

脱空状态下接缝传荷系统服役规律及机制研究

朱国伟

佛山市交通科技有限公司, 广东 佛山

收稿日期: 2026年3月27日; 录用日期: 2026年4月17日; 发布日期: 2026年4月29日

摘要

厘清复合式路面脱空状态下接缝传荷系统服役规律及工作机制, 对于脱空病害的处治及复合式路面结构设计具有重要意义。本文构建了含弹簧单元的三维有限元模型, 通过批量设置弹簧、连接器单元实现了复合式路面接缝传荷系统的模拟, 对比分析了板角半脱空、板角全脱空下不同弹簧刚度的弯沉及接缝传荷系数变化规律, 并对连接器单元的三向应力分布规律进行了分析。结论表明: 脱空尺寸不变, 弯沉和接缝传荷系数随弹簧刚度总体增加而减小, 弹簧刚度宜在 $0.5q\sim 5q$ 范围内; 弹簧刚度不变, 接缝传荷系数随脱空尺寸增加而减小, 弯沉随脱空尺寸增加而增加, 脱空尺寸在 $400\sim 800$ mm时, 弯沉迅速增加; 接缝传荷系统工作特点为局部协同工作机制, 弹簧并非同时参与工作, 而是以脱空局部区域为中心, 随着脱空区域板角挠度的增加, 邻近的弹簧由近及远分批地协同参与工作。

关键词

道路工程, 复合式路面, 接缝传荷系数, 脱空, 局部协同

Research on Service Law and Mechanism of Joint Load Transfer System under Void Conditions

Guowei Zhu

Foshan Transportation Science and Technology Co., Ltd., Foshan Guangdong

Received: March 27, 2026; accepted: April 17, 2026; published: April 29, 2026

Abstract

Clarifying the service law and working mechanism of the joint load transfer system in composite pavements under void conditions is of great significance for void treatment and structural design

of composite pavements. In this study, a three-dimensional finite element model incorporating spring elements was established. The joint load transfer system of the composite pavement was simulated by employing spring elements and connector elements in batches. A comparative analysis was conducted on the variations in deflection and joint load transfer efficiency under partial corner voids and full corner voids with different spring stiffness levels. In addition, the triaxial stress distribution of the connector elements was analyzed. The results show that when the void size remains constant, deflection and joint load transfer efficiency generally decrease with increasing spring stiffness, and the recommended spring stiffness ranges from $0.5q$ to $5q$. When the spring stiffness is constant, joint load transfer efficiency decreases with increasing void size, while deflection increases. Deflection increases rapidly when the void size ranges from 400 mm to 800 mm. The joint load transfer system exhibits a localized cooperative working mechanism. The spring elements do not engage simultaneously. Instead, they are activated in a coordinated manner from near to far, centered around the localized void area, as the deflection ratio at the slab corner increases.

Keywords

Road Engineering, Compound Pavement, Joint Load Transfer Coefficient, Void, Local Cooperation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

复合式路面兼顾了刚性水泥路面的高强度和柔性沥青路面的舒适性,近十年来,在我国应用广泛。因水泥板接缝处未及时封闭或应力集中等原因,复合式路面水泥板板底脱空病害已成为典型病害之一。脱空形成后,水泥板板角失去支撑,水泥板呈悬臂梁受力状态,复合式路面的力学特性发生变化,易引起更深层次病害。然而,水泥板自有的接缝传荷体系将水泥板联结于一体,对于抵抗脱空病害对路面使用性能的劣化具有积极作用。立足于水泥板特有的接缝传荷体系,开展脱空状态下复合式路面结构传荷体系服役状态的相关研究,对于脱空病害的预防及处治具有显著意义。

周博子[1]分析了层间接触状态、刚度、厚度、板底脱空等因素下的接缝传荷规律及板内应力变化情况,对于接缝的设计具有指导意义;叶奋和胡诗园[2]利用有限元模型,开展了对超薄罩面层底接缝中心处的应力分析,对比研究不同因素对应力的影响程度,表明接缝传荷能力与超薄罩面疲劳开裂寿命呈幂函数关系;赵鸿铎等[3]研究了脱空状态与接缝传荷系数两者之间的变化规律,提出了根据接缝传荷来识别脱空状态的检测方法;柴震林等[4]研究发现脱空和接缝传荷能力不足是影响机场道面性能的主要原因,建议提高接缝传荷能力来延长道面使用寿命;蒋鑫等[5]对比研究了脱空形态与板底无脱空时传力杆直径、间距、松动量以及支承模量等参数对传荷能力的影响权重,分析了传力杆非均匀布设对传荷系统的优化效果;苗禄伟[6]揭示了板底脱空程度和接缝传荷对水泥路面力学响应的影响规律,构建了弯沉传荷系数与接缝刚度和脱空尺寸之间的关系模型。

综上所述,现有研究主要集中于脱空程度、脱空尺寸对接缝传荷宏观规律的影响分析,及不同因素对路面结构受力、疲劳寿命的影响规律分析,而忽略了对水泥板特有的接缝传荷工作机制方面的探讨。因此,本文立足于水泥板特有的接缝传荷体系,重在探讨脱空状态下接缝传荷体系的服役规律及工作机制,厘清水泥板内在接缝传荷系统工作原理,可更好为复合式路面脱空病害的预防及处治提供参考和借鉴。

2. 采用弹簧单元的有限元模型

2.1. 有限元模型

采用 ABAQUS 建立三维有限元模型，假定路面结构层材料各向完全均匀同性；约定 X、Y、Z 分别为行车方向、深度方向、横断面方向。沥青层、水泥板及基层尺寸如表 1 所示；在不涉及脱空的模拟时，土基采用温克勒地基模型；在涉及基层脱空时，土基采用扩大基础，X、Y、Z 方向尺寸分别为 10.02 m、3 m、5 m。采用 C3D8R 单元。扩大土基底面采取 ENCASTRE 约束条件，两侧面分别采用 XSYMM、ZSYMM 约束条件。沥青层、水泥板、基层 X 方向约束 U1 和 U3；Z 方向一侧采用弹簧模拟拉杆，另一侧采用自由边界。两块水泥板之间的传力杆采用弹簧模拟；土基和基层采用完全连续，基层和沥青层采用摩擦系数模拟层间摩擦关系。模型采用 Dynamic Explicit 求解。基层有脱空的三维有限元模型如图 1 所示。

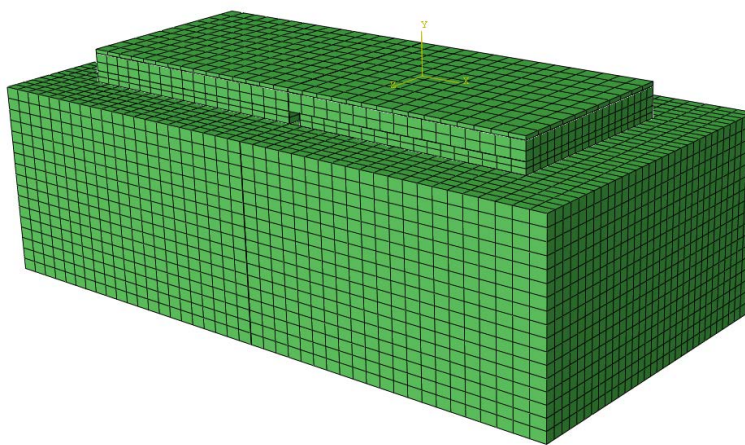


Figure 1. Three-dimensional finite element model with void
图 1. 含脱空的三维有限元模型

2.2. 基准模型材料参数

基准模型及参数如表 1 所示，路面结构如图 2 所示。

Table 1. Benchmark model parameters

表 1. 基准模型参数

结构层名称	长	宽	厚度	模量	泊松比
AC-16	8.01 m	3 m	6 cm	2000 MPa	0.2
水泥混凝土板	4 m*2	3 m	28 cm	30,000 MPa	0.15
水泥稳定碎石	8.01 m	3 m	18 cm	2600 MPa	0.15
地基反应模量				50 MN/m ³	
接缝宽度 δ				1 cm	
层间状态(沥青 + 水泥)				层间光滑	
层间状态(水泥 + 基层)				完全连续	

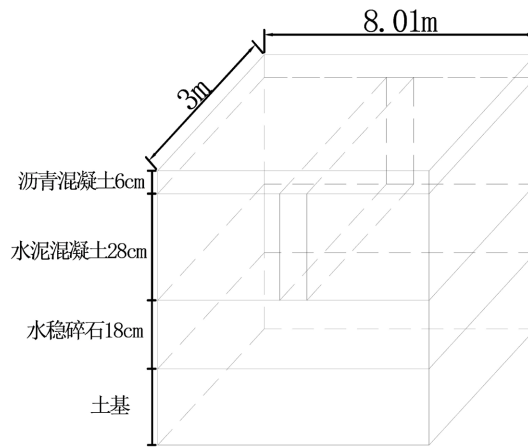


Figure 2. Schematic diagram of pavement structure
图 2. 路面结构示意图

2.3. 接缝传荷模拟

(1) 模拟方法

采用弹簧单元模拟计算，设置三向剪切弹簧单元模拟接缝处的传荷作用。应用弹簧单元法模拟接缝传荷作用时，关键是如何计算接缝刚度 q 。本文采用理论法计算接缝刚度，计算过程如式(1)~(7)所示。计算思路为：① 计算混凝土对传力杆支承的剪切刚度 DCI；② 计算传力杆自身剪切弹簧刚度 C ；③ 计算 DCI 与 C 的组合剪切刚度 D ；④ 计算接缝单位长度的刚度 q 。

$$DCI = \frac{4\beta^3}{(2 + \beta\omega)} E_d I_d \quad (1)$$

$$\beta = \left(\frac{Kd}{4E_d I_d} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

$$C = \frac{E_d I_d}{\omega^3 (1 + \phi)} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{12E_d I_d}{G_d A_d \omega^2} \quad (4)$$

$$G_d = \frac{E_d}{2(1 + \mu_d)} \quad (5)$$

$$D = \frac{1}{\frac{1}{DCI} + \frac{1}{12C}} \quad (6)$$

$$q = \frac{D}{s} \quad (7)$$

上式中， E_d ——水泥混凝土板间传力杆弹性模量，MPa； I_d ——水泥混凝土板间传力杆截面惯性矩， m^4 ； K ——混凝土对传力杆的支承模量， MN/m^3 ； d ——水泥混凝土板间传力杆直径，m； β ——传力杆 - 混凝土的相对刚度， m^{-1} ； ω ——接缝缝隙宽度，m； G_d ——水泥混凝土板间传力杆剪切模量，MPa； A_d ——水泥混凝土板间传力杆有效截面面积， m^2 ； μ_d ——水泥混凝土板间传力杆泊松比； s ——水泥混凝土

土板间传力杆间距, m。

(2) 弹簧刚度计算

参考相关规范和资料, 取杆的弹性模量为 200 GPa, 泊松比为 0.3, 传力杆的直径取 32 mm, 间距为 0.3 m, 接缝宽度为 10 mm, 根据式(1)~(7), 计算结果如表 2 所示。

Table 2. Calculation process of joint stiffness

表 2. 接缝刚度计算过程表

名称	单位	传力杆系数
d	m	0.032
E_d	MPa	2E5
I_d	m ⁴	5.15×10^{-8}
K_d	MPa	4.07×10^5
ω	m	0.01
β	m ⁻¹	23.71
DCI	MN × m ⁻¹	245.45
μ_d	/	0.3
G_d	MPa	76923.08
A_d	m ²	7.23×10^{-4}
ϕ	/	22.19
C	MN × m ⁻¹	443.75
D	MN × m ⁻¹	234.63
s	m	0.3
q	MN × m ⁻²	782.13

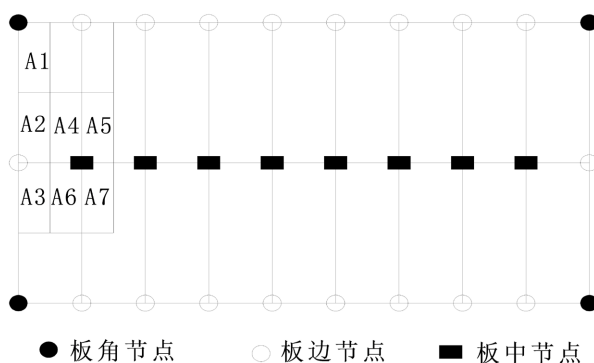


Figure 3. Schematic diagram of nodes of cement concrete slab
图 3. 板侧面结点图

计算得到接缝单位长度刚度 q 后, 按照公式(8)~(10)分别计算板角、板边、板中的弹簧刚度。

$$k'_1 = \frac{q \times L}{4 \times (n_r - 1)(n_c - 1)} \tag{8}$$

$$k'_2 = 2 \times k'_1 \tag{9}$$

$$k'_3 = 4 \times k'_1 \tag{10}$$

式中： k_1' 、 k_2' 、 k_3' ——板侧面板角、板边、板中弹簧刚度， $\text{N} \times \text{m}^{-1}$ ； L ——裂缝长度， m ； n_r 、 n_c ——板侧面结点行、列数，具体分配如图 3 所示。

(3) 弹簧模拟接缝传荷算法

在网格划分后，给出各个节点位置的弹簧刚度，并且设置三向弹簧，工作量较大。本节采用 python 开发了弹簧模拟接缝传荷算法，批量写入 inp 文件，完成水泥板之间接缝传荷模拟及水泥板一侧边界约束条件模拟，接缝处传荷示意图见图 4，水泥混凝土板接缝处弹簧单元模拟见图 5。

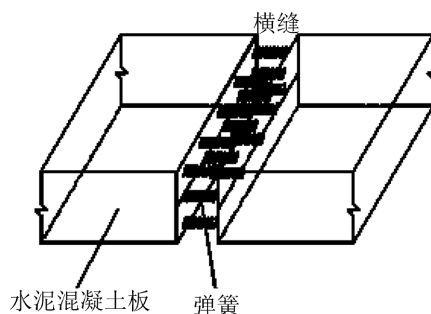


Figure 4. Schematic diagram of using spring to simulate load transfer at the joint
图 4. 利用弹簧模拟节点处荷载传递的示意图

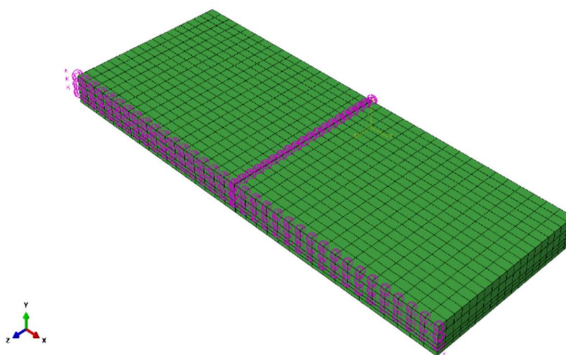


Figure 5. Simulation of spring units at the joints of cement concrete slabs
图 5. 水泥混凝土板接缝处弹簧单元模拟

其中，弹簧模拟接缝传荷算法原理及步骤：

- ① 水泥板纵向传力杆采用两点弹簧 SPRING2 模拟，水泥板一侧拉杆采用接地弹簧 SPRING1 模拟。
- ② 在网格划分后，采用 Renumbering 命令对需要设置弹簧的节点按照一定规则进行重新编号，编号规则要便于 Python 进行程序化语言设计。
- ③ 遵从 INP 文件读取规则，采用 Python 将式 8~10 计算的弹簧刚度批量化书写，然后更新新的 INP 文件。

(4) 采用 Python 将弹簧批量转化成连接器

有限元采用弹簧作为连接单元时，弹簧无法输出三向应力，而有限元中连接器可以输出三向应力。因此，采用 Python 编写转换程序 spring to connector，将弹簧转化为连接器单元。程序按照 inp 文件中的连接器编写规则，将原 inp 文件中对应的重编号后的弹簧连接转换为连接器连接。删除原先定义的重编号后节点之间的连接弹簧，避免刚度呈现两倍。在 step 模块，针对 connector force 输出，勾选 CTF1、CTF2、CTF3；提交分析，待计算完成，通过查看 CTF 便可获得水泥板拉杆、传力杆在不同工况下的三

向应力情况。

3. 计算方案

3.1. 加载、指标及点位

根据荷载等效原则，将 FWD 圆形荷载简化为方形荷载，尺寸为 0.266 m*0.266 m，荷载施加位置为水泥板板角正上方，FWD 加载荷载设置为脉冲荷载，一个周期为 30 ms，荷载最大值为 0.707 Mpa，其时程曲线如图 6 所示。

以接缝两侧相邻板边缘竖向位移值的比值作为弯沉传荷系数。为了统一和方便，后文将 FWD 荷载正下方的水泥板简称为受荷板，另外一块板简称为非受荷板；同时，水泥板的竖向位移仍称之为弯沉。

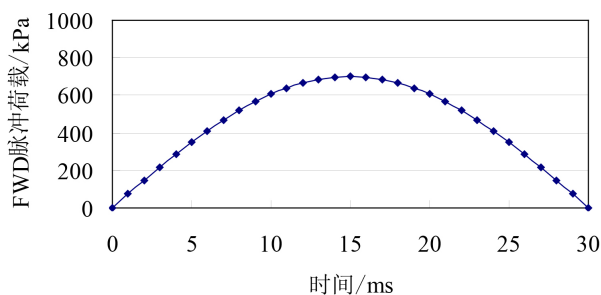


Figure 6. Time-history curve of FWD pulse load
图 6. FWD 脉冲荷载时程曲线

3.2. 脱空形态模拟

采取断面为等腰直角三角形的棱柱体来模拟脱空形态，棱柱体与基层同高，等腰直角三角形边长(简称为脱空尺寸)分别取 0.2 m、0.4 m、0.8 m、1 m；采取模量折减的方式来表征脱空，即脱空处模量取值 0 MPa；选择板角半脱空、板角全脱空两种脱空形式，板角半脱空指仅水泥混凝土板受荷板下有脱空，板角全脱空指受荷板和非受荷板下均有脱空，脱空的形态相同。

4. 弯沉和接缝传荷系数变化规律

变化弹簧刚度及编号，如表 3 所示，对比分析了不同弹簧刚度、不同脱空尺寸、不同脱空形态下的弯沉变化规律，提取水泥混凝土板受荷板和非受荷板的最大弯沉值如图 7 所示。同时，计算了不同弹簧刚度、脱空下的接缝传荷系数，如表 4 所示。

Table 3. Joint stiffness at different points of the slab
表 3. 水泥板不同位置的节点刚度

不同弹簧刚度施加编号	板角 $N \times m^{-1}$	板中 $N \times m^{-1}$	板边 $N \times m^{-1}$
0.005q	8.25×10^4	1.65×10^5	3.3×10^5
0.01q	1.5×10^5	3.0×10^5	6.0×10^5
0.05q	8.25×10^5	1.65×10^6	3.3×10^6
0.1q	1.5×10^6	3.0×10^6	6.0×10^6
0.5q	8.25×10^6	1.65×10^7	3.3×10^7
q	1.5×10^7	3.0×10^7	6.0×10^7
5q	8.25×10^7	1.65×10^8	3.3×10^8
10q	1.5×10^8	3.0×10^8	6.0×10^8

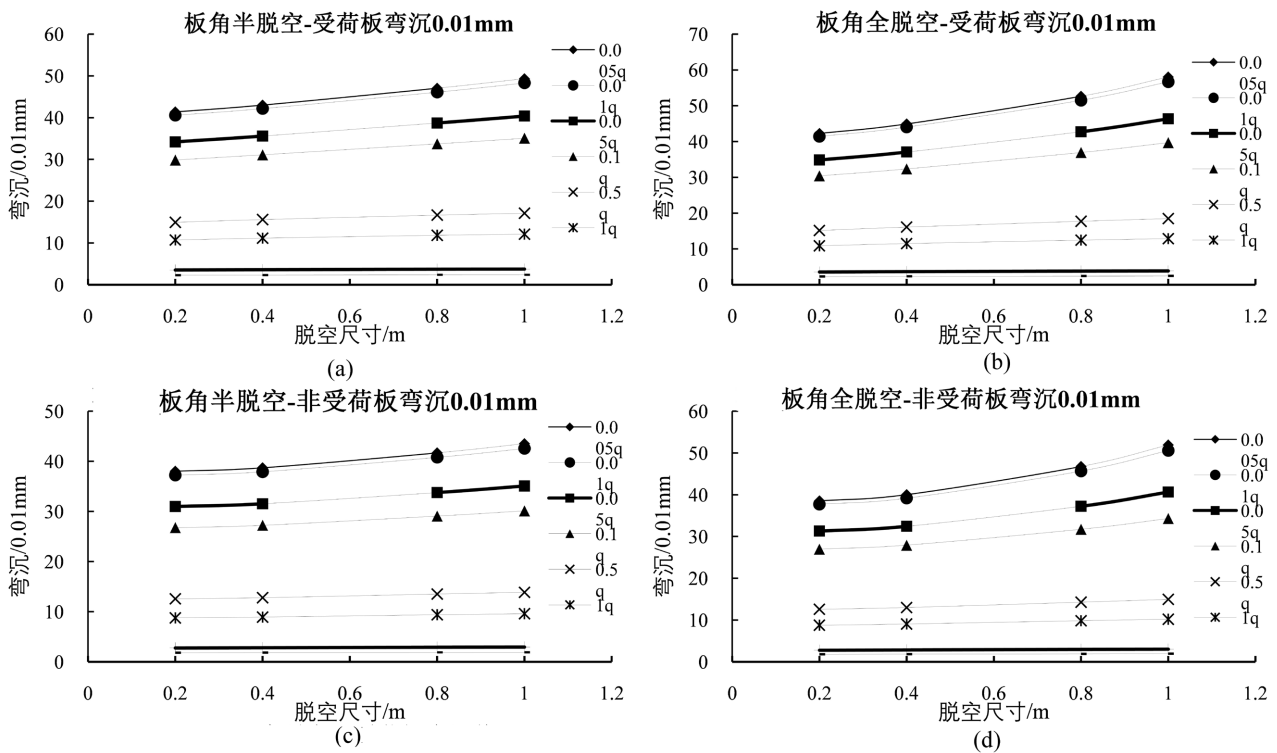


Figure 7. Slab deflection under different values of spring stiffness and degree of void. (a) Deflection of loaded slab with semi-void state; (b) Deflection of non-loaded slab with semi-void state; (c) Deflection of loaded slab with full void state; (d) Deflection of non-loaded slab with full void state

图 7. 不同弹簧刚度和脱空程度下弯沉值。(a) 半脱空下受荷板弯沉值; (b) 半脱空下非受荷板弯沉值; (c) 全脱空下受荷板弯沉值; (d) 全脱空下非受荷板弯沉值

Table 4. Deflection load transfer coefficient under different values of spring stiffness and degree of void

表 4. 不同弹簧刚度、脱空下的弯沉传荷系数

脱空形式	脱空尺寸	0.005q	0.01q	0.05q	0.1q	0.5q	q	5q	10q
板角半脱空	0.2 m	92%	92%	91%	90%	84%	82%	79%	79%
	0.4 m	90%	90%	89%	88%	82%	80%	79%	79%
	0.8 m	89%	88%	87%	86%	81%	79%	79%	80%
	1 m	88%	88%	87%	86%	81%	79%	79%	80%
板角全脱空	0.2 m	91%	91%	90%	89%	83%	81%	79%	79%
	0.4 m	89%	89%	88%	86%	81%	79%	78%	79%
	0.8 m	89%	89%	87%	86%	81%	79%	79%	79%
	1 m	89%	89%	88%	86%	81%	79%	79%	80%

由图 7 和表 4 可得:

(1) 板底半脱空和全脱空时, 随着弹簧刚度增加, 受荷板和非受荷板弯沉均减小; 当弹簧刚度不变, 随着脱空尺寸增加, 受荷板和非受荷板弯沉均增加。变化幅度以 0.1q 为分水岭, 当弹簧刚度小于等于 0.1q 时, 弯沉增幅较大。

(2) 板底半脱空和全脱空时, 随着弹簧刚度增加, 接缝传荷系数大体呈减小趋势, 脱空尺寸越大, 传荷系数减小幅度越小。减小趋势以 0.1q 为分水岭, 当弹簧刚度大于 0.1q 时, 传荷系数变化不大。除弹簧刚度为 10q 外, 在弹簧刚度一定时, 脱空尺寸越大, 传荷系数越小。弹簧刚度一定时, 脱空尺寸从 0.2 m

增加 1 m, 最大弯沉增加率呈现先增加后减小的趋势, 半脱空尺寸和全脱空尺寸由 0.4 m 增加到 0.8 m 时, 最大弯沉增加率均最大。

(3) 随着弹簧刚度增加, 在外部荷载作用下, 受荷板会承担主要更多荷载, 导致变形相对更大, 传荷系数减小, 弹簧过大的刚度反而对传荷不利; 同时, 弹簧刚度过小, 如小于 $0.1q$, 虽然传荷系数较大, 实则绝对变形较大, 对水泥混凝土板不利。由此可见, 弹簧刚度应在 $0.5q \sim 5q$ 范围内。

(4) 相比于板底半脱空, 全脱空下的受荷板、非受荷板弯沉更大, 弯沉传荷系数均大于等于全脱空, 但相差不大; 且当弹簧刚度大于 q 时, 板底半脱空和全脱空的传荷系数均为 80% 左右, 随脱空尺寸的增加基本无变化。可见, 在外部荷载作用下, 弹簧与脱空产生交互效应, 弹簧刚度对弯沉及传荷系数的影响并非简单的线性或非线性变化。

5. 脱空下弹簧的局部协同工作机制

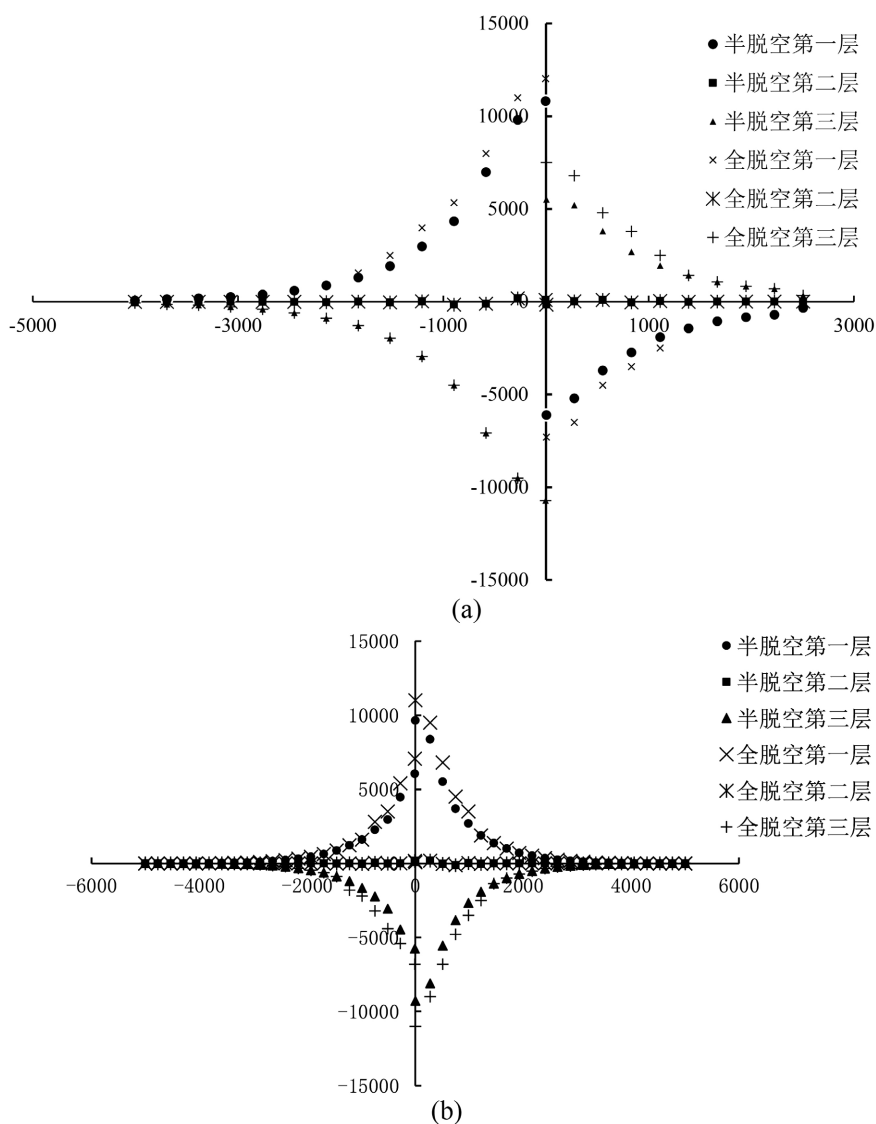


Figure 8. Analysis of three-dimensional stress state of spring. (a) Force analysis of three-layer spring in driving direction; (b) Force analysis of three-layer spring in cross-sectional direction

图 8. 弹簧三向应力状态分析。(a) 行车方向三层弹簧受力分析; (b) 横断面方向三层弹簧受力分析

为分析弹簧在复合式路面脱空状态下的工作机制,在脱空尺寸为 0.2 m 时,提取半脱空和全脱空两种状态下,对比分析横缝及纵缝三层弹簧的受力情况,分析不同脱空状态下的弹簧工作机制,图 8(a)和图 8(b)分别为不同脱空程度下横缝及纵缝三层弹簧的受力情况。

图 8(a)中,弹簧主要模拟纵缝拉杆的力学行为,其主要受力的方向为横断面方向。图 8(b)中,弹簧主要模拟横缝传力杆的力学行为,其主要受力的方向为行车方向。图 8(a)横坐标为距离横缝中线的位移,图 8(b)横坐标为距离纵缝中线的位移;并约定受荷板上弹簧距中线的位移为负,非受荷板上弹簧距中线位移为正。

(1) 随弹簧层位的变化,纵缝处弹簧沿横断面的力学分布规律有很大差别,位于水泥板顶面的第一层弹簧主要受拉力,位于水泥板底面的第三层弹簧主要受压力,中间第二层弹簧处于拉压交替状态;第一层、第三层弹簧力学分布规律近似呈抛物线分布;随弹簧层位的变化,横缝处弹簧沿行车方向的力学分布规律有很大差别,水泥板第一层、第三层弹簧均成双曲线分布形态,但方向相反,第二层弹簧呈拉压交替状态;受荷水泥板顶面第一层弹簧主要受拉力,第三层弹簧主要受压力;非受荷板第一层弹簧主要受压力,第三层弹簧主要受拉力。可见,在有脱空存在时,脱空区域的弹簧处于扭剪状态。

(2) 两个不同方向的力学行为均表明:脱空区域附近弹簧受力大,远离脱空区域的弹簧受力小,并逐渐趋于零;表明在弹簧抵抗因脱空造成的变形时,各弹簧并不是同时工作,而是靠近脱空区域的部分弹簧参与工作。第二层弹簧的拉力和压力无规律,处于拉力和压力过渡状态。

(3) 在弹簧刚度一定时,随着脱空面积的增加,脱空区域附近的拉力和压力绝对值稍有增加,但邻近弹簧的拉力和压力增加幅度较大,表明弹簧接缝传荷系统是局部协同的工作机制:先是脱空区域板角附近弹簧参与工作,而后随着脱空尺寸或脱空程度增加,脱空区域水泥板板角在荷载作用下产生的挠度逐渐增加,脱空区域的弹簧依次开启协同工作机制,板角邻近更大范围的弹簧产生位移而开始抵抗水泥板板角变形。

6. 结论

(1) 采用 Python 实现了批量设置弹簧组、连接器组模拟接缝传荷系统,连接器组可揭示接缝传荷系统的三向应力特征,能准确表征接缝传荷系统的工作规律。

(2) 不同脱空尺寸、脱空形态、弹簧刚度的分析结果表明:脱空尺寸不变,弯沉和接缝传荷系数随弹簧刚度总体增加而减小,综合考虑弯沉和接缝传荷系数变化规律,建议弹簧刚度宜在 0.5q~5q 范围内;弹簧刚度不变,接缝传荷系数随脱空尺寸增加而减小,弯沉随脱空尺寸增加而增加,脱空尺寸在 400~800 mm 时,弯沉迅速增加。

(3) 弹簧接缝传荷系统表现为局部协同的工作机制:脱空区域附近弹簧先参与工作,随着脱空尺寸或脱空程度增加,脱空区域水泥板板角在荷载作用下产生的挠度逐渐增加,脱空区域的弹簧依次开启协同工作机制,板角邻近更大范围的弹簧产生位移而开始抵抗水泥板板角变形。

参考文献

- [1] 周博子. 基于有限元分析的水泥混凝土路面接缝传荷性能研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 湖北工业大学, 2022.
- [2] 叶奋, 胡诗园. 考虑旧水泥路面接缝传荷能力的超薄罩面力学特性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(11): 2636-2643.
- [3] 赵鸿铎, 曾孟源, 吴荻非, 等. 脱空对刚性道面板应力分布的影响及临界脱空状态[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 243-253.
- [4] 柴震林, 袁捷, 谭悦. 脱空与接缝传荷对机场水泥混凝土道面性能的影响[C]//上海空港(第 16 辑). 上海: 上海科学技术出版社, 2013: 5.

- [5] 蒋鑫, 刘竹君, 曾诚, 等. 板底脱空对水泥混凝土路面板缝传荷的影响[J]. 中外公路, 2017, 37(1): 18-23.
- [6] 苗禄伟. 脱空与接缝传荷耦合作用下水泥混凝土路面力学响应分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.