

Research on simulation method of post-foundation relationship of road anti-collision structure

Mingxing GOU¹, Zhengbao LEI¹, Bo LIU¹, Jie SONG¹

¹Changsha university of science and technology, Changsha, China, 410114

Abstract: the post-foundation relationship of road anti-collision structure is the key to the anti-collision structure performance, but the post-foundation relationship is difficult to be detected as the complicated installation environment, therefore to judge the influence of different post-foundation relationship on the performance of the anti-collision structure post, "highway traffic safety facilities design specification" and "highway guardrail safety performance evaluation standard" are the foundation of the post-foundation relationship simulation. Firstly, The simulation foundation is a cylindrical foundation with a diameter of 3000mm and a depth of 2010mm based on the finite element numerical analysis method and the single factor analysis method. Then, a finite element collision analysis model of vehicle and post-foundation is established, and the post dynamic impact test was carry out in three kinds of post foundations and typical post. Finally, the quantitative and qualitative analysis of the center of mass acceleration of the bogie and bending situation of post are made, finding that the quantitative index of acceleration under the relation of concrete post-foundation are about 1.4 times as much as those of soil and compacted soil in three kinds of typical post. Under the three kinds of foundation, all test shows that the trend of bending point is highest in concrete and the minimum in soil. But the qualitative indexes of the test, the bending and inclination situation, show that the bending angle of post in concrete is the biggest, and in soil is minimum and the soil slope is more serious and the concrete is not inclined. The inclination situation in soil is more serious than others and not inclined in concrete.

Keywords: finite element analysis; dynamic impact test; post-foundation relationship simulation; anti-collision structure of road

道路抗撞结构桩基关系模拟方法研究

苟明兴¹, 雷正保¹, 刘博¹, 宋洁¹

¹长沙理工大学, 长沙, 中国, 410114

摘要: 道路抗撞结构桩基关系是抗撞结构发挥性能的关键, 但桩基关系因实地安装环境复杂而难以现场检测, 故为判断不同桩基关系对抗撞结构立柱性能的不同影响, 本文以《公路交通安全设施设计规范》和《公路护栏安全性能评价标准》为抗撞结构桩基关系模拟基础。首先, 基于有限元数值分析方法和单因素分析法确定了抗撞结构地基为直径 3000mm、深度为 2010mm 的圆柱状地基; 随后, 建立台车-桩基的有限元碰撞分析模型, 针对松土、压实土和混凝土三种实地基础分别开展了圆形、矩形及椭圆形三种典型抗撞结构立柱动态冲击试验; 最后, 通过对动态冲击试验中台车质心加速度和抗撞结构立柱弯折情况进行定量和定性对比分析, 得出: 三种典型立柱在混凝土桩基关系下的定量指标台车质心加速度均为松土和压实土基础下的 1.4 倍左右, 且三种基础下立柱弯折点均呈现混凝土最高, 松土最低的趋势; 而试验的定性指标弯折情况和倾斜情况, 则呈现混凝土弯折角度最大、松土最小及松土倾斜更严重, 混凝土不倾斜等特点。

关键词: 有限元数值分析; 动态冲击试验; 桩基关系模拟; 道路抗撞结构

1 引言

基金项目: 国家自然科学基金 (51675059)

作者简介: 雷正保, 男, 湖南邵阳人, 教授, 从事交通安全技术的研究

道路抗撞结构（包括柔性车辆约束系统和半刚性车辆约束系统）作为重要的交通安全设施，在整个道路系统中扮演着十分重要的角色，安全性能良好的道路抗撞结构能很大程度地减轻或减少交通事故损失。道路抗撞结构主要是通过抗撞结构自身的弹塑性变形来吸收车辆的部分或全部的碰撞能量，使车辆减速或者停止，以保护车内乘员安全^{[1][2][3][4]}。然而，决定抗撞结构安全性能好坏的一个重要因素是抗撞结构立柱与其基础之间的作用关系，在仿真模拟设计的过程中，针对抗撞结构立柱桩基一般都是采用理想的约束条件；即便生产厂家通过实车碰撞试验来检测其安全性能，也是根据实验室即有条件对立柱进行桩基约束，两者都无法实现和护栏立柱安装使用现场一致的桩基约束条件^{[5][6][7]}，使得抗撞结构在不同现场进行实地安装后出现了性能不达标，甚至更糟的情况。究其两者之间的变量，则可归结为抗撞结构桩基约束条件的不同。因此，在公路抗撞结构推广使用前对立柱桩基约束条件进行现场检测或者室内模拟是尤为必要的^{[8][9][10]}。目前，对实地安装环境进行检测或模拟的方法主要分为水平静力加载试验和动态冲击试验^[7]，但水平静力加载检测过程非常繁琐，且车辆撞击立柱的过程是一个瞬时动态的过程，使得无法考虑冲击效应的水平静载试验检测结果并不准确^{[11][12][13]}。因此采用动态冲击试验对实地安装环境进行模拟是判断桩基关系好坏的最佳手段。

摆锤和台车是用于抗撞结构立柱动态冲击试验常用的装备^{[9][10][11]}，如图 2 所示。摆锤主要是利用将摆锤调整到一定的高度时具有的势能转变为动能来完成动态冲击试验，其势能与动能之间的关系为 $mg\Delta h = \frac{1}{2}mv^2$ ，最后以速度 v 撞击抗撞结构立柱；而台车主要是利用牵引机构使台车加速到试验所需速度，最后让台车自由行驶撞击抗撞结构立柱，其撞击速度 v 由牵引机构控制。对比分析发现：摆锤试验虽然具有简单易行的特点，但其撞击速度 v 受 Δh 制约而不能大范围变动，而且其运动轨迹与实际车辆运行轨迹不一，不利于实验数据的正确采集；而台车虽然对场地等有一定要求，但其速度可在牵引机构许可范围类大幅变动，运动轨迹也能与实际车辆很好吻合，是抗撞结构立柱动态冲击试验的优选试验装备。而国内对采用动态冲击试验来模拟抗撞结构立柱实地安装环境方面研究较少，本文将对抗撞结构桩基室内模拟方法进行研究，并建立有限元仿真模型进行分析验证。



Figure 1. pendulum test and bogie test

图 1 摆锤试验和台车试验

2 抗撞结构桩基室内模拟的有限元建模

由于抗撞结构在安装的环境差异巨大，不同压实度的基础对抗撞结构的安全性能影响也十分巨大，实验室一般性抗撞结构碰撞试验均在实验室的牢固基础下进行，其性能也不具有代表性。因为在护栏实际安装过程中，当基础性质不符合要求时，会制约抗撞结构安全性能的发挥，甚至起不到安全作用，使得车辆出现冲出道路外的情形，如图 2 所示。由《高速公路交通安全设施设计及施工技术规范》可知，抗撞结构立柱主要安装在土基或者混凝土中，埋置方式主要分为打入式和埋入式^[15]，故本文主要针对实际安装环境中的松土基础、压实土基础和混凝土基础三种形式。

土体作为公路重要载体，其变形特性十分复杂，包括非线性和非弹性变形、静压屈服特性、弹塑性耦合特

性、剪胀性等。要在有限元本构模型中反应土体所有的性质是相当困难的，故应从工程实际出发，选择合理的本构模型来模拟土体性质^[16]。

2.1 碰撞台车有限元模型

从上述分析可知，由于台车相较于摆锤是抗撞结构立柱动态冲击试验的优选装备，故以《National Cooperative Highway Research Program Report 350》（即 NCHRP.350）和《公路护栏安全性能评价标准》（JTG B05-01—2013）中碰撞车辆的相关要求为碰撞台车设计依据，并参考现有台车的设计形式，进行抗撞结构立柱动态冲击试验用台车设计。其中，台车设计的三维效果图和台车的有限元模型如图 3 所示。台车根据实际车辆情况对不同部分赋予不同的材料和属性，台车质量为 NCHRP.350 中 0.8t 小型车质量。

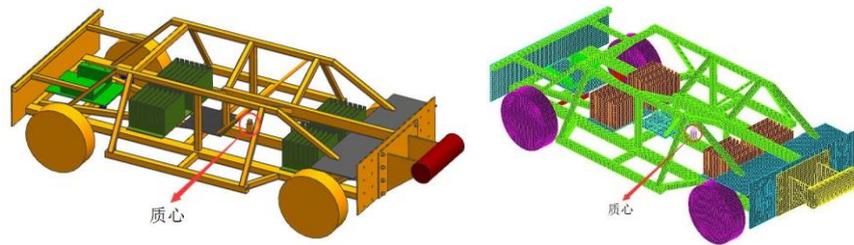


Figure 2. three dimensional vehicle model and finite element model

图 2 台车三维模型及有限元模型

由于台车质心位置是抗撞结构立柱碰撞试验数据采集的关键位置，能获取碰撞试验的相关数据，故确定台车质心位置是顺利完成碰撞试验数据采集的关键。上述台车主要参照法规中实际车辆质心位置进行设计，其质心位置由两部分组成，包括质心到前轴或后轴的距离，以及质心位置的离地高度，确定了质心到前轴或者后轴的距离和离地高度后，质心的位置便可求出，具体求解方法如下：

①质心到前轴的距离可通过下列方程求出：

$$\left\{ \begin{array}{l} G_1 = \Sigma \left[\left(1 - \frac{x_i}{L} \right) \bullet g_i \right] \\ G_2 = \Sigma \left[\frac{x_i}{L} \bullet g_i \right] \\ a = L \bullet \frac{G_2}{G} = L \bullet \left(1 - \frac{G_1}{G} \right) \\ G = G_1 + G_2 = \Sigma g_i \end{array} \right. \quad (1)$$

式中：a 表示质心到前轴的水平距离

g_i 表示各总成（或载荷）质量

x_i 表示各总成（或载荷）到前轴的水平距离

G_1 表示前轴负荷

G_2 表示后轴负荷

L 表示轴距

G 表示总负荷

②质心的离地高度可通过下列方程求得：

$$h = \frac{\sum(g_i \cdot h_i)}{\sum g_i} \quad (2)$$

式中： h 质心到地面的高度
 h_i 各总成（或载荷）离地高度

2.2 基有限元模型

抗撞结构立柱动态冲击试验主要是为了模拟抗撞结构在实地安装环境下的桩基关系并判断桩基关系对抗撞结构安全性能的影响。建立合理的桩基有限元模型对仿真结果十分重要，公路抗撞结构立柱常见有圆形、矩形和椭圆形三种，故以这三种典型立柱为代表，建立有限元模型，其截面图及有限元模型如图 3 所示。结合文献^[1-4]和工程实际，上述三种典型立柱均采用 Q235 钢材，选用 LS-DYNA 材料库中 3 号弹塑性材料 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC 来模拟，该材料的屈服条件满足等式一，并对立柱赋予 *SECTION_SHELL 四节点壳体单元的属性，材料参数如表 1 所示，

$$\phi = \frac{1}{2} \xi_{ij} \xi_{ij} - \frac{\sigma_y^2}{3} = 0 \quad (3)$$

其中：

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_{ij} = s_{ij} - \alpha_{ij} \\ \sigma_y = \sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_{eff}^p \end{array} \right.$$

Table 1. post material parameter

表 1 立柱材料参数

材料参数	密度 (kg/m ³)	杨氏模量 (Mpa)	泊松比	屈服应力 (Mpa)	硬化模量 (Mpa)	应变率参数 c	应变率参数 p	失效应变
数值	7.85×10 ³	2.07×10 ⁵	0.3	235	780	40	5	0.75

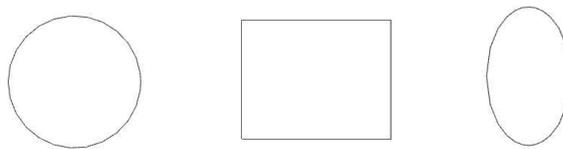


Figure 3. shape of three typical post sections of anti-collision structure

图 3 抗撞结构三种典型立柱截面形状

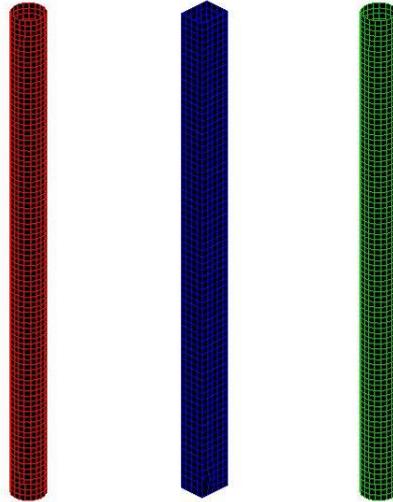


Figure 4. finite element model of anti-collision post

图 4 抗撞结构立柱有限元模型

由于土基的实际情况十分复杂，还没有一种材料模型可以对其进行全面的模拟，故本文为了简化问题，选用 LS-DYNA 材料库中 14 号材料模型 *MAT_SOIL_AND_FOAM 对土体进行模拟。该模型主要是认为土体的变形是各向同性的，并假定土体在竖直方向是逐级变化的。由于土体体应变会导致材料产生体积屈服，故 14 号材料模型在摩尔-库伦屈服面上引入了帽形屈服面，具体屈服函数为：

$$\begin{aligned} \phi_s &= J_2 - [a_0 + a_1 p + a_2 p^2] \\ \phi_p &= p - f \end{aligned} \quad (4)$$

其中： J_2 表示应力偏张量的第二不变量； p 表示平均应力； a_0, a_1, a_2 为自定义常数； f 为有效塑性应变函数。

结合参考文献^{[5][11]}建立直径为 2700mm、高度为 2010mm 的初始圆柱状土基三维模型和有限元模型，如图 5 所示。

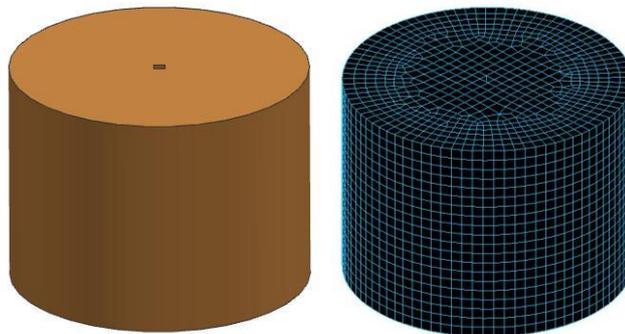


Figure 5. initial cylindrical three-dimensional foundation model and finite element model

图 5 初始圆柱状三维地基模型和有限元模型

3 抗撞结构立柱基础大小的确定

基于上述建立的台车、立柱、土基有限元模型，设定边界条件和接触等属性，建立抗撞结构立柱动态冲击试验的台车-桩基有限元模型，如图 6 所示。以《公路护栏安全性能评价标准》(JTG B05-01—2013) 护栏标准段、护栏过渡段和中央分隔带的试验碰撞条件为抗撞结构立柱动态冲击试验的碰撞依据。其中由车辆撞击护栏的示意图(图 7)可知，土基和立柱的相互作用可以简化为如图 7 所示的平行于护栏方向(即 Y 方向)分力，以及垂直于护栏方向(即 X 方向)分力。法规 JTG B05-01—2013 中规定的小型车辆碰撞角度为 20°，不同防撞等级中最高碰撞速度为 100km/h。故针对抗撞结构立柱动态冲击试验，相当于台车以图 7 中垂直于护栏方向(即 X 方向)的速度撞击立柱，即台车碰撞立柱速度与车辆撞击护栏速度满足下列关系：

$$v_x = v \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

其中： v_x 为台车撞击立柱速度； v 为法规中车辆撞击护栏速度； α 为法规中车辆撞击护栏碰撞角度。故台车撞击抗撞结构立柱的碰撞速度为 34.20km/h，碰撞角度为 90°。

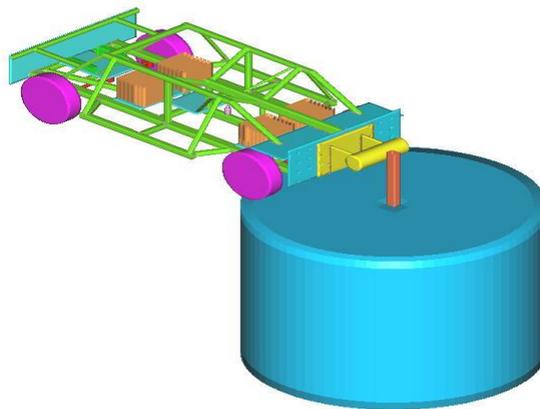


Figure 6. finite element collision model of vehicle and post-foundation

图 6 台车-桩基有限元碰撞模型

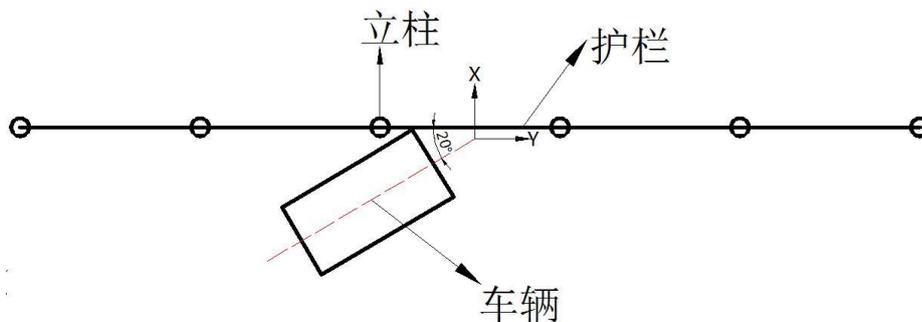


Figure 7. sketch map of vehicle hitting guardrail

图 7 车辆撞击护栏示意图

基于上述建立的台车-桩基有限元碰撞模型，以台车撞击抗撞结构立柱的最大碰撞速度 34.2km/h 进行单因素

试验，并运用圣维南原理确定土基尺寸。即对直径为 2700mm、2800、3000、3200 的基础进行 4 组单因素仿真试验，土基在最广应力（0.04s）时的应力情况如图 8、9 所示：

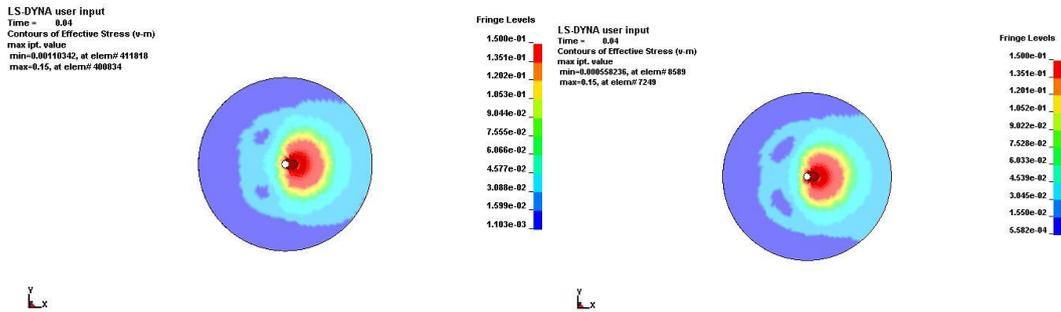


Figure 8. stress at the base diameter of 2700mm and 2800mm
图 8 基础直径为 2700mm、2800mm 时的应力情况

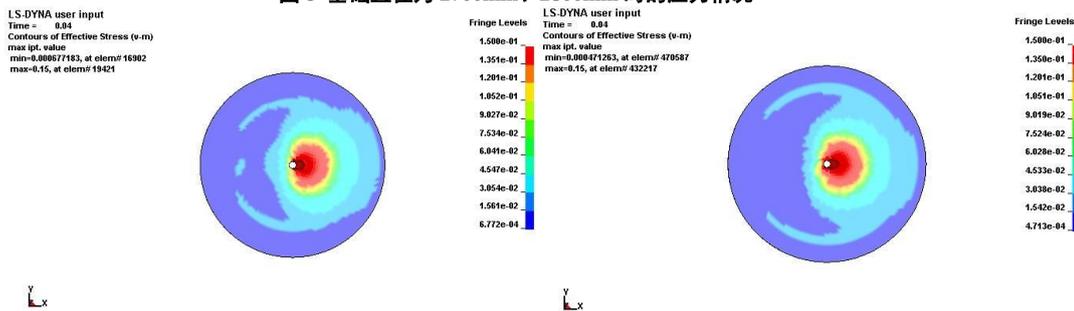


Figure 9. stress at the base diameter of 3000mm and 3200mm
图 9 基础直径为 3000mm、3200mm 时的应力情况

由土基的应力情况可知：按照现有研究建立直径为 2700mm、深度为 2010mm 的圆柱状土基模型存在一定局限性，不能很好地包络土基的应力情况；而通过单因素试验发现：当土基模型的直径达到 3000mm 或以上时，土基的应力情况良好。故确定土基几何模型为圆柱形，直径为 3000mm，深度为 2010mm。

4 抗撞结构立柱动态冲击仿真试验及分析

由《公路交通安全设施设计规范》(JTG D81-2006)可知，抗撞结构立柱在实际安装环境中常见有松土、压实土和混凝土三种安装环境。故针对松土和压实土采用 LS-DYNA 中的 14 号材料 *MAT_SOIL_AND_FOAM 来模拟，模拟的关键是根据松土和压实土的实际性质来调整仿真材料的相关参数；而针对抗撞结构中的混凝土安装环境，则采用 111 号材料 *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE 模拟。

4.1 不同桩基关系对立柱性能的影响

4.1.1 不同桩基关系对圆形立柱性能影响

针对抗撞结构中最广泛使用的圆形立柱，通过上述桩基模拟方法建立台车-立柱有限元仿真碰撞模型，分别进行松土基础、压实土基础和混凝土基础三种仿真试验，碰撞速度为 34.2km/h，碰撞角度 90°。为了评价不同基础对抗撞结构立柱性能的影响，以台车质心加速度和立柱弯折情况为仿真试验的定量和定性指标。仿真过程中，当车辆质心加速度较大或者抗撞结构立柱弯折情况严重时，则表明该桩基关系牢固，有益于立柱性能发挥；反之，则桩基关系差，不利于立柱性能发挥。不同基础与圆形立柱碰撞试验结果如下：

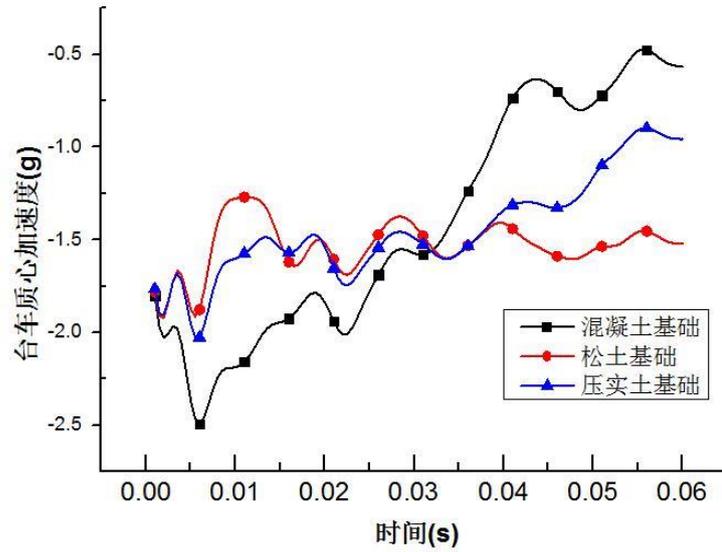


Figure 10. influence of different foundation on the performance of circular post

图 10 不同基础对圆形立柱性能的影响

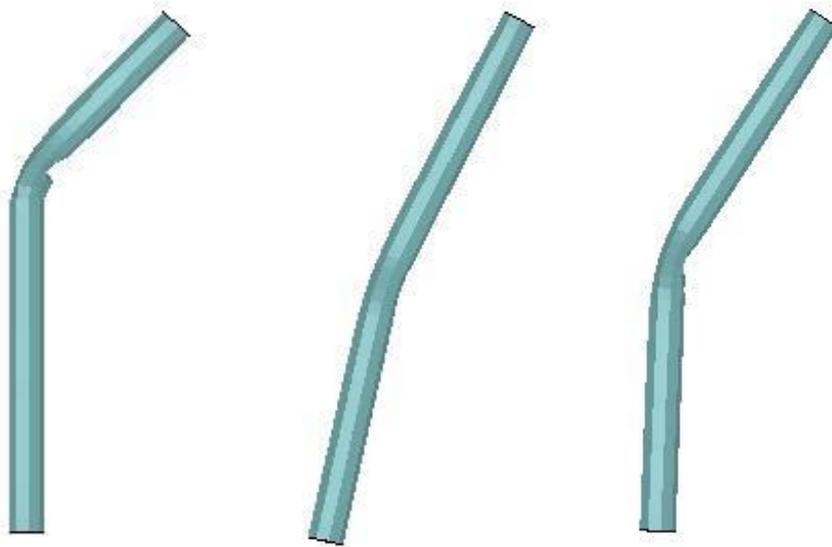


Figure 11. deformation of circular post in three foundations of concrete, soil and compacted soil

图 11 圆形立柱在混凝土、松土和压实土三种基础中的变形情况

由上述仿真试验结果可知：台车与矩形立柱动态冲击试验中，混凝土桩基关系下质心处最大加速度最大为 2.5g，其次是压实土桩基关系下的 2.0g，加速度最小为 1.8g 产生在松土桩基关系下。从台车质心加速度曲线图的后部分及立柱变形情况来看：混凝土桩基关系下立柱弯折点出现基础表面附近，且立柱出现永久失效的迹象（台车质心加速度很小）；压实土桩基关系下立柱弯折点较混凝土桩基关系下低，立柱也出现失效的迹象但未完全失效，对台车的抵抗作用减弱；而松土桩基关系下立柱几乎没出现过弯折的情况，因此加速度相较于前两种基础大（即对台车一直有抵抗作用），但立柱也出现了一定程度的倾斜。

4.1.2 不同桩基关系对矩形立柱性能影响

针对抗撞结构中常用的矩形立柱，也进行松土基础、压实土基础和混凝土基础三种仿真试验，碰撞速度为34.2km/h，碰撞角度90°。不同基础与矩形立柱碰撞试验结果如下：

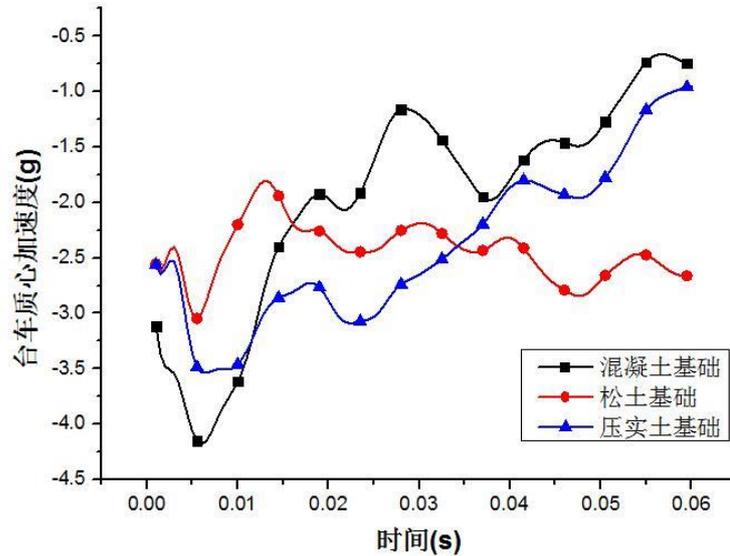


Figure 12. influence of different foundation on the performance of rectangular post

图 12 不同基础对矩形立柱性能的影响

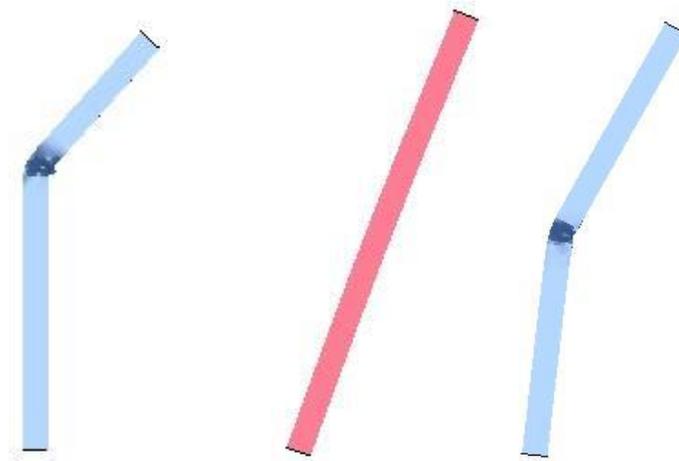


Figure 13. deformation of rectangular post in three foundations of concrete, soil and compacted soil

图 13 矩形立柱在混凝土、松土和压实土三种基础中的变形情况

分析可知：台车与矩形立柱动态冲击试验中，混凝土桩基关系下质心处最大加速度最大为4.2g，其次是压实土桩基关系下的3.5g，加速度最小为3.0g产生在松土桩基关系下。从台车质心加速度曲线图的后部分及立柱变形情况来看：混凝土桩基关系下立柱也发生明显的弯折情况，且弯折点出现在基础表面附近，并伴随永久失

效的迹象（台车质心加速度很小）；压实土桩基关系下立柱弯折点较混凝土桩基关系下低，立柱也出现失效的迹象但未完全失效，且立柱出现轻微倾斜；而松土桩基关系下立柱几乎没有变形，但立柱也出现了较为严重的倾斜，因此加速度曲线后段相较于前两种基础大（即对台车一直有抵抗作用）。

4.1.3 不同桩基关系对椭圆立柱性能影响

针对抗撞结构中椭圆立柱，也进行松土基础、压实土基础和混凝土基础三种仿真试验，碰撞速度为 34.2km/h，碰撞角度 90°。不同基础与矩形立柱碰撞试验结果如下：

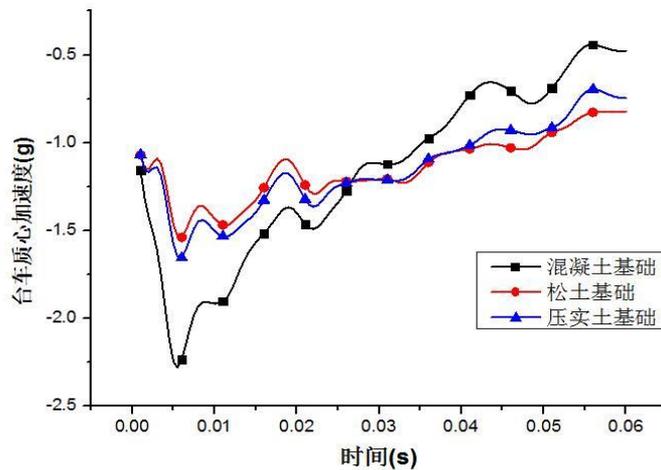


Figure 14. influence of different foundation on the performance of ellipse post

图 14 不同基础对椭圆立柱性能的影响

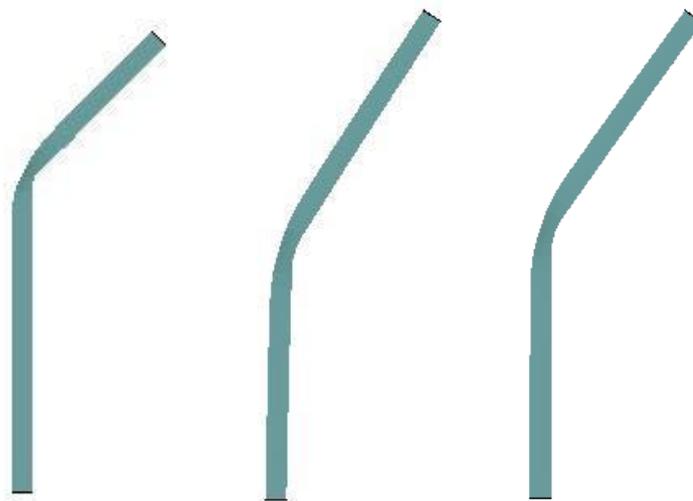


Figure 15. deformation of ellipse post in three foundations of concrete, soil and compacted soil

图 15 椭圆立柱在混凝土、松土和压实土三种基础中的变形情况

可知：台车与椭圆立柱动态冲击试验过程中，混凝土桩基关系下质心处最大加速度最大为 2.25g，其次是压

实土桩基关系下的 1.7g, 加速度最小为 1.5g 产生在松土桩基关系下。从台车质心加速度曲线图的后部分及立柱变形情况来看: 三种桩基关系下立柱发生明显的弯折情况, 弯折程度均较大, 且伴随永久失效的迹象(三种桩基关系下台车质心加速度在试验后期均较小), 但混凝土桩基关系下弯折点较高且程度也较严重; 此外, 压实土桩基关系下相较于松土桩基关系下弯折点稍高, 但松土桩基关系下立柱下端出现细微倾斜情况。

5 结论

通过对松土基础、压实土基础和混凝土基础桩基关系下的圆形、矩形及椭圆等三种典型抗撞结构立柱仿真分析, 实现了抗撞结构在实际安装过程中的常见的安装环境的模拟, 并得出以下结论:

①用材料*`MAT_SOIL_AND_FOAM` 来模拟土基是可行的, 根据实际土基性质调整材料相关参数能实现对抗撞结构立柱实地安装环境(松土和压实土基础)的模拟, 用*`MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE` 能模拟混凝土基础下的实地安装环境。

②通过单因素仿真分析, 发现直径 2700mm、深度为 2010mm 的圆柱状基础不适合本文桩基关系的模拟, 得出直径为 3000mm、深度为 2010mm 的圆柱桩基础满足桩基关系模拟要求。

③通过对比抗撞结构立柱动态冲击试验台车质心处加速度曲线得出, 在圆形、矩形、椭圆形三种抗撞结构典型立柱中, 矩形立柱对台车的阻碍作用最大(即矩形立柱刚度最大), 其次是圆形立柱, 最后是椭圆立柱。

④综合抗撞结构立柱动态冲击试验台车质心处加速度曲线和立柱弯折情况分析, 得出混凝土桩基关系最为牢固, 且立柱弯折点较高; 压实土桩基关系相较于松土桩基关系更强, 弯折点较混凝土基础下低, 而较松土弯折点高。压实土和松土基关系下立柱对台车的阻碍作用是持续的, 而混凝土桩基关系对台车的阻碍作用是短暂的, 因为立柱在混凝土基础下受撞后快速失效。

参考文献(References)

- [1] Lei Zhengbao, Xu Min, Ning Han. The length abnormal model of a new flexible vehicle restraint system. Journal of Changsha University of Science and Technology (NATURAL SCIENCE EDITION), 2015 (3): 21-27.
雷正保, 许敏, 宁寒. 新型柔性车辆约束系统长度变态模型[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2015(3):21-27.
- [2] Li Yong, Yang Runlin. The effect of foundation soil to freight car and corrugated beam guardrail in the collision. Journal of Engineering Science, 2016, 38 (4): 589-594.
李勇, 杨润林. 地基土体对货车与波形梁护栏碰撞效应的影响[J]. 工程科学学报, 2016, 38(4):589-594.
- [3] Lei Zhengbao, Li Lihong, Lei Muxi, et al. New flexible guardrail collision simulation analysis and full-scale crash verification. Vibration and Shock, 2014, 32 (22): 28-31.
雷正保, 李丽红, 雷沐羲,等. 新型柔性护栏碰撞安全性仿真分析及实车验证[J]. 振动与冲击, 2014, 32(22):28-31.
- [4] Yang Jikuang, Kong Cheng, Xiao Ji. Simulation study and improvement of protective performance of double wave guardrail on bus collision. highway Traffic Technology, 2014, 31 (10): 134-140.
杨济匡, 孔成, 肖志. 高速公路双波护栏对客车碰撞的防护性能仿真研究与改进[J]. 公路交通科技, 2014, 31(10):134-140.
- [5] Zhang Weigang, Hu Gaoxian. finite element model research of W-beam guardrail post mounted in soil. Technology of Highway and Transport, 2007, 24 (7): 143-146.
张维刚, 胡高贤. 土基中波形梁护栏立柱的有限元模型研究[J]. 公路交通科技, 2007, 24(7):143-146.
- [6] Lei Zhengbao, Liao Zhuo, Liu Zhuchun. Optimized design of cross-wound cable barrier end anchorage. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2016, 46 (3): 93-98
雷正保, 廖卓, 刘助春. 交叉缠绕式柔性护栏端部锚固优化设计[J]. 山东大学学报(工学版), 2016, 46(3):93-98.
- [7] Bu Qianmiao, Li Yong. Study on Crashworthiness of corrugated beam guardrail in free soil slope. Symposium on Modern Structural Engineering of China. 2015.
卜倩淼, 李勇. 自由边坡土基中波形梁护栏抗撞性能研究[C]. 全国现代结构工程学术研讨会. 2015.
- [8] Ding Hua, Wu Mengxi, Wang Mei, et al. Discussion on the post foundation of guardrail in central divider. Engineering Mechanics, 2008, 19 (1): 125-129.
丁桦, 吴梦喜, 王梅,等. 关于中央分隔带护栏立柱基础的探讨[J]. 工程力学, 2008, 19(1):125-129.
- [9] Herr J E, Rohde J R, Sicking D L, et al. DEVELOPMENT OF STANDARDS FOR PLACEMENT OF STEEL GUARDRAIL POSTS IN ROCK[J]. Transportation Research Record, 2003.
- [10] Sassi A, Ghrib F. Crashworthiness of guardrail posts embedded in cohesionless soils: a parametric study[J]. International Journal of Crashworthiness, 2016:1-17.
- [11] Wu W, Thomson R. A study of the interaction between a guardrail post and soil during quasi-static and dynamic loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(5):883-898.
- [12] Hai-Xia L I, Lei Z B, Xie Y H. Finite Element Modeling of a Guardrail Post Mounted in Soil[J]. Journal of Changchun University of Technology, 2004,2(25):24-25.
- [13] Plaxico C A, Patzner G S, Ray M H. Finite-Element Modeling of Guardrail Timber Posts and the Post-Soil Interaction[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1998, 1647(1647):139-146.
- [14] Sassi A, Ghrib F. Development of finite element model for the analysis of a guardrail post subjected to dynamic lateral loading[J]. International

Journal of Crashworthiness, 2014, 19(5):457-468.

- [15] Jia Ning, Liu Hang, Liang Yaping, et al. Study on the buried way of W-beam guardrail foundation. Highway, 2015 (2): 208-211.
贾宁, 刘航, 梁亚平等. 波形梁护栏基础埋置方式研究[J]. 公路, 2015(2):208-211.
- [16] JTG D81-2006, Standard for design of highway traffic safety facilities. Beijing: General Office of the Ministry of communications, 2006.
JTG D81-2006, 公路交通安全设施设计规范[s].北京: 交通部办公厅,2006.
- [17] JTG B05-01-2013, standard for evaluating safety performance of highway guardrail. Beijing: China Communications Press, 2013
JTG B05-01-2013, 公路护栏安全性能评价标准[s]. 北京: 人民交通出版社,2013.