

## 合成2主桁橋の固有振動特性とねじり剛性向上に関する検討

Study on Vibration Characteristics and Improvement of Torsional Stiffness in Composite Twin I-Girder Bridges

北海道大学大学院工学研究科  
北海道大学大学院工学研究科  
(独)北海道開発土木研究所  
北海道大学大学院工学研究科

F 会員  
○学生員  
正 員  
正 員

林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)  
渡邊 大輔 (Daisuke Watanabe)  
池田 憲二 (Kenji Ikeda)  
平沢 秀之 (Hideyuki Hirasawa)

### 1. はじめに

建設コスト削減の要求を満たす取り組みとして、鋼橋の分野においては2主桁橋に代表される少数主桁橋の建設が進められている<sup>1)</sup>。構造の特徴としては、PC床版を用いることにより床版支間を拡大し、主桁本数を削減していること、横荷重に対して床版で抵抗する設計を行い、下横構・対傾構を省略していること、一部材一断面とし水平補剛材を省略していること等が挙げられる<sup>2)</sup>。また、床版支間の拡大により、床版厚 300[mm]以上の耐久性のある横締め PC 床版を採用していることや横桁のみで両主桁を連結しているために、風・地震等の面外荷重に対して床版を主要部材として扱う必要があることから、床版と鋼桁を合成させた合成桁として設計している事例もある。その結果、合理化設計ガイドラインに準じて設計した2主桁橋に比べ、材片数で36%、加工重量で13%の低減が可能となっている<sup>3)</sup>。このように合成2主桁橋は部材数の少ないシンプルな構造を有しており、景観上はもちろんのこと、製作・架設の合理化・省力化を図った橋梁であると言える。さらに、塗装面積の減少、部材交差箇所の低減による応力集中・疲労問題の解消、点検業務の容易化等、ライフサイクルコストの面からも優れており<sup>4)</sup>、今後も建設が推進されていくと考えられる。

一般に、鋼桁橋は斜張橋や吊橋よりも風による振動は起きにくい<sup>5)</sup>、合成2主桁橋は従来の桁橋に比較して縦長の断面を有しているため、総幅  $B$  に対する有効高  $D$  の比  $B/D$  が3以下となることが多く、空気力学的特性の点で問題となる可能性がある<sup>6)</sup>。また、横構が省略され、基本的に開断面であることから、多主桁橋と比べてねじり剛性が低い構造であると言える。これまで、少数主桁橋は支間長 50[m]程度での採用実績があり、最近では80[m]以上の架設事例も見られる<sup>7)</sup>。このような状況の中、今後も長スパン化していくことが予想されるが、それに伴って固有振動数が低下するため、ねじり振動に関する十分な検討が必要であると考えられる。特に、ねじり渦励振については、設計基準風速以下で発生するケース<sup>8,9)</sup>や大きな応答に起因する初通過破壊・疲労破壊<sup>9)</sup>、自動車との共振による使用性等の問題<sup>10)</sup>が生じる可能性があり、ねじり剛性を向上させることが非常に重要である。そこで、本研究は合成2主桁橋のねじり剛性を向上させる一つの手段として、両主桁下フランジ間に鋼板を設置する箱桁状補剛材に着目し、総ユニット数・設置位置・板厚をパラメータとして、その有効性を検討するものである。

### 2. 解析モデル

合成2主桁橋の固有振動特性を把握し、箱桁状補剛材がねじり剛性に与える影響を検討するために、FEM 解析モデルを作成し、固有振動解析を行う。なお、固有値問題を含む数値計算には有限要素法汎用構造解析プログラム MSC/NASTRAN を使用する。

#### 2.1 合成2主桁橋モデル

一般的な合成2主桁橋の固有振動特性を把握するために、基本モデルの解析を実施する。支間長 50[m]の直線橋であり、その断面図を図-1に示す。床版には PC 床版を用いており、横桁は支間長を 10 等分する 5[m]間隔で設置している。部材断面は表-1の通りである。なお、垂直補剛材は幅 250[mm]、板厚 25[mm]の鋼板を使用し、横

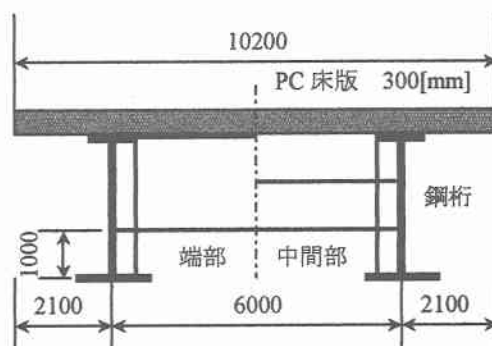


図-1 model-o の断面図

表-1 部材断面

|       | 主桁   | 端横桁  | 中間横桁 |
|-------|------|------|------|
| $B_u$ | 500  | 300  | 300  |
| $t_u$ | 30   | 25   | 25   |
| $H$   | 3000 | 2000 | 1000 |
| $t_w$ | 24   | 16   | 16   |
| $B_l$ | 800  | 300  | 300  |
| $t_l$ | 50   | 25   | 25   |

桁同様 5[m]間隔で設置している。表-2 に境界条件を示す。ヒンジ・ローラーの単純支持であり、下フランジで拘束している。拘束条件はあらかじめ行った桁理論の解析結果と整合性を保つように設定している。

図-2 に FEM 解析モデルを示す。総節点数は 14017、総要素数は 10300 である。床版にはソリッド要素、鋼部材にはシェル要素を採用している。各部材の材料定数は表-3 の通りである。要素分割数については橋軸および橋軸直角方向の二方向があり、固有振動数が十分収束するように設定している。以上のような基本モデルを本解析では model-o と呼ぶことにする。ここで o は original を表している。

## 2.2 箱桁状補剛材を設置したモデル

合成 2 主桁橋のねじり剛性を向上させるために、下フランジと同じ板厚 50[mm]の鋼板を、model-o の両主桁下フランジ間に渡した箱桁状補剛材を設置したモデルの解

表-2 境界条件

| 支持条件            | $u$ | $v$ | $w$ | $\theta_x$ | $\theta_y$ | $\theta_z$ |
|-----------------|-----|-----|-----|------------|------------|------------|
| ▽               | 固定  | 固定  | 固定  | 固定         | 自由         | 自由         |
| ○               | 自由  | 固定  | 固定  | 固定         | 自由         | 自由         |
| hinged support  |     |     |     |            |            |            |
| movable support |     |     |     |            |            |            |

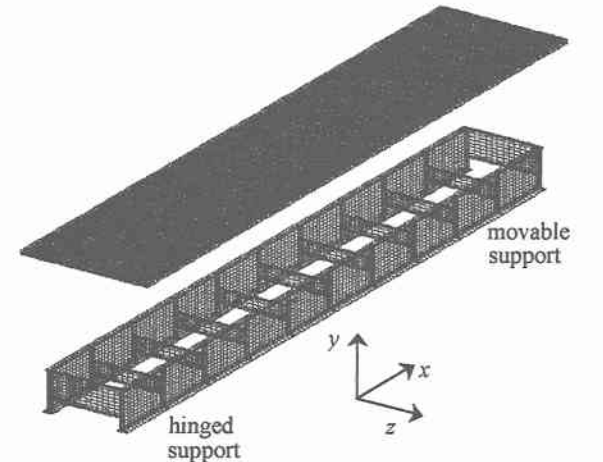


図-2 FEM 解析モデル

表-3 各部材の材料定数

| 部材名  | ヤング係数E<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | ポアソン比 $\nu$ | 単位体積重量 $w$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] |
|------|--------------------------------|-------------|------------------------------------|
| PC床版 | $2.857 \times 10^4$            | 0.2         | 24.5                               |
| 鋼部材  | $2.000 \times 10^5$            | 0.3         | 77.0                               |

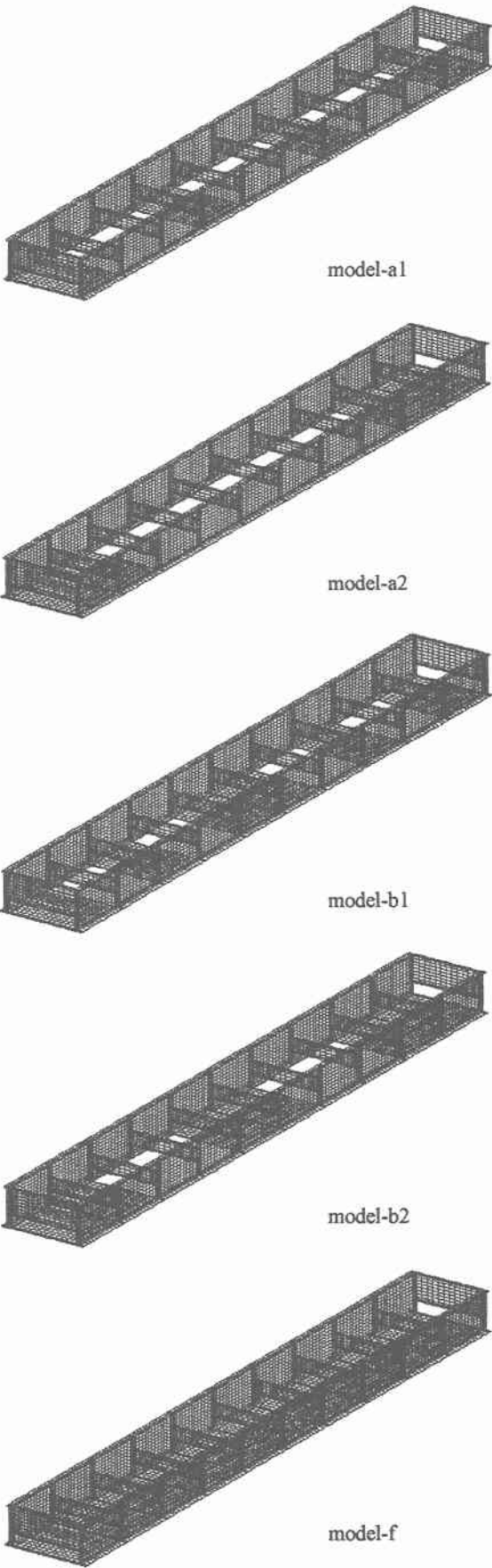


図-3 FEM 解析モデル  
(鋼桁部分のみ)

表-4 各モデルの一覧

| モデル名     | 総ユニット数<br>[個] | 端部のユニット数<br>[個] |
|----------|---------------|-----------------|
| model-a1 | 4             | 1               |
| model-a2 | 4             | 2               |
| model-b1 | 6             | 1               |
| model-b2 | 6             | 2               |
| model-f  | 10            |                 |

表-5 model-o の固有振動数

| モデル名    | 鉛直たわみ1次<br>固有振動数<br>$f_{v1}$ [Hz] | ねじり1次<br>固有振動数<br>$f_{T1}$ [Hz] | $f_{T1}/f_{v1}$ |
|---------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| model-o | 2.571                             | 2.933                           | 1.141           |

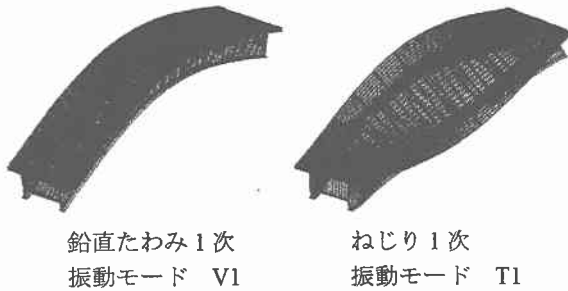


図-4 model-o の振動モード図

析を行う。箱桁状補剛材は運搬上の利便性から5[m]を一つのユニットとして考え、下フランジとは剛結されている。図-3に箱桁状補剛材の総ユニット数・設置位置に応じて設定した5種類のFEM解析モデルを示す。ただし、箱桁状補剛材の設置位置を見やすいように、床版を省いた鋼桁部分のみを表示している。各モデルの一覧は表-4の通りである。モデル名の添え字のアルファベットは総ユニット数、数字は端部のユニット数によって区別している。なお、model-fのfは全面設置であるfullを表している。参考までに、model-fにおける総節点数は15590、総要素数は12004である。

### 3. 解析結果

#### 3.1 合成2主桁橋モデル

基本モデルであるmodel-oの固有振動数を表-5に、振動モード図を図-4に示す。表-5より、ねじり1次と鉛直たわみ1次の固有振動数が近接していることがわかる。ねじり剛性を評価する一つのパラメータとして、ねじり1次固有振動数( $f_{T1}$ )を鉛直たわみ1次固有振動数( $f_{v1}$ )で除した値である固有振動数比  $f_{T1}/f_{v1}$  を用いる。なお、一般的開断面を有する鋼橋の場合、2程度であることが知られている<sup>2)</sup>。それに対してmodel-oでは1.141と6割程度になっており、非常にねじり剛性が低いことが確認できる。また、図-4より鉛直たわみ・ねじりの両振動モードとも局部振動は発生していないことがわかる。

表-6 箱桁状補剛材を設置した各モデルの固有振動数

| モデル名     | 鉛直たわみ1次<br>固有振動数<br>$f_{v1}$ [Hz] | ねじり1次<br>固有振動数<br>$f_{T1}$ [Hz] | $f_{T1}/f_{v1}$  |
|----------|-----------------------------------|---------------------------------|------------------|
| model-o  | 2.571                             | 2.933                           | 1.141            |
| model-a1 | 2.541<br>(-1.2)                   | 3.746<br>(27.7)                 | 1.474<br>(29.2)  |
| model-a2 | 2.578<br>(0.3)                    | 5.004<br>(70.6)                 | 1.941<br>(70.1)  |
| model-b1 | 2.603<br>(1.2)                    | 5.066<br>(72.7)                 | 1.946<br>(70.6)  |
| model-b2 | 2.630<br>(2.3)                    | 4.890<br>(66.7)                 | 1.859<br>(62.9)  |
| model-f  | 3.248<br>(26.3)                   | 7.984<br>(172.2)                | 2.458<br>(115.4) |

#### 3.2 箱桁状補剛材を設置したモデル

##### (1) 総ユニット数・設置位置の影響

箱桁状補剛材を設置した各モデルの固有振動数を表-6に示す。括弧内の値はmodel-oの固有振動数に対する各モデルの固有振動数の差を百分率(%)で表示したものである。model-oと比較すると、全面設置したmodel-fだけでなく、他の4種類のモデルにおいても鉛直1次固有振動数よりもねじり1次固有振動数が大きく上昇しているため、固有振動数比  $f_{T1}/f_{v1}$  は飛躍的に改善されていることがわかる。総ユニット数が4個のmodel-a1・a2と6個のmodel-b1・b2を比較すると、model-a1の効果は若干低いが、端部の補剛を強化したmodel-a2はmodel-b1・b2と同等の効果をもっていると言える。一般に、総ユニット数が増加すればねじり1次固有振動数は上昇すると推測されるが、設置位置によってはねじり剛性を向上させる効果より、重量の増加の影響が大きくなるため、このような逆転現象が現われたと考えられる。すなわち、少ないユニット数でも端部を重点的に補剛したmodel-a2が費用対効果の観点から最も望ましいと考えられる。

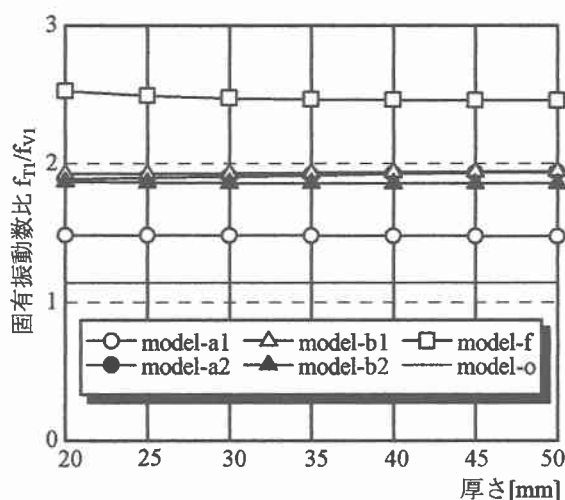
##### (2) 板厚の検討

上述の結果から、箱桁状補剛材の有効性が確認できたが、この補剛材の板厚は50[mm]と厚く、コストや死荷重の増大等の面で問題となる可能性がある。そこで、板厚を20[mm]~50[mm]まで5mm間隔で変化させたモデルを作成し、解析を実施する。

表-7に箱桁状補剛材の板厚を変更した各モデルの固有振動数を、図-5に箱桁状補剛材の板厚と固有振動数比  $f_{T1}/f_{v1}$  の関係を示す。ねじり1次固有振動数について見ると、model-b2は35[mm]・40[mm]で、model-a1においては20[mm]で最大値をとることがわかる。model-a2・b1・fでは50[mm]で最大となっているが、最も薄い20[mm]においても十分な剛性を有していると言える。また、固有振動数比  $f_{T1}/f_{v1}$  に注目すると、いずれのモデルも板厚による顕著な変化は現われていないことが確認できる。特に、model-a1・b2・fにおいては20[mm]で最大値をとっており、適切な設置位置を選択すれば、板厚を薄くすることが可能であると考えられる。

表-7 箱桁状補剛材の板厚を変更した各モデルの固有振動数

| モデル名     | 固有振動数           | 箱桁状補剛材の厚さ |        |        |        |        |        |        |
|----------|-----------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          |                 | 20[mm]    | 25[mm] | 30[mm] | 35[mm] | 40[mm] | 45[mm] | 50[mm] |
| model-a1 | $f_{v1}$ [Hz]   | 2.551     | 2.554  | 2.553  | 2.551  | 2.548  | 2.544  | 2.541  |
|          | $f_{T1}$ [Hz]   | 3.792     | 3.791  | 3.786  | 3.779  | 3.769  | 3.758  | 3.746  |
|          | $f_{T1}/f_{v1}$ | 1.486     | 1.484  | 1.483  | 1.481  | 1.479  | 1.477  | 1.474  |
| model-a2 | $f_{v1}$ [Hz]   | 2.577     | 2.579  | 2.580  | 2.580  | 2.579  | 2.578  | 2.578  |
|          | $f_{T1}$ [Hz]   | 4.875     | 4.904  | 4.929  | 4.951  | 4.970  | 4.988  | 5.004  |
|          | $f_{T1}/f_{v1}$ | 1.892     | 1.902  | 1.910  | 1.919  | 1.927  | 1.935  | 1.941  |
| model-b1 | $f_{v1}$ [Hz]   | 2.583     | 2.598  | 2.604  | 2.606  | 2.606  | 2.605  | 2.603  |
|          | $f_{T1}$ [Hz]   | 4.984     | 5.012  | 5.031  | 5.045  | 5.055  | 5.062  | 5.066  |
|          | $f_{T1}/f_{v1}$ | 1.930     | 1.929  | 1.932  | 1.936  | 1.940  | 1.943  | 1.946  |
| model-b2 | $f_{v1}$ [Hz]   | 2.603     | 2.619  | 2.626  | 2.629  | 2.631  | 2.631  | 2.630  |
|          | $f_{T1}$ [Hz]   | 4.877     | 4.887  | 4.891  | 4.893  | 4.893  | 4.891  | 4.890  |
|          | $f_{T1}/f_{v1}$ | 1.874     | 1.866  | 1.863  | 1.861  | 1.860  | 1.859  | 1.859  |
| model-f  | $f_{v1}$ [Hz]   | 2.904     | 3.010  | 3.081  | 3.135  | 3.180  | 3.217  | 3.248  |
|          | $f_{T1}$ [Hz]   | 7.342     | 7.506  | 7.629  | 7.736  | 7.831  | 7.914  | 7.984  |
|          | $f_{T1}/f_{v1}$ | 2.528     | 2.494  | 2.476  | 2.468  | 2.463  | 2.460  | 2.458  |

図-5 箱桁状補剛材の板厚と  $f_{T1}/f_{v1}$  の関係

#### 4. まとめ

本研究の結論をまとめると以下の通りである。

- (1) ねじり剛性を向上させるための補剛方法を検討し、その振動特性を正確に評価するためには、FEM 解析モデルを作成する必要がある。
- (2) 合成 2 主桁橋のねじり 1 次と鉛直 1 次の固有振動数は近接している。その結果、固有振動数比  $f_{T1}/f_{v1}$  は一般的な開断面を有する鋼橋の 6 割程度であり、非常にねじり剛性が低いことが確認できた。
- (3) 箱桁状補剛材はねじり剛性を上昇させるための方法として非常に有効である。特に、少ないユニット数でも主桁端部を重点的に補剛することにより、より大きな効果を得られる。
- (4) 箱桁状補剛材の板厚を 20[mm]～50[mm]まで変化させたどのモデルも高いねじり剛性を有し、最も薄い 20[mm]においても、固有振動数比  $f_{T1}/f_{v1}$  が最大となるモデルが存在した。これより、適切な設置位置を選択すれば、板厚を薄くすることが十分に可能であると考えられる。

- (5) 橋梁の架設前だけでなく、架設供用後にねじり剛性の低さに起因する渦励振等の問題が発生した場合、箱桁状補剛材は施工性の面からも有効な補剛方法であると考えられる。
- (6) 本論文では箱桁状補剛材に着目したが、合成 2 主桁橋のねじり剛性を向上させるより効果的な補剛方法について、今後とも検討を進めることが重要であるとする。

#### 参考文献

- 1) 高橋昭一ら：PC 床版 2 主桁橋「ホロナイ川橋」の設計および解析・試験検討，橋梁と基礎，Vol.30，No.2，pp.23-30，1996。
- 2) (社)日本橋梁建設協会：新しい鋼橋の誕生，資料編，1998。
- 3) 田村陽司ら：PC 床版連続合成 2 主桁橋「千鳥の沢川橋」の設計，橋梁と基礎，Vol.32，No.9，pp.18-22，1998。
- 4) (社)土木学会：鋼橋の新たな技術展開，土木学会誌，Vol.84，Apr.，pp.4-15，1999。
- 5) (社)日本道路協会：道路橋耐風設計便覧，1991.7。
- 6) 山田均ら：少数主桁橋梁の耐風性，橋梁と基礎，Vol.36，No.2，pp.37-42，2002。
- 7) 中村元ら：利別川第一橋(PC 床版連続合成 2 主桁橋)の実橋振動試験，土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集，I-B108，2000.9。
- 8) 植田利夫ら：合理化構造型式 2 主桁橋梁の空力振動特性，土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集，I-B61，2000.9。
- 9) 渡辺ニ夫ら：長支間鋼少数主桁橋の耐風特性，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集，I-478，2002.9。
- 10) 米田昌弘ら：自動車の固有振動数計測—少数主桁橋で発現が予想される渦励振との共振現象に着目して—，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集，I-482，2002.9。