津波越流量を軽減する堤防設置条件

研究者
春日　大彦　　白鳥　煌大　　林　果穂　　矢田　光

指導教諭
大野　寛務　先生

要旨
日本は度々津波に襲われるが, その被害は小さくないのが現状である. 堤防の設置条件を工夫することで津波の被害を軽減し, 被害を抑制できると考えた. 単線堤の場合海岸線からの距離に, 二線堤の場合前後の堤防の高さに着目した. 結果は, 単線堤は陸側に, 二線堤は海側に高い堤防を設置する場合がより越流量を軽減した. しかし, 単線堤を海側に設置する方が越流量を軽減した場合もあり, 統一的な結論を出すことはできなかった.

1 研究の動機

日本は地震大国と呼ばれるほど頻繁に地震が発生し,しばしば津波を伴う.特に,2011 年の東北地方太平洋沖地震では甚大な津波被害がもたらされ,堤防の脆弱さ,津波の脅威が露わになった.

令和 6 年能登半島地震では,地震発生とほぼ同時に津波の第一波が到達した[1].また,珠洲市の津波観測点では海底が隆起したため津波を観測できなかった[2].津波の到達が早かったり,稀に観測不能になり住民の危機感を劣らせることがあるため,堤防によって津波被害を抑制することが重要である.

海岸堤防は,高潮・津波による海水の侵入を防ぎ,波浪による越波を減少させるとともに,浸食による土砂の流出を防止する施設である[3].しかし,特に津波による海水侵入の防止は必ずしも果たされていないのが課題である.

二瓶ら(2014)によると,「1) 単線堤では,急勾配ののり面の方が,緩勾配のケースよりも津波越流量や背後地家屋への流体力を抑制し得ることが示された.」「2) 二線堤の場合,同一高さの単線堤よりも津波越流量を抑制できている.また,単線堤・二線堤の越流量の差は,二線堤間の貯蓄量を上回る.」「3) 様々な設置条件下における津波越流指標を算出した結果,二線堤条件の工夫により,防潮堤高さを減らしても津波越流量を抑制でき,かつ,背後地への流体力を減らすことができ,多重防潮堤が有用な津波減災効果を発揮することが示された.」と結論づけられている[4].ここで,単線堤とは防潮堤を 1 つ,二線堤とは防潮堤を前後に 2 つ配置したものである.しかし,同論文では検証されていなかった条件もあった.

そこで,我々は堤防の設置条件を変化させ,どのような条件が津波越流量を軽減できるか調べることにした.以降,津波越流量を「堤防を越えた水の体積」と定義する.

2 研究の目的

津波越流量を軽減するような堤防の設置条件を調査することで,経済損失や人的被害を抑制する.

3 実験

3-1.津波の再現

3-1-1.目的

検証するのに十分な高さの津波を起こし,波高に有意差を出す方法および具体的な条件を調査する.ここで,後述する大堤防の高さの 5%以上,すなわち 1.5㎜以上の波高の変化が見られた場合,有意差があるとする.

3-1-2.装置概要

以下図 1 では,おもりの高さを h(㎜),水槽からスタンドの距離をℓ(㎜)とする.

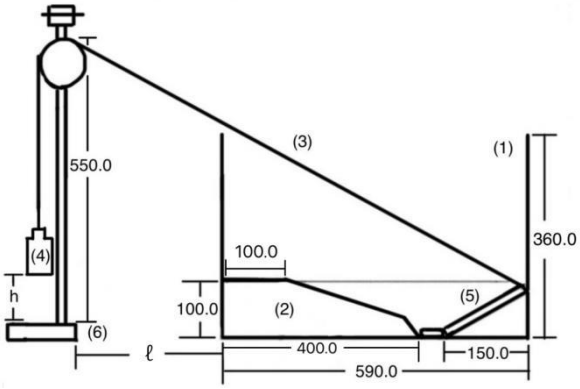


図 1.装置図(概要)

3-1-3.材料

用いる材料とその条件は次の通りである.ただし,主な寸法は図にのみ記載し,単位は㎜とする.

(1) 水槽

水槽の奥行きは 264.0㎜である.また,底面中央に直径 15.0㎜,高さ 3.0㎜の半球状の突起が存在する.

(2) 土台

2 パーツに分け,樹脂を素材とし 3D プリンターで作成した.直方体パーツを土台 1,もう一方を土台 2 とする.どちらも奥行きは 250.0㎜であり,厚さ 1.0㎜の面によって構成されるが,1 つの面が欠落している.土台 1 は陸地を再現し,後述する堤防や観測用容器を設置する.土台 2 は海底を再現している.土台 2 の中でも傾斜が異なるのは大陸棚の再現によるものである.

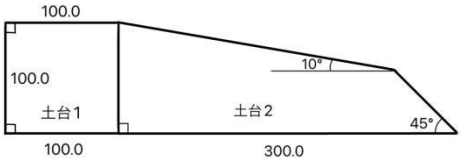


図 2. 土台の断面図

（3）紐

簡単に切れない軽い紐として凧糸を用いた. この実験では約 19Nの荷重に対して 7.0㎜ 伸長したことから, この紐のばね定数は約 27N・ m であった. また, 紐は滑車を通って波源板とおもりを繋いでいる.

（4）おもり

波を起こすためのおもりの質量は 0.959kg である. また, 図のように形状は正六角柱である.

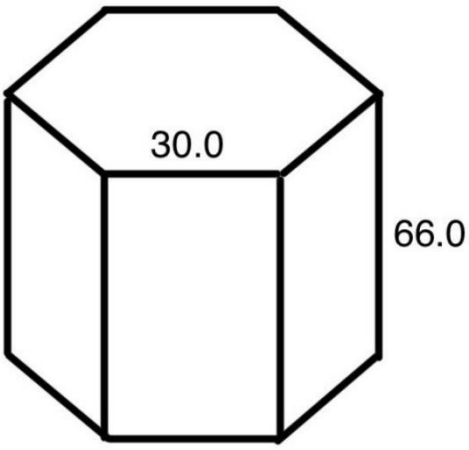


図 3. おもりの形状

（5）板

縦 146.0㎜, 横 247.5㎜, 厚さ 13.0㎜ の桐板を用いた. 密度が水より小さく水に浮いてしまうため, 背面におもりを紐で固定し浮かないようにした. 板とおもりを合わせた質量は 0.644kg である. 以降, この板を「波源板」と表現する.

図 4. 波源板の形状

（6）スタンド

スタンドの土台上面から高さ 550.0㎜ に滑車と紐が最上部で接するよう固定した. また, スタンドにおもりを乗せ, スタンドが動かないようにした.

3-1-4. 方法

以下のようにして波を発生させた.

1. 土台, 物体, 波源板を水槽に入れ, 土台 1 の上面と同じ高さまで水を入れる. 物体は水槽の底面に接した部分が陸方向へ移動しないようなストッパーの役割を果たし, この付近を中心に波源板を円運動させるために用いる. このとき, 水と土台の境界を海岸線とする. 土台や波源板と水槽の側面に空間が生じるが, 片方の側面に接するよう配置した.

2. おもりを手で持ち上げて静止させる. このとき, 波源板が水槽の底面と 2 つの側面に接していて, かつ紐がたるまないようにする. その後, おもりを落として波源板を動かし, 波源板によって波を起こす. スタンドの土台上面にタオルを敷くことで衝撃を吸収し, おもりが落下した後におもりが波源板の運動に関与しないようにした. スタンドの土台上面からおもりの下底までの距離をおもりの高さ h とし, h を 90.0㎜, 120.0㎜, 150.0㎜ と変え, 紐がたるまないようにℓを変える. 紐は自然長から 7.0㎜ 伸長するため, 波源板を動かすことのみに使われる高さは 83.0㎜, 113.0㎜, 143.0㎜ である. このとき, 波高がどう変わるか確かめる. 波高は海岸線で最大の高さを 3 回測定し, 平均値を用いる.

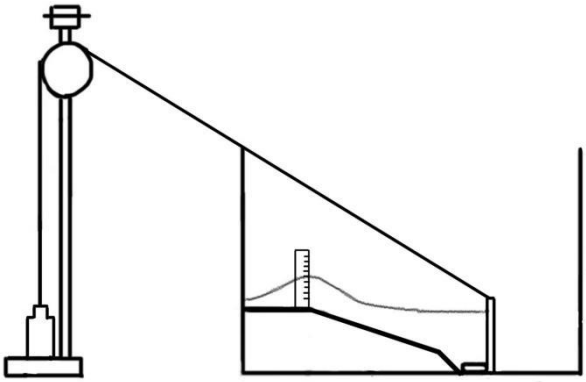


図 5. 波高の測定方法

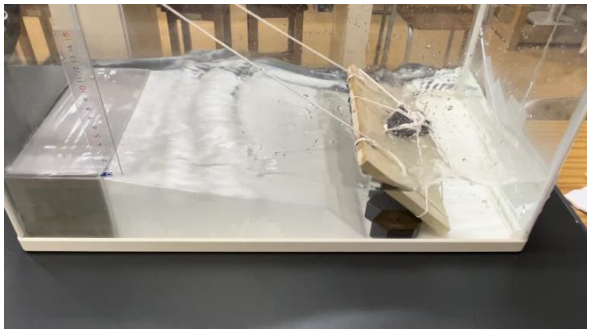


図 6. 波の発生

3-1-5. 再現性

この実験で起こす波はメカニズム的に津波ではないが, 海底から海面までの水が塊として伝わるという津波の性質を再現している[5].

発生する波の高さに対し水深が極めて浅いが, 本実験では水深については特に考慮しないため, 現実世界をそのまま縮小していない.

土台や波源板と水槽間の空間では, 他の部分と比べわずかに波が速いが, その影響は極めて小さいため, 無視する.

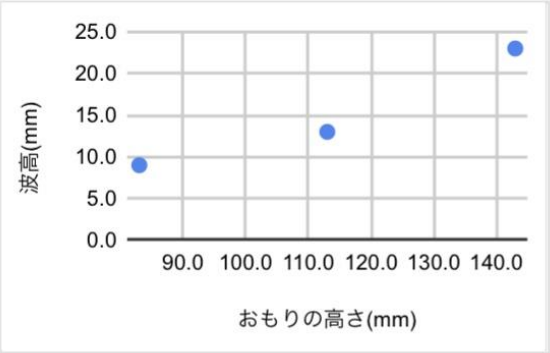
今回発生した波はソリトン分裂波であることが確認された(図 6 参照). ソリトン分裂波とは, 津波が遡上していく過程で, 波形や水深などの条件により, 周期の短い複数の波に分裂し, 波高が増幅する現象である[6]. よって, 今回発生した波は津波の性質を持っており, 本実験は十分な再現性を持っているといえる.

3-1-6. 結果

実験の結果を以下に示す.

おもりの高さ(mm)	波高(mm)
83.0	9.0
113.0	13.0
143.0	23.0

表 1. おもりの高さと波高



グラフ 1. おもりの高さと波高

おもりの高さが 83.0㎜, 113.0㎜, 143.0㎜ のとき, 波高はそれぞれ 9.0㎜, 13.0㎜, 23.0㎜ であった. おもりの高さが 83.0㎜ のときと比べて, おもりの高さが 113.0㎜ のとき波高が +4.0㎜, おもりの高さが 143.0㎜ のとき波高が +14.0㎜ となった.

3-1-7. 考察

波高はおもりの高さに対する単調増加関数である. おもりの質量と重力加速度は一定であるから, おもりの位置エネルギーはおもりの高さに比例し, おもりの位置エネルギーが波源板の運動エネルギーに変換されるから, おもりの高さと波源板の運動エネルギーは比例する. しかし, 波高はおもりの高さに比例しているとは言い切れなかった. このことから, 波高はおもりの高さや波源板の運動エネルギーではなく, 波源板の角速度や移動量に依存すると考えられる.

3-1-8. 結論

前述の方法により十分な高さの波が発生し, 有意差が見られたことから, 前記の条件で次の実験を行うことにした. 以降, 波高が 9.0㎜ の波を小波高, 13.0㎜ の波を中波高, 23.0㎜ の波を大波高とする.

3-2. 堤防での消波

3-2-1. 目的

越流量を測定して比較し, 越流量を軽減する条件を導き出す.

3-2-2. 堤防の作成

樹脂を素材とし 3D プリンターで作成した. 形状は図のように短径で半分にした楕円を柱状にした. これは津波を再現する際に幅が狭く, 台形にすると勾配が急になりすぎるためである. 堤防の長さは 250.0mm, 幅は 10.0mm で統一し, 高さは 10.0mm, 20.0mm, 30.0mm である. 以降, それぞれ小堤防, 中堤防, 大堤防とする.

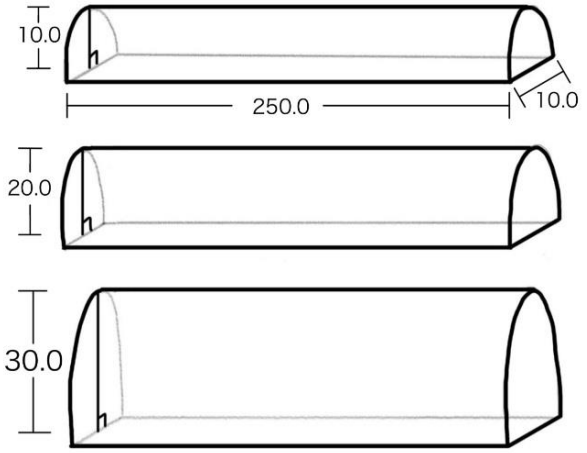


図 7. 堤防の形状

3-2-3. 単線堤について

堤防を海岸線に 1 つ設置したものを単線堤とする. このとき, 堤防の右端を海岸線に置いた場合を「海側」, 海岸線から 30.0mm 陸地側の場所に置いた場合を「陸側」とする.

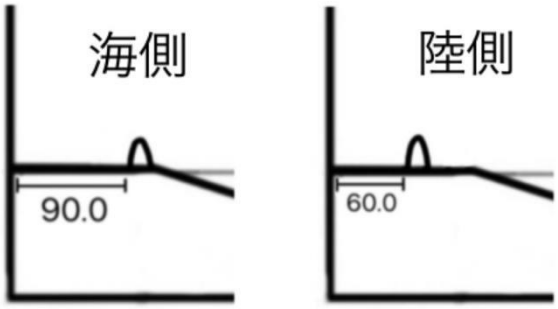


図 8. 単線堤の配置

3-2-4. 二線堤について

堤防を海岸線に対して 2 つ平行に設置したものを二線堤とする. 今回の実験では中堤防・大堤防を使用した. 堤防間の距離は 20.0mm であり, 海側と陸側に配置した.

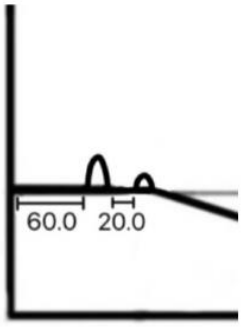


図 9. 二線堤の配置

3-2-5. データの採集

牛乳パックで観測用容器を作り, 堤防の背後(陸地側)に配置した. 容器の底面積はそれぞれ 2.20×10^4mm^2, 1.47×10^4mm^2 である. ただし, 水が入ると容器はわずかに膨張するが, その影響については無視する. このとき, 単線堤で海側に堤防 3 種, 陸側に堤防 3 種, 二線堤で前後を入れ替える計 8 パターンに, それぞれ波高 3 種類を衝突させ計 24 個のデータを採集する. 単線堤を海側に置いた場合のみ容器 A を用い, 他は容器 B を用いる. 堤防や容器は水の力に耐えられず流されてしまうため, 直定規で上から押さえつけた. 3-1-4 と同様に波を起こして堤防に衝突させ, 容器に入った水の水位を測定し, 越流量を算出する. 越流量は 3 回測定し, 平均値を用いる. 以降, この値を平均越流量とする.

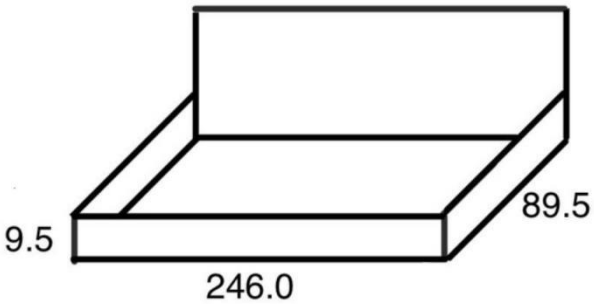


図 10. 容器 A の形状

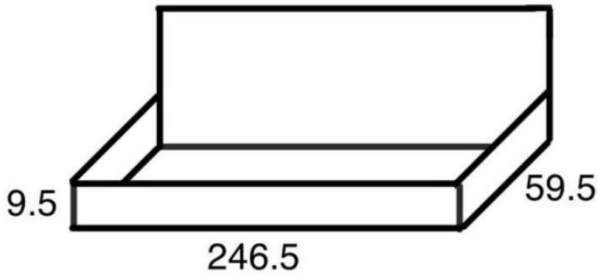


図 11. 容器 B の形状

4　実験結果

4-1. データ処理

波高種は波高の高さを，堤防種は堤防の高さを，位置は海側か陸側かを示している．また，配置は海側と陸側のどちらに高い堤防を配置したかを不等号で示している．表 2・表 4・表 6 内の数値は平均越流量（$\times 10^5 mm^3$）を，表 3・表 5・表 7 内の数値は後述する比率を示している．

4-2. 実験結果のデータ

4-2-1. 単線堤

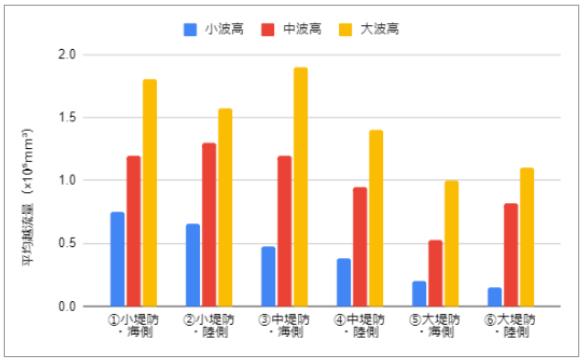
変数が波高種・堤防種・位置の 3 つ存在する．このうち，位置以外の 1 つの変数をメイン変数とし，他 2 つの変数をサブ変数とする．あるメイン変数に対しサブ変数 2 つの組み合わせは全 6 パターン存在し，それぞれの場合を①～⑥として表現する．また，メイン変数は 2 パターンあり，(i)・(ii) として表現する．以下 (i) のデータを並び替えたものが (ii) であり，それぞれ別のデータを取っているわけではない．

陸側での越流量を海側での越流量で割ることで求まる値を比率とする．比率が 1 より小さい場合越流量を軽減し，比率が 1 より大きい場合越流量を増加させることを表す．

(i) メイン変数：波高種

波高種\ 堤防種・位置	①小堤防 ・海側	②小堤防 ・陸側	③中堤防 ・海側	④中堤防 ・陸側	⑤大堤防 ・海側	⑥大堤防 ・陸側
小波高	0.75	0.66	0.48	0.38	0.20	0.15
中波高	1.2	1.3	1.2	0.95	0.53	0.82
大波高	1.8	1.57	1.9	1.4	1.0	1.1

表 2. (i) 各場合の平均越流量



グラフ 2. (i) 各場合の平均越流量

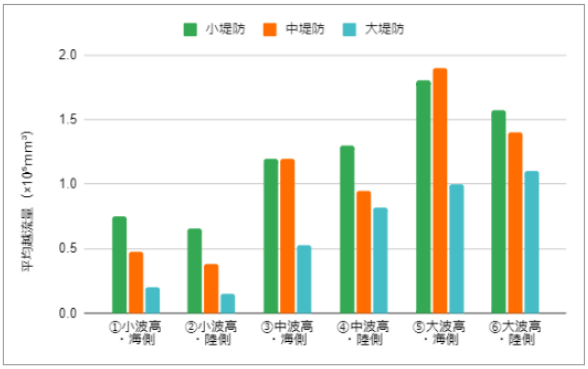
	②／①	④／③	⑥／⑤
小波高	0.88	0.79	0.75
中波高	1.08	0.79	1.55
大波高	0.87	0.74	1.10

表 3. (i) 各場合の比率

(ii) メイン変数：堤防種

堤防種\ 波高種・位置	①小波高 ・海側	②小波高 ・陸側	③中波高 ・海側	④中波高 ・陸側	⑤大波高 ・海側	⑥大波高 ・陸側
小堤防	0.75	0.66	1.2	1.3	1.8	1.57
中堤防	0.48	0.38	1.2	0.95	1.9	1.4
大堤防	0.20	0.15	0.53	0.82	1.0	1.1

表 4. (ii) 各場合の平均越流量



グラフ 3. (ii) 各場合の平均越流量

	②／①	④／③	⑥／⑤
小堤防	0.88	1.08	0.87
中堤防	0.79	0.79	0.74
大堤防	0.75	1.55	1.10

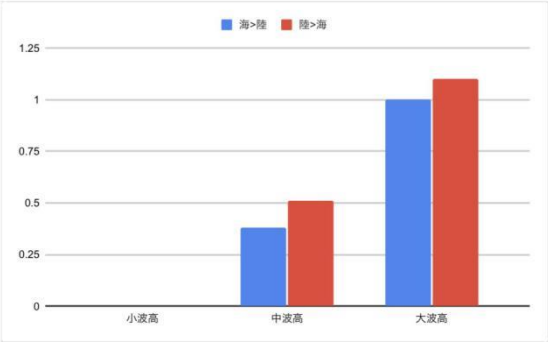
表 5. (ii) 各場合の比率

4-2-2. 二線堤

変数は波高種と配置の 2 つである．ここでの比率は，海側に高い堤防を置いた場合の越流量を陸側に高い堤防を置いた場合の越流量で割った値とする．

波高種\配置	海>陸	陸>海
小波高	0.0	0.0
中波高	0.38	0.51
大波高	1.0	1.1

表 6. 各場合の平均越流量



グラフ 4. 各場合の平均越流量

	比率
小波高	-
中波高	0.75
大波高	0.91

表 7. 各波高での比率

4-3. 単線堤のグラフが示すこと

(i)では,各場合のまとまりの中で比較することで波高による越流量の差が,同色の棒グラフを比較することで各場合における越流量の差がわかる.(ii)では前者が堤防の高さによる越流量の差を示す.また,共通して①②,③④,⑤⑥のまとまりで比較することで位置による越流量の差がわかる.

5 考察

5-1. 単線堤

全体的に陸側に配置した方が越流量が少なかった.この原因については 2 つの仮説が考えられる.1 つめは,水上では津波は水深が低くなるほど減速し,後ろから追突する波により波高が高くなる[5].それに対し,陸上では津波が進むにつれて波高が低くなると考えられる.結果からわかるように,波高が低いほど越流量が少ない傾向にあるため,2 つめは,陸地に近づくにつれ津波が減速し,勢いが失われたため,このような結果になったと考えられる.

陸側に設置する方が越流量を軽減するという傾向は波高が高くなるほど弱くなっている.要するに,波高が高いほど堤防の設置位置による越流量の差は減少していく.

(ii)③や(ii)⑤からわかるように,堤防が高くなっても越流量が減少しない場合があった.これらは波高が高く堤防高が低い,かつ海側に設置した場合であるから,海側では堤防に対し波が高すぎると堤防の効果を著しく低下させる可能性があることがわかった.

堤防を陸側に配置した場合,海側に配置した場合と比べて越流量を最大 26%軽減した一方,越流量を最大 55%増加させた.越流量が増加する条件に目立った規則性は見られず,統一した条件を見出すことはできなかった.

5-2. 二線堤

高い堤防が海側にある方が越流量が少なかった.この実験において高い堤防ほど勾配がわずかに急であり,衝突した水の陸地方向への速度が減衰し,水の勢いが失われたためと考えられる.また,海側に高い堤防があることで,海側の堤防が越流量を大きく減衰させ,波高が低くなった状態で陸側の堤防に衝突したことで越流量が少なくなったと考えられる.

海側に高い堤防を配置した場合,陸側に高い堤防を配置した場合と比べて越流量を最大 25%軽減した.また,越流量が増加したケースは一つもなかった.

5-3. 単線堤と二線堤

単線堤を陸側に置いた場合から更に海側に堤防を設置すると考えると,多くの場合二線堤の越流量は単線堤を陸側に置いた場合の越流量に比べて波高種を 1 段階下げた状態とほぼ等しくなっている.

単線堤で海側から陸側に配置した場合,二線堤で高い堤防を陸側から海側に配置した場合の最大軽減率はほぼ等しかった.

6 結論

単線堤を用いる場合は陸側に配置する方が越流量を軽減する場合が多い.また,二線堤を用いる場合は海側に高い堤防を配置する方が越流量を軽減する.しかし,単線堤では越流量の軽減率を増加率が上回ることがある.また,堤防に対し波が高すぎると,堤防の高さや位置による越流量の差を著しく減少させることがある.

これらを踏まえると,海側に高い堤防を配置した二線堤を内陸に配置することで,最も越流量を軽減できると考えられる.

7 今度の展望

今回は二線堤を用いる場合に2つの堤防間の距離を一定に保ったが,堤防間の距離を変えることで効果に違いがあるのかについても調べることができる.また,堤防の高さや位置による耐久力の差異について踏まえる必要がある.更に,各地域により地形が異なるため,実際は細かく条件分けして実験しなければならない.

8 参考文献

[1]令和6年1月1日16時10分頃の石川県能登地方の地震について
https://www.jma.go.jp/jma/press/2401/01a/kaisetsu202401011810.pdf
[2]能登地方における気象庁の津波観測地点の状況について
https://www.jma.go.jp/jma/press/2401/05a/noto_tsunamikansoku.pdf
[3]九州地方整備局　建設技術情報等　共通事項(土木工事設計要領)　第II編　河川編
(H29.10)　第3章　海岸施設
http://www.qsr.mlit.go.jp/s_top/h22doboku/kasen/2-04.pdf
[4]津波越流量抑制のための多重防潮堤の設置条件の実験的検討
https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaigan/70/2/70_I_311/_pdf/-char/ja
[5]特集　津波について知ろう
https://www.bousai.go.jp/kohou/kouhoubousai/h22/05/special_01.html#:~:text=%E4%B8%80%E6%96%B9%E3%80%81%E6%B4%A5%E6%B3%A2%E3%81%AF%E3%80%81%E5%A4%A7%E8%A6%8F%E6%A8%A1,%E6%B3%A2%E3%80%8D%E3%81%8C%E6%B4%A5%E6%B3%A2%E3%81%A7%E3%81%82%E3%82%8B%E3%80%82
[6]ソリトン分裂波を考慮した津波シミュレーション
https://www.zenchiren.or.jp/e-Forum/2013/PDF/2013-117.pdf