

车辆撞击防撞护墙时桥梁的动力响应分析

尹伊君 刘鑫

中国市政工程中南设计研究总院有限公司

摘要:为切实保障桥梁工程运营期间的安全性,降低车辆撞击对桥梁结构造成的损伤,应借助先进有限元软件,分析车辆撞击防撞护墙时桥梁整体的动力响应情况,为后续优化防撞墙结构提供重要理论依据。本文就针对此,首先提出非线性有限元控制方程结构,对车辆撞击防撞护墙进行仿真分析,总结桥梁损伤特征,以期为相关工作人员提供理论性帮助。

关键词:车辆撞击;防撞护墙;桥梁动力响应

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.14.056

前言:国内桥梁数量日益增多,车辆撞击桥墩等事故的出现概率也日益升高,该类事故会导致严重的经济损失与人员伤亡。现阶段国内对车辆撞击防撞护墙的研究工作正陆续开展,但对于撞击作用机理的认知还较为模糊,后续撞击力计算依据以及撞击后桥梁的损伤评价标准缺失,因此需要针对车辆撞击防撞护墙的撞击力以及桥梁动力响应特征进行深入分析,制定桥梁防撞护墙撞击损伤评价标准。

一、桥梁防撞护墙理论研究

防撞护墙是桥梁工程重要附属结构之一,不仅能够切实保障桥梁结构的安全性,护墙外形及表面光洁度也可直接影响到桥梁工程整体的美观度。现阶段桥梁工程建设规模日渐扩大,防撞护墙预埋件增多,实际施工空间较为狭小,在具体设计过程中通常会选择观赏价值更高的宝瓶型防撞护墙或悬挂式防撞护墙,导致后续施工难度增大。

在防撞护墙具体施工工作开展期间,需要经过钢筋绑扎与焊接、模板安装、混凝土浇筑、拆模与养护等环节^[1]。其中,模板安装及混凝土浇筑是重要施工内容。在模板安装期间需要结合设计图纸具体要求,在施工现场弹出防撞墙的位置墨线。确定防撞墙位置。为切实保障防撞墙外观质量,在钢模板制作过程中需要严格控制模板的平整度,模板接缝处需要使用纸质胶带填补。质检人员需要着重检查钢筋保护层,在保护层厚度不够的情况下用木块临时垫塞。

在混凝土浇筑过程中需要采用分段浇筑方式,浇筑期间需要注意控制预埋件的预埋位置,确保防撞墙整体线型顺直美观。防撞墙需要使用C25混凝土配合浇筑,每层浇筑高度为30~40厘米。利用插入式振捣器逐层振捣,每振捣点的振捣时间应当维持在3~5秒,防撞护墙周边需要进行加密振捣,切实提升防撞墙整体的承载力。

二、车辆撞击防撞护墙的试验有限元分析

(一)有限元分析流程

车辆撞击防撞护墙试验有限元分析主要包括前处理、求解、后处理三个阶段。在前期处理时,需要建立起分析模型,利用前处理程序,将各模型构件划分成连续单元集合体,实现网格划分目标^[2]。在网格划分后,需要给单元定义正确的材料特性、截面特性,给整个结构定义正确的边界条件,在定义好不同工况下的外部荷载后即可提交计算,利用有限元求解装置获得数据文件以及所需文件结果,求解后的文件以进行进一步分析处理。在后处理过程中,需要利用有限元软件处理后的结果,绘制出相应工况下的撞击力与车辆质量及速度的关系曲线、车辆撞击防撞护墙的应力云图和撞击过程的应变曲线。

(二)试验有限元模型

为切实保障有限元软件分析结果的合理性与精准性,可在实际工作中建立起与试验模型相同的有限元分析模型,借助对比方式确定模型相关参数,实现多工况,下有限元模拟分析目标。

构建有限元模型,借助有限元软件开展三维实体模型建模工作。网格划分时,因防撞护墙为钢筋混凝土结构,钢筋可以采用实体单元建立^[3]。钢筋及混凝土依靠节点耦合连接,在钢筋网格划分较为细密的情况下,混凝土网格也应当细密,后续求解时间较长,因此通常钢筋网格设置为1~2厘米,纵向主筋以及箍筋采用四边形网格替代;在混凝土网格划分时,因网格尺寸过大难以与钢筋网格节点耦合,因此也需要结合钢筋网格距离,将混凝土的网格设置为1~2厘米左右。

开展有限元模拟工作,需要首先确定模型与材料之间的本构关系。现阶段关于冲击力的研究多数采用混凝土损伤模型。具体来说,混凝土损伤模型主要就是混凝土体积响应及偏量响应进行解耦处理,借助程序方程描述压力及体积的应力变化。混凝土在受压时会按照流动法则处理,在初始加载或者重复加载情况下,偏应力需要始终保持在弹性范围内,确保应力点能够达到初始屈服面^[4]。混凝土损伤模型可以在主应力空间中定义失效、参与墙面以及屈服面,结合混凝土体积响应及偏量响应进行分析。在初始加载或重新加载的情况下,偏应力需要始终保持在弹性状态,确保应力点能够达到初始屈服面。混凝土损伤模型还可以考虑到钢筋的作用,将钢筋定义为实体模型,与外部混凝土划分一致的网格,建立混凝土损伤模型,通过改变混凝土损伤模型参数,可以获得试验实测撞击力的匹配模型参数。

确定边界与接触定义。边界条件约束主要就是车辆

与防撞护墙碰撞,防撞护墙与主梁刚性连接,主梁梁板之间的横向分布系数,主梁与桥墩的接触,桥墩与基础的接触。在模拟车辆与防撞护墙撞击的工况时,车辆与防撞护墙的撞击模拟,实际上是点面接触模型,点面接触的高度即为实际撞击高度。最后定义汽车的质量、速度以及运行方向,实现该工况下的动力分析。

(三) 影响撞击的因素

在试验工况情况下,可通过有限元模拟软件改变车辆速度和质量,获得各工况对应的撞击力值^[5]。绘制质量相同条件下,撞击力与速度的关系曲线;绘制速度相同条件下,撞击力与质量的关系曲线。由于试验过程中产生的数据点较少,只能研究质量、速度与撞击力的变化趋势。

通过分析不同影响撞击因素之间的关系发现,如撞击期间的车辆质量相同,随着车辆速度的增加,撞击力的值也会增加,但撞击力增加的速度会逐渐减小,撞击力的大小与车辆速度的平方具备正比关系。撞击期间车辆的速度相同时,撞击力和质量之间具备正比关系。

撞击力及影响速度的平方、撞击力与车辆质量均存在比例关系。通过绘制撞击力及撞击能量的曲线关系图,发现图像中离散点呈现出曲线分布规律。拟合图内离散点,利用多次相式与对数关系提升拟合曲线及离散点的契合度。在不分析低速情况下,二次多项式的描述更加符合离散点变化趋势,冲击力及撞击能量具备二次曲线关联。

(四) 试验模型下的应力云图分析

结合运算结果文件应力云图,根据防撞护墙迎撞面与被撞面的应力云图分析桥梁受力过程,绘制出桥梁迎撞面钢筋、混凝土应力云图、被撞面钢筋、混凝土应力云图^[6]。防撞护墙承受车辆撞击作用的瞬间,墙体会沿撞击方向位移,撞击点位置最外侧的混凝土首先与车辆接触,撞击发生后,撞击点处的混凝土崩裂,无法提供抗力,此时内部钢筋应力增大,提供足够的抗力以抵消撞击作用。在整个过程中,混凝土的应力水平较低且发生破坏,钢筋的应力水平较高,发生了塑性形变,整个混凝土结构的完整性主要由内部钢筋来保证的。

防撞护墙沿撞击方向位移时,护墙结构出现变形。受到撞击力作用影响,撞击点位置的钢筋应力变化较大、混凝土应力变化较小,在混凝土结构中,底部需要承受较大的应力作用。试验结果说明,受到撞击的防撞护墙结构,迎撞面的拉应力能够最先发挥出抵抗作用。

在迎撞面混凝土的撞击点位置局部处于较高应力水平的情况下,被撞击面混凝土的下方处于较高应力状态。在钢筋、迎撞面整体应力小于背状面整体应力的情况下,混凝土被撞击面拉应力逐步由两侧相撞地面扩散,撞击面混凝土在刚性约束处应力局部增高。

(五) 有限元应力分析结果

在车辆撞击防撞护墙工况下,撞击点局部位置混凝土会受车辆的撞击作用而受到破坏。护墙结构内的钢筋

能够分散部分应力,控制混凝土开裂范围,因此需要在防撞护墙设计及施工过程中重视钢筋施工过程,着重发挥出钢筋的聚集作用。

三、车辆撞击防撞护墙时桥梁动力响应的非线性有限元控制方程

针对车辆碰撞问题研究工作,通常会使用拉格朗日描述方式建立起非线性有限元控制方程。结合连续介质力学理论,确保运动系统始终处于质量守恒、动量守恒与能量守恒状态下。

能量守恒方程主要包括的参数为防撞护墙结构的质量密度、防撞护墙体积变化率、初始结构的质量密度;动量守恒方程主要包括柯西应力张量、单位质量体积力、质点加速度;能量守恒方程主要包括车辆撞击后变形产生的内能、防撞护墙受撞击后出现的变形内能、车辆碰撞期间摩擦消散的能量值、车辆撞击结束后的残余动力值。

其中,动能的损失为变形能与摩擦耗散能量之和,车辆变形产生的动能比护栏变形产生的动能更大,摩擦产生的能量小。在具体设计工作开展期间,设计人员需要通过不断优化防撞护墙结构,减小防撞护墙变形产生的内能。

四、车辆撞击防撞护墙的仿真分析

(一) 车辆撞击防撞护墙的应力分析

配合使用有限元软件建立起车辆撞击防撞护墙期间的仿真模型,通过变换车辆速度、车辆质量、车辆撞击角度获得不同情况下主梁位移以及防撞护栏应力变化情况。

在撞击防撞护墙的情况下,主梁应力主要用于衡量桥梁是否能够满足安全运行目标,切实保障桥梁运营期间的安全性^[7]。由于在具体撞击过程中面临的工况较多,因此结合几个重要参数进行分析。在车速相同、撞击角度相同时,撞击车辆的质量越大,防撞护墙的局部应力越大;在撞击车辆的质量相同、角度相同时,撞击车辆的速度越大,防撞护墙的局部应力越大;在车速相同、撞击车辆的质量相同时,撞击角度越接近90度,防撞护墙的局部应力越大。

(二) 车辆撞击防撞护墙的位移分析

主梁位移是在车辆与防撞护墙碰撞期间研究桥梁响应的主要参数。经过模拟撞击过程发现,在车速相同、撞击角度相同时,主梁因撞击产生的位移会随着撞击车辆的质量增加而线性增大;在撞击车辆的质量相同、角度相同时,主梁因撞击产生的位移会随着撞击车辆的速度增加而线性增大;在车速相同、撞击车辆的质量相同时,撞击角度越接近90度,主梁因撞击产生的位移越大。

五、防撞护墙损失特征

(一) 防撞护墙损失特征

在车辆与防撞护墙碰撞0.02秒以内时,防撞护墙被撞区域会出现明显的局部损伤。顶部与底部约束附近混

混凝土也会出现一定损伤；分析单元应力可以发现，区域内混凝土在弯曲压应力过大的情况下会出现破坏情况。在碰撞发生0.03秒以内的情况下，汽车发动机开始撞击防撞护栏，上下端混凝土出现明显错动，可判断防护墙结构出现了剪切破坏情况；在碰撞发生0.15秒内时，车辆开始回弹，车辆对防撞护墙的撞击作用力结束。

通过分析防撞护墙撞击效应以及最终损失，发现在防撞护墙被撞击范围内非撞击一侧纵向钢筋的单元应力值最大，该高度范围内的最外侧纵向钢筋主要承受弯曲拉应力。在应力值越大的情况下，防撞护墙弯曲变形值就越大，因此在具体分析过程中，需要对所有收集到的混凝土单元损伤指标进行曲线平均，定义平均后的最大峰值为混凝土综合损伤指标，混凝土综合损伤指标越大，桥梁自身受到的损失也就越大。

假定一辆汽车以每小时100公里的速度向防撞护墙撞击，防撞护墙的顶部会出现严重剪切破坏情况，说明防撞护墙在受到撞击时更容易出现剪切力破坏。在防撞护墙底部约束位置下降一米的情况下，损伤区域扩大到地面上2.5米范围内。防撞护墙顶部竖向位移及变化斜率会在时间的延长下不断增大，说明此时防撞护墙已经失去承受竖向荷载的能力，极易出现垮塌情况。在车辆与防撞护墙发生碰撞时，墙体顶部轴向位移初步稳定，表明墙体结构的重力作用效应完成。

分析车辆撞击与防撞护墙的反力作用，发现车辆撞击就是车辆与防撞护墙接触撞击力之和。通过实际调查研究可知，防撞护墙反力包括防撞护墙上下端约束反力。在车辆撞击速度为每小时80千米的情况下，防撞护墙会出现明显震动，在车辆撞击速度为每小时1千米的情况下，防撞护墙振动没有出现，但却发生了明显的塑性变形情况。

（二）防撞护墙损失度

防撞护墙属于竖向承载结构，在具体设置过程中，也需要承受上部结构传下的轴向压力。在防撞墙被车辆撞击后，桥墩混凝土结构会产生裂缝，裂开，前面的混凝土受压面积减小、针对防撞护墙损失情况，需要切实分析护墙结构损失度。具体来说，损失度为残余承载能力与原承载能力的比值。在防撞护墙受到撞击后，防撞护墙的承载能力受到开裂破坏的最严重截面影响，在不考虑钢筋作用的情况下，损失度就是混凝土开裂截面的开裂截面积与原设计混凝土截面面积比值。通过使用现代测量仪器，测量桥墩最大开裂截面剩余截面积。结合规则桥梁定义，规则桥梁的轴压比应当小于等于0.3。

在防撞护墙为轻微损伤的情况下，开裂截面积不大于10%，防撞墙能够提供剩余承载力为规则桥梁轴压比对应承载力的三倍以上，防撞墙依然可以正常使用，仅对表面裂缝进行处理即可；在防撞护墙为中度损伤的情况下，防撞护墙剩余承载力为正常状态下承载力的0.6~0.9倍，剩余承载力为规则桥梁最大轴压比对应承

载力的两倍以上，需要对防撞墙进行进一步加固处理。在没有加固处理前应当禁止大型车辆或重型车辆上桥；在防撞护墙发生严重损伤的情况下，护墙结构的剩余承载力仅为原来的0.3~0.6倍，在防撞护墙没有经过加固处理前，应当对小型车辆的交通流进行控制，大车或者重型车辆限制通行，并及时对防撞护墙进行加固抢修。在确定防撞护墙结构的损伤位置后，可通过相关计算方法或其他手段对结构构件区域的损伤程度进行定量分析，结合实际损伤程度制定出专项可行的维护技术方案。

由于车辆撞击防撞护墙属于复杂的非线性动力特征，在研究期间包括弹塑性力学、振动理论、有限元分析及风险分析。防撞护墙结构形式多样，不同防撞护墙也会对研究车辆撞击下的桥梁动态响应力结果造成一定影响，因此在后续研究过程中还需要扩大研究范围，选择更加细致的有限元分析方式展开模拟验证。结合上部荷载力、碰撞角度、车辆刚度等参数，不断优化有限元模型结构，确保最终分析结果能够在防撞护墙设计中发挥出重要作用。

结语

总而言之，通过建立起车辆撞击防撞护墙时桥墩的动力应力模型发现，撞击发生时，撞击车辆的质量越大，车速越快，撞击的角度越接近90度，防撞护墙的应力水平越高，同时主梁的横向位移越大。因此在防撞护墙具体设计工作开展过程中，设计人员应当结合桥梁动力响应值，对防撞护墙结构进行切实优化，从根本上提升桥梁整体防撞击能力。

参考文献

- [1]冯忠居,陈锦华,刘星越,等.高速公路改扩建旧桥加宽桩基础差异沉降控制离心模型试验[J].长安大学学报(自然科学版).2022,42(2).1-9.
- [2]冯忠居,关云辉,赖德金,等.强震作用下桩-土-断层非线性动力相互作用特性[J].世界地震工程.2021,(4).
- [3]张笑华,肖兴勇,方圣恩.面向桥梁结构健康监测的压缩感知动力响应信号重构[J].振动工程学报,2022,35(03):699-706.
- [4]苏玉莹.公路施工中混凝土施工管理要点[J].交通世界(上旬刊).2018,(9).
- [5]尹睿.桥梁防撞护墙滑模施工技术[J].交通世界(下旬刊),2022(3):43-44.
- [6]胡惠珍,孔买群,王桂芳,杨雪,王稀田.桥梁防撞护墙滑模施工技术[J].云南水力发电,2021,37(04):128-131.
- [7]李森森,李睿,陈跃,徐征.车辆撞击防撞护墙时桥梁的动力响应分析[J].中国水运(下半月),2018,18(08):197-198.