【鋼桁の横倒れ座屈等の照査ソフト】

本ソフトでは、上路式の２主鈑桁橋や開断面箱桁橋（Ｕ形箱桁）の現場での床版コンクリート打設時における鋼桁全体の横倒れ座屈の照査や下路式鈑桁やポニートラス等の必要剛度の照査等が行えます。

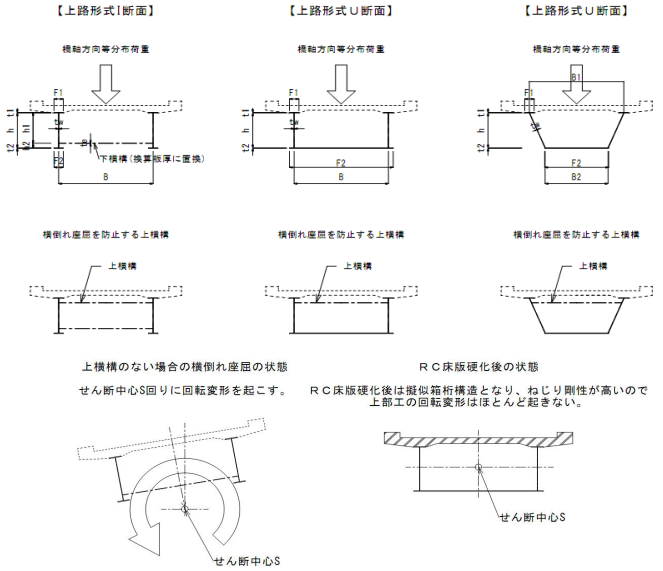
・上部工全体の横倒れ座屈（全体横ねじり座屈）について

一般的な２主鈑桁のＲＣ床版の上路式歩道橋や側道橋の場合などでは、現場でのＲＣ床版打設時において、鋼桁全体の横倒れ座屈の照査が必要となります。
その理由は、一般的な上路式歩道橋では、中間対傾構や下横構があっても上横構を設けない構造が主流です。この上横構がない構造で支間長に比べ主桁間隔が狭く、さらに歩道橋等の主桁の面外剛度が小さいとき床版打設時の載荷死荷重により２本の主桁が同時に横方向に変形を起こし、それに伴い橋全体がねじれることになる。
そのため、橋全体がこのねじりに耐えられなくなって、最悪の場合、落橋することがあります。また、近年、合理化主桁の一環として合成Ｕ形形式（開断面箱桁）が採用されていますが、Ｕ形開断面箱桁についても上記と同様のことが起こりやすい。橋全体の横倒れの起きやすい橋梁とは、巨視的にいうと支間長Ｌ/主桁間隔Ｂが、鋼道示p.121の解説では18、鉄道橋構造物等設計基準・同解説や鋼構造架設設計施工指針等では15～20以上の細長い橋の場合などと言われています。
過去に、上横構がないがために上述の理由により、ＲＣ床版打設時に落橋した橋や座屈事故を起こした橋が日本でも数橋あるので注意が必要です。また、ＲＣ床版のコンクリートの打設は、なるべく幅員に対して偏心荷重（ねじりモーメント）が作用しないように左右均等のコンクリート荷重を蛇行して打設する必要があります。
上記の上横構のない構造に対する照査方法には下表に示す①または②等があります。この照査により橋全体の横倒れ座屈が起きやすい場合には、架設時に上横構等を設ける方法が取られる。この上横構は全支間に渡り設置する場合と部分的に設置する場合の２方法があり、さらにこの下横構をＲＣ床版硬化後、撤去する場合と残す場合があります。
なお、個人的な意見として、照査の結果により問題がある場合には施工時の地震による影響も考慮して安全を考え、上横構はなるべく全支間に渡り設置し、かつＲＣ床版硬化後もこの上横構を残す方が種々の理由(撤去作業に困難を伴うためと撤去にかかる日数および費用の増加等）から望ましいものと思います。
また、上路式Ｕ断面形式で、逆台形断面（上フランジ側の腹板間隔が下フランジ側より広くしたタイプ）も都市部の高架橋の美観上や上部構造をスレンダーに見せる効果を期待する場合、または連続桁形式の場合で中間橋脚の幅員方向の天端幅を狭くしたい場合などに採用されますが、腹板傾斜に伴い上フランジに作用する二次応力が橋全体の横倒れ座屈にどのように影響するか定かではありませんが、なるべく下記の②の照査式により安全側に検討した方が望ましいものと思います。
なお、鋼桁全体の横倒れ座屈に対する安全率ｓについては、鋼道路橋施工便覧(S60.2)では1.36、北海道における鋼道路橋の設計および施工指針(H7.12)では2.0としています。当然、安全率が高いほど横倒れ座屈に対して厳しくなりますが、北海道における鋼道路橋の設計および施工指針(H7.12)p.163に示すｓ=2.0をそのまま使用している根拠が、私の方ではよくわかりません。なお、[照査のための構造力学H10(関西道路研究会)p.59]に示される参考文献（西田・福本[細長い２主並列桁の全体横倒れ座屈実験と座屈設計に関する検討：橋梁と基礎1989-5）では、安全率2.0/架設時の許容応力度の割増率＝2.0/1.25＝1.60としています。個人的にはこの程度が妥当な安全率と思われます。合成床版を採用した場合には、この合成床版の底鋼板がコンクリート打設時の型枠の役目もし、かつねじりに対して有効（擬似箱桁）となりますが、この底鋼板と左右の主桁フランジの結合がある程度確実な構造の場合のみです。この合成床版の底鋼板をねじりに対して有効とした設計例は、[開断面箱桁橋のコンセプトと設計例]2006.07（日本橋梁建設協会）や[新しい鋼橋の設計(山海堂)]p.177等に記載があります。なお、IBグレーチング床版も底鋼板を有する合成床版と似た構造ですが、主桁の上フランジとの連結構造が一般的には合成床版と異なるので、IBグレーチング床版の底鋼板をねじりに対して有効とする場合は、この連結が十分であるかの確認が必要です。
近年、２主鈑桁形式は、ＲＣ床版などの補修時に剛性の小さい中間横桁で左右主桁を連結構造とした場合、片側通行による床版補修工事のときの左右主桁の荷重分配上問題があるとのことで、この形式の採用を見送るケースも出てきています。日本橋梁建設協会では、これに対する補修工事の対応案を最近示しています。私の試案ですがこの日本橋梁建設協会の対応策の他に、ＲＣ床版補修時に左右の主桁の受け持ち断面力の分配上効果のある剛性の大きな中間横桁を取り付けられるように吊り金具のようなコネクションピースを前もって設置しておく構造を提案いたします。この構造であれば、この構造による初期にかかる工事費等もさほど大きなものでないと思います。

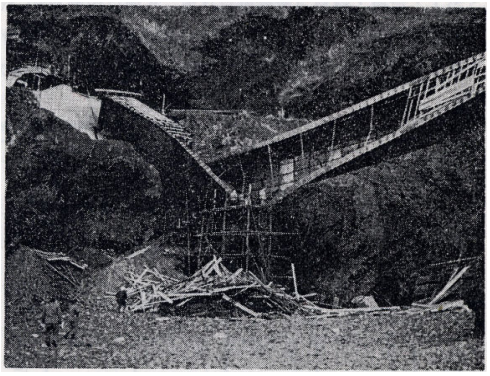
	照査項目	照査式等の参考文献
○	①上路形式（Ｉ形断面）の横倒れ座屈の照査	鋼道路橋施工便覧　（昭和６０年２月）付録１(P.403～)
○	②上路形式（Ｕ形断面）の横倒れ座屈の照査	鋼道路橋施工便覧　（昭和６０年２月）付録１(P.403～)
○	③下路プレートガーターのＵ形フレームの剛度照査	鋼道路橋設計便覧５・２・３(3)（昭和５４年２月）(P.253～,P.273～)
○	④ポニートラスの必要剛度の照査（下路トラス形式等）	鋼道路橋設計便覧５・２・３(3)（昭和５４年２月）(P.253～,P.273～)
○	⑤Ｕ形フレーム必要剛度の照査	ポニートラスのＵ形フレーム必要剛度（Engesserの近似計算法:構造力学公式集P.234)
○	⑥全体座屈に対する目安値の照査	鋼道示3.2.1解説(p.134,135)
×	⑦上路形式（Ｉ形断面）の横倒れ座屈照査の別解	照査のための構造力学H10(関西道路研究会)p.58,59,122～128に別解による具体的な計算例があります。
×	⑧上路形式（Ｕ形断面）の横倒れ座屈照査の別解	北海道における鋼道路橋の設計および施工指針H7.12(北海道土木技術鋼道路橋研究委員会)p.162～
×	⑨全体・横桁間座屈の防止	鋼構造架設設計施工指針(2001年版)（P.41～43)

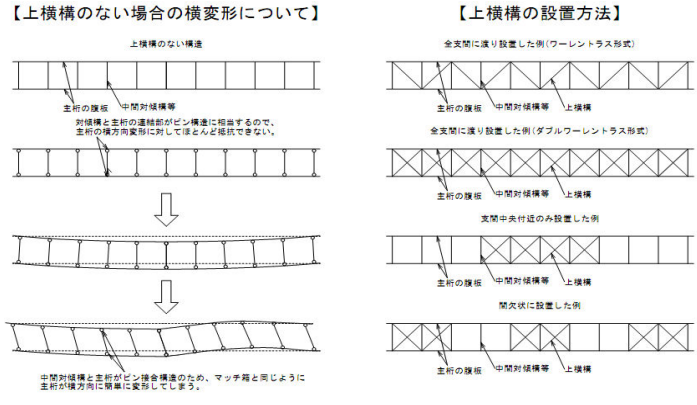
注）上表左端欄の○は本ソフトで計算可能、×は本ソフトで計算不可のものをそれぞれ示しています。

【２主鈑桁およびＵ形箱桁の横倒れ座屈の説明図】



【Ｕ形箱桁（開断面箱桁）の現場施工時の落橋実例写真】
「鋼構造の研究：佐々木道夫（S52.6.16)p.561」の写真を転載しています。この写真は、写真中央付近に足場があり、その上に数人の人がいることから、落橋後、新たに支間中央付近に地上から足場を組み上げ、落橋原因を調査したときのものと思われます。また、地上に山積みしている材片は、ＲＣ床版用の型枠が落下した残骸と思われます。





【上路形式（Ｕ形断面）の横倒れ座屈照査の試算例】

北海道における鋼道路橋の設計および施工指針H7.12(北海道土木技術鋼道路橋研究委員会)p.164の計算例と同じ開断面箱桁（U形箱桁）の条件で鋼道路橋施工便覧　（昭和６０年２月）付録１の計算式（本ソフト）で計算した結果を下記に示します。

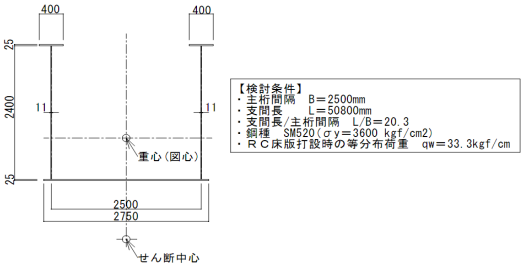
適用基準	弾塑性全体横倒れ座屈荷重 qcr(kgf/cm)	安全率 ν	許容できる等分布荷重 qw=qcr/ν(kgf/cm)	全体横倒れの危険性
北海道における鋼道路橋の設計および施工指針H7.12(北海道土木技術鋼道路橋研究委員会)p.164	52.2	2.00	26.1	OUT
鋼道路橋施工便覧　（昭和６０年２月）付録１	56.7	1.36	41.7	OK

■考察
上表に示すように、弾塑性全体横倒れ座屈荷重qcrの値は9%程度の差なので、ほぼ一致しているものと判断できるが、安全率が大きく異なるのでこの影響で最終的な全体横倒れ座屈の危険性の判定では、北海道の基準では危険がある結果に、鋼道路橋施工便覧では危険がない結果となった。
なお、安全率については、照査のための構造力学H10(関西道路研究会)p.58,59では、安全率2.0/架設時の許容応力度の割増率＝2.0/1.25＝1.60とした例もあります。
以上のことから、実際の照査においては適用基準を確認し、L/Bが目安値以内かどうか、主桁間隔に対する打設床版幅のバランスや床版打設時の張り出し長が大きいかどうか、偏心曲げモーメントが作用しないか、床版打設時の不測の地震などによる橋軸直角方向の水平力に対する対策などを総合的に判断して決定するのがよいものと思います。

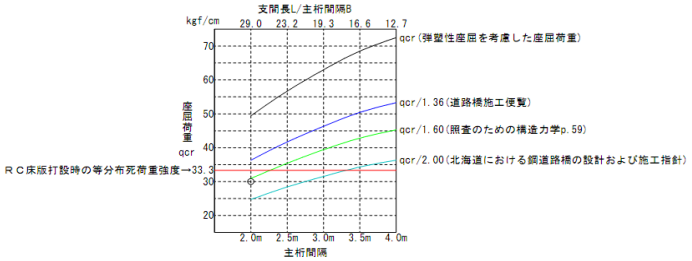
各ソフトによる各断面定数の計算結果の比較

断面定数	記号	単位	①	②	③	④
断面積	A	cm2	1393.5	1415.5	1421	1415.5
水平軸回りの断面二次モーメント	Ix	cm4	1.19×10^7	1.31×10^7	1.32×10^7	1.31×10^7
鉛直軸回りの断面二次モーメント	Iy	cm4	1.54×10^7	1.57×10^7	1.58×10^7	1.57×10^7
そりねじり定数(曲げねじり定数)	CwまたはIw	cm6	1.38×10^11	1.44×10^11	1.52×10^11	1.52×10^11
せん断中心(最下端からの高さ)	ζsまたはys	cm	105.3	108.5	111.4	110.1

注）上表の水色の数値は、厳密解と一致するものを示す。
①：北海道における鋼道路橋の設計および施工指針H7.12(北海道土木技術鋼道路橋研究委員会)p.164の計算例
②：本ソフトによる計算結果
③：任意形薄肉断面定数算定ソフト（当ホームページのソフト）による計算結果
④：そりねじり定数算出ソフト（当ホームページのソフト）による計算結果
■考察
各ソフトによる断面定数は、さほど大きな違いがないことがわかる。したがって、断面定数の使用目的により当ホームページの各ソフトを利用するのが良い。



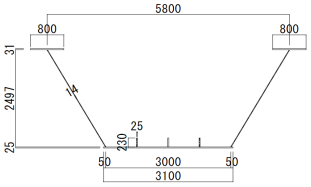
【北海道における鋼道路橋の設計および施工指針H7.12の計算例p.162の主桁間隔のみ変えた場合の試算例】



【考察】
上図に示すグラフより、以下のことが言える。
①主桁剛度が同じならば、主桁間隔を広げた方が許容できる座屈荷重が大きくなるので、主桁間隔を広くすることによりＲＣ床版厚が厚くならない程度の主桁間隔がよい。
　ただし、路面の排水用の排水ますの設置位置と主桁上フランジの取り合い等に留意する必要があります。また、橋台幅は総幅員（地覆幅を含む）に合わせるのが一般的なので主桁間隔に影響されないが、支承の橋軸直角方向縁端幅に注意が必要である。
②許容できる座屈荷重に対してＲＣ床版打設時の等分布死荷重（鋼重＋床版型枠＋コンクリート荷重＋鉄筋荷重＋その他）の大きさにより、全体横倒れ座屈（全体ねじり座屈）の危険性が判断されるので、ＲＣ床版打設時の荷重を十分精査する必要がある。
③全体横倒れ座屈（全体ねじり座屈）に対する安全率の違いにより、危険側か安全側かが大きく影響されるので、この安全率をいくらに設定するかが重要となります。

【逆台形開断面箱桁のそりねじり定数(曲げねじり定数)等の試算例】

「新しい鋼橋の設計(山海堂)p.180」と「開断面箱桁橋のコンセプトと設計例(H18.7)日本橋梁建設協会p.12」に示す断面について、当ホームページの任意形薄肉断面定数算定ソフトにより計算した結果との比較を示す。



断面定数	①	②	③	①/②	①/③	②/③
A(m2)	0.2236	0.2252	0.2079	0.99	1.08	1.08
Ix(m4)	0.2470	0.2549	0.2396	0.97	1.03	1.06
Iy(m4)	0.8843	0.8928	0.8863	0.99	1.00	1.01
Cw(m6)	0.1739	0.1847	0.1793	0.94	0.97	1.03

①：「開断面箱桁橋のコンセプトと設計例(H18.7)日本橋梁建設協会p.12」
②：当ホームページの任意形薄肉断面定数算出ソフトによる計算結果（縦リブ断面も考慮した断面で算出）
③：当ホームページの任意形薄肉断面定数算出ソフトによる計算結果（縦リブ断面を無視した断面で算出）
【考察】
上表の比較結果より、最大で６％程度の差なので、そりねじり定数(曲げねじり定数)等の算出には任意形薄肉断面定数算定ソフトが便利である。