吐水槽による排水機場の津波減勢効果 に関する水理模型実験

中矢 哲郎¹・桐 博英²・安瀬地 一作³

¹正会員 国立研究開発法人 農研機構 農村工学研究部門 (〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6)

E-mail:tnakaya@affrc.go.jp

²正会員 国立研究開発法人 農研機構 農村工学研究部門 (〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6)

E-mail:kiri@affrc.go.jp

³正会員 国立研究開発法人 農研機構 農村工学研究部門 (〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6)

E-mail: issaku@affrc.go.jp

排水機場建屋前面に配置した吐水槽による津波減災対策の策定のために、吐水槽と機場建屋の間隔や波高が津波減勢効果に及ぼす影響を、圧力計による波圧の直接計測を主とした水理模型実験により検討した。吐水槽を越流しない波高の場合は、建屋に生じる波圧を6割程度減少することができ、吐水槽を越流する波高であっても波圧を4割以上削減できた。吐水槽と機場間隔が大きくなるほど津波減勢効果が小さくなり、基準位置から約6倍の距離になると効果はほとんど得られない。津波の最大波圧は衝突時にピークがあり、越流時には吐水槽と建屋間で渦を伴う鉛直下向きの流速が生じることで波圧が低減した。

Key Words : *hydraulic model, wave pressure, tsunami, drainage pumping station, discharge tank*

1. はじめに

レベル2津波に対する海岸保全施設の減災対策に関しては、海岸堤防は設計対象の津波高を超えた場合でも施設の効果が発揮できる「粘り強い構造」が提案されている。しかし、排水機場に関しては減災対策の検討が遅れている状況にある。東日本大震災津波の排水機場を対象とした被災調査によると、津波により干拓地や低平農地のほとんどの排水機場は壊滅的に被災し、地域の浸水が長期にわたり継続したため遺体捜索や復旧活動に支障をきたしたことが報告されている¹⁾。このように排水機場の被災は地域の早期の復旧・復興の大きな妨げとなるため、減災対策を排水機場に講ずることが必要である。

津波以外においても高潮や洪水による決壊などの大規模な水害時を対象としても排水機場の減災対策の検討がなされており、2012年9月に策定された「首都圏大規模水害対策大綱」においては、排水機場の有効活用により、浸水範囲や浸水の継続時間を大幅に減少させ、避難者数の減少や、復旧・復興活動の早期開始による被害を軽減することが可能としている²⁾。河川防災においても排水機場の壊滅的被害を回避するような施設の運用を実施

することが提言されており、浸水しても停止しにくい排水機場の耐水化の必要性が記されている³⁾。

このように排水機場の減災対策が急がれる中、排水機場の具体的な減災対策として、排水機場の吐水槽が機場建屋前面に設置されている場合は、L2津波に対する減災効果を発揮することが東日本大震災津波被害の現地調査と水理模型実験により示されている⁴⁾。本研究ではこの実験結果の残された課題のうち、吐水槽と機場建屋の間隔が津波減勢効果に及ぼす影響や、津波減勢効果のメカニズムを、圧力計による波圧の直接計測を主とした水理模型実験により明らかにすることを目的とする。

2. 吐水槽による排水機場の減災対策の課題

沿岸域の排水機場の吐水槽の設置目的は、ポンプの振動による堤防や樋管への影響を緩和するとともに、ポンプによって吐き出される水を静水圧の状態に必要な水頭をもって堤外へ排水することであり、樋門や樋管を有する場合は原則として設置する。この吐水槽による排水機場の津波減災対策の策定に向けて、現地調査結果や現行の設計基準に鑑みながら課題を抽出する。東日本大震災津波において、波高10m以上の津波により被災した排水機場のほとんどは大破したが、大破にいたらなかった排

吐水槽現地状況

吐水槽位置関係

図-1 吐水槽により全壊を免れた排水機場

水機場の特徴が現地調査により明らかになっている¹⁾。この排水機場の概要を図-1に示す。吐水槽が海側からみて機場建屋前面に設置されており、海側からの津波の波力を低減したことが予想される。吐水槽は常時から水槽内部の水圧に耐える必要があるため、建屋より強固に建造されていることが多く、配置によっては機場建屋の大きな防護効果を発揮することが予想される。一方で、大破した排水機場のほとんどは吐水槽が建屋前面でなく海側からみて建屋の側面に配置しており海側からの津波が直撃したことが予想されている。

この調査結果をさらに吐水槽を活用した減災機能を有する排水機場の設計に適用してゆく際に考慮すべき、吐水槽の配置位置、吐水槽の高さ、形状について、ポンプ場の設計基準²⁾から検討する。

高さに関しては海側に排水する樋門等が横断する堤防の高さ以上とされている。よって吐水槽の高さは機場建屋の高さより低くなることもありえるため、減災効果を付与するには吐水槽高のかさ上げを行うことも対策として有効である。しかしどの程度の高さまでが有効であるかは詳細な検討が必要であるため、今回は減勢効果が得られた図-1の建屋高さの半分程度で設置された吐水槽高を対象に減勢効果を把握する。

形状に関しては、吐水槽内の流速が速いと水槽内部に部分的な水面上昇や形状損失等が多くなるため、流速を減速させ、ポンプからの水流方向を変換し、水路へ導水

することが必要とされている。よって、吐き出し管端の側壁に傾斜を付けたりあるいは吐水槽底に勾配を付けて流れの方向変換をはかり、反対側の側壁に発生した反射波等が隣のポンプ吐き出し管端に直接向かないようにする必要から、図-1のように先端を狭小化させた形状になる場合もある。よって形状に関しては吐水槽内の流況も考慮する必要がある。

配置位置に関しては、吐水槽に接続する吐出管の全長を短くし、曲がりを少なくし摩擦損失や形状損失を小さくすることが必要とされている。ポンプから海側に排水する場合は、ポンプの吐出管は通常は海側に向いているために、曲がりを少なくする上で建屋前面の吐水槽の配置は妥当である。ここで吐水槽と建屋の間隔は、接続する水路や樋門の場所によっては広がることもありうる。よって高さ、形状は現状のもので固定し、建屋と吐水槽の間隔が津波減勢効果に及ぼす影響の把握を本実験の目的とする。

3. 実験方法

排水機場建屋前面に配置した吐水槽と機場建屋の間隔や波高が津波減勢効果に及ぼす影響を、圧力計による波圧の直接計測を主とした水理模型実験を行った。実験には幅 0.9m、長さ 12m の可変勾配水路を用いた。縮尺は 1/40 スケールを想定し、現地換算にはフルード相似則を適用した。排水機場全体に堤防を乗り越え陸域に遡上した津波が衝突する状況を再現するために、水路に貯留した水をゲートにより急開放することで段波を発生させた。現地スケールで 5m、10m、20m の 3 種類の波を発生させた。実験模型の概要を写真-1に示す。排水機場建屋および、吐水槽の形状、高さは、吐水槽の減勢効果が認められた図-1に相当する排水機場と同様にした。吐水槽の位置は、吐水槽の減勢効果が認められた現地の排水機場の配置の 5.7m を基準として、そこから 4m 毎に海側に吐

写真-1 排水機場実験模型の概要

図-2 実験模型の配置関係

水槽を移動させた．実験ケースは，吐水槽なしを CASE1 とし，基準位置を CASE2 とした．それ以降 CASE3~CASE8 まで 4m 毎に海側に吐水槽を移動させ，3 種類の波高を発生させた．

計測は図-2の位置で流速，水位，波圧を測定した．それぞれ，段波発生からサンプリング周期100Hzで6000データを収集した．沖側の機場建屋から1.5m（60m）位置で沖側の流速，水位を測定した．排水機場前面の位置で流速（流下方向，鉛直方向）を測定した．流速測定には電磁流速計を用い，波高計測はサーボ式波高計を用いた．排水機場への波圧は建屋前面に設置した3箇所の圧力計のうち最大値を採用した．圧力計は圧力トランスデューサ STV-020KP(20kPa)（株式会社サヤマレーディング）を用いた．

4. 実験結果

(1) 吐水槽の有無による排水機場への波力状況

それぞれの吐水槽位置の設定波高における最大波高，最大波圧の一覧を表-1に示す．なお，値は全て現地換算で表示している．基準位置(CASE2)での波圧を見ると，どの波高のケースも吐水槽ありの場合の方が吐水槽なし（CASE1）の場合より大きく減少している．吐水槽ありの場合の波力を吐水槽なしの場合の最大波圧で除した値を1から引いた値を減勢割合と定義し，わかりやすくするために100倍し%表示で表すと，波高5mで54%，波高10mで26%，波高20mで43%となり，津波減勢効果が確認できた．飯塚・松富によると⁹⁾，家屋の造り別の大破に至る水深，流速，抗力はそれぞれ以下のとおりである．

鉄筋コンクリート造：

7m以上，9.1m/s以上，332-603kN/m以上，

コンクリート・ブロック造：

7m，9.1m/s，332-603kN/m

木造：

2m，4.9m/s，27.4-49.0kN/m

表-1 実験結果

CASE No.	初期波高 (m)	吐水槽位置 (機場建屋からの距離)(m)	沖側最大波高 (m)	最大波圧 (kPa)	減勢割合 (%)
1-1	5		4.7	32.1	
1-2	10		9.2	89.6	
1-3	20		14.6	223.5	
2-1	5		4.0	14.9	54
2-2	10	5.7	9.1	65.9	26
2-3	20	(基準位置)	15.2	127.4	43
3-1	5		4.2	16.2	49
3-2	10	9.7	9.3	65.4	27
3-3	20		15.2	129.8	42
4-1	5		4.2	16.1	50
4-2	10	13.7	9.9	70.8	21
4-3	20		15.3	138.1	38
5-1	5		4.3	19.0	41
5-2	10	17.7	9.9	68.3	24
5-3	20		15.2	159.6	29
6-1	5		4.3	21.1	34
6-2	10	21.7	9.3	72.6	19
6-3	20		16.0	190.7	15
7-1	5		4.7	29.5	8
7-2	10	25.7	9.6	66.9	25
7-3	20		15.7	192.1	14
8-1	5		5.3	32.9	-3
8-2	10	29.7	9.7	73.3	18
8-3	20		15.6	201.9	10

これらの値と今回の値を比較するために吐水槽あり，

図-3 基準位置における吐水槽の有無と波力の関係

なしの波圧を波力に換算した結果を図-3に示す．ここで，最大波圧が一樣に建屋に生ずると仮定したために，今回の値はやや過大に評価されている．今回の実験で生じた吐水槽なしの条件における波力は，初期波高5mでコンクリート・ブロック造の破壊条件内，初期波高10m以上で鉄筋構造物の大破条件となっている．この吐水槽なしの条件に対し，吐水槽ありの場合の波力は大きく減少している．波高5mの場合は，波高が吐水槽高さ以下であるため，吐水槽に衝突した津波が吐水槽の背後に死水域が生じ津波進行方向の流速は0以下となり大きな減勢効果が得られる．波高10mでは吐水槽は水没し吐水槽を越流した流れの分が排水機場に作用する．しかし，吐水槽を越流する際に吐水槽背後と排水機場前面の間で縦方向

①排水機場衝突時

②排水機場越流時

③排水機場越流時

写真-2 排水機場への衝突状況
(CASE1-3: 吐水槽なし)

の渦の発生に伴う下方向の高流速が発生し、機場前面へ作用する波力が軽減されることが観察された。波高20mで越流水深が増加した場合でも、吐水槽背後と排水機場前面の間で下方向の高流速が発生し、機場前面へ作用する波力が軽減されることで、減勢効果が維持された。

津波発生から吐水槽による減勢までの状況を写真-2 (Case1-3)、写真-3 (Case2-3) に示す。吐水槽なしの写真-2を見ると、高流速の津波が直接機場建屋に大きな衝撃を与えていることがわかる。吐水槽が基準位置の写真-3を見ると高流速の津波が吐水槽衝突時に大きく減勢した後に機場建屋に作用していることがわかる。その後津波高が吐水槽高を越し、機場建屋を越流しても吐水槽と排水機場間で縦方向の渦が生じ減勢効果が継続していた。吐水槽の高さが、機場建屋の約半分であっても津波減勢効果を発揮できるという結果は、機場建屋の周囲全体を覆うような大掛かりな対策なしに、減災対策を講

①吐水槽衝突時

②吐水槽越流時

③排水機場越流時

写真-3 吐水槽による津波減勢状況
(CASE2-3: 吐水槽基準位置)

ずることが可能になることを示している。既設の機場で海側前面に吐水槽がない場合でも、吐水槽に相当する高さの構造物を建屋前面に設置することで、大きな減勢効果が期待できる。

(2) 吐水槽と機場建屋の間隔と波圧の関係

吐水槽ー建屋間隔と波圧の関係を図-4に示す。どの波高のケースも排水機場からの距離が離れるほど、吐水槽なしの波圧に近づいている。この結果を減勢割合に換算して表示したのが図-5である。基準位置における減勢効果は波高5mで次に波高20m、波高10mの順であった。波高5mの時は津波が吐水槽高を越さないために、吐水槽に衝突した津波は吐水槽背後に逆流するかたちで機場建屋に作用するために最も減勢割合が大きい。波高10m以上は津波は吐水槽を越流するために減勢割合は波高5mの場合より小さくなる。しかし波高20mのときの波圧の

図-4 吐水槽ー建屋間隔と波圧の関係

図-5 吐水槽ー建屋間隔と減勢割合の関係

① 吐水槽衝突時

② 排水機場衝突時

③ 排水機場越流時

写真-4 吐水槽による津波減勢状況
(CASE8-3: 吐水槽-建屋間隔 30m)

方が波高10m時より波圧は大きいにもかかわらず減勢割合が波高20mが波高10m時より大きな減勢割合を示した理由については今回の実験からは推定できなかった。

全ての波高において建屋が受ける波圧は吐水槽との距離に関係があり、実験範囲内では距離が短いほど低減効果があった。機場建屋と吐水槽の間隔を現況の間隔の約 5m で除した値を間隔比 d と定義すると、減勢効果は $d=1$ で 40%, $d=4$ 付近までは 20%, $d=6$ 付近は吐水槽がない場合とほぼ同じ波力となり効果はほとんど得られない。

$d=6$ (間隔 30m) の津波の越流状況を写真-4に示す。進行した津波は吐水槽で大きく減勢されているが、建屋との間隔が大きいため背後からの減勢されていない波が吐水槽背後に回りこみ、機場建屋前面に大きな波圧をもたらしている。これらの結果より吐水槽はより建屋に近い場所に設置することが望ましいといえる。

(3) 吐水槽の津波減勢のメカニズム

図-6 には CASE1-3 (吐水槽なし), CASE2-3 (基準位置), CASE8-3 (30m 地点) における水位, 流速 (グラフ上部) と, 波圧 (グラフ下部) の時系列変化を示す。

CASE1-3 からみると、進行してきた津波が建屋に直接衝突し瞬間的に波圧が大きくなるピークが存在している (緑色の線)。衝突後は機場前面の水位が上昇し越流することで再び波圧が上昇している。CASE2-3 をみると進

図-6 水位, 流速, 波圧の時系列変化

行してきた津波は建屋でなく吐水槽前面に衝突するため吐水槽なしのときは建屋に生じていたピーク値が吐水槽に生じていることがわかる (黒線)。この背後の建屋の波圧はこのピークがカットされており、大きな減勢効果が得られることが明らかになった。また建屋前面の水位が大きくなり吐水槽を越流した時も、吐水槽背後と建屋前面の間で鉛直下向きの流速が継続して生じており (水色の線)、吐水槽前面に比べて建屋前面へ作用する波力が軽減されることで、波圧が低く維持されることがわかった。この下向きの流れは建屋と吐水槽間で生じている鉛直方向の渦であることが目視から推定できた。建

屋と吐水槽間の距離が離れ、減勢効果がほとんど得られないCASE8-3をみると、吐水槽にあらわれる波圧のピーク値が、建屋にも生じていることがわかる。これは写真-4に示すように、吐水槽に衝突した津波が、吐水槽ー建屋間で再び背後からの津波により勢いを増して建屋に衝突するためである。吐水槽と建屋間の距離があるため、鉛直下向きの流れの継続もみられず、減勢効果が低減することも明らかになった。

5. 結論

排水機場建屋前面に配置した吐水槽による津波減災対策の策定のために、吐水槽と機場建屋の間隔や波高が津波減勢効果に及ぼす影響を、圧力計による波圧の直接計測を主とした水理模型実験により検討した結果、以下の結果を得られた。

(1) 吐水槽を越流しない波高の場合は、建屋に生じる波圧を6割程度減少することができ、吐水槽の高さが機場建屋の半分の高さであっても吐水槽を越流する波高であっても波圧を4割以上削減できる。

(2) 吐水槽と機場間隔が大きくなるほど津波減勢効果が小さくなり、基準位置から約6倍の距離になると効果はほとんど得られない。

(3) 津波の最大波圧は建屋の衝突時にピークがあり、吐水槽と排水機場の間隔が狭い場合は、このピークをカットすることができる。越流時には吐水槽と建屋間で渦を伴う鉛直下向きの流速が生じることで波圧が低減した。

今後は吐水槽の高さおよび形状が津波減勢効果に及ぼす影響についても検討することで有効性や適用性を向上させる必要がある。

謝辞：本研究は日本学術振興会科学研究費（若手研究(B), No. 25871100），および農林水産省委託研究「食料生産地再生のための先端技術展開事業」の補助を受けて行われました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中矢哲郎，桐博英，丹治肇：沿岸部排水機場の津波減災対策の検討，土木学会論文集B2(海岸工学) Vol.69, No.2, I_841-I_845, 2013.
- 2) 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, I_1471-I_1476, 2013.
- 3) 阿部国治：大規模水害時における排水機場の耐水化について，<http://www.maff.go.jp/j/kanbo/kihyo02/fukkou/pdf/2506bun1.pdf>，参照2018-5-16.
- 4) 国土交通省：安全・安心が持続可能な河川管理のあり方検討委員会の提言について，http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/bunkakai/20/，参照2016-5-16.
- 5) 農林水産省構造改善局：土地改良事業計画設計基準設計「ポンプ場」基準書，pp.46-50, 1997
- 6) 飯塚秀則，松富英夫：津波氾濫流の被害想定，海岸工学論文集，第47巻，pp.381-385, 2000.

(2016. 3.16 受付)

Hydraulic model for the effectiveness of a water discharge tank to dissipate tsunami energy at a drainage pumping station

Tetsuo NAKAYA, Hirohide KIRI and Issaku AZECHI

We used a hydraulic model to study the effects of a pump house's discharge tank space and of the tsunami wave height on the dissipation of tsunami energy. The model used direct measurements of the wave pressure obtained from a pressure gauge at a drainage pump station to support decisions about how to reduce tsunami damage by controlling operation of the water discharge tank.

It was possible to decrease the wave pressure at the pump house by about 60% if the wave height was below the height of the discharge tank. Even when wave height exceeded the height of the water discharge tank, this approach could reduce the wave pressure by more than 40%. Tsunami energy dissipating effect was so small that discharge tank and a pump house interval became big, and when it was about 6 times of distance from the standard location, the effect was hardly obtained.

The peak wave pressure occurs when the tsunami strikes land, when the downward flow velocity between the water discharge tank and the pump house is high, the wave force in the direction of movement of the tsunami wave was reduced.