

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

津波による鉄道構造物への負荷を予測する

実際に発生した津波による地上構造物への負荷を予測するとき、どのくらいの波高と流速の津波が、どのくらいの時間押し寄せてきたかを知る必要があります。ところが、震源における断層のすべり量、海底と地上の地形、市街地に立ち並ぶ地上構造物の大きさや配置などの多くの要素が複雑に絡み合うため、鉄道構造物に対する津波の挙動を正確に再現することは従来の方法では困難でした。そこで、本研究では、津波波源から鉄道構造物までを解析できる手法を開発しました。ここでは、気仙沼の鹿折唐桑駅ししおりからくわを対象とした解析事例を紹介します。



室谷 浩平
Kohei Murotani
鉄道力学研究部
計算力学研究室
副主任研究員
[専門分野] 並列計算、
計算科学、計算力学

はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、日本周辺における観測史上最大の地震でした。この地震により、波高10m以上、最大遡上高40mにも上る巨大な津波が発生し、東北地方太平洋沿岸部は甚大な被害にみまわれました。鉄道構造物では、東北地方太平洋沿岸部のJR線において、在来線23駅、約60kmにわたる線路、橋げた101か所で、津波による流失、瓦礫による埋没などの被害を受け、合計で1,730か所に被害が発生しました¹⁾。

東日本大震災では、地震による直接的な被害よりも津波による被害の方が

深刻でした。そのような背景から、本研究では、大地震により発生した津波が鉄道構造物へ及ぼす影響を解析できる手法を開発しました。

図1は、国土地理院により2011年5月26日に撮影された東日本大震災後の気仙沼の航空写真です²⁾。図1(a)では、気仙沼全体の津波による被害状況が確認でき、多くの地上構造物が流失した様子が確認できます。図1(b)では、60m級の巨大船舶である第18共徳丸ししおりからくわが、鹿折唐桑駅前50m付近に漂着し、ほとんどの地上構造物が流出した様子が示されています。ところが、鹿折唐桑駅の駅舎ししおりからくわは浸水被害を受けたにもかかわらず、原型を留め倒壊を免れ

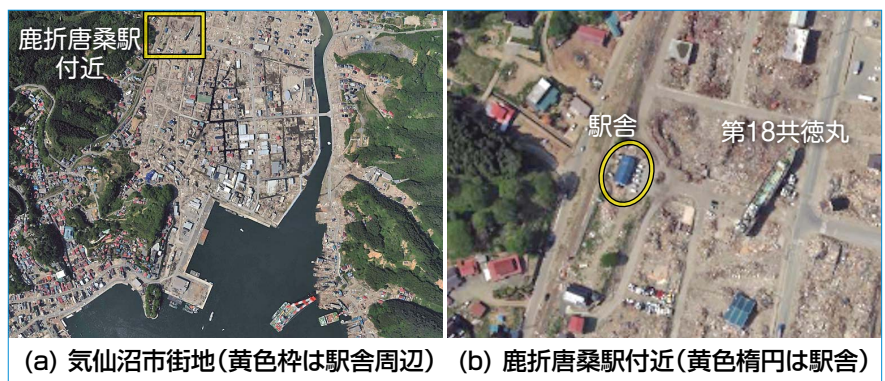


図1 東日本大震災後の気仙沼の航空写真²⁾ (2011年5月26日撮影)

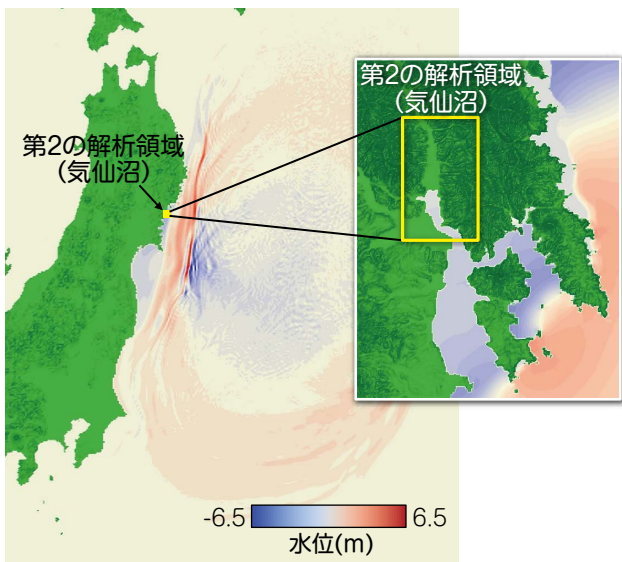


図2 第1の解析結果(15時7分)

ていました。ここでは、^{ししおりからくわ}鹿折唐桑駅の駅舎が倒壊を免れた理由についての検証と考察を、本研究で開発した解析手法を用いて行います。

東日本大震災を模擬した津波解析

3段階のズームアップ津波解析

東北地方太平洋沖地震の震源域は广大で南北500km、東西200kmでした。このように、広範囲な領域で発生した津波が、どのように地上に押し寄せ、地上構造物がどのような影響を受けるかを、単一の解析で行うのは困難です。津波波源から沿岸部までの数百kmの領域は、数kmの幅の波の伝播解析を行うことができればいいので、粗い格子を用いた2次元の浅水長波解析(☞参照)が適しています。一方で、本研究が目的としている鉄道構造物へ及ぼす影響を解析するためには、10cm程度の粗さで解析を行う必要があります。このような背景から、本研究では、津波波源から鉄道構造物までを解析す

るために、1,000km四方程度、4km×2km、180m×150mの3つの解析領域を設定し、大きな解析領域から小さな解析領域に順次に境界条件を渡す3段階のズームアップ解析手法³⁾を開発しました。

第1の解析

第1の解析では、図2のような震源で発生する津波波源から沿岸部までの津波伝播解析を行い、第2の解析のための流入流出境界条件を生成します。この解析は、1,000km四方程度の広範囲の解析が必要となるため、計算コストが低い2次元の浅水長波解析を用います。

第2の解析

第2の解析では、図3のような沿岸部に押し寄せた津波が地上へ遡上(☞参照)する解析を行い、第3の解析のための流入流出境界条件を生成します。ここでは、気仙沼湾と気仙沼市街地の両方を解析範囲に含める必要があるため、気仙沼湾の^{ししおり}鹿折川河口を中心とした南北4km、東西2kmを解析範囲と

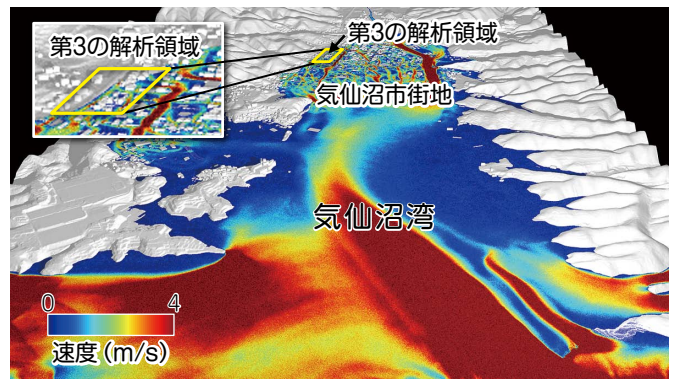


図3 第2の解析結果(15時40分20秒)

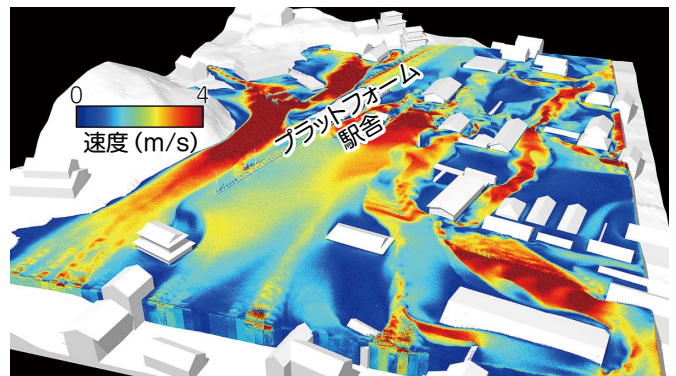


図4 第3の解析結果(15時40分20秒)

しました。

第2の解析では、遡上計算が容易な3次元のMPS法(☞参照)を用いて計算を行います。ここでは、直径1mの粒子を最大1.3億個用いて、1,800秒間の津波を再現するための解析を行うために、鉄道総研のスーパーコンピュータXC30(2016年8月当時)を100ノード用いて88時間を要しました。

図3では、気仙沼湾に侵入してきた

☞ 浅水長波解析

津波のような長い波の伝播を考えると、水深に比べて波長が十分に長く、水平流速と圧力が深さによらないと仮定した解析手法です。

☞ 遡上

津波が海岸から内陸部へかけ上がる現象のことです。

☞ MPS(Moving Particle Simulation)法

数値解析手法の一種で、計算対象を粒子に分割して近似解を得る方法です。大きく変形する解析や接触が発生する得意であるため、自由表面の流れや浮遊物の取り扱いに適する手法です。

津波は、^{ししおり}鹿折川を最初に遡上していき、それを追うように気仙沼市街地内の構造物の間を縫うようにして津波が遡上していく様子が見てとれます。

第3の解析

第3の解析では、**図4**のような津波がどのように市街地に押し寄せるかを再現し、流体圧力による鉄道構造物の挙動を評価します。ここでは、駅舎周辺の流れを再現できる十分な範囲を確保するため、駅舎付近の南北180m、東西150mを解析範囲としました。

第3の解析では、第2の解析と同じく3次元のMPS法を用いて計算を行いました。直径10cmの粒子を最大1.8億個用いて、400秒間の津波を再現するための解析を行うために、鉄道総研のスーパーコンピューターXC30(2016年10月当時)を50ノード用いて2週間を要しました。

鉄道構造物に対する津波挙動の再現

駅舎モデルに作用する水圧の分布

第3の解析では、**図5 (a)**の駅舎の窓とドアがすべて開いている駅舎モデルと、**図5 (b)**の窓とドアがすべて閉まっている駅舎モデルを作成し、それぞれの駅舎モデルに対して津波波圧による駅舎の構造解析を行いました。**図6 (a)**では、津波が押し寄せてくるにしたがい、ドアや窓などの空いている部分から駅舎モデル内に津波が侵入し、海水に満たされていく様子が確認できます。**図6 (b)**では、津波が押し寄せてきても、ドアや窓は閉じられて

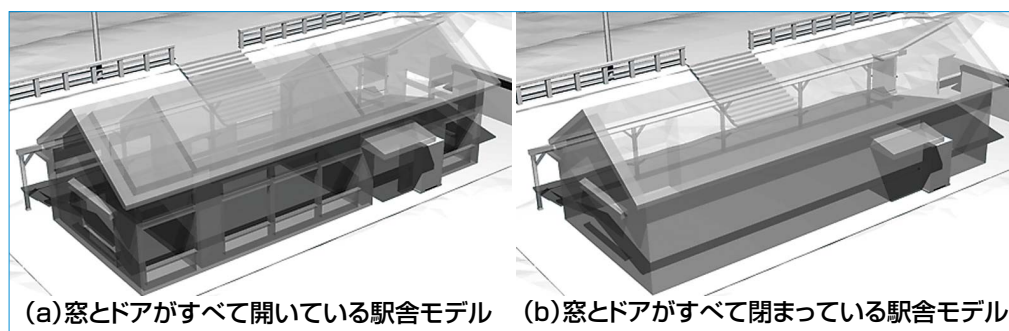


図5 第3の解析における駅舎モデル

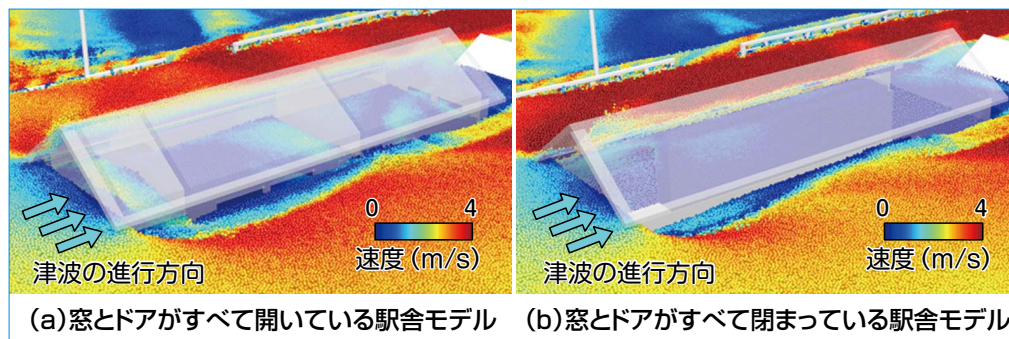


図6 第3の解析における駅舎周辺の解析結果(15時41分10秒)

いるため、津波の侵入口がなく、駅舎モデル内に海水は入ってこない様子が確認できます。

図7 (a)と**(b)**は、それぞれの駅舎モデルを床から見上げた水圧の分布です。**図7 (a)**と**(b)**を比べたところ、水位に応じて駅舎モデル外壁に作用する水圧が変化しているところは類似していますが、**図7 (a)**では駅舎モデル内部に水圧が作用しているのに対して、**図7 (b)**では駅舎モデル内部には水圧が作用していないことが見てとれます。

図8は、駅舎モデルにかかる最大圧力の時系列です。**図8**では、両方の駅舎モデルにおいて、時間が進んでも駅舎モデルが受ける最大圧力は同じようになっています。津波の水圧は静水圧による影響が大きいので、底部ほど大きな水圧を受ける傾向にあります。**駅舎モデルにおける応力の分布**

図9は、津波波圧を外力とした応力解析による、それぞれの駅舎モデルを床から見上げた応力分布です。応力解

析用のFEMモデルには、メッシュサイズ5cmの四面体2次要素を用いました。**図9 (a)**と**(b)**を比べると、水圧による駅舎内部からの支えの有無により、窓とドアがすべて閉まっている駅舎モデルでは、窓とドアがすべて開いている駅舎モデルに比べて大きな応力が生じていることがわかりました。

図10は駅舎モデルにかかる最大相当応力の時系列です。**図10**では、水圧による駅舎内部からの支えの有無により、窓とドアが閉まっている駅舎モデルは、開いている駅舎モデルに比べて、15時43分40秒の時点では5.5倍の相当応力が作用することを示す結果となりました。

以上のことから、^{ししおりからくわ}鹿折唐桑駅の駅舎周辺の構造物がほとんど倒壊しているにもかかわらず、^{ししおりからくわ}駅舎がほぼ原形を留めて残った一因は、^{ししおりからくわ}鹿折唐桑駅の駅舎は窓やドアが開いたオープンな構造になっており、津波が駅舎内部を通過したことで、駅舎に作用する応力が大き

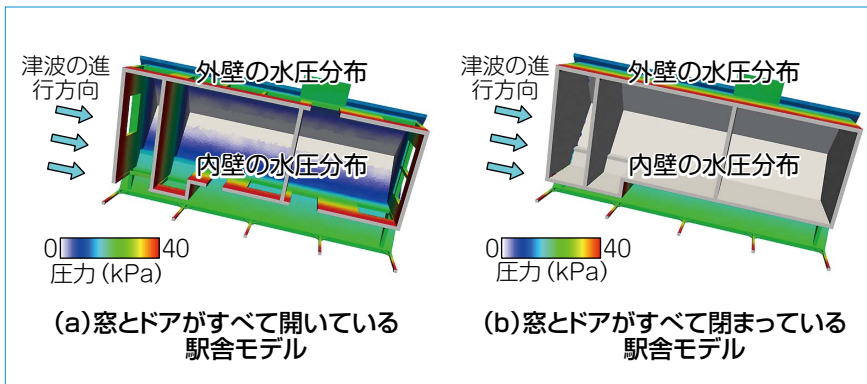


図7 駅舎モデルを床下から見上げた圧力分布 (15時43分40秒)

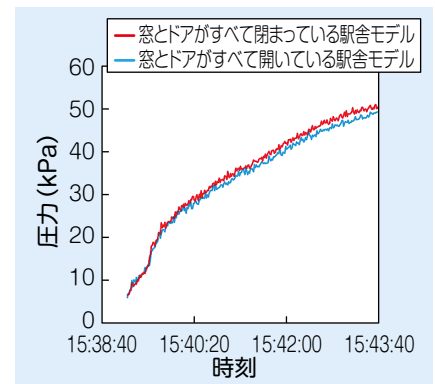


図8 駅舎モデルにかかる最大圧力

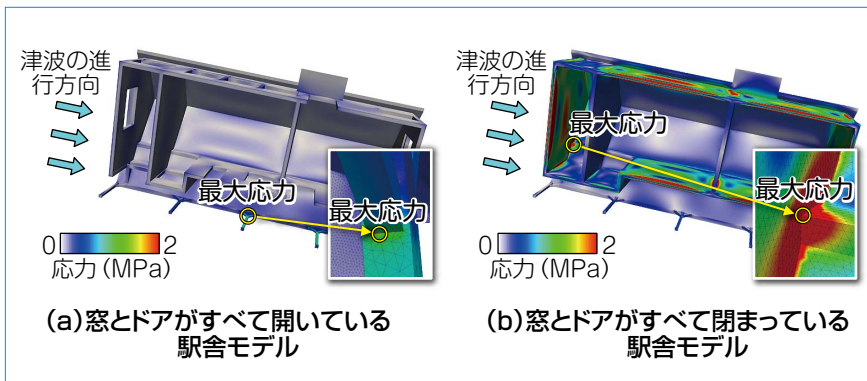


図9 駅舎モデルを床下から見上げた応力分布 (15時43分40秒)

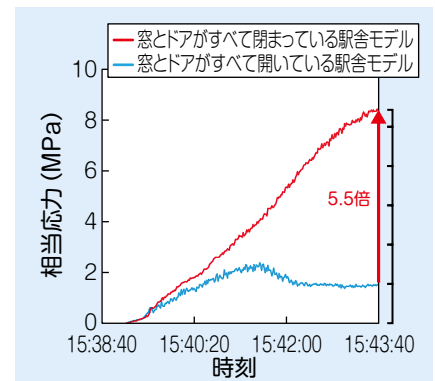


図10 駅舎モデルにかかる最大相当応力

くならず済んだことにあると考えられます。

おわりに

ここでは、気仙沼市街地に対して3段階のズームアップ津波解析の結果を用い、気仙沼市街地にあった鹿折唐桑^{ししおりからくわ}駅の駅舎の構造解析を行いました。震災当日、津波により周辺のほとんどの構造物が倒壊する中、鹿折唐桑^{ししおりからくわ}駅の駅舎は津波による浸水被害を受けたにもかかわらず、ほぼ原型を留めて倒壊を免れました。今回の解析結果により、鹿折唐桑^{ししおりからくわ}駅の駅舎は窓やドアが開いたオープンな構造になっており、津波が駅舎内部を通過したことが、倒壊を免れた一因であると確認できました。

本研究では、3段階のズームアップ解析の結果から、鉄道構造物に対する津波波圧による構造健全性評価手法を開発しました。しかしながら、津波に

よる被害は、波圧だけでなく、津波により押し流された浮遊物によっても引き起こされます。浮遊物を扱う解析では、流体力を評価し浮遊物に外力として渡す必要があり、浮遊物が多数になると浮遊物どうしの衝突を考える必要もあります。さらに踏み込むと、構造物や浮遊物の破壊を扱う必要があります。これまでの研究成果により、浮遊物の扱いや衝突の解析はすでに実現できていますが、妥当性確認が未実施であり、再現性の高い実験の実施も困難です。また、破壊をともなう解析は高解像度の解析が要求されるか、実験的・経験的手法が必要になるため、信頼性の高い解析の実施が困難になるとともに、妥当性確認を行うこと自体が困難となります。このように、本研究で開発した解析手法には、まだ改善の余地が残されています。今後は、解析が実施可能な範囲でさまざまな津波被害を

再現しつつ、実施が困難な解析に対して、さらなる新規研究開発を進めていくことで再現できる現象を増やしていきたいと考えています。

なお、本研究の一部は、JSPS科研費JP26390127の助成を受けたものです。**RRR**

文献

- 1) 国土交通省東北運輸局：よみがえれ！みちのくの鉄道～東日本大震災からの復興の軌跡～、東北の鉄道震災復興誌編集委員会、<http://www.tb.mlit.go.jp/tohoku/td/td-sub100.html>, 2012 (参照日2018年2月21日)
- 2) 国土交通省国土地理院：国土地理院ウェブサイト、地図・空中写真閲覧サービス、整理番号CTO20116、コース番号C10A、写真番号46、撮影年月日2011年5月26日、<https://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1>
- 3) 室谷浩平：大規模数値解析による鉄道駅舎に対する津波挙動の再現、鉄道総研報告、Vol.32, No.6, pp.47-52, 2018