

鋼逆π形合成箱桁橋における 鋼・コンクリート合成床版底鋼板による補剛効果

玉田 和也*

一般に開断面箱桁橋と呼ばれている鋼逆π形合成箱桁橋における鋼桁架設時および床版打設時の開断面桁に近い架設系を対象とした桁のそりを含むねじり変形に着目し、鋼・コンクリート合成床版の底鋼板と主桁上フランジの接合部の構造による補剛効果の影響について研究を行った。

キーワード：鋼逆π形合成箱桁橋，FEM 解析，鋼・コンクリート合成床版

まえがき

鋼桁橋の合理化設計を目指した橋梁形式の一つとして、一般的に開断面箱桁橋と称される鋼逆π形合成箱桁橋がある。鋼逆π形合成箱桁橋は逆π形断面の鋼桁と高性能床版である鋼・コンクリート合成床版を組合せ、構造的合理性を発揮させた橋梁形式である。昭和40年代に建設された同形式の橋梁と異なる点は、鋼・コンクリート合成床版の採用により床組系の部材を削減できること、および架設系における断面形状保持材として上横構の代わりに鋼・コンクリート合成床版の底鋼板を利用できる点である。

鋼逆π形合成箱桁橋は、鋼・コンクリート合成床版のコンクリートが硬化し鋼桁と一体化して完全な閉断面を形成する。それ以前の状態では、逆π形の開断面桁に上フランジを拘束する底鋼板の作用による不完全な閉断面桁(あるいは開断面に近い閉断面)として挙動する。その断面性能は、鋼桁の自重および床版打設時の床版荷重に対して抵抗する必要がある。

そこで桁のねじり変形に着目し、実務設計に必要な精度を得るためのFEM解析の最小要素分割数についての検討を行った。また、底鋼板の補剛効果に関して底鋼板と桁の接合部の性能によるね

じり変形への影響をFEM解析によって明らかにした¹⁾。なお、以下の解析および検討は架設中の桁のねじり変形に着目した弾性変形状態を対象とする。

1. ねじり変形に着目したFEM要素分割

(1) 解析条件

実務設計に必要な精度を得るためのFEM解析における最小要素分割数について検討する。図-1に解析モデルを、表-1に要素分割タイプを示す。図-2にはタイプ別の断面形状を示す。解析モデル

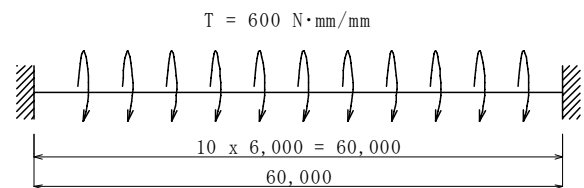


図-1 解析モデル

表-1 解析タイプ一覧

TYPE	要素分割数		上フランジモデル
	各パネル断面方向	橋軸方向	
TYPE-A	1分割	20分割	梁モデル
TYPE-B	6分割	40分割	梁モデル
TYPE-C	10分割	80分割	梁モデル
TYPE-S	10分割	80分割	板モデル

* 橋梁部大阪設計課課長

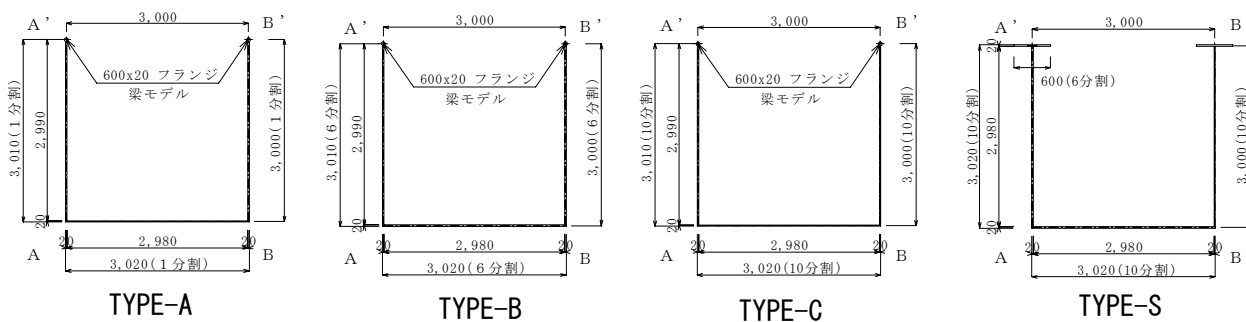


図-2 断面形状

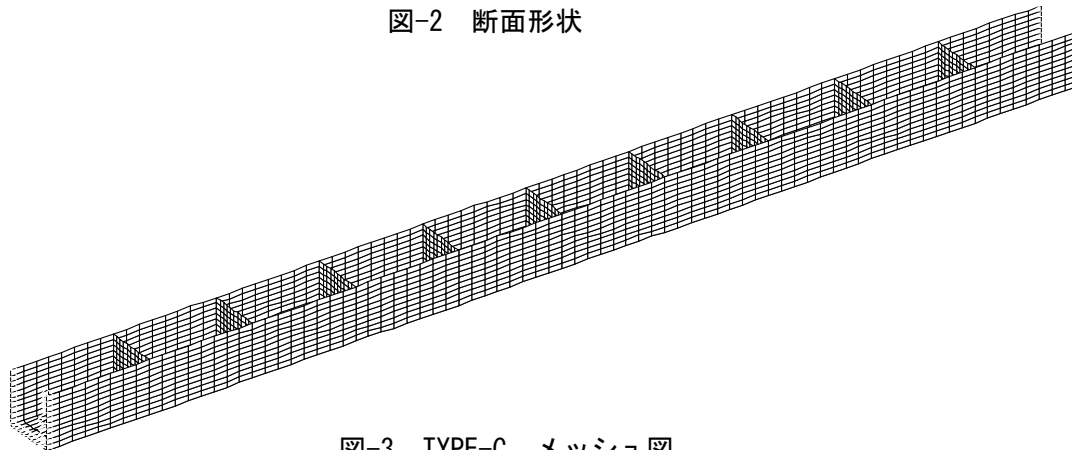


図-3 TYPE-C メッシュ図

は、連続桁の一径間(支間長 60m)を取り出し、支間に非常駐車帯部分の床版コンクリート打設時のねじりモーメントが作用する状態を想定した。図-3のメッシュ図に示すとおり、6mごとにダイヤフラムを配置し、荷重は上フランジとダイヤフラムの交点に載荷した。境界条件は端部の節点自由度を全て拘束した。

(2) 解析結果

FEM 解析結果を評価するにあたり、桁のねじり角を算出する必要がある。その方法として図-4に示すように、左右の腹板上縁の平均水平変位と下縁側の平均水平変位の差に対する桁高の比を桁のねじり角 θ と定義した。ねじり角とせん断中心位置は式(1)、(2)により求めた。

$$\theta = \frac{x_1 - x_2}{h} \tag{1}$$

$$y_s = \frac{x_2}{\tan \theta} \tag{2}$$

ただし、FEM 解析結果には、ねじり変形に起因するせん断変形も含まれるため、求めたせん断中心位置は橋軸方向に微小であるが上下に変化する。

支間中央における弾性はりの解析解²⁾³⁾によるねじり角と FEM 解析結果との誤差は TYPE-A が

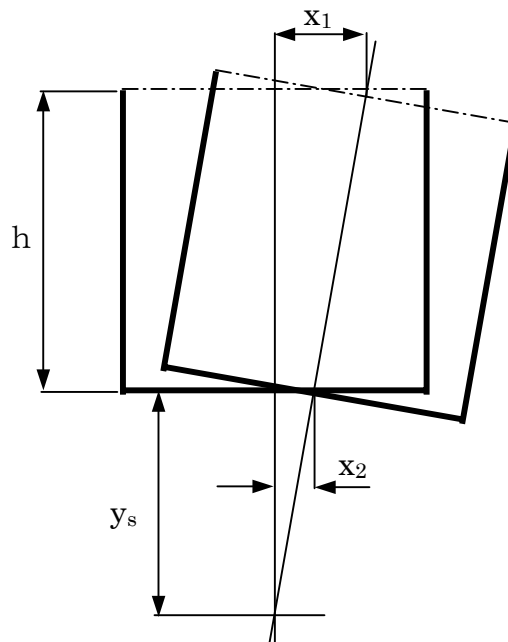


図-4 せん断中心位置

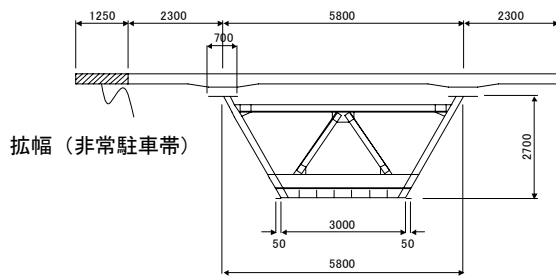
約 14%、TYPE-B 約 2%、TYPE-C 約 1%であった。この結果より、腹板パネルおよびフランジパネルの断面方向の分割数は 6 分割程度、橋軸方向は 40 分割程度で十分な精度のねじり変形を表現できることが確認できた(4 節点要素⁴⁾の要素サイズ 500mm×1500mm 程度)。なお、上フランジは梁要素でモデル化しても板要素としても結果にほとんど影響は無かった。

2. 底鋼板のねじり変形に対する影響

(1) 解析条件

底鋼板による桁のねじり変形に対する影響を明らかにするため、実際の橋梁をモデル化した FEM 解析を行った。境界条件は図-1 に同じとし、図-5 に断面形状と荷重載荷図を示す。また、FEM 解析のメッシュ図の一例を図-6 に示す。

底鋼板の補剛効果の影響を明らかにするために表-2 に示す 8 種類のモデルによる解析を行った。TYPE-1 は無補剛の開断面モデルである。TYPE-2 は底鋼板を 1mm の上フランジに換算し閉断面としたモデルであり、実橋の設計で取り入れられて



1) 鋼重 (対称荷重)	12.2500 (kN/m)	12.2500 (kN/m)
2) 底鋼板 (対称荷重)	6.8735 (kN/m)	6.8735 (kN/m)
3) 底鋼板 (非対称荷重)	1.4814 (kN/m)	-1.4814 (kN/m)
4) コンクリート床版 (対称荷重)	37.7735 (kN/m)	37.7735 (kN/m)
5) コンクリート床版 (非対称荷重)	7.5072 (kN/m)	-7.5072 (kN/m)
1)+2)+4) 対称荷重合計 [CASE-1]	56.8970 (kN/m)	56.8970 (kN/m)
3)+5) 非対称荷重合計 [CASE-2]	8.9886 (kN/m)	-8.9886 (kN/m)

図-5 断面形状および荷重載荷図

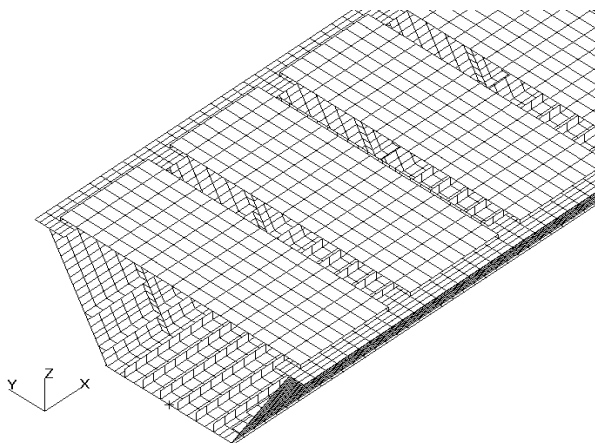


図-6 メッシュ形状図 (TYPE-3)

いる考え方である。TYPE-3 の底鋼板とスタッド金具を用いたタイプは、図-7a) に示すとおり底鋼板の四隅における上フランジとの接合にスタッドボルトを使用し、拘束効果が最も低い取付金具を想定したものである。スタッドボルトは梁要素とし、フランジ側を固定、底鋼板側はピンの境界条件で上フランジと底鋼板を接合した。なお、底鋼板は橋軸方向に 3m 間隔でスリットが入っている。TYPE-4 は底鋼板の補剛効果を橋軸直角方向の拘束に限定したタイプである。TYPE-5 は TYPE-3 のスタッドボルトを梁要素の代わりにばね要素で

表-2 解析モデル一覧

TYPE	モデル
TYPE-1 (開断面)	
TYPE-2 (閉断面)	
TYPE-3 (スタッド+底鋼板)	
TYPE-4 (スタッド+Beam)	
TYPE-5 (バネ+底鋼板)	
TYPE-6 (バネ+底鋼板) ※π型金具	
TYPE-7 (閉断面) スリット有り	
TYPE-8 (バネ+底鋼板) スリット無し	

モデル化した。TYPE-6 は π 形金具を使用するタイプで、図-7b) に示すとおり上フランジと底鋼板に取付けられている補強リブを高力ボルトで接合する構造であり、底鋼板の四隅に設置する取付金具のうち最も拘束効果が大きい金具を想定した。TYPE-7 は TYPE-2 にスリットを入れた場合をモデル化した。TYPE-8 は TYPE-5 の底鋼板を橋軸方向に連続化させた場合を想定したモデルである。

(2) 解析結果

FEM 解析結果を図-8~10 に示す。ここに示すねじり角も前述の定義による。

図-8 に示すとおり底鋼板の拘束効果を橋軸直角方向に限定した TYPE-4 は、開断面の TYPE-1 と同じねじり変形量であった。底鋼板の補剛効果は左右の上フランジに対し橋軸方向のズレを拘束する必要があり、橋軸直角方向の拘束は効果の無いことが確認できた。TYPE-3 と TYPE-5 の差は約 2% であった。これによりスタッドボルトを忠実にモデル化した場合とばね要素でモデル化した場合がほぼ同等であることが確認できた。さらに、 π 形金具など他の構造の接続部もばね定数に換算できることを確認した。

スタッドボルト相当のばね定数をモデル化した TYPE-5 と TYPE-8 の比較により底鋼板の橋軸方向の連続性が及ぼす影響を明らかにする。底鋼板を連続させた場合、ねじり変形量が 1/4 になり拘束効果の効率が良くなる。また、図-9 の TYPE-7 と TYPE-2 の比較は 1mm 換算の上フランジにスリットを入れた場合と入れない場合の比較であり、先ほどと同様にねじり変形量を約 1/4 に抑える効果がある。底鋼板を橋軸方向に連続化させるためには現場継手に工夫が必要であるが、確実に施工可能であれば補剛効果の向上の面で非常に効果的であると言える。

図-9 に示す TYPE-1, TYPE-3, TYPE-6, TYPE-2 のねじり変形量の比較を行う。TYPE-1 の場合、支間中央のねじり角は約 0.06rad であり、床版の外縁でのねじりによる鉛直変位は約 300mm, 水平変位は 200mm となる。底鋼板による補剛効果を考慮しない場合、大きなねじり変形が発生することになる。底鋼板をスタッドボルトによって上フランジと結合した場合、ねじり変形量は TYPE-1 の約 2/3 に低下する。さらに π 形金具を用いた場合のねじり変形量は約 1/6 の

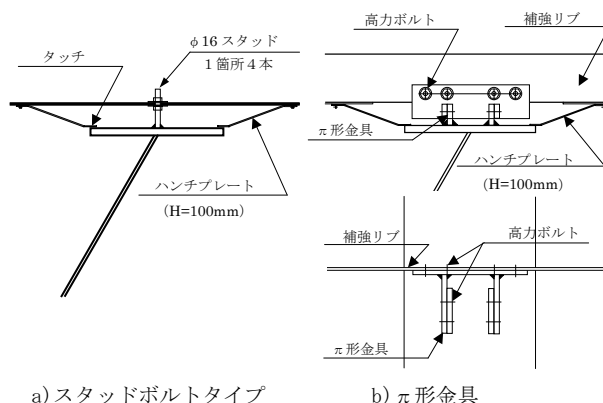


図-7 底鋼板取付金具詳細図

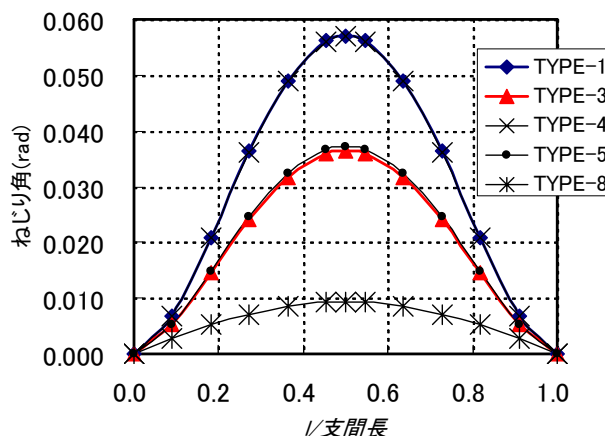


図-8 たわみ角分布図(その1)

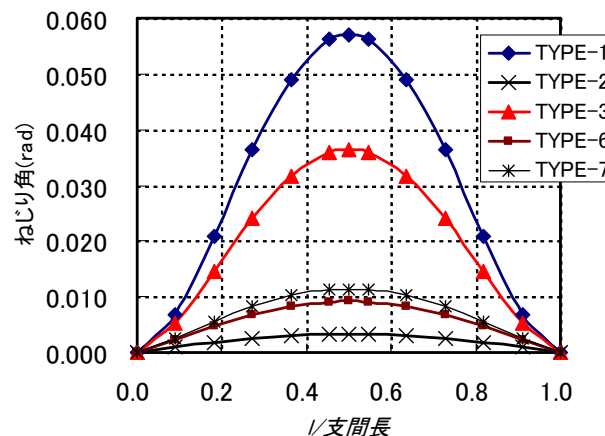


図-9 たわみ角分布図(その2)

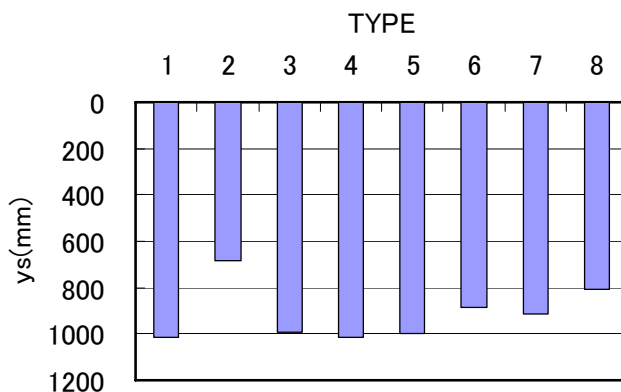


図-10 せん断中心位置

0.009rad であり、床版外縁の鉛直変位が約 48mm、水平変位が約 33mm となる。

1 mm の換算フランジ厚を想定した TYPE-2 のねじり変形量は約 0.003rad となった。π 形金具を利用した場合の約 1/3 のねじり変形量であり、底鋼板が断続している場合、換算板厚を 1mm とすることは鋼桁時のねじり変形量を小さめに算定することになる。ちなみに、π 形金具を使用する TYPE-6 の変形量より換算板厚を逆算してみると 0.250mm 相当であった。

解析結果によると、π 形金具を使用する TYPE-6 の場合においても非常駐車帯部のコンクリート打設時のねじり荷重によって水平方向に約 33mm、地覆位置の鉛直方向には約 48mm の変形が生じることになる。解析モデルにおける支間長や載荷範囲の設定が若干厳しい条件であるという問題はあつたものの上記の変形量は無視し得ない値である。この対策として、

- ① 底鋼板の横断方向のスリットを接合する方法
- ② 非常駐車帯を除く車道部を先行打設して閉断面化する方法
- ③ 底鋼板と上フランジを溶接で連続的に接合する方法

などが考えられる。このうち②,③は現場での施工性に問題があると考えられる。①については、高力ボルトによる接合法による実績もあり実用的であると考える。

図-10 に TYPE ごとの下フランジからせん断中心位置までの距離を示す。開断面である TYPE-1 の手計算によるせん断中心位置は 1119mm であり、FEM 解析の変形から算出したせん断中心位置との差は約 9%であった。FEM 解析ではねじり変形によるせん断変形が考慮されるためであると考えられる。また、閉断面とした TYPE-2 においてもせん断中心は下フランジの下側に位置していることに注意する必要がある。

鉛直たわみについては、底鋼板が断続している TYPE-1, TYPE-3, TYPE-6 は 0.1%程度の相違しがなく、鉛直たわみにおよぼす影響は無視できる。底鋼板を連続化した場合には影響を考慮する必要がある。

3. まとめ

鋼逆 π 形合成箱桁橋の架設系を対象とした桁のそりを含むねじり変形に着目し、鋼・コンクリート合成床版の底鋼板と主桁上フランジの接合部の構造による補剛効果の影響について検討を行った。本稿で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) FEM 解析によって鋼逆 π 形合成箱桁のねじり解析を行う場合、腹板およびフランジの各パネルは断面方向に 6 分割、橋軸方向には支間長を 40 分割程度の要素分割で十分な精度を得ることが可能である。
- (2) 鋼逆 π 形合成箱桁の設計において底鋼板を便宜的に換算板厚 1mm 程度の上フランジを有する閉断面として仮定し、架設系のねじり定数を算出する場合、架設時のねじり変形に関する照査検討では変形量を過小評価することになる。
- (3) 非常駐車帯など、架設時にねじり荷重が作用しうる場合には底鋼板の影響を考慮したそりねじり変形の把握を行う必要がある。
- (4) 底鋼板と上フランジの接続部構造を強固にしても変形を抑えられない場合、底鋼板を連続化することでねじり変形量を約 1/4 に抑えることが可能である。
- (5) 底鋼板の影響を考慮したねじり変形の計算には FEM 解析を使用するが、底鋼板とフランジの接合部構造や底鋼板パネル同士の橋軸方向の連続・断続などの条件を的確に解析モデルに反映する必要がある。

底鋼板を連続化することにより①架設時の補剛効果の向上、②連続合成桁としての主桁の設計への影響、③曲げ変形への影響、④底鋼板に①～③に起因する複雑な力が作用することに対する照査、など種々の検討課題が考えられる。

底鋼板と上フランジの接合部構造の組合せは多種多様であり、系統的に整理することは困難であるが、変形量を制御する方策および架設時のねじり変形をより簡易的に求める 7 自由度骨組解析プログラムの開発などは今後の研究課題であると考えられる。

あとがき

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(A)，研究課題「性能照査型規定に対応する合理化橋梁の耐荷性能照査法に関する研究」(研究代表者 西村宣男)の一部として実施されたものである。また，本研究の実施は大阪大学大学院西村宣男教授と開断面箱桁研究会(災害科学研究所)委員の皆様，特に底鋼板 WG のメンバーである加藤久人氏 (JFE エンジニアリング株式会社)，三原邦啓氏 (松尾橋梁株式会社) と筆者の共同作業によるものであり，酒井和男氏 (株式会社 CRC ソリューションズ) には数値解析面でご助力願いました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 加藤久人・玉田和也・三原邦啓・酒井和男・西村宣男：そりねじり変形を考慮した鋼逆 π 形合成箱桁橋設計の基本事項，鋼構造年次論文報告集，第12巻，pp.91～98，2004.11.
- 2) 土木学会編：構造力学公式集，技報堂，昭和61年6月.
- 3) 小松定夫：薄肉構造物の理論と計算 I，山海堂，昭和44年11月.
- 4) MSC Nastran Linear Static Analysis User's Guide, 2001.