

【寄稿論説】

競争力アップの次の一手 - 次世代鋼橋設計法の開発 -

Next strategy for competitive steel bridge solutions –bridge design for next generation -

長岡技術科学大学
工学部 環境・建設系

Professor of Civil & Environmental Engineering
Nagaoka University of Technology

長井 正嗣
Masatsugu NAGAI



1. まえがき

「先生、競争力アップのためには是非、限界状態設計法で設計したいと思います」、「荷重に異なった係数を乗じます、コストダウンにつながると言われました」、「荷重係数の根拠は？それが無ければ安全率を下げているだけでは？」、「・・・(沈黙のあと、AASHTO なので)」

以上はある技術者との会話です。道路橋示方書が性能規定記述を導入し、更なる改訂を宣言したこともあって、「性能照査型設計」、「限界状態設計法」、「部分安全係数フォーマット」が飛び交うようになっています。どこまで理解されているのか。どうも、複数の安全係数を用いた設計を限界状態設計と勘違いしているのではと疑問に感じます。現行道示でも、許容応力度の割増しがありますから、複数の安全係数を用いていることになります。しかし、これを限界状態設計法とは誰も言いません。また、「限界状態設計法」は20年前にイギリス BS(British Standard)に導入されています。当時、ずいぶん苦労しながら、このフォーマットを使って桁橋の試設計を行った記憶があります。同じ荷重強度を仮定した上での検討でしたが、鋼重など、現在の道示に準じた結果とほとんど変わらなかった記憶があります。

限界(多くの場合、終局、使用、疲労で、疲労が終局に含まれる場合や、この他に修復等があり議論されています)を明確にし、その限界での要求性能もあわせ定義し、部分安全係数を導入した照査フォーマットで、各限界で要求される性能が満足されるかを検討する方法に移行しようとしているわけです。ただ、時間のファクターが入ってくる耐久性に関する要求性能の定義と、性能の照査は依然困難かと感じます。さて、この手法と今回のテーマ「競争力アップの次の一手」とはタイアップするのでしょうか。つまり、この手法が次の一手となり得るのか。最初の会話では、技術者は「なり得る」「鋼橋の救世主となる」と主張しているわけです。皆さんはどう感じておられますか。「是非なって欲しい」と。でも、考えてみてください。なぜ、これまで導入されなかったのか。本文ではこの点について私見を述べたいと思います。まえがきの段階では、「なり得るし、なり得ない、どちらにでもなり得る」と答えて、話を進めます。

2. 少数主桁橋の登場 - 構造(形態)改革(Structural Innovation) -

言うまでもなく、日本道路公団(JH)を中心として、2主1桁橋など少数主桁橋が登場しました。下横構もな

く、横補剛材は小型の中間横桁のみでずいぶんシンプルな形態です。筆者はこれを**構造（形態）改革**(Structural Innovation)と呼んでいます。あわせて腹板の座屈補剛方法についても、正曲げモーメント領域に限定されていますが、少補剛設計が提案されています。また、1980年代には廃れた連続合成桁が復活しています。このタイプの橋の設計では、現行道路橋示方書の幾つかの規定を犯しています。6,7年前、学会の発表会では、「こんな小さな横桁など、アッという間に壊れる」と断言したコメントがありました。「6,7年経ちましたが、アッという間に壊れたでしょうか、横桁には応力がほとんど発生しないことは、今では周知の通りです」。

公団さんは、勿論、複数の技術検討委員会を立ち上げて徹底的に検討しました。とはいえ、随分思い切った対応をとられたと感心します。このタイプの橋を日本(高速道路)で最初に手がけたのは高橋昭一さん(現、JH静岡建設局構造技術課長)です。当初は非合成設計でスタートしたのですが、この形式を北海道限定バージョンではなく全国区とするための委員会があり、お手伝いさせていただきました。高橋さんの、橋の実体に即した設計を行うという思いとコストダウンにかける熱意を強く感じました。その後も連続合成桁の復活を高速道で行い、この過程で合成桁の特性を活かした少補剛設計を導入し、確認のための実験も行いました。果たしてどのように壊れるのかハラハラした記憶がよみがえってきます。コンクリートが圧壊(大きな音を伴います)し、同時に薄い腹板が座屈します¹⁾。曲げ強度は塑性モーメントでした。

現在、このタイプの橋はスパン 30~60m の領域で競争的な形式と位置付けられ、建設数が多くなり、国土交通省の橋梁にも見られるようになっていきます。このご時世というか、経済的であるという魅力には欠けてなくなっているのです。ご心配なく、「安い」という怪しい魅力でなく、技術的にもしっかりしています。

このタイプの導入で約 5~10%のコスト縮減が達成されたという報告があります。ところが、現在さらなるコストダウンが求められています。手はありますか???ここが、今回のテーマです。この構造はあまりにシンプルすぎてこれ以上のシンプル化は限界だと感じています。今回の構造改革は究極の改革で、更なる構造改革によるコストダウン方策には「閉塞感」が漂っていると思います。でも、ブレークスルーしなければ、ではどのような方策があるのか。

3. 長スパン領域での鋼系橋梁の位置付け

先ほどお話した合成 2 主桁橋はスパン 30~60m で競争力のある形式と位置づけられており、そのためこれ以上のコスト縮減対応は必要ないという意見も聞かれます。いつ強力なライバル、カウンターパートが出てくるかもしれません。直ちに追撃できる対策を準備する必要があると思います。あわてて対策を練っても遅いわけです。

一方、スパンが 60m (今は 70m) を超えると、つまり山岳部の橋梁に多いわけですが、鋼系橋梁は見向きをされないようです。そのため、この領域での競争的形式の開発が急務となっています。ところで、長大橋には高強度鋼の使用という定式があります。これは、30 年以上前の古くからの定式です。日本でも HT70, HT80 が開発され、主に本四の超長大橋梁に使用されました。アメリカでは、1990 年代初頭から、官、協会共同で橋梁用の HPS(High Performance Steel)の開発に取り組んでいます。かつてのような、単に強度を高くしただけではなく、高い性能(High Performance)、すなわち溶接性、じん性、成形性他に優れた鋼、HPS-485W(降伏点 485MPa)や HPS-690W(降伏点 690MPa)が開発されています²⁾。W は耐候性です。HPS の使用によって鋼重が減少した報告がありますが、鋼重減に対する単価のアップ、加工性の低下を総合的に勘案する必要があります。これは一つの対策ですが、材料開発は材料屋さんの仕事なので、ここでは、橋のエンジニアリング、デザインという観点から考えてみます。その観点から、鋼材の要求性能を考えたいと思います。

さて、対策として、虹橋(2004)の巻頭言³⁾に書きましたが、スパン 80~120m でも、スパン 30~60m での競争的橋梁

である合成 2 主桁を基本形態として長大化に挑戦すべきだと思っています。耐風安定性の問題が大きいのしかかってくると思いますが、これ以外の問題をも含めて乗り越えていく必要があります。しばしば、縦軸が m^2 あたりのコスト、横軸がスパンのグラフ⁴⁾を目にします。これを見ると明らかなように、2 主桁の 30~60m のコストをスパンとともに直線的に伸ばせるようにすることです。このラインは現在の PC や PC 複合橋梁のコストの下に位置します。では、そう簡単な話でしょうか。ここが研究や検討の課題となるわけです。果たして思い通りとなるのか。

4. 部分安全係数フォーマットを用いた終局限界状態の照査

「はじめに」でお話した話題、終局限界状態の導入にもどります。現行道路橋示方書では、安全係数として、基準値 1.7 を用いますが、現在導入しようとしているフォーマットは、

$$\gamma_i \frac{\gamma_a S(\sum \gamma_f F_k)}{R(f_k / \gamma_m) / \gamma_b} \leq 1.0 \quad (1)$$

です。各記号は紙面の都合で省略しますが、文献 5) を参照ください。

式(1)を見ると、 γ (安全係数)、 S (作用)、 R (抵抗)の 3 つがパラメータです。この 3 つのパラメータをどのようにすれば、橋の姿が変わるのか、競争的になるのかを念頭にもう少し考えてみます。

γ は昔から議論されています。死荷重には 1.1~1.2、活荷重は 2.0 前後。この差異は変動の確率の関係です。また、このような安全係数を導入すると、重量構造物、死荷重の占める割合の大きい長大橋の設計ほどコストダウンができるというわけですが、鋼とコンクリートの競争でいうと鋼が不利になるのではとされています。一方で、これまで建設されてきたものと同じものを作るためにキャリブレーションが行われる可能性があります。キャリブレーションした上でこれまでと同じ計算法や強度式を使用すると何も変わりません。設計計算書が変わるだけです。私は、BS で設計してもほとんど変化が得られなかった理由の一つがこれだと思っています。

次は S (作用) です。桁橋の設計は梁理論をベースに橋を格子状にモデル化 (格子桁) して断面力やたわみを計算します。断面寸法に比べて十分長い部材を対象とした梁理論そのものは問題ないのですが、格子モデルでもって果たして橋の本当の動きをモデル化、再現しているのだろうかという疑問がありました。最近、有限要素法による大規模構造物の 3 次元解析が容易になってきました。今から 10 年以上前、土木学会鋼構造委員会の中に新技術小委員会が設けられ、設計法部会 (部会長: 藤野陽三東京大学教授) がスタートし、3 次元有限要素解析 (3D FEA) で橋の本当の動き、"reality" を検討しました。本格的な橋全体の解析は我が国では初めてだったと思います。この研究は (社) 日本鉄鋼連盟の前身である鋼材倶楽部がスポンサーとなって行われました。とはいえ対傾構、横桁、下横構、ガセット、補剛材を複数もつ橋全体を 3 次元有限要素法で解くのは、当時は大変で、首都公団さんからも多大なご支援を頂きました⁶⁾⁷⁾。有限要素法を用いても、ちょっとしたモデル化の違いで応答が変わってきます。当時、この方法でも 2 次部材まで含めた "reality" の完全な再現は困難で、むしろ構造のシンプル化を図るべきだと痛感しました。その後、有限要素法のおかげで、下横構や対傾構など補剛部材が必ずしも必要でないこと、床版が荷重分配作用に大きく寄与していることや、2 主桁橋や少数主桁橋では断面変形に伴う 2 次応力が非常に小さいことも明らかになりました⁸⁾⁹⁾。非常にパワフルなツールです。個人的には、桁内の局所応力、2 次応力を求めようとするのではなく、桁の主要応力、疲労照査に関係する公称応力をできるだけ正しく同定することに利用すればよいと思っています。勿論、横補剛システムのシンプル化が前提です。

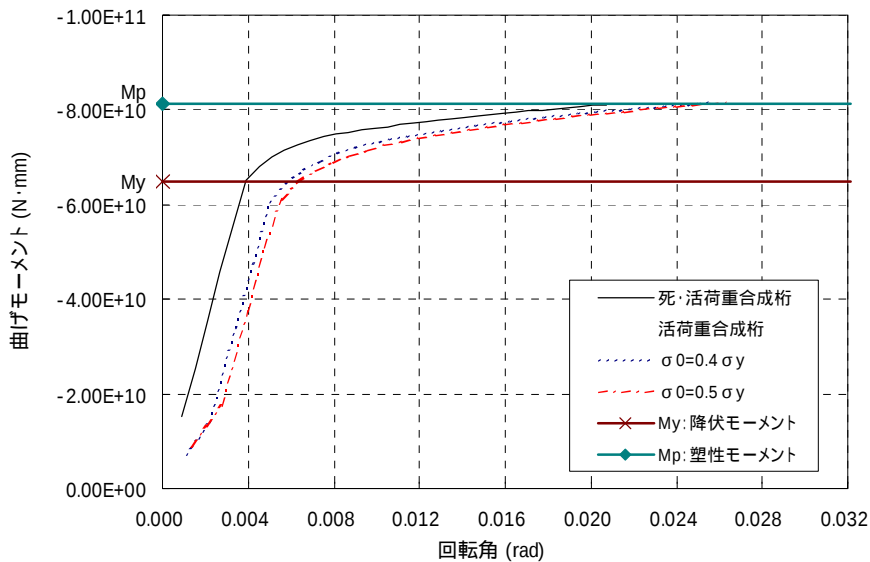


図 - 1 曲げモーメントと回転角の関係(材質:SM570, $H_w=3,000\text{mm}$, $t_w=14\text{mm}$)

最近,「有限要素法で設計する」という話をよく聞きます。過去の経験から言っても,複雑な構造系の“reality”の再現はまだ困難です。とくに2次部材は無理です。2次部材を省略することを考えたほうが賢明です。また,中間支点では床版がひび割れ,荷重の大きさに依存した剛性が変化する非線形解析が必要です。つまり,これまでの影響線載荷の概念が利用できません。「コンクリートのヤング係数を落とせば簡単」だと主張される方もいますが,“reality”の追求という崇高な理念とはかけ離れた対応です。FEAによる設計を否定しませんが,現状ではFEAでもなんらかの割り切りを行わないと設計できません。

文献10)では,横補剛材をシンプル化した合成多主1桁橋の有限要素解析による設計計算結果が紹介されています。床版をソリッド,鋼桁をシェル要素でモデル化していますが,影響線を得るためには気が遠くなるような膨大な繰り返し計算が行われたものと思います。結果,従来の格子解析による鋼重比較で数%の差異です。これでは,建設コストは何も変わりません。計算代が,かえって高くなります。

さて,最新技術を導入しても作用(S)も変化しないとすれば,あとは強度(R)に期待するしかありません。現行では,強度(R)は,降伏強度かまたはそれより低い座屈強度と定義されています。この定義,言い方を変えると終局限界状態での要求性能を踏襲すればここでも変化は期待できません。以上, y , S , R が変わらないので,限界状態設計を導入しても何も変わらないことが,そのため,これまで議論されても導入されなかった理由がわかるかと思います。では,このままでいいのでしょうか。

5. 次の一手

筆者の提案は,「合成桁」の一般化と「塑性強度評価」の導入です。これらは決して新しいキーワードではありませんが,構造改革と同時に**デザイン改革(Design Innovation)**の導入,コンビネーションです。合成桁設計を採用するのであれば,コンクリートにはもっと多くの役割をお願いします。というか,必然的に役割を担ってくれるのです。それは,スタッドの配置間隔も関係しますが,薄肉鋼板の座屈拘束効果です。著者の研究室では,昨年度,材質(SM400, SM490Y, SM570),前死荷重による鋼桁内力及び腹板高/板厚比をパラメータとした100ケース弱の計算を行っています。図-1は,そのうちの一計算結果です。アスペクト比が3.0の合成桁モデルに正曲げモーメントを作用させています。図中の M_y は降伏モーメント M_p は塑性モーメントです。材質SM570で,水平補剛材無しの腹板高(H_w)3,000mm,板厚(t_w)が14mm($H_w/t_w = 214$)のケースでも M_p に達します。最近の少数主桁橋では,塑性中立軸はコンクリート床版内

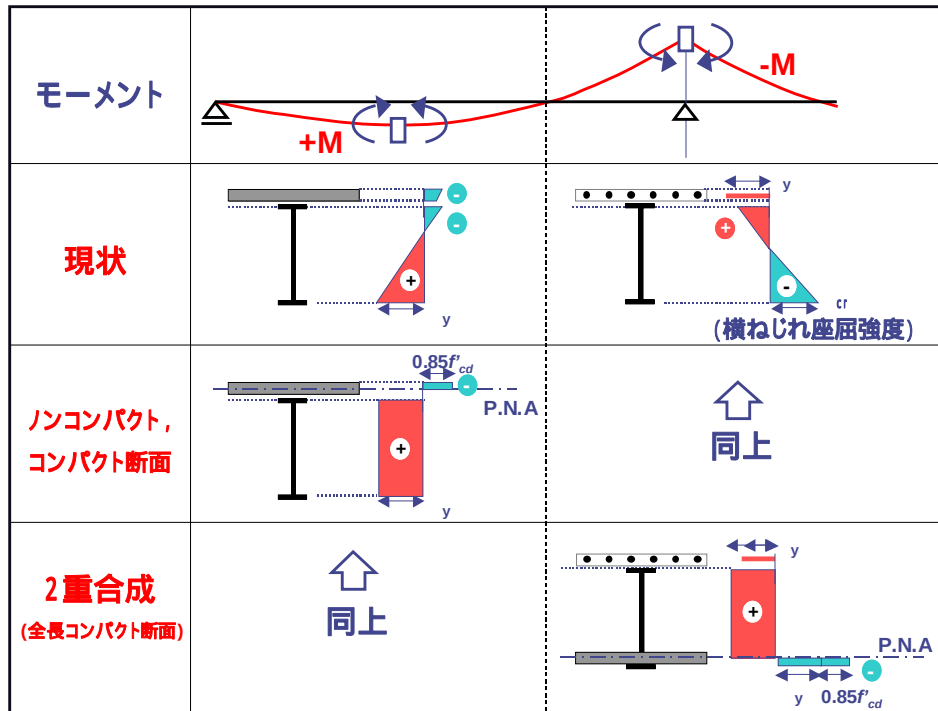


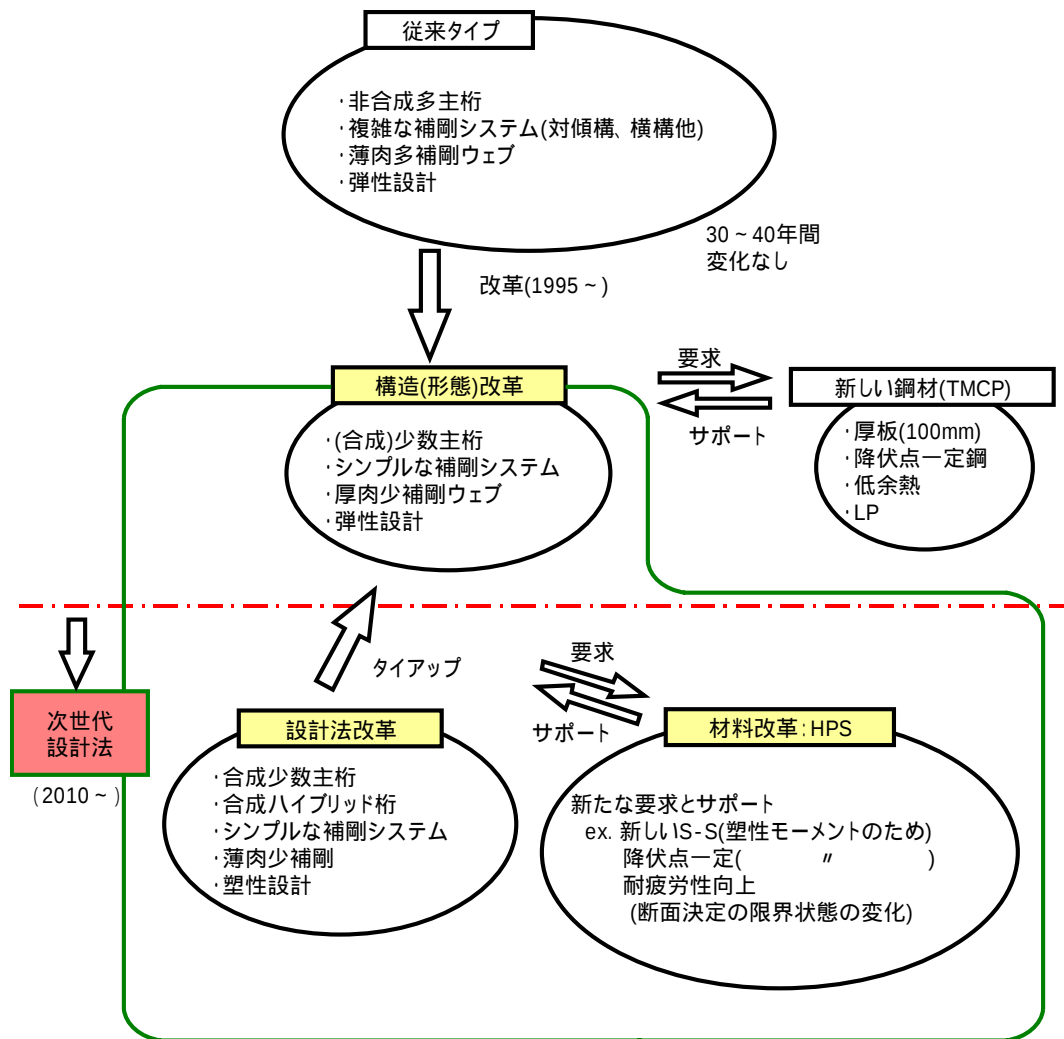
図 - 2 コンパクト断面設計

にあります。桁高にも依存しますが、最終、鋼はすべて引張状態となることを意味しています。最小重量で最大強度の発揮です。 M_p は M_y の 25%(合成桁として M_y を計算) ~ 45%(活荷重合成として M_y を計算) アップです。我々は活荷重合成を扱うため、まず、架設時を想定した鋼桁のみの非線形解析を行い(上フランジの圧縮応力で $\sigma_0 = 0.5\sigma_y$, $0.4\sigma_y$ を仮定)、その後、床版を取り付けてモーメントを漸増させます。図中には、現在使用例がないのですが、死・活荷重合成桁の結果も与えています。既に知られているように、塑性モーメントに達する場合、荷重履歴は関係しません。コンクリートの役割が極めて重要です。再び不安に感じる方が多いかと思います。しかし、サバイバルのためには耐久性の高い床版がキーワードです。なお、ここでの議論は塑性モーメントが達成できる最小腹板厚の同定です。実用上の観点からは、薄い腹板には限度があります。製作性、ウェブブリージングその他の要因を勘案して決定していく必要があります。また、 M_y を終局限界強度に設定とすることが悪いわけではありません。こうしておく、勿論合成桁設計が前提ですが、将来、交通荷重が大きくなった場合に対応できます。20~30%以上の余裕が利用できます。大切なことは、限界状態の定義と要求性能を明らかにしておくことです。単に設計フォーマットを変更するだけでなく、経済性が発揮できるのか、より信頼性の高いものとなっているのかもあわせて勘案した上での話です。

6. さいごに

“次の一手”として、既に提案された**構造(形態)改革**をベースに**デザイン改革**とのコンビネーションを提唱しました。具体的には、構造形態としては、合成2主1桁、(+ 剛結構造)、(+ 2重合成構造)の採用をスパンに応じて使い分けます。概ね、長スパンになるにつれて、2,3番目の構造を採用していきます。さらに、デザイン改革であるコンパクト断面設計を導入します(図 - 2 参照)。既に、EC や AASHTO の合成桁設計では採用されています。とくに AASHTO の設計法には「進化」を感じます。日本では、非合成設計も合成設計でも、腹板の補剛設計は同じです。おかしい、と感じませんか。正曲げ部はコンパクト断面設計、負曲げ部はノンコンパクト断面設計(負曲げ部はこれまでと同じ設計)です。中間支点位置で2重合成を使用すれば、全長にわたりコンパクト断面設計となり、この場合、終局限界状態で

表 - 1 競争力アップのための改革



の設計では、作用として収縮、クリープの影響が無視できます。2重合成の塑性モーメントは降伏モーメントの35～45%アップで、これを利用しない手はないと思います。果たしてこのような設計が可能かを現在検討中です。また、中間支点部下フランジ側にコンクリートを打設するため閉断面となり曲げ剛性はもとより、ねじれ剛性もアップします。スパン中央部は2主桁です。しばしば耳にするパーシャルボックスです。合成床版の底鋼板を2主桁上フランジに取り付け、 π 断面として架設時全体系の横ねじれ座屈を防ぎます。さらに、ケースバイケースですが、下横構を取り付けて（架設後は残す）張出し架設すれば、耐風安定性の問題も解決できるのではないかと期待を抱いています。下フランジ側にコンクリート（合成床版をイメージしています）を打設する費用はコストアップ要因であると思っていますが、検討しましょう。

架設時は鋼桁としての設計（ノンコンパクト断面設計）、完成後は合成桁ですが、コンパクト、ノンコンパクト断面設計の併用、2重合成なら全長コンパクト断面設計、まさにハイブリッドな設計です。この他に、腹板に、フランジに比べて低い強度の鋼材を用いるハイブリッド桁の導入等いろいろな手が考えられます。「Structural Innovation」、今回説明した「Design Innovation」、さらに材料屋さんにも参画をお願いしましょう。HPSの参画です。コストパフォーマンスの検討が必要ですが、鋼材の改革である「HPS」の導入も含めた改革を提唱します。そして、これに基づく設計が、「次世代鋼橋設計法」です（表 - 1 参照）。

はたして、コンパクト断面設計が可能，導入できるのでしょうか．ここは皆さん気になるところかと思いますが，筆者の提案のポイントでもあります．新しい設計でもって，安全性，使用性，耐久性が確保できており，しかも経済的な設計が可能となれば，変化の流れは間違いなく生じるはずです．「**進化した次世代鋼橋設計法**」の開発，導入による新たな競争時代の幕開けが必ずきます．競争力アップ，次世代設計法開発に向けた業界あげでの取り組みを期待しています．

最後に，繰り返しますが，“次の一手”の「合成桁」や「塑性」あるいは「ハイブリッド」は決して新しいキーワードではありません．古いキーワードです．これが，次の一手ですか，と詰問されそうです．筆者が主張したいのは，技術的キーワードは古いかもしれませんが，「構造，設計，材料改革のコンビネーション」と具体的な「行動」，「実践」です．

参考文献

- 1)大垣賀津雄，川口喜史，磯江暁，高橋昭一，川尻克利，長井正嗣：合成 2 主桁橋の鋼主桁補剛設計に関する実験的研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.44A，pp.1229-1239 (1998)
- 2)M. Lwin：High Performance Steel Designer's Guide, U.S.Dept. of Transportation, FHWA (2002)
- 3)長井正嗣：提案型体制の構築を，虹橋(巻頭言)，68，pp.14-17 (2004)
- 4)(社)日本橋梁建設協会：新しい鋼橋の誕生 (改訂版)，2004
- 5)土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，丸善(2002)
- 6)黒田充紀，長井正嗣，藤野陽三，柄川伸一，川井豊：並列 I 桁橋の有限要素モデル化に関する検討，構造工学論文集，土木学会，Vol.42A，pp.1073-1080 (1996)
- 7)長井正嗣，藤野陽三，黒田充紀，山崎和夫，柄川伸一，下見成明：I 桁橋の横方向部材の撤去に伴う鉛直荷重下の全体，局所変形挙動，構造工学論文集，土木学会，Vol.42A，pp.1081-1091 (1996)
- 8)長井正嗣，吉田康治：合成 2 主桁橋の横補剛材をパラメータとした 2 次応力に関する検討，構造工学論文集，土木学会，Vol.42A，pp.1061-1072 (1996)
- 9)長井正嗣，吉田康治，藤野陽三：シンプルな横補剛システムをもつ鋼多主 I 桁の立体力学挙動，構造工学論文集，土木学会，Vol.43A，pp.1141-1151 (1997)
- 10)村越潤，高橋実，吉岡勉，野中哲也，加藤修：FEM 解析を用いた鋼多主桁橋の設計合理化の検討，鋼構造論文集，鋼構造協会，第 11 巻，第 43 号，pp.131-145 (2004)