

第十四章 水底隧道

A. 参考書 水底隧道に関する参考書は次の如きものである。

Tunnel shield for subaqueous works, Copperthwaite, 1906.

Setting out of tube railways' G. M. Halden, 1907.

Transation of American Society of civil Engineers, Vol LXXVIII, 1915.

(Subaqueous Highway Tunnels by George Duncan Snyder)

Shield & Comressed air tunneling, Hewett & Iohannesson, 1922.

Handbibliothek für Bau-cigenieure, Städte-bau, 1921.

Handbuch für Essenbetonbau, VII Bd, 1912.

Neuerungen auf dem Gebiete derUnterwasser-tunnels, Fritz Steiner, 1913.

Grundzüge des Unterwasser-tunnelbaues, A Haag, 1916.

Tunneling, Prelini & Hill にも比較的多く此種隧道に関する記事がある。

B. 概説 水底隧道は隧道上の地理的名稱により、河底隧道及海底隧道等に種別せられる、然し大海洋に穿たれたる隧道はまだ一箇所もない。

河底隧道中最も古きは、倫敦塔の下流一哩の位置テムス河底に設けられたる Thames T. である、1825 年起工せしも工事困難と資金缺乏のために一時工事を休止したが、1843 年に至り漸く竣成した。此隧道は最初車馬道路用として用ひられたが、1866 年 Great Eastern Railway Co. に買収せられ、現在では鐵道用隧道である、1866 年に第二の隧道が造られた、それは Chicago River 下の Washington street の街路用隧道である、而して今日現存する水底隧道は 50 箇所以上である、就中著名なるものは第 6 表の通りである。

著名水底隧道表 第6表

名 稱	位 置	用 途	建設又は 竣工の年	工 法
Great Eastern Railway	Thames River	鐵 道	1825—1843	橋 工
Washington Street	Chicago River	街 路	1869	締 切 工
La Sall	"	"	1871	同 上
Severn	Great Western Railway	鐵 道	1873—1886	普通の隧道工
Hudson, New York, New Jersey Railway	Hudson River	"	1874—1905	1891以降橋工
Mersey	London & North-western Railway	"	1881—1886	普通の隧道工
Thames No. 1.	City & South-western Railway	"	1890	橋 工
St. Clair	北米合衆國と加奈陀との 國境	"	1891	空氣式橋工
Glasgow	Clyde River	街 路	1893	同 上
Blackwall	Thames River	街 鐵	1894	同 上
Spree	Berlin	"	1899	締 切 工
Greenwich	Thames River	街 路	1901	空氣式橋工
East Boston	Boston	街 鐵	1903	同 上
Harlem	Harlem River	鐵 道	1904	潜 函 工
Batterfly	East River	"	1907	空氣式橋工
Hudson	Pennsylvania Railroad	"	1908	同 上
Rotherhithe	Thames River	街 路	1908	同 上
Seine	No. 4. Line, Paris	地下鐵	1907	潜 函 工
"	near Mirabeau, No. 8. Line, Paris	"	1908	同 上
"	near Concorde, No. 8. Line, Paris	"	1908	空氣式橋工
Detroit	Detroit River	鐵 道	1909	沈 埋 工
Elbe	Hamdurg	街 路	1910	空氣式橋工
Harlem	Harlem River	地下鐵	1914	沈 埋 工
Holland	Hudson River	自動車道	1922—1928	空氣式橋工
Oakland	San Francisco Bay	街 路	工 事 中	沈 埋 工
Severn	Severn River	街 路		普通の隧道工
Mersey	Mersey River	"		同 上

C. 海底隧道 内海の水底に埋設せらるゝ隧道は、第6表に載せた通りOaklandにあるが、外海の水底に穿つものは未だ現存せぬ、而して計畫中のものは相當多いが、實現性に富むのは(1) Gibraltar Straits Tunnel, (2) English Channel Tunnel 及 (3) 關門隧道にて何れも鐵道用である。

1. Gibraltar Straits Tunnel は、西班牙の Vanqueros よりモロッコの Tanger に連絡する海底隧道である、第6表の Seine に成功したる佛蘭西の技術者 Berlier の計畫に係り、之が現實に努力してゐる、同隧道の平面及縦断面は第38圖の如くである。

同隧道の中心線を西班牙の Tarifa に寄せれば、隧道延長を短縮することが出来る、然るに該地點は海底の水深甚だ大にして勾配が

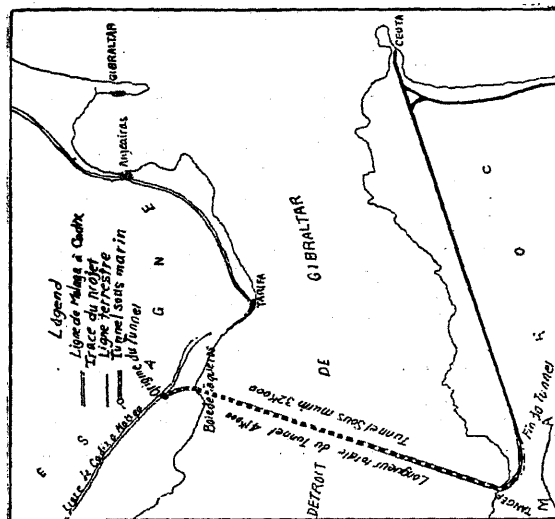
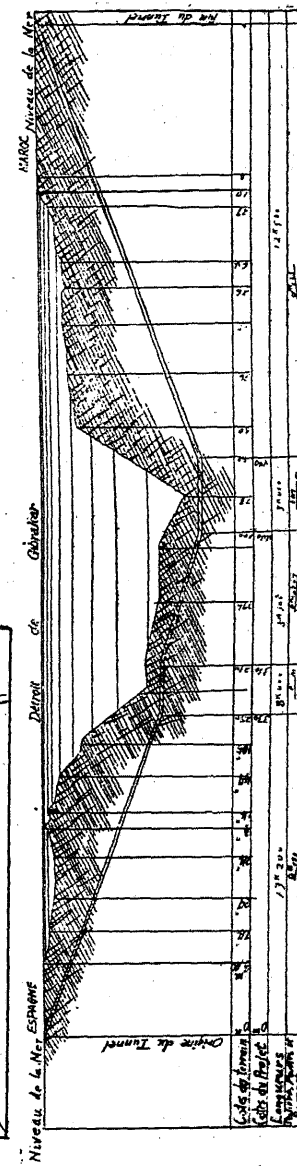
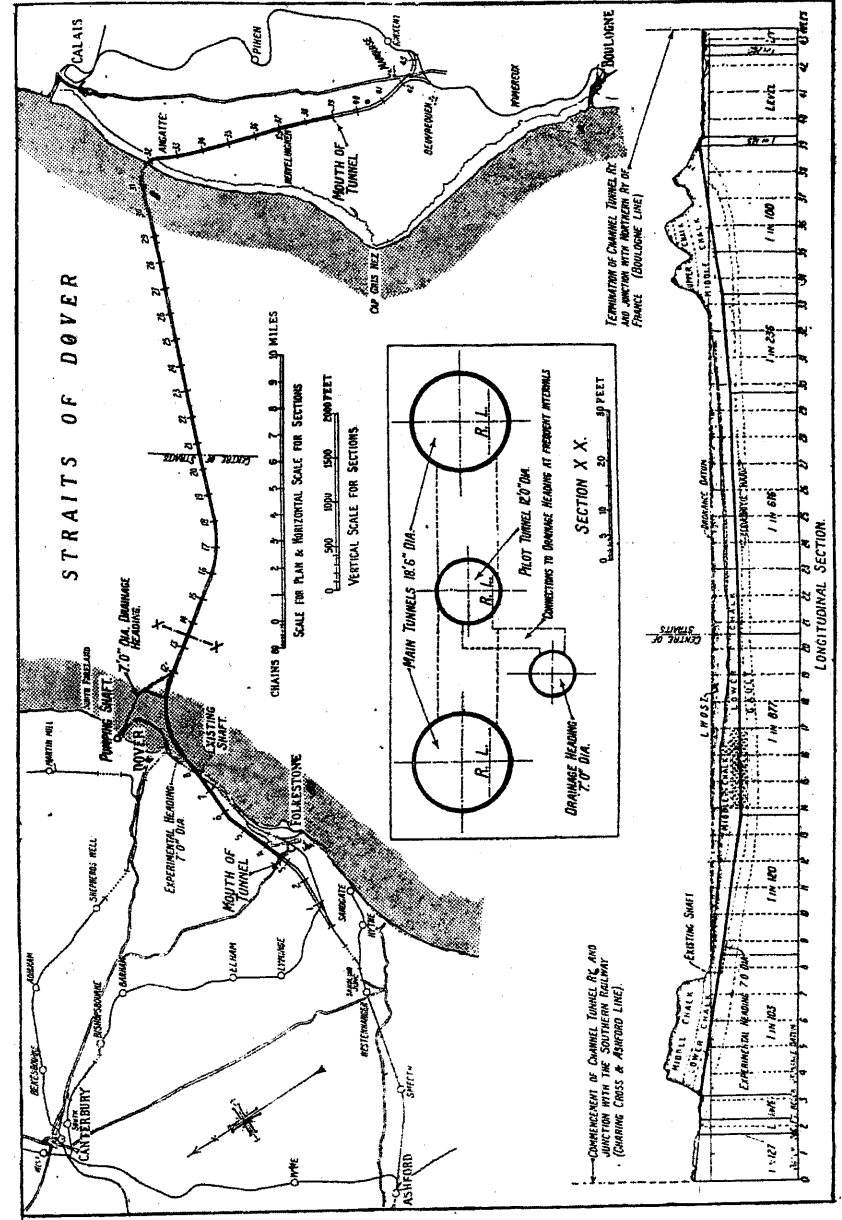


圖 38



急過ぎる、それ故に隧道の長さを犠牲にして、海峡幅の廣き Vanqueros—Tanger 間を通過するのである、隧道の總延長は 48.2 km にして此内水底下に屬するものは 32 km、又隧道の最も深き地點は水面以下 396 m である。

2. English Channel Tunnel は沿革に富んでゐる、事の起りはナポレオン一世の時代に萌芽する、初めは馬車道用の計畫であつたが後鐵道用に改められた、1876 年(我明治九年)英佛兩國とも隧道の建設に乗り氣になつて海峡中心を境界とし、佛側及英側共別個の會社が創立せられた、1883 年に至り佛側は Calais の西方に位する Wissant に、又英側は Dover に近き Shakespear Cliff に豎シャフトを穿ち、坑底近き箇所より海心に向つて試掘した、其結果掘鑿土は純粹なる石灰石で、セメント製造の好原料なることが確められ、同隧道の建設に有利な條件を加へることになつた、それにも係らず英國の在野黨たりし保守黨は、内閣の顛覆を目的として頑迷なる舊家の多數と結托して、此工事を許容して國家の獨立を危くしたるの故を以て、時の自由黨内閣を攻撃した、此形勢を見た佛國は大に讓歩して鐵道線路の一部を殊更に海中に移動して、海面上 14m 延長 800 m の橋梁を架設し、兩國有事の際英海軍の砲撃に便宜を與へることにした、佛國は隧道建設に熱心にしてこれ丈の犠牲を拂ふたにも係らず、英の一海軍提督は愛國的見地より隧道反對の意見を發表した、其反響は頗る大きく英國の輿論は沸騰した、海峡鐵道會社は企業權確保を議會に提出したところ議會は一回の詮議もなさず此請願を却下したので、會社は止むなく工事を止めた、佛國も此形勢を見て Calais に於ける工事を休止するに至つた、此結果佛側にては導坑(將來排水坑に使用の豫定であつた) 1.84 km、英側では 1.25 mi が今猶水中に没却せられてゐる、其後 1887 年及 1907 年並に世界大戰の當時に、隧道再興問題が擡頭したが沙汰止みとなつた、其後英國にては委員會を組織して調査を進めたが、1930 年(昭和五年)に至り、委員會は隧道工事の可能性に富むことを報告した、此報告書に添付せられた隧道圖は第 39 圖の通りである。



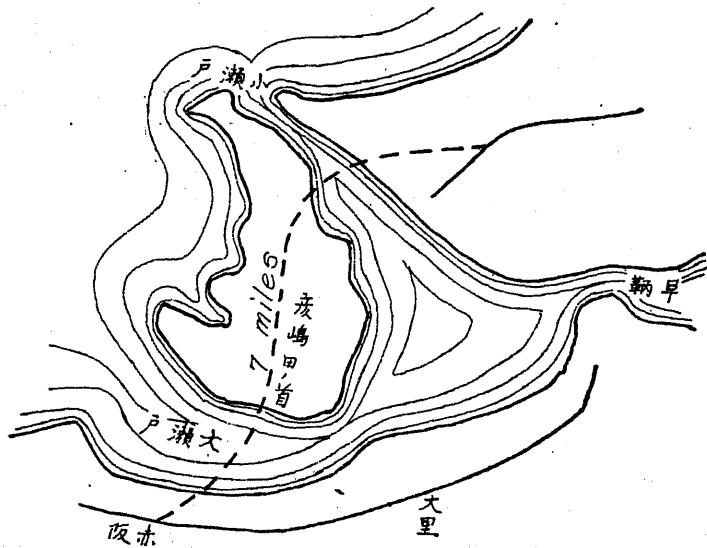
Plus, Longitudinal and Cross-Sections of Proposed Channel Tunnel (Appendix IV to Report)

中心線の大西洋に向つて中凸となれるは、地質調査の結果かく彎曲すれば斷層又は罅裂に會せざることを確めたからである、工事の順序は先づ排水坑を掘鑿し、之より本隧道の中央に位する指導坑を掘鑿し、該坑より左右に横坑を穿ちて本隧道に達し、更に本隧道を開掘するのである、而し是等の諸坑の直徑及相互間の距離は次の如くである。

排水坑 7 ft; 指導坑 12 ft; 本隧道 18½ ft; 本隧道中心間距離 66 ft

3. 關門隧道の沿革は明治年代の末葉に始まる、初め橋梁架設との比較調査を行ひたるが終に隧道の建設に決し、政府は大正7年の第四十一議會に、18,160,000圓の豫算を以て十箇年間に工事を遂行するの案を提出して協贊を経た、翌8年より9年に掛けて線路の實測及地質の調査を進めたが、戦後にて物價及勞賃の騰貴著しく豫算とは非常に懸隔を來し、少くとも 30,000,000圓(楕工を以て施工の計畫であつた)を要する事が明かになり着手し兼ねてゐる内、大正12年の震災のため改良計畫の改訂となり本工事は計畫中より削除せらるゝに至つた、今後仕事を始めるには

更に議會の協贊を経ねばならぬ、最後案の隧道中心線は第40圖の如く彦島の中央を南北に縦斷し、隧道の全長7mi餘此内



第 40 圖

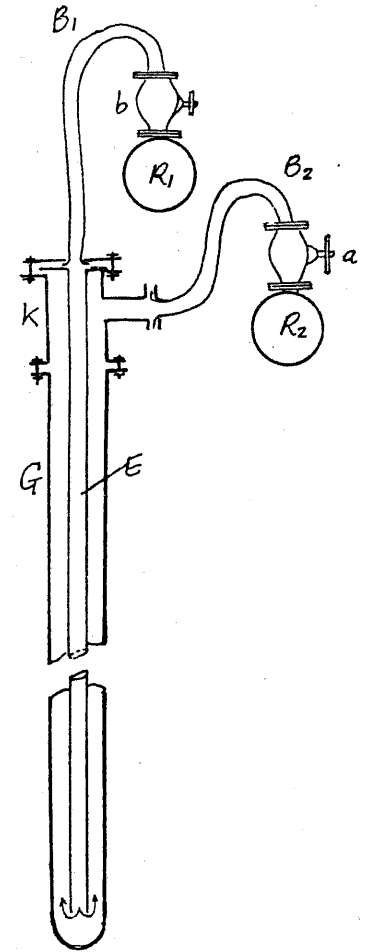
水底に屬する分は 1 mi である、而して施工の方法が沈埋式に改められた。

D. 水底隧道の施工法 第6表の工法欄に記するが如く數種の方法が用ゐられてゐる、此内より最も現場に適應するものを選択すべきである、以下各工法を記述する。

(a) 締切工 (Cofferdam method) 隧道位置を締切工を以て圍ひ其内側の水を汲み出して河底の裸掘を行ひ、露天の下に隧道を築造する方法を言ふ。

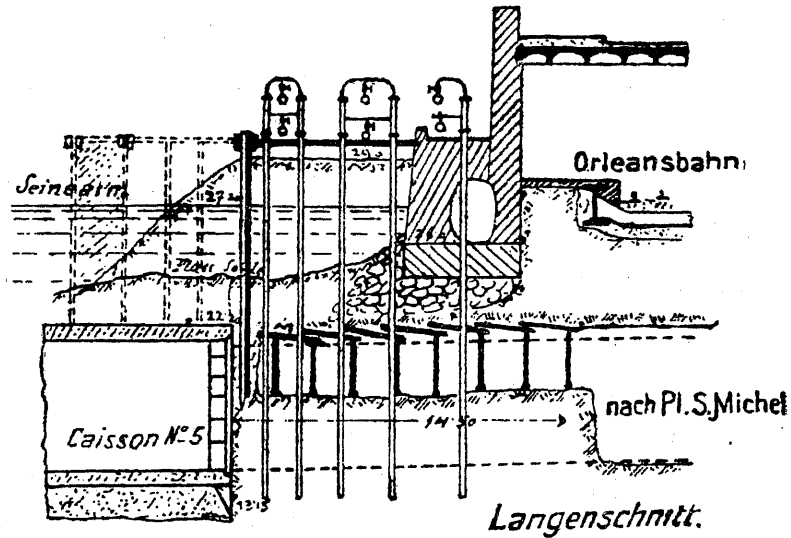
(b) 凍結法 (Freezing method) 此方法は、第41圖の如き底のある鐵管 G (其内徑 100~140 mm にして、厚さ 6~8 mm 程度である)を相互の距離 1 m の間隔を保たしめて隧道建設箇所に埋め込む、P 管内には底なしの空管 E (内徑 26~40 mm 厚さ 8 mm 程度である)を挿し込み G 管の上端には異形特種の管 K を取付ける、而して R₁ 及 R₂ は水管又 a 及 b は開閉瓣とする。

R₁ 管よりアンモニア溶液(NH₃+H₂O) 或は鹽化マグネシウム溶液(MgCl₂+H₂O)を壓力を以て押込むとき、溶液は E 管の内部より其外圍を繞りて R₂ 管の方に流通する、然るときは G 管の外圍が凍結する、かくの如く硬化したる地質内に導坑を進捗せしめ、次いで切擴げ工を行ひたる後疊築を完成する、かくて工事の完成迄凍結法を



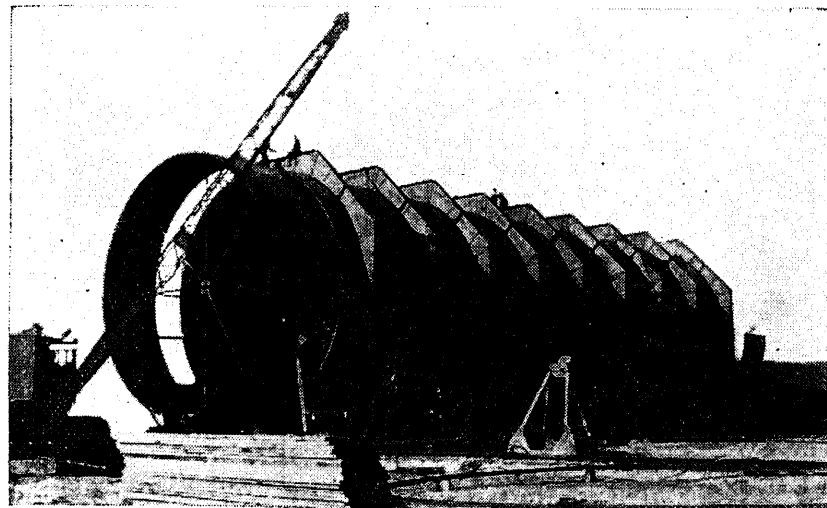
第 41 圖

繼續する、Seine 河にて施工したときの縦断面圖は第 42 圖の如くである。



Seinetunnel der Métrolinie 4 nächst Pl. St. Michel (Paris)

第 42 圖

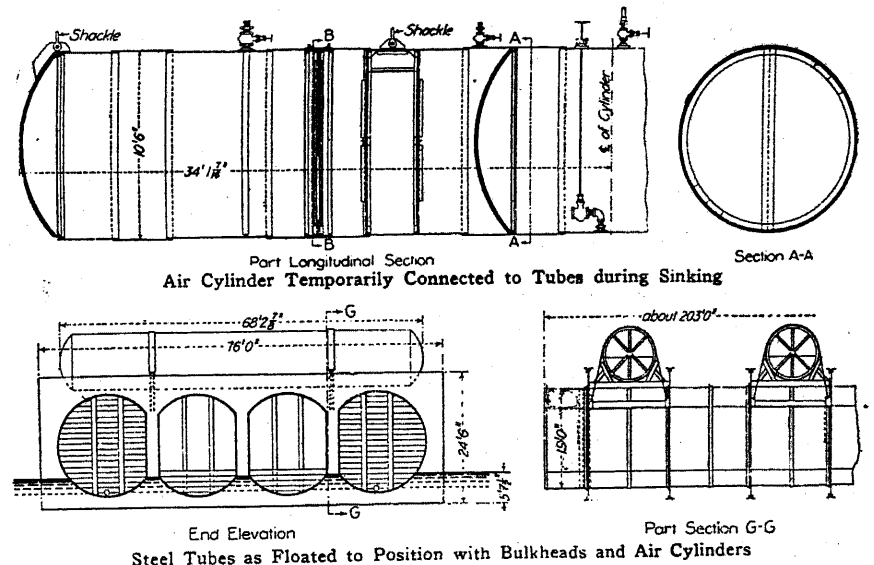


第 43 圖

此工法は丁抹の首都ストックホルムに於ては成功し、紐育市を流る East River には失敗に歸し、巴里のセーヌ河にて使用したるときは成敗相半ばの成績であつた、水に流れのなき、所謂死水の箇所にては成功し地下水の流るゝ所には不適である。

(c) 沈埋法 (Tube-sinking method) 陸上便宜の地點に於て隧道の軀體となるべき鋼鐵製の圓筒を構成する (第 43 圖)、其兩縁端は木製隔壁 (Buckhead) を以て密閉し、同壁内に沈下の際鐵筒内に水を誘引するための開閉瓣を裝置する、而して鐵筒内空氣の滲漏を許すため、其頂部に排氣瓣を取付ける、鐵筒沈下の際鐵筒の長さ方向に傾斜することを防ぐため、鐵筒の上部兩端近くに二箇宛の小圓筒を取付け置き沈下後は之を取外す、第 44 圖は Harlem river に沈埋したる地下鐵道 (第 6 表) の鐵筒を示し、上の方の圖が假取付の小圓筒である、鐵筒一本の長さは

Detroit river (鐵道復線用鋼鐵板構成) 262 ft



End Elevation Steel Tubes as Floated to Position with Bulkheads and Air Cylinders

第 44 圖

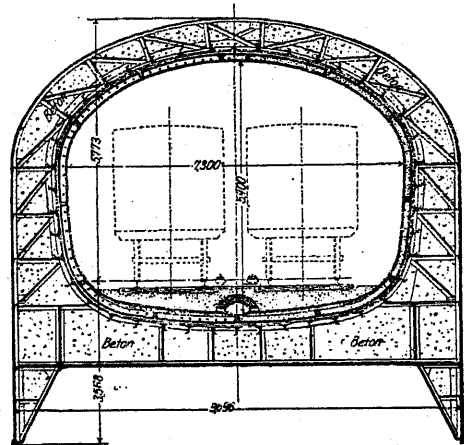
Harlem river (鐵道複線用鋼鐵板構成) 200 及 220 ft

Oakland (内に電車及街路を通ず鐵筋混凝土製) 203 ft

であつた。

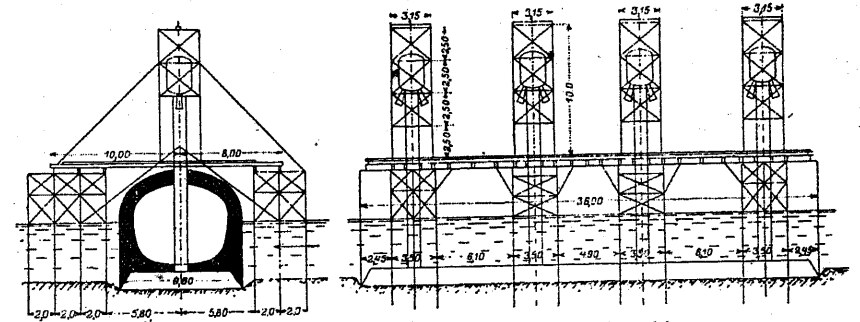
隧道の位置は豫め河底を切均し置く、鐵筒は其浮泛力を利用して水上に浮べ、蒸汽船に曳かれて現場の川上に至る (Detroit には沈埋位置の上流 700 ft)、そこで蒸汽船との連絡が断たれ、同時に鐵筒内に水を注入すると鐵筒は流れ乍ら沈下する、豫定の位置に据付けるため二臺の動臂起重機 (Derrick) が使用せられた (鐵筒一本の重量は Detroit のもの陸上 892 米噸水中にて 513 米噸であつた) 隣接鐵筒の継手の所は其縁端外部に取付けられたソケット (Socket) の間に潜水夫に依つて圓錐狀のピン (Pin) を差込む、かくて鐵筒を現場に沈め終れば、混凝土を船上よりトレミー (Tremie) し水中混凝土を以て鐵筒の周圍を被包する、次に鐵筒内の水を汲出し継手の漏水する箇所は内部より之を防止して、最後に混凝土を以て鐵筒内面を卷立するのである。

(d) 潜函法 (Caisson method) 巴里の地下鐵道は此工法を採つて複線型隧道をセーヌ河底に沈埋した、構造は第 45 圖に示すが如く、隧道本體の下に潜函を取付けた鐵骨混凝土 (鐵骨の間 1.2 m) で、長さは線路の彎曲せる箇所は短く直線の部分では長く 19.8~43.2 m である、又 120 m 3 本を用ゐた箇所もある。第四號線のもの Solferino 橋の直下右岸に於て組立てられ二隻の汽船に曳かれて現場に移され、第 46 圖に示す足場に繋留せられた、



1:150.
Kreuzung der Seine durch die Stadtbahnlinie 4. Tunnelquerschnitt und Senkkasten.

第 45 圖



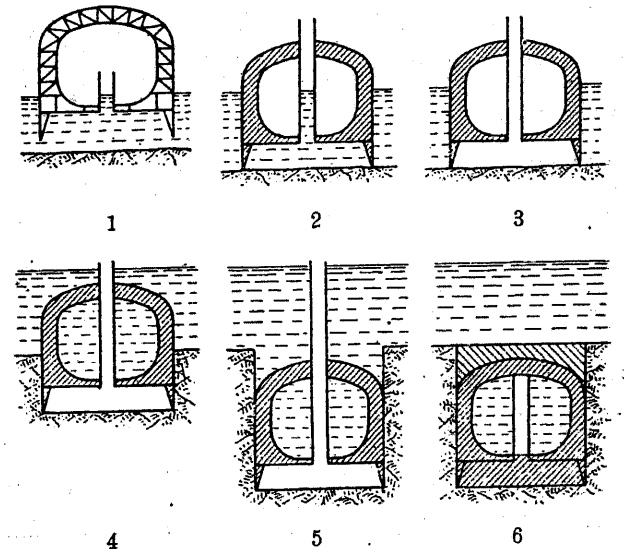
Montiergerüst der Caissons der Seine-Unterfahung.

第 46 圖

初めは水上に浮んでゐるが混凝土を施すに従ふて沈下し、河底に達すれば潜函内に壓搾空気を送りて地盤を掘下げ豫定の深さに達せしめた、而して使用済の潜函内には混凝土を填充した、其工事順序は第 47 圖の如くである、隣接する隧道の間には 1.5 m の空隙を生じて潜函を沈め、此の空隙の兩側を塞ぐため第 48 圖の

如く長 4.8 m 幅 1.75 m の潜函付混凝土壁を沈下した。

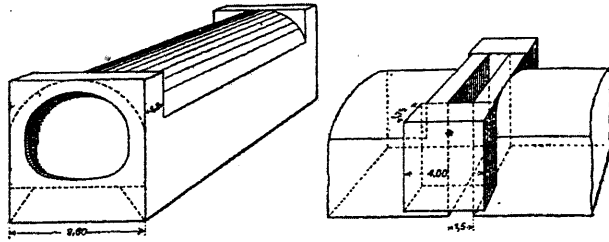
かくの如く隧道間の空隙の兩側を閉塞したる後空隙の天井部には、長 11 m 幅 3m の可動潜函 (Diving Bell) を載せて空隙を塞ぎ、之に壓搾空気を送ると同時に隣接二隧道内部の水



Schematische Darstellung der einzelnen Bau-stadien bei der Seine-Unterfahung.

第 47 圖

替を行ひ、空隙内に残留する土砂を開掘し縦手に於ける疊築工を完成した。



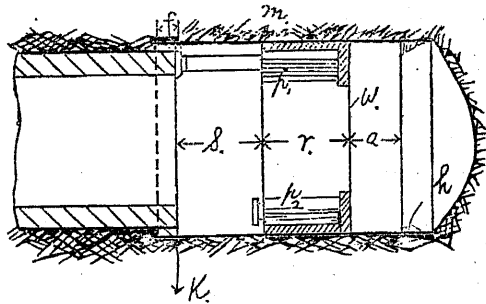
Schematische Darstellung der Verbindung von je zwei benachbarten Caissons.

第 48 圖

(e) 楯工(Shield method) 楯

工には壓搾空気を作業場に送るもの (Pneumatic shield) と然らざるものとの二種あるが、前者を説明すれば後者の方は自ら明かになるから、茲には空気式楯工のみを記述する。

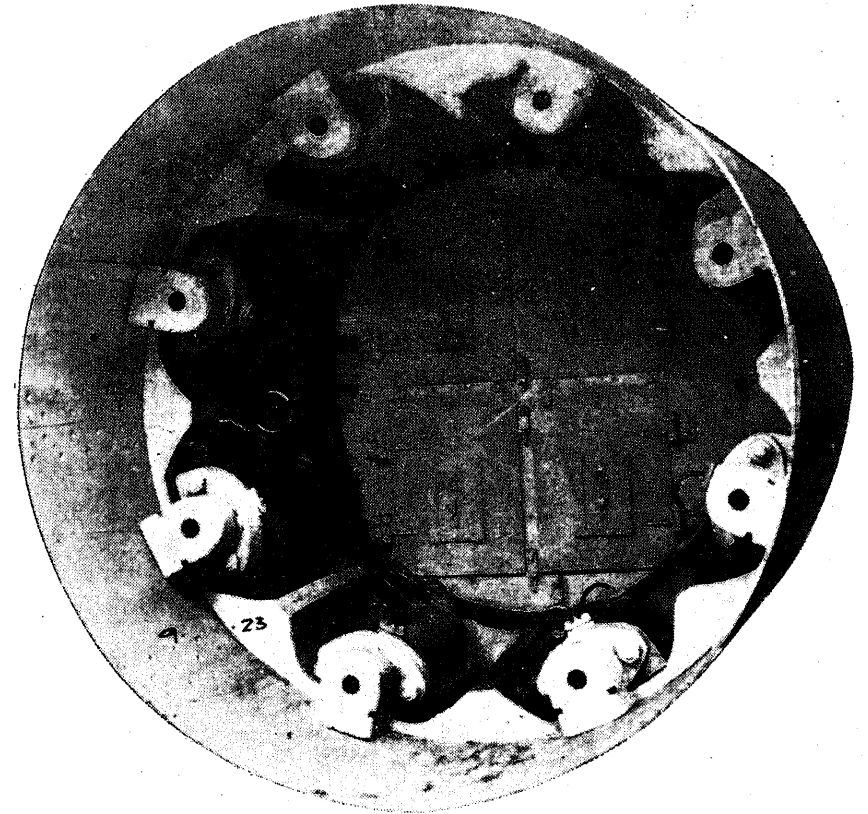
地下水を以て飽和せられ、而も地表下深き柔軟土層内に隧道を穿つには此方法以外に安全確實なる施工法がない、Sir Isambard Brunel (1769~1849) は始めて楯工をテムス河底 (第 6 表) に應用したが、之は水底隧道の上に新時代を劃した偉大なる創案である、其後 Lord Cochrane に依りて空気式楯工が考案せられたのである、楯の構造は第 49 圖に示すが如く、鐵製の圓筒 m (Skin と言ふ)の内が三區間に分割せられてゐる、 m の内徑は隧道壁 (Lining) の外圍よりは稍大きい、 m 内の三區間は次の如くである。



第 49 圖

1. 掘鑿作業場 (Working chamber 又は Front part).....a
 2. 軀體 (Body 又は Internal structure)r
 3. 隧道壁組立作業場 (Tail 又は Rear part)s
- 此外には 先端 = h 切端 (Cutting edge) を備へてゐる。

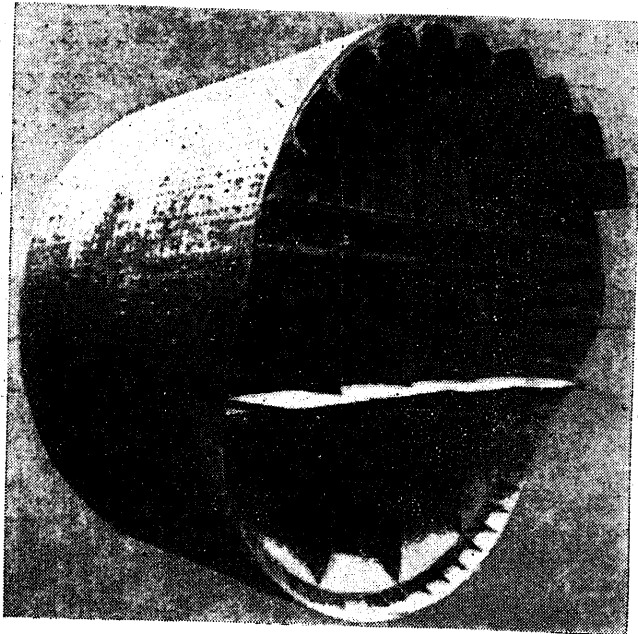
m は其後端の小部分 f を既設隧道壁の外圍に残し、他大部分を以て地山を支持してゐる、楯自身を前進せしむるため多數の水壓托重機 (Hydraulic Jack) が r の周圍に取附けられてゐる、是等托重機の個々に加へる水壓力の多少に依つて、楯工を任意の方向に曲げて前進させることが出来る、第 49 圖は楯を進め切つた時の状態を示すもので、此際 p_1 を縮めて p_2 の如くにして S の區域に隧道壁を造ると同時に、一方 a に於ては土砂を開掘し隧道壁の完成を待つて、其縁端面に托重機の脚基 (Plunger) を當てがひ托重機に水力を加へて楯を前進せしめる、楯の前進後隧道壁の外周に m の厚さに相當する空隙を生ずるから、隧道内



第 50 圖

より膠泥を注射して空隙を填充する。

地質の甚だ軟弱なる箇所に適用する場合は、土砂の崩壊してr部に侵入することを防ぐためa及rの間にwなる隔壁(Bulk-head)を設け、これに戸を装置



第 51 圖

し従業者のaに出入並びに開掘土の搬出此の戸に依ることとする、第50圖は楯の後部より隔壁を見たものである、又地盤の非常に悪い箇所ではaを小區域に仕切り猶切端hの先端を垂直でなく第51圖の如く頂点を廣く底部を狭くするやう傾斜状にする、既設隧道に使用せられた楯の構造は次表の通りである。

第 7 表

隧 道 名	外 徑		スキンス厚 ins.	長 さ		打重機 の 數	打重機 内 徑 ins.	最 大 前 進 力 米噸	楯 の 量 米噸
	ft.	ins.		ft.	ins.				
St. Clair	21	6	1	15	3	24	8	1,795	92
Hudson	19	11	1 1/4	10	6	16	8	1,540	92
Glasgow Distr	12	2 1/2	1/2	6	6	6	6 1/2	100	7
Blackwall	27	8	2 1/2	19	6	23	8	5,785	224
Clichy Siphon	8	4 1/2	3/4	6	8	6	10		
						5	6 1/2	80	73

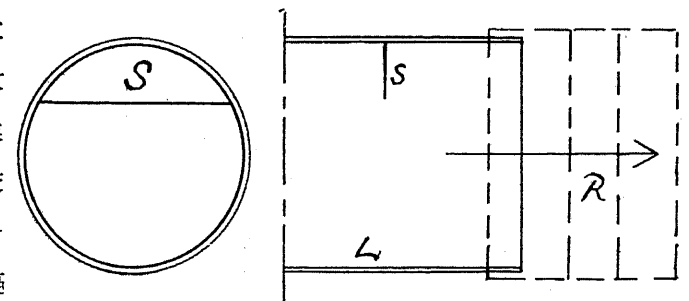
East River Gas	11	0 3/4	7/8	7	2 1/4	12	5	595	12
Waterloo & City	24	10	1	10	0	22	7	845	112
Baker street & Waterloo	13	0	1	9	8	14	6	475	33
Greenwich	13	0	1	14	1	13	7	840	84
Battery. East R.	16	11 1/4	1 1/8	9	6	14	8	1,750	55
E. River, P.R.R.	23	6 1/2	2 1/4	18	0	27	9	7,730	240
H. River, P.R.R.	23	6 1/4	2 1/8	17	3 3/8	24	8 1/2	3,300	193
羽越線折渡	24	2	—	12	0	32	—	800	—

打重機の水壓 120~130 lbs/□ のものが多い、楯の進行は地質の柔かき粘土の場合は次の如くであつた。

第7表最下行の Hudson River, P. R. R.	平均一箇月の進行	360 ft
同 上	最大一箇月の進行	545 "
第6表に記入の Holland	同 上	535 "

作業場に壓搾空気を入れるから、隧道壁完成の箇所に氣閘室 (Air Lock) を設置し外氣と作業場とを遮断せねばならぬ、氣閘室は従業者出入用、材料の搬出入用の外に豫備として一個即ち合計三室を設備するが良い、氣閘室と作業場との間で隧道壁完成の箇所の上部には、第52圖の如く鐵板張りの隔幕 (Screen) を豎

し置くが宜しい、其故は萬一作業場に水の浸入した場合空氣は此隔幕のために妨げられて



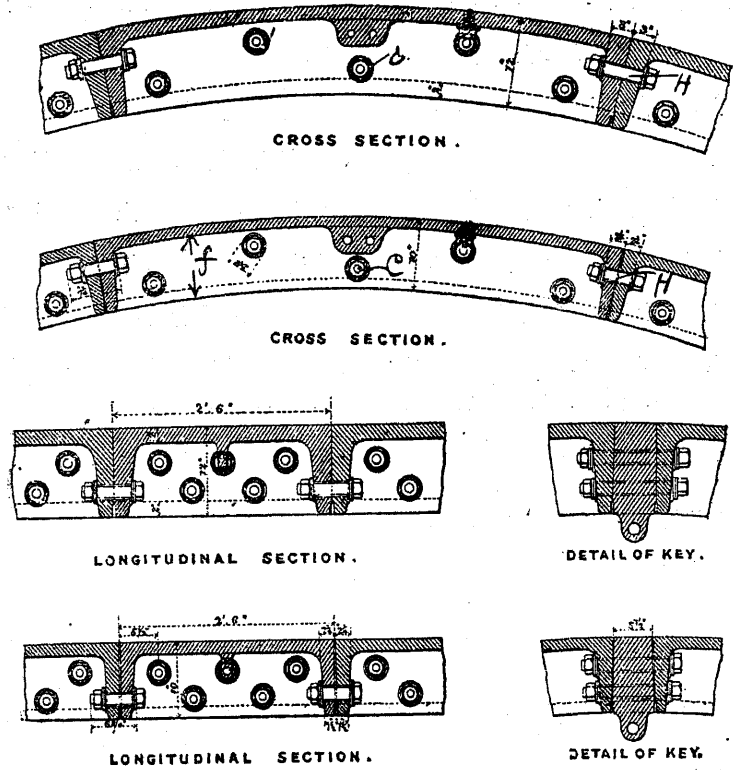
R 楯 L 隧道壁完成箇所 S 隔幕

第 52 圖

全部逸出しない、其結果従業者を救助し得る見込がある。

E. 隧道壁 水底隧道は鑄鐵の板片 (Segment と言ふ) を以て被覆 (Cast-iron Lining) するを最上法とする、其理由は次の如くである。

- (1) 迅速に組立てることが出来る
- (2) 扛重機に反應力を與へる
- (3) 壁の厚さ薄きが故に従つて開掘土が少ない
- (4) 組立後直に最大の強度を備へる
- (5) 水密にすることが容易である



BLACKWALL TUNNEL, LONDON.
Details of Joints of Cast-Iron Lining.

其形状は第 53 圖の通りである、圖中楔(Key) とあるは最後に押込む鐵片である、又その寸法其他は第 8 表の如くである。

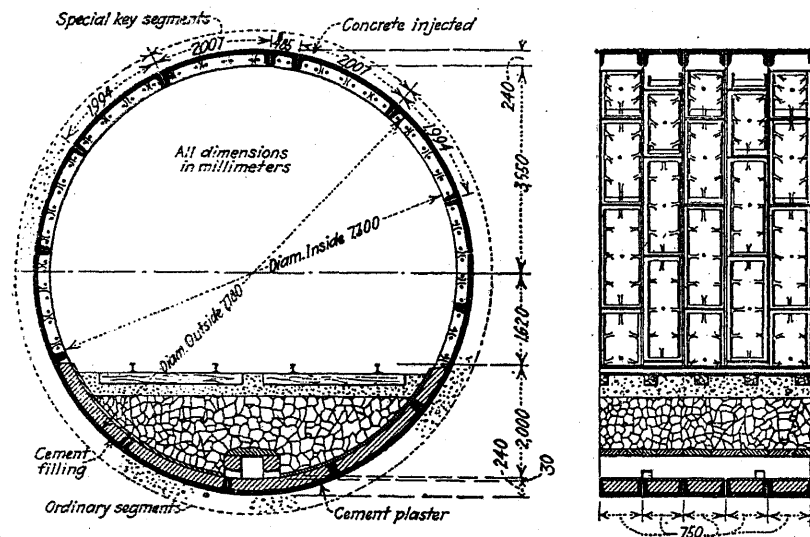
第 8 表

隧道名	Segment の			第53圖 f の 深さ ins.	Segment の數 (Key を除く)	隧道の 長さ 毎呎の 重さ lbs.	締付ボルトの 數		徑 ins.	底部の 水面下 最大深 度 ft.
	外周直徑 ft. ins.	長さ ins.	厚さ ins.				C	H		
Tower, London	7 13/4	18	7/8	3	3	971	31	...	3/4	...
Antwerp	10 10 3/4	19	1	4 3/8	6	1,880	47	...	1	...
City & S. London	11 3	20	7/8	4 1/2	6	1,880	47	...	7/8	75
Mersey	10 0	18	1 11/16	6	10	3,061	28	22	...	54
St. Clair	21 0	18 3/4	2	7	13	4,333	157	56	7/8	78
Hudson	19 6	20	1 1/2	9	11	6,055	66	36	1	100
Glasgow Harbour	17 0	18	1	6	13	4,559	66	23	...	62
Glasgow District	12 0	18	3/4-1	6	9	2,211	66	20	1	70
Kingston N.Y.	9 0	18	7/8	4	6	1,580	37	14	1	...
Blackwall	27 0	30	1 1/2 2	10 12	14	9,408 13,265	70	75	1 1/2	80
Clichy Siphon	8 2 1/2	19 3/4	1	4	5	1,453	36	24	1	58
East River Gas	10 10	16	1 1/4	4	9	2,400	46	20	1	122
Mound of Edinburgh	17 6	18	1 3/4	7	14	7,100	...	...	1 3/8	...
Waterloo & City	13 0 13 7 1/4	20	7/8	5 1/8 5 1/8	7 7	2,326 2,431	57 57	24 24	1 1	62
Concorde Ssphan	6 6 1/2	19 3/4	7/8	3 5/8	4	895	21	15	7/8	38
Spree +	13 1 1/2	25 5/8	3/8	4	3	1,270	72	36	...	35
Baker St. and Waterloo	12 9 3/4	18	1	4 7/8	6	2,643	53	14	7/8	70
Greenwich	12 9	20	1 1/4	6	8	3,080	47	...	1 3/8	70
Monot River Battery. East River	16 8 1/2	22	1 1/8	7 1/2	8	4,000 4,540 5,130	49	27	1	94

East River	Land	23	0	30	1	8	11	5,166	67	60	1 1/4	...
		23	0	30	1 1/4	9	11	6,776	67	60	1 1/4	...
	Pa. R. R. River	23	0	30	1 1/2	11	11	9,102	67	60	1 1/2	68
		23	0	30	1 1/2	11	11	9,102	67	60	1 1/2	93
No. River, P.R.R.	23	0	30	2	11	11	12,127	67	60	1 3/4	98	
	23	0	30	1 1/2	11	11	9,273	67	60	1 1/2	...	
Hilsea Creek	12	6	20	...	...	6	2,240	...	...	...	58
Rotherhithe	30	0	30	2	14	16	16,600	...	...	...	...
				1 3/4	14	16	14,700	85	79	1 1/2	97	
River Dee	8	6	18	1	5	5	1,960	42	18	1	50	

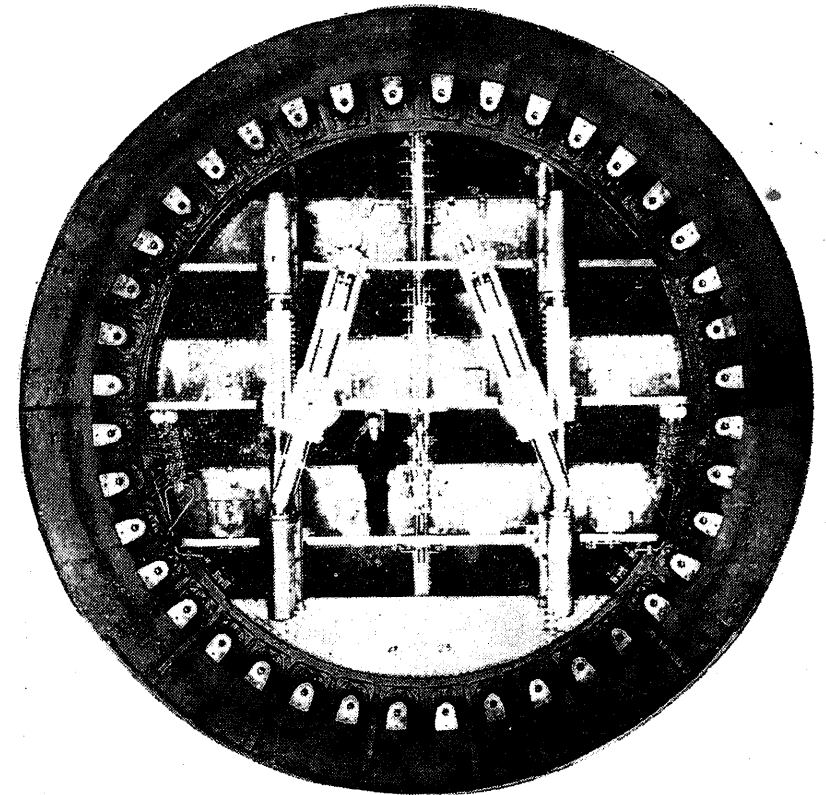
【備考】 +印 Spree は鑄鋼、C は隧道軸に並行するもの、H は隧道軸に直角のもの (第 53 圖参照)

ライニングの内面に混泥土を塗り付ける例もあれば、猶其表面に白色タイル(Tile)を張詰めて隧道内を明るくすることもある、羅馬地下鐵道用隧道の計畫は第 54 圖の通りである。セグメントの取付には Hydraulic Erector と稱する頗る



Section of tunnel of concentric cast-iron rings used under the Tiber River and at other points

第 54 圖



第 55 圖

便利な機械が使はれる、此機械はセグメントを掴みながら之を外方へ押付けることも出来れば、又周圍望みの箇所に持ち行くことも容易である、此機械の一例を第 55 圖に示す、同圖にてはエレクターは二臺付けられてゐるが、断面の小なる隧道では中心部に一臺設備せられるだけである。