

汽车与护栏碰撞特性的研究 ——车与波形梁护栏碰撞过程的力学模型

丁 桦 贾日学 储劲草 庞曰成 周春明

[中国科学院力学所,北京,100080]

[中国公路工程咨询监理总公司]

[福州市公路局]

摘要:本文给出了通过对实车足尺护栏碰撞实验数据的观察分析总结出的车与护栏碰撞过程中的一些基本特征,根据这些特征建立了这一过程的力学模型,并讨论了这一模型的适用范围。

关键词:汽车,波形梁护栏,碰撞特性,力学模型

分类号:U417.12

Study of Collisions of Vehicles and Guard Rails —Modeling of the Collisions of Uncontrolled Vehicles and W—Beam Guard Rails

Ding Hua^① Jia Rixue Chu Jincao Pang Yuecheng Zhou Chunming

[①Institute of Mechanics, CAS, Beijing, 100080]

Abstract: The characteristic of the collision procedures of vehicles and w-beam guard rails, which are based on the analysis of the experimental data of full scale crash tests, are given in this paper. According to these properties we establish a mechanical model to modeling the procedures. Some remarks on the validation of the model are given.

Key words: Vehicle, W-beam guard, Collision, Mechanical model

护栏,作为高速公路上的主要安全设施,在世界范围内受到了人们的广泛重视。国外公路交通较发达的国家在高速公路出现的初期就着手于护栏结构的研究。例如,在美国,人们从1920年起就开始了护栏的研究与使用^[1~6],在理论分析和模拟实验的基础上,通过实车足尺护栏碰撞验证实验和公路上的应用实践,积累了大量的资料和丰富的经验,制定了有关护栏形式的选择、结构设计、实验方法、手段以及护栏的生产制造、运输安装和维修等一系列的标准。如美国国家研究会交通研究所在1981年制定了高速公路安全设施的评价标准,在1970年和1986年前后组织了高速公路护栏结构及各种安全设施的一系列的研究工作以及

收稿日期:1995—07—05

编写各种设计规范。在欧洲,如法国、英国、德国等国家也在很早就开始护栏结构的研究工作,建立健全了一整套的实验设施和相应的实验规程,从理论和实验上研究了多种类型的护栏结构。日本于50年代开始这方面的的研究工作,名神高速公路开始正规使用护栏。在短短十几年中,以日本道路公团、日本道路协会、建设省土木研究所为中心,联合有关大学、护栏生产厂家,对各种护栏结构进行了广泛的开发研究,于1965年制定了护栏设置纲要,对护栏的适用范围,结构设计,功能要求、施工安装等方面作出了明确的规定。其它许多国家,大致在50~60年代,也相继开展了各自国家的护栏结构的设计标准的研究。

我国在“七五”期间就已开始针对高速高路护栏的设计,生产与施工等方面的研究工作。但在初期,尽管我国高速公路上已安装了各种结构形式的护栏,其设计基本都是参照国外有关标准和规范进行的。而对于修改的部分也没有充分的科学依据。1992年前后,中国公路工程咨询监理总公司组织有关人员对全国已通车的高速公路护栏的使用情况作了调查。据此拟定了“波型梁护栏实车碰撞试验方案”经交通部工管司批准,公司联系了近十个单位组织了近百人的实验研究课题组,进行了一年多的工作,完成了我国第一次实车足尺碰撞试验的研究任务,建立了一整套实验方法和设施,紧接着公司又承担了“玻璃钢护栏的实验研究”工作并通过分析、计算和实验圆满地完成了这项工作^[7,8]。

护栏作为承受冲击作用的抗冲击结构,其受力状态,作用过程是非常复杂的,加之护栏的施工对其性能也会带来一些不可忽视的影响,几乎所有开展护栏研究的国家都是通过大量的实验研究辅以理论分析、计算最终通过实车足尺实验来完成护栏结构的设计,开发的。近年来,人们在大量的实验研究的基础上建立了各种护栏结构和碰撞过程的力学模型^[9~12],已可以描述、模拟碰撞过程的一些主要参数,但目前距代替和取代设计过程中的实验(包括模拟实验和实车足尺实验)研究尚有一定的距离。我们在分析前人工作和自己的实验、计算、分析和设计工作的基础上,提出了一个能反映车与护栏碰撞过程的主要特征的力学模型。

1 碰撞过程的特征分析

汽车与护栏碰撞是一复杂的结构碰撞问题。影响碰撞效果的因素有很多:如车型、车况、车的载货情况,护栏的施工、路基的密实度,事故原因(爆胎、失控等)、司机的干预、碰撞时的车速、入射角等等,这些因素中有许多都具有一定的随机性,因而我们必须对这些因素作一定的限制以使我们有可能抓住主要矛盾,使问题得到简化。本文讨论的问题是:车在自由行驶状态下,以一定的初速和角度撞向理想施工安装的波形梁结构(见图1)的碰撞过程。这一过程的主要特征是车体和护栏结构的运动、变形的耦合效应,即:车的运动引起护栏结构的变形和运动,而护栏结构的变形与运动吸收了车体的一部分能量并给车以反作用力来改变车体的运动方向。这里我们不考虑车体的倾覆,倾覆过程的力学模型将在后继文章中介绍。

1.1 实车足尺护栏碰撞实验的观察结果和分析

车以一定速度和角度撞上护栏后,护栏结构开始变形和运动并吸收车的能量,同时给车以反作用力来改变车的运动状态。通过对这一过程的实验数据(高速摄影,加速度,应变及静态测量见文献[8])的观察分析,我们发现:

(1)车型、车况和车的载货情况对碰撞过程中车体的倾覆的情况影响很大。这主要是因

为这些因素决定了车体的重心位置和对车体和货物质量的约束情况。当车况良好且货物被很好地约束时,在不翻车的情况下车体的变形和载货在车中的相对运动是可以忽略的。

(2) 在不翻车的情况下,车体在碰撞后,没有大的变形和破坏。其主要变形是前保险杠的弯曲变形,保险杠是车与护栏首先接触的点,在保险杠弯曲后,对于大车(10t解放卡车),是前轮与护栏接触,之后护栏与车体有轻微的接触。在护栏变形到最大位移附近时,护栏同车体的接触基本上是在两处:前轮和后轮。但这时护栏对车体的主要作用仍是通过前轮与护栏的接触点,直到前轮离开护栏的前后,后轮才对护栏的变形有较明显的影响。这种影响使车体在驶离护栏的同时有一个使车头回转向护栏的趋势。

(3) 护栏结构的变形主要体现在横梁的弯曲变形和立柱的塑性弯曲变形上,托架的变形能够吸收一部分车体的能量。但它对车体运动姿态的影响不是很大。

(4) 立柱的变形主要是地表下15~25cm处的弯曲变形,地基的影响可以结合立柱的变形一起考虑。弯曲断面情况类似于立柱进行三点弯曲实验的形态,在碰撞过程中,立柱在车体(通过护栏)的作用下开始向路外侧弯曲,对于车体后面的立柱有可能在护栏拉直的过程中向路内侧回弯。但由于托架的存在这种回弯的可能性很小。

(5) 横梁的变形主要是与车体的接触点处和与立柱(通过托架)的接触点处的弯曲变形。车体与护栏横梁的接触点可近似地看作一滚动的塑性铰。这样的塑性铰要承受正反两个方向的屈服(即撞弯和拉直),其反向屈服严格的说是离散的。具有一定的特征尺度。

(6) 护栏横梁和立柱在弯曲变形较大时会出现截面弱化和失稳。它们的弯曲特征如单结构弯曲特性图2所示。

(7) 托架的变形一般是被压扁。在护栏位移较大的地方,压扁的托架又被拉开、拉扁、拉脱(离立柱),这时护栏横梁与立柱脱离。

(8) 边坡的存在对碰撞过程有一定影响,但影响不大。车体在碰撞过程中进入边坡的部分很少,加之是车轮内侧与边坡接触,故在碰撞过程中车体的重心高度(在不翻车的情况下)变化不大。

1.2 问题的简化

正如前面所指出的那样,车与护栏的碰撞过程是一极其复杂的过程,即使在不考虑随机因素的情况下,它也是一个复杂的、涉及结构大变形和滑动接触及其耦合问题的强非线性问题。要模拟碰撞过程的每个细节,在实际中是很难实现的。我们将利用实验观测分析结果将问题作适当的简化,以求建立一个能估计、预测碰撞过程的主要特征—车的运动轨迹和护栏的变形的力学模型。为此我们建立如下模型假定(在不翻车的情况下):

- (1) 车体的运动和护栏横梁的变形将按平面问题考虑。
- (2) 车体将被看作一具有一定质量的质点,这里我们忽略了车体的变形和刚体转动。
- (3) 忽略护栏结构的惯性。

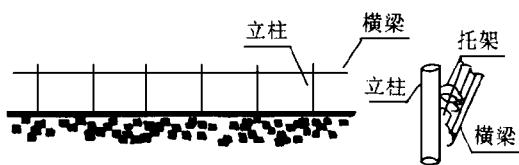


图1 护栏结构示意图

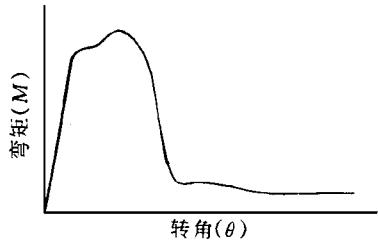


图2 单结构弯曲特性图

(4) 护栏立柱只有地表下20cm处向路外侧的刚塑性弯曲变形,其弯曲特性符合理想失稳模型(见图3),其中 M_c 为屈服弯矩, θ_c 失效转角。这里忽略了弹性变形、强化和弱化,只考虑塑性铰的形成和截面失稳。

(5) 护栏横梁将承受横向塑性弯曲和纵向弹性伸长,其弯曲特性符合理想失稳模型。由于横梁的纵向拉力的存在、弯曲中性线的不对称性、截面的失稳及托架的变形等会使护栏横梁有一定的永久伸长,我们称之为表观塑性伸长,护栏横梁的纵向伸长将被理解为表观塑性伸长和弹性伸长之和。

(6) 护栏横梁和立柱在立柱失稳以后将立即脱开。这是由于托架的拉开、拉脱一般是在立柱失稳以后,并且此时的拉力不大,可以忽略。

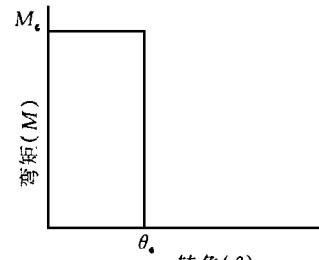


图3 理想失稳模型

2 模型及算法

2.1 力学模型

根据上一节的假设,车体被简化为质点,它的运动将遵从牛顿运动定律:

$$mX = F \quad (1)$$

其中, m 为车体质量, $X=(x,y)$ 为车体位置坐标,
 $F=(f_x,f_y)$ 为护栏对车体的作用力的合力(见图
4)。

T 产生于护栏横梁的纵向弹性变形

$$T = SE \frac{DL - DL_p}{L} \quad (2)$$

其中, L 为参与作用的护栏横梁的原长, DL 为护
栏横梁的总伸长量, S 为护栏横梁的截面积, E 为弹性模量, DL_p 为护栏横梁的表观塑性伸
长量,它可近似地定义为

$$\frac{d}{dl}(DL_p) = \alpha T \quad (3)$$

我们称 α 为护栏的表观塑性伸长系数,而 Q_1,Q_2 则来自于铰点的力矩

$$Q_i = \begin{cases} \frac{M_c}{\alpha_i} & \theta < \theta_c \\ 0 & \theta \geq \theta_c \end{cases} \quad (4)$$

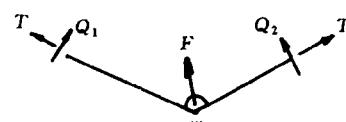


图4 车体受力示意图

而这些力又将由立柱来承受,立柱的受力状态类似于车体的受力状态(参见车体受力示意图)。这样立柱顶端所受的合力 H 将是 T 与 Q 的联合作用,它在此合力 H 对其地表下20cm处的力矩 $H \times (h+20\text{cm})$ 作用下的变形遵从理想失稳模型。

2.2 计算方法

对于上面的模型我们给出了下面的显式算式,算法步骤如下(参见图5)。

步骤一:确定车体和护栏结构的初始状态:

车体的初始参数

$$X(t_0) = X_0; \quad \dot{X}(t_0) = V\cos\gamma, V\sin\gamma; \quad F(t_0) = (0, 0)$$

其中, V 为车体碰撞速度, γ 为碰撞角度。

护栏的初始参数

$$H_i(t_0) = 0; \quad P_i(t_0) = IP_i; \quad I(t_0) = n; \quad J(t_0) = n + 1$$

$$T(t_0) = 0; \quad DL(t_0) = 0; \quad DL_p(t_0) = 0; \quad B_i(t_0) = 0$$

其中, H_i 为护栏传给第 i 根立柱的力; P_i 为第 i 根立柱的位置坐标, IP_i 为它的初始位置, B_i 为其失效指示参数 ($=1$ 为失效, $=0$ 为未失效), I 为车体后第一未屈服的立柱号, J 为车体前第一个未屈服的立柱号。我们假设车体和护栏的第一接触点在第 n 号立柱和第 $n+1$ 号立柱之间。

步骤二: 给定时间步长 Δt , 利用 t_n 时刻的参数求解 t_{n+1} 时刻车体的速度和位置;

$$\dot{X}(t_{n+1}) = \dot{X}(t_n) + \frac{F(t_n)}{m} \Delta t$$

$$X(t_{n+1}) = X(t_n) + \dot{X}(t_n) \Delta t$$

步骤三: 利用车体的新位置, 判断有无新立柱屈服和失稳。

首先利用车体的新位置求得护栏横梁的伸长 $DL(t_{n+1})$, 如对于计算方法示意图中的情况我们有

$$DL(t_{n+1}) = |P_1 - P_3| + |P_3 - X(t_{n+1})| + |x(t_{n+1}) - P_2| - |P_1 - P_2|$$

$$L(t_{n+1}) = |P_1 - P_2|$$

再由表观塑性变形的定义, 近似地有

$$DL_p(t_{n+1}) = DL_p(t_n) + \alpha T(t_n) \Delta x$$

其中, Δx 为车体纵向位移。这样就可以利用公式(2)求出 $T(t_{n+1})$, 进而求出立柱所受的力 $H_i(t_{n+1})$ 和立柱位置, 这样就可以判断是否有新的立柱屈服。若有, 重复上述工作, 直到无新立柱屈服。

步骤四: 由步骤三确定的立柱位置, 根据车体受力图求出护栏对车体的作用力 $F(t_{n+1})$ 及 t_{n+1} 时刻的所有其它参数, 回到步骤二。

3 结语

本文给出的模型中需要特殊测定的参数有: 护栏横梁的屈服弯矩 M_c 和失效转角 θ_c , 护栏立柱的屈服弯矩 M_i 和失效转角 θ_i , 以及护栏横梁的表观塑性伸长系数 α , 对于屈服弯矩 M_c 和失效转角 θ_c , 它们只与单结构的弯曲特性有关, 我们可通过进行单结构弯曲实验来得到, 对于表观塑性伸长系数 α , 由于它与横梁的弯曲特性及托架的性能有关, 我们则必须通过模拟实验或实车足尺护栏碰撞实验的数据来拟合。

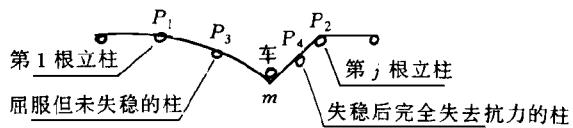


图 5 计算方法示意图

作简单的推广,我们可以将本文给出的车体的一点接触质点模型改为两点接触的刚体模型,以改善模型精度。但是实践证明,这样作效果不大,不过它可以改善对车体离开护栏后的运动的模拟。

我们利用本文给出的模型对 1992 年实车足尺护栏碰撞实验的情况进行了模拟。对未翻车的车的轨迹,模拟结果和实验结果的相对误差不大于百分之十,大部分可控制在 6%~7%。

我们利用此模型分析了立柱在碰撞过程中的特性,并利用这些结果成功地设计了采用玻璃钢材料的组合式护栏立柱。这种立柱以通过实车足尺护栏碰撞验证实验(见文献[8])。

实践证明此模型能够较真实地给出车体在离开护栏前的运动轨迹和护栏的变形情况。这样我们就可以用它来进行碰撞过程中的车体的倾覆分析、护栏结构的优化等工作。

参 考 文 献

- 1 Michie, J. D. ,et al. Guardrail perfomance and design. National Cooperative Highway Research Program Report 115 TRB,National Research Council,1971.
- 2 Michie, J. D. Recommended procedures for the safety performance evaluation of highway appurte-nances. National Cooperative Highway Research Program Report 230. TRB,National Research Council, 1981
- 3 Viner, J. G. ed. Safety fences and bridge parapets—TRRI papers for the 1986 TRB annual meeting. Re-search Report 75.CROWN 1986
- 4 Bronstad, M. E. Performance of longitudinal traffic barriers, National Cooperative Highway Research Program Report 289. TRB,National Research council,1987
- 5 Richard, M. E. ,et al. Crash test evaluation of eccentric loader guardrail terminals. Transportation Re-seach Record 1065,1987.
- 6 Bronstad, M. E. ,et al. Crash test evaluation of eccentric loader guardrail terminals. Transportation Re-seach Record 1065,1087
- 7 贾日学,储劲草等. 实车足尺护栏碰撞实验研究. 中国公路工程咨询监理总公司,1992
- 8 丁 桦,王剑文,储劲草等. 玻璃钢护栏立柱的研究和设计. 中国公路工程咨询监理总公司,1994
- 9 Giavotto, V. Mathematical model for impact tests on crash barriers. Technological University,Milan-italy,1972
- 10 Powell, G. H. Computer evaluation of automobile barrier systems. Report FHWA—RD—73—73. De-partment of Transportation,FHWA,U. S. ,1970
- 11 Powell, G. H. BARRIER II:A computer program for evaluation of automobile barrier systems. Report FHWA—RD—73—51. Department of Transportation,FHWA,U. S. ,1973
- 12 Dunlap, D. F. Curb—guardrail vaulting evaluation. H. S. R. I. ,University of Michigan,1972