

河川砂防技術研究開発 【成果概要】

①研究代表者	氏名 （ふりがな）		所属	役職
	内田 龍彦（うちだ たつひこ）		中央大学 研究開発機構	機構教授
②研究テーマ	名称	非静水圧準三次元解析法による津波の河川遡上・津波氾濫・局所洗掘の一体解析法の開発とその実用化に関する技術開発		
	政策領域	[分野] 河川技術分野 [公募課題] 津波河川遡上及び浸水解析手法に関する技術研究開発	融合技術	リモートセンシング, 都市計画
③研究経費 （単位：万円）	平成26年度	平成27年度	平成 年度	総 合 計
	1 6 8 6	1 1 4 1		
※端数切り捨て。				
④研究者氏名 （研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）				
氏 名		所属・役職（※平成28年3月31日現在）		
内田龍彦		中央大学研究開発機構・機構教授		
福田朝生		中央大学研究開発機構・機構准教授		
後藤岳久		中央大学研究開発機構・機構助教		
竹村吉晴		中央大学研究開発機構・機構助教		
田端幸輔		中央大学研究開発機構・機構助教		
塚本洋佑		中央大学研究開発機構・準研究員		
⑤研究の目的・目標 （申請書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。）				
<p>東日本大震災を受けて、河川は津波の主要な経路となり、津波の河川遡上、堤防越水、破堤は津波氾濫被害の大きな要因となることが改めて認識され、効果的な津波被害軽減対策のために、これらの現象を適切に評価できる数値解析法が求められている。このためには津波の多重スケール現象とその相互作用を一体的に解析できる解析法が求められる。</p> <p>著者らは非静水圧準三次元解析法を開発し、これまでに種々の三次元流れや局所洗掘現象への適用し、その妥当性を示してきた。この解析法は、流速と圧力の鉛直分布を平面二次元解析法の枠組みで計算できるため、広域の大きなスケールの現象から狭域の小さなスケール現象の解析が必要となる津波シミュレーションに有効と考えられる。しかし、この解析法では、洪水時の緩やかな非定常性が想定され、計算の安定性と簡略化のために、鉛直方向流速の非定常項などが省略されており、これらの簡易化が津波の河川遡上現象に対して妥当であるかや、その評価方法は明らかでない。</p> <p>本研究では、非静水圧準三次元解析法を応用し、津波の河川遡上・津波氾濫・局所洗掘の一体解析法を開発し、国土技術政策総合研究所での大型水理模型実験に適用し、非静水圧準三次元解析法に基づく非定常急変流解析法を津波の河川遡上解析に対する適用性を明らかにする。また、断層モデルを含めた津波伝播解析に基づいた今次津波の北上川河川遡上と津波氾濫の一体解析を行い、現地水位観測データを用いて、検証、検討する。そして、これを用いて津波の河川遡上メカニズムの解明と津波対策について検討する。</p>				

⑥研究成果

(様式 A-11と同じ内容について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

(1) 非静水圧準三次元津波解析法の開発

一般BVC法¹⁾は、平面二次元解析の枠組みにおいて、流れの鉛直構造を評価する方法である。流れの鉛直構造は、水平方向渦度の非平衡性と圧力分布からなる。一般BVC法では、これらを渦度方程式等や鉛直方向流速の方程式等から評価した方程式系を連立して解く。この手法を非定常性の高い津波解析に応用するため、底面圧力の計算において鉛直方向流速の非定常項、水面の鉛直方向圧力勾配項を新たに導入した。図-1に開発した非静水圧準三次元津波解析モデルの基礎方程式と上述の改良点を示す。鉛直方向流速の非定常項は、時空間的に平均して評価することにより、安定した解析を行うことが可能となった。水面の鉛直方向圧力勾配は、水面における鉛直方向運動方程式を導入することにより評価し、これにより、非定常性の激しい流れにおいて圧力の非静水圧成分による水面の変化を説明できることを示した。

(2) 北上川津波遡上実験への適用と検証

開発した解析法を国総研で行われた図-2に示す実験に適用し、検証した。実験水路は、追波湾の一部を含む北上川約10kmの河道とその周辺地形を現地縮尺1/330で作成されている。地盤高は地震前の地形データ、堤防データに地震による地盤沈降量を考慮したものとなっている。津波流入境界条件の曖昧さをなくすために、湾域の複雑な地形が単純化されている。河川流量は考慮しておらず、造波前の湾内及び河道内は一定の水位(T.P.-0.42m)で湛水している。図-2に示す湾内・河道内及び堤内地に水位計が設置され、各点の水位の時間変化が計測されている。ここでは、実験のスケールの問題を回避するために、できる限り大きな津波波形を堤防上に壁立を設け、氾濫域の流れのない条件で実験を行っている。図-3に2D解析法と本解析法(BVC法、非定常項を考慮)の水位波形の比較を示す。2D解析は、0km左岸の極端な水位低下など小さな波形に違いはあるが、全体的な波形には流れの三次元性の影響は現れない。ただし、非静水圧成分の底面抵抗や、流速鉛直分布の変形、砕波によるエネルギーロスなどが2D解析では考慮されないために、河道上流部ではそれらが積分されて解析の誤差として現れる。図-4

$$\begin{aligned}
 & \text{水深積分連続式: } h & \text{水深積分運動方程式: } U_i \\
 & \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U_i h}{\partial x_i} = 0 & \rho \left(\frac{\partial U_i h}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j h}{\partial x_j} \right) = -\rho g h \frac{\partial z}{\partial x_i} - \tau_{ix} + \frac{\partial h \tau_{ix}}{\partial x_i} + d p_x \frac{\partial z}{\partial x_i} \\
 & \text{水深積分乱れエネルギーの輸送方程式: } k & \\
 & \frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu h \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k - \varepsilon & \\
 & \text{底面流速の方程式(水深積分渦度): } u_{bi} & \\
 & u_{bi} = u_{bi} - \varepsilon_{ijk} \Omega_j h - \frac{\partial W h}{\partial x_i} + w_i \frac{\partial z}{\partial x_i} - w_i \frac{\partial z}{\partial x_i} & \\
 & \text{水深積分渦度方程式: } \Omega_i & \text{水面の運動方程式: } u_{si} \\
 & \frac{\partial \Omega_i h}{\partial t} = R_{\Omega_i} + P_{\Omega_i} + \frac{\partial h D_{\Omega_i}}{\partial x_j} & \frac{\partial u_{si}}{\partial t} + u_{sj} \frac{\partial u_{si}}{\partial x_j} = -g \left(\frac{\partial p}{\partial x_i} \right)_{s,i} \frac{\partial z}{\partial x_i} + P_{s,i} \\
 & \text{鉛直方向流速の方程式(水深二重積分連続式): } W h & \text{水面の鉛直方向圧力勾配} \\
 & W h = h \left(\frac{\partial w}{\partial t} + U_j \frac{\partial w}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ h^2 (k_2 \Delta u_j + k_1 \partial_i u_j) \right\} & \\
 & \text{水深積分鉛直方向運動方程式: } d p_x & \text{非定常項を時空間的に平均することにより評価可能に} \\
 & \frac{d p_x}{\rho} = h \left(\frac{\partial W}{\partial t} + U_j \frac{\partial W}{\partial x_j} \right) + \tau_{ix} \frac{\partial h}{\partial x_i} + \tau_{ix} \frac{\partial h}{\partial x_i} & \left(\frac{\partial w}{\partial t} + U_j \frac{\partial w}{\partial x_j} \right)_{s,i} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial p}{\partial x_i} \right)_{s,i} \\
 & \text{鉛直方向流速の非定常項} & \frac{\partial w}{\partial t} + U_j \frac{\partial w}{\partial x_j} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial p}{\partial x_i} \right)_{s,i}
 \end{aligned}$$

図-1 一般BVC法に基づく非静水圧準三次元津波解析法の枠組み

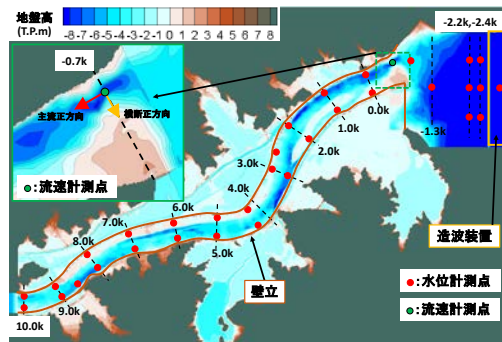


図-2 実験水路平面図

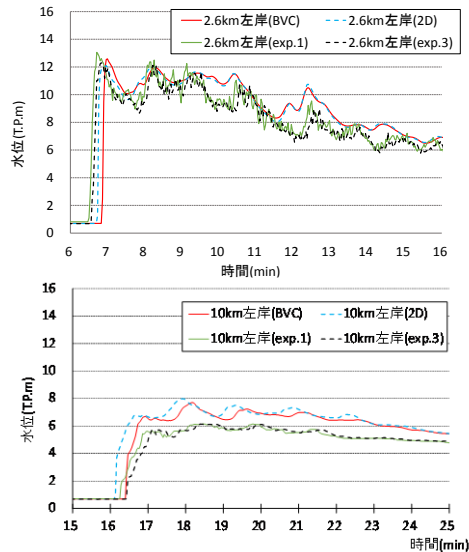


図-3 2D解析法と本解析法による水位波形の比較

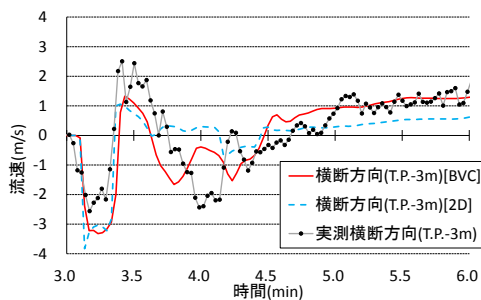


図-4 実測流速と計算結果(BVC法・2D解析法)の比較

⑥研究成果 (つづき)

に底面付近の実測流速と計算結果(BVC法・2D解析法)の比較を示す。主流速の時間変化はBVC法、2D解析法の差は小さく、ともに実験結果をよく再現していたが、横断方向流速は主流速に比べ複雑に変化している。BVC法による計算結果は4min付近の波形等、2D解析法と比較して実験結果の再現性は改善されている。

計算結果から底面状態を調べると、津波先端部では遷移領域で、解析領域全体は滑面状態となっていた。本解析法では流速鉛直分布が計算できるため、底面境界条件における粗滑の遷移を考慮した解析法を検討し、本実験データの取り扱い方法について検討する。粗滑の遷移を考慮した計算を滑面考慮($k_s=0.01\text{mm}$)とする。この k_s は実験のフロント到達時間を再現するように決めている。同じ粗度を用いて完全粗面として計算したものを、完全粗面($k_s=0.01\text{mm}$)、実験のフロント到達時間を再現するように k_s を再決定したものを、完全粗面($k_s=0.1\text{mm}$)としてこれらの解析結果を比較する。図-5に底面の取り扱いによる解析水位波形の比較を示す。ここではスケールの影響を見るために実験のスケールをそのまま表示している。粗滑の遷移を考慮した解析結果は表面張力と思われるごく小さな波形を除いて実験結果を良好に再現できている。粗滑の影響を考慮しない場合、粗滑を考慮した場合に比べて抵抗を過小評価し、上流に行くにつれて到達時間が早く、波形が減衰していないことが分かる。しかし、完全粗面として底面を扱った場合でも、実験のフロント到達時間を再現するように粗度を再調整すれば、水位波形は再現できることが分かる。図-6は横断方向流速の瞬間鉛直分布の比較である。時間とともに流速分布特性が大きく変化しており、津波の非定常的の三次元流れの特性が強く表れている。解析結果は、時間とともに流速鉛直分布特性が変化する実験の特徴をよく説明できている。底面評価方法を比較すると、完全粗面($k_s=0.1\text{mm}$)と滑面考慮($k_s=0.01\text{mm}$)の流速鉛直分布にもほとんど差がない。

図-7に河川地形がある場合とない場合の最大水位縦断分布の比較を示す。本解析法は、河口砂州が無いことによって、津波が減衰せず高いピーク水位を保ったまま河川を遡上することを説明できており、実験結果と概ね一致している。

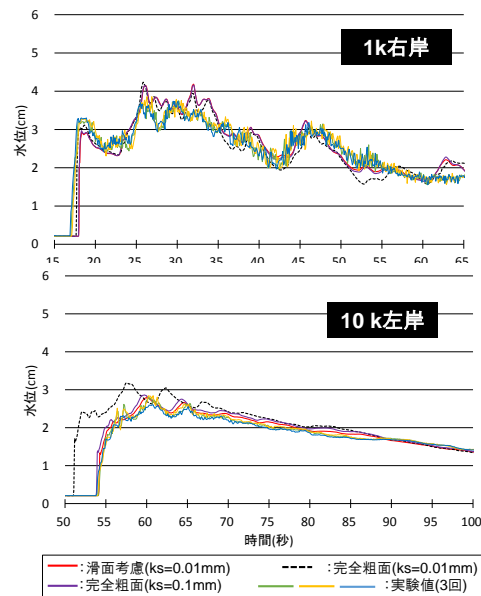


図-5 底面の取り扱いによる解析水位波形の比較

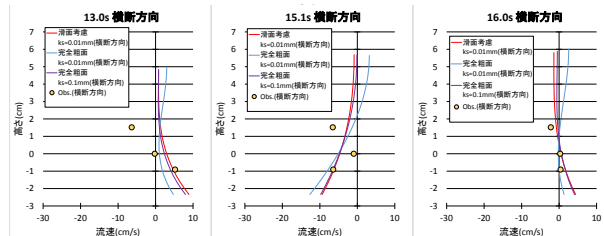


図-6 横断方向流速の瞬間鉛直分布の比較

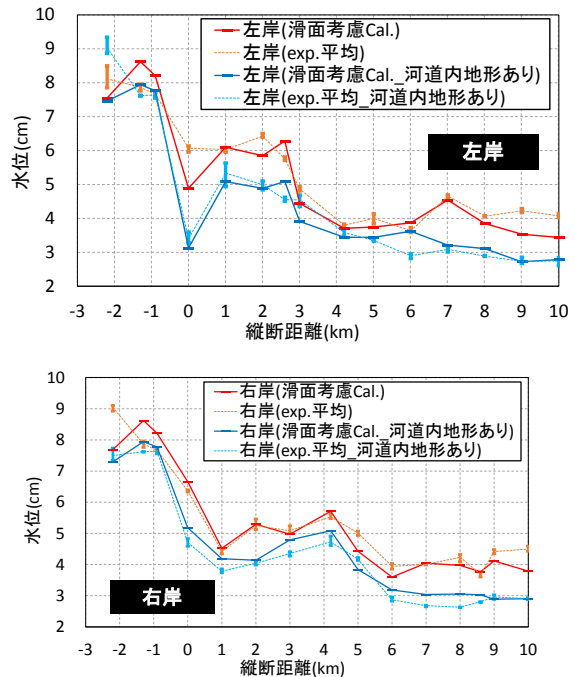


図-7 河川地形がある場合とない場合の最大水位縦断分布の比較

⑥研究成果 (つづき)

(3) 今次津波による北上川遡上, 氾濫流の一体解析

本研究では, 図-8に示すように, 断層モデルを含む津波伝播解析部分と追波湾, 北上川, 氾濫域の詳細解析部分に分けて解析を行う. 著者らの既往研究と同様に, 格子スケール比を3とし, 1wayネスティング手法²⁾を適用する. 50mメッシュの計算結果を用いて, 詳細計算領域の境界条件(湾域)の流速, 水位の時空間分布を与える. 東北大学モデル(version 4.2)³⁾と藤井・佐竹モデル³⁾を用い, 断層モデルによる水波形の比較を行った(図-9). 海域においては二つの断層モデルにより計算される水位波形は大きく異なるが, 湾域の水位波形はほぼ一致している. これは, 今次津波における北上川の津波遡上の境界条件となる追波湾の水位波形は湾内セイシュの影響が支配的であると考えられる. このため, 湾域の水位波形を取得することが津波河川遡上を検討する上で極めて重要である. 以降, ここでは東北大学モデルを用いて検討する.

本研究では, 初期河川流況, 破堤, 河川地形が津波波形に与える影響を調べた. ここでは, 初期河川流況の適切な与え方と河口地形の影響を述べる. 図-10に初期条件の設定方法を含めた本津波解析法の方法をまとめる. 地震発生前の河道湾域の流れを再現するために, 堰下流水位と潮位を境界条件とし, 河道内の水面形を再現する. 次に, 地盤沈下の影響を考慮する. 地震による地盤沈下は瞬時に生じると

して, 地盤と水位を瞬間的に下げる. 本研究では, 初期河川流況, 破堤, 河川地形が津波波形に与える影響を調べた. ここでは, 初期河川流況の適切な与え方と河口地形の影響を述べる. 図-10に初期条件の設定方法を含めた本津波解析法の方法をまとめる. 地震発生前の河道湾域の流れを再現するために, 堰下流水位と潮位を境界条件とし, 河道内の水面形を再現する. 次に, 地盤沈下の影響を考慮する. 地震による地盤沈下は瞬時に生じるとして, 地盤と水位を瞬間的に下げる. ここで, 水位のゼロ点高変化に合うようから東北大学モデルによる沈下量から-7cmしたものを与えた. 地震発生直後の水面形は, 河川流や潮位による流れを考慮しないこれまでの初期水位と比較すると, 全体的に50cm以上水位が低くなった.

図-11に観測所(北上大堰下流左岸, 17.20km)での水位波形の比較を示す. 第三波以降水位波形の再現性が低い理由は定かでないが, 断層モデルの影響も考えられる. 降河口砂州が無くなると, 津波波高を大きくするだけでなく, 引き波による水位低下を引き起こすことが分かる. 図-12は計算水位と氾濫痕跡水位の比較であり, 痕跡水位は東北地方整備局により計測されたものである. 計算結果を比較すると, (a),(b)では同様に, 砂州が無いことによる遡上量の増加により, 計算水位が高くなり氾濫量が増加している. 一方, (c)の破堤部である右岸4.0~6.0km堤内地では, 砂州が無いことにより計算

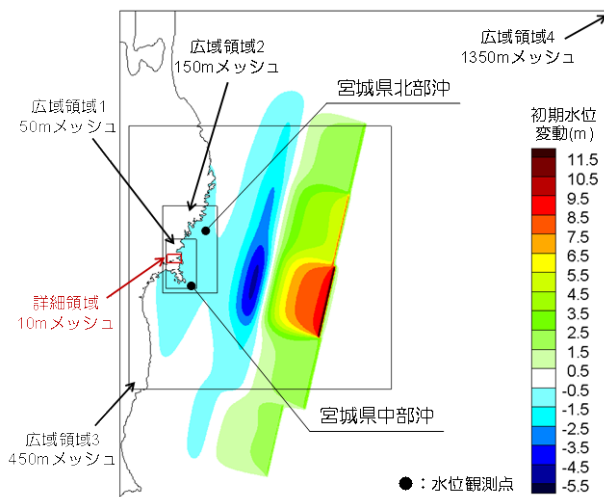


図-8 広域計算領域と東北大学モデル³⁾による初期水位

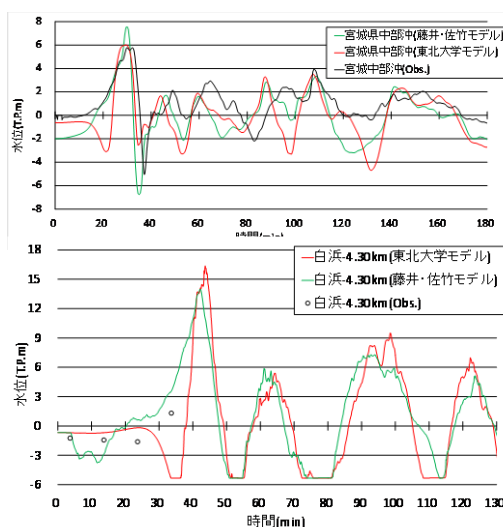


図-9 断層モデルによる水位波形の比較

⑥研究成果（つづき）

水位が低下している．このことから，河口砂州は津波の遡上量を低減させ，河口付近での大きな水位低下，上流河道においてもわずかに水位を低下させ，津波の到達時間を遅らせる効果を持つ．しかし，一方で引き波による河川流下方向の流量を低減させ，河道内の水位が高い状態を継続させることから，河道内水位より低い堤防高，例えば破堤部において，氾濫を助長させる．このため，河口砂州の存在が津波波高を大きくするかどうかは，河口の津波波形と河道特性によって変わると考えられる．

(4) まとめと今後の課題

底面流速解析法を応用した非静水圧準三次元津波解析法の構築し，その妥当性を示すことができた．今次津波解析では，観測データと本解析法を用いて，断層モデル，初期河川流況，破堤，河川地形などが北上川の津波波形に与える影響を明らかにした．追波湾のような複雑な地形をもつ湾域では，複雑に変形した水位波形が北上川への津波遡上や津波氾濫の境界条件となる．このような場合では，ピーク水位の縦断分布のみで津波対策を講じるのは十分でなく，津波波形を適切に考慮に入れた検討が必要となる．特に，今回のような大津波に対する検討では，このような複雑な波形をもつ津波がどの方向からどのように伝わってくるのかを地形特性や断層特性から予め明らかにしておくことが重要である．本研究で示したように妥当性が検証された数値解析モデルは，このような津波波形の変化をかなりの程度まで説明できることを示した．一方で，今次津波による大きな地形変化を再現するには至らなかった．これは津波フロントなどにおける激しい土砂運動機構を従来の地形変化解析では表現できないためと考えられる．また，このような土砂運動の抵抗が津波伝播に大きな影響を与えたと考えられる．本解析法は流れの三次元性とともにもこのような土砂と水の相互作用を考慮する新しい解析法に展開が可能である．また，河道の水位計測および痕跡水位計測は，洪水時の場合と同様に，津波解析モデル構築の上では重要である．

参考文献：

- 1) 内田龍彦，福岡捷二：底面流速解析法による連続する水没水制群を有する流れと河床変動の解析，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.67，No.1，pp.16-29，2011．
- 2) 内田龍彦，福岡捷二：底面流速解析法を用いた津波による構造物周りの三次元流れと局所洗掘解析，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.69，No.2，I_271-I_275，2013．
- 3) 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 (version1.2)，東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター，2012
- 4) 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, 63, 815-820, 2011.

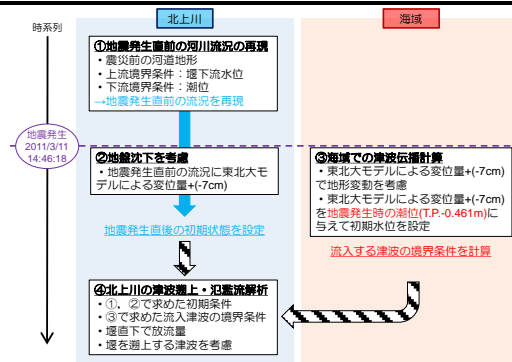


図-10 河川の初期流況を考慮した解析法

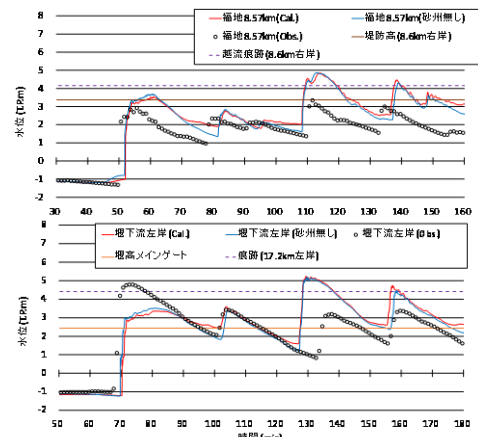


図-11 水位波形の比較

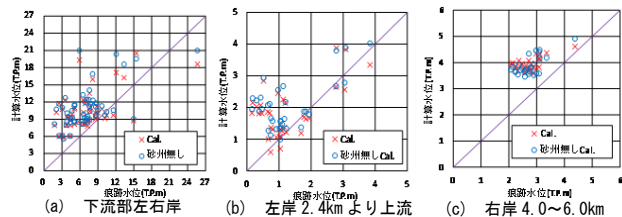


図-12 痕跡水位の比較

⑦研究成果の発表状況

(本研究の成果について、予定しているものも積極的に記入して下さい。(以下記入例))

・これまでに発表した代表的な論文

- 1) 松井大生, 内田龍彦, 福岡 捷二: 北上川における津波の河川遡上と津波氾濫流解析から導かれる現地観測データの解釈, 水工学論文集, 第60巻, I_415-I_420, 2016.
- 2) 立山政樹, 内田龍彦, 福岡捷二: 底面境界が大きな勾配を有する河口砂州周辺の三次元流れと河床変動の解析法, 水工学論文集, 第60巻, I_835-I_840, 2016.
- 3) 松井大生, 内田龍彦, 中村賢人, 服部 敦, 福岡 捷二: 非静水圧準三次元解析法による北上川の津波河川遡上・氾濫流の一体解析, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 71, No. 2, I_181-I_186, 2015.
- 4) 内田龍彦, 福岡捷二: 非平衡粗面抵抗則を用いた一般底面流速解析法の導出と局所三次元流れへの適用, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol, 71, No. 2, 43-62, 2015.

・国際会議、学会等における発表状況

- 5) 松井大生, 内田龍彦, 中村賢人, 服部 敦, 福岡捷二: 非静水圧準三次元解析法による津波河川遡上・氾濫流解析の検討, 第70回年次学術講演会, II-155, 岡山大学, 2015. 9.
- 6) 内田龍彦, 福岡捷二: 種々の水深積分モデルを用いた湾曲部三次元流れ機構と適切な解析法の考察, 第70回年次学術講演会, II-062, 岡山大学, 2015. 9.
- 7) 立山政樹, 内田龍彦, 福岡捷二: 大規模洪水時の河口砂州周辺の三次元流れ場の渦構造とその解析法の考察, 第70回年次学術講演会, II-058, 岡山大学, 2015. 9.
- 6) 松井大生, 内田龍彦, 福岡捷二: 非静水圧準三次元解析法による津波の河川遡上と氾濫流の一体解析法の検討, 第42回関東支部技術研究発表会, II-3 9, 2015. 3, 東海大学.

⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

本研究成果の一部は、研究室のHPにて公開されている。

<http://c-faculty.chuo-u.ac.jp/~sfuku/>

⑨表彰、受領歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

なし

⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や河川政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

実験条件の制約等から、検証データがなく、検証できなかったものには、三次元非定常急変流場(津波による堤防越流)がある。本研究では、障害物を越流するダムブレイク実験を用いて、鉛直二次元場の非定常急変流場において解析法の妥当性を検証した。しかし、津波による堤防越流現象は、任意の堤防形状、津波方向で生じるため、三次元非定常急変流場への妥当性を検証できる実験データが必要である。また、今次津波氾濫では、津波による激しい地形変化と輸送土砂の運動量による抵抗を考慮するには至っていない。このような解析のためには、従来の掃流砂量式や浮遊砂量式を用いた解析法では不十分であり、流れと土砂の相互作用を考慮した解析法が必要となる。近年、申請者らは、非静水圧準三次元解析法の枠組みで、底面において平衡状態を仮定せずに動的に境界条件を定める非平衡粗面抵抗則を導いた(内田・福岡, 土木学会論文集, 2015)。さらに、内田(<http://c-faculty.chuo-u.ac.jp/~ths2016/JWS/>)は非平衡粗面抵抗則と土砂の運動方程式と連続式と連立されることにより、流砂様式や底面浮遊砂濃度式を用いることなく、流れの三次元性と合わせて流れと土砂の相互作用を考慮できる二相流モデルの枠組みを示している。本研究成果は、このような新しい解析法に展開できる。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、河川政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

本研究では、津波における湾域水位データを取得する必要性を明らかにし、湾域の解析方法とともに検討していくべきであることを示した。追波湾のような複雑な地形をもつ湾域では、複雑に変形した水位波形が北上川への津波遡上や津波氾濫の境界条件となる。また、北上川では北上大堰からの津波反射の影響も大きいことから、津波による水位波形は単純ではない。このような場合では、ピーク水位の縦断分布のみで津波対策を講じるのは十分でなく、津波波形を適切に考慮に入れた検討が必要となる。特に、今回のような大津波に対する検討では、このような複雑な波形をもつ津波がどの方向からどのように伝わってくるのかを地形特性や断層特性から予め明らかにしておくことが重要である。

本研究で示したように妥当性が検証された数値解析モデルは、このような津波波形の変化をかなりの程度まで説明できることを示した。数値解析モデルの活用としては、解析で想定される様々な断層モデルから典型的な津波波形と津波氾濫などの被害の仕方を把握することが重要である。本研究で議論した底面抵抗を適切に扱うことは、津波の到達時間、減衰だけでなく、このような津波伝播方向を適切に表すためにも重要である。また、河床変動解析で見られたように、津波は基本的に洪水とは逆向きの流れとなるために、通常洪水で弱点箇所となる場所とは異なる場所が危険となる。津波は洪水と比較して発生頻度が低い上に、大規模津波では複合的な現象となるため、これらを予め検討しておくために数値解析モデルを用いた検討が不可欠である。数値解析モデルを活用するには、妥当性をしっかりと検証した、信頼性の高い数値解析モデルを構築することが重要である。本研究結果から国総研の北上川津波遡上、壁立有・最大波形の実験データに対しては非静水圧準三次元解析法、平面二次元解析法の再現性は明らかとなっており、これらを合わせて解析法を検証するベンチマークデータとして用いることができる。