

# 中間横桁を省略した狭小箱桁橋の 3次元変形挙動の解析的検討

志村勉<sup>1</sup>・辻角学<sup>2</sup>・依田照彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 川田工業(株) 橋梁事業部 新事業企画室 (〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11)

<sup>2</sup>正会員 川田工業(株) 橋梁事業部 新事業企画室 (〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11)

<sup>3</sup>フェロー 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

「狭小箱桁橋」は従来の箱桁橋に比べ、ウェブ間隔を狭小化することにより縦リブ・横リブを大幅に削減し、併せて床版を強化することで縦桁も省略した構造である。本構造は上記の特徴から床版支間長が大きくなるという点では、2主桁橋などの少数主桁橋と同様に長支間床版の革新的な技術が要求されるが、主桁のねじり剛性などの性能が異なるため、設計上の多くの点で2主桁橋に比べて優れていると考えた。そこで全体挙動の把握と、横桁の省略・簡素化を一つの到達点としたさらなる構造の合理化を目指して、立体 FEM 解析を用いた検討を行った。さらに、床版の長支間化によって床版および床版と主桁の接合部に生じる作用力について、2主桁橋との比較を交えながら構造上の安定性を検証した。

**Key Words** : narrowed box girder bridge, finite element method, crossbeam omission, shear connector

## 1. はじめに

橋梁建設費の削減に向けた検討がここ数年で急速に展開されており、鋼橋の分野においては2主桁橋が経済性に優れるとの判断から既に数橋が架橋された<sup>1)</sup>。

しかしながら、2主桁橋は桁の輸送に関わる桁高の制約を受け、大きな支間長に対しては不経済となり<sup>2)</sup>、また地震時の橋軸直角方向の変形に付随する床版の引張応力なども考慮すると、その適用支間長は60m~70m程度までと考えられる。

また、床版と鋼桁の接合部(ずれ止め)に発生する様々な力に対しては、依然として十分な知見やデータが得られていないという問題もあり、一般的な普及には若干の抵抗があることは否めない。そのため、確実な安全性が保証でき、支間長や幅員の拡大、さらには曲線などの線形条件も含めた適用範囲を拡大しうる、経済性の高い橋梁を模索する必要があった。

そこで、上記の要求に見合った構造として箱桁に着目することにした。

一般的に、箱桁橋はI桁橋と比べて以下のような多くの長所を有すると考えられる。

- ◆ I桁より長い支間長に対応できる
- ◆ 曲線橋への適応度が高い
- ◆ 送り出し架設時などの安定性に優れる
- ◆ 主桁の桁高をI桁より低くできる

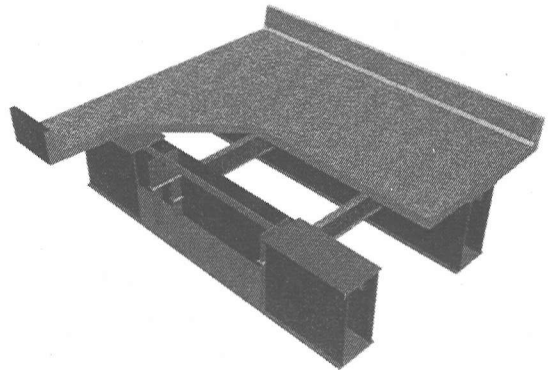


図-1 狭小箱桁橋イメージ図

さらに床版に発生する応力や、主桁と床版間のずれ止め等に生じる力に対しても、箱桁橋はI桁橋に比べて有利であると考えられる。

以上のことをふまえて、箱桁橋の合理化としてウェブ間隔(以下箱幅と呼ぶ)を狭くすることで縦リブと横リブを大幅に削減し、併せて床版の強化により縦桁を省略することで、桁製作費に大きな影響を与える材片数、部材数および溶接延長などを大幅に削減することが可能となる「狭小箱桁橋」(図-1参照)を開発した<sup>3),4),5)</sup>。詳しくは文献3),4),5)に譲るが、狭小箱桁橋は縦リブ数の低減のみならず横リブの省略によって、桁製作に関わる材片数の削減に大きく寄与し、主桁内のリブ材片数の総数は30分の1以下となる。

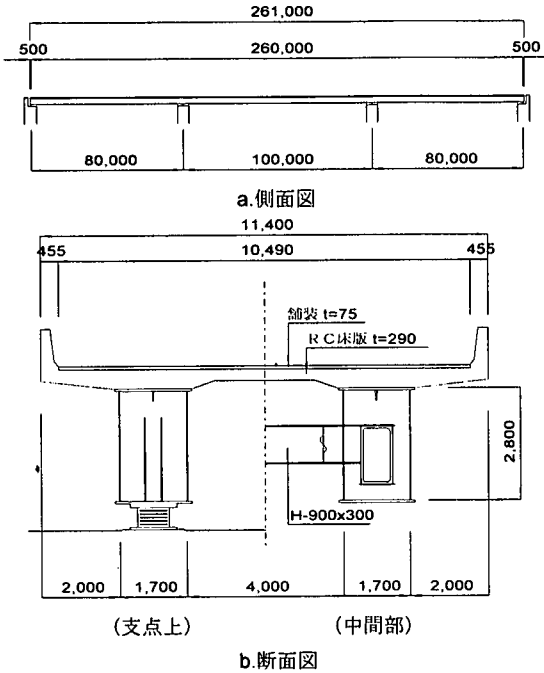


図-2 解析対象橋梁

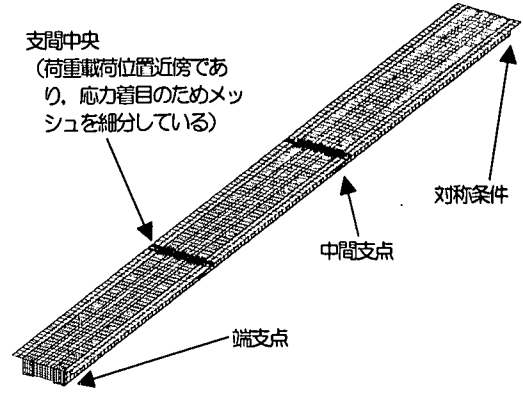


図-3 解析モデルメッシュ全体図

表-1 解析モデルのタイプ

モデル タイプ	各径間の中間横桁本数			備考(横桁)
	第1径間	第2径間	第3径間	
TYPE1-1	15本	19本	15本	5~6m間隔
TYPE1-2	1本	1本	1本	各径間に1本
TYPE1-3	—	—	—	中間横桁省略

さらに縦桁の省略によって減ずる製作加工や架設時の労務数低下により、通常の2主桁桁橋に対して建設コスト(上部工全体)を10~15%程度以上削減できるものである。

また、狭小箱桁橋は従来の箱桁橋に比べて主桁の狭小化と前述の縦桁省略のため、床版が厚くなるために荷重分配の床版依存度が高まり、横桁への負担が減少する。そのため横桁の省略あるいは少量化、小サイズ化などの合理化が期待できるものと考えられる。

そこで、設計で想定される種々の荷重に対して箱桁橋の全体挙動を明らかにし、横桁の省略もしくは簡素化に向けた基礎的な知見を得るため、全体モデルによる立体FEM解析を行った。また、床版および床版と桁を接合するジョイントに生じる応力など、各部の設計的な課題を抽出すべく、より詳細な部分モデルでの立体FEM解析を行った。

本論は、これらの解析結果を基に狭小箱桁橋の挙動についての知見と、横桁の省略もしくは簡素化の可能性を論じるとともに、狭小箱桁橋と2主桁橋の部分詳細モデルでの解析結果とを比較する中で、狭小箱桁の優位性と、2主桁橋の設計の留意点について論ずるものである。

なお、全体モデルによる立体FEM解析において、横桁本数の減少に対する横桁応力の変化量や横桁省略に伴う全体挙動などについての検討報告は文献6)でもなされているが、本検討は狭小箱桁橋の構造および適用支間長を対象とし検討項目をより発展させたものである。

## 2. 全体モデルの解析

### (1) 解析の目的

狭小箱桁橋は従来の鋼箱桁橋と比べ、大きな支間長に対しても従来の箱桁橋に比べ箱幅を狭くし、縦桁を省略しているため比較的厚い床版の使用を前提としている。そのため全体的な挙動は従来の箱桁橋の延長上にあり、課題は少ないと推測できる。

しかし、これまで2主桁橋の挙動については十分な検討・報告がなされてこなかったことや、箱幅の狭小化によるねじり剛性の低下がもたらす得失の確認を含めた挙動を把握することを目的とした。

また、横桁数の違いに対する変形・発生応力を確認するため、中間横桁を従来の箱桁橋で用いられている間隔(5m~6m)のもの、支間中央に1本のみ配置したもの、および中間横桁を省略したものの3タイプのモデルを準備した。

### (2) 解析モデル

解析で対象とする橋梁は3径間連続桁で、狭小箱桁橋の経済的適用支間長のほぼ最大<sup>4)</sup>である支間長100mを最大支間とする80m+100m+80mとし、一般の高速道路を想定して全幅員11.4mの狭小2主桁橋とした。この程度の幅員での狭小箱桁橋は、床版支間4mまでのRC床版として箱幅を1.6~1.7mとするケースと、製作性を考慮した最小箱幅である1.2mとして、4mを超える床版支間長に対してPC床版を用いるケースが考えられ、両者の建設コストは

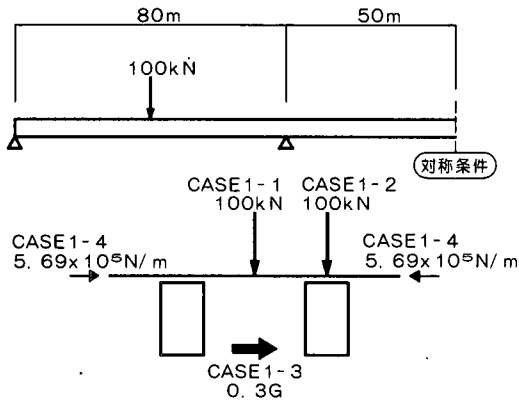


図4 荷重ケース

表-2 荷重ケース

CASE1-1	端径間中央・ 床版支間中央部に集中荷重 100kN
CASE1-2	端径間中央・ 片主桁に集中荷重 100kN
CASE1-3	地震水平荷重 0.3G
CASE1-4	床版へのプレストレス荷重 2.0N/mm <sup>2</sup>

肉薄しているということが試算より解っている<sup>5)</sup>。ここでは、主桁が有するねじり剛性により横桁および床版への影響が大きくなる前者の断面を設定する。このときのRC床版厚は、道示の規定に準じて定めた。図-2に対象橋梁の側面図および断面図を示す。なお、狭小箱桁では床版ハンチ部のコンクリートは箱幅が狭いことや、床版型枠の施工性、さらには床版と主桁の接合力を強化する目的で上フランジ全面に打ち下ろす構造とした。

解析モデルは中央径間の支間中央を対称条件とした全長の1/2の長さで作成した。解析モデルのメッシュ全体図を図-3に示す。なお、モデルは床版・鋼桁を含むすべてをシェル要素（床版については厚板としてせん断変形を考慮）で構成し、床版と鋼桁には中立軸を考慮したオフセット要素を用いて完全合成とした。

前述のように、横桁数の違いによる全体挙動や各部での応力の相違を把握するため、中間横桁本数の異なる3タイプのモデルを作成し、従来通りとなる横桁間隔5~6mのモデルをTYPE1-1、中間横桁を各径間中央に1本のみとしたものをTYPE1-2、中間横桁を完全に省略したものをTYPE1-3とした（表-1）。参考までに、TYPE1-1における総節点数は10271、総要素数は13468であった。

### (3) 荷重ケース

各タイプごとのモデルによる挙動と発生断面力の比較

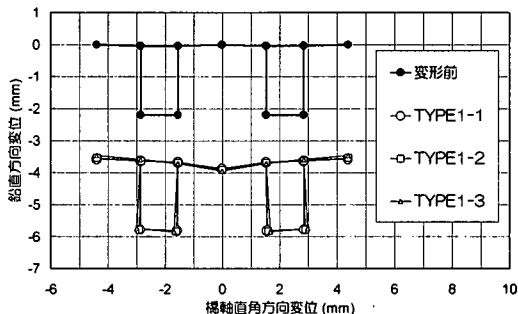


図-5 CASE1-1 支間中央断面の変位

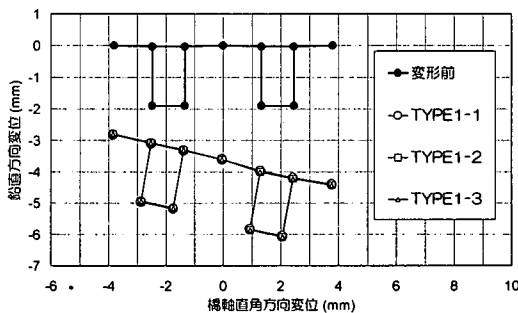


図-6 CASE1-2 支間中央断面の変位

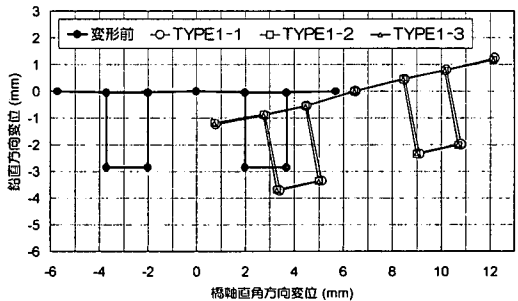


図-7 CASE1-3 支間中央断面の変位

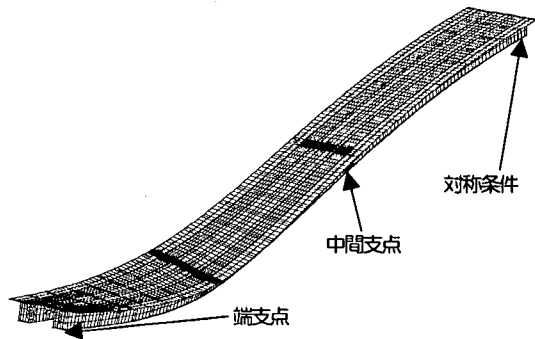


図-8 CASE1-2 変形図

を行うため図-4および表-2に示す荷重ケースを設定した。

主桁間に載荷される荷重や、一方の主桁上に載荷される偏載荷重、さらに地震などの横方向荷重に対して、変形や各部の発生応力に着目した。このときCASE1-1・CASE1-2は各荷重での挙動を明確にするため一つの集中荷重とし、設計荷重との整合性を結果から推測しやすいよう、T荷重の一単位荷重とな10kNとした。さらに、また、床版の強化策として注目されるプレストレストコンクリート床版（以下、PC床版と呼ぶ）に対し、主桁のねじり剛性や横桁によりプレストレス力が十分に導入できない懸念があるため、床版へのプレストレス荷重も載荷し、導入量について本モデルで確認した。

#### (4) 変形・挙動

図-5～図-7にCASE1-1～CASE1-3に対する端径間中央部の変位を横断面図で示す。各々のグラフに荷重載荷前と荷重載荷によるTYPE1-1～TYPE1-3の変形を比較表示した。図における縦軸・横軸ともに変位量を示している。また参考として、図-8にTYPE1-1・CASE1-2における解析モデルの全体変形図を示す。このときの最大たわみは3.87mmである。

CASE1-1では、主桁間の床版が曲げ変形するのに対応して、主桁がハの字形に下方が外へ開く変形を伴う（図-5参照）。また各タイプを比較すると、鉛直変位の差異はほとんど無いものの、水平変位はTYPE1-1に対してTYPE1-2、TYPE1-3がそれぞれ2.6倍、7.1倍となった。ただし、横桁省略構造であるTYPE1-3で0.15mm程度（鉛直変位の1/21）と僅かな数値であった。

CASE1-2における変形は、偏載荷重に対して荷重が載荷されない主桁の鉛直変位量が、載荷された主桁の約8割（78%）に達しており、高い分配性能が伺える（図-6参照）。また、横桁の本数による差異はほとんど生じていない。一方、主桁のねじり剛性が非常に小さい2主I桁橋で同様の載荷を行うと、載荷されない主桁に生じる鉛直変位量は小さな値であることが知られている<sup>7)</sup>。このことから分配性能は床版の曲げ剛性に加えて主桁のねじり剛性が大きく寄与していることが理解できた。

CASE1-3による挙動の差はほぼ無いと言える（図-7参照）。僅かな違いは横桁数の違いによる自重の差であり、横桁数が多いほど変位量が大きかった。

以上のことから、床版剛性と主桁のねじり剛性が荷重分配性能を決定するものであり、横桁の寄与は低いと推定できる結果となった。

#### (5) 床版および横桁の断面力

表-3、表-4にそれぞれ床版の最大曲げモーメントおよび横桁の曲げモーメントと軸力を把握するために、上下フランジの最大軸力を示す。なお、対象となる荷重の変形状態

表-3 床版上縁で橋軸直角方向の発生最大曲げモーメント (N・mm/mm)

		正曲げ	負曲げ
CASE1-1	TYPE1-1	21794 (1.00)	-10358 (1.00)
	TYPE1-2	22185 (1.02)	-10055 (0.97)
	TYPE1-3	23101 (1.06)	-8900 (0.86)
CASE1-2	TYPE1-1	1820 (1.00)	-2166 (1.00)
	TYPE1-2	2433 (1.34)	-2771 (1.28)
	TYPE1-3	2840 (1.56)	-3165 (1.46)
CASE1-3	TYPE1-1	49062 (1.00)	-49062 (1.00)
	TYPE1-2	49329 (1.01)	-49329 (1.01)
	TYPE1-3	49278 (1.00)	-49278 (1.00)

括弧内にTYPE1-1の値に対する割合を示した。

表-4 横桁フランジでの発生最大応力 (N/mm<sup>2</sup>)

		引張	圧縮
CASE1-1	TYPE1-1	0.200 (1.00)	0.103 (1.00)
	TYPE1-2	0.430 (2.15)	0.174 (1.69)
CASE1-2	TYPE1-1	0.311 (1.00)	-0.271 (1.00)
	TYPE1-2	0.385 (1.24)	-0.343 (1.27)
CASE1-3	TYPE1-1	0.587 (1.00)	-0.587 (1.00)
	TYPE1-2	0.784 (1.34)	-0.784 (1.34)
CASE1-4	TYPE1-1	0.590 (1.00)	-0.604 (1.00)
	TYPE1-2	0.932 (1.58)	-0.445 (0.74)

括弧内にTYPE1-1の値に対する割合を示した。

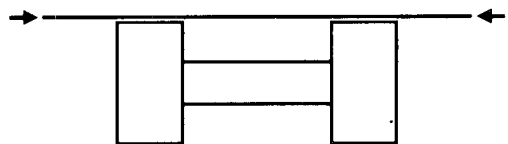
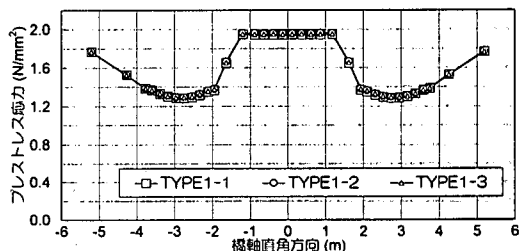


図-9 CASE1-4 床版導入プレストレス力

は前頁図-5～図-7のものであり参照されたい。

CASE1-1では、中間横桁本数をTYPE1-1からTYPE1-2、さらにTYPE1-3へと減じるに従い、横桁による主桁の回転拘束度が低下するため、床版支間中央における正の曲げ

モーメントが増加し、逆に主桁近傍の床版に発生する負の曲げモーメントが減少した。しかしながら、横桁を省略した TYPE1-3 でも床版支間部の正の曲げモーメントの増加率は6%、主桁近傍の負の曲げモーメントの減少は14%であり、増減は僅かであった。

一方、横桁の断面力はTYPE1-1とTYPE1-2で比較すると上下フランジの値はほぼ2倍に増加した。これは、横桁が僅かに負担している断面力に対し、横桁数の減少によってその断面力が集中したことによる。ただし、中間横桁数を15本から1本にしても、2倍に増加しているに過ぎず、あらためて荷重分配における床版の高い依存度が確認できた。

CASE1-2における床版曲げモーメントは、横桁本数をTYPE1-1からTYPE1-2へと減じることにより両主桁近傍で約3割増加し、中間横桁を省略するTYPE1-3では約5割増加した。また、横桁の断面力もTYPE1-1からTYPE1-2とすることで約3割増加した。しかし、解析に用いた載荷荷重と設計荷重との相違を勘案しても解析結果から得られた断面力は設計上の課題とは成り得ない小さな値であった。

CASE1-3における床版曲げモーメントの各タイプによる差は僅かであるが、横桁の断面力はTYPE1-1に比べてTYPE1-2が4～5割増加した。CASE1-1と同様に、横桁が僅かに負担している断面力に対し、横桁数の減少によって1本のみである横桁に集中したことによると推測できる。また、応力レベルは非常に小さく設計上の課題とは成り得ないと考えられる。

CASE1-4では床版へのプレストレス導入量と横桁・上フランジへの流出量を確認した(図-9参照)。その結果、床版プレストレス(圧縮力)は主桁上ではハンチによる床版厚の増と上フランジのため3～4割減少するが、設計上で必要となる床版支間部および床版張出し部には有効にプレストレスが導入された。また、床版へのプレストレス導入量  $2\text{N/mm}^2(20\text{kgf/cm}^2)$  に対して横桁の軸力は、 $0.8\text{N/mm}^2(8\text{kgf/cm}^2)$  に過ぎなかった。ただし、この結果はH-900(形鋼)程度の横桁を主桁高の中間付近に設置していることを前提としている。

以上のことにより、荷重ケースによっては横桁を省略することで床版の断面力が増加するが、その数値は比較的低く設計上の課題となるレベルではない。

したがって本検討の範囲において狭小箱桁橋は各種荷重に対して設計上の課題は確認されなかった。また、全体挙動における横桁の寄与率は応力面から見ても非常に低いものであると考えられる。

### (6) 解析結果から得られた知見

- i) 偏載荷重に対して、荷重載荷されない桁の変位量が載荷直下の桁の約8割に及び、非常に高い分配性能

表-5 解析モデルのタイプ

TYPE2-1	2主桁桁・箱幅 B=1.7m	図-2 参照
TYPE2-2	2主桁桁・箱幅 B=1.2m	図-10 参照
TYPE2-3	2主桁	図-10 参照

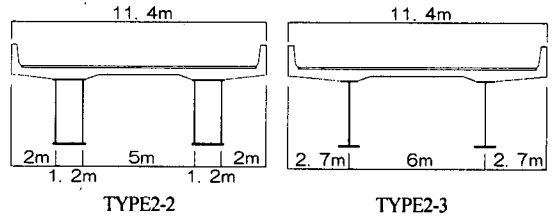


図-10 解析モデルTYPE2-2,TYPE2-3の理想断面

を示した。

- ii) 変形に対する横桁の機能は小さく、床版の曲げ剛性の依存度ははるかに大きい。したがって横桁の有無による差はほとんど無い。
- iii) 中間横桁の省略もしくは減少による床版および横桁の応力増加量は数値的に非常に小さい。
- v) 床版プレストレスの導入効果は、H-900程度の横桁を主桁高さの中間位置に配置した場合、床版支間部と床版張出し部に有効に作用することが確認できた。

### 3. 部分モデルの解析

#### (1) 解析の目的

2主桁橋が経済性の高い構造として普及しつつあり、これまでも様々な研究・検討が報告されている。しかし、ジベル引き抜き力に関しては未だ明確な把握に至っていないように思われる。さらに2主桁橋では、宿命的に大きな断面力が床版に生じるという課題もある。これらの課題を克服する構造として狭小箱桁橋に期待するところである。

しかし、解析にあたり全体モデルはモデル長が130m(1/2長さ)と長いために要素分割が粗く、ジベルや床版などの忠実なモデル化が困難となる。よって上記の課題に対し、より詳細な検討を行うため、モデル長10mの詳細な部分モデルを作成して解析を行うこととした。このとき、道示で床版が1方向性版として規定される辺長比1:2程度となり、箱桁橋のダイアフラムおよび2主桁橋の横桁により部材が2パネル分となる寸法として10mをモデル長とした。部分モデルの解析目的は以下の通りである。

#### a) ジベルの引き抜き力の把握

箱桁橋およびI桁橋の床版と上フランジを接合するジ

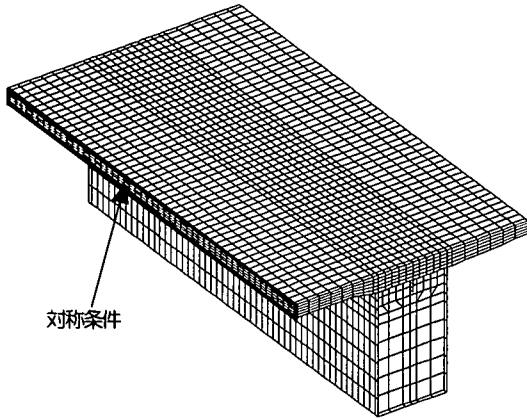


図-11 解析モデル TYPE2-1

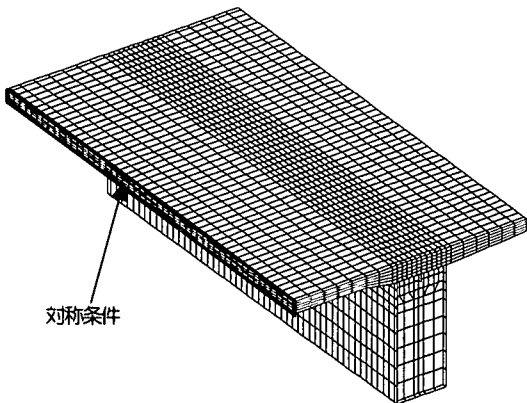


図-12 解析モデル TYPE2-2

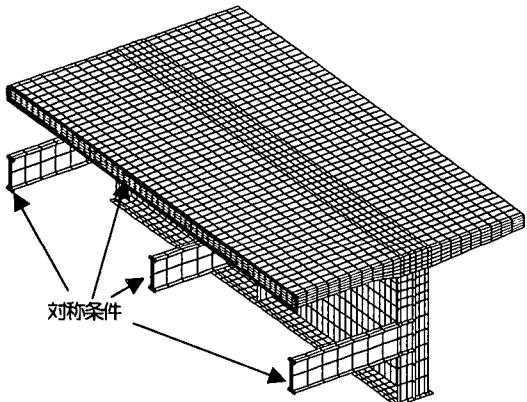


図-13 解析モデル TYPE2-3

ベルに生じる軸力（引き抜き力）についての知見を構築する。

**b) 床版断面力の定性的把握**

箱桁橋は、箱桁自体のねじり剛性が高いために床版支間部両端の回転変形が拘束され、床版支間部の床版曲げモーメントが小さくなると予想される。したがって、これらの

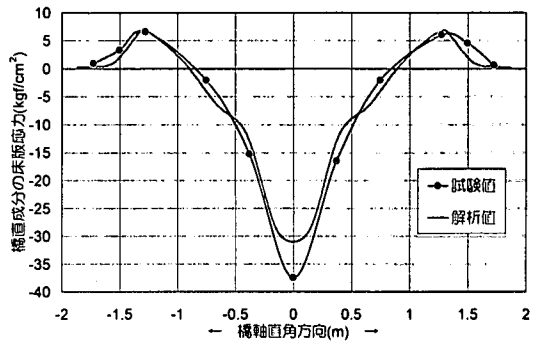


図-14 床版応力-橋軸直角方向(kgf/cm<sup>2</sup>)

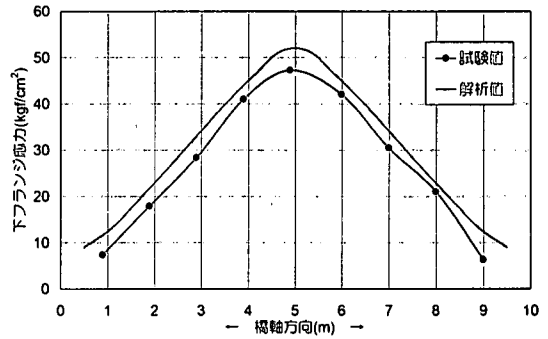


図-15 下フランジ応力(kgf/cm<sup>2</sup>)

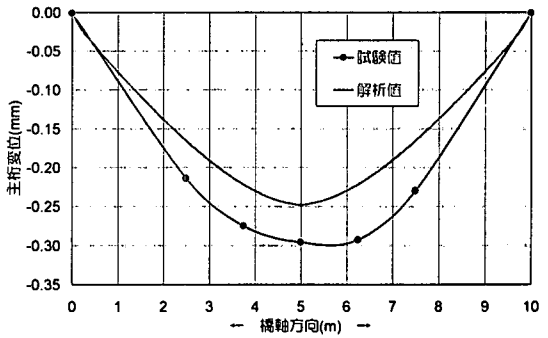


図-16 主桁鉛直変位(mm)

床版曲げモーメントにおける主桁の拘束度と、発生する曲げモーメント分布を確認する。

なお、これらの解析にあたっては、既の実績のある2主桁橋と比較検討することで、お互いの構造的特徴を把握するとともに、狭小箱桁橋に期待される床版と主桁の接合部に生じる作用力の低減効果を確認することを意図した。また、狭小箱桁橋の最小箱幅となるウェブ間隔 1.2m のモデルとの比較も行った。比較対象断面を図-10 に示す。

**(2) 解析モデル**

部分モデルは全体モデルの対象橋梁の1部（10m分）を抜き出したモデルとした。また、表-5 に示すように3タイ

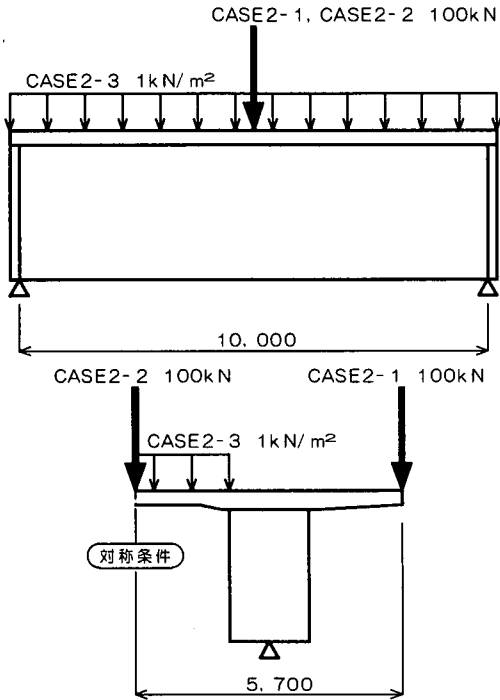


図-17 荷重ケース

表-6 荷重ケース

CASE2-1	幅員端に集中荷重 100kN
CASE2-2	幅員中央に集中荷重 100kN
CASE2-3	床版支間に分布荷重 1kN/m <sup>2</sup>

プのモデルを作成し、橋軸方向の断面中心面を対象条件を有する1/2モデルとした(図-11～図-13参照)。

構成する要素は床版を5層のソリッド要素、鋼桁をシェル要素とし、床版と鋼桁の合成には3方向のパネ要素を用いた。パネ要素の配置は、橋軸方向に20cm間隔、橋軸直角方向に対してTYPE2-1・TYPE2-2は1列9本(TYPE2-1はウェブ上17cm間隔で各3本、ウェブ間34cm間隔で3本・TYPE2-2はウェブ上12cm間隔で各3本、ウェブ間24cm間隔で3本)、TYPE2-3は1列5本15cm間隔とした。D22のスタッドジベル1本分のパネ定数には水平方向:  $3.0 \times 10^5 \text{ N/mm}$ 、鉛直方向:  $4.0 \times 10^5 \text{ N/mm}$ を設定した。なお、ジベルの本数は各断面に対して試設計を行い決定した。また、箱桁モデルでは中間ダイアフラムを中央に一つ設けるが横桁は省略した。2主桁モデルでは5m間隔に3本の横桁を配置した。

### (3) 解析モデルの妥当性の確認

解析的検討を行うにあたって、解析モデルの妥当性を確認しておくことは重要である。そのため、文献7)にて行っ

た1/2スケール供試体(2主I桁橋、幅員4m、支間長:10m)の試験データと、本検討で用いた解析モデル(床版:厚さ方向に4層以上のソリッド要素、主桁:シェル要素、ジベル:パネ要素)で再現したモデルによる解析結果を比較したところ、主桁の橋軸方向応力および床版の橋軸直角方向応力で両者はほぼ一致した(図-14、図-15参照)。また、主桁および床版の鉛直変位では解析値が試験値に比べて2、3割下回った(図-16参照)。この理由は明確ではないが、試験体の床版橋軸直角方向にクラックの発生が確認されており、これによる剛性の低下が原因の一つとも考えられる。

また、全体モデルの解析結果に基づいて、箱桁モデルでは横桁を省略したが、この妥当性を検証するため横桁を設置したモデルでも同様の解析を行い、ジベル引き抜き力や床版曲げモーメントに差異がないことを確認した。

したがって、本検討に用いた解析モデルは妥当であると判断できる。

### (4) 荷重ケース

解析目的に合わせ、床版と主桁の接合部に生じる力を抽出するため、2ケースの集中荷重100kN(CASE2-1:支間中央でかつ幅員の両端に載荷、CASE2-2:支間中央でかつ幅員中央に載荷)および床版支間部の床版曲げモーメント分布を把握するため、等分布荷重1kN/m<sup>2</sup>(CASE2-3:床版支間部のみ)を載荷した(図-17、表-6参照)。

### (5) ジベル引き抜き力(鉛直パネ要素の軸力)

CASE2-1におけるジベル引き抜き力分布を図-18～図-20に示す。これらは片側の主桁上フランジに配置したパネ要素の発生軸力を針状の立体グラフで表したものである。図-18、図-19(引張:正、圧縮:負)に見られるとおり、ウェブおよびダイアフラム直上のパネ要素で発生軸力が卓越している。つまり、上フランジの板曲げ剛性がコンクリート床版に比べて非常に低いため、上フランジ下面に裏当て材(ウェブ、ダイアフラムなど)を有する位置周辺のパネ要素(ジベル)で力の伝達が行われたものと考えられる。このジベル引き抜き力の分布傾向は箱幅1.2m(TYPE2-2)のモデルにおいても同様であり、ジベル引き抜き力の値は箱幅にほぼ反比例して大きくなった。

ジベルに生じる引き抜き力は表-7に示すようにTYPE2-1、TYPE2-2においてCASE2-1でそれぞれ3.83kN、4.26kNであり、相当する静的なジベルの引張応力はそれぞれ10.1N/mm<sup>2</sup>(103kgf/cm<sup>2</sup>)、11.2N/mm<sup>2</sup>(114kgf/cm<sup>2</sup>)と低く、箱桁橋で発生するジベル引き抜き力は設計上の課題とはなりにくいレベルであることが確認できた。

また、分布図を示さないが、CASE2-2における箱桁モデルのジベル引き抜き力分布は、CASE2-1の正負逆転の分布となっており、CASE2-1同様に応力レベルは低い(ジベル

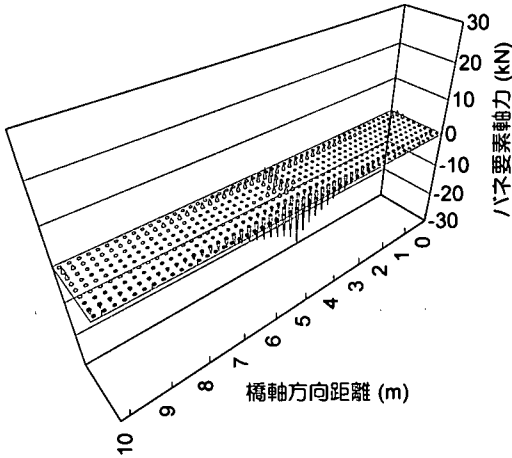


図-18 ジベル引き抜き力分布 TYPE2-1

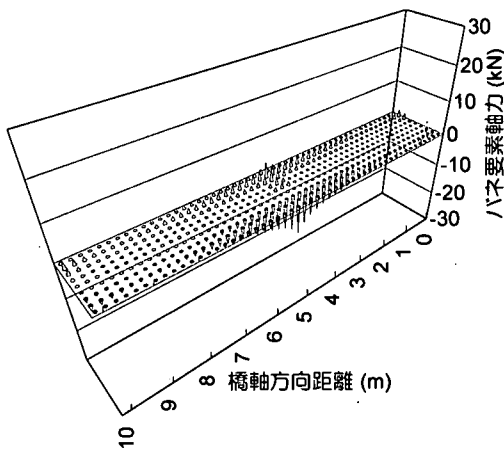


図-19 ジベル引き抜き力分布 TYPE2-2

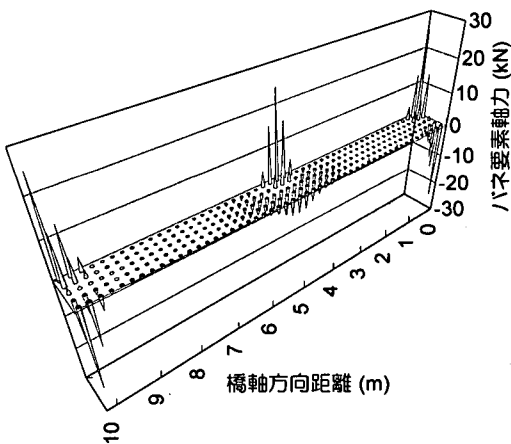


図-20 ジベル引き抜き力分布 TYPE2-3

引き抜き力は表-7に示す)。

次にTYPE2-3(2主桁I橋モデル)は、図-20に示すとおりジベル引き抜き力(パネ要素軸力)が箱桁モデル

表-7 最大ジベル引き抜き力(kN)

モデルタイプ	CASE2-1	CASE2-2
TYPE2-1	3.83	2.26
2主箱桁・箱幅 B=1.7m	(1.00)	(1.00)
TYPE2-2	4.26	3.16
2主箱桁・箱幅 B=1.2m	(1.11)	(1.40)
TYPE2-3	25.43	15.07
2主I桁	(6.64)	(6.67)

TYPE2-1, TYPE2-2 に比べて局部的に卓越していることが解る。これはI桁ではウェブラインが1本のみであるため、箱桁のようにウェブライン2本で圧縮・引張を分担する挙動とはならず、卓越が横桁位置の垂直補剛材上の狭い領域に集中したと推測される。その最大値は25.43kNと箱桁モデル(TYPE2-1)の約7倍であり、相当する静的なジベル引張応力は $66.96\text{kN/mm}^2$ ( $682.3\text{kgf/cm}^2$ )に達した。よって、2主桁橋では横桁位置の垂直補剛材付近に配置するジベルの設計には、特に注意すべきであると考えられる。

ただし、上記に述べた結果は、定性的な比較検討を目的としており、数値がそのまま設計指標となるものではないことを付記しておく。例えば、本解析で $4.0 \times 10^5 \text{N/mm}$ とした鉛直方向のパネ定数を低く設定する場合、ジベル引き抜き力は低減する。また、前述したように上フランジの板厚によって変化する板曲げ剛性を増加させた場合も、同様にジベル引き抜き力が分散して低減する。参考までにTYPE2-3(2主I桁橋モデル)でジベルのパネ定数を25000倍( $1.0 \times 10^{10} \text{N/mm}$ )にしたところ、ジベル引き抜き力の最大値は約2.5倍となった。

したがって、ここでは定性的な比較論としての判断を中心に行うべきと考える。

#### (6) 床版断面力

図-21～図-23は、CASE2-3における床版の曲げモーメント分布であり、それぞれ支点部・支間長の1/4点・支間中央での横断面を示すものである。また、床版支間部の両端を単純支持としたもの、および完全固定とした板の曲げモーメントも加えて表示している。

TYPE2-1(箱幅1.7mモデル)、TYPE2-2(箱幅1.2mモデル)における床版の曲げモーメントは、それぞれ図-21、図-22に示すとおり両端完全固定版に非常に近い値となり、主桁が床版両端の回転を十分拘束することが確認された。

TYPE2-3(I桁モデル)における床版の曲げモーメントは、図-23に示すように両端完全固定と両端単純支持の中間的な分布であった。また、横桁位置(支点上・支間中央)では主桁上で局部的に負の曲げモーメントが生じているが、床版支間の正の曲げモーメントは橋軸方向ではほぼ一定であることから、発生した負の曲げモーメントは床版を主



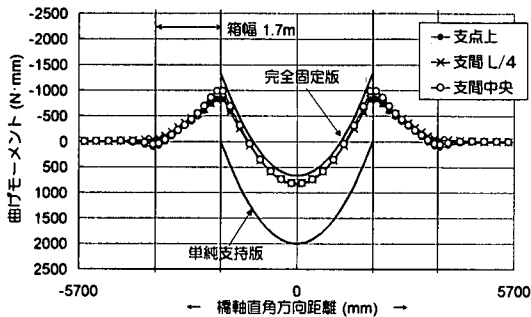


図-21 床板上縁の曲げモーメント分布 TYPE2-1

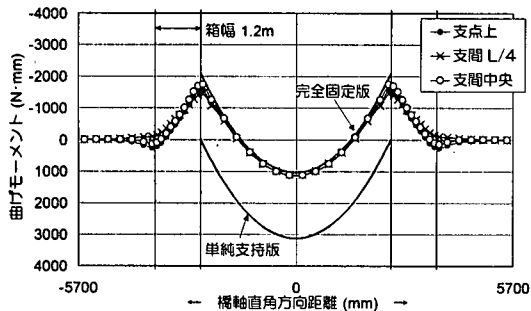


図-22 床板上縁の曲げモーメント分布 TYPE2-2

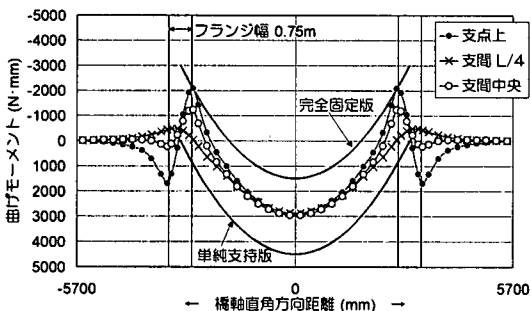


図-23 床板上縁の曲げモーメント分布 TYPE2-3

桁が拘束した結果ではなく、横桁と併せた垂直補剛材の影響による局所的なものであると推測される。

このように、2主桁橋では、主桁による床版の回転拘束度はあまり大きくなく、床版支間・床版厚・主桁寸法・横桁間隔など多くのファクターによって変化するものと考えられる。

TYPE2-1 と TYPE2-3 を比較すると、床版曲げモーメントの最大値は3.5倍になる。したがって同じ幅員の橋梁を想定した場合、床版支間や主桁の回転パネの違いにより、2主桁橋に比べて狭小箱桁橋の床版曲げモーメントは、非常に低い値となることが確認できた。

#### (7) 解析結果から得られた知見

i) 主桁フランジ上のジベルに生じる引き抜き力は、フランジ下面に力を伝える裏当て材があるところに集

中する。

- ii) ジベル引き抜き力は箱桁では2本のウェブラインで偶力として抵抗するが、I桁ではウェブと垂直補剛材の狭い領域に集中するため、概して大きな力となり、設計に注意を要する。
- iii) 箱桁橋の床版支間部に生じる床版曲げモーメントは、ほぼ両端完全固定版として評価できるが2主桁橋では単純支持板と完全固定版の間に位置する。

#### 4. まとめ

狭小箱桁橋を対象とした全体モデルによる立体 FEM 解析と、より詳細な部分モデルにおいて2主桁橋モデルとの比較を含めた立体 FEM 解析を行った結果、下記に示すような結論を導いた。

- (1) 狭小箱桁橋は、床版の大きな曲げ剛性と主桁のねじり剛性によって、非常に高い荷重分配性能を有することが確認できた。
- (2) 狭小箱桁橋は、中間横桁の有無による変形・挙動や各部応力の差異は小さいため、横桁の省略または簡素化の可能性が確認できた。ただし、中間横桁は完成状態での機能以外に、架設時や床版施工時に有用な部材となることも考えられ、これら施工法を提案した設計が求められる。
- (3) 耐久性を考慮した床版の強化策として優れる橋軸直角方向のプレストレスの導入<sup>8)9)</sup>に対して、主桁高の中間程度の高さに900mm程度の桁高を有する横桁を設置した狭小箱桁橋では、十分なプレストレス導入効果が期待できることが確認できた。
- (4) 2主桁橋に比べて、狭小箱桁橋は主桁幅相当分の床版支間長の低減と、主桁のねじり剛性に伴う床版支間部の両端を拘束する性能の違いにより、床版支間部に生じる曲げモーメントは非常に小さいことが確認できた。このことから床版の合理的な設計や広幅員への展開が期待できるものと考えられる。
- (5) 狭小箱桁橋は、床版と主桁を接合するジベルの引き抜き力など今回の解析に用いた荷重と実際の差を勘案しても、設計時に大きな課題となり得ないレベルの力であることが確認できた。また、引き抜き力が卓越するのはウェブやダイヤフラムなど上フランジの下方に作用力を伝達する部材が存在するところに限定されるため、設計時にそれらを念頭にジベル配置やジベル構造を選択することで、より高い長期健全度が期待できると思われる。
- (6) 2主桁橋ではウェブと垂直補剛材のごく限られた領域のジベルで引き抜きに抵抗せざるを得ず、垂直補剛材上へのジベル設置を避けて、引き抜き力を分散させ

ることや、ドイツなどで実施されている引抜き力に抵抗させることを目的とするジベル<sup>10)</sup>を別途設置するなど、十分な注意を必要とすることが確認できた。

以上のように、狭小箱桁橋においても海外の箱桁橋<sup>11)</sup>に見るような横桁の省略を含む簡素化(少本数化・小サイズ化)および広幅員への適用の可能性を見出すことができた。

狭小箱桁橋が、当初の目的である安全性が高く2主桁橋の適用範囲をより拡大させた、経済性の高い橋梁形式となり得ると期待するものである。

本検討が我が国の橋梁建設事業において、経済性・耐久性等の要求に適った構造の発展の一助となれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) たとえば 高橋昭一, 志村勉, 木村宏, 小西哲司: P C床版2主桁橋「ホロナイ川橋」の現場施工, 橋梁と基礎, Vol.30, No.3, pp.2-7, 1996.3.
- 2) 志村勉, 安川義行: 2主桁橋の主桁作用の特徴と最適桁高について, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集 I, pp.44-45, 1998.10.
- 3) 宮森雅之, 志村勉, 松井邦人: 鋼箱桁橋の箱幅狭小化による補剛材減少量の検討, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集 I, pp.584-585, 1997.10.
- 4) 宮森雅之, 志村勉, 松井邦人: 鋼箱桁橋の箱幅狭小化による建設コストの低減効果と適用支間長について, 土木学会第

- 53 回年次学術講演会講演概要集 I, pp.56-57, 1998.10.
- 5) Shimura,T., Tsujikado,M. and Yoda,T. : Increased Cost Effectiveness and Durability Achieved Through Narrowed Box Girder Bridge, Proceedings of 16<sup>th</sup> Annual Meeting International Bridge Conference, pp.181-188, 1999.6.
- 6) 土木学会鋼構造新技術小委員会: 最終報告書(設計法研究), pp.103-124, 1996.5.
- 7) 高橋昭一, 志村勉, 橋吉宏, 小西哲司: P C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.
- 8) 西川和廣: ライフサイクルコストを最小にするミニマムメンテナンス橋の提案, 橋梁と基礎, Vol.31, No.8, pp.64-72, 1997.8.
- 9) 松井繁之: 床版の技術開発, 橋梁と基礎, Vol.31, No.8, pp.84-94, 1997.8.
- 10) BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR : STAHL-BETON-VERBUNDBAUWEISE, DOKUMENTATION 1997.
- 11) 飯岡豊, 志村勉: 橋梁新技術のヒントを求めるヨーロッパの旅, 橋梁と基礎, Vol.31, No.4, pp.45-49, 1997.4.
- 12) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 1996.12.
- 13) 志村勉, 辻角学, 依田照彦: 狭小2主桁橋の横桁省略の可能性と全体挙動の把握, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集 I, 1999.10.
- 14) 辻角学, 志村勉, 依田照彦: 箱桁・I 桁のジベル引き抜き力および床版断面力に関する比較検討, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集 I, 1999.10.

(1999. 11. 15 受付)

## ANALYTICAL STUDY OF THREE DIMENSIONAL STATICAL BEHAVIOR OF NARROWED BOX GIRDER BRIDGE

Tsutomu SHIMURA, Manabu TSUJIKADO and Teruhiko YODA

By narrowing the box girder width, it is expected that overall costs will effectively be reduced. Moreover, by increasing slab thickness, it is possible to omit stringers in addition to decrease the box girder width. Thus box girder fabrication productivity and bridge durability are greatly improved. If torsional rigidity of the box girder is decreased and the floor slabs became thicker, the amount of required cross-beams can be also reduced.

This paper is concerned with an analytical study focusing on the following points: (1) the validity of omitting cross-beams in the narrowed box girder bridges and (2) in which MSC-NASTRAN was utilized throughout to conduct 3D finite element analysis.