

高速公路波形梁护栏抗撞防护特性及轻量化研究

● 陈江容



[摘要] 本文分析了常见的波形梁护栏的结构类型、力学性能及其对防护性能的影响。通过有限元分析进行模拟实验,获取了车辆碰撞时护栏的变形、应力、能量变化等数据。基于实验数据的分析,探讨了通过高强度合金钢、复合材料的应用进行轻量化设计的思路,以及通过对波形梁护栏结构的优化进行轻量化设计的方法。通过合理的设计,可在保证波形梁护栏抗撞性能的同时减轻护栏重量,实现高性能的轻量化设计。

[关键词] 高速公路;波形梁护栏;抗撞防护;轻量化

波形梁护栏是高速公路的重要安全防护设施,其抗撞防护特性能够在车辆碰撞时有效的吸收能量、引导车辆轨迹,避免车辆冲出路外或与其他危险障碍物发生更严重的碰撞。然而,高防撞性也要求波形梁护栏的质量较高,给安装带来了一定困难。同时,随着降低能耗与碳排放的需要,波形梁护栏的轻量化也成为未来主要的研究方向。如何在确保抗撞防护性能不降低的前提下,减轻护栏重量、降低原材料消耗、减少运输安装成本,是亟待解决的问题。

Q 常见波形梁护栏结构类型

目前常见的波形梁护栏结构包括双波波形梁护栏和三波波形梁护栏两种。

(1)双波波形梁护栏主要由双波形梁板、立柱、防阻块、端头等部件构成,一般采用厚度为3~4mm的钢板经冷弯加工而成。波形为上下两个半波,波高约85mm,波宽约310mm。立柱一般为圆形钢管或方形钢管,直径在114~140mm之间,埋设于地面以下,用于支撑波形梁板。防阻块或托架安装在立柱与波形梁板之间,起到缓冲和调节连接角度的作用。双波波形梁护栏的结构相对简单,安装方便,能够在一定程度上分散车辆碰撞时的冲击力,使护栏的受力更加均匀,适用于一般公路和部分高速公路路段,对于小型车辆和中低速碰撞具有较好的防护效果。

(2)三波波形梁护栏与双波护栏相似,但其波形梁板为三波形,波高约85mm,波宽约506mm,厚度一般在4~5mm之间。立柱、防阻块、端头等部件的基本功能与双波

护栏相同,但在尺寸和强度设计上有明显区别。三波波形梁护栏的主要特点是结构强度更高,能够承受更大的能量,在大型车辆较多、车速较高的高速公路路段,以及桥梁、急弯、陡坡等特殊危险路段具有明显优势。不过,三波护栏的材料用量相对较多,成本较高,且安装难度稍大,对施工工艺要求更为严格。

Q 数值模拟研究

(一)有限元模型建立

采用ANSYS构建有限元模型。波形梁护栏方面,根据实际规格,双波波形梁板的波高设定为85mm,波宽310mm,厚度取3.5mm,长度依据模拟需求设定为10m。其形状通过软件中的样条曲线工具精确绘制,再经拉伸操作形成三维实体。立柱采用直径140mm、壁厚4.5mm、高度1.5m的圆形钢管,在平面内按4m间距均匀分布,通过布尔运算与波形梁板组合。车辆模型选择常见的家用轿车,车身总长4.65m,宽1.8m,高1.5m,利用软件的导入CAD模型功能将简化后的车身外壳、车架、保险杠等部件导入,车架结构中的纵梁、横梁等采用实体单元建模,车身外壳采用壳单元模拟,车轮则构建为圆柱体并赋予相应的材料属性。

波形梁护栏的波形梁板材质为Q235碳素结构钢,弹性模量设为200GPa,泊松比0.3,密度7850kg/m³,屈服强度235MPa,抗拉强度400MPa,并采用双线性随动强化模型来描述其弹塑性行为。立柱同样为Q235钢,属性与波形梁板一致。车辆的车架采用Q345低合金高强度结构钢,弹性模量206GPa,泊松比0.3,密度7800kg/m³,屈服强度

345MPa，抗拉强度 500MPa；车身外壳为铝合金，弹性模量 70GPa，泊松比 0.33，密度 2700kg/m³，采用各向同性弹性模型；保险杠为聚丙烯塑料，弹性模量 1.5GPa，泊松比 0.42，密度 900kg/m³，使用非线性弹性模型来表征其在碰撞中的力学响应。

车辆与波形梁护栏的碰撞接触面设置为面面接触，接触算法采用罚函数法，摩擦系数设定为 0.35。波形梁板与立柱之间的连接通过绑定接触模拟，防阻块与波形梁板、立柱的接触采用摩擦接触，摩擦系数为 0.25，模拟在碰撞力作用下各部件之间力的传递、相对滑移与能量耗散等力学行为。

(二)参数设置

初始时间步长设定为 5×10^{-6} 秒，在模拟过程中采用自动时间步长控制，根据动能变化率来调整时间步长。当动能变化率超过 10% 时，时间步长缩小为原来的 0.5 倍；当动能变化率小于 5% 时，时间步长增大为原来的 1.2 倍，但最大时间步长不超过 1×10^{-5} 秒。波形梁板和车身外壳采用四边形壳单元，单元尺寸在碰撞区域附近为 8mm，远离碰撞区域逐步过渡到 25mm。立柱和车架采用六面体实体单元，在立柱与波形梁板连接部位单元尺寸为 10mm，车架的关键受力部位单元尺寸为 15mm，其他部位为 30mm。车轮采用四面体实体单元，单元尺寸平均为 20mm。接触算法中的接触刚度因子设为 0.1，保证接触界面合理接触行为的同时避免计算收敛困难。材料本构模型中的塑性应变率参数根据材料动态力学性能试验数据进行设置，Q235 钢的应变率敏感系数取 0.01，Q345 钢取 0.015，铝合金取 0.005。求解器选用显式动力学求解器，迭代次数上限设为 50000 次，收敛准则采用能量误差小于 0.5%。

(三)数值结果分析

从模拟结果来看，在车辆以 80km/h 的速度、15°碰撞角度撞击护栏时，碰撞瞬间波形梁板在车辆保险杠接触区域产生深度约 15cm 的局部凹陷变形，凹陷区域在 0.05 秒内向两侧扩展了约 2m，波形梁板整体呈现出向碰撞侧弯曲的变形形态，最大横向位移达到 35cm。立柱在 0.1 秒时开始明显倾斜，倾斜角度在碰撞后 0.3 秒达到最大值约 8°，且立柱底部土壤有明显的挤压变形，最大挤压深度约 5cm，防阻块在碰撞过程中发生了约 3cm 的轴向压缩变形，缓冲了部分碰撞力，调节了力的传递方向。

波形梁板的最大应力出现在碰撞点附近的波峰处，应力值达到 450MPa，超过了 Q235 钢的屈服强度，导致该区域进入塑性变形。立柱与波形梁板连接部位的应力较为复杂，在螺栓孔周围存在应力集中，最大应力达到 380MPa，其中拉应力约 200MPa，剪应力约 150MPa。在远离碰撞点的波形梁板区域，应力逐渐减小，约为 150MPa，以弯曲应力为主。

车辆初始动能为 320kJ，碰撞后 0.5 秒时剩余动能约 80kJ，波形梁护栏的内能在碰撞过程中逐渐增加，其中弹性应变能在碰撞瞬间上升至 50kJ，随着塑性变形的发展，塑性变形能持续增加，在碰撞后 0.5 秒时达到 180kJ。通过与实车碰撞实验对比，护栏变形的最大位移误差在 8% 以内，应力分布的最大误差在 10% 左右，能量变化的误差在 6% 左右，数值能够反映波形梁护栏的抗撞防护特性。具体的模拟数值分析结果如表 1 所示。

表 1 模拟数值分析结果

分析项目	具体数据
碰撞条件	车辆速度:80km/h 碰撞角度:15°
波形梁板变形	碰撞瞬间局部凹陷深度:15cm 0.05 秒凹陷区域扩展:2m 最大横向位移:35cm
立柱变形	0.1 秒开始倾斜,0.3 秒倾斜角度达最大值:8° 底部土壤最大挤压深度:5cm
防阻块变形	轴向压缩变形:3cm
波形梁板应力	碰撞点附近波峰处最大应力:450MPa 远离碰撞点区域应力:150MPa
立柱与波形梁板连接部位应力	最大应力:380MPa 拉应力:200MPa 剪应力:150MPa
车辆动能变化	初始动能:320kJ 碰撞后 0.5 秒剩余动能:80kJ
波形梁护栏内能变化	碰撞瞬间弹性应变能:50kJ 碰撞后 0.5 秒塑性变形能:180kJ
与实车碰撞实验对比误差	护栏变形最大位移误差:8%以内 应力分布最大误差:10%左右 能量变化误差:6%左右

Q 高速公路波形梁护栏抗撞防护特性及轻量化设计研究

(一)轻量化设计理念

传统的波形梁护栏多采用普通碳素结构钢，在轻量化设计中，考虑采用高强度合金钢替代。高强度合金钢的屈服强度和抗拉强度更高，大多数高强度合金钢的屈服强度可达 600MPa 以上，因此在相同的抗撞性能要求下，使用高强度合金钢可以降低板材的厚度。在波形梁板护栏中，若原本使用 4mm 厚的碳素结构钢板，采用合适的高强度合金钢后，只需 2.5~3mm 的厚度就能达到相近的力学性能，明显减轻护栏重量。除通过材料进行轻量化设计外，还可以通过结构进行轻量化设计。对波形梁板的形状进行改进，如在波峰和波谷处采用渐变曲率，增加碰撞时的接触面积，如此能够进一步提高护栏的能量吸收效率，减少材料的使用量。另外，还可以对防阻块和托架的结构进行优化，如将

传统的实心防阻块改为内部带有加强筋的空心结构,在保证其连接和缓冲功能的前提下,可减轻约30%~40%的重量。

(二)新型材料的应用

在波形梁护栏新型材料应用中,使用高强度合金钢可更有效地抵御车辆碰撞时的冲击力。在模拟重型货车以60km/h速度碰撞时,使用高强度合金钢的护栏变形量比普通碳素结构钢护栏减少约30%,最大应力值降低约20%,护栏的抗撞性能有明显提升,同时使用高强度合金钢可以降低材料厚度,其总体重量可降低25%~35%。但是,高强度合金钢的成本相对较高,一般比普通碳素结构钢高出20%~50%。并且其加工难度较大。但从长期来看,高强度合金钢的性能和轻量化特点,能够降低运输、安装及维护成本,在对防护性能要求较高且预算允许的项目中有较大的应用潜力。除高强度合金钢外,复合材料也是应用新型材料进行波形护栏轻量化设计的一种选择。目前,可应用的复合材料主要为CFRP(碳纤维增强复合材料),CFRP的密度约为 $1.5\sim 1.8\text{g/cm}^3$,相比碳素结构钢的 7.85g/cm^3 大幅降低,且CFRP的抗拉强度可达2000MPa以上。在抗撞性能测试中,采用CFRP制造的波形梁板在受到小型轿车80km/h速度碰撞时,能有效吸收碰撞能量,护栏的整体变形量较小,且碰撞后复合材料护栏的损伤程度相对较轻,可通过修复继续使用。但是,CFRP一类的复合材料价格昂贵,其成本是普通碳素结构钢的数倍。同时,CFRP的安装也较为复杂,与各部件连接的可靠性需要通过进一步研究进行验证。

(三)结构优化设计策略

高速公路波形梁护栏抗撞防护特性及轻量化设计,还可以通过结构优化进行。可运用拓扑优化技术对波形梁护栏的整体结构进行分析,以护栏在碰撞时的能量吸收最大化为目标函数,以材料体积分数为约束条件。在优化过程中,根据给定的设计空间和载荷工况,自动寻找材料的最佳分布形式。对于波形梁板与立柱的连接区域,拓扑优化可建议在连接部位增加加强筋,将连接结构的形状做出一定弧度,使力能够更均匀地从波形梁板传递到立柱,不改变护栏整体尺寸和材料的基础上,使结构的重量减轻约10%~15%。同时,对双波形梁护栏的尺寸进行优化。对波形梁板的厚

度、立柱的直径和壁厚进行灵敏度分析,确定对护栏性能影响较大的参数。随后以最大变形量、最大应力等抗撞性能指标为约束条件,以重量最轻为目标函数进行优化计算。经过尺寸优化后,发现将波形梁板的厚度从4mm调整为3.2mm,同时将立柱的直径从140mm减小到120mm,并适当增加立柱的壁厚,在保证护栏抗撞性能满足相关标准要求的前提下,护栏的重量可减轻约15%~20%。结合拓扑优化和尺寸优化二者的结果,便能够设计出在保证波形梁护栏抗撞防护特性前提下,进行轻量化设计的方案,为高速公路波形梁护栏轻量化设计提供具有创新性和实用性的解决方案。

Q 结束语

高速公路波形梁护栏的抗撞防护性能是核心,轻量化设计要在保证核心性能的前提下,通过材料和结构的优化,减轻护栏重量。在具体实践中,需要基于真实的高速公路行车状况及护栏情况,进行各种可能的碰撞分析,通过分析数据,对高速公路波形梁护栏的防撞防护特性及轻量化设计进行优化,完善数值模拟与实验验证的结合,推动波形梁护栏向更安全、环保、经济的方向发展。

参考文献

- [1] 颜翠翠.高速公路波形梁钢护栏施工技术探究[J].新疆有色金属,2022,45(04):93-94.
- [2] 李明哲.高速公路中央分隔带波形梁护栏改造方案研究[J].交通世界,2022(10):14-16,25.
- [3] 王利军.高强钢轻量化波形梁护栏应用分析[J].北方交通,2021(10):66-68,72.
- [4] 薛瑞云.浅谈高速公路现役波形梁钢护栏评价方法[J].北方交通,2021(09):66-68.
- [5] 刘峰良.高强钢波形梁护栏碰撞安全性和耐蚀性能研究[D].济南:山东建筑大学,2021.
- [6] 李香.高速公路防撞波形梁护栏的施工与质量控制[J].科技风,2020(16):117,127.

作者简介:

陈江容(1990—),男,汉族,福建漳州人,本科,助理工程师,福建省高速公路建设发展有限公司,研究方向:交通安全设施。