

論文 津波による津谷川周辺地域の PC 桁橋梁を含む構造物の損傷分析

佐々木 達生^{*1}・幸左 賢二^{*2}・付 李^{*3}・田崎 賢治^{*4}

要旨： 気仙沼市本吉町の津谷川周辺の構造物を対象とした現地調査を実施し、深刻な被害を受けた平野部では、住宅建物の破壊被害は98%、橋梁の流出被害は55%にも上ることを確認した。次いで、PC桁をはじめとする橋梁を対象に、ビデオ解析により得た一定流速値を用いて、 β 値(橋梁上部構造の抵抗力と津波作用力の比)を算出した結果、損傷分類による明確な差が得られなかった。そこで、流速と流向について、津波伝搬・遡上解析の結果を反映することで、 β 値の精度が向上することを確認した。

キーワード： 津波被害, 住宅建物, PC 橋梁, 橋梁の被害指標, 津波伝搬・遡上解析

1. はじめに

2011年3月11日14時46分、宮城県牡鹿半島東南東約130km付近を震源として発生した東北地方太平洋沖地震は、日本の観測史上最大のM9.0を記録し、震源域は岩手県沖から茨城県沖までの南北約500km、東西約200kmの広範囲に及んだ¹⁾。この地震により、波高10m以上にもものぼる大津波が発生し、東北地方の太平洋沿岸部に壊滅的な被害をもたらした。著者らは、津波による構造物の被害状況を調査するために、東北地方の沿岸地

域の現地調査を実施し、東北地方の太平洋沿岸部の多数の橋梁が流出しているのを確認している。

本論文では、橋梁の流出被害が比較的大きく出ており、PC橋梁の被害が多い図-1に示す気仙沼市本吉町津谷川付近を対象として、住宅建物と橋梁について、損傷ランクの違いに焦点を当てた被害分析を行っている。

その後、道路橋と鉄道橋を対象として桁移動有無の簡易判定式²⁾である、桁の抵抗力と水平波力の比、 β 値により流出条件の違いを評価をしている。更に、橋梁の上

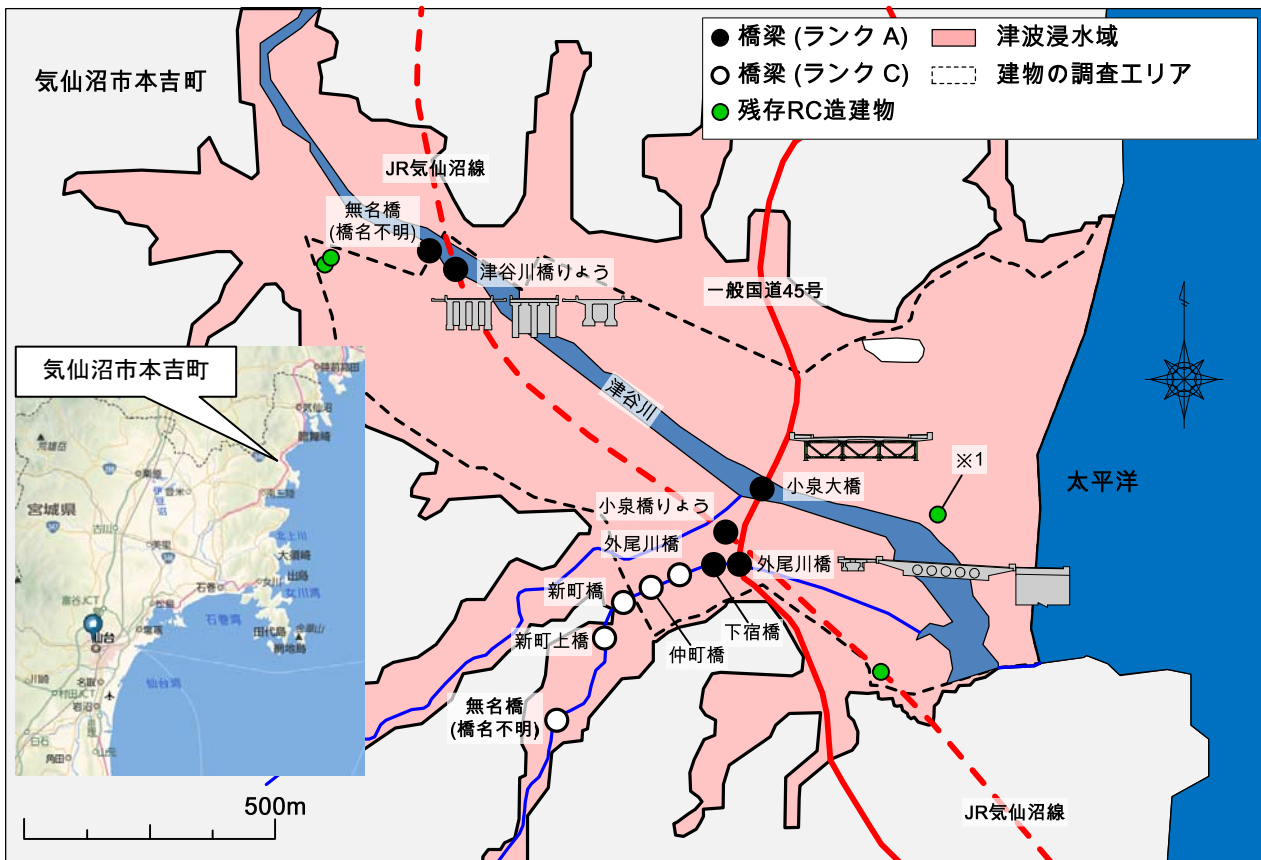


図-1 気仙沼市本吉町(津谷川エリア)

*1 大日本コンサルタント(株) 東北支社技術部構造保全計画室 (正会員)
 *2 九州工業大学 工学部建設社会工学科教授 Ph.D. (正会員)
 *3 九州工業大学 工学部建設社会工学科 (学生会員)
 *4 大日本コンサルタント(株) 大阪支社技術部特殊構造技術室 博士(工学)

部構造流出判定の指標とすべく、精度の向上を目的として、津波伝搬・遡上解析により求めた流速と流向、波高を用いて、 β 値の再評価を試みた。

2. 構造物の被害状況

2.1 住宅建物の被害

現地調査に基づき、図-1 に対象地域の津波浸水域を示す。特に、点線で囲んだエリアは、標高の低い平地部で、津谷川を遡上した津波により、地域への影響が大きい深刻な被害が発生したと考えられる範囲を示している。詳細調査は、ゼンリンの住宅地図²⁾より検索した 242 戸の住宅建物と、11 橋梁について実施した。

建物被害の被害程度を明確に分類するために、著者らは表-1 に示すとおり、損傷ランクを定義した。

図-2 に示す調査結果より、全 242 戸の建物内 238 戸は、そのほとんどが木造で全て流出、または瓦礫化していることから、損傷ランク A に分類される。

一方、4 戸の鉄筋コンクリート造の建物は(特に図-1 に示す※1 の建物は海岸線より約 230m に位置している)、津波の衝撃に耐えており損傷ランクは C である。

2.2 橋梁の被害

(1) 橋梁被害のマクロ分析

橋梁被害の場合で、損傷ランクの定義を表-2 に示す。ここで、表-2 に示す損傷ランクは、既往の研究³⁾に基づき、上部構造の流出や移動の有無で 3 段階に分類している。道路橋と鉄道橋の全 11 橋の調査結果より、図-3 に示す通り、6 橋の上部構造が完全に流出している。

一方、調査対象橋梁の約半数の 5 橋梁は存置しており、軽微な損傷に留まっている。これら損傷ランク C に分類される橋梁の多くは、図-1 に示す点線で囲んだエリア外に位置する。

損傷ランク	状態
A	重度な構造上の損傷
B	非耐震壁等の非構造体の損傷のみ
C	軽度な損傷

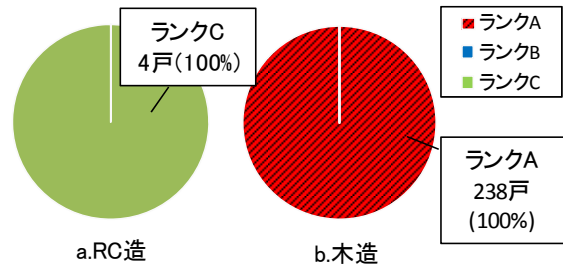


図-2 建物の調査結果

損傷ランク	上部構造
A	完全に流出
B	桁移動、ただし橋台上に存置
C	軽度な損傷

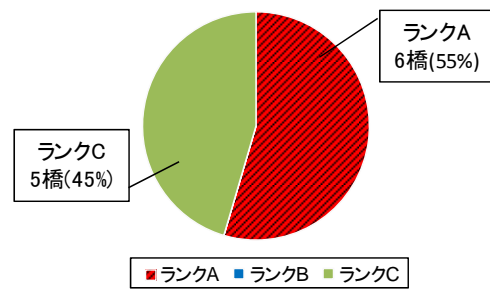


図-3 橋梁の調査結果

(2) 津谷川橋りょうの被害状況

PC 桁を上部構造に有する津谷川橋りょうを例に、流出被害の概要を述べる。現地調査結果より復元した津谷川橋りょうの概況図を図-4 に示す。

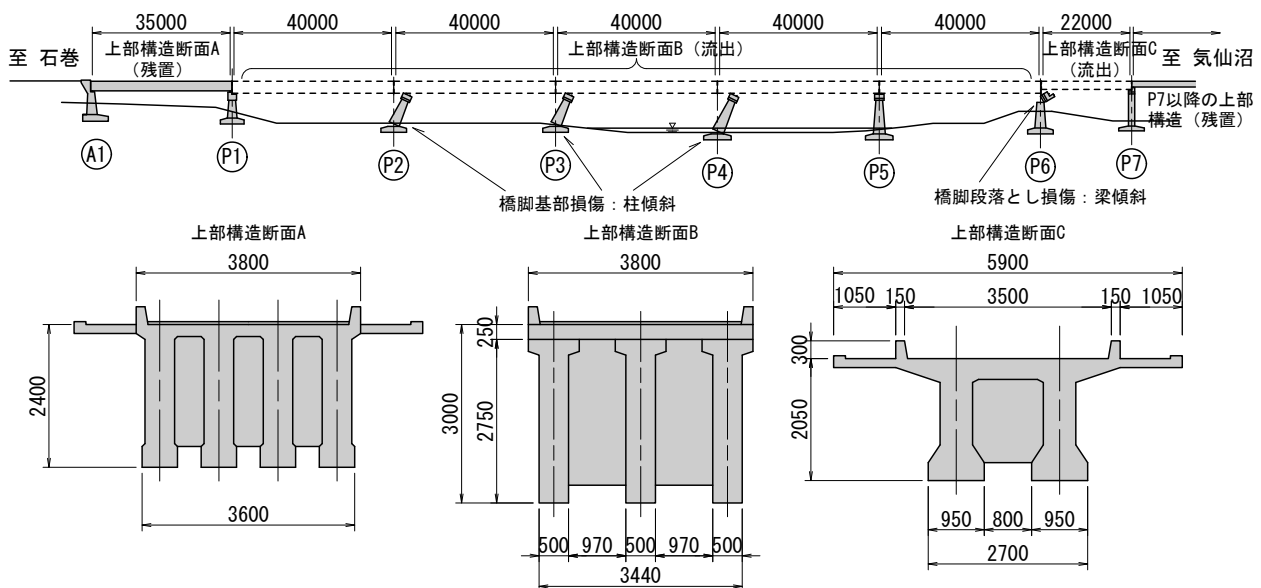


図-4 津谷川橋りょう概況図

津谷川渡河部の上部構造は全て単純桁で構成され、石巻側より断面 A が支間長 35m で 1 径間、断面 B が支間長 40m で 5 径間、断面 C が支間長 22m で 1 径間の計 7 径間である。今回の津波により、渡河部 7 径間中 6 径間が上流側に流出している。流出した上部構造は、上流側へ 30~160m 移動しており、断面 C の桁は上下逆さの状況であった。なお、管理用の張出し床版部を除き、流出後も桁形状を保持しており、上部構造の外形寸法の計測が可能であった。また、下部構造では、P2~P4 橋脚で柱基部の損傷が確認され、これらの柱は全て上流側に傾斜している。堤体内の P6 橋脚は、梁下約 0.5m の高さの段落し部で損傷しており、梁部が上流側に傾斜している。

これらの橋脚は、流出した上部構造位置と一致していることや、上流側へ傾斜している状況より、押波時の上部構造流出に伴い、引きずられて損傷したと考えられる。

3. 津波作用力と桁抵抗力の関係

3.1 検討対象橋梁

本章では、今回の津波により上部構造に作用した力と上部構造の抵抗力を推定し、流出状況を評価した。対象とした橋梁は、対象地域において著者らが直接現地で損傷状態を確認した橋梁のうち、計測や図面により上部構造重量の算出が可能であった 12 基である。橋梁単位は 5 橋であるが、支間長に応じて桁形状が異なる橋梁があり、 β 値も変化するため、これらを分類するものとした。

外尾川橋は、本線橋に加え左右両側に設置された側道橋のうち、下り線側を対象とした 2 基である。上り線側は函渠構造のため、対象から除外している。また、鉄道橋である津谷川橋りょうは渡河部である第 1 径間から第 7 径間までの 3 基とし、小泉橋りょうは海岸線に近いことから全径間を対象とした 5 基としている。

橋の総幅は地覆外側幅とし、橋の総高は上部構造高に、文献³⁾に準拠して鋼製防護柵の高さ $D=0.4m$ を加えた。

なお、検討対象橋梁のほとんどが PC 橋で、支承構造はパッド型ゴム支承である。唯一、鋼橋である小泉大橋は BP-A 支承であるが、全ての対象橋梁の移動制限装置は、レベル 1 地震動の慣性力により設計されている。

また、津谷川橋りょうにみられた下部工損傷は、小泉大橋の P3 橋脚が流出しているのが確認される。

3.2 津波作用水平力

移動制限装置に損傷がない下宿橋などの状況より、上部構造流出は鉛直波力の作用で浮上がったとも考えられるが、ここでは、被害と津波の流速との関連付けを行うことを目的に、水平力に着目した。

上部構造への作用水平力は、式(1)を用いて算出し、式中の効力係数 C_d は、桁幅と桁高の比 B/D より文献³⁾に基づき式(2)より求めた。受圧面積の算出は、橋軸直角方向

に津波が作用したと仮定した。流速 v は今回の津波で撮影された他地区の動画を基に、漂流物の移動速度から求めた平均流速 $6.0m/s$ ⁵⁾を用いた。これは、検討対象とした地区で撮影された動画の入手が困難であったためである。

$$F = \frac{1}{2} \sigma_w C_d v^2 A_n \quad (1)$$

$$C_d = \begin{cases} 2.1 - 0.1(B/D) & 1 \leq B/D < 8 \\ 1.3 & 8 \leq B/D \end{cases} \quad (2)$$

ここに、津波水平力 F 、効力係数 C_d 、水の密度 ρ_w ($1030kg/m^3$)、津波流速 v ($6.0m/s$ と仮定)、上部構造の有効水平投影面積 $A_n [m^2]$ 、橋の総幅 $B [m]$ 、橋の総高 $D [m]$

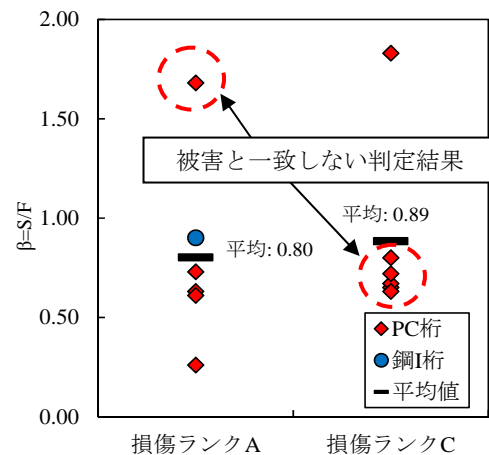


図-5 桁抵抗力津波作用力比 β

3.3 桁抵抗力

津波に対する上部構造の水平抵抗力 S は、式(3)に示す、摩擦係数 μ (Rabbat らの実験結果⁶⁾より 0.6 と仮定)と上部構造重量 W の積によって計算された摩擦力とみなす³⁾。なお、移動制限装置の影響は考慮していない。

$$S = \mu W \quad (3)$$

3.4 水平方向の作用力と抵抗力の関係

桁移動の有無は、桁抵抗力 S を作用力 F で除す式(4)より桁抵抗力作用力比 β を求めることで判定する。ここで、 β が大きい場合は上部構造の抵抗力が勝り、桁が移動しにくいことを示す。

$$\beta = \frac{S}{F} \quad (4)$$

水平方向桁抵抗力津波作用力比 β の算出結果を図-5に示す。この結果では、損傷ランク A に分類される橋梁が 12 橋中 6 橋で平均の β 値は 0.80、損傷ランク C に分類される橋梁が 12 橋中 6 橋で平均の β 値は 0.89 となり、明確な差が得られず、被害状況とも整合が図れない。その理由として、他地区の動画に基づいた津波の流速と流向の仮定に誤差があると考えられたため、津波伝搬・遡上解析を実施し、流速と流向を補正するものとした。

4. 津波特性の算出

東日本大震災における津谷川付近の津波特性(波高, 流速, 流向)を推定するため, 気仙沼市本吉町(図-1)を対象に津波伝搬・遡上解析を行い, β 値の再算出を行った。

4.1 解析手法

津波の伝搬・遡上解析手法は, 非線形長波理論式(浅水理論式)とし, 海底の摩擦, 及び, 移流項を考慮している。

津波発生モデルは, 図-6 に示すように, 波源領域を10分割で設定した東北大モデル(Ver1.0)を用い, 各領域にすべり量等のパラメータを設定している⁷⁾。

また, 地形データは表-3 に示すように, 陸域と海域の各デジタルデータを用いて作成し, 陸域では50mメッシュデータ, 海域では, 等値線データからクリギング法で20mグリッドデータに内挿変換している。なお, 使用する地形データは海域と陸域を一体とするため, 東京湾平均海面(T.P.)を基準面としている。

一方, 計算領域及び計算格子間隔は図-7 に示すように, 対象地点に近づくにつれて3の倍数で小さくし, 特に陸上部における最小格子間隔は10mとしている。なお, 地形データから計算格子への内挿方法は9点(もしくは4点)のアイソパラメトリック法を用いている。

粗度データは土地利用状況図や衛星画像等で判別し, 文献⁸⁾に準拠し, 中密度建物用地は0.060, 森林は0.030, 田畑は0.020, 水域は0.025に設定している。

その他を含む計算条件の一覧を表-4 に示す。本解析では, 対象地点の最大波高や最大流速の算出を目的としているため, 計算時間が津波発生より3時間程度, 時間間隔は1.0秒としている。また, 地盤変位量は初期水位変動量と海底地盤変位量の鉛直成分を等しく設定するMansinha Smylieの方法を用いている。さらに, 遡上計算における波先端条件は, 水域側水位と陸域側地盤高さの差(実水位)が 10^{-5} mを超える場合に遡上すると設定している。なお, 津波発生時の潮位は考慮していない。

4.2 解析結果

前述のモデル化及び解析手法により, 津波特性の解析結果を以下に示す。

図-8 に解析の結果得られた浸水エリアと図-1 の浸水エリアの重ね図を示す。概ね浸水エリアは整合していると考えられるが, 解析結果の浸水範囲は若干狭く, これは, 地震発生後の地盤沈下量や今回の津波伝搬・遡上解析では津波発時の潮位を考慮していないためと考えられる。図-9(a)には, 対象箇所である津谷川付近の対象橋梁代表4箇所の着目地点を示している。

(1) 解析結果による津波波高

まず, 図-9(b)に各着目地点における時刻歴波高図を示す。解析時間は津波発生から3時間としたが, 着目地点では, 波高, 流速ともに第1波で最大となったことか

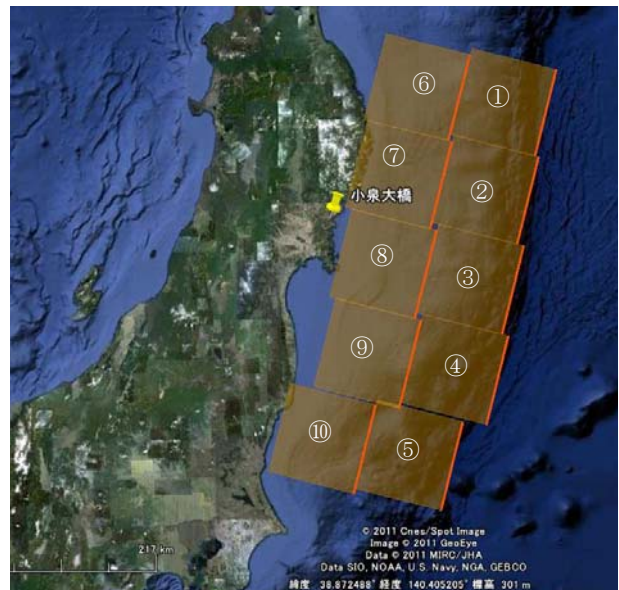


図-6 波源モデルと算出対象箇所 (東北大モデル (Ver. 1.0))

表-3 地形データ

	地形データ	提供元	メッシュ	適用
1	数値地図50mメッシュ 日本II, 日本III	国土地理院	50m	陸地
2	MIRC-JTOPO30	海洋情報研究センター (財)日本水路協会	30秒 (1km)	海域 (中領域)
3	海底地形 デジタルデータ	海洋情報研究センター (財)日本水路協会	等値線 等深線	海域 (小領域)
4	ETOPO2	NOAA米国海洋 大気庁	2分 (4km)	陸地, 海域 (大領域)

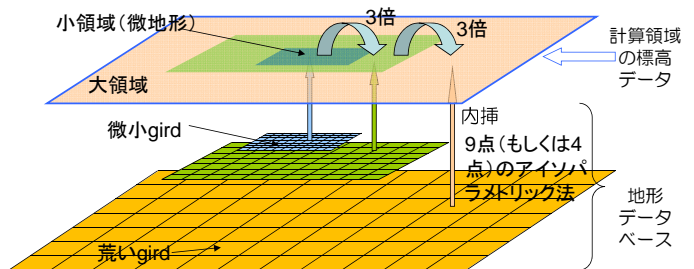


図-7 地形データベースと計算領域の格子設定概念図

表-4 津波シミュレーションの計算条件

項目	内容
基礎式と解法	非線形長波方程式を基礎とし, Leap-Frog差分法により計算。越流: 本間公式による越流計算
計算格子間隔	7290m, 2430m, 810m, 270m, 90m, 30m, 10m
大小格子間の接続方法	空間: 波源から陸地までの計算領域を接続 時間: 計算時間間隔はすべての計算領域で一定
計算時間・間隔	発生より3時間, $\Delta t=1.0$ 秒
地盤変位量	Mansinha Smylieの方法
初期条件	初期水位変動量=海底地盤変位量の鉛直成分
粗度条件	津波浸水シミュレーションの手引き (国土交通省 H23.711)に準拠
遡上計算における波先端条件	水域側水位と陸域側地盤高さの差(実水位)が 10-5mを超える場合に遡上
波源モデル	東北大モデル(Ver1.0)

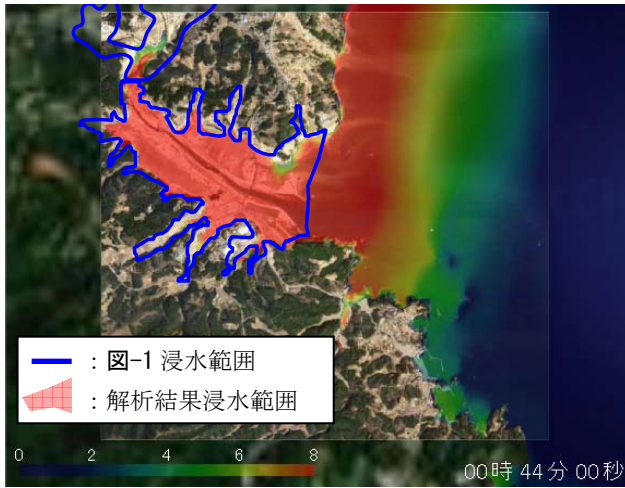


図-8 浸水エリアの比較 (調査結果と解析結果)



ら、図中には津波発生から1時間までの結果を示している。解析結果より、4個所の着目地点の最大波高は13.2m～14.8mである。【小泉大橋】の上流部に位置する【JR渡河部】は4個所の中で最も高い結果となっている。併せて同図に、津谷川橋りょう、小泉大橋、外尾川橋の路面高を併記している。それぞれ、津波波高は41.9分後、38.7分後、37.3分後に路面高を超える。

(2) 解析結果による津波流速

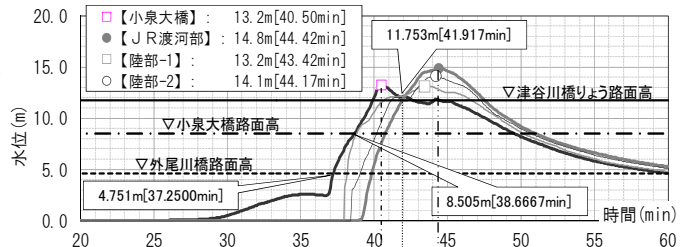
次に、図-9(C)には、各着目地点の時刻歴流速図を示している。各図中には、図-9(a)に示す東西方向のU成分と、南北方向のV成分について示している。解析結果より、最大流速はU方向、V方向ともに、【小泉大橋】の地点で最大となっており、U方向に対して6.5m/s、V方向に対して4.3m/s、2方向合成で7.7m/sの流速が生じる結果が得られた。一方、損傷ランクCの橋梁が点在する【陸部-1】では、U方向に対して2.9m/s、V方向に対して1.9m/s、2方向合成で3.2m/sと、比較的流速が遅い結果が得られた。

また、【小泉大橋】では海岸線に近いいためか、最大流速を記録した直後に最大波高13.2mを記録する。一方、4個所のうち、最も内陸部に位置する【JR渡河部】では、最大流速を記録した2～3分後に最大波高14.8mとなる。なお、【JR渡河部】では、津谷川橋りょう頂部付近に波高が達する直前が最も流速が早い。【陸部-1】では、唯一流向が南西向きであり、4箇所中、最も流速が遅いが波高は2番目に高い。これは、地形状況より、谷の向きが津波の進行方向と異なるためと考えられる。【陸部-2】は、【JR渡河部】と概ね傾向は一致しているが、陸地のためか、遡上が始まった瞬間にV方向流速は徐々に低下する。

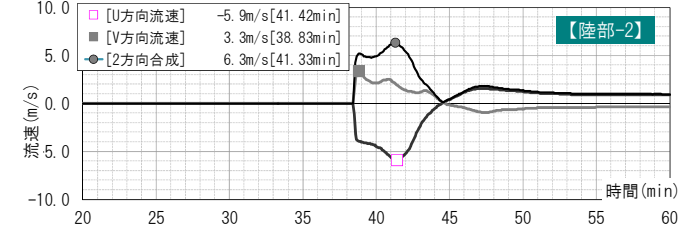
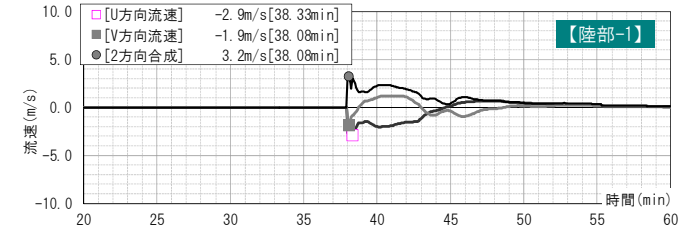
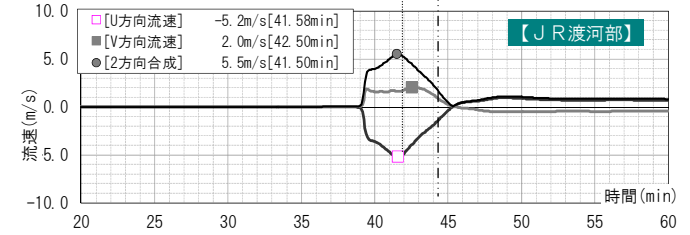
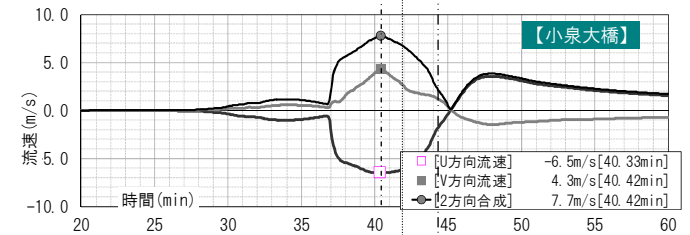
4.3 解析結果を用いたβ値の再算出

前述の解析結果を用いて、再度β値を算出し、損傷状況を判定する。対象橋梁における流速と、桁方向並びに津波の方向を整理したものを表-5に示す。備考欄には

(a) 津波特性の算出箇所



(b) 各着目地点における時刻歴波高図



(c) 各着目地点における時刻歴流速図

図-9 津波特性の解析結果

使用した流速と流向のタイミングを示している。

β 値の再算出は、波高が橋梁の路面高に達した時点までの最大合成流速とその際の流向で評価するものとしたが、小泉橋りょうは路面高≒最大波高であるため、最大波高時点とした。津波の流向は、式(1)では流速 v は 2 乗で評価されるため、上部構造の有効水平投影面積 A_n の算出に用いる桁長を、交差角で角度補正して評価した。

再算出した β 値の結果を図-10 に示す。図中の記号は表-5 と整合を図っている。流速一定、流向を橋軸直角方向として評価した β 値(図-5)に比較して、損傷ランク A の平均 β 値は 1.16、損傷ランク C の平均 β 値は 2.18 と、より明確な差が確認でき、やや精度が向上する結果となった。このことから、 β 値の精度向上を図るために、津波伝搬・遡上解析により流速と流向を評価することが有効であると言える。ただし、図中 c(小泉橋りょうの第 10 径間)にみられるように、損傷ランク A に分類されながらも $\beta=2.16$ と被害にそぐわない結果もあることや、移動制限装置の影響も盛り込み、今後さらに検討を加える必要がある。

5. まとめ

PC 橋梁被害の多い津谷川付近を対象に現地調査に基づく建物と橋梁の損傷分析を行い、道路橋と鉄道橋の 12 橋を対象に、 β 値による流出評価を実施した。また、津波伝搬・遡上解析で対象地域の津波特性を推定し、 β 値の精度向上を試みた。

- (1) 現地調査に基づいた被害分析より、気仙沼市本吉町の津谷川エリアにおける建物の被害戸数は、全 242 戸中、238 戸が流出または瓦礫化する損傷ランク A に分類される。RC 造は 4 戸全てが、建物としての機能を喪失しない損傷ランク C であった。一方、橋梁では、軽微な被害となる損傷ランク C に分類される橋梁が半数(11 橋中 5 橋)である。
- (2) 津波流速を 6.0m/s と仮定した桁抵抗力津波作用力の比 β 値による流出判定結果によれば、損傷ランクの分類による明確な差は得られなかった。
- (3) 津波伝搬・遡上解析により、結果の妥当性を判断した上で津波特性を把握した。流速が小さいエリアでは軽微な損傷にとどまり、流速が大きいエリアでは重大な損傷が生じており、流速の大きさと桁の損傷度との間には、非常に良い相関があると考えられる。
- (4) 解析結果の流速と流向を評価することで、 β 値は損傷ランクの分類による差が生じ、やや精度が向上する結果が得られた。

参考文献

- 1) 気象庁：現地踏査による津波観測点付近の津波の高

表-5 桁方向と津波流向の関係

対象箇所	橋梁名	流速 [m/sec]	橋軸方向 [度]	津波の方向 [度]	交角 [度]	備考
①小泉大橋付近	a:外尾川橋	4.19	90.0	166.8	76.8	路面高超
	b:小泉大橋	6.24	65.9	166.8	100.9	路面高超
	c:小泉橋りょう	7.75	135.0	146.6	11.6	最大波高
	d:下宿橋	7.75	105.4	146.6	41.3	最大波高
②JR渡河部	e:津谷川橋りょう	5.27	103.2	162.6	59.4	路面高超

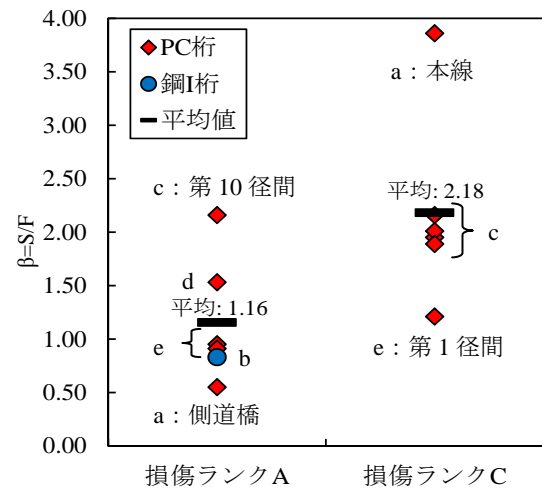


図-10 桁抵抗力津波作用力比 β (解析結果の流速)

さについて、報道発表資料、2011.4. (<http://www.jma.go.jp/jma/press/1104/05a/tsunami20110405.pdf>)

- 2) (株)ゼンリン：ゼンリン住宅地図 気仙沼市 3(本吉)、2010.3.
- 3) 幸左賢二、二井伸一、庄司学、宮原健太：スマトラ沖地震に伴う津波による橋梁の被害分析、構造工学論文集 Vol.56A, pp.454-463, 2010.3.
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編, pp.47-52, 2002.3.
- 5) Li FU, Kenji Kosa, Hideki Shimizu, Tatsuo Sasaki : Damage Analysis of Utatsu Bridge Affected by Tsunami due to Great Eastern Japan Earthquake, 第 14 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.111-118, 2011.7.
- 6) Rabbat , B.G. and Russel , H.G : Friction coefficient of steel on concrete or grout , Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.111, No.3, pp.505-515, 1985
- 7) 今村文彦, 越村俊一, 大家隆行, 馬淵幸雄, 村嶋陽一：東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施, 東北大学モデル (Ver1.0), 2011.6
- 8) 国土交通省水管理・国土保全局海岸室, 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室：平成 23 年東北地方太平洋沖地震による津波の対策のための津波浸水シミュレーションの手引き, pp.15, 2011.7.