

次世代スーパーコンピュータによる鋼構造物の 高精度耐震解析プログラムの開発

奥村 徹¹, 野中 哲也², 馬越 一也³

1.九州産業大学 准教授, 2.名古屋工業大学 教授, 3.(株)地震工学研究開発センター

設計の想定を超える規模の地震動に対する鋼構造物の崩壊挙動を予測するためには、シェル要素などを用いた精緻なモデルによる高精度の数値解析が必要となる。本研究ではスーパーコンピュータ「富岳」と同型の計算機で構成された名古屋大学の「不老」で実行可能な大規模並列計算に対応した耐震解析プログラムの開発を行った。単柱式鋼製橋脚の Pushover 解析をもとにプログラムの基本的な検証を行い、大規模計算の例として上路式鋼アーチ橋の複合非線形動的解析を行った。

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震（2011）や熊本地震（2016）における被災経験から、橋梁等構造物の耐震設計では、照査の対象とされていない事象や設計での想定を上回る規模の事象にも対処し、致命的な被害を回避することの必要性が認識されてきている。現行の道路橋の設計¹⁾では、落橋防止システムが一つの例であり、熊本地震では上部構造の落下を防止しその有効性が確認された。設計体系への導入に向けた動きとしては、2018 年制定鋼・合成構造標準示方書耐震設計編²⁾では、先駆的な 2 つの照査法が提示された。ひとつは 3 次元挙動を考慮した地震動下の構造物の挙動を正確にとらえて構造安全性を照査する手法であり、これにより現行の 1 方向の入力地震動に対する照査では対象とされていない事象をカバーすることが期待できる。いまひとつは構造物の応答が安全限界を超える場合を想定して、耐震設計とは別の観点から致命的な大規模崩壊を回避する方法（崩壊制御設計法）である。また、鉄道構造物³⁾においても、設計を超える外力に対しても耐性を確保する「危機耐性」という概念が導入され設計体系に組み込むことが求められている。

このように、想定外の事象に対する致命的な被害低減のためには従来の耐震設計ではほとんど取り扱われることなかった設計上の安全限界を超えた後の構造物が崩壊に向かう領域の挙動を予測し、評価することが求められつつある。しかし、一般に橋梁システムは複数の部材で構成される不静定構造であるため、構造全体系の崩壊挙動を予測するためには各部材の座屈や塑性化を伴う力学挙動を精度よく表し、これらの部材間の荷重再配分効果を考慮した全体系の解析を行う必要がある。したがって、一般的な耐

震設計で用いられるはり理論に基づく近似的な解析手法では崩壊挙動を予測するには不十分であり、シェル要素などを用いた精緻な構造解析モデルによる大規模な解析が必要となる。これを実現する計算環境としては、近年様々な分野で活用されているディープラーニングに用いられるような並列計算用のワークステーションが考えられる。さらに大規模なものでは HPCI⁴⁾が利用できる。

本研究では、2021 年に本格稼働予定の次世代スーパーコンピュータ「富岳」⁵⁾への導入を視野に入れ、これと同型の計算ノードにより構成されたシステムを有する名古屋大学のスーパーコンピュータ「不老」⁶⁾（2020/7 より運用開始）で実行可能な鋼橋の大規模耐震解析プログラムの開発を行った。

2. 大規模耐震解析プログラム概要

大規模モデルの解析を実施するにあたり、以下の課題が挙げられる。

- ・精緻な解析モデルの構築に要する労力と時間、ミスのチェック
- ・設計との親和性
- ・解析結果として出力される膨大なデータの処理

これらの課題を念頭に置き、開発した大規模耐震解析プログラムの概要を以下に述べる。

(1) シェル要素によるモデルの構築

先に述べたとおり、シェル要素による精緻な構造解析モデルを構築するためには多大な時間と労力を要する。さらにヒューマンエラーの恐れもあるため、構築したモデルの検証作業も必要となる。すでに著者らはモデル構築における上記の課題を解決するために、従来の耐震解析に用いられているはり要素の解析モデルからシ

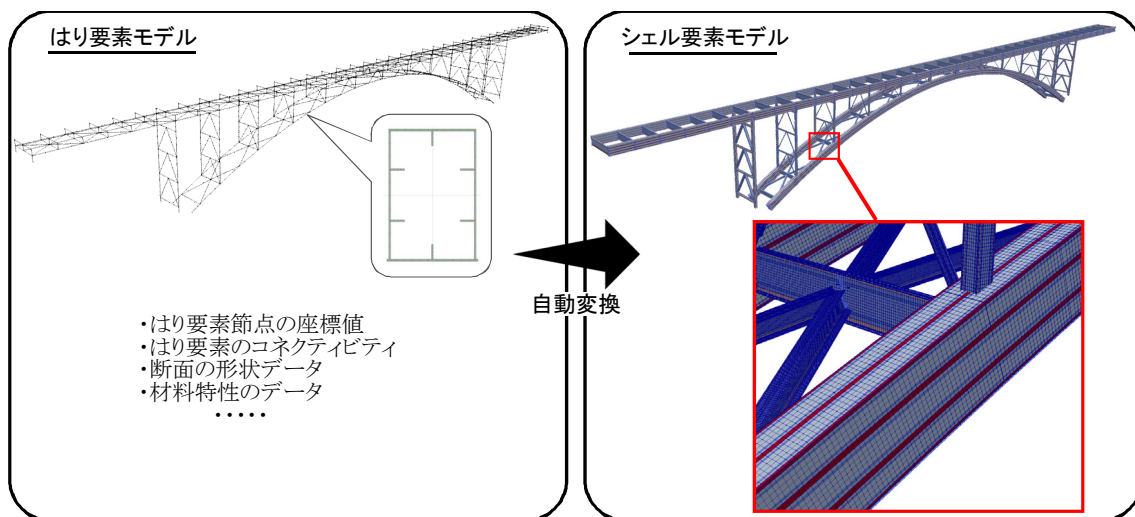


図-1 変換プログラムの概要

シェル要素の解析モデルへの自動変換プログラム（図-1）を開発した^{7),8)}。はり要素モデルの任意の部材を指定することにより、当該部材をシェル要素のモデルに自動変換する。図-1の例ではすべての部材をシェル要素に変換しているが、指定した一部の部材のみをシェル要素のモデルに変換し、残りの部材ははり要素のままにすることも可能である。シェル要素に変換した部材は図-2に示ように、部材両端の断面上の節点をはりの基本仮定を満足するように剛体で拘束する。部材両端の剛体断面の運動は部材両端断面に位置するもとのはり要素の節点に従属させる。断面両端に上記の拘束を与えることにより、部材両端の節点変位と節点力により部材の巨視的な挙動を取り扱うことができるため、従来のはり理論に基づく部材照査の枠組みとの親和性が高く、さらに後述する出力結果の抽出についても効率的に処理することができるという利点がある。また、部材の内部には両端の断面と同様に剛体によりダイアフラムを構築することができる。ダイアフラムの情報ははり要素のモデルには存在しないので、各部材ごとにその位置を部材軸に沿う1次元の無次元化座標値（ $0 \leq s \leq 1$ ）で指定する。はり要素をシェル要素のモデルへ変換する処理等の詳細は文献8)を参照されたい。なお、本研究では新たに2軸対象断面についてダイアフラムをシェル要素でモデル化する機能を追加した（ただし、開口部は無視）。この際に入力データとして与える情報はダイアフラムの板厚とその材料特性のデータのみである。

(2) 並列計算

ソルバーは SeanFEM（開発元：（株）地震工学研究開発センター）をもとに開発を行う。当該ソフトウェアは明石海峡大橋をはじめとした

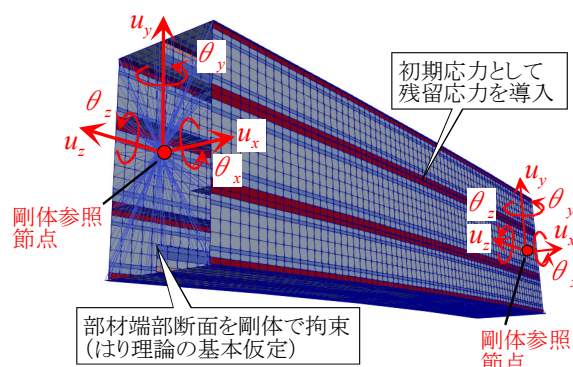


図-2 部材のモデル化

本州四国連絡橋やアーチ橋、トラス橋などの特殊橋梁の耐震解析業務に採用された多くの実績を有する。本研究で対象とする崩壊挙動を解析する際には、橋梁を構成する多くの部材をシェル要素によりモデル化を行う。この場合には計算規模が非常に大きくなるので、計算能力の高いコンピュータを用いる必要がある。本システムでは、分散メモリ型の並列計算機であるスーパーコンピュータ上で解析を行うために、SeanFEM をベースに MPI を用いて並列計算を行う処理を組み込んだ。なお、計算ノード内のスレッド並列化手法はオリジナル版の SeanFEM と同様の OpenMP による。

本計算システムに用いた領域分割法（Domain Decomposition Method (DDM)）による並列計算⁹⁾の概念図を図-3に示す。計算ノード0にはシェル要素に変換しないはり要素の部分とシェルに変換した部材の境界節点を解析領域として割り当て、計算ノード1以降にシェル要素に変換した各部材の計算を割り当てる。基本的には、本システムではシェル要素に変換する1部材を1つの領域単位として計算ノードに割り当てている。従って、1つの計算領域の境界節点は2

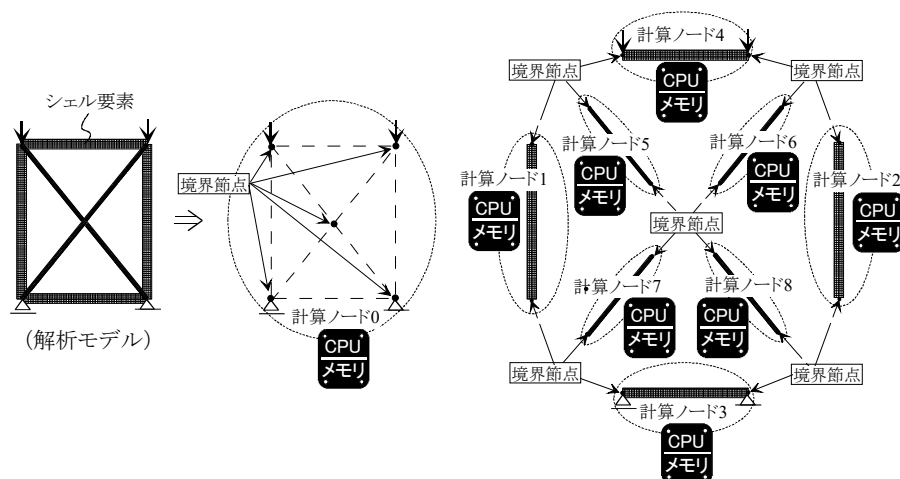


図-3 部材を単位とした領域分割

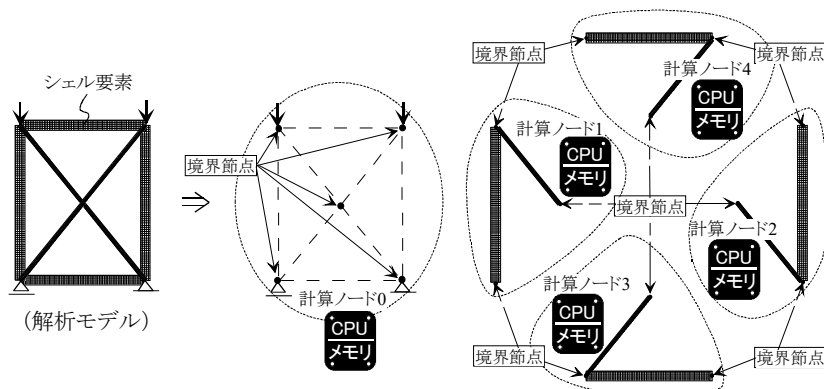


図-4 計算ノードへの部材のグルーピング

節点，12 自由度 (=2 節点×6 自由度) と機械的かつ大幅に自由度を縮退することができる．また部材を計算領域の単位とすることで，後述の結果処理においても膨大な解析結果のデータを取捨選択できるため効率が良い．

従来のシステムでは上述のように 1 つの部材を 1 つの計算ノードに割り当てる仕様であったが，計算機のハードウェア上の制約から多数 (= シェル要素に変換する部材数) の計算ノードを確保できない場合への対応や，各計算ノードの負荷分散 (load balancing) を調整できるように，1 つの計算ノードに複数の部材をグルーピングできる機能を追加した (図-4)．グルーピングした場合の計算ノードの境界節点の数は 2 つ以上となることもある．従来の大規模並列計算のソルバーの機能では静的解析の機能⁸⁾のみであったが，本研究において，新たに時刻歴応答解析の機能を追加した．

(3) 結果処理

大規模モデルの解析結果のデータは膨大となるため，解析を実施したスーパーコンピュータ

等の計算機からのファイルの転送や必要な出力値を抽出する際には時間を要し，データのハンドリングが悪い．本システムではこのような大規模解析における結果処理の問題についても対処し得るように，DDM での領域分割は部材を単位としている．

通常，骨組構造の力学挙動を定量的に把握する際には，構造全体の挙動を代表する着目点の変位や支点反力，部材両端の断面力等のはり理論に基づく巨視的な力学量を確認することが多い．一方，シェル要素でモデル化した部材の詳細な応力分布や局部座屈等の変形形状などは定性的な力学挙動を把握するために用いられることはあるものの，照査においてはあまり必要とされないことが多い．これらのシェル要素でモデル化した領域の出力データはファイルサイズが大きい割には設計上の優先度は低い．

本システムでは計算ノード 0 での出力ファイルに境界節点すなわち格点の出力情報を保持しているため，上記で述べた設計における重要度の高いデータがコンパクトにまとまっている

(図-5). したがって、計算ノード0の出力データのみをスーパーコンピュータ等の計算機から転送し、必要な応答値を抽出すれば、ほぼ必要な情報を得ることができる。もちろん、部材の詳細な応力分布や座屈形状が必要であれば該当する部材の解析を行った計算ノードの結果ファイルを重ね合わせて可視化することにより、詳細な変形形状や応力分布等のCGを表示することもできる(図-6)。なお、本システムでは大規模な解析データの可視化においてParaview¹⁰⁾を用いることとし、これに対応したフォーマットであるvtu, pvtu形式でファイル出力を行う機能を実装した。

(4) 実行環境

スーパーコンピュータ「不老」上で解析を実施するために使用したソフトウェアの例を以下にまとめる。

- ・ファイル転送：WinSCP
- ・ジョブの投入：TeraTerm
- ・解析結果の可視化：ParaView

3. 単柱式鋼製橋脚の静的解析に基づく検証

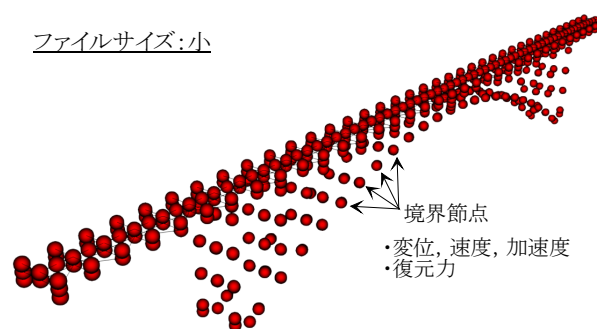
(1) 解析対象モデル

開発したプログラムの基本的な検証のために、図-7に示す単柱式鋼製橋脚モデル¹¹⁾について、目標変位を $5\delta_y$ としたPushover解析を行った。はじめにはり要素(ファイバーモデル)によるモデルのインプットデータを作成し、2.(1)で述べた本システムのプリ処理のプログラムを用いて、はり要素からシェル要素のモデルへの自動変換を行った。この際、表-1、図-8に示す5種類のケースを設定した。解析は名古屋大学のスーパーコンピュータ「不老」のTYPEIサブシステム(富士通製、FX1000)上で実施した。

(2) 並列計算の検証

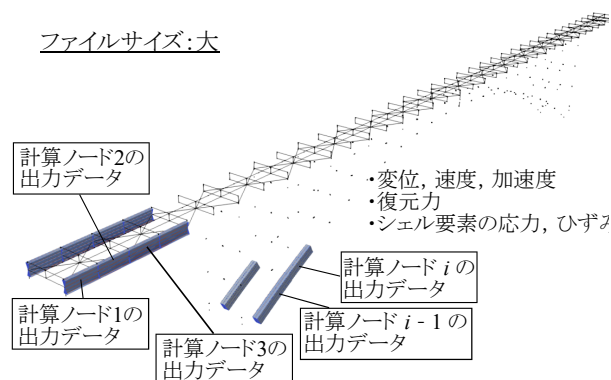
計算ノード数の差異による計算時間および計算誤差を把握するためにシェル要素を用いた解析領域の計算ノード数をそれぞれ1, 3, 5に設定したモデル(表-1, No.1~3)の間の解析結果を比較する。なお、解析対象の単柱式鋼製橋脚モデルの総節点数は25078であり、計算ノード数が2の場合の1計算ノードあたりの最大節点数は12700と約半分、計算ノード数が5では6501と1/4程度である。単一の計算ノードで実行した場合には約2500sの計算時間を要するが、計算ノード数が2では1270sと半減する。しかし、計算ノード数が5では654sとなり、1計算ノードあたりのパフォーマンスは低下する傾向がみられる。並列度を増すとその効果が徐々に飽和することは一般に知られていることである

ファイルサイズ:小

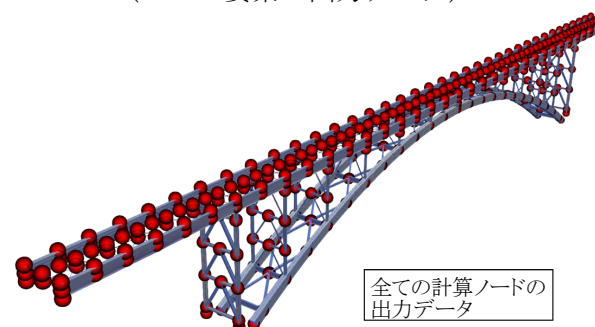


(a) 計算ノード0の出力データ
(はり要素, 境界節点の出力データ)

ファイルサイズ:大



(b) 計算ノード1以降の出力データ
(シェル要素の出力データ)



(c) すべての計算ノードの出力データ

図-5 各計算ノードの解析結果データの概念図

が、とくに本解析では柱基部に損傷が生じ、この領域を受け持つ計算ノードにおける収束計算が全体の計算時間に対して支配的となってくることも要因として考えられる。すなわち、損傷が生ずる柱基部以外の領域の計算ノードは基部の計算ノードの収束計算が完了するまでの待ち時間が大きくなり、全体の計算時間の効率を損なうことになる。

解析の精度について、水平荷重・水平変位関係を単一ノードの場合と5ノードの場合で比較した結果を図-10に示す。これより両者の結果が一致していることが確認できる。最大荷重値に

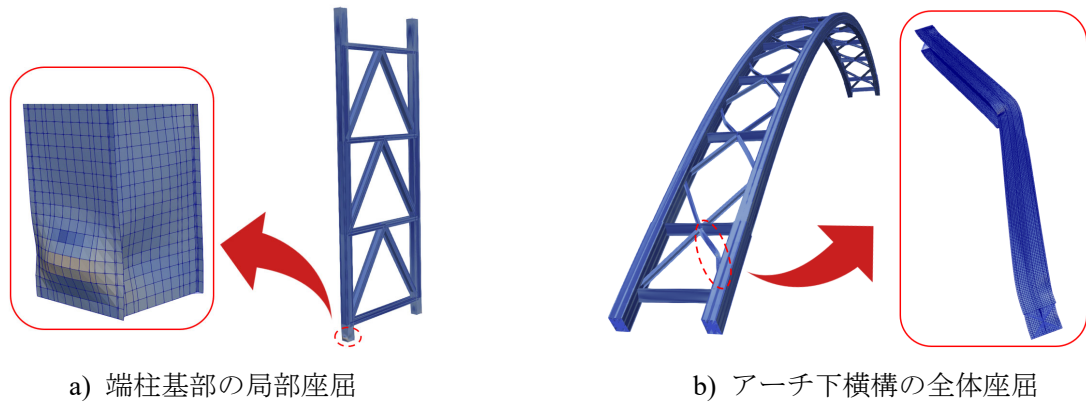


図-6 シェルモデルにおける各部材の変形形状

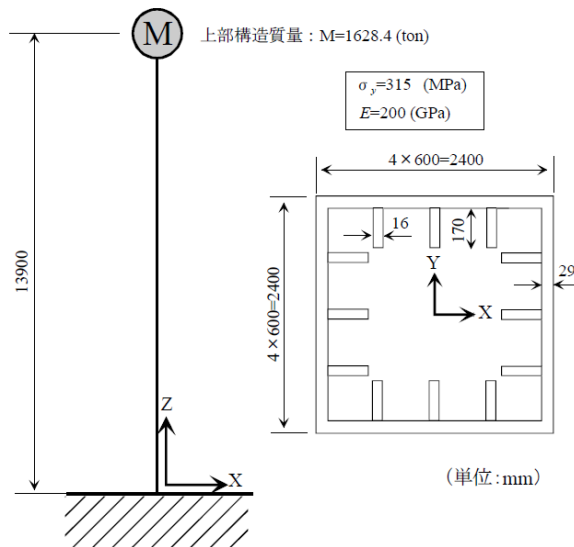


図-7 単柱式鋼製橋脚モデルの諸元

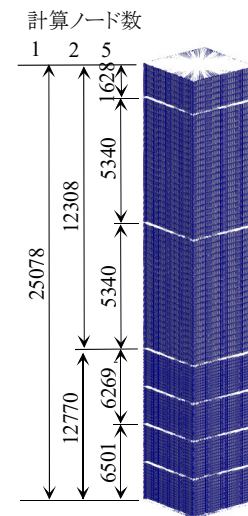


図-8 各計算ノードの節点数
(ダイアフラム部除く)

表-1 検討ケース

解析ケース No.	残留応力	ダイアフラムのモデル化	計算ノード数
1	考慮	剛体	1
2			2
3			5
4	無視	考慮	5
5			5

ついて有効数字 6 桁まで両者の結果は一致しており、並列化による計算誤差は問題ないことを確認した。

(3) はりモデルとシェルモデルの比較

水平荷重・水平変位関係について、はりモデルとシェルモデルの解析結果を比較したものを図-11 に示す。シェル要素モデルは残留応力を考慮した場合と無視した場合についても比較している（表-1、No.3、4）。初期剛性ははりモデルとシェルモデルで一致していることから、等価なモデルへ変換できていることが確認できる。シェルモデルにおいては局部座屈の発生により

2.7 δ_y で最大耐力点となり、軟化挙動が生じている。また、残留応力を考慮した場合はこれを見無視した場合よりも先に荷重が低下していることが確認できる。

(4) ダイアフラムのモデル化の確認

本研究で追加したダイアフラムを自動構築する機能の検証を行う。ダイアフラムの板厚は一般的な 12mm とした。図-12 にダイアフラムの有無による荷重変位関係の差異、図-13 には柱基部の局部座屈形状の比較を示す。ダイアフラムをシェル要素で考慮した場合には、剛体とした場合よりもやや荷重が下回っている。両者の差

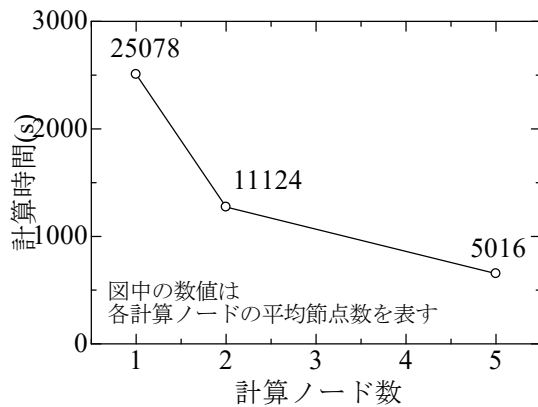


図-9 計算時間と計算ノード数の関係

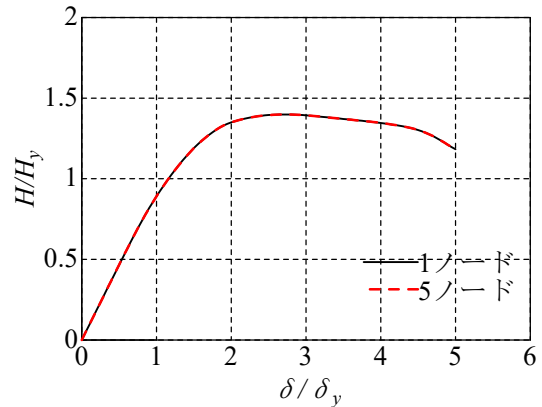


図-10 計算ノード数の影響

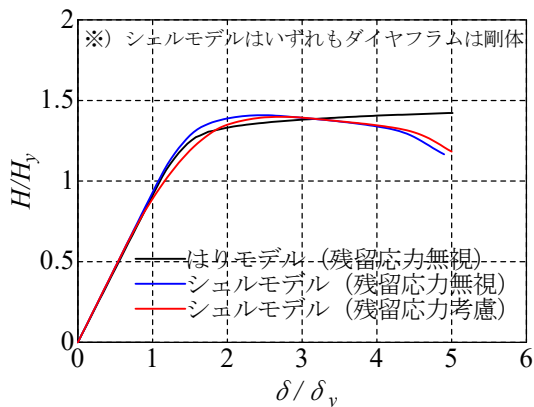


図-11 はりモデルとシェルモデルの比較

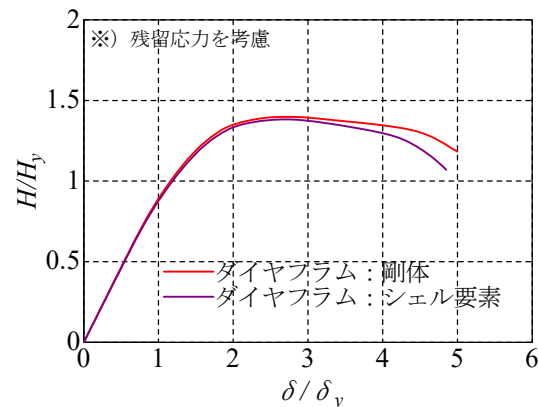
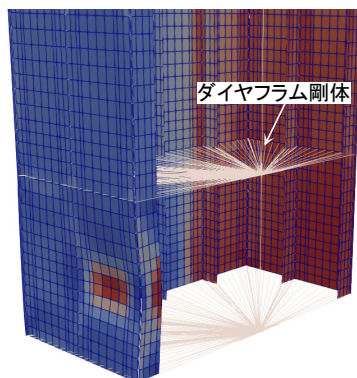
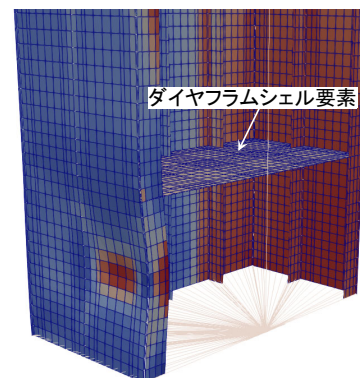


図-12 ダイアフラムの影響



(a) ダイアフラムを剛体でモデル化



(b) ダイアフラムをシェル要素でモデル化

図-13 目標変位 ($=5\delta_y$) 到達時の柱基部の変形形状 (切断表示)

異は軟化域において大きく生じる傾向がみられる。変形形状からもダイアフラムが適切にモデル化できていることが確認でき、ダイアフラムの変換は問題なく行われていると考えられる。

4. 大規模モデルを用いた時刻歴応答解析

大規模並列計算の検証として、上路式鋼アーチ橋の時刻歴応答解析を実施した。対象とするアーチ橋¹¹⁾のはり要素モデルの概要を図-14に示す。粘性減衰は剛性比例型減衰とし、支配的な振動モードである橋軸直角方向の1次モード(固有周期: 1.03s)に対して2%の減衰定数を

設定した。本アーチ橋モデルの部材数は424であり、これらをすべてシェル要素に変換した全体系のモデルでは総節点数165万となる。部材の大きさは様々であるため、シェル要素に変換後の各部材の節点数は図-15(a)に示すように大きなばらつきがあり、1つの部材を1つの計算ノードに割り当てると並列計算における負荷分散が悪い。そこで、2.(2)で述べたグルーピング機能を用い、計算ノード間の負荷分散を平滑化した(図-15(b))。この結果、計算ノード数は174となった。

入力地震動として、兵庫県南部地震(1995)

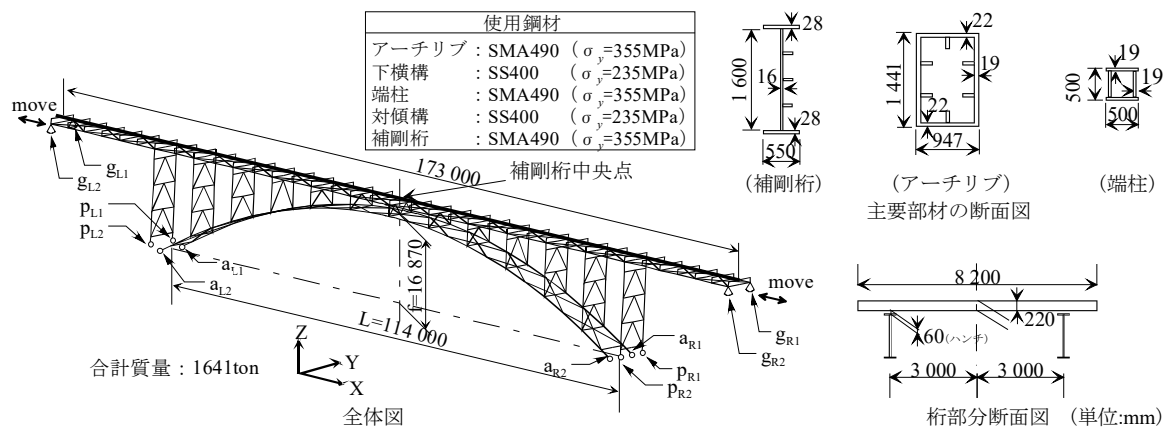


図-14 上路式鋼アーチ橋モデル

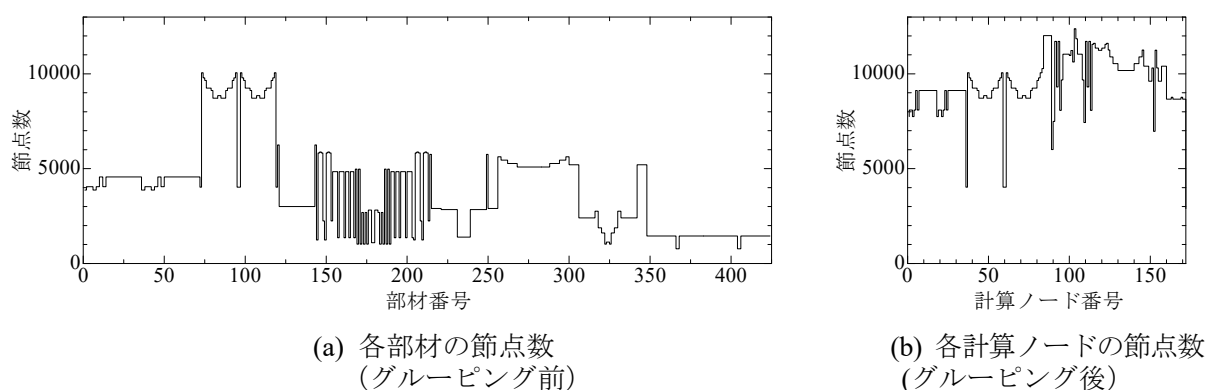


図-15 負荷分散の平滑化

の JR 鷹取駅観測波形を用い、NS 成分を橋軸直角方向、EW 成分を橋軸方向にそれぞれ同時入力する。ここでは加速度の振幅倍率を 100%とした場合に加え、150%に増幅した場合についても検討する。

解析結果として、アーチ補剛桁中央点（図-14 参照）における桁の高さ h ($=18.97\text{m}$) で無次元化した橋軸直角方向の時刻歴応答変位 u_Y を図-16 に示す。図中には比較のためにはり要素モデルによる結果を示している。これより、0.4s あたりの損傷レベルが小さな範囲では、はり要素モデルの結果とシェル要素モデルの結果はよく一致していることから、もとのはり要素モデルと力学的に等価なシェル要素のモデルに変換できていることが確認できる。最大応答変位については振幅倍率 100%の場合では両者の無次元化相対差は小さく 2%程度であるが、より損傷が大きく生ずる 150%では 6%に増加する。構造全体の巨視的な力学挙動として橋軸直角方向の水平力 F_Y と補剛桁中央部の橋軸直角方向の水平変位 u_Y の関係を図-17 に示す。水平力は死荷重 W で無次元化して表示している。今回の加震レベルでは構造全体として明確な軟化領域には

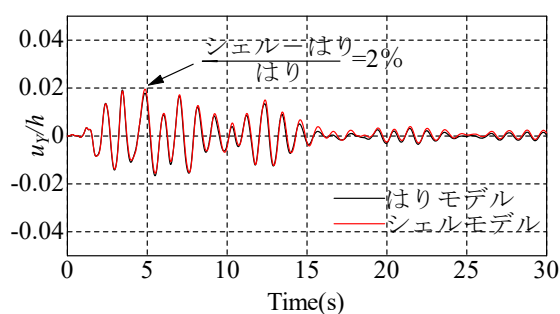
至っておらず、シェルモデルとはりモデルとの挙動に大きな差異が生じていないことがわかる。今後の検討課題として、構造全体として明確な軟化挙動が生ずるレベルの動的解析を実施し、崩壊挙動を取り扱うための本解析プログラムの妥当性の検証を行う予定である。

5. まとめ

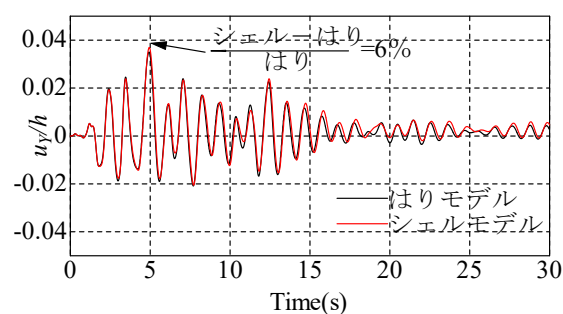
設計の想定を超える規模の地震動に対する鋼構造物の崩壊挙動を解析するためのツールとして、シェル要素を用いた精緻なモデルによる大規模並列計算機能を有する耐震解析プログラムを開発した。本プログラムは名古屋大学のスーパーコンピュータ「不老」上で実行可能である。開発したプログラムは、単柱式鋼製橋脚の Pushover 解析をもとに基本的な検証を行った。さらに、シェル要素を用いた精緻な上路式鋼アーチ橋モデルによる動的解析を実施し、大規模並列計算の動作確認を行った。

6. 謝辞

本研究は九州建設技術管理協会の支援を受け、名古屋大学のスーパーコンピュータ「不老」を

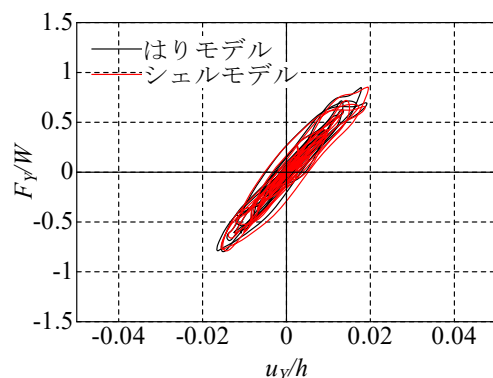


(a) 振幅倍率 100%

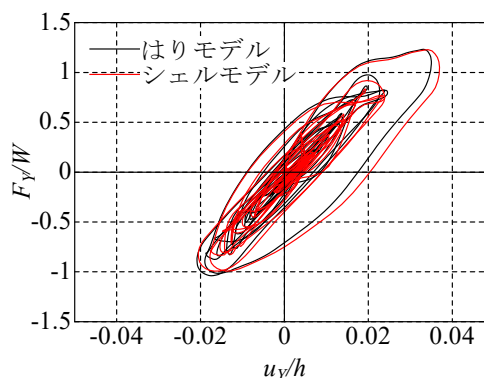


(b) 振幅倍率 150%

図-16 橋軸直角方向水平変位



(a) 振幅倍率 100%



(b) 振幅倍率 150%

図-17 橋軸直角方向水平力-水平変位関係

利用して実施した。プログラム開発においては（株）地震工学研究開発センター吉野廣一氏にご協力をいただいた。ここに付記し、謝意を表する。

7. 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善，2017.
- 2) 鋼構造委員会，鋼・合成構造標準示方書耐震設計編小委員会：2018 年制定 鋼・合成構造標準示方書 耐震設計編，土木学会，2018.
- 3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善，2012.
- 4) (財)高度情報科学技術研究機構：High Performance Computing Infrastructure, <<https://www.hpci-office.jp/>>, (accessed 2021.5.7)
- 5) 理化学研究所 計算科学研究センター：「富岳」について | 理化学研究所 計算科学研究センター(R-CCS), <<https://www.r-ccs.riken.jp/fugaku/>>, (accessed 2021.5.7)
- 6) 名古屋大学 情報連携推進本部：スーパーコンピュータ「不老」紹介, <<https://icts.nagoya-u.ac.jp/ja/sc/overview.html>>, (accessed 2021.5.7)

- 7) 奥村徹，野中哲也，馬越一也，吉野廣一：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，第 74 回年次学術講演会，I-70，2019.
- 8) 奥村徹，馬越一也，野中哲也，吉野廣一：非エネルギー吸収部材の損傷を伴う上路式鋼アーチ橋の構造全体系の地震時終局挙動，構造工学論文集 Vol.66A，pp.264-273，2020.
- 9) 吉野廣一，野中哲也，本橋英樹，金治英貞，鈴木威，八ツ元仁，中村良平：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，pp.43-50，2014.
- 10) Utkarsh Ayachit: The ParaView Guide, <<https://www.paraview.org/paraview-guide/>>, (accessed 2021.5.7)
- 11) (社) 日本鋼構造協会：ファイバーモデルを用いた鋼橋の動的耐震解析の現状と信頼性向上，JSSC テクニカルレポート No.93，2011.