

ボックスシールド機の開発と施工性に関する 実験的検討

多田幸司*・谷口 徹*・古川浩平**・
中川浩二**

都市トンネルの有力な施工法であるシールド工法の最近の研究開発動向の1つとして異形断面シールド工法がある。泥水加圧式で矩形断面を掘削するボックスシールド機について、その掘削性能実験や施工性の検証実験を行い、その有意性を追求した結果、シールド工法として成立すると考えられた。従来の円形シールドとの相違点と共に実施した実験内容、結果について考察する。

Key Words : shield tunneling method, pressurized slurry rectangular shield, box shield, experimental operation

1. はじめに

都市トンネルの施工法として多用されているシールド工法も最近では地下河川への適用、東京湾横断道路での採用など大断面、大深度化の新しい気運にある。地下空間の有効利用が喧伝される昨今にあってはなおさらその傾向が強くなり、都市部での地下掘削方法として今後も有力であると見なされる。このように都市内の基盤整備が進むにつれ、地下の構造物も輻輳化しており、上部用地の確保の困難さも併せ、都市土木としての制約が年々厳しいものとなっている。

これらの状況に対し、より合理的、より経済的な方法を求めてシールド工法の技術開発に力が注がれているがその1つとして掘削断面を供用時の必要断面にできるだけ近づけようとする流れがある。多連式や自由断面もその一例であるが、矩形断面の開発も注目を浴びている。電力洞道や地下鉄、道路など供用時の内空断面を考えると、矩形が最も有利であり、この断面形だと上部の用地買収費や残土処理量が少なくすむという利点を持つことによる。また矩形断面シールドは複数のシールドトンネルを組合せて大断面のトンネルとすることが比較的容易であり、今後の発展が期待される。従来も矩形断面の有意性は認められていたが、密閉式での適切な掘削方法がなく、手掘り式で数例の実施例があるに留まっていた。

密閉式の矩形シールド工法として円形 cutter に遊星 cutter を組合せた方法¹⁾、スイング式ドラム cutter による方法²⁾、平行リング掘削機構による方法³⁾、スイングアームによる方法⁴⁾などの開発が現在鋭意行われているように見受けられる。筆者らは連壁掘削機であるエレクトロミルの機構⁵⁾をシールドへ適用する事を試み、

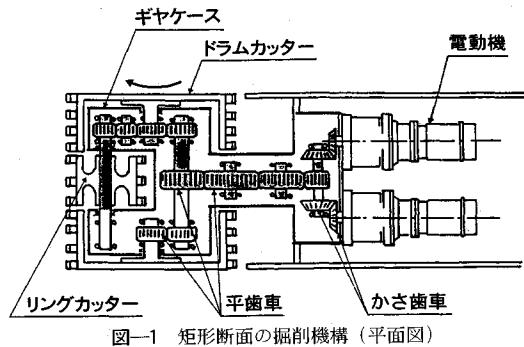


図-1 矩形断面の掘削機構(平面図)

実験機の製作と共に大型土槽を用いた実験、施工性を確認するための実証施工などを行った。本研究は本掘削機構の性能確認や切羽の安定性、シールド機の姿勢制御などについて、土槽実験、実証施工のデータをもとに検討を行ったものである。

2. ボックスシールド

(1) 矩形断面掘削機構

トンネル軸に平行な軸をもつ通常の円形 cutter と比べて、トンネル軸に直交する方向に軸をもつ円筒状の cutter で掘削すれば、掘削断面が矩形となるのは明らかである。しかし cutter に駆動力を伝達する部分あるいは cutter 支持部の前面が掘削できないという欠点がある。

この問題を解決するため、エレクトロミルで使用されているドラム cutter とリング cutter を組合せた掘削機構を適用する事とした。その機構を図-1に示す。電動機により発生する駆動力を歯車の連結によって左右のドラム cutter に伝達する。それと同時にドラム cutter 回転軸よりさらに歯車を連結してリング cutter に駆動力を伝達する。リング cutter は駆動力伝達部の前面に配置されており、この機構の採用によってシールド

* 正会員 戸田建設(株) 土木技術開発室
(〒104 東京都中央区八丁堀 4-6-1)

** 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

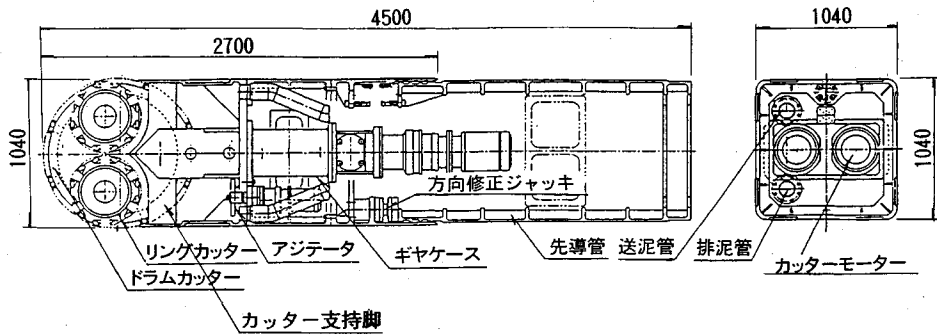


図-2 実験機組立図

全断面の掘削を可能とした。

(2) ボックスシールド機

ドラムカッターとリングカッターの組合せを1ユニット有する実験機の組立図を図-2に示す(泥水加圧式、推進タイプ)。

円形シールドとの相違点、開発課題を表-1に示す。多くの開発課題があるが、要約すると以下の通りである。

a) カッター

新しい掘削機構を用いるため当然ではあるが、カッターの形状は円形とは全く異なる。1枚の面板で切削する円形に比べ、ドラムカッターとリングカッターを組合せたユニットを複数個用いる形状となる。土砂の取り込み、切羽の安定など立証すべき項目を数多く持つ。

b) チャンバー

底面がフラットであり、土砂の滞留、堆積等不確定な要素を持っている。アジテーター他の泥水攪拌機構の検討が必要である。

c) エレクター

手掘りの矩形シールドと同等であるが、従来は特殊事例であり、セグメントとも併せあまり深く追求されていないように思われる。円形シールドと同程度の施工能率を確保するためには重要なポイントである。

d) その他の点

機構的に円形シールドと異なるわけではないが、ピッチング、ローリングに対する姿勢制御、カーブ施工のしやすさなど矩形独自の特性があり、その解明が必要であろう。

3. 土槽実験

前章で述べたように円形シールドとの相違点は多数あるが、未知の要素をもっとも多く持つと思われる掘削性能に焦点を絞り、大型土槽での性能確認を試みた。

(1) 実験概要

a) 実験内容

検討項目を表-2に示す。検討項目について簡単に説明すると次の通りである。

表-1 円形シールドとの相違点、開発課題

項目	円形シールド	ボックスシールド	開発課題	
カ	種類	トンネル軸に平行な面板	トンネル軸に垂直なドラムカッター	シールドへ初適用土砂の掘削性能、切羽の安定など確認する必要あり
	回転数	外周部の速度15~20m/minが経験的な値。外周と中央で切削速度が異なる。	全断面同一速度で切削できる	最高速度は未知、実験的に追求する必要あり
タ	回転方向	左または右ローリング防止の関連で随時切り換える	上または下(水平軸)ピッチング、土砂の取り込みと関連すると思われる	確認の要あり
	スリット	スリット開閉ジャッキを取り付ければ調整可土砂は切削後直ちにスリットから取り込まれるのが原則。	スリットなし土砂はマシン側とドラムカッターの間隙から取り込まれる。	土砂の移動、取り込みを確認する必要がある。玉石の処理に問題あり。
I	トルク	経験的に α 値で設定 $T = \alpha D^3$ T:トルク, D:カッター径 $\alpha: 0.9 \sim 1.5$ (泥水式~4t)	α 値では表現できない	独自の計算式を構築する必要あり
	チャンバー	円形であるため、排泥管を下部に設置すれば土砂の堆積は少ない	底面がフラットである	コーナー部の工夫と共に土砂堆積防止を図る必要あり
エ	エレクター	リングガーダー式 ¹⁾ 他多数の実績あり	手掘り式で数例の実施例	改良の余地あり
余	掘り装置	コピカッター、オーバークッター実績多数	実施例なし	新規考案の必要

表-2 土槽実験での実験項目

項目	種類
カッターの形状	ドラムタイプ、スポークタイプ
カッターの軸方向	水平軸、鉛直軸
カッター回転数	3, 5, 10 rpm (ドラムカッター)
カッター回転方向	上向き, 下向き (水平軸の場合)
推進速度	30~100 mm/min
対象土	砂質土, 粘性土

1) カッター形状

ビットで切削した土砂はカッター間あるいはカッターとシールド機鋼殻の間からチャンバーに入る。土砂の最長経路を考えれば、カッター半周分を移動する必要がある。切削すればスリットからチャンバーへ直ちに入るのが基本となっている円形シールドと大きく異なる点であり、写真-1に示す2種のカッターを準備した。単にドラムにビットを植えただけのドラムタイプとスポークに

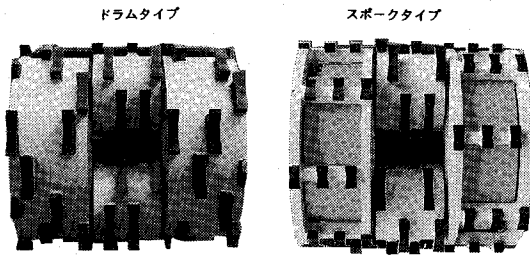


写真-1 カッターの形状

よる土砂の運搬作用を期待したスポークタイプとを比較する。

2) カッター軸方向

トンネル軸に対するカッター軸方向の選定が問題となる。水平方向、鉛直方向いずれも機械的には可能であるが、掘削土砂の運搬性や切羽の安定性が異なると考えられる。

3) カッター回転数

円形のように外周側と内周側で回転速度が異なる⁸⁾という問題がなく、切羽面を全て同じ速度で掘削できるという利点を持っている。回転速度に関しては円形シールドの場合に周速の考え方で経験的に設定されているのを参考に9~30 m/minの範囲で回転速度を変化させ、最適回転数を追求する。

4) カッター回転方向

土砂の運搬性にも関係するが、シールド機の姿勢にも影響すると考えられる。実施工においてはドラムカッターとリングカッターの組合せを偶数ユニット配置して互いに反力を打ち消す方向に回転させる事が可能であるが今回は1ユニットであるため、特性を追求する事に主眼を置く。

5) チャンバー

基礎実験であるため、極力単純な構造とし、土砂の堆積、付着などの状況を確認する。

6) 掘進速度

円形シールドとの掘進速度の比較を行う。

7) 姿勢制御

矩形シールド機特有のくせを見る事を主目的とし、ピッチング、ローリングに対する修正を試みる。

b) 実験機

写真-1に示すようにドラムカッターとリングカッターの組合せ1ユニットで実験機を構成している。土槽実験では掘削性能の確認に主眼を置いており、実験回数を数多く実施する必要があるため、□1040×1040 mmの小型泥水加圧式シールド機とし、覆工としてのボックスカルバートを元押しジャッキで推進するタイプとした。

概略仕様を表-3に示す。製作上の留意点は前項の各

表-3 シールド機の仕様

項目	仕様
外形寸法	□1040×1040mm
重量	9.8 t(先導管を含む)
機長	4500mm
カッター電動機	7.5kw-4P×2set
ドラムカッター/回転数	1287kgm/5.54rpm
リングカッター/回転数	644kgm/11.1rpm
アジテーター電動機	0.75kw-4P
アジテーター回転数	30rpm
カッター形状	F5M, スポーク2種
カッター軸方向	水平、鉛直2種変換可
ピッチャー材質	E-5(JIS規格)
ピッチ幅	50mm

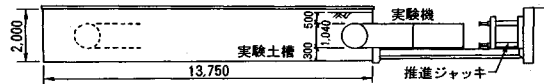


図-3 実験に用いた土槽の断面図

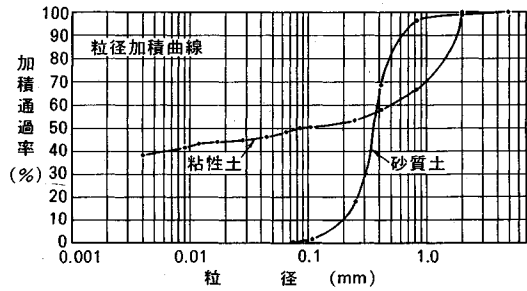


図-4 試料土の粒度分布

検討項目に対応し、以下に示す通りである。

①カッター駆動用電動機にインバーター制御を導入し、回転数を変換可能とした。またドラムカッター、リングカッター1対を1台の電動機で回転させ、左右(上下)のドラムカッターの回転数、回転方向を各々変えられる構造とした。

②従来の円形シールドとは異なる掘削機構であるため、必要トルクは未知であり、この実験機では機内に搭載できる最大のモーターを装備した。掘削断面積が等しいφ1.13 mの円形シールドに換算した場合α値が1.8に相当する。

③カッター軸方向を縦軸、横軸とした場合の確認を行うため、送排泥管、アジテーターを付け替え可能とした。

④チャンバー内はシンプルな構造とする事を前提としており、排泥管閉塞防止用のアジテーター1台のみを装備した。

⑤ピッチング、ヨーイング修正用に方向修正ジャッキを4本装備した。

c) 掘削対象土

図-3に実験土槽の断面図を示す。土槽はスラッシュタンクを改造して蓋付きとし、水圧をかけられる構造と

表-4 土槽実験一覧

		カッター形状	
		ドラムタイプ	スポークタイプ
カッター軸方向	砂質土	水圧 0.4kgf/cm ² 10ケース	水圧 0.4kgf/cm ² 8ケース
		水圧 0 kgf/cm ² 5ケース	
	粘性土	水圧 0.4kgf/cm ² 7ケース	水圧 0.4kgf/cm ² 14ケース
		水圧 0 kgf/cm ² 1ケース	(内4ケースは山砂)
土	水圧 0 kgf/cm ²	水圧 0 kgf/cm ² 3ケース	
	水圧 0.4kgf/cm ² 5ケース	水圧 0.4kgf/cm ² 2ケース	
	水圧 0 kgf/cm ² 10ケース	水圧 0 kgf/cm ² 5ケース	

*4ケース分データ欠損

した。この中に試料土を充填，転圧して飽和させた後，水圧をかけて実験を行った。水圧は0及び0.4 kg/cm²とした。

試料土は砂質土，粘性土の2種類である。砂質土は利根川産の川砂を主体とし，一部千葉産の山砂を使用した。粘性土はつくば実験ヤード近くで採取した凝灰質粘土を使用した。図-4に試料土の粒度分布を示す。

(2) 実験結果

実施した実験ケースの一覧を表-4に示す。

実験ケース（リング数）は総計113であり，最初の39ケースはシールド機の作動確認，設備，土槽のチェック，整備改良を行っている。カッター回転数は3，5，10 rpmであり，掘進速度は30 mm/minを標準とし，20～100 mm/minの範囲で変化させている。これらは各ケース毎にあるいは同一ケース内で段階的に変化させている。切羽泥水圧はシールド機天端部において土槽内水圧に等しい値を管理値とした。土被り50 cmのゆるい人工地盤であり，+αを加えると地盤を持ち上げてしまう事が予備実験で確認されたためである。

a) カッター形状，軸方向

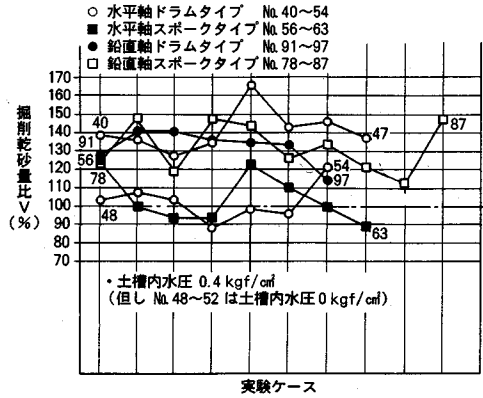
カッター形状，軸方向の特性を評価する指標として切羽崩壊の有無，余掘りの程度あるいは粘性土の付着を考える。切羽崩壊や余掘りを反映する量として掘削乾砂量⁹⁾を考える。

i) 砂質土地盤

砂質土において切羽崩壊，余掘りの程度が主たる問題になると考えられる。掘削乾砂量の測定値と設計値との比較を図-5に示す。ここで設計値は掘削断面積×掘進長×(1-間隙率)であり，掘削乾砂量が100%より多い事は必要以上に土砂を取り込んだ事すなわち余掘りを意味し，100%より少ない事は必要量の掘削を行わず，その分周囲の地山へ押し込みにより，所定の空間を形成したものと解釈される。図-5から次の①～④が言える。

① 水平軸ドラムタイプ

土槽内水圧0.4 kgf/cm² (No. 40～47) では地盤崩壊の連続であり，異常に大きい乾砂量を示している。しかし土槽内水圧を0 kgf/cm² (No. 48～54) とすると掘削乾砂量はほぼ管理範囲内に入る。ゆるい人工地盤であり，切羽水圧の脈動時に土槽内水圧に地盤が押されて崩壊し



$$V = V_{s1} / V_{s2}$$

測定乾砂量 $V_{s1} = \{ (\gamma_2 - 1) Q_2 - (\gamma_1 - 1) Q_1 \} / (G_s - 1)$
 設計乾砂量 $V_{s2} = (1 - n) A L$
 但し G_s : 土粒子の真比重 (t/m³), γ_2 : 排泥密度 (t/m³)
 γ_1 : 送泥密度 (t/m³), n : 地山の間隙率
 Q_2 : 排泥流量 (m³/min), Q_1 : 排泥流量 (m³/min)
 A : 掘削断面積 (m²), L : 掘削長 (m)

図-5 掘削乾砂量の変化

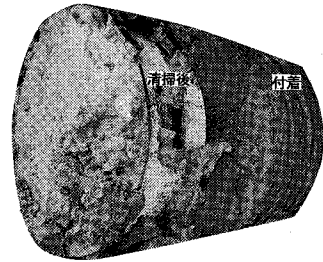


写真-2 粘性土の付着状況

たものと考えられる。

② 水平軸スポークタイプ

乾砂量が管理範囲内に入るケースが多く，安定した掘進状況を示した (No. 56～63)。

カッター形状の違いだけでこれほどの差異を示すのは，ドラムタイプではビットとカッターが共廻りするため，ビットの周囲に土砂が付着して掘削土砂の円滑な流動を妨げ，地山の受動崩壊が生じた後，切羽に流入したものと推測される。後に述べる粘性土ほどの付着はないが，ビット周囲に土砂が固結している現象は実験終了時に目視で確認されている。

③ 鉛直軸ドラムタイプ

掘進速度を種々変化させているが，前半に余掘り傾向である (No. 91～97)。

④ 鉛直軸スポークタイプ

ドラムタイプと同様に乾砂量が多く，余掘り傾向である。鉛直軸の場合，カッター上面の縁切りチップ（高さ5 mm）が地山を不安定とする傾向が目視で確認されており，これが1つの原因であろうと考えられる。実際の地盤においては縁切りチップに替わる摩擦抵減方法を工

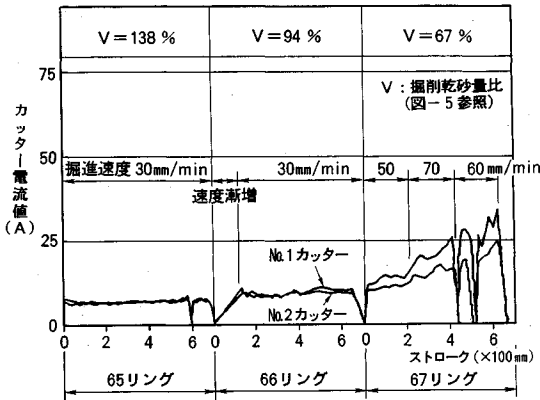


図-6 粘土地盤におけるカッター電流値の変化

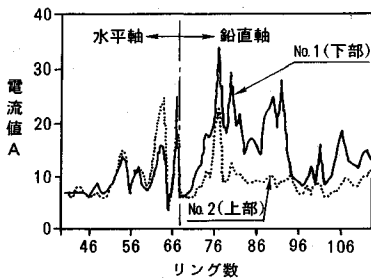


図-7 軸方向によるカッター電流値

夫する必要がある (No. 78~87).

ii) 粘性土地盤

粘性土地盤においてはカッターへの粘土の付着現象を主として検討した。ドラムタイプにおける付着状況を写真-2に示す。カッターとビットが共廻りするため付着が発生し易い機構であると言える。スポークタイプはギャケース表面をスポークが移動するため、付着は生じにくいと考えられたが、全ての場合に言える訳ではなく、掘進速度によっては付着が発生する事がわかった。図-6にスポークタイプにおけるカッター電流値の記録を示す。掘進速度 30 mm/min ではカッター電流値が低く安定した状況であるが、徐々に速度を上げた結果、50 mm/min から電流値の上昇が認められた。このときの掘削乾砂量は 67% であり、土砂の円滑な取り込みが困難となって電流値が上昇したものと考えられる。ドラムタイプに比べれば、付着は少ない結果となっているが、実施工においてはさらに工夫する必要があると言える。

iii) カッター負荷

またカッター軸方向については砂質土、粘性土を問わず、次の現象が見られた。図-7に予備実験ケースを除く全実験ケースでカッター電流のピーク値を示す。各リングで最大電流を記録したときの値である。水平軸の場合左右のカッター電流値はほぼ同等であるが、鉛直軸の場合、明らかに下部のカッター電流が大きい。これは上

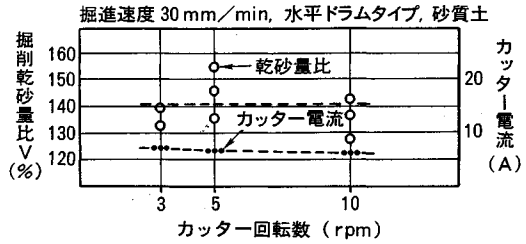


図-8 カッター回転数による変化

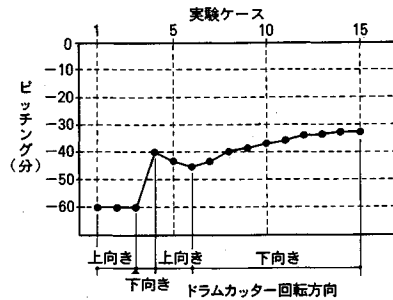


図-9 カッター回転方向によるピッチング変化の一例

部カッターで切削された土砂が落ち込み、下部カッターからチャンバーへ排出されるため、下部カッターの負荷が大きくなっている現象であると考えられる。カッターモーター選定上の留意点である。

b) カッター回転数

カッター回転数による土砂の取り込み性能や周速の考え方の妥当性を見るのが目的であった。ドラムカッターの回転数を 3, 5, 10 rpm の 3 段階に変え、掘削乾砂量やカッター負荷の測定を行った。他の因子を固定してカッター回転数だけを変えているケースは数少ないが、砂質土における水平ドラムタイプの掘削乾砂量と回転数の関係 (全 8 ケース) を図-8 に示す。3, 5, 10 rpm の回転数によって掘削乾砂量が問題にしなければならないほど大きくは変動傾向のない事が読み取れる。また同図中にカッター電流値もあわせて示すが、カッター回転数によらず、電流値は一定である。実験ケースが少ないため、結論を出すのは性急であるが、特に大きな取り込み性能への影響はないと考えられる。

c) カッター回転方向

砂質土においては乾砂量等、掘削土量を見る限り土砂の排出とは明確な関連はない。粘性土の場合は次項に示す鉛直軸の場合のスケッチから見て、土砂の流れが回転方向による事が明白である。

またシールド機の姿勢とも関係があり、上向き回転のときシールド機が下降傾向、下向き回転のときシールド機が上昇傾向を示している。一例を図-9 に示す。カッター回転方向によってピッチングが変化している事がわかる。ビットの地山へのくいこみが反力を生じてピッチ

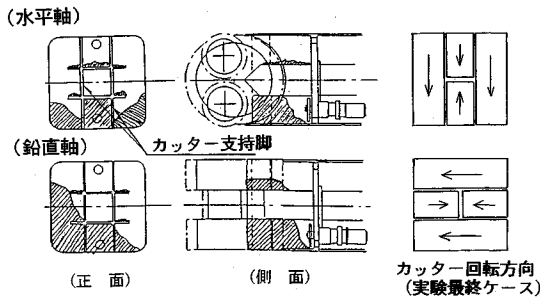


図-10 粘性土の堆積状況

ングに影響したものと考える。

d) チャンバー

チャンバー内閉塞という事態には至らなかったが、粘性土において堆積が見られた。この状況は砂質土においてもコーナー部で生じている。粘性土のマシン引き上げ後のスケッチを図-10に示す。カッター軸方向によって土砂の堆積状況が異なるのが先ず認められる。隅角部の堆積は構造上やむを得ないものであり、洗浄管等の対策を取る必要があると示唆される。排泥管前方の堆積は予測していないものであった、ギヤケース支持脚の存在が泥水の円滑な流れを妨げたものと推測できる。実際においてはバルクヘッドを強化し、チャンパー内には支持脚を設けない構造とすべきであると考えられる。

e) 掘進速度

砂質土では80 mm/minまで実施したが、カッター形状他の因子を選定すれば、掘削上何ら問題はない。粘性土においてはカッターへの付着もあり、図-6に示したように50 mm/min程度までが安全な範囲と考えられる。実施工においてカッター洗浄等の工夫を施せば、さらに高速も可能であると考えられる。

f) 姿勢制御

土槽の関係上、10 m程度の推進長であり、断定的なことは言い難いが、ローリング、ヨーイングはほとんど生じていない。ピッチングは全般に下がり傾向であったが、これは地山が軟弱な人工土であり、ジャッキによる修正に十分な反力が取れなかった事による。この点については自然地山を掘削する実証施工の章で再度述べる。

(3) 考察

以上の結果をまとめると次の通りである。

a) カッター形状、軸方向

カッター形状はドラムタイプに比べてスポークタイプの方が粘性土の付着防止でやや有利な点、砂質土において切羽がより安定する点から見て適当であると言える。軸方向はこの実験結果だけで結論を出すのは性急であるが、鉛直軸は縁切りチップによって上部地山を乱すという点があり、水平がやや有利と考えられる。

b) カッター回転数

砂質土、水平軸の場合土砂の取り込みがカッター回転数に依存する事は大きくないという結果が得られている。粘性土の場合は同種の実験を行っていないが、推進速度に対する電流値の結果を見ると、土砂の取り込みに対して回転数を調整するというよりも、付着防止を狙ってビットのくいこみ量を小さくするために回転数をあげるといった使い方が必要になると推測できる。

今回の実験は崩壊しやすい人工地盤であるため、周速の考え方にまで踏み込む事ができなかった。今後の課題である。

c) カッター回転方向

カッター回転方向による土砂の取り込み性能に差はなく、むしろカッター回転方向によって生じる反力のためシールド機の方向が影響を受ける。水平軸の場合、上向き回転ではマシンが下降する傾向を示しており、ジャッキ修正だけでなく、回転方向によっても姿勢制御ができる可能性がある。今後追求していくべき課題であると考える。

d) チャンパー

ボックスシールドの1つの問題となる事項である。1 mという小径においては、掘削可能ではあったが、粘性土の堆積が発生した。スケールアップしたときには砂質土の堆積も発生する可能性があると考えられ、チャンパーの形状も含め、アジテーター、洗浄管等の堆積防止策を講ずる必要がある。

e) 推進速度

円形シールドでは、経験上30~40 mm/minが通常の推進速度である。今回の実験では種々の速度で掘進したが砂質土、粘性土を問わず50 mm/min程度までは問題なく掘進できる事がわかった。

f) 姿勢制御

地山に十分な反力がとれない人工地盤であったため姿勢制御に関するデータがほとんど得られなかった。ジャッキによる修正ならびにカッター回転方向によるピッチング修正を実証実験で確認する。

4. 実証実験

(1) 実験概要

a) 目的

土槽実験の結果から、① ドラムカッターとリングカッターの組合せでも土砂の切削、取り込みは可能である、② 軸方向、カッター形状については当面水平軸スポークタイプが良い、③ 回転数は周速16 m/minに相当する5 rpmを標準として3~10 rpmとする、④ 回転方向はピッチングと関係し、姿勢制御の観点から選定すべきである。等の諸点が判明あるいは適当であると考えられた。

しかし、あくまでこれらは人工地盤における結果であ

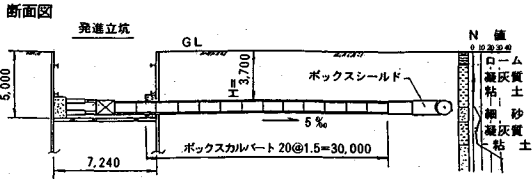


図-11 実証実験の概要

表-5 実証実験での検討項目

項目	種類
切羽の安定	地盤変状、掘削乾砂量、切羽土圧
姿勢制御	修正ジャッキ、カッター回転方向
掘進速度	30~50mm/min

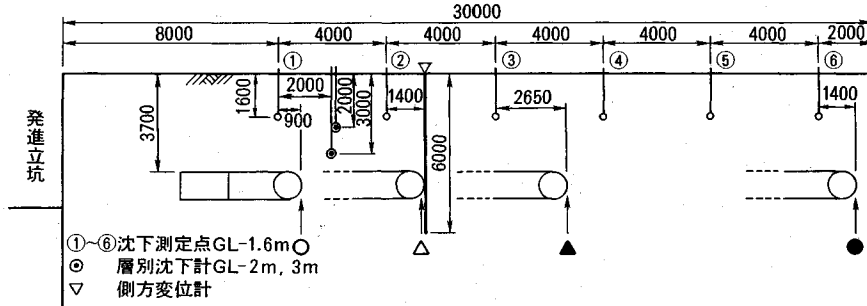


図-12 地盤変状測定ポイントとシールド機的位置

り、自然の地山において掘削乾砂量や周辺地盤へ与える影響、姿勢制御などを立証する必要がある、実証実験を行った。図-11に施工断面図を示す。延長30mという短い距離ではあるが、種々のセンサーを配置し、計測施工を実施した。検討項目を表-5に示す。計測項目は土槽実験に加えて層別沈下、地表面沈下、側方変位、ドラムカッター前面土圧、リングカッター前面土圧を計測した。

土被りは平均3.7m、地下水位はGL-1mであり、掘進土質は上部1/3が凝灰質粘土、下部2/3が細砂層の互層であり、土槽実験にほぼ相当する地山である。ピッチング修正を確認するため、上り5%の勾配を設定した。

b) 方法

土槽実験時と同じマシンを使用し、泥水加圧式推進工法で施工した。カッターは水平軸スポークタイプ、回転数は3~10rpm、回転方向は下向き、掘進速度30mm/minを標準としている。発進立坑は既設の立坑を利用したため、スペースの関係上斜め発進となっている。

覆工体であるボックスカルバートの長さが1.5mであるため、半分の0.75mを1リングとして計40リングの掘進を行った。

(2) 実験結果

a) 切羽の安定

① 地盤変状測定結果

図-12に計測器、沈下測量ポイントの配置ならびにシールド位置を示す。図中に示すシールド機的位置○、△、▲、●が後の図-13、14に対応している。

沈下測量の測定結果を図-13に示す。シールド掘進に伴う地盤の隆起、沈下を計測したものである。測定値に若干の変動はあるものの、シールド機の進行に対応し

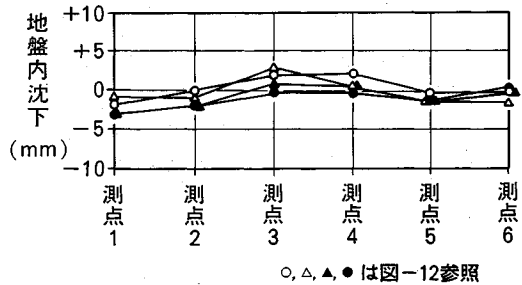


図-13 地表面沈下

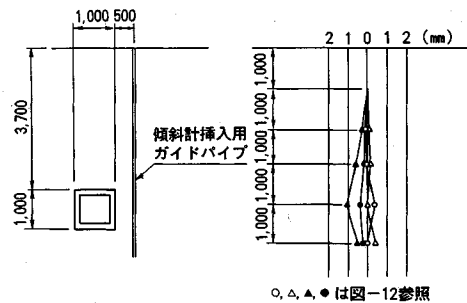
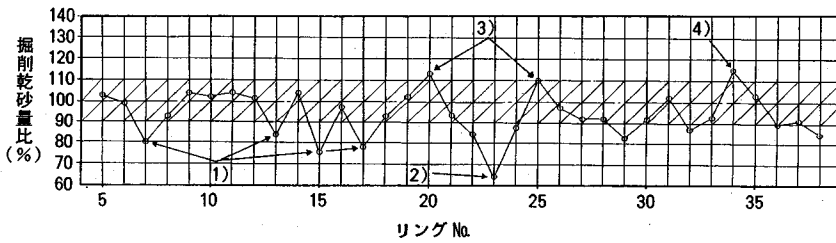


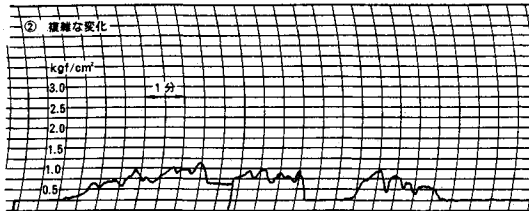
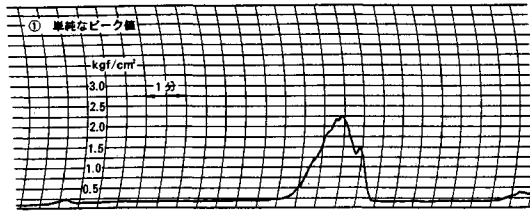
図-14 側方変位測定結果

た変動は特に見られず、レベルの測定誤差を考えると明確な傾向はない。また層別沈下計に全く変化がなかった事を併せ考えると、地盤の大きな鉛直方向の変位はないものと推測できる。

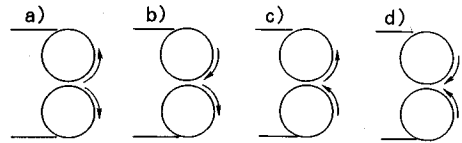
挿入式傾斜計による側方変位の測定結果を図-14に示す。シールド機テールの通過時(▲印)に最大変位を示しており、変位状況を傾向として捉えてはいるが、絶対量が最大1mmであり、裏込が推進完了後になる工法である事を考えれば、問題となる大きさではない。



図—15 掘削乾砂量の変化



図—16 リングカッター前面の土圧



図—17 リングカッター回転方向

リングカッター前のギヤケースに取り付けた土圧計の記録を図—16に示す。リングカッターで切削する土砂の動きを見るために設置したものである。土圧が複雑な変化を示すパターンはリングカッター回転方向によらず、切羽水圧や送排泥流量が逸水、閉塞等により不安定な状況になったときに生じている。この土圧計が切羽の動きと密接に関連することを示している。

リングカッター背面には駆動部のギヤケースがあり、カッターの回転方向によって土砂の動きが変わると予想した。リングカッター回転方向は図—17に示すように4通りある。図—16の単純なピーク値の頻度は1リング中で1~2回であるが、a)においてはピーク値が0.5~0.75 kg/cm²、d)は1.5~2.25 kg/cm²とその圧力にかなりの差が見られる。リングカッターの回転方向から見てギヤケース側に土砂を排出するd)では土砂が多く滞留し、高い圧力で抜けるといった現象であると考えられる。実機におけるリングカッター回転方向は背面にギヤケースが存在しない位置に向けて、すなわちa)のパターンで設定するのがより良いと言える。

以上に述べた地盤変状測定結果、掘削乾砂量、切羽土圧の3点より、本実証実験においては切羽の安定を確保しながら掘進できたものと判断できる。

b) 姿勢制御

① ピッチング

土槽実験においては人工地盤であったため、地山の強度が不足して修正ジャッキの作動でマシン全体が前方に動くという場合もあり、確実に修正可能とは言い切れなかった。実証実験における出来型勾配を図—18に示すが修正ジャッキの作動によって頭下りの傾向を修正でき、計画勾配通りに施工できたことが確認できる。

② ローリング

図—19に測定結果を示す。マシンをセットするときの元押しジャッキや架台等の癖により、10°程度のロー

② 掘削乾砂量

リング毎の掘削乾砂量の変化を図—15に示す。管理限界を通常設定される±10% (図中斜線部) とすると若干の凹凸はあるものの、ほぼ管理範囲内にあるというて良い。図中に1), 2), 3), 4)で示した諸点の突出している原因については次の通りである。

1) 小口径であるため、切羽水圧保持装置¹⁰⁾を取付けていない。エントランスパッキンに不良箇所があり、休日の間に逸水してチャンバー内の泥水が清水に置き換わっているため、乾砂量が少なくなっている。

2) バイパス運転が不十分であり、掘進終了時の泥水内に土砂が過大に含まれている。

3) 転石の発生によって排泥管が閉塞気味となり、泥水逆送等を行ったので乾砂量が見かけ上、大きくなっている。

4) カッター回転方向を左右逆にする操作をおこなっているため、チャンバー内で攪拌作用が生じて余分な土砂が排出された。

③ 切羽土圧

ドラムカッター前面のギヤケースに取り付けた土圧計は施工期間を通じてほぼ切羽水圧0.25 kg/cm²に等しく、切羽崩壊などの異常現象は生じていないと推測できる。

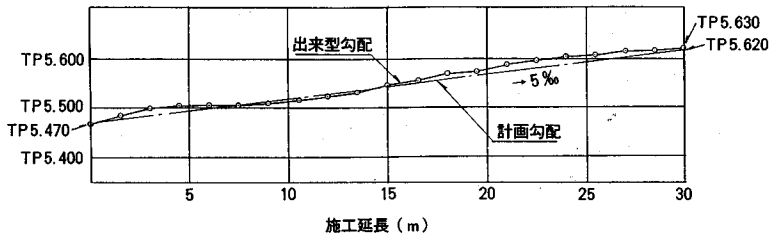


図-18 出来型勾配

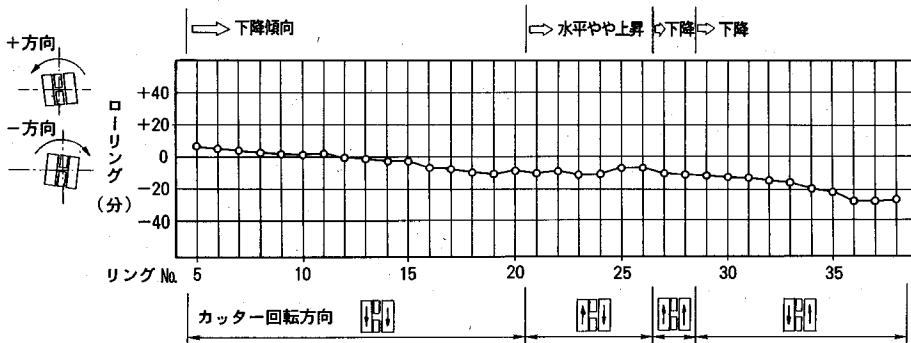


図-19 ローリングの変化

リングが生じた。その後やや増加の傾向が見られるが、これは送排泥管を機内左側に配置せざるを得なかった事による重心のズレが原因と考えられる。特別の修正装置をつけていなかったため、左右のカッター回転方向を逆にして反力による修正を試みたところ、進行を抑える効果が現れた(21~26リング)。カッター回転方向がマシンの姿勢と関係することは明らかであり、今後も追求すべきところである。

c) 掘進速度他

掘進速度は30 mm/minを標準として一部40~50 mm/minも試みたが、何ら支障は無く、円形シールドと同等の性能を持っていると判断できる。カッター回転数は5 rpmを標準として掘進した。周速の考え方を議論するにはデータ不足であるが、切羽の安定上問題はなかった。

掘削土質は上部1/3が粘性土、下部2/3が砂の予定であったが、結果的に全断面砂層の掘進となった。チャンパー内の堆積については土槽実験と同様にコーナー部の堆積が確認された。

5. まとめ

土槽実験、実証実験により、本研究で示した掘削機構が矩形断面のシールド掘削機構として有効であることを確認した。要点をまとめると次の通りである。

① シールド機

密閉式で未掘削部を残さず、矩形断面を掘削する実験を繰り返して行ったが、根本的な問題はないと考えられ

る。カッター支持脚や泥水攪拌機構などの細部を工夫すれば、長距離掘進においても土砂の堆積は防止できると考えられる。粘性土の付着という問題に対してもスポークタイプのカッターを考案し、ほぼ解決できた。

カッター軸方向については結論を出すのはまだ早いですが、現状で選択するなら水平軸となる。

カッター回転方向については、土圧計の測定結果より土砂の流れを妨げない、回転反力によるピッチングへの影響を考慮する、の2点に留意して定めるべきであることがわかった。

カッター回転数は経験的に言われる周速の考え方で実験上問題はなかったが、より多くの土質条件で結論を出すべきである。回転数を固定して考える必要はなく、土質に応じて自在性を持たせて良いという事が言えよう。

掘進速度については円形シールドと全く同等である。

② 切羽の安定

切羽上部の形状が円弧状となるのが1つの問題である。軟弱な地盤においてはシールド機鋼殻を突き出し、カッターを鋼殻内に納める対策が可能であるが、推力の増大が予想される固い粘性土や砂質土においては現在の形とせざるを得ない。円形シールドにおけるドームカッター形状や本実験結果を参考としてカッター径をφ1~1.5 mとするのが妥当であるが、今後も地山の土質定数とカッター径の関係を追求していく必要がある。

③ 姿勢制御

円形シールドに比べカッター部が重いという特徴を持っているが、ピッチングの修正は十分可能である。ロー

リングについてはもともと生じにくい形状ではあるが、一旦発生するとセグメント組立に支障をきたすという欠点もあり、実機においては偏心ジャッキ、伸縮式スタビライザー等の対策を施すべきである。

以上の通り、ボックスシールド工法の開発において、掘削に主眼を置いた基本的な性能を確認した。

6. あとがき

工法開発の目的はコストダウン、工程短縮あるいは安全性の増大のいずれかにあると言われる。ボックスシールド工法の利点がどこにあるかを見定めるには未だ少しの時間を必要とするが、既設構造物の近傍通過等、矩形でなければ施工できないという事例もぼつぼつ発生しており、工法完成が急がれるところである。

なお、本工法の開発は大成建設(株)、(株)利根、三井造船(株)との共同開発であり、ご協力頂いた皆様に文末を借りて謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 自由断面シールド工法パンフレット, 東京都下水道局, 自由断面シールド工法研究会, 1991.
- 2) 坪井広美・宇津木薫: 矩形断面シールド工法の開発(その1), 西松建設技報第15号, pp.7~12, 1992.
- 3) DPLEX シールド工法公開実験資料, 大豊建設, 1991.7.
- 4) 矩形シールド公開実験概要, 五洋建設, イセキ開発工機, 1991.10.
- 5) EMS シリーズ・エレクトロミルパンフレット, 利根, 1990.10.
- 6) 土木学会編: トンネル標準示方書(シールド編)・同解説, pp.103~105, 1986.
- 7) 土木学会編: トンネル標準示方書(シールド編)・同解説, pp.94~95, 1986.
- 8) 例えば, 波多腰明: 超大断面トンネル施工用シールドの設計における考え方, 第27回シールド講習会テキスト, pp.106, 日本プロジェクトリサーチ社, 1987.3.
- 9) 例えば, 塚田章他: シールド工法の実際, pp.80~84, 鹿島出版会, 1983.
- 10) 例えば, 栗原和夫: 泥水加圧式シールド工法, pp.46~48, 鹿島出版会, 1987.

(1993.3.11 受付)

EXPERIMENTAL OPERATION OF BOX SHIELD TUNNELING MACHINE

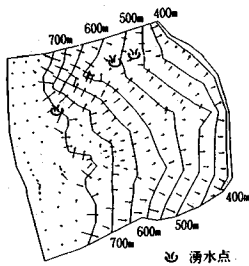
Koji TADA, Toru TANIGUCHI, Kohei FURUKAWA and Koji NAKAGAWA

One of the recent trends in the area of research on methods of tunneling in urban environments is the use of shields with irregularly shaped cross sections. A series of boring performance tests and tunneling efficiency tests were conducted to verify the effectiveness of a pressurized slurry box shield tunneling machine with a rectangular cross section. The tests confirmed that the box shield tunneling method using the machine is viable. This paper reports on the tests and the evaluation of the test results, as well as the differences between the rectangular shield machine and the conventional circular shield machine.

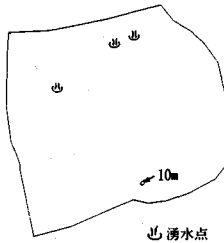
あの地下水解析ソフトがさらに機能充実!

UNISSF_{ユニセフ(V-2)}

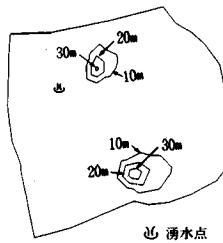
スピーディな同定・安価な解析



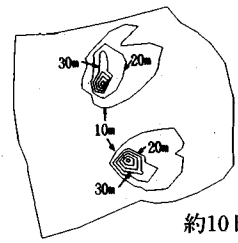
初期状態の地下水流



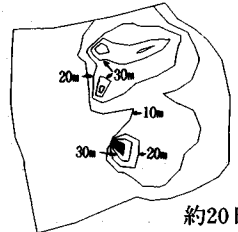
トンネル掘削開始直後



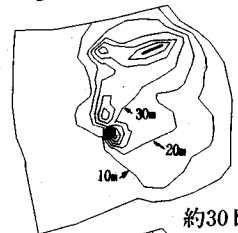
約4日後



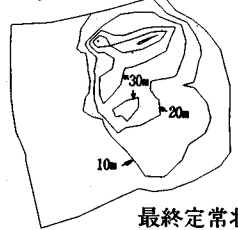
約10日後



約20日後



約30日後



最終定常状態

特長 ○有限要素法による準3次元解析を中心とした地下水の流れのトータルシステムです。

○観測水位と計算水位より、非線形最小二乗法を用いて帯水層定数の同定が可能です。(逆解析手法)

○建設・土木工事(掘削・ディープウェルその他)の解析に対応する多くの機能を備えています。

○メッシュ・ジュネレータにより、モデル(要素分割)作成の手間を軽減できます。

○図化処理プログラムにより、結果の確認が容易に行えます。

適応機種: SUN, NEWS, HP,
IBM 30XX, FACOM-Mシリーズ 他

この製品は、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発したものです。
通商産業省 特別認可法人

IPA 情報処理振興事業協会
株式会社CRC総合研究所 西日本支社

〒105 東京都港区芝公園三丁目1番38号
TEL. (03) 3437-2301

問合せ先

〒541 大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06) 241-4121 営業担当: 岩崎
(03) 3665-9741 本社窓口: 菅原

地球を切る! 視る! 創る!

未来設計企業
CRC

3次元地質解析システム

GEORAMA

ジオラマ

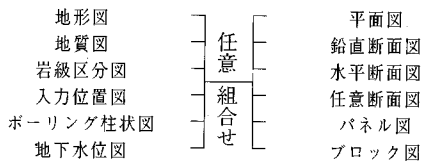
概要

地質調査で得られたデータを基に、利用者の判断を加味して3次元地質モデルを作成します。この3次元モデルより地質・岩級区分・地下水位等をグラフィック表示並びに作画します。今後この3次元モデルを利用して解析用メッシュ作成等への応用が考えられます。

特徴

- ・走向・傾斜データも考慮できる高度な推定法
- ・複雑な地質体モデルの表現が可能
- ・ビジュアルで豊富な出力機能
- ・図面間での整合性がとれる
- ・操作性の高いシステム

出力図面



ユーザーインターフェースにより、拡がる適用分野

- データベース 土量計算 構造物マッピング
- メッシュジェネレータ プレゼンテーション資料 その他

標準適応機種(EWS)

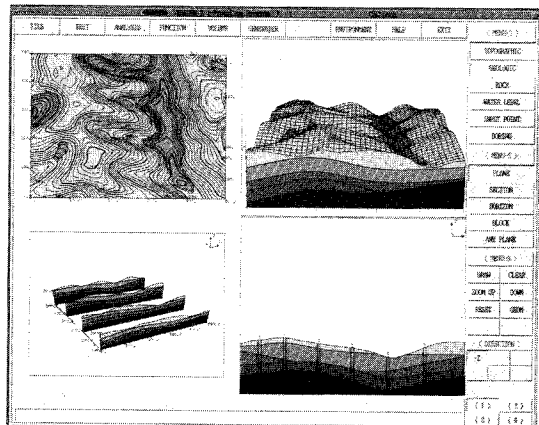
- ・SONY-NEWSシリーズ*
 - ・Sun-3, Sun4, Sun-SPARCシリーズ*
 - ・HP9000/300, HP9000/800シリーズ*
- *ウィンドウシステムとしてX-Window System, Version 11 (X11)が必要です。
(標準以外のものにつきましても御相談に応じます)

(株)アイ・エヌ・エー
アイサワ工業(株)
アイドールエンジニアリング(株)
アサヒ地水探査(株)
(株)エイトコンサルタント
応用地質(株)
大阪ガス(株)
大手開発(株)
(株)大林組
(株)奥村組
川崎地質(株)
基礎地盤コンサルタント(株)
(株)熊谷組
(株)建設技術研究所
(株)建設省 土木研究所
五洋建設(株)
佐藤工業(株)
サンコーコンサルタント(株)
(株)四国総合研究所
(株)四電技術コンサルタント
清水建設(株)

(株)情報数理研究所
(株)新日本技術コンサルタント
住友建設(株)
住友建設(株)
石油資源開発(株)
全日本コンサルタント(株)
大成建設(株)
大豊建設(株)
(株)ダイソク
(株)ダイヤコンサルタント
(株)竹中工務店
中央開発(株)
(株)地球科学総合研究所
(株)中電技術コンサルタント(株)
通産省 地質調査所
電源開発(株)
(株)電力中央研究所
東急建設(株)
東建地質調査(株)
東京電力(株)

東電設計(株)
東電ソフトウェア(株)
東洋地質調査(株)
動力炉・核燃料開発事業団
(株)中堀ソイルコーナ
西松建設(株)
日本工営(株)
日本国土開発(株)
(株)日本パブリック
エンジニアリング
(株)間組
(株)阪神コンサルタント
ヒロセ(株)
フジタ工業(株)
(株)富士和ボーリング
北光ジオリサーチ(株)
北海道開発コンサルタント(株)
三井建設(株)
三菱金属(株)
村本建設(株)
明治コンサルタント(株)

3次元地質解析システム研究会 参加メンバー



株式会社 **CRC総合研究所** 西日本支社

〒541 大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06) 241-4121 営業担当: 岩崎
(03) 3665-9741 本社窓口: 菅原

移流拡散解析プログラム

未来設計企業

CRC

MATRAN EX

地下水汚染
の解析に!

塩水くさび
農薬汚染
廃棄物処理
その他

飽和・不飽和浸透解析に、移流分散・拡散を考慮。
EXtensiveな問題に適用可能なEXcellentなプログラム。

プログラムの特長

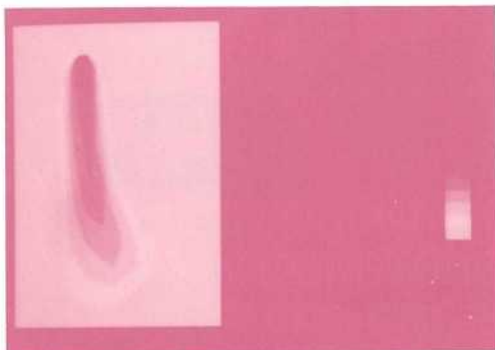
■断面(EXV)および平面(EXH)の解析が可能

■充実した解析機能

- 定常・非定常解析 (断面、平面)
- 軸対称解析 (断面)
- 降雨 (断面、平面)
- 揚水・注水 (断面、平面)

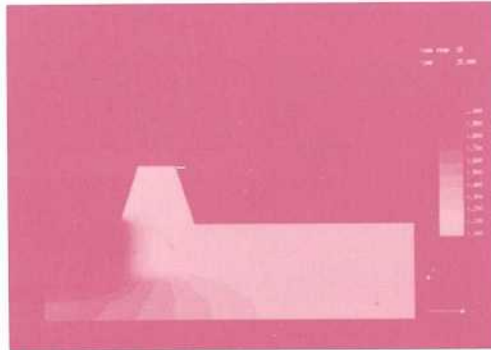
- 浸出面 (断面)
- 材質変更 (断面、平面)
- 境界条件の変更 (断面、平面)
- 水位・濃度の経時変化 (断面、平面)

■豊富なグラフィック出力 (濃度コンター図、流速ベクトル図、濃度の時間推移グラフ 他)



濃度コンター図(平面解析例)

画面出力図



濃度コンター図(断面解析例)

画面出力図

株式会社 **CRC総合研究所** 西日本支社

〒541 大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06) 241-4121 営業担当:岩崎
(03) 3665-9741 本社窓口:菅原