論文　ＰＣ橋架設における安全管理システムへの３Ｄ－ＣＧの適用

宮本　文穂[*1]・樋口　陽一[*2]・中村　秀明[*3]

要旨：橋梁架設工法の複雑化，多様化に伴い，その施工には多くの経験や知識を必要とするようになってきた。しかし，橋梁架設に携わる経験豊富な熟練現役技術者の数は年々減少傾向にあり，今後，これまで培われてきた架設技術の伝承が十分行われなくなるという懸念もある。そこで，本研究では，3 次元コンピュータグラフィックス(3D-CG)を適用して PC 橋梁架設工程の視覚化を実現することにより，2 次元図面ではつかめない実際の架設工程および架設時事故のイメージを容易に習得可能となる橋梁架設安全シミュレータを構築した。

キーワード：PC 橋架設，安全管理システム，3D-CG

1.　はじめに

3 次元コンピュータグラフィックス（3D-CG）はコンピュータ内に仮想の 3 次元空間をつくり，物体の質感・運動といったものを映像的に再現する技術のことである。最近のコンピュータの性能面での飛躍的向上，各種機器やソフトウェアの低価格化などが 3D-CG の普及に拍車をかけ，科学計算のシミュレーション，エンターテイメントなどをはじめとする様々な分野に広く用いられるようになってきた。土木分野においても，種々の構造物の計画・設計段階における景観評価，各種解析シミュレーション等に広範囲に用いられてきている[1)]。

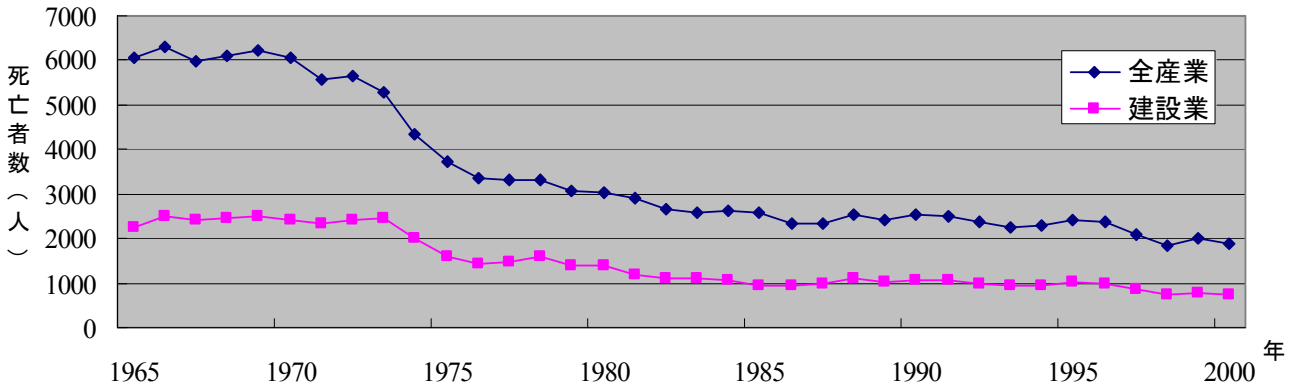
3D-CG を使うことの利点としては，ビジュアル化が有する直感的な情報伝達力によりイメージでの理解を容易にすることが挙げられる。さらにコンピュータ上で色彩・形状などのデータの変更にも柔軟に対応できることも大きな利点である。これらのことはすなわち，製品などの製造業において設計段階での製品のイメージを把握しやすいものにしたり，試作品製作コストを節約したりすることが可能になる。また，3D-CG には現実世界では撮影が難しい事故や災害などといった現象の再現ができるといった特徴もある。これは 3D-CG により再現された事故・災害を見ることが製造業に携わる作業員たちの安全意識・危機管理能力の向上につながると考えられる。

本研究ではこうした 3D-CG の特徴を踏まえ，橋梁架設工程の視覚化ならびに架設中の重大事故発生を未然に防ぐ安全管理への応用を試みた。すなわち，橋梁架設工事の複雑化および架設作業員の高年齢化を考慮して，架設作業員への教育用ツール「橋梁架設工程シミュレータ」および「架設時安全管理シミュレータ」をそれぞれ構築し，「Virtual Bridge Construction System（以下 VBCS）」と呼ぶ橋梁架設安全シミュレータを開発した[2),3)]。さらに，本システムの具体的な適用例として，山陽自動車道に架かる AR-H 橋（PC 橋）を取り上げ，3D-CG を用いた架設工程および架設時事故の再現を行った。その結果，今後検討すべき課題もあるが，本システムの利用が架設作業員の作業工程の円滑な理解につながり，作業の効率化および架設時事故の減少に効果が期待できる。

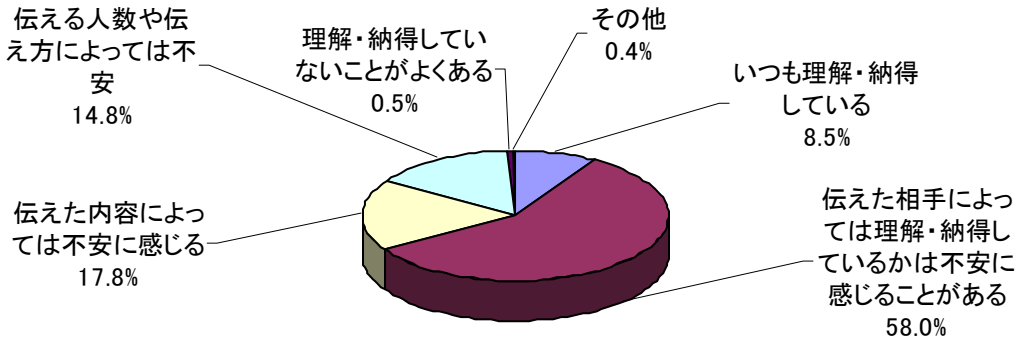
*1 山口大学教授　工学部知能情報システム工学科　工博　(正会員)

*2 (株)西日本情報システム　修士(工学)

*3 山口大学助教授　工学部知能情報システム工学科　博士(工学)　(正会員)



図－１　全産業および建設業における年間死亡者数の推移（1965～2000）



図－２　職長や作業員に指示を伝えた後の手応えや感触

2.　橋梁架設時安全管理の現状と課題[4)]

図－1 は日本の全産業および建設業における死亡者数の推移を示している。これによると，建設業従事者の年間死亡者数は，1972 年に労働安全衛生法が施工された直後は激減し，その後も緩やかに減少してきたが，最近の 15 年間は 1000 人前後で横ばいであることが分かる。このような横ばいの状態は，安全上の細則が整備され，安全設備が高機能化され，さらに安全教育・指導が徹底されてきていると思われる現状を考えると納得できないところである。この主な原因として，作業員の高年齢化，ヒューマンエラー，無理な工期・現場経費節約の追求，技術継承の不備および安全教育のマンネリ化が挙げられる。この内，現場での安全教育については，「こういうことはしてはいけない」，「こういう点に注意するように」というような規制中心で行われてきたが，これの限界も指摘されている。（財）建設経済研究所が発表したアンケート結果によれば，元請け会社の現場代理人や管理・主任技術者が現場作業員に指示を伝えた後の手ごたえや感触について約 9 割の人が相手の理解･納得に不安を持っていると回答している（図－２参照）。指示した内容がうまく伝わらない要因として，

1)指導を行う側が安全に関するポイントを十分に理解していない

2)指示する内容が具体性に欠けてマンネリ化している

3)伝え方が一方的で指示される作業員の個性・能力が反映されていない

などといった課題が浮き彫りになった。

以上のような課題の解決手法としては，IT，最新情報処理技術などを積極的に応用した臨場感を出した安全管理教育へと切り口を新たにした方策が必要であると考える。その一例として，厚生労働省が設置した安全衛生管理センターのホームページでは過去十年間に起こった死亡事故などの重大事故をデータベース化し公開している。また，同センターには立体映像を使って危険な作業を疑似体験できる設備もある。なお，ヒューマンエラーの原因の一つが事故の危険性

に対する無知であり，なぜ事故が起きるのかといったところを疑似体験することで事故を未然に防ぐ意識が備わるものと考える。

3. VBCS の概要

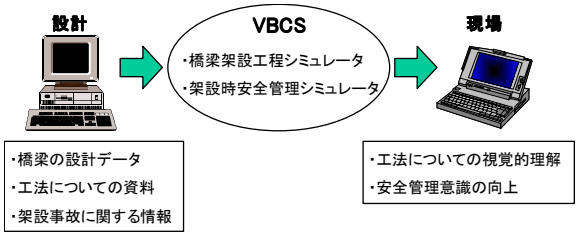
現在のところ，橋梁架設現場における映像，3D-CG などを用いた視覚的な架設工程および架設時安全管理教育は一般的となっていない。その主な理由として考えられるのが，

1)設計図面からデジタル化された 3D-CG への視覚化が非常に複雑であったこと

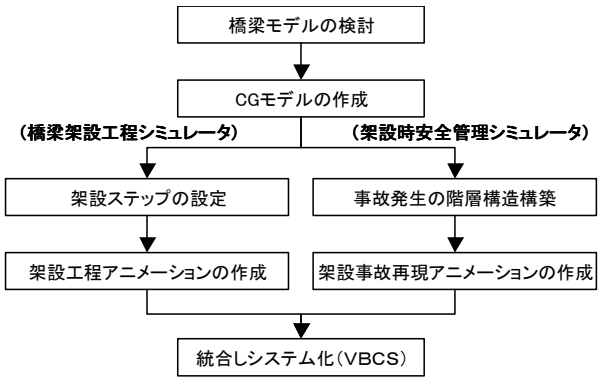
2)各架設工程での事故事例が系統的に十分整理されていないこと

などである。こうした現状は，年々複雑化する橋梁架設工事の工程理解を円滑に進められず，今後工期の遅れや安全管理能力の低下につながる事態が予想される。

本システムは，**図－３**に示したように設計と架設現場を結ぶことを想定し，3D-CG を利用して臨場感のある橋梁架設工程の再現と架設作業員への安全管理教育に役立てることを念頭に開発したものである。設計現場からのデータとして，設計図，施工条件に関する資料，架設工程ごとの事故例に関する資料を用いて橋梁架設安全シミュレータ(VBCS)を構築する。一方，施工現場ではこの VBCS を用いることで架設作業員に架設工程の視覚的理解，架設時安全管理教育の効率化を図る。なお，本システムは，工法の理解不足が原因となって発生する重大事故の防止を対象としており，ヒューマンエラー等による事故については考慮していない。



図－３　本システム利用の概念図



図－４　システム構築の流れ

本システムは大きく分けて「橋梁架設工程シミュレータ」と「架設時安全管理シミュレータ」から構成される。その作成の流れを**図－４**に示す。各サブシステムについての詳細を以下に述べる。

3.１　橋梁架設工程シミュレータ

「橋梁架設工程シミュレータ」とは，3D-CG を用いて橋梁架設工程を視覚化し，橋梁架設の実際を視覚的に疑似体験するためのシミュレータである。以下にその作成手順を述べる。

＜CG モデルの作成＞

設計図面，施工計画書などを利用して，橋梁部材および架設機材を個々のパーツとして CG 化する。さらに，CG 化した個々のパーツ（CG モデル）の表面をコンクリート，鋼材などの各材料の表面特性に対応させてテクスチャ・マッピングという処理を施すことによって質感を出す。

＜架設ステップの設定＞

橋梁形式ごとに適用される種々の架設工法と対応させた主要な架設ステップを設定して，上記橋梁部材および架設機材の CG モデルを順次組み合わせることによって，架設ステップごとに次々と橋梁としての形状が整っていく様子を再現する。

＜架設工程アニメーションの作成＞

各架設ステップにおけるアニメーションは，一連の動きの中で節目の状態（キーフレーム）を数箇所つくり，それらの間をコンピュータに自動的に補間させて作成する。

3.2　架設時安全管理シミュレータ

「架設時安全管理シミュレータ」とは，3D-CG を用いて各架設工程で想定される事故事例の再

現を行い，架設作業員が過去に発生した事故を視覚的に疑似体験するとともに，発生原因を理解することによって架設現場における安全管理を徹底するためのシミュレータである。

＜事故発生要因の階層化＞

過去に発生した架設工程ごとの事故事例分析より，連鎖的に連なっていることが考えられる種々の事故発生要因相互の関連を整理して，事故の発生に至る経路を明確にするために事故要因の階層化を各架設工程で行う。

＜架設事故再現アニメーションの作成＞

架設工程ごとの事故要因の階層モデルに従って，事故発生要因の連鎖によって重大事故発生に至る過程をアニメーション化することによって架設時事故の視覚的な疑似体験を可能とし，事故発生につきものの見落し，不注意などのヒューマンエラー防止を効率的に行う。

3.3　VBCS の作成

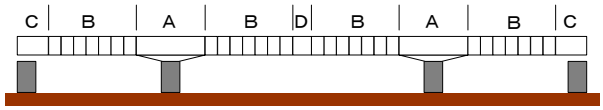
上述した 2 つのシミュレータを統合し，架設ステップ図の表示，アニメーションの再生が可能な VBCS を構築する。

4. 実橋への適用事例

本システムの適用対象とした AR-H 橋は山陽自動車道の延伸に伴い河川上に架設された橋梁であり，橋長 209.5m，中央支間長 97.5m の 3 径間連続 PC 箱桁形式の橋梁である。

AR-H 橋の架設には片持ち張出し架設工法が適用された。片持ち張出し架設工法とは，橋脚の両側に配置された移動式作業車(ワーゲン)の中で型枠の組み立て，鉄筋および PC 鋼材の配置，コンクリートの打設および養生後にプレストレスを導入して一体化した後，順次ワーゲンを両側に張り出す工法である。この工法は道路や河川上を下部からの支保工無しに施工できる画期的工法で, PC 橋の架設工法として一般化しており，既に 600 橋以上の架設実績がある。

AR-H 橋で採用された架設時施工の詳細を**図－５**に示す。**図－５**に示すように施工区分として，区分 A：柱頭部，区分 B：張出し施工部，区分 C：側径間支保工部，区分 D：中央連結部の 4 つに分けられている。本橋の施工順序の詳細は以下の通りである。



図－５　架設時施工の詳細

(1)最初に両橋脚上の柱頭部（区分 A）を支保工により施工する。

(2)完成した一方の柱頭部上に 1 台のワーゲンを組み立て，B 区分の 1 ブロック目を施工しワーゲンを 1 ブロック先に前進させた後，反対側に 2 台目のワーゲンを組み立て，以後交互にバランスを取りながら張出し施工する。

(3)張出し施工部（区分 B）の全施工終了後，施工区分 C を施工する。この部分の施工方法としては，一般的に支保工を組んで施工する。

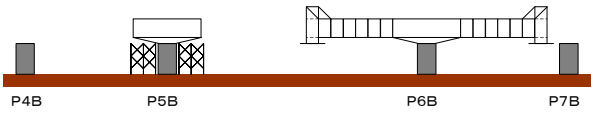
(4)(2)，(3)の施工手順をもう一方の柱頭部について同様に行う。

(5)最後に施工区分 D を吊り支保工を用いて施工することにより橋梁を完成させる。

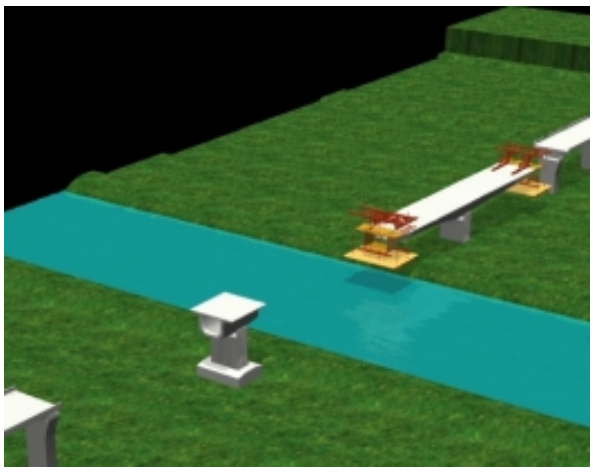
3D-CG の作成

＜架設ステップ＞

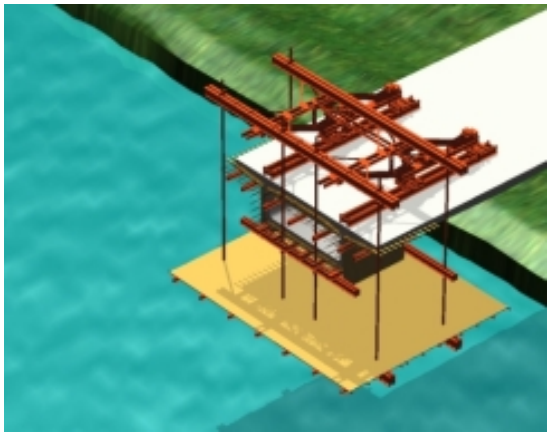
3.1 節の手順に従って, 実際の施工計画書で使用された施工手順を 6 ステップに分割して再現



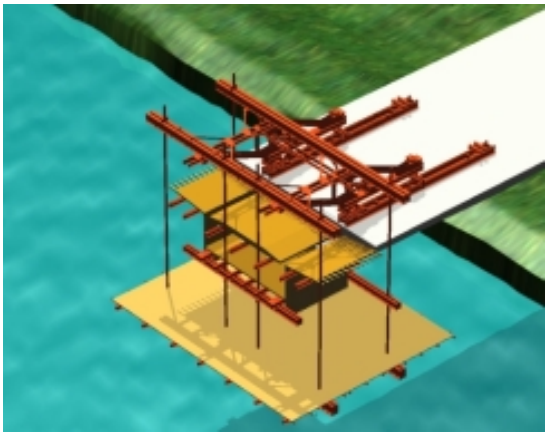
図－６　ステップ２の架設詳細図



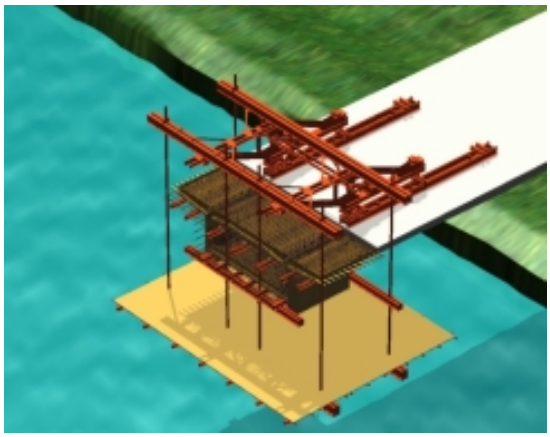
図－７　ステップ２の 3D-CG 実行画面



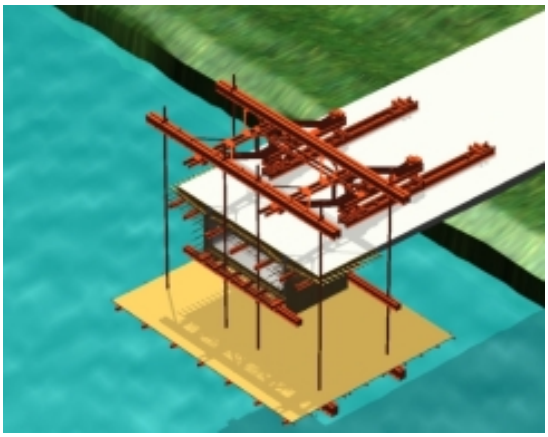
(a) ワーゲン移動前



(b) ワーゲン移動後



(c) 鉄筋・型枠組立



(d) コンクリート打設

図－８　PC 橋張り出し架設のキーフレームの例

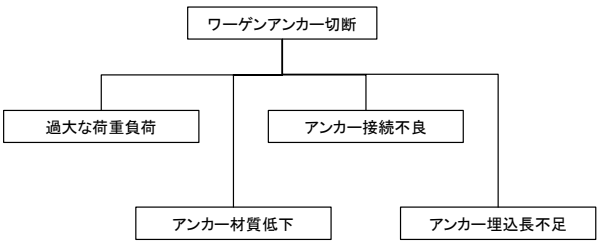
した。3D-CG 作成結果の一例として，**図－６**にステップ 2 の架設ステップ図を，また**図－７**にその 3D-CG 画像を示すようなワーゲンにより張出し施工を行っている様子を再現した。

＜架設アニメーション＞

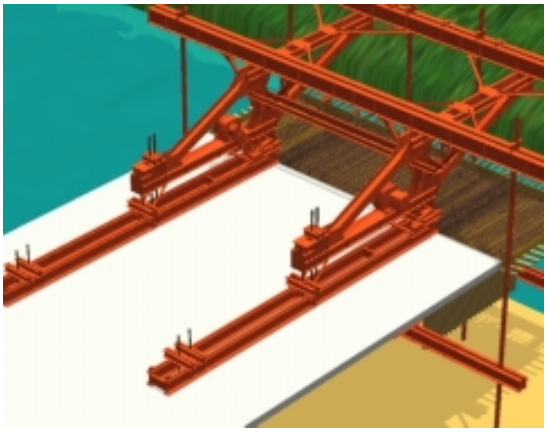
3.1 節で述べたように，架設アニメーションは施工中の一連の連続した動作の中で節目の状態（キーフレーム）を数箇所作り，それらの間をコンピュータに自動的に補間させて作成した。キーフレームとしては，型枠組立，鉄筋配置，コンクリート打設，ワーゲン移動などがこれにあたる。**図－８**(a)～(d)に張出し施工中に設定したキーフレームの例を示す。

＜事故例アニメーション＞

AR-H 橋の場合も無事故で竣工されたが，今後同様の橋梁形式が数多く採用されることを想定して，過去の事故例などを参考にしていくつかの重大事故発生を再現した。ここでの事故発生要因相互の関連を表す階層モデル作成には，同種の橋梁形式の架設に数多く携わってきた熟練技術者への数回にわたるインタビューを通じて行う手法を採用した。**図－９**に事故発生要因の階層モデルの例を示し，**図－10**(a)にはワーゲンアンカー切断前（事故発生前）の状態，**図－10**(b)にはコンクリート打設時のアンバランス状態など，種々の事故発生要因の連鎖によってワーゲンアンカーが切断され，ワーゲン全体が傾いた（事故発生後）状態を示す。



図－９　事故要因の階層図



(a)事故の再現（事故発生前）

(b)事故の再現（事故発生後）

図-10　3D-CG によるワーゲン事故の再現結果

システム画面

本システムの画面の一部を**図－11** に示す．画面左のボタンを押すことで各ステップ図の表示，アニメーションの再生ができる．

図-11　システム実行画面

5. 結論

本研究では，PC 橋に対する橋梁架設安全シミュレータ（Virtual Bridge Construction System）を構築し，橋梁架設現場での作業工程の視覚化および安全管理教育を臨場感あるものにしようとしたものである。また，本システムを実橋に適用してその有効性を明らかにすることを試みたものである。以下に本研究の成果をまとめる。

(1)従来，2 次元的な図面を中心に設計現場と施工現場との情報伝達が行われてきたものを，3D-CG を適用することによって，橋梁架設工程を実際の施工手順に従って動画としてアニメーション化でき，架設作業員の理解を容易にした。

(2)橋梁架設時に発生することが想定される事故を，事故発生要因相互の階層モデルに基づき再現した。これにより事故発生の背景と発生要因の関連が臨場感をもって理解可能になり，橋梁架設に従事する作業員の安全管理意識向上に役立つことが期待できる。

(3)「橋梁架設工程シミュレータ」と「架設時安全管理シミュレータ」を統合した「橋梁架設安全シミュレータ（Virtual Bridge Construction System）」の開発を行い，橋梁架設現場での利用を可能にした。

参考文献

1) 木内里美：身近な土木のコンピュータグラフィックス最終回，土木施工，39 巻 9 号，1998.9

2) （社）土木学会関西支部：橋梁架設の工法選定と安全管理の総合型システム，1999.7

3) Miyamoto, A. and Konishi, H.,”A Knowledge Based Expert System for Risk Management in Construction Works of Steel Bridge”, Computing in Civil and Building Engineering, Vol. 2, pp. 1557-1564, 1995

4) 事故の記憶を呼び起こせ：日経コンストラクション，2 月 11 日号，2000.2