

文章编号:1000-582X(2005)06-0060-04

水泥混凝土路面力学性能研究综述*

吕惠卿,张湘伟,成思源

(广东工业大学 机电学院,广州 510090)

摘要:水泥混凝土路面的力学性能分析是路面结构设计的基本依据.系统地介绍了水泥混凝土路面结构的弹性地基板、弹性层状体系等各种力学模型,分析了各种力学模型的优缺点,并给出了其解算方法的发展历程.在此基础上,展望了路面力学性能研究的发展趋势.

关键词:水泥混凝土路面;力学性能;力学模型;有限元

中图分类号:U416.216

文献标识码:A

建立水泥混凝土路面结构在荷载和环境因素作用下,力学响应的定量模型,是路面结构设计理论的基本依据^[1].近代发展的弹性地基板理论,采用板体理论的简化模型,解算路面的应力、位移并验算其路面结构的强度,已广泛应用到各国路面结构设计中.由于计算机计算能力的不断提高,以及弹性力学和数值计算方面的发展,弹性多层体系、层状体系地基上板的解算已逐步完善及混凝土的强度理论进一步发展^[2-3],利用计算机模拟路面对静动态荷载的响应^[4-7],并用优化算法^[8]对路面的结构可靠度和经济性进行分析,已成为各国路面设计的发展趋势.

作者介绍了路面结构的弹性地基板、弹性层状体系的力学模型,分析各种力学模型的优缺点,并给出了其解算方法的发展历程以及近年的发展动向,在此基础上,展望了路面力学研究的发展趋势.

1 弹性地基板的力学模型

弹性地基板理论^[8]把刚度大的水泥混凝土面层看作是支承于弹性地基上的小挠度弹性板.水泥混凝土路面层的厚度不到其平面尺寸的十分之一,且混凝土是脆性的,面板的挠度远小于其厚度,因此其完全符合薄板小挠度理论.对于面板通常作了如下的假设:

1) 板为具有弹性常数 E (弹性模量)和 μ (泊松比)的等厚度弹性体;

2) 作用于板上的荷载,其施压面的最小边长或直径大于板厚时,利用薄板弯曲理论进行计算分析,忽略竖向压缩应变和剪应变的影响;当施压面尺寸小于板厚时,需采用厚板理论计算,或依据厚板理论对薄板理论的计算结果进行修正.

3) 弹性地基仅在接触面对板作用有竖向反力,即地基和板之间无摩阻力.在荷载作用下,板同地基的接触保持完全连续,板的挠度即为地基顶面的挠度.

水泥混凝土面层下的各结构层看作为单层的均质弹性地基.按地基假设的不同分为温克勒(Winkler)地基、弹性半空间地基、巴斯特纳克(Pasternak)地基.

1.1 温克勒地基板

1867年,温克勒提出了温克勒地基假设,即地基每单位面积上所受的的压力与地基沉降成正比.20世纪20年代,威斯特卡德(Westergaard)首先采用温克勒地基板模型建立了荷载应力和温度翘曲应力的计算理论,他提出地基反力只有垂直力,与板的翘曲成正比.地基的反应力用下面公式表示:

$$q(x,y) = kw(x,y), \quad (1)$$

式中: q ——地基顶面某一点的反力(MPa);

k ——地基反应模量(MPa/cm);

w ——竖向挠度(cm).

温克勒地基把地基看作是由许多紧密排列而互不关联的线性弹簧组成,认为地基某一点的沉降仅决定

* 收稿日期:2005-03-10

于作用在该点的压力,而和邻近的地基不发生任何关系.实际上地基由于土体或材料颗粒直接的横向联系,在横向是相互制约的,一部分受力,相邻部位也受到影响,发生沉陷.鉴于其缺点,人们进一步提出了符合弹性体基本假设的弹性均质半空间体.威氏方法和计算公式经过各国的修改补充,现在仍广泛地运用于很多国家的刚性路面设计的实践.虽然它低估了地基的侧向联系,却使计算结果略偏于安全.文献^[10]推导了基于有粘滞作用的温克勒地基模型的动态相应求解公式.

1.2 弹性均质半空间地基

鉴于温克勒地基模型与实际地基之间存在较大差异,弹性均质半空间体地基假定地基为连续、均质、各向同性、完全弹性的半空间体.地基顶面任一点的挠度不仅同作用于该点的压力有关,也同地面其它点的压力有关.其力学特性也用弹性模量 E_0 和泊松比 μ_0 表示.1885年,布辛尼斯克计算出弹性均质半空间体在单个荷载作用下的应力和位移.由于可以运用布辛尼斯克公式^[1]建立竖向位移值 w 和反力 p 与地基参数 E_0 和 μ_0 之间的关系式,从而可以使微分方程得到解答,但在数学和力学计算上较温克勒地基假设的板更为复杂.由于近代计算机的发展,使得复杂的数学计算得以迅速解决.

Winkler 地基模型和弹性均质半空间地基都与实际地基情况有出入,且测定这两类地基模型参数的试验条件与理论模型中两种地基的工作状况不同.因此参与这样的参数数值计算得到的理论挠度和应力值同实测值有出入,需要根据测定参数值对理论公式进行修正.

1.3 Pasternak 地基板

Winkler 地基模型把地基看成横向无联系的独立弹簧体系,而弹性均质半空间模型则把地基看作是线性连续介质,前者低估了实际地基的横向联系,而后者夸大了实际地基的横向联系.1954年,前苏联的 Pasternak 为了探求一种物理上接近而数学上简单的地基模型,提出了双参数地基模型,在 Winkler 地基模型的反应模量参数外,当 $G=0$ 时,它便是 Winkler 地基模型;随着剪切模量的增大,它趋近与弹性半空间地基;当时,地基成为刚体.因而 Pasternak 地基可以起到调节地基的反应,使挠度和应力的理论计算结果同实际相符合的作用.

2 弹性层状体系

弹性地基板理论虽然广泛用于水泥混凝土路面的

应力分析,但仍然存在着不足,主要是地基模型方面.除了直接铺在地基上的水泥混凝土路面之外,凡是设有基层的混凝土路面都应视作为弹性层状半空间地基的板体.按面层下的结构层次和材料性质采用层状地基模型^[11-13],可以更加接近实际地基在面层板下的特性.

弹性层状地基与半空间地基不一样,它在深度方向分成若干层次,最下层为向下无限深的半无限体,层次之间符合一定的连续条件.每一个层次有不同的弹性特征 E (弹性模量) 和 μ (泊松比),符合弹性理论的基本假定,即连续、弹性、均质、各向同性.双层和3层弹性层状体系理论解首先由伯米斯特 (Burmister) 于1943~1945年间建立的,而后经过许多研究者的贡献发展到多层体系,并广泛应用到柔性路面结构分析.

在重复荷载作用下,混凝土路面在半角接缝两侧由于基层的塑性变形产生脱空,最终导致面板破坏,随着道路测试手段的发展^[14-16],利用落锤式弯沉所测量的数据反演路面结构层模量^[17-20]、判定接触状况^[21],从而建立精确的路面结构模型,进行路面结构的力学性能计算和模拟,评价路面服务性能,并利用实际检测的数据验证模型的可靠性和有效性^[22-25].

2.1 双层弹性体系

弹性双层体系是弹性层状体系中较为简单的一种,在理论上已获得完善和发展.双层体系包括具有一定厚度 h 的上层和一个向下无限深的半无限体的下层,上层的连续支承是下层,上下两层的弹性特征分别为 E_1, μ_1 和 E_2, μ_2 . 它的理论可以直接引用到双层路基路面体系的应力分析.

在刚性路面设计中,采用弹性半空间体上无限大板的理论验算板中应力,对基层具备较高的弹性模量往往忽略不计,或稍微提高土基的模量,或采用土基和基层的综合当量模量,但是如何估算综合当量模量,则无完善的方法.对设有基层的混凝土路面,采用双层地基板的理论,则较为理想.求解双层弹性地基上无限大薄板小挠度问题时,有关薄板的基本假设,板与地基直接联系的附加假设仍适用.

混凝土路面的基层如采用刚度大、板体性好的材料,而近似地当作弹性薄板处理的话,路面结果可模型化为弹性地基上由面层和基层组成的双层板.对旧式水泥混凝土路面进行改建时,往往需在旧水泥面层上加铺一次新的水泥层,层间可采用结合的或隔离滑动的,此时宜采用弹性地基上双层板的理论.

2.3 三层弹性体系和弹性多层体系

由于实际路面结构往往是一个3层或多于3层的弹性体系,多层弹性体系根据实际的路面结构,把基层、垫层和路基在内的多层地基体系采用3层或多层弹性体系进行建模.在泊米斯特之后,英国的富克斯和阿克姆、法国学者乔弗洛、苏联学者柯岗等对双层、3层弹性体系应力和应变计算进行了研究.美国陆军工程师部队(CEO)最先开展水泥混凝土道面应用弹性多层体系理论研究,1979年分别提出了采用弹性多层体系基础刚性道面及军用道路刚性路面的结构设计方法,认为水泥混凝土路面和沥青路面采用同一个弹性多层体系理论,可方便于设计者使用.

多层体系假设最下层为向下无限深的半无限体.多层弹性体系的缺点是它假设面层在水平方向伸展无限远,因而只能考虑板中受荷的情况.为了克服这一缺点,可选用多种道面结构和荷载,分别采用弹性地基板模型和弹性多层体系模型计算板边缘和板中的最大应力 σ_{eq} 和 σ_{il} ,而后通过回归分析建立了弹性地基板模型和弹性多层体系模型之间良好的统计关系^[8]:

$$\sigma_{\text{il}} = 0.64\sigma_{\text{cb}}^{0.972}. \quad (2)$$

从而将多层体系的板中应力转换成板边应力.

3 水泥混凝土路面力学模型解算方法

3.1 解析法

就力学模型而言,水泥混凝土路面属于弹性地基板三维连续体系.只有经过一系列简化假定和复杂的数学推演,才能建立以解析法为基础的应力分析方法.在求解微分方程和变形连续方程的解析解时,以轴对称弹性空间的一般解为基础,把平衡微分方程转换为贝塞尔(Bessel)微分方程,利用汉克尔积分变换法,导出应力和位移分量的一般表达式^[1].

弹性地基板理论的研究虽已有百年历史,挠度和应力的解析解^[1-2]却主要局限于无限大板的情况,Westergaard的板中、板边和板角应力计算公式,长期以来得到路面界的广泛采用,但其板边公式也仅在十几年前才得到确证,而板角公式至今尚无严密的论证.这种应力分析法无法反映许多工程结构中的实际问题,具有一定局限性.

3.2 数值计算法

随着有限元分析方法和计算机技术的发展,各种复杂边界条件下的弹性地基板荷载应力和温度应力都可得到满意的数值解,为混凝土路面结构分析提供了

强有力的工具.

有限元用于路面应力分析始于20世纪60年代,Y. K. Cheung和O. C. Zienkiewicz提出了地基上板体的有限元分析法.W. R. Hudson, H. Matlock用离散单元法分析了温克勒地基上刚性路面板存在脱空情况下的应力.70年代初,S. R. Wang, M. Sargions, Y. K. Cheung用有限元位移法分析了混凝土路面板的应力和挠度,提出板的应力计算图.Y. H. Huang, S. T. Wang不仅提出了弹性地基假定下的有限元分析,而且对温度应力计算,板底有脱空现象,对称性的利用,带状矩阵的利用,两块板之间的连接等问题均做了深入的研究.黄仰贤与邓学钧合作完成的研究工作对板与板之间各种不同的荷载传递方式进行了深入分析,同时,通过简化方法或迭代方法,将有限元分析范围扩大到由若干块组成的多板系统.有限元分析方法已解决了有限大矩形块在任意位置荷载作用下,计算任意位置的应力和位移,具有传力功能的多板系统的应力、位移计算,地基不均匀支承和地基部分脱空等情况下的应力及位移计算^[26].

我国从70年代后期对有限元等数值方法用于水泥混凝土路面计算的研究进行了大量卓有成效的工作,并且将研究成果系统化,成为我国刚性路面设计规范的基础.80年代中期,许多学者采用三维有限元法对中厚板或厚板问题进行应力计算,对旧路(道路)进行加固,维修时存在的双层板之间有软弱夹层的情况,或者具有裂缝的情况进行分析.这些研究工作将刚性路面应力分析问题推向了一个新的阶段,研究成果都已先后反映在1984年、1994年和2002年的《公路水泥混凝土路面设计规范》^[27-28]中.

以实际实验为基础,将连续介质力学、损伤力学和计算力学相结合,在细观层次上建立数值模型^[29-32],描述混凝土细观单元的本构关系及混凝土损伤与断裂的过程,进行试验研究和数值模拟,架起了细观层次结构与宏观力学特性的连接桥梁.但迄今为止,对混凝土的数值模拟仅限于少级配小尺寸试件的,多数文献都是注重对破坏过程的数值模拟,还不能代替部分实验.

3 总结与展望

1) 随着现代数学和力学的发展,以及快速大型计算机的应用,将建立愈来愈完善的力学模型,从而得到更接近于实际的理论解答,但无论是有限元解还是解析解,其解算同实测结果均有偏离,仍需要根据实测值作出必要的修正.

2) 利用 FWD(落锤式弯沉测量仪)室内和野外的实测数据,可以建立解析解、有限元数值解同实测结果的关系,用反演法和各种数值方法算出地基模量值,可便捷地评价路面力学性能。

3) 在细观层次上建立数值模型,对混凝土进行试验研究和数值模拟,将连续介质力学、损伤力学与计算力学相结合,利用细观力学方法,架起混凝土微观结构与宏观力学特性的连接桥梁。

参考文献:

- [1] 王秉刚,邓学均.路面力学计算[M].北京:人民交通出版社,1985.
- [2] KOLLURU V SUBRAMANIAM, SURENDRA P SHAH. Bi-axial Tension Fatigue Response of Concrete[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2003, 25(6): 617-623.
- [3] 赵均海,俞茂宏,刘云贺.混凝土统一强度理论及其应用[J].西北建筑工程学院学报,1998,15(4):1-9.
- [4] LU SUN. Computer Simulation and Field Measurement of Dynamic Pavement Loading[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2001, 56(3): 297-313.
- [5] 耿大新,钟才根,杨琳德.行车荷载作用下刚性路面结构体系的动力响应[J].中南公路工程,2003,28(4):16-19.
- [6] 王林玉,谢永利,朱向荣.循环荷载作用下路面模型试验研究[J].西安公路交通大学学报,1999,19(4):11-14.
- [7] 常志权,罗虹,褚志刚,等.谐波叠加路面输入模型建立及数字模拟[J].重庆大学学报(自然科学版),2004,27(12):5-8.
- [8] HAHN M N S, ARFIADI Y. Optimum Rigid Pavement Design by Genetic Algorithms[J]. *Computers and Structures*, 2001, 79(17): 1 617-1 624.
- [9] 姚祖康.水泥混凝土路面设计理论和方法[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [10] KIM SEONG-MIN, MCCULLOUGH B FRANK. Dynamic Response of Plate on Viscous Winkler Foundation to Moving Loads of Varying Amplitude[J]. *Engineering Structures*, 2003, 25(9): 1 179-1 188.
- [11] 罗晓辉.路面结构厚度与疲劳破坏关系分析研究[J].公路,2004,(12):85-87.
- [12] 于传君.路面层状弹性体系在轴对称荷载作用下结构分析的状态变量法[J].辽宁交通科技,2004,25(4):14-17.
- [13] 陈杰.公路路面动态特性分析方法[J].东北公路,2001,24(4):23-27.
- [14] 梁新政,潘卫育,徐宏.路面无损检测技术新发展[J].公路,2002,(9):95-98.
- [15] 楼伟,沈宁.高等级公路路面裂缝类病害轮廓提取的算法研究[J].电子技术应用,2002,(10):30-31.
- [16] GEORGOPULOS A, LOIZOS A, FLOUDA A. Digital Image Processing as a Tool for Pavement Distress Evaluation[J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1995, 50(1): 23-33.
- [17] 苏卫国.旧水泥混凝土路面 FWD 实测数据的分析[J].公路交通科技,2004,21(1):12-15.
- [18] KARADELIS J N. A Numerical Model for the Computation of Concrete Pavement Moduli: A Non-destructive Testing and Assessment Method[J]. *Ndt&E International*, 2000, (3): 77-84.
- [19] 王陶,王钊.弹性层状地基板模量反演的进化方法[J].武汉大学学报(工学版),2003,36(2):66-69.
- [20] 杜莉莉,张小庆,王宾.刚性路面的材料性能反演[J].郑州大学学报,2004,25(1):109-112.
- [21] 王陶,王复明,王钊.弹性地基接缝板模量反演和地基脱空判定[J].岩土力学,2003,24(2):233-236.
- [22] 职雨风,徐科,张肖宁.路面基层施工质量均匀性评定方法研究[J].公路,2005,(1):101-105.
- [23] 陈佩林,谭集青,马立军.广佛高速公路半刚性路面弯沉与破坏相关分析[J].广东公路交通,2003,24(2):42-45.
- [24] 王林玉,谢永利,朱向荣.循环荷载作用下路面模型试验研究[J].西安公路交通大学学报,1999,19(4):11-14.
- [25] PROZZI J A, MADANAT S M. A Nonlinear Model for Predicting Pavement Serviceability [A]. *Proceedings of the Seventh International Conference Applications of Advanced Technology in Transportation*[C]. 2002. 481-488.
- [26] (美)黄仰贤.路面分析与计算[M].北京:人民交通出版社,1998.
- [27] JTJ 012-94.公路水泥混凝土路面设计规范[S].
- [28] JTG D40-2002.公路水泥混凝土路面设计规范[S].
- [29] 朱万成,唐春安.混凝土损失逾断裂-数值模拟[M].北京:科学出版社,2003.
- [30] 刘光廷,王宗敏.用随机骨料模型数值模拟混凝土材料的断裂[J].清华大学学报(自然科学版),1996,36(1):84-89.
- [31] 彭一江,黎保琨,刘斌.碾压混凝土细观结构力学性能的数值模拟[J].水利学报,2001,(6):19-22.
- [32] 马怀发,陈厚群,黎保琨.混凝土细观力学研究进展及评述[J].中国水利水电科学研究院学报.2004,2(2):124-130.

Fuzzy Sensitivity Analysis of Structures

LV En-lin, LV Xi-lin

(Department of Engineering Mechanics, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Based on fuzzy sets theory, a kind of method for analyzing the sensitivity in engineering structures of which design parameters are fuzzy variables is presented. The structural response sensitivity is analyzed by means of "simulate load" method and "virtual load" method, and a formula for calculating the fuzzy displacement sensitivity and fuzzy stress sensitivity is developed. The example shows that the presented method is rational and efficient.

Key words: fuzzy sets; engineering structures; sensitivity

(编辑 刘道芬)

(上接第 63 页)

Study on Mechanical Properties of Cement Concrete Pavements

LV Hui-qing, ZHANG Xiang-wei, CHENG Si-yuan

(Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)

Abstract: The study of the mechanical properties of cement concrete pavements is the base of the structural design of pavement. The existing mechanical models, such as elastic plate system, layered elastic system and so on, are systematically presented. The limitations and merits of various mechanical models are discussed at the same time. The development process of the solution methods for the study on mechanical properties of cement concrete pavements is also presented. The development trend of the study on pavement mechanical properties is given in the end.

Key words: cement concrete pavements; mechanical properties; mechanical models; finite element

(编辑 成孝义)