

シールドマシン地中接合用分割ドッキングフード部の止水対策
WATERTIGHT MEASURES AT DIRECT UNDERGROUND DOCKING POINT BY TWO SLURRY SHIELD MACHINES

浦沢義彦*・桑原弘昌*・山下智之**・石塚政勝***

Yoshihiko URASAWA, Hiromasa KUWABARA, Tomoyuki YAMASHITA, Masakatsu ISHIZUKA

In Narita sand layer, direct underground docking of two shield machines was performed using partitive docking hoods. Since the ground is liquescent, chemical grouting was necessary as a auxilliary watertight measure to prevent inflow of sand and grand water at the openings between machine and partitive docking hoods. Newly developed evaluation method using the Elastic Finite Element Analysis was applied, in order to estimate the minimum chemical grouting area. Thereafter, grouting and following direct docking was executed, though inflow of grand water was observed. Thus, the performance of this evaluation method as well as the critical watertight devices previously equipped with the docking shield machines should be thoroughly assessed, as indicated in this paper.

Keyword: direct underground docking, partitive docking hoods,
minimum chemical grouting area, the Elastic Finite Element Analysis

1. はじめに

東京電力(株)では、船橋市内に建設中の地中送電線用洞道工事の内、住宅密集地で立坑用地の確保が困難な場所において、シールドマシンの地中接合を行った。両工区の洞道は図-1に示す通り必要内径が異なるため、シールド機間に約150mmの外径差が生じる。そこで本地中接合においてはこの外径差に着目して、外径の大きい後着シールド機に分割型ドッキングフードを装備し、ドッキングフードを先着シールド側に押し出してラップさせ、施工を完了した。この地中接合の施工結果については、既に報文¹⁾により報告済みである。

本稿では、ドッキングフードのスリットという限られた部分からの土砂や地下水の流入を防止するための必要最小地盤改良

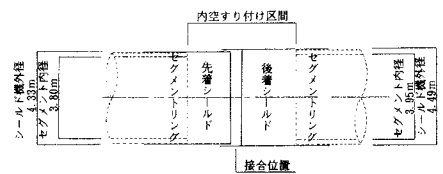


図-1 地中接合部分の必要内径差

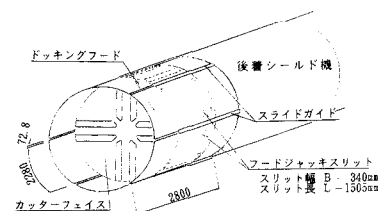
- * 正会員 東京電力株式会社 地中線建設所
** 正会員 東京電力株式会社 送変電建設本部
*** 正会員 清水建設株式会社 千葉支店

範囲を、浸透流解析および地盤変形解析によって設定し、実際に施工を行った結果より得られた知見について報告するものである。

2. 地盤特性および分割ドッキングフード方式の採用

地中接合を行う地点の地質は細砂を主体とした成田砂層で、N値40、均等係数4以下、細粒分12%程度である。地下水位はシールド機天端（GL-11m）付近で、透水係数は $1.4 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ である。この砂質土の流動化の判定を、「矢田・森下の方法」および「土木学会の方法」で行った結果、流動化しやすい地山であることが明らかになった。このことは、完全機械接合でない場合、フード内側に自由解放面が生じると接合部の隙間からの湧水とともに土砂も流入する可能性が高いことを示唆し、隙間の外側に止水のための地盤改良が必要であると判断された。地中接合方法は、環境条件、地盤条件、および施工条件を考慮し、本施工地点で適用可能な①凍結工法、②カッターディスク摺動工法、③ドッキングフード方式を比較検討した結果、補助工法の併用により接合部での湧水、砂の流動化を防止できることを条件に、機構が簡易で、安全性・経済性に優れているドッキングフード方式を採用した。なお、機械接合方式として MSD（メカニカルシールドドッキング工法）があるが、異径接合であるため本施工での使用は見送ることにした。

ドッキングフードは後着シールド機到達後の面盤解体時、一時的に地山を保持する役割を担っていることから、最悪の状況でも先着シールド機の上半分を覆わなければならないため、施工の確実性を考慮し、一体型フードではなく、分割型フードを採用することにした。一方、施工の安全性からドッキングフード貫入時のねじれを防止するために、摺動ジャッキはフード一枚につき2本設置することにしたが、シールド機内のスペースの関係から設置可能な本数は12本となり、可能なフード分割数は最大で6枚となった。そこで、マシン外周部に設けた4本のオーバー／コピー・カッターのうち何本かが引込み不可能になっても、貫入可能なフードの枚数を最大にできる6分割が最適であると判断した。なお、分割されたフードはシールド機のスキンプレート外周に取りつけられた突起（スライドガイド）に沿って押し出される構造である。図-2、図-3にドッキングフードの仕様と摺動ジャッキとの関係を示す。



先着シールド機とドッキングフードとの隙間量

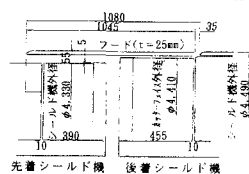


図-2 ドッキングフードの仕様

3. 地盤改良範囲の設定

3・1 解析方法

ドッキングフードのスリット部から流入する砂、地下水を防止するための地盤改良範囲を設定することは通常の計算方法では困難であるため、図-4に示す独自の検討手順を考案し、解析・検討を行太っている。まず、地山の流動化判定については第2章で述べた通りの、流動化の可能性が大と判定されたため、次の FEM浸透流解析を行うことにした。浸透流解析では原地盤での非定常解析により、スリットからの浸透流速、流量、およびスリット周辺の圧力水頭分布を算出し、この算出された浸透流速と地

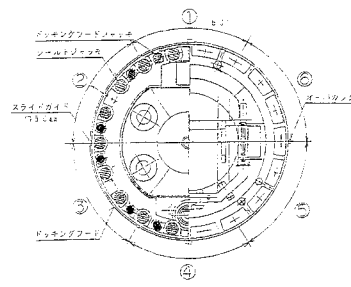


図-3 ドッキングフードと摺動ジャッキの位置

盤の浸透係数から浸透力Fを（式・1）により求めている。

$$F = \gamma_w \cdot i = \gamma_w \cdot V / K \quad (\text{式} \cdot 1)$$

ここに γ_w : 水の単位体積重量 (tf/m³)

i : 動水勾配

V : 流速 (m/sec)

K : 透水係数 (m/sec)

浸透力Fは地盤内の土粒子に作用するものであることから、その力を物体力として取扱い、次の FEM地盤変形解析を行う。FEM地盤変形解析の解析フローは図-4に示す通りである。地盤変形解析は初期応力解析後、スリット部に応力の解放力を作用させる。これは地中接合時のスリット部が応力解放状態になることを考慮したものである。さらに $t = 1$ 秒～5 秒（1 秒毎）の浸透力を逐次作用させて解析することにした。なお、解析はシールド横断面を対象とし、平面ひずみ状態にあると仮定して弾性解析を行っている。解析上必要な地盤改良範囲は、解析結果の応力とモール・クーロンの破壊基準との比をとって要素安全率fsを求め、必要安全率以下の領域を必要範囲とする。要素安全率fsは（式・2）により求め、必要安全率は 1.2 とした。

$$fs = \{ 2C \cdot \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi \} / (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (\text{式} \cdot 2)$$

以上のようにして求められるのが解析上の必要改良範囲であるが、実施工での改良範囲を決定するには地盤改良工法とその施工精度等を考慮する必要がある。そこでさらに、地盤改良後の地盤条件で FEM浸透流解析を行って浸透流量を算定し、坑内排水が可能かどうかを基準に最終地盤改良範囲を設定することにした。

3・2 解析モデルと条件

FEM浸透流解析の要素分割図は図-5に示す通りで、地盤変形解析でも同一のモデルを使用した。解析条件は表-1に示す通りである。

シールドの周囲は、シールド中心に向かう放射方向を固定条件とし、その接線方向（円周方向）はスライド（自由条件）としている。土質定数は表-2に示す通りで、Ns層上部のLm、Mc層は初期応力解析時に上載荷重（10.68t/m²）として与えた。

3・3 解析結果

浸透流解析では、時間の経過に伴い地盤内の圧力水頭分布がスリット部に向かって徐々に低下した。このため、

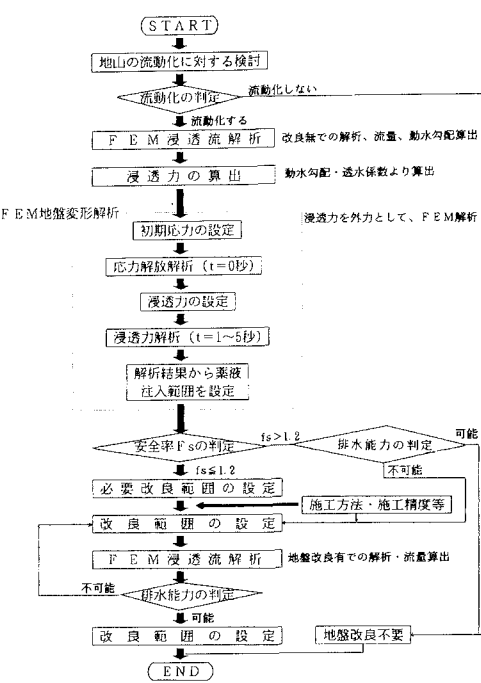


図-4 地盤改良範囲設定のフローチャート

表-1 解析条件

項目	解析条件
解析領域	Ns層 (GL-7.5m～23.5m)のみ検討 シールドセンターから15m幅の半断面
シールド径	4.49m
シールド深度	センター GL-12.8m
地盤の透水係数	$K = 1.4 \times 10^{-3}$ cm/sec
解析法	非定常解析
経過時間	$t = 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0$ 秒

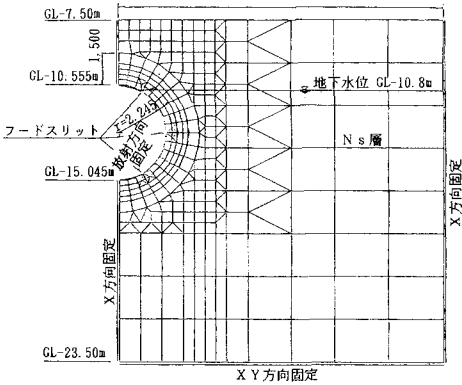


図-5 解析モデル

流速・流量ともに $t = 1$ 秒の時が最大となり、経過時間が長くなるにつれ減少することが判明した。図-6に $t = 1$ 秒の流速ベクトルおよび圧力水頭コンター図を示す。圧力水頭は、スリット部から 1.0～1.5m離れた位置からスリットに向かって低下し、スリット部では当然のことながら 0 tf/m^2 となる。下端スリット部

の流速および流量は、 $t = 1$ 秒で各々 $1.50 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$ 、 $8.30 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec/m}$ と小さな値となったが、浸透力 F は $F = \gamma_w \cdot V / K = 1.0 \times (1.50 \times 10^{-4} / 1.4 \times 10^{-5}) = 10.7 \text{ tf/m}^3$ と大きな値を示している。しかしながら、スリットから離れるに従い流速は非常に小さくなり、それに伴い浸透力も小さくなっていく。浸透流解析結果を受けて行った地盤変形解析の結果、地盤内変位については浸透力が作用した後に、徐々にスリット方向に変位が大きくなったが、スリット部においては $t = 1$ 秒で変位が最も大きく、その後漸減することが判明した。これは時間の経過とともにスリット近傍で地山がアーチ形状で外力に抵抗するアーチアクションが働き、スリット部からの抜け出しを抑えているものと想定される。また、地盤内応力については水頭差が小さいため、応力解放力に比べて浸透力が地盤に与える応力の影響は小さいことも判った。図-7に $t = 1$ 秒の要素安全率 f_s コンター図を示す。同図には $f_s < 1.2$ の範囲を太線で表しているが、この範囲はスリット部から最大で 20cm 程度となっており、解析上はこの範囲を地盤改良すれば良いことになる。しかしながら、本解析は弾性解析であり、実際はスリット部からの流砂現象等により破壊される範囲が広がっていくことが予想された。また、現状土木技術レベルでの地盤改良工法自体の施工精度が不確実であること等も考慮して、必要改良範囲を決定することが重要となった。

表-2 土質定数表

	変形係数 (kgf/cm^2)	ポアソン比	単位体積重量 (t/m^3)	粘着力 (kgf/cm^2)	内部摩擦角 (度)	静止土圧係数
表土・ローム層 (Lm)	7	0.45	1.3	0.12	15	—
松戸粘土層 (Mc)	20	0.40	1.6	0.28	0	—
成田砂層 (Ns)	150	0.35	1.9	0.00	30	0.5

注) 〇 今回 の 解 析 で 使 用 し た 定 数

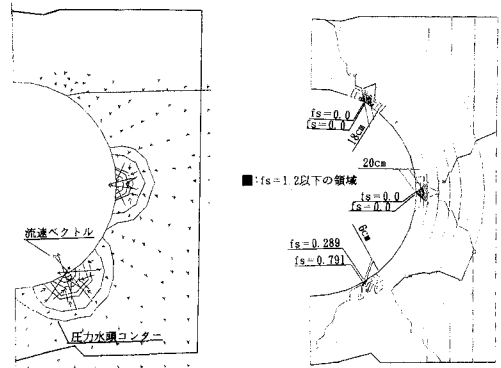


図-6 浸透流解析結果 図-7 要素安全率 f_s コンター図
($t = 1$ 秒) ($t = 1$ 秒)

3・4 必要地盤改良範囲と想定湧水量

地盤改良工法は、実用上十分な止水性を確保できること、必要な地盤強度を満足できかつドッキングフードの摺動抵抗があまり増加しないこと（改良目標粘着力 $c = 0.8 \text{ kgf/cm}^2$ ）、坑内注入および地上からの斜め注入が可能なこと、経済的であること等を必要条件とした結果、二重管複合薬液注入工法を採用した。薬液注入工法は、その注入方法のコントロールに限界があり、改良される範囲が必ずしも1孔ごとにきれいな円柱体を確保できるとは限らず、むしろ不均等になるのが一般的である。地盤強化のみなら

ず止水をも目的とする場合には、未改良部をカバーするために注入孔の複列配置が原則であり、実績からも1.5mの改良厚さを確保することが望ましい。よって本接合位置での改良範囲は最小改良厚を確保し、かつ図-8に示す①先着シールド機とドッキングフード間のスリット部、②フードジャッキのスリット部、③6分割ドッキングフードのスリット部、以上3タイプのスリット部の防護を目的として最終地盤改良範囲を設定した。各々の改良範囲をそれぞれ図-9(1)、(2)、(3)に、それら全てを合成した範囲を図-9(4)に示す。解析の最後として、必要範囲の地盤改良後の透水係数を $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ とした条件のもとで、再

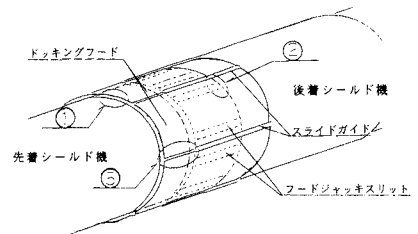


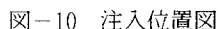
図-8 地中接合部におけるスリット

＜1＞ ドッキングフードとシールド機の スリット部防護範囲	＜2＞ フードジャッキスリット部の防護範囲	＜3＞ 6分割ドッキングフード簡の スリット防護範囲	＜4＞ 合成範囲

4. 施工実績

実施工での薬液注入工は、接合位置に先着シールド機だけが到達した状態で行った。まず路上より注入を行い、先着シールド機下部については路上からの斜注入をもってしても改良不可能なため、先着シールド機のスキンプレートに孔をあけ、坑内より注入した。工法は二重管複合注入工法で溶液型無機系の注入材を使用している。この先行注入完了後に後着シールド機が接合位置に到達し、ドッキングフードを所定の位置に摺動させた。そのため、後着シールド機到達時には地盤改良部はオーバークッターで乱され、ドッキングフード摺動後にはスライド部のスキンプレートと地盤の間に空隙が生じることが考えられた。そこで、このような状況を想定して後着シールド機内にあらかじめ取付けておいたボイド充填バルブ孔を用いて、二液可塑性注入材による空隙の充填を行った。

機内注入孔からの空隙充填後、チャンバー内の泥水を3回に分けて排出しながら湧水量を測定して、止水性の評価を試みたところ、事前解析による予測では6 l/minであった湧水量が、実測では60~80 l/minと予測値の10倍以上であった。また湧水に伴い地山が流動化をおこし、チャンバー内に土砂が流入していた。このため空隙充填に用いたバルブ孔とグラウトホールから補足注入を行わざるを得なかった。補足注入は二重管注入工法で行い、まずゲルタイムが比較的短い溶液型と懸濁液型の注入材で粗づめし、その後ロングゲルの溶液型注入材を浸透させた。空隙充填および補足注入の注入位置を図-10に、注入過程一覧表を表-3に示す。補足注入は湧水量が目標値以下になるまで続行



させた。この補足注入総量は約 14.8kℓと多量で、一部がチャンバー内に流入していることがシールド機解体時に確認されている。当初の注入計画で良好な止水性が得られなかった原因としては、チャンバー内での観測結果から、改良範囲を設定する解析時に考慮していなかったシールドスキンプレート縦断方向からの湧水であることから、ドッキングフードのスライドガイドが水道となったと考えられる。また、①水が浸入することが出来るフード間のすき間が多い、②フード摺動後の空隙充填に用いる注入孔が少ない等、シールド機の構造上の問題と、先行施工した地盤改良部をシールド機の到達やドッキングフードの摺動により乱すことになった施工手順上の問題点が考えらる。

表－3 注入過程一覧表

項目	日付	注入位置 (図-11参照)	注入量 (ℓ)	注入最終圧 (kgf/cm ²)	注入材	注入後の湧水量 (ℓ/min)	
空間 充填	7/21	②	485	3.0～4.0 切羽飽水圧が 0.75kgf/cm ² で 注入STOP	二液可塑性 注入材	50～80	
		③	368				
		④	346				
		⑤	0				
		⑦	194				
⑧	0						
	8/17	④	4000	4.0	添液型掘削系	—	
		8/18	④	1650	8.0	添液型掘削系	—
			⑤	1150	6.0		
			⑦	800	5.5		
掘 足	8/19	④	506	5.0	替液成型 セメント系	—	
		⑤	204	8.0			
		⑦	652	7.5			
		⑧	488	5.7			
注 入	8/20	⑧	552	6.2	替液成型 セメント系	1～2	
		6-3	1140	4.0			
		6-2	622	5.0			
		6-4	850	5.0			
	9/ 3	6-1	304	5.0	添液型掘削系	1～5	
		④	230	15.0			
		⑤	340	16.0			
		⑦	400	11.0			
	9/ 4	④	400	11.0	添液型掘削系	6	
		⑤	300	11.0			
		⑦	400	16.0			
		⑧	400	16.0			

5. まとめ

分割型ドッキングフードのスリット部の止水対策として薬液注入工を施工したが、その必要改良範囲を設定するには従来用いられている手法では困難であった。そこで今回、FEM浸透流解析とFEM地盤変形解析を組み合わせた設定方法を考案し、解析を行った。その結果、スリット部から約20cm程度の狭い範囲を地盤改良すれば止水対策としては十分であるということが明らかになった。これは、狭いスリット部を止水するという事を考えれば十分納得できる結果であった。ところが実際の施工では施工精度等を考慮して改良範囲を設定し、薬液注入を行ったにも関わらず、解析でも対象としていなかったスリット部周辺のシールド縦断方向の水道が十分に充填できず、予想以上の湧水・砂の流入が発生した。このため、約 14.8kℓもの補足注入を余儀なくされたが、湧水は完全に止まり地中接合は無事完了した。

今後同種工事を行う場合には、今回考案した検討方法および実施工結果を踏まえて、①シールド縦断方向を対象とした事前解析を加える、②スリット部周囲の水道を塞ぐために、地盤改良をドッキングフード摺動後に行う、③空隙充填用の注入孔をより多く装備しておき、より確実な充填を行う、④一体型ドッキングフードあるいは分割数を減らしたフード構造を採用する等の、解析方法、施工手順、および機械構造に関する改善が必要であると考えられる。

さらに、工期・工費の面からみると、現状の薬液注入工技術レベルで決まる必要最小範囲を改良することは、ドッキングフード方式採用のメリットを失うことにもなりかねない。解析上必要な改良範囲を確実に改良できる施工方法、施工技術の開発・確立が、今後の重要な課題であると考えられる。

(参考文献)

1) 浦沢義彦・矢吹忠平・桑原弘昌・山下智之：ドッキングフード方式によるシールドマシンの地中接合，第3回トンネル工学研究発表会，1993. 11.