スロープ式造波方法の提案とその性能向上に関する検討

平間 史泰¹・畠山 純一²・加藤 茂³・岡辺 拓巳⁴

¹学生会員 豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 建築・都市システム学専攻
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1)

E-mail:f-hirama@umi.ace.tut.ac.jp

²学生会員 豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 建築・都市システム学専攻
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1)

E-mail:j-hatakeyama@umi.ace.tut.ac.jp

³正会員 豊橋技術科学大学教授 大学院工学研究科 建築・都市システム学系
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1)

E-mail:s-kato@ace.tut.ac.jp

⁴正会員 豊橋技術科学大学助教 大学院工学研究科 建築・都市システム学系
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1)

E-mail:okabe@ace.tut.ac.jp

長周期且つピークの鋭い波を造波するには大型な実験装置の使用や水路を工夫する必要があるが、実験設備の使用上の制約から困難な場合が多い。本研究では、既存施設に大幅な改良をせず、鋭いピークを持った波を造波させる「スロープ式造波方法」を提案し、本造波方法による造波特性や性能向上に関して実験、数値計算を用いて検討を行った。その結果、水路実験により高い再現性と鋭いピークを持った波を造波可能であることを確認した。数値計算によりタンク貯水量を増加させることで、最大波高が増加することが明らかとなった。また、スロープ上に制御板を設置することで波高が増大し、より効率的な造波が可能であることが明らかとなった。以上より、本造波方法を用いることで水路に大幅な改良をせず、鋭いピークを持つ波を造波可能であることが示された。

Key Words : slope-type wave making method, experiment, numerical calculation, sharp wave profile

1. はじめに

現在、津波を想定した鋭いピークを持った波の造波方法として、ダムブレイク式や水塊落下式、造波機を使用するもの等、多くの種類がある。その中から測定対象により適切な造波方法が選択され、模型実験が行われている。しかし、それぞれの造波方法にも課題があり、例えば、ダムブレイク式ではゲート開閉速度が出力波高に影響を与えたり¹⁾、水塊落下式では落下時に水塊の形が乱れてしまう²⁾ことによる波高の減少等が課題として挙げられる。また、一般的な水路で汎用的に用いられるピストン式造波機では、周期が長く且つ波高の大きな単独の波の造波は容易ではない。これらへの対応として、実験設備の大型化や水路急縮のような工夫が行われる³⁾。

これを受け、近年では様々な波を造波できるような造波装置が提案されている。平石ら²⁾はピストン型造波機と水塊落下、流水ポンプを組み合わせ、津波初期の段波を形成するソリトン波を造波する造波装置を開発し、

織田ら⁴⁾は貯水タンクと吸気バルブを調節することにより、長周期で大波高の波を造波可能なチャンバー式造波装置を提案している。しかし、これら造波方法においても、大型の実験装置が必要であったり水路を改良して新たな装置を設置する必要がある造波方法が一般的であると言える。一方、実験設備の使用上の制約から水路へのゲート設置や装置の大型化は困難な場合も多い。したがって、可能な限り造波に対して機械的な制御を必要とせず、既存の水路に可能な限り手を加えない造波方法の開発は、設備の有効利用の観点からも非常に有用であると考えられる。

そこで、本研究では既存施設に大幅な改良を加えずに鋭いピークを持った波を造波させる新たな方法として「スロープ式造波方法」を提案し、小型（模型）（図-1(a)）、大型水路実験（図-1(b)）によりスロープ式造波の妥当性を確認するとともに、数値実験による詳細な造波特性と課題の把握、本造波方法の性能向上に関する検討を行った。

2. スロープ式造波方法の概要

本造波方法は、水路上部に設置したタンクからスロープを介して大量の水塊を水路内に流入させることにより、水塊の運動エネルギーを波の進行方向に効率的に伝えることで造波を行う方法である。図-1(a)のように、造波機上部の空間に貯水タンクを設置し、そこから水路内にスロープを設置するため、水路自体にはほぼ手を加えていない。造波時にはタンク内に敷き詰めた止水シートをタンク前面（開口部）の上端部に固定し、規定水量に達し次第、そのシート固定を解放することで、タンク内水塊の自重により落下させる。そのため、シンプルかつ人為的な影響が少ないのが特徴である。後述するように、本方法により最初に鋭いピークを持った波が造波可能であることを確認している。

図-1 スロープ式造波方法のイメージ

写真-1 作成した小型水路

表-1 小型水路実験条件

貯水量	初期水深	ケース数
3~9L (3 ケース)	5~20cm (7 ケース)	21

表-2 大型水路実験条件

貯水量	初期水深	ケース数
60~100L (3 ケース)	20~30cm (3 ケース)	9

3. 造波実験方法及びその結果

(1) 小型水路の概要

スロープ式造波方法による造波の妥当性を確認するために簡易的に作成・実験が行える小型水路にて、造波の確認実験を行った。写真-1 に作成した小型水路を示す。水平水路の寸法は、全長3.6m、高さ0.3m、幅0.3mとし、スロープ勾配は1/3である。水路内に容量式波高計を設置して、波の再現性、波形の確認、タンク貯水量・水路内水深と波高の関係の把握を行った。小型水路実験における実験条件を表-1 に示す。

(2) 大型水路の概要

水路および設置するスロープの大型化に伴う造波の再現性を確認した。写真-2 に大型水路に作成・設置したスロープを示す。水平水路の寸法は、全長16.5m、高さ0.6m、幅0.8mである。波高計測地点の関係上、スロープの勾配は1/2とした。小型水路実験のスロープ勾配とは異なるが、スロープ勾配が波高に対して大きな影響がないことは小型水路において確認を行っている。容量式波高計は水塊が水面に衝突した時の水面の乱れの影響が出ないスロープ先端から1.9m程度離れた位置に設置した。大型水路実験における実験条件を表-2 に示す。

(3) 造波実験の再現性の確認

本造波方法が目標とする波形は、図-2 のような東北地方太平洋沖地震津波時の釜石港沖20kmのGPS波浪計で観測された最も波高が高くなる1波目を想定した鋭いピ

写真-2 作成したスロープ（大型水路）

図-2 GPS 波浪計で観測された津波波形⁵⁾

ークとなる波形である⁹⁾。これを踏まえ、図-3に小型水路における本造波方法で発生させた1波の水位変化を示す。小型水路実験において、目標とした鋭いピークを持つ波が発生していることを確認した。また、全ケースで最大5mm程度の誤差であり、全体の波形も大きな変化は見られなかった。この結果から各ケース2回の実験で再現性を確認できたと判断した。

スロープ勾配による波形の変化も確認するため、図-4に小型水路実験におけるスロープ勾配変化による波形の比較を示す。この結果より、勾配を3種類で比較したが、本研究で対象としている第1波目に大きな変化は見られなかった。この結果より、スロープ勾配による造波への影響は少ないことを確認した。

同様に、大型水路においても実験の再現性の確認を行った。図-5に大型水路における水位変化を示す。その結果、小型水路に比べ最大水位に1~2cm程度のばらつきはあるものの、大型水路においても最大波高16cm程度の造波が可能であり、再現性も十分であることを確認した。大型水路実験については、小型水路実験に比べてスケールが大きくなったことで2回の再現のデータ比較では確認としては不十分であると判断し、最低5回の実験を行っている。

また、小型、大型水路に共通して、鋭いピークを持った波を造波することが可能であるが、造波にあたり水塊の自重を利用しているため、現段階では周期や波形を制

御することは困難であることが本造波方法の欠点であると考えられる。

(4) 造波実験による造波特性の把握

図-6、図-7に小型、大型水路における水路内水深、タンク水量と最大波高の関係を示す。全ての実験において砕波は生じていないことを確認している。大型水路の結果(図-7)では、傾向を確認しやすくするために5回の実験結果の平均値もあわせてプロットしている。小型、大型水路実験結果より、共通してタンク貯水量 V が増加すると水深 h に関わらず、最大波高が増加することを確認した。また、小型水路実験においては、タンク水量によって発生する最大波高に限界があると考えられることも明らかとなった。

図-5 大型水路における水位の時間変化

図-3 小型水路における水位の時間変化

図-4 スロープ勾配変化の波形 (小型水路)

図-6 水深、貯水量と最大波高の関係 (小型水路)

図-7 水深、貯水量と最大波高の関係 (大型水路)

4. 数値計算を用いた造波性能向上に関する検討

(1) 数値計算条件

造波時のより詳細な流体運動を把握するために数値計算を用いて解析を行った。解析には数値波動水槽 CADMAS-SURF⁷⁾を用いて、断面2次元での検討を行った。計算対象とする水路の寸法は大型水路と同様とし、計算の再現性の確認には大型水路実験の実験結果を参考にした。数値計算の解析条件、解析ケースを表-3、表-4に示す。表-3において、X方向は水路方向、Y方向は鉛直方向を示している。表-4において、数値計算でのタンク貯水量を最大110Lとしているが、これは本実験規模の大型水路実験では最大貯水量が110Lであったためである。また、水深についても最大40cmとしているが、本研究で使用している実験水路が高さ0.6mであるため、これ以上の水深では水路から溢れてしまうことを考慮してこの条件を定めた。

(2) 数値計算による造波特性の把握

大型水路の実験条件を参考に、水位の時間変化の比較により数値計算の再現性を確認したもので最大波高の誤差が最も小さいケースを図-8、最も誤差が大きいものを図-9に示す。本研究で対象としているのは、最も波高が大きくなる第1波目のみのため、2波目以降の再現性については考慮していない。また、全ケースの実験と計算結果の誤差を比較したものを図-10に示す。この結果より、最も誤差が大きいケースでは、計算値が実験の平均値より最大2cm程度過大となっていることが分かる。

数値計算による再現性の確認後、より詳細な実験条件での水深、タンク貯水量、最大波高の関係を検討した。貯水量変化における計算波高を比較した結果を図-11に示す。この図より、実験と同様に貯水量を増加させても発生する最大波高には限界があることが明らかとなった。どの解析ケースにおいても、波高計測点で碎波は生じていないことを確認している。本研究の実験規模では、タンク貯水量を増加させても最大18cm程度が限界であり、ある水深では貯水量を増加させても最大波高が低下してしまうケースも確認した。ただし、本研究では全ケースを同じ格子間隔で計算を行っているため、水面への流入量が増加していくことによる複雑な水面の乱れ等の影響が正確に計算されていない可能性も否定できないため、今後、詳細な数値計算の実施も検討課題の1つである。

表-3 解析条件

計算時間	間隔 Δt	AUTO
	終了時間	5.0s
解析領域	X方向	10.000m
	Y方向	2.000m
格子間隔	X方向	0.020m
	Y方向	0.010m

表-4 解析ケース

貯水量	初期水深	ケース数
50~110L (7 ケース)	5~40cm (8 ケース)	56

図-8 実験、計算結果の比較 ($h=30\text{cm}$, $V=60\text{L}$)

図-9 実験、計算結果の比較 ($h=25\text{cm}$, $V=100\text{L}$)

図-10 実験結果と計算結果の誤差
($h=20\text{cm}$: 赤, $h=25\text{cm}$: 青, $h=30\text{cm}$: 緑
 $V=60\text{L}$: ○, $V=80\text{L}$: □, $V=100\text{L}$: ◇)

図-11 貯水量変化における計算波高の比較

(3) 水塊落下後の流況について

図-11より、本実験規模では貯水量を増加させても、発生可能な最大波高には限界があることが確認できた。この結果をうけ、図-11における $h=30\text{cm}$ のみの結果を図-12に示す。この図では、90Lに比べ100Lの波高が低くなっていることが分かる。この結果より、水深やタンク貯水量などの条件によっては水路内において造波のための運動エネルギーが失われる可能性があることが分かった。この原因を探るため、エネルギーが失われる地点と考えられる水塊突入地点の流況観察を行った。図-13に、 $h=30\text{cm}$ における限界波高に達したケース ($V=90\text{L}$) と波高が低下したケース ($V=100\text{L}$) のスナップショットを示す。この結果より、 $t=0.09\text{s}$ では両ケースに大きな違いは見られない。しかし、 $t=0.11\text{s}$ では波高が低下していない図-13(a)では衝突した水塊が水を波の進行方向（右方向）に押し出している一方で、波高が低下した図-13(b)では水槽内の水を波の進行方向に十分に押し出せず、押し出された水塊が分裂していることが確認できた。この結果より、スロープ端部において水塊の運動エネルギーが効率よく造波へと転化されていないため、発生できる最大波高に限界が生じてしまったり、波高が低下してしまったことが考えられる。

以上のことからスロープ式造波方法では、水塊が水面と衝突する時のスロープ上における流動が重要となってくることが確認できた。

(4) スロープ改良の効果と考察

図-13より水塊の流入時に、その運動エネルギーが効率的に造波外力として作用していないことを確認した。この問題を解決するため、スロープ上での簡易な改良によって造波性能を向上させる方法を検討した。そこで、図-14のようなスロープの途中に水面下に侵入した水塊の移動方向を変化させるための制御板を設置することで、水塊の運動エネルギーを造波のために水面付近に集中させる改良を試みた。また、水塊の制御板への衝突によってより多くの水塊を水面方向に送り出すことで、水面を押し上げる効果も期待した。図-15により、制御板の設置方法を検討した。スロープ先端よりさらに前面に制御板を設置することにより、水塊を水面に集中させる効果があることが確認できた。これを受け、図-16に制御板設置前後の最大波高の比較を示す。制御板を設置前とスロープ先端（最深部）に設置したケース（図-15(a)）、先端部から水平方向に20cm手前に設置したケース（図-15(b)）を比較した。まず、制御板をスロープ先端に設置したケースと設置前の波高を比較すると、タンク貯水量に関係なく、波高に大きな変化は見られない。しかし、制御板を手前に移動しやや浅い位置に設置した場合は、設置前と比較すると、多くの貯水量で波高が高くなる結

図-12 貯水量変化における計算波高 ($h=30\text{cm}$)

(a) 波高が低下しないケース ($V=90\text{L}$)

(b) 波高が低下したケース ($V=100\text{L}$)

図-13 水塊流入時の様子

図-14 スロープ改良のイメージ

(a) スロープ先端

(b) スロープ先端より手前

図-15 制御板位置による流動比較 ($V=100\text{L}$)

図-16 制御板設置前後の波高比較

果を得た。また、設置前では90L程度が造波波高のピークとなっていたが、設置後（前面）では造波波高にピークは確認されず、貯水量が増加するとそれに伴い、波高も増加している。波高の増加にピークが現れないことから、制御板を設置することによりタンク貯水量の変化に見合った効率的な造波が可能となることが確認できた。しかし、制御板の配置位置により、結果が大きく異なってくることも確認されたため、改良後に実験を行う際には制御板の位置の調整が必要である。

以上より、制御板の調整は必要ではあるが、スロープ上端部（水面付近）の流動を把握し改良を行っていくことで、より効率的な造波が可能であることが示された。

5. 結論

本研究では、既存施設に大幅な改良を加えず、鋭いピークを持った波を造波することを目的とした新たな造波方法についての提案、造波特性の把握、造波性能向上について検討を行った。主な結論を以下にまとめる。

- 1) 小型、大型水路実験において、スロープ式造波方法の再現性と鋭いピークを持った波を造波可能であることを確認した。
- 2) 本造波方法では、水塊の自重により造波を行っているため、波形や周期の制御は困難である。

- 3) タンク貯水量を増加させると最大波高は増加する傾向にあるが、必ずしも増加するわけではない。また、タンク貯水量により発生可能な波高には限界がある。
- 4) 数値計算結果から、タンク貯水量は最大波高に影響を与えることを確認した。
- 5) 数値計算により、スロープ上に制御板を設置することで、最大波高を増大させることが可能であることが確認できた。これにより、設置位置等の調整は必要だがスロープに改良を加えていくことで、より効率的な造波が可能であることが示された。また、この改良は比較的簡易なものであり、実際の水路実験においても十分に適用が可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 鶴ヶ崎和博：ドラム型遠心模型実験法の開発と沿岸域実問題への適用，京都大学学術リポジトリ紅，pp.103-105，2009。
- 2) 平石哲也，森信人，安田誠宏，東良慶，間瀬肇，アディブラスティヨ，大倉翔太：複数の造波手法を有する津波再現装置で造波された津波の特性，土木学会論文集B2(海岸工学)，第71巻，pp.349-354，2015。
- 3) 有川太郎，中野史丈，大坪大輔，下迫健一郎，石川信隆：遡上津波力による構造物の変形・破壊挙動の検討，海岸工学論文集，第54巻，pp.836-840，2007。
- 4) 織田幸伸，伊藤一教，本田隆英：津波水理実験のための造波装置の導入(その1)，大成建設センター報，第45号，pp.44-1-44-4，2012。
- 5) ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)：東北地方太平洋沖地震による津波観測データ，<https://nowphas.nmlit.go.jp/prg/pastdata/static/sub311.htm>，参照：2017-05-16。
- 6) 河合弘泰，佐藤真，川口浩二，関克己：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震津波の特性，港湾空港技術研究所報告，第50巻，第4号，pp.8-23，2011。
- 7) 財団法人沿岸開発技術研究センター：CADMAS-SURF 数値波動水路の研究・開発—数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会中間報告書—，沿岸技術ライブラリー，No.30，2008。

(2017.3.15 受付)

PROPOSAL OF SLOPE-TYPE WAVE MAKING METHOD AND ITS IMPROVEMENT ON PERFORMANCE

Fumiyasu HIRAMA, Jun-ichi HATAKEYAMA, Shigeru KATO and Takumi OKABE

It's necessary to use a large scale experimental facility and devise the channel in order to generate wave with a sharp peak and a long period. However it's difficult because of restriction on use of experimental equipment. In this study, "slope-type wave making method", which is not necessary to remodel the facility extensively, is proposed and the characteristics of wave generation and the performance of wave making were investigated using experiments and numerical calculations. As a result, it was demonstrated that the proposed method can produce a sharp wave profile with high reproducibility in experiment. Numerical experiment indicated that the maximum wave height becomes higher by increasing of the volume of water tank. In addition, installation of a control plate on the slope yielded increase of the wave height, and achieved more efficient wave formation by the simple modification. Consequently, it was demonstrated that the proposed method can make wave with a sharp peak by only small modification of a channel.