

粗粒土颗粒接触特性对路基动应力衰减影响研究

王建立¹, 蒲阳², 杨晓明³, 王文炳³, 方明镜^{4*}

(1. 安徽省交通控股集团有限公司, 安徽 合肥 230088; 2. 中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙 410004; 3. 安徽省高速公路试验检测科研中心有限公司, 安徽 合肥 230601; 4. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:粗粒土作为一种典型的不均匀散粒体材料,其力学性质较为复杂,常需要从细观角度研究其宏观力学特性,颗粒细观接触特性可直接反映粗粒土强度及其力学性能,目前对接触特性参数影响的研究多集中于表征其强度特性,对其外荷载作用下的动力响应特性研究较少。基于此,采用颗粒离散单元法,建立粗粒土路基冲击应力加载数值分析模型,研究不同颗粒接触特性参数与动应力衰减规律间的关系,分析颗粒摩擦系数,颗粒间接触刚度对粗粒土动应力衰减的影响。结果表明:随着颗粒摩擦系数的增加,应力衰减的速率也随之增大;颗粒接触刚度越高,其对应力敏感性越强,越不易被压实,其内部应力传递越不均匀,且应力衰减越慢,整体趋势呈指数衰减。通过实际动应力加载试验,验证了数值分析结果的准确性,相同条件下,实际试验结果与数值分析结果相近。

关键词:公路路基;粗粒土;接触特性;动应力;衰减

1 前言

影响路基动应力大小的参数主要有载重、路面平整度、路面结构以及填料特性等^[1],对于粗粒土,因其具备良好的工程特性,被作为一种优良的路基填料而广泛应用于公路路基填筑。粗颗粒土大多是由不易风化的碎石颗粒和土所组成^[2],不同于砂和一般细粒土,属于不均匀土石混合料,其组成伴随着颗粒的重排列及细颗粒填充粗颗粒等内部细观结构的改变^[3],细观结构的变化直接影响宏观力学特性的改变。从组成上看,粗粒土是由不同形状大小的颗粒互相接触且随机排列组合形成的混合体结构,从本质上其结构强度由颗粒间的接触应力所表征,内部应力也是通过颗粒与颗粒之间的接触进行传递,为从本质上揭示其力学性能,有必要对粗粒土颗粒细观接触特性进行研究。

介质颗粒接触特性无法从宏观的角度进行研究,PFC离散单元法作为一种研究不连续土颗粒、散体材料或流动颗粒体的非连续介质分析方法^[4],能够很好地从微观的角度模拟粗粒土材料力学特性^[5]。PFC离

散单元法利用牛顿第二定律和力一位移法则确定颗粒的运动和接触面上的力,其核心是颗粒接触特性,即接触本构。接触本构由表征刚度、摩擦等特性的细观模型和参数描述^[6]。周健等^[7]通过引入不同颗粒的接触本构模型,研究适用于砂土和黏性土等不同颗粒材料的颗粒模型,研究了细观接触参数对宏观力学响应的影响;冯大阔等^[8]通过试验研究,分析了粗粒土与其结构接触面间的相互作用现象,总结了在常刚度法向边界条件下二者相互作用的基本规律;Renzo等^[9]基于材料的力学特性,研究得出了颗粒初始切向接触刚度与法向接触刚度的关系;同样Mindlin^[10]假设两颗粒弹性体为椭圆接触,也对颗粒的法向接触刚度和切向接触刚度关系进行了研究;邢纪波^[11]根据离散单元中的应力波传播条件,得到了颗粒间接触刚度的确切表达式。但是,不同颗粒接触特性参数与动应力衰减规律间的关系研究不够充分。

颗粒间的接触行为主要受颗粒间摩擦力和颗粒本身刚度的影响,鉴于此,该文以PFC2D为工具,建立粗粒土路基冲击应力加载数值分析模型,以颗粒摩擦系数、颗粒间接触刚度作为研究变量开展微观参数的

收稿日期:2020-02-23(修改稿)

基金项目:安徽省交通控股集团交通科技攻关项目(编号:JKKJ-2018-13),安徽省2018年度交通运输科技进步计划项目(编号:2018-029)

作者简介:王建立,男,教授级高工, E-mail: 1452056580@qq.com

*通信作者:方明镜,男,博士,副教授, E-mail: mingjingfang@whut.edu.cn

敏感性分析,研究变量对粗粒土动应力衰减的影响^[12]。同时参照现行规范规定标准轴载作用下路基工作区应力衰减比例 20% 为标准,研究冲击荷载下应力影响深度。最后,选取与数值模拟相应的填料开展现场试验,研究加载动应力随路基深度的变化规律,以验证数值模拟结果。

2 数值模拟

2.1 数值建模

结合粗粒土的力学性能,综合考虑粗颗粒土是由细颗粒填充粗颗粒而组成的土石混合体,属于非黏聚性材料,其颗粒间黏聚力可忽略不计。因此,选取颗粒单元之间的连接为线性接触,设置颗粒与颗粒间的本构模型为线性接触模型;加载板与颗粒之间也设为线性接触。主要设置的相关参数有颗粒弹性模量 E_c 、刚度比、初始空隙率、颗粒密度、摩擦系数。

采用 PFC2D 内置 fish 语言并根据颗粒级配编写程序,在边界范围内按照指定条件生成颗粒集合体,建立路基横断面范围内的单层中粗颗粒填料二维堆积模型。综合考虑加载板尺寸、颗粒尺寸及数量等因素,取模型宽度 $L=0.8\text{ m}$,高度 $H=0.8\text{ m}$,以 3 组墙(wall)单元构成模型边界,墙体定义柔性接触,以减少边界尺寸效应,模型顶部中央生成 Clump 以模拟加载板。对于颗粒生成数目,考虑计算效率,将 2 mm 以下的颗粒按照质量所占比例等量代换为 2~60 mm 的相关颗粒,试验所用粒径组成及其质量占比见表 1。为简化分析考虑设定颗粒密度相同,设为 $2\,500\text{ kg/m}^3$ 。

表 1 数值模型的土样级配

粒径组/mm	质量百分数/%	粒径组/mm	质量百分数/%
60~40	16.94	10~5	18.23
40~20	19.81	5~2	23.84
20~10	21.18		

2.2 模型参数

根据室内试验结果,并参考相关文献参数选取方法^[13-15],结合颗粒流模型各细观接触特性参数与宏观参数之间的关系,通过模拟过程的反复调试,得到一组与土体实际宏观参数相匹配的细观参数值(表 2)。

2.3 模型加载与应力监测

根据 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》^[16],100 kN 标准轴载作用下,轮胎接地压强为 0.7

MPa。因此,考虑到路面结构对应力的扩散作用^[17],同时考虑规范对于路床动模量的设计要求^[18],即路床顶部动态模量要求不低于 0.066 MPa,设置加载板上瞬态冲击应力为 0.066 MPa,作用时间设定为 20 ms,加载力时程如图 1 所示。

表 2 加载模型细观参数

项目	细观参数	单位	取值
Ball	密度 ρ	kg/m^3	2 500
	摩擦系数 f		0.7
	初始弹性模量 E_c	Pa	2×10^7
	刚度比 k_n/k_s		2.5
	空隙率 n		0.1
Ball—wall	法向刚度 k_n	Pa	2.5×10^6
	切向刚度 k_s	Pa	2.5×10^6
Clump—ball	密度 ρ	kg/m^3	3 167
	接触刚度 k_n/k_s	Pa	1×10^7

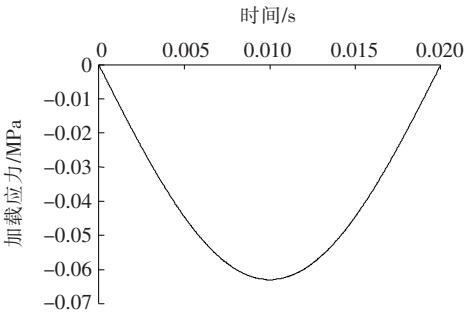


图 1 半正弦加载力时程曲线

因 PFC 软件中不能对墙体施加力,所以必须使用颗粒边界条件。通过构造由颗粒组成的 Clump 作为加载装置。固定 Clump 在水平方向的位移和角速度为 0,使之不产生水平位移和旋转,并对 Clump 设置加载力,从而实现加载。

采用上述方式对压实路基体进行加载,以检测粗粒土路基内部动应力衰减规律及影响深度。该模型通过 Measure 测量圆命令在竖直方向设置一系列测量圆以监测模型不同深度处的应力大小。

3 结果与讨论

根据实际工况,在粗粒土路基加载过程中,在保证试样尺寸和级配相同的条件下,分别研究动应力对颗粒接触刚度和颗粒摩擦系数的敏感性,并对其衰减规律进行分析。

3.1 颗粒摩擦对动力衰减的影响

PFC2D中变化颗粒间的摩擦力可以反映出颗粒粗糙度对动力特性的影响。据此,分别设置4种不同摩擦系数,其他参数相同,得到应力随深度的衰减曲线如图2所示。

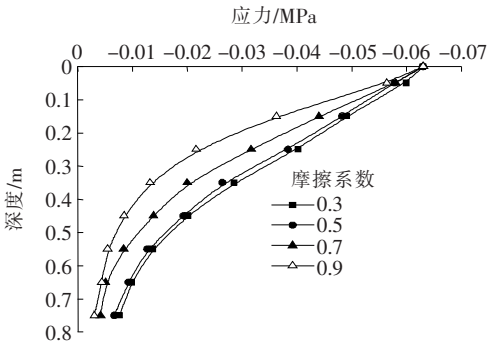


图2 不同摩擦系数下的动应力衰减

图2表明:摩擦系数会一定程度上影响动应力的衰减。随着颗粒摩擦系数的增加,应力在土体内部的传递整体趋势是开始随深度的增加,应力衰减较快,随后衰减速率开始减慢。同时,随着摩擦力的增大,应力衰减的速率也随之增大。可得出在0.3~0.9的4种摩擦系数条件下应力的影响深度范围为45~58 cm。

3.2 颗粒接触弹性模量对动力衰减的影响

PFC2D中,在颗粒大小分布及 k_n/k_s 值一定时,细观接触模量 E_c 和宏观模量 E 、颗粒接触刚度线性相关。 E 随着 E_c 的增大而增大^[6],颗粒法向刚度 k_n 由 $k_n = AE_c/L$ 确定,再由 k_n/k_s 的值确定切向刚度 k_s 的大小。分别设置4种接触弹性模量以表征不同接触刚度,其他参数相同,得到应力随深度的衰减曲线如图3所示。

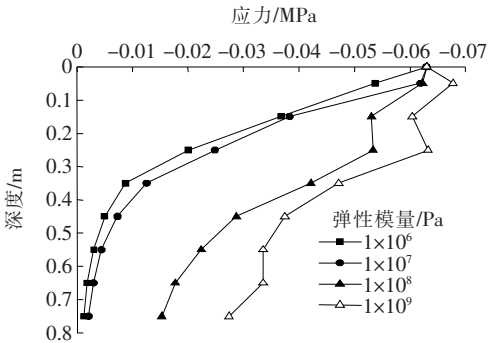


图3 不同接触模量下的动应力衰减

图3表明:接触弹性模量 E_c 很大程度上影响动应力的传递。相同条件下,随着颗粒接触弹性模量的增大,其接触刚度越高,应力影响越深,动应力衰减与

其接触刚度呈负相关;且随着接触模量的增大,应力在土体内部的传递开始呈现非规律性衰减,由图3可知:在接触模量由 1×10^7 Pa变化到 1×10^8 Pa时,其内部应力不均匀性突然增大,甚至在模量为 1×10^9 Pa条件下,内部应力出现比施加应力大的情况。分析原因,因粗粒土是由土石混合形成,其内部分布很不均匀,材料特性属于非连续性介质,颗粒刚度越大,其对应力的敏感性越强,不同级配处的应力敏感效应不同,从而导致其内部应力的传递呈现应力波动现象;此外,颗粒刚度越大,越不易挤压密实,对应力的传递扩散作用越不明显,导致应力影响就越深。可得出在4种接触弹性模量 E_c 条件下动应力的影响深度为32 cm以上。

4 现场试验研究

4.1 试验方案

针对粗粒土路基冲击荷载加载过程,为与数值分析理论计算值进行对比和验证,对粗粒土进行了动应力影响深度的现场加载试验。该试验在填土最底部预先埋设压力盒,通过在路基顶部施加冲击动荷载,采集加载状态下不同结构层深度位置处的应变值,通过压力盒标定系数和标定公式换算得出其层内应力值,最终得出应力衰减规律及影响深度。

4.2 动应力衰减

根据试验结果,得到加载动应力随深度的变化情况如图4所示。

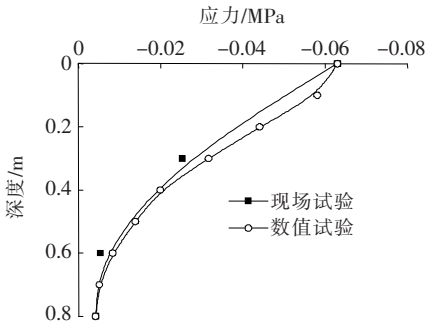


图4 现场试验与数值试验结果对比

从图4可看出:实际条件下,粗粒土中动应力的衰减呈指数衰减,初始衰减较快,在50 cm深度处即衰减了80%左右,其衰减到20%应力影响深度为49 cm。对比现场试验与数值分析结果表明:数值试验结果与实际试验结果十分接近,由此可判断此次数值试验结果较为科学,可比较真实地模拟实际工况下应力衰减情况。

5 结 论

以细观力学参数影响宏观力学特性为背景,通过数值分析模拟粗粒土路基动力加载过程,以颗粒接触刚度和颗粒摩擦系数作为研究变量,分析粗粒土路基在不同接触特性下的动应力衰减情况,并通过现场动应力影响深度试验验证相同条件下数值分析结果的准确性和真实性,得到以下结论:

(1) 在冲击动载作用下,随着粗粒土颗粒摩擦系数的增加,应力衰减的速率也随之增大;且整体趋势是开始随深度的增加,应力衰减较快,随后衰减速率减慢,并呈指数衰减。

(2) 在冲击动载作用下,粗粒土颗粒接触刚度越高,其对应力敏感性越强,越不易被压实,其内部应力传递越不均匀,且应力衰减越慢,影响深度越深。

(3) 采用 PFC2D 进行粗粒土数值试验可比较真实地模拟实际工况下应力衰减情况。

(4) 与现行路基设计规范中路床顶部动态模量设计要求一致的冲击动应力 0.066 MPa 作用下,压实粗粒土填料路基因颗粒间较好的接触特性,其动应力影响深度可达到 50 cm,即可采用冲击动应力分层检测路基压实质量具有可行性。

参考文献:

- [1] 张静波,何荷,王鹏,等.路基动压应力的现场测试分析[J].中外公路,2017,37(2):32-35.
- [2] 冯忠居,张永清.粗粒土路基的压实试验[J].长安大学学报(自然科学版),2004,24(3):9-12.
- [3] 原通鹏,高久平.粗粒土的室内试验研究[J].公路工程,2014,39(5):279-281.
- [4] Itasca Consulting Group, Inc., PFC2D (Particle Flow Code in 2 Dimensions), Version1. 1 [Z]. Minneapolis,

MN:ICG,1999.

- [5] BOLTON M D. The Role of Micro-Mechanics in Soil Mechanics[R]. International Workshop on Soil Crushability Yamaguchi University, Japan,1999.
- [6] 徐小敏,凌道盛,陈云敏,等.基于线性接触模型的颗粒材料细-宏观弹性常数相关关系研究[J].岩土工程学报,2010,32(7):991-998.
- [7] 周健,贾敏才.土工细观模型试验与数值模拟[M].北京:科学出版社,2008.
- [8] 冯大阔,张嘎,张建民,等.常刚度条件下粗粒土与结构接触面三维力学特性的试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(10):1 571-1 577.
- [9] DI Renzo A,DI Maio F P. Comparison of Contact-Force Models for Simulation of Collision in DEM-Based Granular Flow Codes[J]. Chemical Engineering Science,2004,59:525-541.
- [10] MINDLIN R D. Compliance of Elastic Bodies in Contact [J]. Journal of Applied Mechanics,1949,71(3): 258-269.
- [11] 邢纪波,俞良群,张瑞丰,等.离散单元法的计算参数和求解方法选择[J].计算力学学报,1999,16(1):47-52.
- [12] 严守靖,刘敬辉,杨泽众,等.沥青路面路基工作区深度研究[J].中外公路,2018,38(5):14-18.
- [13] 耿丽,黄志强,苗雨.粗粒土三轴试验的细观模拟[J].土木工程与管理学报,2011,11(4):24-29.
- [14] 胡敏云,肖斌,张旭俊,等.粗粒土细观组构分析的影响因素研究[J].浙江工业大学学报,2018,46(3):342-349.
- [15] 刘勇,朱俊樸,闫斌.基于离散元理论的粗粒土三轴试验细观模拟[J].铁道科学与工程学报,2014,11(4):58-62.
- [16] JTG D50-2017 公路沥青路面设计规范[S].
- [17] 杨彬,李志勇,董城.基于路基动应力的路基工作区深度确定方法研究[J].公路工程,2014,39(2):115-118.
- [18] JTG D30-2015 公路路基设计规范[S].