

小樽港北防波堤の健全度調査および改修

THE INVESTIGATION AND REPAIR OF NORTH BREAKWATER OF OTARU PORT

早川篤¹・井元忠博²・飯田純也³・窪内篤⁴

Atsushi HAYAKAWA, Tadahiro IMOTO, Junya IIDA and Atsushi KUBOUCHI

¹国土交通省 北海道開発局 港湾計画課 (〒060-8511 札幌市北区北8条西2丁目)

²(独)北海道開発土木研究所 港湾研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

³工修 警察庁 交通局 交通規制課 (〒100-8974 東京都千代田区霞が関2-1-2)

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

North Breakwater of Otaru Port was constructed from 1897 to 1908. Dr. HIROI was the leader of this construction. Sloping block system was applied to construct this upright breakwater. The breakwater has protected Otaru Port and City from waves. However, a result of a series of inspections has shown that these blocks, which are part of the rubble mound, were moved and the rubble mound was eroded by ocean waves. In order to keep the proper function of this breakwater, Otaru port office has investigated the present condition and CERI of Hokkaido has conducted hydraulic model tests on this breakwater. In addition, the design and the way of construction have been studied by reading literatures written at the time of construction. Based on these, repair plans were examined.

This report shows the results of the investigation, the hydraulic model test, and the repair plan of this breakwater.

Key Words : Dr. HIROI, sloping block, repair plans, improving restoration, compression strength visual investigation, angle of slope, shape change of block and rubble mound

1. はじめに

小樽築港第1期工事(1897~1908年)によって建設された北防波堤は延長1,289m. 西北の暴風に際して発生する激浪から海面50万坪(165万 m^2)を庇蔽するため, わが国初の本格的な外洋防波堤として計画された施設であって1世紀を越え, 現在も機能する近代築港の金字塔である.

北防波堤の構造は図-1¹⁾に示すとおり捨石を基礎とし幅24尺(7.27m), 高さ23尺(6.97m)とし, 重量14~23tの方塊を積み上げ, 堤体前面には12tの方塊を配置して捨石を防御するとともに, 波浪を強制

的に碎波して, 堤体に作用する波力を減殺する効果を期待している.

さらに, 落下する水塊に対し捨石を擁護するために堤体背後には2列の小塊を配置している. 堤体はスローピングブロック(斜塊)によって構成され, ブロック相互のもたれかかりによって堤体の一体性を強固にする構造となっている.

近年, 堤体前面の方塊の散乱および堤体の部分的な劣化が見られることから, 防波堤全体の健全度調査を行ってきた. その調査結果から堤体前面の方塊の広範囲な散乱および捨石マウンド表面の変形等が明らかになったので, 水理模型実験によってその現

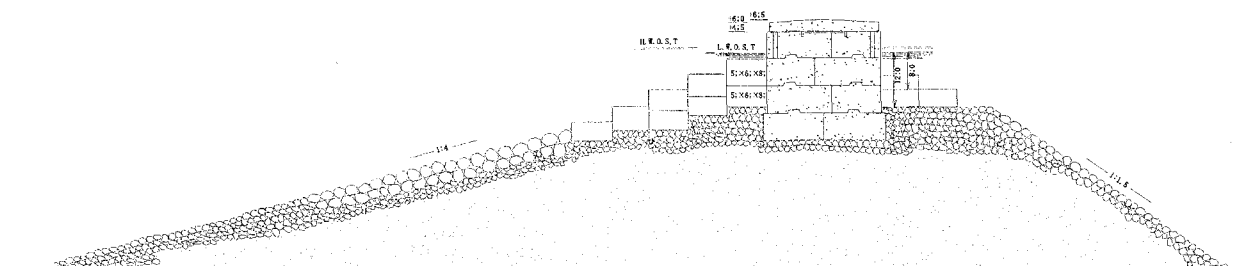


図-1 北防波堤構造図(第1期工事)
(図-10と比較のため反転している)

象を再現し、恒久的な対策を検討し防波堤の改修計画を作成した。本論文において健全度調査、水理模型実験および改修計画について報告する。

2. 現況施設点検・調査

健全度調査は、①堤体コンクリートの劣化・損傷、②スローピングブロックの傾斜角度、③基礎マウンド部の形状および捨塊の配置状況等の把握を目的に、実施した。各調査対象箇所を写真-1に示す。

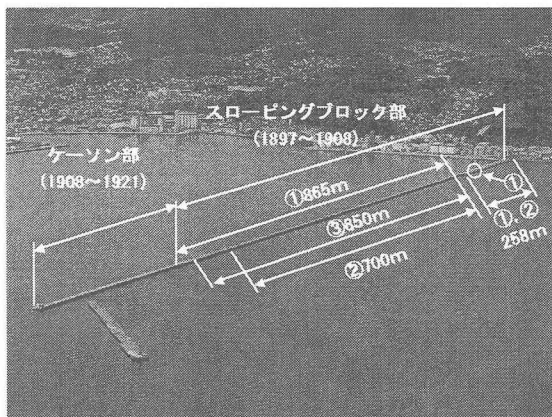


写真-1 調査位置図

(1) 堤体コンクリートの劣化・損傷

a) 圧縮強度

平成3年に北防波堤のスローピングブロックを対象として、5カ所からコアを採取し、コンクリートの圧縮強度を調査²⁾した。コアの採取は、上部工から斜塊の設置角度を考慮して、2カ所は港内側および港外側へ抜く方向へ、3カ所は最上段ブロック下端までとし、コア供試体(寸法φ15cm、高さ30cm)18個について圧縮試験を行い、圧縮強度試験結果の平均値は30.0N/mm²であった。小樽港で用いられたコンクリートは、現在のコンクリートに比べ、その配合やセメントの質が相違するため単純な比較は認められないが、一つの目安として現在のコンクリートの設計基準強度³⁾と比較すると1.67倍の強度を有していた。

このことから、堤体に用いられているコンクリートブロックは、現在もなお構造体としての耐力を十分に有しているものと、判断されている。

b) 堤体ブロックの目視調査

堤体ブロックの損傷状況を把握するため、平成15年に水上部および水中部の目視調査を実施した。

その結果、水上部については、写真-2に示すように最上段ブロックの天端角部の剥落が港内外の別なく確認され、潮の干満によって乾湿の繰り返しを受けた箇所には表面剥離が一樣に生じていた。

水中部の港外側については、部分的に堤体ブロック角部に小さな欠損が見られた。また、写真-3に示すような比較的大きな欠損部(60cm×30cm、奥行き

22cm)が切り通しから610~630mの位置に発見された。しかし、港内側の堤体ブロックの損傷は、ほとんど確認されなかった。

目視調査の結果から、コンクリートの剥落や欠損は、直ちに構造物全体の機能を著しく低下している状況にはないが、比較的大きな欠損部は、ブロックに作用する揚圧力の増加によって、堤体ブロックの目地の開きにつながることも想定しうるため、補修を実施する必要があると考えられる。



写真-2 ブロック最上段天端角部の欠損

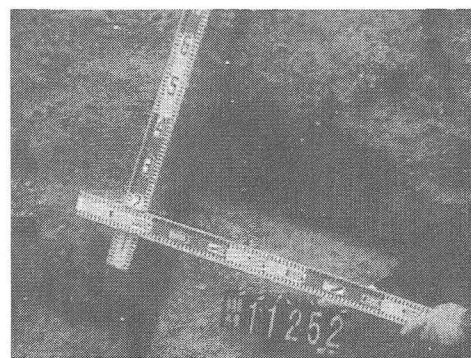


写真-3 ブロック角部の欠損

(2) スローピングブロックの傾斜角度

スローピングブロックの傾斜角度測定位置は、岸壁から切り通し部までを20m間隔、切り通しから100m毎に700mまでの範囲を測定した。傾斜角度は、簡易傾斜計を用いて、港内側の最上段スローピングブロックと上部工が接する箇所を計測した(写真-4)。

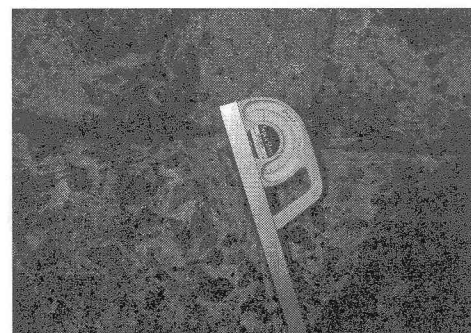


写真-4 傾斜角度測定状況

表-1は傾斜角度の測定結果をとりまとめたものである。結果は70.5° から72.5° の範囲であり、設計上の傾斜角度71.6° に対して約±1° の範囲にとどまっていた。ブロック製作上の誤差、据付時の誤差、またブロックの凹凸や付着物などによる測定誤差を考えると、現在でも殆ど設計で想定した通りの構造を保っていると判断できる。したがって、構造的に安定していると考えられる。

表-1 傾斜角度測定結果

測点No.	傾斜角度(°)	測点No.	傾斜角度(°)
1	71.5	7	72.5
2	71.0	8	70.5
3	71.5	9	70.5
4	72.5	10	71.0
5	70.5	11	72.0
6	71.5	12	72.0

(3) 捨塊、基礎マウンド形状変化

捨塊、基礎マウンドの形状の調査は、マルチビーム測深機を用いて行った。マルチビーム測深器は、船と直行方向に120° の幅240本の音響ビーム(周波数455KHz)により面的に調査できるため、海底地形の鳥瞰図を高精度(水深分解能6mm)で作成できる。図-2に港外および港内の測定結果の一例を示す。

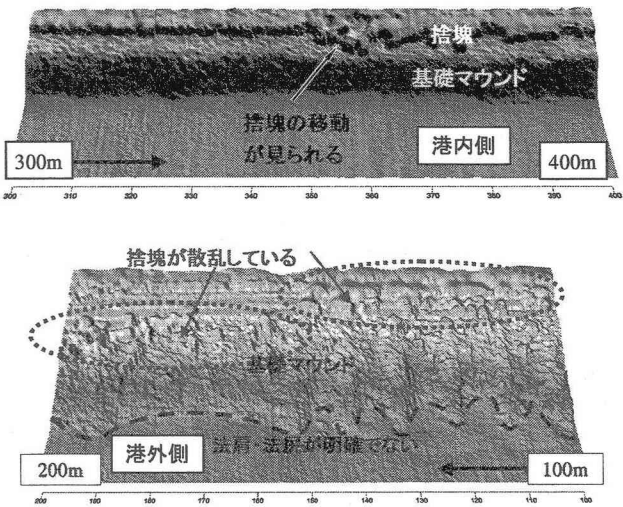


図-2 港外および港内の測定結果

調査結果を判別するため、捨塊の状況を4段階に、基礎マウンド法尻状況を3段階に区分して図-3に整理した。

港内側については、捨塊は350～420m区間で移動がみられるものの、その他は階段状の配置を保っている。基礎マウンドの法尻は全延長にわたり洗掘は見られないが、法肩については不明瞭な区間が半分程度占める。

港外側については、捨塊は全延長の約70%で移動・散乱が著しい。基礎マウンドは全体的に法尻は

洗掘あるいはマウンド材による堆積によって法勾配を確保していない。

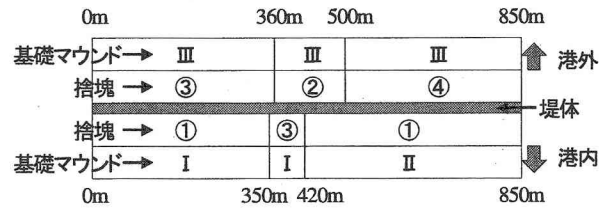


図-3 捨塊・基礎マウンド判定

(4) 評価

本体部の評価として採取したコンクリートコアによる圧縮強度試験によって、ブロックに使用されたコンクリートが、現在のコンクリートに劣らない品質であると、評価できる。

次に、堤体コンクリートの目視調査によって、欠損や剥離といった損傷が存在することがわかった。その一方、傾斜角度測定によって、調査範囲の堤体ブロックには目地の開きもなく、概ね設計通りの構造を保っていることが判明した。

したがって、堤体コンクリートについては、剥離や欠損といった損傷はみうけられるが、堤体ブロックとして一体性を現在も有しており、100年を経過した構造物としてはすこぶる健全であると評価する。

基礎マウンド部の形状および捨塊の配置状況では、港外側で変形移動している箇所が広範囲にみられ、港内側では、基礎マウンドの法肩の変形と一部捨塊の移動が確認された。

以上を統合すると、堤体コンクリートは健全であるが、基礎部は損傷を受けていると判定することができよう。基礎部の損傷(洗掘)が進むと、将来、本体にまで影響がおよぶ可能性がある、とみなしうるからその対策が肝要となる。

3. 建設当初構造の水理模型実験

小樽港北防波堤は現況施設の点検・調査によって、港内外の捨塊およびマウンドに変形が認められた。

このため、水理模型実験によってマウンド被覆材の変形過程を明らかにし、さらに港外側の捨塊が飛散した状態で波を長時間作用させた場合の堤体の変形状況を推測することとした。

(1) 実験方法

実験は図-4の29.7m×23.3m、深さ1.0mの平面水槽において行い、モルタル水平床上に図-5に示す

模型を設置した。模型の設置範囲は10.0mとし、その内中央部1.0mの範囲で現地を再現し、実験での測定対象範囲はその内0.6mとした。実験縮尺は1/50として堤体幅Bを14.5cm、堤体天端高hcを5.6cm、水深hを29.2cm、港内側マウンド天端水深htを7.3cm、被覆石の設置範囲を0.40mとした。現地での波の入射角 β は、 $36\sim 45^\circ$ であり、実験では 40° とした。実験波はBretschneider・光易型を目標スペクトルとした不規則波で、有義周期 $T_{1/3}$ が1.78sの1種、有義波高 $H_{1/3}$ は3.0 $\sim$ 9.0cm(現地換算値1.5 $\sim$ 4.5m)で1.0cm毎に7種とした。

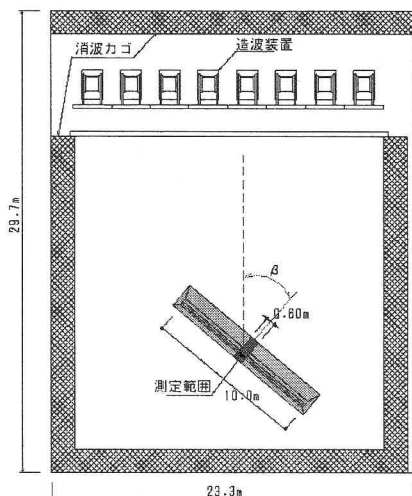


図-4 平面水槽

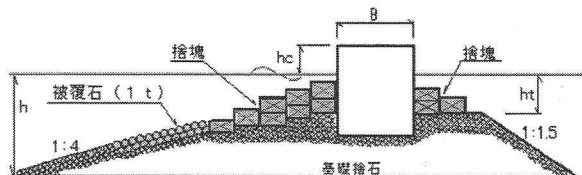


図-5 模型断面図

なお、波高4.0m(現地換算)は設計波に相当する。実験は、波高の小さい波から作用させ、波高毎に被覆石および捨塊の被害個数を目視により確認し、波高毎による被覆材の並べ替えは行わず、累計を被害個数とした。波の作用波数は、1波群200波として3波群を連続して作用させた。被覆石は、法線方向に2等分、水深方向に4等分した各区分の石に着色して区分外に移動した石を被害個数とした。捨塊は、捨塊の半個長以上の移動もしくは設置個所から立ち上がった場合を被害個数とした。被覆石は全個数、捨塊は表層の全個数に対する被害個数の比を被害率D(%)として表わした。

現況の港内側のマウンドは捨塊2列の被覆で、マウンド法肩および法面は露出している状態にある。

このため波によるマウンドの変形状況を把握するため、作用波毎に堤体背面から10.0cmピッチでマウ

ンド形状を計測した。

堤体の変形状況測定は、設計波に相当する波を6,000波(現地換算で20時間程度)作用させ、マウンド形状の計測と堤体の写真撮影によった。

(2) 被覆材の安定性

図-6は被覆石および捨塊の移動状況を観察した結果を示したものである。

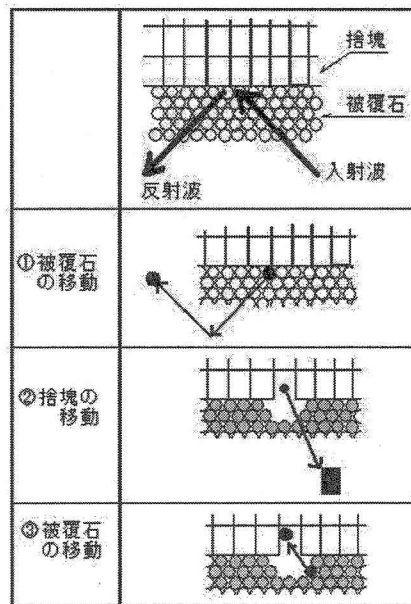


図-6 被覆材の移動状況

波の作用状況はマウンド勾配(1:4)と捨塊上を遡上し、堤体からの反射波と堤体上を越流する越波に分かれている。港外側近傍には、入射波による法線方向へ進む流れが生じている。

被覆材の移動は、図中①に示したように反射波により沖側へ移動し、さらに入射波によって入射方向へ移動している。次に(図中②)被覆石の移動後、捨塊の肩部分が露出し入射波の影響を受けやすくなり不安定な状態となって移動している。捨塊の移動後は被覆石が入射波によって運ばれている(図中③)。

写真-5、6は有義波高 $H_{1/3}=4.0$ mのときの波の作用状況と実験終了時を示したものである。

図-7は現地換算で有義波高に対する被害率の関係を示したものである。



写真-5 波の作用状況

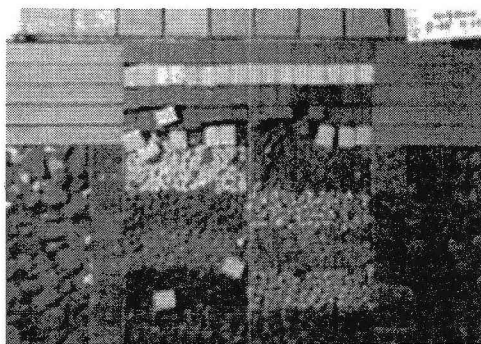


写真-6 波の作用後 ($H_{1/3}=4.0\text{m}$)

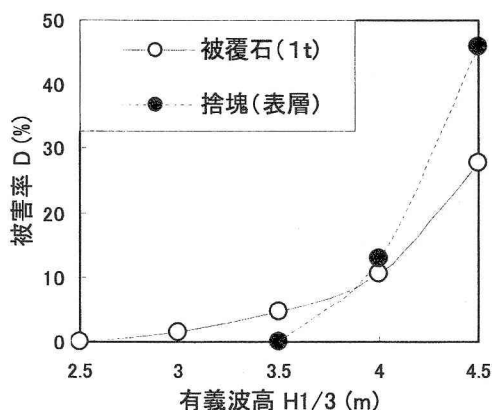


図-7 波高と被害率

被覆石の被害は3.0mから始まり、被害率は4.0mまで1.5~10.0%へと漸増し、4.5mで3倍程度に増加している。捨塊の被害は4.0mで始まり、それ以降は急増している。有義波高 $H_{1/3}=4.0\text{m}$ を境に被覆石および捨塊共に被害の度合いは大きくなっている。これは、図-6で示したように被覆石の移動によって捨塊の移動が生じ、さらに波高が大きくなると被覆材(被覆石、捨塊)の被害範囲が岸沖方向へ拡大したためである。

次に図-8は越波により打ち込まれた水塊により変形が生じた港内側マウンドを計測した結果である。

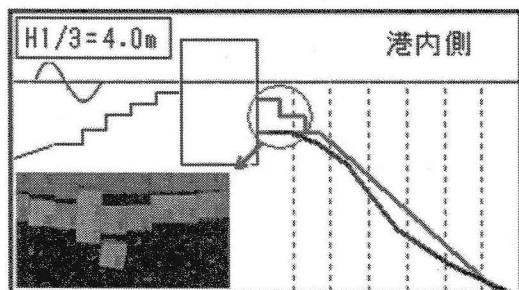


図-8 港内側マウンド状況

また、図中には港内側捨塊の移動状況を示した写真を付している。計測および観察結果から波の打ち

込みによって、マウンド法肩が崩れ、法面中央部の洗掘がみられる。

さらに、洗掘は捨塊の底面まで達し、マウンドの変形と共に捨塊は水深方向へ下がり、捨塊間に隙間が生じ、さらなる越波水の打ち込みによって捨塊は移動している。

(3) 連続作用波による堤体の変形

港外側の捨塊が飛散した状態で $H_{1/3}=4.0\text{m}$ の波を長時間作用させた場合の堤体の変形状況を実験により推測した。

図-9は実験断面と6,000波作用後の結果を示したものである。マウンドの変形は、4,000波で収束しており、堤体前面マウンド法面の洗掘が著しい。

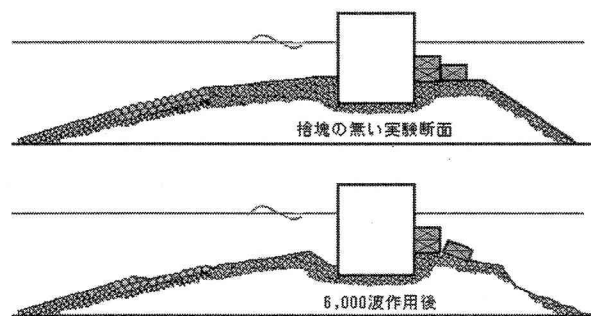


図-9 マウンドの変形状況

写真-7は、6,000波作用後の堤体の変形状況である。上部工が持ち上がり、堤体ブロック間の目地が開いた状況となっているが堤体の倒壊には至っていない。

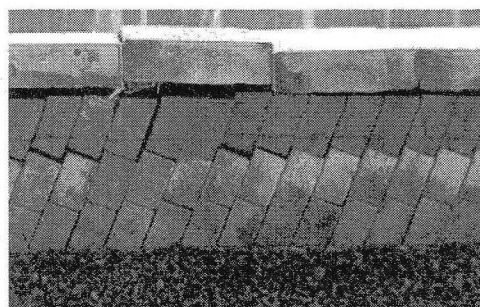


写真-7 堤体の変状

しかしながら、現地において適切な維持管理や補修の実施が困難であることを考慮すれば堤体に変形を発生させることは避けなければならない。

以上の結果から、マウンド部の安定は防波堤全体の安全性に係わる重要な問題である。そのため、波の作用に対して変形を生じないように十分に被覆することが必要である。

4. 北防波堤の改修計画

(1) 改修基本方針

本施設は健全度調査より、部分的に港内外の捨塊

およびマウンドに変形が認められたが、スローピングブロック自体の構造に変形がないことが確認された。また、水理模型実験の結果からマウンド部を補強することによって、本施設の機能を回復できることが明らかとなった。

したがって、現存している構造を可能な限り生かすことが経済的および工学的に優位性があると判断した。今なお防波堤本来の機能を維持している「現状施設の構造および設計思想を生かすこと」を改修基本方針としたのはこのためである。

(2) 改良構造の検討

改良構造形式は、小樽築港工事報文⁴⁾に記述されている廣井博士の設計思想や創意工夫を加えた点を踏襲し、ブロックの安定性など不明な事項については、本施設の構造による波の作用状況から水理模型実験によって決定することとした。

基礎部は、捨塊に飛散状況が見受けられたため、既設捨塊の据付直しを行うとともに新規根固方塊を製作し据付ることとした。基礎マウンド部は全体を安定させるため、必要に応じて整形し直し、石材の代わりに被覆ブロックを使用するなど、一部、材

料を取り替えることとした。

また、上部は防波堤本来の機能を満足させるために「 $0.6H_{1/3} + H.W.L.$ 」の高さまで嵩上げを行うこととした。

以上の検討を行った結果、図-10に示す改修基本断面を決定した。

5. あとがき

このようにして改修基本断面は決定したが、今後、改良工事を進めながら、さらに現地において各般の追加調査を実施し、施工計画・方法を詳細に検討していく必要があると思われる。

参考文献

- 1) 廣井勇：小樽築港工事報文 前編，第七図，1908年7月
- 2) 北海道開発局小樽港湾事務所：小樽港防波堤コンクリート調査業務報告書，pp. 1-19，1991年10月
- 3) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻），p. 336，1999年4月
- 4) 廣井勇：小樽築港工事報文 前編，pp. 152-165，1908年7月

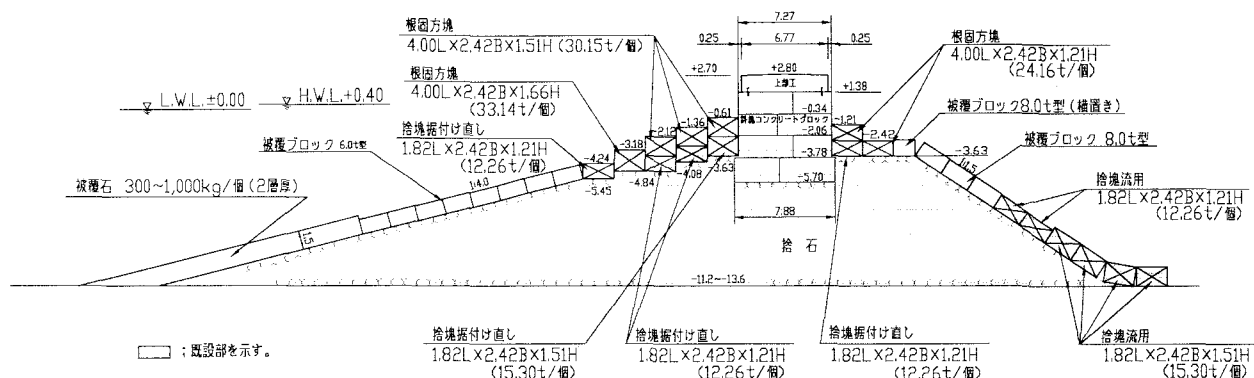


図-10 改修基本断面