

土圧系シールド適用地盤の研究

藤原 紀夫 羽生田 吉也
山下 幸夫

Study on Suitability of Ground for Earth Pressure Type Shield

Toshio Fujiwara Yoshinari Hanyuda
Yukio Yamashita

Abstract

The purposes of this study were to find the kinds of ground in which earth pressure type shields are applicable and to clarify the scope of conditions in which this type of shield is usable. The authors thus analyzed in detail the excavation data of 13 projects undertaken by their company and compared the characters of excavation soils with the applicability of the shield. Still further, the authors carried out compaction tests, taking notice that the degree of soil compaction is strongly affected by grain-size distribution, moisture content, and other factors. Consequently, it was clarified that the maximum dry densities of soils where the shield is difficult to apply in actual projects are very great. Opinions regarding critical density and critical moisture content are given in this paper.

概 要

この研究は土圧系シールド工法に適した地盤条件を把握し、適用範囲を明らかにすることを目的とする。そのため、当社で施工した13現場について、掘進データを詳細に分析し、切羽土質の性状と施工性を対比した。これら結果はブラインドシールド工法とも比較しながら、適用範囲として示している。また土の締固めやすさが粒度分布、含水比などの影響を強く受けることに着目し、現場発生土を用いた締固め試験を実施した。その結果、実際の工事で適用が困難と認められた土質は、最大乾燥密度が非常に大きいことが明らかになった。ここでは圧力室内が閉塞を起こさないために必要な限界密度と限界含水比の考え方を示している。

1. まえがき

土圧系シールドは、圧力室内に取り込まれた掘削土を、常に充満させながら掘進することに特長がある。そのため圧力室内の掘削土の性状が、施工性を大きく左右することになる。

本来、この工法は、従来から行なわれているブラインドシールドに対して、

- (1) 切羽の切削機構を機械掘りとし（メカニカル掘削機構）
- (2) 掘削土砂をスクリーコンベアにより強制排土させる

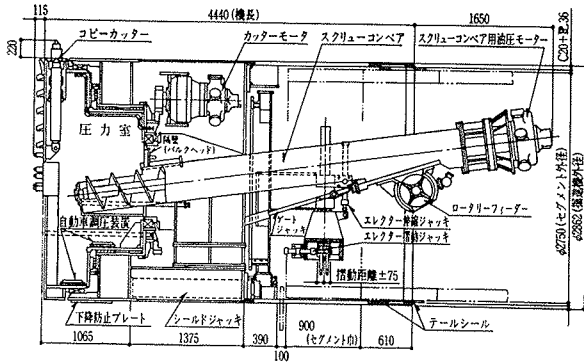
ことにより、その適用地盤を飛躍的に増大させる施工法である(図-1)。ただしこの工法は実施に移されてからまだ数年しか経ておらず、どのような地盤に対して適用

できるかについては、現在でもまだ不明確な点が多い。したがって多くの施工例を調査し、土圧系シールドの適用性と土質性状との関連を把握しておくことが、とりわけ重要である。

筆者らは、すでにこの工法に関して86件の施工例を調査し、まとめたものを報告している¹⁾。ただし、この内容は、主にシールド機械の装備能力と施工上の問題点を中心としたもので、適用地盤についてあまりふれていない。そこで今回は、この工法の適用地盤を把握することを目的として、当社で施工した工事例のなかから13件を選び、施工データの詳細な分析と室内土質試験による適用性の判定を行なった。

2. 施工実績調査の概要

適用地盤について論ずるためには、できるだけ詳細な



図一 土圧系シールド掘進機

施工記録と切羽土質の性状を知る必要がある。そのため調査は当社の施工例にかぎり、直接工事現場にてかけて必要な資料を入手した。

圧力室内が閉塞し、排土が不可能になった状態を入念に調査してみると、掘削土が極度に締固められていることが分かる。このような状態は掘削土が圧縮、脱水などの作用を受けるために発生するもので、特に砂質地盤では、脱水作用に伴うアーチアクションの発生が直接の原因となることも多い。いずれにしても、掘削土の締固めやすさが、土圧系シールドの適用性を左右する大きな要因となっている。

ここで適用性とは、対象とする地盤が本シールドの運転に適しているか否かを判断するもので、現場の施工状況および掘進記録などを総合的に評価して決定した。仮に適用が困難な地盤であっても、圧力室内にベントナイト注入、注水およびその他の補助工法を併用することにより、掘進が可能となる場合もある。ただしここでは圧力室内に対して何らかの補助工法を必要としたものは、一応“不適な地盤”とした。

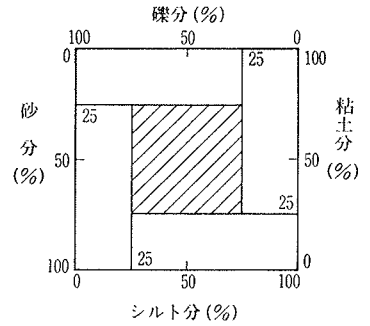
3. 土質性状による適用性の判定

3.1. 粒度分布による判定

この報告では、従来の三角座標に新たに礫分の含有率を加えた“四角座標”を提案した。その結果、礫分から粘土分に至る一連の粘土分布を表示することが可能となった。

四角座標とは図一2に示す座標系に、礫、砂、シルト、粘土の含有率をとり、これらの線で囲まれた長方形の部分で、土の粒度分布を示そうとするものである。例えば、それぞれの含有率が25%の土質は図中に示すような範囲で表わされる。このように中央部に粒度分布が図示される場合は、粗粒分から細粒分まで広い範囲の粒径が含まれた土質を示し、逆に辺部に図示される場合は粒径の分布が狭いことを意味する。図一3に四角座標による切羽

土質の区分を示す。この図と粒径加積曲線などから総合的に判断すると、土圧シールドが適した地盤と不適な地盤では、それぞれ次のような特徴がみられる。



図一2 四角座標

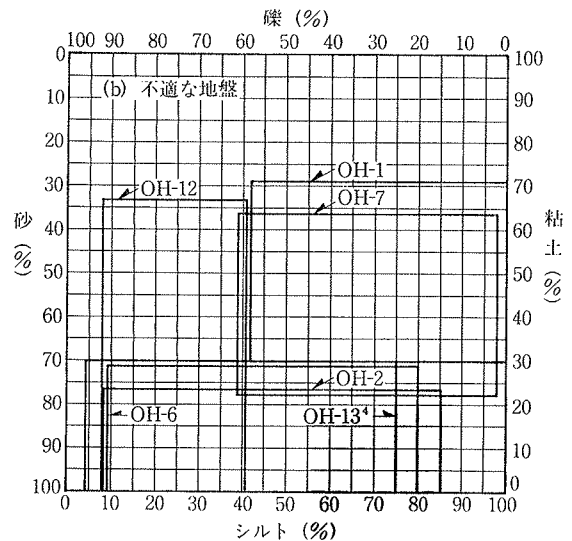
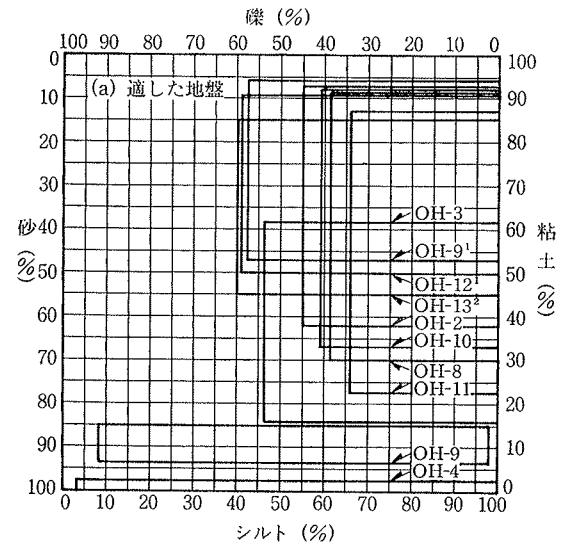
1) 適した地盤

- 粘土系：砂分15%以下、粘土分15%以上で、微粒分が多く D_{10} が0.02 mm 以下
- 砂質系：砂分85%以上で均一な砂

2) 不適な地盤

- 粘土系：砂分30%以上で粒度分布の良いもの
- 砂質系：砂分70~80%の範囲のもの

なお礫質地盤では、礫最大径が20 mm 以上になると



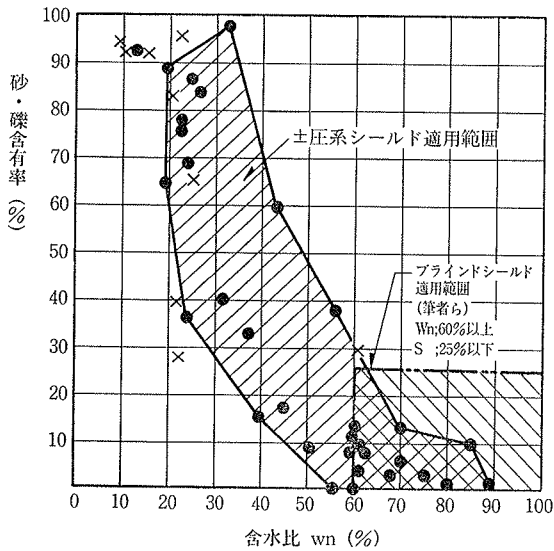
図一3 四角座標による切羽土質の区分

カッタートルク，土圧などが不安定になる。

3.2. 含水比による判定

図一4に砂・礫含有率（砂分と礫分の合計含有率）と自然含水比からみた切羽土質の適用範囲を示す。ここでは，筆者らの提唱するブラインドシールドの適用範囲²⁾も参考までに記入している。

当然のことながら土圧系シールドはブラインドシールドの範囲を，はるかに越えて適用されている。なおブラインドシールドの適用範囲は，本来はすべてこの工法の適用範囲内に含まれるものと思われるが，ここでは調査した結果のみを包含して，適用範囲として示した。実際には，路線の全長にわたって軟弱な粘性土地盤が分布するような場合は，ブラインドシールドが使用され，互層となって適用が難しい場合に土圧系シールドが使用される。



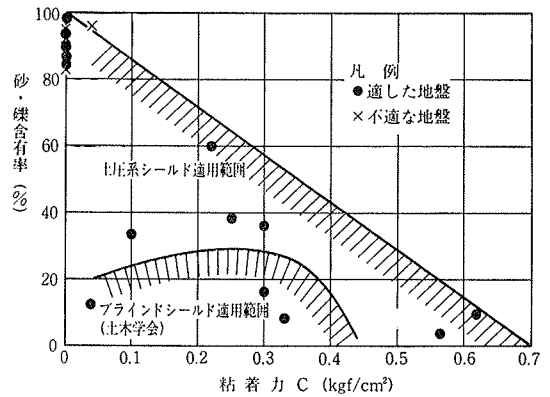
図一4 砂・礫含有率と自然含水比

3.3. 力学的性質とコンシステンシーによる判定

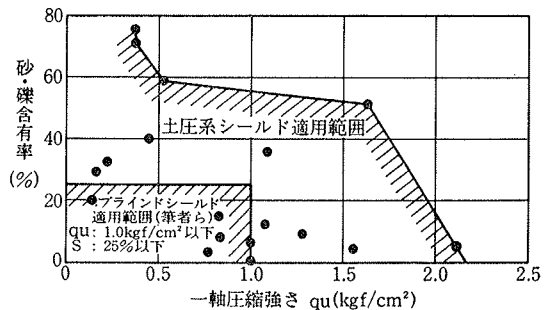
図一5，6に砂・礫含有率と，粘着力および一軸圧縮強度からみた切羽土質の適用範囲を示す。図中には土木学会の規定³⁾，および筆者らの提唱する，ブラインドシールドの適用範囲も併記している。

土圧系シールドは，ブラインドシールドに比べて適用地盤の範囲が非常に大きいことが分かる。これは本シールド工法の有効性を示すものである。特にブラインドシールドでは施工できなかった砂質，および砂礫地盤に対して適用範囲が広がったことは，それだけでも大きな意義がある。

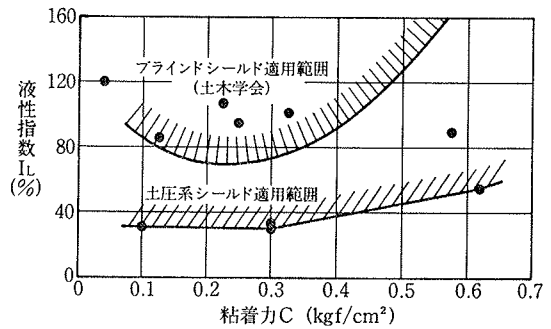
図一7，8はコンシステンシーと粘着力からみた切羽土質の適用範囲を，前図と同様に示したものである。土圧系シールドの適用範囲は，液性指数 (I_L) 30%以上，自然含水比と液性限界との比 (W_n/W_L) 0.6以上と，い



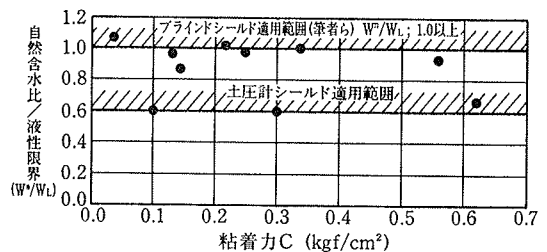
図一5 砂・礫含有率と粘着力



図一6 砂・礫含有率と一軸圧縮強さ



図一7 液性指数と粘着力



図一8 W_n/W_L と粘着力

ずれの場合もブラインドシールドの適用範囲を上回っている。したがって粘性土に対しても本シールドは有利に適用される。

3.4. 締固め試験による判定

土の締固めは含水比，粒度分布，均等係数などの影響を強く受ける。そこで，掘削土が圧力室内で締固まりやすいか否かを試験し，土圧系シールドへの適用性を判定

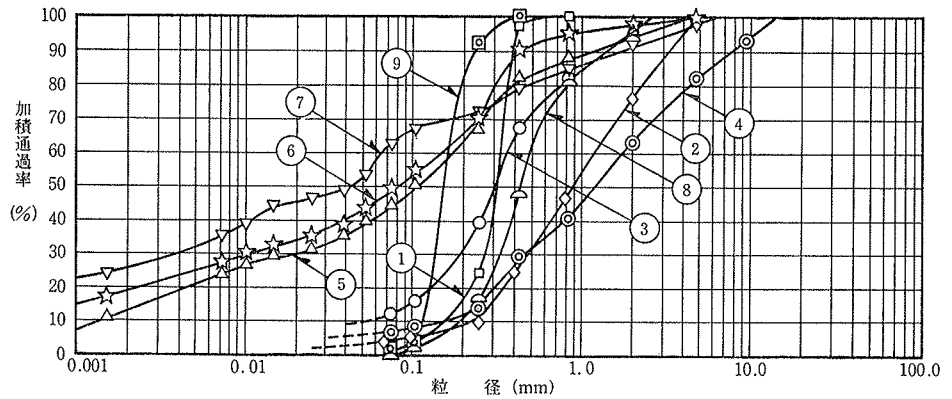
する目的で、締固め試験を実施した。試験方法は JIS A1210 の規定による第 1 方法である。

試料は砂質土を中心とする 9 種類で、現場で採取した発生土のほかに、比較のため利根川産粗砂、標準砂などの購入砂も加えている。表一に試料の一覧表を、また図一9には全試料の粒径加積曲線を示す。このうち試料 2, 4, 6 は、シールド掘進中に圧力室内で掘削土が締固められ、閉塞あるいは何らかのトラブルを生じたもので、土圧系シールドの適用が困難な地盤の代表と考えてよい。ただし試料 2 については工事がすでに完了し、試料の採取ができないため、利根川産粗砂をふるい分けして、切羽土質と同一の粒度分布となるよう、その粒度を調整して使用した。

図一10の締固め試験の結果を示す。土圧系シールドの適用が困難であると判断される試料 2, 4, 6 については、いずれも最大乾燥密度が非常に大きいことが分かる。圧力室内の閉塞は、中に取り込まれた掘削土が脱水・締固め作用を受けるために起こるもので、この点から

試料番号	施工場所	土質名称	礫分 (%)	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	最大粒径 (mm)	均等係数
1	施工例A (新潟市内)	細砂	0	98.0	2.0	0	0.84	1.9
2	施工例B (東大阪市内)	礫混り粗砂	25.2	71.1	3.7	0	4.76	5.5
3	施工例C (倉吉市内)	細砂	2.8	84.6	12.6	0	2.20	7.2
4	施工例D (呉市内)	礫混り粗砂	37.0	55.9	7.1	0	14.00	35.3
5	施工例E (大東市内)	粘土質砂	4.4	51.3	23.0	21.3	2.60	128.6
6	施工例F (名古屋市内)	粘土質砂	1.7	49.5	25.0	23.8	5.50	—
7	施工例G (大阪市内)	砂質粘土	9.0	27.8	31.2	32.0	6.00	—
8	購入砂; 利根川産粗砂	礫混り粗砂	5.1	93.9	1.0	0	4.76	2.6
9	購入砂; 標準砂	細砂	0	98.5	1.5	0	0.42	1.3

表一 締固め試験における試料一覧表

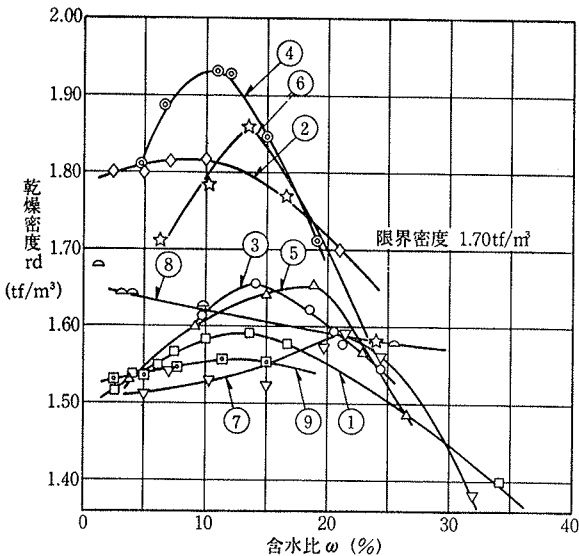


図一9 粒径加積曲線

も締固め試験の結果は、本シールド工法の適用性を判断するうえで有効な指標を与えるものと思われる。

- これらの結果をまとめて示すと、次のとおりである。
- (1) 掘削土の締固めによりアーチアクションが発生し、圧力室内が閉塞しやすい土質は、最大乾燥密度が非常に大きい。特に締固め試験の結果、最大乾燥密度が 1.70 tf/m^3 以上となる土質については注意が必要である。
 - (2) 上記とは逆に、最大乾燥密度が 1.70 tf/m^3 以下となる土質については、まずアーチアクション発生心配はなく、土圧系シールドで順調な掘進が期待できる。
 - (3) 最大乾燥密度が 1.70 tf/m^3 以上となる土質でも、圧力室内の含水比が高ければアーチアクションは発生しない。具体的には乾燥密度が図一11に示す限界密度よりも、常に小さくなるような含水状態であれば、掘削土は締固まらないことになる。したがって自然地盤の含水比が低いか、または圧力室内で掘削土が脱水され、限界含水比以下となってアーチアクションの発生が予想される場合は、圧力室内に注水し掘削土の含水比を高めることも補助手段として非常に有効である。

なお限界密度については、実際に圧力室内が閉塞した場合の掘削土の含水比を調査し、締固め試験の結果と対比すると、 $1.70 \sim 1.75 \text{ tf/m}^3$ 程度になっていることが多



図一10 締固め試験の結果

い。ここでは判定基準が安全側になるよう、小さい方の値を採用した。

4. まとめ

施工データの分析および締固め試験の実施により、今までに得られた結果をまとめて示すと次のようになる。

- (1) 土圧系シールドはブラインドシールドに比べて適用地盤の範囲が非常に大きく、粘性土地盤から砂礫地盤にいたるまで広く適用できることが確認できた。ただしこの工法も、すべての地盤に対して万能という訳ではなく、土質性状により限界があるので注意を要する。表-2に適用地盤の総合判定表を示す。
- (2) 一般の土構造物では締固めやすい粒度分布の良いものが要求されるが、この工法では逆に粒度分布の悪いものが望ましい。掘削土の含水比は、当然高いほど締固まりにくく有利である。
- (3) 締固め試験の結果、最大乾燥密度が1.70 g/cm³以上となる土に対しては圧力室内の閉塞を懸念する必要がある。ただしこのような土でも、掘削土の含水比が高く流動性が確保される状態では、一応閉塞は起こらないものと判断される。この場合はスクリーコンベア出口から水だけが流出し、室内が脱水されるような事態は避けなければならない。

5. あとがき

この報告では適用地盤の判定を中心として、土圧系シールドの適用性について述べてきた。ひとつの成果として、適用地盤の総合判定表を提案し、掘進に適する地盤条件を示している。この結果は今後の施工計画などに、広く利用できるものと思う。ただし、ここに示した適用性の判定は、わずか13件という少ない施工データからの分析であり、得られた基準は必ずしも明確ではない部分も多い。

さらにこのシールドの適用性は、圧力室の形状、機能によっても大きな影響を受けるとともに、砂礫地盤など

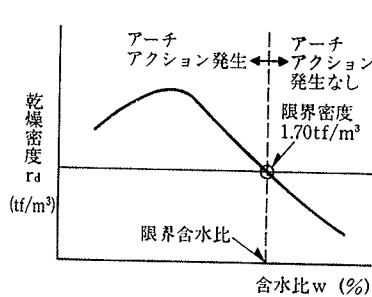


図-11 限界密度

地盤		粘土系	砂質系
土質性状			
粒度分布		四角座標において端部にかたまり粒度分布の悪いもの	同 左
粒度組成	砂分	15%以下	85%以上
	粘土分	15%以上	—
粒径	D ₁₀	0.02mm以下	—
	最大径	—	20mm以下
自然含水比 (w _n)		50%以上	23%以上
液性限界 (w _L /w _U)		0.6以上	—
液性指数 (I _L)		30%以上	—
内部摩擦角 (φ) (三軸試験)		20度以下	30度以下
粘着力 (C) (三軸試験)		0.7kgf/cm ² 以下	—
一軸圧縮強度 (q _u)		2.5kgf/cm ² 以下	—
地下水位		—	水被り10m以下
飽和度 (S _r)		約100%	約100%
最大乾燥密度 (rd) (締固め試験)		1.70tf/m ³ 以下	1.70tf/m ³ 以下

表-2 適用地盤の総合判定表 (適する地盤条件)

ではシールド機械が大径になるほど有利となる傾向も認められている。この報告では、これらの機械装備および機能に係る要因は考慮していない。

今後はさらに施工データを蓄積し、適用性の評価について、検討と修正を加えて行くつもりである。

参考文献

- 1) 斎藤, 藤原, 羽生田, 山下: メカニカルブラインドシールド工法(土圧バランス型シールド)の現況と施工上の問題点, 大林組技術研究所報, No. 20, (1980), pp. 60~64
- 2) 斎藤, 内藤, 藤原: ブラインド式シールド工法の概要と施工例, 建設の機械化, (1972. 11), pp. 27~33
- 3) 土木学会: トンネル標準示方書(シールド編)・同解説, (昭和52)