

基于状态空间法的含裂缝水泥路面结构分析

孙雅珍¹, 郑直¹, 黄伟明², 王金昌³

(1. 沈阳建筑大学 交通工程学院, 沈阳 110168; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058; 3. 浙江大学 交通工程研究所, 杭州 310058)

摘要: 为了通过解析方法求解含裂缝连续配筋混凝土路面(CRCP)的内力与变形, 基于状态空间法和 Euler-Bernoulli 梁理论, 引入能揭示刚度弱化的接头模型来模拟裂缝, 建立综合考虑土体竖向抗力、裂缝处的抗剪切力和抵抗弯矩的三弹簧单层直梁模型, 通过 MATLAB 编程求得了含裂缝路面结构在竖向荷载作用下变形和内力的解析解, 并与已有文献和有限元的结果对比, 验证了解析结果。探讨了裂缝间距、荷载大小和面层厚度等参数对路面结构变形响应的影响, 其结果也表明了本文解析方法的正确性。

关键词: 道路工程; 状态空间法; Euler-Bernoulli 梁; 连续配筋混凝土路面; 横向裂缝

中图分类号: U416.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2023)01-0188-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20210486

Structural analysis of cement pavement with cracks based on state-space method

SUN Ya-zhen¹, ZHENG Zhi¹, HUANG Wei-ming², WANG Jin-chang³

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Institute of Transportation Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: To determine the deformations and internal forces of Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP) with cracks by the analytical solution based on the state-space method and Euler-Bernoulli beam theory, a three-spring straight beam model was proposed. The vertical soil resistance and the rotation-resisting and shear-resisting capacities of the cracks were taken into account. In addition, the joint model which reveals the stiffness degradation was introduced to simulate the cracks. The analytical solutions for the internal forces and deformations of the pavement structure with cracks under vertical load were obtained by MATLAB programming. The analytical solutions were verified by the existing literature and finite element method. The influences of crack spacing, the magnitude of load and the surface thickness on the deformation response of the pavement structure were discussed. This also validates the analytical approach proposed in this paper.

收稿日期: 2021-05-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308084); 浙江省交通运输厅科技项目(ZJXL-JTT-202201A, ZJXL-JTT-202201A-202303); 辽宁省教育厅项目(LJKZZ20220080).

作者简介: 孙雅珍(1969-), 女, 教授, 博士生导师. 研究方向: 道路工程. E-mail: syz16888@126.com

通信作者: 王金昌(1974-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 交通基础设施. E-mail: wjc501@zju.edu.cn

Key words: road engineering; state-space method; Euler-Bernoulli beam; continuously reinforced concrete pavement; transverse crack

0 引言

路面结构的分析方法多种多样,包括试验方法^[1]、有限元法(FEM)^[2]、离散单元法(DEM)^[3]等。随着有限元软件的发展,人们越来越倾向于使用它们去分析问题。尽管它们在处理某些问题的时候更为有效,同时也能得到较为准确的结果,但需要耗费大量的资源。

简化的力学方法包括刚度矩阵法^[4]、精细积分法^[5]等,受到了业内人士的广泛关注。沈凯仁等^[6]基于半解析有限元原理计算了不含裂缝的水泥路面结构的荷载响应;Yan等^[7]采用 Fourier-Hankel 变换,对冲击荷载作用下不含裂缝的路面结构的控制方程进行了解析求解,并推导了单层的解析层元。

状态空间法从根本上改变了控制论的基本理论体系,是现代控制理论的标志^[8]。它是建立在 Hamilton 辛对偶体系理论和状态辛空间基础上的,通过将能量对偶的两类物理量如内力与位移作为状态变量,避免了求解高阶微分方程,最后通过代入边界条件求解初值,进而求出其余的物理量,简化复杂问题的求解过程,求解问题时物理概念清晰、计算效率高,已被广泛地应用于土木工程领域^[9-11],比如盾构隧道管片和衬砌结构的变形和内力研究^[9,10],多土层中的桩受力响应研究^[11]等。在道路领域,应用状态空间法对路面结构的力学行为研究相对较少。

本文基于 Euler-Bernoulli 梁理论,采用状态空间法,推导了弹性地基上连续直梁的首末两端状态向量间的矩阵传递关系;又根据裂缝处的内力连续性条件与弹簧的线性变形假定,得到裂缝处状态向量间的矩阵传递关系。最后,根据整个直梁的连续性条件,求得任意截面位置的内力与变形,并借助 MATLAB 软件编写了单层路面结构响应的计算程序。

1 问题描述

CRCP 纵向配有大量的钢筋,但 CRCP 并非完全没有横向裂缝,只是一般情况下分布比较分散,通常间距为 1.0~2.0 m^[12]。由间距很小(小

于 0.6 m)的横向裂缝引起的冲断病害,是 CRCP 的主要病害形式^[13]。同时在现行规范中,横向裂缝是有关 CRCP 设计的一个重要参数。基于此,本文以含横向裂缝的 CRCP 为例,在弹性地基上用单层 Euler-Bernoulli 直梁模拟混凝土路面板,用双向的线弹簧模拟混凝土板上的横向裂缝,即每一个裂缝位置都包含竖向和转动方向的线弹簧,分别用以考虑裂缝处的抗剪力力和抗弯矩,如图 1 所示。图 1 中: L 为梁的长度, q_z 为竖向外荷载, k_z 为 Winkler 弹簧的竖向抗力系数。

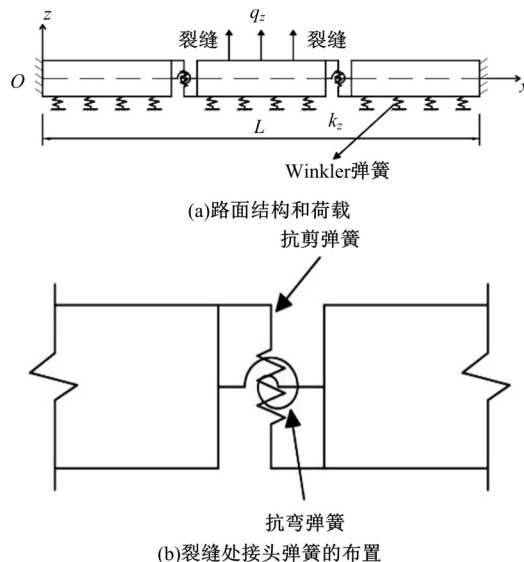


图 1 存在横向裂缝的单层路面结构分析模型

Fig. 1 Model scheme of single-layer pavement structure with transverse cracks

2 含横向裂缝的单层 CRCP 路面结构解析模型

2.1 弹性地基上的单层直梁模型

设矩形截面的单个连续直梁段如图 2 所示。以直梁最左端为坐标原点 O ,沿直梁的轴线建立坐标 x ,沿垂直于轴线的方向建立坐标 z 。图中, h 为截面的高度, u_z 为水平位移, w 为竖直位移, φ 为截面的转角, E 为弹性模量, I 为横截面的惯性矩, A 为横截面面积, M 和 Q 分别为弯矩和剪力。

本文的基本假定如下:①材料为线弹性;②路面结构的变形为小变形问题,采用 Euler-Bernoulli 梁理论^[14]描述路面结构层的力学行为;③采用竖

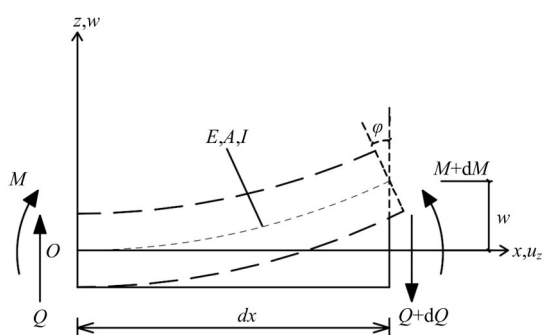


图2 弹性地基上单个连续直梁段模型

Fig. 2 Model diagram of single continuous straight beam on elastic foundation

向的 Winkler 弹簧模拟其他层位对面层的支撑作用。

在直梁的弯曲变形计算中,根据 Euler-Bernoulli 梁理论^[14]和本构方程,以及图 2 中的几何关系,截面上任意一点的轴向位移 u_z 和轴向应变 ϵ_z 可以分别表示为:

$$u_z = z\varphi \quad (1)$$

$$\epsilon_z = \frac{du_z}{dx} = z \frac{d\varphi}{dx} \quad (2)$$

式中: φ 为任意截面的转角,其表达式为:

$$\varphi = \frac{dw}{dx} \quad (3)$$

截面上的弯矩 M 为:

$$M = \int_A E \epsilon_z z dA = EI \kappa \quad (4)$$

式中: κ 和 ρ 分别为曲率和曲率半径。

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{d\varphi}{dx} \quad (5)$$

由最小势能原理,写出系统的总势能为:

$$\Pi = \sum \int_{\Omega_i} \frac{1}{2} E \epsilon_z^2 d\Omega_i + \int_L \frac{1}{2} k_z w^2 dL - \int_L q_z w dL \quad (6)$$

再由变分法,得到:

$$\delta \Pi = \sum M_i \delta \varphi_L - \sum M_i' \delta w_L + \int_L (M_i'' + k_z w - q_z) \delta w dL \quad (7)$$

进而可得到 Winkler 地基上单层直梁系统的平衡方程为:

$$\frac{dQ}{dx} + k_z w - q_z = 0 \quad (8)$$

其中:

$$Q = \frac{dM}{dx} \quad (9)$$

把式(3)(4)(8)(9)整理成矩阵形式:

$$\frac{d\bar{x}}{d\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{q} \quad (10)$$

为了保证计算过程中数值的稳定,对式(10)进行无量纲化处理,建立如下的状态方程:

$$\frac{d\bar{x}}{d\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{q} \quad (11)$$

式中: $\bar{x}$ 为无量纲的状态向量,由直梁截面上的 2 个位移量和与其能量共轭的 2 个内力量组成:

$$\bar{x} = [\bar{w}, \bar{\varphi}, \bar{Q}, \bar{M}]^T \quad (12)$$

$\bar{q}$ 为直梁受到的无量纲的外荷载向量:

$$\bar{q} = [0, 0, -\bar{q}_z, 0]^T \quad (13)$$

$\bar{A}$ 为无量纲的状态方程的系统矩阵:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} \bar{B} & \bar{C} \\ \bar{D} & -\bar{B}^T \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中:

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1/\bar{I} \end{bmatrix}, \bar{D} = \begin{bmatrix} -\bar{k}_z & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中无量纲的内力、位移以及坐标等其他量分别为:

$$\begin{cases} \bar{w} = w/L, \bar{x} = x/L \\ \bar{M} = \frac{M}{EAL}, \bar{k}_z = \frac{k_z L^2}{EA}, \bar{q}_z = \frac{q_z L}{EA} \\ \bar{Q} = \frac{Q}{EA}, \bar{I} = \frac{I}{AL^2} \end{cases} \quad (17)$$

根据矩阵理论,式(11)的标准解为:

$$\bar{x}(\bar{x}) = \bar{T}(\bar{x} - \bar{x}_0) \bar{x}_0 + \bar{f}(\bar{x} - \bar{x}_0) \quad (18)$$

式中: $\bar{x}_0$ 为梁始端的状态向量,即表示 $\bar{x} = \bar{x}_0$ 时状态向量 $\bar{x}$ 的值; $\bar{T}(\bar{x} - \bar{x}_0)$ 为从 $\bar{x}_0$ 到 $\bar{x}$ 的传递矩阵,具体形式为:

$$\bar{T}(\bar{x} - \bar{x}_0) = \exp[\bar{A}(\bar{x} - \bar{x}_0)] \quad (19)$$

$\bar{f}(\bar{x} - \bar{x}_0)$ 为从 $\bar{x}_0$ 到 $\bar{x}$ 的荷载积分向量,具体形式为:

$$\bar{f}(\bar{x} - \bar{x}_0) = \int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}} \exp[\bar{A}(\bar{x} - \xi)] \bar{q}(\xi) d\xi \quad (20)$$

当 $\bar{x}_0 \sim \bar{x}$ 有 m 个集中荷载 P_i 作用时,荷载作用位置的坐标为 $\xi_i, i = 1, 2, \dots, m$, 此时 $\bar{f}$ 的表达式为:

$$\bar{f}(\bar{x} - \bar{x}_0) = \sum_{i=1}^m \exp[\bar{A}(\bar{x} - \bar{\xi}_i)] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \bar{P}_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中:

$$\bar{P}_i = \frac{P_i}{EA} \quad (22)$$

当式(18)取 $\bar{x} = \bar{x}_1$ 时,便可得到单个直梁段上两端状态向量 $\bar{x}_0$ 和 $\bar{x}_1$ 之间的矩阵传递关系,即:

$$\bar{x}_1 = \bar{x}(\bar{x}_1) = \bar{T}(\bar{x}_1 - \bar{x}_0)\bar{x}_0 + \bar{f}(\bar{x}_1 - \bar{x}_0) \quad (23)$$

若只有 1 个连续直梁段,则式(23)中含有 8 个未知数,但是只有 4 个方程,所以需要补充 4 个边界条件才能求解,其具体的形式详见 2.3 节。

2.2 模拟裂缝的接头模型

由于直梁上存在多处裂缝,直梁的整体刚度将会受到削弱。引入能揭示刚度弱化的接头模型^[9,10,15]来模拟裂缝,由于裂缝处的内力包括 Q 和 M ,所以采用竖向和转动方向的线弹簧分别来模拟裂缝处的抗剪和抗弯特性,如图 1(b)所示。

根据弹簧的线性变形关系以及内力的连续性,裂缝处的内力可以用相应方向上的位移变化量来表示。以分析第 j 处裂缝为例,此裂缝介于第 j 个直梁段和第 $j+1$ 个直梁段之间,裂缝处的内力表达式为:

$$\begin{cases} Q_0^{(j+1)} = Q_1^{(j)} = k_w^{(j)}(w_0^{(j+1)} - w_1^{(j)}) \\ M_0^{(j+1)} = M_1^{(j)} = k_\varphi^{(j)}(\varphi_0^{(j+1)} - \varphi_1^{(j)}) \end{cases} \quad (24)$$

式中: $k_w^{(j)}$ 和 $k_\varphi^{(j)}$ 分别为模拟第 j 处裂缝的纵向单位长度的线弹簧剪切刚度和转动刚度; $Q_1^{(j)}$ 和 $Q_0^{(j+1)}$ 、 $M_1^{(j)}$ 和 $M_0^{(j+1)}$ 分别为第 j 处裂缝前后第 j 段直梁末端截面和第 $j+1$ 段直梁始端截面处的剪力和弯矩。

式(24)可以整理成无量纲的矩阵形式:

$$\bar{x}_0^{(j+1)} = \bar{J}^{(j)} \bar{x}_1^{(j)} \quad (25)$$

式中: $\bar{x}_1^{(j)}$ 和 $\bar{x}_0^{(j+1)}$ 分别为第 j 段直梁末端截面和第 $j+1$ 段直梁初始端截面的无量纲状态向量; $\bar{J}^{(j)}$ 为第 j 处裂缝的无量纲化传递矩阵,其具体的形式为:

$$\bar{J}^{(j)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\bar{k}_w^{(j)}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \frac{1}{\bar{k}_\varphi^{(j)}} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

其中:

$$\bar{k}_w^{(j)} = \frac{k_w^{(j)}L}{EA}, \bar{k}_\varphi^{(j)} = \frac{k_\varphi^{(j)}}{EAL} \quad (27)$$

一根完整的直梁被 n 处裂缝分为 $n+1$ 个直梁段,当直梁某裂缝处双向弹簧的刚度取为无穷大,则认为直梁在该位置的连接是完美的,即此处不存在裂缝。那么,若所有弹簧的刚度都取为无穷大,直梁等同于连续截面,此时, $\bar{J}^{(j)}$ 退化为四阶单位矩阵。

2.3 含裂缝的单层直梁模型

假设该路面结构层中存在有 n 处横向裂缝,如图 3 所示,结合式(23)建立的直梁段内状态向量间的传递关系和式(25)建立的裂缝处状态向量的传递关系,从第 $n+1$ 段末端截面向第 1 段始端截面依次向前传递,便可以得到第 n 处裂缝左右两侧截面状态向量间的传递关系,即为:

$$\begin{aligned} \bar{x}_1^{(n+1)} &= \bar{T}^{(n+1)} \bar{x}_0^{(n+1)} + \bar{f}^{(n+1)} = \\ &= \bar{T}^{(n+1)} \bar{J}^{(n)} \bar{x}_1^{(n)} + \bar{f}^{(n+1)} = \dots = \\ &= \bar{H} \bar{x}_0^{(1)} + \bar{p} \end{aligned} \quad (28)$$

式中:

$$\bar{H} = \bar{T}^{(n+1)} \bar{J}^{(n)} \bar{T}^{(n)} \dots \bar{T}^{(2)} \bar{J}^{(1)} \bar{T}^{(1)} \quad (29)$$

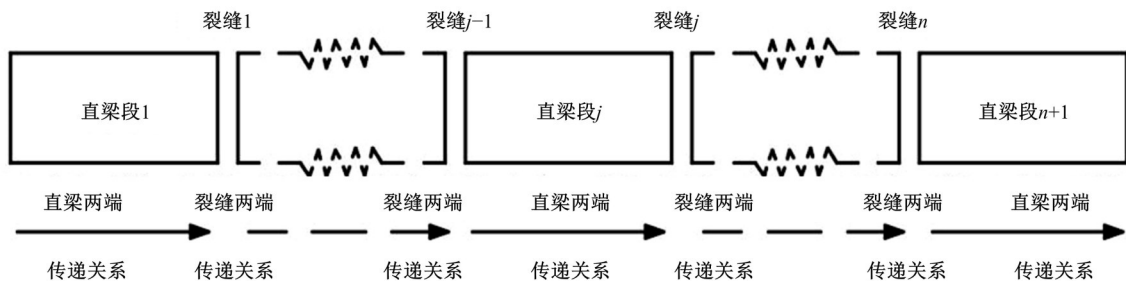


图 3 存在横向裂缝的单层路面结构状态向量传递路线

Fig. 3 Transmitting route of state vector in single-layer pavement structure with transverse cracks

$$\bar{p} = \bar{T}^{(n+1)} \bar{J}^{(n)} \bar{T}^{(n)} \dots \bar{T}^{(2)} \bar{J}^{(1)} \bar{f}^{(1)} + \dots + \bar{T}^{(n+1)} \bar{J}^{(n)} \bar{f}^{(n)} + \bar{f}^{(n+1)} \quad (30)$$

$$\bar{T}^{(j)} = \bar{T}(\bar{x}_1^{(j)} - \bar{x}_0^{(j)}) \quad (31)$$

$$\bar{f}^{(j)} = \bar{f}(\bar{x}_1^{(j)} - \bar{x}_0^{(j)}) \quad (32)$$

式中: $j = 1, 2, \dots, n, n+1$ 。

该解析模型考虑了 2 种约束: 两端自由和两端固定。具体边界条件分别为:

两端自由:

$$Q_0^{(1)} = 0, Q_1^{(n+1)} = 0, M_0^{(1)} = 0, M_1^{(n+1)} = 0 \quad (33)$$

两端固定:

$$\varphi_0^{(1)} = 0, \varphi_1^{(n+1)} = 0, w_0^{(1)} = 0, w_1^{(n+1)} = 0 \quad (34)$$

当选定 1 种边界条件代入求解出第 1 个直梁段始端截面的状态向量 $\bar{x}_0^{(1)}$ (包括 2 个内力和 2 个位移量) 之后, 再由式 (23) 求得第 1 个直梁段上任意截面处的内力和位移; 根据式 (25), 即在第 1 个裂缝处, 第 1 段直梁末端截面和第 2 段直梁始端截面的状态向量间的传递关系, 求出第 2 个直梁段始端截面的状态向量 $\bar{x}_0^{(2)}$, 重复以上过程, 就可求得单层路面结构直梁模型中所有直梁段内任意截面处的内力和位移。

3 算例验证与参数分析

3.1 解析结果的验证

3.1.1 Winkler 地基上不含裂缝的单层路面结构验证

通过与已有文献中的线弹性 Winkler 地基上单层路面结构模型进行对比来验证本文方法的正确性。马立博等^[16]考虑地基对梁的竖向支撑作用, 采用 Winkler 地基模型模拟两者之间的相互作用, 得到了弹性地基梁在受到集中力作用时的挠度变化曲线。

为了进行对比验证, 与文献[16]采用统一的模型参数, 取直梁的长度 $L = 20$ m, 直梁的宽度为 1 m, 高度 $h = 0.5$ m, 弹性模量 $E = 20$ GPa, 即梁的抗弯刚度 $EI = 2 \times 10^5$ kN·m², Winkler 地基上竖向弹簧的刚度 $k_z = 3 \times 10^4$ kPa/m。在直梁上作用 3 个竖直向下的集中荷载, 位置分别在 2、10 和 18 m 处, 大小均为 500 kN。

图 4 为本文解析解与文献[16]结果的对比曲线, 可以观察到曲线呈“M”形, 在梁的 6 m 和 14 m 处, 直梁竖向位移 w 的绝对值达到了最小值, 在靠近梁两端的位置, w 的绝对值较大且为最大值。

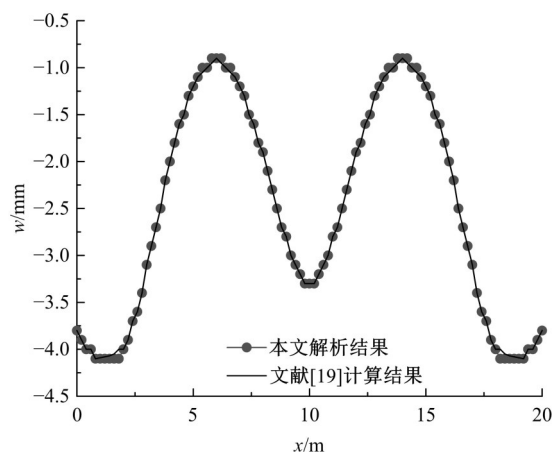


图 4 本文解析解与已有文献的计算结果对比

Fig. 4 Comparison between present analytical results and results of existing literature

本文解析结果与文献[16]的结果十分吻合, 两者的计算结果最大相差为 2.9%, 从一定程度上证明了本文解析方法的可靠性。

3.1.2 含裂缝的单层路面结构有限元验证

通过与经典 Winkler 地基上单层路面结构有限元模型计算结果对比来验证本文分析方法的正确性。

图 5 给出了该数值算例用到的含裂缝的单层路面结构及建立的坐标系。该路面结构上存在 1 处裂缝, 其位置在 $x = 4$ m。长度为 6 m, 截面高度为 0.3 m, 宽度取为 1 m。CRCP 中混凝土路面板的弹性模量一般为 26~34 GPa, 故在该模型中取其中间值 30 GPa。

本文在有限元软件 ABAQUS 中, 用三结点平面二次梁单元 (B22) 对该路面结构进行模拟, 沿梁全长设置竖向接地弹簧单元, 经典 Winkler 地基上竖向弹簧的刚度 $k_z = 1.0 \times 10^3$ kN/m (对应于本文解析解中的 $k_z = 1.0 \times 10^4$ kPa/m)。直梁的边界条件采用“两端固定”约束, 即约束直梁始末两端截面的竖向位移和转角。

本文利用接头模型来模拟路面结构上的横向裂缝, 裂缝处分别采用竖向和转动方向的点对点弹簧单元模拟。由于接头模型常用于分析隧道衬

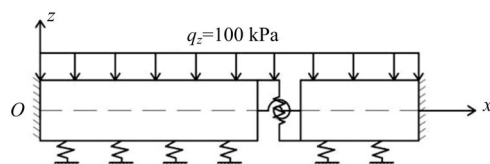


图 5 数值模型及坐标系

Fig. 5 Numerical model and coordinate system

砌结构的力学行为,而用于路面结构的分析还尚未见报道。考虑到裂缝处在不同方向上的刚度会存在一定的差异,但本文旨在提出一种解析分析方法,所以对于接头模型中线弹簧刚度的选取,综合考量后决定通过参考隧道方向的相关文献[15, 17]并进行多次试算来确定,线弹簧的转动刚度为 $3.6 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{rad}$,线弹簧的剪切刚度为 $1.0 \times 10^7 \text{ kN} / \text{m}^2$ 。荷载为向下的均布荷载,大小为 100 kPa 。在解析模型中,直梁的边界条件与有限元保持一致,所以需要补充 4 个边界条件,即直梁始末两端截面的竖向位移和转角均为 0。

图 6(a)~(d)分别给出了本文解析方法和数值计算方法竖向位移、转角、剪力和弯矩的计算结果对比。由于模型中弹簧的存在,根据弹簧的线性变形关系及内力的连续性可知,在裂缝位置内力是连续的,而位移是不连续的,故其左右两侧的位移不同。所以从图 6(a)和(b)中可以看出,无论是 ABAQUS 数值模拟还是解析解,竖向位移和截面转角曲线在 $x=4 \text{ m}$ 处均会出现错层。

对比本文解析方法和 ABAQUS 数值模拟的

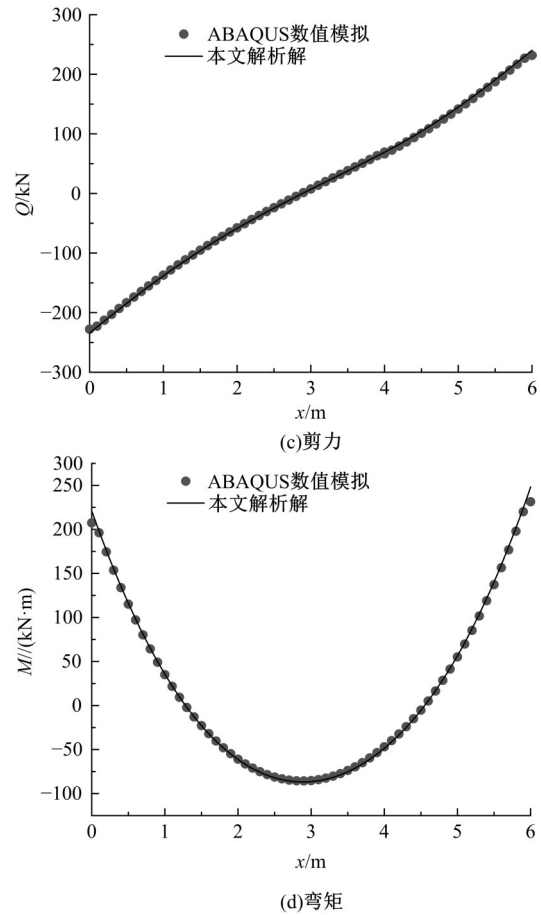
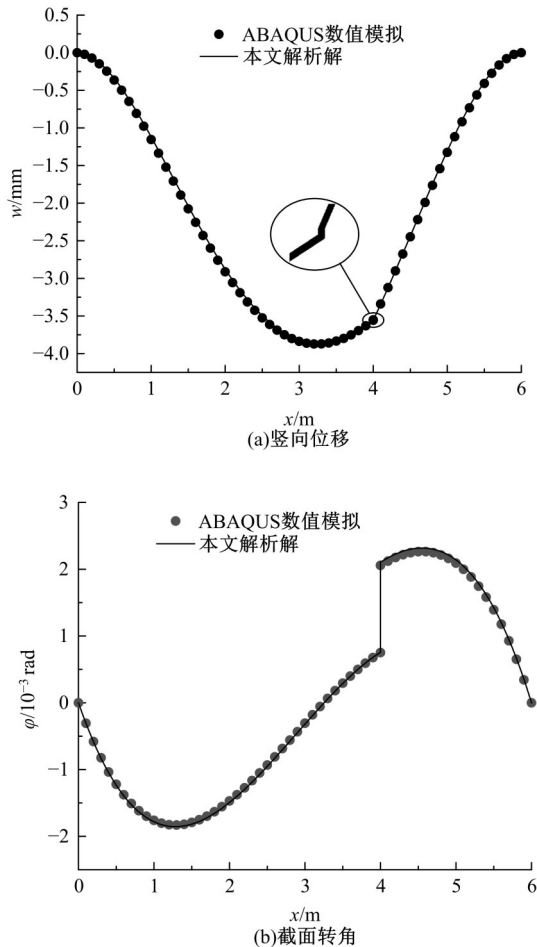


图 6 本文解析解与有限元计算结果对比

Fig. 6 Comparison between present analytical results and numerical results of ABAQUS

计算结果发现,两者竖向位移、截面转角、剪力和弯矩的计算结果最大相差分别为 2.2%、2.1%、3.0% 和 5.9%,其结果非常接近,证明了解析结果的正确性。

3.2 参数分析

以典型的含裂缝 CRCP 路面结构为例, L 取 6 m ,边界条件为两端固定。

3.2.1 裂缝间距的影响

若横向裂缝的间距较小(小于 0.6 m),可能会产生冲断病害,严重影响到车辆在行驶时的安全性以及驾乘人员的舒适性^[18]。有研究表明,在 CRCP 中,发展成熟的横向裂缝间距一般在 1 m 到 2 m 之间^[12]。综上,设裂缝间距为 d ,本节选取 $d=1.0 \text{ m}$, 1.5 m , 2.0 m 。截面高度 h 为 0.28 m ,荷载为跨中作用向下的集中力 P (100 kN)。

图 7(a)为不同裂缝间距下直梁变形响应的计算结果。由图观察到,裂缝间距较小时,直梁的竖向位移很大,且当荷载作用在裂缝位置时,曲线

会出现尖角。随着裂缝间距的增大,直梁的竖向位移变化曲线趋于圆滑。

随着裂缝间距的减小,在作用荷载的位置,直梁的竖向位移分别增加了 46.6% 和 10.3%。当裂缝间距从 2.0 m 减小到 1.0 m 时,最大竖向位移增加了 61.6%。由此可见,裂缝间距对直梁的竖向位移影响是显著的,不可忽略。

图 7(b) 为不同裂缝间距下直梁截面转角的变化曲线。从图中可以观察到,当 $d=1.0$ m 和 $d=1.5$ m 时,即在直梁跨中有 1 处裂缝,在集中荷载的作用下,梁截面产生了很大的转角,而其他位置的转角相对较小。梁在受荷时,截面本身就会产生一定的转角,若集中荷载作用在裂缝位置,则会产生更大的转角。

如果横向裂缝的间距过小,对路面结构非常不利,因此,无论是在设计过程还是施工过程中,都应该控制过小的横缝间距的发生,从而降低中断病害发生的概率,进而提高路面结构在服役期

间的使用性能。

3.2.2 荷载大小的影响

荷载的大小会直接影响路面结构的破坏速度,尤其是水泥混凝土路面。本文荷载 P 的大小分别取 100 kN、150 kN 和 200 kN,且在直梁的三分点共有 2 处裂缝,考虑荷载 P 的大小对路面结构变形响应的影响。

图 8(a) 为不同大小的荷载 P 作用下直梁变形响应的计算结果。从图中直梁的竖向位移结果来看,当荷载较小时,曲线是光滑的,随着荷载的增大,曲线在裂缝位置开始出现转折,且荷载越大,转折现象越明显。当荷载增大一倍时,直梁的竖向位移也几乎增大了一倍,这与本文的基本假定①相符。

图 8(b) 为不同大小的荷载 P 作用下直梁截面转角的变化曲线。观察曲线可以得到,在裂缝处,直梁的转角曲线会发生明显的突变,且随着竖向集中荷载的增大,在裂缝处,梁截面的转角变化

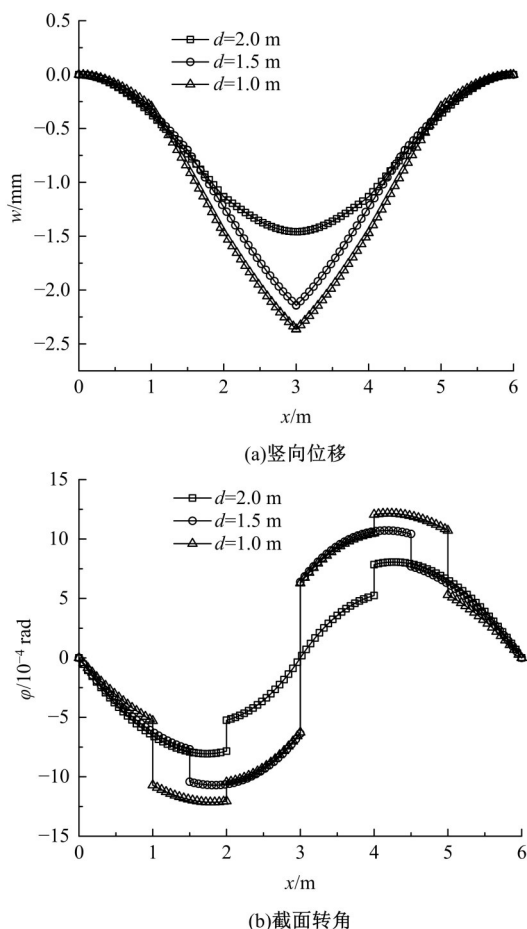


图 7 不同裂缝间距下直梁的变形响应

Fig. 7 Deformation responses of straight beam with different crack spacing

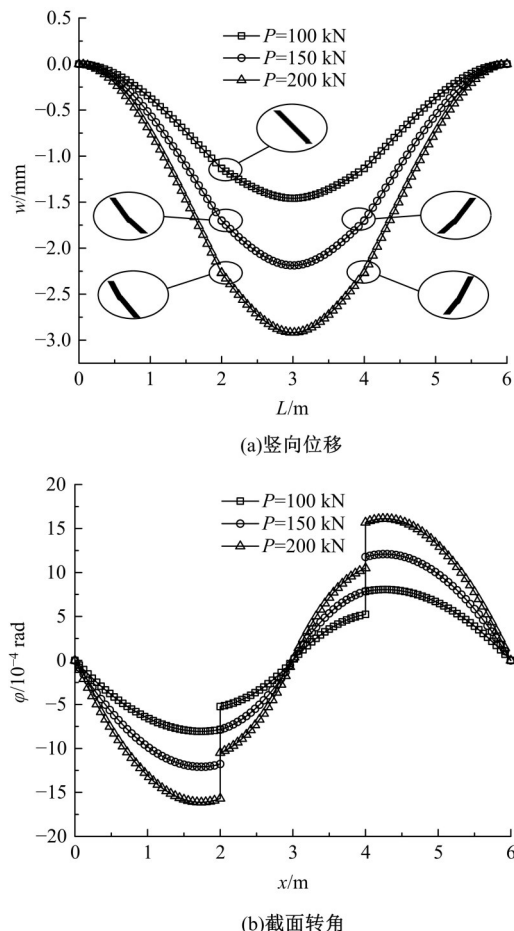


图 8 不同荷载大小作用下直梁的变形响应

Fig. 8 Deformation responses of straight beam with different magnitude of load

率分别增加了51.2%和100%,这说明荷载的增大会加剧路面结构的弯曲变形。

由此可见,重载作用对路面结构的损害很大,因此对于车辆超载的现象一定要严格控制。

3.2.3 面层厚度的影响

面层板厚度是水泥路面结构本身的敏感因素之一,经相关的文献调查^[18],本节选取混凝土板厚度 $h=0.28\text{ m}$, 0.26 m , 0.24 m , 0.22 m 。荷载条件为跨中作用方向向下的集中荷载 P ,大小为 100 kN ,且在直梁的三分点共有2处裂缝。

图9(a)为不同面层厚度下直梁变形响应的计算结果。从图中可以观察到,当面层厚度减小时,竖向位移逐渐增大,其增大的幅度分别为14.4%、15.0%和15.1%。经计算得出,在裂缝处,厚度为 22 cm 时路面结构的竖向位移值比厚度为 28 cm 时的竖向位移值大51.4%。故可以说明,增加面层厚度可以减小路面结构的竖向位移值,但随着厚度的增加,竖向位移减小的效果逐渐减弱。

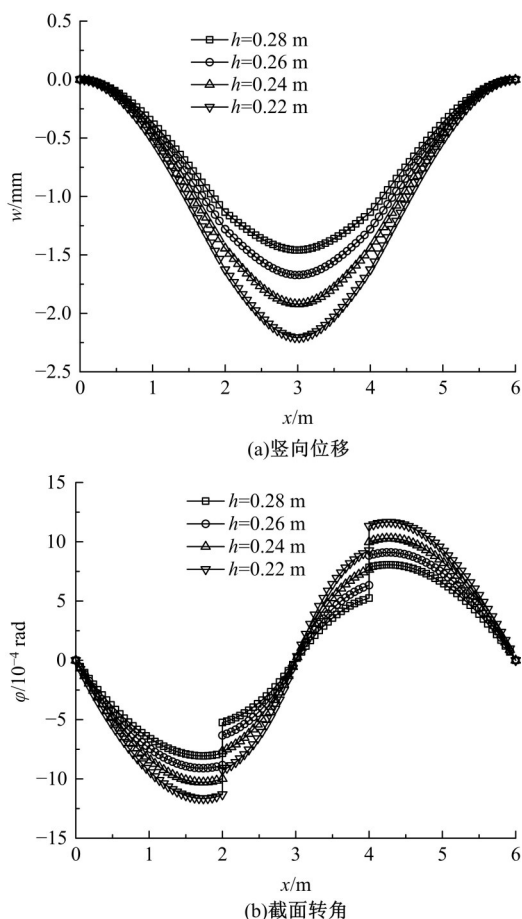


图9 不同面层厚度下直梁的变形响应

Fig. 9 Deformation responses of straight beam with different surface thickness

图9(b)为不同面层厚度下直梁截面转角的变化曲线。由图可知,截面最大转角与厚度呈反比,随着板厚的减小,在裂缝处,梁截面的转角分别增大了12.6%、12.9%和13.2%。这里可以认为,增大面层厚度会抑制直梁的弯曲变形。

通过以上分析得出,路面板厚度也是影响路面结构力学特性的一个重要因素。在实际工程中,可以通过增大板厚以减小其变形,延长路面结构的使用寿命,但也要考虑预算成本,不能单纯地依靠增加板厚来减小结构层的竖向位移。

4 结 论

(1)当荷载作用在裂缝位置时,梁的竖向位移变化曲线会出现尖角,且裂缝间距越小,竖向位移和转角越大。控制过小的裂缝间距的发生,能够有效地减小路面结构的弯曲变形。

(2)当荷载较小时,梁的竖向位移曲线是光滑的,随着荷载的增大,曲线在裂缝位置开始出现转折,且荷载越大,转折越明显。重载对于路面结构的损害极大,在路面的服役期内,要严格控制超载现象。

(3)增加面层厚度可以减小路面结构的竖向位移值,但随着厚度的增加,竖向位移减小的效果逐渐减弱。在水泥路面设计中,可以适当增大板厚来减小路面结构层的竖向变形并抑制其弯曲变形,但不能单纯地依靠这种方法。

参考文献:

- [1] Gu Fan, Luo Xue, Luo Rong, et al. Numerical modeling of geogrid-reinforced flexible pavement and corresponding validation using large-scale tank test[J]. Construction and Building Materials, 2016, 122: 214-230.
- [2] 钟春玲, 李娜, 孟广伟. 连续配筋混凝土路面力学行为的温度效应[J]. 吉林大学学报:工学版, 2014, 44(1): 68-73.
Zhong Chun-ling, Li Na, Meng Guang-wei. Temperature effect on mechanical behaviors of continuously reinforced concrete pavement[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2014, 44(1): 68-73.
- [3] Wang Lin-bing, Park J Y, Fu Yan-rong. Representation of real particles for DEM simulation using X-ray tomography[J]. Construction and Building Materi-

- als, 2005, 21(2): 338-346.
- [4] 鲁巍巍, 郑健龙. 横观各向同性黏弹性沥青路面的动力响应[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2018, 49(4): 964-970.
- Lu Wei-wei, Zheng Jian-long. Dynamic response of cross-anisotropic viscoelastic asphalt pavement[J]. Journal of Central University (Science and Technology), 2018, 49(4): 964-970.
- [5] Zhang Peng-chong, Liu Jun, Lin Gao, et al. Axisymmetric dynamic response of the multi-layered transversely isotropic medium[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 78: 1-18.
- [6] 沈凯仁, 陈先华, 周杰, 等. 基于半解析有限元的水泥路面荷载响应分析[J]. 工程力学, 2020, 37(2): 134-144.
- Shen Kai-ren, Chen Xian-hua, Zhou Jie, et al. Study of the cement pavement mechanical response using the semi-analytical finite element method[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(2): 134-144.
- [7] Yan Ke-zhen, Xu Hong-bin, You Ling-yun. Analytical layer-element approach for wave propagation of transversely isotropic pavement[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016, 17(3): 275-282.
- [8] 姚伟岸, 钟万勰. 辛弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [9] Wang Jin-chang, Huang Wei-ming, Xu Ri-qing, et al. Analytical approach for circular-jointed shield tunnel lining based on the state space method[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2020, 44(5): 575-595.
- [10] Wang Jin-chang, Huang Wei-ming, Xu Rong-qiao, et al. Analytical solution for segmental tunnel lining incorporating interaction between adjacent rings[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2020, 146(7): No. 04020075.
- [11] Zhu Ming-xing, Zhang Yan-bei, Gong Wei-ming, et al. Generalized solutions for axially and laterally loaded piles in multilayered soil deposits with transfer matrix method[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(4): No. 04016104.
- [12] 张雅婷. 连续配筋混凝土路面的层间粘结状态与横向裂缝特性研究[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2018.
- Zhang Ya-ting. Evaluation of interlayer bonding condition and transverse crack properties in continuously reinforced concrete pavement[D]. Hangzhou: College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 2018.
- [13] 张洪亮, 郝景贤, 王衍辉, 等. 基于参数变异性的连续配筋混凝土路面横向裂缝分布预估方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34(6): 1-6.
- Zhang Hong-liang, Hao Jing-xian, Wang Yan-hui, et al. Prediction method of the distribution of transverse cracks on continuously reinforced concrete pavement based on variability of parameters[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2014, 34(6): 1-6.
- [14] Ma Zhen-hui, Ma Ze-hua, Wu Ying-wei, et al. Numerical study on thermal deformation behaviors of the single subassembly in sodium-cooled fast reactors based on Euler-Bernoulli beam theory[J]. Nuclear Engineering and Design, 2019, 345: 28-39.
- [15] 陈秋杰, 杨仲轩, 徐荣桥, 等. 一种新的盾构隧道双层衬砌解析分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊 1): 2713-2724.
- Chen Qiu-jie, Yang Zhong-xuan, Xu Rong-qiao, et al. A new analytical solution for shield tunnel with double lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Sup. 1): 2713-2724.
- [16] 马立博, 时伟, 周印章, 等. Winkler与三参数弹性地基梁模型的计算比较[J]. 青岛理工大学学报, 2008, 29(4): 36-39, 45.
- Ma Li-bo, Shi Wei, Zhou Yin-zhang, et al. The calculation comparison between winkler and tri-parameter elastic foundation beam model[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2008, 29(4): 36-39, 45.
- [17] Yan Qi-xiang, Yao Chao-fan, Yang Wen-bo, et al. An improved numerical model of shield tunnel with double lining and its applications[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2015, 37(12): 114-120.
- [18] 李权权. GFRP筋连续配筋混凝土路面横向裂缝纵向分布预估研究[D]. 武汉: 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 2018.
- Li Quan-quan. Prediction of longitudinal distribution of transverse cracks in continuously reinforced concrete pavement with GFRP bars[D]. Wuhan: School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, 2018.