

隧道施工技术文集

Proceedings of Tunnel Construction Technique



1985—1988

编者按

上海隧道施工技术研究所成立三年了。三年在历史的长河中是短暂的，然而研究所发生了巨大的变化。人数从三十多人发展到一百二十多人，产值从几十万提高到三百多万，凡是我公司承担的重大工程都留下了我们的足迹。更重要的是研究所在社会上的声誉与日俱增，在科研和完成工程的认真负责态度方面受到各方面的交口称赞。

这一本论文集，仅仅是三年中广大科研技术人员在科研和工程技术方面的一些总结。从中可以看出我们所选的课题都是紧密结合工程的，是为解决工程中的实际问题而立题研究的，所以具有较大的生命力。能够产生较大的经济效益和社会效益，这也是我们今后工作的宗旨。我们并不想把科学研究的水平停留在实用主义上，必须努力去探求规律性的东西。把所得的经验上升为理论，来指导工程的实践。这也是汇编这本论文集的目的。

三年的发展过程使我们深深地体会到，任何事物的发展都不是孤立的。一个单位的发展也是这样，需要各方面的支持和帮助。研究所三年来得到各级领导的关怀，各位隧道与地下工程技术专家的帮助，各兄弟单位的配合，在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促、论文集的编辑工作难免存在不少错误，请各位读者提出批评意见。

目 录

施工技术

延安东路隧道地基原理和施工监控·····	刘立礼 (1)
注浆加固在上海延安东路越江隧道中的应用·····	程 晓 (16)
软土地层抓斗法施工地下连续墙技术·····	王育南 (21)
顶升立管建造海底进水口及其水力计算初探·····	刘立礼 (29)
延安东路越江隧道气压施工中工业电视和无线电通信的应用·····	奚志勇 (43)
盾构跟踪注浆·····	程 晓 (52)

试验研究

盾构法隧道拼装式钢筋混凝土衬砌接头的试验和研究·····	傅德明 (60)
软土地基注浆的机理和效应·····	白 云 (73)
圆形隧道的土压力·····	侯学渊 刘立礼 (109)
上海地铁试验现场调查分析报告·····	潘国庆 (136)
软土地基注浆加固——轮土分层注浆SRF工法·····	程 晓 (145)
上海地铁试验盾构隧道衬砌结构的现场测试报告·····	傅德明 (155)
预制板——泥水固化地下连续墙试验·····	王育南 (165)
石洞口电厂沉井混凝土水化热测试·····	王乃安 (175)
软土地基注浆加固设备的概述·····	王善根 (178)
对地表沉降与注浆加固的探讨·····	张冠军 (190)
邓肯——张模型的改进·····	白 云 (193)

防水材料

遇水膨胀防水橡胶在地下工程中的设计和应用·····	俞志强 史复兴 (199)
地下工程中高分子防水材料的防霉·····	夏伟中 (207)
SNT——彩色聚氨酯防水涂膜橡胶及其施工应用技术·····	徐根法 任 春 (212)
软土地基加固注浆材料·····	冯善彪 程 晓 (218)
废泥水的分离利用研究·····	王育南 (228)
水玻璃在注浆中的应用·····	程 晓 (232)

电测技术

隧道内VHF/UHF无线电波的传播特性和应用特性·····	奚志勇 (237)
应变式传感器制作技术及故障分析·····	王顺根 (247)
消除电阻应变测试中接触电阻影响的方法·····	安伯川 (253)
计算机和传感器应用于隧道施工的设想·····	奚志勇 (258)

隧道施工技术研究所简介

延安东路隧道地基处理和施工监控

刘立礼

前言

上海是我国最大的沿海城市，浦西建筑鳞次栉比，人口密集，交通繁忙，市容繁华。东大片土地尚未开发利用。一江之隔，发展悬殊，亟待开发。为发展浦东地区，势必变浦天堑为通途。

继打浦路第一条隧道之后，在中央和上海市领导的关怀下，以客运为主的延安东路隧道，一九八四年十二月十八日，盾构自浦东三号井向浦西挺进，标志着隧道主体工程开工。一九八七年十月廿四日，盾构完成1476米推进，顺利进入一号井宣布浦东浦西贯通。与此同时，东、浦西矩形隧道，引道同步相继进行，由于隧道所经地区，建筑密集，地下管线如网，地质条件复杂，又遇到旧洋泾浜废址，给隧道施工带来一系列问题。为保证隧道施工的利进展，区别情况，分别对待，对地基进行处理和伴随施工进行了监制。

一、延安东路隧道简况

延安东路越江隧道东起浦东陆家咀路烂泥渡路，穿越黄浦江，西至延安东路盛洋路（如图1），全长2261米。（按浦东引道口到浦西北引道口计），自浦东烟台路附近的三号起，经浦东原毛麻四库的二号井，过江到浦西延安路江西路口的一号井为盾构法施工的圆隧道，长1476米。盾构外径为11.3米。衬砌为八块钢筋混凝土。予制管片组合而成，外11.0米，内径9.9米。浦东暗埋段为矩形，长70米。引道为II形，长303.5米。浦西出口音叉形，二个进出口。北出口暗埋段为矩形，长205.1米，引道为II形，长206.4米。南进暗埋段为矩形，长177.2米，引道为II形，长203.8米。隧道设计从坡一般为3%，最大3.5%（浦西南引道）。最低隧道底标高-32.84，浦江底隧道最小自然复土5.8米。（小于构直径）黄浦江平均最低水位标高为+0.5米。

园形隧道为盾构法施工，盾构为隧道设计院自行设计，上海江南造船厂制造，盾构为格型半挤压盾构，胸板开有可启闭的闸门，推进时根据需要开启闸门，网格切土，通过闸进土，以水力冲搅成泥浆，由水力输运排出泥浆，盾构内装40只225吨千斤顶，可同时或别驱动，全部启动最大推力可达10800吨。

二号、三号井用沉井法施工。一号井为16幅地下连续墙组成多边形。三号井，施工时盾构拼装井、施工材料进出井。二号井，施工时为中间井，在沟通二、三号井后作为人员出井，运行时为通风井。一号井为施工盾构拆卸井，运营时的通风井。

浦西暗地埋改用地下连续墙施工，槽宽65厘米，深度按设计分别为13、16、18、20、米。遇旧洋泾浜地质复杂有驳基，桥台等，此处用钻孔成槽，就地浇注连续墙施工。引道钢筋混凝土板桩压桩、钢板桩，明挖法施工。

延安东路隧道,地处市水陆交通繁忙,人口稠密、建筑密集、地下管线如网的地区,特别浦西延安东路地段、更是车水马龙、盾构过江后即遇到旧抗日胜利纪念碑桩基,天文台48.68米塔型建筑物,三层砖木结构浦江商店,新建人行天桥桥基。沿线尚有人防地下室和加油站地下储油罐、变电所。在盾构推进影响范围内尚有 $\phi 1650$ 下水管。地下连续壁所经,尚有 $\phi 700$, $\phi 300$ 煤气管、 $\phi 1350$ 下水管、地下电力电、缆电车电缆,以及通讯电缆、靠地下连续墙最近的建筑物仅距4.5米,其基础为一般条形基础,有些区段相距仅8.8米,且6.0米为车辆繁忙通行的车道。

延安东路隧道沿线水文地质情况复杂、原地质钻孔,孔距50—100米,黄浦江中孔距近100米。初步钻探结果,隧道所经地层为第四纪冲积层,属饱和含水、软可塑、高压缩性土层。具体说表层为回填土、褐黄色亚粘土、其下为亚粘土、亚沙土、轻亚粘土,淤泥质亚粘土。浦东盾构段有较厚的亚沙土,延伸入黄浦江,给盾构施工带来很大困难,江中复土5.8米厚其上亦有1~2米透水的亚沙土层,给江底盾构施工带来威胁。在浦东,盾构自三号井出洞后就相继遇到人工回填的旧河浜、尚有旧驳基、桥土敦,过小弄、体育场又遇到事先不明的下水管、上水管,浦西暗埋段、引道段遇到旧洋泾浜蜿蜒于设计的轴线范围。地质纵剖面如图1所示。

在这种地质情况复杂、交通繁忙、人流稠密的条件下修建隧道,给施工增添了一定的难度,为克服这些困难,从加强地质勘探、进行地基处理、实行施工监控(量测)几个方面作了努力,收到一定效果,这些措施为提高施工质量、保证施工安全、科学施工发挥了一定作用。下面就分别对这些措施予以阐述。

二、重视地质勘探

1. 在原地质钻探的基础上,对江中、浦东岸边段进行补钻孔,修正、完善原地质剖面。原在两岸钻地质孔34个,一般间距50—70米,江中钻孔为5个,间距约100米。施工过程中补钻了9个钻孔,包括江中4个钻孔。

盾构出洞前在二号井至江边约70米范围内补钻了5个钻孔,进一步探明隧道南侧亚沙土、土层层位比北侧深2米,为此,井点滤头埋置深度按地层采取不同深度,使降水更有效地发挥了作用。

通过江中补钻孔,探明浦东段一层亚沙土,并不像原地质剖面图所示在岸边尖灭(原在a, b线为尖灭),而是延伸至江中120米处,即图中c点(见图1剖面图),从而修正了原地质剖面。诚然江中是否有这层亚沙土,对盾构法施工是至关重要的。因这层亚沙土属透土层,按此江中盾构上方的复盖粘土实际上是更薄了,危及了盾构安全过江,由于这一探明为抛填粘性土加厚复盖层,提供确切的依据。

2. 进行地震反射波法探测浅地层构造

在测区内布置了三条测线。按测定的反射波进行整理分析,绘制了如图2的地质构造图。在隧道南侧沿f—f'有一地层错动,这与地质钻孔资料中南北亚沙土层位相差2米结果相一致,在隧道范围有一隆起,直径约13米,可能为一透镜体,提醒隧道盾构推进时注意,这一地球物理勘探为该区地质提供了定性的参考资料。

3. 对江底进行地球物理调查

几个钻孔不同土层的主要物理力学指标如下表:

土层物理力学指标

浦东二号井附近地质																	
层位	深度 (m)	土层名称	含水量 W	孔隙比	饱和度	液限	塑限	塑性 指标 I _p	粒 径 组 分 %			内聚力 C	内摩擦角 Ψ	渗透系数 K	压 系 B	缩 数 B	压 模 量 E
									0.1—0.05	0.05—0.005	<0.005						
—6.0	10	灰色亚沙土	34.2	0.93					21	74	5	0.07	25°		0.019		101.1
—11.0	15		35.0	0.95					28	62	10	0.05	25°	1.7×10^{-4}	0.016		120.8
—14.0	18	灰色亚粘土	41.5	1.19		43.2	23.0	20.2				0.14	9°		0.063		33.2
—22.0	26		40	1.0					16.0			0.09	11°	5×10^{-7}			
江 中 段 地 质																	
—13.0		泥质亚 粘土	46.1	1.33				14	8	67	25	0.11	8°	1.32×10^{-1}	0.092		24
—23.0			35.1	1.05				15	12	70	18	0.88	13°	1.1×10^{-9}	0.04		38
浦西一号井附近地质																	
—3.5	7	亚沙土	34.0	0.96	1.0				10	76	14		30°		0.04		43
—11.5	15	淤泥质粘土	41.0	1.15		42	23	19				0.09	6°		0.09		22
—18.5	22	亚粘土	40	0.95		42.1	23.2	18.9				0.18	1°		0.09		23

黄浦江航运繁忙，过去航运事故时有发生，1944年意大利法西斯投降时，曾有一艘“康梯凡蒂”三千吨邮船，在现隧址江中偏浦西一侧沉没，后经打捞排除，此外一些小船，可能在此区域沉没。

另杂物散落江底势在难免，近年铺设了一些电缆后，明禁抛锚，当小沉船，落锚，不影响航运时，一般则不作清理打捞。这些疑存物可能对盾构推进造成影响，或形成渗水通路，为此需要摸清江中疑存物，经上海航海学会的协助，邀请地矿部海洋地质综合研究大队、第一海洋地质调查大队进行了江底地球物理调查，在调查基础上又请上海打捞局进行了潜水探摸。

调查采用了测深法、旁侧声纳扫描法、或地层剖面法及磁法，相互配合的综合探测办法。

根据调查发现隧道轴线30米范围有30个异常物磁性异常9个，在隧道中的20米范围为10个，磁性异常4个，江中有三个异常物突出江底，经潜水员探摸为一个反仆的水泥船，一个砼块，一个工字钢突出江底，通过调查对江底疑存物做到心中有数。

4. 延安东路隧道浦西段与旧洋泾浜多处相交，据调查旧洋泾浜虽经填没，但原有条石驳岸、桥台、桩基……等仍埋于路下，然确切位置不明，埋深不清，影响地下连续墙挖槽，影响压桩板桩施工，为此组织了详探。

经地矿部海洋地质综合研究大队补钻，确证旧洋泾浜位置系用人工抛填、抛填料为杂填物，高透水，不稳定，有些地段有30厘米以上条石，分析属旧浜驳岸，局部地段石块下尚有木桩，可能是旧桥台木桩，尽管其确切位置与原调查位置稍有出入，但为工程施工采取特殊技术措施指明了方位，提供了设计依据。在施工过程中逐个地暴露出来，确实给施工带来不少困难，在职工的共同努力下逐个地被克服。

三、地基处理

1. 为使盾构自2°井安全出洞进行地基处理

针对地质补探的资料，经研究在盾构出洞，尚无条件加气压的情况下，采取对亚沙土、亚粘土层进行分层劈裂注浆，加固地层，沿隧道两侧形成两道抗渗隔水围幕前方加封闭隔水墙，在隔水围幕内加井点，降低内部水位，其作用：①为盾构出洞而疏干土层、稳定土体；②为盾构后续设备车架、压浆车架（约50米）进入闸墙内提供空间。③为安装闸墙、创造条件。

具体方案布置为图—2所示，在井壁洞口处，为防止沉井侧边的未固化泥浆涌入盾构，布置了一排注浆孔。在两侧各布置三排注浆孔，呈梅花形，边上两排为“封闭孔”中间一排为劈裂注浆孔，端头亦布置三排注浆孔，为考虑盾构推进易通过，浆液配制与两侧不同，用强度稍低浆液。

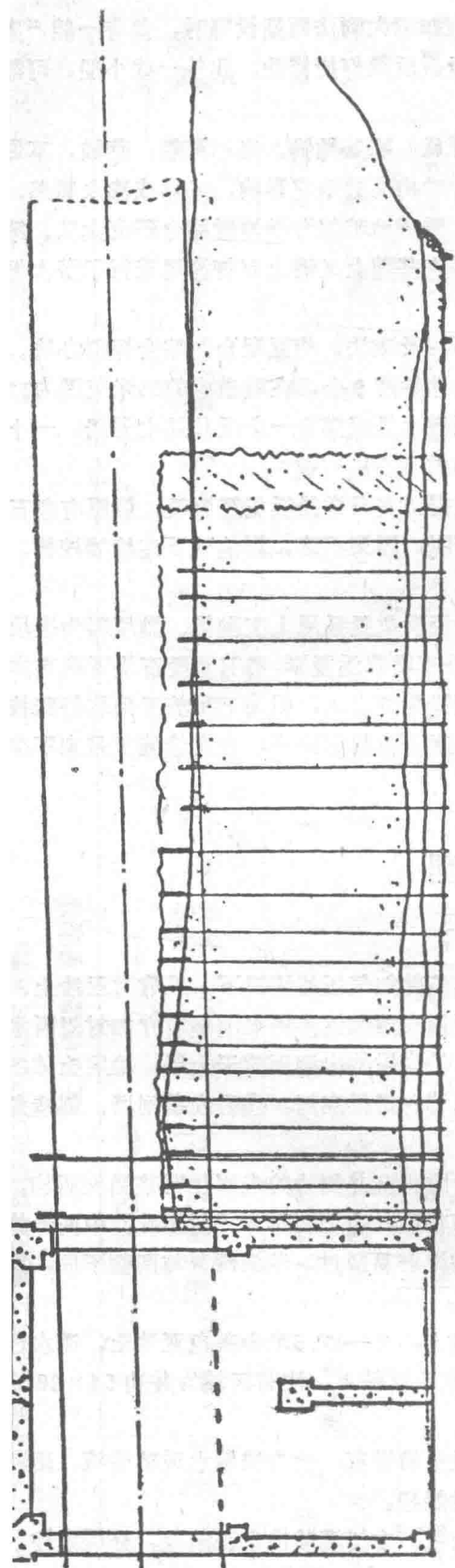
二号井西侧地质情况为：上部2米左右为回填表土，2—17.5米为灰色亚沙土，透水性较好，水平渗透系数 $K=1.7 \times 10^{-4}$ ，17.5米以下为灰色亚粘土，注浆区域为井边 54×26 米的II区，注浆深度20米，主要对象是亚砂土层。

浆液采用二种：一为水泥、膨润土浆液，加入适量粉煤灰，一为酸性水玻璃浆液，后者粘度较前者低，可灌性更好，浆液凝结的胶体抗渗性能好。

注浆管一般排为三排，内外两排注水泥、膨润土浆，中间灌酸性水玻璃浆，分层灌注。

油泉管; +井头管;
观测孔; ●孔内水压计;
5层沉降测点; *地表沉降坑

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----



注浆压力一般 2 kg/cm^2 左右, 劈裂时, 压力可稍提高, 凝结后强度可根据需要选择不同配比而达转到 $10\text{--}40\text{ gf/cm}^2$, 沿井壁盾构出洞处及盾构前方封墙, 选强度较低者, 以利盾构推进。

注浆处效果较好, 盾构出洞至装气压闸墙及45环推进中没有出现涌水、渗水, 土体相对较稳定, 盾构推进得以顺利进行。盾构出洞拆除封门后, $\phi 11.8$ 米的洞口没有大量土体坍入, 24小时后, 洞口土体尚能自立。

检测结果, 说明效果良好, 从水位观测孔情况看, 围幕外的 2°孔水位 $+2.4$ 米, 围幕内 1°孔水位 -11.0 米, 相差 13.4 米 (如图 3), 实测降水总抽水量为 $3\text{ m}^3/\text{s}$ 按 30 根井点管计, 每根为 $Q = 0.1\text{ m}^3/\text{s} = 27.77\text{ cm}^3/\text{s}$ 按达西公式计: $K = 4.53 \times 10^{-6}\text{ cm}/\text{秒}$ 较加固前 $1.7 \times 10^{-4}\text{ cm}/\text{秒}$ 渗透系数降低了。

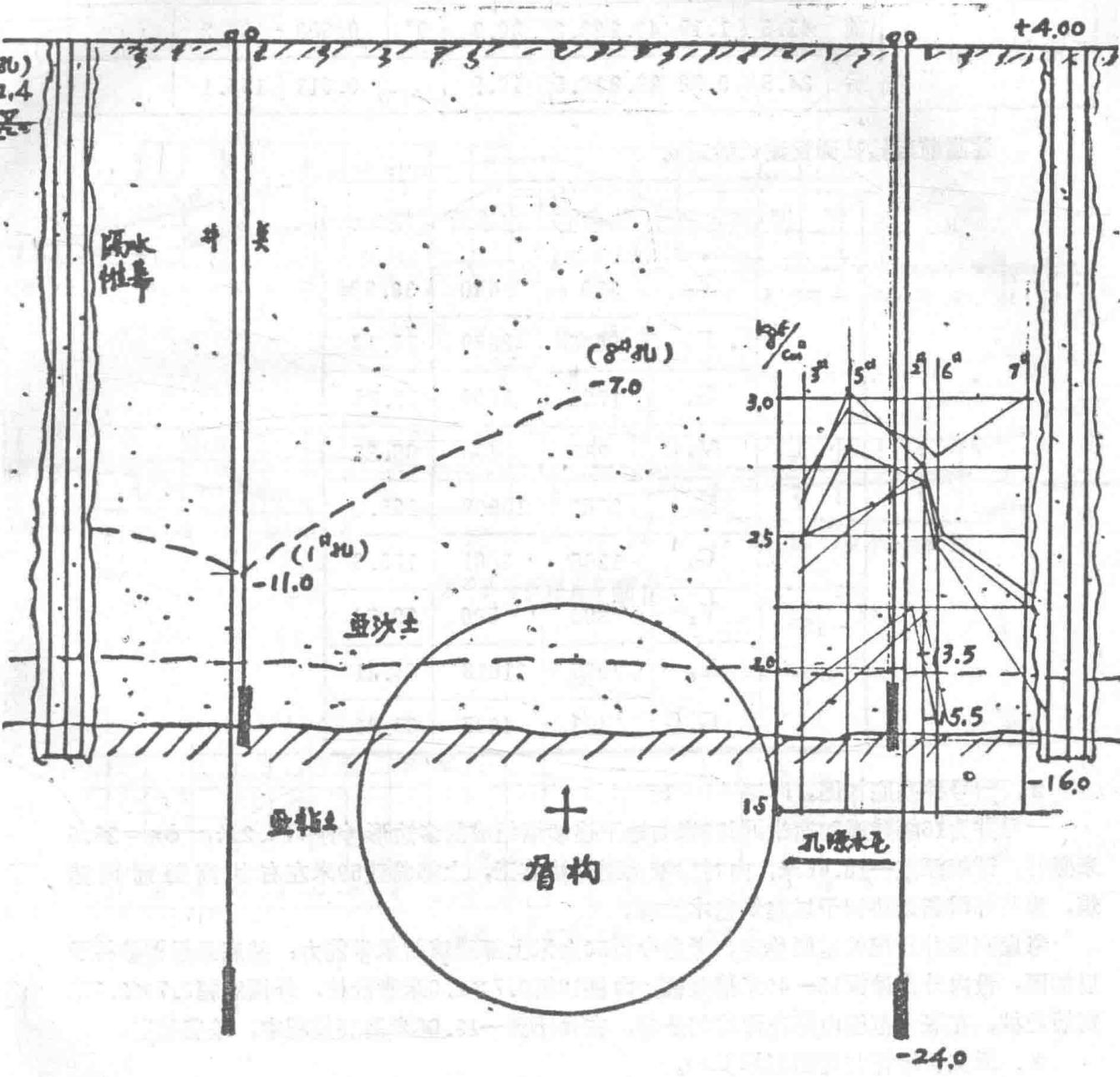


图 3

劈裂注浆前后土的指标亦有提高，其对比值如下表所示

土层	深度	加固前后	含水量	孔隙比	液限	塑限	塑性指数	ϕ	压缩系数	压缩模量	贯入度 N
亚沙土	10 ^m	前	34.2	0.93				25°	0.016	101.3	9
		后	28.7	0.83					0.017	111.2	12
亚沙土	15 ^m	前	35.0	0.95				25°	0.016	120.8	12
		后	21.4	0.59					0.006	248.4	24
亚粘土	18 ^m	前	41.5	1.19	43.2	23.2	20.2	9°	0.063	33.2	
		后	34.5	0.92	29.3	18.5	10.8		0.011	155.1	

注浆前后钻孔弹性波试验对比

深 度	测定项目	注浆前	注浆后	提高率
- 7 ^m	V _s	330	440	33.3%
	E _a	5076	8889	75.12
	G _a	1721	3056	77.75
- 10 ^m	V _s	283	468	65.37
	E _a	3761	10008	166.1
	G _a	1265	3461	173.6
- 12 ^m	V _s	390	506	29.74
	E _a	7075	11618	64.21
	G _a	2403	4045	68.33

2. 一号井基底加固。

一号井为16幅壁厚70厘米，深30米的地下连续墙组成的多边形 $\phi_{内}=27.2$ 米， $\phi_{外}=28.6$ 米竖井，开挖深度—18.66米，内衬井壁为逆作法施工，上部将建59米左右的高耸通风建筑，为与外滩街景协调予以建筑艺术处理。

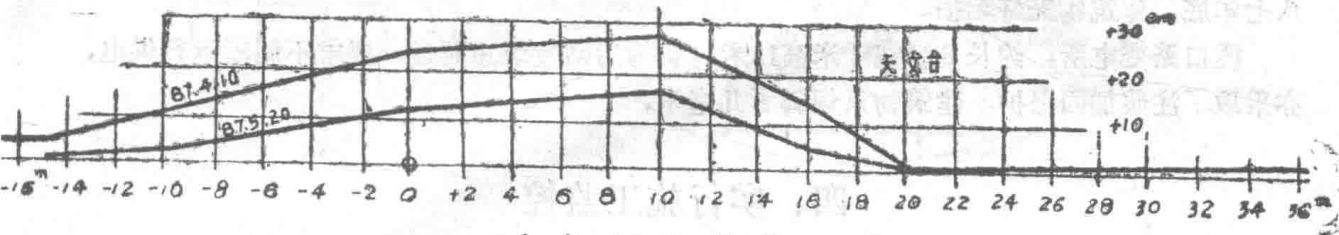
考虑到竖井开挖的基底稳定，考虑今后50余米上部建筑的承带能力：基底采用槽壁桩予以加固，设内外两圈深18—40米槽壁桩，内圈13幅0.7×2.6米素砼桩，外圈23幅0.7×2.7米钢筋砼桩，在底板范围内梅花形均匀分布，在开挖到—13.66米基底过程中，基底稳定。

3. 天文台塔标与浦西驳岸保护。

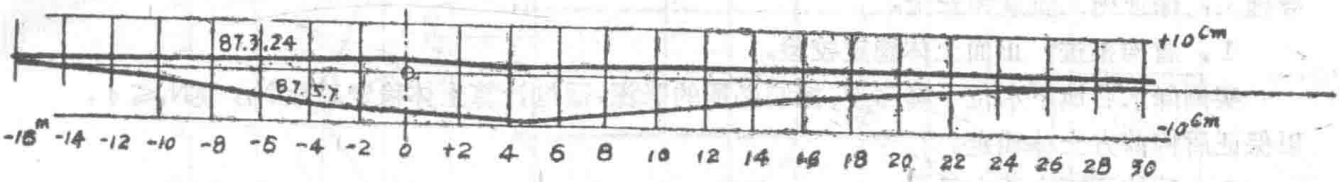
天文台塔标，建于1907年，高48.68米，为外滩象徵之一，海外巨轮驶近吴淞口即可见，盾构中心离天文台塔标中心约22米，盾构顶离地面约16米。设计估算，土体损失量如达3%，

则沉降槽约宽60米，最大沉降约30厘米，天文台离盾构边仅15米处于沉降槽范围将受到影响。

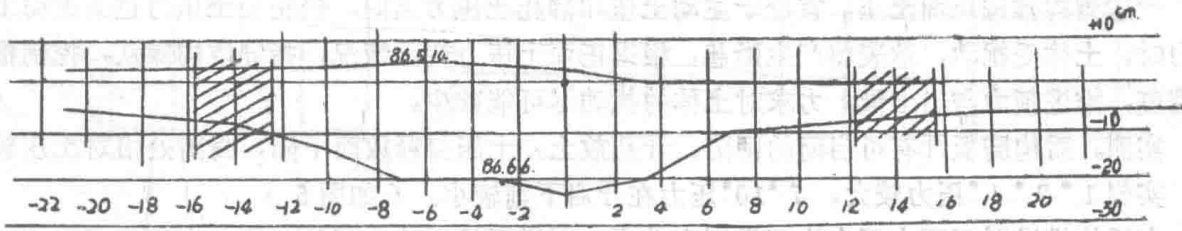
为此设计了加固地基保护方案：为考虑此处摆渡交通繁忙，尽量后缩施工区域，设计了在天文台塔标与隧道相邻之侧，半圆范围设置“树根桩”，保护地基，以减少沉降量和沉降差斜率，天文台处地表变形横断向如图，从图中可看出，经保护盾构推过后天文台地基变形很小，它安然屹立于浦江之滨，浦西延安路驳岸经加固处理后变形亦很小，如图4所示。最大沉陷小于10厘米。



天文台处断面



浦西延安路驳岸断面



浦东2#外40m处断面 (E-F线)

图4

4. 河南路口隧道音叉段处理。

河南路口隧道段地下连续壁，离河南路延安路口投资信托服务部建筑仅9米之宽，71路车维持单向通行，车辆频繁，有附加车载和行车振动，对该处暗埋段施工甚为不利。

为保施工安全，保证质量，地下连续墙适当加深。考虑到音叉口基坑跨度相对较大，为保基底开挖稳定，在坑底部位，事先进行局部分层劈裂注浆予以保护，现在投资信托服务部前已完成基坑开挖，浇完该段隧道结构。实现了紫金路至河南中路车辆单向通行，对建筑物没有什么危害。

5. 沿线其他建（构）筑物保护。

盾构进一号井沿线，尚遇到一些建（构）筑物，分别情况予以适当保护，结合实际情况，采用分层壁裂注浆加固地基，佐以压密注浆措施。

上海医药品公司仓库，正处在隧道轴线上方，为确保仓库正常使用，不可一日停顿，采取了加强底板，劈裂注浆，盾构推进跟踪注浆，压密地基措施，87年6月1日盾构通过直至八七年底，建筑物完好无损。

溪口路变电所，约长8米宽4米高12米，盾构边贴建筑边而过，要求不间断运行供电，亦采取了注浆加固保护，建筑物只倾斜了几毫米，

四、实行施工监控

进行实测正面土压力、地表变形、地下水位变化、孔隙水压力变化、土层变位等，以指导施工，保证施工质量和安全。

1. 盾构推进，正面土体稳定校验。

实测降水后地下水位下降深度，控制必需的降深，通过计算土体稳定系数 N_t ，使 $N_t \leq 4$ ，以保证盾构前方土体稳定。

2. 盾构正面土压力量测。

为盾构施工，控制对土体的扰动，在盾构正面埋放土压力盒。量测正面土压力，实行施工监控。

盾构进入二号井进行大检修时，在盾构胸板安装了20只土压力盒。（如图5）

一般盾构推进正面土压，宜处于主动土压和静止土压力之间。当正面土压力达到被动土压力时，土体受扰动，地表将产生隆起，根据正面土压力变化情况，指导盾构操从，控制推进速度，推进顶力与出土量，力求对土体的扰动尽可能减少。

实测。盾构胸板开有可启闭的闸门，开孔放土，土压将释放而下降，封闭处相对土压较大，实测 $1^{\circ}2^{\circ}4^{\circ}$ 压力较大， $7^{\circ}10^{\circ}$ 压力在开启下则较小。（如图5）

在盾构推进时正面土压力比正常压力升高，则说明推进速度偏快，前方产里积压，可调节推进速度和调节闸力，增加出土量，当正面压力在正常压力下逐渐下降，则说明正面土层可能有变化，土质可能变得软弱，或是放土过量，卸了荷，为此，可减少出土量或加快推进速度，如遇正面压力在增长后骤然下降，则可能正面土体在挤压后沿剪切面滑动，应引起注意，特别是在江中推进更应警惕。

3. 江中段江底隆陷测量监控。

江中段经过补钻孔，查明砂性土延伸至江中，在原江中最浅复盖5.8"处采取加抛粘

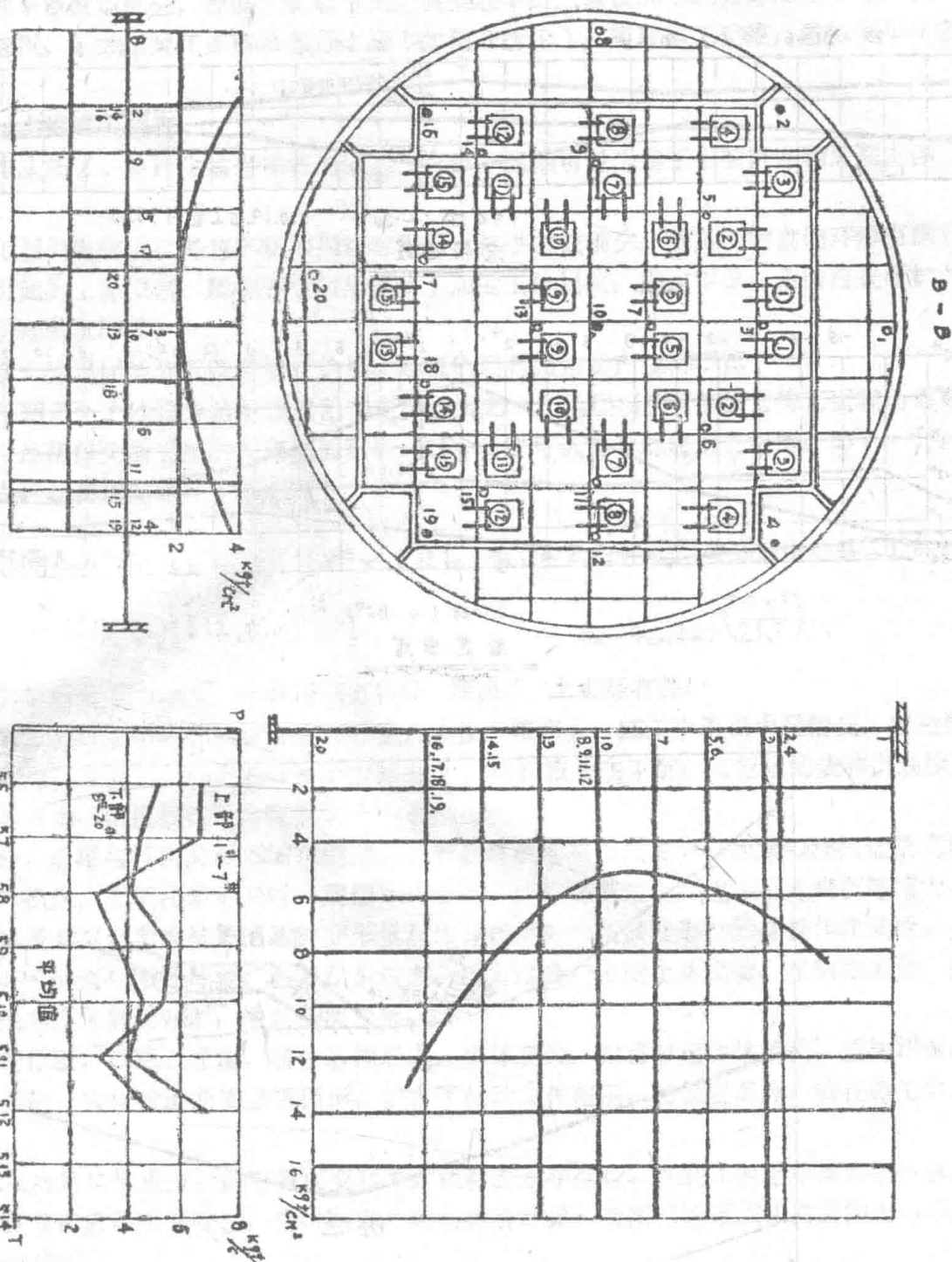


图 5

土, 增加复盖厚度, 但盾构推进仍应慎重, 应密切注视江底隆陷情况, 通过江中测深, 掌握江底变化。

水深测量运用交通艇上装双通道精密测深仪测深,可测得江底隆陷值,指导盾构推进、出土,当盾构推至复土区时(靠防汛墙约120米处),由于放土量偏大(约120%),测出江底下陷约2^m,盾构正面土压力骤降,接到这一讯号,盾构推进立即采取关闭闸门,减少出土

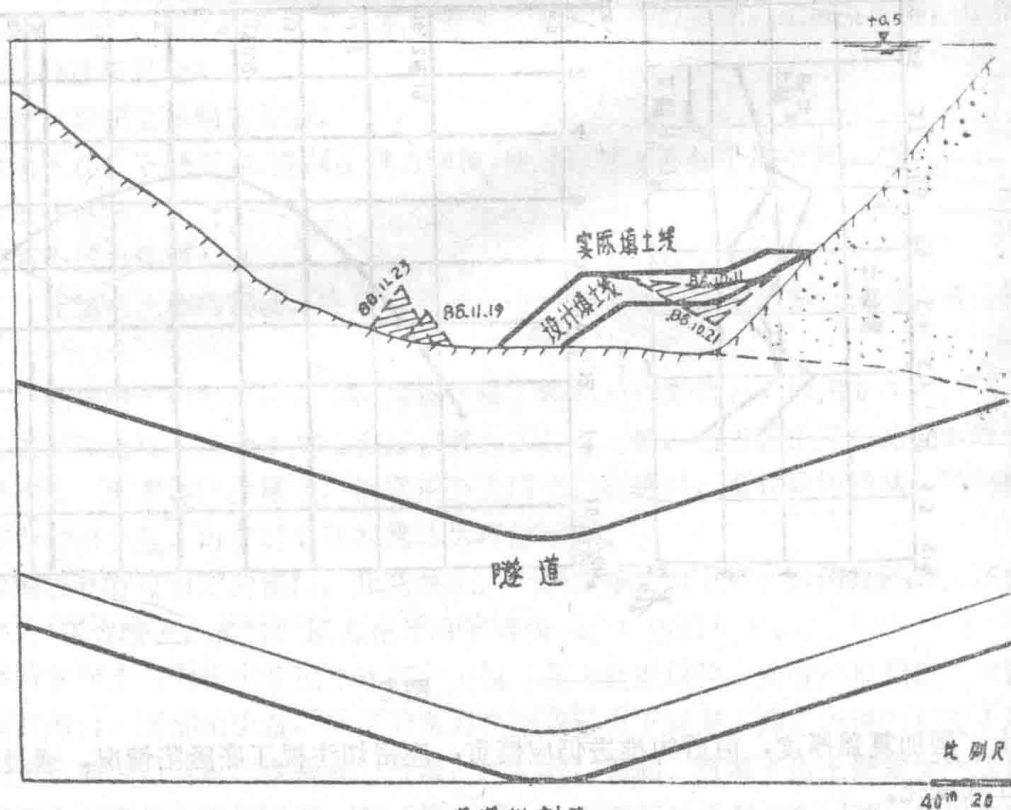
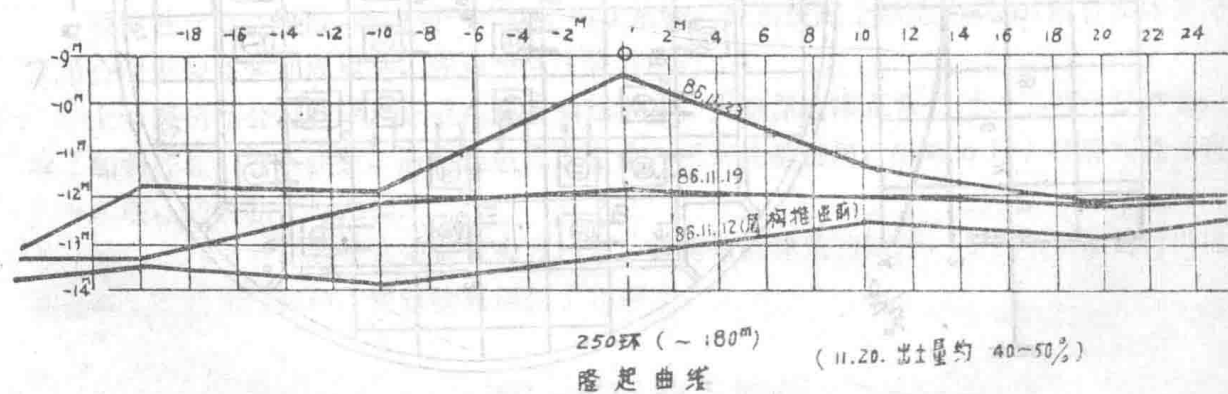
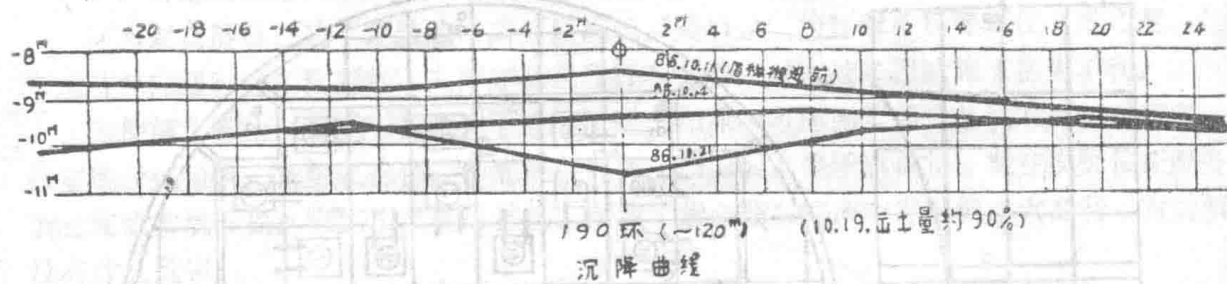


图6 隧道纵剖面

量,盾构不停歇地推进,控制了江底下沉,当推进中出土量仅50—60%时江底将隆起,局部闭胸挤压,不放土时江中可隆起近3米(如图6所示),通过施工监控,盾构安全地通过黄浦江。

4. 土层变位监测。

盾构法施工,将产生地表的竖向隆起或沉降,隆陷可分为施工期的沉降和后期土体次固结沉降。

施工期的隆起或沉降包括盾构推进时正面土体拱起或损失,盾尾与衬砌间环形空隙充填不实而引起的土体损失,盾构停歇时后退所引起的土体损失,盾构纠偏,曲线推进而扩大扰动范围引起的沉降等。

后期土体重固结的沉降是软土地层,经扰动后再固结所产生的沉降

施工期正面土体损失是地表隆陷的主要因素之一,地层损失 V 可按盾构正面横断面百分数估计,地层损失所引起的沉降槽面积 V_1 ,按Peck法可认为与地层损失相等,即 $V = V_1$,沉降槽曲线近似高斯曲线(正态曲线)

最大沉降 $\delta_{\max} = \frac{V_1}{\sqrt{2\pi} l_0}$, $V_1 = \sqrt{2\pi} l_0 \cdot \delta_{\max} \approx 2.5 \sqrt{\delta_{\max}}$ 离隧道中心线 X 处的沉降

$$\delta_x = \delta_{\max} \exp\left(\frac{-x^2}{2l_0^2}\right) \quad \delta_x = \delta_{\max} \exp\left(\frac{-x^2}{2l_0^2}\right)$$

l_0 为沉降槽宽度参数,它与隧道直径 D ,埋深 Z 、土质等有关。

V 地层损失在现用盾构上与正面开窗进土量直接相关,施工中根据土层情况,应适当掌握开孔进土,多进土,超挖量即为土体损失 V ,将招致地表下沉,欠挖则地表将出现隆起。水力输送出土,则应按泥浆密度换算出土量。

此外,盾尾与衬砌间环形间隙的充填不善是造成地层损失的另一因素,及时、适量充填可减少土体损失,充填注浆不及时,周围土体变形,环形间隙缩小,将导致地表沉降增大。

注浆量宜综合考虑推进时瞬时变形量和土体扰动后的压实变形,选择最佳注浆量。一般宜取100—150%环形间隙量,注浆超量过多、压力过高,将使土体扰动,在粘性土层,扰动后将产生非排水剪切变形,增大压实变形。

盾构停歇,或液压泄漏,将使盾构后退,土体变形,亦将引起土体损失,盾构纠偏,包括曲线推进,盾构投影断面呈椭圆形,扩大了扰动土体范围,将加剧沉降,故在施工中宜适当掌握。

土层当盾构推进过程除有竖向变形外,还存在水平变位,在施工监测中测得盾构前方与周围土体有向前和两侧变位,当拼装管片时土体有回弹,在闸门附近土体向盾构内运动,变位与推进反向。

5. 孔隙水压力量测:

盾构推进,周围土体孔隙水压上升,盾构两侧孔隙水压力如图3右侧所示,切口附近,土体向盾构运动,压力释放下降,稍远孔隙水压上升,然后随距离增加压力减少。土体中孔隙水压升高,土的有效应力则降低。

孔隙水压力消散过程,即土体再固结过程,土体再固结将带来地表的后期沉降。

实测说明砂性土与粘性土,在盾构推进中孔隙水压力的上升与消散情况不同,浦东二号井出洞60米区段,上部为亚沙土,实测孔隙水压上升情况如图7,测得孔隙水压力上升后