

海底トンネル工事における水中ケーソンの使用

“Use of Submerged Caissons in the Construction of Undersea Tunnels”

Marine System Engineering Division Taurio Corporation

J.V.Harrington*

W.L.Bohannan*

1. 概要

より多くの切羽での作業を目指して、地表から地下の作業箇所へ立坑を下すことは、鉱山やトンネル工事では、普通になっている。同様にして、海底トンネル工事の工期も、そのトンネル・ルート沿いに、中間進入点を設けることで、短縮できる。これを実施し、所要の安全を維持するのに、「水中ケーソン (submerged caissons)」の使用があり、必要な完全防水を与え、潜在的な災害に対処できる能力がある。

この論文は、トンネルを数区間に分割して施工することを調べており、その各分割部分を別々に、平行して掘削し、最後に、各端部を接合して、連続した通路にするものである。トンネル・ルートへの海中進入口には、水中ケーソンがあてられ、そのケーソンは、作業空間を完全防水するものである。このケーソンに関係する作業活動、特に工程と補給兵たん活動 (logistic activities) への影響を、詳細に論じている。

ここでの目的は、トンネル工事に含まれる主な作業活動の1つひとつを調べ、それらの方法がケーソン能力に最もよく適合していることを確認することである。ケーソンの設計に係わる因子は、次の通りである：適切な工期；掘削とズリ出しの最適な方法；掘削面の支保工と覆工の最適方法；

中間境界点を通る人員、機械、固形材料の移動、および通信所のような場所での多くのサービス性やその他の所での、快適性と居住性を与える上での最適な方法。

ケーソン工事の検討がなされている。完全防水を維持するには、安全設備が必要なので、数通りのやり方を論じる。ケーソンの予備設計スケッチ図を出し、設置方法を示す。

本論は、イギリス海峡トンネル工事でのケーソン使用を述べているが、その方法は全く一般的で、その他の海底トンネル工事にも適用できる。

2. トンネルとケーソンの接合部

2.1 序論

英仏間の海岸連絡路の設置は、過去250年近い間、討議されている。交互に English Channel と La Manche と呼んでいるイギリス海峡の下のトンネル建設を始めようとする活動は、過去、何度も行われた。なされた活動は、この事業の完成までは支持されず、毎回、その理想の遂行を将来に残した。

現在、2国間のこのような連絡路の建設について、新しい考えが現れている。大問題は資金と技術の問題である。この連絡路建設に選ぶ工法と、工費の形での連絡路の性格評価は、これらの因子の必要な反映になる。

*Taurio Corporation, 海洋システム、エンジニアリング部
36 Laurelwood road, Groton, CT06340

資本条件の現在の主流的な解析では、建設期間の短縮が利息を減らし、工事期間中の資本金を減らすことになり、また、投下資金のより早い回収になることを示している。これは、工事に使用すべき最も望ましい技術は、最大限の努力をして、最短の工期で、その仕事を終らせうる技術であることを意味している。

海中作業を支援するには、多くのシステムがある。大きな方の最も重要なシステムを詳しく論じる。ズリ処理、電力、給水のような主要システムが、工事を支える補給兵たんシステムである。救命、通信、その他の似たような活動に対する別な多くのシステムが当てられている。それらの確認はするが、詳しくは論じない。

2.2 概観

イギリス海峡のトンネルの施工は、そのトンネル・ルート沿いに、数個の中間進入点を設けることで、したがって、掘削の行える多数の切羽を用意することで、工期の短縮と工費の節減ができる。

イギリス海峡の水路部は20海里 ($1.852 \times 20 = 37$ km) で、ルートのこの部分への進入には、上方にある水と、その下の土の部分の両方を通り抜けることが必要である。

当初のやり方の1つは、1個ないし複数の圍繞締切堤をつくって、その下の海底に、立坑を掘り、作業箇所まで貫入させ、水のない進入路にすることを考えた。海面上に出る締切堤は、船舶航行上の障害と思われたので、航海上の関心から拒否された。完全に水没する水密ケーソンの設置は、そのケーソンの設置頂面と海面の間に、水深20mの航路をとるなら、反対されなかった。

どのケーソンも、作業活動の進行によく釣合った速度で、全ての補給支援の手段になると期待されており、こうした要求を、ケーソンの設計に反映させねばならない。

考慮すべき主要な因子は次の通りである：

1. 地下作業箇所から海面上への、人員、機械、材料用出入口の設置。
2. 掘削した土の、作業箇所から適当な投棄地への連続移送。
3. 機械、宿泊所、安全設備および所要作業活動を支援するのに必要で便利な設備などに対する電力の連続供給施設。

4. 露出トンネル面の支持と覆工に必要な材料のほぼ連続に近い供給。

5. 作業活動の支援に必要なと思われる空気とか携行飲料水、排泄物のような流体の供給と排出。

2.3 基礎データ

この試行に組み入れた計算に使用した基礎データは、参考文献(3)から採った。イギリスとフランスの両側で、立坑やトンネルで行ったテストは、この地層が、陶土質石灰岩 (80%が CaCO_3) から石灰質粘土 (20%が CaCO_3) へ周期的に変化する厚さ0.5~2 mの粗目の帯状地層であることを示している。この帯状地層を横切ると同時に、物理的性質が変化した。周期的変動のため、この地層全体の性質を査定するには、大規模なテストの実施が、明らかに大切だった。フランス側のチョーク質泥灰土は、イギリス側のものよりも緻密で、強いようだった。6~21%範囲の含水比は、平均12%と推定された。また、1.6~2.3t/m³範囲の乾燥密度の平均値は2 t/m³、さらに1.5~14MN/m² (15.3~143kgf/cm²)の圧縮強度は、平均6.5MN/m² (66.3kgf/cm²)で、0.2~0.3のポアソン比を持つと推定された。全計算を通じて、これらの平均値を使用した。参考文献(3)に示されるその他のデータは、このトンネルの海底部分が平均海面下110mまでの所にあつて、海底床下40~60mの間になることを示している。設計は、内径7.1mの2本の走行用トンネルと、その傍らの、中心間隔15mの所にある直径4.5mのサービス用トンネルからなっていた。この複合体は250m間隔の横断通路で、連結されていた。150km以上のトンネルが、つくられることになる。

2.4 掘削スケジュール

1959年頃作られたトンネル施工工程 (参考文献(2))が、それ以後の、このプログラムの施工と財政の両面を査定する基礎として使われている。その工程は図-1に出ている。このトンネルの水底区間の掘進速度は、1作業切羽当り、1日68フィート (20.7m) と示されていた。

その後の数年間に、採掘とズリ出しの機械に、大きな改良があった。工期を減らすための手段としての、海峡中間の進入路という新施設と組み合

わせて、現在の技術に基づく、このトンネルの水底区間に対する新しい工程が調べられている。はじめの頃の工程（図-1）を調べてみると、第1年度は、本質的には準備作業に当てられている、6カ月目に掘削が始まり、54カ月目まで続いている。トンネル内の鉄道装置と地表工事は共に、60カ月目にまで及んでいるので、工事が5年目の年末を越えて続くのかどうかは、明らかでない。このスケジュールは、掘削の全期間を示すものである。それはまた、本トンネルの水底区間の作業が、14カ月目に始まることも示している。水底部分に対するこの準備時間は、今でもなお、合理的なものである。

軟かい地山での現在の採掘機の掘進速度は、1日数百フィートであり、数種類の掘削機の設計の間で変化している。最初のスケジュールが発表されて以来、ズリの処理装置と運搬もまた、大きく改良されている。より早い掘削と処理装置の組み合わせ、およびケーソンを使っての、より多数の作業切羽を準備する能力が、現在、入手できる機械を使って、予定の完成工期に、最大限の短縮をもたらすであろう。

掘削と作業箇所からの掘削土の除去速度は、その作業に付随する機械の仕様についての詳細な情報がないため、正確にはわからないので、新しい工程では、パラメータによる研究が行われた。それは、1ケーソンと2ケーソンが掘削時間に及ぼす影響、ならびに、工程に及ぼす掘進速度とズリ出し速度の影響を調べている。それはまた、このプログラムの工費に及ぼす掘削作戦の影響も調べている。

次のような3つの掘削方法がある：

1. 海峡の各岸に立坑を下ろし、その両立坑から通路（図-2のAとBからXまで）を掘進して、海峡の中央付近で互いに出会うことにする。
2. 各岸に1本づつの立坑と、海峡の中央に水のはいらぬ進入口を下げ、次いで、AとCからX1までと、BとCからX2まで掘進し、図-2に示すように、X1およびX2で出会うようにする。
3. 各岸に1本づつの立坑と、トンネル・ルート沿いの所々に、水のはいらぬ2つの進入口を下げ、AとCからX1までと、CとDか

作 業 記 述		第 1 年 度	第 2 年 度	第 3 年 度	第 4 年 度	第 5 年 度
準 備		[Bar spanning from start of Year 1 to start of Year 2]				
掘	排水およびサービス用の トンネル フランス側		[Bar spanning from start of Year 2 to start of Year 4]			
	イギリス側	[Bar spanning from start of Year 1 to start of Year 5]				
削	主トンネルの水底区間 フランス側(15.6km)			[Bar spanning from start of Year 3 to start of Year 5]		
	イギリス側(20.75km)		[Bar spanning from start of Year 2 to start of Year 5]			
	主トンネルの陸上区間 フランス側(5.3と4.4km)		[Bar spanning from start of Year 2 to start of Year 3]			
	イギリス側(11.25km)		[Bar spanning from start of Year 2 to start of Year 4]			
覆工、その他の土木工事			[Bar spanning from start of Year 2 to start of Year 5]			
トンネル内の鉄道装置					[Bar spanning from start of Year 5 to end of Year 5]	
地 表 工 事				[Bar spanning from start of Year 3 to end of Year 5]		

図-1 工程表

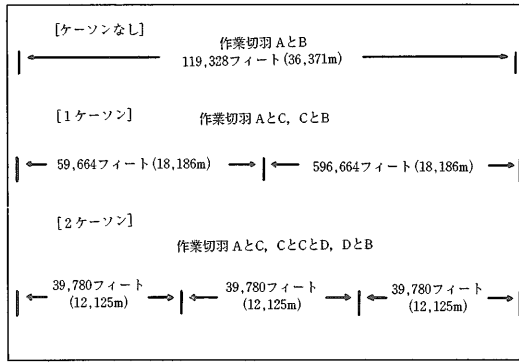


図-2

らX 2まで、そしてDとBからX 3まで掘進して、図-2に示すように、各通路が、X 1、X 2、X 3でつながるようにする。

これらの各掘削方法には、表-1に示すような全体工期を考えている。この表には、兩岸の間に通路を通すのに必要な掘削日数が、種々の日進掘削速度を使って示されている。

海峡中間での進入に使うケーソンを1つにするか、2つにするかの判断には、図-3に示すドーバー海峡の海図と、図-4に示すこのトンネルの縦断図を調べることが必要である。この海峡のフランス側とイギリス側には共に、沿岸航行船舶用の沿岸航路帯が設けられている。海峡の中央には、この海峡を通る船舶用の、2本の沖合航路レーンが印るされている。この2本の航路レーンの間には、分離帯が設けられていて、航路標識がある。トンネルのルート線に沿って、イギリス側の沿岸航路帯が、海側に6.0海里(11km)ひろがっている;南西行きの航路ゾーンは、幅4海里(7.4km);海峡中央付近には、1海里(1.85km)の分離ゾーンがあって、北東行きの船舶から南西行きの船舶を分離している。北東行きの航路レーンは、幅5海里(9.3km)で、それに続いて、フランス側の沿岸航路ゾーン5海里がある。

ケーソン1個を使用する場合は、そのケーソンは、2本の航路レーン間の中央分離帯におかれ、このトンネルの水底部分の中央点と一致する。その代わりに、2個のケーソンを使うとすれば、それらのケーソンは、この海峡の航路レーン境界の標識線上におかれることになる。これらのケーソン位置はまた、航行上の障害になってはならない。選定された位置でのこれらのケーソンは、その上方の足場(プラットフォーム)で支持され、その

表-1

掘進速度 (ft/日/1切羽)	ケーソンなし (日数)	1ケーソン (日数)	2ケーソン (日数)
50(15.2 m)	1,194	597	400
100(30.5 m)	597	300	200
150(45.7 m)	399	200	133
200(61.0 m)	300	150	100
250(76.2 m)	240	120	80
300(91.4 m)	198	100	67
350(106.7 m)	170	86	57
400(121.9 m)	149	74	50

足場もまた、補給兵たん上の貯蔵所になる。

ケーソン位置の判定を下すためには、縦断線形を調べねばならない。この縦断図は、それぞれW 1、W 2と印るされた2つの低点と、Mと印るされた海峡中央付近の高点を示し、トンネルの両端では昇って、地表に出ている。低点では、トンネルの排水ができる。ケーソン底までのズリ移動は、樋を使って、最も効果的に行えるので、ケーソンの位置は、トンネルの最低点にすべきであり、それぞれW 1とW 2になる。しかしながら、これらの地点の現在位置は、海面作業をするには、最適の位置である航行ゾーンの境界とは一致していない。W 1、W 2を航路ゾーン境界に移し、M1をそれらの中間点に動かすことによって、このトンネルの水底部分で掘ったズリの大半を、ケーソンの基底へ動かし、そこから、このズリを投棄場所へ、ポンプで送ることができよう。掘削したズリは、水とチョーク質泥灰土を混ぜたスラリー(泥水)を流す樋式水路の中を、重力で動くことになる。

排水目的に対しては、海峡中央点Mは高い地点なので、この地点だけの単一ケーソンには、そこまでの掘削土の重力配送という利点はない。故に、航路ゾーンの境界に2つのケーソンを使い、W 1とW 2を、それらのケーソンの基底に移すのが、最適の選択である。切羽からケーソンへのズリ輸送が、掘進速度の支配因子になる場合には、2ケーソン型式での樋式水路の使用が、掘削時間を最も短くすることになる。

ケーソンを設置することになるこの地域は、春の大潮のとき、約22フィート(6.7m)の高潮位と3ノット(5.6km/h)位の流速を有している。ケーソン位置の海底深度は、30mを越えるであろう。

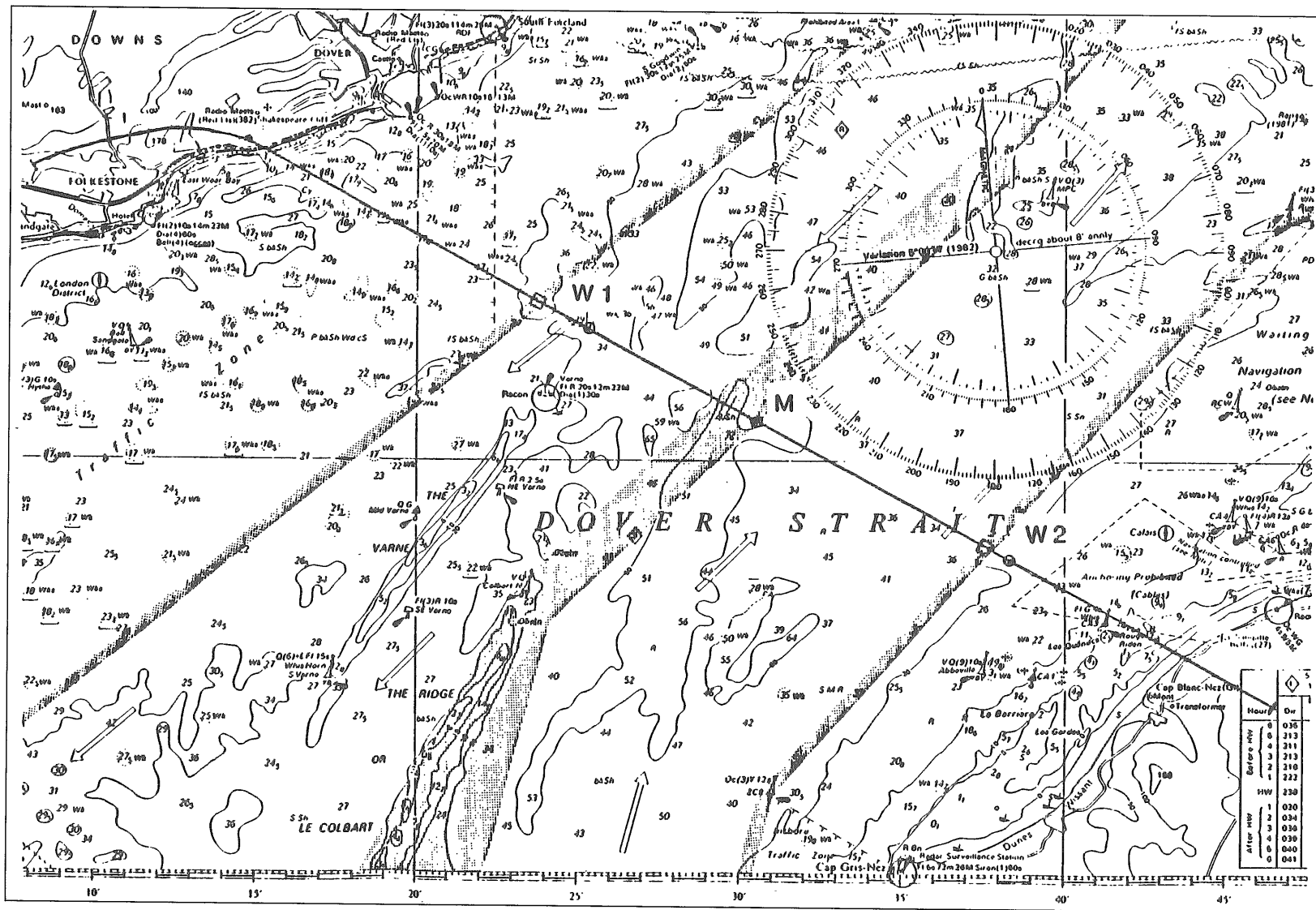


図-3 ドーバー海峡海図

を推奨する。というのは、これらの因子は、建設費に大きく影響するからである。

2.5 掘削

トンネルを掘削することには、適切に同時進行する一連の作業活動を含んでおり、その中には、作業切羽で地山を削る作業、削った岩を作業切羽の直接部分から動かして、掘削機が作業を続けられるようにする除去作業、削った岩を砕き、ふるい分けて、水と混ぜ、スラリー（泥水）をつくり、そこからポンプで送れるように処理する作業、そして露出したトンネル岩面に、少なくとも一時的な支保工をして、その面が通路に落ちないようにする設備などがある。

参考文献(1)からとった図-5は、孔径12フィート(3.7m)と20フィート(6m)のトンネルについて、1日20時間作業で、種々の硬さの岩内に、孔を掘りうる速度(フィート/日の進行率)を示している。図-6は平均ズリ出し速度(t/日)を示すもので、上述のものと同じ寸法のトンネルについて、種々の硬さの岩から取り出せる速度を示している。

7mのトンネルでの進行速度は100フィート(30m)/日で、2,650米t/日(2,400t/日)のチョーク層の除去になる。4mトンネルでの進行速度では100フィート(30m)/日で、860米t/日(770t/日)の産出となる。7mトンネルのズリ量は、ほぼ11,000米t/日(10,000t/日)、4mトンネルでは7,000米t/日(6,300t/日)となる。このデータから7mトンネルでは400フィート/日(120m/日)、4mトンネルでは800フィート/日(240m/日)の進行速度を維持できると推定される。この場所ではまたロックボルトや支保工の設置作業のような、他の作業活動も行わねばならないし、さらに、できれば、掘削の後、間もなく、覆工体を仕上げる。

トンネルの掘進には、数種の方法がある。その1つはトンネル径に等しい頭部(head)直径を有する掘進機か、または、多数のカッターないしドリルを有して、しばしばジャンボ(jumbo)と呼ばれている装置のいずれかを使う全断面法である。部分切羽法も使われ、その掘削はクラウンで始まり、数段のベンチをへて、インバート部まで下向きに進めている。掘削作戦のうちのこの部分

は、機械装置の選択と寸法に大きく影響し、またケーソンの寸法にも影響する。というのは、その単体部分は、ケーソン通路を通して下さねばならないからである。直径20フィート(6m)を越える掘進機は、部分切羽の掘進に選ぶ場合の機械よりも、はるかに大きな通路を必要とする。下組み法を使って、より大きな単体に、容易に組立てられるようにすることは、関連する輸送作業活動にとって重要である。

掘削した岩を動かす作業には、クラッシャーとふるい分け装置を使って、その岩を適当な大きさにすることを含んでいる。コンベアが掘削土を仮置場へ移す。そこで、このズリの最終投棄のためのスラリー(泥水)がつくられる。

イギリス海峡トンネルの場合、ズリをスラリーにするための大量の水が入手できる。スラリーを最も多く輸送できるのは、パイプラインであるが、樋式開水路でも送れる。海峡下のトンネル部分は、水平か、または水平に近いと予想されているサービス用トンネルの底に、溝として切り込まれる樋式開水路は、全部で3本のトンネル・チューブからのスラリーを、ケーソンの基底まで運べるようにする。この樋式水路の寸法を決める計算によれば、スラリーをつくるのと同じ速さで、そのスラリーを、この開水路が処理できることを示している。

以上の技術調査に基づいて、1日数百フィートの速さでサービス用トンネルを掘り、その両側に、2本の本トンネルを、少なくとも、1日200フィート(61m)の速さで掘ることは、可能と思われる。進行率を、表-1に示した情報と比較することで、新しいスケジュールが、容易に開発できよう。

ポンプによるスラリーの輸送速度、トンネル通路から掘削土を排除するのに、ケーソン基底で必要とする排出ポンプの台数、および、掘削土のポンプ輸送に必要な電力を求めるために、数案の進行率を使って計算した。樋式水路の容量、パイプの寸法、ケーソン頂面から岸までスラリーを運ぶのに必要なポンプ動力などを示す計算も出されている。スラリー密度や掘削速度、ポンプ輸送速度などを含む多数のパラメータを調べて、所要能力の全体的な検討をした。

入手されたこれらの計算から、掘削機械やクラッシャー、運搬装置、コンベア、スラリーの配

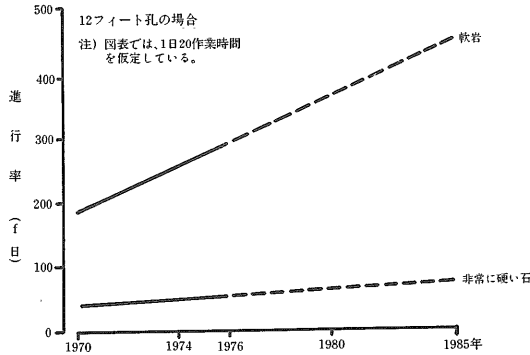
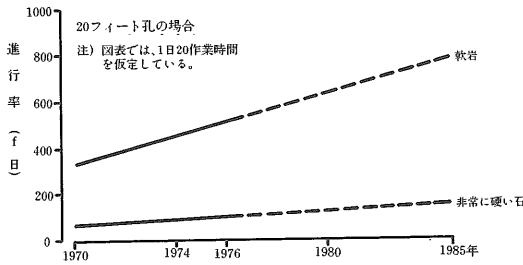


図-5 トンネルの計画日進速度

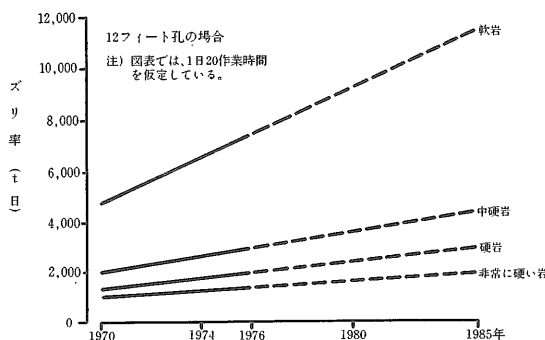
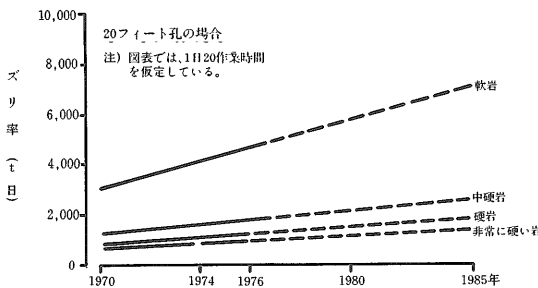


図-6 トンネルのズリ発生量

合、スラリー用ポンプなどの詳細な検討に、それらを関連づけることができよう。こうした装置の売り手は多数いるから、買い手は、このプログラ

ムの中の種々の作業活動に適切に同調する一連の適合機器を入手するように努力せねばならない。これが工学的な全体計画の中での1つの重要な要素である。

第2の要素は、粒子寸法に関係している。掘削機から出る粒子の中には、寸法の大きな粒度のものがありうる。高压でポンプ輸送するためのスラリーをつくる際には、またとくに、トンネルの底からケーソンの頂上までのような垂直方向とか、ケーソンの頂上から岸までのような所では、圧送ポンプが最も多く使われると思われる。全粒子が、そのポンプ通路をきれいに通過しなくてはならない。さらに垂直管の中では、粒子が流送中に沈降する傾向がある。垂直管中の合理的な速度は12フィート(3.6m)/秒であろう。そして粒子は全て、この流れで運ばれるのに十分なだけ小さくなくてはならない。従って、掘削機やクラッシャーからの粒子や、樋式水路内の粒子の寸法とその分布を知っておかねばならないし、さらに、適切粒度のものだけが、ポンプに入ることを確実にするための監視をせねばならない。樋式開水路は、大きな貯水池であるから、輸送プロセスの一部として、攪拌と、補助的なすりつぶしを考慮するのが合理的である。

スラリーの比重は、ポンプ動力と容量に大きく影響する。海水の比重は1.02、ズリの比重は1.6~2.3で変化するが、計算に使った平均値は2.05である。比重1.1のスラリーは、ズリ容積1に対して水容積11.8を必要とし、比重1.3のスラリーは、ズリ容積1に対して水容積2.65を、比重1.5のスラリーは、ズリ容積1につき水容積1.14を必要としている。トンネルから取り出されるズリの体積は一定しているから、機械で適切に処理できる、最も高密度のスラリーを使うのが、望ましいことになる。この因子は、単に運転費だけでなく、その他の因子と同様に、ポンプの寸法と台数、方式とケーソンの寸法、投資する機械装置に大きな関係を持っている。この研究の一部として行った計算には、含まれる工学的因子の概要がはっきりと出ている。ロックボルト工とショットクリート設備のことも、この問題の検討の中で、評価すべきである。

以上に概説した因子のさらに突っ込んだ検討、つまり、この報告の第2段階の、精練された反覆

は、機械装置の売り手に頼んで、彼らの種々の機械の能力の概要を説明して貰う時になるであろう。ここでは、売り手が、達成できると考える機械の性能を概説し、買い手が、適当で同調できると考えるための共通の場を、確立しておかねばならない。入手したこの情報で、トンネル建設の工学的な面と、財政的な面が、はっきりするはずである。

ここで特別に考慮する事項を出しておく。Taurio社は、非常に小さな粒子寸法にする掘削方法と、その掘削過程でスラリーをつくる方法に注目している。この方法は、キャピテーション領域で運転する小口径高速ジェット水の使用からなっている。このプロセスには、無数の小泡の発生と崩壊があり、それが衝突したものには、激しい侵食が起こる。硬岩に数秒間で、大きな穴をつくれるようなこの技術が、実演されている。小さな粒子をスラリーの形にすることに加えて、作業用のジェット水をつくるノズルには、数千時間もの長い寿命がある。岩のせん孔に使うカッター・ビットは短命で、高価で、しかも取り換えに時間がかかる。この技術のトンネルへの適用について、若干の用法が考えられている。例えば、ロックボルト用のせん孔とか、スラリーをつくるための小粒子にする際のクラッシャーの代わりとか、上述した特性をもつ掘削機などである。工程計画の早い時期に、この開発への支援、激励があれば、このトンネル工事全体の工費を、さらに節減することになる。

2.6 トンネルの覆工

大半のトンネルは、覆工して、地山を支持し、シール（密閉）している；主として、水を排除し、トンネル内に落ちることになる岩ブロックの分離を防ぐためである。トンネルの覆工には、多くの選択があり、掘削中に遭遇する種々の地山への適合性に基づいて選ばれる。その種類には、次のものがある：①ヒンジ継手と拡張部のある通常5個のセグメントからなるコンクリート・リング、②ボルト締めする継手用節部のある鑄鉄覆工、③半径方向の等圧下で、コントロールされた変形をす

（脚注） * Cavitationとは、急回転する遠心ポンプのまわりなどに生じる真空部分という。

る柔な覆工、④吹き付け式覆工。

掘削後1日以内というような早期覆工が提案されている。というのは、この地層は、多量の水分を含んでいて、その蒸発から、収縮と版（slab）の形成が起こり、その版が分離して、掘削部分に落ちるからである（参考文献(3)、(4)）。チョーク層の乾燥は、空気中の水分と湿気を取り除くための換気速度の影響を受ける。

早期覆工の代わりに、トンネルの最終覆工をする前に、待ち時間をとる別な理由も出されている。掘削の直後には、新しくできた開口部の方へひずむ、岩体の寸法増加がある。当初の変形は、比較的高い速度で起こり、次いで、時間の対数に比例する速度で減衰し、事実上、地層の長期クリープになる。トンネルの覆工を、掘削後、10日から100日位の間、遅らせることによって、時間と共に、消散するひずみエネルギーと減少するひずみ速度が、覆工にかかる荷重の分布を減らすことになる。

覆工の早期と遅延という、明らかに相反する2つの推奨は、海峡トンネルでは、版片の落下につながる地山の乾燥と収縮を防ぐには、ある量の早期支持が必要であることを認識することによって、解決できよう。市販のシール材製品のようなものの不透水性コーティングをして、地層中の水分を保持させておくことができる。ロックボルトとアーチ支保工の組み合わせが、版片の落下を阻止するであろう。後に設置する最終覆工が、地山を安定させる。トンネル覆工についての膨大な討論が、参考文献(5)に出ている。

トンネルの覆工方法は、ケーソンとそれに関連する海上での支援作業活動に影響する。プレキャスト式の覆工材は、プレキャスト・コンクリート、ないし鑄鉄のいずれであっても、ひとまとめにして、ケーソンを通して設置箇所へ送らねばならない。これは、かなり長期にわたる高価な人と船の強力な活動を表わしている。配送船からケーソンを通して、作業現場まで、トンネルの覆工材料をポンプ輸送プロセスで供給すれば、作業強度を大いに減らし、投下資金と運転費の両方を減らすことになる。ロックボルトとアーチ支保工は、水中エレベータで、ケーソンへ配送されよう。

トンネルを覆工するには、規則的な時間間隔で、大量のコンクリートを作業箇所へ配送する必要がある。既述のように、ケーソン内のパイプを通す

材料の配送の方が、ケーソンのハッチを通して、大きな物を下ろすよりも、時間の消費を大幅に減らす。したがって、海面上の船ないし塔から送る材料を使つてのコンクリートの方が、覆工材料を供給するためには、好ましいやり方である。掘削の開始時点から、サービス用トンネルが兩岸の間に開通するまでの期間、シール用コーティング材だけで済ますという選択を実行するなら、工費の一層の低減にならう。というのは、船で運び、配送する量が減れば減るほど、運搬の時間と回数が、少なくてすむからである。

参考文献

1. Faddick, Robert R. and Martin, James W.. "The Transportation of Tunnel Muck by Pipeline.", Report No. UMTA-MA-06-0025-78-4, U.S. Department of Transportation, Urban Mass Transportation Division, NTIS PBZ81103.
2. Bruckshaw, John M.; Goguel, Jean ; Harding Harold, J.B. and Malcor, Rene, "The Work of The Channel Tunnel Study Group, 1958-1960", Journal of the Institution of Civil Engineers, Paper No. 6509
3. Curtis, D.J.; Lake, L.M.; Lawton, W.T. and Crook, D.E. "In-Situ Ground and Lining Studies for the Channel Tunnel Project", Tunnelling '76, The Institution of Mining and Metallurgy.
4. Potts, E.L.M.; Dunham, R.K.; Maconochie, D.J. and Reid, A.G. "Design and Installation of Ground Instrumentation for the Channel Tunnel", Tunnelling '76, The Institution of Mining and Metallurgy.
5. Horst Pochhacker; "Austrian Method of Tunnel Building In Very Heavily Squeezing Ground in Mountainous Terrain, Theory and Practice", Proceedings, 1976 Rapid Excavation and Tunnelling Conference, The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc.

3. 水中ケーソン方式

3.1 概観

水中ケーソン開発の初期段階のとき、その中で行われる主要作業の機能ならびに居住性の支援についての需要を確認するために、一連のシステム図を作成した。ケーソンとトンネルの境界面因子の継続調査から、今回、これらのシステムについて、もっと進んだ評価をするのに十分なだけの情報と技術データの集積を得た。

大きな機械と高レベルの電力を要するこれらの主要システムに注目が集まっている。そのシステムは、作業量が極度に広範囲にわたっており、作業活動遂行上、きわめて重要である。計測や通信機能のようなレーザー・システムもまた重要で、寸法と電力需要の面では、主システムよりは小さいが、主システムが発展するにつれて、進展することを期待されている。

最初の努力は、掘削速度を調べることで始まった; 関連するズリの発生速度、およびそのズリを適切な捨て場へ送る速度。ズリを動かす考えの中には、ズリをスラリーとして運ぶことと、輸送できるスラリーをつくるために、ズリに混ぜねばならない水量があった。種々のスラリー密度とズリの発生速度(掘削切羽数に対応した)を仮定して、反覆計算をした。スラリー用ポンプと管路の寸法、樋式水路の寸法、所要電力量、1気圧の大気を維持するのに必要な新鮮空気量などの値が求められた。その計算は、スラリー密度と掘進速度が、樋式水路の寸法やポンプの台数、所要馬力数、電力消費量に及ぼす影響を、はっきりと示している。これらの計算結果は、その評価に用意したグラフを見ると、最もよく判る。この評価の後段で、各グラフをもっと詳細に吟味する。ポンプ台数と関連するシステムおよび必要となった装置は、投下資金に直接関係し、電力消費量は、資金と運営費の両方に直接ひびく。

3.2 エア・システム

ケーソンとそれに付属する作業空間全体に、コンプレスト・エアを供給するシステムが用意される。コンプレスト・エアは、多くの目的に役立つ。水密で、気密な閉塞空間である作業空間から、地山をとり除くにつれて、掘った土の量だけの空気を入れて、1気圧の大気を完全に維持しなくてはならない。コンプレスト・エアはまた、多くの道具、とくに手作業道具を運転するのに必要で、後者は維持その他の目的の多くの場合に使われる。

埋設管を通してケーソンにコンプレスト・エアを供給するために、海岸に設置するコンプレッサー基地のことを査定した。計算では8インチ(20cm)のパイプと200 psi (14kg/cm²)の初期圧を使うと、そのエアがケーソンに届くまでに、4~16%の圧力降下があることを示した。ケーソン

内にはトンネル複合体全体に行きわたるサービス・ライン網がセットされ、必要な道具へのサービスをすることになる。6つの各切羽で、10フィート（3m）／時の掘進速度を採用しておれば、トンネル内の大気を1気圧に維持するには、コンプレッサーは、毎秒0.55ポンド（0.25kg）のエアを配送せねばならないであろう。道具の動力所要量を考慮すると、コンプレッサー所からは、毎秒最大1ポンド（0.45kg）のエアを、ケーソンへ送らねばならないであろう。

3.3 大気コントロール・システム

全作業箇所を通じて、空気を循環させるために、換気システムを設置する。このシステムはまた、必要に応じて、暖房と冷房をする。閉塞システム内の汚染物は、多くの発生源から生じうるが、代表的には、同化作用の二酸化炭素は、人から生じるし、煙とその他の汚染物は、溶接作業ないし潤滑油を使う機械に付随する油の蒸気から、また地山に取り込まれたガスから生じうる。

地下の空気容積が、外側の大気から遮断されている期間中は、汚染物の蓄積がありうる。故に、住んでいる人の快適さを保証するには、汚染物についての大気監視プログラムが必要である。汚染物は、吸収、ろ過、その他の処理のような多くの方法で、大気中から除去されよう。

人が住む閉塞空間では、1人1時間当たり1/10ポンド（0.045kg）の割合で生成される二酸化炭素（CO₂）のあることは、確かである。作業空間に連続して滞在する100人に対して、CO₂の平衡値を与える種々の寸法のCO₂ガス浄化器の性能が、図-7に示されている。

3.4 スラリー・システム

スラリー処理システムはトンネルを掘ることで発生するズリを、切羽から海岸の土捨場まで運ぶことを想定している。このシステムは、次の事項からなる：作業箇所のすぐ後で、クラッシャーないしグラインダー（すりつぶし機）が、ズリを小粒にする。この粒子をコンベアで、サービス用トンネルに送る。サービス用トンネルの中で、このズリに海水を混ぜて、スラリーをつくる。そのスラリーを樋式水路にあげ、ケーソン底まで、重力で流す。ケーソンは、トンネル縦断線形の低い地

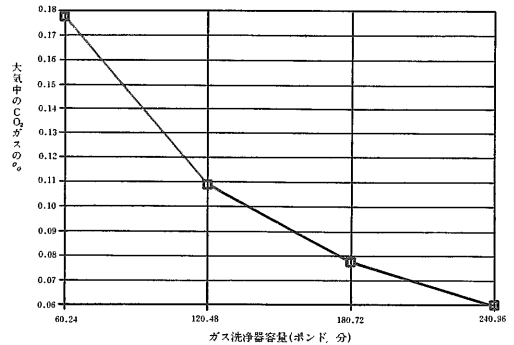


図-7 トンネル空洞で100人が働いていると仮定した時のCO₂とガス洗浄器容量の平衡レベル

点にある。スラリーをケーソンの底から頂面まで動かすには、多数のポンプとライザー（riser）が使われよう。ライザーが、スラリーを大きなパイプの中にあげ、そのパイプが、海岸の土捨場へスラリーを送る。

スラリーの沈澱を防ぐためには、その流速を毎秒6フィート（1.8m）ないしそれ以上のレベルに保たねばならない。これはスラリー用ポンプを吸引側に2台投入すれば達成される。スラリーの最大生産状態下で、このスラリー・ポンプは、樋式水路ないし付属貯水槽からのスラリーの吸い出しを行い、そのスラリーをライザーを通して吐出し、排送ラインを通して、ケーソンから岸までスラリーを運ぶ。スラリーが、最大速度では生産されていない場合には、このスラリー・ポンプのうちの1台か、または2台が、スラリーから海水の方の吸引に移され、スラリーをつくるために、樋式水路に海水を供給するラインによって、海水をケーソン底に注ぎ込む。この供給源の方に移したスラリー・ポンプは、海面からポンプまで測った正の吸引水頭をもつことになり、それらのポンプは、このシステムを通して吐水するので、その負荷電力は最小になる。正運転になったポンプとして、これらは同じ流速を出し、このパイプ・システム全体を通して、最適の流速を維持し続けることになる。この海水流入は、排送ライン中の泥水の密度を減らし、すべての沈澱物を、そこから除去するのに役立つであろう。

指定されたスラリー密度にするのに加えねばならない水の割合、そのスラリーを作業箇所からケーソン底まで送るのに必要な樋式水路の寸法、

スラリーをケーソンの底から頂面まで送るのに必要なポンプとライザーの台数、そして、このスラリーをケーソンの頂面から海岸の土捨場へ送るのに必要なパイプ寸法とポンプ寸法を求めるための計算が行われた。この計算は、スラリー密度、作業切羽数、ライザー直径、掘削土をケーソンから岸まで送るパイプの直径などからなる変数の範囲に対して、実施された。この計算結果は、付属のグラフに出ている。

次のような仮定をした：鉄道トンネルの掘削直径は8m、サービス用トンネルの直径は5m、掘進速度は1時間当たり10フィート(3m)、1日の作業は20時間、作業のできる切羽の最大数は6個、ズリの密度は2.05t/ya³(2.67t/m³)、ケーソンの底から頂面までの距離は250フィート(76m)、ケーソンから海岸の土捨場までの距離は6.67マイル(10.7km)、スラリーの許容最大流速は12フィート(3.6m)/秒。

図-8は、スラリーの製造速度(ft³/sec)を掘削切羽数の関数として、またスラリー密度の関数として表わした棒線グラフである。作業切羽数を増す方法には、意味がない。

図-9は、スラリー製造速度のカーブで、全部で6つの切羽を使うときのスラリー密度の関数になっている。

図-10は、ケーソンの底から頂面まで、スラリー

をポンプで上げるのに要する総電力量と所要ライザー数を、スラリー密度の関数として示す棒線グラフである。このグラフは、指定されたスラリー密度に対しては、ライザーの直径とは係わりなく、所要電力量は、ほぼ同一であることを示している。

図-11は、パイプ直径を変えて、ケーソンの頂面から海岸の土捨場へスラリーを、ポンプ輸送するのに必要な総電力量を、スラリー密度の関数として示す棒線グラフである。このグラフは、パイプの直径を減らすことによって、したがって、スラリー速度を減らすことによって、電力量が劇的に減ることを示している。

図-12と13は、ショットクリートで巻いた樋式水路と滑めらかな覆工をした同じ水路について、通水容量(ft³/sec)を、深さの関数として示したカーブである。

図-14は、樋式水路ないし海水ラインのいずれかから吸引するスラリー・ポンプの能力を示す基本図表である。

3.5 上水および下水システム

上水道ラインは、飲料用、調理用、洗濯用、セメント水用、工事に付属するその他の作業活動用に、海岸からケーソンまで設置される。新鮮な水を貯蔵するために、5,000ガロン(19m³)の水槽が、ケーソン複合体の内部に設けられる。海岸と

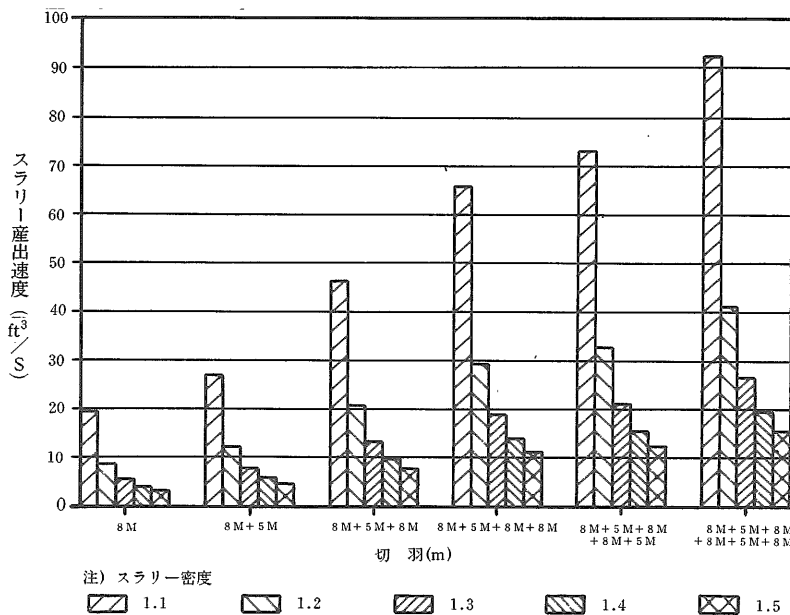


図-8 10t/時の掘進速度で掘られる切羽の数の関数としてのスラリー産出速度

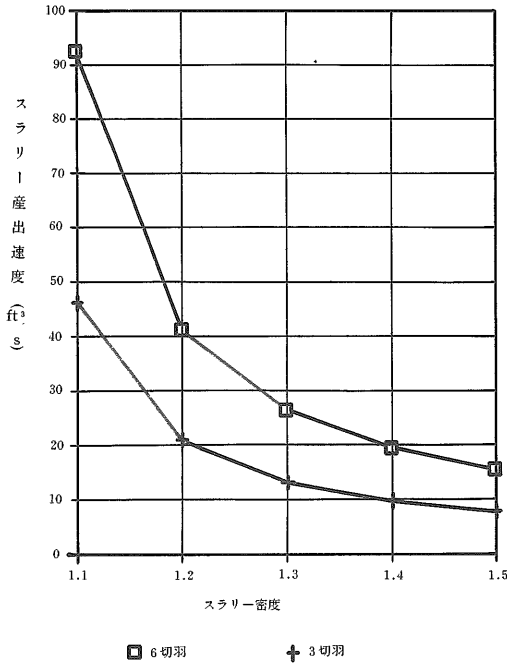


図-9 全部で6つの切羽が10ft/時の速度で作業している時のスラリー密度の関数としてのスラリー産出速度

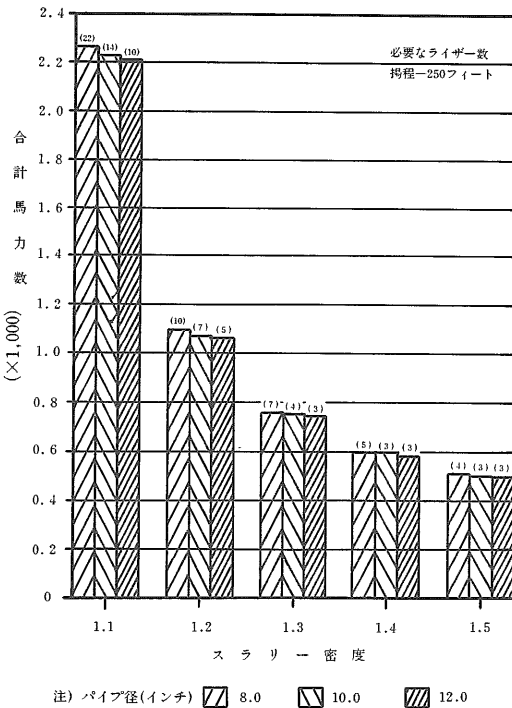
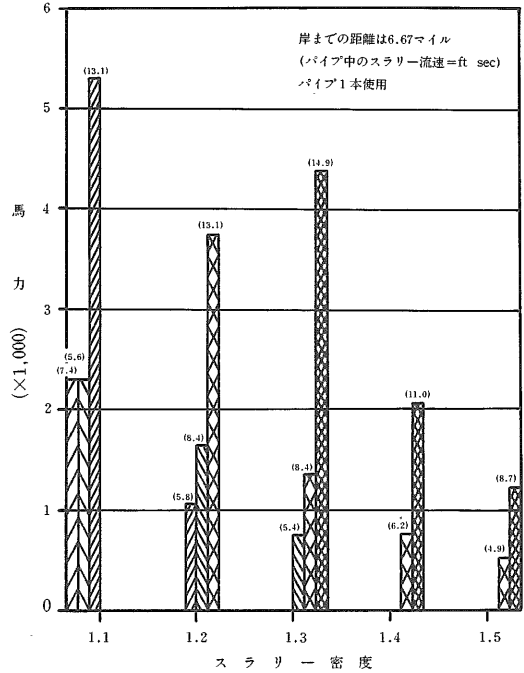


図-10 全部で6つの切羽が10ft/時の速度で稼働している時、ケーソンの底から頂面までスラリーをポンプで上げるのに必要な電力とライザー数



注) パイプ径(インチ)
 48 42 36 30 24 18

図-11 全部で6つの切羽が10ft/時の速度で稼働している時ケーソンの頂面から岸までスラリーをポンプ輸送するのに必要な電力

ケーソンの間の水頭差によって、水は、ポンプを使うことなしに、自然流下し、3インチ(75mm)パイプを通して、2,500ガロン(9.5m³)/時が流れるであろう。所要水量については、まだ確定されていない。

台所の流しや洗面所、便所からの排水はすべて、スラリーと混ぜて、排水システムを通して排出する。

実施した計算では、径3インチ(75mm)パイプを使えば、水の流速は2フィート(0.6m)/秒になることを示している。この流れを使えば、5,000ガロン(19m³)の水槽を一杯にするには、約2時間かかる。

3.6 その他のシステムの図表化

種々のシステムの要約を、図-15に掲げる。また負荷電力の予備解析を表-2に示す。図-16は、バッテリーの特性を示すもので、海岸からの送電が途絶えた時の支援に使われる。

4. ケーソンの設計

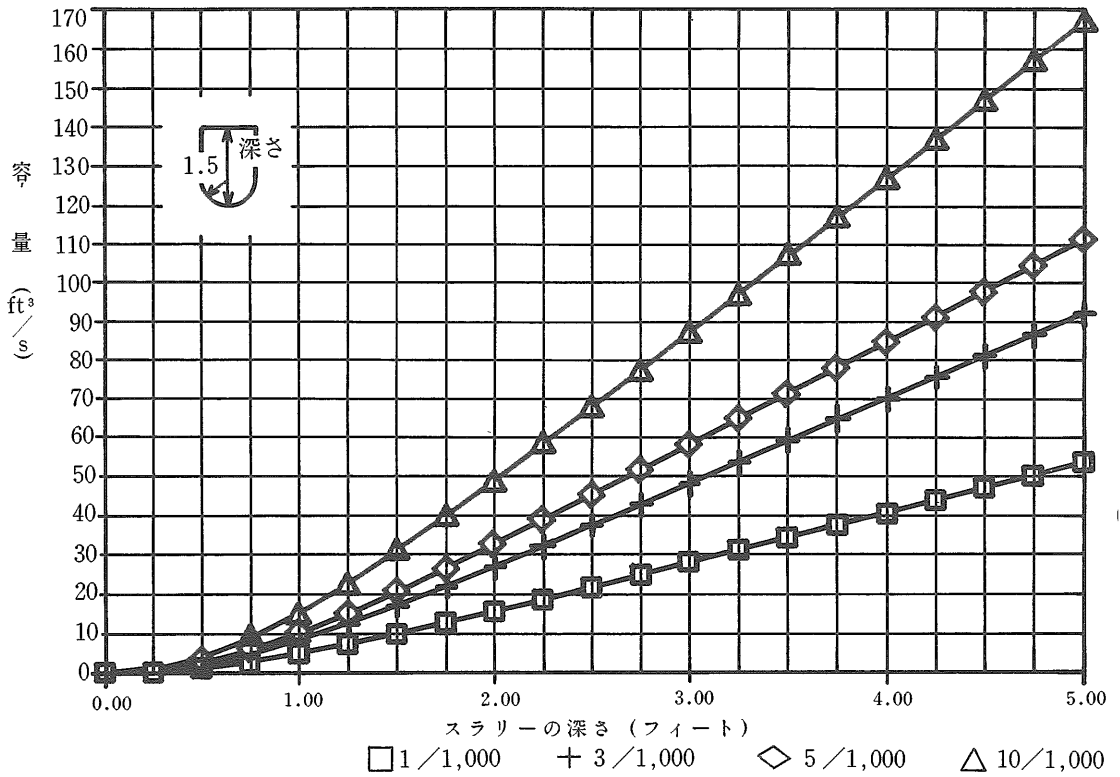


図-12 桶式水路の容量と深さの関係(ショットクリート覆工)

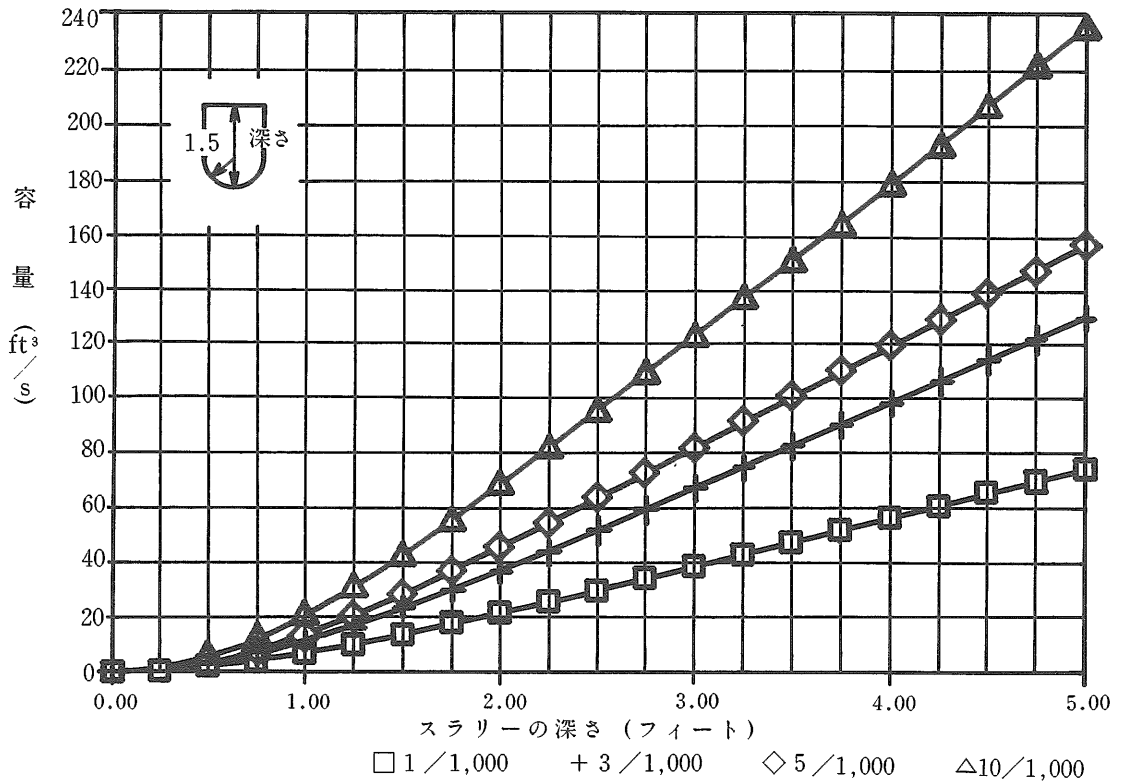


図-13 桶式水路の容量と深さの関係(滑らかな覆工)

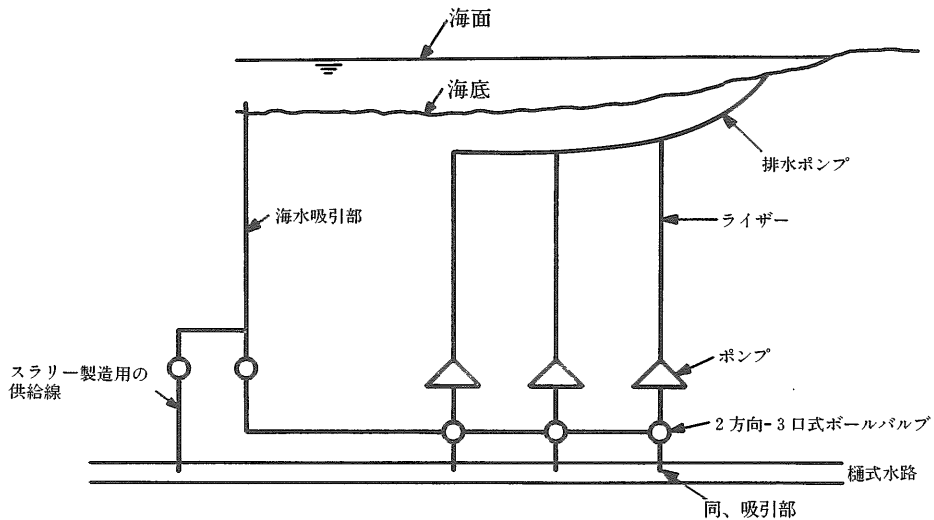


図-14 スラリー関係システム基本図表

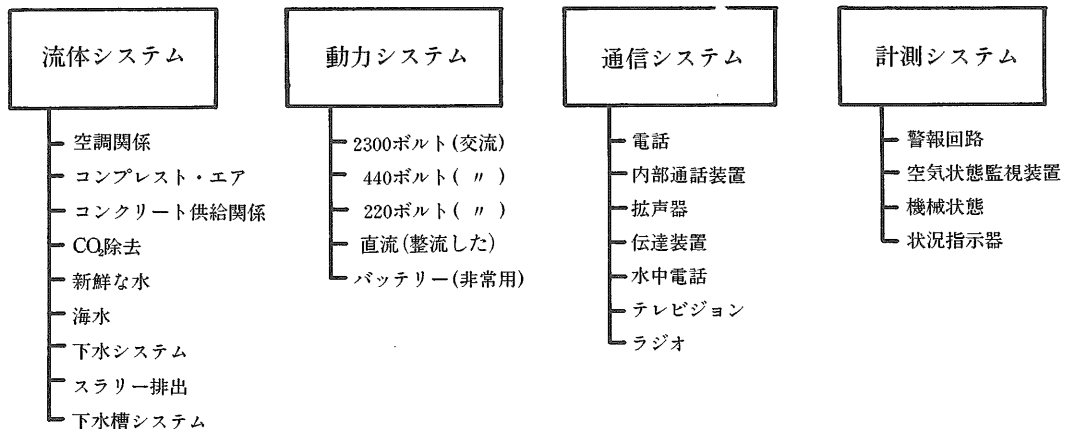


図-15 一般システム

表-2 イギリス海峡トンネルの負荷電力の解析 (1ケーソン当り)

項目	単体	単体数	合計
大型掘削機	750馬力	4台	3,000馬力
小型掘削機	500	2	1,000
大型コンベア	100	4	400
小型コンベア	50	2	100
大型クラッシュ・グラインダー	150	4	600
小型クラッシュ・グラインダー	100	2	200
換気ファン	10	10	100
ポンプ (ケーソン底)	250*	6	1,500
ポンプ (ケーソン頂面のブースター)	1,500	6	3,000
CO ₂ ガス浄化器	125	2	250
照明関係 (1ワット/フィート)	0.00134	21 X 6080	180
その他の機械	10	20	200
計器および通信器			100
その他の宿泊所用			300
クレーンとエレベーター			500
地下輸送系統			500
			11,930馬力 =8,900kW

*スラリー密度=1.2とする。8,900kW/2,300V=3,870アンペア

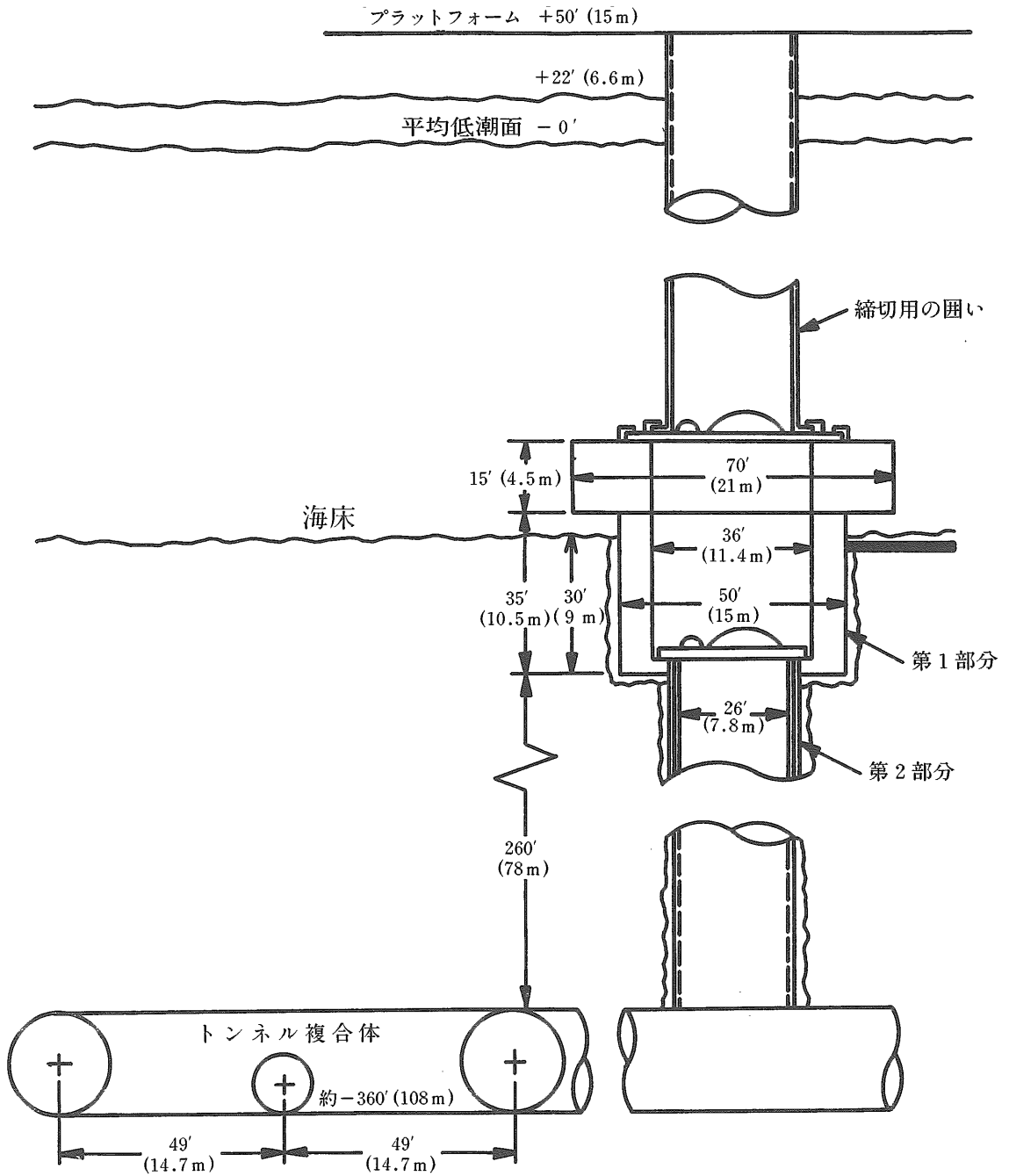


図-17 水中ケーソン構造図

材は、環体の内部空間を、独立した水槽に分けるように設置される。この水槽は、全体システムの設計が進むにつれて、有効になる。

この区間の上方の環状部分には、作業空間全体を通じての補給兵たんと安全管理をするための事務室とコントロール室のスペースがある。それは、

作業空間への人員、機械、材料の出入りをコントロールする。それは頭上にあるプラットフォームと協同して、また海上の支援船と協同して働いたり、あるいは独立して立つ管理センターとして、丁度その時、進行中の作業活動の基地にもなりうる。後者のケースでは、それはまた、非番労働者

用の適切な宿泊施設を入れることにもなる。

下方環体の底のところに、1つのフランジが内殻から内向きに突き出している。このフランジを使って、第2ケーソン部分を吊り、第1部分と第2部分が互いに接合された後、その間の水密シールをする。このフランジ面は、機械仕上げし、第1部分の底と地下空間の間の立坑を掘る作業過程で、被害を受けないようにせねばならない。

第1部分の上面は、支持面および、第1部分と第3部分の間のシール面の両方として働く。この面なし、それに続く部分もまた、機械仕上げし、掘削過程での防護をせねばならない。上面の正確な形状は、詳細設計の過程で定まる。

第1部分は、施工中の種々の時点で、様々な荷重状態を受ける。結果として、それは自立し、次いで第2部分を支持する。最後に第3部分に加えられる。補給支援活動中に、機械や装置の重量が、断続的な荷重になる。というのは、それらが、この複合体を通るからである。最後に、ケーソン複合体は、作業空間の洪水を防ぐことを目的とした水密な障壁であるから、種々の災害形態が、この構造物に及ぼす影響を調べておかねばならない。荷重状態毎の解析をしておくべきである。

第1ケーソン部分はまた、立坑を掘る作業にも使われる。せん孔作業装置をまわすには、大きなトルク荷重をかけねばならない。通常、このトルク荷重に抵抗するのは、プラットフォームの高さのところである。しかしながら、海床に適切にアンカーすると、第1ケーソンをせん孔トルクに抵抗させるのに使える。第1部分の頂面にのっている減速機は、ピットを低速で動かすが、一方、プラットフォームは、かなり高いスピードでピニオン(小歯車)を動かしており、結果として、プラットフォームにかかるトルク荷重を低くする。これは、プラットフォームの脚にかかる片張り出し荷重を、速度比の倍数だけ減らすことになる。それは立坑をせん孔する時間を減らすものである。この立坑は、第2ケーソン部分を入れるが、直径28フィート(8.4m)まで掘られると予期している。それは、孔の表面粗度が、地山の切削作業で、かなり変化すると考えているからである。

4.3 第2ケーソン部分

図-17に示すケーソンの第2部分は、外径約26

フィート(7.8m)を有する、長さ約260フィート(78m)の円筒シェルを補剛したリングからなり、垂直軸を一致させて、第1部分から吊っている。この部分の上端は、外側フランジのところで終わっており、その外側フランジは、第1部分下方の内側フランジの上ののっている。密着する2つのフランジ面の間のエラストマー・シール剤*は、海水がケーソンにはいるのを防いでいる。第2部分の頂面に、1つのハッチが設けられる。それは外側フランジの上面に対して開閉でき、また、洪水災害に対する予防として、エラストマー・シール剤を有している。

第2部分のシェルの荷重状態は、設計上、2つの形態が考えられる。この部分は、事実上、孔の覆工であるから、シェル底に対する全上載荷重圧が、それにかかる最大圧縮荷重を表わすと考える。一方、その代りとして、このシェルは、それが立坑内に下げられる時には、洪水になることはなく、設置当初にかかる差圧を受けることもないと考えられ、このシェルと地層の間に注入するコンクリートの型枠と考える。この形態では、型枠内の水頭の内圧以下の、ほぼ260フィート(78m)の高さのコンクリート・ヘッドに等しい基底での差圧で、このシェルは加圧される。シェルの外周に、厚さ約1フィート(30cm)のコンクリート覆工があれば、そのコンクリートが凝固すると、上載部分の荷重圧力を適切に支え、シェルに追加的な荷重を伝えることはないはずである。この後者の形態では、第2ケーソン部分は、その受ける荷重が軽くなるので、かなり軽い目方になる。

4.4 第3ケーソン部分

ケーソンの第3部分は、円筒状の、リング補剛した締切囲い(coffer dam)であり、クランプ(止め金)で、第1部分の頂面に連結されている。両者の間のフランジ継手には、エラストマー・シール剤を入れて、完全水密にする。締切り囲いは、海面上に立っているプラットフォームのデッキ面の付近で終る。この第3部分は、プラットフォームが、ケーソン複合体の上に据えられた時にのみ使われる。

4.5 吟味

(脚注) * elastomer: ゴムのような弾性をもつ人造物質

ケーソンは、トンネル軸（導坑）を、岸から岸まで通す作業に含まれる多くのプロセス遂行にとって、中心となるものである。このトンネル軸を通す主要な作業活動は、掘削、ズリ出し、掘削土をスラリーにして適切な土捨場へ送る作業、トンネル軸の掘削後に残る地層の完全性を保つためのロックボルトと支保工の設置工、トンネル壁を防護し、支持し、最終仕上げをするために、覆工材料を供給し、それを適用する作業などである。作業切羽が、ケーソン底から遠ざかるにつれて、機械やその他のサービスに対する電力を供給するために、電力ケーブルの連続的な追加需要がある。サービス用トンネルと、その中の樋式水路が、ケーソン底から伸ばされるにつれて、スラリーをつくるための海水を供給するパイプ工の連続的な追加需要がある。トンネル軸（導坑）表面に適用するロックボルトや支保工装置、覆工材料の連続的供給が要求される。トンネルが伸びて、絶えず通行時間が増えるにつれて、運搬車両の追加が必要になる。その結果、常時、ケーソンに出入りする材料や機器、人員の連続的供給がある。トンネルの水平交通に加えて、ケーソン複合体を通る垂直方向にも大きな交通がある。

ケーソンを通る兵たん補給的支援は、パイプやケーブル、エレベーター、解装装置で行われる。ケーブルはエネルギー（電力）を供給し、岸、プラットフォーム、管理所、作業空間を相互連絡する通信サービスをする。パイプは、掘削土の大半をケーソンに運び、そこから土捨場へケーソン底を起点とするパイプを通して動かす。スラリー製造に使う海水は、ケーソンの所で、海峡の水からとり、スラリーをつくっている所で、樋式水路に配送する。エアや新鮮な水のような、その他の流体や、セメントと砂のような細かな固体もすべてが、パイプを通して持ち込まれる。

ある種の固体材は、連続した台の上にある解装装置と分裂防止装置を通して、作業場所へ持ち込む。作業の前進につれて、かなりの量の大小のケーブルが、毎日の基礎として、必要になることを認識するなら、巻いていないかなりの長さを、通路内に考えるのが合理的である。この方法は、ホースにも同じように適用される。作業要求に合わせて、作業箇所に必要な端末がくるようにする。鋼棒や鋼板のような工事材料のストックも、連続し

た長さで巻いて、送ることが必要であろう。ロックボルト工用や、天井支保工と覆工支持用の枠をつくるためのこれらの材料は大量になる。

ロックボルトを切断し、ネジ山をつけることや、地下の場所での圧延プロセスで、枠をつくり、それによって、補給兵たんプロセスを簡略化することを考えるのが合理的である。カーブした骨組は、特に大きなスペースと取扱い場所をとり、完成した形でケーソンを通すことは、非効率な荷物となる。

エレベーター・システムは、垂直に動く作業活動のうちで、最も厄介なものである。その理由の一部は、全体の完全水密と人の安全を維持するために、数段階でハッチを操作して、荷物を移送するからである。

このため、可能などころでは、パイプ法やケーブル法、解装プロセスを使うべきである。ケーソン設計の主な因子の中には、構造的、機械的、電気的、通信的考慮と共に、各種の部品要素を輸送するための補給支援をする最も有効な手段の決定、人員と各項目の材料の安全を、常時、確保するための機構と装備の設置がある。

4.6 ハッチとエレベーター

ハッチは、ケーソン複合体の2カ所に設けられ、2つは第1ケーソン部分の頂面に、また2つは第2ケーソンの頂面に置かれる。各段には直径18フィート（5.4m）の開口部を閉める大きなハッチと、直径30インチ（75cm）の開口部を覆う小さなハッチがある。大きなハッチは、作業空間を使う最大寸法の装置を通すことを目的にしており、小さな方のハッチは、ケーソン複合体を通る人の通路用を目的にしている。

人員の移送は、第3ケーソン部分を通るエレベーターで、人員をプラットフォーム・ケーソン部分まで下げることで行われる。彼らは、小さなハッチを通り、プラットフォームから、はしごか階段で第1ケーソン部分を通り抜け、第2ケーソンの頂面に、小さなハッチを通過してはいり、このケーソンの頂面直下のプラットフォームに降り立つ。このプラットフォームから彼らは、恒久装置の人用エレベーターでトンネルのレベルまで下がる。

第3ケーソンを通る垂直通路は、150フィート

(45m) を越えるであろう。また、第1ケーソンの通路は、約45フィート (13.5m)、第2ケーソンの通路は260フィート (78m) 位になろう。作業班の終了交代時には、この手順は逆になる。ハッチは、使わないときは常に、閉じておくようにする。

ケーソン複合体を通しての装置の搬送には、プラットフォームから、第3ケーソン部分を通して、第1ケーソン部分に、部品片を下げるが含まれており、第1ケーソンの所で、この部品片は、構造物上に置かれる。次いで、荷物を下げたクレーンを十分に引っ込めて、第1ケーソン部分頂面の上方ハッチを、閉められるようにする。このハッチ中央のシール用装置 (分裂防止装置) を開いて、再びクレーンのフックが入れるようにして、それに再度、荷物を取り付けて、つかみ上げる。完全水密になるように、つり綱のまわりをシールする。第2ケーソン部分頂面の下段ハッチを開け、荷物をトンネルのレベルまで下げる。次いで、つり綱を引っ込め、入れた時と逆の手順で行う。この荷降ろし方法は、水が入るのを防ぐハッチの1つは、常に閉じられていることを保証するもので、それは完全防水を保証する。

5. 結論

1. 水中ケーソンは、海底トンネルの施工に、次のような利点を与えることができる：

- 工期の大きな減少
- トンネル縦断線形の低点上におく時の単純なズリ処理
- トンネル空間での車両交通と労力の大幅な縮減
- 施工費のかんりの節減

2. ケーソンの使用を、トンネルの設計と施工方法の計画段階で考慮すれば、工費と工期の便益を最大にでき、海面船舶との相互干渉を最少にできる。

3. サービス用トンネルのインバートに掘った樋式水路の使用によるトンネル内のズリ移動は、施工費節減の上で、多くの必然的長所を有している。スラリー形成用の大量の水は、入手可能である。スラリー密度はできるだけ高くして、混合物中の水量を最少にすべきであり、そうすることで、ポ

ンプ輸送の容積と所要馬力を減らせる。

4. 作業切羽掘進用に、またロックボルトのせん孔用に、さらに、スラリーの粒子寸法を減らすために、キャビテーション法のジェット水能力を調べるべきである。この能力は、装置の寸法と費用、ならびに運転費を減らすであろう。スラリーは、掘削過程で形成することを期待している。

5. トンネルを支持し、覆工する方法は、その方法と同時に、施工時期についても査定せねばならない。最終覆工の設計をする前に、参考文献(3)、(4)、(5)の種々の技法を、技術的内容と同時に、施工に対する財政的影響についても、評価しておくべきである。

6. 水中ケーソンを使う海峡水底トンネル工事のやり方の記述は、性質上、一般的なものである。故に、それは、他の海底トンネルにも適用できる。

6. 謝辞

筆者たちは、この資料作成にあたって、Taurio社チームの他のメンバーが、それぞれの分野で、貴重な貢献をしてくれたことに謝意を表したいと思う。Anthony Traveyn氏は、多くの時間をかけて、マイクロコンピュータ用プログラムをつくってくれ、そのプログラムが反覆解析プロセスの工学的計算をした他、多くの数表を作成した。Frank Bennett氏もまた、所要電力量のさらい出しと、その他の作業を調べるのに、惜しみなく時間をさいってくれた。Chris Golnik女史とJulia Holmberg女史は、ワードプロセッサ操作や編集、査続の仕事をしてくれたし、Paul Havener女史とMara Beckwith女史は、論文用の図を用意してくれ、その同僚各位がグラフをつくってくれた。

タウリオ社 (Taurio Corporation) の概要

本社：ヴァージニア州アレクサンドリア

独立部門研究所：2カ所

支店：3カ所 (米国内)

社長：W.E.KUHLMANN

設立：1979年

従業員数：約25名 (1984年現在)

売上高：1億1千万ドル (1984年)

特徴：技術専門サービス会社 設計、システムエンジニアリング ライフサイクルプロジェクトマネジメント 設備計画・設置・運用 トレーニング解析