

曲線2主桁橋におけるフランジの局部座屈

北海道大学大学院工学研究科	正 員	平沢秀之
北海道大学工学部	学生員	鈴木学
北海道大学大学院工学研究科	フェロー	林川俊郎
北海道大学大学院工学研究科	フェロー	佐藤浩一

1. はじめに

曲線プレートガーダーのフランジには曲げ応力の他にそり応力が作用するため、設計の際にはもちろん耐力力算定においてもそり応力の影響を考慮しなければならない。このそり応力の存在により曲線桁では直線桁の曲げ耐力力より一般には小さくなる¹⁾。曲線桁の圧縮フランジの耐力力についての既往の研究には、フランジを板要素でモデル化して有限要素法等で解析し、そり応力の大きさや板のアスペクト比、曲率等をパラメータとして極限強度を調べた研究が多数ある。有住ら²⁾は垂直補剛材間のフランジを扇形板でモデル化し、両端の2辺に圧縮力と面内曲げモーメントを作用させて有限要素解析を行っている。そして種々のパラメトリック解析により、フランジの極限強度実用算定式を提案している。Davidsonら³⁾は3本主桁から成る曲線桁橋の外桁圧縮フランジを長方形板でモデル化し、モデル内に分布する曲げ応力とそり応力を考慮できるような境界条件と外力を与えて弾性座屈解析を行っている。

ところで我が国では鋼2主桁橋に関する研究、施工例が近年増加しており耐力力についての検討もなされている⁴⁾。2主桁橋の曲線橋への適用に当たっては耐力力を含めた種々の角度から検討をする必要がある。本研究では曲線2主桁橋のフランジに着目し曲げ応力とそり応力を同時に受ける場合の座屈強度を調べようとするものである。解析パラメータには実際の橋梁を想定した中心角を用い、中心角=0 (直線橋)の結果と比較した。また2主桁橋は一般にフランジ厚及び腹板厚が厚いため、このフランジ-腹板接合線部での軸回りの回転がある程度拘束されることが考えられる。そこでこの箇所における境界条件を変化させた解析も行っている。なお座屈解析には汎用構造解析プログラムMSC/NASTRANを使用した。

2. 曲線2主桁橋全体解析モデル

2.1 構造モデル

本研究では、図-1のような中規模程度の単径間曲線2主桁橋を想定した。断面寸法は2主桁橋の実例を参考にし、表-1の通りとした。また開断面であることから中心角は小さい範囲に限定し、 $\Phi=0\sim16^\circ$ とした。ここではフランジに作用する圧縮応力分布を調べるために、図-1の全体構造モデルに対して立体骨組構造解析を行った。主桁、横桁の各部材にはそりねじりを考慮したはり要素を適用した。なお荷重は死荷重を等分布荷重として主桁の各節点に与えた。

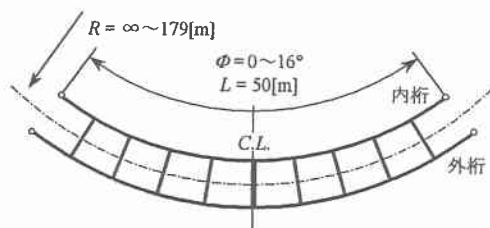


図-1 解析モデル

表-1 断面寸法 [mm]

	主桁	$B=800$
		$H=2900$
		$t_f=50$
		$t_w=23$
	横桁	$B=250$
		$H=700$
		$t_f=19$
		$t_w=12$

Local buckling of flange in horizontally curved two-girder bridges

by Hideyuki HIRASAWA, Manabu SUZUKI, Toshiro HASHIKAWA and Koichi SATO

2.2 曲げモーメント・そりモーメント分布

解析結果より外桁の曲げモーメント M 及びそりモーメント W の分布をそれぞれ図-2、図-3に示す。曲げモーメントは等分布荷重により放物線状の分布を示し、支間中央で最大値をとる。そりモーメントは横桁が配置されている断面と横桁間の断面では正負が異なる分布性状を示している。そりモーメントは上下フランジに1対の面内曲げモーメント M_f を生じさせ、2軸対称なI形断面では次式の関係式がある。

$$M_f = \frac{W}{h} \quad (1)$$

ここで h は上下フランジの板厚中心間隔である。したがってフランジでは M_f により横桁位置と横桁間で向きの異なる面内曲げを受けている。

2.3 応力分布

外桁の上フランジに着目すると断面内には曲げモーメントによる曲げ応力 σ_M とそりモーメントによるそり応力 σ_W が作用している。これらは次式により求めることができる。

$$\sigma_M = \frac{M}{I} \frac{h}{2} \quad (2)$$

$$\sigma_W = \frac{W}{C_W} \omega \quad (3)$$

ここで I 、 C_W はそれぞれ断面2次モーメント、そりねじり定数であり、 ω はそり関数である。実際の断面にはこれらを合計した垂直応力すなわち

$$\sigma = \sigma_M + \sigma_W \quad (4)$$

が作用している。図-4は外桁上フランジの曲率中心側の縁部における σ の分布を表したものである。図4より最大応力は、直線桁を除いて支間中央の横桁とその隣の横桁の間部で発生していることが分かる。図-5は垂直応力 σ の内、 σ_W の占める割合を示したものである。中心角が大きくなるにつれ、 σ に対する σ_W の割合が大きくなり、その影響が増大する。

3. FEMによる座屈解析

3.1 圧縮フランジプレートと境界条件

局部座屈解析の対象とする圧縮フランジプレートは最大応力を発生する付近の部分モデルとし、図-6の通りとする。幅はフランジの全幅とし、長さは図-3中の点A、B間とする。点A、Bは $W=0$ となる点を表している。ここで図-6の点A、Bはそれぞれ図-3の点A、Bと一致し

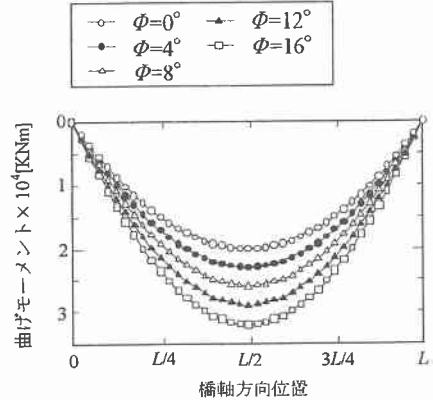


図-2 曲げモーメント図

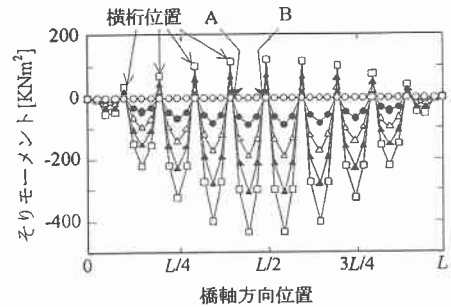


図-3 そりモーメント図

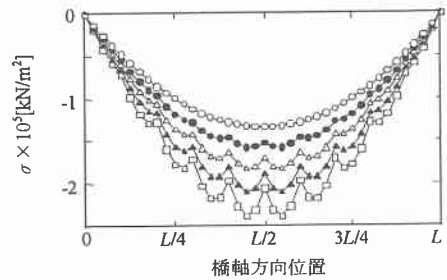


図-4 外桁上フランジの垂直応力

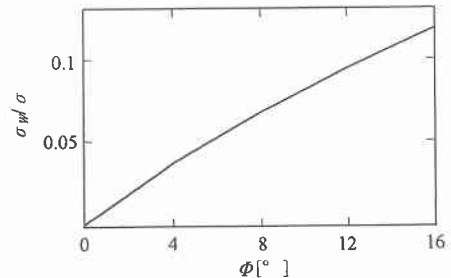


図-5 そり応力の比率

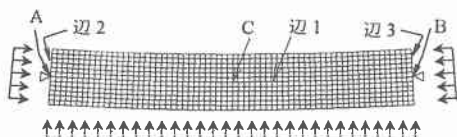


図-6 圧縮フランジプレート

ている。解析モデルは、構造全体の中心角 $\phi=0^\circ \sim 16^\circ$ に対応した計5通りを設定した。座屈解析には4節点シェル要素を用いたFEMを適用する。要素分割は軸方向に12分割、長さ方向に66分割とした。座標系には円筒座標系(R, T, Z)を用いた。境界条件は表-2の通りとする。ここで r_R 、 r_T 、 r_Z はそれぞれ横方向(半径方向)、橋軸方向(円周方向)、Z軸方向回りの回転とする。Fは自由、0は拘束を表す。なおフランジ幅の中心軸線上では橋軸方向(円周方向)回りの回転に対する境界条件として拘束と自由の2通りを設定した。外力は σ_M を再現するために両端部に橋軸方向(円周方向)の圧縮力、およびプレート内部に分布荷重を作用させた。また σ_W を再現するためにフランジ幅の中心軸線上に横方向荷重を作用させた。

3.2 解析結果

3.2.1 フランジ腹板接合部の回転が自由のとき

座屈解析を行い、その結果を図-7に示す。グラフの縦軸はそれぞれの中心角における座屈応力を中心角 $\phi=0$ (直線橋)の座屈応力で除し、無次元化したものである。中心角が増大するにつれて座屈応力が低下していくことが分かる。これはフランジプレートの曲率が大きいほどそり応力が增大するため、作用させる横荷重が大きいからである。図-8は $\phi=16^\circ$ のときの座屈モードを表している。その他の ϕ についてもほぼ同様なモード図が得られている。フランジプレート中心線軸での軸回りの回転が生じており、プレートがねじられるようなモード形状を示している。

3.2.2 フランジ腹板接合部の回転が拘束のとき

座屈解析より3.2.1と同様に結果を図-9に示す。図-7と同様に中心角が増大するにつれて座屈応力の直線橋に対する比率は低下している。図-10は

表-2 境界条件

	並進 (R, T, Z)	回転 (r_R, r_T, r_Z)
辺1	(F, F, 0)	(F, F, F), (F, F, 0)
辺2,3	(F, F, 0)	(0, F, F)
点A,B	(F, 0, F)	(0, F, F)
点C	(0, 0, 0)	(F, F, F)

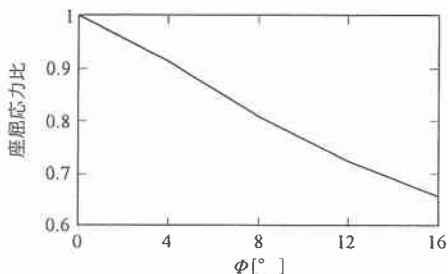


図-7 座屈応力比(回転自由)



図-8 座屈モード(回転自由)

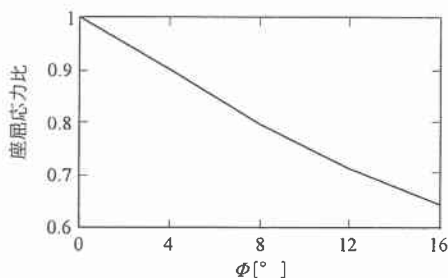


図-9 座屈応力比(回転拘束)



図-10 座屈モード(回転拘束)

$\phi=16^\circ$ の時の座屈モードである。プレート中心軸での軸回りの回転が拘束されているため、中心線より内側(曲率中心側)と外側では変形の状態が異なっている。フランジ面内の圧縮応力は式(4)で表され、図-6の载荷状態によって再現される。このためフランジの内側よりも外側で応力の値が小さくなり、内側で大きな座屈変形を生じ外側ではほとんど変形しない座屈モードが発生したと考えられる。図-11は境界条件が拘束のときの座屈応力を自由のときの座屈応力で除し無次元化した値を各中心角について表したものである。中心角が増加すると減少する傾向にあるが減少の割合は小さい。いずれの中心角においても拘束としたときは自由としたときよりも座屈応力は増大し、2.6～2.7倍程度となっている。

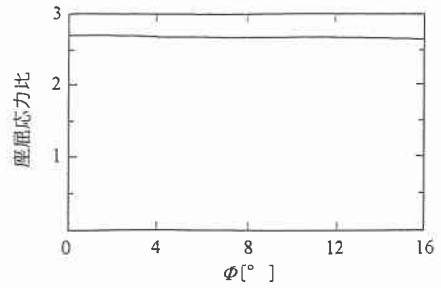


図-11 拘束条件の違いによる応力比

4. おわりに

本研究では、単径間曲線2主桁橋の圧縮フランジの局部座屈解析を、中心角をパラメータとして行った。またフランジ-腹板接合部の境界条件を自由及び拘束の2通りとして座屈応力と座屈モードを得た。中心角に関しては $0 \sim 16^\circ$ の狭い範囲ではあるが、中心角が増大するにつれ座屈応力が減少することが確かめられた。このことから所り応力の座屈応力に及ぼす影響は非常に大きいことが分かる。境界条件に関しては自由と拘束では全く異なる座屈モード図が得られた。実際の2主桁橋では板厚の大きいフランジ、腹板が用いられるため完全な自由ではなく半剛結の状態と考えられる。今後はこの接合部における拘束の程度を考慮した検討が必要である。

参考文献

- 1) 藤井堅、中岡智昭：曲線プレートガーダーの曲げ耐力推定式、構造工学論文集、vol.41A, pp313-320, 1995.
- 2) 有住康則、矢吹哲哉：曲線プレートガーダーフランジ板の極限強度に関する解析的検討、構造工学論文集、vol.43A, pp117-124, 1997.
- 3) Davidson, J. S. and Yoo, C. H. : Local buckling of curved I- girder flanges, J. Struct. Engrg., ASCE, 122(8), 936-947, 1996.
- 4) 大垣賀津雄、川口喜史、磯江暁、高橋昭一、川尻克利、長井正嗣：合成2主桁橋の鋼主桁補剛設計に関する実験的研究、構造工学論文集、vol.44A, pp1229-1239, 1998.