

文章编号:1673-2049(2014)03-0032-06

## 辅助墩对大跨度铁路悬索桥抗震性能及 列车走行性的影响

李永乐<sup>1</sup>,王云飞<sup>1</sup>,周 昱<sup>1</sup>,何庭国<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院,四川 成都 610031;

2. 中国中铁二院工程集团有限责任公司,四川 成都 610031)

**摘要:**为研究辅助墩对铁路悬索桥抗震性能及列车走行性的影响,以主跨 828 m 的某单线铁路悬索桥方案为工程背景,建立了有限元模型,采用反应谱法和时程分析法对比研究了辅助墩对铁路悬索桥地震响应的影响。通过车-桥耦合振动分析,比较了不同位置辅助墩对桥梁和列车动态响应的影响。结果表明:设置辅助墩后,加劲梁的竖向地震反应明显减小,而桥塔的地震响应增大;车辆通过桥梁时,设置辅助墩后梁端竖向转角、车辆竖向加速度和轮重减载率均减小;当辅助墩位置向梁端移动时,梁端竖向转角、车辆竖向加速度及轮重减载率均逐渐减小,车辆响应对辅助墩纵向位置的变化不敏感。

**关键词:**辅助墩;铁路悬索桥;地震响应;车-桥耦合振动;动力响应

**中图分类号:**U448.27 **文献标志码:**A

## Influence of Auxiliary Piers on Seismic Behavior and Train Runability for Long-span Railway Suspension Bridge

LI Yong-le<sup>1</sup>, WANG Yun-fei<sup>1</sup>, ZHOU Yu<sup>1</sup>, HE Ting-guo<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** To investigate the influence of auxiliary piers on the seismic behavior and train runability of long-span railway suspension bridge, a single-line railway suspension bridge with a main span 828 m was regarded as an example, and the finite element models were built. Meanwhile, a comparative research on the influence of the auxiliary piers on seismic response of railway suspension bridge was carried out by using response spectrum method and time history analysis method. The dynamic responses of the train and bridge were compared under different locations of the auxiliary piers by analyzing the train-bridge coupling vibration. The results show that vertical seismic response of the stiffening girder is significantly decreased after setting auxiliary piers, and the seismic response of the bridge towers is increased after setting auxiliary piers. The vertical rotation angle at girder ends, the vertical acceleration and load reducing ratio of the train are decreased after setting auxiliary piers. The vertical rotation angle at girder ends, the vertical acceleration and load reducing ratio of the train are decreased as the auxiliary piers moving to the girder ends, and the train responses are not sensitive to the changes of the auxiliary

收稿日期:2014-05-12

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAG05B02);国家自然科学基金项目(U1334201)

作者简介:李永乐(1972-),男,河南洛阳人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:lele@swjtu.edu.cn。

**Key words:** auxiliary pier; railway suspension bridge; seismic response; train-bridge coupling vibration; dynamic response

图 2 中给出了工况 1 下桥塔横向弯矩、桥塔纵向位移及加劲梁的竖向位移。由图 2 可见:设置辅助墩会增大塔身横向弯矩和桥塔纵向位移,但是会明显减小加劲梁的竖向位移,而加劲梁跨中竖向位

表 1  $E_2$  概率下重要截面计算结果

Tab.1 Calculation Results of Important Section Under Probability  $E_2$

工况编号	参数	有辅助墩	无辅助墩
1	桥塔顶纵向位移/m	0.338 1	0.238 2
	中跨跨中纵向位移/m	1.606 6	1.603 8
	中跨跨中竖向位移/m	0.615 9	0.662 1
	边跨跨中竖向位移/m	0.032 4	0.544 1
	主梁最大弯矩/(kN·m)	5 855	10 882
	桥塔底横向弯矩/(kN·m)	6 097 073	4 806 507
2	桥塔顶横向位移/m	0.418 0	0.416 3
	中跨跨中横向位移/m	2.308 9	2.309 9
	中跨跨中竖向位移/m	0.616 5	0.664 2
	边跨跨中竖向位移/m	0.017 4	-0.112 4
	主梁最大弯矩/(kN·m)	449 297	537 138
	桥塔底纵向弯矩/(kN·m)	3 165 891	3 099 128

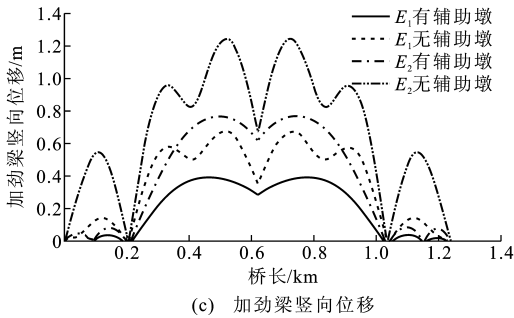
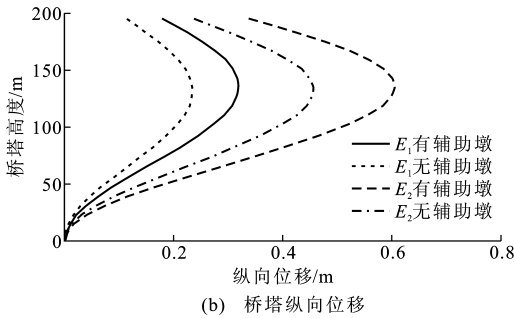
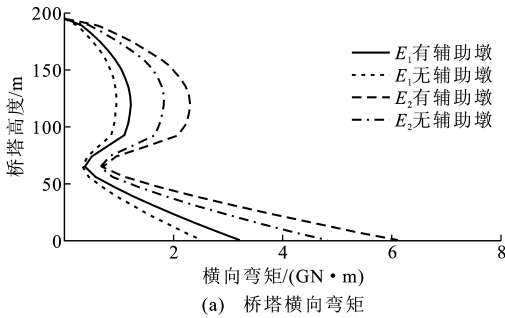


图 2 工况 1 下结构的响应 I

Fig.2 Structure Responses I Under Case 1

移改变不大,这与表 1 中的结果一致。

图 3 中给出了工况 2 下桥塔纵向弯矩、桥塔横向位移及加劲梁的竖向位移。由图 3 可见,设置辅助墩后,桥塔的地震响应变化很小,加劲梁的竖向位

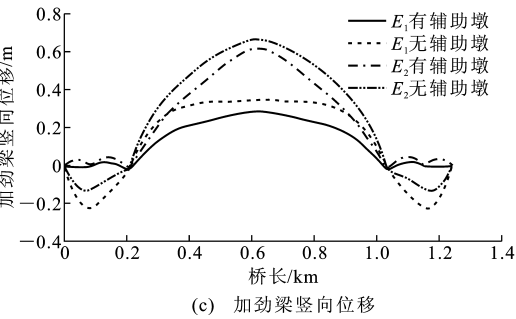
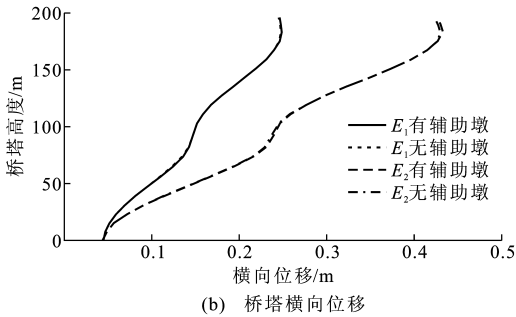
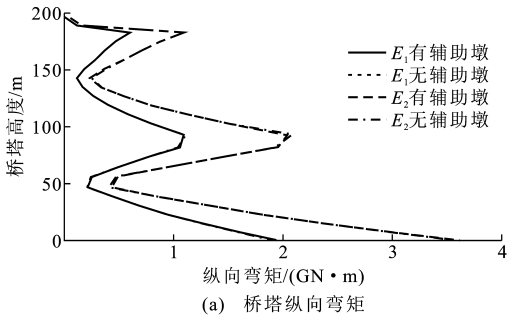


图 3 工况 2 下结构的响应

Fig.3 Structure Responses Under Case 2

移有所减小,与工况 1 类似。

1.4 桥梁结构时程分析

根据上述求得的对应  $E_1, E_2$  两种概率水平地震动的地表加速度时程曲线,对该大桥于地震动作用下的动力微分方程在时域内直接积分求解即可进行时程反应分析,计算时考虑主缆对刚度的影响,考虑几何非线性的影响,计算工况与第 1.3 节相同。

图 4 中给出了工况 1 下塔底横向弯矩、塔顶纵向位移、主跨跨中竖向位移的时程反应及塔身横向的最大弯矩。由图 4 可见,设置辅助墩后,塔底横向弯矩和塔顶纵向位移的时程反应增大,主跨跨中竖向位移减小,塔身最大弯矩增大,结果与反应谱分析方法接近。这表明 2 种分析方法得到的结果能够反映实际地震作用下的结构,辅助墩对减小悬索桥主梁地震反应有利,而对桥塔地震反应不利。

2 车-桥耦合振动分析

2.1 分析方法

在进行分析时,将车-桥系统分成车辆子系统和

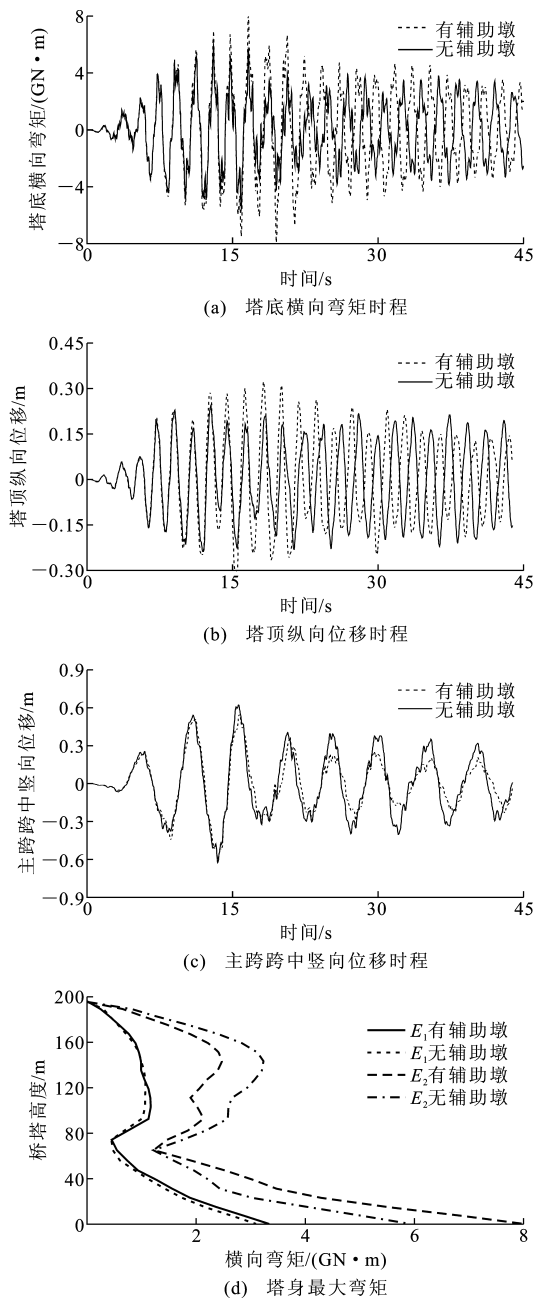


图 4 工况 1 下结构的响应 II

Fig. 4 Structure Responses II Under Case 1

桥梁子系统,分别对这 2 个子系统求解桥梁及车辆的运动方程,通过分离迭代来满足车辆、桥梁 2 个子系统间的几何和力学的耦合关系<sup>[7-10]</sup>。

本研究采用的列车为 CRH2 型动力分散式车组,列车编组为  $2 \times (\text{拖车} + \text{动车} + \text{拖车})$ ,共 8 节,速度采用  $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ <sup>[11-12]</sup>。动力分析的空间步长为  $0.2 \text{ m}$ ,轨道的不平顺情况采用美国 6 级谱进行模拟,采用自主研发的桥梁结构分析程序 BANSYS 对桥梁结构进行车-桥耦合振动分析。

### 2.2 桥梁响应

为分析辅助墩对大跨度铁路悬索桥车-桥耦合

振动中桥梁响应的影响,分别分析了有辅助墩和不设置辅助墩时桥梁的响应,同时对辅助墩设置在不同位置时也进行了分析。以下结果中辅助墩 1,2,3 分别表示辅助墩设置在距边吊索 1 个节间、2 个节间、3 个节间的位置(图 1)。表 2 中给出了不同辅助墩设置工况下桥梁主跨跨中在列车作用下的响应和出桥侧梁端竖向转角的结果。

表 2 车速  $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时不同辅助墩位置下桥梁在列车作用下的响应

Tab. 2 Bridge Responses Under Action of Train for Different Auxiliary Piers' Locations when Train Speed is  $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

辅助墩位置	位移/mm		扭转角/ $10^{-5} \text{ rad}$	加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$		梁端竖向转角/ $10^{-4} \text{ rad}$
	横向	竖向		横向	竖向	
	5.61	204.87	8.8	0.065	0.307	5.183 4
1	5.51	203.41	9.5	0.064	0.301	1.491 4
2	5.42	203.87	9.1	0.065	0.301	1.374 5
3	5.29	204.21	8.8	0.065	0.302	1.124 0

由表 2 可见:桥梁主跨跨中横向和竖向位移在设置辅助墩后略有减小;出桥侧梁端转角在设置辅助墩后明显减小,且随着辅助墩向梁端移动(远离吊索方向)而逐渐减小;辅助墩对跨中扭转角和跨中截面加速度无明显影响。

图 5 为 CRH2 动车组以  $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的速度通过不同辅助墩工况下的桥梁时主跨跨中的横向位移、竖向位移、扭转角及梁端竖向转角随车辆移动的时程曲线。由图 5 可见,跨中横向位移在设置辅助墩后有所减小,梁端竖向转角明显减小,而辅助墩位置对跨中横向位移影响不大,对跨中竖向位移和跨中扭转角的影响不明显。

### 2.3 车辆响应

辅助墩主要影响悬索桥竖向刚度,车辆的横向加速度等横向响应在不同工况下变化很小,因此车辆横向各响应项不列出讨论,本文中主要研究辅助墩对车辆响应的影响。

表 3 中给出了 CRH2 动车组以  $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的速度通过不同辅助墩设置工况下车辆的响应。由表 3 可知,车辆响应对辅助墩的变化不敏感,动车与拖车的竖向加速度和轮重减载率在设置辅助墩后均有所减小,并且随着辅助墩位置向梁端移动,车辆的竖向加速度和轮重减载率均有逐渐减小的趋势。

## 3 结 语

(1)在纵向+竖向地震波作用下,设置辅助墩后加劲梁的竖向位移和最大弯矩明显减小,桥塔的弯

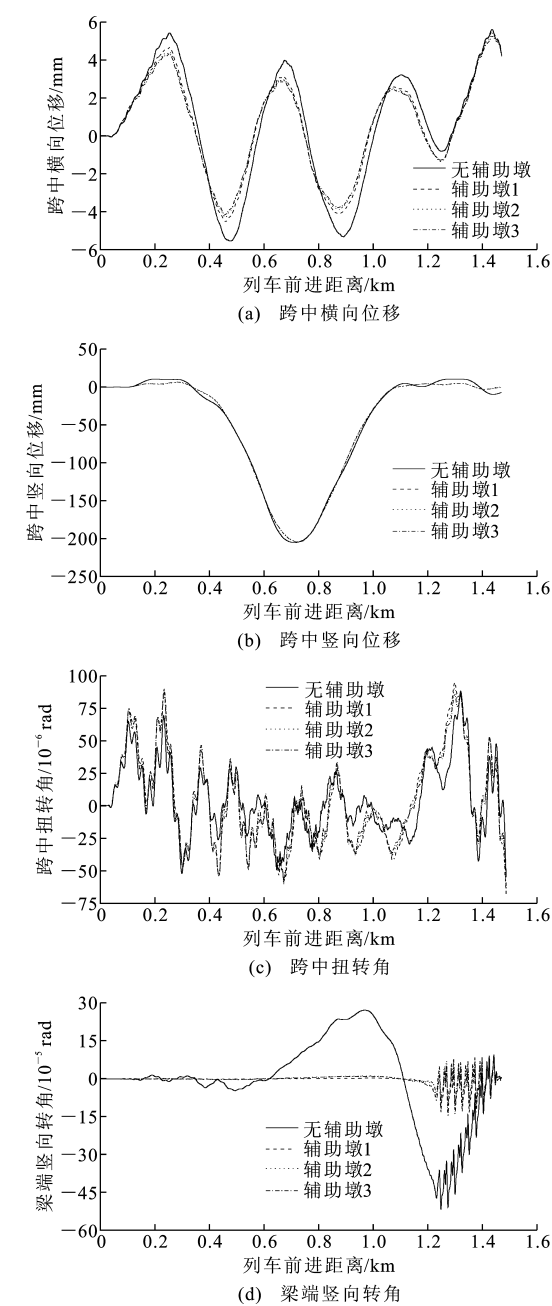


图5 车速  $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  时主跨跨中位移、扭转角及梁端竖向转角时程曲线

Fig. 5 Time History Curves of Midspan Displacement, Torsion Angles and Girder End Vertical Rotation Angles of Main Span when Train Speed is  $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$

表3 车速  $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  时不同辅助墩位置下车辆的响应

Tab. 3 Train Responses Under Different Auxiliary Piers' Locations when Train Speed is  $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$

辅助墩位置	动车					拖车				
	竖向加速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	轮轴横向 力/kN	轮重减载率	脱轨系数	竖向舒适 指标	竖向加速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	轮轴横向 力/kN	轮重减载率	脱轨系数	竖向舒适 指标
	1.396	34.120	0.559	0.246	2.282	1.754	29.680	0.678	0.250	2.026
1	1.360	34.540	0.549	0.246	2.274	1.606	30.040	0.635	0.256	2.034
2	1.346	34.480	0.541	0.246	2.269	1.586	29.900	0.625	0.255	2.032
3	1.328	34.320	0.531	0.245	2.269	1.551	29.790	0.613	0.255	2.032

矩和位移增大,表明辅助墩对减小悬索桥主梁竖向地震反应有利,而对桥塔地震反应不利。

(2)在横向往竖向地震波作用下,桥塔各项响应在有辅助墩时无明显变化,主梁竖向位移在设置辅助墩后有明显减小。

(3)桥梁主跨跨中横向和竖向位移在设置辅助墩后略有减小;出桥侧梁端竖向转角在设置辅助墩后明显减小,且随着辅助墩向梁端远离吊索的方向移动而逐渐减小。

(4)车辆响应对辅助墩纵向位置的变化不敏感,动车与拖车的竖向加速度和轮重减载率在设置辅助墩后均有所减小,并且随着辅助墩位置向梁端移动,车辆的竖向加速度以及轮重减载率均有逐渐减小的趋势。

参考文献:

References:

[1] 严国敏. 现代悬索桥[M]. 北京:人民交通出版,2002.  
YAN Guo-min. Modern Suspension Bridges[M]. Beijing:China Communications Press,2002.

[2] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海:同济大学出版社,1997.  
FAN Li-chu. Aseismic Analysis of Bridges [M]. Shanghai:Tongji University Press,1997.

[3] 范立础,胡世德,叶爱军. 大跨度桥梁抗震设计[M]. 北京:人民交通出版社,2001.  
FAN Li-chu,HU Shi-de,YE Ai-jun. Aseismic Design of Long Span Bridge[M]. Beijing:China Communications Press,2001

[4] 周 牧,王君杰,袁万城. 自锚式悬索桥地震反应有限元分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2008,28(1): 66-71.  
ZHOU Mi,WANG Jun-jie,YUAN Wan-cheng. Seismic Response Analysis and Simulation of Self-anchored Suspension Bridge Based on ANSYS[J]. Journal of Chang'an University:Natural Science Edition, 2008,28(1):66-71.

[5] 朱朝银,郑凯峰,万 鹏. 辅助墩对高低塔单索面斜拉桥动力性能与稳定性影响的计算分析[J]. 四川建筑, 2005,25(6):92-93.

- ZHU Chao-yin, ZHENG Kai-feng, WAN Peng. Analysis on the Influence of Auxiliary Piers on the Dynamic Performance and Stability of High and Low Towers Single Cable Plane Cable-stayed Bridge[J]. Sichuan Architectural, 2005, 25(6): 92-93.
- [6] 李江龙. 辅助墩对斜拉桥静力和动力响应影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- LI Jiang-long. Influence of Auxiliary Piers on the Static and Dynamic Response of Cable-stayed Bridge [D]. Harbin: Harbin Institue of Technology, 2009.
- [7] 李小珍, 蔡 婧, 强士中. 京沪高速铁路南京长江大桥列车走行性分析[J]. 工程力学, 2003, 20(6): 86-92, 22.
- LI Xiao-zhen, CAI Jing, QIANG Shi-zhong. Train Runability of the Schemed Beijing-Shanghai High-speed Railway on the Nanjing Yangtze-river Bridge [J]. Engineering Machanics, 2003, 20(6): 86-92, 22.
- [8] 李小珍, 刘德军, 晋智斌. 大跨度铁路悬索桥车-线-桥耦合振动分析[J]. 钢结构, 2010, 25(12): 6-12, 71.
- LI Xiao-zhen, LIU De-jun, JIN Zhi-bin. Analysis of Train-track-bridge Coupled Vibration of a Railway Long-spansuspension Bridge[J]. Steel Construction, 2010, 25(12): 6-12, 71.
- [9] 李永乐, 侯光阳, 乔倩妃, 等. 超大跨径悬索桥主缆材料对静风稳定性的影响[J]. 中国公路学报, 2013, 26(4): 72-77.
- LI Yong-le, HOU Guang-yang, QIAO Qian-fei, et al. Effects of Different Cable Materials on Aerostatic Stabilities of Super-long-span Suspension Bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(4): 72-77.
- [10] 方 志, 唐盛华, 张国刚, 等. 基于多状态下静动态测试数据的斜拉桥模型修正[J]. 中国公路学报, 2011, 24(1): 34-41.
- FANG Zhi, TANG Sheng-hua, ZHANG Guo-gang, et al. Cable-stayed Bridge Model Updating Based on Static and Dynamic Test Data of Multi-state [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(1): 34-41.
- [11] 朱东生, 田 琪. 高速铁路车桥系统横向振动研究[J]. 兰州铁道学院学报, 1997, 16(3): 1-6.
- ZHU Dong-sheng, TIAN Qi. Study of the Lateral Vibration of Vehicle-bridge System on High Speed Railways[J]. Journal of Lanzhou Railway Institute, 1997, 16(3): 1-6.
- [12] 张 强, 李永乐, 邓江涛, 等. 桁宽对大跨度铁路斜拉桥车-桥耦合振动性能的影响研究[J]. 桥梁建设, 2012, 42(1): 19-23.
- ZHANG Qiang, LI Yong-le, DENG Jiang-tao, et al. Study of Influence of Truss Width on Train-bridge Coupling Vibration of Long Span Railway Steel Truss Girder Cable-stayed Bridge[J]. Bridge Construction, 2012, 42(1): 19-23.

## 《土木工程学报》2015 年征订通知

《土木工程学报》是中华人民共和国住房和城乡建设部主管, 中国土木工程学会主办的土木工程类综合性学术期刊, 以土木工程界中高级工程技术人员为主要读者对象; 主要报道结构工程、桥梁工程、岩土力学及地基基础、隧道工程、防护工程、道路及交通工程、建设管理等专业在科研、设计、施工等方面的重要成果及发展状况, 重视刊登结合工程实践的论著, 并报道行业综述、科技信息和动态, 促进国内外土木工程界的学术交流。

《土木工程学报》创刊于 1954 年 3 月, 现为美国《工程索引》(Ei) 收录期刊、北京大学工业技术类全国中文核心期刊、中国科技信息研究所中国科技核心期刊、中科院文献情报中心中国科学引文数据库核心期刊和武汉大学中国科学评价研究中心权威学术期刊。

《土木工程学报》为月刊, 大 16 开本, 每期定价 25 元, 全年共 300 元; 国内外公开发行, 国内邮发代号: 2-582, 国外发行代号: M288。《土木工程学报》2015 年征订工作已经开始, 欢迎各界有关单位及个人订阅。

地 址: 北京市三里河路 9 号住建部内 电 话: (010) 58934211 网 址: www.cces.net.cn  
邮 编: 100835 传 真: (010) 58933912 E-mail: tumuxuebao@263.net