

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420457

研究課題名(和文) 鋼I桁フランジ垂直座屈の発生要因と力学モデル

研究課題名(英文) Collapse mode of flange vertical buckling of an I-sectioned steel girder

研究代表者

清水 茂 (SHIMIZU, Shigeru)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：90126681

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、実橋梁に近い大きさを持つ鋼桁について、実際の設計に用いる荷重に近い荷重条件のもとで数値解析を行い、垂直座屈が発生する条件や垂直座屈挙動の詳細を調べるものである。研究の結果、これまで得られた座屈モードに加え、フランジが高次のモードで変形している。また、フランジのねじれを拘束したところ、本来、ねじれ座屈が発生したモデルであっても垂直座屈が発生した。このことは、床版による座屈抑制効果が期待できないことを意味している。

Timoshenkoの式におけるバネ定数を求めたところ、モデルの条件にはほとんど依存せず、フランジ厚に対しほぼ一つの直線で表すことができた。

研究成果の概要(英文)：Flange vertical buckling is studied numerically on an I-shaped steel girder having its dimension of a practical bridge girder. As the result, in addition to the buckling mode observed in the experimental test, the displacement pattern for the higher mode is obtained. The analysis with the condition in which the torsional deformation of the top flange is restricted, flange vertical buckling arises in the model which show the flange torsional buckling. This means that the deck plate can no longer restrict the flange buckling in the vertical buckling problem. The flange vertical buckling problem is modeled as a bar element under compression on the elastic foundation proposed by Timoshenko. In the Timoshenko's model, the spring constant is required. The results of this study indicates that the spring constant varies almost linearly for the flange thickness, and the web plate has very small contribution on the spring constant.

研究分野：橋梁工学

キーワード：垂直座屈 鋼I桁

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 研究代表者の清水が参加した、日本鋼構造協会によるハイブリッド鋼桁に関する実験では、実験用模型桁のうちの一体で予期せぬフランジ垂直座屈が発生した(図-1)。ハイブリッド鋼桁は、コスト削減のため、フランジのみに高強度鋼、腹板に普通鋼を用いた鋼桁である。一方、フランジ垂直座屈は腹板がフランジに比べ弱い場合にのみ発生するとされていた。そこで、当初、実験で観察された垂直座屈は、ハイブリッド鋼桁特有の現象であると考え、ハイブリッド鋼桁の垂直座屈に関する研究を行ってきた(清水、科研23-26、課題番号23560566)。



図-1 鋼構造協会による実験  
(清水他、鋼構造論文集 2003)

(2) 上記の科研(23560566)の研究では、比較のため、ハイブリッドではない通常の桁についても調べた。その結果、通常の桁でも条件によっては垂直座屈が発生することが分かった。一方で、この研究により、  
・座屈発生後、他の座屈パターンでは荷重が緩やかに減少するのに対し、垂直座屈では荷重がきわめて急激・衝撃的に減少する、危険な現象である。

・Baslerにより提案されている垂直座屈照査式によると、その前提となる腹板の変形、得られた照査結果とも、上記実験や科研(23560566)の結果を説明できない。などのこともわかった。

(3) 上記の科研の研究では、解析は、実際に架設される桁よりも小さい実験用模型と同じ公称寸法・形状を有するモデルを基本として考察していた。また、荷重も実験時と同じく2点荷重としていた。

(4) 以上のことから、実橋梁に近い大きさを持つ、ハイブリッドでない通常の鋼桁(以下ホモジニアス鋼桁という)について、実際の設計に用いる荷重に近い荷重条件のもとでの垂直座屈挙動の詳細や、垂直座屈の照査式について検討が必要である。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、実橋梁に近い大きさを持つ鋼桁について、実際の設計に用いる荷重に近い荷重条件のもとで数値解析を行い、垂直座屈が発生する条件や垂直座屈挙動の詳細を調べ、垂直座屈の照査式について検討することである。対象は、主としてハイブリッドではない、いわゆるホモジニアス鋼桁であ

るが、この一連の研究は、当初、ハイブリッド鋼桁を対象としていたことから、比較のため、一部、ハイブリッド鋼桁についても解析対象とした。

(2) 垂直座屈に関する唯一の照査式であるBaslerの式は、腹板がその上下方向全体にわたって変形することを仮定して得られたものである。しかし、先の清水らの研究では、垂直座屈に伴う腹板の変形は、腹板の上部のみ観察され、腹板下部では変形は見られなかった(図-2)。そこで、本研究では、Baslerのモデルに代る新たな崩壊モデルについても考察することとする。なお、この腹板の変形は、垂直座屈に対しては、腹板は、その上部のみしか影響しないことを意味していることから、解析では、腹板上部のみを取り出したモデルも対象とした。

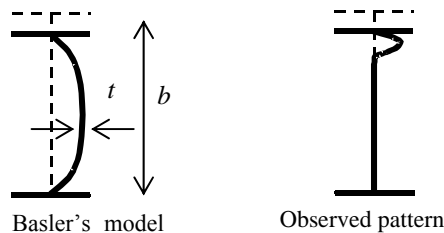


図-2 Baslerのモデルと実際の変形

### 3. 研究の方法

(1) 研究は、有限要素法による数値解析によって行った。解析の対象とするモデルは、橋梁会社から提供を受けた、実際に架設された橋梁をもとに設定したモデル、I桁の上部のみを想定したT型断面のモデルの2種類である。具体的には、のモデルは桁高2500mm・フランジ幅600mm・桁長29800mmであり、は注目すべき桁中央部のみパネルに注目し、フランジ幅600mm・桁長2500mmとし、高さは100mm~1000mmで変化させている。また、フランジ厚については28~42mm、腹板厚については7~10mmの間で1mmずつ変化させている。図-3は、この研究で扱った解析モデルの一例である。

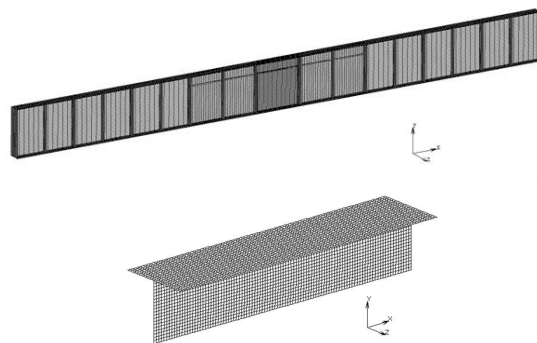


図-3 解析モデル  
上：桁全体を対象とした場合  
下：桁上部のみを対象とした場合

(2) 荷重は、前回の研究では、実験の際の載荷状態を考慮し、大きさが1%異なる集中

荷重を桁上の2点に載荷していた。しかし、桁本体を設計する際の荷重は、道路橋示方書のL活荷重であり、等分布荷重が基本となっている。そこで、今回は、上記の解析モデルについては、上フランジに等分布荷重を満載とした(図-4上)。また、上記のモデルについては、フランジが受ける、曲げに伴う圧縮応力を想定し、フランジ両端に圧縮を作用させている(図-4下)。

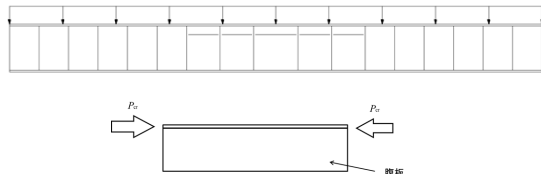


図 - 4 荷重

上：桁全体を対象とした場合  
下：桁上部のみを対象とした場合

(3) 解析に用いた材料特性は、SM570 高强度鋼を想定したものを基本とし、ハイブリッド鋼桁では、SM400 普通鋼、および LY235 低降伏点鋼も用いることとした。すなわち、ホモジニアス桁については、すべての部分に

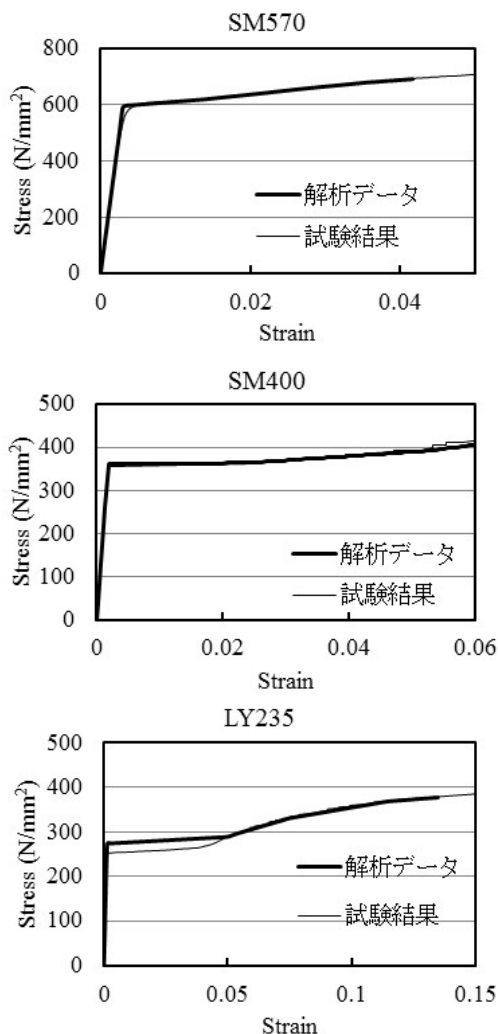


図 - 5 材料特性

SM570 鋼、ハイブリッド桁については、フランジに SM570 高强度鋼、桁中央部分の腹板には LY235 低降伏点鋼、それ以外の腹板には SM400 普通鋼を用いている。それぞれの鋼種の具体的な材料特性の値は、実験(清水他：日本鋼構造協会、2003)の中で行われた材料試験の結果を元に、図-5および表-1のように設定した。図中、細線は材料試験の結果、太線が、それを元に本研究で用いた値である。

表 - 1 鋼材の材料特性値

鋼種	SM570	SM400	LY235
降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	596	360	265
ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	200,000	188,000	189,000
ポアソン比	0.30	0.28	0.29

(4) 解析には、先行する研究(清水：科研23-26)でライセンスを購入した有限要素法プログラム・パッケージの MSC-Marc を用いた。用いた要素は、1要素4節点アイソパラメトリック四角形シェル要素である。

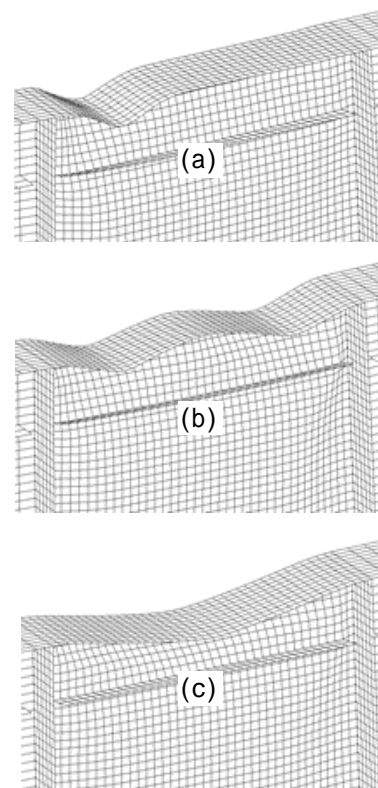


図 - 6 垂直座屈の座屈形式

#### 4. 研究成果

##### (1) 座屈形式と荷重 - 変形曲線

図-6~図-8に、本研究で得られた最も典型的な座屈形式を示す。うち、図-6は、垂直座屈が発生した場合の座屈形式である。図-6中、(c)はハイブリッド鋼桁のみに見ら

れた形式である。(a)は実験結果(清水、2003)とほぼ同一の形式であり、先行研究による解析(清水、科研 23560566)によっても類似の結果が得られている。(b)は、今回の研究ではじめて見られた形式で有り、フランジが高次のモードで変形している。これは、解析対象のモデルが実橋サイズであり、これまでの研究よりも大きく、フランジの、圧縮部材としての固定端長、言い換えると有効座屈長が大きくなったためと考えられる。

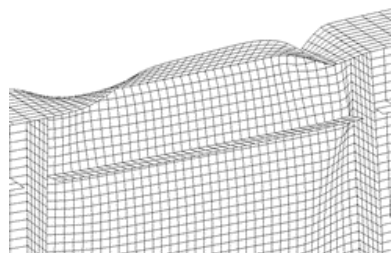


図 - 7 フランジねじれ座屈

一方、図 - 7 はフランジのねじれ座屈である。また、図は割愛するが、連成座屈は当初は図 - 7 のような変形を呈し、後に図 - 6 のような変形に変わっている。

図 - 8 は、本研究で得られた荷重 - 変形曲線の一部である。この図は、フランジ厚  $t_f$  が  $t_f=30\text{mm}$ 、 $34\text{mm}$ 、 $41\text{mm}$  のモデルについて、フランジの最も変形した位置における鉛直方向の変形、およびパネル中央のフランジねじれ量を荷重に対してプロットしたものである。腹板厚はいずれも  $9\text{mm}$  である。ここで、フランジねじれ量は、フランジ左右両端の変異量の差で表している。この図に用いられているモデルでは、 $t_f=30\text{mm}$  のモデルでフランジねじれ座屈、 $t_f=34\text{mm}$  のモデルで連成座屈、 $t_f=41\text{mm}$  のモデルで垂直座屈が発生している。

図中、垂直座屈が発生した  $t_f=41\text{mm}$  のモデルでは、荷重は最大値に達した後に、ほぼそのままの値を保ちながら変形がやや増加し、その後、荷重はきわめて急激に低下している。このことは、先行の研究でも指摘されていた

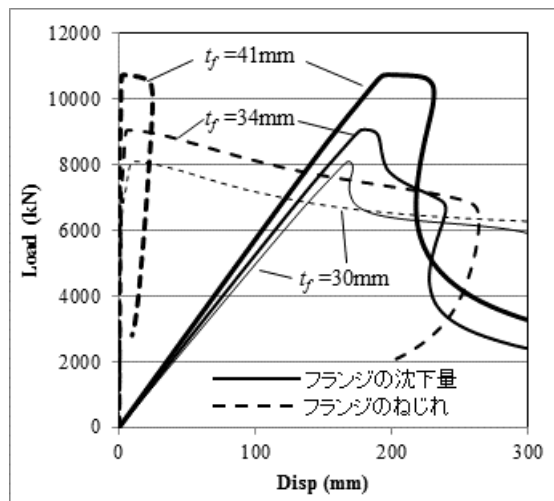


図 - 8 荷重変形曲線

ことであり、垂直座屈が危険な現象であることを示唆している。一方、フランジねじれ座屈が発生したモデルでは、荷重は初めに急激に減少するものの、その後の減少は緩やかである。連成座屈では、当初はフランジねじれ座屈と、その後は垂直座屈と類似の傾向を示している。

### (2) フランジのねじれ拘束

道路橋では、通常、桁上に床版が存在しており、I桁の上フランジは、そのねじれを床版により拘束されている。すなわち、道路橋では、前述のフランジねじれ座屈・連成座屈は発生しないと考えられる。そこで、フランジねじれ座屈が発生したモデルについて、フランジのねじれを拘束し、再び同様の解析を試みた。その結果、ねじれ座屈が発生したすべてのモデルについて、座屈形式が垂直座屈へと変化した。

図 - 9 は、フランジねじれ座屈が発生したモデルのうち、フランジ厚  $t_f=30\text{mm}$ 、腹板厚  $t_w=9\text{mm}$  について、フランジのねじれを拘束した場合の荷重 - 変形曲線である。比較のため、図 - 8 の  $t_f=30\text{mm}$  の場合の曲線も再掲している。この図を見ると、最大荷重はほとんど変化しないものの、座屈形式が垂直座屈に変化した結果、荷重 - 変形関係も、図 - 8 の垂直座屈の場合とほぼ同様、急激に荷重が減少する形式に変わっていることが分かる。

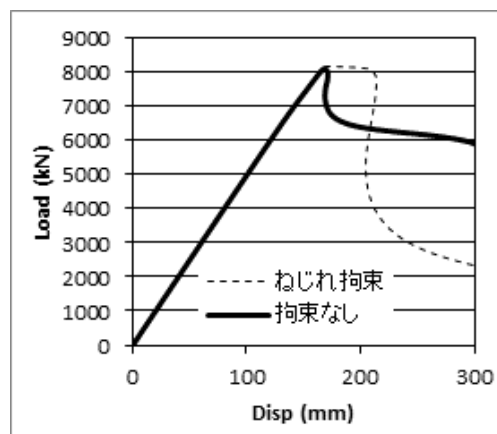


図 - 9 ねじれ拘束の影響

フランジ垂直座屈は、フランジがそのまま鉛直下方に沈み込む変形を呈するため、床版による座屈抑制効果は期待できないことになる。

### (3) T型断面のモデル

図 - 2 に示したように、フランジ垂直座屈が発生した場合、腹板は、Basler の仮定とは異なり、その上部のみが変形する。そこで、解析を容易にするため、腹板上部とフランジのみを取り出したT型断面のモデルについて、これまでと同様の解析を試み、その結果を比較した。

図 - 10 は、腹板高さ  $600\text{mm}$  のモデル、すなわち桁上部の  $600\text{mm}$  の部分のみを取り出したモデルの荷重 - 変形曲線とねじれ量である。フランジ厚  $t_f=36\text{mm}$ 、腹板厚  $t_w=5\text{mm}$  の場合

はフランジのねじれは小さく、また、荷重が急激に減少し、典型的な垂直座屈が発生している。それに対し、 $t_f=30\text{mm}$ 、 $t_w=7\text{mm}$  の場合はフランジねじれ座屈が発生していることがわかる。

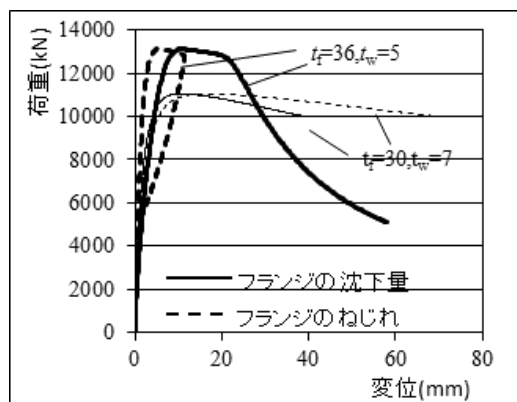


図 - 10 T型断面の荷重 - 変形曲線

なお、図などの詳細は割愛するが、T型断面を用いる場合、腹板高さは、おおむね400mm程度以上であれば、全断面を対象とした解析と、ほぼ同等の結果が得られることを確認している。

(4) Timoshenko のモデル

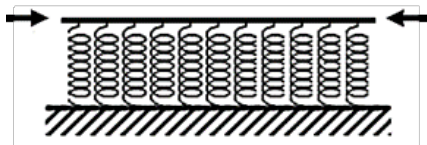


図 - 11 Timoshenko のモデル

本研究では、フランジ垂直座屈のモデルとして、フランジを、圧縮荷重を受け、腹板に支持された棒部材と考え、Timoshenko の弾性床の上の柱の座屈問題を適用する。Timoshenko のモデルでは、圧縮力を受ける弾性床の上の柱の座屈荷重  $P_{cr}$  は近似的に  $P_{cr} = 2\sqrt{\alpha EI}$  で表される。すなわち、バネ定数が得られれば、フランジ垂直座屈の座屈荷重を求めることができる。

本研究では、バネ定数を決定するための第一段階として、そのバネ定数の特徴を探るため、これまでに得られた桁としての最大荷重から、垂直座屈発生時のフランジ圧縮力を求め、それを Timoshenko の式に代入することで、バネ定数を求めた。図 - 12 は、こうして得られたバネ定数を、フランジ厚に対してプロットしたものである。図中の凡例のうち、7mm などの数値は腹板の厚さ、hy はハイブリッド桁、fix はフランジのねじれを拘束した場合の結果である。また、最小二乗法とある線は、これらの線に対し最小二乗法を用いたものである。図に示すとおり、バネ定数は、他の条件にはほとんど依存せず、フランジ厚に対しほぼ線形の関係を示している。そこで、バネ定数は、最小二乗法による線ではほぼ近似できるものと思われる。ただし、実務では、

最小二乗法による線をそのまま下方にやや平行移動し、これらの線群の下限となるようにした線を用いることが適当である。

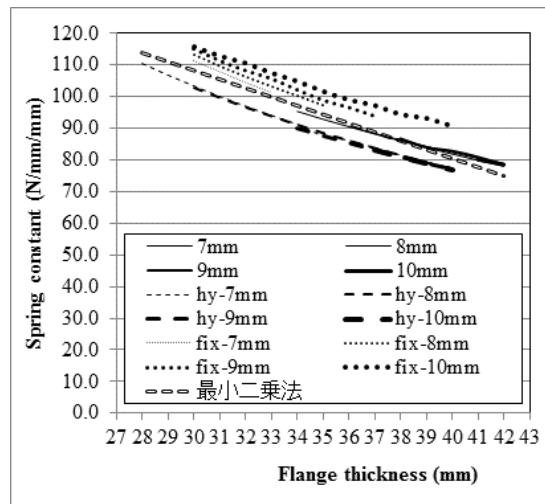


図 - 12 バネ定数

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[論文発表(査読あり)] (計1件)

Shuhei SHIMIZU, Shigeru SHIMIZU, Takuo UEDA, Gaku FUJITA, Nobunao TANAKA : Flange vertical buckling of I-shaped steel girders : Thin-Walled Structures 107(2016), 327-334

[学会発表] (計3件)

Tomoyuki OKAWA, Shuhei SHIMIZU, Shigeru SHIMIZU, Gaku FUJITA, Nobunao TANAKA : Study on the Vertical Buckling Collapse of I-Shaped Steel Girders, 40th Solid Mechanics Conference (Solmech2016), Poland (2016.8.31)

Shuhei SHIMIZU, Shigeru SHIMIZU, Gaku FUJITA, Nobunao TANAKA : Flange vertical buckling of I-shaped steel girders, Proc. of XIV symposium on stability of structures, Zakopane, Poland, (2015.6.11)

Takuo UEDA, Shigeru SHIMIZU, Gaku FUJITA, Nobunao TANAKA : Flange Vertical Buckling of Hybrid Steel Girder under Bending, 39th Solid Mechanics Conference (Solmech2014), Poland (2014.9.2)

6. 研究組織

(1)研究代表者

清水 茂 (SHIMIZU, Shigeru)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：90126681