

文章编号:1671-1637(2015)02-0032-10

# 表层嵌入混合 FRP 筋的连续梁弯曲性能与影响因素

王兴国<sup>1</sup>, 朱坤佳<sup>1</sup>, 郑宇宙<sup>2</sup>, 郑丹丹<sup>1</sup>, 小室雅人<sup>3</sup>

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096;

3. 室兰工业大学 建设系统工学科, 北海道 室兰 0508585)

**摘要:**通过4根表层内嵌入不同FRP筋加固连续梁试件的静载试验,研究了试验梁的弯曲性能,借助通用有限元分析软件分析了影响试验梁承载力的混凝土强度、初始荷载、FRP筋弹性模量与配纤率等因素。分析结果表明:FRP筋与混凝土之间未发生剥离破坏,加固效果显著;与未加固梁相比,加固梁屈服荷载与极限荷载提高幅度分别可达31%、56%;随着混凝土强度、FRP筋弹性模量与含纤率的提高,加固梁屈服荷载与极限荷载提高幅度分别可达38%、17%;随着初始荷载的增大,加固梁屈服荷载与极限荷载降低幅度分别可达6%和24%;试验梁屈服荷载模拟值与试验值的平均比值为0.969,极限荷载模拟值与试验值的平均比值为0.962,钢筋屈服时跨中挠度模拟值与试验值的平均比值为1.104,梁破坏时跨中挠度模拟值与试验值的平均比值为1.024,荷载-挠度模拟曲线与试验曲线走势基本一致,这说明有限元分析结果与试验结果吻合较好,有限元法可以较好地模拟试验梁的力学性能。

**关键词:**桥梁工程;混凝土连续梁;内嵌加固;混合FRP筋;承载力;有限元法

**中图分类号:**U445.72

**文献标志码:**A

## Flexural properties and influence factors of continuous RC beam strengthened with near-surface mounted mixing FRP tendons

WANG Xing-guo<sup>1</sup>, ZHU Kun-jia<sup>1</sup>, ZHENG Yu-zhou<sup>2</sup>, ZHENG Dan-dan<sup>1</sup>, KOMURO M<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China; 2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 3. Department of Civil Engineering and Architecture, Muroran Institute of Technology, Muroran 0508585, Hokkaido, Japan)

**Abstract:** The flexural properties of four continuous reinforced concrete(RC) beams strengthened with near-surface mounted(NSM) mixing fiber reinforced polymer(FRP) tendons were studied by static test. The influence factors of bearing capacities of test beams were analyzed by finite element analysis(FEA) software, such as strength of concrete, initial load, elastic modulus and content of FRP tendons. Analysis result indicates that the reinforcement effect without debond between FRP tendons and concrete is significant. Compared with unstrengthened RC beam, the yield load and ultimate load of strengthened RC beam can increase by 31% and 56% respectively. When concrete strength, elastic modulus and content of FRP tendons increase, the yield load and ultimate load can increase by 38% and 17% respectively. When initial load increases, the yield load and ultimate load can decrease by 6% and 24% respectively. For test RC beams, the mean ratio of simulation and test values for the yield load is 0.969, 0.962 for the ultimate load, 1.104 for the midspan yield deflection, 1.024 for the midspan destructive deflection, and the trends of

收稿日期:2014-11-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51108161);河南省科技计划项目(132102310312,14A560002)

作者简介:王兴国(1977-),男,湖北襄阳人,河南理工大学副教授,工学博士,从事工程结构维修加固研究。

simulation load-deflection curves are basically consistent with test curves, so FEA result is in good agreement with test result, and FEA can accurately simulate the mechanical properties of test beam. 4 tabs, 18 figs, 22 refs.

**Key words:** bridge engineering; continuous RC beam; NSM; mixing FRP tendons; bearing capacity; finite element method

**Author resume:** WANG Xing-guo(1977-), male, associate professor, PhD, +86-391-3987278, paulw@hpu.edu.cn.

## 0 引言

在运营过程中,由于环境、使用条件等影响可能导致混凝土桥梁承载力不足,通过经济技术综合考量,有必要对混凝土结构进行维修加固,以延长其服役年限。常用的传统加固方法有增大截面、粘钢加固与改变受力体系等,近十几年来,由于纤维增强聚合物(Fiber Reinforced Plastic/Polymer,以下简称 FRP)因其质轻高强、抗疲劳及耐腐蚀性强等特点替代钢板形成的加固方法(外贴 FRP 布/板加固方法)已广泛应用于结构加固<sup>[1-4]</sup>。针对外贴 FRP 加固方法自身的缺点(受到恶劣的环境、外力磨损和撞击等因素影响易发生 FRP 剥离,特别是连续梁负弯矩区加固问题尤为突出)而发展起来另一种新型的加固方法——结构表层嵌入加固方法(Near-Surface Mounted,简称 NSM)<sup>[5-7]</sup>,是将 FRP 筋/板条嵌入结构物表层已经开好的槽中,并向其中注入化学粘结剂,使 FRP 筋/板条与结构物通过粘结剂作用成为一个整体而共同受力,提高结构承载能力与安全性。

贺学军等对 6 根足尺混凝土梁采用内嵌碳纤维增强聚合物(Carbon Fiber Reinforced Polymer,以下简称 CFRP)板条的方式进行了加固,考虑了 CFRP 用量与试验前试验梁受荷状况等影响因素,对试验梁的破坏过程、受力性能、截面应变分布和挠度变形规律进行了研究。试验结果表明:内嵌 CFRP 板条加固梁跨中截面应变分布和挠度变形规律与外贴 CFRP 加固梁相似,但内嵌加固能有效避免板条的剥离破坏,抗弯加固性能优于相应的外贴加固,预载加固将会降低内嵌板条的加固效果<sup>[5]</sup>。

曾宪桃等以 CFRP 加固量和开槽尺寸为参数,开展了内嵌与外贴 CFRP 板条加固 RC 梁抗弯性能试验。研究表明:与未加固梁相比,内嵌 CFRP 板条加固梁的极限承载力提高了 11.2%~41.7%;与外贴 CFRP 板条加固梁相比,其极限承载力提高了 15.5%~22.7%<sup>[6]</sup>。

黄丽华等以不同 FRP 布外贴加固钢筋混凝土

梁,考察了初始预损伤与不同 U 形箍筋的布置方式对纤维布加固效果的影响,对粘贴纤维布加固钢筋混凝土梁的受弯性能与破坏特征进行了分析。研究结果表明:CFRP 布加固梁的承载力和延性提高最大,玄武岩纤维增强聚合物(Basalt Fiber Reinforced Polymer,以下简称 BFRP)布用于加固的性价比最优,初始预损伤对加固效果影响不大,而沿全梁横向布置 U 形锚固形式并不能有效发挥纤维布的抗拉性能<sup>[7]</sup>。

Al-Mahmoud 等用直径为 6、12 mm 的 CFRP 筋嵌粘混凝土强度为 C30/C60 的混凝土简支梁,粘结材料为环氧树脂和水泥砂浆,开展了相应弯曲性能试验研究。研究表明:无论粘结材料是环氧树脂还是水泥砂浆,内嵌加固法(NSM)均能很好提高 RC 梁弯曲性能<sup>[8]</sup>。

张海霞等开展了内嵌玻璃纤维增强聚合物(Glass Fiber Reinforced Polymer,以下简称 GFRP)筋加固混凝土梁弯曲性能试验,考虑了纵向钢筋配筋率和 GFRP 用量对梁抗弯性能影响,分析了裂缝扩展情况和受力过程。研究表明:表面内嵌 GFRP 筋加固方法不仅不同程度地提高了试件的屈服荷载和极限荷载,而且也提高了梁屈服阶段和破坏阶段的截面刚度,并在限制裂缝开展方面起到了一定有利的作用<sup>[9]</sup>。

Choi 等在试验梁受拉面开槽、部分嵌粘 CFRP 筋进行加固,研究 CFRP 筋无粘结区域的长度变化对试验梁变形的影响。试验结果显示:部分粘结加固梁在受力主筋屈服后刚度有一定降低;在相同荷载下,随着无粘结加固长度的增加,梁的变形相应有所增大<sup>[10]</sup>。

Capozucca 对已受损混凝土梁采用内嵌 CFRP 进行加固,并对其静、动态性能进行了测试,将静态弯曲荷载-挠度曲线与非线性理论分析曲线进行对比,加固改善了梁的刚度与延性;在动态性能分析时,考虑了自振频率和振型变化对加固效果影响,加固效果明显<sup>[11]</sup>。

目前的表层内嵌 FRP 加固主要集中在简支梁的试验和理论研究上,也有部分学者对混凝土连续梁与连续板加固开展了一些探索。

Yuan 等将理想双线性界面滑移本构应用于连续梁外贴 FRP 加固端部剥离破坏模型研究,加载梁裂缝扩展模型分为四段式:弹性、弹塑性、弹塑性-剥离与塑性-剥离阶段,其中弹塑性-剥离阶段又分为 4 个子阶段。通过求解线性方程组得到剥离破坏的界限粘结长度。若混凝土与 FRP 板结合部胶粘剂的倒角足够大,可以忽略上、下层 FRP 板间作用<sup>[12]</sup>。

Farahbod 等利用外贴 CFRP 片材加固了 6 组双跨 RC 框架,以 CFRP 用量与不同加固形式组合为变量。为防止 CFRP 片材在半段和梁柱节点剥离,采用了 U 形 CFRP 箍加强措施,同时在一跨的这些部位采用了钢板条与螺栓的机械锚固措施。试验结果表明:在加固框架中,弯矩重分布最大可达 56%,加固后承载力提高幅度为 20%~38%,在正、负弯矩区,弯曲承载力提高幅度分别为 35%~55%和 9%~20%<sup>[13]</sup>。

曹国辉等开展了不同类型纤维布和不同加载历史条件下 RC 连续梁外贴 FRP 布弯曲性能试验。试验结果表明:粘贴 CFRP 布和 GFRP 布后加固梁的正截面承载力有不同程度的提高,裂缝宽度减小,抗弯刚度增强;粘贴纤维布加固的 RC 梁承载力和加固时的初始应力水平有关,初始应力越高,加固梁的极限承载力越低;在粘贴纤维布后,混凝土梁的延性有一定的降低,相对于 CFRP 布加固的 RC 梁,粘贴 GFRP 布混凝土梁的延性和连续梁支座塑性转动能力较好<sup>[14]</sup>。

Aiello 等对钢纤维混凝土连续梁有无外贴 CFRP 片材加固开展了试验,为防止早期剥离破坏,在 CFRP 片材端部用 CFRP 布缠绕。研究结果表明:如果加固方案设计合理,可较充分发生弯矩重分布,理论分析也可验证这点<sup>[15]</sup>。

盛光祖等用 CFRP 布对 5 根相同尺寸的钢筋混凝土连续梁做了增强处理,通过改变 CFRP 布的粘贴位置与层数等参数,研究了 CFRP 布对于钢筋混凝土连续梁抗弯性能的影响。试验结果表明:碳纤维布加固可以显著提高试验梁的抗弯承载力,同时,对于增强梁的抗弯刚度也有良好的作用<sup>[16]</sup>。

程东辉等对 3 根 2 跨连续梁跨中控制截面采用 CFRP 布进行加固,开展静载试验,基于实测数据,利用通用软件开展了加固梁的有限元分析。分析结果表明:利用碳纤维布加固混凝土连续梁并未显著

提高构件弹性状态下的承载力,而对塑性状态下的极限承载力有明显提高,且加固后的连续梁呈现明显的内力重分布<sup>[17]</sup>。

Mari 等采用一种非线性与基于时间的进化模型分析 FRP 外贴加固混凝土受弯构件,考虑了几何尺寸、加固方案、材料特性和预加载历史等因素,依据该模型提出了预测 FRP 剥离破坏判断准则,通过前期的 RC 连续梁与简支梁外贴 FRP 加固试验结果验证了该模型的合理性<sup>[18]</sup>。

Ouyang 等开展了外贴 BFRP 布加固混凝土连续 T 梁弯曲试验,加固区采用 U 形纤维布约束,考虑了正弯矩区 BFRP 用量变化。研究结果表明:加固梁表现出了较好的屈服强度、极限强度和延性<sup>[19]</sup>。

Breveglieri 等基于试验,开展影响混凝土连续板表层嵌粘(NSM)加固技术多参数研究,包括混凝土强度、加固方案、FRP 用量、弯矩重分布能力和延性等,并编制相应有限元分析程序,将分析结果与试验结果进行了对比<sup>[20]</sup>。

Dalfré 等对混凝土连续板开展了内嵌 CFRP 板条加固试验,试验结果表明:与未加固板相比,设计承载力提高幅度为 25%~50%;加固板的承载力受限于抗剪能力或加固构件的混凝土保护层厚度,对部分构件来说,内嵌的 CFRP 板条降低了混凝土连续板的弯矩重分布<sup>[21-22]</sup>。

这些研究的加固材料基本上集中在同一种 FRP 材料,然而不同的 FRP 类型、价格与材料性能有较大差异,且单一 FRP 材料加固后结构延展性差,有必要寻求一种性价比较理想的加固材料组合,在保证要求下,可大大降低加固成本。基于此,本文对 4 根 NSM 混合 FRP 筋加固连续梁进行静载试验,借助通用有限元软件,对试验进行全过程非线性分析,并对影响试验梁加固效果的因素进行研究。

## 1 试验梁简介

试验梁均采用矩形截面,混凝土设计强度为 C30,截面尺寸为 150 mm×250 mm,梁全长 3.2 m。受拉主筋采用 2 根 HRB335 级直径为 14 mm 钢筋,箍筋采用 HPB300 级直径为 8 mm 钢筋,箍筋间距为 100 mm。嵌入 FRP 筋的长度均为 1 200 mm,CFRP 筋直径均为 9 mm,弹性模量为 160 GPa, BFRP 筋直径均为 10 mm,弹性模量为 55 GPa。在连续梁的跨中受拉区与中间支座截面负弯矩区分别切割一个 20 mm×30 mm 的沟槽,试验梁尺寸见图 1,加固方案见表 1。

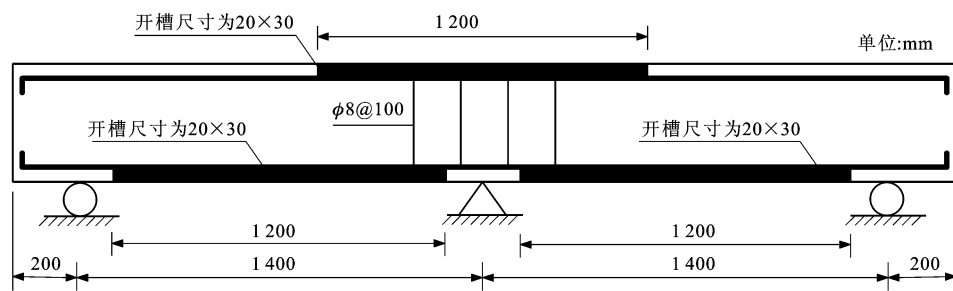


图 1 试验梁尺寸  
Fig.1 Sizes of test beam

表 1 加固方案  
Tab.1 Strengthening schemes

试验梁 编号	模拟梁 编号	加固方法	加固材料 直径/mm	加固前受荷 状况
L1	LX1	螺纹 BFRP 筋材	10	0
L2	LX2	光圆 CFRP 筋材	9	0
L3	LX3	CFRP/BFRP/CFRP	9/10/9	0
L4	LX4	CFRP/BFRP/CFRP	9/10/9	0.4M <sub>y</sub>

注:M<sub>y</sub> 为 RC 连续梁屈服荷载计算值。

本文试验是在河南理工大学结构实验室完成,

按照《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—92) 的结构单调加载静力试验的加载方法,通过 50 t 手动螺旋式千斤顶、分配梁与反力架对试验梁施加集中荷载,采用静态应变仪和百分表分别采集试验梁的应变与挠度。试验加载与测点布设见图 2。

2 试验结果分析

2.1 承载力

预加载时试验梁已开裂,试验梁荷载特征值见表 2。加固梁 L1~L4 屈服荷载分别提高 25 %、

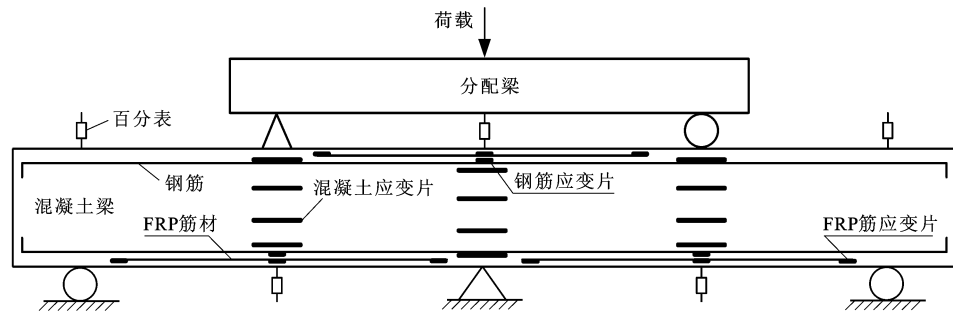


图 2 试验梁加载与测点布置  
Fig.2 Loading and monitoring point arrangement of test beam

37 %、31 %和 25 %,极限荷载分别提高 45 %、56 %、50 %和 40 %,表明表层内嵌 FRP 筋加固连续梁提高承载力效果显著,且混合纤维筋材加固梁 L3 与单一种类筋材加固梁 L1、L2 的屈服荷载分别相差 5.0 %、4.5 %,极限荷载分别相差 3.7 %、3.6 %,差别很小。

与加固梁 L3 相比,承受初始荷载作用的试验梁 L4 屈服荷载与极限荷载降低程度分别为 4.8 %、7.1 %。加固梁 L4 承载力略有降低的原因可能是试验梁在试验前已施加初始荷载,钢筋在加固前受初始荷载作用产生了一定的应变,加固后 FRP 筋应变始终滞后于钢筋应变。与直接加固试验梁相比,二次受力试验梁在钢筋屈服前 FRP 筋发挥的作用较小,试验梁承载力略有降低。

表 2 试验梁荷载特征值

Tab.2 Load characteristic values of test beams

梁 编号	屈服荷载/ kN	屈服荷载提高 幅度/%	极限 荷载/kN	极限荷载 提高幅度/%	破坏 形态
BD	160		186		弯曲 破坏
L1	200	25	270	45	
L2	220	37	290	56	
L3	210	31	280	50	
L4	200	25	260	40	

注:BD 为试验对比梁。

2.2 FRP 筋荷载-应变

FRP 筋荷载-应变曲线见图 3、4,试验梁开裂之前,由于荷载较小,处于弹性变化阶段,试验梁尚未出现裂缝,施加的荷载主要由混凝土、钢筋与 FRP 筋共同承担。FRP 筋应变呈线性增加,且增加量较小,

FRP 筋荷载-应变曲线斜率相差不大。试验梁开裂以后,受拉混凝土退出工作,试验梁截面刚度降低,达到屈服荷载之前,荷载由钢筋和混凝土共同承担,其拉应力显著增加,但截面还可以承受较大的弯矩增量,此阶段斜率略有减小但仍呈线性变化。钢筋屈服后,试验梁刚度进一步降低,FRP 筋荷载-应变曲线斜率明显下降,在达到破坏荷载之前试验梁还可以继续承受一定的弯矩增量,且 FRP 筋应变增加显著。

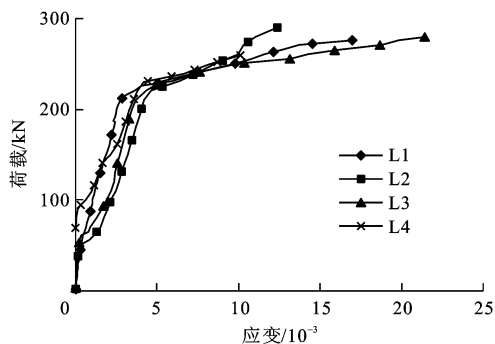


图 3 负弯矩区 FRP 筋荷载-应变曲线

Fig. 3 Load-strain curves of FRP tendons in negative moment areas

### 2.3 裂缝发展与破坏形态

FRP 加固钢筋混凝土梁裂缝的开展受到 FRP

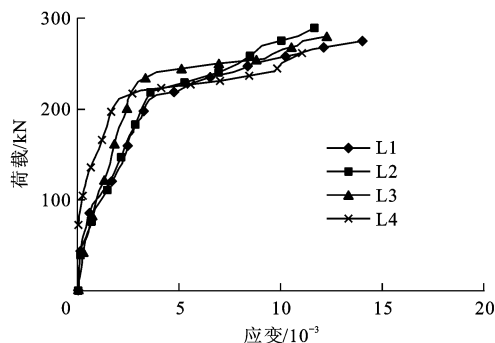


图 4 跨中 FRP 筋荷载-应变曲线

Fig. 4 Load-strain curves of FRP tendons at midspans

筋的约束,受力性能得到改善,见图 5~9。分析裂缝与试验现象发现加固梁的裂缝发展和最终形态与普通钢筋混凝土梁有所不同。在加载初期,由于受到筋材的约束作用,加固梁裂缝高度和宽度发展均较对比梁缓慢。随着荷载加大,裂缝条数增多,宽度、高度逐渐增大。加固梁裂缝条数较多,间距较小,斜裂缝发展较充分。内嵌 FRP 筋材加固梁的主裂缝高度均超过梁高的  $2/3$ ,且裂缝发展较均匀、充分,裂缝的平均间距较小,说明内嵌的 FRP 筋材得到充分发挥。

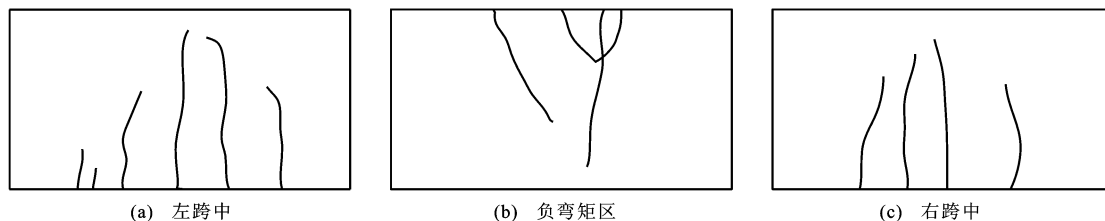


图 5 BD 梁裂缝分布

Fig. 5 Crack distribution of beam BD

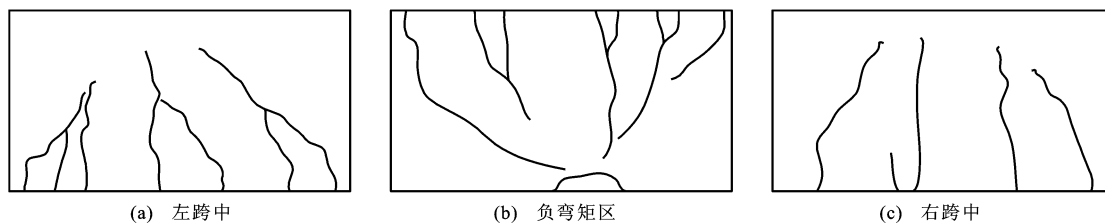


图 6 L1 梁裂缝分布

Fig. 6 Crack distribution of beam L1

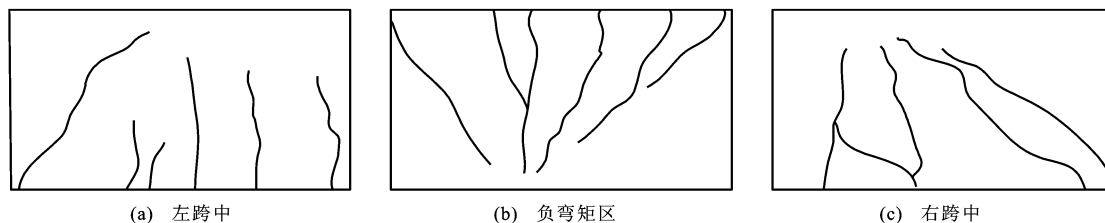


图 7 L2 梁裂缝分布

Fig. 7 Crack distribution of beam L2

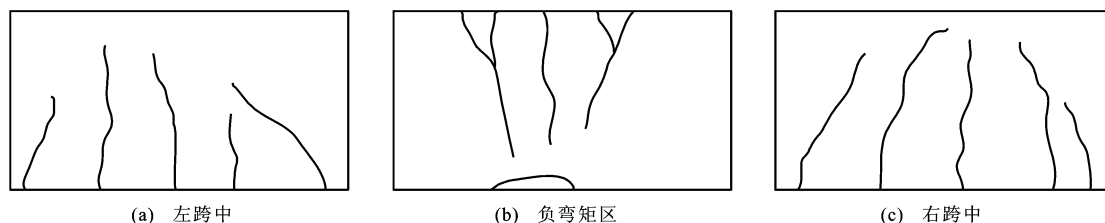


图 8 L3 梁裂缝分布

Fig. 8 Crack distribution of beam L3

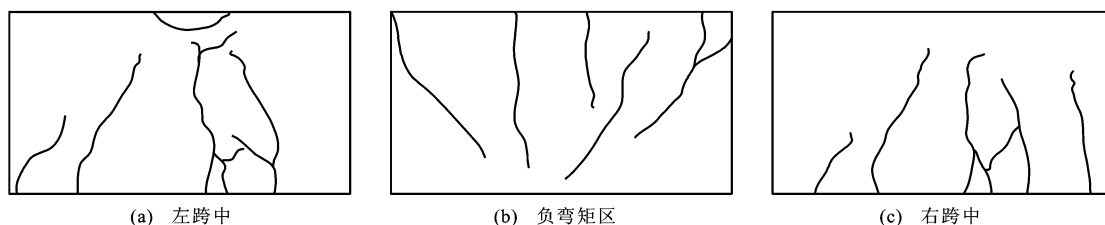


图 9 L4 梁裂缝分布

Fig. 9 Crack distribution of beam L4

### 3 试验梁有限元分析

#### 3.1 单元类型的选择

使用有限元法模拟试验梁力学性能时采用分离式模型,混凝土和垫块采用三维实体单元 C3D8R,模拟混凝土受力时采用塑性损伤模型,考虑混凝土弹性和塑性变化,假定混凝土破坏是由拉伸作用或压缩作用产生的。钢筋与 FRP 筋均采用三维桁架单元 T3D2,桁架单元不能承受弯矩,只能承受拉伸荷载作用。

#### 3.2 定义约束和荷载

为避免模拟过程中直接对点施加荷载产生数值奇异和负特征值,在加载点位置设置刚性垫块并建立 2 个不同参考点,参考点与垫块之间采用耦合约束,垫块与 RC 梁之间采用绑定约束,认为 2 个接触面紧贴在一起。钢筋骨架和 FRP 筋与混凝土之间采用嵌入区域约束,认为钢筋骨架和 FRP 筋镶嵌到混凝土中,模拟过程中采用位移加载的方式施加荷载。

#### 3.3 模型的建立与网格划分

根据试验梁截面尺寸与配筋情况,建立分析模型,并进行单元网格的划分,钢筋与 FRP 筋采用的单元尺寸控制为 20 mm,混凝土采用的单元尺寸控制为 50 mm,网格划分后的模型见图 10。

#### 3.4 试验结果与模拟结果对比分析

由表 3 中数据可知,试验梁屈服荷载模拟值与试验值平均比值为 0.969,标准差为 0.013,变异系数为 0.013;极限荷载模拟值与试验值平均比值为 0.962,标准差为 0.007,变异系数为 0.007;钢筋屈

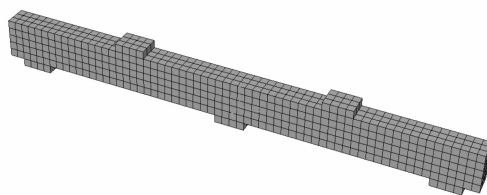


图 10 连续梁有限元模型

Fig. 10 Finite element model of continuous beam

服时跨中挠度模拟值与试验值的平均比值为 1.104,标准差为 0.025,变异系数为 0.023;梁破坏时跨中挠度模拟值与试验值平均比值为 1.024,标准差为 0.019,变异系数为 0.019。通过数据分析发现,模拟值与试验值吻合程度较好,数据离散性较小,而且变异系数小。

实测与模拟荷载-挠度对比曲线见图 11~14,模拟与试验曲线走势基本一致,都具有明显屈服阶段。通过数据对比分析发现有限元分析结果与试验结果吻合较好,有限元法可以较好模拟内嵌混

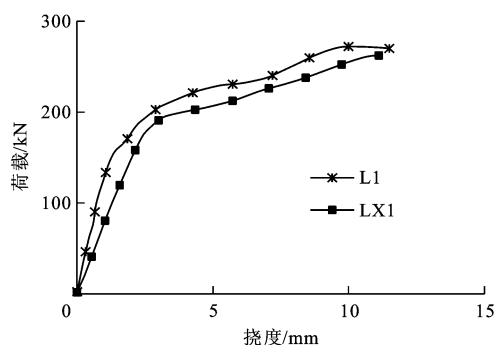


图 11 梁 L1 与 LX1 荷载-挠度曲线

Fig. 11 Load-deflection curves of beams L1 and LX1

表 3 测试结果与模拟结果比较  
Tab. 3 Comparison of test result and simulation result

梁编号	荷载/kN				跨中挠度/mm			
	屈服荷载	模拟值比试验值	极限荷载	模拟值比试验值	屈服挠度	模拟值比试验值	弯曲破坏挠度	模拟值比试验值
L1	200	0.984	270	0.969	2.69	1.126	10.56	1.051
LX1	197		262		3.03		11.10	
L2	220	0.963	290	0.950	2.37	1.063	9.82	1.023
LX2	212		276		2.52		10.05	
L3	210	0.978	280	0.963	2.55	1.101	11.56	0.997
LX3	205		270		2.81		11.52	
L4	200	0.950	260	0.964	4.25	1.124	11.73	1.024
LX4	190		251		4.78		12.01	

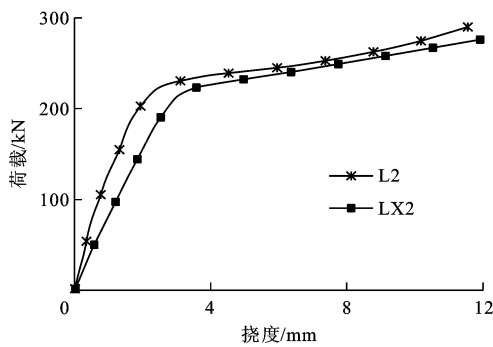


图 12 梁 L2 与 LX2 荷载-挠度曲线  
Fig. 12 Load-deflection curves of beams L2 and LX2

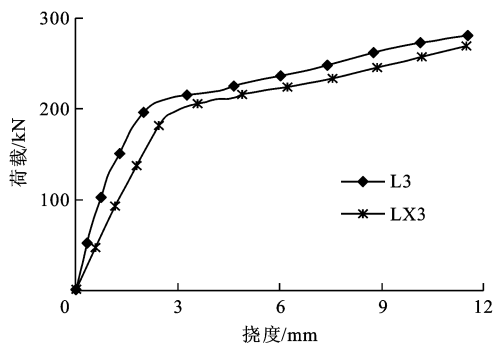


图 13 梁 L3 与 LX3 荷载-挠度曲线  
Fig. 13 Load-deflection curves of beams L3 and LX3

合 FRP 筋加固连续梁力学性能。实测与模拟曲线存在部分差异的原因可能是计算采用的混凝土强度为 28 d 轴心抗压强度,而试验梁放置时间较长,混凝土强度有可能会高于实测值;采用 DM-201 多通道数据采集仪采集挠度受试验环境影响较大;采用人工分级加载,未计入分配梁和千斤顶的重力作用;而在有限元分析中,采用混凝土 28 d 轴心抗压强度,采用线性加载方式。

## 4 试验梁承载力影响因素分析

采用通用有限元软件建模分析结果与试验值吻

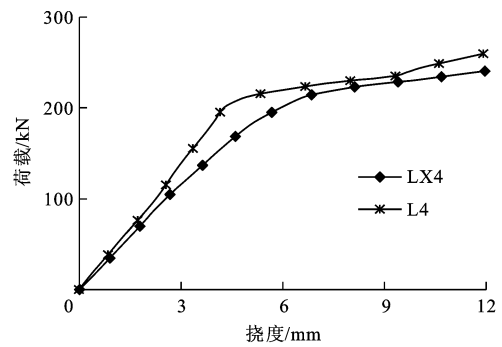


图 14 梁 L4 与 LX4 荷载-挠度曲线  
Fig. 14 Load-deflection curves of beams L4 and LX4

合较好,利用该模型以试验梁 L1 为原型,对影响内嵌混合 FRP 筋加固连续梁承载力主要因素进行分析,找出各因素变化对试验梁承载力的影响规律,计算结果见表 4。

表 4 模拟梁屈服荷载和极限荷载计算结果  
Tab. 4 Calculation results of yield loads and ultimate loads for simulation beams

影响因素	模拟梁编号	屈服荷载/kN	屈服荷载提高幅值/%	极限荷载/kN	极限荷载提高幅值/%
混凝土强度	LX(C30)	195		269	
	LX(C40)	233	19	278	3
	LX(C50)	271	38	317	18
FRP 筋类型	LX(B)	200		240	
	LX(C)	222	11	259	8
	LX(C-B)	217	9	249	4
FRP 配纤率	LX(B7)	170		209	
	LX(B10)	184	8	232	11
	LX(B14)	197	16	220	5
加固前初始荷载	LX(0)	195		233	
	LX(0.4M <sub>y</sub> )	179	-4	222	-17
	LX(0.7M <sub>y</sub> )	175	-6	205	-24

### 4.1 混凝土强度

LX(C30)、LX(C40)和 LX(C50)分别表示混凝

土强度为 C30、C40 和 C50 的模拟梁,模拟梁除混凝土强度不同之外,其他参数与试验梁 L1 完全相同,其荷载-挠度曲线见图 15。混凝土强度从 C30 分别提高到 C40、C50 时,模拟梁屈服强度分别提高 19%、38%,极限荷载分别提高 3%、18%。与 LX(C40)相比,LX(C50)屈服荷载与极限荷载分别提高 38、39 kN,提高幅度分别为 16%、14%。混凝土强度发生变化时,模拟梁的屈服荷载与极限荷载变化明显。

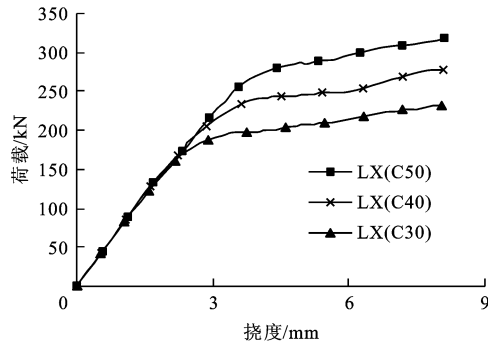


图 15 不同混凝土强度时模拟梁荷载-挠度曲线

Fig. 15 Load-deflection curves of simulation beams with different concrete strengths

#### 4.2 FRP 筋类型

LX(B)、LX(C)分别表示在梁受拉区和负弯矩区表层分别嵌入1根直径为10 mm的单一FRP筋材的模拟梁,LX(C-B)表示在梁受拉区表层和负弯矩区表层分别各嵌入1根直径为10 mm不同类型FRP筋的模拟梁,其荷载-挠度曲线见图16。FRP筋平均弹性模量从55.0 GPa分别提高到84.5、114.0 GPa时,模拟梁屈服荷载分别提高9%、11%,极限荷载分别提高4%、8%。与LX(C-B)相比,LX(C)屈服荷载与极限荷载分别提高2%、4%。类似钢筋混凝土适筋梁,内嵌筋材发生弯曲破坏时,混合筋材加固模拟梁虽嵌入筋材种类发生了变化,但弯曲特征荷载(屈服荷载与极限荷载)计算值变化不明显。

#### 4.3 FRP 筋配纤率

LX(B7)、LX(B10)和LX(B14)表示在模拟梁受拉区和负弯矩区表层分别嵌入1根直径分别为7、10、14 mm的BFRP筋的模拟梁,其荷载-挠度曲线见图17。类似普通钢筋混凝土梁的配筋率,在确保模拟梁适筋情况下,FRP筋配纤率从0.09%分别提高到0.20%、0.40%时,模拟梁屈服荷载分别提高8%、16%,极限荷载分别提高5%、11%。与LX(B10)相比,LX(B14)屈服荷载与极限荷载分别提高7%、5%。可见配纤率的增大使模拟梁屈服荷

载和极限荷载均有不同程度增大。

#### 4.4 试验梁初始受荷状态

模拟梁LX(0)、LX(0.4 $M_y$ )和LX(0.7 $M_y$ )的初始荷载分别为0、0.4 $M_y$ 、0.7 $M_y$ 的荷载-挠度曲线见图18。初始荷载从0分别提高到0.4 $M_y$ 、0.7 $M_y$ 时,模拟梁屈服荷载分别降低4%、6%,极限荷载分别降低17%、24%。与LX(0.4 $M_y$ )相比,LX(0.7 $M_y$ )屈服荷载与极限荷载分别降低2%、8%。可见模拟梁的初始受荷状态对模拟梁的屈服荷载和极限荷载产生了一定影响。

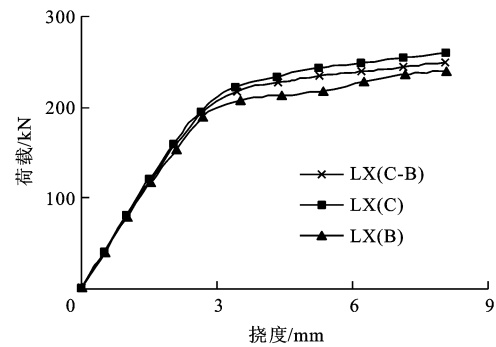


图 16 不同FRP筋类型时模拟梁荷载-挠度曲线

Fig. 16 Load-deflection curves of simulation beams with different types of FRP

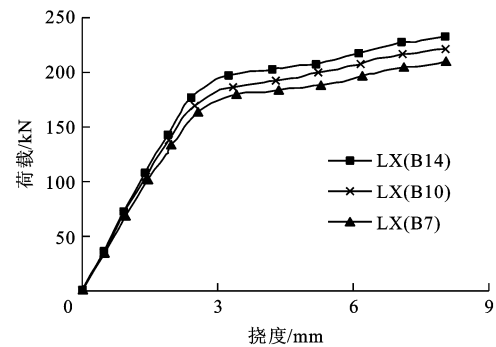


图 17 不同FRP筋配纤率时模拟梁荷载-挠度曲线

Fig. 17 Load and deflection curves of simulation beams with different ratios of FRP

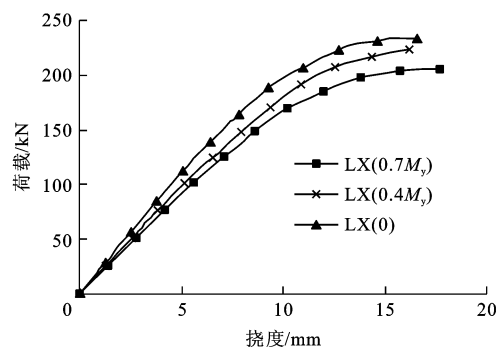


图 18 不同初始荷载时模拟梁荷载-挠度曲线

Fig. 18 Load and deflection curves of simulation beams with different initial loads

## 5 结 语

(1)表层内嵌 FRP 筋对试验梁开裂荷载影响较小;加固前,试验梁已承受荷载情况下,支座负弯矩区 FRP 筋应变滞后于钢筋,加固效果仍比较明显;FRP 筋与混凝土之间粘结良好,未发生明显粘结滑移现象,加固效果良好;CFRP/BFRP 筋材混合嵌粘加固梁与单一 CFRP 筋材加固梁的特征荷载相差较小,可节省造价,与单一 BFRP 筋材加固梁相比,特征荷载较大,承载力安全储备较高。

(2)试验梁加载曲线与有限元模拟曲线吻合较好,有限元法可较好模拟内嵌混合 FRP 筋加固连续梁加载过程。有限元分析时梁均发生弯曲破坏,模拟梁混凝土强度增大时,屈服荷载与极限荷载均有不同程度提高;内嵌单一种类 FRP 筋弹性模量增大对模拟梁屈服荷载与极限荷载均有一定提高,若采用混合筋材加固时,与采用单一纤维加固梁相比,特征荷载变化不明显;FRP 筋配纤率增大时,模拟梁屈服荷载与极限荷载均有所提高;模拟梁加固前承受的初始荷载从 0 增加到  $0.7M_y$  时,屈服荷载与极限荷载有不同程度的降低。

(3)考虑 FRP 筋与混凝土梁之间的粘结滑移将会使分析结果更精确,混合 FRP 筋嵌入加固后混凝土梁的长期性能和疲劳性能将是今后的研究方向。

## 参 考 文 献 :

### References :

- [1] 郭樟根,曹双寅,王安宝,等.爆炸荷载作用下外贴 FRP 加固钢筋混凝土双向板试验研究[J].建筑结构学报,2011,32(2): 91-97.  
GUO Zhang-gen, CAO Shuang-yin, WANG An-bao, et al. Experimental study on performance of FRP strengthened RC two-way slabs under explosion load[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2): 91-97. (in Chinese)
- [2] 邵劲松,薛伟辰,刘伟庆,等. FRP 横向加固木柱轴心受压性能计算[J].土木工程学报,2012,45(8):48-54.  
SHAO Jin-song, XUE Wei-chen, LIU Wei-qing, et al. Calculation of axial compressive behavior of timber column laterally strengthened with FRP[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(8): 48-54. (in Chinese)
- [3] 孙永梅,刘永军,孟宪宏.纤维增强复合材料(FRP)在砌体结构加固中的应用与研究进展[J].玻璃钢/复合材料,2012(1): 77-82.  
SUN Yong-mei, LIU Yong-jun, MENG Xian-hong. Application and research progress of fiber reinforced plastics in masonry structure reinforcement[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2012(1): 77-82. (in Chinese)
- [4] ZORDAN T, BRISEGHIELLA B, LIU T. Finite element model updating of a tied-arch bridge using Douglas-Reid method and Rosenbrock optimization algorithm[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(4): 280-292.
- [5] 贺学军,周朝阳,徐 玲.内嵌 CFRP 板条加固混凝土梁的抗弯性能试验研究[J].土木工程学报,2008,41(12):14-20.  
HE Xue-jun, ZHOU Chao-yang, XU Ling. Experimental study on the flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with near-surface mounted CFRP laminates[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(12): 14-20. (in Chinese)
- [6] 曾宪桃,成香莉,高保彬.内嵌碳纤维增强塑料板条抗弯加固混凝土梁试验研究[J].工程力学,2008,25(12):106-113,122.  
ZENG Xian-tao, CHENG Xiang-li, GAO Bao-bin. Experimental study on flexural characteristics of RC beams strengthened with near-surface mounted CFRP laminates[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(12): 106-113, 122. (in Chinese)
- [7] 黄丽华,李宇婧,张耀烨,等.不同种类 FRP 加固混凝土梁加固效果试验研究[J].大连理工大学学报,2013,53(1):102-107.  
HUANG Li-hua, LI Yu-jing, ZHANG Yao-ye, et al. Test research on strengthening effects of various FRP on RC beams[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013, 53(1): 102-107. (in Chinese)
- [8] AL-MAHMOUD F, CASTEL A, FRANÇOIS R, et al. Strengthening of RC members with near-surface mounted CFRP rods[J]. Composite Structures, 2009, 91(5): 138-147.
- [9] 张海霞,孔丹丹,刘国瑞.表面内嵌玻璃纤维增强材料筋加固混凝土梁抗弯性能试验[J].工业建筑,2011,41(10):20-24.  
ZHANG Hai-xia, KONG Dan-dan, LIU Guo-rui. Experimental study on flexural behavior of concrete beams strengthened with near-surface mounted GFRP bars[J]. Industrial Construction, 2011, 41(10): 20-24. (in Chinese)
- [10] CHOI H T, WEST J S, SOUDKI K A. Partially bonded near-surface-mounted CFRP bars for strengthened concrete T-beams[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(5): 2441-2449.
- [11] CAPOZUCCA R. Static and dynamic response of damaged RC beams strengthened with NSM CFRP rods[J]. Composite Structures, 2009, 91(3): 237-248.
- [12] YUAN Hong, LIN Zi-feng. Theoretical model on interface failure mechanism of reinforced concrete continuous beam strengthened by FRP[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2009, 22(2): 161-170.
- [13] FARAHBOD F, MOSTOFINEJAD D. Experimental study of moment redistribution in RC frames strengthened with CFRP sheets[J]. Composite Structures, 2011, 93(3): 1168-1177.
- [14] 曹国辉,方 志,吴继峰. FRP 片材加固混凝土连续梁试验研究[J].建筑结构,2005,35(10):63-66.  
CAO Guo-hui, FANG Zhi, WU Ji-feng. Experimental study on continuous RC beams strengthened with FRP laminates[J]. Building Structure, 2005, 35(10): 63-66. (in Chinese)
- [15] AIELLO M A, VALENTE L, RIZZO A. Moment redistribution in continuous reinforced concrete beams strengthened

- with carbon-fiber-reinforced polymer laminates[J]. *Mechanics of Composite Materials*, 2007, 43(5): 453-466.
- [16] 盛光祖,刘沐宇,张伟.碳纤维布加固钢筋混凝土连续梁抗弯性能试验研究[J]. *结构工程师*, 2008, 24(5): 126-129. SHENG Guang-zu, LIU Mu-yu, ZHANG Wei. Flexural performance of RC continuous beams strengthened with CFRP Sheets[J]. *Structural Engineers*, 2008, 24(5): 126-129. (in Chinese)
- [17] 程东辉,易亚敏,王天峰.碳纤维布加固混凝土连续梁塑性性能试验及有限元分析[J]. *中国铁道科学*, 2011, 32(3): 27-32. CHENG Dong-hui, YI Ya-min, WANG Tian-feng. Plastic performance test and finite element analysis on the concrete continuous beams strengthened with CFRP sheets[J]. *China Railway Science*, 2011, 32(3): 27-32. (in Chinese)
- [18] MARI A R, OLLER E, BAIRÁN J M. Predicting the response of FRP-strengthened reinforced-concrete flexural members with nonlinear evaluative analysis models[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2011, 15(5): 799-809.
- [19] OUYANG Li-jun, LU Zhuo-dao, CHEN Wei-zhen. Flexural experimental study on continuous reinforced concrete beams strengthened with basalt fiber reinforced polymer/plastic[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Science*, 2012, 17(5): 613-618.
- [20] BREVEGLIERI M, BARROS J A O, DALFRÉ G M, et al. A parametric study on the effectiveness of the NSM technique for the flexural strengthening of continuous RC slabs[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(4): 1970-1987.
- [21] DALFRÉ G M, BARROS J A O. NSM technique to increase the load carrying capacity of continuous RC slabs[J]. *Engineering Structures*, 2013, 56(5): 137-153.
- [22] 彭秀丽,马守恩,范伟.钢-混组合连续梁分析验算[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2011, 28(10): 173-175, 178. PENG Xiu-li, MA Shou-en, FAN Wei. Analysis and checking calculation of steel-concrete combined continuous beam[J]. *Road Machinery and Construction Mechanization*, 2011, 28(10): 173-175, 178. (in Chinese)

### Journal of Traffic and Transportation Engineering(English Edition)

Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) is a new bimonthly English journal, which is organized by Ministry of Education of China and sponsored by Chang'an University, Southeast University, and Southwest Jiaotong University.

#### Aim & scope

As an academic journal, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) provides a platform for exchange and discussion of novel and creative ideas on theoretical and experimental researches of traffic and transportation. It publishes high-quality peer-reviewed papers of traffic and transportation in the context of civil engineering, industry, materials, information, fuel, economy, and society, as well as the interaction of fields related with traffic and transportation.

The scope of this journal includes road and railway engineering; transport vehicle engineering (such as automobile, train, ship, aircraft, and so on), including its component, operation and maintenance; planning and management of traffic and transportation; traffic information engineering and control.

#### Editorial board

In editorial board, there are 11 academicians of Chinese Academy of Engineering, Canadian Academy of Engineering, and American Academy of Engineering, Zhi-yun SHEN, Kong-hui GUO, Wen-hao LIANG, Chang-wen MIAO, Meng-shu WANG, Ying-ren ZHENG, Yan-liang DU, Jian-guo NIE, Xu-hong ZHOU, Said Easa, and Man-Chung TANG; famous foreigner scholars, Steven Chien, James Tsai, David A Noyce, Lee D Han, Cheng-min FENG, Gang-len CHANG, William G Buttlar, Richard Kim, Musharraf Zaman, Zhan-ping YOU, Bruno Briseghella, Wei-hsing HUANG, Hai-bo CHEN, Kevin Cullinane, Honoré Pierre Yin, Hervé Di Benedetto, et al.

#### Inviting editorial board members

To build an international platform for communication of scientists, our journal is longing for great support of experts, scientists, and scholars in the field of traffic and transportation from all over the world to join in our editorial board. If you or someone you know may have interest in our journal, please contact us at JTTE@chd.edu.cn or JTTE2014@126.com without any hesitation.

#### Call for papers

Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) is calling papers! There are four columns in this journal: road and railway engineering, transport vehicle engineering, planning and management of traffic and transportation, and traffic information engineering and control. All the manuscripts related with traffic and transportation are welcome and appreciated. Please send your manuscript to JTTE@chd.edu.cn or JTTE2014@126.com. Submitted papers will go through normal peer review process.

**Contact:** Yue-jie HAN, editor of Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)

**Tel:** +86-29-82334388; **http:** //jtte.chd.edu.cn

**Address:** Periodical Office, Chang'an University, Southern Middle Section of the Second Circular Road, Xi'an, Shaanxi, P. R. China

**Post Code:** 710064