

(10) 合成版用立体トラス型ジベル付板の
座屈解析

BUCKLING ANALYSIS OF STIFFENED PLATE BY TRUSS FRAMED SHEAR CONNECTORS

高海克彦* 浜田純夫**

Katsuhiko TAKAMI, Sumio HAMADA

This study concerns to buckling strength of a thin plate with truss framed shear connectors which are used for the composite deck. Truss framed shear connectors contribute as longitudinal ribs of the plate. These members act at the upper flange of bridge girders under construction.

The analysis of the stiffened plate under uniform compression are carried out by using the finite strip method based on the elasto-plastic buckling theory. From numerical results, it is found that the stiffened plate has high buckling strength, and the reinforcement on the connectors has the effect of raising torsional and transverse bending stiffness.

1. まえがき

近年、コンクリートおよび鋼の構造材料としての、それぞれの特性の相乗効果を狙う合成構造の研究・開発が盛んに行われており、本研究で対象とするトラス型ジベルを有する鋼・コンクリート合成床版もその一つである。

構造的には、立体トラス型ジベルを、型枠を兼用し構造部材としては引張材となる鋼版（低鋼板）に溶接し、さらにその上部に鉄筋を接合した骨組みに、コンクリートを打設して合成構造としたものである。本合成版を含め、鋼製型枠合成版は、現場での型枠、支保工組み立て、および鉄筋組み等の施工の簡易化、省力化を促進するものと期待される。

本構造の特徴である立体トラス型ジベルは、鋼版の曲げ剛性を高め、ずれ止めとして2方向水平せん断力に抵抗し、コンクリートの浮き上がり防止に効果があること、また立体トラス斜材がせん断補強の役割を果たすことなどが実験的に明らかにされている。

本床版は、橋梁の完成系においては合成桁あるいは合成箱桁の床版となるが、コンクリート打設時および打設コンクリート硬化前の架設系においては、主桁の上フランジ作用をさせることも考えられる。その際、立体トラス型ジベルは鋼版に対する桁軸方向リブとみなすことができる。

設計にあたっては、トラス型ジベル付鋼版は一種の補剛板として設計されることになり、架設系における

* : 工博 山口大学講師 工学部土木工学科 ** : Ph.D. 山口大学教授 工学部土木工学科

座屈安定性の検討が必要とされる。すでに長方形断面補剛材で補剛された板の座屈解析は、古くから行われ、多くの研究成果が得られ、日本道路橋示方書（道示）¹⁾などの各種示方書に取り入れられている。しかし、本構造を補剛板として、研究、設計したものはほとんどなく、座屈安定性について明らかにすべき点が多い。

本報告は、この構造を薄板集成構造とみなし、弾塑性線形座屈解析によりその一端を把握しようとするものである。

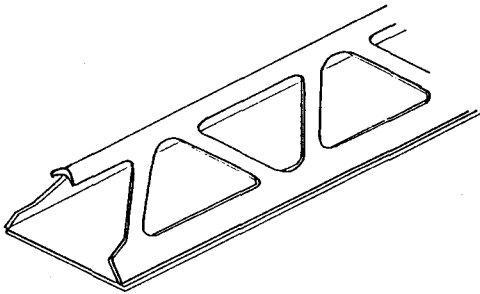
2. 解析

2. 1 解析モデル

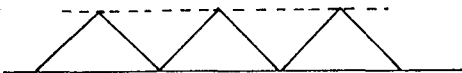
桁軸方向に配置されたトラス型ジベル付板の座屈安定解析において、モデルとしては図－1に示す斜材、上弦材は局部的な座屈は生じないとする。そこで本研究では、斜材を無視し、上弦材と下弦材のみを考え、これを断面積等値の薄板に図－2のように置換する。置換手法はいくつか考えられるが、本研究ではトラス型ジベルの縦リブとしての桁曲げに対する剛性を評価するため、断面積等値とした。また、床版支間方向の主力筋を考慮する場合は、軸直角方向のみの剛性を有する薄板に置換する。解析に用いる鋼材は一応SS41とする。

本構造は溶接接合であるため、残留応力は避けられない。残留応力の分布形状ならびにその大きさは多数の実験実測結果を待たねばならないが、文献2)より図－3に示す分布形状を仮定する。残留応力は、鋼板トラス置換板各々で自己平衡を満たすとする。残留応力の大きさは、従来の補剛板解析に用いられた値を参考に、表－1のようにCASE 1とした。値はSS41の降伏応力 $\sigma_y=2400\text{kgf/cm}^2$ で割って無次元化したものである。なお表中CASE 2はCASE 1との比較のため、低鋼板の圧縮残留応力を降伏応力の1/2としたものである。

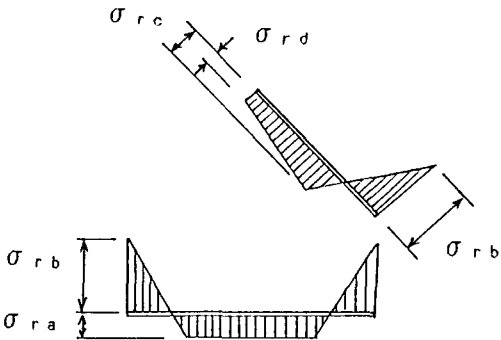
境界条件としては、補剛板四辺単純支持、トラス置換板も面内変位は自由、面外変位に対して単



図－1 トラス型ジベル



図－2 薄板置換モデル



図－3 残留応力分布

表－1 残留応力

	σ_{ra}	σ_{rb}	σ_{rc}	σ_{rd}
CASE 1	0.3	-1.0	0.2	0.1
CASE 2	0.5	-1.0	0.2	0.1

(圧縮が正)

純支持とする。

2.2 解析手法

本研究では、上のようにモデル化した薄板集成構造に、有限帯板法を用いる。

各帯板要素に対し、図-4の様な自由度を設定し、次式の変位関数を仮定する。

$$u = \left\{ \left(1 - \frac{x}{b}\right) u_{im} + \frac{x}{b} u_{jm} \right\} \sin(k_m)y$$

$$v = \left\{ \left(1 - \frac{x}{b}\right) v_{im} + \frac{x}{b} v_{jm} \right\} \cos(k_m)y$$

$$w = \left\{ \left(1 - 3\frac{x^2}{b^2} + 2\frac{x^3}{b^3}\right) w_{im} + \left(x - 2\frac{x^2}{b} + \frac{x^3}{b^2}\right) \theta_{im} \right.$$

$$\left. + \left(3\frac{x^2}{b^2} - 2\frac{x^3}{b^3}\right) w_{jm} + \left(-\frac{x^2}{b} + \frac{x^3}{b^2}\right) \theta_{jm} \right\} \sin(k_m)y$$

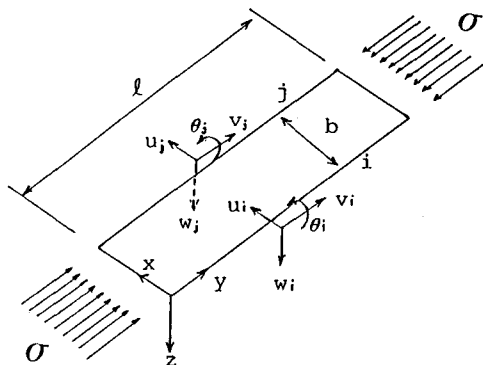


図-4 有限帯板要素

ここに、 (x, y, z) は要素の局所座標、 b, l は要素幅、要素長である。 m はモード次数を表し、 $k_m = m\pi/l$ である。

解析上の基本仮定は次に挙げるものである。

- ① 低部鋼版および両置換板の材質は等しく、かつ完全弾塑性体とし、ひずみ硬化は考えない。
- ② 幾何学的初期不整はなく、座屈まで同一平面内にある。
- ③ 初期応力として溶接による残留応力が鋼版およびトラス置換板に存在し、その分布形状ならびに大きさは長さ方向に一定とする。
- ④ 座屈時にはひずみの反転は生じないものとして、塑性域ではBijlaardの塑性変形理論³⁾を用いる。

以上の仮定に基づき定式化した有限帯板法により、最終的に次式の連立一次方程式を得る。

$$([K] - \lambda^2 [K_0]) \{W\} = 0$$

ここに、 $[K]$ 、 $[K_0]$ 、および $\{W\}$ はそれぞれ補剛板全体の剛性マトリクス、安定係数マトリクス、節線変位ベクトルであり、 λ^2 は次式の定数である。

$$\lambda^2 = \left(\frac{b_0}{t_0}\right)^2 \frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2}$$

ここに、 b_0, t_0 は基準板幅、基準板厚、 σ_y は鋼材の降伏応力、 E はヤング係数、 ν はポアソン比である。

弾塑性線形座屈理論では、 λ^2 を固有値とする固有値問題を検討する。有限帯板の分割数は、低部鋼板を4分割、トラス置換板を2分割とした。

3. 結果と考察

本構造は、トラス型ジベルが閉断面補剛材を形成し、かつそれが密に配置されている。比較のため、図-5の3つの円に示されるモデルについて、残留応力を考慮しない弾性座屈における座屈係数とアスペクト比の関係を調べた。モデルⅠは本構造モデルであり、トラス脚部が鋼板に剛結されたモデルである。モデルⅡは、モデルⅠのトラス脚部が鋼板にヒンジ結合されたモデル、モデルⅢはトラス頂部にスリットが入り、開断面となったモデルである。補剛板の座屈解析に用いられるパラメーター諸元は、どのモデルも断面積比 $\delta = 0.113$ 、曲げ剛比 $r = 30.48$ 、パネル数 $n = 5$ 、アスペクト比 $\alpha = 1$ とする。曲げ剛比は道示の必要最小剛比を満

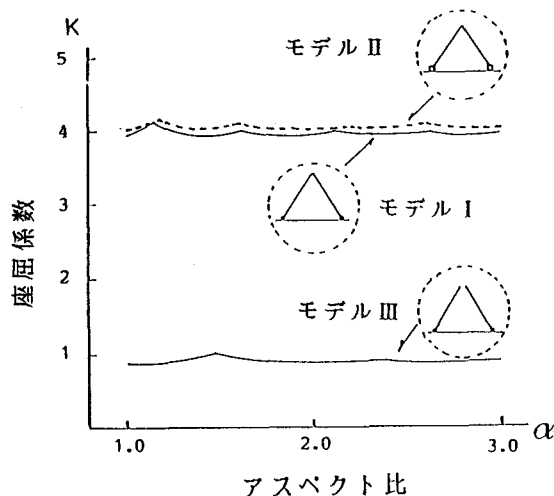


図-5 座屈係数-アスペクト比

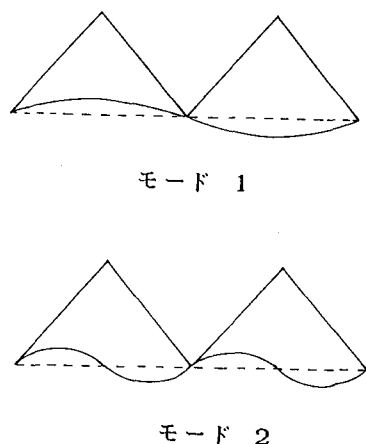


図-6 座屈モード

たすものである。ただし、ねじり剛比 η は、モデルⅠ、Ⅱが、23.06であるのに対し、モデルⅢは0.32で1/70以下である。図より明らかなように、開断面となるモデルⅢは座屈係数が小さく、座屈しやすい。また、トラス脚部が剛結合であってもヒンジ結合であってもほとんど変わらない。このときの座屈モードは、モデルⅠでは、アスペクト比が2以下で図-6のモード2を、それ以上ではモード1を生じる。モデルⅡではモード1と、モード1と全体座屈モードの連成モード、モデルⅢでは、すべてモード1を示した。モデルⅢは、補剛材の幅厚比が大であるため、補剛材自身のねじり座屈と考えられる。

CASE 1の残留応力が存在するとき、図-7に図中の諸元を有する補剛板の耐力曲線を示す。縦軸には、平均座屈応力をSS41の降伏応力で割って無次元化した値を、横軸には幅厚比 R を採っている。 n はトラスの本数を、 r^* は道示の必要最小剛比を表す。 σ_{cr}/σ_y が0.7以下では補剛板はすべて弾性域にあり、3者の違いはない。 σ_{cr}/σ_y が0.8~1.0で差は出てくるが、必要最小剛比を有していれば、その2倍、3倍の剛比を有しても、それほど座屈強度の増加はみられない。 r^* では σ_{cr}/σ_y が0.85以上で全体座屈モード

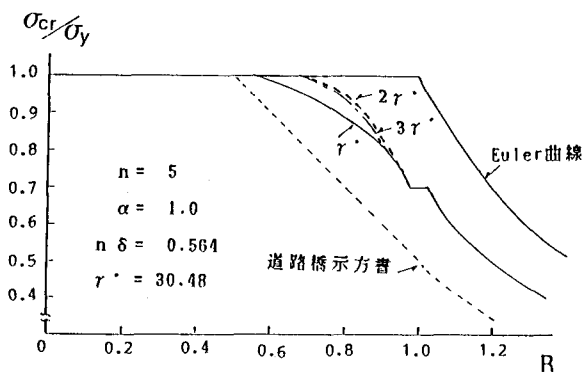


図-7 剛比と座屈曲線関係

となるが、 $2r^*$ 、 $3r^*$ の場合、局部座屈のみ生じる。また、これらと道示の基準耐力曲線を比較すると、基準耐力曲線が下回り、設計においては安全側となっている。

残留応力の大きさについてCASE 1とCASE 2の場合を比較し、耐力曲線を示せば、図-8になる。両者は補剛板が弾性域から塑性域に移る平均応力が異なるだけで、 σ_{cr}/σ_y が0.7以上ではほとんど一致している。この場合も、道示の基準耐力曲線を上回っている。また、文献(4),6)にみられるように、残留応力を有すると、長方形断面補剛材を持つ補剛板は、平均座屈応力 σ_{cr} が降伏応力 σ_y に近づくと、座屈曲線の傾きは水平

に近くなり、急激に幅厚比Rは減少するが、トラス型ジベル付板ではそのRの減少の割合も小さく、これも本構造の特性の一つである。

箱桁フランジなど幅広くなれば、当然トラス型ジベルの本数も増える。そこで、 $n=8, 10, 12$ としたときの耐荷力曲線を図-9示す。残留応力としては、CASE 1を与え、各 n に対して、 γ は道示の規定を満たしている。 n が増えたと、同じRの値に対し、座屈強度が低下するのが分かる。 $n=10$ の場合 $R=0.7$ 以下で、 $n=12$ の場合 $R=0.75$ 以下で、座屈強度は道示の基準を下回っている。トラス型ジベル上部に配置される床版としての主鉄筋を考慮したときの耐荷力曲線を図-10に示す。板厚は、鉄筋(D16)が20cm間隔で配置されたとしたときの、置換板厚である。主鉄筋作用により座屈強度が上がるのが分かる。これは、鉄筋がトラス型ジベルと協同して閉断面を形成し、板としてのねじり剛度が大きくなると同時に、横方向補剛材として板の曲げ剛比を上げるためと考えられる。

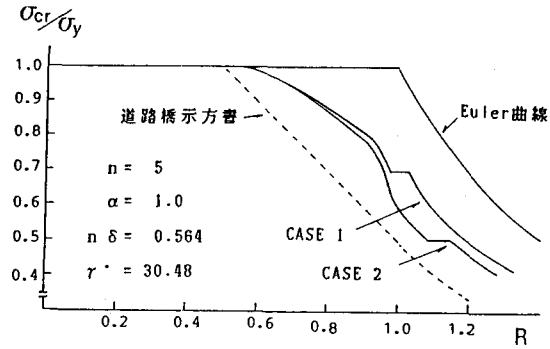


図-8 残留応力と座屈曲線関係

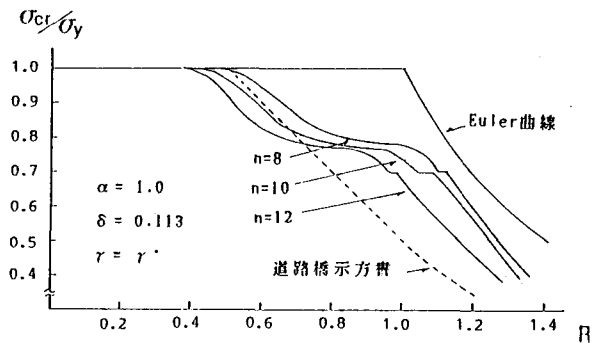


図-9 ジベル本数と座屈曲線関係

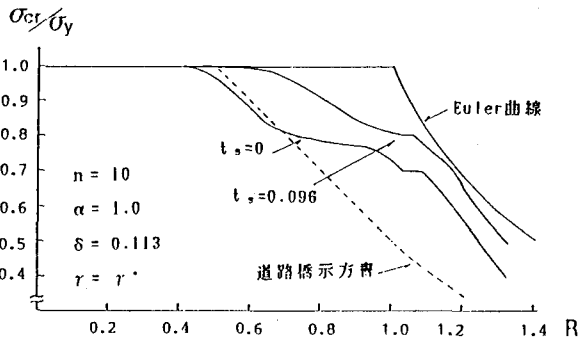


図-10 主力筋の座屈曲線に対する影響

4. あとがき

新しい床版形式を構成するトラス型ジベル付鋼板は、架設系において橋桁の上フランジと成ることから、補剛板としての座屈安定性を、有限帯板法を用いて調べた。得られた結果をまとめると、次のようになる。

- 1) トラス型ジベル付板は、溶接残留応力があっても、平均座屈応力が降伏応力に近づくまで、幅厚比の急激な低下は起らない。
- 2) トラス型ジベルは縦リブとして、曲げ剛性および高いねじり剛性を有するため、低部鋼板に対し補剛効果を発揮し、座屈強度を高める。
- 3) トラス型ジベル上部に配置される主鉄筋は、補剛材としてねじり剛性ならびに床版支間方向曲げ剛性も

高めるため、補剛板の座屈強度を上げるのに効果的である。

なお、本構造の実用化に当たっては、トラス型ジベルの斜材および上弦材の局部的座屈について、別途検討を要すると考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅰ）、1980年2月
- 2) 土木学会：座屈設計ガイドライン、1987年10月
- 3) Bijlaard, P. P.: Theory of Plastic Buckling of Plates, Jour. of Applied Mechanics, Vol. 23, 1956
- 4) 宇佐美勉：補剛材つき板の弾性ならびに非弾性圧縮座屈強度、土木学会論文報告集、No. 228, 1974-8
- 5) 長谷川彰夫・大田孝二・西野文雄：補剛された板要素の座屈強度に関する二、三の考察、土木学会論文報告集、No. 232, 1974-12
- 6) 小松定夫・牛尾正之：圧縮補剛板の弾塑性座屈強度と合理的設計方について、土木学会論文報告集、No. 278, 1978-10