

シリーズ 港湾技術の創生期に学ぶ ~廣井勇に学ぶ OTARU ゼミナールの活動より~ (その2)

廣井波圧式の背景と成立

関口 信一郎 *

1. はじめに

小樽港北防波堤(1897~1908)の建設は、近代港湾の調査、計画、設計、施工のすべてにわたり日本人の手によって初めてなし遂げられたこと、その技術は当時の世界最高水準であること、職員の教育のためにまとめた「築港卷之一~卷之五」はその技術水準を解説したものであり技術の普及に貢献したこととあわせ、極めて価値の高い工事であった。

北防波堤建設における課題のひとつは波力の推定であった。その時用いた波力推定式は廣井式と同形となるが、水分子の速度から出発しているという点で、結論にいたるまでの展開は異なる。1919年に東京帝国大学工学部紀要に発表された波力推定に関する論文(廣井論文と称す)に記載された波力推定式は廣井式として我が国において1970年代後半まで、碎波が作用する混成防波堤の直立部の設計に用いられてきた。従来、廣井式には有義波高が用いられてきたが、有義波高の概念がわが国に紹介されたのは第2次大戦後であり、廣井式を提案した時期には存在しない概念であった。

本論文では、廣井論文における廣井式の構築過程をトレースすることによって、波力推定式に用いる波高は最大波高であることを明らかにする。次に、廣井式を扱った主要文献から、廣井式中の波高を有義波高としたことによる問題点に対して新しく解釈を加える。次に、港湾構造物集覧等によって明治期以降に建設された第一線防波堤のうち混成防波堤の主要断面を取り出し、設置水深に対するマウンド厚の変化から廣井式の適用について考察する。



写真-1 廣井博士(28歳)
(浅田英祺氏提供)

2. 廣井式の構築

2.1 廣井式の構築

碎波が混成防波堤の直立壁に作用する場合の波力推定式 $p=1.5\omega H$ (p : 波圧強度, ω : 水の密度, H : 波高) は、計算の簡便性および信頼性の高さから、わが国において長く使用されてきた。最初に使われたのは1897年に着工した小樽港北防波堤の設計である。波力推定式については廣井勇著「築港卷之一」¹⁾に詳述されている。「築港」は1898年に発刊されて以降、順次研究成果を取り入れて改訂され、5版に及んだ。初版は工事監督に臨む青年技術者に対して、築港工事に関する研究の路を指示するために記述したもの(同書緒言より)で、「卷之一」より「卷之五」までの5分冊構成となっている。

小樽港北防波堤に作用する波力の推定に際しては、波圧は射水が衝突するときに生じる圧力に等しく、その時の水分子の平均速度は波浪進行の速度にほぼ等しいと仮定し、ラッセルが案出した波浪の速度を用いて、波力推定式を導いている。その際、防波堤付近の水深をもって波浪の高さとしている。ただし、波力推定式の展開方法は記述しているが、推定式そのものは記述していない。

1919年に発表された廣井論文²⁾においては、波圧は射水が衝突するときに生じる圧力に等しいとする仮定は「築港卷之一」と同様である。射水の水分子速度は碎波の最終落下速度としている。廣井式の展開については、前報「廣井公式の導出過程」を参照されたい。

2.2 廣井式をめぐる解釈

廣井論文では、波の最大圧力強度は水面近くにあって比較的小面積に作用すること 波力計が暴風中に起る波の最大圧力を記録できるとは限らないこと

大面積に働く波の平均圧力強度を直接観測することは至難であること 一地方における波の平均圧力強度

を適当に推定するには現在の知識では信頼すべき公式によるほかないことが結論として述べられている。

上記結論からは小樽港北防波堤における波力記録等より導かれた結論であり、それに基づいてが結論づけられている。ここで結論に着目すると、次の論文中の記述から明らかなように、波の不規則性がその原因となっていることを指摘している。なお和訳はすべて文献³⁾による。

On examining the record of dynamograph shown in Fig.6, it will be seen that there is but one max. pressure recorded in the course of about 27 hours, during which no less than 10,000 strokes must have been by the waves on the disk of the dynamograph. During a storm of a shorter duration, it is by no means unlikely that the instrument may fail to record any of the maximums.

Therefore, it is not to be wondered, when a great number of waves generally irregular in motion when breaking may totally fail to exert their force on obstacles; hence the discordant records often obtained by maximum-recording dynamometers.

(和訳) 附圖第六圖ニ示セル波力計圖形ノ記録ヲ見ルニ、約二十七時間ニ波力計ノ圓板力打擊ヲ受クルコト一萬回以上ナルニ拘ラス、最大壓ハ僅カニ一回記録セラレタルノミナリ。從ツテ、小期間ノ暴風ニ於テハ、波力計力最大壓ヲ記録シ得サルコト多カルヘシ。(中略) 一般ニ碎波時ノ運動、不規則ナル多數ノ波浪力障碍物ニ向ヒテ全圧力ヲ現ハシ得サルコトアルハ當然ト云フベク、波力計力屢々矛盾セルカ如キ記録ヲ示ス所以モ亦、茲ニ存ス。

第2次大戦後、わが国に不規則波の概念が導入されるに及んで、それまで設計に用いていた波力推定式の波高は不規則波のいずれの波高に相当するかという点が問題になった。廣井式中の波高については主要文献によると以下の変遷がある。

1932年に発刊された鈴木雅次著「港工學」⁴⁾においては単に波高と記述しているが、例題には最大波高を用いている。1950年5月に港湾協会より発刊された「港灣工事設計示方要覽」⁵⁾のうち「防波堤設計示方書」においては、沖波の高さと記載されている。

1959年、日本港湾協会より発刊された「港湾工事設計要覽」⁶⁾においては、防波堤設置位置における進行

波としての波高を用いることとされている。

伊藤ら⁷⁾は、廣井式中の波高として有義波高を用いることになっているが、通常の型式の防波堤に対しては従来の設計波高を、推算や観測から求めた有義波高と対応せしめてほぼ妥当であろうという程度の根拠に基づくものと指摘している。

そして、1978年3月に運輸省港湾局によりまとめられた「港湾施設設計指針」⁸⁾では、壁体設置位置における進行波としての有義波高を用いることとされている。

廣井式に有義波高を用いることにした場合の問題点は、構造物が設計対象とする波群に対して安定であることを確認するためには、波群のもたらす最大の波力に対して安定であることを確認しなければならない。したがって、規則波による理論または実験に基づく波高 H には最大波高 H_{\max} または H_b (限界碎波高) を代入する必要がある。捨石マウンド天端高が比較的高い場合、実際より過小な波力を与える場合があることである。

2.3 廣井論文における波高

廣井論文の目的は、最大波力の推定である。

In designing a breakwater or an allied structure in a given locality, the most important thing to know is the force of greatest waves that are likely to assail the structure.

(和訳) 防波堤、其他、此種ノ工作物ヲ設計スルニハ、先ツ之ヲ襲フヘキ最大波浪ノ力ヲ求メサルヘカラス。

論文では、まず、深海における最大波高を推定する Stevenson の公式 (Stevenson's well-known formula for the height of greatest waves) およびその妥当性を検証した後、浅海域に進行する波浪の挙動を解説し波力推定式を導いていく展開となっている。

廣井式を導くにあたって碎波の落下高さ H_1 は碎波前の波の高さ H によって表され、その後の式の展開は波高 H を用いている。したがって、式中の波高 H は碎波直前の波高であり、沖波ではなく構造物設置位置周辺の波高であることは明らかである。さらに、次の理由から廣井式中の波高 H は最大波高であると特定できる。すなわち、

波の高さは水深を超えることがないので、構造物に作用する最大波高をその点の水深と等しいとして廣井式を用いて良いとしていること。

Since the height of a wave does not exceed the depth of water in which the wave travels, the height of a greatest wave assailing a structure may be assumed to be equal to the depth of water at the site of the structure, unless the fetch is such as to make the highest wave-height less than the depth.

廣井論文において、廣井式の妥当性を検証するため用いた事例10件のうち、波高、防波堤の水深を用いた例がそれぞれ4件、6件ある。

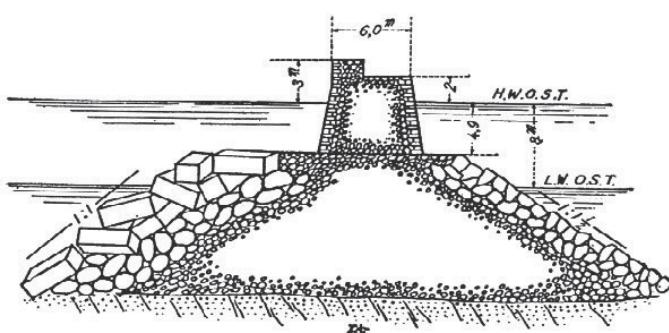
波高に注目すると水深を用いた事例の内訳は、Peterhead Breakwater の事例では大洋の波高が40フィートを超えることが稀であるとしてその数値、Milwaukee の事例では最大波高 (the greatest wave-height) Buffalo の防波堤には波高が20フィートを超えることが稀であるとしてその数値、鶴見埋築會社の防波堤の被災事例には最大波高を推算する Stevenson の公式をそれぞれ用いており、全て最大波高と見なすことができる (表-1)。

以上のような論理展開から、廣井論文においては、防波堤その他の海洋構造物に作用する最大波力を推定するために、波高は波浪推算から一貫して最大波を対象としていることを見ることができる。

表-1 廣井論文における事例

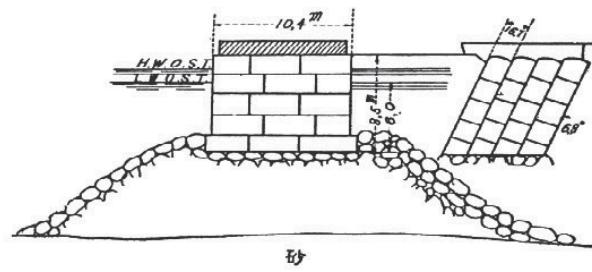
場所	年代	廣井式に用いた波高等
Wick 防波堤	1872年	本体工底面水深 (30feet)
Colombo 防波堤	1878年	水深 (25feet) を用いて入射角補正
Peterhead 防波堤	1898年	波高 (45feet)
函館港	1898年	水深 (7feet)
留萌港	1913年	水深 (22feet)
Milwaukee	1891年	最大波高 (12feet)
Buffalo 防波堤	1899年	波高 (20feet)
North Beach	1890年	水深 (6feet)
Superior 湖Portage 運河防波堤	1901年	水深 (30feet)
鶴見埋築會社防波堤	1917年	波高 (6feet)

BOULOGNE BREAKWATER



(a) 高基載壁堤

COLOMBO BREAKWATER



(b) 低基載壁堤

図-1 載壁堤の種類⁹⁾

2.4 結論

「築港卷之一」および廣井論文における廣井式の導き方から明らかのように、廣井式は規則波に基づく実験あるいは純粋な理論から導かれたものではない。廣

井式中の波高は統計処理をしない絶対的な最大波高であり、式の妥当性は実際に発生した被災事例によって検証されている。

廣井博士は波の不規則性を十分認識しており、構造物の安定を検討するためには最大波力を用いる必要が

あるという認識のもと、廣井式中の波高としては最大波高を用いることとしていた。したがって廣井式を用いる場合、限界碎波高に近い設置水深を最大波高に代えて用いても理論的に矛盾がない。

小樽港北防波堤および函館港西防波堤の設計においては廣井式による波力の推定に設置水深が用いられている。

3. 廣井式の適用について

3.1 「築港」による防波堤の分類

近代における大防波堤工事は1687年に起工したフランスの軍港シェルブルをもって嚆矢とする¹⁾。以来、防波堤をはじめとする港湾構造物は現在に至るまで種々の改良が加えられており、20世紀初頭からの防波堤構造の変遷を概観するためには当時の資料を参考する必要がある。

廣井勇著「築港 第4版」⁹⁾によると防波堤構造は捨石防波堤、直立防波堤、載壁防波堤の3種類に大別される。そのうち載壁防波堤は、捨石マウンドの上に直立堤を築設するもので「築港卷之一」における直立捨石混成防波堤と同義である。

載壁防波堤は直立部基礎が干潮面以上にあるか否かによって高基および低基に区分される。高基載壁堤は、

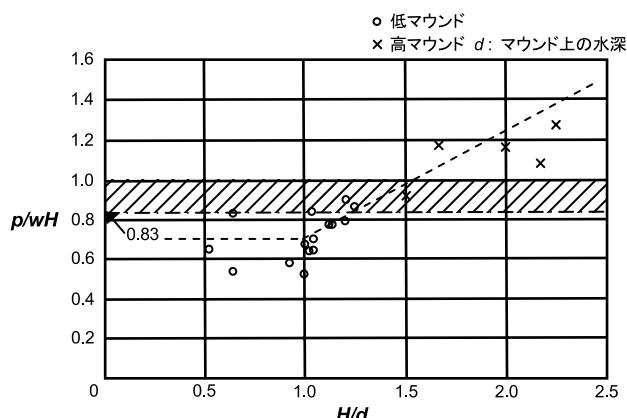


図-2 平均波圧強度と波高水深比

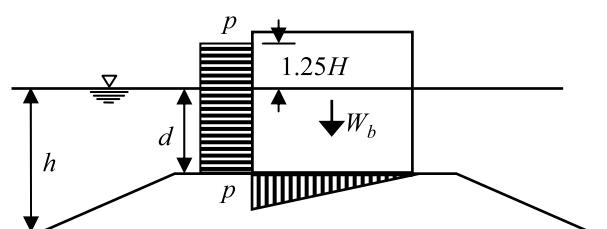


図-3 波圧・揚圧力の分布

直立部のほとんど全体が干潮面以上にあり、最も作工を要する直立部の工事を水中で行うことを避ける目的から出た構造である。低基載壁堤は、直立部の基礎を干潮面以下とし捨石マウンドは捨石が波浪により移動されない高さに止め、直立部によって波浪の激衝に当たらせる構造である。捨石マウンドの高さは通常干潮面以下6~9mとすることが多いとしている(図-1)。現在の混成堤はマウンドと水深を比較した相対的な大きさによって低基および高基に分類している。すなわち、高基混成堤は高基載壁堤および低基載壁堤のうち水深に比しマウンド厚が大きいもの、低基混成堤は低基載壁堤のうちマウンド厚が小さいものという対応になる。低基載壁堤でも捨石マウンドを捨石が移動しない高さまでは積み上げるので、「築港 第4版」「日本築港史」¹⁰⁾に掲載されているように現代の標準的な混成防波堤と比較してマウンド厚が大きい傾向にある。

3.2 廣井式の適用範囲についての考察

波力は波高のほか周期、波向、直立壁およびマウンドの形状、海底勾配など多くの要因によって変化する。また、碎波のような衝撃的波圧を正確に捉えるには波圧計の精度に加え、直立部とマウンド上での構造物と水の動的挙動および摩擦力、波圧および揚圧力の時間的変化などを体系的に解析する必要がある。しかし、実務的な設計において波力を算定するには、種々の要因によって複雑に変化する波浪および構造物の動的挙動を静的関係に置き換えるモデル化するため、その精度は実用的に問題がない範囲に収まっていることが重要である。その視点から、廣井式の適用について概観的に検討する。

図-2は、伊藤ら⁷⁾による期待滑動量の研究から引用した図に筆者が斜線を加筆したものであり、不規則波による滑動限界波高と堤体重量との関係を限界波圧と滑動抵抗との関係に置き換え、壁面に作用する平均波圧強度を求めたものである。破線は通称、伊藤式といわれる波力推定式である。図中、低マウンドおよび高マウンドとは、それぞれのマウンド厚が4m(水深13m)、9m(水深13.5m)であり、水深に対するマウンド厚の比がそれぞれ約1/3、2/3となっている。海底勾配1/100、模型縮尺1/36である。その場合の波圧および揚圧力の分布を図-3に示す。波圧の作用高さは壁高あるいは底面から静水面上1.25Hまでの高さのうちいざれか小さい方をとり、壁面に作用する

波圧強度 p は鉛直方向に一様分布としている。揚圧力は、堤体前端で波圧強度に等しく、後端で 0 となる直線分布をするものと仮定し、摩擦係数は 0.6 とした。

図-2においては、縦軸にはこのようにして算出した波圧から $p/\omega H$ の値をとり、横軸に波高とマウンド上の水深との比 H/d をとっている。 ω は水の密度である。 $p/\omega H$ は、 H/d が 1.0 を越えて増加するに従って比例的に増加する傾向にある。 $p/\omega H$ の最大値は、低マウンドのとき 0.9、高マウンドのとき 1.3 となっている。

いま、滑動限界波高 H を最大波高 H_{\max} とし有義波高との関係を $H_{\max}=1.8H_{1/3}$ として、従来の方法（有義波高を用いる）で廣井式を適用した場合の波圧強度は、図-2 の一点鎖線のようになる。滑動安全率を 1.2 とすると、網掛けの部分が安全率に対応し、低いマウンドの場合に作用する波力をカバーできるが、高いマウンドで $H/d > 1.5$ の場合は滑動安全率を考慮しても波圧強度が実験値より小さく、ほとんどカバーできない。

それに対し、最大波高を廣井式に用いた場合には、碎波（廣井式の構築上からは完全碎波）が生じる H/d の値をどこに取るかという問題はあるが、その値より H/d が大きい場合の $p/\omega H$ は 1.5 に一定となり、高いマウンドでかつ $H/d > 1.5$ の場合の平均波力もカバーできる。廣井論文においては波の作用高さが示されておらず、揚圧力の記述はない。また、波浪の周期や海底勾配など、波力に影響を与える要因が考慮されていないという条件下ではあるが、図-2においては最大波高による廣井式が平均波力の上限に近い値を算出していると言える。

以上は、伊藤による考察に基づいて論述したものである。伊藤は、混成堤のマウンドが低い場合は従来どおり $H_{1/3}$ でよいが、マウンドが高くなると $H_{1/3}$ では危険なことがある、その場合は箇々にその報告を参考にしながら $H_{1/10} \sim H_{\max}$ を用いるべきとしている。

廣井論文および「築港」においては、構造物の安定を検討する場合に安全率という概念が取り入れていないので、最大波高を用いた廣井式によって算出される平均波圧は、実際の波力以上である必要がある。したがって、廣井式による計算値と実験値との関係を標準偏差で評価することは適当ではない。また、一般に最大波高 H_{\max} と有義波高 $H_{1/3}$ との関係は $H_{\max}=1.6 \sim 2.0$ の関係にあるが、水理実験における波の諸元が実際と大きく異なる場合¹¹⁾ は、最大波高と有義波高の関係が上述のようにならないため、本論文では考察の対象としていない。

次に、評価指標を増やし、マウンド厚および波高に

着目して平均波圧との関係を分析する。マウンド厚が大きい場合は衝撃碎波が発生する可能性が高くなるが、衝撃碎波が発生する場合はいずれの波力算定式を用いてもその波力を正しく推定することはむずかしい。衝撃碎波が発生するか否かの判定はマウンド法面、マウンド幅、マウンド厚、波高など種々の要因によって微妙に変化するため定性的¹²⁾¹³⁾ にならざるをえない。

谷本¹⁴⁾は、水理実験によって、海底勾配が 1 / 50 より緩やかな場合のマウンド厚と波高の変化による衝撃碎波力発生の危険範囲を図-4 のように整理している。波圧は波高によって無次元化されている。図-2 の場合と同じように、代表波高 H を最大波高として検討を加える。

破線は $p/\omega H \geq 1.5$ の波力が発生する包絡線、実線は $p/\omega H \geq 2.0$ なる範囲を示している。マウンド上の水深と設置水深の比が $d/h < 0.1$ あるいは $d/h > 0.6$ の場合は、強大な衝撃碎波力は発生しないようである。 $d/h > 0.6$ の範囲ではおおむね $p/\omega H < 1.0$ となり、従来のように廣井式に有義波高を用いた方が実験値に近い値となる可能性が高い。一方、 $d/h \leq 0.4$ の場合、衝撃碎波が発生しない範囲では $1.0 \leq p/\omega H < 1.5$ となり、廣井式に最高波高を用いた適用範囲となる可能性が高い。

4. 実例による廣井式の適用範囲の検証

マウンド厚と廣井式の関係について考察してきたが、実際に建設された混成防波堤のマウンド厚を調査

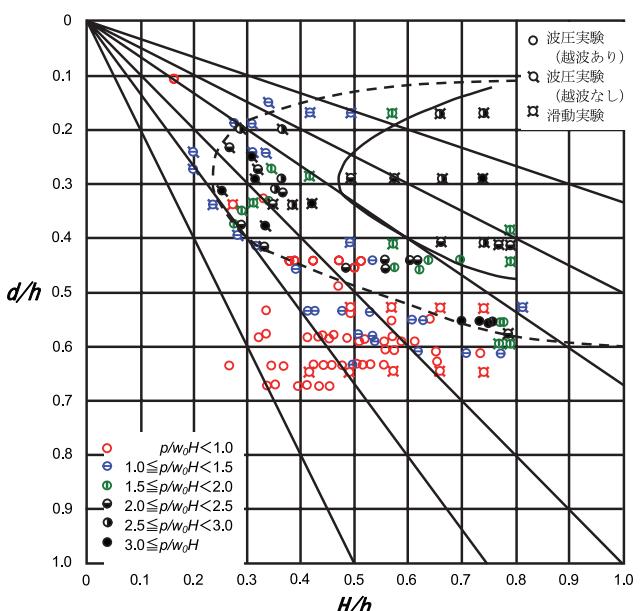


図-4 衝撃碎波力発生の危険範囲（谷本勝利、昭和 51 年港湾技研講演集、p. 15 による）

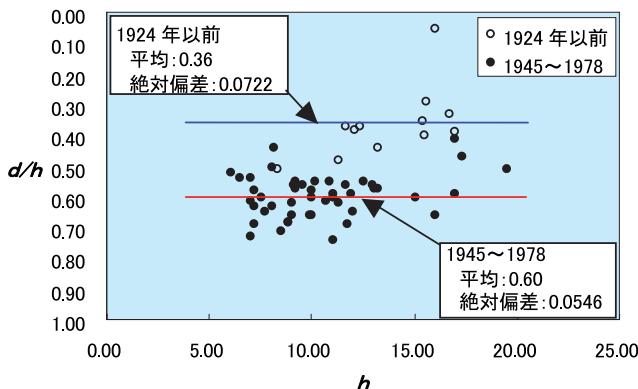


図-5 混成堤の相対水深比 (L.W.L.)

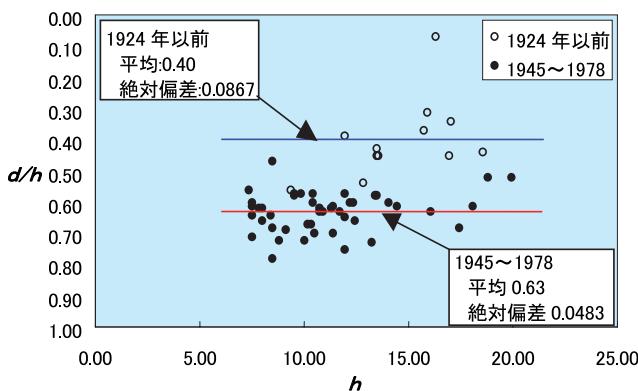


図-6 混成堤の相対水深比 (H.W.L.)

するため、「築港要覧」¹⁵⁾および「北海道港湾構造物集覧」¹⁶⁾¹⁷⁾を用いて第一線防波堤の主要断面を選び、その設置水深とマウンド厚を整理した。内訳は、明治・大正期(1924年以前)に建設された防波堤の12施設12断面、昭和20年度から昭和53年度(1945-1978年)までに建設された39施設47断面である。このうち、明治期に建設された小樽港北防波堤および明治・大正期に建設された函館港西防波堤は廣井式を用いて波力を算定している。縦軸に根固め方塊上の水深と設置水深との比 d/h 、横軸に設置水深 h をとり、水位を L.W.L および H.W.L として図-5、図-6 に示す。

L.W.L および H.W.L 別に明治・大正期の d/h の平均はそれぞれ0.36(平均絶対偏差0.0722)および0.40(平均絶対偏差0.0867)、昭和20年度から53年度までの d/h が0.60(平均絶対偏差0.0546)および0.63(平均絶対偏差0.0483)となる。波の諸元が明らかでないものが多く、図-2 および図-4 との正確な照合はできないが、明治・大正期においては d/h が0.36から0.4の高マウンドの混成防波堤が多く、最大波高を用いた廣井式の適用範囲にあるのに対し、昭和20年度から53年度の混成防波堤は d/h が0.6程度の低マウンドであり、有義波高を用いた廣井式の適用範囲にあるとみることができ

る。また、図-5 および図-6 をみる限り、防波堤の設置水深は明治・大正期の方が昭和20年度から53年度のものと比較して大きい傾向にあり、明治・大正期の防波堤が小規模であるとは言えない。図中、 $d/h=0.05$ は小樽港北防波堤であるが、堤体前面に階段状に設置された塊により独特な形状を呈しており、日本人だけの手によって初めて計画・設計・施工された極めて高マウンドな混成堤であることがわかる。

5. 結論

廣井論文を初めとする文献調査および防波堤構造の統計処理から以下のことが明らかになった。

- (1) 「築港卷之一」および廣井論文とでは廣井式の導き方が相違する。
- (2) 廣井式中の波高は最大波高である。
- (3) したがって、廣井式は波浪が作用する構造物の安定性の検討において、最大波高によって最大波力を求めている。
- (4) マウンドが比較的高い混成防波堤に対し廣井式を適用した場合、実際より小さい波力を算定することがあるという従来の指摘は、有義波ではなく最大波高を用いた廣井式によって再評価する必要がある。
- (5) 我が国に導入された低基載壁堤は現在、混成堤と称する防波堤形式と同じ範疇に属するが、 d/h が平均0.4内外の高マウンドであるため、低マウンドな場合と比較し大きな波力が作用し、最大波高を用いた廣井式の適用範囲となっている。昭和20年度から53年度の間に建設された混成堤は、 d/h が平均0.6程度の低マウンドであり、碎波が作用する場合は有義波高を用いた廣井式の適用範囲となる。
- (6) 防波堤の設置水深は前者の方が後者より大きい傾向にあり、明治・大正期の防波堤は戦後のもとの比較しても遜色ない規模である。

6. おわりに

廣井式には最大波高を用いることになっている。その適用は高マウンドな混成堤に対して妥当であることを明治・大正期に建設された防波堤の主要断面および既往の文献に基づいて論述した。廣井式は、小樽港北防波堤および函館港西防波堤の設計に用いられている

ことが明らかになっていることから、これらの防波堤を設計・施工した北海道庁においては波力推定式として廣井式を用いていたとみて間違いない。小樽港北防波堤および函館港西防波堤の設計にあたっては、廣井式には最大波高ではなく防波堤の設置水深が用いられた。

以上のことから、本論文において取り上げた明治・大正期の防波堤は、最大波高あるいは防波堤設置水深を用いた廣井式によって設計されているとみている。また、防波堤のデータは全て北海道のものであるが、全国的にデータを広げても同様の傾向にあるとみている。

参考文献

- 1) 廣井 勇；築港卷之一，丸善商社（明治31年8月）
- 2) I. Hiroi ; On a Method of Estimating the Force of Waves. , THE JOURNAL OF THE COLLEGE OF ENGINEERING , TOKYO IMPERIAL UNIVERSITY (1919)
- 3) 参考資料 土木学会誌 第6卷第2号（大正9年4月）
- 4) 鈴木雅次；湊工學 ,常磐書房 ,pp60-63 (1932年10月)
- 5) 港灣協會 ,港灣工事設計示方要覽 ,p84 (1950年5月)
- 6) 日本港湾協会 ,港湾工事設計要覽 ,pp.13-14 (1959年)
- 7) 伊藤喜行・藤島睦・北谷高雄；防波堤の安定性に
関する研究 ,港湾技術研究所報告 ,第5卷第14号
(1966年)
- 8) 運輸省港湾局 ,港湾施設設計指針(1) ,p.2-241 (昭和53年3月)
- 9) 廣井勇；築港前編 ,第4版 ,丸善株式会社 ,p71
- 10) 廣井勇；日本築港史 ,丸善株式会社 (1926年)
- 11) 堀川清・小沢保臣・高橋邦夫；高基混成堤直立部の期待滑動量について ,第19回海岸工学講演会論文集 ,pp.351-356 (1972年)
- 12) 谷本勝利・高橋重雄・北谷高雄；混成防波堤のマウンド形状による衝撃碎波力の発生と対策について ,港湾技術研究所報告 ,第20卷第2号 ,pp.3-39 (1981年)
- 13) 谷本勝利・高橋重雄・明瀬一行；防波堤直立部に働く不規則波力に関する実験的研究 ,港湾技術研究所報告 ,第23卷第3号 ,pp.47-99 (1984年)
- 14) 谷本勝利；港湾技術研究所講演会講演集 (1) ,pp.1-26 (1976年)
- 15) 北海道廳 ,築港要覽 (1924年12月)
- 16) 北海道開発局港湾部港湾建設課 ,北海道港湾構造物集覽 (その1) (1980年4月)
- 17) 北海道開発局港湾部港湾建設課 ,北海道港湾構造物集覽 (その2) (1980年4月)
- 18) 北海道廳 ,函館港工事報文 (1919年3月)



関口 信一郎 *

国土交通省
北海道開発局
室蘭開発建設部
部長
博士（工学）