越流を伴う巨大津波に対する 海岸堤防の減災機能の検証

田島 芳満¹・舟竹 祥太郎²・佐藤 慎司³

¹正会員 東京大学大学院准教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail: yoshitaji@coastal.t.u-tokyo.ac.jp

²新日鉄住金エンジニアリング株式会社 海洋事業部 (〒141-8604 東京都品川区大崎1-5-1)
E-mail: funatake.shohtaroh@eng.nssmc.com

³フェロー 東京大学大学院教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail: sato@civil.t.u-tokyo.ac.jp

2011年東北地方太平洋沖地震津波による甚大な被害を受け、ハードとソフトを組み合わせた減災機能の高い地域づくりの重要性が提唱されている。設計天端高を超える規模の津波に対し、海岸堤防には損壊を最小限にとどめ、可能な限り氾濫流を減衰させる粘り強い機能が求められており、越流を伴う津波に対する減災効果の定量的評価が極めて重要となる。本研究では、2011年津波による宮城県仙南地域と福島県勿来地域における被災事例を対象とし、調査結果および数値氾濫解析を通じて海岸堤防による減災機能の定量的評価を試みた。その結果、減災効果は津波に対する堤防の相対高さや周辺地形に依存し、条件によってはその効果が著しく低下すること、堤防高が不均一であると背後域の減災レベルが低下する危険があることなどの有用な示唆が得られた。

Key Words : tsunami, seawall, inundation, overflow, disaster mitigation

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震津波による沿岸部での津波痕跡高¹⁾は海岸堤防の天端高を大幅に上回り、堤防を越えて流入した津波は甚大な被害を引き起した。氾濫域に限らず、特に岩手、宮城、福島の各県では、全延長300kmの海岸堤防のうち、実に190kmが全壊・半壊した²⁾。

この様な設計潮位をはるかに超えた巨大津波による被災を経験し、中央防災会議では、最大クラスと頻度の高い津波の2つのレベルの津波を想定した、ハードとソフトを組み合わせた減災機能の高い地域づくりの重要性が提言された³⁾。この中で、海岸堤防には設計条件を超える規模の津波に対してもその損壊を最小限にとどめ、氾濫域へと流入する津波をできる限り減衰させる粘り強さを持つことが期待されており、海岸堤防による減災機能の定量的な推定は、最適な減災機能を有する地域づくりを設計・実現するために極めて重要である。

2011年東北地方太平洋沖地震津波に対する海岸構造物の被災状況やその減災効果に関して、既にいくつかの調査結果が報告されている(たとえば佐藤ら⁴⁾、平石ら⁵⁾、柴山ら⁶⁾)。この中で、佐藤ら⁴⁾は、福島県いわき市勿来

海岸を対象として堤防天端高、浸水高などの計測値や、ヒアリング調査結果に基づく分析を行い、来襲津波高さがほぼ同程度であったと考えられる隣接した2地域においても、被災後の防潮堤天端高がTP+6.0mだった大島地区と、TP+4.2mだった岩間地区では、背後域の被災程度が大きく異なっていたことを指摘している。また、平石ら⁵⁾、柴山ら⁶⁾も宮城県以南における現地調査に基づく津波被災状況を整理しているが、氾濫津波の詳細挙動を含めた定量的な議論はなされていない。

本研究では、越流を伴う巨大津波に対する海岸堤防の減災効果に着目し、数値解析と実測データに基づき、その定量的な評価・検証を行うことを目的とする。具体的には、防潮堤の有無や天端高、来襲する津波高さを様々な変化させた氾濫解析をそれぞれ実施し、被害の大きさと相関が深いと考えられる流体力などの影響因子を比較・検証する。

対象地域としては、福島県勿来海岸と宮城県仙南地域を選定した(図-1)。勿来海岸は既に述べた不均一な高さの堤防が設置されており、堤防高さの不均一性による減災効果への影響についても定量的な評価を試みる。仙南地域は地形勾配1000分の1程度の非常に平坦な地形上

で氾濫域が広大に及んでおり、勿来海岸とは地形特性が大きく異なる。以上の比較的急峻な地形上に位置する勿来地域、および、平野部の地形を代表する仙南地域の二つの特徴的な対象地域における計算結果を比較することにより、周辺地形等の違いも勘案した、より一般的な海岸堤防の減災効果の特性解明を試みる。

2. 津波氾濫解析の概要

津波の伝播・氾濫解析では、広領域計算と狭領域計算を組み合わせた。広領域では線形長波方程式に基づき波源から沿岸域までの伝播・変形計算を、狭領域では非線形長波方程式に基づき、沿岸部沖合から氾濫域までの津波の伝播・変形・遡上計算を行った。通常はスケールの異なる複数の計算領域における計算を境界線上で接続し、時々刻々の計算結果を相互にフィードバックしながら津波の伝播・変形計算を行うのが一般的であるが、本研究では、異なる防潮堤条件や津波高さにおける氾濫域の被災要因の定量的比較に焦点を当てており、対象領域における最初の数波の挙動に着目し、その条件を変えながら多数の氾濫解析を実施し比較するため、広領域の解析は独立して一度だけ行い、その結果から狭領域計算の沖側境界線上での水位変動条件を抽出することとした。以下、広領域および狭領域計算の概要とその検証結果を示す。

(1) 広領域計算

広領域の計算領域は、推定される波源を十分に含む東日本およびその海域全体を計算領域とし、波源から海岸

線までの津波の伝播を線形長波理論に基づき計算した。波源は、Fujii & Satake ver.4.2⁷⁾の断層パラメタに基づき、Okada⁸⁾の計算式を用いて初期水面形を与え、計算格子は球面座標系に基づき格子間隔を1/200度、計算時間間隔を0.1秒、計算期間を地震発生から180分間とした。また、地形データは日本海洋データセンターによるJEGG-500を用いた。

広領域計算の精度検証は、ナウファスGPS波浪計データとの比較により行った。その結果を図-1に示す。GPS波浪計の設置位置が左図に黒点で示されており、右図には、地震発生後の計測波形を青色、計算された波形を緑色で示している。図より、計算による一波目の到達時間は実測値に比べて北へ行くほど遅れる傾向がみられる。たとえば岩手北部（一番上のグラフ）では、一波目の到達時間が5~10分程度遅れている。この原因は、波源モデルの構築において北部のデータが比較的少なかったことなどが考えられる。また、福島南部（一番下のグラフ）や、宮城北部（下から三番目のグラフ）に関しては、地震発生後一時間以降の水位変動を過大評価している。これは広域計算が減衰を考慮していない線形長波モデルに基づいているためであると考えられる。

以上のように、地震発生後約一時間以降の波形や第一波到達時間、ピーク水位など、必ずしも十分な再現精度が得られているとは言えない部分もあるものの、全体としての再現性はおおむね良好である。また本研究では、仙南および勿来地域における海岸堤防による氾濫域での津波の減衰効果に着目しており、個々の地点における到達時間は結果に大きな影響は及ぼさないと考えられるこ

図-1 検証対象領域および水位変動データ比較地点位置(左)および、水位時間変化の比較(右)

と、さらに狭領域計算で沖波境界として与える水面波形では、広領域で計算された波形に係数を乗じて、津波高さと堤防高さを変化させた複数ケースの計算を行い比較検証することなども勘案し、広領域の計算ではこれ以上のモデルのチューニングは行わなかった。

(2) 狭領域氾濫計算

狭領域計算では、図-1に示した仙南および勿来地点を対象に、非線形長波方程式に基づき陸域の遡上を含む津波の伝播・変形解析を行った。狭領域計算の境界入射波には広領域計算結果から抽出した境界線上の水位の時系列データをそのまま利用し、計算格子は平面直角座標に基づく格子間隔20mの正方格子とし、計算時間間隔は0.05秒、計算期間は地震発生から180分間とした。遡上先端部の移動境界における限界水深は10cmとし、遡上時における先端境界上での流量は平山・平石⁹⁾と同様に越流公式に基づき与えた。

陸上部における流れの抵抗則については、流速の自乗に比例する一般的な摩擦抵抗則に基づき、その無次元抵抗係数は田畑や草原等で0.01、居住区などの建造物が多く存在する格子では福岡ら¹⁰⁾の水理模型実験結果に従い0.1とした。また、地形データは、陸域に関しては国土交通省によるLP (Laser Profiler) データを、海域に関しては、日本水路協会による海底地形デジタルデータ (M7000シリーズ)をそれぞれ用い、両者を水際線位置で接続して作成した。

また海岸堤防については、国土交通省による堤防位置と高さの情報を正方格子データ上に合わせ、直近の一格子で実際の堤防高さを表現した。数値解析はスタガードメッシュに基づき、水位は底面標高を定義した座標上で、流速は水位や標高と半メッシュずらした場所で定義した。流速の算定地点における地面標高は、その両側の格子点上の標高を線形内挿して算定したが、堤防境界上

のみでは標高が不連続に変化するため内挿せず、堤防高さをそのまま与えた。すなわち、堤防の境界線位置は格子点上ではなく、流速の算定位置で定めている。以上より堤防は格子幅のスケールで表現されるため摩擦抵抗係数には堤防の断面形状による損失は考慮せず、平地と同様にその値を0.01として与え、堤防境界上で急激に水深が拡大する流れに伴う損失をRanasingheら¹¹⁾と同様の運動量損失項を導入して与えた。格子間隔20mに比べて幅の小さい堤防に対しては堤防の実断面形状が正しく再現されず、堤防近傍の水面形の精度には問題があると考えられる。しかしながら、堤防部における摩擦係数の大きさを10倍のオーダーで変化させた計算においても、氾濫域の広さや後に比較する堤防近傍を除く氾濫域での流体力などには大きな差は見られなかった。堤防による氾濫流の減衰には、堤防の断面形状に伴う局所的な損失よりも、本研究で導入している大きなスケールでの越流に伴う急激な水深の拡大による運動量損失の方が支配的であったと考えられる。

狭領域計算の精度検証として、合同調査グループによる津波痕跡高¹⁾、および国土地理院による浸水範囲概況図¹²⁾に基づく浸水範囲と計算結果とをそれぞれ比較した。図-2および図-3はそれぞれ勿来地域、仙南地域の比較結果であり、左から(a)氾濫域周辺の地盤標高、(b)計算による浸水高(最高水位)分布と実際の浸水域境界(赤実線)の比較、(c)実測津波痕跡高と計算浸水高の比較である。津波痕跡高の計測地点は(b)にそれぞれ計算値との誤差に応じて異なる記号で示し、記号は実測値と30%以上かつ50cm以上の誤差があった地点は四角とし、計算値が過大だった場合は赤色、過小だった場合は青色とした。また再現性が良好だったその他の地点については丸で示した。また図-2(a)、3(a)に示した陸上部の領域は狭領域計算におけるそれと一致しており、水域における側方境界は線形長波の透過境界、遡上域では閉境界とした。

図-2 勿来地域における(a)地形(左, T.P. 10m以下), (b)計算浸水高の平面分布((a)の青枠内)と実測浸水域(赤実線)の比較および痕跡高計測地点。四角は誤差30%以上(赤:過大, 青:過小), 丸は30%未満, (c)実測痕跡高と計算浸水高の比較。

図-3 仙南地域における(a)地形(左, TP.10m以下), (b)計算浸水高の平面分布と実測浸水域(赤実線)の比較および痕跡高計測地点。四角は誤差30%以上(赤:過大, 青:過小), 丸は誤差30%未満, (c)実測痕跡高と計算浸水高の比較。

図-2の勿来地域での比較を見ると、浸水域、最高浸水位ともに妥当な再現性が得られていると考えられるが、全体的に南側で浸水域がやや過大に計算されている。浸水高についても南側でやや過大評価となる地点が見られたため、計算上の来襲波向が実際よりもやや北寄りだったことが推察される。また図-3の仙南地域においても、浸水域および浸水高ともに高い再現性が得られた。ただし、阿武隈川北側の領域については、図に見られるように他の遡上域よりも高い浸水高が計算され、実測値の再現性も良くなかった。これは陸上部での側方境界を鉛直壁境界としており、河口から北向きに蛇行する阿武隈川左岸堤防と側方境界に挟まれた狭い領域に氾濫流が集中したためであると考えられる。これは実際の現象とは異なるため、本研究では以後の分析における比較対象領域から除外した。また、図-3(b)を見ると浸水高の計算値が実測値に比べて過大であった赤い四角は、海岸線から離れた領域で多く見られた。これは、氾濫域における摩擦係数が実際よりも小さかったことや、計算では地盤面を不透過条件で計算していること、下水等による排水効果を考慮していないことなどが原因として考えられるが、一方で、高い再現性を示した丸も同じ領域に点在していることなども勘案し、本研究の計算方法は、以後の相対的な比較に焦点を当てた分析には十分な精度を有しているものと判断した。

3. 海岸堤防による減災効果の検証

ここでは妥当性を検証した氾濫解析モデルを用いて、勿来および仙南地域を対象に津波や堤防高さを変えた数

図-4 勿来地域の衛星画像(google earth, 画像取得日: 2011年3月18日)と防潮堤位置(図-2(a)の赤枠内)

値解析を実施し、その減災効果への影響を検証する。ただし、再現計算と同様に数値解析では堤防の破壊や下水や排水路等による排水効果は考慮していない。

(1) 福島県勿来海岸

既に述べたように、勿来海岸では堤防高さが不連続となる地点が存在し、相対的に低い堤防の背後では甚大な氾濫被害があったことが報告されている⁴⁾。そこで本研究では、まず図-4で示した海岸堤防AおよびBの堤防高さをそれぞれ変えた組み合わせた5ケース(表-1)に対し、再現計算と同じ津波が来襲した場合の氾濫計算を行った。表中の堤防AおよびBの高さは標高(TP.)であり、それぞれの配置は図-4に示した。このうちケース2(現況)

表-1 勿来海岸における氾濫計算条件とその結果

case	堤防高(m)		浸水域(堤内地)		被災域(堤内地)	
	A	B	面積(km ²)	低減率(%)	面積(km ²)	低減率(%)
1	無	無	1.57	0	0.25	0
2	4.2	6.0	1.44	9	0.20	20
3	6.0	6.0	0.64	59	0.09	62
4	5.1	5.1	1.22	22	0.14	44
5	4.2	4.2	1.49	5	0.20	19

と4では、海岸堤防の平均高さは同等であり、両者の違いは不均一な堤防高による減衰効果への影響を表していると考えられる。

また、氾濫域における被害度を表す指標として、本研究では浸水域面積に加え、より直接的な「被災域」を以下に示すように定義し、減災効果の比較を行った。ここで羽鳥¹³⁾によれば、水深 h で流速 U の流れが物体に作用するときの流体力と同等の指標 $X=U^2h$ と家屋損壊率の間には高い相関があり、 X が $5\sim9(\text{m}^3/\text{s}^2)$ より大きいと家屋の破壊率が50%を超える。また田島ら¹⁴⁾もハリケーン・カトリナにおけるメキシコ湾岸での家屋の損壊率が、流速に波動流速振幅を用いた指標 X と高い相関を持つことを確認している。また越村ら¹⁵⁾は、2004年スマトラ島沖地震津波によるBanda Aceh市街地での家屋群の被害率と、数値解析に基づく浸水深や流速などのいくつかの被害要因との関係をそれぞれ回帰式(被害関数)で表して比較し、指標 X に水の密度と抗力係数($C_D=1.0$ の一定値)を乗じて算定した抗力の最大値と家屋の被害率との間には高い相関があることを示している。このようにして地域ごとに得られた被害関数と、実際の家屋群の密度分布を用いれば、様々なシナリオにおける数値解析結果に基づく氾濫域全域での被害家屋数を算定して比較することも可能であると考えられるが、本研究では、家屋の被害要因である流体力の水平分布の変化を直接的に把握することを目的としているため、 X の最大値 $X_{\max}$ が $5(\text{m}^3/\text{s}^2)$ を上回った領域を「被災域」として定義し、その面積の変化を比較することとした。

計算結果の一例として、実際の堤防高を再現したケース2における $X_{\max}$ の分布を図-5に示す。図中の破線は $X_{\max}=5(\text{m}^3/\text{s}^2)$ の境界位置を示している。6.0mの海岸堤防Bの背後域に位置する大島地区では $X_{\max}$ の値が $0\sim5(\text{m}^3/\text{s}^2)$ であるのに対し、4.2mの堤防Aの背後域にあたる岩間地区では、 $X_{\max}$ が $5(\text{m}^3/\text{s}^2)$ 以上となる領域が広がっている。この結果は佐藤ら⁴⁾の現地調査結果による両地区での被害の対比と良く符合している。

表-1には、氾濫解析を実施した5ケースに対する浸水域および被災域の面積と、堤防を設置しなかったケース1に対するそれぞれの面積の低減率を示した。浸水域お

よび被災域の海岸堤防による低減率に着目すると、総じて浸水域よりも被災域の低減率の方が大きく、海岸堤防による減災効果は浸水域よりも家屋損壊率などにより顕著に表れることが分かる。またケース2(現況)と5を比較すると、両者の浸水域および被災域の低減率はそれぞれ9%と5%、20%と19%となっており、特に被災域面積の低減率では堤防Aの天端高を6.0mに嵩上することによる減災効果は認められなかった。その一方で、堤防高さの平均値が同等であるケース2とケース4の比較では、堤防高さを一律に5.1mとしたケース4における浸水域や被災域の低減率は、ケース2におけるそれらの約2倍となった。

不連続な堤防高さによる減災効果への影響をさらに詳しく検証するために、図-6にはケース2およびケース5における指標 $X_{\max}$ の差分値の平面分布を、図-7には堤防Aの背後(岩間地区)周辺への流入流速がピークに達した地震発生から55分後の時点における水位と流速ベクトルを、図-8にはケース2および5における最大水位の差分値をそれぞれ図示した。ここで差分値は、ケース2の値からケース5の値を差し引いたものであり、赤で示した正の値は堤防Aの天端高さを4.2mから6.0mにしたことによって、 X あるいは最高水位が増加したことを、青で示した負の領域は減少したことをそれぞれ表している。

まず、6.0mの海岸堤防Bの背後に位置していた大島地区に着目すると、負の値を示す青い領域が広がっており、堤防高を6.0mに上げたことにより $X_{\max}$ の値が減少したことが分かる。一方で、4.2mの堤防Aの背後に位置する岩間地区を見ると、正の値を示す赤い領域が広がっている。堤防Aの標高は両ケースともに4.2mであるが、堤防Bの天端高を6.0mにしたことにより堤防Aの背後で $X_{\max}$ が増加したことを示している。以上より、堤防Bを6.0mにすることにより $X_{\max}$ が増加した領域も存在し、結果として両者が相殺したことにより、 $X_{\max}=5(\text{m}^3/\text{s}^2)$ で判定した被災域面積は、ケース2と5ではほぼ同程度となった。

次に図-7を見ると、沖から伝播してきた津波が、堤防Bを迂回して堤防Aとの接続部付近に集中し、そこから陸域へと侵入していく様子が見られ、堤防Bの天端高を6.0mとすることによって堤防B上の越流量が減少し、堤防Aからの流入量が増加したことが分かる。同様にして図-8に着目すると、堤防Bの天端高を6.0mにしたことにより、その海側の水位が特に上昇していることが分かる。堤防Aの周辺についても陸海両側で水位の上昇が見られるものの、堤防B前面に比べると上昇量は小さく、堤防BからAに向けて下る水面勾配が大きくなり、結果として堤防Aの方向への流れの集中を促進したことが分かる。

以上の分析結果より、高さが不連続な高さの堤防に対して巨大津波が来襲して越流する場合、相対的に高い堤防の背後域では局所的に顕著な減災効果がみられるものの、その一方で、低い堤防への流れの集中も引き起こ

図-5 流体力指標 $X_{\max}$ の平面分布(case 2) 図-6 $X_{\max}$ の差分値の平面分布(case2 - case5)

図-7 地震発生 55 分後の水位と流速ベクトルの分布(case 2)

図-8 最高水位の差分値の平面分布(case2 - case5)

され、その背後では被害を増加させる危険があることが確認できた。

なお、高さが不連続な海岸堤防が設置された経緯は不明であるが、当海岸の保全状況から以下のように推察される。勿来地区には5mを超える規模の津波が来襲した記録は残されていないため、海岸堤防の高さは、波浪による打ち上げ高さに基づいて決定されている。海岸堤防の高さは、当初約3m程度であったが、1960年代後半から進行した海岸侵食の影響により、必要天端高が見直され、堤防のかさ上げや更新工事により、現在はTP+5.5~6.0mの高さの海岸堤防が建設されている。これに加えて、侵食の激しい鮫川河口より南部の海岸では、侵食対策として、離岸堤や潜堤群が設置されている。一方、鮫川河口より北部の海岸では、以前は、鮫川河道が北部へと湾曲して海岸北端部に河口が位置し、洪水時には河道海側の砂州が大きく変形することが多かったが、1957年に発電所が建設され、その後1982年には、温排水放流のため、現在の鮫川河口部北岸に仕切り堤が建設さ

れ、河口が現在の位置に固定されることとなった（例えば、阿部ら¹⁰⁾）。これにより、北部の海岸の前面には、以前の河道である水域を挟んでバリア砂州が存在することとなり、鮫川の洪水時においても、河口から離れた北部領域では洪水流が砂州へ及ぼす影響は少なく、ほぼ固定化した砂州が存在する環境となった。バリア砂州が存在する条件では、波浪の堤防への打ち上げ高さは小さくなるため、河口から離れた北部海岸では、堤防をかさ上げる必要がないと判断されたものと考えられる。

以上より、沿岸部の土地利用形態や標高分布、高波や高潮、津波の局所集中特性等を勘案し、一部の海岸堤防をかさ上げすることは有効な方策のひとつとなる可能性はあるが、巨大津波の来襲を想定した本研究の分析では、堤防高さの不連続性は、低い堤防区間における被害を拡大する危険があることが明らかとなった。堤防を越流する規模の津波に対する減災計画には、一連の海岸における堤防高さの不均一性にも注意することが重要であると考えられる。

図-9 氾濫解析結果(堤防あり) : (a) 浸水高, (b) 浸水高の堤防なしの結果との差分値, (c) 地盤標高, (d) $X_{\max}$, (e) $X_{\max}$ の堤防なしの結果との差分値.

(2) 宮城県仙南地域

宮城県仙南地域では、海岸堤防の高さは実際の条件と合わせて標高5mで一樣とし、堤防を設置しなかった場合や来襲する津波の高さを変化させながら、海岸堤防の減災効果を検証した。堤防を設置しなかった条件(堤防なし)における堤防位置の地盤高は、堤防前後の値から直線内挿して与えた。堤防を設置した場合(堤防あり)に対する計算結果を図-9に整理する。ここで図-9(a)は、氾濫域における浸水高の平面分布、図-9(b)は、浸水高の堤防なしの結果との差、図-9(c)は、氾濫域の地盤標高(TP+5mまでを图示)、図-9(d)は、前述した $X_{\max}$ 、図-9(e)は、堤防あり・なし時の $X_{\max}$ の差分値の平面分布である。

a) 浸水高および損壊度指標の比較

まず、図-9(a)および図-9(b)の浸水高に着目する。図-9(a)に見られるように、津波浸水高は堤防(海岸線)周辺で最大値をとり、背後の広大な氾濫域では海岸線から離れると急激に低下しており、調査結果⁹⁾に見られる特徴とよく一致している。また、特に阿武隈川周辺で顕著に見られた常磐自動車道による氾濫津波の低減効果も妥当に再現されている。次に、海岸堤防による浸水高の低減効果を示す図-9(b)に着目すると、堤防から1~2kmの沿岸部では、堤防により30~50cm程度の浸水深の低減効果が見られたのに対し、そのさらに陸上側では、逆に50~70cm程度の増加傾向を示しており、海岸堤防により浸水高が上昇している。

図-10 地点A~D(図-9(a))における水位の時間変化

ここで見られた海岸堤防による逆転現象を詳しく検証するために、図-9(a)に示したA~Dの4地点における時々刻々の計算水位を抽出し、その時間波形を図-10に比較した。ここで地点A~Dは、沿岸(南北)方向の変化が少なく岸沖(東西)方向の一次元的な遡上が卓越的であったと想定される場所として、鳥の海から約2.5km南に離れた岸沖方向の直線上に配置した。各地点の海岸線からの距離は、AからDの順にそれぞれ、0.2km, 1km, 2.8km, 3.2kmである。図中、実線は海岸堤防を設置しなかった場合、破線は設置した場合の水面波形を表しており、1分毎の計算水位(T.P. 基準)をプロットした。各地点とも浸水開始直前の標高(浸水深ゼロ)からプロットを開始し

ている。図に見られるように、地点AおよびBでは海岸堤防による正の低減効果が見られ、CおよびDでは負の効果が見られる。

堤防から約200mの場所に位置するAでは、浸水開始時刻が堤防ありのケースの方がなしのケースに比べて2分程度遅く、またピークの値も70cm程度低くなっており、確かに海岸堤防の効果が見られる。しかしながら、次のピークが来襲するまでの引き波の時間帯(地震発生から70~100分)では、堤防なしの条件の方が水位の下降速度が大きく、結果として第一波引き波時の極小水位は、堤防なしのケースの方が11cm程度低くなった。同様にB~D点においても、堤防を設置することによって浸水開始時間は遅くなり、ピークに達するまでの水位の上昇速度も低減されるものの、同時にピーク後の水位の下降速度がさらに低減され、結果として第3ピーク以後の地震発生から140分後には、4地点全てで堤防ありの条件の方が水位が高くなった、すなわち、氾濫域に残存する水量が大きくなった。ただし、AやBでは、ピーク水位の方が卓越するため、最高水位の比較では堤防なしの方が低くなっている。一方で海岸から遠いCやDでは、ピーク水位の立ち上がりが比較的緩やかであり、最高水位も残存量による高い水位により規定されることが分かった。

次に図-9(d)および(e)に示した流体力を表す指標 $X_{\max}$ の平面分布に着目すると、海岸線から1~2kmの地域までは $5(\text{m}^3/\text{s}^2)$ 以上の大きな値を示しており、実際の家屋の損壊率の高さと符合する。また図-9(e)に示した堤防あり、なしの条件における $X_{\max}$ の差分値を見ると、ほぼ全域で負の値を示す青い領域が広がっており、浸水高とは異なり指標 X については、海岸堤防による正の低減効果がほぼ全域で期待できることが分かる。これは、浸水高で負の低減効果が見られた内陸部では、浸水がゆっくりと起きており、浸水深が大きくても流速は小さかったことが原

因として考えられる。

b) 津波に対する海岸堤防の相対高さと減災効果

以上の氾濫解析結果の比較から、海岸堤防による減災機能は、浸水域よりも流体力に相当する指標 X でより高い効果が見られることが分かった。また、減災効果の高さは、堤防に対する相対的な津波の規模に大きな影響を受けることも推察された。ここでは、津波に対する海岸堤防の相対高さや減災効果との関係を調べるため、来襲する津波の高さのみを変えた氾濫解析を実施し、氾濫域への流入量や浸水面積、 $X_{\max} > 5(\text{m}^3/\text{s}^2)$ の被災域の面積などを抽出して比較した。ここで狭領域氾濫解析における入射津波の波形は、入射させる水位変動データに一律に係数を乗じることで津波高さのみを変えた。

まず、浸水域に直接的な影響を及ぼすと考えられる堤防からの流入量、流出量、および残水量を、異なる津波高さに対して比較した(図-11)。図中の津波高さは、堤防前面におけるピーク水位、流入量および流出量は堤防境界における岸向きおよび沖向き流量の全計算期間に対する時間積分値、残水量は流入量および流出量の差で求められる正味の流入量、すなわち氾濫域内に残された全水量である。ただし、本計算では下水や排水路からの排水は考慮しておらず、残水量についてはやや過大評価している可能性がある。また計算した全流量は、計算領域における海岸堤防の全延長で除すことにより、堤防延長方向の単位幅あたりの流量に換算して示した。

図より、津波高さと各流量には単調増加の傾向が見られるものの、その増加率は異なる。特に堤防ありの条件では津波高さに伴う流入量の増加率に比べて流出量のそれは非常に小さく、結果として残水量の増加率が大きくなる。これに対して、堤防なしの条件では流入量の増加に伴い流出量も大きく増加しており、結果として残水量の増加率が比較的小さくなっている。このため、残水量

図-11 仙南地域における異なる津波高さに対する氾濫域への流入量、流出量、残水量の比較

図-12 仙南地域における異なる津波高さに対する氾濫域における浸水域および被災域の比較

を比較すると、津波の相対高さの増大に伴い堤防ありとなしの条件における残水量が逆転することが分かった。

次に同じ津波高さに対して、浸水域および被災域の面積を算出し、堤防延長で除して単位幅あたりの面積を求めた(図-12)。すなわち、単位幅あたりの浸水面積は、浸水距離の平均値とほぼ一致する。図に見られるように、それぞれの面積は津波高さに伴いほぼ線形に増加する傾向が見られるが、特に浸水域ではその傾きが堤防ありとなしでは異なり、特に津波高さの大きい条件では堤防なしの方が浸水域が小さくなる逆転現象が見られる。一方、被災域の面積に着目すると、津波高さに対する堤防ありとなしの条件における被災面積の増加率はほぼ同程度で、浸水面積に見られたような逆転現象は本研究の分析の範囲内では見られなかった。しかしながら、津波が高くなるにつれて海岸堤防による被災面積の低減率は大きく低下し、たとえば津波高さ11.7mの条件では、被災面積の低減率が4%弱となった。

4. 相対堤防高に基づく減災機能の評価

ここでは、より一般的な海岸堤防の減災機能特性を明らかにすることを目的として、条件の異なる勿来地域および仙南地域の氾濫解析結果を比較した。海岸堤防による氾濫流の相対的な低減効果を表す指標として、堤防なしの条件における堤防位置での津波水位の最大値 $\eta_{\max}$ 、および海岸堤防高さ H_{BW} を用いて無次元パラメータ $Z=H_{BW}/\eta_{\max}$ で津波に対する相対堤防高さを表した。ここで、 $\eta_{\max}$ 、 H_{BW} はともに堤防設置位置における地盤標高を基準とし、堤防なしの条件、すなわち $H_{BW}=0$ のとき Z は0となり、 $H_{BW}=\eta_{\max}$ のとき Z は1となる。ただし、 $\eta_{\max}$ は堤防を設置しない条件での津波高さであるため、 $H_{BW}=\eta_{\max}$ であっても堤防設置条件下での津波高は堤防を越流する可能性がある。

指標 Z と浸水域や被災域の低減率との関係を比較するため、勿来地域では実堤防高さ(4.2mと6.0mの組み合わせ)に加え、堤防高さをそれぞれ一律に6.0m, 5.1m, 4.2mとした合計4ケースを、仙南地域では図-11, 12に示した津波高さの異なる5ケースに加え、堤防前津波高さが最大(11.7m)だったケースに対して海岸堤防高さを10m, 8m, 6mにそれぞれ変えた3ケースを加えた合計8ケースの計算結果を用いた。

それぞれの氾濫解析結果より、海岸堤防を越流して陸域に輸送された流入量および浸水域、被災域を計算し、その低減率を Z を横軸にしてそれぞれ図示した(図-13)。ここで低減率は、堤防あり、なしの計算結果の差を堤防なしの結果で除した値であり、堤防ありの結果がなしの結果に比べて小さい場合は正、大きい場合は負(負の低減効果)とした。また図中の黒丸は仙南地域、三角は勿

図-13 海岸堤防の設置に伴う(a)流入量、(b)浸水域、および(c)被災域の低減率と堤防相対高さの関係(計算結果)。

来地域における計算結果を示している。また図中に赤い破線で囲んだ値は、勿来地域で堤防高さを実際の4.2mと6.0mの組み合わせにした場合の結果であるが、 Z の算定時には堤防高平均値の5.1mを用いたため、5.1mの均一な堤防を設置した場合の計算結果と Z の値が同一となっている。図に見られるように、堤防高を不均一にすることにより、いずれの値も低減率が大きく減少していることが確認できる。

図-13より、全体的な傾向としては相対堤防高 Z の増加に伴い低減率も増加するが、流入量の低減率に比べると浸水域や被災域の低減率は小さかった。特に仙南地域については、流入量と浸水域の低減率の違いが勿来地域に比べても顕著で、たとえば $Z=0.51$ の時、流入量の低減率が55%程度であるのに対し、浸水域の低減率は20%程度となった。さらに Z が0.4~0.5を下回ると海岸堤防による排水機能の低下に伴い、浸水域の低減率が負に転じている。これは仙南地域では低平地が広大であり、浸水域が広範囲におよぶ一方で浸水深は小さくなり、堤防による排水阻害による影響が助長されるためであると考えられる。平野部での浸水による塩害や、復旧作業の効率も勘案すると、排水を阻害しない海岸堤防の開発は今後の重要な課題である。

勿来地域では仙南地域に比べると低平地が狭く、 $Z=0.49$ でも流入量と浸水域の低減率がともに5%程度と非常に低い値となった。これは浸水域が比較的小さな流入量でもすぐに背後地形の標高で限定される浸水域が満水状態となったことが原因として考えられるが、その一方で

被災域の低減率は20%程度となり、堤防背後近傍に集中する被災域の低減には、 $Z=0.5$ 程度でもある程度の効果があったことがわかる。また流入量や浸水域の低減率に比べると、被災域の低減率は、不均一な堤防高のケースを除けば勿来地域と仙南地域の結果はほぼ同程度となった。これは前述した様に被災域は海岸堤防近傍の比較的狭い領域に限定されるため、周辺地形による影響を比較的受けにくいことなどが理由として考えられる。

全体として、海岸堤防による減災機能は、浸水域よりも被災域の低減率において、相対的に高い効果を確認することができた。しかしながら、その被災域についても、相対堤防高 Z が0.5を下回ると低減率も20%を下回ることとなり、堤防が崩壊しない条件においても有意な効果が見込めなくなることが想定される。逆に Z が0.5程度となるまでは堤防による減災効果が見込めるため、このような越流条件となる津波に対しても損壊しない粘り強い堤防の整備が重要となる。

また特に流入量や浸水域に対して、仙南地域の低減率は勿来地域のそれを上回る傾向があり、このことは、海岸堤防の設計思想に重要な示唆を与えている。すなわち、勿来地域の様に比較的山がちな沿岸部では、越流を許すような巨大津波が襲来した場合の減災効果があまり期待できないため、海岸堤防には粘り強さよりも堤防高さを少しでも高くすることが優先されるべきである。一方で、仙南地域のように広大な低平地を有する沿岸部では、巨大津波に対しても海岸堤防による一定の減災効果が見込めるため、越流を許しても損壊しない粘り強い海岸堤防を作ることがより重要となると考えられる。

5. おわりに

海岸堤防を大きく越流する巨大津波に対する海岸堤防の減災機能について、2011年東北地方太平洋沖地震津波による被災調査およびその数値氾濫解析を通じて分析した。分析対象地点には、広大な低平地を持つ仙南地域と、比較的急峻な背後地形を有し、かつ、海岸堤防高さが不連続であった勿来地域を選定し、堤防高さや来襲する津波高さを変えた複数の計算条件における氾濫解析を実施した。氾濫解析結果より、海岸堤防からの流入量や浸水域、氾濫域の流体力の大きさに基づき定義される被災域などの被害指標を抽出し、津波に対する堤防の相対高さなどの指標を用いて整理した。

その結果、勿来地域においては海岸堤防高さが不均一であることにより、相対的に低い堤防からの越流が集中し、結果として浸水域や被災域を増大させる危険があることが明らかとなった。また特に仙南地域のように広大な低平地を有する地域では、海岸堤防により引き波時の排水が阻害され、海岸堤防を設置することによって浸水

域が拡大する可能性があるため、排水機能を損なわない海岸堤防の整備・開発が重要である。

津波に対する相対堤防高 Z を指標として浸水域や被災域の低減率を比較した結果、 Z が0.5以上であれば相応の減災効果が期待できることが分かった。また Z が0.5~0.8程度では、広大な低平地を有する沿岸地域の方が、急峻な背後地形を有する沿岸地域よりも、相対的に高い減災効果が得られることも明らかとなった。本研究では堤防が崩壊しない仮定に基づいているため、特に広大な低平地を有する地域においては、津波の越流を許しても損壊しない堤防の整備が重要であると考えられる。一方、背後地形が比較的急峻な沿岸地域においては、越流時の粘り強さよりも Z を可能な限り大きくすることが重要であると考えられる。

謝辞：本研究は文部科学省のグリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス (GRENE) 事業環境情報分野「環境情報技術を用いたレジリエンスな国土のデザイン」の一環として実施しました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ：
<http://www.coastal.jp/ttjt/>, 2011.
- 2) 内閣府：平成 23 年度防災白書，第 1 部第 1 編第 2 章，2012.
- 3) 中央防災会議：今後の津波対策の基本的な考え方について，東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会中間とりまとめ，<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/higashinohon/4/tyuukan.pdf>, 2011.
- 4) 佐藤慎司，武若聡，劉海江，信岡尚道：2011 年東北地方太平洋沖地震津波による福島県勿来海岸における被害，土木学会論文集 B2(海岸工学)，pp.1296-1300, 2011.
- 5) 平石哲也，米山望，馬場康之，森信人，東良慶，安田誠宏，間瀬肇：宮城県沿岸における 2011 東北太平洋沖地震による津波被災について，土木学会論文集 B2(海岸工学)，pp.1306-1310, 2011.
- 6) 柴山知也，松丸亮，高木泰士，Esteban, M., 三上貴仁：2011 年東北地方太平洋沖地震による津波災害の宮城県以南における現地調査，土木学会論文集 B2(海岸工学)，pp.1301-1305, 2011.
- 7) 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 and Space*, Vol.63, pp.815-820, 2011.
- 8) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.75, pp.1135-1154, 1985.
- 9) 平山克也，平石哲也：ブシネスクモデルによる砕波・遡上計算法とその適用性，海岸工学論文集，第 51 巻，pp.11-15, 2004.
- 10) 福岡捷二，川島幹雄，松永宜夫，前内永敏：密集市街地の氾濫流に関する研究，土木学会論文集，

- No.491/II-27, pp.51-60, 1994.
- 11) Ranasinghe, R.S., Sato, S. and Tajima, Y. : Boussinesq modelling of waves and currents over submerged breakwaters, *Proc. of the 5th Int. Conf. on Asian and Pacific Coasts*, Vol.3, pp. 58-64, 2009.
- 12) 国土地理院：平成 23 年東日本大震災 2.5 万分 1 浸水範囲概況図, 国土地理院技術資料 D-1-No.589, 590, 2011.
- 13) 羽鳥徳太郎：津波による家屋の被害率, 地震研究所彙報, Vol.59, pp.433-439, 1984.
- 14) 田島芳満, 佐藤慎司, 藤原弘和：Hurricane KatrinaによるBiloxi周辺の高潮被害分布とその外力特性の検証, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.406-410, 2006.
- 15) 越村俊一, 行谷佑一, 柳澤英明：津波被害関数の構築, 土木学会論文集B, Vol.65, No.4, pp.320-331, 2009
- 16) 阿部真人, 福山貴子, 佐藤慎司, 磯部雅彦, 熊谷隆宏：鮫川河口砂州の変形と勿来海岸の地形変化過程に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.531-535, 2002.

(2012. 8. 27 受付)

DISASTER REDUCTION FUNCTION OF SEAWALLS AGAINST OVERFLOWING CATASTROPHIC TSUNAMI

Yoshimitsu TAJIMA, Shotaro FUNATAKE and Shinji SATO

Lessons of the catastrophic disaster due to the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami call for importance of integrated disaster mitigation strategies over the entire coastal regions. Under this strategy, coastal protection works such as seawalls are expected to avoid fatal collapse and to reduce the energy of overflowing tsunami as much as possible. Quantitative evaluation of such disaster mitigation function of the seawall is therefore essentially important for optimum designs of the integrated disaster mitigation strategies. This study applied numerical models for predictions of tsunami inundation around seawall with various heights and investigated how various disaster factors can be reduced by seawalls. The model was applied to Nakoso and Sen-nan regions attacked by the 2011 tsunami. It was found through the analysis that the relative height of the seawall against the height of attacking tsunami is one of the most dominant factors to determine the level of disaster reduction and this reduction level becomes insignificant when the tsunami height doubles that of seawalls. It was also found that non-uniformity of the heights of seawalls decreases the overall function for energy reduction of the overflowing tsunami and the damage level behind the seawall is dominantly governed by the lowest heights of such non-uniform seawalls.