

さらなる合理化を目指した合成桁橋腹板の座屈耐荷力評価式の提案と試設計

橋梁工学分野 井上晴雄

第1章 緒論

1.1 研究背景

近年、不況のあおりから社会全体にコスト削減の流れが大きくなってきている。橋梁業界においても、公共事業への歳出が削減傾向であることから、新設橋梁の建設が減少している。このような状況の中で、橋梁業界では合理化橋梁が数多く建設されている。その中でも、少数I桁橋に代表される、プレートガーダー橋は数多く建設されており、この橋梁形式には、大きなコスト削減が図られている。

1.2 研究目的

これまでのプレートガーダー橋の設計は、薄肉多補剛設計（従来桁）に始まり、ガイドライン型設計を経て、現在の千鳥の沢川橋に代表される厚肉少補剛設計に至っていると考えられる。本研究では、合成桁の架設時のプレートガーダーの腹板の設計法に着目し、道路橋示方書¹⁾（以降、道示とする）にとらわれない薄肉少補剛設計の方針のもとで、材料片数をなるべく減少させ、さらなる鋼重ミニマム化を図り、プレートガーダー断面で大部分を占める腹板の板厚を減少させ、十分に安全な構造を提案することを目的としている。

第2章 曲げ耐荷力に着目した腹板合理化設計

本章では、せん断力が断面決定にあまり影響しない、正曲げモーメントが卓越する支間中央部分に着目し、薄板少補剛設計による、腹板薄板化のための検討を行う。

具体的には、以下の3項目を検討し、プレートガーダーの腹板厚の低減の可能性を示す。

- (1) プレートガーダーの架設時の許容応力度の割増 ($M_y/1.7 \cdot 1.25$) を基準とした、曲げ耐荷力の照査。
- (2) 腹板薄板化に伴う、水平方向のたわみ増加を、メッキ桁のたわみ制限 ($b/150$) を用いて照査。
- (3) 腹板の薄板化に伴う、フランジと腹板との溶接部の疲労上の問題を、Eurocode prEN²⁾の提案式を用いて照査。

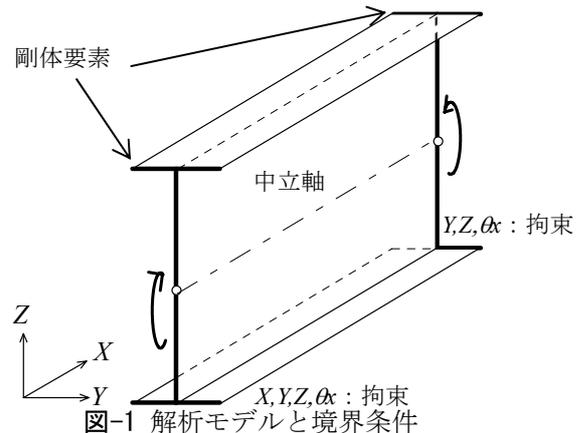
2.1 設計諸元

プレートガーダーの腹板の寸法を決定するにあたり、道示の幅厚比規定に着目した。本研究では、プレートガーダーの腹板厚が、幅厚比規定によらず、最小板厚あるいは製作性で決定される表-1の領域AおよびBに着目し、腹板厚の決定を行う。領域A、Bの腹板厚については、製作性によって板厚の増加が必要とされる領域であ

表-1 道示および解析モデルの腹板厚 (寸法:mm)

水平補剛材	0段		1段		2段
	道示	解析値	道示	解析値	道示
1100	9	9			
1200	10	9	6→9		
1300	11	9	7→9		
1400		9	7→9		
1500		9	8→9		
1600		9	8→9		
1700		9	9		
1800		9	9		
2100			11	11	
2200			11	11	
2300			12	11	8→11
2400			12	11	9→11
2500			12	11	9→11
2600			13	11	9→11
2700			13	11	10→11
2800				11	10→11
2900				11	10→11

道示：道路橋示方書に従った板厚
解析値：解析モデルの板厚



り、それぞれの領域において耐荷力には余裕があると判断できる。そこで、領域Aの腹板では水平補剛材を無しにして腹板厚9mmを設定した。また領域Bの腹板では、水平補剛材を1段設置し、腹板厚を11mmに設定した。

解析ケースは、水平補剛材無しで桁高1,100~1,800mmの8種類と、水平補剛材1段で桁高2,100~2,900mmの9種類とを、各々アスペクト比 $\alpha=2/3, 1, 1.5$ の3種類について、全51ケースの解析を行った。使用材質は一般的なSM490Y材とした。

2.2 解析方法

プレートガーダーが終局状態に至るまでの挙動を、弾塑性有限変位解析プログラムUSSP³⁾を用いて解析を行った。図-1に示すように、境界条件は両端を単純支持板とし、桁の両端部の剛体要素の中立軸に、強制回転角

を導入することにより、曲げモーメントを導入した。初期たわみは正弦波によって、最大値を、腹板で $W_{ow} = b/250$ 、フランジで $W_{of} = h/150$ とした。

2.3 曲げ耐荷力に対する照査

図-2は、作用曲げモーメント M と腹板の最大のたわみ W との関係として示している。 $M/My=1.0$ を道示で期待する安全率 1.7 で除したものをライン a ($=0.588$)、また、ライン a に施工時における許容応力度の割増係数 1.25 を乗じたものをライン b ($=0.735$) としている。ここで、道示を適用した設計曲げモーメントは、全てのモデルで、ライン a 以下の値となる。

水平補剛材無しの場合、桁高が高い (1500mm ~ 1800mm) ケースにおいては、弾性座屈が生じ、曲げ耐荷力が低くなる。ただし、水平補剛材無しの全ての解析ケースにおいて、ライン a を上回っており、道示の設計荷重に対しては、設計で期待するのと同様に安全率を確保できていることがわかる。また水平補剛材 1 段の場合、全てのケースにおいて、ほぼ降伏曲げモーメントの曲げ耐荷力を有している。水平補剛材 1 段を設置したケースについては、ライン b を十分上回っており、施工時断面力により断面が決定されたとしても、十分な安全率を確保できることがわかる。

2.4 残留変形に対する照査

腹板の変形性能を、残留たわみで評価した。残留たわ

みは「作用曲げモーメント-腹板たわみ曲線」とライン b との交点から初期剛性の傾きで除荷した時に得られるたわみ値である。図-3は、初期たわみ W_i と残留たわみ W_R の和と腹板高さ b との関係を示している。ここで、初期たわみ W_i + 残留たわみ W_R の許容値として、メッキ桁のたわみ制限値を参照し $b/150$ とした

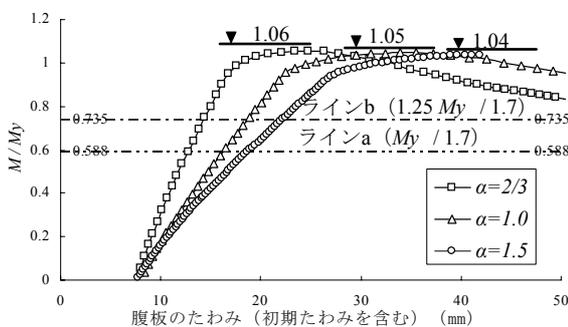
図-2より、水平補剛材 1 段のモデルについては、変形が安定しており、たわみ制限値をすべて満足することがわかる。また水平補剛材無しの場合においては、 $\alpha=1.0, 1.5$ のケースで、たわみ制限値である $b/150$ を満足していない。

2.5 疲労に対する照査

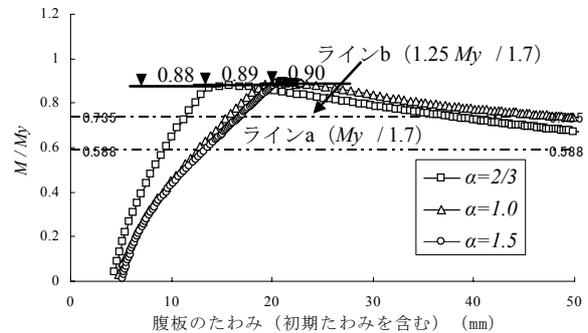
プレートガーダーの腹板厚を薄くすることにより生じる、疲労の問題については、現在プレートガーダーの腹板の疲労における、照査式が日本の設計法では提案されていないことから Eurocode prEN の「Web Breathing」の提案式、式(1)を用いて考察を行った。

$$b/t_w \leq 30 + 4L \quad \dots (1)$$

照査を行った結果、水平補剛材 1 段の場合、すべて式(1)を満足することを示した。また水平補剛材無しの場合、式(1)を全てのケースで満足しないことがわかった。ただし、今回のような、式(1)を満足しない場合、別途詳細計算式を用いて、再照査することが可能である。再



(a) 水平補剛材 1 段, $b=2100\text{mm}$



(b) 水平補剛材無し, $b=1500\text{mm}$

図-2 作用曲げモーメント-腹板中央点のたわみ曲線

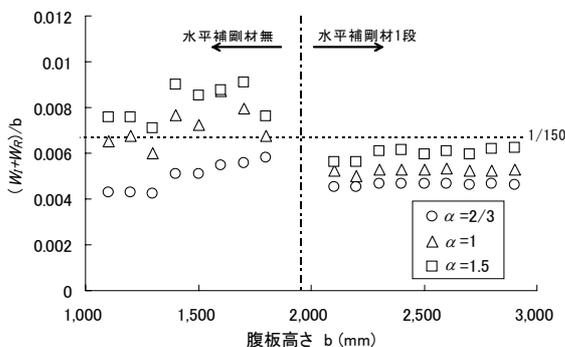


図-3 残留たわみと初期たわみとの和と腹板高さとの関係

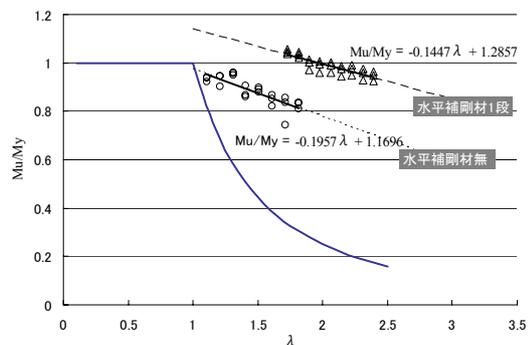


図-4 提案曲げ耐荷力曲線

照査の結果、水平補剛材無しの場合は、桁高が1500mm~1800mmのものについて、疲労上問題があることが明らかになった。

2.6 提案耐力曲線

2.1節で示した全51ケースの解析結果に基づいて、耐力曲線を図-4のように提案した。解析結果から、腹板のアスペクト比の変化によって、曲げ耐力へ影響があまり見られなかったため、「水平補剛材無し」、および「水平補剛材1段」の場合において、耐力曲線を示した。どちらの耐力曲線も、オイラー曲線などと比較して高い耐力を示していることがわかる。

第3章 せん断耐力に着目した腹板の合理化設計

せん断耐力に着目し薄板化した腹板のせん断耐力への影響について検討を行う。

3.1 設計諸元

設計諸元は2.1で示した同様の断面で、水平補剛材無しで桁高1100~1800mmおよび、水平補剛材1段で桁高2100~2900mmの場合について解析を行った。垂直補剛材間隔は、全て1500mmで共通である。

3.2 解析方法

境界条件は図-5に示すとおりであり、解析モデルの中央を支点として固定した。初期たわみ、および使用材質は2.2に示したものと、同様である。載荷荷重は桁の両端を剛体要素とし、二つの剛体要素の中立軸に、相反

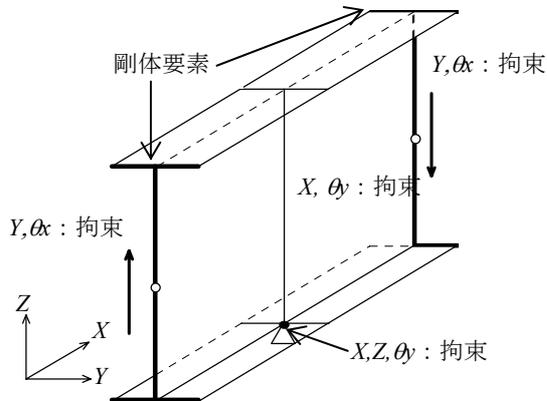


図-5 解析モデルと境界条件

する鉛直方向の力を与えた。

3.3 解析結果

解析を行った結果を図-6に示す。全ての解析ケースにおいて、板厚が変化しても安定して高い耐力力が示された。今回のように、道示の幅厚比規定で、満足しない薄い腹板厚を使用しても、十分なせん断耐力を有し、設計上問題ないといえる。

第4章 組合せ荷重による耐力特性

プレートガーダーは桁端部、支間中央、などの各断面の間では作用する断面力特性はそれぞれ異なる。そのような様々な部位における耐力力を明確に判断し、その部位に適したプレートガーダー断面を簡単に設計することが可能であるなら、より省力化を図った設計が可能である。

本章では、式(2)を用い、曲げ耐力とせん断耐力の相関性を検討する。

$$\left(\frac{M_u}{M_{u0}}\right)^n + \left(\frac{V_u}{V_{u0}}\right)^m = 1 \quad \dots (2)$$

4.1 設計諸元

断面は2章の検討で最適であるとされた、水平補剛材1段で桁高2300mm~2700mmとした。そして、それらのモデルをアスペクト比 $\alpha=2/3, 1, 1.5, 2$ の場合について、相関曲線を作成した。

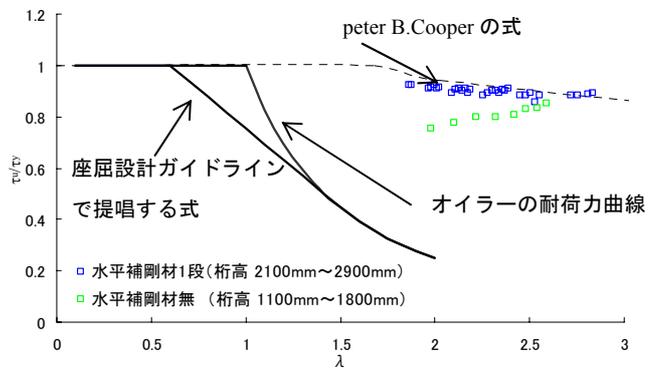


図-6 極限せん断耐力

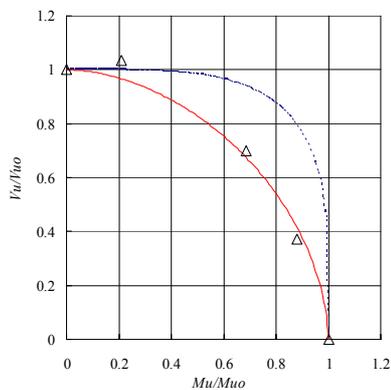


図-7 相関曲線桁高2500mm, $\alpha=2/3$

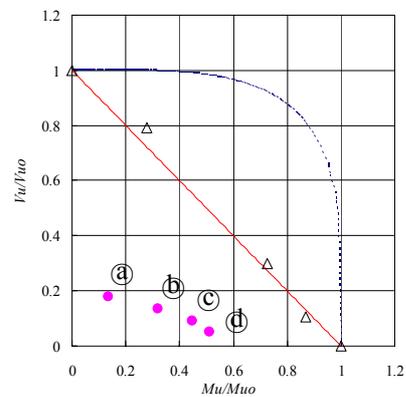


図-8 相関曲線との比較, 桁高2500mm, $\alpha=2$

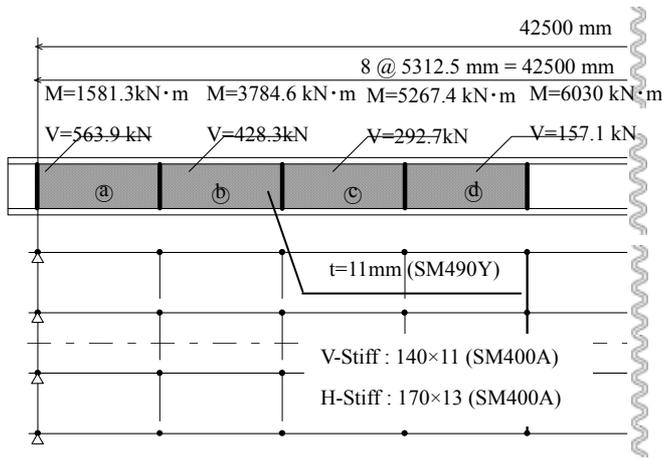


図-9 試設計モデル，桁高 2500mm， $\alpha=2$

4.2 解析結果

解析結果から得られた相関曲線を図-7 に示す．図中の破線はプレートガーダーに適切であるとされる， m ， $n = 4$ の相関曲線であり，実線のラインは解析結果によって得られた値に対する，近似相関曲線である．桁高の違いが，耐荷力の相関曲線に及ぼす影響は認められない．一方，腹板のアスペクト比を大きくすることで，せん断耐荷力への影響が大きいことがわかる．

第5章 合理化橋梁の試設計

本章では，4 章で算出された，相関曲線を使用して，薄肉少補剛で設計されたプレートガーダーの試設計を行い，照査をする．また，道示の規定である， $\alpha=1.5$ を超えた設計の検討についても行う．

5.1 設計諸元

2 章の検討から最適であるとされた，水平補剛材 1 段 (2300~2700mm) の中から，桁高 2500mm のモデルを，基に，試設計を行う．対象桁は，4 主桁の単純桁を想定した．アスペクト比 $\alpha=2/3$ 付近で設計したものと， $\alpha=2$ 付近のものについて試設計を行った．

5.2 比較結果

図-8 に 4 章で算出した相関曲線と，試設計によって求められた断面力を比較したものを示す．試設計に用いた，アスペクト比 $\alpha=2/3$ ，および $\alpha=2$ のいずれの設計においても，相関曲線と比較してかなり安全側に，設計断面力が位置している．また $\alpha=2/3$ と $\alpha=2$ とを比較すると， $\alpha=2$ が多少，危険側に移行しているものの，十分に安全率を有しているがわかる．これらから，道示のアスペクト比の規定である $\alpha=1.5$ を超えても耐荷力に余裕があり，設計が可能であることがわかった．

第6章 経済性

鋼橋の建設にあたり，高耐久性だけではなく，経済性に富んだ鋼橋の設計が望まれる．本節では経済性に注目し，本論文で提案している薄肉少補剛の合理化橋の設計が，工事費用へ及ぼす影響について述べる．これまでの章で検討した結果を踏まえ，本章では特に実現性の高

いと考えられる，水平補剛材 1 段配置した桁高が高いケース (2100~2900mm) の経済性を照査する

6.1 試算条件

試算をするにあたり次のような，設計条件を示す．

- (1) 鋼重および工数算定要素については，「非合成桁の概略自動設計」(JIP テクノサイエンス編)を用いて計算する．
- (2) 工場製作費は，材料費と製作費を足した直接工事費とし，間接工事費は含まないものとする．
- (3) 場製作費には，工場塗装工および付属物製作工は含まないものとする．
- (4) 直接労務単価は 27,400 円 (平成 15 年度) とする．材料費は材質によらず，一律 80,000 円/t とする．

6.2 試算結果

提案した合理化桁を従来桁と比較した結果，直接工事費で約 1~10% 程度の低減が可能であることがわかった．また，全体を通して，腹板厚の鋼重に占める割合が大きい．水平補剛材を適切に配置し，腹板厚をできるだけ薄くすることがコスト縮減や作業の省力化につながると考えられる．

第7章 結論

本研究では，薄肉少補剛の考え方から，合理化設計の提案を行った．照査の結果は，以下に示すとおりである．

- (1) 提案設計より，水平補剛材を 1 段設置する方が，鋼重を軽減できるとともに，変形，疲労の面からも，水平補剛材を 1 段設置する方が，効果的であることを示した．
- (2) せん断耐荷力は道路橋示方書が示す耐荷力曲線よりかなり高くなることを示した．すなわち，せん断耐荷力においても，かなり腹板断面に余裕をみており，板厚の低減が可能であると考えられる．
- (3) 相関曲線より，桁高の違いよりも，主にアスペクト比の設定が耐荷力に及ぼす，影響が大きいことがわかった．
- (4) 相関曲線上で，提案合理化設計と比較した結果，設計断面力は相関曲線を大きく下回り，十分な安全率を確保できることを示した．またアスペクト比 $\alpha=2.0$ にしても，十分な安全率を確保しており，耐荷力上問題のないことを示した．
- (5) 提案設計法で試算を行った結果，従来桁に比べ 1~10% 程度の直接工事費の削減が図れることを示した．

以上の照査結果より，薄肉少補剛設計は，実現性があり，合理的な設計であるといえる．

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，丸善，2001,12
- 2) Eurocode prEN, 1993-2 :2003
- 3) USSP 研究会：ユーザーズ・マニュアル，理論編，Ver.3.0, JIP テクノサイエンス，1996,10