

シールド掘進機の土中での運動特性の推定

清水 賀之¹・山里久仁彦²・西田昭二³

¹正会員 工博 日立造船(株) 技術研究所 機械技術研究センター (〒551 大阪市大正区船町2-2-11)

²日立造船(株) 情報システム室 (〒550 大阪市西区京町堀1-4-16)

³日立造船(株) 建機・物流事業本部 建機設計部 (〒554 大阪市此花区桜島1-3-40)

シールド掘進機の土中での姿勢(角度)変化過程を模擬した数値解析を行い、著者らが以前作成した運動モデルの角度変化運動をあらわす係数について、模型実験ならびに実機運転データ分析結果との比較を行った。その結果、著者らが以前誘導した簡易推定式より精度良く機械の角度変化運動を推定し得ることがわかった。

Key Words: tunnel, construction, machine, construction machinery, shield tunneling machine, moving characteristics, numerical analysis, finite element method, modulus of deformation

1. 緒論

著者らは、以前、シールド工法における機械(シールド)の位置・姿勢制御技術の高度化を目的とした一連の研究を実施した^{1)~3)}。その中で、シールドの土中での運動特性を把握するための模型実験を行い、その運動を角度変化運動と位置変化運動にわけ、それぞれ運動モデルを作成した¹⁾。さらに実機データを分析することにより、作成した運動モデルの検証を行った²⁾。さらにまた、運動モデル中の係数のうち角度変化運動をあらわす係数の簡易推定式を誘導し、模型実験データならびに実機データ分析結果により、その妥当性を評価した³⁾。その結果、シールドの角度変化運動を推定する場合には、掘進による外周部の地山のゆるみの影響を考慮した変形係数を使用する必要があること、さらには、簡易推定式を用いて実際の機械の運動モデルの係数を推定する場合には、上記した掘進による外周部のゆるみの他に、簡易推定式誘導時の仮定や近似により、おおまかではあるが推定式から求められる値の約4倍程度で見積もるのが妥当であることなどが明らかになった。そこで著者らは、簡易推定式にある仮定や近似を取り除き、角度変化運動をあらわす運動モデルの係数を精度良く推定することを目的に、土中でのシールドの運動を模擬した数値解析を行った。

シールドの掘進過程を数値解析した従来の研究の中で、赤木⁴⁾は、シールドの掘進と地盤の取り込み状況をモデル化した3次元弾塑性有限要素法解析を行い、地盤の変位およびシールドの姿勢変化状況について、解析結果が実際の工事の計測結果と近い

値を示すことを述べている。

本解析手法はシールドの角度変化過程と前進過程とを分け、2次元弾性有限要素法解析と地盤の応力状態の移動を繰り返すことでシールドの運動を模擬した。得られた解析結果を模型実験ならびに実機データ分析結果、さらには簡易推定式と比較することにより、本解析手法の評価を行った。本ノートではこれらの検討結果について述べる。

2. 土中での運動メカニズムと簡易推定式^{1)~3)}

3章以降に関連するシールドの土中での運動モデルならびに運動モデル中の係数の簡易推定式を、シールドの運動メカニズムを含めて簡単に説明する。

図-1は、シールドの位置と角度の変化運動のメカニズムを概念的に説明したものである³⁾。シールドの位置と角度の変化運動は、以下の過程であらわすことができる。

- ①シールドが施工計画線に対し θ_0 の角度である状態
- ②シールド外周部に発生する土の応力が、推進用油圧シリンダと掘削面盤で発生する旋回モーメントと釣り合う θ_{11} まで角度変化する過程
- ③この角度で距離 dz 分掘進する過程(位置変化運動)
- ④シールド外周前面が、地盤と接触しているような初期状態となり、外周部の土の応力が、推進用油圧シリンダと掘削面盤で発生する旋

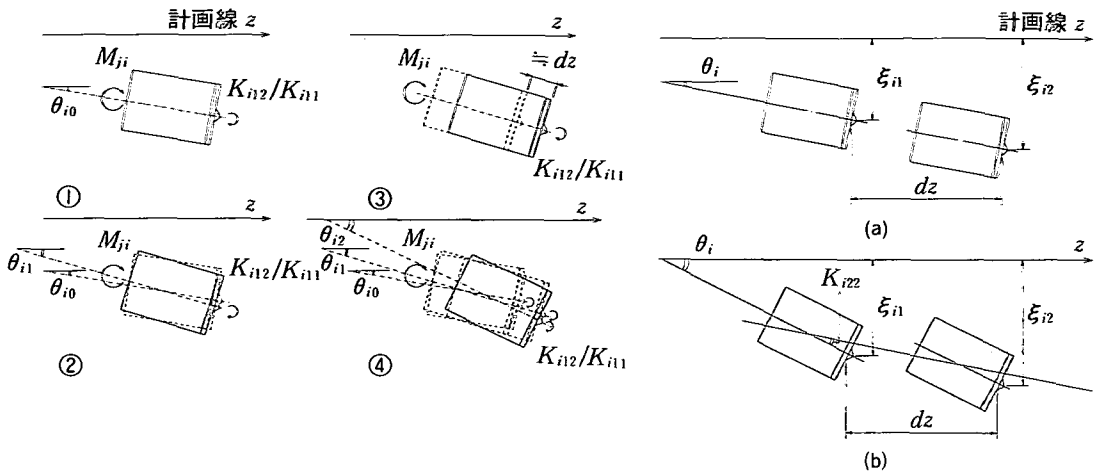


図-1 位置と角度変化運動のメカニズム 文献3) より引用

回モーメントに釣り合わなくなり、 θ_{i2} まで更に角度変化する過程

D: シールドの直径 [m]
 k_i : 地盤反力係数 [N/m²]

なお③の位置変化運動は、シールドが軸心の方向に進む場合(a)と、ある角度をもって横すべりする場合(b)が考えられる。

模型実験および実機データ分析から、土中でのシールドの位置と角度の変化特性をあらわす運動モデルを式(1)および(2)であらわした^{1),2)}。

$$\frac{d\xi_{i1}}{dz} = K_{i21}\theta_i + K_{i22} \quad (1)$$

$$\frac{d\theta_i}{dz} = K_{i11}M_{ji} + K_{i12} \quad (2)$$

ξ_{i1} : 施工計画線からの位置 [m]
 θ_i : 施工計画線からの角度 [-]
 M_{ji} : 推進用油圧シリンダによる旋回モーメント [Nm]
 z : 掘進距離 [m]
 K_{i11} , K_{i12} , K_{i21} , K_{i22} : 運動モデルの係数
 添字 $i=y, p$ y : 水平面内
 p : 鉛直面内

式(2)中のシールドの角度変化の傾向をあらわす運動モデルの係数 K_{i11} ($i=y, p$ [1/(Nm²)])の簡易推定式は、式(3)で与えられる³⁾。

$$K_{i11} = \frac{12}{k_i L^4 D} \quad [1/(Nm^2)] \quad (3)$$

L: シールドの機長 [m]

3. 数値解析

(1) 解析方法

図-2に、解析方法の概念を示す。解析は、推進用油圧シリンダにより旋回モーメントを発生させ、直線あるいは緩曲線を位置・姿勢制御していく場合を想定し、シールドの角度変化と前進の過程を以下に示すように模擬した。

- ①シールド要素に旋回モーメントを発生させ、シールドおよび地盤要素の初期応力状態を作る。
- ②シールドの進行を模擬するために、シールド要素を前進させる代わりに地盤要素を1要素分後ろにずらし、シールド外周部の地盤の応力状態を移動させる。
- ③移動させた応力状態を次の解析での初期応力状態とし、シールド要素に旋回モーメントを発生させる。
- ④シールドの角度変化運動が定常状態となるまで②③を繰り返す(本解析では2機長)。

赤木らの解析では⁴⁾、シールドの前面に掘削要素を配置し、掘削要素の変形と掘削要素と地盤要素の再分割によりシールドが掘削地山を取り込みながら掘進する状況をモデル化している。本解析では、運転状態、すなわちシールドが前進しながら角度変

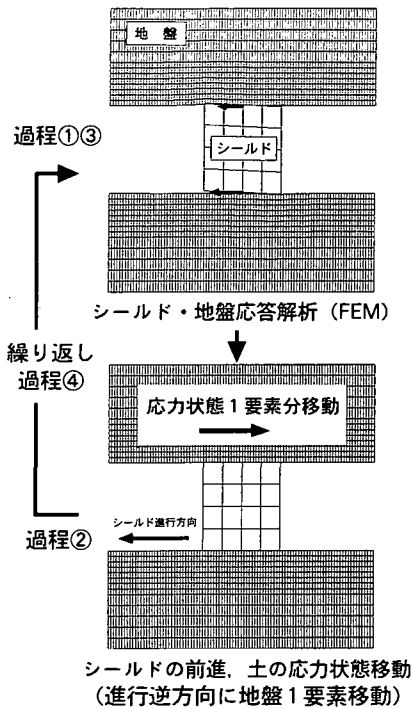


図-2 解析方法

化する過程を検討するために、シールドの前進を地盤要素を後ろへずらすことで置き換えた。このようにすることにより、シールドの角度変化量を決定するシールドと周辺地盤との力の不釣り合い状態(図-1 過程④)を作ることができる。また、個々の工事現場に対応したシールドの掘進過程を厳密に推定する場合には、シールドの運動変化に起因する全ての力、すなわち推進用油圧シリンダによる推力(旋回モーメント)だけでなく、シールドおよび地盤の自重、地盤の土圧分布や間隙水圧等も考慮する必要がある。しかしながら、これらの項(式(2)の係数 K_{11} に相当)が掘進中に大きく変化せず、その結果生ずるシールドの角度変化がほぼ一定となると考えられること、ならびに本研究が、角度変化過程を表す運動モデル(式(2))の係数 K_{11} の推定精度の評価を行うことが主目的であることから、自重、土圧分布等の推進用油圧シリンダによる推力以外でシールドに旋回モーメントを作用させる外力を考慮していない。

図-3および表-1に、解析モデルならびに解析条件を示す。解析モデルは、奥行き方向にシールドの直径の厚さを持った2次元モデルである。単円形シールド模型実験¹⁾ならびに実機データ分析(文献3)表-2)に対応させ、シールドならびに地盤をモデル化し、また条件を設定した。地盤要素は、模型実験に対応する計算の場合には、実験装置(土砂タンク

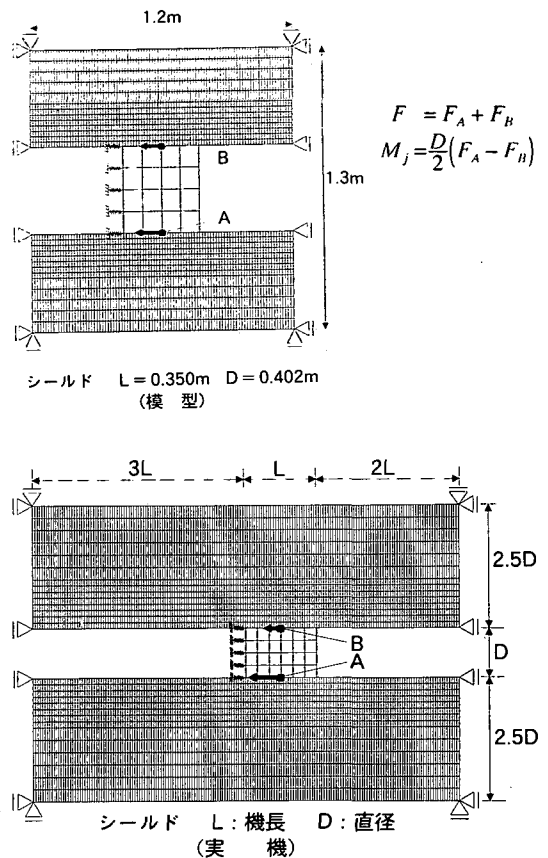


図-3 解析モデル

の大きさ)に対応させ、また実機に対応する計算の場合には、シールド要素の角度変化による地盤要素応力の局所的な変化が小さくなる範囲まで大きくとり、前方に $3L$ 、後方に $2L$ 、左右方向にそれぞれ $2.5D$ とした。それぞれの地盤要素の外周部各節点の変位を拘束した。

従来、シールドの旋回性能の検討では、地盤反力係数を用いた短期荷重による地盤の弾性的な応答を主に着目して検討が行われている。そこで本研究においても、地盤は弾性モデルとした。

地盤の変形係数 E_0 は、各種試験方法により得られる値が異なる。地盤反力係数 k_f を変形係数より求める場合には、各種試験で得られる変形係数を補正し、補正係数を含めた変形係数 αE_0 が用いられる²⁾。また、 N 値と各種試験により得られる変形係数の関係は式(4)³⁾で与えられる。そこで、計算に用いる変形係数 E_0 は、各種試験で得られる変形係数に対応させ、補正係数 α を1ないし4として、 N 値との関係から求めた。ただし模型実験に対応する計算では、掘削による模型外周部地盤のゆるみを考慮した解析を行うために、文献3)図-8に示す実験により得

表-1 解析条件

(模型)

	弾性・変形係数 kgf/cm ²	ポアソン比
シールド	2.1×10 ⁶	0.3
地盤	29.3~117	0.3

(実機)

No.	変形係数 kgf/cm ²	No.	変形係数 kgf/cm ²
1	52.5~210	7	14~56
2	266~1064	8	210~840
3	52.5~210	9	350~1400
4	17.5~70	10	280~1120
6	42~168	11	350~1400

No.は、文献3)表-2のNo.に対応
ポアソン比 0.3

シールドの弾性係数およびポアソン比は模型と同じ

	推力 F kN	旋回モーメント Mj kN.m
模型	3.6	0.1
実機	0.2~ 1.98×10 ³	0.1~ 2.0×10 ³

られた模型外周部の地盤反力係数を用いた。したがって変形係数 E_0 [kgf/cm²]は、この得られた地盤反力係数 k_i [kgf/cm³]から式(5)³⁾を用いて逆算した。

$$\alpha E_0 = 28N \quad [\text{kgf/cm}^2] \quad (4)$$

$$k_i = \frac{\alpha E_0}{30} \left(\frac{\sqrt{A_i}}{30} \right)^{-\frac{3}{4}} \quad [\text{kgf/cm}^3] \quad (5)$$

α : 補正係数 (1~4) [-]

E_0 : 変形係数 [kgf/cm²]

A_i : 地盤反力が発生する外周部投影面積 [cm²]

また、シールドが旋回モーメントにより角度変化する場合、地盤に発生する抵抗モーメントは、シールド外周部のみでなくシールド前面にも発生する。しかしながら、シールド前面は面盤による掘削が行われており、発生する抵抗モーメントは小さいと考えられる。そこで、シールド前方には地盤要素を配置せず、代わりにバネ定数の小さい圧縮のみ働くバ

ネを配置した。その結果、前面ではシールドジャッキによる推力のみを、また旋回モーメントは、ほとんど外周部の地盤からの反力で受ける。なお解析では、シールドと地盤要素の間に接触要素を配置し摩擦の影響を考慮した。また、シールドの角度変化に、シールド後部の地盤は大きな影響を及ぼさないと考え、本解析では後方でのシールドとの境界となる部分の拘束をしていない。なお過程①③のシールド・地盤応答解析は、FEM汎用解析コードABAQUSを用いた。

(2) 解析結果ならびに考察

図-4は、模型実験に対応する計算結果で、進行方向に対し垂直方向の地盤の応力分布 (0 (移動なし) 1/4 1/2 1 1.5 2機長進行後) を示したものである。右回りの旋回モーメントを発生させているため、進行方向に対し右側 (旋回内側) 前部および左側 (旋回外側) 後部の地盤の応力が大きく変化している。旋回内側の応力分布は、進行開始時の地盤の応力状態が後方へ移動している。また、地盤の応力状態の移動とともに、さらにシールド前部の地盤に受働土圧に相当する圧縮応力が発生するため、定常状態 (1ないし2機長進行後) での地盤の応力分布は全体的に広く均一となっている。一方、旋回外側では、後部で発生する大きな応力変化状態がその移動とともにシールドと接触しない部分へ移動するため、その応力分布はあまり変わっていない。

図-5は、図-4と同じ条件でシールドの進行に伴う角度ならびに角度変化特性を表わす運動モデルの係数 K_{III} の変化を示したものである。移動距離が零の場合は、シールドの角度変化によって発生する応力が地盤に発生していないため角度変化は大きい。土の応力状態の移動が始まると、1回の計算過程でシールド周りの地盤の応力状態が移動し、推進用油圧シリンダによる旋回モーメントと釣り合わなくなり、釣り合い状態になるまで角度変化する。

図-6は、図-5の計算結果に対応する模型実験結果として、水平面内についての旋回モーメントと角度 (ヨーイング角) および模型外周部に作用する土圧の変化を示したものである。一定の旋回モーメントをかけた場合には、角度は掘進とともに旋回モーメントの方向にほぼ一定の割合で変化している。

表-2は、模型の角度変化が一定になったときの運動モデルの係数 K_{III} を、実験結果と比較したものである。なお、表中に式(3)に示す簡易推定式による推定値を合わせて示す。簡易推定式では、解析と同様に、文献3)図-8の実験で得られた模型外周部の地盤反力係数を用いた。

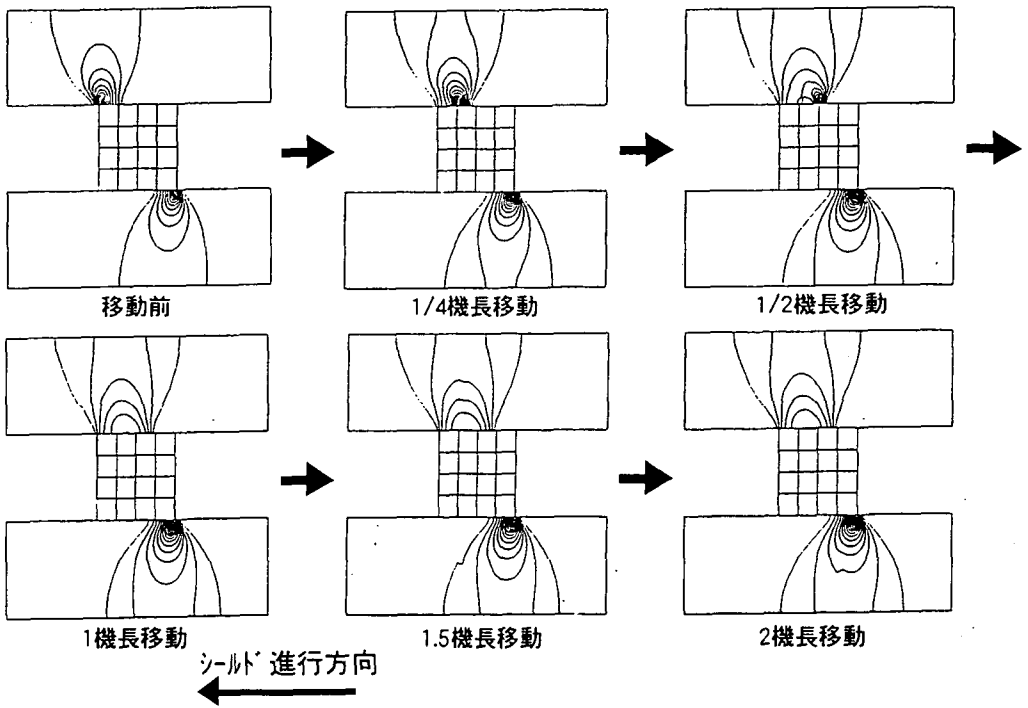


図-4 計算結果 (地盤の応力分布の変化)

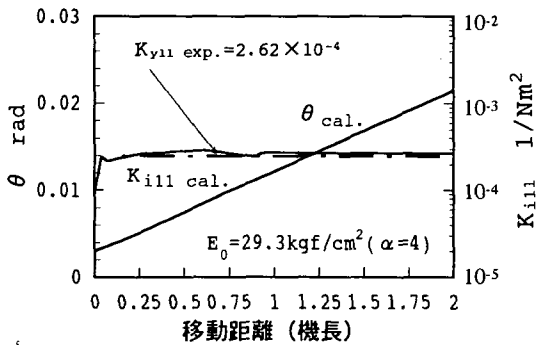


図-5 角度および運動モデルの変化

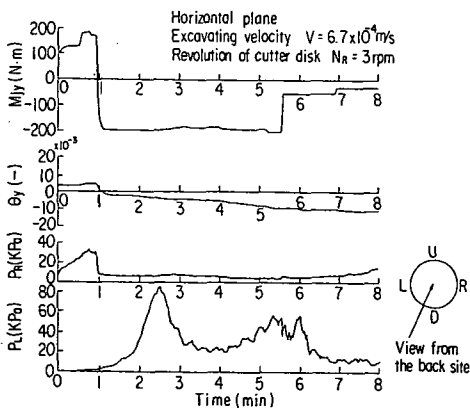


図-6 模型実験結果 文献1) より引用

表-2 K_{III} の計算値(実験結果, 簡易推定式との比較)

	実験, 分析結果	簡易推定式	計算値
模型実験	2.62×10^{-4} (H)	6.15×10^{-5}	0.668~
	2.86×10^{-4} (V)		2.67×10^{-4}

単位 $1/\text{Nm}^2$

H: 水平面内 V: 鉛直面内

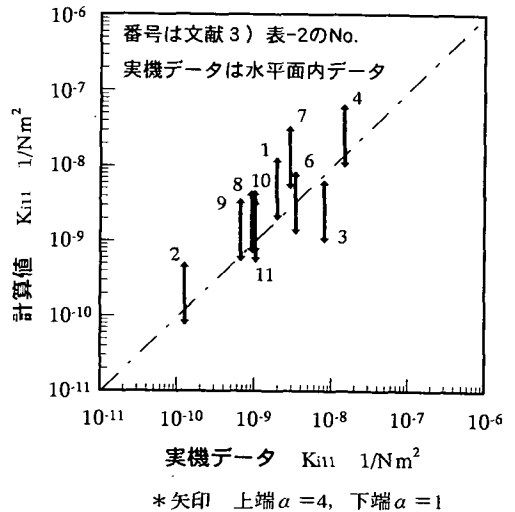


図-7 K_{III} の計算値と実機分析結果との比較

変形係数を実験から得られた模型外周部の地盤反力係数を用いた場合には、変形係数に範囲(補正係数 α が1~4)があるため計算結果に幅はあるが、計算値と実験結果はほぼ一致している。一方、式(3)の簡易推定式では、実験結果より小さい(角度変化しにくい)結果となる。これは、文献(3)において指摘したように、簡易推定式では、式の誘導において、シールドの図心を中心として旋回すると仮定し、またdz掘進時の角度変化の積分を1機長ごとに行っているなどの仮定や近似があるためと考えられる。

図-7は、実機に対応する計算で、シールドの角度変化が一定になったときの運動モデルの係数 K_{III} を、実機データ分析結果(水平面内データ)と比較したものである。なお実機データの線形は、直線および曲率半径が200mまでの緩曲線である。模型の場合と同様に、計算結果は分析結果とほぼ一致している。当初、シールド外周部の地山が掘削および前進によりゆるめられ、実際の変形係数が、N値から推定する値とくらべ小さい値になるため、N値から推定した変形係数を用いた計算結果は、実際より角度変化しにくい傾向になると考えられたが、N値から変形係数を求める段階で補正係数の取り得る範囲(α が1~4)の中にその影響はすべて含まれてしまう。計算値が実機分析結果と一致する補正係数 α の平均値は1.6となる。計算値と分析結果の違いの一つの理由として、模型実験で明らかになったように、N値などから事前に得られる地盤の変形係数と、実際にシールドが掘進しているときの外周部の地盤の変形係数の違いが考えられる。模型実験の場合のように掘進時のシールド外周部の変形係数がわかれば、本解析手法を用いて、シールドの角度変化特性を更に精度良く推定することが可能であると考えられる。

4. 結論

シールド掘進機の土中での運動を模擬した数値解析手法を提案し、模型実験結果ならびに実機データ

分析結果と比較し、その妥当性を評価した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 本解析手法は、式の誘導過程で仮定や近似のあった簡易推定式より精度良くシールドの角度変化運動を推定することが可能である。
- (2) 解析に使用する変形係数をN値から求める場合、N値と変形係数の関係(式(4))に補正係数として1ないし4の範囲で値を与えれば、本解析手法によりシールドの角度変化(運動モデルの係数 K_{III})を推定することが可能である。

本解析手法では、シールドとの相互作用により発生する地盤の応力状態を逐次移動させていく。したがって、シールドの姿勢を修正するために、余掘りにより積極的に外周部の地山をゆるめた時などのシールドの過渡的な角度変化特性の検討にも、本解析手法が適用可能であると考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、日立造船(株)情報システム室の関係各位に多くのご協力をいただいた。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 清水、鈴木：単円形シールド掘進機の運動特性に関する研究(模型実験および制御系の設計)、機械学会論文集C1編、Vol.58、No.550、pp.155-161、1992年。
- 2) 清水、古川、今井、鈴木：単円形シールド掘進機の運動特性に関する研究(第2報 実機データの解析および制御システムの実証)、機械学会論文集C1編、Vol.58、No.554、pp.121-128、1992年。
- 3) 清水、西田：シールド掘進機の土中での運動特性、土木学会論文集、No.535/III-34、pp.103-114、1996年。
- 4) 赤木、小宮：有限要素法によるシールド工事の施工過程を考慮した地盤挙動解析、土木学会論文集、No.481/III-25、pp.59-68、1993年。
- 5) (社)日本道路協会編、道路橋示方書・同解説、pp.200-203、(社)日本道路協会、1990年。

(1996.9.3 受付)

ESTIMATION OF SHIELD MOVEMENT WITH FEM

Yoshiyuki SHIMIZU, Kunihiko YAMAZATO and Shoji NISHIDA

A numerical analysis was conducted to estimate the movement of a shield tunneling machine accurately. This analysis simulated the movement of the machine, that is, the process of the angle change and the forward movement. The validity of the method was checked by comparing the coefficient in mathematical models estimated by the analysis with the data of model experiments and practical tunneling projects. Furthermore, the estimated values of some parameters in the analytical model were compared with those from the simple method which was proposed by the authors previously. It was clarified that this method estimated the shield movement more accurately than the simple method.