

土 木 建 筑 譯 丛

隧 道 工 程

同 济 大 学 隧 道 教 研 組 編
上 海 市 隧 道 工 程 局

第 一 冊

上 海 市 科 学 技 术 編 譯 館

土木建筑译丛
隧道工程

第一册

同济大学隧道教研组编
上海市隧道工程局

上海市科学技术翻译馆出版

(上海南昌路59号)

新华书店上海发行所发行 各地新华书店经售

商务印书馆上海厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 5 7/16 字数 150,000

1962年6月第1版 1962年6月第1次印刷

印数 1-800

书 号: 6009·14

定 价: 1.15 元

(内部发行)

內 容 簡 介

本輯選譯了近年來國外在此工程方面的若干科學技術資料,主要內容包括隧道地層壓力測定、襯砌結構應力檢驗、隧道的盾構法與沉放管段法施工等。上述文獻資料對國內隧道、地下鐵道、水底隧道和各種多用途地下工程的設計、施工與試驗以及對高等院校隧道專業的教學、科研工作,都有一定的參考價值。

本輯由上海市城市建設局隧道工程處和同濟大學隧道工程教研組有關人員分工翻譯審校,並由同濟大學隧道工程教研組孫鈞同志編輯。

1962年5月

目 录

1. 混凝土隧道衬砌試驗——蒸煉混凝土	1
2. 隧道衬砌的試驗研究工作	3
3. 隧道衬砌應力狀態的實驗研究	4
4. 現代的隧道衬砌方法	10
5. 用測力儀測量隧道衬砌上岩石壓力的經驗	13
6. 密封盾構在不穩定飽和土壤中工作狀況的研究	36
7. 隧道上土壓力	50
8. 隧道衬砌	56
9. 美國赫德遜河下採用盾構修建的水底隧道設計	61
10. 赫德遜河下的林肯隧道	64
11. 哈瓦那水底公路隧道	65
12. 泰晤士河下新的公路隧道建築	72
13. 波斯登港軟土層中水下隧道的建築	76
14. 盾構法施工的水底隧道	79
15. 穿越倫敦粘土的兩個隧道試驗段	84

混凝土隧道衬砌試驗——蒸煉混凝土

Széchy, C. H.

Concrete and Constructional Engineering, 54(3): 105~109 (1959) [英文]

对隧道衬砌管片的主要要求是：(1)在本身重量尽可能小的情况下，能承受外荷载和内荷载；(2)在压力水头 5~8 个大气压的情况下，管片及其间的接头不渗水；(3)接触面（突缘）应有足够的强度和精度，以抵抗千斤顶顶进隧道盾构时所产生的推力；(4)应有足够的抗蚀性以抵御腐蚀及化学侵蚀；(5)应有合适的重量及尺寸，以便当搬运和安装时很少可能引起损伤，同时又易于操作。

下述試驗的目的在于进一步探討一种能满足上述各种要求的钢筋混凝土管片，我們的首要任务是生产防水砰，它具有：(a)在 24 小时及 28 天的最小强度分别为 6430 及 8570 磅/吋² [約 450 及約 600 公斤/厘米²] (量自 8 吋 [20 厘米] 立方体試件)；(b) 24 小时的及 28 天的最小受拉强度分别为 570 及 780 磅/吋² [約 40 及約 55 公斤/厘米²] (量自 6 吋 [15.24 厘米] 見方及 2 呎 7 吋 [78.74 厘米] 长的柱体試件)；(c)在压力水头为 10 个大气压之下，砰厚度为 $3\frac{3}{16}$ 吋 [8.09 厘米] 时，仅有极少的渗水現象。

在标准大气压、温度 85°C 之下，进行蒸汽养护而制出的砰，虽有足够强度，但防渗性較差，因此这种企图虽曾試过，可是沒有成功。但是，采用在蒸压釜內，温度为 167°C、压力为 $7\frac{1}{2}$ ~10 个大气压之下进行蒸煉处理的砰，所得結果十分成功，关于蒸煉处理过程的 5 个阶段可見图 1 中所示。用这种方法制出的管片能完全满足上述条件。

这样蒸煉处理过的砰能够在压力水头 14 个大气压之下也絲毫不渗水，同时对化学侵蚀有很高的抵抗力，例如：将曝置于空气中的，以及如前述方式养护的試件浸入濃硫酸鋁液中，只有曝置于空气中养护的試件受到腐蚀。水泥細度或骨料級配的改变以及水灰比的較大变化，对由上述养护方法制出的砰的性质影响不大。水泥含量 590 磅/碼³ [約 350 公斤/米³] 已足以保証所規定的强度。骨料系来自多瑙河，它由等量的砂（最大尺寸为 $\frac{3}{16}$ 吋 [5 毫米]）及砾石（最大尺寸为 $\frac{3}{5}$ 吋 [15 毫米]）組成，水灰比在 0.37 到 0.40 之間。加入石英粉可增加强度，天然

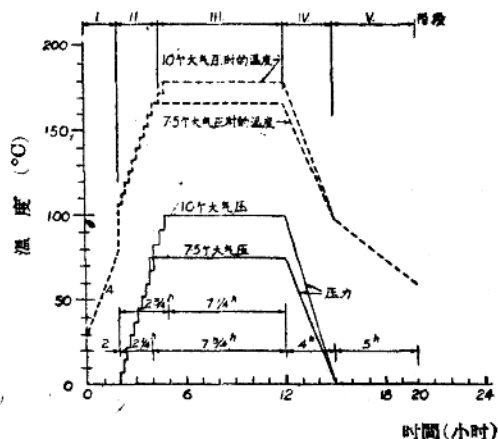


图 1 蒸压处理过程

- I—預加热而求加压力。
- II—升温及升压。
- III—在压力下恒温蒸煉。
- IV—降温及降压。
- V—冷却。

細砂亦可，不过增加程度略小。砰的水縮极微小，可忽視不計，砰与钢筋間的粘着力正常。

于是进行試驗确定管片的强度，試驗时的条件与管片在隧道中的情况相似。这些試驗也可用来进一步探求管片的最有效的结构布置以及配筋。管片系整环地进行試驗，以便确定它們对橫向和纵向应力的抵抗程度，然后分別找出肋条、配筋和接头的最好布置。

管片环是放入一个垂直圓形井筒內进行試驗，井筒的內徑为 23 呎 3 吋 [7.07 公尺]，深为 16 呎 8 吋 [5.08 公尺]，其中可选放六个管片环。橫向荷载系借鋼衬垫作用到管片环的外表面上。通过将压缩空气压入衬垫而施加压力，衬垫嵌置在薄干砂层內 (图 2) 以保証荷载能均匀分布。軸向荷载是借 18 个水力千斤顶而施加的，每个千斤顶的容量为 100 吨，它們的布置可見图 3 中所示。管片环間填以油毡紙，以消除管片突緣面不平整的影响。

所有的試驗均获得了滿意的結果。由于橫向荷

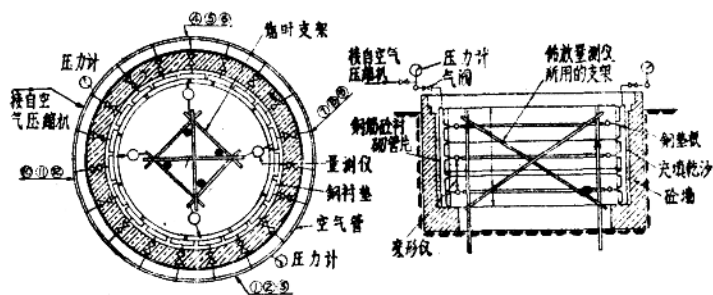


图2 横向荷载试验的布置

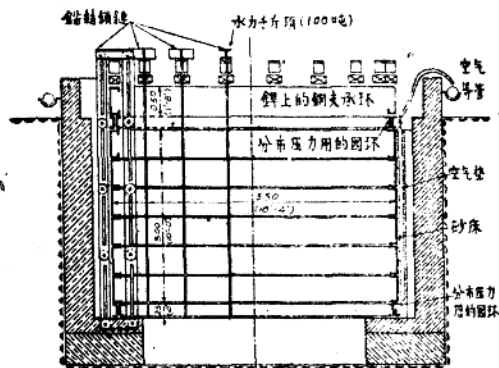


图3 纵向荷载试验的布置

载作用产生的变形较由计算而得的小得多，特别是当荷载非均匀分布时；此时测得剩余变形，接头可允许管片环调整它的形状去适应推力作用线，因此可使弯矩减小。当承受轴向荷载时，由木模制成的管片表面不平整，会使混凝土产生散片，而用钢模制成的管片则只发生较小的散片现象。

单个管片只是进行弯曲、受压以及弯曲加受压的试验。试验可使配筋布置改进，并证实了箍筋和弯起钢筋(腹筋)的重要性。突缘亦需配筋，以抵抗剪力和弯曲的合并作用，同时证明肋条之间用双向配筋也是最有效的。试验证明需要弯钩和弯起钢筋来围绕螺栓孔和压浆孔，以使高的局部应力分布开来。

对两种型式的管片进行了试验，一种约1呎8吋[60.8厘米]宽，并有二根内肋条，另一种约3呎4吋[101.6厘米]宽，并有三根内肋条。试验结果表明后者大尺寸的管片的强度约为前者小尺寸的两倍，

但是大尺寸管片的用料只是多了约百分之五十；隧道管片接头数目如果采用大尺寸管片，则亦将减少一半，因此，这种大尺寸管片是值得推荐的。

进一步试验表明螺栓最有效的布置，如图4中所示，最适当的接头材料，可用四层油毡纸以及中间隔层青层组成，这样构成的接头能抗御高达8个大气压的水压力。在外肋条之间亦设有约 $\frac{3}{4}$ 吋[1.9厘米]宽、 $1\frac{1}{4}$ 吋[3.18厘米]深的槽缝(图4)，在这些槽缝中填以膨胀水泥。

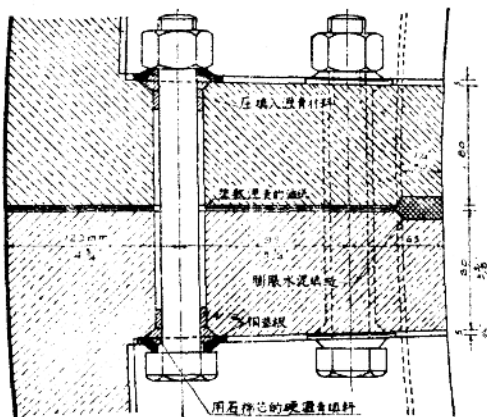


图4 接头详图

经估计，按上述方法制成的钢筋混凝土管片，其所化的费用将为铸铁管片的75%~80%之间，同时节约金属材料将超过90%。

(秦麟源译 王汉忠审校)

隧道衬砌的試驗研究工作

Civil Engineering and Public Works Review, 55(642): 79(1960)[英文]

英国建筑研究委员会 (Building Research Board) 在 1958 年的报告中, 阐述了已进行多年的专门性試驗研究工作; 它对于埋于倫敦粘土地层中的隧道衬砌設計提供了新的方向。委员会在 1957 年的报告中介绍了在倫敦某处地下鉄道延長綫上的 7 呎 (2.13 米) 直徑隧道的試驗研究工作; 这一年不断地在观察隧道直徑变化和周围土压力值, 由于变动尚未終止, 还不可能全面分析其結果。

在 1958 年的报告中还叙述了泰晤士河南岸正在修建的一座新的二十七层高的大楼对于在它下面地下鉄道所起的影响。修建大楼須挖基坑深达 40 呎 (12.2 米), 直至离下面隧道的最高拱頂仅 4.0 呎 (1.22 米) 左右, 基坑在隧道綫上的延伸范围約有 120 碼 (110 米)。試驗研究計划是准备观察大楼施工对隧道变形和应力的影响。隧道中的測量仪器布置如下: 近基坑南北两端, 集中一組仪器, 以測量擋土墙围堰修筑时的局部影响和主基坑开挖的边緣影响。在基坑中心处, 另外集中一組仪器, 以測量中部开挖时的影响。以上各点, 均置有应变仪, 这些应变

仪固定于隧道的几个衬砌环上。在隧道內設立了相应的标志以量測: 1. 沿水平向和豎直向的直徑变化; 2. 纵向形变; 和 3. 隧道頂部的水平度。所有仪器和量測设备都在晚上列車停駛时安装, 观察工作也在晚上进行; 但在任何時間內, 都能从遙控的精密电訊系統中迅速地讀出应变仪的記錄。对打入围堰的擋土板桩, 和在貼近隧道处挖掘堰內土壤对隧道的影响, 都有观察記錄。报告中指出, 这些观察記錄是連續进行的, 以記錄繼續开挖和建筑工程进行时结构的重量不断作用的影响。

这项研究工作不但对隧道的設計很重要, 且能了解因基坑开挖和建筑荷载不断增加的作用下土壤应力变化的情况。目前的大楼支持在粗圓桩上, 由圓桩将荷重傳到隧道下的地基上。此种設計通常均假定所有在筏基础上的荷重都由桩承受。在这个特殊位置上, 将量測土壤与筏基之間的作用力, 因为該作用力將經過地层傳達到隧道衬砌上。

(威德均摘譯)

(上接第 64 頁)

片器將管片安装。挖出来的淤泥 80% 堆于河边, 再用小艇运走, 其余 20% 让其在盾构前方的洞孔中进入盾构, 并利用为压仓荷重。

北面的管道 (即第二个管道) 仍繼續担负向新澤西运行的单向交通。新建的第三个管道則向曼哈頓运行。需改变方向的交通, 則在中間的管道 (即第一个管道) 內运行。在这个管道中的交通是按需要可单向往西, 或单向往东运行, 或則一半往西, 一半往东。当中間的管道作双向交通时, 貨車封閉运行, 仅供往返于新澤西与紐約間运行的客車通过。

在前年 (1957) 統計, 完全利用林肯隧道通过的机动車达 21,618,846 輛次, 其中 90% 是小客車。

每一管道在一小时內能通过大卡車 1700 輛, 或小客車 2400 輛。自从第三个管道开始运营后, 隧道的

通过能力在高峰运行時間可以增加一倍, 隧道的年运量增长 50%。

在中間管道如需改变运行方向时, 則需封閉交通 6 分钟。正常的通过隧道的時間是 4 分钟。如发生“抛錨”的情况, 則有时会于一分钟之內, 在发生故障地点的后面, 堵住 35 輛汽車。

行車标志和色灯信号, 曾化了 25 万美元新装起来的。隧道兩端的引道和洞口广场也是新筑起来的, 并按三个管道的交通布置的。

新的通风设备能保証隧道內的空气, 每 $1\frac{1}{2}$ 分钟換气一次。灵敏的设备可以使隧道內空气中二氧化碳的含量稳定, 当隧道內二氧化碳的含量上升时, 通风设备能自动而强烈地运转。

(潘昌乾摘譯 張人龙审校)

隧道衬砌应力状态的实验研究

Маковский, В. Л. 等

Сооружение Тоннелей и Метрополитенов за Рубежом 109~119, 128(1957)[俄文]

要进行隧道衬砌计算,必须知道地层的力学性能,尤其是各种地层弹性模量的大小,而这些都与地层整体的应力状态有关。1950年,法国工程师哈比布曾经应用液压千斤顶来测定各种地层的弹性模量,发现在坑道中进行测定的结果与用实验室方法测定的相差很大。

为了确定处于天然埋置状态下的岩层弹性模量,法国工程师列尔密特和谢夫捷维曾根据声波在岩石中传播速度的原理来测定,这种方法适用于均匀和整体的岩层。

整体岩层的应力状态也可以通过所谓“卸载”的方法用间接的方式来测定,这种研究在岩质坑道中的运用已被工程师捷拉所证实。所谓“卸载”法,即在所研究的坑道区段中,借助于使该部分岩层与周围的整体岩层相脱离的方式进行卸载:“卸载”前与“卸载”后所测定数据的差数,在一定的程度上反映了整体岩层的应力状态。“卸载”法的缺点是当确定整体岩层的应力状态时,首先必须知道脱离了整体的那部分岩层弹性模量的大小,但是,这个弹性模量又是特定的未知数。

1952年,工程师金捷宁研究出一种在岩质地层中测定应力的方法,并将其应用到地下坑道中。这个方法的要点是:在坑壁上设置小孔,小孔的两旁预先装置音响测力计,然后将千斤顶旋入小孔中,以便通过千斤顶对孔壁的压力来了解在开挖小孔之前岩层中的原始应力状态。千斤顶对孔壁施加压力的大小应当这样来确定,即使在音响测力计中,弦线的振动频率刚好等于开挖小孔之前所测定的频率。这种方法可以在两个彼此垂直的方向上进行应力测定。上述应用液压千斤顶测量以确定岩层弹性模量的方法,可以得出令人满意的结果,因此,完全可用此法来复核隧道衬砌计算中所采用的岩层弹性模量的数值。

在英夫特(非洲卡萨布兰卡城附近)建造直径5.3米、长度17公里、埋置在由于裂缝和断层所造成的各种破碎岩层(从软砂岩至硬石英岩)地带的圆断面有压隧道时,为了解处于30米静水头压力下

衬砌计算中的岩层抗力大小问题,曾经就确定岩层的弹性模量方面进行了一系列研究。当时,曾提出过下列研究任务:

- 1) 确定与衬砌计算有关的岩层弹性模量;
- 2) 岩层的各向异性对衬砌变形的影响;
- 3) 找出使周围岩层与衬砌结构最理想地共同作用的最简单方法。

根据以上所提任务,曾进行下列三阶段的观测:

- 第一阶段——利用千斤顶对22种类型的岩层进行42次的观测;
- 第二阶段——在考虑内水压力变化的影响下,在10个区段上进行观测;
- 第三阶段——在压力为20~40千克/厘米²下,进行岩石水泥灌浆时所作的观测。

采用千斤顶进行研究的装置(图1)为:在千斤顶与岩层之间放置橡皮垫块,垫块中留有小孔,固定在弹簧上的测杆穿过小孔,弹簧的作用是承受岩层的压力,测杆的位移用装在固定基础上的比长仪来量得。利用千斤顶曾对下列三类主要岩层进行过试验研究:

- 1) 整体的岩层;
- 2) 有裂缝的岩层;
- 3) 破碎的岩层。

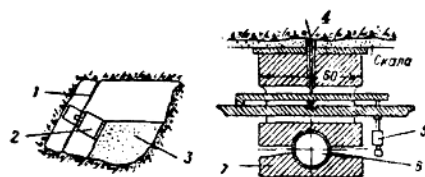


图1 隧道试验区段的横断面与千斤顶装置图

1—管状的横撑; 2—千斤顶; 3—混凝土底座; 4—供测杆通过的小孔; 5—比长仪; 6—球状的联结(球面铰); 7—千斤顶。Скала—岩石。

试验结果表明:应用此法尚不可能为隧道衬砌计算提供确定岩层弹性模量值的充分和可靠的数据,因此,只好对所试验的区段再作进一步研究。

克/厘米²的压力下用水将其充满,再进行试验。从试验的成果中,发现很近似于用千斤顶所测定的结果。此外,在实验室中也进行了对由现场研究所得的岩层标本弹性模量的测定,比较两者所得的结果表明,在现场和实验室条件下分别测定的岩层弹性模量,仅仅对于坚硬的岩层,其结果才相近似。

The drawing consists of two parts: a cross-section (top) and a plan view (bottom).
 The cross-section shows a hull profile with a circular bow. The bow radius is labeled $R = 6.00$. The hull is divided into sections with widths of 6.50 , 4.50 , 4.50 , and 5.50 . A vertical dimension of 17.00 is indicated at the top. A small detail of a hull section is shown with labels 1, 2, 3, 4, and 5.
 The plan view shows the circular bow from above, with a radius of $R = 6.00$. It is divided into sectors with angles of 60° and 45° . A dimension of 1.50 is shown for one of the sectors. The hull is divided into sections with widths of 6.50 , 4.50 , 4.50 , and 5.50 . A small detail of a hull section is shown with labels 1, 2, 3, 4, and 5.

1—隧道的橫斷面；2—道風管；3—供注入和抽出水用的管道；4—人孔；5—混凝土堵壁；
6—調整壓力的裝置；7—音响計；8—金屬杆（針狀的）。

和建築部門除了在試驗室內測定外，還在現場條件下進行了荷載及變形的實測工作。這樣，就對測量儀器和測量方法的簡化方面提出了一系列要求：在不良的地下條件下，進行長時期觀測的可能性，在施工狀況下儀器的保護等等。

为了测量作用在导坑支撑上的水平土压力，采用安置在横木上的测力计。对于各种形式的测量仪器所测定的精度大约在 1~2 吨之间。但是温度和大气的作用会严重地影响到测量的结果，在野外的条件下，采用欧姆电阻量算来进行压力测定证明是不够恰当的。用于测量导坑板桩围堰中应力状态的音响弦线测力计测量，能得出令人满意的结果。这种测力计小巧而坚固，并且在长期工作情况下能密闭和稳定。

1942年,英国首次进行了对作用在鑄铁管片隧道衬砌上的地层压力测定工作,隧道的直径为3.6米,埋置深度为33米。采用伐脱摩尔测力计作为测量的仪器,这种仪器連基座长为 $l=15$ 厘米。所确定压力值的误差在 ± 5 千克/厘米²以内。这时可以确定隧道衬砌环中的压应力分布情况。

5) 衬砌中的应力根据周围岩层的岩理方向、衬砌本身的厚度和向衬砌背后压浆的质量等变化而呈不均匀地分布;

6) 向衬砌背后压浆时,衬砌将视压浆压力的大小而承受相当大的压缩应力,于是衬砌的局部变形将被缩小,并趋于均匀化。

为了研究作用在建筑结构上的土体压力，英国科研

1952年,进行了直径为7.5米、埋置深度为30米的隧道衬砌管片的应力测量。从组成衬砌环的十四块管片中的六块管片上安置弦线测力计,两个测力计安置在管片的边缘上,而一个安置在管片背面的外表面上。弦线长度为15厘米,用金属盖保护。所测得应力值的误差在 ± 5 千克/厘米²以内(见图3)。

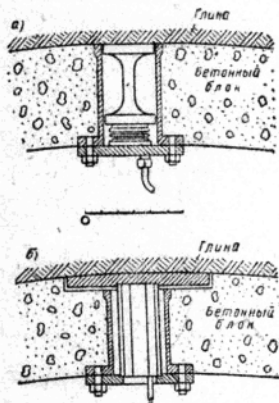


图3 安置在隧道衬砌块中的各式测力计

а, 水力测力计, Гидра—粘土

б, 弦线测力计, Бетонный блок—混凝土砌块

还应该指出1952年所进行的其他研究工作。水下隧道的直径为2.7米,水面下埋置深度为27米。隧道衬砌是由混凝土砌块组成的。研究的目的是测定衬砌环中的压缩应力,衬砌变形以及作用在衬砌上的地层压力。在九个衬砌环中安置了二十块

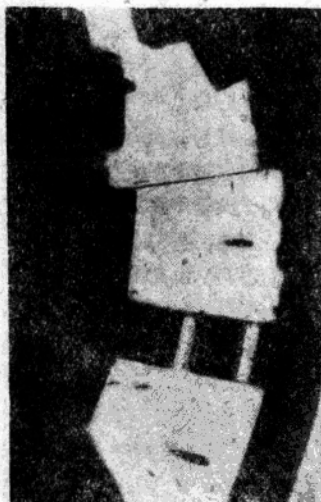


图4 安置在隧道衬砌块间的圆筒形测力计

装有弦线测力计的砌块和十块装有力测力计的砌块(见图4)。在四个衬砌环中安置了测定衬砌环中压应力的仪器,其测力数值曾达到42吨。当用52米水头的水充灌隧道时仪器尚留在隧道内。

当测量在导坑支撑构件中产生的应力时,用音响测力计曾获得良好结果。在实验室内试验时,广泛采用的欧姆电阻量算对施工条件下进行现场测定是不大适当的。

用弦线音响测力计来测定隧道铸铁管片衬砌中的应力,经证明是恰当的。在研究混凝土砌块衬砌应力状态的测定工作中,除了采用水力测力计外,也多采用这种音响测力计。

在芝加哥地下铁道后期线路的建筑中,捷尔查格教授研究了隧道开挖时的地层压力,隧道的直径为8.5米,埋置在深12米的塑性蓝色粘土质厚层中,并用盾构法施工。在隧道基底出现了10吨/米²的地层压力,而在拱圈顶部为5吨/米²。在衬砌结构上安置仪器以测量由周围地层压力所引起的应力。由所进行的研究工作的结果表明,在芝加哥那种粘土的条件下,侧向压力约为竖向压力的60~80%。

在伦敦地下铁道隧道中曾采用斯盖姆帕脱仪器。在捷脱洛依脱地方的阿万市中心的地下铁道中则用哈乌塞尔仪器来进行类似的试验工作。

在修建米特塔温城赫德逊水底隧道期间,曾进行过与确定土壤作用压力大小及测定在隧道直径为9.4米的铸铁结构中荷载分布情况等有关的研究工作。

为了测量淤泥质土壤中的法向和切向地层压力,安置了42件仪器,其中每一件仪器均由汽缸和在汽缸中自由移动的活塞所组成,活塞将压力传递给地层。

由机械作用的测量仪器所测得的数据表明,其精度在 ± 2.5 微米以内。

在压缩空气下进行开挖,管片环的椭圆率为4.5厘米时,测量过程中曾测得作用在衬砌上的最大土压力为29吨/米²。在正常的大气压条件下进行开挖,椭圆率为1.5厘米时,作用在衬砌上的土压力为25吨/米²。

二、测定土壤压力的压力盒及其校正设备

为了测定土壤压力,在1948年曾设计了直径为

25 厘米的压力盒。压力盒的构造如图 5 所示。

厚 0.1 毫米的表层弹性薄膜承受土壤的压力，

并通过中间的液体介质(油)把压力传给直径为 5 厘米的内层薄膜，薄膜的挠度用固定在薄膜自由表面

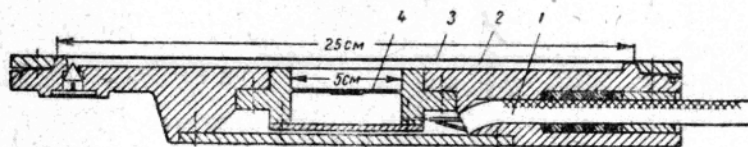


图 5 测定土壤压力的压力盒(横剖面)

1—电线；2—用油剂充填；3—薄膜；4—装有应变仪的隔膜。

上的欧姆电阻量标来测定。在图 6 中表示了压力盒的全貌。

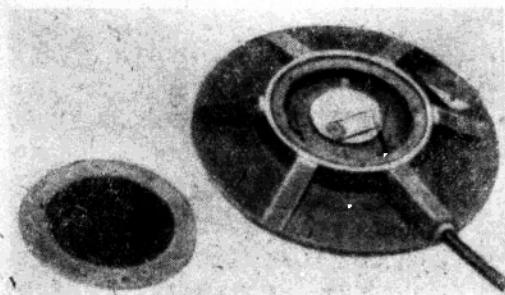


图 6 测定土壤压力的压力盒全貌。

该种型式的压力盒可以满足下列要求：

- 1) 测量精度——偏差不超过 1%；
- 2) 强度——可承受 5 吨动荷载；
- 3) 水与空气的不渗透性可经受若干昼夜的 5 个大气压的液压和冷水及热水 (75°C) 循环作用的试验。

校正压力盒装置的结构见图 7。压力盒放在装满砂子的校正容器(砂筒)中央部分，砂子装放在侧面用水支持的橡皮圆柱体内，因此，除侧向摩擦力外，还可能产生水平压力。为了均匀地分布垂直荷载，可利用充满水的橡皮垫子，垫子上面放块钢板，液压千斤顶的压力就加载于钢板上。在校正容器的底板上也放有用水充满的橡皮垫子，用它来确定侧向摩擦力的存在。上面和下面垫子的压力以及侧向

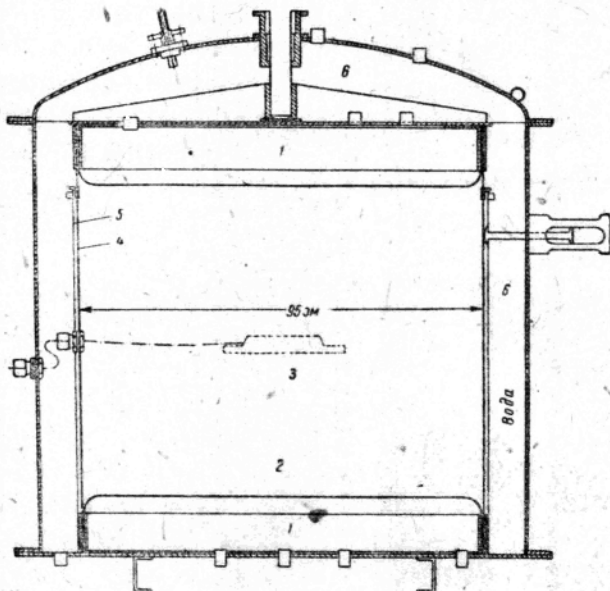


图 7 压力盒校正设备

1—充满水的橡皮垫子；2—砂；3—压力盒；4—橡皮圆柱体；5—护壳；6—容器壁与橡皮圆柱体之间用水充填的空间。Вода—水

水压力,都可用专门的电工仪表来测量。橡皮圆柱体的侧向变形用弹簧指针来测量。在加载时可采用圆柱形喷嘴来保证砂子的均匀密实度,沿高度均匀地布置喷嘴位置,可使砂子降落的高度保持准确。砂子也可采用分层法来压实。在松散的砂中、密实的砂中和在水中来校正压力盒,将得到不同的校正曲线,因为压力盒横隔膜的弹性与上述各材料的弹性并不是相适应的。

这种型式的压力盒具有高的质量,能保证在现场工作条件下有极精确的测量结果。

图8所示为校正压力盒设备的全貌。

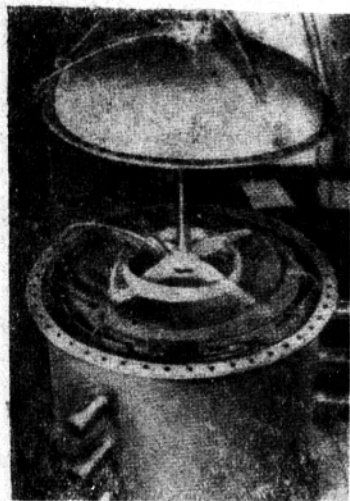


图8 压力盒校正设备全貌。

校正设备能相近地模拟出天然埋藏条件下原有

地层的压力,量测的高精度可以抵消校正设备结构上复杂性的不足。

三、关于处在很大岩石压力下深置地下结构的若干意见

在设计深埋的结构物时,应该利用以前已使用的结构物的建筑和观测的经验以及对岩体的理论分析和试验研究。

盖依玛理论给出了关于岩体内部应力的近似概念。现今,法国安德烈教授认为,在某些条件下,对于深埋隧道,水平的岩石压力可能比垂直压力更重要。

当分析岩石的力学性质时,应特别注意下面几点:

- 1) 就表面看来,在天然埋藏的岩层中,具有较小可逆变形的岩石压缩程度;
- 2) 弹性变形的大小和性质;
- 3) 残余变形和塑性变形的大小和性质。

了解作为岩体破坏过程速度指标的侧压力大小,是极为重要的。布里德斯曼指出坑道掘进中不大的侧压力,表现出岩体破坏过程的缓慢性;

- 4) 岩石物理力学性质的变化(风化等等)。

隧道的施工过程对于周围岩体的平衡具有特殊的影响。

当岩质坑道开挖时,可观测下列情况(图9):

- a) 坑道岩石稳定的状态;
- b) 沿坑道表面岩石中,因坑道表面边缘应力增长所引起的塑性变形的缓慢增长;

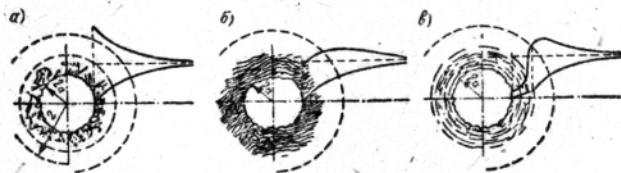


图9 开挖隧道时岩体中的应力。

b) 沿同心圆周围岩石局部破坏(剥落)的情况。由开挖深置隧道的经验,可以得出下列的实践结论:

1) 仅在不需要特殊支撑工作面的稳定坑道中,才推荐以全断面方式开挖隧道;

2) 在坑道周围岩体中会产生很大的超应力,以及坑道表面的岩石产生局部破坏(剥落)的情况下,

应在坑道横断面的下部预先开挖前进导坑。前进导坑的开挖,在一定程度上降低了坑道周围岩石的应力状态。在该种情况下,坑道的横断面应接近于圆形。

岩石中压力的大小是上述推断的主要准绳,确定岩石压力的唯一方法是量测。

试验研究如下方法:对处于受力状态下的岩石试

件进行量测,然后将試件应力解除,并重新量测所需参数。

最简单的方法是在地下坑道的表面装置应变仪,求得讀数后再挖去岩块(图10),这样就解除了岩石的受力状态。确定岩石的弹性模量后,再来求算岩石中压力的大小,但是,这个方法是不完善的,因为只能在地下坑道的側壁上來測量压力,而不能在岩体的深处來測量。

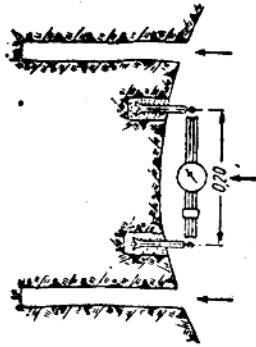


图10 隧道周围岩石中压应力的测量。

因为在实践中,虽然是近似些,但几乎总有可能测定岩体中岩石压力的数值,测定岩石的塑性极限和岩石的破坏强度极限,所以能预先确定开挖坑道时将遇到上述三种情况中的哪一种。对于第三种情况,在岩体中产生很大超应力的这区域内,将坑道仔细支撑加固具有很大的意义。

必须特别注意深置隧道衬砌的结构,衬砌结构应保证隧道使用的必要条件:

- 1) 保护岩石免受那些破坏因素的影响;
- 2) 保护岩石免受温度变化的影响;
- 3) 保护岩石免受由于构筑衬砌结构而产生的破坏;
- 4) 支承很大厚度的破碎岩石。

衬砌压浆是构筑隧道的必要工序,但是直到現在为止,压浆工作进行得还不够满意,因此,应建議改用預应力衬砌。必須指出,有适当面层的預应力磚,由于消除了裂縫扩展的可能性,也可得到满意的不透水性。

岩体内部应力状态的量测,大大地帮助工程师們来解决設計和建筑隧道中的有关問題。

但是,适用于服从弹性規律岩石的上述原理,在埋置于很大深度的开挖情况下才能适用。

四、与隧道衬砌应力状态試驗研究有关的若干問題

最近,在国外隧道建筑的实践中,非常注意在隧道内直接进行各种試驗工作,并且強調指出这些工作的特殊意义和重要性。在研究隧道结构应力状态的試驗工作方面,以及为弄清在隧道衬砌承重结构的构件中产生的实际应力之性质而进行的直接而系统的观察工作方面,需要化費很多的資金。試驗工作的結果,已証明有可能依靠縮小衬砌尺寸和縮減隧道建筑造价来改善结构和减少工程数量。建筑时所节省下来的經費,将超过在試驗工作中所耗費的全部費用。

由于在一系列隧道(非洲卡薩布蘭加城附近的英夫特隧道和芝加哥地下鐵道等等)中所进行研究的結果,已經获得許多資料,这些資料都考慮到了岩石物理力学性质,从而能作出关于衬砌上岩石压力特性的結論性。

在国外实践中,表明了在现场条件下,即直接在开挖时,进行試驗研究的一定方向。同时,还应研究所开挖隧道岩石的物理力学性质、岩体的应力状态和衬砌结构中的应力与变形大小等。

为了試驗研究岩石与隧道衬砌在建筑隧道时的应力状态所采用的方法与仪器,应认为还不是足够可靠的,仪器讀数也不完全稳定。因此,各种类型的测量仪器,在一定的条件下要进行專門的檢驗,从而挑选出最适用的仪器。

在测量仪器的檢驗与試驗方法的檢查过程中,对于测量仪器和能保证使測量結果与实际值相接近的試驗方法的研究,应給予特別注意。

以上介紹的資料也表明国外在解决隧道建筑的复杂任务的实践中,試驗研究工作正在广泛地发展着。在进行必要試驗研究工作方面所用的巨大費用是完全值得的,因为,如上所述,这样就能合理和有效地解决在各种不同地质与水文地质条件下隧道建筑的实际任务。

(陈馬可等譯 孙鈞审校)

現代的隧道衬砌方法

Hammond, R

Engineering, May 16: 381~383(1941)[英文]

正确地选择隧道衬砌结构在隧道工程中是一个重要环节。在实际工程中，隧道的建设速度在很大程度上取决于衬砌的砌筑速度。近年来出现了许多新的隧道衬砌形式，采用这些结构一般说来能够加快隧道建设速度和节约建设费用。

在水底隧道中成功地应用的結構鋼管片是一种新型的衬砌结构。美国底特律——温莎 (Detroit-Windsor) 隧道所采用的結構鋼管片，每环衬砌由 11 块标准管片及 1 块封顶管片所构成。管片是用 9 毫米的鋼板冲压而成，每块管片弧长 2.74 米、宽 0.76 米，在翼緣上焊有加勁角鋼，在环肋之間焊有工字鋼的加勁杆以承受盾构推进时千斤頂的推力。根据美国的使用經驗，在粘土中采用这种管片在很多方面都較鑄鉄管片优越，造价也較为經濟。

在英国，越来越多的隧道采用鋼筋硃管片作为衬砌。大約在三年以前曾創制了一种安特生 (Anderson) 式的鋼筋硃管片。澆搗管片的硃是用洗淨的砂和碎石按重量比例配制而成的，水灰比是 0.42。硃在电动震動台上震实，震動台的頻率是 3,000 赫芝，震幅是 0.4 毫米，震動对顆粒所产生的加速度是 4g，經過 3 分鐘的震搗后，硃的容重是 2,410 公斤/米³，坍落度为零。按設計規定，硃的 7 天抗压强度为 283 公斤/厘米²，28 天强度为 426 公斤/厘米²，实际上 7 天强度就达到了 462 公斤/厘米²。管片在水中养护 3 天后，再停放 21 天就可应用了。

曾进行試驗比較鋼筋硃管片和鑄鉄管片的强度。首先进行了管片承受盾构千斤頂推力的强度試

驗，在一条新的隧道中拼装了一环鋼筋硃管片，試驗的結果証明它完全能承受盾构千斤頂的推力（其值达 560 吨）。其后又进行了承受土壤压力的强度試驗。在胡特兰 (Wood-Lane) 曾建造了一段直徑为 2.6 米的試驗隧道。其一端用鋼筋硃管片衬砌，另一端拼装了 3 环鑄鉄管片。由于隧道頂离地面仅 0.76 米，因此必須在地面上加荷才能使衬砌受到和一般隧道埋設深度时相同的土壤压力，为此在 3 环鑄鉄管片和 3 环鋼筋硃管片上加了 175 吨的鉄块，当鑄鉄管片已經破坏时，鋼筋硃管片还是完好的。此外对一段直徑为 3.74 米的隧道进行了試驗，取得結果相同，地面上的荷載加到了 228 吨，所得到的結果表明，鋼筋硃管片与鑄鉄管片具有同等的强度。

图 1 至图 4 为倫敦郡議会的这种型式的暴雨溢流排水管的临时施工竖井管片的截視立面图，平面图和两张断面图，應該注意到它有加固用的鋼材，管片系用螺栓連接，和鑄鉄管片一样。图 5 为构件断面图。

在紹斯窩克 (Southwark) 的一座作为防空隱蔽所的长达 1,100 米的双綫隧道中，曾用鋼筋硃管片修建了 8 座內徑为 3 米的斜隧道。隧道的埋設深度为 15 米到 21.3 米。地下水位在地表下 4.9 米，因而隧道是在压缩空气下开挖的。

近年来麦克阿尔宾 (Mc Alpine) 式鋼筋硃砌块也获得了相当的成功，这是一种在环縫和端縫上予留有凹凸形榫槽的鋼筋硃砌块。图 8 为西密特賽克斯 (West Middlesex) 主要排水道中最大和最小的管子（最大的直徑为 3.55 米，最小的直徑为 1.37 米）。每当一环衬砌拼装好之后，在它的环状凹槽中嵌入

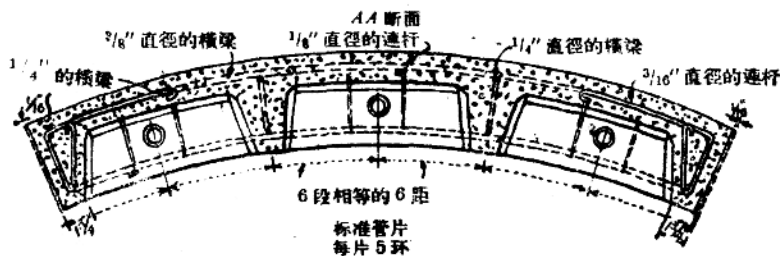


图 1

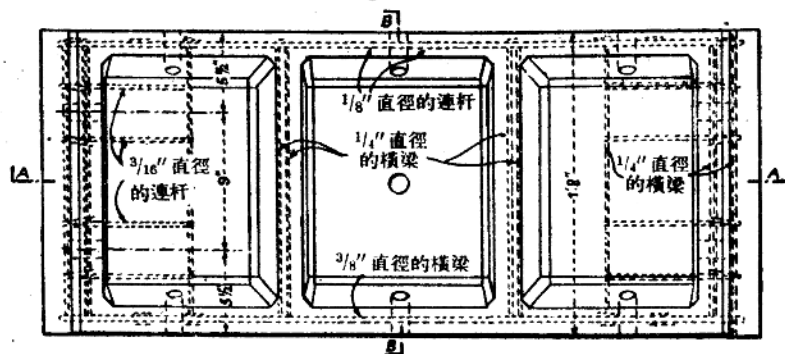


图 2

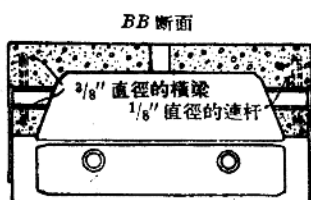


图 3

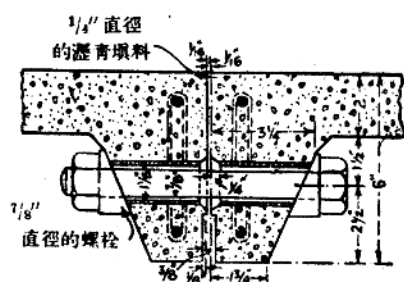
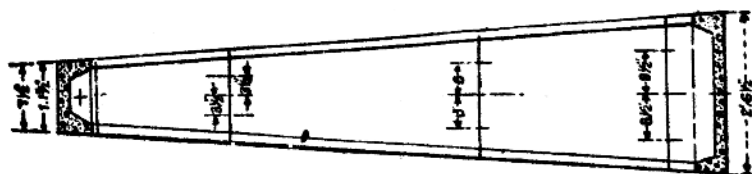


图 4



环向鋼筋，等下一环衬砌拼装好之后就往这环状的榫槽中压注水泥砂浆，使之連成整体。环向鋼筋在预定的地点对接，而搭接的短鋼筋則在该处予埋在砌块里面(见图9)。这种砌块在压力較大的地层中用矿山法开挖时，是随开挖随安装衬砌，开挖一环拼装一环的，这样可使支撑減低到最少程度。在土质良好的地层中，可以开挖一段以后再行衬砌，即使这样，地层沉陷的可能性还是比较小的。

卅年前曾对这种砌块进行了强度試驗。为了試驗曾拼装了二环內徑为2米的隧道衬砌，砌块寬30厘米、厚10厘米。在二环衬砌之間的榫槽中嵌入了一根19毫米的鋼筋，并压注了水泥砂浆。当压在拱頂上的荷載达114吨时衬砌才破坏。由于二环衬砌之間仅有一圈鋼筋，可以設想，每环衬砌的承载能力还要大得多。图6图7为对不同类型的隧道衬砌强度作比較試驗的机械，通过設在台架中心的液压千斤頂使衬砌环受到法向压力，調整套筒螺栓，可以調整各向的受力大小。試驗証明，仅对衬砌施加均匀荷載是得不出結論来的，但二点集中負載能使衬砌受弯而致破坏。美国的泰尔勃(Talbot)教授用来試驗涵管强度的台架与此相仿。英国的规范規定，这种台架是衬砌强度試驗的标准方法。对鋼筋砼，鑄鉄和三磚厚的下水道衬砌所进行的强度試驗表明：每延英尺的麦克阿尔宾式衬砌的极限荷載是9.2吨，鑄鉄的是2.17吨、磚是0.68吨。

在倫敦皇家学院(Imperial College)矿井安全研究所曾將5种不同断面，內徑为2.4米的鋼筋砼衬砌进行了荷載試驗。每次試驗由7环30厘米寬、12.5厘米厚的砌块拼成一个試驗段。为这个試驗特制了一种可以施加400吨垂直荷載和125吨水平荷載的試驗台架。荷載是用液压千斤頂通过砂垫层施加在衬砌上的。第一个試驗是一种沒有环向嵌縫鋼筋的麦克阿尔宾式砌块。每环砌块之間做到最大可能程度的錯縫，并使封頂砌块的位置沿隧道长度方向形成一个螺旋形。这种将环向鋼筋予澆在砌块內的衬砌适用于需要灌漿的破碎地层。当砌块干砌拼装之后，施加了12吨垂直荷載和30吨水平荷載，

此时，出現了环向的裂縫。当水平和垂直荷載均增到100吨时，在隧道頂部的砌块中开始出現裂縫。垂直荷載达到130吨时，在水平軸以上約60厘米处的砌块边上出現受压裂縫。当荷載达到168吨时2块封頂砌块破坏了。

第二个試驗是标准型式的砌块，拼装时在砌块外面盖了几层厚紙以避免垫层的砂子侵入接縫。在嵌入环向鋼筋并压注水泥砂浆經過一个星期之后，將水平荷載和垂直荷載加到80吨，此时在仰拱处出現裂縫。当卸荷后再加荷，在水平軸以上約30厘米处出現裂縫。当荷載增至104吨后，水平荷載保持不变，而垂直荷載逐步增加，当其值达172吨时，仰拱处出現裂縫，底部接縫并开始張开。当垂直荷載为242吨时，在水平軸以上30厘米处出現了一系列的裂縫，当其值达268吨时，衬砌破坏。

卅年前在諾初特(Norwood)地方用麦克阿尔宾式砌块修建了一段地下鉄道隧道。这段隧道穿越諾胡特铁路樞紐的6条行車繁忙的綫路。隧道內徑2.9米，厚15厘米。在这种交通頻繁的地方，經過了卅年的实际使用証明这种砌块的設計和施工是完美的。恐怕最值得注意的是在西密特賽克斯地方用这种砌块在总长为30英哩的排水系統中修建了22.5英里的隧道。隧道直徑从1.37米至3.46米。隧道頂离地面的深度自2.5米到27.5米。其中有一英哩多是沿着倫敦最大的蓄水庫修建的。

衬砌防水是一个困难的問題，經驗証明，即使用特殊的嵌縫方法和压漿都不能使衬砌达到不漏水的程度。在修建墨西(Mersey)隧道时所用的內衬套是一种最好的方法。它是在隧道衬砌內部用噴漿法再做一层設有伸縮縫的鋼筋水泥內衬套。內衬套和隧道主要衬砌結構是脫开的，这样可以避免由于次应力而产生的裂縫。滲过外层衬砌的地下水，通过二层衬砌之間的空隙流入排水系統排出隧道。在含水地层中用这种方法可以保证隧道內部裝飾不受潮。

(王振信摘譯 王汉忠审校)

用測力儀測量隧道衬砌上岩石壓力的經驗

Виноградов, Б. Н.

• Сборник научных сообщений транспортного
строительства No. 31 (1959) [俄文]

一、前 言

為了正確地進行隧道衬砌的設計，必須掌握有關所受荷載的資料。影響荷載大小的因素是很多的，而且各不相同，對於這些因素，採用理論計算的方法不能確定得很精確。因此，有必要對岩石壓力進行多次的實地量測，以便積累必需的材料，這些材料經過綜合以後，便可成為在不同地質條件下建造隧道時設計衬砌的基礎。

在許多情況下，通過試驗研究而獲得的材料，在建設過程中或解決衬砌今后的加固問題時都可用來較精確地確定衬砌的尺寸。

量測作用荷載大小的主要方法取決於採用何種隧道衬砌。在大多數的情況下，地鐵隧道是用裝配式構件衬砌建造的，因此，裝配式鋼筋砼衬砌是一種用得最廣泛的衬砌。

用裝配式構件建造隧道時，確定作用荷載可以採用兩種方法：確定衬砌結構中的法向力或應力（間接方法）和直接確定衬砌周圍的接觸壓力。在全蘇運輸工程科學研究所，此兩種方法均在不同的條件下使用過。

衬砌之間的法向力的大小是根據鋼杆變形值來確定的，鋼杆安裝在衬砌兩側的水平直徑上，安裝時，必須使全部荷載能通過這些鋼杆從衬砌環的上半部傳送到衬砌環的下半部。在這種情況下，鋼杆便成了一种特殊的測力儀。鋼杆的變形是用可拆卸的指示儀器測出來的。

用測力杆確定荷載的缺點是，只能確定出垂直荷載的總值，而仍不能解決關於隧道衬砌表面所受荷載分布情況的問題。除此以外，採用這種量測方法時，必須在水平直徑上將衬砌分割成兩個單獨的部分，因而，不可避免地將使衬砌有所減弱。在地質條件特別困難的條件下建造隧道時，這種方法是不能用來確定作用於衬砌上的荷載的，而在此種條件下，量測荷載的問題卻又極其重要。

用指示儀器根據管片鋼測標形成的基綫測量出

某一段管片的變形以後，便可確定出隧道衬砌內的應力。在這種情況下，由於管片衬砌受力的複雜性，而且，對於應力在管片斷面上分布的形式又無明確概念，因此，對於作為確定隧道上的外荷載的法向力和彎矩是很難進行統計的。

這種方法不適用於鋼筋砼的衬砌，因為砼的變形不僅決定於本身的應力，而且还取決於其他種種因素（蠕變、收縮、沉陷、膨脹等等）。

隧道衬砌周圍產生的壓力，即法向接觸壓力，是一種最能說明作用在隧道衬砌上的土壓力。這種壓力可以用專門的量測儀器——測力儀（壓力傳感器）來量測。

進行這種量測時，不僅能量測出作用荷載的總值，而且還能量測出分布在衬砌整個表面上的荷載。此種量測方法既不會削弱衬砌，也不會損害衬砌的防水性能，它可以在極其複雜的地質條件下應用。

二、用測力儀量測隧道衬砌所受荷載的兩種方法

目前，在大多數情況下，測定建築物所受土壓力的儀器主要是量測儀器構件（測力儀薄膜）在承受了土壓力以後的彎曲度。全蘇運輸工程科學研究所量測隧道衬砌所受的土壓力時，採用鋼弦式的測力儀。在這種情況下，可以採用兩種量測方法。

採用第一種量測方法時，壓力是直接由隧道衬砌外的物質傳送到測力儀上的。此種方法最宜用於量測軟弱的易變形的土壤，但是有一個條件，即是隧道衬砌外必須無臨時加固的構件。

採用第二種量測方法時，壓力是通過瀝青層傳遞到安裝有測力儀的管片表面上的，由於瀝青本身具有塑性，因此，壓力通過瀝青層後便均勻地分布在隧道衬砌外表面的一定面積上了。這種方法適用於量測堅硬岩層和衬砌外部還有臨時支撐情況下的土壓力。

無論是採用第一種方法或是第二種方法，測力儀的安裝均必須是可裝可拆的，其目的在於將測力

仪从衬砌内取出后,有可能检查其工作是否正确,然后通过它再检查仪器的讀数。

1. 第一种量测方法

采用此种量测方法时,用测力仪量测隧道内的接触压力与用测力仪测定土壤和其他建筑物结构的相互作用,在原则上是没有什么区别的。但是,必須注意到,松土或是易变形的粘性土的压力在建筑物表面上的分布情况要均匀一些,而且,测力仪的讀数也很少为薄膜必須与土壤相接触的这种固有特性所左右。一般說来,用装配式衬砌结构在坚实的土壤中建造隧道时,根据施工条件来看,土壤往往是不直接与衬砌相接触的,其間隔有一层水泥浆,隧道衬砌外的空隙在水泥浆压入后便填满了。在这种情况下安装测力仪,若薄膜与衬砌的外表面齐平,那么,由于薄膜上有一层厚度不一的凝固水泥浆,无法形成相应的弯曲,因而也就不能提供正确的讀数。

为了保証获得正确的讀数值,一个方法是将测力仪移放在衬砌外能使薄膜与土壤相接触的地方,另一个方法是在衬砌外灌注不凝固的物质。

以往所进行的几次試驗表明,将测力仪安放在与土壤接触的地方是不能获得正确的量测結果的。测力仪只有在本身支撑结构(如活动管,管端固定测力仪)的刚度完全能与周围介质(如剩余的临时支撑、剥落的土块、凝固了的水泥浆等)的刚度相匹敌时,才能确定出实际的压力。要滿足此种条件是非常困难的。因此,安装测力仪时,应使其薄膜在任何情况下都要与衬砌外表面齐平。

由此,这种量测方法可以得出两个基本要求:其一,試驗段衬砌外压注的材料应是不凝固的,也就是說,应压注无水泥的砂浆;其二,支撑开挖面的頂部时,必須保証做到衬砌外不剩有临时支撑的构件。只有滿足了这些要求后,所有安装的测力仪才有可能参与量测工作和提供正确的讀数。

用这种方法量测接触压力的历次試驗情况表明,即使隧道建造在比較松軟的粘土层中,分布在衬砌表面上的压力亦是极不均匀的。鉴于这一原因,要想获得确实可靠的材料,就必须量测出隧道大部分衬砌表面上的接触压力。接触压力可以用两种方法量测出来:一种是安装大量尺寸不大的测力仪;另一种是安装为数不多,但尺寸較大的测力仪。

第一种方法較好,因为采用尺寸大的测力仪时,

勢必要在每一安装仪器的地方留出一些較大的洞孔,从而大大地削弱了装配式衬砌的结构强度。用钢筋砼砌块砌筑衬砌时,这些洞孔便将破坏受力钢筋之間間距或完整性,而若采用鑄鉄管片,要在管片背部钻尺寸大的洞孔却又非常困难。

中央科学研究院一九五四年第五十一号(注)的通告記述了安装在钢筋砼砌块内的测力仪加固装置,这种加固装置可以保証测力仪的拆卸。

2. 第二种量测方法

在坚硬的不易变形的土壤中或在隧道衬砌外必須安装临时支撑的情况下进行量测时,应采用第二种量测方法。采用这种量测方法时,测力仪上的压力不直接由土壤或填注在土壤与衬砌之間的材料傳遞,而是通过预先涂在衬砌外面每一构件上的瀝青层傳遞。

瀝青的可塑层調整了管片或砌块的整个表面或个别地方所承受的压力,而测力仪則指示出作用在衬砌这些部分上的平均接触压力值。

为使作用在隧道全部衬砌上的压力不被調整,以及防止瀝青流入隧道衬砌周围的土壤縫隙中或通过衬砌的縫隙流入隧道,特在每一衬砌构件的外面設置了适当的瀝青隔离层。这种瀝青隔离层是这样制成的:在衬砌面有关管段的整个面积上涂一层瀝青,并盖上一层金属薄板,然后在金属板周围的地方将板与衬砌构件表面之間的空隙填满。

当管片背部涂有一层密实的瀝青时,上述輔助装置是通过下述方法进行安装的。将薄的鋼板(1~1.5厘米)固定在同管片有一定距离的管片背部上,然后,在管片整个边缘与鋼板相接的地方,安放一层密封的橡皮垫,螺釘通过橡皮垫将鋼板固定住。当管片承受荷载时,这种橡皮垫亦可用作緩冲装置,以分散管片周围所受的壓力。图1繪制了鋼板与管片固定的情况。

溶解了的瀝青,借压力注入鋼板与管片背部間的空隙內。为了压注这种瀝青,鋼板或管片背部特钻有两个孔,两孔的位置在管片对角綫上的对角內。两孔中,一个孔用来灌注瀝青,另一个孔則是排气孔。为使瀝青更好地注入鋼板与管片背部之間的空隙,管片应傾斜成某一角度,以便使瀝青能从下孔注入,并使空气从上孔排出。

在与管片压浆孔相对应的位置上,鋼板上亦钻