

志賀原子力発電所における揚力減殺型マウンド被覆ブロックの開発とその現地施工

——急勾配海域に建設された上部斜面堤被覆工——

宮崎 甚夫*・竹沢 隆一**・野口 猛雄*

1. 緒 言

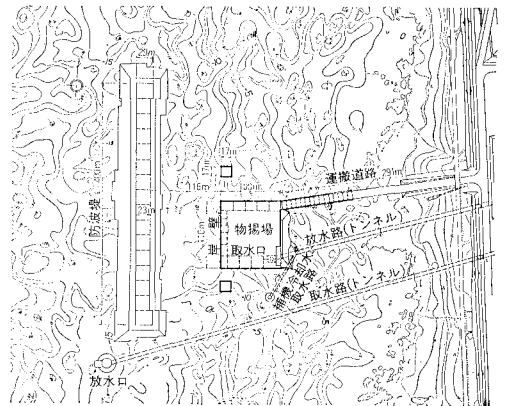
原子力発電所の建設・運転にあたっては、設計・建設・運転の各段階で安全性の確認に万全の配慮が払われているが、取放水施設・荷揚施設・各種建物基礎等の土木工事も例外ではなく、極めて厳密な設計と徹底した施工・品質管理がなされている。なかでも、海岸構造物については、過酷な自然条件の海域に建設される場合が多く、海岸工学上、それらの施設の安定性が極めて重要である。

石川県能登半島西岸の羽咋郡志賀町赤住に立地する北陸電力㈱志賀原子力発電所の前面は凹凸の激しい急勾配岩礁海域であり、ここに、冷却水取放水施設、建設資機材の荷揚と使用済燃料を搬出する物揚場およびこれら施設を保護する防波堤を建設している。これらの施設の計画にあたり、海域の自然環境保護上の観点から、流況の変化を極力小さくするため、物揚場は穴開き型の連絡道路で陸域と結んだ出島式とし、防波堤は一字型式を採用した。また、施設の設計にあたっては、信頼性の確保に万全を期すため可能な限り水理模型実験による確認を行った。なかでも、防波堤の設計条件は、海底勾配が1/30、設置水深が約15m、設計波が100年確率波（最高波高14.1m、周期14秒）と非常に過酷であることから、直立堤に比べて堤体の安定が大きく、かつコスト低減が図られる上部斜面堤を採用した。一方、防波堤の安定性にとって重要なケーソンマウンド被覆ブロックの設計においては、各種の安定重量算定法が提案されているが、従来不規則波を対象とした研究は少なく、また上部斜面堤の影響についても未解明な部分が残されている。著者らは被覆ブロックの設計に際し、まず既存ブロックの検討から開始したが、水理実験の結果、最高波高来襲時に比べ、連続した高波浪が作用した場合に危険性が増大し、40tのブロックに相当する模型ブロックでは、明らかに水中重量不足と思われる転倒が確認された。さらにまた、単純に重量を増加するだけでは安定は得られず、70tブロックでもこれが動揺しケーソンに衝突した

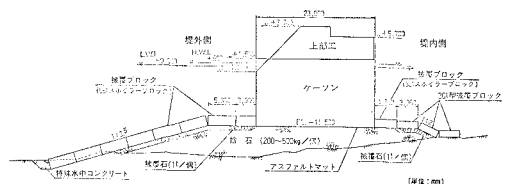
り、捨石マウンドに地割れが生じたりする現象が確認された。また、ブロック重量の増加に伴い、ブロック高さが高くなり、ケーソンへの波力の増大を招く結果となるため、ブロック高さの増大を抑えつつ安定性が確保されるブロックを開発する必要が生じた。本論では、被覆ブロックの設計にあたり、揚力減殺型マウンド被覆ブロック（以下、スプライアーブロックと呼ぶ。）を新たに開発した経緯と、その水理特性および現地設置後2年間の安定性の実証結果を報告する。

2. 被覆ブロックの開発

被覆ブロックの開発に際しては、表一1に示す形状開発および安定確認実験を実施した。実験は北陸電力㈱技術研究所の施設を用いて行った。二次元造波水路は長さ100m×幅1.0m×高さ1.4m、三次元平面造波水槽は長さ25m×幅17m×深さ1mである。図一1は志賀



図一1 志賀原子力発電所海域施設平面図



図二 防波堤標準断面図

* 正会員 北陸電力(株)志賀原子力発電所建設所

** 正会員 北陸電力(株)技術研究所

原子力発電所の海域施設の平面図であり、図-2は防波堤の標準断面図である。模型の縮尺は、断面二次元実験では1/35、平面三次元実験では1/40とし、フルード相似則による歪の無い模型を用いた。作用させた不規則波は、Bretschneider・光易型のスペクトルを持つ不規則波であり、その大きさは、現地スケール換算した場合、有義波高が8.4m、有義波周期が14秒、最高波高が碎波限界波高である14.1mとした。また、有義波高以上の波が3波以上連なる波列が存在するように配慮した。

(1) 被覆ブロックの形状特性

a) 実験内容

従来、被覆ブロックに縦の貫通孔を設けると、安定性が增大することが知られている。今回、より効果的な孔の大きさや分散方法を見出すため、数種類の形状を考案し、これらに対し規則波を作用させて、3分力計によりブロックに働く流体力を測定した。また、揚力については、航空機の主翼の上面の気流を乱すことにより揚力を低減させるスポイラーに着目し、今回初めて被覆ブロックへのスポイラー（ブロック上面縁部に設けた台形状の凸部）の採用を試み、その揚力低減効果について確認を行った。実験は、循環水路に捨石マウンドを設置し、スポイラーの間隔 l と高さ h の比 l/h に対する揚力低減特性を3分力計により測定した。なお、試験体の寸法は、現地スケールで、厚さが1.5m、スポイラーの高さ h が0.4mとし、スポイラー背面の傾斜角は、自動車の車体におけるハッチバック傾斜角の空力特性を参考にして 45° と仮定した。

b) 実験結果

図-3は開孔率と無孔ブロックに対する開孔ブロックの揚力低減の割合（揚力低減率）との関係を示したものであり、開孔によるブロック重量減少以上に、揚力が低減することが確認された。また、図-4は開孔率を15%とし、孔の分散方法を変えた場合の揚力低減率の変化を示したものであるが、開孔率が一定の場合、開孔部を1孔より複数孔に分散したほうがより揚力が低減する傾向が認められた。図-5は、揚力係数 C_L とスポイラーの間隔 l と高さ h の比の関係を示したものであり、 l/h

が10付近において揚力係数は急激に減少することがわかる。また、三角形状スポイラーやブロック底面縁部にスカート設けた場合には、さらに揚力が減少する結果となった。

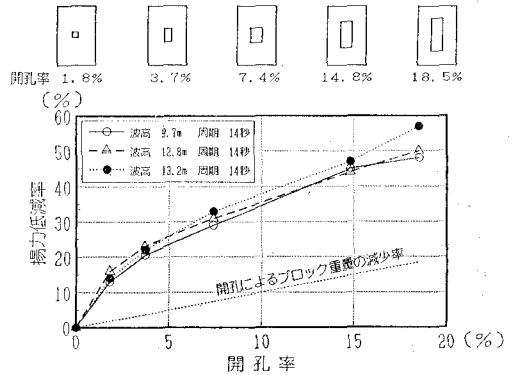


図-3 開孔率による揚力低減特性

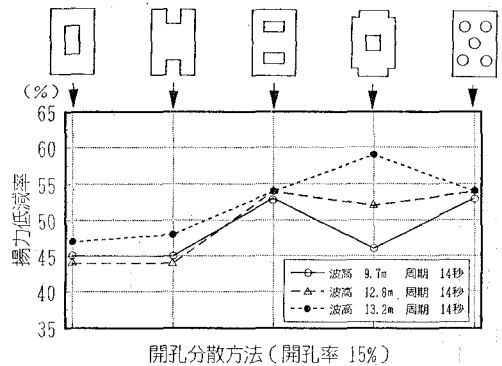


図-4 開孔分散方法による揚力低減特性

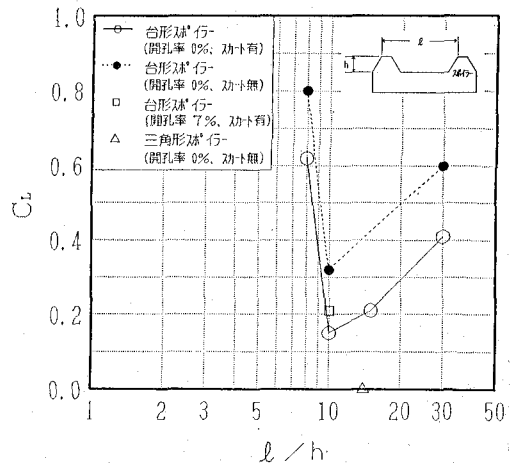


図-5 スポイラー形状による揚力係数低減特性

表-1 被覆ブロック形状の決定のための検討内容

検討内容		使用施設	実験波
既存形状ブロック安定実験		二次元水路	不規則波
形状開発実験	孔効果	二次元水路	規則波
	スポイラー効果	二次元循環水路	定常流
形状特性確認実験		二次元循環水路	定常流
流速測定実験		三次元水槽	不規則波
スポイラーブロック安定実験		二次元水路	不規則波
		三次元水槽	不規則波

(2) 新型ブロックの形状

a) 新型ブロックの基本形状

上記スポイラーおよび孔の効果に関する実験結果を取り入れ、試行錯誤により最終形状に近いブロック形状を決定し、定常流を用いた断面二次元循環水路における実験を行った結果、現地に配置するように配列した状態における値として揚力係数は約 0.2、抗力係数は約 0.4 であった。また、堤頭部付近を模擬した平面三次元実験により、被覆ブロックに作用する波による最大水粒子速度の測定を行い、設計流速を 8.8m/s とした。

これらの結果を踏まえ、スポイラーブロックの基本形状は 図-6 および 写真-1 に示すように決定したが、これは以下の特徴を有している。

①ブロックの短辺に2個の台形状 スポイラーを設けた。三角形スポイラーでは、より揚力が減少する実験結果が得られているが、耐久性の観点からスポイラー形状は台形とした。また、全方向からの流れに対する有効性を期待して4辺にスポイラーを設けてみたが、4隅にできるスポイラーの死水域によりスポイラー効果が減少することが判った。よって、スポイラーは2辺にのみ設けることとし、ブロック据付方向については流向を考慮してスポイラーが有効となる方向に配置した。すなわち、ケーソン根固め位置では、斜め入射の波を勘案して

ブロック長手方向を防波堤法線方向に、それ以外の位置では、防波堤法線直角方向に設置した。

②ブロックに2つの縦孔を貫通させたことに加え、4側面にも凹部をつけ、ブロック配列後の被覆面全体としての開孔率を 17% まで確保した。

③ブロック底面縁部にスカート进行を設け、捨石との馴染みの強化を図ることにより、ブロック間隙からブロック下面へ流れが進入するのを極力防止した。

④ブロック底面に4ヶ所のスパイクを設け、捨石へのくい込みによる滑動抵抗力の増大を図った。なお、ブロック配列後にスパイクが分散配置されるよう設置位置を工夫した。

b) スポイラーブロックの安定確認実験

不規則波を用いて二次元および三次元実験により、スポイラーブロックの安定性を検討した。二次元実験では、堤幹部の標準断面において 55t スポイラーブロックの安定性を、また、三次元実験では、堤頭部付近を模擬して 80t スポイラーブロックの安定性を確認した。いずれの実験においても、スポイラーブロックの転倒、滑動、浮上およびマウンドの地割れ等の現象は認められず、既存形状ブロックの場合に大きな被害が生じる連続した高波浪の来襲時にも、まったく安定であった。

3. 現地施工

志賀原子力発電所の防波堤では、安定性の確保と工事費の低減を目的とし、マウンド被覆ブロックとして今回新たに開発したスポイラーブロックを採用した。堤幹部の堤外側には 55t スポイラーブロックを、また堤内側根固め部には 30t スポイラーブロックを施工し、堤頭部は 80t スポイラーブロックを施工した。表-2 に施工実績および予定数量を示すが、今回開発したスポイラーブロックの使用量は約 1,000 個にもなった。

スポイラーブロックは金沢港の仮設ヤードで製作し、200t 吊旋回式起重機船で海路約 70 km を運搬して据付を行ったが、作業基地・避難港として現場付近には小さ

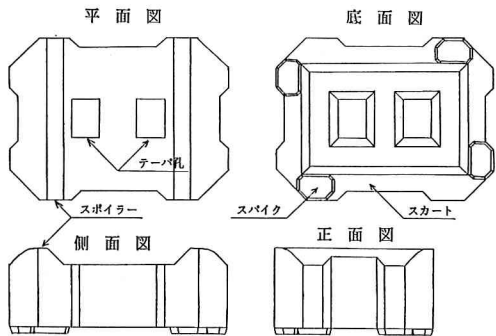


図-6 スポイラーブロック図

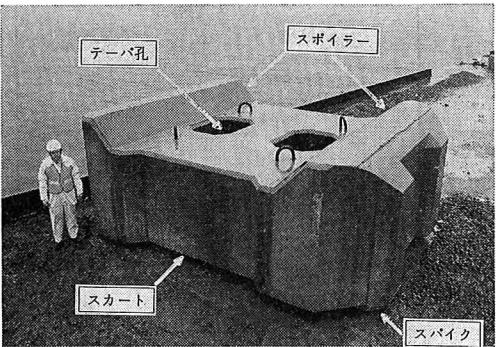


写真-1 スポイラーブロック外観

表-2 防波堤の施工数量

	全体計画	元年実績	2年実績	3年予定
防波堤延長 (m)	400	100	150	150
30t スポイラーブロック(個)	93	10	48	35
55t スポイラーブロック(個)	636	204	253	179
80t スポイラーブロック(個)	265	177	—	88
30t エックスブロック (個)	258	15	135	108
捨石 (m ³)	81,500	20,400	29,900	31,200
中詰砂 (m ³)	89,900	22,600	32,700	34,600
上部コンクリート (m ³)	39,100	10,000	12,100	17,000

な漁港しかなく、主に金沢港を利用せざるを得なかった。また、当海域は、日本海特有の冬期の高波浪の影響を直接受けることから、施工期間が4月から10月の7ヶ月間に限られ、静穏日も年平均90日と少なく、特に被覆ブロック据付工事は毎年最後の工程となるため、海象の急変と残された静穏日にたえず注意して行わざるを得なかった。このように非常に厳しい作業環境で工事を遂行するため、気象の専門家を現地に常駐させて24時間の気象海象予報体制をとり、海象の急変時の対策をたえず準備するなどして予定の工程を安全かつ確実に実施した。

そのほか被覆ブロックの安定性を向上させるために実施した方策を以下に示す。

①凹凸の激しい岩礁であるため、被覆ブロックの法先部を岩盤掘削し、ブロックを特殊水中コンクリートに埋め込み、法先部を押さえることによりブロック全体の安定性向上を図った。

②防波堤の工事期間中2回の冬期間のみ堤頭部となる部分については、55t スポイラーブロックと同じ形状・寸法で80t スポイラーブロックと単位面積当たり重量が等しくなるよう、砂鉄を混入した高比重コンクリートを用いたスポイラーブロックを採用し、被覆ブロックの安定を確保すると共に、根固め水深の減少によるケーソンへの波力の増加を防止した。

スポイラーブロックの施工後、防波堤は平成元年度および2年度の2回の越冬を経過している。この間に来襲した高波浪について、京都府の経ヶ岬および石川県金沢港の観測結果を表-3に示す。いずれの観測地点においても、この2年間に観測史上最大の波高を記録しており、非常に厳しい海象であったことがうかがわれる。写真-2はこのような冬期の高波浪が本防波堤に来襲した時のものであり波の打ち上げ高は50m程度にも及んでいる。また、金沢港と志賀原子力発電所前面海域との最高波高の関係を図-7に示すが、両者の相関はきわめて良いため、当地の波浪データとして金沢港の波浪データが有効に利用できると考えられる。

スポイラーブロックの安定性を評価するため、越冬後

表-3 波浪状況(最高波高)

	京都府 経ヶ岬			石川県 金沢港		
	既往最大*	平成元年度	平成2年度	既往最大**	平成元年度	平成2年度
10月	10.05	10.91	8.24	11.79	4.35	8.20
11月	10.10	11.61	11.82		5.64	11.72
12月	11.20	8.98	13.00		6.06	12.01
1月	10.10	9.09	8.27		8.80	8.93
2月	10.10	6.67	欠測		5.74	11.28
3月	11.11	8.22	5.55		7.63	5.1

(注) *: 昭和51年～平成元年 3月

** : 昭和45年～昭和63年

および高波浪来襲後に、潜水士および水中ビデオロボットにより目視観測を行うとともに、代表ポイントにおけるブロック位置を測定した。その結果では、最も被害を受けやすい堤頭部の80t および越冬用の砂鉄混入スポイラーブロックならびに堤幹部の55t スポイラーブロック共滑動や転倒などの異常は認められなかった。図-8は、平成元年度の越冬前後と平成2年11月の高波浪来襲前後および平成2年度の越冬前後のブロック据付間隔の調査結果を示したものであるが、いずれの調査でもブロック据付間隔の変化は、ほとんどが10cm程度以内であり、まったく問題はなかった。また、法先部のブロックは、水中コンクリートにより押さえられており、ブロックおよびコンクリート共に異常に認められなかった。

なお、防波堤堤体についても、潜水調査および測量を行ったが、ケーソン本体に損傷、クラック等の異常は認められず、堤体の位置についても、波浪を受けたことによる捨石マウンドの締め固まりによる数cm程度の沈下が認められたに過ぎなかった。



写真-2 波浪状況

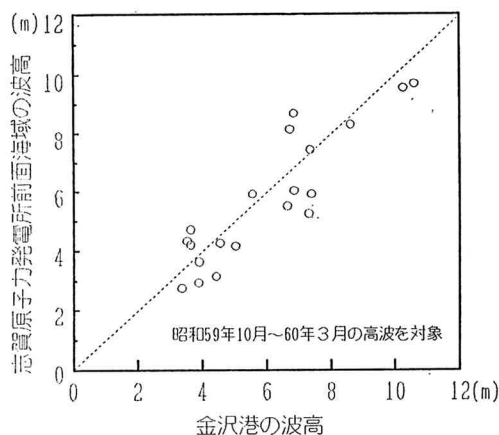


図-7 志賀原子力発電所前面海域の波高相関

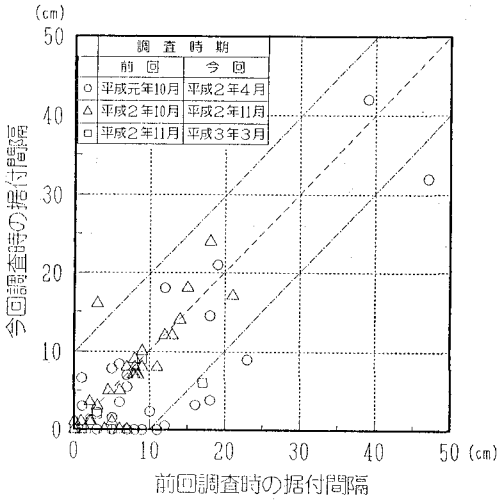


図-8 ブロック間隔調査結果

4. 結 語

急勾配の岩礁海域に建設された北陸電力関志賀原子力発電所の防波堤は、厳しい波浪条件に対する安定性の確保および工事費の低減を目標とし、水理模型実験を行うことにより、新たに着目したスポイラー効果と開孔効果を取り入れた揚力減殺型被覆ブロックを開発し、これを

現地施工に適用した。その結果、最も不安定である施工後の2年間に、観測史上最高の波高が来襲し、さらに、10 m 以上の高波浪の時化を数度経験したが、これらは全く異常は認められず安定であり、新型ブロックの有用性が実証された。

このブロックの開発にあたり、有益な指導と助言を頂いた斯界の先生および専門家の方々に厚く謝意を表します。

参 考 文 献

小舟浩治・菅原一晃・橋本典明・亀山 豊・成田 明 (1987): 沿岸波浪観測年報(1985), 港湾技研資料, No. 574, p. 128.
小舟浩治・亀山 豊・成田 明・菅原一晃・後藤智明・橋本典明 (1988): 沿岸波浪観測年報(1986), 港湾技研資料, No. 612, p. 121.
小舟浩治・亀山 豊・末次広児・菅原一晃・後藤智明・橋本典明 (1989): 沿岸波浪観測年報(1987), 港湾技研資料, No. 642, p. 118.
小舟浩治・亀山 豊・菅原一晃・橋本典明 (1990): 沿岸波浪観測年報(1988), 港湾技研資料, No. 666, p. 116.
菅原一晃・小舟浩治・佐々木弘・橋本典明・亀山 豊・成田明 (1986): 沿岸波浪観測 15 年統計(昭和 45 年~昭和 59 年), 港湾技研資料, No. 554, p. 16.
(財)日本気象協会 (1990): 気象庁波浪観測資料, 13 号, p. 231.
谷本勝利・柳生忠彦・村永 努・柴田綱三・合田良実 (1982): 不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する研究, 港研報告, 21 巻, 3 号, pp. 3-41.