

莫桑比克马普托大桥钢桥面铺装用地材匹配性研究

付 斌, 尚 飞

(重庆市智翔铺道技术工程有限公司, 重庆市 401336)

摘 要: 针对莫桑比克马普托大桥钢桥面铺装所用集料和矿粉地材, 首先采用 NIKON LV100POL 型偏反光显微镜对集料和矿粉进行矿质含量和岩性鉴定, 并通过 SiO₂ 含量检验其酸碱性; 其次按照国内规范对集料和矿粉规格与基本性能进行检测分析, 并进行 SMA10 和 GA10 沥青混合料的配合比设计与性能验证。结果表明, 马普托大桥区位产的集料为(杏仁状)含铁质辉石玄武岩; 集料和矿粉呈碱性且规格与各项指标均符合钢桥面铺装要求; 通过配合比设计得到的沥青混合料可直接用于铺装施工。

关键词: 钢桥面铺装; 地材; 岩性; 匹配性

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)01-0208-05

0 引 言

莫桑比克马普托(Maputo)大桥及接线工程, 主线起点 K1+566~ K114+998.245, 全长 113.429 km, 为莫桑比克首都马普托市向南去往南非与莫桑比克南部 Casa commercial 边界口岸的干线公路。

马普托大桥桥面铺装施工项目属于境外施工, 原则上原材料应尽可能使用当地地材, 但是对于钢桥面铺装工程, 相比于传统路面铺装对于原材料的要求更为苛刻^[1]。由于境外材料的规格以及性能指标均与国内不同, 故本文通过两者对比来确定当地地材对于桥面铺装的匹配性, 从而为铺装工程原材料的供应提供指导。

1 集料匹配性研究

1.1 集料岩性鉴定

取 5~10 mm 马普托地材集料若干, 切片制样后在 NIKON LV100POL 型偏反光显微镜下进行岩性鉴定, 鉴定结果见图 1。由图 1 可分析集料样品的结构构造、结构组分、集料酸碱性等。

1.1.1 结构构造

集料主要由自形-半自形板状斜长石颗粒组成, 间隙分布有辉石等细小颗粒或隐晶质-玻璃质等, 构成间粒间隐结构(见图 1(a)), 少量呈斑状结构(见图 1(b))的块状构造, 局部见杏仁状构造。

收稿日期: 2021-06-01

作者简介: 付斌(1982—), 男, 本科, 高级工程师, 从事工程管理工作。

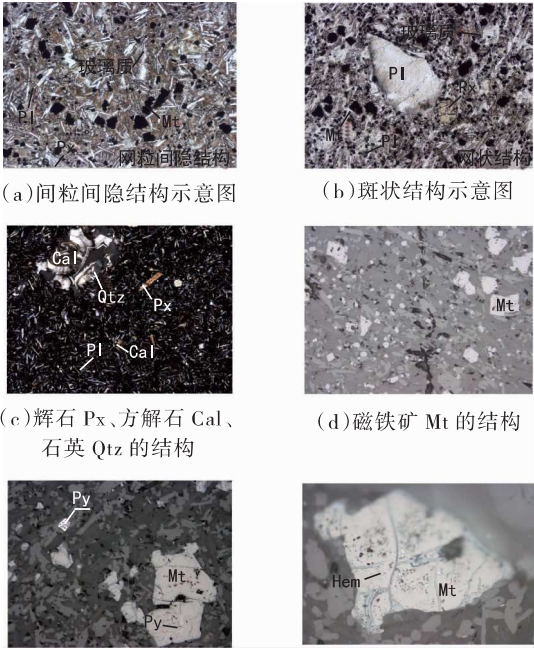


图 1 集料切块后在 NIKON LV100POL 型偏反光显微镜下的形貌

1.1.2 结构组分

集料结构组分主要有斜长石(48%)、辉石(12%)和玻璃质(18%)等, 含绿帘石(少量)、方解石(8%)、绿泥石(3%)、石英(少量)和绢云母(少量); 副矿物由金属矿物磁铁矿(8%)、赤铁矿(微量)和黄铁矿(少量)等组成。

斜长石(Pl): 约 48%, 呈自形-半自形板状结构, 发育聚片双晶(见图 1(a)、图 1(b)), 偶见生长环带; 斜长石板状晶体略具定向排列特征, 呈交织结构, 晶体格架中分布有细粒辉石及玻璃质等, 构成间粒间隐结构; 部分斜长石呈斑晶, 局部被方解石、绿泥石、绢

云母和绿帘石等交代(见图 1(b)),局部方解石交代强烈,呈残余结构,粒径为 0.01~0.40 mm。

辉石(Px):约 12%,呈半自形粒柱状结构(见图 1(c)),部分可见近六边形或板状晶体截面,可见解理,部分可见加大边结构特征,分布于板状斜长石格架中(见图 1(a)),颗粒间被玻璃质充填,局部被绿泥石及方解石等交代,粒径为 0.01~0.25 mm。

玻璃质:约 18%,隐晶质,浅褐黄色(见图 1(a)),沿板状斜长石及辉石等颗粒间充填,正交镜下全消光。

绿帘石(EP):少量,呈不规则粒状,交代辉石和斜长石等,粒径为 0.01~0.20 mm。

绿泥石(Chl):约 3%,鳞片状,浅绿色-褐绿色,交代斜长石和辉石等,局部沿气孔边缘分布,粒径为 0.01~0.05 mm。

绢云母(Ser):少量,鳞片状,交代斜长石等,粒径小于 0.10 mm。

方解石(Cal):约 8%,呈不规则粒状结构,交代斜长石和辉石等,局部沿岩石裂隙充填,呈脉状分布,或沿岩石气孔充填,呈胶环状集合体与放射状石英等构成杏仁体,部分可见发育解理,高级白干涉色(见图 1(c)),粒径为 0.01~0.30 mm。

石英(Qtz):少量,不规则粒状,多沿岩石气孔充填(见图 1(c)),集合体呈放射状,波状消光,与方解石等共生,粒径小于 0.10 mm。

磁铁矿(Mt):约 8%,呈自形-半自形粒状,可见其菱形十二面体晶体截面特征,沿裂隙及边缘被黄铁矿及赤铁矿等交代(见图 1(d)、图 1(e)),呈细脉状或尖角状结构等,磁铁矿等零散分布于斜长石和辉石等颗粒间,粒径为 0.002~0.250 mm。

赤铁矿(Hem):微量,呈不规则粒状,交代磁铁矿(见图 1(f)),粒径为 0.002~0.020 mm。

黄铁矿(Py):少量,呈不规则粒状零散分布于斜长石和辉石等颗粒间,部分集合体呈细脉状,偶见立方体晶体截面(见图 1(e)),多沿磁铁矿边缘及裂隙交代,粒径为 0.002~0.100 mm。

集料鉴定名称:(杏仁状)含铁质辉石玄武岩。

1.1.3 集料酸碱性

在道路铺筑中所用的集料可分为酸性集料和碱性集料,但实际情况复杂,集料一般均同时存在酸性和碱性成分,只是含量多少而已。一般以 SiO₂ 含量判断集料的酸碱性:SiO₂ 含量>65%为酸性,52%<SiO₂ 含量<65%为中性, SiO₂ 含量<52%为碱性^[2]。

参照《水泥化学分析方法》(GB/T 176—2008)测定马普托地材集料的酸碱性,得到其中的 SiO₂ 含量为 42.67%,故该集料属于碱性集料。

1.2 集料基本性能

1.2.1 集料规格

马普托地材集料共计 3 种规格:5~10 mm、3~5 mm 和 0~3 mm,根据《公路沥青路面施工技术规范》(JT-GF40—2004),这 3 种规格分别对应沥青混合料 S12、S14 和 S16 这 3 档集料。马普托地材集料的筛分通过率结果和集料规格要求见表 1、表 2。

由表 1、表 2 中的筛分通过率可以看出,马普托地材 3 档集料的筛分结果均符合《公路沥青路面施工技术规范》中对集料规格的要求,通过合理掺配可以对其进行配合比设计。

1.2.2 集料性能试验

针对马普托地材集料,分别进行集料密度、压碎值、针片状含量和黏附性等级等试验,试验结果见表

表 1 马普托地材集料筛分结果

筛孔尺寸 /mm	集料通过率 /%								
	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
4.75~9.5	100.00	98.30	1.60	0	0	0	0	0	0
2.36~4.75	100.00	100.00	90.11	3.37	0.45	0.14	0.14	0.14	0.02
0~2.36	100.00	100.00	100.00	91.86	54.01	33.50	12.78	5.73	3.72

表 2 沥青混合料用集料规格

规格名称	集料通过率 /%								
	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
S12	100	90~100	0~15	0~5					
S14	100	100.00	90~100	0~15		0~3			
S16			100	80~100	50~80	25~60	8~45	0~25	0~15

3、表4。

表3 马普托粗集料(2.36~9.5 mm)性能试验结果

试验项目	试验结果	技术要求	试验规程
4.75~ 9.5 mm 表观相对密度	2.912	≥2.5	T0304—2005
吸水率 /%	0.500	≤2	
2.36~ 4.75 mm 表观相对密度	2.913	≥2.5	
吸水率 /%	0.670	≤2	
压碎值 /%	16.2	≤26	T0316—2005
洛杉矶磨耗值 /%	15.6	≤28	T0317—2005
(4.75~9.5 mm) 针片状含量 /%	14.3	≤15	T0312—2005
黏附性等级	5	>4级(年降水量>1 000 mm)	T0616—2000
软石含量	1.2	≤3	T0320—2005

表4 马普托细集料(0~2.36 mm)性能试验结果

试验项目	试验结果	技术要求	试验规程
表观相对密度	2.887	≥2.5	T0304—2005
吸水率 /%	0.910	≤2	
含泥量 /%	1.6	≤3	T0333—2005
亚甲蓝值 / (g·kg ⁻¹)	19.6	≤25	T0349—2005
棱角性 /s	15	≤30	T0345—2005
砂当量 /%	46	≤60	T0334—2005

由表3、表4可知:马普托集料的性能均能够较好地满足《公路沥青路面施工技术规范》基本要求,匹配性良好。

2 矿粉匹配性研究

2.1 矿粉岩性鉴定

对马普托地材矿粉进行岩性鉴定。由于矿粉为粉末状试样,故无法进行结构构造鉴定。在 NIKON LV100POL 型偏反光显微镜下对粉末状矿粉试样进行观察,结果见图2。

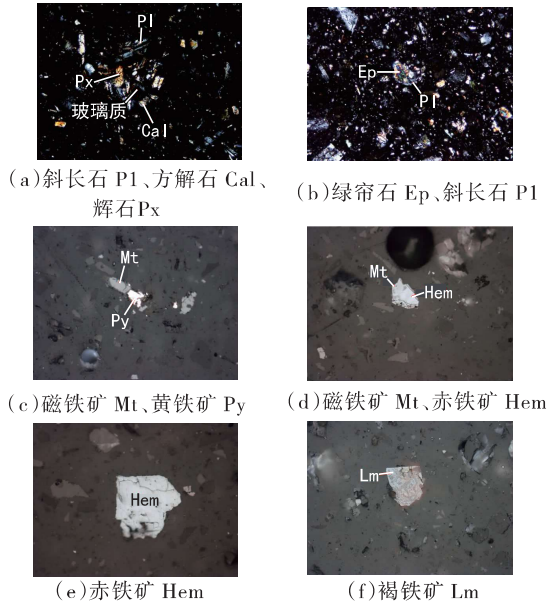


图2 矿粉试样光薄片在 NIKON LV100POL 型偏反光显微镜下的形貌

2.1.1 结构组分

样品经由环氧树脂搅拌,凝固后加工成光薄片,在 NIKON LV100POL 型偏反光显微镜下进行观察,发现其组分主要为斜长石(60%)、辉石(22%)、角闪石(4%)和玻璃质(3%)等,含绿帘石(少量)、方解石(3%)、绿泥石(少量)和绢云母(微量),金属矿物有磁铁矿(5%)、赤铁矿(约2%)、黄铁矿(少量)和褐铁矿(微量)等。

斜长石(Pl):约60%,呈不规则粒状,部分见板状晶体截面特征,偶见解理及聚片双晶,一级灰白干涉色,偶见辉石细小颗粒和玻璃质分布于斜长石格架中(见图2(a)),局部被方解石、绿泥石、绢云母和绿帘石等交代(见图2(b)),粒径为0.01~0.20 mm。

辉石(Px):约22%,呈不规则粒状,部分可见解理,偶见分布于板状斜长石格架中,并且颗粒间被玻璃质充填(见图2(a)),局部被绿泥石及方解石等交代,粒径为0.002~0.100 mm。

角闪石(Hbl):约4%,呈不规则粒状,绿色-深绿色,显多色性,可见解理,多单晶体分布,粒径为0.002~0.100 mm。

玻璃质:约3%,隐晶质,浅褐黄色(见图2(a)),沿板状斜长石和辉石等颗粒间充填,正交镜下全消光。由于玻璃质与环氧树脂胶在透射光下均为无色,且具全消光特征,因此粉末试样中不好区分,含量估计偏少。

绿帘石(Ep):少量,呈不规则粒状,交代斜长石等(见图2(b)),粒径为0.01~0.10 mm。

绿泥石(Chl):少量,鳞片状,浅绿色,交代角闪石和辉石等,粒径小于0.05 mm。

绢云母(Ser):微量,鳞片状,交代斜长石等,粒径小于0.05 mm。

方解石(Cal):约3%,呈不规则粒状,交代斜长石和辉石等,高级白干涉色(见图2(a)),粒径为0.002~0.100 mm。

磁铁矿(Mt):约5%,呈不规则粒状,沿裂隙及边缘被黄铁矿和赤铁矿等交代(见图2(c)、图2(d)),呈细脉状或尖角状结构等,粒径为0.002~0.100 mm。

赤铁矿(Hem):约2%,呈不规则粒状(见图2(e)),交代磁铁矿,粒径为0.002~0.100 mm。

黄铁矿(Py):少量,呈不规则粒状,可见沿磁铁矿边缘及裂隙交代,粒径为0.002~0.050 mm。

褐铁矿(Lm):微量,呈不规则粒状或胶状(见图2(f)),分布于透明矿物中,褐红色内反射色,粒径小

于 0.05 mm。

矿粉鉴定名称：由于粉末状试样无法观察结构特征,故无法对矿粉进行名称定性。

2.1.2 矿粉酸碱性

参照《水泥化学分析方法》(GB/T 176—2008)测定马普托地材矿粉的酸碱性，得到其中的 SiO₂ 含量为 51.40%。由此可知,该矿粉属于碱性但偏中性,可以用于铺装工程。

2.2 矿粉基本性能

针对马普托地材矿粉,分别进行外观观察、矿粉密度试验和筛分试验等,试验结果见表 5。

表 5 马普托地材矿粉性能试验结果

试验项目		试验结果	技术要求	试验规程
表观相对密度		2.750	≥2.5	T0352—2000
筛孔通过率 /%	粒径 <0.6 mm	100	100	T0351—2000
	粒径 <0.15 mm	99.7	90~100	
	粒径 <0.075 mm	98.7	75~100	
亲水系数		0.6	<1.0	T0353—2000
外观		无团粒结块		
含水量 /%		0.2	≤1	T0103 烘干法

由表 5 可知，马普托地材矿粉的性能指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》基本要求,匹配性良好。

3 沥青混合料配合比设计及性能验证

3.1 浇注式沥青混合料配合比设计及性能验证

3.1.1 配合比设计

进行浇注式沥青混合料配合比设计时，所使用的集料与矿粉均为马普托地材原料。针对地材矿粉过细这一因素,参照交通部已经发行的《公路钢桥面铺装设计与施工技术规范》(JTG/T 3364-02—2019)中的级配范围进行配合比设计。

浇注式聚合物改性沥青混合料 GA10 的优化级配及范围见表 6。

根据优化配合比，结合经验选取相差 0.5% 的 3 种油石比 7.3%、7.8% 和 8.3% 作为备选油石比,进行混合料的刘埃尔流动性及贯入度试验。3 种油石比对应的浇注式聚合物改性沥青混合料流动性与贯入度试验结果见表 7。

表 6 浇注式聚合物改性沥青混合料 GA10 的优化级配及范围

孔径 /mm	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配范围 /%	100	80~100	63~80	48~63	38~52	32~46	27~40	24~36	20~30
优化级配 /%	100.00	99.47	68.24	55.16	42.15	35.24	28.45	25.56	23.54

表 7 不同油石比下浇注式聚合物改性沥青混合料性能

试验项目	油石比 /%			要求
	7.3	7.8	8.3	
流动性(240 ℃)/s	66	16	5	3~20
贯入度(60 ℃)/mm	2.21	2.62	4.32	1.0~4.0
贯入度增量(60 ℃)/mm	0.23	0.27	0.51	≤0.4

由表 7 可知,在矿粉过细优化级配下,最佳油石比位于相对合理的范围内。3 种油石比对于浇注式聚合物改性沥青混合料的性能影响明显:7.3% 的油石比对应的混合料偏“硬”,流动性超过了 1 min,将会对现场施工造成较大影响;8.3% 的油石比对应的混合料过“软”,相应的流动性优异,但是贯入度过大,将影响混合料的高温稳定性;7.8% 的油石比对应的混合料性能均符合相关性能的影响,并且成本也可接受。

在允许范围内，沥青混合料的优化级配应尽量减少矿粉用量，以保证在矿粉过细的情况下混合料中仍然具有足够的有效油膜厚度，从而使得正常油石比范围中的混合料流动性能得到保证。

3.1.2 性能验证

除了油石比优选时已经得到验证的流动性和贯入度指标，本文还对浇注式聚合物改性沥青混合料 GA10 的低温弯曲性能和疲劳性能进行了验证。-10 ℃ 下 GA10 的低温弯曲试验结果和四点弯曲疲劳性能试验结果见表 8、表 9。

表 8 GA10 在 -10 ℃ 下的低温弯曲试验结果

材料类型	弯拉强度 /MPa	弯拉应变 /(μm·m ⁻¹)	弯拉模量 /MPa
聚合物改性沥青混合料 GA10	11.15	7 784.4	1 537.3

表 9 GA10 的四点弯曲疲劳性能试验结果

材料类型	应变水平 /(μm·m ⁻¹)	初始模量 /MPa	终止模量 /MPa	疲劳次数 /万次
聚合物改性沥青混合料 GA10	600	6 602.6	3 523.7	>100
	400	6 339.0	2 720.3	>100

由表 8、表 9 可知,设计得到的聚合物改性沥青混合料 GA10 的低温性能和四点弯曲疲劳性能均十分优异,能够达到规范要求。

3.2 高弹性改性沥青混合料 SMA 配合比设计及性能验证

3.2.1 配合比设计

根据级配设计理论和矿料筛分结果,确定的 SMA10 级配组成见表 10。

按照马歇尔试验结果,确定高弹性改性沥青混合料 SMA10 的最佳油石比为 6.3%(掺加 0.2% 聚酯纤维);在最佳油石比下,SMA10 的体积指标及性能测试结果见表 11。由表 11 可知,在确定的最佳油石比基础上,设计混合料的空隙率、矿料间隙率、干粗骨料骨架空隙率等体积指标都可以满足现行规范的基本要求。

3.2.2 性能验证

3.2.2.1 抗水损害性能

由于马普托地材矿粉的岩性偏中性,使得填料与沥青结合料的黏附不良,在水的作用下,易产生失黏和剥落破坏,从而影响沥青-集料的整体性,进而影响沥青混合料的抗水损性能。这对于濒海多雨的马普托大桥来说存在较大的风险,所以拟采用适当降低空隙率的方法(控制混合料的空隙率接近 3%)来提高混合料的抗水损能力^[3-5]。

表 12 为改善前后的 SMA10 抗水损害性能。

由表 12 可知,降低空隙率能够明显提升 SMA 混合料的抗水损害性能,改善后其冻融劈裂残留强度比为 87.8%,高于规范要求的 85%。

3.2.2.2 高温抗车辙性能

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ 052—2000)中 T0719 的试验方法测试了 60℃ 和 70℃ 重载时 SMA10 车辙的动稳定度,结果见表 13。由表 13 可以看出,高弹性改性沥青混合料的高温抗车辙性能符合规范技术要求。

3.2.2.3 低温弯曲性能

沥青混合料的低温极限变形能力可通过低温大梁弯曲试验测试。SMA10 低温大梁弯曲试验结果见表 14。可以看出,高弹性改性沥青混合料 SMA10 的 -10℃ 低温大梁弯曲应变值大于 7 000 μm/m,满足

表 11 SMA10 在最佳油石比下的体积指标及性能测试结果

项目	SMA10	性能要求
最佳油石比 /%	6.3	
毛体积相对密度 /(g·cm ⁻³)	2.489	
最大理论相对密度 /(g·cm ⁻³)	2.572	
空隙率 VA /%	3.4	3~4
集料间隙率 VMA /%	17.8	≥16.5
沥青饱和度 VFA /%	81.8	75~85
粗骨料骨架空隙率 VCA /%	38.5	
干粗骨料骨架空隙率 VCA _{DRC} /%	40.0	
马歇尔试验		
稳定度 /kN	14.6	≥6
流值 /(0.1 mm)	62.0	

表 12 改善前后 SMA10 的抗水损害性能

技术指标	改善前	改善后	技术要求
浸水残留稳定度比 /%	89.5	91.2	
冻融劈裂残留强度比 /%	86.3	87.8	≥85

表 13 SMA10 高温抗车辙试验结果

测试温度 /℃	车辙深度 /mm	动稳定度 /(次·mm ⁻¹)	技术要求 /(次·mm ⁻¹)
70	2.333	3 566	夏炎热区 ≥3 000
60	1.867	5 246	夏凉区 ≥3 000

本项目研究提出的要求^[6]。

表 14 SMA10 低温大梁弯曲试验结果

最大荷载 /N	跨中挠度 /mm	弯拉强度 /MPa	劲度模量 /MPa	弯拉应变 /(μm·m ⁻¹)
8 703	1.482	10.39	1 014	10 246

3.2.2.4 四点弯曲疲劳性能

对高弹性改性沥青混合料 SMA10 进行 2 种微应变情况下的疲劳研究,得到 2 种微应变下的疲劳性能,结果见表 15。由表 15 可知,SMA10 在 2 种微应变情况下的疲劳性能均十分优异。

表 15 SMA10 的疲劳试验结果

应变水平 /(μm·m ⁻¹)	初始劲度模量 /MPa	疲劳寿命 /万次
1 000	1 770	138
1 500	1 685	71

4 结 语

(1) 经过鉴定,马普托集料地材为(杏仁状)含铁

表 10 SMA10 合成级配表

级配类型	筛孔通过率 /%								
	0.075 mm	0.15 mm	0.30 mm	0.60 mm	1.18 mm	2.36 mm	4.75 mm	9.50 mm	13.20 mm
合成级配	11.57	12.07	13.44	17.38	21.31	28.79	39.87	98.98	100.00
级配上限	13.00	16.00	18.00	20.00	25.00	30.00	48.00	100.00	100.00
级配下限	8.00	10.00	12.00	14.00	17.00	20.00	32.00	90.00	100.00
级配中值	10.50	13.00	15.00	17.00	21.00	25.00	40.00	95.00	100.00

```

n,npmax,x,y-dxyz/20,z
!施加切向的弹簧阻尼器
type,2
real,2
e,npnum,npmax
d,npmax,all,0.
*enddo
allsel,all
/pnum,type,1
/number,1
eplot
finish

```

4 结 语

本文对黏弹性人工边界基本理论与等效荷载波动输入方法进行了总结,并依据实际工程案例,实现 ANSYS 有限元自由场振动分析与实际工程中的应用。且通过计算表明黏弹性人工边界具有满意的计算精度和稳定性,可广泛应用于地下工程抗震分析中。

参考文献:

[1] Y.X.Cai,P.L.Gould,C.S.Desai. Nonlinear analysis of 3D seismic in-

teraction of soil-pile-structure systems and application [J]. Engineering Structures, 2000, 22(2): 191-199

[2] J.P.Stewart, G.L.Fenves, R.B.Seed. Seismic soil-structure interaction in buildings.I:Analyticalmethod [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1999, 125(1):26-37

[3] J.P.Stewart, G.L.Fenves, R.B.Seed. Seismic soil-structure interaction in buildings.II:Empirical findings [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1999, 125(1):38-48

[4] R.W.Boulanger, C.J.Curras, D.W.Wilson. Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analysis [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(9):750-759

[5] C.J.Curras, R.W.Boulanger, B.L.Kutter. Dynamic experiments and analysis of a pile-group-supported structure[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2001,127 (7): 585-596

[6] D.Finn, G.Wu. Nonlinear Seismic Analysis of Pile Foundations. In: Proc.11th World Conf. Earthquake Eng[C]. Acapulco, 1996, No.1414

[7] Dasgupta G.A finite element formulation for unbounded homogeneous eontniua[J]Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME, 1982,49:36-140

[8] 阎俊义. 结构-地基动力相互作用的 FE-SBFE 时域耦合方法及工程应用[D].北京:清华大学.2003.10.

[9] Li P, Song E X. A high-order time-domain transmitting boundary for cylindrical wave propagation problems in unbounded saturated poroelastic media [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013,48:48-62.

[10] 刘晶波,王振宇,杜修力,等.[J].工程力学,2005,22(6):46-51.

(上接第 212 页)

质辉石玄武岩,属于碱性集料,各项性能均满足《公路沥青路面施工技术规范》中对沥青路用混合料集料的相关要求。

(2)马普托地材矿粉岩性为碱性岩性,各项性能均满足《公路沥青路面施工技术规范》对路用混合料集料的相关要求,但其中矿粉 0.075 mm 筛孔通过率偏高,总体符合使用要求。

(3)针对马普托大桥地材进行了浇注式聚合物改性沥青混合料 GA10 和高弹性改性沥青混合料 SMA10 的配合比设计,并通过各项路用性能指标进行验证,发现根据马普托地材设计得到的两种混合料配合比能够符合马普托大桥桥面铺装的使用要求。

参考文献:

[1] 黄卫,刘振清.大跨径钢桥面铺装设计理论与方法研究[J].土木工程学报,2005,38(1):51-59.

[2] 王旭东. 集料岩性及微观特征对沥青混合料路用性能的影响研究 [D].长春:吉林大学,2014.

[3] 向文凤,胡德勇,程华才.矿粉对浇注式沥青混合料性能的影响分析[J].公路交通技术,2016,32(4):22-25.

[4] 石红星,李海军,朱立国,等. SMA 混合料水稳定性的试验研究[J].石油沥青,2000(2):14-17.

[5] 薛文,史建方,夏志国. SMA 混合料水稳性能的探讨[J].河北工业大学学报(社会科学版),2001,16(4):16-20.

[6] 王民,周启伟,胡德勇,等. 三种不同钢桥面铺装材料的疲劳特性分析[J].公路工程,2016,41(3):40-42.