

トンネル掘削時の観測変位に基づく地山初期応力の推定

Estimation of initial stress state based on observed displacements during tunnel excavation

小嶋 啓介*・足立 紀尚**・木村 宏***

Keisuke KOJIMA, Toshihisa ADACHI and Kho KIMURA

Described is a numerical procedure to back-analyze the initial state of the ground based on the monitored displacements during tunnel excavation. The unknown stress parameters to be estimated are the generalized overburden pressure, the coefficient of earth pressure at rest, the unit weight and the direction of principal stress. Firstly, the proposed procedure is verified with hypothetical case studies. Subsequently, the procedure is applied to model tests and actual case studies and comparisons are made with observed initial stress.

Keywords : back-analysis, initial-stress, coupling method, observed displacements

1. まえがき

トンネル掘削時の周辺地山の变形性、安定性、支保工・覆工への作用荷重などを評価するためには、トンネルの形状、施工法、支保条件に加え、地山の变形性や各種強度などの構成特性ならびに地山の初期応力状態を的確に評価する必要がある。これらの要因のうち地山の構成特性と初期応力状態は、トンネル掘削以前にその詳細を把握することが容易でないため、NATMに代表されるようないわゆる情報化施工も一般化してきている。著者らはここ数年来、軟弱地盤における圧密問題、トンネル掘削問題などを対象とし、現場観測結果から構成パラメータを推定する逆解析手法に関する検討¹⁾²⁾を行ってきた。しかしながら、トンネル掘削問題の場合には、構成特性よりも初期応力の把握により困難を伴い、トンネルの挙動に及ぼす影響も大きい場合も少なくないと考えられる。桜井ら³⁾や、平島ら⁴⁾の研究はこの

点にも注目し、地山は弾性としているものの、初期拘束圧の逆解析を試みている。本報告では、トンネル掘削、開削問題を対象として、境界・有限要素結合解析を利用し、施工時に観測される内空変位および地表面変位などから、地山の初期応力状態を規定するパラメータを推定する方法を提案し、アルミ棒積層体による模型実験ならびに青函トンネルに適用した結果を報告する。

2. 逆解析問題の定式化

(1)境界・有限要素結合解析法

有限要素法は極めて柔軟性の高い優れた解析手法であるが、対象領域全体を扱う必要があるため、入力データの準備や計算コストなどで制限がある。一方境界要素法は、境界のみを対象とすることにより、無限領域を含む問題も厳密に扱うことができるが、現時点では解析の自由度の面で有限要素法に及ばな

* 正会員 福井大学工学部環境設計工学科

** 正会員 京都大学工学部交通土木工学教室

*** 正会員 日本鉄道建設公団

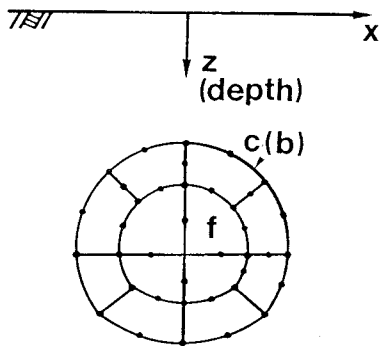


図-1 領域結合解析の概念図

いと考えられる。このように両解析法の欠点は相互補完的であるため、両者の結合解析法が種々提案されている。Mindlin解に基づく境界要素法と有限要素法の結合解析法では、図-1に示すようなトンネル掘削問題に対し、段階掘削や支保の建て込みならびに非線形挙動が卓越するトンネル周辺を有限要素領域、その外側を境界要素領域とした単一の要素分割により、種々の土被り深さの問題を解析することが可能となる。図のトンネル掘削問題では境界要素単独の領域bが存在せず、解析領域は有限要素部分のfと結合領域cに分割できる。この場合、境界要素領域の支配方程式(1)を有限要素法の形式に変換して結合する等価有限要素結合法⁵⁾は、次の様に誘導される。

$$[H_c]\{u_c\} = [G_c]\{t_c\} \quad (1)$$

$$[G_c]^{-1}[H_c]\{u_c\} = \{t_c\} \quad (2)$$

$$[M_c][G_c]^{-1}[H_c]\{u_c\} = [M_c]\{t_c\} \quad (3)$$

$$[B_c]\{u_c\} = \{F_c\}$$

ここに、H、G：変位および表面力に関する係数マトリックス、u、t：変位および表面力ベクトル、M：表面力を節点力に変換するマトリックス、B：等価剛性マトリックス、F：節点力ベクトルを示し、添え字は属する領域を示している。結合境界上での変位と力の連続条件を考慮し、式(3)と有限要素法の支配方程式を結合することにより、次式のような結合解析の支配方程式が得られる。

$$\begin{Bmatrix} u_f \\ u_c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ff} & K_{fc} \\ K_{cf} & K_{cc} + B_{cc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_f \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ここに、K：剛性マトリックスを示している。等価

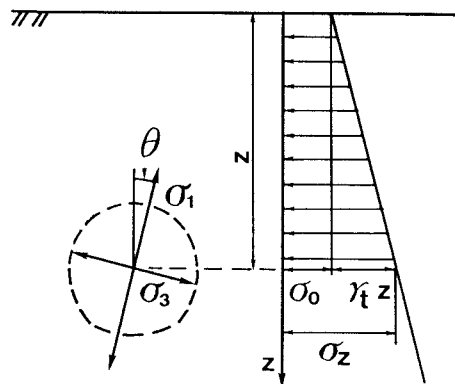


図-2 初期応力状態の仮定

有限要素結合法では、非バンドマトリックスであるBが、境界要素に属する節点のみに現れるため、記憶スペース等の面で有利であることが式(4)より明らかである。

(2) 初期応力状態の仮定

地山の初期応力状態の逆解析に際し、地山の鉛直、水平応力ならびにせん断応力は次式で与えられるものと仮定する。

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \sigma_0 + \gamma_t z \\ \sigma_x &= K_0 \sigma_z \\ \tau_{xz} &= \tan 2\theta (\sigma_z - \sigma_x) \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 σ_0 ：層固有の応力成分、 γ_t ：地山の単位体積重量、 K_0 ：静止土圧係数、 θ ：主応力の鉛直方向からの傾きであり、これら4個のパラメータが逆解析の対象となる。なお σ_0 は、地山に作用している重力以外の応力成分（テクトニクス応力など）を包括的に表すために導入したパラメータである。

地盤掘削のシミュレーションは、掘削部分の要素を除去し、その初期応力から計算される掘削相当外力Fを作用させることによって行われるので、ある施工段階における計算変位は、初期応力状態を規定する上記のパラメータの関数と考えることができる。一方、トンネル施工現場において、各掘削段階ごとに内空変位、あるいは地表面、地盤内などで変位が経時的に観測され、各観測値間の重みは等しいものとする。以上の仮定から、初期応力パラメータの逆解析問題は、式(7)を制約条件として次式を最小化するパラメータを探索する最適化問題として定式化

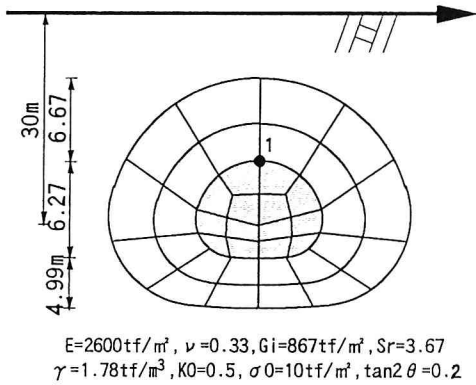


図-3 モデルトンネルの要素分割図

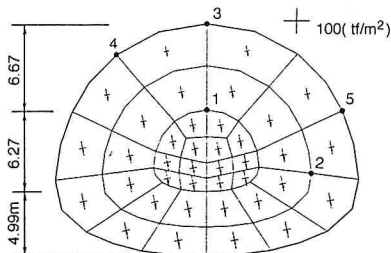


図-4 初期応力分布と変位の観測位置

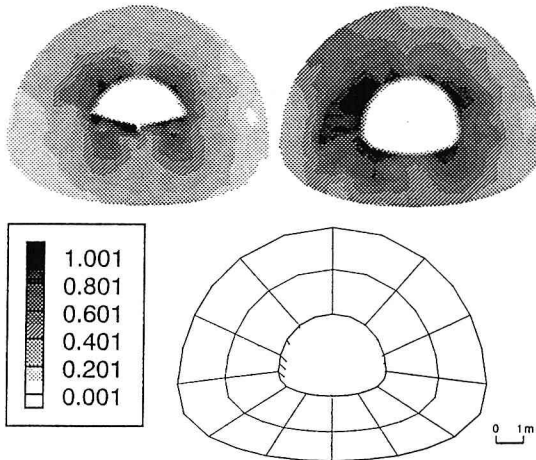


図-5 せん断応力比および変位の分布

できる。

$$J = \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_d} (u_i^t - U_i^t)^2 \rightarrow \text{minimum} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 0 &\leq \sigma_0, \quad 0 < \gamma_t, \\
 0 < K_0, \quad -\pi/4 \leq \theta \leq \pi/4
 \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 U_i^t : 時刻 t , 節点 i の観測変位, u_i^t : U_i^t に対応する計算変位, N_t : 計測時刻数: N_d : 計測節点数を示している。式(6)の最適化には、

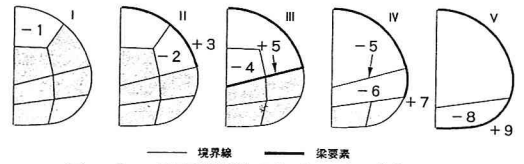


図-6 施工過程のシミュレーション

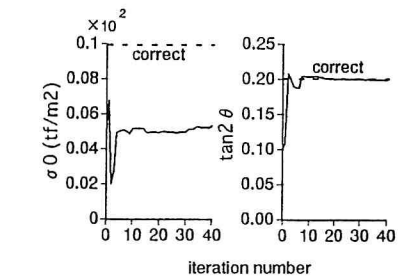
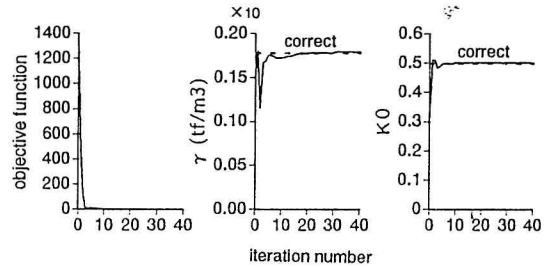


図-7 モデルトンネルの逆解析結果

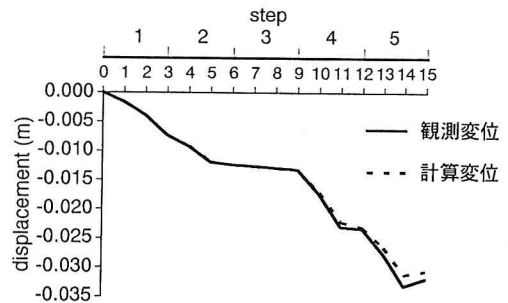


図-8 節点1の変位の経時変化の比較

目的関数 J の各パラメータによる勾配を数値的に計算して、共役方向を探索するPowell法を採用した。

3. 適用結果

(1) モデルトンネル

第1の適用対象は、図-3に示すようなトンネル掘削を想定したものであり、図に併記したパラメータを用いて計算される初期応力分布は図-4に示すとおりである。施工手順は図-6に示す5段階であり、各段階とも33%ずつ3段階で応力を解放した。支保工は施工遅れをシミュレートするために、初期

応力が67%解放された段階で導入している。図-5は第2および最終掘削段階におけるせん断応力比の分布、ならびに最終段階の変形状態を示している。図-3に併記した初期応力パラメータが未知であるとし、図-4に番号を示す節点の変位が観測されたとして逆解析を行う。ただし、逆解析は掘削初期で行うことに意味があると考え、第1段階終了時点までの観測変位を用いて逆解析を行った。図-7は各パラメータの収束状況であるが、 γ_t が若干大きめに、また σ_o が小さく推定されていることがわかる。これは第1段で掘削される要素の深さ方向の広がり土被りに比べて小さいため、式(5)で計算される鉛直応力が、 σ_o と γ_t の一義的な組み合わせによらないためと考えられる。図-8は逆解析されたパラメータを用いた観測点1の鉛直変位の経時変化であるが、第1段階までの観測変位を用いたにもかかわらず、最終段階までの変位を精度良く再現できていることがわかる。

(2)アルミ棒積層体による開削実験

第2の適用対象は、図-9に示すようなアルミ棒積層体を用いた立抗のシミュレーション実験である。地盤材料は長さが5cmで、直径が1.6mmと3.0mmのアルミ棒を重量比で3：2に混合したものである。実験は、シートパイルの剛性および埋め込み深さ、アースアンカーなどの条件も変化させて行ったが、ここではアンカーは設けず、シートパイルを底面に固定した実験結果を対象とする。表-1は事前に行った2軸試験などから求めたアルミ棒積層体の土質パラメータであるが、静止土圧係数についてはJakyの式に $\phi=27^\circ$ を代入して求めたものである。実験はシートパイルを模した鋼板を固定し、図-9の様に準備したモデル地盤で、シートパイルの左側のアルミ棒を深さ2.5cmずつ取り除くことによって掘削をシミュレートした。各掘削段階ごとに土圧を計測するとともに、撮影した写真から、標点の変位を読みとって観測データとした。図-10は要素分割図ならびに変位の観測位置を示しているが、図の太い線は地盤の不連続的な変形を表すために導入したジョイント要素を示している。

本報告では初期応力の推定を主なテーマとしているが、この例では σ_o ならびに θ がゼロであると考

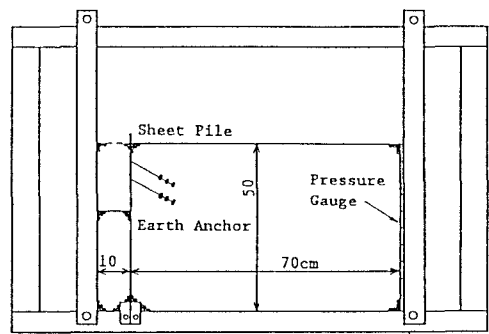


図-9 アルミ棒積層体による開削実験装置

表-1 アルミ棒積層体の物性値

Unit Weight	γ_t (gf/cm ³)	2.18
Young's Modulus	E (gf/cm ²)	500+100 σ_{mo}
Poisson's Ratio	ν	0.333
Cohesive Strength	c (gf/cm ²)	0.0
Internal Friction Angle	ϕ (°)	27.0
Coefficient of Earth Pressure at Rest	K_o	0.546

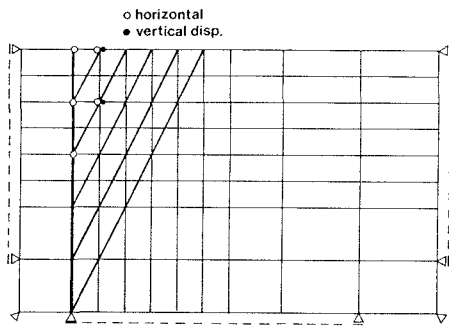


図-10 要素分割図および変位の観測位置

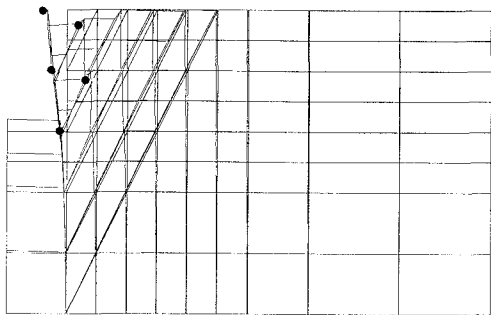


図-11 観測変位と計算変位の比較

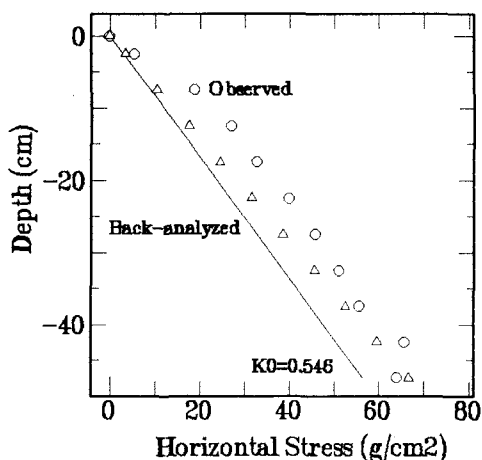


図-12 水平土圧分布の比較

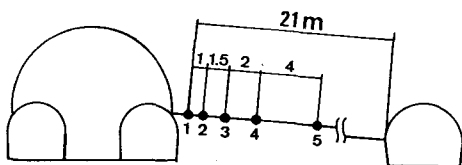


図-13 青函トンネルの変位の観測位置

えられることを考慮し、逆解析される初期応力パラメータは γ_t と K_0 とする。一方、地山の構成パラメータのうち、地山および地山とシートパイル間に設置したジョイント要素の構成特性も不明であるため、そのせん断強度も未知としてそれらの逆解析を試みた。深さ5cmずつ4段階で、20cmまで掘削された時までの観測変位を与えて逆解析を行った結果、

γ_t は 2.07 gf/cm^3 、 K_0 は0.65に、またジョイントのせん断強度から求まる地山の摩擦角は 26.2° 、シートパイルと地山のそれは 9.31° という逆解析結果が得られた。これらの値は、表-1の実験結果に比較して、 K_0 は若干大きく、 γ_t と ϕ は小さいことがわかる。図-11は逆解析されたパラメータを用いて計算された変位と観測変位の比較を示すが、シートパイルならびに地盤の変状を的確に再現できていると考えられる。図-12は水平土圧の比較であり、○印は実測値、実線はJaky式による $K_0=0.546$ として求めたものを、△印は逆解析された γ_t と K_0 を用いて計算された土圧分布を示している。逆解析結果はJaky式よりも実際に近いといえるが、実測土圧よりも若干小さいことがわかる。

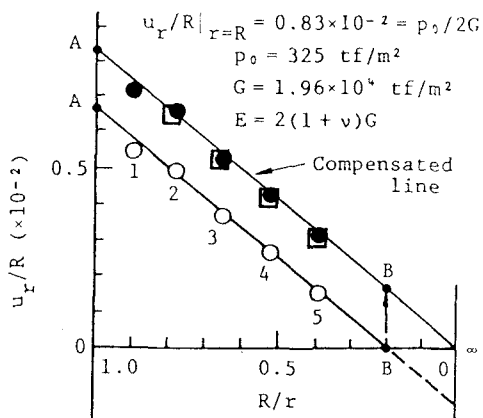


図-14 $u_r/R - R/r$ 関係の比較

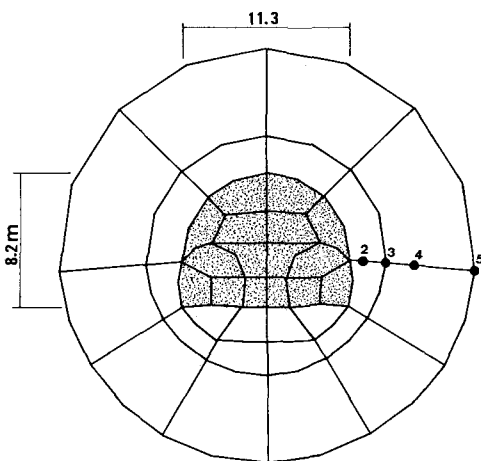


図-15 青函トンネルの要素分割図

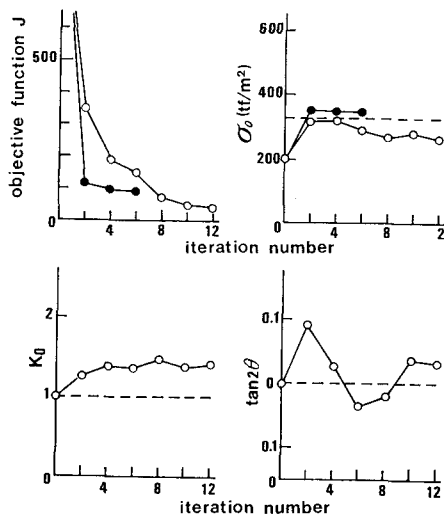


図-16 青函トンネルの逆解析結果

(3) 青函トンネル

青函トンネル吉岡方25km965m (地山は黒松内層砂

質泥岩で $\gamma_t = 1.85 \text{ tf/m}^3$ 、トンネルは海面下 240m、海底下 100m に位置する) において、図-13 のように先進導坑から前もって地中変位計を設置し、本坑掘削時の変位計測が行われた。参考文献(6)の方法によれば、中心から距離 r における計測変位 u_r は、トンネルを半径 $R = 5.62 \text{ m}$ の円形断面と仮定すれば、図-14 の○印のように表示できる。さらに $r = \infty$ で u_r がゼロとなるべきことから、トンネル掘削に伴う応力解放の影響を除去した変位が、図の●のように補正される。また、このように整理した変位が直線上に位置する場合は、弾性挙動を示しており、その直線と縦軸との切片の値は $p_0/2G$ であることが示されている。初期等方土圧 p_0 を 325 tf/m^2 とすると、剛性係数 G は $19,600 \text{ tf/m}^2$ と計算される。

逆解析に際し、土被りが 240m と大きく、土圧の深さ方向の分布の影響が小さいと考えられることから、 $\gamma_t = 0$ とし、 σ_0 、 K_0 、 θ の推定を試みた。図-15 は解析断面の要素分割図および変位の観測位置である。図-14 の結果から、地山は周辺部も含めて線形弾性とし、 $G = 19,600 \text{ tf/m}^2$ 、 $\nu = 0.3$ に固定し、掘削は全断面を 1 回で行うこととして逆解析を行った。図-16 は逆解析結果であるが、図中の点線は、施工時に採用された値を示している。逆解析された σ_0 は実測値の 325 tf/m^2 より小さく、 K_0 は 1 よりも大きく推定されており、 $\tan 2\theta$ の値は初期値の 0 を挟んで、上下にふらついていることがわかる。このような結果が得られた理由として、観測変位が図-15 に示す 1 方向に位置する観測点から得られた値であること、 K_0 が 1 に近いことなどが考えられる。別途行われた A E 法による初期応力の推定値としては、鉛直方向で 210 tf/m^2 、軸方向で 340 tf/m^2 であり、そこから得られる $K_0 = 1.6$ であることを考慮すると、推定値は A E による実測値により近いといえる。図-14 に示した□印は、逆解析されたパラメータを用いて求められた計算変位をプロットしたものであるが、観測変位に非常に近い値が得られている。図-16 の●は、 σ_0 のみを逆解析したものであるが、この値は 325 tf/m^2 に近いものとなっている。

4. あとがき

有限要素法と境界要素法の結合解析手法を用い、

施工時に経時的に観測される変位から、地山の初期応力状態を規定するパラメータを推定する方法を定式化し、モデルトンネル、アルミ棒積層体による模型実験ならびに青函トンネルに適用した結果から、以下の知見を得た。

- (1) 小数の観測変位から、初期応力パラメータを精度良く推定できるが、掘削領域の深さ方向の広がり小さい場合には、 σ_0 と γ_t を一義的に推定することが困難である。
- (2) ジョイント要素を導入しることにより、不連続的な変形が卓越するアルミ棒積層体によるモデル実験に対しても、初期応力パラメータおよび強度定数を推定することが可能である。
- (3) 青函トンネルに適用した結果、逆解析されたパラメータは、実測変位を精度良く再現できることが確かめられた。
- (4) 推定された初期地圧は、A E 法によって算出された土圧分布に近い。

参考文献

- 1) 小嶋啓介・足立紀尚・荒井克彦：地下水面下に掘削される土被りの浅い砂質地山トンネルのモデル実験と逆解析，土木学会論文集，第448号/Ⅲ-19，1987。
- 2) 荒井克彦・片瀬貴文：トンネル内空変位計測に基づく地盤変形・強度定数の推定，土質工学会論文報告集，Vol. 24, No. 2, pp. 171-179, 1984。
- 3) 桜井春輔・竹内那文：トンネル掘削地における変位計測結果の逆解析法，土木学会論文集，第337号，pp137-145, 1984。
- 4) 平島健一・川上哲太郎・藤原紀夫・山下幸夫：弾性厳密解に基づく円形・楕円形トンネルを有する等方および異方性岩盤の逆解析，土木学会論文集，第439/Ⅲ-17, pp1-8, 1991。
- 5) 結城良治・木須博行：境界要素法による弾性解析，培風館，pp. 158-164, 1987。
- 6) 足立紀尚，矢野隆夫：トンネル掘削に伴う地山内変位計測結果の簡易解析法，土木学会論文集，第388号/Ⅲ-8，1987。
- 7) 青函トンネル土圧研究調査報告書，土木学会，pp. 377-384, 1985。