

論文

[2134] コンクリート構造のトラスモデルによる視覚化

正会員 ○ 斎藤貴之（日本国土開発(株)）
 正会員 矢澤英治（東京都立大学大学院）
 松岡一雄（日本国土開発(株)）
 正会員 山崎 淳（東京都立大学工学部）

1. はじめに

1.1 コンクリート構造の設計におけるモデル化の現状

コンクリート構造の設計においては、古くから、トラスモデルが、様々な構造部材や、部分構造のモデル化に用いられてきたが、その例としては、梁の曲げと剪断の抵抗機構を表すMörschのトラスモデルをはじめとし、梁のねじり抵抗を平面トラスからなる折板構造で表す方法、面内力を受ける板、ディープビーム、コーベル、プレストレストコンクリートの定着部の割裂力の評価などが挙げられる[1],[2]。土木学会コンクリート標準示方書には、構造物の形状、支持条件、荷重状態、および考慮する限界状態に応じて、トラスモデルに限らず、スラブ、梁、柱、ラーメン、アーチ、シェルなど、「適切な解析モデルを設定」すべきことが述べられている[1]。日本コンクリート工学協会では、有限要素法の適切な利用法をすすめるための研究も始められ[3]、その場合も、モデル化が重要なテーマとされている。このような現状において、構造物のモデル化は、配筋の決定や、強度算定の基礎となっているが、モデル化の方法の論理として依拠すべきものは確立されておらず、力学の知識の応用として、また、経験や直感により無意識的に行なわれる場合が多いと思われる。

1.2 目的とトラスモデルの利点

構造物の耐荷機構を視覚化すること、すなわち、構造物の内部の力を、ベクトルとして、大きさと方向で、かつ、出発点から終点まで連続した流れとして表現することは、設計と強度および安全性の評価において有用である。最新の科学技術手法であると見做されている汎用の連続体の有限要素法は、古典的方法である連続体の力学、またそれを、形状や力学の場の特性に応じ一般理論から縮退した形であるシェル、板、線材の理論によっているが、これらの表現では、その定式化の特性上、応力を流れとして表現するのに適さない。さらに、構造解析をするために「適切な解析モデルを設定」出来るためには、予め構造物の応力場や変位場の特性を知っていなければならないという矛盾もある。

トラスモデルは、有限要素モデルのひとつにほかならないから、その長所と限界をあわせもちながら、種々の実際の構造の耐荷機構を流れとして認識し表現するには、最も適していると思われる。また、トラスの単位構造ユニットをつくり、それをモジュールとして任意の形状の構造物や部分構造を構成すれば、応力場や変位場の特性を考慮せずに、構造モデル、解析モデルの基本形を得ることができる。材料特性の変化による耐荷機構の変化は、その基本形に対して、主に剛性の変更で対処出来ると思われる。

ここでの目的は、トラスモデルにおけるトラス部材の配置方法、配向性、剛性、トラスモデルによる耐荷機構の視覚化の有効性、トラスモデルを用いて力学的に合理的な構造形式を形成するための論理、ならびに結果の視覚化の方法について考察するものである。

2. 構造のモデル化

2.1 トラスモデル

古典的トラスモデルと対比したここでのトラスの特徴は以下の各項である。(1) トラスの単位構造ユニットをつくり、それをモジュールとして任意の形状の構造物を構成する。2次元面内挙動、および、シェルおよび板の場合のユニットは、図1のようにした。シェルは、ユニットを1層にならべる。ソリッドの場合は、シェルのユニットの内部に更に4本の部材を加え、すべての頂点が相互に結ばれるようにした。これらの配向性の意味は剛性と複合して理解すべきものであるが、その理論は未完成である。ここで示したシェルのユニットの利点は、面内力、面外力とも同じ方法で表現できることである。

(2) 前項によるトラスの

構成方法において、力の流れる道筋をなるべく等方的に確保することに留意したが、道筋を予め固定してしまうことは望

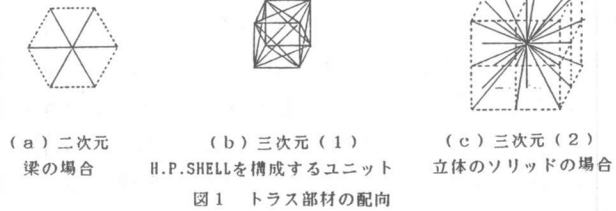


図1 トラス部材の配向

ましくない。道筋を可変とする方法が2次元問題で試みられているが[4]、3次元での例は著者らには知られていない。(3) コンクリートの部分と鋼材の部分は、トラス部材の軸剛性で表現できる。(4) 鋼材を含んでいて、引張りによりひびわれが生ずる部分の剛性は、ある断面での断面積比と弾性係数比で考慮した。ここでは、鋼材による補強は、鉄筋間隔が直径の10倍、すなわち断面積比が0.01、弾性係数比が10、よって軸剛性はひびわれ後、1/10になるとした。付着が切れることは考慮しなかったが、これを考慮する場合は、付着が切れる長さに反比例して軸剛性を減らすべきである。

2.2 3次元トラス有限要素法

Bathe-WilsonのSTAP[5]を用いた。節点自由度が X, Y, Z 方向の並進で定義される一般的なものである。3次元トラスにおいては、節点に接合されるトラスがすべてひとつの平面に含まれ、かつその平面が全体座標系の X, Y, Z いずれかの軸と直交すると、その節点は面外方向に不安定となる。これを避けるためにも、板などの平面や、曲率の小さいシェルなどは、前節2.1で述べたユニットで構成するのが便利である。有限要素計算は大型計算機でFortran言語で行なった。

3. 視覚化の方法

3.1 画面およびビデオカラープロットによる視覚化

構造物の耐荷機構をトラスで視覚化する場合、画素の数400x640の画面において、力の大きさは線の太さ、2段階で、また力の圧縮と引張りは色の数、2種類で表現した場合、2次元問題の場合は情報が質・量ともに適切であると思われた。ビデオカラープロットでは画素が正方形で印刷されるため、より鮮明な図が得られた。今回は、16ビット画面でBasic言語で、トラス部材を1本ずつ描画した。3次元の場合は、視点を変えられる等角法(isometric)と透視図法(perspective)によったが、立体図を平面に投影する方法では、線が重ね描きされてしまう問題があり、切断面表示などでは、立体感、奥行感が得られず、いずれも適切な方法とは言えなかった。描画すべき部材の探索と選択、描画方法についての研究が更に必要である。

3.2 本報告中の図版

本来、 κ - η の画面で表現すべきものを単色のプリンタ[®]ロットで印刷したもので、2次元図面ですら、線の太さの違いが辛うじて判明する程度で情報伝達力は極めて乏しい。これらの図の主目的は、解いた問題の特徴を説明するためであって、表現すべきことは書込による説明で補った。

4. 結果

4.1 2次元耐荷機構の例

(1) 梁の挙動の視覚化および配筋への利用： 梁の初等理論として良く知られているローラー

支持され等分布荷重を受ける梁の耐荷機構は、ここでのトラスモデルでは図 2 のようになる。梁の下縁に引張り領域、上縁に圧縮領域、支点寄りの剪断力の高い領域で、斜圧縮と斜引張

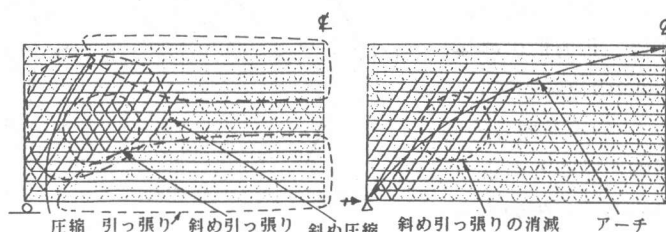


図2 ローラー支持に等分布荷重をかけたもの 図3 ビン支持に等分布荷重をかけたもの

りが交差する状態は梁理論と一致しており、更に、支点直上に反力が圧縮として伝播するとともに、上縁を流れてきた圧縮力が支点へ流れこんでいるとも解釈される。この状態は、初等梁理論では定式化されていないことである。また、下縁の引張力の線のように主鉄筋を、また、支点寄りの斜めの線に、曲げ上げ鉄筋を配筋するのが合理的であるとも解釈できる。

(2) π - η の機構の形成の視覚化： 前項の支点の水平方向の自由度を拘束しただけで、梁の耐荷機構と全く異なる π - η の機構に変ることが図 3に視覚的に示されている。下縁と斜の引張力が著しく減少し、圧縮の線が π - η の形に表れている。この梁の輪郭内には等方的に力の流れる道筋が与えられているにも拘らず、力の流れとして構造形式が形成された例である。

(3) 梁の π - η 中央の引張縁のひびわれによる耐荷機構の変化： 集中荷重を受ける梁で、 π - η 中央の引張縁のひび

われによって、たとえ通常の補強量の鉄筋があっても剛性の低下によって、耐力機構が大きく変る例が示された。支点における水平反力は、付着が全長にわたっ

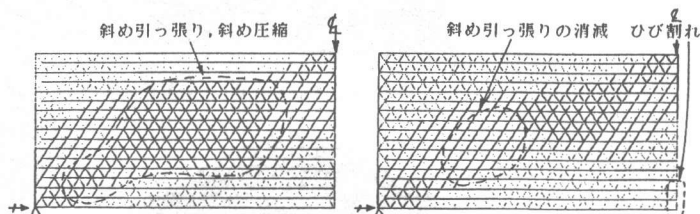


図4 ビン支持に集中荷重をかけたものでひび割れ前のもの 図5 ビン支持に集中荷重をかけたものでひび割れ後のもの

で切れた主鉄筋の端部の定着による力とみなされる。このような、主鉄筋の付着が切れ、 π - η

中央にひびわれが生ずると梁から斜引張力が消滅し、アーチ機構となる。斜引張力が消滅することは、剪断破壊をしにくくなることを示すのであり、「主鉄筋の付着がないと梁やアンボンドプレストレストコンクリート梁は剪断に対して強い」と池田、Leonhartらが報じた現象を追認するものと考えられる。

4.2 3次元耐荷機構の一例：H.P.シェルの場合

H.P.シェル (Hyperbolic Paraboloid Shell) は、直交する2方向の曲率の符号が異なるGauss曲面のひとつであり、

サドル曲面とも呼ばれるが、これが屋根などに用いられる場合の形の一例は、正方形の餅焼網の3つの角を固定し、残る1つの角を面外方向に移動することによって得られる。網のふちに平行な直交する針金は直線のままであるが、ふたつの対角線は、凹および凸の曲線となる。

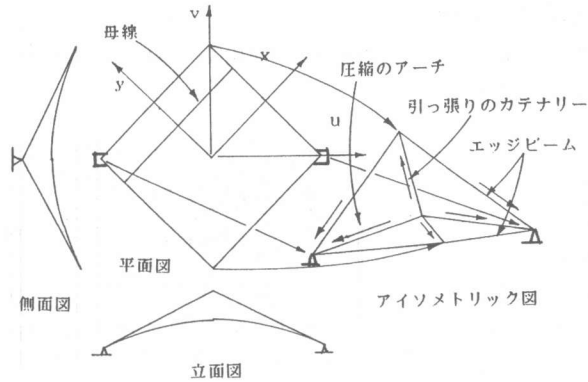


図6 H. P. SHELL および耐荷機構 概略図

よび凸の曲線となる。このシェルの、上に凸の対角線の両端のみを支点として、等分布荷重を加えると上に凸の線は平行なアーチとして圧縮を受け、それと直交する下に凸な線は桁材として引張力を受け、それらと45度の方向（ふちに平行な方向であって、直線）には力が発生しないことが知られている。図6はその場合の構造と耐荷機構の概念図である。

図7,8,9は、トラスモデルによる解析結果を、透視図、立面図および平面図で示したものであるが、上記の耐荷機構を表すことが明示されている。

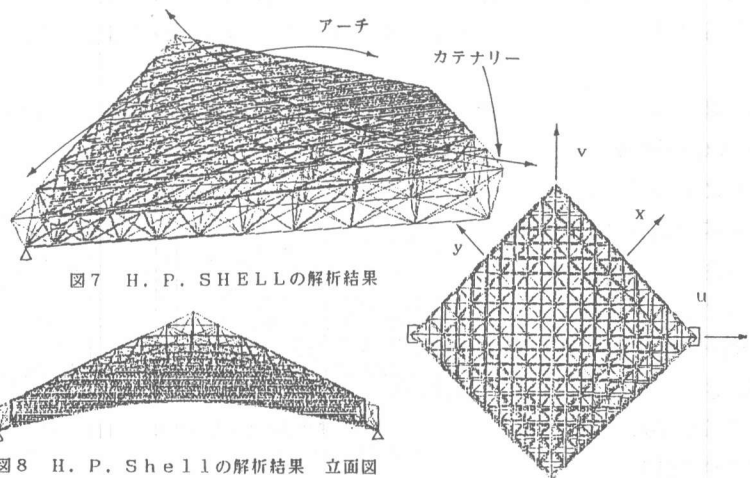


図7 H. P. SHELLの解析結果

図8 H. P. Shellの解析結果 立面図

図9 H. P. Shellの解析結果 平面図

4.3 3次元の力学的に合理的な構造を形成する論理の一例

前節4.2で解析したシェル耐荷機構は、軸力によっていること、面要素の中に、引張りと圧縮が共存していること、構造の部分要素がすべて耐荷機構に不可欠となっていることなどから、極めて効率の高い、また、力学的に合理的なかたちと言えよう。このような構造のかたちをつくりだす力学の論理を考察する。前節での2次元のアーチの形成は、ある領域に等方的に力の道筋を設けておき、荷重と支点を与えるだけで十分であった。

ここでのH.P.シェルの場合には、図10(a)のように、シェルを外包する直方体を縦、横、高さそれぞれ8x8x4個のシェルユニットの集合として、等分布荷重と支点を与えただけでは、H.P.シェルのかたちは形成されない。

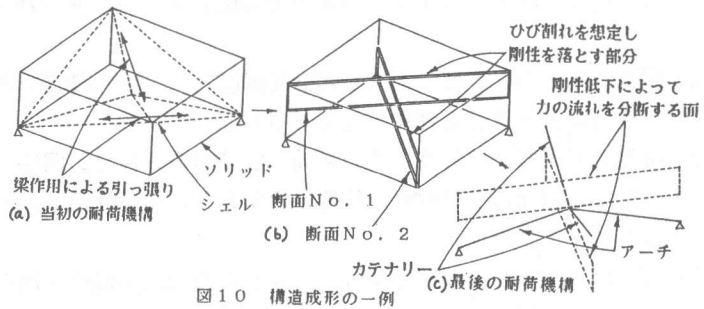


図10 構造成形の一例

この直方体は、支点を結ぶ方向には、単純梁のように、また直角方向には中央で支持される張り出し梁のような耐荷機構になっている。鉄筋コンクリート部材の引張り領域の鋼材による補強において、ひびわれによる剛性の低下が耐荷機構を大きく変化させることが、2次元の梁挙動についても前節4.1で示めされている。ここで同じ論理を適用すると、図10(b)のように、対角線上で交差し、支点を結ぶ線方向は、直方体の上半分、直角方向は下半分の断面の剛性を低下させるべきである。このように断面の剛性を低下させると、それを横断するような力の道筋が断たれることがわかっているが、今回既に知られているシェルの耐荷機構は、図10(c)のようにして成立つ可能性が残されていることがわかる。

実際、解析を行なうと図10(c)のアーチとカテナリとなるべき2つの断面において、やや不完全ではあるが図13,14のようにアーチ的な耐荷機構とカテナリ的な耐荷機構が得られた。

断面1では、図14のように、支持条件で見れば、単純梁のように見えるがスパン中央の下側半分の剛性が低下させてあるためアーチ的な耐荷機構となり、断面2

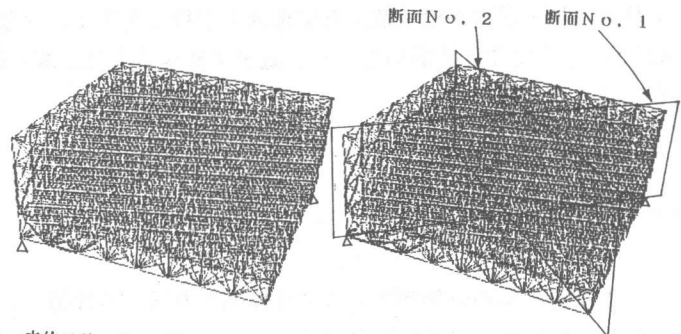


図11 立体ソリッドひび割れ前の解析結果 図12 立体ソリッドひび割れ後の解析結果

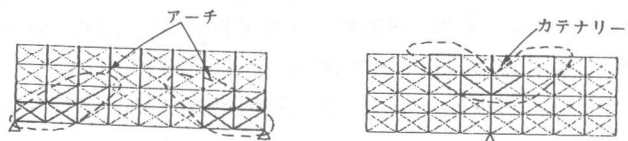


図13 立体ソリッドひび割れ後の解析結果 図14 立体ソリッドひび割れ後の解析結果

では、図13のように、支持条件で見れば、中央で支持する張り出し梁のように見えるが、中央の支点の上側半分の

剛性が低下させてあるため、加判的な耐荷機構となっていることを示す。

5. まとめ

- (1) 今回試みたような、トラスの単位構造ユニットから、平面構造や、シェル構造を構成し耐荷機構を視覚的に表現する方法は、力学の忠実度、結果の理解の効率ともほぼ適切なものが得られた。
- (2) 視覚的表現のために、画素が400x600程度で、色が2種類であっても、パソコン画面の情報伝達力は質・量とも効果が大きかった。
- (3) 視覚的表現方法により、梁の挙動、配筋の合理性との関係、鉄筋コンクリートで鋼材で補強されている領域のひびわれ、付着劣化などによる剛性低下が耐荷機構を変化させる様子が示された。
- (4) 構造物を力学的合理性によって形成する場合の論理の一例を示し、2次元構造としてのアーチ、3次元構造としてのH.P.シェルについて適用した。
- (5) 3次元構造の耐荷機構の視覚的表現は、シェルなどの面構造においては、等角法、透視図法などが有効であるが、マッシュな構造の場合には、描画すべき部分の探索と選択、描画方法についての研究が更に必要である。

謝辞

この研究は第一著者が東京都立大学土木工学科に在学中に行なった。グラフィック画面のビデオプロットによる出力でご助力戴いた、セイコ電子工業株式会社、富田規男、宮原 仁、谷口慎一の各氏に厚く御礼申上げる。

参考文献

1. 土木学会：昭和61年制定 コンクリート標準示方書 設計編
2. Beton-Kalender 1984 Teil 1,2
3. 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の設計にFEM解析を適用するためのガイドライン
4. 杉本、山崎：コンクリート構造物の自動解析モデル化と設計への利用、コンクリート工学年次論文報告集 1987、日本コンクリート工学協会、pp.127-132
5. Bathe, K.J., Wilson, E.L. 著、菊池文雄訳：有限要素法の数値計算、科学技術出版社