

白鳥大橋主塔基礎における 大深度地中連続壁の動態計測と設計値との対比

Comparison of computed behaviour and actual behavior
of high depth slurry wall for tower foundation of Hakucho Oohashi

竹田 俊明* 坂場 武彦** ○安部 善憲***

By Toshiaki TAKEDA and Takehiko BANBA and Yoshinori ABE

Hakucho Oohashi is suspension bridge with closed box section having 720m of center span and 1320m of all over length. which is now under construction in Muroran city, Hokkaido as sponsored by Hokkaido Development Bureau.

Because of high depth of TP-73m for 3P and TP-57m for 4P, the construction of tower foundation was carried out by using the deep slurry wall as temporary retaining/cut-off wall.

This paper will report, with the measurement results obtained during the construction of slurry wall and the excavation, the comparison of computed behaviour such as soil pressure, water pressure and stress with actual behaviour.

1. まえがき

白鳥大橋は、北海道室蘭市に建設中の中央径間720m、側径間330m、バックステイ径間80mの側塔付き2ヒンジ補剛桁吊橋である(図-1)。この吊橋は、6基の基礎を持つが、そのうち主塔基礎の形式は、支持層とする地盤が陣屋側主塔(以下3Pと称す)でTP-73.0m、祝津側主塔(以下4Pと称す)でTP-57.0mと非常に深いため、円形に近い平面形状の地中連続壁を仮設用の土留・止水壁とし、内部をドライで掘削し基礎本体を構築する地中連続壁併用剛体逆巻き基礎形式を採用した。

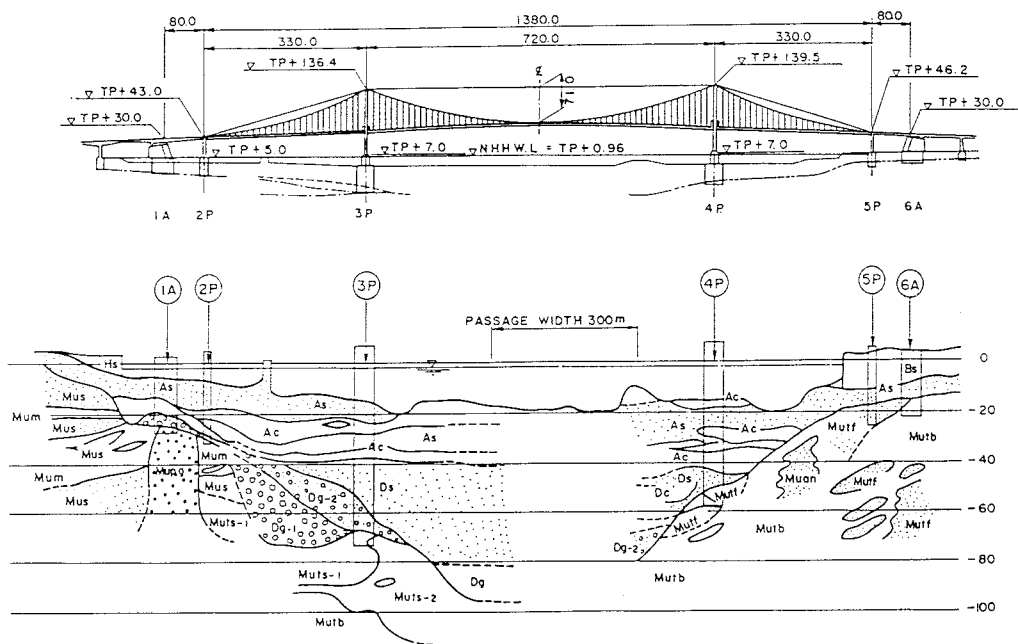
特に3Pは、地中連続壁の深さがTP-103.0m、内部掘削深さも76.0mと非常に深く、施工上も掘削深度が100mを越え、地中連続壁としては例を見ないものであった。このため設計においては、構造解析に3次元有限要素法を用いたり、荷重など安全側となるよう、種々の検討を行い設計法を決定している。

現在、工事は地中連続壁工事および内部掘削工事が終了し、基礎本体の構築を行っている段階である。本報告は、3P主塔基礎に用いた大深度地中連続壁の施工時の安全管理計測結果を利用して、実際の地中連続壁の動態計測結果と、設計時に仮定した荷重および計算された地中連続壁の応力度とを比較検討したものである。

*工 修 北海道開発局 室蘭開発建設部 次長 (〒 051北海道室蘭市入江町1-14)

** 北海道開発局 室蘭開発建設部 室蘭道路事務所 (〒 059北海道室蘭市大和町2丁目34-1)

***技術士 株式会社 長大 長大橋部 (〒 305茨城県つくば市春日3丁目22の6)



図－１ 白鳥大橋全体一般図

2. 地中連続壁の構造と地質概要

2.1 地中連続壁の構造

3P主塔基礎の構築に用いる地中連続壁の形状は、図－2（平面図）および図－3（エレメント割り図）に示す通り、円形に近い多角形々状を持っており、全高さはコーピングを含め106.0mである。この地中連続壁の構造上の大きな特徴は、地中連続壁の天端から20.0m区間は、図－3（地中連続壁継ぎ手構造図）に示すようにジョイントボックス（着色部）を用い、鉄筋による継手構造とし、それ以深は掘削機により先行エレメントを切削して継ぎ手とするカッティングジョイントを採用している点にある。このため、地中連続壁の平面形状は図－3（エレメント割り図）に示すように円形よりも多角形々状に近いものとなっている。

2.2 地質概要

架橋地点の地質は図－2の地質柱状図に示すように、約50mの軟弱な砂、シルトからなる沖積層、洪積層と、その下に新第3紀の火山性の凝灰質粗粒砂岩（Muts-1）および軽石質凝灰岩（Muts-2）層の軟岩層から構成されている。支持岩盤の深度はTP-73.0mと深く、中間層の洪積層には巨礫を介在する砂礫層が存在する。この砂礫層には礫径1m以上の巨礫が存在すると予想されていたが、実際地中連続壁内部を掘削した結果、礫径1～2mの巨礫が数多く確認された。

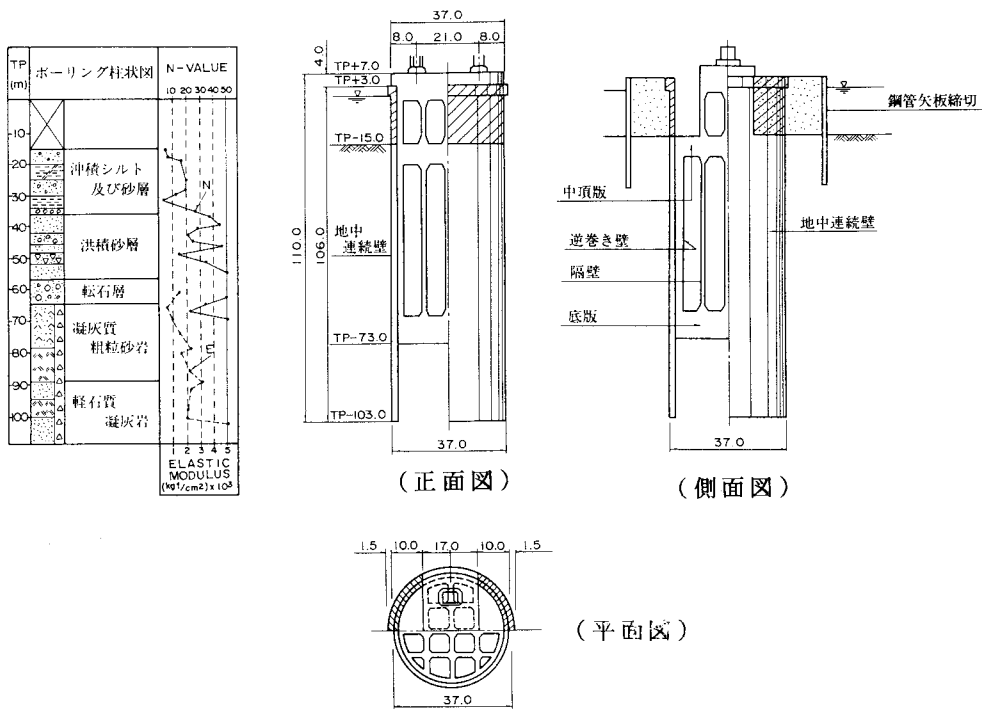


図-2 3P主塔基礎構造一般図

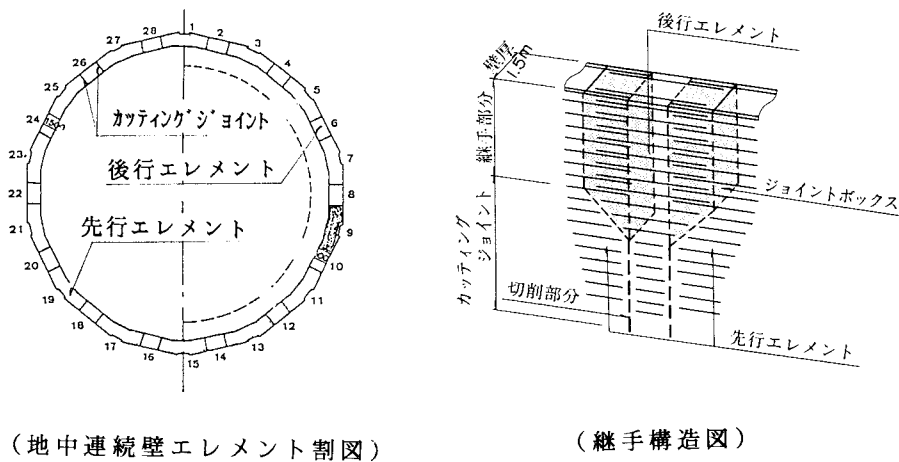


図-3 地中連続壁構造図

3. 地中連続壁の施工概要

施工は、先行エレメントを3ガット、後行エレメントを1ガットとし、水平多軸掘削機（ハイドロフレーズ掘削機およびエレクトロミル掘削機）により溝壁掘削を行い、鉄筋籠を建込み、高強度流動化水中コンクリート（ $\sigma_{ck}=370\text{Kg}/\text{cm}^2$ ）をトレミー工法で打設し地中連続壁を構築する要領で行なった。地中連続壁の構築が終了した後、地中連続壁の内部の掘削を行なった。掘削は図-4（地中連続壁施工順序図）に示すように掘削深さ76mを9段階に分け、各段階毎に、高さ6.0m、厚さ2.0mのリング支保工（本体の側壁を兼ねる）を取り付けた。リング支保工は、逆巻き工法となるため、各ロットの上部には、ブリージングを抑える分離低減剤とアルミニウム粉末を添加した特殊膨張コンクリートを使用した。なお、地中連続壁内部の水位管理は、 $\phi 500\text{mm}$ 、深さTP-83mのディーブウエルにより行った。地下水水位は、掘削深さTP-57.5mまでは掘削地盤から2.0m下で、それ以深は0.5m下となるよう管理を行った。

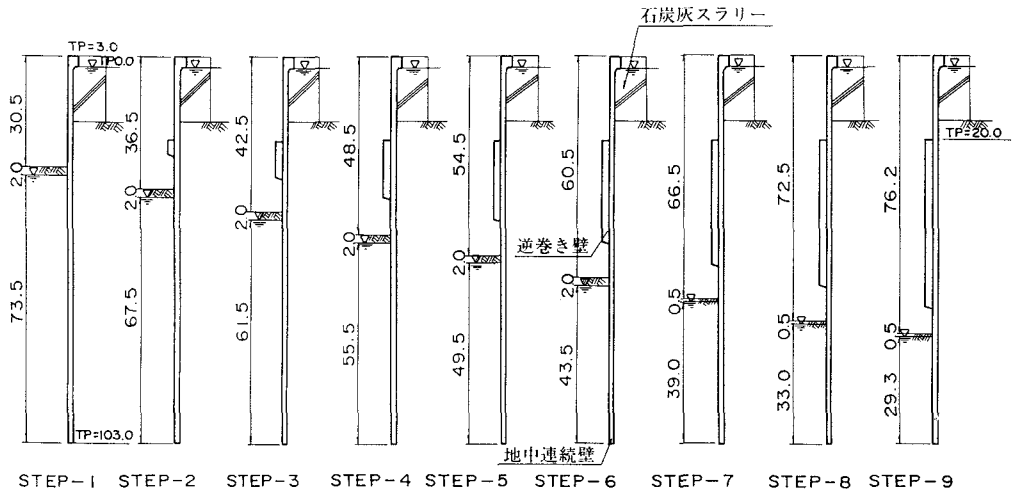


図-4 3P地中連続壁施工順序図

4. 計測器の配置

計測器の数量と目的を表-1に、計測器から得られたデータを処理するための静的システムフロー図を図-5に示す。また、計測器の配置を図-6に示す。計測器は平面を8分割とし、そのうち先行エレメントとなるA断面、後行エレメントとなるC断面を主測線とし計測器を密に配置した。本システムは、工事の安全管理を行うのが主目的であるため計測器の各種データは、挿入式傾斜計を除き一日一回測定した。挿入式傾斜計は、各掘削段階の前後に測定を行った。

表-1 計測項目と設置数量

対称	計測項目		計器名称	設置数量	目的
コーピング	応力	鉄筋応力	鉄筋計 (円周方向)	32	・許容応力度との対比
地中連続壁	外力	側圧	土圧計	30	・作用外力の確認
		水圧	水圧計	62	・設計側圧との対比 ・偏圧の確認
	応力	鉄筋応力	鉄筋計	188	・内8個は動的鉄筋計
		コンクリート応力	有効応力計	12	・許容応力度との対比
	変形	壁体変位	挿入式傾斜計	8	・設計値との対比 ・他の計測項目との相関 ・異常現象の検知

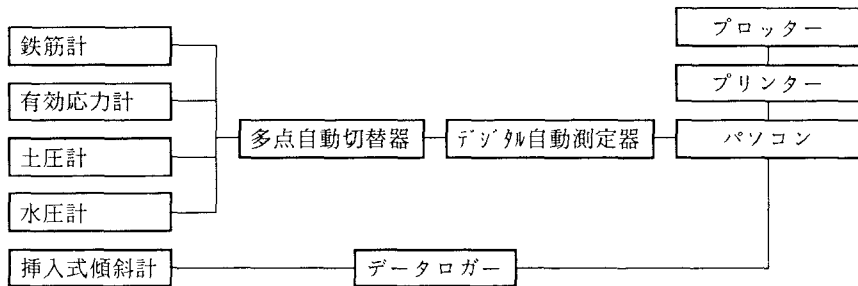
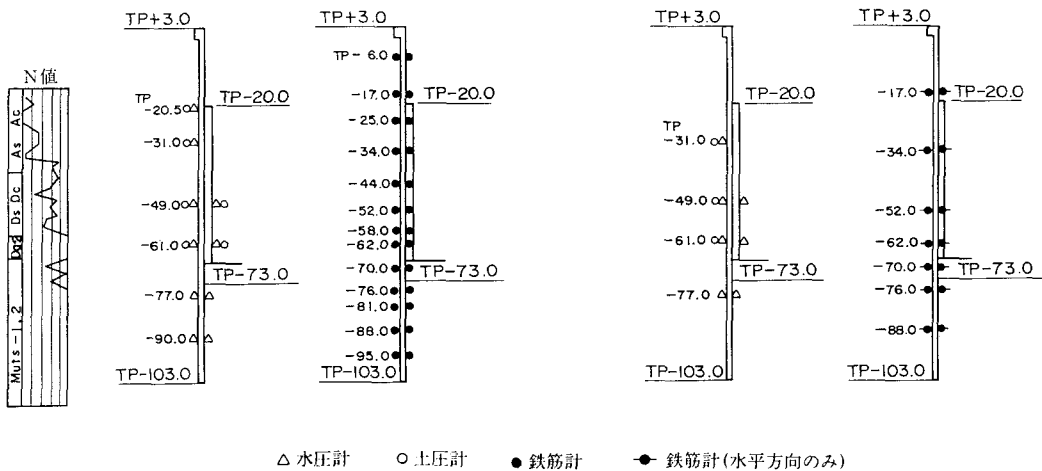


図-5 静的システムフロー図

A, C断面

B, D, E, F, G, H断面



△ 水圧計 ○ 土圧計 ● 鉄筋計 ● 鉄筋計(水平方向のみ)

図-6 計測器配置図

5. 計測結果

5.1 作用外力

1) 設計上の仮定

白鳥大橋の地中連続壁の設計荷重は、次3種の荷重を仮定している。

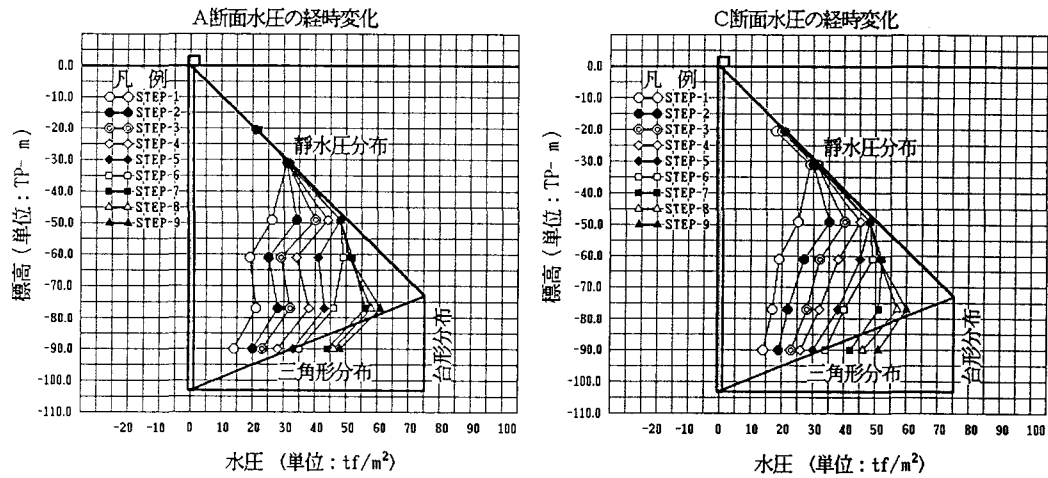
- ①水圧：水圧は、静水圧分布を基本と考えた。しかし、地中連続壁内部の掘削面以下の地盤内の残留水圧の程度から、荷重として作用する水圧の分布形状を三角形分布と台形分布の2種類仮定した。
- ②土圧：土圧は、静止土圧とし深さに比例して増大すると仮定し、掘削面以上に载荷した。
- ③偏圧：LNG地下タンクの施工実績などを考慮して、安全側となるよう、静止土圧の20%を偏圧と仮定した。

2) 作用外力の計測結果

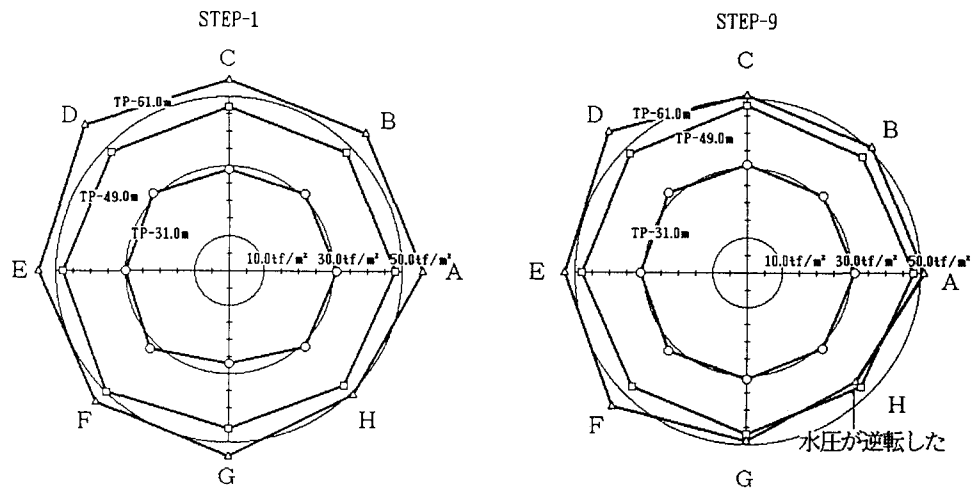
(1) 水圧

水圧の鉛直方向の分布図を図-7に、水平方向の分布のうち第1段階と最終段階(第9段階)を図-8に示す。鉛直方向の分布は、外側の水圧計の値から内側の水圧計の値を差し引いた値を示した。掘削初期は、ほぼ静水圧分布であった水圧は掘削が進むにつれ、深い位置から静水圧より減少する傾向を示し、最終的な

水圧分布は三角形と台形の間間的な形状となった。一方、水平方向の水圧の分布形状を見ると、概ね等圧分布となっているが、ディープウェルに最も近いH断面と、最も遠いD断面とを比べて判るように、ディープウェルに近いH断面付近は水圧の低下が著しいことが判る。



図－7　水圧の鉛直方向分布図



図－8　水圧の水平方向分布図

2)土圧

土圧の鉛直方向の分布図を図-9に、水平方向の分布図を図-10に示す。ただし、土圧の値は、埋設された側圧計から水压を差し引いた値とした。鉛直方向土圧分布は、当初仮定していた三角形分布ではなく深くなるにつれて値が減少する逆三角形分布となった。土圧強度は、一部では設計土圧程度の大きさを示しているものの、概ね設計土圧より小さかった。一方、水平方向の土圧分布は、図示した通り不規則なものであった。なお、C断面の上部やG断面に見られるように、計測器の埋設位置の掘削が終了すると土圧が急激に減少するものがあった。

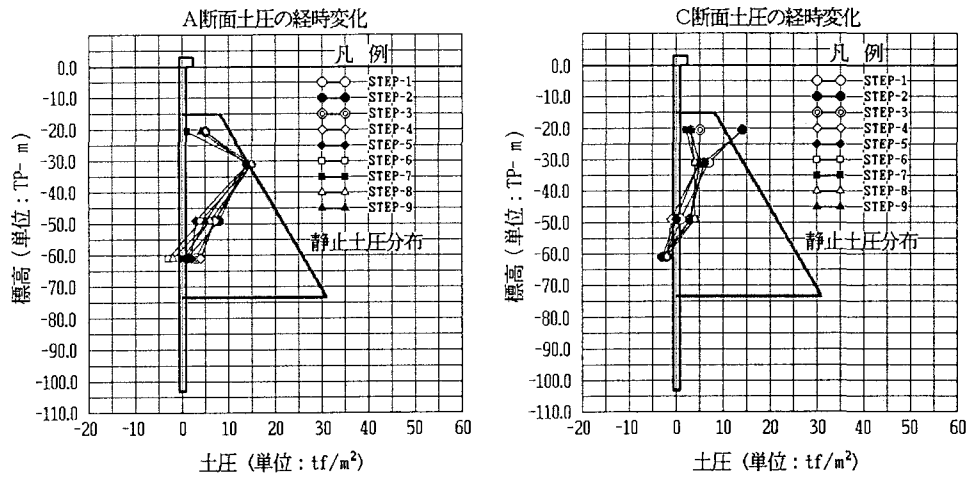


図-9 土圧の鉛直方向分布図

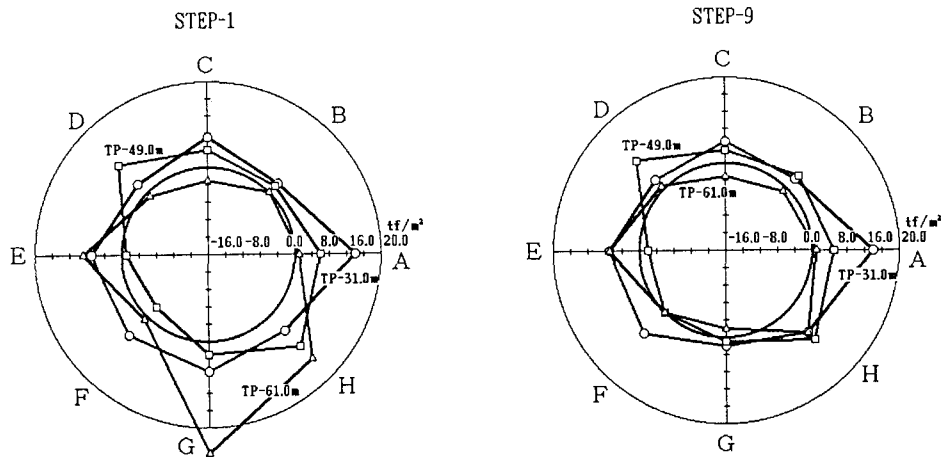


図-10 土圧の水平方向分布図

3)偏圧

偏圧はLNG設計施工指針に従い、静止土圧の20%と仮定していたが、土圧の計測結果に規則性がなく分布も一様でないことから、土圧から偏圧を推定することは困難であった。しかし、偏圧は土圧以外により発生する可能性があり設計に見込むことは必要であると判断される。

5.2 発生応力度および変位の計測結果

3 P 地中連続壁は、構造上の特徴でも述べた通り、平面形状が多角形に近い形状をしている。このため直線パネルの中央付近は梁の中央部のように掘削面側に引張応力が発生し、逆にコーナー部ではラーメン構造の隅角部のように、外側に引張応力が発生すると考えられる。従って、当時一般的であった軸対称 2 次元モデルを用いた解析ではこのような曲げによる応力度を算出することが出来ず、危険側の計算結果となる可能性があり、地中連続壁の構造解析モデルには 3 次元有限要素法の逐次解析法を採用した。解析結果からは、最終掘削段階でのコンクリート縁圧縮応力度は約 $170\text{Kg}/\text{cm}^2$ となるため通常的水中コンクリートよりも高強度の流動化水中コンクリート ($\sigma_{ck}=370\text{Kg}/\text{cm}^2$) を使用することとした。今回は、上述のような設計々算上の仮定やコンクリートの選定について水平方向のコンクリート縁応力度を中心に検討を行ったので報告する。なお、グラフは計測結果（マーク付きの太線）と設計計算結果（細線：荷重組合せ＝水圧（三角形分布）＋静止土圧＋偏土圧）から、第 1，5，9 段階の結果を示す。計測結果は、鉄筋計により計測された応力から有効断面内（全断面圧縮の場合は全断面有効）で応力度が線形分布となると仮定し、実際に地中連続壁に用いたコンクリートの弾性係数を使用して算出したがコンクリートのクリープの影響については、設計計算の仮定と合わせるため考慮しなかった。

(1) 水平方向応力度の計測結果

図-11 に A 断面（先行エレメント）の地中連続壁の内、外側の水平方向コンクリートの縁応力度の計測結果（マーク付き実線で示す）と設計計算結果（細線で示す）を示す。また、図-12 に C 断面（後行エレメント）の同一内容のグラフを示す。着目断面は地中連続壁の平面形状に対して、A 断面は地中連続壁が折れ曲がる点、C 断面は地中連続壁の直線部分のほぼ中央点に対応する。計測結果を見ると、各断面も掘削初期では、設計々算値と計測値がよく一致しているが、掘削が進むにつれて応力度の急激な変化が見られ、許容応力度に近づいた部分がある。発生応力は A 断面内側および C 断面外側の圧縮応力度が卓越し、設計値に近い圧縮応力度が発生している。一方、多角形々状の影響により圧縮応力度が小さくなるはずの C 断面内側で急激に大きな圧縮応力度が計測された。これは後で述べるように、逆巻き壁に打ち込んだコンクリートの水和熱の影響であると推定出来る。なお、継ぎ手部の発生応力を見ると、施工時地震時のみに発生すると考えていた引張応力度が地中連続壁上部に発生しており、継ぎ手構造は常時でも有効であった。

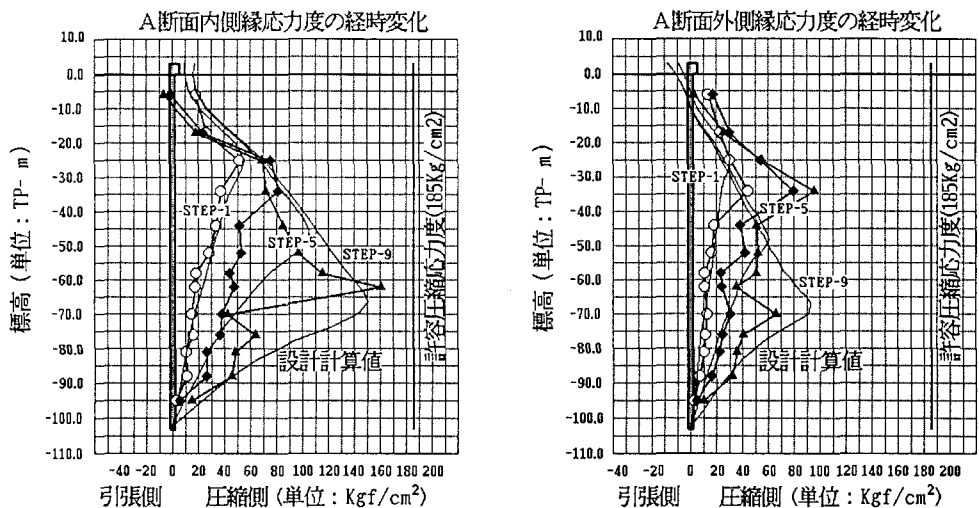


図-11 先行エレメントの水平方向応力度

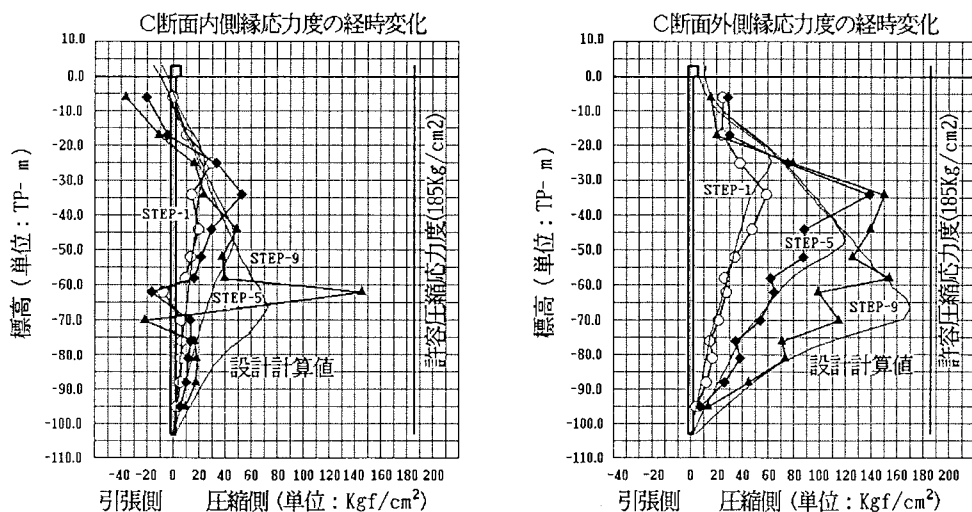


図-1 2 後行エレメントの水平方向応力度

(2) 鉛直方向の鉄筋応力度

鉛直方向の鉄筋応力度は、値も小さく問題はなかったが、温度の影響を受け不規則なものとなった。

(3) 変位

変位は、計測深さが深いことによる計測器誤差により、満足な結果を得ることが出来なかったが、変位の形状を見ると、側壁による変形を抑える効果が現われていることが判った。今後、この様な深い構造物の変位計測にあたっては、埋設型の傾斜計を用いるのが望ましいと考えられる。

6. 逆巻きコンクリートの水和熱の影響

水平方向の応力度の計測結果から、急激な圧縮応力度の変化が計測された。これは、逆巻き壁に打ち込まれたコンクリートの水和熱が原因と推定されるため、TP-58mに設置した鉄筋計により鉄筋計の温度とコンクリートの縁応力度の関係を調べた。この結果を図-1 3に示すように、鉄筋温度は地中にある場合には約20℃程度で一定であり安定しているが、掘削により気中にさらされると温度降下を起し、それに伴って鉄筋応力は引張側に移動する。次にコンクリートが打設されると温度上昇により逆に圧縮側に变化する関係が明確に現われている。なお、コンクリートに発生する圧縮応力は温度上昇1℃について約4 Kg/cm²であった。

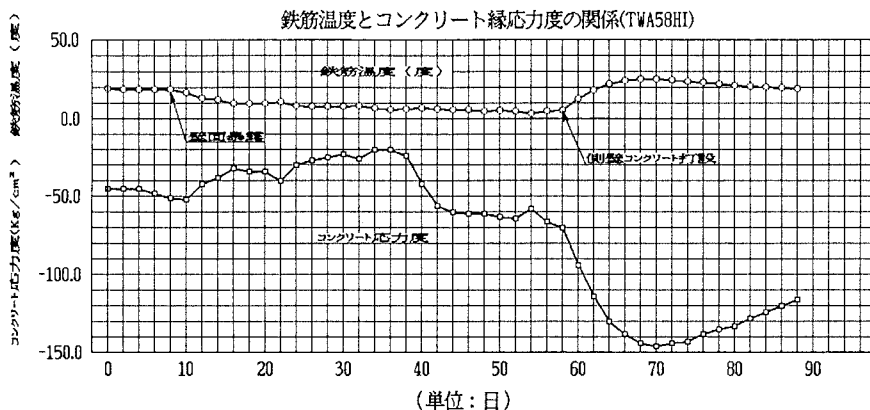


図-1 3 鉄筋温度とコンクリートの縁応力度の関係

7. まとめ

計測値と設計値を比較した結果、仮定条件および解析手法について次の事項が考察される。

- ①水圧は、周辺および底面以深の地盤の透水性に影響を受けるが、概ね水平方向は等圧分布、深さ方向は3角形分布と台形分布の中間的ものとなり設計上の仮定と一致した。
 - ②土圧は、深さに比例して増加すると考えていたが、実際には逆三角形に近い分布をし、値も小さかった。
 - ③偏圧は、ディーブウエルの影響などで水圧によっても生ずることが観測された。
 - ④計測された地中連続壁の応力度は、水圧がほぼ設計値通りであったのに対して、土圧・偏土圧は設計値よりかなり小さかった。それにもかかわれず計測値が設計計算値に近いものとなったのは、水圧による応力度が設計々算値の約70%を占め支配的であること、土圧・水圧による応力度が逆巻き壁のコンクリートの水和熱による応力度と相殺されたことが原因であると考えられる。また、多角形々状の影響は明確に現われており、解析に3次元有限要素解析を用いたことは妥当であったと考察される。
- 以上、白鳥大橋の主塔基礎の構築に用いた地中連続壁の、施工中の計測結果と設計上の諸仮定の対比について報告した、施工管理計測が主眼であったため十分な資料と言うまでには至らなかったが、今後類似の構造物の設計にいくらかでも参考となれば幸いである。

〔参考文献〕

- 1)石原勝、熊谷勝弘、佐藤謙二：白鳥大橋の主塔基礎 - 地中連続壁併用逆巻剛体基礎 - 基礎工
1988年1月
- 2)野坂隆一、石原勝、佐藤謙二、田口史雄：白鳥大橋の主塔基礎に利用した地中連続壁 基礎工
1989年1月
- 3)野坂隆一、川崎博巳、高橋守人、田口史雄：白鳥大橋主塔基礎における地中連続壁 基礎工
1989年10月
- 4)高橋守人、和田忠幸：白鳥大橋下部工の設計と施工 土木技術44巻11号 1989年11月
- 5)NAMIKI Hiroyuki, ABE Yoshinori: DESIGNING THE SUBSTRUCTURE OF MAIN TOWER OF SUSPENSION BRIDGE
CONSIDERING NEW CONSTRUCTION METHOD, EASEC-2 January 1989

(1992年 1月20日受付)