浸水津波の減勢における排水路の効果

CHARACTERISTICS OF DRAINAGE CHANNELS TO ALLEVIATE TSUNAMI FLOOD DISASTERS IN COASTAL FARMLANDS

桐 博英¹・中矢哲郎²・丹治 肇³・松島健一⁴

Hirohide KIRI, Tetsuo NAKAYA, Hajime TANJI and Kenichi MATSUSHIMA

¹ 正会員 博(農) (独) 農研機構 農村工学研究所 (〒 305-8609 茨城県つくば市観音台二丁目 1-6)

² 正会員 博(農) (独) 農研機構 農村工学研究所 (〒 305-8609 茨城県つくば市観音台二丁目 1-6)

³ 正会員 博(農) (独) 農研機構 農村工学研究所 (〒 305-8609 茨城県つくば市観音台二丁目 1-6)

⁴ 正会員 博(農) (独) 農研機構 農村工学研究所 (〒 305-8609 茨城県つくば市観音台二丁目 1-6)

In coastal farmlands, farm roads and farmland serve to dissipate the energy of the tsunami in stages. The role of drainage channels in spreading and draining a tsunami flood should also be considered. The energy dissipation characteristics of a drainage channel and sidewall behind a coastal levee were evaluated in this paper. The sidewall was installed either on the coastal side or on the inland side of the channel bank. A tsunami that overflowed the coastal levee washed the back slope of the levee by supercritical flow. The tsunami that reached the beginning of the inland zone generated a hydraulic jump, the location of which moved to the coastal levee. A comparison of the distribution of the bottom velocity in case of the drainage channel with or without sidewall yielded the following results: 1) In the region of small volume of overflowed tsunami, the drainage channel without sidewall dissipates the energy of the tsunami. However, a drainage channel with a wide cross section is required for a large volume. 2) The sidewall effectively dissipates tsunami energy, and the effect varies with the location of the sidewall.

Key Words: *Tsunami flood, drainage channel, hydraulic model test, disaster-prevention technique, coastal farmlands*

1. はじめに

2011 年の東北地方太平洋沖地震で発生した津波では、東北地方の太平洋岸を中心に甚大な浸水被害が生じ、発生から 3 年を迎えようとしている現在も復興に向けた努力が続けられている。この東北地方太平洋沖地震津波では、地震発生後に津波が仙台空港に達する状況がリアルタイムで配信されたほか、土木学会海岸工学委員会と地球惑星連合が中心となって、産官学の津波調査チームが収集した 5,900 個所にのぼる津波浸水痕データがとりまとめられる¹⁾など、多くの記録が残っているのが特徴である。特に東北地方太平洋沖地震津波後の被災状況調査や映像記録により、陸域を浸水する津波(以下、浸水津波と呼ぶ)に対して、仙台東部道路といった高盛土の道路や、海岸線と並行に仙台平野を流れる貞山堀にも津波遡上エネルギーを減勢させる効果があったことが推察されている。

さらに、津波の越流により海岸堤防背後に形成された落ち堀が海岸堤防破堤の引き金になった一方で、背後の津波の減勢効果が認められたことが報告される²⁾

など、将来起こり得る巨大津波災害において、浸水津波の減勢を図ることが減災対策の 1 つとして認識されつつある。

このような中、筆者らは、震災直後から農地海岸を中心に数次にわたる被災現場の調査を行い、市街地と比較して瓦礫や人的被害が少なく、早期の復旧が期待できる沿岸部の農業地域を津波浸水のバッファーとして活用する浸水津波の減災手法³⁾を提案してきた。また、この減災手法を具体化するため、農道標高を嵩上げすることで 2 線堤の効果を持たせたり、農地の段差を利用したりすることで津波浸水を抑制する効果が得られることを水理模型実験で検証するとともに⁴⁾、被災地域の合意形成に参画し地域復興に実践してきた⁵⁾。

しかしながら、2 線堤の機能を付加させた農道の整備は、そのコストを考えれば海岸線が短いリアス式海岸への適用に限定されると考えるのが適当である。このため、本研究では、平野部の沿岸部農地を津波浸水のバッファーに活用するため、排水路に津波の減勢機能をもたせた場合にどの程度の効果があり、どのような流況を呈するのかを水理模型実験で検証した。

図-1 津波実験施設の概要

図-2 水理模型の概要

2. 水理模型実験

(1) 津波実験施設の概要

実験は、図-1 に示す幅 2m × 高さ 3m × 全長 47.5m のコンクリート製水槽にスルースタイプの津波発生ゲートを有する津波実験施設で行った。この津波実験施設は、津波発生ゲートを閉鎖して上流側の貯水槽に給水し、ゲート上下流水位を所定の値に設定した後ゲートを開放することで目標の津波を発生させる。実験終了後、水槽下流端の模型内部に設置したポンプで貯水槽に送水し、次の実験に備えゲート上下流の水位を設定する。ここで、津波発生ゲートは可能な限り短時間で開放するのが望ましいが、水圧がかかったゲートを引き上げる際に大きなトルクを必要とするため、ゲート開放操作が始まるごくわずかな時間は速度を落とし、ゲートが上昇を始めてからは 1.5m/s でゲートを開放した。このため、ゲート開放直後にわずかな波が発生するが、本装置で発生した孤立波の波形データを確認し、津波発生ゲート開放初期の影響はほとんどないことを確認した。

(2) 水理模型

実験に使用した水理模型の概要を図-2 に示す。本模型では、前浜から沿岸部農地、内陸部を模した地形に

海岸堤防および排水路を設置した。

海岸堤防の断面は、東北地方太平洋沖地震津波で被災した農地海岸の堤防復旧事業における堤防断面を参考に海側，陸側法面とも 1:2 勾配とし、堤高は使用した津波実験施設で発生できる津波波高を勘案し 10m（実物換算値）とした。これ以降、特に断らない限り、示す数値は実物換算したものとする。

海岸堤防背後に設けた排水路は、津波の減勢に対する効果を持たせることを想定して、沿岸部の農業地帯に見られる潮受け水路をモデルに排水路幅を 11.5m とし、海岸堤防を越えた流れが安定し、かつ内陸部の逆勾配の影響を避けられるよう沿岸部農地の中央付近に設置した。また、排水路の深さは、津波被災後の沿岸部農地で復旧上の課題となっている地下水の塩水侵入⁶⁾の防止効果を想定して水理模型で再現可能な限り深くし、6.25m とした。また、排水路には、浸水した津波を減勢させる目的で高さ 1.5m の側壁の設置による効果を検証したが、長い水路延長で過度に整備コストがかかるのを避けることを考慮し、水路の海側，陸側いずれかのみに設置するものとした。

模型はフルード相似則に基づく縮尺 1/25 とし、海岸堤防は内部を砂とジオテキスタイルで堤防形状を整形して外側をモルタルで固定した構造とし、前浜から内

表-1 設定した目標津波波高

ケース	波高 I	波高 II	波高 III
第 1 波波高	10.0m	9.5m	9.0m

陸部までの地盤は一部を鉄製のアンクルで枠を作成し表面は耐水ベニヤ製とした．なお，模型表面には後述する電磁流速計の設置地点を除き，青色の耐水ペイントを施した．

(3) 計測項目と実験条件

実験では，図-2 に示した 4 点の水位および海岸堤防背後 12 点の底面流速を計測し，各データは A/D 変換器を介して 20Hz のサンプリングレートで PC に収録した．ここで，水位計測には容量式波高計を用い，海岸堤防の堤頂中央部にはストローク 1.5m，海側波高，前浜および排水路後方の背後地の 3 点には水路壁側にストローク 2.5m の波高計を設置した．一方，底面流速は模型に埋め込む形式の電磁流速計（直径 30mm）を使用した．水位および流速の計測に加えて，水理模型を設置した長さ 22.5m の観測部は片面がガラス張りであり，側方から水理模型全体および海岸堤防部分の 2 つのシーンをデジタルビデオで撮影した．

実験では，表-1 に示す 3 とおりの目標津波を設定し，予備実験で目標波高を発生できる初期水深と貯水槽水位の関係を確認した．

予備実験の結果，図-3 に示すように，津波が碎波せずに海岸堤防に達する条件では堤防法面で津波がジャンプし，水塊が堤防背後の地面に衝突する流況を呈することが分かった．このように津波が海岸堤防でジャンプする場合は，今回の実験目的である背後地の津波減勢状況を把握するのが困難である．このため，孤立波の状態沿岸部に到達した津波を前浜付近で碎波させ，図-4 に示すように津波が海岸堤防裏法を射流で越流する状況が継続できるよう実験開始時の海域部の初期水位を 2.5m に設定した．ここで，本論文では，標高値は海岸堤防法先の標高を基準とする．なお，碎波させた津波については予備実験の水位データを比較し，複数回の実験を行っても津波波形の再現性が保たれていることを確認した．

実験は，表-2 に示すとおり，背後地が水平である Case 1 を対照に，排水路を掘削した Case 2，排水路の片岸に水路壁を設けて津波減勢効果を高めた Case 3 および Case 4 の実験条件を設定した．実験は，上述の 3 パターンの津波波高に対し，各ケースで 5 回ずつ津波を発生させ，合計 60 回の実験を行った．

収録したデータは，1s で移動平均処理を行ったうえで整理した．

図-3 海岸堤防でジャンプする津波の状況

図-4 海岸堤防を津波が越流する様子

表-2 実験ケース一覧

Case	排水路	水路壁	水路壁位置
1	なし	—	—
2	あり	なし	—
3	あり	あり	海側
4	あり	あり	陸側

3. 実験結果

(1) 全体流況

a) 海岸堤防海側の状況

設定した目標津波波高に対し，得られた第 1 波のピーク水位を図-5 に示す．ここで，示した値は後述する水位データと比較するため，目標津波波高に初期水位(2.5m)が加えられており，津波波高を評価するには図-5 から初期水位を差し引く必要がある．設定した目標波高に対し得られた第 1 波の平均波高は，それぞれ 10.27m(波高 I)，9.62(波高 II)および 8.92(波高 III)であり，実験の性質上多少のばらつきはあるものの，津波波高の目標値をほぼ再現していると考えられる．

図-6 は，Case 1 の波高 I の条件における地点 P1 での水位の時間変化の例を示したものである．図-6 において，最初の波形が津波発生ゲートで発生したものであり，この波が海岸堤防に衝突して沖側に伝播していくのをとらえたのが 45s 以降の波形である．また，127s 以降に現れる波形は，津波発生ゲートで反射した波によるものである．このように本実験で発生させた津波

図-5 各ケースの P1 地点における第 1 波の最高水位

図-7 各ケースの P1 地点における最高水位

図-6 点 P1 における水位変化の例

の波高は海岸堤防の天端高を大きく超えるものではないが、これが海岸堤防で反射して沖側に伝播することで水位が上昇し、海岸堤防海側の水位が高い状態が安定して継続する。

各実験ケースにおける海岸堤防で反射した津波による最高水位を図-7 に示す。海岸堤防で津波が反射することで、入射した津波波高の約 1.7 倍程度まで堤防海側の水位が上昇することが分かる。また、最高水位を記録する際の津波波形は津波第 1 波と比較して水面の動揺が少ないため、Case 4 の波高 I を除いて、各ケースにおける最大水位の間隔がほぼ均等であることが分かる。

各実験ケースにおける海岸堤防越流水深をプロットしたのが図-8 である。津波が堤防を越流する際に海岸堤防上で限界流を生じることから、水位変動が少なく安定した状態を呈する。沖側の波高は目標津波の差異が明瞭でない場合も見られたが、海岸堤防天端の越流水深を評価する限り、発生させた津波により越流状態を区別できていると判断した。

図-8 各ケースの海岸堤防越流水深

b) 浸水津波の流況

海岸堤防を越流した津波は、図-4 で見られたように、堤防裏法および堤防背後地を射流で流下したあと内陸部に達し、ここで発生した跳水が海側へ移動しながら最終的に海岸堤防に到達する。

本論文では、海岸堤防背後に浸水した津波の減勢効果を検証することを目的としているため、実験で得られた流速データのうち、跳水が生じる前のものだけを対象として以下に整理した。ここで、実験では測定レンジ 3m/s の電磁流速計を使用していたが、海岸堤防に近い 3 つのセンサーで測定レンジを越える流速を記録した。これらのデータを詳細に検証したところ、3.5m/s 程度までは測定した流速値が線型に上昇するのを確認し、データとして採用した。ただし、最も海岸堤防に近い 0m 地点のセンサーでは波高 I で流速が測定限界を振り切っているものが見られたため、当該地点の流速は参考値である。

波高 I、II および III での背後地の流速分布を図-9 ~ 図-11 に示す。ここで、各マーカーに示したエラーバーは、5 回のデータの標準偏差を示している。実験値のばらつきは、Case 4 の排水路直後の計測点を除き、いずれも平均値の 5% 以内に収まっており実験の再現性に問

題はないと判断した。

(2) 排水路掘削による効果

図-9～図-11で青線(Case 1)は背後地が水平であり、赤線(Case 2)が排水路が掘削された結果である。Case 1と2の比較では、越流水深が最も大きい波高Iで両者に違いはなく排水路掘削の効果は認められないが、波高IIで1m/s程度、波高IIIで2m/s程度排水路の掘削が陸側(距離72m以降)の流速を減少させている。ここで、25mから50m地点までの流速のプロファイルを見ると、いずれの越流条件でも40m地点と50m地点で流速の値に大きな違いは見られず、50m地点では定常に近い状態になっていると推測できる。このときの流速は、波高Iで14.2m/s、波高II、IIIがそれぞれ13.8m/s、13.3m/sであり、今回の模型で再現した排水路では、排水路近傍の流速を14m/s以下に落とすことができれば排水路掘削による津波減勢効果が得られることが分かった。

(3) 水路壁の効果

a) 波高Iの場合

図-9において、排水路を掘削しただけのCase 2と水路壁を有するCase 3および4を比較すると、水路壁の設置により流速が減少しているのが確認できる。排水路背後(堤防法尻から84m地点以降)の流速と流速の減少率を表-3に示す。ここで水路壁を排水路の海側に設置したCase 3では、排水路直後の84m地点で6.6%の減少を記録するが、その後、減少割合は水路壁を設置しないCase 2との差は見られず、当該条件では水路壁設置の効果が排水路近傍に限られることが分かる。これは、海岸堤防を射流で流下した津波が水路壁に衝突し、一時的に流向を上向きに変えるものの津波を減勢するには至らず、上昇した水位で生じる位置エネルギーがそのまま運動エネルギーに変換されるためと考えられる。

一方、水路壁を陸側に設置したCase 4では、排水路直後の流速の減少率は18%であり、それ以降も12%を

表-3 排水路背後の流速と減少割合(波高I)

堤防法尻からの距離(m)	Case 2	Case 3	Case 4
84	12.26	11.45	9.97
	—	6.6%	18.7%
94	12.27	12.42	10.72
	—	-1.3%	12.6%
104	12.55	12.34	10.93
	—	1.6%	12.9%
114	12.12	12.38	10.35
	—	-2.2%	14.6%
124	12.26	12.40	10.50
	—	-1.2%	14.3%

上段は流速(m/s)、下段はCase 2からの流速の減少割合を示す。

図-9 浸水津波の流速分布の比較(波高I)

図-10 浸水津波の流速分布の比較(波高II)

図-11 浸水津波の流速分布の比較(波高III)

越える効果が継続している。

b) 波高 II, III の場合

波高 II, III における排水路背後の流速の減少割合をそれぞれ、表-4 および表-5 に示す。これらの条件でも Case 2 と 3 で流速の減少に明瞭な差は見られない。これは、波高 I では高速の津波が水路壁に衝突し、Case 3 では上向きに流速を変え、Case 4 では上向きに加え排水路内部に向く流れに分かれる流況を呈するのに対し、波高 II, III では、Case 3 で津波が水路壁に衝突することでジャンプするものの、減勢効果の多くが排水路の掘削によるためと考えられる。

一方、水路壁を陸側に設けた Case 4 では 84m 地点で 24% を越える大きな減少率を記録し、それ以降も波高 I ほどではないものの流速の減少が維持される。この高い減少率は、陸側に設けた水路壁が陸側に向かう流れを乱しているためと考えられる。これは、図-10、図-11 で見られたように、波高 II, III の Case 4 で排水路背後の流速のばらつきが大きかったことから推察される。

以上のことから、排水路の側壁を高くした場合の効果は、水路壁を海側に設置した場合は効果が小さいといえる。しかし、側壁を陸側に設置した場合は、排水路の掘削に加えてさらに 4~10% 程度の流速の減少が認められ、これが背後でも維持されることがわかった。

4. まとめ

本研究では、沿岸部の農地に浸水津波の遡上を抑制する効果を高めることを目的に、水理模型実験により海岸堤防背後に設けた排水路の遡上津波の減勢効果を検証し、以下の結論を得た。

- 津波越流量が大きい場合は排水路の掘削で減勢効果が得られる
- 越流量が大きい津波では排水路断面を大きくする必要があるが、水路壁を高くすることで減勢効果を高めることができる。
- 排水路の掘削に加えて水路壁を陸側に設置することで津波減勢効果を大きくすることができるが、排水路幅を十分に確保できる場合は水路壁の効果は小さい。

この津波減勢効果が得られる流速の限界値は排水路幅や深さにより変化すると考えられ、排水施設群の整備コストと効果の関係を明らかにするにはさらなる検証が必要であるが、これらの評価は今後の課題である。

参考文献

- 1) The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group: Nationwide field survey of The 2011 off the Pacific Coast of

表-4 排水路背後の流速と減少割合（波高 II）

堤防法尻からの距離 (m)	Case 2	Case 3	Case 4
84	11.70 —	11.21 4.2%	8.90 24.0%
94	11.37 —	11.09 2.5%	10.28 9.7%
104	11.15 —	11.21 -0.5%	10.50 5.8%
114	11.31 —	11.13 1.6%	10.11 10.6%
124	10.93 —	10.89 0.3%	10.10 7.6%

上段は流速 (m/s)、下段は Case 2 からの流速の減少割合を示す。

表-5 排水路背後の流速と減少割合（波高 III）

堤防法尻からの距離 (m)	Case 2	Case 3	Case 4
84	10.47 —	11.65 -11.2%	7.53 28.1%
94	10.38 —	10.45 -0.7%	9.15 11.8%
104	9.81 —	10.48 -6.8%	9.43 3.9%
114	10.10 —	10.10 -0.1%	8.51 15.7%
124	9.82 —	9.85 -0.3%	8.51 11.6%

上段は流速 (m/s)、下段は Case 2 からの流速の減少割合を示す。

Tohoku Earthquake Tsunami, 土木学会論文集, B2(海岸工学), Vol.67, No.1, pp.63-66, 2011.

- 2) 常田賢一, 谷本隆介: 2011 年東北地方太平洋沖地震における土盛構造の耐津波特性および落堀の形成特性, 土木学会論文集, A1(構造・地震工学), Vol.68, No.4, pp.L1091-L1112, 2012.
- 3) 毛利栄征, 丹治 肇: 海岸堤防の後背農地による津波減勢-減災農地の考え方と提案-, 農村工学研究所技報, 第 213 号, pp.105-116, 2012.
- 4) 桐 博英, 丹治 肇, 中矢哲郎: 後背農地を活用したレベル 2 津波の浸水抑制効果の水理模型実験, 土木学会論文集, B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.L1311-L1315, 2012.
- 5) 福与徳文, 山本徳司, 桐 博英: 岩手県大船渡市吉浜地区における農地復興計画作成支援-減災農地と地域復興計画-, 農村工学研究所技報, 第 213 号, pp.287-295, 2012.
- 6) 中矢哲郎, 丹治 肇, 桐 博英: 農地・排水系施設の復旧状況からみる 2011 東日本地震津波による塩害長期化の実態, 土木学会論文集, B1(水工学), Vol.69, No.4, pp.L1471-L1476, 2013.

(2013.9.30 受付)