

山留設計用外力についての一考察

金谷 祐二 宮崎 祐助
森脇 登美夫 土屋 幸三郎

Study of Lateral Earth Pressures for Earth-Retaining Design

Yuji Kanatani Yusuke Miyazaki
Tomio Moriwaki Kozaburo Tsuchiya

Abstract

This paper makes a concrete proposition for a plan of excavation work which would be more practical based on diaphragm wall measurement data (earth pressure, water pressure, reinforcing bar stress, wall deformation, etc.). Firstly, the authors investigate what would be the most influential input data on the results of calculations and refer the characteristic of the program for the design of an earth-retaining wall. Then, from this result, the size and form of the load for design which were among the most influential of the input data are considered, and the following two points are proposed:

① The method of qualitatively determining the decrease in earth pressure accompanying excavation. ② The method of indicating the depth to which lateral pressure back of the earth-retaining wall acts as external force, and determining the depth of action as load and the distribution form of external forces for design.

概要

この報告は、当社が保有する OWS 壁での実測データ（側圧・水圧・応力変形など）をもとに、山留の設計をより実状に即したものとするための具体的な提案を行なったものである。本文では、まず、山留設計でインプットするデータ（側圧・切ばりの支点条件、土の変形係数など）のうち、どの項目が計算結果に大きく影響を与えるかを調査し、当社の山留設計用プログラムのもつ特徴について言及している。次に、この結果から、最も影響度が大きいと判断された項目のうち、設計用外力の大きさと形状について考察し、①掘削に伴う側圧の減少量を定量的に求める方法、②山留壁背面側の側圧が、どの深さまで外力として作用するか示し、荷重としての作用深さと設計用外力の分布形を求める方法、などについて提案した。

1. はじめに

深い掘削や山留壁が鉄筋コンクリートである場合の山留設計は、一般に、弾性法あるいは弾塑性法と呼ばれる設計法に基づいて行なわれている。これらの設計法は、地盤を弾性体、もしくは部分的に塑性体と仮定した理論に立脚して提案されている。しかし、材料としての土は、厳密には、弾性体ではなく、また、塑性体として扱うにも無理がある。ここに、理論と実際の現象とに差異を生ずる因があり、その設計法にマッチしたインプットデータの選定など運用面に多くのノウハウが必要となる。山留にかぎらず、土を扱う設計では、理論があっても、これに適合するインプットデータが完備し、はじめて設計法として成用に供されるといわれる所以もこのことにある。筆者らは、昭和40年以來、OWS 壁での山留工

事で、側圧、水圧、壁体応力、変形、切ばり軸力などを実測し、山留架構の挙動を知る膨大な資料を蓄積してきた。本文は、これらの資料をもとに、当社の山留設計用プログラムの特徴と、計算結果に最も影響を与える設計用外力の取り方について報告する。

2. 当社の山留設計法の特徴

当社の山留設計法は、いわゆる弾塑性拡張法と呼ばれる方法に属するもので、昭和43年に開発され、数回の部分改正を経て今日に至っている。設計法としては、過去1,000件以上の設計実績を持ち、すべての山留工事を安全に消化し得たことから一応確立されたものといえる。しかし、設計が安全であったことは事実としても、経済的かつ実状に即したものであったかどうかについては検討の余地もある。

設計法に基づいた計算結果を実状に即したものとするには、理論的に設定した仮定条件と実際の現象との溝を運用面でどのようにカバーしていくかにつきるといえる。運用面のノウハウを得るには、まず、設計法の特徴を知ることが必要であり、ここでは、インプットデータが計算結果にどのような影響を与えるかというかたちでその特徴を調べてみた。

当社の山留設計用プログラム“NEW-OWS”のインプットデータとしては、山留架構の諸寸法をはじめ、側圧、土の物性（単位体積重量、粘着力、内部摩擦角、変形係数）、切ばりの支承条件（固定 or 弾性支承）、山留壁の弾性係数・断面二次モーメントなどがあるが、ここでは、比較的その影響が大きいと考えられる側圧と切ばりの支承条件および土の変形係数についてその影響度を調査した。

図-1~3は、OWS壁を山留壁として約16mの掘削を5段階に分けて行なった工事を例にとって試算したもので、ここでは、側圧、切ばりの支承条件および土の変形係数 E_s をパラメータとしてそれぞれの影響度を定量的に調査した結果を示したものである。また、参考まで

変化させた項目	山留め計算結果への影響度			
	モーメント	変形	切ばり軸力	
側圧 $K=0.5\sim 0.8$	支点条件固定	○	△	◎
	バネ(k)	◎	◎	○
土の変形係数 $E_s/2, E_s, 2\cdot E_s$	支点条件固定	△	△	△
	バネ(k)	△	○	△
支点条件k/2,k,2·k,固定	◎	◎	○	

◎: 大きく影響する ○: 影響する △: あまり影響しない

表-1 インプットデータの影響度

に、応力と変形については、実測値を併記しておいた。実測値と計算値とを比較することによって、どの組合せが最も実状に即したもの

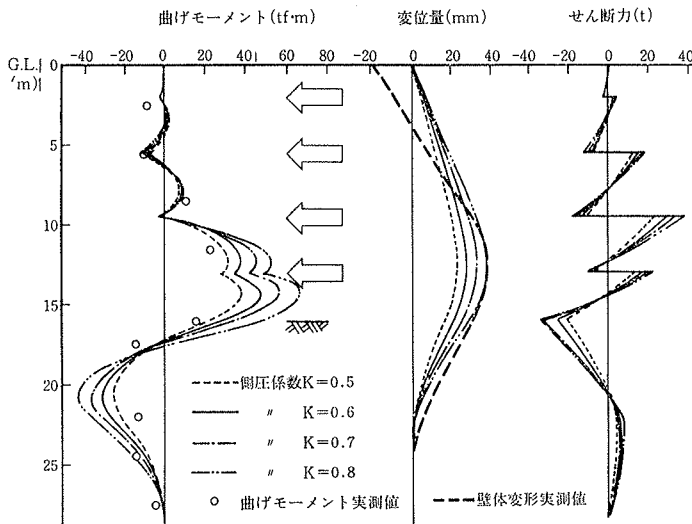


図-1 側圧の大きさによる影響度（弾性支承）

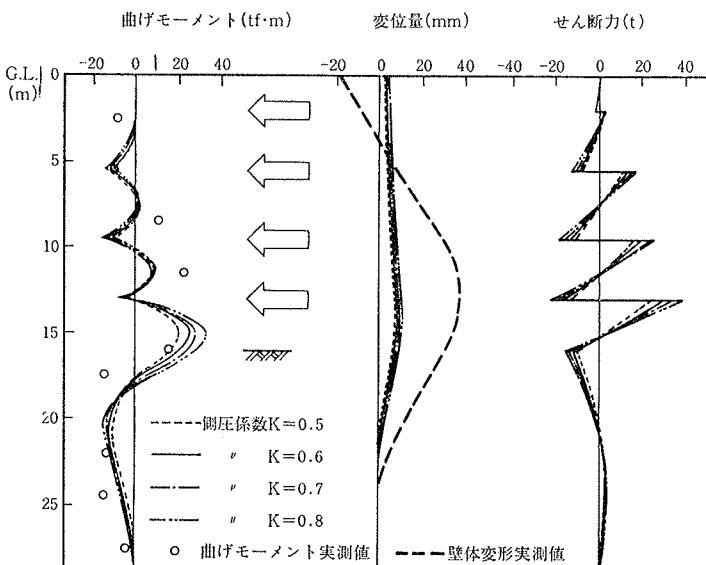


図-2 側圧の大きさによる影響度（固定支承）

となるかを判断することもできる。

表-1は、これらのインプットデータの影響度を定量的に示したものである。

以上の結果からわかるように、計算値は側圧の大きさと切ばりの支承条件に大きく影響を受けている。例えば、図-1は、切ばりの支承条件を弾性支承とし (E_s : const.), 側圧を変化させたときの結果であり、この場合は、曲げモーメントと変形に大きな影響が出ている。また、図-2は、切ばり支承を固定として側圧を変化させたときの結果であり、ここではせん断力が側圧量に影響を受けることがわかる。すなわち、側圧の大きさは、切ばりの支承条件を弾性支承とした場合には、山留壁の断面寸法や鉄筋量に直接的に関係し、固定支承とした場合には切ばりの断面寸法に影響を与えることになる。

一方、切ばりの支承条件を弾性支承とした場合も、弾性バネをどのように評価するかによって計算結果に大きな影響が出ている。図-3は、側圧と E_s を一定としバネの強さをパラメータとして計算したもので、曲げモーメント、変形、せん断力のすべてに影響を与えている。一般に、弾性バネの値は力学的に求められる値を用いているが、厳密には、鋼製切ばりにプレロードを導入した場合や温度応力の影響、あるいは、RC切ばりや逆打ち工法での躯体の剛性、乾燥収縮、クリープなどをどう評価するかなどについては不明の点が多く、適正なバネ定

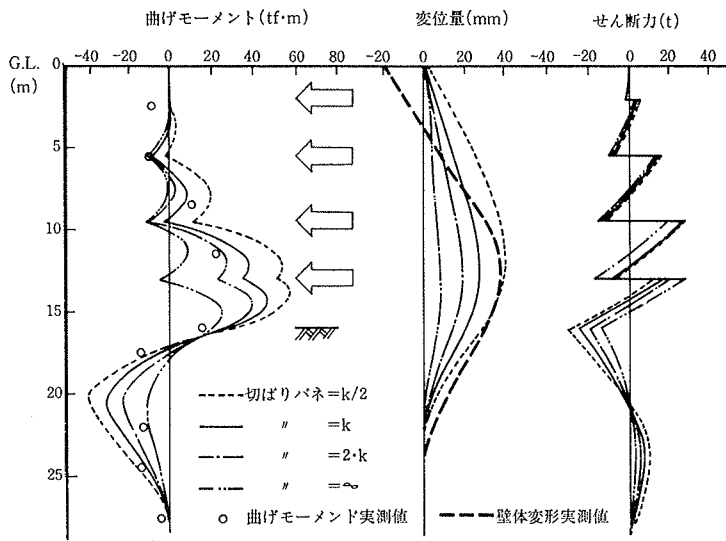


図-3 切ばりバネの強さによる影響度 (側圧・ $E_s = \text{const.}$)

数を決めることそのものが一つのテーマともいえる。適正なバネ定数の決定法については今後の課題として残るものの、図-1にみられるように、実用的には側圧の大きさを適正に評価しておけば、現行の方法で求めたバネ定数を用いた設計で差し支えないと思われる。

次に、土の変形係数 E_s は、側圧の大きさや切ばりの支承条件ほど計算結果に影響をおよぼさないとという結果を得た。したがって、実施設計では、オーダー的にとらえておけばよく、N値などからの推定値を採用して差し支えないと考える。

以上の結果から、総体的にみて当社の山留設計法では、切ばりの支承条件を弾性支承とし、側圧を次項で述べるような方法で採用すれば、ほぼ実状に即した適正な結果が得られると考える。

3. 山留設計用外力の大きさと形状

一般に、山留壁には、図-4に示すような側圧(土圧と水圧)が作用している。そして、基本的には、山留壁の背面側に作用する側圧は荷重として働き、掘削側に作用する側圧はこれに対する抵抗力として働くといえる。したがって、山留壁には、両サイドの側圧の差分が荷重もしくは反力として作用することになる。このように、山留の設計に用いる外力を知るためには、山留壁背面側に作用する側圧と、根入れ部掘削側に作用する側圧を定量的に把握する必要がある。

山留壁の背面側に作用する側圧については、実測に基づいた多くの報告があり、その性状もかなり把握されている。すなわち、背面側に作用する側圧は、(1)式で与えられるような深さに比例して増大する三角形分布をとり、根入れ部においてもその形状は変わらない。

$$P_H = K \cdot \gamma_t \cdot H \quad \dots\dots\dots(1)$$

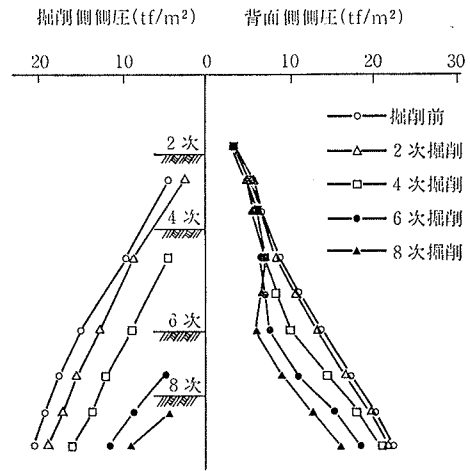


図-4 側圧の実測例

- ここに、 P_H : 深さHにおける背面側の側圧 (tf/m²)
- K: 側圧係数
- γ_t : 土の湿潤単位体積重量 (tf/m³)
- H: 地表面からの深さ (m)

したがって、現行の山留設計では、山留壁の背面側に作用する側圧を表-2に示される側圧係数を用いて(1)式で得ている。しかし、側圧は、図-4にみられるように、掘削の進行

に伴って減少することよく知られている事実である。この側圧の減少は、掘削に伴う山留壁の変形と水圧の減少によるものであるが、その減少量

地盤	条 件	側圧係数	備 考	
			N 値	qu(kg/cm ²)
砂	一様な透水性の地盤	ゆるい	0.7~0.8	N < 10
		中位の	0.6~0.7	10~25
	不透水性を用いた場合など、高い水位が保たれると判断されるような掘削	密実な	0.5~0.6	25 < N
		ゆるい	0.6~0.7	N < 10
整	上記以外の場合の掘削	中位の	0.4~0.6	10~25
		密実な	0.3~0.4	25 < N
	層厚の大きい未圧密ないし正規圧密程度のとくに緻密な粘土	ゆるい	0.3~0.5	N < 15
		中位の	0.2~0.3	15~30
粘土	層厚の大きな正規圧密程度の緻密な粘土	ゆるい	0~2	30 < N
		非常な軟弱粘土	0.7~0.8	qu < 0.5
	正規圧密程度の粘土	軟弱粘土	0.6~0.7	
		中位の粘土	0.5~0.6	
地盤	透圧密と判断される粘土	0.4~0.6		0.5~1.0
	安定した洪積粘土	0.3~0.5		1.0~2.0
	堅い洪積粘土	0.2~0.3		2.0 < qu

表-2 側圧係数一覧表 (当社山留設計指針より)

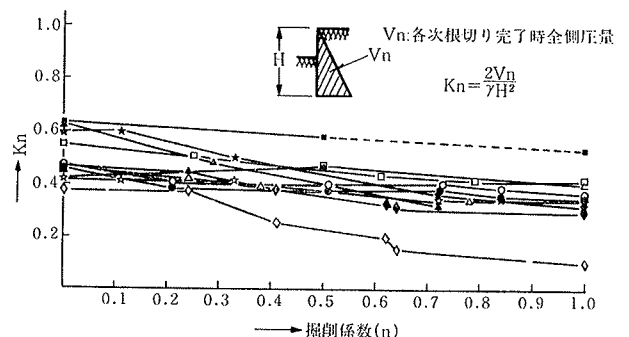


図-5 掘削に伴う側圧係数の減少 (砂質土盤)

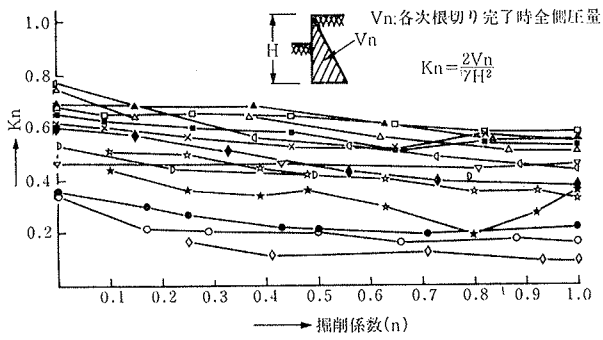


図-6 掘削に伴う側圧係数の減少 (粘土質地盤)

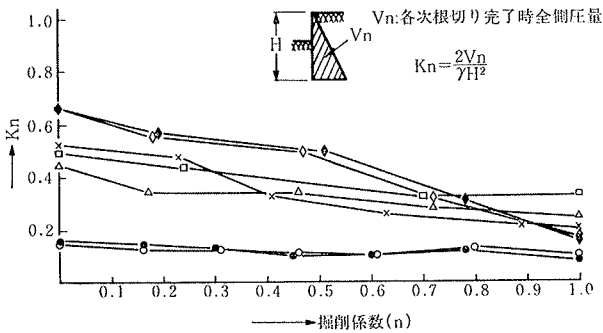


図-7 掘削に伴う側圧係数の減少 (複合地盤)

についての定量的な把握がされておらず、実設計にこの現象が勘案され得なかった。しかし、前項で述べたように、側圧の大きさを適切に評価することが山留の設計を実状に即したものとするための大前提であることを考えると、この現象を設計に反映させることは是非とも必要な事項である。図-5~7は、計31地点での実測結果を基にこの現象を地盤別に調査しまとめたものである。図の縦軸は側圧係数、横軸は掘削の進行状況を表す掘削係数 n (ある工程での掘削深さ/最終掘削深さ) である。この図でわかるように、側圧係数は、各地盤とも掘削の進行に伴ってある一定のこう配で減少しており、この減少こう配は、おおよそ0.2~0.25の範囲にある。したがって、いま、掘削前の側圧係数を K_0 (近似的に表-2に示される値) とすると、ある掘削段階での側圧係数 K_n は、一応次式で推定されることになる。

$$K_n = K_0 \{1 - (0.2 \sim 0.25)n\} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 n : 掘削係数 ($0 < n \leq 1$)

すなわち、(2)式で求めた各掘削段階での側圧係数を用いて側圧を算定すれば、掘削に伴う側圧の減少を考慮した背面側の側圧を得ることができることになる。

一方、根入れ部の掘削側側圧は、掘削前には背面側の側圧と全く一致した状態で作用しているが、掘削が開始されると背面側の側圧と同様に減少してくる。しかし、図-4にみられるように、その減少傾向は多少異なる。すなわち、根入れ部掘削側の側圧は、掘削によって土被

り圧が除去されることによる減少と、受働抵抗の発生による増加とがミックスして変化しており、その様相は非常に複雑である。図-8, 9は、実測結果を基にして根入れ部の側圧の性状を模式的に示したものである。

図-8は、背面側と掘削側の側圧のバランス状況から山留壁に作用する力の状態を示したものであり、図-9は、横軸に土被り深さをとり、縦軸に掘削側の側圧 P_1 と根入れ部背面側の側圧 P_2 との比 (P_1/P_2) をとって、両者の比が土被り深さによってどのように変化するかを示したものである。以上の図からわかるように、掘削側の側圧は、掘削底面からの深さ (土被り深さ h) によってその性状が異なり、基本的には図-8に示したように、土が塑性化して受働抵抗が発生する領域 (Ⅰの領域) と、弾性的な受働抵抗が作用する領域 (Ⅱの領域) と、背面側の側圧とほぼバランスしている領域 (Ⅲの領域) とに区別される。この三つの領域での側圧の性状をもう少し詳しく説明すると次のようにいえる。

- (1) Ⅰの領域 ($0 < h \leq h_2$): 掘削底面にごく近い部分 (図-8で示す $h > h_1$ の部分) では、 P_1 (根入れ部掘削側側圧) $< P_2$ (根入れ部背面側側圧) となり、それ以深では $P_1 > P_2$ となる。すなわち、山留壁には、掘削底面から深さ h_1 までは背面側からの力 ($P_2 - P_1$) が荷重として作用し、それ以深では掘削側の側圧が卓越するので反力として作用する。 $P_1 = P_2$ となる深さ h_1 は、地盤の硬軟によって異なり、硬い地盤で1m程度、軟かい地盤で3m程度である。また、土被り深さ h_2 (3~5m) では、

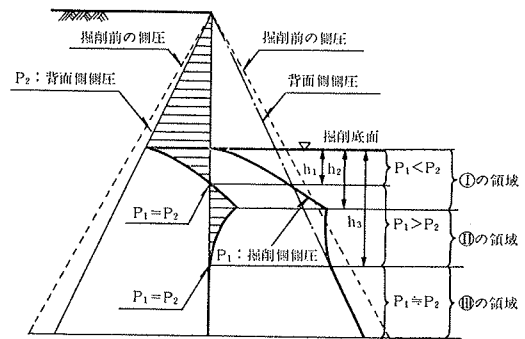


図-8 根入れ部側圧のバランス状態の模式図

P_1/P_2 はほぼ最大値を示し、その値は1.2~2.0程度となる。

- (2) Ⅱの領域 ($h_2 < h \leq h_3$): この領域では、 $P_1 > P_2$ となり、山留め壁には掘削側からの力 ($P_1 - P_2$) が

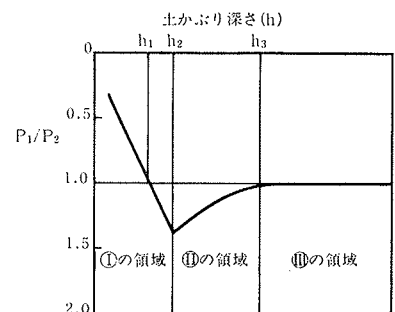


図-9 P_1/P_2-h の関係の模式図

反力として作用する。 P_1 と P_2 の差は、土盛りが深くなるにしたがって、順次小さくなり、 h_3 以深ではほぼ $P_1 \approx P_2$ となる。両サイドの側圧がバランスする深さ h_3 は、地盤の硬軟によって異なるが、おおよそ 10 m 程度である。

(3) ④の領域 ($h_3 < h$): この領域では、 $P_1 \approx P_2$ となり、根入れ部背面側の側圧と掘削側の側圧がほぼバランスする。したがって、山留壁には、荷重もしくは反力として外的な力の作用はほとんどないと考えてよい。

以上のように、根入れ部における背面側の側圧と掘削側の量的な大小関係が概略ではあるが把握された。すなわち、背面側の側圧が勝る部分が設計時に荷重として考えるべき範囲であり、掘削側の側圧が卓越する部分が抵抗力として評価されることになる。

このような考えに基づけば、山留設計用の外力条件は次のような方法で求めることができる。

〈山留設計用外力条件の求め方〉

(1) 掘削底面までの背面側側圧を、掘削の進行を伴う減少を考慮して算出する。掘削底面での値 (図-10のBO) は $K_r H$ となる。

(2) 根入れ部において荷重として作用する深さ h を次の方法で求める(ここでいう h は図-8, 9の h_1 を指す)。
 ○砂質地盤: $h = 3 - 0.1 N(m)$ ただし、 $N \geq 25$ の場合は $h = 0.5$ とする。ここに、 $N = N$ 値

○粘土質地盤: $h = 3 - 0.5 C(m)$ ただし、 $C > 5 \text{ tf/m}^2$ の場合には $h = 0.5$ とする。ここに、 $C = \text{土の粘着力}$

(3) 図-10のB点から h 点を通る直線 Bh を描き、得られた $\triangle BOh$ が根入れ部で山留壁に荷重として作用する。したがって、山留壁に作用する全荷重は $\triangle ABh$ となる。

(4) 掘削底面から h 以深では、図-10に示す直線 Bh

を延長して塑性域を判定する。すなわち、直線 Bh と $E_s \cdot y$ 線との交点Cが求められれば深さ h 以深の反力分布が得られる。

この方法によった場合、根入れ部で荷重として作用する深さ h を適切に想定する必要がある。筆者らは、この荷重の作用深さ h を種々変えて山留壁の曲げモーメントや変形量を算出し、この結果が実測値とどう照合するかを調査してみた。根入れ部での荷重の作用な数値としてここに挙げるには、まだまだデータ不足、深さ h を定量検討不足の感があるが、一応、現状での一つの目安値として示しておいた。なお、図-11は、以上の考えに基づいて算定した結果を実測値と比較したものである。図には参考までに、掘削側の側圧をランキン・レザール式で求め、根入れ部背面側の側圧を無視した条件で算出した結果を点線で示しておいた。

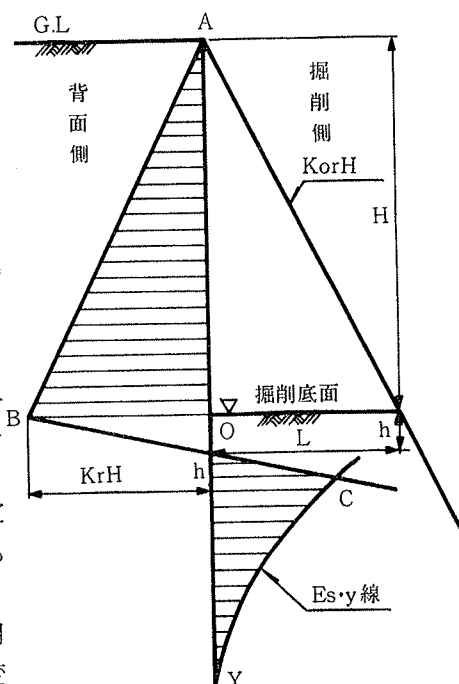


図-10 山留設計用の外力

4. まとめ

本文に記した内容はすべて実際の工事で得た実測データに基づいて検討、考慮したものである。使用したデータ数は、側圧関係: 31 パネル、応力・変形関係: 10 パネルで山留壁はすべてOWS壁である。山留めの複雑な現象をすべて定量的に把握し言及するにはデータ不足の感もあるが、定性的な把握は十分なし得たと考えている。ここで提案した内容については、今後とも実測による検証を重ね、必要に応じて修正しその精度を高めていくつもりである。

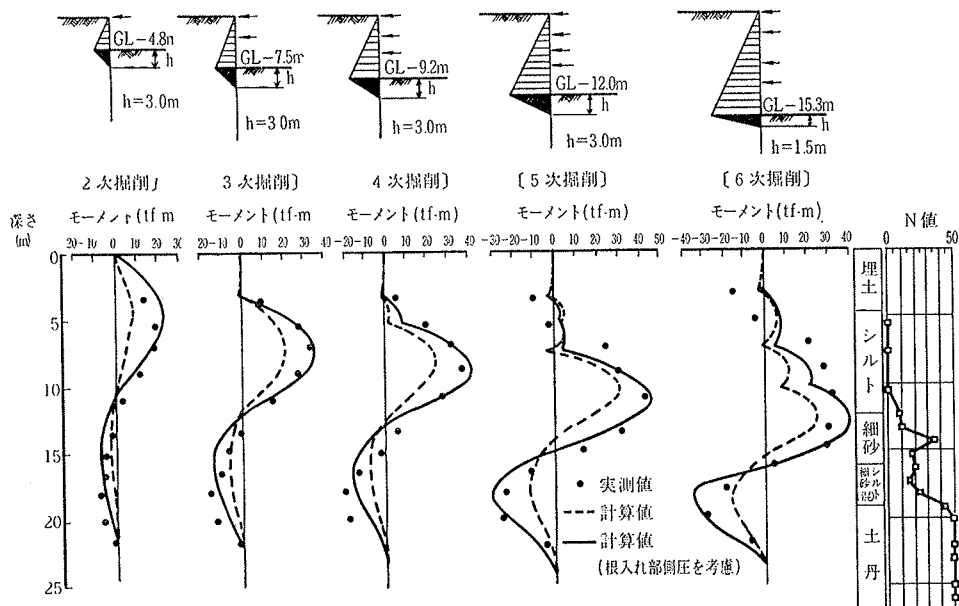


図-11 計算値と実測値との比較