

# 机场道面板底部应力模型研究

李巍逍<sup>1</sup>, 黄崇伟<sup>1</sup>, 朱美宣<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学交通运输工程系, 上海

<sup>2</sup>上海市浦东新区建设(集团)有限公司, 上海

收稿日期: 2023年11月22日; 录用日期: 2023年12月31日; 发布日期: 2024年1月10日

## 摘要

本研究针对机场高填方地基在安装水泥混凝土道面板后, 由于地基沉降不均引发板底应力的变化的问题, 采用有限单元法, 借助有限元软件建立了机场高填方地基上水泥混凝土道面板的二维有限元模型, 深入研究了这种应力变化的规律。通过理论分析和有限元仿真相结合的方法, 构建了不同填方高度30 m~90 m的高填方模型, 提取道面板底部路径发现, 填方高度90 m条件下, 在道面板最右侧处的最大压应力为0.06 MPa, 填方高度30 m下, 最小压应力为0.02 MPa。这项研究对于理解机场道面板在高填方地基下的受力特性具有重要意义, 为提高机场道面使用寿命和安全性提供了关键信息。

## 关键词

水泥混凝土道面板, 机场高填方工程, 有限元模拟

# Research on Stress Model at the Bottom of Airport Pavement Slab

Weixiao Li<sup>1</sup>, Chongwei Huang<sup>1</sup>, Meixuan Zhu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Transportation System Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>2</sup>Shanghai Pudong New Area Construction (Group) Co., Ltd., Shanghai

Received: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2023; accepted: Dec. 31<sup>st</sup>, 2023; published: Jan. 10<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In this study, aiming at the problem that the uneven settlement of the foundation causes the change

of the stress at the bottom of the plate after the cement concrete pavement is installed on the high fill foundation of the airport, the finite element method is used to establish the two-dimensional finite element model of the cement concrete pavement on the high fill foundation of the airport with the help of the finite element software, and the law of this stress change is studied in depth. Through the combination of theoretical analysis and finite element simulation, a high fill model with different fill heights of 30 m~90 m was constructed. The bottom path of the pavement slab was extracted. It was found that under the condition of the fill height of 90 m, the maximum compressive stress at the rightmost side of the pavement slab was 0.06 MPa. Under the fill height of 30 m, the minimum compressive stress was 0.02 MPa. This study is of great significance for understanding the mechanical characteristics of airport pavement under high fill foundation, and provides key information for improving the service life and safety of airport pavement.

## Keywords

Cement Concrete Pavement Slab, Airport High Fill Project, Finite Element Simulation

Copyright © 2024 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

我国机场跑道主要采用水泥混凝土道面结构,因其稳定性、维护费用低和环保特性而被广泛采用。然而,在使用一段时间后,许多水泥混凝土道面出现了各种病害,例如接缝破碎、填缝料损坏、板体断裂和坑洞,这些问题严重影响了道面的使用寿命,对机场的运行安全造成了显著威胁。当前的机场跑道水泥混凝土道面板的装配方法一般在地基沉降稳定后进行,但高填方地基不均匀沉降会导致道面板在外力作用下产生应力集中现象,这可能导致板边角的局部破坏,进而缩短道面板的使用寿命。

国内外学者对高填方地基上加盖水泥混凝土道面板的层底应力进行了广泛的研究。杨彪[1]模拟了道面面层和接缝用板单元,并考虑了面层和基层之间的界面接触,构建地基-道面-飞机轮载的三维有限元模型;李一凡[2]构建了水泥混凝土道面板的有限元模型,对板内最大弯拉应力随脱空状态的变化规律进行了分析;江圣泽[3]使用有限元软件针对水泥混凝土板块的受力进行模拟分析,研究发现板边和板角的应力最大,机轮滑行过程中,接缝两侧部位产生挤压现象;国外学者 Alexander John [4]基于有限元建模,采用了考虑弯剪耦合的非线性梁单元对水泥混凝土板进行建模。可以看出,国外研究大多集中在理论分析和数值模拟方面,对于实际道面的影响机理及解决方案的落地应用存在一定差距;国内研究多侧重于飞机动静荷载引起的道面板损坏研究,缺乏对加盖道面后,受地基影响的层底应力变化规律研究。

因此本研究通过理论分析和有限元仿真相结合的方法,构建了不同填方高度下 30 m、40 m、50 m、60 m、70 m、80 m、90 m 的加盖道面板的高填方模型,分析了不同填方高度对道面板的层底拉压应力的影响规律,以期为解决实际道面破损问题提供更为科学和全面的参考依据。

## 2. 有限元模型建立

### 2.1. 有限元基本理论

在本研究中,我们选择采用有限元法进行道面板应力应变数值模拟分析,并选用特定的有限元分析

软件来进行数值计算。我们采用了 CPE4 和 CPE4P 平面应变单元，其中 CPE4 平面应变单元用于考虑平面应变问题，适用于分析机场道面板在水平方向上的变形。CPE4P 平面应变单元与 CPE4 单元类似，也用于平面应变问题，但它具有更高的数值稳定性，特别适用于模拟具有非线性行为的土体和填筑材料。其他所涉及到的有限元基本方程式如下文介绍。

### (1) 位移函数与坐标变换

在有限元分析方法中引入等参元概念，将整体坐标中的子单元转化成自然坐标下( $\xi, \eta$  坐标)的任意母单元，四节点等参单元如图 1 所示。

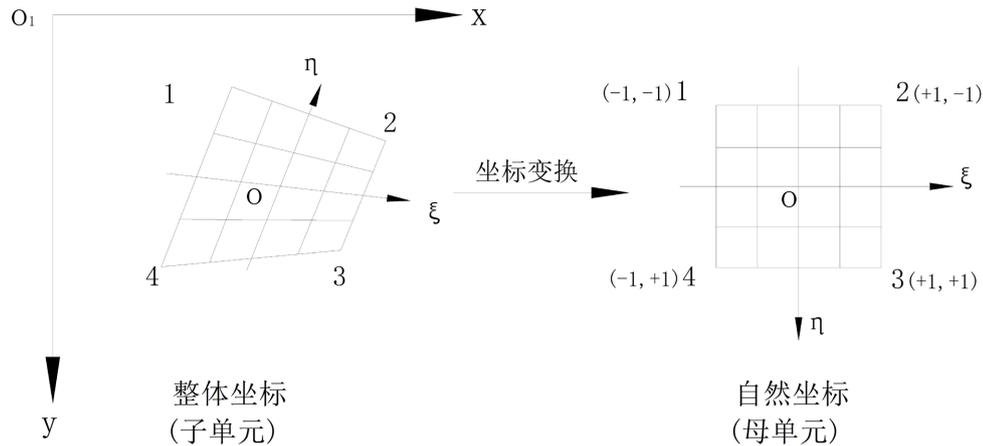


Figure 1. Four-node isoparametric element

图 1. 四节点等参单元

母单元在自然坐标系( $\xi, \eta$ )下为正方形，则位移函数( $u, v$ )在参考四节点矩形单元的位移函数后，可取为：

$$\begin{cases} u = N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3 + N_4 u_4 = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) u_i \\ v = N_1 v_1 + N_2 v_2 + N_3 v_3 + N_4 v_4 = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) v_i \end{cases} \quad (1)$$

### (2) 单元应变矩阵和应力矩阵

单元应变 $\{\varepsilon\}$ 可以由位移函数式(1)代入平面问题的几何方程而得到：

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} = [B_1 \quad B_2 \quad B_3 \quad B_4] \{\delta\}^{(e)} \quad (2)$$

$$[B_i] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

## (3) 单元刚度矩阵

平面问题的刚度矩阵定义为:

$$[K]^{(e)} = \iint_A [B]^T [D][B] t dx dy \quad (4)$$

应变矩阵 $[B]$ 由于是局部坐标 $(\xi, \eta)$ 的函数, 面积元 $dA = dx dy$ 必须用局部坐标 $(\xi, \eta)$ 表示, 则可以证明:

$$dA = |J| d\xi d\eta \quad (5)$$

## 2.2. 数值仿真模型构建

本节针对某机场工程不同填方高度的填筑体, 填筑土体参数参考施工现场勘察资料, 引入道面层, 探究机场高填方工程道面板层底应力的变化。考虑到在进行有限元软件建模时, 边界尺寸会对计算结果造成比较大的影响, 参考国内外学者的研究, 高填方的坡脚到边界的尺寸不应小于填筑体高度的 1.5 倍, 高填方顶部至边界的距离不应小于填筑体高度的 1.0 倍, 即可消除边界效应对计算精度造成的影响, 基于以上的研究结果, 建立如图 2 所示的几何模型。

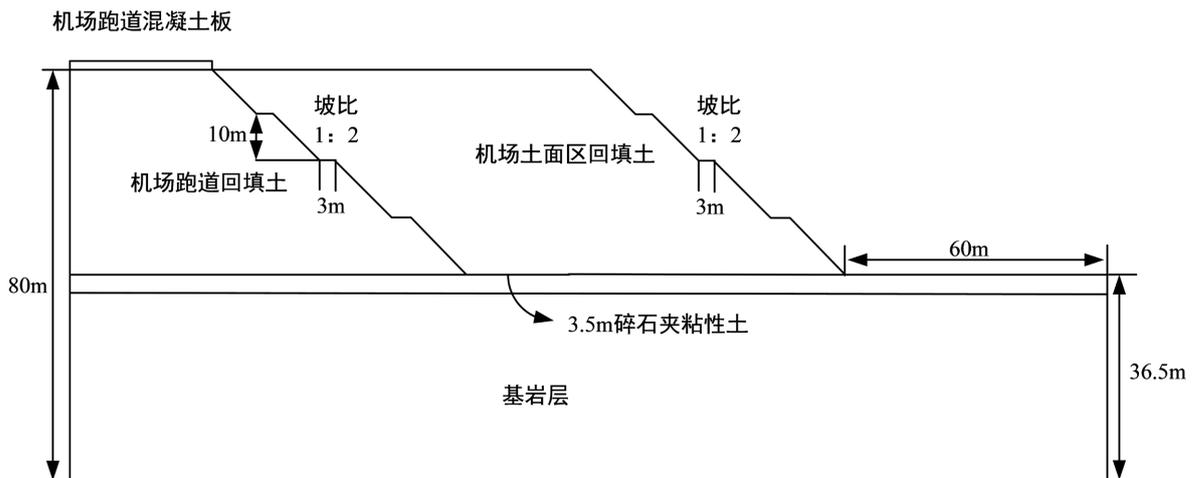


Figure 2. High fill geometric model of overlay pavement

图 2. 加盖道面的高填方几何模型

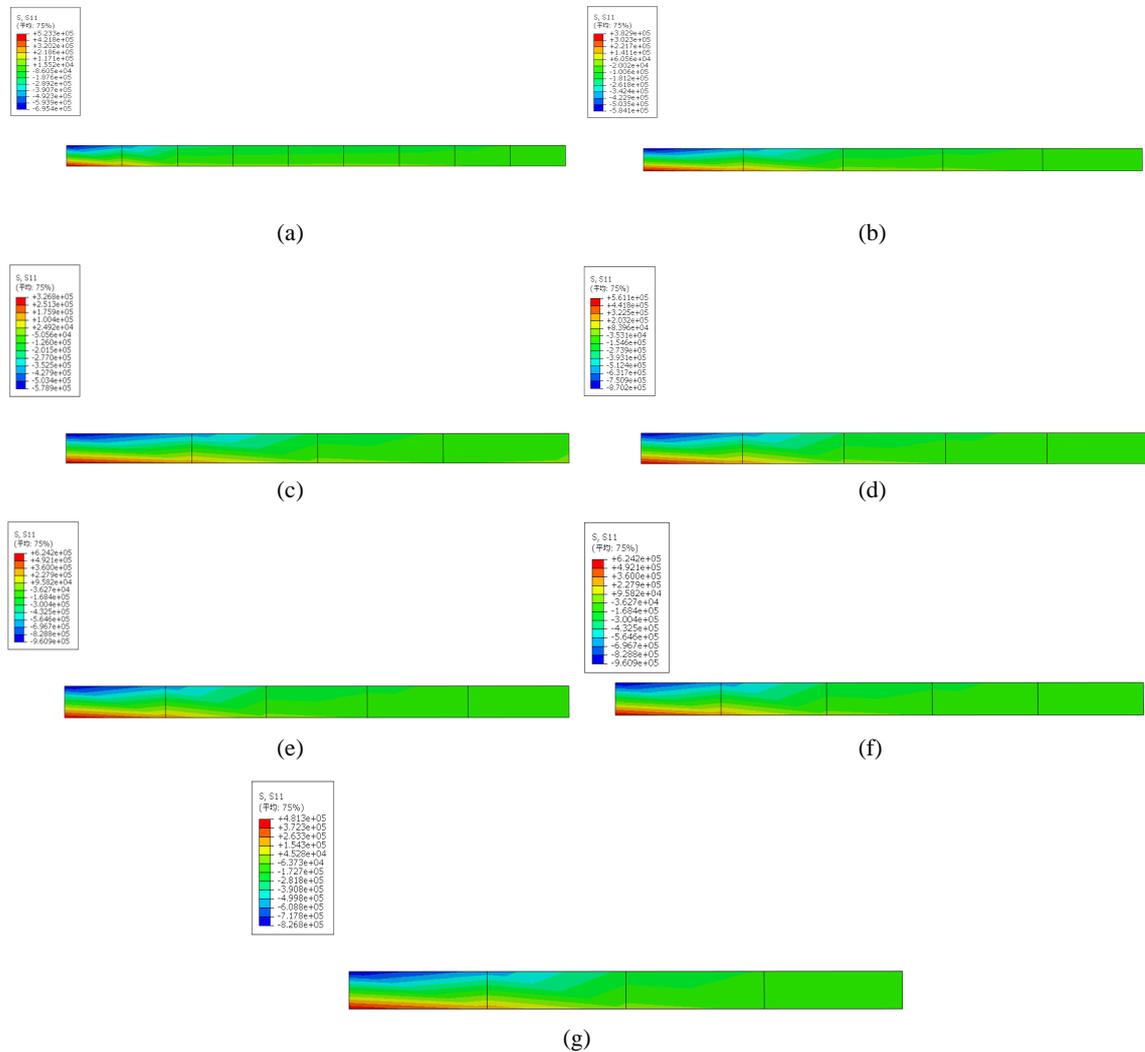
道面层参数的确定主要依据了浙江大学赵云博士的研究成果[5]以及民航专业工程项目的实践经验, 道面层的参数如表 1 所示。

Table 1. The value of pavement panel parameters

表 1. 道面板参数取值

厚度(m)	密度(g/cm <sup>3</sup> )	弹性模量(MPa)	泊松比
0.7	2540	33,000	0.2

为了探究不同填方高度下对道面层的力学特征, 本节分别对不同填高模型 30 m、40 m、50 m、60 m、70 m、80 m、90 m 引入道面层, 分析其层底应力  $S_{11}$ , 以此来研究不同填方高度对道面板的影响。图 3 为不同填方高度 30 m、40 m、50 m、60 m、70 m、80 m、90 m 下, 层底应力随跑道距离变化的云图。



**Figure 3.** The stress change cloud diagram of the lower bottom of different filling heights. (a) The bottom stress change cloud map of 30 m filling height; (b) the bottom stress change cloud map of 40 m filling height; (c) the bottom stress change cloud map of 50 m filling height; (d) the bottom stress change cloud map of 60 m filling height; (e) the bottom stress change cloud map of 70 m filling height; (f) the bottom stress change cloud map of 80 m filling height; (g) the bottom stress change cloud map of 90 m filling height

**图 3.** 不同填方高度下层底应力变化云图。(a) 30 m 填方高度下层底应力变化云图; (b) 40 m 填方高度下层底应力变化云图; (c) 50 m 填方高度下层底应力变化云图; (d) 60 m 填方高度下层底应力变化云图; (e) 70 m 填方高度下层底应力变化云图; (f) 80 m 填方高度下层底应力变化云图; (g) 90 m 填方高度下层底应力变化云图

### 3. 仿真模拟分析

基于建立的加盖道面的高填方有限元模型,将道面板从应力应变中提取出来,在不同填方高度(30 m、40 m、50 m、60 m、70 m、80 m、90 m)下,距离跑道中心点越近的区域呈现出更深的颜色,表示层底拉应力更为显著;而距离跑道中心点越远的区域则显示出浅色,表明层底拉应力逐渐减小,直至在距离 11 m 至 20 m 的范围内内转变为层底压应力,并逐渐增大。

为了更直观地探究不同填方高度下道面板层底应力的变化情况,我们提取了道面板底部的路径数据,并绘制了层底应力变化趋势对比图,如图 4 所示。在这个图表中,层底应力 S11 呈现正数时代表层底为拉应力,而当 S11 为负数时,则表示层底为压应力。

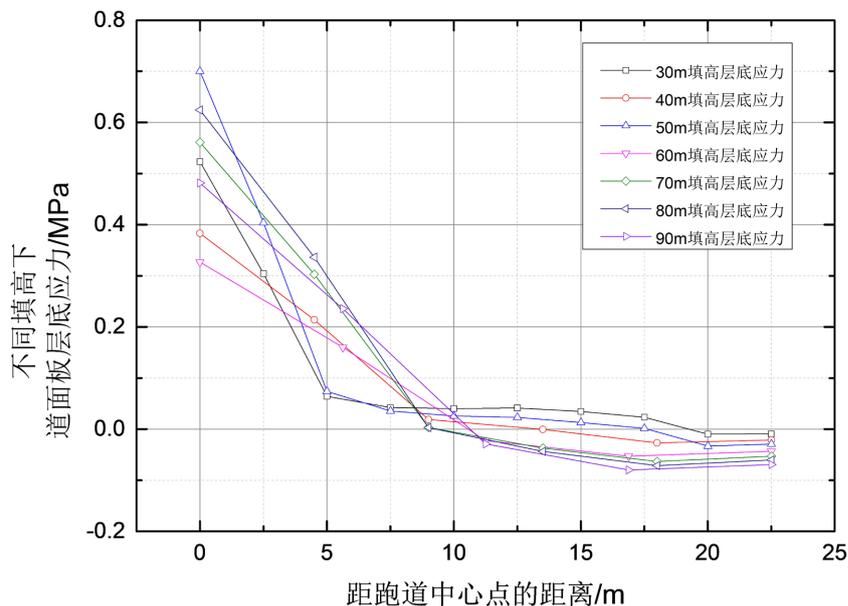


Figure 4. Comparison of stress change trends at the bottom of different fill heights  
图 4. 不同填方高度下层底应力变化趋势对比图

不同填高下的 7 条曲线, 随着距跑道中心点距离的增大, 道面板层底应力的变化趋势均是从大到小、由正变负, 其层底应力的表现形式从层底拉应力逐渐减小成为层底压应力。其中道面板中心点处的最大拉应力为 0.7 MPa, 最小拉应力为 0.3 MPa; 在道面板最右侧处的最大压应力为 0.06 MPa, 最小压应力为 0.02 MPa。随着填筑高度不断增加, 水泥混凝土板底应力均先快速减小再趋于平缓, 且以距跑道中心点 10 m 的距离为明显分界点, 这种基本的层底应力趋势与河南大学张业[6]学者针对装配式水泥混凝土路面结构的性能研究较为相符, 可以推断, 本研究构建的加盖道面板的高填方模型具有可行性。

#### 4. 结论

本文结合某机场高填方工程施工项目, 采用有限元软件建立不同填方高度的加盖道面的高填方模型进行数值模拟计算, 对不同填方高度对道面板层底拉压应力的影响进行分析, 得出以下结论:

(1) 通过理论研究及施工现场设计勘察资料, 构建了不同填方高度 30 m、40 m、50 m、60 m、70 m、80 m、90 m 的加盖道面板的高填方模型, 并采用了 CPE4 和 CPE4P 平面应变单元, 模拟了不同填高对道面板层底应力的分布规律, 此建模思路可为机场高填方沉降模拟仿真提供指导。

(2) 通过有限元计算分析, 得到不同填方高度 30 m、40 m、50 m、60 m、70 m、80 m、90 m 的水泥混凝土道面板的层底应力大小, 得到距离跑道中心点越近的区域层底拉应力更为显著; 而距离跑道中心点越远的区域层底拉应力逐渐减小, 直至在距离 11 m 至 20 m 的范围内转变为层底压应力, 并逐渐增大。

(3) 50 m 填方高度下, 道面板中心点处的最大拉应力为 0.7 MPa, 60 m 填方高度下, 最小拉应力为 0.3 MPa; 在 90 m 填方高度下, 在道面板最右侧处的最大压应力为 0.06 MPa, 填方高度 30 m 下, 最小压应力为 0.02 MPa。

#### 参考文献

- [1] 杨彪. 考虑接缝影响的机场刚性道面的有限元分析[J]. 山西建筑, 2010, 36(27): 265-266.  
<https://doi.org/10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2010.27.034>
- [2] 李一凡, 袁捷, 焦华成, 等. 基于有限元的水泥混凝土道面脱空分析与评价[J]. 上海公路, 2023(1): 8-12, 42.

- 
- [3] 江圣泽, 盛昀. 水泥混凝土道面板边角破损的数值仿真与分析[J]. 交通工程, 2021, 21(5): 7-13.  
<https://doi.org/10.13986/j.cnki.jote.2021.05.002>
- [4] Liu, J., Alexander, J., Song, S., *et al.* (2024) Finite-Element-Based Study on Girder Behavior and Load-Sharing of Shear-Connected Multigirder Prestressed Concrete Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, **29**, 1-14.  
<https://doi.org/10.1061/JBENF2.BEENG-6064>
- [5] 赵云. 飞机荷载作用下高填方机场道基动力响应及累积沉降研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [6] 张业. 装配式水泥混凝土路面结构与材料研究[D]: [硕士学位论文]. 开封: 河南大学, 2021.  
<https://doi.org/10.27114/d.cnki.ghnau.2021.001807>