堤防線形が津波波圧に 与える影響に関する実験的研究

上島 浩史¹・下園 武範²・田島 芳満³

¹学生会員 東京大学大学院 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:uejima@coastal.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学大学院 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:shimozono@coastal.t.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東京大学大学院 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

2011年3月の東日本大震災に伴った巨大津波による被害は、特に低平地が広がる河口域で顕著に確認された。河口域では河道を含む複雑な地形形状に沿って堤防が築かれるため、堤防線形は曲線である場合が多く、作用する津波波圧はその線形の影響を受けると考えられる。しかし、従来の研究では堤防線形の影響を考慮した研究は少ない。本研究では平面水槽を用いて水理模型実験を実施し、堤防線形が衝撃波圧および重複波圧の分布に与える影響と、それらの波圧の評価法を検討した。その結果、最大衝撃波圧は来襲津波の段波波高と入射角から評価できること、また、最大重複波圧は入射角による低減の度合いが衝撃波圧と比較して小さいことが分かった。さらに曲線堤防の曲率を考慮することにより、最大衝撃波圧および最大重複波圧のより詳細な予測が可能となることが示唆された。

Key Words : *Tsunami, wave pressure, hydrodynamic experiment, form of dyke*

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災に伴う巨大津波は、東北地方沿岸を中心とした各地に壊滅的な被害を与えた。特に津波被害は低平地の広がる河口周辺で顕著に見られた。木村ら¹⁾によると、津波が河口テラスにおいて急峻な波面をもつ段波へと遷移し、その著大な波力によって破堤が引き起こされたことが被害拡大の要因のひとつに挙げられる。

これまで津波に関して、堤防に作用する波圧については多くの研究が活発に行われてきた。福井ら²⁾は、段波の堤体衝突により生じる水位および波圧を詳細に測定することで波速算定式を提案し、同時に段波津波の堤防面遡上高、波圧、堤防越流量について検討した。その後、池野ら³⁾は海域部に位置する構造物に作用する津波波力の設計式を提案し、有川ら⁴⁾が大規模実験でその妥当性を確認した。このように津波波力について実験を通して詳細に研究がなされてきたが、研究対象は断面一次的に現象を捉えるものが主で、堤防線形の効果を対象とした研究は少ない。

河口域では河道を含む複雑な地形形状に沿って堤防が

建設されるために堤防線形は曲線となっている場合が多く、そのような堤防に作用する津波波力は線形の影響を受けることで特定の箇所で作用力が局所的に集中し、また別の箇所では作用力が緩和されるといった状況が生まれることが予想される。このように堤防の箇所により津波波力に偏りが生じることが想定される場合、堤防線形と波圧の分布特性の関係を理解することは堤防設計を行う場合に重要であるといえる。波圧の分布特性を理解することにより、集中する箇所をより強固にするような効率的かつ有効な堤防設計が可能となる。

そこで本研究では、平面水槽を用いた水理模型実験を通して堤防線形が津波波圧に与える影響を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

(1) 実験の概要

一般に津波波圧は、津波が堤防に衝突し作用する初期に瞬間的に発生する衝撃波圧とその後の堤防前面での水位上昇に伴って生じる重複波圧に分けて扱われることが多い。本研究では、段波の入射条件を変えながら様々な

線形を有する堤防に作用させ、堤防に沿った波圧分布および堤防前面での水位変動を計測し、得られたデータを整理・分析することで段波による衝撃波圧および重複波圧の特性と評価法について検討を行った。

はじめに、段波津波実験は奥行き6.5 m、幅11 mの平面水槽を使用して行った。平面水槽中には奥行き0.8 m、幅3 mの段波造波装置（以下、造波装置）が設置されていて、その造波装置の岸側には1/10、1/20の二つの勾配からなる斜面があり、さらに岸側は奥行き1.6 m、幅1.9 mの水平部となっている。造波した段波が左右に広がることなく水平部まで伝播するように、水平部の幅に合わせて岸沖方向に仕切り板を設置している。（図-1参照）

造波装置は貯水槽の前面に空気圧で急開するゲートが取り付けられたもので、その初期貯水深によって様々な波高の段波を発生させることができる。本実験では図-1のとおり、造波装置外の水深を0.2 mとし、水位差が $\Delta h=0.1, 0.15, 0.2$ mとなるように造波装置内の水位を設定して段波を発生させた。また、図-1の点A, B, Cに容量式波高計を設置することで、初期の造波装置内外の水位差および発生させた段波の大きさを確認できるようにした。

図-1 平面水槽と設置条件の概要図 単位(m)

(2) 堤防模型

本実験は縮尺1/100で行った。用いた堤防模型は高さ6 cm、長さ約62.5 cm、厚さ5 mmの亚克力板を組み合わせることで制作した直立堤で、直線堤防と曲率の異なる2種類の曲線堤防の計3種類とした。直線堤防は2枚の亚克力板で制作し(長さ125 cm)、曲線堤防については曲率の異なる放物線部(曲線長: 62.5 cm)の両端に直線部(62.5 cm)を繋げることで製作した。図-2はその模式図であり、原点の図-1のD点に一致するように設置した。このとき、y軸の正方向が沖側を表している。また堤防設置の際、段波の作用により模型に変位が生じないように裏側から複数ヶ所を支持板で強固に支えた。図-2中の1~5の堤防前面の各点で圧力および水位のデータを測定した。圧力については(株)SSK製の直径1 cm、厚さ3 mmの高感度ディスク型圧力計(型番:P310)を堤防前面底部に設置している(図-3参照)。同じ地点で圧力および水位を測定する際には小型の波高計をわずかに位置をずらして設置することで圧力計測に影響しないように配慮した。また波高計を設置する際に、先端部と底面とに数mmの隙間が生じるため、あらかじめ正確な隙間の高さを計測することで得られた水位データを補正した。直線堤防では等間隔に圧力計および波高計を設置している一方で、曲線堤防では頂点に近い曲線部で細かくデータを取れるように配置した。また曲線堤防では、岸沖方向に対して左右対称という仮定の下、堤防前面の片側のみを計測している。

図-2 堤防模式図

図-3 圧力計設置例

(3) 実験ケース

本実験のケースをまとめたものを表-1に示す。直線堤防は段波の入射角が $\theta = 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ となるよう計4通りの設置をした。以下、このケースをCase1- θ と表す。また曲率の小さい曲線堤防のケースをCase2、曲率の大きな曲線堤防のケースをCase3とする。全てのケースで造波装置内外の水位差 $\Delta h = 0.1, 0.15, 0.2$ mの3種類の段波を5回ずつ起こし、計90回分のデータを整理した。図-1の点B、Cで測定した段波発生後の初期の水位変動は堤防線形によらずに一定であるので、入射波の再現性を確認しながら全てのケースで繰り返し測定した。

3. 実験結果

(1) 水位と圧力の関係

本実験で得られた計測データの代表的な例を図-4に示す。図はある計測点での浸水深および圧力の時系列データを重ねて表したものであり、赤色のグラフは圧力を、青色のグラフは浸水深を表している。圧力と浸水深を同次元で比較できるように、圧力は流体密度 ρ と重力加速度 g を用いて水頭で表しているため、両グラフが重なっている範囲ではおよそ圧力が静水圧となっているとみることができる。

圧力の特徴として、段波の先端部が堤防前面に衝突した瞬間に急激な上昇がみられ、その後、堤防前面での反射波と、後続する入射波が重なり合うことによる水位上昇に伴う圧力上昇がみられる。本研究では前者を衝撃波圧、後者を重複波圧として扱う。多くの場合は、圧力は浸水深と同じタイミングでピークを取ったあと、ほぼ静水圧となって水位の低下とともに緩やかに下降していく。以下、衝撃波圧の最大値を p_{max} と表記し、重複波圧の最大値を p'_{max} と表記する。水位の特徴もおおよそ圧力と似た傾向がみられ、段波は先端部が堤防前面に当たると急激に鉛直方向上向きに跳ね上がり、その落下した水と後

続の水塊が重合して浸水深のピーク値を取ったあと、緩やかに下降していく。浸水深は容量式波高計を使用して計測しているため、その値は飛沫の高さを表すものではない。本研究では跳ね上がった際の水深の最大値を h_{max} と表記し、反射波と重合した浸水深のピーク値を h'_{max} と表記する。本実験ではほとんどの場合、重複波圧は衝撃波圧と同等あるいはそれより大きくなる傾向が見られた。また衝撃波圧は入射角が 40° 以上になると明確に観察することが難しくなる傾向があり、その場合は欠測とした。

また、図-4で $t=5$ s以降にみられる水位上昇は平面水槽の壁で反射した波が伝わってきたものであるため本研究では考察の対象としない。

前述のとおり、本実験では各ケースで5回ずつ計測を行っているため、計測値のピーク値を読み取ったうえで、5つのデータの平均をそのケースの代表値とした。標準偏差はほとんどの場合、10%以内に収まっており、相対偏差は入射波高の大きい条件ほど大きくなる傾向が見られた。このようにして求めた衝撃波圧および重複波圧の堤防に沿った分布を調べることで堤防線形が津波波圧に与える影響を議論する。

表-1 実験ケース

堤防形状	設置方法	段波条件
直線	$\theta=0^\circ$	$\Delta h=10, 15, 20$ (cm)
	$\theta=20^\circ$	
	$\theta=40^\circ$	
	$\theta=60^\circ$	
曲線(緩)	冲向きに凸	$\Delta h=10, 15, 20$ (cm)
曲線(急)	冲向きに凸	$\Delta h=10, 15, 20$ (cm)

図-4 代表的な浸水深・圧力の時系列データ

図-5 浸水深の時系列データ（上段）と圧力の時系列データ（下段） $\Delta h = 0.15$ m

図-5は $\Delta h = 0.15$ mのCase1-0, Case2, Case3の堤防前面の計測点におけるデータを浸水深、圧力ごとに分け、整理したグラフである。上段が浸水深、下段が圧力を水頭に換算した時系列データで左から順にCase1-0, Case2, Case3のデータを表している。Point1~5は図-2で表されている計測点1~5に相当する。また $t = 0.5$ sで堤防前面に段波が衝突するように $t = 0$ sを設定した。

Case1-0について、直線堤防に対して段波が垂直に入射したにも関わらず、衝突時の水位変動および圧力変動のデータには堤防前面の観測点によって多少のばらつきがみられた。これは入射する段波の先端部が非一様であることによるものと考えられる。

Case2, Case3をみると圧力は衝撃波圧および重複波圧ともに堤防頂点付近で最も高い値を示し、端部にいくに従って徐々に低減していく。曲率の大きい堤防ほどその低減は顕著に現われ、入射角が 40° を超えた辺りから衝撃波圧を明瞭に識別することができなくなる。水位変動についても概ね圧力変動と同じ傾向が見られるが、入射波の堤防衝突時においては、波高計の設置位置により、堤防前面に沿って跳ね上がった水塊の捉え方に違いが生じている。そのためCase3のPoint3で大きな値を取る一方でPoint2では跳ね上がりを捉えられてはいないが、対応

する圧力変動をみてもこの跳ね上がりは堤防前面に作用する圧力に寄与していないため、以下では考察の対象としないこととする。

(2) 波圧評価法に関する考察

a) 最大衝撃波圧

直線堤防に段波が垂直に入射する場合の衝撃波圧については、一般的に朝倉⁹⁾による評価法が広く用いられている。これによると、最大衝撃波圧は通過波の最大波高 η によって無次元化すると、3程度の値までに収まる。

本実験で行った、設置角の異なる直線堤防 (Case1-0, 20, 40, 60) および沖側に凸の曲線堤防 (Case2, 3) の結果について、無次元最大衝撃波圧と堤防前面の計測点での局所的な段波の入射角の関係を図-6に示す。縦軸は最大衝撃波圧 p_{max} を η によって無次元化した値を表し、横軸が入射角を表している。異なる色で各ケースを、異なる形状で段波の大きさを区別している。ケースは図中に表示してあるとおりで、段波の大きさは Δ , $\circ$, $+$ の順に $\Delta h = 0.1, 0.15, 0.2$ mのものを示している。また、図中には朝倉の評価式に入射角の余弦を乗じたものを実線で表している。衝撃波圧は入射角が 40° を超える範囲で明瞭に現れなくなってくるため、衝撃波圧が読み取れな

かったものは欠測としてデータには含めなかった。

この結果から、本実験の結果では、入射角が 0° の場合に実線を上回っているものはいくつかみられるものの、最大衝撃波圧は朝倉らの評価式に加え入射角を考慮することで概ね包絡できることが分かる。つまり衝撃波圧は堤防に作用する段波の先端部の波形が主に関係するため、堤防線形による集中などの影響を受けにくく、沖合いに対して凸な場合は、局所的な入射角で概ね決まると考えられる。また、最大衝撃波圧に関しては段波の大きさの違いによる大きな傾向の差はみられなかった。

b) 最大重複波圧

本実験で行った、設置角の異なる直線堤防 (Case1-0, 20, 40, 60) および沖側に凸の曲線堤防 (Case2, 3) の全てのケースの結果について、最大重複波圧と浸水深 h'_{max} の関係を図-7に示す。縦軸は流体密度 ρ と重力加速度 g を用いて最大重複波圧を水頭に置き換えた値を表していて、横軸は h'_{max} を表している。図のマーカーの色および形状は図-6と同様に分けて区別している。また実線で $Y=X$ を表している。この結果から最大重複波圧はその値を取るときの水位に対応する静水圧と説明することができる。

段波が大きいほどデータのばらつきが大きくなり、また h'_{max} が $p'_{max}/\rho g$ に比べ大きくなる傾向がみられた。この傾向は h'_{max} が6 cm (堤防高さ) を超えたあたりからよくみられるようになることから、段波が堤防を越流することで堤防前面では浸水深に相当する圧力よりも小さな値となっていると考えられる。

次に、最大衝撃波圧の評価と同様に、無次元最大重複波圧と堤防前面の計測点での局所的な段波の入射角の関係をまとめたものを図-8に示す。図のマーカーの色および形状は図-6, 7と同様に分けて区別している。

この結果から、沖側に凸の曲線堤防では、特に頂点付近で最大重複波圧が抑えられているが、入射角と最大重複波圧の低減の関係は最大衝撃波圧と比べ緩やかであることが分かった。つまり、河口部では上流側の堤防を設計する際にも最大重複波圧を考慮する必要があることが示唆された。

図-7の結果から重複波圧は水位に対応していることから、堤防前面での水位のせき上げ高が重複波圧を決めることが考えられ、入射角が大きくなるにつれてこのせき上げ高が低減することで最大重複波圧が低減していくと推察できる。また曲線堤防の頂点付近で最大重複波圧が抑えられる理由は、直線堤防に段波が直射する場合であれば本来せき上がるはずの流体粒子が、堤防の後方に受け流されることにより、せき上げ高が抑えられたことが挙げられる。

図-6 最大衝撃波圧と入射角の関係
(Δ : $\Delta h = 10$ cm, $\circ$: $\Delta h = 15$ cm, $+$: $\Delta h = 20$ cm)

図-7 最大重複波圧と水位の関係
(Δ : $\Delta h = 10$ cm, $\circ$: $\Delta h = 15$ cm, $+$: $\Delta h = 20$ cm)

図-8 最大重複波圧と入射角の関係
(Δ : $\Delta h = 10$ cm, $\circ$: $\Delta h = 15$ cm, $+$: $\Delta h = 20$ cm)

C) 曲率の影響

堤防線形が最大衝撃波圧および最大重複波圧に与える影響を評価するために曲率と各波圧の関係をまとめた。

はじめに曲率 κ は曲率半径 R を用いて以下のように表される。

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{d^2y}{dx^2} \left(1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right)^{-\frac{3}{2}} \quad (1)$$

図-9は横軸が曲率 κ に η を乗じることで無次元化した値を、縦軸が最大衝撃波圧および最大重複波圧を η で無次元化した値を表している。入射波先端部の非一様性を考慮し、観測地点の座標および局所的な入射角の等しい Case1-0のPoint3, Case2のPoint1, Case3のPoint1のデータのみを抽出して整理した。

本実験の結果から、堤防形状が沖側に凸の場合、各最大波圧は $\kappa\eta = 0 \sim 0.1$ の範囲で大きく変化し、曲率が大きい地点では最大衝撃波圧が増大し、また、最大重複波圧については $\kappa\eta = 0$ の地点で最大値を取ることが分かった。その理由として、最大衝撃波圧については、曲率が一定以上大きいと入射波先端部の非一様性に影響されず、入射波の衝突を直接受けることが考えられる。また最大重複波圧については、その地点に衝突した水塊が端部へ受け流されやすくなることでせき上げ高が抑えられるからであると推察される。

図-9 衝撃・重複波圧と曲率の関係

4. 結論

本研究では、段波津波実験を行い、特に沖側に対して凸な堤防の線形と波圧の関係について考察を行った。得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) 衝撃波圧は入射角が 40° を超える程度から明瞭な識別が困難となる。最大衝撃波圧は局所的な入射角と段波波高から概ね評価できる。
- (2) 最大重複波圧の入射角による低減は、最大衝撃波圧に比べ緩やかで、河口部では上流側まで一定以上の重複波圧が堤防に作用する。
- (3) 曲率が一定以上大きいと最大衝撃波圧は増大し、また最大重複波圧は曲率が0である地点で最も大きな値を取る傾向がみられた。

謝辞：本研究は河川整備基金の助成を受けて実施された。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 木村雄貴, 下園武範, 佐藤慎司：高解像度津波氾濫モデルに基づく海岸堤防の越流・破堤による後背地の影響評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71 (2015) No.2
- 2) 福井芳郎, 白石英彦, 中村 充, 佐々木泰雄：津波研究 (II) — 一段波津波が堤防におよぼす影響 —, 海岸工学研究発表会論文集, 第9巻, pp50～pp54, 1962
- 3) 池野正明, 松山昌史, 田中寛好：ソリトン分裂津波の大陸棚上での変形とその防波堤設計波圧に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第45-1巻, pp366～pp370, 1998
- 4) 有川太郎, 池辺将光, 山田文則, 下迫健一郎, 今村文彦：護岸・陸上構造物に対する津波波力の大規模実験, 海岸工学論文集, 第52巻, pp746～pp750, 2005
- 5) 朝倉良介, 岩瀬浩二, 池谷 毅, 高尾 誠, 金戸俊道, 藤井直樹, 大森政則：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp911～pp915, 2000

EXPERIMENTAL STUDY ON TSUNAMI-INDUCED PRESSURE DISTRIBUTION ALONG CURVED SEAWALLS

Hirofumi UEJIMA, Takenori SHIMOZONO and Yoshimitsu TAJIMA

The 2011 Tohoku Tsunami severely damaged river mouth areas protected by seawalls and dikes. In a river mouth area, the defense structures are usually meandering as they are aligned along complex coastlines and river channels. The purpose of this study is to clarify the tsunami force exerted on curved seawalls. Laboratory experiments were conducted to measure wave pressure distribution along seawalls which are convex to incident waves. The results show that the impact wave pressure rapidly decreases with the local angle of wave incidence, whereas the standing wave pressure reduces with a relatively lower rate. It was also found that the local curvature of seawall tends to enhance the impact pressure, while relaxes the standing wave pressure.