

釧路港における水中ストラット式鋼製岸壁について Quay Wall By Underwater Strutted Steel Structure System In Kushiro Port

得永道彦*・関野高志*・高橋邦夫**・清宮理**・塩見雅樹**
佐藤光一***・白井博己****

Michihiko. Tokunaga, Takashi. Sekino, Kunio. Takahashi, Osamu. Kiyomiya, Masaki. Shiomi,
Koichi. Satoh, Hiromi. Shirai

Hokkaido Development Bureau designed and constructed a new type quay wall in kushiro port. This new structure is called 'Underwater Strutted Steel Structure System (Quay Wall type)'. The horizontal deformation and stress distribution of the system against active earth pressure which are acting on the wall are measured and analyzed in this report.

Keywords: Kushiro, Quay Wall, Strut, Field test

1. はじめに

釧路港東港区中央埠頭-7.5m 岸壁は建設後25年以上経過し、鋼矢板壁(控え:組杭)の腐食が進行し危険な状態となったため、平成元年度より岸壁の改良工事に着手している。平成2年度には隣接の6号バースを供用させながら5号バースの改良工事を進めることとなったが、前面水域は港湾区域と河川区域の重複区域となっており河川管理上いわゆる前出し改良が不可能であった。さらに既設鋼矢板壁の背後約15mの位置には上屋があり、また軟岩からなる支持層が比較的浅い位置に出現していた。このように施工上種々の制約条件があり施設築造空間が限られていた。このため、ケーソン式や控え工式鋼矢板壁など既往の構造形式での施工が困難であった。

そこで、運輸省港湾技術研究所と新日本製鐵(株)(以下、共同開発者)が開発中であった『水中ストラット工法』を岸壁として設計・施工することとなった。本工法については、裏込部を含まない地盤-鋼構造系に関して共同開発者においてすでに実施された実大規模構造体水平載荷試験等一連の構造試験によりその力学的挙動が把握され、それに基づく設計法の提案がなされており、裏込部を含む地盤-鋼構造全体系の力学的挙動の調査・解明と設計法の検証が待たれていた。

このため、本事業は北海道開発局の『技術活用パイロット事業』として位置付けられ、本工法に特有な工種に関する施工性の確認を行いながら、当該岸壁の一部において裏込部を含む地盤-鋼構造全体系としての力学的挙動を計測調査し、構造物の安定性の確認と設計法確立のための基礎資料を得ることとなった。

この計測調査の計画および計測結果の評価は、(社)寒地港湾技術研究センターに佐伯浩北大教授を委員長とし、大学、運輸省、北海道開発局、新日本製鐵(株)等の関係者により構成される『釧路港水中ストラット式鋼製岸壁技術検討委員会』を設置し行われた。

以下では、『水中ストラット式鋼製岸壁』の設計・施工の概要および力学的挙動に関する計測結果について報告する。

2. 構造の概要と特徴

2. 1 構造の概要

水中ストラット式鋼製岸壁は、鋼管矢板等からなる土留壁体と鋼管杭等からなる前方杭およびこれらの頭部を連結する上方連結材より構成された根入れ式ラーメン構造を海中において耐圧縮斜材(水中ストラット部材)で補強した岸壁構造である。耐圧縮斜材の下端部は格点を介して前方杭と、また上端部は上方結合部において剛結合されている。格点はシャキーを有するメカニカルグラウト接合からなる二重管構造となっている。本構造は、海洋施設として実績のある『石油掘削用ジャケット』や港湾施設として実績のある『前方斜め支え杭式係船岸』など既往の構造物を参考に開発



図-1 中央埠頭-7.5m 岸壁
第5号バース位置図

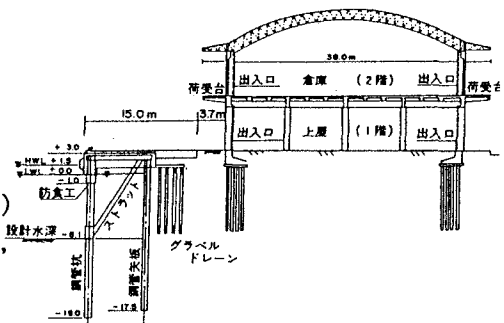


図-2 第5号バース構造概略断面図

* 北海道開発局港湾部港湾建設課(〒060 札幌市北区北8条西2丁目)

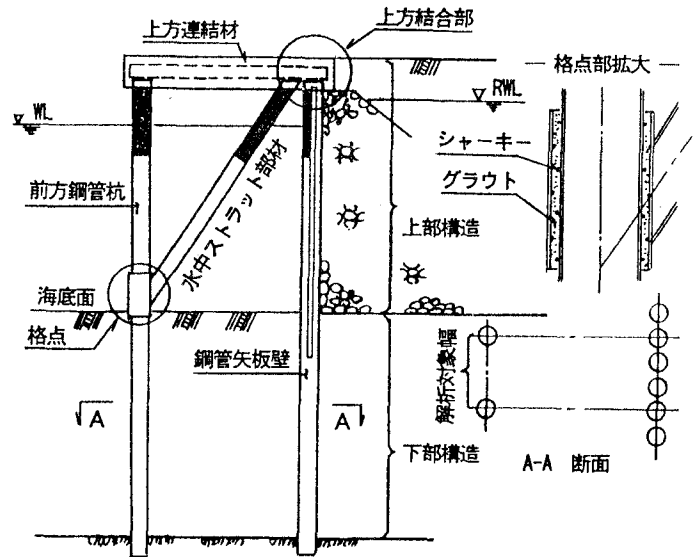
** 運輸省港湾技術研究所 *** 新日本製鐵株式会社 **** 寒地港湾技術研究センター

されたものである。構造各部の名称を図－3に示す。

2. 2 構造の特徴

水中ストラット式鋼製岸壁の構造上、施工上および利用上の特徴を示せば以下の通りである。

- ①地盤の支持力（軸方向、横方向）を有効に活用することができる。
- ②壁体幅や水中ストラット部材の取付け角度を変化させることにより、軸方向支持力と横方向支持力の分担割合を調整することができる。このため、設計の自由度が向上し、地盤条件・外力条件等に応じ合理的な設計をすることができる。
- ③杭一壁体からなる根入れ式構造物であるため、軟弱地盤域において地盤改良を少なくすることが期待できる。
- ④背後に控え工を有さず、断面がコンパクトなため狭い場所での施工が可能であり港湾再開発にも適している。
- ⑤前方杭に『フィン型消波部材』等を取付け、壁体幅を遊水室として活用することにより反射波対策機能を付与することもできる。
- ⑥線部材のみによる構築のため、小規模な施工設備で急速施工が可能である。
- ⑦前方杭が比較的密に配置されているので、集魚効果も期待できる。



図－3 水中ストラット式鋼製岸壁各部名称

表－1 土質条件

C.H.	土質	γ (t/m^3)	K_h (kg/cm^2)	N 値	ϕ 値
+3.00					
R.W.L +1.00		1.8			
D.L. -8.10	砂質土	1.0		8	30°
-10.04	粗砂	1.0	1.05	7	35°
-11.04	粗砂	1.0	2.10	14	
-14.44	砂礫	1.0	3.90	26	
-15.29	貝殻混り砂	1.0	3.15	21	
-18.00	細砂	1.0	1.65	11	40°
-19.50	細砂	1.0	6.00	40	
	B A S E	1.0	7.50	50	

注) 横方向地盤反力係数は、N値より $k=0.15 N$ として求めた。

3. 設計・施工概要

3. 1 設計概要

1) 設計条件

- ・設計水深 : -8.10 m
- ・残留水位 : R.W.L +1.00 m
- ・上載荷重 : 常時 2.0 tf/m², 地震時 1.0 tf/m²
- ・対象船舶 : 5000 D/W 級, 接岸速度 0.13 m/sec
- ・設計波高 : $H_{max} = 1.5$ m, 揚圧力 $p_u = 4 W_0 H_{max}$
- ・潮位 : L.W.L ± 0.00 m, H.W.L +1.50 m
- ・裏埋土内部摩擦角: $\phi = 30^\circ$
- ・地震震度 : $K_h = 0.2$, K_h' = 見掛けの震度
- ・船舶の牽引力: 35 tf/20m
- ・土質条件: 表－1 の通り。

2) 設計手法と設計上の仮定

設計は『港湾の施設の技術上の基準・同解説／日本港湾協会、以下『技術上の基準』』および『ジャケット式鋼製護岸設計指針（案）／日本港湾協会、以下『ジャケット式指針』』を準用して行った。

『ジャケット式指針』では、ジャケット部（上部構造）とくい基礎部（下部構造）を分離して計算する方法とこれらを一体化して計算する方法が示されている。本設計では、上部構造と下部構造を一体とした骨組構造モデルとし、変位法による平面骨組構造解析により変形と断面力を算定している。また、上部構造を構成する各部材は『通常の梁』として、また下部構造を構成する各部材は『弾性床土上の梁』として扱っている。なお、格点部の耐力照査については、A P 1－R P 2 A 等海洋構造物の設計基準を準用して行っている。その他の設計上の仮定を要約し以下に示す。

- ①格点部や上方結合部などの部材の結合部は剛結合節点とみなす。
- ②土留鋼管矢板壁と前方鋼管杭におけるいわゆる水平方向の群杭効果の影響は考慮しない。
- ③主働土圧（クーロン土圧）の作用深度は設計海底面までとする。
- ④残留水圧の作用深度は土留鋼管矢板壁下端までとする。
- ⑤地震時の主働土圧は震度法による。

①、②は共同開発者により実施された実大規模構造体水平載荷試験（壁体幅：6.5 m、地盤表層のN値：約 5）結果等をもとに設定した。③は本施工箇所の地盤が良質な砂地盤とみなせることおよび『ジャケット式指針』の規定を準用し設定した。④、⑤は『技術上の基準』、『ジャケット式指針』を準用し設定した。

3) 設計結果

構造安定計算は、常時、地震時および揚圧力作用時について実施しているが、地震時の設計荷重を図－4に、構造計算結果を図－5に示した。なお、応力、支持力、壁体部の根入れ長については『技術上の基準』に基づき照査している。

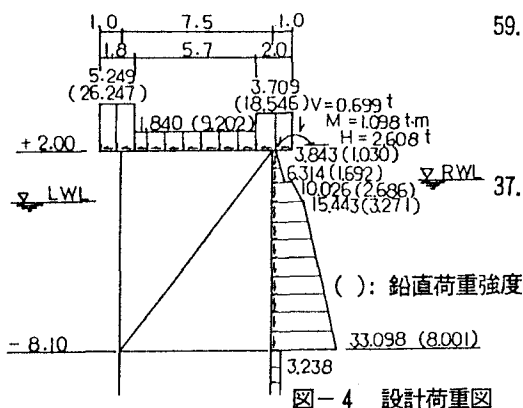


図-4 設計荷重図
(地震時)

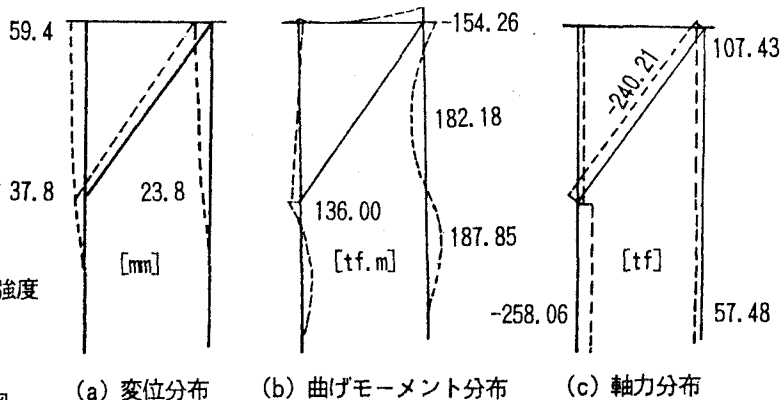


図-5 構造計算結果(地震時)

3. 2 施工概要

1) 施工概要

水中ストラット式鋼製岸壁は、通常構造体完成後に土留壁体背後に裏込材を投入するいわゆる『埋立方式』により構造物が完成される。しかし、本工事においては施工空間が狭い等種々の制約があり、既存の施設用地内での工事となったため土留鋼管矢板壁築造後に土留鋼管矢板壁と前方鋼管杭との間の土砂を掘削し水中ストラット部材の取付けを行ういわゆる『浚渫方式』による施工方法を採用した。その際、土砂掘削時の土留鋼管矢板壁の安定を確保するために、既設の控え工である組杭と土留鋼管矢板壁とを中間腹起こしを介して仮設タイロッドで締結した。この仮設タイロッドは計測調査のために構造体完成後に切断している。

2) 水中ストラット部材の取付け

水中ストラット部材は、①斜材+さや管、②架設用水平支保梁（H形鋼）とを工場で別々に製作し、施工現場近くのヤードでボルト結合により一体化した。その後、クレーンにて水中ストラット部材を吊り上げ前方鋼管杭の上端部よりさや管部を嵌め込んでいる。施工能率（吊り上げ～架設終了）は1セット当たり約15分であった。

施工上のポイントは、さや管の下端部を前方鋼管杭の上端部に速やかにアジャストする点にある。また、水中ストラット部材の重心位置と浮心位置（斜材は中空であり、没水深さにより浮心が変化する。）を事前に計算で求めておき、重心位置より若干偏心させた箇所を吊り上げ点とした。

3) 格点部へのモルタル充填

格点は斜材に作用する力を前方鋼管杭に伝達する重要な役割を果たす部位である。本工事においてはモルタルの充填作業を冬期に実施することおよび計測調査の關係上早期に所定強度を発現させる必要があったこと等のため事前に試験練りを行い配合（W/C = 40 % , 1:2 モルタル、水中不分離剤・流動化剤混入）を決定した。また、あらかじめ透明アクリルパイプによる二重管を用いてモルタルの充填性等を視察により確認するなどして圧送速度やフローの管理幅を設定した。施工能率については、平成2年度工事は一部潜水士による作業を行っておりあまり良くなかったが、平成3年度工事においてはグラウトラインを海上部まで配置するなどの工夫を行ったため、17格点/4.5時間という高能率で施工することができた。なお、格点一箇所の正味の充填量は約0.5m³である。

4. 力学的挙動の計測調査

4. 1 計測内容

①前方鋼管杭、土留鋼管矢板および水中ストラット部材の応力 ②前方鋼管杭、土留鋼管矢板の変形 ③土留鋼管矢板頭部／+1.46 mの水平変位 などの静的計測を実施した。計測装置の配置状況を図-6 に示した。

4. 2 理論解析の前提

理論解析における土質定数等は、計測対象区域近傍における土質調査結果等から以下のように設定した。

(1) 裏埋土

①土圧算定式：クーロン土圧 ②内部摩擦角： $\phi = 35^\circ$ ③壁面摩擦角： $\delta = +15^\circ$

断面設計は $\phi = 30^\circ$ で行っているが計測対象区域近傍における土質調査結果等から理論解析では $\phi = 35^\circ$ と設定した。

(2) 潮位および残留水位

①L.W.L ±0.0 m ②H.W.L +1.5 m ③R.W.L ±0.0, +1.0 m

工事の都合上計測期間中に裏埋土側の水位を観測することができなかった。工事がほぼ終了した後に水位観測を実施し潮位変動との対応を調査したところ残留水位 $RWL = (HWL - LWL) \cdot 2/3$ の関係が認められたので計測値の最小および最大に対応すると考えられる±0.0 および+1.0 m の2通りについて検討した。

(3) 海底地盤のN値

計測対象区域近傍の土質調査結果より図-7 のように設定した。

(4) 横方向地盤反力係数

$k = 0.2 \text{ N}$

$k = 0.1 \text{ N} \sim 0.4 \text{ N}$ の範囲で k 値を変化させて予備解析を行ったところ、結果に大きな差がなかったため中間値である $k = 0.2 \text{ N}$ を採用することとした。

本工事においては、『水中ストラット式鋼製岸壁』の土留鋼管矢板壁は前面の土砂掘削の都合上当初『タイロッド式鋼管矢板壁』の構造状態にあり、次に『水中ストラット式構造』として完成し、その後タイロッドが切断されて最終完成断面となっている。以下ではこれらの施工手順を考慮した解析を行っている。

なお、計測期間中の残留水位については、工事の都合上水位の観測をできなかったこと、また上部コンクリート工の施工の都合上海水のドライアップ作業を行っていたことなどから正確なデータを得ることができなかった。そこで、工事終了後の潮位観測および裏埋土の水位調査結果から、理論解析に際しては計測値の最小および最大に対応するとみられる $RWL \pm 0.0 \text{ m}$ および $+1.0 \text{ m}$ の2通りについて検討している。

4. 3 計測結果と理論解析結果

4. 3. 1 『タイロッド式鋼管矢板壁』について

理論解析の構造モデルを図-7に、また、理論解析上の仮定を要約し以下に示す。

・理論解析上の仮定・

- ①鋼矢板壁は控え工（タイロッド、組杭）も含めた骨組構造モデルとし解析する。
- ②地盤反力は『弾性床上の梁』理論を適用する。
- ③控え組杭の k 値の増減を考慮する。
- ④控え組杭の水平方向の群杭効果の影響は考慮しない。
- ⑤控え組杭の横抵抗（受働）領域と鋼管矢板壁背後の主働領域が重複する影響は考慮しない。
- ⑥主働土圧の作用深度は設計海底面まで、残留水圧は鋼管矢板壁下端まで作用させる。

これらの仮定は『技術上の基準』にある通常の鋼矢板壁の設計法では設計海底面以深の断面力、変形やタイロッド 取付け点の変位などの情報が得られないこと、および後出の『水中ストラット式構造』の理論解析の仮定との整合性を考慮して設定したものである。水平変位および曲げモーメント分布についての計測結果と理論解析結果を図-9に示す。

(1) 水平変位

図-9(a)において実線および一点鎖線は、それぞれ $RWL = \pm 0.0 \text{ m}$ と $+1.0 \text{ m}$ の時の理論解析値を示し、○印と△印は多段式傾斜計の計測値より算出された2月18日（掘削終了直後）と3月8日の鋼管矢板壁の水平変位である。また、⊖印、△印は鋼管矢板壁頭部（ $+1.46 \text{ m}$ ）において『イパー-線+変位計』により計測された水平変位である。分布形状は比較的良好に一致しているが、計測値は全体として理論解析値よりやや大きめの値となっている。これは、多段式傾斜計の計測値から求めた水平変位分布は、下方から上方に向かって順次算定したものであるため上方の値ほど誤差累積の影響を受けやすいこと、中間腹起こし等におけるタイロッドの馴染み変形の影響をうけている可能性のあること、また理論解析では前記の仮定④、⑤のために水平変位が小さめに計算される傾向にあることなどが原因と考えられる。

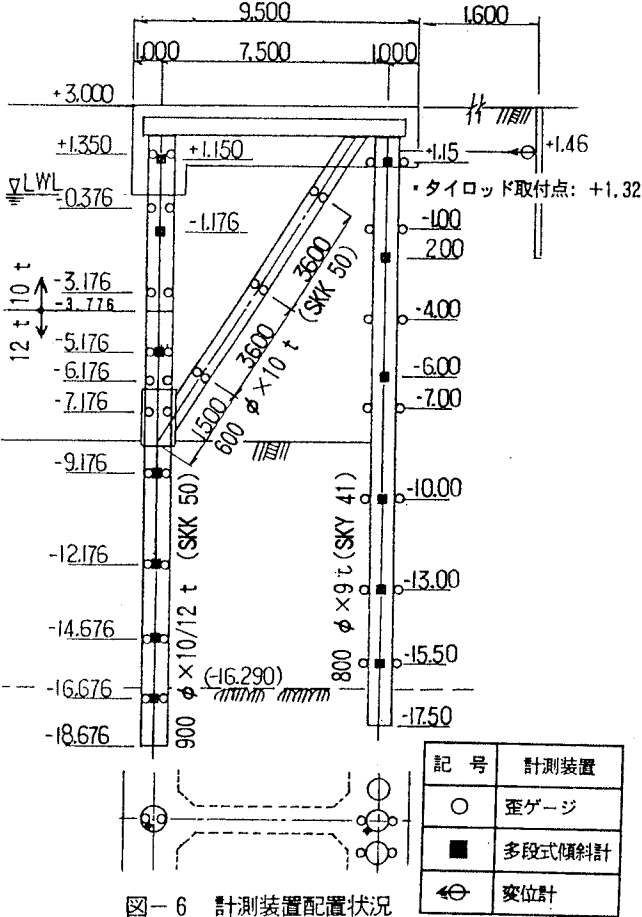
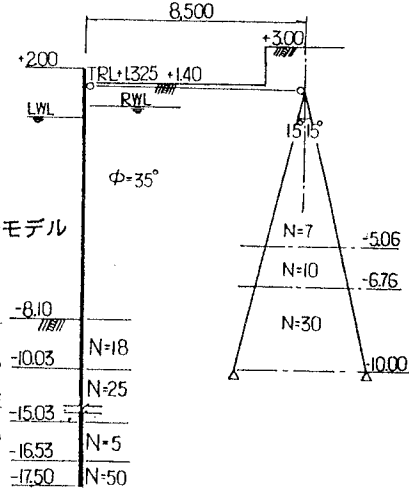


図-6 計測装置配置状況

図-7

『タイロッド式鋼管矢板壁』の理論解析モデル



曲げモーメント [tf・m] 土圧・地盤反力分布 [tf/m] (概略計測値分布)

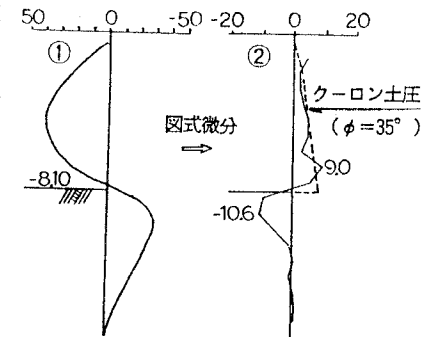


図-8 土圧・地盤反力分布

(2) 曲げモーメント

図-9(b)において実線および一点鎖線は、それぞれ $RWL = \pm 0.0 \text{ m}$ と $+1.0 \text{ m}$ の時の理論解析値を示している。2月18日の計測値(○印)は理論解析値よりも小さいが3月8日の計測値(△印)は理論解析値と比較的良好に対応している。点線は3月8日の計測値の概略曲げモーメント分布を示したものであるが、これをもとに図式微分により土圧・地盤反力分布を求めたのが図-8である。 $\phi = 35^\circ$ として算定したクーロン土圧分布(図-8②の点線)と比較すると全体の分布形状は比較的良好に対応を示している。

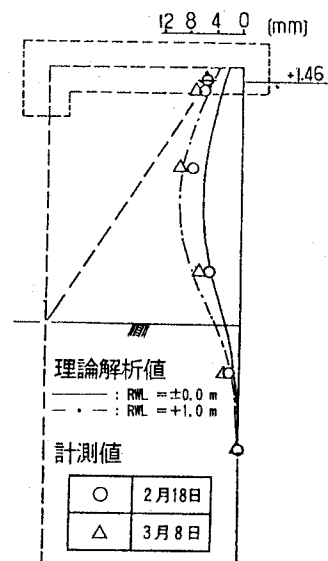


図-9(a) 水平変位分布(タイロッド式)

4. 3. 2 『水中ストラット構造』について

理論解析は基本的に3.1に記した当該断面設計時に採用したものと同様な手法を用いている。すなわち、上部構造と下部構造を一体とした骨組構造モデルとし、部材同士の結合を剛結合節点とみなして平面骨組構造解析を行っている。水平変位、曲げモーメントおよび軸力分布についての計測結果と理論解析結果を図-10に示す。なお、計測期間中の裏埋土の天端は $+1.40 \text{ m}$ の暫定高さとなっている。

(1) 水平変位

図-10(a)において実線および一点鎖線は、それぞれ $RWL = \pm 0.0 \text{ m}$ と $+1.0 \text{ m}$ の時の理論解析値を示している。前方鋼管杭と土留鋼管矢板壁の水平変位の計測値は時間の経過とともに漸増傾向にあるが、タイロッド切断後1ヶ月目と2ヶ月目ではほとんど差がない。このことから、タイロッド切断後1~2ヶ月で土圧の再配分・回復等がほぼ収束状態に達したものと考えられる。計測値分布形状は前方鋼管杭および土留鋼管矢板壁とも理論解析値と比較的良好に一致している。多段式傾斜計の計測値から算定された値の方が『インバー線+変位計』から得られた値よりも大きめになっている。これは多段式傾斜計にもとづく値で下方から上方にむかって順次算定したものであるため上方にいくほど誤差累積の影響を受けやすいことにも起因していると考えられる。

(2) 曲げモーメント

図-10(b)において実線および一点鎖線は、それぞれ $RWL = \pm 0.0 \text{ m}$ と $+1.0 \text{ m}$ の時の理論解析値を示している。図によれば各部材とも時間が経過しても計測値にはあまり変化がみられない。計測値を理論解析値と比較すると前方鋼管杭について比較的良好に対応している。また、土留鋼管矢板壁の計測値は理論解析値よりもかなり小さな値となっているがその分布形状はほぼ近似しており、反曲点が設計海底面よりもやや上の位置に現れてきている。

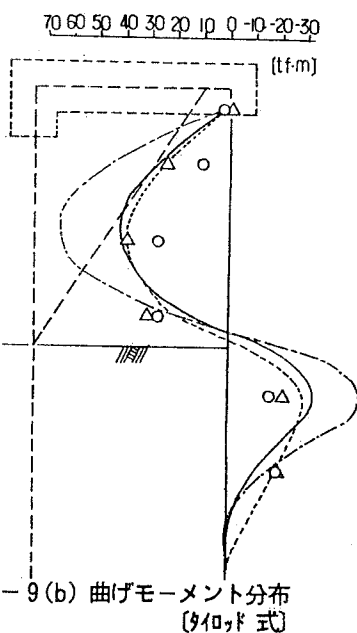


図-9(b) 曲げモーメント分布(タイロッド式)

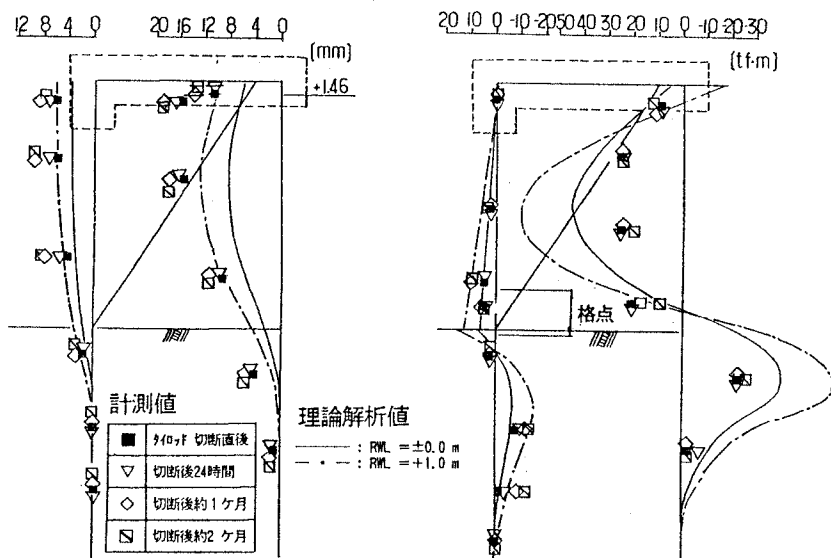


図-10(a) 水平変位分布(水中ストラット式)

図-10(b) 曲げモーメント分布(水中ストラット式)

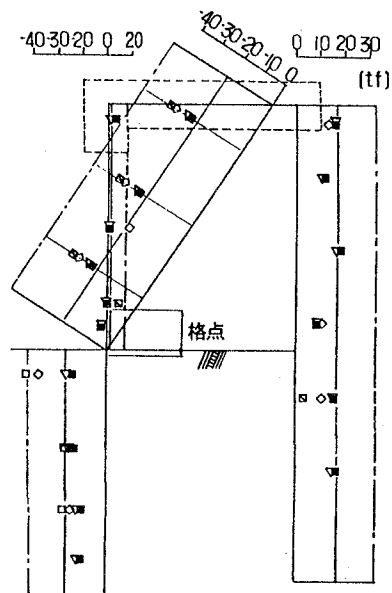


図-10(c) 軸力分布(水中ストラット式)

なお、前方鋼管杭の格点が位置する箇所における曲げモーメントは正常な値を示しており応力集中等の影響は認められない。

(3) 軸力

図-10(c)において実線および一点鎖線は、それぞれ $RWL = \pm 0.0 \text{ m}$ と $+1.0 \text{ m}$ の時の理論解析値を示している。斜材および前方鋼管杭については時間の経過とともに漸増傾向にあるが、タイロッド切断後1～2ヶ月ではほぼ収束しつつある。また、計測値と理論解析値はよく対応しており、特に斜材については同一時間断面で各計測部位とも25～35 tfの軸圧縮力が一様に作用していることが分かる。なお、前方鋼管杭の格点が位置する箇所における軸力も小さく応力集中等の影響は認められない。

5. さいごに

今回実施した『水中ストラット式鋼製岸壁』は我が国で初めて設計・施工されたものである。このため、本構造物に特有な工種（水中ストラット部材の取付け、格点へのモルタル充填）に関する施工性の調査・確認を行うとともに、構造物の一部において力学的挙動確認のための計測調査を行った。計測結果と理論解析結果とは良好な対応が認められ、また所定の安全性を確保していた。このことから、本施設の設計法は妥当なものであったと考えられる。

以下に本施設に採用した設計上の基本的事項を要約する。

①上部構造と下部構造を一体とした骨組構造モデルとして変形、断面力を計算する。

本設計では変位法による『平面骨組構造解析プログラム』により構造計算を行った。

②上部構造を構成する部材を『通常の梁』、また下部構造を構成する部材を『弾性床上の梁』と仮定する。

共同開発者において実施された実大規模構造体水平載荷試験では、下部構造を構成する部材を『港研方式』と仮定する方が実際の挙動により近似する結果が得られているが、本設計・解析のように『弾性床上の梁』と仮定した場合と大きな差がないことが確認されている。今回は施工手順を考慮した理論解析を行う必要もあったため『重ね合わせの原理』を適用できる『弾性床上の梁』理論によった。

③水平方向の群杭効果の影響は考慮しない。

今回の設計、理論解析ではいわゆる水平方向の群杭効果の影響を考慮していない。計測結果でもこの影響は認められなかった。共同開発者において実施された実大規模構造体水平載荷試験（壁体幅：6.5 m、地盤表層 N値：約 5）においても同様な結果が得られている。このため、本施工箇所のように横抵抗に関し比較的良質な地盤とみなすことができ壁体幅が 7 m前後確保できる場合には、水平方向の群杭効果の影響を考慮する必要はないものと考えられる。しかし、海底地盤が軟弱な場合や壁体幅が狭い場合には地中応力を介して土留壁体と前方杭が互いに影響しあうことになるため適切な方法で検討する必要がある。

④主働土圧の作用深度を設計海底面までとする。

今回の設計、理論解析では主働土圧を設計海底面まで作用させ、それ以深には作用させていない。これは本施工箇所の海底地盤が良質な砂地盤とみなすことができ側圧の影響が小さいと判断できること、類似構造物の設計指針である『ジャケット式指針』にもこのような規定のあること、所定の根入れ長を有する通常の鋼矢板壁の断面設計において採用されている『仮想梁法/タイロッド取付点と海底面を単純支持』でもこのような考え方を採っていることなどによる。しかし、海底地盤が軟弱で裏埋部の偏載荷重の影響による設計海底面以深の側圧の影響を無視できない場合には適切な方法で検討する必要がある。このような場合は土留壁体部を横切る円形すべりの安全率も小さく、いわゆる側方流動も問題となるような場合であろう。

本工法は線部材の組み合わせによるシンプルな構造であり耐荷機構も比較的単純であるため応用範囲も広く港湾分野に新たな構造形式を提供したものである。断面がコンパクトなため、今回のような港湾再開発での適用が増加するものと考えられるが、大水深域や軟弱地盤域での適用も期待できるものである。

さいごに、技術検討委員会において熱心に御討議いただいた北海道大学、運輸省港湾局の方々並びに施工にあられた大成建設(株)・白崎建設(株)共同企業体の方々など関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 金田他；釧路港中央埠頭-7.5m 岸壁改良工事のストラット工法について
第34回北海道開発局技術研究発表会，平成3年2月
- 2) 関野；釧路港-7.5m 岸壁の水中ストラット工法について
第8回港湾技術報告会，平成3年11月
- 3) 佐藤他；釧路港東港水中ストラット式鋼製岸壁の計測と評価
第35回北海道開発局技術研究発表会，平成4年2月
- 4) 日本港湾協会；港湾の施設の技術上の基準・同解説
平成元年2月
- 5) 日本港湾協会；ジャケット式鋼製護岸設計指針（案）
昭和52年4月