

複合構造物の立体 FEM 解析

上阪 康雄*1, 高德 裕平*2, 安部 要*3

1. はじめに

最近の構造物は、合理化、経済性の面から鋼、コンクリート、強化ガラス、FRP などの構造材料を組み合わせた複合形式をより多く取り入れる傾向にあり、さまざまな新しい形式の複合構造物に対してはトラス、ビーム、シェル要素を含む立体解析ソフトの適用が求められている。

本文は、ドイツで開発された実用的な立体 FEM 解析ソフトを使用して、鋼製トラス、プレストレストコンクリートスラブおよび外ケーブルよりなる複合橋梁構造物の解析を行い、こうした新形式構造の解析における立体 FEM 解析の適用性および問題点を明らかにしようとするとともに、欧州における立体 FEM 解析ソフトの適用例を参考に示すものである。

2. 構造解析へのアプローチ

近年のコンピュータの発達は、各種構造物の立体解析をパソコンで実施することを可能としている。とはいえ、一般的な構造物に対してはこれまで使用されてきた平面フレームもしくは格子モデルによる構造解析で満足できる場合が多く、複数のトラス要素が交差する結合部など一部の部位に限定した応力照査を目的に立体 FEM 解析が実施されるケースがほとんどであった。

従来のコンクリート橋構造解析では、T 桁であれ、箱桁であれ、梁 1 本（もしくは数本）を桁高変化のあるビーム要素としてとらえ、その中に内ケーブルもしくは外ケーブルを配置する方法が一般的であり、PC 橋の場合、この方法は今後も有用であり続けるはずである。たとえば 1 室箱桁の場合、通常モデル化は橋軸方向の部材接点ごとに所定の曲げ剛性 (I)、ねじり剛性 (J)、断面積 (A) をもった梁 (ビーム) とし、橋台・橋脚部で支点を設ければ良い。

また、ラーメン橋脚等がある場合には、桁の剛結部で所定の曲げ剛性、ねじり剛性、断面積をもった支柱をつなげることで対応できる (平面フレーム解析, plane frame analysis)。

また、コンクリートスラブや横桁に作用する断面力を求める場合に、これまでは平面格子モデル (plane grid model) 解析が多く使用されてきた。一方、欧州では 90 年代から平面格子モデルを組む代わりに平面 FEM モデルを使用する例が増えてきていた。

その理由は、平面 FEM モデルを組むほうがスラブ内の

断面力を直接的に求めることができるとともに解析時間の節約にもつながるからであった。その背景には一般の橋梁設計技術者が無理なく使え、比較的廉価に入手できる平面 FEM 解析ソフトの開発があった。

さらに、近年のめざましいコンピュータ技術の発展にともなって、解析ソフトの開発技術者たちは従来のような多接点構造におけるメモリーオーバーを気にすることなく、土木・建築多方面からの要望にあわせたプログラムの開発に没頭することができるようになった。こうしてフランスやドイツを中心に、建設工学のための立体 FEM 解析ソフトが開発された。近年、フランスを中心に多く建設されているコンクリートスラブと鋼製トラス、外ケーブルなどで構成される複合構造の橋梁の設計は、こうした立体 FEM 解析ソフトの開発と無関係ではないと言える。ことに広幅員の道路橋などで、3 面以上のトラスが構成される場合に、立体 FEM 解析ソフトの有用性が発揮される。以下に、立体 FEM 解析に用いる基本要素を示す (図 - 1)。モデル図での要素図化はソフト上、各形状を反映して図化されている。また建築の分野でも、ヨーロッパでは従来よく使用されていた立体フレーム解析に代わって、より迅速にモデル化が可能な立体 FEM 解析が重宝されるようになってきている。

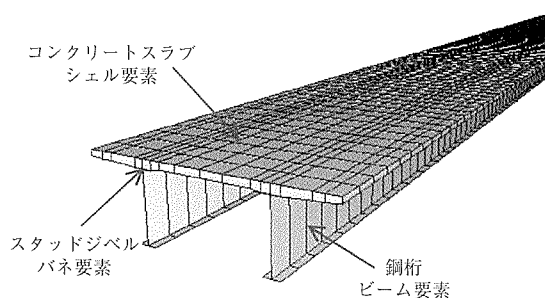


図 - 1 基本的なモデル構成要素

図 - 1 に示す基本要素に加えて、軸力のみに対応するトラス要素が外ケーブルなどに使用される。スラブハンチなどは厚さ変化をもたせたシェル要素で対応できるが、ときには 8 接点からなるソリッド (充実ブロック) 要素も使用される。ビーム要素のみをもちいて、従来のフレーム解析ももちろん行うことができる。

これらの基本要素の分割は、市場に出回っているノート

*1 Yasuo KOSAKA : コサカ設計・アソシエーツ代表

*2 Yuhei TAKATOKU : (株) 大林組 東京本社 土木技術本部構造技術部

*3 Kaname ABE : (株) 大林組 東京本社 土木技術本部構造技術部 設計副部長

パソコン（1 GHz 程度のプロセッサ搭載）を使用すれば、楽に 10 万接点を越えることができる。70 年代に穴あきカードをかかえて大型計算機センターに通った時代、1 千節点で苦労したことをかえりみると、つくづく時代の移り変わりを感じる。なお特筆すべきはこうした立体 FEM モデルが、現在の標準製図になりつつある CAD データを利用して作成でき、逆に FEM モデルから CAD 図面を作成することもできることである。

3. 鋼コンクリート複合橋梁の立体 FEM モデル化

例として、ここではコンクリートスラブおよび H 形鋼などで構成される複合トラス橋をとりあげてみる。従来の解析手法は、仮に 2 面トラス構造であれば、まず 1 面トラスの断面積を求め、これを 2 倍した平面フレームを組み、その上にスラブ相当のビームを取り付けた。そしてこうして求めた断面力を 2 で除し、1 面あたりの断面力とした。こうした手法に対し、立体 FEM 解析の場合には、図 - 1 の要領でスラブをシェル要素で分割し、トラス部材はビーム要素として所定の断面形状を 1 本ずつ入力する。ここで筆者らはドイツ・ミュンヘン工科大学の構造解析チームによって開発され、現在ドイツの各大学構造研究室、設計コンサルタント・ゼネコンなどで幅広く使用されている立体 FEM 解析ソフト（SOFISTIK）を使用しモデルを作成した。モデルはコンクリート床版に鋼部材であるトラスウェブを有する 2 径間連続 PC 複合トラス橋（支間長 $L = 2@50$ m）を対象とした。モデル化にあたっては、全体モデルの作成およびチェックが容易となるよう、スラブモデルは、橋軸方向

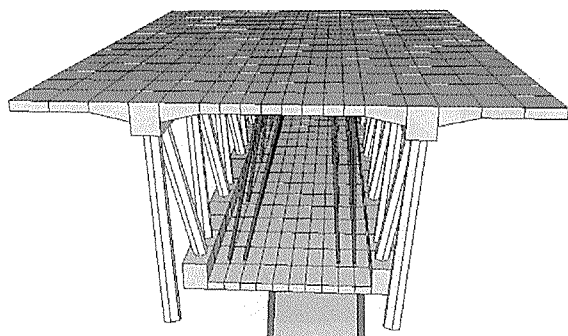


図 - 2 外ケーブルを有する PC 複合トラス橋

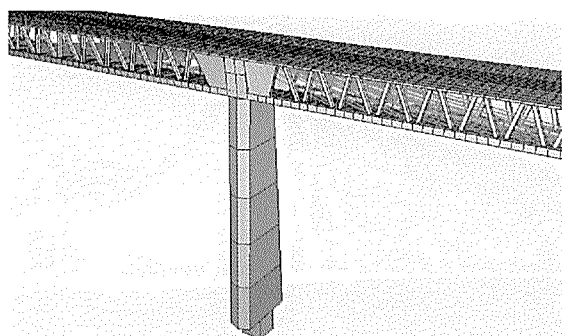


図 - 3 PC 複合トラスウェブと橋脚

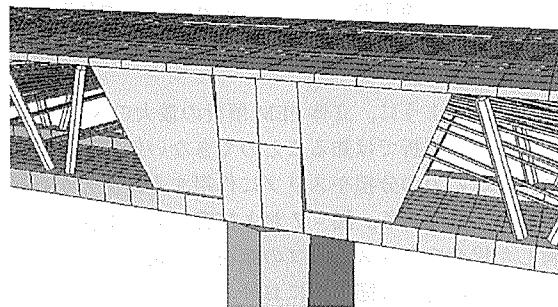


図 - 4 PC 複合トラス橋 柱頭部

50 要素/支間、橋軸直角方向 20 要素程度とした。上スラブ・下スラブは 4 接点のシェル要素で構成されている。各トラス部材は、H 形またはボックス形の鋼製ビーム要素とした。外ケーブルは、それぞれのグループに置き換えた丸鋼のトラス要素とした（図 - 2）。なお、橋脚は基本的に 1 脚のビーム要素とした（図 - 3）。ただし、柱頭部は 8 接点で構成されるソリッド要素を用いた（図 - 4）。ビーム要素と同様に、各スラブの中に付着のある内ケーブルを入れることも可能である。

4. 鋼コンクリート複合橋梁の立体 FEM 解析

4.1 鋼コンクリート複合橋梁の立体 FEM 解析事例

前節で作成した各要素による全体モデル（図 - 5）を用いて FEM 解析を行ってみる。ここで鋼コンクリート複合橋

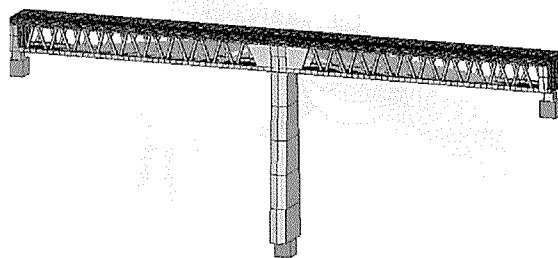


図 - 5 PC 複合トラス橋 全体モデル

梁が張出し架設工法により施工されるとする。この場合、施工ステップごとの架設時変形計算は、施工時の温度、相対湿度、施工インターバルなどに応じて、クリープ・乾燥収縮を考慮して行われる。長大橋梁においては、少なくとも架設終了時までの計算は、各施工ブロックの有効コンクリート材齢を考慮して行う必要がある。使用した解析ソフトでのクリープ・乾燥収縮の取扱いは、レオンハルトのコンクリート講座第 5 巻りに示されたリラクセーション係数法に準じている。この方法を用いることによって、面倒な積分項は省略され、迅速な数値解析ができる。クリープ・乾燥収縮係数に関しては、現行の道路橋示方書・共通編²⁾に示されている係数がリンクされている。たとえば、上中間スラブをグループ 1、張出しスラブをグループ 2、下スラブをグループ 3 としておき、施工ステップが 1 ~ 50 とすると、その組合せに応じて各グループの有効コンクリート

材齢が求まる。基本的にこうした計算はひび割れのない弾塑性域で実行され、スラブ内に配置された鉄筋量を考慮する(図-6)。

先に述べたように、立体FEM解析の最大のメリットは、平面フレーム解析では知ることのできない偏心載荷時のトラスウェブの力の分担やスラブに作用する断面力が直接入手できることである。図-7および表-1にT荷重を偏心載荷した場合のトラスウェブの断面力(軸力)を示す。平面フレーム解析では図-7におけるトラスウェブ①③および②④の平均相当としての断面力しか得ることができないが、立体FEM解析ではトラスウェブそれぞれの断面力を直接得ることができる。

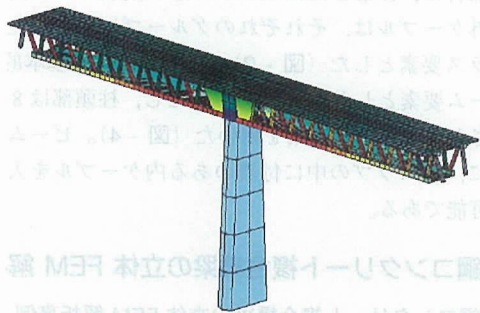


図-6 張出し架設時の応力図

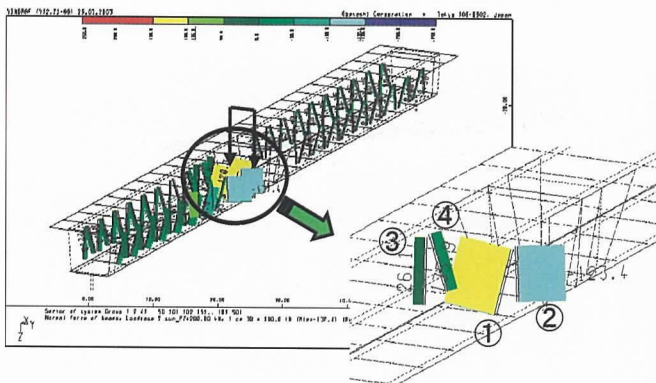


図-7 トラスウェブの断面力

表-1 トラスウェブの断面力 (単位: kN)

	トラスウェブ	軸力
立体FEM解析	①	135.9
	②	-123.4
	③	26.1
	④	-28.0
平面フレーム解析	①③相当	81.0
	②④相当	-75.7

+: 圧縮, -引張

4.2 立体FEM解析の適用にあたっての問題点

立体FEM解析ソフトの適用にあたって、第1の問題は、対象構造物のモデル化が利用者に任されてしまうことである。フレーム解析などの場合は、これまでの慣例や使用マニュアルにしたがって入力すれば安定した解析結果が得られる。一方、立体FEM解析ソフトの場合には、使用要素

の選定、メッシュ分割まで細かい使用マニュアルはなく、慣例が非常に少ないため、初心者入力の場合、安定した結果が得られないことも起こる。こうした問題を改善するには、数多く解析を実行し、適切なモデル化ができるように訓練しなければならない。

立体FEM解析ソフトの土木・建築構造物への適用性に関しては、従来の平面もしくは立体フレームで取り扱える分野であれば、シェル要素を難なく取り入れることが可能である。ただし、これまで図表使用が標準であった版状構造物の解析の場合、板面の接点分割しだいで結果に影響が出やすいので、どのソフトを用いる場合にも適用できるモデル作成マニュアルの標準化が求められる。ただし、この場合にはHomberg³⁾などの図表が準備されているので、前もってこうした図表でモデルの精度を確かめておくことと安心である。ドイツ・フランスなどでは設計照査技師制度があり、設計事務所が求めた解を照査技師事務所にて別の解析ソフトを用いて照査している。

適用にあたっての問題点として、さらに立体FEM解析ソフトがこれまでの汎用解析ソフトより割高となっていること、FEM解析ソフトの習得が容易でないことがあげられる。しかし、こうした問題は次第に解消されつつある。また、シェル要素のプレストレス力による計算、コンクリートのクリープ・乾燥収縮計算が、これまでの汎用解析ソフト並みに行える機能は、PC構造物設計には欠かせない。なお、シェル要素を用いる場合には、その出力参照にあたって版状構造物に対する基礎知識が不可欠である。



写真-1 ミュンヘン空港 センタービル



写真-2 ハノーファー メッセビル

5. 欧州における立体 FEM 解析ソフトの適用

5.1 建築構造物への適用事例

上述したような立体 FEM 解析ソフトは、最近欧州で数多く建設されている鋼製フレームと強化ガラスなどによる建築構造の解析にも使用されている。写真 - 1~3 に欧州の建築構造物の事例を、図 - 8 に薄膜屋根モデルの解析事例を示す。

もともと、ミュンヘン工科大学では 1972 年のミュンヘンオリンピックスタジアムに採用された吊屋根構造を契機として、こうした構造に対する解析ソフトの開発を研究してきたといえる。いまや、立体 FEM 解析ソフトを使用して

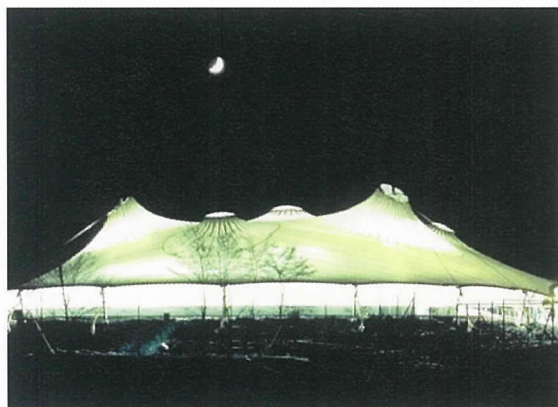


写真 - 3 ハンブルク 薄膜屋根構造

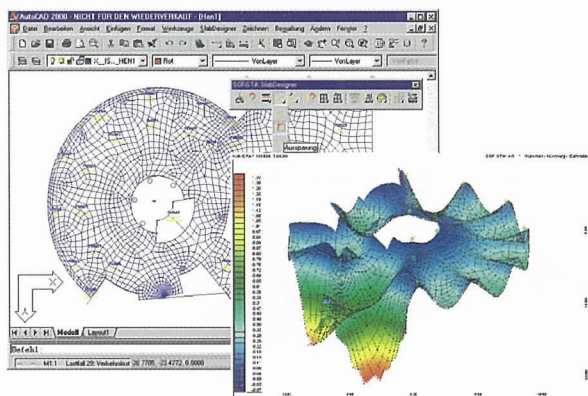


図 - 8 薄膜屋根モデル

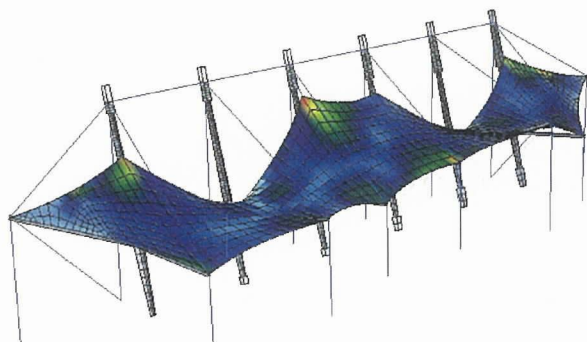


図 - 9 形状作成および認識機能をもちいた例

平面上に置かれた幕の数点を持ち上げ、任意の位置で固定し、その形状を記憶させる技術 (図 - 9) や製作用 CAD 図面を作成することも可能である。

5.2 動的解析への適用について

立体 FEM 解析ソフトの適用で忘れてはならないのが、動的解析である。図 - 10 は樹木が倒れて、建築ビルに接触する場合の衝撃応力を解析したケースであり、図 - 11 は、自動車が壁にぶつかるケースを想定している。この他、図 - 12 では、鉄道線路が地震などの災害で陥没した際に、ブレーキをかけた列車がどのような挙動をするかを検証している。

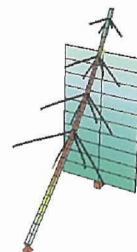


図 - 10 倒木による建物への衝撃応力の解析事例

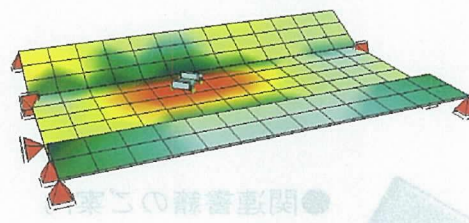


図 - 11 自動車の壁への衝突を解析した事例

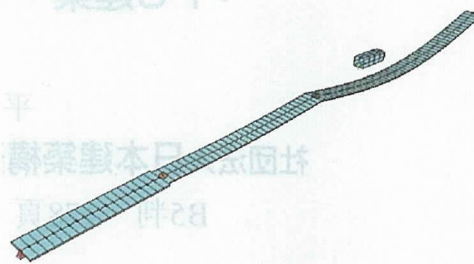


図 - 12 地震時の列車の挙動に対する検討

6. あとがき

ヨーロッパにおいては新しい複合構造物の解析に対して、立体 FEM 解析ソフトの適用が標準となりつつある。近年、わが国においてもさまざまな形状・材料を駆使した構造物が増えてきているが、プレストレストコンクリートとの複合である場合、容易に取り扱える立体 FEM 解析ソフトが

ほとんど手に入らないのが現状であった。

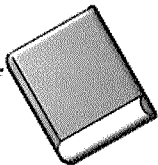
ここで紹介した立体 FEM 解析ソフトは、ミュンヘンの建設系構造解析専門チームによって開発され、シュツットガルトのシュライヒ設計事務所との連携によって発展してきたものであり、長大スパンの複合橋梁、建築吊屋根構造、地下構造など、ほぼあらゆる建設領域に適用可能である。今後、わが国でもこうした立体 FEM 解析ソフトの適用がますます望まれる時代になっていくと思われる。わが国の構造解析専門チームの、複合構造物へのより一層の取組み

を期待したい。

参考文献

- 1) フリッツ・レオンハルト著 横道英雄監訳 成井信・上阪康雄・本間秀世訳：レオンハルトのコンクリート講座⑤ プレストレストコンクリート、鹿島出版会、1983.9
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編、2002.3
- 3) Homberg, Ropers : Fahrbahnplatten mit veraenderlichen Dicke, Springer - Verlag, 1965

【2003年1月31日受付】



● 関連書籍のご案内

● PC建築 —計画から監理まで—

平成14年11月発行

社団法人日本建築構造技術者協会編／技報堂出版刊

B5判・178頁・本体価格4,800円(税別)

技報堂出版

〒102-0075 東京都千代田区三番町8-7 第25興和ビル

TEL03(5215)3165 FAX 03(5215)3233