文章编号:1005-0523(2017)01-0067-06

富水软弱隧道围岩工后软化效应分析及其控制措施研究

陈国中[1],徐前卫[2],程盼盼[2],董继涛[1],吴永波[1]

(1. 中铁七局集团第二工程有限公司,陕西 西安 7100321;2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

摘要:南华一号隧道穿越地层以富水软岩为主,为确保隧道安全施工,以此工程为研究背景,对富水软弱隧道围岩的软化效应及其控制措施进行了研究。首先,采用数值模拟分析了隧底围岩遇水软化后对围岩及支护结构稳定性的影响,并在此基础上提出了相关控制措施;随后,结合现场监测对相关控制措施的合理性进行了验证。

关键词:隧道;地下水;软化效应;控制措施

中图分类号:U25 **文献标志码**:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.01.011

隧道开挖后,开挖面附近围岩应力在释放过程中,围岩内各种裂隙不断扩张与发展,使得渗透性不断增强,在水头差的作用下,地下水会不断地向隧道内汇集,使得隧道成为地下水的排泄通道。对于软弱隧道围岩而言,地下水对围岩的物化作用常常使得围岩的力学性质变差,从而使围岩的稳定性面临着威胁。长期以来,富水软岩隧道围岩稳定性一直被广泛地研究,其中主要的研究内容大致可以分为如下几个方面:通过现场监控量测等手段,对富水软岩隧道的施工变形特性和机理开展分析和研究[1-2];基于流固耦合理论,分析隧道施工力学特性和变形特性[3-4];基于风险管控的角度,分析富水软岩隧道的施工风险[5-6];结合实际的工程背景对富水软弱围岩隧道的控制措施开展研究[7-10]。不难发现对于隧道工后地下水对围岩的软化作用和控制措施研究甚少,本文结合南华一号隧道工程实践,采用数值模拟和现场实测手段,对富水软岩隧道的稳定性及其控制措施开展研究。

1 工程概况

南华一号隧道为时速200 km/h的客货共线双线铁路隧道,隧道全长1 900 m,最大埋深约96 m。隧址区属山间盆地与低中山宽谷缓坡过渡区,隧道进出口均位于盆地边缘缓坡地带。

1.1 工程地质

隧址区地表上覆第四系全新统冲洪积层(Q_4^{al+pl})淤泥质黏土、松软土、细砂、粗圆砾土、粉质黏土,坡洪积(Q_4^{dl+pl})淤泥质土、松软土、粉质黏土及坡残积(Q_4^{dl+el})粉质黏土,下伏基岩为白垩系上统马头山组(K_2m)砂岩夹泥岩及下统普昌河组(K_1p)泥岩夹砂岩、泥灰岩。段内发育玉碗水向斜,与线路相交于DK60+652附近,交角约57°。隧道主要穿越白垩系上统马头山组(K_2m)砂岩夹泥岩、下统普昌河组(K_1p)泥岩夹砂岩、泥灰岩地层,属典型的滇中红层软弱围岩,图1为该隧道工程部分地段的地质纵断面图。隧道围岩质软、破碎,向斜核部富水,泥岩具弱膨胀性,暴露后易风化,遇水易崩解。

收稿日期:2016-06-28

作者简介:陈国中(1982—),男,工程师,主要研究方向为隧道工程。

通讯作者:徐前卫(1973—),男,副教授,博士,主要研究方向为岩土工程,地下工程。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.2 施工情况

根据设计技术资料，Ⅴ级围岩区段施工采用CRD工法，CRD法隧道开挖分四部进行。如图2所示，①、③部开挖采用人工配合小型机具开挖，②、④部采用人工配合小型机械开挖，大型机械辅助。隧道初期支护采用格栅钢架、喷C25砼、钢筋网、中空注浆锚杆，中隔壁及临时仰拱采用I20工字钢、喷C25砼、钢筋网支护。

1.3 存在问题

南华一号隧道Ⅴ级围岩区段在施工时，根据掌子面开挖揭露的围岩情况可以看出，围岩软弱破碎，多为泥岩、泥岩夹砂岩，且地下水丰富，施工时围岩和掌子面易失稳，如Dk59+618~Dk59+636段由于隧底围岩受到水的浸泡、软化作用从而导致初期支护整体下沉近1 m，后期的换拱治理耗费了大量的人力、物力，影响了正常的施工进度和增加了工程资本投入。

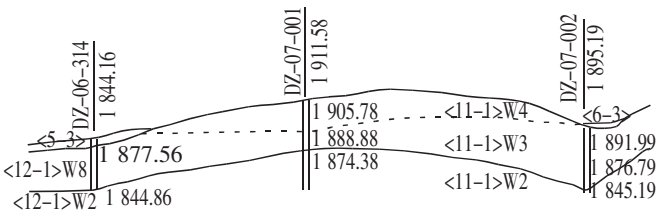


图1 工程地质图(单位:m)

Fig.1 The geological cross- section(unit:m)

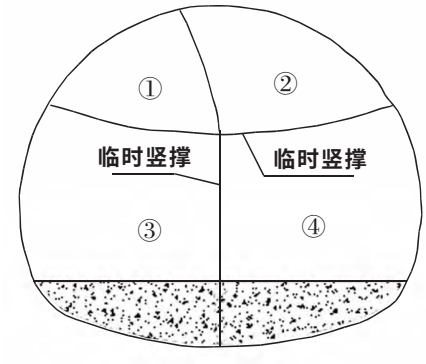


图2 CRD法施工示意图

Fig.2 Construction schematic diagram of CRD method

2 数值模拟

2.1 计算模型

本文计算选取南华一号Ⅴ级围岩区段某一典型断面开展研究，据该段工程地质资料，地层从上至下依次为粉质黏土<6-3>、全风化泥岩夹砂岩<12-1>(W_4)、强风化泥岩夹砂岩<12-1>(W_3)、弱风化泥岩<12-1>(W_2)，各地层厚度及地层和衬砌结构的物理力学参数见表1。隧道埋深约12 m，主要穿越全风化泥岩夹砂岩和强风化泥岩夹砂岩。

表1 地层和衬砌结构物理力学参数

Tab.1 Mechanics properties of stratum and lining structure

地层	地层厚度/m	密度/(kg/m³)	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	体积模量/MPa	剪切模量/MPa
(6-3)	6	1 990	36.3	12.65	4.17	1.92
(12-1)W_4	9	1 960	46.63	10.92	8.33	3.85
(12-1)W_3	15	2 200	2 200	35	940	710
(12-1)W_2	30	2 400	3 000	45	4 000	3 000
衬砌	-	1 000	2 500	30	11 600	8 750
二衬	-	1 050	2 800	26	12 700	8 972

交叉中隔壁法(CRD法)模型网格划分如图3所示，计算模型上边界取至地表、左右及下边界取约3倍洞径，竖向取60 m，水平方向取94 m，纵向取单位长度1 m，前后左右和下边界沿法向进行约束，上边界为地表，设为自由面。为模拟开挖的空间效应，采用应力释放法，但因实测资料不完善，主要由工程类比法确定应力释放率。文献[11]建议，对于Ⅴ级围岩，每一分部开挖时释放荷载40%，施作喷锚支护后释放60%[11]。

隧道围岩采用摩尔-库仑模型进行模拟，钢拱架和钢筋网通过提高喷射混凝土的弹性模量来模拟，初

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

期支护采用 shell 单元。

2.2　计算结果分析

为了分析水对隧底围岩的软化效应，先按照 CRD 施工工序分部进行开挖，待计算完毕再对隧底围岩的参数进行弱化计算。其中弱化范围如图 3 中红线所围区域，其水平方向长 30 m，取至隧底以下 6 m。围岩物理力学参数弱化为原参数的 30%[12]。

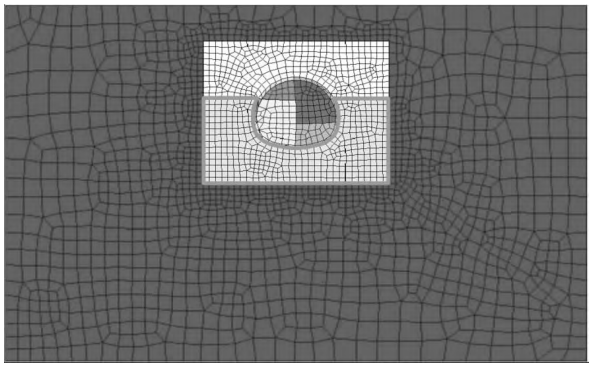


图 3　计算模型网格划分图
Fig.3　Mesh map of calculation model

1）位移变化规律。图 4、图 5 分别为隧道开挖后以及隧底围岩软化后围岩的竖向位移云图。

由图 4、图 5 可知，考虑隧底围岩软化后，围岩竖向位移约增大了 53%，其中最大位移发生在拱顶，其值为 230 mm，一倍洞径宽度范围内地表也发生了约 125 mm 的沉降，这主要由两个方面的作用所致：一是由于地下水对围岩的物理化学作用，降低了围岩的抗剪强度所致，使其承载性能降低；二是由于地下水的存在，围岩的有效应力降低，根据摩尔–库伦准则，应力状态容易达到极限平衡状态而失稳。

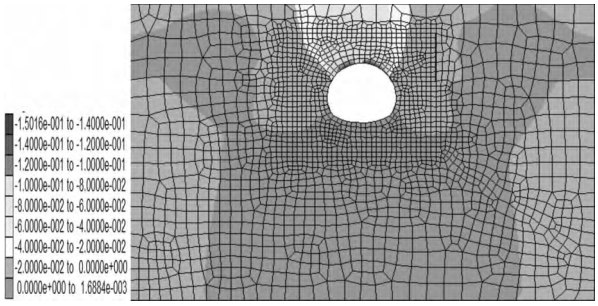


图 4　隧道开挖完毕竖向位移云图（单位：m）
Fig.4　Vertical displacement contour after tunnel excavation (unit: m)

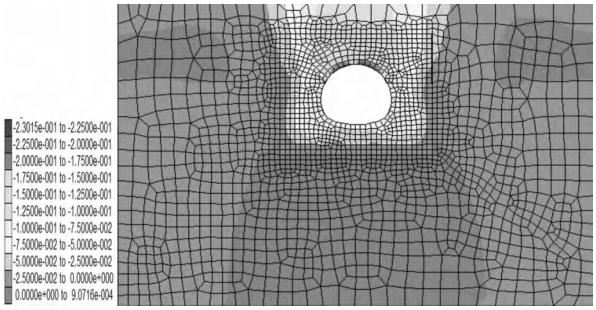


图 5　隧底围岩软化后竖向位移云图（单位：m）
Fig.5　Vertical displacement contour after tunnel bottom rock mass softened by water (unit: m)

2）初期支护结构受力分析。图 6、图 7 分别为隧道施工完毕和隧底围岩软化后初期支护结构的弯矩内力图，由图 6、图 7 可知，在隧底围岩软化后，支护结构弯拉部位没有改变，在拱顶和拱肩部位承受一定的拉应力，竖向支撑和边墙部位初期支护结构承受较大的压应力，当发生软化效应后，支护结构的内力增加了约原来内力的三倍。由此可见，对于富水软弱围岩隧道，水对隧底围岩的软化作用极可能使初期支护结构发生破坏，进而造成围岩失稳。例如，在 Dk59+618~Dk59+636 段施工时，由于没有对地下水采取有效的防排水措

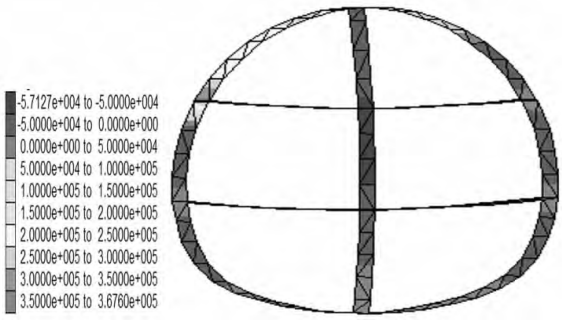


图 6　隧道开挖完初期支护弯矩图（单位：N·m）
Fig.6　Bending moment of the initial support after excavation (unit: N·m)

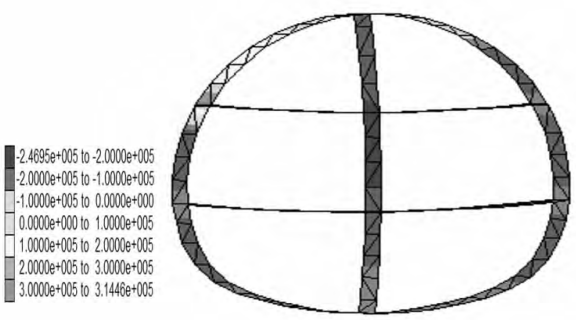


图 7　隧底围岩软化后初期支护弯矩图（单位：N·m）
Fig.7　Bending moment of the initial tunnel support after tunnel bottom rock being softened (unit: N·m)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

施，导致初期支护未封闭段围岩产生大变形，使得初期支护的钢拱架发生扭曲，喷射混凝土发生剥落，如图8所示。故在施工时，应对地下水采取有效的防排水措施，并保证初期支护结构尽早封闭成环。



图8 南华一号隧道初支大变形

Fig.8 Large deformation of the initial tunnel support of Nanhua No.1 Tunnel

3 富水软岩隧道施工措施

对于具有遇水软化效应、弱膨胀性的软弱围岩隧道，隧底富水不仅影响着围岩和支护结构的稳定性，还会对后期的运营安全造成潜在的威胁，因此，必须采取有效的措施进行加固改善。

3.1 注浆堵水

注浆是利用水泥或其他浆液在围岩中通过渗透、充填、压密扩展形成浆脉，待浆液硬化后有效的将破碎围岩凝固成一个整体，提高围岩的整体性，从而形成一个强度大、压塑性低、抗渗性好的新岩土体。浆液在岩土介质中的扩散可以有效封堵围岩裂隙，减小地下水向隧道内的渗流，从而从源头上控制水的来源。南华一号隧道Ⅴ级富水围岩区段采用全断面帷幕注浆，以尽可能地减小地下水渗入隧底的可能，注浆采用直径Φ42 mm、长度3~5 m的钢花管，注浆压力为0.2~2.0 MPa，水泥浆液水灰比为1:1，注浆加固布置图9、图10所示。

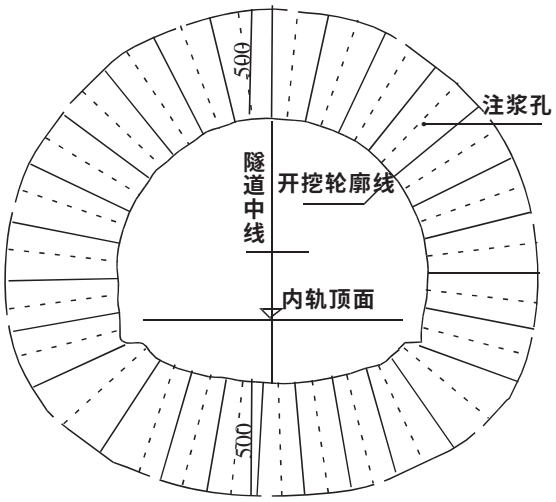


图9 径向注浆横断面布置图(cm)

Fig.9 Radial cross-sectional view of grouting(cm)

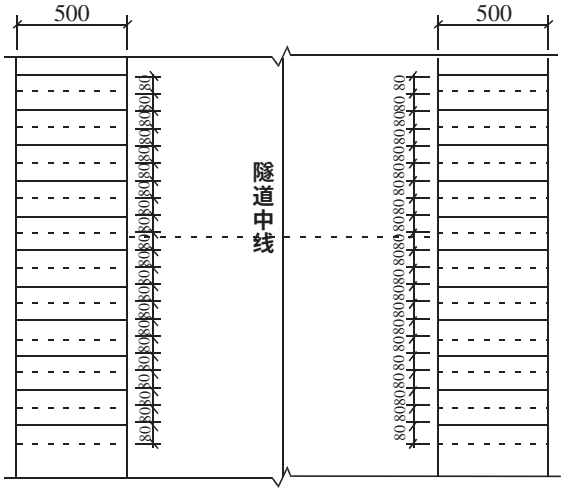


图10 径向注浆横平面布置图(cm)

Fig.10 The layout of radial grouting on plane(cm)

3.2 加强洞内排水

为了有效减少地下水向隧底的集聚和渗透，施工时可在仰拱开挖部位设置降水井，降水井的位置可以根据施工条件而定，并定时抽取降水井内的积水，同时要及时清理拥堵在中心排水沟内渣土，做好隧道内的排水工作。

4 现场实测分析

监控量测不仅是新奥法的核心，更是一种重要的研究手段，可以有效的弥补数值模拟的不足。现场监控量测数据尤其是拱顶下沉数据是工程地质、施工等因素共同作用的物理量，能综合各种因素表征围岩的稳

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

定性状态。为此，为分析地下水对隧底围岩的软化效应和评价围岩的稳定性，选取南华一号隧道大变形段典型断面的拱顶竖向位移的监测数据进行分析。

图 11，图 12 分别为南华一号隧道 DK59+622 断面的拱顶竖向位移–时间曲线和竖向位移变化速率–时间曲线。

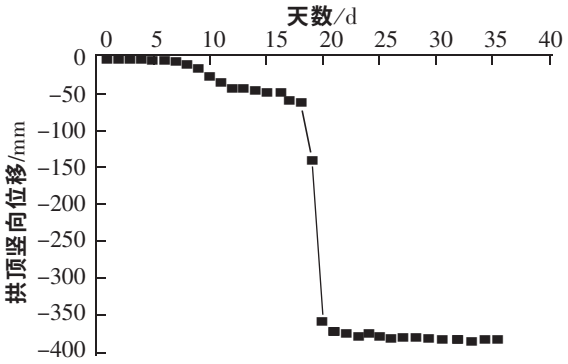


图 11　DK59+622 拱顶竖向位移–时间曲线(cm)
Fig.11　The convergence time curve of vault displacement at section DK59+622(cm)

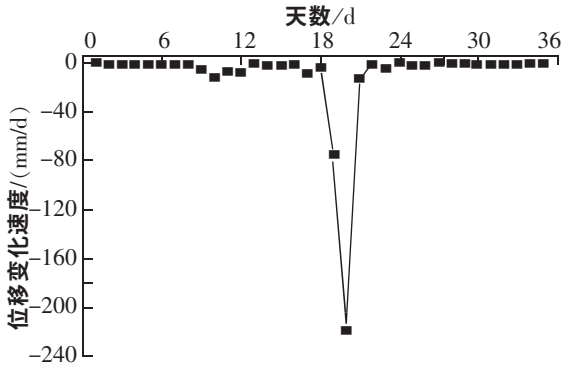


图 12　DK59+622 拱顶竖向位移变化速率–时间曲线(cm)
Fig.12　The convergence time curve of vault displacement rate at section DK59+622(cm)

由图 11 和图 12 可知，随着施工的进行，地下水向隧道内的汇集，在围岩与地下水相互作用的过程中，围岩的变形量逐渐增大。在开挖后 15 d 内拱顶的沉降量约为 50 mm；而当仰拱刚刚开挖完后，较多地下水渗入隧底，使得地下水对隧底围岩的软化作用加剧，导致在开挖后约 20 d 时，拱顶的沉降量发生突变，瞬间增大到 350 mm，大大超出了开挖预留变形量，也伴随着初期支护结构变形和破坏。之后，由于及时采取反压回填、加强支护等措施，使得围岩的变形趋于稳定。

图 13、图 14 分别为采取全断面帷幕注浆、加强支护后换拱施工过程中 DK59+622 断面拱顶的竖向位移–时间曲线和竖向位移变化速率–时间曲线。由图 13、图 14 可知，采取治理措施后，围岩约 35 d 后趋于稳定，拱顶的最大沉降量约在 60 mm，远小于开挖预留变形量，同时由图 14 拱顶竖向变化速率曲线可知，在前 25 d 内，围岩的变形速率在 5 mm 以内，后期因为施工爆破振动变形速率较大，随后又恢复到稳定状态。可见加强隧道内的防排水工作对于围岩和支护结构的稳定性有着重要的意义。

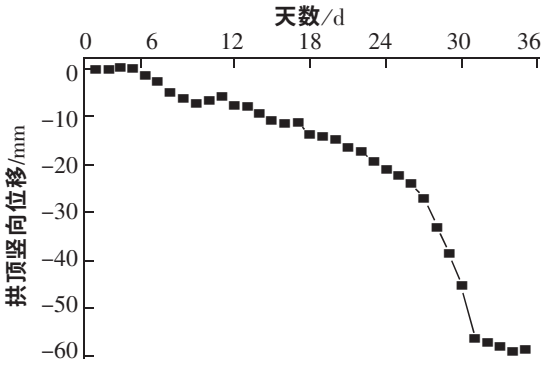


图 13　整治后 DK59+622 拱顶竖向位移–时间曲线
Fig.13　The convergence time curve of vault displacement at section DK59+622 after renovation

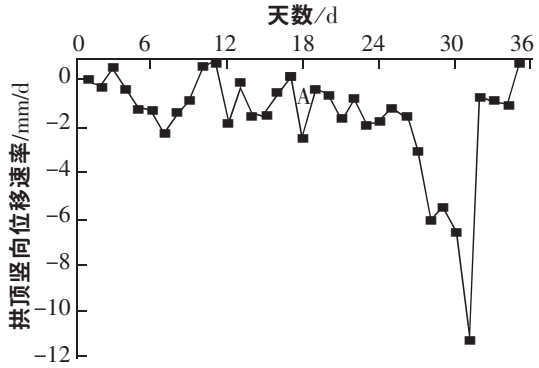


图 14　整治后 DK59+622 拱顶竖向位移变化速率–时间曲线
Fig.14　The convergence time curve of vault displacement rate at section DK59+622 after renovation

5　结论

1）地下水对隧底围岩软化作用，会使围岩的变形量增大，同时使得支护结构的内力增大，隧底围岩承

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

载能力对于围岩和支护结构的稳定性有着重要的意义。

2）对于富水软弱围岩隧道而言，施工时应采取有效的措施封堵地下水向隧道内的渗流，同时还应加强隧道内排水工作。

3）现场监控量测和数据分析对于评价围岩的稳定性有着重要的意义，及时反馈设计和施工可以有效防止富水软弱隧道围岩的失稳。

参考文献：

[1] 李继波，乔春生. 富水软岩隧道现场监控量测与分析研究[J]. 路基工程，2006(6)：76-77.
[2] 张青龙，李宁，曲星，等. 富水软岩隧洞变形特征及变形机制分析[J]. 岩石力学与工程学报，2011，11：2196-2202.
[4] 王文忠. 富水软岩隧道施工与地下水环境相互影响规律研究[D]. 石家庄：石家庄铁道大学，2013：54-65.
[3] 路平. 考虑流固耦合的富水软岩隧道力学特性及合理注浆参数研究[D]. 中南大学，2012：27-40.
[5] 石钰锋，阳军生，邵华平，等. 超浅覆大断面暗挖隧道下穿富水河道施工风险分析及控制研究[J]. 岩土力学，2012，S2：229-234.
[6] 李得昌，杨新安，王树杰. 基于AHP-模糊综合法的浅埋隧道施工风险评估[J]. 华东交通大学学报，2012，29(3)：67-73.
[7] 霍翼. 铁路客运专线黄土地质浅埋富水隧道施工技术[J]. 铁道建筑，2010(4)：53-55.
[8] 王学敬. 浅埋偏压黄土富水隧道施工变形控制 [C]// 中国土木工程学会第十五届年会暨隧道及地下工程分会第十七届年会论文集，成都：中铁西南科学研究院出版社，2012：421-425.
[9] 邓仁清. 高压富水隧道注浆堵水施工技术及应用[J]. 地下空间与工程学报，2006(2)：263-266.
[10] 郑保才，张俊兵，薛继明，等. 富水隧道整体道床及隧底病害治理技术研究[J]. 铁道工程学报，2015(1)：110-114.
[11] 何川，李玉文，姚勇，等. 公路小间距隧道[M]. 北京：人民交通出版社股份有限公司，2015：49.
[12] 周翠英，邓毅梅，谭祥韶，等. 饱水软岩力学性质软化的试验研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报，2005(1)：33-38.

Study on Softening Effect of Water-Rich Soft Rock Mass around the Tunnel and Its Control Measures

Chen Guozhong[1], Xu Qianwei[2], Cheng Panpan[2], Dong Jitao[1], Wu Yongbo[1]

(1. The Second Engineering Co., Ltd. of China Railway Seventh Group, Xi'an 710032, China;
2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai, 201804)

Abstract: Nanhua No.1 Tunnel is mainly constructed in water-rich as well as weak rock mass. In order to ensure the safety of Nanhua No.1 tunnel, this paper carries out a series of researches on the softening effect of water-rich soft rock mass and its control measures. Firstly, numerical simulation is conducted to analyze the softening effect of soft rock mass, and then control measures are proposed according to the calculation results. Finally, field monitoring results are analyzed to verify the reasonability of the construction control measures.

Key words: tunnel; underground water; softening effect; control measures

（责任编辑　王建华）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net