



近接工事の調査・設計・施工技術

4. 近接施工での影響予測

青木 雅路 (あおき まさみち)
 ㈱竹中工務店 エンジニアリング本部

清 広 歳 (せい ひろとし)
 ㈱大林組 技術研究所 山留めグループ長

4.1 はじめに

近接施工では、近接する既設構造物（近接構造物と以下呼ぶ）に有害な影響を及ぼさないように施工することが求められる。そのため、施工に伴う近接構造物への影響予測が行われ、必要に応じて対策工が検討される。

根切り山留め工事に限定すると、検討すべき近接構造物があることを考慮した山留め側圧の設定、その側圧を考慮した山留め壁変位に伴う近接構造物への影響評価、掘削に伴うリバウンド、山留め壁背面地盤の地下水位を低下させた場合の地下水位低下に伴う変状等が近接施工に伴う影響予測として挙げられる。

ここでは、新設工事を建築工事等の開削工事に限定して、現状行われている近接施工の現状を踏まえて、近接施工での影響予測について紹介する。

4.2 検討項目

根切り山留め工事に伴う周辺地盤および近接構造物への影響は、施工に伴う各種地盤変位より生じる。近接施工の計画段階で検討すべき項目は、一般的に次の①～③の項目である^{1)~3)}等。また、④その他の検討項目(2.3.2の④～⑦に対応)として、杭、山留め壁、地盤改良等の施工に伴う周辺への影響が挙げられる。

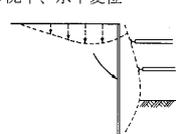
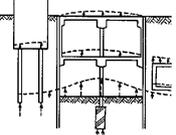
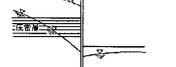
- ① 山留め壁変位に伴う周辺への影響
- ② 掘削に伴う地盤浮上り（リバウンド）の周辺への影響
- ③ 地下水位低下に伴う周辺への影響
- ④ その他(杭、山留め壁、地盤改良等の施工時影響)

①～④の検討項目と、主な予測手法を表-4.1に示す。予測手法に関しては、4.3節で詳述する。

周辺地盤および近接構造物への影響評価は、①～④の中で関係ある項目を検討し、必要に応じて対策工を検討する。②リバウンドについては、①、③の沈下と逆に浮上る方向の値のため、省略することもある。ただし、近接施工対策で山留め壁変位を小さく抑えると、リバウンドが卓越し周辺構造物が浮上る場合もあり、注意が必要である。

なお、近接構造物についての確認事項としては、構造物の機能や使用上の問題となる変位や傾斜角、ならびに構造上問題となる相対変位や傾斜角と付加応力等がある。

表-4.1 近接施工における検討項目と予測手法¹⁾等より作成

検討項目	主な予測手法
①山留め壁変位に伴う周辺の沈下、水平変位 	a. 過去の事例から推定 a-1 山留め壁の最大変位から最大沈下量を推定 a-2 山留め壁の変位分布から背面地盤の変位分布を推定 a-3 地盤変位から構造物への影響を推定 b. 別に求めた山留め壁変位を与えて、有限要素法解析にて推定 c. 掘削を応力解放で与えて FEM 解析にて推定
②掘削に伴う周辺の浮上り 	a. Steinbrenner の弾性解などを利用し、掘削範囲の根切り底に掘削除荷重を与え、背面地盤内の浮上り量を算定、浮上り分布から既設構造物の影響検討 b. ①の b、c 項の方法で、掘削範囲の根切り底に掘削除荷重を与えて解析 c. ①の b、c 項の方法で、根切り底の深さの地盤面に a 項で求めた地盤変位を与えて解析
③地下水位低下に伴う周辺の沈下 	a. 井戸理論や FEM 解析により、透水層の水位低下を求め、弾性論（砂質土）や圧密理論（粘性土）により、背面地盤の沈下を算定、既設構造物への影響を検討
④その他 ・杭（場所打ち、埋込み、打込み）施工に伴う変位 ・山留め壁施工・撤去に伴う変位 ・地盤改良（薬液注入工法、深層混合処理工法、生石灰杭工法）施工に伴う変位	a. 過去の事例から推定 b. 有限要素法を用いた推定

4.3 地盤変位の予測法

4.3.1 山留め壁変位に伴う周辺影響予測の分類

近接施工での影響予測において、すべて詳細な検討が必要なわけではなく、簡易な推定で安全性が確認できれば、それ以上の詳細な検討が省略できる場合も多い。

図-4.1に山留め壁の変位に伴う周辺地盤・構造物の変位予測方法の分類を示す。大きく、次の3種類に分類される。

- (a) 根切り規模等から、概略沈下量を予測
- (b) 山留め壁変位量より、沈下量を予測
- (c) 山留め架構と地盤を考慮した一体解析により構造物の変位量を予測

周辺地盤への影響評価では、検討レベルに応じて、次のような値が評価項目として挙げられる。

- ① 地表面最大沈下量
- ② 最大沈下量が発生する山留め壁からの距離
- ③ 地表面沈下量の分布形
- ④ 地中を含めた背面地盤内の変位分布

例えば、①最大沈下量が、近接構造物の傾斜角を含めた許容値以下となれば、基本的に沈下は問題とならない。

講座

最大沈下量が許容値以上であっても、②最大沈下量の発生位置が近接構造物よりかなり山留め壁側にある、③沈下の分布形から、近接構造物位置の沈下量や傾斜角は許容値以内と予測できる等の判断ができれば、良いこととなる。図-4.1は、既往の予測法を分類したもので、上記①~④がどの予測法で求まるかも示されている。文献4)には、主な予測法の概要が示されているので、参照していただきたい。

次に、参考となる予測法とそれより得られる主な知見を以下に示す。

1) 山留め壁の最大変位量を沈下量の最大値と設定
 最大沈下量は山留め壁の最大変位量より小さい¹⁾。圧密沈下等地下水低下に伴う沈下が無い場合を前提としての知見である。従来から最大沈下量の目安として、山留め壁の最大変位量が考慮されている理由である。このことを根拠に、近接協議では、山留め壁の最大変位量に着目した議論が行われることも多い。

2) 山留め壁からの距離を考慮した沈下量の予測法^{2)他}

山留め壁変位に伴う近接軌道の沈下量の予測値として、(1)式が提案されている(図-4.2参照)。なお、列車の運転保安上の値として、鉛直変位の他に水平変位も注意すべきであるが、実測結果によれば掘削による山留め壁変位が軌道に与える影響は水平変位より鉛直変位の方が約3倍程度大きかったため、鉛直方向に着目して管理すれば良いとしている。なお、 $B=1\sim 10\text{ m}$ とすると、 $A=(0.2\sim 0.1)\delta_{\text{max}}$ となる。

$$A = \delta_{\text{max}} / (\beta \cdot \gamma \cdot \varepsilon) \dots\dots\dots (1)$$

δ_{max} : 山留め壁の許容最大変位量

$\beta, \gamma, \varepsilon$: 係数 :

β : 山留め壁変位の実測値と計算値の比、 γ : 山留め壁変位と路盤変位との比、 ε : 路盤変位と軌道変位との

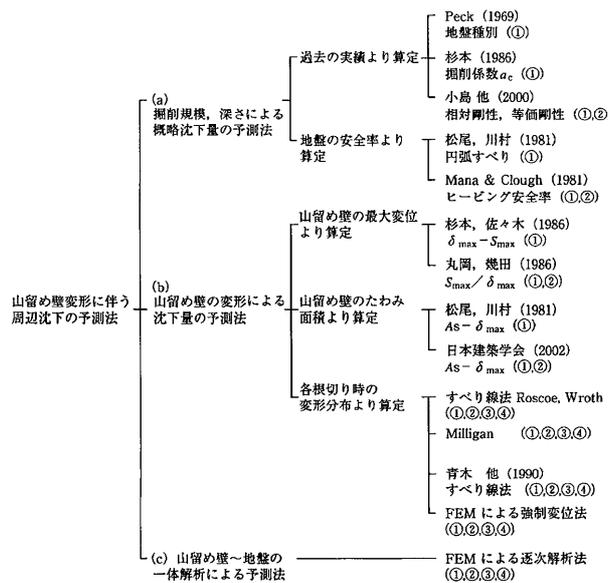


図-4.1 周辺地盤沈下の予測法の分類⁴⁾

比。過去の実績より、次の値を用いてよい²⁾。

$\beta=1.58, \gamma=1/(0.388-0.022B), B=$ 山留め壁から軌道中心までの距離, $\varepsilon=1.14$

A : 予測軌道沈下量 (目標速度に応じた管理基準値)

3) 山留め壁変形面積による予測法¹⁾

山留め壁変位に伴う沈下分布の予測値として、図-4.3の方法も提案されている。この方法では、沈下が山留め壁の変位に伴う背面地盤内の土砂の移動により生じることから、山留め壁の変形面積を用いて沈下量を算定する。この場合、1次根切り時と2次根切り時以降で沈下の分布形を変えたモデルが使われる。この理由は、1次根切り時と支保工が仮設される2次根切り時以降で山留め壁の変位分布が変わり、沈下のモードも変わることから考慮したものである。また、 $A_S=(0.5\sim 1.0)A_d$ となっているのは、実測値に基づく設定であるためであり、山留め壁の変形に伴う土の体積変化や掘削に伴うリバウンドの影響を考慮したことに対応する。

4) 近接構造物の応力算定が可能な予測法

近接構造物に作用する付加応力を算定する方法としては、次の(a), (b)の方法が用いられている。

(a) 構造物位置での地盤変位から荷重を算定し既設構造物に入力する方法 (応答変位法)。

(b) 既設構造物を含む地盤~構造物を一体として解析する方法 (一体解析法)。

応答変位法(a)は、構造物位置での地盤変位 (δ) を求め、地盤反力係数 k を仮定することで、 $P=k \cdot \delta$ として、荷重度 P を算定して既設構造物に荷重度として入力す

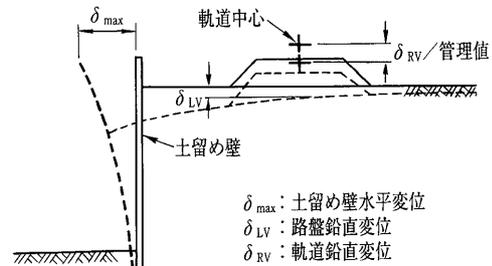


図-4.2 土留め壁と路盤および軌道の変位の関係^{2),5)~8)}

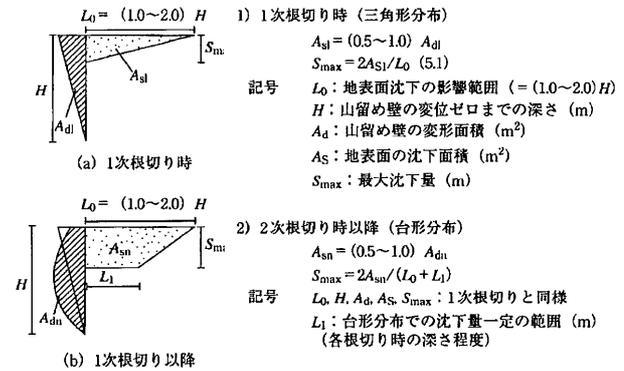


図-4.3 山留め壁の変形による地表面沈下量の算定モデル¹⁾

る方法である(図-4.4(a)参照)。地盤変位を1度荷重に置き直して載荷することで、構造体の剛性の影響をある程度考慮することができる。既設構造物の規模と剛性が大きく、地盤変位と既設構造物の変位が異なると予想される場合や地盤と既設構造物が相互に影響し合うと考えられる場合に用いられる。

地盤変位の予測は図-4.4(b) 一体解析法と同じ FEM 解析を用いる場合が多い。FEM 解析は、図-4.4(b)に示すような断面方向での2次元で行われることが一般的であり、線状構造物や群杭構造物では、地盤変位を別途求めて、構造物の作用荷重として与え、付加応力を求めた方が、実務的な値が得られると判断される場合で用いられる。

一体解析法(b)は、既設構造物を含む地盤~構造物を一体として解析する方法であり、一般に有限要素法による解析となる(図-4.4(b)参照)。解析方法は、4.3.2で記述する。

どちらの方法を採用する場合にしても、現在では地盤変位の予測精度が確立されているとはいえないこと、現実の複雑な地盤状況を的確に把握することが困難であること、地盤を連続体として取扱う有限要素法では地盤の崩壊や滑りを表現しにくいこと等の限界を理解しておく必要がある。また、図-4.4では掘削に対する断面方向での2次元解析での比較例を示したが、既設構造物がトンネルのような平面的に長く連続した構造体の場合、掘削規模と既設構造物の大きさ・位置関係によっては、平面方向での2次元解析での検討が行われることもある。なお、実際の検討にあたっては、入力値の設定や解

析結果の判断に過去の経験に基づく配慮も重要である。

4.3.2 有限要素法による地盤変位の予測方法

実際の近接協議では、山留め壁変位に伴う周辺地盤変位の予測方法として、有限要素法を用いた解析が行われることが多い。

山留め壁変位が周辺地盤および近接構造物に与える影響を考慮できる FEM 解析方法として、表-4.2に示す「強制変位法」と「逐次解析法(節点力解放法)」の二つの方法がある。同表に、解析法の解析モデル・手順および長所・短所なども示す。これらの予測方法では、掘削によるリバウンドも考慮することができる。

強制変位法は、山留め壁に梁・ばねモデルなどにより算定した変位を強制的に与える方法である。リバウンドの考慮としては、掘削底面に土被り圧を解放力として与えたり、別途求めた変位量を強制変位として与える方法がある。逐次解析法は、掘削によって解放される山留め壁掘削側の側圧および掘削底面の土被り圧を、節点に解放力として作用させて解析する方法である。

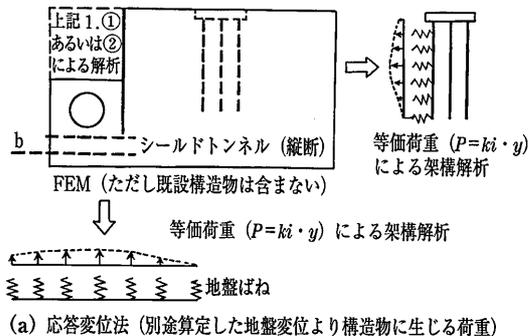
表-4.3に、近接協議20事例で用いられた検討方法(予測方法)の分類を示した。20例中、18例で強制変位法が、2例で逐次解析法が用いられている。また、地盤の非線形性を考慮した弾性解析や弾塑性解析はあまり用いられていないことも指摘できる。以下に、同表に示す近接協議での適用実績を踏まえて、強制変位法と逐次解析法についてまず紹介し、ついで解析領域、地盤定数、および解放力などに関して現状の考え方と留意点を整理して示す。

(1) 強制変位法

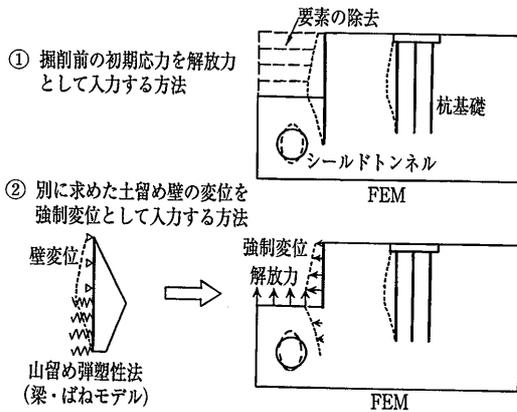
① 解析領域(解析メッシュ)・境界条件(拘束条件)

水平方向掘削側の領域に関しては、一般的な矩形の場合、掘削平面の中心を対称面と考え、対称条件を利用して掘削平面中心までを解析領域とし、対称面の水平方向の自由度を拘束、鉛直方向を自由とする。掘削平面が矩形でない場合や、片面のみが階段状掘削などのように、対称条件が利用できない場合は、掘削平面を中心に左右の山留め壁背面に解析領域を設定すれば良い。

山留め壁背面側における水平方向の解析領域の設定は、基本的には、掘削による影響が及ばない領域(不動領域)までを対象とし、節点の全方向の自由度を拘束する。この領域の設定には、荷重応力がどこまで及ぶかを示した圧力球根の利用も考えられる。現状では山留め背面から



(a) 応答変位法(別途算定した地盤変位より構造物に生じる荷重)



(b) 一体解析法(既設構造物を考慮した有限要素法による解析)

図-4.4 近接構造物の変位予測方法⁹⁾に加筆修正

表-4.3 実際の近接協議で使用された検討方法の分類¹⁰⁾

資料No.	強制変位法				逐次解析法
	タイプ-1	タイプ-2	タイプ-3	タイプ-4	タイプ-5
壁	梁・ばねモデルにより山留め壁の変形・応力を検討	梁・ばねモデルにより山留め壁の変形・応力を検討	梁・ばねモデルにより山留め壁の変形・応力を検討	梁・ばねモデルにより山留め壁の変形・応力を検討	弾性FEM
リバウンド	弾性FEM(掘削底に上向き荷重)	考慮せず	リバウンド量をFEM解析に強制変位として入力	スタンププレーナ多層近似解	弾性FEM
隣接対象物	弾性FEM(梁・ばねモデルで計算した変形を強制変位で与える)	弾性FEM(梁・ばねモデルで計算した変形を強制変位で与える)	弾性FEM(梁・ばねモデルで計算した変形を強制変位で与える)	弾性FEM(梁・ばねモデルで計算した変形を強制変位で与える)	弾性FEM
件数	9	5	2	2	2

表-4.2 有限要素法 (FEM) 解析での検討法例 (2次元解析の場合)⁴⁾に加工

	逐次解析法 (節点力解放法)	強制変位法
解析モデル 例および 解析手順	<p>1) 掘削前の断面をモデル化し自重解析 2) 根切り段階の各ステップで掘削要素を除去 (節点力の解放) → 周辺地盤内の応力・変形の算定</p>	<p>1) 別途山留め計算により、山留め壁変位を算定。 2) 掘削後の断面をモデル化し、山留め壁変位を境界条件として入力。 3) リバウンドは、鉛直方向力の解放として考慮。 → 周辺地盤内の応力・変形を算定</p>
長 所	<ul style="list-style-type: none"> ・解析上、かなり実際の施工段階を疑似できる。 ・適切な自重解析ができれば、近接構造物の影響を考慮できる。 ・土の構成式も考慮可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ・梁・バネモデルで求められた値を山留め壁の変位として入力、施工途中での観測施工では、実測値を入力することも可能。 ・背面地盤内の地下水を別途考慮しなくて良い。 ・土の構成式の考慮では、増分ひずみのみでの評価となる。
短 所	<ul style="list-style-type: none"> ・山留め壁変位に合うような入力定数の設定が必要 ・背面側側圧として、(土圧+水圧)の両者を考慮する必要がある。 ・リバウンドは、鉛直方向力の解放として考慮されるが、2次元解析では地中応力の3次元的広がりを考慮しにくい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・山留め壁変位の算定に近接構造物の影響を考慮しにくい。 ・地盤内の応力は、増分応力のみ算定されるため、不明確となる。 ・リバウンドの評価で、2次元解析では地中応力の3次元的広がりを考慮しにくい。
解析上の 留意事項	<ul style="list-style-type: none"> ・一般的な掘削条件で山留め壁の変形が合う解析であることを事前に確認することが必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ・背面地盤内の増分応力は引張り力として求められるが許容できる (自重を考慮すると圧縮応力) 範囲などの確認が必要

掘削深さの2倍から3倍程度の領域を解析対象としている。

一方、鉛直方向の解析領域に関しては、山留め壁下端から最低でも5~10m程度を考慮し、それ以上の深さに硬質層がある場合には、この層の上端やこの層の上端から深さ数mまでモデル化することが一般的に行われている。しかしながら、水平方向山留め壁背面側と同様、基本的には掘削の影響を受けない不動領域まで解析領域を設定すべきである。したがって、根切り底から掘削幅程度、または掘削面積の平方根以上の深さまでを解析領域とすることが妥当であろう。図-4.4に、敷地内外のリバウンドを層別沈下計で測定した例を示す。測定は二重管のレベル計測であり、平面規模140m×146m、掘削深さ12.6mと大規模掘削の事例であるが、GL-44mの鉛直変位として、掘削中央で20mm程度あり、また、山留め壁から2.5m離れた地盤のGL-44mの層別沈下計の値も浮上っている点が指摘できる。

このように解析領域を設定した場合、大規模掘削では、すぐ100mクラスの解析領域が必要となり、深部の地盤定数の評価、解析要素数の増加、深い部分の要素分割とのバランスによる地表から根切り底までの要素分割の粗

さといった問題がある。特に表層近くの近接構造物の挙動予測が課題の近接施工での解析では、地表から根切り底までの要素分割に留意する必要がある。なお、境界条件としては、不動であることから全自由度を拘束することが基本である。

以上、解析領域・境界条件の設定について示したが、矩形掘削では、3次元状態であり2次元状態とみなせない場合もある。この場合、3次元解析を行えば問題は解決する。しかし、十分な解析に必要な要素数や労力、時間などの制約で2次元モデルを用いる場合、解析結果に3次元効果が反映されていないことを認識、考慮して、実際の工事計画の立案や施工への対応を行うべきである。

② 地盤定数

地盤を弾性体とした解析では、山留め壁の変位の実測値と解析値が良い対応を示す地盤剛性と、根切り底面のリバウンドの実測値と解析値が良い対応を示す地盤剛性が一般に異なる。この原因としては、地盤剛性のひずみ依存性、地盤剛性の水平・鉛直の異方性等が考えられる。この問題は、近接施工におけるFEM解析に限らず大きな問題である。解決法としては、地盤要素を非線形モデ

ルを採用すること、弾性解析（地盤）の場合ひずみレベルに対応した剛性を用いることなどがある。しかしながら、非線形モデルとしてはどれが適切か、そのモデルの地盤定数の設定法をどうするのか、弾性解析（地盤）でのひずみレベルに応じた剛性設定法や各要素でひずみレベルが異なることなどを、どう解決するかといった問題がある。また、①解析領域と同様、3次元状態の掘削工事を、地盤定数を工夫して2次元モデルで解析する手法も問題といえる。

このように、地盤剛性設定に関しては、問題が多いが、弾性解析での設定に当たっての参考として、文献2)では、定数の設定や非線形解析での留意点も記載されている。

③ 解放力

解放力としては、山留め壁掘削側に作用させるものと、掘削底面に作用させるものがある。

掘削底面に作用させる解放力は、掘削深度までの土の重量となる。また、掘削底面に作用させる解放力については、山留め壁の強制変位に整合させるため、例えば、直接基礎の沈下量予測に実績のあるSteinbrenner（スタインブレナー）の多層近似解を利用して、掘削底面の変位をあらかじめ算定しておき、節点解放力に代えて強制変位を掘削底面に与える方法もある。

なお、掘削深さが平面的に異なったりする3次元状態の掘削の場合や、地下水位の変動により有効応力が変化する場合などは、これらの影響に留意する必要がある。

④ その他

強制変位法の場合、山留め壁に変位を与える。現状では、逐次解析法を用いた山留め壁変位が実挙動と良好な対応を示すか検証が十分なされていないことから、山留め壁の変位予測法として実績のある梁・ばねモデルの解析法によって変位を求めて、山留め壁位置の変位入力値として用いる。しかしながら、梁・ばねモデルの解析法では、山留め壁背面側の近接構造物が、山留め壁の変位（側圧）に与える影響は一般に考慮されておらず、この点に留意する必要がある。

周辺変状の度合が大きく、地盤と背面側山留め壁、地盤と近接構造物の間のズレなどを考慮する必要がある場合は、山留め壁背面際と近接構造物際にジョイント要素を用いる方法もある。

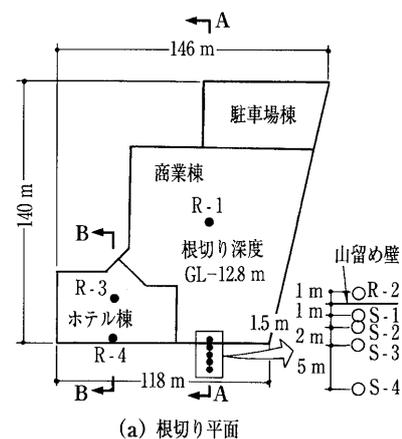
(2) 逐次解析法（節点力解放法）

逐次解析法においては、①解析領域（解析メッシュ）・境界条件（拘束条件）、②地盤定数、および④その他に関しては、(1)強制変位法と同様である。ここでは、逐次解析法と強制変位法とで異なる③解放力についてのみ以下に示す。

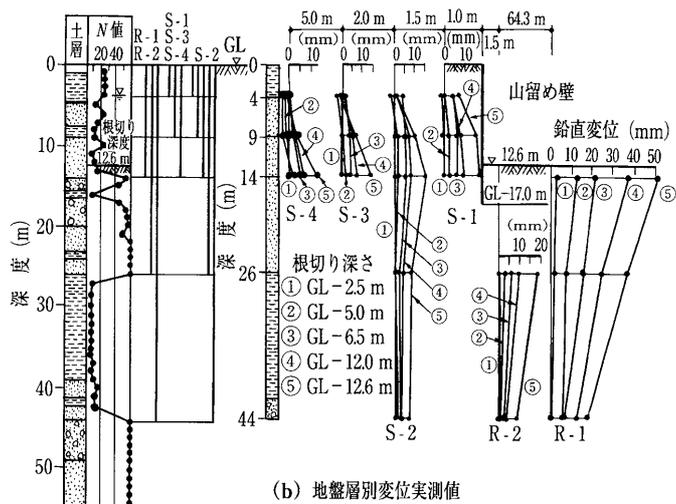
③ 解放力

解放力としては、山留め壁掘削側に作用させるものと、掘削底面に作用させるものがある。

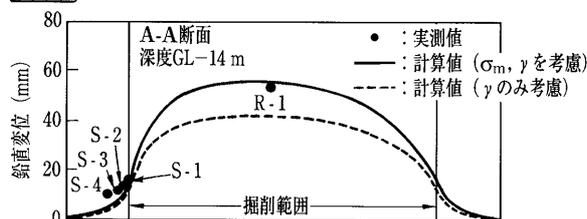
山留め壁面に作用させる初期荷重の設定値としては、静止側圧（または、静止土圧）を作用させれば良いと考えられる。静止側圧は、表—4.2の逐次解析法の解析モ



(a) 根切り平面



(b) 地盤層別変位実測値



(c) 平面分布図 (GL-14 m) の実測値と計算値の比較

図—4.5 周辺地盤のリバウンドの測定値と計算値の比較例¹¹⁾に加筆修正

デルの欄で示した山留め壁や近接構造物を除いた水平な地盤での自重解析を行えば静止側圧が求まる。なお、自重解析で静止側圧係数（静止土圧係数）を設定して行う方法もある。しかしながら、近接構造物が有る場合には、近接構造物が無い場合と比べて静止側圧が異なることも予想されるが、その影響を考慮する一般的な方法は現状では示されておらず、この点に留意する必要がある。

掘削底面に作用させる解放力については、(1)強制変位法と同様である。

なお、上記の(1)、(2)の解析法とも、地下水の低下による周辺変状については、地盤と地下水を考慮する特別な解析¹³⁾等以外では対象としていない。地下水の低下による影響評価の方法については、4.3.4で示す。

4.3.3 背面地盤のリバウンド

根切りに伴う背面地盤のリバウンドは、根切り内部の浮上り・沈下の検討と同様に行うことができる。主な検討方法としては、(1)、(2)のような検討法がある。

講座

(1) 弾性解を用いた Steinbrenner の多層近似解や、Terzaghi (テルツァーギ) の圧密理論を除荷時に適用した簡易的な理論解を用いるもの

(2) 有限要素法による一体解析から求めるもの

簡易的な理論解を用いる(1)の方法は、基礎の沈下算定と同じ弾性論の重ね合わせで地中応力や変位を算定する。掘削範囲と近接構造物位置までを考慮することで、近接構造物位置のリバウンドが算定できる。この方法でも、地盤の変形係数を適切に評価することで、掘削面内・面外とも図-4.5の計算値のように算定できる。ただし、構造物がない場合の地盤変位を算定するものである点に注意が必要である。

有限要素法による一体解析(2)の方法は、近接構造物の剛性を考慮できるなどの長所はあるが、2次元解析では、3次元的地中応力の分散を適切に考慮していない場合もあり注意が必要である。

なお、掘削によるリバウンドの量は、実際より過大に見積られることが多い。原因としては、掘削底面以深の地盤の変形係数を過少評価している、2次元解析では除荷重の3次元的地中応力分散が考慮できていないなどが考えられる。対策としては、地盤の変形係数の適切な評価や除荷荷重の解析上での調整(3次元効果等の影響を考慮して実際より荷重を低減)が考えられる。図-4.6に、リバウンドに関する文献から掘削中央における排土荷重とリバウンド量の関係をまとめたものを示す。リバウンド予測解析の結果が妥当性であるかどうかを判断する上で、参考とされたい。

4.3.4 地下水位低下に伴う沈下

排水工法により山留めの周辺地盤の地下水位を低下させれば、地盤中の有効応力が増加し少なからず沈下が生じることになる。

地下水位低下に伴う沈下量の算定は、水理公式に基づく水位低下曲線や有限要素法による山留め壁の影響を考慮した浸透解析を行って、検討位置の水位低下量を算定し、有効応力の変化に伴う沈下量として求める。

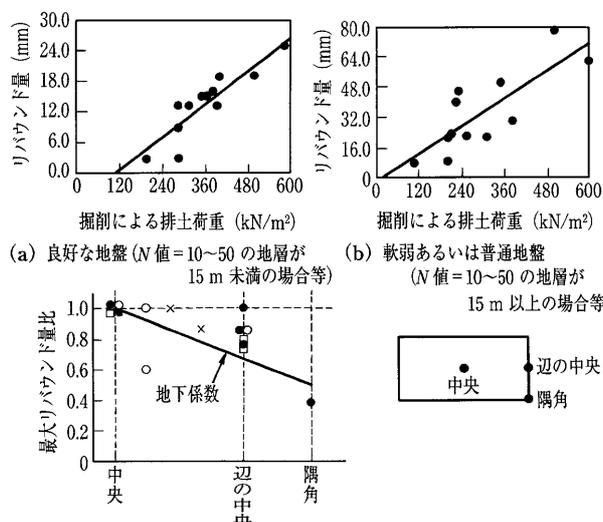


図-4.6 地盤種別と平面位置を考慮したリバウンドの実測例のまとめ¹²⁾

粘性土層では、水位低下に伴う有効応力の変化が遅いため一般に圧密沈下として検討する。圧密沈下の検討では、地下水位低下に伴う地盤沈下は比較的広範囲となることから、一次元圧密条件として検討されている¹⁾等。また、有効土被り圧に地下水位低下に伴う有効応力の増分を加えた値が圧密降伏応力より小さければ、圧密沈下は生じないと判断して砂質土と同様に弾性沈下として検討する場合もある。圧密降伏応力を超える場合には、水位低下期間を考慮した検討が行われる場合もある。具体的な圧密沈下の算定方法は、一般的な圧密計算の方法を参照されたい¹⁾等。

砂質土層では、水位低下に伴う有効応力の変化が早いいため、一般に弾性沈下として検討される。検討方法は、圧密沈下の場合と同様に一次元圧縮条件として検討しても良い¹⁾。また、比貯留量を用いた Lohman (ローマン) の式を用いる方法も提案¹³⁾されている。弾性沈下量は絶対値が小さいため、地下水位の低下量が小さい場合には検討を省略することもある。

4.4 予測精度の現状

地盤変位の予測には、山留め壁変位に伴う地盤変位が検討される。山留め壁変位の予測精度がまず問題となる。

FEM 解析での強制変位法では、山留め壁位置に山留め計算により算定した変位を強制的に与えることが一般的である。山留め計算には実績から梁・ばねモデルが使われることが多いが、山留め側圧の設定における近接構造物の考慮方法は不明確である。

また、逐次解析法では、自重解析により地盤の初期応力を設定して、以後ステップ解析で掘削過程を模擬するが、近接構造物がある場合の初期応力を正確に設定することは難しい。初期応力を正確に求めようとするれば、近接構造物の構築前からの地盤内応力の経時的な変化を考慮する必要があり、地盤の長期的な堆積環境や地下水位の変動等も考えると現実的な検討は難しい。

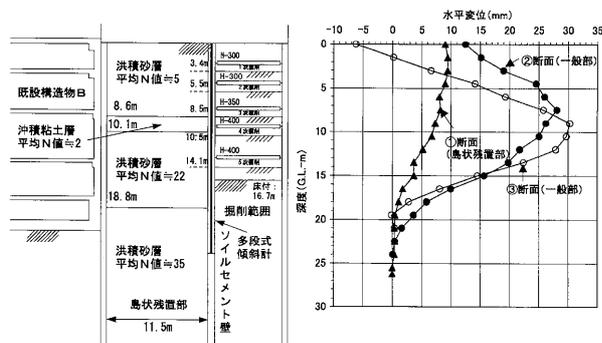
山留め壁変位が正しく求めた場合でも、4.3.2で示した解析領域および地盤定数の妥当性や、2次元モデルで解析する場合の3次元的效果の考慮の有無等、予測精度を左右する要因は多い。

以下に、近接施工での山留め壁変位の現状、強制変位法での FEM 解析の予測精度について、現状の知見を示す。

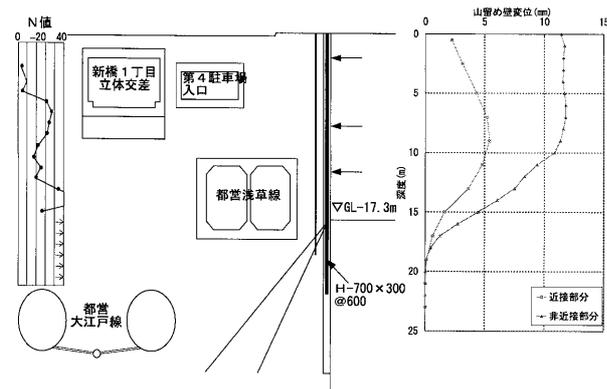
(1) 山留め壁の変位予測

山留め壁に作用する側圧を適切に評価し、山留め壁変位を精度良く予測する必要がある。既設の建物地下躯体や地中構造物が近接した場合、構造物重量を上載荷重として山留め壁に作用する側圧を評価する方法は指針¹⁾等に示されているが、それ以外の近接構造物を考慮した側圧の考え方は一般的に示されていない。

図-4.7(a), (b)に、近接構造物がある場合とない場合の両者が測定されている事例での山留め壁変位の実測値を示す。建物地下室や地中構造物の場合、山留め壁変位は一般的な地盤に比べて小さくなる。ただし、図には



(a) 近接構造物が地下躯体の場合での比較例



(b) 近接構造物が地中構造物の場合での比較例

図-4.7 近接構造物の有無による山留め壁変位量の比較¹⁰⁾

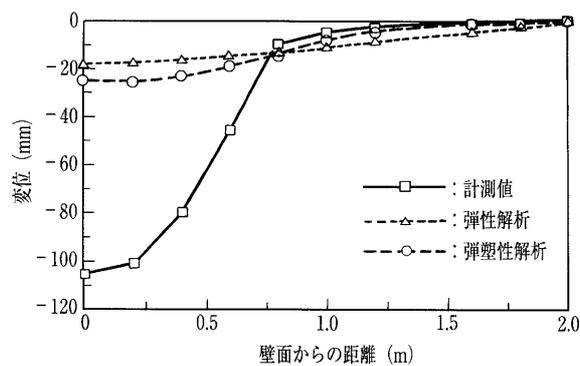


図-4.8 各種解析値と実験値の比較¹⁴⁾

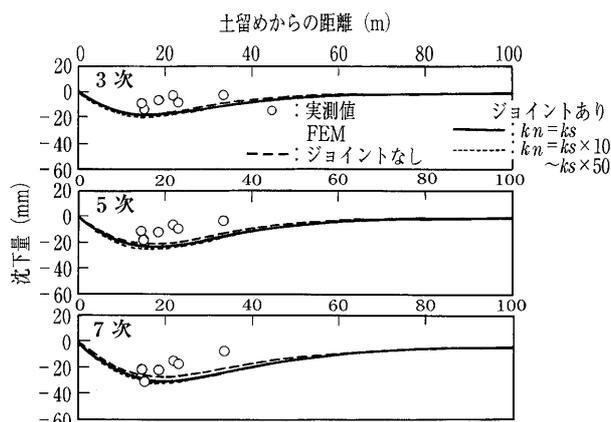


図-4.9 3次元 FEM 解析でのジョイントの効果¹⁵⁾

示していないが、土より重い上載荷重として働く場合、それより下方の側圧は当然大きくなる。

近接構造物を考慮した側圧の算定方法はまだ不明確であり、より合理的な検討には、山留め壁の背面に構造物が近接する場合の適切な側圧設定法が今後の課題である。

(2) 周辺地盤変位の予測精度

4.3.2で示したように、近接施工での検討では、FEM解析による強制変位法が一般的に使われている。

岡原他¹⁴⁾は、深さ4mの大型土槽を用いた山留め壁を強制変形させた背面地盤変位の実験を行い、強制変位モデルによるFEM解析結果との比較を行った。解析モデルは、弾性解析、弾塑性モデル(Drucker-Pragerタイプ)を用いて山留め壁変位を入力値とする強制変位法である。解析結果の比較および実測値との比較では、弾性解析より弾塑性解析の方が壁近傍の沈下が大きい。ただし、弾性解析・弾塑性解析とも壁近傍の沈下は実測値よりかなり小さいことを指摘している(図-4.8)。この理由として、弾塑性解析でもすべり土塊の移動量の推定が困難なことを挙げている。

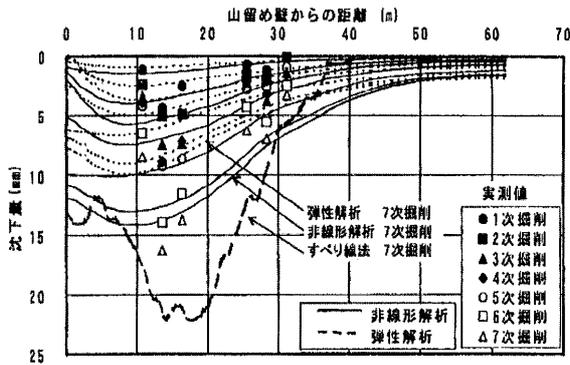
杉江・上野他¹⁵⁾は3次元FEM解析(関口・太田モデル)で、山留め壁と地盤の境界に入れたジョイント要素の効果を検討している。ジョイント要素は、Goodmanタイプで山留め壁の掘削側と背面側に用いており、直剛性 K_s (ジョイント要素の面外方向剛性)を1~50倍で変化させたものである。図-4.9にジョイント要素の有無および直剛性を変えた解析結果の比較を示す。ジョイ

ント要素の効果は比較的小さい。また、この結果では山留め壁の変位量、分布形も周辺沈下分布と同様にほとんど差がみられていない。

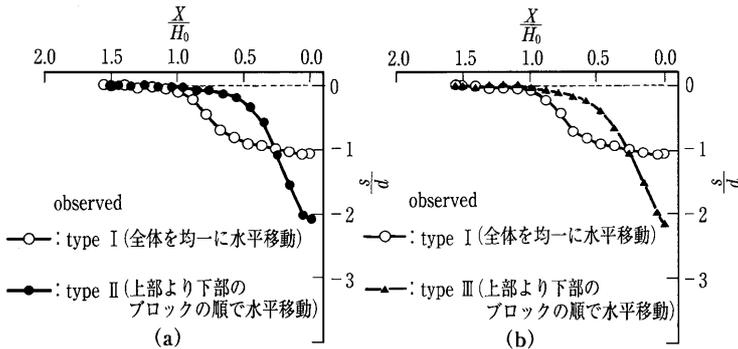
河野他¹⁶⁾は、非線形弾塑性解析(R-Oモデル)を用いたFEM解析を行っている。解析方法は山留め壁変位を入力値とする強制変位法である。実測された山留め壁変位を用いて背面地盤の沈下を求め、実測沈下量との比較をしている。地盤の変形係数は、PS検層や N 値からせん断波速度を設定し求めた微小ひずみの変形係数から非線形解析を行っている(図-4.10)。弾性解析ではかなり合わないこと、非線形解析では大きな沈下まで比較的良く予測できることを示している。

中井他¹⁷⁾は、アルミ棒を用いた2次元モデルで、山留め壁の変位手順と沈下の影響を調べている。山留め壁の変位手順は、type I:全体を均一に水平移動、type II:上部より下部のブロックの順で水平移動、type III:下部より上部のブロックの順で水平移動の3とおりが行われた。図-4.11に示す実験結果の比較から、周辺沈下は、type Iとtype II、IIIでは異なることを指摘している。実際の掘削は、地表面から行われるため、メカニズムとして、type Iよりtype IIに近い。施工段階を考慮しない評価より実際の沈下は、type Iより最大値が大きく、より局所的であることが予想されるとしている。なお、弾性解析は、実際の挙動で重要な施工段階の違いを考慮できないことを指摘している。

講座



図—4.10 非線形解析での背面沈下の計算例¹⁶⁾



縦軸 s/d (s : 最終沈下量, d : 山留め壁最終変位量 = 10 mm)
横軸 X/H_0 (X : 山留め壁からの距離, H_0 : 山留め壁高さ = 300 mm) で無次元化した値

図—4.11 山留め壁変位モードの違いによる沈下分布の比較¹⁷⁾

4.5 おわりに

近接施工での影響予測に関する現状と課題について述べた。近接施工では、許容値が数 mm 程度とかなり厳しいのが現状であり、それに対して、予測精度が十分でないと感じる読者が出ることを恐れるが、かなり厳しく書いたつもりである。

近接施工に伴う近接構造物の実測事例から、リバウンドが卓越する場合があることが分かっている。現状の近接協議では、山留め壁の変形による沈下が中心であり、周辺地盤のリバウンドの議論が少ない。今後、近接構造物のリバウンド評価法は、より重要となると考える。

近接施工での近接構造物を含めた予測には、有限要素法が一般に用いられている。調査した近接協議の実績では、その多くが梁・ばねモデルにより山留め壁変位を求めて、弾性 FEM モデルに強制変位として入力する解析方法（強制変位法）を用いている。また、山留め壁に作用する側圧は、近接構造物が無い場合に比べて異なるこ

とは十分考えられるが、上載荷重としての評価に留まっている。今後、地盤条件・近接構造物の有無の比較ができる実測事例の収集と弾塑性・非線形解析を含めた各種解析結果との比較・検証を進め、より合理的な解析が適用されることが必要と考える。

参考文献

- 1) 日本建築学会：山留め設計施工指針，2002.
- 2) 東日本旅客鉄道会社：近接工事設計施工マニュアル，2004.
- 3) 首都高速道路公団：首都高速道路に近接する構造物の施工指導要領（案），1983.
- 4) 地盤工学会：入門シリーズ29 知っておきたい根切り・山留めの基本，2004.
- 5) 桑原 清・増田 達・星野 正・会澤真喜：線路近接掘削による土留め工と路盤の変位について，第32回地盤工学研究発表会，pp. 1747~1748, 1997.
- 6) 小西康人・桑原 清・坂下伸一郎：線路近接掘削による路盤と軌道の変位について，第32回地盤工学研究発表会，pp. 1749~1750, 1997.
- 7) 柳河 勇・加藤 誠・会澤真喜：線路近接掘削による土留壁と路盤の変位について，土木学会第52回年次学術講演会，pp. 376~377, 1997.
- 8) 星野 正・桑原 清・松浦康博：線路近接掘削による土留壁と軌道の変位について，土木学会第52回年次学術講演会，pp. 378~379, 1997.
- 9) 中野正則・木村嘉富：近接施工における留意点，基礎工，Vol. 21, No. 10, pp. 9~15, 1993.
- 10) 日本建築学会：シンポジウム「山留め設計の諸課題」，委員会報告Ⅲ（近接施工の影響評価と対策），2006.
- 11) 青木雅路・柴田恭幸・丸岡正夫：地下工事に伴う根切り地盤の浮上りと沈下（その1），（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 1649~1652, 1990.
- 12) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説一開削トンネル，pp. 429~436, 2001.
- 13) 東京地下鉄（旧帝都高速度交通営団）土留工解析指針（案），p. 43~48, 1999.
- 14) 岡原美知夫・木村嘉富・渡会正晃・井上昭生：土留め壁の変形に伴う地盤変状に関する実験および解析，第28回土質工学研究発表会，pp. 2003~2006, 1993.
- 15) 杉江茂彦・上野孝之・秋野矩之・崎本純治：変形解析結果に与える土留め壁と地盤間の接触条件の効果，土木学会第53回年次学術講演会，pp. 496~497, 1998.
- 16) 河野貴穂・青木雅路・丸岡正夫：有限要素法に基づく山留め壁背面沈下の算定法の評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 583~584, 2001.
- 17) Nakai, T., Kawano, H., Murata, K., Banno, M. and Hashimoto, T.: Model Tests and Numerical Simulation of Braced Excavation in Sandy Ground: Influences of Construction, Wall Stiffness, Strut Position and Strut Stiffness, Soils and Foundations, Vol. 39, No. 3, pp. 1~12, 1999.