

経済性を視点とした泥水式シールド工法の高速度化対策 Steps expedite slurry shield tunneling time in terms of cost effectiveness

大塚正博*・山崎 剛**・伊藤利昭***・狹間 博****

Masahiro OHTSUKA, Takeshi YAMAZAKI, Toshiaki ITOH and Hiroshi HAZAMA

In order to save the time period over which roads are occupied for tunneling, reduce construction time period extended by an increase in tunnel length, and prevent a drop in productivity by reducing work hours, it is necessary to expedite slurry shield tunneling time actively even further. Taking into account the need for reducing construction costs, it is considered also important to take steps to speed up tunneling by not only easily undertaking investment to expand the capacity of tunneling equipment but also evaluating benefits against costs.

This paper reports the results of a study on the steps to speed up slurry shield tunneling with an eye to cost effectiveness for the sake of efficiently expending slurry shield tunneling time.

1. はじめに

シールド工法は、都市域の地下空間建設工法として今や不可欠なものとなっており、都市機能の高度化に対応して、大断面化、異形断面化、自動化、長距離化および高速度化などの複雑、多岐にわたる要求をも満足できるようになってきている。

このうち、高速度化については、「路上工事占用期間の短縮」、「長距離化に伴い長期化するトンネル工事の工期短縮」および「労働時間の短縮に伴う生産性の低下抑制」等を目的として積極的に推進していかざるを得ない事項であると考えられる。

加えて、「公共工事の建設費の縮減に関する行動計画」に代表されるように所定の品質を確保した上で極力建設費を縮減することが必然となってきている。すなわち、所定の高速度を達成するためにただ単に投資をして設備を増強すれば良いというのではなく、費用対効果の評価により高速度化対策を採用することが重要であると考えられる。特に、地下構造物は地上構造物に比べ多大な建設費を必要とし、そのことが民間企業にとってみれば地下利用推進を慎重にさせていることは否めないもので、経済性を視点とした地下空間建設工法の技術開発、工法選択は必要であると考ええる。

本報告は、筆者らが直面するシールド掘進高速度化を経済的に遂行することを目的として、掘削土搬送として高速度化対応に比較的適応性が高いと思われる泥水式シールド工法を対象に、上述した背景に鑑み工法の基本に立ち返って、経済性を視点とした高速度化対策の検討内容について述べるものである。

* 正会員 東京電力㈱ 地中線建設所次長

** 正会員 東京電力㈱ 工務部地中線課課長（管路建設技術担当）

*** 正会員 東電設計㈱ 第二土木本部地中線土木部長

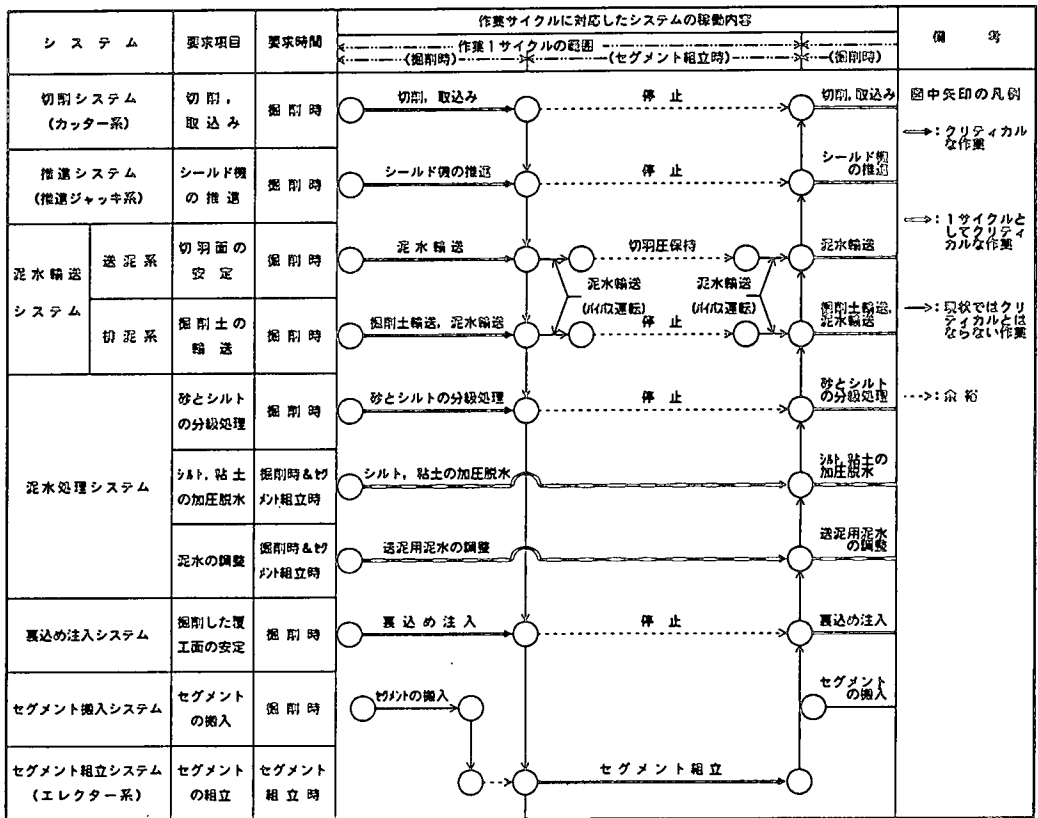
**** 正会員 東電設計㈱ 第二土木本部地中線土木部課長

2. 泥水式シールド工法を構成する各設備の施工時における稼働状況の整理、および高速化した場合に影響を受ける設備の直列・並列関係の分析

まず、泥水式シールド工法の作業単位を基準にしてシステムに分類した。次に、各システムが作業1サイクル、すなわち掘削からセグメント組立に至る稼働状況を分析した。その結果は表-1に示すとおりである。この表より次のことがわかった。

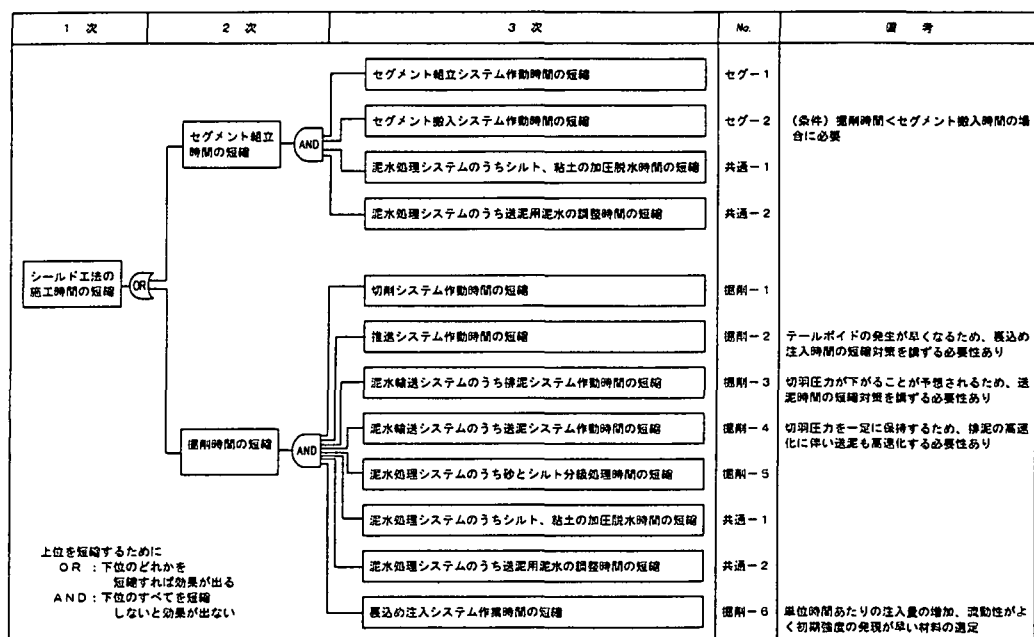
- ①掘削時間においては、「切削」、「推進」、「泥水輸送」、「泥水処理」および「裏込め注入」システムが並行して作動している。
- ②セグメント組立時間においては、「泥水処理のうちシルト・粘土の加圧脱水」、「泥水処理のうち送泥水の調整」および「セグメント組立」システムが並行して作動しており、「掘進時間<セグメントの搬入時間」の場合に限り、セグメント搬入システムの作動時間も組立時間の短縮を阻害する要因になる。
- ③掘削およびセグメント組立の作業時間を短縮するためには、それぞれ①、②の並行して作動しているシステムの時間短縮が必要となる。

表-1 セグメント組立時、掘削時における各システムの作動状況
(直列作業と並行作業の明確化)



そこで、「シールド工法の施工時間の短縮」として「セグメント組立時間の短縮」と「掘削時間の短縮」に着目し、それぞれの短縮を行った場合、換言すれば高速化した場合に影響を受ける設備の直列・並列関係を表-1の稼働状況をもとに分析した。その結果は表-2に示すとおりである。

表－2 シールド工法の施工時間の短縮と各システムの作動時間短縮の関係



3. 各設備を高速化するための具体的対策の系統的抽出、および施工実績に基づく故障頻度から見た高速化目的の設備投資に対するリスク評価

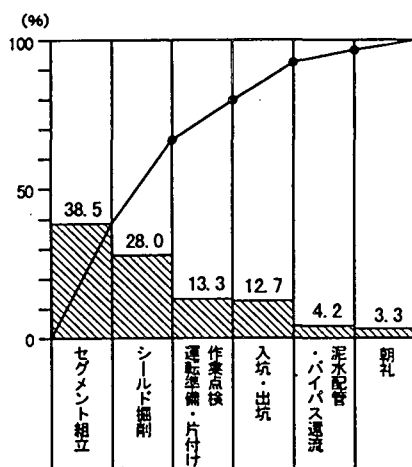
表－2 に示した 3 次段階における作業時間の短縮対策をさらに具体化するために、表－3 に示すようにさらに 5 次、6 次まで展開した。そして、5 次、6 次展開に対して具体的な最終検討対策を策定した。高速化の実現のためには、最終検討対策のそれぞれに対して、具体的な検討が必要であるが、次に示す理由から、表－3 に示す最終検討対策のうちセグメント組立時の作動システムを対象に実施することとした。

- ①セグメント組立時間が掘進時間に占める割合が最も大きいこと。(図－1)
- ②ANDゲートでつながる、並行して高速化しなければならないシステムの数掘削時に比べ少ないことから、効率的に高速化が図れるものと思われること。(表－2)
- ③掘削に係わる故障時間および故障件数は、表－4 に示す掘進実績によれば、セグメント組立に係わるシステムよりも多いことがわかる。さらに、掘進負荷が大きくなる地質条件(表中の洪積粘性土)の場合は、掘進にかかわるシステムの故障が極端に増加する。

このことから、セグメント組立は地質条件にかかわらず安定した作業が行える作業項目といえる。

いいかえれば、表－4 の実績は、シールド機械に

高速化対策を施す場合、地質条件によっては効果が十分に発揮される場合とされない場合があり、高速



図－1 作業別構成時間

表-3 各 シ ス テ ム の 高 速 化 案 の 検 討

No.	3 次	4 次	5 次	6 次	最終検討対象	対策番号
セグ-1	セグメント組立システム動作時間短縮の経路	エレベーターを使用した組立時間短縮の経路	セグメント組立位置のジャッキ動作時間短縮の経路	シールドジャッキの伸縮速度の高速化(ただし、安全確保が必須)	シールドジャッキ動作速度の高速化(ただし、安全確保が必須)	セグ1-1
			エレベーター設置(設置区、配管経路等)時間短縮の経路	エレベーター設置区間の増設(安全確保が必須)	エレベーター稼働時間の短縮	セグ1-2
			組立位置の時間短縮の経路	エレベーターの動作を速くすること	エレベーター稼働時間の短縮	セグ1-3
			ジャッキ動作完了までの待ち時間短縮の経路	エレベーターとシールドジャッキを同時動作可能とする	エレベーター稼働時間の短縮	セグ1-4
			通過、空回りの時間短縮の経路	通過・組立同時施工のシールド工法とする	エレベーター稼働時間の短縮	セグ1-5
			通過・組立の同時化	通過・組立同時施工のシールド工法とする	エレベーター稼働時間の短縮	セグ1-6
			セグメント組立の同時化	複数ベースの同時組立	エレベーター稼働時間の短縮	セグ1-7
			バレット組立の同時化短縮	1箇所あたりの時間短縮の経路	エレベーター稼働時間の短縮	セグ1-8
			バレット数を減らす	バレット数を減らす	エレベーター稼働時間の短縮	セグ1-9
			バレット数を減らす	バレット数を減らす	エレベーター稼働時間の短縮	セグ1-10
			バレット数を減らす	バレット数を減らす	エレベーター稼働時間の短縮	セグ1-11
セグ-2 (最終区)	搬送サイクルの短縮	立降・送降への投入時間短縮の経路	エレベーター(リフト)の使用	エレベーター(リフト)の使用	セグ2-1	
			セグメント搬送速度の高速化(ただし、安全確保が必須)	セグメント搬送速度の高速化(ただし、安全確保が必須)	セグ2-2	
			列車構成の最適化	列車構成の最適化	セグ2-3	
			搬送設備の安定性の向上	搬送設備の安定性の向上	セグ2-4	
			1区あたりの搬送量の増加	1区あたりの搬送量の増加	セグ2-5	
共通-1	送水配管システムのうちシールド、既設の送水配管の経路	単位時間あたりの配管量増加	加圧配管速度の増加	加圧配管速度の増加	共通1-1	
			加圧配管速度の増加	加圧配管速度の増加	共通1-2	
共通-2	送水配管システムのうち送水配管の経路	単位時間あたりの配管量増加	加圧配管速度の増加	加圧配管速度の増加	共通2-1	
			加圧配管速度の増加	加圧配管速度の増加	共通2-2	
個別-1	切削システム動作時間短縮の経路	カットトルク(切削速度)増加	保護トルクの増加	保護トルクの増加	個別1-1	
			ビットの刃先角度を一定に保つ	ビットの刃先角度を一定に保つ	個別1-2	
			切削速度のスレーブ送り込み	切削速度のスレーブ送り込み	個別1-3	
			土砂シールドの厚さを増やす	土砂シールドの厚さを増やす	個別1-4	
			土砂シールドの厚さを増やす	土砂シールドの厚さを増やす	個別1-5	
			土砂シールドの厚さを増やす	土砂シールドの厚さを増やす	個別1-6	
個別-2	送水システム動作時間短縮の経路	ジャッキ伸縮速度の増大	シールドジャッキの伸縮速度の高速化	シールドジャッキ動作速度の高速化	個別2-1	
			シールドジャッキの伸縮速度の高速化	シールドジャッキ動作速度の高速化	個別2-2	
			シールドジャッキの伸縮速度の高速化	シールドジャッキ動作速度の高速化	個別2-3	
			シールドジャッキの伸縮速度の高速化	シールドジャッキ動作速度の高速化	個別2-4	
個別-3	送水配管システムのうち送水配管の経路	単位時間あたりの送水量増加	流量の増加	流量の増加	個別3-1	
			流量の増加	流量の増加	個別3-2	
			流量の増加	流量の増加	個別3-3	
			流量の増加	流量の増加	個別3-4	
			流量の増加	流量の増加	個別3-5	
個別-4	送水配管システムのうち送水配管の経路	送水能力の向上	流量の増加	流量の増加	個別4-1	
			流量の増加	流量の増加	個別4-2	
			流量の増加	流量の増加	個別4-3	
			流量の増加	流量の増加	個別4-4	
			流量の増加	流量の増加	個別4-5	
			流量の増加	流量の増加	個別4-6	
			流量の増加	流量の増加	個別4-7	
個別-5	砂とシルトの分離処理時間短縮の経路	単位時間あたりの処理量増加	砂とシルトの分離処理速度の増加	砂とシルトの分離処理速度の増加	個別5-1	
個別-6	送水配管システムのうち送水配管の経路	単位時間あたりの送水量増加	流量の増加	流量の増加	個別6-1	
			流量の増加	流量の増加	個別6-2	
			流量の増加	流量の増加	個別6-3	
			流量の増加	流量の増加	個別6-4	
			流量の増加	流量の増加	個別6-5	
			流量の増加	流量の増加	個別6-6	
			流量の増加	流量の増加	個別6-7	
			流量の増加	流量の増加	個別6-8	

化を目的とした設備への投資に対するリスクから見て、地質評価に基づく採用適否の判断が極めて重要であることを示唆しているものと考ええる。

4. 実用化されている高速化対策を実施した場合の費用対効果のシミュレーション

セグメント組立時間に占める割合が大きい作業内容には図-2に示すとおりである。この結果をもとに考えた高速化対策は、表-5に示すとおりである。表中の「高速化により顕在化すると考えられる問題点」を解決する条件で、実用化段階にある対策について費用対効果のシミュレーションを実施した。

シミュレーション結果の一例として、シールドジャッキ作動油の輸送速度の増加(セグ1-1)によるジャッキ伸縮時間の短縮とコスト増分の関係を図-3に示す。この傾向を示す主要因として次のものがある。

- ①シールドジャッキ引戻し作業と並列する作業は、セグメント供給・据付である。このとき、ジャッキ引き速度の高速化による1リングあたりの短縮時間が300秒付近まではジャッキ引戻し作業がクリティカルパスになるとともに、ジャッキ引き速度を向上させる対策費用が比較的少なく済むことから、短縮時間の増加に対してコスト増分率は低く、引き速度の高速化による効果は現れている。
- ②それ以上の引き速度の高速化は主にセグメント供給・据付作業の影響を受けるとともに、ジャッキ引き速度を向上させる対策費用が指数関数的に増加することから、短縮時間の増加に比べてコスト増分率は急激に増加し、その効果は低くなる。

表-4 洪積砂質土と洪積粘性土(土丹)における掘進実績と故障時間(件数)の比較

比較項目		洪積砂質土 (A現場)		洪積粘性土 (B現場)		
切羽面の土質性状	粘着力 c [kgf/cm ²]	$c_d \approx 0.15$		$c_v \approx 18$		
	内部摩擦角 ϕ [°]	$\phi_d \approx 35$		$\phi_v \approx 17$		
	変形係数 E [kgf/cm ²]	$E_{s0} \approx 200$		$E_{s0} \approx 5600$		
	シールド工法	泥水		泥水		
	掘削径 [m]	4.5		5.0		
工事規模	掘削延長	TOTAL 4000		3500		
	[m]	シールド 1台当り	A-1 工区 2300	A-2 工区 1700	B-1 工区 2400	B-2 工区 1100
	土被り [m]		9~19	9~11	2~40	37~50
	地下水圧 [kgf/cm ²]		0.4~1.4	0.3~0.5	0.1~3.8	3.5~4.8
	シールド機仕様と実績	駆動方式	電動		油圧	
急曲線	[tf・m]	装備	常用 132	常用 111	常用 135	常用 190
			最大 198	最大 133	最大 203	最大 285
		実績平均値	50	34	63	84
	回転数 [r.p.m.]	最大 1.3	最大 1.05	最大 1.1	最大 1.0	
	掘進速度 [mm/min]	全数作動時 73	51	58	57	
	総推力 [tf]	装備 1920	1800	2400	2700	
		実績平均値 850	600	1260	1200	
	急曲線		50R 1箇所	無し	20R 4箇所	20R 4箇所
	故障時間 (件数)					

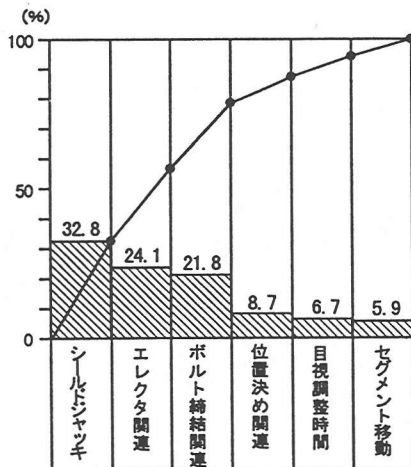


図-2 セグメント組立時間に占める割合が大きい作業内容

表-5 高速化対策

システム：セグメント組立システム									
対策 番号	対 象	実用化 の程度	短縮時間 の 配 分 シミュレーション 実施ケース	高速化) コ ス ト 増 分 率 ×10 ⁻⁴ 96/sec	対策 検討 優先 順位	高速化により顕在化すると考えられる問題点			シミュレーション としての採否
						影響を与 える品質	問 題 点	解 決 方 針	
セグ 1-1	セグメント作動油 の循環速度の増加	実用化	○	約5	3	シグナル、 油圧回路の 耐圧性、 油密性 作業安全	油流量の増大に伴い、停止時のセグ圧も上昇 することが予想される。これに対する油圧機 器類（シグナル、油圧制御弁、ホース等）の耐圧性 および油密性に対する信頼性の向上が必要 通常施工より、シグナルの引通速度が早くなるの で作業員が従来の感覚でいると「挟まれ」の 心配がある	セグ圧の予測と機器の信頼度について 機械、油圧機器メーカーに協力を仰ぐ 作業安全については、危険性の実態を 現場で確認するとともに、作業手順、 機械構造（フレキシブルの観点で）面から も検討を行う	採用
セグ 1-2	作用油圧の高圧化 による使用油量の 低減	構想 段階	—	未定	—	シグナル、 油圧回路の 耐圧性、 油密性 作業安全	高圧による油圧機器類（シグナル、油圧制御弁 、ホース等）の耐圧性、油密性の信頼性の向上 が必要 同上欄	「セグー1」対策と併せてメーカー に協力を仰ぐ	構想段階のため未 検討
セグ 1-3	セグメント分割部の 低減	実用化	○ (6分割 15分割)	約75 、	1	セグメントの 品質 作業安全	セグメント間の接合部がゆるむこと、ホースがゆる むに伴う構造上の問題を回避する セグメントに当たりの長さが長くなるので、 ハンダリング時に「挟まれ」等に対する注意が 必要	継手耐力試験、他シミュレーション等により 検討を行う 危険性の実態を現場で確認し問題点が あれば改善策を検討する	採用
セグ 1-4	セグメント作動油の 循環速度の増加	実用化	○	約36	5	シグナル、 油圧回路の 耐圧性、 油密性 作業安全	油流量の増大に伴い、停止時のセグ圧も上昇 することが予想される。これに対する油圧機 器類（シグナル、油圧制御弁、ホース等）の耐圧性 および油密性に対する信頼性の向上が必要 通常施工より、セグメントの戻り速度が早くなる ので作業員が従来の感覚でいると「挟まれ」 、「衝突」、「墜落」の心配がある	セグ圧の予測と機器の信頼度について 機械、油圧機器メーカーに協定を行う 作業安全については、危険性の実態を 現場で確認するとともに、作業手順、 機械構造（フレキシブルの観点で）面から も検討を行う	採用
セグ 1-5	セグメント等設置位置 機能性を高める	実用化	—	未定	—	無	無	「セグー1」対策と併せてメーカー に協力を仰ぐ	位置合わせをAI-1 に行うことによる高 速化を目的としてい るが、計測実績が無い ため今回は未検討
セグ 1-6	推進系とセグメント のバックアップの分離	実用化	○	約2	2	作業安全	セグメント作業とセグメント戻り作業が同時に行われる ため、「挟まれ」等に対する注意が必要	作業安全については、危険性の実態を 現場で確認するとともに、作業手順、 機械構造（フレキシブルの観点で）面から も検討を行う	採用
セグ 1-7	a 大型セグメント b セグメントの空中受	実用化	○	a 約26 b 未定	4	作業安全	従来と施工形態が異なる部分も生じるので、 作業中および故障修理中等の作業安全につ いて配慮が必要	作業安全については、危険性の実態を 現場で確認するとともに、作業手順、 機械構造（フレキシブルの観点で）面から も検討を行う	aを採用
セグ 1-8	機関型（シグナル）の 準備	準備段階	—	未定	—	作業安全	従来と施工形態が異なるので、作業中および 故障修理中等の作業安全について配慮が必要	作業安全については、危険性の実態を 現場で確認するとともに、作業手順、 機械構造（フレキシブルの観点で）面から も検討を行う	今後施工実績および 効果を調査する予定 今回は未検討
セグ 1-9	セグメントの強化	準備段階	—	未定	—	作業安全	セグメント組立時に、同時に2台のセグメントが動くた め、作業員とセグメントとの「衝突」が心配され る	作業安全については、危険性の実態を 現場で確認するとともに、作業手順、 機械構造（フレキシブルの観点で）面から も検討を行う	シミュレーションが無い ため今回は未検討
セグ 1-10	締結がAI-1で 低減な継手方式の 検討	実用化	—	未定	—	セグメントの 品質 セグメントの 製造	セグメントの継手形状が特殊な形となるので、継 手耐力、変形特性、止水性について品質を確 認しておく必要がある 特殊な継手を組込む製造となることから、量 産までに至るまでに100%に検討し製造品質 を確認しておく必要がある	継手曲げ試験、せん断試験、溶接曲げ 試験等の力学試験情報から継手の特性 を把握する 生産実績のある、または今後生産予定 のある建設会社およびセグメントメーカーに製 造に関する調査の協力を仰ぐ	実績はあるもののデ ータ収集中であるた め今回は未検討
セグ 1-11	セグメントの大きく する形式の検討	1.5mま で国内 で実用 化	—	未定	—	セグメントの 品質 セグメントの 製造	セグメントの機械加工長が長くなることに伴い、特に 曲線部でセグメントの品質低下を招く要因とな る 1.5m超の製造上での留意事項を整理しておく 必要がある	製造中のセグメントの管理方法を高水 準化するとともに製造制御に生かす 製造に関する留意事項の調査について セグメントメーカーに協力を仰ぐ	調査では、1.0～1.2 mに短縮化すること による効果を確 認しているが、さらなる 短縮化に対しては実 績が無いため今回は 未検討

※）高速化設備とは、同じ時間を短縮させるために必要な設備費の増分をさす。

※※）今回はシミュレーションの対象とはしていないが、セグメント費用を低減しつつも高速化が図れる可能性が高い項目

5. 経済性を視点とした場合の高速化対策設計上のまとめ

経済性を視点とした場合の高速化対策設計上のポイントは次に示すとおりである。

5. 1 第一段階として着手すべきもの

地質条件によらず比較的安定した高速化を確保できるセグメント組立作業のうちセグメント単体に着目し、高速化しつつもコストダウンが図れる方策を最優先することが重要である。

具体的には次に示すものが考えられる。

- ①ハンドリングに留意し、セグメント分割数を低減することにより、セグメントおよびシール材等の材料費を低減しつつ組立速度を向上させる。
- ②ハンドリングに留意し、セグメント幅を拡張することにより、セグメントおよびシール材等の材料費を低減しつつ組立速度を向上させる。
- ③継手構造を簡素化することにより、継手金物費用の低減およびボルトボックスの削減による閉塞費用の低減を行いつつ、組立速度（特に継手の締結速度）を向上させる。

5. 2 第二段階として着手すべきもの

地質条件によらず比較的安定した高速化を確保できるセグメント組立作業のうち、セグメント組立装置に着目しつつも高速化に必要な設備投資を極力抑制できる方策を優先することが重要である。具体的にはサイクルタイムのシミュレーションより得られた高速化設備費（同一時間を短縮させるために必要な設備費の増分）が少ない、次に示す順から方策を施すことが得策であると考えられる。

- ①推進系とエレクター系のパワーユニットを分離し、シールドジャッキ引戻し作業とエレクター旋回作業を同時に行うことにより高速化を図る。
- ②シールドジャッキ作動油の輸送速度を増加させ、シールドジャッキ伸縮時間を短縮することにより高速化を図る。
- ③L型エレクターを装備し、エレクターの空旋回・退避旋回時間を短縮することにより高速化を図る。
- ④エレクター作動油の輸送速度を増加させ、エレクター動作時間を短縮することにより高速化を図る。

5. 3 第三段階としての高速化方策

第一および第二段階の方策においても目標とする高速化が得られない場合には、シールド機の掘進速度を向上させるべきであると考えられる。この場合には、次に示す注意を要する。

- ①シールド機の高速化には、図-4に示すように、第二段階として施す対策費に比べ極めて多大な設備費の増加が必要となる。
- ②さらに、砂礫層、土丹層等のシールド機に負荷が大きくかかる地質においては、表-4に示すような機械系の故障が急激に増大する可能性が考えられるため、投資の割にはその効果が低下してしまう危険性がある。したがって、地質を慎重に評価して適用することが重要である。

その他に、シールド掘進とセグメント組立の同時施工が考えられるが、掘進時のシールド機の姿勢制御で変化するテールクリアランスを適正量に確保しつつも同時にセグメントを組立なければならない点や、推進反力により微小ではあるが動くセグメントの継手位置を合せながら掘進と同時に組立なければならない点に難しさがあると想定される。この方策の実用にあたっては、これからの実績を踏まえて慎重に評価しなければ

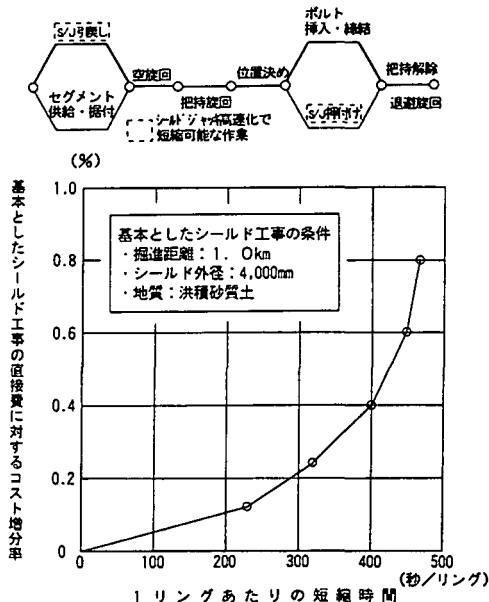


図-3 シールドジャッキ速度の高速化(セグ1-1)による短縮時間とコスト増分率の関係

ばならないと考える。

最後に、今回高速化シミュレーションを行った方策について経済性を視点とした最適組合せの検討結果を図-5に示す。これによると、セグメント組立時間を短縮するための方策により1リング当たり1,000秒(約17分)付近まで設備費増分を抑制しつつ高速化が効率よく行えると考えられるが、それ以上の時間短縮を要求しようとすると急激に対策設備費用が増加することが予測できた。

6. おわりに

今回の検討およびシミュレーションは極力実績データをもとに客観的に行うことを基本としたが、

今後はさらに地質や施工環境面から多くのデータを集約・整理し、多面的な検討を行い、着実に実用化に向けた高速化対策選定方針を構築しなければならないと考えている。

また、土圧式シールド工法的高速化については、今回の第一および第二段階の方策が基本的に応用可能であると考えられるが、第三段階のシールド機的高速化については土圧バランスの本質を逸さないように極めて慎重な対応が必要ではないかと考える。

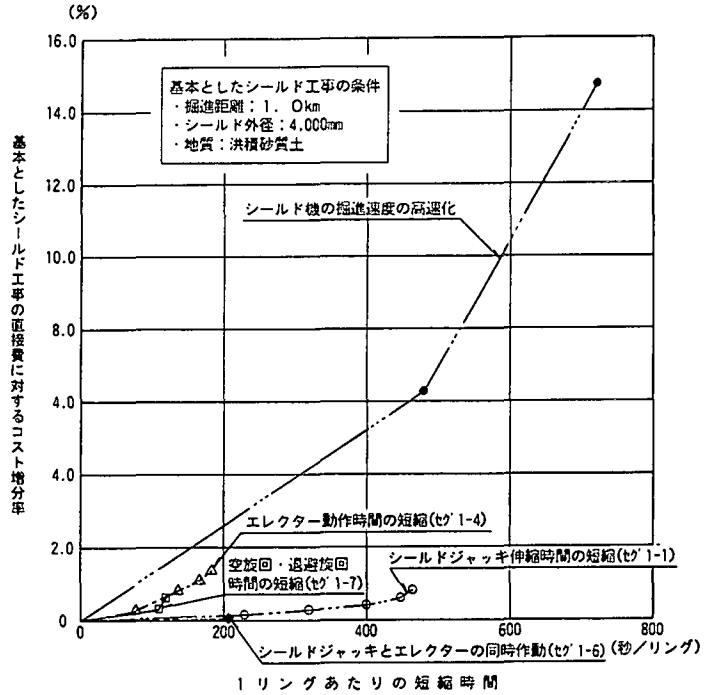


図-4 高速化対策とコスト増分率の関係

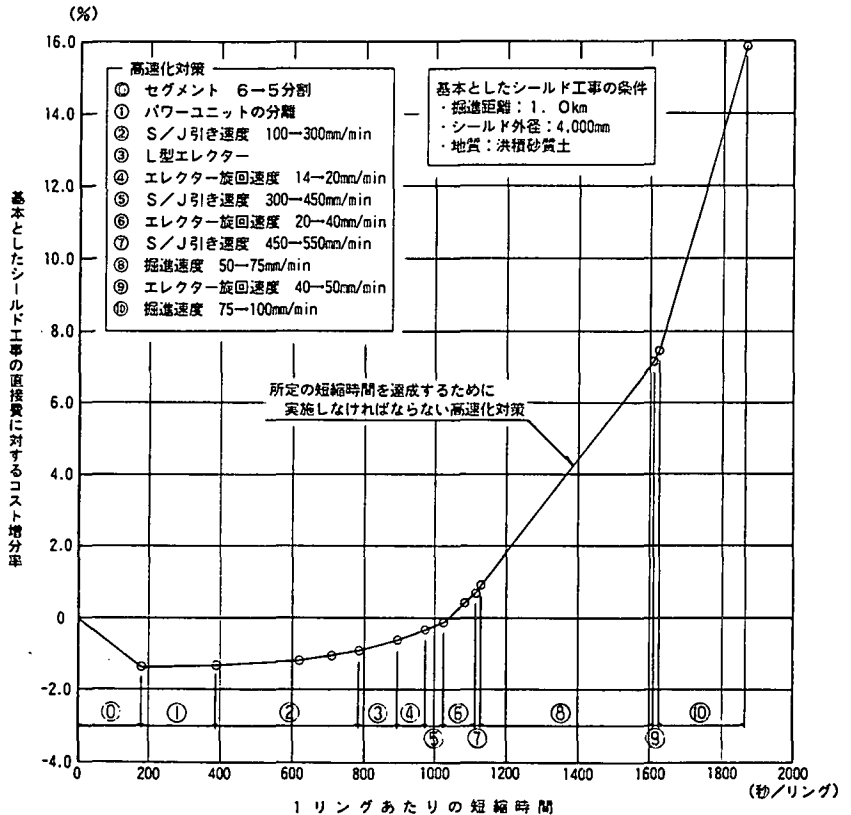


図-5 高速化シミュレーションを行った対策の最適組合せ