

3次元プロダクトモデルを利用した施工管理技術

中村 定明*1・横田 勉*2・矢吹 信喜*3

3次元プロダクトモデル（以下、3DPM）によるデータ相互運用システムは、計画、予備設計、構造解析、詳細設計、設計照査、積算、施工計画、施工管理および維持管理といった構造物のライフサイクル全般にわたってデータを共有することが可能となる。このため複雑な構造データを合理的に受けわたすことで、設計・施工・維持管理にかかるコストの低減および構造物の品質向上によるライフサイクルコストの低減が可能となる。本稿では、3DPMの施工管理技術の事例を紹介するとともに、プレストレストコンクリート橋への適用の可能性について述べるものである。

キーワード：3次元プロダクトモデル、3次元形状計測、拡張現実感技術、AR、配筋検査支援システム

1. はじめに

現在、多くの土木構造物は、計画、予備設計、構造解析、詳細設計、設計照査、積算、施工計画、施工管理および維持管理といった多くの作業が異なる機関や企業で分散され実施されている。これらの作業の多くは、コンピュータを用いた自動化への努力がなされているが、各作業で使用されるアプリケーション・ソフトウェア間のデータの互換性が乏しいため、下流工程においてデータ入力を手作業に頼らざるを得ないという問題が従来から指摘されていた。これらの問題を解決するため、データ間の共通フォーマット

ト、すなわちプロダクトモデルを開発する努力が20年以上続けられている¹⁾。

(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会（以下、PC建協）は3次元プロダクトモデル検討小委員会（以下、3DPM検討委員会）を立ち上げ、図-1に示すような3次元プロダクトモデル（以下、3DPM）を中心としたデータ相互運用により、効率的で精度の高い計画・設計・施工・維持管理システムの構築について検討を行っている。

本稿は、相互運用システムの中で施工管理に注目し、3DPMを利用した適用事例について紹介するものである。

2. 3次元プロダクトモデルの概要

プロダクトモデルは、1980年代半ばから欧米で開発され、国際標準としてはISO 10303（略称STEP）が開発されつつある。しかし、ISO-STEPでは建設分野における3DPMの取組みが遅れたため、1994年に米国の民間会社を中心となり国際的な業界団体IAI（International Alliance for Interoperability）を設立した。そしてIAIは、建物のプロダクトモデルであるIFC（Industry Foundation Classes）を構築し、本格的な実用化に向けて取り組み始めた。

また、橋梁に関してはIAIフランス支部において、SETRA（Service d'Etudes Techniques des Routes et

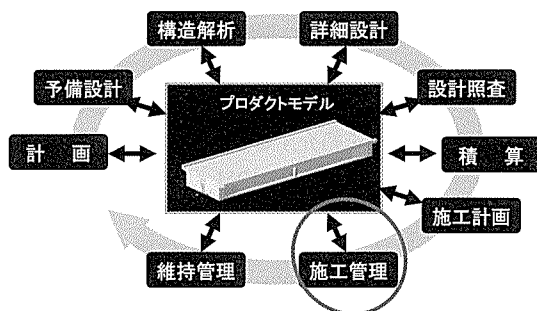


図-1 プロダクトモデルによるデータ相互運用システム



*1 Sadaaki NAKAMURA

プレストレスト・コンクリート建設業協会



*2 Tsutomu YOKOTA

プレストレスト・コンクリート建設業協会



*3 Nobuyoshi YABUKI

大阪大学大学院 工学研究科教授

Autoroutes, 仏設備省道路技術局) が中心となって橋梁用プロダクトモデル IFC-BRIDGE を開発している²⁾。

一方、国内では、鋼橋を対象とした 3DPM が数年前から開発・販売されてきているほか、2004 年 11 月に IAI 日本支部土木分科会が設立され、国内においても実用化に向け本格的に始動した。

これらの背景から、PC 建協 3DPM 検討委員会でも、プレストレストコンクリート橋 (以下、PC 橋) における 3DPM の検討を開始した。PC 建協の 3DPM データ構造の書式には、国際標準を意識し IAI で開発された ifcXML を用いることとした。これは、階層指向型の構造形式をもち、クラスを属性型として持つ場合、どのクラスをもつのか特定可能であり、クラスの継承関係を表現することができる。ここで、クラスとは建設プロジェクトで最小限必要とされるデータを定義するもので、建築分野では梁、柱などが一般にはクラスとして定義されるが、PC 橋の 3DPM では、それらの部材を構成するコンクリート、鉄筋および PC 鋼材などのクラスを拡張することとした³⁾。さらに本委員会では、3 次元 CAD (以下、3D-CAD) システムとプロダクトモデルデータとの間でデータの相互運用を行うために、室蘭工業大学で開発されたデータ変換を行うコンバータプログラム⁴⁾を用いた。図 - 2 に示すコンバータ I (以下、CAD2PM) は、3D-CAD システムにおいて設計した構造物のデータを ifcXML 形式のプロダクトモデルのインスタンスファイルとして半自動的に生成するものである。また、コンバータ II (以下、PM2CAD) は、ifcXML のインスタンスファイルを一時 DOM (Document Object Model) としてコンピュータ上のメモリに展開してからファイル内部のデータを読み取り、3D-CAD 上にモデリングを自動実行できるようになっている。

図 - 3 にプレテンション方式単純床版橋の適用例⁵⁾を示す。このモデルでは、床版桁で使用されるボイドを側型

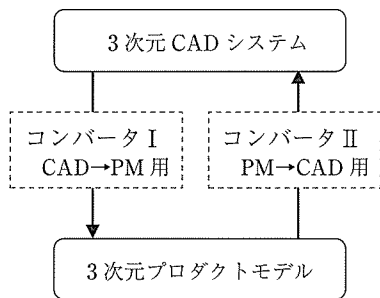


図 - 2 コンバートシステム (プロトタイプ)

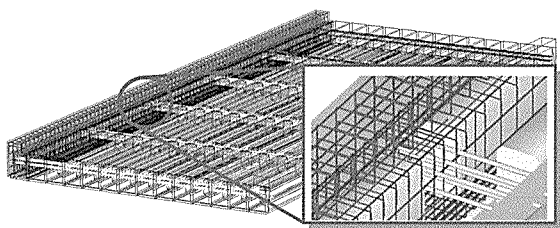


図 - 3 適用例: プレテンション方式単純中空床版橋

枠などと同様に型枠データとして表現した。また、現状のモデルでは、PC 鋼材のボンドコントロールを表現できる部材データは定義していないが、本モデルではボンドコントロール区間にシースを配置することで表現した。さらに、鉄筋は配置されるすべてを 1 本ごとに表現しているが、軸方向鉄筋の重ね継手は表現していない。橋軸方向鉄筋と橋軸直角方向鉄筋、橋軸直角方向鉄筋どうし、PC 鋼材と鉄筋はすべて実配置を考慮して干渉しないようモデル化した。

3. 3DPM の施工管理技術への適用

3.1 概 要

3DPM の最も効果的な適用方法は、図 - 1 に示す相互運用であるが、設計・施工・維持管理の各段階における 3DPM の効果的な利用方法を検討することは、この技術のユーザーにとって重要である。以下に、3DPM の施工管理技術への適用事例について紹介する。

3.2 PC 鋼材配置検査への適用

施工時の出来形管理として、配筋の検査および PC 鋼材形状の検査が行われる。これらの検査は、一般には検査対象となる鉄筋に磁石などのマーカーを設置し巻尺を指標にして、カメラを用い撮影することとなる。構造物に配置される全鉄筋について実施されるため作業量も膨大であり、雨天時においては作業効率が低下し煩雑な作業である。

3DPM では、鉄筋や PC 鋼材の配置形状を 3 次元データとして保持しており、実構造物と重ね合わせることで、実際の鋼材の配置が設計値通りに行われているかを容易に確認することが可能である。

ここでは、鉄筋および PC 鋼材の配置状況をデジタルカメラで撮影した 2 次元画像データを、同一視点から眺めた 3DPM データとパソコン上で重ね合わせることで配置状況の確認を行った事例を紹介する。

図 - 4 に PC コンボ桁の 3DPM データを可視化した 3D-CAD を示す。

PC 鋼材の位置は、一般にシースの位置で確認される。シースおよび鉄筋配置が完了した段階でデジタルカメラにて撮影した。その後、3D-CAD データを同じ視点から眺めた 2D 画像へと変換した。この際、遠近の差を画像処理ソフトにより補正を行っている。これらの画像を重ね合わせ、CAD データを透過画像とすることでシース位置を容易に確認することができる。図 - 5 に検証実験結果を示す。この図から PC 鋼材配置が適切であると確認できた。

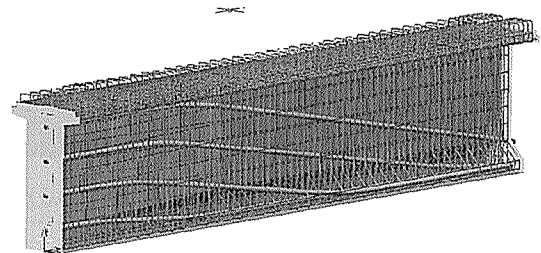


図 - 4 PC コンボ桁 3DPM データ

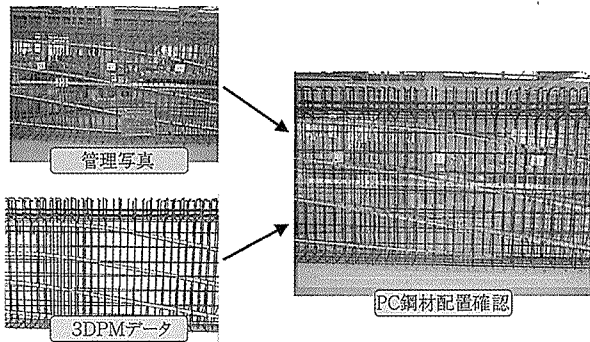


図 - 5 3DPM を用いた PC 鋼材配置検査

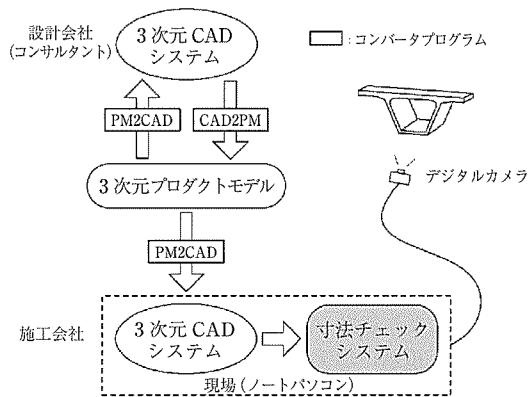


図 - 6 簡便な寸法チェックシステム⁶⁾

システムを開発した⁴⁾(図 - 6)。ただし、本システムはミスを見逃して架設の手戻りなどの防止することを主目的としており、10 cm オーダーのミスを発見するために使用される。

以下にプレキャストセグメントによる事例を紹介する。

まず、設計者は3D-CADシステムおよび図 - 2に示すCAD2PMを使用し、プレキャストセグメントのモデリングを行う(図 - 7)。モデリングが完了すると同時に、設計データを実装したインスタンスファイルが自動生成されるので、このファイルを現場に携帯するノート型パソコンに転送し、現場に持ち込む。

次に、現場においてノート型パソコン内の3D-CADシステムおよびPM2CADを起動し、インスタンスファイルからプレキャストセグメントの3Dモデルを表示させ、デジタル画像の撮影を開始する。画像がコンピュータ内に保存されると、図 - 6の寸法チェックシステムが起動し、ディスプレイ上に表示される。ここで、カメラの位置や向き、焦点位置などのデータを入力し方向を一致させる(図 - 8)。

さらに、デジタル画像を半透明にして3D-CADデータに重ねた状態を図 - 9に示す。この図では、画面右側のプレキャストセグメントの張出し部にずれが生じていることが確認できる。本事例では、ずれを確認するため意図的に3D-CADモデルの寸法を変化させたものであるが、製品と設計値に比較的大きなずれがある場合、このシステムによりすばやくその状態を確認することが可能である。

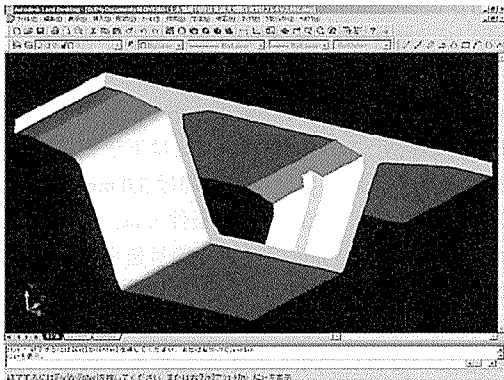


図 - 7 プレキャストセグメントの CAD モデル

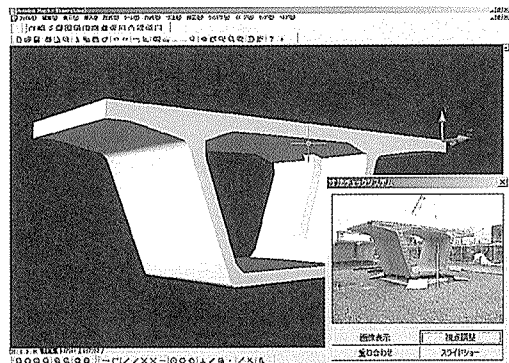


図 - 8 カメラの位置、方向、焦点位置がほぼ一致した状態

3.3 簡便な寸法チェックシステムへの適用

通常、現場における構造物の寸法検査は、巻尺によって行われる。巻尺では、すべての部材や鉄筋などのチェックを短時間で行うことは困難であるため、あらかじめ施工管理要領などの定められた箇所を中心に行われ、残りの部分は目視によるチェックが行われる。こうした従来の方法では、ヒューマンエラーをなくすことは困難である。

3次元形状を容易に取得する方法として、レーザープロファイルスキャナーなどの使用も考えられるが、まだ価格が高く、処理に時間もかかることから、通常の現場ではまだ利用は困難である。矢吹らは現場において構造物の寸法を安価で、容易かつ迅速にチェックすることを可能とする

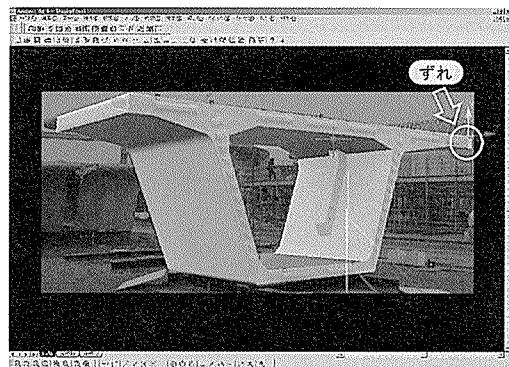


図 - 9 デジタル画像と CAD モデルを重ねた状態

3.4 デジタルカメラを用いたセグメント形状管理

近年、市販のデジタルカメラを利用してさまざまな対象物の3次元形状を容易に取得する技術の進展は著しく、これらの解析ソフトも比較的安価に入手できるようになってきた。PC建協3DPM委員会では、デジタルカメラを用いてプレキャストセグメントの3次元形状管理を行い、既存のシステムと比較することで、より簡便なシステムを開発することを試みた。また、これらの技術を3DPMと連携して、製品の品質向上および管理作業の効率化の検討を行った⁷⁾。以下、デジタルカメラを用いてプレキャストセグメントを撮影し3次元形状を解析することで部材の出来型を算出し、その精度について検証を行った事例を紹介する。

デジタルカメラを用いた3次元形状計測とは、対象とする構造物を複数方向からデジタルカメラを用いて撮影し、この画像データをコンピュータに取込み、市販の3次元形状解析ソフトウェアを用いて画像上で指示した点の3次元座標を算出する方法である。よって、部材寸法の算出はもちろん3次元形状の再現も可能となる。本検討で使用されたプレキャストセグメントを写真-1に示す。

以下、計測手順を示す。

(1) マーカーセット

写真撮影の前準備として、写真-2に示すように計測対象のセグメントに赤印のマーカーをセットした。これは、後で行う画像処理において形状変化点（各辺の端点）を容易に認識するためである。

(2) 立体フレームの組立および設置

解析時に撮影画像の局所座標系の決定および寸法の基準とするための立体フレーム（基準尺）を用意した。立体フレームの設置状況を写真-3に示す。

立体フレームは2mのL型のアルミ棒を直交する3方向に組立てた。

デジタルカメラによる撮影は、マーカーの設置および立

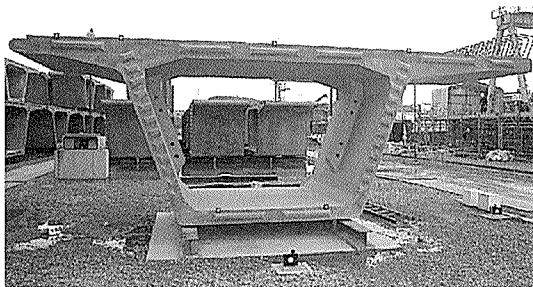


写真-1 計測対象のプレキャストセグメント

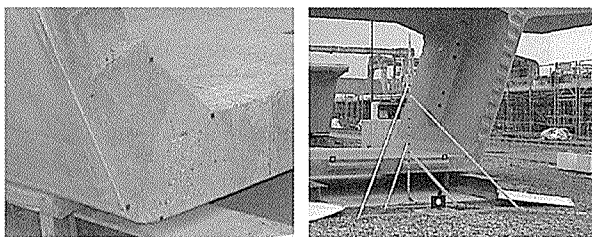


写真-2 マーカーセット 写真-3 立体フレーム

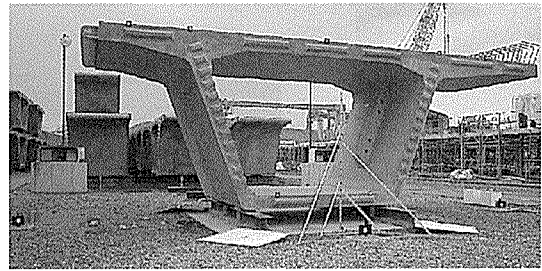


写真-4 撮影状況

体フレームの設置後に実施した。デジタルカメラの有効画素数は撮影画像の解析精度に大きく影響するため、計測当時（2005年）では、極力高解像度のカメラ（500万画素）を選定した。実際に撮影した画像を写真-4に示す。撮影は立体フレームと撮影面全体が画像の中に収まるように行った。最終的にセグメントの立体形状を再現するため、1つの立体フレームを移動させ、4方向から立体フレームを設置し、各方向で3枚ずつ、計12枚の写真を撮影した。

以上の手順で撮影を行い、その後解析を行った。解析精度の検証は、現場に導入されている固定式CCDカメラ計測システムにより算出した部材寸法と比較することで行った。ここで、現場に導入されている固定式CCD計測システムは、デジタルカメラによる計測を実施した時にすでに1000個以上のセグメントの計測を行っており、その精度については実証済みであるものとして検証を進めた。

図-10に解析結果を示す。写真-2に示されているようにマーカーは必ずしも縁端の正確に設置されていないため、補正が必要となる。図-10の四角のマークは補正前の解析結果で菱形は補正後の結果である。横軸の計測箇所で、USは上床版、WBはウェブ、LSは下床版を示す。

解析結果から、誤差の絶対値平均は3.0mm、標準偏差は3.8mmとなった。今回の撮影条件では、撮影画像の1画素の大きさが約3.5mmで誤差の絶対値平均に近い値となった。この誤差は、解析時に行う座標の指示において、画像データの最小単位である1画素以上の判定を解析担当者ができないために発生したものと推察される。現在では、より高い解像度のデジタルカメラもあり、この誤差は次第に低減していくものと思われる。

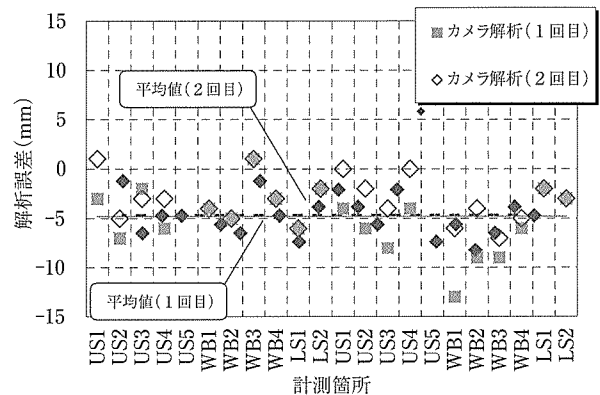


図-10 部材厚さの計測誤差

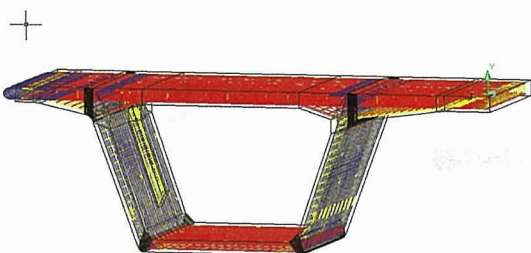


図 - 11 3DPM データ

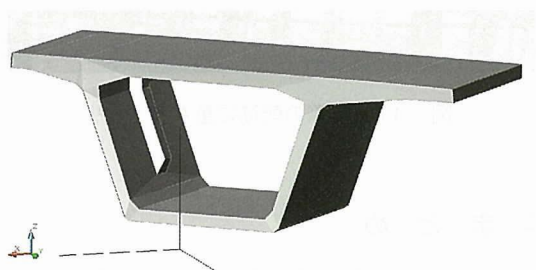


図 - 12 実測データ (デジタルカメラ計測)

施工時の出来形管理における3DPMの活用方法としては、架設後の3次元シミュレーションを実施できることはもちろんであるが、図-11に示す3DPMデータを図-12に示す実測データと重ね合わせによる比較を行うことでセグメント個々の形状誤差の確認が容易に行うことが可能となる。

3.5 拡張現実感技術を用いた配筋検査支援システム

従来、建設現場における配筋検査は、巻尺(スケール)と2次元の配筋図面を用いて行われている。

室蘭工業大学(現、大阪大学大学院)の矢吹らは、橋梁プロダクトモデル新IFC-BRIDGE(3DPM)と拡張現実感(Augmented Reality, 略称AR)技術を用いた配筋検査支援システム⁸⁾を開発した。AR技術は、現実世界にコンピュータで構築した仮想世界を重ね合わせることにより、現実世界の情報を拡張、強化する技術のことである。具体的には、ユーザーがヘッドマウントディスプレイ(Head Mounted Display, 以下HMD)を利用し、現実世界(現場における配筋)と仮想世界(コンピュータ内の3次元配筋

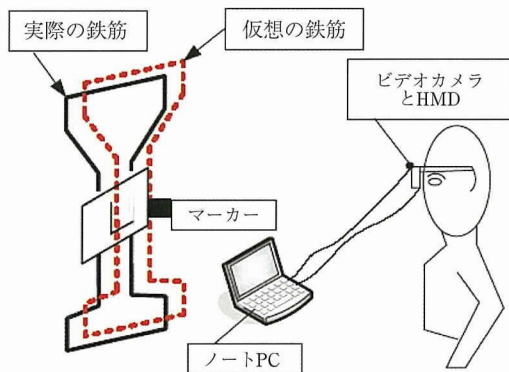


図 - 13 配筋検査支援システムの開発コンセプト⁸⁾

モデル)の画像を同時に観察することができる技術のことである。

このシステムでは、図-13に示すようにARを実現するためのマーカーを実際の鉄筋の近くに設置する。ビデオカメラを用いて鉄筋および周りの映像を撮影して、HMDに表示する。カメラで撮影した映像から、マーカーを認識し、カメラの位置と方向を推定し、設計された鉄筋の3次元CGモデルを合成してHMDに描画する。そこで、鉄筋の映像と仮想的な3次元CGモデルは、同時にHMDに描画される。鉄筋の検査員は、HMDに表示される鉄筋の映像と3次元CGモデルのずれを観測して、配筋検査を行う。

矢吹らは、実際の現場実験を実施する前に、室内で本システムの卓上実験を実施した。図-14は、80mm×80mm×240mmの木の手棒で製作した配筋モデルの映像である。予め新IFC-BRIDGE(3DPM)で作成した配筋モデルのインスタンスファイルから、模型の形状、位置のデータを読み込み、模型の映像と3次元CGモデルを同時にHMDに描画する。図-15の赤、青色が仮想空間の鉄筋で黄色が現実の鉄筋モデルである。ユーザーは、HMDに表示される配筋モデルと3次元のCGモデルのずれを観測して検査を行うことができる。本実験では、カメラのレンズのひずみなどにより、画像の誤差があるので、定量的な

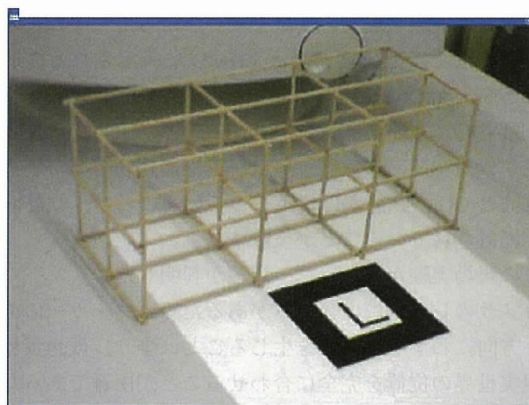


図 - 14 配筋モデルの映像⁸⁾

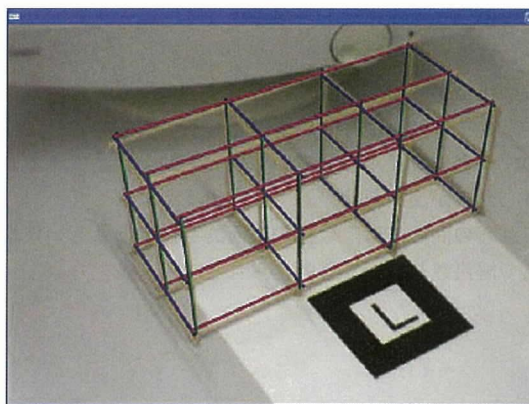


図 - 15 基準となる配筋(赤、青色)と上手な配筋モデル(黄色)の重ね合せ⁸⁾

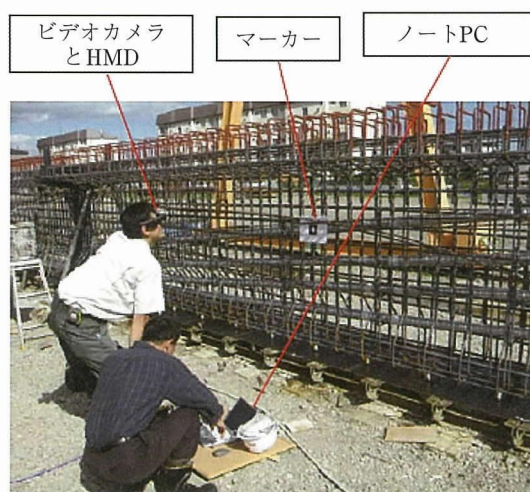


図 - 16 配筋検査支援システムの現場実験⁸⁾

寸法を測量することはできないが、配筋のずれを確認するのに十分な情報は得られた。

さらに矢吹らは、PC 部材の製作工場にて、工場の配筋検査員と協力して、配筋検査支援システムの現場実験を実施した(図 - 16)。事前に新 IFC-BRIDGE8 (3DPM) を元に配筋のインスタンスファイルを作成した。現場実験では、マーカーを実際の鉄筋に貼付け、HMD にマーカー周囲の仮想配筋と実際の配筋の映像を映しながら、マーカーの位置を調整した。配筋検査員は、HMD に表示される鉄筋の映像と 3 次元 CG モデルのずれを観測して配筋検査を行った。図 - 17 に、配筋検査員が HMD で見た画像を示す。赤、青色が仮想空間内の鉄筋、黒色が実際の鉄筋である。実際の鉄筋と CG の鉄筋がほぼ重なっていることで、鉄筋が正しく配置されていることが検証された。

この現場実験から、以下の課題が判明した。

- カメラのレンズにははずみがあるため、マーカーの位置と方向にわずかなずれを生じることにより、仮想世界と現実世界の位置を完全に合わせることが困難であった。
- データ量が増えたことから、ビデオカメラを移動した後、HMD の画像切替えにかなりの時間を要した。
- ビデオカメラが撮影し、HMD で表示する現場の画像は、品質がいくら高くても、現場の様子と違うため、ユーザーに真実感の問題が存在した。
- この現場実験で使用した正方形マーカーの場合、視野はかなり狭かった。実際の構造物に適用する場合は、複数のマーカーを使用し幅広い範囲の鉄筋を観察できるようにした方がよい。

これらの問題点は、今後の技術的な進歩と新しい技術の導入で解決されていくと考えられる。

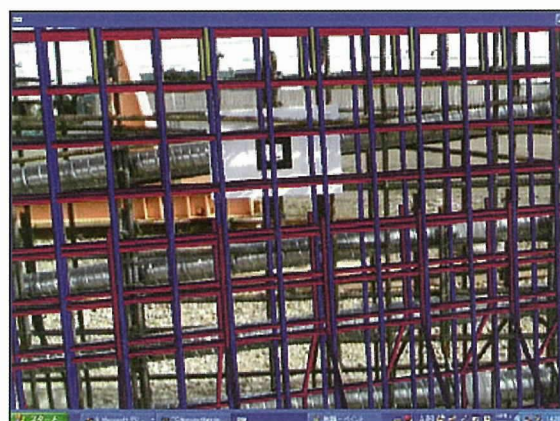


図 - 17 実際の配筋に重なる CG⁸⁾

4. ま と め

本稿は、3DPM を施工管理技術に適用した事例および検証実験を中心に現状および今後の課題について述べた。3DPM の PC 橋への実用化そのものがこれからの課題であるが、新しい施工管理技術としての可能性を確認することができた。今後、さらにこの技術の実構造物への実用化に向けての開発および検討を活発に進めていくことが重要である。本稿が、それらの一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 矢吹信喜：3次元プロダクトモデル、橋梁と基礎、pp.54-55, 2004.8
- 2) IAI French chapter：IFC-BRIDGE V2 Data Model：http://www.iai-tech.org/groups/msg-members/projects/IFC-BRIDGE-V2-Data-Model-R7-draft.pdf
- 3) 矢吹信喜、志谷倫章：PC 橋梁の 3 次元プロダクトモデルの開発と応用、土木学会論文集 No.784/VI-66, pp.171-187, 2005.3
- 4) 矢吹信喜：橋梁 3 次元プロダクトモデルの国際標準の構築、橋梁と基礎、pp.47-52, 2005.7
- 5) 岡田規子、澤大輔、近藤琢也、竹中秀樹：PC 橋における 3 次元プロダクトモデルによる相互運用への取組み、第 14 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp.205-208, 2005.11
- 6) 矢吹信喜、志谷倫章、今村晃久、近藤琢也：PC 橋梁用プロダクトモデルのコンバータプログラムと簡便な現場寸法チェックシステム、土木情報利用技術論文集 Vol.13, pp.235-242, 2004
- 7) 近藤琢也、中村定明、今泉安雄、大野達也：プレキャストセグメント橋におけるデジタルカメラを用いた 3 次元形状計測試験、コンクリート工学 Vol.43, No.11, pp.27-34, 2005.11
- 8) 矢吹信喜、李占涛：拡張現実感技術を用いた配筋施工支援に関する基礎的検討、土木情報利用技術論文集 Vol.16, pp.99-106, 2007

【2010 年 9 月 22 日受付】