

橋梁 3Dモデルのキャンバー自動変形処理

～キャンバー処理の自動化に関する一提案～

A Proposal on Method to Deform 3D-MODEL

本摩 敦

Atsushi HOMMA

川田工業(株)橋梁事業部富山技術部
技術課

松原 哲朗

Tetsuro MATSUBARA

川田テクノシステム(株)開発部次長

渡辺 滉

Hiroshi WATANABE

川田工業(株)橋梁事業部技術総括部長

越後 滋

Shigeru ECHIGO

川田工業(株)技術開発本部長

熊谷 輝重

Terushige KUMAGAI

川田工業(株)橋梁部
3次元CADプロジェクト

佐藤 真也

Shinya SATO

川田工業(株)橋梁部
3次元CADプロジェクト

The time has come to introduce CALS and STEP, new concepts for the effective use of digital data, to the Japanese construction industry. STEP covers not only the exchange of CAD-DATA, but also the built technique of 3D-Product Models. If a 3D-model is built at the early design stage, it will undoubtedly be more efficient to take product NC-DATA from the 3D-model.

The problem of making a 3D-model at the early stage is the management of camber. Generally, in the design department bridges are dealt with as a complete proportion without camber. Therefore, even though a 3D-Model is made in the design department, a 3D-model with camber is still needed for fabrication at the plant. This need for two different 3-D models leads to inefficiency. KAWADA INDUSTRIES, INC. has developed a method to automatically transform a 3D-model lacking camber to a 3D-model with camber. This paper describes the efficiency and validity of the method.

Key words: finite element method, camber, 3D-CAD, CALS

1. はじめに

CALSやSTEPといったデジタルデータを有効に利用しようとする新しい概念が、日本の建設業界にも導入されようとしている。建設業界におけるCALSは、建設省主導のもとに2005年頃の実現化を目指して調査や研究が進められている。現在の建設業界において最も重要な要素の一つである図面情報の交換に関して、STEPの整備が遅れていることもあって、デファクトスタンダードのCADを用いた2次元データに関する計画案が、日本道路公団や建設省総合技術開発プロジェクト¹⁾等から出されたところである。やがてこうした動きがSTEPの整備に伴って、3次元モデルのデータ交換の方向に向かっていくことは必定である。

3次元モデルは、これまで手書き図の代用であった2次元CAD図面と比較して優れた特徴を持つものである。例えば、出来上がった形状をそのままディスプレイに表示できるため形状の確認が容易にできたり、色彩の検討や走行感覚のシミュレーションが行えたり、部材同士の取り合いの矛盾もコマンド一つで抽出することができる。また、これまで大変な労力が要る作業だった塗装面の面積計算や数量計算も、3次元モデルを作成することで実現できる。

川田工業(株)の橋梁部門では、3次元モデルから製作資

料までを生成するシステムはすでに実用されており、設計部門で3次元モデルを作れば、それを製作部門に渡すことで、一貫した情報の流れが構築できる(図1)。

しかし、設計から製作に情報を流すためには、一つの重大な障壁がある。それはキャンバー処理である。現在製作部門において実用されているシステムは、設計図を基にキャンバーを付加した3次元モデル(製作系モデル)を新たに作成している。これでは作業的、時間的にも無駄であり、ぜひとも設計部門で作成した3次元モデル(設計モデル)を、自動的にキャンバーを付加した製作系モデルに変換するシステムを作成する必要があった。

本報告では、有限要素法で用いられる変形の近似法によって、設計モデルを直接変形させて(キャンバー変換)、

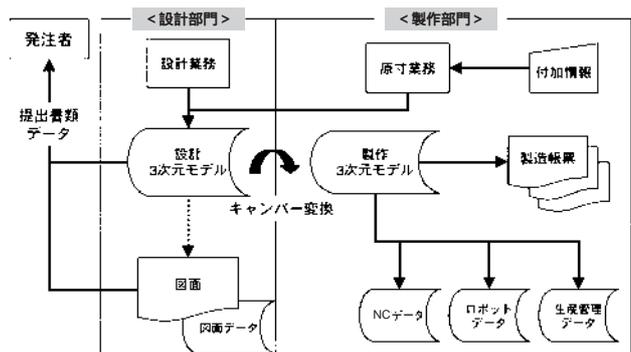


図1 本システムにより実現される作業フロー

製作系モデルを得る方法を採用した。さらにこの方法を用いて例題解析を行い、従来から行われているキャンパー変換方法の結果と比較して、その妥当性を確認するものである。

2. キャンパーによる変形

一般に設計作業は、橋梁の完成時の形状で行われるため、製作部門および発注者に提出される設計図は完成形状を表している。しかし、桁製作では死荷重のたわみ分をそり上げた（キャンパー）形状で製作しなければならない。

この製作段階でのキャンパーを考慮する方法には図2に示す2つの方法がある。(a)は桁端部および支点部が完成時に鉛直になり、(b)はすべての断面方向が完成時に鉛直となる考え方である。

過去の慣習から手ケガキ作業の効率化のため、(a)が一般的である。

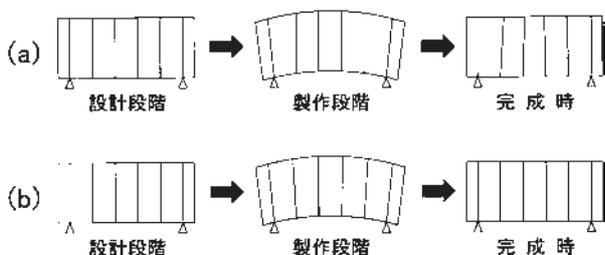


図2 キャンパー付加方法

3. キャンパー変換システム

キャンパー変換の自動処理を実現するには、3種類の方法が考えられる²⁾。

- 部材属性を利用する方法
- 幾何学的変形を施す方法
- 操作履歴を再実行する方法

今回はこのうちの方法を採用した。の特徴は、全体系を一度にキャンパー付きモデルに変換することができることである。それと比較して、の方法はフランジ・リップなどの部品名ごとに異なる変形挙動を処理するシステムが必要となる。またの方法は完成系部材軸線上で行ったモデル作成の操作履歴を、製作系部材軸線上で再現する方法であるが、矛盾なく操作を再実行することは困難であると判断した。

ここで用いたの方法は、次の4つのステップによって構成される。

- Step 1 キャンパー付加前後の桁断面線の計算。
- Step 2 包括ブロックの定義。
- Step 3 変形係数の算出。
- Step 4 モデルの変形。

以上の処理により製作モデルが作成される。次に製作モデルを構成する部品ごとに2次元に展開して、製作図を得る。

以下、Step 1 からStep 4 について述べる。

4. 設計および製作段階での桁断面線

設計部門から製作部門に提供されるのは、設計モデルと主構造部材のキャンパー図である。キャンパー図は、主構造断面について橋軸方向の長さを横軸として、その位置の鉛直方向高さを縦軸にとって図3のように示される。

この図中の完成時に鉛直となる箇所に設計段階の断面線を設定し、その時の断面と縦断勾配線との交差角を計測する。そして、縦断勾配線にキャンパーを付加した曲線を描く。

先ほど計測した断面の交差角をもとに、桁断面を再配置する。これが製作段階での桁断面線となる（図3下図参照）。

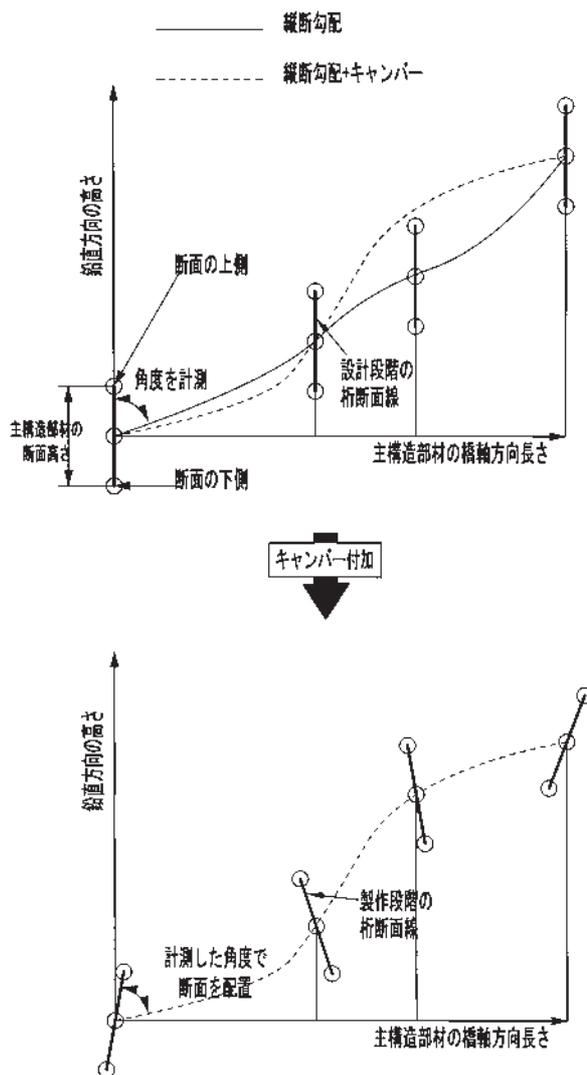


図3 設計および製作段階での桁断面線

5. 包括ブロックの定義とモデルの分割

前節の桁断面線の始末端を頂点とするブロックを定義する。このとき、設計段階でのブロックは設計モデルを覆い尽くすことになる(図4)。

以後の作業は各ブロックでモデルを分断した単位にて行う。したがって、この時点で設計モデルの構成点が所属するブロックを明確にしておく必要がある。

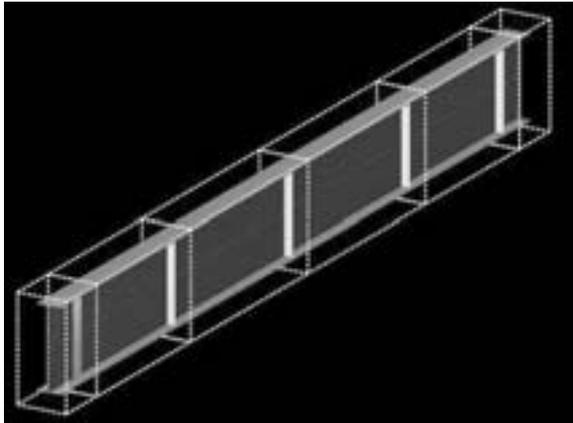


図4 包括ブロックの概念図

6. 変形係数の算出

設計段階と製作段階のブロックを構成する節点変位から6面体の変形係数を求める。

有限要素法で一般に使用される8節点24自由度の6面体要素の変位関数は式(1)で表される³⁾(図5参照)。

$$u(x, y, z) = \frac{1}{27} \left(\alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z + \alpha_5 x^2 + \alpha_6 y^2 + \alpha_7 xy + \alpha_8 xz \right) \quad \text{式(1)}$$

ここで u は変位、 $\alpha_1 \sim \alpha_8$ は未定係数、 (x, y, z) は座標値を示している。6面体要素を構成するX,Y,Z座標値それぞれについて変形前と変形後についてマトリクスを作成し、式(1)中の $\alpha_1 \sim \alpha_8$ を求めることによって、変

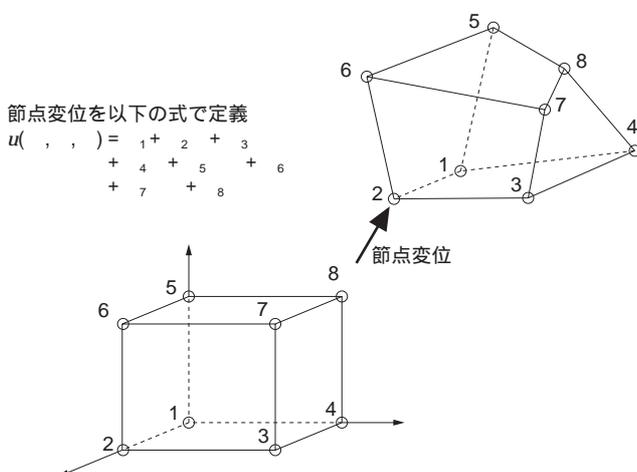


図5 要素の変位と変位関数

位関数が確定する。この要素の内側に含まれる任意点が、変形後にどこに移動するかが近似的に求められる。

なお、今回の検証ではブロック各辺の1/3点に節点を追加した式(2)の変位関数でも変換誤差の確認を行った。

$$u(x, y, z) = \frac{1}{27} \left(\alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z + \alpha_5 x^2 + \alpha_6 y^2 + \alpha_7 xy + \alpha_8 xz + \alpha_9 x^3 + \alpha_{10} y^3 + \alpha_{11} z^3 + \alpha_{12} x^2 y + \alpha_{13} x^2 z + \alpha_{14} y^2 x + \alpha_{15} y^2 z + \alpha_{16} z^2 x + \alpha_{17} z^2 y + \alpha_{18} x^3 y + \alpha_{19} x^3 z + \alpha_{20} y^3 x + \alpha_{21} y^3 z + \alpha_{22} z^3 x + \alpha_{23} z^3 y + \alpha_{24} x^3 yz + \alpha_{25} x^2 y^2 + \alpha_{26} x^2 yz + \alpha_{27} x^2 z^2 + \alpha_{28} xy^2 z + \alpha_{29} xyz^2 + \alpha_{30} x^2 yz^2 + \alpha_{31} xy^2 z^2 + \alpha_{32} xyz^2 \right) \quad \text{式(2)}$$

7. モデルの変形

ブロック内部に存在する分断された設計モデルを変位関数により変形後の製作モデルを得る(図6)。

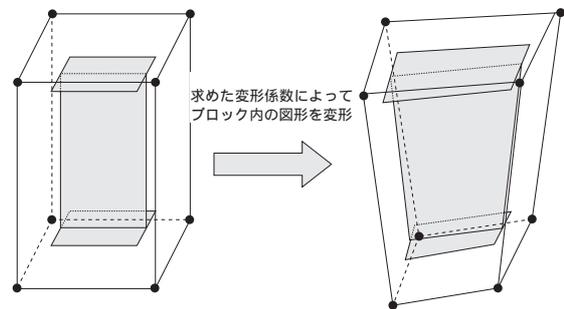


図6 ブロック変形による図形変形の概念図

8. 従来方法との比較・検討

ここで採用したシステムの妥当性を確認するために、従来から行われている原寸作業により得られた数値との比較を例題解析を通して行った。

図7に検証に用いたモデルの構造一般図、写真1に仮組状況を示す。テストモデルは曲線の線形を有する3径間連続RC床版箱桁である。検討部位は、桁端・支点・一般部が含まれるよう、G-ENDからC2付近までとした。製作系のモデルは2種類用意した。ひとつは従来の原寸作業で行う手法と同様に製作時鉛直断面と完成時鉛直断面が混在したモデル(以下、モデルAと呼ぶ)、もうひとつはすべて完成時鉛直としたモデルである(以下、モデルBと呼ぶ、図8参照)。従来からの原寸作業により得られた数値を正として、これら2つの製作系モデルを比較した。

比較は、桁の製作時に問題となる展開図で行い、具体的には展開した部材の構成点間距離(対角距離も含む)で比較した。対象部材は主桁(上下フランジ・腹板)・ダイアフラム・横リブ・横桁・縦桁である。

詳細な報告は別の機会に譲るとして、今回は比較結果の概要を述べる。比較した部材のうち、主桁(上下フランジ・腹板)・ダイアフラム・横リブ・中間横桁に関して、モデルA・Bとも誤差は0.00~0.03mmと製作上問題

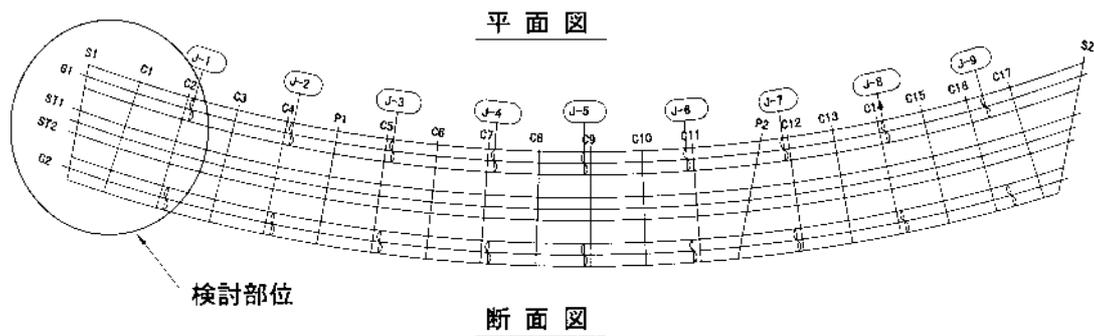


図7 テストモデル構造一般図



写真1 テストモデル仮組状況

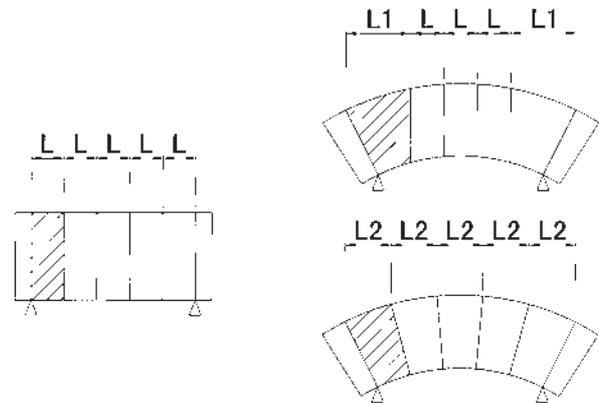


図9 モデルによる変位量の差

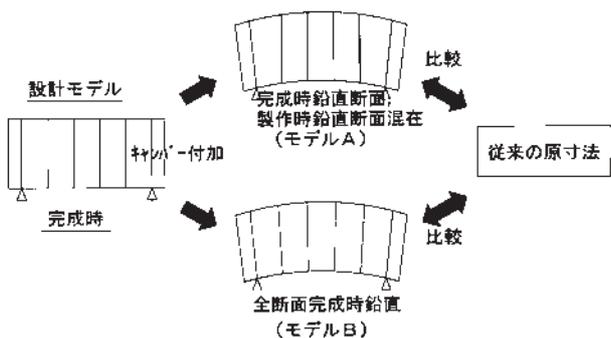


図8 断面定義方法と比較対象

ない結果となった。端横桁フランジと縦桁についてはモデルにより、生じる誤差に差異があった。

表1に端横桁フランジに関するモデルAの比較結果、表2にモデルBのそれを示す。しかしながら、モデルAの場合はモデルBに比較して横桁上フランジ幅の誤差が大きいことが分かる。理由としては、以下のとおり考えられる。図9のハッチ部分に着目すると、L2(モデルB)に比較してL1(モデルA)はキャンパ-変形による伸び

が集中する。また、通常移動変位だけであるはずのフランジ幅といった要素に誤差が発生する理由は、本システムにおけるモデルの変形処理は、部品属性とはかわりなく、部品を構成している図形を変形させているためである。しかしながら、いずれの結果においても製作上問題となる程度の誤差は生じていない。同様の傾向は縦桁でも生じている(表3, 4)。

製作時の鉛直性という制限は、手作業によるケガキを効率化するための方法である。これがNCによるケガキに取って替わった今となつては無意味な慣習であるといえ、今後は現場継ぎ手部を除き、全断面完成時鉛直としても製作は可能であり、本システムを採用し、より変形の精度を高めるには全断面完成時鉛直とすることが望ましい。

今回用いた手法による3Dモデルの変形はブロックの設定法によっては計算結果に理論誤差を含むことが確認されているが、それは製作上まったく問題にならない程度であった。

また、ブロック各辺の1/3点に節点を追加したモデル

表1 端横桁比較結果 (モデルA)

座標値の比較														
位置1	位置2	番号	X	Y	位置1	位置2	番号	X	Y	位置1	位置2	番号	X	Y
U.FLG	左	1	0.00	0.00	WEB	左	1	0.00	0.00	L.FLG	左	1	0.00	0.00
		2	-0.02	0.00			2	-0.00	0.00			2	0.02	0.00
		3	-0.14	-0.30			3	-0.01	0.05			3	-0.02	0.17
		4	-0.17	-0.40			4	0.00	-0.00			4	0.01	0.17
	中	1	0.00	0.00		中	1	0.00	0.00		中	1	0.00	0.00
		2	-0.01	0.00			2	0.01	0.00			2	0.01	0.00
		3	-0.02	-0.23			3	0.01	-0.04			3	-0.01	0.13
		4	-0.06	-0.31			4	-0.00	0.05			4	-0.02	0.17
	右	1	0.00	0.00		右	1	0.00	0.00		右	1	0.00	0.00
		2	0.02	0.00			2	-0.00	0.00			2	-0.02	0.00
		3	0.04	-0.29			3	-0.00	-0.00			3	-0.01	0.13
		4	0.02	-0.23			4	-0.00	-0.04			4	-0.03	0.13

距離の比較														
位置1	位置2	番号	単純距離	対角距離	位置1	位置2	番号	単純距離	対角距離	位置1	位置2	番号	単純距離	対角距離
U.FLG	左	1-2	-0.02	-0.30	WEB	左	1-2	-0.00	0.05	L.FLG	左	1-2	0.02	0.10
		2-3	-0.33	-0.35			2-3	0.05	-0.00			2-3	0.17	0.12
		3-4	-0.01				3-4	-0.01				3-4	-0.03	
		4-1	-0.44				4-1	-0.00				4-1	0.16	
	中	1-2	-0.01	-0.04		中	1-2	0.01	-0.00		中	1-2	0.01	-0.00
		2-3	-0.23	0.03			2-3	-0.04	0.02			2-3	0.13	0.04
		3-4	0.03				3-4	0.01				3-4	0.01	
		4-1	-0.32				4-1	0.05				4-1	0.17	
	右	1-2	0.02	-0.24		右	1-2	-0.00	-0.00		右	1-2	-0.02	0.08
		2-3	-0.29	-0.19			2-3	-0.00	-0.04			2-3	0.13	0.10
		3-4	-0.00				3-4	-0.00				3-4	0.02	
		4-1	-0.23				4-1	-0.04				4-1	0.13	

表2 端横桁比較結果 (モデルB)

座標値の比較														
位置1	位置2	番号	X	Y	位置1	位置2	番号	X	Y	位置1	位置2	番号	X	Y
U.FLG	左	1	0.00	0.00	WEB	左	1	0.00	0.00	L.FLG	左	1	0.00	0.00
		2	-0.02	0.00			2	-0.00	0.00			2	0.02	0.00
		3	-0.08	-0.06			3	-0.01	0.05			3	-0.03	0.05
		4	-0.08	-0.08			4	0.00	-0.00			4	-0.01	0.05
	中	1	0.00	0.00		中	1	0.00	0.00		中	1	0.00	0.00
		2	-0.01	0.00			2	0.01	0.00			2	0.01	0.00
		3	0.00	-0.06			3	0.01	-0.04			3	-0.02	0.05
		4	-0.02	-0.07			4	-0.00	0.05			4	-0.04	0.05
	右	1	0.00	0.00		右	1	0.00	0.00		右	1	0.00	0.00
		2	0.02	0.00			2	-0.00	0.00			2	-0.02	0.00
		3	0.03	-0.07			3	-0.00	-0.00			3	-0.03	0.04
		4	0.01	-0.06			4	-0.00	-0.04			4	-0.04	0.05

距離の比較														
位置1	位置2	番号	単純距離	対角距離	位置1	位置2	番号	単純距離	対角距離	位置1	位置2	番号	単純距離	対角距離
U.FLG	左	1-2	-0.02	-0.10	WEB	左	1-2	-0.00	0.05	L.FLG	左	1-2	0.02	0.01
		2-3	-0.08	-0.07			2-3	0.05	-0.00			2-3	0.05	0.05
		3-4	-0.01				3-4	-0.01				3-4	-0.03	
		4-1	-0.11				4-1	-0.00				4-1	0.05	
	中	1-2	-0.01	-0.00		中	1-2	0.01	-0.00		中	1-2	0.01	-0.02
		2-3	-0.06	0.01			2-3	-0.04	0.02			2-3	0.05	0.05
		3-4	0.02				3-4	0.01				3-4	0.02	
		4-1	-0.07				4-1	0.05				4-1	0.05	
	右	1-2	0.02	-0.05		右	1-2	-0.00	-0.00		右	1-2	-0.02	0.01
		2-3	-0.07	-0.04			2-3	-0.00	-0.04			2-3	0.04	0.05
		3-4	0.01				3-4	-0.00				3-4	0.02	
		4-1	-0.06				4-1	-0.04				4-1	0.05	

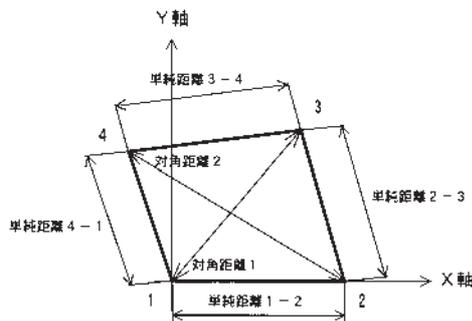


表3 縦桁比較結果（モデルA）

座標値の比較				距離の比較			
部材名	番号	X	Y	部材名	番号	単純距離	対角距離
SU0001	1	0.00	0.00	SU0001	1-2	0.27	0.27
	2	0.27	0.00		2-3	- 0.00	0.27
	3	0.27	- 0.00		3-4	0.27	
	4	- 0.00	- 0.00		4-1	- 0.00	
SW0001	1	0.00	0.00	SW0001	1-2	0.00	0.00
	2	0.00	0.00		2-3	0.00	0.18
	3	0.00	0.00		3-4	0.19	
	4	- 0.18	- 0.00		4-1	- 0.00	
SB0001	1	0.00	0.00	SB0001	1-2	0.01	0.01
	2	0.01	0.00		2-3	- 0.00	0.03
	3	0.01	- 0.00		3-4	0.03	
	4	- 0.01	0.00		4-1	0.00	

表4 縦桁比較結果（モデルB）

座標値の比較				距離の比較			
部材名	番号	X	Y	部材名	番号	単純距離	対角距離
SU0001	1	0.00	0.00	SU0001	1-2	0.08	0.08
	2	0.08	0.00		2-3	- 0.00	0.08
	3	0.08	- 0.00		3-4	0.08	
	4	- 0.00	- 0.00		4-1	- 0.00	
SW0001	1	0.00	0.00	SW0001	1-2	0.01	0.04
	2	0.01	0.00		2-3	- 0.00	0.04
	3	0.04	- 0.00		3-4	0.07	
	4	- 0.03	- 0.00		4-1	- 0.00	
SB0001	1	0.00	0.00	SB0001	1-2	- 0.11	- 0.11
	2	- 0.11	0.00		2-3	- 0.00	- 0.10
	3	- 0.11	- 0.00		3-4	- 0.10	
	4	- 0.01	0.00		4-1	0.00	

U: 上フランジ, W: 腹板, B: 下フランジ

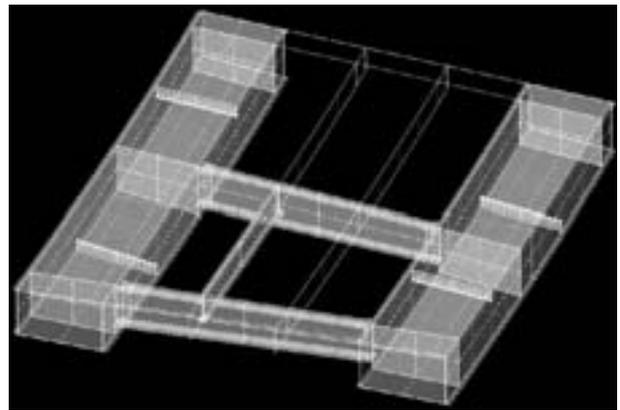


図10 3Dモデル（全景）

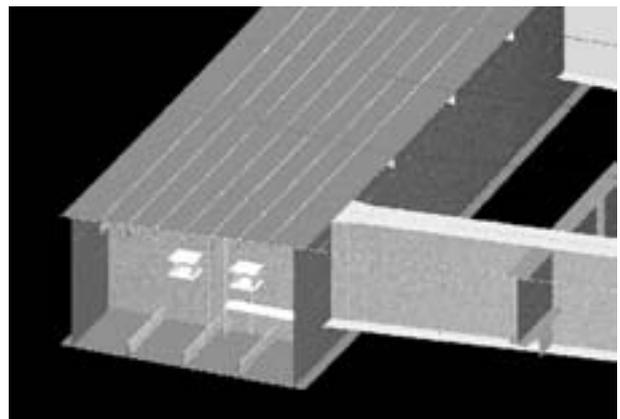


図11 3Dモデル（近景）

でも良好な変換結果を得ることができた。

以上のように、本システムによるモデルの変形は妥当であることが、今回の検証で確認されたと言える。

9. おわりに

本報告は、設計部門において作成された設計モデルを、製作部門で使用するキャンパー付きの製作モデルに変換する一つの方法について述べた。この方法は一般的に有限要素法で用いられる、8節点24自由度の3次元要素によって設計モデルを直接変形する方法である。

この方法を検証する目的で例題解析を行い、従来方法と部材寸法による比較を行った。比較の結果、すべての部材に関して精度良く展開図を得ることができた。

本システムにより、キャンパー変換という障壁が取り除かれ、設計から製作に至る情報のシームレス化が技術

的には可能になった。

今後も引き続き検証作業を行い、近年中にはシステムの実橋運用を目指していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 松原哲朗ほか：3次元CAD/CAMによる橋梁生産情報システム，川田技報，Vol.15，pp.36-41，1996年1月．
- 2) 片脇 清ほか：統合情報活用による建設事業の高度化技術に関する共同研究報告書（その2），建設省総合技術開発プロジェクト，1998年6月．
- 3) 渡辺 滉ほか：設計/製作情報をシームレスに，川田技報，Vol.17，pp.96-99，1998年1月．
- 4) 当麻庄司・真柄祥吾：よくわかる有限要素法解析入門，技報堂出版，pp.305-307，1996年6月．