

斜面スリットケーソンの開発

DEVELOPMENT OF THE SLOPING SLIT CAISSON

関口 信一郎¹・渥美 洋一²・中内 勲³・宮部 秀一⁴・福士 昌哉⁵・三輪 俊彦⁶
Sin-ichiro SEKIGUCHI, Yoiti-ATUMI, Isao NAKAUCHI, Shuichi MIYABE, Masaya HUKUSHI,
Toshihiro MIWA

¹正会員 工修 北海道開発局港湾部空港課 (〒060-8511 札幌市北区北8条西2丁目)

²正会員 北海道開発局農水部水産課 (〒060-8511 札幌市北区北8条西2丁目)

³正会員 北海道開発局函館開発建設部築港課 (〒040-8501 函館市大川町1番27号)

⁴正会員 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

⁵正会員 北海道開発局函館開発建設部松前港湾建設事業所 (〒049-1501 松前郡松前町字建石216-1)

⁶正会員 前田建設工業(株)土木本部海洋グループ (〒179-8903 東京都練馬区高松5-8)

Many types of breakwater have been developed to withstand the enormous wave force of a deep sea area.

However, most have not proven viable in terms of constructability, economy and so on.

The sloping slit caisson is expected to overcome these problems. It acts to dissipate wave energy by a front perforated wall and a wave chamber. The downward force acting on the slope increases the caisson's stability.

This study describes the efficiency, design and construction method, and then explains the results of actual construction.

Keywords: Breakwater, wave force, deep sea, sloping wall, perforated wall, wave chamber, design, construction method, economy sloping slit caisson

1. 開発の目的と特長

現在, 我国では, 混成堤の前面に消波・反射に効果がある消波ブロックを設置した消波ブロック被覆堤が主流である。

近年, 大水深高波浪の海域に防波堤を建設する機会が多くなり, 新形式の防波堤が開発されるようになった。このような海域に消波ブロック被覆堤を建設した場合, 消波ブロックは重量が大きく, かつ多量に必要となり, 施工性が悪く工費がかさむためである。

数多くの新形式防波堤が開発されている¹⁾が, 大水深・高波浪への対応として現在最も実用的といわれているのは, 直立スリット堤と上部斜面堤である。他の新形式防波堤は, 構造が複雑であったり, 施工性や経済性に問題があるため普及していない。

直立スリットケーソンを大水深・高波浪の海域に適用した場合は, 強大な波力に対するスリット部材の耐荷性・耐久性が課題となる。スリット部材を厚くして対応する場合にはコンクリートの温度応力によるひび割れ防止の検討等も必要となる²⁾。

上部斜面ケーソンは上部工として波力を減少させ

るための斜面を有しているものであり, 斜面に下向きに働く力が揚圧力を相殺してケーソンの安定性を高めるものである。

ケーソンの斜面は, 通常は建設上の理由から静水面よりも上にある。

しかし, 斜面部が静水面下まで延長されると波に対する抵抗力はさらに大きくなる³⁾。

これらの新形式防波堤に対し, 4章において述べる工法で作られる斜面スリット堤は両者の機能を有し, 以下の特徴を有する(図-1)⁴⁾。

① 斜面の傾斜, スリットの開口率およびスリット板の間隔を調整することにより, 消波効果および反射効果を増加することができる。

② 波が斜面に作用することにより水平波力が減少

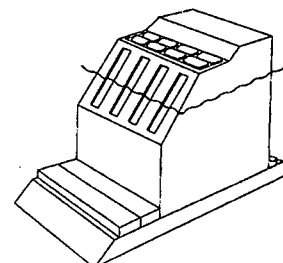


図-1 斜面スリット堤

し、鉛直分力が増加するので、滑動に対する抵抗が増大する。堤体はその目的に応じて、透過あるいは不透過にできる。透過堤にした場合は、堤体上面を藻の繁殖水面に利用できる。

③ 側壁およびスリット部が高耐久性埋設型枠、流動性の高いコンクリート（スランプフロー値が35～60cmのコンクリート。以下中流動コンクリートと称す）および形鋼で形成されているため、耐荷性および耐久性に優れている。高耐久性埋設型枠の物理特性および中流動コンクリートの配合条件を、おのこの表-1、表-2に示す。

④ スリット部および遊水部の斜面が水中から立ち上がるので、斜面の効果が大きい。

表-1 高耐久性埋設型枠材料の特性値

項 目	特 性 値
圧縮強度	68.6×10 ³ kN/m ² 以上
曲げ強度	11.8×10 ³ kN/m ² 以上
ヤング係数	3.4×10 ⁷ kN/m ²
単位体積重量	23.5kN/m ³

表-2 中流動コンクリートの配合条件

設計基準強度(N/mm ²)	空気量(%)	粗骨材最大寸法(mm)	スランプフロー(cm)	水セメント比の限度(%)	最小単位セメント量(kg/m ³)	混和剤の種類
24	4.5	20	50	50	300	高性能AE減水剤

2. 斜面スリット堤の水利特性

斜面スリットケーソンの設計・構築工法および効果を確認するため、北海道松前郡の福島漁港において実証試験を行うこととし、その水利特性を把握するため水利実験を行った。

縮尺は1/20、海底勾配1/50、不規則波で波数は130～150波である。消波ブロック被覆堤、直立スリット堤についても同一条件で実験を行い、斜面スリット堤の水利特性と比較した。

設計波に相応する波の諸元は、 $T_{1/3}=2.3s$ 、 $H_{1/3}=16.5cm$ である。

2.1 波力

滑動安全性については、図-2に示すとおり斜面スリット堤が直立スリット堤に比べ安全性が高く、波高が増加するほど滑動限界重量の差が大きくなる。直立スリット堤は、遊水室後壁に波面が作用する瞬間(Phase-II)に波力が最大になるのに対し、斜面スリット堤では波高が18.3cm以下では、波面が前面スリット壁に作用する瞬間(Phase-I)に波高が最大となり、波高が18.3cm以上では波面が遊水室後壁に作用する瞬間(Phase-II)に波高が最大となる。

図-3は $T_{1/3}=2.30s$ 、 $H_{1/3}=16.5cm$ での相対天端高さ $hc/H_{1/3}$ と滑動限界重量 W' の関係である。天端

高さを変化させても W' はほぼ一定である。これは天端高さに関係なく、作用する波力が一定であることを示唆していることから、波力が前面スリット部に作用している時に波力が最大となることを意味していると思われる。

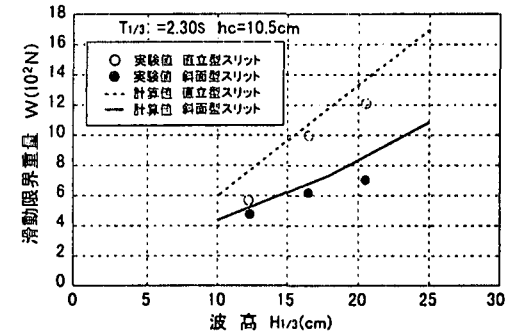


図-2 波高と滑動限界重量の関係

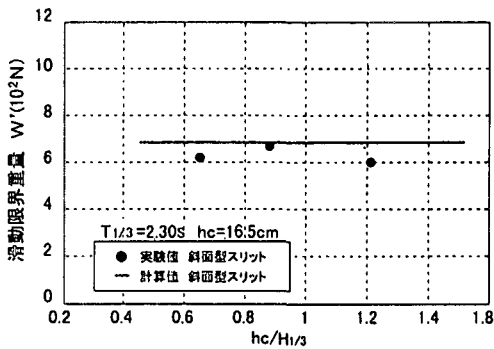


図-3 相対天端高さと滑動限界重量の関係

2.2 波力算定式

堤体の安定計算に用いる波力は、直立スリット堤および上部斜面堤に用いる波力算定式を重ね合わせて求める。

直立スリットは表-3に示す6種類の波の位相を考慮し、その波力算定式は以下のとおりである。

なお、図-4に押し波時Ⅱaの波圧分布を示す。

表-3 検討する6種類の波の位相の概要

押し波時Ⅰ	スリット部の波力が最大となる位相
押し波時Ⅱa	遊水室後壁の衝撃的な波力のピークが現れる位相
押し波時Ⅱb	遊水室後壁に比較的緩やかに変化する波力のピークが現われる位相
引き波時Ⅰ	スリット部の波力が負のピークとなる位相
引き波時Ⅱ	ケーソン前面の水位が最も低下する位相
引き波時Ⅲ	遊水室内の水位が最も低下する位相

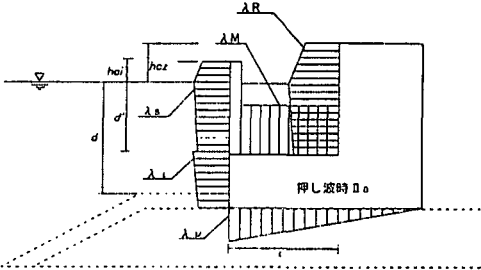


図-4 直立消波ケーソンの波圧分布

$$P_1=0.5(1+\cos \beta)\left(\lambda_1 \alpha_1+\lambda_2 \alpha \cos ^2 \beta\right) W_0 H D \quad (2.1)$$

ここに、

$$\alpha_1=0.6+0.5\left\{\left(4 \pi h / L D\right) / \sinh \left(4 \pi h / L D\right)\right\}^2 \quad (2.2)$$

$$\alpha^*=\max \left\{\alpha_2, \alpha_1\right\} \quad (2.3)$$

$$\alpha_2=\min \left\{\left(1-d / h_b\right)\left(H_0 / d\right)^2 / 3, 2 d / H_0\right\} \quad (2.4)$$

λ_1, λ_2 : 押し波時における波力補正係数(表-4)

β : 波の入射方向と防波堤の壁面に対する垂線のなす角

$H D, L D$: 設計波力の計算に用いる波高および波長

α_1 : 衝撃波力係数

W_0 : 水の単位体積重量 $(=\rho \cdot g)$

また、図-5に波圧分布を示す上部斜面堤の波圧算定式は、以下のとおりである⁶⁾。

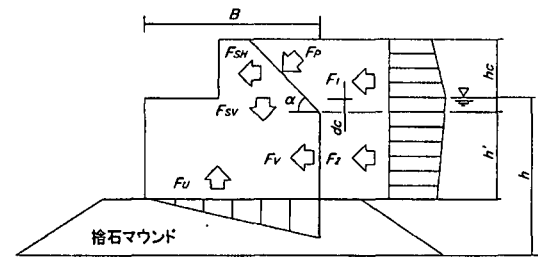


図-5 上部斜面堤の設計波圧分布

① 斜面部に働く波力

斜面部に働く波力の水平成分 F_{SH} および鉛直下向き成分 F_{SV} はそれぞれ以下のとおりである。

$$F_{SH}=\lambda_{SL'} F_1 \sin ^2 \alpha \quad (2.5)$$

$$F_{SV}=\lambda_{SL'} F_1 \sin ^2 \alpha \cos \alpha \quad (2.6)$$

$$\lambda_{SL'}=\min \left\{\max \left(1.0,-23(H / L) \tan ^{-2} \alpha+0.46 \tan ^{-2} \alpha+\sin ^2 \alpha\right), \sin ^2 \alpha\right\} \quad (2.7)$$

ここに、 F_1 は斜面と同じ高さの等価な直立壁に働く水平波力であり、 α は斜面角、 $\lambda_{SL'}$ は補正係数である。

② 直立部に働く波力

上部斜面堤の直立部に働く波力 F_V とケーソン底面の揚圧力 F_U は、合田式を用いて計算する。

すなわち、

$$F_V=\lambda_V F_2 \quad (2.8)$$

$$F_U=0.5 P_U B \quad (2.9)$$

ここに、 P_U は通常のケーソン前趾における揚圧力、 B は揚圧力が働く長さ、 F_2 は対応する直立部に働く波力であり、いずれも合田式で計算する。補正係数 λ_V は以下のとおりである。

$$\lambda_V=\min \{1.0, \max \{1.1, 1.1+11 d c / L\}-5.0(H / L)\} \quad (2.10)$$

ここに、 dc は斜面部の深さ（静水面から斜面下端までの深さ）で、静水面より上にある場合を正とする。

水理実験の範囲では、斜面スリット堤の波力算定値はすべて実験値を若干上回っているものの、設計波高程度では算定値と実験値は一致している。

2.3 伝達波特性

伝達波特性については、波高伝達率の目標値を0.1とすると、図-6に示すとおり必要な相対天端高さ $h a / H_{1/3}$ は、消波ブロック被覆堤、直立スリット堤で0.8程度、斜面スリット堤で1.2程度となる。

2.4 反射特性

① 図-7は反射特性を示したものであり、消波ブロック被覆堤が $h / L_{1/3} \geq 0.25$ で $K_R=0.25$ と一定になるのに対し、斜面スリット堤、直立スリット堤とも大きな差はなく、無次元遊水室幅 $B / L_{1/3}$ が0.13~0.14付近において反射率 K_R が0.35で極小となる。

表-4 直立消波ケーソンの波圧補正係数

		押し波時 I	押し波時 II a	押し波時 II b
スリット	λ_{S1}	0.85	0.7	0.3
	λ_{S2}	0.4 $(\alpha^* \leq 0.75)$ 0.3/ α^* $(\alpha^* > 0.75)$	0	0
前面	λ_{L1}	1.0	0.75	0.65
	λ_{L2}	0.4 $(\alpha^* \leq 0.5)$ 0.2/ α^* $(\alpha^* > 0.5)$	0	0
後面	λ_{R1}	0	$\begin{cases} \frac{20 \ell}{3 L'} & (\ell / L' \leq 0.15) \\ 1.0 & (\ell / L' > 0.15) \end{cases}$	$\begin{cases} 1.4 & (H_D / h \leq 0.1) \\ 1.6-2 H_D / h & (0.1 < H_D / h < 0.3) \\ 1.0 & (H_D / h \geq 0.3) \end{cases}$
	λ_{R2}	0	$\begin{cases} 0.56 & (\alpha^* \leq 25 / 28) \\ 0.5 \alpha^* & (\alpha^* > 25 / 28) \end{cases}$	0
下床版	λ_{M1}	0	$\begin{cases} \frac{20 \ell}{3 L'} & (\ell / L' \leq 0.15) \\ 1.0 & (\ell / L' > 0.15) \end{cases}$	$\begin{cases} 1.4 & (H_D / h \leq 0.1) \\ 1.6-2 H_D / h & (0.1 < H_D / h < 0.3) \\ 1.0 & (H_D / h \geq 0.3) \end{cases}$
	λ_{M2}	0	0	0
揚圧力	λ_{U1}	1.0	0.75	0.65
	λ_{U2}	0	0	0

2.5 斜面スリット堤の有効性

斜面スリット堤の有効性を明らかにするため、水深-14.7m、海底勾配1/50、設計波高 (Hmax) 10.4 m、有義波高 ($H_{1/3}$) 6.0m、周期 ($T_{1/3}$) 10.7秒、入射角0度における直立スリット堤と斜面スリット堤の断面を計算した。図-8に示すように、斜面スリット堤は直立スリット堤と比較し堤体幅を大幅に減少できる。その傾向は、水深が増し、波高が大きいほど顕著になる。地盤改良を必要とする場合は、改良幅を大幅に小さくできる。また、海面の消失面積を最小限に抑えることができることから、経済性に加え、環境的にも優れていることが明らかである。

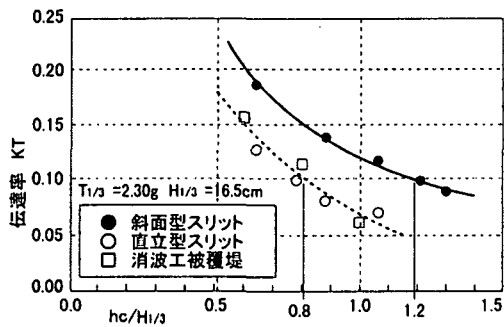


図-6 伝達波特性

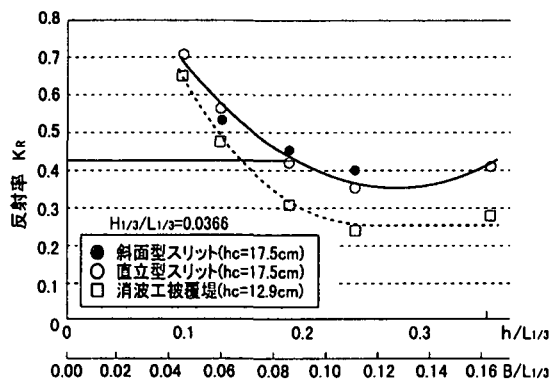


図-7 反射特性

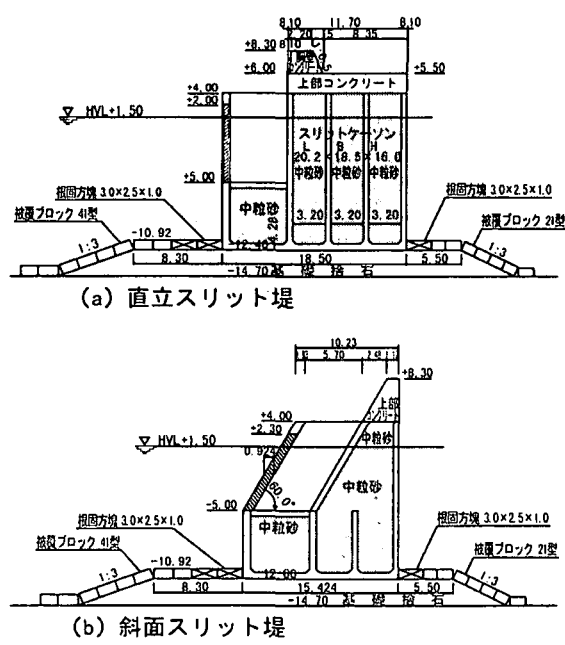


図-8 防波堤断面の比較例

3. 斜面スリットケーソンの構築

従来、ケーソンは鉄筋コンクリート構造体として考えられた。しかし、ケーソンの設置水深が深く高波浪が作用する海域では、鉄筋コンクリート部材の耐荷力が問題になる可能性がある。すなわち、高波浪がケーソンに及ぼす大きな波力に対しては、鉄筋コンクリートよりも鉄骨コンクリートあるいはプレストレストコンクリートの方が耐荷性能が優れている。また、プレストレストコンクリートがフルプレキャスト部材である場合、接合部が耐荷性や耐久性の弱点になることが多い。その弱点を補う工夫によって経済的にコスト高となることから、施工性および経済性において前者が優れている。鉄筋コンクリート構造の他の問題点は配筋に要する労力が大きいことおよび斜面版の構築が容易にできないことである。

斜面スリットケーソンの構築においては、図-9に示す工法によって、上述した鉄筋コンクリートおよびフルプレキャスト構造の問題点を解決する。

斜面スリットケーソンの基本部材を表-5に示す。

表-5 ケーソン各部材における材料の組合せ

部 材		H 形 鋼	高耐久性埋設型枠	R C プレキャスト型 枠	中流助コンクリート
前 壁	スリット柱	○ (NH)	○		○
	側壁スリット柱	○ (NH)	○		○
	隔壁スリット柱	○ (NH)	○		○
壁	上部梁		○		○
	下部鉛直壁		○		○
側壁 (遊水室)			○		○
側壁 (中詰室)			○	○	○
側壁 (背 面)		○ (SH)	○	○	○
遊水室後壁		○ (SH)	○	○	○
隔壁 (遊水室)			○		○
隔壁 (中詰室)				○	○
底板 (遊水室)					
底板 (中詰室)					

注) SH : 突起付き H 形鋼, NH : 普通 H 形鋼

4. 実証試験

斜面スリットケーソンの構築工法を実証するため、平成11年10月から12月にかけて、北海道檜山郡の福島漁港において、防波堤2函を製作した。施工に要した実働日数は43日であった。設計条件は、設計波高 (Hmax) 6.0m、周期 (T_o) 10.3秒、入射角0度、海底勾配1/50である。ケーソンの寸法は長さ15 m、幅9.8m、高さ8.5m、6室、斜面角度65度、総重量は923トンである。標準断面図、一般図をそれぞれ図-10、図-11に示す。

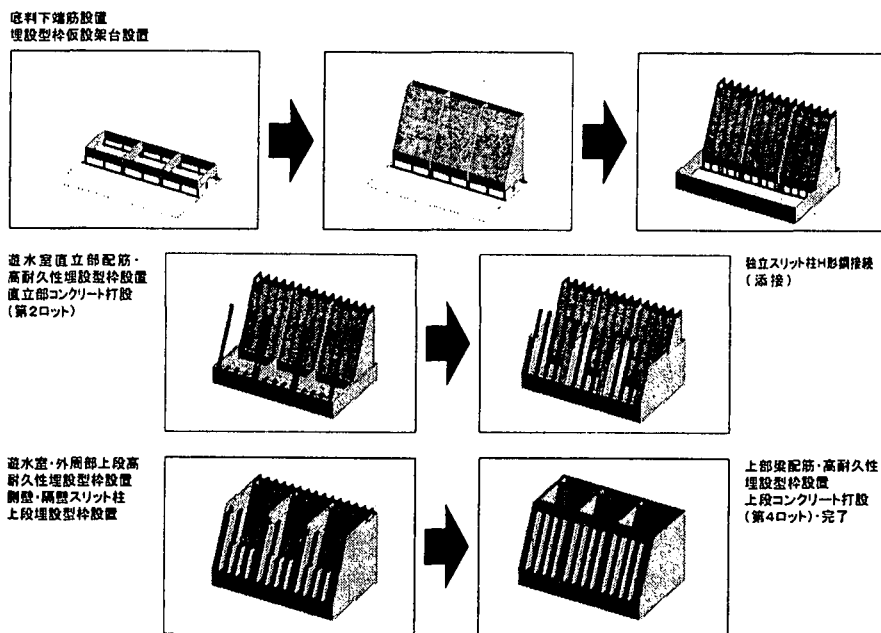


図-9 ケーソン製作順序 PFC工法を用いた斜面スリットケーソンの製作順序の概要

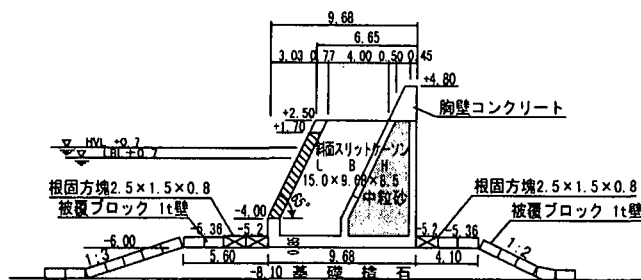


図-10 斜面スリットケーソン標準断面図

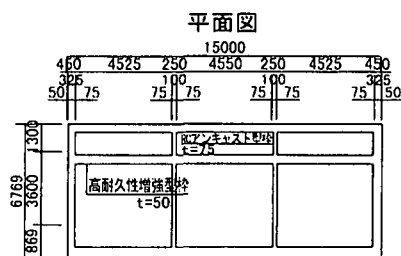
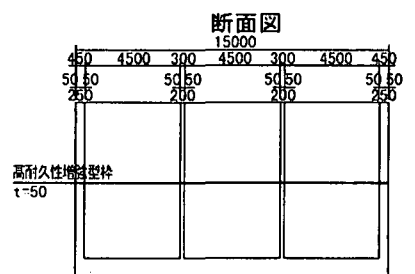
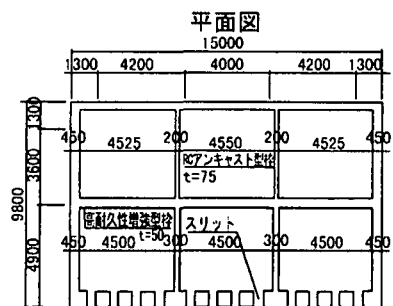
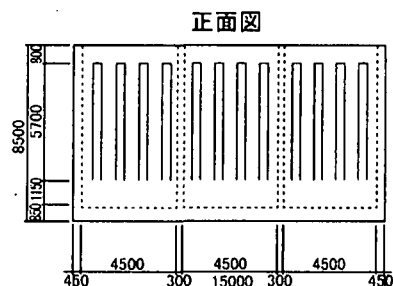


図-11 斜面スリットケーソン一般構造図

4.1 現地計測

斜面スリットケーソン特有の形状であるスリット部および遊水室後壁における埋設型枠間への中流動コンクリートの充填性、コンクリート充填時の埋設型枠、セパレータの強度について確認した。

図-12は、遊水室後壁の鉄骨フランジ背面に鉛直方向に熱電対を設置し、温度変化によって中流動コンクリートの到達を計測した例である。

いずれの熱電対で計測された温度履歴も同様な形態であり、コンクリートの充填性が良好であることが確認できた。また、平均打設速度は0.7m/hr、発生温度は18℃以下であった。

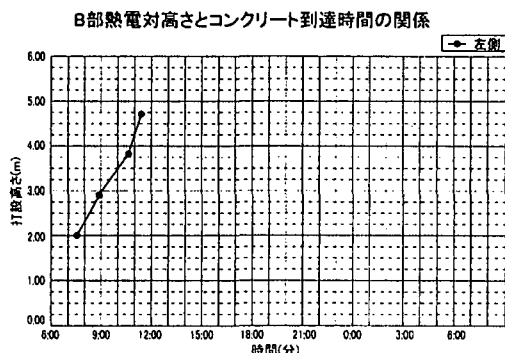


図-12 打設高さと中流動コンクリートの到達時間の関係(b部)

4.2 施工結果と考察

斜面スリットケーソンの製作は施工計画通り行われた。実証試験の主要な結果は、以下のとおりである。

- ① 施工計画通りケーソンを製作でき、工法の有効性が実証された。
- ② 特に、従来施工が難しいとされていた斜面部を容易かつ良好な結果で施工できることが実証された。
- ③ 工費は、消波ブロック被覆ケーソンの場合と比較し、約17.4%減であった。

5. 結論

今後、総合的な水理特性の解明が必要であるが、今回の研究の範囲では以下の点が明らかになった。

- ① 斜面スリット堤の特長として、消波ブロック被覆堤はもとより、直立スリット堤など従来開発されてきた防波堤と比較し堤体幅を小さくできる。また、水理実験によれば、直立スリット堤と比較し、波高が増大するほど滑動限界重量を大幅に小さくできる。
- ② 以上のことから、工費縮減に加え、防波堤建設による海面の消失および地盤改良をとともう場合はその範囲を最小限にできるなど、斜面スリットケーソンを大水深・高波浪の海域に適用するメリットは大きい。
- ③ スリットおよび遊水室後壁における斜面部の構築は、既往の工法に比較し、効率性、確実性、品質において格段に優れていることが実証された。
- ④ 工費は、消波ブロック被覆ケーソンの場合と比

較し、約17.4%減であった。遊水室の隔壁の構造・施工に改良の余地があること及び高耐久性埋込型枠の使用箇所を限定することができることから、コスト面で更に大きな改善が可能である。

謝辞：斜面スリットケーソンの開発は委員会（委員長：北大院 佐伯浩教授）を設置して進められた。特に佐伯教授、北海道工業大学 水野雄三教授、早大 清宮 理教授には、構想段階から励しとご指導を頂いた。ここに記して謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) (財)沿岸開発技術研究センター：新形式防波堤技術マニユアル, 平成6年4月
- 2) 高橋重雄：ケーソン防波堤の被災形態について－変形を考慮した新しい耐波設計に向けて－, 港湾技術研究所講演会講演集, 1999年12月
- 3) 高橋重雄：新構造防波堤とその設計, 水工学シリーズ97-B-5, 土木学会海洋工学委員会, 1997年7月
- 4) 関口信一郎, 妹尾英世, 中内勲：斜面スリット堤の開発, 海と港, 第17巻, (社)寒地港湾技術研究センター, 1999年
- 5) 高橋重雄, 下迫健一郎, 佐々木均：直立消波ケーソンの部材波力特性と耐波設計法, 港湾技術研究所報告第30巻第4号, pp3-34, 1991
- 6) 細山田得三, 高橋重雄, 谷本勝利：離島港湾における上部斜面堤の適用性について, 海岸工学講演集第41巻, pp. 706-710, 1994
- 7) 関口信一郎, 妹尾英世, 中内勲：鉄骨構造によるハイブリットケーソンの構築工法－斜面スリット堤の開発－, 土木技術54巻9号, 1999.9