

崔光耀,孟令瀚,王明胜.跨黏滑断层隧道纤维混凝土衬砌抗错断技术研究[J].地震工程学报,2020,42(1):194-198.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.194

CUI Guangyao, MENG Linghan, WANG Mingsheng. Anti-dislocation Technology for Fiber-reinforced Concrete Linings of Tunnels Crossing Stick-Slip Faults[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(1): 194-198. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844. 2020.01.194

跨黏滑断层隧道纤维混凝土衬砌抗错断技术研究

崔光耀¹, 孟令瀚¹, 王明胜²

(1. 北方工业大学 土木工程学院, 北京 100144; 2. 中国中铁隧道集团有限公司, 广东 广州 511458)

摘要: 为提高跨黏滑断层隧道的结构安全性和稳定性, 以都汶高速友谊隧道 F₁ 黏滑断层段为研究背景, 通过采用纤维混凝土衬砌对跨黏滑断层隧道抗错断技术进行研究。结果表明: 同体积纤维掺量条件下, 混杂纤维混凝土(SBFRC) 立方体抗压强度比纤维混凝土(SFRC) 略低, SBFRC 抗折强度比 SFRC 略高; 断层黏滑错动对隧道上盘的影响大于下盘; 纤维混凝土衬砌对下盘隧道结构的抗错效果优于上盘隧道, SFRC 二衬平均抗错效果为 12.22%, SBFRC 二衬平均抗错效果为 15.81%。研究成果可为黏滑断层隧道的结构设计及施工提供参考。

关键词: 隧道工程; 断层黏滑错动; 纤维混凝土; 抗错断

中图分类号: U452

文献标志码:A

文章编号: 1000-0844(2020)01-0194-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.194

Anti-dislocation Technology for Fiber-reinforced Concrete Linings of Tunnels Crossing Stick-Slip Faults

CUI Guangyao¹, MENG Linghan¹, WANG Mingsheng²

(1. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;
2. China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Guangzhou 511458, Guangdong, China)

Abstract: To improve the safety and stability of tunnels crossing stick-slip faults, we used fiber-reinforced concrete lining to research the technology of fault dislocation resistance for tunnels crossing stick-slip faults, based on the stick-slip fault F1 crossing the Youyi tunnel of the Duwen highway. Results showed that, under the same volume of fiber content, the compressive strength of SBFRC cube was slightly lower than that of SFRC, although the flexural strength of SBFRC was slightly higher than that of SFRC. The effect of stick-slip fault dislocation on hanging wall was larger than that on footwall. The effect of fiber-reinforced concrete lining on the dislocation resistance of the tunnel structure of footwall was better than that on hanging wall. Average dislocation resistance effect of the SFRC secondary lining was 12.22%, and 15.81% for the SBFRC secondary lining. These results can provide a reference for the structural design and construction of tunnels crossing stick-slip faults.

Keywords: tunnel engineering; fault stick-slip dislocation; fiber reinforced concrete; anti-

收稿日期: 2018-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(51408008); 北京市青年拔尖人才培育计划(1816008); 中铁隧道集团科技创新计划项目(548418K5)

第一作者简介: 崔光耀(1983—), 男, 山东莒南人, 博士, 副教授, 主要从事隧道与地下工程的教学与研究工作。E-mail:cya0456@163.com。

dislocation

0 引言

随着我国西部交通基础建设的蓬勃发展,高烈度地震区黏滑断层隧道不断涌现,如在建川藏高速系列隧道、成兰铁路系列隧道等。汶川地震灾害调查表明,都映高速黏滑断层系列隧道洞身主体结构遭受严重破坏,甚至垮塌。如何提高断层黏滑错动时隧道结构的安全性和稳定性是亟待研究和解决的关键技术问题之一。

造成强震区黏滑断层隧道震害的影响因素主要有:断层黏滑错动和强震震动。断层黏滑错动影响较大,强震震动影响次之^[1]。由于纤维混凝土相较普通混凝土,其增强、增韧、阻裂性能优异,用于隧道衬砌可在一定程度上降低断层黏滑错动对隧道结构的破坏程度。本文提出采用纤维混凝土衬砌对跨黏滑断层隧道进行设防设计。

国内外有关专家、学者对纤维混凝土在隧道及地下工程中的应用进行了一些研究,主要有:通过室内试验对钢、玄武岩等单一纤维混凝土的基本力学性能进行了研究^[2-3];通过室内试验对钢-聚丙烯、玄武岩-聚丙烯、钢-聚乙烯醇等混杂纤维混凝土的基本力学性能进行了研究^[4-6];通过理论分析及室内试验对钢纤维混凝土、玄武岩纤维混凝土、钢-玄武岩混杂纤维混凝土的承载特性进行了研究^[7-9];通过室内试验对钢纤维及钢-聚丙烯混杂纤维在地铁管片的应用进行了研究^[10-11]。以上研究在纤维混凝土的基本性能方面取得了较为丰富的成果,但在地下工程中应用较少,尤其是针对断层黏滑隧道抗错方面

更是未见报道。本文依托都汶高速友谊隧道 F₁ 黏滑断层段,通过采用纤维混凝土衬砌对跨黏滑断层隧道抗错断技术进行研究。

1 友谊隧道 F₁ 黏滑断层段工程概况

1.1 工程地质

隧道地址区位于纸厂沟与小桃沟之间的山体内,受断层和岩性影响,节理裂隙较发育,岩体较破碎。

F₁ 黏滑断层为挤压性逆断层,隧道洞身穿 F₁ 黏滑断层而过,走向 NE, 倾向 NW, 倾角 60°, 破碎带宽度 0.5~2.0 m。断层破碎带主要由糜棱岩、碎块岩组成,为 V 级较差围岩。上下盘岩体均为 V 级较好围岩。

1.2 支护结构设计

隧道支护结构为复合式衬砌,跨度×高度=9.4 m×8.0 m;隧道初支采用 C25 喷射混凝土,厚度为 25 cm,二衬采用 C25 模筑混凝土,厚度为 40 cm。

2 纤维混凝土基本力学性能试验

2.1 试验内容

以素混凝土、钢纤维混凝土(SFRC)、钢-玄武岩混杂纤维混凝土(SBFRC)为对比,通过室内试验研究同体积纤维掺量下纤维混凝土的抗压、抗折性能。立方体抗压强度试件尺寸为:100 mm×100 mm×100 mm;抗折强度试件尺寸为:100 mm×100 mm×400 mm,试验内容及各试验所需试件的数量列于表 1。

表 1 试验内容

Table 1 Test contents

项目	立方体抗压强度/MPa	抗折强度/MPa
素混凝土试件数量(C25)	3	3
SFRC 试件数量(CF25, 42 kg/m ³)	3	3
SBFRC 试件数量(CF25, 钢纤维 30 kg/m ³ +玄武岩纤维 3.3 kg/m ³)	3	3

注:钢纤维长为 30 mm, 直径为 0.55 mm;玄武岩纤维长为 30 mm, 直径为 18 μm。

2.2 试验结果及分析

试验在数显压力试验机(YES-2000)和抗折试验机(JES-300)上进行,抗压强度和抗折强度试验结果见表 2、表 3。

由表 2、表 3 可知,相对素混凝土,纤维的掺入提高了混凝土的立方体抗压强度和抗折强度。SFRC 立方体抗压强度提高了 20.19%, SBFRC 立方体抗压强度提高了 17.11%;SFRC 抗折强度提高

了 17.71%, SBFRC 抗折强度提高了 19.07%。这说明同体积纤维掺量条件下, SBFRC 立方体抗压强度比 SFRC 略低, SBFRC 抗折强度比 SFRC 略高。

3 纤维混凝土衬砌抗错断技术研究

3.1 研究情况

3.1.1 计算模型

以友谊隧道 F₁ 黏滑断层段为研究背景,建立计

表 2 立方体抗压强度试验结果

Table 2 Results of cube compressive strength test

项目	换算强度/MPa	增长百分比/%(相对素混凝土)
素混凝土	25.822	-
SFRC	31.035	20.19
SBFRC	30.240	17.11

表 3 抗折强度试验结果

Table 3 Results of flexural strength test

项目	换算强度/MPa	增长百分比/%(相对素混凝土)
素混凝土	6.218	-
SFRC	7.319	17.71
SBFRC	7.404	19.07

算模型,隧道埋深为 40 m,隧底围岩厚 40 m,左右两侧宽度取 5 倍隧道跨度约 60 m,纵向开挖长度 100 m。本文主要研究上下盘岩体中隧道结构受断层黏滑错动作用的影响及对策,对破碎带段围岩及结构不做研究,加之破碎带较窄,故简化为平面进行

表 5 计算模型参数

Table 5 Parameters of calculation model

参数	重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
围岩	20	1.5	0.4	0.1	24
C25 喷射混凝土	22	23	0.2	-	-
C25 模注混凝土	25	28	0.2	-	-
SFRC	25	29.5	0.2	-	-
SBFRC	24.5	29.3	0.2	-	-

3.1.4 监测布置

模型上下盘各 4 个监测断面对称布置,每个监测断面各 8 个测点,由于越靠近断层位置,隧道衬砌内力分布越复杂,变化程度越快,规律性降低,所以靠近断层处的监测断面布置相对密集,远离断层处的监测断面布置相对稀疏,位于模型边界附近不设置监测断面,监测布置如图 1 所示。

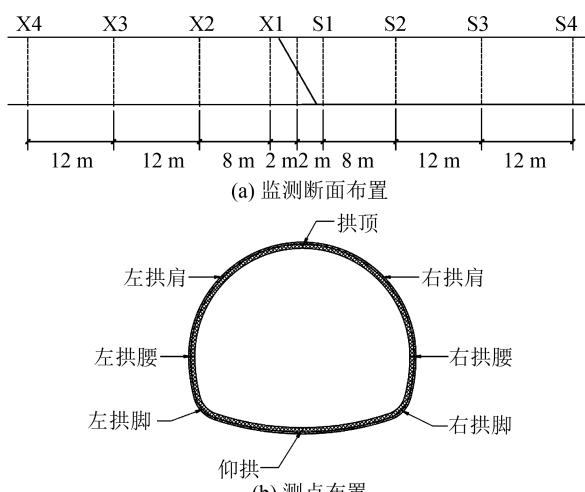


图 1 监测布置

Fig.1 Arrangement of monitoring

断层黏滑错动作用效果模拟及影响研究。错动模拟采用的边界条件是以下盘为固定盘,以上盘为活动盘,通过在上盘施加位移荷载来模拟断层错动。

3.1.2 计算工况

为研究纤维混凝土隧道衬砌的抗错效果,选取 SFRC、SBFRC 与素混凝土进行对比分析,计算工况见表 4。

表 4 计算工况

Table 4 Calculation condition

工况	计算内容	备注
1	素混凝土二衬	对比工况
2	SFRC 二衬	抗错效果分析
3	SBFRC 二衬	抗错效果分析

3.1.3 计算参数

纤维混凝土参数根据基本力学实验可得,围岩根据勘测资料选取 V 级围岩,计算模型物理学参数列于表 5。

3.2 计算结果及分析

3.2.1 结构内力

断层错动是一个能量逐渐积累的过程,故提取各工况错动完成时的各监测断面计算数据进行内力分析。

(1) 轴力

各监测断面最大轴力值列于表 6。

由表 6 可知,各工况监测断面最大轴力均呈现出压应力状态,且沿隧道纵向分布趋势相似,最大值均出现在下盘靠近断层断面,其中工况 2 最大,为 -16 200 kN,工况 3 次之,值为 -15 424 kN,工况 1 最小,值为 -14 884 kN。随着上下盘断面与断层的距离增大,断面最大轴力呈下降趋势。从数值上整体来看,工况 2、3 较工况 1 监测断面最大轴力值较大,其中工况 2 最大,工况 3 次之。

(2) 弯矩

各监测断面最大弯矩值列于表 7。

由表 7 可知,除工况 1 下盘靠近断层断面最大弯矩表现为内侧受拉,其余各监测断面均表现为外侧受拉,且沿隧道纵向分布趋势相似,最大值均出现在下盘靠近断层断面,其中工况 1 最大,值为

243 kN/m, 工况 2 次之, 值为 -232 kN/m, 工况 3 最小, 值为 -224 kN/m。随着监测断面与断层的距离增大, 隧道下盘最大弯矩呈下降趋势, 上盘最大弯

矩先下降然后上升。从数值上整体来看, 工况 2、3 较工况 1 断面最大弯矩值较大, 其中工况 2 最大, 工况 3 次之。

表 6 监测断面最大轴力(单位:kN)

Table 6 Maximum axial force of monitoring section (Unit:kN)

工况	距断层距离/m							
	-34	-22	-10	-2	2	10	22	34
1	-2 200	-6 468	-9 754	-14 884	-13 376	-13 341	-9 551	-3 702
2	-2 457	-6 922	-10 454	-16 200	-14 798	-14 588	-10 647	-4 502
3	-2 277	-6 575	-9 867	-15 424	-14 084	-14 020	-10 097	-4 079

注: 距断层距离正值为上盘, 负值为下盘, 其他同理。

表 7 监测断面最大弯矩(单位:kN/m)

Table 7 Maximum bending moment of monitoring section (Unit:kN/m)

工况	距断层距离/m							
	-34	-22	-10	-2	2	10	22	34
1	-24	-60	-129	243	-185	-121	-45	-126
2	-27	-65	-149	-232	-200	-136	-51	-132
3	-25	-60	-143	-224	-191	-127	-47	-132

3.2.2 结构安全系数

提取各工况错动完成时的各监测断面计算数据

进行安全系数分析, 各工况监断面最小安全系数列于表 8。

表 8 监测断面最小安全系数

Table 8 Minimum safety factor of monitoring section

工况	距断层距离/m							
	-34	-22	-10	-2	2	10	22	34
1	5.68	1.93	1.28	0.84	0.93	0.94	1.31	3.38
2	6.32	2.24	1.48	0.96	1.05	1.07	1.46	3.46
3	6.64	2.30	1.53	0.98	1.07	1.08	1.50	3.71

由表 8 可知, 各工况监测断面最小安全系数沿隧道纵向分布趋势相似, 最小值均出现在下盘靠近断层断面, 其中工况 1 最小, 值为 0.84, 工况 2 次之, 值为 0.96, 工况 3 最大, 值为 0.98。随着上下盘断面与断层的距离增大, 断面最小安全系数呈增大趋势, 且距离断层同间距下, 上盘安全系数整体较下盘小, 断层黏滑错动对隧道上盘的影响大于下盘。从数值上整体来看, 工况 2、3 较工况 1 断面最小安全系数较大, 原因在于纤维的掺入提高了混凝土的抗压、抗剪性能; 工况 2 较工况 3 监测断面安全系数较小, 原因在于同体积纤维掺量条件下, SFRC 抗剪强度比 SBFRC 略低, 断层黏滑错动作用下抗剪性能得到主要体现。

3.2.3 抗错效果

根据各工况二衬结构安全系数计算抗错效果(相对工况 1), 抗错效果可按式(1)进行计算, 工况 2 和工况 3 的抗错效果如图 2 所示。

$$\lambda = \frac{K_1 - K_0}{K_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: λ 为抗错效果; K_0 为素混凝土衬砌工况监测点安全系数; K_1 为纤维混凝土衬砌工况监测点安全系数。

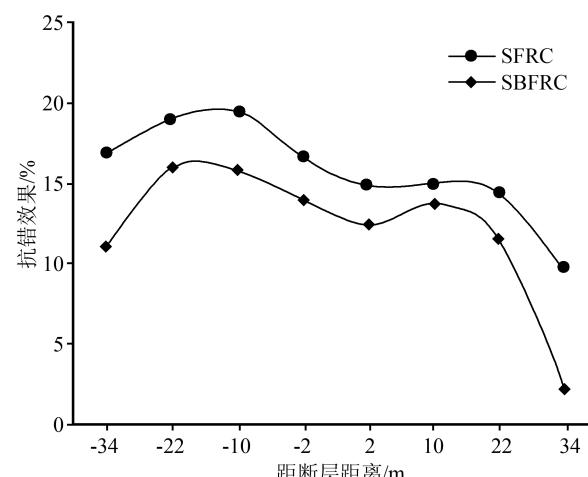


图 2 抗错效果

Fig.2 Anti-dislocation effect

由图 2 可知, 工况 2、3 抗错效果沿隧道纵向分布趋势相似, 随着上下盘断面与断层的距离增大, 上

盘抗错效果整体呈下降趋势,下盘抗错效果整体先上升后下降,且下盘抗错效果较上盘整体更好。从平均抗错效果来看,工况2平均抗错效果为12.22%,工况3平均抗错效果为15.81%,工况3抗错效果优于工况2。

4 结论

(1) 同体积纤维掺量条件下,SBFRC 立方体抗压强度比 SFRC 略低, SBFRC 抗折强度比 SFRC 略高。

(2) 断层黏滑错动对隧道上盘的影响大于隧道下盘,隧道上盘是黏滑断层隧道的设防设计重点。

(3) 纤维混凝土衬砌对下盘隧道结构的抗错效果优于上盘隧道, SFRC 二衬平均抗错效果为 12.22%, SBFRC 二衬平均抗错效果为 15.81%。

参考文献(References)

- [1] 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院.“5·12”汶川特大地震四川灾区国省干线公路检测评估技术总结[R].成都:四川省交通厅,2008.
Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Sichuan Provincial Communications Department. Conclusion of Detecting and Evaluating of National and Provincial Highways in Sichuan Province after “5·12” Wenchuan Earthquake [R]. Chengdu: Sichuan Provincial Communications Department, 2008.
- [2] 王新忠,李传习.玄武岩纤维混凝土长柱偏心受压承载能力试验研究[J].硅酸盐通报,2016,(10):3242-3246.
WANG Xinzong, LI Chuanxi. Experimental Study on Eccentric Compression Bearing Capacity of Basalt Fiber Reinforced Concrete Long Column [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016,(10):3242-3246.
- [3] 赵军,高丹盈,朱海堂.钢纤维高强混凝土抗压性能试验研究[J].新型建筑材料,2005,(1):24-27.
ZHAO Jun, GAO Danying, ZHU Haitang. Experimental Study on Compressive Behavior of Steel Fiber Reinforced High-Strength Concrete [J]. New Building Materials, 2005,(1):24-27.
- [4] 徐礼华,邓方茜,徐浩然,等.钢-聚丙烯混杂纤维混凝土柱抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2016,49(1):3-13.
XU Lihua, DENG Fangqian, XU Haoran, et al. On Seismic Behavior of Steel-polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete Columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(1):3-13.
- [5] 赵兵兵,贺晶晶,王学志,等.玄武岩-聚丙烯混杂纤维混凝土抗冻性试验[J].辽宁工程技术大学学报,2015,34(12):1402-1407.
ZHAO Bingbing, HE Jingjing, WANG Xuezh, et al. Experimental on Frost Resistance of Basalt-polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2015, 34(12):1402-1407.
- [6] 海然,刘俊霞,张茂亮,等.钢-聚乙烯醇混杂纤维超高性能混凝土性能研究[J].混凝土,2016,(5):95-101.
HAI Ran, LIU Junxia, ZANG Maoliang, et al. Performance of Hybrid Steel-polyvinyl Alcohol Fiber Reinforced Ultra High Performance Concrete [J]. Concrete, 2016,(5):95-101.
- [7] 崔光耀,王道远,倪嵩陟,等.软弱围岩隧道钢纤维混凝土衬砌承载特性模型试验研究[J].岩土工程学报,2016;1-7.
CUI Guangyao, WANG Daoyuan, NI Songzhi, et al. Model Test Study on Bearing Capacity of Steel Fiber Reinforced Concrete Lining in Weak Surrounding Rock Tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016;1-7.
- [8] 王新忠,李传习.玄武岩纤维混凝土长柱偏心受压承载能力试验研究[J].硅酸盐通报,2016,(10):3242-3246.
WANG Xinzong, LI Chuanxi. Experimental Study on Eccentric Compression Bearing Capacity of Basalt Fiber Reinforced Concrete Long Column [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016,(10):3242-3246.
- [9] 倪嵩陟.钢-玄武岩混杂纤维混凝土衬砌承载特性及抗震性能研究[D].北京:北方工业大学,2017.
NI Songzhi. Study on Bearing Capacity and Seismic Performance of steel-basalt hybrid fibers reinforced concrete [D]. Beijing: North China University of Technology, 2017.
- [10] 同治国,朱合华,廖少明,等.地铁隧道钢纤维混凝土管片力学性能研究[J].岩石力学与工程学报,2006,(增刊1):2888-2893.
YAN Zhiguo, ZHU Hehua, LIAO Shaoming, et al. Study on Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Tubes in Metro Tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, (S1):2888-2893.
- [11] 宁博,欧阳东,易宁,等.混杂纤维混凝土在地铁管片中的应用[J].混凝土与水泥制品,2011,(1):50-53.
NING Bo, OUYANG Dong, YI Ning, et al. Application of Hybrid Fiber Reinforced Concrete in Subway Segments [J]. China Concrete and Cement Products, 2011,(1):50-53.