

軟弱粘性土地盤における土留め背面側壁面に作用する 土圧・水圧の力学挙動

玉野富雄¹・福井 聡²・鈴木宏昌³・松澤 宏⁴・植下 協⁵

¹正会員 工博 大阪産業大学教授 土木工学科 (〒574 大阪府大東市中垣内三丁目一番一号)

²正会員 大阪市下水道局建設部処理場課設計係長

³正会員 工修 日本下水道事業団大阪支社計画設計課主査

⁴正会員 工博 応用地質(株)中部支社技術センター部長
(前・名古屋大学助教授地圏環境工学専攻)

⁵正会員 工博 中部大学教授 土木工学科

本報告では、西大阪地域粘性土地盤における RC 連続地中壁を土留め壁とする掘削工事での詳細な現場計測結果を基に、土留め背面側壁面に作用する土圧および水圧の力学挙動について示した。まず、土留め壁面に作用する水圧は、掘削側への土留め壁面変位に対応して減少し、その減少量は、土留め壁面変位と一次比例する関係にあることを示し、その関係式を導いた。次に、土留め壁面に作用する土圧は、20~30 mm の土留め壁面変位に対応して、まず主働土圧状態まで減少し、その後、変位の進行につれて増大する現象が生じることを示し、これらの力学挙動について考察した。

Key Words : excavation, soft ground, earth pressure, water pressure, field test

1. まえがき

軟弱粘性土地盤における土留め工の掘削時に土留め壁面に作用する土圧および水圧(単に壁面土圧、壁面水圧と呼ぶ)については、連成して変化することや精度よく測定できた事例が少ないことなどから、個々の力学値としての評価で不明確な点が残されている。そのため、軟弱粘性土地盤における土留め工の設計に際しては、その合算値である側圧という概念で評価し、土留め壁背面側の外力として壁面側圧(壁面土圧と壁面水圧の合圧という意味で壁面側圧と呼ぶ)を設定^{1)~3)}しているのが現状である。

しかしながら、壁面側圧という形で設計外力を設定することは、壁面土圧および壁面水圧の力学挙動を的確に把握した上での評価でないことが問題点として指摘できる。特に、軟弱粘性土層中を掘削する場合では、土留め壁の壁面変位(単に壁面変位と呼ぶ)に対応して、壁面土圧や壁面水圧が大きく変化することが推測できることから、壁面土圧、壁面水圧として区別して考察する方が、土留め工の力学挙動や安全性を考える上で理解しやすい。

実測値として見た場合、土留め壁背面側の壁面側圧は、一般的には、掘削の進行による掘削側への壁面変位に対応して減少する傾向にある^{4)~8)}。しかし、軟弱粘性土層中を掘削する場合においては、時には、一旦減少した壁面

側圧がその後の掘削による壁面変位の進行とともに増大するといった現象が生じた事例のあることが報告されている¹⁾。このような壁面側圧の増大現象は、土留め工の安全性を考える上で重要な力学挙動と認識でき、軟弱粘性土層における壁面変位と壁面土圧および壁面水圧の相互力学挙動や壁面土圧と壁面水圧との間の連成力学挙動について、詳細な現場計測に基づく事例研究の蓄積が必要といえる。

ところで、壁面変位と壁面土圧に関する室内実験による研究として Terzaghi⁹⁾、市原・松澤¹⁰⁾らによる可動壁を用いた実験が著名である。また、Lambe¹¹⁾は、三軸試験により静止土圧状態から主働および受働土圧状態に移行するに要する水平ひずみを示している。これらの研究成果は、土留め工における壁面変位と壁面土圧の関係を考える重要な知見となる。

近年の土留め工における壁面支持機構で地盤と構造物との力学機構をより合理的に考慮できる弾塑性法と呼ばれる土留め解析法の開発^{12),13)}の結果として、より精度のよい外力としての背面側の壁面土圧・壁面水圧や掘削側の受働抵抗としての壁面土圧・壁面水圧を設定できれば、土留め解析精度の向上が期待できる状況にある。

本報告では、西大阪地域での沖積軟弱粘性土地盤における泥水トレンチ工法により築造した RC 連続地中壁を土留め壁とする土留め工事での、土留め壁背面側の壁面土圧および壁面水圧の詳細な現場計測に基づく実測力学

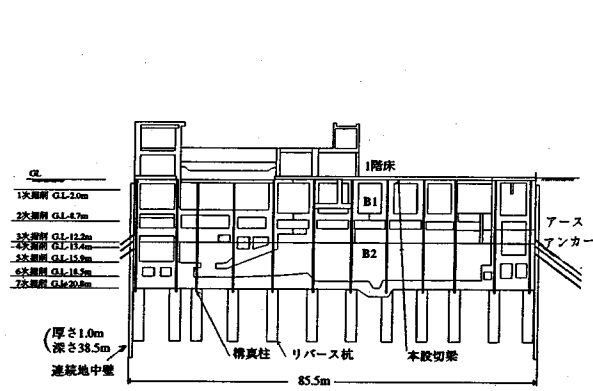


図-1 施工断面図 (A 地点土留め工)

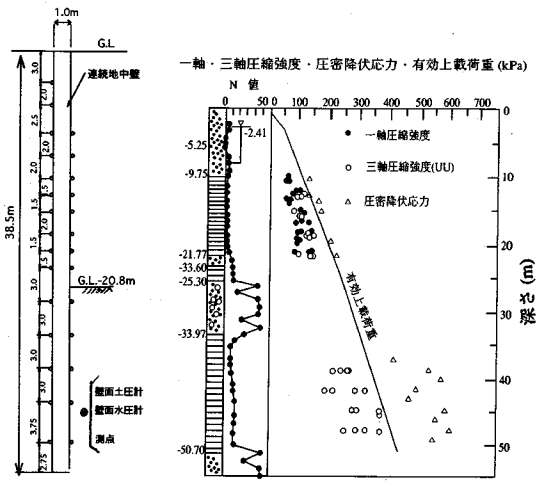


図-2 計測器設置位置図 図-3 地盤状態 (A 地点土留め工)

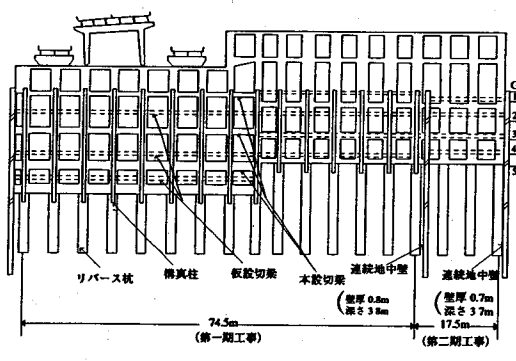


図-4 施工断面図 (B 地点土留め工)

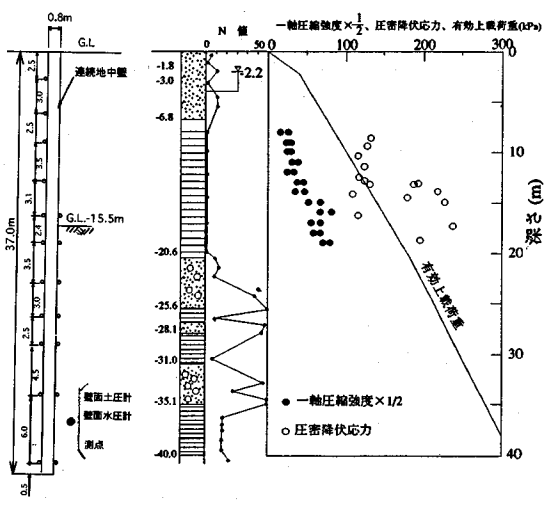


図-5 計測器設置位置図 図-6 地盤状態 (B 地点土留め工)

挙動について示し、これらの力学挙動について考察を行う。

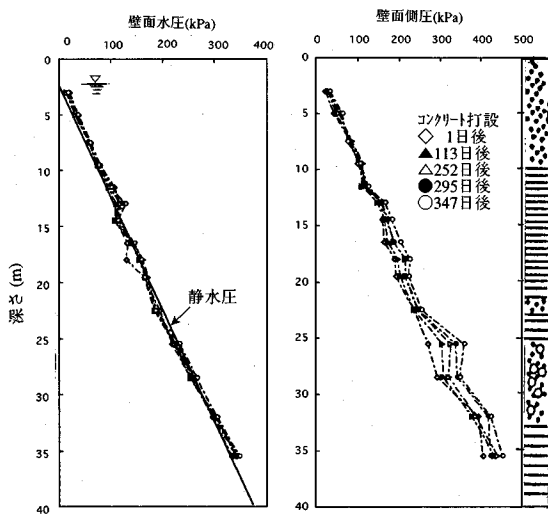
2. 地盤および土留め工

本報告で対象とした土留め工の施工事例は、西大阪地域である千島および海老江での二か所の下水道ポンプ場築造工事での土留め工(単に、千島をA地点、海老江をB地点と呼ぶ)である^{14)~17)}。

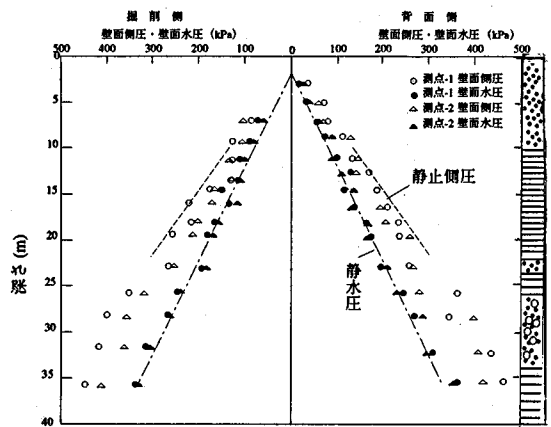
A地点土留め工における施工断面図を図-1に、壁面土圧計・壁面水圧計の設置位置図を図-2に、地盤状態を図-3に示す。G.L.-9.8~-21.8mの土層は、一軸圧縮強度60~140kPa、自然含水比40~50%、液性限界

50~70%、塑性限界20~27%の正規圧密状態にある沖積軟弱粘性土層である。土留め工の施工規模は、長さ85.5m、幅58.5m、掘削深さ20.8mである。土留め壁は、壁厚1.0m、深さ38.25mの泥水トレンチ工法で築造したRC連続地中壁である。G.L.-15.9mまでの掘削には3段の逆打工法を採用し、基礎ぐい、構真柱(はり、床版を支える構造用柱)を先行施工し、その後、はり、床版を築造し、土留め壁を支保しながら掘削を行っている。それ以降のG.L.-20.8mまでの掘削は、3段のアースアンカーで土留め壁を支保しながら行っている。計測位置は、長さ方向(測点-1)と幅方向(測点-2)の二か所である。

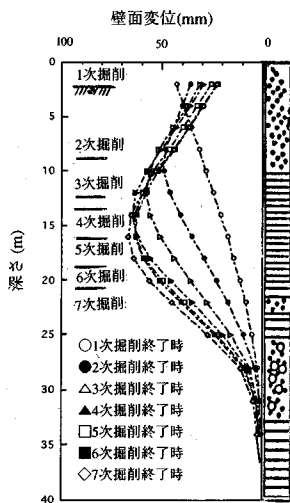
B地点土留め工における施工断面図を図-4に、壁面



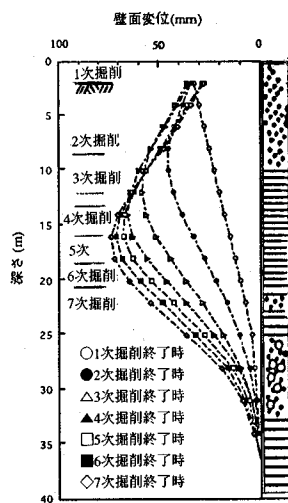
図一七 掘削直前までの壁面土圧・壁面水圧の変化
(A 地点土留め工, 背面側, 測点-1)



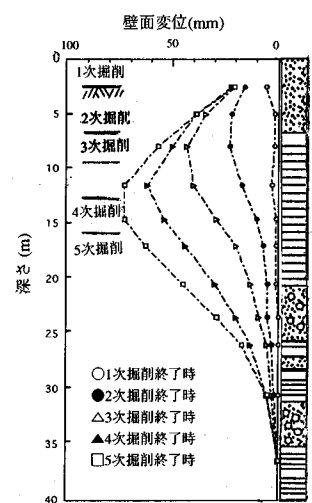
図一八 掘削直前における壁面側圧・壁面水圧分布
(A 地点土留め工)



図一九 壁面変位
(A 地点土留め工, 測点-1)



図一十 壁面変位
(A 地点土留め工, 測点-2)

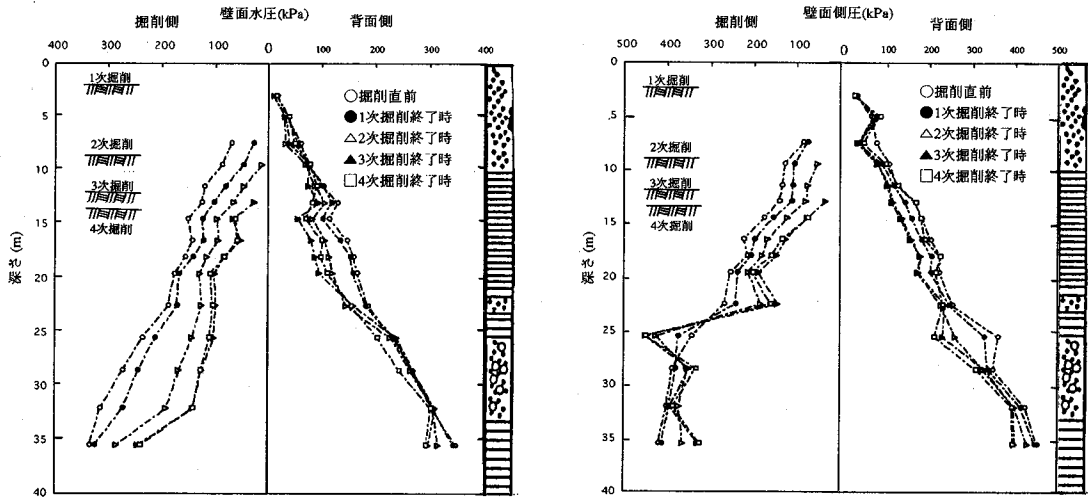


図一十一 壁面変位
(B 地点土留め工)

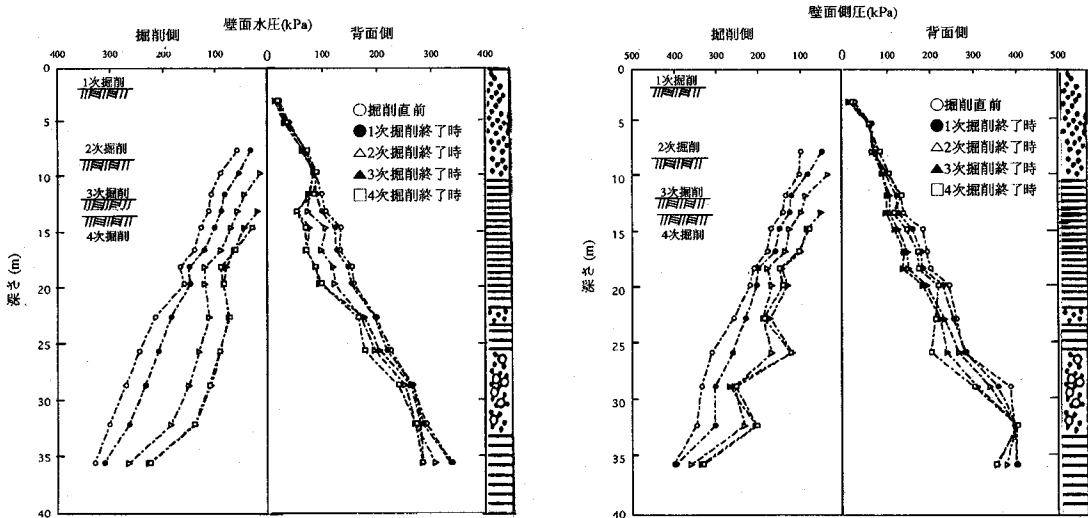
土圧計・壁面水圧計設置位置図を図一五に、地盤状態を図一六に示す。なお、B 地点土留め工では、第一期工事の躯体構築完成後、第二期工事の土留め工を施工している。本報告は、第二期工事における土留め工についてである。G.L.-6.8~20.6 m の土層は、一軸圧縮強度 80~160 kPa, 自然含水比 30~68%, 液性限界 40~89%, 塑性限界 21~35% のやや過圧密状態とみなされる沖積軟弱粘性土層である。土留め工の施工規模は、長さ 67.6 m, 幅 15.4 m, 掘削深さ 15.5 m である。土留め壁は壁厚 0.8 m, 深さ 37.5 m の泥水トレンチ工法で築造した RC 連続地中壁である。掘削は、4 段の鋼製切梁により土留め壁を支保して行っている。計測位置は、長さ方向中央

部である。

なお、本報告での壁面土圧は、RC 連続地中壁に設置した壁面土圧計(直径 14.8 cm, 差動トランス型)による壁面側圧より、同じく RC 連続地中壁に設置した壁面水圧計(直径 14.8 cm, 差動トランス型)による壁面水圧を差し引いた値である。壁面土圧計・壁面水圧計は泥水トレンチ中に挿入した鉄筋籠に設置し、ジャッキアップにより軽く地盤に接させて、その後に泥水中にコンクリートを打設した状態で設置されている。特に、本報告で検討する沖積軟弱粘性土層における壁面土圧計測については、測定精度をより明確にするため、掘削時に採取した実地盤での粘性土をもって土槽検定を行い、載荷時および



図一12 壁面水圧・壁面側圧分布(A地点土留め工, 測点-1)



図一13 壁面水圧・壁面側圧分布(A地点土留め工, 測点-2)

除荷時の検定曲線を作成して用いている¹⁸⁾。

3. 壁面土圧・壁面水圧分布

泥水トレンチ工法によるRC連続地中壁築造時¹³⁾から掘削開始直前までの壁面土圧・壁面水圧の変化は、その後の掘削時の基となる初期状態として、掘削時の壁面土圧・壁面水圧の力学挙動を考察する上で重要となる。

ここでは、泥水トレンチ中へのコンクリートの打設終了時から土留め掘削直前までの12か月間の壁面側圧・壁面水圧の変化を千島土留め工(測点-1, 背面側の場合)について図一7に例示する。また、掘削直前における壁面側圧・壁面水圧をA地点土留め工(測点-1, 測点

-2)について図一8に例示する。沖積軟弱粘性土層における壁面水圧は、掘削直前では、自由水面からの静水圧とほぼ一致している。また、壁面側圧は、12か月間の間で漸増している。図中に原地盤での地中水平方向土圧計による計測値より推定した静止側圧状態(静止土圧係数を0.5として計算できる土圧と静水圧の合圧としての静止側圧とほぼ一致している)を示している。掘削直前の壁面側圧はこの静止側圧状態までの回復は生じていない。

図一9~11に壁面変位、図一12~14に壁面水圧・壁面側圧分布を示す。なお、A地点土留め工では、5次掘削以後はアースアンカー工法を採用しており、アースアンカー孔の削孔およびプレロードの影響があるため、4次

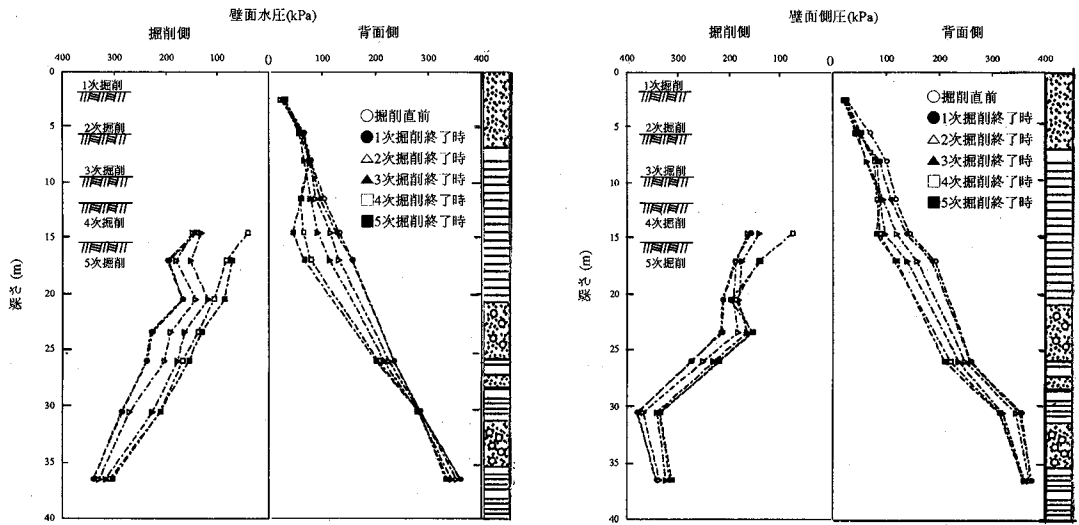


図-14 壁面水圧・壁面側圧分布 (B地点土留め工)

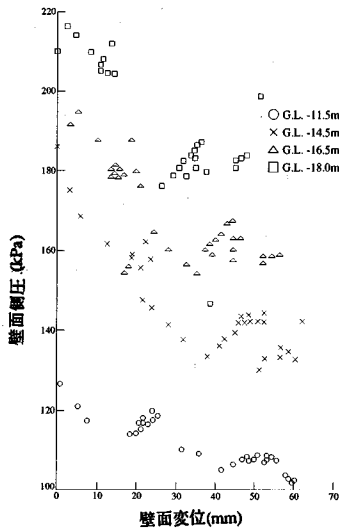


図-15 壁面変位と壁面側圧の関係 (A地点土留め工, 測点-1)

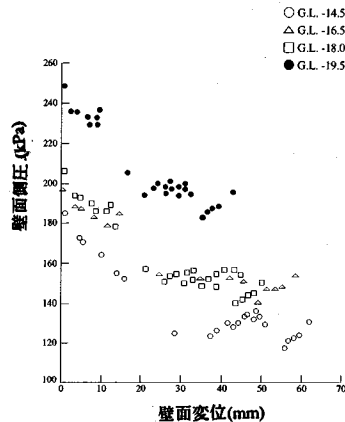


図-16 壁面変位と壁面側圧の関係 (A地点土留め工, 測点-2)

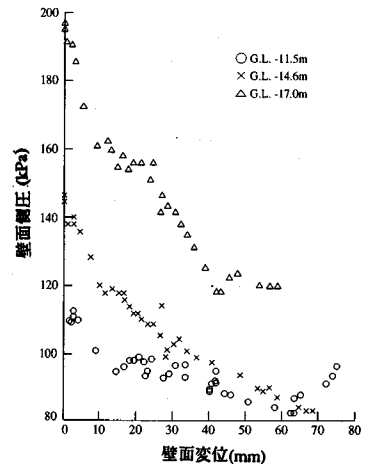


図-17 壁面変位と壁面側圧の関係 (B地点土留め工)

掘削までの分布を示している。

A地点土留め工, B地点土留め工とも, 壁面変位については, 軟弱地盤掘削時特有のはらみ出し現象を示し, 掘削底付近で最大変位を生じている。背面側壁面水圧については, 掘削の進行に対応して明確な減少現象を示している。その最大減少量は, A地点土留め工, B地点土留め工とも 89 kPa となっている。また, 壁面側圧は, まず減少し, その後あまり変化がないことが読み取れる。これらの力学挙動を壁面変位との関係を基に以下に詳細に検討する。

4. 壁面変位と壁面土圧・壁面水圧の関係

沖積軟弱粘性土層における壁面変位と壁面側圧との関係を図-15~17に示す。壁面側圧は, 壁面変位が小さい間は, ほぼ直線的に減少しているが, その後は, さらに壁面変位が増大しても減少せず, 横ばいから逆に増大の現象を示している。こうした力学挙動の中で, 壁面土圧と壁面水圧がどのように作用しているのかを明らかにするため, まず, 壁面変位と壁面水圧の関係を考える。

沖積軟弱粘性土層における壁面変位と壁面水圧の関係を図-18~20に示す。A地点土留め工, B地点土留め工

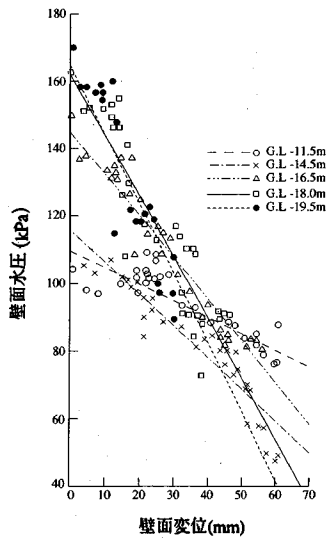


図-18 壁面変位と壁面水圧の関係 (A地点土留め工, 測点-1)

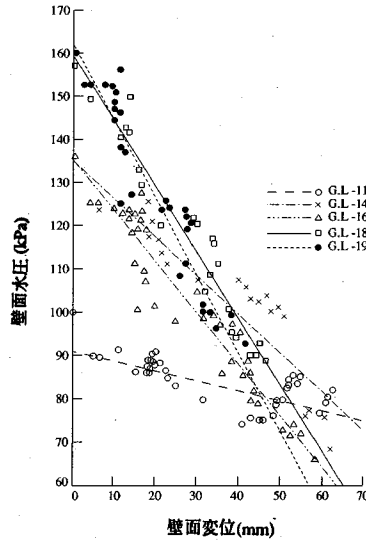


図-19 壁面変位と壁面水圧の関係 (A地点土留め工, 測点-2)

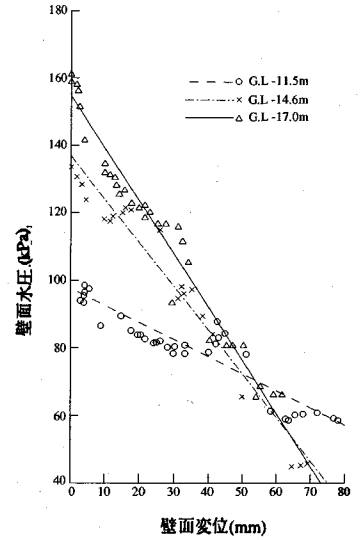


図-20 壁面変位と壁面水圧の関係 (B地点土留め工)

表-1 壁面変位～壁面水圧の一次関係式と相関係数

計測場所	計測点の深さ (G.L.-m)	a^* (kPa)	u_0^* (kPa)	相関係数
A地点土留め工 測点-1	11.5	-4.9	107.51	0.905
	14.5	-0.94	113.68	0.945
	16.5	-1.25	143.77	0.947
	18.0	-1.78	159.74	0.935
	19.5	-2.05	164.38	0.929
A地点土留め工 測点-2	11.5	-2.16	89.96	0.720
	14.5	-8.42	132.20	0.941
	16.5	-11.47	132.10	0.962
	18.0	-14.80	155.82	0.961
	19.5	-17.54	158.86	0.962
B地点土留め工	11.5	-5.10	87.84	0.935
	14.6	-12.25	132.89	0.970
	17.0	-15.09	150.63	0.984

a, u_0 は次式による
 $U = ax + u_0$
 ここに U : 壁体変位 x (cm)の時の壁面水圧 (kPa)
 u_0 : 掘削前の初期壁面水圧 (kPa)

とも壁面変位が増大するにつれて、壁面水圧は減少しており、これには一次の比例関係が認められる。こうした壁面水圧の減少は壁面変位につれて地盤中の粘土骨格が膨張し空隙内に負圧が生じたことによると考えられる。表-1は、壁面変位と壁面水圧の一次関係式と相関係数を示したものである。相関係数は、大部分が0.9以上となっており、一次比例の極めて高い相関関係にある。

図-21は、壁面変位と壁面水圧の関係での壁面水圧減少勾配と初期壁面水圧の関係を示したものである。初期壁面水圧は、A地点土留め工、B地点土留め工とも掘削

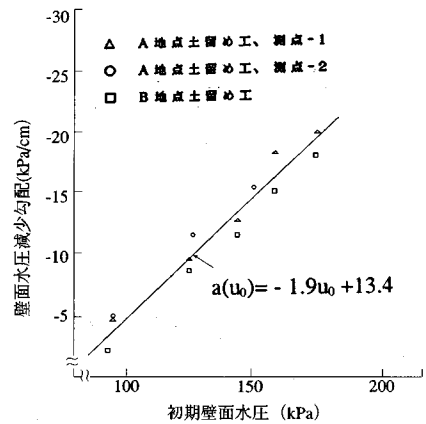


図-21 壁面水圧減少勾配と初期壁面水圧の関係

直前には自由水面からの静水圧を示していたため、静水圧とした時の水圧をもって初期壁面水圧としている。壁面変位と壁面水圧との間の減少勾配は、初期壁面水圧が大きい程大きく、相関係数0.96の一次比例の関係が成立する。以上の検討より、沖積軟弱粘性土層における壁面変位と壁面水圧については、次式で示される関係が成立する。

$$u = a(u_0)X + u_0$$

$$a(u_0) = -1.9u_0 + 13.4 \quad (1)$$

ここに、 u : 沖積粘性土層中の任意の深さにおける壁面水圧 (kPa), u_0 : 沖積粘性土層中の任意の深さにおける掘削前の初期壁面水圧 (kPa), X : 沖積粘性土層中の任意の深さにおける壁面変位 (cm)

次に、沖積軟弱粘性土層における壁面変位と壁面水圧

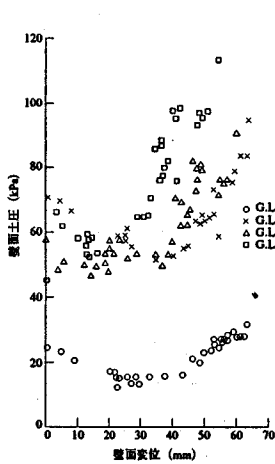


図-22 壁面変位と壁面土圧の関係
(A 地点土留め工, 測点-1)

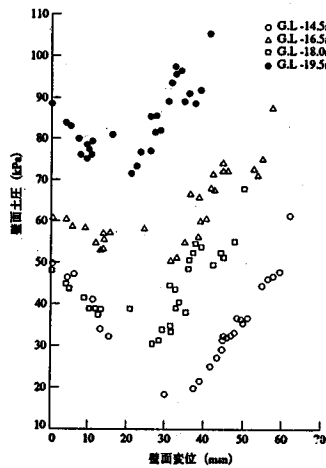


図-23 壁面変位と壁面土圧の関係
(A 地点土留め工, 測点-2)

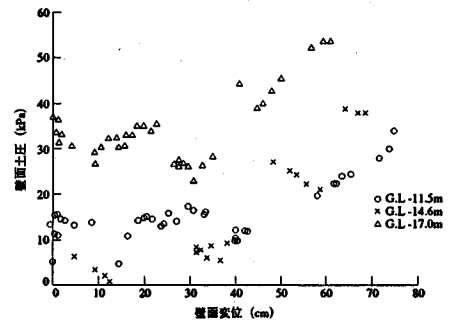


図-24 壁面変位と壁面土圧の関係
(B 地点土留め工)

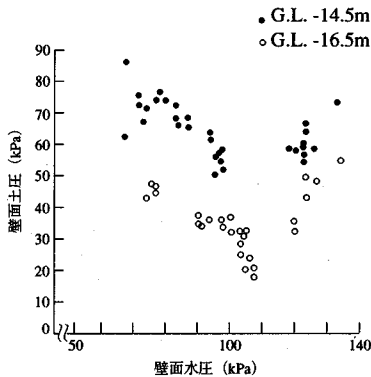


図-25 壁面水圧と壁面土圧の関係
(A 地点土留め工, 測点-2)

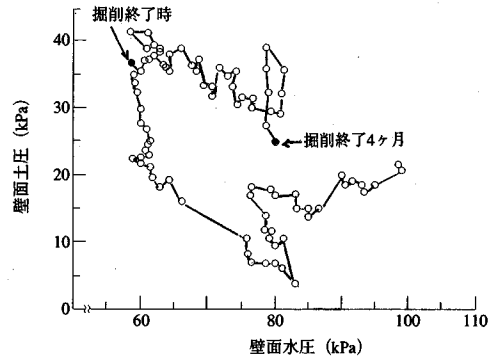


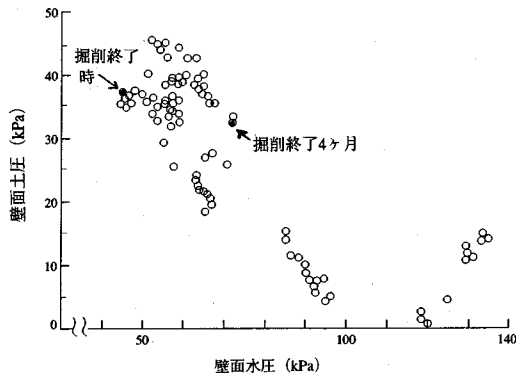
図-26 壁面水圧と壁面土圧の関係
(B 地点土留め工, G.L.-11.5m)

の関係を図-22~24に示す。壁面土圧は、壁面変位が20~30 mmまでは減少し、さらに壁面変位が進むと逆に増大し掘削前以上の圧となっており、20~30 mmの壁面変位でほぼ主働土圧状態に移行しているものと推測できる。また、これらの壁面土圧の力学挙動を考察するため、掘削開始時からの壁面土圧と壁面水圧の両者の関係を図-25~28に示す。なお、B地点土留め工については、最終掘削終了後で基礎ばりとなる底盤コンクリート打設後に壁面変位がほぼ停止しているが、その後の4か月にわたって両者の関係をプロットしている。

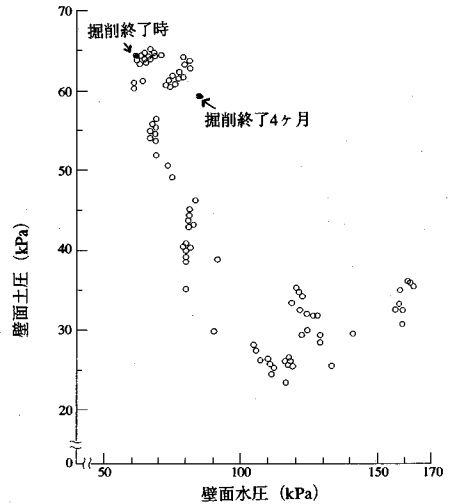
図-29は、これらの関係を模式的に示したものである。図-29での模式図による力学挙動は次のように説明できる。まず、掘削開始前のA点から壁面変位とともに両者とも減少して、主働土圧状態と考えられるB点に至る。B点からは、壁面変位がさらに進むにつれて、壁面水圧はさらに減少し続けるが、壁面土圧は逆に増大

し、掘削終了時点であるC点に至る。壁面変位が停止したC点からは、壁面水圧は増大、壁面土圧は減少し始めD点に至る。A点からB点では、壁面水圧は、壁面変位によって、掘削前の静止土圧に近い状態から主働土圧状態への移行によると考えられる減少が生じている。壁面変位が小さいの間では、主働土圧状態への移行による減少が大きいことから、結果として、壁面側圧は減少する。次に、主働土圧状態であるB点をこえ、壁面変位がさらに進むと、壁面土圧の増大が卓越するようになりC点に至る。

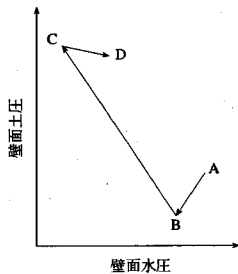
壁面土圧の減少は、壁面変位により掘削当初の静止土圧に近い状態よりの主働土圧状態への移行によることが主要因であると判断できるのに対し、その後の壁面土圧の増大は、沖積軟弱粘性土層のすべての計測点で生じていることから、土圧の再分配のような現象が生じているとは考えにくい。壁面変位の進行による地盤の塑性化現



図一27 壁面水圧と壁面土圧の関係
(B地点土留め工, G.L.-14.6 m)



図一28 壁面水圧と壁面土圧の関係
(B地点土留め工, G.L.-17.0 m)



図一29 壁面水圧と壁面土圧の関係の模式図

象が原因しているのではないかと推測できる。また、図一29に模式的に示したようなC点からD点への移行は、軟弱粘性土地盤では壁面変位の増大が停止した段階において壁面水圧の回復により壁面側圧が増大する可能性があることを意味している。掘削終了後、土留め壁に対する強固な支持点とできるような構造物ができるまでの期間が土留め架構として最も危険な状態と言える。

本報告は、西大阪地盤でのRC連続地中壁を土留め壁とする掘削工事での沖積軟弱粘性土層に対する事例報告であり、地盤条件・施工条件が異なれば、本報告で示した力学挙動での壁面土圧や壁面水圧の変化量は異なってくるものと考えられる。こうした点を念頭におき、本報告事例を軟弱粘性土地盤における土留め工の設計・施工時の参考とできよう。

5. 結論

以上、本報告では、西大阪地域沖積軟弱粘性土地盤での二か所のRC連続地中壁を土留め壁とする掘削工事での背面側土留め壁面に作用する壁面土圧・壁面水圧について詳細な長期計測結果を基に、壁面変位との関連を中心に計測値を整理し、考察を行った。本報告で得られた

主要な力学挙動を要約して示すと次の通りである。

(1) 掘削側への壁面変位により背面側の壁面水圧の減少が生じる。その減少量は、壁面変位と一次比例する関係にある。また、この壁面水圧減少勾配は、初期壁面水圧の一次関数で示される。

(2) 背面側壁面土圧は、20~30 mm程度の掘削側への壁面変位によって主働土圧状態まで減少する。その後、掘削側への壁面変位の増大とともに背面側壁面土圧は増大する。

(3) (1)、(2)の結果として、背面側圧はまず掘削側への壁面変位によって減少し、その後の壁面変位の増大とともに横ばいか、いくぶん増大の傾向を示す。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計基準・同解説, pp. 401-445, 1974.
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書(開削編)・同解説, 1986.
- 3) 日本建築学会：山止め設計施工指針, 1988.
- 4) 金谷祐二, 宮崎裕助：剛な山留め壁の変形と土圧変化, 土と基礎, Vol. 21, No. 11, pp.29-34, 1973.
- 5) 黒柳正得, 井上嘉信, 川西秀次郎：軟弱地盤におけるRC山留め壁の変形と側圧の測定結果と検討, 第12回土質工学研究発表会, pp.1149-1152, 1977.
- 6) 幾田悠康, 丸山正夫：実測から見た山止め側圧, 土と基礎, Vol. 28, No. 3, pp.19-26, 1980.
- 7) 柳田真司・渡辺留雄, 山口伊佐雄, 中村兵次, 福島進, 水谷進：掘削土留め工の設計用側圧に関する研究(その1：掘削前の側圧及び背面側側圧), 第16回土質工学研究発表会, pp.1445-1448, 1981.
- 8) 田中洋行：軟弱地盤における山留め工の挙動に関する研究, 港湾技研資料, pp.17-24, 1992.
- 9) Terzaghi, K.: Large Retaining Wall Test, *Enginner-*

- ing News Record*, Vol. 112, pp.136-140, 1934.
- 10) 市原松平, 松澤宏: 壁変位中における土圧特性と裏込め砂のせん断特性の関連, 土木学会論文報告集, 第 176 号, pp.61-74, 1970.
 - 11) Lambe, T.W. and Whiteman, D.V.: *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons Inc., pp.162-194, 1969.
 - 12) 山肩邦男, 吉田洋次, 秋野矩之: 掘削工事における切ばり土留め機構の理論的考察, 土と基礎, Vol. 17, No. 9, pp.33-45, 1969.
 - 13) 中村兵次, 中沢章: 掘削工事における山留め壁応力解析, 土質工学会論文集, Vol. 12, No. 4, pp.33-45, 1972.
 - 14) 玉野富雄, 福井聡, 植下協: 軟弱粘土地盤における泥水トレンチ掘削の安定, 土木学会論文集, 第 346 号, III-1, pp.37-45, 1984.
 - 15) 村上仁, 高柳枝直, 玉野富雄, 福井聡: 大規模土留め工, 土と基礎, Vol. 36, No. 11, pp.62-67, 1988.
 - 16) 玉野富雄, 福井聡, 村上仁, 門田俊一: 掘削底部地盤におけるリバウンドの力学挙動解析, 土木学会論文集, 第 418 号, III-13, pp.221-230, 1990.
 - 17) Fukui, S and Tamano, T.: Earth and water pressures acting on Retaining Wall, *Proc. of the 9th Asian Regional Conference on S.M.F.E.*, Vol. 1, pp.267-270, 1991.
 - 18) 松澤宏: 土圧計の作動特性と検定について, 土と基礎, Vol. 30, No. 7, pp.71-76, 1982.

(1994.8.1 受付)

MECHANICAL BEHAVIORS OF EARTH AND WATER PRESSURES ACTING ON OUTSIDE OF BRACED WALLS IN SOFT CLAYS

Tomio TAMANO, Satoshi FUKUI, Hiromasa SUZUKI,
Hiroshi MATSUZAWA and Kano UESHITA

This paper describes the problem involved in the excavation work using the diaphragm wall in the soft grounds, which consists mostly of alluvial soft clay layer. In particular, the mechanical behavior of earth and water pressures acting on the outside of the braced walls in the soft clay layers is discussed in detail based on the on-site measurements of some excavation works. As a result, braced wall displacement causes the outside water pressure to decrease. The quantity of decrease and wall displacement show a linear partial relation. The outside earth pressure first drops the active earth pressure level owing to the wall displacement up to 20 to 30 mm. After the range is exceeded, outside earth pressure increases with the wall displacement.