

# 新形式の大深度シールド立坑の開発

木村 克彦 荻迫 栄治 前 孝一 西川 洋二 平井 孝典  
(技術研究所) (技術研究所) (土木本部) (土木本部) (土木東京支店)

## Development of New Construction Method of Deep Shield Shaft

by Katsuhiko Kimura, Eiji Ogisako, Kouichi Mae, Youji Nishikawa and Takanori Hirai

### Abstract

In terms of structural characteristics and profitability, the cylindrical shell is the best form for constructing a deep shafts. Therefore it is often used. In terms of environmental loading, however, the best cross-sectional shape is the rectangle. This paper describes a new method for constructing deep shafts that considers both environmental loading and economy. The method uses a tied-arch structure that produces a small environmental load.

The paper compares the amounts of work needed to construct tied-arch type shafts and cylindrical-shell type shafts. Using the 3-dimensional finite element method, we designed a deep tied-arch shaft. The resulting analysis showed the tied-arch structure to be both economical and easy to construct.

### 概 要

一般にシールドなどの立坑は、形状の面からは矩形が最も掘削量が少なく環境面では好ましいが、大深度立坑では、円形が構造上また経済性の面から有利になるために多く用いられている。そこで、環境面を考慮した立坑構築法について検討した結果、タイドアーチを組み込んだ構造とすることで「施工に必要な面積を確保し、構造上または経済性に優れた環境を考慮した大深度立坑構築法」を開発できた。本報告では、本工法を用いた大深度立坑と円形の大深度立坑の概略数量の比較を行うとともに、本工法を用いた大深度立坑について3次元有限要素法を用いて試設計を行い、その有用性を確認したのでその概要を報告する。さらに、2次元および3次元解析結果の比較を行い、解析法の影響について検討した。

### § 1. はじめに

大深度地下の有効利用に関連する法律の制定に伴い、大深度地下を利用した構造物の建設が今後期待される。大深度地下の利用については鉄道、電力やガス幹線などがあり、これらの建設には大深度立坑の建設が必要である。従来、構造上の観点から円形の立坑が大深度立坑に採用されることが多い。しかし、本来の立坑の使用目的からは、形状の面では矩形の立坑が最も優れているが、大深度であることにより円形立坑の方が構造が簡易になり、その結果経済的に有利になっているのが現状である。

そこで、筆者らはより矩形に近く、経済性に優れた立坑構築工法について検討を行い、タイドアーチを用いた構造とすることによりこれまでの課題を解決できることを明らかにした。本報告では、タイドアーチを組み込んだ大深度立坑工法について3次元有限要素法による解析を行い、その有用性を確認したのでその概要を報告する。さらに2次元解析との比較結果から解析結果に及ぼす解析法の影響についても報告する。

### § 2. 工法の概要

本工法は、大深度のシールド立坑などを対象にしたもので、従来はこのような立坑では円形の立坑が構造上有利であることから多く用いられている。しかし、シールド立坑の場合では多くは円形であるために施工に必要以上の掘削を行うことになる。そこで、掘削面積を極力小さくする工法について検討した結果、放物線(タイド)アーチを連結することによって大深度立坑の施工に必要な面積を確保した、より合理的な立坑の構築法を開発した。

本工法の主な特徴を以下に示す。

- (1) 山留め構造は、放物線(タイド)アーチを組み合わせた構造で、円弧アーチに比較してライズを自由に設定でき、より有効な空間の設定ができる。
- (2) 放物線アーチのライズおよびアーチ結合用のタイバーを適切に設定・配置することにより圧縮力が卓越した構造とすることができ、各構造部材の持つ材料特性を有効に活用できる。
- (3) 本工法は、立坑設置面積が小さいので、完成後の

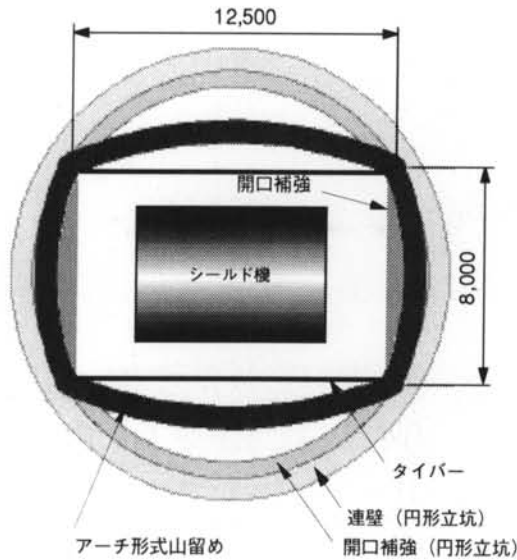


図-1 本工法と円形立坑の平面比較例

| 項目     |                   | アーチ立坑 | 円形立坑  | (アーチ) - (円形) |      |
|--------|-------------------|-------|-------|--------------|------|
| 細項目    | 単位                |       |       | 差            | 比率   |
| 掘削土量   | 連壁：m <sup>3</sup> | 2,111 | 2,532 | -421         | -17% |
|        | 内部：m <sup>3</sup> | 3,883 | 7,106 | -3,248       | -45% |
| 設置面積   | 連壁：m <sup>2</sup> | 34    | 40    | -88          | -40% |
|        | 内部：m <sup>2</sup> | 98    | 179   |              |      |
| コンクリート | 連壁：m <sup>3</sup> | 2,111 | 2,532 | -421         | -17% |
|        | 内部：m <sup>3</sup> | 514   | 1,694 | -1,180       | -70% |

表-1 本工法と円形立坑の施工数量比較例

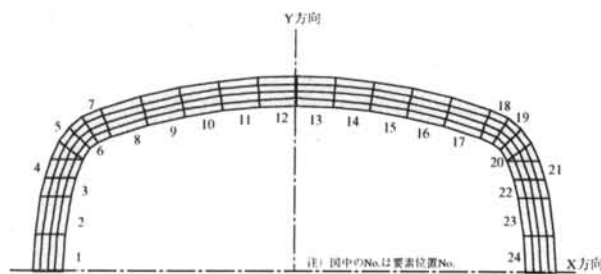


図-2 連壁平面

浮き上がりに対して有利な構造となると共に、内部掘削量が少なくなり環境面でも優れている。

本工法と円形立坑の平面の比較例を図-1に示す。図は、シールド径が約5mの立坑を想定したもので、必要内空を7m×11m、地中連続壁（以下、連壁）長さ62m、内部掘削深さ（床付け）39.5mとした。この場合の施工数量の比較結果を表-1に示す。表からわかるように設置面積が40%減少し、これに伴い内部掘削量も45%減少する。さらに、浮き上がりに対する対策（安全率1.03）も含めると必要な内部コンクリート量は70%削減できる。このように設置面積を低減した結果、内部掘削量、コンクリート量を大幅に削減できる。

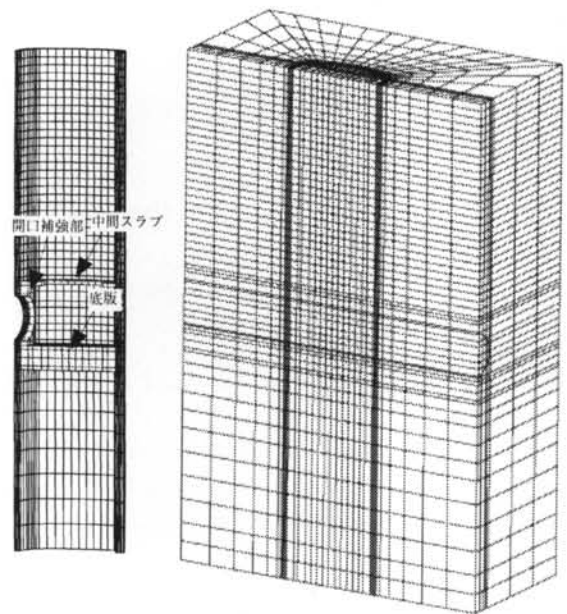


図-3 連壁およびモデル全体図

### § 3. 解析方法および条件

#### 3.1 解析モデルおよび解析方法

連壁施工時の応力・変形を把握するために有限要素法を用いた3次元解析を行った。

検討対象の立坑はシールド径が5mで、その概要は図-1のように立坑の内空有効寸法が7.0m×11.0m、中間スラブは物資の搬入に支障がない5.0m×8.0mの開口とする。アーチライズは、予備解析の結果から圧縮応力が卓越する10%とした。

解析に用いた連壁平面図、連壁およびモデル全体図を図-2および図-3に示す。地盤を含む解析モデルの大きさは、22.0m×22.5m×67.0m（X\*Y\*Z方向）で、構造物の外側にXおよびY方向にそれぞれ約10mおよび15mの地盤が存在するモデルである。地盤および連壁については六面体ソリッド要素で、タイバーは棒要素でモデル化した。逐次掘削モデルは、全要素数：18,545、全節点数：20,278である。なお、図-2のNo.は以後の要素位置の表示に対応したものである。

次に、解析においては掘削を2mごとに行い、掘削にあわせてタイバーを設置し、再度掘削する。このステップを20回繰り返し、深度GL-39.5mまで掘削して終了する。その後、底版（厚さ3m）を施工し、開口部補強を行った後にシールド発進用の開口部の施工を行う。開口部の直径はφ5,500mmで、その中心は底版上面から3,200mmとする。なお、約GL-29m掘削後に中間スラブ（厚さ0.5m）を設置する。

#### 3.2 初期応力解析（自重解析）

本検討では、土圧、水圧および上載圧は地盤の掘削

| 土層レベル<br>DL(m) | 土層区分 | 土層  | 単位体積重量<br>$\gamma_i$ (kN/m <sup>3</sup> ) | N値 | 内部摩擦角<br>(°) | 粘着力<br>(kN/m <sup>2</sup> ) |
|----------------|------|-----|---|----|--------------|-----------------------------|
| 4.50<br>-2.30  | 埋立層  | Bs1 | 2.00                                      | 16 | 30           | 0                           |
| -12.60         | 埋立層  | Bs2 | 1.60                                      | 5  | 0            | 45                          |
| -21.30         | 沖積層  | A1c | 1.60                                      | 4  | 0            | 70                          |
| -23.50         | 洪積層  | D1m | 1.60                                      | 18 | 0            | 110                         |
| -34.90         | 洪積層  | D1s | 1.90                                      | 50 | 35           | 0                           |
| -54.80         | 洪積層  | D3s | 1.90                                      | 50 | 38           | 0                           |
| -61.70         | 洪積層  | D3c | 1.75                                      | 38 | 0            | 500                         |
|                | 泥岩   | Kac | 1.75                                      | 50 | 0            | 1000                        |

表-2 検討に用いた土質

に先立ち初期応力解析を行い、地盤の初期応力状態を求めておき、掘削に伴いこれらの応力を解放することによって取り扱った。対象とする地盤は、文献1)を参考に表-2のように設定した。解析に用いるポアソン比 $\nu$ は、次のようにして求めた。まず、 $K_0=0.5$ とした場合の(土圧+水圧)を式(1)から求めておき、式(2)から見掛けの $K_0'$ を算定する。その後、ポアソン比と側圧係数の関係を用いて換算したポアソン比を算定して解析に用いた。

$$P = K_0 (\sum \gamma_i \cdot h_i) + P_w \quad (1)$$

$$K_0' = P / (\sum \gamma_i \cdot h_i + P_w) \quad (2)$$

$$\nu' = K_0' / (K_0' + 1) \quad (3)$$

ここに、

P : 任意の深度で作用する土圧+水圧

$K_0$  : 側圧係数 (=0.5)

$\gamma_i$  : 任意深度での土の密度

$h_i$  : 任意深度での土層の厚さ

$P_w$  : 任意深度での水圧

$K_0'$  : 見掛けの側圧係数

$\nu'$  : 見掛けのポアソン比

### 3.3 逐次応力解析および偏土圧・地震時の解析

逐次応力解析および偏土圧・地震時の解析では、式(3)で求めたポアソン比を用い、その他の材料定数は所定の値を用いた。地盤要素の引張強度はないと考え、解析上は各掘削時ごとに躯体との境界の地盤要素の応力をチェックし、引張応力になっていればその要素の変形係数を1kN/m<sup>2</sup>とした。

逐次解析においては、2mごとに掘削し、タイバーを設置後再び掘削するというステップとする。なお、タイバーの鉄筋量は、D51@250 (GL0m~GL-10m)、2×D51@300 (GL-10m~GL-20m)、2×D51@200 (GL-20m~GL-30m)、2×D51@125 (GL-30m~GL-39.5m)である。これらの鉄筋量は、2次元解析結果を参考に決めたので、深度が大きくなるほど3次元効果が無く、タイバーの鉄筋量が過剰になっている可能性が大き

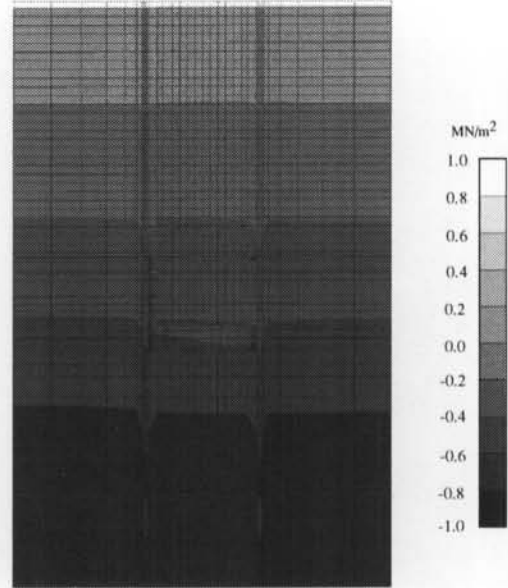


図-4 初期応力状態 ( $\sigma_3$ )

い。掘削に伴う荷重作用は、次のように考えている。すなわち、当該の地盤要素を掘削に伴い取り除くことにより、それらの要素が分担していた応力が解放され再分配されるので、各掘削段階で作用する(土圧+水圧)を順次作用させて解析した場合と同じ結果になる。このことは、シールド貫通部の場合も同様である。

さらに、偏土圧作用時には偏土圧として上載荷重を含む静止土圧の20%を長辺アーチに両押し荷重として作用させ、地震時にはLNG地下貯槽指針による地震時土圧としたが50kPa以下であったので50kPaとした。なお、床付け時には、(自重+土・水圧+偏土圧)、地震時には、(自重+土・水圧+地震時荷重)が作用するとした。

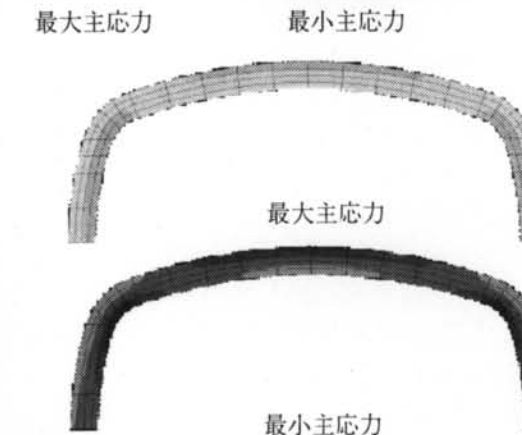
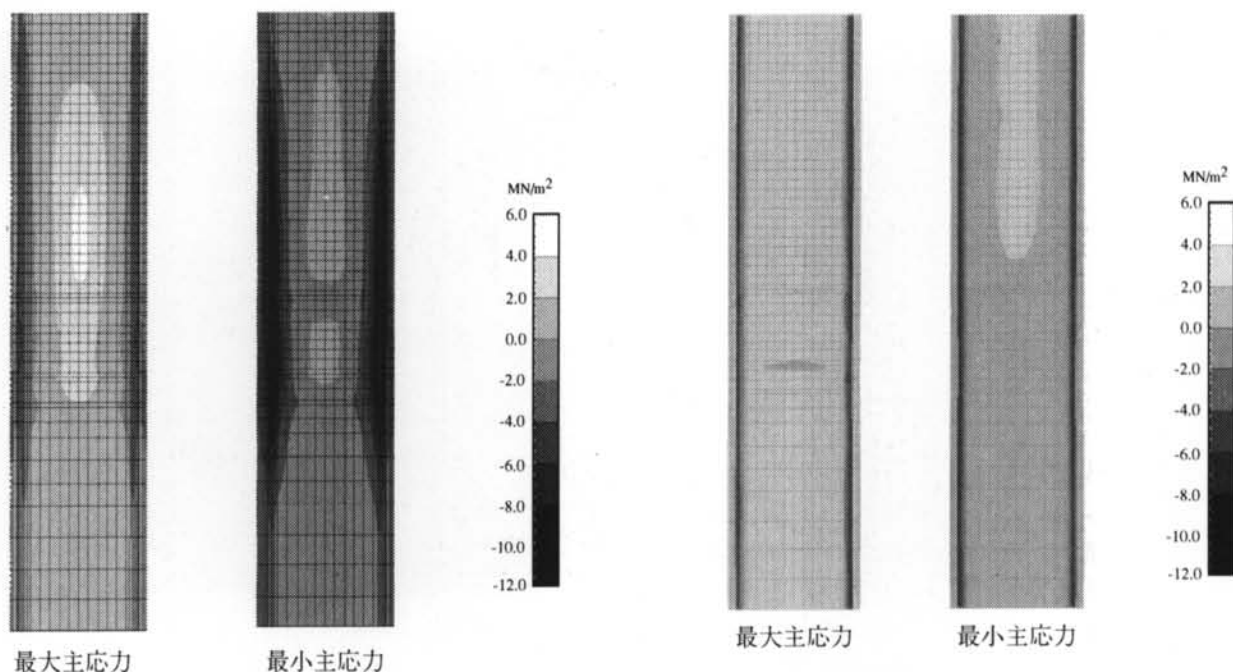
## § 4. 応力解析結果

### 4.1 初期応力解析

ここでは、地盤の初期応力を求めることを目的に初期応力解析を行う。解析条件は先述したとおりであるが、これらの条件の設定に際しては幾度かシミュレーションを行い、その結果から最もよいと思われるものを選定した。地盤応力は連壁下端近傍で幾分連壁に引き込まれ乱れた状態であるが、概ね地層に沿ってほぼ同じ値で均一であると見なせる。

### 4.2 逐次掘削応力解析

初期応力解析結果を初期状態として、2mごとにタイバーを設置しながら掘削し、所定の深度まで掘削した。ここでは、掘削深度GL-39.5m(床付け時)の連壁の掘削側から見た応力状態、深度GL-39.5mでの連

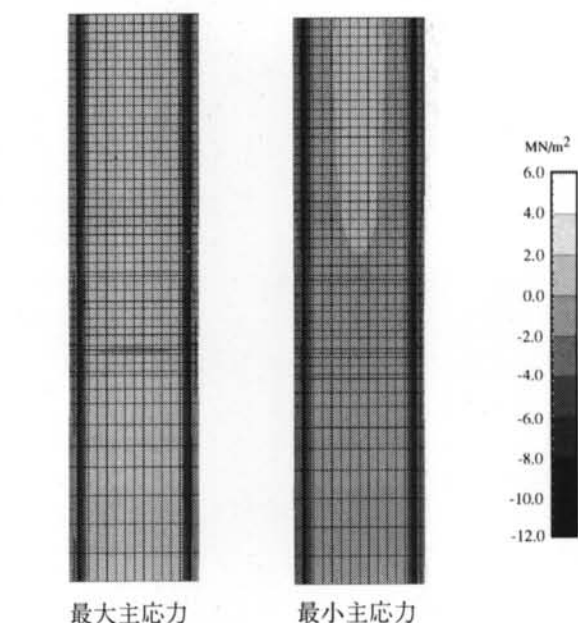


図一五 G L -39.5 m掘削時連壁の応力状態

壁の最大および最小主応力を図一五に示す。連壁の掘削側から見た最大主応力（以下、掘削深度がGL-20mより深い場合には、掘削面の最大主応力）が $2\text{MN/m}^2$ 以上である範囲は、連壁のアーチ中央部全域に拡がっている。これは、掘削に伴う連壁の変形が、各要素間の相対変位を考慮していないために、連壁下端近傍の剛性の大きい地盤要素により拘束されるためと考えられ、実構造物では相対変形があることから引張領域の範囲は小さくなると考えられる。また、最大主応力が $4\text{MN/m}^2$ 以上の範囲は、GL-30m以上の掘削時に連壁中央アーチ部に発生している。同様に、掘削面の最小主応力の絶対値が大きい領域は、それぞれのアーチの結合部である隅角部で、最小値は掘削面近傍で示しており、GL-25m以深では $-8\text{MN/m}^2$ 以下で最大 $-12\text{MN/m}^2$ 程度の圧縮となっている。連壁地山側の応力は、掘削側の逆の傾向を示している。

#### 4.3 偏土圧作用時および地震時応力解析結果

偏土圧および地震時荷重作用時の連壁の発生応力



図一六 偏土圧作用時の連壁の応力増分

(増分)の最大および最小主応力の例を図一六および図一七に示す。なお、応力は掘削側から見たものである。偏土圧および地震時荷重による発生応力は、ほぼ同じ傾向を示しており、その増分は $\pm 2\text{MN/m}^2$ の範囲にある。

#### § 5. 断面力算定結果

ここでは3次元解析結果から求められた応力を断面力に変換した結果を用いて検討する。そして得られた

各掘削深度における断面力の最大値および最小値を表一3に示す。なお、( )内は断面力の発生位置で、軸力は引張が(+)、圧縮が(-)、モーメントは内側引張が(+)、外側引張が(-)である。また、掘削深度GL-39.5m、偏土圧作用時、貫通時の断面力(Mx、Mz、Nx、Nz)の深度方向分布、平面分布の例を図一8~図一13に示す。タイバー応力の床付け時および地震時での最大値は、いずれもGL-15m近傍でそれぞれ約26N/mm<sup>2</sup>および約37N/mm<sup>2</sup>で、その発生応力は小さいことが分

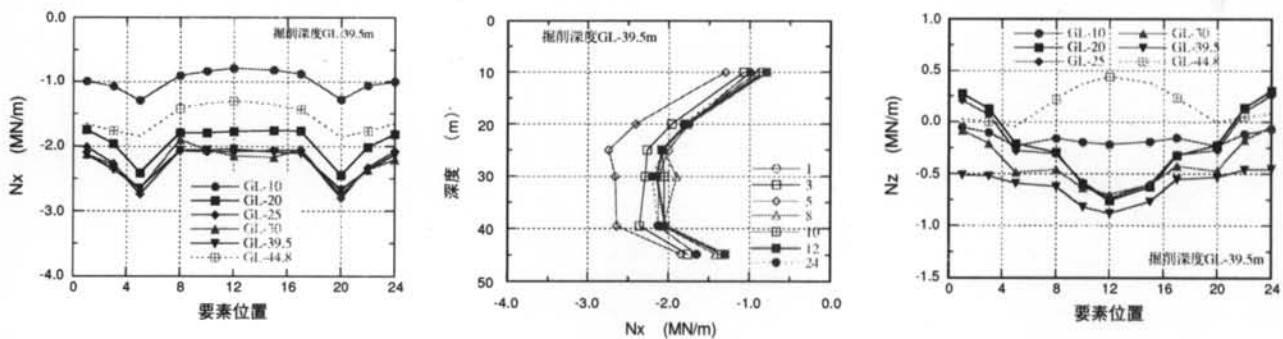
かった。とくに、GL-30m以深では、中間スラブにより変形が拘束され、地盤の剛性が高いことなどから連壁の変形が小さくなり、その結果タイバーに発生する応力が小さくなっている。このように中間スラブの設置によりタイバーの応力を低減できることが分かった。

周方向の軸力Nxの最大・最小値は、いずれの深度でも圧縮で、深度が大きくなるほど大きくなっている。しかし、GL-25m~GL-39.5mでは大差なく、圧縮

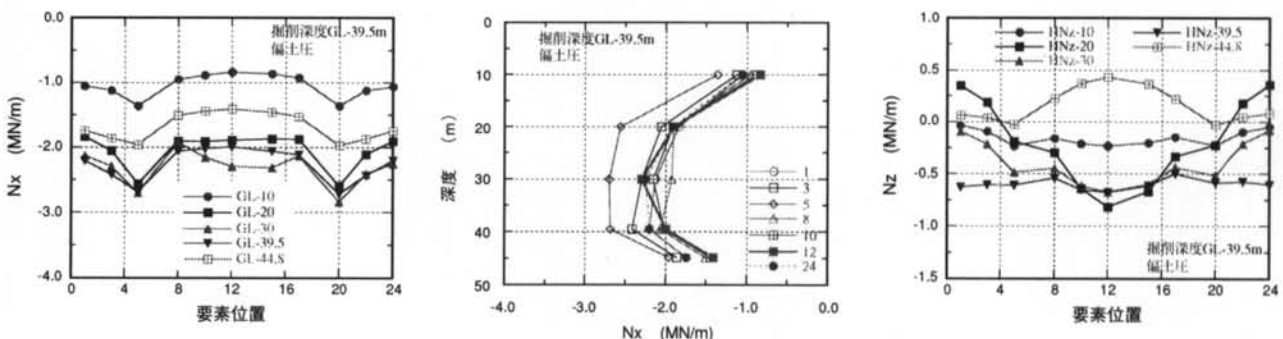
| 深 度     | 断面力 | Nx         | Nz         | Mx         | Mz         | Sxy        | Szy        |
|---------|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| GL-10   | 最大値 | -0.614( 1) | 0.130( 1)  | 0.532(12)  | 0.116(12)  | 0.302( 3)  | -0.033( 3) |
|         | 最小値 | -1.362(20) | -0.396(12) | -0.471( 5) | -0.100( 5) | -0.293( 8) | -0.063( 1) |
| GL-20   | 最大値 | -0.326(12) | 0.465(24)  | 0.954(12)  | 0.266(12)  | 0.574(17)  | 0.025(12)  |
|         | 最小値 | -2.596(20) | -0.910(12) | -0.900( 5) | -0.198( 5) | -0.545( 8) | -0.074( 1) |
| GL-25   | 最大値 | -0.271(12) | 0.494(24)  | 0.962(12)  | 0.334(12)  | 0.613(17)  | 0.036(24)  |
|         | 最小値 | -2.805(20) | -0.997(12) | -1.003(20) | -0.221(20) | -0.582( 8) | -0.081(12) |
| GL-30   | 最大値 | -0.271(12) | 0.293(12)  | 0.882(12)  | 0.115(12)  | 0.691(17)  | 0.144(10)  |
|         | 最小値 | -2.839(20) | -0.847(12) | -0.959(20) | -0.213( 5) | -0.633( 8) | -0.188(12) |
| GL-39.5 | 最大値 | -0.356(24) | 0.752(12)  | 0.618(12)  | -0.009(12) | 0.446(17)  | 0.004(22)  |
|         | 最小値 | -2.720(20) | -0.977(12) | -0.865(20) | -0.264( 5) | -0.449( 8) | -0.488(12) |
| GL-44.8 | 最大値 | -0.409(24) | 0.815(12)  | 0.420(12)  | 0.069(12)  | 0.317(17)  | 0.003(15)  |
|         | 最小値 | -1.978(20) | -0.203( 5) | -0.568(20) | -0.111(20) | -0.317( 8) | -0.138(12) |

注) 単位 N, S: MN/m, M: MNm/m  
 ( )内は図-2の要素番号, (1), (24); 短辺アーチ中央, (3); 短辺アーチ端部, (5), (20); 隅角部, (8), (17); 長辺アーチ端部, (12); 長辺アーチ中央

表一3 各深度での断面力の最大値および最小値



図一8 Nx, Nzの分布 (GL-39.5m, 床付け時)



図一9 Nx, Nzの分布 (偏土圧作用時)

力が大きく、最小値は隅角部で-2.839MN/mである。同様に縦方向の軸力 $N_z$ は、最大値が0.815MN/m、最小値が-0.997MN/mであり、長辺アーチ中央部近傍で縦曲げに伴う引張力が発生しており、深度方向には最大値がGL-44.8m、最小値はGL-25mで発生している。床付け時に比較して偏土圧作用時には $N_x$ は、GL-30m近傍で長辺アーチ中央部で増加傾向を示すが、 $N_z$ は逆

に短辺アーチ中央部で増加傾向を示し、長辺アーチ部では幾分減少傾向を示している。

周方向のモーメント $M_x$ は、最大0.962MNm/mで、最小-1.003MNm/m、隅角部には外引張、長辺アーチ中央部には内引張のモーメントが発生しており、その発生深度はGL-25mである。縦方向モーメント $M_z$ は、最大0.334MNm/m、最小-0.264MNm/mといずれも $M_x$ に

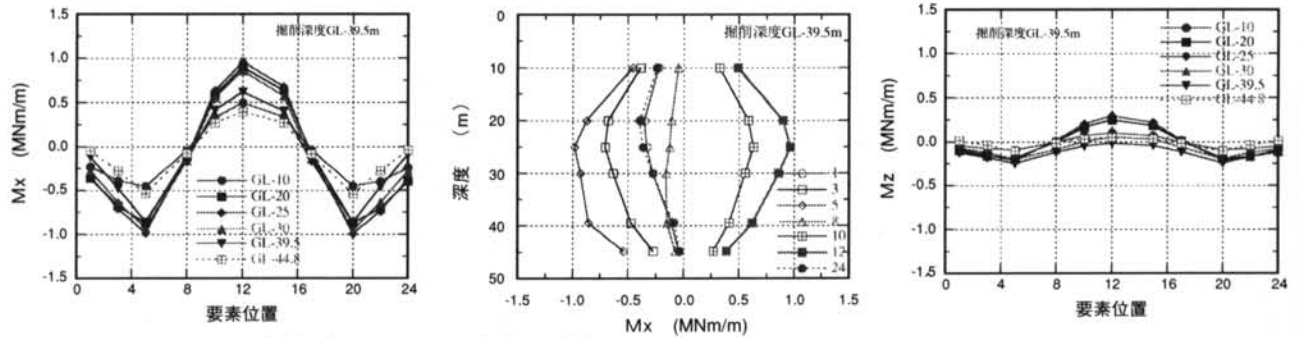


図-10  $M_x$ ,  $M_z$  の分布 (GL-39.5m, 床付け時)

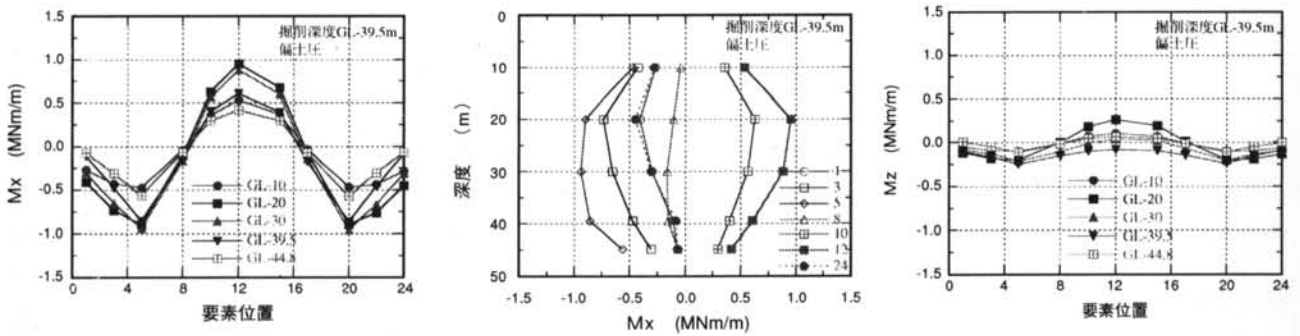


図-11  $M_x$ ,  $M_z$  の分布 (偏土圧作用時)

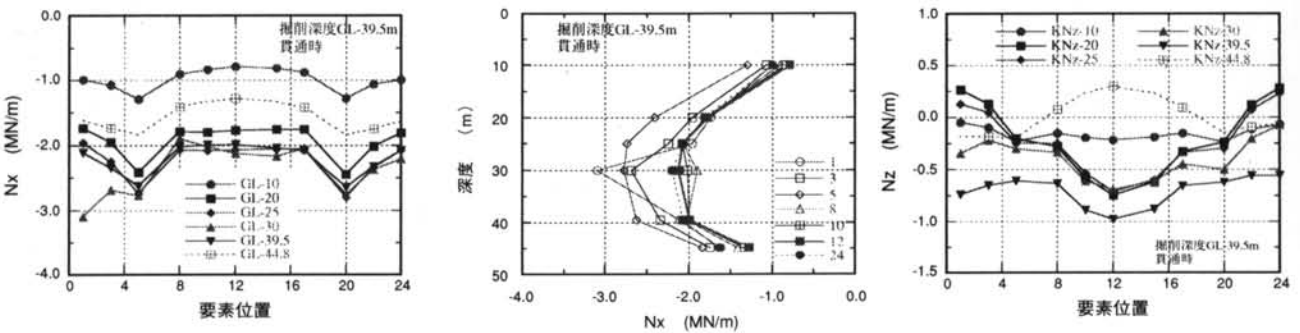


図-12  $N_x$  の分布 (貫通時)

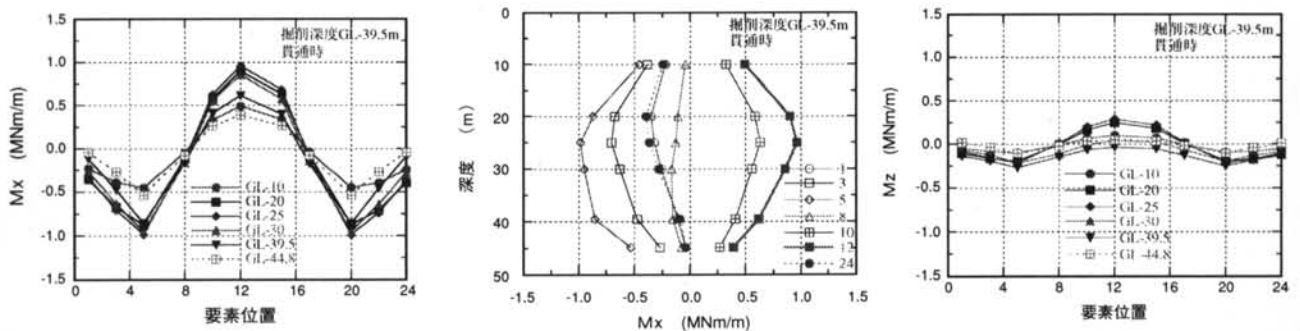


図-13  $M_x$ ,  $M_z$  の分布 (貫通時)

比べて小さく、それぞれの発生位置はMxと同じ長辺アーチ中央および隅角部である。図-10および図-11に示すように床付け時と偏土圧作用時のモーメント分布は、それぞれ大差ないことが分かる。

せん断力Sxyの最大値および最小値は、0.697MN/m、-0.633MN/mで、いずれもGL-30m近傍で発生しており、その位置は長辺アーチ端部、すなわちモーメントの変曲点で、中間スラブ設置位置である。せん断力Szyは、最大値が0.144MN/m、最小値が-0.488MN/mで、GL-30mおよびGL-39.5mで発生しており、値そのものは小さい。

次に、シールド貫通による開口部(φ5.5m)の構築に伴う断面力の変化について述べる。表-4にシールド貫通に伴う断面力の変化を示す。周方向の断面力の変化は、モーメント、せん断力ともに小さく、GL-30m近傍の短辺アーチ部中央で0.972MN/mの軸圧縮力が増加しているが、貫通に伴う影響は小さい。図-8および図-12を比較することによって分かるように、短辺アーチ中央近傍でのNxの圧縮力の増加が比較的大きい。

シールド貫通時の縦方向の断面力の変化は、モーメント、せん断力ともに小さく、GL-30m以深では軸圧縮力は、最大約0.3MN/mの増加しており、とくに、軸引張力の大きいGL-44.8m近傍では約0.1MN/mの軸圧縮力が増加し、軸引張状態の緩和に寄与している。これに対して、GL-30mでは隅角部近傍で約0.2MN/mの軸引張力が増加しているがその値は小さい。このようにシールド貫通が、立坑の応力に及ぼす影響は小さいと考えられる。

次に、ここで得られた断面力に対して概略どの程度の配筋になるのかを検討し、配筋面から施工性について確認する。連壁は、1ガットの掘削幅を小さくするためにバケット方式による掘削として、1ガットの幅を2.8mとした。先行エレメントの長さは、2.9m、後

行エレメントが7.5mである。このようなエレメント割付に対応したそれぞれの断面力に対応する配筋は、周方向ではD19@250～(D22@250+D25@250)、縦方向ではD19@250～D25@250(掘削側)、D19@250～D32@250(地山側)である。これらの配筋は、十分に施工可能な範囲である。

## § 6. 解析方法の比較

ここでは、3次元解析および2次元解析結果の周方向断面力の比較を行うことによって、それぞれの解析方法の違いについて考察する。なお、2次元解析に用いた荷重が3次元解析で用いた荷重より幾分小さく、また、3次元解析結果は床付け時の結果を用いる。比較する深度は、GL-10m、-30m、-40mである。

### 6.1 モーメント

モーメントの2次元および3次元解析結果の比較を図-14に示す。なお、2D、3Dは2次元および3次元を意味し、その前の数字は位置を示す要素No.である。GL-10mおよびGL-20mではいずれの解析結果ともに大差ないが、GL-20m以深では差が生じ始め、GL-30mおよびGL-40m(床付け)では3次元解析と2次元解析結果に大きな差が生じている。これは、2次元解析では地盤の拘束がないのに比べて、3次元解析では地盤、中間スラブなどによる変形拘束が大きいためと考えられる。これらの傾向は、それぞれのアーチの中央部近傍で顕著である。

以上のように、周方向(x方向)のモーメントは、2次元解析結果を用いれば安全側の評価になるが、掘削深度が大きくなる床付け近傍では過大評価になり、経済性を求める場合には3次元解析によるか、何らかの方法によって補正することが必要である。

| 位置 | GL-30m |      |     |     |     |     | GL-39.5m |      |    |     |     |     |
|----|--------|------|-----|-----|-----|-----|----------|------|----|-----|-----|-----|
|    | Nx     | Nz   | Mx  | Mz  | Sxy | Szy | Nx       | Nz   | Mx | Mz  | Sxy | Szy |
| 1  | -972   | -264 | 22  | 14  | 17  | 93  | 19       | -228 | 1  | -11 | 0   | 4   |
| 3  | -392   | -12  | -1  | 1   | 34  | 19  | 19       | -128 | -2 | -13 | -4  | 3   |
| 5  | -114   | 182  | -17 | -12 | -6  | 5   | 20       | -18  | 0  | -19 | 7   | 6   |
| 8  | 2      | 123  | -9  | -19 | -20 | 10  | 39       | -14  | -6 | -21 | 7   | -5  |
| 10 | 34     | 29   | -4  | -10 | -10 | 19  | 58       | -68  | -5 | -17 | -2  | -8  |
| 12 | 23     | 5    | -2  | -4  | -3  | 8   | 55       | -95  | -3 | -13 | -4  | -7  |
| 15 | 9      | -12  | 0   | -1  | 0   | 2   | 44       | -111 | -3 | -11 | -8  | -6  |
| 17 | 5      | -22  | 0   | 0   | 1   | 0   | 35       | -104 | -2 | -11 | -14 | -2  |
| 20 | 3      | -26  | -1  | 0   | 4   | -1  | 31       | -90  | 4  | -10 | -5  | 4   |
| 22 | -1     | -29  | -1  | 0   | 1   | -1  | 46       | -99  | -2 | -9  | 9   | -2  |
| 24 | -1     | -30  | -1  | 0   | 0   | -1  | 48       | -103 | -2 | -9  | 2   | -4  |

注) 単位 N, S: kN/m, M: kNm/m

表-4 シールド貫通時の断面力増分

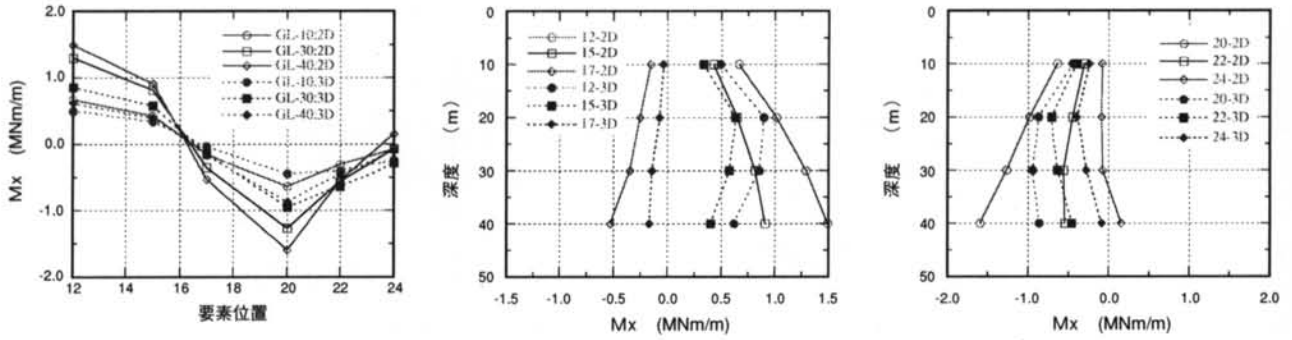


図-14 モーメントの2次元および3次元解析結果の比較

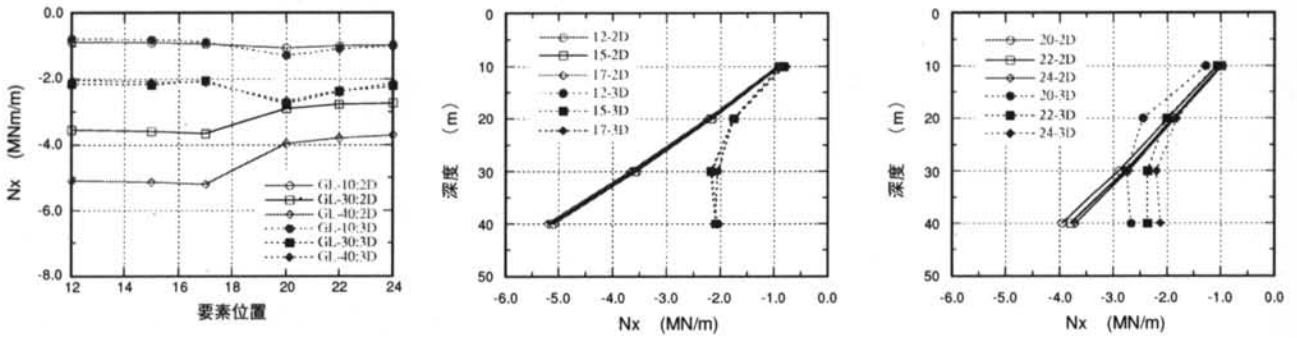


図-15 軸力の2次元および3次元解析結果の比較

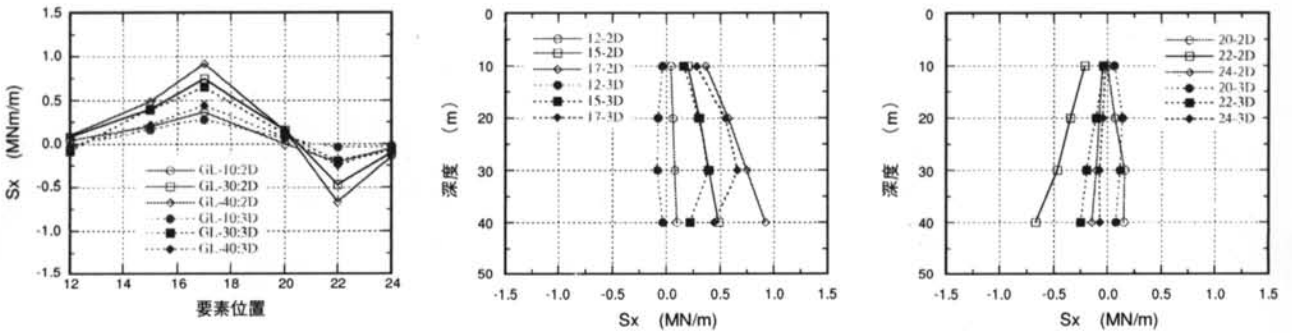


図-16 せん断力の2次元および3次元解析結果の比較

## 6.2 軸力

軸力の2次元および3次元解析結果の比較を図-15に示す。GL-10mおよびGL-20mではいずれの解析結果ともにその差は小さいが、GL-30m以深では大きな差が生じている。とくに、GL-40m(床付け)の要素位置12~17の間では3次元解析と2次元解析では差が大きい。これは、モーメントと同様に2次元解析では地盤の拘束がないのに比べて、3次元解析では地盤や中間スラブによる拘束が大きいために変形が拘束され軸力が小さくなるためと考えられる。これらの傾向は、図-15から分かるように長辺アーチで顕著である。

以上のように、周方向(x方向)の軸力は、2次元解析結果を用いてもGL-20mまでは大差ないが、それ以深では一概に軸力が小さくなるからと安全側であるとは言えない。GL-30m以深では作用するモーメントも大きく、鉄筋量・鉄筋応力、コンクリート応力を総合的に判断する必要がある。

## 6.3 せん断力

せん断力の2次元および3次元解析結果の比較を図-16に示す。GL-10m~GL-30mでは、いずれの解析結果ともに要素位置22を除いてその差は小さいが、GL-40mでは差が大きくなっている。とくに、GL-40mの要素位置17および22では3次元解析と2次元解析では大きな差が生じている。せん断力は、モーメント分布の影響を大きく受けることから予想できる。この原因は、モーメントと同様に地盤および中間スラブの変形拘束の影響である。これらの傾向は、図-16からよくわかる。

以上のように、周方向(x方向)のせん断力は、2次元解析結果を用いても安全側の評価になるが、GL-40mでは過大評価となることが分かる。2次元解析結果を用いる場合には、せん断力が大きく合理的な範囲でせん断補強できない場合も考えられる。



## § 7. まとめ

アーチ山留めを用いた大深度立坑について逐次掘削、シールド貫通の影響を考慮した3次元解析を行い、各ステップにおける応力、とくにシールド貫通時の影響について検討した。さらに、2次元解析と3次元解析結果を比較を行った。以下に、検討の結果得られた主な事項を示す。

(1) 周方向の軸力はいずれの深度でも圧縮であり、最小値はGL-30mの隅角部近傍で発生している。縦方向の軸力は、掘削床付け (GL-39.5m) の約5m下部のアーチ中央部で最大値を示し、深度が浅くなるにつれて圧縮側になっている。長辺アーチ部は引張軸力が卓越しており、全断面引張になる範囲が大きい。

(2) 周方向のモーメントは、深度方向にGL-20m～GL-30m近傍で、アーチ部では内側引張、隅角部では外側引張のモーメントの最大値が発生している。これに対して縦方向の曲げモーメントはいずれの場合にも小さい。

(3) シールド貫通時の周方向のモーメント、せん断力ともにその変化は小さく、GL-30m近傍の短辺アーチ

部中央で約1MN/mの軸圧縮力が増加している。

(4) シールド貫通時の縦方向の断面力の変化は小さく、GL-39.5m以深では貫通による軸力増分は、圧縮である。

(5) シールド貫通が立坑の応力に及ぼす影響は小さいと考えられる。

(6) 2次元および3次元解析について、解析法が断面力の計算結果に及ぼす影響を検討した結果、深度が大きくなるほどその影響が大きいことが分かった。

(7) それぞれの解析結果を比較した結果、断面力は2次元解析結果の方が大きく、とくに深度が大きくなるとその傾向は顕著になる。よって、経済性を求める場合には3次元解析によるか、何らかの方法によって補正することが必要である。

## 謝辞

本工法の開発にあたってプロジェクトメンバーや他の方々の有意義な多くのアドバイスがあり、その結果開発目標を達成することができた。ここに本プロジェクトに直接、間接に携わっていただいた方々に感謝いたします。

## <参考文献>

- 1) 小松原徹他：“深度59mのLNG配管用シールドの設計・施工 - 東京ガス 扇島トンネル (陸上工区)”，トンネルと地下，第27巻，7号，1996，pp.47-54

