

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01521

研究課題名（和文）高架橋から構成される広域道路ネットワークの超大規模地震応答シミュレーションの構築

研究課題名（英文）Construction of large-scale seismic response simulation of wide-area expressway network connected by elevated girder bridges

研究代表者

野中 哲也（NONAKA, TETSUYA）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：20772122

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,500,000円

研究成果の概要（和文）：スーパーコンピュータを頂点とした高性能コンピュータ上にて、高架橋が壊れるまで表現できる高精度な解析モデルの構築および計算時間がかかる解析モデルの高速計算方法の開発を行った。これによって、高架橋から構成される広域道路ネットワークの超大規模地震応答シミュレーションを完成させ、設計地震動を超えた地震が発生した場合の道路ネットワークとしての評価が可能となった。さらに、高架橋以外に、これまで実施が不可能であった長大橋の解析まで試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

都市内高速道路は、ほとんどが高架橋であり、地震発生時の緊急輸送路として指定されている場合が多い。十分に耐震設計された高架橋でも、想定を大きく超える地震が発生すると、倒壊することがある。本研究では、高架橋が損傷して倒壊するまでの挙動が表現できる精緻なモデルを構築し、そのモデルがつながった高速道路の地震応答シミュレーションを構築した。今後、発生が危惧されている南海トラフ巨大地震発生時に本シミュレーションを実施すれば、道路ネットワークとして評価が可能となり、地震防災や避難計画立案等に対して有効な情報を提供する。

研究成果の概要（英文）：A high-precision analysis model was constructed that can express the elevated girder bridge until it breaks on a high-performance computer with a supercomputer at the top. In addition, a high-speed calculation method for the analysis model that requires a long calculation time has been developed. Based on this research result, a super-large-scale earthquake response simulation of a wide-area road network composed of elevated girder bridges was completed, and it could be evaluated as a road network when an earthquake exceeding the design seismic motion was applied. In addition to elevated girder bridges, we also attempted to analyze long span bridges that were previously impossible to carry out.

研究分野：高架橋や長大橋等の鋼橋に対する耐震工学

キーワード：地震応答シミュレーション 道路ネットワーク 高架橋 DDM 大規模解析モデル シェルモデル 長大橋 PCクラスタ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1)終局状態や崩壊挙動まで表現できる高精度な解析モデルの必要性

東北地方太平洋沖地震(2011年)や熊本地震(2016年)においては、想定外の巨大津波や震度7の地震が2回発生するなど、設計上の想定を超える事象が発生し、数多くの構造物が甚大な被害を受けた。我が国の耐震設計基準は、大規模な地震が発生して甚大な被害を受ける度に、設計地震動が繰返し引き上げられてきた。近年、発生が危惧される南海トラフ地震や都市直下型地震に備えるためには、これまでのように既往の発生地震だけを考慮して、無損傷が限定的な損傷を許容する耐震設計法では対応が困難であると考えられる。したがって、今後は、想定を超える地震動が作用した場合に、対象構造物がどのような挙動を示すか予め予測することが必要である。すなわち、構造物に対して終局状態や崩壊挙動まで表現できる高精度な解析モデルを作成して、設計地震動を上回る地震動を含めた最大級の地震動を作用させた地震応答シミュレーションが重要である。

(2)広域の地震応答シミュレーションの期待

地震防災・減災対策を検討する上で、設計実務で用いられている橋梁単位の地震応答解析ではなく、広域の地震応答シミュレーションを行い、路線単位等の損傷程度を予測することも含めた広域道路ネットワークとしての評価が注目されている。このシミュレーションと前述(1)が合わさると、さらに膨大な計算時間がかかり多くの計算資源を必要とする。近年、国立研究開発法人理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を頂点とする大規模計算機が国内の研究機関や大学に整備されてきたことから、これについては解決できると予想される。

2. 研究の目的

都市内高架橋に対して、高架橋の終局状態、崩壊挙動まで表現できるように、高精度な材料構成則のシェル要素等によるモデル化を行い、さらに、そのモデルを連続させて路線全体にモデル化の範囲を拡大することによって、想定を超える巨大地震発生時にも道路ネットワークとしての評価が可能な高架橋の地震応答シミュレーションを構築する。そのシミュレーションの膨大な計算を可能にするため、本研究ではスーパーコンピュータの使用を前提にして、その計算が確実に行えるように、本シミュレーションで使用する独自開発の構造解析ソフトウェアに対して、並列処理の性能を向上させて高速化を行う。また、本研究で得た高速化技法およびソフトウェアを公開することによって、土木分野の研究者や技術者に対するスーパーコンピュータ利用の促進につながる。

3. 研究の方法

(1)PC クラスタを含めた計算機環境の整備およびプログラムの開発

高速演算(並列処理)のためのプログラム開発をして、構造解析ソフトウェアに組み込む。このプログラムの開発および解析データの作成に PC クラスタ(複数台の PC 等をネットワークで接続してひとつのコンピュータに見立てて利用する並列コンピュータ)を、大規模計算にスーパーコンピュータ「京」を使用する。

(2)解析モデルの構築

多くの高架橋のシェルモデルを効率よく作成するため、シェル変換ツールを開発する。この変換ツールは、すでに存在する解析データを有効に活用して、シェルモデルを作成するものである。

(3)高架橋からなる道路ネットワークの構築

前述した方法により作成した高架橋のシェルモデルを連続させて、広域道路ネットワークモデルを構築する。このモデルは大規模になるため、スーパーコンピュータ「京」を使用する。

(4)他の橋梁への展開

並列処理のためのプログラムおよびシェル変換ツールを活用して、高架橋以外にアーチ橋、長大斜張橋、長大トラス橋の解析へ展開する。

4. 研究成果

(1)大規模解析モデルの解析手法の確立

本シミュレーションは計算量が膨大になることから、本科研費で購入した PC クラスタとスーパーコンピュータ「京」を組み合わせ、計算機環境をまず構築した。本シミュレーションでは、地震応答解析(動的解析)を実施するが、運動方程式において等価剛性、等価荷重および等価変位に整理できて、結果的には静的解析と同様に大次元の連立一次方程式を解くことが重要になる。スーパーコンピュータ「京」の演算部は、約8万のCPUで構成され、この多くのCPUを使って効率よく並列処理する必要がある。連立一次方程式の解法として、本研究(並列処理プログラ

ム)では, DDM (Domain Decomposition Method) を採用した。実際に, 高架橋に対して DDM を適用すると, 図 1 に示すようにひとつの高架橋を橋脚と桁をそれぞれサブドメインとして分けて, そのサブドメインをひとつの CPU で計算する。各 CPU で計算(サブドメイン内部節点消去)した後は, 支承位置を境界としたインターエース方程式を生成して解くことになる。ひとつの高架橋に対して, 5~10 程度の CPU を使うことになり, 後述する広域道路ネットワークでは高架橋数 × (5~10) の CPU で構成されるコンピュータが必要となる。現在のほとんどスーパーコンピュータは, スーパーコンピュータ「京」のように多くに CPU を実装しているため, 本研究の並列処理に適しているといえる。

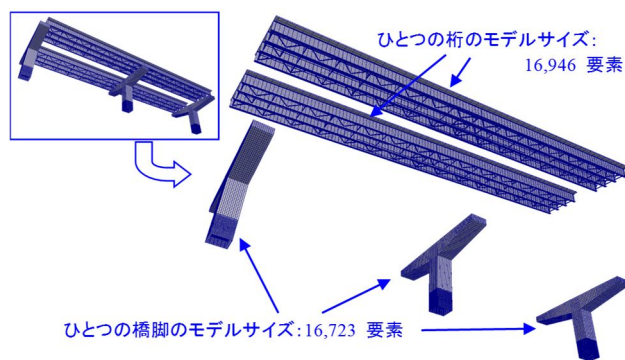


図 1 DDM の高架橋への適用

(2) 解析モデルの合理的な構築方法の開発および高精度な高架橋モデルの構築

高架橋に対して, 効率よく解析モデルを作成する方法として, 梁モデル(ファイバーモデル)からシェルモデルへの変換するツール(シェル変換ツール)を開発した(図 2 参照)。ファイバーモデルのデータは, 断面情報も含まれているため, ダイアフラム, 隅角部等の情報を追加すればファイバーモデルからシェルモデルへ変換が可能となる。実際にこの変換ツールを活用して, すでに存在する 3 径間連続高架橋のファイバーモデルをもとに作成した高精度な高架橋モデルを図 3 に示す。本高架橋モデルに対して, 前述した DDM により解析した結果も同図に示している。この図から, 橋脚の基部が大きく損傷(赤色: 塑性化)しているのがわかる。さらに, シェル変換ツールを活用して作成した高架橋モデルに対して, 地震時の詳細な上部構造(桁)の挙動も解明した¹⁾。

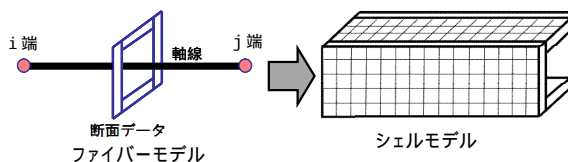


図 2 開発したシェル変換ツール

(3) 広域道路ネットワークの構築および実務への適用

計算量が膨大になることから, これまで広域道路ネットワークとして地震応答シミュレーションを行った例はほとんど存在しなかった。しかし, 本研究成果を活用すれば, 実際に可能となってきたことを, 実務の橋梁技術者に最も購読されている雑誌「橋梁と基礎」に, 「道路ネットワークをつなぎつづける」というタイトルで広域道路ネットワークについての事例を交えて紹介した²⁾。その後, 道路管理者から問い合わせ等があった。

実際の適用した例として, 名古屋高速道路全線(92%が高架橋)の約 6 割(37.9km)の高架橋(約 1200 径間)を対象としたシミュレーションが挙げられる。これらの高架橋は, すでに, ファイバーモデルでモデル化されていたため, 本シェル変換ツールを活用して, 図 4 に示すように道路ネットワークのモデルを構築することができた。この大規模モデルに対して, スーパーコンピュータ「京」上で約 3700 の CPU を使用して計算した。

また, 名古屋高速の防災点検システムに地震応答解析の部分に本研究成果が

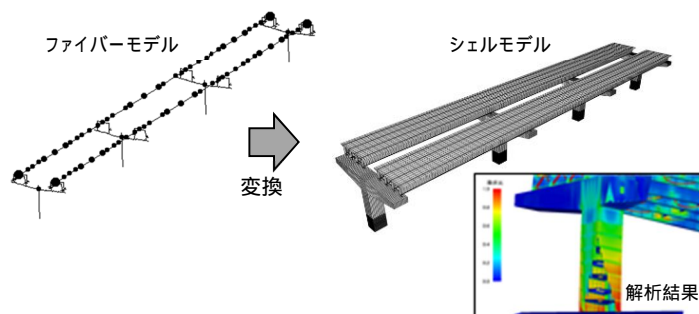


図 3 シェル変換ツールの適用例

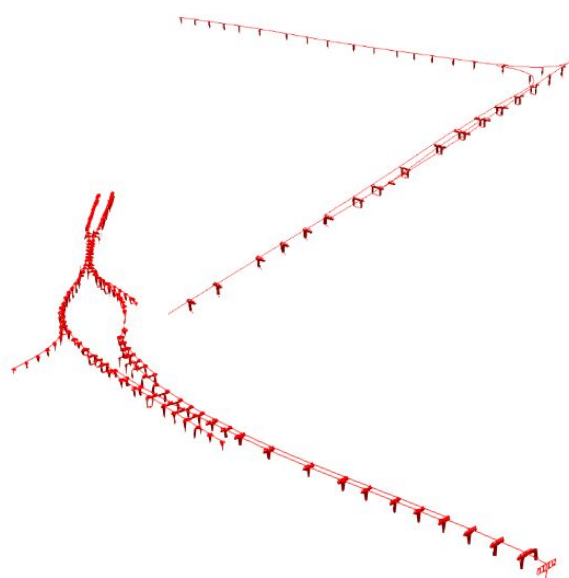


図 4 広域道路ネットワークの大規模解析モデル

活用され、運用の準備が完了している。また、阪神高速道路においても、同様に本研究成果の計算方法が採用され、その計算結果の一部は、テレビ等で紹介された。

(4)他の橋梁への展開

対象橋梁としては、当初予定していた高架橋だけでなく、特殊橋梁や長大橋まで拡張した。高架橋以外の橋梁に対して、シェルモデルの構築および解析が実施できることを証明した上で、実存する特殊橋梁のアーチ橋へ適用した³⁾。さらに、大規模な長大斜張橋モデル⁴⁾まで展開させることができた(図5参照)。

以上から、高架橋、特殊橋梁、長大橋等の精緻なモデルの構築およびそれらの橋梁がつながった広域道路ネットワークとして評価が行えることを提示した。

最後に、実存の長大トラス橋に対して、約1億節点の超大規模モデルの静的弾塑性有限変位解析に成功して、HPCI (High Performance Computing Infrastructure) の研究成果(課題番号: hp200087)として発表した。

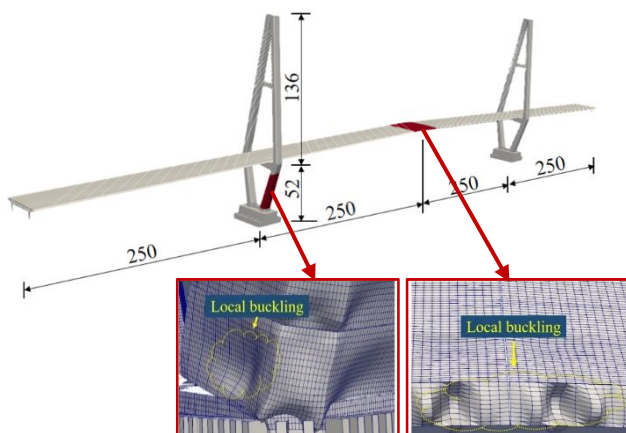


図5 長大斜張橋の大規模有限要素モデルの解析結果

(5)本研究成果の普及活動

土木学会・鋼構造委員会・高精度な数値解析法を用いた鋼橋の耐震性能照査に関する調査研究小委員会(委員長:野中)において、本研究成果(DDMによる計算方法、シェル変換ツール)を公表した。また、本研究で開発して並列処理プログラムを含む構造解析ソフトウェアを本小委員会メンバー中心に公開することになった。

<引用文献>

- 1)徳橋亮治, 宮田秀太, 馬越一也, 野中哲也: 鋼桁橋の上部構造に対する耐震設計上の課題とその対応, 鋼構造論文集, 108号, 日本鋼構造協会, 2020.
- 2)野中哲也: 道路ネットワークをつなぎつづける, 橋梁と基礎, Vol.53, pp.125-128, 2019.
- 3)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.264-27, 2020.
- 4)Li, L., Nonaka, N., Xiang, N., Hatsushika, Y., Obata, M. (2021.3). THREE-DIRECTIONAL PUSHOVER ANALYSIS AND DAMAGE INVESTIGATION OF A LARGE-SCALE CABLE-STAYED STEEL BRIDGE USING SUPERCOMPUTING. Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Civil Engineering (ICACE 2020), 4-6 March 2021, CUET, Chattogram-4349, Bangladesh.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 奥村徹, 馬越一也, 野中哲也, 吉野廣一	4. 巻 Vol.66A
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 pp.264-273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 野中哲也	4. 巻 Vol.53
2. 論文標題 道路ネットワークをつなぎつづける	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 橋梁と基礎	6. 最初と最後の頁 pp.125-128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 徳橋亮治, 宮田秀太, 馬越一也, 野中哲也	4. 巻 第27巻, 108号
2. 論文標題 鋼桁橋の上部構造に対する耐震設計上の課題とその対応	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鋼構造論文集	6. 最初と最後の頁 pp.105-115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Li, L., Nonaka, N., Xiang, N., Hatsushika, Y., Obata, M.	4. 巻 -
2. 論文標題 THREE-DIRECTIONAL PUSHOVER ANALYSIS AND DAMAGE INVESTIGATION OF A LARGE-SCALE CABLE-STAYED STEELBRIDGE USING SUPERCOMPUTING	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Civil Engineering (ICACE 2020)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Nailiang Xiang, Tetsuya Nonaka, Makoto Obata, Liao Li
2. 発表標題 SEISMIC DAMAGE ANALYSIS OF A LARGE-SCALE CABLE-STAYED STEEL BRIDGE USING PRECISE SHELL MODELS AND SUPERCOMPUTING
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野中哲也, 森本優美, 吉野廣一
2. 発表標題 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
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森本優美, 野中哲也, 奥村徹, 吉野廣一
2. 発表標題 シェル要素を用いた超大規模トラス橋モデルのPushover解析
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥村徹, 野中哲也, 馬越一也, 吉野廣一
2. 発表標題 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
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------