

文章编号: 1000-7598(2010)01-0076-05

多荷载作用下层状土路基的力学特性研究

路军富¹, 刘立², 王明年¹, 李培楠¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 西华大学 建筑与土木工程学院, 成都 610039)

摘要: 依据荷载叠加理论, 建立了动、静荷载耦合作用下的加载模型, 并提出了组合荷载、组合应力、组合沉降变形等概念; 根据相似理论建立层状土路基模型, 通过室内相似模型试验, 对层状土路基在动荷载和静荷载耦合作用下的应力、变形发展规律进行研究, 保持动载不变, 通过改变静载的大小, 研究动、静组合荷载作用下层状土路基的应力和沉降变化规律。结果表明: 层状土路基中, 各层的组合应力和组合变形随组合荷载的增加而增大, 且呈线性变化; 组合荷载、沉降变形随着深度的增加呈非线性减小, 并成指数函数递减。其结果为公路路基的设计、施工、运行和维护提供了参考依据。

关键词: 路基; 模型试验; 组合荷载; 组合应力与组合变形

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Study of mechanical characteristics of layered subgrade under more loads

LU Jun-fu¹, LIU Li², WANG Ming-nian¹, LI Pei-nan¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: The loading model of the static load and dynamic load being acted at the same time was established according to the superposition theory. The concepts, for example, combinatory load, combinatory stress and combinatory deformation, were put forward. At the same time, it provides the basis for continuing study the mechanical characteristics of layered subgrade under combinatory loads. Based on the similarity theory, through the resemble model test, the variation of the layered subgrade soil stress and deformation is discussed when the static load and dynamic load are acted at the same time. The variation of stress and deformation of the layered subgrade soil is discussed under keeping the dynamic invariable and changing the static load. The results show that: the combinatory stress and the combinatory deformation of layered subgrade linearly increase with the increasing amount of the combinatory load, the combinatory stress and the combinatory deformation of layered subgrade nonlinearly decrease with the increasing amount of the depth; the rule is exponential function. In conclusion, these results are instructive for the design, construction, operation and maintenance of layered subgrades.

Key words: layer subgrade; model test; combinatory load; combinatory stress and deformation

1 引言

随着国民经济的发展和社会生产力的提高交通运输业迅速发展, 交通量逐渐增大, 堵车以及道路维修时常发生, 引起路基承受路面传来的荷载变得日益复杂, 由于复杂荷载对路基土的耦合作用导致确定路基土力学特性困难, 特别是对于层状土路基其力学特性更加复杂, 层状土路基可能产生过量的应力、变形而损坏, 因此研究多荷载作用下层状土路基的力学特性对其设计、施工具有工程意义。

目前国内外对荷载作用下路基土的力学特性进行了大量地研究, 但均为单一介质土、单一荷载作用下的力学特性^[1-6], 而关于多荷载作用下层状土路基的力学特性研究缺乏, 因而研究多荷载作用下层状土路基的力学特性具有创新性。

本文依据相似理论, 以都汶高速公路多层夯实路基为背景, 通过室内相似模型试验, 研究层状路基土在动荷载和静荷载耦合作用下的应力、变形发展规律。通过改变静载的大小, 研究动静组合荷载作用下层状土路基的应力和沉降变化规律。

收稿日期: 2008-05-12

基金项目: 四川省人事厅人才培养基金项目 (No. 06206033)。

第一作者简介: 路军富, 男, 1978年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程和地下工程方面的研究工作。E-mail: lujunfu@126.com

2 模型试验设计

2.1 试验模型

根据几何相似原理和模型试验的实际情况确定结构尺寸, 采用与实际工程相似的材料和结构。路堤模型尺寸底宽 120 cm, 顶宽 40 cm, 模型分层填料并分层夯实, 以达到层状土路基的目的。每 12 cm 厚度为一夯实层, 人工夯实, 填实厚度达到 24 cm 时开始放坡, 坡度比值为 1:1.5, 见表 1。在模型制作过程的同时, 按位置要求埋设土压力盒和位移计。

表 1 路基路面模型结构

Table 1 Structure of pavement and subgrade model

参数	结构名称					
	地基			基层	面层	
	黏土	卵石土	粉质黏土	黏土	粗砂	混凝土板
厚度/cm	12	12	24	6	2	4

2.2 荷载设计

2.2.1 荷载叠加模型

根据荷载的作用形式, 本文所谓的组合加载为在路面上先加静载 P_S , 然后再加一个正弦波形的动载 $P(t)$, 静载和动载共同作用下层状土路基内部发生应力和变形, 如图 1 所示, 建立的加载模型为

$$P_{SD} = P_S + P_D = P_S + q \sin(\omega t) \quad (1)$$

式中: P_S 为不随时间变化的荷载即静载; P_D 为随时间变化的荷载即动载; P_{SD} 为动静组合后的荷载, 称为组合荷载。

本文把组合荷载作用下层状土路基中产生的土压力和沉降变形称为组合应力和组合变形。

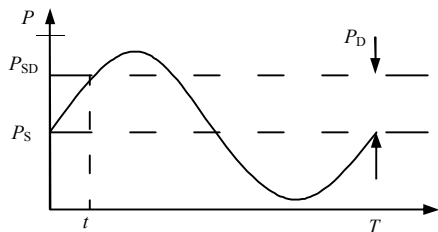


图 1 加载模型图
Fig.1 Loading model

2.2.2 加载装置

(1) 静荷载加载设计

本文中静载主要指路基施工或运营维护时来自路面上的静止荷载或准静载。整个加载装置设备自上到下依次为: 反力梁—压力环—千斤顶—路面,

静载通过千斤顶逐级加载, 荷载步进为 5 kN。

(2) 动荷载加载设计

当车辆以一定速度在路面上行驶时, 由于自身的振动和路面的不平整, 车轮实际上是以一定的频率和振幅在路面上运转, 本文采用带偏心轮的振动电机模拟室内模型上的车辆荷载, 动载加载过程中保持动载的作用频率不变。

2.2.3 数据量测系统

路基土中的应力和位移值通过 DYB-2 型土压力盒和位移计采集, 路基土中传感器的布置形式, 如图 2 所示。

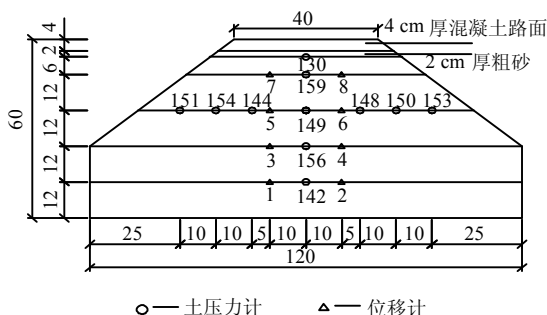


图 2 位移传感器与土压力传感器布置图 (单位: cm)
Fig.2 Disposal chart of sensor of displacement and stress (unit: cm)

3 试验结果及分析

组合加载试验是为考察动静荷载耦合作用下路基土各结构层的应力和变形的变化规律, 特别是具有特殊地质条件的层状路基。试验中在保持动载频率和大小不变的情况下缓慢改变静载的大小, 测出各层土压力传感器波形的变化特征, 计算出组合荷载作用下的波峰值即最大土压力, 并分析路基土中沿深度和横行方向的土压力变化特性。根据位移计的读数, 分析竖向位移变化特征。

3.1 层状土路基中竖向应力

3.1.1 沿深度方向竖向压应力

图 3 为保持动荷载不变的情况下路基土中沿深度方向的组合应力随静载的变化关系。分析图 3 可知, 路基土中各土层的组合应力随静荷载的增加而增大, 且近视呈线性变化, 直线方程可归纳为: $y = ax + b$, b 为竖轴截距, 表示静载为 0 时, 动荷载引起的土压力值, 相关系数达 0.99。静载为 15 kN 处, 停止施加动载时, 曲线骤然下降, 其原因这是由于动载变为 0, 组合荷载变为单一作用下的静载, 组合应力突然减小的缘故。

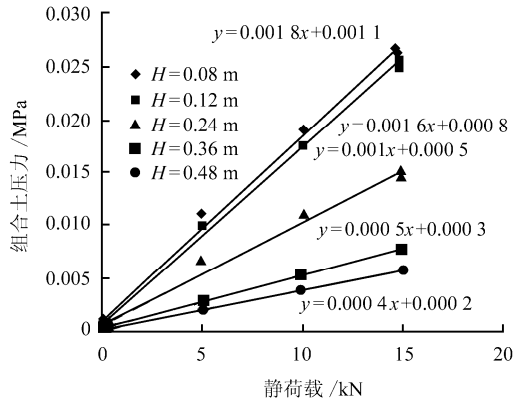


图3 竖向组合应力与静荷载关系曲线图

Fig.3 Curves of combinatorial stress and static load

图4为路基土组合应力随深度方向的变化规律。分析图4可知,对于层状土路基,土中组合压力随着深度的增加而降低,呈非线性变化趋势,满足3次多项式 $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ 的变化规律,其中 a 、 b 、 c 随荷载的变化而不同; d 为静载为0时动荷载产生的应力,相关系数达0.99。

由于路基土为层状土,应力传递的介质不同,从而组合应力传递的大小和速度不同,以致组合应力传递为非线性,特别在各土层介质交界处变化最大。引入应力衰减速率的概念 v ,即单位路基深度内组合应力变化量:

$$v = \Delta P_{SD} / \Delta H \quad (2)$$

式中: v 为组合应力沿深度方向衰减速率 (MPa/m); ΔH 为路基土中沿深度方向某位置层厚度(m); ΔP_{SD} 为 ΔH 土层厚度内组合应力变化值(MPa)。

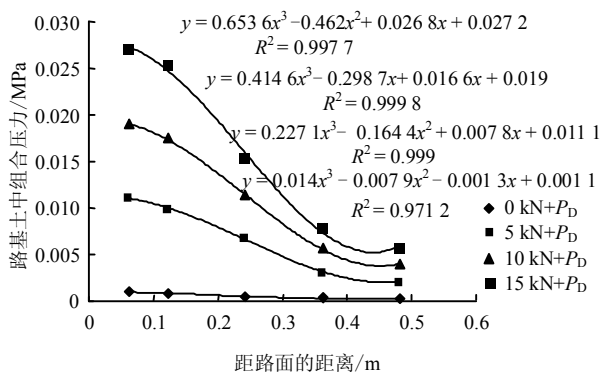


图4 不同组合荷载作用下路基土应力随深度变化规律

Fig.4 Variation of stress with the depth under different combinatorial loads

表2 组合应力沿路基深度的变化规律

Table 2 Variation of combinatorial stress with the depth

介质层厚度 /m	衰减速率 v /(MPa/m)	同介质层内	层状土范围内
黏土层	0.03	线性	非线性衰减,
粉质黏土层	0.07	线性	满足三次多项式
粉质黏土层	0.06	线性	$y = ax^3 + bx^2 + cx + d$
卵石土	0.02	线性	x -距路基顶面的距离

由表2可知,不同土层组合应力衰减速率不同,0.12~0.36 m 的粉质黏土层衰减速率为 0.07 MPa/m,卵石土层介质中组合应力衰减速率为 0.02 MPa/m,所以材料的性质(例如弹性模量、黏聚力、内摩擦角等)对路基土传递荷载的能力有较大的影响。压实度好,弹性模量大的介质中,应力传递能力强,然而,在同一层压实度大和均匀的介质中,组合应力衰减几乎成线性变化。

3.1.2 沿宽度方向竖向应力

图5为沿宽度方向组合土压力与静荷载关系曲线图。分析图5可知,随着组合荷载的增加沿路基宽度方向路基土中组合应力也随着增加,增加趋势几乎为线性变化,线性方程可归纳为: $y = ax + b$, b 为竖轴上的截距,表示静载为0时,组合应力大小即动荷载值, R 为拟合曲线相关系数。图5显示,距路基中心距离的变化,直线的斜率也随之改变,距路基中心距越远,直线斜率越小。

根据几何对称、荷载对称、约束对称,应力对称的原则,沿宽度方向组合应力变化曲线见图6,沿宽度方向距离路基中心越远土中组合应力值越小,约成正态分布曲线趋势递减,但当组合荷载较小时这种衰减趋势变化不明显。

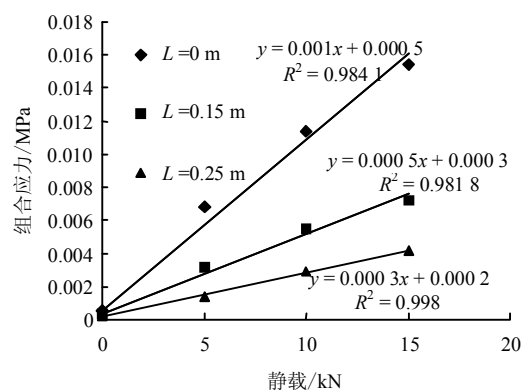


图5 沿宽度方向组合土压力与静荷载关系曲线图

Fig.5 Curves of combinatorial stress and static load at different widths

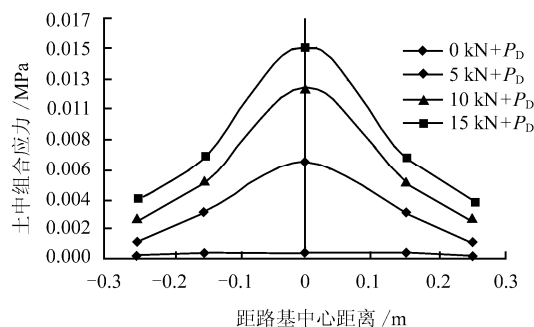


图6 不同组合荷载作用沿宽度方向土中组合应力变化曲线
Fig.6 Curves of combinatorial stress-width under different combinatorial loads

3.2 层状土路基沉降变形

本试验主要研究组合荷载作用下路基的总沉降变形, 本文通称为组合变形。

图7为组合荷载作用下路基总沉降值和随荷载的变化规律。分析可得, 当静载为0 kN时, 路基的沉降由动荷载引起, 沉降值中永久变形占的比例较大, 且距路基顶面越近沉降值越大。随着组合荷载的增加, 路基的沉降变形也逐渐的增加, 变形规律可以用线性来描述。当静载为15 kN时, 路基的沉降变形最大, 几乎是静载为0时的10倍, 主要由于随着静载的增大和动载作用次数的增加, 路基中塑性变形和弹性变形同时增大的缘故。

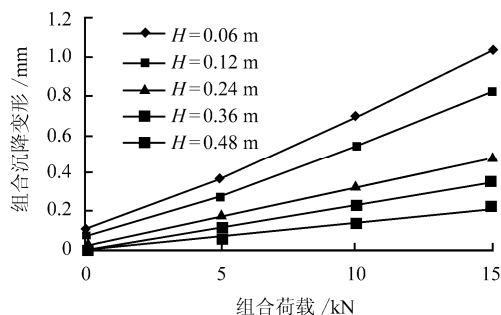


图7 动载不变路基组合沉降变形与静载的变化曲线
Fig.7 Curves of combinatorial deformation and static load under keeping dynamic load constant

根据图8可知, 路基的沉降变形随深度的增加急剧减小, 距路基顶面越近, 沉降值越大。由于构筑路基的介质不同, 黏土层和粉质黏土层沉降变形曲线陡峭, 相同荷载作用下变形值大且最易发生沉降变形, 土石混合体层相对变形值小, 在相同的荷载条件下不易发生沉降变形, 所以, 沿深度方向沉降变形值呈非线性变化, 采用非线性回归的方式, 利用指数函数 $y = ae^{bx}$ 进行拟合, 对组合变形-深度的变化规律能达到较高的拟合度, 其相关指数为0.99。

由图8中可知, 由于动荷载重复作用的原因, 荷载作用初期, 黏土和粉质黏土路基的沉降速率相应较大, 在组合荷载共同作用下变形趋于稳定, 主要由于黏土和粉质黏土可塑性大、刚度小、强度低。在静载和动载共同作用下, 首先表现为以塑性沉降为主, 路基土压实后, 路堤在不被破坏的情况下以弹性变形为主, 路基在设计 and 施工的过程中在考虑填料强度情况下, 一定提高其压实度。在相同的组合荷载作用下, 不同土层的沉降变形值不同, 随着荷载的增加, 卵石土层沉降速率小, 相对比较稳定, 土石混合体夯实后作为路基要好于粘土路基, 如果采用黏土路基必须使其密实、均匀、稳定, 以减小沉降, 保证路面质量。

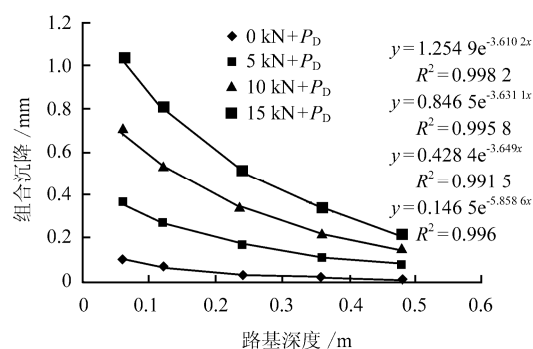


图8 组合沉降变形沿深度的变化曲线
Fig.8 Curves of combinatorial deformation with depth

4 结 论

根据试验得出以下主要结论:

(1) 组合荷载作用下, 路基中的应力主要表现为组合应力, 试验表明组合应力值约等于各单一荷载作用时的应力相加, 组合荷载造成路面和路基的破坏不容忽视。

(2) 在保持动载不变的情况下路基土中各层的组合应力和组合变形随组合荷载的增加而增大, 且呈线性变化。

(3) 对于层状土路基, 介质对动荷载的传递能力不同, 动荷载传递有上到下成非线性变化, 组合荷载、沉降变形随着深度的增加成非线性减小, 为指数函数递减, 在设计和施工时, 路基顶面采用抗压强度较高的介质来支撑基层和路面是非常必要的。

(4) 随着组合荷载的增加沿路基宽度方向的组合应力也随着增加, 增加趋势几乎成线性变化。路基中心点处组合应力幅值最大, 然后向两边逐渐减小, 约成正态分布曲线趋势递减。同时, 动应力幅值在路基中心表现最强烈, 然后向两边逐渐趋于0。

(5) 随着组合荷载的增加, 路基各层的沉降变形也随之增大, 但不同介质沉降变形值不同, 随着弹性模量、黏聚力、内摩擦角增加, 相同荷载条件下沉降变形减小, 所以, 在路基设计和施工中, 通过控制材料的性质以实现对沉降变形的控制是非常必要的。

参考文献

- [1] BROWN S F. Soil mechanics in pavement engineering[J]. *Geotechnique*, 1996, 46(3): 383—426.
- [2] 蒋建群, 周华飞, 张土乔. 弹性半空间在移动集中荷载作用下的稳态响应[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(4): 440—444.
- JIANG Jian-qun, ZHOU Hua-fei, ZHANG Tu-qiao.

上接第 75 页

(4) 将不同围压和基质吸力下的各个非饱和土试验点的动应力幅值 σ_d 经归一化处理, 得到的归一化非饱和土循环强度与破坏振次之间的关系曲线明显具有规律性, 都可以用同一条曲线表达式(1)来表示, 因此就可以通过非饱和土静强度 τ_f 利用式(1)得出不同破坏次数的非饱和土的循环强度。同样, 当初始基质吸力和固结压力一定时, 通过非饱和土静强度就能够在循环应力给定的条件下估算破坏次数 N_f 。

参考文献

- [1] HYODO M, YASUARA K, HIRAO K. Prediction of clay behaviour in undrained and partially cyclic triaxial tests[J]. *Soils and Foundations*, 1992, 32(4): 117—127.
- [2] ANDERSEN K H. Properties of soft clay under static and cyclic loading[C]//Proc. Intn' I Conf. Eng. Problems on Reg. Soils, Beijing: [s. n.], 1988: 7—26.
- [3] ANDERSEN K H, LAURITZSEN R. Bearing capacity for foundations with cyclic loads[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1988, 114(5): 540—555.
- [4] 魏海斌, 刘寒冰, 高一平, 等. 循环荷载下粉质中液限黏土和粉煤灰土的动剪强度研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(9): 1928—1931.
- WEI Hai-bin, LIU Han-bing, Gao Yi-ping, et al. Study on dynamic shear strength of middle-liquidity limit silty clay and fly ash soils under cyclic loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(9): 1928—1931.
- [5] 杨超, 杨林德, 季倩倩. 软黏土在循环荷载作用下动力本构模型的研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(4): 609—614.
- YANG Chao, YANG Lin-de, JI Qian-qian. Study on dynamic constitutive model of soft soils under cyclic load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(4): 609—614.

Steady-state response of an elastic half-space under a moving point load[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(4): 440—444.

- [3] 姜志全, 李廷芥. 动力固结法加固软土路基试验分析[J]. *岩土力学*, 2004, 25(12): 2033—2036.
- JIANG Zhi-quan, LI Ting-jie. Test on a soft foundation consolidated by dynamic consolidation method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(12): 2033—2036.
- [4] 徐毅. 交通荷载对高速公路路基影响的试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [5] JONES D V, PETYT M. Ground vibration due to a rectangular harmonic load[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1998.
- [6] 卿启湘. 高速铁路无砟轨道-软岩路基系统动力特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- [6] 田堪良, 张慧莉, 张伯平, 等. 动扭剪荷载作用下非饱和黄土动力特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(24): 4151—4155.
- TIAN Kan-liang, ZHANG Hui-li, ZHANG Bo-ping, et al. An experimental study on dynamic properties of unsaturated loess under dynamic torsional shear[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(24): 4151—4155.
- [7] 骆亚生, 田堪良. 非饱和黄土的动剪模量与阻尼比[J]. *水利学报*, 2005, (7): 830—835.
- LUO Ya-sheng, TIAN Kan-liang. Dynamic shear modulus and damping ratio of unsaturated loess[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, (7): 830—835.
- [8] 中华人民共和国水利部. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社.
- [9] USABORISUT P, KOIKE M, BAHALAYODHIN B, et al. Cyclic torsional shear loading test for an unsaturated, hollowed specimen using Bangkok clayey soil[J]. *Journal of Terramechanics*, 2001, 38: 71—87.
- [10] 栾茂田, 郭莹, 李木国, 等. 土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪研发及应用[J]. *大连理工大学学报*, 2003, 43(5): 670—675.
- LUAN Mao-tian, GUO Ying, LI Mu-guo, et al. Development and application of soil static and dynamic universal triaxial and torsional shear apparatus[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2003, 43(5): 670—675.
- [11] ANDERSEN K H, LAURITZSEN R. Bearing capacity for foundations with cyclic loads[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1988, 114(5): 540—555.
- [12] 黄绍铭, 高大钊. 软土地基与地下工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.