

【寄稿論説】

最近の複合構造の諸問題について

Some Problems of Recent Hybrid Constructions

大阪大学名誉教授、工博
近畿大学理工学部土木工学科教授

*Emeritus Professor of Osaka University,
Professor of KINKI University, Dr.-Eng.*

前田幸雄
Yukio MAEDA



1. まえがき

鋼・コンクリート合成桁橋は、わが国では一時、単純鋼桁橋の80%以上を占め、プレストレスした、又はプレストレスしない連続合成桁橋も架設されたのであるが、実橋の床版破損が多く報告されるに及んで、合成桁橋も手控える傾向がみられた。又、学問的にも合成構造の理論が確立されて、古典的な学問とみなされて余り大きな関心を呼ばなかった。その後、コンクリート構造の目ざましい発展に伴って、鋼構造の危機が叫ばれ、再び鋼・コンクリート複合構造として脚光を浴び、時には断面が異種材料の組み合わせからなるいわゆる合成構造が、あるいは、一つの構造物を構成する各要素部材が各々異種材料でつくられた混合構造が、世界の各地で積極的に使用されはじめている。1985年9月ルクセンブルグで開かれたIABSE(国際構造工学会)とECCS(ヨーロッパ鋼構造連合)の共催の「建築鋼構造に関する国際シンポジウム」において、第2日目のセッションDは合成・混合構造を扱ったのであるが、20の論文が発表されて建築の分野でも、日本のSRC構造の他に各国で合成梁や合成柱などの研究が盛んになってきたことを示している。海洋構造においても、昨年わが国で建造されて、すでにアラスカ北岸で稼働中の移動式コンクリート人工島にみられるように、今後も新しい複合形式の構造の発展が期待されている。

混合構造の橋梁としては、ヨーロッパの斜張橋の中で、塔にコンクリート構造、桁の主径間に鋼桁、側径間にPC桁を架設工法の容易さから使用した例が出現した。1978年のノルウェーのBybrua橋、1979年の西独のDüsseldorf-Flehe橋、1980年のスウェーデンのNew Tjörn橋である。これらについてはすでに別のところで紹介¹⁾したので、ここでは省略する。

1985年5月、著者は、アメリカ鋼構造協会(AISC)とカナダ鋼構造協会(CISC)共催で米国シカゴで開かれた鋼構造の国際シンポジウムに招待をうけて出席し、自らも「鋼斜張橋の世界の現況と展望」について講演を行った。この時、シンポジウムの基調演説の中で、今後、米国の技術者は、日本やヨーロッパの国々が米国の中で建設プロジェクトを受注するのを、腕をこまねいて眺めているだけでなく、どんどん先進国に米国の技術を売り込みに歩かなくてはならないと、決意をのべて万場の大拍手を浴びた。斜張橋については、米国の技術者から、もし日本で混合形式や合成形式の斜張橋の研究が進んでいれば是非その資料が欲しいと頼まれた。又、米国とカナダでは鋼床版は工費が増大して不経済であり、従ってコンクリート床版に負けることが多いといった意見も述べられた。事実、近年、米国の斜張橋はコンクリート系橋梁と鋼橋との激しい競争の繰り返しだ。

この論説では、最近の米国の斜張橋における合成構造の適用例を紹介するとともに、設計の考え方について新しいアプローチが生まれつつあることを指摘したい。次に、複合構造の発達のためには、将来、鋼とコンクリートの種々の形式の継手構造が要求されると思うが、現在、西独の鉄道橋の合成構造をめぐって、Bochum大学のK. Roik教授とStuttgart工科大学名誉教授で、かつ設計事務所をもっているF. Leonhardt教授が興味ある論争を展開中であり、その概略を紹介して、読者の方々にも考えて戴きたい。最後に、設計法の問題として、合成構造に限らないが、橋梁の荷重係数設計法、又は限界状態設計法の世界の現状にふれて、著者を中心としたグループの合成橋梁設計指針案を紹介することを考えたが、頁数の都合から別の機会に譲りたい。

2. アメリカとカナダの斜張橋

米国では、1978年、中央スパン298.9mのコンクリート斜張橋Pasco-Kennewick Inter-City橋が建設されて漸く、おくればせながら長大斜張橋の一歩をふみ出した。1982年には、Luling橋がミシシッピ河に、中央スパン372mの鋼斜張橋形式で架けられた。その後、コンクリート橋と鋼橋が激しい競争を繰り返している。現在工事中の橋は表-1のようである。主塔はすべてコンクリートである。

表-1 アメリカとカナダの最近の斜張橋

橋名	国名	中央スパン(m)	有効巾員(m)	主桁構造	断面合成の有無	完成年
EAST HUNTINGTON	米国	274.32	9.14	PC桁	有	1985
SUNSHINE SKYWAY	米国	365.76	24.32	PC箱桁	無	1986
WEIRTON-STEUBENVILLE	米国	249.94	24.68	プレートガーダー	有	1986
QUINCY	米国	274.30	9.74	プレートガーダー	有	1986
ANNACIS ISLAND	カナダ	465.00	36.00	プレートガーダー	有	1988

その他、Dames Point橋、Talmadge Memorial橋、Vancouver Rapid Transit橋の着工は不明である。

(1) East Huntington橋

Ohio河を渡ってWest Virginia州のHuntington市とOhio州のProctorville市を結ぶ複合コンクリート・鋼斜張橋で、Engineering News Record誌(ENRと略称)の表現ではHybrid Girder in Cable-Stayであって、1985年完成予定。全長599.24m、スパン割り48.16+91.44+274.32+185.32m。この内で、274.32mと185.32mの2径間が斜めケーブルで吊り上げられている。

主桁高/スパン=1/14.3である。桁はプレキャストコンクリートセグメント張り出し工法で架設された高強度コンクリートの背の低いPCの2主桁構造である。横桁には広巾型鋼を用い、プレキャストコンクリート床版と組合せで合成する。塔は橋軸方向に1本であって、橋脚上89.73mの高さ、形状は逆Y形、脚部はPC箱断面、上部はH形断面のPC、ケーブルは2面のFan型であって、HiAm 307ケーブルを使用している。

(2) Sunshine Skyway橋

鋼桁案とコンクリート案の激しい競争が行われ、結局プレキャストコンクリート逆台形中空箱形断面主桁のコンクリート橋案が勝利をおさめた。スパン割りは146.74+365.76+146.74mである。断面形状はフランスのBrotonne橋(320m)と同じである。

(3) Weirton-Steubenville橋

West Virginia州のWeirton市とOhio州のSteubenville

市を結ぶ橋で、上部工は1986年完成予定。斜張橋の総延長502.96m、スパン割りは43.34+249.94+209.68m、非対称である。

主桁高/スパン=1/91.5。主桁は2主桁のI形プレートガーダーで、これをプレキャストコンクリート床版と合成する。床組として横桁と縦桁が設けられているが、床版との合成は不明である。主塔は橋軸方向に1本で、橋脚上111.3mの高さ、形式は逆Y形、脚部はPC箱断面、上部はH形断面。ケーブルはHiAm 235のFan形である。

この橋は元来、鋼主桁と鋼主塔の予定で下部工が完成しており、その後、鋼桁とコンクリート塔か、又はコンクリートの塔と桁か、鋼橋も含めて3種の案の競争入札の結果、鋼桁とコンクリート塔の組み合わせに決定したいきさつがある。

(4) Quincy橋

本橋はミシシッピ河を渡ってイリノイ州のQuincyに架けられつつある斜張橋で、全長664.98m、スパン割り61.0+134.10+274.30+134.10+61.0m。主桁は構造用I形断面鋼桁で、これとプレキャストコンクリート床版を合成する。塔は橋軸方向2本、H形の形状、高さ橋脚上75.56mと72.0m、断面はPC箱形である。ケーブルはHiAm 283のFan型である。床組は横桁の上に縦桁が設けられ、縦桁は床版と合成されている。

(5) Annacis Island橋²⁾

バンクーバ市近くのAnnacis島に工事中の橋で、1984年4月上部工に着手し、1988年完成予定である。わが国の横浜港横断斜張橋(工事中、中央スパン長460m)を抜いて世界最長の斜張橋となるはずである。斜張橋部分の橋長930.5m、スパン割りは50.0+182.75+465.0+182.75+50.0m、巾員は36.0mである。

主桁は2主桁のプレートガーダーで、これとプレキャスト床版を合成する構造となっている。縦桁を設けないで、4.5m間隔で鋼横桁を2主桁の間に配置している。主桁高/スパン=1/20.4。わが国やヨーロッパの鋼床版形式よりも施工が容易で経済的といっている。但し、横桁と床版が合成されているかは不明であるが、36.0mという広い巾員を考えると、有効巾から床版と主桁の合成が十分確保できるかどうか疑問に思われる。塔は橋脚上153.8m、ケーブル配置はFan型、ケーブルはHiAm 235である。設計はカナダオンタリオ道路橋設計指針の限界状態設計法に従い、疲労はB S 5400, Part 10を用いている。

3. 合成断面主桁の斜張橋

East Huntington橋は当初、鋼橋として設計されて、下部工も鋼橋として施工されたが、これに対して設計会社 Arvid Grantは鋼・コンクリート合成断面の主桁をもつ斜張橋を提案して成功した。この形式は当初の鋼橋案に對して約25億円安くなった。低価格の長大スパン斜張橋の一つとして新しい可能性を開いた。ENR, 1984年11月15日号の表紙にはこの橋の工事中の写真が掲載されて、New Generation of Hybridという見出しがつけられている。又、同社はこれ迄橋梁で用いられた中で最も強度の高いコンクリート560kg/cm²の使用を提案した。このArvid Grant社は先に米国最初の長大斜張橋Pasco Kennewick橋の設計においてコンクリート床版桁(concrete deck girder)を用いた実績があり、当時コンクリート床版を用いて鋼床版よりもかなり工費を低減できることについて、すでに高い評価を得ていた。Grant氏が長い間主張してきたことは(ENR, 1984年11月29日号)、「橋梁技術者は鋼で設計するのか、又はコンクリートで設計するかの選択について議論することを止めて、代りに、現在の手持ちの橋の設計について、2つの材料の最も有効な組み合わせを見出すような設計を勉強しなければいけない」ということである。同氏は以前に、1977年8月18日号のENR誌上で「米国には橋梁工学の技術がない。ヨーロッパ流に競争設計を主体とし、施工過程の中で設計技術者を多数含めるべきである」という提案を行ったことがある。代案設計は今日では米国では当たり前のこととなり、又一層技術を洗練させてゆくために設計者と施工業者の密接な協力が進みつつある。一つの結果としてGrant氏は彼の橋梁技術をEast Huntington橋において実現したと言えよう。

上記のENR誌(1984年11月15日号)はこの橋の特集号で、“Hybrid girder in cable-stay debut”, “High-strength concrete deck rivals the weight of steel”, “Score one for bridge art”, などといった見出し語にみると、この橋の考え方を全面的に支持していることが分る。鋼床版の製作工数が高いために、プレキャストコンクリート床版の全面的な使用が米国の現況である。これを米国の国内事情ときめてしまわないで、日本でも十分に研究してみる必要がある。

4. 複合構造の継手

複合構造が混合形式であり、合成形式であれ、これから益々鋼とコンクリートの種々な継手構造が要求される。継手にはずれ止めとしてスタッドが、又引張にはP C鋼棒などが使われているが、果して現在普及しているスタッド形式に問題がないのか検討してみる必要がある。以下に紹介するのは、上のような考え方にもとづいて西独のLeonhardt教授が³⁾なげかけた基本的な問題である。

(1) ずれを伴うせん断結合モデル理論

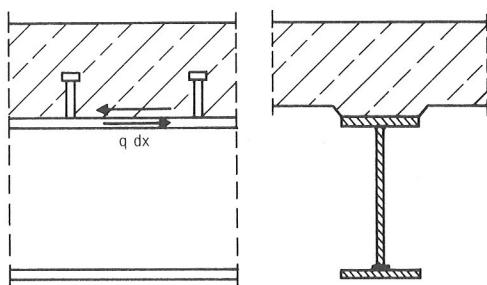


図-1 合成桁のせん断結合モデル

鉄筋コンクリート床版と鋼桁から成る合成桁が曲げをうける場合、合成桁は図-1に示したせん断結合モデルに従って設計され、合成の最終崩壊状態は図-2に示したいわゆるRoikモデルのようになる。この考え方は広く受容されて、各国の、又は国際的な合成桁設計指針の中でも定着した感がある。

この考え方では、合成功力は鋼桁フランジに平行に働くせん断力として評価され、比較的径の大きな、背の低い

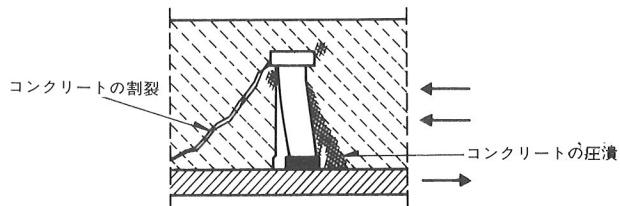


図-2 頭つきスタッドを用いたせん断結合の破壊状態

頭つきスタッドの溶接によって与えられる。このせん断結合理論に従う限りは、押し抜き試験の結果が、ずれ止めのせん断耐荷力に対して支配的な資料を提供することになる。例えば西独、ボッフム大学のRoik教授らの押し抜き試験では、スタッドの破壊荷重のおよそ0.3倍の荷重でずれが生じ始める。すなわち、低い荷重段階でコンクリート床版は鋼桁に対してずれ、その結果、大きな支圧力が始めてコンクリートに作用することになる。英国ワーウィック大学のJohnson教授はずれの影響について解析を行い、コンクリートと鋼桁の間の接触面において、ずれが生じて初めてスタッドがその機能を果す、と述べている。

ずれによる合成功能の損失は確かに実際に生じるが、その結果の応力増加は大きな問題にならないことから、現行の鋼・コンクリート合成桁はせん断結合モデルによる完全合成を前提として設計されている。

(2) 主応力線理論にもとづいたトラスモデル

曲げとせん断が同時に作用する梁では、この両者によ

る応力が組み合わされて主応力を生じる。鉄筋コンクリート部材でも、ひびわれが生じない場合には、この主応力線理論が適用できる。曲げとせん断をうける合成桁では図-3の側面図と平面図に示したように、主応力線が鋼桁のウエブから同じ方向を保持してコンクリート床版の中に連続して進むと仮定できる。従って合成の結合部分にはせん断力のみならず、斜め方向の引張および圧縮応力成分が作用する。今、この中の圧縮主応力に着目すると、その垂直成分（引張）が完全に伝達できる合成の方法が用いられるならば、主応力の作用が実現できる。すなわち、スタッドの高さが床版のほぼ全厚にわたっており、かつ、スタッドの頂部に大きな頭部分、あるいは溶接した横筋がある場合に、垂直方向引張力に抵抗できてコンクリートの斜め方向圧縮ストラットを支えることができる。

更に、鋼桁の上フランジ表面は通常粗であるために、傾斜のゆるい斜め圧縮ストラットをずれを生じることなく伝達できる。Leonhardt教授は、実験の結果、合成の継目におけるずれを防止するには、鋼フランジ表面に僅かな凹凸があれば十分であることを確かめている。圧縮ストラットに抵抗し、垂直方向の引張成分を完全に受けとめるためには、トラスモデルに従って合成手段の形成と結

合材寸法の設計を行わなければならない。もしこれが可能となれば、合成桁は高い疲労強度を示すことが予想できる。

以上の考え方にもとづいてLeonhardt教授が提案している設計方法は次のようである。彼は、鋼フランジ表面に小さな突起をつけて斜め圧縮ストラットに抵抗させることと、通常のスタッドに代って背の高い頭つき鋼棒を用い、それを床版の上面近くで十分に定着することを提案している。この鋼棒はスター・ラップと同じ性質のものであって、もはやせん断力は作用しないで引張のみが働くことになる。その設計はトラスモデルで行い得るが、桁端附近ではコンクリートの斜め圧縮ストラットの傾斜は $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ と仮定してよいと同教授は述べている。

又、同教授はわが国の川崎製鉄や住友金属が開発した突起付き縞鋼板を用いるならば、それに対して十分な抵抗を確保できることを示唆し、かつ3mm深さの突起を8~12mm間隔で設計してよいと述べている。この理論によるとずれのないせん断結合の確保が最も大切といえよう。

上に述べたせん断結合理論についての英國R.P.Johnson教授とトラスモデル理論についてのLeonhardt教授の間に展開された討議と、著者の両理論に対する見解については参考文献³⁾を参照されたい。ここで合成桁が実用に供されはじめた昔のことを考えると、当時はブロック又はチャンネル形式のずれ止めによってせん断に抵抗し、併用した斜め筋によって引き抜きに抵抗する設計であった。それが製作の容易さから現行のスタッドにとつとつて代ったのであるが、今一度この方法も検討し直してみる必要がある。尚、本年（1985年）9月、ルクセンブルグで開かれたIABSE-ECCSのシンポジウムにおいて、Leonhardt教授から同教授の次の論文を渡されて意見を求められた。別の機会に紹介したい。

"Zur Dauerfestigkeit von Stahlverbundträgern für Eisenbahnbrücken, Stuttgart," Sept. 3, 1985.

参考文献

- 前田幸雄：土木における合成構造、コンクリート工学、Vol.21, No.12, 1983.
- Taylor, P.R.: Hybrid Design for the World's Longest Span Cable-Stayed Bridge, IABSE Vancouver Congress, Final Report, pp.319-324, 1985.
- 前田幸雄：合成桁のせん断結合に関する考察、昭和59年度首都高速道路公団委託、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.

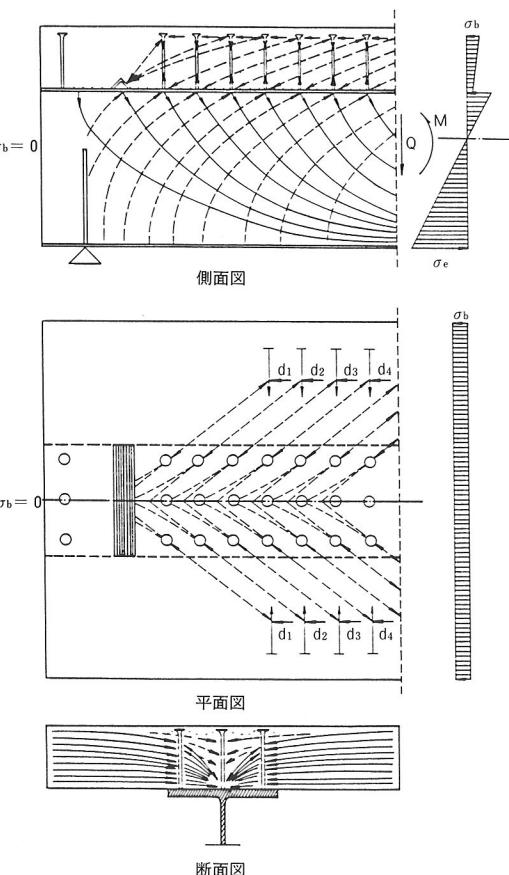


図-3 主応力線理論にもとづいたトラスモデル