



沥青-级配粒料铺面 在境外欠发达地区港口上的应用

王鹏飞¹, 田渊², 蔡伟¹

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 中国水产科学研究院渔业工程研究所, 北京 100141)

摘要: 沥青铺面以沥青混合料面层-水泥稳定碎石(水稳)基层结构为主, 而境外欠发达地区通常缺乏稳定的原材料供应, 自建水稳拌合站亦相对困难, 水稳的施工质量、进度往往难以保证。为解决该问题, 需要选择合适的水稳替代材料。综合分析适用性、原材料供应等因素, 选择级配粒料为替代材料, 并合理分析转换系数、优化级配粒料层厚度, 可以有效降低施工难度和风险, 确保质量、进度、成本可控。以南亚某港口项目采用沥青-级配粒料铺面结构为例, 介绍该型铺面结构在境外欠发达地区的应用。实施效果表明: 级配粒料压实性好, 沥青表面无裂缝、车辙, 道路无明显差异性沉降。

关键词: 沥青铺面; 转换系数; 水稳; 级配粒料

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)03-0061-05

Application of pavement of asphalt and graded granular material at ports in underdeveloped regions overseas

WANG Peng-fei¹, TIAN Yuan², CAI Wei¹

(1.CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2.Fisheries Engineering Institute, CAFS, Beijing 100141, China)

Abstract: Asphalt pavement mostly has a structure of a surface layer of asphalt mixture and a base layer of cement bound granular mixtures (CBGM). However, underdeveloped regions overseas are often without stable material supply and unable to build CBGM batching plants by themselves and maintain the quality and progress of CBGM construction. A suitable substitute material for CBGM needs to be chosen to tackle this problem. A graded granular material is adopted as the substitute material after a comprehensive analysis of factors such as adaptability and raw material availability, and the conversion factor is analyzed properly to optimize the thickness of the graded granular material layer. In this way, construction difficulties and risks can be significantly reduced, and quality, progress, and cost of construction can be controlled. This paper, taking a port project in South Asia that adopts a pavement structure of asphalt and the graded granular material as an example, describes the application of such pavement structure in underdeveloped regions overseas. According to the implementation result, the graded granular material has a good capacity of compaction, no cracking or rutting is observed on the asphalt surface, and no observable differential settlement of the road occurs.

Keywords: asphalt pavement; conversion factor; CBGM; graded granular material

沥青混合料面层-水泥稳定碎石基层(沥青-水稳)结构是港口堆场道路的常见铺面结构形式, 水稳基层为半刚性结构, 主要起承重和扩散荷载的作

用。某项目原设计堆场道路采用沥青-水稳结构, 断面形式为 150 mm 沥青混合料面层、300 mm 水稳基层、150 mm 级配粒料底基层, 其中沥青基层下设

有格栅，防止沥青面层开裂。原设计沥青铺面结构见图 1。

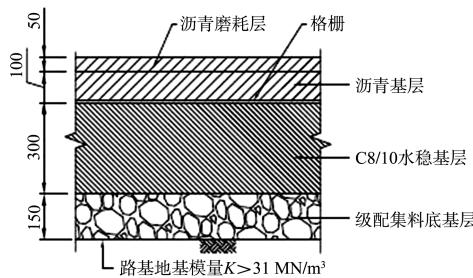


图 1 原设计沥青-水稳结构断面 (单位: mm)

原设计对水稳层的抗压强度要求较高，7 d 最小抗压强度需达到 8 MPa。而国内对于该等级的路面，《公路沥青路面设计规范》^[1]要求 7 d 抗压强度标准值为 4~6 MPa(一级公路, 重交通)，《港口道路与堆场设计规范》^[2]要求 28 d 抗压强度设计值不宜低于 6 MPa。考虑到当地原材料供应不稳定的市场条件，水稳的施工质量、进度难以把控。

由于水稳材料对运输、铺设时间有较高要求，应自建水稳站，但是建水稳站所需的时间和费用成本很高。另外，水稳的压实度检测需要核密度仪，存在较大进关风险。因此，采用其他材料代替水稳，成为推动沥青铺面进度的核心技术问题。

1 复核水稳基层厚度

本项目设计以英标为主，铺面计算采用海外项目认可度较高的 *The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries*^[3] (简称 HDP)。HDP 假定铺面为联锁块-水稳结构，以 C_{8/10} 水稳为基层的基准材料，根据车辆荷载及铺面设计年限内的作用次数计算水稳厚度，并引入材料等价系数 MEF(即转换系数)计算各类替换材料所需厚度，可快速得到多种铺面结构方案。

首先对原设计沥青-水稳方案进行计算，复核水稳层厚度。铺面设计使用年限为 25 a，主要考虑集装箱拖挂车(最大轴压 196 kN)行驶，设计使用年限内的累计交通量为 243.3 万次。集装箱拖挂车荷载图示按英标码头设计规范 BS 6349^[4] 中的 roll trailer(牵引车+半挂车)考虑，见图 2。由于

BS 6349 中所列 Roll trailer 轴压与设计所采用的 196 kN 不匹配，参照欧标 EN 1991-2^[5] 中轴压 90、190、140、140 kN 的 frequent lorry(集卡)荷载进行后续计算。

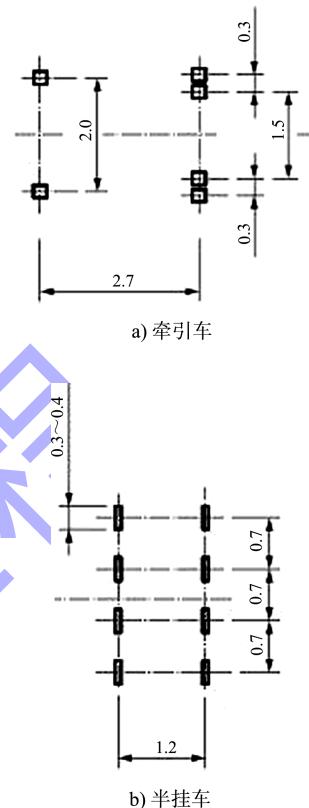


图 2 集装箱拖挂车荷载图示 (单位: m)

牵引车前轴轴压 90 kN、后轴轴压 190 kN，半挂车轴压(双轴) 140 kN。铺面结构所受轮压需考虑相近轮间作用以及行驶过车中刹车、过弯等瞬间因素的影响。

当车轮足够接近时，轮压的辐射应力因彼此互相重叠而增大，HDP 通过相近系数(proximity factor)考虑该作用。相近系数与轮间距和反映地基 CBR(加州承载比)的铺面有效厚度 D_{eff} 有关，D_{eff} 计算公式为：

$$D_{eff} = 300 \times \sqrt[3]{\frac{35\,000}{CBR \times 10}} \quad (1)$$

式中：CBR 为加州承载比(California bearing ratio)，即标准试件在贯入量为 2.5 mm 时所施加的试验荷载与标准碎石材料在相同贯入量时所施加的荷载之比值(%)，现场地基 CBR 为 15%。根据式(1)得到铺面有效厚度 D_{eff} 为 1 847 mm。

根据 HDP 表 19 计算相近系数, 对牵引车前轴轮距(2 m)相近系数为 1, 对牵引车后轴轮距(每侧两轮等效为单个, 1.8 m)相近系数为 1.16, 对半挂车轴距(1.2 m)相近系数为 1.4, 对半挂车轮距(取一侧两轮中线, 0.35、1.05、1.75 m)相近系数为 1.87、1.47、1.38。

HDP 引入动力系数 f_d 以考虑刹车、过弯、加速和道路不平坦等因素对铺面所受轮压的影响。对于集装箱拖挂车, 以上 4 项因素的动力系数分别为 $\pm 10\%$ 、 $\pm 30\%$ 、 $\pm 10\%$ 和 $\pm 20\%$ 。考虑刹车、过弯、加速属于车辆特殊行驶情况, 不存在特定路面一直承受相关动力荷载的问题, 而表面不平整的路面则会一直受到动力冲击, 因此选定道路不平坦为最不利情况时 $f_d = 20\%$ 。

根据相近系数和动力系数计算有效轮压, W_1 、 W_2 、 W_3 分别为牵引车前轴、后轴和半挂车有效轮压, 分别为 54、132、125 kN。

集装箱拖挂车最大有效轮压为 W_2 。通过将各轴单次有效轮压等效为最大有效轮压的作用次数, 可以得到车辆单次通过时总的单次有效轮压(SEWL)次数。对于集装箱拖挂车, 单次 W_1 相当于 $(54/132)^{3.75} = 0.035$ 次 W_2 , 单次 W_3 相当于 $(125/132)^{3.75} = 0.815$ 次 W_2 ; 单次集装箱拖挂车驶过, 相当于铺面受到 $0.035 + 1.000 + 0.815 = 0.815 = 2.665$ 次最大有效轮压 W_2 的作用, 铺面设计使用年限内集装箱拖挂车 SEWL 作用次数为 650 万次。

根据 HDP 设计图表, 得到在 650 万次 132 kN 荷载作用下, 所需 $C_{8/10}$ 水稳层厚度为 250 mm。地基 CBR 为 15%, 根据 HDP 表 20, 无需进行额外处理, 铺设 150 mm 粒料底基层即可。计算得到铺面结构为 80 mm 联锁块、30 mm 砂垫层、250 mm $C_{8/10}$ 水稳层、150 mm 级配粒料底基层。

用 150 mm 沥青混合料面层代替联锁块, 根据 HDP, 联锁块、沥青磨耗层(按 HRA 热轧沥青考虑)、沥青基层(矿粉含量约为 4%, 按 DBM 密沥青碎石考虑)与 $C_{8/10}$ 水稳层的转换系数分别为 1.00、1.25、1.00, 等效替换后调整铺面结构为 150 mm

沥青面层、220 mm $C_{8/10}$ 水稳层、150 mm 级配粒料底基层。可见原设计 300 mm 水稳基层较厚, 存在一定的优化空间。

2 计算水稳替代材料厚度

针对 $C_{8/10}$ 水稳层的替代材料, HDP 中给出了混凝土、沥青结合料及相应的转换系数。混凝土基层通常用于荷载等级 P4 及以上的情况, 以使铺面获得较高的承载力, 但混凝土基层不具备成本优势, 且混凝土板在接缝处易开裂, 产生的反射裂缝对沥青面层影响较大, 导致面层容易出现裂缝、变形等; 沥青结合料基层无反射裂缝问题, 但其与水稳一样受到原材料供应不稳定的市场条件制约, 施工进度难以把控。综合判断适用性、成本、市场原材料供应、质量控制等因素, 项目选用级配粒料作为水稳基层替代材料。

对于级配粒料, HDP 仅对碎石底基层给出了 MEF 转换系数为 3, 如果直接采用该系数则会得到 $220 \text{ mm} \times 3 = 660 \text{ mm}$ 的等效厚度。基于一般工程经验, 该厚度过大、方案不经济。另外, 考虑水稳和级配粒料基层的破坏控制因素不同, 对水稳等无机结合料半刚性基层, 其横向拉应变为破坏控制因素; 而对于粒料基层等柔性基层, 控制因素则是地基的竖向压应变。HDP 基于材料的抗拉强度得到 MEF 转换系数, 认为其等效原则已不适用于粒料基层。

AASHTO Guide for Design of Pavement Structures^[6](简称 AASHTO)也提供了转换系数的计算方法。对粒料基层基于回弹模量(或 CBR 等)确定结构层系数(图 3), 对水稳基层基于弹性模量(或抗压强度等)确定结构层系数(图 4), 再将粒料基层与水稳基层的结构层系数相除即得到两者间的转换系数。查图可得, 级配粒料(要求 CBR 不低于 80%)的结构层系数为 0.135, $C_{8/10}$ 水稳(7 d 抗压强度 8 MPa, 即 1 160 psi)的结构层系数为 0.27。计算得到级配粒料对 $C_{8/10}$ 水稳的转换系数为 $0.27/0.135 = 2$, 等效厚度 $220 \text{ mm} \times 2 = 440 \text{ mm}$ 。确定级配粒料基层厚度为 450 mm。

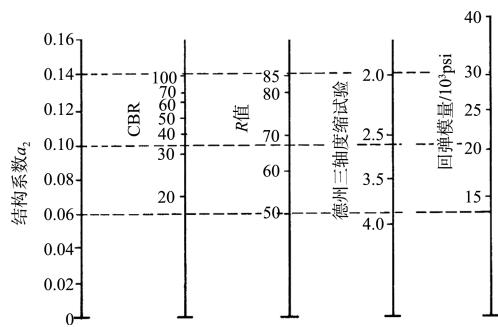


图 3 粒料基层结构层系数(a_2)与其 CBR、
回弹模量等的统计关系

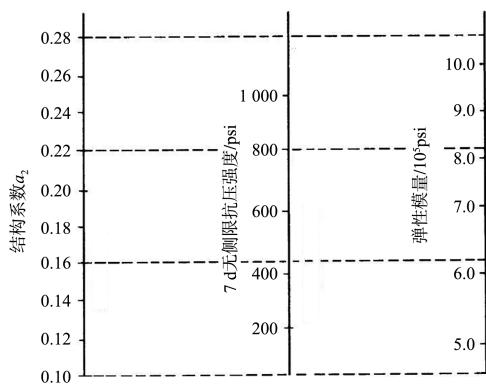


图 4 水稳基层结构层系数(a_2)与其 7 d 抗压强度、
弹性模量的统计关系

替代方案确定为: 150 mm 沥青混合料面层、450 mm 级配粒料基层、150 mm 级配粒料底基层。由于替代方案采用粒料类基层, 无需考虑反射裂缝问题, 原设计中沥青混合料面层底部的格栅已

失去作用, 予以取消。替代方案断面见图 5。

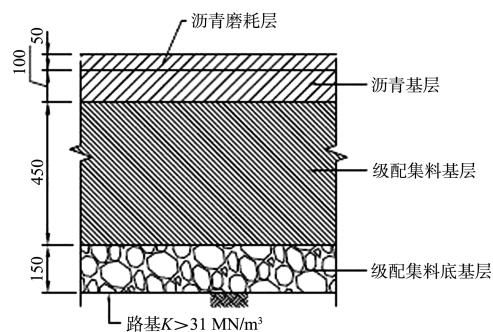


图 5 替代方案设计断面 (单位: mm)

以上计算方法充分结合了 HDP 以及 AASHTO 的优点, 基于级配粒料材料及受力特性, 充分分析 HDP 中部分转化系数的不足并选择 AASHTO 中更为合理、精细的转换系数计算方法, 从而得到较为优化的级配粒料基层厚度。

3 级配粒料特性及应用效果评价

有别于国内常用的级配碎石、级配砾石等粒料类基层材料, 结合当地条件, 对级配粒料的组成和级配进行优化。基层由碎石、角砾和较大量的石屑组成, 底基层则混合有卵石、圆砾和大量的砂土。级配粒料基层和底基层的级配见表 1, 同时附以国内对级配碎石的级配要求以供对比。

表 1 材料级配

筛孔尺寸/mm	通过质量百分率/%			
	级配粒料	基层	底基层	级配碎石
50	100(100)	—	100(100)	—
26.5	—	100	—	100/90~95
25	70~95(89.7)	—	55~85(79.4)	—
19		95~100/79~88	—	79~88/72~84
16	—	82~89/70~82	—	70~82/65~79
13.2	—	70~79/61~76	—	61~76/57~52
9.5	30~65(45.3)	53~63/49~64	40~70(65.8)	49~64/47~62
4.75	25~55(39.7)	30~40	30~60(50.5)	30~40
2.36	—	19~28	—	19~28
2.00	15~40(36.3)	—	20~50(39.6)	—
1.18	—	12~20	—	12~20
0.6	—	8~14	—	8~14
0.425	8~20(18.3)	—	10~30(23.4)	—
0.3	—	5~10	—	5~10
0.15	—	3~7	—	3~7
0.075	2~8(5.5)	2~5	5~15(10.5)	2~5

注: 括号中数值为项目某单次实测结果。

由表1可见, 国内级配碎石对材料的级配控制更为严格, 筛孔总共分12级, 多于级配粒料的7级, 且级配碎石每级筛孔的允许通过质量浮动范围更小。级配粒料中砂土(0.075~2 mm)、粉土或黏土(0.075 mm以下)含量显著高于级配碎石, 尤其底基层中含量更大; 通过2 mm筛孔的质量百分率平均值级配粒料基层和底基层分别为27.5%和35%, 而实际配比中为达到设计压实度, 小于2 mm的颗粒通常要占35%~40%。另一方面, 级配粒料允许混有更大粒径的碎石, 尤其是底基层, 甚至允许粒径超过25 mm的碎石占比达到45%。

级配碎石铺设对CBR的要求很高, 《公路沥青路面设计规范》要求基层、底基层CBR不应小于180、100(一级公路, 重交通), 《港口道路与堆场设计规范》要求用作基层时CBR不应小于120, 用作底基层时不应小于120、80。而对级配粒料, 由于细颗粒占比较大, 很难通过碾压获得较高的CBR; 根据AASHTO, CBR在达到80%之后继续增大对提高结构层系数的作用有限(图3)。因此, 选取80%CBR作为级配粒料的控制指标较为合理。

综上, 级配粒料与国内粒料类材料在级配组成上存在较大差异。由于细颗粒含量较多, 级配粒料压实后能形成较强的板结效果, 其压实性也在实践中得到了验证。现场基层、底基层实测压实度分别达到100%及98%, 满足项目质量控制要求。已移交部分堆场沥青道路使用状况优异, 沥青表面无裂缝、车辙, 道路无明显差异性沉降, 级配粒料基层承重和荷载扩散作用良好。

由于级配粒料对材料级配的要求较低, 更适宜在原材料供应不稳定的境外欠发达地区推广应用。相较于级配碎石、级配砾石等常用粒料, 级配粒料在经济性上更具优势。

另外与水稳层对比, 级配粒料可以大量储存, 便于大面积施工, 而水稳施工的推进速度依赖搅拌站的供应能力, 难以有效控制。所用的级配粒

料供给保障率高, 材料在供应商处就已经拌合完毕, 送达现场后经过筛分试验满足级配要求即可用于施工, 若不满足可以根据实际级配情况相应添加粗料或细料, 现场不必大量堆料, 进而节省了贮存空间。

4 结论

1) 沥青-水稳结构是港口堆场道路常见铺面结构形式, 而海外欠发达地区往往缺乏稳定的原材料供应, 水稳质量难以把控。

2) 水稳材料可由粒料类材料、混凝土、沥青结合料等代替, 选择替代材料可根据材料适用性、成本、市场原材料供应、质量控制等因素综合判断。

3) 本项目级配粒料供应充足, 通过将水稳材料替换为级配粒料, 有效降低了施工难度和风险, 同时节省了水稳站建站成本。

4) HDP假定铺面为联锁块-水稳结构, 根据车辆荷载及作用次数计算 $C_{8/10}$ 水稳基层厚度。计算过程中引入相近系数、动力系数考虑相近轮间作用, 并考虑行驶过车中刹车、过弯等瞬间因素对铺面所受轮压的影响。

5) HDP给出了常见铺面材料与 $C_{8/10}$ 水稳间的转换系数, 通过合理选取替代材料, 可以快速得到多种铺面结构方案。但级配粒料不适用于HDP对碎石底基层的转换系数, 通过对材料及受力特性的分析, 选择AASHTO对转换系数的计算方法, 进一步优化级配粒料层厚度, 可以得到更为经济、合理的设计断面。

6) 对于级配粒料, 其与级配碎石等国内常用粒料类材料在级配组成上存在较大差异; 相较国内严格的级配要求, 级配粒料对材料级配的要求较低, 更适宜在原材料供应不稳定的境外欠发达地区推广应用。级配粒料细颗粒含量较多, 压实后能形成较强的板结效果。

(下转第77页)