

設計比較からみる米国の鋼道路橋設計の考え方

—連続合成桁橋の場合—

Design Tips of Composite Highway Girder Bridges in USA by Viewing through Design Comparisons

北海学園大学工学部社会環境工学科 ○フェロー 当麻 庄司 (Shouji Toma)

JIP テクノサイエンス (株) 正会員 吉田 宏朗 (Hiroaki Yoshida)

California Department of Transportation, Division of Structures design Lian Duan

1. まえがき

我が国では鋼道路橋の設計示方書がよく整備されており、設計者は示方書に従って設計することを“正しい”こととして受け入れてきたように思われる。しかし、鋼道路橋の設計も時代と共に変化しており、最近では合理化橋等道路橋示方書の規定の範疇に入らないような新しい形式の橋が出てきている。その様な状況に対応するためには、設計手法の合理化を常に考えていかなければならない。

そこで、同種の構造物に対して、設計基準が異なる国の間で設計比較をすることは、その国の構造設計の考え方が分かり、非常に興味深い。筆者らは、前に単純合成桁橋についての日米比較を示した¹⁾。ここでは、3径間連続合成桁橋について、アメリカのAASHTO LRFD (Load and Resistance Factor Design)²⁾ およびカリフォルニア交通局の設計荷重に基づいた設計と同じ設計条件を用いた道路橋示方書³⁾ による設計とを比較する。

2. 設計基準について

我が国の道路橋示方書は、現在まだ許容応力度設計法になっている。一方、アメリカのAASHTOの設計基準は2種類から成り、Standard⁴⁾ (Allowable Stress Design, Load Factor Design) およびLRFDがある。LRFDの特徴は、荷重と抵抗の間に確率論を導入して安全性により統一性をもたせたことにある。アメリカの技術者も古いStandardからLRFDへの転換が行われているが、現在設計基準はLRFDしか維持されておらず、Standardは廃止の方向にある。AASHTOの設計基準はアメリカ全土における基本となるものであるが、カリフォルニア州ではその他に州独自の活荷重等の修正基準をもっている。

よく設計法の違いを経済的であるかどうかという観点から論じられることがあるが、設計法の違いは経済性よりも合理性から論じられるべきである。合理性とは、構造物は合理的な安全性を保有しているかどうかである。荷重や使用材料が同じである限り、設計法の違いによる安全性の比較を行うことが出来るが、それは橋の生涯コストを考慮した経済性の比較ではない。日米では当然設計活荷重の取り方に相違があるが、活荷重の比較からだけでは安全性の比較を直接行うことは難しい。しかし、日米間で実際の交通状況に大きな差はないと考えると、ここで行う設計結果としての主桁断面の比較は直接的な安全性比較としての重要な意味をもっている。

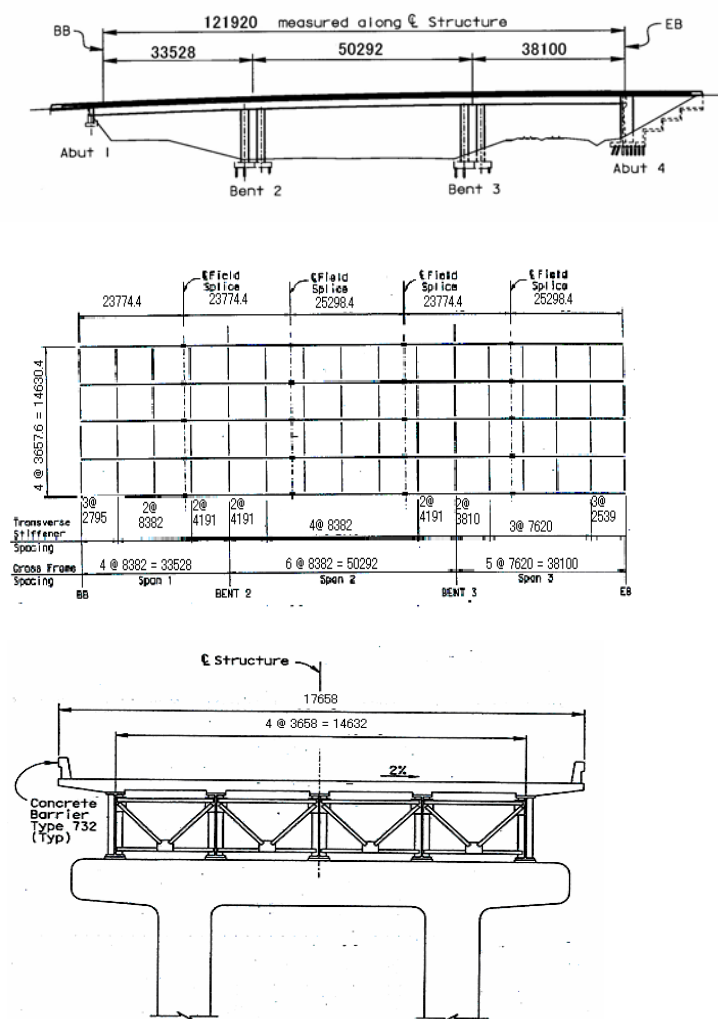


図-1 一般図

3. 基本設計の比較

3.1 設計条件

本論文では、鋼道路橋について同一設計条件の下で、日米の設計基準で設計した結果を比較する。橋の構造形式は、左右非対称の3径間連続活荷重合成桁橋であり、その設計条件を図-1の一般図に示す。本設計例は、最初カリフォルニア交通局(以下、Caltrans)で設計されたものである。これを日本の道

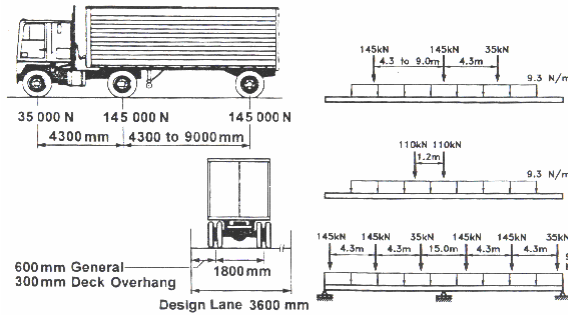


図-2 AASHTO LRFDの活荷重 (HL-93)

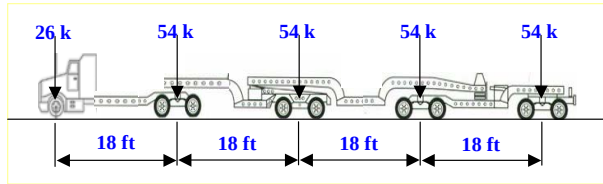


図-3 Caltrans のP-9特殊荷重

路橋示方書で設計するが、その場合合成桁の概略自動設計プログラムJSP-4W (JIPテクノサイエンス (株)) を使用した。

3. 2 主桁間隔

主桁間隔は、広い方が主桁数も少なくなり経済的であるが、広すぎると床版の支間が大きくなって、床版の厚さが大きくなる。アメリカでは、主桁間隔は2.44~4.88m 内でなければならない。Caltrans では、支間に応じて次のような主桁間隔を目安としている。

$$42.6\text{m} > 3.05\text{m} \sim 3.66\text{m}$$

$$42.6\text{m} < 3.35\text{m} \sim 4.27\text{m}$$

ここでは、3支間 33.5m+50.3m+38.1m、総幅員 17.7m に対して5主桁、主桁間隔 3.66m を採用している。

4. 荷重の算定

4. 1 限界状態設計における荷重の組み合わせ

LRFD の限界状態は、強度限界状態5、特殊限界状態2、使用限界状態4そして疲労限界状態1、合計12の限界状態がある。本設計例では、その内強度限界状態Ⅰ、Ⅱおよび疲労限界状態Ⅰで設計されている。強度限界状態Ⅰは LRFD の活荷重 HL-93 に対して、強度限界状態Ⅱは Caltrans の特殊荷重 P-15 に対しての安全性照査である。これらの設計では活荷重に対する荷重係数が異なっている。

LRFD の疲労設計では図-2の HL-93 を用いるが、Caltrans ではさらに独自の疲労限界状態Ⅱを定めており、そこでは図-3の P-9 荷重と、HL-93 の場合よりは小さい荷重係数を用いる。図-4に示すように、HL-93 は無限寿命である疲労限界曲線に対して用い、P-9 は有限疲労曲線部分に対して用いる。本設計例における疲労設計では、日平均トラック交通量を HL-93 に対して 2500 台、P-9 に対して 20 台として設計している。橋の寿命は HL-93 には無期限とし、P-9 には 75 年とする。

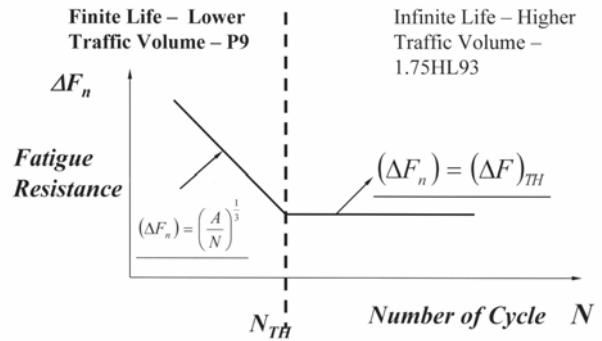


図-4 疲労設計曲線 (Caltrans)

4. 2 死荷重について

合成前死荷重は鋼桁断面に作用し、その荷重強度はレバー法 (1-0 法) で各種桁に分配する。一方、合成後死荷重は各種桁に均等分配する。いずれも簡易法である。

アメリカの一般的な高欄はバリアーと呼ばれ、車の墜落防止壁の役割を負っているので、コンクリート製の重量の大きい構造物である。アメリカではこの高欄や舗装の合成後死荷重は、標準橋では各主桁全体に均等に受け持つとして設計するので、外桁と中桁に負担の差が生じない。しかし、日本では反力影響線を用いて算出するので、一般的に外桁の負担が大きくなる。

4. 3 活荷重について

ここでの道路橋示方書による設計では、B活荷重を用いる。

LRFD の活荷重 (HL-93) は図-2に示すように、トラック荷重、タンデム荷重および車線荷重の3つから成る。トラック荷重はトレーラー、タンデム荷重は特殊な軍用車を対象とした車軸幅の小さい集中荷重である。一方、車線荷重はその他の一般的な自動車を対象とした等分布荷重であり、その大きさは換算すると道路橋示方書の p_2 荷重と大差はない。

アメリカでは、AASHTO が定める活荷重 HL-93 の他に各州毎に定める特殊荷重がある。Caltrans には、図-3に示すように9個の車軸をもつP-9特殊荷重や15個の車軸をもつP-15特殊荷重がある。P-9 は疲労限界状態設計に、P-15 は強度限界状態設計に用いる。

これらの活荷重は集中荷重あるいは単位長さ当たりの分布荷重を表しており、道路橋示方書の道路単位面積当たりとは異なる。LRFD では、これらの荷重に次節に示す分配係数を乗じて中桁に作用する活荷重強度を求める。

なお、LRFD では活荷重に抵抗する合成断面性能は、短期荷重用合成断面性能として鋼とコンクリートの剛性比 $n=8$ (日本では7) を用いて算出している。また、長期荷重用合成断面性能の算出には、 $n_2=3n=24$ を用いる。この断面は、降伏モーメントやたわみの算出の際に合成後死荷重に対して用いられる。

LRFD では、衝撃係数は活荷重の内集中荷重にのみ適用し、車線荷重である等分布荷重には適用しない。衝撃係数は強度限界状態Ⅰに対して 33%、強度限界状態Ⅱに対して 25% の一定値としており、道路橋示方書で考慮しているようなスパンの影響はないと考えている。これに対し、道路橋示方書による本設

計例の衝撃係数は支間長によって異なり、第1支間は0.239、第2支間は0.199、第3支間は0.227である。これらはかなりLRFDに比べて小さいが、適用する荷重の種類が異なるため直接の比較は難しい。

また、LRFDでは疲労限界状態に対して、強度限界状態よりも小さい一定値15%の衝撃係数を採用している。

LRFDでは、活荷重を分配係数により中主桁へ分配する。例として、曲げモーメント算出のための分配係数 DF_m の算定式を示すと、次のようである。

$$DF_m = 0.075 + \left(\frac{S}{9.5} \right)^{0.6} + \left(\frac{S}{L} \right)^{0.2} \left(\frac{K_g}{12Lt_s^3} \right)^{0.1} \quad (1)$$

ここに、 S = 主桁間隔、 L = 支間、 K_g = 床版の中立軸に関する鋼主桁のコンクリート換算断面2次モーメント、 t_s = 床版厚さ

この式を見ると、格子計算で考慮される分配横桁や対傾構の要素が含まれていないことが分かる。

なお、外桁への荷重分配はレバー法(1-0法)によっている。

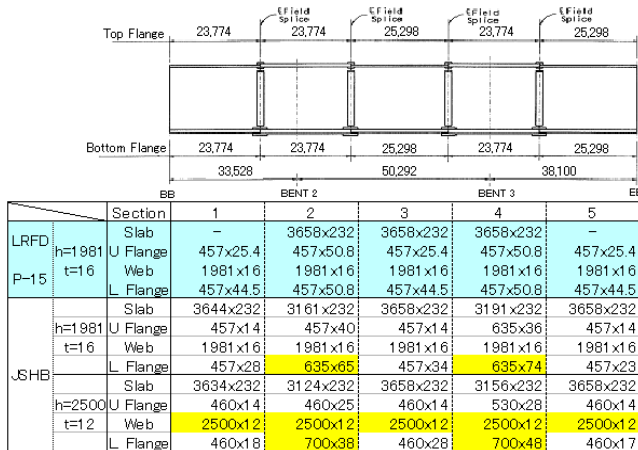


図-5 中主桁の断面比較

5. 断面の決定

5.1 合成断面と非合成断面

図-5は、Caltransと道路橋示方書(JSHB)によって設計した主桁断面の比較を示す。第1段目はLRFDのHL-93とCaltransのP-15特殊荷重を用いて設計したものであるが、P-15が支配的となっている。第2、3段目は道路橋示方書により設計した結果で、第2段目はCaltransと同じ桁高さとし、第3段目は日本での通常の経済的高さとした結果である。

本設計例は活荷重合成桁であるので、正モーメント部分(Section 1, 3, 5)は合成断面で、負モーメント部分(Section 2, 4)は非合成断面で設計されている。中間支点をまたぐ負モーメント部分の非合成断面では床版の鉄筋を考慮した鋼桁断面を有効とし、特に圧縮力を受ける下フランジの横倒れ座屈に配慮しなければならない。フランジに腹板よりも高強度の鋼材を用いたハイブリッド桁はフランジの断面を小さくできるのでCaltransでは推奨しているが、本設計例には適用していない。

合成断面では、全断面が降伏応力度にまで到達するコンパ

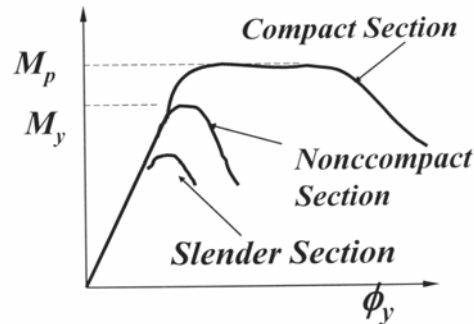


図-6 断面と変形挙動

クト断面を用い、非合成断面では縁端応力度が降伏応力度に到達する非コンパクト断面を用いるのが一般的である。図-6に各種断面と曲率との関係を示す。図-6からわかるように、コンパクト断面は大きな変形性能を有しているが、スレンダー断面は変形性能が小さいので、用いてはならない。

現場継ぎ手はフランジの断面変化点の位置に設け、板厚の変化はスペーサーを用いて調整している。

5.2 腹板の断面

アメリカでは、腹板高さと厚さは一定とし、補剛材を省略できるサイズにするのが望ましい。特に、水平補剛材は部材数が増えるので省略するのがよいとしている。腹板厚の選択は3.2mm毎にする。本設計例では水平補剛材の不要な15.9mmを採用している。本設計例の腹板高さは1981mmであり、中央支間に対して1/25.4である。

LRFDの腹板高さの制限値は、以下の通りである。

単純橋 1/30.3 <

連続橋 1/37 <

道路橋示方書にはこの制限値はなく、また日本では腹板高さ／支間の比は1/18～1/20が経済的として、この間を採用することが多い。本設計例では道路橋示方書を用いた場合、経済高さとして中央支間比1/20である2500mmとした。

また、LRFDでは合成桁高さ(床版を含めた総桁高さ)／支間の比の制限値も設けており、それは以下の通りである。

単純橋 1/25 <

連続橋 1/31.3 <

LRFDの推奨値は単純橋1/22、連続橋1/25であり、本設計例は中央支間に対して1/21.2である。合成桁高さに対する制限は、限界状態設計法をとっている場合塑性モーメントに対する影響が大きいためと思われる。もちろん、道示ではこの規定がない。

次に、本設計で用いられているSM490Y級の鋼材に対して、LRFDの腹板の高さ／厚さの比の制限値は以下の通りである。

水平補剛材がない場合 <150 (道示 123)

LRFDの本設計例では1/124.8である。LRFDではこの制限値がかなり緩いことが、腹板の高さと厚さの選択に大きく影響している。すなわち、日本ではアメリカに比べこの規定が厳しいために、腹板厚さが厚くなる。

また、腹板高さと厚さは補剛材との必要性とも密接に関係し

ており、アメリカでは水平補剛材を不要とすることを優先して高さを小さく厚さを大きくとっているのに対し、日本では高さを大きくとり厚さを薄くして水平補剛材を厭わない。すなわち、アメリカではより単純な構造とすることを優先するのに対し、日本では鋼重を小さくすることを優先する設計になっている。

中間垂直補剛材は、各支点近くでは対傾構間隔を3等分、その他は2等分して配置されている。

5. 3 フランジの断面

図-5の比較を見ると、フランジの断面は道路橋示方書による設計の方がかなり大きいことがわかる。アメリカでは、フランジ幅はできるだけ一定幅が望ましいとして、本設計例でも一定にとっている。フランジの最小幅は305mmであり、また横構が省略できる大きさにするのがよい。フランジ厚さの変化は現場継ぎ手位置で行い、その差は1/2以下にする。この1/2の考慮は、道路橋示方書を用いた設計では無視した。

図-5の主桁断面比較で注目すべきは、負モーメント部の下フランジの大きさである。負モーメント部で道路橋示方書の設計は、下フランジ幅がCaltransよりは大きくなっているが、これはCaltransと同じ幅をとると厚さが厚くなりすぎるためである。これは、道路橋示方書の横倒れ座屈に対する規定が厳しいことからくる。横倒れ座屈に抵抗するためにはフランジ幅を大きくするのが有効であり、厚さを増すだけでは限界がある。

6. コンクリートの乾燥収縮とクリープ応力

LRFDの強度限界状態には、コンクリートの乾燥収縮やクリープの影響を含まなければならないが、Caltransではコンクリート橋では考慮しても合成桁に対してはこれらの影響は小さいとして、無視している。ただし、キャンパーの算定においては影響が大きいため、床版荷重を10%増しすることによって考慮している。

7. 対傾構と横構について

アメリカでは対傾構の間隔を従来7.6m以下としていたが、現在のLRFDでは合理的な理由があればこの制限値以上であってもよいとしている。しかし、推奨値としては直線橋で7.6m、曲線橋で4.6～5.5mである。一方、道路橋示方書では対傾構の間隔は6m以下にとっている。LRFDの本設計例では、第1、2支間を8.38m、第3支間を7.62mとしている。

対傾構を取り付けるための垂直補剛材は、腹板の変形を拘束し、力をフランジに伝達するため、下部を下フランジにボルトで接続するようにしている。下横構は出来るだけ不要とする構造が望ましく、本設計例でも取り付けしていない。

8. 設計概念の比較

表-1に、日米の設計概念の比較をまとめて示す。Caltransの耐震設計においては、多くの橋の重要度を普通の橋としているので、大地震による損傷後は撤去する考え方である。それに対し、日本ではほとんどの橋を重要な橋として設計しているた

め、下部構造の設計には大きな違いが生じている。また、最近日本では非合成桁橋の設計が多いが、アメリカでは連続桁を含めて合成桁橋で設計するのが普通である。

現場継ぎ手は、フランジ幅が異なると断面変化点ではできないので、日米では違いが出てくる。すなわち、アメリカではフランジ幅を一定に取り、現場継ぎ手を断面変化点の位置に設けるのに対し、日本では大きな板厚変化を避けるため部分的にフランジ幅を変化させることがあり、その場合断面変化点近傍の大きい方の断面位置に設けることになる。

表-1 日米の設計比較

	LRFD (Caltrans)	道路橋示方書
耐震設計	普通の橋	重要な橋
大地震損傷後の処置	撤去	補修
桁の種類	合成桁橋	非合成桁橋
腹板高	小	大
腹板厚	大	小
水平補剛材	なし	あり
荷重分配	分配係数	格子桁
分配機構	床版	分配横桁
分配横桁	なし	あり
現場継ぎ手位置	断面変化点	断面の大きい方
主桁断面	小	大
フランジ幅	一定	変化
横倒れ座屈	緩い	厳しい
対傾構間隔制限	なし (<7.62m)	<6m
+ モーメント断面	コンパクト断面	ノンコンパクト断面
- モーメント断面	ノンコンパクト断面	

9. 結語

ここでは、日米の鋼道路橋の設計基準の相違を、設計例に基づいて検討した。その結果、アメリカの設計は日本の設計に比べ主桁断面がかなり小さいことが判明した。したがって、主桁高さや剛性もLRFDの設計結果は小さく、道路橋示方書の基準には適合しない。この差がかなり大きいので、今後より詳細にその原因を分析していく必要がある。

また、最近日本の設計においても鋼重より部材数を減らして製作コストを下げる傾向にあるが、それでもまだアメリカの設計に比べると徹底さが足りないと言える。

ここで述べた以外にも、たわみの制限、衝撃係数、対傾構の間隔等の設計の詳細においても考え方に様々な違いがあり、興味深い点が多い¹⁾。

謝辞

本論文では、北海学園大学工学部社会環境工学科の卒研究生である汲川隼也君の助力を得たので、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) TOMA, Shouji, and Duan, Lian : Comparative Study of Highway Steel Girder Bridge between Japan and USA, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), Weimar, Paper ID 118, September 19-21, 2007.
- 2) AASHTO : LRFD Bridge Design Specifications, 3rd ed., 2004.
- 3) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説、平成14年3月。
- 4) AASHTO : Standard Specifications for Highway Bridges, 1992.