

東日本大震災大津波による 道路橋等の被害要因の水工学の成果を用いた考察

石野和男

正会員 工博 大成建設(株)技術センター土木技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

1. はじめに

筆者らは、2004年福井水害におけるJR西日本越美北線橋梁被害調査¹⁾を契機として、2005年スマトラ津波によるスリランカ橋梁被害調査²⁾等を行い、主に水理実験を用いて洪水による橋梁被害の要因検討^{3) 4)}および津波による橋梁被害の要因検討^{5) 6)}を行ってきた。

2004年以降に調査した概要⁷⁾を示すと、基本的に、流体力や流木により桁が折れる事例は吊り橋以外はほとんど見られていない。太平洋戦争以前に完成した橋脚には無筋のものが多く切損被害が多数発生している。太平洋戦争以後の新耐震設計以前に完成した橋脚は有筋であるため倒壊は見られなかった。一方、桁の重量に比例した設計水平地震力が小さいために、桁の支承部が新耐震設計以後のそれに比べて弱く流出した事例が多く見られた。新耐震設計以後の桁でも、合成桁は桁高が高いすなわち流体力作用面積が広いにもかかわらず、桁の重量が軽くその分支承が弱くて流出していた。

なお、2005年スマトラ津波によるスリランカの橋梁被害状況²⁾は、今回の津波に比べて津波外力が弱く比較対象にならない。

一方、水理実験を用いた津波による橋梁被害の要因検討⁶⁾では、支承をフリーの状態として橋の自重を変化させた移動限界実験を行い、桁下高が8m程度で支承が片側2点の合成桁は8m程度の高さの津波により流出することが求められている。

今回の津波では、10数橋の橋梁が被害を受けたが、本文では、国道45号線に架かる橋梁を中心として、今までの調査結果および水工学的見地から破壊要因を考察する。なお、本調査は、東北地方整備局がインターネットで公開した写真⁹⁾を基に考察していて、釜石および気仙沼の橋梁を除いて現地踏査は未実施

である。

2. 被災橋梁の状況と考察

(1) 陸前高田市の国道45号線橋梁等

図-1に陸前高田市の地図を示す。陸前高田市の国道45号線では東側から沼田跨線橋（延長65m）、川原



図-1 陸前高田市のMapFan地図⁸⁾

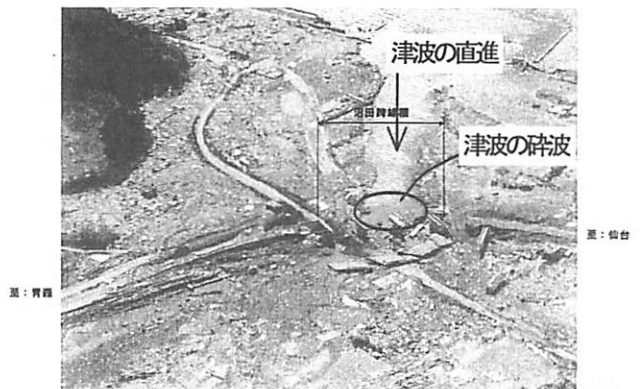


図-2 沼田跨線橋（延長65m）の落橋状況⁹⁾

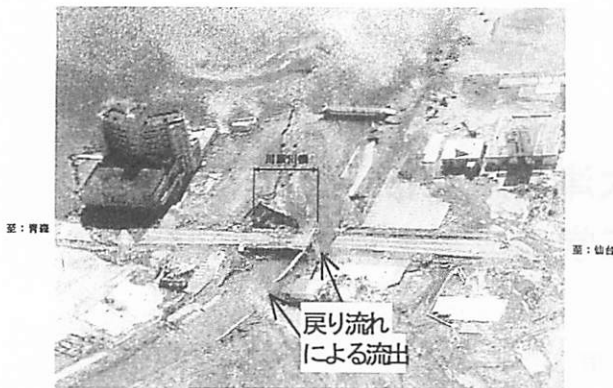


図-3 川原川橋（延長29m）の落橋状況⁹⁾

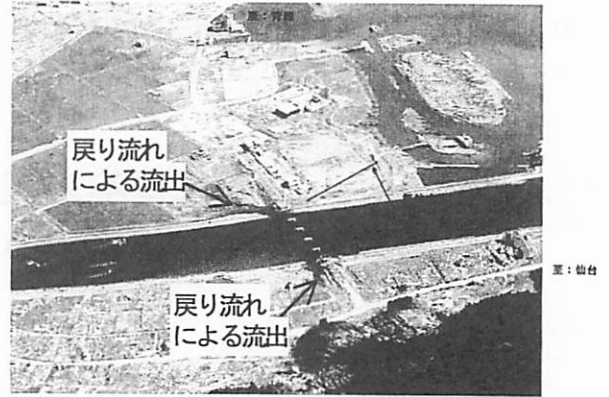


図-5 気仙大橋（延長182m）の落橋状況⁹⁾

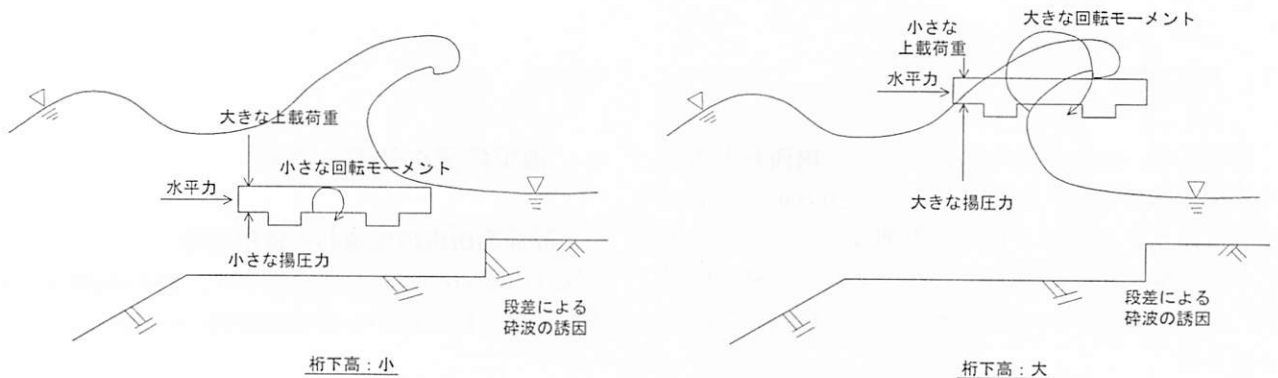


図-4 津波作用時の橋の桁下高と作用力の関係の推定

川橋（延長29m）気仙大橋（延長182m）の3橋が被災した。

図-2に沼田跨線橋（延長65m）の落橋状況を示す。はじめに示したように、日本において近年に建設されたコンクリート桁橋の洪水による流出例は無い。なお、2007年の台湾88台風水害¹⁰⁾では、1橋のみコンクリート板桁橋が流出している。沼田跨線橋は、コンクリート桁橋であり、貴重な落橋事例である。津波は、陸上部に比べて河川内で波高が減衰しない状態で遡上する。また、海岸線のように水面と陸地の境界では波高が大きくなり碎波した状況も見られている。図-2を考察すると、河川が沼田跨線橋の下で屈曲しているために、海岸から河川を遡上した津波が直進し沼田跨線橋の下で碎波し沼田跨線橋の床版に衝突するとともに大きな揚圧力を作用させて、これらの力に沼田跨線橋の支承部が耐え切れずに落橋したと推察される。図-2に見られるように沼田跨線橋の床版は津波の直進方向に跳ね飛ばされている。なお、沼田跨線橋の床版の下面は、例えば図-3に示す川原川橋のそれに比べて常時水面から高く、碎波がもぐり込むに十分な高さがあったことも落橋の要因に挙げられる（図-4参照）。

図-3に川原川橋（延長29m）の落橋状況を示す。川原川橋の東側（青森側）にはビルが見える。ま

た、海側には高田松原が存在していた。一方、川原川橋の下の川は若干上流部で曲がっているが、沼田跨線橋とは異なり上流側に水面が見える。これらの状況から、津波は高田松原で若干減少するとともに河川横断方向に複雑な波高分布を持ちながら遡上したと推察される。このため、沼田跨線橋に比べて川原川橋には大きな揚圧力は作用せず落橋は免れたと考えられる。なお、川原川橋の西側の取り付け部が流出している。図-3に示した方向の戻り流れにより取り付け部が流出したと考えられる。

なお、沼田跨線橋は延長65mで3スパンであり、1スパンの延長は21.7mである。一方、川原川橋は延長29mで1スパンである。橋梁の支承部の耐力は、橋梁の自重に比例する。このことから、川原川橋の支承部の耐力が沼田跨線橋のそれに比べて大きいことも推察される。また、桁下高が低いことも未倒壊の要因に挙げられる。いずれにしても、今後は各橋梁の設計図書を手入しての耐力の照査による作用力の推定が必要である。

図-5に気仙大橋（延長182m）の落橋状況を示す。気仙大橋は総延長182mの5スパンで1スパン当りの延長36.4mの合成桁橋である。合成桁橋は、コンクリート桁橋に比べて単位長さ当りの自重が軽い、そのために延長を伸ばすことが出来て、合成桁橋の

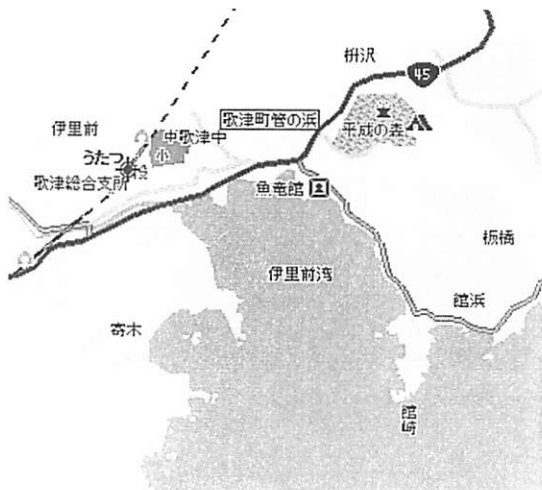


図-5 南三陸町の歌津のMapFan地図⁸⁾



図-7 気仙沼市の陸前小泉のMapFan地図⁸⁾



図-6 歌津大橋（延長304m）の落橋状況⁹⁾



図-8 小泉大橋（延長182m）の落橋状況⁹⁾

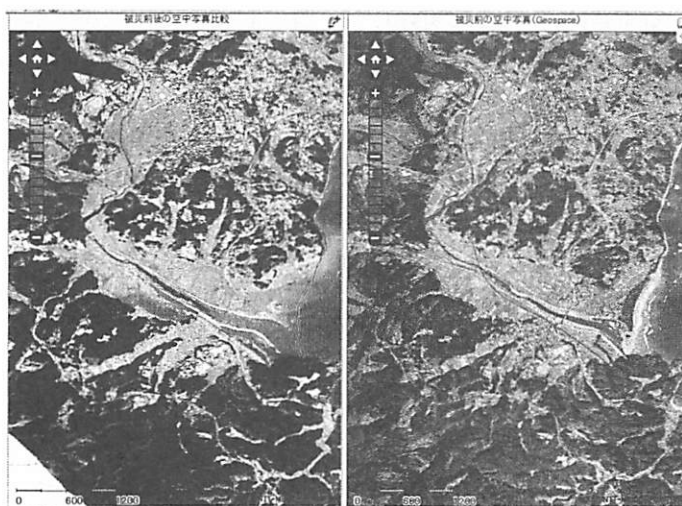


図-9 小泉大橋周辺の震災前後の空中写真の比較¹¹⁾

支承部の強度はコンクリート桁橋それに比べて弱いと推察される。一方、合成桁橋の桁高は、コンクリート桁橋と同程度である。これらのことから、近年に建設された合成桁橋の流出事例は宮崎の耳川に唯一の事例があるのみである⁷⁾。図-4に見られるように気仙大橋が架かる気仙川は、沼田跨線橋や川原川橋のそれに比べて幅が広く水深も深いと推察される。

よって、気仙大橋が架かる気仙川を遡上した津波の波高は、沼田跨線橋や川原川橋のそれに比べて高く、また波速も早く、大きな水平力を作用させ落橋に至ったと考えられる。気仙大橋の桁の流下距離が沼田跨線橋のそれに比べて長いことから作用水平力の大きさが推察される。なお、気仙大橋の直上流側の護岸は左右ともに被災している。この要因としては、



図-10 小泉大橋の被災前の状況¹²⁾



図-12 津谷川PC橋の被災後の状況¹³⁾



図-11 JR気仙線津谷川PC橋の被災前の状況¹²⁾



図-13 Googleで見た津谷川PC橋の被災後の状況¹⁴⁾

戻り流れによると考えられる。

(2) 南三陸町の国道45号線橋梁等

図-5に南三陸町の歌津の地図を示す。歌津において、国道45号線では東側から歌津大橋（延長304m）の中央部が落橋した。図-6に歌津大橋（延長304m）の落橋状況を示す。図-6に示すように、歌津大橋では、湾に面したP2～P10の桁（上部工）が落橋した。図-6の左側の2スパンと、右側の水門の上流の2スパンは落橋していない。左側の2スパンは、その右側に見える丘により津波が減衰して中央に比べて大きな水平力は作用しなかったことが落橋に至らなかった要因と推察される。また、右側の2スパンは、下流の水門がバリアの効果を発揮するとともに津波が河川を遡上して大きな揚圧力は作用しなかったことが落橋に至らなかった要因と推察される。一方、湾に面した中央のP2～P10は、海岸線の直上流であり津波が重複波状に砕波することにより、また、桁下高が高く大きな揚圧力と水平力が作用して、桁を流出させたと考えられる。なお、歌津大橋はコンクリート桁橋であり、一部は反転して、揚圧力の大きさが推察される。

(3) 気仙沼市の国道45号線橋梁等

図-7に気仙沼市の陸前小泉の地図を示す。陸前小泉では、国道45号線の小泉大橋（延長182m）が落橋

した。図-8に小泉大橋（延長182m）の落橋状況を示す。小泉大橋は総延長182m、6スパンで1スパン当りの延長30.3mの合成桁橋である。図-9に小泉大橋周辺の震災前後の空中写真の比較を示す。小泉大橋は河口から約700mに位置する。図-9に示すように津波は河口の砂州を破壊して遡上し小泉大橋を破壊している。ここで特徴的な事項は、図-8に示すように中央のP3橋脚が流出していることである。今回の大津波による橋脚の流出は、小泉大橋のみであり、橋脚の設計図書の入手および流出状況の調査による流出原因の調査が必要である。図-10に小泉大橋の被災前の状況を示す。図-10に示すように桁高を堤防が嵩上げられていて、洪水は堤防から溢水して桁には洪水が作用しないように設置されていた。しかし、今回の大津波では堤防高を上回る波高の津波が来襲して小泉大橋は落橋している。

図-11に JR気仙線津谷川PC橋の被災前の状況を、図-12に JR気仙線津谷川PC橋の被災後の状況を示す。図-11に示されるようにJR気仙線津谷川PC橋は、近年に建設された単線のPC桁橋である。2004年以降の越美北線等の洪水では太平洋戦争以前に建設された無筋のコンクリート橋脚が破壊されているが、近年に建設された鉄道橋が被災を受けたものはJR気仙線津谷川PC橋が初めてである。また、図-12に示されるようにJR気仙線津谷川PC橋は、桁が上流に散



図-14 新北上大橋のMapFan地図⁸⁾

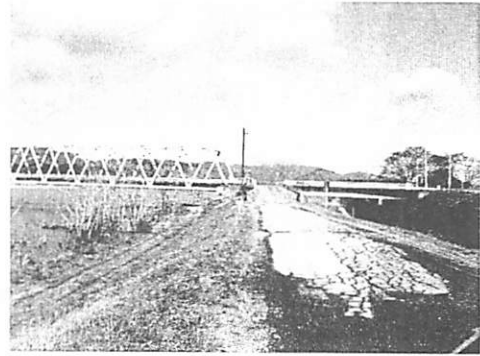


図-17 被災前の右岸取付け部

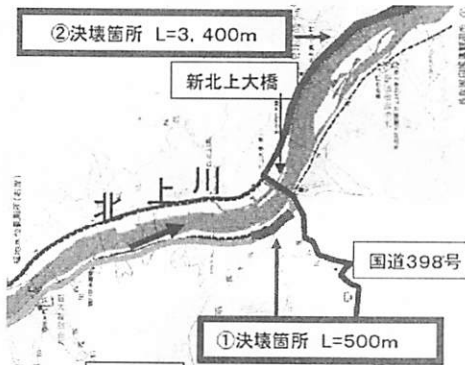


図-15 新北上大橋周辺の堤防決壊状況⁹⁾



図-18 新北上大橋被災後の桁上状況¹²⁾

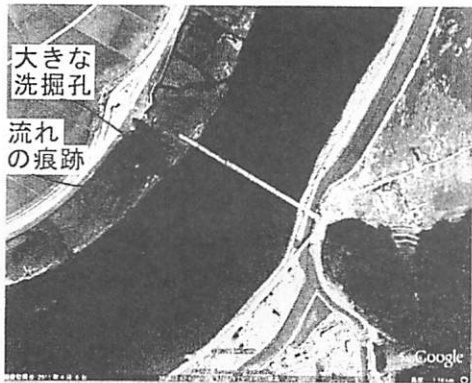


図-16 Googleで見た新北上大橋被災後¹⁴⁾

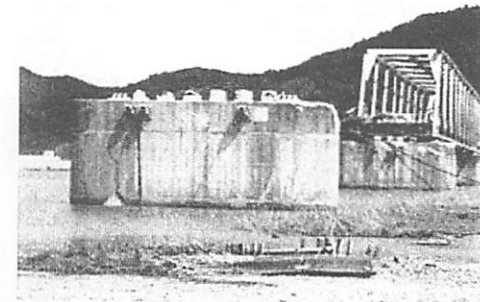


図-19 新北上大橋の被災後の支承部状況¹²⁾

乱している。さらに、図-13に示されるようにJR気仙線津谷川PC橋は、橋脚が上流に折れ曲がっていて、津波の破壊力の大きさが推察される。

(4) 新北上大橋

図-14に示すように、新北上大橋は北上川の河口から約4.0kmに位置し、昭和50年頃に完成した宮城県管理の橋梁である。図-15に示すように、新北上大橋の上下流の外岸側の堤防が決壊している。また、図-16に示すように、新北上大橋の左岸側の2スパンが流出している。ここで、何故、内岸側の左岸側の2スパンが流出したかが検討課題である。図-16の左岸側上流の高水敷には大きな洗掘孔が、また、その上流には下流堤防法線に平行に流れの痕跡が見える。住民の証言によると、図-17の左側に見える信号を津

波は乗り越えたらしい。図-18に示すように、津波後の桁上にはごみが散乱している。なお、図-19に見られるように支承部には多くの支点と落橋防止装置が見られる。左右岸の支点の構造および強度が等しければ、左岸側の津波外力が右岸側のそれに比べて大きかったことが証明される。設計図書の手入による今後の詳細検討が望まれる。

(5) 釜石矢の浦橋梁および配管橋

図-20に釜石矢の浦橋梁と配管橋の位置を示す。

図-21左は、甲子川の最下流に架かる矢の浦橋梁の右岸側アプローチで、周辺の建物は2階の一部まで破損していた。

図-21右は、矢の浦橋梁（桁下～河床高：3.8m、橋長：104.63m、橋幅：14.8m）である。

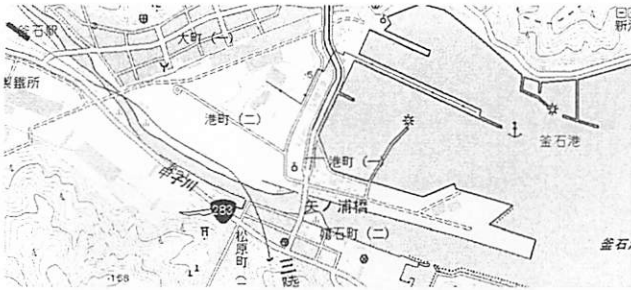


図-20 釜石矢の浦橋梁および配管橋の位置図



図-24 釜石の被害状況(4)

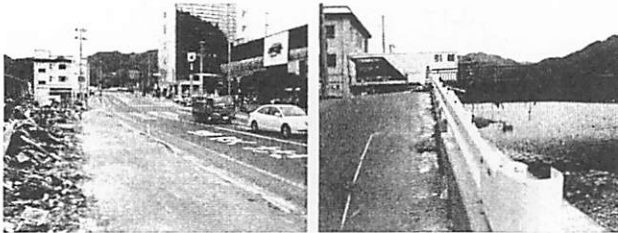


図-21 釜石の被害状況(1)

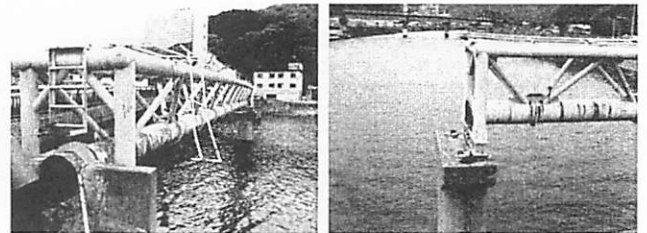


図-25 釜石の被害状況(5)

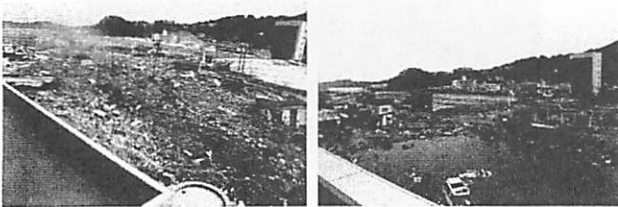


図-22 釜石の被害状況(2)¹⁵⁾

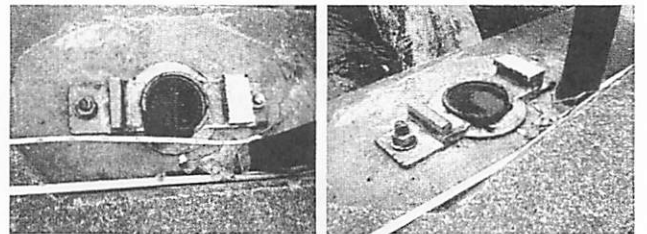


図-26 釜石の被害状況(6)

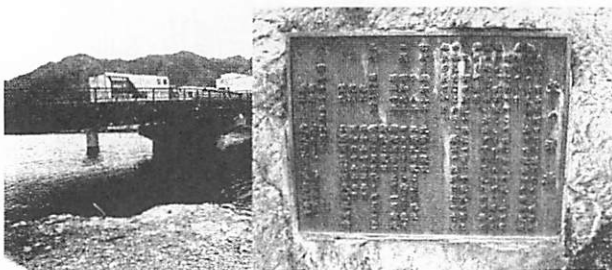


図-23 釜石の被害状況(3)



図-27 釜石の被害状況(7)

図-22左は、住民が左岸側から撮影した津波作用状況写真である。写真左上側が海で右上端のガラス外壁ビルの下に矢の浦橋を越流する津波が見える。図-22右は、津波後の矢の浦橋梁とその直下流で右岸側が流出した水管橋を望む。図-22左は、デジタル写真であり、撮影日時が記入されているはずである。また、図-22右は、新聞社のホームページから転用している。今後、新聞社および撮影者とのデータ入手の交渉が必要である。

図-23左は、矢の浦橋梁である。桁が多数あり、それと橋脚を繋ぐ支点が多数あり、支承の強度が高く流出を免れたと考えられる。図-23右は、矢の浦橋梁の銘板である。これによると、この橋は3代目で、初代の木橋は津波により流出し、2代目は艦砲射撃

により損傷している。

図-24左は、津波により流出した矢の浦水管橋の左岸側である。手前の橋脚が微かに左（上流）に傾斜しているように見える。図-24右は、矢の浦水管橋の銘板である。

図-25左は水管橋を示し、配管径711.2mm、肉厚12mm、主部材0.3m、2次部材0.1m、部材高さ1.7m、部材間隔1.6mである。

図-26は、流出した右岸側の支承部分である。支承の左側に見える朱色の部材上のクリーム色の部材を取り付けていた直径20mm 2本のボルトが切断されていた。左右端のボルトは40mmである。

図-27左は、矢の浦橋梁右岸端から海側を望む。図-27右は、矢の浦橋梁右岸端から上流側を望む。



図-28 気仙沼大川に架かる気仙沼大橋とその下流の歩道橋の位置図

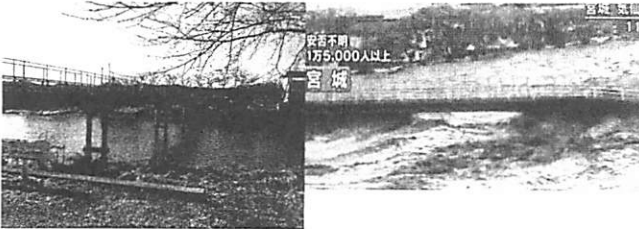


図-29 流出した歩道橋(1)¹⁶⁾

(6) 気仙沼大川の橋梁

図-28に気仙沼大川に架かる気仙沼大橋とその下流の歩道橋の位置を示す。

図-29左は、流出前に左岸側から撮影した写真である。橋脚は細いパイルで弱い状態である。左岸の桁は、堤防から1.5m程高いことが示されている。

図-29右は、NHKで放映された右岸の小学校から撮影したと思われる津波作用状況である。放映された映像に橋梁の倒壊状況は示されていないが、映像が保存されているのであれば、今後、NHKおよび撮影者とのデータ入手の交渉が必要である。

図-30は、堤防を乗り越える津波の作用により杭が折れて、右岸上流に流出した桁を示す。杭は見られなかった。歩道橋の諸元は、桁高：0.7m、橋長（河幅）：110.4m、護岸パラペット高：0.7m、護岸～河床高：4～6mである。

図-31は、気仙沼大橋を示す。この橋の諸元は、桁高：1.7m、橋長（河幅）：110.4m、護岸パラペット高：0.7m、護岸～河床高：4～6mである。矢の浦橋梁と同様に多数の桁で構成され多数の支承があり水平耐力は高い。

3. まとめ

以上に示したように、津波による落橋を防止するためには、津波は洪水に比べて河川内に止まらず海岸線および河川内外で様々な波高および流速分布を示すので、海から陸への津波の伝播解析を行い、それにより求められる波高および流速分布を用いて水平力・揚圧力を求め、水平力・揚圧力に耐えることが出来る支承を設計することが重要であることが示

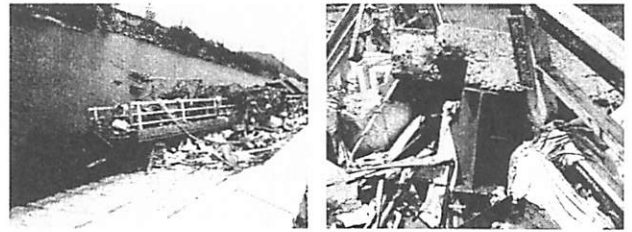


図-30 流出した歩道橋(2)

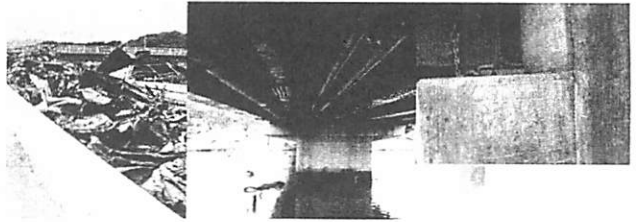


図-31 気仙沼大橋

された。

なお、津波に関する研究者は少なく、道路橋の被害予測に関する研究者としては、九工大の幸左教授がスマトラ地震津波による橋梁被害の調査を契機として研究を進められている¹⁷⁾。また、長岡技大の丸山教授¹⁸⁾や東工大川島教授のグループ¹⁹⁾は、今回の津波による橋梁被害調査を契機として研究を進められている。今後、筆者と大阪大学の荒木准教授、幸左教授、丸山教授、川島教授グループおよび、橋梁の設計者、支承制作会社を交えた、設計図・倒壊状況写真および映像の入手による詳細検討およびこれらの成果による津波に対する橋梁の設計指針の制度化が必要と考えている。

謝辞：本調査は、土木学会水工学委員会内に設けられた東日本大震災被害調査団の中で実施した。本調査を行うにあたりご援助いただいた方々に感謝します。

参考文献

- 1) 石野和男, 榎田真也, 玉井信行: 2004年福井水害における鉄道橋梁の被害原因の調査解析と今後の長寿命化方策の検討, 河川技術論文集第11巻, pp157-162, 2005.6
- 2) 石野和男, Bandara Nawarathna, 矢野真一郎, 中川一, 田中仁: スマトラ地震津波によるスリランカ南西部の橋梁被害調査と津波対策の今後の課題, 水工学論文集第50巻, pp157-162, 2006.2.
- 3) 石野和男, 渡邊亮史, 玉井信行: 洪水時に道路トラス橋梁に作用する流体力に関する研究, 水工学論文集第52巻, 2008.
- 4) 玉井信行, 石野和男, 榎田真也, 渡邊康玄: 豪雨に

- よる河川橋梁災害に関する現地調査, 被災原因解明, 対策工立案の研究, 平成17年度～平成19年度河川整備基金助成事業最終報告書, 2008.
- 5) Susumu Araki, Kazuo Ishino, Ichiro Deguchi : STABILITY OF GIRDER BRIDGE AGAINST TSUNAMI FLUID FORCE, ICCE2010
 - 6) 荒木進歩, 石野和男 : 津波作用時の河川に架けられた橋桁の流出限界に関する研究の研究, 平成20年度河川整備基金助成事業報告書, 2009.3
 - 7) 石野和男, 玉井信行 : 2004年以降に日本で発生した豪雨による橋梁の倒壊要因と対策, 土木学会安全問題研究論文集Vol. 5, 2010.11.
 - 8) インターネットMap Fanより
 - 9) 東北地方整備局道路局:東北地方太平洋沖地震における道路関係施設の被災状況, 2011.3.24
 - 10) 石野和男 : 2009年台風8号豪雨による台湾南部の橋梁被害の特徴と日本の被害状況等との比較, 第65回土木学会年次学術講演会講演集CS部門, 2010.9
 - 11) インターネット被災前後の空中写真比較より
 - 12) インターネット公開写真より
 - 13) 日経コンストラクションホームページより
 - 14) Googleホームページより
 - 15) 読売新聞ホームページより
 - 16) NHKホームページより
 - 17) 幸佐賢二ら : 津波による道路構造物の被害予測とその軽減策に関する研究, 新道路技術会議, 平成22年6月
 - 18) 丸山久一 : 構造物全般総括, 土木学会東日本大震災特別委員会総合調査団 調査速報会, 2011.4.8
 - 19) 川島一彦ら : 9.3津波による被害, 土木学会東日本震災被害調査団 (地震工学委員会) 緊急地震被害調査報告書 (暫定版), 2011.4.11