

劈裂注浆法在运营铁路软土地基处理中的应用

王 哲¹, 龚晓南¹, 程永辉², 张玉国¹

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 长江水利委员会 长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 详细介绍了运营中的黑龙江滨绥铁路运用劈裂注浆法进行软土地基处理的设计方法和施工工艺, 探讨了劈裂注浆容许注浆压力的设计计算方法, 根据运营铁路的地理条件和地质性质设计了快速凝结的水泥浆水玻璃的一组配合比, 并设计了 3 个不同角度采取不同的压力分段注浆, 实现了防参与地基加固的双重目的。此方法占地少、不影响运营, 地基固结速度快, 地基处理效果好。

关键词: 土力学; 劈裂注浆; 浆液配合比; 软土地基; 防渗; 加固

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)09-1619-05

APPLICATION OF FRACTURING GROUTING METHOD TO TREAT SOFT FOUNDATION OF OPERATING RAILWAY

WANG Zhe¹, GONG Xiao-nan¹, CHENG Yong-hui², ZHANG Yu-guo¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Yangtze River Scientific Research Institute, Yangtze River Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: The design method and construction process of fracturing grouting method applied in soft foundation treatment in operating Harbin—Suifenhe railway are introduced in details. The design method of allowable grouting pressure is discussed, and a group of mixture ratios grouting liquid and soluble glass are designed according to geography condition and geologic property of the railway foundation. Several kinds of pressure are designed to sectionalized grouting with three kinds of angles to realize the aims of seepage prevention and reinforcement. The method need small operation site and does not affect the operation of railways with fast concretion speed and well treatment effect.

Key words: soil mechanics; fracturing grouting; mixture ratio grouting liquid; soft foundation; seepage prevention; reinforcement

1 引 言

对于运营中的铁路软土地基处理, 目前国内遇到的极少。通常采用的排水固结法(砂桩、袋装砂井、塑料插板桩等)和复合地基处理法(碎石桩、粉喷桩、挤密桩)均需在不干扰的场地上进行, 且占用施工场地范围大, 施工时间长, 用于运营铁路地基加固是不合适的。钻孔劈裂注浆法加固软土地基, 特别在场地狭窄、地形条件复杂的情况下, 运用轻便的施

工机械, 可以起到施工方便、快速、经济节约的效果^[1-6]。在对运营中的黑龙江滨绥铁路软土地基处理时, 采用劈裂注浆法加固防渗技术, 通过调整合理的注浆压力、浆液配合比, 对滨绥铁路线进行钻孔注浆, 取得了较好的效果, 为铁路软土地基处理相关工程提供了经验。

2 工程概况

滨绥铁路 K325+850 ~ K326+000 段位于牡丹江

收稿日期: 2004-01-13; **修回日期:** 2004-02-20

作者简介: 王 哲(1978-), 男, 1999年毕业于长春地质学院岩土工程专业, 现为浙江大学建筑工程学院岩土工程专业博士研究生, 主要从事软粘土力学和地基处理方面的教学与研究工作。E-mail: wangzsd@163.net。

旁海林市，于 1958 年由粘土、淤泥质粘土、粉质粘土垫砌而成，地层性质及主要参数见表 1。

表 1 地层性质及主要参数

Table 1 Characteristics of strata and main parameters

层厚/m	地层名称	地层性质	容重 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	液限 / %	塑限 / %	孔隙比 e
0.8	灰渣中砂	松散、含水少				
1.6	粉质粘土	松软、粘性差、含水	14.27	53.7	24.8	1.39
1.8	淤泥质土	黑色、可塑、含水较大	15.95	54.8	25.6	1.42
5.1	粘土	黄色、教硬、含水少	17.50	45.2	18.6	0.70

近年来铁路一侧耕地由旱田改为水田，距离铁路 2.5 m 处沿铁路走向有一条深 1.5 m 的水渠，水位与铁路路轨高差 1 m。当重载列车通过时，铁轨上下浮动幅度超过安全限度，且靠近水渠一侧轨道比另一侧低 0~4 mm，迫使列车在此 5 km 范围内减速行驶，大大影响了铁路运输及列车安全。究其原因，路基在地表水的长期浸泡下，靠近水渠侧地基的含水量逐年增加，路基土质变得松软，承载力和动强度显著降低，轨道下方的路基土因反复受到挤压和固结而产生过大的累计塑性变形，从而导致了铁轨的过大变形而影响运营。

在保证这条繁忙的运输干线正常运营条件下，针对地层及地理条件，决定采用轻型钻机钻孔进行劈裂注浆，对该路基进行防渗加固。

3 注浆设计

劈裂灌浆是一个先压密后劈裂的过程，存在多次劈裂现象，所以设计时应计算初始劈裂压力和最大容许注浆压力。作用机理是在钻孔中施加较高的灌浆压力，当浆液能够克服地基中初始应力和土体抗拉强度时，地层中原有的裂隙或孔隙张开形成新的裂隙或孔隙，或者土体强度最弱的平面上发生劈裂，使渗入性灌浆不可灌的土体顺利灌浆，增大浆液扩散范围，达到地基处理的目的。

注浆点在水渠一侧，根据地质资料和钻孔取样结构，确定注浆加固范围为沿铁路线长 150 m。

3.1 注浆量计算和浆液配合比

(1) 注浆量计算

注浆量按单孔注浆量控制，按照如下经验公式计算：

$$\left. \begin{aligned} Q &= V\lambda \\ V &= \pi r^2 L \\ \lambda &= na(1 + \beta) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： Q 为单孔注浆量(m^3)； V 为土体体积(m^3)； λ 为注浆率； r 为浆液扩散半径，取 0.9 m； L 为注浆管长，取全孔长减去孔口密封段长(本工程为 0.8 m)； n 为土体的孔隙率； a 为有效灌注系数； $1 + \beta$ 为损失系数。各参数可查文[2]获得。

经计算，单孔注浆量为 0.6 m^3 。工程施工中通过观测得到的注浆压力变化来决定注浆量的实际大小，其结果与设计值吻合。

(2) 浆液配合比

注浆的目的是建立防渗墙，断绝地表水侵入路堤；提高地基承载力和地基密实度，使之在列车运营中不发生超过规定的变形和沉降，同时保证碎石垫层的缓冲减震作用。

根据上述要求来选定浆液配合比，采用水泥浆水玻璃混合注浆，试验结果显示：水泥浆浓度越高，凝胶时间越短；水玻璃浓度越高，凝胶时间越长。实际施工中，为了控制凝胶时间，可加入氢氧化钙作促凝剂，使凝胶时间缩短，或加入磷酸氢二钠作缓凝剂，使凝胶时间延长。进行劈裂注浆 15 孔现场试验时，第 1 次钻孔 3.0 m，当压力达到 0.3 MPa 时，由于道渣、灰渣松散，碎石层局部冒浆；停注 2~3 min，待浆液初凝，继续压浆，原冒浆处止浆，但旁侧出现冒浆，这类钻孔很普遍。由于碎石垫层对路基起着减震缓冲作用，所以需要控制浆液进入碎石层。进行现场配合比调整，最后确定施工配合比：水泥浆水灰比为 1 : 1，水泥浆和水玻璃体积比为 1 : 1，其初凝时间为 20 s。

3.2 容许注浆压力

注浆压力是影响扩散半径及注浆效果的主要参数。而注浆压力的影响因素主要是地层性质和上覆地层的重度。采用较大的注浆压力可以增加浆液的扩散能力，从而减少钻孔数量，还能使一些微细孔隙张开以提高可注性，挤出多余水分，提高结石强度，增加加固效果。当注浆压力超过被注地层上部强度时，将出现地表变形，使铁轨变形进而危及行车安全。有时出现冒浆现象，减弱了路基的减震缓冲作用。因此，采取由上而下分层注浆的方法，以利用上层注浆后的结石强度增加下层注浆压力；同时，注浆时要经常观测注浆压力的变化，进行必要的调节，以加强劈裂注浆效果。

根据水力劈裂经典理论，参照具有无线外延半径和内压力等于 0 的厚壁圆筒应力分配，可求解出当注浆钻孔内施加流体压力 P_0 后，钻孔内周围应力的变化，即

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_{r0} + P_0 R_0 / R^2 \\ \sigma_t &= \sigma_{t0} - P_0 R_0 / R^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： σ_{r0} 为加压前钻孔周围的径向应力， σ_{t0} 为加压后钻孔周围的切向压力， σ_r 为加压后土体中的径向应力， σ_t 为加压后土体中的切向应力， R_0 为钻孔半径， P_0 为钻孔内施加的流体的初始注浆压力。

当切向应力 σ_t 超过土层的抗拉强度 S_t 时，土体即开始破坏。注浆钻孔周围土体产生径向裂缝，浆液进入土体裂缝并挤压原土体中的水分，使其结构形成网状浆脉状的硬实土体。此时有

$$\left. \begin{aligned} \sigma_t &= 2\gamma H - P_0 \\ P_0 &= 2\gamma H + S_t \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： γ 为土体的容重， H 为注浆孔轴线的埋深。

由式(3)可知，劈裂注浆的最大容许注浆压力值稍大于 2 倍注浆孔上部岩土重量的压力，在该压力作用下软粘土开始产生劈裂。由于淤泥质粘土的抗拉强度近似等于 0，根据设计孔深即可计算出钻孔埋深和最大钻孔埋深处的初始注浆压力值 P_0 。由文[2]可知，当压力达到 P_0 后，进行劈裂注浆的劈裂流动阶段，随后压力降低，裂缝发展到一定程度之后，注浆压力又重新上升而进入劈裂注浆的被动土压力阶段，这与实测结果也是相符的。劈裂注浆最大容许压力 P_{max} 计算公式采取文[2]中计算公式，即

$$P_{max} = \gamma gh + S_t \quad (4)$$

钻孔埋深和初始压力值见表 2。

由表 2 可知：75° 乳施工中注浆压力值和计算值吻合很好，劈裂初始压力和施工中注浆压力实测值都在容许注浆压力范围内；15°、45° 乳施工中注浆压力值和计算有较大出入，施工中注浆压力调整所

得值远大于计算容许注浆压力值。究其原因，是因为 75° 乳主要起防渗作用，是单孔单次注浆；而 15°、45° 乳起加固作用，要单孔分段多次注浆，采取由上而下分层注浆方法，由于上层注浆后结石强度的增加而使下层注浆压力大大增加，从而加强劈裂注浆效果。

3.3 浆液扩散半径和注浆孔布置

浆液扩散半径与浆液的流变特性、凝胶时间、注浆压力和注浆时间等因素有关。一般可由单管灌注溶液经现场试验确定。选取 3 个不同位置和不同深度的钻孔进行注浆试验，深度为 1.5、3.0 和 5.0 m 的注浆压力分别为 0.2、0.34 和 0.7 MPa。注浆后在孔四周钻孔取样进行物理分析，经测定距孔中心 0.89、0.96 和 1.06 m 处的土质均达标，因此确定浆液扩散半径为 0.9 m。

采取单排注浆，为了使浆液能更好地连通，注浆时采取隔两孔交替注浆，注浆压力逐渐升高，使间隙能完全充填。改变孔间距，则相应孔数、钻孔总长度、注浆量和打孔费用都发生相应改变，为取得最优注浆效果，保证最佳经济效益，要求平面上相邻 2 个孔的注浆材料重迭 0.2 m，确定孔间距为 0.5 m。

4 注浆工艺

4.1 施工设备

(1) 钻机

由于施工设备只能在铁路和水渠之间 2.5 m 宽的场地上施工，要求设备体积小、质量轻，故选用吉林大学钻探工程研究所研制的 SNG-1 型振动钻机进行钻孔施工。钻孔方向可调节，钻孔直径 56 mm，钻孔深度 30 m。

(2) 注浆设备

采用北京探矿机械厂生产的 SNB-90 型往复式泥浆泵 2 台。该泵流量、压力分为 8 级，最低流量为 18 L/min，最高泵压为 5 MPa。

表 2 钻孔埋深和初始压力值

Table 2 Burial depth of boreholes and initial pressure values

孔深/m	倾角/(°)	埋深/m	容重 γ /(kN·m ⁻³)	P_0 /MPa	P_{max} /MPa	施工中注浆压力调实测/MPa
2.0	75	1.93	15.95	0.060	0.300	0.2
3.5	45	2.48	15.95	0.078	0.390	0.2~0.8
5.0	15	1.29	14.27	0.041	0.205	0.2~1.0

(3) 钻具

采用钻杆为 $\phi 42$ mm 普通地质钻杆，孔内注浆管为 $\phi 25.4$ mm 钢管，底端封闭，管壁钻孔；采用胶囊密封方式， 0.64 m^3 水泥搅拌桶一个， 0.1 m^3 水玻璃搅拌桶一个。

4.2 注浆材料

注浆材料为水泥水玻璃双液浆。水泥采用 525[#] 普通硅酸盐水泥，水玻璃为 37 Be'。水泥凝固后产生较高的抗压强度，水玻璃可促使水泥浆早凝。

4.3 注浆方法

为了使浆液能更好地连通，注浆时采取隔两孔交替注浆，根据地层条件和施工目的，沿铁路线走向循环布置 3 个不同方向的注浆孔，注浆孔间距为 0.5 m，如图 1 所示(α 为沿铁路线方向钻孔倾角)。1[#]，2[#]，3[#]注浆孔方向及深度分别为：15 乳深 5 m、45° 孔深 3.5 m 和 75 乳深 2 m。灌浆速度为 36 L/min。

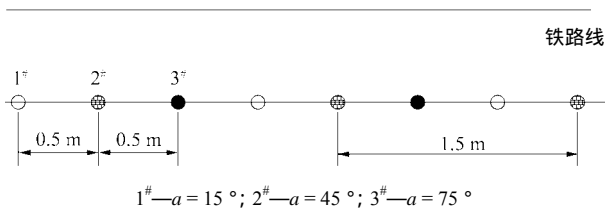


图 1 注浆钻孔平面布置示意图

Fig.1 Floor plant of grouting boreholes

首先施工 15 乳，该孔采用由上向下分段注浆。第 1 次钻进 2.5 m 后注浆，使注浆孔四周土体产生劈裂和压缩，浆液充填在软土中形成结石，注浆压力为 0.2~0.5 MPa。第 2 次钻进至 5 m 再注浆。注浆是对孔周围土体再次压密，补充第 1 次注浆时未注到的空隙部分，以达到最佳效果。第 2 次注浆压力为 0.4~1.0 MPa，大于第 1 次注浆压力。

为切断地下水的来源，防止地表水侵入，在迎水侧路基进行劈裂注浆以形成挡水墙体结构。然后进行 45 乳和 75 乳施工并注浆。劈裂注浆孔参数见表 3。

5 路基加固效果

施工完毕后，为了探索劈裂注浆加固对土体性质的影响及各项指标的改善，在行车间隙进行了钻孔取芯、探槽和动力触探检查。试验表明：整个土

表 3 劈裂注浆孔参数表

孔深 /m	倾角 /($^{\circ}$)	第 1 次钻孔深度 /m	第 1 次注浆压力 /MPa	第 2 次钻孔深度 /m	第 2 次注浆压力 /MPa
2.0	75	2.0	0.2	0.0	0
3.5	45	2.0	0.2	1.5	0.3~0.8
5.0	15	3.0	0.2~0.5	2.0	0.4~1.0

层浆液形成网格状，扩散半径为 1.0 m；碎石层中有大面积碎石被双浆液固结为一体，路基中碎石层以下存在大量水泥固结体，炉渣层、砂垫层中充满了水泥浆结石；加固范围土体的压缩模量明显提高，与原勘察报告相比，注浆加固后土体功能指标平均变化量见表 4。

表 4 注浆加固后土体功能指标平均变化量表

Table 4 Relative change of parameters of soil after treatment

岩性	平均变化量/%				
	含水量 W	孔隙比 e	压缩模量 E	粘聚力 c	内摩擦角 ϕ
加固后土体	-5.6	-20.5	54.2	18.5	31.2

经检测，靠近水渠侧铁轨略有抬升，重载列车经过时，铁轨振动幅度在安全限度内。对处理线路进行为期 1 a 的跟踪监测，结果表明，加固后的路基基本无下沉现象。

6 结 论

(1) 防渗加固可以达到运营铁路软土地基处理的目的，由此最后确定了 1 组可以快速凝结的水泥浆水玻璃配合比：水泥浆水灰比为 1:1，水泥浆和水玻璃体积比为 1:1，其初凝时间为 20 s。

(2) 根据水力劈裂经典理论，探讨了劈裂注浆初始注浆压力 P_0 的计算方法；进行了初始注浆压力和最大容许注浆压力的计算并同施工实际压力进行了比较分析。

(3) 实践证明，运用劈裂注浆法加固运营铁路软土地基是行之有效的。特别在场地狭窄、地形条件复杂的情况下，运用轻便的施工机械，可以起到施工方便、快速和经济节约的效果。同时注意到地

质条件及外加荷载的复杂性,施工和运营过程中要注意监测,随时调整施工参数以保证安全,取得最佳效果。

参考文献(References):

- [1] 龚晓南. 地基处理新技术[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1997. 127 - 130.(Gong Xiaonan. New Technique of Foundation Treatment[M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1997. 127 - 130.(in Chinese))
- [2] 邝键政, 翁月稳, 王 杰等. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 75 - 79, 106 - 107.(Kuang Jianzheng, Zan Yuewen, Wang Jie, et al. Theory and Project Example of Grouting[M]. Beijing: Science Press, 2001. 75 - 79, 106 - 107.(in Chinese))
- [3] 坪井直道. 化学注浆法的实际应用[M]. 吴永宽译. 北京: 煤炭工业出版社, 1980. 114 - 125.(Pingjing Zhidao. Application of Chemical-grouting Method[M]. Translated by Wu Yongkuan. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1980. 114 - 125.(in Chinese))
- [4] 卢文阁, 陈 晨. 静压与劈裂注浆加固铁路路基的效果分析[J]. 水文地质工程地质, 1999, 26(4): 54 - 57.(Lu Wenge, Chen Chen. Analysis of construction effect by static pressure and fracture grouting process on railway soft foundation[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1999, 26(4): 54 - 57.(in Chinese))
- [5] 刘占营. 应用注浆法加固运营铁路软土地基[J]. 铁道建筑技术, 1996, (2): 1 - 4.(Liu Zhanying. Application of grouting method to treat soft foundation of operating railway[J]. Railway Construction Technology, 1996, (2): 1 - 4.(in Chinese))
- [6] 赵大军, 计胜利. 滨绥铁路某线段路基加固技术[J]. 探矿工程, 2000, (1): 50 - 51.(Zhao Dajun, Ji Shengli. Reinforcing technique of Harbin—Suifenhe railway foundation[J]. Exploration Engineering, 2000, (1): 50 - 51.(in Chinese))

新书简介

《**建筑工程施工技术标准 4**》一书由中国建筑第八工程局编著, 中国建筑工业出版社 2005 年 4 月出版, 定价 68.00 元。

中国建筑第八工程局根据《中国建筑第八工程局十五科技发展规划》的要求, 于 2002 年初启动了《建筑工程施工技术标准》的编制工作。该标准包括: 钢结构工程施工技术标准、电梯工程施工技术标准、施工组织设计编制标准、施工技术交底编制与管理标准、建筑施工脚手架安全技术标准和施工现场常用垂直运输设备技术标准。

该书可作为工程技术人员和管理人员的参考书。

《**工程地质概论**》一书由李 忠、曲力群等编著, 中国铁道出版社 2005 年 1 月出版, 定价 25.00 元。

该书内容包括岩石和造岩矿物、岩石圈的变形与变位、土的工程地质性质、水的地质作用、岩石的工程地质性质、常见地质灾害以及工程地质勘察。

该书可作为土木类本科生、土木工程专业专科函授生和工程地质培训班学员的参考书。

《**土木工程概论**》一书由段树金主编, 中国铁道出版社 2005 年 2 月出版, 定价 19.50 元。

该书是为适应土木工程专业拓宽专业口径而编写的, 内容包括交通土建、水利水电、建筑工程、规划与经济、能源与环境工程、建筑材料和机械等概论。

该书可作为土建类本科生、高职学生及相关技术人员的参考书。

《**建筑结构与构件**》一书由徐占发、王 茹主编, 人民交通出版社 2005 年 1 月出版, 定价 68.00 元。

该书根据新颁布的各种建筑结构规范和标准、教育部有关土建类专业建筑结构课程教学基本要求以及总结多年教学经验编写而成。该书内容有绪论、建筑结构选型、建筑结构荷载与材料、结构分析和设计方法、钢筋混凝土结构与构件、预应力混凝土、钢结构与构件、砌体与混凝土组合结构、钢与混凝土组合结构、钢筋混凝土楼盖结构、单层厂房结构、钢筋混凝土框架结构设计以及建筑抗震设计。

该书中附有大量设计实例、例题、复习题、设计资料和常用图表, 可满足一般教学、课程设计、工程设计和施工和管理工作需要。

该书可作为工民建、建筑工程专业、建筑施工专业和建设管理专业等土建类专业师生以及土建设计、施工和管理人员的参考书。