

文章编号:1001-7372(2004)01-0039-06

体外索加固 T 型刚构桥的静动力性能研究

项贻强,姚永丁,胡峰强,荆龙江,朱卫国

(浙江大学 交通工程研究所,浙江 杭州 310027)

摘要: T型刚构桥的大部分病害均与预应力损失过大有关,因此目前对 T型刚构旧桥加固的方法主要是通过增加预应力索及粘贴钢板等来补偿混凝土的预应力。为评价采用这种方法加固桥梁的效果,采用空间有限元法分析了一座体外索加固后的 T型刚构桥的静动力性能,并进行了试验研究。结果表明:采用体外预应力成品索进行加固,预应力混凝土 T型刚构的强度、刚度、抗剪能力和承载力都有明显的提高,达到了设计的要求,但是预应力混凝土 T型刚构的部分振动频率与体外索的主振频率较为接近,应采取减振措施,预防体外索的疲劳破坏。

关键词: 桥梁工程;体外索;空间有限元法;预应力混凝土;T型刚构桥;加固;静动力工作性能;试验
中图分类号: U441.5 **文献标识码:** A

Study of static and dynamic behavior of T-shape rigid frame bridge reinforced by prestressed external tendon

XIANG Yi-qiang, YAO Yong-ding, HU Feng-qiang, JING Long-jiang, ZHU Wei-guo

(Institute of Traffic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: According to the fact that most defects of this type of bridge are related to loss of prestress, the main method to reinforce old T-frame bridges is to compensate loss of prestress by increasing prestressed tendons. In order to evaluate the effect of this method, the static and dynamic behavior of a T-frame bridge reinforced by prestressed external tendons was analysed by 3D finite element method, and the field test study was also made. The results show that the strength, rigidity, shear resistance and bearing capacity of old bridge have been greatly improved, but partial vibration frequencies of T-frame bridge are close to master frequency of external tendons, so shock absorbing measures should be taken to prevent external tendons from fatigue failure.

Key words: bridge engineering; prestressed external tendon; 3D FEM; prestressed concrete; T-frame bridge; reinforcement; static and dynamic behavior; field test

0 前言

预应力混凝土 T 型刚构加挂梁结构由于具有修建时可以不中断航道交通,跨度大的特点,而广泛应用于跨越水运繁忙的航道桥,例如在京杭运河浙江段就有十几座,而在中国,近二十年来已修建了不

少座 T 型刚构桥。这些已建的 T 型刚构桥,部分由于施工不当(如悬臂拼装缝过大),部分由于预应力筋应力松弛、混凝土收缩徐变较大,造成桥梁的预应力损失过大,或由于桥梁超载等其他原因,使得部分桥梁出现了诸如悬臂端挠度过大、梁体局部裂缝、桥面开裂等一些病害,严重降低了桥梁的实际承载力

收稿日期:2003-01-16

作者简介:项贻强(1959-),男,浙江杭州人,浙江大学教授,博士生导师,工学博士. E-mail:xiangyiq0@sina.com.cn

和使用寿命,影响交通的安全。

根据 T 型刚构桥的结构特点及大部分病害均与预应力损失过大有关,目前对 T 型刚构桥加固的方法和主要措施是通过增加预应力及粘贴钢板等来补偿混凝土的预应力,提高承载力,弥合裂缝和控制裂缝的扩展。以一座典型的预应力混凝土 T 型刚构桥的加固为工程背景,通过采用预应力体外索及粘贴钢板来提高结构的抗裂性能和承载力。为进一步评价采用这种方法加固桥梁的效果及静动力性能,有必要进行理论分析和试验研究,笔者将结合这一实际工程问题作一些探讨。

1 加固工程概况

浙江嘉兴七星桥位于繁忙的杭申线航道上,该桥上部结构主桥采用 40+60+40 m 悬拼式预应力混凝土 T 型刚构加 20 m 挂梁,T 型刚构截面形式为单箱双室箱梁,箱顶宽 8.5 m、底宽 6.36 m;两侧引桥均采用 8×13 m 钢筋混凝土空心板梁桥。预应力箱梁的混凝土设计标号为 C50,预应力材料采用 φ¹⁵ 15.00 高强度钢绞线,标准抗拉强度为 R_b⁰ = 1500 MPa。桥梁的桥面宽为净—7+2×1.0 m 人行道,设计荷载为汽—20 级、挂—100,人群荷载为 3.5 kN/m²。该桥从 1998 年 9 月建成到加固前,由于施工拼装不当,预应力损失过大,造成箱体局部产生裂缝和桥面严重开裂、悬臂端下挠^[1],经过设计分析计算,对该桥采用了如下加固措施:

(1)增设贯通整个箱梁的预应力索 6 束,每束设

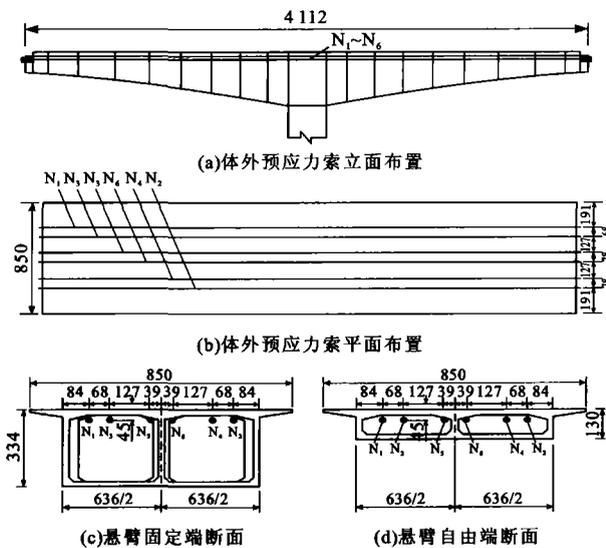


图 1 预应力体外索加固 T 型刚构桥/cm
Fig. 1 T-shape rigid frame bridge reinforced by prestressed external tendon

计张拉力 2 000 kN,具体布置见图 1。体外预应力索采用标准强度 σ^b 为 1 680 MPa 的低松弛钢绞线成品索,张拉控制应力 σ_k = 0.45σ^b。锚固点设在两个悬臂端的端部,为方便施工,将靠河侧的悬臂端作为体外预应力索的锚固端,箱体靠岸侧的悬臂端作为张拉端,安装可调锚具,便于以后的预应力调整。

(2)T 型刚构的箱体裂缝和拼块之间接缝处存在的缝隙用 k-801 树脂砂浆压浆予以填实。

(3)在箱体内侧腹板,沿 45° 方向粘贴厚 0.6 cm、宽 6 cm 的钢板,钢板通过膨胀螺栓和粘结材料与箱壁联接固定,以增强箱体的抗剪强度,修补已有的裂缝。

(4)凿除原桥面铺装,设置桥面加强钢筋网,桥面铺设钢纤维混凝土,恢复桥面的原设计标高,达到应有的平整度。

2 理论分析模型

理论分析采用有限元通用程序 ANSYS 建立空间模型进行,其中预应力混凝土 T 型刚构箱梁采用三维板单元,挂梁纵横隔梁采用空间梁单元,体外预应力索采用杆单元模拟,共划分为 2 288 个三维板单元、36 个杆单元、92 个空间梁单元、2 633 个节点,空间有限元计算模型见图 2。

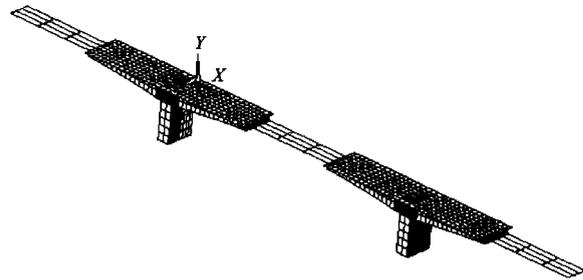


图 2 七星大桥预应力混凝土 T 型刚构空间有限元分析模型

Fig. 2 Theoretical analysis model of Seven Stars Bridge

3 静力性能分析与试验研究

3.1 测点布置及测试内容

结合七星桥预应力混凝土 T 型刚构原有的状况、加固施工的特点,考虑到与加固前的荷载试验结果相对比,仍选取西跨第 11# 墩西侧靠岸的预应力混凝土 T 型刚构桥跨进行试验研究,各测试截面及测点布置见图 3。

3.2 试验研究测试方法

研究对混凝土及粘贴钢板的应变,采用粘贴应

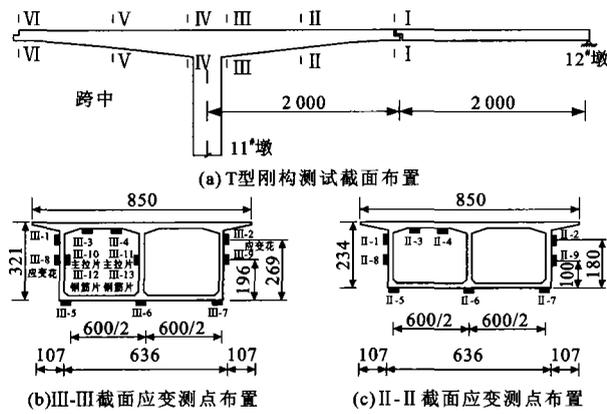


图 3 测试截面及测点布置/cm

Fig. 3 Test sections and distribution of observation points
变片用静态电阻应变仪测量。应变测试中,应注意温度的补偿,在布片截面的梁底搁置贴有温度补偿片的试块。

由于主跨位于运河的主航道上,在河中不可能搭支架,故采用连通管悬挂毫米级钢尺测读梁体的挠度,对岸上的悬臂端点挠度,则通过在梁底装置电子百分表直接测读挠度。裂缝宽度用裂缝观测仪测读。

根据设计,本预应力混凝土 T 型刚构桥以二列

表 1 预应力混凝土 T 型刚构挠度测点实测挠度与理论计算挠度的比较

Tab. 1 Comparison between measured and theoretical deflections of T-frame

荷载 工况	测点 截面	测点 编号	加固前实测弹性 挠度 S_e /mm	加固后实测弹性 挠度 S_e /mm	理论挠度 S_e /mm	校验系数 S_e/S_0	备注
西悬臂根部 负弯矩二辆车	I - I	5#	—	11.00	13.12	0.84	连通管观测
		6#	16.45	13.61	13.68	0.99	电测百分表
		7#	16.99	13.50	13.68	0.99	
西悬臂根部 负弯矩三辆车	III - III	5#	—	17.50	18.12	0.97	连通管观测
		6#	24.45	18.75	18.84	1.00	电测百分表
		7#	25.77	18.20	18.52	0.98	
	II - II	4#	8.73	5.40	5.63	0.96	连通管观测
西悬臂根部 负弯矩四辆车	III - III	5#	—	20.70	19.90	1.04	连通管观测
		6#	27.92	20.50	20.73	0.99	电测百分表
		7#	28.20	20.20	20.73	0.97	
	II - II	4#	9.71	5.90	6.21	0.95	连通管观测
西悬臂根部 剪力四辆车	III - III	5#	—	13.00	13.84	0.94	连通管观测
		6#	19.32	14.18	14.21	1.00	电测百分表
		7#	19.90	14.07	14.21	0.99	
	II - II	4#	7.67	1.40	5.72	0.24	连通管观测

注:6#、7# 挠度测点为 I - I 截面的箱梁两外侧腹板下缘的点,其余挠度测点为相应截面上缘的点。

3.4 结果分析

(1)从表 1 可以看出:在各荷载工况作用下,加载测试截面加固后的实测挠度明显小于加固前的实测挠度,体外预应力索的加固效果明显,预应力混凝土

汽—20 级车队和挂—100 布载控制设计^[2],故试验加载汽车选用新解放大型载重汽车(单车总重为 300 kN 左右,前轴重 60 kN,中后轴重 240 kN)车队模拟汽车—20 级(包括人群荷载)和挂—100 的内力效应较大值布置加载。加载试验效率按规范要求控制在 0.85~1.05,具体加载载位限于篇幅,这里略去。

3.3 空间静力分析结果及与试验值的比较

预应力混凝土 T 型刚构桥的挠度理论分析采用有限元空间分析模型^[3],加固后的实测挠度值与理论挠度值及加固前的实测挠度值的比较见表 1,实测的各主要测试截面的相对残余挠度较小,卸载后能迅速回弹,表明加固后的预应力混凝土 T 型刚构具有良好的弹性工作性能。最大弯矩和最大剪力荷载工况下,预应力混凝土 T 型刚构桥跨各测试截面测点的应力实测值与理论值的比较见表 2,西跨悬臂根部 III - III 截面箱梁内部两侧腹板处的钢板和混凝土的实测应变基本一致,说明钢板和混凝土受力协调,加强了预应力混凝土 T 型刚构抗剪能力,达到了加固设计的目的。各级加载工况下,所有控制截面均未出现裂缝。

土 T 型刚构的刚度有很大的提高;悬臂端平均挠度恢复了 7.71 mm,和设计预计的相吻合。

(2)各荷载工况作用下,各加载测试截面的实测挠度值和理论计算挠度基本一致,西悬臂端点 III - III

表2 最大一级荷载下预应力混凝土T型刚构各测试截面实测应力与理论应力的比较

Tab. 2 Comparison between measured and theoretical stress of concrete T-frame under the maximum loading condition

荷载工况	测试截面		测点位置	西侧T型刚构应力/MPa						
				实测应力	空间理论应力	平面理论应力	空间校验系数	平面校验系数		
西悬臂根部 负弯矩四辆车	III-III	箱梁顶板	III-1	1.322	2.217	1.936	0.60	0.68		
			III-2	1.322	2.217		0.60	0.68		
			III-3	1.165	1.849		0.63	0.60		
			III-4	2.450	1.886		1.30	1.27		
		箱梁底板	III-5	-1.540	-3.562	-3.047	0.43	0.51		
		主拉应力	III-8	0.385	—	0.570	—	0.68		
			III-9	0.035	—		—	0.06		
			III-10	0.315	—		—	0.55		
			III-11	0.245	—		—	0.43		
		西悬臂根部 剪力四辆车	III-III	箱梁顶板	III-1	0.841	1.367	1.402	0.62	0.59
					III-2	1.081	1.487		0.73	0.76
III-3	0.700				1.203	0.58	0.50			
III-4	1.491				1.040	1.43	1.06			
箱梁底板	III-5			-1.085	-2.985	-2.207	0.36	0.50		
主拉应力	III-8			0.105	—	0.708	—	0.15		
	III-9			0.105	—		—	0.15		
	III-10			0.455	—		—	0.64		
	III-11			0.490	—		—	0.69		
西悬臂根部 负弯矩四辆车	II-II			箱梁顶板	II-1	1.276	1.933	1.902	0.66	0.67
					II-2	0.457	1.933		0.24	0.24
		II-3	0.897		1.937	0.46	0.46			
		II-4	1.121		1.971	0.57	0.57			
		箱梁腹板	II-8	-0.945	—	-1.121	—	0.84		
			II-9	-0.910	—		—	0.81		
		箱梁底板	II-5	-2.625	-3.310	-3.362	0.79	0.78		
			II-6	-2.975	-3.381		0.88	0.88		
			II-7	-2.590	-3.310		0.78	0.77		
		东悬臂根部 负弯矩四辆车	IV-IV	箱梁顶板	IV-1	-0.120	2.217	1.936	—	—
				箱梁底板	IV-2	-1.820	-3.562	-3.047	0.51	0.60
IV-3	-2.170				-3.435	0.63	0.71			
V-V	箱梁底板	V-1	-2.135	-3.310	-3.362	0.65	0.64			
		V-2	-2.660	-3.381		0.79	0.79			
		V-3	-2.065	-3.310		0.62	0.61			

注:箱梁顶板底缘的混凝土实测应力已按平截面假定换算为桥面混凝土的应力,III-6、III-7、IV-4为测点应变片损坏。

截面最大实测挠度为20.50 mm(连通管观测20.70 mm),相对悬臂跨长为 $L/966$,小于《桥规》规定的 $L/300$,说明该桥的刚度大于规范的要求,且有一定的安全储备。

(3)从表2可以看出:在最后一级荷载作用下,

除III-4点应变片有问题外,其余各测试截面的实测应力均小于理论计算应力,测试截面主拉应力实测值均小于理论值,校验系数基本在0.50~0.90之间,说明该预应力混凝土T型刚构桥跨的混凝土工作基本正常,T型刚构的抗剪能力有很大的提高,满

足加固设计的要求。

4 动力性能分析与试验研究

4.1 测点布置及测试内容

根据七星桥在汽车荷载作用下的振动特点,仍以西跨预应力混凝土 T 型刚构作为试验对象,测试内容有:①T 型刚构在跳车荷载下,悬臂端截面点及典型体外索的振动响应;②T 型刚构在不同车速的移动荷载下,悬臂端截面关键点及典型体外索的振动响应、结构的冲击系数等。各动态测点的布置见图 4,并由动态测试分析系统进行测试数据的采集和分析。

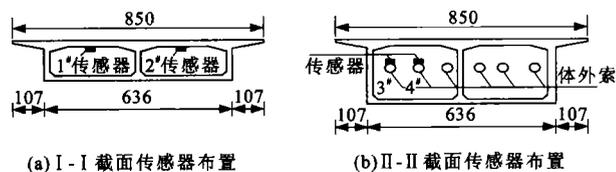


图 4 动载试验测点布置/cm

Fig. 4 Dynamic load test on distribution of observation points

4.2 空间动力分析及试验结果

4.2.1 前几阶自振频率及振动模式

由空间有限元空间模型计算的前 6 阶振型如图 5 所示。现场试验测得频率与理论分析频率一并列于表 3,可见第 1、3~6 阶频率基本吻合,而第 2 阶频率没有测到。

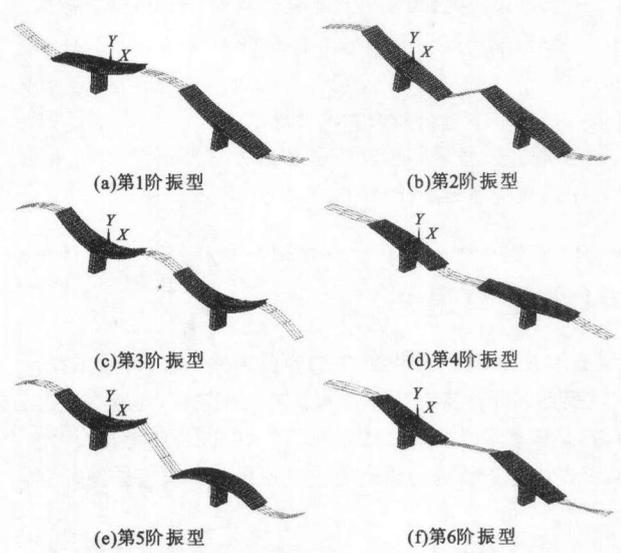


图 5 理论计算的前 6 阶频率对应的振型

Fig. 5 Prior six model shapes of T-frame calculated by FEM

4.2.2 跳车试验结果与分析

T 型刚构悬臂端跳车试验时,预应力混凝土 T 型刚构和典型体外索的加速度时程曲线见图 6~8。

表 3 前 6 阶实测频率与理论计算值/Hz

Tab. 3 Comparison the values between measured frequencies and theoretical frequencies of prior six

阶次	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶	第 4 阶	第 5 阶	第 6 阶
实测频率	1.875	—	3.750	4.063	4.375	5.625
理论频率	2.049	2.276	3.558	3.635	4.233	5.265

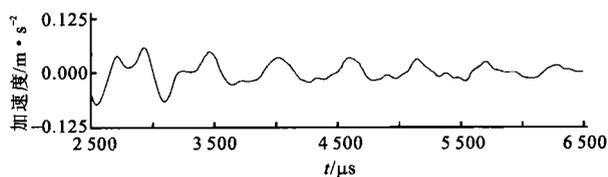


图 6 预应力混凝土 T 型刚构悬臂端跳车试验加速度时程曲线

Fig. 6 Acceleration-time curve of prestressed concrete T-frame under jumping truck test at cantilever

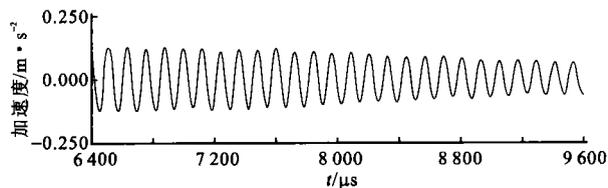


图 7 预应力混凝土 T 型刚构体外索 1 跳车加速度时程曲线

Fig. 7 Acceleration-time curve of external tendon 1 in prestressed concrete T-frame under jumping truck

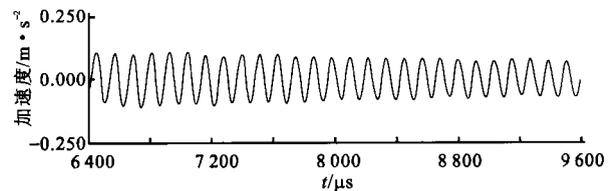


图 8 预应力混凝土 T 型刚构体外索 2 跳车加速度时程曲线

Fig. 8 Acceleration-time curve of external tendon 2 in prestressed concrete T-frame under jumping truck

试验测得 T 型刚构的主振频率为 8.75 Hz,接近于理论计算第 14 阶自振频率 8.401,其振型如图 9 所示。预应力混凝土 T 型刚构的主振频率如此之高,在其他类型桥梁少有。

从跑车试验索的加速度时程曲线经分析可以发现:索 1、2 的主振频率为 8.125、8.438 Hz,而预应力混凝土 T 型刚构的实测频率在 3.75~7.5 Hz 左右,两者较为接近;另外在激振后,典型体外索 1、2 的加速度时程曲线衰减非常缓慢,这主要是体外索的阻尼非常小所致。

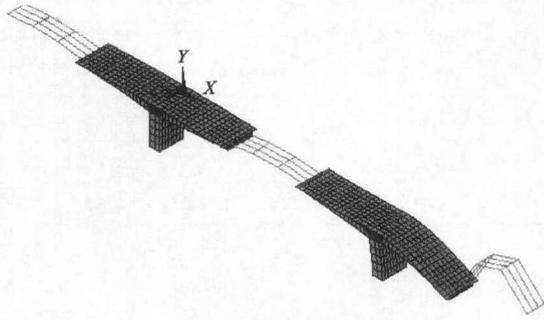


图9 理论计算的第14阶频率对应的振型

Fig. 9 The 14th model shape of T-frame calculated by FEM

4.2.3 跑车试验结果与分析

预应力混凝土 T 型刚构在不同车速时的冲击系数见图 10。从图 10 中可以看出汽车以较低车速行驶时,对桥的冲击较大,实测最大冲击系数为 1.118,按《桥规》计算该桥的冲击系数为 1.037 5,与实测值相比偏小。在不同车速下,预应力混凝土 T 型刚构和体外索的主振频率见表 4。

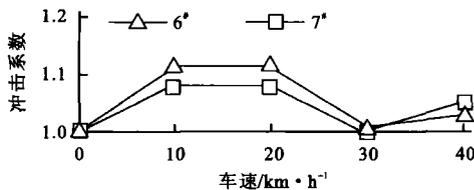


图10 冲击系数随速度的变化曲线

Fig. 10 Impact coefficient-velocity curves of T-frame

5 结 语

(1)加固后的预应力混凝土 T 型刚构在荷载作用下,各加载测试截面的实测挠度值与空间理论计算挠度基本吻合,且具有良好的弹性工作性能。

(2)实测预应力混凝土 T 型刚构的冲击系数随

表4 跑车时预应力混凝土 T 型刚构和体外索的主振频率/Hz

Tab. 4 Measured master frequencies of T-frame and external tendons under truck running

试验车辆数	测试对象	车速/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$				
		5	10	20	30	40
一辆车	T 型刚构	7.500	4.063	3.750	4.375	3.750
	体外索 1	8.125	8.125	8.125	8.125	8.125
	体外索 2	8.438	8.438	8.438	8.438	8.438

车速变化,且与桥梁的平整度等因素有关,与《桥规》计算值相比,实测的冲击系数值较大。

(3)分析与试验研究发现预应力混凝土 T 型刚构的部分振动频率与体外索的主振频率较为接近,体外索的振动衰减非常缓慢,应采取减振措施,预防体外索的疲劳破坏。

(4)七星桥预应力混凝土 T 型刚构采用体外预应力成品索进行加固,在中国尚不多见,该法具有加固施工简单方便、可行和有效的优点,后期还可以根据需要进行索力调整,分析测试研究表明采用此方法加固使预应力混凝土 T 型刚构的强度、刚度、抗剪能力和承载力都有明显的提高,显示了这种加固方法的魅力和独到之处。

参考文献:

- [1] 项贻强. 悬拼式预应力混凝土 T 型刚构桥病害成因的分析及其试验研究[J]. 公路交通科技, 2002, 19(1): 40-44.
- [2] JTJ 021-89, 公路桥涵设计规范[S].
- [3] 项贻强. 桥梁结构分析的数值方法及程序[M]. 北京: 人民交通出版社, 1993.

《中国公路学报》2004 年征订通知

《中国公路学报》(季刊)是中国公路学会主办的公路交通行业最权威的学术性刊物,主要刊载道路工程、桥隧工程、交通工程、筑路机械工程、汽车与汽车运用工程、公路运输经济与工程经济等专业的应用技术及理论性文章,并适当报道有关公路交通的新技术、新材料、新工艺以及国内外重大学术活动、工程建设及科技动态信息等。《中国公路学报》网络版——中国公路网延伸了《中国公路学报》的信息传播功能,为读者提供全方位的公路交通信息服务。中国公路网的网址为: <http://www.highway-china.com>。

《中国公路学报》(大 16 开本)读者对象为:公路交通界的科研人员、工程技术人员、经济管理人员及大专院校的师生。《中国公路学报》每期定价 15.00 元(含邮寄费),2004 年 4 期共 60.00 元。

另外,《中国公路学报》编辑部现有少量 2002 年合订本,100 元(含邮寄费)/册。欢迎订阅!

收款单位:长安大学杂志社(西安市南二环路中段)

邮编:710064

开户行:西安市工商行小寨分理处

账号:3700021609014486011

联系人:赵文义

电话:(029)82334387