

文章编号: 0451-0712(2004)07-0042-05

中图分类号: U455.49

文献标识码: B

隧道软黄土介质综合稳固技术

张汉舟

(甘肃省交通规划勘察设计院 兰州市 730030)

摘 要: 在分析土家湾隧道软黄土介质坍方原因的基础上,阐述了该隧道软黄土介质坍方综合处治技术和相关的防排水措施、水泥~水玻璃双液注浆加固、围岩支护的技术参数取值及其施工工艺。监控结果表明:处治后塌方段周边相对位移小于 0.2%,整体已处于稳定状态,满足公路隧道施工技术规范要求,说明所采取的综合处治技术措施是有效的。

关键词: 软黄土介质; 隧道; 坍方; 处治; 水泥~水玻璃; 注浆

1 研究背景与工程概况

连霍国道主干线岷柳高速公路为黄土山区高速公路,全长 77.45 km,有 4 座上下行分离的双洞黄土隧道,土家湾隧道就是其中之一,隧道穿过的土家湾山梁(位于甘肃省定西县与榆中县交汇处的马儿湾分水岭)中间是第三纪泥岩山梁,上覆较厚的 Q_3 马兰黄土和 Q_2 离石黄土,隧道的 4 个进出口段处于含水量大的饱和软黄土中,土家湾隧道的水文地质条件是甘肃中部普遍存在的黄土隧道的典型问题。土家湾隧道上行线长 1 289.25 m(里程桩号 K28+000.75~K29+290),下行线长 1 210 m(里程桩号 K28+075~K29+285),隧道净宽 9.75 m,净高 7.1 m,最大开挖宽度 13.4 m,二次复合衬砌,隧道设计时对处于含水量大的饱和软黄土中的 4 个进出口段地基做了加固处理。其中下行线进口段 K29+285~K29+144,埋深 31~35 m,当开挖至 K29+199.8~K29+198.6 段时,洞顶突然坍方,黄土泥流涌入隧道,土体含水量高达 32.5%~33.7%,使开

挖面后退近 10 m,并有多处渗水点。同时,洞顶坍方延伸至地表,在地表 K29+205~K29+194 处发现地表下陷,形成长 15 m、宽 10 m、深 1.5 m 的椭圆形陷坑,在陷坑周围出现数条环向裂缝,使本来施工难度就很大的工程“雪上加霜”,致使施工中断,成为制约全线按期完工的控制工程。

2 工程地质概况及坍方原因分析

2.1 工程地质概况

土家湾隧道属于黄土梁峁地貌单元,隧址区地表被厚层黄土所覆盖,地质构造痕迹不明显,根据勘察资料,隧道位置分布的地层自上而下如下。

(1)第四系上更新统新黄土(Q_3^{nd})。

覆盖整个山梁,层厚 4~42 m,浅黄色,土质较均匀、疏松,大孔隙、垂直节理发育,半坚硬~硬塑状,具强烈湿陷性,湿陷性黄土厚 6~20 m。该土层物理力学性质见表 1。

表 1 新黄土物理力学性质

天然含水量 %	天然容重 kN/m ³	塑限/%	液限/%	塑性 指数	液性 指数	饱和度 %	天然 孔隙比	压缩系数 MPa ⁻¹	压缩模量 MPa	粘聚力 kPa	内摩 擦角	起始压力 kPa	湿陷 系数
7.20	15.10	19.00	26.80	7.00	0	32.50	0.75	0.08	13.57	35	25°		0.018
~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	122.14	~
20.50	18.80	21.00	31.20	10.70	0.40	78.70	1.30	0.15	24.53	37	30°		0.150

(2)第四系中更新统老黄土(Q_2^{al-pl})。

隧道进出口,老黄土呈灰褐、黄褐、微红、杂色

国家西部交通建设科技项目 2001 318 00021 资助项目。

收稿日期:2004-05-28

等,土质不均匀,较致密。层理和垂直节理发育,含水量较大,多呈软塑状,层厚 8.25~27.00 m。隧道中部,老黄土呈棕红、棕黄色,质地均匀、致密,柱状节

理发育,呈硬塑状,层厚 44.00 m。进口段土层物理力学性质见表 2。

表 2 进口段老黄土物理力学性质

天然含水量 %	天然容重 kN/ m ³	塑限 %	液限 %	塑性 指数	液性 指数	饱和度 %	孔隙度 %	天然 孔隙比	压缩系数 MPa ⁻¹	压缩模量 MPa	内摩 擦角	粘聚力 kPa
25.10 ~ 27.50	19.20 ~ 20.70	19.83 ~ 20.85	29.05 ~ 30.18	9.22 ~ 9.33	0.47 ~ 0.83	90.50 ~ 96.90	38.72 ~ 44.23	0.63 ~ 0.79	0.15 ~ 0.18	8.68 ~ 9.56	22° ~ 25°	11.0 ~ 18.00

(3)第三系上新统泥岩(N₂)
与老黄土呈不整合接触,桔红色,泥质胶结,具

有软硬相间岩性,表层 1~4 m 岩质较软,4 m 以下岩质坚硬。泥岩的物理力学性质见表 3。

表 3 泥岩物理力学性质(平均值)

天然 容重 kN/m ³	含水率 %	孔隙率 %	饱水率 %	吸水率 %	单轴极限抗压强度/MPa			单轴抗剪切强度/MPa			变形 模量 MPa	弹性 模量 MPa	软化 系数	泊松比	内摩 擦角	粘聚力 MPa
					天然 状态	饱和 状态	干燥 状态	天然 状态	饱和 状态	干燥 状态						
23.6	19.78	31.45	57.33	39.99	1.64	0.27	3.13	0.33	0.14	0.82	0.696 ×10 ⁴	0.670 ×10 ⁴	0.1	0.16	340	0.28

2.2 坍方原因分析

(1)坍方段位于黄土与泥岩分界带附近,由于黄土的垂直节理发育,竖向渗透性强,而泥岩为不透水层,地下水渗流在界面受阻,使之滞留于黄土与泥岩界面附近,加之开挖的隧道成为一集水廓道,改变了原有地下水的渗流方向,加速了地下水向隧道围岩富集,导致该段黄土成为饱和黄土,土体呈软塑~流塑状,强度较低,灵敏度较高,稍有扰动,就会产生较大变形。

(2)该地段原为一冲沟,陷穴发育,原始地形较低,施工之前有泉水出露,为地下水的排泄通道。20 世纪 70 年代,当地农民为了造田,填平了陷穴,但填土未压实,使隧道的上覆地层为欠固结土层,围岩自稳能力极差,随着隧道的开挖而产生坍塌。

(3)在隧道开挖过程中,阴雨连绵,降水较多,大量地表水渗入土层,导致土体的工程性质恶化。

(4)为了赶工期,未采取先降排水和围岩预加固措施,隧道开挖中仅采取了加密锚杆和管棚超前支护手段,根据力学计算分析,在饱和黄土层中仅采用锚杆(或管棚)超前支护,其效果很不理想,基本上不起作用。

3 坍方综合处治措施

3.1 地表陷坑及裂缝处理

(1)修筑环向截水沟。

为了阻止地表水继续向坍方区汇集,首先在陷坑周边 5 m 以外修筑梯形截水沟,并与原设截水沟联接,形成完整的排水系统。截水沟断面尺寸为:底宽 60 cm,深 50 cm,边坡坡度 1:1,采用厚 6 cm 的 C15 水泥混凝土预制块防护,截水沟周边铺设土工膜进行防渗处理。

(2)裂缝封闭回填。

对陷坑周边环向裂缝回填夯实,并在表层采用 3:7 灰土封闭,厚度为 30 cm。

(3)陷坑回填压实。

当施工安全通过坍方段及二次衬砌强度达到设计标准后,对陷坑进行回填压实,在地表下 50 cm 处铺设防渗土工膜,并与周边截水沟防渗系统形成整体,以防地表水下渗。

(4)地表沉降观测。

坍方段每间隔 5 m 设置一个沉降观测断面,每个断面设 3 个观测桩,观测频率为 2 次/d,以防坍方体突变危及处治施工安全。

3.2 水泥~水玻璃双液注浆加固

由于坍方段处于饱和黄土中,围岩强度低,自稳能力差,加之坍方体含水量大,处于流塑状态,坍方处拱顶上部仍有 30 余 m 土体,从洞内处理坍体,无

论采用何种辅助施工措施,都难以保证隧道安全施工,即使能通过坍方段,对隧道结构的稳定仍留有隐患。因此,根据劈裂灌浆原理,采用水泥~水玻璃双液注浆方法,利用该种浆液速凝且凝固时间可控,浆液结石率高,结石体早期强度大的特性^[2],在相对较高的灌浆压力下,使浆液克服地层的初始应力和抗拉强度,引起土体结构的破坏和扰动,使水泥和水玻璃两种浆液在劈裂的孔隙或裂隙中混合并迅速凝结,在土体中形成网状浆脉,快速固化坍方体,改善其物理力学性能,提高围岩抗剪强度和自稳能力,减少围岩对支护结构的压力,增强超前支护的效果,以求顺利通过坍方段,加快工程进度。

(1) 注浆参数。

根据浆液配方试验(表 4 和表 5)和现场试验结果,采用开挖掌子面超前分段注浆方式,每段长度 6 m;加固范围沿隧道周边呈半环形,厚度 4~6 m,处理长度 66 m(K29+210~K29+144);浆液扩散半径 0.80 m;注浆速度 30~40 L/min;注浆初压 0.6~2.5 MPa,终压 3.5 MPa;每段单孔注浆量 1.2~1.8 m³;水泥浆的水灰比 0.75:1~1.0:1(重量比),水玻璃浓度 35Be',模数 $M=2.9$;水泥浆和水玻璃溶液体积比为 1:1.0;浆液胶凝时间控制在 1.0~1.5 min。

表 4 水泥~水玻璃浆液胶凝时间

浆液温度	15℃	18℃	21℃	24℃	27℃	30℃	备 注
水泥浆	0.75:1	11'28"	1'20"	1'14"	1'07"	1'02"	①水玻璃浓度为 35Be', $M=2.9$; ②水泥为 425 号普通硅酸盐水泥; ③水泥浆:水玻璃 = 1:1.0(体积比)。
水灰比	1.0:1	12'18"	1'52"	1'35"	1'26"	1'18"	

表 5 水泥~水玻璃浆液结石体抗压强度

水泥浆 水灰比	浆液结石体抗压强度/MPa				备 注
	3 d	7 d	14 d	28 d	
0.75:1	7.30	8.20	10.50	13.00	①水泥为 425 号普通硅酸盐水泥; ②水玻璃浓度 35Be', $M=2.9$; ③水泥浆:水玻璃 = 1:1.0(体积比); ④试块在室温水中共生。
1.0:1	4.00	6.90	9.20	11.70	

(2) 注浆孔布置

开挖掌子面横断面注浆孔间距 1.0~2.0 m,交错布置,见图 1;纵断面呈扇形布设,注浆孔角度为 $\pm 45^\circ$,见图 2。

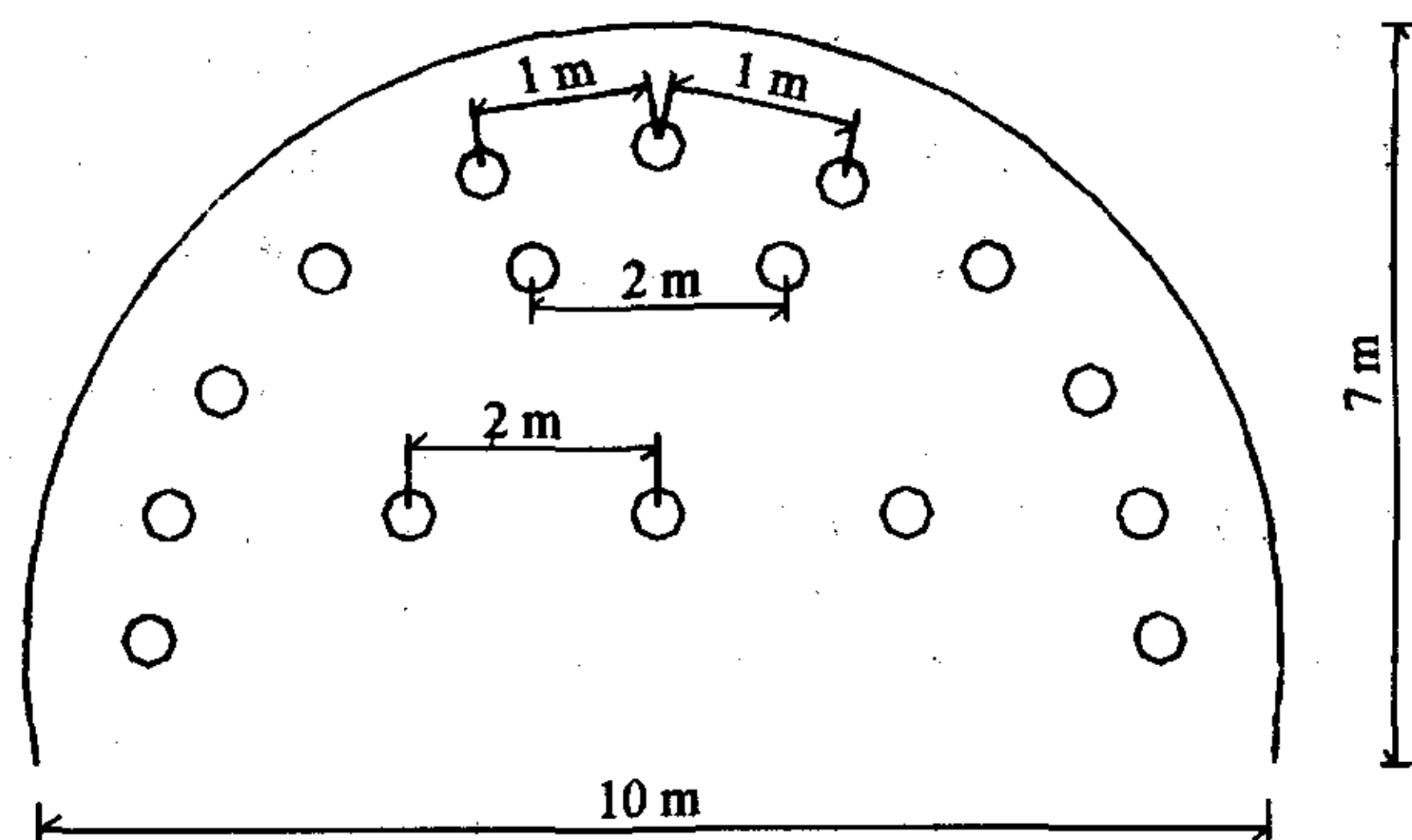


图 1 注浆孔横断面布置

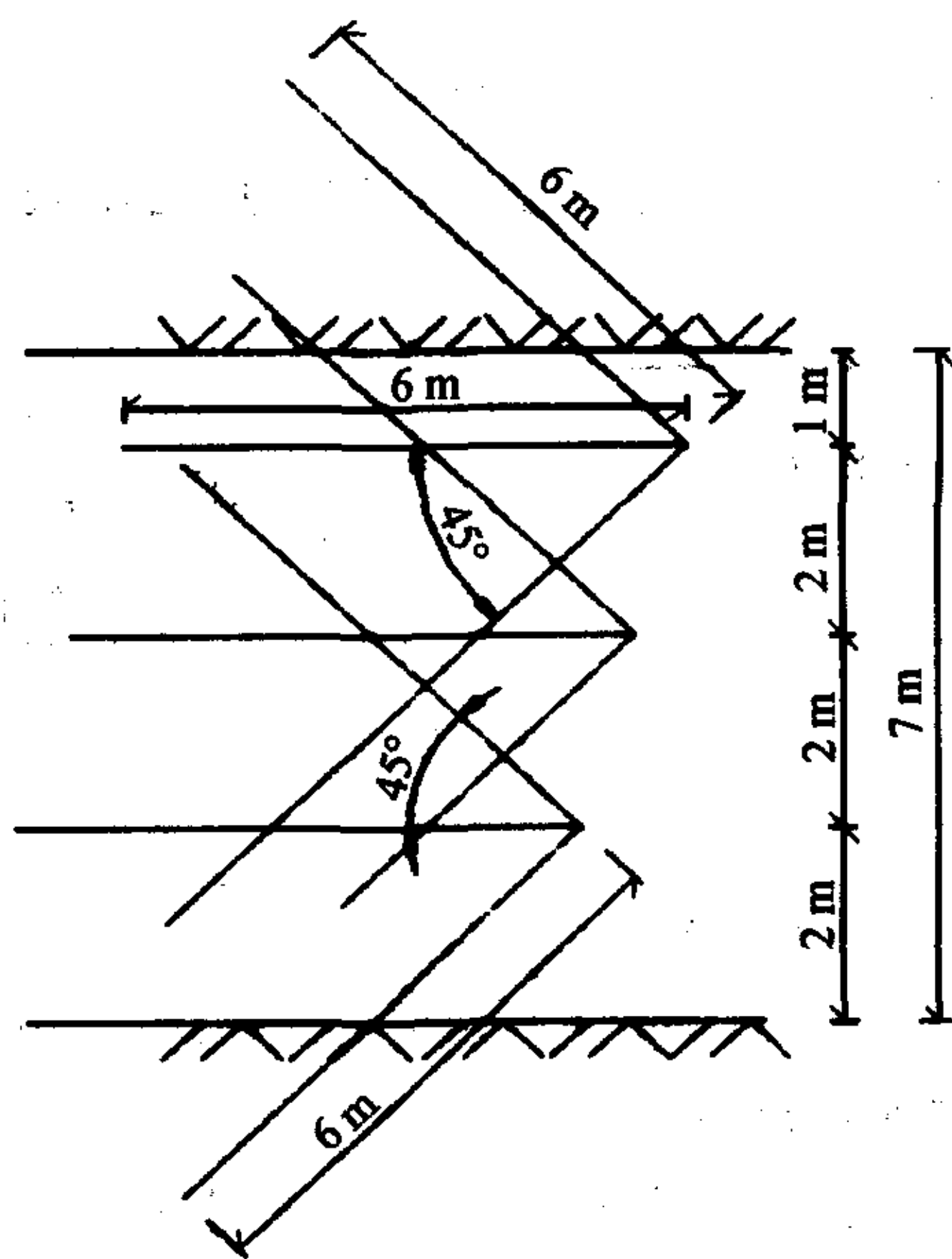


图 2 注浆孔纵断面布置

3.3 管棚超前支护及钢拱架支撑

每段水泥~水玻璃双液注浆加固完成后、隧道开挖前,在起拱线以上的拱部周边,采用 $\phi 89$ 、长 12 m 大管棚超前支护,环向间距 50 cm;仰角 $3\sim 5^\circ$,搭接长度 2 m。每米设一榀 I18 钢拱架支撑。

3.4 降排水措施

掌子面上设 4~5 个 $\phi 89$ 、长 20 m 水平泄水孔,安设 $\phi 50$ 弹簧排水管,以便及时降低地下水位,疏排地下水,改善围岩的物理力学性质。

4 施工工艺及处治效果

4.1 施工工艺

(1) 总体施工流程,见图 3。

(2) 注浆工艺及控制。

注浆前喷射 20 cm 厚 C25 钢纤维混凝土,封闭掌子面形成止水墙;注浆时采用封闭体系定量注浆工艺,注浆顺序由外向内进行,先注外圈,形成一个封闭环,然后再加固封闭圈内的土体,注浆过程中,

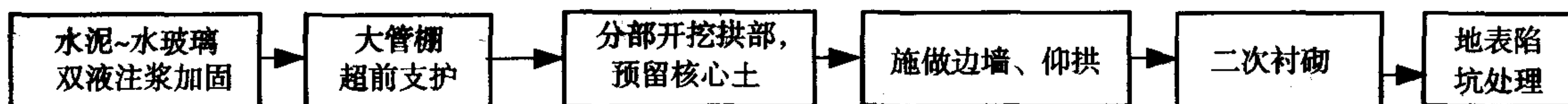


图3 总体施工流程

按分段间歇式隔孔循环的方法,每6 m为一个循环,由外向里进行注浆,一段内每次注浆长度不超过2 m,考虑到施工时浆液由于流动而不断被扰动、拌合,浆液实际胶凝时间比实验室测出的时间长5~6倍^[1],间歇时间5 min左右;注浆压力由小到大依次施加,根据吸浆量和注浆压力大小,随时调整浆液浓度;每段注浆完成后,根据土体的液性指数,判断是否需要补注浆,即 $I_L < 0.5$ 时,要加密补注浆。

4.2 处治效果

水泥~水玻璃注浆工序完成后,经钻孔取样及施工过程中的开挖观察表明,浆液在土体中呈脉状分布,结石体3 d平均抗压强度达3.5 MPa,掌子面处软泥被挤出,核心土被劈裂,地下水从裂缝中被排出,土体含水量降至22.6%~23.4%,液性指数 $I_L = 0.32 \sim 0.40$,松散土体得到有效固结,由软塑~流塑状变为硬塑状,为后序工作的开展创造了良好条件。加固后土体物理力学性质如表6所示。

表6 注浆土体物理力学性质

天然含水量 %	天然容重 kN/m ³	塑限 %	液限 %	塑性指数	液性指数	内摩擦角	粘聚力 kPa	浆液结石体			备 注
								3 d 抗压强度 MPa	分布密度 条/m	平均直径 (加权) mm	
22.6 ~ 23.4	18.3 ~ 19.7	19.8 ~ 20.1	28.6 ~ 29.4	9.1 ~ 9.3	0.32 ~ 0.40	270 ~ 300	37 ~ 43	3.5	2.3	33.6	浆脉最大直径为150 mm,最小直径为5 mm

在地质条件最不利的下行线进口段埋设传感器,进行隧道围岩、衬砌和结构的应力~应变测试。测试组件布设如图4所示,处治工程结束后,对拱顶沉降、隧道收敛位移及隧道结构受力与变形,进行了

长期的监控量测,监测结果表明,土家湾隧道进口段坍方处治所采取的措施是可行的,取得了良好的处治效果,达到了预期目的。

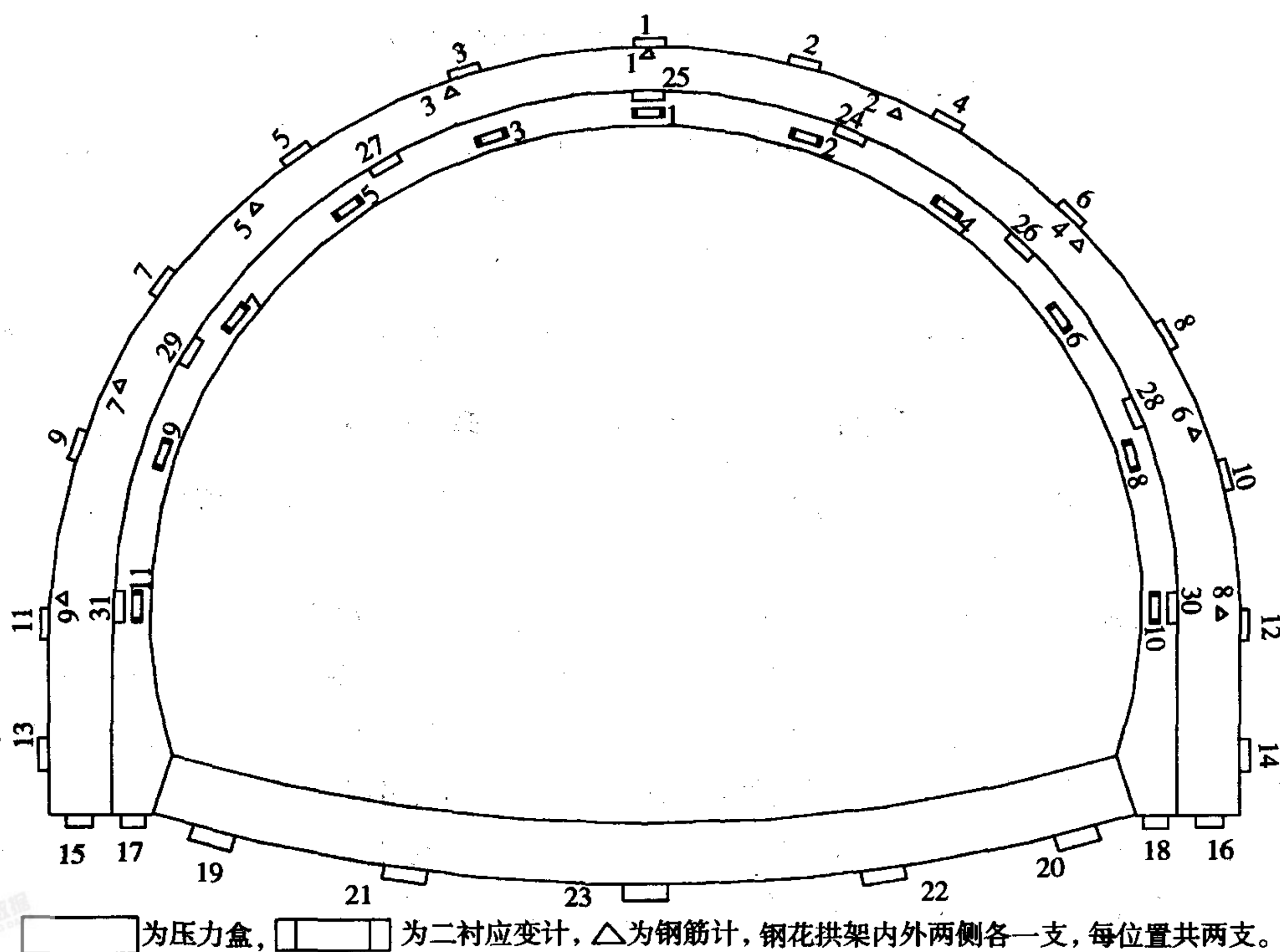


图4 隧道测试布置

5 结语

通过对土家湾隧道坍方处治的工程实践,笔者体会到:

(1)黄土隧道施工过程中,一定要贯彻“先排水、短进尺、快支护、早封闭、勤量测”原则,不可盲目求快。

(2)在黄土与泥岩交界附近的饱和黄土层施工时,采用水泥~水玻璃双液注浆方法对饱和黄土围岩进行预加固是可行的,效果也较好。

(3)坍方处治过程中,水泥~水玻璃双液注浆是关键环节,注浆时应根据实际情况,选择合理的注浆参数和注浆工艺,进行动态控制。

(4)黄土隧道开挖时宜将目前常用的“先拱后墙

法”调整为“先墙后拱法”,以减小拱顶沉降量。

参考文献:

- [1] Bader T A and Krizek R J. Injection and Distribution of silicate Grout in sand. proc. of conference on Grouting in Geotechnical Engineering. New York: American society of civil Engineers. 1982, 540~563.
- [2] 龚晓南,主编. 地基处理手册(第二版)[M]. 中国建筑工业出版社,2000.
- [3] 林宗元,主编. 岩土工程治理手册[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,1993.
- [4] 铁道部第二勘测设计院主编. 铁道工程设计技术手册——隧道[M]. 中国铁道出版社,1999.

Synthetical Soundness Technique for Soft Loess Medium of Tunnel

ZHANG Han-zhou

(Gansu Provincial Transportation Planning, Survey & Design Institute, Lanzhou 730030, China)

Abstract: On the basis of the analysis of the reason for collapse of soft loess medium of Tujiawan Tunnel, the synthetical soundness technique and method for collapse of soft loess medium of the tunnel and the relative measure of preventing and draining water are put forward, the technical parameter of cement~sodium silicate grouting reinforcement, support of surrounding rock and its relative technology are discussed. The supervising data shows that the surrounding relative displacement of collapse plot of the tunnel after being treated is lower than 0.2%, which express that the whole surrounding rock has been in stable condition and satisfy the standard of highway tunnel construction techniques. All above show that synthetical treatment technique and measure taken is very effective.

Key words: soft loess medium; tunnel; collapse; treatment; cement~sodium silicate; grouting

205 国道滨州东绕城线通车

2004 年 6 月 10 日上午,山东滨州黄河大桥北侧东绕城线向东 2 km 处彩旗飘扬,锣鼓喧天,205 国道滨州东绕城线竣工通车仪式隆重举行。

205 国道滨州东绕城线工程起点位于黄河大桥唐赛儿雕塑处,顺黄河大堤向东,沿朝河桥经东郊水库向北与省道东滨路(S310)重合,向西与 205 国道相接。该路全长 17 km,路基封顶宽度 30~33 m,路面宽 24 m,一级路标准,双向六车道,大小桥涵 5 座,工程概算投资 1.7 亿元。工程于 2002 年 12 月经山东省交通厅公路局正式立项建设,至 2003 年年底完成了路基、桥涵工程,其中 11 km 路段具备通车条件。今年以来主要进行了剩余 6 km 路面及附属工程的施工。205 国道滨州东绕城线工程建成通车后,将有效缓解滨州市区的交通压力,确保“绿色通道”的安全畅通,为黄河三角洲开发、“海上山东”建设发挥积极作用。