三次元モデルを利用した 横断歩道橋の落下防止設計法の検討

永富 大亮¹・藤澤 泰雄²・鷺見 英吾³・竹重 和馬⁴

¹正会員 八千代エンジニアリング(株)名古屋支店 道路・構造部
(〒460-0004 名古屋市中区新栄2-9 スカイオアシス栄)
E-mail:ds-nagatomi@yachiyo-eng.co.jp

²正会員 八千代エンジニアリング(株)技術推進本部 CIM推進室
(〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8 CSタワー)
E-mail:fujisawa@yachiyo-eng.co.jp

³正会員 八千代エンジニアリング(株)名古屋支店 道路・構造部
(〒460-0004 名古屋市中区新栄2-9 スカイオアシス栄)
E-mail:sumi@yachiyo-eng.co.jp

⁴応用技術(株)エンジニアリング本部 防災・環境解析部 CIM推進室
(〒112-0012 東京都文京区大塚1-5-21 茗溪ビルディング)
E-mail:takesige@apptec.co.jp

現在、建設生産プロセスへの情報通信技術(ICT)の活用の一つとして、Construction Information Modeling(以下、CIMとする)の導入が検討されており、建設分野の三次元モデルの利活用が始まっている。属性情報が付与された三次元モデルが建設のライフサイクルを通して活用されることで、建設事業全体の生産性の向上が期待される。しかし現状のCIM試行業務等は、三次元モデルを利用した設計手法が確立されていないため、従来手法で設計し、この結果を受けて施工側で利用する三次元モデルを別途作成しており、モデル作成の分、従来設計に比べて、設計者の負担が増加し、重複設計となっている。本研究は、鋼構造設計の小規模事例として、横断歩道橋の落下防止装置の設計に着目し、三次元モデルから設計計算を行い、このモデルから従来形式の契約図書を出力する設計法を検討したものである。

Key Words : 3D Models, design, product model, bridge falling prevention device, CIM

1. はじめに

現在、国土交通省が推進しているCIMの考え方は、調査・設計から施工、維持管理に至るまでの建設分野のライフサイクルを通じたあらゆる工程で三次元モデルを活用し、建設事業全体の生産性の向上を目指すものである。

国土交通省は、平成24年度にCIM試行業務をスタートさせ、設計段階における効果検証が始まった。三次元設計モデルを活用した積算手法は、藤澤・矢吹の研究¹⁾で紹介されている。しかしながら、現段階は、従来方式の契約体系による発注方式で発注作業を行うため、従来の契約図書(二次元の図面及び数量計算書等)が必要となっている。これは、施工段階、維持管理段階等、各ステージで、引き渡すデータの仕様が未整備であることに起因し、実プロジェクトで三次元モデルを活用する場合、従来設計で得られる契約図書で、情報を引き渡す現行シ

ステムを採用せざるをえない状況にある。

これまでのCIM試行業務の多くは、設計段階における三次元モデルの活用を試行しつつも、発注段階に引き渡す従来方式の契約図書を作成するため、設計の基本は従来手法を採用しつつ、三次元モデルの活用場面に応じて、従来設計成果から三次元モデルを作成し、検証を行っているケースが多い。

そこで、現行の従来システムで発注・施工ができるように、設計段階で作成した三次元モデルから、契約図書(設計図面と数量計算書)を出力できる設計手法を採用すれば、設計段階の重複作業が無くなり、本来の目標の一つである生産性の向上に寄与するのではないかと考えた。

本研究は、横断歩道橋の落下防止装置という比較的小規模な装置の詳細設計を対象に、三次元モデルで設計し、契約図書(設計図面・数量計算書)を出力する手法を検討したものを報告するものである。

2. 横断歩道橋の落下防止装置設計の課題

(1) 対象構造物の詳細設計の概要

昭和55年より以前に設計された横断歩道橋の多くは、大規模地震時に、階段部が落下することを想定していなかった。このため、階段が設置される歩廊の取付け部材(フック)には、固定ボルトが設置されていない仕様が多数。また、フックに固定ボルトが設置されていても、歩廊と階段部の接合部の目地材(シーリング材)の劣化により、漏水すると、経年劣化によりフックとボルトが腐食して、断面が欠損し、耐力が低下している歩道橋も少なくない。

このような横断歩道橋は、大規模地震が発生すると、図-1に示す通りに、縦揺れで階段部が浮き上がり、横揺れで外れて落下する危険性がある。

今回、詳細設計を対象とした落下防止装置とは、図-2に示す既設横断歩道橋の階段取付け部に、地震時の落下防止を目的として設置される構造となる。

落下防止装置は、2つの取付ブラケット、連結板、これらを繋ぐ2つの連結ボルトから構成される。

既設横断歩道橋の落下防止装置の設計は、図-3に示す手順で設計される。

図-1 横断歩道橋の階段取付け部の落下のメカニズム

図-2 既設横断歩道橋の落下防止装置

(2) 現状の設計手法の課題

落下防止装置が設置される階段取付け部は、図-4に示す通り立体的に複雑に部材が交差している。竣工図が現存していても、現状の設計手法では、複雑に交差する落下防止装置の取付角度(θ)や連結板の部材長(L)を、設計段階で詳細に決定することが困難であるため、現場不一致による不整合の要因となっている。このため、落下防止装置の施工のために足場が設置された後に、現況を計測し、部材寸法を決定後、再設計するのが一般的である。

設計段階でこうした取り合いを三次元化できれば、正確な部材寸法が決定でき、設計精度が向上するため、足場設置後の現況計測を待たずに取付部材の工場製作が可能となり、現場工期の短縮が期待できる。

図-3 落下防止装置の設計フロー

図-4 取付ブラケットと連結板の関係

3. 契約図書としての数量計算書の仕様

三次元モデルから契約図書としての数量計算書を出力するための仕様を整理する。これは、発注者の工事発注(積算)するために必要となる契約図書としての数量計算書を作成するための仕様となる。

(1) 数量算出に使用する適用基準

現段階で工事発注(積算)するのに必要となる数量は、数量算出要領²⁾に準じて算出された数量計算書となる。使用する構造名称、形式記号等は、鋼道路橋数量集計マニュアル(案)³⁾に従って記述される。これらの基準は、数量算出時に必要な算出区分や、単位、数値等の取り決めが詳細に規定されており、現状の発注者側のシステムで工事発注(積算)するには、この基準に準じてとりまとめた数量計算書が必要となる。

(2) 鋼材質量の算出区分

数量算出要領によれば鋼構造物の数量は、構造形式、材種、材質、寸法に区分して鋼材質量を算出しなければならない。このため、三次元モデルから、詳細設計の数量計算を作成するには、ボルト1本まで、細分化したモデルの作成が必要となる。この細分化されたモデルから、鋼材の質量を算出することとなる。

(3) ネット質量とグロス質量

鋼構造物の数量算出のうち、特徴的な算出方法として、ネット質量とグロス質量の区別(表-1)がある。異形部材の組合せ等により矩形部材と考えられるものは、その部材の実質量(ネット質量)で計上することが原則とされるが、極端な異形部材で、四辺形部材から切り出す場合は、グロス質量で計上することとなる。

(4) 単位と数値

数量計算に用いる単位と数値(数値の丸め)は、数量算出要領に規定される。このうち、鋼材質量算出に関連する仕様を抜粋すると、表-2の通りとなる。

4. 契約図書としての図面の仕様

三次元モデルから契約図書としての図面を出力するための仕様を整理する。これは、発注者の工事発注するために必要となる契約図書としての発注図を作成するための仕様となる。

(1) 図面作成に使用する適用基準

現在、土木設計業務の詳細設計の成果図面、土木工事

の発注図、完成図のCADデータは、CAD製図基準(案)⁴⁾に準じて作成することとなる。作図の基本は、土木製図基準⁵⁾ならびに土木CAD製図基準⁶⁾に従って図化される。そして、これらは二次元の図面として作画される。

(2) ファイル形式

CAD製図基準(案)で指定される図面のファイル形式は、SXF(P21)形式のVer.2.0レベル2が原則となっている。

(3) 座標系

CAD製図基準(案)で指定できるSXF仕様で定義される座標系(図-5)は、用紙座標系と対象構造物に基づいた部分図座標系に大別されるが、三次元モデルで必要とされる測地座標系として扱うことができない。

表-1 ネットとグロスで計算するモノの例²⁾

ネットで計算するモノ	グロスで計算するモノ
矩形部材・台形部材 ・平行四辺形	ガセットプレート
全長にわたってテーパ のついた部材	板厚変化のテーパ
伸縮継手の楕円部	板厚変化のテーパ

表-2 数量計算の単位及び数値一覧表(抜粋)²⁾

計算書	種 別	単 位	数 値	摘 要
鋼材 質量	幅,高,長	m	小数位以下3位止	4位四捨五入
	質量	kg	整数位止	1位四捨五入
ボルト 質量	単位質量	g/本	整数位止	1位四捨五入
	本数	本	整数	
	質量	kg	整数位止	1位四捨五入

図-5 用紙座標系と部分図座標系の関係⁴⁾

5. 三次元モデルを用いた設計手法の提案

(1) 三次元モデルを用いた設計手順

落下防止設計における最終的なアウトプットは、契約図書(図面、数量計算書)の出力となる。このため、構造計算・数量計算・概算工費算出等の設計プロセスを、三次元モデルとデータ連携する仕組みを定義して、三次元モデルと契約図書のシームレスな関係を成立させることにより生産性の向上を図ることとして、従来の設計手順をもとに三次元モデルを用いて落下防止装置を設計するための手順を図-6のように仮定した。

(2) 落下防止装置のモデル化

属性情報を付与した三次元モデルの作成は、国土交通省のCIMモデル作成仕様[検討案]〈橋梁編〉(以下、CIMモデル作成仕様)⁷⁾を参考にした。

契約図書に必要な数量計算書は、ボルト・ナットの個数まで集計しなければならない。このため、落下防止装置の設計に使用する三次元モデルは、すべての部材を正確に再現した。これは、CIMモデル作成仕様に示されるレベル4(表-3)の三次元モデルの作り込みレベル(詳細度)に該当する。

(3) 属性情報の設定

CIMモデル作成仕様によれば、基本属性情報の他に、利用目的別に属性情報を定めることができると記載される。今回の場合、数量計算の他、構造計算、概算工事費算出に属性情報を利用する活用場面を想定している。これらの活用場面で必要となるパラメータを検討した結果、数量計算書を算出するのに必要なパラメータがあれば、部材の構造計算や概算工事費の算出が可能となることが確認できた。そこで、落下防止装置の設計に使用する三次元モデルには、数量集計に必要なパラメータを、属性情報として付与することとした。

(4) 形状寸法の取り扱い

数量計算及び構造計算で必要となる形状寸法のうち、長さを表す属性情報「幅」、「厚さ」、「長さ」は、寸法が可変するパラメータとして属性情報を定義(図-7)した。これにより、モデルの形状を変更すると、寸法パラメータを含む関連する属性情報が連動して変更される。構造計算及び数量計算等は、属性情報を引数として、計算するため、モデル側の形状変更と、各種計算が同期される。

モデルの変更と、契約図書(構造計算書、数量計算書)の再計算が同期するため、その後の変更や修正作業の短縮、ミス防止等が改善され、生産性の向上が期待できる。

(5) 三次元モデルから図面作成

一般的な図面は、立体形状の実構造物を、製図手法に基づき、必要な視点の形状を図化している。立体的な実構造物を、三次元モデルと置き換えれば、三次元モデルから図面を生成することが可能である。具体には、三次元モデルを必要な視点からみた形状で表示させ、ワイヤーフレームと陰線処理を施し、二次元図面を作成する。

(6) 各種計算書の出力

各種計算書(数量計算書、構造計算書等)は、既存の表計算シートを利用する。新たに各種計算書の作成ツールを開発せずに、既存のツールを有効活用し、データの受け渡し方法(三次元モデルとの連携)を新規に定義する。

図-6 三次元モデルを利用した設計フロー

表-3 三次元モデルの作り込みレベル(詳細度)⁷⁾

レベル1	直方体等で部材形状の特徴を表現した構造ブロックモデル
レベル2	主要部材の外形形状が正確
レベル3	レベル2に加え、主要部材以外の一部部材外径形状が正確
レベル4	全ての部材が正確

図-7 可変する形状寸法の属性情報の定義の例

6. 設計手順の検証

実際の横断歩道橋の落下防止装置の詳細設計に適用し、図-6の設計手順の検証を行った。

(1) 使用したソフト

三次元モデルの作成は、Autodesk社のRevit Structure 2014(以下、RSTとする)を用いた。属性情報は、契約図書(数量・構造計算書等)が必要となる新設の落下防止装置のモデルのみに付与した。図面の生成は、Autodesk社のAutoCAD 2014(以下、ACDとする)を使用した。各種計算書に使用した既存の表計算シートは、Microsoft社のExcel 2010(以下、EXL)で作成されたシートを使用した。各ソフトのデータ連携の概念図を、図-8に示す。

(2) 属性情報の設定

属性情報は、RSTで作成した部材モデルに対し、契約図書を出力するのに必要な属性情報を付与した。

今回設定した属性情報は、工場製作時に必要となる属性情報「材片」や、ボルト・ナットで板材を締め付けた際の首下長さの計算に必要な属性情報「(ボルトの)首下長さ」、ネット質量を計算させるための属性情報「net」等、全21種類の属性情報(表-4)が必要となった。

(3) データ連携の方法

三次元モデルと表計算ソフトのデータ連携は、RSTの機能を用いて属性情報を抽出(図-9)した。これをEXLに取り込み(図-10)、既存のシートにリンク(連携)した。

(4) 各種表計算(契約図書)シートの出力

EXLの数量計算書は、計算過程を表現できるため、契約図書としての数量計算書の体裁を満足するには適したツールである。各種質量の計算は、RST上のモデルから算定される質量を使用せずに、属性情報として定義した形状寸法(幅、厚さ、長さ)と単位重量から算定する既存シートとデータの連携を図った。これにより、従来使用してきたEXLの既存シートを活用して、契約図書(数量計算書(図-11)、構造計算書(図-12)、概算工費算出書)を作成した。

図-8 設計の三次元化の概念図

表-4 21種類の属性情報

C(連番)	幅	グロス質量(鋼材)
ファミリー	厚さ	質量(ボルト類)
分類	長さ	材質
グループ名	首下長さ	摘要
形式記号	比重	net
材片	質量	メッキ
呼び径	ネット質量(鋼材)	備考

図-9 モデルに付与した属性情報を表形式で集計(RST)

図-10 表計算ソフト(EXL)で取り込んだ属性情報

図-11 数量計算書(EXL)の出力の例

図-12 構造計算書(EXL)の出力の例

(5) 三次元モデルからの図面作成

契約図書としての設計図を作成するため、RSTの三次元モデルをCADデータで出力して、ACDで読み込み、設計図を作成した。したがって、ACD上(図-13)では三次元の図形であるが、図面(図面レイアウト)としてみると二次元の従来図面と同じ出力になる。

取付ブラケットの詳細図は、図-14に示すように三次元モデルからM1ブラケットのモデル以外を非表示にして、表示されるモデルに寸法線を加え、ウェブの正面からの視点で詳細図を作成した。同じ手法で、図枠の中に設けた窓枠で、各視点(正面図、側面図等)の図を表示させ、契約図面に相当する各部詳細図(図-15)を表示させている。

(6) 立体組立図の作成

横断歩道橋に設置される落下防止装置は、材料が少ない単純な構造であるが、二次元の従来図面では、分かりにくい形状となる。落下防止装置を取り付ける際に、装置の立体組立図がある方が取付時の間違いも少なく、施工者の理解も得やすい。ACD上には、設計用に作成した三次元モデルがあるため、これを活用すれば、立体組立図(図-16)も容易に作成できる。具体には、各部材をオフセットで移動させて作成する。

図-13 三次元モデルと図面(ACD)の関係

図-14 三次元モデルから図面の作成イメージ

図-15 三次元モデルから図面の作成(取付ブラケットM1)

図-16 三次元モデルから作成した立体組立図

7. 二次元設計との比較(設計の三次元化の効果)

従来設計(以下、二次元設計)と三次元設計とを比較した結果を報告する.

(1) 数量精度

二次元設計と三次元設計は寸法の丸め(数位)を、EXL上で算定しているため、計算上の差は生じない。ここで、生じる数量の差は、歩廊と階段部の取り合いを三次元化し、落下防止装置の各種形状寸法の決定を、三次元モデルを使用したことによる設計精度の向上を示す。

二次元設計のブラケット及び連結板の設計図は、図-17の様に記載される。ブラケットのベースプレートとウェブの接続角度 θ や、連結板の部材長 L は、二次元設計で確定することが困難なため、現地計測後決定する仕様となっている。つまり、設計としては未完成品となる。

二次元設計と三次元設計の数量を比較した結果を表-5に示す。二次元設計の数量に対し、三次元設計では23%の鋼重増となった。従来の二次元設計は、現地計測を行い、この23%の鋼重増を確認していたことになる。しかしながら、この精度の大小は問題ではない。場合によっては、誤差がない場合も考えられる。現地計測の上決定する行為を設計仕様としていることで、二次元設計の信頼性が、現地計測に委ねてしまっていることが、設計として未完成となる原因となっている。

(2) 現場工期の短縮効果

既設横断歩道橋の落下防止装置の設置工事は、階段直下に足場を設置した後、現地計測を行い、設計図との不整合(現場不一致)が確認されることが一般的である。その後、施工者、設計者及び発注者の三者で協議し、修正設計を経て、工場製作を行い、部品完成後に部材を取付を行い、足場が撤去される。このため、足場が設置されている間は、歩道利用者の不便を強いることとなる。

設計が三次元化され、設計段階で、現況の横断歩道橋の三次元モデル情報が精度よく入手でき、これに対する設計が設計段階で可能となれば、足場設置前に取付け部材の工場製作を先行することができる。これにより、足場の設置期間を大幅に短縮することができる。また、設計者・施工者・発注者の三者調整会議も省略できる可能性がある。今回のケースでは、図-18に示すように、現場工期が45%短縮することが可能の試算結果となった。

(4) フロントローディング効果

製品開発の分野では、初期段階(フロント)で、製品を作り込み(負荷をかける=ローディング)することで、できるだけ早い段階で問題点を抽出し、早期改善して、設計品質を向上させるという考えを、フロントローディング

グという。製品開発プロセスの分野で、CAEが普及する理由となっており、三次元設計の導入効果として期待されている。一般的な事例としては、試作するまで発見できなかった不具合を、三次元データを使って、設計段階で見つけられるようになることや、工程終盤での手戻りやその後に発生する設計変更等が減ずることで、コストやリードタイムを大幅に削減できると期待されている。

立体的かつ複雑な取付構造を持つ横断歩道橋の落下防止装置の設置工事においては、二次元設計では予測できなかった不具合を、設計の三次元化により、事前に探知することで、大きなフロントローディング効果が得られると考えられる。

(3) 繰り返し検討時間の短縮化

三次元設計の場合、三次元モデルの作成や属性情報の付与、既存表計算シートへのデータ連携の仕様作成が、新たな設計行為となる。しかし、これの設定は、一度作成すると他の橋にも転用しやすいため、長期的に見れば、導入直後の負担増と言える。

一方、一度、各種計算シートと三次元モデルのデータ連携を定義すれば、繰り返し検討によるモデルの修正に伴う各種計算シートの出力は、即座にデータ連携が図れるため、作業時間の短縮が図られると考える。

図-17 二次元設計のブラケットと連結板の設計図

表-5 数量精度の比較

	鋼材質量集計	比率
二次元設計	208kg	(1.000)
三次元設計	256kg	(1.231)

図-18 工程表の比較

8. まとめ

将来的には属性情報を付与した三次元モデルが、建設ライフサイクルでの引き渡しデータにとって代わることと期待されている。このデータがあれば、構造計算・発注時の積算・施工にも運用され、現在の契約図書(図面や数量計算等)に代わる基本データになるとされるが、今しばらくは、現状の建設生産システムが運用されるため、即座に三次元設計に移行することはないと思われる。

しかしながら、三次元設計を進めることによる生産性の向上の可能性があるのであれば、積極的に設計の三次元化を採用していくべきと考える。これらの普及に対し、契約図書が作成できない故の重複設計が、問題視されているのであれば、本研究で提案した「三次元モデルから契約図書を作成する」という仕組みを一時的に開発することで、三次元設計の普及に貢献できることを期待する。

また、契約図書を作成するプロセスは、発注や施工に必要な属性情報の検証にも有効な検証プロセスになると思われるため、このような視点も重要であると思う。

また、維持管理の視点では、当時の設計の考え方を知ることが、将来の不測の事態の損傷原因究明の糸口にな

ることが多々ある。設計当時(2015年現在)の契約図書を出力するルーチンを作成しておくことは、将来の維持管理に有効な手立てとして布石を残すことができる。

本研究の三次元モデルから契約図書を作成する視点が、CIMを進めていく上での新たな着眼点として活用して頂けるきっかけになれば幸いである。

参考文献

- 1) 藤澤泰雄, 矢吹信喜: CIM モデル事業の事例と三次元モデルの積算への利用方法の検討, 土木情報シンポジウム講演集 vol.38, pp.127-130, 2013.
- 2) 国土技術政策総合研究所 防災・メンテナンス基盤研究センター, 平成 26 年度 土木工事数量算出要領(案), 2014
- 3) 国土交通省道路局国道・防災課(監修), 土木工事積算研究会(編著), 財団法人 建設物価調査会(出版), 鋼道路橋数量集計マニュアル(案)改定, 2003
- 4) 国土交通省, CAD製図基準(案), 2008
- 5) (社)土木学会, 土木製図基準, 2003
- 6) (社)土木学会, 土木CAD製図基準(案), 2005
- 7) 国土技術政策総合研究所 防災・メンテナンス基盤研究センター メンテナンス情報基盤研究室, CIM モデル作成仕様【検討案】<橋梁編>, 2015

(2015. 10. 26 受付)

CONSIDERATION OF A FALL PREVENTION DESIGN WAY OF THE PEDESTRIAN OVERBRIDGE FOR WHICH 3D MODEL WAS USED

Daisuke NAGATOMI, Yasuo FUJISAWA, Eigo SUMI and Kazuma TAKESHIGE

Introduction consideration of a CIM is accomplished as utilization of IT to a construction production process (ICT) in our country in recent years. As a result data profit utilization of three-dimensional model of the construction field has started. The three-dimensional model to which attribute information was given is to be utilized in a construction life cycle, and improvement of the productivity of the whole construction business is expected. For the moment, I design at both of three dimensions and two dimensions. Therefore designer's work rate isn't reduced. This study will report the result which considered a drawing of the usual method and the way to calculate the quantity from a 3D model.