

合理的なシールド機設計法に関する一考察

—三次元有限要素法による土圧の逆解析—

A Study on Precise Design of Shields

金安 進*・野口 利雄**・西岳 茂***・綱田 知博****

Susumu KANEYASU, Toshio NOGUCHI, Shigeru NISHITAKE and Tomohiro TSUNADA

The number of shield tunnels with large cross-sections built deep underground has been increasing in recent years. In order to design shields safely and precisely, there are unclarified factors to be studied in detail.

The authors measured actual strain on the shield being in operation, and estimated the earth pressure acting on the shield by means of reverse analysis with FEM.

This paper deals with the studies concerning reverse analysis technique to assume earth pressure, evaluation of the calculated earth pressure, applicability of analytical models and their boundary conditions.

keywords: earth pressure, reverse analysis, design method

1. はじめに

最近のシールドトンネルの大型化、異形断面への適用には顕著なものがある。このような環境下、シールド機をより安全かつ合理的に設計するためには、現時点で解明されていない項目について、より研究を進める必要がある。シールド機の設計時に必要な条件のうち、剛性は精度良く求められるが、土圧については、大半の設計例が安全側を考慮して全土被り圧を採用している。これはシールド機に実際に作用する土圧（以後実土圧と呼ぶ）を正確に把握することが困難であるのが要因となっている。また、解析方法については、フード部及びリングガーダ部は二次元リングモデル、テール部は三次元有限要素法（以後FEMと呼ぶ）による解析手法を一般的に使用しているが、実際の条件を完全に再現できる解析とはなっていない。

そこで、実工事で施工中のシールド機の実ひずみを計測し、三次元FEMによる全体モデルを使用して土圧の逆解析を行い、実土圧を推定した。また、解析コスト低減のため、簡易モデルを新たに想定し、各モデルの境界条件を変化させた場合の全体詳細モデルに対する応力度の検証を実施した。その結果、簡易モデルでの解析により、十分な事前検証および、より合理的な設計に活用できる見通しが得られた。

本報告は、土圧逆解析の手法、算定された実土圧の評価、各種解析モデルおよび境界条件について考察を行い、今後のシールド機設計の有用データとして提示を行うものである。

* 正会員 東京都地下鉄建設（株）計画部計画課

** 正会員 （株）熊谷組 技術開発本部シールド技術部

*** 正会員 三菱重工業（株）神戸造船所建設機械部

**** 三菱重工業（株）高砂研究所建機研究推進室

2. ひずみ計測による実土圧の推定

2・1 ひずみ計測

シールド機に作用する土圧を把握することは、施工管理面、また、シールド機の設計に関し有用である。通常、シールド機に作用する土圧は、シールド機各所の土圧計で計測し、施工管理のデータの一つとして計測し活用している。しかし土圧計による計測方法では、土圧が機械系に与える全体的な影響を把握できない、シールド機の方向制御の影響を強く受ける、などの事柄からシールド機設計への応用は不向きである。

そこで、シールド機に実際どのように土圧が作用したのかを把握するため、シールド機にひずみ計を取り付け、実際に発生した応力度からの土圧の逆解析を試みた。この方法は、局部的に土圧が作用しても、シールド機全体としては局部土圧の影響を大きく受けず、シールド機全体として土圧に抵抗するため、作用土圧を巨視的に捉えることができ、設計土圧と実土圧とを同水準で比較できる手法といえる。

計測は都営地下鉄12号線練馬第2工区の泥土圧シールド工法による現場で実施した。工事概要は、シールド掘削外径8.66m、掘削総延長617m(半径165mの曲線区間が2箇所)、土被り11~14m、主として洪積砂礫層を掘進する。図-1に当工区の平面・縦断線形と土質の概要を示す。計測に用いるひずみ計は測定長10cmでシールド機に装着後、保護カバーを設置する。総数は52点で、バルクヘッド部に12点、リングガーダ前部に12点、同後部に16点、テールプレート部に12点設置されている。図-2にひずみ計設置場所を、図-3にセグメント組立時の直線区間の平均値を示す。

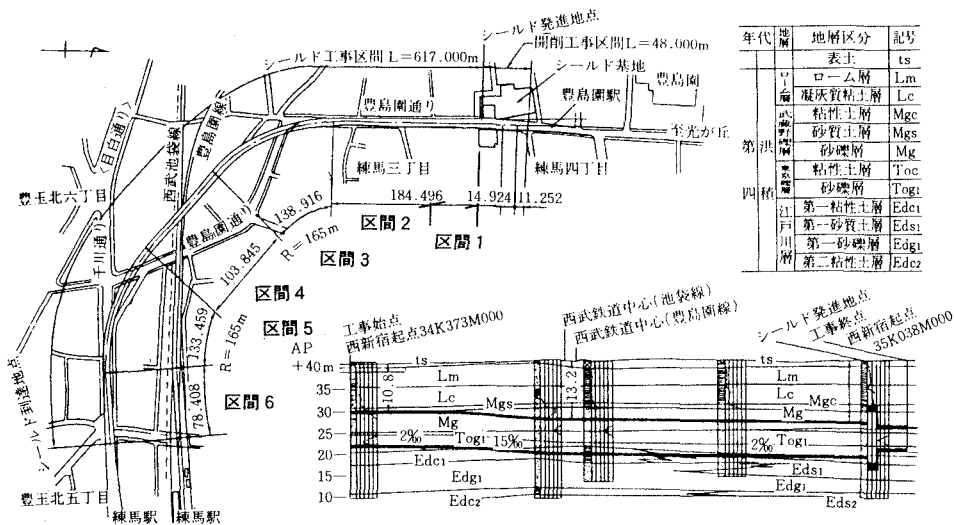


図-1 都営12号線練馬第2工区の平面・縦断線形と土質の概要

2・2 有限要素法を用いた実土圧の逆解析

シールド全体を忠実にモデル化し、モデル規模は全体で節点数、要素数共に約10000個である。解析プログラムはMSC/NASTRANである。モデル形状は3章の図-7で詳しく示す。計算の効率化を図るため、スーパーエレメントモデルを用いモデル全体の節点数を1/4に低減した。スーパーエレメントモデルとは、シールドを円周方向に分割した場合、円周方向にほぼ等しい構造の繰り返しになっていることを利用し、分割した一つの基本部材についてモデル化を行い、その部材を円周方向に連続的に連結して全体モデルとする方法である。円周方向に連結する部材の剛性・質量マトリクスはそのままの形で継承するので、演算は基本部材についてのみ実行され、計算効率が向上する。

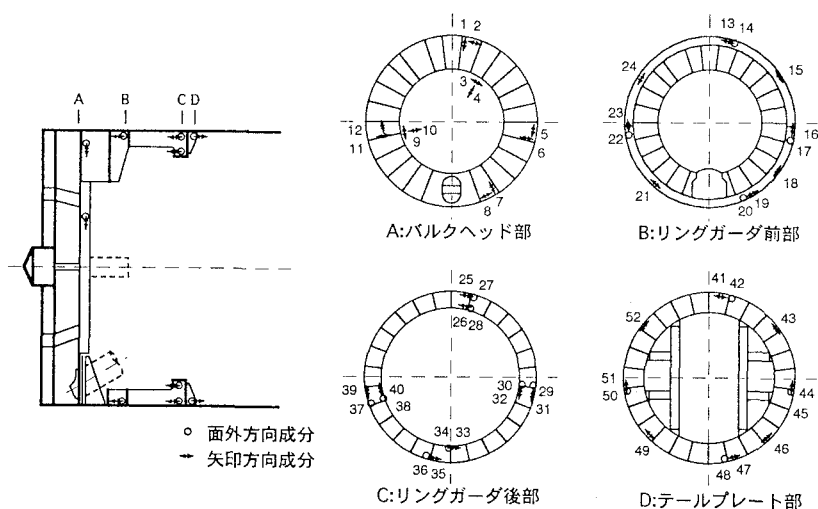


図-2 ひずみ計設置場所

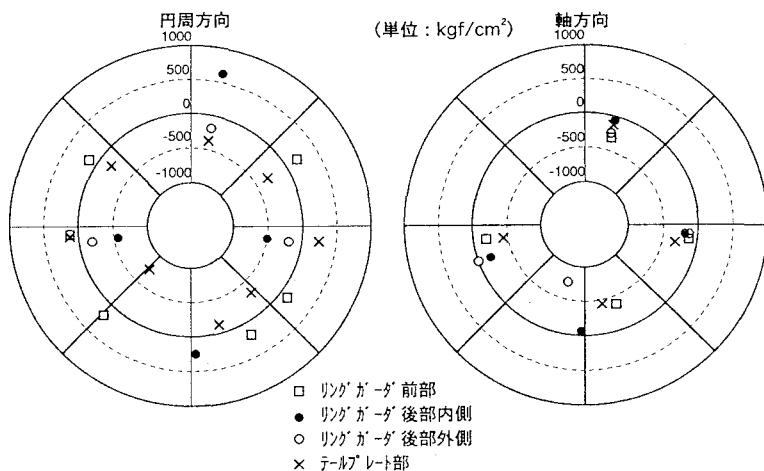


図-3 計測応力値（組立時：直線区間の平均値）

シールド機に作用する土圧の考え方は、設計時に規定されている土圧要素及び分布を使用する。但し、地盤反力による荷重は側方土圧と同じ方向となり、逆解析過程では分離しにくいと考えられるため、地盤反力を含めて評価を行う。シールド機に作用する土圧を $P1$ 、 $P2$ 、 QR 、 QL とすると、計測点 A 、 B 、 C ・・・ N での応力値 σA 、 σB 、 σC ・・・ σN は(1)式で表すことができる。ここに、 $\sigma a, P1$ 、 $\sigma a, P2$ ・・・ $\sigma n, QR$ 、 $\sigma n, QL$ は、単位荷重を作用させた場合に発生する各点での応力で、FEM計算で求めることができる。解析方法は、シールドを忠実に三次元モデル化し、有限要素法によりひずみ計を取り付けた点で、単位荷重を作用させた場合に発生する応力を計算した。実土圧、 $P1$ 、 $P2$ 、 QR 、 QL は、計測データ N より少ないため、(3)式以降の最小自乗法により解くことが可能である。

$$\begin{Bmatrix} \sigma A \\ \sigma B \\ \sigma C \\ \vdots \\ \sigma N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma a, P1 & \sigma a, P2 & \sigma a, QR & \sigma a, QL \\ \sigma b, P1 & \sigma b, P2 & \sigma b, QR & \sigma b, QL \\ \sigma c, P1 & \sigma c, P2 & \sigma c, QR & \sigma c, QL \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma n, P1 & \sigma n, P2 & \sigma n, QR & \sigma n, QL \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} P1 \\ P2 \\ QR \\ QL \end{Bmatrix} \quad \text{--- (1)}$$

$$[H] = \begin{Bmatrix} \sigma a, P1 & \sigma a, P2 & \sigma a, QR & \sigma a, QL \\ \sigma b, P1 & \sigma b, P2 & \sigma b, QR & \sigma b, QL \\ \sigma c, P1 & \sigma c, P2 & \sigma c, QR & \sigma c, QL \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma n, P1 & \sigma n, P2 & \sigma n, QR & \sigma n, QL \end{Bmatrix} \quad \text{---- (2)}$$

$$\{\sigma\} = [H] \{P\} \quad \text{----- (3)}$$

$$\{\sigma\} = \{\sigma A, \sigma B, \dots, \sigma N\}^T \quad \text{----- (4)}$$

$$\{P\} = \{P1, P2, QR, QL\}^T \quad \text{----- (5)}$$

最小自乗法を利用して、

$$S^2 = \|\sigma - HP\|^2 = (\sigma - HP)(\sigma - HP)^T \quad \text{--- (6)}$$

2・3 実土圧の推定

全施工延長を直線区間と曲線区間に6区間に分割し、セグメント組立中（以後組立中と称する）と掘進中に分けて逆解析を実施し推定実土圧を求めた。この推定実土圧は分割した区間内の各リング毎に計測されているシールド機のひずみ値を平均してその区間の代表値とし、この値を逆解析して求めたものである。シールド機には土水圧双方が作用しているため、逆解析結果も水圧の影響を含んでいる。推定実土圧と従来からの設計に用いられている全土圧、およびTerzaghiの式によるゆるみ土圧の値を比較するため、土質調査の結果からこれらの値を求めた。各区間で土質調査が実施されていればその値を使用するが、実施されていない場合はその区間に最も近い位置の結果を採用する。表-1に推定実土圧（組立中、掘進中）、全土被りによる設計土圧、ゆるみ土圧の値を示す。ここで設計土圧は実機設計時に採用した土圧で、最も安全側を考え、区間1の全土圧としている。実土圧のQR、QLの値は図-4に示すように、坑口側からみて右側、左側の側方土圧の上部と下部の平均値である。全土圧、ゆるみ土圧ではP1を求めた後、シールド機自重による反力を加えP2を求める。また直線区間と曲線区間での差を明確にするため平均値を求めてある。

表-1 推定実土圧とゆるみ土圧

単位 tf/m²

			初期掘進	直 線 区 間				曲 線 区 間		
	区 間 名		1	2	4	6	平 均	3	5	平 均
逆 解 析 に よ り 推 定 さ れ た 集 庄	セ グ メ ン ト 組 立 中	P1	13.84	18.98	14.76	13.41	14.24	9.51	14.23	11.85
		P2	15.46	17.43	15.28	12.55	14.23	11.97	14.50	13.22
		QR	7.76	10.36	9.34	7.21	8.52	4.67	6.54	5.60
		QL	8.98	12.53	9.32	7.43	8.59	6.69	12.00	9.32
	掘 進 中	P1	15.52	21.20	18.31	15.00	17.04	10.33	15.00	12.64
		P2	15.83	17.84	15.37	12.31	14.19	11.33	14.51	12.90
		QR	8.41	11.30	11.07	7.78	9.81	4.41	6.45	5.42
		QL	10.21	13.95	10.63	8.03	9.63	7.20	12.93	10.04
ゆ る み 土 圧	P1	13.01	12.82	12.24	9.51	* 28.56	12.30	12.24	* 28.56	
	P2	22.36	22.17	21.59	18.86	* 37.90	21.65	21.59	* 37.90	
	QRL	21.93	21.86	21.63	20.53	* 23.86	21.65	21.63	* 23.86	

* : 全土被りによる設計土圧

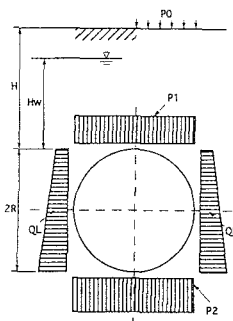


図-4 坑口からみた
シールドに作用する土圧

図-5に直線および曲線区間での組立時、掘進時の推定実土圧の平均値と設計土圧を、P1、P2、QR、QLの4成分表示で示す。また図-6に設計土圧に対する推定実土圧の比を示す。組立時の推定実土圧と設計土圧の比は直線区間で0.30～0.67、曲線区間で0.20～0.50、掘進時ではそれぞれ0.28～0.73、0.19～0.54である。

2・4 推定実土圧からの合理的な設計土圧の設定

シールド機に作用する土圧の傾向は図-5、図-6から把握することができる。組立時には全土被り圧の値（軸目盛りは右側）、掘進時にはゆるみ土圧の計算値を併記してある。まずシールドトンネル縦断線形、すなわち土被りの変化と推定実土圧の変化がある程度連動していることが読み取れる。直線部の区間2、4、6に着目すると、後半の区間になるほど推定実土圧／設計土圧の比は減少している。

次に曲線施工の影響は区間4～6で顕著に現れている。QRとQLを比較すると、区間4、6では組立時、掘進時とも値は殆ど一致しているのに対し、区間5ではQLがQRの約2倍の値となっている。実施工では左曲線なので、シールド機内側に抵抗土圧が発生すると考えられ、現実の傾向と一致している。

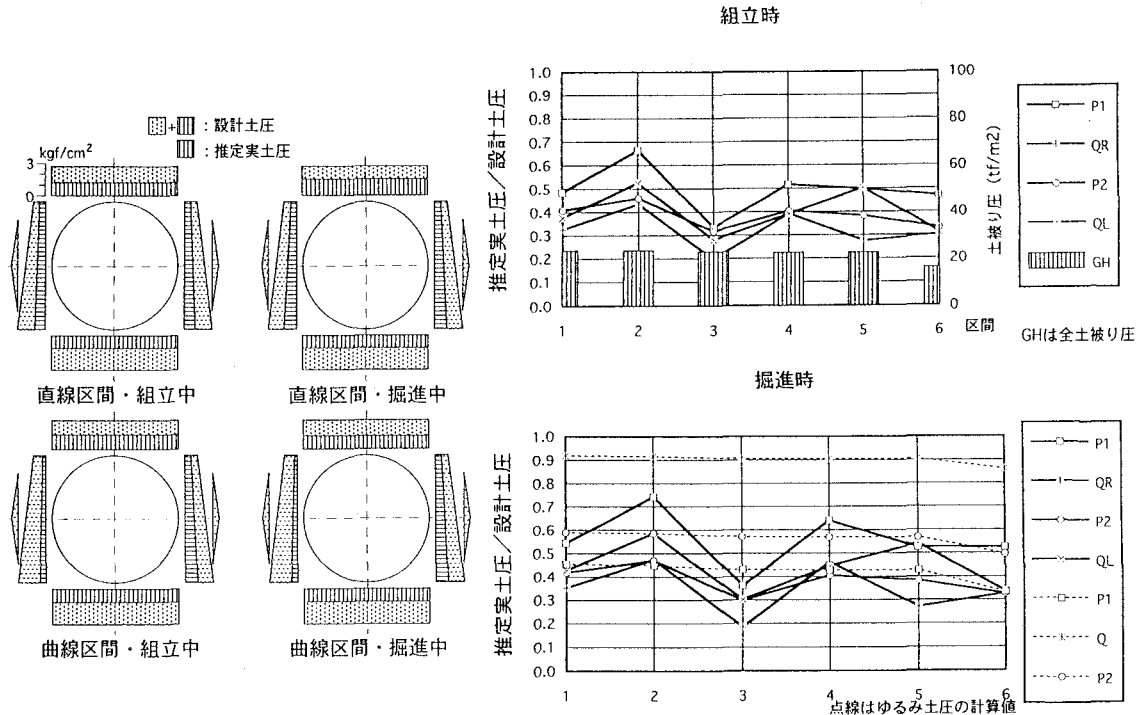


図-5 土圧4成分表示

図-6 推定実土圧と設計土圧の比

土圧の評価について考えるため、表-2に区間別土圧変化を示す。これは直線部（区間2、4、6）の土圧をゆるみ土圧（計算値）、組立中の実土圧、掘進中の実土圧の3種類について、鉛直上方向土圧P1に着目し、ゆるみ土圧の区間2の値を基準として比率を表示したものである。実土圧についてはおののの区間2の値を基準とした比率も表示する。

今回行った手法は、シールド機自体を一つの大きなセンサとして位置づけ、全体傾向をつかむことに主眼を置いている。そのためシールド機円周方向に対し不規則性を有する複雑な形状の構造部材（ジャッキ取付穴、スクリーコンベア付近

表-2 区間別土圧変化

区 間	2	4	6
ゆるみ土圧	1.00	0.95	0.74
組立中実土圧 対区間2比	1.00	0.78	0.71
掘進中実土圧 対区間2比	1.00	0.87	0.71

の補強部材、マンロックのハッチなど）を忠実に三次元モデル化した。このことにより実際のひずみ計測点での計測値と解析結果の比較が意味のあるものとなる。その結果、逆解析により得られた推定実土圧の値は表－２に示す土被りの変化によるゆるみ土圧の変化に相応した変化傾向を示しており、曲線区間の有無に対し、定性的ではあるが土圧変化の挙動が一致している傾向があること、実土圧はゆるみ土圧に比較的近く、全土被り圧よりやや小さい値を示すことが把握できた。この問題は今回の一例のみで結論づけることは困難であり、今後の計測例の増加、特に土被り、土質、曲線曲率の異なる施工での計測が待たれるが、当該逆解析は、今後データを蓄積することにより、シールド機の構造設計や線形制御、掘進時の安全施工などにも活用できる有用な資料であると考えられる。

3. シールド機解析手法

3・1 解析手法の現状

現在、シールド機に発生する応力度、変位量の確認は、強度的に最も弱い部分であるテール部に主眼をおき、一端がガーダ部で固定された有限円筒にモデル化し三次元FEM解析を、剛性の高いリングガーダ部は無限円筒として二次元解析を行うのが一般的である。前述のテール部三次元FEM解析では、剛性の高いリングガーダ部を固定端として各節点の変位、回転を全方向固定しているため、固定部での曲げ強度に関しては解析値が大きく得られ、安全側の設計となっている。一方変位量は、前記境界条件の影響により過少評価することとなる。この解析手法は結果の特性が理解されている、多くの実績がある、など利点も有するが、より高度・複雑なシールド機設計の要求から、合理的かつ容易な方法を確立すべき時期に到来している。

そこで、実際のシールド機の挙動を最もよく再現できると考えられる全体詳細モデルによる解析結果を真値とする前提で、各種モデル構造・拘束条件を設定し、効率的な手法について検討する。図－７に各モデルの構造の概要を、図－８に各モデルの拘束条件を示す。ここで全周固定とは x, y, z 、各軸方向変位、及び各軸方向回転変位をすべて拘束する条件、荷重バランスとは鉛直・水平各方向での土圧、自重をバランスさせ、基本的には不均衡力の発生をゼロとして計算を行う条件である。図－９に各モデルによる解析結果を示す。横軸の角度は、 -90° が下部、 0° が側部、 90° が上部である。ここで設計計算の結果は自由端が後述する(4)のテールモデル、ガーダ部が同(5)のリングモデルによるものである。

3・2 解析モデル〔モデルの節点数、CPU 時間（秒）、CPU 時間比（全体詳細モデルを1.0 とする）〕

(1) 全体詳細モデル：節点数 9705、CPU 時間（秒）586、CPU 時間比 1.0

実際のシールド機を三次元で忠実に再現したモデルであり、実土圧の逆解析時にも使用している。応力度・変位双方の解析が可能で、実ひずみ計測値と同一ひずみ方向成分の応力度が得られるため、これらの値から逆解析が可能となる。拘束条件は荷重バランスを用い、固定端の応力度が高くなる現象を回避している。

(2) 全体簡易モデル：節点数 2063、CPU 時間（秒）256、CPU 時間比 0.44

全体詳細モデルと同様にリングガーダを含むモデルであるが、開口部や複雑な形状のリップなどは含まず簡略化し、節点・要素数を減らしている。全体詳細モデルと同様に拘束条件は荷重バランスを用いている。

(3) 部分簡易モデル：節点数 1403、CPU 時間（秒）59、CPU 時間比 0.10

全体簡易モデルよりもさらにデータ数を少なくしている。剛性の高いガーダ部外側で拘束すると過大な曲げ応力度が発生する場合がある。このモデルはこのことを避けるため、リングガーダとしてのリングを形成するフランジ部材のうち、坑口側の部材を含んでいる。拘束条件はモデル前端部の全周固定及び荷重バランスの双方を用いる。

(4) テールモデル：節点数 854、CPU 時間（秒）27、CPU 時間比 0.05

シールドテール部を取り出し、有限円筒体の一端の全ての節点の変位、回転を拘束したモデルである。従来、実際のシールド機の設計に採用されているものである。拘束条件はリングガーダ部外側で全周固定としているため、固定端での曲げ応力度は大きく、一方で変位は小さく算出される。

(5) リングモデル：

シールド機のリングガーダ部を等価な曲げ剛性を持つ梁に置換し、二次元リングとして解析する方法である。等価剛性モデルのためガーダ部の形状は評価できない。また縦断方向の応力度と変位は扱えない。従来、リングガーダ部の解析に多く用いられている。

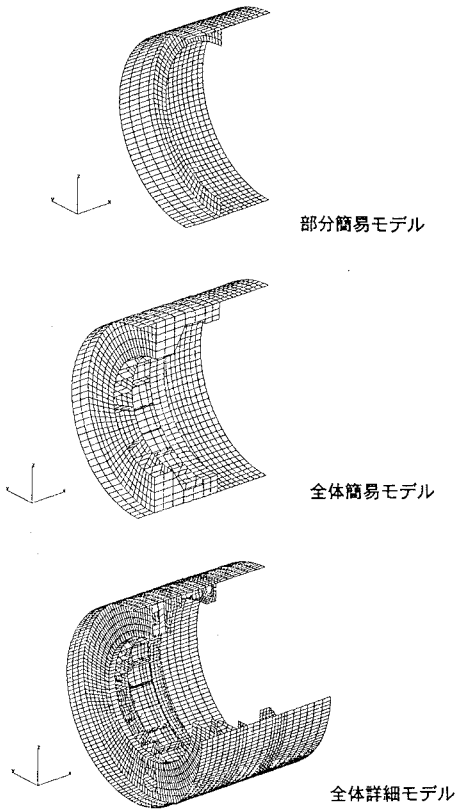


図-7 モデルの構造

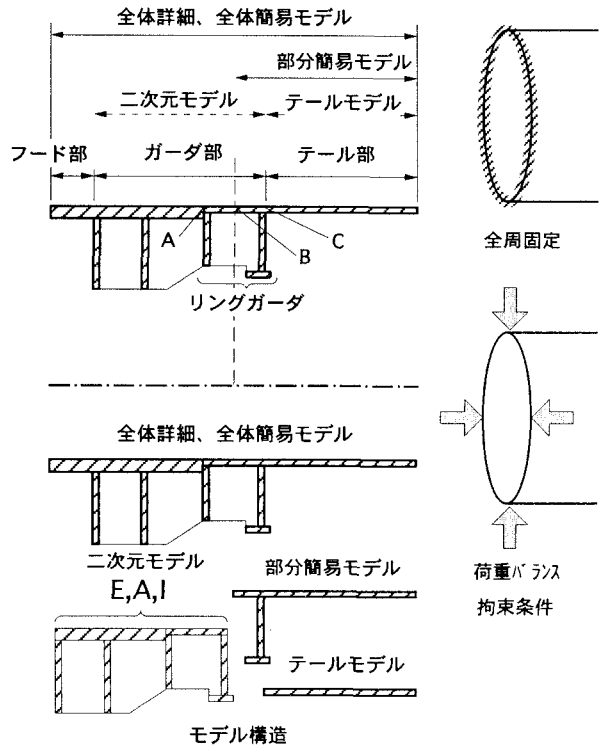


図-8 モデルの拘束条件

3・3 各種モデルによる応力度評価（+：引張、－：圧縮）

全体簡易モデルと部分簡易モデルを設定し、全体詳細モデルおよび従来からの設計計算との応力度の比較を行った。本来、変位についても検討を加える必要があるが、実機のテール端部変位はテール部にセグメントが組まれているため計測が困難であり、実機レベルでの比較は実施していない。着目したシールド機の部位は、実機で実施した設計計算値と対比させるため、テールプレート部自由端円周方向とリングガーダ部軸方向のおおの内外両面とした。

テールプレート部自由端では全体詳細モデルの結果に対し、全ての簡易モデルでよい一致を示している。また設計計算値も大きな差は生じていない。これは自由端が拘束地点から離れた位置にあり、拘束の影響を受けにくいためと考えられる。自由端外面での全体簡易モデル、部分簡易モデル双方とも解析値は $-550 \sim -900 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲に分布している。また設計計算値も $-600 \sim -950 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲の分布である。また自由端内面でも解析値は $-530 \sim -850 \text{ kgf/cm}^2$ 、設計計算値は $-580 \sim -920 \text{ kgf/cm}^2$ の分布であり、分布の傾向は外面と類似している。リングガーダ部では各解析手法による応力度に顕著な差が見られる。応力度の分布状態は外面を例にとると、一連の簡易モデルで $-90 \sim 150 \text{ kgf/cm}^2$ 、全体詳細モデルで $-90 \sim 40 \text{ kgf/cm}^2$ である

のに対し、設計計算値は $-180 \sim 490 \text{ kgf/cm}^2$ となっている。これは設計計算の拘束条件がガーダ部全周固定となっていることに起因するものと考えられるが、応力度の評価としては安全側の値が得られている。全体詳細モデルの結果は一連の簡易モデルの結果の領域中に殆どが収まっているため、簡易モデルの結果も安全側の値と考えることができる。

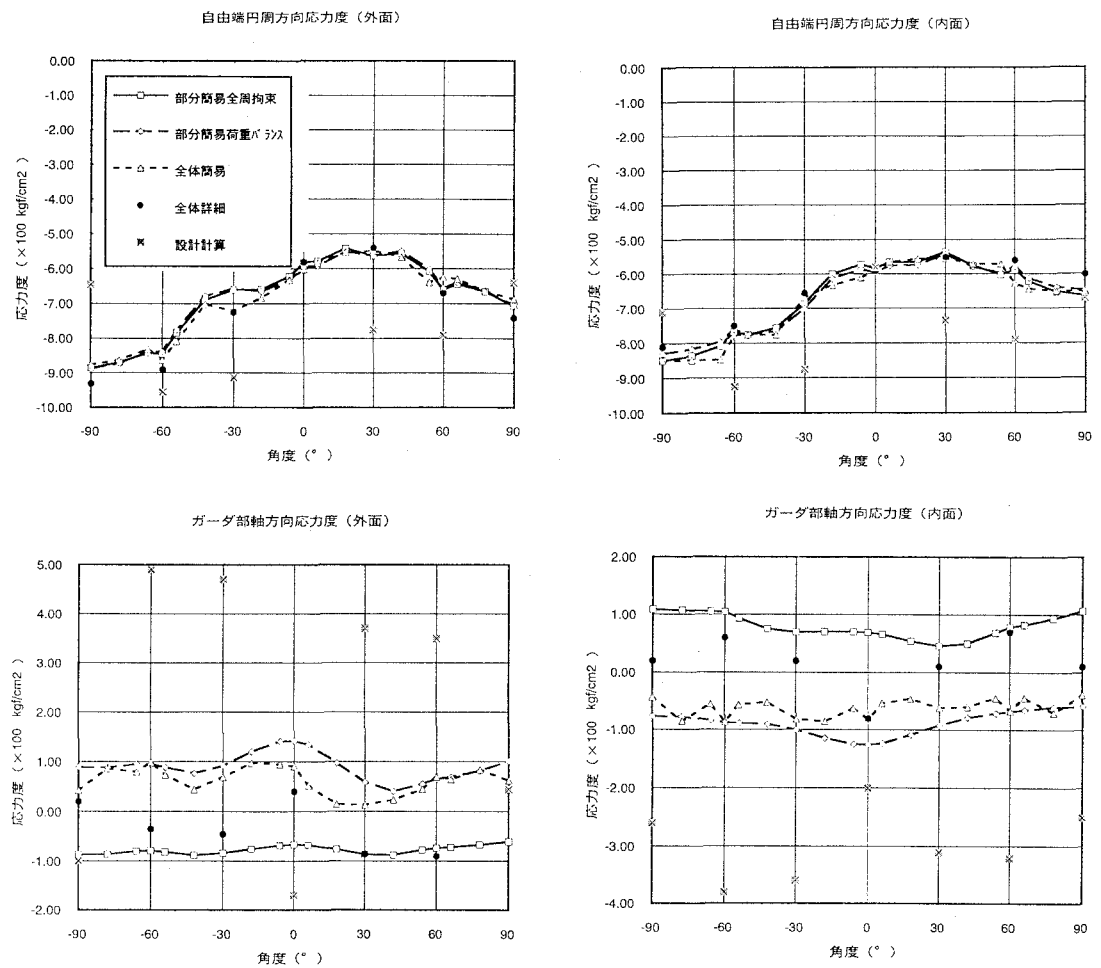


図-9 各解析手法の比較 (+ : 引張、- : 圧縮)

4. あとがき

今回の研究は、シールド機にひずみ計を取り付け、施工中にひずみの連続計測を行い、シールド機に発生する応力、逆解析による実土圧の推定を行い、更には数値解析モデルについてまで検討を加え、シールド機の設計時に必要な項目について総合的にまとめたものである。実土圧は全土被り圧に比較しゆるみ土圧に近いこと、部分簡易モデルを使用し、全周固定及び荷重バランスの拘束条件を採用することにより、全体詳細モデルの解析結果をある程度の幅をもってであるが、再現できることがわかった。今後もより合理的、かつ安全なシールド機的设计を目指し、現場計測・数値解析を並行して実施していく必要があると考える。