

遡上解析手法を用いた小泉地区の津波特性の評価

大庭裕貴¹・幸左賢二²・佐々木達生³

¹非会員 九州工業大学大学院 建設社会工学専攻（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）

²正会員 Ph.D. 九州工業大学 工学部建設社会工学科（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）

³正会員 大日本コンサルタント(株) 技術統括部（〒170-0003 東京都豊島区駒込3-23-1）

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震で発生した津波により、東北地方の太平洋沿岸部では壊滅的な被害を受けた。太平洋沿岸部の浸水域では多数の橋梁が流出しており、被災時の緊急輸送路としての機能を喪失している。著者らは橋梁の流出状況の被害調査を実施しており、図-1に示すように、宮城県気仙沼市小泉地区において道路橋と鉄道橋の全11橋中、6橋の上部構造が流出しているのを確認している。

本論文では、小泉地区の代表として上流側に大きく上部構造が流出、移動した小泉大橋を対象に、数値シミュレーションを用いた詳細な被害分析を実施し、桁の抵抗力と水平作用力の比 β 値を用いた上部構造の流出メカニズムの推定を行った。

次いで、小泉地区に襲来した津波の波形状や流速の変化を海底地形と陸地形の状況から分析し、粗度係数の違いによって生じる陸上の遡上状況の変化を考究した。

2. 数値解析結果に基づく小泉大橋の被害分析

(1) 小泉大橋の被害状況

津谷川を渡架する国道45号の小泉大橋について、現地調査結果に基づいて復元した概況図を図-2に、流出状況を図-3に示す。小泉大橋は橋長182.1mの3径間連続4主桁桁が2連の合計6径間の鋼道路橋である。全幅員は11.3mで、200mmの厚さのRC床版を有する。被災前には耐震補強工事が行われており、P1、P4橋脚に繊維シート補強が実施され、A1、A2橋台にダンパーおよび落橋防止構造が設置されている。また、P3胸脚上の掛け違い部には、桁連結タイプの落橋防止構造が設置されている。

今回の津波により全6径間が流出し、左岸側3径間の主桁は架橋位置から上流約420mの津谷川河川内に移動し、主桁と床版は完全に分離している。右岸側3径間の主桁も上流側約420mの右岸堤内地に移動しており、左岸側と同様に主桁と床版は完全に分離していた。

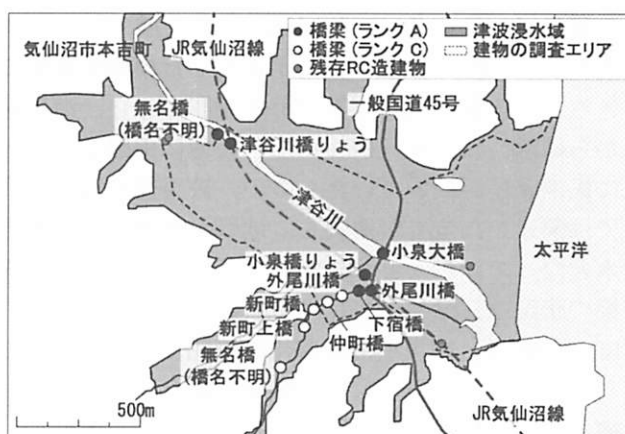


図-1 小泉地区の被害状況

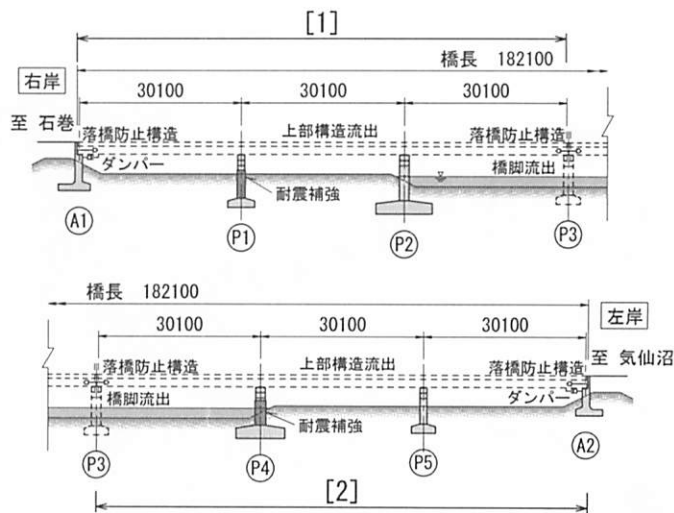


図-2 小泉大橋の流出状況

さらに河川中央の低水敷内のP3橋脚は、柱基部から上部の柱が流出しており、P3橋脚以外の残された下部構造にはひび割れや角部の欠損等は見られるが、大きな損傷は無い。

写真-1は、今回対象とした小泉地区の東日本大震災に伴って発生した津波の被災前状況（同写真(a)）と被災後状況（同写真(b)）を対比するために示した。

全体的な下部構造の損傷傾向は、橋梁中央のP3橋脚を挟んで右岸側と左岸側の下部構造がほぼ対象の損傷度合となっており、津波作用力は小泉大橋に対してほぼ直角方向であったと推定される。また、耐震補強工事で橋軸方向地震時慣性力を分散する目的で追加した制震ダンパーは、全てそれらの取付部が損傷し、津波作用力に抵抗出来ていない。このことから、これらの装置が主に橋軸方向について抵抗を期待するものであり、橋軸直角方向が主な作用方向である津波については、別途補強装置が必要と考えられる。従って、次節の流出メカニズム評価では、流出に対する上部構造の抵抗力にダンパーや落橋防止構造等の抵抗力を考慮しない。

写真-1 (a), (b)に示す[a]は小泉大橋であり、前述のように[b]の位置に橋桁が流出した模様が確認できる。[c]の範囲は、写真 (a)を確認すると、海岸線から砂浜、防風林（松林）、背後地に田圃とまばらに民地家屋が続いていたものの、被災後の写真 (b)では前述した全てが消失し、地盤が洗掘されて未排水となっていることが確認できる。この砂浜等の洗掘の状況は、津谷川河口内でも確認される。また、[d]の範囲は、被災前は津谷川右岸側堤防が山付けとなっており、堤防としての機能を果たしていたが、被災後は破堤しており堤防としての機能を喪失し、堤内地側への浸水を許している。全体的には、示した写真の範囲内で、高台にある小泉小学校や比較的

軌道標高の高い鉄道橋である小泉橋梁を除き、ほとんどが津波の作用を受けて流出している。

なお、同写真では判別し難いが、小泉大橋直上流の堤防も破堤しており、これらの状況の比較結果を踏まえれば小泉地区に襲来した津波は、非常に大きなエネルギーを持っており、陸地を遡上した津波の流速や水位上昇は大きかったことが推察される。

(2) 数値解析結果に基づく被害分析

本節では数値解析結果を用いて、小泉大橋の流出メカニズムを推定した。

数値解析は既往報告¹⁾と同様の手法であり、非線形長波理論に基づいている。波源モデルとして藤井佐竹モデルVer4.6²⁾を用い、片岡ら³⁾を参考に宮城県北部沖に設置されたGPS波浪計による沖合での津波高さ5.7mと、国土地理院の浸水範囲、東北地方太平洋沖合同調査グループの浸水高、それぞれと整合が図れるように小領域の断層すべり量を調整している。

図-4に、小泉大橋を分析対象とした解析結果の抽出点と評価方法を示す。同図の範囲は図-3の[A]部である。の解析結果は抽出点毎に浸水高と流速の時刻歴が得られるが、抽出点毎に生じる微小な誤差や局所的な位置における特異値を除去することを目的に、

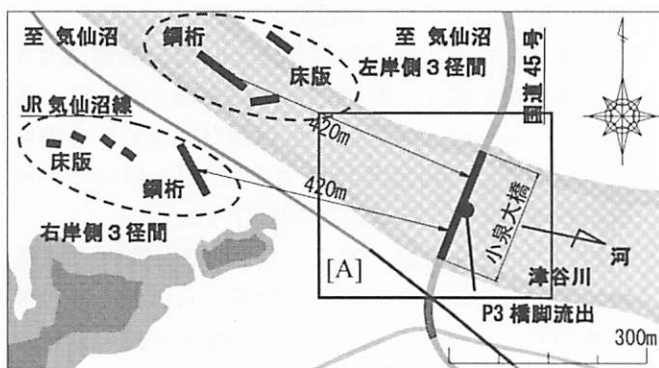
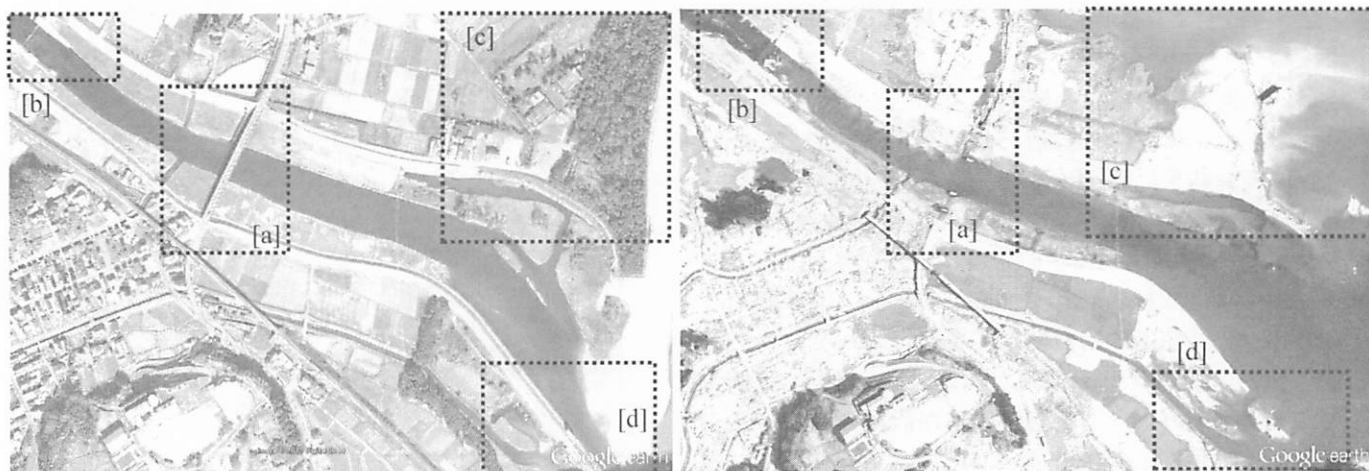


図-3 上部構造流出後の移動状況



(a) 津波被災前の状況

(b) 津波被災後の状況

写真-1 小泉地区の衛星写真（津波被災前後の比較）

[1]右岸側と[2]左岸側のそれぞれ1連の桁に対して桁長×幅員を1つの平面として、平面を10mピッチで設置した20の抽出点の結果を平均化した。

図-5に、解析結果から[1]、[2]それぞれの上部構造に作用する、浸水高に応じた津波の流速の変化状況を示す。ここで、水位が桁下到達点から路面浸水点までを区間[a]、路面浸水点から最大浸水高までを区間[b]と定義している。

同図より、区間[a]の流速は V_1 が[1]、[2]でそれぞれ3.7m/s、4.2m/s（以降、[1]、[2]の順で示す）から、 $V_2 = 5.5\text{m/s}$ 、 5.7m/s まで上昇する。区間[b]の中間点付近で最大流速 $V_3 = 7.3\text{m/s}$ を迎え、区間[b]での平均流速は $V_4 = 6.8\text{m/s}$ 、 7.0m/s となる。

図-6は、これらの流速が上部構造に直角方向に作用したと考え、式（1）で作用力を、式（2）で抵抗力を算出した結果を示している。

$$F = \frac{1}{2} \rho_w C_d v^2 A_h \tag{1}$$

$$\beta = \frac{S}{F} \tag{2}$$

式（2）の浮力 U は、上部構造が完全に浸水した以降の区間[b]にのみ考慮しており、同図に示すように区間[b]では浮力の影響で抵抗力が6,000kNから3,630kNへと40%減少する。一方、作用力は上部構造に作用する流速の変化に伴って作用力が変化し、区間[a]の状態で上昇する作用力が路面浸水直前に抵抗力を上回る。これは[1]、[2]のいずれも同様の状況である。

これらの結果から推定した小泉大橋の流出メカニズムを図-7に示す。桁下浸水開始から路面浸水までに津波の流速が5m/s程度へ上昇することで、作用力が抵抗力を超過して上部構造が流出し、続く7m/sまでの流速の上昇の仮定で上部構造が陸側へ移動した。このことから水平方向の作用力が大きかったと考えられる。

3. 小泉地区の流速分布の推定

前章で述べた流出メカニズムの推定結果に基づけば、小泉大橋が流出したのは、急激な流速上昇が理由として挙げられる。本章では、この急激な流速上昇が如何にして発生したのか、広域な地形の観点から考察を加える。

図-8は流速と浸水高の結果を抽出する5つの代表断面位置と39分50秒の時間の流速ベクトルを示している。津谷川から沖までの流線方向に沿った断面を縦断方向としてA-A'断面と定義する。A-A'断面

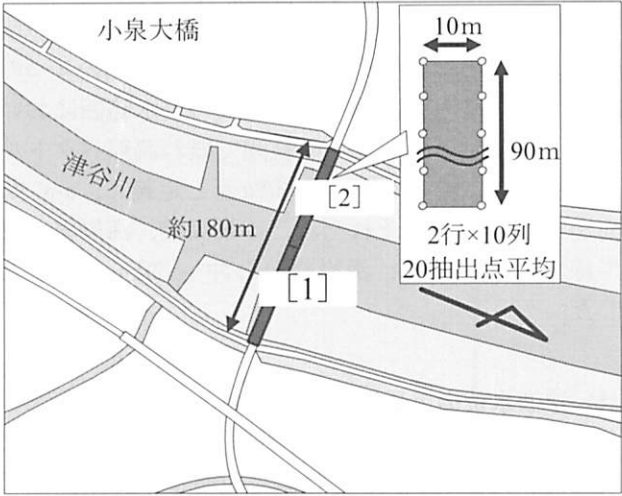


図-4 流出メカニズム分析のための結果抽出点
(図-3 [A]部拡大図)

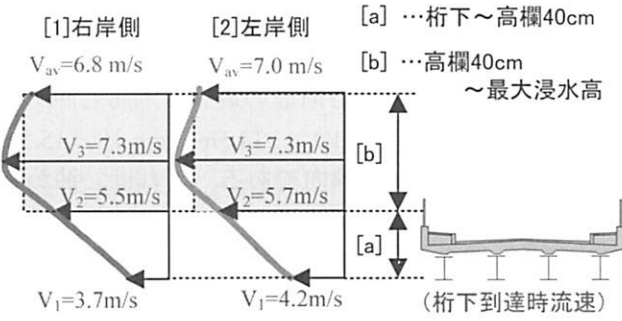


図-5 上部構造に作用する津波の流速分布

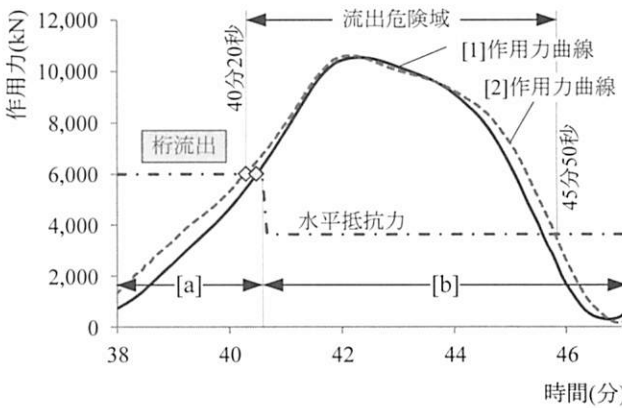


図-6 小泉大橋の作用力と抵抗力

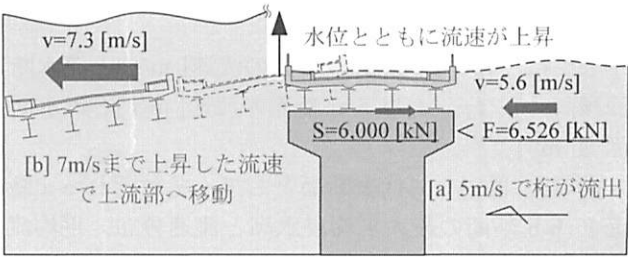


図-7 小泉大橋の流出メカニズム

は、b-b' 断面を境とする陸域で概ね遡上方向と一致する津谷川方向とし、海域は海岸線での津谷川の接線方向とした。また a-a' 断面から d-d' 断面の4つの断面は、小泉地区に襲来した津波の浸水範囲において、山から対岸の山までの範囲で概ね流れベクトルの法線方向に沿った断面を横断面と定義し、a-a' 断面から d-d' 断面はそれぞれ、小泉大橋、海岸線、海岸線から沖へ 1km、海岸線から沖へ 2km の位置とした。

(1) 津波水位の上昇浸水高の分布

図-9 に A-A' 縦断線上の時間の経過に伴う波形状の変化状況を示す。波形状は、前述の4横断位置での最大浸水高となる時間のものである。すなわち、d-d' 断面の最大浸水高を開始点として、a-a' 断面の最大浸水高までの波形状を示している。波形状は概ね正弦波状を呈しており、海底地形が沖から陸に向けて浅くなるに従い、海岸線付近で大きくなっている。この変化につれて各断面の最大浸水高も沖から陸に向けて 12.8m (d-d')、14.5m (c-c')、15.5m (b-b') と大きくなる傾向である。これは、沖から海岸に近づき水深が浅くなることで、津波の伝播速度は低下し波長が短くなる結果、波形が前傾化して、かつ波高が増すという波形の浅水変形（あるいは津波の非線形性）と傾向が一致する。

ここで、a-a' では最大浸水高は 13.5m と b-b' での最大浸水高 15.5m に比較して減少しており、海域断面の沖から陸に向けての水位の上昇傾向とは異なる傾向を呈する。この理由として、海岸線の b-b' を境に、陸側の地形が急激にフラットな状態となったことで内陸側の地形変化が無く、海岸線付近で前傾化した波前面が内陸に向かってスムーズに流れ出した結果と考えられる。

(2) 流速増加要因の分析

本節では式 (3) を変形した式 (4) を用いて小泉大橋位置で流速が極端に大きくなった要因の説明を試みる。

$$Q = Av = \text{const.} \quad (3)$$

$$v_a = \frac{A_b}{A_a} \times v_b \quad (4)$$

ここに、 v_b 、 A_b は b-b' 断面の流速 [m/s] と流水断面積 [m^2]、 v_a 、 A_a は a-a' 断面の流速 [m/s] と流水断面積 [m^2]

図-10、図-11 に代表断面として、それぞれ a-a' 断面と b-b' 断面の最大平均浸水高と流速分布、平均流速に加え、各断面での最大浸水高時の水域を積分し

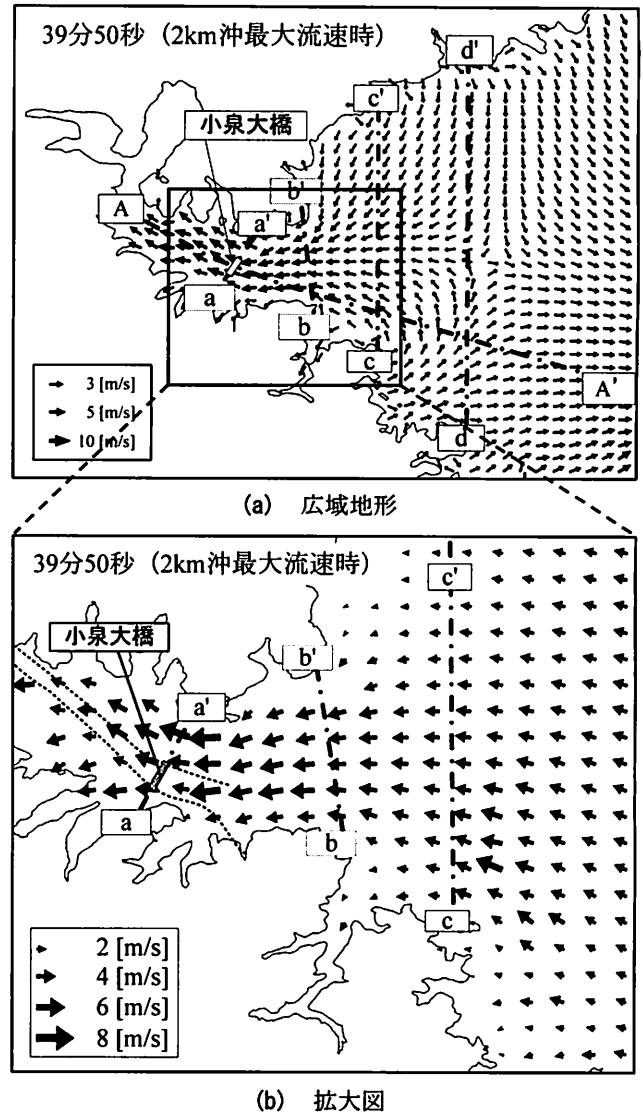


図-8 流速ベクトル図と断面設定図

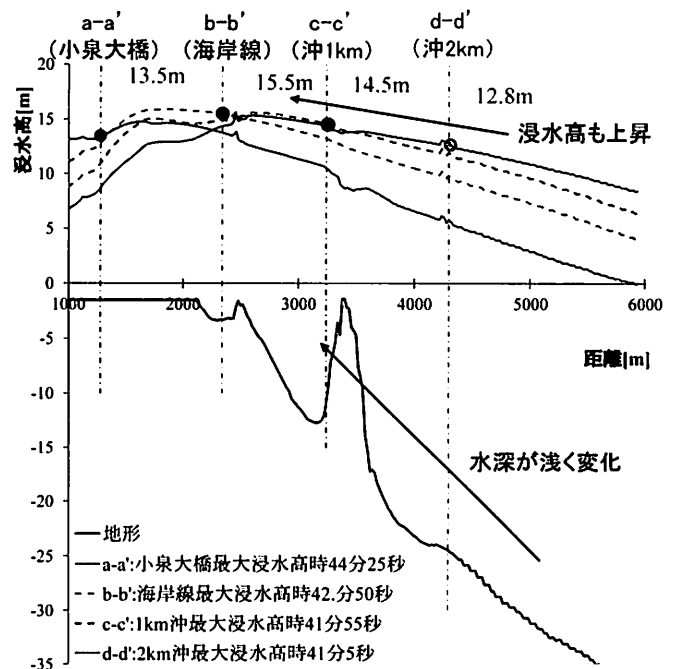


図-9 各断面の最大浸水高時の波形状と海底地形図

て求めた面積を流水断面積と定義し、図中に A として示した。

図-10 より b-b' 断面は、平均浸水高 $\eta_b=15.5\text{m}$ 、平均水深 $h_b=4.3\text{m}$ 、平均幅 $b_b=1,262\text{m}$ 、ハッチング部の流水断面積は $A_b=24,931\text{m}^2$ となる。同様に、図-11 より a-a' 断面は $\eta_a=13.5\text{m}$ 、 $h_a=1.0\text{m}$ 、 $b_a=865\text{m}$ より $A_a=12,552\text{m}^2$ となる。この結果から a-a' 断面と b-b' 断面の流水断面積の比は 1 : 2 と算出される。従って、式 (4) から、a-a' 断面の流速は b-b' 断面の流速の 2 倍となることが想定される。

次に、図-12 に縦断方向流速分布を示す。同図は a-a' 断面から d-d' 断面の 4 つの断面で、それぞれ最大流速が発生する時間の A-A' 縦断方向における流速分布であり、各断面の最大流速は、順に、7.7m/s、4.0m/s、3.9m/s、2.6m/s である。同図から、沖から陸に向けて徐々に流速が増加し、小泉大橋位置で流速が急激に増加して最大となる。b-b' 断面の流速 4.0m/s は、a-a' 断面では式 (4) から流速 8.0m/s と求められ、解析結果で得られた流速 7.7m/s に対し、4% と非常に小さな誤差で近似する。なお、c-c' 断面での最大流速が若干高めとなっているのは、海底地形に存在する突起の影響で越流波のような現象が生じているためと考えられる。

これらの結果から、沖から陸へ進行する津波が陸に向けて流水断面積が減少する地形の影響を受けて流速 4.0m/s まで緩やかに上昇し、更に海岸線から急激に断面が減少することで、小泉大橋位置で流速 7.7m/s まで極端に流速が大きくなったと考えられる。

4. 粗度係数と要素分割の違いが解析結果に与える影響

前章では、沖から海岸線までの津波水位に基づく波形状や流速の変化状況を海底地形と周辺地形の観点から考察した。一方で、小泉大橋位置での流速が非常に大きくなるのは、陸域側への遡上が進行して浸水高がある程度の高さまで成長した時刻である。このことから、陸域の遡上状況が変化すれば、小泉大橋に作用する流速も変化することが予測される。

本章では、上述したように陸上遡上状況の変化が、小泉大橋作用時の流速に与える影響度を把握することを目的として、粗度係数をパラメータとした感度分析を行った。同時に要素分割数の違いが解析結果に与える影響度合いの確認を行った。

(1) 粗度係数の設定と要素分割

図-13は感度分析を行う上での土地利用条件を示

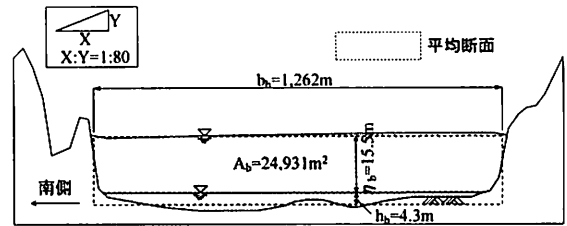


図-10 b-b'断面の平均浸水高と平均幅

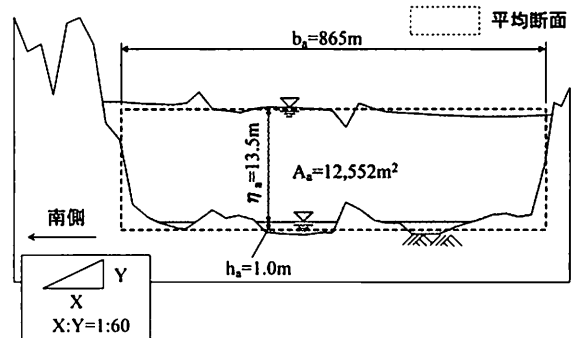


図-11 a-a'断面の平均浸水高と平均幅

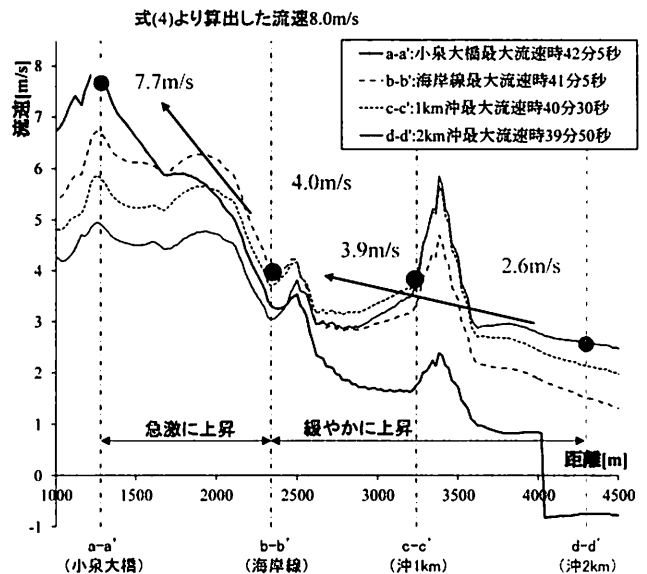


図-12 縦断方向の流速分布

している。同図 (a) に示すように、小泉地区は陸部内地から海岸に向かって延びる津谷川の左右岸森林に囲まれた地形である。津谷川兩岸の平地は主に田圃として利用されている。図-13 (b) は粗度係数を変える際に設定した領域の範囲を示した。粗度係数の変化範囲は津谷川流域において陸上部を先行して遡上したと考えられる津谷川のみとした。厳密には浸水範囲内の津谷川の粗度係数を変化させるべきであるが、ここでは簡易的に感度を評価するために陸部側は津谷川橋梁、海岸側は津谷川河口の海岸線位置までとした。比較ケースは下記の通りである。

a) Case1 ; 既往文献⁷⁾に基づき、陸域全体を

$n=0.025$ とした標準ケース。前章までの分析に使用しているモデルである。

- b) Case2；同図に示す津谷川範囲を $n=0.015$ に変化したケース。陸地に比較してある程度の水深を有する河川部は遡上が先行すると考え、海底摩擦項を低減して遡上しやすくするためにコンクリート人工水路⁸⁾に用いられる値を便宜的に用いた。

更に図-13 (a), (b)には、両ケースを比較するために設定した津谷川の縦断方向断面A-A'と、小泉大橋位置の横断方向断面a-a'を併せて示した。

ここで、本解析で使用している解析コードは解析領域に1つの粗度係数のみが設定されると共に、領域は格子状でなければならないという制約を受ける。従って、粗度係数を変化させたCase2では図中に示すように津谷川領域にさらに小領域を設けることとした。なお、Case1は同図(b)の範囲の領域を親領域として、図-4に示した範囲が小領域となる。

(2) 遡上速度と水位上昇の比較

図-14にCase1とCase2の浸水範囲の変化を、それぞれ(a), (b)に示した。同図(a), (b)には浸水状況の変化を比較するために、地震発生後27分後と30分後の様子を示している。

まず、河川部の遡上状況の違いに着目する。Case1では27分後に遡上範囲は小泉大橋に到達した一方、Case2の27分の時点では小泉大橋の位置を超えた上流側まで遡上する。30分後では、Case1, 2のそれぞれは、河川全体に広がるように遡上するのに対して、河川中央部が先行して遡上しており、かつ遡上範囲はより上流側となる。

次に河川以外の陸地部に着目する。陸地部の粗度係数は、それぞれのケースで変化は無いにも関わらず、27分後のCase1、津谷川の左岸側では概ね小泉大橋位置まで遡上しているのに対し、Case2では更に上流側まで遡上している。30分後も違いは顕著に現れており、同様にCase2の遡上範囲が広いことがわかる。この傾向は津谷川の右岸側にも見られる。

両ケースとも陸地遡上の進行速度に違いがあるものの河川より陸地を先行する傾向は一致している。これは写真-1で示した範囲[c]の防風林の消失や深い洗掘の状況からも推察されるように、大きなエネルギーをもった津波が遡上したと考えられ、使用している地形モデルが被災後の洗掘されたモデルであることも助長して陸地の遡上が先行したと考えられる。

図-15 (a), (b)に、それぞれCase1, Case2について前述のA-A'縦断方向断面の浸水高に基づく波形状

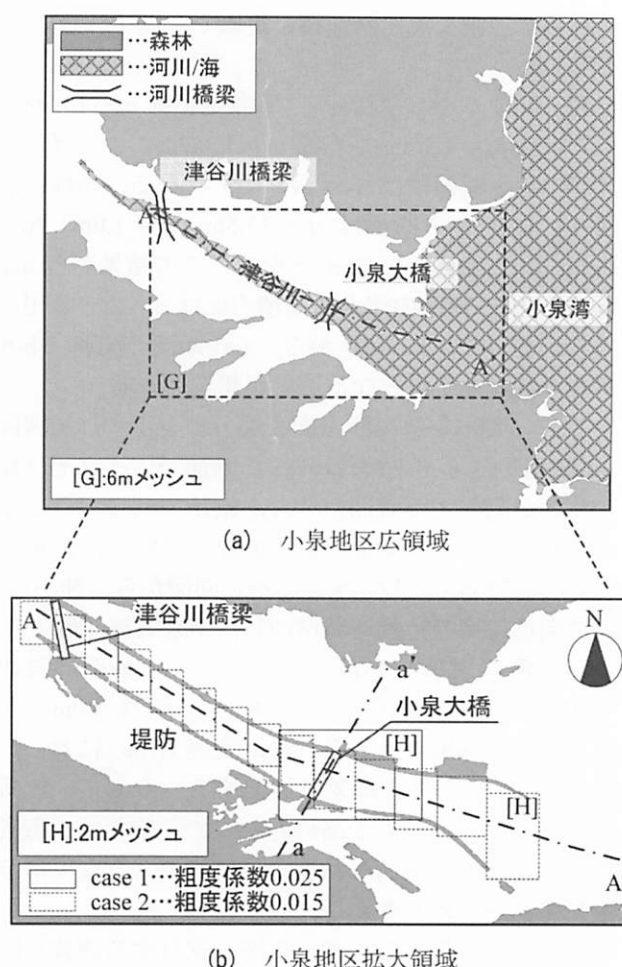


図-13 粗度係数設定と領域設定

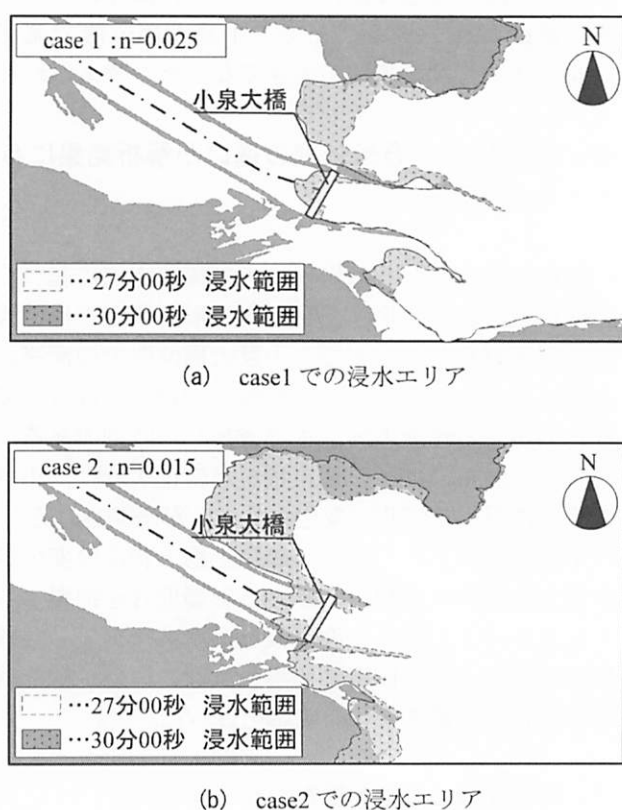


図-14 case1 と case2 の浸水範囲

の変化を示す。各図はCase1を標準に地震発生後、海岸線付近遡上時を20分後、小泉大橋到達時の27分後、小泉大橋上流側遡上時の30分後と、3つの時刻の波形状を示している。20分後の波形状は両ケースで大きな変化は見られない。これは海岸線付近に津波が到達した直後時間であるため、粗度係数の変化による影響をあまり受けていないためであるが、27分後の波形状はCase1に比してCase2が浸水高が高く、かつ波の前面も切り立つ。更に30分後になるとその傾向がより顕著に現れる。ここで、3つの時刻と波先端の移動距離の関係から波先端の遡上速度を算出した。Case1を代表として説明すれば、20分後から27分後の波先端の移動距離は1800-1400=400mであり、この間の時間は7分(=420秒)、従って、遡上速度は $400\text{m} \div 420\text{秒} = 0.95\text{m/s}$ と求められる。同様に、27分後から30分後の遡上速度は0.78m/sと先の時間より減少する。

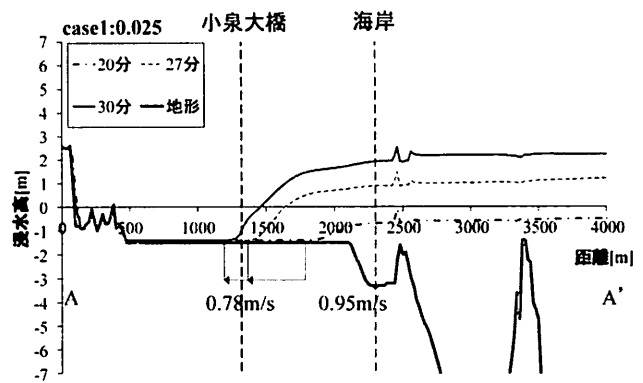
一方、Case2の遡上速度は、20分後から27分後、27分後から30分後の両者とも1.00m/sであり、Case1と比較して遡上速度が速いことに加え、時間の経過に伴う減少傾向は見られない。

このことから、粗度係数をより小さく設定したCase2は河川部の遡上速度が速く、水位上昇の速度も速いと言える。これは、非線形長波理論において用いられる運動の式中、粗度係数は海底摩擦項として計算される粘性力のパラメータであり、粗度係数が小さくなることで遡上を阻害する向きに働く海底摩擦項が小さくなった結果である。なお、この結果から、両ケースでの同時時点における流速にも影響を与えることが予測される。

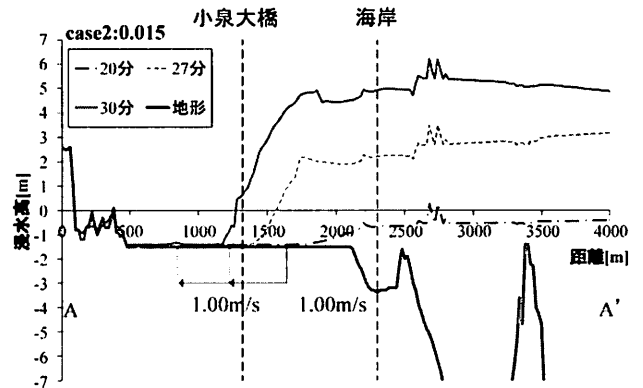
続いて、図-16に小泉地区を遡上する津波について顕著に違いが生じている27分後と30分後の流速ベクトルを示す。流速ベクトルを示す図中の矢印のサイズは流速の大きさを概念的に示している。また、これまでの図と同様に(a)と(b)はそれぞれCase1とCase2を示している。

同図(a)、(b)を比較すると、27分後、30分後ともに明らかにCase2の流速が大きいことに加え、30分後では津谷川左岸側の陸地部の浸水部先端でも大きな流速が生じていることがわかる。なお、流向にさほど大きな変化は見られない。

図-17(a)、(b)に、それぞれCase1とCase2の図-13(b)に示したa-a'横断面図に27分後、30分後に加え、31分後の浸水高の状況をプロットした図を示す。同図で確認すると、27分後の水位形状に大きな変化は見られないが、30分後には両ケースに大きな水位差が生じており、特にCase2では陸上を遡上する津波

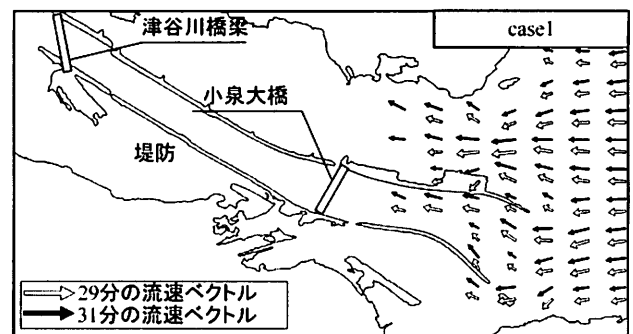


(a) case1での沖から海岸までの波形状

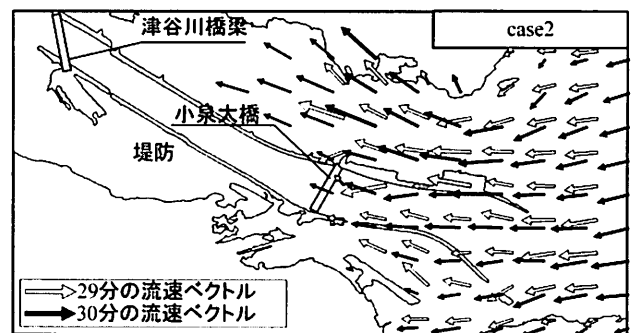


(b) case2での沖から海岸までの波形状

図-15 粗度係数による波形状の違い



(a) case1での遡上時の流速ベクトル



(b) case2での遡上時の流速ベクトル

図-16 case1とcase2の流速ベクトル

が陸地から河川内に流れこむ様子が確認出来、31分後も同様で、Case1にはこの傾向は確認されない。

このことから、Case2では津谷川河川部のみに小さな粗度係数を設定したにも関わらず、遡上速度と浸水高の上昇速度の上昇傾向が河川部だけにとどまらず、河川部以外の陸域にも発生しており、河川よりも陸部が先行して遡上する結果となった。

これらの結果をまとめて考察すると、河川部に小さな粗度係数を設定したことで河川部の遡上開始が速まり、そこに後続の津波本体の流量が集中したことが陸域の遡上状況にも影響を与えたと考えられる。なお、Case1、2双方で要素分割の領域が異なることも陸域の遡上状態が異なる要因と考えられる。今後、粗度係数の変化による結果への影響度合いの正確な把握のため双方のケースの要素分割を整合させて分析を実施する。

5. まとめ

小泉地区を対象に、数値解析を用いて津波の特徴を分析した結果から得られた知見を以下に示す。

- (1) 数値解析結果を用いた小泉大橋の流出メカニズムの分析結果から、小泉大橋は路面浸水までの流速 5m/s 程度の流速によって発生した作用力が抵抗力を上回ることによって流出し、その後の 7m/s を超える急激な流速の上昇で河川内を上流側へ移動したと推定される。
- (2) 数値解析結果を広域な地形状況から検討した結果、沖から海岸線まで進行してきた津波は海底地形が海岸に近づくにつれ浅くなることより、浸水高は 2km 沖で 12.8m、1km 沖で 14.5m、海岸線位置付近では最大の 15.5m まで成長する。
- (3) 流量一定の仮定に基づいた流速変化の検討結果から海岸線から小泉大橋位置までに流水断面積が 24.931m² から 12.552m² に半減するという周辺地形の影響を受け 4.0m/s から 7.0m/s を超える流速に上昇した。
- (4) 粗度係数をパラメータとした感度分析の結果、河川部に小さな粗度係数を設定すると陸域の遡上速度が 0.8m/s から 1.0m/s へと速くなり、それに応じて陸域の浸水高も高くなった。一方で陸域の遡上状況の遡上速度や水位上昇の変化には要素分割数の影響も可能性として考えられる。

参考文献

- 1) 佐々木達生，幸左賢二，付李，田崎賢治：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，

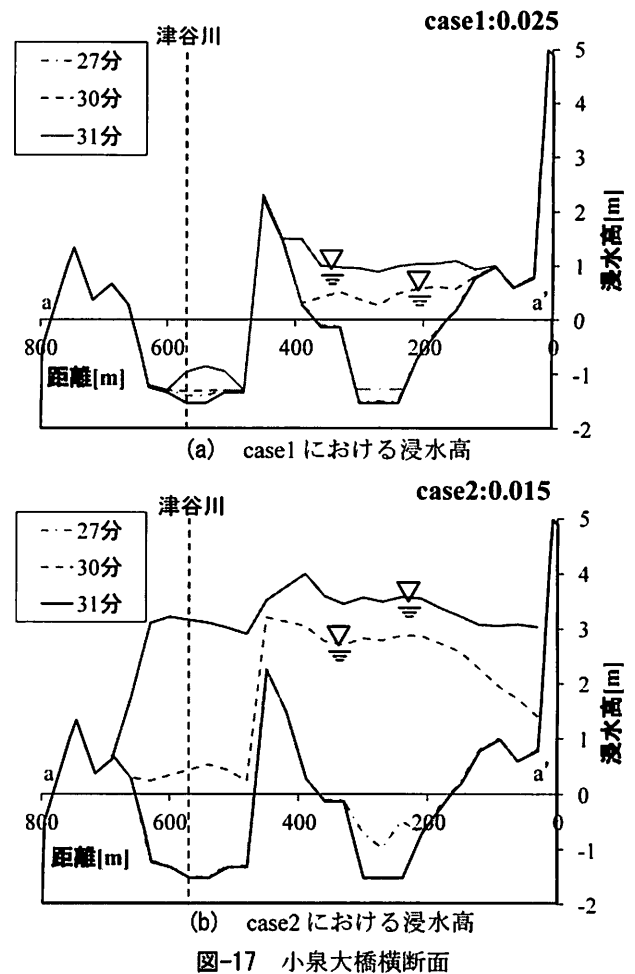


図-17 小泉大橋横断面

- コンクリート工学年次論文集，Vol.34，pp.1117-1122，
- 2) 藤井雄二郎・佐竹健治：2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の津波波源，2011.10. http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami_ja.html
- 3) 片岡正次郎，金子正洋，松岡一成，長屋和弘：道路橋の地震・津波複合応答解析，第15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.9-16，2012.7.
- 4) 佐々木達生，幸左賢二，神宮司博志：津波被害を受けた小泉地区橋梁の詳細被害分析，コンクリート工学年次論文集Vol35，pp.805-810，2013.7.
- 5) Rabbat, B.G. and Russel, H.G.: Friction coefficient of steel on concrete or grout, J.Struct.Eng., ASCE, Vol.111, No. 3, pp. 505-515, 1985.
- 6) 庄司学，森山哲雄，藤間功司，嶋原良典，笠原健治：単径間橋桁に作用する砕波津波の荷重に関する実験的検討，構造工学論文集，第55巻，pp. 406-470，2009.4.
- 7) 国土交通省：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.
- 8) (社)日本河川協会，建設省河川局；建設省河川砂防技術基準(案)同解説，計画編，pp. 107-132，2008. 7