

巻頭言

Hybrid 桁設計考と “Synthesis”、“Integration” 力

長岡技術科学大学 環境・建設系教授 長井 正嗣

相変わらず堅い話ですが、1断面が異なる強度の鋼材で構成される桁をハイブリッド桁と呼んでおり、主にはウェブに相対的に低強度鋼を適用します。また、合成桁ですと、正曲げ領域の上フランジに相対的に低強度鋼が使用できます。これは、合成桁の中立軸の位置が上フランジに近いことで、後死荷重や変動する活荷重による応力が小さいためです。我が国でも、30年以上前に研究が行われています。最近ですと、2002年にJSSCからテクニカルレポート（No.53）が発行されています。いずれも、経済性、競争性を求めての研究と思いますが、これまで本格的にという意味では実現していないように思います。なぜでしょう。このタイプは現行の許容応力度設計法（ASD）では競争力は発揮できません。低強度側の鋼材が降伏応力に達したときが、橋の限界状態、崩壊や破壊と判定されるためです。これまでの研究をみても、本当にメリットが有るのか、または無いのか、有るとしてもその程度についてはハッキリしない“もやもや”状態のままです。今回はこの点について私見を紹介します。

さて、このテーマを進める前に、少し話題がそれ、また個人的な話になり恐縮ですが、感じていることを話させていただきます。写真はスコットランドのフォース鉄道橋（2008年6月撮影）です。白い布が「絆創膏」のようで少し痛々しく感じました。この橋は永久に、順次、塗り替え工事が続く、と聞いています。



フォース鉄道橋（1890年開通）

最近、どうしても「維持管理」関係の仕事というか「委員会」に関係する機会が多くなっています。橋の長寿命化や点検費用のミニマム化ですが、「橋ドクター」に関連する物件の場合、現地ですら待ったなしの判断が要求されます。即手術か、経過観測か、あと何カ月、何年耐えるか、といった医者のような判断です。このとき、広い範囲に渡る「基盤技術」、たとえば、鋼材の性質、座屈

強度、橋システムとしての力の流れ、連結強度など、またそれぞれの分野での「深い見識」、**“Synthesis”** 力、さらにそれらの**“Integration”** 力が問われます。また、設計と実態、実挙動の差異にも目配りが必要です。要求される技術力の高い維持管理事業と、それに対する決して高くないと聞く代価には、大きな矛盾を感じます。右肩上がりの時代に、製作技術は別として、技術力とくに設計力の重要性を軽視してきたツケでしょうか。

「痛い」「苦しい」など、人と異なり、物言わぬ「橋」は何を訴えようとしているのか。医者は、患者の申告、すなわち生の声と検査データを連動させて高い精度で「症状（状態）把握」と「症状の進行予測」を行います。準備する検査データは、患者の声をベースにほぼ的確に必要な検査項目を同定します。時には、再検査、再検査となりますが、最近は見立てでなく、適切な検査を指示できない医者、あれこれ検査費用がかさむ場合を藪医者というのでしょうか。

さて、橋は大変です。まず、動きませんので、医療のように診療に来てくれませんか、ものを言いません。また、往々にして、（劣化）症状、悪化の進行が遅いという問題もあります。さらには、動かないだけでなく、患部へのアクセスが極めて難しい。大きすぎます。地元にも大きなトラスやアーチがありますが、アクセスだけで大仕事です。そのため、モニタリング技術が大きく進展、展開しようとしています。当研究室でも、若い先生が中心に取り組む核のテーマになっています。間違いなく、次世代を担う重要な「基盤技術」の一つと言えます。一方で、何を、どこをモニターするかの同定が今後とも大きな課題だと感じています。恐らく多くの方々が感じられていると思います。

現在行われているのが、外見からの「状態評価」判定です。A, B, CやB1, B2など、企業の格付けのようですが、どの程度、実物の性能と直結した判定でしょうか。最も重要なポイントが、最も曖昧であると、大きな問題です。ここが、人間でいう医者と患者の関係と大きく異なっているところかと思えます。また、この解決が今後のキーポイントと感じます。サイエンスに基づいた確かな「状態評価」「状態の将来予測」なくして、維持管理の戦略、BMS, LCCは成り立たないと考えています。さらに重要なことは、予算と関わるため、説明責任が欠かせません。予算が多くなるにつれて、「バッシング」の対象になります。本当に必要で、そうでないと、「インフラの安全神話」が崩れ、人命を脅かします、と胸を張って主張する必要があります。では、どのようにしてモニタリングや点検結果と状態把握、将来予測を**“Integration”** するのでしょうか。

実際問題としては極めて難しいことも十分承知しています。よいアイデアが浮かんでいないのも事実ですが、個人的には、ここに3D-FEAの適用を考えています。「入口ではなく、的確な状態把握とケア」のための解析です。それも、橋全体の、実態を再現できる忠実なモデル化です。力の流れを確実に把握できるモデル化です。既存の橋の中で何が密かに進行しているのか、何が起ころうとしているのか。遠い将来、それとも近い将来に何かがおきそうか。泥臭いのですが、多くの外見情報、劣化情報と橋システムの振る舞い、余耐力、最終強度の関係をFEAで準備します。そして、モニタリングの対象同定や得られたデータと連動させるわけです。個々の、要素の技術の**“Integration”** です。最終の狙いは、BLS(Bridge Life Simulation)です。ただ、現状では、自信が言っているわけではありません。また、いろいろご批判もあるかと思えます。

サブプライムローンの破綻に端を発した不況の波は、100年に一度の不況と言われるように、各分野、とくに我が国の成長性の根幹となる輸出関連企業が大きなダメージを受けています。北米、中国の旺盛な購買、消費力に支えられえ、世界進出のストーリーは順風満帆とみえましたが、動きが大きくかつ急速に変化しています。日本の上得意、利益の源の北米は、ひどい状況のようで、アメリカ政府は対応に追われています。オバマ次期政権からは、8,000億ドルに達する膨大な財政出動の話が聞こえてきます。当初は「橋の補修などの公共事業」「環境・エネルギー分野」などが聞こえてきました。最近「グリーンイノベーションすなわち環境、エネルギー（風車、太陽光エネルギー）」「病院のIT」が聞こえてきます。とくに日本のマスコミは公共事業の話はしません。むしろ、「ばらまき」型の対策から「成長ストーリー」の描ける対策を謳い、相変わらずのバッシングです。

この一連の流れの中で、ABCでしたかCNNでしたか、忘れましたが、ASCEのテロップがあり、我が国（アメリカ）の構造物の劣化状態は、D,Eといったコメントをしていました。このように、劣化の状態を権威ある形で国民に説明できる、納得してもらう必要があると思います。更にもその上で、維持管理を法令化していく手立てを施すべきかと思ひます。そのためには、先ほどお話しした信頼できる診察を行う必要があります。藪医者に金をもっていかれた、と言われぬように。法令化されると、お医者さんのように告訴されることもあるわけです。構造屋にとっても、今後の重要な研究領域になると思ひます。

ずいぶん話がそれてしまったようです。内容自体がサイエンスの裏付けに欠けると指弾されそうなので、そろそろタイトル、ハイブリッドの話に戻しましょう。また、ページ数も多くなったので、簡潔にメリットの“有無”を議論しましょう。



ハイブリッド桁

最初に書きましたが、ASDではメリットが見えません。EC, AASHTOではハイブリッド桁が扱えるのですが、限界状態設計法（LSD）を採用しています。それでも、知人のProf. Raoul（フランスSETRA）はメリット“有”論者で、Prof. Hanswille（ドイツWuppertal大学）は“無”論者です。ハイブリッド桁が使えない我が国の橋屋さんには、ピンとこないと思います。世界の流れからは少し離れたところにいるのを感じてもらえると思います。

まず、鋼材ですが、強度差は1ランクが無難です。SM570材とSM490Y材です。SM490YとSM400の組み合わせは、我が国での鋼材単価の差が小さいので、メリットが少ないと思います。そのため、スパンは60から70m以上の長スパンが適用の対象となります。スパン60m程度になって、中間支点位置でSM570材を使用し始めるからです。お気づきの通り、鋼系橋梁の競争力がコンクリート橋に対して弱くなっていく領域です。

さて、設計を行う上で、以下のような使用、終局（安全、強度）限界状態における性能照査法を設定します。

$$\sigma_{1.0D + 1.3(L+I)} \leq \sigma_y \quad (1)$$

$$M_{1.3D + 2.0(L+I)} \leq M_{ult} \quad (2)$$

ここで、D、(L+I)は死荷重、衝撃を含む活荷重、 σ_y は降伏応力、 M_{ult} は終局曲げ強度です。

式（1）はAASHTO LRFDの使用限界状態での性能照査式です。式（2）の終局限界状態の照査では、現行道示の荷重係数（1.3, 2.0）を使用しています。AASHTO LRFDでは、式（2）に対応する強度照査式として、

$$M_{1.25D + 1.50DW + 1.75(L+I)} \leq M_{ult} \quad (3)$$

が用いられます。ここで、Dが舗装を除く死荷重、DWが舗装です。多くの場合、断面は式（1）、（3）で決定されます。とくに、合成桁の正曲げ領域のように（ M_{ult} ）が塑性モーメントの場合、式（1）の使用限界状態で断面が決まるようです。

このような設計が可能となれば、現行ASDで設計した鋼断面（非合成桁）をそのままHybrid桁（ウェブの強度を1ランク落とす）にしてもOKとなります。理由は、鋼桁の終局曲げ強度は、ハイブリッド桁とノン・ハイブリッド（ホモ）桁間で大きく変化しないためです。つまり、式（2）の M_{ult} は、通常降伏モーメントに近く、かつ両者の差異が小さい。これは、桁の曲げ強度に占めるウェブの曲げ強度の割合が小さいためです。また、式（1）で、ウェブの応力照査もOKになります。例えば、SM570材の許容応力度は260MPaのため、最大発生応力が260MPaに抑えられます。SM490Y材の降伏強度は355MPaです。210MPa（許容応力度）には抑えられませんが、355MPaに対しては、比率1.35程度で、式（1）は満足できます。

次に、式（1）、（2）を用いて設計してみます。その場合、ASDで設計された断面に比べて、正曲げ部では鋼断面積が約20%小さく設計できます。この理由は、正曲げ部の終局強度（ M_{ult} ）が塑

性モーメント (M_p) で、降伏モーメント (M_y) の約 1.5 倍となるためです (詳細な理由は省略しますが、 $M_{ult.}$ は $1.3M_y$ [AASHTO LRFD] または $0.9M_p$ [EC] に制限される)。一方、負曲げ部は変化しません。これは、負曲げ部は鋼桁断面のため、 $M_{ult.}$ が降伏モーメント (M_y) か、それより若干小さい。したがって負曲げ部では、式 (2) で断面が決定されるためです。式 (2) のモーメント (M) を応力 (σ)、また ($M_{ult.}$) を降伏応力 (σ_y) に置き換え、式 (1) と比較するとわかりやすいと思います。

さて、この設計法で設計したノン・ハイブリッド桁をハイブリッド桁に置き換える (ウェブの強度を 1 ランク落とす) と、正曲げ部のウェブが式 (1) を満足しません。そのため、ノン・ハイブリッド桁設計に比べて断面を少し大型化して応力を小さくする必要があります。その結果、ASD に比べると、10% 程度の減少になります。負曲げ部は、先と同様変化しません。負曲げ部は、ASD でも式 (1), (2) の設計でもノン・ハイブリッド、ハイブリッドともに変化しないわけです。ですから、LSD で変化するのは (部分係数を大きく変化させた場合は別ですが) 合成桁の正曲げ部だけです。

そろそろ結論としたほうがよさそうです。合成桁を現行の設計法に代わり LSD 設計 (式 (1), (2) を使用) することで、橋全体の鋼重量でみると 10% 程度減少する。ハイブリッド設計を行うと、約 5% の鋼重減ですが、鋼材単価が 5.6% 減 (スパン 80,100m の 2 車線用連続合成 2 主 I 桁橋の概略設計に基づく。また SM570 材と SM490Y 材の材料単価を 1.25 : 1.00 と設定) となる。いかがでしょうか。数値が常にこの通りかと言われると、ちょっと自信のないところがりますが、検討の手順はご理解いただけたと思います。個々のケースで検討されることを期待します。

LSD に移行した場合、実質的には複合橋梁の設計でメリットが見られます。合成桁の場合、変化の程度は上述の通りです。極端に大きな変化でもありませんが、日本ではずいぶん嫌われています。限界状態設計だと橋は塑性化して壊れる、あるいは床版が壊れるので危険だ、ASD は弾性設計だから問題ない、と言われる方がいる。驚きです。現行でも、限界状態として橋の弾塑性座屈崩壊を想定し、これに対して安全係数 (= 1.7) を考慮して設計している。また、ウェブは弾性座屈後の後座屈強度を見込んだ設計を行っています。先の「橋ドクター」のくだりで触れたように、技術者は橋の終局状態を熟知する必要があります。今後益々その重要性が高くなります。

LSD やハイブリッド桁設計にしても、「今更ながらの古い話で、これまでずいぶん検討してきましたよ」、とよく耳にします。逆に、「ではそのメリットと程度は、またデメリットは」と質問すると、「ムニャムニャ」となります。よくあるパターンです。ここでは、新たな設計法、アメリカやユーロ圏では一般的な設計法ですが、それと関連づけてハイブリッド桁設計を議論しました。いきなりハイブリッド桁の強度を研究するのではなく、ここでお話した様な、そもそもメリットはどの程度見込めるのか、つまりエンジニアリング力ですが、それとの“Integration”が大事です。この力が欠如していると、投資効率を低下させ、結局「ムニャムニャ」話で終わります。