

# 背面側と掘削側の土圧変化を考慮した山留め解析法の開発と 実工事への適用事例

元井 康雄 石井 雄輔  
 (本社 丸の内1丁目A工区JV)  
 森脇 登美夫

## Development of Analysis Method for Earth Retaining Structure Considering Changes in Earth Pressure and Application to Actual Excavation Work

Yasuo Motoi Yusuke Ishii  
 Tomio Moriwaki

### Abstract

A theory based on a beam on an elastic subgrade is widely used to simulate behavior of earth retaining walls. We have expanded this theory and developed a new simulation method that takes account of the relationship between earth pressure and displacement of earth retaining walls. This method can simulate the behavior of earth retaining walls under actual conditions, such as modification of soil properties by soil improvement during excavation, nonlinear behavior of reinforced concrete diaphragm walls, and increasing wall rigidity and binding effect on rotation after construction of underground structure. It is difficult to estimate these phenomena with previous method. This paper describes this new simulation method and a case history of the behavior of an actual excavation work.

### 概要

山留め挙動解析に従来から実務で広く用いられている、梁ばねモデルによる弾塑性法を拡張し、山留め壁の変位に伴う背面側および掘削側の土圧変化を考慮した、実現象をより忠実に再現可能な山留め解析ソフトを開発した。本解析手法により、従来法では解析上の評価が困難であった、地盤改良による施工途中での地盤物性の変化や、RC地中連続壁の非線形性状、ならびに逆打ち工事での本設躯体施工によるの壁体剛性増加や回転拘束効果が評価可能となる。本報では、本解析手法の概要を説明するとともに、地盤改良を採用した実工事の挙動予測に本解析手法を適用した事例解析結果を紹介する。

### 1. はじめに

山留め挙動解析には、梁ばねモデルによる弾塑性法(以下、弾塑性法)が従来から用いられている。弾塑性法は、山留め壁を弾性梁材、地盤反力を各深度ごとの弾塑性ばねとして与える方法であり、モデル化が比較的容易であることと、数多くの実測データに基づく定数評価方法が提案<sup>1)</sup>されているため、実務上広く用いられている。しかしながら、山留め壁によって仕切られている掘削側地盤と背面側地盤を、解析上同一の材料として取り扱うため、掘削側のみを地盤改良する場合などにおいては、地盤反力および土水圧の適切な評価が困難である。そこで本研究では、弾塑性法を拡張し、掘削側と背面側の地盤ばねおよび側圧を独立して評価可能な手法を開発し、実工事の測定結果を用いた事例解析による検証を行った。

### 2. 解析方法

#### 2.1 解析方法の概要

新しく提案する山留め解析モデルをFig. 1に示す。山留

め壁の背面側と掘削側の地盤ばねを、それぞれ独立して配置し、各々の地盤反力骨格曲線および履歴性状を別々に評価する。これにより、例えば、図中に示すように施工途中で地盤改良により掘削側のみ地盤物性が変化する

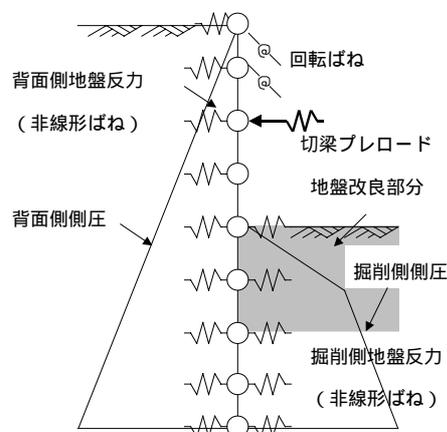


Fig. 1 解析モデル  
Analytical Model

場合などにおいても、新たな地盤反力骨格曲線上にそれまでの施工段階で生じた地盤変位を引き継ぐことにより、実現象を忠実に解析することが可能となる。また、従来の弾塑性法では、山留め壁に外力として作用する側圧(土圧+水圧)を、背面側側圧から掘削側側圧をあらかじめ差し引いた値として与えていたが、本解析方法では、背面側側圧と掘削側側圧をそれぞれ与えるため、近年の研究<sup>2)</sup>に基づく新しい土圧理論も解析に導入可能である。併せて、施工管理を目的として設置する壁面土水圧計の測定値と、解析値を直接比較することが可能となる。さらに、本解析方法では、RC山留め壁のひび割れ発生などによる剛性低下や、逆打ち工事での本設躯体施工に伴う山留め壁剛性増加および回転ばねによる回転拘束効果も評価可能である。

2.2 基本方程式

山留め解析に用いる基本方程式を(1)式に示す。山留め壁を深さ方向に層分割して各層について(1)式を与え、これに山留め壁上下端の境界条件および各層境界の連続条件を与えることにより、山留め壁の応力・変位および切梁反力を算定することができる。なお、切梁あるいは地盤アンカーなどによる支持点は、水平方向のみに作用する集中ばねとして評価する。

また、山留め壁の各段階での総変位量は、(1)式により求めた増分変位量を(2)式に代入して求める。

$$\frac{d^2}{dx^2} (EI \frac{d^2 y_x}{dx^2}) + E_{sf} y_x + E_{sb} y_x + K \cdot y_x = (a_f + b_f x) + (a_b + b_b x) \dots \dots \dots (1)$$

- EI : 山留め壁材料の曲げ剛性(kN・m<sup>2</sup>)
- x : 部材端部から着目点までの深さ(m)
- y<sub>x</sub> : xにおける山留め壁の増分変位(m)
- E<sub>sf</sub> : 掘削側地盤の変形係数(kN/m<sup>2</sup>)
- E<sub>sb</sub> : 背面側地盤の変形係数(kN/m<sup>2</sup>)
- K : 支保工のばね定数(kN/m<sup>2</sup>)
- a<sub>f</sub>+b<sub>f</sub>x : 掘削側地盤の側圧(kN/m)
- a<sub>b</sub>+b<sub>b</sub>x : 背面側地盤の側圧(kN/m)

$$y_{xTotal,i} = y_{xTotal,i-1} + y_{x,i} \dots \dots \dots (2)$$

- y<sub>xTotal,i</sub> : xにおける(i)段階の山留め壁の総変位量(m)
- y<sub>xTotal,i-1</sub> : xにおける(i-1)段階の山留め壁の総変位量(m)
- y<sub>x,i</sub> : xにおける(i)段階の山留め壁の増分変位量(m)

2.3 土圧・地盤反力の骨格曲線および履歴曲線

土水圧を分離して取り扱う場合、背面側および掘削側の土圧を、それぞれFig. 2に示すようなバイリニヤ型の骨格曲線で評価する。変位発生前に山留め壁に作用している土圧を初期土圧(P<sub>fo</sub>, P<sub>bo</sub>)として与え、土圧の上下限値となる受働土圧(P<sub>fp</sub>, P<sub>bp</sub>)および主働土圧(P<sub>fa</sub>, P<sub>ba</sub>)は、通常の場合、ランキン・レザール式により求める。また、履歴曲線を与えることにより、地盤が塑性域に達

した場合の残留変位を考慮している。このようにして求めた各深度の土圧に、水圧を加算した値を山留め壁に作用する地盤からの外力として与える。なお、側圧を土水圧一体として取り扱う場合は、Fig. 2に表記した「土圧」を「側圧」に置き換えて評価し、この値を山留め壁に作用する地盤からの外力とする。

2.4 壁の非線形性状

一般に、山留め壁は解析上弾性体として取り扱うことが多いが、RC連続地中壁などを採用する場合、コンクリートのひび割れや鉄筋降伏が発生すると、壁剛性が低下する。このような壁の非線形性状を考慮する場合、Fig. 3に示すようなトリリニヤ型のM~曲線からEIを求め、(1)式に導入している。

3. 地盤改良を採用した掘削事例への適用

3.1 工事概要

山留め壁の変位抑制や施工性の向上を目的として、生石灰杭による地盤改良を採用した工事の解析例を示す。

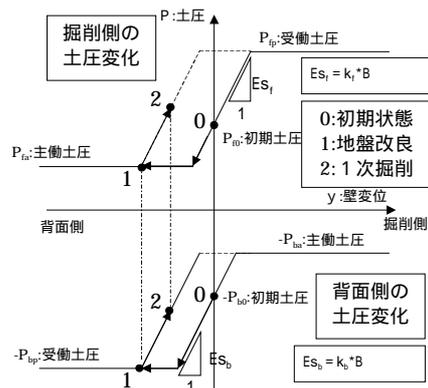


Fig. 2 土圧（側圧）モデル  
Relationship between Earth Pressure and Displacement of Earth Retaining Walls

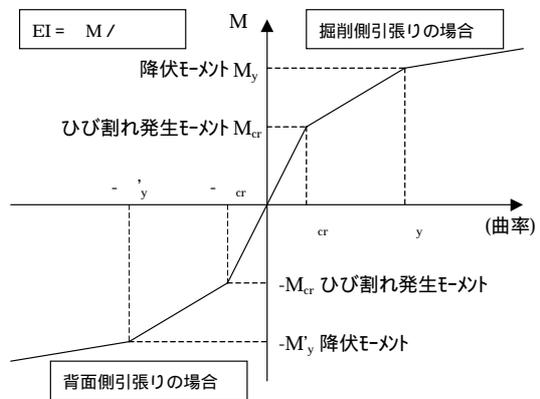


Fig.3 RC壁のM~関係  
Relationship between Moment and Curvature of Reinforced Concrete Walls

生石灰杭工法は、生石灰の吸水膨張により、地盤の剛性や強度の増加を期待する工法であるが、生石灰杭の施工時に山留め壁が背面側に変位し、山留め壁や周辺の地盤・構造物に悪影響を及ぼすことも多い。しかしながら、生石灰杭の施工に伴う山留め壁の変位を、事前に精度よく予測することができれば、以降の掘削に伴う山留め壁の絶対変位量をコントロールすることも可能である。

Fig.4に解析対象断面を示す。本工事は、掘削平面が約100m×50mの逆打ち工事で、最終床付け深度はG.L.-12.0mである。施工手順は、図中に(a)～(j)で示すように、山留め壁(ソイルセメント柱列壁)の施工(a)、生石灰杭打設(b)、各次掘削・地下躯体構築(c)～(j)のとおりである。地盤は地表面からG.L.-17m付近まで軟弱層が堆積しており、G.L.-7.5m～-15.5mのN値2程度の軟弱粘土層に、生石灰杭を打設している。生石灰杭は、直径400mm、配置は1.8m間隔の正方形配置とし、排土工法で施工している。なお、山留め壁から生石灰杭までの最短距離は約1mである。

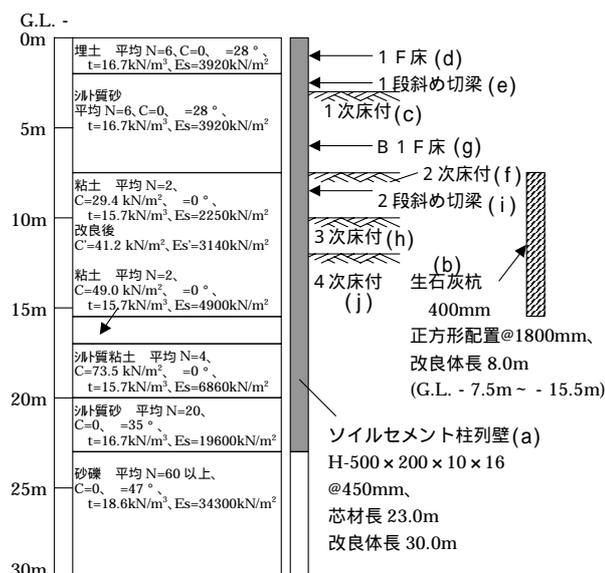


Fig. 4 解析対象断面

Soil profile and section of earth retaining structure

### 3.2 地盤改良効果を考慮した側圧モデル

本地盤は粘性土であり、土水圧を分離して評価することが困難であるため、側圧を土水圧一体として評価している。Fig. 5に地盤改良による物性変化を考慮した側圧モデルを示す。生石灰杭打設に伴い山留め壁は背面側に变位し、背面地盤は圧縮され変位量によっては受働状態となる。一方、掘削側の側圧は、微小変位により主働状態となった後は変位が進行しても一定値を示す。以降の掘削段階において地盤改良効果が発揮され、掘削側側圧は改良後の新たな側圧骨格曲線上的値を取る。なお、改良地盤の非排水せん断強度は、概ね原地盤の1.4倍に増加していることから、解析に際しては、地盤反力係数 $E_s$ に関しても同様の割合で増加するものと仮定した。

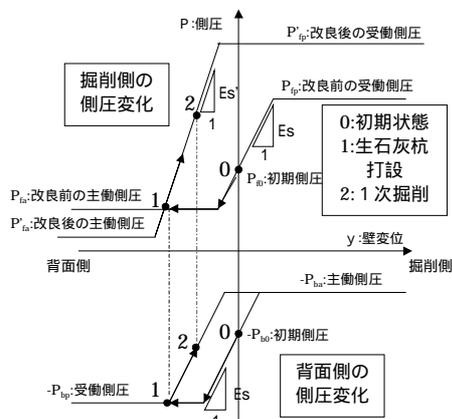


Fig. 5 地盤改良効果を考慮した側圧モデル

Model of Lateral Pressure considering Soil Improvement

### 3.3 側圧評価方法および解析結果

Fig. 6に、地盤改良を施さず原地盤を掘削した場合の、各掘削段階における入力側圧分布および解析結果を示す。初期側圧は、掘削側・背面側ともに山留め芯材先端まで側圧係数0.5の三角形分布とし、背面側入力側圧は最終掘削段階まで変化しないものとした。一方、掘削側側圧は、軟弱粘性土であることから、根切り底以深3mまで排土による除荷の影響を受け、以深は初期側圧が残留する<sup>3)</sup>ものとした。解析の結果、最終掘削時における山留め壁は最大約7cmと、大きく変位している。

Fig. 7に、地盤改良を実施した場合の、各掘削段階における入力側圧分布および解析結果を実測変位と併せて示す。初期側圧は、掘削側・背面側ともに山留め芯材先端まで側圧係数0.5の三角形分布とし、背面側入力側圧は最終掘削段階まで変化しないものとした。一方、掘削側側圧は、生石灰杭打設に伴う山留め壁への圧力増加分布性状がいまだ不明確な点が多いため、本事例では、生石灰杭打設および地盤改良効果が側圧に与える影響を、以下

のように仮定して掘削側入力側圧とした。

- 1) 生石灰杭打設段階においては、側圧分布図に示すように、改良部分では70kN/m<sup>2</sup>の等分布荷重、改良部分以浅は地表面まで、改良部分以深は硬質地盤までの三角形分布荷重が掘削側側圧に加わるものとする。
- 2) 1次掘削時には、根切り底以浅の側圧が除去されるとともに、根切り底以深においても生石灰打設時の増加荷重が取り除かれる。さらに、地盤改良効果により改良部分の側圧係数が0.2に低下するものとする。
- 3) 2次掘削以降では、根切り底以浅の側圧のみが除去され、根切り底以深における側圧変化はないものとする。各施工段階における解析変位は、実測変位と良く対応している (Fig.7参照)。生石灰杭打設時に、山留め壁は地中深部から背面側に变位し、掘削完了時の山留め壁の掘削側への最大変位量は約4cmに収まっており、地盤改良をしない場合 (Fig.6参照) に比べて約60%程度に低減している。また、曲げモーメント分布は、生石灰杭の打設時には、背面側引張りの曲げモーメントが発生し、以

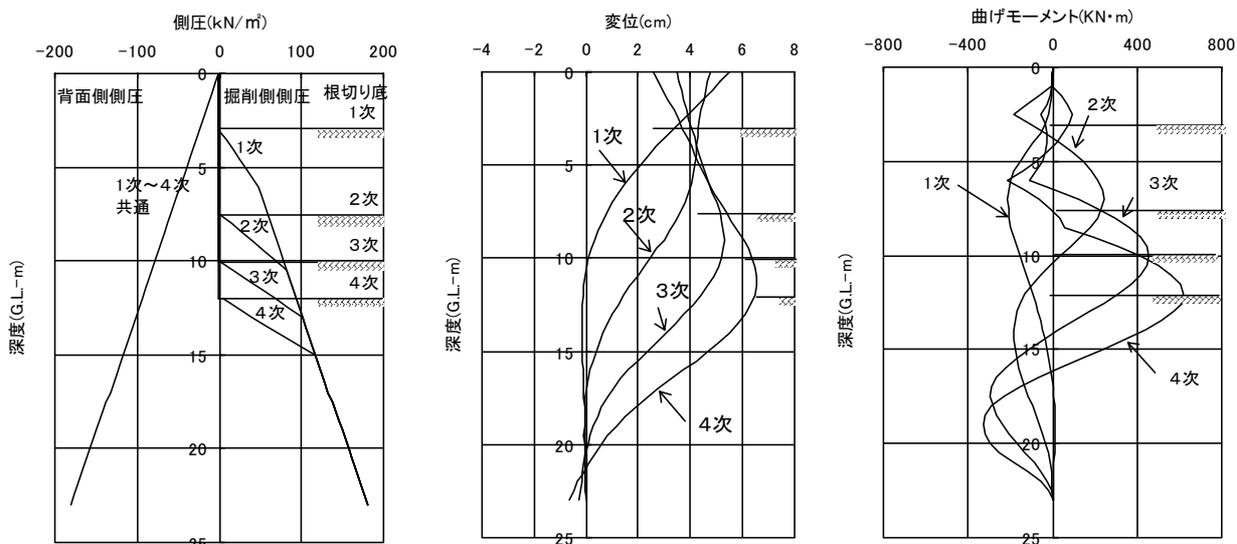


Fig. 6 原地盤（地盤改良なし）の場合の予測解析結果  
Analytical results (without soil improvement)

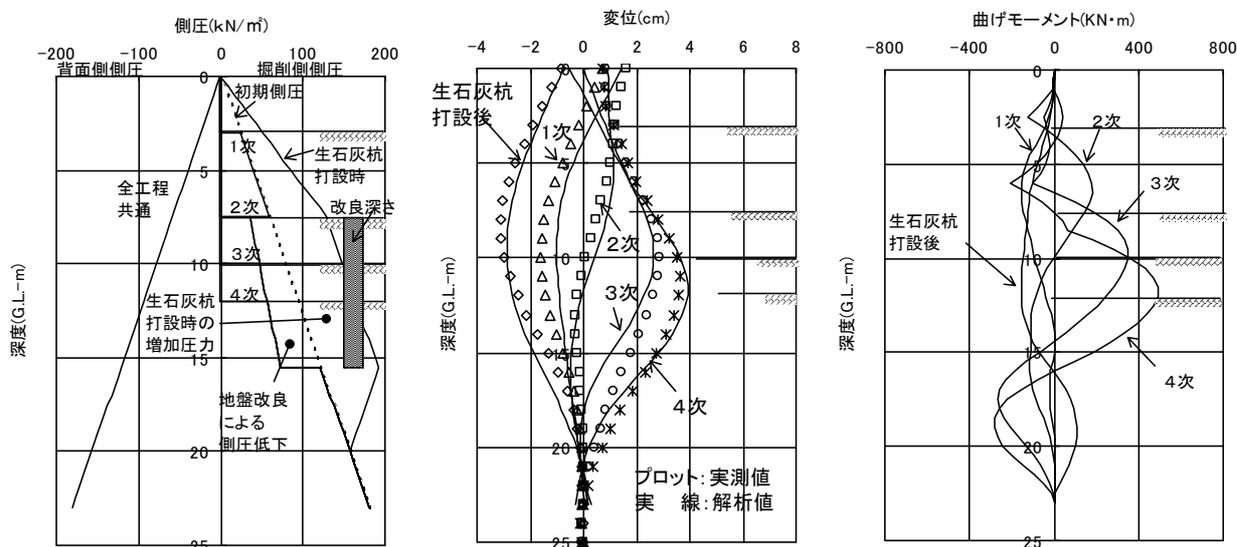


Fig. 7 地盤改良実施の場合の予測解析結果および実測変位分布  
Comparison of measured and calculated values

降の掘削による掘削側引張り曲げモーメントを緩和する傾向にある。従って、山留め壁としてRC連続壁を採用する場合など、生石灰杭打設による掘削開始前の応力状態を考慮した断面設計を行うことにより、より合理的な設計が可能となる

#### 4. まとめ

弾塑性法を拡張して、山留めの実現象をより忠実に再現できる解析ソフトを開発し、事例解析によりその適用性を確認した。本解析手法により、施工途中での地盤物性の変化や、山留め壁剛性の非線形性状、ならびに逆打ち工事での本設躯体施工後の壁体剛性増加や回転拘束効果が評価可能となる。また、生石灰杭の打設から掘削ま

での一連の解析を実施することにより、実情に即した山留め壁の応力・変位を予測することが可能となり、より合理的な山留め設計が可能となることを示した。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：山留め設計施工指針，pp.127～141，(2002)
- 2) Mayne, P.W. and Kulhawy, F.H. :  $K_0$ -OCR Relationships in Soil, Journal of the Geotechnical Eng. Division, ASCE, Vol.108, No.GT6, pp.851～872, (1982)
- 3) 宮崎祐助：実測に基づく山留め設計用外力に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.458，pp.59-68，(1994)