

山留め壁実測変位から推定した背面側側圧・土圧の評価

Lateral Earth Pressure Estimated from Displacement of Earth Retaining Wall

下 村 修 一
實 松 俊 明
鈴 木 康 嗣

要 約

山留め設計における背面側側圧は、理論式や実測値に基づく設定法がいくつか提案されているが、十分な検証が得られているとは言えない。また、側圧は山留め壁の変形の影響を受けると考えられるが、側圧と変位の関係が明確でないため、山留め設計ではその影響を考慮することはほとんどない。本研究では、山留め計装安全管理で一般的に測定されている山留め壁の変形データから、根切り底以浅の背面側側圧及び土圧を推定し、その性状に関する検討により、以下の知見を得た。

- 山留め壁実測変位の差分から、背面側側圧及び土圧が評価可能である。
- 最終根切り時の実測変位から求めた背面側側圧は、山留め壁が直前の支保工架設段階から掘削側に変位する場合、ランキン・レザール式による主動側圧と同程度あるいはそれ以下である。
- 土圧は山留め壁が掘削側に変位するに従って減少し、背面側に变位するに従って増加する傾向が認められる。

目 次

- はじめに
- 実測地点と実測データ
- 側圧・土圧の算出方法
- 実測変位から求めた側圧・土圧の評価
- おわりに

I. はじめに

山留め壁の設計において、外力となる背面側側圧は重要なパラメータのひとつである。その設定には、理論的なランキン・レザール式による主動側圧¹⁾(以後、ランキン側圧)あるいは、実測側圧から推定した側圧係数¹⁾を主に用いているが、十分な検証が得られているとは言えない。また、山留め壁に作用する側圧を直接把握する方法として、壁面土圧計と水圧計による測定があるが、測定には多くの費用がかかることや、現在多く用いられているソイルセメント壁での測定は難しく検討範囲が限られる。

背面側側圧は山留め壁の変形の影響を受けると考えられるが、その影響による背面側側圧の変動を考慮した設計はほとんど行われていないのが現状である。山留め壁変位と側圧または土圧に関する研究は模型実験など²⁾により数多く行われているが、側圧又は土圧と変位の関係式が提案されているものは見当たらない。水圧は山留め壁変位に関連しないと考えられることから、側圧から水圧を分離した土圧による検討が重要であると考えられるが、土圧に対する検討はほとんど行われていない。

本研究では、山留め計装安全管理で一般的に測定される山留め壁の変形データから、根切り底以浅の背面側側圧及び土圧を推定し、ランキン側圧との比較及び土圧－変位関係について検討する。

II. 実測地点と実測データ

本研究で検討対象とした山留め工事の概要を Table 1 に、土質柱状図、切梁又はスラブ(以後、支保工)の架設位置、及び根切り深度を Fig. 1 に示す。山留め壁はすべてソイルセメント壁(単位幅当たりの断面 2 次モーメント $I=10250\sim73111\text{cm}^4/\text{m}$)であり、山留め壁の施工方法は順打工法 9 現場(鋼製切梁)、逆打工法 1 現場である。根切り回数は 2～5 回、最終根切り深度は 10m 前後で、最終根切り底以浅の地盤は、主に N 値 10 以下の砂質土及び N 値 5 以下の粘性土で構成されている。掘削側最大変位は 6～43mm 程度である。なお、すべての山留め工事で根切り時及び支保工架設時に変位の計測が行われている。

Table 1 山留め工事概要
(Outline of Sheathing Work)

現場	測点	地域	土質	地下水位(m)	山留め 壁長さ (m)	施工 方法	根切り 深度(m)	支保工 段数	最大 変位 (mm)
A	1	関西	粘土・砂互層	4.89	16.5	順打	12.7	3	6.4
	2								9.2
B	1	関西	砂・シルト	1.90	15.0	順打	9.1	1	25.9
	2								38.2
C	1	関西	シルト・砂互層	3.25	15.0	順打	10.9	3	25.5
D	1	関西	砂・シルト互層	12.5m以深	22.0	順打	12.5	4	43.0
E	1	関西	砂	1.80	13.5	順打	8.0	2	14.8
	2								21.1
	3								15.4
F	1	関西	砂・シルト	2.30	14.5	順打	7.7	2	21.2
	2				15.4				
	3				18.2				
	4				21.6				
	5				37.4				
G	1	関西	粘土・砂互層	2.00	11.0	順打	7.5	2	14.0
	2								20.3
H	1	関西	砂・粘土	9.9m以深	15.5	順打	9.9	2	29.3
I	1	関西	砂・シルト	3.00	15.0	順打	8.5	2	26.2
J	1	関東	砂・粘土互層	2.50	12.0	逆打	8.4	1	21.2

キーワード：山留め、変位、側圧、土圧係数
ランキン・レザール式

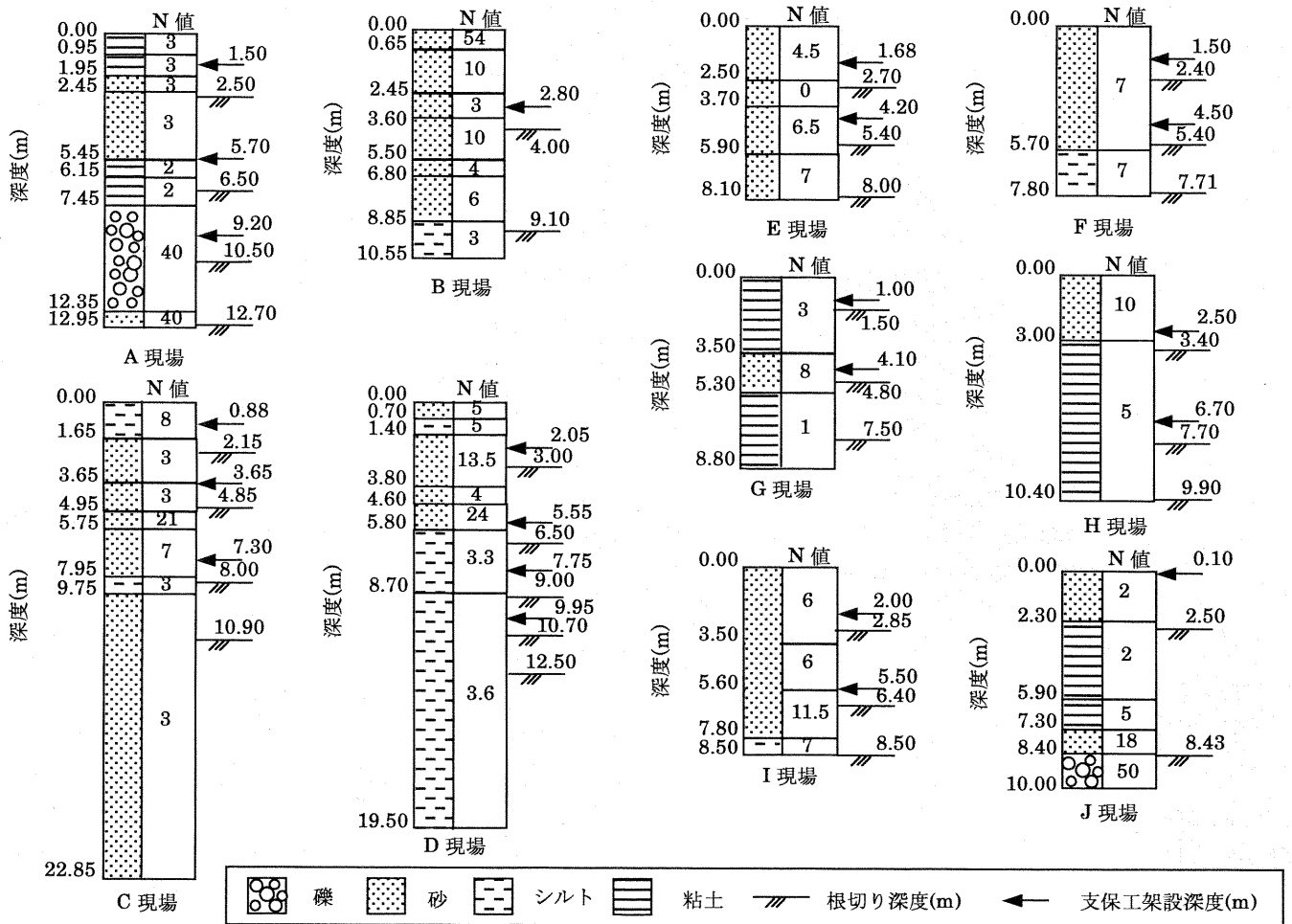


Fig.1 土質柱状図, 支保工架設位置及び根切り深度
(Soil Profile, Strut Position and Excavation Depth)

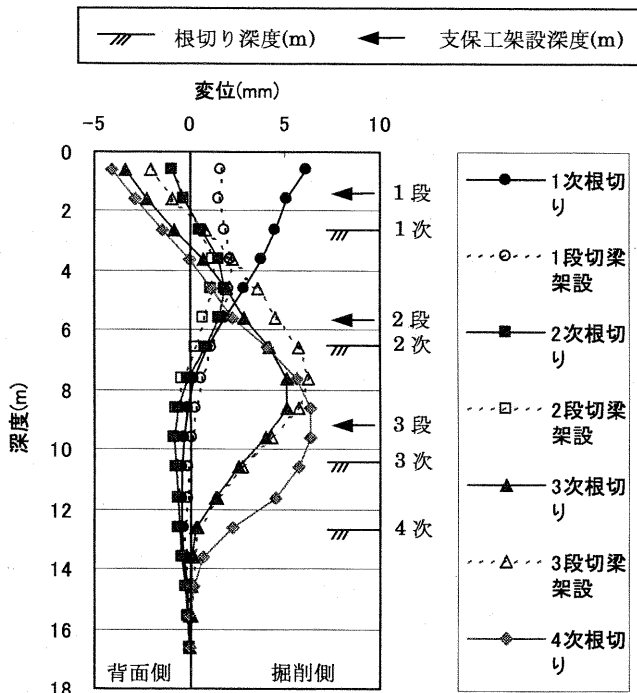


Fig.2 山留め壁変位深度分布の一例 (A 現場)
(Example of Displacement Distribution at Site A)

Fig.2 に実測変位データの深度分布の一例を示す。地表面に近い深度では、切梁位置を支点として、山留め壁が背面側の地盤を押し出すような形状を示している。同様な挙動は半分近くの側点で確認されている。

Ⅲ. 側圧・土圧の算出方法

分布荷重が作用する山留め壁を一般の梁にモデル化した場合、支保工間又は支保工と根切り底間の基本式は次のように示される。

$$-EI \frac{d^4 y}{dx^4} = w(x) \quad (1)$$

ここに、EI：山留め壁の曲げ剛性 (kN・m²/m)

x：深度 (m)

y：山留め壁変位 (m)

w：深度 x における側圧 (kN/m/m)

(1)式より、側圧は変位の4階微分で求まることが分かる。本研究では、変位の実測データを曲線で近似せず、等間隔の実測変位データを区間毎に差分することにより側圧を推定した。支保工架設位置におけるせん断力の補正は、支保工軸力の実測値ではなく以下の手順で行った。

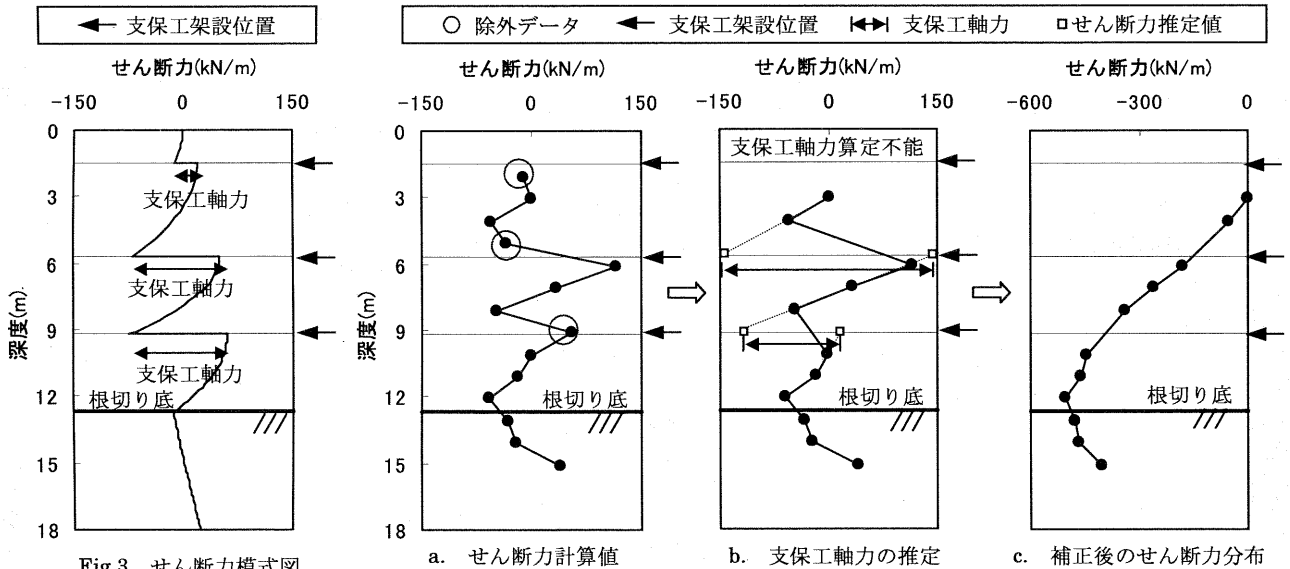


Fig.3 せん断力模式図
(Typical Figure of Shearing
Force Distribution)

Fig.4 せん断力補正例 (A 現場)

(Example of Corrected Shearing Force at Site A)

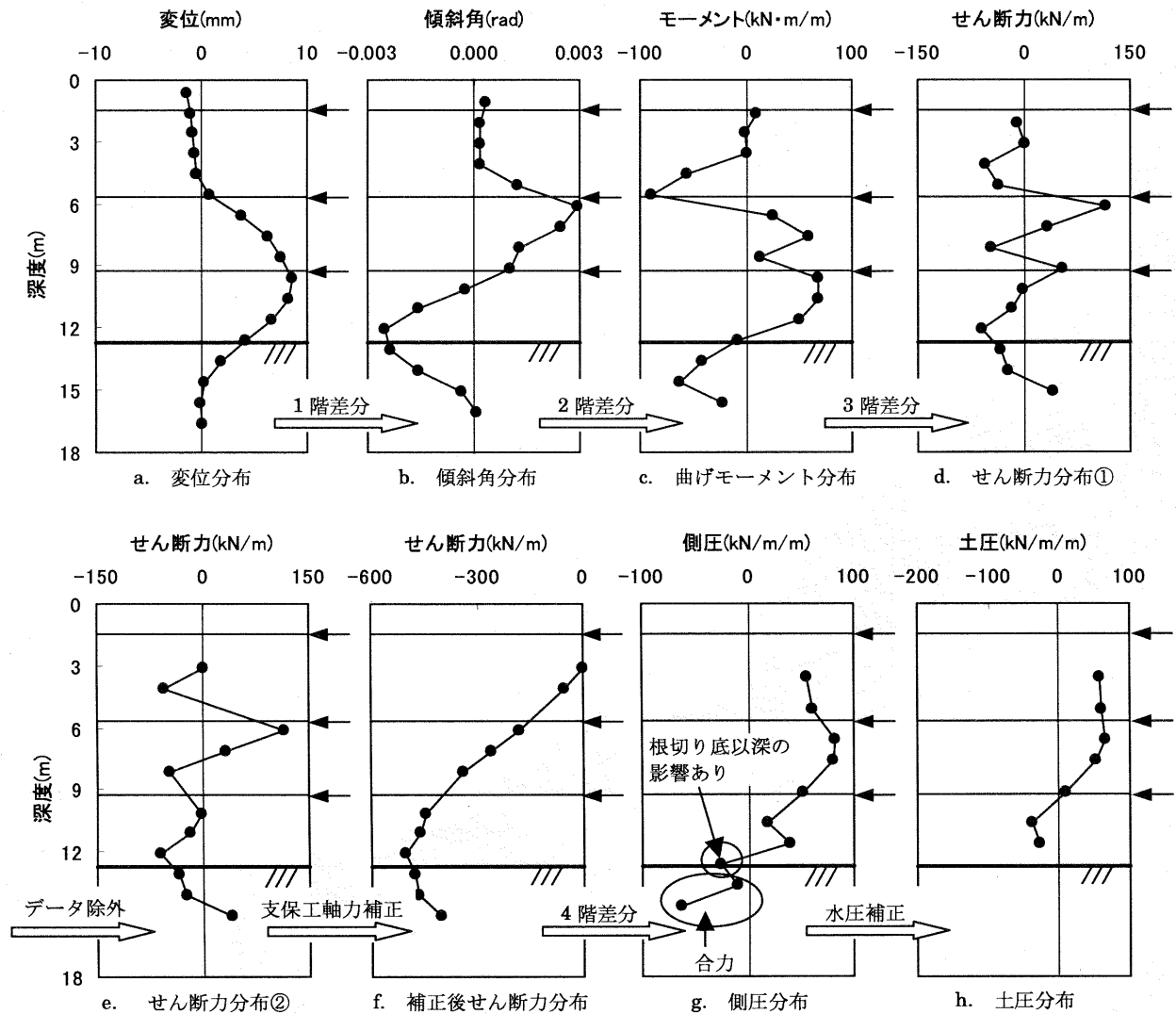


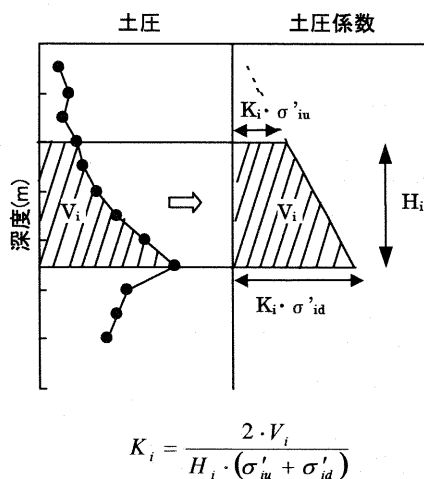
Fig.5 実測変位から土圧評価までの流れ (A 現場)

(Flow Chart of Earth Pressure Estimated from Displacement at Site A)

- 支保工架設位置のせん断力は、Fig. 3 に示すように不連続になると考えられるため、支保工架設位置付近のデータを検討対象から外す(Fig. 4a)。
- 支保工架設位置以浅と以深のせん断力をそれぞれ直線で延長し、支保工架設位置でのせん断力の差を支保工軸力とする(Fig. 4b)。
- 求めた支保工軸力を用いてせん断力分布の補正を行う(Fig. 4c)。

実測変位から土圧評価までの流れを Fig. 5 に示す。変位(Fig. 5a)を1階差分して傾斜角(Fig. 5b)を、2階差分して単位幅当たりの曲げモーメント(Fig. 5c)を、3階差分して単位幅当たりのせん断力(Fig. 5d)を、その後、Fig. 4 に示した補正を行い側圧(Fig. 5g)を求めた。また、土圧(Fig. 5h)は、側圧から水压を差し引いて求めた。各根切り深度以深の側圧は背面側側圧と掘削側側圧の合力として求まる。そのため、本論文では各根切り深度以浅の側圧のみを対象とした(Fig. 5g)。また、変位分布の差分により側圧を評価しているため、根切り深度付近では根切り深度以深の合力の影響を受けていると考え、側圧推定後に根切り深度の層に該当するデータは検討対象から外した(Fig. 5g)。最上段支保工架設位置以浅についてはせん断力が得られない場合があり、対象層の側圧が得られないものがある(Fig. 5e)。Fig. 5c, d から、曲げモーメント及びせん断力分布の支保工架設位置に反曲点が見られ、実測変位から差分により求めた曲げモーメント及びせん断力分布の妥当性が伺える。

各深度の側圧は、変位分布の差分により求めているため、各算定地点付近の平均的な値を示すと考え、以後の検討に用いる側圧及び土圧は各層の平均値で評価した。山留め壁の変位も側圧と同様に各層の平均値で評価した。土圧係数は、Fig. 6 に示すように各層で算定した土圧の合力と等価な合力を与える値で評価した。



K_i : i 層の土圧係数 H_i : i 層の層厚 V_i : i 層の合力
 $\sigma'_{iu}, \sigma'_{id}$: i 層上端及び下端の有効上載圧

Fig.6 土圧係数の評価方法
 (Evaluating Method of Earth Pressure Coefficient)

IV. 実測変位から求めた側圧・土圧の評価

1. 側圧の評価

実測変位から求めた側圧の評価は、(2)式に示す実務で良く用いられるランキン側圧¹⁾と比較することにより行った。

$$p_a = (\gamma_t z - p_{wa}) K_a - 2c \sqrt{K_a} + p_{wa} \quad (2)$$

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2) \quad (3)$$

ここに、 p_a : 地表面からの深さ z (m)における背面側側圧(kN/m²)

γ_t : 土の湿潤単位体積重量(kN/m³)

z : 地表面からの深さ(m)

p_{wa} : 地表面からの深さ z (m)における背面側水圧(kN/m²)

c : 粘着力(kN/m²)

ϕ : 内部摩擦角(度)

K_a : 主働土圧係数

なお、(2)式によるランキン側圧が水压以下となることがある。その場合、ランキン側圧は水压と等しい値とした。ランキン側圧の計算に使用する内部摩擦角及び粘着力は、(4)式³⁾及び(5)式³⁾により推定した。

$$\text{砂質土: } \phi = \sqrt{20N} + 15, \quad C = 0 \quad (4)$$

$$\text{粘性土: } C = 6.25N, \quad \phi = 0 \quad (5)$$

ここに、 ϕ : 内部摩擦角(度)

c : 粘着力(kN/m²)

N : N 値

なお、シルト質砂や砂混じり粘土などの中間土は、砂又は粘土とし、砂質土の粘着力及び粘性土の内部摩擦角は無視した。また、単位体積重量は Table 2 の値を用いた。

Table2 単位体積重量(kN/m³)^{3), 4)}

(List of Unit Weight)

	礫	砂	シルト	粘土
関西	19.5	18.3	16.5	16.5
関東	19.2	18.1	16.2	15.0

最終根切り段階の実測変位から求めた側圧とランキン側圧の関係を Fig. 7 に示す。全データの場合(Fig. 7a)、実測変位から求めた側圧はランキン側圧を上回るデータが多数見られ、両者に明確な相関は認められない。山留め壁設置位置から掘削側へ変位しているデータのみを取り出して整理した場合(Fig. 7b)、実測変位から求めた側圧は、ばらつきはあるものの、ランキン側圧を上回るデータが少なくなる。地表面付近では、各根切り段階の変位とその直前の支保工架設段階の変位との差(以後、増分変位)が負になる、つまり、山留め壁が背面側地盤に向かって戻るデータが多い。そこで、増分変位が正のデータのみに着目すると(Fig. 7c)、実測変位から求めた側圧はほとんどがランキン側圧と同程度又はそれ以下となっている。文献⁵⁾では、山留め壁の剛性が高く、変位が掘削側へ単調増加する傾向が強い連続地中壁の実測側圧とランキン側圧を比較し、実測側圧はランキン側圧に近い値となることが示されている。同様な傾向を示す変位データのみに着目した Fig. 7c と文献⁵⁾の傾向が整合していることから、山留め壁の実測変位から求めた側圧の妥当性が認められる。山留め壁の設計では、変位が掘削側へ単調増加する傾向の強い地中連続壁の実測側圧データを背景にした側圧係数法¹⁾や、山留め壁が掘削側に変位し塑性平衡状態となった場合の側圧を背面側側圧として設定しているが、山留め壁が背面側に変位する場合、

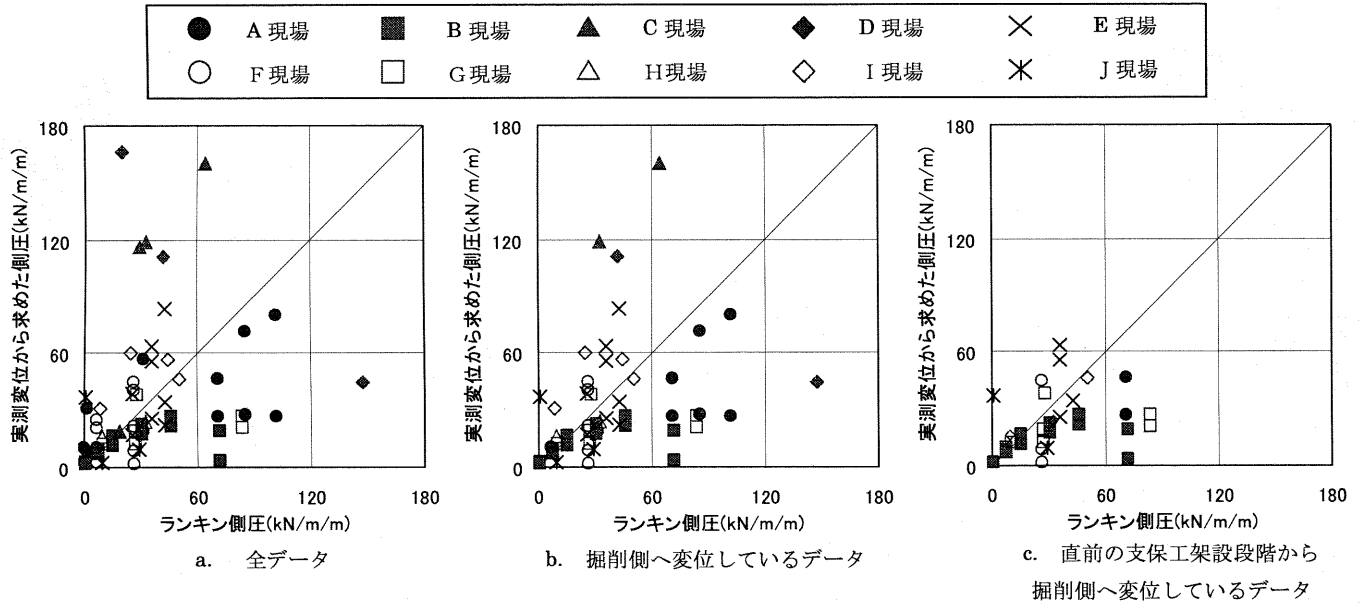


Fig.7 最終根切り段階における側圧の比較
(Comparisons of Lateral Pressures at Final Excavation)

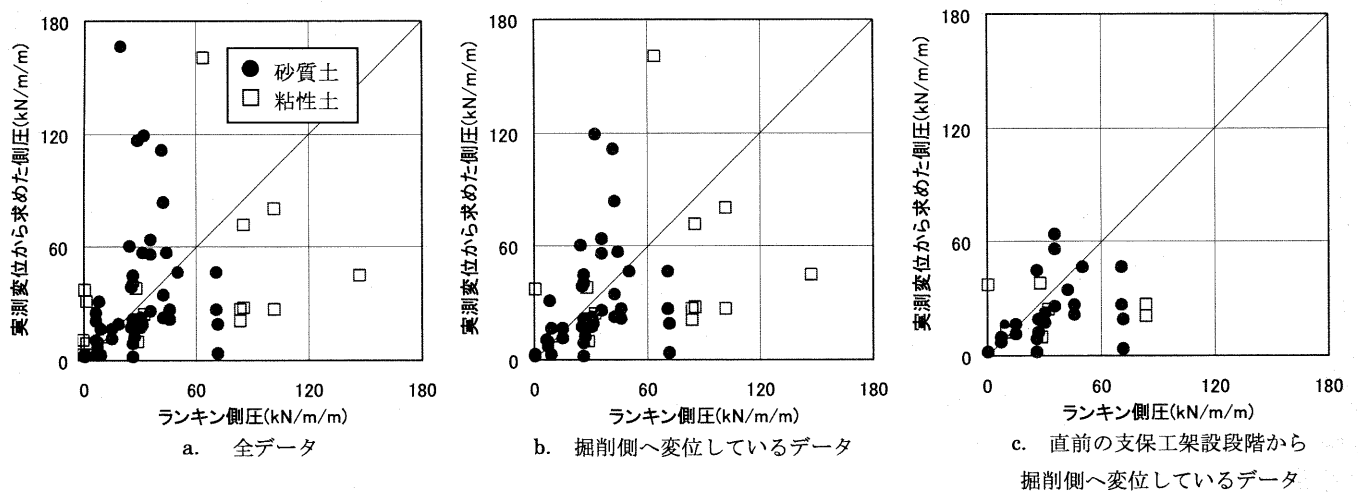


Fig.8 砂質土と粘性土に分類した最終根切り段階における側圧の比較
(Comparisons of Lateral Pressures at Final Excavation in terms of Soil Type, i.e., Sand and Clay)

Fig. 7a に示したようにランキン側圧を上回る可能性もあり、その扱いには注意が必要であると考えられる。

Fig. 7 のデータを砂質土と粘性土に分けて Fig. 8 に示す。山留め壁の実測変位から求めた側圧とランキン側圧の関係は、山留め壁の変位挙動に関わらず、砂質土、粘性土ともに同様な傾向を示しており、土質による明確な傾向の違いは見られない。

2. 土圧－変位関係

Fig. 9 に土圧－変位関係を示す。土圧は、最終根切り時以外の根切り段階においても算出した。地下水位を地盤調査時の値とし、根切り過程における揚水の影響を考慮していないため、土圧が負となるデータがある。同図からは、山留め壁の変位に対する土圧挙動に明確な傾向は確認できない。Fig. 10 に、Fig. 6 の方法により求めた土圧係数－変位関係を示す。土圧を有効上載圧で基準化することにより、山留め壁が掘削側から背面側に変位するに従い、土圧係数が大きくなる傾向が確認できる。また同図では、掘削側の増分変位が

負のデータを塗り潰して示している。なお、今回のデータには、背面側で増分変位が正となっているものはない。掘削側領域において土圧係数が大きい値を示している点は増分変位が負のデータに相当している。このことは、土圧係数－変位関係において、繰返し変形が起きた場合、その経路は同一ライン上を往復しないことを示していると考えられる。Fig. 11 に示す模式図のように、山留め壁の増分変位が負（以後、受働状態）から正（以後、主働状態）に変わる点、また逆に正から負に変わる点（以後、反転点）が存在するデータについては、直前の反転点を変位の原点に取って Fig. 10 の土圧係数－変位関係を書き直したものを Fig. 12 に示す。Fig. 10 と比較して、Fig. 12 は、変位の増減に伴う土圧係数の変動傾向がより明確に認められる。土圧係数をランキン－レザール式より求まる受働土圧係数（以後、ランキン受働土圧係数）で除した値と変位の関係を Fig. 13 に示す。同図から、受働側のほとんどのデータは 1 を下回っており、15mm 程度の変位では受働土圧に達しないと考えられる。また、

Fig. 12 では砂質土のデータに比べて粘性土のデータは、受働側・主働側ともに狭い範囲に存在していたが、ランキン受働土圧係数で除すと、粘性土のデータも砂質土のデータとほぼ同じ範囲に存在している。

実際の山留め壁の挙動は、根切りと切梁プレロードなどを交互に行うことにより、山留め壁が掘削側及び背面側に繰返し変形する。この繰返し変形を考慮した土圧-変位関係の定式化を行えば、より実現象に則した山留め設計が可能になると考えられる。

V. おわりに

山留め壁の実測変位から根切り底以浅の側圧と土圧を評価し、その特性を検討した。得られた知見を以下に示す。

- 山留め壁実測変位の差分から、背面側側圧及び土圧が評価可能である。
- 推定した側圧は、最終根切り段階の変位が直前の支保工架設段階の変位から掘削側へ変位する場合、ランキン側圧と同程度あるいはそれ以下である。
- 土圧は山留め壁が掘削側に変位するに従って減少し、背面側に変位するに従って増加する傾向が認められる。

本検討により、多くの山留め壁に作用する外力をより詳細に評価出来る可能性を示した。今後、土圧-変位関係の定式化を進めるにあたり、残された課題を以下に示す。

- 地中連続壁や親杭横矢板など他の山留め壁に関する検討
- 実測側圧・土圧による、実測変位から推定した側圧・土圧の検証

最後に、本検討を行うにあたり、山留め計測データを提供して頂いた関西支店生産計画部に末筆ながら謝意を表します。

参考文献

- 日本建築学会；山留め設計施工指針，2002。
- 例えば、元井康雄，石井雄輔；模型山留め壁の水平載荷実験による地盤反力評価，第36回地盤工学発表会，(2001)，pp.1891-1892。
- 大崎順彦；建築基礎構造，技報堂出版，1991。
- 日本建築学会近畿支部，土質工学会関西支部編；大阪地盤図，コロナ社，1966。

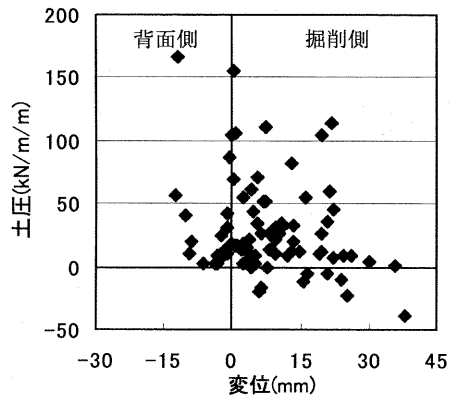


Fig.9 土圧-変位関係
(Relationship between Earth Pressure and Displacement)

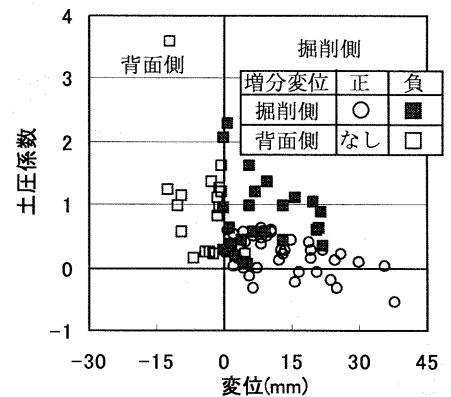


Fig.10 土圧係数-変位関係
(Relationship between Earth Pressure Coefficient and Displacement)

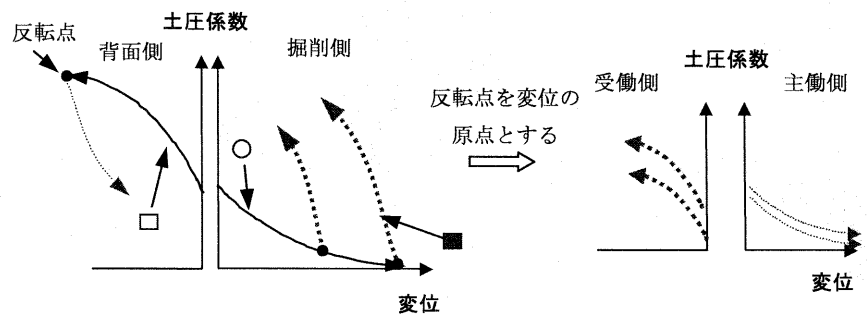


Fig.11 土圧係数-変位関係の模式図

(Typical Relationship between Earth Pressure Coefficient and Displacement)

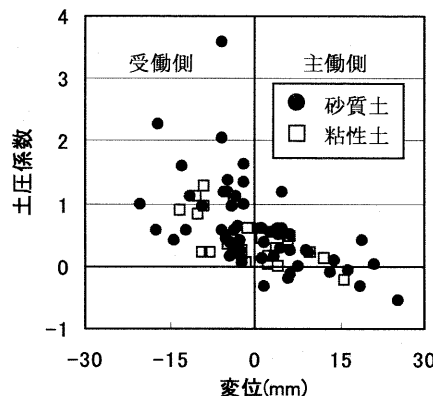


Fig.12 土圧係数-変位関係
(反転点を変位の原点とした場合)
(Relationship between Earth Pressure Coefficient and Displacement which Original Points Assumed at Turning Point)

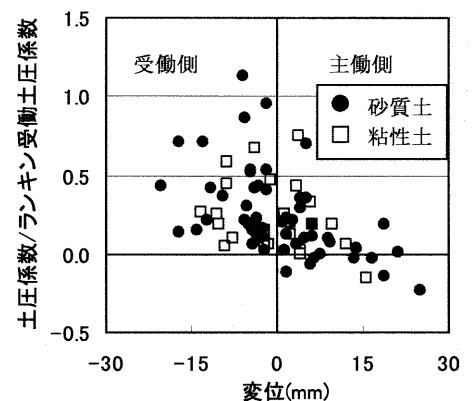


Fig.13 正規化土圧係数-変位関係
(反転点を変位の原点とした場合)
(Relationship between Normalized Earth Pressure Coefficient and Displacement which Original Points Assumed at Turning Point)

- 5) 實松俊明，石崎長俊，佐藤英二，中居正樹，渡邊徹；実測値に基づく山留め背面側側圧の評価 その4ランキン側圧の検討，日本建築学会学術講演会梗概集(投稿中)，(2004)。