

单面钢丝网水泥砂浆加固承重夯土墙体抗震试验研究

张又超, 王毅红, 张项英, 权登州

(长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 针对我国村镇大量在役生土结构民居抗震性能低的问题, 提出单面钢丝网水泥砂浆加固夯土墙体的方法, 研究用该法加固的生土墙体的受力性能及抗震性能。设计了 5 片夯土墙试件进行拟静力试验, 在恒定竖向荷载下, 对试件施加低周反复水平荷载, 研究墙体在地震水平荷载作用下的破坏过程和破坏形态, 分析夯土墙体的滞回曲线和骨架曲线特征, 得到加固后和未加固夯土墙体的极限荷载和极限位移, 验证了采用钢丝网水泥砂浆面层加固夯土墙体的效果, 分析了加固后墙体在地震水平荷载作用下的破坏机理。研究表明: 采用钢丝网水泥砂浆面层加固可明显提高夯土墙体的承载能力和变形能力, 可有效避免夯土墙体在地震作用下的倒塌破坏。

关键词: 生土结构; 夯土墙; 加固改造; 钢丝网水泥砂浆; 抗震性能

中图分类号: TU361

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)02-0255-05

Experimental study on strengthening rammed-earth wall with single side Ferro-cement surface layer

ZHANG Youchao, WANG Yihong, ZHANG Xiangying, QUAN Dengzhou

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: This paper proposed an easy construction method that strengthening rammed-earth wall with single side Ferro-cement surface layer and studied the reinforced the mechanical behavior and seismic behavior of the reinforced raw soil walls by this method. Five rammed-earth wall specimens were designed. Vertical loading and low cycle reversed horizontal loading are carried out on specimen aimed to study the failure process, failure mode, failure mechanism and hysteretic curve and skeleton curve feature. The ultimate load and ultimate displacement of the reinforced rammed-earth wall and unreinforced rammed-earth wall are also obtained. The reinforcement effect is also verified. The results show that reinforcement method proposed in this paper have remarkable results on the load-carrying and deformation capacity of the rammed-earth wall, and effectively avoided the rammed-earth wall's damages and collapse.

Key words: raw-soil structure; rammed-earth wall; strengthening woks; Ferro-cement; seismic performance

生土结构房屋就地取材、造价低廉、绿色环保、保温与隔热性能优越, 在我国农村地区大量存在^[1-4], 但目前生土房屋的结构安全及抗震性能方面存在着较大的问题, 大批在役生土结构房屋有抗震加固的需求^[5-6]。钢筋网水泥砂浆面层加固已证明是一种行之有效的砖墙加固方法, 能明显提高墙体的抗震能力^[7-9], 用这种方法加固土坯墙体也能够大幅度提高其承载力^[10], 但用该法对夯土墙体加固的效果尚未得到试验验证。本文采用钢筋网水泥砂浆面层对夯土墙体进行加固, 对比分析不同加固方法对夯土墙体受力及抗震性能的影响, 为制定住建部行业标准《村镇建筑抗震鉴定与加固技术规程》提供编制依据。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

参考村镇夯土墙承重房屋的实际尺寸, 取 4 950 mm×3 900 mm×720 mm 尺寸的墙体为原型, 结合试验室加载设备的情况, 采用 1:3 缩尺比例, 夯土墙试件的尺寸为: 1 650 mm×1 300 mm×240 mm。模型与原型的参数相似关系见表 1。制作了五片夯土墙试件: 夯土墙对比试件 (W-1), 正放钢丝网水泥砂浆面层加固的夯土墙试件 2 片 (W-2-1, W-2-2), 斜放钢丝网水泥砂浆面层加固的夯土墙试件 2 片 (W-3-1, W-3-2), 试件的外形及尺寸见图 1。

表 1 模型与原型的相似关系

Tab.1 The similar relationship between model and prototype

| 物理量 | 长度 | 质量 | 位移 | 弹性模量 | 应变 | 应力 | 弯矩 | 轴力, 剪力 | 竖向荷载 |
|------|-----|------|-----|------|-----|-----|------|--------|------|
| 相似关系 | 1:3 | 1:27 | 1:3 | 1:1 | 1:1 | 1:1 | 1:27 | 1:9 | 1:9 |

收稿日期: 2014-11-05

修改稿日期: 2015-03-25

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130205110012); 住建部 2013 年工程建设标准规范制定修订项目(建标[2013]6 号第 99 项)

作者简介: 张又超 (1988-), 男, 博士研究生, 主要从事砌体结构抗震及生土结构抗震研究。E-mail: 814476290@qq.com

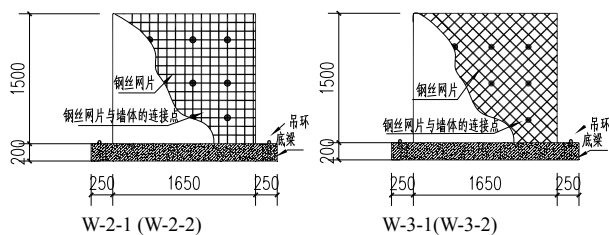


图1 正放、斜放的钢丝网水泥砂浆面层加固夯土试件

Fig.1 The rammed earth specimen reinforced with upright or oblique steel mesh and mortar surface layer

加固试件所采用的钢丝网的钢丝直径为 2 mm, 钢丝网格尺寸为 100 mm×100 mm, 试验前对单根钢丝进行张拉试验, 实测钢丝平均抗拉强度为 668.79 MPa. 对夯土墙体所用土料进行土工试验得到性能参数如表 2 所示.

表2 土工试验结果
Tab.2 Results of soil test

| 名称 | 最优含水量 /% | 最大干密度 /g·cm ⁻³ | 粘聚力 /kPa | 内摩擦角 /° |
|----|-------------|------------------------------|-------------|------------|
| 素土 | 18.70 | 1.72 | 61.32 | 33.64 |

夯土墙基础用钢筋混凝土梁模拟, 梁面为浇筑的自然毛面, 接近实际情况中的毛石基础, 但比毛石基础的抗滑能力差. 底梁浇筑完成后, 在室内养护 28 d, 然后在梁上夯筑墙体. 为使试验接近实际情况, 夯土墙完全按照民间工艺制作, 使用高为 300 mm 的钢模板作为模具, 每层放入素土 150~180 mm, 夯实厚度约为 100 mm. 墙体制作完成后, 在室内常温下养护 3 个月, 再进行加固. 墙体干缩较大, 有不同程度的裂缝, 最大裂缝宽度可达到 10 mm, 最长裂缝达 1 200 mm.

加固前在墙体上用直径为 6 mm 的钻头进行钻孔, 钻孔的位置和布局如图 1 中所示. 钻孔后选择加固面层进行人工凿毛, 并除去墙面的浮土, 刷一层 1 mm 厚的素水泥浆, 将钢丝网(正方或斜放)置于墙面, 用穿墙螺杆固定, 螺杆与钢丝网绑扎连接, 墙面另一侧用垫板和螺母将螺杆拉紧(见图 2). 钢丝网固定后, 在墙面抹 M10 水泥砂浆, 加固层的总厚度控制在 12 mm 左右. 加固墙体在室内养护 28 d 后进行试验.



(a) 背面加垫板螺杆固定 (b) 正面绑扎固定

图2 钢丝网固定

Fig.2 Fixed with steel mesh

1.2 加载方法与加载制度

模拟墙体实际受荷状态, 在墙顶施加恒定竖向荷载和低周反复水平荷载. 施加的竖向荷载是按照二层三开间的一字型布局生土房屋的实际荷载计算所得, 原型墙体顶部所承受的的竖向荷载为 529.83 kN, 考虑缩尺关系, 施加在试件上的竖向荷载为 58.87 kN, 该荷载维持至试验结束. 为保证荷载均匀作用在墙体上, 在墙顶平铺 20~30 mm 厚水泥砂浆找平层, 其上安装工字钢, 将轴力稳压装置的集中荷载转化为均布荷载作用在墙顶.

低周反复水平荷载由美国 MTS 公司生产的 50T 电液伺服作动器施加, 作用在墙体平面内, 试验装置见图 3. 试件加载采用位移控制, 每级 0.5 mm, 加至 4.0 mm 后每级 1.0 mm, 加至 10.0 mm 后每级 2.0 mm, 各循环 2 次, 加载速度 0.2 mm/s, 直至试件破坏为止.

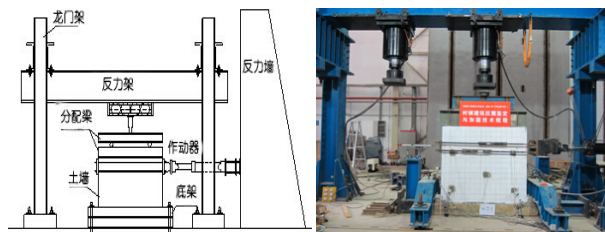


图3 试验装置图

Fig.3 The view of test equipment

1.3 测点布置及数据采集

试验安装位移计监测底梁和墙体位移(见图 4). 位移计 3 观察水平方向位移, 位移计 2 和 6 观察底梁是否发生偏转, 位移计 4 和 5 观察墙体的剪切位移, 位移计 1 观察墙身位移.

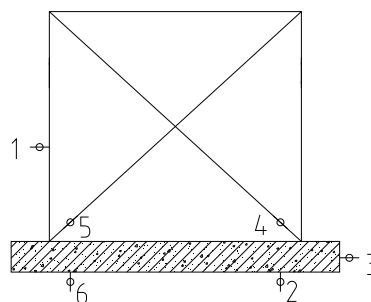


图4 墙体测点布置图

Fig.4 Locations of test on the wall

2 试验过程及现象

全部 5 个墙体试件从加载开始到破坏经历了弹性、弹塑性、破坏三个阶段, 其破坏形式均表现为剪切破坏.

未加固夯土墙体 W-1 试件在拉 0.5 mm 时墙体中部、靠近初始水平裂缝下方出现细微斜裂缝; 随着位移的增加, 在初始的水平 and 竖直干缩裂缝下方

出现的拉向 45° 斜裂缝与初始裂缝相交; 推 9 mm 时, 墙体两侧出现图 5 红圈中所示的贯通裂缝, 并且墙根出现松动, 整个墙体有被抬起迹象; 位移继续增大, 45° 斜裂缝向上向下延伸形成贯通的拉向斜裂缝, 在推 12 mm 时, 多数裂缝已发展完全, 墙体松动破坏, 试验结束.

采用钢丝网加固的墙体, 拉 1.5 mm 时, 在未加固一侧出现细小裂缝; 随着位移增加, 在推拉 2~3.5 mm 时, 未加固一侧的夯筑分层处出现水平裂缝; 随位移增大, 裂缝继续发展, 在拉 11 mm 时, 45° 斜裂缝与夯筑分层处的水平裂缝相交贯通; 推 14 mm 时, 在加固一侧出现斜向交叉的细小裂缝; 拉 16 mm 时, 墙体厚度方向的加固面层出现凸起, 与墙体剥离, 随位移增大, 部分掉落; 推 18 mm 时, w-3-1 墙体未加固一侧在水平通缝与斜向贯通裂缝之间出现土块破落现象(见图 8(b)), 停止加载, 试验结束. 至试验结束, 加固一侧始终未出现大的裂缝, 墙角基本维持完整, 墙体未出现抬起现象.

正放钢丝网加固墙体 W-2-1、W-2-2 与斜放钢丝网墙体 W-3-1、W-3-2 破坏过程与现象大致相似, 其破坏形态分别见图 6~9.



图 5 W-1 破坏图
Fig.5 The destroying figure of W-1

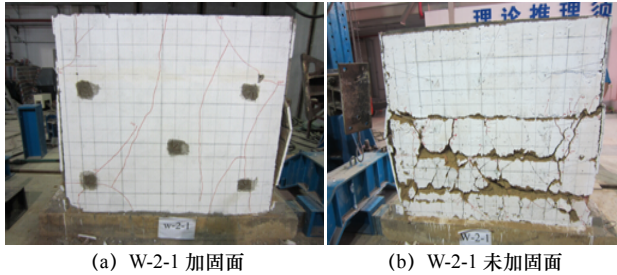


图 6 W-2-1 破坏图
Fig.6 The destroying figure of W-2-1

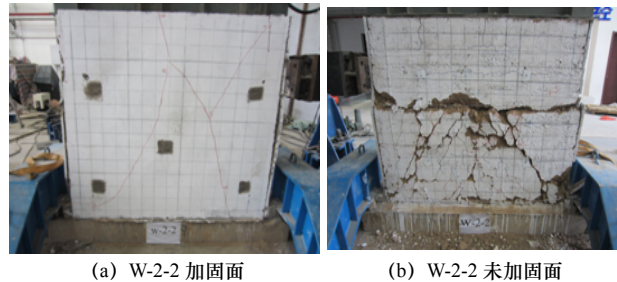


图 7 W-2-2 破坏图
Fig.7 The destroying figure of W-2-2



图 8 W-3-1 破坏图
Fig.8 The destroying figure of W-3-1

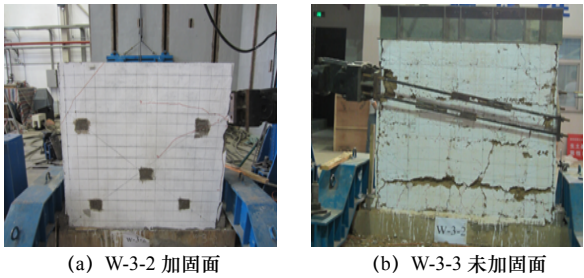


图 9 W-3-2 破坏图
Fig.9 The destroying figure of W-3-2

3 试验结果分析

3.1 墙体水平承载力和变形能力

各墙体在水平荷载作用下的开裂荷载、极限荷载及开裂位移、荷载峰值位移和极限位移见表 3.

表 3 试件在水平荷载作用下的荷载及位移
Tab.3 The load and displacement of specimen under lateral loads

| 试件 | 开裂荷载 F_{cr}/kN | 极限荷载 F_u/kN | 开裂位移 /mm | 荷载峰值 位移/mm | 极限位移 /mm |
|-------|----------------------------|-------------------------|-------------|---------------|-------------|
| W-1 | 8.66 | 46.34 | 0.5 | 9 | 11 |
| W-2-1 | 35.4 | 67.71 | 1.5 | 9 | 22 |
| W-2-2 | 45.34 | 67.92 | 1.5 | 9 | 22 |
| W-3-1 | 35.92 | 58.04 | 1.5 | 9 | 18 |
| W-3-2 | 32.4 | 63.96 | 1.5 | 14 | 16 |

由表中数据可知,加固后墙体的开裂荷载、极限荷载以及开裂位移、极限位移明显高于未加固的墙体 (W-1), 说明钢丝网水泥砂浆面层加固夯土墙体延迟了墙体开裂, 提高了墙体承载能力和变形能力.

本次试验的对比结果显示, 钢丝网正方与钢丝网斜放对墙体的加固效果影响不大. 试件设计时考虑斜放钢丝网的钢丝与裂缝方向一致, 拟考察其对斜裂缝的抑制作用, 但本次试验未表现出斜放钢丝网加固的优势, 可能与试件数量较少、施工质量差异等其他因素有关.

将各墙片的荷载情况与计算所得的地震力进行对比可以得出: 未加固墙体在未达到 6 度时, 即会开裂; 经加固的墙体开裂荷载都大于 7 度, 其中墙片 W-2-2 的开裂荷载超过了 7 度 (0.15 g). 墙片 W-1 的极限荷载只能达到 7 度 (0.15 g), 经过加固的墙片中极限荷载最小的 (W-3-1) 也超过了 8 度,

其他各墙片的极限荷载都明显超过了 8 度的地震力。可以看出, 钢丝网水泥砂浆面层加固夯土墙可明显提高墙体的抗震性能。

3.2 滞回曲线和骨架曲线

各墙片的滞回曲线以及墙片间骨架曲线对比情况见图 10。

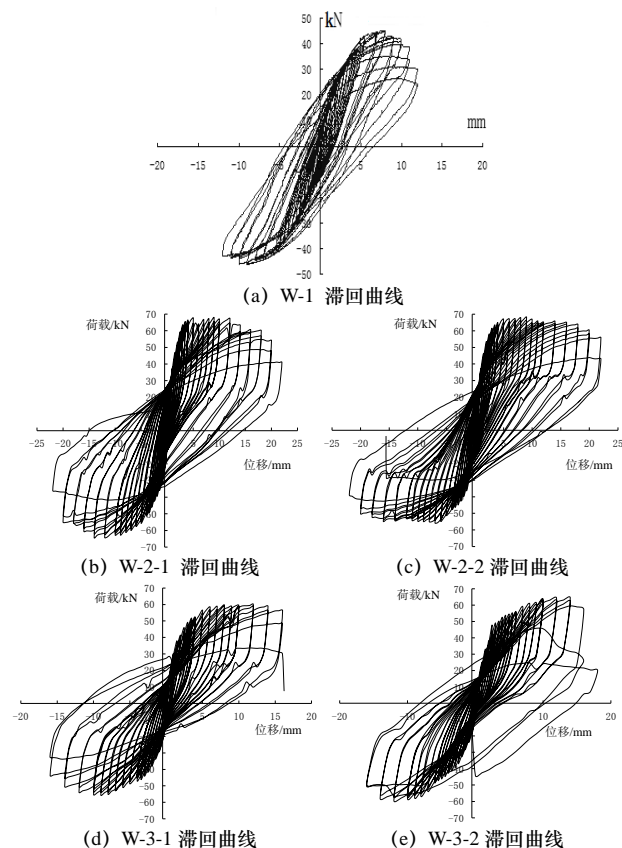


图 10 各墙片的滞回曲线

Fig.10 Hysteresis curves

5 个试件的滞回曲线, 均表现为从加载开始到出现第一条裂缝之前, 试件处于弹性阶段, 滞回曲线接近于直线, 此时滞回环面积较小。从第一条裂缝出现开始, 试件进入弹塑性阶段, 曲线斜率变小, 滞回环面积逐步增大。随着加载位移继续增大, 新裂缝出现, 原裂缝继续发展, 滞回曲线的形状也有初始的梭形演化为弓形。

未加固试件 W-1 的滞回曲线在第一、第三象限下降比较明显, 并且下降段斜率较大, 未出现塑性平台, 表现出明显的脆性破坏特征。加固试件 W-2-1、W-2-2、W-3-1、W-3-2 与 W-1 滞回曲线最明显的区别是比较饱满, 证明加固后试件的耗能能力明显增强。

从各片墙的骨架曲线分析, 加固后墙体的极限荷载明显大于未经加固的夯土墙体试件, 钢丝网水泥砂浆面层受力明显, 限制了斜向剪切裂缝的发展, 提高了墙体承载力。进入下降段, 加固试件的曲线斜率呈减小趋势, 比未经加固的试件平缓, 由于钢

丝网水泥砂浆面层延缓了斜向剪切裂缝与夯筑分层处水平裂缝的贯通, 限制了夯土墙体的急剧变形, 使试件表现出了一定的延性。

4 结论

(1) 钢丝网水泥砂浆面层加固夯土墙体是一种行之有效的加固方法, 可以明显提高夯土墙体的承载力, 改善墙体脆性破坏特征。

(2) 钢丝网水泥砂浆面层在试验过程中受力明显, 能够有效控制斜向剪切裂缝的发展, 并延缓斜裂缝与墙体夯筑分层部位的水平通缝相交贯通。从而提高墙体极限荷载, 约束墙体变形, 在一定程度上防止了墙体的整体溃散垮塌。

(3) 试验加载过程中, 未加固夯土墙体墙根处出现松动, 墙体有抬起迹象, 钢丝网水泥砂浆面层与混凝土底梁连接较好, 加固墙体的墙角基本保持完整。表明在实际房屋中采取措施加强墙体与毛石基础的抗滑移和抗剪性能有助于改善房屋的整体受力性能。

(4) 本次试验中, 斜放钢丝网的加固方式与正放钢丝网相比, 在承载力方面差别不大, 斜放钢丝网试件的极限位移略大于正方钢丝网试件, 但由于试件数量有限, 夯土材料、墙体的性能离散性较大, 钢丝网放置方式对加固效果的影响还有待进一步研究。

(5) 未加固的夯土墙有一定的抗震能力, 可以满足低烈度下的抗震要求。经过钢丝网水泥砂浆面层加固后, 夯土墙抗震能力可从 7 度 (0.15 g) 提高至 8 度, 本文加固方法可为 8 度 (0.20 g) 及以下地区的在役生土房屋的加固改造提供参考, 也是住建部行业标准《村镇建筑抗震鉴定与加固技术规程》编制的试验依据。

参考文献 References

- [1] 周铁钢, 段文强, 穆均, 等. 全国生土农房现状调查与抗震性能统计分析[J]. 西安建筑科技大学学报, 2013, 45(4): 487-492.
ZHOU Tiegang, Duan Wenqiang, Mu Jun, et al. Statistical analysis and survey on the aseismatic performance of the raw-soil Building Status in China's rural areas[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.(Natural Science Edition), 2013, 45(4): 487-492.
- [2] 尚建丽, 刘加平, 赵西平. 低能耗夯土粗粒土建筑特性的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2003, 35(4): 325-328.
SHANG Jianli, LIU Jiaping, ZHAO Xiping. Test study on construction performance of energy-saving material[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition,

- 2003, 35(4): 325-328.
- [3] 王毅红, 李丽, 王冲锋, 等. 村镇既有生土结构房屋抗震性能现状分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(S): 462-467.
WANG Yihong, LI Li, WANG Chongfeng, et al. Research and analysis on aseismic behavior of existing country raw-soil structure[J]. China civil engineering journal, 2010, 43(S): 462-467.
- [4] 常卫华, 王建卫, 徐福泉. 村镇生土住宅结构现状研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(S): 375-378.
CHANG Weihua, WANG Jianwei, XU Fuquan. Study on existing situation of adobe and rammed earth building construction in town and village[J]. Building Structure, 2010, 40(S): 375-378.
- [5] 王毅红, 苏东君, 刘伯权, 等. 生土结构房屋的承重夯土墙体抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2007, 39(4): 451-456.
WANG Yihong, SU Dongjun, LIU Boquan, et al. Study on the seismic behavior of raw soil structure with rammed earth wall[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2007, 39(4): 451-456.
- [6] 卜永红, 王毅红, 韩岗, 李丽. 内置绳网承重夯土墙体抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2013, 45(1): 38-42.
BU Yonghong, WANG Yihong, HANG Gang, et al. Study on seismic behavior of the rammed earth walls with built-in rope nets[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2013, 45(1): 38-42.
- [7] 朱伯龙, 吴明舜, 蒋志贤. 砖墙用钢筋网水泥砂浆面层加固的抗震能力研究[J]. 地震工程与工程振动, 1984, 4(1): 70-81.
ZHU Bolong, WU Mingshun, JIANG Zhiyi. A Study on aseismic capacity of brick wall strengthened with cement mortar reinforced with steel mesh[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1984, 4(1): 70-81.
- [8] 黄忠邦. 国外关于钢筋网水泥砂浆抗震加固的研究[J]. 建筑结构, 1994, 24(5): 44-47.
HUANG Zhongbang. A Study on Strengthening Rammed-earth Wall with Ferro-cement Surface Layer from aboard[J]. Building Structure, 1994, 24(5): 44-47.
- [9] 王天贤. 加固在役砖墙 KP1 砖墙的抗震性能试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2003, 25(3): 51-54.
WANG Tianxian. Investigation on Seismic Behavior of KP1 Masonry Wall Strenthened[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2003, 25(3): 51-54.
- [10] 王建卫. 既有村镇生土结构房屋承重土坯墙体加固试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
WANG Jianwei. Experimental Study on Load-Bearing Adobe Wall Reinforcement of Existing Country Raw-soil Structure[D]. Xi'an: Univ. of Chang'an, 2011.

(本文编辑 桂智刚)

(上接第 203 页)

- SUN Jian, ZHANG Juan. Survival Analyses of Traffic Flow Breakdown at Urban Expressway Bottlenecks[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(4): 530-535.
- [8] 刘博航, 裴玉龙, 徐慧智. 基于视频处理的车道变换轨迹获取技术[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2007, 12(3): 7-11.
LIU Bohang, PEI Yulong, XU Huizhi. Lane-changing Track Access Technology Based On Video[J]. JOURNAL HARBIN UNIV. SCI. & TECH, 2007, 12(3): 7-11.
- [9] 杨鹏. 样条曲线在道路平面线形中的应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
YANG Peng. The spline curve study of highway horizontal alignment design[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011.
- [10] 裴玉龙, 张银. 车道变换期望运行轨迹仿真[J]. 交通与计算机, 2008, 26(4): 68-71.
PEI Yulong, ZHANG Yin. Lane-changing Virtual Desire Trajectory Simulation[J]. Computer and Communications, 2008, 26(4): 68-71.
- [11] 许伦辉, 罗强, 吴建伟. 基于最小安全距离的车辆跟驰模型研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(10): 96-100.
XU Lunhui, LUO Qiang, WU Jianwei. Study of Car-following Model Based on Minimum Safety Distance[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(10): 96-100.
- [12] 许伦辉, 罗强, 傅惠. 基于前车制动过程的车辆跟驰安全距离模型[J]. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2010, 28(1): 1-5.
XU Lunhui, LUO Qiang, FU Hui. Car-following Safe Distance Model Based on Braking Process of Leading Vehicle[J]. Journal of Guangxi Normal University: Natural Science Edition, 2010, 28(1): 1-5.
- [13] 柏伟, 李存军. 基于不同限速条件下的超车模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(2): 63-68.
BAI Wei, LI Cunjun. Overtaking Model Based on Different Limiting Speed[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 13(2): 63-68.

(本文编辑 桂智刚)