

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.02.016

湛徐高速公路多指标沥青路面抗滑性能评价分析

韩炜贤

(广东能达公路养护股份有限公司, 广东 广州 510030)

摘要: 基于湛徐(湛江—徐闻)高速公路路面检测数据进行路面抗滑性能指标相关性分析, 构建多指标下雨天事故率和抗滑性能养护之间的关系式及抗滑性能养护方程, 并进行抗滑性能养护评价分级。结果表明, 横向力系数与标准温度 20 ℃ 下摆值、动摩擦因数具有相关性, 但与构造深度不相关, 在路面使用性能评价中运用很广泛; 动摩擦因数与横向力系数、20 ℃ 下摆值均相关, 但与构造深度无关, 是路面抗滑性能的主要影响因素; 雨天事故率与横向力系数、集料磨光值、动摩擦因数、构造深度具有显著的相关性; 抗滑安全指数考虑了雨天事故率的外界影响因素, 在分级划分及考虑指标全面性方面比抗滑性能指数更好。路面养护决策中, 可根据实测横向力系数、动摩擦因数、构造深度、集料磨光值按照雨天事故率和抗滑安全指数的关系式求得抗滑安全指数, 判断路面抗滑性能等级, 决定是否进行养护处理。

关键词: 公路; 沥青路面; 抗滑性能; 多指标; 影响因素; 评价分级

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)02-0073-05

路面抗滑性能受多种因素影响, 如材料类型、材料性质、交通量、气候条件等, 不同因素对路面抗滑性能的影响程度及影响方式均存在差异, 需结合路面具体条件确定抗滑性能的具体要求^[1-2]。学者们对路面抗滑性能指标进行了较多研究, 如杨小龙等分析了公路隧道混凝土路面的抗滑机理、抗滑指标体系、抗滑性能衰减规律^[3]; 吴国雄等分析了橡胶颗粒对沥青路面抗滑性能的影响^[4]; 何俊辉等对沥青路面抗滑性能影响因素进行分析, 结果表明集料的形状因子影响构造深度, 同时构造深度与细集料的棱角性具有相关性^[5]。上述研究通过抗滑性能试验获得了大量基础数据, 但局限于各地区材料、环境等, 试验结果并不能作为一种可复制的经验做法。尤其是在分析抗滑指标间关系时, 必须在当地特殊环境下充分考虑特定项目的试验数据, 才能准确反映特定项目路面抗滑性能指标间关系^[6]。本文基于广东湛徐(湛江—徐闻)高速公路沥青路面现状进行路面抗滑性能指标相关性分析, 进行多指标下路面抗滑性能评价, 为路面抗滑性能养护提供依据。

1 工程概况

湛徐高速公路全长 115.296 km, 2010 年 12 月 30 日通车。采用沥青路面, 结构层由上至下分别为 4 cm 改性 GAC-16C 罩面、5 cm 改性 AC-16C、6 cm AC-20C、8 cm AC-25C、下封层、34 cm 4%~5% 水泥稳定级配碎石、18 cm 3%~4% 水泥稳定碎石、20 cm 级配碎石, 总厚度 95 cm。

湛徐高速公路自建成通车以来运营状况良好, 但在交通荷载、环境等共同作用下, 部分路段出现路面网裂、基层层间断裂、连续坑槽、推移车辙、强度不足等病害, 在一定程度上影响了行车安全。为防止病害进一步扩展, 从 2013 年 12 月开始对部分路段沥青路面进行铣刨重铺、微表处罩面预防性养护。

根据近 5 年湛徐高速公路路面抗滑性能检测数据, 其路面抗滑横向力系数为 [40, 90], 横向力系数 < 48 (路面抗滑性能指数评分小于 90) 的路段长度占比为 45% 左右。2021 年横向力系数 < 48 路段统计结果见表 1。

表 1 湛徐高速公路部分路段横向力系数统计

桩号	横向力系数均值	横向力系数 < 48 路段长度/m	横向力系数集中范围及其路段累计长度占比	
			横向力系数集中范围	累计长度占比/%
K3469+412—K3470+412	52.7	38	[48, 54)	52.7
K3470+412—K3471+412	49.2	59	[43, 48)	43.7

续表1

桩号	横向力系数均值	横向力系数<48 路段长度/m	横向力系数集中范围及其路段累计长度占比	
			横向力系数集中范围	累计长度占比/%
K3471+412—K3472+412	52.1	67	[43,48)	45.6
K3472+412—K3473+412	53.2	76	[48,54)	43.2
K3473+412—K3474+412	56.7	98	[48,54)	57.9

2 路面抗滑性能指标相关性分析

路面抗滑性能指标较多,各指标之间具有相关性。统计学原理对指标间相关程度的界定见表2。

表2 路面抗滑性能指标之间的相关程度

相关程度	相关系数	相关程度	相关系数
不相关	<0.30	高度相关	[0.80,0.95)
弱相关	[0.30,0.50)	显著相关	[0.95,1.00]
中度相关	[0.50,0.80)		

高速公路路面抗滑性能指标包括抗滑性能指数、横向力系数、摆值、动摩擦因数、构造深度,各指标之间存在相关性,但这种相关性受具体路面状况的影响。可通过两两指标比较分析,根据路面检测数据拟合得到函数关系式来确定其相关性。以湛徐高速公路 K3469+412—K3479+412 路段(共10 km)为例,对其2021年实测数据进行分析,得到各指标间的关系图(见图1~6)。

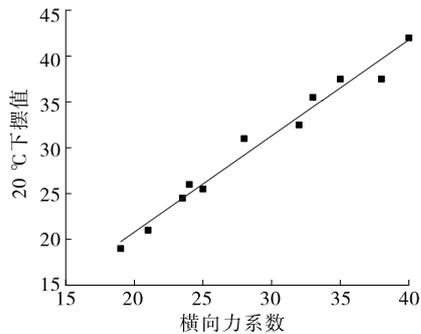


图1 横向力系数与20℃下摆值的关系

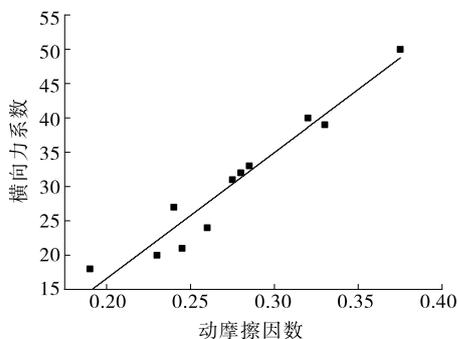


图2 动摩擦因数与横向力系数的关系

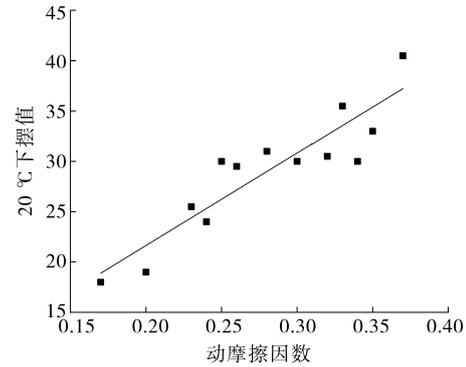


图3 动摩擦因数与20℃下摆值的关系

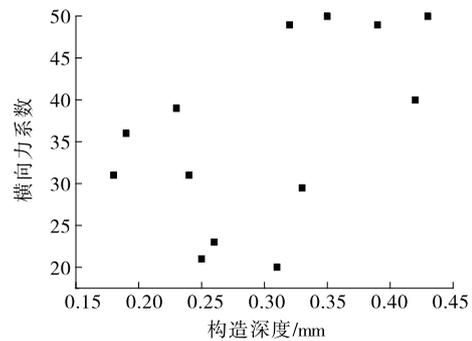


图4 构造深度与横向力系数的关系

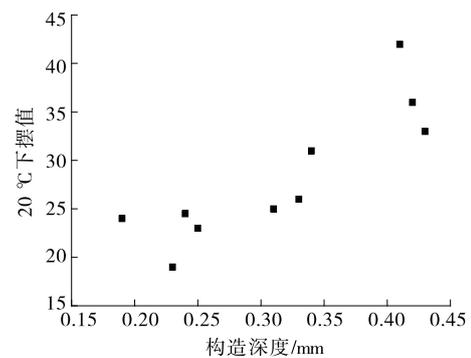


图5 构造深度与20℃下摆值的关系

由图1~6可知:20℃下摆值与横向力系数呈线性相关,相关系数 $R^2=0.973$,相关性显著;动摩擦因数与横向力系数呈线性相关, $R^2=0.931$,相关性较显著;动摩擦因数与20℃下摆值呈线性相关, $R^2=0.809$,相关性较显著;构造深度与横向力系数数据分布零散,两者间不存在较显著的线性或非线

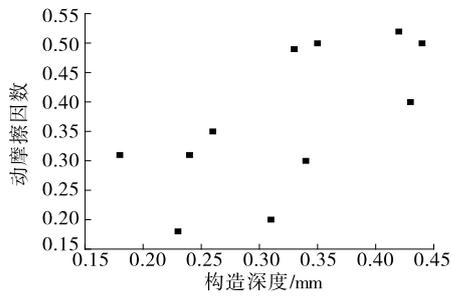


图6 构造深度与动摩擦因数的关系

性关系,两者不相关;构造深度与 20℃下摆值数据分布零散,两者间不存在较显著的线性或非线性关系,两者不相关;构造深度与动摩擦因数数据分布零散,两者间不存在较显著的线性或非线性关系,两者不相关。

为更好地分析抗滑性能指标间的相关性,结合高速公路路面使用性能特点,对各指标的相关性进行分析,结果见表3。

表3 高速公路路面抗滑性能指标间的相关关系

抗滑性能指标	与其线性相关的指标	不相关的指标	说明
横向力系数	20℃下摆值、动摩擦因数	构造深度	横向力系数检测便捷,作为路面使用性能指标运用很广泛,是主要评价指标
构造深度	—	横向力系数、20℃下摆值、动摩擦因数	构造深度是体现路面抗滑性能的宏观指标,是对路面构造纹理的一种描述
20℃下摆值	横向力系数、动摩擦因数	构造深度	20℃下摆值一般适用于分析路面使用前期的性能,是考察车辆低速行驶下路面抗滑性能的指标
动摩擦因数	横向力系数、20℃下摆值	构造深度	动摩擦因数是车速影响路面动摩擦性能程度的描述,日本相关规范将其作为路面抗滑性能评价指标

3 基于多指标的路面抗滑性能评价

目前多倾向于采用横向力系数评价路面的抗滑性能,但单一指标评价不能全面反映路面抗滑性能状况。路面抗滑性能受多种因素影响,如横向力系数、摆值、动摩擦因数、构造深度等。考虑各种抗滑性能影响因素进行多指标抗滑性能评价,才能全面展现路面的抗滑性能。文献[7]根据中国华东地区3条高速公路的交通量、降雨量、交通事故和路面横向力系数数据,采用雨天事故率、雨天事故危险率对上述数据进行分析,得出了雨天事故率、雨天事故危险率与路面抗滑力之间的关系。下面基于已有研究成果,分析雨天事故率和抗滑性能指标间的关系,建立相应养护评价方程。

3.1 雨天事故率与抗滑性能养护影响因素的关系

国内学者对抗滑性能与事故率的相关性进行了试验研究和模拟分析,发现事故率在未下雨时无较明显的规律,而在雨天,事故率与路面抗滑性能存在相关关系,雨天事故率与抗滑性能呈非线性关系。

选取湛徐高速公路 K3469+412—K3479+412 路段雨天事故率和抗滑性能指标数据,按照横向力系数进行数据分级,得到雨天事故率计算公式^[7]:

$$R_{\text{WAR}} = (\text{雨天事故次数} \times 10^8) / (\text{路面长度} \times \text{年平均日交通流量} \times 365)$$

式中: R_{WAR} 为雨天事故率[次/(亿车·km)]。

路面横向力系数、动摩擦因数、构造深度已被广泛用于路面抗滑性能评价,也有学者从路面材料的角度将集料磨光值作为抗滑性能养护的影响因素。为保证研究的全面性,收集湛徐高速公路 K3469+412—K3479+412 路段的横向力系数、动摩擦因数、构造深度、集料磨光值数据(见表4~7),分析这些因素与雨天事故率的关系,结果见表8。

表4 雨天事故率和路面横向力系数的相关性数据

横向力系数	雨天事故率/[次·(亿车·km) ⁻¹]	横向力系数	雨天事故率/[次·(亿车·km) ⁻¹]
38	34.5	46	15.5
40	27.0	47	14.5
42	23.5	48	13.0
44	18.0	50	6.0

表5 雨天事故率和集料磨光值的相关性数据

集料磨光值/BPN	雨天事故率/[次·(亿车·km) ⁻¹]	集料磨光值/BPN	雨天事故率/[次·(亿车·km) ⁻¹]
29	34.5	37	14.5
31	28.0	38	13.5
32	26.5	40	10.5
33	24.0	42	5.5
34	20.0	43	5.0
35	15.0		

表6 雨天事故率和动摩擦因数的相关性数据

动摩擦 因数	雨天事故率/[次· (亿车·km) ⁻¹]	动摩擦 因数	雨天事故率/[次· (亿车·km) ⁻¹]
0.24	68.0	0.39	12.0
0.26	46.0	0.41	11.0
0.28	32.0	0.42	10.0
0.32	16.0	0.44	9.5

表7 雨天事故率和构造深度的相关性数据

构造深 度/mm	雨天事故率/[次· (亿车·km) ⁻¹]	构造深 度/mm	雨天事故率/[次· (亿车·km) ⁻¹]
0.25	68.0	0.35	37.0
0.26	56.0	0.39	23.0
0.31	45.0	0.42	13.0
0.34	29.0	0.44	12.0

表8 雨天事故率与抗滑指标的相关性计算结果

抗滑指标	与雨天事故率的 相关系数	抗滑指标	与雨天事故率的 相关系数
横向力系数	0.93	动摩擦因数	0.96
集料磨光值	0.97	构造深度	0.92

由表8可知:雨天事故率和路面横向力系数、集料磨光值、动摩擦因数、构造深度之间的相关性较显

表9 湛徐高速公路雨天事故率与抗滑性能评价指标数据

路段	横向力系数	集料磨光值/BPN	构造深度/mm	动摩擦因数	雨天事故率/[次·(亿车·km) ⁻¹]
K3469+412—K3470+412	37	28	0.35	0.31	37.5
K3470+412—K3471+412	39	32	0.37	0.33	26.2
K3471+412—K3472+412	41	34	0.39	0.35	18.7
K3472+412—K3473+412	43	34	0.41	0.36	17.2
K3473+412—K3474+412	44	36	0.43	0.37	16.5
K3474+412—K3475+412	43	41	0.44	0.37	11.7
K3475+412—K3476+412	45	40	0.45	0.40	10.9
K3476+412—K3477+412	47	39	0.40	0.41	10.3
K3477+412—K3478+412	52	38	0.39	0.43	13.2
K3478+412—K3479+412	56	38	0.42	0.39	13.8

根据式(1),雨天事故率与横向力系数、集料磨光值、动摩擦因数、构造深度呈显著线性关系。

3.3 抗滑性能养护评价分级

已有研究表明路面抗滑性能指标影响雨天事故率,确定雨天事故率的阈值有助于实现路面抗滑性能指标分级。收集湛徐高速公路雨天事故率和路面横向力系数数据,对其路面雨天事故率阈值进行分析。雨天事故率和横向力系数的关系见图7。

由图7可知:整体上,随着雨天事故率的增大,横

向力系数减小。雨天事故率 ≤ 5.5 次/(亿车·km)时,两者的相关性弱;雨天事故率 > 5.5 次/(亿车·km)时,两者的相关性较强。表明横向力系数较大则雨天事故率较小,横向力系数较小则雨天事故率较大,并且随着横向力系数的减小,雨天事故率逐渐提高。

3.2 抗滑性能养护评价方程

以抗滑安全指数表征路面横向力系数、动摩擦因数、构造深度、集料磨光值,将雨天事故率引入抗滑性能综合评价中。收集湛徐高速公路K3469+412—K3479+412路段的横向力系数、集料磨光值、构造深度、动摩擦因数、雨天事故率数据(见表9),以一次函数 $y = ax$ 为基础,依次增加自变量,对雨天事故率与抗滑性能指标之间的关系进行拟合,得:

$$R_{\text{WAR}} = e_1 + a_1 \cdot C_{\text{SFC}} + a_2 / C_{\text{SFC}} + b_1 \cdot V_{\text{PSV}} - d_1 \cdot \exp(d_2 \cdot \mu) + c_1 \cdot D_{\text{DT}} \cdot \exp(b_2 / V_{\text{PSV}})$$

$$R^2 = 0.992$$

(1)

式中: C_{SFC} 为横向力系数; e_1 、 a_1 、 a_2 、 b_1 、 d_1 、 d_2 、 c_1 、 b_2 均为常数, $e_1 = 21\ 9873$, $a_1 = 0.62$, $a_2 = 51\ 201\ 229$, $b_1 = 0.672$, $d_1 = 0.126$, $d_2 = 3\ 198$, $c_1 = 319\ 823$, $b_2 = 4.17$; V_{PSV} 为集料磨光值; μ 为动摩擦因数; D_{DT} 为构造深度。

雨天事故率为[12.5, 27.2]次/(亿车·km)时,横向力系数与雨天事故率的负相关斜率比雨天事故率为[5.5, 12.5]次/(亿车·km)时的负相关斜率大,说明雨天事故率超过12.5次/(亿车·km)时,

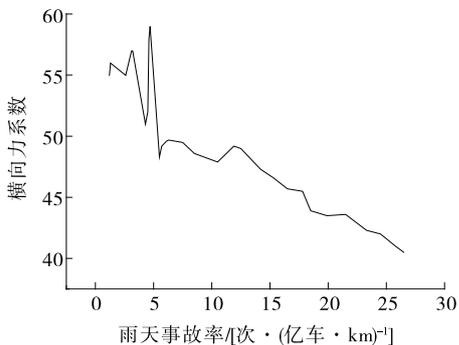


图 7 雨天事故率与横向力系数的关系

横向力系数减小, 会增大雨天事故率, 应引起路面养护单位的注意; 雨天事故率 > 27.2 次/(亿车 · km) 时, 横向力系数降到 33.6 以下, 处于较差水平, 应进行路面养护处理。

由上述分析可知抗滑安全指数与雨天事故率密切相关, 根据路面雨天事故率, 参考路面抗滑性能指数评价标准(见表 10), 对抗滑安全指数进行评价分级。考虑到路面抗滑安全指数处于“次”时就需要进行路面养护, 不再划分“次”以下标准(见表 11)。

表 10 路面抗滑性能指数评价标准

评价等级	路面抗滑性能指数	评价等级	路面抗滑性能指数
优	≥90	次	≥60~70
良	≥80~90	差	<60
中	≥70~80		

表 11 路面抗滑安全指数评价标准

评价等级	路面抗滑安全指数	雨天事故率/ [次 · (亿车 · km) ⁻¹]
优	≥90	≤5.5
良	≥75~90	5.5~<15.5
中	≥60~75	15.5~<27.2
次	<60	≥27.2

抗滑安全指数的分级是类比路面抗滑性能指数的分级进行的, 充分考虑了雨天事故率下路面抗滑性能。根据表 11, 抗滑安全指数与雨天事故率呈负相关关系, 随着雨天事故率的增大, 抗滑安全指数减小。结合表 11, 构建抗滑安全指数与雨天事故率间关系式, 令抗滑安全指数的范围为 [30, 100], 采用插值法, 以雨天事故率为变量, 得到抗滑安全指数与雨天事故率间关系式:

$$I_{STDP} = \frac{100 - I_{STDP, \min}}{\alpha_1 + \alpha_0 \exp(\alpha_2 R_{WAR})} + I_{STDP, \min} \quad (2)$$

式中: I_{STDP} 为抗滑安全指数; $I_{STDP, \min} = 30$; $\alpha_0 = 0.267$; $\alpha_1 = 0.773$; $\alpha_2 = 0.0712$ 。

式(2)反映了雨天事故率和抗滑安全指数之间的关系, 雨天事故率与横向力系数、动摩擦因数、构造深度、集料磨光值显著相关, 抗滑安全指数比路面抗滑性能指数在分级划分及考虑指标全面性方面更好, 充分考虑了路面抗滑性能的多个影响因素, 还考虑了雨天事故率这一外界影响因素。路面养护检测中, 可根据实测横向力系数、动摩擦因数、构造深度、集料磨光值按照式(1)、式(2)求得抗滑安全指数, 再依据表 11 判断路面抗滑安全指数等级, 决定是否进行养护处理。

4 结论

(1) 横向力系数与 20 °C 下摆值、动摩擦因数具有相关性, 但与构造深度不相关, 该指标作为路面使用性能指标运用很广泛; 构造深度与横向力系数、20 °C 下摆值、动摩擦因数均不相关, 是表现路面抗滑性能的宏观指标, 是对路面构造纹理的一种描述; 20 °C 下摆值与横向力系数、动摩擦因数具有相关性, 但与构造深度不相关, 该指标一般适用于分析路面使用前期的性能, 是考察车辆低速行驶下路面抗滑性能的指标; 动摩擦因数与横向力系数、20 °C 下摆值均相关, 但与构造深度无关, 是道路抗滑性能的主要影响因素。

(2) 雨天事故率与横向力系数、集料磨光值、动摩擦因数、构造深度之间具有显著相关性。

(3) 抗滑安全指数比路面抗滑性能指数在分级划分及考虑指标全面性方面更好, 充分考虑了路面抗滑性能的多个影响因素, 还考虑了雨天事故率这一外界影响因素。抗滑安全指数与雨天事故率呈负相关关系, 随着雨天事故率的增大, 抗滑安全指数减小。路面养护检测中, 可根据实测横向力系数、动摩擦因数、构造深度、集料磨光值, 按照雨天事故率和抗滑安全指数的关系式求得抗滑安全指数, 评价路面抗滑安全指数等级, 判断是否需要养护处理。

参考文献:

[1] 廖勇, 任涛, 刘丹. 沥青路面抗滑性能影响因素识别研究进展[J]. 交通节能与环保, 2021, 17(1): 124-128.
 [2] 董祥, 张士萍, 丁小晴, 等. 沥青混凝土路面的纹理构造与抗滑性检测方法[J]. 公路, 2011(11): 14-20.
 [3] 杨小龙, 李波, 李晓辉. 甘肃省公路隧道混凝土路面抗滑特性测试与分析[J]. 公路工程, 2015, 40(3): 105-108.

(下转第 90 页)

减小 33.5%；优化后主梁弯矩图相对于优化前更平顺，结构受力更合理。

由图 8 可知：混凝土梁因为刚度较大，索力变化对其竖向累积位移几乎没有影响；主塔北侧钢箱梁因里程较短且受到混凝土梁段的支撑作用，其竖向累积位移较小；优化后主塔南侧合龙段钢箱梁竖向累积位移最大值由 248.2 mm 减小至 120.0 mm，减小 51.7%。

由图 9 可知：优化前塔顶偏位为 92.8 mm，优化后塔顶偏位为 41.5 mm，减少 55.3%。

4 结语

混合梁斜拉桥属于高阶超静定结构，采用正装迭代法计算，计算过程复杂、烦琐，而采用最小弯曲能量法和遗传算法建立模型进行索力优化，可在很大程度上避免求解繁杂的影响矩阵，在结构较复杂时其计算效率比普通优化方法高。本文以某混合梁斜拉桥为研究对象，利用最小弯曲能量法，结合遗传算法求解得到索力最优解。相较于优化前，索力优化后斜拉桥主梁应力、弯矩、线形和索塔偏位的峰值都得到不同程度改善，且变化更平顺，符合斜拉桥成桥阶段的要求。

参考文献：

[1] 戴杰,秦凤江,狄谨,等.斜拉桥成桥索力优化方法研究综述[J].中国公路学报,2019,32(5):17-37.

[2] WANG P H, TSENG T C, YANG C G. Initial shape of

cable-stayed bridges [J]. Computers & Structures, 1993, 46(6): 1095-1106.

[3] 刘陈韬,李新生,贾春鑫,等.独塔不对称斜拉桥拉索索力施工监控研究[J].公路与汽运,2022(2):105-109.

[4] 颜东煌,李学文,刘光栋,等.混凝土斜拉桥合理成桥状态确定的分步算法[J].中国公路学报,2003,16(1):43-46.

[5] 颜东煌,李学文,刘光栋,等.用应力平衡法确定斜拉桥主梁的合理成桥状态[J].中国公路学报,2000,13(3):51-54.

[6] 戴杰,屈骏,乔建刚,等.基于有效约束集法的混合梁斜拉桥合理成桥状态确定方法[J].科技导报,2014,32(34):69-77.

[7] 张玉平,刘雪松,李传习.基于 MOPSO 算法的斜拉桥索力优化分析[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(2):107-114.

[8] 严松,颜鹏飞.基于遗传算法的钢斜拉桥成桥索力优化[J].中外公路,2021,41(2):198-202.

[9] 孙平宽,方艳辉.大跨独塔斜拉桥合理成桥索力确定方法研究[J].公路交通科技(应用技术版),2014,10(9):221-222.

[10] 李晓林,邓洁.基于改进粒子群算法的斜拉桥索力优化方法[J].公路与汽运,2021(5):106-110.

[11] 徐冰霜.基于最小弯曲能量法的斜拉桥索力优化[J].山西建筑,2017,43(16):190-191.

[12] 金俊杰,沈勇.基于能量法的独塔斜拉桥施工索力优化研究[J].湖南交通科技,2021,47(2):122-124.

收稿日期:2022-03-07

(上接第 61 页)

[14] LIAKOPOULOS A C. Transient flow through unsaturated porous media [D]. Berkeley: University of California, 1965.

[15] GAWIN D, BAGGIO P, SCHREFLER B A. Coupled heat, water and gas flow in deformable porous media[J]. International Journal for Numerical Methods

in Fluids, 1995, 20(8/9): 969-987.

[16] SCHREFLER B A, SCOTTA R. A fully coupled dynamic model for two-phase fluid flow in deformable porous media[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2001, 190(24/25): 3223-3246.

收稿日期:2022-04-10

(上接第 77 页)

[4] 吴国雄,叶新雨,余苗,等.基于黏弹性的橡胶改性沥青路面抗滑性能研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(2):81-86.

[5] 何俊辉,陈海涛,赵艳娜,等.基于灰关联法的沥青路面抗滑性能影响因素研究[J].中外公路,2020,40(6):47-52.

[6] 王慧,王彝乾,李俊,等.石灰岩排水沥青路面路用性能及其抗滑持久性研究[J].中外公路,2021,41(6):73-76.

[7] 文斌,曹东伟.高速公路路面抗滑力与交通事故的统计分析[J].公路交通科技,2006,23(8):72-75.

收稿日期:2022-03-06