シェル要素を用いた耐震解析の高度化に向けたプログラム開発

○　九州産業大学　正会員　奥村徹　　名古屋工業大学　野中哲也
(株) 地震工学研究開発センター　馬越一也，吉野廣一

１．まえがき

東北地方太平洋沖地震（2011）や熊本地震（2016）での教訓を踏まえ，想定外の被害を低減するための新たな取り組みとして，多方向地震動に対する耐震性能照査 [1)]や設計の想定を超える地震作用に対して構造系の大規模崩壊を防ぐための損傷シナリオの検討などが行われつつある．しかしながら，その多くは現行の設計のフレームワークでは対処できず，シェル要素などを用いた高精度の解析が必要とされる．このような新たな課題に対応すべく，2018 年制定鋼・合成構造標準示方書耐震設計編 [2)]では，シェル要素などの高精度の解析を導入した先駆的かつ汎用的な照査法が提示された．しかしながら，実務的な立場からは，シェル要素等を用いた高精度の解析を実施するためには解決すべきいくつかの課題が挙げられる．ひとつは，シェル要素を用いた解析モデルを構築する時間と労力の問題である．とくに複数回の試行を必要とする断面諸元の決定においてシェル要素を用いたモデルを FE ソフトウェアのプリプロセッサ等を用いて逐次修正作業を行い，さらに解の精度確保のためのメッシュ分割の検討も含めると多大な労力と時間を要することが容易に想像できよう．二つ目の課題はシェル要素を用いることによる解析モデルの自由度の増大に伴う計算時間の増加である．これについてはハードウェアとソフトウェアの面からの対処が考えられる．前者については近年，進歩の著しいコンピュータ関連分野に委ねるものとし，後者については数値計算手法の工夫により対処できる部分がある．三つ目はシェル要素を含む大規模な情報を有する構造解析結果の処理と評価である．本報では上記の課題を踏まえ，高精度の数値解析を活用した次世代の耐震性能照査に向けた取り組みの一つとして新たに開発したツールを紹介する．

２．ツールの概要

鋼アーチ橋やトラス橋などの特殊橋梁を対象とした耐震性能照査においては，弾塑性はり要素（ファイバーモデル）を用いた橋梁モデルの耐震解析が多く実施されてきた．ファイバーモデルでは，材料の非線形挙動を断面上に設けた複数の積分点で評価するためにインプットデータとして断面形状の諸元が与えられる．したがって，鋼部材からなる構造物の形状（ただし，ダイヤフラムや横リブおよび接合部の詳細構造等を除く）はファイバーモデルのインプットデータのみから構築することが可能である．すなわち，ファイバーモデルのインプットデータをもとにシェル要素を用いた構造解析モデルを自動的に構築することができる．ここでは著者らが最近開発した弾塑性はり要素（ファイバーモデル）を用いた耐震解析モデルの入力データから，シェル要素のモデルに自動的に変換するツールについて紹介する．対象とする耐震解析ソフトとしては，弾塑性はり要素（ファイバーモデル）を実装し，かつ実務でも用いられてきた実績のある SeanFEM を対象とする．なお解析モデルの可視化には ParaView を用いる．

３．コンセプト

本ツールのコンセプトを以下にまとめる．

I.はり要素（ファイバーモデル）を用いた橋梁モデルからシェル要素を用いた橋梁モデルへのシンプルかつシームレスな変換

II.部材を単位とした領域分割法に基づく並列計算

まず，I.については，従来の耐震解析に用いられてきたはり要素を用いたモデルの解析を基本とした．これは，既存の橋梁のインプットデータを情報資源として有効活用することに加え，新たに耐震性能照査を実施する場合においても適切な耐震構造を設計するためには，依然としてはり理論に基づく断面力等の各種の物理量をもとに，いわゆる”構造力学”をベースとした巨視的な観点から対象構造の地震時挙動特性を把握することが必要であると考えたためである（ただし，AI による設計が実現した場合には必ずしもこの限りではなかろう）．すなわち，構造の概略検討ははり要素をベースとした構造解析によるものとし，限界値の評価など高精度の解析を必要とする場合においては対象となる部材をシェル要素に変換し，詳細な FE 解析を行うといった設計の流れを想定している（**図-1**）．シェル要素を用いた解析では構造系の最大耐力点および最大耐力以降の挙動を精度よく評価する必要があるので，初期不整（残留応力，初期たわみ）を考慮する．残留応力につい

© Japan Society of Civil Engineers

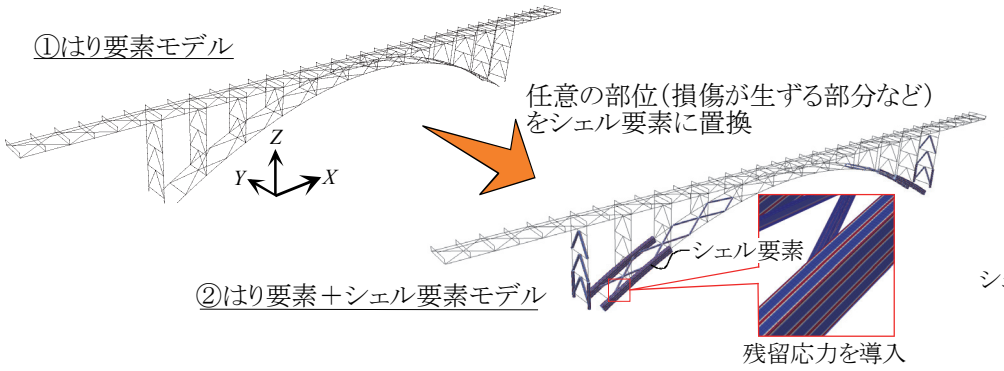

図-1 はり要素モデルからシェル要素モデルへの変換

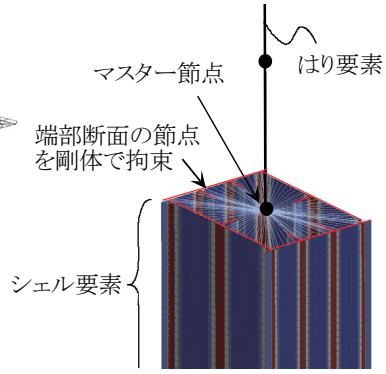

図-2 部材端部断面の拘束

ては箱形断面，H 型断面等の代表的な溶接部材で残留応力分布が明らかなものについては自動的に初期応力として導入する機能を実装した．一方，初期たわみについては着目する安全限界状態の荷重モードに対する座屈固有値解析を行い，工学上重要と考えられる固有モードを選択し初期の節点座標値に与えるものとした．初期たわみには全体座屈に対応する部材軸線のたわみと局部座屈に対応する板のたわみモードを与える．なお，ダイヤフラムの諸元（設置位置，板厚）は，はり要素のインプットデータには存在しないが，シェル要素のモデルでは局部座屈を適切に考慮する必要があるので，ダイヤフラムの位置を付加情報として与えることでダイヤフラム位置の断面を剛体で拘束するようにモデル化を行う．以上の従来のはり要素を用いたモデルからシェル要素を用いた解析モデルへのシームレスなモデル間の変換により，作業の効率化およびモデルを構築する際の人的過誤を大幅に低減できるものと期待できる．

II.については，とくにシェル要素でモデル化する部材が多く，解析モデルの自由度が大規模に及ぶ場合に対する数値計算上の工夫である．ここでいう「部材」とは格点間を両端とする 1 本の棒材をあらわす．シェル要素に置換した部材の両端における断面上の節点は**図-2**に示すように剛体により拘束し，はり理論の基本仮定（平面保持，断面不変）を与えることで部材両端にそれぞれ一つずつ設けた節点（マスター節点）に従属させる．シェル要素でモデル化した部材はそれぞれ 1 つの計算ノードに割り当て，このノード内で完結した FE 解析を実施する（**図-3**）．計算ノード内では，各部材間の境界節点となる部材両端の 2 節点（12 自由度）を有する部材の剛性マトリクス，等価節点力に縮退し，他の部材を計算した各ノードの計算結果とアセンブルして構造全体系の計算を行う（領域分割法（DDM））[3]．各計算ノ

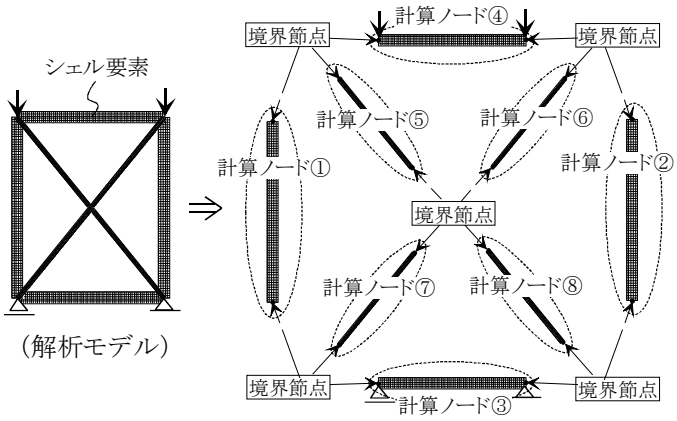

図-3 部材を単位とした領域分割法のイメージ

ードに部材剛性マトリクスと等価節点力の計算ルーチンを割り当てるイメージである．ここで 1 部材を 1 つの領域に割り当てるようにしたのは以下の 2 つの理由による．ひとつは，DDM を用いるにあたり，部材単位で領域に割り当てることにより，機械的にシェル要素に置換するすべての部材において，境界節点は 2 節点（12 自由度）と大幅に自由度を低減できるためである．いまひとつは，I.でも述べたように，部材単位を基本とすることにより各計算ノードで算定される部材両端の等価節点力の評価が容易であり，従来の各部材に対する照査を基本とした設計の考え方との親和性が高いと考えたためである．したがって，本手法は計算効率よりも設計との親和性を重視した考え方となっている．

4．あとがき

シェル要素を用いた次世代の耐震性能照査を視野に入れた実用的なツールの開発を行い，その概要と設計思想について述べた．

参考文献：1) 奥村ら：鋼製橋脚で支持された連続高架橋の多方向地震動下の耐震安全照査法に関する検討，構造工学論文集 vol.64A，pp.208-221，2018．2) 土木学会：2018 年制定鋼・合成構造標準示方書耐震設計編，丸善，2018．3) 吉野ら：京コンピュータによる高架橋の広域 3 次元地震応答シミュレーション，第 17 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2014．

© Japan Society of Civil Engineers