

合成纤维应用于隧道衬砌中的 可行性分析与计算

朱思成¹, JUHASZ Karoly Peter², 白云¹, RIDOUT Andrew³

(1: 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

(2: JKP Static, Budapest, Hungary)

(3: Elastoplastic Concrete, Sydney, Australia)

摘要: EPC (弹塑性混凝土) 公司开发了一系列新型合成纤维Barchip, 以其耐久性好, 更能抗火灾、绿色环保等优点使其成为钢筋良好的替代品。EPC 公司欲将合成纤维Barchip 应用于上海地铁隧道的建设中。本设计的目的在于用合成纤维Barchip 完全代替钢筋设计隧道衬砌。本文介绍了Barchip 加固混凝土的各项测试结果, 以及其在其他工程中的应用实例。本文以典型的上海工程地质条件为背景进行设计; 基于EPC 公司提供的真实梁受弯试验的数据; 参考相关规范计算相关模型参数, 模拟出合成纤维加固混凝土的材料模型。然后在ATENA 有限元软件中, 用地层结构法, 模拟出隧道衬砌的受力情况。结果显示, 隧道管片的抗拉抗压性能以及裂缝控制等均满足要求。Barchip 合成纤维可以应用于上海地铁隧道衬砌的建设。

关键词: 合成纤维; 材料模型; 数值模拟

The Analysis and Calculation of Synthetic Fibre's Application in Tunnel Lining

ZHU Sicheng¹, JUHASZ Karoly Peter², BAI YUN¹, RIDOUT Andrew³

(1: Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(2: JKP Static, Budapest, Hungary)

(3: Elastoplastic Concrete, Sydney, Australia)

Abstract: The Company EPC (elastoplastic concrete) has developed a series of new synthetic fibers: Barchip. It a good alternative to steel bars, because of its better durability, fire resistance and low carbon emission, etc.. EPC company desires that the synthetic Barchip can be applied in the subway tunnel construction in Shanghai. Therefore, this paper is intended to replace the steel bars with Barchip in tunnel lining. This article describes the various Barchip reinforced concrete test results, as well as synthetic fibers' other engineering application examples. The design in this paper is based on a typical Shanghai geological condition. According to the results of real beam test from EPC and design guide (RILEM TC 162-TDF), a model of Barchip reinforced concrete was built in the Software ATENA. The model of ground and the tunnel lining was simulated in the Software. The results showed that the tensile and compressive stress and crack control etc. meet the engineering requirements. Barchip synthetic fibers can be used in the construction of the Shanghai subway tunnel lining.

Key words: Synthetic fiber; material model; numerical modeling

1 引言

合成纤维被用来加固混凝土已有20年的历史。这种新兴的加固方法发展迅速，并且有着诸多应用，其中之一就是用来加固隧道管片。使用这一方法可以克服传统钢筋混凝土衬砌的诸多缺点。比如，由于地质地形条件复杂、以及气候条件潮湿等因素的影响，导致地下结构劣化、承载能力降低；安全性、适用性及耐久性大幅度降低；而且在正常的隧道施工过程中以及工程结束之后，会产生废弃钢材，造成大量的资源浪费^[1]。合成纤维的应用可以有效解决这些问题。与钢筋混凝土相比，其在优越性体现在，优异的耐高温和耐化学侵蚀性能；抗剥落，能减少火灾危害；同时，合成纤维比钢筋更安全，更轻；便与储存、运输与放置，与钢筋相比，降低了70%的碳足迹^[2]。本文旨在对合成纤维应用于隧道衬砌的可行性进行分析与计算。

2. 合成纤维混凝土

2.1 Barchip

合成纤维Barchip是一种聚丙烯烃。其化学式为 $-[CH_2 - CH(CH_3)]_n -$ 或 $-(CH_2 - CH)_n -$ 。所用纤维Barchip54，长度54mm，抗拉强度640MPa，杨氏模量为10GPa，每公斤纤维数为37,000根。在加固混凝土时，与混凝土共同搅拌散布其中。本文试验所采用的纤维掺量为每立方米8公斤^[2]。



图 1 Barchip 外观图

2.2 Barchip加固混凝土性质

针对合成纤维Barchip加固的混凝土的耐久性能、防火性能等，EPC公司进行了一系列的试验。

在抗酸性腐蚀试验中，BarChip加固混凝土在一年的暴露测试后保持了99.8%的承载能力；而钢纤维加固混凝土只有54%；在100年的加速模拟抗碱腐蚀试验中，Barcip加固混凝土抗拉强度与延展性均无显著降低，而PET塑料则降低明显；在耐火性能测试中，分别对三组混凝土试块进行火烧试验。结果显示，Barchip加固混凝土剥落高度为36mm，钢纤维加固混凝土为118mm，素混凝土为108mm；韧性反映了混凝土开裂后吸收能量的能力，Barchip加固混凝土在韧性测试中，比钢筋混凝土略低，但其韧性优于钢纤维混凝土^[3]。

另外，EPC公司还对Barchip加固混凝土进行了劈裂抗拉强度，剥离强度，氯离子扩散，渗透性和吸水率进行了测试，都符合相应的隧道建设标准。

3. 材料模型

本文的一个重点之一是确定纤维加固混凝土的模型参数。由EPC公司根据相关规范做真实梁受弯试验，处理试验数据，得到相应的荷载—位移曲线。然后在数值模拟软件ATENA中，重现该真实标准梁受弯试验，调整各个参数，从而使软件中得到的曲线，与试验中的曲线相一致或相似。由此，便完成了材料的模型建立；之后，用该材料模型来进行隧道管片的计算。

3.1 材料试验

该试验参照国际材料与结构研究实验联合会建议的《RILEM TC 162—TDF：钢纤维加固混凝土试验与设计方法》。

RILEM TC 162-TDF 本是针对于钢纤维加固混凝土所制定的设计与试验方法，但合成纤

维Barchip与钢纤维都是离散分布于混凝土介质当中，故而可以使用类似的试验方法以及计算公式和理论。

该试验是为了测试纤维加固混凝土的抗弯性能。试样通过一个简支的三点受弯梁来得到荷载-位移曲线，以及裂缝开口宽度与跨中位移的关系和应力和裂缝宽度间的关系。如图

该试验采用一个Barchip加固混凝土梁，纤维掺量为 $8\text{kg}/\text{m}^3$ 。标准试块的截面为 $150 \times 150\text{mm}$ ，长度为 550mm ，跨度 450mm 。在梁的底部跨中用锯子开一个小口。每个开口的宽度应为 $2\text{--}3\text{mm}$ ，深度应为 $25\text{mm} \pm 1\text{mm}$ 。加载系统中，由两个直径为 30mm 的圆柱体作为支座。可以自由转动，圆柱体需被安装在一个钢板上，钢板在试验中可以水平自由移动。^[4]



图2 梁受弯试验图

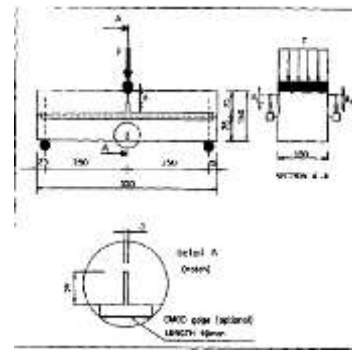


图3 标准梁试样尺寸图

3.2 模型模拟

上述试验共进行了5组，所得数据经处理，得到图4所示的荷载位移曲线图。之后根据试验所得数据参数，在ATENA软件中模拟上述梁受弯试验，并经过参数调整，得到与真实试验（平均值）类似的荷载位移曲线。如图5所示。

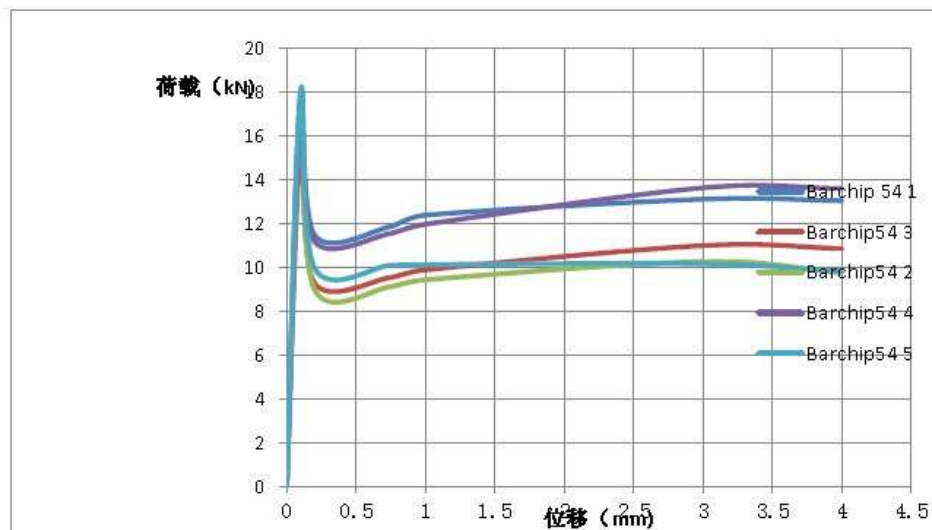


图4 荷载位移曲线

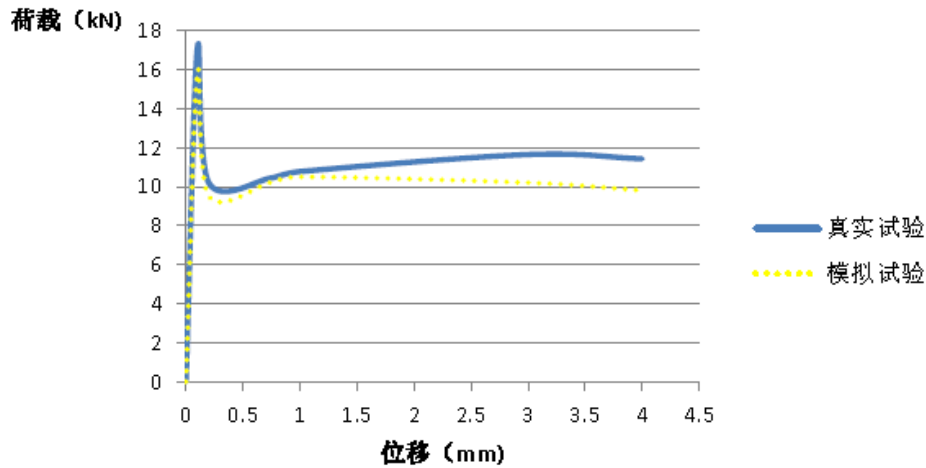


图 5 真实试验与模拟试验荷载位移对比图

由图5可得，用ATENA软件模拟所得的曲线与真实试验所得的荷载—位移曲线基本一致。在形状大致相同的情况下，最大荷载值，真实试验为17.076kN，而模拟试验略低，为15.79kN，且都发生在位移为0.1mm左右时；在第一条裂缝出现后，荷载值在下降后，都有一个明显的回升过程。而在真实试验中，回升值较大，且在1mm—4mm的范围保持缓慢上升的趋势，而真实试验则是下降的趋势。两者略有不同。可能的原因是，模拟试验的公式来自钢纤维加固混凝土设计规范；对于钢纤维加固的混凝土，虽然理论和受力状态与合成纤维类似，但有一定的区别。不过模拟试验的结果比真实试验略小，故而是偏安全的设计，是可以接受的。

4. 数值模拟

4.1 模型背景

本文采用典型的上海地层情况，埋深取15米，和20米两种工况。水位-1米，地面超载40kPa。衬砌为标准地铁隧道衬砌，外径6.2米，内径5.5米，衬砌厚度0.35。土层分布情况见表1。

隧道衬砌结构由ATENA软件中的用户自定义混凝土本构模型模拟，各个土层用Drucker-Prager模型模拟。

由于隧道模型也是对称结构，故取半结构进行计算，因是平面应变问题，故用二维平面设计，以达到节省计算时间的目的。埋深15米时取土体深度共26米，宽25米。

在顶部加宽为7米，40kN/m的荷载，分为10个加载步完成。

表 1 土层分布情况

土层名称	厚度 (m)	土容重 g (kN/m^3)	水土合算容重 g (kN/m^3)	c (kPa)	φ ($^\circ$)
人工填土	1	18.4	18.4	13	20
淤泥质粉质粘土	2	17.2	7.2	12	16
淤泥质粘土	3	16.8	6.8	14	12.5
粘土	5	17.3	7.3	16	14
粉质粘土	15	18.4	8.4	14	15

4.2 模拟结果

4.2.1 均质圆环法

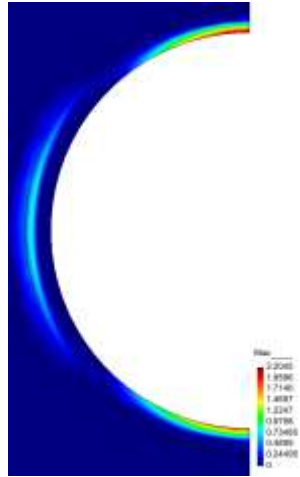


图 6 最大主应力

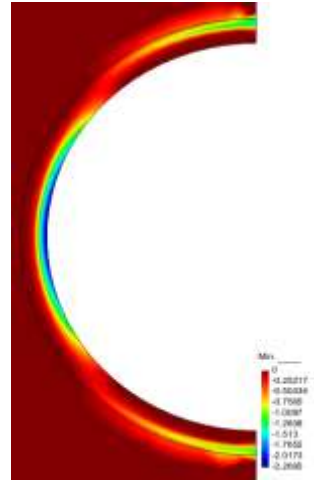


图 7 最小主应力

由上图可以看出，最大拉应力出现的位置为拱顶以及拱底的内侧约2.20MPa小于允许拉应力3.307MPa，侧面跨中拉应力约为0.73MPa。最大压应力出现在侧面90°处，约为2.27MPa，远小于混凝土的允许压应力。拉压应力分布与实际结果较为相近，且最大拉压应力均小于允许值。

另外，隧道跨中最大横向位移约1.2mm，顶部与底部约0.1mm；竖向位移隧道底部约6.8mm，顶部约10mm。横向位移符合要求，然而竖向位移较大，可能是与Drucker-Prager土模型有关，该模型较适合模拟岩石，模拟软土较少，因此在计算沉降方面可能与实际情况有所差距^[6]。结构并无裂缝产生。

4.2.2 不同埋深比较

由于埋深不同，对于隧道结构的受力也有着一定的影响。对于上海地铁隧道，埋深较深会达到20米左右，故取20米的隧道作比较分析。

模型与前所述基本相同，采用均质圆环法分析，不同之处在于埋深的变化。埋深20米时，土体模型深度为31米。

表 2 不同埋深模拟结果

埋深 (m)	最大拉应力 (MPa)	最大压应力 (MPa)	最大水平位移 (mm)	最大竖向位移 (mm)
15	2.2045	2.2696	2.48	10
20	1.87	1.86	0.6	8

由表2中结果可以看出，埋深为20米时，最大拉压应力反而比埋深为15米时更小。由于土拱效应，所以上部土体重量并未完全加在结构上。埋深20米时同样满足要求。

4.2.3 开裂后应力分析

由上述各种情况的对比分析研究可以看出，混凝土中均未出现裂缝。为了研究并验证纤维加

固混凝土的开裂后性质，有必要研究其开裂后的应力应变性质。这里采用逐步增加地面超载的方法来使其开裂。地面超载变为80kN/m，分为20个加载步，即每步4kN/m。模型仍用埋深为15米的模型，采用均质圆环法。

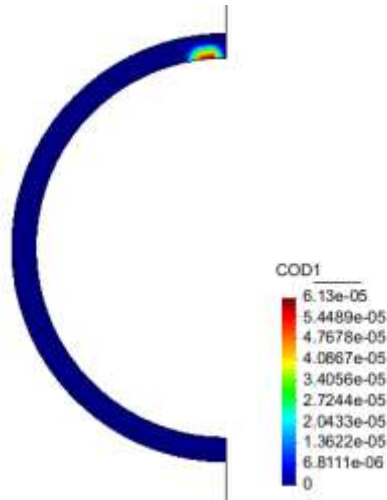


图 8 第 16 步裂缝图

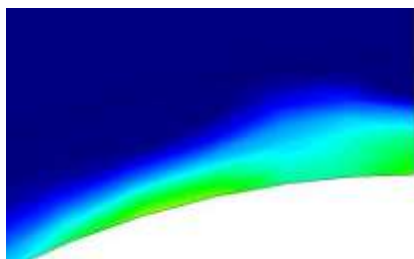


图 9 第 16 步最大主应力



图 10 第 16 步最小主应力

在加载至第16步，即64kN时，结构开始出现裂缝。位于顶端内侧，宽度约为0.0613mm。同时，顶部的最大主应力见图9在裂缝开展出，拉应力减小，且分部由原本的由内向外递增分布变为均匀分布；而底部拉应力达到最大，为2.789MPa。

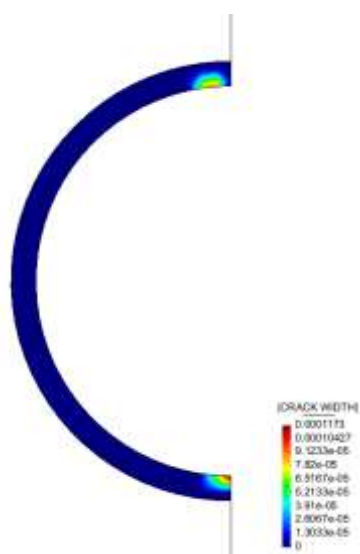


图 11 第 19 步裂缝图

当加载到第19步，即76kN/m时，最大裂缝达到0.1173mm，此时的顶部最大及最小主应力

分布见下图。

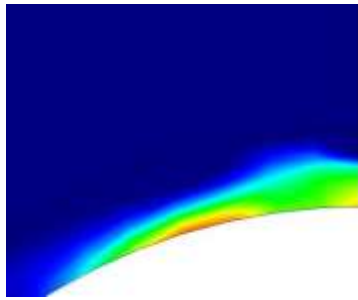


图 12 19 步顶部最大主应力

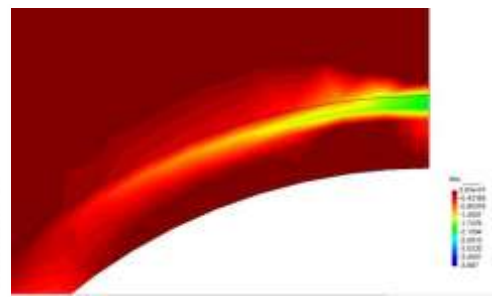


图 13 19 步顶部最小主应力

对比图12和图13可以清楚的看到，在裂缝开展区，由于纤维的作用，拉应力在高度范围内几乎呈均匀分布，（图12均布的绿色区域），而对应的压应力仍成一定的由内向外递增趋势。这与其理论上的应力分布基本一致（见图14）。而理论上，受拉区高度为 $0.66h$ ，数值模拟的结果也类似，在 $0.5-0.6h$ 之间^[5]。

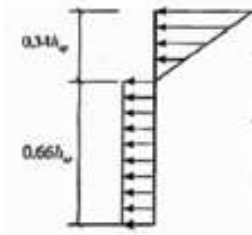


图 14 理论应力分布^[5]

对比第19步与第16步的结果，可以发现，当裂缝较大时，最大拉应力反而有所减小，第16步时，最大拉应力为 2.789MPa ，19步时降到 2.065MPa 。这是因为在加载过程中，拉应力不段加大，直到接近抗拉强度 3.307MPa 时，某处拉应力一直处于递增过程中。当达到最大拉应力开裂后，某点处的最大拉应力值将减小，因为截面上 $0.6h$ 高度的区域均处于受拉状态，分散了大部分的拉力。这便是纤维加固混凝土独有的特性^[7]。

这一点在加载到第20步时更为明显。跨中部分也出现了裂缝，同时跨中的最大压应力也从16步的 3.8MPa 急剧增大到 5.31MPa 。

5. 结论

本文介绍了合成纤维Barchip加固混凝土的各项测试性能。在数值模拟中，以典型的上海工程地质条件为背景，基于真实梁受弯试验的数据，参考相关规范计算相关材料模型参数；模拟出合成纤维Barchip加固混凝土的材料模型。然后在ATENA有限元软件中，模拟出隧道衬砌的受力情况。用三种不同的方式模拟管片接头，分析了埋深15米和20米两种工况，并以荷载结构法的手算结果为依据进行了比较，可以得出以下结论：

1. Barchip加固混凝土的各项性能优越，符合隧道衬砌所需要的防腐蚀，抗火、耐久性等要求。
2. Barchip加固的混凝土隧道衬砌在正常15米埋深时的最大拉应力，最大压应力以及裂缝宽度，位移等均满足设计要求。
3. 深埋隧道(20米时)因土拱效应的影响，衬砌中最大拉压应力与裂缝宽度均比15米时更小，因此，Barchip加固的隧道衬砌在正常使用阶段静力学特性均满足要求。
4. 隧道衬砌内的应力状态呈弹塑性分布，数值模拟所得结果与理论应力分布非常相近，很好的反应了纤维加固混凝土开裂后的性能。

因此，对于上海的地质条件来说，纤维增强混凝土在一定程度上基本满足要求，可以用在上海地铁隧道衬砌中。进一步详细的论证还留待以后进行。

参考文献(References):

- [1]陈润锋,张国防,顾国芳.我国合成纤维混凝土研究与应用现状[J]. 建筑材料学报,2001,02:167-173.
- [2] EPC Company. Product Sheets Barchip54. EPC Website www.elastoplastic.com
- [3] EPC Company. Barchip Testing Report. EPC Website www.elastoplastic.com
- [4]RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fiber reinforced concrete, Materials and Structures.Vol.33,January-February 2000
- [5]RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fiber reinforced concrete, $\sigma - \epsilon$ design method,Final Recommendation. Materials and Structures,Vol.36,October 2003
- [6]刘金龙,栾茂田,许成顺,王吉利,袁凡凡. Drucker-Prager 准则参数特性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006,S2:4009-4015.
- [7]Nicola Buratti, Claudio Mazzotti, Marco Savoia. Post-cracking behaviour of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes. Construction and Building Materials, Volume 25, Issue 5, May 2011

作者简介:



朱思成，男，1990年7月生。于2013年6月毕业于同济大学土木工程学院地下建筑与工程专业，获学士学位。

Email: sczhu1990@hotmail.com

Sicheng Zhu, male, birthday: July.1990. Graduated from Department of Geotechnical Engineering ,College of Civil Engineering ,Tongji University. Bachelor Degree.