

# 明治初期に建設された三国港防波堤に関する土木学的考察

— 特に、防波堤の耐波性について —

松 並 仁 茂\*

## A Study of the Civil Engineering for the Breakwater of Mikuni Port in the First Stage of Meiji Era

— Especially, on Resistivity of Breakwater to Breaking Wave —

Hitoshige MATSUNAMI

The breakwater of Mikuni Port in Fukui prefecture was constructed as the first period of this work during two years and seven months from 1878 ( Meiji 11 ). This was one of the first port constructions by the new Meiji Government. George Arnold Escher, an employed Holland engineer, was ordered to investigate and to plan the breakwater of Mikuni Port in 1876. Continually, Johannes de Rijke, an employed Holland engineer, was ordered to construct it under his direction and supervision in May 1878.

This breakwater of Mikuni Port is famous as the first port construction with occidental technique in Meiji era. Although many internal engineers have censured for that they had only the technique of fascine mattress. In this paper the technique of the breakwater of Mikuni Port is investigated.

### 1. まえがき

福井県三国港の防波堤は明治11年(1878)から2年7か月かけて、その第1期の工事が行われたが、これは明治新政府が行なった築港第1号ともいわれているものである。それは、明治元年に生じた竹田川沿村82か村の水害の後、それまで北前船で賑わっていた九頭龍川河口にある三国港は、水害後の漂砂によって堆砂・河口埋没・濔筋不安定となり、重要な中継港としての機能が次第に低下していった。これらの事態に対して、当時のわが国の土木の技術力では、なんら有効な対策を講ずることはできなかった。そこで、新政府は御雇オランダ人工師エッセル (George Arnold Escher) を現地に派遣し、調査・計画させたうえ、後年、この築港計画を御雇オランダ人工師デレーケ (Johannes de Rijke) の指導・監督のもとに工事施工させたもので、これらは、西洋の築港技術導入の第1号といえるものとして広く知られている。

当時の政府の基本施策は殖産興業・富国強兵であったが、国内・国外を問わず難問題が山積している状態であるうえに、世情不安もつのる一方であった。このような状況のもとにあって、辺境の地、三国に近代的な西洋技術導入による築港計画の承認と工事施工の許可を行ったが、その理由や背景には不明な点が多く解明されないまま現在に至っている。また、三国港に派遣された

---

\*建設工学科 土木工学専攻

オランダ工師たちの築港技術に対して、「単に、そだ沈床の技術のみを携えてきた技術者集団」だとして、厳しい批判<sup>1)</sup>をする人達もいたのであるが、技術的な観点からどの程度の水準のものであったのかについて検討し、明らかにする必要があると思われる。

筆者は、これらの2つの事項については、既に、前回の研究<sup>2)</sup>において工学的な考察を加えた。ここでは、前者の建設にいたる経緯については十分な検討が行えたものの、後者の土木工学的な考察については、その一部について今後十分な検討を行う必要があると考えていた。それゆえ、ここでは、残されている課題、特に、防波堤の耐波性を中心に考察を加えることにした。

## 2. 防波堤建設計画についての土木工学的考察

エッセルの行った第1次の調査の結果は、三国町郷土資料館に保存されている和訳古書「坂井港修築建議」（明治9年7月）にまとめられている。前回の研究において、その主要な項目について工学的な考察を行った。すなわち、(1) 防波堤の築造計画について、(2) 港内水深の維持について、(3) そだ沈床工について、(4) 防波堤の天端高と天端幅について、(5) 防波堤の耐波性について、の各項目についてである。(1)～(4)の項目については、今日の技術基準に照らしても十分満足できるものとしての評価を行った。ただ、(5)の防波堤の耐波性については、現地調査が量的に少なく事前調査の域を越えない程度のものであったので、十分な検討を行うことができなかった。それゆえ、今回の研究は防波堤の耐波性に関する事項を中心に考察を行なうこととした。

## 3. 防波堤の耐波性についての土木工学的考察

### 3-1 防波堤の構造断面について

防波堤被覆石の耐波性を検討するには、その構造断面を知る必要があるが、それらに関する資料は全く残されていない。そこで、ここでは、「坂井港修築建議」に描かれている水制工の構造断面図を基に、これまで述べてきた諸事項に加えて、野蒜港の防波堤の構造断面などを参考にし、図-1に示す構造断面を想定した。その凡その理由は以下のようである。

(1) 法面の勾配 本体の中詰石工の法面の施工については、海上部は1:2で仕上げることは可能であろうと推測される。しかし、海中部については、施工機械もなく、ただ、石塊を海上から捨て込む工法では、法面の勾配を1:3に仕上げることでさえも容易なことではできないと思われる。さらに、この防波堤は天端高が5尺と低く押さえられていることから、ここでは、法面の勾配は外側・内側とも一様に1:3と考えるのが適当なところであろう。

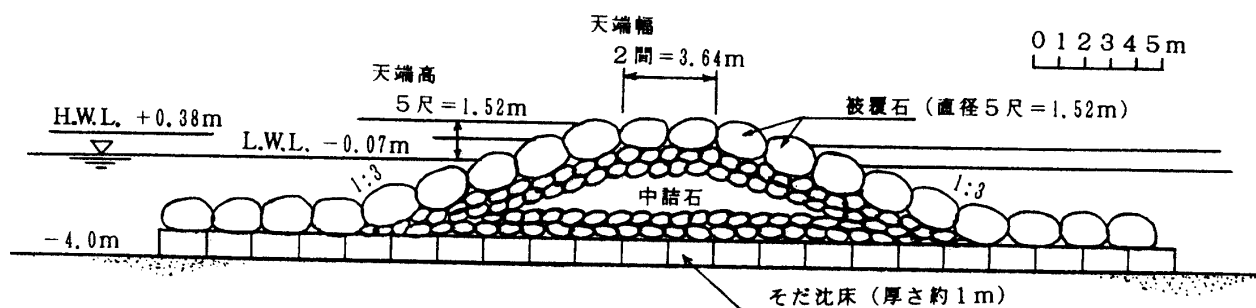


図-1 三国港防波堤の先端部の構造断面図（想定）

(2) 被覆石工 「坂井港修築建議」では被覆石は直径5尺を用いることとしている。防波堤に用いられた現地の安山岩の単位体積重量は、われわれの実測<sup>2)</sup>では  $2.57 \text{ tf/m}^3$  であるので、これを用いることにすると、直径5尺の安山岩の被覆石の重量は  $4.68 \text{ tf}$  となる。当時の施工能力をもって、このような大石の施工は容易なことではない。現在では、被覆石工は2層以上とすることが当然のこととして常時行われているが、当時の技術力を考えると1層と考えるのが妥当と思われる。

(3) 法先洗堀防止工 ここでは、まず、防波堤として、外海側の法先は波に対する法先洗堀防止工が必要である。一方、導流堤として、内側の法先は流水に対する法先洗堀防止工を施す必要がある。上述の水制工の構造断面図に示されているように、図-1のように海底上のそだ沈床の上に被覆石工を施し、法先洗堀に馴染む可とう性のある構造が適当な工法と思われる。

### 3-2 防波堤の耐波性について

現在、我国においては、捨石式を含む傾斜式防波堤の被覆石の設計法は、もっぱら、ハドソン公式によって行われている。この方式は昭和39年(1964)頃に一般に知るところとなったもので、歴史的には新しいものといえる。

(1) 我国における捨石式防波堤の設計法の経緯 御雇オランダ人工師達の築港技術力に対して他の外国人達とともに強烈に批判した人達もいたが、明治初期の我国の築港技術力はほとんど無力といってよい程度のものであった。特に、捨石式防波堤の設計法については、かなり量の施工を行ってきたにもかかわらず、昭和30年頃までは、これに対して有効な新たな研究を行うこともなく、明治以来ただ単に、波高と粗石重量の経験的な関係とか法面勾配などを示したり、また、内外の事例を示すに留まっていたにすぎなかったのである。

これに対し米国では、イリバーレン(Iribarren)が1949年(昭和24年)被覆石の安定に関する研究を発表<sup>3)</sup>したのに続き、ハドソン(R.Y. Hudson)がこれを改良し、イリバーレン・ハドソン公式(1953)<sup>3)</sup>として注目されるところとなった。更に、1959年(昭和34年)ハドソンは改良した算定式<sup>3)・4)</sup>を発表するとともに、被覆材によって定まる係数、 $K_D$ 値の実験値を公表<sup>3)・4)</sup>した。現在、我国で広く用いられているのがこのハドソン公式である。ここでは、この算定式を用いて被覆石の安定を検討することにする。すなわち、

$$W = \gamma_r H^3 / \{K_D (S_r - 1)^3 \cot \alpha\}$$

ここに、 $W$ ：被覆石の所要最小重量(tf)、 $\gamma_r$ ：被覆石の空中単位体積重量(tf/m<sup>3</sup>)、 $S_r$ ：被覆石の海水に対する比重、 $\alpha$ ：斜面が水平となす角度(度)、 $H$ ：設計に用いる波高(m)、 $K_D$ ：被覆石の積み方や被害率等によって定まる係数、である。

(2) ハドソン公式に用いる各要素について まず、石の単位体積重量はエッセルの記録による値<sup>5)</sup>  $2.56 \text{ tf/m}^3$ と、われわれの実測値<sup>2)</sup>  $2.57 \text{ tf/m}^3$ とは、ほぼ一致している。ここでは、われわれの実測値を用いることにする。また、海水の単位体積重量は  $1.03 \text{ tf/m}^3$ を用いる。

$K_D$ の値は非常に重要であるが、各種の因子によりかなり変化するうえ、許容する被害の程度によっても異なってくるので、模型実験に基づいて定めるのが良いとされている。ここでは、被

覆石が1層の場合を対象としているので、1966年に発表された米国の陸軍海岸工学研究センター (Coastal Engineering Research Center) の実験結果の値<sup>3)</sup>を用いる。すなわち、防波堤の幹部において、砕波する状態、被覆石は角ばった石で、乱積で1層のときは2.3、これが2層のときは3.0を用いる。被覆石の斜面の勾配は上述のように、外側・内側ともに一様に1:3とするが、比較検討のため1:2.5と1:2の場合についても算定することにした。

三国港に襲来する波については、運輸省第一港湾建設局において、波浪観測が昭和37年9月から現在にいたるもなお続けられており、貴重な資料としてまとめられ、発表<sup>6)</sup>されている。これによると、昭和62年12月までにおいて、最大波は波高12.14 m、周期11.5 secである。一方、潮汐についても同様に長期間の観測がなされており、その結果、HWLは38 cm、LWLは-7 cmと公表<sup>6)</sup>されている。防波堤の先端部は水深4 mのところに築造されているとし、設計潮位を50 cmとして、防波堤先端部に発生する波を推測すると、最大3.5 mを考えれば十分と思われる。一方、水深5 m以浅の発生波の最大の波高は $0.77 \times (\text{水深})$ の関係から求めて十分であると思われるので、これをもって設計波高とすることにした。しかし、この防波堤を建設した当時の海底の水深に関する資料はない。それゆえ、ここでは、図-2に示す鈴木雅次の資料<sup>7)</sup>はかなり古いものであり、当時の海底水深を類推するのに最も適していると思われたので、これを用いることにした。

### 3-3 被覆石の分布とその耐波安定性について

この防波堤の工事はデレーケの指導・監督のもとに行なわれた。技術古書「築工水則」(1873年11月)は三国町郷土資料館に保存されているが、これはデレーケによって書かれたものとされている。彼はそだ沈床工の第一人者であったのであろう。三国でもそだ沈床工は防波堤や水制の基礎に大幅に使用されているようである。

第1期工事は明治13年12月に上部工を除いて竣工させ、港銭徴収のため供用を急いだ。それがため、翌年2月に、冬季風浪によって大災害を被った。今日では冬季風浪に耐える処置を行なって越冬するのが常識となっているが、これを当時を求めるのは厳しい事柄かも知れない。一度、被災した捨石防波堤は、中小形の中詰石が表層に現われたり散乱したりするので、これを除去しない限り、そのまま補修を行なっても、耐波力の大きい防波堤に復元することは非常に難しい。幸いなことに、この防波堤はその後の度重なる修復を行ったにもかかわらず、現在もなお、かなりの部分で原形を保っている

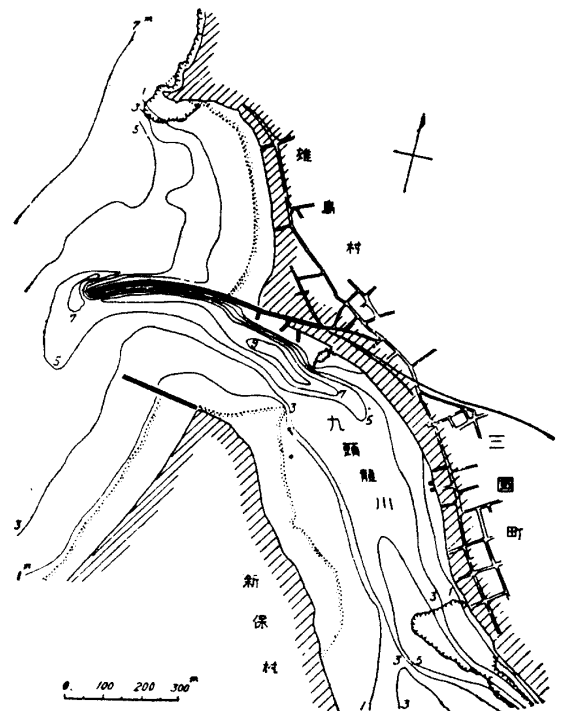


図-2 旧三国港の導流堤兼防波堤  
(出典：鈴木雅次，港工学)

ようであり、今日でも、外側の被覆石は、その役割を十分に果しているように見える。潮位差の小さい三国港では、海面上の被覆石の形状寸法の計測は気象・海象が穏やかであれば容易に行える。

図-3と図-4は、平成4年7月中旬に行なった本防波堤の被覆石の計測調査の結果を、外側と内側について、防波堤の延長に対する被覆石の重量の分布で示したものである。被覆石の調査は海面上にある形状寸法の計測可能なすべての石を対象としたが、中小の雑石は対象外とした。海面上の被覆石の現在の斜面勾配は  $1:9.0 \sim 1:2.8$  であるが、そのほとんどは  $1:7 \sim 1:5$  と緩勾配である。これをもって、建設当時の防波堤被覆石の勾配とすることはできない。ただ、この中に  $1:3$  に近いものがあったということのほうは、当時の施工能力を知るうえで重要であり興味深い。

(1) 防波堤外側の被覆石の分布とその耐波安定性について

図-3は防波堤の外側の被覆石の重量の分布を示す。石の重量は  $0.98 \sim 15.07 \text{ tf}$  であるが、全体として防波堤の先端に向けて重量の大きい石が分布していることが分かる。すなわち、防波堤の先端部  $520 \text{ m}$  から  $320 \text{ m}$  の約  $200 \text{ m}$  の区間で  $3 \text{ tf}$  以下の被覆石が  $140$  個のうち僅か  $5$  個しか見当たらないが、このことから、少なくとも被覆石工に関しては、厳格にして慎重に施工されたことを伺い知

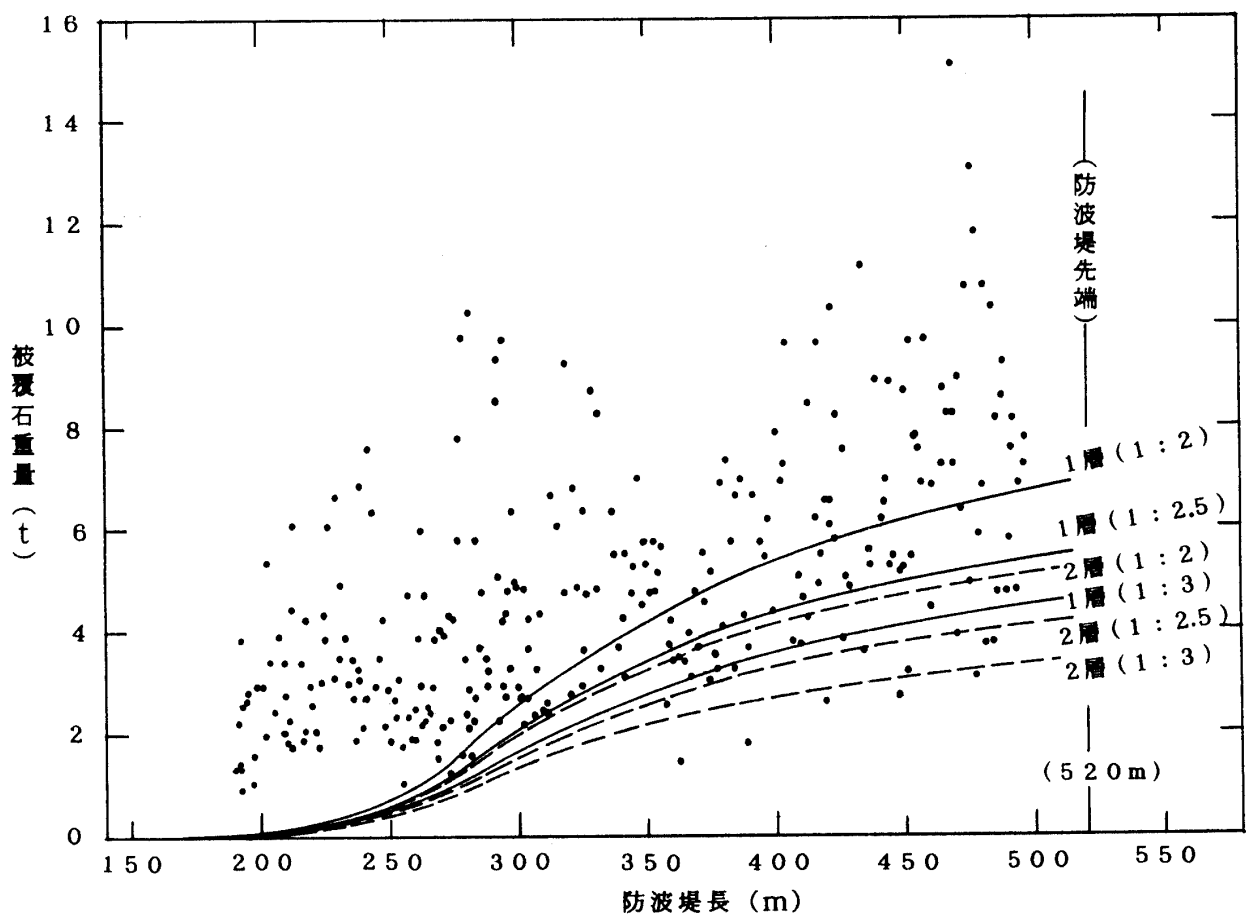


図-3 防波堤外側被覆石の重量分布と耐波性

ることができる。

図の中の各曲線は防波堤の設置水深から推定できる最大の発生波に対して、被覆石が安定していることができる最小の重量をハドソンの公式によって求めたものである。実線は被覆石が1層の場合であり、破線は被覆石が2層に施工されている場合である。また、括弧内の数字は被覆石の斜面勾配を示している。既に述べたように、当時の施工能力から勾配は1:3を標準に考察すべきものと考えが、この検討方法によると、不安定な被覆石は極めて少ないといえることができる。表-1はこれまで述べたことをより詳細にとりまとめたものである。すなわち、外側の被覆石 279 個に対して重量不足の石は 14 個で 5.0 %でしかない。これが重量不足石のあった測点区間だけについて算定しても 10.5 %であり、現在の厳格な基準で検討を行なっても、ほぼ妥当な設計であり、慎重に施工がなされたものと評価することができる。

(2) 防波堤内側の被覆石の分布とその耐波安定性について 図-4は防波堤の内側の被覆石の重量の分布を示す。石の重量は 0.99 ~ 11.67 tf であるが、外側の被覆石と同様に防波堤の先端にむけて重量の大きい石を用いていることが分かる。上述のように、ここでは、被覆石が1層で斜面勾配が1:3の場合を標準と考えているので、所要最小重量の曲線は全体的に被覆石のほぼ中央を通っていると判断される。エッセルは「坂井港修築建議」において、「波裏の被覆石工は波表に較べてやや小さい石でよい。」と報告しているが、今回の調査によって、この報告書の通りに施工されていることが明らかになった。

捨石式防波堤の標準的断面構造としては、今日、図-5に示すもの<sup>4)</sup>が広く用いられている。これは、1966年版の米国陸軍海岸工学センター編集の海岸保全施設設計指針に示されていたも

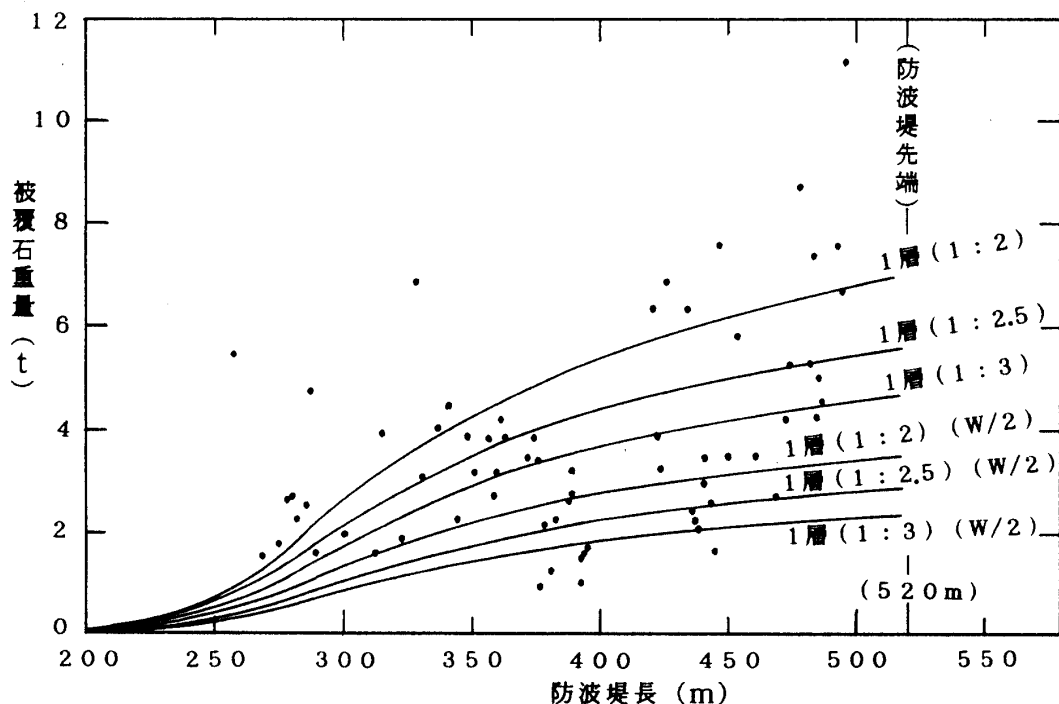


図-4 防波堤内側被覆石の重量分布と耐波性

ので、水深が深い ( $h > 1.3H$ ) 場合のものであり、水深の浅い場合とともに提示されていた。いずれの場合を適用するとしても、内側の波裏に用いられる被覆石は外側に用いるものと同じ重量のものとされているので、本防波堤の場合は表-1によると、重量不足石は調査対象石 67 個に対して 29 個 (43.3 %) となり、波に対しては弱い防波堤であると評価することができる。

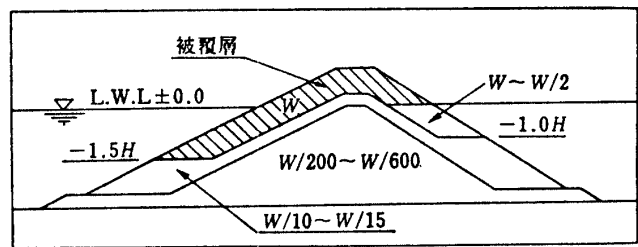


図-5 傾斜堤の被覆石や中詰石の標準構成  
(出典: CERC)

(3) 堤頭部の耐波安定性について 現在、堤頭部の被覆石は標準部で求めた所要重量の5割増のものをを用いることとされている。これは上述の米国の陸軍海岸工学センターが被覆石が捨石の場合、1割増を提示したのであるが、後日、わが国において、この値が不十分だとし、望ましい値として新たに提示したものである。本防波堤の堤頭部は水深4mのところですると、防波堤標準部の被覆石所要重量は表-1から 4.638 tf であるので、その5割増は 6.957 tf となる。ところで、現在の防波堤は、さらに沖にむけて延長して築造されており、その表層

表-1 防波堤被覆石の耐波性

測点 番号 No	測点 の位置 (m)	水深 (m)	設計 水深 (m)	設計波高 H (m)	被覆石の 所要重量 W (t)	外側被覆石の重量不足石の個数			内側被覆石の重量不足石の個数		
						調査個数	1 層	2 層	調査個数	1 層	W/2
先端	520.00 (8.40)	4.00	4.50	3.465	4.638	—	—	—	—	—	—
15	511.60 (30.01)	3.97	4.47	3.442	4.546	14	1	0	8	1	0
16	481.59 (30.05)	3.90	4.40	3.388	4.336	26	3	1	6	3	0
17	451.54 (30.16)	3.83	4.33	3.334	4.132	22	4	1	14	10	1
18	421.38 (30.37)	3.71	4.21	3.242	3.798	23	1	1	5	5	4
19	391.01 (30.77)	3.58	4.08	3.142	3.457	25	4	2	12	6	2
20	360.24 (31.43)	3.38	3.88	2.988	2.973	23	1	0	9	2	0
21	328.81 (32.52)	3.10	3.60	2.772	2.375	29	0	0	4	2	0
22	296.29 (33.34)	2.66	3.16	2.433	1.606	43	0	0	8	0	0
23	262.95 (34.45)	1.88	2.38	1.833	0.686	34	0	0	1	0	0
24	228.50 (36.70)	1.14	1.64	1.263	0.225	40	0	0	0	0	0
25	191.80	0.57	1.07	0.824	0.062						
合 計						279	14	5	67	29	7
記事の説明 (1) 測点番号 : 防波堤上部工に既に埋設固定されている真鍮製基準板に刻印されている番号を用いた。 (2) 測点の位置 : 現存の防波堤上部工の先端を当時の防波堤の先端と同一とみなし、総延長520mをあてることとした。なお、この欄の( )の内数は測点間の距離である。 (3) 水深 : 各測点の水深は鈴木雅次著「港工学」p204 から求めた。 (4) 設計水深 : 潮位記録を参考にして、設計水位を50cmとした。設計水深はその時の水深である。 (5) 設計波高 : 水深5m以浅の発生波の波高について、 $0.77 \times (\text{水深})$ の関係があるので、これを設計波高とした。 (6) 被覆石の所要重量W (t) : ハドソンの式によって求めた。ここでは、被覆石1層、勾配1:3の場合のみ示した。 (7) 調査個数 : 計測可能な各測点間の被覆石の全個数。 (8) 1層 : 被覆石1層、勾配1:3の時の所要重量に対する重量不足の被覆石の個数。 (9) 2層 : 被覆石2層、勾配1:3の時の所要重量に対する重量不足の被覆石の個数。 (10) W/2 : 被覆石1層、勾配1:3の時の所要重量の1/2を所要重量とする時の重量不足の被覆石の個数。											

は鉄筋コンクリート製の異形ブロックで被覆されているので、堤頭部の被覆石の調査は極めて困難な状況にある。今回の調査で最先端にある（先端から 23.5 ～ 30.0 m）被覆石 10 個について述べるならば、5.80 ～ 11.67 tf で、7 tf 以下の石は 4 個であり、重量の大きい石で被覆されていることが分かる。従って、堤頭部の安定度はかなりなものであったと評価できよう。当時の技術力から、堤頭部を特別に補強することへの配慮はなかったものと考えらるべきであろうが、以上のことから厳格にして慎重に施工されたことを伺い知ることができる。

#### 4. 結 言

明治初期の世情不安な状況のもとにあって、政府は三国という辺境の地に近代的な西洋技術を導入して第 1 号の築港事業を民活方式で行なった。前回の研究ではその理由や背景などについての不明な諸点について、その大綱を明らかにすることができた。今回の研究は築港工事の技術的側面について、特に、防波堤の耐波性について土木工学的な検討を行なった。ここでは、海上部にある被覆石についての調査結果に基づくものであった。

本研究では、エッセルの築港計画もデレーケの指導・監督による築港工事も、一部の人達の厳しい批判とは反対に、ともに、今日の計画法や設計基準に照らしても十分に適合する技術水準で行われていたことが明らかになった。ただ残念なのは、日本海の冬にむけて、防波堤の上部工の施工を行わず工事を終えなければならなかったことである。この事実を除いてみるならば、防波堤の築造工事は、計画どおり厳格にして慎重に施工されていたといえることができる。これらのことに対して、深い感動を覚えるとともに、深甚なる敬意を捧げたい。

今後は海水面下の捨石の調査を加え、さらに充実した研究結果にいたしたい。海水面下に散在するすべての石の調査を行うことは、費用の面で問題があると思われるが、代表的な断面についての捨石の調査はさほど困難ではない。

終わりに、本研究のために協力頂いた平成 4 年度福井工業大学工学部建設工学科土木工学専攻 4 年生、市川 敬、山崎貴史の両君に対して深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 長野正孝：世界港湾発展史，「港湾」日本港湾協会，pp. 87～92，1989.
- 2) 松並仁茂：明治初期に建設された三国港防波堤に関する工学的考察，福井工業大学研究紀要，pp. 151～158，1990.
- 3) 土木学会：海岸保全施設設計便覧 改訂版，pp. 172～193，1969.
- 4) 運輸省港湾局 監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，pp. 2-119～2-120，1989.
- 5) 伊藤安男 監修：蘭人工師エッセル回想録，福井県三国町，p. 154，1990.
- 6) 福井港湾管理者：福井港湾計画資料（その 1）改訂，pp. 56～57，1989.
- 7) 鈴木雅次：港工学，風間書房，p. 204，1952.

（平成 4 年 10 月 22 日受理）