

长陡斜井钢纤维喷射混凝土单层衬砌试验研究

宋战平^{1,2}, 刘京¹, 吴焕通², 牛荻涛¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中铁十三局集团有限公司, 天津 150008)

摘要: 摩天岭隧道 1# 通风斜井纵坡 45.3%, 长度接近 1 400 m, 在此条件下施工风险高、施工难度大; 采用施工简单, 抗拉强度高, 可随开挖掘进同步实施的钢纤维喷射混凝土单层衬砌是一种理想的技术方案。在借鉴 Q 系统支护设计基础上初步确定了斜井隧道单层衬砌参数; 通过钢纤维喷射混凝土室内力学试验和现场规模试验, 确定并推荐了斜井隧道单层衬砌最优配合比; 在以上工作基础上通过数值分析、现场规模试验和监测测试, 对斜井隧道单层衬砌方案进行了优化和稳定性分析。研究表明: (1) 在隧道喷射混凝土中加入体积掺量 0.6% 左右的钢纤维, 可极大地增大喷射混凝土支护结构的延展性, 其峰后强度明显提高, 同时可随隧道开挖掘进同步进行, 是一种经济、合理、可靠地隧道和地下结构工程支护结构; (2) 由于采用湿喷工艺, 钢纤维喷射混凝土早期强度高, 施工质量高, 施工环境影响小, 回弹率低; 同模筑混凝土相比, 地质条件适宜性强, 施工工艺简单、方便、灵活, 在条件适宜时可作为隧道和地下工程的永久支护。 (3) 建议摩天岭隧道 1# 通风斜井洞身段 II、III 及 IV 级围岩无地下水出露洞段采用钢纤维喷射混凝土单层衬砌取代原设计的复合衬砌。

关键词: 隧道工程; 喷射混凝土单层衬砌; 现场试验; 监测

中图分类号: U 455

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)03-0348-08

在隧道和地下工程喷射混凝土中掺入一定量的纤维可大大提高喷射混凝土的延展性, 其抗拉强度和抗压峰后强度明显增加^[1-5]。国外在 20 世纪八九十年代开始使用纤维喷射混凝土, 并将其作为单层永久衬砌应用于诸如慕尼黑地铁, 瑞士长隧道和巴西等的隧道和地下工程中, 即所谓的纤维喷射混凝土单层衬砌。当前纤维喷射混凝土中纤维多数使用钢纤维, 即所谓的钢纤维喷射混凝土衬砌。我国在 2000 年和 2002 年在西康铁路秦岭隧道和西南铁路磨沟岭隧道中进行了钢纤维喷射混凝土衬砌的试验研究^[6-10]。已有研究资料表明^[11-13], 与普通喷射混凝土相比, 在混凝土中掺入体积掺量约 0.6% 的钢纤维可显著提高混凝土的抗磨、抗拉、抗剪及抗渗能力, 且能提高其断裂韧性、抗爆破冲击等性能^[14-17], 因此在一定条件下是一种理想的代替隧道和地下工程模筑衬砌的新工艺、新技术, 特别是对于施工难度大的竖井、长、陡斜井等工程。

斜长 1 367.71 m, 倾角 24.37° 的杭兰高速摩天岭特长隧道 1# 通风斜井纵坡 45.3%, 在此长陡斜井施工中大坡度导致二次衬砌钢模台车的固定、行走等困难重重; 且受隧道和地下工程施工特点的限制, 隧道开挖掘进、二次支护不能同时并头施工, 二次支护需等斜井开挖后再自下而上进行, 因此, 该斜井施工风险高、施工周期长, 施工质量和工期难以保证^[18-20]。国外上世纪八九十年代开始已成功应用于诸如慕尼黑地铁, 瑞士长隧道和巴西等的隧道和地下工程中的纤维喷射混凝土单层衬砌技术以及国内在 2000 年左右在西康铁路秦岭隧道和西南铁路磨沟岭隧道中进行了钢纤维喷射混凝土试验为摩天岭隧道长陡斜井工程提供了可供借鉴的技术。依托摩天岭隧道工程, 借鉴已有国内外钢纤维喷射混凝土单层衬砌施工技术, 结合隧道围岩 Q 分级系统, 在现场典型洞段进行了钢纤维喷射混凝土综合试验、测试和数值仿真分析, 确定了该斜井单层衬砌支护参数。摩天岭隧道 1# 通风斜井于 2008 年 11 月完成施工, 现场监测和运营调查表明, 通风斜井结构稳定。

收稿日期: 2012-12-17 修改稿日期: 2013-05-05

基金项目: 西部交通科技项目(200831800030); “十二五”科技支撑计划(2012BAJ17B01)

作者简介: 宋战平(1974-), 男, 陕西蒲城人, 副教授, 博士后, 主要从事岩石力学、隧道及地下工程方面的教学科研。

1 摩天岭隧道1#通风斜井单层衬砌厚度的初步确定

1.1 摩天岭隧道1#通风斜井工程简介

摩天岭隧道为双洞四车道分离式特长公路隧道,隧道左线长7 353 m,最大埋深880 m.为解决该特长隧道运营通风,隧道左线设置通风斜井一座.通风斜井轴线水平投影长1 250 m,斜长1 367.71 m,倾角24.37°,纵坡45.3%,为当前我国坡度最大的长陡公路斜井.摩天岭隧道1#通风斜井洞身穿越围岩为厚层状石灰岩,围岩完整,壁面干燥,无明显节理、裂隙出露;隧道开挖周边残孔率100%,其围岩饱和单轴抗压强度82.3 MPa,围岩稳定性良好.根据《公路隧道设计规范》(JTGD70-2004),1#通风斜井原设计为复合式衬砌,其中斜井洞身Ⅳ级围岩初期支护采用格栅钢架+钢筋网喷射混凝土,二次支护采用40 cm的钢筋混凝土;洞身Ⅲ级、Ⅱ级围岩均采用喷射混凝土初期支护,二次支护均采用35 cm素混凝土模筑衬砌;在长度接近1 400 m,倾角超过24°的长陡斜井施工中,受隧道和地下工程施工特点的限制,开挖、二次支护不能同时并头施工,二次支护需等斜井开挖后再自下而上进行,因此该斜井施工风险高、施工周期长,施工质量和工期难以保证.

1.2 按Q法确定的钢纤维喷射混凝土单层衬砌厚度

国外目前应用于单层衬砌支护设计方法是挪威法(简称NMT法).在NMT中对围岩稳定性评价主要采用Q系统分级法^[21].Barton等给出了通过Q值和De值查支护方案的图表,并随着支护技术的发展,结合工程实例不断对图表进行完善.Q(Tunneling Quality Index)Q围岩分级系统中Q值的计算如下:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

式中:RQD为岩石的质量指标; J_n 为岩体中节理的组数; J_r 为岩体结构面的粗糙度系数; J_a 为岩体中结构面的蚀变系数; J_w 为岩体中水的折减系数;SRF为岩体地应力的折减系数.

根据设计院提供的摩天岭隧道地质勘查资料,摩天岭1#斜井洞身围岩为下统嘉陵江组灰岩和大冶组白云岩,其岩石的质量指标RQD值平均为60;在岩体中发育一组完整节理,其岩体节理组数 J_n 取4;根据对典型结构面节理的粗糙度分析,其节理面粗糙度系数 J_r 取3;考虑到岩体中结构面典型节理面有砂化现象,其节理蚀变系数 J_a 取2;由于斜井洞身干燥无水,其岩体水折减系数 J_w 取1;斜井洞身典型灰岩饱和抗压强度 σ_c 值取82.3 MPa,其最大主应力 σ_1 取上覆岩体自重,其值约为20 MPa,因此岩体地应力折减系数SRF取5.根据以上数值计算得Q值为4.5.

取斜井隧道最大开挖跨度11.84 m,开挖支护比ESR取值1.3,则计算De为9.11.根据Q值4.5和De值9.11值按Grimstad等2002年提供的图表并综合考虑摩天岭隧道1#通风斜井施工实际情况,确定摩天岭隧道1#通风斜井钢纤维喷射混凝土单层衬砌方案:考虑摩天岭隧道1#斜井工程为永久性工程,为之建议洞口50 m采用复合衬砌;斜井其他洞段均采用钢纤维喷射混凝土单层衬砌;钢纤维喷射混凝土支护参数,洞身Ⅱ级围岩单层衬砌厚度10 cm;Ⅲ级围岩段钢纤维喷射混凝土单层衬砌厚度15 cm;Ⅳ级围岩段钢纤维喷射混凝土单层衬砌厚度20 cm.由于左线斜井隧道干燥无水,因此无需考虑防水问题.对需要考虑防水问题的隧道,可以加入聚丙烯微纤维提高钢纤维喷射混凝土的抗裂和抗渗性能,以达到防水效果,必要时可在两层喷混凝土中间施作防水层.

2 钢纤维喷射混凝土室内强度实验

2.1 钢纤维喷射混凝土试验方案

为配合现场施工,西安建筑科技大学课题组于2007年6月15日进驻现场开展工作,前期进行了纤维混凝土配合比试验,纤维混凝土现场试喷工作.试验纤维材料采用重庆宜筑有限公司生产的钢纤维,规格为30 mm×0.5 mm(长度×直径)剪切波浪型、30 mm×0.5 mm冷拉端钩和剪切端钩型钢纤维,长径比均为60,其中冷拉型钢纤维弯折性能≥90%,抗拉强度≥1 000 MPa;剪切型钢纤维弯折性能≥90%,抗拉强度≥380 MPa.骨料采用现场机制砂和中粗河砂混合料;外加剂借鉴欧洲有关规范,选取德国巴斯夫公司生产的高效无碱液态速凝剂.在以上室内和现场试验和实践基础上,推荐了表1所示的5

种钢纤维喷射混凝土单层衬砌配合比。

表 1 摩天岭隧道斜井钢纤维喷射混凝土配合比方案

Tab.1 Tunnel lining of steel fiber shotcrete of material gradation

配合比 编号	钢纤维参数		水灰比	水泥质量 /kg·m ⁻³	水质量 /kg·m ⁻³	砂子质量 /kg·m ⁻³	石子质量 /kg·m ⁻³	硅粉掺量 /kg·m ⁻³	减水剂掺量 /%
	长径比	形状							
1	60	冷拉端钩	0.46	441	226	1 180	598	36.8	0.8
2	60	剪切端钩	0.48	441	226	1 180	598	36.8	0.7
3	60	剪切波浪	0.48	441	226	1 180	598	36.8	0.8
4	60	剪切波浪	0.48	441	226	1 180	598	36.8	0.9
5	60	剪切波浪	0.47	441	226	1 180	598	36.8	0.8

表 2 摩天岭斜井纤维单层衬砌室内试验结果(MPa)

Tab.2 The test results of steel fiber shotcrete concrete

/MPa

配合比编号	抗压强度		抗拉强度		平均强度			
	14 d	28 d	14 d	28 d	抗压强度		抗拉强度	
					14 d	28 d	14 d	28 d
1	42.24	45.20	2.94(无效)		41.89	45.24	4.98	5.45
	42.32	46.22	5.41	5.47				
	41.13	44.40	4.54	5.86				
2	33.02	38.85	2.63	2.78	31.08	39.84	2.55	2.86
	30.01	39.43	2.35	2.85				
	30.21	41.24	2.68	2.96				
3	31.30	42.06	2.74	2.85	31.23	41.92	2.70	3.24
	31.06	42.93	2.70	3.90(无效)				
	31.33	40.77	2.66	3.63				
4	36.37	43.16	2.84	3.21	36.71	43.82	2.77	3.11
	36.32	43.49	2.52	3.05				
	37.45	44.81	2.96	3.08				
5	36.44	52.46	3.06	3.97	35.81	50.86	3.34	4.33
	37.62	49.39	3.69	4.16				
	33.36	50.73	3.27	4.85				

2.2 钢纤维喷射混凝土力学性能试验

现场喷射大板,每组配合比采用成都岩峰 TK500 湿喷机喷射大板若干,隧道内养护 2 d 后脱模运至实验室标准养护,在实验室内养护 7 d 后进行切割、打磨,制作成 150 mm×150 mm×150 mm 标准试块和 100 mm×100 mm×400 mm 小梁试块,分别进行抗拉、抗压和抗折试验.试验结果见表 2、图 1 和图 2 所示;钢纤维喷射混凝土抗折强度试验结果见表 3 所示。

由表 2 和图 1~2 可见:就 28 d 强度而言,钢纤维体积掺率由 0 增加到 0.8%,其试样抗压强度提高超过 20%,其抗拉强度增加了约 1 倍.同时,不同掺率的对比研究表明,在纤维掺量超过 0.6% 以后掺量增加对试样的抗拉强度增加基本无影响,因此,建议钢纤维掺率以 0.6% 左右为宜。

钢纤维喷射混凝土同普通喷射混凝土相比,在 8 h、12 h、1 d、3 d、7 d 龄期中,钢纤维喷射混凝土的强度比普通喷射混凝土分别增长了 17.6%、24.9%、24.5%、17.6%、11.5%。钢纤维硅粉喷射混凝土 1 d 的初期抗压强度达到了 12.30 MPa,远大于《锚杆喷射混凝土支护技术规范》所规定的不低于 5.0 MPa 要求,说明钢纤维的掺入对喷射混凝土的早期强度有明显的提高.同时,钢纤维喷射混凝土与普通喷射混凝土的

表 3 钢纤维湿喷射混凝土

土抗折强度试验结果

Tab.3 The flexural strength test results of steel fiber shotcrete concrete

体积掺率 /%	抗折强度 /MPa	抗折初裂强度 /MPa
0.0	4.68	3.75
0.4	6.93	5.16
0.6	8.27	6.09
0.8	8.61	6.36

早期抗压强度虽然均随着龄期的增长而提高,但相比而言,钢纤维喷射混凝土的早期强度提高得更快,这说明在喷混凝土中掺入钢纤维可以有效地加快早期强度的发展,更有利于抵抗隧道开挖初期的围岩变形。

从表3的试验结果可见:当钢纤维体积掺率从0.0%分别增加到0.4%,0.6%,0.8%时,钢纤维喷混凝土的抗折强度分别提高了48.1%,76.7%,84.0%;抗折初裂强度分别提高了37.6%,62.4%,69.6%。可见钢纤维的掺入对喷射混凝土的抗剪和抗弯强度影响明显,随着纤维增量的增加,喷射混凝土的抗拉、抗剪和抗折强度随之增加;但在掺量超过0.6%以后,掺量影响基本稳定,再增加掺量,喷射混凝土强度提高不甚明显。

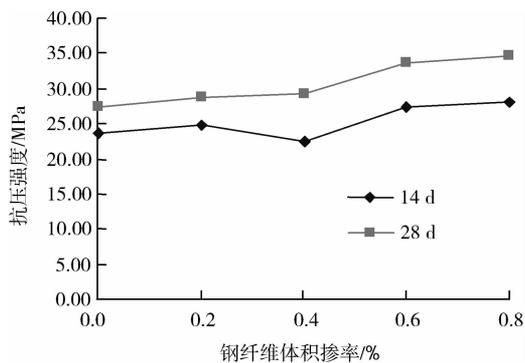


图1 钢纤维体积掺率与抗压强度关系曲线

Fig. 1 The relational curves of steel fiber between volume-doped rates and compressive strength

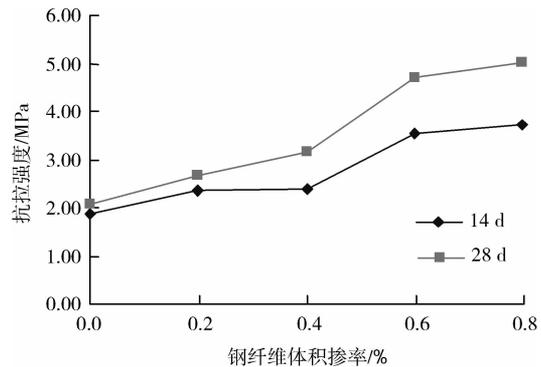


图2 钢纤维体积掺率与抗拉强度关系曲线

Fig. 2 The relational curves of steel fiber between volume-doped rates and tensile strength

3 摩天岭斜井隧道单层衬砌现场试验及分析

3.1 摩天岭隧道斜井试验段单层衬砌厚度优化

按室内实验确定5种配合比,进行现场试验。根据摩天岭斜井隧道地质条件,选取XJ1K1+065~XJ1K1+055和XJ1K1+055~XJ1K1+045共7段120m的典型洞段进行现场试验。为确定试验段单层衬砌厚度,按以Q法确定的单层衬砌建议厚度和室内实验测定的不同配合比的钢纤维喷射混凝土强度参数,采用三维数值试验,模拟摩天岭隧道的开挖过程以及支护的受力情况,对确定的支护参数进行优化。

数值分析中,整个地层与隧道共同作用的模型宽120m,高180m,深100m,数值模型共划分22599个单元。在模拟围岩时采用8节点等参实体单元;支护结构采用壳体单元。边界条件按位移约束设置,左右侧面取UX与UZ约束,前后各侧面均约束水平向位移UZ,底面约束UY与UZ。根据隧道斜井的地质勘察报告提供的建议值和《工程岩体分级标准》确定斜井隧道洞身试验段岩体参数,其中钢纤维

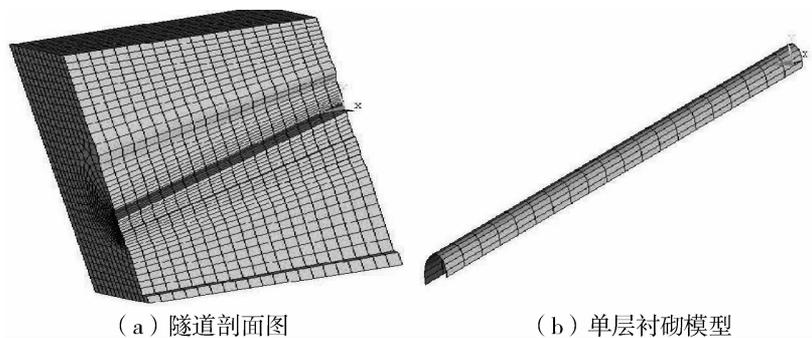
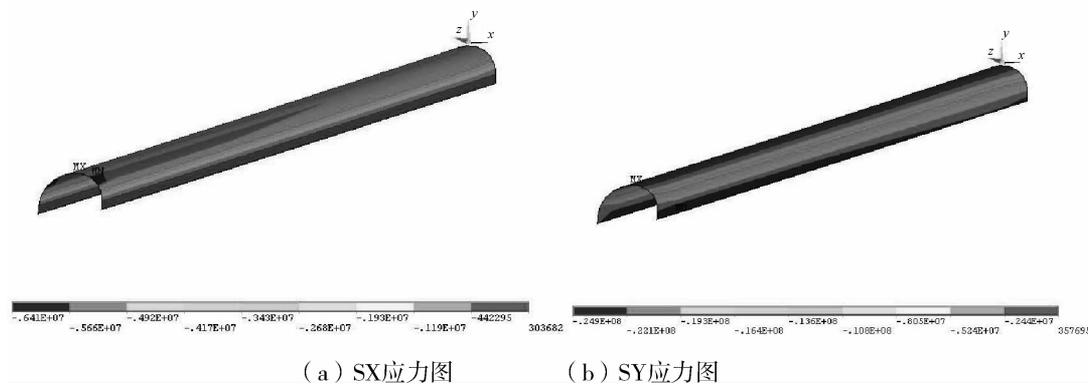


图3 隧道模型及模型受力图

Fig. 3 The tunnel model and model stress

维喷混凝土弹性模量通过实验计算求得。摩天岭隧道1#通风斜井模型及钢纤维支护结构模型见图3所示。

由图4给出的摩天岭隧道1#斜井典型洞段采用15cm厚钢纤维喷射混凝土单层衬砌施工后的结构受力图和数值试验可见:典型试验段钢纤维喷射混凝土单层衬砌厚度从5cm增加到10cm,斜井隧道净空收敛位移将明显减小,但钢纤维厚度增加到15cm后再增加钢纤维喷射混凝土单层衬砌厚度,斜井隧道净空变化量较少不明显。这一分析结果表明基于Q分析系统推荐的单层衬砌支护参数合理、可行。根据本次数值试验的结果对各试验段建议现场试验方案如表4所示。



(a) SX应力图 (b) SY应力图

图 4 衬砌支护应力图

Fig. 4 The lining supports stress

3.2 钢纤维喷射混凝土单层衬砌现场试验

现场试验选取 7 段共 120 m 典型洞段进行,其试验段试验方案见表 4 所示,其中 XJ1K1+065~XJ1K1+055 试验段和 XJ1K1+055~XJ1K1+045 试验段已按设计进行了初期支护.现场试验中,为确定不同围岩条件下钢纤维喷射混凝土推荐支护参数的安全型,对试验段进行了位移监测.隧道位移监测主要测量隧道围岩两点间的距离变化.在各试验段(7 段)边墙 1.5 m 高度处(图 5 的 2、3 点位置)、和顶拱(图 5 的 1 点位置)各布设一组变形监测测点,进行围岩和支护结构的变位监测.各试验段的位移监测结果见表 5 所示.图 6 给出了 S-3 段的 2-3 线位移时态曲线图.由表 5 和图 6 可见,钢纤维喷射混凝土施做后的 10 d 内,隧道位移变化速率急剧降低,围岩收敛位移平稳增加.在 15 d 以后,斜井隧道日最大收敛位移均小于 0.1 mm/d,累积变形量小于 2.0 mm.因此,支护结构稳定.

表 4 钢纤维喷混凝土现场试验方案

Tab. 4 The field test program of steel fiber shotcrete concrete

试验段编号	起止桩号	配合比编号	喷层厚度/cm	围岩级别	喷射混凝土强度
S-1	XJ1K0+802.0~XJ1K 0+782.0	1	15	II	C30
S-2	XJ1K0+782.0~XJ1K 0+762.0	2	20	II	C30
S-3	XJ1K0+762.0~XJ1K 0+742.0	3	15	II	C30
S-4	XJ1K0+742.0~XJ1K 0+722.0	4	15	II	C30
S-5	XJ1K0+722.0~XJ1K 0+702.0	5	10	II	C30
S-6	XJ1K1+065~XJ1K 1+055	5	10	IV	C30
S-7	XJ1K1+055~XJ1K 1+045	5	10	III	C30

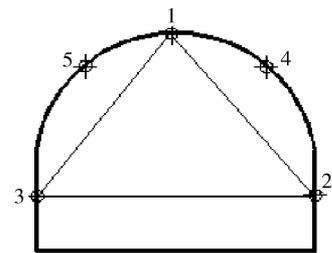


图 5 试验监测点位置图

Fig. 5 The location map of test monitoring point

表 5 摩天岭隧道斜井试验段位移监测结果

Tab. 5 The monitoring results of displacement

试验段编号	试验段起止桩号	最大日收敛值/mm·d ⁻¹			平均日收敛速度值/mm·d ⁻¹		
		1-3 线	1-2 线	2-3 线	1-3 线	1-2 线	2-3 线
S-1	XJ1K0+802.0~XJ1K 0+782.0	1	1.26		0.51	0.411	
S-2	XJ1K0+782.0~XJ1K 0+762.0	2	0.09	1.18	1.09	0.077	0.204
S-3	XJ1K0+762.0~XJ1K 0+742.0	3	0.02	0.06	0.635	0.01	0.146
S-4	XJ1K0+742.0~XJ1K 0+722.0	4	0.105	0.24	0.575	0.041	0.085
S-5	XJ1K0+722.0~XJ1K 0+702.0	5	0.03	0.03	0.515	0.013	0.011
S-6	XJ1K1+065~XJ1K 1+055	5			0.555		
S-7	XJ1K1+055~XJ1K 1+045	5			0.52		

3.3 摩天岭隧道1#斜井单层衬砌施工建议

摩天岭隧道现场实践表明,与普通喷射混凝土支护结构相比较而言,由于采用湿喷工艺,钢纤维喷射混凝土的作业环境大为改善,其施工回弹量大大降低;摩天岭隧道1#通风斜井现场喷射试验测定表明,其回弹率在15%以下,远低于一般喷射混凝土回弹率的20%~30%,节约了原材料,降低了成本;且其喷射面观感效果有了很大的改善,真正做到内实外美;且采用湿喷工艺使得喷射工作区域及其附近的粉尘含量比干喷明显降低,改善了劳动环境.摩天岭隧道1#通风斜井120 m试验段现场监测表明,采用钢纤维喷射混凝土单层衬砌,隧道围岩稳定,支护效果良好.基于以上的认识,对杭兰高速摩天岭1#斜井有如下建议:

(1)根据摩天岭隧道1#斜井施工揭示围岩条件,根据现场试验、实践及数值分析,建议该斜井Ⅱ级围岩无水洞段采用15 cm厚钢纤维喷射混凝土单层衬砌;斜井Ⅲ、Ⅳ级围岩无水洞段(已经进行了钢拱架+喷射混凝土初次支护段)支护参数以10 cm为宜.

(2)钢纤维喷射混凝土单层衬砌施工时,钢纤维喷射混凝土的配合比是决定单层衬砌性能的重要因素,基于现场试验和现场情况,推荐选用剪切波浪型钢纤维,且钢纤维混凝土中钢纤维参量以 60 kg/m^3 为宜;施工时砂率以70%为宜,水灰比不宜大于0.47.

(3)按推荐配比条件下,在采用素砂浆找平基础上,摩天岭1#通风斜井钢纤维喷射混凝土单层衬砌厚度:Ⅱ级围岩段以15 cm为宜;Ⅲ级围岩段以20 cm为宜;Ⅳ级围岩段以25 cm为宜.

4 结 论

本文通过对摩天岭隧道1#斜井现场120 m试验段进行的钢纤维喷射混凝土力学性能试验、现场监测和施工实践的分析、研究,并结合摩天岭隧道施工用应情况,可以得出如下结论:

(1)在隧道喷射混凝土支护中,加入体积参率0.6%左右的钢纤维可从根本上改变喷射混凝土材料的性质,增加支护结构的柔性和峰后强度,很好地使用了隧道和地下工程的变形特点.且钢纤维喷射混凝土早期强度高,施工工艺简单,回弹率少(一般低于15%),作业粉尘浓度小于 1.6 mg/m^3 ,施工环境好,是优良的隧道和地下工程支护结构.

(2)建议摩天岭1#斜井洞身段Ⅱ级、Ⅲ级及Ⅳ级围岩洞段可采用钢纤维喷射混凝土单层衬砌结构;钢纤维喷射混凝土中优先选用剪切波浪型纤维.为确保单层具有足够的抗剪强度和韧度,且易于喷射施工,钢纤维喷射混凝土中,以 60 kg/m^3 的钢纤维掺量为宜;施工时砂率以70%为宜,水灰比不宜大于0.47.

(3)按推荐配比条件下,建议摩天岭1号通风斜井钢纤维喷射混凝土单层衬砌厚度:Ⅱ级围岩段以15 cm为宜;Ⅲ级围岩段以20 cm为宜;Ⅳ级围岩段以25 cm为宜.

(4)钢纤维喷射混凝土立方体的抗压、劈拉试验数据离散性小,可信度高,为之,建议隧道和地下工程中宜优先采用土立方体试样作为试验标本,其28 d抗压强度宜大于30 MPa;并建议喷混凝土1 d的初期抗压强度宜不小于8.0 MPa;考虑单层衬砌作为永久性结构,建议钢纤维单层衬砌中应适当掺入一定的粉煤灰,以提高喷射混凝土的抗渗性能,且其抗渗等级应不低于 S_8 为宜.

(5)隧道及地下工程中,采用钢纤维喷射混凝土作为单层衬砌,其结构的耐久性工程关注的主要焦点之一,当前这方面的研究较少,需要进一步深入研究.

参考文献 References

- [1] DING Y, KUSTERLE Wolf. Compressive stress-strain relationship of steel fibre-reinforced concrete at early age.

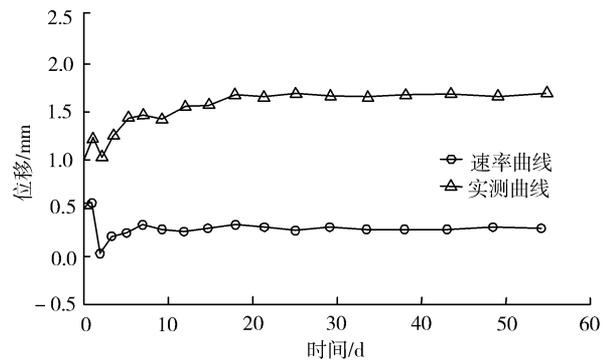


图6 隧道收敛时态曲线

Fig. 6 The normal curve of tunnel convergence

- Cement and Concrete Research[J]. 2000,112(30):1573-1579.
- [2] TAN K H, SAHA M K. Ten-Year Study on Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams Under Sustained Loads[J]. ACI Structural Journal, 2005,102(3):472-480.
- [3] 张俊儒,仇文革. 隧道单层衬砌研究现状及评述[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(4):693-699.
ZHANG Jun-ru, CHOU Wen-ge. The research and review of single shell lining tunnel[J]. Journal of underground space and engineering,2006,2(4):693-699.
- [4] 何林生,王明年. 隧道工程中的挪威法(NTM)[J]. 广东公路交通,1998,54(2):108-110.
HE Lin-sheng,WANG Ming-nian. The Norwegian law in tunnel engineering (NTM)[J]. Guangdong Highway Communications,1998,54(2):108-110.
- [5] 史世雍,马金荣. 隧道钢纤维喷射混凝土强度试验研究[J]. 山西建筑,2004,30(2):55-56.
SHI Shi-yong, MA Jin-rong. The strength test research of Tunnel steel fiber shotcrete[J]. Shanxi Architecture, 2004,30(2):55-56.
- [6] 周欣竹,郑建军,张 弥. 钢纤维混凝土在秦岭隧道衬砌中的应用研究[J]. 北方交通大学学报,1998,22(4):50-52.
ZHOU Xin-zu, ZHENG Jian-jun, ZHANG Mi. The application of steel fiber reinforced concrete in the qinling tunnel lining[J]. Journal of Northern Jiao tong University,1998,22(4):50-52.
- [7] 朱永全,刘 勇,刘志春,等. 聚丙烯纤维网喷射混凝土性能和衬砌试验[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(19):3376-3380.
ZHU Yong-quan, LIU Yong, LIU Zhi-qun, et al. Polypropylene fibres shotcrete performance test and lining[J]. Journal of rock mechanics and engineering,2004,23(19):3376-3380.
- [8] 贺少辉,马万权,曹德胜,等. 隧道湿喷纤维高性能混凝土单层永久衬砌研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(20):3509-3517.
HE Shao-hui, MA Wan-quan, CAO De-sheng, et al. Tunnel spray wet fiber study of single-layer permanent lining of high performance concrete[J]. Journal of rock mechanics and engineering,2004,23(20):3509-3517.
- [9] 范 新,章克凌,王明洋,等. 钢纤维喷射混凝土支护常规爆破震塌能力研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(7):1437-1442.
FAN Xin, ZHANG Ke-ling, WANG Ming-yang, et al. Steel fiber reinforced shotcrete supporting conventional blasting earthquake collapse capacity study[J]. Journal of rock mechanics and engineering,2006,25(7):1437-1442.
- [10] 丁 琳. 隧道衬砌中湿喷钢纤维土的应用[J]. 岩土力学,1996,17(1):36-40.
DING Lin, Application of wet-spray steel fiber soil tunnel lining[J]. Rock and Soil Mechanics,1996,17(1):36-40.
- [11] BANTHIA N, SAPPAKITTIPAKORN M. Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization[J]. Cement and Concrete Research, 2007,5(5):1016-1020.
- [12] 高尔新,李元生,薛 玉,等. 喷射混凝土钢纤维分布特性分析[J]. 岩土工程学报,2002,24(2):202-203
GAO Er-xin, LI Yuan-sheng, XUE Yu, et al. The distribution features of the steel fiber sprayed concrete analysis [J]. Rock and Soil Mechanics,2002,24(2):202-203.
- [13] 严少华,钱七虎,孙 伟,等. 钢纤维高强度混凝土单周压缩下应力-应变关系[J]. 东南大学学报:自然科学版,2001,31(2):77-80.
YAN Shao-hua, QIAN Qi-hu, SUN Wei, et al. Steel fiber reinforced high strength concrete under compression stress-strain relationship for the week[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition,2001,31(2):77-80.
- [14] 张 擎,蔡友清,冯 勇. 水泥混凝土路面加铺层的疲劳性能[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006(4):26-29.
ZHANG Qing, CAI You-qing, FENG Yong. The fatigue performance of cement concrete pavement overlay layer [J]. Journal of chang 'an university: Natural Science Edition,2006(4):26-29.
- [15] 罗立峰. 钢纤维增强聚合物改性混凝土的冲击性能[J]. 中国公路学报,2006(5):71-76.
LUO Li-feng. The impact of the steel fiber reinforced polymer modified concrete performance[J]. China Journal of Highway and Transport,2006(5):71-76.
- [16] 黄承逵,赵国藩,彭 骏. 二级配钢纤维混凝土疲劳性能的研究[J]. 中国公路学报,1994(3):29-35.
HUANG Cheng-kui, ZHAO Guo-fan, PENG Jun. Secondary distribution of fatigue property of steel fiber reinforced concrete research[J]. China Journal of Highway and Transport,1994(3):29-35.

- [17] 凌天清,蒋建明. 玻璃纤维、钢纤维及其复合增强混凝土的力学特性试验研究[J]. 中国公路学报,1994(S1):67-74.
LING Tian-qing, JIANG Jian-ming. Fiber glass steel fiber and its composite experimental study the mechanical properties of reinforced concrete[J]. China Journal of Highway and Transport,1994(S1):67-74.
- [18] 祝云华. 钢纤维喷射混凝土力学特性及其在隧道单层衬砌中的应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2009.
ZHU Yun-hua. Steel fiber sprayed concrete mechanical properties and its application in the tunnel of single-layer lining[D]. Chongqing:Chongqing University,2009.
- [19] 杜国平,刘新荣,祝云华,等. 隧道钢纤维喷射混凝土性能试验及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2008(7):1448-1454.
DU Guo-ping, LIU Xin-rong, ZHU Yun-hua, et al. Tunnel steel fiber shotcrete performance test and its engineering application[J]. Journal of rock mechanics and engineering,2008(7):1448-1454.
- [20] 刘新荣,祝云华,李晓红,等. 隧道钢纤维喷射混凝土单层衬砌试验研究[J]. 岩土力学,2009(8):2319-2323.
LIU Xin-rong, ZHU Yun-hua, LI Xiao-hong, et al. Experimental study single-layer tunnel steel fiber shotcrete lining[J]. Journal of rock mechanics and engineering,2009(8):2319-2323.
- [21] 甘立松. 隧道钢纤维混凝土单层衬砌动力响应研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.
GAN Li-song. Research on dynamic response of single-layer lining tunnel steel fiber concrete[D]. Chengdu:south-west jiao tong university,2011.

Experimental research on single-layer tunnel lining of steel fiber shotcrete and the application in motenlin deviated well

SONG Zhan-ping^{1,2}, LIU Jing¹, WU Huan-Tong², NIU Di-tao¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;
2. China Railway 13th Bureau Group Co. LTD, Tianjin 150008, China)

Abstract: Motenlin 1# tunnel ventilation deviated at a vertical grade of 45.3%, with a length of nearly 1 400 m. Under these conditions, the construction is extremely difficult, especially in the construction of the secondary lining using a single layer of steel fiber lining technology which is a simple construction, have high tensile strength, and is liable for the project to meet security requirements. A single layer of steel fiber lining technology is an ideal technical solution. As the research motenlin 1 # tunnel ventilation deviated well single lining the feasibility of the scheme, this paper designed for the motenlin tunnel's 120 m hole in paragraph (7-segment, five kinds of mixing ratio) live steel fiber sprayed concrete monolayer shotcrete plate lining scale test. Through the jet concrete slab, mechanics performance test of steel fiber sprayed concrete was conducted indoors, Based on the displacement monitoring, the safety of the structure 7-segment test section steel fiber reinforced shotcrete single lining was analyzed. The practical test of #1 Motenlin tunnel deviated well field steel fiber scale shows that: (1) In the tunnel shotcrete support, adding certain amount of steel fiber (steel fiber volume and rate of about 0.6%) can significantly increase the soft and after peak strength of the support structure, which is also suitable for tunnel soft support. (2) Steel fiber reinforced shotcrete has higher strength, less construction resilience rate, less homework dust concentration, and simple construction process. Under suitable geological conditions, it can be used as a permanent support of tunnel and underground construction. (3) Steel fiber reinforced shotcrete single lining technology is proposed to #1 motenlin inclined shaft hole figure class II, III and IV level around the cave section.

Key words: tunnel and underground engineering; steel fiber shotcrete monolayer lining; field test; monitoring