

隧洞初期支护喷射混凝土结构纤维与 钢筋网增强方式对比研究

赵正¹, 李强², 刘国平¹, 施慧聪¹, 姚欣¹

(1.上海罗洋新材料科技有限公司,200092;2.中交一航局第一工程有限公司,天津 300456)

摘要:对采用钻爆法施工的隧洞初期支护喷射混凝土的两种增强方式(结构纤维 RL60、钢筋网)进行了研究。结果表明,通过等效抗弯能力测试与计算可以得出 RL60 纤维与配筋率之间的对应关系;RL60 纤维在一定掺量下可以超过钢筋网的弯曲韧性能量吸收值,而且其极限抗弯承载力和低挠度残余抗弯承载力均高于钢筋网。

关键词:结构纤维 RL60;钢筋网;喷射混凝土;等效抗弯强度;弯曲韧性

Abstract: When using the drilling and blasting method, the two kinds of reinforcement (structural fibers RL60 and steel fabrics) for shotcrete are studied in tunnel initial support. The results indicate that the corresponding relationship between the content of RL60 fiber and the ratio of reinforcement is set through equivalent flexural capacity tests, and the flexural toughness energy absorption value of RL60 with certain content can surpass that of the steel fabric, and its ultimate flexural capacity and residual flexural capacity in low deflection range are higher than those of the steel fabric.

Key words: Structural fiber RL60; Steel fabric; Shotcrete; Equivalent flexural strength; Flexural toughness

中图分类号:TU528.57 文献标识码:A 文章编号:1000-4637(2014)02-47-04

0 前言

对于采用钻爆法的围岩软弱隧洞,初期支护通常采用喷射混凝土挂网的设计方案。喷射混凝土挂网具有支护及时、质量好、操作简单、灵活性大等优点,特别是在软弱围岩地质条件下,配合钢拱架和系统锚杆作为联合支护,其优点更为明显^[1]。钢筋网配置于喷射混凝土层中进行增强,有利于抵抗岩石塌落和承受冲击荷载。另外,钢筋网还可以提高喷射混凝土的整体性,包括防止混凝土收缩开裂,并使混凝土中的应力均匀分布^[2-4]。但采用钢筋网喷射混凝土具有以下缺点:①在凹凸不平的岩面,钢筋挂网难以沿岩石表面布置在拉应力区;②喷射混凝土回弹率大,同时混凝土容易集结在挂网的表面,而在挂网的背后形成空洞,不能对围岩形成及时的支护;③耗时、成本高;④在松落岩块区布置钢筋挂网有很大的危险性。

由于钢筋网喷射混凝土存在以上诸多的缺陷,所以,工程界一直在寻找新的设计方案来替代钢筋网喷射混凝土。纤维增强技术的发展为此带来契机,其中结构纤维(以增强、增韧为目标的纤维)性能优异,可以有效解决使用钢筋网带来的问题^[5-6]。在日本、澳大利亚和美国等国,合成结构纤维正被广泛应用于隧道的喷射混凝土支护,取代全部的钢筋挂网。

1 基于等效抗弯能力的结构纤维喷射混凝土设计方案

钢筋网增强喷射混凝土与结构纤维增强喷射混凝土的结构示意图如图 1。按照 GB 50086—2001《锚杆喷射混凝土支护技术规范》的要求,钢筋网与岩石面的间隙为 30mm^[7]。结构纤维以三维乱向均匀分散在混凝土中。

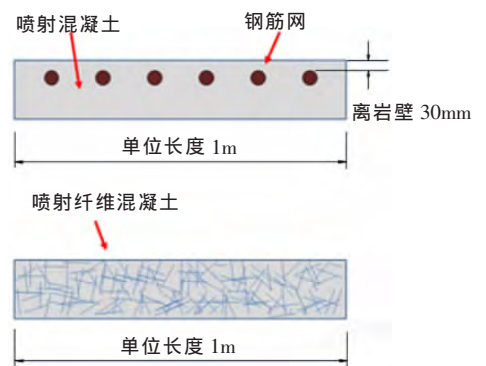


图 1 钢筋网增强喷射混凝土与纤维增强喷射混凝土结构的剖面示意图

钢筋网增强喷射混凝土的抗弯能力按式(1)计算:

$$M_s = h_0 \cdot A_s \cdot f_y \quad (1)$$

式中, M_s —钢筋网增强喷射混凝土衬砌可承载的最大弯矩, $N \cdot mm$;

h_0 —钢筋网中心平面与岩壁的距离, mm ;

A_s — 单位长度 (1m) 的衬砌内的钢筋面积, mm^2 ;

f_y — 钢的屈服强度, N/mm^2 。

结构纤维增强喷射混凝土的抗弯能力按式 (2) 计算:

$$M_f = f_e (bh^2)/6 \quad (2)$$

式中, M_f — 结构纤维增强喷射混凝土衬砌可承载的最大弯矩, $\text{N}\cdot\text{mm}$;

f_e — 结构纤维混凝土的等效抗弯强度, N/mm^2 ;

b — 衬砌的单位长度 (1000mm);

h — 衬砌的厚度, mm。

当用结构纤维取代钢筋网时, 令 $M_f \geq M_s$, 求得结构纤维混凝土最低等效抗弯强度 (f_e), 若结构纤维混凝土的 f_e 值与掺量关系已知, 即可得出在何种掺量下该结构纤维可以达到所需的增强效果。

2 试验

2.1 结构纤维混凝土等效抗弯强度测试

试验按照 ASTM C1609/C1609M-10 进行^[8], 试验装置示意图见图 2。

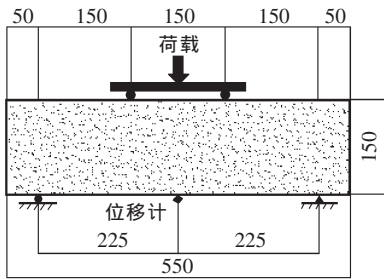


图 2 纤维混凝土弯曲性能试验装置示意图

纤维混凝土 f_e 值根据式 (3) 计算:

$$f_e = \frac{150T_{150}}{bd^2} \quad (3)$$

式中, f_e — 等效抗弯强度, N/mm^2 ;

T_{150} — 弯曲韧度 ($\text{N}\cdot\text{mm}$), 对应挠度为 $L/150$ (即 3mm) 下荷载-挠度曲线包含的面积;

b — 试件截面平均宽度, mm;

d — 试件截面平均厚度, mm。

2.2 基于能量表征方式的结构纤维与钢筋网混凝土韧性测试

等效抗弯强度是在混凝土试件挠度为 3mm 下进行的计算, 但实际工程中隧道围岩条件较差情况下围岩变形有可能较大, 因此, 需要对大挠度条件下纤维喷射混凝土的韧性进行测试, 并与钢筋网混凝土进行对比, 以验证纤维喷射混凝土是否可以达到钢筋网的增韧效果。

试验按照 ASTM C1550-10 进行^[9], 试验装置见图 3。利用试验测得的荷载-挠度曲线即可通过积分计算荷载起始点和指定中心挠度 (5mm、10mm、



图 3 ASTM C1550-10 试验装置

20mm、40mm 等) 之间试件的能量吸收值。

2.3 试验方案

试验所用 C30 喷射混凝土配合比见表 1。水泥选用 P·O 42.5; 细骨料为天然河砂, 细度模数 2.9; 粗骨料最大粒径为 12mm; 减水剂为羧酸系减水剂; 速凝剂掺量为胶凝材料的 4%; 采用的 RL60 纤维材质为聚烯烃, 长度 60mm, 抗拉强度 640MPa, 弹性模量 10GPa; 钢筋网钢筋规格为 HPB235, 直径 6mm, 间距 200mm; 水胶比为 0.43。喷射工艺采用湿喷。

表 1 C30 喷射混凝土配合比

| 编号 | 水泥 | 细骨料 | 粗骨料 | 减水剂 | 速凝剂 | 水 | 纤维 |
|--------|-----|-----|-----|------|-------|-----|----|
| JZ | 442 | 884 | 884 | 4.42 | 17.68 | 190 | 0 |
| RL60@1 | 442 | 884 | 884 | 4.42 | 17.68 | 190 | 1 |
| RL60@3 | 442 | 884 | 884 | 4.42 | 17.68 | 190 | 3 |
| RL60@6 | 442 | 878 | 878 | 4.86 | 17.68 | 190 | 6 |

等效抗弯强度试验 (ASTM C1609/C1609M-10) 分 4 组, 分别为 JZ (基准, 不掺纤维或钢筋)、RL60@1 (RL60 掺量为 $1\text{kg}/\text{m}^3$)、RL60@3 (RL60 掺量为 $3\text{kg}/\text{m}^3$)、RL60@6 (RL60 掺量为 $6\text{kg}/\text{m}^3$), 每组 3 个试件, 结果取平均值。

弯曲韧性能量吸收试验 (ASTM C1550-10) 分 4

组, 分别为 JZ (基准, 不掺纤维或钢筋)、RL60@3 (RL60 掺量为 $3\text{kg}/\text{m}^3$)、RL60@6 (RL60 掺量为 $6\text{kg}/\text{m}^3$)、 $\emptyset 6@200$ (钢筋直径 6mm、间距 200mm、置于试件中心位置), 每组 3 个试件, 结果取平均值。

3 试验结果与讨论

3.1 等效抗弯强度

图4为等效抗弯强度试验结果,通过回归分析得出纤维掺量(V_f)与等效抗弯强度(f_e)之间的函数关系式为:

$$f_e = -0.033V_f^2 + 0.75V_f + 0.55 \quad (4)$$

经方差分析得出相关系数 $R^2=1$, 显著性水平 $P<0.0001$ 。由此可见,RL60纤维在 $1\sim 6\text{kg/m}^3$ 掺量范围内, V_f 与 f_e 很好地符合公式(4)的二次函数关系式,若纤维掺量已知,可以直接通过公式(4)求出纤维混凝土的等效抗弯强度。

通过公式(1)、(2)、(4)便可计算一定掺量下纤维可以取代的单位长度(1m)内钢筋面积,结果见表2,反之亦可。

表2 纤维掺量与配筋间的对应关系($h_0=30\text{mm}$)

| $V_f / (\text{kg/m}^3)$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| f_e / MPa | 1.267 | 1.918 | 2.503 | 3.022 | 3.475 | 3.862 |
| A_s / mm^2 | 101 | 153 | 200 | 241 | 277 | 308 |
| 对应配筋 | $2\times\phi 8$ | $3\times\phi 8$ | $4\times\phi 8$ | $8\times\phi 6$ | $9\times\phi 6$ | $6\times\phi 8$ |

3.2 基于能量表征方式的结构纤维与钢筋网混凝土韧性

素混凝土是脆性显著、韧性较差的结构材料,当混凝土受力超过自身抗力并产生裂缝时,裂缝迅速扩展并断裂(见图5中JZ曲线),混凝土破坏时变形较小,而“新奥法”隧洞初期支护需要支护与围岩同时变形、吸收变形能,喷射混凝土应具有较强的变形能力,这就需要通过配筋或掺纤维来实现,在隧洞环境下架设钢筋网存在诸多难点与弊端,而通过掺纤维替代钢筋网则可以克服这些问题,并且减少了工序、节省了造价。

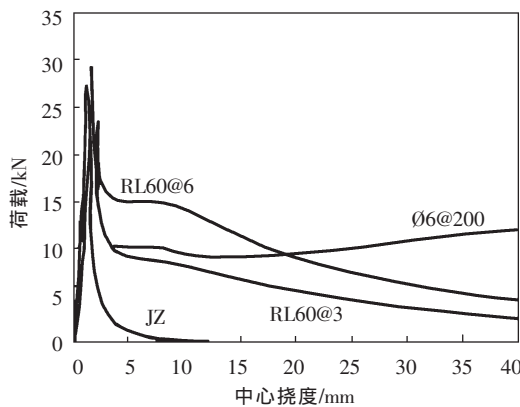


图5 各试的中心挠度-荷载曲线

表3为各试件峰值荷载及不同挠度范围内能量的吸收值。由表3可知,掺入 3kg/m^3 和 6kg/m^3 纤维后,峰值荷载分别比基准提高 22.9%和 14.0%,而钢筋网没有提高;RL60在 3kg/m^3 掺量下韧性值低于 $\phi 6@200$ 钢筋网,但掺入 6kg/m^3 纤维在 $0\sim 35\text{mm}$

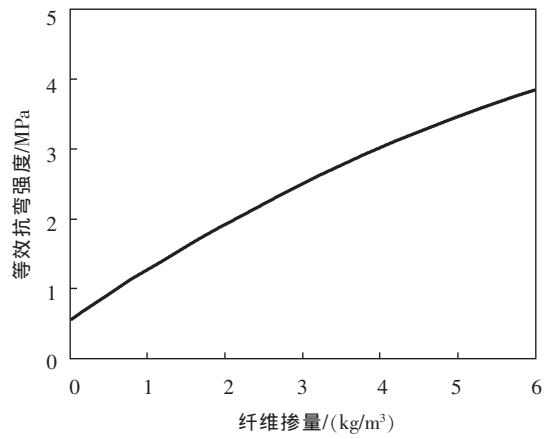


图4 纤维掺量与等效抗弯强度间的关系

挠度范围内能量吸收值均高于 $\phi 6@200$ 钢筋网(见图6),而且在 18mm 低挠度范围内,残余承载力均高于钢筋网(见图5)。

表3 各试件峰值荷载及不同挠度范围内能量吸收值

| 编号 | 不同挠度范围下能量吸收值/J | | | | 峰值荷载/kN |
|--------------|----------------|-------|-------|-------|---------|
| | 10mm | 20mm | 30mm | 40mm | |
| JZ | 34.1 | 34.8 | 34.8 | 34.8 | 23.6 |
| RL60@3 | 103.7 | 170.9 | 216.5 | 247.9 | 29.0 |
| $\phi 6@200$ | 110.5 | 202.2 | 302.4 | 415.9 | 22.9 |
| RL60@6 | 153.1 | 267.2 | 343.1 | 397.3 | 26.9 |

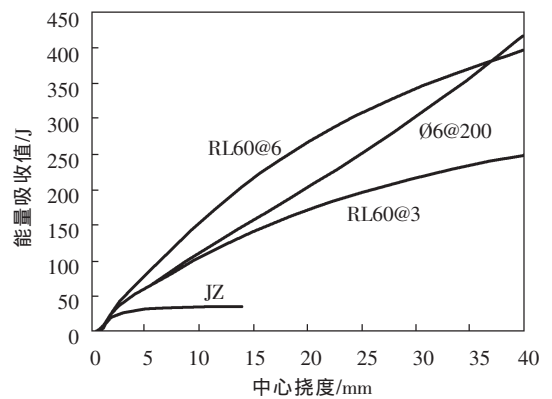


图6 各试的中心挠度-能量吸收值曲线

4 结论

(1)通过等效抗弯能力计算,可以得出在同一弯矩作用下分别所需的配筋率和纤维混凝土等效抗弯强度。

(2)经试验得出 RL60 纤维掺量(V_f)与等效抗弯强度(f_e)之间的函数关系式,并通过等效抗弯能

力计算得出 RL60 纤维各种掺量所对应的配筋率。

(3) 弯曲韧性能量吸收试验表明, 掺入 $3\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $6\text{kg}/\text{m}^3$ 纤维后, 峰值荷载分别比基准提高了 22.9% 和 14.0%, 而钢筋网没有提高; RL60 在 $3\text{kg}/\text{m}^3$ 掺量下韧性值低于 $\text{O}6@200$ 钢筋网, 但掺入 $6\text{kg}/\text{m}^3$ 纤维在 0~35mm 挠度范围内能量吸收值均高于 $\text{O}6@200$ 钢筋网, 而且在 18mm 低挠度范围内, 残余承载力均高于钢筋网。

(4) 抗弯承载力和大挠度韧性测试表明, RL60 纤维在一定掺量下可以替代钢筋网, 而且其极限抗弯承载力和低挠度残余抗弯承载力均高于钢筋网。

参考文献:

- [1] Einar Broch, etc. The inner lining system in Norwegian traffic tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2002, 17(3): 305-314.
- [2] O. Cengiz, L. Turanlı. Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(8):1357-1364.
- [3] Anders Ansell. Investigation of shrinkage cracking in shotcrete on tunnel drains [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(5): 607-613.

[4] R. Lackner, H.A. Mang. Cracking in shotcrete tunnel shells [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70(7-8):1047-1068.

[5] Ann Lamontagne, Michel Pigeon. The influence of polypropylene fibers and aggregate grading on the properties of dry-mix shotcrete[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(2):293-298.

[6] Vojkan Jovičić, etc. The application of fiber reinforced shotcrete as primary support for a tunnel in flysch[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(6): 723-730.

[7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国建设部. GB 50086—2001 锚杆喷射混凝土支护技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001.

[8] ASTM C1609/C1609M-10, standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)[S].

[9] ASTM C1550-10, standard test method for flexural toughness of fiber reinforced concrete (using centrally loaded round panel)[S].

收稿日期: 2013-12-29

作者简介: 赵正 (1986-), 男, 硕士研究生, 工程师。

通讯地址: 上海市杨浦区四平路 1398 号

联系电话: 15821351160

E-mail: aaron.zhao@royang.com

专业设计制造

市政、水利、公路、铁路水泥制品成型塑料模具

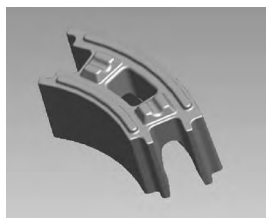
△市政配套系列: 井壁弧形模块、井壁矩形模块、雨水井、沟盖、窨井盖、水表盖、侧石、平石、植草砖、树围、工艺护栏等。

△水利配套系列: 生态连锁块、挡墙、空芯实芯六角护坡、渠道砌块、驳岸块等。

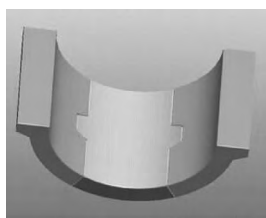
△高速公路配套系列: 路缘石、路肩、拱型骨架、人字型骨架、边沟板、蝶型边沟、踏步板、护坡等。

△高速铁路配套系列: 步行板、电缆槽、盖板、桥栏、路基护栏、拱型防护等。

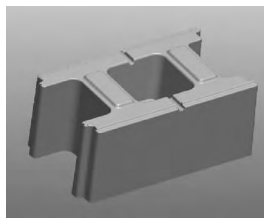
现已自行设计开发 1000 多种产品, 欢迎各新老客户垂询!



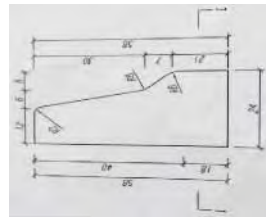
弧形模块



排水槽



挡墙矩形块



路缘石图纸

扬州国路塑业有限公司

地址: 江苏高邮经济开发区科技产业园内 电话: 0514-84623050

总经理: 王春新 手机: 13801449811