

シールド機地中接合のための高精度相対位置検知システムの開発

宮本幸始*・白井伸一**・吉村宗男***・佐々木幸信****

地上からのチェックボーリングを行わずに、2台のシールド機を高精度で直接地中接合できるように、新型の水平ボーリングマシンと磁気・RIの2種類のセンサを組合せて、シールド機の相対位置を非破壊かつ高精度で確認できるシステムを開発した。

本報告では、開発の必要性と開発目標の設定、及び開発システムの内容と特性、そして実工事に適用した結果について述べる。

Keywords : shield tunnel, position detecting system, tunnel docking

1. はじめに

近年、シールドトンネル工事における立坑構築は、用地取得が困難となり既設構造物を避ける大深度化のため、工費や工期が増大する傾向にある。また、海底トンネルなど途中で立坑を構築することができないケースも増えている。こうした状況のなかで中間立坑を省略できる地中接合法が経済性と工期短縮の観点からも注目されており、さらに大規模な地盤改良をせずに宇宙船ドッキングのようにシールド機を直接接合するメカニカルドッキング工法も実用化されつつある。

しかし、このような地中接合法では接合時に相互のシールド機の中心線を一致させる必要があり、線形が複雑であったり長距離であるなどトンネル測量では十分な精度が確保できない場合には別途方法による相対位置の検知が必要となる。

そこで、著者らはメカニカルドッキング工法を考慮に入れたシールド機相対位置検知システムを考案・開発した。以下、システム開発の内容と海底シールドトンネル工事に実適用した成果について報告する。

2. 従来の方法と開発したシステム

今まで行われてきている接合前の位置検知の方法としては、図-1に示すように2ヶ所のチェックボーリングを地上からセグメントを貫通して行い、このボーリング孔を使ってシールド機相互間の位置を測量している。

しかし、チェックボーリングは周囲の条件から制約を受ける場合がある。例えば、海域部の場合では、漁業権・航路の安全確保・作業足場の確保で問題があり、また、

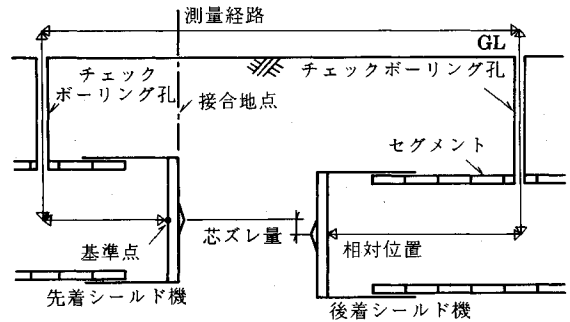


図-1 地上からのチェックボーリングによるシールド機位置測量

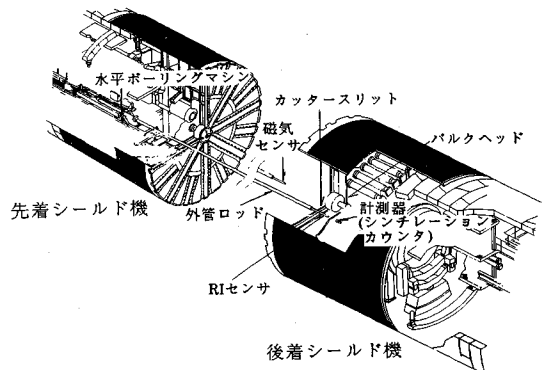


図-2 水平ボーリングによるシールド機の位置検知システム

大深度の場合では、地下水圧が大きく、覆工体であるセグメントに孔をあけることは、安全上で問題となる。

チェックボーリングを必要としない、位置検知方法としては、水平ボーリングと磁気センサを組合せて、計測する方法もあるが¹⁾、その実績は少なく、一般化されるには至っていない。開発したシステムは、図-2に示すようにトンネル内の作業のみで、水平ボーリングマシンと2種類のセンサを用いて相手側のシールド機に孔をあ

* 正会員 工修 東京電力(株) 富津ガス導管建設所次長 (〒299-112 千葉県富津市新富 25)
 ** 正会員 工修 東京電力(株) 建設部土木調査課副長
 *** 正会員 鹿島建設(株) 土木技術本部 課長
 **** 鹿島建設(株) 土木技術本部 課長代理

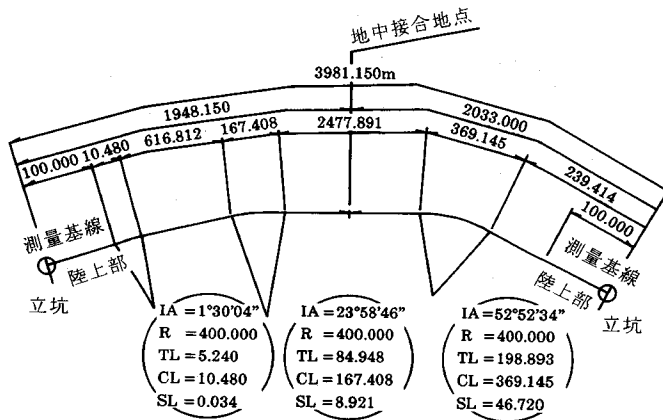


図-3 適用工事のルート線形

表-1 シールド機位置測量の誤差 (3σ値)

		(mm)	
		NO.1 立坑側	NO.2 立坑側
水平 方向	坑外測量	2.4	2.4
	坑内導入測量	60	60
	坑内測量	114	156
	測距	17.1	26.4
	合計	$\sqrt{2.4^2+60^2+114^2+17.1^2}=130$	$\sqrt{2.4^2+60^2+156^2+26.4^2}=169$
		$\sqrt{130^2+169^2}=213$	
鉛直 方向	坑外測量	2.1	1.8
	坑内導入測量	1.5	1.5
	坑内測量	10.8	10.8
	測距	10.8	10.8
	合計	$\sqrt{2.1^2+1.5^2+10.8^2}=11$	$\sqrt{1.8^2+1.5^2+10.8^2}=11$
		$\sqrt{11^2+11^2}=16$	
合成	測量誤差	$\sqrt{213^2+16^2}=214$	

けない非破壊方式で安全に検知できるものである。

3. シールド機の計画線からのズレ量とその修正

システム開発の前提として、想定するシールド機の計画線からのズレ量と許容接合誤差及び修正掘進距離を次のように定めた。

位置検知時の2台のシールド機の計画線からのズレ量は、トンネル測量の誤差にシールド機の制御誤差が加わったものとなる。測量誤差については、今回、本システムを適用した現場のルート線形(図-3)のもとで推算し、制御誤差については、著者らが過去に施工した実績から求めた。許容接合誤差は、最も条件の厳しくなるメカニカルドッキングの場合を想定して設定した。

また、修正掘進距離については、今回システムを適用したトンネルの条件より求めた。

(1) シールド機位置測量の誤差

施工中のシールド機の位置測量誤差には、坑外測量、坑内導入測量及び坑内測量の各誤差が含まれる。各誤差を総合して接合地点での測量誤差を推算すると、表-1

表-2 施工条件

NO	内容	条件
1	シールド機外径	4,000mm, 機長6m
2	シールド機形式	泥水加圧式
3	施工可能最小曲率	130mR
4	通過土層	沖積層 水圧 3kgf/cm ² 洪積層
5	許容	芯ズレ ±30mm (想定)
	接合精度	角度誤差 1° (想定)
6	計測精度	±10mm
7	計測距離	30m

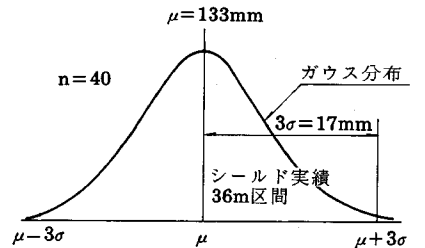


図-4 シールド機の制御誤差 (出来型のばらつき)

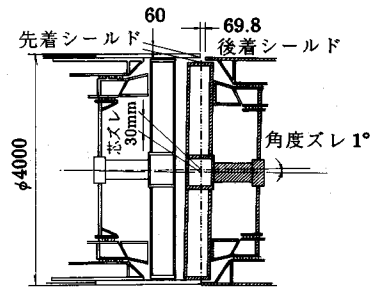


図-5 カッターディスク貫入方式の接合状態 (許容芯ズレ 30 mm, 許容角度ズレ 1°)

に示すように、3σ値(測量結果が99.7%の確率ではいる範囲)で214mmとなる。

(2) シールド機の制御誤差

ある区間でセグメント1リング毎に出来型(トンネル中心位置)のパラツキを統計処理して、平均が出来型線形を、偏差がシールド機の制御誤差を表す、と考えることとした。この考え方に基づいて、過去の施工実績(後述の修正距離としてやや余裕を持った値の36m、40リング分)について整理すると、制御誤差は3σ値で17mmとなっている(図-4参照)。

(3) 許容接合誤差

メカニカルドッキングの方式には、接合リング方式、フード押し出し方式、カッターディスク貫入方式など数種類の方式が提案²⁾されているが、今回は筆者らがφ4m程度のシールド機のメカニカルドッキングを目標に開発したカッターディスク貫入方式(図-5参照)の場

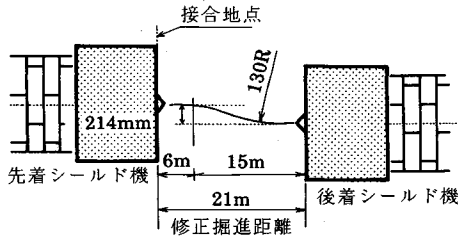


図-6 接合時の修正掘進

表-3 センサー一覧表

センサ	測定対象(用途)	測定範囲	測定精度
弾性波	地質・層境界判別、地中障害物	9m	±10%
超音波	泥水中の孔壁測定(場所打坑)	2m	±2cm
レーザ波	地質・層境界判別、地中障害物	7m	5~10%
磁気	シールド位置検知(ボーリング併用)	-	不明
磁界	機構管位置検知	3~5m	±10cm
	金属管検知器	2m以上	±10%
電磁波	無人走行台車誘導(誘導線地中埋設)	-	-
	土質・層境界・泥水浸透領域判別	0.24m	5cm
	地中障害物	2~3m	不明
	空洞検知	2m	10cm
	切羽崩壊探査	不明	不明

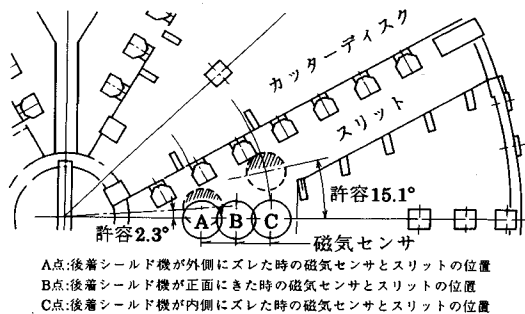


図-7 磁気センサのスリット判別精度

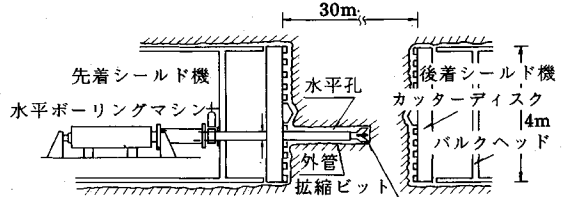
合について、許容接合誤差を設定した。

この方式は、先着シールド機の中に後着シールド機のカッターディスクを貫入させ、カッターディスクとスキンプレートとの間に固化材を充填して地山との止水を行い接合するものである。著者らは別途物性実験やφ1mのドラム実験³⁾を行い、芯ずれ30mm、角度ずれ1°までは充分な接合性能(止水6kgf/cm²)が得られることを確認している。このことから、許容接合誤差を芯ズレ30mm、角度ズレ1°以内と設定した。

(4) 修正掘進距離の設定

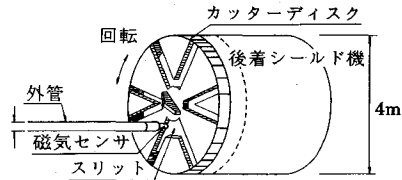
修正掘進距離は、計画線からのズレ量と修正曲率との関係で決まるものであるが、ここでは表-2に示す条件のもとに、130mRの曲率で修正掘進を行うものとした。この場合、214mmのズレ量を修正するには、15mの修正掘進距離が必要となる。さらに、接合時のシールド機の角度ズレを少なくするため、直線掘進で接合を行うと

1. 水平ボーリング(センサ設置用外管挿入)



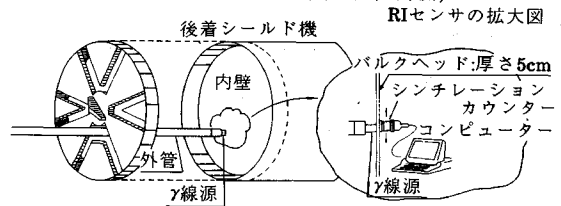
説明：先着シールド機から後着シールド機まで、水平ボーリングにより水平孔を開ける。先端の拡縮ビットの向きを変えることができ、水平孔をまっすぐ正確に掘ることができる。

2. 磁気センサ(スリット中央位置判別)



説明：外管をカッターディスクに接近させ、磁気センサを外管の先端に出す。カッターディスクを回転させながら磁気センサを用いてスリット中央位置を判別し、センサ正面にスリット中央が来たところでカッターディスクを停止する。

3. RIセンサ(2台のシールド機の位置計測)



説明：磁気センサを抜いて、次にγ線源を外管に挿入する。さらに発信装置を(スリットを通過させて)バルクヘッドに押し付ける。後着シールド機内側からシンチレーションカウンターを用いてγ線源の位置を確認して、2台のシールド機の位置を計測する。

図-8 位置検知システム概要

すれば、その距離が機長分約6m必要で、合計すると修正掘進距離は21m(15m+6m)以上となる(図-6参照)。

4. 位置検知システムの開発目標

(1) 目標検知精度

前述のように、メカニカルドッキングを行うためには、シールド機相互の距離が21m以上離れている時に、接合のための特別な測量を行い、そのデータを基に修正掘進し、誤差±30mm以内で接合を行う必要がある。

この条件での許容検知誤差は以下に示す通り13mmと見積ることができる。

$$\text{許容検知誤差} \leq \text{許容接合誤差} - \text{シールド機の制御誤差} \leq 30\text{mm} - 17\text{mm} = 13\text{mm}$$

このことから、相対位置検知精度の開発目標値は、余裕を見て接合前30mの距離で、±10mm以下とした。

(2) 検知方法

泥土中で位置検知が可能なセンサ類は現状では表-3

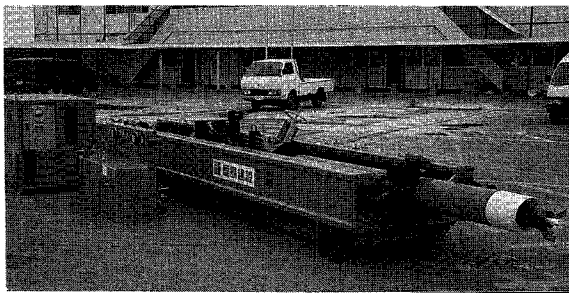


写真-1 水平ボーリングマシン

表-4 水平ボーリングマシン仕様

駆動方式及び 推力、トルク	スイベルヘッド (油圧モーター駆動)		トルク	回転数
			0~900kgf・m	20rpm
管 径	メインフィードシリンダ (2連油圧シリンダ)		前進	94t 0.37m/min
			後退	60t 0.57m/min
止水機構 (耐水圧試験 5kgf/cm ² 実施済み)	先導管	ピンチバルブ	耐水圧 3kgf/cm ² 以上	
	外管止水装置	内管止水装置		
測量機器	CCDカメラ付トータルステーション精度±5mm			

の通りであるが、いずれも距離による減衰が大きく、30 m 離れて相手の位置を±10 mm 以下の精度で検知することは困難である。このため、精度良く計測する方法として、先着シールド機から後着シールド機に向けて30 m 程度の水平ボーリングを行い、後着シールド機のスリットを判別し、さらに、スリットを通過させてセンサをバルクヘッドに押し当てて位置検知する方法を考案した。システム概要を図-8に示す。

30 m の掘削を行う水平ボーリングについては、狭隘なシールド機内に止水装置を設置する関係上、外管径をφ300 mm 以下に抑える必要があり、ボーリング孔先端の位置を後方から視準するために使えるスペースはφ90 mm と狭くなった。しかし、±20 mm まではボーリング孔がS字形に曲がったとしても、先端位置の視準が可能なることから、掘削直線精度の目標を±20 mm 以内とした。

後着シールド機のスリット位置の判別には、金属の有無ならびに距離を計測できる磁気センサを選定し、回転するカッタービット(高さ60 mm)を避ける必要からカッターディスクより100 mm 以上離れた位置で計測出来るものとした。磁気センサ精度の目標値は図-7に示すようにシールド機の芯ズレがあってもスリットを通過してボーリングができるように、±2.3°以内とした。バルクヘッドに押し当てて位置検知をするセンサは、周囲の条件に左右され難く、物質を透過する性能の高いγ線による方式を選定した(以下RIセンサと呼ぶRI: Radio Isotope)。センサ位置の計測は、センサ背面に取

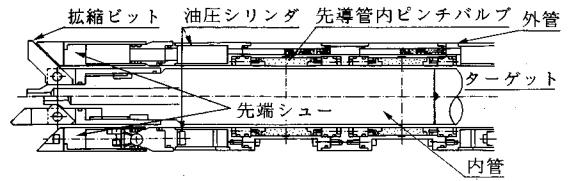


図-9 方向制御装置

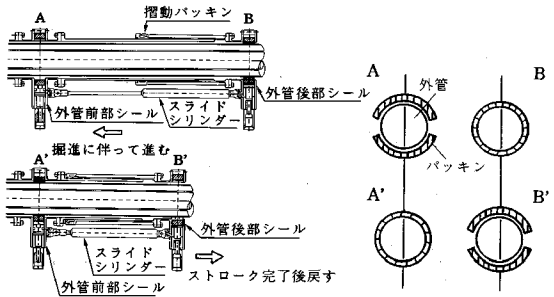


図-10 外管止水装置 (非摺動型シール)

り付けたターゲット(発光ダイオード)を先着シールド機内側から、ボーリング内管を通して直接視準して求めることとした。RIセンサ精度の目標値は、相対位置検知精度±10 mm から直接視準精度±5 mm (表-4参照)を差し引いた±5 mm 以内とした。

5. 要素技術の開発

このシステムは、水平ボーリングマシン、磁気センサ、RIセンサと3つの要素技術を組み合わせた複合技術である。各要素技術及び全体システムの開発内容は以下の通りである。

(1) 水平ボーリングマシンの開発

既往のマシンでは、±20 mm 以内の精度で、3 kgf/cm²の高水圧下を掘進するという条件を満足するものがなく、さらにビットやセンサーの挿入・撤収をする必要から、新たにマシンを開発した。写真-1にボーリングマシンを、表-4に仕様を示す。

a) ±20 mm 以内の精度での掘進方法

掘進方法として、ボーリング外管を回転させずに、内管を回転させ、内管先端に取り付けたビットにより掘進する二重管方式を採用し、さらに積極的に姿勢制御を行う手段として油圧シリンダ4本による先端シュー方向制御装置(図-9)を装備した。掘進中には、ビット背面に取り付けたターゲットを後方から CCD カメラ付きトータルステーションで直接視準(測定精度は±5 mm)し、必要に応じて油圧シリンダを遠隔操作して、掘進精度±20 mm 以内を確保した。

b) 高水圧下での止水方法

外管の表面は、直接地山に接するため損傷しがちであ

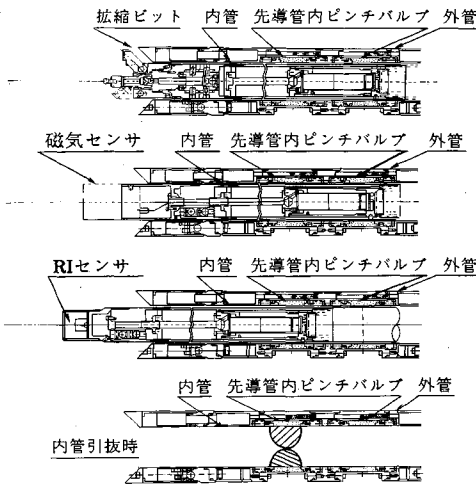


図-11 ビット・センサ挿入・撤去

り、それによるシール能力の低下や管表面とシールの磨耗によるシール能力の低下に対処するため、非摺動型シールを2組組み合わせた外管止水装置を考案した。すなわち、図-10に示すように、2組のシールを交互に使って止水するもので、掘削時には後部シールを、盛替時には前部シールを使って止水することができた。内管の止水についても同様の機構で止水することができた。

c) ビットやセンサの挿入・撤収の方法

掘削終了後、孔壁保護のため外管を残したまま、ビットを回収し、センサを挿入する必要があるため拡張ビットを考案した。

すなわち、内管を押ししてビットを掘削面に押し付けるとビットの羽が拡大して削孔でき、内管を引き寄せると縮小して、発進側に引き抜くことができる。

ビットやセンサーの挿入・撤収時など内管が引き抜かれている時には、外管先端に取付けたピンチバルブを閉じることにより、止水を行うことができる機構とした。(図-11 参照)

(2) スリット位置計測用磁気センサの適用

a) 磁気センサの基本原理

磁気センサはうず電流式のものである。図-12のように、金属板上にコイルがある距離を隔ててセットし、コイルに交流電流を流すと磁束 Φ が発生する。金属板にはこの磁界を受け、相互誘導作用によって、うず電流 I_e が流れる。また、 I_e は磁束 Φ_e を発生させ、 Φ_e はコイルの磁束が強くなろうとするとそれを弱めるように生じる。うず電流 I_e はコイルのインピーダンスに変化をもたらす、この変化分をコイル側ブリッジ回路から電圧出力として取り出す。こうして距離情報を非接触で計測できる。

b) 室内実験

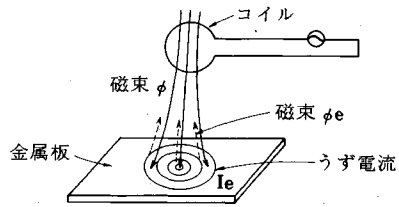


図-12 うず電流式磁気センサの基本原理

表-5 磁気センサ仕様

名称	仕様	
磁気センサ	測定範囲	0~100mm (MAX120mm)
	直線性	±1%/F・S
	被測定体金属	磁性体または非磁性体
	動作温度	-55°C~104°C
	耐水压	5kgf/cm ²
	外形寸法	158φ×300

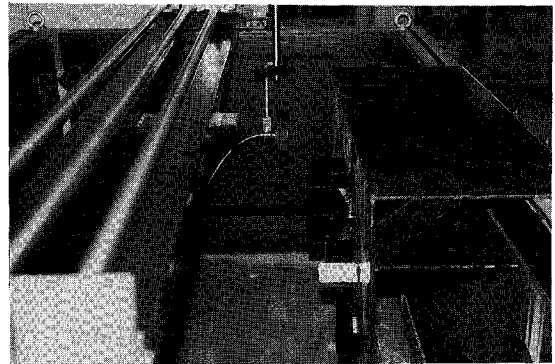


写真-2 模型実験状況 (スリットの判別)

室内実験は、写真-2 に示す装置を用いて行った。センサの仕様を表-5 に示す。

磁気センサの基本特性を確認するために、鉄板との距離を変化させて出力電圧を実測した。その結果、図-13 に示すように計測距離が 100 mm までは、出力電圧特性に直線性、再現性のあることが確認できた。

この特性を逆に応用して、磁気センサと計測対象鉄板の距離を 100 mm 程度に固定すると、センサ正面に鉄板がある場合には出力電圧が 0.8 V 程度を示し、センサ正面に鉄板がない場合には出力電圧が 4 V 以上に急激に上昇することになる。このことを利用して、スリット位置を判別することとした。

① シールド機スリットの判別

本来、磁気センサはセンサヘッドの大きさ以上の対象物がその正面にある時に、対象物までの距離を計測するものであるため、計測する対象物がシールド機の Cutter ディスクのように、ビット等の突起物が複雑に配置されている形状の場合にも、前項で述べた現象をとらえてスリットの判別ができるかどうか、模型実験を行うことにより確認することとした。

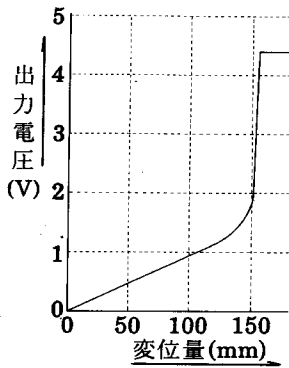


図-13 磁気センサ出力特性

表-6 水・砂の影響

介在物 鉄板ま での距離	水	泥土砂	泥水
5cm	0.44V	0.45V	0.43V
10cm	1.05V	1.08V	1.05V

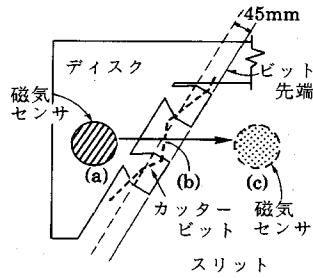


図-14 スリットの検出

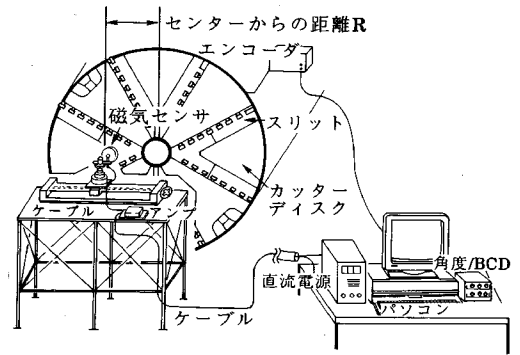


図-15 実験方法

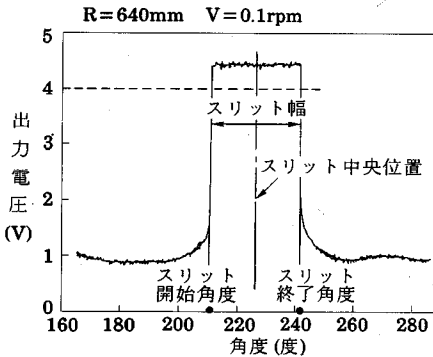


図-16 スリット計測

表-7 スリット計測データ

センターから の離れ	4Vの出力 スリット中央角度誤差
540mm	0.2°
640mm	0.8°
740mm	-0.3°
840mm	1.3°
940mm	0.1°
1040mm	1.1°
3σ	±1.7°

図-14に示した模型のカッターディスクを使い、ディスク表面から100mmの離隔を保ちながら、磁気センサをディスク側(a点)からスリット側(c点)に向けて移動すると、センサがディスク側にある時には、その出力電圧は0.8V程度を示し、カッタービットの近辺で出力電圧が急激に上昇し、4V以上となるポイント(b点)があることが分かった。さらにディスク上においてb点と同様な特性を示す位置を調べた結果、その位置は図-14の破線の折線で示すような分布を示しカッタービットの先端からディスク側に平均約45mm入った所であることが分かった。

このことから、磁気センサをカッターディスクから100mm離れた位置に設置して、カッターディスクを回転させれば、磁気センサの出力電圧の変化からスリット位置の判別が可能であることが確認できた。

② 磁気センサの水・砂の影響

磁気センサと鉄板部の間に水や砂を介在させても出力特性に、ほとんど影響がないことを確認した。確認結果を表-6に示す。

③ 耐水圧対策

磁気センサのヘッド部及びアンプ部の構造は、センサへの影響がないよう非金属製とし、さらに機械的強度、耐疲労性、耐衝撃性に優れた材質のものとしてエンジニアリングプラスチックを用いてケースを作製し、5

kgf/cm²の耐水圧試験を行い、その性能を確認した。

c) 実機による工場実証実験

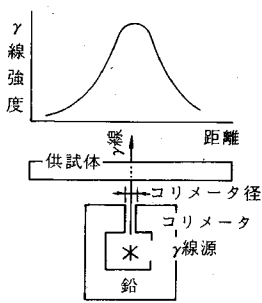
磁気センサの実機に対する特性を調べるため、図-15に示したように、センサとディスクまでの離隔を、100mmとなるように設置し、カッターディスクを回転させ、出力波形を実測した。同時にスリットの開始角度(出力電圧4V以上)と終了角度(出力電圧4V以下となる角度)をエンコーダで計測することにより、スリット位置と出力波形との関係を調べた。なお、磁気センサは実機カッターディスク中心から半径R=540~1,040mmの間を100mmピッチで移設した。

その結果、図-16、表-7に示すように、スリットの開始角度と終了角度の中央値をスリットの中央角度とした場合、シールド機の設計図面と比較すると、±1.7°(3σ)の範囲でスリット中央位置が判別でき、目標値の±2.3°を満足することが確認できた。

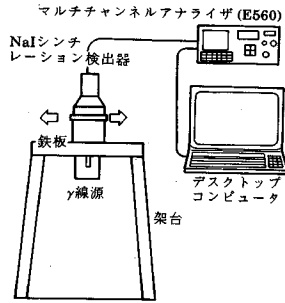
(3) 位置検知用RIセンサの開発

a) RIセンサの基本原

RIセンサは、図-17に示すように、鉛のコリメータで、γ線を細いビーム状にして鉄板に照射すると、鉄板背面に透過したγ線の透過線量率が線源の位置で最も大きく、線源からの距離に応じて減少することから、その頂点(中心軸)の位置を求めることによって、鉄板の向う側にあるγ線線源の位置を求めようとするものであ



図一17 測定原理



図一18 実験方法

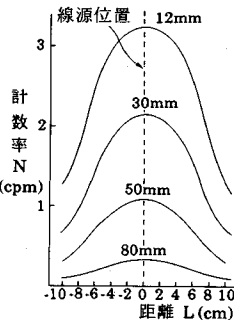
表一8 RI センサの仕様

機器名	仕様
線源	Co60 γ線密封線源, 3.33MBq, φ2mm, ℓ=10mm
線源容器	φ60mm, φ90mm, φ134mm, 鉛製容器、ℓ=100mm
検出器	5° NaI シンチレーション検出器
測定器	マルチチャンネルアナライザ
計算機	デスクトップコンピュータ

表一9 中心位置計測誤差

実測位置 (mm)	検知位置 (mm)	誤差 (mm)
0.0	-1.0	-1.0
0.0	-1.0	-1.0
0.0	-1.0	-1.0
0.0	-1.0	-1.0
0.0	0.0	0
0.0	2.0	+2.0
0.0	1.0	+1.0
45	45	0
52	50	-2
52	51	-1
45	45	0
45	45	0
52	49	-3
45	44	-1
52	52	0
45	46	+1
52	52	0
45	45	0

3σ = ±3.4mm



図一19 板厚と計数率の関係

る。鉄板背面の透過線量率 I は一般的に式 (1) で表される⁵⁾。

$$I = I_0 \times B \times \text{EXP}(-\mu x) \dots\dots\dots (1)$$

I : 透過線量率 I_0 : 入射線量率 μ : 線吸収係数
 x : 吸収体 (鉄板) の厚さ B : 再生係数

b) 室内実験

図一18 に示す実験装置を用い、鉄板背面で各測定点での係数率 (1 分間当たりのカウント数で N で表す) を測定した。使用した RI センサの仕様を表一8 に示す。

① 鉄板厚と γ 線透過線量率 (計数率) との関係

鉄板厚と透過する計数率との関係を図一19 に示す。この結果、鉄板背面における計数率の強度は、線源の位置で最も大きく線源から離れるに従って小さくなる左右対称性を示すことが確認できた。また、板厚が大きくなるに従ってそれぞれの位置での計数率が減少し、板厚による計数率への影響がうかがわれた。

② 線源の位置計測

鉄板背面の計数率の強度は、図一19 に示すように線源から離れた位置から線源に近づくにしたがって増加し、線源付近で最も高くなり、さらに線源を通り過ぎると、近づいて来た時とは対称に元の値に向かって、低下していくことが分かる。

この分布から、RI センサのシステム構築にあたっては、計数率の分布が指数関数 $e^{(x)}$ に近似できるものと仮定して、測定値を最小二乗法により $e^{(x)}$ に回帰させ、得られた回帰式より中心軸を算出する方法を検討した。計数比 Y は式 (2) のようになると仮定した。

$$Y = \text{EXP} \{ K_0 + K_1 \times X + K_2 \times X^2 \} \dots\dots\dots (2)$$

X : 線源からの距離

Y : 計数比 (距離 X での計数率 / 距離 0 での計数

率)

K_0, K_1, K_2 : 定数

この式では、ピークから離れると 0 に収束するが、RI の測定ではバックグラウンド値に収束する。

そこで、バックグラウンド値を BGR とおき、式 (2) の対数をとって変形すると、

$$\begin{aligned} \text{Log}(Y - \text{BGR}) &= K_0 + K_1 \times X + K_2 \times X^2 \\ &= K_2 \{ (X + K_1 / (2K_2))^2 \} + K_5 \dots (3) \end{aligned}$$

K_5 : $K_0 - K_1^2 / (4K_2)$

となる。つまり回帰式の中心軸は $X = -K_1 / (2K_2)$ となる。したがって、線源の位置を C とすると、 C は式 (4) で表わせる。

$$C = -K_1 / (2K_2) \dots\dots\dots (4)$$

この式を使って実測値と比較を行った結果、その差は表一9 に示すように $-0.2 \sim 1.0$ mm であった。さらに 3σ 値をとると ± 3.4 mm となり、これをこの RI センサの計測精度と考えることができ、線源の高精度位置計測が可能であることが分かった。

③ コリメータと検知精度との関係

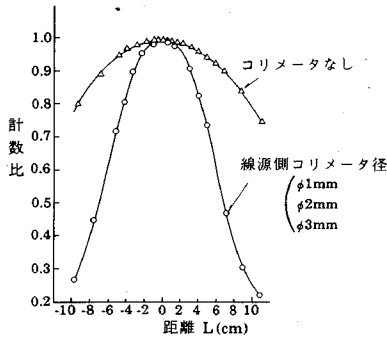
線源側ならびに検出器側についてコリメータ径と計数比 (ここでは鉄板背面で線源にあたる位置で求めた γ 線の計数率を基準とした各点での計数率との比として表した) との関係を図一20 (a), (b) に示す。

この結果、線源側については、コリメータが必要であるが、コリメータの径の違いによる分解能 (ここでは位置ごとの計数比の差) の違いは見られず、いずれの径でも良いことがわかった。

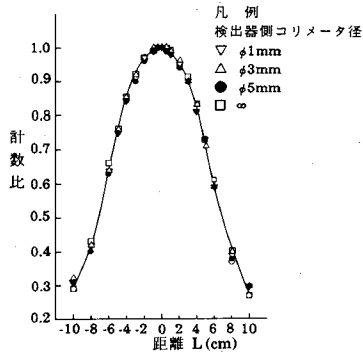
また、検出器側については、コリメータの有無、径の違いによる差が見られなかった。

④ 線源部周辺の条件の違いによる検知特性の把握

実際の検知作業ではチャンパー内が泥水や水などで満



(a) 線源側コリメータ



(b) 検出器側コリメータ

図-20 コリメータ径と計数比との関係

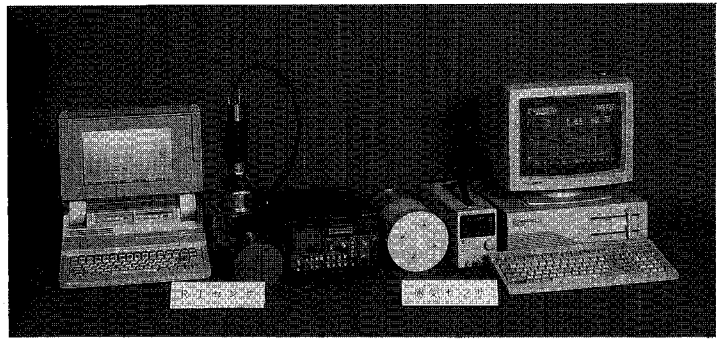


写真-3 磁気・RI センサ計測システム

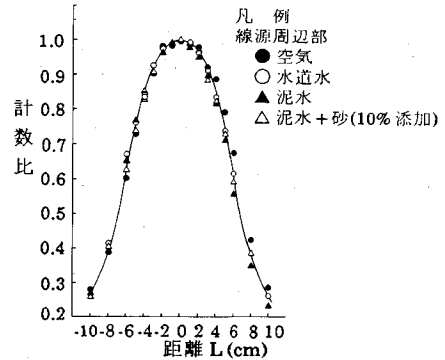


図-21 線源部周辺の影響図

たされているため、線源部周辺を泥水、水、空気に変えて検知に与える影響を調べた。測定結果を図-21 に示す。その結果、線源部周辺の条件の違いは、検知特性にほとんど影響せず、無視できることがわかった。

以上の実験結果から、測定システムとしての仕様は、線源部のコリメータ径を 3 mm、検出器側はコリメータなしとし、解析は指数関数 $e^{f(x)}$ にあてはめて行うこととした。

(4) 位置検知システム

以上の要素技術の組み合わせによるシステムの位置検知精度は、RI センサ精度 ± 3.4 mm、センサの位置計測精度 ± 5.0 mm を総合して、開発目標値 ± 10 mm を満足するものとなった。

システムとしては、さらに効率的にデータを収集・解析できるようにパソコンと組み合わせることとし、写真-3 に示すようなシステムを構築した。ブロック図を図-22 に示す。

特に磁気センサによる後着シールド機スリット位置計測は、先着シールド機側の磁気センサの計測データを後着シールド機内に設置したパソコンにデータ伝送 (NTT 電話回線利用) し、後着シールド機の cutter 回転角度のデータと合わせて解析し、上記パソコンのモニター画面にリアルタイムで表示するシステムとした。

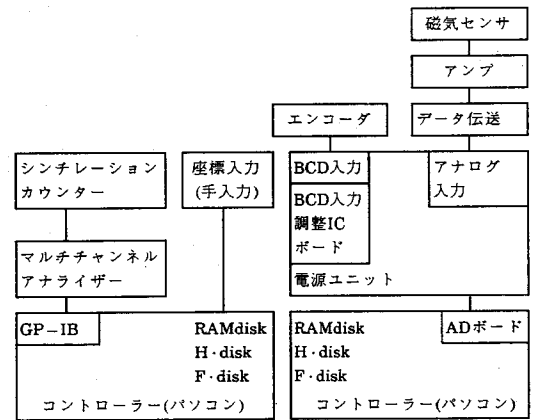


図-22 センサブロック図

また cutter の停止は、インバーター制御により 0.1 rpm で回転させ、モニター画面でスリット中央位置を確認し、遠隔操作で行う方式とした。

6. 実施工での実証^{(5)~(8)}

本検知システムを実際に適用した工事は、図-23 に示す木更津港を横断する延長約 4.0 km、内径 $\phi 3,000$ mm の海底シールドトンネル構築工事であり、両立坑からシールド機を発進させ、約 2.0 km の中間点の海底下

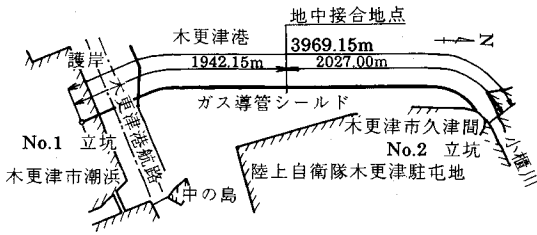


図-23 現場平面図

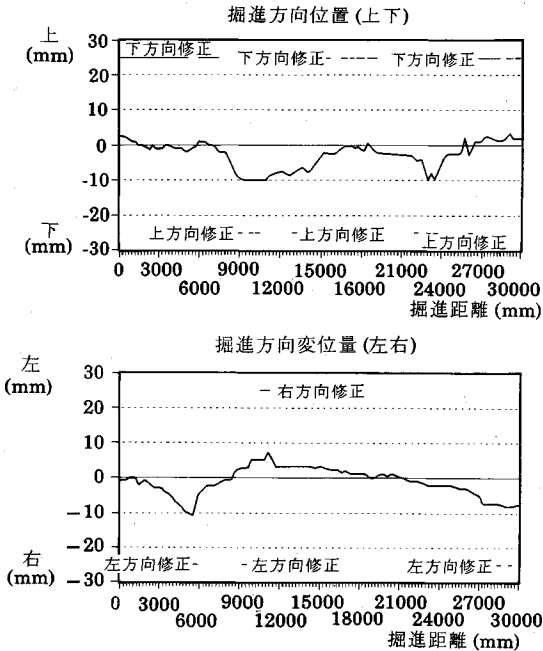


図-24 水平ボーリングマシンの掘進精度

で、補助工法に凍結工法を用いて地中接合させたものである。本システムを用いた位置検知は、接合前 30 m 及び 15 m の 2 地点で実施した(施工条件は表-2を参照)。

本システムによる位置検知の精度は、接合前 15 m 地点において、今回開発した水平ボーリングマシンを用いて後着シールド機のバルクヘッドを切断し、直接視準を行った結果と比較して評価した。

(1) 施工手順

施工手順は以下の通りである。

- ① シールド機到達位置手前約 30 m 地点で、先着シールド機側から後着シールド機に向けて高精度の水平ボーリングを行う。
- ② 拡縮ビットを先着シールド機側に回収後、後着シールド機カッターディスク手前 100 mm まで磁気センサを挿入する。
- ③ カッターディスクを回転させスリット位置を判別し、スリット中央位置でカッターを停止させる。
- ④ RI センサをバルクヘッドに押し付け、非破壊方

表-10 スリット中央位置判別検知・シールド相対位置検知実績表

	検知距離	センサ名	水平	垂直	合成
スリット中央位置判別	30m	磁気センサ	1.0°	-	-
シールド相対位置検知	30m	RIセンサ	2.8mm	7.0mm	7.5mm
	15m		1.0mm	1.0mm	1.4mm
<各要素の単体精度>					
● 視準測量精度 : ±5.0mm					
● 磁気センサ : ±1.7°					
● RIセンサ : ±3.4mm					

式で後着シールド機とセンサ間の相対位置を計測する。

⑤ 先着シールド機内で、CCD カメラ付きトータルステーションを用いて RI センサ位置(ボーリングマシン先端位置)の 3次元座標を測量する。

⑥ 最後に、RI センサによる検知結果と、トータルステーションによる測量結果からシールド機の相対位置を算出する。

なお、15 m 地点では直接視準測量のために、後着シールド機のバルクヘッドにボーリング受入れのための止水バルブを取り付け(取り付け位置は上記④を再度繰り返すことにより求めた)後、水平ボーリングマシンの内管先端をメタルクラウンに替えバルクヘッドを切断した。

(2) 実施工の結果

水平ボーリングでは、先端位置を視準しながら、先端シュートを遠隔操作することにより、図-24に示すように 30 m の掘進距離を孔曲がり ±10 mm 以内で施工でき、センサ位置を直接視準することができる。また、内・外管止水装置を用いることにより、3 kgf/cm² の水圧下で安全にボーリングを行うことができ、拡縮ビットやセンサの挿入・撤去も自由に行うことができた。

磁気センサについては、事前に実シールド機を用いて出力特性を把握しておくことにより、スリット位置判別が可能であり、直接視準測量の結果から逆算評価すると 1.0°であった。この値は、2 台のシールド機のズレが 214 mm (前述の測量誤差評価の 3σ 値) となった場合でも、確実に RI センサがスリット通過させるのに必要な計測精度 ±2.3°を満足している。

シールド機相対位置検知(RI センサ+トータルステーション)の精度は、15 m 地点における直接視準測量の結果から逆算推定すると、表-10に示すように、30 m 地点の計測では 7.5 mm、15 m 地点では 1.4 mm であり、開発目標 ±10 mm を満足するものであった。

7. まとめ

本開発では、地中接合する 2 台のシールド機の相対位置を非破壊方式で安全に高精度で検知する手段として、水平ボーリングマシン、磁気センサ、RI センサと 3 つの要素技術を組み合わせたシステムを考案し、実現場に適用した。以下に、その結論をまとめる。

(1) 実証した検知精度から逆算すると、今回の検知システムを利用することによる地中接合精度の保証値は、検知精度(10 mm)とシールド機の制御誤差(17 mm)を単純加算すると27 mmとなり、メカニカルドッキング工法の接合構造は、この接合精度を基に設計できることになる。

(2) 今後の課題

a) 当システムでは1回の計測では角度ズレの計測をすることが出来ない。角度ズレの計測を行うためには、1回芯ズレ量を計測したのち後着シールド機を直進させ再び芯ズレ量を計測し、両方の芯ズレ量の差から間接的に角度ズレを算出するという手段を取る必要がある。

角度ズレ = \tan^{-1} (芯ズレ量の差 / 直進距離)

しかし、この方法では検知の手間が掛かるため角度ズレの計測に何等かの工夫が必要と考える。

b) 磁気センサの出力は通信ケーブルによりシールド機内のパソコンまで伝送したが、実作業ではケーブルに傷を付けないように1本3mの内管にケーブルを通し(抜きながらセンサを挿入(撤去)したが、この作業に思いのほか手間取った。センサの出力はケーブルを用いずに、レーザー、電磁波などを用いてデータを伝送する方式を考える必要がある。

8. あとがき

以上、本システムの採用により、従来から行われている地上からのチェックボーリングを実施せずに、シールド機の相対位置を非破壊で安全に精度良く検知できることを確認した。その結果、シールドトンネルの建設計画・設計の自由度が増し、より経済的なルート及びトンネル断面の選定が可能になると考える。

また、この検知システム採用のためのシールド機本体

の改造点は、水平ボーリング発進口のバルブ設置のみとシンプルなため、シールド機の掘進性能に影響を与えない。さらに、センサ類についても、検知前の性能チェックが可能で、検知時に不具合が生じた場合にも交換が容易にできるなど、高水圧下あるいは長距離掘進後の地中接合工法においても、高い信頼性を有するといえる。

最後に本システムの開発と実証は、東京電力(株)、鹿島建設(株)、東電富津～袖ヶ浦間ガス導管新設工事第4工区JVの多くの関係者の協力の下に行われたことを付記し、関係した皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 金谷・森：海底下での地中ドッキング，トンネルと地下，Vol. 18, No. 8, 1987.
- 2) 最新のシールドトンネル技術編集委員会編：最新のシールドトンネル技術，技術書院.
- 3) ガス導管設計施工合理化に関する研究のうちシールドトンネル地中接合工法の開発，共同研究報告書，平成元年3月，東京電力(株)社内資料.
- 4) 今池・榎木：うず電流式センサ，電気学会誌，104巻8号，1984.8.
- 5) 日本放射性同位元素協会編：新版ラジオアイソトープ講義と実習，丸善株式会社.
- 6) 宮本・山崎：シールドトンネル地中接合のための相対位置検知システムの開発，土木技術46巻11号，1991年.
- 7) 白井・赤村・今川・川端：長距離海底下シールドトンネルの地中接合のための位置計測システムの開発，トンネル工学研究発表会(論文・報告集)第1巻，1991年12月.
- 8) 宮本・山崎：泥水シールド工事における自動化施工と地中接合工における位置検知工，建設の機械化，1992年1月.

(1992.4.10 受付)

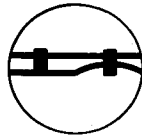
DEVELOPMENT OF A RELATIVE POSITION DETECTING SYSTEM FOR THE UNDERGROUND DOCKING OF TWO SHIELD TUNNELING MACHINES

Koji MIYAMOTO, Shin'ichi SHIRAI, Muneo YOSHIMURA and Yukinobu SASAKI

A relative position detecting system of two shield tunneling machines has been developed for the underground docking. Using a horizontal boring machine and two types of position sensors, the system provides nondestructive and very precise confirmation of the relative position of two shield machines without conducting a conventional check boring from ground surface.

The paper describes the development of the system and the results of its application to an actual project.

新刊案内



海岸工学用語集
「シソーラス付」「和英対照付」

A 5 版 430頁
定価 2,000円
会員特価 1,800円
〒480円

フォース橋の100年
100 YEARS OF THE FORTH BRIDGE

B 5 版 160頁
定価 5,000円
会員特価 4,500円
〒480円

橋 1991-1992
BRIDGES IN JAPAN

A 4 版 158頁
定価 8,500円
〒480円

軟岩評価
—調査・設計・施工への適用—

B 5 版 386頁
定価 6,000円
会員特価 5,400円
〒480円

BASIC Pascal C
による土木情報処理の基礎Ⅱ
サンプルプログラム収録 フロッピーディスク付(5inch)

B 5 判 271頁
定価 3,800円
会員特価 3,400円
〒480円

土木学会誌 1992年6月号別冊増刊

エコ・シビルエンジニアリング読本

[第1章]
環境社会システム史
Part 1 Eco-Social Systems

[第2章]
自然生態系の保全・復元と創造をめざして
Part 2 Toward Preservation, Restoration,
and Creation of the Ecosystem

[第3章]
物質循環・エネルギー循環のマネジメント
Part 3 Management of Material
Recycling and Energy Conservation

[第4章]
世界に貢献する地球環境都市の構想
Part 4 The Eco-Polis in Global Society

A 4 版 120頁
定価 2,000円
〒100円

圧密解析ソフトパソコンに上陸!!

未来設計企業

CRC

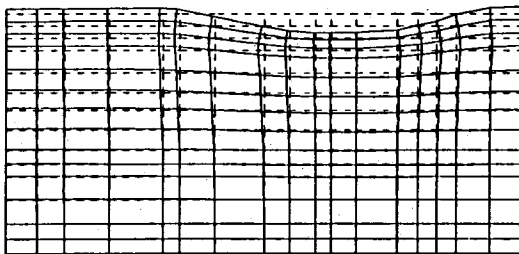
地盤の非定常圧密解析プログラム

Mr. 圧密

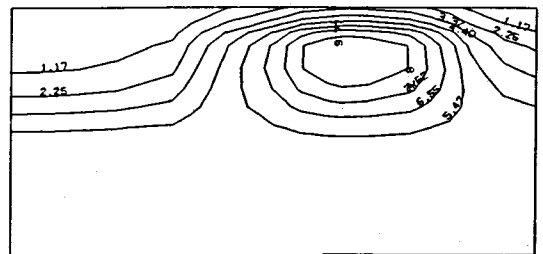
(特長)

- 非定常FEMによる線形弾性解析(christian系の解法)。
- 二次元平面歪解析。
- 要素として三角形・任意四角形が扱える。
- スケーリングをしているので安定して解が求まる。
- リスタート機能の完備。
- 入力はわかりやすいコマンド形式を採用(フリーフォーマット)。
- 図化处理(プロッタ、画像出力)等、豊富な機能を持つポストプログラムを完備。
- ジェネレート機能(長方形要素)により簡単にモデル作成が可能。
- 大モデルはそのままCRCネットワークでも(ホスト処理)可能。

販売価格：60万円 機種：NEC PC9800シリーズ 他



変形図



過剰間隙水圧コンター図

※EWS、汎用機用の圧密解析プログラム(逆解析も可能)として"UNICON"も用意しております。

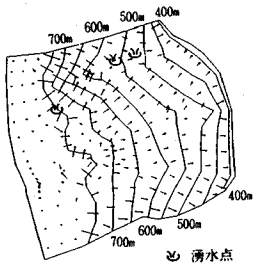
株式会社 **CRC総合研究所** 西日本支社

〒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:小林

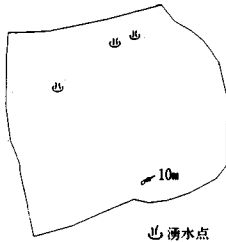
あの地下水解析ソフトがさらに機能充実!

UNISSF_{ユニセフ(V-2)}

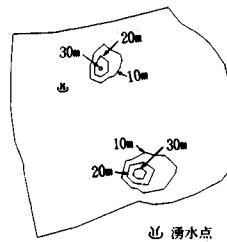
スピーディな同定・安価な解析



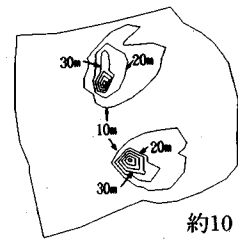
初期状態の地下水流



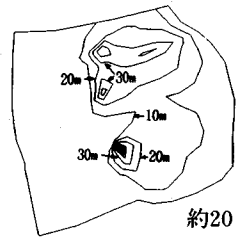
トンネル掘削開始直後



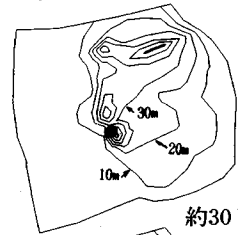
約4日後



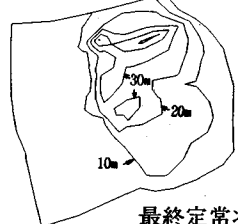
約10日後



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。

○図化处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

このシステムは、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。

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

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

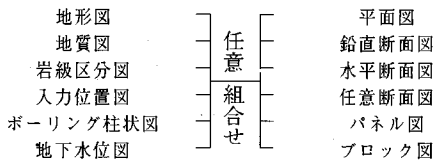
概要

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)

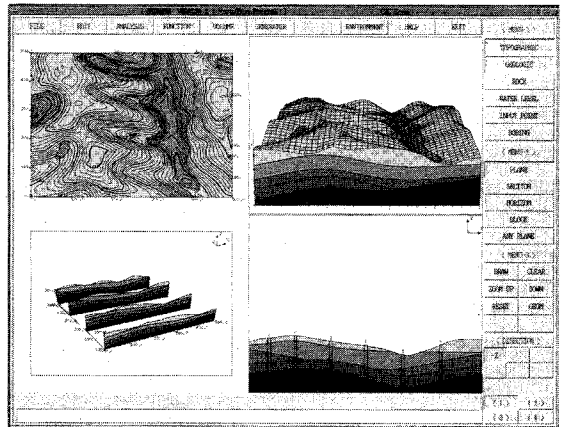
- ・SONY-NEWSシリーズ*
 - ・Sun-3, Sun4, Sun-SPARCシリーズ*
 - ・HP9000/300, HP9000/800シリーズ*
- *ウィンドウシステムとしてX-Window System, Version 11 (X11)が必要です。
(標準以外のものにつきましても御相談に応じます)

(株)アイ・エヌ・エー
アイサワ工業(株)
アィドルエン지니어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
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
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)中塚ソイルコーナー
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)阪神コンサルタンツ
ヒロセ(株)
フジク工業(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

土と水の連成逆解析プログラム

未来設計企業
CRC

UNICOUP

応力解析と浸透解析がドッキングした!

軟弱地盤の解析に!

海洋開発・埋立

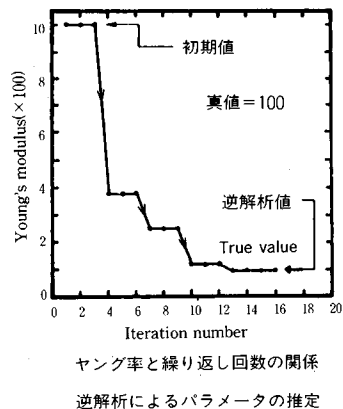
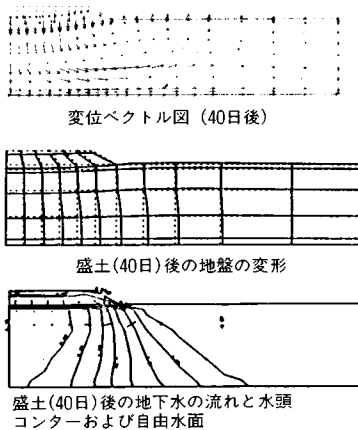
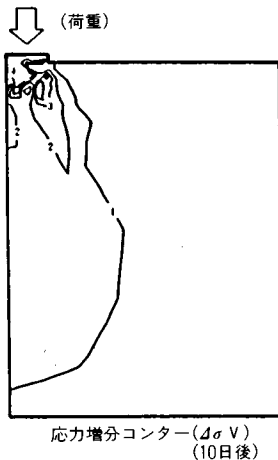
盛土・掘削

出力項目

- 各節点での変位、各要素での応力
- 各節点での全水頭・圧力水頭 他
- 豊富な図化処理
変位図、変位ベクトル図、応力ベクトル図、応力コンター図、安全率コンター図、水頭コンター図、圧力水頭コンター図

プログラムの特長

- 応力と地下水の流れをカップルさせた問題が解析可能です。(圧密含む)
- 地下水の流れは飽和・不飽和域を対象としています。
- 多段掘削・盛土や降雨等が扱えます。
- 梁や連結要素も扱え実用的です。
- 経時観測記録(変位・水位)があれば、非線形最小二乗法に基づき変形係数や透水係数が逆解析できます。(順解析、逆解析がスイッチにて選択可能です。)
- 弾性・非線形弾性・弾塑性・弾粘塑性を示す地盤が扱えます。
非線形弾性(電中研式、ダンカン・チャンの双曲線モデル)
弾塑性(ドラッカー・ブラガー、モール・クーロン、カムクレイモデル、ハードニング、ソフトニング)
弾粘塑性(関口・太田モデル)



このシステムは、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。

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

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

移流拡散解析プログラム

未来設計企業
CRC

MATRAN EX

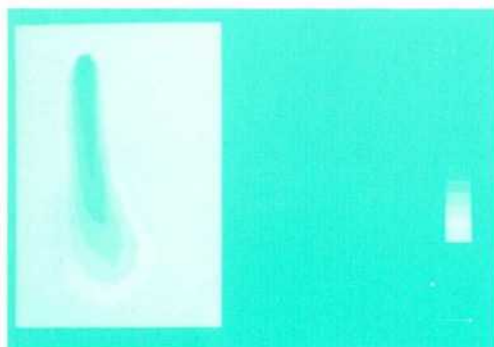
地下水汚染
の解析に!

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)

断面出力図



濃度コンター図(断面解析例)

断面出力図

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