

3. 1. 2 沿岸防災手法の工学的評価

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 8か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
 - 1) 平成25年度
 - 2) 平成26年度
 - 3) 平成27年度
 - 4) 平成28年度
 - 5) 平成29年度
 - 6) 平成30年度
 - 7) 平成31、32年度
- (e) 平成27年度業務目的

(2) 平成27年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の成果
- (c) 結論ならびに今後の課題
- (d) 引用文献
- (e) 成果の論文発表・口頭発表等
- (f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

(3) 平成28年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

1.2 沿岸防災手法の工学的評価

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
東京大学大学院工学系研究科	教授	佐藤慎司
	教授	田島芳満
	講師	下園武範

(c) 業務の目的

東北地方太平洋沖地震津波では東日本太平洋側を中心に壊滅的な被害が発生した。これを受けて、今後の津波対策としては、二段階の津波レベルを設定して、防災・減災の具体的な対策を進めることとなっている。すなわち、頻度の高い津波（レベル1津波）と最大クラスの津波（レベル2津波）を設定し、頻度の高い津波に対しては、海岸堤防などで陸地への浸水を防ぐことにより人命と資産を防護し、最大クラスの津波に対しては、避難手段の確保などにより人命を守るというものである。太平洋側沿岸では、プレートの動きにより百年程度の周期で繰り返し発生する地震による津波と、複数の地震の連動などにより発生する巨大津波が、プレート境界付近を中心に発生するため、二段階の津波レベルによる対策は津波の発生メカニズムと整合しており、社会的な認知も得やすい。しかしながら、日本海側沿岸では、地震の発生機構が異なるうえ、砂浜・砂丘によって特徴づけられる緩勾配海岸において、季節的に繰り返される高波の来襲や慢性的に深刻化していく海岸侵食の問題が深刻化しているという海岸の特徴を有しているため、これらの特徴を踏まえて最適な防災手法を検討する必要がある。

本サブテーマでは、日本海における地形・海象・津波の特徴に鑑み、地域の沿岸防災力と防災リテラシーの向上に資するため、工学的な観点から津波防災手法を評価することを目的とする。具体的には以下の4つの課題を8か年にわたって実施する。

(d) 8か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成25年度：日本海側沿岸における海象特性と沿岸防災手法の調査

日本海側の海岸の特徴を海岸防災の観点から整理し、単調な砂浜海岸が多く、太平洋側に比較して、堤防・護岸の整備率はやや低いことを明らかにした。堤防の高さは、高波の打ち上げ高さで設計されており、日本海側では、津波より冬季季節風による高波に対する防護が構造物設計の基準となっていることが確かめられた。さらに、海岸堤防の津波被害軽減性能に関する予備実験を実施し、堤防の壊れにくさと越流する津波のエネルギー減殺がトレードオフの関係にあることを明らかにした。

2) 平成26年度：津波による海岸堤防の性能と限界の調査

津波の堤防越流に伴う後背地のリスク評価を可能にするため、平成26年度に引き続いて越流時における堤防周辺の流体運動に関する水理模型実験を実施した。実験は、堤防法肩や法尻で局所的に発生する鉛直加速度による非静水圧が越流量に及ぼす影響を明らかにすることを目的として実施した。実験および数値モデルによる検討の結果、津波高さが堤防高に対して相対的に大きい場合には、従来の方法では後背地への氾濫を危険側に評価することが示唆された。また、この効果は、堤防法面勾配が1/3を越えると急激に大きくなることが示され、一般的な堤防の法面勾配の範囲(1/2-1/3)では無視できないことが示された。

3) 平成27年度：津波による海岸堤防の性能と限界の調査、沿岸低地における津波の氾濫予測

堤防によって防護された沿岸地域への津波氾濫予測の高精度化を目的として、津波が堤防を越流する際の水利特性を水理模型実験および数値流体モデルを用いて詳細に調べた。水理模型実験では勾配の異なる6通りの堤防モデルに津波に見立てた段波を作用させて、各点での水位変動や越流量の計測を実施した。さらに、堤防周辺の詳細な流れ場の構造を明らかにするために、Navier-Stokes方程式に基づく数値計算モデルにより実験結果の再現を行った。得られた結果をもとに堤防の表法面および裏法面の勾配がどのように越流特性に影響するかを整理した上で、氾濫モデルにおいて広く使われている越流公式の改良を行った。新たな越流公式は堤防形状の効果が反映されるため、従来のものに比べて高精度な越流量評価が可能であることが実験結果との比較によって示された。

4) 平成28年度：沿岸低地における津波の氾濫予測（北海道～東北日本）

北海道～東北日本を対象にいくつかの代表地域を選定して、氾濫計算を実施する。海岸堤防が破壊されない場合と破壊される場合の浸水範囲や浸水量を比較することにより、堤防の効能を定量的に評価する。

5) 平成29年度：沿岸低地における津波の氾濫予測（北陸～西日本）

北陸～西日本を対象にいくつかの代表地域を選定して、氾濫計算を実施し、検討を継続する。

6) 平成30年度：沿岸低地における津波の氾濫予測、日本海沿岸に適した津波防災手法の提案

日本海側に特徴的な海岸地形を選定し、大河川周辺の砂丘低平地を対象とした計算を分析する。

7) 平成31、32年度：日本海沿岸に適した津波防災手法の提案

波の先端部が分裂する条件も含めて、日本海側の津波防災に最適な工学的防災手法を提案する。

(e) 平成 27 年度業務目的

海岸堤防を越流する津波の特性を明らかにするため水理模型実験および数値流体計算を実施し、得られた知見をもとに越流および後背地への氾濫を精度良く予測できる実用性の高い手法の開発を行う。

(2) 平成 27 年度の成果

(a) 業務の要約

日本海沿岸地域の津波被害予測を行うためには堤防や砂丘の効果を適切に評価することが重要である。しかしながら、現状の広域津波氾濫計算では堤防等の効果は簡易的に考慮されているため、必ずしも十分な精度で後背地への氾濫被害を予測することができない。より高精度な氾濫予測を実現するためには、堤防形状を考慮した越流評価手法が求められる。前年度までの結果を踏まえて、平成 27 年度は津波が堤防を越流する際の水理特性を水理模型実験および数値流体モデルを用いてより広範かつ詳細に調べた。これらの結果を踏まえて堤防の表法面および裏法面の勾配がどのように越流特性に影響するかを整理した上で、氾濫モデルにおいて広く使われている越流公式の改良を行った。改良された越流公式を用いた場合、津波来襲初期の越流量をより正確に評価することができるとともに、その後の定常的な越流状態においても堤防形状の効果を考慮した後背地への氾濫予測が可能になることが示された。

(b) 業務の成果

日本海側の海岸部では冬季風浪を想定外力とした海岸堤防が設置されている地域が多く、また、砂浜や砂丘の発達した海岸も多い。太平洋側に比較して想定される津波の規模も小

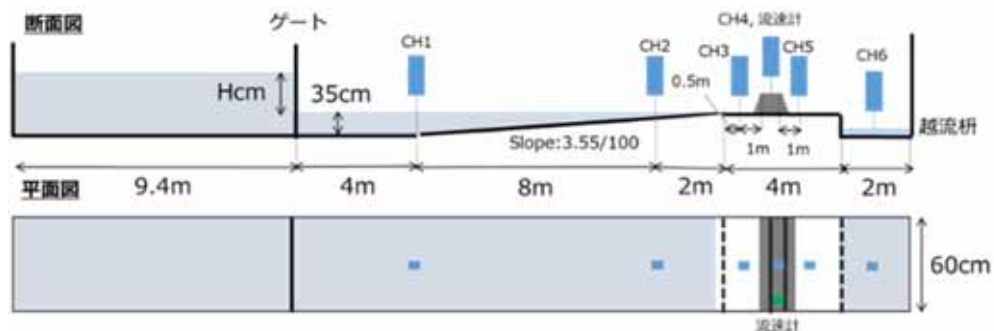


図 1 実験に用いた水路と計測器の設定



図 2 実験での津波越流の様子 (左：非常定常越流状態、右：準定常越流状態)

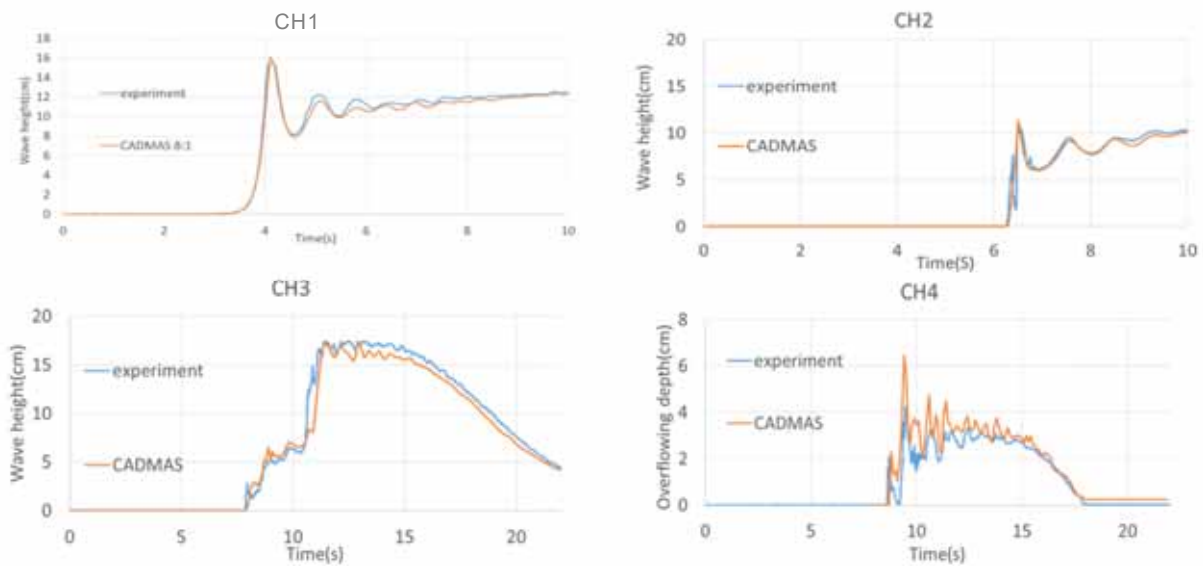


図3 数値モデルと実験による水路各点での水面変動の比較

さいことから、津波の陸上氾濫に対するこれら堤防や砂丘の効果が相対的に大きい。したがって、沿岸地域の被害予測を行うためには、これらの人工構造物や自然地形による海岸の起伏の効果を適切に評価する必要がある。従来の広域津波氾濫計算において計算格子サイズ以下の堤防や地形の効果は、経験的な越流公式を用いた簡易の評価法が用いられている。前年度までの海岸堤防越流に関する研究の結果は、従来の評価法が後背地への氾濫を過小評価することを示唆しており、より高精度な評価のためには越流公式を改良することが求められる。津波が越流する際の堤防周辺の流体場の特性を明らかにするため、前年度に続いて水理模型実験を実施するとともに、より詳細な情報を得るため数値流体モデルによる再現計算を行った。

これまでに実施した実験によって海岸堤防の断面形状と越流量の関係は明らかになっている。しかしながら、堤防周辺の流体運動がどのように大域量に影響を及ぼすかについては依然として不明な点が多い。堤防周辺の複雑な流れ場を直接計測するには困難な面が多いため、ここでは数値流体モデルによる再現計算を念頭においてその検証データを得ることを主目的として水理模型実験を行った。実験は、これまでに得られた結果を踏まえて、堤防条件および入射波条件の双方についてより広範な条件で実施した。6通りの断面形状（法面勾配）の異なる堤防模型に対して、3通りの波高の異なる段波を堤防に作用させ、計18ケースの越流実験を行った。実験の縮尺は1/50とし、いずれの堤防模型の高さも12 cmに設定した。実験では堤防周辺の水位変動を中心に波高計による計測を行うとともに、堤防岸側に設けた越流枡により堤防を越流した水量を求めた（図1参照）。段波によって生じる堤防越流は、初期の非定常性の強い越流状態から準定常の越流状態へと遷移する。以下では、前者を非定常越流、後者を準定常越流と呼ぶこととする（図2参照）。

堤防周辺の詳細な流れ場を明らかにするため、Navier-Stokes方程式に基づく数値計算モデルであるCADMAS-SURFを用いて実験での堤防越流を再現した。このモデルではVOF法によって自由表面の複雑な変形問題を扱うことができる。数値計算において堤防形状を忠実に表現するため計算格子のサイズは水平方向に5 mm、鉛直方向に2.5 mmと非常に細かく設定するとともに、POROUSグリッドを用いて堤防斜面を表した。入射条件は

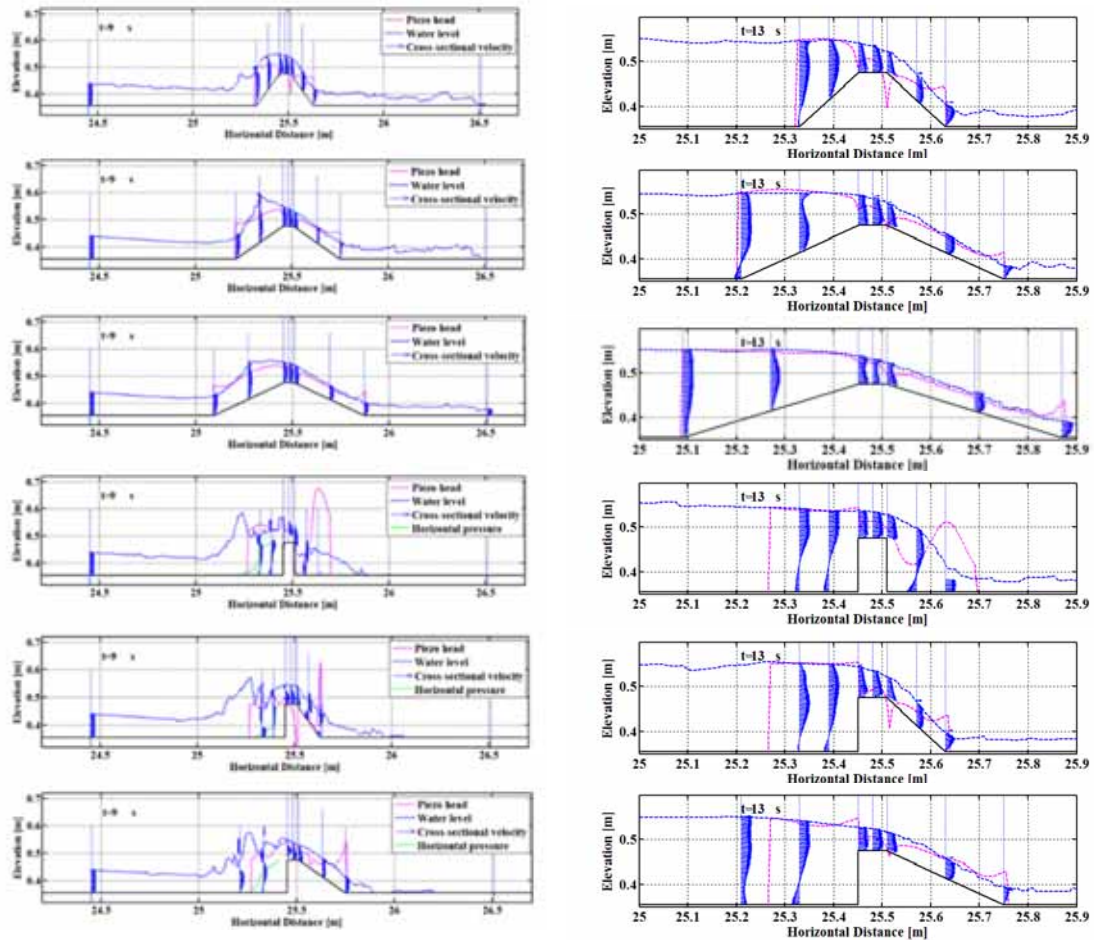


図 4 数値モデルによる様々な堤防周辺の流れ場 (左：非定常越流、右：準定常越流状態)

実験と同様に計算領域端部に貯水槽を設定して段波を生成させた。図 3 には、各点での水位変化について数値計算と実験の比較を行った結果を例として示している。各実験ケースについて比較を行ったところ、この結果のように段波が堤防越流に至るまでの一連の過程を数値計算によって良好に再現することができた。したがって、数値計算結果をもとに堤防周辺の流れ場の様子を調べることにした。

図 4 は数値モデルによって求められた断面形状の異なる堤防(全 6 ケース)まわりの流れ場を示している。左側には初期の非定常越流時、右側には準定常越流時の結果を表しており、いずれも段波を入射してから同一時刻の結果である。津波は左側から来襲して堤防を越流しており、各図中には堤防周りの水面形状、流速分布および圧力分布(ピエゾ水頭)が表示されている。初期の非定常越流時には堤防形状によって越流量に大きな違いを生じていることが分かる。表法面が急なほど初期の越流を防ぐ効果が高く、前面の流れ場は強い反射によって乱れた状態となっていることが分かる。非定常越流については、裏法面勾配による違いは比較的小さく、表法面勾配が後背地への氾濫流の到達時間や越流量に大きな違いをもたらす。堤防越流が準定常状態に達すると堤防周辺の流れ場は表・裏法面勾配によって複雑に変化する。表法面が急な場合には堤防上流側の底部に戻り流れが発生して

おり、定常的に渦が形成されている様子が読み取れる。堤防天端上の流速は底面に向かって大きくなり、裏法面勾配が急になるほどこの傾向は顕著になる。ピンク色の線で示したピエゾ水頭は、水面に一致する場合には圧力が静水圧になっていることを表し、水面より低い場合には動圧によって圧力低下を生じていることを示す。堤防上では流線の曲がりによる遠心力によって圧力が低下するが、裏法面勾配が急になるほどこの圧力低下が大きくなって上述のような流速分布を生じる。しかしながら、裏法面勾配がある一定以上になると越流水は堤防から剥離して自由落下するようになるため、直立堤防の場合には堤防上での圧力低下は顕著に見られない。このように堤防越流特性は、渦の発生や流線の曲がりによる遠心力の効果を通して堤防形状によって複雑に変化しており、数値モデルを適用することで素過程に関する定量的なデータを得ることができた。

以上で得られた知見をもとに、広域津波氾濫計算における堤防越流量評価法の改良を試みた。従来、津波氾濫計算において堤防の効果を検討する際には、本間の越流公式²⁾が広く用いられている。これは上流側の越流水深から越流量を算定する式であり、越流量を越流水深の $3/2$ 乗に比例する形で表し、諸々の仮定による誤差を補正するため越流係数と呼ばれる補正係数を乗じている。津波氾濫計算では一般に **0.35** 程度の値が補正係数として用いられているが、この値は遠心力の効果が無視できるような幅広堤防を前提としたものである。したがって、遠心力の効果が生じる場合には、過小評価となることが前年度の研究によって示されている。また、本間の越流公式は上流側の水位が堤防高を超えた段階で、越流水深が正となって初めて適用できるものであるため、初期の非定常時の越流を考慮することができない。以上の問題点を踏まえて、まず本間の越流公式を堤防への接近流速の効果を含んだ形として水頭による表記に置き換えた。すなわち、上流側の水位が堤防より低い場合でも流速によるエネルギーを考慮した水頭が堤防高さを上回る場合には越流量を評価できる。この変更によって、図 4 の左側に示したような非定常越流の状況においても越流量の算定が可能になる。さらに、定常越流時の越流量評価精度を向上するために堤防形状と遠心力の関係を定式化することによって、越流係数を堤防形状に関するパラメータの関数として表した。図 5 には数値モデルによる越流量の時間変化と、その上流側の水理量から越流公式によって評価した越流量の比較の一例を示している。本間の越流公式では初期の越流量が評価されず、準定常時の越流量が過小となっているのに対して、改良した新越流公式ではより精度良く数値モデルによる結果を表現していることが分かる。

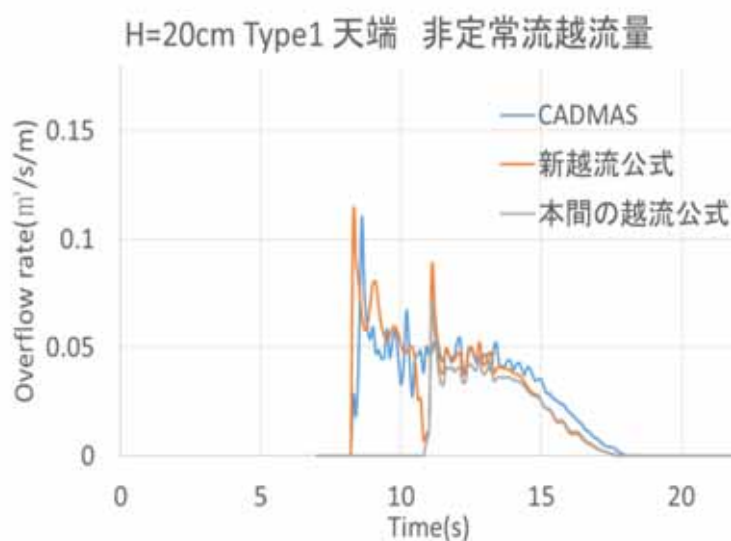


図 5 CADMAS-SURF と越流公式による堤防越流量の比較

(c) 結論ならびに今後の課題

広域津波氾濫計算における堤防効果の再現精度向上を目的として、水理実験および数値流体モデルにより津波が様々な勾配を有する堤防を越流する際の水理特性を調べた。堤防の表法面勾配は初期の非定常越流量に大きく影響しており、勾配が急になるほど越流低減効果が大きい。また、準定常越流状態においても表法面勾配が急になると堤防前面に戻り流れが生じて越流量が低減される。一方、堤防の裏法面勾配は堤防上での遠心力による圧力低下を通して越流量に影響を及ぼす。勾配が急になるほどこの効果は顕著になるが、ある一定以上になると流線が堤防から剥離するため越流特性に影響しなくなる。以上を踏まえて、既往の越流公式を非定常越流量の評価が可能な形にした上で、堤防形状の効果を組み込んだ。数値モデルによる結果と比較した結果、これらの改良による越流量評価精度の改善が確認できた。しかしながら、非定常時の流体加速度の効果や定常時に堤防前面で発達する渦の効果など、十分に考慮できなかった効果が残されており、今後のさらなる精度向上に向けた課題となった。

(d) 引用文献

- 1) 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会：数値波動水路（CADMAS-SURF）の研究・開発，沿岸開発技術ライブラリー，No.12，2001.
- 2) 本間仁：低溢流堰堤の越流係数，土木学会誌，Vol. 26，No.，pp. 635-645，1940.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
池澤広貴・ 下園武範	非静水圧を考慮した鉛直積分型堤防越流モデルの開発	土木学会論文集 B2 ,71(2), 7-12	平成 27 年 11 月

佐藤慎司			
Shinji Sato, Kanto Nishiguchi, Yusuke Yamanaka	Tsunami sediment analysis based on luminescence measurement (口頭発表)	Coastal Sediments 2015, San Diego,	平成 27 年 5 月

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 28 年度業務計画案

これまでの堤防越流に関する基礎実験から得られた知見をもとに、堤防を含む複雑な平面地形を伝播・遡上する津波を高精度に再現するモデルの開発を行う。また、平面造波水槽に典型的な海岸地形を構築し、津波の平面挙動を計測することで開発したモデルの検証および改良を行う。

