

ペタスケール計算による超大規模鋼トラス橋モデルの耐震解析

名古屋工業大学大学院 正会員 ○野中哲也, 学生員 森本優美
株式会社耐震解析研究所 正会員 吉野廣一

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震以降, 想定を上回る地震に対しても, 耐震性能を確認することが求められている. 具体的には, レベル2地震動を超える地震動に対して, 直ちに致命的な崩壊が生じないように, 崩壊に対する抵抗性(ロバスト性やリダンダンシーの確保)の確認を実施することが要求されている. しかし, このような要求があるにもかかわらず, 現状では, 構造全体の終局挙動さらには倒壊挙動まで正確に予測できる高精度な解析モデルや解析法等が確立していないことから, それらについての検討が十分になされていない.

高精度な解析モデルの1つとして, シェル要素によりモデル化したシェルモデルが挙げられる. 鋼トラス橋や鋼アーチ橋のような橋梁に対して通常はファイバーモデル(はりモデル)が用いられることが多く, 塑性化すると予想される着目部材だけをシェル要素でモデル化することがある. 可能であれば橋梁全体の正確な挙動を評価するために, 橋梁全体をシェル要素でモデル化したい. しかし, 橋梁全体をシェル要素でモデル化すると, 解析規模が膨大になり通常のコンピュータおよび一般的な耐震解析プログラムでは解析できない. そこで, 本研究では, ペタスケール計算が行えるスーパーコンピュータ「京」(以下, 「京」と呼ぶ)を実際に使用して, 橋梁全体をシェル要素でモデル化した超大規模シェルモデルによる耐震解析¹⁾²⁾を試みた.

2. 最近のコンピュータの使用環境

現在, 「京」を中核とした HCPI が整備されている. アプリケーションソフト(耐震解析プログラム等)を使用する側から見れば, 「京」は, 図-1のようなシステム構成の分散メモリ型超並列計算機である. そのため, 並列化されていないプログラムでは, 性能が全く出ない. 「京」に限らず全世界のスーパーコンピュータはこの形式のコンピュータである. 並列化されていないプログラムは, 図-1内の1CPUの1コアだけで動作することになり, 計算速度は手元にあるPCレベルである. したがって, 「京」上で解析するには, 並列化されたプログラムが必要であり, 本研究で使用する耐震解析プログラム SeanFEM は, ハイブリッドMPIにより並列化されている.

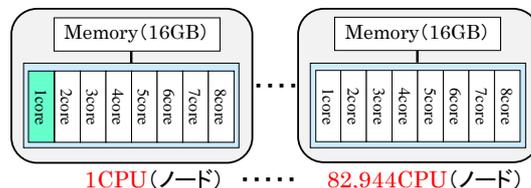


図-1 「京」のシステム構成

3. 超大規模モデルの作成法

(1) 対象トラス橋のはりモデル

検討対象の橋梁は3径間連続上路式鋼トラス橋である. このトラス橋は, 図-2のようにファイバー要素で既にモデル化されている.

(2) シェルモデルの作成法

近年, 鋼トラス橋等の特殊橋梁や長大橋に対して, ファイバー要素でモデル化したファイバーモデルがよく使用されている. ファイバー要素とは, はり断面上に積分点を配置するFEMはり要素のことである. 本検討で使用する SeanFEM のファイバー要素の定義は, 積分点の座標値ではなく, 部材断面の形状および材質, 初期応力を定義するようになっている.

通常, シェル要素でモデルを作成する際, トラス橋を構成する部材に対して, 図面を見ながら市販ソフトを使用してモデル化するのが一般的であるが, ここでは作成済みのファイバーモデルを活用して効率よく解析モデルを作成することにした. 具体的には, ファイバーモデルの部材の断面形状と部材の構成節点を入力して, シェル要素への変換が行える(図-3参照)変換ツールを用いる.

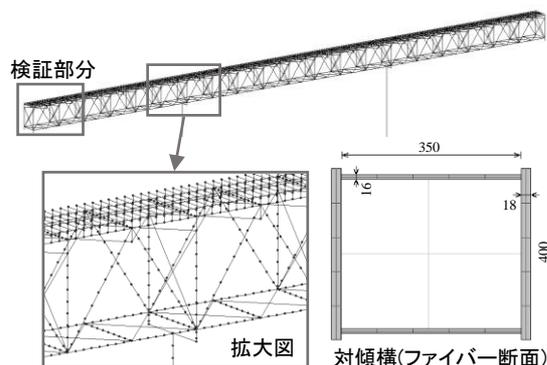


図-2 鋼トラス橋のファイバーモデル

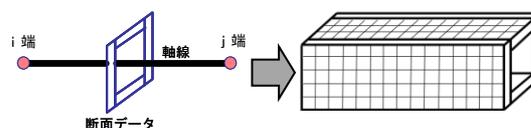


図-3 ファイバー要素からシェル要素へ

キーワード ペタスケール計算, 大規模解析, 鋼トラス橋, 耐震解析

連絡先 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町 TEL 052-735-5563

4. 超大規模モデルの解析法

本研究では、並列処理による解法として DDM (Domain Decomposition Method) を採用する。DDM は、解析領域 (ドメイン) をサブドメインに分けて計算する方法である。本トラス橋に対して、1 トラス部材=1 サブドメイン=1CPU (計算ノード) として並列処理を行うことにする。

トラス橋等に対して DDM の適用事例がないため、実際に対象トラス橋を解析する前に、DDM の検証を行うことにした。検証は、通常の解析が行える規模 (部材数 50) の部分モデル (図-2, 図-4(a) 参照) を用いて Pushover 解析を行った。その結果を図-4(b) に示す。この比較解析結果から、通常の解析と DDM の結果がほとんど一致していることがわかり、DDM がトラス橋へ適用できることが確認できた。図-4(a) は、DDM により解析した方の結果 (変形図) である。

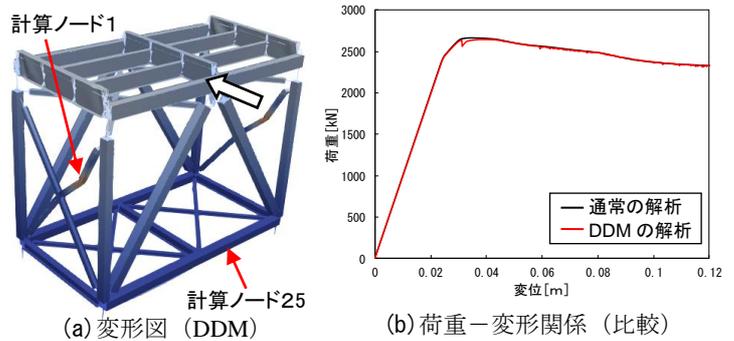


図-4 DDM の検証結果

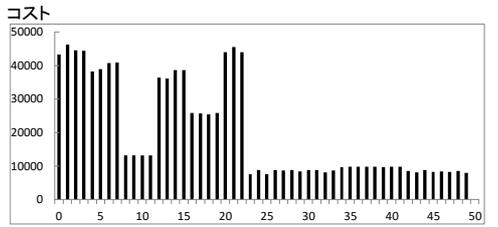


図-5 ロードバランス

ここで、各計算ノードの速度性能をグラフ化すると図-5 のようになる。縦軸がコスト (≒CPU 時間) で、横軸が各部材を処理する計算ノード番号である。このグラフから、局部座屈する (収束性が悪い) 対傾構を処理する計算ノードのコストが増加して、ロードバランスが悪くなっていることがわかる。これまで DDM は線形解析で用いられ、節点数が同じになるようにサブドメインに分割していた。今後、非線形の耐震解析を行う場合には、このロードバランスを改善する必要がある。

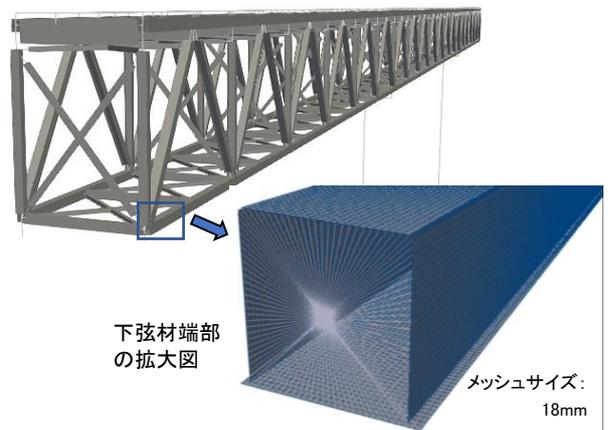


図-6 超大規模モデル (約 1800 万節点)

5. 「京」上でのトラス橋の Pushover 解析

本トラス橋全部材に対して、前述の変換ツールによってシェルモデルを作成した結果、本トラス橋は約 1800 万節点の超大規模モデルとなった (図-6 参照)。シェル要素のメッシュサイズは 18mm であり、十分に局部座屈が表現できる。この超大規模モデルを「京」で実際に 848 ノード (=部材数), 6,784 並列で解析し、その結果の一部を図-7 に示す。この図から、支点部の対傾構が局部座屈しているのがわかる。なお、解析時間は、約 5 時間であった。

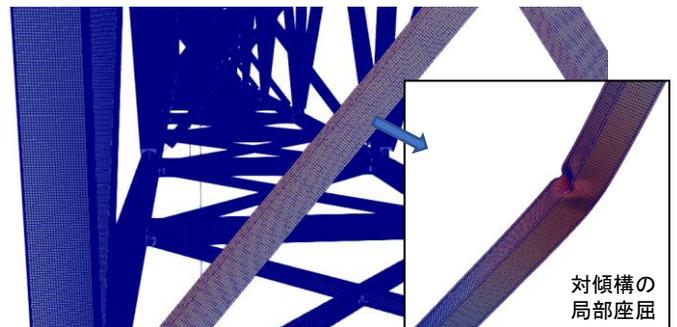


図-7 鋼トラス橋の解析結果 (座屈発生の前後)

6. おわりに

本検討では、トラス橋全体に対してシェル要素でモデル化する超大規模シェルモデルを構築し、「京」を使用してそのモデルによる Pushover 解析を試み、ペタスケール計算なら十分に実施可能であることを示した。

スーパーコンピュータの定義は、その時代の通常のコンピュータより、1000 倍、計算が速いコンピュータをいう。計算速度が 1000 倍速くなると、これまで不可能であった解析も容易に実施できるようになるので、鋼橋の耐震設計、耐震解析において革新的な技術開発が起こることを期待したい。まずは、SeanFEM のファイバーモデルのデータを所有していれば、そのデータを変換ツールによりシェルモデルへ変換して、橋梁全体の耐震解析を行ってはいかがであろうか。なお、本研究の今後の課題としては、初期不整の考慮や部材接合部のモデル化、計算速度の更なる向上等が挙げられる。

スーパーコンピュータの定義は、その時代の通常のコンピュータより、1000 倍、計算が速いコンピュータをいう。計算速度が 1000 倍速くなると、これまで不可能であった解析も容易に実施できるようになるので、鋼橋の耐震設計、耐震解析において革新的な技術開発が起こることを期待したい。まずは、SeanFEM のファイバーモデルのデータを所有していれば、そのデータを変換ツールによりシェルモデルへ変換して、橋梁全体の耐震解析を行ってはいかがであろうか。なお、本研究の今後の課題としては、初期不整の考慮や部材接合部のモデル化、計算速度の更なる向上等が挙げられる。

謝辞：解析モデルのデータ変換にあたり、地震工学研究開発センターの奥村氏にご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1)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.
- 2)八ツ元ら：大規模計算による長大橋地震応答解析の構造要素モデルの高度化に関する検討，応用力学論文集，2017.