

水泥混凝土修补道面结构参数敏感性分析

杨永刚

(贵州大学 明德学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:为研究尺寸和厚度等因素对水泥混凝土道面修补效果的影响,运用 Ansys 有限元软件建立混凝土道面板的修补模型,分别对单轮和温度荷载作用下新旧道面之间的黏结应力进行计算分析,改变道面板修补尺寸、厚度、温度、混凝土弹性模量和膨胀系数等参数,探究道面板水平和竖直黏结面黏结应力对这些参数的敏感性。结果表明:修补混凝土的长宽比接近于1时,水平黏结面的剪切应力和竖直黏结面的拉应力都达到最小值;0.06~0.08 m的修补厚度,可以保证修补结构具有合理的受力状态;当外界温度上升时,修补混凝土发生膨胀,水平黏结面产生剪切应力,竖直黏结面产生压应力;选用与旧混凝土弹性模量相近的材料有利于减小黏结面的应力;进行道面修补时必须选用与旧混凝土膨胀系数一致的材料,防止产生过大应力导致修补黏结面的破坏。

关键词:混凝土道面;快速修补;黏结性能;敏感性分析

1 引言

水泥混凝土道面在长期荷载和环境的共同作用下容易产生多种损坏,常见的混凝土损坏现象主要包括裂缝、板边角的剥落、接缝的损坏和板面的破坏等,这些损坏降低了跑道的使用性能,减小了道面结构承载能力,严重影响了机场跑道正常使用和起降飞行安全。实际情况表明:水泥混凝土道面的严重损坏都是由局部病害造成,如孔洞坑槽、边角断裂、表层剥落等。小范围的局部损坏如果得不到及时有效的修复,则会导致破坏范围进一步增大,最终形成更严重的破坏。因此,在道面破坏早期对混凝土的局部病害进行修补可以有效保持混凝土道面完整性、承载力,并延长道面使用寿命。

在道面的实际修补工程中,道面修补的尺寸、厚度、混凝土材料的弹性模量和膨胀系数都对修补道面的承载性能和黏结效果有较大的影响,为研究尺寸和厚度等因素对修补效果的影响,可以对足尺道面进行修补研究,但在相关参数发生变化时需要重新进行铺筑,这样会造成大量的资源浪费并导致试验周期过长;另一方面,修补的新混凝土在外界温度变化时会产生温度应力,由温度应力导致的道面的受力变化在试验研究中测定难度较大,不利于对修补道面特性进行系

统、有效的研究。利用 Ansys 有限元分析软件建立修补道面的模型,采用数值模拟的方法对修补道面的力学响应进行分析可以比较真实地反映道面受力情况,探究各种因素对修补道面性能的影响,减少资源消耗并可以得到较多的分析数据。

该文采用有限元分析方法,对道面尺寸和厚度、温度、混凝土弹性模量和膨胀系数等因素影响下的修补道面进行力学响应分析研究,并研究各参数对修补道面结构响应的影响程度,可为道面修补的参数取值提供参考。

2 水泥混凝土修补道面结构模型建立

2.1 有限元计算单元及力学计算模型

以弹性半空间地基上的弹性道面板为理论基础,Ansys 建模中主要使用以下单元类型:① Solid70 单元;② Solid45 单元;③ Target170 目标单元;④ Contact173 接触单元。

采用 Ansys 有限元分析软件建立修补道面结构的模型,以弹性半空间理论为基础进行应力分析,为使计算简单易行,对模型的结构作出以下假设:①基础、道面板等材料是均匀、连续、各向同性的弹性体,使用弹性模量和泊松比表征其材料性质;②基础底面采用固定约束,各向位移都为零,混凝土旧道面和基础侧面

水平方向不发生位移;③修补道面和旧道面之间的接触设置为闭合黏结状态,接触单元可以实现材料之间的热传导,基层和道面板之间的界面完全接触并连续;④道面结构不计自重。

根据以上假设,建立机场道面单块板修补结构的三维有限元模型,根据弹性半空间地基的要求采取扩大尺寸模型,选取基础尺寸为 $10\text{ m} \times 10\text{ m} \times 5\text{ m}$,旧水泥混凝土道面板的尺寸为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$,厚度为 0.3 m ,修补位置位于道面板板角,新旧混凝土道面之间设置 1 个水平、2 个竖向接触面,机轮荷载作用在道面修补的位置。机场混凝土单块修补道面板的有限元模型和网格划分如图 1 所示,修补位置示意图如图 2 所示。

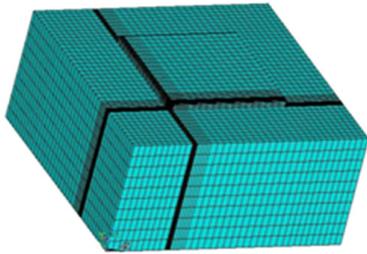


图 1 机场混凝土修补道面板的有限元模型

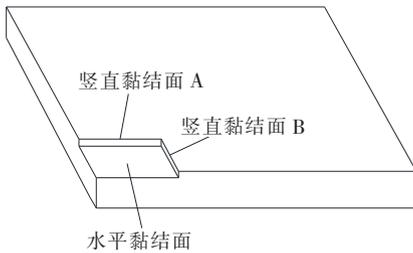


图 2 修补位置示意图

2.2 主要计算参数

2.2.1 道面材料和尺寸参数

修补道面有限元模型主要由基础、旧道面和修补道面 3 部分组成,基础的弹性模量指水泥混凝土道面板下基层、垫层和压实土基弹性模量的当量值。由于水泥混凝土的线膨胀系数主要与粗集料类型有关,故将粗集料的膨胀系数作为道面混凝土膨胀系数,其值参考表 1。该文选取的水泥混凝土修补道面结构的具体参数如表 2 所示。

表 1 粗集料类型的线膨胀系数

粗集料类型	线膨胀系数/ ($\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)	粗集料类型	线膨胀系数/ ($\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)
石英岩	1.188	花岗岩	0.954
砂岩	1.170	玄武岩	0.864
砾岩	1.080	石灰岩	0.684

表 2 水泥混凝土修补道面结构参数

结构层	弹性模量/MPa	厚度/m	泊松比	导热系数/ [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]
旧水泥混凝土道面	36 000	0.30	0.15	2.5
修补部分道面	37 000~ 42 000	0.02~0.10	0.15	2.5
基础	200	5	0.35	1.0

2.2.2 机轮荷载参数

将单轮机轮荷载作为计算荷载,将轮印面积转换成矩形均布荷载,胎压为 1.53 MPa ,单轮轮印长度为 0.43 m ,单轮轮印宽度为 0.3 m 。

2.2.3 新旧混凝土接触的参数

建立板角修补道面的三维有限元模型时,用面一面接触单元表征新旧混凝土 3 个接触面之间的黏结作用,Conta173 单元中接触状态参数 0、1、2、3 分别表示分开没有接触、分开接近接触、闭合滑动、闭合黏结 4 种状态,该文选定新旧混凝土之间的接触关系为闭合黏结状态,对新旧道面的黏结面受力状态进行分析。

3 修补道面结构的参数敏感性分析

3.1 道面板修补尺寸的影响

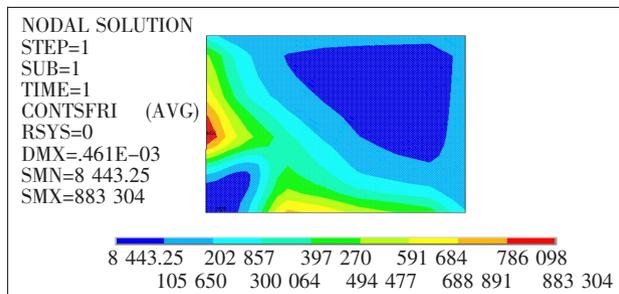
以道面的板角修补为例,选定道面修补厚度为 0.07 m ,取新旧道面混凝土的弹性模量分别为 $39\,000$ 、 $36\,000\text{ MPa}$,对修补后的道面板板角施加单轮荷载作用,研究不同修补尺寸下应力的变化规律。修补结构的竖直黏结面 A 的长度 L_A 为 0.7 m ,竖直黏结面 B 的长度 L_B 变化范围为 $0.4\sim 1.0\text{ m}$,表 3 为部分尺寸组合情况下的黏结面应力计算结果,各黏结面的应力分布云图如图 3 所示(以修补尺寸 $0.7\text{ m} \times 0.7\text{ m}$ 为例),各黏结面的应力随修补混凝土边长比的变化规律如图 4 所示。

由图 4 可以看出:水平黏结面的最大剪切应力和竖直黏结面的最大拉应力随着修补板边长的增大呈现出先减小后增大的趋势,在修补板边长比为 1 时达到最小值,水平黏结面应力的最大减小幅度为 9.1% ,竖直黏结面应力的最大减小幅度为 13.3% 。由此可以看出:黏结应力对修补板的边长比变化有较小的敏感性,在边长比过大和过小时,黏结面的剪切应力和拉应力会有一定幅度的增大,在一定程度上影响了新旧混

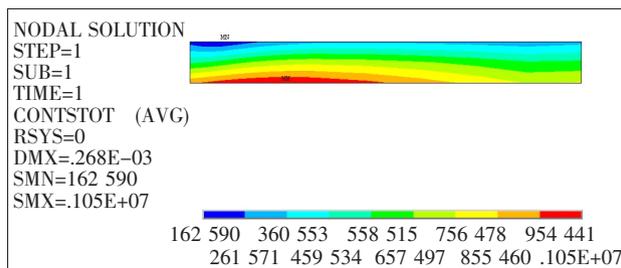
表3 黏结面应力计算结果

修补尺寸			水平黏结面	最大正应力/MPa	
L_A/m	L_B/m	L_B/L_A	最大剪切应力/MPa	竖直黏结面 A	竖直黏结面 B
0.4	0.57	0.95	0.95	1.09	1.21
0.5	0.71	0.92	0.92	1.08	1.18
0.6	0.86	0.89	0.89	1.06	1.16
0.7	0.7	1.00	0.88	1.05	1.15
0.8	1.14	0.91	0.91	1.09	1.19
0.9	1.28	0.94	0.94	1.13	1.23
1.0	1.40	0.96	0.96	1.19	1.25

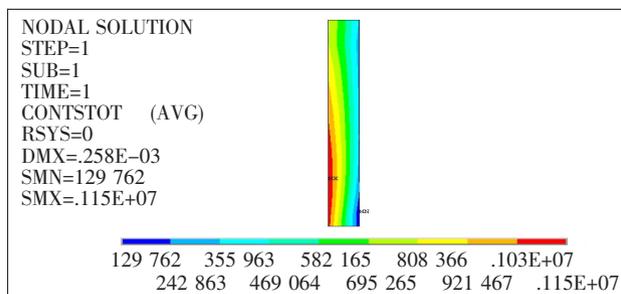
注:表中剪切应力只取大小,不区分方向;竖直黏结面应力正值为拉应力,负值为压应力。



(a) 水平黏结面剪切应力云图



(b) 竖直黏结面 A 正应力云图



(c) 竖直黏结面 B 正应力云图

图3 单轮作用下新旧混凝土黏结面应力分布(单位:Pa)

混凝土的黏结效果。因此,在实际工程中可以通过控制修补的尺寸来达到控制剪切应力和拉应力的目的。

3.2 道面板修补厚度的影响

在道面修补中,修补厚度一般根据道面板的破坏

类型和特征来确定,修补厚度较薄时,在荷载作用下容易再次发生剥落和断裂等病害,修补过厚会导致施工量的加大和材料的浪费。根据施工经验,一般道面修补的厚度范围为 60~80 mm。建模时改变修补厚度参数,其余参数同前述,计算结果如图 5 所示。

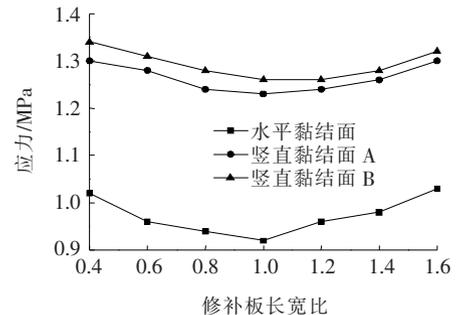


图4 黏结应力随修补混凝土边长比的变化

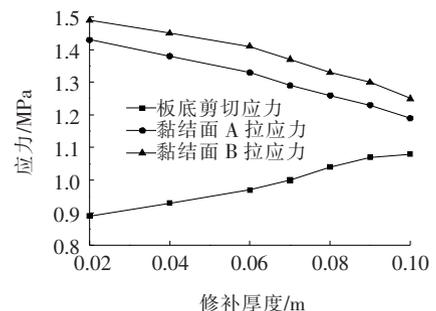


图5 新旧混凝土黏结面应力随修补厚度的变化

由图 5 可以看出:随着修补厚度的增加,水平黏结面的剪切应力呈增大的变化趋势,修补厚度从 0.02 m 增加到 0.1 m 时,剪切应力的增大幅度为 24.6%;另一方面,随着板底剪切应力的增大,两个黏结面的拉应力相应有所减小,修补厚度从 0.02 m 增加到 0.1 m 时,黏结面 A 和黏结面 B 的拉应力减幅分别为 18.5% 和 18.2%。由此可以看出:新旧混凝土黏结应力对修补厚度有较强的敏感性,对于竖直黏结面而言,修补厚度的增加对黏结面的拉应力有减小作用,这使得新旧混凝土竖直黏结面的受力情况更加合理,不易发生开裂破坏。同时,对于水平黏结面而言,修补厚度的增加会导致水平剪切力的增大,不利于修补结构的受力。因此,根据图中曲线的变化特点,同时结合实际修补工程中对骨料等方面的要求,0.06~0.08 m 的修补厚度为最佳修补厚度。

3.3 温度的影响

修补道面结构能够保持良好使用性能的关键是保持较好的黏结性能,外界温度变化时,新旧混凝土黏结面会产生剪切应力和拉应力,一旦超出黏结面的黏结强度,修补结构就会产生裂缝,甚至发生更严重的破

坏,影响道面的修补质量和使用寿命。建模时将道面初始温度拟定为 20 ℃,考虑道面板的翘曲应力以及道面板和空气的对流,从-40 ℃到 50 ℃依次改变道面表面的温度,通过热分析求出道面温度场的分布如图 6 所示(以表面温度下降到 10 ℃为例)。然后将节点温度施加到结构单元节点上求解出修补部分道面的黏结面应力如图 7 所示。

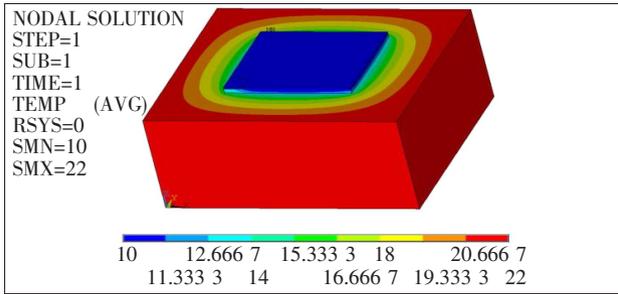
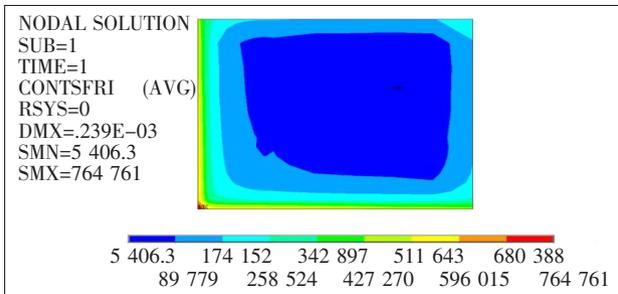
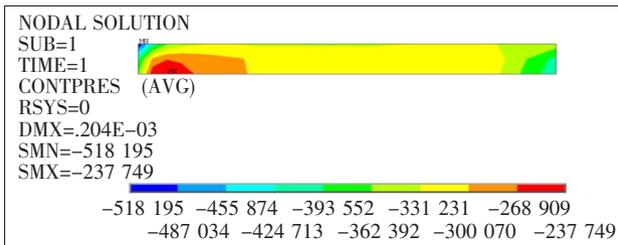


图 6 道面温度分布(单位:℃)



(a) 水平黏结面剪切应力云图

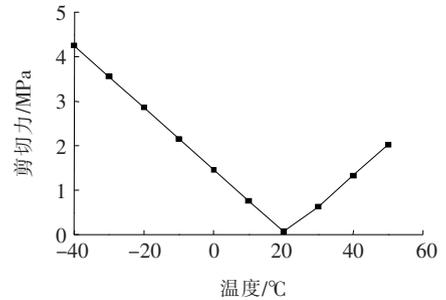


(b) 竖向黏结面正应力云图

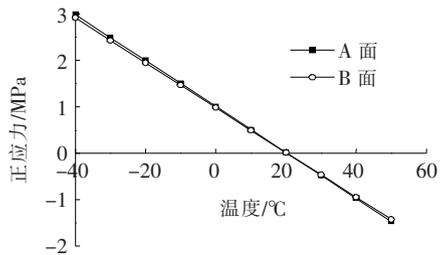
图 7 新混凝土板黏结面黏结应力分布(单位:Pa)

从图 7(a)可以看出:水平黏结面的剪切应力最大值出现在板角,且表现出由板角向板中递减的趋势,这是由于板内温度沿深度方向的不均匀分布导致了板角的翘曲,新旧混凝土之间的黏结剪应力因此而变化;图 7(b)为竖向黏结面 A 的正应力分布,竖向黏结面 B 的应力分布与其相似。可以看出:在温度下降时,竖向黏结面出现拉应力,这是由于温度下降使修补混凝土板产生收缩导致,拉应力最大值出现在靠近板边一侧则是由于板边翘曲导致。

改变道面板表面的温度,针对温度进行敏感性分析的计算结果如图 8 所示,图 8(b)中正值为拉应力,负值为压应力。



(a) 水平黏结面最大剪应力与温度的关系



(b) 竖向黏结面最大正应力与温度的关系

图 8 黏结面应力与温度的关系

由图 8 可以看出:新旧混凝土水平黏结面的最大剪应力和竖向黏结面的最大正应力随着温度的上升和下降呈现出线性增大的变化规律。进行计算时板的初始温度设置为 20 ℃,因此在顶面温度为 20 ℃时水平黏结面剪应力和竖向黏结面正应力都接近于 0。顶面温度上升时混凝土发生膨胀,导致水平黏结面产生剪切力,竖向黏结面产生压力;顶面温度下降时混凝土产生收缩,导致水平黏结面产生与膨胀时相反方向的剪切力,竖向黏结面产生拉力,并且随着温度变化幅度的增大而增大。在-40 ℃时,由温度引起的水平黏结面最大剪应力可以达到 4.26 MPa,竖向黏结面的拉应力达到 2.99 MPa,与 20 ℃时的应力差别非常明显,这说明修补道面结构的力学响应对温度的变化十分敏感。

3.4 混凝土弹性模量的影响

修补道面板的新旧混凝土弹性模量往往存在一定的差异性,为探究修补混凝土的弹性模量对修补结构力学性能的影响,对仅在温度作用下的修补道面进行有限元分析。建模新旧道面的线膨胀系数分别为 0.86×10^{-5} 、 $0.68 \times 10^{-5}/\text{℃}$,温度变化设置为道面顶面温度从初始温度 20 ℃降至 10 ℃。通过改变新修补混凝土的弹性模量,计算新旧混凝土在不同弹性模量比值情况下各黏结面的最大黏结应力,探究新旧混凝土黏结应力对混凝土弹性模量参数变化的敏感程度。

各黏结面应力的计算结果如图9所示。

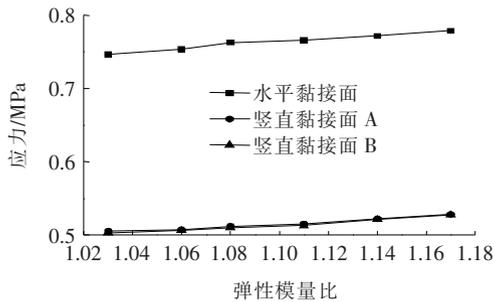


图9 新旧混凝土黏结面应力随弹性模量比的变化规律

由图9可以看出:在温度荷载作用下,水平黏结面的剪切应力和竖直黏结面的拉应力都随着新旧混凝土弹性模量比值的增大呈现出近似线性增大的规律,由于竖直黏结面A和竖直黏结面B的受力情况相同,两者的变化曲线呈现出重合的现象。当新旧混凝土的弹性模量比由1.02增加到1.17时,新旧道面水平黏结面剪应力的增加幅度为4.2%,竖直黏结面A和竖直黏结面B的拉应力增加幅度分别为4.5%和4.7%,由以上计算结果可以看出:新旧道面的黏结应力对修补混凝土的弹性模量变化有较弱的敏感性,采用弹性模量接近于旧混凝土的修补混凝土在一定程度上有助于增强新旧混凝土的黏结性能。

3.5 混凝土膨胀系数的影响

混凝土在温度下降时会发生收缩现象,使新旧混凝土的黏结面产生拉应力作用,严重时会导致黏结面开裂破坏,这往往是由新旧混凝土膨胀系数的差异引起。为探究修补混凝土膨胀系数对修补结构力学响应的影响作用,对仅在温度作用下的修补道面进行有限元分析。建模时选定旧道面混凝土的线膨胀系数为 $0.86 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,新混凝土的线膨胀系数根据表1中的参数选用,温度变化设置为道面顶面温度从初始温度 20°C 降至 10°C 。各黏结面应力的计算结果如图10所示。

由图10可以看出:在温度荷载作用下,水平黏结面剪应力和竖直黏结面拉应力都随新旧混凝土膨胀系数比值的增大呈近似线性增长的趋势,且增长幅度较大,说明新旧混凝土膨胀系数的差异显著影响了新旧混凝土黏结面的应力,由于两竖直黏结面位于对称位置,故受力情况相同,应力变化曲线出现重合的现象。膨胀系数比值从1.26增加到1.73时,新旧混凝土水平黏结面剪应力的增加幅度为71%,竖直黏结面A和竖直黏结面B的拉应力增加幅度分别为114.8%和

114.6%,由计算结果可以看出:新旧道面的黏结应力对新混凝土膨胀系数变化具有十分显著的敏感性,在进行道面修补时,减小新旧混凝土材料的膨胀系数差异可以有效减小黏结面的应力,可以通过合理选用修补混凝土粗骨料类型来达到目的,优先选用和旧混凝土类型相同或者膨胀系数相近的石料作为修补混凝土粗骨料。

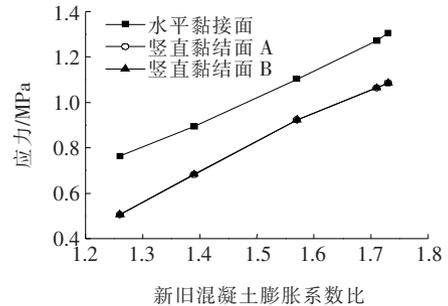


图10 新旧混凝土黏结面应力随膨胀系数比的变化规律

4 结论

(1) 新旧混凝土黏结面的应力响应对修补板的尺寸参数有较弱的敏感性,在修补混凝土的长宽比接近于1时,水平黏结面的剪切应力和竖直黏结面的拉应力都达到最小值。

(2) 新旧混凝土黏结面的力学响应对厚度的变化有较强的敏感性。随着修补厚度的增加,水平黏结面剪切应力呈线性增大的趋势,竖直黏结面拉应力呈线性减小的趋势。修补厚度的变化范围为 $0.06 \sim 0.08 \text{ m}$,可保证修补结构具有合理的受力状态。

(3) 新旧混凝土黏结面的应力响应对温度的变化十分敏感。当外界温度上升时,修补混凝土发生膨胀,水平黏结面产生剪切应力,竖直黏结面产生压应力,当外界温度下降时,修补混凝土发生收缩,水平黏结面产生相反方向的剪切应力,竖直黏结面产生拉应力。

(4) 新旧混凝土的黏结面应力响应对新混凝土弹性模量变化有较弱的敏感性,新旧混凝土弹性模量比值从1.03增大到1.17时,修补道面的水平黏结面剪应力和竖直黏结面的拉应力的增幅分别为4.5%和4.7%。

(5) 新旧混凝土的黏结面应力响应对新旧混凝土膨胀系数变化有很强的敏感性,新旧混凝土膨胀系数比值从1.26增大到1.73时,修补道面的水平黏结面剪应力和竖直黏结面的拉应力都有大幅度的增加,增幅分别达到74%和114.8%。