2011 年東北地方太平洋沖地震津波により 被災した橋梁の構造被害把握

高橋 和慎1・庄司 学2

¹学生会員 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1) E-mail:s1330224@u.tsukuba.ac.jp

²正会員 筑波大学准教授 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1) E-mail:gshoji@kz.tsukuba.ac.jp

2011年東北地方太平洋沖地震津波により被害を受けた橋梁を対象に衛星画像に基づく分析を行い,津波 作用と構造被害との関係を明らかにした.津波作用の指標としては,対象橋梁の位置における最大浸水深 及び最大流速とし,浅水理論にもとづくStaggered格子を用いたleap-frog差分法による数値計算によって算 出した.構造被害としては,津波作用による主桁の流出被害及び浸食・洗掘作用を受けた橋台背面盛土の 流出被害とし,Google Earthが提供する衛星画像から目視により検出した上で,それらと対象橋梁位置で の最大浸水深及び最大流速との関係を明らかにした.さらに,橋台背面盛土の流出領域をテクスチャ解析 及びROC解析に基づいて半自動的に検出し,その推定精度を検証した.

Key Words : the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake tsunami, bridge, structural damage detection, inundation depth, flow velocity, satellite image

1. 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(Mw = 9.0)では、東日本沿岸の広域に及ぶ道路構造物が津波作 用を受け、その多くが甚大な構造被害を受けた。それら の中でも、特に橋梁が被害を受けその機能が失われると、 道路交通網が寸断されることで発災直後の救援・復旧活 動に甚大な影響を及ぼす。そのため広域な津波災害に対 し、道路交通網の重要な要素である橋梁の構造被害の状 況を迅速に把握することは重要である。このような観点 から、衛星画像に基づく橋梁の広域的な被害把握に関す る研究が精力的に行われており、著者らも衛星画像を利 用して橋梁の構造被害を把握するとともに、それらの浸 水高に対する脆弱性を明らかにしてきた^{1,2}.

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震津波により 被害を受けた橋梁を対象に衛星画像に基づく分析を行い、 浸水深及び流速を指標として構造被害との関係を明らか にする. さらには橋梁の構造被害をテクスチャ解析及び ROC解析に基づいて半自動的に検出し、その推定精度を 検証する.



図-1 対象橋梁の位置及び観測された浸水高 (図中の番号及び記号は橋梁の通し番号 及び各橋梁を示す記号を意味する)

2. 対象橋梁と津波数値シミュレーション

本研究で対象とする橋梁は,庄司ら³によって分析された津波作用により被災した33橋梁の中で,桁橋構造であり,かつ,衛星画像から主桁の流出(以降,主桁流出)または橋台背面盛土の流出(以降,盛土流出)の被害を把握可能な27橋梁とする(図-1).なお,主桁流出の被害が生じた橋梁の中で,後述する数値計算結果で主桁の標高の位置まで浸水した橋梁のみを対象としている.

東北大学により開発されたTUNAMI-CODE (Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of Tsunami)[®]を用いて津波の伝播及び浸水に関する数値シミュ レーションを行い,橋梁の位置における最大浸水高を求 めた.支配方程式は浅水理論に基づく以下の式となって おり,格子配列はStaggered格子を採用しleap-frog差分法に より計算を実施した.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \qquad (1a)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D}\right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \qquad (1b)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D}\right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \qquad (1c)$$

ここで、 η は津波波高、 $M \ge N$ はそれぞれ東西方向であ るx方向, 南北方向であるy方向の流量フラックス, D (= η_{+h} は全水深, h は静水深である. なお, Manningの粗 度係数は全計算で一様に0.025とした.数値計算は27の対 象橋梁を19の計算Groupに分割し、それぞれにおいて計 算領域を広域(Region1)から狭域(Region6)までの6段階に設 定した.標高及び水深のデータについては、陸域の広域 4領域ではGEBCO30のデータ、陸域の狭域2領域では国 土地理院提供の数値標高モデル (10mDEM) を利用し、海 域の広域1領域ではGEBCO30のデータ、海域の狭域5領 域では日本水路協会の海底地形デジタルデータM7000シ リーズを利用した. 各領域でこれらのデータをKriging法 で補間した. 津波波源モデルはFujii et al.のモデル (version4.2)⁷⁾を利用し, Okadaの方法⁸⁾により初期水位を静 的に与えた.計算時間は刻み幅0.10秒で総計算時間は120 分とした.

図-2には各観測地点における浸水高の観測値と計算値の関係を示す.津波シミュレーションの妥当性の評価については観測点iに対して浸水高の観測値Riの計算値Hi



に対する比を K_i と定義した上で、以下の式により定義される対数平均Kと対数標準偏差 κ を指標として評価する⁹.

$$\log K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \log K_i$$
 (2a)

$$\log \kappa = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (\log K_i)^2 - (\log K)^2}$$
(2b)

ここで、nは観測点の総数である.計519の各観測地点 における観測値及び計算値を基に計算した結果、観測点 における平均的な補正倍率を表すKは0.927,Kに対する 変動の割合を表す ~は1.190となった.これらは共に1に 近いほど精度が良いとされ、相田¹⁰はKが0.92, ~が1.2 となる津波波源モデルを精度の良いモデルとしている. この検討結果に基づき、各橋梁の位置での数値計算の精 度が十分であると考え、以降の分析ではこれらの計算値 を用いる.

数値計算から得られる浸水高及び流速の時刻歴波形か ら最大浸水深及び最大流速を算出する過程を図-3に示す. 最大浸水深IDmaは、図-3(a)に示すように最大浸水高か ら橋梁の位置における河川水面の標高を差し引いて算出 した. なお、河川水面及び桁上の標高は測量を伴う現地 調査結果及び国土地理院が提供する震災後の航空レーザ 測量結果に基づく数値標高モデル(5mDEM)を基に特定し ている. 最大流速Vmax については、図-3(b)に示すよう に盛土流出に関わると推察される全時刻歴中における最 大流速に加え、主桁流出に関わると推察される桁上まで 浸水している時間
↓ 間における最大流速を算出してお り、次章では前者を盛土流出面積の分析、後者を主桁流 出距離の分析で使用した. なお, 主桁流出に関わる最大 流速については、主桁流出の被害が発生した計15橋梁に おいてのみ算出している.また,図-4では主桁流出及び 盛土流出に関わる最大流速の方向を示す.なお、図-3及 び図-4で示される5橋梁については、後述する盛土流出





図-4 主桁流出距離及び盛土流出面積の算出結果と主桁流出及び盛土流出に関わる最大流速の方向

に関わる最大流速の各流速タイプで代表的な橋梁となっている.

次に、最大波高が発生した波、最大流速が発生した波 及びその波の方向の3項目に基づいて、最大流速を分類 した結果を示す. 主桁流出に関わる最大流速Vmax につい ては、全15橋梁において最大波高及び最大流速がともに 第1波で生じており、図-5に示すように最大流速の方向 は9橋梁で押しの方向,残りの6橋梁で引きの方向を示し た.なお、波の押し引きの方向の定義については、主桁 の橋軸線に対して内陸側を示す方向を押しの方向とし、 海側を示す方向を引きの方向としている. 盛土流出に関 わる最大流速Vmm については、表-1に示す5つの流速タ イプに分類することができ、図-6に示すように全27橋梁 のなかでTYPE-Aに16橋梁, TYPE-Bに1橋梁, TYPE-Cに1 橋梁, TYPE-Dに8橋梁, TYPE-Eに1橋梁が該当した. な お、表-1に示す5つの流速タイプの中でTYPE-A, B, Cの場 合は最大流速が押しの方向であり、TYPE-D. Eの場合は 最大流速が引きの方向となっている.

3. 主桁流出及び盛土流出の被害に関する分析

衛星画像に基づく道路交通インフラの被害把握に関す る研究事例^{例えば、文献III}を参考にし、本研究ではGoogle Earth が公開する衛星画像を対象に、図-4に示すように津波作 用を受けた橋梁の主桁流出距離及び盛土流出面積を算定 した.さらに、主桁流出距離を各主桁の長さで除すこと で無次元主桁流出距離Dw^{*}を、盛土流出面積を元の盛土 の面積で除すことで盛土流出面積率Aw^{*}を算出し、それ らと最大浸水深ID_{max}及び最大流速V_{max}との関係を分析し た.

(1) 主桁流出の被害に関する分析

図-7には算定した主桁の最終的な流出位置を示す.流 出方向は、図-7(a)に示すようにN14WからN75Wの間が 最も多く計15桁、N111WからN143Wの間に計6桁、N21E からN29Eの間に計3桁となっている.以上の合計24桁に ついては橋脚の位置より内陸側に流出しており、主に遡 上する津波、すなわち、押し波の作用を強く受けて流出 したと推察される.一方、図-7(b)に示す残りの合計4桁 はN87EからN179Eの間の方向で橋脚の位置より海側に流 出しており、これらの主桁については主に遡上した津波 が海に引き返す時の波、すなわち、引き波の作用を強く 受け流出したものと推察される.

次に、図-5に示す主桁流出に関わる最大流速Vmacのベクトルと図-7に示す主桁の流出位置との関係を分析する. 最大流速が押しの方向であった9橋梁において流出した 11桁については、計10桁が押しの方向である内陸側に流



表-1 盛土流出に関わる最大流速の分類				
流速タイプ	最大波高が 発生した波	最大流速が 発生した波	最大流速が 発生した波の方向	
TYPE-A	第1波	第1波	押し	
TYPE-B	第1波	第2波	押し	
TYPE-C	第2波	第2波	押し	
TYPE-D	第1波	第1波	引き	
TYPE-E	第3波	第3波	引き	





出していたが、残り1桁は引きの方向である陸側に流出



していた.一方,最大流速が引きの方向であった6橋梁 において流出した17桁については,計3桁が引きの方向 である海側に流出していたものの,残り14桁は押しの方 向に流出していた.

続いて、無次元主桁流出距離 Dw^* と最大浸水深 ID_{max} と の関係を図-8に示す.図-8(a)に示すように、RC・PC桁 に対する Dw^* については、 $ID_{max} \leq 13.0$ mで $Dw^* = 0.03 \sim 3.26$ の4倍以下の比較的小さな値を示す.これが ID_{max} が大き くなるに伴い上昇し、 $ID_{max} = 13.0$ mでは Dw^* は12倍程度 超える程度まで上昇、 $ID_{max} \geq 18.0$ mでは Dw^* は12倍程度 まで上昇した.図-8(b)に示す鋼製桁に対する Dw^* につ いては、 ID_{max} が大きくなるに伴い上昇し、 $ID_{max} \geq 17.0$ m で Dw^* は10倍を超える程度まで上昇した.

次に、無次元主桁流出距離Dw^{*}と最大流速Vmacとの関

係を図-9に示す.図-9(a)に示すように、RC・PC桁に対 するDw^{*}については、最大流速が押しの方向の場合、 $V_{max} \leq 6.0 \text{m/s} \cap Dw^* = 0.30 \sim 0.57$ の主桁の長さ以下の小さな 値を示す.これが V_{max} が大きくなるに伴い上昇し、 $V_{max} =$ $6.0 \text{m/s} \sim 8.0 \text{m/s} \cap Dw^*$ は3倍程度の値を示し、 $V_{max} = 8.0 \text{m/s} \sim$ $\sim 10.0 \text{m/s} \cap C Dw^*$ は3倍程度の値を示し、 $V_{max} = 8.0 \text{m/s} \sim$ $\sim 10.0 \text{m/s} \cap C Dw^*$ は3倍程度の値を示し、 $V_{max} = 8.0 \text{m/s} \sim$ $\sim 10.0 \text{m/s} \cap C Dw^*$ は3倍程度の値を示し、 $V_{max} = 6.0 \text{m/s} \sim$ $\sigma Dw^* = 0.06 \sim 2.0802$ 倍程度の値を示し、 $V_{max} = 6.0 \text{m/s} \sim$ $c Dw^* = 0.06 \sim 2.0802$ 倍程度の値を示すが、 V_{max} が大きくなる に伴い上昇し、 $V_{max} \geq 8.0 \text{m/s} \cap C \cap U \c$



一方,最大流速が引きの方向の場合, $V_{max} = 5.5$ m/sで Dw^* = 10.58と10倍を超える値を示し, $V_{max} = 7.8$ m/sでは $Dw^* = 3.14 \sim 4.14$ の4倍程度の値を示した.

(2) 盛土流出の被害に関する分析

盛土流出面積率 Aw^* と最大浸水深 ID_{max} との関係を分析 する.図-10に示すように、 Aw^* については ID_{max} が大きく なるに伴い線形的に上昇し、 $ID_{max} \leq 10.0$ mでは $Aw^* = 0.16$ ~0.26の3割以下の値を示す.広内橋(No.1)、沼田跨線橋 (No.9)及び野々浜橋(No.22)では Aw^* の値に異なる傾向が見 られるものの、 $ID_{max} \geq 10.0$ mでも線形的に上昇し、 $Aw^* =$ 0.13~0.45と4割程度まで上昇した.

次に,文献12)により類型化される盛土の破壊程度(部 分破壊,大部分破壊,全壊または流出)ごとでのAw^{*}と ID_{max}の関係を図-11に示す.部分破壊の5橋梁ではAw^{*} = 0.02~0.24の比較的狭い面積率を示し,ID_{max}も15.0m以下 の比較的小さな値を示している.大部分破壊の5橋梁で は $Aw^* = 0.11 \sim 0.42$ を示し、 ID_{max} は10.0m以上25.0m未満の 値を示す.これが全壊または流出の17橋梁では $Aw^* = 0.13$ ~0.66の広い面積率を示しており、 ID_{max} も4.0m以上20.0m 未満の値を示している.以上のように、各破壊程度にお ける Aw^* の範囲には開きがあるものの、破壊程度が大き いほど Aw^* も大きな値となる傾向を示した.

続いて、盛土流出面積率 Aw^* と最大流速 V_{max} との関係 を図-12 に示す。図-12(a)に示すように、最大流速が押 しの方向である TYPE-A、B、C の場合、 $V_{max} \leq 5.0$ m/s では $Aw^* = 0.17 \sim 0.26$ の 3割以下の値を示す。これが V_{max} が大 きくなるに伴い緩やかに上昇し、 $V_{max} = 5.0$ m/s ~ 8.0m/s で は $Aw^* = 0.16 \sim 0.42$ の 4 割程度まで上昇する。広内橋 (No.1)については $V_{max} = 8.1$ m において Aw^* が極端に小さ な値を示しているものの、 $V_{max} \geq 8.0$ m/s でも $Aw^* = 0.17 \sim$ 0.36 と 4 割程度の値を示した。一方、図-12(b)に示す最



図-13 盛土流出領域の半自動的検出手法

大流速が引きの方向である TYPE-D, E の場合, $V_{max} \leq 6.0$ m/s では $Aw^* = 0.11 \sim 0.30$ の3割以下の値を示す. これが V_{max} が大きくなるに伴い急激に上昇し, $V_{max} = 6.0$ m/s ~ 8.0 m/s では $Aw^* = 0.16 \sim 0.45$ の4割程度の値を示し, $V_{max} \geq 8.0$ m/s では $Aw^* = 0.13 \sim 0.66$ の6割を超える程度まで上昇した.

4. 盛土流出領域の半自動的検出手法

被災前後の衛星画像から橋台背面の盛土流出領域を半 自動的に検出する手法を図-13に示す.具体的には,地 上基準点を活用して被災前後の衛星画像に対し位置合わ せを行い¹³,カラー画像をモノクローム画像に変換し, その上で被災後画像及び被災前後の画像の画素値の差分 を取った差分値画像を対象にテクスチャ解析¹⁴⁾を行うこ とで画像の特徴量として分散を算出する.その結果に対 して,既往の研究事例^{例えば、文献15}のように真陽性率と偽 陽性率の考え方に基づくROC解析を行い,盛土流出領域 を検出する.

半自動的検出手法の推定精度を検証するため、図-14 には盛土の破壊程度ごとでの盛土流出領域の推定面積Ae と盛土流出面積Awの関係を示す. Awに対するAeの倍率 を考えると,推定精度が高いと考えられる倍率が0.7倍 以上1.5倍未満の10橋梁においては全壊または流出が8橋 梁と全体の80%を占めている.次に推定精度が高いと考 えられる倍率が1.5倍以上3.0倍未満の13橋梁においても 全壊または流出が8橋梁と多いものの,推定精度が低い と考えられる倍率が3.0倍以上の4橋梁においては,全壊 または流出は1橋梁のみであり,大部分破壊と部分破壊 とで合計3橋梁と全体の75%を占める. このことから盛



土の破壊程度が大きいほど推定精度が高いと言えるが, 一方で,破壊程度が小さいと推定精度が低く3.0倍以上 の面積を推定してしまうことがわかる.

以上のように推定精度の点で多くの課題は残されてい るが、本提案手法により半自動的に盛土流出領域を検出 して、そこから盛土の破壊程度を推定することで、地域 的な道路交通機能の損失状況を迅速に把握することが可 能である.

5. まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震津波により被害を受けた 橋梁の構造被害を対象に衛星画像に基づく分析を行い, 無次元主桁流出距離及び盛土流出面積率と最大浸水深及 び最大流速との関係を明らかにするとともに,半自動的 に盛土流出領域を検出して,即時的に構造被害を推定す る手法を提案した.得られた知見は以下のとおりである. 1) RC・PC桁の主桁流出距離は津波作用が大きくなる に従い延伸し,最大浸水深に対しては,13m以上で主桁 長さの8倍を超える値を示し,最大浸水深が18m以上で は主桁長さの12倍程度まで延伸した.押しの方向の最大 流速に対しては10m/s以上で主桁長さの8倍を超える値を 示し,引きの方向の最大流速に対しては8m/s以上で主桁 長さの12倍程度の値を示した.

2) 鋼製桁の主桁流出距離はRC・PC桁と同様に津波作 用が大きくなるに従い延伸し,最大浸水深に対しては, 17m以上で主桁長さの10倍を超える値を示した.押しの 方向の最大流速に対しては10m/s以上で主桁長さの7倍程 度の値を示したが,引きの方向の最大流速に対しては, その流速の上昇に伴って主桁流出距離が延伸する傾向が 見られなかった.

3) 盛土流出面積は津波作用が大きくなるに従い拡大し, 最大浸水深に対しては,10m以下で盛土全面積の3割以 下が流出し,最大浸水深が10m以上では盛土流出面積が 4割程度まで拡大した.押しの方向の最大流速に対して は、5m/s以下で盛土全面積の3割以下が流出し,最大流 速が5m/s以上では盛土流出面積が4割程度まで拡大した. 引きの方向の最大流速に対しては、6m/s以下で盛土全面 積の3割以下が流出したが、その流速の上昇に伴い急激 に上昇し,最大流速が6m/s以上では盛土流出面積は6割 を超える程度まで拡大した.

4) 被災前後の衛星画像に対し地上基準点に基づく画像の位置合わせ及びカラー画像からモノクローム画像への変換を行い、さらにテクスチャ解析及びROC解析を行うことで橋台背面の盛土流出領域を半自動的に検出する手法を提案した。

謝辞:本研究では東北大学の今村文彦先生及び越村俊一 先生に数値計算に関して貴重なご助言を多々賜りました. 数値計算に当たっては筑波大学の中村友治氏及び石川尚 樹氏,元筑波大学の江面嘉之氏及び高橋宏允氏から多大 なるご協力を賜りました.ここに記して謝意を表します.

参考文献

- 庄司学,高橋和慎,中村友治:2011 年東北地方太平 洋沖地震において津波作用を受けた橋梁構造物の被 害把握,日本地震工学会論文集,第12巻,第6号 (特集号),2012年.
- Takahashi, K., Shoji, G. and Nakamura, T.: Tsunami Damage Detection on Road Infrastructures Subjected to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami, The 1st Asian Conference on Urban Disaster Reduction, No.3-4, 2012.
- 注司学,中村友治,高橋和慎,櫻井俊彰:2011 年東 北地方太平洋沖地震において津波作用を受けた道路 構造物の被害,土木学会論文集 A1 (構造・地震工 学), Vol. 68, No. 4, pp.I_1186-I_1193, 2012 年.
- 国土地理院:10万分1浸水範囲概況図, http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku60003.html.
- 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ:痕跡 調査結果,2012年12月,http://www.coastal.jp/ttjt/.
- Disaster Control Research Center (DCRC), Tohoku University: TUNAMI-CODE Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of tsunami, 2009.
- Fujii, Y., Satake, K., Sakai, S., Shinohara, M. and Kanazawa, T.: Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, Vol.63, pp.815-820, 2011.
- Okada, Y.: Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.75, No.4, pp.1135-1154, 1985.
- 2) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会:津波評価 手法の高精度化研究,土木学会論文集 B, Vol.63, No.2, pp.168-177, 2007年.
- 10) 相田勇:東海道沖におこった歴史津波の数値実験, 地震研究所彙報, Vol.56, pp.367-390.
- 11) 例えば、丸山喜久、山崎文雄、用害比呂之、檜作正登、岡本拓:新潟県中越地震における高速道路被害状況と航空写真を用いた被害早期把握に向けた基礎的検討、土木学会地震工学論文集、第28巻、第127号、2005年.
- 12) 首藤伸夫:津波による海岸堤防・護岸の被災-昭和8 年三陸大津波から昭和35年チリ津波まで-,津波工学 研究報告(東北大学災害制御研究センター),第16号, pp.1-38,1999年.
- 13) 日本リモートセンシング学会:基礎からわかるリモ ートセンシング第10章幾何補正,理工図書.
- 14)(財)画像情報教育振興会:画像処理標準テキストブック 3-2-1 テクスチャ特徴の抽出,1997年.
- 15) 例えば、翠川三郎、三浦弘之:高分解能 SAR 画像に よる 2008 年岩手・宮城内陸地震での斜面災害地域の 抽出、日本地震工学会論文集、第 10 巻、第 3 号、 pp.3_25-3_32, 2010年.

STRUCTURAL DAMAGE DETECTION ON BRIDGES SUBJECTED TO THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE TSUNAMI

Kazunori TAKAHASHI and Gaku SHOJI

We analyze satellite images of 27 damaged bridges due to tsunami waves during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake tsunami, located in the coastal areas of Iwate, Miyagi and Fukushima prefectures. We detect wash-away distances of 28 decks and wash-away areas of 27 embankments. We calculate inundation depths and flow velocities at the damaged bridges by carrying out tsunami flow and inundation simulations. The dependence of wash-away distances of the decks and wash-away areas of the embankments at the damaged bridges upon inundation depths and flow velocities is revealed.

Furthermore, we examine the texture characteristics of areas of wash-away embankments based on statistics values of luminosity of the images, such as variance. From the texture analysis and ROC (Receiver Operating Characteristic) analysis, the wash-away areas of the embankments are estimated.