

软土隧道综合施工技术

张焕城* 杨少宏

(中铁第十四工程局, 济南 250014)

提 要: 结合工程实例, 介绍了进口端位于浅埋、沟槽软土等不良地质隧道的工程实践。施工中, 综合运用了预锚固桩、洞门与锚固桩联体、钢管桩、锚管注浆、竖向旋喷桩连续墙、超前小导管注浆、密排管棚、全环钢拱架解决了进口端隧道“全浮”在软土上的进洞、开挖、支护、衬砌等技术难题。对施工支护受大雨影响产生的剧烈开裂进行了跟踪监测, 并提出了处理方案。可供不良地质隧道的设计和施工参考。

关键词: 软土隧道; 预支护; 施工技术

中图分类号: U 412 **文献标识码:** A

1 工程概况

西南某单线铁路隧道所处地形起伏不大, 属高原剥蚀深丘地貌, 地面植被较差, 隧道进口百余米穿过软土层, 属浅埋、特软弱围岩隧道。进口里程DK X+498, 出口里程DK X+800。沿线不均匀地分布有坡残积、坡洪积、沟槽型的高山斜坡软土; 下卧基岩为灰岩夹页岩、炭质页岩, 薄煤层、炭质页岩、页岩呈薄层状, 质软, 易风化, 遇水极易软化, 在地下水的长期作用下, 风化极严重的炭质页岩、页岩多呈软塑状, 物理力学性质极差, 与软土性质相近。

该隧道进口端自地面至线路路肩附近有淤泥质软土和富水砂粘土, 局部呈软塑状。顺线路方向软土分布122 m, 其中的74 m在路肩以下分布有2.5~12 m厚度不等的富水砂粘土和软土(软土厚6~8 m), 隧道开挖时两侧土体挤压内涌, 并沿线路轴向推挤移动。

该地区地下水主要为第四系空隙水和基岩裂隙水, 受地表降水影响较大, 每年5~10月份为雨季, 年平均气温10~13℃, 平均降雨量738.2~960.6 mm, 日最大降雨量93.2 mm。

2 地质情况

该隧道地表被第四系坡残积层所覆盖(0~3 m), 进口段100余m范围内堆积层较厚, 表层为0~6.5 m的坍滑体。其下为砂粘土和淤泥质粘土, 土质不均, 含水量不均, 具“流滑性”和蠕变作用, 几乎无自稳能力,

在有临空面的情况下易产生下滑。岩体挤压破碎严重, 受地下水长期浸泡作用, 大部分已成土状、淤泥质土状, 在局部残存的破碎岩块上可见断层擦痕。

砂粘土厚1~24 m, 呈褐黄色、灰色、灰白色, 夹有10~30%的砂岩质石角砾, 一般呈硬塑状, 局部为软塑状。天然密度 $\rho = 1.53 \sim 1.846 \text{ g/cm}^3$, 天然含水量 $w = 43.6 \sim 74.8\%$, 天然空隙比 $e = 1.226 \sim 1.846$, 个别达2.165, 液限 $w_L = 54.4 \sim 78.6\%$, 天然快剪强度 $C = 13.7 \sim 34.4 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\phi = 6.8 \sim 11.6^\circ$, 个别达到18.9°; 压缩系数 $a = 0.86 \sim 1.14 \text{ MPa}^{-1}$ 。

淤泥质粘土厚0~20 m, 呈灰黑色、黑色, 硬塑~软塑, 局部夹有炭质页岩角砾, 遇水后强度急剧降低。下卧石灰岩夹炭质页岩、页岩, 深灰、褐色、灰黑色, 薄~中厚层状; 灰岩质坚, 节理发育, 炭质页岩、页岩呈薄层状, 与灰岩互层, 质软, 风化严重, 遇水极易软化, 物理力学性质差。 $\rho = 1.70 \sim 1.82 \text{ g/cm}^3$, $w = 29 \sim 44.3\%$, $e = 0.745 \sim 0.89$, $w_L = 33 \sim 35.4\%$, $C = 10 \text{ kPa}$, $\phi = 8^\circ$, $a = 0.71 \sim 0.8 \text{ MPa}^{-1}$, 贯入阻力 $P_s = 500 \sim 700 \text{ kPa}$, 局部仅200~400 kPa, 自由膨胀率40~70%。

隧道围岩级别: DK X+498~+608为Ⅵ级, DK X+608~+629为Ⅴ级, DK X+629~800为Ⅳ级。

3 方案制定及主要工程措施

由于围岩几乎无承载力, 且隧道进口端110 m范

* 收稿日期 2001-09-05 张焕城 男 高级工程师 1949年出生

围完全“浮”在软土上,侧压力大,洞前路堑开挖时就发生初始变形,变形速度快。若采用常规的承载型柔性支护,如大管棚或洞内水平旋喷,可在开挖前预先加固拱部岩体,而无法在洞内开挖前和开挖后对边墙两侧岩体有效加固并控制变形。经过多次现场调查和钻探,在摸清了地质情况和掌握了大量的变形量测资料的前提下,经反复研讨论证,制定出“纵横向旋喷桩连续墙预加固,洞内辅以大管棚支护,路基面下采用旋喷桩加固方案”。

该方案优点:地表旋喷法,可在开挖前人为改良岩体,施工难度相对小些,改良效果易于保证,可靠性及安全有保证,相对减少洞内施工工序,保证施工支护及衬砌的及时施作。地表旋喷加固法,通过在洞身范围内设纵横向旋喷桩连续墙将土体隔开,可有效阻止土体在开挖过程中的变形,提高围岩稳定性,约束土体变形,同时,能取得良好的止水防渗效果,为后续工序的开展,特别是为永久衬砌提供了稳定的空间和时间。旋喷桩连成一体,在隧道轮廓线外形成了良好的“附加直墙式衬砌”,边墙底的旋喷桩起支承墙部的作用,经旋喷桩加固的地层,开挖时施工支护有比较牢靠的支承。

4 预加固措施及施工技术

4.1 预加固桩

在进口段垂直于线路的洞身两侧各设4根锚固桩,间距17m,纵向间距6m。锚固桩截面为1.5m×2.5m矩形桩,桩深一般为22m~24m,桩底在内轨面以下10m,桩身为C20钢筋混凝土,护壁为厚20cm的C15钢筋混凝土。预加锚固桩施作完成后,进行边仰坡封闭处理。

4.2 增设明洞

隧道洞口路堑拉槽时,两侧路堑边坡及临近洞口的正面坡体发生坍塌,暴露的滑动面光滑如镜,牵连滑动开裂范围:左侧18m,右侧25m,正面80m,正面裂破呈数道环状,最大裂缝宽度50cm。为稳定洞门和抵抗山体坍塌推力,及时施作了洞门,洞门外移12m,并将洞门与路堑抗滑桩联在一起。

4.3 钢筋混凝土横梁、八字斜撑、钢管桩、锚管的施工

在洞身两侧锚固桩顶间设一根矩形钢筋混凝土横梁,并与附近的锚固桩顶间设八字钢筋混凝土斜撑,斜撑对称设置,一端支撑于附近锚固桩,另一端联接于横梁中部,横梁、八字斜撑均与锚固桩联结在一起,形成八字横梁,以抵抗仰坡土体推力及两侧土压力。在横梁

中设水平锚管及竖向钢管。

4.4 进洞施工

快速开挖锚喷支护至拱脚标高后,迅即在拱脚外以60°俯角打入 $\Phi 48$ 钢管桩(长4~6m,间距0.4m),以提高拱脚承载力。开挖时,将拱脚扩大1~1.2m,并在拱脚处架立托梁钢筋笼,钢筋笼主筋与护拱钢筋焊联,一并立模浇筑混凝土。

4.5 临时仰拱超前

边墙施工支护完成后,迅即用型钢作为临时仰拱支撑,及早使全断面施工支护封闭成环,尽快达到稳定、收敛的目的。

4.6 旋喷桩施工

旋喷桩用于隧道进口段软土地基的整治,包括单管旋喷桩和三重管旋喷桩两种类型,详见图1。

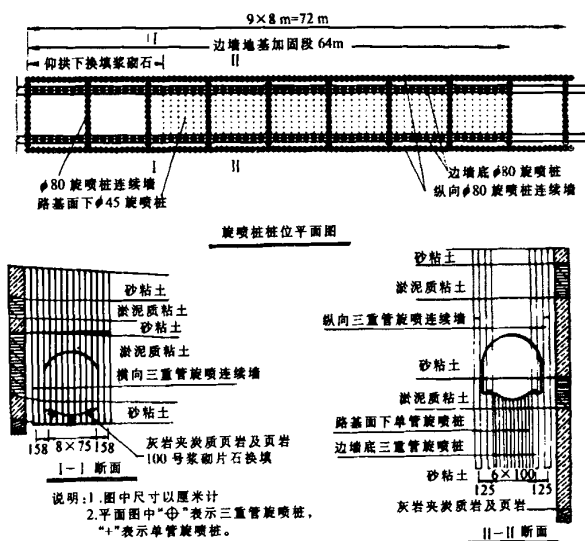


图1 隧道进口软土整治图

4.6.1 软土加固范围内纵向每隔8m沿横向设一道 $\Phi 80$ cm三重管旋喷桩连续墙,在隧道边墙外侧采用 $\Phi 80$ cm三重管旋喷桩连续墙作临时支撑,以利于隧道掘进。在边墙地基加固段,由于受洞内场地及高度限制,架设单重管机具施工困难,从地表采用 $\Phi 80$ cm三重管钻机钻到边墙基础底以下2.4~2.8m,其中边墙底以上部分空钻,只旋喷边墙底以下的软土部分,以加固边墙地基,保证施工支护钢架及拱墙衬砌安全,避免下沉变形。

4.6.2 旋喷连续墙施工完毕14天后,施作洞内预支护以加固土体,再进行隧道的掘进及开挖支护,隧道开挖及施工支护完成后,及时或超前施作仰拱,衬砌紧

跟,及早封闭成环。最后进行 $\phi 45$ cm 单管旋喷桩加固隧道底部。

4.6.3 旋喷桩施作

施工前,进行现场旋喷桩固结体试验,选定旋喷参数、浆液配方和外加剂材料。

采用地质钻机成孔,钻机就位后进行水平校正,使钻杆轴向垂直对准钻孔中心位置,保证钻孔的垂直度。钻孔完毕,拔出岩芯管,并换上旋喷管插入预定深度,由下而上进行喷射作业。注意检查浆液初凝时间、注浆流量、风量、压力、旋转提升速度等参数是否满足设计要求,并做好记录,绘制作业过程曲线。

为防止泥沙堵塞喷嘴,可边射水边插管,水压力一般控制在 1 MPa 以下,否则易将孔壁射塌。

4.6.4 喷射工艺

由于本地段软土成因及组成完全不同于海相、湖相软土,其土层组成、密实度、地下水状态存在明显的差异,喷射施工工艺需及时调整,以适应地质变化。

隧道洞外及两侧纵向旋喷桩均为 23 m 长的深层桩,穿过砂粘土、淤泥质粘土地层。旋喷深层桩形成固结体时,若只采用单一的固定不变旋喷参数,势必形成直径不匀的上粗下细的固结体,严重影响其承载或抗渗作用。经过试桩,并结合地质剖面图、地下水资料,在不同深度、不同土层应适当调整旋喷参数。在不同的介质环境中有效喷射长度差别很大,重复喷射有增加固结体直径的效果。

高压旋喷桩按跳孔间隔法施工,相邻两桩间隔 48 小时以上,荷载试验采用载荷板法。

5 进口段施工支护开裂及处理方案

在遭遇了 10 月 3 日至 4 日连续 19 个 h 中到大雨后,于 4 日凌晨施工支护出现开裂,地表出现环向裂缝。此时,进口端掌子面里程为 DK X+ 557,衬砌至 DK X+ 528.2,超前仰拱施作到 DK X+ 542。

5.1 洞内外开裂情况

洞内可见的施工支护变形主要出现在线路前进方向左侧边墙处,裂缝基本沿线路纵向延伸,距拱脚 1~2 m,错台高 3~4 cm,范围为 DK X+ 524~+560,其中喷混凝土有错台的长度为 10 m (+540~+550),其余地段裂纹细小,无错台,并有派生斜向裂纹。

洞外地表裂纹主要呈环状,分布于旋喷桩的工作平台上,其中线路左侧裂缝宽 5~8 cm,无明显错台,其余为细小裂缝,宽度一般在 3~5 cm。地表裂缝最大出现在 DK X+ 575 线路左侧 30 m,与线路交角 80°;长度 15~20 m。

5.2 周边位移收敛,地表裂缝,下沉量测

自 9 月 25 日起,对拱顶下沉量侧、拱脚及墙中相对位移量测,对地表裂缝、下沉进行了量测,量测成果见图 2。

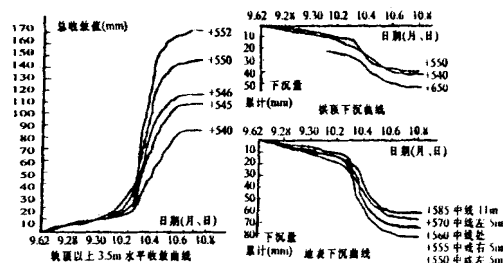


图 2 洞内外量测成果

5.3 施工支护开裂处理方案

5.3.1 立即停止进口端洞内开挖, DK X+ 540~+560 用型钢对施工支护加设上中下三道横向支撑。必要时,将三道横向支撑连成一体,提高其刚度和承载力。

5.3.2 洞内仰拱底部单重管旋喷由“施工支护封闭成环及临时仰拱施作后进行”,改为拱墙及仰拱施作完后进行。

5.3.3 DK X+ 542~+557 段仰拱钢架采用挖槽间隔封闭,间隔部分用 $\phi 8$ 钢管支撑两则边墙的底部,钢架用 20 cm 厚喷射混凝土包裹,仰拱钢架之间的土体暂不开挖。

5.3.4 DK X+ 530~+548 段仰拱地基改用 $\phi 45$ 单重管旋喷桩加固,间距 1 m。

5.3.5 旋喷桩施作只能在拱、墙衬砌施作后进行,受时间先后及地基本身存在不均匀沉降的影响,分段进行衬砌之间留有沉降缝,并预留一定的沉落量。

5.3.6 对施工支护的侵限部分,在边墙处采用 $\phi 42$ 小导管径向注浆加固土体,在原有工字钢架间挖槽,重新嵌入钢架替换原工字钢架,加强钢架接头连接。墙设锚杆、钢筋网片,并加密衬砌主筋。

5.3.7 下半断面掌子面采用网喷混凝土封闭, $\phi 42$ 小导管注浆加固未开挖软土,确保其稳定,已施作的上半断面设扇形支撑,并采用型钢施作临时仰拱,防止施工支护下沉。

5.3.8 洞内基底旋喷桩时,采用单管旋喷斜桩时 DK X+ 538~+586 段三重旋喷桩边墙基础补强。

5.3.9 DK X+ 530~+546 仰拱刚度加大,以保证衬砌的整体性。

5.3.10 地表裂缝夯填密实,用水泥砂浆封闭,定时对线路中线、地表、洞内周边进行观测、量测。

5.4 施工支护开裂段衬砌及效果评价

通过及时、认真实施上述处理方案,至10月7日开裂变形的收敛值一般在 $1\sim 2\text{ mm}/\text{日}$,趋于稳定,迅即组织衬砌。

经过长时间的连续观测,施工支护的收敛值一般在 $0\sim 2\text{ mm}$,衬砌完整无变形,隧道已稳定。

6 几点认识

该隧道属浅埋、特软弱围岩隧道,尤其是进口段贯穿沟槽软土地带,软土具有“流滑性”,物理力学性质极差,在隧道建设史上也较为罕见。通过对预锚固桩、旋喷桩连续墙、超前小导管、管棚、临时仰拱等一系列处理措施的综合运用,成功完成了穿越软土的隧道施工,解决了因围岩蠕动、地表下沉造成的支护开裂的施工难题。

6.1 旋喷桩作为软土地基处理措施之一,能快速固结土体,提高软土强度、承载力和稳定性,减少了隧道不均匀沉降。旋喷桩施工后,特别是地下连续墙的施作,为地下暗挖和地表明挖提供了第一道预支护,也是后续预支护及其它支护措施得以实施的重要保障。

6.2 预锚固桩的主要作用在于稳定进洞拉槽边坡和抵抗暗挖时的侧向挤压力,为第二道预支护。

6.3 洞门与锚固桩联体主要用于抵抗隧道受到的纵向力,纵向力来源于仰坡及前方具“流滑性”土体的蠕动作用。

6.4 超前小导管注浆和管棚作为第三道预支护,对掘

进等后续工序的开展起标尺作用,增强围岩的整体性,保障开挖面能出现较完整平顺的开挖轮廓和施工安全。

6.5 全环钢拱架支护在掌子面范围内立即起支护作用,对锚喷混凝土和掘进起标尺作用,用作管棚的支承点,对下一步掘进起支护作用。全环相对于底部开口的钢拱架能提供更为强劲的抵抗力,更主要的还是约束拱架的侧向变形,确保开挖轮廓、衬砌厚度和隧道净空。

6.6 预支护、开挖、施工支护、衬砌时,预留一定的变形量在软土隧道施工中也相当重要,特别是对于着落于软土上的隧道,地层虽经旋喷处理,隧道仍会随时间而有所下沉。为确保隧道净空和线路标高,衬砌时应预留适当的沉落量。

6.7 地表旋喷桩的施工对后续施工的开展起着重要作用。尤其是布置于隧道两侧的纵向地下连续墙,能阻止暗挖时软土的侧向涌动,但对土体的纵向涌动仅靠超前小导管注浆难以起到有效的扼制作用,用旋喷桩地下纵横连续墙将隧道穿过的软土层分成数个隔室,使管棚尾端支承于钢拱架,前端打入横向连续墙内可提拱较安全的施工环境。否则,当横向连续墙间距过大,管棚前端没有稳固的支承点,极易引起坍塌等不良后果。

总之,对该隧道的设计与施工作为浅埋、软土隧道工程的成功实践,可为不良地质隧道的设计和施工提供有益的借鉴和广泛的参考价值。

COMPREHENSIVE CONSTRUCTION TECHNIQUE OF TUNNEL IN SOFT SOIL

ZHANG Huan-cheng, YANG Shao-hong

No. 14 Engineering Bureau of the Railways of China

Abstract Combined with engineering example, the construction practice of tunneling is introduced for the tunnel whose entrance stand at harmful geologic conditions of shallow cover and groove with soft soil. In the course of construction, the techniques were adopted integratively, such as the pre-anchor pile, entrance gate joined with anchor pile, steel tube pile, anchor-tube injected with slurry, continuous underground wall of vertical spraying pile, super fore-canula injected with slurry, tubular shed arranged closely, timbering with steel annularity arch, hanging meshwork and anchor bolt spraying, foretimbering with temporary ob-arch, forsetting ob-arch, built by concrete following closely, floor spraying pile in tunnel done in time and so on. It triumphantly resolved the thorny problems about the entrance of tunnel full floating on soft soil to start digging, excavate, support, build with concrete, etc. For heavy rain tempestuous crack of the temporary shoring, the tracking measure and the construction treatment are introduced. It can be used for reference to design and construct tunnel under harmful geologic conditions.

Key words: soft soil tunnel; pre-supporting; construction technique