

橋梁の津波対策に関する研究

虻 川 高 宏

要 旨

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震の巨大津波により東北地方太平洋沿岸部を中心に、甚大な津波被害をもたらした。津波は沿岸部の建物や構造物を流失させ、橋梁も同様に上部構造や橋脚、橋台背面盛土の流失被害が発生した。道路網の重要なポイントに橋梁は架橋されているため、流失による道路網の遮断は人命救助、緊急輸送、復旧および復興の遅れに直接つながるため、防災の観点から橋梁の津波に対する安全性確保が求められている。現在、橋梁に作用する津波の力やその力に対する具体的な設計方法や対策方法は確立されていない。近い将来、東海地震や東南海・南海地震、日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震が発生するであろうと予測されており、橋梁における津波に対する設計方法や対策方法について、早急に確立することが望まれている。

本研究では、橋梁における津波に対する設計や対策を検討するうえで必要となる、橋梁の流失メカニズムの解明および橋梁に作用する津波力軽減のための基礎資料を得ることを目的とし、実験により検証を行った。実験は、東北地方太平洋沖地震の津波により流失した気仙大橋および歌津大橋を対象とし、実橋の形状を忠実に再現した詳細な橋梁模型（縮尺 1/50）を用いた水路実験を行い、橋梁流失メカニズムの解明を行った。また、津波による水平力軽減を図るためのフェアリングの実験を行い、その効果を検証した。

第 2 章では地震および津波について整理し、橋梁点検結果より被害状況を分析した。東北地方整備局管内（岩手、宮城、福島）の橋梁緊急点検結果から、点検した 1572 橋の内、津波の影響を受けた橋梁は 151 橋（10%）であった。津波の影響を受けていない橋梁において損傷がある割合は 58%（819 橋/1421 橋）、津波の影響を受けた橋梁における損傷がある割合は 93%（141 橋/151 橋）であり、津波が影響したほとんどの橋梁に損傷被害が発生している。また、津波の影響を受けていない橋梁では耐荷力に影響する損傷は 3%（36 橋/1421 橋）であるが、津波の影響を受けた橋梁では耐荷力に影響する損傷は 14%（21 橋/151 橋）であり、津波の影響を受けると重大な被害を生じやすいことがわかる。

第 3 章では、流失した気仙大橋および歌津大橋を対象橋梁として、橋梁の細部形状を詳細に復元した 1/50 の縮尺模型を作成し、水路実験により模型に作用する力を把握し、支承部の耐力に着目して流失メカニズムの解明を行った。

気仙大橋は耐震補強によりゴム支承に交換がなされており、ゴム支承の本体および取付けボルト、アンカーボルトに着目し流失メカニズムの把握を行った。その結果、2 径間連続鈑桁

学位記番号と学位：博第 53 号，博士（工学）

授与年月日：平成 28 年 3 月 18 日

の中間支点上である P4 橋脚の支承取付けボルトが水平破断、3 径間連続鈎桁の中間支点上である P1 橋脚、P2 橋脚支承取付けボルトが水平破断することにより、流失が始まり連鎖的に各支承が破壊され、最後に端支点上のゴム支承が水平破断することにより完全に流失したものと推測される。気仙大橋においては、水平力による取付けボルトのせん断破壊を起因として流失したものと推測される。被災時の連続写真から定常流に近い津波により流失したものと考えられ、定常流により破壊される流速を逆算すると、P4 橋脚の支承取付けボルトで 7.2m/s、P2 橋脚の支承取付けボルトで 8.5m/s となることから、実際に気仙大橋には、流速 8.5m/s 以上の定常的な津波が作用し流失したものと推測される。

歌津大橋はプレテンション PC 単純 T 桁 (Span6) とポストテンション PC 単純 T 桁 (Span9) で構成されている。

Span6 における実験の結果より、桁高は低く津波による水平作用力は小さいが、支承はパット型ゴム支承で水平力に対して抵抗しないこと、設置されていた直角方向変位制限装置 (RC 突起) の耐荷力が小さかったことから、水平的な津波の作用力により RC 突起が破壊されることにより流失したと考えられる。気仙大橋と同様に、歌津大橋においても被災時の動画記録から定常流に近い津波により流失したものと考えられ、定常流により破壊される流速を逆算すると、流速 6.7m/s 以上の定常的な津波が作用し、RC 突起が破壊され流失したものと推測される。

Span9 については Span6 と同様に水平的な津波の作用力により、支承サイドブロックが破壊され流失が始まったと推測される。ただし、Span9 の RC 突起は強度が高く、山側の支承サイドブロックが破壊されても水平的な作用力では流失しなく、支承サイドブロックが水平力により破壊されると同時に、そのサイドブロックに取り付けられていた浮き上がり防止装置が外れることにより、回転しながら流失したものと推定される。これは、Span9 の桁高が高く、桁間隔が小さいため、津波により作用する水平力により大きな回転力が発生したためである。Span6 と同様に定常流により破壊される流速を逆算すると、流速 6.9m/s 以上の定常的な津波が作用し、サイドブロックが破壊され流失したものと推測される。

気仙大橋および歌津大橋で、流失の原因や形態に違いは見られるものの、主要因は津波による水平力であることが確認された。従って、橋梁における津波対策を行う上で水平力の低減が重要であることが分かった。

第4章では、流失の主要因である水平力の低減を図るため、耐風安定性で効果のあるフェアリングを設置した実験を実施した。また、フェアリングにより鉛直上向き力の増加が確認されたことから、鉛直上向き力の抑制を図るためフェアリングにスリットを設けた場合の実験を実施した。

実験結果より、フェアリングを設置することにより、津波による水平力を低減できることが確認され、橋梁の水平力低減対策としてフェアリングが有効であることが確認できた。L 形フェアリングよりも箱形フェアリングにおいて水平力を低減できたが、箱形フェアリングはフェアリングにより密閉された空間内に空気が残存するため浮力が作用し、鉛直上向き力を増大させる結果となった。鉛直上向き力は橋梁の安定性を低下させることから、浮力低減対策も同時に必要であると考えた。

フェアリングにスリットを設けると、箱形フェアリングにおいて鉛直上向き力は低減できることが確認された。しかしながら、箱形フェアリングにスリットを設けると、水平力の低減効果が低下し、L 形フェアリングにスリットを設けた場合と同程度となった。従って、対象橋

梁に応じて水平力と鉛直上向き力のバランスを考慮して、水平力を大幅に低減させたい場合には箱形フェアリングを採用し、水平力および鉛直力の両方をバランスよく低減したい場合には、L 形フェアリングまたは L 形スリットフェアリングを採用するのが適切であると考えられる。

本研究において、ゲート式造波装置による段波状の波を用いて実験を行っているが、実際には実験と異なる様々な性状の津波が考えられる。また、橋梁の津波対策としてフェアリング以外にも桁高の低減や床版張出長の短縮等による対策も考えられる。橋梁の上部構造における耐津波研究は未だ発展途上であり、具体的な橋梁へ作用する力や橋梁形状の違いが及ぼす影響等、今後さらなる実験や解析等の研究が必要と思われる。

主指導教員 長谷川 明

A Study on Anti-Tsunami Measures for Bridges

Takahiro Abukawa

Abstract

The giant tsunami caused by the Great East Japan Earthquake in 2011 inflicted extensive damage in the Pacific coastal area around the Tohoku region. The tsunami washed away buildings and constructions in the coastal area. Bridge superstructures were also washed away. Since bridges are constructed at important points of road networks, traffic blocks due to washouts directly led to delays in lifesaving measures, emergency transportation, restoration, and recovery efforts. Accordingly, it is necessary to ensure the safety of bridges against tsunamis from the perspective of disaster prevention. Until now, no specific design methods or measures to counter the force of tsunamis have been established for bridges. Since the occurrence of major earthquakes is being predicted, it is desirable that bridge design methods and anti-tsunami measures be established immediately.

In this study, verification by experiments was conducted for the purpose of obtaining basic data to clarify mechanisms of bridge washouts and to reduce the force of tsunamis on bridges. Such basic data is necessary to consider bridge designs and anti-tsunami measures. The objects of the experiments were Kesen Bridge and Utatsu Bridge. Experiments were conducted using detailed bridge models, which reproduce the actual forms of the bridges, in order to clarify the washout mechanisms of bridges. Experiments were also conducted using a model with fairings—which were installed to reduce the horizontal force of tsunamis—to verify their effects.

In Chapter 2, knowledge concerning earthquakes and tsunamis was sorted out and the damage situation was analyzed using the results of bridge inspections. According to the results of the emergency inspections of the bridges within the jurisdiction of Tohoku Regional Development Bureau (Iwate Prefecture, Miyagi Prefecture and Fukushima Prefecture), 10% of the inspected bridges were affected by the tsunami and 93% of the bridges that were affected by the tsunami had damage. It means that most bridges affected by the tsunami were damaged. In addition, damage affecting load-bearing capacity was found in 3% of the bridges that had not been affected by the tsunami, whereas damage affecting load-bearing capacity was found in 14% of the bridges that had been affected by the tsunami. The results above show that serious damage tends to be inflicted if a bridge was affected by a tsunami.

In Chapter 3, detailed models were constructed reproducing the detailed configurations of Kesen Bridge and Utatsu Bridge, which were washed away. Forces acting on the models were examined through experiments and the washout mechanisms were clarified paying attention to the resilience of bearings.

Attention was paid to bearings to clarify the washout mechanism. It was suggested that a shear failure of a mounting bolt due to horizontal force triggered the Kesen Bridge to be washed away. According to a sequence of photographs taken at the time of the disaster, the bridge was washed away presumably by a tsunami similar to a steady flow. The steady flow rates that can wash away the bridge were calculated and it was presumed that a steady tsunami flow of 8.5 m/s or above swept away Kesen Bridge.

Utatsu Bridge consists of a pre-tension PC simple T girder bridge (Span6) and a post-tension PC simple T girder bridge (Span9).

Based on the experimental results concerning Span6, the bridge was presumably washed away as the RC projection was destroyed by the tsunami's horizontal acting force. As in the case of Kesen Bridge, a video record at the time of the disaster showed that Utatsu Bridge was washed away by a tsunami closely resembling a steady flow, too. Based on calculating a steady flow that can demolish a bridge, a steady tsunami with a flow rate of 6.7 m/s or above destroyed the RC projection and washed away the bridge.

As for Span9, it was presumed that the washout started as the bearing side block was destroyed by the tsunami's horizontal acting force. At the same time as the bearing side block was destroyed by horizontal force, the lifting prevention device attached to the side block got out of place and then the bridge was washed away while rotating. As in the case of Span6, the flow rate of a steady flow that can destroy the structure was calculated and it was estimated that a steady tsunami with a flow rate of 6.9 m/s or above destroyed the side block and washed away the bridge.

It was confirmed that the main factor of the washouts was horizontal force caused by the tsunami. Therefore, it was understood that reducing the horizontal force is important when taking anti-tsunami measures for bridges.

In Chapter 4, experiments were conducted using a model with a fairing—effective for improving stability against wind—in order to reduce horizontal force, which is the main factor of washouts. Furthermore, experiments were conducted in which a slit was made in the fairing to suppress vertical upward force.

The experiment results confirmed that horizontal force by a tsunami can be reduced by installing a fairing. It was confirmed that a fairing is an effective measure to reduce horizontal force on bridges. Although a box-shaped fairing can reduce horizontal force more effectively than an L-shaped fairing, a box-shaped fairing increases vertical upward force.

It was confirmed that vertical upward force can be reduced if a slit is made in a box-shaped fairing. However, if a slit was made in a box-shaped fairing, its effect of reducing horizontal force was reduced to be around the same level as an L-shaped fairing with a slit. Therefore, it is reasonable to consider the balance between horizontal force and vertical upward force to select the type of fairings.

In this study, waves like hydraulic bores were produced by a gate-type wave generating device. However, actual tsunamis consist of various kinds of waves that differ from the experiments. On the other hand, there are anti-tsunami measures other than introducing fairings, such as reducing the girders' height or the overhang length of the floor slabs. The study on anti-tsunami measures for bridge superstructures is still in the developmental stage and further research is necessary.

Main
supervisor

Akira Hasegawa
