

预制水泥混凝土板路面结构力学分析

陈龙庭¹ 金坚定¹ 俞金龙² 徐东² 郑好瑜²

1 浦江县公路与运输事业发展中心, 浙江 浦江 322200

2 河海大学, 江苏 南京 210024

[摘要] 水泥混凝土路面在承受交通荷载和气候环境影响的情况下往往容易出现裂缝, 断板等破坏现象。因此, 深入分析水泥混凝土预制板的结构力学响应对于探讨合理的结构设计以及提升路面使用性能显得尤为重要。本研究以 ABAQUS 有限元软件为工具, 建立了三维有限元模型, 着重对预制水泥混凝土板在非移动荷载下的力学响应进行了详尽分析。首要目标在于确定模型的临界荷载情况, 随后, 基于此情况, 深入探讨了静态荷载对路面结构各个参数的影响, 从而在水泥混凝土预制板结构设计过程中, 确立各个参数的合理范围。这些研究成果将为优化路面结构设计及提升使用性能提供有益的指导。

[关键词] 预制水泥混凝土板; ABAQUS; 力学分析; 结构响应

DOI: 10.33142/ec.v6i11.9890

中图分类号: U4

文献标识码: A

Mechanical Analysis of Prefabricated Cement Concrete Slab Pavement Structure

CHEN Longting¹, JIN Jianli¹, YU Jinlong², XU Dong², ZHENG Haoyu²

1 Pujiang County Highway and Transportation Development Center, Pujiang, Zhejiang, 322200, China

2 Hohai University, Nanjing, Jiangsu, 210024, China

Abstract: Cement concrete pavement is often prone to cracking, slab breakage, and other destructive phenomena under the influence of traffic loads and climate environment. Therefore, in-depth analysis of the structural mechanical response of cement concrete precast panels is particularly important for exploring reasonable structural design and improving pavement performance. This study used ABAQUS finite element software as a tool to establish a 3D finite element model, focusing on a detailed analysis of the mechanical response of precast cement concrete slabs under non moving loads. The primary goal is to determine the critical load situation of the model. At present, based on this situation, the influence of static load on various parameters of the pavement structure was deeply explored, in order to establish a reasonable range of various parameters in the design process of cement concrete precast slab structures. These research results will provide useful guidance for optimizing pavement structure design and improving service performance.

Keywords: prefabricated cement concrete slabs; ABAQUS; mechanical analysis; structural response

引言

近年来,随着交通运输需求的不断增长,道路基础设施的建设和维护变得愈发重要。预制水泥混凝土板路面作为一种重要的道路结构形式,具备快速施工、优异的耐久性和可持续性等优势,可广泛应用于城市道路、县乡道、农村公路。然而,随着交通荷载的增加以及环境变化的影响,预制水泥混凝土板路面在使用过程中可能会受到各种力学性能方面的挑战。

针对这些挑战,研究人员逐渐开始关注预制水泥混凝土板路面的力学结构特性,旨在深入理解其在不同荷载、环境和几何参数下的响应。这种研究可以为优化设计、施工和维护提供有力支持,从而确保道路的安全性、可靠性和经济性。国内外学者对预制拼装板在吊装、使用等环节的力学特性进行了深入分析。

J W Bull 和 C. H. Woodford (1997 年)^[1]使用有限元模拟了机场预制混凝土路面,研究发现,这种预制水泥混凝土路面相比原水泥混凝土路面具有更长的使用寿命。因此适用于机场道路的长期使用。

M Madhkan 等人(2012 年)^[2]用有限元方法研究了弹塑性地基上钢筋混凝土预制板的特性。研究结果表明,基于空心板轻 30%左右的自身重量,其使用性能更佳。

卢哲安^[3]在其研究中发现随着板厚的增加,可以有效地减小板底的拉应力,不过随着板厚增加,这种降低趋势逐渐减弱。

王火明和赵军^[4]在其研究中专注于预制板块路面的特性。通过建立有限元模型,研究板块厚度、基层类型,土基模量等因素对预制块路面受力的影响,研究结果表明随着板块厚度的增加,路表的弯沉逐渐减小;在板块厚度保持不变的情况下,随着基层厚度的增加,路表弯沉也逐渐减小。此外,基层底部的弯拉应力会随着土基模量的增大而减少,这一发现对于路面结构的设计和性能优化具有重要的指导作用。

王冬亚^[5]通过应用有限元软件,对移动荷载下水泥混凝土路面的接缝性能进行了探究。研究发现增大接缝宽度会导致接缝传荷能力变差;增加板厚可以有效提升接缝处的受力和变形性能。

预制水泥混凝土板路面力学结构分析的研究,对于提高路面的质量和寿命,降低维护成本,以及满足不断增长的交通需求,都具有重要的实际意义。这些研究成果有望为道路工程领域的专业人士和决策者提供有益的指导,促进交通基础设施的可持续发展。

1 路面结构有限元模型建立

1.1 模型基本信息

(1) 结构材料参数

结合江苏地区乡村道路实际情况,道路宽度为 5.5m,且施工为预制水泥混凝土板的连续铺设施工,路面材料参数如表 1 所示。同时根据相关文献调研选取预制板宽度为 2.75m,长度选取从 2m 到 5m。

表 1 路面结构与材料参数

结构层	参数	数值
面层	宽度/m	2.75
	弹性模量/MPa	27000、29000、31000、33000
	泊松比	0.2
	厚度/cm	16、18、20、22、24
	密度/(kg/m ³)	2400
基层	尺寸/m ²	6×6
	弹性模量/MPa	300、800、1300、2200
	泊松比	0.2
	厚度/cm	30
土基	地基反应模量/(MN/m ²)	14.68

1.2 单元选取与网格划分

本研究使用 ABAQUS 软件进行三维有限元静力计算。网格划分如图 1 所示。

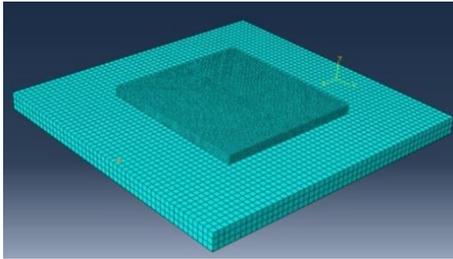


图 1 网格划分图

1.3 边界条件和车辆荷载

预制水泥混凝土板沿行车方向两端和纵缝接触端施加纵向(x方向)及横向(z方向)位移约束,如图 2 所示。

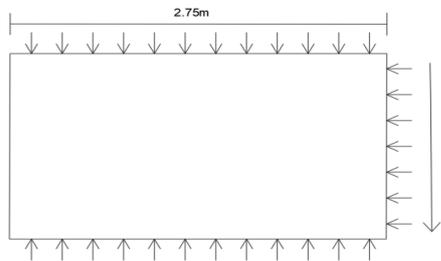


图 2 边界条件

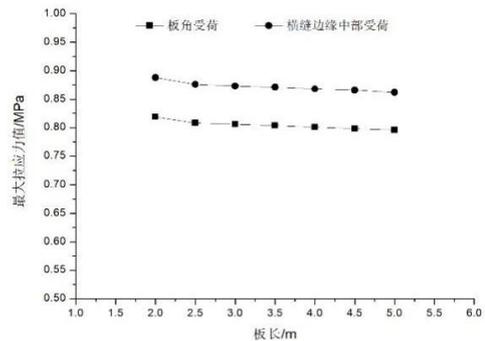
研究中使用了 BZZ-100 标准轴载来模拟车辆荷载。轮胎与路面接触的压强为 0.7MPa,单轮传压面的当量圆直径为 21.30cm,而两轮的中心距离为 1.5 倍的当量圆直径。这些参数的选取使得我们能够准确地模拟车辆荷载的作用,从而深入研究路面结构的力学响应。

2 路面结构力学分析

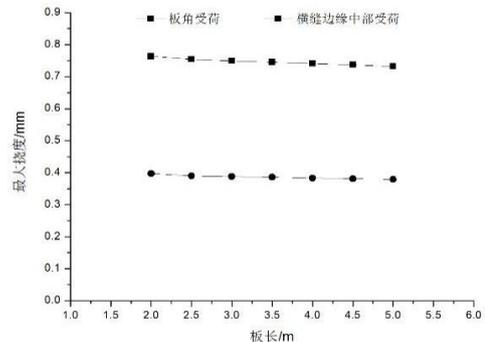
通过调整路面结构和材料参数,来研究各个参数对预制板结构的力学响应和接缝传荷能力的影响,进而确定了水泥混凝土预制板结构设计参数的合理取值范围。

2.1 预制板平面尺寸对板块结构响应的影响

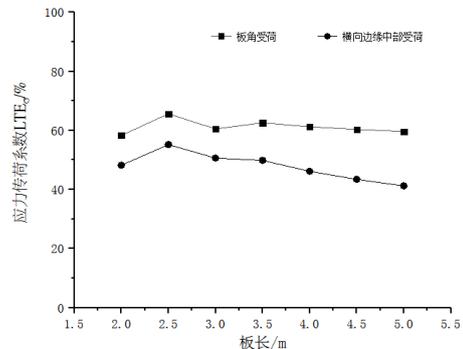
选取了 2m、2.5m、3m、3.5m、4m、4.5m、5m 七种不同的板长,在分析过程中,我们保持了预制板的宽度不变,仅对其长度进行了改变。其中预制板厚度保持 20cm 不变,面层模量保持 31000MPa 不变,基层模量保持 1600MPa 不变。模拟结果如图 3 所示。



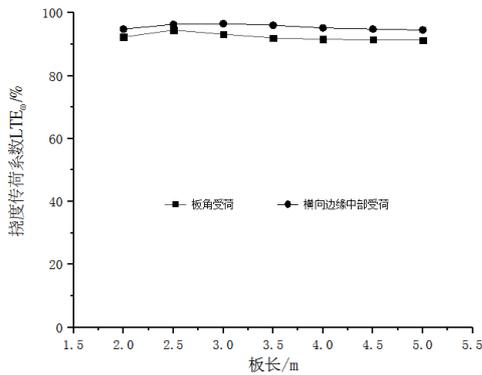
(a) 最大拉应力值随着板长的变化趋势



(b) 最大挠度随着板长的变化趋势



(c) 应力传荷系数随着板长的变化趋势



(d) 挠度传荷系数随着板长的变化趋势

图3 水泥混凝土预制板力学响应及接缝传荷系数随板长变化趋势

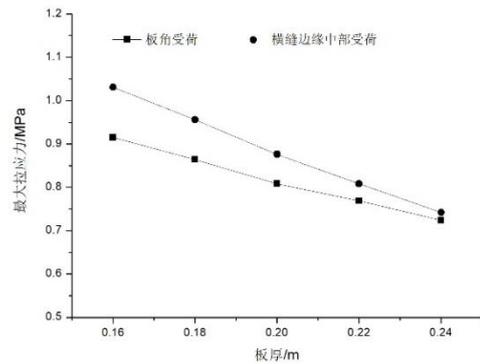
由图3可知：(1)在板长从2m增大到2.5m的过程中，水泥混凝土预制板在板角受荷和横缝边缘中部受荷情况下最大拉应力和最大挠度下降幅度均较为明显，板角受荷情况下最大挠度下降幅度略大于横缝边缘中部受荷，最大拉应力下降幅度基本接近；而板长从2.5m增大到5m的过程中，水泥混凝土预制板在板角受荷和横缝边缘中部受荷情况下最大拉应力和最大挠度下降幅度均较为缓慢，由上可知，当预制板长度达到2.5m后，继续增大预制板长度对减小应力值和挠度意义不大。

(2)在板长从2m增加到2.5m的过程中，水泥混凝土预制板在板角受荷和横缝边缘中部受荷情况下应力传荷系数和挠度传荷系数均呈现上升趋势。然而，当板长从2.5m进一步增加至3.5m时，预制板在板角受荷情况下应力传荷系数呈现先上升后下降的趋势，而在横缝边缘中部受荷情况下一直呈现下降趋势；板长对挠度传荷系数的影响程度较小。在将板长从2m增加到2.5m的情况下，水泥混凝土预制板在板角和横向接缝边缘中部受荷载情况下，挠度传荷系数均呈现上升趋势。然而，当板长进一步从2.5m增加至3.5m时，横缝边缘中部受荷情况下挠度传荷系数下降幅度大于板角受荷，当板长从3.5m增加至5.5m时，挠度传荷系数均呈现下降趋势。综上所述，接缝传荷系数受预制板的长度变化影响不大。

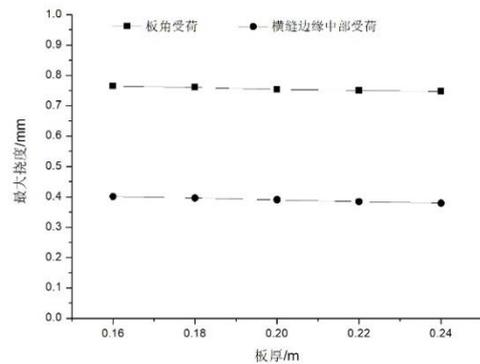
(3)根据以上数据分析结果，水泥混凝土预制板的最佳板长为2.5m。

2.2 面板厚度对板块结构响应的影响

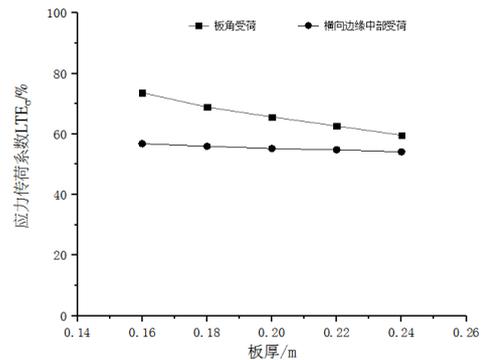
选取16cm、18cm、20cm、22cm、24cm这五种面板厚度，分析时控制其他参数不变，只改变面板厚度，平面尺寸选择2.75m×2.5m，模拟结果如图4所示。



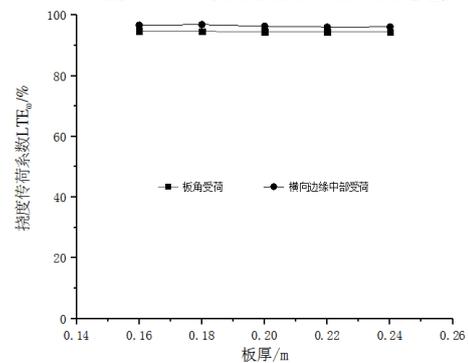
(a) 最大拉应力值随着面板厚度的变化趋势



(b) 最大挠度随着面板厚度的变化趋势



(c) 应力传荷系数随着面板厚度的变化趋势



(d) 挠度传荷系数随着面板厚度的变化趋势

图4 水泥混凝土预制板力学响应及接缝传荷系数随面板厚度的变化趋势

由图 4 可知:

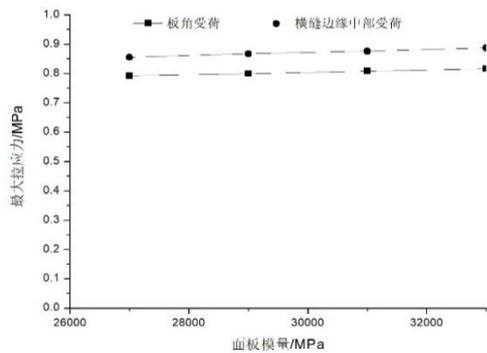
(1) 在两种不同荷载情况下, 调整预制板的厚度对其所受最大拉应力影响较大。当板厚从 16cm 增加至 24cm 时, 预制板所受最大拉应力在板角受荷情况下减小了 0.334MPa, 而在横缝边缘中部受荷情况下减小了 0.399MPa。然而, 板的厚度对预制板的最大挠度影响较大, 当板的厚度从 16cm 增加至 24cm 时, 挠度在板角受荷情况下和横缝边缘中部受荷减少程度均较小。综上所述, 增加板厚可以显著减小预制板所受的最大拉应力, 但对减小挠度的效果有限。

(2) 当板厚从 16cm 增加至 24cm 时, 在两种受力的情况下应力传荷系数均会呈现下降趋势, 但在板角受荷的情况下, 水泥混凝土预制板应力传荷系数下降幅度远远大于在横缝边缘中部受荷的情况下; 当板厚从 16cm 增加至 24cm 时, 水泥混凝土预制板挠度传荷系数的变化趋势均不明显。综上所述, 增加板的厚度并不能提高水泥混凝土预制板的接缝传荷系数。

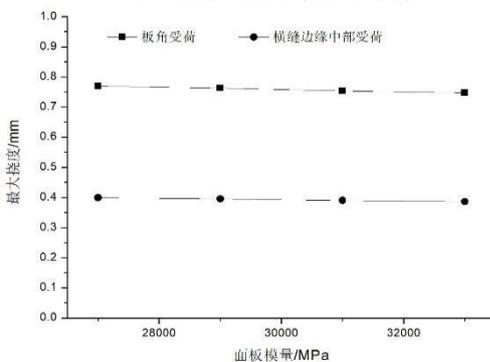
(3) 考虑现场为连续施工且增加板厚能够减小最大拉应力, 故选取最佳板厚为 20cm。

2.3 面板模量对板块结构响应的影响

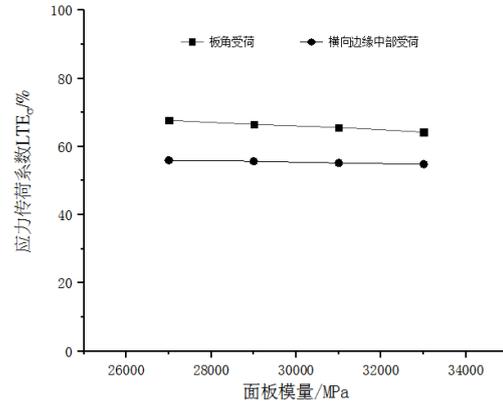
通过选取 27000MPa、29000MPa、31000MPa、33000MPa 这四种面板模量, 分析时控制其他参数不变, 只改变面板模量, 平面尺寸选择 2.75m×2.5m, 其他参数保持不变。模拟结果如图 5 所示。



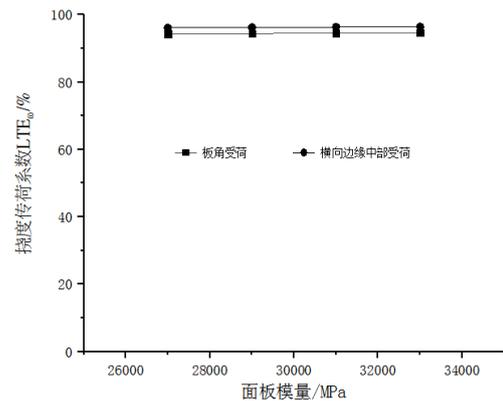
(a) 最大拉应力随面板模量变化趋势



(b) 最大挠度随面板模量变化趋势



(c) 应力传荷系数随面板模量变化趋势



(d) 挠度传荷系数随面板模量变化趋势

图 5 水泥混凝土预制板力学响应及接缝传荷系数随面板模量变化趋势

由图 5 可知:

(1) 水泥混凝土预制板的最大拉应力和最大挠度受面板模量影响均较小, 其中面板模量对最大拉应力的影响略大于最大挠度。当面板模量从 27000MPa 增加至 33000MPa 时, 预制板的最大拉应力仅在板角受荷情况下增大了 0.037MPa, 而在横向接缝边缘中部受荷情况下增大了 0.032MPa, 预制板的最大挠度仅增大了 0.028mm (板角受荷载) 和 0.013mm (横缝边缘中部受荷载)。

(2) 水泥混凝土预制板在两种受力状态下, 面板模量对应力传荷系数的影响较小。当面板模量从 27000MPa 增加至 33000MPa 时, 应力传荷系数在两种受力状态下均下降, 其中在板角受荷情况下下降幅度大于横缝边缘中部。增大面板模量对挠度传荷系数基本无影响。所以增大水泥混凝土面板模量以增加接缝传荷系数并不是一种可行的方法。

(3) 综上所述, 调整面板模量基本不会影响水泥混凝土预制板的结构力学响应, 因此建议水泥混凝土预制板的模量取值参照原水泥混凝土面板。

3 结论

本文主要结论如下:

(1) 在保持预制板宽度不变的情况下, 板长对最大拉应力的影响较小。随着板长的增加, 预制板最大拉应力会不断下降, 但降幅不明显。当板的长度逐渐接近板宽时, 预制板最大拉应力减小最为显著。板长对预制板最大挠度的影响也相对较小。同时, 对应力传荷系数和挠度传荷系数的影响也不大。因此, 建议采用接近正方形平面尺寸的预制板。

(2) 板厚对水泥混凝土预制板的最大拉应力和最大挠度影响均较大。随着板厚的增加, 最大拉应力和最大挠度均慢慢减小。然而, 板厚对应力传荷系数和挠度传荷系数的影响较小。鉴于板的自重影响, 建议采用 20cm 的预制板厚度。

(3) 面板模量对水泥混凝土预制板的最大拉应力、最大挠度、应力传荷系数以及挠度传荷系数影响均较小。因此, 建议采用与原路面相同的面板模量。

[参考文献]

- [1] Bull J W, Woodford C H. Design of precast concrete pavement units for rapid maintenance of runways[J]. Computers & Structures, 1997, 64(4): 857-864.
 - [2] Madhkhan M, Entezam M, Toriki M E. Mechanical properties of precast reinforced concrete slab tracks on non-ballasted foundations[J]. Scientia Iranica, 2012, 19(1): 20-26.
 - [3] 卢哲安. 层布式钢纤维混凝土预制路面板应力分析[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(10): 5.
 - [4] 王火明, 赵军. 预制块体路面结构力学特性的有限元计算分析[J]. 公路交通技术, 2011(6): 16-20.
 - [5] 王冬亚. 移动荷载作用下水泥混凝土路面接缝性能有限元分析[D]. 云南: 昆明理工大学, 2013.
- 作者简介: 陈龙庭(1976.8—), 从事的专业: 公路工程, 职称: 工程师。