造部材として成立し得ないことから、鋼材等との複合や合成は必須の課題であり、材料の進歩を含む技術の発展に対応して、より合理的な複合を目指すことが重要である。

2. 合成・複合構造の基本

合成構造に関する形式の呼称としては、合成構造のほかに複合構造、混合構造、鉄骨鉄筋コンクリート構造、鋼管コンクリート構造などがある。合成構造とは部材断面が異種材料あるいは異種部材の組合せによって構成され、断面力に対してこれらが一体となって抵抗する構造のことである。混合構造とは異種材料から成る部材を組み合わせた構造システムで、たとえば支間の片側をコンクリート構造とし、他の側を鋼構造とした連続桁などが挙げられる。複合構造とは合成構造と混合構造とを含めた総称であると考えられる。また、複合材料の呼称も別に存在しており、用語的にも類似しているので対応すると思われる英語名を付して関連する用語を表-1に示した。

また、鉄筋コンクリート床版をプレストレストコンクリート桁の上に施工して活荷重に一体断面として抵抗させるPC合成桁もある。

3. 合成構造発展の経緯

合成構造が今日のように発展してきた理由は、その性能の優れている点とその経済性とである。しかしながら依然として鋼構造とコンクリート構造も存在するので、合成構造が総合的に判断して最も適当な構造として常に選択されるわけではない。したがって、どのような場合に合成構造が最も適した構造となり得るのかを明確に把握しておくことが重要である。

表-2に合成構造の発展に関連する事項について年代順にいくつかの例を示した。これに示されるようにコンクリート充填鋼管柱やコンクリート被覆鋼管柱の歴史は最も古いものであるが、その後の発展普及は遅れていることが伺える。鉄骨鉄筋コンクリートについては関東大震災によってその耐震性が認識されたが、設計法そのものは1958年に建築学会が計算規準を定めるまでは設計方法が特に定められていなかったようである。建築の分野で鉄骨鉄筋コンクリートが普及したのは、階数の多い建物には行政指導によって鉄骨鉄筋コンクリートの採用が求められていたことにもよっている。

合成構造として急速に世界に普及したのものとしては合成桁橋がまず第一に挙げられる。合成桁

道路橋の場合、別の部材である鉄筋コンクリート床版を主桁の圧縮側にも活用し、かつ、鋼桁の圧縮フランジの断面積を大幅に低減できることによりきわめて経済的な構造となるのである。

表-2の合成構造の発展を眺めるとき、合成構造の大きな特徴として、合成構造は鋼部材をコンクリートによって補強あるいは改良させた構造であることに気が付く。すなわち、出発点はあくまで鋼であって、コンクリートはその補強材あるいは改良材なのである。このことは鉄筋コンクリートやプレストレストコンクリートがコンクリートを鋼材によって補強したものであることと対照的なことである。したがって、いわゆる合成構造の場合、一般に鉄筋コンクリートの場合と比べて断面中の鋼材の比率が相当に高い。

鉄骨鉄筋コンクリートの場合には、一般に鋼材量は鉄筋コンクリートの場合より相当に多いが、これは構造的には鋼部分と鉄筋コンクリート部分との累加的な概念を基本としているからである。したがって、いわゆる合成構造の場合よりはコンクリート構造に近いものといえる。

合成構造に関する示方書や指針類もようやく整備され、種々の目的に応じた合成構造の設計が合理的に行える状況になってきているといえる。土木学会におけるコンクリート構造の限界状態設計法への移行、日本建築学会における保有水平耐力の検討の追加、およびヨーロッパにおける統一コード制定の準備などが設計規準の最近の主な動きといえる。

4. 合成構造採用の実例

現在までに多くの合成構造が建設されてきたがこれらはその採用にあたり最適なものと判断されたはずである。なぜならば責任ある設計者が採用した構造形式が、その時点での最適な構造形式であると定義してもよいからである。そこで、ここではいくつかの合成構造の実例についてその採用の理由を検討し合成構造の特質を抽出してみたい。

4.1 活荷重合成桁橋

衆知のように活荷重合成桁橋は鋼桁を架設した後にそれを支保工としてその上に鉄筋コンクリート床版を築造して合成させ、その後作用する荷重のみに対して合成断面で抵抗するものであ

表-1 複合構造の用語例

用語	英語名
合成構造	Composite Structure
混合構造	Mixed Structure
複合構造	Hybrid Structure
鉄骨鉄筋コンクリート	Steel-Reinforced Concrete
鋼管コンクリート柱	Concrete-filled Steel Column
埋込み合成柱	Concrete-encased Steel Column
複合材料	Composite Material
累加方式	Superposition Method
完全合成	Full Interaction
部分合成	Partial Interaction
コンパクト断面	Compact Cross-section

表-2 合成構造発展の経緯

西暦(年)	事項
1854	Lambot による鉄筋コンクリート製ポートの製作
1886	Jackson によるプレストレストコンクリートの発明
1901	Sewell による角形鋼管へのコンクリートの充填(剛性の増加)
1908	Burr による鋼柱のコンクリート被覆(耐火性の増加)
1923	関東大震災における鉄骨鉄筋コンクリート建物の耐震性の実証
1941	Maier-Leipnitz らによる合成桁の設計
1944	アメリカの合成桁設計規準
1950	西ドイツの合成桁設計暫定規準
1950頃	スタッドの溶植法の開発
1953	わが国初の合成桁である神崎橋竣工
1954	西ドイツの合成桁設計規準
1958	日本建築学会の SRC 規準
1959	日本道路協会の鋼合げた橋の設計施工指針
1967	首都高速道路公団の SRC 設計基準
1970	日本道路協会の道路橋示方書に合成桁を規定
1973	日本国有鉄道の合成鉄道橋の設計標準
1975	プレビーム合げた橋設計施工指針(国土開発技術研究センター)
1977	本四公団委託の土木学会 SRC 構造設計指針
1979	本四公団の大型 SRC 橋脚設計要領(案)
1979	CEB・ECCS・FIP・IABSE の合成構造のモデルコード案
1979	西ドイツのフレール橋竣工(主径間は鋼けた、側径間は PC けた)
1980	SC くい設計指針(国土開発技術研究センター)
1986	土木学会コンクリート標準示方書改訂(限界状態設計法および SRC の規定)
1987	日本建築学会の SRC 規準に保有水平耐力の検討と鋼管コンクリート構造の組み込み

備考：ここでは鉄骨鉄筋コンクリートのことを SRC と記した。

る。すでに道路橋において多数の実績があり、地盤があまり良くない地域では下部工まで含めた全体の工事費を見積るとこの形式が最も経済的な橋梁となる例が多くみられた。合成桁による道路橋の場合、鉄筋コンクリート床版は、床版としての機能に加えて鋼桁との合成により主桁の圧縮フランジとしての二重の機能をもつことにより飛躍的な経済性が図れるのである。しかしながら単純支持橋では伸縮継目の設置が必要となり、車両走行上の快適性の問題および維持管理上の問題から伸縮継目の少ない形式の橋梁が求められるようになってきた。合成桁橋でも連続桁形式のものが今までにいくつか建設されてきたが、中間支点上のコンクリート床版に発生する引張応力を打ち消すための方策が必ずしも容易でないためにあまり普及していないのが現状である。また、合成桁橋の場合にはコンクリート床版の乾燥収縮が鋼桁によって拘束されるために床版に収縮ひびわれが発生しやすくこれがコンクリート床版の劣化の一因ともなっている。これらのことから径間数の多い道路橋の場合、活荷重合成桁橋以外の形式の橋梁が種々の理由で選択されることが増えてきている。

鉄道橋の場合には列車走行時の騒音および振動の点で鋼橋を用いることが不適当となったが、鋼橋は架設の工期を短縮する等の多くの優れた特徴を有している。そこで、合成桁形式とすることにより騒音と振動の問題を解決し、かつ、支間が河川からの制約によって70m程度以上とする必要から複線鉄道橋に対して1箱形合成桁橋が東北新幹線の荒川橋梁に採用された。

コンクリート床版にプレキャスト版を用い、これと鋼桁とを合成する方法も施工の合理化を図る目的で用いられるようになってきた。

鋼桁をヤードであらかじめ曲げ変形させた後にその引張側フランジ周囲にコンクリートを打ち込んで一体化させ、曲げ変形を解除することによってそのコンクリートにプレストレスを与えるプレビーム工法が合成桁橋として用いられている。プレビーム橋では鋼ウェブの周囲にもコンクリートを被覆し、鋼桁の上フランジはコンクリート床版の中に埋め込まれるために外見上はコンクリート橋である。しかしながら設計計算上ではコンクリートの引張強度を無視するためにまったく通常の鋼合成桁と同じ扱いとなっている。プレビーム橋の特徴は、鋼桁をコンクリートで被覆するために騒音や振動を大幅に軽減できること、たわみの検討に際してはコンクリートの曲げ剛性を適切に考慮することによってたわみ制限に対して有利となること、桁高を小さくできること、などを挙げることができる。すでに350橋の実績があるが、支間41.4mの2径間連続桁橋2連からなる二上大橋へと発展してきた。なお、プレビーム橋の発展は1975年に刊行された「プレビーム合成げた橋設計施工指針」に負うところが多い。

4. 2 鉄骨鉄筋コンクリート

わが国の建築の分野で発展した鉄骨鉄筋コンクリート構造は、都市内の高速道路の高架橋の橋脚に適用されそのために土木構造物に対する鉄骨鉄筋コンクリートの設計規準が定められた。この場合の鉄骨鉄筋コンクリートの採用の理由としては狭い建設空間の中で可能な限り小さい断面の橋脚を経済的に建設できることが挙げられる。また、鉄道の建設に際しては、鉄骨部分のみにて上部工を支えておき、上部工の施工と並行して逆巻で橋脚の鉄骨部分の周りにコンクリートを施工することにより工期を大幅に短縮した例がみられる。

一方、上述のような都市内の構造物と異なって長大橋の高橋脚の場合には鉄筋の多段配筋を避けたら、鉄骨を定規やガイドとする架設上の必要性から鉄骨鉄筋コンクリートが用いられるようになってきた。これに関しての設計方法として都市内高架橋の橋脚を主として対象とした設計基準を用いることは不適当な点が多かったため、大型鉄骨鉄筋コンクリート橋脚のための設計要領

が定められ実験的な裏付けも行われた。この設計要領に沿って本州四国連絡橋の鳴門大橋に接続する門崎高架橋の設計が実施された。この設計の基本的考えは、鉄骨に価格の安いH形鋼を用い、これを鉄筋の一部と置き換えて断面を構成するとともに鉄骨をブレース材でトラス状に結合することによって架設時および完成後のせん断抵抗を確保しようとしたものである。また鉄骨のフーチングへの定着はアンカーフレームを省略し、それに代えてH形鋼のフーチング埋込み部分にスタッドジベルを用いたことである。この構造形式はその後の本州四国連絡橋の瀬戸大橋の建設にも採用された。

以上のような土木分野における鉄骨鉄筋コンクリートの設計施工の実績を踏まえて、1986年制定の土木学会のコンクリート標準示方書の中に鉄骨鉄筋コンクリートに関する条項が定められたのである。

土木学会のコンクリート標準示方書に定められた条項の特徴としては、鉄骨鉄筋コンクリートの形式を、累加型構造、鉄筋鉄骨併用構造、および架設主体構造の3種類に分類したことである。これにより、構造物の状況に応じて鉄骨と鉄筋コンクリートとを適切に組み合わせて設計することが可能となったのである。

なお、鉄骨鉄筋コンクリートを方杖ラーメン橋の脚部に適用し、鉄骨を支保工としながら脚部を構築し、張出し架設によってわが国最大支間のこの種の橋梁を建設した富山県の祖山橋（PC方杖ラーメン橋、支間108m）の例が報告されている。このように、ユニークな架設方法や構造形式を計画する場合、鉄骨を活用すると有利性が多くなるものと思われる。

4.3 長大橋への合成構造の活用

長大支間のアーチ橋の建設にはアーチリブに鉄骨を用いることが多い。日本道路公団の中国自動車道では、鉄筋コンクリートアーチ橋の張出し架設上の必要から支間中央部分に鉄骨を用いて帝釈橋（支間145m）および宇佐川橋（支間204m）が建設された。

最近竣工したものとしては同じく日本道路公団の別府明ばん橋がある。この橋梁は支間が235mで東洋一のコンクリートアーチ橋である。架設はPC鋼棒を斜材としたトラス形式の張出し架設の後に中央部約70mを鋼トラス桁を用いて閉合した。このトラス桁は架設後にコンクリートで巻き立てられた。また、架設時の応力度とその後作用する荷重による応力度とで鋼トラス桁の応力度が許容値を越えるため、この鋼トラス桁は本体の断面としては考慮されず、あくまで架設のために用いられている。このような鉄骨材の活用方法は土木学会のコンクリート標準示方書の分類における架設主体構造に該当するものである。

長大橋への合成構造の適用例の特色あるものとしては、PC斜張橋の桁の重量をできるだけ軽くする方策として横桁に鋼桁を用いて成功した East Huntington橋（支間274.3m+185.3m）の例がある。世界最大級の鋼斜張橋であるカナダの Alex Fraser橋（Annacis 橋、支間465m）では鋼2主桁上にプレキャストコンクリート床版を用いて合成させた。なお、これらの橋梁の主塔は鉄筋コンクリート構造である。

合成構造とは異なるが、鋼とコンクリートとの複合構造の合理的なものとして支間の一方を鋼構造とし、他をコンクリート構造とするいわゆる混合構造も長大橋の建設に登場してきた。西ドイツの Flehe橋（支間367m）の完成によって注目されたこの構造はわが国の本州四国連絡橋の生口橋の建設に応用されている。また、特色ある混合構造として、鋼斜張橋の両端支点の橋脚を省略して直接PC連続桁と接合した大阪の菅原城北大橋（支間238m）がある。今後フランスの Normandy 橋（支間856m、工事着手）や尾道・今治ルートが多々羅大橋（支間890m、事業化決定）の

ような長大斜張橋に混合構造が多く適用されるようになるものと思われる。

5. 合成構造の新しい展開

鋼管の中にコンクリートを打ち込んだ構造はコンクリートが鋼管によって拘束されるためにきわめて強固で靱性に富んだ構造とすることができる。鋼管のみは比較的軽量であるから架設や組立ても容易に行うことができる。

佐渡島に建設された城址橋（支間 82m）は3本の角形鋼管を建設地点の両アバット部分に鉛直に組み立て、これを回転しながら倒して閉合し、鋼管の中にコンクリートを充填してアーチリブの剛性を高めてから、これにコンクリートを巻き立ててコンクリートアーチリブを構築する方法で架設された。この方法は内外で注目されており、今後の発展が期待されるものである。

フランスではPC橋の経済化を進めるためにコンクリートウェブに代えて波形鋼板をウェブに適用し自重の軽減を図る試みがなされた。この場合PCケーブルは外ケーブル方式である。この延長上としてさらに合理化を進めた結果、下フランジに鋼管を用いてその中にコンクリートを充填し、ウェブを波形鋼板とする外ケーブル方式のPC橋が登場してきた。現在のところPC橋では、これが最も革新的な構造であると思われる。図-1に示すように Maupré 橋では下フランジにコンクリートを充填したφ610mmの鋼管を用い、支間約50mの7径間連続PC橋が押し出し工法によって架設された⁽¹⁾（写真-1）。

上の2つの例からも明らかなように合成構造は単に鋼とコンクリートの合成の時代からPC技術やコンクリート充填鋼管の活用といった新しい展開を迎えるようになったのである。

一方、合成構造のうちで最も鋼材量の少ない部類の鉄筋コンクリートにおいても鉄筋の太径化が進み、直径が70mm以上の極太径鉄筋もいずれ登場するものと思われる。このような鉄筋は鉄骨と類似の挙動をするものとも考えられ今後の活用が期待できるものである。建築の分野では、60キロ鋼クラスの高張力鋼を鉄骨鉄筋コンクリートに活用する研究が進められており、高性能の材料の活用によって鉄骨鉄筋コンクリートが建築の分野で鋼管コンクリート構造とともに一層発展してゆくものと思われる。

超高強度コンクリート、高張力鋼材、耐蝕性鋼材、炭素繊維、アラミド繊維、水中不分離コンクリートなどの新しい材料の出現が、今後の合成構造の展開に大いに組み込まれてくることが期待できるのであり、構造技術者としては種々の構造材料を適切に組み合わせて使用することのできる柔軟な思考能力が一層必要とされるものと思われる。

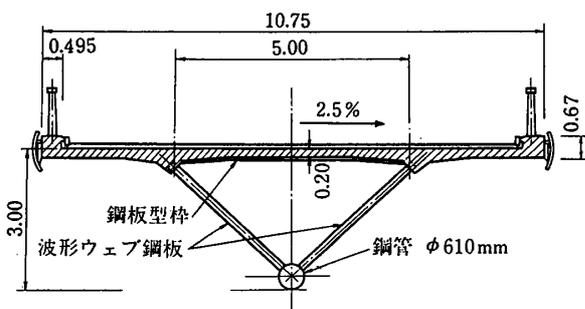


図-1 Maupré 橋の断面図

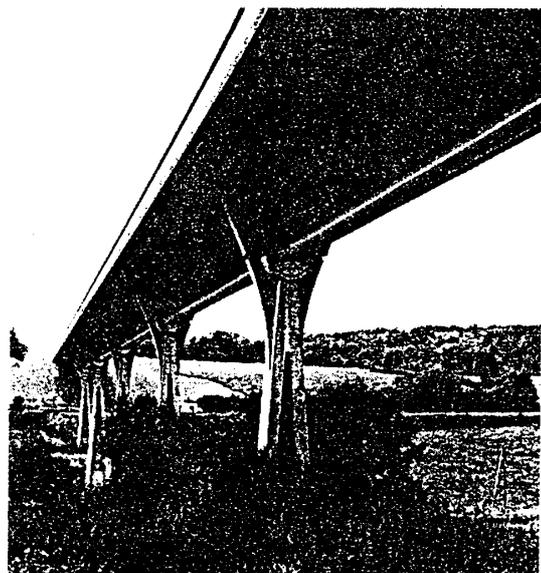


写真-1 Maupré 橋

なお、従来からコンクリート建造物の架設には鋼材が多量に用いられているのであって、広い意味ではこのような使用方法も一時的な複合構造と考えることも別の見方として参考になるものと思われる。

世界一の長大吊橋となる明石海峡大橋（支間1990m）ではその主塔基礎に直径80m、重量15300トンの鋼ケーソンが曳航設置され、現在その中に特殊水中コンクリートが打ち込まれている。この大規模な基礎構造に対しても、鋼とコンクリートとの複合構造の観点から大いに注目すべきであると思われる。

6. 複合構造への展開

構造設計をする場合、総合的に判断して最も合理的な構造形式を選定するのが常である。この場合には経験や実績が極めて重要であるが時として革新的構造への挑戦も行われる。単純化するために合成構造をとりあえずコンクリートと鋼との合成に限定してその得失を考えてみよう。第1に自重の影響を考えない場合、例えば短柱のような場合にはコンクリート構造は鋼構造より3倍程度も経済的に有利となる。第2に自重の影響を考える場合には明らかに鋼構造が有利となる。合成構造とすればいずれの場合も両者の中間に位置する筈である。第3に架設の条件あるいは工期等の条件、等が存在する場合には、合成構造が最も有利になる場合が有り得るのである。この場合、架設用材料まで含めて最も合理的な構造形式の検討が行われるべきである。しかしながら、鋼とコンクリートはそれぞれ品質も多様であり、その組合せも多様であるから検討の対象となる合成構造は極めて自由度の大きいものと言わざるを得ない。その中から適切な判断で最も好ましい形式を選定することになる。複合構造に枠を広げれば自由度は増々大きくなるので客観的に最適な形式を選定することは極めて困難である。そこで市場の原理の力を借りながら複合構造の合理的な形式を徐々に確立して行くことが重要であると思われる。コンクリートの強度等の品質が現在急速に高められていること、鋼材も高強度化が進んでいること、複合構造専用の形鋼等が造られ始めていること、新素材も登場してきたこと、などの状況を考えると合成構造や複合構造が構造設計のベースとなる日が来ることも遠くないと思われる。鋼、コンクリート、新素材、軽金属合金、プレストレス等を複合した建造物を対象とするには構造技術者の教育も複合化したシステムに進化する必要がある。

7. おわりに

鋼構造側からもコンクリート構造側からも複合構造へのアプローチは必然的な方向の一つであると思われる。何故なら複合構造は本質的に競争に強いからである。ただし、設計、施工に際しては多くの創意と苦心が要求されると思われる。なお、本文は著者の最近の論文⁽²⁾の内容を中心にとりまとめたので参考文献はその中に記載してある。

参考文献

- 1) Combault, J. et al, : Viaduc du vallon de Maupré, à Charolles, Travaux, pp.67~80
October 1988.
- 2) 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 第414号/V-12
pp.15~22、1990年 2月