

氏 名	馬 越 一 也
国 籍 ・ 本 籍	福岡県
学 位 の 種 別	博士（工学）
学 位 の 番 号	甲第246号
学位授与の日付	平成27年 3 月19日
学位授与の要件	名城大学学位規程第 3 条第 3 項該当
学 位 論 文 題 目	地震と津波の複合被害を受ける鋼長大橋の 応答性状と性能評価法に関する研究
論文審査委員	主 査 葛 漢 彬
	副 査 久 保 全 弘
	副 査 近 藤 明 雅
	副 査 水 谷 法 美

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、巨大地震において地震と津波が直接的に原因となる被害と、それらが間接的な原因と考えられる事象の被害に遭遇した場合の鋼長大橋の応答性状を数値シミュレーションによって明らかにし、それらの複合作用を受けた構造物の性能評価について研究を行ったものである。

東北地方太平洋沖地震では、地震と津波が直接的な原因となる被害以外に、火災や漂流物の衝突といった2次被害も多く、複合的な作用となって被害が拡大した。今後、発生が懸念される南海トラフ地震をはじめとする地震と津波および、それらによって連鎖的・複合的に発生が考えられる事象に対する備えは、避難、防災計画だけではなく、構造物の設計段階においても考慮すべき課題である。

日本国内において観測史上最大といわれる 2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震では、大規模な津波が発生し、東日本一帯の広い範囲の構造物に対して壊滅的な被害をもたらした。津波が直接的な原因と考えられる海岸施設の破壊や橋梁の流出、建物の浸水といった被害の他に、津波が船舶やコンテナを押し流し、漂流物となって構造物を損傷もしくは破壊した二次的な被害も甚大であった。気仙沼市では、漂流物に 330 重量トンクラスの大型漁船も含まれており、岸壁係留位置から 800m 以上もの距離を住居などの建物や施設を破壊しながら漂流した報告がある。大型漁船が通ったとみられる道筋には、通常は津波で破壊されないと考えられる鉄骨構造物も破壊され、さらに家屋の火災を誘発したことも深刻な被害である。同様の事象は 2004 年スマトラ島沖地震においてインドネシア・バンダアチェで 2,500 重量トンの発電船が港から 2.4 km 内陸の住宅街まで流された報

告があり、漂流船舶による被害拡大が指摘されていた。

津波の研究分野では、津波襲来地域の広域な津波伝播解析を用いて、津波伝播・到達時刻の予測、遡上域・浸水域の予測および災害状況の予測精度の高度化が図られ、避難、防災計画へ役立てられている。コンテナなどの構造物、破壊片などの漂流挙動を表現するモデル化も含めた数値解析および水理模型実験ならびに漂流物衝突力の算定方法などに関する研究は数多いものの、構造物に対して地震被害を受けた後の津波波力の影響や、地震被害を受けた後の漂流物の衝突による影響のように、実際に起こった複合事象に対する定量的な検討はなされていないようである。

そこで本研究では、日本の主要港湾に架橋する鋼長大橋をモデル橋として、南海トラフを震源とする 4 連動地震を想定し、大型漂流物の衝突、津波波力の影響ならびに断続的に発生する余震作用を、同一震源断層による地震と津波による複合作用として捉え、一連の事象を一貫した数値シミュレーションによって対象橋梁の解析手法の構築および応答性状の解明を行い、構造物の性能評価を試みた。

東北地方太平洋沖地震において発生した津波による漂流物被害報告を背景に、地震による損傷を受けた対象橋梁に大型船舶が衝突する複合被害について検討し、その一連の複合作用に対する解析手法を提案した。そこではまず、南海トラフの巨大地震モデル検討会が発表した津波波源モデルを参考に、南海トラフの 4 連動地震を想定した震源断層の波源モデルを用いて、非線形長波理論による津波伝播解析によって架橋付近の津波特性を算定した。津波伝播解析で想定した断層と同一震源断層の震源モデルから作成した広帯域地震動を入力する地震応答解析によって、対象橋梁が受ける地震による損傷状態を再現した。津波伝播解析から得られた津波特性で漂流した大型船舶が、地震の被害を受けた橋梁に衝突する数値シミュレーションによって、対象橋梁への複合被害の応答性状を明らかにし、その一連の複合作用に対する解析手法を提案した。数値シミュレーションの結果からは、地震時に受けた主塔基部の僅かな損傷が大型船舶の衝突によって被害が拡大され、さらに、単一事象（地震の影響を考慮しないケース）との比較により、衝突部位よりも主塔基部の損傷が大きくなるという複合作用の特徴的な被害モードが得られたことから、地震による損傷レベルが比較的小さいとしても、2 次的被害（ここでは漂流物の衝突）によってその被害の拡大化が懸念されるといった知見が得られた。このことから、偶発作用における複合被害を一連の現象として捉えて構造全体で評価することは、損傷メカニズムを議論する上で重要と考えられる。そこで、対象橋梁の基礎構造物に着目して、同一震源断層における地震動と津波の複合現象による構造物被害について見識を深めることにした。津波伝播解析から得られる対象橋梁付近の津波特性をオープンソースの数値流体解析コード OpenFOAM を用いた 3 次元津波解析の初期状態とし、大型ケーソン基礎に作用する津波波力を求めた。地盤と基礎の非線形動的相互作用を考慮した橋梁全体系モデルに地震による損傷を再現させた後に、3 次元津波解析で得られた津波波力を動的に入力する応答解析を実施し、津波波力作用時の基礎周辺地盤の非線形挙動および橋梁全体の応答性状を調べた。ケーソン基礎は僅かな浮き上がりが生じたが、地震による主塔基部の損傷範囲が津波波力によって広がることはなく、基礎の残留変形も見られなかったことから、本検討における想定では津波波力の影響は小さいという結論を得た。これは想定地域におけるひとつのケーススタディを示しているため、架橋位置の地域特性や橋梁形式、ケーソン基礎の形状によっては損傷メカニズムが異なることが予想される。しかしながら、同一震源断層による地震と津波の複合被害評価のために本解析手法を用いることで、他の地域の構造物評価に対しても定量的な分析が可能である。

東北地方太平洋沖地震では、3年以上経った現在においても本震と同じ震源域で断続的に余震が発生している。余震の規模は本震よりも小さいことが多いが、余震源が本震の震源よりも近い場所では本震と同程度の震度となることがあり、その発生メカニズムは複雑である。そのため、構造物に対しての余震は復旧時の一種の偶発的な作用として捉えることができ、本震によって損傷を受けた構造物に断続的な余震が発生したときの応答性状の解明を試みた。本震に加え、2回の余震を模擬した連続地震動を入力する地震応答解析を行い、余震を含む地震に対する構造安全性および地震後の使用性について評価した。想定したサイト波では、本震が最大の応答を示し、主塔基部に僅かな塑性化が見られたが、構造の損傷程度が小さいため、付随した余震の影響も小さいものであった。また、地震後の使用性の照査において、主塔の機能保持性および橋梁全体系に対する残留変位評価の2つの目的で評価を行った。サイト波はいずれの照査においてもほとんど残留変位は生じなく、橋としての機能を速やかに回復できる耐震性能を確保していることが確認できた。距離減衰式を用いた評価手法で余震動を作成し、本震から想定した余震までの期間内すべての余震を考慮していないため、この条件における限定的な結論であるが、この想定地震によって損傷を受けたとしても、本震の規模を上回る他の誘発地震（または余震）が発生しない限りは、本震と同一震源を持つ余震によって橋梁全体が崩壊に至るような被害の拡大化はないと考えられる。また、本研究によって本震－余震の地震動作成のための詳細な評価手法についての課題点を整理した。

本研究によって構築した解析手法と、長大橋特有の振動特性による応答性状の解明と性能評価法は、地震時に作用する間接的・偶発的作用を含む地震と津波の複合被害を耐震性能向上化構造の開発やダンパー等の制震デバイスの余剰耐荷性能評価に転化することができるだけでなく、維持管理の確実性・点検計画策定に享受できるものである。

論文審査の結果の要旨

本論文は、巨大地震において地震と津波が直接的に原因となる被害と、それらが間接的な原因と考えられる事象の被害に遭遇した場合の鋼長大橋の応答性状を数値シミュレーションによって明らかにし、それらの複合作用を受けた構造物の性能評価について研究を行ったものである。

第1章では研究の背景をレビューし、本研究の目的を述べている。第2章では地震と津波の複合作用を受ける長大橋の想定と解析モデルの構築について論述している。第3章では南海トラフの4連動地震を想定した震源断層の波源モデルを用いて、非線形長波理論による津波伝播解析によって架橋付近の津波特性を算定する手法を提示している。第4章では津波伝播解析で想定した断層と同一震源断層の震源モデルから作成した広帯域地震動を入力する地震応答解析によって、対象橋梁が受ける地震による損傷状態を再現し、津波伝播解析から得られた津波特性で漂流した大型船舶が地震の被害を受けた橋梁に衝突する数値シミュレーションによって対象橋梁への複合被害の応答性状を明らかにし、その一連の複合作用に対する解析手法を提案している。第5章では津波伝播解析から得られる対象橋梁付近の津波特性を3次元津波解析の初期状態とし、大型ケーソン基礎に作用する津波波力を求めたうえで、地盤と基礎の非線形動的相互作用を考慮した橋梁全体系モデルに地震による損傷を再現させた後に、3次元津波解析で得られた津波波力を動的に入力する応答解析を実施し、津波波力作用時の基礎周辺地盤の非線形挙動および橋梁全体の応答性状を調べている。第6章では本震によって損傷を受けた構造物に断続的な余震が発生したときの応答性状の解明を試みている。本震に加え、2回の余震を模擬した連続地震動を入力する地震応答解析を行い、余震を含む地震に対する構造安全性および地震後の使用性について評価している。第7章では本論文で得られた知見と今後の課題が総括されている。

本論文で得られた知見は、実務レベルにおいて適用可能な評価手法を提案し、今後の耐震設計法の高度化や維持管理、補強工事に対する基礎的かつ有用な情報を与え、工学上寄与するところが多い。

本申請論文は学位論文としての条件を備えていると評価できる。従って、博士(工学)の学位を授与することを妥当なものと判断する。