

基于 CTM 的高速公路隧道入口段交通流仿真与分析

张正义, 路巧珍, 朱可宁, 刘浩学

(长安大学汽车运输安全保障技术交通行业重点实验室, 陕西 西安, 710064)

摘要: 为模拟隧道内事故发生前后隧道入口段交通流的变化状况, 首先采集事故发生前后交通流参数, 应用 CTM 模型对事故发生前后隧道入口段交通流进行仿真, 再运用 GEH 值比较仿真值与实际值之间的差异, 通过交通流参数曲线反映交通流集聚状态, 最后, 基于 CTM 模型产生的安全指数评价二次事故风险. 结果表明: 运用 CTM 模型的仿真状况与实际状况吻合度较高, 能较好的描述隧道内事故发生前后交通流状态, 特别是交通激波现象的产生及变化趋势, 还可以对二次事故风险进行评价并描述其时变规律, 模型可作为高速公路隧道入口段交通模拟与安全评价的有效手段.

关键词: 交通安全工程; 隧道入口段; 高速公路; 交通流; CTM 模型

中图分类号: U491.254

文献标识码: A

文章编号: 1006-7930(2015)04-0543-6

Simulation and analysis of freeway traffic flow in the tunnel entrance section based on CTM

ZHANG Zhengyi, LU Qiaozhen, ZHU Kening, LIU Haoxue

(Key lab. for Automotive Transportation Safety Enhancement Technology of the Ministry of Communication, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to simulate the traffic flow changes in tunnel entrance section before and after the accident, the author collected traffic flow parameters and used CTM model to simulate the traffic flow at the tunnel entrance section before and after the accident. The data mining method was used to compare the difference between simulated and actual values. The traffic flow parameters' curve was also compared and used GEH for evaluation. The results showed that the simulative condition was highly consistent with the actual situation. The CTM model can be applied to describe the traffic flow in the tunnel before and after the accidents fairly well. Especially after the accident, it can also be used to describe the traffic shock wave's generation and change trends. The CTM model can also help evaluate secondary accident risks and describe its time-dependent rules, so it can be used to simulate the traffic flow at the tunnel entrance section of various conditions, in providing technical support for the traffic security control of tunnel entrance section of freeway.

Key words: traffic safety engineering; tunnel entrance section; freeway; traffic flow; CTM model

高速公路隧道交通事故多发且具有灾情易扩散、救援困难的特点, 极易造成群死群伤事件. 从事故发生的空间分布特征看, 隧道入口段与出口段交通安全问题突出, 占事故总量的 60% 以上^[1]. 研究表明, 驾驶人在高速公路隧道入口段行驶时, 心理负荷增加, 心理紧张程度增加^[2-3]. 依据交通流理论, 当隧道入口段交通流量增大导致隧道内拥堵或发生交通事故, 此时车辆进入隧道入口段, 会产生交通冲击波, 并且冲击波向后传播, 更容易引发二次事故^[4-6], 其传播现象与规律值得研究, 并可作为事故防控的依据.

相关文献对隧道安全问题进行了研究, 韩直提出了公路隧道常见的交通流组织方案及应用条件^[7], 张生瑞等分析了隧道交通事故分布特性, 基于事故数据提出了交通事故的预防与控制措施^[8], 许宏科

等通过对交通流的数据挖掘, 得到公路隧道特性信息^[9], 尚荣丽等以实际高速公路隧道为例, 探讨了隧道交通安全保障系统技术^[10], 刘浩学等利用眼动追踪装置, 研究了驾驶人在长隧道入口段的心理和生理变化规律^[11], 刘嘉等研究了瞳孔面积与环境照度之间的变化规律, 采用系统聚类的方法对隧道出入口照明区段进行聚类分析, 并给出了模型求解的方法^[12]. 上述研究多基于事故数据、驾驶人心理数据, 对于交通流研究较少. 另一方面, 交通仿真研究主要集中在城市干道出入口、信号交叉口、快速干道; 高速公路可变限速以及缓解高速公路出入匝道的交通拥堵等方面^[13-15], 对隧道入口段交通流仿真研究较少, 故对隧道入口段交通流进行有效仿真研究, 可为隧道入口段交通安全的有效改善提供依据与决策支持.

收稿日期: 2015-01-22

修改稿日期: 2015-07-31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51178054); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51108036)

作者简介: 张正义(1986-), 男, 博士生, 主要从事交通运输方面研究. E-mail: 13772053829@163.com.

论文以高速公路长隧道入口段交通流为研究对象,利用监控设备采集交通流参数,运用CTM模型模拟隧道内发生交通事故前后入口段交通流状况以及交通激波现象,将采集的真实速度值与仿真速度值进行对比,采用GEH值评价仿真结果进而验证模型的可靠性,并评价二次事故风险,为高速公路隧道入口段交通控制提供有效的技术支持。

1 交通流仿真实论

运用CTM模型模拟隧道入口段交通流状态,该模型属于宏观交通流模型,可有效的反映交通流从自由流到非自由流、从顺畅的交通状态到拥挤的交通状态的转变,且能描述经常发生和偶尔发生的交通事件过程^[16],从而为研究交通流变化和交通管理及控制提供依据。

1.1 CTM模型

CTM模型识高速公路隧道段为若干个长度相等的元胞组成的系统,每个元胞的状态通过占有率进行描述.对于任意一个元胞,当交通流处于低密度时,假定自由流速度 v_f 为一个常量,高密度的向后传播的特征波速 ω 也是常量,每个元胞可流入的最大交通量为 Q ,密度为 k , k_{jam} 为阻塞时的密度^[17],则

当高速公路隧道段交通流量较小时,交通流量为

$$f = \min \{kv, Q\} \quad (1)$$

当隧道段交通流量较大时,交通流量为

$$f = \min \{ \omega(k_{jam} - k), Q \} \quad (2)$$

当隧道段处于堵塞时,元胞内车辆的占有率为100%,此时交通流量为

$$f = 0 \quad (3)$$

可以看出,CTM模型交通流量 f 和密度 k 之间服从梯形函数关系,如图1所示CTM的交通流量 f 和密度 k 之间的线性关系表达式为

$$f = \min \{ \omega(k_{jam} - k), Q, vk \} \quad (4)$$

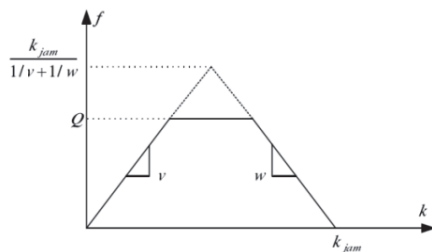


图1 CTM 状态方程中 $f-k$ 的梯形关系

Fig.1 CTM $f-k$ trapezoid in the equation of State

1.2 CTM模型扩展

图2所示为高速公路隧道段CTM模型中交通流量传输示意图:图中道路被分割成均匀的元胞单元,可依据此模型将高速公路隧道段分割成由元胞形成的节点集和由连接段组成的链路集,编号为 $j=0,1,2,\dots,j$,依据宏观交通流模型中的密度和流量之间的关系,对CTM模型进行改进,用具体的公式表达出两者之间的关系(如公式7所示)。

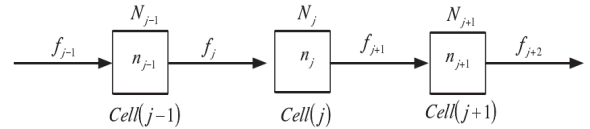


图2 CTM模型的流量传输示意图

Fig.2 The traffic transmission diagram of CTM model

由此可见,可将高速公路隧道段划分为长度为 L_m 的小段,车道数为 λ_m ,时间间隔为 T ,时间离散因子为 $k=0,1,2,\dots,K$, $\rho_{m,i}(k)$ 表示的密度和元胞内的车辆数相对应.改进的CTM模型如下所示

$$\rho_{m,i}(k+1) = \rho_{m,i}(k) + (T/L_m \lambda_m) [q_{m,i-1}(k) - q_{m,i}(k)] \quad (7)$$

$$q_{m,i}(k) = \min \{ v_{f,i} \rho_{m,i}(k) \lambda_m; \bar{Q}; \omega_{m,i+1} [\rho_{\max,i+1} - \rho_{m,i+1}(k)] \lambda_m \} \quad (8)$$

其中: $q_{m,i}(k)$ 表示的是在 kT 时间段内从分段 i 进入 $i+1$ 段的流量; $\bar{Q} = \min \{ Q_{m,i}, Q_{m,i+1} \}$ 表示的是分段 i 和 $i+1$ 的交通容量的最小值, $\omega_{m,i}$ 为交通流向后传播的特征波速。

2 隧道入口段交通流仿真及分析

2.1 仿真参数

选择陕西境内的某特长隧道为仿真对象.该隧道全长约8 km,双洞分离双向通车,单洞三车道通行,洞内有照明,隧道路段全线限速60 km/h。

鉴于实际事故发生于隧道内约600 m处,选取隧道入口800 m至事故点隧道内600 m进行仿真.整个路段划分为7段,编号记为0-6号路段,每段长200 m,共记8个节点,编号记为A-H.车辆由图3左侧向右运行,即车辆由A点向H点方向移动.路段3和4连接处节点为隧道入口处,节点H为事故发生点.将以上数据作为模型基本参数,生成仿真路段图,如图3所示.将各路段车速作为仿真目标参数,事故前后各路段实际车速从高速公路视频监控系统获得。

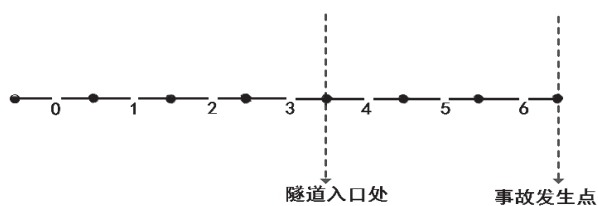


图3 CTM仿真路段示意图

Fig.3 The schematic diagram of CTM simulation section

根据未发生事故时的车辆运行速度均值,将进入隧道入口段前车辆速度设置为94 km/h,到隧道入口处减速至60 km/h,车流量设置为0.8veh/sec,阻塞流密度为144 veh/km.事故发生在隧道入口600 m处,事故持续时间为仿真起始后600s.将以上数据编程并输入CTM模型,模拟仿真路段交通流参数值同时生成曲线.

利用CTM模拟隧道事故发生前后交通流状态,首先通过对比不同路段内速度仿真值和实测值的差异,验证模型有效性.再通过模拟交通流状态,还原事故发生前后交通流变化规律,为交通管理与控制提供依据.

2.2 事故后交通流仿真与分析

2.2.1 流量分析

以5 s为一个步长,路段车流量仿真结果如图4所示.在仿真时间段内,前60 s隧道内无事故且车辆处于自由流速时,路段的车流量恒定,流入量等于流出量,两条曲线的距离处于均值变化;60 s后由于隧道内发生事故,车辆流速下降,流出量小于流入量,两条曲线距离逐渐增大,420 s后两条曲线的距离增大较为明显,表明该路段交通堵塞情况严重且冲击波向后传递.

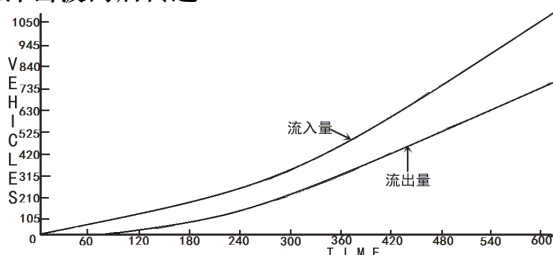


图4 车流量CTM软件仿真示意图

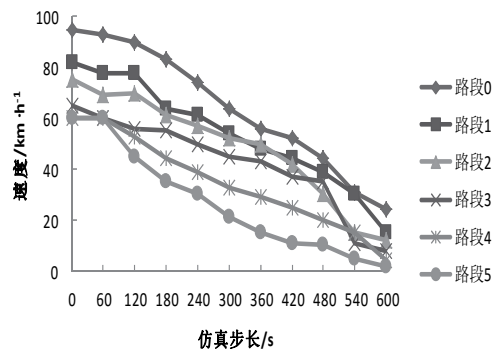
Fig.4 The flow simulation diagram of CTM software

2.2.2 车速分析

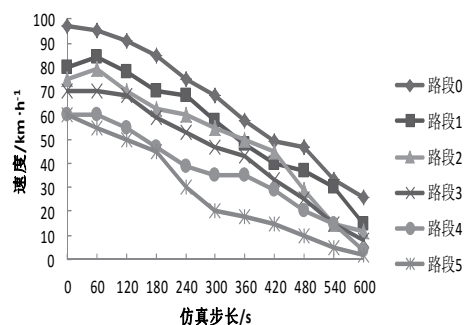
车速对比主要分为两个方面,一是整个仿真路段速度的变化对比;二是仿真得到的速度值和实测值之间的对比.

对比整个路段速度变化.如图5所示,隧道内发生事故,道路通行能力下降,事故上游路段车流量增大,随着车流量的增大,车辆运行速度降低,且这种降低会产生交通冲击波,波谷会逐步向事故上

游移动.通过仿真得到的数据与实测数据对比发现,该模型可以较为逼真模拟此时交通流的变化,亦可形象描述这种交通激波现象,如图6所示:当事故发生以后,事故路段完全阻塞,各路段车流量急剧增加,交通激波向后传递,随着时间推移,各路段平均车速降低,逐渐趋于零,从图上各路段纵向数据可以看出,速度降低趋势明显,激波现象比较明显.



(a) 仿真值



(b) 实际值

图5 车速CTM仿真示意图

Fig.5 The speed simulation diagram of CTM software

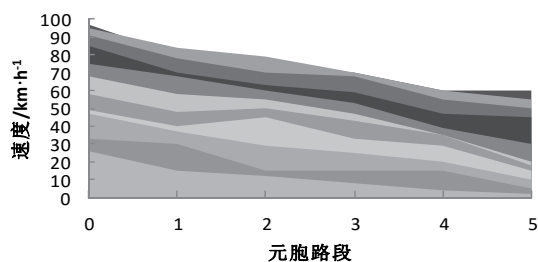


图6 隧道交通激波现象

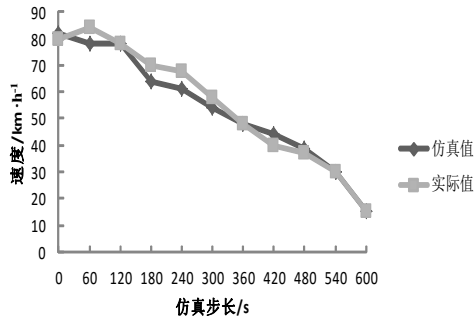
Fig. 6 The tunnel traffic phenomena of shock wave

对比各路段速度值.每个路段仿真值与实际值的对比采用GEH值来评价,该值为英国高速公路机构首先提出,计算方法如公式9所示.

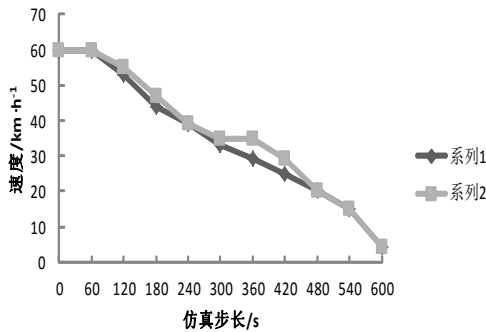
$$GEH = \sqrt{\frac{(M_{obs}(n) - M_{sim}(n))^2}{(M_{obs}(n) + M_{sim}(n))/2}} \quad (9)$$

式中: $M_{obs}(n)$ 表示的是实际测量值, $M_{sim}(n)$ 表示的是仿真模拟值,这些值主要包括平均速度,最

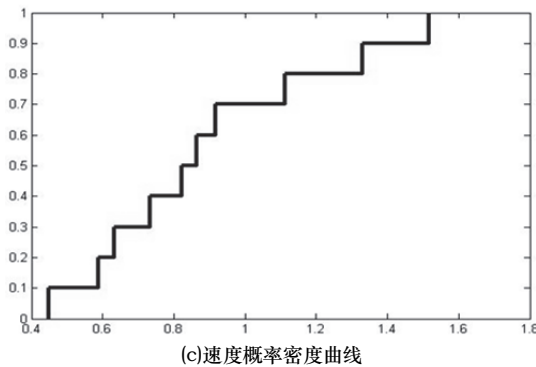
大速度和最小速度, (联邦高速公路管理机构通过实践检验证明) 只要超过85%的观测点的GEH值低于5, 则说明该仿真模型能够有效的模拟交通流的变化状况[18].选取路段1和路段4的速度曲线进行对比, 如图8所示, 从图中可以看出, 仿真曲线和实际曲线重合度较高, 同时结合表1所示的GEH值, 结果表明各路段的GEH值均小于5, 故说明仿真有效, 模型可在较高的水平上用来仿真隧道入口段交通流的变化.



(a) 路段1速度拟合曲线



(b) 路段4速度拟合曲线



(c) 速度概率密度曲线

图7 CTM仿真软件验证图

Fig.7 The diagram of road speed and curve fitting

表1 各路段的GEH值

Tab.1 Sections of the GEH

路段	GEH值/平均速度
0	1.15
1	1.17
2	1.28
3	1.56
4	1.83

3 二次事故风险评价

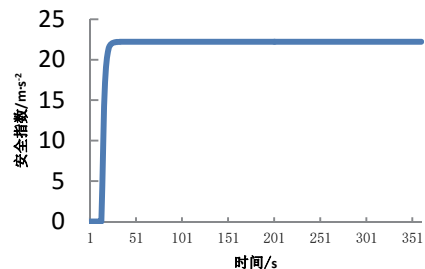
由于隧道环境的特殊性, 事故发生后极易引发二次事故, 通过以上的验证分析, 已经证明了CTM软件的有效性和准确度, 根据以上仿真结果, 从交通流理论对可能诱发的二次事故风险进行评价, 以期为高速公路隧道交通安全提供理论依据. 以往研究成果表明, 车速标准差与事故率之间存在着联系. 车速分布离散程度越高, 事故率越高^[19]. 基于此理念, 将相邻路段速度差作为安全指标用来评价道路交通安全性. 本研究通过模拟事故发生后, 由于事故严重程度及救援能力的不同, 造成道路通行能力的下降, 事故路段及上游各相邻路段的车速差, 会随着通行能力的不同而产生相应的变化. 因此, 由 n 个元胞组成的路段, 其安全性指数可定义为 R :

$$R = \sum_{i=1}^{n-1} |V_{i+1} - V_i| \quad (10)$$

其中: V_i 为本元胞的车速平均值, V_{i+1} 为下一元胞的车速平均值. 安全指数越高说明安全性越低, 二次事故风险越大.

依据以上理论, 模拟事故发生后, 原有3车道通行能力损失1、2、3个车道三种情况下交通安全指数的变化情况, 评价二次事故风险. 道路全段的安全指数模拟结果如图8所示.

由图8可知, 3种情况下, 当通行能力损失3车道时, 安全性最差, 二次事故风险最高; 通行能力损失2车道时, 安全性和二次事故风险次之; 通行能力损失1车道时安全性最好, 二次事故风险最小. 同时, 当通行能力损失3车道时, 风险从事故发生点一直向后续路段传递, 安全系数一直保持在23, 表明该风险一直在传递而未消除; 通行能力损失2车道情况下, 风险峰值达到20, 而损失1车道时, 风险峰值不足15. 后两种情况下, 风险值达到峰值后逐渐降低, 表明事故出现之初, 由于部分车辆迅速停车, 风险较大, 而随着车辆速度逐渐降低, 风险值逐渐减小.



(a) 损失3车道通行能力

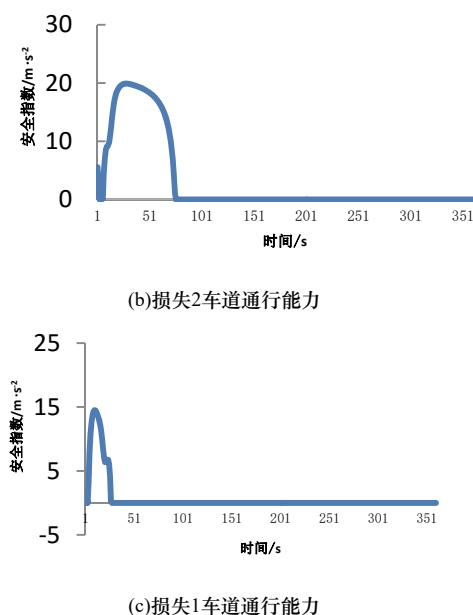


图8不同通行能力条件下安全指数变化图

Fig. 8 The change diagram of safety index under different traffic conditions

4 结论

针对高速公路隧道内交通事故发生前后,入口段交通流状况变化展开研究,在采集实际交通流相关数据基础上,运用CTM仿真模型对事故状态下交通流状况进行仿真,并对比不同参数,得到以下几点结论:

(1) 隧道内发生事故后,随着事故上游车流量增大,迅速产生交通激波,随着时间推移,交通激波逐渐向上游移动。

(2) 通过对比仿真与实测的交通流参数,并结合仿真有效性评价指标GEH值,模型可有效模拟隧道入口段交通流变化状况,可为高速公路隧道段仿真提供理论和技术支持。

(3) 事故后上游路段二次事故风险增大,事故导致通行能力损失3、2、1车道三种情况下,二次事故风险性依次升高,风险消除时间依次降低,通行能力损失3车道情况下,风险一直向上游路段传递。

参考文献 References

- [1] YEUNG J S, Wong Y D. The effect of road tunnel environment on car following behavior[J]. Accident Analysis & Prevention, 2014, 70: 100-109..
- [2] YEUNG J S, Wong Y D, XU H. Driver perspectives of open and tunnel expressways[J]. Journal of Environmental Psychology, 2013, 36: 248-256.
- [3] 戴忱华, 郭忠印. 空间通视性对高速公路隧道路段驾驶行为的影响[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(9): 1307-1312.

- DAI Youhua, GUO Zhongyin. Space of the visibility on Expressway tunnel section of driving behavior influence [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(9): 1307-1312.
- [4] SUN J, YANG X, LIU H. Study on Microscopic traffic simulation model systematic parameter calibration [J]. Journal of System Simulation, 2007 (1): 10-14.
- [5] LIU Y, ZENG X. Modeling and validation in traffic flow production under congested traffic conditions based on MC method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009: S1.
- [6] PAYNE H J. Models of freeway traffic and control [J]. Mathematical models of public systems, 1971.
- [7] 韩直. 公路隧道交通控制模式研究[J]. 公路交通技术, 2004 (1): 86-90.
HAN Zhi. Highway tunnel traffic control models [J]. Technology of Highway and Transport, 2004(1):86-90
- [8] 张生瑞, 马壮林, 石强. 高速公路隧道群交通事故分布特点及预防对策[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(1):63-66.
ZHANG Shengrui, MA Zhuanglin, SHI Qiang. Distribution characteristics and countermeasures of traffic accidents in expressway tunnel group [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(1): 63-66.
- [9] 许宏科, 揣锦华, 张绍华, 等. 公路隧道交通流的数据挖掘[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(4): 66-69.
XU Hongke, CHUAI Jinhua, ZHANG Zhaozhua, et al. Data mining of traffic flow in road tunnel[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(4): 66-69.
- [10] 尚荣丽, 张生瑞. 高速公路隧道交通安全保障系统的研究[J]. 公路, 2007 (12): 127-130.
SHANG Lirong, ZHANG Shengrui. Study on tunnel traffic security system of Expressway [J]. Highway, 2007 (12): 127-130.
- [11] 赵炜华, 刘浩学, 丁光明, 等. 长隧道入口对驾驶人心理及车速的影响[J]. 公路与汽运, 2011 (3):48-51.
ZHAO Weihua, LIU Haoxue, DING Guangming, et al. The influence of long tunnel entrance on the driver's psychology and speed[J]. Highway & Automobile Application, 2011 (3):48-51.
- [12] 刘嘉, 杨海峰, 刘浩学, 等. 公路隧道出口段亮度优化计算[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(1): 64-68
LIU Jia, YANG Haifeng, LIU Haoxue, et al. On the optimized design of the luminance at the expressway tunnel exits [J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(1): 64-68.
- [13] MESSER A, PAPAGEORGIOU M. METANET: A macroscopic simulation program for motorway networks [J]. Traffic Engineering & Control, 1990, 31(8-9): 466-470.
- [14] 孙剑, 刘好德, 李克平. 城市干道交通信号协调控制仿真优化[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009 (11): 1467-1471.
SUN Jian, LIU Dehao, LI Keping. Optimization of urban road traffic signal coordination control simulation [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009 (11): 1467-1471.

- [15] Masroor Hasan, Mithilesh Jha, Moshe Ben_Akiva. Evaluation of Ramp Control Algorithms Using Microscopic Traffic Simulation[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2002, 10(3): 229-256.
- [16] Daganzo C F. The cell transmission model, part II: network traffic[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1995, 29(2): 79-93.
- [17] YU R, ABDEL-ATY M. An optimal variable speed limits system to ameliorate traffic safety risk[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 21:235-246.
- [18] Spiliopoulou A, Kontorinaki M, Papageorgiou M, et al. Macroscopic traffic flow model validation at congested freeway off-ramp areas[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 41: 18-29.
- [19] 林声. 基于线形设计一致性的公路安全设计理论研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- LIN Sheng Research on Highway Safety Design Theory Based on Alignments Design Consistency [D]. Beijing: Beijing Jiangtong University, 2014.
- (编辑 吴海西)

(上接第536页)

(3) 轻钢结构临建房屋不能满足规程的变形要求, 如何解决该类房屋广泛应用与其刚度较弱之间的矛盾值得进行讨论. 一种思路是制订针对该类房该类房屋的允许较大变形的标准; 另一种是改进该类房屋的结构布置, 如加密立柱和减小抗侧移墙体的间距, 使之符合规程要求. 出于满足最基本安全的考虑, 建议采用后一种解决方法.

参考文献 References

- [1] DB11/693-2009. 建设工程临建房屋应用技术标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- DB11/693-2009. Technical specification of temporary building for construction engineering [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [2] 查晓雄. 轻钢活动房计算理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- ZHA Xiaoxiong. Calculation theory of light steel prefabricated house [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [3] 董强. 施工现场轻钢结构临建房屋技术研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2006.
- DONG Qiang. Technology research on construction site light steel structure temporary housing [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2006.
- [4] 李强, 郝际平. 拼装式活动房在风荷载作用下的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(4): 489-495.
- LI Qiang, HAO Jiping. Experimental research on assembled mobile house under wind load [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2009, 41(4): 489-495.
- [5] 孙艳军. 轻型铝合金活动房屋结构的足尺试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
- SUN Yanjun. Test research on full-scale light aluminum alloy mobile building structure [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [6] 刘建飞. 扩展集装箱式活动房静力试验与有限元分析[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- LIU Jianfei. Static test and finite-element analysis on the extendable container mobile house [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [7] GB50009-2012. 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- GB50009-2012. Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [8] JGJ227-2011. 低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- JGJ227-2011, Technical specification for low-rise cold-formed thin-walled steel buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

(编辑 吴海西)