

摘 要

本文研究的高速公路单坡面中央分隔带混凝土护栏交通安全设施,针对桂柳高速公路的实际情况,结合美国近几年研究成果,对这种形式的护栏进行了开发应用。主要根据车辆与护栏碰撞的动力学、工程结构力学等学科综合确定护栏的强度、刚度、高度、内侧坡面形式等结构参数。同时,采用目前国际上通用的实车碰撞实验技术对护栏性能进行检测,来对护栏进行评价,并通过在桂柳高速公路上的实际应用,以检验和确定该结构形式的护栏在实际应用过程中的可行性、安全性和经济性,为对其不断改进、优化,使其更加适应我国高速公路建设的实际需要,同时,获取该结构形式护栏在实际应用过程中数据和参数,为制定和修改相应的规范提供依据,并为今后进一步推广使用奠定基础。

关键词: 高速公路; 交通安全设施; 中央分隔带; 混凝土护栏; 开发应用

Abstract

In this thesis, for researching the traffic safety device—concrete guard fence of the median separator on the single face of slope of highway, we countered the practical situation of GUILIN-LIUZHOU freeway, exploited and utilized this kind of the guard fence by linking up with the recent research in USA. According to dynamics, engineering theory of structure etc., we fixed on the structure parameter about this fence's strength, rigidity, height and form of inside slope. Meanwhile, we tested the capability of this guard fence adopting international common practice: experimental technology of auto collision. Furthermore, via the applications of the guard fence in the GUILIN-LIUZHOU freeway project, we improved this kind of fence's feasibility, security and economy in reality. In addition to accelerating the process of concrete guard fence optimization which can make this technology to be adapted for the practical situation in China, our research will provide a basis for the formulating and modification of relevant rules, and then lay the foundation of the fence's popularization in the future.

Keyword: Freeway, Traffic safety device, Median separator, Concrete guard fence, Application and Utilization

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京工业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签名: 王福江 日期: 2004.1.9

关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

签名: 王福江 导师签名: 任福江 日期: 2004-5-10

第1章 绪论

1.1 问题的提出

广西第一条高速公路——桂林至柳州高速公路（简称桂柳高速公路，下同），是一条修建在山岭重丘地区的高速公路，路基宽度只有21.5m，中央分隔带宽度仅有1.5m，中央分隔带原设计为新泽西式混凝土护栏。在路基大部分建成的情况下，正准备进行路面和交通安全设施施工时，交通部主管部门根据国内高速公路运营中，混凝土护栏存在的问题，提出了今后在高速公路建设中要慎用原已采用的新泽西式混凝土护栏，据此，桂柳高速公路工程建设总指挥部进行了多次的研究，由于改用钢护栏有一定的难度，主要是中央分隔带宽度不够，没有建排水系统，重新建排水系统，造价太高。为此，工程建设总指挥部根据桂柳高速公路的实际情况和上级主管部门的要求，与有关设计单位合作，研究开发了单坡面中央分隔带混凝土护栏，报经交通部主管部门批准，同意在桂柳高速公路上试用。

1.2 国内外研究现状

混凝土护栏是护栏的一种形式，在国外得到了较为广泛的应用，特别是在路基宽度较窄的路段。国外在高速公路出现的初期就开始在较窄的中央分隔带和桥梁上大量使用。特别是在美国和加拿大等西方发达国家，现在高速公路的中央分隔带防撞护栏大量使用混凝土护栏，而且比重还在不断地增加（图1-1，图1-2）。



图 1-1 加拿大 401#高速公路

Fig 1-1 No401 Expressways of Canada



图 1-2 美国 95#高速公路

Fig 1-2 No95 Expressways of U.S.

目前，正在大量使用的比较好的混凝土护栏的型式主要有三种：（1）NJ 型（新泽西式）；（2）F 型（NJ 改进型）；（3）GM 型（通用汽车型）。我国在借鉴国外大量使用混凝土护栏的基础上，也在国内的一些高速公路上使用了混凝土护栏。但是，近几年，我国高速公路和一级公路中原用的混凝土护栏，多为 NJ 型或 F 型，即 NJ 的改进型，这种混凝土护栏由于本身结构的特点，对车辆防撞性能较差。为此，如何研究开发出一种既能减少工程造价和维护费用，又能降低交通事故，尤其是二次交通事故的中央分隔带护栏是国内高速公路中央护栏设计与

开发的目标，作为国家重点科技攻关项目《高速公路交通安全设施的研究》，交通部公路科研部门组织有关专家，通过大量使用混凝土护栏的效果调查、碰撞试验及理论研究和分析，取得了不少的科研成果，并制定出我国高速公路交通安全设施的行业标准。

1.3 本文研究的主要内容

本文研究的高速公路单坡面中央分隔带混凝土护栏交通安全设施，针对桂柳高速公路的实际情况，结合美国近几年研究成果，对这种形式的护栏进行了开发应用。主要根据车辆与护栏碰撞的动力学、工程结构力学等学科综合确定护栏的强度、刚度、高度、内侧坡面形式等结构参数。同时，采用目前国际上通用的实车碰撞实验技术对护栏性能进行检测，来对护栏进行评价，并通过在桂柳高速公路上的实际应用，以检验和确定该结构形式的护栏在实际应用过程中的可行性、安全性和经济性，为对其不断改进、优化，使其更加适应我国高速公路建设的实际需要，同时，获取该结构形式护栏在实际应用过程中数据和参数，为制定和修改相应的规范提供依据，并为今后进一步推广使用奠定基础。

第2章 结构设计与分析

2.1 断面的结构设计

2.1.1 断面结构形式的选择

混凝土护栏是一种具有一定形状的墙式护栏结构，它是一种刚性承力结构。当汽车与护栏发生碰撞时，由于护栏是刚性的，基本不变形，在碰撞过程中的能量主要是依靠汽车与护栏面结出滑动并沿着护栏面爬高和转向来吸收。因此，混凝土护栏的截面形状和几何尺寸直接影响碰撞效果。由于国外早已大量使用混凝土护栏，特别是美国，混凝土护栏的使用已有几十年了，为此，他们做了大量的实验和理论研究。目前，国内大量使用的混凝土护栏的结构形式主要是美国的新泽西式（NJ型）及其改进型。针对国内目前已使用的混凝土护栏存在的问题，结合桂柳高速公路的具体情况，借鉴美国近几年的研究成果，设计开发了高速公路单坡面中央分隔带混凝土护栏，其断面结构形式如图2-1。

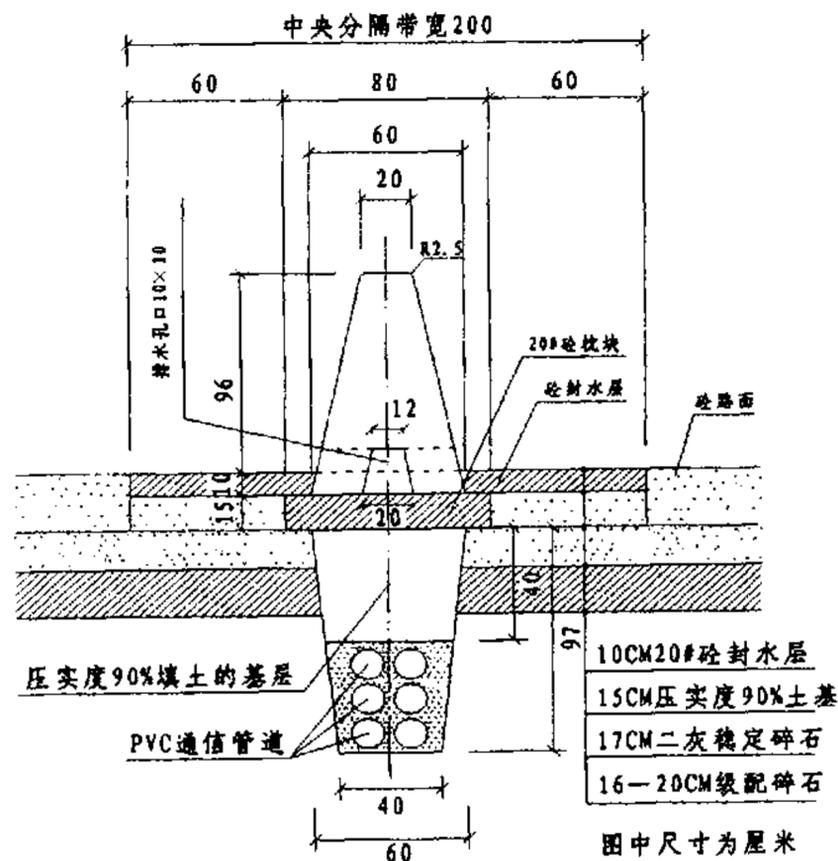


图2-1 断面结构图

Fig 2-1 Section structure chart

2.1.2 关于平面布置

关于平面布置，根据施工工艺不同，提出两种布置：一是预制工艺，平面布置见图 2-2；二是现场浇筑工艺，平面布置见图 2-3。

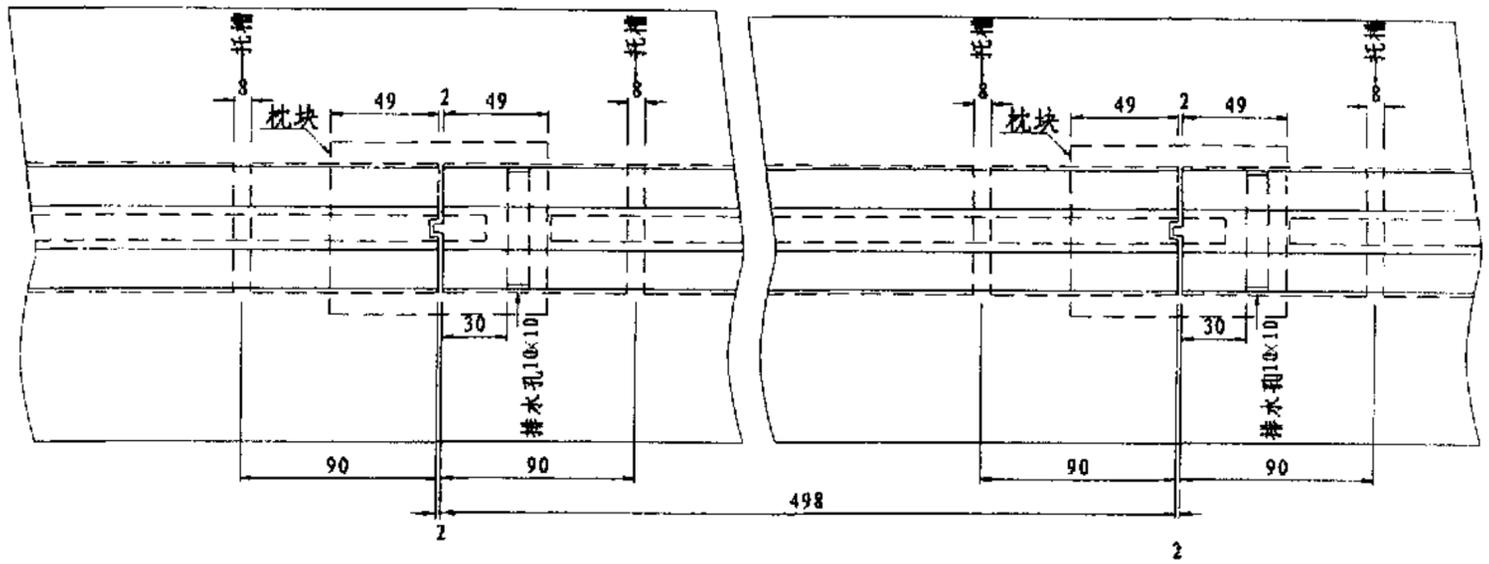


图 2-2 预制工艺平面布置图

Fig2-2 Prefabricate craft level assign figure

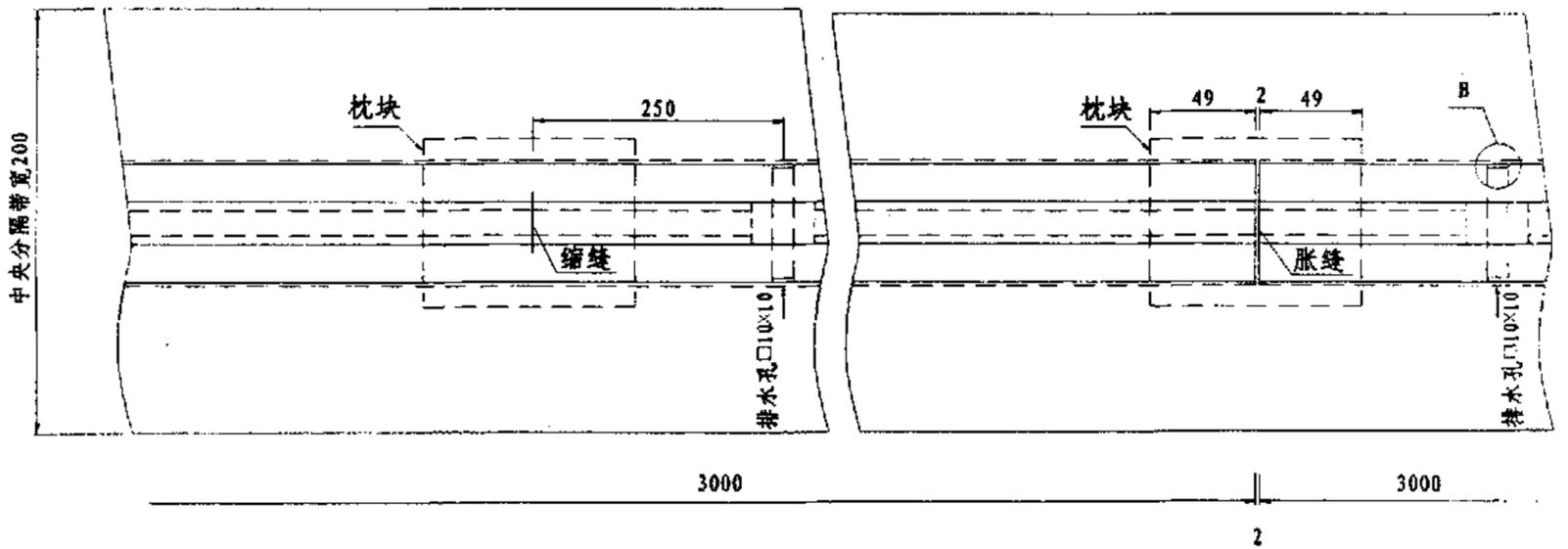


图 2-3 现浇工艺平面布置图

Fig 2-3 Cast-in-place craft level assign

2.2 基础应力的计算

2.2.1 护栏基础应力的计算

1. 护栏重量

地基应力验算采用 5m 一段为验算单位。

(1) 护栏

截面积： $1/2 * (20+60) * 106 - 1/2 * (12+20) * 20 = 3920 \text{ cm}^2$

容重一般为： 20 KN/m^3 ，特殊为： 26 KN/m^3

这里按 26 KN/m^3 考虑；

重量： $3920 * 5 * 26 * 10^{-4} = 50.96 \text{ KN}$

(2) 基础

体积： $100 * 80 * 15 = 120000 \text{ cm}^3 = 0.12 \text{ m}^3$

重量： $0.12 * 26 = 3.12 \text{ KN}$

(3) 共重： $50.96 + 3.12 = 54.08 \text{ KN}$

2. 地基应力

按最不利状态考虑，如基础中间地基下沉，仅基础承受重量，则承受自重面积为： $100 * 80 = 8000 \text{ cm}^2 = 0.8 \text{ m}^2$

地基应力： $\sigma = 54.08 / 0.8 = 67.6 \text{ KPa}$

粘土地基的容许应力见桥涵设计规范。与规范相比较，接近沉积粘性土。其可能接近 0.25，孔隙比 $e \leq 0.8$ 。

按《公路桥涵地基与基础设计规范 (JTJ024—85)》表 2.1.2—3，查得， $[\sigma_0] = 140 \text{ KPa}$ ，即： $[\sigma_0] = 140 \text{ KPa} > \sigma = 67.6 \text{ KPa}$ 。实际上，由于夯实，压实度 $\geq 90\%$ ， $[\sigma_0]$ 还应高些，因此，地基承载力不存在任何问题。

实际上，基础间的地基，特别是中间部分，仍能承受一定的力，因此基础下的地基承载力更无问题。

2.2.2 静荷载作用下基底应力

每 5m 护栏设一枕块，由于枕块刚度较大，其下土基各点沉降相同，所以假

设其受力模式为一均布载荷（包括 5m 护栏及枕块）作用在土基上，并计算枕块四角及中心点引起的竖向应力，以验算其在土基上的稳定性。

5m 护栏及枕块重量： $N=54.08 \text{ KN}$

均布载荷： $P=N/S=54.08/0.8=67.6 \text{ KN/m}^2$

(1) 计算 a 点下的竖应力

由于地基为亚粘土， $[\sigma_0]=105 \text{ KPa}$ (由工程指挥部实验室提供)

又 $\alpha_0=0.25$

故 $\sigma_{za}=0.25*67.6=16.9 \text{ KPa} < [\sigma_0] =105 \text{ KPa}$

(2) 计算枕块中心 M 点下的竖应力

$\sigma_{za}=\alpha_0*P=1.0*67.6=67.6 \text{ KPa} < [\sigma_0] =105 \text{ KPa}$

有以上验算可知：枕块在土基上是稳定的。

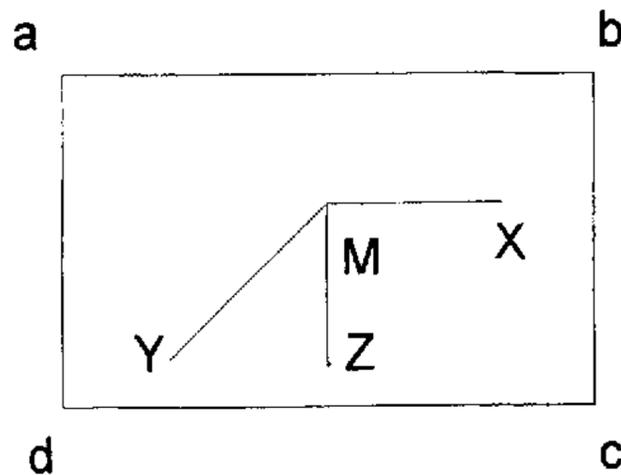


图 2-4 枕块中心 M 点

Fig 2-4 Rest the head on pieces of in the center M point

2.2.3 撞击时土基应力

当中央分隔带混凝土护栏受到撞击时，枕块的受力状态将发生变化，其下的土基竖向应力也会重新分布，现对其应力进行分析。

1. 基本假设

(1) 假设混凝土护栏是连续受力的，在受到撞击后，不会发生横向位移，并靠自重维持稳定。

(2) 假设两端封水层（70cm 宽）与护栏紧密相接，并在混凝土护栏发生倾覆时被扰动。（见图 2-5）

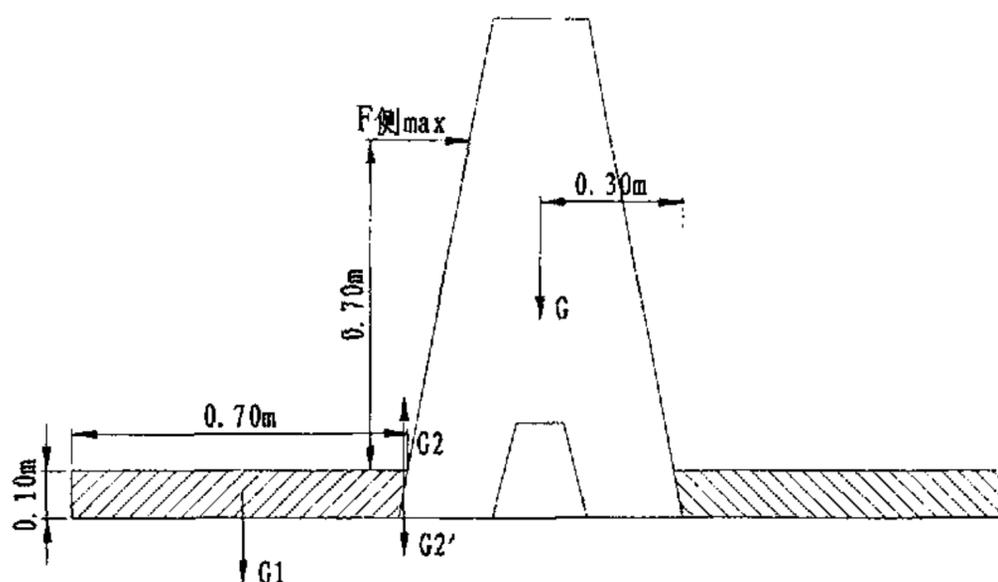


图 2-5 护栏及两侧封水层断面图

Fig2-5 Guardrail and both sides seal the sectional drawing

2. 受力分析

以受力碰撞时封水层为研究对象（见图 2-6）：

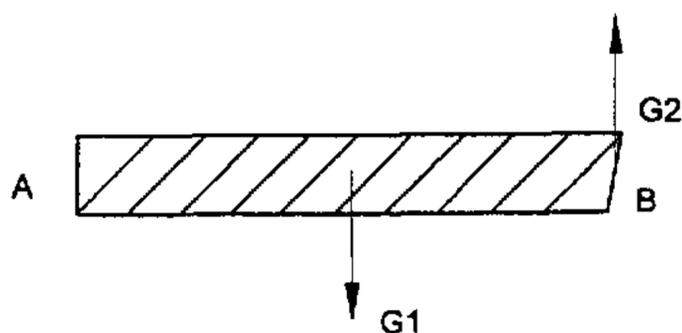


图 2-6 封水层断面图

Fig2-6 Layers of protecting water drawing

$$G_1 = \gamma \cdot AB \cdot L \cdot h = 2.3 \cdot 0.7 \cdot 1.5 \cdot L = 2.415L \text{ KN}$$

$$\Sigma MA = 0 \text{ 得 } G_2 = G_1 \cdot 0.35 / 0.7 = 1.208L \text{ KN}$$

(2) 以中央分隔带混凝土护栏为研究对象

a. 碰撞力的计算

已知：车辆质量： $m = 10000 \text{ kg}$

碰撞角度： $\theta = 15^\circ$

碰撞速度： $V_1 = 60 \text{ km/h} = 16.7 \text{ m/s}$

车辆重心距保险杠的距离： $C = 3.34 \text{ m}$

车辆宽： $Z_b = 2.47 \text{ m}$

护栏横向变位： $Z = 0$

$$\begin{aligned} \text{求: } F_{\text{横max}} &= \pi / 2 * m * V_1 * \sin^2 \theta / \{2000[c * \sin \theta - Z_b (1 - \cos \theta) + Z]\} \\ &= \pi / 2 * 186820.88 / \{2000 * [c * \sin \theta - 0.084]\} \\ &= 188 \text{ KN} \end{aligned}$$

b. 剪切应力

中央护栏截面积 $S = 0.392 \text{ m}^2$

$$\tau = 188 / 0.392 = 480 \text{ KPa} < [Z_0] = 3.3 \text{ Mpa}$$

所以护栏不会在撞击下发生剪切破坏，故混凝土护栏连续整体受力假设成立。

c. 计算受力长度 L (图 2-7)

由力平衡条件知：

$$G_2 = 10208L \text{ KN}$$

$$G = 0.392L * 2.3 = 0.9016L \text{ KN}$$

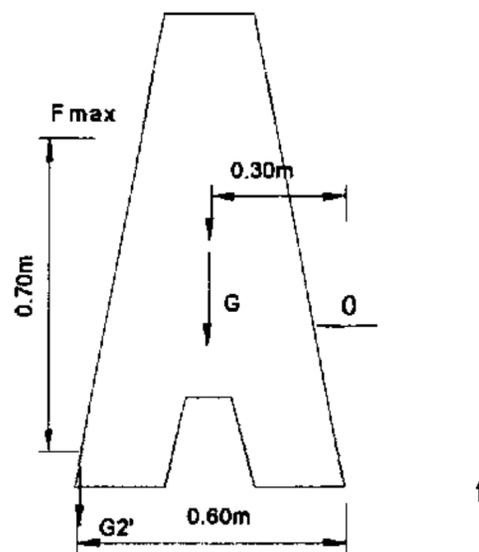


图 2-7 护栏断面图

Fig2-7 Guardrail sectional drawing

当混凝土护栏在 $F_{\text{横max}}$ 作用下，绕 O 轴有旋转趋势，但未旋转，此时其受力平衡。

由 $M_0 = 0$ 知：

$$G_2 * 0.6 + G * 0.3 - F_{\text{横max}} * 0.7 = 0$$

代入已知值：

$$1.208L * 0.6 + 9.016L * 0.3 - 188 * 0.7 = 0$$

所以： $L = 38.37 \text{ m}$

d. 土基上枕块在抵抗混凝土护栏倾覆时，其受力状况相当于在其作用一集中力 P ，此集中力的大小由护栏受力段 L 决定，假设全段内每一个枕块受力是均衡

的。

则: $G_2+G=392 \text{ KN}$

枕块数= $L/S=38.37/5=7.6$ 块

每个枕块受集中力 $P=392/7.6=52 \text{ KN}$

e. 混凝土护栏在抵抗横向撞击力 $F_{\text{横 max}}$ 时, 枕块下的竖向应力计算, 见图 2-8。

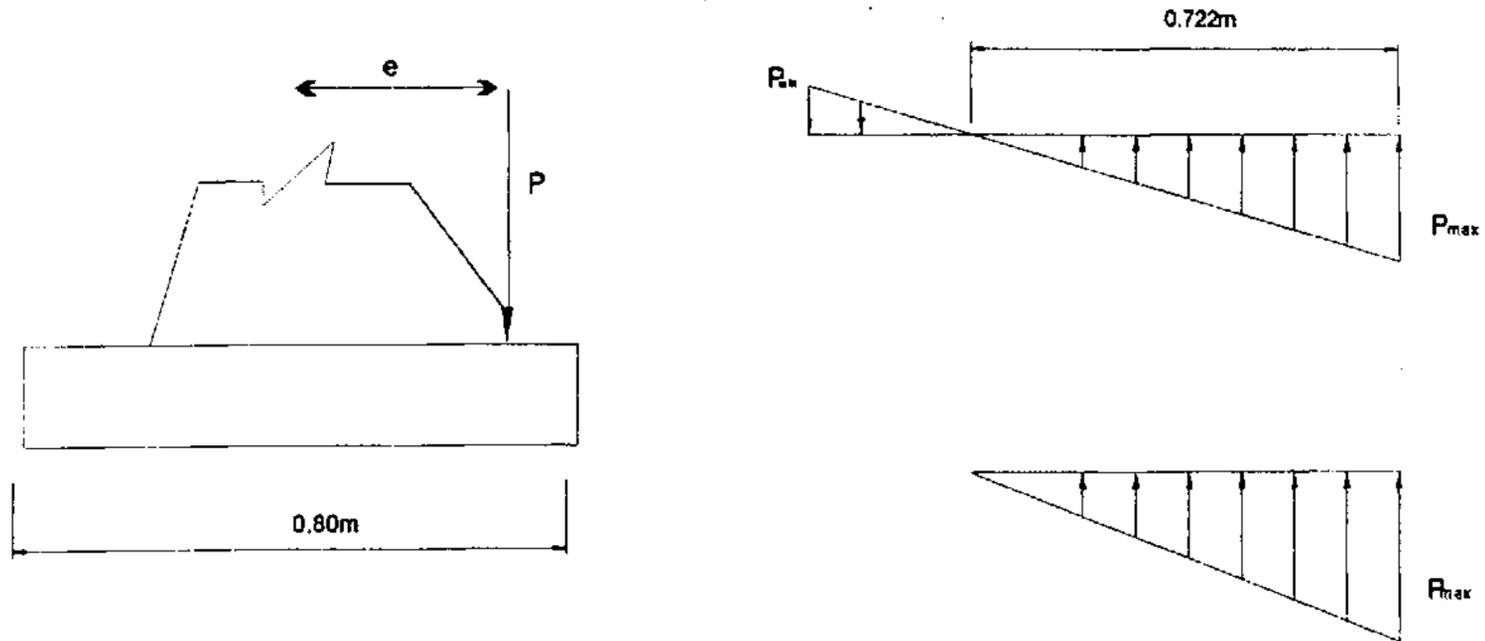


图 2-8 护栏在受撞击时枕块下的竖向应力

Fig2-8 Guardrail rest the head on piece vertical to the stress

(a) 基底压应力按偏心受压公式计算

$$P_{\max(\min)}=P/F \pm M/N$$

$$\text{式中: } P=52 \text{ KN} \quad F=1*0.8=0.8 \text{ m}^2$$

$$M=Pe=52*0.3=15.6 \text{ KN:m}$$

$$W=1b^2/6=1*0.8^2/6=0.107 \text{ m}^2$$

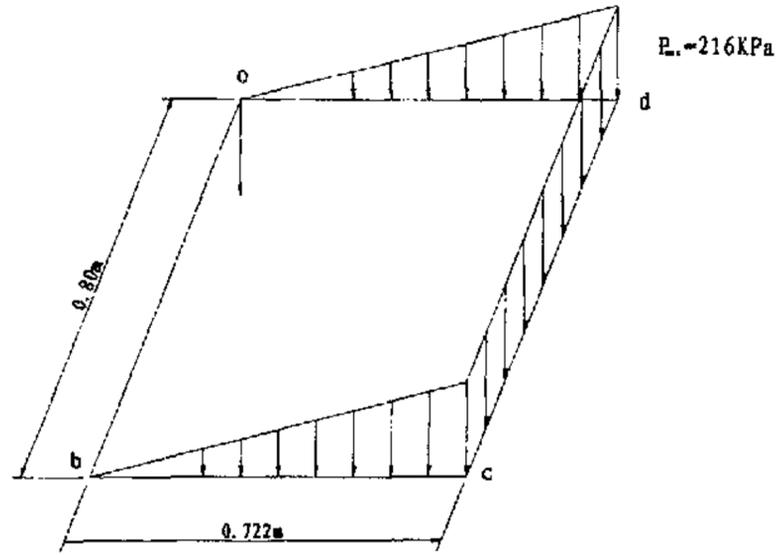
$$P_{\max(\min)}=52/0.8 \pm 15.6/0.107=65 \pm 146.3$$

$$=211.3 (-81.3) \text{ KN/m}^2$$

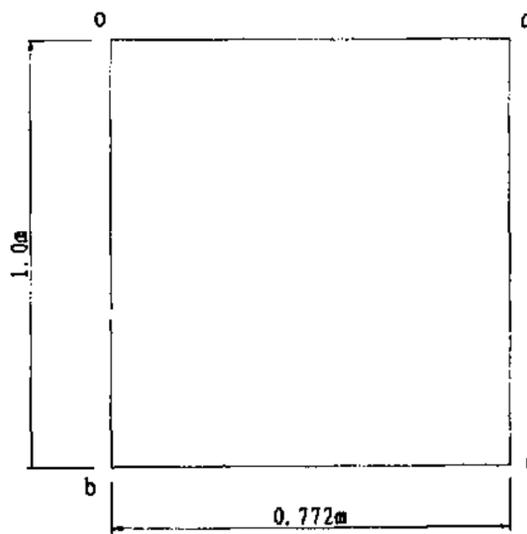
由于基底与土之间不能承受拉应力, 其产生拉应力的基底与土脱开, 而不能传递荷载, 其基底压应力将重新分布

$$P_{\max}=2P/3(2/b-e)l=2*52/3(0.8/2-0.3)*1=346 \text{ KN/m}^2$$

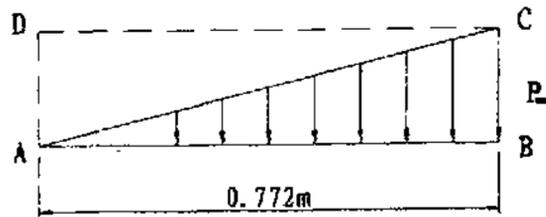
(b) 计算矩形面积上作用三角形分布荷载时, 土中竖向应力 σ_{zc} (见图 2-9)。



(a)



(b)



(c)

图 2-9 竖向应力分布图

Fig2-9 Vertical stroke distribution map of the stress

求图 (a) 中 C 点下的竖向应力, 可用角点法计算出矩形 (abcd) 在均布荷载 P_{max} 作用下 C 点的竖向应力 σ_{z1} , 再减去三角形分布荷载 (ACD) 见图 (c), 作用下荷载零点 C 下的竖应力 σ_{z2} , 即: $\sigma_{zc} = \sigma_{z1} - \sigma_{z2}$

在矩形 (ABCD) 荷载作用下

由 $z/b=0$ 知 $\alpha_1=0.25$

所以 $\sigma_{z1}=\alpha_1*P_{max}=0.25*346.7=86.7 \text{ KPa}$

在三角形荷载 (ACD) 作用下, 其零点 (C 点) 荷载下的竖应力系数:

由 $z=0$ 知 $\alpha_2=0$

所以 $\sigma_{z2}=\alpha_2*P_{max}=0$

所以 $\sigma_{zc}=\sigma_{z1}-\sigma_{z2}=86.7 \text{ KPa}<[\sigma_0]=105 \text{ KPa}$

通过以上验算证明: 混凝土护栏在受到撞击时, 护栏是安全的, 其基地土应力满足要求。

2.2.4 建议

建议施工中, 最好采用现场浇筑工艺, 经济、方便, 加强混凝土护栏的整体性, 更接近实车碰撞条件。

2.3 断面结构特点分析

这种断面结构形式具有如下特点:

1. 高度为 96cm, 比新泽西式 81cm, 高出 15cm, 更有效地拦阻车辆翻越护栏, 侵入另半幅车道, 造成两次交通事故。

2. 单坡面混凝土护栏重心高 47cm, 比原来多坡面混凝土护栏 29.2cm, 更接近一般车辆的重心, 当发生碰撞时, 车辆更稳定。

3. 由于单坡结构, 当车辆碰撞时, 比原多坡护栏加强了对车辆的拦阻作用, 减少了车辆倾覆的可能性。

4. 由于截面形状简单, 便于制模和现场浇注, 施工方便。

第3章 护栏实车碰撞实验

3.1 实验情况概述

由于目前国内公路界对混凝土护栏的防撞能力、安全性能等方面的认识尚不甚明确。因此有必要根据目前我国的道路条件,通过实车碰撞实验来对该形式的护栏进行评价,为混凝土护栏的研究、设计、开发、施工提供依据。

实验场位于北京昌平区,是一座新型护栏碰撞实验场。其主要的建筑设施有:借助山坡地势(32.8度)实验滑道,滑道长140m,作用是提供车辆加速的运行轨道;滑道中间的导向轨,主要作用是对车辆进行导向,摄影塔,主要作用是安装高速摄影机。车辆加速的基本原理是机械守恒定律,即根据碰撞速度,车辆质量的要求,并考虑摩擦力做功等因素,得到车辆达到设计速度时所需要的势能和提升高度。该实验装置可以满足大吨位、高速度车辆碰撞实验的要求。实验场全貌见图3-1。



图3-1 实验场全貌

Fig 3-1 Panorama of experimental field

为了进一步减少混凝土方量,缩小护栏宽度,节省道路用地,实验护栏对桂柳高速公路的混凝土护栏断面形式进行了一些改进。具体办法是保持原来护栏内侧坡面坡度及护栏的高度,顶端的宽度不变,改原来的坡角为直角。具体的断面尺寸见图3-2。

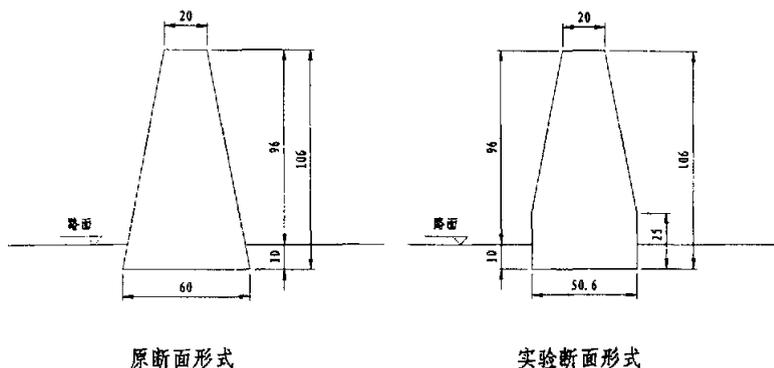


图 3-2 断面尺寸

Fig3-2 Section size

混凝土护栏的设计标号为 30#。采用预制安装方式，预制件长度为 6m，预制件之间采用企口连接，其中碰撞区域的三段护栏之间采用钢板连接。实验护栏总长为 70m，其中碰撞点位置在第二段护栏的中部，距离护栏的起始端为 9m，末端为 61m。这里以车辆最先接触护栏的一端为起始端。预制件预埋钢板连接情况及实验前的护栏形态见图 3-3~图 3-5。



图 3-3 吊装护栏情况

Fig 3-3 Hoist and mount guardrail situation

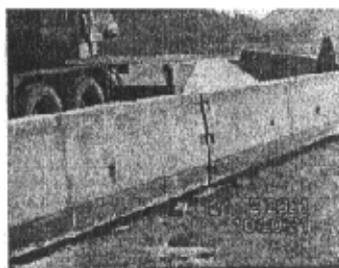


图 3-4 护栏连接情况

Fig 3-4 Guardrail join situation

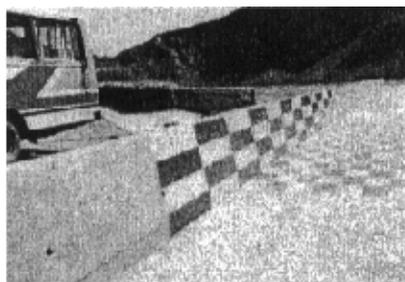


图 3-5 实验前护栏状况

Fig 3-5 State of the guardrail before the experiment

碰撞实验中主要的测量项目包括：混凝土护栏的横向变位情况、混凝土护栏的破坏情况、车辆的碰撞速度和角度、车辆的运行轨迹、车辆的破坏情况、乘员所受的冲击等，车辆与护栏的破损情况、车辆的运行轨迹，通过碰撞结束后对碰撞现场的观测分析，以及对照片、摄像等记录结果进行分析，乘员所受的冲击加速度通过三向加速度传感器的测量。

实验使用的主要设备及仪器：

电子位移计：本次实验采用 5-10cm 大量程的电阻应变式位移传感器直接测量，并配置 16 通道的 DH—3846 型应变放大器和 INV303A 型智能信号采集箱及其配套的大型软件包 V6.61 版本的 DASP 数据大容量自动采集和信号处理系统，对位移数据进行采集及处理分析。车辆碰撞护栏后，护栏和桥梁翼板所产生的位移将通过位移传感器，以电压值的方式被系统收集，经过信号处理后成为以毫米计的位移值。图 3-6 为横向位移采集系统的工作原理示意图。

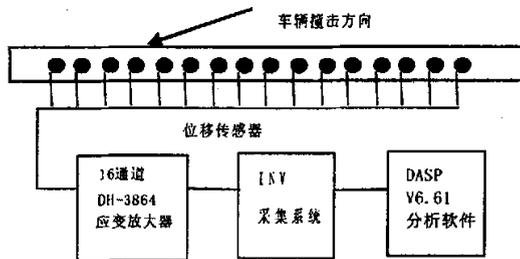


图 3-6 横向位移采集系统的工作原理示意图

Fig3-6 Horizontal displacement gather systematic operation principle sketch figure

加速度测量系统：本次实验中人体加速度测量采用的是航天部设计开发的模拟人体和中科院力学所开发的碰撞加速度测量系统。加速度传感器安装在模拟人的头部和胸部，用以测量这两个部位所受的冲击加速度值。传感器采用三向加速度传感器，安装部位见图 3-7。加速度测量系统工作原理见图 3-8。

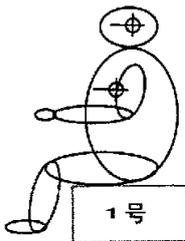


图 3-7 传感器安装部位图

Fig 3-7 Acceleration sensor install
the position picture

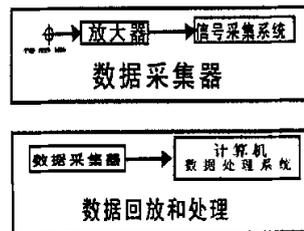


图 3-8 加速度测量系统工作原理图

Fig3-8 Acceleration Measuring system
the position picture

高速摄影机：本次碰撞实验所采用的高速摄影机是加拿大 MREL 公司生产的 FASTCAM Super10K 型黑白两色高速摄影机。摄像机的最高拍摄速度率为 500f/s，照片尺寸大小为 13.47×6.32cm，像素大小为 512×240 像素，分辨率为 38 像素/厘米，拍摄范围约 6.7×3.16 米，记录最大时长为 5.4 秒。高速摄影机安装见图 3-9。



图 3-9 高速摄影机安装情况

Fig 3-9 Erection state of the high-speed cine camera

碰撞车辆的准备：本次实验的各实验车辆的有关参数见表 3-1。

表 3-1 实验车辆的相关性能及参数

Table 3-1 Performance and parameter of experimental vehicle

车辆编号	车型	自重 (t)	配重 (t)	总重 (t)	车身宽度 (cm)	车身高度 (cm)
1	福特轿车	1.1	0.9	2	165	145
2	沃尔沃轿车	1.28	0.72	2	150	145
3	东风140货车	3.5	6.5	10	250	250
4	东风140货车	3.1	6.9	10	250	250
5	京华大客车	8.985	5.015	14	250	302
6	北京大客车	6.55	7.45	14	245	280
7	解放141货车	4.64	15.36	20	250	250

3.2 评价标准和碰撞条件的确定

3.2.1 评价标准的确定

对于中央分隔带护栏来说，最基本的功能就是防止事故车辆穿越中央分隔

带，侵入对向车道。只要事故车辆不穿越中央分隔带，不与对向车道行驶的车辆相撞，其事故的严重程度就可以控制在一定的范围之内。在对护栏评价标准确定的同时还应考虑一些其它指标，详述如下：

(1) 车辆不得突破护栏，侵入对向车道

这一指标的含义包括，车辆既不能越过护栏或撞倒护栏后驶入对向车道，也不能从护栏上翻过，倾覆在对向车道上，因为这都会影响到对向车辆的正常行驶，引发二次事故的发生。这是中央分隔带护栏所应满足的最基本的功能。

(2) 车辆不驶出相邻于护栏的车道

设置这一条评价标准的目的在于，使车辆碰撞护栏后不会有太大的反弹，以避免事故车辆在碰撞护栏后与同向行驶的其他车道上车辆相撞或对并行车道产生很大的影响。

(3) 乘员在系安全带的情况下，所受综合加速度不大于15g

当事故车辆冲向护栏并被护栏阻挡时，车辆和乘员均会受到冲击加速度的作用。当冲击加速度达到某一程度时，人体就会受到相应程度的伤害。冲击加速度与乘员伤害程度之间的关系与人体生物力学、冲击加速度的作用方式和部位等有关。本文中确定的评价指标参照欧美和日本相关研究成果确定。

美国对碰撞护栏事故中乘员的伤害评价指标大体描述如下：伤害后不残留严重的后遗症，应将车辆加速度限制在 20g/10ms (g 为重力加速度)，而推荐采用 75%限定值 (20g/10ms)，即 15g/10ms。这里，对于每个容许冲击加速度，都是指在碰撞过程中乘员所受冲击加速度持续时间为 10ms 时，其最大瞬时加速度的平均值。

一般来说，当护栏的强度高时，缓冲性较差，车辆与乘员所受的冲击加速度较大；反之，当护栏强度低时，缓冲性较好，车辆与乘员所受到冲击加速度较小。考虑到强度和缓冲性之间的平衡方面，日本在最新的交通安全规范中针对不同的护栏强度采用了不同的冲击加速度指标。

参照国外经验，本次实验对乘员安全性评价指标为：乘员所受最大的冲击加速度值不超过 15g/10ms。

3.2.2 碰撞条件的确定

碰撞条件主要是指实验中所采用的实验车辆的车型、车重、碰撞速度、碰撞角度。本实验碰撞条件的确定依据是我国高速公路的道路交通现状，基本思想是保证大多数车辆和乘员的安全。

根据调查资料得到目前我国高速公路中央分隔带护栏碰撞角度的累计百分比曲线图(见图 3-10)，以及几个特征统计量的值，见表 3-2。

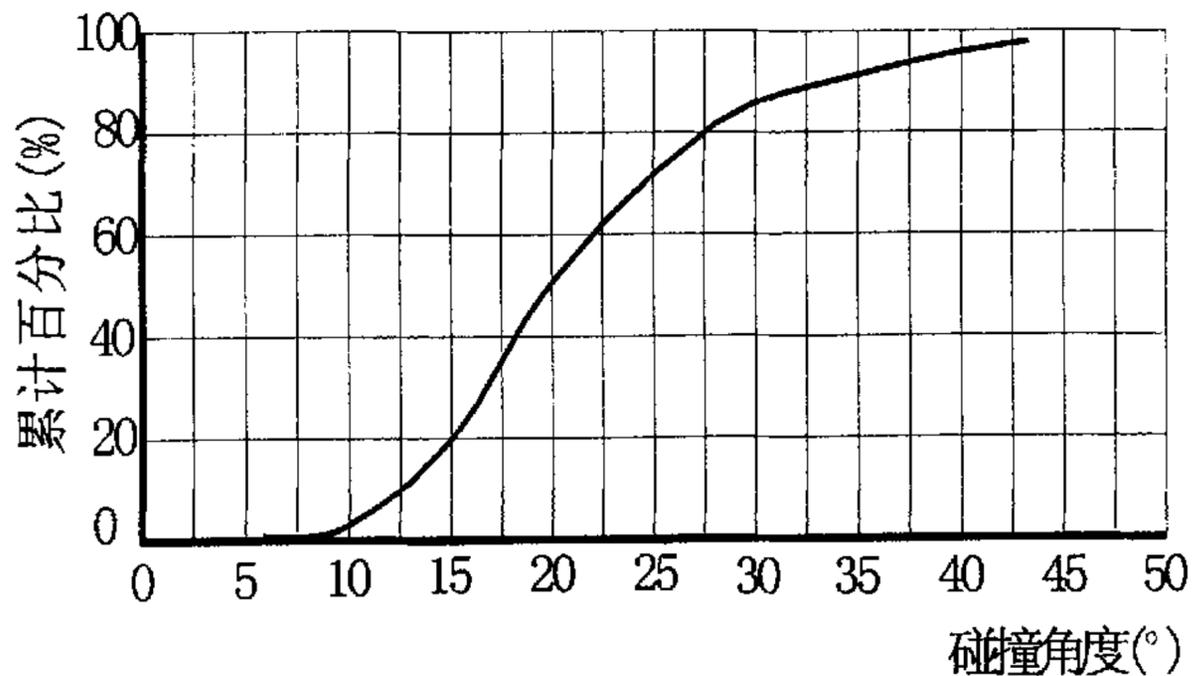


图 3-10 中央分隔带护栏碰撞角度的累计百分比曲线图

Fig 3-10 Central authorities is it take guardrail collide the accumulative total percentage curve graph of the angle to separate

表 3-2 典型统计量所对应的碰撞角度值

Table 3-2 Typical statistic related collided angle

特征点 角度值 (°)	E(□) (km/h)	□ _{15%} (km/h)	□ _{85%} (km/h)
	13.7	6.4	20.5

表 3-3 特征角度所对应的事故累计百分比

Table 3-3 Typical angle related add up percent of accidents

特征点 (°)	15	20	25
累计百分比 (%)	65.5	83.4	92.8

按照表 3-4 的分类标准，调查得到我国高速公路的车辆构成见表 3-5。

表 3-4 调查车型的划分标准

Table 3-4 Dividing standard of investigating vehicle

车型	小客车	中客车	大客车	小货车	中货车	大货车
划分标准	额定载客 6人以下	额定载客 6人以上 40人以下	额定载客 40人以上	载重2.5 吨以下	载重2.5 吨以上8 吨以下	载重8 吨以上

表 3-5 我国高速公路的车辆构成

Table 3-5 Vehicle composing of Chinese freeway

车型	小型车		中型车		大型车		总计
	小客	小货	中客	中货	大客	大货	
流量	345	57	67	97	26	37	629
	402		164		63		629
百分比	54.8	9.0	10.7	15.5	4.1	5.9	100
	63.8		26.2		10.0		100

从上表中可以看出,目前我国高速公路的主流车型是小客车,其中又以小轿车为最多。考虑到人员在交通事故中的特殊地位,因此,这里特别考虑了各种车型载客人数,得到以载客数为权重的交通组成,见表 3-7。

表 3-6 各种车型平均载客人数

Table 3-6 Average passenger quantity of each vehicle style

车型	小型车		中型车		大型车	
	客车	货车	客车	货车	客车	货车
载人数	4	2	25	3	46	4

由表 3-5 和表 3-6 可以得到折算后的车型比例,详见表 3-7。

表 3-7 载人数量权重的各种车型比重

Table 3-7 Passenger quantity and proportion of each vehicle style

车型	小型车		中型车		大型车		总计
	小客车	小货车	中客车	中货车	大客车	大货车	
载人数	1380	114	1675	291	1196	148	4804
	1494		1966		1344		4804
百分比	28.7	2.4	34.9	6.1	24.9	3.1	100
	31.1		40.9		28.0		100

相应于交通组成,几种主要车型的速度分布曲线见图 3-11~图 3-13。

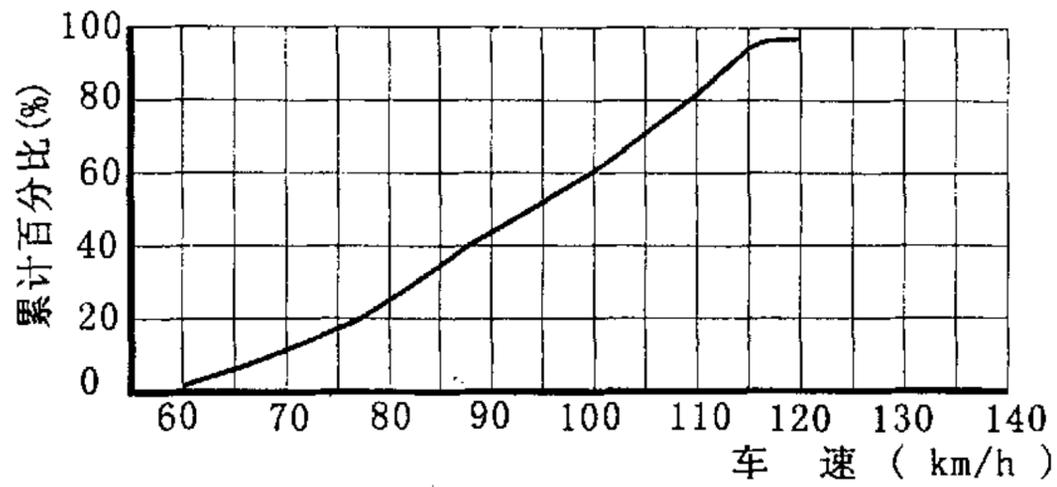


图 3-11 小轿车车速累计百分比曲线图

Fig 3-11 Car speed add up to the curve graph of percent

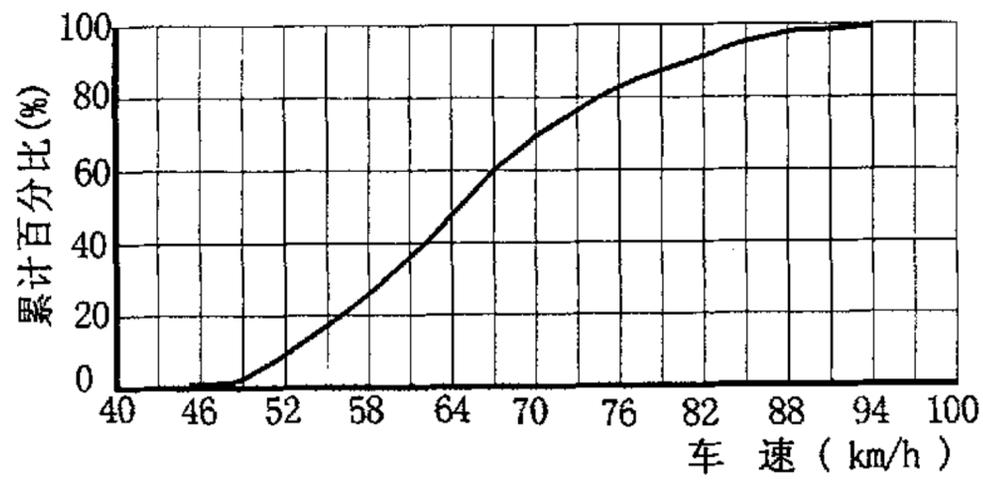


图 3-12 中货车车速累计百分比曲线图

Fig 3-12 Speed of freight train adds up to the curve graph of percentage in Fig

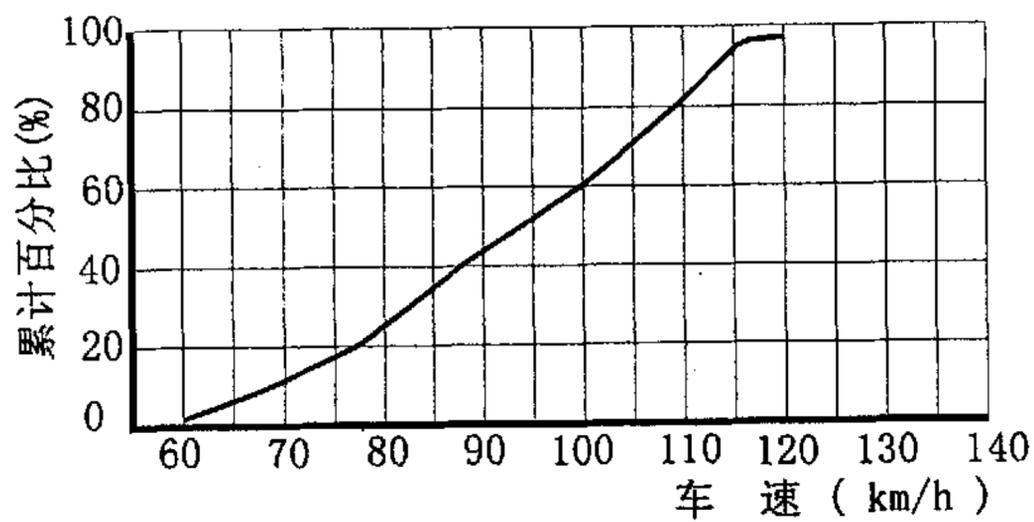


图 3-13 大客车车速累计百分比曲线图

Fig 3-13 motor bus speed add up to the curve graph of percentage

表 3-8 三种车型的特征车速对比

Table 3-8 Contrasts of three kinds of vehicle's characteristic speed

车型	E(V) (km/h)	V _{15%} (km/h)	V _{85%} (km/h)	V' (km/h)
小轿车	115	95	135	96
中货车	65	54	75	60
大客车	89	72	107	85.6

注：E(V) —车速的平均值；V_{15%}—15%位车速；V_{85%}—85%位车速；V' —计算碰撞速度，当V_{85%}小于限制车速时，为V_{85%}的0.8倍；当V_{85%}大于限制车速时，为限制车速的0.8倍。

结构形式一定的护栏能否有效地阻止车辆穿越，取决于护栏在受到车辆的碰撞后结构的破坏情况。而结构的碰撞形态又直接与碰撞力的大小有关。碰撞力的大小和车辆的质量、碰撞速度、碰撞角度成正比。如果只考虑碰撞力的因素，中型货车产生的碰撞力可以涵盖85%的车辆产生的碰撞力。但是如果考虑到人员的因素，就必须保证大型客车的安全，采用达到85%乘员的安全的目的。从对乘员的伤害来讲，由于小轿车速度快、质量轻，在碰撞时产生的冲击加速度最大，所以有必要将小轿车作为一种标准车型。考虑了以上的因素，最终确定的三种实验车型及车重、车速、碰撞角度见表3-9。

表 3-9 实验车型一览表

Table 3-9 Experimental vehicle's style

	车辆类型	车辆质量(t)	碰撞速度(km/h)	碰撞角度(°)
组合一	小轿车	2	100	20
组合二	中货车	10	60	20
组合三	大客车	14	80	20

3.3 实车碰撞实验

3.3.1 碰撞速度与碰撞角度

1. 碰撞速度的确定

碰撞速度是指车辆碰撞护栏时的速度，因此，从理论上讲是一个即时速度。根据高速摄影机纪录的照片所求得的速度实际上是一个平均速度，但是，由于计算这个平均速度的时间段很短，可以认为这个平均速度等于碰撞速度。具体地计算步骤为：

- (1) 假定高速摄像机镜头保持不动，则可认为每张照片均处在同一个坐标

系中。根据车体上的黑白格标定车体上的某一点假定为 A 点。

(2) 找出两张均能看到 A 点的照片。假定这两张照片所处的时刻分别为 T_1 、 T_2 。应保证 T_1 、 T_2 时刻处在碰撞时刻之前。

(3) 在图片中找出 A 点在这两张照片中的坐标，计算 A 点的图上运行距离 L_0 。我们假定车辆在碰撞前没有转动，则可以认为 A 点的运行距离就是车体在这一时间段的运行距离。

(4) 找出地面上的两点，根据地上黑白格确定图上距离与实际距离的比例 K 。

(5) 计算 A 点的实际运行距离 $L=L_0*K$ ，除以相应的时间 $T=T_1-T_2$ ，即得到车辆的碰撞车速。

2. 碰撞角度的确定

碰撞角度就是实验车辆即将碰撞护栏时，车体与护栏的交角。其具体的计算步骤为：

(1) 取车辆即将碰撞护栏的照片一张，取 A、B 两点，使 A、B 的连线平行于车辆的运行方向。取 C、D 两点，使 C、D 的连线平行于护栏。A、B、C、D 点的获取可以由车辆与地面上的黑白格很方便地得到。

(2) 量取 A、B、C、D 四点在图片中的坐标。

(3) 根据 A、B、C、D 的坐标值计算直线 AB 和 CD 的交角。这个交角即为碰撞角。

根据数据分析结果，得到了 7 次碰撞实验的碰撞速度和碰撞角度的数据，见表 3-10。

表 3-10 实验车辆的碰撞速度和碰撞角度一览表

Table 3-10 Collision speed and angle of experimental vehicle

实验编号	实验时间	碰撞车型	碰撞速度 (km/h)	碰撞角度 (°)	碰撞能量 (kJ)
1	2001-3-29	小轿车	96	22.0	99.8
2	2001-3-29	小轿车	98	20.8	93.4
3	2001-3-31	中货车	63	19.3	167.3
4	2001-4-2	中货车	63	21.6	207.5
5	2001-4-4	大客车	80	19.5	385.2
6	2001-4-7	大客车	82	19.9	420.8
7	2001-4-10	大客车	90	19.5	696.4

3.3.2 护栏的横向变位

1. 测点布置与设备的安装

测点布置见图 3-14。

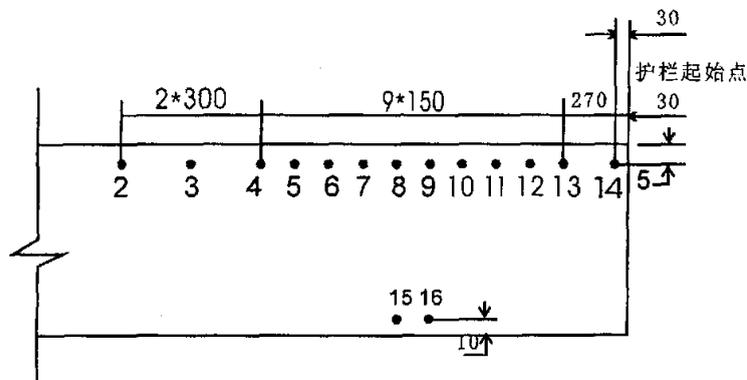


图 3-14 测点布置图

Fig 3-14 Measure point of disposal Fig

安装就位后的变位测量系统见图 3-15、图 3-16。



图 3-15 变位测量数据处理系统

Fig 3-15 shifts and measures

the data handling system

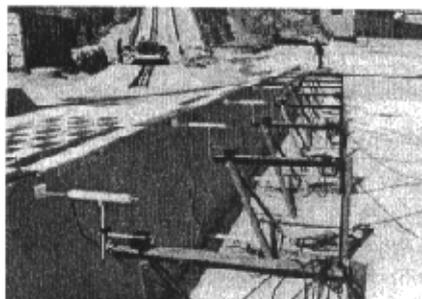


图 3-16 变位测量传感器布设情况

Fig 3-16 shifts and measures the

sensor to lay the situation

2. 横向变位曲线

第 1, 2, 3, 4 次实验中护栏横向变位曲线见图 3-17~图 3-20。第 5, 6 次实验中大量数据超过仪器量程, 结果不可靠, 不予采用。第 7 次实验目的为破坏护栏, 故没有测量。横向变位曲线为车辆碰撞护栏的瞬间护栏达到最大变位的测点所对应的时刻的挠曲线, 时间 t 的起始时刻为测试仪器开始工作的时刻。

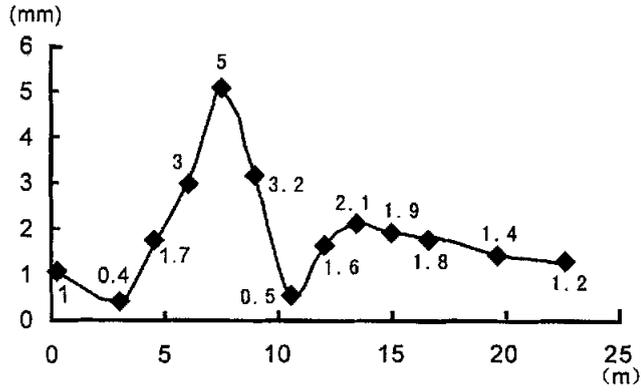


图 3-17 第 1 次实验横向变位曲线

Fig 3-17 The 1st experiment horizontal to shift curve

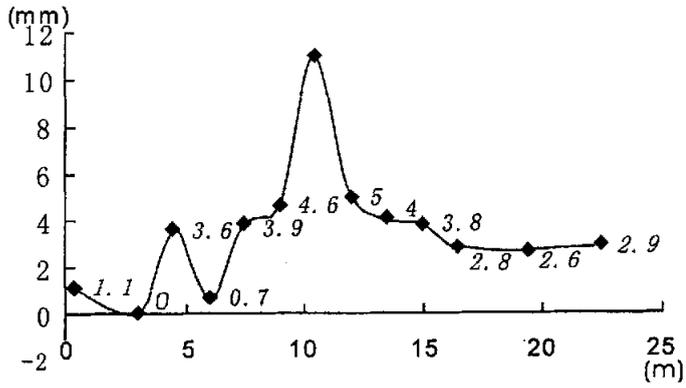


图 3-18 第 2 次实验横向变位曲线

Fig 3-18 The 2nd experiment horizontal to shift curve graph

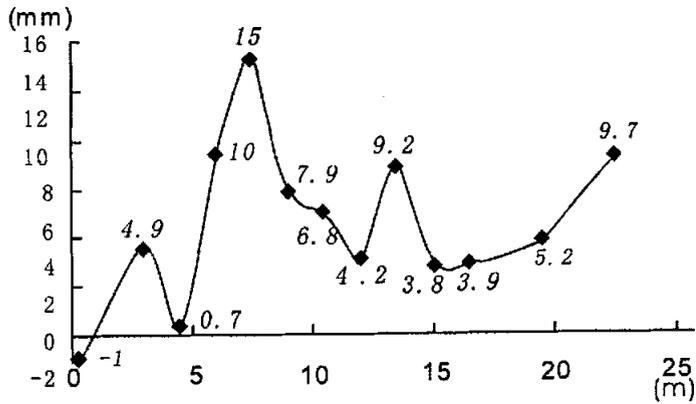


图 3-19 第 3 次实验横向变位曲线

Fig 3-19 The 3rd horizontal to shift curve experiment

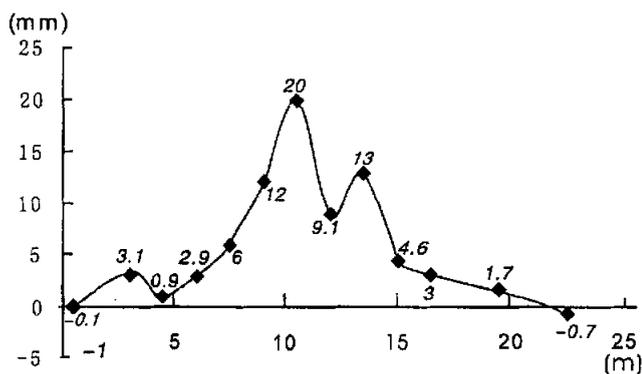


图 3-20 第 4 次实验横向变位曲线

Fig 3-20 The 4th experiment horizontal to shift curve

由以上各图可以看出:刚性护栏在水平方向仍有一定的挠曲变形;碰撞力的影响宽度可达 15 米以上;中型货车引起的护栏最大变位大于小客车引起的护栏最大变位。

3. 最大变位点位置分析

这里通过对比最大变位点和碰撞点的相应位置来分析最大变位点出现的规律。碰撞点的位置由高速摄影照片得到。对比结果列于表 3-11。表中最大变位点和碰撞点的位置指该点到护栏起始点的距离。

表 3-11 最大变位点位置相关数据表

Table 3-11 Data related to the biggest distortion point

实验序号	车型	最大变位点位置 (cm)	碰撞点位置 (cm)	最大变位值 (mm)
1	小轿车	1350	958	5
2	小轿车	1050	1026	11
3	中货车	1350	1070	15
4	中货车	1050	955	20

由上表可以看出:最大变位点均发生在碰撞点之后;碰撞点与最大变位点的距离大约在 1~3 米范围内;中型货车引起的护栏最大变位大于小客车引起的的护栏最大变位。

3.3.3 乘员加速度数据的采集与分析

1. 加速度测试系统的安装

模拟人安装在驾驶员的位置,系三点式安全带。测试系统的安装见图 3-21、图 3-22。



图 3-21 模拟人安装情况

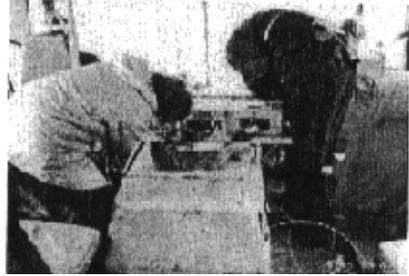


图 3-22 测试系统的安装情况

Fig3-21 Install of the pretend simulation people Fig 3-22 Tests the systematic install state

2. 测量结果

第 4 次实验数据没有采集, 第 6 次实验数据有异常, 不予采用。其余 5 次实验测试结果见表 3-12。表中的最大值是 10 毫秒平均的最大值。

表 3-12 加速度测试结果

Table 3-12 Experimental results of acceleration

实验序号	人体位置	传感器方向					
		X(胸)	Y(胸)	Z(胸)	X(头)	Y(头)	Z(头)
		最大幅值(g)					
1 (小轿车)	驾驶员	10.7	14.4	9.6	10.8	8.4	8.7
2 (小轿车)	驾驶员	8.9	14.5	8.9	14.4	15.2	15.4
3 (中货车)	驾驶员	5.8	7.6	4.8	10.8	8.2	7.4
5 (大客车)	驾驶员	4.9	9.2	4.7	6.8	7.5	7.6
7 (大货车)	驾驶员	3.6	12.7	5.9	5.9	11.7	11.6

3. 结果分析

由以上测试结果可以看出, 大客车和中型货车碰撞护栏时, 乘员所受的冲击度满足评价标准的要求; 小客车有两个数据略超过评价标准的要求。

3.3.4 碰撞车辆的运行形态

车辆的运行形态通过高速摄影机, 普通摄像机的录像资料, 以及车辆的轮胎痕迹来分析研究。

1. 车体在碰撞瞬间的运行与变形情况

以下以第一、三、六次实验的高速摄像情况来说明车辆在碰撞瞬间的运行与变形情况 (见图 3-23~图 3-31)。以车体接触护栏的时刻为 0 时刻。

第一次实验:

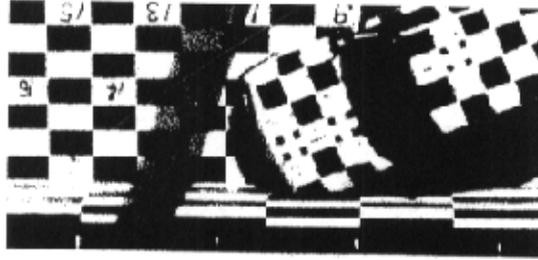


图 3-23 ($t=0s$, $F=697KN$)

Fig3-23 ($t=0s$, $F=697KN$)

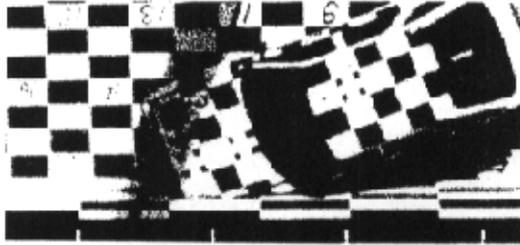


图 3-24 ($t=0.04s$, $F=717KN$)

Fig3-24 ($t=0.04s$, $F=717KN$)

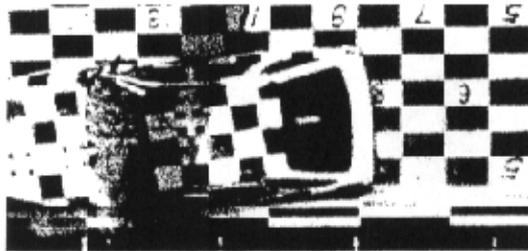


图 3-25 ($t=0.12s$, $F=757KN$)

Fig3-25 ($t=0.12s$, $F=757KN$)

第三次实验:

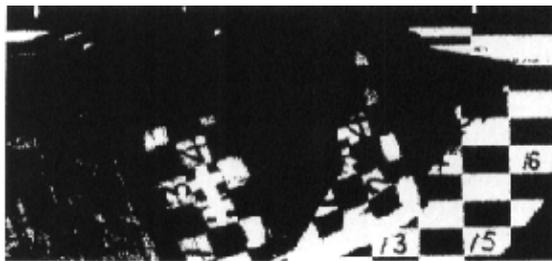


图 3-26 ($t=0s$, $F=761KN$)

Fig3-26 ($t=0s$, $F=761KN$)

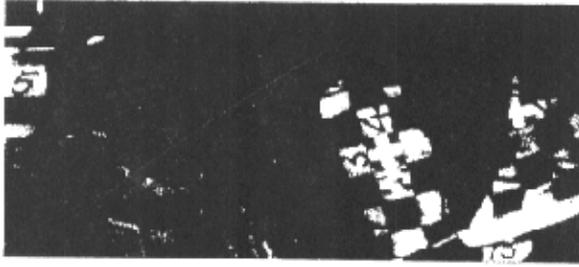


图 3-27 ($t=0.10s$, $F=811KN$)

Fig3-27 ($t=0.10s$, $F=811KN$)

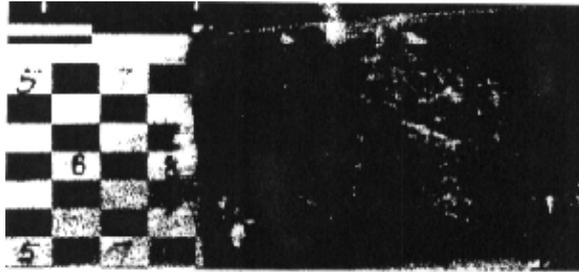


图 3-28 ($t=0.28s$, $F=901KN$)

Fig3-28 ($t=0.28s$, $F=901KN$)

第六次实验:

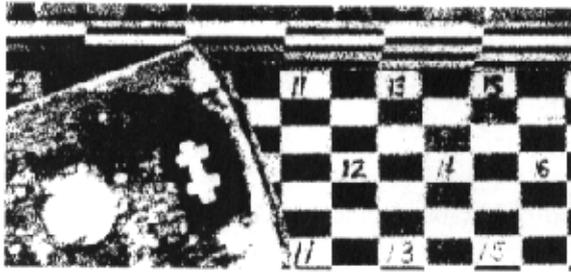


图 3-29 ($t=0s$, $F=571KN$)

Fig3-29 ($t=0s$, $F=571KN$)

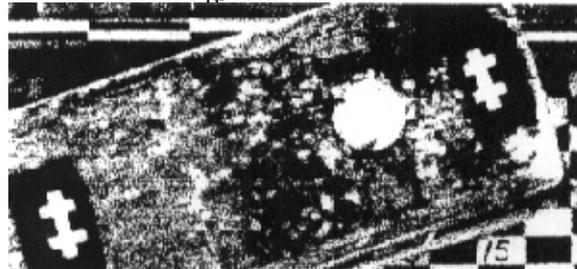
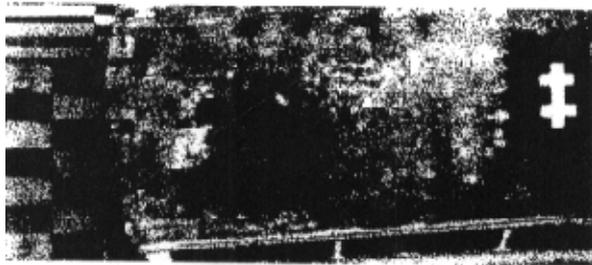


图 3-30 ($t=0.12s$, $F=631KN$)

Fig3-30 ($t=0.12s$, $F=631KN$)

图 3-31 ($t=0.34s$, $F=741kN$)Fig3-31 ($t=0.34s$, $F=741kN$)

由以上的照片可以看出,车辆在接触护栏后,首先是车体的左前部开始变形,而车辆的运行方向基本保持不变。这一阶段称为变形阶段,这一阶段发生时间的长短随着车辆速度的不同而不同,速度快则时长短,速度慢则时长长。如上所示,对于小型车变形阶段的时长约为 40ms;对于大型车,变形阶段的时长约为 100ms。之后,由于受到车辆对护栏碰撞力的反作用力的影响,车体开始以重心所在的竖向轴为中心转动,至车体与护栏基本平行,该阶段称为转向阶段。转向阶段也与车速有关,对于小型车转向阶段时长约为 80ms;对于大型车,转向阶段的时长约为 200ms。车辆碰撞护栏的第三阶段即为驶离阶段,其表现为车辆以一定的驶出角离开护栏。转向阶段结束之时,车辆有一定的转动速度,这是车辆能够驶离护栏的主要原因。车辆驶离护栏的角度与护栏内侧的断面形式相关,好的断面形式能够给予车辆以导向作用,使车辆尽可能的沿着护栏行驶,不驶入或少驶入相邻车道,减少二次事故发生的隐患。但是车辆驶离的轨迹同时也受到其它一些因素的影响,如车体的长度,碰撞速度,碰撞角度,车辆的轮压状况,是否有爆胎,车辆的装载情况,路面状况,道路横坡等等。因此,必须从统计学角度来分析车辆碰撞护栏后的驶离状态。第三阶段时车辆已经驶出高速摄像机的拍摄区域,因此在下文中另做讨论。

2. 车辆的爬高

车辆在碰撞护栏后均有一定程度的爬高,但是爬高的幅度有限。一定程度的爬高有助于碰撞能量的消减,但过量的爬高往往会导致车辆的内侧翻。实验护栏的断面行驶保证了车辆的爬高幅度在一定的范围之内,既消减了部分碰撞能量,又有效控制了内侧翻。除最后一次实验中由于车辆采用了大大超过设计条件的碰撞等级(破坏性实验)而导致的车辆损坏和翻车外,其余 6 次实验中均没有出现翻车。见图 3-32~图 3-34。车辆的爬高和下文将要介绍的侧倾均属于上文所述

的转向阶段。



图 3-32 小客车爬高形态



图 3-33 中货车爬高形态

Fig3-32 The limousine climbed the high form Fig 3-33 Freight climbed the tall form



图 3-34 大客车爬高形态

Fig 3-34 The bus climbed the high form

3. 大型车的侧倾

中型货车和大客车在碰撞护栏后均发生一定程度的侧倾。侧倾并没有导致车辆翻越护栏。

车辆的侧倾见图 3-35、图 3-36。



图 3-35 中货车侧倾形态



图 3-36 大客车侧倾形态

Fig 3-35 The freight inclines form

Fig3-36 The bus inclines form

4. 车辆的驶出的轨迹

除第7次实验外,其余6次实验中有2次实验的车辆驶离本车道。第1、5、6次实验中车辆驶离护栏后又转向护栏,有二次碰撞的趋势,但由于实验护栏的长度的限制,车辆冲到了车行道前方空地上。第3次实验车辆左前轮爆胎,实验车辆沿护栏滑行约20米后靠在护栏上。第4次实验中车辆驶离本车道与车辆的配载有很大关系。但总的来说,实验护栏的内侧坡面形式具有良好的导向能力。图3-37为实验时车辆的运行轨迹,图3-38为实验中车辆的停靠状态。



图 3-37 实验时车辆运行轨迹



图 3-38 实验车辆停靠状态

Fig3-37 Experiment vehicle running orbits Fig 3-38 Experiment vehicle stop at state

3.3.5 护栏的损坏情况

1. 总体情况

从7次实验的情况来看,实验护栏的损坏情况不是十分严重,没有出现护栏被撞倒,车辆跨越护栏的情况。小型车辆对实验护栏的损伤仅仅是擦痕,实验护栏的防撞能力基本上没有受到影响;大型车辆有造成实验护栏裂缝、企口破坏的情况,但并没有彻底撞坏实验护栏,使实验护栏的防撞能力完全丧失。

2. 破坏形态

实验护栏的破坏形态主要有三种,分别叙述如下:

(1) 实验护栏表面擦痕或破损

所有车辆在碰撞实验护栏后均留下擦痕,不同能量等级的碰撞对实验护栏表面造成的擦痕的严重程度不同。对于小型车来说,实验护栏上的擦痕很浅;对于大型车来说,实验护栏上的擦痕较深,造成实验护栏表面的局部破损,有些刮槽的深度可达3厘米。实验护栏表面的擦痕或局部破损对护栏的防撞能力来说基本

上不受影响。见图 3-39、图 3-40。

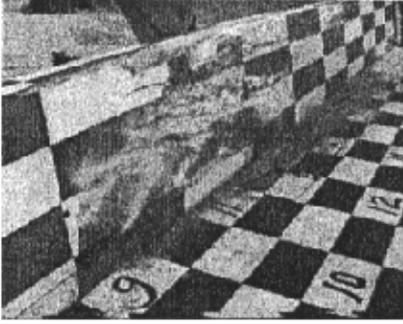


图 3-39 实验护栏表面擦痕情况

Fig3-39 Experiment guardrail surface rub
mark situation



图 3-40 实验护栏表面刮槽情况

Fig 3-40 Experiment guardrail surface
shaves the situation of the trough

(2) 企口破坏

由于实验护栏采用分段预制的方法施工,因此加强护栏预制段之间的连接强度,使尽可能多的护栏段共同参与受力,对于增强护栏的防撞能力很有好处。施工中对前三段预制件采用钢板连接,从实验的结果来看连接强度可靠。其余各段之间采用企口连接,在受到大车碰撞时,碰撞点 20 米范围内的企口均受到不同程度的破坏。企口破坏的一般形式为阳口被撞掉,或阴口承力的一侧被撞坏,企口破坏形态见图 3-41。

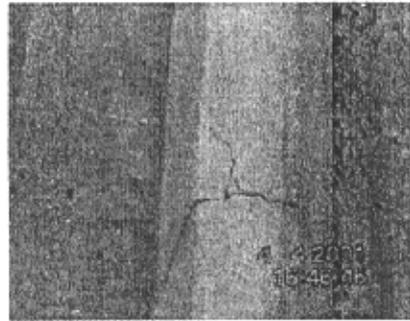
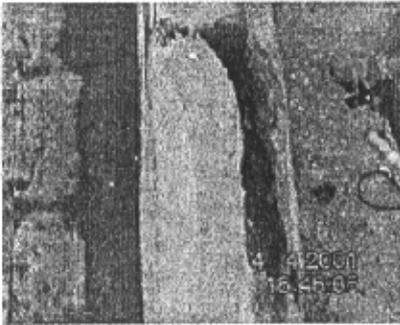


图 3-41 企口破坏形态

Fig 3-41 Tongue-and-groove destroys the form

由实验情况可知,若预制护栏段通过企口连接,必须加强企口部分的强度,避免由于企口的破坏,造成护栏整体防撞能力的降低。钢板连接的形式虽然强度可靠,但工艺复杂,造价较高。

(3) 护栏墙体断裂

护栏破坏的最严重形式为护栏墙体断裂。在 7 次碰撞实验中,有 2 次护栏被

撞断的情况，这两次均为大客车碰撞造成。第5次实验中，裂缝宽度正面小于1mm，背面1~2mm；第6次实验中，裂缝宽度正面为3~5mm，背面为0.2~2mm，断裂后的护栏仍基本保持原来的护栏外形，由于路面对护栏嵌固作用继续存在，断裂后的护栏两侧咬合很好，所以仍具备一定的防撞能力，破坏形态见图3-42。

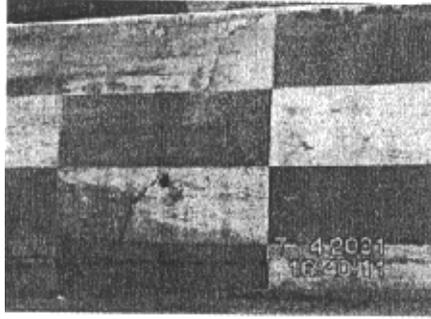


图 3-42 护栏破坏形态

Fig 3-42 The form of the guardrail destroys

3.3.6 碰撞车辆的损坏情况

1. 总体损坏情况

实验车辆损坏最严重的部分为车体最先接触护栏的部分，也即车体的左前部，见图3-43~图3-45。



图 3-43 小客车总体损坏情况

Fig 3-43 Overall damage situation of car



图 3-44 中型货车总体损坏情况

Fig 3-44 Overall damage situation of medium-sized truck



图 3-45 大客车总体损坏情况

Fig 3-45 Overall damage situation of the bus

2. 局部损坏情况

一般来说车辆前保险杠、前轴破坏严重。见图 3-46~图 3-48。



图 3-46 小客车局部损坏情况

Fig 3-46 Some damage situation of car



图 3-47 中货车局部损坏情况

Fig 3-47 Freight train some damage situation

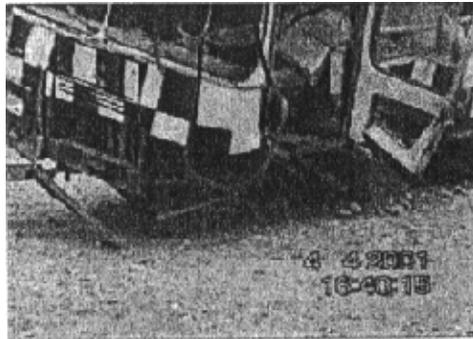


图 3-48 大客车局部损坏情况

Fig 3-48 Part damage situation of the bus

有的实验车辆在碰撞后轮毂变形或爆胎，见图 3-49。



图 3-49 车辆轮毂变形或爆胎情况

Fig 3-49 The vehicle hub is out of shape or tyre burst situation

最后一次实验为破坏性实验，由于采用了较大的碰撞等级，同时由于车辆超载比较严重，原载重 5 吨，配载至 20 吨。车辆碰撞速度为 90km/h，撞击护栏后车箱与车体分离，车辆损坏严重，见图 3-50。



图 3-50 破坏性实验车辆损坏情况

Fig 3-50 Destructive experiment vehicle damage situation

3.4 混凝土护栏整体性能评价

1. 混凝土护栏的结构强度

从 7 次实验的情况来看，实验护栏的结构强度能够满足要求，能够防止车辆撞断护栏侵入对向车道，同时，也能够防止大型车辆翻越护栏，影响对向车道的正常交通。但是护栏的强度储备仍然较大，一方面增加了护栏的工程量，另一方面又导致护栏的刚性过大，引起车辆的损坏较为严重。采用预制安装的形式施工，若预制段间靠企口连接，则企口部分强度不足，应该加强。路面中的 10 厘米高的嵌固部分，足以保证护栏的横向稳定性。

2. 混凝土护栏的导向能力

混凝土护栏具有较好的导向能力,能够较好地防止车辆在碰撞护栏后驶入相邻车道,造成二次事故的隐患。

3. 对乘员的损伤

对于车速较低的大型车辆,乘员所受的冲击加速度均在要求值以内;对于车速较高的小型车辆,乘员所受的冲击加速度略微高于限制值。但仍在可以接受的范围之内。因此,可以说实验护栏满足乘员的安全要求。

4. 对车辆的损伤

由于混凝土护栏的刚性较大,碰撞后车辆的损伤一般较大,大多车辆的左前部车体严重变形,车辆轮胎和前轴均受到较大程度的损坏。

第4章 混凝土护栏在桂柳高速公路的应用

4.1 桂柳高速公路概况

桂柳高速公路是广西第一条高速公路,它北起桂林市郊僚田村与桂林两江国际机场道路相接,南至柳州市东郊静兰大桥,途经鹿寨、永福县城及临桂县境,全长138公里,于1997年5月1日建成通车。它北连桂林至全州一级汽车专用公路通向湖南衡阳,南接已经建成通车的柳州至南宁、南宁至北海、防城港的高速公路以及柳州至宜州高速公路,是通往沿海港口及大西南的重要通道。

桂柳高速公路是当时广西公路建设史上投资最多、标准最高、工程最艰巨、技术难度最大的工程。设计行车速度100公里(山岭区80公里),路基宽度24.5米(山岭区21.5米),双向四车道,水泥混凝土路面,全立交、全封闭,控制出入口。

桂柳高速公路穿越桂北山区,地形复杂,横穿架桥山区和越秦岭山脉,横跨六处河流。共征用土地25393亩,路基土石方工程量达2560万立方米,平均每公里土石方为18.5万立方米,山岭区平均每公里土石方量达28万立方米,40米以上的挖方边坡有43处,最高为118米,20米以上的填方路堤有21处,最高填方为48米。防护排水工程量为98万立方米,最高挡土墙高达30米。小桥20座596米,中桥15座783米,大桥12座2622米,隧道2处4洞共1956米,互通式立交7座。水泥混凝土路面240万平方米。

桂柳高速公路中央分隔带为混凝土护栏,路侧为钢护栏,用植物刺篱和刺铁丝网进行隔离,配套设有反光标志、标线、道钉及轮廓标等交通安全设施。

4.2 中央分隔带混凝土护栏在桂柳高速公路的应用

4.2.1 桂柳高速公路中央分隔带混凝土护栏的设计与开发

桂柳高速公路穿越桂北山区,其中有30多公里的路段是处于重丘山岭地区,

路基宽度只有 21.5 米，中央分隔带仅有 1.5 米宽，加之，中央分隔带下基层没有预留地下排水系统，布设波形梁钢护栏后，还须将中央分隔带部分用水泥混凝土封层，为此，广西桂柳高速公路工程建设总指挥部与有关单位合作设计与开发了单坡面中央分隔带混凝土护栏，在桂柳高速公路上试用。设计方案通过了交通部组织的专家组的评审。设计方案是在做了大量的调查研究工作，在参考美国混凝土护栏实验研究以及多年使用经验总结的基础上，结合桂柳高速公路的实际情况提出的。这种单坡面中央分隔带混凝土护栏结构设计，依据充分、资料详实、理论及设计正确，护栏的截面形式简捷，即节省材料，便于施工，又有利于防止碰撞车辆的倾覆，更有效地保护了乘员的安全。护栏高度设计合理，既满足了小型车的要求，又考虑到大型车的需要。

1. 桂柳高速公路主要技术指标

(1) 公路等级

柳州至黄冕段 (k145+634~k209+640) :重丘区高速公路

黄冕至永福段 (k209+640~k244+300) :山岭区高速公路

永福至桂林段 (K244+300~K286+760) :平原微丘区高速公路

(2) 设计车速:

柳州至黄冕段 (k145+634~k209+640) :100km/h

黄冕至永福段 (k209+640~k244+300) :80km/h

永福至桂林段 (K244+300~K286+760) :100km/h

(3) 路基宽度

柳州至黄冕段 (k145+634~k209+640) :24.5m

黄冕至永福段 (k209+640~k244+300) :21.5m

永福至桂林段 (K244+300~K286+760) :24.5m

(4) 平曲线最小半径: 255m

(5) 最大纵坡: 4.5%

(6) 中央分隔带宽度

柳州至黄冕段 (k145+634~k209+640) :2.0m

黄冕至永福段 (k209+640~k244+300) :1.5m

永福至桂林段 (K244+300~K286+760) :2.0m

(7) 中央分隔带自混凝土路面一下设有上宽 60cm, 下宽 40cm, 高 97cm

的通讯管道沟槽。

2. 设计方案

在一般路段中央分隔带混凝土护栏采用标准型。标准型混凝土护栏，采用两种设计方案：

(1) 预制施工方案：每段护栏长度 4.98m，纵向企口联接，中央挖槽，以减少工程量，护栏底对称地设两个托槽，用钢丝绳捆绑式吊装施工。

(2) 现场浇筑施工方案：设计断面与预制方案相同，但每隔 5m 设计一缩缝，隔 30m 设计一道 2cm 宽胀缝，并设传力杆，缝内塞沥青木条或其它防水材料。

在与中央分隔带通讯管道人孔、手孔、以及原有桥梁分离式混凝土护栏、上跨线桥墩相衔接时采用特殊的过渡设计，共分九种过渡类型：

①混凝土护栏过渡 I 型：适用于混凝土护栏跨越人孔；

②混凝土护栏过渡 II 型：适用于混凝土护栏跨越手孔；

③混凝土护栏过渡 III 型：适用于标准型混凝土护栏同原有桥梁分离式混凝土护栏的过渡；

④混凝土护栏过渡 IV 型：适用于高速公路下穿时，对中央分隔带内直径为 ϕ 1100 (1000) mm 单柱式桥墩的防护的过渡衔接；

⑤混凝土护栏过渡 V 型：适用于高速公路下穿时，对中央分隔带内直径为 ϕ 1100 (1000) mm，净距为 3.0 米双柱式桥墩的防护的过渡衔接；

⑥混凝土护栏过渡 VII 型：适用于对中央分隔带内直径为 ϕ 1100 (1000) mm，净距为 3.6 米双柱式桥墩的防护的过渡衔接；

⑦混凝土护栏过渡 VIII 型：适用于对中央分隔带内直径为 ϕ 1100 (1000) mm，净距为 4.7 米双柱式桥墩的防护的过渡衔接；

⑧混凝土护栏过渡 IX 型：适用于对中央分隔带内纵向长度为 4800mm，净距为 3.6 米双实体墩的防护的过渡衔接；

⑨混凝土护栏过渡 X 型：适用于对中央分隔带内纵向长度为 3000mm，净距为 3.6 米双实体墩的防护的过渡衔接；

以上九种过渡类型中，除过渡 I 型和过渡 II 型为预制外，其余均现浇施工。

中央分隔带混凝土护栏每两公里左右设一处开口，开口长度为 30m，开口段采用活动护栏。

3. 施工技术要求

(1) 材料要求

①混凝土护栏采用的水泥、砂石等材料,应符合现行的交通行业标准《公路桥涵施工技术规范》(JTJ041-89)的规定。

②混凝土护栏用钢筋不得有裂缝、断伤、刻痕等缺陷,钢筋需经调直、除锈、去油污处理。钢筋的设计强度等应符合《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ023-85)的有关规定。

(2) 混凝土护栏施工

桂柳高速公路中央分隔带混凝土护栏采用两种施工方案:

第一施工方案为预制施工工艺,即混凝土护栏标准段及跨越通讯管道人孔、手孔的护栏及枕块事先预制,然后拼装施工,而其余七种过渡形式采用现场浇筑施工工艺。

第二施工方案为现场浇筑施工工艺,即除两种过渡(跨越通讯管道人孔、手孔的护栏及枕块)采用预制施工工艺外,其余七种过渡段及标准混凝土护栏采用现场浇筑施工工艺。

混凝土护栏施工要求如下:

1. 预制混凝土护栏

(1) 预制

①预制场地应平整、坚实、并应采取必要的排水措施,防止场地沉陷。

②预制混凝土护栏块使用的模板,应采用钢模板。钢模板应采用强度高的钢材,其厚度不应小于 4mm,钢模侧面要刨光,拼接应紧密牢固,不得出现漏浆现象,内侧尺寸应符合设计要求。

③混凝土拌合物应采用机械搅拌。每块预制件的混凝土必须一次浇筑完成,不得间断,混凝土应采用机械振捣,一般可用附着在侧模的振捣器,辅以插入式振捣器来振捣密实,并且应以拌合物停止下沉,不再冒气泡并泛出水泥砂浆为准,不宜过振。

④混凝土护栏、枕块浇筑完毕后,按养护要求加以养护。

⑤拆除模板时间应根据气温和混凝土强度情况而定,拆模时混凝土强度不应低于设计强度的 70%,并且不得损坏混凝土护栏的边角。

⑥混凝土护栏块、枕块在脱底模、移动、堆放、吊装时,混凝土强度不应低

于设计强度的 70%。

(2) 安装

①混凝土护栏块、枕块在安装前,应先精确放样定位,在基层夯实,平整,压实度达到设计要求,并复核标高和平面位置无错后,方可开始安装。

②混凝土护栏的安装应从一端逐步向前推进。在安装过程中应使每块护栏构件的中线与公路中心相一致。在曲线路段,应使护栏布设圆滑;在竖曲线路段,应使护栏与公路线形协调。

③安装程序按先放置枕块,后吊装护栏,再浇筑混凝土封层的顺序进行。安装枕块时应保证基层已达设计压实度并且标高正确。

④混凝土护栏块安装就位后,如有小的损伤,应采用高于构件强度的拌合物及时修补,并用 7.5 号砂浆勾抹企口接缝。

2. 现浇混凝土护栏

(1) 浇筑混凝土护栏前应先根据设计图定位、放样,并做好基层的平整工作及枕块的设置。

(2) 浇筑混凝土护栏的模板,应具有足够的强度、刚度和稳定性,能可靠地承受施工过程中可能产生的各项荷载,保证构件的形状不变形,尺寸准确。模板板面平整,接缝严密,拆装容易,施工操作方便、安全。

(3) 钢筋混凝土护栏在浇筑混凝土前,应按设计图纸安装好钢筋,在检查合格后,方可浇筑混凝土。

(4) 混凝土的拌合及振捣同预制施工,每节护栏的混凝土必须一次浇筑完成,不得间断。

(5) 现浇的混凝土护栏,可采用湿式养护或塑料薄膜养护。采用湿式养护时,应符合下列规定:

①采用草袋、草帘等,在混凝土初凝后覆盖其表面,并应均匀洒水,经常保持潮湿状态。

②养护时间应根据强度增长情况而定,一般宜为 14—21 天,养护期满后,方可将覆盖物清除,外表面不得留有明显的痕迹。

采用塑料薄膜养护时应符合下列规定:

i. 塑料薄膜溶液的配比应由试验确定,薄膜溶剂一般具有易燃或有毒等特性,应做好贮运和安全生产工作。

ii.塑料薄膜养护,宜采用喷洒法。当混凝土表面不见浮水和用手指压无痕迹时应进行喷洒,喷洒厚度以能形成薄膜为度。

iii.在高温,干燥、刮风时,在喷膜前后,应用遮荫棚加以遮盖。

iv.养护期间应保护塑料薄膜完整,若有破裂应立即修补。

(6)在夏季,当混凝土拌合物温度 $30^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ 时,混凝土护栏施工应符合下列规定:

①施工中应尽量缩短运输、浇筑、振捣的工序时间,浇筑完毕应及时覆盖,洒水养护。

②搅拌站应有遮荫棚,基层表面,在浇筑混凝土前应洒水润湿。

③注意天气变化,如有降雨,应暂停施工。

④气温高时,宜避开中午施工,可在夜间进行。

(7)在冬季,根据多年气温资料,当室外平均气温连续5天低于 5°C 时,混凝土护栏施工,应符合《高速公路交通安全设施设计及施工技术规范》的有关要求。

3. 施工质量要求与验收

(1)混凝土护栏用材料的质量,因按《公路工程水泥混凝土试验规程》(JTJ053—94)的规定进行检验。

(2)混凝土拌制和浇筑质量,应满足《公路桥涵施工技术规范》(JTJ041—89),强度应满足《公路工程质量检验评定标准》(JTJ071—94)的要求。

(3)浇筑混凝土护栏钢模板的各部尺寸应符合表4-1的规定:

表4-1 钢模板内侧尺寸允许误差

Table 4-1 Allowable error of steel template's inboard size

项 目	允许误差	检查点数	检查方法
长 度	$\pm 10\text{mm}$	2	钢直尺量
上部宽度	$\pm 2\text{mm}$	3	钢直尺量
中部宽度	$\pm 2\text{mm}$	3	钢直尺量
下部宽度	$\pm 2\text{mm}$	3	钢直尺量
高 度	$\pm 2\text{mm}$	2	钢直尺量

(4) 混凝土护栏的基层质量应符合表 4-2 规定:

表 4-2 混凝土护栏的基层质量要求

Table 4-2 The quality requirements of concrete guardrails at the basic level

项 目	允许误差	检查要求		检 验 方 法
		范 围	点 数	
当量回弹模量	不小于设计要求	50m	2	现场实测
压实度	不小于设计要求	50m ²	1	无骨料: 用环刀法测定 无骨料: 用灌砂法测定
厚 度	±10%	50m	1	用 尺 量
平整度	10mm	50m	1	用3m直尺

(5) 混凝土护栏实测项目应符合表 4-3 规定:

表 4-3 混凝土护栏实测项目表

Table 4-3 Concrete guardrail survey item

项 次	检 查 项 目	规定值或允许偏差	检查方法和频率	规定分
1	地基压实度 (%)	符合设计要求	检查施工纪录	10
2	地基厚度 (mm)	±10%H	检查施工纪录	10
3	地基平整度 (mm)	10	检查施工纪录	15
4	地面以上护栏中心高度 (mm)	±2	随机: 抽检10%	15
5	护栏混凝土强度 (MP ₂)	在合格标准里	按有关标准执行※	25
6	轴线横向偏差 (mm)	±25	随机: 抽检10%	25

※《公路工程质量检验评定标准》(JTJ071—94)

(6) 混凝土护栏预制块不得有断裂现象, 且各混凝土块件之间, 混凝土与基础的连接方式应严格按设计要求施工, 各种预制块几何尺寸应满足设计要求。

(7) 混凝土护栏的外观鉴定应符合以下要求:

- ①混凝土块件之间的错位不大于 2mm。
- ②混凝土表面的蜂窝麻面面积不超过该面面积的 0.5%, 深度不超过 5mm。
- ③混凝土块件的损边, 掉角处不得超过 2cm, 否则应予修补。
- ④混凝土护栏线形顺适。

4.2.2 桂柳高速公路中央分隔带混凝土护栏的应用

桂柳高速公路使用的这种单坡混凝土护栏,是根据美国近几年的研究成果,结合桂柳高速公路的具体情况,且经过实车碰撞试验,将原截面多坡形式设计成现在使用的这种单坡结构形式。这种结构形式简捷,既节省材料、便于施工,又有利于防止碰撞车辆倾覆,更有效地保护了乘客的安全。当发生碰撞时,车辆首先沿着单坡斜面较平稳地爬高,然后改变方向,沿着护栏滑移,经过一段距离的滑移后,车辆停下来,大多数车辆损坏较小。例如,2001年1月17日上午11时,一辆满载的东风货车(总重超过10吨),当行驶到K479+150米(下行线)时,由于车速过快,操纵不当,车辆发生追尾,制动失灵,从行车道,撞向中央分隔带混凝土护栏,碰撞速度约为60公里,碰撞角度约为 20° ,碰撞后,汽车沿护栏滑动了约300米后停下来,护栏表面擦伤,车辆受到一定的损伤,但人员无损伤,碰撞效果较理想。现场情况见图4-1~图4-3。



图 4-1 碰撞现场正面情况

Fig4-1 On-the-spot front situation that collide



图 4-2 碰撞现场背面情况

Fig4-2 On-the-spot the back situation that collide

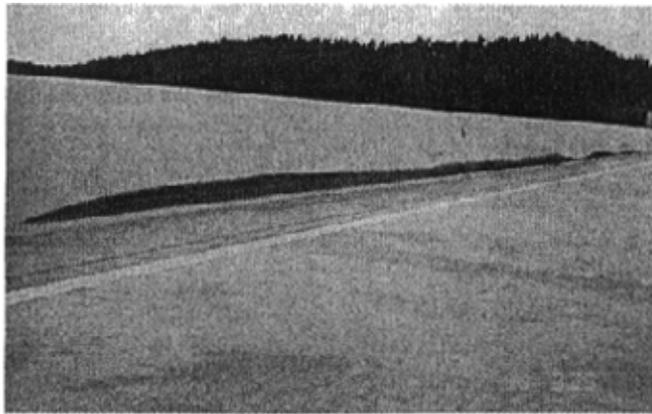


图 4-3 护栏表面擦痕情况

Fig4-3 Surface rub mark situation of the guardrail

桂柳高速公路使用的这种新型中央分隔带混凝土护栏,由于这种单坡护栏的重心比原新泽西式护栏的重心提高了近 18cm,更接近车辆的碰撞点,这样有效地保证了车辆碰撞时能处于安全状态。从桂柳高速公路通车后发生的碰撞中央分隔带混凝土护栏的事故来看,这种新型的单坡护栏,能有效地防止车辆越过中央护栏,造成二次事故。从实际使用的情况来看,这种新型单坡护栏,高度设计合理,既满足了小车的要求,又考虑到大型载重汽车安全的需要,使用效果很好。桂柳高速公路通车至今还未发生一起这类事故。

对于碰撞车辆来说,损坏的程度,除了与碰撞速度、质量、角度以及护栏的形式有关,还与碰撞时车辆沿护栏滑动的长度有关,即与护栏的表面摩擦系数有关。碰撞时,为了减小车辆的损伤,就要适当保证车辆的滑动距离,这就要使护

栏表面具有一定的光滑程度,为此,对桂柳高速公路全线的中央分隔带护栏的表面进行了必要的处理,在刮底的基础上,涂刷了一层淡绿色的外墙涂料,这样,一方面降低了表面的摩擦系数,另一方面又弥补了混凝土护栏表面观感不尽如人意的缺陷,取得了良好的效果。

一般情况下,波形梁钢护栏,被认为是一种比较理想的防撞护栏,在国内外都得到了广泛地使用。它是一种半刚性护栏,它是利用地基立柱、横梁(含防阻块)的变形来吸收碰撞能量,并迫使失控车辆改变方向,回复到正常的行驶方向,防止车辆冲出路外,以保护车辆和乘客的安全,减少事故造成的损失。但由于这种形式的护栏往往受结构的限制及对路基压实度的要求,在实际使用中,有时使用效果不是很理想。在车辆发生碰撞时,如果立柱的侧压力达不到要求,护栏的变形量过大,加之护栏高度偏低,车辆很容易突破护栏冲出路面,造成翻车事故。桂柳高速公路和柳王高速公路自开通以来,已发生多起此类事故,造成车毁人亡。

4.2.3 中央分隔带混凝土护栏与波型梁钢护栏的比较。

1. 工程造价低,节约建设资金。

这种新型的单坡面混凝土护栏与波形梁钢护栏相比,工程造价低。1998年12月8日建成通车的柳(州)至王(灵)高速公路(简称柳王高速公路,下同)中央分隔带护栏采用的是波形梁钢护栏,每公里造价为26.8万元,考虑到与其配套的中央分隔带地下排水工程以及绿化工程的费用,则每公里的造价就高达35.6万元。而中央分隔带若采用混凝土护栏,就无需考虑地下排水系统,这样,即使考虑到封水层及防眩的费用,每公里的造价为32.2万元。相比之下,混凝土护栏比钢护栏每公里节约资金3.4万元。若在广西已建成通车1000公里高速公路上应用,可节约资金3400万元,经济效益相当显著。而且,混凝土护栏占有路面面积少,按可减少50厘米宽度计算,每百公里可节省用地75亩,这对于广西这样一个地少人多的地区来说,它的经济效益和社会效益就显的尤为突出。而且符合我们国家保护耕地的基本国策。另外,这种新型单坡面混凝土护栏,截面形状简捷,节省材料,便于施工,易于推广。

2. 结构设计合理,安全性能好。

这种新型单坡混凝土护栏,与钢护栏相比,结构设计合理,用做中央分隔带

防撞护栏,能有效地防止车辆突破护栏,造成二次事故,使用效果很理想。而且,由于混凝土护栏占用路面面积少,增加了路面的有效宽度,视线更为开阔,更加有利于行车安全。2000~2002年桂柳高速公路和柳王高速公路中央护栏碰撞情况统计数据见表4-4。

表4-4 2000年~2002年桂柳高速公路和柳王高速公路中央护栏碰撞情况统计表

Table 4-4 Guilin—Liuzhou expressway and Liuzhou—Wangling expressway centreguardrail collide the statistical form of the situation 2000 - 2002 year

项目	单位	桂柳高速公路			柳王高速公路		
		混凝土护栏			钢护栏		
年份		2000年	2001年	2002年	2000年	2001年	2002年
总数	次	39	48	32	63	52	68
侧翻	次	3	4	1	10	8	5
突破护栏	次	0	0	0	4	1	3
伤	人	1	2	0	11	24	25
亡	人	0	0	0	0	0	2
路产受损情况:							
500元以下	次	36	44	29	7	9	13
501~1000元	次	2	1	1	2	4	3
1001~5000元	次	1	3	2	26	31	40
5001~10000元	次	0	0	0	15	4	9
10000元以上	次	0	0	0	13	4	3
最高路损赔偿额	元/次	1200	1500	2320	23910	22330	26040
平均路损赔偿额	元/次	262	283	300	5713	3501	3359

从表中的统计数据来看,就桂柳高速公路中央分隔带的混凝土护栏与柳王高速公路的钢护栏而言,混凝土护栏作为中央分隔带防撞护栏,它的安全性要比钢护栏好。另外,在容易塌方的路段,混凝土护栏作为中央分隔带防撞护栏,还具有另外一种功能,这就是,在发生塌方时,混凝土护栏可以起到挡墙的作用,将塌下的土石方拦阻在半幅车道内,可以有效地保障另半幅车道的通畅。这一功效,在1998年雨季桂柳高速公路的塌方中,效果非常显著。

3. 护栏损坏程度小,维护费用低。

由于混凝土护栏本身是刚性的,当汽车与其发生碰撞时,基本不变形,在碰撞过程中的能量主要是依靠汽车与护栏面接触滑移并沿着护栏爬高和转向来吸收。因此,对护栏损伤较小,所以,它的维护费用很低。桂柳高速公路通车6年来,每年用于混凝土护栏的维修费用不超过3万元,而同一时期用于路侧钢护栏

的维修费就达 50 多万元。对于通车 5 年的柳王高速公路静兰至小平阳 109 公里的路段来说, 仅钢护栏的维修费用每年就高达 100 多万元(含路侧)。相比之下, 混凝土护栏的维修费非常低, 经济效益相当显著。钢护栏的维修费用高, 从另外一个侧面来说, 也就是反映了路产损失大, 而这些因为汽车碰撞护栏造成的路产损失, 按规定是需要当事人赔偿的, 这就又给当事人带来了较大的经济负担, 在一定程度上产生了不良的社会影响。据对桂柳高速公路及柳王高速公路行车碰撞护栏造成护栏路产损失的统计, 混凝土护栏的路产损失平均每车次仅为 300 元左右, 而钢护栏的路产损失平均每车次就高达 4000 元左右。柳王高速公路通车 5 年来, 中央分隔带钢护栏一次性路产损失在万元以上的就有 25 起, 其中最高的一次达 26000 元以上。这无形中又给当事人带来了巨大的经济负担。

对于中央分隔带布设波形梁钢护栏而言, 建成后还存在着中央分隔带绿化养护的问题, 为了保证中央分隔带植物的正常生长, 每年还需一笔可观的养护费用。

4. 良好的视线诱导性。

桂柳高速公路中央分隔带混凝土护栏表面配以较为养目的浅绿色的外墙涂料, 使得这种形式的护栏线形的更加醒目, 具有良好的视线诱导性, 而且降低了护栏表面的磨擦系数, 增加了车辆与其碰撞时的滑行距离, 降低了碰撞时车辆的损伤程度并提高了车辆和乘员的安全性。

结论

高速公路中央分隔带单坡面混凝土护栏的开发研究及应用,在国内同行业中属先进水平,其达到的性能指标主要包括:

1. 混凝土护栏能有效的拦阻车辆包括大型客车(总质量 14t、碰撞速度 80km/h,碰撞角度 20°)的倾覆并能较好地防止车辆在突破护栏后侵入对向车道,造成二次事故;

2. 混凝土护栏具有良好的导向能力,能够较好地防止车辆在碰撞护栏后驶入相邻车道,造成二次事故;

3. 对乘员的冲击加速度全部控制在 20g 以内,其中,大多数在 15g 之内。

由于混凝土护栏具有以上优点,在目前我国建设养护资金不足,公路交通事故率居高不下的情况下,具有很好的实用价值,特别是对于山岭重丘区路基宽度较窄,中央分隔带小于 2m 的高速公路,意义非常重大。与钢护栏相比混凝土护栏具有防护能力强、造价及养护费用低,占地面积小等优点,因而能有效的减少投资,减少事故损失,对于我国高速公路事业的发展具有明显的社会效益。

当然,混凝土护栏在实际使用中,也存在它自身所固有的一些缺陷,这主要表现在两个方面:一是由于混凝土护栏是刚性结构几乎不变形,在车辆与护栏的碰撞角度较大时,对车辆及乘员的损伤较大,安全性较差;再一方面,由于混凝土护栏是墙式结构,阻碍了噪音的扩散,车辆行驶噪音反射较大,在某种程度上降低了高速公路的行车舒适性。在实际使用中,应采取相应措施,尽量减少其不利因素,比如合理选择中间带的侧余宽,采用绿化的方式改善景观和降低噪音。因此,如何将混凝土护栏的应用与防眩及降噪结合起来,这将是中央分隔带混凝土护栏以后的一个发展方向。正是基于这种考虑,高速公路管理部门与有关单位合作进行了《中央分隔带混凝土护栏滴灌种植迎春花试验》的科研项目,这一项目研究的目的,就是解决中央分隔带混凝土护栏的防眩及降噪问题,同时,也使混凝土护栏的景观及到了有效地改善。这项科研成果已通过交通部科教司组织的专家鉴定。这一项科研项目已取得了初步的成果,效果令人满意。在夏天的高温季节及秋天的缺水季节,由于应用了先进的远程滴灌系统,使种植的苗木经受了夏季高温和秋季缺水的考验,苗木生长良好。采用滴灌系统种植植物这一方法的

费用，每公里也只有 10 万元左右，而且维护费用很低，与安装防眩板的费用相当。但防眩板是工业产品，而种植植物符合国家的环保政策，更重要的是，它不仅解决了混凝土护栏的防眩问题，而且在一定程度上还具有降噪的效果。这一科研项目的完成，为解决混凝土护栏应用上的防眩与降噪问题提供了有效方法。

参考文献

- 1 任福田, 刘小明, 荣建. 交通工程学. 人民交通出版社. 2003 年
- 2 高速公路丛书编委会. 《高速公路交通工程及沿线设施》. 北京: 人民交通出版社, 1999. 6
- 3 李继业, 《新型混凝土技术与施工工艺》, 北京: 中国建材工业出版社, 2002. 12
- 4 霍明, 《山区高速公路勘察设计指南》, 北京: 人民交通出版社, 2003. 10
- 5 黄志平. 结构力学. 建工出版社. 2001 年
- 6 孟祥波. 土质与土力学. 建工出版社. 2001 年
- 7 徐吉谦. 交通工程总论. 人民交通出版社. 2001 年
- 8 Special Report Transportation Research Board National Research Council Washington D. C1994 Highway Capacity Manual
- 9 Paul H. Wright. Transportation Engineering Planning and Design. John Wiley and Sons
- 10 谢新宇, 《高速公路沿线设施施工》. 北京: 人民交通出版社, 2003. 3
- 11 交通工程手册. 中国公路学会. 人民交通出版社. 2001 年
- 12 任福田. 交通工程心理学. 北京: 北京工业大学出版社. 1993 年
- 13 山区高速公路建设与管理. 云南省公路学会. 人民交通出版社. 2003 年
- 14 任福田, 刘小明. 论道路交通安全. 北京: 北京人民交通出版社. 2001 年
- 15 Mike Slinn. Arnold . Traffic Engineering Design a member of the Hodder Headline Group
- 16 P. K. Mehta . Advancements in Concrete. Technology Concrete International June 1999
- 17 K. W. Barrows. the Visible and Invisible Cracking of Concrete. Monograph of ACI. 1998
- 18 R. Springenschmid. Avoid Ance of Themal Craching in Concrete at Early Ages. 1998
- 19 FHWA. Concrete Pavement Design Manual. 1992
- 20 P. K. Mehta. Darability Critical Issues for the Future Concrete International. July 1997
- 21 公路陡崖峭壁护栏开发研究. 云南玉元公路建设指挥部. 2003 年
- 22 徐霄鹏. 工程力学. 建筑工业出版社. 2001 年
- 23 公路水泥混凝土路面施工技术规范. 人民交通出版社. 2002 年
- 24 徐培华. 公路工程混合材料配合比设计与试验技术手册. 人民交通出版社. 2001.9
- 25 吴初航. 水泥混凝土路面施工及新技术. 人民交通出版社. 2001 年
- 26 Benjamin S. B. Systems Engineering and Analysis. Prentice-Hall, INC, Englewood Clifls, 1981
- 27 Wolfgang S . Hamburger Transportation and Traffic Engineering Handbook , PRENPRETICE-HALL. INC
- 28 K. J . Salter. Highway Traffic Analysis and Design. Macmillan Education LTD
- 29 James L. Pline. Traffic Engineering Handbook. PRENTICEHALL
- 30 高增礼. 结构动力学. 人民交通出版社. 1996 年
- 31 Colin Henson. Institute of Transportation Engineering ITE, 525 School , st.

- 32 PCA. Design and Control of Concrete Mixtures 1994
- 33 G. H. Tattersall. the Workability of Concrete.1988
- 34 Neville A. M. Property of Concrete.1994
- 35 B. J. Walker. Mechanized Construction of Concrete roads. 1991
- 36 王燕. 水泥混凝土公路技术实践与展望. 人民交通出版社. 2000 年
- 37 吴新璇. 混凝土无损检测技术手册. 人民交通出版社. 2003 年
- 38 郭小峰, 应明. 混凝土护栏滑模施工试验研究. 江苏省交通科学研究院. 2003 年
- 39 张应立. 混凝土全过程质量管理手册. 人民交通出版社. 2003 年
- 40 公路工程水泥混凝土试验规程 JTJ053—94. 人民交通出版社. 1993 年
- 41 混凝土结构规范修订版. 建工出版社. 2003 年
- 42 高速公路路政卷宗. 广西桂柳高速公路管理处. 2000 年~2002 年
- 43 征费统计年鉴. 广西桂柳高速公路管理处. 2000 年~2002 年
- 44 中国公路学会. 2003 年学术年会论文集. 人民交通出版社. 2003 年 11 月
- 45 2003 年全国公路环保与景观技术研讨会论文集. 中国公路杂志社. 2003 年 4 月
- 46 全国公路交通安全设施设计及施工技术研讨会论文集. 中国公路学会. 2001 年 11 月
- 47 混凝土结构规范. 建筑工业出版社. 1999 年 12 月
- 48 马荣国, 杨立波. 《交通工程设计理论和方法》, 北京: 人民交通出版社, 2002. 8
- 49 吴初航. 水泥与水泥混凝土. 建筑工业出版社. 2001.3
- 50 高大钊, 袁聚云 《土质学与土力学 (第三版)》, 北京: 人民交通出版社, 2003. 3
- 51 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾 《土力学》北京: 清华大学出版社, 1994
- 52 李廉琨 《结构力学 (第三版)》, 高等教育出版社, 1996
- 53 方守恩. 《高速公路 (第二版)》, 北京: 人民交通出版社, 2002. 9

致谢

本论文是在尊敬的任福田教授及荣建副教授的悉心指导下完成的。三年来，在学业上深得任先生和荣老师的教诲和指导，使我受益匪浅。任先生和荣老师严谨的治学态度、渊博的理论和丰富的实践经验，将使我终生受益。在此，我谨向任先生和荣老师表示崇高的敬意和衷心的感谢。同时，我还要感谢各位授课老师及研究生部的老师，并感谢所有在学业上给予我指导和帮助的人士。

我还要感谢课题组的全体成员以及在论文写作过程中给予支持和帮助的广西高速公路管理局及桂柳高速公路管理处的有关领导和人员。

同时，我还要感谢我的家人，是他们的大力支持和关爱，才使我得以完成学业和论文。

在此，谨向所有关心和帮助我的人致以深深的谢意！