

合成桁の新しい設計法
New design approach for composite girders

長井正嗣*, 杉山俊幸**, 奥井義昭***
Masatsugu NAGAI, Toshiyuki SUGIYAMA and Yoshiaki OKUI

ABSTRACT This paper deals with the design method, such as ASD, LSD and Performance-based Design. Benefit from application of LSD to composite girder is explained. Realization of a continuous composite twin-I-girder bridge based on LSD, the first time practice in Japan, is reported. Double-composite girders and composite girders with hybrid section are also dealt with, and future prospect on realization of them is given. Finally, relating to serviceability limit design, crack width control design is dealt with, in which, through comparison to European practice, reconsideration of the current approach is recommended.

KEYWORDS : 合成桁, 2重合成桁, ハイブリッド桁, 限界状態設計法

Composite girders, Double-composite girders, Hybrid girders, Limit State Design

1. まえがき

我が国で建設される鋼系橋梁の多く(95%以上)は、その設計が非合成、すなわち床版の主桁作用を考慮しない設計である¹⁾。桁橋の設計のあたり、経済性を念頭においた場合、合成桁設計を行うのは至極当然で、日本を除く世界では一般的である。この事実は、多くの外国人技術者に驚きを与える。日本の設計のユニークな点と言えるが、決して褒められているわけではない。1960年代、経済的に豊かでない時代、当然のごとく合成桁設計を採用したものの、早期に床版の損傷を招き、これがその後の、また今日に至る発注者側の「合成桁嫌い」に繋がっていると思われる。一般橋梁を対象として、外国人技術者から、我が国の設計に対するお褒めを頂いた経験はほとんど無いが、唯一、「保守的だが大胆な設計を行っている」と言われたのが、床版上に「防水層」を施工しなかった点である。皮肉であった。

本文では、まず、設計法そのものやその動向について説明する。次に、本題である、“新しい設計法”，具体的には限界状態設計法であるが、その紹介とあわせて、合成桁への適用における有用性を紹介する。

*工博、長岡技術科学大学教授、環境建設系(〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1)

**工博、山梨大学教授、工学部土木環境工学科(〒400-8511 甲府市武田4-3-11)

***工博、埼玉大学教授、工学部建設工学科(〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

2. 設計法

2.1 許容応力度設計法

言うまでもなく、我が国の橋設計は許容応力度設計法(ASD)をベースとしている²⁾。安全性に関わる性能照査法として以下の式が用いられる。

$$\sum f \leq h \cdot f_{ult} / \gamma \quad (1)$$

ここで、係数(h)は荷重の組合せ確率に応じた安全率の割増係数、 f_{ult} は降伏応力(f_y)または座屈終局強度($f_{buckling} \leq f_y$)のうち小さい方の値、 γ は安全係数(基準安全率)で、約1.7。SM570材などの高強度材は、(f_B/f_y)が小さいこと也有り、やや大きい1.77を採用している。なお、 f_B は最大強度。右辺をみればわかるように、最大強度は鋼材の降伏強度(f_y)で、この方法では塑性強度($\geq M_y$)は考慮できない。

式(1)では、鋼材の降伏ないし部材の破壊、崩壊が終局状態、限界状態となる。つまり、部材レベルでは、いわゆる、終局限界状態を考慮している設計法とも言える。一方で、不安定現象が生じない場合でも、降伏強度が終局限界状態で、降伏応力に対しても安全率約1.7を考慮する設計を行うことになる(道示、II鋼橋編、条項10.2.5、式(10.2.3))²⁾。後ほど説明するが、たとえば、EC^{3) 4)}やAASHTO LRFD⁵⁾では、使用限界状態(塑性変形、降伏変形が生じないことが照査事項の一つになっている)と終局限界状態(橋全体の不安定、部材の崩壊、破壊などの不安定現象が生じない)を使い分け、それぞれに対して異なる部分係数が用いられている。また、前者の部分係数が小さく設定されている。

2.2 世界のコード動向

1980年代半ば、BSが限界状態設計法(LSD)の導入をおこなった。第一筆者には、このBSで思い出がある。1985年にイギリス、サウスハンプトンで開催された境界要素法(BEM)の国際会議とあわせて、恩師、故小松定夫先生とBSの調査、コンサルタント(たとえば、当時のFreeman Fox社)を訪問した記憶がある。帰国後、関西道路研究会で、BSの勉強、LSDによる設計計算例の作成、我が国との違い、設計された橋の寸法、重量比較などに関する調査研究会が組織された。BSの設計フローを作成するのにずいぶん時間を要した記憶がある。面倒きわまりないというのが当時の印象であった。幾つかのコンビネーションでの比較設計を行ったが、私は、荷重は道示の規定に準じて構造計算を行い、I桁橋の断面設計を行った。具体的には、道示とBSで設計を行い、両者の結果を比較した。驚いたのは、結果に差異がなかったことである。こんなに面倒な手順を踏んで、ほぼ同じものが設計される。個人的に失望し、LSD移行への興味は薄れてしまった。なぜなのかについて、当時は理解する気持ちも無く時間が過ぎた。

現在ヨーロッパでは、LSDに基づくEC作成がほぼ終了し、各国での適用(各國適用基準、National Application Documentと併用して)が始まっている。AASHTO LRFDも、当初のASDから、1970年代には、荷重に異なる係数を乗じる荷重係数設計法(LFD)を、現在では、荷重抵抗係数法(LRFD)を採用している。LRFDの大きなメリットとして、信頼性理論に基づくこと、各々の構造物で同一の安全指標(β)が保証できることを挙げている。

2.3 JSCE コード(鋼・合成構造)

土木学会鋼構造委員会では、1987 年に、鋼構造設計指針 PART-A(Structures in general), PART-B(Specific Structures)を出版し、1997 年に、その改定版⁶⁾⁷⁾を出版している。1997 年版では、PART-B が“Composite structures”となった。前者は許容応力度設計(Allowable Stress Design : ASD)を、後者は限界状態設計(Limit State Design : LSD)をベースにしている。

さて、世の中で、“性能照査型設計”，すなわち要求性能のみをあたえ、性能の照査法は自由とする設計法の導入が検討され始めた。鋼構造委員会も、「鋼構造物の性能照査型設計体系の構築」に関する小委員会(市川篤司委員長)が発足し、2003 年には報告書⁸⁾が提出され、これを受けた形で 2004 年，“鋼・合成構造標準示方書小委員会(現在、長井正嗣委員長)”が発足した。なお、この示方書では合成構造を扱うが、それは以下の理由による。我が国では、とくに 1980 年代以降は、連続合成桁の建設機会が極めて少なくなったこともあり、研究成果もほぼ見られなくなった。それ故、鋼構造物設計指針 PART-B(合成構造物)⁷⁾の合成桁設計に関わる条項は当時の EC のコピーが記載されている。鋼構造委員会としては、世界に目を向けた場合、合成桁の競争性は見逃せない。とくに、今後のアジアでの市場競争において重要な位置づけになるとの認識を持っている。すなわち、EC, AASHTO LRFD と対等以上の条項を具備する必要があると認識を持っていた。そのため、筆者らを含め、鋼構造委員会の複数メンバーが、後述する合成桁の限界状態設計法構築に関わる活動を積極的に行ってき、それらの成果を導入すべく、あわせて世界に発信すべく、合成構造、実質的には合成桁を扱っている。

さて、2010 年現在で、全 6 編のうち、「総則編」⁹⁾「構造計画編」⁹⁾「設計編」⁹⁾「耐震設計編」¹⁰⁾「施工編」¹¹⁾が出版され、「維持管理編」の出版を待つ状態にある。また、最初の 3 編の英語バージョンが 2010 年に出版され¹²⁾、すでに AASHTO が浸透しているアジアを中心とした国際活動の重要なカウンターパートになると想定している。なお、本標準示方書は、我が国の土木鋼構造物を対象とした初の性能照査型限界状態設計法である。

2.4 JSSC テクニカルレポート¹³⁾¹⁴⁾

鋼構造協会では、日本鉄鋼連盟(JISF)の目的研究助成の一貫として、鋼橋の構造合理化、設計の信頼性向上を目的に委員会が設置されている。この委員会の部会として、鋼橋の競争力アップを念頭に、合成桁、2 重合成桁、ハイブリッド断面を有する合成桁などハイブリッド橋梁を対象とし、その限界状態設計法構築を扱う部会が発足した。2006, 2009 年には、その活動成果が JSSC テクニカルレポートとして出版されている。

2.5 NEXCO^{15)~18)}

NEXCO は、連続合成桁の限界状態設計法に関する調査、研究を行い^{15)~17)}、2009 年には、設計計算例・同解説¹⁸⁾を出版している。より具体的な計算事例が記載されており、理解を深める上で有益である。

また、限界状態設計法をベースとした合成 2 主 I 枠橋が、現在建設中であり¹⁹⁾、2010 年度には完成予定と聞く。完成すれば、日本初の限界状態設計法による連続合成桁になる。今後の展開が期待されるところである。

3. 限界状態設計法の導入

限界状態設計法というと、設計が面倒、繁雑になるというクレームを聞く。現行設計法は、基本的に、前述の式(1)で安全性能を満足すればよい。使用限界に対応するのが「たわみ制限」の照査である。細かい照査事項を省略して話を続けると、概ね以上の2項目で設計、断面寸法の決定が行われる。これに対して、限界状態設計法では、複数の限界状態設定と、各限界状態の照査に当たり、荷重係数を変えた複数項目の照査が必要になる。実務上はコンピュータで処理されると思うが、この方法で何が変わるか、どこに有意性があるのか、というのが実務者の感覚かと思われる。後ほど詳しく説明するが、確かに、鋼構設計の範囲、あるいは連続合成桁の中間支点位置では、大幅に安全率を変えない限り大きな変化が生じない。しかし、市場のグローバル化を考えると、それだけで逡巡している時ではないと言える。たとえ、「我が国の現行設計法が優れている、世界一」と主張しても、仮にそうであっても世界から取り残されるのは必然である。たとえ優れた船員がいても、船頭がかじ取りを間違うと、みじめな結果が待っている。

許容応力度設計法に基づく実務設計では、多くの場合、主要応力(f_m : ここでは、梁理論をベースに、格子構造モデルに代表される骨組みモデルの FEA から得られる値)に付加応力(シアラグ、そり応力、断面変形によるそり応力等)や応力集中などの2次応力(f_2)を加えて、その値を許容応力度と比較している。

$$f_m + (\Sigma f_2) \leq f_{ult}/1.7 \quad \text{--- (2)}$$

部材の終局強度(f_{ult})が f_y (応力が降伏に達するまで不安定現象は生じないとする)としよう。この場合、すべての発生応力、より実際に近い応力を知る必要がある。その上で、式(2)より安全性を照査する。その際、疑問に感じるのが安全率(= 1.7)である。2次応力まで知れば知るほど板厚がアップする。より高度な理論(たとえば弾性論で、ただし正解が求められないため、シェル要素を用いた FEA で近似解を求める)を用いて”reality”を知れば知るほど鋼重量が増える。

隅角部の設計で経験した実務者も多いと思うが、板厚は厚くなり、製作も大変、輸送も大変。東京や大阪の湾岸線道路の整備率の上昇に伴い、最近は設計事例も少なくなっていると思うが、「フルペネ溶接をどうしよう」「重くて運べない」と頭を痛めた技術者も多かったと思われる。前者は後に問題を起こすことになる。あんなに、厚板が必要だったのでしょうか。誰も設計法に触れないで、「フルペネ溶接や利益」に頭を悩ます。

次に、終局強度が座屈強度($\leq f_y$)である場合を考える。実験をするとわかるように、荷重の上昇に伴い、残留応力の影響で断面内の塑性化が始まる。実橋梁でいうと、2次応力の大きい箇所(主要応力と異なり、断面内の特定の位置)から塑性化が始まる。しかし、終局時の強度に与える影響は小さい。それでも式(2)で照査が必要なのか、つまり、左辺に2次応力を考慮した上で、右辺では、梁、桁全体の終局座屈強度を扱う必要があるのかという問い合わせである。これも古い話で恐縮ですが、第一著者と恩師との会話です。「初期たわみや残留応力を考慮した板の終局強度を、非線形 FEA や実験で解明して、オイラー強度からの低下度合を明らかにしてきた。ところが、それに対して安全率 1.7 を課せると許容値も同時に下が

る。不確定要因を明らかにしたのだから、安全係数を低下させてもよいのでは、何のために強度の研究、解明を行っているのか、わからなくなる。」

これを避ける手法として、使用限界状態では、

$$f_m + \sum f_2 \leq f_y / \gamma_1 \quad (3)$$

終局限界状態では、

$$f_m \leq f_{ult} / \gamma_2 \quad (4)$$

上記の(f_{ult})は部材の座屈崩壊など不安定に関わる限界値である。

また、終局限界での照査に当たっては、終局強度を断面力表示できること、塑性強度も扱えることを考慮して、以下の断面力(S)表示を用いる。

$$S_m \leq S_{ult} / \gamma_2 \quad (5)$$

とし、 $\gamma_2 = 1.7$ とするが、 γ_1 は使用状態とみなして、小さい値を用いる。ここで、Sは曲げモーメントやせん断力などである。

このような照査手法を導入できれば(基本的な設計思想に関わる問題で、議論を要するが)、2次応力の問題は緩和できる。また、終局強度(S_{ult})の評価にあたり、有限要素(FE)耐荷力解析による評価法の導入も考えられる。

4. AASHTO LRFD の照査

この基準を簡単に説明できないが、非常に実務的なセンスで話を進める。桁橋の断面寸法が決定されるのは、以下の2つの照査式による。

使用限界状態で、

$$f_{[1.0D + 1.3(L + I)]} \leq f_y \quad (6)$$

なお、文献13), 18)では、上式に代わって、

$$f_{[1.0D + 1.0(L + I)]} \leq f_y / 1.15 \quad (7)$$

が用いられている。式(6), (7)では、ほぼ同等の照査(ほぼ同じ安全レベルの確保)を行っているとみなせる。ここで、 $f_{[1.0D + 1.3(L + I)]}$ は、死荷重と衝撃を含む活荷重の1.3倍が作用したときに応力である。

終局限界状態では、塑性強度を考慮できるよう、断面力(S)表示を行う。

$$S_{[1.25D' + 1.5DW + 1.75(L + I)]} \leq S_{ult} \quad (8)$$

また、文献 13), 18) では、それぞれ、

$$S_{[1.0D + 1.0(L + I)]} \leq S_{ult}/1.7 \quad (9)$$

$$S_{[1.3D + 2.0(L + I)]} \leq S_{ult} \quad (10)$$

と与えられる。ここで、 $S_{[1.25D' + 1.50DW + 1.75(L + I)]}$ は、舗装を除く死荷重の 1.25 倍、舗装荷重の 1.5 倍、そして衝撃を含む活荷重の 1.75 倍を加えた荷重による断面力、 S_{ult} は終局強度。

合成桁では、コンクリート床版のクリープ、収縮に伴う作用、応力を考慮する必要がある。一般に活荷重合成桁では、クリープの影響は小さいが、これらの応力は使用限界状態(式(6), (7))で考慮される。一方、終局限界状態では、不静定力に伴う断面力のみが考慮されている。

4.1 鋼桁の設計

鋼桁の設計を考えよう。形鋼は別として、一般に薄肉の板で構成される桁橋の終局曲げ強度は構成要素に局部座屈が生じて降伏曲げ強度(M_y)を超えない。これをスレンダー断面($M_{ult} \leq M_y$)と呼んでいる。鋼 I 桁が塑性モーメントに達すると、計算上は 10~15% の強度アップが期待できる。しかし、ウェブの塑性強度を確保するには、かなりの厚板が必要となり、塑性モーメントも大幅に大きくできるが、実用上意味をなさない。また、薄板の圧縮領域に水平補剛材を設けて局部座屈を防止しても、薄板ゆえに、塑性強度のアップは小さい。

つまり、鋼桁では、その終局強度は降伏強度かそれ以下とみてよい。さて式(7), (9)をみて欲しい。強度が降伏強度以下のため、式(9)を以下のように応力表示に書き換える。

$$f \leq f_{ult} (\leq f_y)/1.7 \quad (11)$$

式(7), (11)の比較から、明らかに断面寸法は式(11)、終局限界状態での要求性能に支配されることがわかる。これは、現行設計法と同じで、現行法の結果と大きな変化がない。すなわち、鋼重比較の観点からは大きな差異は生じない。これが、先に説明した BS での設計の話に繋がる。当時は、このような点を考えなかった。個人的に思ったのは、鋼部材の(桁曲げ、板座屈、柱座屈)強度評価は世界も日本も、重力場が変わるわけでもなく同じ。時差で変わるわけもないであろう。設計用に設定する耐荷力曲線は変わらるが、大きな変化でもない。安全率を大きく変えれば別であるが。あわせて、どうして部材レベルでなく構造システムとしての終局強度を議論しないのか、と疑問に感じた記憶がある。

4.2 合成桁の設計

非合成設計した桁、すなわち鋼桁単独を耐荷部材とする設計を AASHTO LRFD で行っても、安全性能を満足するための鋼重量などが現行道示²⁾による設計と大きく変わらないこと、あわせその理由を説明した。では、合成桁はどうであろうか。

まず、中間支点部に着目する。中間支点部は、コンクリートがひび割れることから、抵抗断面は架設時は[鋼桁]断面、完成後は[鋼桁+鉄筋]断面となる。鉄筋を除けば、基本は鋼桁

断面であることから、4-1で議論した通りとなる。中間支点では、得られる断面構成に大きな差異が生じない。

正曲げを受ける径間部を考える。この場合、桁の塑性モーメント(M_p)を終局曲げ強度とできる($M_{ult} = M_p$)。架設時の安定性が確保できるウェブの板厚を用いて、塑性強度が得られる。一般に、少数桁の全塑性状態では、塑性中立軸が床版内にあり、ウェブは全高さにわたり引張り、薄板でも座屈の心配はない。また、活荷重合成桁の塑性モーメントは、 $M_p = (1.4 \sim 1.6)M_y$ と降伏モーメントに比べてかなり大きくなってくる。ここで、式(7), (10)をみてみよう。式(7)の応力 f を M (曲げモーメント)で置き換える。また、式(10)の断面力 S を M で置き換えると、以下の2式を得る。

$$M \leq M_y/1.15 \quad (12)$$

$$M \leq M_{ult} (= M_p)/1.7 = M_y/1.13 \quad (M_p = 1.5M_y \text{ 仮定}) \quad (13)$$

また、EC⁴では、 M_{ult} が $0.9M_p$ に制限されている。このことを考慮すると、

$$M \leq M_y/1.25 \quad (14)$$

となる。

以上より、式(12), (13)を比べると、使用限界状態で断面が支配されることがわかる(終局限界状態も同レベルの安全係数となり、降伏強度に対して安全係数 1.15 を用いて設計を行うことになる)。また、式(12), (14)を用いる場合、終局限界状態で断面が支配されるが、安全係数は 1.25 程度と小さくなっている。これより、現行設計の式(1)と比較して(ただし、 $h = 1.0$)、大幅に断面低減が可能となることが分かる。具体的に試算されることをお勧めするが、通常の 40~60m スパンの橋梁で、15~20%程度鋼重が低減する。橋全長でみると、中間支点位置の断面には LSD 導入でも変化がないことから、10%程度の鋼重減となる。

たとえば、先に説明した東日本高速道路(株)が建設中の連続合成桁(最大スパン、約 38m)¹⁹⁾では、鋼重で約 16%(うち 5%は現場溶接への変更による)の低減が報告されている。なお、最大活荷重たわみは、スパンの約(1/1,000 \leq 1/500²⁾, 1/800⁵⁾)と報告されている。これは、道示や AASHTO の規定を満足しているが、これまでの ASD 橋梁に比べて多少大きな値となっており、このことを心配する技術者も多いと思う。

文献 17)では、スパン 55~60m 程度の連続合成桁を対象に、ASD と LSD で設計した場合の騒音振動、耐風安定性の比較検討が行われている。結果、騒音振動において、大きな差異が生じないことが示されている。また、耐風安定性については、動的振動の発現風速が低下する傾向にあるものの、この程度のスパンで問題が生じることは無いとされている。ただし、耐風安定性は、設計法に関係なく、建設現地の地形の影響を受けることから、その点は別途注意が必要となる。

以上のように、合成桁に限界状態設計法を適用した場合(ただし、使用、終局限界の照査で、上記のような部分係数を設定する)、鋼重の変化が見られる。また、式(3)(4)(5)で説明したような照査法を採用すれば変化が期待できる。つまり、2 次応力は使用限界状態でのみ考慮し、かつ、使用限界状態(最大設計荷重時)での照査(永久、塑性変形が生じない)において

て、部分係数を低減させる。

5. 合成桁の強度

合成桁の強度評価については、文献 9), 13), 14), 18)~25) に詳しく記述されている。是非、参照されたい。ここでは、紙面の都合で、詳細な設計式の記述を省く。

6. 2重合成桁の強度

2重合成桁は、中間支点位置の圧縮を受ける鋼桁部にコンクリートを設置し、剛性の増加と鋼重の低下を意図している。また、比較的長スパンでの代案として検討される。2重合成構造は、ドイツで、長大箱桁橋や長大トラス橋に多用されている²⁶⁾が、I桁橋での適用は少ない。比較的最近、鉄道橋用の2主桁橋(スパンは 50, 60m クラス)での適用が見られるようになつた。一方、我が国での例は極めて少ない。唯一、加地大橋(新潟県、1970 年前後)に適用が見られる。径間部は開断面箱桁で、中間支点部が箱桁、中間支点部の下鋼板の上にコンクリートが打設されている。

一般に、スパンが 60, 70m を超えると、PC 箱桁橋、PC 鋼ウェブ箱桁橋が競争的とされ、市場を支配している。その代案として、2重合成桁が提案されているが、許容応力度設計を適用したのでは、大きな変化が期待できないと考えられる。その理由は、曲げ剛性のアップは可能であるが、弾性中立軸が下床版側に移動し、鉄筋の断面係数に大きな変化が生じないと思われるためである。つまり、鉄筋の降伏強度で断面の曲げ強度、降伏強度が決定される。

この2重合成構造に限界状態設計法を導入すれば、前述の通り、終局限界状態で塑性強度が利用できる。しかも、全長コンパクト断面($M_{ult} \geq M_p$)のため、径間部の曲げ強度が($M_{ult} \leq 0.9M_p$, EC)または($M_{ult} \leq 1.3M_y$, AASHTO LRFD)に制限されない。

なお、2重合成桁の終局強度は 14), 27), 28) に詳しく記述されているので、参考されたい。また、2重合成桁中間支点部の用いられる水平スタッドの設計については文献 14), 29) を参考されたい。あわせ、文献 30) に、長スパン(130m クラス)合成 I 桁橋を対象とした試算例が紹介されているので参考されたい。

7. ハイブリッド断面をもつ桁の設計と経済性

1断面が異なる強度をもつ鋼材で構成されている桁をハイブリッド桁と呼んでいる。最近、我が国では“ハイブリッド”が広く使用される。区別をするため、“ハイブリッド断面をもつ桁”と称することとする。通常、曲げを受け持つフランジに高強度鋼を、曲げ抵抗への寄与が小さいウェブに低強度鋼を使用する。余計な話ではあるが、最近のノン・ハイブリッド(ホモ)断面でも、ウェブ厚が薄く、相対的に高い降伏応力を有することから、見掛け上、ウェブに高強度材を用いたハイブリッド断面になっていると考えられる。世界的な動向をみると、ユーロ圏での適用はあまり活発でなく³¹⁾、アメリカ圏での研究活動が目を引く。後者は HPS の導入にあわせて検討が行われている^{5), 32)}。

ハイブリッド断面の桁に関する我が国の研究は、1970 年代に見られる^{33), 34)}。これは、HT700, HT800 が開発されたことと連動しており、高強度材を効率的に桁橋に適用しようとい

う発想から来たものと考えてよい。その後、2000年以降に、再び研究例が見られる^{35), 36)}が、このときは限界状態設計法の導入に関連付けて検討されたものと思われる。比較的最近になっても研究が行われているが、再び、高強度鋼(SBHS700)の開発に関連付けて研究が行われている³⁷⁾。また、性能照査型設計法の導入をにらんだハイブリッド桁のせん断強度、曲げとせん断の相関強度に関する研究³⁸⁾も行われている。

本文では、ハイブリッド断面桁が我が国の設計法と照らし合わせて、適用可能であるか、また、適用にあたりそのメリットがどの程度あるのかについて、以下に説明する。なお、以下の論調の詳細、根拠の説明はシンポ講演時に行う。

7.1 現行 ASD での設計

既に説明したように、ASD では、桁断面の強度が低強度側(ウェブ)の鋼材強度(f_{yw})に支配されて、高強度側(フランジ)鋼材の高強度分が無駄となる。つまり、現行道示に準じる場合、ハイブリッド桁の設計は意味をなさない。

$$f \leq f_{yw}/1.7 \quad (15)$$

ただし、活荷重合成桁の設計では、通常、合成後の断面中立軸が上フランジ位置に近いことから、合成桁としての発生応力は極めて小さい。そのため、ASD で設計を行う場合でも、ウェブではなく上フランジのみを低材質化したハイブリッド断面桁の設計が可能となる。

7.2 LSD での設計

7.2.1 鋼ハイブリッド桁の設計

まず、同じフランジ、ウェブ断面をもつノン・ハイブリッド桁とハイブリッド桁の終局曲げ強度(M_{ult})を考えてみよう。高強度側のフランジ断面が共通のため、差異はウェブの強度の差異となる。周知の通り、ウェブの曲げ強度に対する寄与は小さいことから、両者の差異は小さいと考えられる。

具体的な照査方法を再掲すると、

$$f \leq f_y/1.15 \quad (16)$$

$$M \leq M_{ult}/1.7 \quad (17)$$

と与えられる。断面は上式(17)に支配される、あるいは式(17)で決定されるが、上述の通り、ノン・ハイブリッド桁、ハイブリッド桁で曲げ強度が大きく変わらないことから、ほぼ同じ断面構成の設計が可能になる。

次に、使用限界状態(式(16))を考える。たとえば、SM570($f_y = 450\text{MPa}$)と SM490Y($f_y = 355\text{MPa}$)のハイブリッド断面を対象とする。使用状態でのフランジの最大発生応力度は、断面が式(17)で支配されていることから、最大で 260MPa である。 $f_y/1.15 = 390\text{MPa}$ であり、式(16)は当然満足されている。低材質側(ウェブ)に着目すると、式(16)の右辺は、 $(260\text{MPa}) \leq$

$f_y/1.15 = 309\text{MPa}$)となり、使用限界状態を満足できる。一方、ウェブにSM400材を用いた場合、 $(260\text{MPa} \geq f_y/1.15 = 204\text{MPa})$ となり、式(16)を満足できない。この場合の強度比は約1.9である。

以上より、本文で扱う使用、終局限界状態での要求性能の照査法をベースとするLSDの導入により、ハイブリッド桁の採用が可能となる。つまり、ノン・ハイブリッド桁で設計された断面(4.1で説明したように、ASDで設計される断面と変化は無い)のウェブを低材質化してコストダウンを図ることが可能となる。ただし、ウェブのせん断強度については別途照査を行う必要がある。また、降伏強度比は2.0まで許容している^{3), 35)}が、AASHTOの2004年以降のバージョンは低強度側の降伏強度として高強度側の70%以上を推奨している。

7.2.2 合成ハイブリッド桁の設計

連続合成桁の中間支点部は、使用、終局限界状態とともに、[鋼桁 + 鉄筋]断面が抵抗断面として設計される。したがって、負曲げを受ける中間支点部は7.2.1で議論した通り、ウェブに低材質を用いるハイブリッド化が可能となる。

さて、正曲げを受ける径間部では、4.2に記述した式(12),(14)で断面が決定されている。そのため、ノン・ハイブリッド桁では、ASDに比べて断面積が15~20%程度低減できる。ウェブを低材質化すると式(12)が満足できないことが分かる。したがって、径間部はノン・ハイブリッド断面のままか、あるいは、断面を大きくして応力を低減した上で、すなわち、式(12)を満足できるようにハイブリッド化を行う必要がある。そのため、合成桁でのハイブリッド化については、両者(ノン・ハイブリッド桁と、それに比べて大きな断面をもつハイブリッド桁)の経済比較を行う必要がある。

8. 使用限界状態での照査

8.1 一般

我が国の設計²⁾では、使用限界と銘打った照査事項はないが、主にはたわみ制限を設けるとで、使用性に対する配慮がなされている。

ここでは、使用限界状態で設定される複数の照査事項のうち、連続合成桁中間支点部のコンクリート床版の「ひび割れ幅制御設計」に関する話題を提供する。筆者(第1,3)らは、高耐久性が期待できるプレキャスト(PCa)床版をもつ鋼連続合成桁の開発に関する技術検討委員会で検討を重ねてきた^{15), 39)~41)}。本形式では、グループスタッドの扱い、グループスタッドの橋軸方向間隔、ピッチが長くなる問題、PCa版間詰め部の鉄筋比の問題をクリアする必要がある。現状では、このうち、「ひび割れ幅制御」をクリアできずに、連続合成化には至っていない。なお、桁端部や中間支点位置を「場所打ち」とし、残りの部分にプレキャスト床版を用いた、組み合わせ状態での建設は可能と考えている。ここでは、実現の障壁となっている鉄筋比の問題について、今後の検討課題を含めて簡単に説明する。

8.2 ひび割れ幅制御設計

道示では、ひび割れ幅の計算式は与えられていない。ただし、鉄筋比(ρ_s)が2%以上、また発生応力度が、鉄筋強度に関係なく140MPa(主桁作用と床版作用を重ね合わせる必要があ

り、その場合 20%の許容応力度の割り増しが許される)以下に抑えることが規定されている。ひび割れ幅は、ひび割れ間隔と鉄筋ひずみの平均値の積で評価されることから、これら鉄筋比や鉄筋応力の制限は、ひび割れ幅制御に対する配慮である。

今、コンクリートの引張強度(f_{ctm})を 3MPa と仮定し、かつ鉄筋比 2%とする。コンクリートにひび割れが発生すると、コンクリートの引張力が鉄筋で受け持たれる。このとき、鉄筋応力(σ_s)は、

$$\sigma_s = f_{ctm} / \rho_s = 150 \text{ MPa} \quad (18)$$

となる。この段階で、すでに 140MPa をオーバーしている。一方、床版曲げによる鉄筋の引張応力を 100MPa($\leq 140 \text{ MPa}$)程度で設計したとする。両者を重ね合わせると、

$$\sigma_s = 150 + 100 = 250 \text{ MPa} \geq 1.2 \times 140 = 168 \text{ MPa} [\text{許容値}] \quad (19)$$

となる。主桁作用の鉄筋応力と重ね合わせると、設計が極めて困難になることが分かる。

当時、我が国の最新の知見を取り入れたひび割れ幅制御設計に基づく文献 42)では、スパン 50m の連続合成 2 主 I 桁橋が扱われているが、必要な鉄筋比は 2.6%となる。計算例の詳細をみると、コンクリート床版の下側鉄筋の応力照査が、以下のように与えられる。

$$\sigma_s = 70 \text{ (主桁作用)} + 81 \text{ (版曲げ)} = 151 \leq 1.2 \times 140 = 168 \text{ MPa} \quad (20)$$

このとき、ひび割れ幅は 0.111mm ($\leq 0.198 \text{ mm}$ [許容値]) である。これより、版作用および主桁作用の重ね合わせ状態での鉄筋応力照査で鉄筋量が決定されていることがわかる。さて、式(18), (19)では、主桁作用による大きな鉄筋応力が示されている。一方、式(20)では、70MPa となっている。この差異は、文献 42)では、初期ひび割れ状態を考慮しないためで、作用する負曲げモーメントの大きさに関係なく(作用モーメントが小さくても)，安定ひび割れ状態(最初から、コンクリートは無いものと仮定)としているためである。果たして実際の状態を再現しているか疑問が残る。

フランス、スイスの連続合成 2 主 I 桁橋の設計計算例が文献 43), 44) に示される。ともに、スパン 60 + 80 + 60(m) の同じ橋梁を対象に設計が行われている。文献 43) の著者の一人、フランス SETRA の J. Raoul と、文献 44) の第 1 著者、スイス EPFL(スイス連邦ローザンヌ工科大)の Prof. J. P. Lebet が友人関係にあり、意図的に同一橋梁で設計を行ったものである。

中間支点部の必要鉄筋比は約 1.0%強となっている。スパン 80m で 1.0%強のフランス、イスと、スパン 50m で鉄筋比 2.5%以上が必要な日本。これでは、プレキャスト版での配筋が困難となる。この制約によって、高い耐久性が期待できるプレキャスト版の連続合成桁へ採用が阻まれている。今後、設計の考え方について、検討の余地があると言える。

9. まとめ

以上、合成桁の新しい設計法と題して、限界状態設計手法、合成桁への適用とその有用性、

それによる変化を説明した。また、我が国において、限界状態設計法をベースとする初の連続合成桁の実現が近いことを紹介した¹⁹⁾。あわせ、2重合成桁、ハイブリッド断面を有する合成桁について説明した。2重合成構造については、是非実現されることを期待したい³⁰⁾。ハイブリッド断面を有する合成桁については、限界状態設計法（LSD）を導入することで実現可能となることを示した。

本文が、若いエンジニア、世界を見据えなければならないエンジニアにとって有益な情報となれば幸いである。

謝辞

本文をまとめるにあたり、資料提供や貴重なご意見をいただいた、(株)高速道路総合技術研究所の本間淳史氏(現、東日本高速道路(株)関東支社)、稻葉尚文氏(現、中日本高速道路(株)東京支社)、酒井修平氏(現、中日本高速道路(株)名古屋支社)に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 山口栄輝：鋼橋設計の合理化，B+F(特集号)，Vol. 40, No. 8, pp. 40-43, 2006
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，II鋼橋編，丸善，2002
- 3) CEN : Eurocode3, Design of steel structures, Part1-1, General rules and rules for buildings, 2003
- 4) CEN : Eurocode4, Design of composite steel and concrete structures, Part2 : General rules and rules for bridges, 2004
- 5) AASHTO : LRFD bridge design specifications -2005 Interim versions-, 2005
- 6) 土木学会鋼構造委員会：鋼構造物設計指針 PART A 一般構造物、鋼構造物設計指針小委員会(西野文雄委員長), 1997
- 7) 土木学会鋼構造委員会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物、鋼構造終局強度研究委員会合成構造物の終局強度分科会(中井 博主査), 1997
- 8) 土木学会鋼構造委員会：鋼構造物の性能照査型設計体系に構築に向けて、鋼構造物の性能照査型設計法に関する調査特別小委員会(市川篤司委員長), 2003
- 9) 土木学会鋼構造委員会, 2007 年制定鋼・合成構造標準示方書[総則編(杉山俊幸主査), 構造計画編(市川篤司主査), 設計編(依田照彦主査)], 鋼・合成標準示方書小委員会(長井正嗣委員長), 2007
- 10) 同上：2008 制定鋼・合成標準示方書[耐震設計編(宇佐美勉主査)], 鋼・合成構造標準指示方書小委員会(長井正嗣委員長), 2008
- 11) 同上：2009 制定鋼・合成標準示方書[施工編(森猛主査)], 鋼・合成構造標準指示方書小委員会(長井正嗣委員長), 2009
- 12) Committee on Steel Structures of JSCE : First edition 2007 Standard Specifications for Steel and Composite Structures, I General Provision, II Structural Planning, III Design, Subcommittee on Standard Specifications for Steel and Composite Structures (chaired by Masatsugu NAGAI), 2010

- 13) (社)鋼構造協会[鋼橋性能向上委員会(藤野陽三委員長)合理化設計法部会(長井正嗣部会長)], 合成桁の限界状態設計法試案, JSSC テクニカルレポート, No. 70, 2006
- 14) (社)日本鋼構造協会[鋼橋の性能・信頼性向上に関する研究委員会(藤野陽三委員長):合理化設計部会(長井正嗣部会長)] :ハイブリッド桁の限界状態設計法試案, JSSC テクニカルレポート, No. 83, 2009
- 15) (財)高速道路技術センター:平成 17 年度鋼連続合成桁の構造合理化に関する技術検討(長井正嗣委員長)業務報告書[東日本高速道路(株)関東支社委託], 2006
- 16) (財)高速道路技術センター : 平成 18 年度鋼連続合成桁の合理化に関する技術検討(依田照彦委員長)報告書[中日本高速道路(株)中央研究所委託], 2007
- 17) (財)高速道路技術センター : 平成 19 年度鋼連続合成桁の合理化に関する技術検討(依田照彦委員長)報告書[(株)高速道路総合技術研究所委託], 2008
- 18) (株)高速道路総合技術研究所 : 鋼連続合成桁の限界状態設計法を用いた設計計算例・同解説(案)[フォローアップ検討版], 2009
- 19) 本間淳史, 高久英彰, 及川俊介, 酒井修平, 佐々木力 : 高速道路橋における鋼連続合成桁の限界状態設計法の適用に関する検討報告, 土木学会第 64 回全国大会講演会講演概要集, I-438, 2009
- 20) Gupta, V.K., Okui, Y and Nagai, M. : Development of web slenderness limits for composite I-girders accounting for initial bending moment, Journal of Japan Society of Civil Engineers A, Vol. 62, No. 4, pp. 854-864, 2006
- 21) Gupta, V.K., Okui, Y., Inaba, N. and Nagai, M. : Effect of concrete crushing of flexural strength of steel-concrete composite girders, Journal of Japan Society of Civil Engineers A, Vol. 63, No. 3, pp. 475-485, 2007
- 22) 奥井義昭, T.M.H. Bandula, 小室雅人, 山口栄輝, 長井正嗣 : 連続合成桁の負曲げ領域における横倒れ座屈強度, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 54A, pp. 58-67, 2008
- 23) 長井正嗣, 稲葉尚文, 奥井義昭, 宮下剛 : 合成 I 桁の正, 負曲げ強度評価に関する一考察, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 55A, pp. 115-123, 2009
- 24) 土木学会鋼構造委員会 : 鋼・合成構造標準示方書に基づく新たな設計, 合成桁の限界状態に関する調査研究委員会(奥井義昭委員長)報告書, 2009
- 25) 稲葉尚文, 奥井義昭, 長井正嗣, 本間淳史, 春日井俊博, 野呂直以 : 合成 I 桁の曲げ,せん断相関強度解明に関する実験的研究, 土木学会論文集 A(登載決定)
- 26) 大久保宣人, 梁鐘護, 大山理, 夏秋義広, 栗田章光 : 鋼・コンクリート二重合成桁の実績調査と考察, 第 5 回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会鋼・コンクリート連合小委員会, pp. 19-22, 2003
- 27) M. Nagai : Structural and design innovations for competitive steel-concrete hybrid girder bridges, Steel Construction Today and Tomorrow (SCTT), No. 27, July, pp. 2-5, 2009 (issued from JISF & JSSC)
- 28) 稲葉尚文, 奥井義昭, 長井正嗣, 本間淳史, 春日井俊博, 野呂直以 : 2 重合成 I 桁の曲げ及びせん断強度の評価方法の関する実験的研究, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 1, pp. 117-132, 2010
- 29) 平山繁幸, 碇山晴久, 長井正嗣, 宮下剛 : 水平スタッドのせん断耐力に関する実験研究,

東骨技報, No. 54, pp. 25-34, 2008

- 30) 稲葉尚文, 橋爪智, 坂手道明, 関宏一郎 : 二重合成構造による鋼連続合成 I 枠橋の長支間化に関する検討, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集(講演予定), 2010
- 31) M. Veljkovic and B. Johansson : Design of hybrid steel girders, Jour. of Constructional Steel Research, 60, pp. 535-547, 2004
- 32) A. Azizinamini, B. Hash, A. J. Yankel : Shear capacity of hybrid plate girders, Journal of Bridge Engineering, ASCE, SEPTEMBER/OCTOBER, pp. 535-543, 2007
- 33) 久保源三, 石渡正夫, 大方滋 : ハイブリッドビームの実橋への適用-その経済性と新井橋の設計-, 川崎製鉄技報 : Vol. 7, No. 2, pp. 133-148, 1975
- 34) 前田幸雄, 梶川靖治, 石渡正夫 : ハイブリッド合成けたの曲げ耐荷力に関する実験的研究, 川崎製鉄技報, Vol. 10, No. 1, PP. 86-99, 1978
- 35) (社)日本鋼構造協会[ハイブリッド桁の設計基準作成小委員会(中井博委員長)] : 限界状態設計法に基づいたハイブリッド桁の設計基準(案), JSSC テクニカルレポート, No. 53, 2002
- 36) 清水茂, 張健, 田中伸尚, 明橋克良, 中井博 : ハイブリッド鋼桁の耐荷力挙動に関する実験的研究, 鋼構造論文集, Vol. 10, No. 37, pp. 51-60, 2003. 03
- 37) 成瀬久聰, 利根川太郎, 渡邊英一, 杉浦邦征, 宇都宮智昭 : 高機能鋼材を用いたハイブリッド桁の力学特性に関する研究, 応用力学論文集, Vol. 8, pp. 423-430, 2005
- 38) 竹谷純一, 野阪克義, 奥村学, 伊藤満 : 曲げ-せん断組み合せ荷重を受けるハイブリッド桁のせん断耐荷力性状に関する一考察, 土木学会論文集 AZ, Vol. 64A, No. 2, pp. 530-541, 2008
- 39) (財)高速道路技術センター : 平成 15, 16 年度鋼連続合成桁橋の構造合理化に関する技術検討(長井正嗣委員長)業務報告書[日本道路公団東京建設局委託], 2004, 2005
- 40) (財)高速道路技術センター : 平成 18, 19 年度鋼連続合成桁の構造合理化に関する技術検討(長井正嗣委員長)報告書[西日本高速道路(株)関西支社委託], 2007, 2008
- 41) 宇根孝司, 信永博文, 大城莊司, 利根川太郎, 中村宏, 三根克秀 : 第二京阪道路門真高架橋西(鋼上部工)工事の設計・施工, 橋梁と基礎, Vol. 44, No. 5, pp. 5-10, 2010
- 42) (社)日本橋梁建設協会 : 連続合成 2 主桁橋の設計例と解説, 2005
- 43) SETRA : Guidance book, Eurocodes 3 and 4 (Application to steel-concrete composite road bridges), 2007
- 44) J. P. Lebet and M. A. Hirt : PONTS EN ACIER, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2009