

[文章编号] 1003-4684(2023)04-0092-05

FRP 锚杆在石膏岩隧道中的支护效果研究

刘伟民¹, 窦斌强², 陈 智¹

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2 山西省交通规划勘察设计院有限公司, 山西 太原 030012)

[摘 要] 当前穿越石膏层的隧道工程越来越多,因石膏岩具有遇水膨胀、腐蚀性等危害,传统钢锚杆支护效果不理想。FRP 锚杆具有轻质高强、耐腐蚀、工艺性优良等特点,将其应用于石膏岩隧道中能够克服钢锚杆劣势。以某穿越石膏层公路隧道为依托,重点研究了 FRP 锚杆与传统锚杆在石膏岩隧道中的支护效果,从围岩变形、锚杆受力情况、塑性区分布、初期支护应力分布、岩体安全度等方面,对其支护效果进行对比。研究表明:在遇水膨胀的石膏岩中,FRP 锚杆在控制围岩变形、改善塑性区分布、减少应力集中等方面优于传统锚杆,尤其是在长期运营条件下,耐腐蚀的 FRP 锚杆可代替传统钢锚杆作为新型支护材料应用于石膏层隧洞支护中。

[关键词] 石膏岩; FRP 锚杆; 公路隧道; 支护效果

[中图分类号] TU94 **[文献标识码]** A

石膏或者硬石膏与碳酸盐沉积共生的岩类一般称作石膏质岩,在整个地质沉积历史上分布广泛。近年来,随着中国公路、铁路建设事业的发展,越来越多的隧道穿越石膏质岩地层,但其不良地质特性(膨胀性、腐蚀性)严重影响隧道的施工与运营^[1]。石膏岩产生的膨胀力会导致隧道的支护结构被挤压变形,最终失去平衡而破坏,出现底板隆起、衬砌开裂、渗漏水等严重病害^[2]。因此,在遇水膨胀且腐蚀性严重的石膏岩中,传统钢锚杆与围岩协同作用弱,严重影响锚固体系安全性,隧道运营期的锈蚀问题也将成为影响支护结构耐久性的重大隐患。FRP 锚杆是一种以玻璃纤维及其制品作为增强材料,以合成树脂作基体材料的一种复合材料,相比于传统锚杆具有:轻质高强、耐腐蚀性能好、绝缘性好、导热率低、可设计性好、锚固反应快、工艺性优良等优点,越来越多地应用于不同类型的地下工程中^[3]。FRP 材料相对于钢筋的弹性模量低,将其应用在石膏岩隧道中,能有效解决传统钢锚杆与围岩协同作用弱的缺陷,且较好耐腐蚀性能为隧道工程长期运营提供保障。

目前,国内外学者对石膏岩的工程特性以及 FRP 锚杆的应用分别开展了一定的研究。陈志明等^[4]通过室内试验及数值模拟,验证了石膏质岩具有膨胀性及腐蚀性,并会影响隧道的结构稳定性。吴顺川等^[5]通过数值模拟,论证了衬砌结构中增加

EPS 缓冲层是富水膨胀性围岩隧道的有效支护形式和潜在灾害防治措施。许崇帮等^[6]结合杜公岭隧道工程建成运营后出现的隧道病害与检测情况,研究得出杜公岭隧道工程地质危害性是由地层岩性、地下水、岩溶、地质构造等多种地质因素共同作用的结果。李强等^[7]通过室内试验方法研究了硬石膏岩的膨胀力学特性,得出膨胀应力应变曲线为凹形函数,膨胀应变时间曲线为"S"型函数,膨胀应力时间曲线为指数型函数等规律。王洋等^[8]归纳分析了 FRP 锚固体系的破坏模式,指出锚固体系的失效通常是由多种破坏模式耦合作用的结果,总结 FRP 锚杆与基体介质界面黏结性能的影响因素、界面黏结强度模型和界面黏结-滑移关系,并探讨了界面剪应力分布规律。肖红武等^[9]基于典型软弱围岩条件下的铁路隧道工程实例,结合多种工况条件,给出了 FRP 锚杆的优化设计参数和施工方案。王志杰等^[10]对大断面隧道掌子面采用 FRP 锚杆加固的参数进行了研究,建立了隧道掌子面失稳破坏模式,确定了锚杆加固长度的合理取值范围为 8~11 m,通过掌子面前方塑性区分布深度确定了锚杆的搭接长度为 4 m。李明等^[11]在Ⅳ、Ⅴ级围岩下进行了 GFRP 锚杆与传统锚杆的受力特性对比,研究表明 GFRP 锚杆在拉拔力的作用下其杆体受力远小于其自身的极限抗拉强度。Mathieu Robert 等^[12]通过现场试验证明将 FRP 筋加载至其极限抗拉强度的

[收稿日期] 2021-12-02

[基金项目] 国家自然科学基金(51808203)

[第一作者] 刘伟民(1996-),男,山东淄博人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为岩土力学。

[通信作者] 陈 智(1988-),男,湖北黄冈人,湖北工业大学副教授,研究方向为岩土力学。

60%时,并未对 FRP 钢筋的耐久性产生显著的影响。Salvatore Russo 等^[13]通过高温循环实验的方式验证了 FRP 材料在严酷的环境条件下仍具有内在的耐久性和可持续性。

虽然石膏岩的膨胀特性以及 FRP 锚杆的应用效果已开展了大量研究,但目前尚未见将 FRP 锚杆应用于石膏岩隧道中的研究。基于此,本文以某穿越石膏岩公路隧道为依托工程,通过数值仿真计算,对比 FRP 锚杆与钢锚杆在膨胀性石膏围岩隧道中的支护效果,以此探讨在石膏层隧道下采用 FRP 锚杆代替传统锚杆作为隧道支护结构的可行性,为石膏岩质隧道的支护提供思路和借鉴。

1 工程概况

某高速公路设计时速 80 km/h,双向四车道,全线设置隧道 18 座,隧道建筑界限宽度 10.25 m,净高 5.0 m。其中某特长隧道(长 3265 m),隧道双洞间距 24~26.7 m。本文取隧道左线 ZK17+858~ZK18+338 段,该段落围岩以奥陶系下马家沟组中风化含白云质石膏岩为主,局部中风化灰岩。岩体结构面不发育,结合好,呈整体状结构,隧道最大埋深 147.8 m,水文地质类型为岩溶裂隙水,含白云质石膏岩强度低,开挖易坍塌、变形。项目区地形复杂起伏大,沟谷形态多呈“V”字型,主沟方向以南北向、南西向、北西向为主,次级沟谷方向多呈南南西和北北东向,标高介于 840.5~1118.3 m 之间,地貌单元属溶蚀侵蚀中低山区。

石膏段隧道超前支护采用超前小导管注浆,初支采用 I16 工字钢,喷 22 cm 厚混凝土,钢筋挂网,锚杆采用 $\Phi 22$ 水泥砂浆锚杆,长度 3 m,间距 100 cm。二衬采用 40 cm 厚钢筋混凝土结构。

2 数值计算模型

采用有限元软件 FLAC 3D 对隧道的开挖及支护进行模拟。图 1 为数值计算模型图,数值模型取 100 m \times 90 m \times 30 m(长 \times 高 \times 宽),共 101220 个单元,109179 个节点。

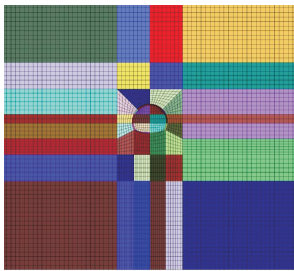


图 1 数值计算模型

设置边界条件为对模型四周施加法向位移约

束,并将模型底部位移固定。模型上部为强风化泥灰岩,中部为石膏岩,底部为石灰岩。围岩参数依据本工程的地勘报告及对应岩体参数的常规取值确定,如表 1 所示。隧道断面尺寸如图 2 所示。

表 1 围岩参数

名称	弹性模量 E/GPa	质量密度 $\gamma/$ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 μ	内聚力 C/MPa	内摩擦角 $\phi/(\text{^\circ})$
强风化泥灰岩	0.14	2498	0.21	0.87	32
石膏岩	0.18	2310	0.25	1.64	36
石灰岩	1.63	2580	0.21	1.29	36

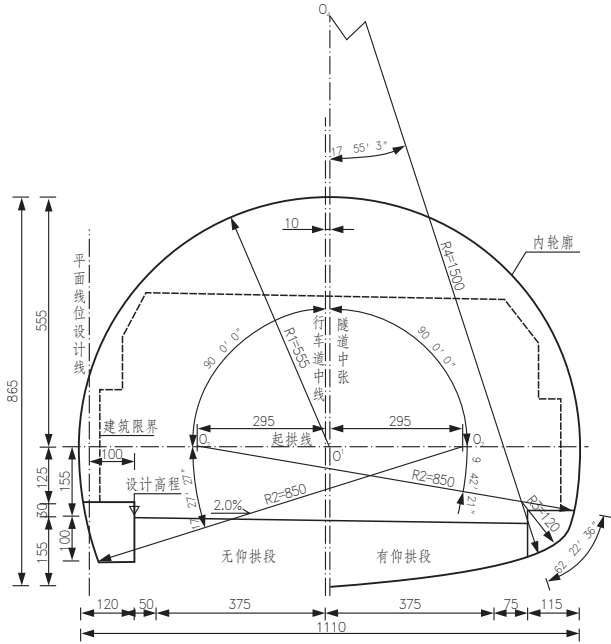


图 2 隧道断面

对于水敏感性强的石膏质岩体,其通过吸水产生的膨胀压力对隧道结构造成破坏,故将石膏岩视为弹塑性材料,数值计算采用摩尔-库仑屈服准则;模拟石膏岩遇水膨胀的过程则是基于 FLAC 3D 中的热学模块,即设置体积膨胀系数,洞身周围石膏岩的膨胀范围如图 3 所示。

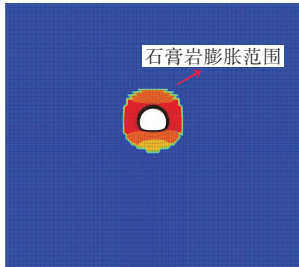


图 3 围岩膨胀范围

FRP 锚杆与传统钢锚杆均采用 cable 单元,锚杆的相关力学性质参数见表 2,锚杆沿隧道环向梅花形布置,杆长 3 m,直径 22 mm,环向间距 1 m,将每根锚杆划分为 12 个节点。隧道采用台阶法开挖,每次进尺为 5 m,共 15 步开挖。

表 2 锚杆参数

锚杆名称	弹性模量 E / GPa	抗拉强度 F_t / MPa	水泥浆黏结刚度 K_g / (GN·m ⁻²)	水泥浆黏结力 C_g / (kN·m ⁻¹)	水泥浆的摩擦角 φ_g / (°)
FRP 锚杆	60	600	4.837	40.36	25
传统钢锚杆	200	400	4.837	20.36	25

3 计算结果分析

通过数值分析软件模拟石膏岩的遇水膨胀过程,并分别取无锚杆支护、传统钢锚杆支护和 FRP 锚杆支护 3 种工况进行对比分析。

3.1 围岩变形特征

表 3 为三种支护条件方式下的围岩变形情况。并分别对比有无膨胀作用下的三种支护方式对隧道围岩变形的影响。总体来说,在锚杆的支护作用下,围岩变形明显减小。

表 3 不同支护条件下的围岩变形 mm

支护类型	无膨胀		有膨胀	
	拱顶沉降	边墙位移	拱顶沉降	边墙位移
无支护	52	24	87	48
FRP 锚杆	26	11	44	15
传统钢锚杆	24	9	48	17

当未施加膨胀作用时,与无锚杆支护的工况相比,FRP 锚杆与传统锚杆均能有效地限制隧道的变形位移。FRP 锚杆相较于无支护情况下的围岩拱顶沉降、边墙位移分别减少 50%和 54%。传统钢锚杆相较于无支护情况下的围岩拱顶沉降、边墙位移分别减少 53%和 62%。传统钢锚杆支护的隧道围岩变形更小,控制围岩变形的效果优于 FRP 锚杆。

当考虑膨胀作用时,围岩体积膨胀,变形增大。无支护条件下拱顶沉降达到了 87 mm,边墙位移达到了 48 mm,较未施加膨胀时分别增加了 40%和 50%。此时隧道围岩变形较大,极易发生坍塌事故。在膨胀作用下施作锚杆支护后,FRP 锚杆相较于无支护情况下拱顶沉降、边墙位移分别减少 49%和 68%。传统钢锚杆相较于无支护情况下拱顶沉降、边墙位移分别减少 44%和 64%。FRP 锚杆拱顶沉降较传统钢锚杆减少 8%,边墙位移减少 11%。可见,在具有膨胀力作用下的石膏围岩中,FRP 锚杆对限制隧道的变形位移更具有优势。

3.2 锚杆轴力分布

图 4 为无膨胀作用下的锚杆轴力分布图,在边墙处传统钢锚杆与 FRP 锚杆的最大轴力较拱顶处大,传统锚杆在边墙处的最大轴力为 90 kN,在拱顶处的最大轴力为 50 kN,均大于 FRP 锚杆的最大轴

力。结合表 3 中无膨胀作用下钢锚杆支护的围岩变形更小,说明在无膨胀作用下,刚度更高钢锚杆的对围岩支护特性发挥优于 FRP 锚杆,且此时两种锚杆均小于其自身的极限抗拉强度。

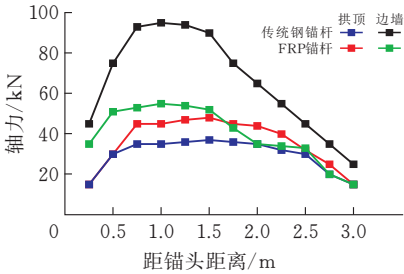


图 4 无膨胀作用下锚杆轴力分布

图 5 为有膨胀作用下的锚杆轴力分布图,在膨胀力的作用下,围岩的变形增大。为控制围岩的变形,传统钢锚杆与 FRP 锚杆自身轴力明显增大。此时传统钢锚杆在拱顶处的最大轴力为 220 kN,已经达到其最大抗拉强度,钢锚杆中部分节点已经失效,无法达到最佳支护效果。FRP 锚杆最大轴力为 260 kN,未达到其抗拉强度,尚未失效,还能继续发挥支护效果。结合表 3 中 FRP 锚杆支护下围岩的变形更小,说明 FRP 锚杆在石膏围岩发生膨胀效应或变形较大隧道中的受力特性优于传统钢锚杆,能更好地发挥其锚固作用。

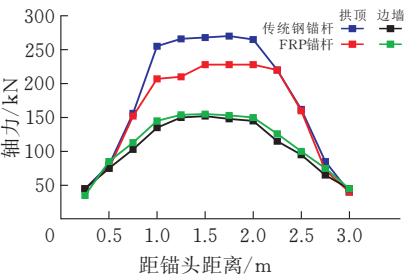


图 5 膨胀作用下锚杆轴力分布

3.3 围岩塑性区分布

图 6 为施加膨胀力作用时,围岩的塑性区分布情况。

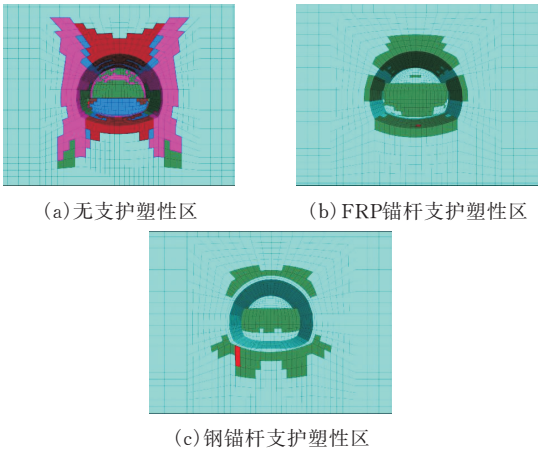


图 6 围岩塑性区分布

由于隧道围岩较软且具有膨胀效应,3 种工况下隧道围岩均进入塑性区。无支护时,隧道围岩塑性区范围较广,塑性区深度较大,围岩破坏严重。施作锚杆后,两种支护方式均有效地抑制了围岩塑性区向四周的发展,塑性区范围减小,围岩在无锚杆支护、传统钢锚杆支护和 FRP 锚杆支护 3 种情况下的塑性区面积分别是 320 m²,165 m²,155 m²。施作 FRP 锚杆后,围岩塑性区面积较传统锚杆支护减小 6%,较无锚杆支护减小 51.5%,说明 FRP 锚杆较传统钢锚杆更好地限制围岩塑性区的发展。

3.4 初期支护受力分析

表 4 为初期支护受力分布情况。三种支护工况下,垂直应力都在边墙处集中,水平应力在拱顶处集中。

表 4 初期支护受力		MPa			
项目	支护类型	垂直应力		水平应力	
		拱顶	边墙	拱顶	边墙
无膨胀	无锚杆	1.98	6.71	7.65	1.72
	传统锚杆	1.77	6.52	7.42	1.51
	FRP 锚杆	1.82	6.65	7.54	1.56
有膨胀	无锚杆	3.98	7.83	15.32	3.56
	传统锚杆	3.12	6.70	13.41	3.10
	FRP 锚杆	3.04	6.53	12.20	2.89

当无膨胀作用时,三种工况下的初期支护受力差距不明显,在边墙处 FRP 锚杆较无锚杆垂直应力减少 0.9%,在拱顶处水平应力减少 1.4%。结合表 3 和图 4 分析,这是由于无膨胀作用下围岩变形较小,两种锚杆自身轴力远未达到其最大抗拉强度,导致锚杆与围岩共同作用效果不佳。

当施加膨胀作用时,随着围岩变形增大,初期支护受力明显增加。无锚杆支护条件下边墙处垂直应力增加 14%,拱顶处水平应力增加 51%。在两种锚杆的支护作用下,边墙处 FRP 锚杆和传统钢锚杆较无锚杆垂直应力减少 16.6%和 14.4%,在拱顶处水平应力减少 20.3%和 12.4%。说明在施加膨胀力作用下 FRP 锚杆能有效减少衬砌的应力集中,支护效果优于传统锚杆。

隧道周围受影响的岩土体在隧道开挖支护过程中及开挖后随时间效应的稳定程度,叫做隧道围岩的稳定性,也称岩体安全度。计算岩体安全度常用的方法有极限位移判别法和岩体强度折减法^[14]。由于石膏岩会遇水软化,其力学强度会发生不同程度的降低,在施加膨胀作用后,利用强度折减法对隧道围岩进行计算,用简化模型的方式来模拟石膏岩不断软化的进程,最终得到石膏围岩的岩体安全度。岩体安全度为 1 时处于临界状态,安全度越大,安全性越好。图 7 为三种支护条件下的岩体安全度,

在无支护、传统钢锚杆支护、FRP 锚杆支护的围岩安全度分别为 0.9,1.2 和 1.4。锚杆与围岩共同作用提高了支护的可靠性,说明在 FRP 锚杆支护条件下,锚杆与围岩的共同作用效果优于传统钢锚杆,提高了支护结构的可靠性。

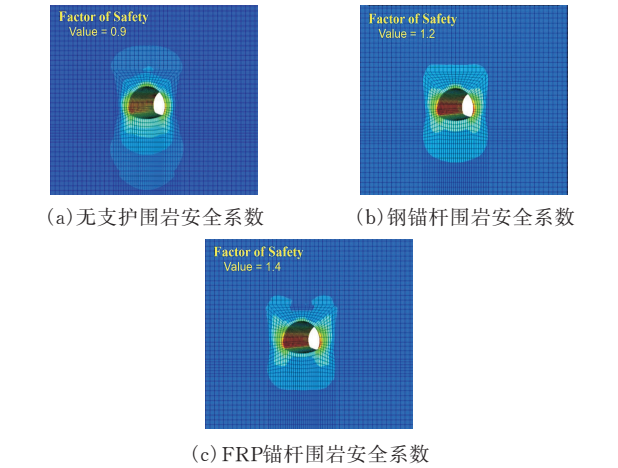


图 7 岩体安全度

4 结束语

通过数值分析软件模拟了石膏围岩的膨胀作用,并对无锚杆支护、传统钢锚杆支护和 FRP 锚杆支护在石膏岩中的支护效果进行了对比分析。得到以下结论:

- 1)在无膨胀力的石膏围岩中,由于隧道围岩周围的应力较小,FRP 锚杆弹性模量较传统锚杆低,因此 FRP 锚杆的受力特性不如传统锚杆,其控制围岩变形效果相比传统钢锚杆没有优势,但差距不大。
- 2)在有膨胀力的石膏围岩中,FRP 锚杆的支护效果更佳,体现为拱顶沉降较传统钢锚杆减少 8%,边墙位减少 11%,围岩塑性区面积较传统锚杆支护减小 6%,FRP 锚杆支护下的围岩安全度大于传统钢锚杆,与围岩的共同作用优于传统锚杆。
- 3)石膏层围岩不仅有膨胀性,还有腐蚀性,由于 FRP 锚杆具有耐腐蚀的特点,结合本文研究,FRP 锚杆可以代替传统钢锚杆作为新型支护材料应用于石膏层隧洞支护中。

[参 考 文 献]

[1] 万飞,王华牢,许崇帮.石膏质岩隧道新置换衬砌结构受力特征研究[J].中国公路学报,2020,33(12):262-272.

[2] 刘艳敏,余宏明,汪灿,等.白云岩层中硬石膏岩对隧道结构危害机制研究[J].岩土力学,2011,32(09):2704-2708.

[3] 郭震山,郑俊杰,崔岚,等.聚酯锚杆与传统锚杆的力学

性能及支护效果比较分析[J].岩土工程学报,2015,37(S1):202-206.

[4] 陈志明.石膏质岩特殊性质对隧道结构稳定性影响及处治技术[J].公路,2020,65(07):336-342.

[5] 吴顺川,韩伟,陈钊,等.基于膨胀本构的石膏岩隧道衬砌缓冲层厚度优化研究[J].岩土力学,2018,39(04):1182-1190.

[6] 许崇帮,王华牢,杜公岭隧道工程地质特征及工程危害性分析[J].公路交通科技,2019,36(08):93-99.

[7] 李强,陈扬勇,李信臻,等.硬石膏岩膨胀特性试验及隧道抗膨胀衬砌设计[J].地下空间与工程学报,2019,15(03):850-855.

[8] 王洋,冯君,李珈瑶,等.FRP 锚杆在岩土锚固中的研究进展[J].工程地质学报,2018,26(03):776-784.

[9] 肖红武.隧道玻璃纤维锚杆全断面预加固机理与应用[J].现代隧道技术,2019,56(05):163-169.

[10] 王志杰,杨宝,高靖遥,等.昔格达组地层大断面隧道掌子面玻璃纤维锚杆加固参数研究[J].现代隧道技术,2019,56(02):92-97.

[11] 李明,张庆彬,叶智威,等.GFRP 锚杆与常规锚杆在隧道支护中的承载力对比试验[J].中外公路,2018,38(02):177-181.

[12] MATHIEU ROBERT, BRAHIM BENMOKRANE. Physical, mechanical, and durability characterization of preloaded gfrp reinforcing Bars[J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 14(4): 368-375.

[13] SALVATORE RUSSO. Residual strength testing in pultruded FRP material under a variety of temperature cycles and values [J]. Composite Structures, 2015, 133: 458-475.

[14] 姜谔男,张权,许梦飞,等.基于 Hoek-Brown 准则的隧道围岩改进单元安全度分析[J].中国公路学报,2020, v.33;No.203(07):135-144.

Study on Supporting Effect of FRP Bolt in Gypsum Rock Tunnel

LIU Weimin¹, DOU Binqiang², CHEN Zhi¹

(1 School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ.of Tech.,Wuhan 430068,China ;
2 Shanxi Province Communications Planning Surveying and Designing Institute Co., Ltd., Taiyuan 030012,China)

Abstract: At present, there are more and more tunnel projects through gypsum layer, but the traditional steel bolt support effect is not ideal because gypsum rock has the harm of water swelling and corrosiveness. FRP bolt has the characteristics of light weight, high strength, corrosion resistance and excellent technology, and can overcome the disadvantages of steel bolt when it is used in gypsum rock tunnel. In this paper, based on a through the plaster layer of highway tunnel, the research is mainly focused on the traditional FRP bolt and anchor in the gypsum rock tunnel supporting effect, from the surrounding rock deformation, bolt stress distribution, plastic zone distribution, stress distribution, degree of safety of rock mass, the primary support, etc. Comparing the supporting effect, the research results show that in the expansion of the gypsum rock under the influence of water, FRP bolt is better than traditional bolt in controlling surrounding rock deformation, improving plastic zone distribution and reducing stress concentration. Especially in long-term operation conditions, corrosion-resistant FRP bolt can replace traditional steel bolt as a new supporting material for gypsum tunnel support.

Keywords: gypsum rock; FRP bolt; highway tunnel; supporting effect

[责任编辑：裴 琴]