

逆台形箱桁の送出し架設時局部座屈に対する検討

太田貞次*

吉川 薫**

古市憲男***

1. まえがき

近年、主として景観上あるいは耐風安定上の理由から斜めウェブを持つ逆台形箱桁橋が多く用いられるようになってきた。ここ数年当社で製作・架設を続けている首都高速葛飾江戸川線においても、外主桁に、逆台形箱断面形状を使用している（写真-1）。

上記工事のうち、KE31工区高架橋上部構造新設工事では、中川水門分水場を跨ぐ径間の架設に、送出し装置による手延機を用いた引出し工法を採用している。本工法により桁架設を行う場合には、通常の応力検討、全体座屈検討に加えて、送出し支承上の桁の局部座屈に対する検討が必要となる。

桁橋の送出し架設時の局部座屈に対する検討については、支承上鉛直ウェブの垂直補剛材間を取出して検討する方法が提案されている^{1)~3)}。しかし、今回対象としている斜めウェブを持つ箱主桁の場合には、①斜めウェブと下フランジの変形が相互に影響しあい内部の応力状態が複雑となるため、各々単独に取出して解析できないこと、②斜めウェブ、下フランジとも面外曲げモーメントの作用を受けること、などから鉛直ウェブの場合と比較して対応がむづかしくなる。そのため、FEMにより船舶の船底横桁コーナー部に対する補強について考案した報告⁴⁾が見られる程度である。

本文は、KE31工区逆台形箱主桁の送出し架設時を対象とし、FEM解析により送出し支承上の桁の局部座屈を検討する方法について論じるものである。すなわち、送出し支承上の桁の局部座屈の影響が及ぶ範囲として箱桁ダイヤフラム間を取出し、FEM解析により局部座屈の性状を把握するとともに、より簡易的なモデルを用いて架設時の補強検討を行う方法を提案する。

本報告の構成を以下に示す。まず、2.で計算に使用する2つのFEMモデルについて説明を加える。3.では、架設補強なしの断面を対象として、2.で説明した2つのFEM解析モデルを用いて座屈解析し、局部座屈現象を見るとともに簡易モデル適用の可否を論じる。更に、4.では簡易モデルを用いて、桁の内部補強とそれに伴う局部座屈耐力の増加について調べる。

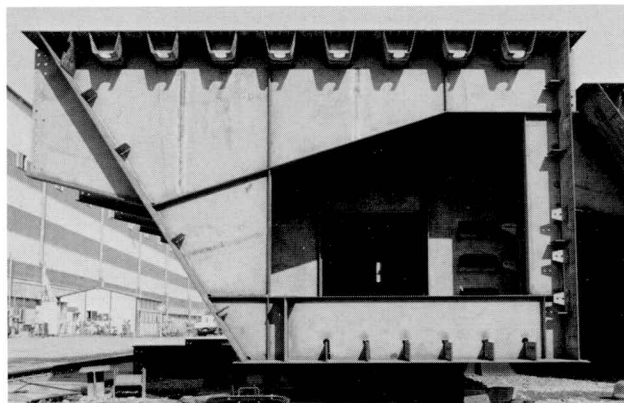


写真-1 KE31区鋼床版桁断面形状

2. 解析の概要

本報告で取扱う構造は斜めウェブを持つ逆台形箱桁であるため、上下フランジおよび斜めウェブに板面外の曲げモーメントが作用する。そのため、鉛直ウェブ桁の局部座屈検討で使用している垂直補剛材間のウェブを取出してFEM解析を行うだけでは充分ではない。それは、垂直補剛材が局部座屈における変形拘束線になっているとの保証が得られないためである。

上記の理由から、ダイヤフラム間を解析モデルとして

* 技術本部設計部設計開発課係長

*** 千葉工場製造部製造計画課係長

** 技術本部設計部設計開発課主任

取出すこととし、これを逆台形箱桁モデルと呼ぶ（図-1）。このモデルを用いてFEM応力解析およびFEM座屈解析を行い、架設時送出し支承上の桁の局部座屈問題を論じる。

次に、逆台形箱桁モデルでは節点数が多く、計算に多大の時間を必要とするため、以下の手順で妥当と考えられる簡易モデルを作成し、局部座屈補強の検討をする。

- ① 逆台形箱桁モデルFEM座屈解析結果から、局部座屈現象に対する変形拘束線を見出し、この線で囲まれる部分を解析モデルとして取出す。これを部分立体モデルと呼ぶ。
- ② 部分立体モデルの境界上の節点に対し、逆台形箱桁モデルで得た対応する節点の変位を強制変位として与え、部分立体モデルFEM応力解析を行う。このとき、内部応力状態は、逆台形箱桁モデルの対応する部分と一致している。
- ③ ②の部分立体モデルを用いてFEM座屈解析を行う。境界条件としてはつぎの2つを考える。
 - i) ②のFEM応力解析で得られた境界節点反力を外力として作用させる。
 - ii) ②で用いた境界節点強制変位を与える。

以上、簡易モデルの選定と、このモデルを用いて局部座屈現象を検討する方法の概要を述べたが、境界条件として挙げた i)、ii) とともに各々つぎのような欠点を持っている。i) については、更なる荷重増加に対し隣接する部材の剛性が無視されることになり、実際以上の変形量の増加を生じてしまうことになる。また、ii) については、境界が変位拘束線となっている場合には有効であるが、境界上の座屈あるいは境界上の変形が局部座屈に影響を及ぼす場合に対しては実際より強く評価してしまうことになる。検討にあたっては、i)、ii) の解析結果をもとに総合的に判断することになる。

3. FEM解析および結果の考察

(1) 逆台形箱桁モデルによる解析

解析に使用する逆台形箱桁モデルおよび境界条件をそれぞれ図-2、3に示す。解析モデルは、通常的设计計算から得られる断面構成とし、送出し工法で架設するために必要となる補強等は考えないこととする。

次に境界条件について説明する。境界に作用する外力

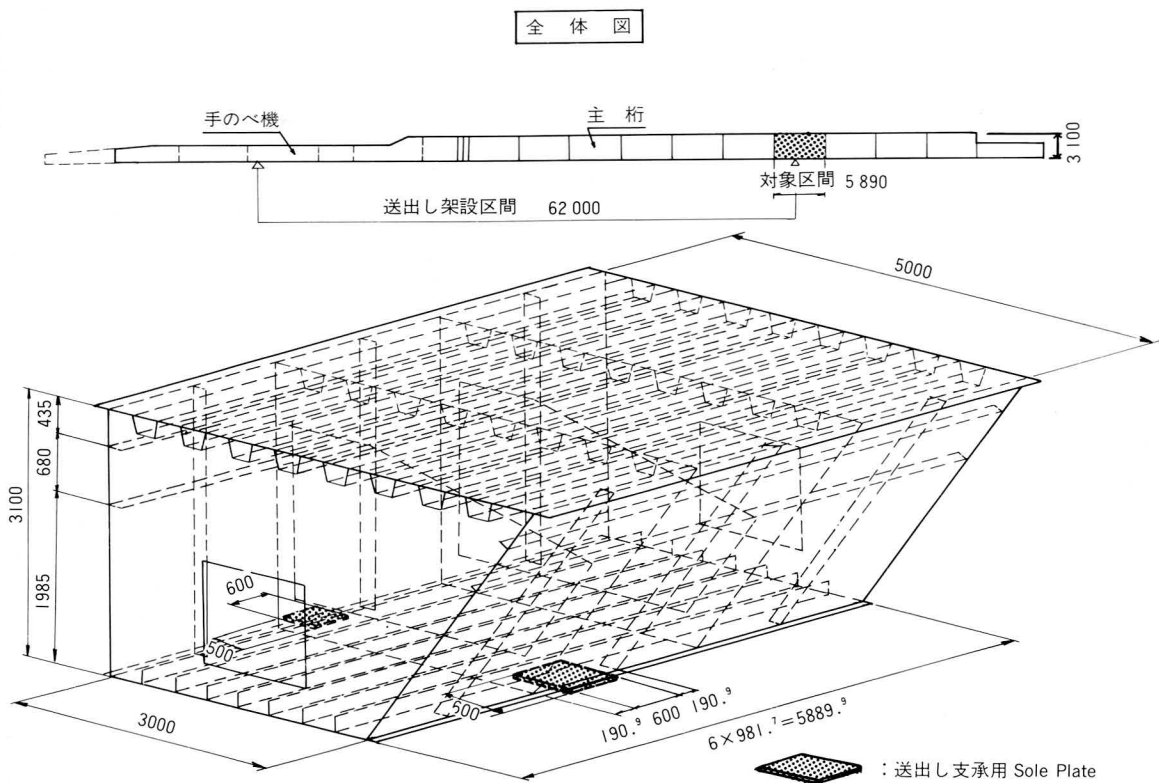


図-1 逆台形箱桁モデル寸法諸元

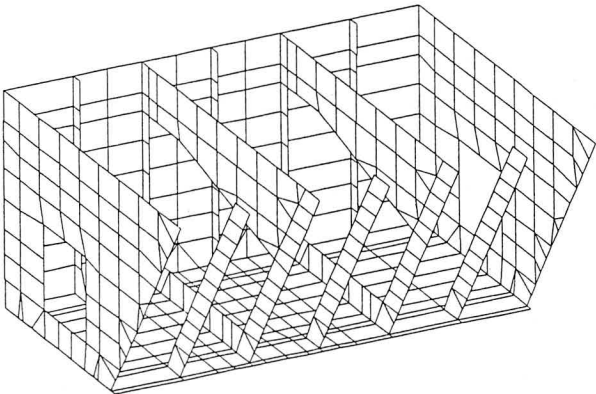
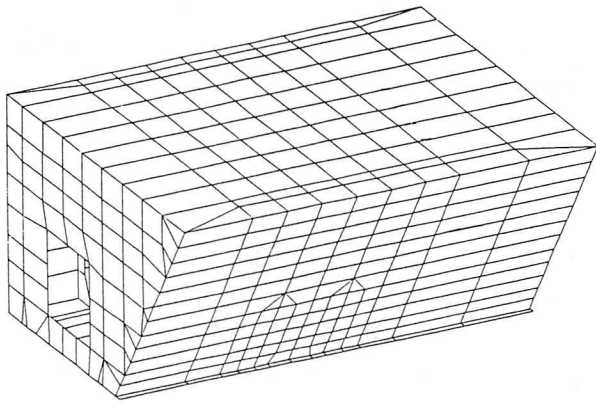


図-2 解析モデル

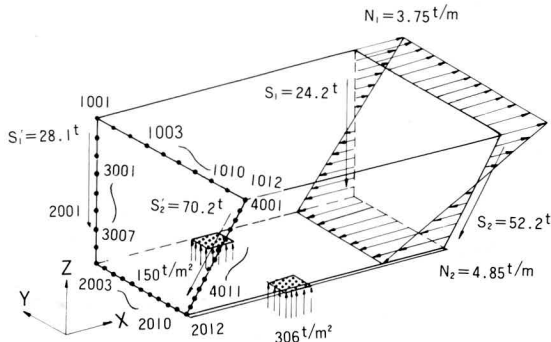


図-3 境界条件

としては、架設全体系を扱った別途計算書⁵⁾から得られる送出し支承反力、境界ダイヤフラム断面に作用する曲げモーメント、せん断力、ねじりモーメントを使用する。まず支承反力は、支承部ソールプレート全断面で均等に受けると仮定して分布鉛直荷重に置換える。次に境界ダイヤフラム断面に作用する外力については、次式によって算出する：

$$M = \int Nz \, dA$$

$$S = S_1 + S_2 \cos \theta$$

$$T = S_1 e_1 + S_2 e_2$$

ここに、M、S、T、は架設全体系より得られる境界ダイヤフラム位置断面力。N、S₁、S₂は境界断面に作用させる軸方向力、鉛直ウェブ側及び斜めウェブ側せん断力である。また、zは断面中立軸から着目位置までの鉛直距離、θは斜めウェブの鉛直線との交角であり、e₁、e₂はそれぞれせん断中心から鉛直ウェブ、斜めウェブまでの距離である。変位拘束節点については、系が不安定にならないことと、拘束することにより内部応力状態に変化が生じないことの2条件から、表-1に示すように設定した。

表-1 節点変位拘束

	自 由 度					
	X	Y	Z	Q _x	Q _y	Q _z
1001, 1012	○	○	○			
1003-1010	○					
2001-2012	○					
3001-3007	○					
4001-4011	○					

上記モデルを用いてFEM応力解析を行い、要素応力について以下の結果を得た。

- ① 下フランジの最大応力度は、送出し支承上要素で橋軸直角方向に生じ、 $\sigma = -1475 \text{ kg/cm}^2$ である。ただし、張出し部に板曲げの影響で $\sigma = -2004 \text{ kg/cm}^2$ の応力が生じている。
- ② ウェブの最大応力度は、斜めウェブ側送出し支承上に生じ、 $\sigma = -1262 \text{ kg/cm}^2$ である。
- ③ 斜めウェブ垂直補剛材に $\sigma = -1694 \text{ kg/cm}^2$ の応力度が生じている。

①～③に示した応力度は、板の上下面の平均応力度であり、板曲げの影響を除いた値である。この結果から、SS41材の場合、許容応力度は超えるが、基準降伏応力度 $\sigma_f = 2400 \text{ kg/cm}^2$ 以下の値であり、応力度には問題なしと判断できる。

次に、FEM応力解析で求めた要素応力を初期値として座屈解析して得られた固有値 λ を表-2に示す。表中の固有値 λ は、応力解析で得られた応力度の λ 倍で座屈が生じることを表すパラメーターであり、 $\lambda < 1$ の場合

表-2 逆台形箱桁モデル座屈解析結果

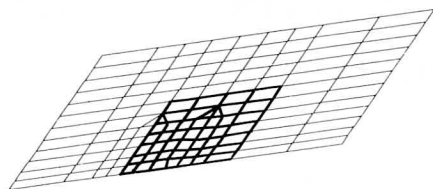
次 数	固 有 値	座 屈 箇 所
1 次	0.832	斜めウェブ垂直補剛材
3 次	1.085	〃
4 次	1.161	〃
5 次	1.549	〃
6 次	1.696	〃
8 次	2.067	〃

合にはすでに座屈していることを意味する。また、2次と7次はダイヤフラムの座屈モードであり、解析モデルに固有のもので実際に生じることはないと判断できるため、ここでは省略する。ここに示した座屈は全て斜めウェブ垂直補剛材に生じている。図-4、5に斜めウェブ及び送り支承近傍斜めウェブ垂直補剛材の座屈モードを示す。

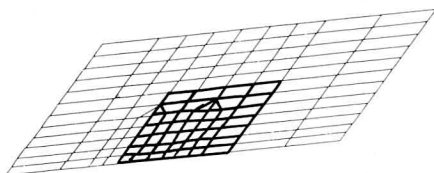
(2) 部分立体モデルによるFEM解析

逆台形箱桁モデルによるFEM応力解析および座屈解析結果から

- ① 応力レベルを見ると、斜めウェブと下フランジが大きく、直ウェブ、上フランジでは最大でも $\sigma = -422 \text{ kg/cm}^2$ 程度であり、非常に小さい。
- ② 座屈モードを見ると、2つの横リブ位置で基準変位1.0に対し最大でも 10^{-2} オーダーであり、この線上で変形が拘束されていると仮定しても誤差が少な



第3次モード



第4次モード

図-4 斜めウェブ座屈モード

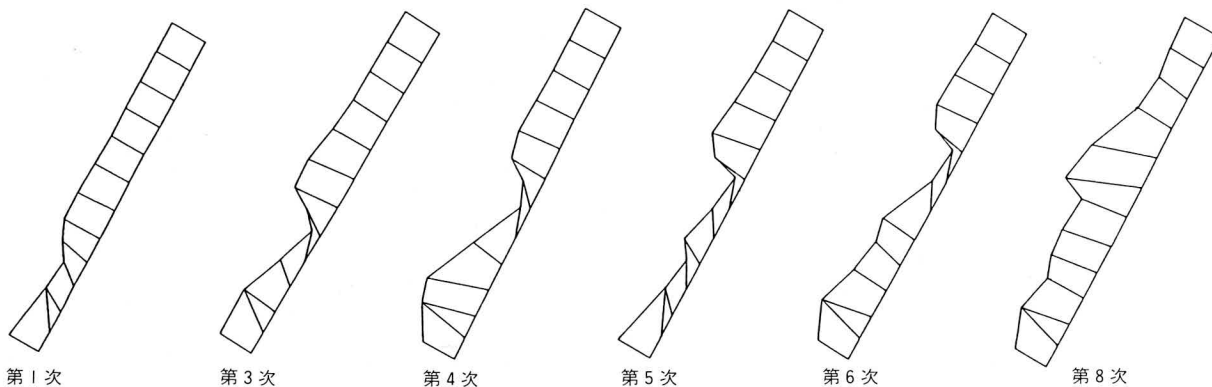


図-5 斜めウェブ 垂直補剛材座屈モード

いと考えられる。

の2点がわかったので、ここでは、2つの横リブ間の斜めウェブと下フランジから構成される部分立体モデルを取出し、このモデルにより解析をすすめる。なお、境界の横リブ、垂直補剛材はモデルを簡略化させるために線材で剛度を与え、中間の垂直補剛材のみ板材とする。これを部分立体モデル (Model (I)) と呼ぶ。

上記解析モデルの境界条件として、つぎの2通りを考える。

- ① 逆台形箱桁モデル応力解析から得られる節点変位を境界節点に強制変位として与える。
- ② ①で得られる境界節点反力を外力として与える。

以上2通りの境界条件のもとでFEM応力解析を行った結果、要素応力は①では逆台形箱桁モデルの値と一致しており、②でも3桁目で違う程度であり、両モデルとも静的には逆台形箱桁モデルと良く対応していることがわかった。

次に、境界条件を変位で与えた場合と外力で与えた場合の2ケースについて、FEM座屈解析を行って得られた固有値を表-3に各々の座屈モードをそれぞれ図-6、7に示す。

本文で対象としている斜めウェブを持つ逆台形箱桁の

表-3 部分立体モデル (Model (I))座屈解析結果

次数	変位境界条件		外力境界条件	
	固有値	座屈箇所	固有値	座屈箇所
1次	0.833	斜めウェブ垂直補剛材	0.845	斜めウェブ垂直補剛材
2次	1.074	//	1.060	//
3次	1.360	//	1.115	下フランジ横リブ位置
4次	1.662	//	1.331	斜めウェブ垂直補剛材
5次	2.054	//	1.581	//
6次	—	—	1.864	//

送出し支承上局部座屈の検討モデルとして部分立体モデルを使用することの適否を見るために、逆台形箱桁モデル座屈解析結果と部分立体モデル座屈解析結果との比較検討を行い、次の結果を得た。

- ① 実際の座屈現象に意味を持つ低次の座屈を見ると、1、2次座屈では境界条件に係わらず固有値、座屈モードともほとんど一致している。
- ② 変位を境界条件とする座屈解析結果を見ると、逆台形箱桁モデルの3、4次座屈に対する斜めウェブ垂直補剛材の座屈モードは見られず、3次座屈モードとして斜めウェブ垂直補剛材に別形状の座屈モードが生じる。しかし、逆台形箱桁モデルの5、6次座屈と部分立体モデルの4、5次は固有値、座屈モードとも良く対応が取れている。
- ③ 外力を境界条件とする座屈解析結果との比較では、3次座屈として境界近傍下フランジの座屈モードが生じている。また、4次以上の座屈については、固有値が若干小さくなるが、変位を境界条件とする座屈解析結果と同様な傾向を示す。すなわち、逆台形箱桁モデルの3、4次座屈に対応する座屈モードは見られないが、5、6次に対応する座屈モードは生じている。

以上の結果から、逆台形箱桁モデルの3、4次座屈モードが部分立体モデルでは捕捉できないものの、1、2次座屈については固有値、座屈モードとも変位、外力の境界条件に関係なくほとんど一致している。また、5、6次といった高次座屈モードも部分立体モデルで捕

捉しており、逆台形箱桁の送出し架設時局部座屈の検討に当たって、逆台形箱桁モデルの代わりに今回提案した部分立体モデルを用いることが可能であると判断できる。

4. 局部座屈に対する補強について

現モデルでは座屈固有値 $\lambda < 1$ であるから、このままでは架設時に桁に局部座屈を生じるため、座屈が生じないよう桁内部に補強を施す。この補強法の検討には、前章で提案した部分立体モデルを用いることとする。

部分立体モデルにより補強法の検討をする際、厳密には補強後の断面構成で逆台形箱桁モデルに戻り応力解析をしなければ、内部の要素応力や境界節点の変位量の正確な値は得られない。しかし、補強により構造全体系の力の流れが大きく変わらなければ補強前の要素応力、境界変位を用いても差は小さいと思われるため、ここでは補強前の断面における要素応力、境界条件を使用する。

(1) 補強ステップ (I)

前章の検討で、座屈が最初に斜めウェブ垂直補剛材 (PL 170×16) に生じているため、垂直補剛材にフランジ (PL 150×10) を取付けて局部座屈耐力の増加を図る。これをModel (II) と呼ぶ。Model (II) を変位および外力の境界条件のもとで座屈解析して得られる座屈固有値、座屈モードを表-4及び図-8、9に示す。

変位境界条件で1次固有値 $\lambda = 2.331$ 、外力境界条件

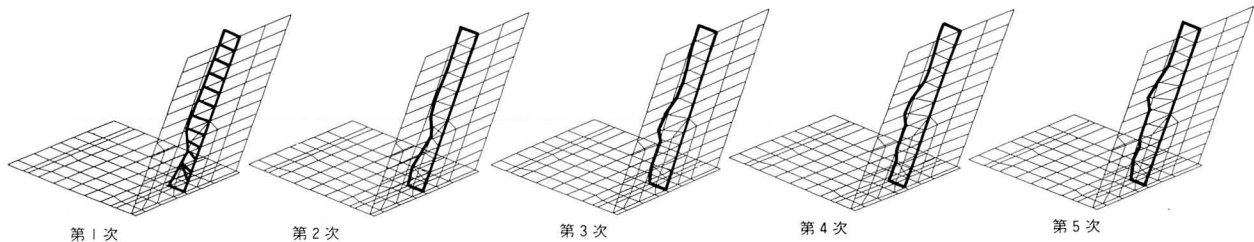


図-6. Model (I)座屈モード図 (変位境界条件)

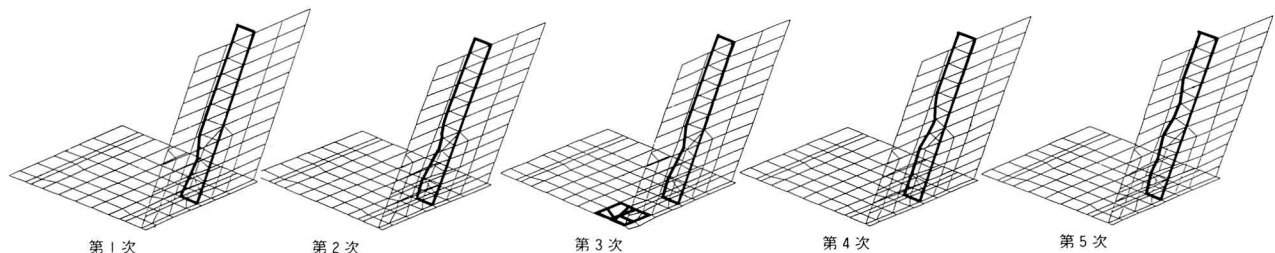


図-7. Model (I)座屈モード図 (外力境界条件)

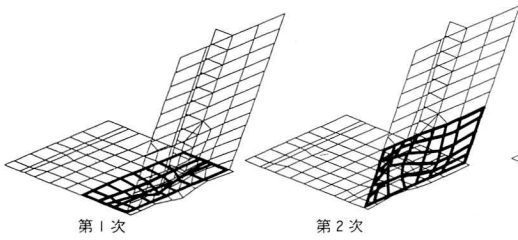


図-8 Model(II)座屈モード図 (変位境界条件)

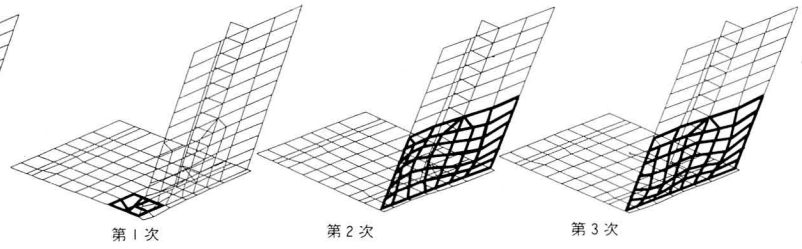


図-9 Model(II)座屈モード図 (外力境界条件)

表-4 部分立体モデル(Model(II))座屈解析結果

次数	変位境界条件		外力境界条件	
	固有値	座屈箇所	固有値	座屈箇所
1次	2.331	斜めウェブ側下フランジ	1.152	斜めウェブ側下フランジ
2次	2.436	斜めウェブ下部	1.666	斜めウェブ下部
3次	2.870	斜めウェブ側下フランジ	2.267	//
4次	3.432	斜めウェブ下部	2.630	斜めウェブ側下フランジ
5次	3.658	斜めウェブ側下フランジ	3.293	垂直ウェブ側下フランジ

で1次固有値 $\lambda=1.152$ と得られた。この違いの要因として、変位境界条件では境界線上の変形が拘束されているのに対し外力境界条件では拘束されていないことがある。どちらが実際に近いかの判断には逆台形箱桁モデルに戻ることが不可欠であり、ここでは $\lambda=1.152$ 程度の座屈耐力があると言うにとどめる。

(2) 補強ステップ (II)

補強ステップ (I) の結果から、①境界の変形を拘束できれば $\lambda=2.331$ 程度の座屈耐力が得られる、②外力境界条件の座屈モード図から、下フランジ、斜めウェブとも橋軸方向面外曲げ変形が卓越していることがわかる。①、②より、下フランジ、斜めウェブそれぞれに図-10のように縦リブ、水平補剛材を追加する。これをModel (III) と呼ぶ。外力を境界条件としてModel

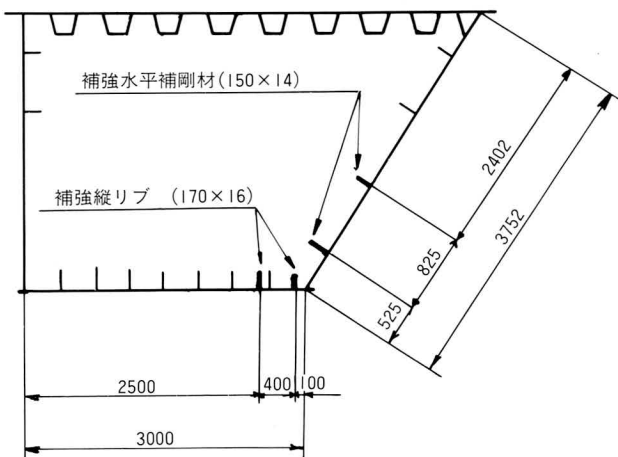


図-10 STEP(II)補強図

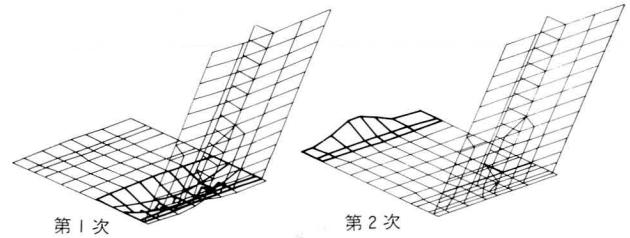


図-11 Model(III)座屈モード図 (外力境界条件)

表-5 部分立体モデル座屈解析結果(Model(III)、外力境界条件)

次数	固有値	座屈箇所
1次	2.991	斜めウェブ側下フランジ
2次	3.869	垂直ウェブ側下フランジ
3次	3.970	//
4次	4.367	斜めウェブ側下フランジ
5次	4.934	//

(III) の座屈解析を行い、表-5、図-11のように座屈固有値、座屈モードを得た。

上記補強後の解析結果から、1次固有値 $\lambda=2.991$ と架設時荷重の約3倍まで局部座屈が生じないことがわかった。また座屈形状が橋軸、橋軸直角の2方向ともに湾曲しており、簡単な補強では局部座屈耐力の増加を図れないものであることから、これまでに示した補強が1つの安全かつ妥当なものであると判断できる。

5. あとがき

本報告では、斜めウェブを持つ逆台形箱桁送出し架設時の桁の局部座屈現象の把握と、局部座屈に対する補強法の検討をFEM解析で行い、つぎの結果を得た。

- ① 通常的设计計算でつくられる断面では、局部座屈に対して耐力が不足する。
- ② 局部座屈に対する補強法として、斜めウェブ垂直補剛材にフランジを巻き、更に、下フランジの斜めウェブ近傍と斜めウェブの下側に縦リブを取付けることが有効である。

上記結論は、逆台形箱桁モデル、部分立体モデルの2

つの解析モデルを用いてFEM解析を行うことにより得たものである。一般に、FEM解析はモデルと実際構造の対応が取れていれば非常に有力な解析手法であるが、現実問題として、構造全体をFEMモデルとして採用することは計算機的能力、演算時間の問題があり、本文のように構造の一部を取出して解析モデルとしている。この解析モデルの縮小の段階でいかに実際構造に対応させ得るかで結果に大きな差が生じてしまう。本報告では逆台形箱桁モデルと部分立体モデルの2種類の縮小モデルを用いたが、このモデルを用いる際に以下の問題を内包していることを頭に置いて解析結果の運用をすべきだと考える。

- ① 逆台形モデルの境界条件としては、架設全体系の骨組計算により算出された断面力を静力学的に等価となる境界外力に置き換えて使用している。
- ② 部分立体モデルの境界条件としては、補強前の平衡状態から求めた値を補強後にも採用している。
- ③ FEM解析モデルを縮小したために縮小前のモデルに生じていた座屈モードを落としてしまう可能性がある。

以上3つの事項のうち①、②については設計上仕方のない事項であり、構造系が大幅に変わるものでもないで、ある程度結果の見極めが可能であるように思われる。③については、実際上問題となる1次座屈でも起こる現象であるのかどうか、また座屈モードから判断できないかどうか等今後の課題である。また、結果に対する検証としては、実験あるいはより厳密な解析結果との比較が必要となるが、これに対しても今後の成果を期待することとしたい。

最後に、本報告で使用した部分立体モデルの境界条件はこれより大きな逆台形箱桁モデルの応力解析の結果を用いているが、架設時全体系での骨組解析の結果から得られる断面力から直接得ることができれば、計算の大幅な簡略化が可能となることを付記しておく。

本報告中の逆台形箱桁モデル、部分立体モデルFEM解析は日本電子計算(株)所有プログラムMSC/NASTRANにより行っており、解析モデルの作成、境界条件の設定等と同科学技術事業部FEM担当グループより有益なアドバイスをいただいた。また、本稿執筆にあたり首都高速道路公団第一建設部設計課の皆様にご協力いただいた。紙上を借りて深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 池田肇：鋼橋の送出し架設工法、土木学会誌；昭和56年2月
- 2) DIN4114 (1952/53)：鋼構造物の座屈計算基準
- 3) 伊藤鉦一：鉛直局部荷重を受けるプレートガーター腹板のDAS_t 指針012による座屈照査例：橋梁と基礎、昭和59年3月
- 4) 松石正克：座屈に対する補強材の効果に関する研究、日立造船技報第34巻1号昭和48年2月
- 5) 宮地・三菱共同企業体：KE31工区高架橋上部構造新設工事P39～P40手延機引出し工法における主桁補強検討書

グラビア写真説明

新白滝橋

本橋は北海道の中心旭川市とオホーツク海沿岸地域を結ぶ国道333号線中間部、山岳地帯の紋別郡白滝村に架る。架橋地は昔から交通の要所であり、近年交通量の増大と冬期の除雪等の問題解決に延長2kmのバイパスが建設され、この中間の支湧別川に架っている。

バイパス区間では道路の両側に植栽として寒さに強いプンゲンストーヒ3000本が植えられている。本橋の親柱には地元特産の黒曜石が使われており、地方色豊かなバイパスである。この自然にうまく溶け込んで、斜角をもつ2径間連続曲線箱桁がこの橋である。