

# 新型護岸の開発と施工

## DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF THE NEW TYPE SEAWALL

秋山真吾<sup>1</sup>・池谷毅<sup>2</sup>・木下勲<sup>3</sup>・安部鐘一<sup>4</sup>・井島雅広<sup>4</sup>・天野英樹<sup>5</sup>  
 Shingo AKIYAMA, Tsuyoshi IKEYA, Isao KINOSHITA, Shoichi ABE, Masahiro IJIMA  
 and Hideki AMANO

<sup>1</sup>正会員 工修 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1)

<sup>3</sup>正会員 鹿島建設株式会社 札幌支店 (〒060-0003 札幌市中央区北3条西3丁目)

<sup>4</sup>非会員 北海道電力株式会社 (〒045-0123 北海道岩内郡共和町宮丘19番地)

<sup>5</sup>非会員 北電総合設計株式会社 (〒045-0123 北海道岩内郡共和町宮丘19番地)

We started the seawall construction of the Tomari nuclear power station unit 3 from March in 2001. Before the construction, since it was necessary to reduce costs of the seawall, we tackled development of new type seawall. In this development, we tested several forms of seawall and investigated functions and improved weak points of seawall by hydraulic model tests, and finally developed the low crest seawall that fitted for field condition and made it possible to reduce costs. It was found by hydraulic model test using multi-directional random waves that wave overtopping quantity was within the permissible range in all place of the seawall, and the blocks were unstable though the wave pressure was low at the concave section, so we put the high specific gravity blocks to improve stability and miniaturize the caissons to reduce costs at the concave section. The seawall was nearly completed, we started the field survey to verify wave pressure characteristics.

**Key Words:** low crest seawall, cost down, hydraulic model test, multi-directional random waves, wave overtopping quantity, concave section, high specific gravity block, field survey.

### 1. はじめに

北海道電力泊発電所3号機増設工事では、埋立造成地を築造するための護岸を計画し、2001年3月から施工を行っている。本工事では、後背地の重要構造物を防護する所要の耐波機能を有し、工程確保に寄与できる護岸を必要とした。また、護岸工事は造成工事全体の工費に占める割合が大きく、コストダウンも命題であった。この命題に対処するために新型護岸開発に取組み、現地条件に適合した天端被覆ブロック型護岸を開発し、工事に採用した。そして、工事着工以来約2年の歳月を経て護岸がほぼ完成し、引続き水理実験により評価した護岸の波圧特性を検証し、今後の設計に反映させるための現地計測を実施した。本報文では、泊発電所3号機増設工事の計画概要を述べるとともに、新型護岸の開発フローと、これまで実施した水理実験のうち、平面水槽を用いた実験の概要とその結果について説明する。さらに、現在行われている工事の状況、及び2002年10月から実施した、護岸に作用する波圧特性を検証するための現地計測について説明する。

### 2. 3号機増設工事計画

図-1に泊発電所の位置を、図-2に新型護岸の施工範囲を含む、3号機完成予想図を示す。泊発電所は北海道小樽市南西の日本海に面した海岸部に位置しており、1号機、2号機が既に運転している。3号機は現在の泊発電所南東側に隣接する海岸部に建設される計画であり、これに伴い約670mの護岸構築と土地造成などの建設準備工事が行われている<sup>1)</sup>。

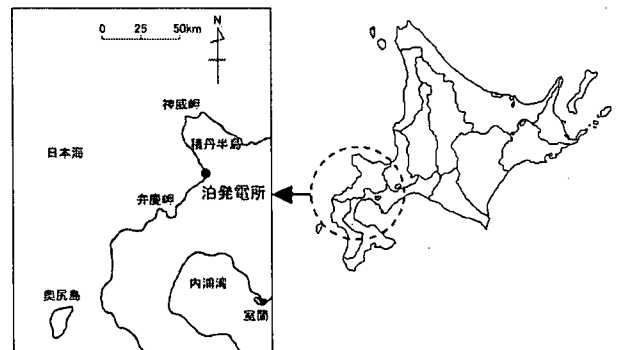


図-1 泊発電所位置図

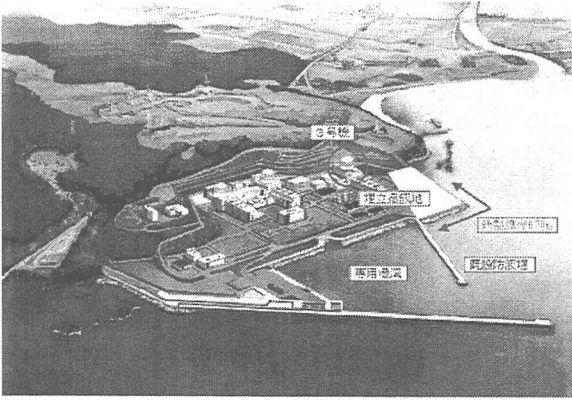


図-2 泊発電所3号機完成予想図

### 3. 新型護岸の開発

#### (1) 新型護岸開発フロー

本工事では、後背地の重要構造物を防護する所要の耐波機能を有し、さらに工程の確保及びコスト低減に寄与できる護岸を必要としたが、現地条件の制約上、ケーソンと消波ブロックの組み合わせの中で施工性の良いものが望まれた。この命題に対処するため、護岸形状の調査、水理模型実験による形状の絞込み、機能の比較・検証を行い、現地条件に適合した構造として、天端被覆ブロック型の新形式護岸を開発した。

図-3に護岸の開発フローを示す。施工前には調査によって絞り込んだ護岸を対象に断面2次元実験を行い<sup>2),3)</sup>、さらに最終的に選ばれた形状に対して平面水槽を用いた水理模型実験を実施し、詳細な検証を行った<sup>4)</sup>。施工後には水理実験の妥当性と護岸の機能検証のための現地計測を実施した。

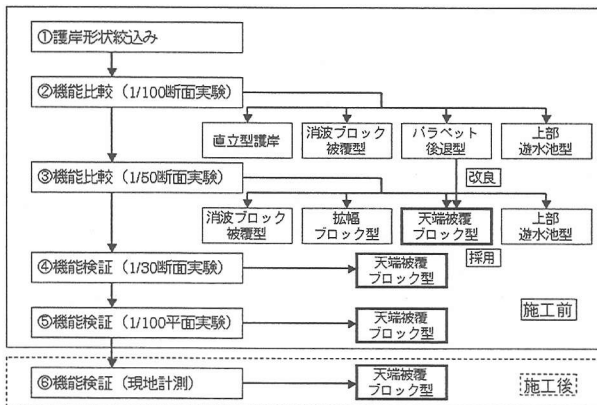
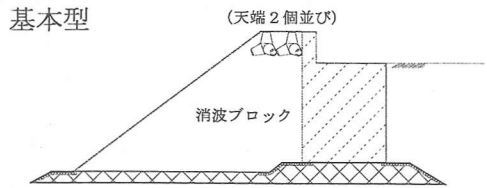


図-3 新型護岸開発フロー

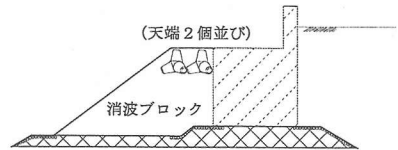
#### (2) 護岸形状

図-4に断面2次元実験で検討した低天端ケーソン護岸の形状を、図-5に一連の水理実験によって開発した天端被覆ブロック型護岸の断面形状を示す。本護岸の大きな特徴は、従来の消波ブロック被覆型混成堤と異なり、パラペットを後退させてケーソン上部工の天端にも消波ブロックを設置した点である。

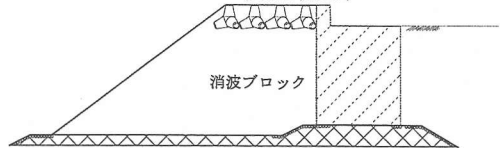
これにより、天端の高さを従来設計に比べ2m近く下げることができ、一般部ケーソンの小型化が可能になるとともに、ケーソン、消波ブロック等の数量減により約5%のコストダウンを実現できた。



#### 後退パラペット型



#### 拡幅ブロック型



#### 上部遊水池型

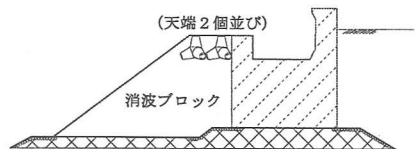


図-4 低天端ケーソン護岸のアイデア

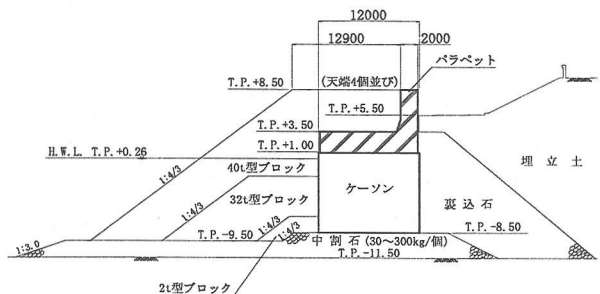


図-5 天端被覆ブロック型護岸 単位(mm)

### 4. 平面水槽実験

断面実験の結果、図-5に示した天端被覆ブロック型護岸は、コスト面だけでなく耐波性能も優れていることがわかった。しかし、実海域における波の現象は非常に複雑であるとともに、構造物や海底地形の影響により、断面の一部を代表させて行う2次元実験では予想できない現象が発生する可能性もある。そこで、既設の施設を含む発電所全体を取り込み、波浪の3次元性を考慮した平面水槽実験により、各施設の水利機能の評価を行った。

**(1) 設計条件及び実験模型**

実験はフルードの相似則に従い、縮尺を約 1/100 として行った。表-1に護岸の設計条件を、図-6に実験模型のセットアップ状況を示す。平面水槽内には現地の海底地形を模擬した1/100勾配の斜面を設置し、護岸位置での水深及び海底勾配を合わせた。ただし、造波可能な水深を確保するため、碎波変形の影響の少ない水深までは1/10勾配の斜面とした。なお、本実験装置は側壁からの反射を利用しており、斜面を設置した状態でも平面水槽中央付近に実験に有効な領域を十分確保することができる<sup>5), 6), 7)</sup>。

表-1 護岸設計条件

	現地(実験)
換算沖波	$H_0'=8.3m, T_0'=13sec$ ( $H_0'=8.8cm, T_0'=1.3sec$ )
設計波	$H_{max}=9.4m, H_{1/3}=6.9m, T_{1/3}=13sec$ ( $H_{max}=9.9cm, H_{1/3}=7.3cm, T_{1/3}=1.3sec$ )
設計潮位	H.H.W.L.T.P.+1.00m (+1.06cm) H.W.L. T.P.+0.26m (+0.27cm) L.W.L. T.P.-0.14m (-0.16cm)
設計波向き	WSW (WSW)
護岸設置水深	11.76m (12.4cm)
海底勾配	1/100 (1/100)
許容越波流量	$q_0=0.02 m^3/sec/m$ ( $0.2 cm^3/sec/cm$ )

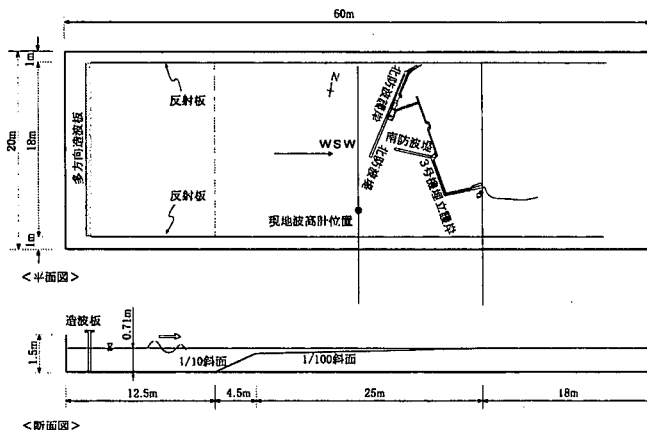


図-6 実験模型セットアップ

**(2) 実験項目**

実施した主な実験項目を図-7に示す。

**a) 越波排水路実験**

3号機埋立護岸背後への越波量の分布、流入量の時間変化を調べる。

**b) 隅角部安定実験**

護岸隅角部に設置するケーソンと消波ブロックの安定性を確認する。

**(3) 実験方法**

**a) 越波排水路実験**

護岸背面に6個と既設防波堤との付け根(南防波堤基部)の港内側に1個の計7個の越波升を設置し、

越波した波をシュートにより升に集積した(図-8)。升には電子式荷重計を取り付け、越波流量の時系列変化を連続的に計測するとともに、容量式波高計により越波が生じた際の越波高さを計測した。

**b) 隅角部安定実験**

ケーソンの安定性を確認する実験では、ケーソン前面及び底面に小型波圧計と水中6分力計を設置し、ケーソン及びパラペットに作用する波力を計測した。消波ブロックの安定性を確認する実験では、消波ブロックが実験の前後で移動した個数を目視により数えるとともに、被害率が大きい場合には対策案を検討した。

なお、各実験は設計波を中心に波高、周期及び潮位を変化させて行った。また、波条件は一方向不規則波とし、設計波のみ多方向不規則波による実験を行った。表-2に実験波浪の一覧を示す。

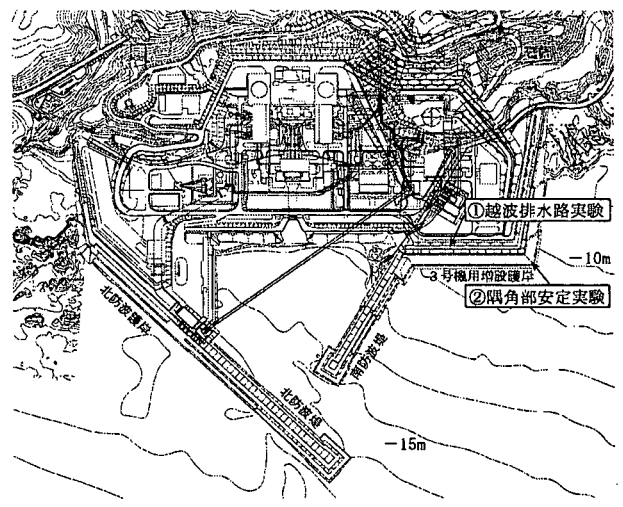


図-7 実験項目

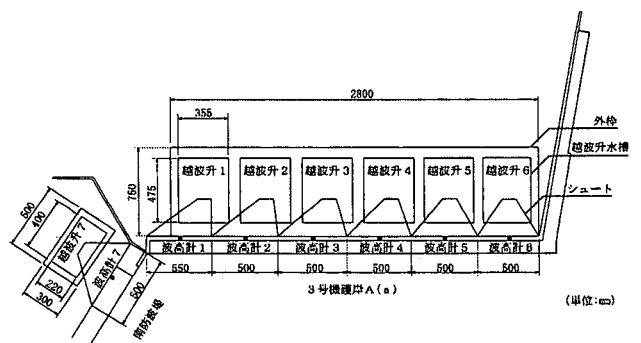


図-8 越波流量計測方法

表-2 実験波浪一覧

$T_0'$	11.0sec (1.1sec)	13.0sec (1.3sec)	14.0sec (1.4sec)
$H_0'$			
7.7m (8.1cm)	—	○	—
8.3m (8.8cm)	○	○ 設計波	○
9.0m (9.5cm)	—	○	—

現地(実験)

#### (4) 実験結果

写真-1に平面水槽実験の状況を示す。

##### a) 越波排水路実験

写真-2に越波流量計測実験の状況を、図-9に一方向不規則波及び多方向不規則波に対する越波流量の平面分布を示す。一方向不規則波実験の波向きはWSWであり、多方向不規則波実験では主波向きをWSWとした。両ケースともに構造物からの反射や回折の影響で場所によって越波流量に違いは見られるが<sup>8), 9), 10)</sup>、全ての場所で許容値 $0.02\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ を下回り、護岸の越波防止機能に問題無いことが確認された。また、一方向不規則波に比べ多方向不規則波の方が越波流量が全体的に少なく、一方向波の実験は安全側の評価となっていることがわかった。なお、断面2次元実験の越波流量は約 $0.006\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ であり、平面実験の隅角部と同程度であったが、6升の平均値と比較すると、一方向波が $0.003\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 、多方向波が $0.002\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 程度となり、多方向波が最も小さくなった。経済的な設計をするためには、多方向不規則波による詳細な検討も必要と考えられる。

また、波高を一定(8.3m)として周期を変化させた条件(11.0秒, 13.0秒, 14.0秒)と、周期を一定(13.0秒)として波高を変化させた条件(7.7m, 8.3m, 9.0m)について実験を行ったが、周期の変化が越波流量に与える影響が大きいことがわかった。ただし、いずれのケースについても越波流量は許容値を下回っており、護岸の機能に問題はなかった。

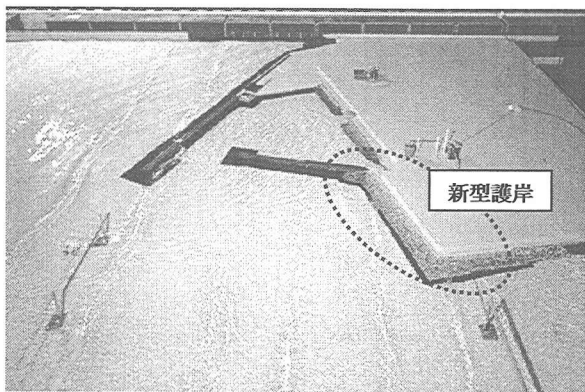


写真-1 平面水槽実験状況

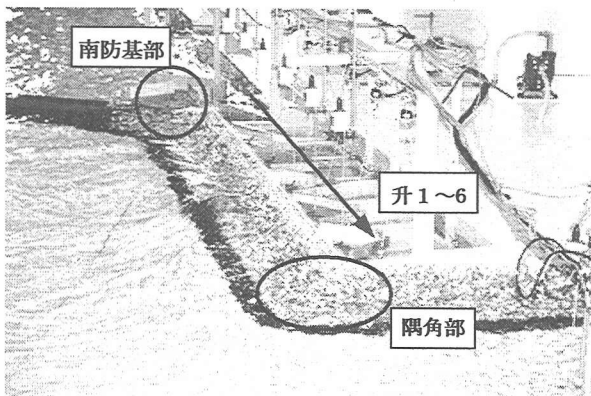
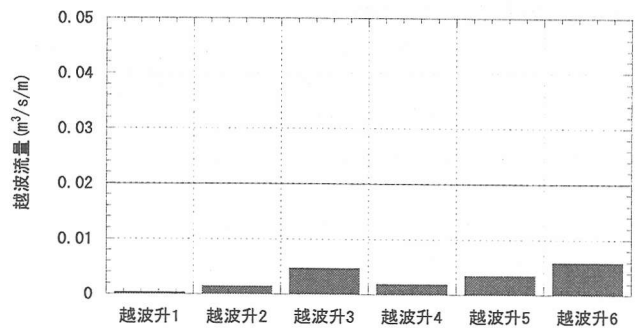
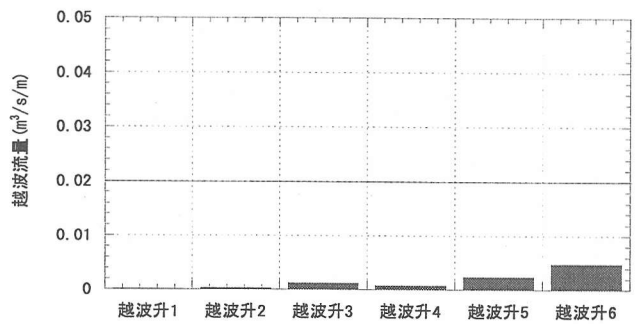


写真-2 越波流量計測実験状況



(一方向不規則波)



(多方向不規則波)

図-9 越波流量平面分布 (現地スケール)

##### b) 隅角部安定実験

実験の結果、隅角部のケーソンに作用する波圧は断面実験で求めた一般部に比べて小さく、特に隅角部を回り込んだ箇所では水位変動による静水圧程度の波圧が作用するだけであった。ただし、隅角部は消波ブロックに関して構造的に不安定な箇所であり、一般部に比べて安定性が劣ることが指摘されているが<sup>9), 10), 11)</sup>、本実験からも同様の傾向が見られた。そこで、消波ブロックの被害率を低減させるための対策について検討するとともに、作用する波圧が小さい箇所についてはケーソンの形状見直しを行った。

図-10に隅角部の設計案を示す。本実験では、消波ブロックの設置範囲を広げ、厚みにより波に抵抗させる方法(拡幅案)と、消波ブロックの重量を増して安定させる方法(重量案)について検討した。重量案では、隣接する消波ブロックとの噛み合わせや施工性、さらにコストを考慮し、当初設計と同じ40t型の寸法で、比重の1割大きい骨材を用いた高比重ブロックを使用した。その結果、拡幅案よりも重量案の方が効果的であることがわかり、1%を超えていた消波ブロックの被害率を、全ての波浪条件で1%以下に抑えることができた。また、当初設計では隅角部を回り込んだ箇所に一般部と同じ大きさのケーソンを3函設置する計画であったが、作用する波圧が静水圧程度であることから、陸側の2函については小型のケーソンを設置することとした。隅角部側の1函については、設置する消波ブロックに回折波が作用することを考慮し、隅角部で断面が変化しないよう、同一形状とした(図-10参照)。

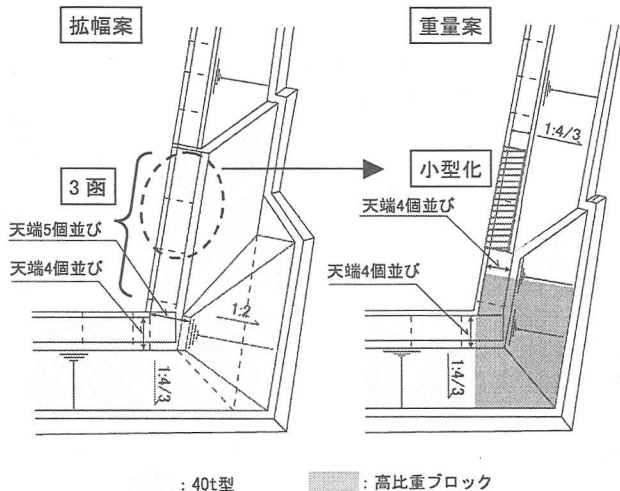


図-10 隅角部の設計案

## 5. 施工状況

本工事は2001年3月に始まり、2年間でケーソン23函据付、パラペット構築、消波ブロック約9,000個据付を行い、護岸をほぼ完成させた。写真-3に消波ブロック据付状況を示す。泊発電所の位置する日本海側は冬期波浪が非常に厳しい場所であり、海上での施工可能期間が4月から9月までのほぼ半年に限られる。そこで、工期短縮を実現するためにパラペット構築には急速施工を目的としたスライド式型枠工法を用い、構築が完了した範囲から消波ブロックの据付を順次行った。また、従来形式と違い、本護岸はケーソン上部工天端にも消波ブロックが設置されるが、据付は整積で行った。工事は順調に進み、施工性も良好であることが確認された。写真-4に2002年12月時点の埋立護岸の施工状況を示す。

## 6. 護岸に作用する波圧の現地計測

現地計測は、2002年度の工事がほぼ終了した10月1日から2003年2月末の5カ月間実施した。

### (1) 計測目的

3号機建設に伴う護岸工事に採用した新形式護岸は、我が国で初めてとなる低天端被覆ブロック型である。そこで、現地の護岸に作用する波力を実際に計測し、水理実験結果と比較することにより、新形式護岸の波力特性を明らかにするとともに、耐波性能を検証し、護岸の設計指針を確立することを目的として現地計測を実施した。

### (2) 計測項目

今回実施した主な計測項目は、①護岸に入射する波浪、②護岸に作用する波圧、の2点である。波浪データからは、護岸に入射する冬期波浪の波高、周

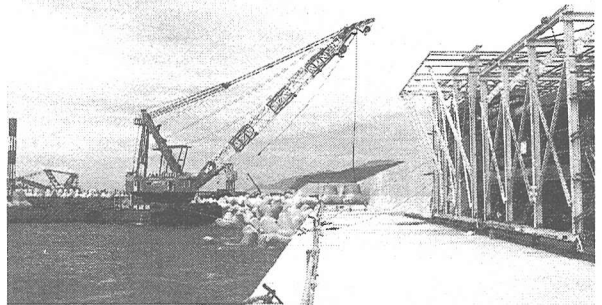


写真-3 消波ブロック据付状況

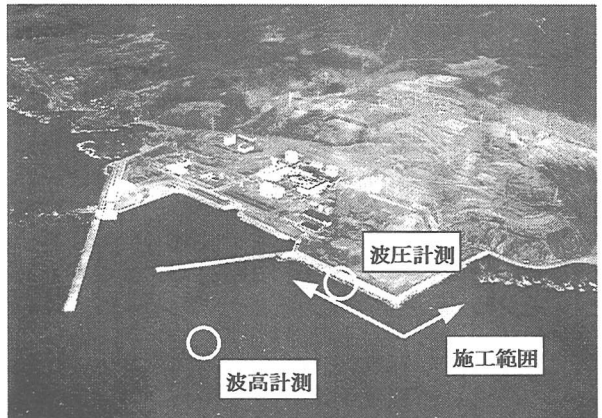


写真-4 埋立護岸施工状況 (2002年12月)

期、波向き特性を明らかにするとともに、波圧の評価を行う際の入力条件とした。

### (3) 計測方法

波浪の計測には超音波式波高計を用い、計器を護岸前面の水深15m地点の海底に設置した(写真-4参照)。データサンプリングは毎偶数正時を挟む±10分の計20分間について2Hzで行った。

波圧の計測には直径約10cmの小型式波圧計を用い、ケーソン4台、上部工1台、パラペット3台の計8台を設置した。また、計測は護岸を代表する中央付近の1測線とした。図-11に波圧計の設置位置を、写真-5にパラペット前面の波圧計設置状況をそれぞれ示す。データサンプリングは毎正時を挟む±10分の計20分間について50Hzで行った。

なお、波浪データが欠損する場合には、水深18m地点に設置された既設の波高計データを用いた。

### (4) 計測結果

計測期間中に護岸に作用した波高は、最大でも5年再現確率( $H_{max}=8.6m$ )程度であり、実験で想定していた50年確率波( $H_{max}=9.4m$ )に比べ小さかった。そのため、パラペット前面に作用する波圧は実験結果に比べて小さいものであった。護岸に作用する波浪と波圧分布の関係については、現在データ整理中である。



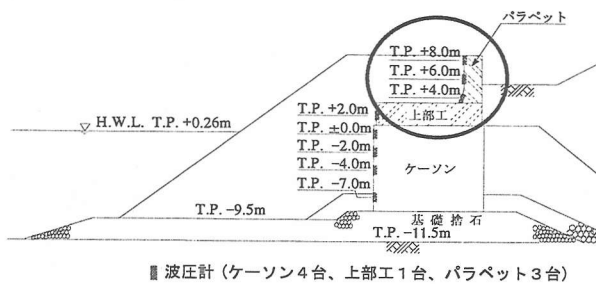


図-11 波圧計設置位置

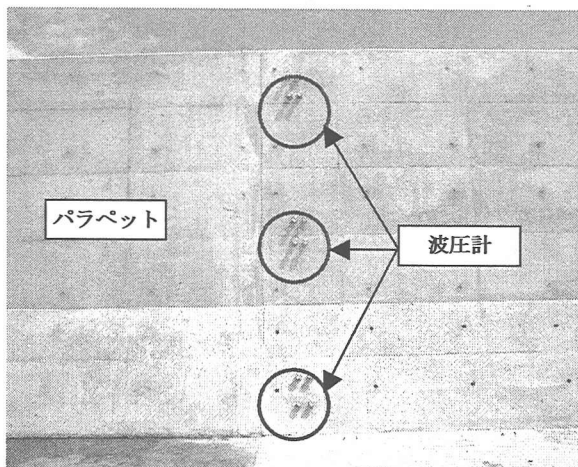


写真-5 波圧計設置状況 (パラペット)

## 7. おわりに

本研究により得られた結論及び今後の課題は次のとおりである。

### (1) 結論

- 一連の水理実験により、従来の消波ブロック被覆型混成堤に代わる天端被覆ブロック型護岸を開発し、コストダウンを実現した。
- 平面水槽実験により、越波流量の平面分布特性について検証するとともに、隅角部に設置する消波ブロックの安定性とケーソンの波圧特性について検討した。その結果、護岸の越波流量は場所、波条件によって変化するものの、全ての波浪条件で許容値を下回り、新型護岸の耐波機能に問題ないことが確認された。また、隅角部に設置する消波ブロックの被害率が大きく、その一方で隅角部を回り込んだ場所はケーソンに作用する波圧が小さいことから、施工性を考慮した高比重ブロックを設置することで消波ブロックの安定性を高めるとともに、ケーソンの一部を小型化してコストダウンを図った。
- 新型護岸の施工を開始するとともに、順調に工事が進み、施工性も良好であることが確認された。
- 新型護岸に波圧計等の計測器を設置し、護岸の波圧特性を検証するためのデータ取得を行った。

### (2) 今後の課題

一連の実験を通して開発した天端被覆ブロック型護岸は、従来形式の護岸と同等の耐波機能を有するだけでなく、コスト面で優れている。その利点を活かし、広く護岸建設に適用させるためにも、今回の計測で得られたデータについて詳細な検討を行うとともに、今後もデータを蓄積し、より安全で経済的な設計を実現することが重要である。

謝辞：天端被覆ブロック型護岸の開発にあたり、尾崎晃北海道大学名誉教授、佐伯浩北海道大学工学部教授、(社)寒地港湾技術研究センターには、開発の当初から適切なご指導をいただきました。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 坂本容，池谷毅：天端被覆ブロック護岸，土木学会誌，vol. 88，2003（投稿中）。
- 岩瀬浩二，池谷毅，安部鐘一，白川部秀基，天野英樹：天端被覆ブロック護岸の設計法に関する研究，海岸工学論文集，vol. 46，pp. 891-895，1999。
- 岩瀬浩二，池谷毅，安部鐘一，能登谷勇人：ケーソン式天端護岸の水理特性に関する研究，海洋開発論文集，vol. 15，pp. 19-24，1999。
- 松本頼明，安部鐘一，星秀樹：泊発電所 3 号機準備工事 埋立護岸の開発と施工，電力土木，No. 303，pp. 30-34，2003。
- R. A. Dalrymple：Directional wavemaker theory with side wall reflection，Journal of Hydraulic Research，Vol. 27，No. 1，p. 23-34，1989。
- 今井貫爾，池谷毅，秋山義信，南誠信，岩瀬浩二：側壁反射を利用した斜め規則波の造波方法，第 38 回海岸工学論文集，pp. 131-135，1991
- 秋山真吾，池谷毅，高橋俊彦：斜面上の不規則波造波理論の検証，土木学会第 55 回年次学術講演会，pp. 118-119，2000
- 平石哲也，望月徳雄，佐藤一央，丸山晴広，金澤剛，榎本達也：護岸越波流量における波の多方向性の影響，港湾技術研究所報告，第 35 巻，第 1 号，1996
- 榎山勉，鹿島遼一，窪泰治：多方向不規則波に対する人工島防波護岸の越波特性と耐波特性，第 41 回海岸工学論文集，pp. 656-660，1994。
- 富田孝史，河合尚男，海原敏明，平石哲也：隅角部を有する消波ブロック被覆式護岸の多方向不規則波による越波特性とブロックの安定性，第 47 回海岸工学論文集，pp. 886-890，2000。
- 木村克俊，上久保勝美，坂本洋一，水野雄三，竹田英章，林倫史：消波ブロック被覆堤の堤頭部におけるブロックの安定性，第 44 回海岸工学論文集，pp. 956-960，1997。