盾构管片横向大变形 TRC 控制方法及作用机制研究

刘德军[1]，黄宏伟[2, 3]，左建平[1]，薛亚东[2, 3]，李英杰[1]

(1. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院，北京　100088；
2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室，上海　200092；3. 同济大学 地下建筑与工程系，上海　200092)

摘要：为有效控制盾构管片的横向变形，分析盾构隧道的加固特点和常用内表面加固方法存在的不足，提出纤维编织网增强混凝土(textile-reinforced concrete，TRC)控制方法。建立 TRC 加固层及界面模拟方法，并利用试验结果验证该方法的合理性，进一步采用数值手段研究隧道横向变形和顶拱接头张开量在不同地层刚度系数、加固时机、纤维编织网用量和加固层布置范围下的响应规律。在此基础上，结合管片的变形和内力规律，揭示 TRC 控制管片横向变形的作用机制。研究表明：TRC 能有效控制隧道横向变形和顶拱接头张开量，地层刚度系数越小，控制效果越优异；加固前隧道已有变形会造成纤维编织网产生损失应变，已有变形越小，损失应变越小，控制效果越好；纤维编织网用量提高，控制效果增强，但纤维编织网利用率降低，因此增强趋势减弱；TRC 加固层合理布置范围建议在顶拱反弯点间的受拉部位，在该范围内，加固层越长，控制效果越好。研究结果丰富了管片内表面加固方法，深化了内表面加固机制的认识，可为工程实践提供理论指导和技术支持。

关键词：隧道工程；纤维编织网增强混凝土；数值分析；接头张开；横向变形；加固机制

中图分类号：U 457　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000－6915(2017)08－1889－10

Control method and mechanism of large transverse deformation of shield segment using TRC

LIU Dejun[1]，HUANG Hongwei[2, 3]，ZUO Jianping[1]，XUE Yadong[2, 3]，LI Yingjie[1]

(1. *School of Mechanics and Civil Engineering*，*China University of Mining and Technology*，*Beijing* 100088，*China*；2. *Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education*，*Tongji University*，*Shanghai* 200092，*China*；3. *Department of Geotechnical Engineering*，*Tongji University*，*Shanghai* 200092，*China*)

Abstract：The strengthening characteristics and the shortcoming of the strengthening methods commonly used at the inner interface of the shield tunnel were analyzed and the textile reinforced concrete(TRC) was proposed to control the transverse deformation. The method of simulating the strengthened layer and interface was presented and validated by experiment. The responses of lateral deformation and joint opening at the top arch were analyzed with numerical analysis in terms of the stiffness coefficient of the formation，the timing of the strengthening construction，the amount of the textile and the arrangement of the reinforcement layer. The mechanism of TRC in controlling the transverse deformation of shield tunnel was revealed based on the analysis of deformation and internal force of the segment. The results of the research indicate that TRC can effectively restrict the horizontal

收稿日期：2017－03－02；**修回日期：**2017－04－16

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51508584，51622404)；中央高校基本科研业务费(2017QL02)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51508584 and 51622404) and Fundamental Research Funds for the Central Universities(Grant No. 2017QL02)

作者简介：刘德军(1985－)，男，2014 年于同济大学隧道及地下工程专业获博士学位，现任讲师，主要从事地下工程方面的教学与研究工作。E-mail：ldj@cumtb.edu.cn

DOI：10.13722/j.cnki.jrme.2017.0190

convergence and joint opening. The reinforcement effect is better if the stiffness of ground layers are lower. The increasing in textile layers enhanced the control effect，however，the efficiency of fiber utilization was decreased. The reasonable layout of the strengthening layer was proposed to be set in the tension section of the arch between the inflection points. The longer the strengthening layer，the better the controlling effect.

Key words：tunnel engineering；textile-reinforced concrete；numerical analysis；joint opening；transverse deformation；strengthening mechanism

1　引　言

作为重大地下工程的城市轨道交通地下结构，随着运营时间的增加、周边环境的变化以及结构自身特点的影响，盾构隧道逐渐产生纵向不均匀沉降和横向变形，由此造成渗漏水、管片裂缝和接头张开等病害。这些病害使得结构性能劣化，影响隧道的整体稳定性，严重的情况可能造成城市交通系统的瘫痪[1]。因此有效控制管片的病害，保证隧道健康服役成为运营维护的首要任务。

对隧道横向变形及相关病害的控制治理，国内外开展了系列的研究。何 川等[2]通过相似试验，探讨了内贴 FRP 加固衬砌的效果；罗立娜[3]开展了碳纤维补强衬砌计算方法的研究；周大举[4]从概率理论出发探讨了碳纤维补强衬砌的可靠度；杨成忠等[5]得出了碳纤维布能有效控制衬砌裂缝扩展的结论；杨 勇[6]介绍了地铁隧道管片纤维布和钢环联合加固的方法；柳 献等[7]开展了内张钢圈加固盾构隧道结构的试验，探讨了钢环加固后隧道结构的极限承载性能；张冬梅等[8]采用数值手段探讨了隧道横向变形的侧向注浆加固效果和加固机制。研究现状表明，盾构隧道横向变形控制方法的选择仍比较局限，需要进一步丰富，同时内表面控制方法的作用机制也需要进一步的探讨。

在分析常用内表面控制方法存在不足的基础上，结合盾构隧道的加固特点，提出了盾构管片横向变形的纤维编织网增强混凝土(textile-reinforced concrete，TRC)控制方法。与试验进行验证分析，建立了 TRC 加固管片的合理数值模型，研究了管片横向收敛和顶拱接头张开量在不同加固参数下的响应规律；结合管片的变形和内力分布规律，揭示了 TRC 控制管片横向变形的作用机制。

2　盾构隧道加固特点

在隧道加固上，国际隧道协会指出，隧道加固总体要求为[9]：有效、经济和足够的耐久性。在选择加固材料和加固技术的过程中，需要考虑加固材料的强度、耐久性和病害的周围环境；需要考虑地下水、隧道内温度、通风和废气等因素对加固技术的影响。除此之外，还需考虑材料的透气性、收缩性、热膨胀系数、耐腐蚀性、适用性以及经济性能。

在当代社会，除了满足上述基本要求之外，快速便捷成为了隧道管片加固修复方法的新特点。以上海地铁为例，晚上 11～12 点停运，凌晨 3 点左右清场，轨道车试运营，5 点左右正式运营，因此可利用的加固时间大约为 3 h。在这短暂的 3 h 内，不仅需要完成加固施工，而且要求加固层开始发挥作用。

因此，盾构管片加固应根据可靠性鉴定结果和结构功能降低的原因，结合结构布置特点、主体结构传力特征、新功能要求和周围环境等因素，从安全、适用、经济角度出发，具有以下的综合特点：(1) 静力加固时必须考虑二次受力要求；(2) 必须考虑施工的便捷性和质量易于保证；(3) 必须综合考虑加固效果和经济指标；(4) 快速便捷，能迅速起到加固作用。

3　管片典型变形模式及内表面处置方法

3.1　盾构管片横断面典型变形模式

作用在盾构隧道上的荷载通常包含竖向与水平土压力、水压力、管片自重、超载重、地基反力以及变形引起的弹性抗力等。随着这些荷载的不同，横断面变形呈现以下 2 种模式(见图 1)：(1) 竖向直径为压缩变形，水平直径为拉伸变形，隧道整体变形类似于“横鸭蛋”状；(2) 竖向直径为拉伸变形，水平直径为压缩变形，隧道整体变形类似于“竖鸭蛋”状。隧道变形除覆土较浅[10]、基坑开挖的下卧隧道[11]、挤压法施工阶段[12]等少数工况下呈现“竖鸭蛋”状，一般以“横鸭蛋”状为主。当隧道 “横鸭蛋”变形过大时，会带来顶拱内侧接头张开量过大、封顶块裂缝，侧向内侧管片接头挤压而造成的防水失效等病害。为此，本文主要针对“横鸭蛋”

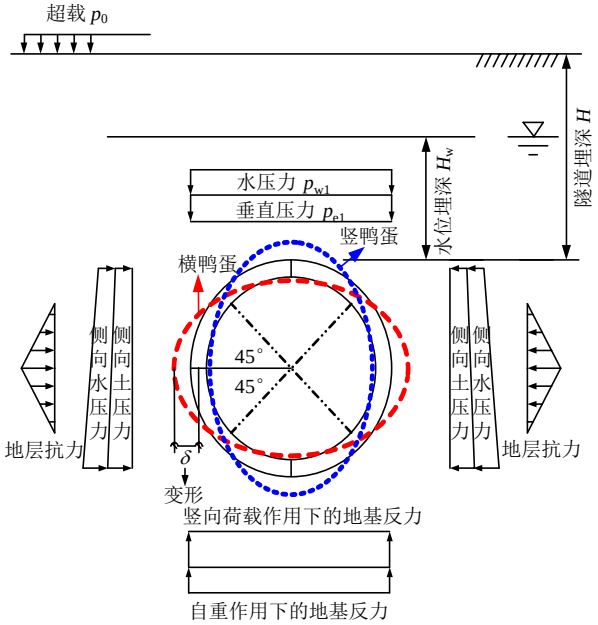


图 1　盾构管片横断面受力及变形模式

Fig.1　The load at and the deformation model of the cross section of shield tunnel

变形模式，探讨 TRC 控制方法的作用效果及机制。

3.2　横向变形内表面处置方法

针对隧道的“横鸭蛋”大变形，目前常用治理方法有地层侧向注浆和管片内表面控制两类方法。常用的内表面控制方法主要有以下 2 类：

(1) 黏贴 FRP 布法

黏贴 FRP 布法由于具有较强的耐腐蚀性能、高强度、施工便捷、基本不增加构件的自重和尺寸等优点，成为了盾构隧道内表面加固最受推荐的一种方法，见图 2。

图 2　黏贴 FRP 布加固盾构隧道

Fig.2　Shield tunnel strengthened by bonding FRP

对于黏贴 FRP 布法，主要存在着以下弊端：耐高温、耐火性能极差(一般低于 60 ℃)；低温环境下施工过于困难；不适合于潮湿的混凝土表面，而渗漏水是盾构隧道最常见的一种病害；界面不协调，缺乏蒸汽渗透性；对破损表面需要附加的处理措施，如管片缺角、裂缝的预灌浆处理等；环境协调性较差；价格相对昂贵等。另外，现场应用的失败案例使得黏贴 FPR 法的界面可靠性一直饱受诟病，如 2009 年 12 月 22 日，上海轨道交通 1 号线由于隧道结构顶部碳纤维脱落造成陕西南路至人民广场区间突发供电触网跳闸故障，造成该区列车停驶，16 万人受困于地铁内、数百万人出行受阻，为建国以来城市轨道交通发生的最大事故。

(2) 黏钢法

另一种常用的内表面处置方法为黏钢法(见图 3)，是使用黏结剂把钢板黏贴于被加固构件的表面，使其与原有构件共同工作，实现加固目的方法。

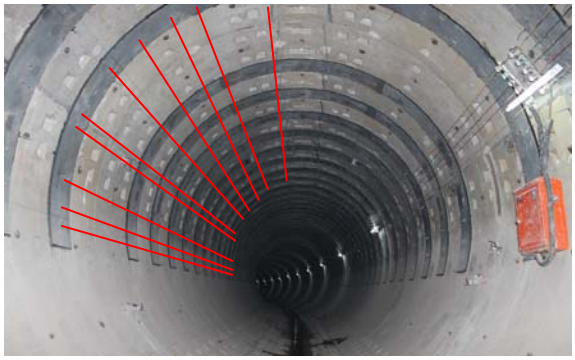


图 3　黏贴钢板加固盾构隧道

Fig.3　Shield tunnel strengthened by bonding steel plate

环氧树脂为黏钢法常用黏结剂，因此也存在由环氧树脂所带来的一系列缺点，如耐高温性能差、难以用于潮湿表面等。另外，黏钢法对施工场地的要求比较苛刻，增加了管片自重，对建筑限界影响明显。除此之外，在低频循环震动荷载作用下，黏钢法界面的可靠性一直存疑。因此，为保证钢板与管片协同作用，需要增设螺栓锚固措施，给管片造成严重损伤。如图 3 所示，沿隧道环向每环钢板打设 22 道、共 44 个锚固孔，严重破坏了管片的整体性。

4　盾构管片横向变形 TRC 控制方法

TRC 是一种采用高性能纤维编织网或网格作为加筋材料，采用水泥基基体材料作为黏结剂的新型加固方法(见图 4)。与黏贴 FRP 布法和黏钢法相比，TRC 具有如下优势[13]：(1) 与混凝土基底的协调性好，耐高温、耐火性能强；(2) 可以用于潮湿的环境；(3) 采用喷射法施工，施工便捷；(4) 基体

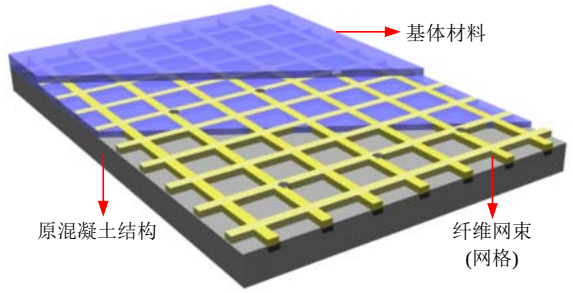


图 4　TRC 加固方法示意图

Fig.4　Demonstration of TRC strengthening method

材料流动性，自密实性和抗离析性强，可以很好地修补结构表面的缺陷和缝隙，限裂效果好；(5) 性价比较高。近年来，A. A. Yousef 等[14-17]在 TRC 加固方法上做了大量的研究工作，推动了其迅速发展，成为了混凝土结构加固的主流加固方法。但是有关 TRC 加固方法的研究主要集中在钢筋混凝土梁的抗弯和抗剪加固上，相关研究结果难以直接应用于盾构管片的加固。

根据所采用水泥类型的不同[13]，TRC 的基体材料主要有硅酸盐、铝酸盐及磷酸盐 3 种类型。但是，现有基体材料的早强性能欠佳，这并不能满足盾构隧道“快速便捷，能迅速起到加固作用”的加固特点。为此，根据 TRC 对基体材料的性能要求，作者所在团队开发了一种早强性能优异、黏结性能好、耐腐蚀、耐高温的基体材料，形成了早强性的纤维编织网增强混凝土加固方法[18]。试验表明该方法 2 h 内即可起到加固作用，可以满足盾构隧道加固要求。

5　TRC 加固管片数值研究

5.1　TRC 加固管片数值模型

本文以上海地铁隧道为研究背景，数值软件采用 ABAQUS 有限元商业软件，模拟方法采用荷载结构法。

(1) 管片尺寸

上海地铁典型管片结构如图 5 所示，由 1 块封底块 D，2 块标准块 B，2 块邻接块 L，1 块封顶块 F 组成。各块之间采用 2 根高强螺栓连接，构成管片纵缝接头。不考虑纵向不均匀变形对隧道横断面变形的影响，将模型简化为平面问题，因此计算中仅取一环管片展开研究。隧道内径 5.5 m，环宽 1.2 m，管片厚度 350 mm。

(2) 材料模型

管片假设成由均匀各项同性的混凝土材料组成，本构关系采用在 Saenz 混凝土本构模型基础上简化而成的三折线模型[19]，如图 6 所示的 *OBCD′*。管片混凝土模型参数见表 1。

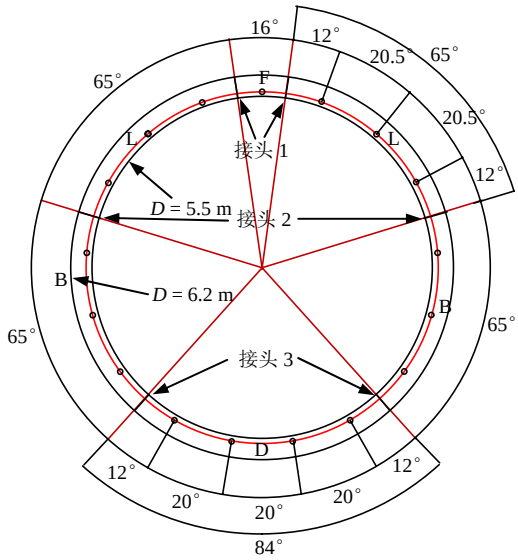


图 5　上海地铁隧道典型管片结构

Fig.5　Typical segment structure of Shanghai metro tunnel

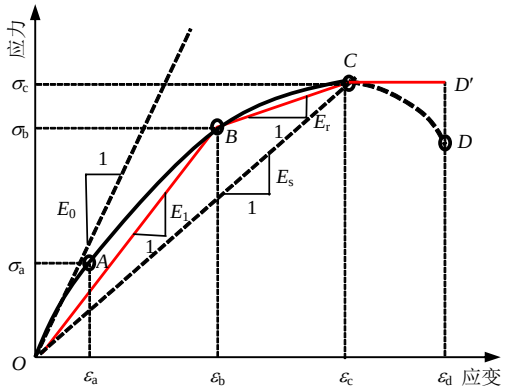


图 6　管片混凝土应力－应变曲线

Fig.6　Stress-strain curves of segment concrete

表 1　管片混凝土模型参数

Table 1　Model parameters of segment concrete

混凝土等级	ρ/(g • cm^{-3})	E_1/MPa	E_r/MPa	σ_b/MPa	泊松比
C55	2.5	35495	592	25.3	0.167

螺栓采用 8.8 级螺栓，螺栓外径 30 mm，长度 400 mm。由于盾构隧道中采用的高强螺栓属于硬钢，应力－应变关系表现为无明显流幅，故采用采用双折线弹塑性模型，见图 7。

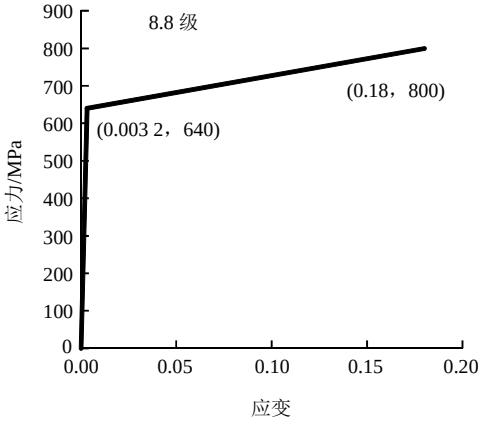


图 7　螺栓应力－应变关系曲线

Fig.7　Stress-strain curve of bolt

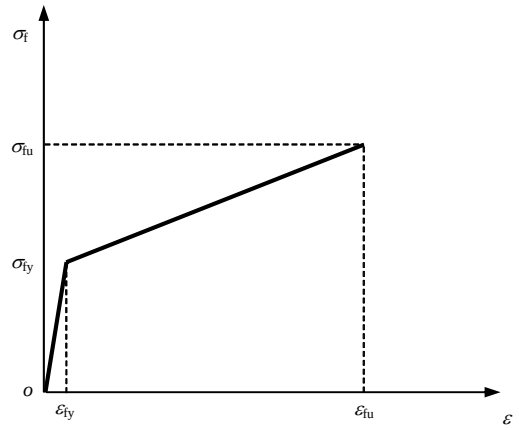


图 8　纤维编织网双线性本构模型

Fig.8　Bilinear constitutive model of textile

(3) 载荷、接触及边界条件

为了合理模拟隧道横断面变形过程中地层抗力对隧道变形的影响，全周设置地层非线性弹簧，法向刚度 K_n 取 1 250，2 500 和 5 000 kPa/m 三种工况，切向刚度 K_s 取法向刚度的 1/3。计算埋深 H 为 0～60 m。土体重度取 18.3 kN/m^3。

隧道由管片拼装而成，管片之间除螺栓外不存在拉力而存在摩擦力，因此 Abaqus 模型中定义管片之间为硬接触，接触方式为面面接触。管片间接触面摩擦因数设为 0.4[20]，该摩擦力和螺栓共同提供隧道接头的抗剪能力。

模型中隧道结构、荷载对称，顶部和底部限制水平位移，前后侧面限制纵向变形。

(4) 加固层及界面模拟方法

纤维编织网采用相互垂直的碳纤维束和无碱玻璃纤维束混编的二纬缝编织物，网格间距为 1 cm，单束纤维束面积为 0.45 mm^2，其力学特征参数见表 2。纬向碳纤维束沿管片环向布置。

根据单轴拉伸试验[21]，纤维编织网采用双折线本构关系，见图 8。图 8 中：σ_f 为纤维束拉应力，ε_{fu} 为纤维束的极限拉应变，σ_{fu} 为纤维束的极限抗拉强度，ε_{fy} 为纤维束单独承载时的应变。ε_{fu} = 0.017，σ_{fu} = 4 100 MPa；对于单层网：ε_{fy} = 0.035%，σ_{fy} = 1 650 MPa；对于多层网：ε_{fy} = 0.040%，σ_{fy} = 1 350 MPa。

表 2　纤维束的力学特征参数

Table 2　Mechanical parameters of fiber yarns

结构	纤维类型	纤维规格	单丝抗拉强度/MPa	单丝弹性模量/GPa	单丝断裂伸长/%	克重/(g • m^{-2})
90°	T700SC	12K	4 900	230	2.0	80±3%
0°	E-glass	1500TEX	1 900	80	4.5	150±3%
搭接	Polyester	5.5	–	–	–	5±3%

对于加固层与管片间的界面关系，引入面面绑定－分离接触关系，在压缩荷载作用下，该接触关系与普通摩擦接触一样，在拉应力与剪切应力作用下，根据破坏准则允许界面发生分离。界面破坏准则为

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{NFS}\right)^2+\left(\frac{|\sigma_t|}{SFS}\right)^2 \geqslant 1 \tag{1}$$

式中：σ_n 为界面法向应力；σ_t 为界面切向应力；NFS，SFS 分别为法向和切向破坏应力。由下式[22-23]确定：

$$SFS = 0.62\sqrt{\min(f_c,\ f_m)} \tag{2}$$

$$NFS = \frac{SFS}{3.1} \tag{3}$$

式中：f_c 和 f_m 分别为混凝土和基体材料的抗压强度，分别为 55 和 71.6 MPa[21]。

纤维编织网与基体材料分别采用 Truss 单元和 C3D8R 单元进行模拟，不考虑纤维编织网的滑移作用，二者之间共用节点单元。为简化计算，忽略基体材料的抗拉作用，基体材料采用与被加固混凝土相同的本构关系。

刘德军[21]将衬砌简化为偏压短柱，开展了 TRC 加固隧道衬砌的试验研究。采用文中的试验结果，验证上述建立的加固层及界面模拟方法，验证结果见图 9。结果表明，数值模拟曲线与试验曲线基本吻合，表明上述加固层及界面的模拟方法可行。

(5) 数值模型

混凝土管片采用 C3D8R 单元进行模拟，螺栓用实体单元进行精细模拟。整个模型共剖分 108 074 个单元，见图 10。收敛性分析表明，单元尺寸的进一步细化对数值结果基本无影响，但计算时间会大幅增加。

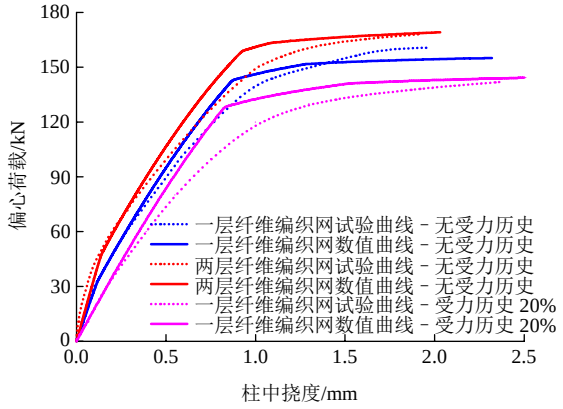


图 9　数值模拟与试验曲线对比

Fig.9　Comparison between numerical and experimental curves

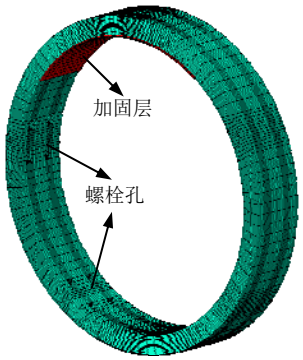


图 10　数值模型

Fig.10　Meshes of domain for numerical analysis

5.2　数值模拟结果分析

(1) 地层刚度系数对加固效果影响分析

图 11，12 分别为纤维编织网 3 层、加固范围 90°，不同地层刚度参数下的封顶块接头张开量、横向直径变形与埋深间的关系曲线。分析结果表明，处于不同地层刚度的盾构隧道经 TRC 加固后，接头张开量和横向直径变形均有效降低，但接头张开量降低幅度更明显。具体而言，埋深为 60 m 的盾构

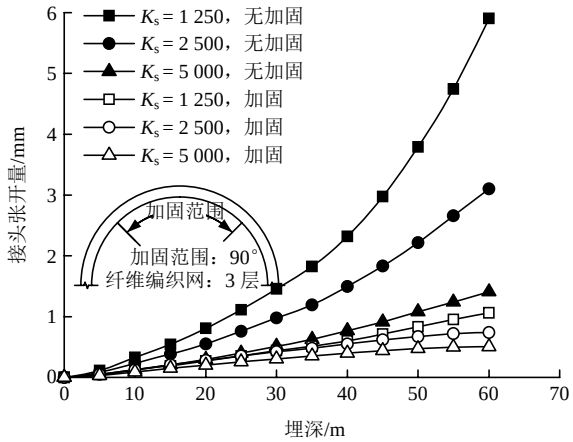


图 11　不同地层刚度参数下的接头张开量

Fig.11　Joint opening under different stiffness coefficients

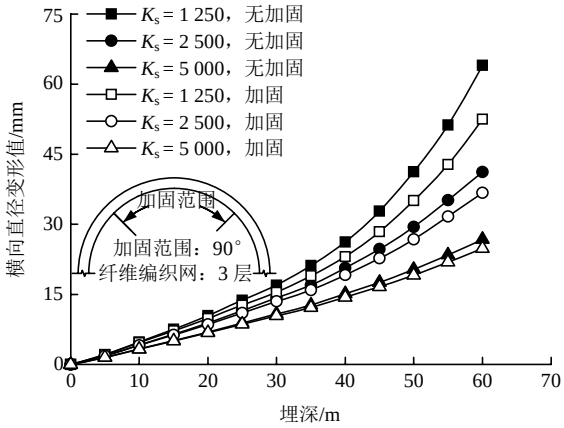


图 12　不同地层刚度参数下的横向直径变形

Fig.12　Transverse deformation under different stiffness coefficients

隧道，地层刚度系数分别为 1 250，2 500 和 5 000 kPa/m 的地层，经加固后，接头张开量降低幅值分别为 82%，76.3%和 64%，横向直径变形减小幅值分别为 18%，10.8%和 7.2%。结果表明，地层刚度系数越小，加固效果越明显。

(2) 加固范围对加固效果影响分析

图 13，14 分别为纤维编织网 3 层、地层刚度系数 2 500 kPa/m，不同加固范围下的顶拱接头张开量、横向直径变形与埋深间的关系曲线。当加固范围为 45°时，张开量和横向直径变形明显减小，当加固范围扩大至 90°时，加固效果有所提高，但是提高幅值不明显。当加固范围进一步扩大至 135°，接头张开量－埋深、横向直径变形－埋深曲线和 90°范围加固的基本重合，加固效果不再提高。

(3) 已有变形对加固效果影响分析

当隧道产生“横鸭蛋”变形之后，研究加固前横向直径已有变形量对加固效果的影响规律，结果见图 15，16。当地层刚度系数为 1 250 kPa/m，在 3 层纤维编织网加固下，对无变形、变形 0.15%D 和变形 0.30%D 的盾构隧道，接头张开量降低比率分别为 82%，64%和 48%，而横向直径变形降低比率分别为 18%，11.7%和 6%。这表明，已有变形对加固效果存在明显的负面影响，已有变形越大，加固效率越低。

(4) 纤维编织网用量对加固效果影响分析

图 17，18 为地层刚度 1 250 kPa/m、加固范围 90°、不同层数纤维编织网下的接头张开量、横向直径变形－埋深关系曲线。分析结果表明，埋深为 60 m 的盾构隧道，地处地层刚度系数为 1 250 kPa/m 的地层中，一、二和三层的纤维编织加固下，接头

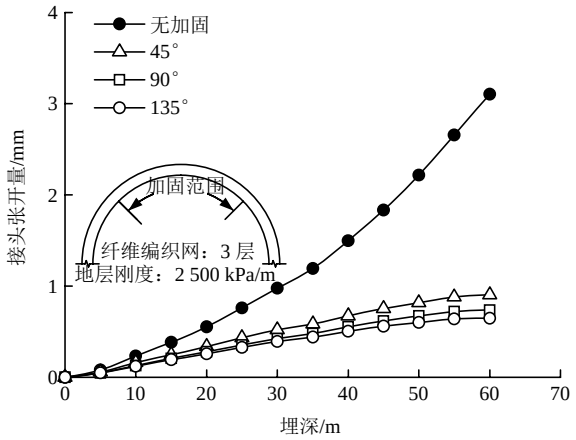


图 13　不同加固范围下的接头张开量

Fig.13　Joint opening under different strengthened ranges

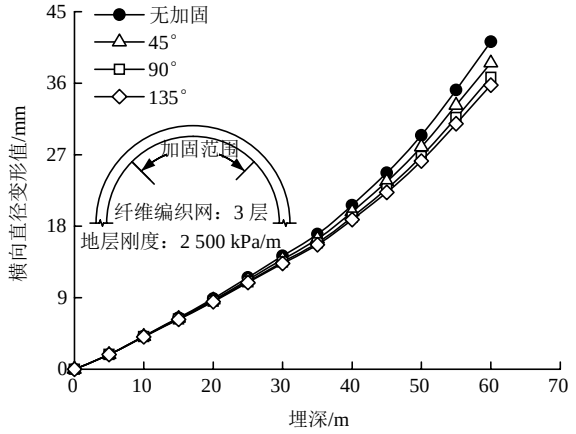


图 14　不同加固范围下的横向直径变形

Fig.14　Transverse deformation under different strengthened ranges

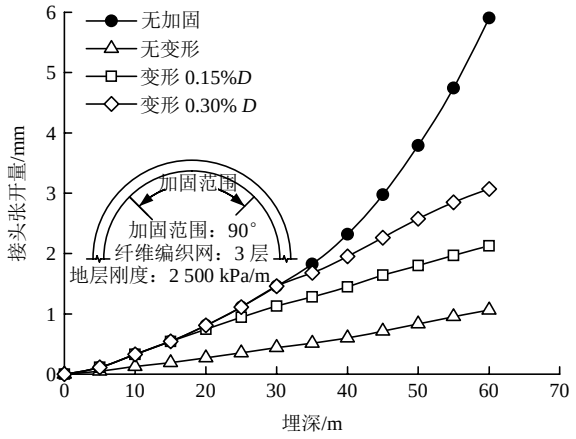


图 15　不同已有变形的接头张开量

Fig.15　Joint opening under different preload ratios

张开量降低比率分别为 54%，72.1%和 82%；横向直径变形降低比率分别为 8.2%，13.2%和 18%。结果表明，随着纤维编织网层数的提高，加固效果增强，但是增强幅值逐渐降低的。

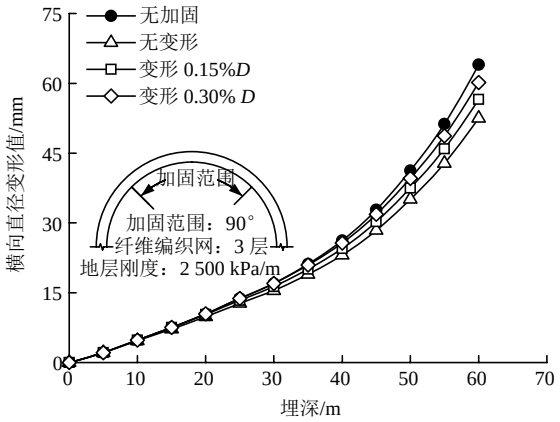


图 16　不同已有变形的横向直径变形

Fig.16　Transverse deformation under different preload ratios

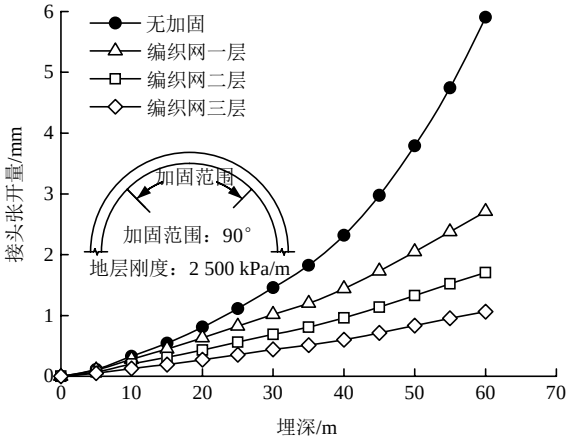


图 17　不同层数纤维编织网的接头张开量

Fig.17　Joint opening under different textile layers

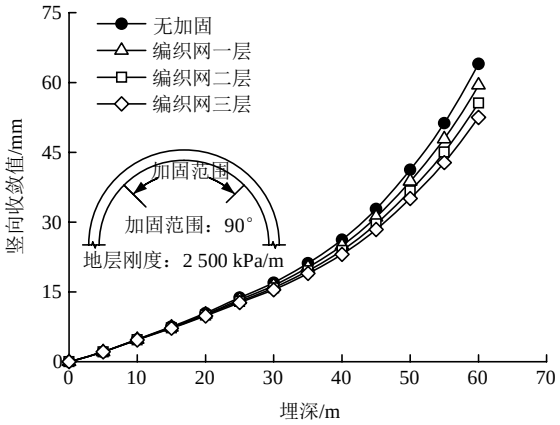
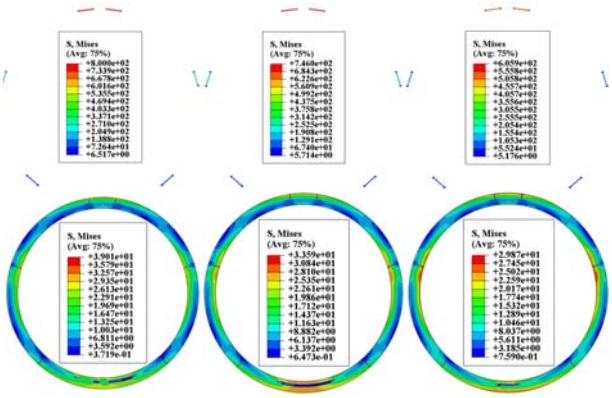


图 18　不同层数纤维编织网的横向直径变形

Fig.18　Transverse deformation under different textile layers

6　TRC 控制盾构横向变形机制

图 19 从左至右分别为埋深 60 m、刚度系数 1 250 kPa/m 的隧道在无加固、一层和两层纤维编织网加固下的管片螺栓和混凝土应力分布。结果表明，



(a) 无加固　　(b) 一层　　(c) 两层

图 19　不同加固层数下的螺栓、混凝土应力分布(单位：MPa)

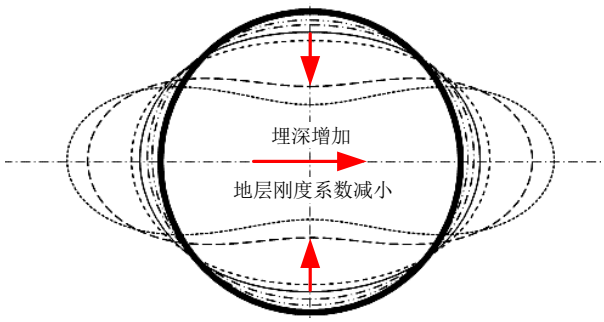
Fig.19　Stress distribution in bolt and concrete under different strengthening parameters(unit：MPa)

各工况最大螺栓应力均发生在封顶块接头处，无加固时螺栓最大应力为 800 MPa，已经进入屈服阶段，而在一层和二层纤维编织网加固下螺栓应力分别降至 746 和 651 MPa。另外，各工况最大混凝土应力均发生在邻接块和标准块接头处，对于无加固、一层和二层纤维编织网加固，最大混凝土应力分别为 39，33.6 和 29.9 MPa。螺栓和混凝土的应力分布均表明，在 TRC 加固下，管片结构受力相对更为均匀。

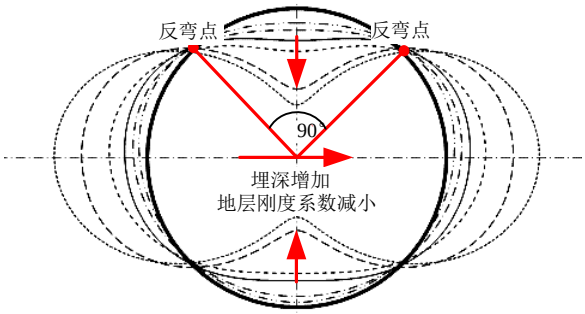
采用修正惯用法、图乘法分别求解不同埋深和地层刚度系数下的管片变形和弯矩见图 20。取隧道顶拱受拉微段进行受力分析见图 21。可知，在外荷载作用下，管片封顶块部位内表面受拉，因此在封顶块内表面喷射 TRC 加固层后，纤维编织网将和顶拱内侧受拉钢筋、螺栓共同承受拉应力，它们与顶拱外侧受压区混凝土及受压钢筋共同组成抵抗弯矩。

(1) 地层刚度系数对 TRC 控制盾构管片横向变形的影响机制

将施加 TRC 加固层后的管片看成整体，根据平截面假设[21]，由图 21 可知，纤维编织网应变与截面内力满足如下关系：



(a) 隧道变形图



(b) 隧道弯矩图

图 20　不同埋深、地层刚度系数下的隧道变形及弯矩趋势

Fig.20　The deformation and bending moment trend under different depths and stiffness coefficients

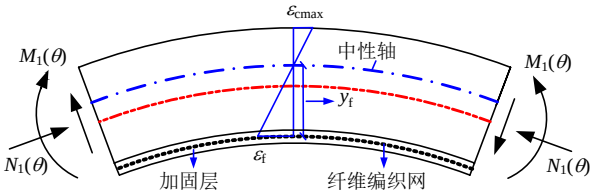


图 21　盾构隧道顶拱微段受力及截面应变分布

Fig.21　The demonstration of loading and strain distribution at top arch of shield tunnel

$$\varepsilon_f = \frac{M_1(\theta) y_f}{EI_z} - \frac{N_1(\theta)}{EA} \tag{4}$$

式中：ε_f 为纤维编织网应变；y_f 为纤维编织网至截面中性轴的距离；I_z 为横截面对中性轴 z 的惯性矩；E 为截面的弹性模量；A 为横截面面积；$M_1(\theta)$，$N_1(\theta)$ 分别为截面承受的弯矩和轴力。

内力分析结果表明，在相同外荷载作用下，随着地层刚度系数的降低，管片弯矩和轴力均增大，但弯矩增加幅值远高于轴力。因此，随着地层刚度系数的降低，纤维编织网应变增大，强度利用率提高，TRC 控制管片横向变形效果增强。

(2) 加固范围对 TRC 控制盾构管片横向变形的影响机制

管片内力分析结果表明，由封顶块中轴线向反弯点方向，弯矩逐渐减小，过反弯点后，内表面由受拉转为受压，见图 20(b)。由式(4)知，纤维编织网应力最大值位于封顶块中轴处，向两侧逐渐减小，表明沿顶拱中轴线向反弯点方向纤维编织网的利用率逐渐降低。由于纤维编织网的抗拉特性显著高于抗压特性，使得当加固层范围延伸到管片内表面受压部位时，加固效果基本不再提高。因此，TRC 加固盾构隧道的最大加固范围建议在顶拱反弯点间的受拉部位。另外，为充分发挥纤维编织网的高强抗拉特性，界面的黏结力应大于或等于纤维编织网所能承受的极限荷载，可推导得

$$Af_{\mathrm{f}} \leqslant \frac{\tau S}{2} \Rightarrow S \geqslant \frac{2Af_{\mathrm{f}}}{\tau} \Rightarrow \theta \geqslant \frac{Af_{\mathrm{f}}}{\pi R\tau} \times 360^{\circ} \tag{5}$$

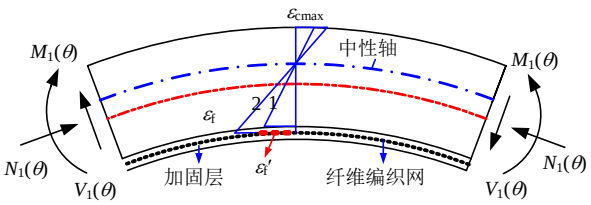
式中：A 为纤维编织网横截面积，f_{f} 为纤维编织网抗拉强度，τ 为界面抗剪强度，S 为界面面积，θ 为最小加固范围。

通常，盾构隧道反弯点位于隧道纵向对称轴两侧 45°处，顶拱反弯点受拉部分范围为 90°(见图 20(b))，因此加固层的合理加固范围建议为

$$\frac{Af_{\mathrm{f}}}{\pi R\tau} \times 360^{\circ} \leqslant \theta \leqslant 90^{\circ} \tag{6}$$

(3) 已有变形对 TRC 控制盾构管片横向变形的影响机制

已有变形作用下，封顶块横截面产生应变，见图 22 中的曲线 1。若保持隧道变形不变，施加 TRC 加固层，此时纤维编织网无应变，但一旦隧道变形继续增加，为保证加固层与隧道内表面间不发生离层，纤维编织网应变将由 0 激增至 $\varepsilon_{\mathrm{f}}'$(见图 22 中红色水平曲线，根据平截面假设，可由曲线 1 中的封顶块内表面受拉应变或外表面受压应变求出)。而应变 $\varepsilon_{\mathrm{f}}'$ 并不参与构成抵抗弯矩，为已有变形造成的纤维编织网损失应变。随着变形的继续发生，截面应变由曲线 1 变成曲线 2，纤维编织网应变为 ε_{f}，但这其中包括由已有变形作用造成的损失应变 $\varepsilon_{\mathrm{f}}'$，真正与受拉钢筋、受压区混凝土和受压钢筋构成抵抗弯矩的应变为 $\varepsilon_{\mathrm{f}} - \varepsilon_{\mathrm{f}}'$。已有变形越大，顶拱管片反弯点间的弯矩越大，管片内表面应变也越大，因此纤维编织网的损失应变越大，纤维编织网真正构成抵抗弯矩的应变越小。故，已有变形越大，TRC 控制管片横向变形的效果越差。



1—已有变形作用下的截面应变分布
2—施加 TRC 加固层的截面应变分布

图 22　已有变形下的盾构隧道顶拱微段受力及截面应变分布

Fig.22　The demonstration of loading and strain distribution at top arch of shield tunnel under existed tunnel deformation

(4) 纤维编织网用量对 TRC 控制盾构管片横向变形的影响机制

前期分析表明，TRC 可以有效控制隧道“横鸭蛋”变形。虽然随着纤维编织网层数的增加，参与构成抵抗弯矩的纤维编织网横截面增大，但是隧道变形降低，隧道顶拱部位的弯矩减小，纤维编织网的利用率降低。这也就是随着纤维编织网层数的提高，加固效果增强，但是增强幅值逐渐降低的本质原因。

7　结　论

为克服盾构横向大变形内表面常用控制方法存在的不足，提出 TRC 控制方法。建立了 TRC 加固管片的合理数值模型，研究了 TRC 控制隧道横向变形在不同加固参数下的响应规律和相应的作用机制，获得的主要结论如下：

(1) 采用 TRC 加固盾构隧道，可以有效地控制封顶块接头张开量和横向变形，其中抑制封顶块接头张开量的效果更为突出。

(2) 采用 TRC 控制隧道横向大变形的合理布置范围建议为顶拱反弯点间的受拉部位，并存在一最小布置长度。

(3) 采用 TRC 控制盾构隧道大变形，不同加固参数下的响应规律为：地层刚度系数越小，纤维编织网率利用率越高，控制效果越优异；已有变形越大，纤维编织网损失应变越大，控制效果越差；纤维编织网用量提高，控制效果增强，但纤维编织网利用率降低，增强趋势减弱；在合理 TRC 加固层布置范围内，加固层越长，控制效果越好。

参考文献(References)：

[1] 王如路. 上海轨道交通隧道结构安全性分析[J]. 地下工程与隧道，2011，(4)：37－44.(WANG Rulu. Structural safety analysis of Shanghai rail transit tunnel[J]. Underground Engineering and Tunnels，2011，(4)：37－44.(in Chinese))

[2] 何　川，唐志成，汪　波，等. 内表面补强对缺陷病害隧道结构承载力影响的模型试验研究[J]. 岩土力学，2009，30(2)：406－412.(HE Chuan，TANG Zhicheng，WANG Bo，et al. Research on effect of inner surface reinforcing on structure bearing capacity by model test in defective tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics，2009，30(2)：406－412.(in Chinese))

[3] 罗立娜. 碳纤维补强条件下公路隧道衬砌计算方法的研究[硕士学位论文][D]. 上海：同济大学，2006.(LUO Lina. Research on the calculation method of CFRP strengthened highway tunnel lining[M. S. Thesis][D]. Shanghai：Tongji University，2006.(in Chinese))

[4] 周大举. 基于可靠度理论的碳纤维加固公路隧道衬砌计算方法的研究[硕士学位论文][D]. 上海：同济大学，2008.(ZHOU Daju.

Calculation method of CFRP strengthened highway tunnel lining based on reliability theories[M. S. Thesis][D]. Shanghai：Tongji University，2008.(in Chinese))

[5] 杨成忠，黄 明，刘新荣，等. 碳纤维布用于深埋隧道衬砌裂缝的加固效果[J]. 解放军理工大学学报：自然科学版，2010，11(3)：322－327.(YANG Chengzhong，HUANG Ming，LIU Xinrong，et al. Effect of lining crack treatment using carbon fiber in deep buried tunnel[J]. Journal of PLA University of Science and Technology：Natural Science，2010，11(3)：322－327.(in Chinese))

[6] 杨 勇. 某运营地铁隧道管片钢环加固工法介绍[J]. 工程建设，2012，11(12)：41－43.(YANG Yong. Reinforcement method of segment steel ring for an operation metro tunnel[J]. Engineering Construction，2012，11(12)：41－43.(in Chinese))

[7] 柳 献，唐 敏，鲁 亮，等. 内张钢圈加固盾构隧道结构承载能力的试验研究－整环加固法[J]. 岩石力学与工程学报，2013，32(11)：2 300－2 306.(LIU Xian，TANG Min，LU Liang，et al. Experimental study of ultimate bearing capacity of shield tunnel reinforced by full-ring steel plate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2013，32(11)：2 300－2 306.(in Chinese))

[8] 张冬梅，刘梓圣，阎静雅. 软土盾构隧道横向大变形侧向注浆控制机制研究[J]. 岩土工程学报，2014，36(12)：2 203－2 212.(ZHANG Dongmei，LIU Zisheng，YAN Jingya. Effective control of large transverse deformation of shield tunnels using grouting in soft deposits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2014，36(12)：2 203－2 212.(in Chinese))

[9] Working Group No.6 Maintenance and Repair. International Tunneling Association. Study of methods for repair of tunnel linings[R]. Brown：International Tunneling Association，2001.

[10] 周 松，韩 磊，叶冠林，等. 浅覆大断面盾构隧道横截面受力变形特性研究[J]. 土木工程学报，2015，48(增 2)：284－287.(ZHOU Song，HAN lei，YE Guanlin，et al. Analysis on inner force and deformation characteristics of large shallow shield tunnel cross section[J]. China Civil Engineering Journal，2015，48(Supp.2)：284－287.(in Chinese))

[11] 黄宏伟，黄 栩，SCHWEIGER F H. 基坑开挖对下卧运营盾构隧道影响的数值模拟研究[J]. 土木工程学报，2012，45(3)：182－189.(HUANG Hongwei，HUANG Xu，SCHWEIGER F H. Numerical analysis of the influence of deep excavation on underneath existing road tunnel[J]. China Civil Engineering Journal，2012，45(3)：182－189.(in Chinese))

[12] 蒋洪胜，侯学渊. 软土地层中的圆形隧道载荷模式研究[J]. 岩石力学与工程学报，2003，22(4)：651－658.(JIANG Hongsheng，HOU Xueyuan. Study of the loading pattern on circular tunnel in soft ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2003，22(4)：651－658.(in Chinese))

[13] 尹世平. TRC 基本力学性能及其增强钢筋混凝土梁受弯性能研究[博士学位论文][D]. 大连：大连理工大学，2010.(YIN Shiping. Research on TRC mechanical behavior and flexural performance of concrete beam reinforced with TRC[Ph. D. Thesis][D]. Dalian：Dalian University of Technology，2010.(in Chinese))

[14] YOUSEF A A，HUSSEIN M E，SALEH H A，et al. Experimental and numerical study for the shear strengthening of RC beams using textile reinforced mortar[J]. Journal of Composites for Construction，2012，16(1)：74－90.

[15] BRUCKNER A，ORTLEPP R，CURBACH M. Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear[J]. Materials and Structures，2006，39(8)：741－748.

[16] LARBI A S，CONTAMINE R，FERRIER E，et al. Shear strengthening of RC beams with textile reinforced concrete(TRC) plate[J]. Construction and Building Materials，2010，24(10)：1 928－1 936.

[17] 徐世烺，尹世平. 纤维编织网联合钢筋增强混凝土梁受弯性能解析理论[J]. 中国科学：技术科学，2010，40(6)：619－629.(XU Shiliang，YIN Shiping. Analytical theory of flexural behavior of concrete beam reinforced with textile-combined steel[J]. Science China Technology，2010，40(6)：619－629.(in Chinese))

[18] 黄宏伟，刘德军，薛亚东，等. 基于快凝复合砂浆和纤维编织网的隧道早强快速加固方法[P]. 中国：ZL201310459411.2，2015－06－03.(HUANG Hongwei，LIU Dejun，XUE Yadong，et al. Early strength and fast strengthening method of tunnel based on fast setting composite mortar and textile[P]. China：ZL201310459411.2，2015－06－03.(in Chinese))

[19] 张厚美，张正林，王建华. 盾构隧道装配式管片接头三维有限元分析[J]. 上海交通大学学报，2003，37(4)：567－569.(ZHANG Houmei，ZHANG Zhenglin，WANG Jianhua. 3D FEM analysis on prefabricated segment joints of shield tunnel[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University，2003，37(4)：567－569.(in Chinese))

[20] 叶 飞，朱合华，丁文其. 考虑管片环间接头效应的盾构隧道抗浮计算与控制分析[J]. 中国公路学报，2008，21(3)：76－80.(YE Fei，ZHU Hehua，DING Wenqi. Calculation for anti-buoyangcy and control analysis of shield tunnel considering effect of joint of segment rings[J]. China Journal of Highway and Transport，2008，21(3)：76－80.(in Chinese))

[21] 刘德军. 隧道衬砌开裂机制及纤维编织网增强混凝土(TRC)加固方法研究[博士学位论文][D]. 上海：同济大学，2014.(LIU Dejun. Study on cracking mechanism of mountain tunnel lining and strengthened by textile-reinforced concrete[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai：Tongji University，2014.(in Chinese))

[22] ACI 318－11. Building code requirements for structural concrete and commentary[S]. Detroit，MI，USA：American Concrete Institute，2011.

[23] SILFWERBRAND J. Shear bond strength in repaired concrete structures[J]. Materials and Structures，2003，36(6)：419－424.