

軟岩地盤に構築した山留め工の挙動解析に用いる簡易モデル

A Simple Model Used for an Analysis of Behaviors of Ground Anchor Retaining Walls Constructed on Softrocks

鈴木 義和 (すずき よしかず)

東京電力㈱柏崎刈羽原子力建設所土木課 課長

兵藤 英明 (ひょうどう ひであき)

東京電力㈱柏崎刈羽原子力建設所土木課 副主任

村山 恒雄 (むらやま つねお)

東京電力㈱柏崎刈羽原子力建設所土木課 副長

大津 宏康 (おおつ ひろやす)

大成建設㈱土木設計部 係長

1. まえがき

東京電力㈱は新潟県柏崎市および刈羽村にまたがり合計7基、最終電気出力8212 MWの原子力発電所を運転、建設中である(図-1)。当発電所は建屋の基礎岩盤となる西山泥岩が深部に位置するために、建屋の基礎掘削工事に大規模なアンカー式山留め工を採用しており、山留め工の安全確保のために、きめ細かな計測ならびに予測管理を実施している。

本報告では、平成5年3月に通産省による岩盤検査に合格した7号機本館基礎掘削工事の、山留め工の施工中の予測管理に用いた簡易解析モデルの特徴と、解析結果およびモデルに用いる水平方向地盤反力係数(以下、反力係数と呼ぶ)の検討について報告する。

2. 山留め工の設計・管理

掘削域の地質は下位から基礎岩盤である西山層(泥岩)、安田層(粘性土と砂の互層)、新期砂層、埋土層であり、山留め工の形式としては図-2、3に示すとおり、主に連続地中壁にグラウンドアンカーを組合せた山留め工を採用している。山留め工は二次元FEM逐次掘削解析により設計した。図-4に図-3のS3断面のFEMメッシュ図を示す。ランキン・レザールの主動土圧と水圧相当の側圧の総和を等分したアンカー導入力を与え、地盤の初期側圧としては、原位置孔内載荷試験結果を基にして、図-5のような比較的高い地圧を設定している^{1),2)}。

施工中は傾斜計、鉄筋計等の計測値が管理基準値内であることを確認する計測管理を実施した。また、

壁体水平変位の計測値を用いて、地盤の初期側圧や、変形係数の実際の値を推定し、再設定して次段以後の山留め工の挙動予測の精度を上げ、安全管理に役

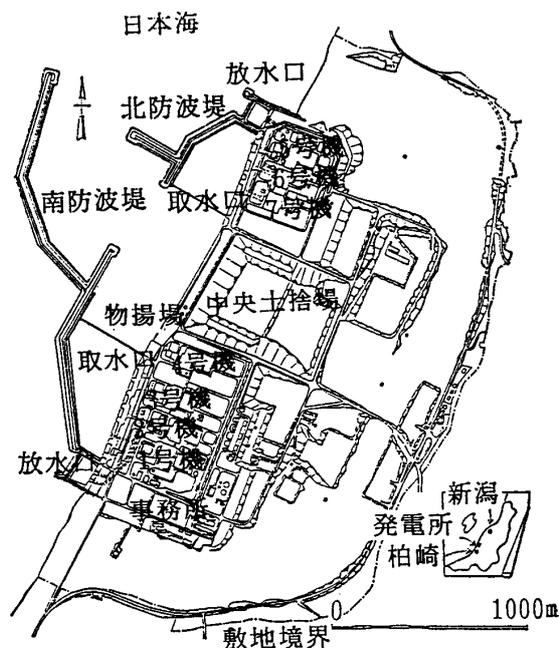


図-1 柏崎刈羽原子力発電所配置図

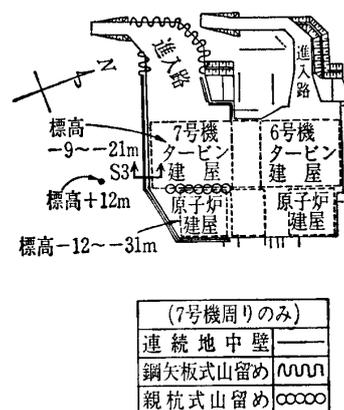


図-2 6, 7号機掘削域平面図

工事報告

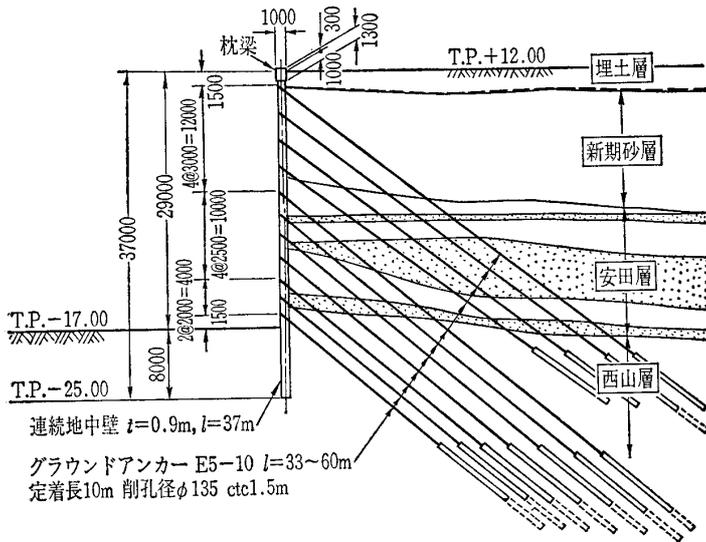


図-3 山留め工配置および断面図(S3断面)

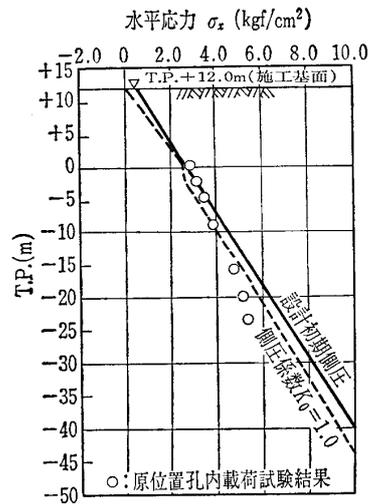


図-5 S3断面初期側圧分布

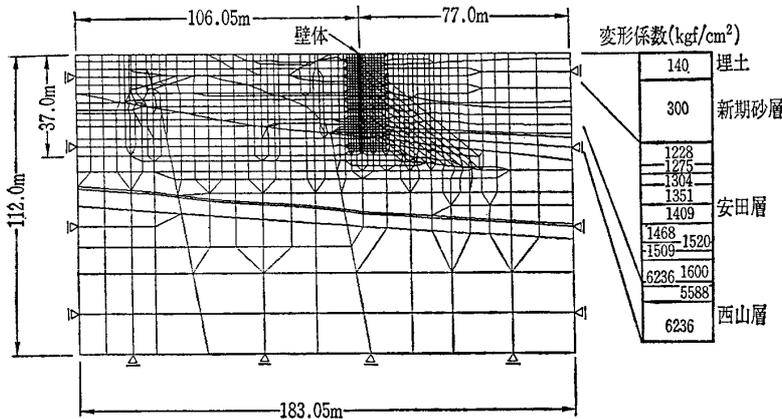


図-4 S3断面 FEM 解析メッシュ図と地層、変形係数分布図

立てた。最適値の決定に繰返し計算を実施するため、短時間の解析で済むように、二次元 FEMモデルより簡単な解析モデルを用いている。

3. 簡易モデルの特徴

施工中の予測解析には図-6 に示すように、山留め壁を梁要素、地盤を反力係数で表した、簡易モデルを用いた。このモデルには以下のような特徴がある。

- ① 荷重として壁前面に掘削解放力を作用させるため、当地点の特徴である比較的大きな初期側圧を表現できる。
- ② 各段階での増分変位を計算するので、掘削解放力による変形の特徴を良く表現できる。
- ③ 壁背面に反力係数を設定しているため、アン

カーにプレストレスを与えた時の背面側への変形を評価できる。

このモデルで逐次修正すべき変数は、各段の掘削解放力および各深度における反力係数であるが、数が多く、すべてを調整して変位の実測値を再現しようとすると、作業が繁雑になる。そこで本工事では、掘削解放力は FEM 解析と同じ値を用い、反力係数のみを調整することとした。これは、掘削解放力は FEM と対応して力学的な意味が比較的明確な値をあらかじめ想定できるが、反力係数は妥当な値の想定が難しいからである。平板载荷試験等を基

にした反力係数の算定式は、等分布に近い载荷条件を想定しており、各段の掘削解放力やアンカー導入力等が集中的な载荷条件である本モデルには適用しにくい。

4. 簡易モデルによる解析結果

前述の簡易モデルを用い、施工中に解析した例を

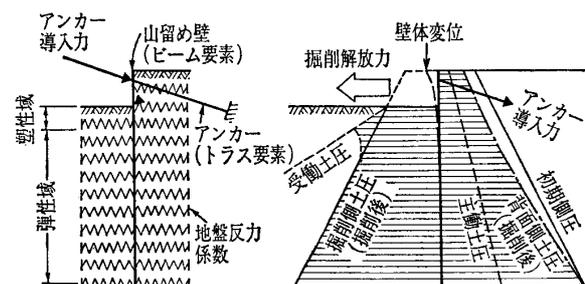


図-6 簡易モデル

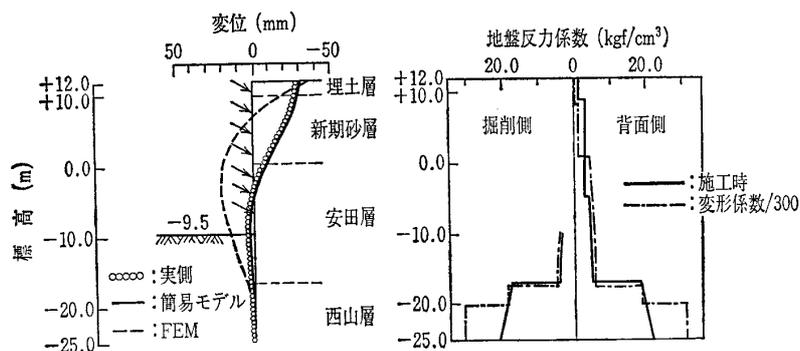


図-7 壁の水平変位 (8段掘削後)

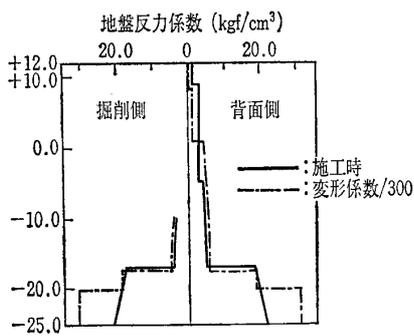


図-8 地盤反力係数 (8段掘削後)

示す。図-3に示したS3断面の8段目の掘削後の壁変位の実測値、FEM解析値、簡易モデルによる計算値を図-7に示す。また、このときに用いた反力係数を図-8に示す。簡易モデルによる計算値は実測値を良く再現している。壁上部が背面側へ倒れているのは、側圧の総和を等分して各アンカーに分担させたために、上部が過引きぎみであるためであり、設計時にFEM解析で予想した挙動と同じ傾向を示している。FEM解析と実測値の絶対値は幾分か開きがあるものの、壁の変形モードは比較的良く合致している。

図-8には各深度の地盤の変形係数(図-4参照)を300で割った値を一点鎖線で示している。変形係数は原位置孔内載荷試験および三軸試験等の結果から設定している。反力係数(kgf/cm³)と変形係数(kgf/cm²)は単位が異なるので、単純な数値のみの比較であるが、施工中の予測解析に用いた反力係数は変形係数の1/300程度であった。当地点の先行号機の基礎掘削工事における簡易モデルを用いた解析でも、ほぼ同じような反力係数と変形係数の関係が得られている。

5. FEMによる地盤反力係数の算定

当地点と初期側圧や地盤物性等が異なる山留め工に、前章で述べた実績が適用できるとは限らない。そこで今回、二次元FEMモデルから反力係数を導出することを試みた。詳細は割愛して要点のみを述べる。

壁を表す梁要素は別にして、地盤部についてのFEMモデルの方程式を、壁に接する節点の水平変位に関する式に整理する(ほかの変位を消去する)

と、マトリクス型式で次のようになる。

$$[K][u]=[q] \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

[K]: 地盤部の剛性マトリクス

[u]: 壁に接する節点の水平変位ベクトル

[q]: 荷重ベクトル

一般に[K]は対角項 K_{ii} に加えて非対角項 K_{ij} を含んでいる。一方、簡易モデルの方程式を(1)式と同じように書くと、[K]は対角項 K_{ii} のみであり、非対角項 K_{ij} はす

べて0である。ここで、FEMモデルの[K]と等価な、対角項 K_{ii} のみのマトリクス[K*]を導き、それより反力係数を算定することを考える。そのためには非対角項 K_{ij} の影響を何らかの形で取り入れて、対角項 K_{ii} を再設定しなければならない。式(1)から考えると[K]と[K*]は等価で、同じ[u]を与えるのだから、[K*]の決め方、つまり非対角項 K_{ij} の影響の取入れ方は、[q]によって異なることが予想される。以下で小規模な二次元FEMモデルを作成し、[K*]の決め方を検討するが、[q]の影響を考慮して、側圧係数 $K_0=1.0$ および0.5の場合を設定した。

壁体長が8m、解析領域が縦横20m程度、メッシュの大きさを縦横1mとしたFEMモデルを用いて[K]を求めた図-9に[K]の5行目の各項を対角項 K_{ii} で正規化した値を示す。対角項 K_{ii} がかなり卓越していることから、非対角項 K_{ij} を無視して対角項 K_{ii} のみで反力係数を求めてみた。その結果、どちらの K_0 の場合でもFEM解析の変位を再現するには値が過大であり、もう少し値を低減させる必要が生じた。ここで図-9を見ると、非対角項 K_{ij} はすべて負であるので、低減の方法として、これらの非対角項 K_{ij} を対角項 K_{ii} に単純に加えることとした。その結果、各 K_0 に対して、

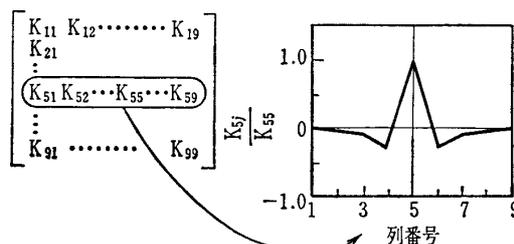
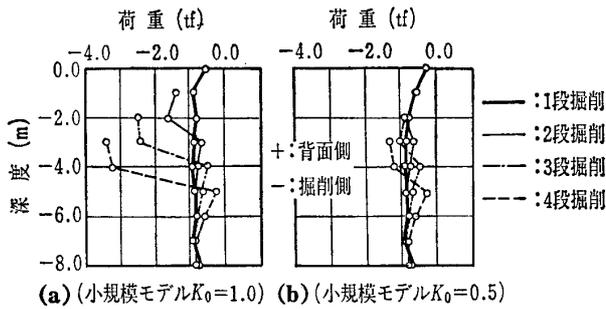


図-9 小規模モデルの[K]の各項の値の比較

工事報告

図-10 荷重ベクトル $\{q\}$

$K_0=1.0$; 両隣の $K_{i,i-1}$ と $K_{i,i+1}$ を加える。

$K_0=0.5$; i 行の非対角項 K_{ij} をすべて加える。

とした場合に、最も良く FEM 解析の変位を再現する値が得られた。図-10に $K_0=1.0$ および 0.5 の場合の荷重ベクトル $\{q\}$ を示すが、 K_0 が小さいと荷重が均等な分布に近くなり、このような荷重分布ほど、非対角項 K_{ij} の影響が大きくなりやすいと考えられる。

以上の検討結果を本工事の S 3 断面の FEM モデルに適用してみた。S 3 断面の初期側圧は図-5 に示すように、比較的高く $K_0=1.0$ に近いので、前述の小規模モデルの $K_0=1.0$ の場合の方法で反力係数を算出した。その結果を 8 段掘削後を例に取って、図-11に示す。今回の手法により、施工時に実測変位から推定した値と、ほぼ等しい値が得られている。

6. ま と め

山留め掘削工事の施工中の安全管理の一つとして、簡易モデルを用いた予測解析を実施した。簡易モデルは、初期側圧の影響を取り入れられることに最も特徴があるが、本モデルに用いる反力係数は、平板載荷試験等から求められる通常の水平方向地盤反力係数とは載荷条件が異なるため事前の算定が難しく、

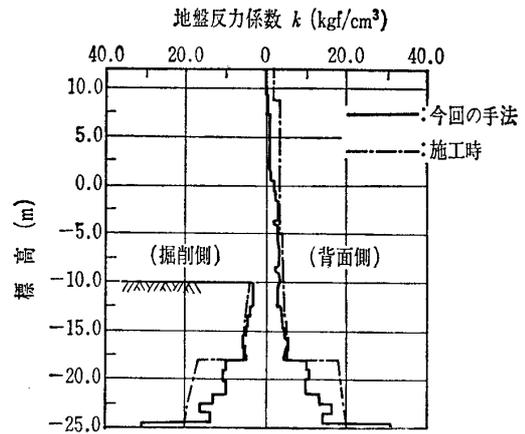


図-11 FEM による算定値と施工時の値の比較

また実測変位から推定した値も力学的意味があいまいであった。

このような反力係数を、FEM モデルから算定する方法を検討したところ、比較的簡易な手法を見出させた。この手法を用いて本工事の実地盤の FEM モデルから反力係数を導出すると、施工時に実測変位から推定した値と同様な値が得られた。今後、初期側圧や地盤物性が当地点と異なる山留め工を、簡易モデルを用いて解析する場合でも、設計用の二次元 FEM モデルから、反力係数のほぼ妥当な値を算定できると考えられる。

最後に本工事の計画、設計、施工にあたられた関係各位に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 黒田輝夫・寺田賢二・植木一浩：柏崎刈羽原子力発電所基礎掘削工事における山留め工の設計と挙動解析結果，土と基礎，Vol. 37, No. 8, pp. 51~56, 1989.
- 2) 東出 昇・小林 進・鈴木義和：柏崎刈羽原子力発電所 6 号機本館基礎掘削工事における山留工の設計と挙動解析結果，電力土木，No. 245, pp. 49~58, 1993.

(原稿受理 1993. 6. 24)