

並列 I 桁橋の有限要素モデル化に関する検討

ON FINITE ELEMENT MODELING OF I-GIRDER STEEL BRIDGES

黒田充紀*・長井正嗣**・藤野陽三***・柄川伸一†・川井 豊‡
Mitsutoshi KURODA, Masatsugu NAGAI, Yozo FUJINO, Shinichi EGAWA and Yutaka KAWAI

* 足利工業大学 工学部土木工学科 (〒326 栃木県足利市大前町268)
** 長岡技術科学大学 建設系 (〒940-21 新潟県長岡市上富岡1603-1)
*** 東京大学 大学院工学系研究科 土木工学専攻 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)
† 首都高速道路公団 工務部設計技術課 (〒100 東京都千代田区霞ヶ関1-4-1)
‡ 川崎製鉄株式会社 橋梁・鋼構造事業部技術部規格開発室 (〒100 東京都千代田区内幸町2-2-3)

The main objective of this paper is to investigate finite element modeling of I-girder steel bridges in order to predict accurately deformation and forces in all the secondary stiffening members. A three-I-girders steel bridge with a span of 39 meters is employed as a model. First, a finite element model that includes all the secondary members as well as RC slab in detail is developed. The degrees of freedom of this model are more than 300 thousands. The numerical result of this model is taken as a reference: i.e., we assume that the result obtained from this detailed model represents the actual behavior of the bridge. Secondly, several simplified models based on some different concepts are developed. The validity of these simplified models is examined, comparing the results with those by the reference model.

Keywords: Finite Element Method, I-Girder Bridges, Secondary Member Forces

1. 緒 言

わが国の並列 I 桁橋の多くには、対傾構、横構などのいわゆる 2 次部材が多数配置されている。設計時には応力計算されないこれらの 2 次部材に発生する力が、近年問題となっている疲労と密接に関係しているといわれている。しかし、これらの 2 次部材に作用する力が、実橋でどの程度生じているかを、正確に評価することは極めて難しい。2 次部材を含む構造システムは、全体として極めて複雑なものになっているからである。

このような現状において、従来の設計概念に基づく構造系を見直し、かつ現在の標準的な設計よりも大幅に簡素化した構造系を検討・提案することには大きな意義がある。

この種の課題に対して、有限要素法を用いたパラメトリック解析は、最も有力な手段の一つである。通常、パラメトリック解析は解析ケースが相当数にのぼる。したがって、従来の構造系の省察さらには新たな構造系の提案という目標の第 1 段階としては、現実的な自由度の範囲で高い精度の解が得られる合理的な解析モデルおよびモデル化手法の開発が行われなければならない。本論文では、上述の目的を達成するための解析モデルの作成について検討する。

過去にも相当数の I 桁橋の解析^{1)~6)}が行われ、2 次部材力の予測¹⁾、さらにはブーミング法による局部応力の算定^{2,3)}などがなされた。これらの解析の妥当性は実測値との比較によって検討された。しかし、供用開始から年数が経っていると、床版の剛性低下、各部の損傷などから新橋当時と厳密には構造系が変化している場合が多い。解析モデルの側にこれらの損傷の影響を正確に取り込むことは難しく、仮に、実測値と解析値が近くなっても、必ずしもそれがモデルの正しさを意味する保証はない。また、計算機容量などの問題から、従来は対傾構・横構などの 2 次部材は、主桁間を結ぶ梁またはトラス要素として単純にモデル化されており^{2,4)~6)}、その精度に関しては必ずしも明らかになっていない。

本論文では、最近のコンピューターの発達を背景に、可能な限り厳密な解析モデルによる数値解を基準とする次のような方法で検討を進める。

(1) まず用いる計算機の容量が許す範囲で最大限精密な橋梁全体モデルを作成しこの数値解を参照解とする。解析対象として現存する 3 主桁で支間長 39m の比較的小規模の橋梁を選んでいる。仮により主桁数が多く支間長が大きいものを対象として選定すると、計算環境の制約から相対的に粗いモデル化しか行えず、細部のモデル化の問題点を適切に把握できない可能性がある。

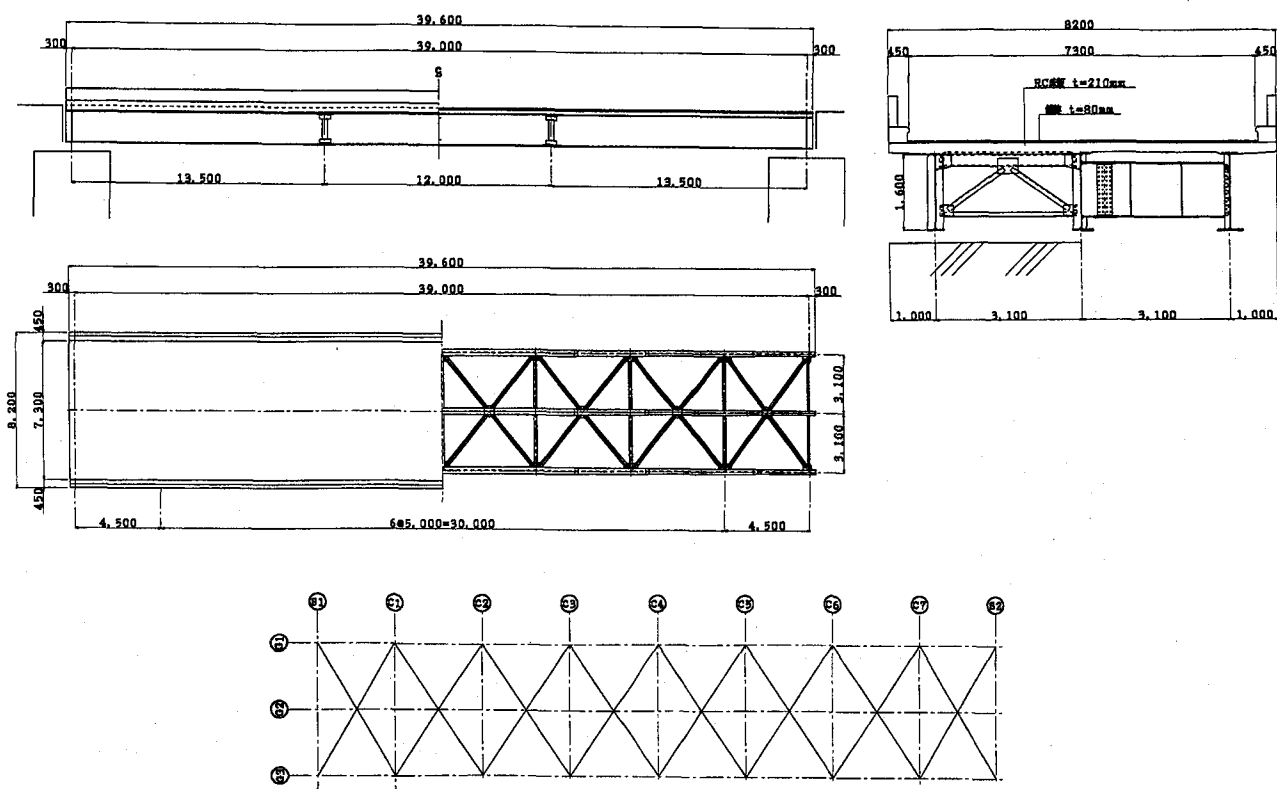


図-1 解析対象とした橋梁

表-1 解析モデル一覧

Model	Type	Boundary Conditions	Sway and lateral bracing members
R-A (Reference	1/2Width	Pin-Roller	8-nodes shell
	1/2Span	Pin-Pin	8-nodes shell
R-B)	1/2Width	Pin-Roller	8-nodes shell
	1/2Span	Pin-Pin	8-nodes shell
S-A	1/2Width	Pin-Roller	Bar
	1/2Span	Pin-Pin	Bar
S-C	1/2Width	Pin-Roller	Bar
	1/2Span	Pin-Pin	Bar

(2) いくつかの概念に基づいて簡易化した複数のモデルを作成し、(1)の参照解と比較することによりその妥当性を検討する。最終的に一つのモデルに絞り込み、これをパラメータ解析に用いるべきモデルとする。

著者らによる文献7)では、本研究で吟味されたモデルを用いて、実際にパラメータ解析を行い、簡易な構造システムに関する検討と提案を行っている。

2. 解析対象とそのモデル化

2.1 対象とした橋梁

図-1に解析対象とした支間39m、幅員7.3mの

3主桁並列橋を示す。支間中央に荷重分配横桁が、また5m間隔で中間対傾構が配置されている。

より主桁数が多く支間長が大きいものを対象として選ぶと、計算環境の制約から相対的に粗いモデルしか設定できず、モデル化の問題点を適切に把握できない可能性がある。このことを念頭に置いて図-1の規模の橋梁を対象として選んでいる。

2.2 計算環境

スーパーコンピューターFACOM VP-2200(川崎製鉄株式会社千葉工場付設)を用いた。主メモリーは128MBであり、主メモリーで不足する記憶はハードディスクを仮想的に用いることによって補った。

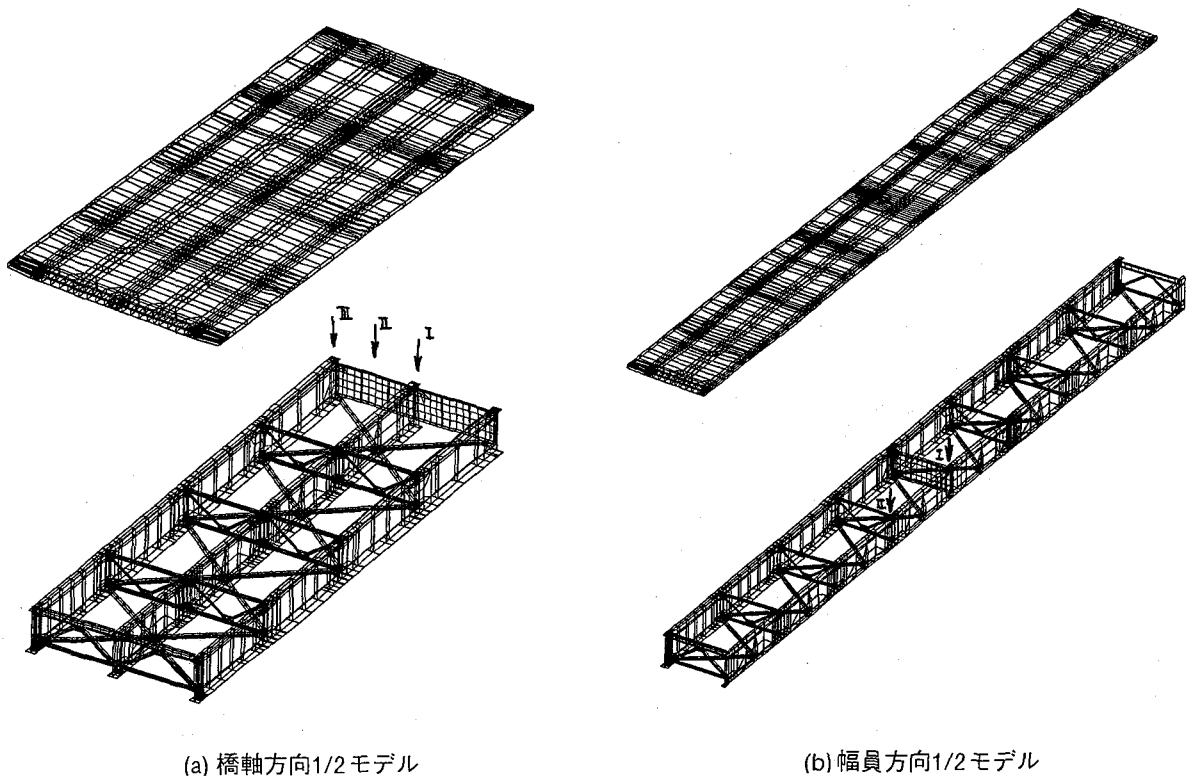


図-2 モデルR-Aの要素分割図

使用可能なハードディスクは10GBである。ソルバーには汎用有限要素コードMARC-K4[®]を用いた。

2.3 解析モデル

表-1に設定した解析モデルをまとめて示し、以下に詳しく説明する。モデルはR-A、S-Aなどの記号で表す。モデルRは、すべての鋼部材がシェル要素でモデル化されている。モデルSは、対傾構などの2次部材が棒要素に置き換えられて大幅に簡易化されている。続く記号-A、-B、-Cは、次のようなモデル化のレベルを表す。

- A: L形鋼とガッセトプレートの材軸の偏心、重ね継手の板厚による偏心などを考慮に入れたモデル。
- B: Aにおける重ね継手の板厚による偏心を省略したモデル。
- C: 部材取り合い部の偏心を一切考慮しないモデル。

2.3.1 2次部材に板要素を用いたR系モデル

(1) 最も厳密な参照解用モデルR-A 「可能な限り実橋を忠実に再現する」という考え方でモデル作成を行った。これにより得られる解は一連の検討の参照解(すなわち真の解と仮定)とする。

床版は20節点立体要素、その他はすべて8節点シェル要素(面内回転自由度あり)でモデル化した。ハ

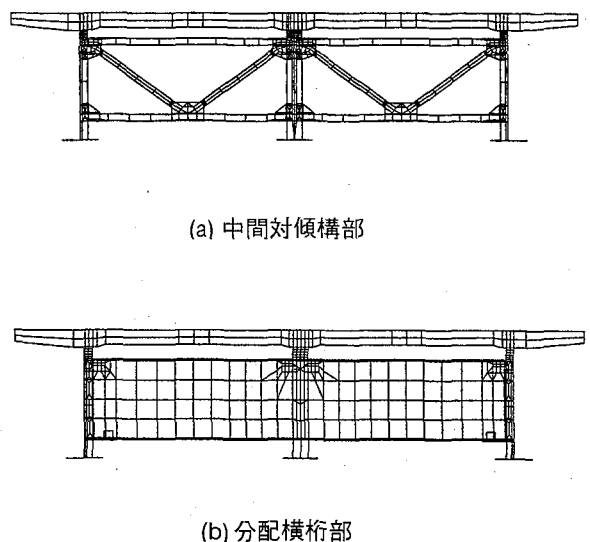
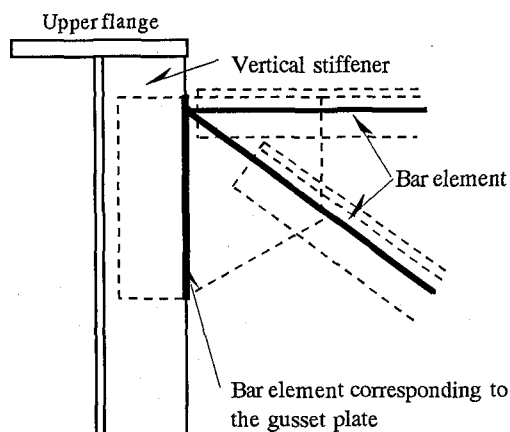
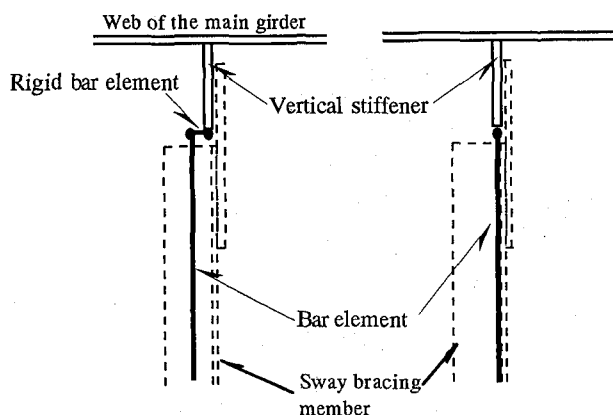


図-3 R-A橋軸方向1/2モデルの対傾構と横桁

ンチ下面と主桁上フランジ上面は節点を共有させて連結している。このR-Aでは、隅肉溶接による重ね継手部の板厚中心の偏心および1面摩擦のボルト接合による偏心の影響を考慮する。ボルトは剛棒でモデル化し、隅肉溶接部はのど厚に相当する板を配置して、実橋通りに板を板厚分だけ偏心させる。このようなモデル化を全橋に対して行くと、総節点数は12万を越え総自由度は30万を上回る規模となり、用



(a) ガセットと対傾構の棒要素化



(b) 対傾構の棒要素化
偏心考慮 (S-A)

(c) 対傾構の棒要素化
偏心考慮せず (S-C)

図-4 棒要素による簡易なモデル化

意した計算機環境では実行不可能となる。

そこで、2つの1/2橋モデルを考えた。一つは、橋軸方向1/2モデルである。このモデルでは、重ね継手の板厚分の偏心をすべての箇所では考慮している。橋軸方向1/2モデルの境界条件は、支間中央断面で橋軸方向の変位を拘束し、支承部はピン支点とした。これは実際の橋梁と異なるが、計算機環境から受ける制約からやむを得ず採った方策である。もう一つは、幅員方向1/2モデルである。このモデルの場合には、分配横桁部、C3対傾構および一部の横構においてボルト接合や隅肉溶接による板の偏心を考慮している。

図-2に橋軸方向1/2モデル(168,000自由度)と幅員方向1/2モデル(146,000自由度)の要素分割の全景を示す(見やすさのため床版は分離して示した)。また、図-3に分配横桁および対傾構部分の要素分割を示す。これは橋軸1/2モデルのものであるが、幅員1/2モデルの場合の同部分の分割様式はこれらと全く同様である。

(2) 板厚偏心を省略するモデルR-B これは、R-Aでなされた分配横桁、対傾構、横構に関わる重ね継手において、板厚分の材軸偏心を省略したモデルである。すなわち、実際には板が重なっている部分であっても、それらが同一平面にあるとみなしてモデル化している。分配横桁取り付け部のボルト接合もモデル化しない。ただし、板が重なった部分の「入力データ」としての板厚は実際の複数の板の厚さの総和としている。R-Aと同様に、橋軸方向1/2モデルと幅員方向1/2モデルの2つを作成した。

2.3.2 棒要素を用いて簡易化されたS系モデル

(1) 材軸の偏心を考慮したモデルS-A このモ

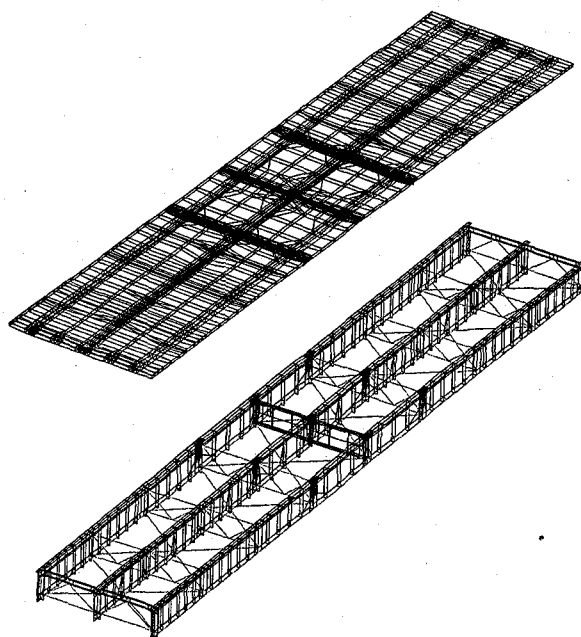


図-5 簡易モデルS-Aの要素分割図

デルでは、対傾構、横構は、すべて断面積と断面2次モーメントを実部材と一致させた棒要素でモデル化する。ガセットプレートも棒要素に置き換えてモデル化する。例えば対傾構取り付け部は図-4(a)のようにモデル化する。実橋の対傾構部材はL形鋼なので、その断面の重心は取り付けガセット面から偏心していることになる。この材軸の偏心量をこのモデルでは考慮している。すなわち、図-4(b)のように剛棒を張り出して材軸の偏心を表現している。このモデルは、R-Aの2次部材を材軸の偏心量を正確に考慮して棒要素に置き換えたモデルと解釈できる。容量節約のため主桁下フランジも棒要素に置き換えている。床版の分割もやや簡易化している。ただし、

ウェブギャップ近傍の要素分割はR-Aと同程度の細かさのまま残している¹⁾。

上記の概念で簡易化したS-Aの全橋モデルは、総自由度で比較すると1/2詳細モデルの約50%程度であり、用意した計算環境で全橋（図-5）が解析可能である。しかし、実際の計算では、詳細モデルと対応づけるために便宜的に1/2モデルを考え、幅員方向1/2モデルと橋軸方向1/2モデルの2つを考えた。

（実際は、図-5の全橋モデルの境界条件を調節して作成。）

（2）材軸の偏心をも無視したモデルS-C このモデルはS-Aにおいてすべての材軸の偏心を無視したモデルである。すなわち、各部材の材軸の偏心をせず、図-4(c)のようにモデル化する。したがって、本モデルはR-Bと概念的には対応しない。その意味で、“S-B”ではなくあえて“S-C”としている。

本研究の範囲ではこれ以上の簡易化は行わなかった。床版を板殻要素でモデル化したり^{1),2),5),6)}、主桁を偏心棒要素に置き換え¹⁾たりする簡易化が既往の研究で行われている。しかし、床版の荷重分配効果が大いこと、また主桁の断面変形が無視できないことなどを、予備的な解析を行って確認していたので、今回はより簡易なモデルは作らなかった。

各モデルの作成過程で、要素分割と解の精度についての基礎的な検討をいくつか行っている。その概要は付録に示した。

2.4 荷重条件

本研究ではモデル化手法の検討に主眼を置くので、トラック荷重のような実際の荷重ではなく、単純な1点集中荷重のみを考えた。荷重ケースは図-2の参照解用モデルの要素分割図中に示すとおりである。幅員方向1/2モデルでは、I) G2C4とII) G2C3の位置の2ケース、橋軸方向1/2モデルでは、I) G2C4、II) C4上でG1とG2の midpoint、III) G1C4の3ケースを設定した。荷重の大きさは全橋に対して単位荷重1.0tf (9.8 kN) とした。

3. 解析結果

3.1 橋梁全体のたわみ

図-6と図-7に床版たわみの比較結果を示す。図-6は幅員方向1/2モデルのC3G2位置に荷重を載

¹⁾ 文献7)におけるパラメトリック解析では、このSAとほぼ同じモデルを使用している。パラメトリック解析において、ウェブギャップの応力の評価も行うことを、SA作成時点で計画していたので、この部分の分割はR-Aと同程度としている。

荷したときの各モデルのC3対傾構部における床版上面のたわみである。全体的な変形はモデルによらずほぼ一致している。

図-7(a)は橋軸1/2モデルのG2C4の位置に荷重した場合、(b)図はG1C4に荷重した場合、(c)図は{G1-G2}C4に荷重した場合のC4部の床版上面のたわみを示している。(b)図のG1C4に荷重した場合には、R-Aが最も変形量大きい、すなわち、“やわらかい”結果となっている。これは、R-Aでは2次部材取り付けの隅肉溶接まで考慮しているので、対傾構・横構部材の変形能が他のモデルに比べて小さくなっているためと考えられる。このたわみの差が2次部材のモデル化の違いによるものであることを確認するため、R-A、R-B、S-Aに対応するすべての対傾構・横構を取り除いた（実際にはこれらの部分の剛性を数値的にゼロに近づけた）モデルを作成し、同じ荷重条件による比較計算を実施した。この場合には、期待したとおりたわみは、各モデルでほぼ完全に一致した。

図中にRoller-RollerとあるのはR-Aにおいて支点条件をPinからRollerに変更した場合のたわみである。図-6と比較すれば、実際のPin-Roller条件におけるたわみ量はむしろこれに近いと考えられる。

3.2 対傾構軸力・横構軸力

図-8は幅員方向1/2モデルによるC3対傾構の部材の軸力を示す。(a)図は荷重位置がG2C3の場合、(b)図は荷重がG2C4の場合である。モデルR-Aについては、軸力をkgf単位で示し、その他のモデルについては、R-Aとの比で示した。R-Bでは斜材で30~40%の差が生じている。これは重ね継手による板の偏心を無視したことの影響の大きさを端的に示している。

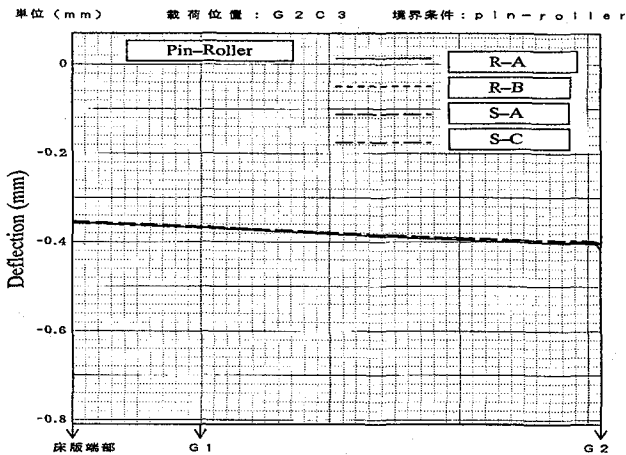
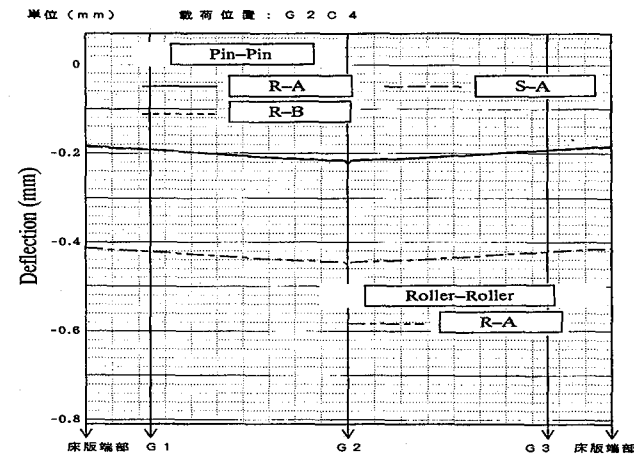


図-6 幅員方向1/2モデルにおいてG2C3に荷重した場合のC3位置での床版上面のたわみ

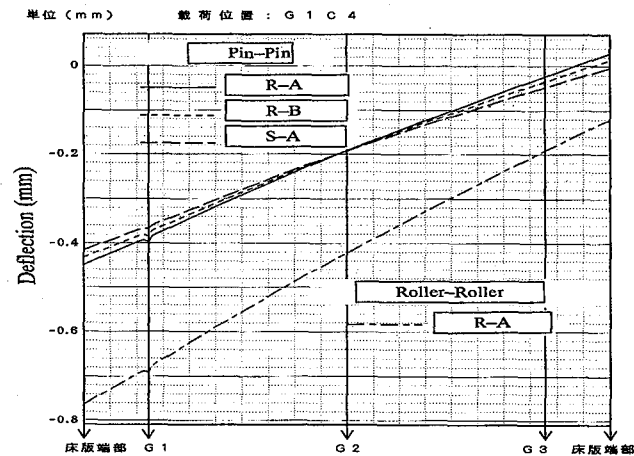
対傾構部材を偏心を考慮して棒要素で簡易化したS-Aの場合、絶対値の小さい上弦材ではR-Aに対する相対誤差が大きいが、斜材、下弦材ではほぼ30%程度以内の誤差である。偏心の影響を取り入れているS-Cでは60%を越える誤差が斜材で発生している。すべてシェル要素でモデル化しているものの重

ね継手部の偏心量を考慮しないR-Bと、棒要素を用いてはいるが偏心量を正確に考慮したS-Aとを比べると、2次部材の軸力の予測精度はほぼ同程度か、S-Aのほうがむしろよい場合もあることがわかった。部材の偏心量を正確に考慮すれば棒要素を用いても相当に信頼性の高い解析が可能であることが確認された。

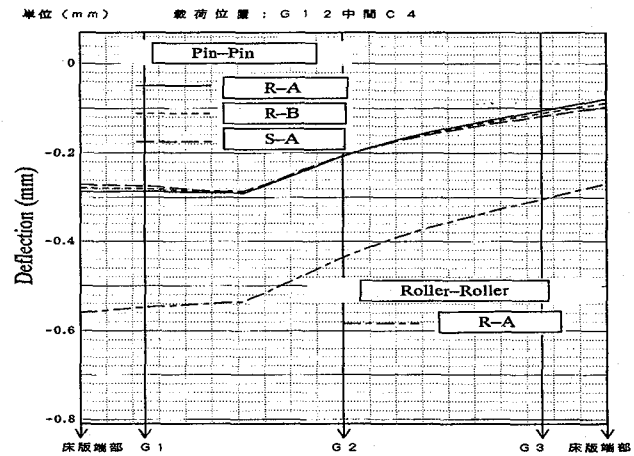
図-9は幅員方向1/2モデルによるC4とC3の間に配置された下横構の軸力を示している。



(a) 载荷位置: G2C4

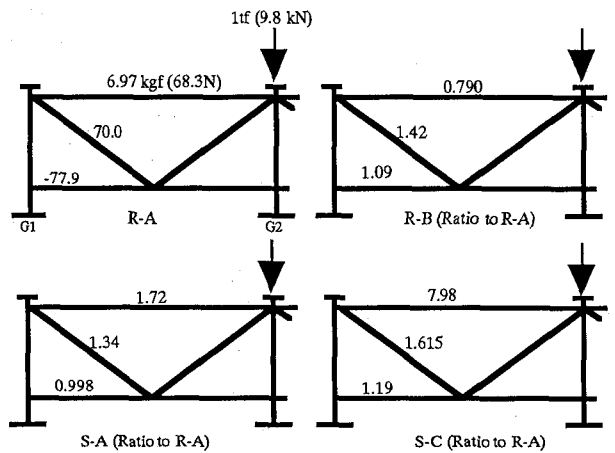


(b) 载荷位置: G1C4

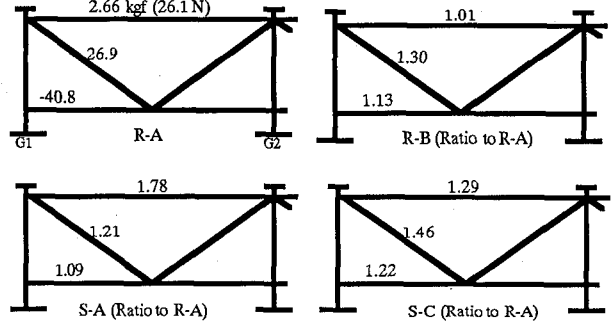


(c) 载荷位置: G1G2の中間-C4

図-7 橋軸1/2モデルによるC4位置での床版のたわみ



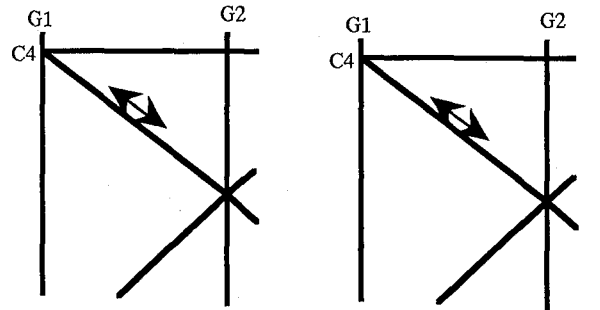
(a) Load: G2C3



(b) Load: G2C4

図-8 幅員方向1/2モデルによるC3対傾構部材の軸力

R-A 27.8kgf (272 N) R-A 61.7kgf (605 N)
R-B 1.28(Ratio) R-B 1.27(Ratio)
S-A 1.35(Ratio) S-A 1.31(Ratio)
S-C 1.44(Ratio) S-C 1.44(Ratio)



(a) Load: G2C3

(b) Load: G2C4

図-9 幅員方向1/2モデルによるC3とC4の間に配置された下横構部材の軸力

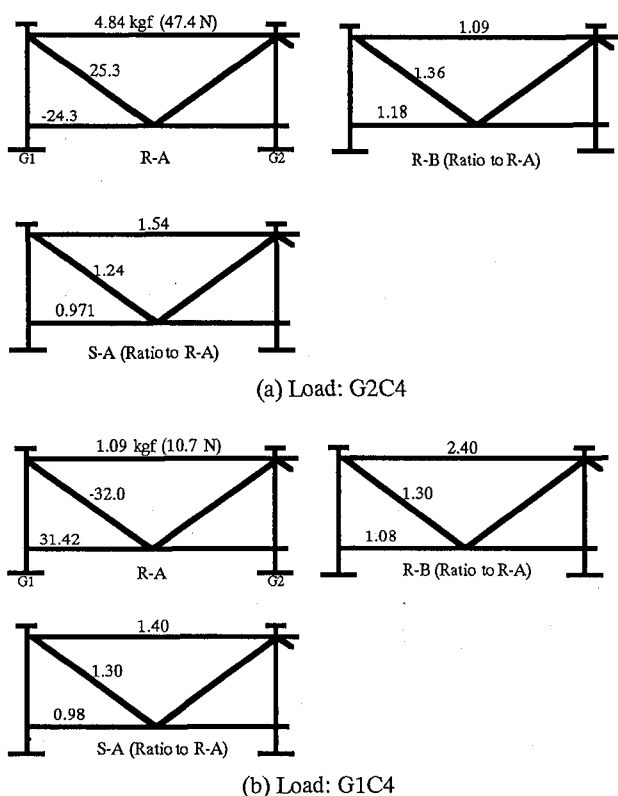


図-10 橋軸方向1/2モデルによるC3対傾構部材の軸力

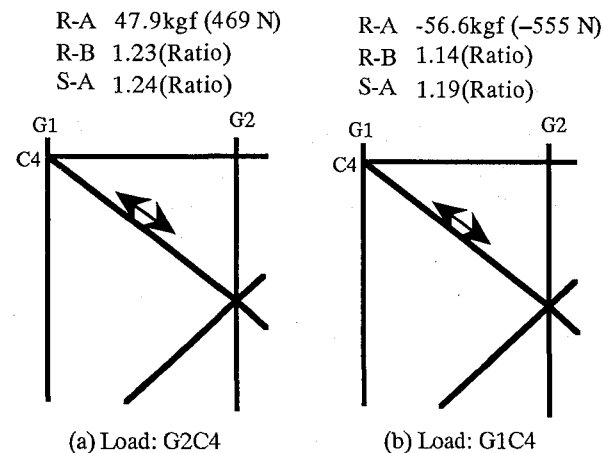


図-11 橋軸方向1/2モデルによるC3とC4の間に配置された下横構部材の軸力

(a)図は荷重位置がG2C3の場合、(b)図は荷重がG2C4の場合である。この場合でも、モデルS-Aを用いれば、30%程度の誤差で下横構の軸力を推定できている。

図-10は橋軸方向1/2モデルによるC3対傾構の部材の軸力を示す。(a)図は荷重位置がG2C4の場合、(b)図は荷重がG1C4の場合である。図-11は橋軸方向1/2モデルによるC4とC3の間に配置された下横構の軸力を示す。(a)図は荷重位置がG2C4の場合、(b)図は荷重がG1C4の場合である。この場合も、モデルS-Aは、軸力の絶対値が小さい対傾構上弦材を除いて、R-Aに対してほぼ30%以内の誤差である。

4. 結 言

並列I桁橋の構造系式を検討することを目的とした有限要素解析モデルについて種々の検討を加えた。従来、数値解析解の妥当性は、実測値との比較によって行われてきたが、本研究では、可能な限りの詳細なモデル作成し、これによる数値解を参照解として、より簡易なモデルの妥当性を議論した。得られた主な結論は次の通りである。

- ・ 2次部材の部材力を評価するためには、部材の偏心量を正確に考慮する必要がある。
- ・ 偏心を考慮して対傾構、横構部材を棒部材に置き換えた場合、本研究の範囲では、全ての鋼部材を板要素でモデル化した詳細モデルによる解（参照解）に対して、おおむね30%以内の誤差でそれらの軸力を評価すること可能であった。
- ・ 上で述べたように棒要素を用いた場合、部材偏心を正確に取り込んだモデルを用いても30%程度の軸力誤差は避けられない。したがって、より簡易化されたモデルを用いた場合、大幅に精度が低下することが懸念される。本研究の範囲では、部材偏心を無視した場合(S-C)、2次部材の軸力予測誤差は50~60%程度にまで増大した。また、そのような簡易なモデルによる解析結果に基づいて、たとえ疲労寿命予測を行ったとしても重大な誤差が混入するので注意が必要である。

文献7)においてなされた、よりシンプルな橋梁構造系の検討に対しては、モデルS-Aを基礎とする解析モデルを使用している。

なお、本研究で簡易モデルと称するS-Aの場合で、全橋を解析するのにCPU時間で約70分、経過時間では約40時間（仮想記憶を使っているのでデータのI/O時間が多大）であった。参照解モデルR-Aの場合は、1/2橋モデルであるが、計算時間はその2倍以上を要した。

謝 辞： 本研究は、首都高速道路公団の技術開発プロジェクトとして行われたものである。川鉄エンジニアリングの福田源太郎氏、下見成明氏、川鉄情報システムの三宅章太氏、梶原堅生氏、木暮泰輔氏には数値解析実施に対して多大なる尽力を頂いた。また、土木学会鋼構造委員会新技術小委員会設計法WGのメンバーの諸氏には有益なコメントを頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Masuda, N., Miki, C., Kashiwagi, H. and Kaidoh, H.: Analysis of sway bracing members in composite-girder bridges, Proc. of JSCE, No.386/I-8, pp. 115-133, 1987.
- 2) 中井 博・黒山康弘・栄羽憲作・明橋克良: 疲労に着目したプレートガーダー橋二次部材取合部の応力測定結果について, 構造工学論文集, Vol. 35A, pp. 899-909, 1989.
- 3) 明橋克良・大塚久哲・佐賀弘一・辻 正樹: 並列I桁橋における対傾構および横構取付部の有限要素法応力解析, 土木学会第44回年次学術講演会(第I部門), pp. 450-454, 1989.
- 4) 中原俊之・吉田 均・杉浦邦征・渡邊英一: 実働荷重による鋼I桁橋の疲労強度と2次部材の効果に関する2, 3の検討, 土木学会第46回年次学術講演会(第I部門), pp. 400-401, 1991.
- 5) 大塚 勝・竹中裕文・佐藤哲也・和地輝雄: 下横構を省略したプレートガーダー橋の提案, 橋梁と基礎, 93-11号, pp. 33-39, 1993.
- 6) 21世紀の橋梁技術検討委員会: 橋梁の単純化に関する調査検討委員会報告書, (財)高速道路調査会, pp. 208-219, 1993.
- 7) 長井正嗣・藤野陽三・黒田充紀・山崎和夫・柄川伸一・下見成明: I桁橋の横方向補剛材撤去に伴う全体・局所変形挙動, 構造工学論文集, Vol. 42A.
- 8) 日本マーク株式会社, MARC K4, ユーザーズマニュアル, Vols. A~F, 1992.

付 録: 解析モデル開発過程での基礎的な検討の概要

(1) 要素の基本特性の検討

20節点立体要素の精度の検証. 等分布荷重を受ける辺長2m厚さ22cmの単純支持正方形版に対して, 各辺2分割, 厚さ方向1分割の粗いモデルと, 各辺20分割, 厚さ方向3分割の細分割モデルを作成して, たわみを比較したところ, その差は2.8%であった. これにより, 20節点要素を用いれば, 床版を1層分割で相当に粗い分割でモデル化しても十分な精度を確保できることを確認した.

(2) 下フランジを棒要素に置き換えることの妥当性の検証

主桁1本を取りだして検討した. すべてシェル要素のモデルと下フランジを棒要素で置き換えたモデ

ルの結果を比較した. 鉛直荷重, 水平荷重, 偏心荷重(桁にねじりが生じるように载荷)に対して, 2つのモデルの変形はほぼ完全に一致することを確認した.

(3) 部分構造モデルによる分配横桁, 対傾構のモデル化と要素分割に関する検討

特に対傾構部材とガセット部を棒要素で置き換える場合のモデル化の方法について重点的に検討した. 図-A1は, 中間対傾構部の詳細部分モデル(これは図-3に示すものよりさらに細分割している)と簡易部分モデルを示している. この種の一連の部分モデルによるチェック計算では, 対傾構(または横構)取付部のガセットプレートは, 垂直補剛材(または腹板)に沿って取り付けられる剛な棒としてモデル化が可能であることが確認された. 棒要素を使った簡易部分モデルによる2次部材力が, 詳細部分モデルによるそれと高々数%の差しかないことを確認し, その上で, 簡易部分モデルをほぼそのままの形で, 全体簡易モデル(S-A)に持ち込んだが, 本文に示すように全体詳細モデル(R-A)との差は30%程度まで拡大してしまった. 分配横桁に関しても同様な部分モデルを作成してメッシュの収束性を確認した.

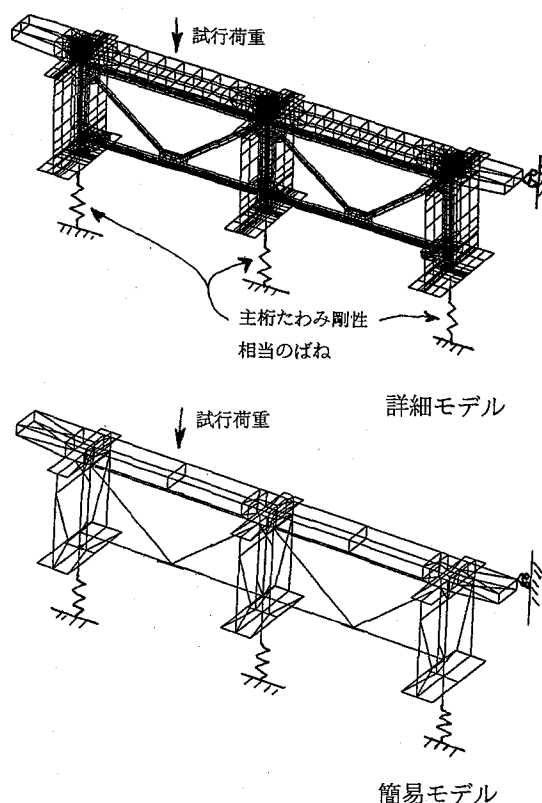


図-A1 部分モデルによる部材の簡易モデル化の検討
(中間対傾構部の例)

(1995年9月18日受付)