

Development of the Mechanical Modeling of Vehicle Impact Abutment and Other Column Structures Under Winkler Foundation

Liu Meigang¹, Guo Xiaoyong¹, Song Jie¹, Lei Zhengbao¹

¹ School of Vehicle and Mechanical Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, China, 410004

Email: songjie@stu.csust.edu.cn

Abstract: Based on vehicle collision pier column type structure, based on the Winkler foundation model (expressed in a series of parallel springs and stick pot soil for the role of the transient transverse vibration pile) to establish the constitutive model of the cylinder and the foundation; Based on the principle of d 'alembert, the dynamic equation of the collision system was established, and the collision of the column structures such as the collision bridge pier was quickly analyzed by solving the equation. Compared with the traditional finite element simulation, this method greatly saves the computation time and can detect the collision resistance of the column structure in the project..

Keywords: Winkler foundation; Vehicle collision column structure; D 'alembert principle;

基于 Winkler 地基的车辆撞击桥墩等柱类结构物的力学建模

刘美刚¹, 陈小勇¹, 苟明兴¹, 雷正保¹

¹ 长沙理工大学汽车与机械工程学院, 长沙, 中国, 410114

Email: songjie@stu.csust.edu.cn

摘 要: 本文针对车辆碰撞桥墩等柱类结构物, 基于 Winkler 地基模型 (用一系列并联的弹簧和粘壶表示土对瞬态横向振动桩的作用) 建立柱体与地基的本构模型; 基于达朗贝尔原理, 建立该碰撞体系动力学方程, 通过方程的求解以便快速分析计算车辆碰撞桥墩等柱类结构物的撞力。该方法相对于传统的有限元仿真, 大大节约了计算时间, 在工程中可以检测柱类结构物的抗撞性。

关键词: 文克儿地基; 车辆碰撞柱类结构物; 达朗贝尔原理;

1 引言

汽车的快速发展对人们的生活带来了许多方便, 汽车的碰撞安全也越来越受到人们的关注。汽车在道路行驶时, 如图 1、2 所示, 经常会出现桥墩、电线杆和广告牌等柱类障碍物, 对汽车的行驶安全造成一定的威胁^[1]。虽然桥墩防护结构对桥墩防撞起到一定的作用, 但具体工程中还能出现公路宽度有限、护栏减小车辆可行驶区域等原因无法安置防撞装置, 所以车辆碰撞桥墩等柱类结构物的碰撞力的计算相当重要。



Figure 1. Cabin vehicle-bridge collision



Figure 2. Dump truck-bridge collision

近年来,如图 3、4,国内外一些研究者针对防撞杆进行了实车碰撞试验和仿真^[2,3,4,5]。这类防撞杆主要用于重要结构物周围,防止意外车辆或恐怖袭击车辆驶近结构物。Buth 等进行了两次大型卡车与桥墩的实车碰撞试验,作者对试验结果进行了分析并给出了关于桥墩防撞设计的建议:1)将 AASHTO《桥梁设计规范》中撞击力设计值由原来的 1800 kN 提高至 2700 kN;2)撞击力作用位置由原来的 1.2 m 提高至 1.5 m;3)撞击作用方向由任意方向改为与公路成 0-15°夹角的方向^[6]。这些建议后来均被美国 AASHTO《桥梁设计规范》(2013)所引入。与实车碰撞试验相比,大多数研究者采用落锤冲击试验装置或摆锤试验装置进行相关研究。这些试验中的撞击体一般均由实心钢材制成,刚度非常大,因此与真实车辆特性有着非常大的区别。这类试验有助于了解一般性的撞击规律,但其试验结果很难直接用于结构防车辆撞击设计。

由于车辆撞击试验研究的成本较高,目前大多数研究者采用数值模拟的方法对车辆撞击桥墩等柱类结构物进行研究,特别是采用有限元分析方法^[7,8]。Gomez 和 Alipour(2014)对卡车撞击钢筋混凝土桥墩进行了有限元分析,其中桥墩模型下部采用了弹性基础。重点分析了桥墩箍筋间距等对桥墩抗车辆撞击能量的影响^[9]。数值模拟虽然相比较于传统的有限元仿真模型减少了时间和成本,但计算模型较为复杂且很难考虑地基对桥墩等柱类结构物的撞击力影响。因此,寻找一种成本低廉且能考虑实际地基对桥墩等柱类结构物影响下车辆撞击力计算方法对于结构防车辆撞击研究具有十分重要的意义。



Figure 3. The car crash the column

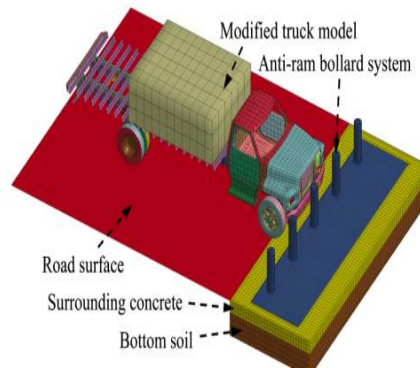


Figure 4. The simulation of vehicle collision column

2 地基模型和地基参数的计算

Nvoak(1974)得出了粘弹性介质中的弹簧和阻尼常数,这种近似的土的模型在动力分析中得到了较理想的结果。基于 Winkler 地基假设,即用一系列并联的弹簧和粘壶表示土对瞬态横向振动桩的作用, Winkler 参数 k (单位长度桩周土弹簧刚度系数)和 c (单位长度桩周土粘壶阻尼系数)。尽管这个假设忽略了土层之间的剪力传递,仍然被证明对于桩的横向静力和动力反应分析是一种行之有效的方法^[11,12]。

Winkler 模型多年来被很多学者广泛的应用在桩土研究中,主要的原因是:模型计算的结果与严格解的相吻合程度很高;可以考虑非线性的情况,主要包括材料在竖向和外荷载作用下的非线性;改变阻尼器的并联形式可以用来求解外荷载时动力的情况;相对三维连续介质方法和数值模拟的方法,模型的计一算工作量小,速度快。

桩周土模拟为动力文克尔地基,土的动反力用连续分布的弹簧和阻尼器模拟。弹簧系数和阻尼系数可用下式表示,即

$$k = \pi \rho_s v_s^2 (-1 + 4\eta - \eta^2) / (2\eta^2)$$

$$c = 2\pi \rho_s v_s (1 + \eta) / (2\eta)$$

$$\eta = \frac{v_s}{v_1} = \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)}}$$

其中, r_0 为桩半径; ρ_s 为桩周土密度; η 为桩周土泊松比 ν 的函数; v_s 和 v_1 分别为桩周土的剪切波速和纵波波速^[12]。

3 碰撞模型的建立与理论的推导

考虑到碰撞过程中的车辆和立柱的动力响应耦合关系, 忽略掉立柱的侧向变形, 将碰撞系统简化为如下图 5 所示的质点-刚性杆-地基系统, 其中, m_1 表示碰撞车辆的质量; m_2 表示立柱的质量; k_1 表示接触点模拟弹簧刚度; h 表示立柱质心到碰撞接触点的距离; l_1 表示立柱质心到地面的距离; l_2 表示立柱预埋深度; k 、 c 表示 Winkler 地基参数。

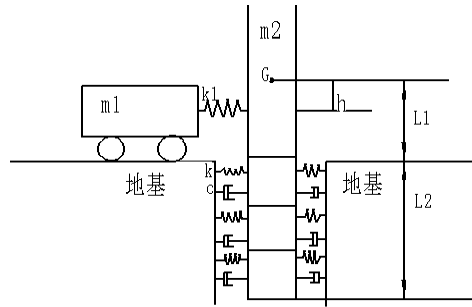


Figure 5. Winkler foundation model

基于达朗贝尔原理^[13,14,15], 对汽车碰撞桥墩等柱类结构物的力学模型进行碰撞分析得,

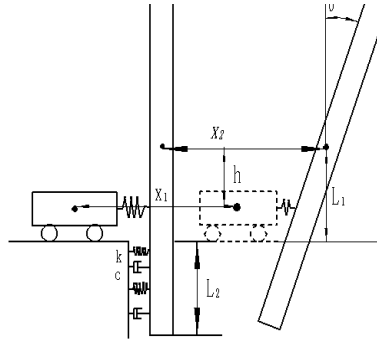


Figure 6. Collision bridge pier model

设碰撞过程中, 汽车位移为 x_1 ; 立柱重心水平位移为 x_2 ; 立柱转动角度为 φ 。基于达朗贝尔原理, 建立运动方程:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + k_1 [x_1 - (x_2 - h\varphi)] = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + k_1 [x_1 - (x_2 - h\varphi)] + \int_0^{l_2} k_2 [x_2 - (l_1 + x)\varphi] d_x + \int_0^{l_2} c [\dot{x}_2 - (l_1 + x)\dot{\varphi}] d_x = 0 \\ J\ddot{\varphi} + k_1 [x_1 - (x_2 - h\varphi)]h + \int_0^{l_2} \{k_2 [x_2 - (l_1 + x)\varphi](l_1 + x)\} d_x + \int_0^{l_2} \{c [\dot{x}_2 - (l_1 + x)\dot{\varphi}](l_1 + x)\} d_x = 0 \end{cases}$$

式中：J 为转动惯性矩； k_1 为碰撞点模拟弹簧钢，其主要取决于车辆碰撞刚度 k_3 和立柱抗侧弯刚度 k_4 ；其

中 $k_3 = \frac{3E_C I_C}{l^3}$ ，（ E_C 、 I_C 、 l 分别为立柱的弹性模量、换算截面惯性矩和碰撞有效高度）。碰撞点模拟弹簧刚度 $k_1 = \frac{k_3 k_4}{k_3 + k_4}$ 。则汽车与立柱的碰撞力 $F = k_1 [x_1 - (x_2 - h\varphi)]$

4 结论

本文通过以 winkler 地基基础为模型，构建柱类结构物于土壤的本构关系。很好的解决了桥墩等柱类结构物在车辆碰撞下的动态状况，较之前未考虑地基影响的力学模型能更加真实的。相比较于有限元仿真的方法，大大节约了有限元建模和仿真运算的时间，在桥墩等柱类结构物碰撞力检测方面可以得到广泛推广，从而提高汽车碰撞桥墩等柱类结构物的安全性。

参考文献 (References)

- [1] LJ Xu X Lu ,H Guan ,YS Zhang.Finite element and simplified models for collision simulation between over-height trucks and bridge superstructures[J].《Journal of Bridge Engineering》. 2013 , 18 (11) :1140-1151.
- [2] B Hu ,GQ Li.Maximum Impact Force of Truck Frontal Crashing into Antiram Bollard Systems.《Journal of Structural Engineering》, 2016 , 142 (12) :04016125.
- [3] N Zhu, Y Kim ,T El-Korchi.Nonlinear Analysis of Bridge Piers under High Impact Vehicle Collision[J].Structures Congress , 2014 :667-676
- [4] PF Silva ,WD Mesia ,D Marzougui ,SS Badie.Performance evaluation of flexure impact resistance capacity of reinforced concrete members[J].《Aci Structural Journal》, 2009 , 106 (5) :726-736
- [5] AM Remennikov , S Kaewunruen.Impact resistance of reinforced concrete columns: experimental studies and design considerations[J].Faculty of Engineering-papers , 2006
- [6] CE Buth ,MS Brackin , WF Williams , G Fry.Collision Loads on Bridge Piers: Phase 2. Report of Guidelines for Designing Bridge Piers and Abutments for Vehicle Collisions[J].《Texas State Publications》, 2011
- [7] A Pajouh ,SG Lim.Collision Loads on Bridge Piers: Phase 2. Report of Guidelines for Designing Bridge Piers and Abutments for Vehicle Collisions[J].《Texas State Publications》 2011
- [8] Mojdeh Asadollahipajouh.Experimental and Numerical Investigation of Impact Loads on a Group of Piles[J].ResearchGate. December 2015 with 5 Reads
- [9] NL Gomez ,A Alipour.Study of Circular Reinforced Concrete Bridge Piers Subjected to Vehicular Collisions[J].Structures Congress , 2014 :577-587
- [10] Jean-Louis Briaud, Marc Ballouz. LATWAK: impact test to obtain pile lateral static stiffness[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1996,122(6): 437—444.
- [11] Shintaro Yao, Toyooki Nogami. Lateral cyclic response of pile in viscoelastic Winkler subgrade[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1994, 120(4):758—774.
- [12] XI Ya-nan , LIU Dong-jia , GAO Yun .Numerical simulation of transient vibration response of integral piles[J]. JO U R N A L O F H E F E I U N I V E R S I T Y O F T E C H N O L O G Y . 2009 , 32 (8) :1233-1236
- [13] M Izadi ,AK Sanyal , E Samiei , SP Viswanathan.Discrete-time rigid body attitude state estimation based on the discrete Lagrange-d'Alembert principle[J].American Control Conference , 2015 :3392-3397
- [14] CH Glocker.Discussion of d'Alembert's Principle for Non - Smooth Unilateral Constraints[J].ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mecha... , 2015 , 79 (S1) :91-94
- [15] M Izadi ,AK Sanyal , E Barany , SP Viswanathan.Rigid body motion estimation based on the Lagrange-d'Alembert principle[J].IEEE Conference on Decision & Control , 2015 :3699-3704