



中美英港口重型铺面结构设计差异分析

廖源, 袁静波

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 根据英标、美标在荷载系数选取、基层材料要求及计算方法上与我国规范的不同, 分析中美英3种不同标准在港口重型铺面结构的设计差异, 并通过计算实例加以说明。

关键词: 重型铺面; 设计差异; 中国标准; 美国标准; 英国标准

中图分类号: U 653.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)02-0020-07

Analysis of design difference for heavy-duty pavement at port of China, America and Britain

LIAO Yuan, YUAN Jing-bo

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Based on the difference between British Standard & American Standard and Chinese Standard in selection of loading coefficient, requirement of base material and calculation method, this paper analyzes the difference on the design of heavy-duty pavement at port of based on the three different standards, and gives the calculation example to illustrate.

Key words: heavy-duty pavement; design difference; Chinese Standard; American Standard; British Standard

全球港口的重型铺面设计, 常用的规范有英标、美标、欧标等, 应用最为广泛的当属英标和美标, 但其计算参数的选取和计算方法与我国规范存在差异。本文主要就中、美、英3种设计标准在港口重型铺面结构的设计差异进行分析。

1 中国、美国及英国的重型铺面结构设计

1.1 规范应用

英国港口铺面设计执行*The Structural Design of Pavements for Ports and other Industries*^[1] (简称《重型铺面》)。在美国, 港口铺面设计执行由美国连锁块协会(ICPI)出版的*Port and Industrial Pavement Design with Concrete Pavers, A Comprehensive Guide*^[2] (简称《连锁块铺面设计》)。而我国现行规范为JTJ 296—1996《港口道路、堆场铺面设计与施工规范》^[3] (简称《道堆规范》)。

1.2 设计原理及计算方法

无论是中国标准, 还是英国或美国标准, 其设计原理都是以弹性层状体系理论为基础, 以基层底拉应变作为有效控制约束条件。在计算方法上, 英、美标准与我国标准不同之处在于计算荷载时还需要考虑轮胎靠近系数及动力系数的综合影响。

荷载集度大、荷载作用图式复杂是港口铺面受力的特点。因此, 如何保证重型铺面结构不失效, 是工程师需要重点考虑的问题。下面针对中、美、英3种规范在重型铺面的设计原理、计算方法及不同的材料要求进行介绍。

1.2.1 中国

我国现行所使用的《道堆规范》于1996年发布, 其明确了港口铺面的设计要求, 给出了在重型荷载作用下各种铺面的设计与施工方法。随着港口装卸机械日趋大型化, 《道堆规范》的一些

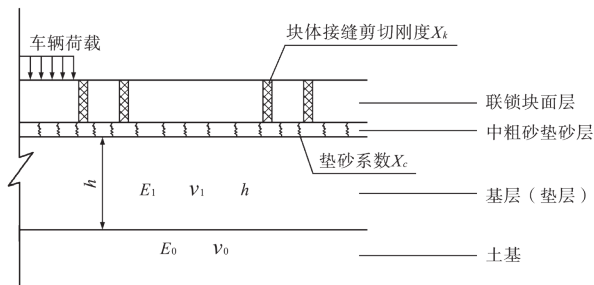
收稿日期: 2013-11-12

作者简介: 廖源(1981—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事道路与堆场工程、机场场道工程等方面工作。

条款及要求已渐渐不能满足现代化大型港口的使用要求, 需重新修编, 目前正由中交第四航务工程勘察设计院负责新规范的修编工作。

1) 联锁块铺面设计原理。

《道堆规范》规定联锁块铺面的设计采用面层有缝的半空间轴对称模型进行计算, 其力学模型见图1。



注: E 为回弹模量; ν 为泊松比; h 为基层厚度。

图1 联锁块铺面结构力学模型

其中, 面层的弹性模量 E_c 取 35 GPa, 泊松比 ν_c 取 0.15, 接缝剪切刚度 X_k 取 20 MPa, 垫砂系数 X_c 取 30 MPa。基层稳定类材料的回弹模量可取 2 GPa, 抗弯拉强度可取 1 MPa, 土基回弹模量 E_0 和其它材料回弹模量 E_i 及抗弯拉强度 σ_s 按现行《公路沥青路面设计规范》^[4] 规定的试验方法测定或按《道堆规范》附录 A 和附录 B 的建议值确定。

2) 计算方法。

针对流动机械轮载作用的设计, 基层为主要承重层, 面层为功能层, 联锁块铺面设计主要是计算承重层(基层)的厚度。计算步骤如下:

① 根据项目所在地区的地基条件确定土基回弹模量。② 根据流动机械荷载大小选取设计标准荷载等级, 确定标准荷载计算参数。③ 计算流动机械的年运行次数 N_i , 并将 N_i 换算成标准荷载作用次数 N_m 。④ 根据土基回弹模量计算基层以下的当量回弹模量 E_i 。⑤ 根据 N_m 和 E_i 查基层厚度设计图(流动机械荷载作用), 得到基层的厚度。

对于集装箱荷载, 其计算步骤更为简单, 直接计算基层以下的当量回弹模量 E_i , 根据堆高层数和 E_i 查基层厚度设计图(集装箱荷载作用), 得到所需的基层厚度。例如某重箱堆场, 堆高 5 层, 40 ft 单箱满载为 305 kN, 土基回弹模量

$E_0=30$ MPa, 泊松比 $\nu_c=0.35$ 。根据上述步骤计算得到 $E_i=79.8$ MPa, 查参考文献[1]图 5.4.3-5 得出所需基层厚度 $h=460$ mm。

3) 联锁块面层材料要求。

我国《道堆规范》认为联锁块厚度与作用荷载相适应, 荷载作用次数越多, 应选用厚度越大的块体, 常用的联锁块厚度为 8, 10, 12 cm, 最小厚度不宜低于 8 cm。垫层材料采用干砂, 厚度为 30 ~ 50 mm。

4) 基层材料要求。

基层材料包括水泥稳定类、石灰稳定类、贫混凝土以及级配碎(砾)石等。其中, 最常用的为水泥稳定类材料, 其 7 d 浸水抗压强度为 2.5 ~ 5 MPa。

5) 其它类型面层结构的设计原理及计算方法。

对于沥青铺面, 我国《道堆规范》规定以双圆垂直均布荷载作用下的弹性层状体系理论为基础, 采用表面容许弯沉值为控制指标的半经验半理论方法进行铺面厚度计算。沥青面层一般采用双层式, 最小厚度粗粒式不小于 60 mm, 中粒式不小于 40 mm, 细粒式不小于 25 mm。

对于水泥混凝土铺面, 我国《道堆规范》规定采用文克尔(Winkler)地基上中厚板理论计算。以 28 d 龄期弯拉强度作为控制标准, 弯拉强度不小于 4.5 MPa。板厚计算通过最不利临界荷位, 并综合考虑疲劳折减系数 K_1 、温度应力折减系数 K_2 、铺面等级系数 K_3 、混凝土强度增长系数 K_4 的影响, 当计算荷载应力 σ_c 与容许荷载应力 σ_a 满足 $0.95\sigma_a < \sigma_c < 1.03\sigma_a$ 时, 初估板厚可作为设计板厚。否则应改选初估板厚, 重新计算, 直至满足上述要求。

1.2.2 英国

英国《重型铺面》专门用于港口及其他工业的铺面结构设计。现行的第 4 版于 2007 年由 Interpave 出版, 它是在 1996 年出版的第 3 版的基础上进行的更新。

第 4 版不仅采用了更多更详细的有限元模型对铺面进行分析, 而且还延续了将铺面分成 3 个设计

要点的设计原则，即选择面层、成比例的基层和提供合适相匹配的基础，这样的设计原则不但没有失去准确性而且还大大简化了设计过程，方便设计者更好地使用。

第4版的另一个优势在于凭借过去25年积累的丰富经验，已获得了大量的Material Conversion Factors(MCFs, 材料转换系数)^[1]和Material Equivalence Factors(MEFs, 材料等值系数)^[1]。因此，在设计过程中，这些系数可以用于将一种材料等效换算成为另外一种材料，也可以用于加铺层的路面设计，这意味着设计者使用这套手册进行设计时可以根据不同的材料有着许多不同的设计解决方案。

1) 设计原理。

英国《重型铺面》以弹性层状理论体系为基础，采用轴对称理想化的模型进行分析，该模型为圆柱体层状体系，直径为12 m，深度6 m，包括480个三维轴对称有限元单元，通过有限元计算得到设计图表。

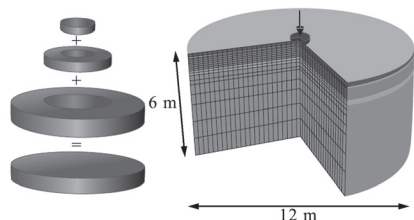


图2 英国《重型铺面》采用的有限元模型

如图2所示，重型铺面模型由24个同心的有限元单元形成每一层直径12 m的铺面层。面层（联锁块+垫层材料）为单层的由24个轴对称有限元单元构成模型。基层包含8层，每层由24个轴对称有限元单元构成模型，底基层包含2层，每层由24个轴对称有限元单元构成模型，地基模型为7层，每层由24个轴对称有限元单元构成模型，深度为6 m。

每个模型周边节点受水平方向约束，每个模型在最低层的节点同时受水平和垂直方向约束。一个局部荷载施加于模型顶部的中心，通过在最里面的两个有限元单元施加压力，并调整其几何尺寸以确保第2个有限元单元的外半径与轮胎的接触面或假定的集装箱箱角接触面相一致。

2) 计算方法。

重型铺面分为基础、结构层和面层3个设计要

点，结构层（即基层）厚度应能承受所施加的荷载，基础在考虑地基条件时应能提供给基层和面层足够的支撑。

① 基础厚度的确定及材料要求。

重型铺面产生的应力影响深度（路基工作区）^[5]远比公路深，软弱地基是导致重型铺面失效的最常见原因，因此，提供相匹配的基础支撑是保证重型铺面设计成功的首要因素。

基础设计包括底基层和覆盖层设计，其厚度根据地基CBR值（表1）确定。当地基CBR<5%时，需设置250~900 mm厚度不等的覆盖层，覆盖层可选用CBR为15%或更易压实，并能形成一个工作层的低成本材料，如废弃的混凝土或其它硬质材料。当CBR≥5%时，无需设置覆盖层，可直接设置底基层，厚度为150 mm。

表1 不同地基CBR值的粒料类底基层和覆盖层厚度

地基CBR%	覆盖层厚度/mm	底基层厚度/mm
1	900	150
2	600	150
3	400	150
4	250	150
≥5	不需要	150

② 结构层厚度的确定及材料要求。

结构层（基层）厚度应能承受所施加的荷载。根据规定，重型铺面设计必须考虑车辆的荷载系数影响，包括车轮靠近系数、动力荷载系数。车轮靠近系数根据车辆的车轮间距及有效深度（表2）采用内插法求得：

$$\text{有效深度} = 300 \times \sqrt[3]{\frac{35\,000}{\text{CBR} \times 10}} \quad (1)$$

表2 车轮靠近系数

轮距/mm	不同基层有效深度/mm		
	1 000	2 000	3 000
300	1.82	1.95	1.98
600	1.47	1.82	1.91
900	1.19	1.65	1.82
1 200	1.02	1.47	1.71
1 800	1.00	1.19	1.47
2 400	1.00	1.02	1.27
3 600	1.00	1.00	1.02
4 800	1.00	1.00	1.00

动力荷载系数又分为制动、转弯、加速、不平整度4类, 根据表3综合确定。

表3 动力荷载系数

条件	设备类型	$f_d/\%$
制动	正面吊/前置叉车	± 30
	跨运车	± 50
	侧叉车	± 20
	拖挂车	± 10
	轮胎龙门吊 (RTG)	± 10
转弯	正面吊/前置叉车	40
	跨运车	60
	侧叉车	30
	拖挂车	30
	轮胎龙门吊 (RTG)	0
加速	正面吊/前置叉车	10
	跨运车	10
	侧叉车	10
	拖挂车	10
	轮胎龙门吊 (RTG)	± 5
不平整度	正面吊/前置叉车	20
	跨运车	20
	侧叉车	20
	拖挂车	20
	轮胎龙门吊 (RTG)	± 10

根据车轮靠近系数及动力荷载系数进行修正之后得到Single Equivalent Wheel Load (SEWL), 然后将其它车轮荷载等效为SEWL并累加, 计算不同车轮经过同一点的当量作用次数。根据当量作用次数总和及SEWL查设计图表(图3), 确定所需的基层厚度。

设计图表采用弯拉强度为2 N/mm²的Cement Bound Granular Mixture C_{8/10} (CBGM) 作为标准基层材料, 其它合适的材料可通过表4所列的材料等值系数 (MEF) 进行换算, 其相对的基层厚度与允许应力的关系为:

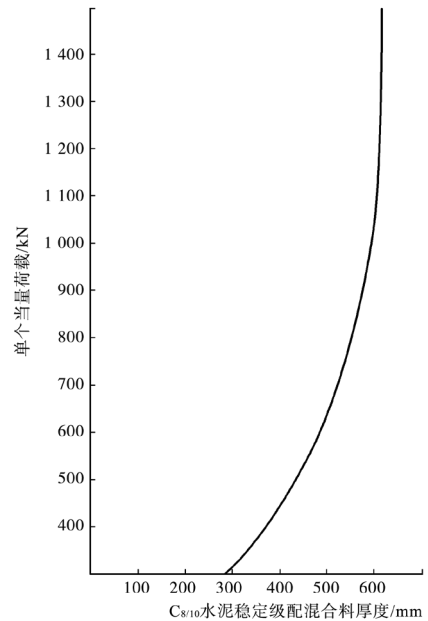
$$d_{new} = d_{stand} \cdot (\sigma_{stand} / \sigma_{new})^{1/2} \quad (2)$$

式中: d_{new} 为其它可替代材料的基层厚度; d_{stand} 为标准材料CBGM C_{8/10}的设计厚度; σ_{stand} 为CBGM C_{8/10}的抗拉强度; σ_{new} 为其它可替代材料的抗拉强度。

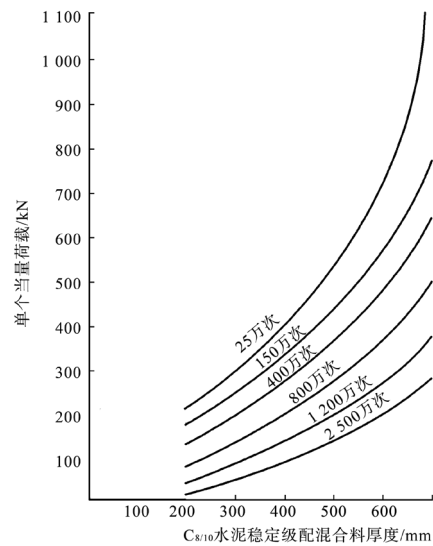
假设设计图表中显示所需要的CBGM C_{8/10}厚度为200 mm, 如果建议采用CBGM C_{5/6}进行替代, 那么它的正确厚度应为200 mm × 1.16=232 mm。

③ 联锁块面层材料要求。

第4版指出在整个铺面结构体系中, 面层的刚



a) 集装箱荷载作用基层厚度设计图表



b) 流动机械荷载作用基层厚度设计图表

图3 英国《重型铺面》设计图

度对铺面整体强度和结构性能影响不大, 其主要功能是保持面层下的各层结构的稳定。因此, 面层厚度在选择上主要考虑正常工作条件的要求和避免面层失效, 而非考虑铺面结构的强度要求, 也就是说选择100 mm, 甚至120 mm厚的联锁块, 其工作效能与80 mm厚的没有实质性的区别, 而且还会增加工程投资, 这与我国《道堆规范》的规定有所不同。因此, 从经济性上考虑, 英国《重型铺面》推荐常用的联锁块面层组合为80 mm厚联锁块+30 mm垫层材料。

表4 其它材料相对于CBGM C_{8/10}的材料等值系数 (MEF)

材料分组	优先选择的铺面基层施工材料		材料等值系数MEF
	材料强度	相关标准	
水稳混合料	C _{1.5/2.0}	遵循 BS EN 14227-1	1.74
	C _{3/4}	遵循 BS EN 14227-1	1.38
	C _{5/6}	遵循 BS EN 14227-1	1.16
	C _{8/10}	遵循 BS EN 14227-1	1.00
	C _{12/15}	遵循 BS EN 14227-1	0.87
	C _{16/20}	遵循 BS EN 14227-1	0.79
	C _{20/25}	遵循 BS EN 14227-1	0.74
	C _{1.5/2.0}	遵循 BS EN 14227-2&3	1.74
	C _{3/4}	遵循 BS EN 14227-2&3	1.38
	C _{6/8}	遵循 BS EN 14227-2&3	1.10
	C _{9/12}	遵循 BS EN 14227-2&3	0.95
	C _{12/16}	遵循 BS EN 14227-2&3	0.85
	C _{15/20}	遵循 BS EN 14227-2&3	0.79
	C _{18/24}	遵循 BS EN 14227-2&3	0.76
	C _{21/28}	遵循 BS EN 14227-2&3	0.72
	C _{24/32}	遵循 BS EN 14227-2&3	0.68
	C _{27/36}	遵循 BS EN 14227-2&3	0.63
混凝土	C8/10	遵循 BS 8500-1	1.00
	C12/15	遵循 BS 8500-1	0.87
	C16/20	遵循 BS 8500-1	0.79
	C20/25	遵循 BS 8500-1	0.74
	C25/30	遵循 BS 8500-1	0.65
	C25/30	遵循 BS 8500-1包括20 kg/m ³ 钢纤维	0.60
	C25/30	遵循 BS 8500-1包括30 kg/m ³ 钢纤维	0.55
	C25/30	遵循 BS 8500-1包括40 kg/m ³ 钢纤维	0.50
	C28/35	遵循 BS 8500-1	0.62
	C32/40	遵循 BS 8500-1	0.60
	C32/40	遵循 BS 8500-1包括20 kg/m ³ 钢纤维	0.55
	C32/40	遵循 BS 8500-1包括30 kg/m ³ 钢纤维	0.50
	C32/40	遵循 BS 8500-1包括40 kg/m ³ 钢纤维	0.45
C35/45	遵循 BS 8500-1	0.58	
传统水泥 稳定材料	CBM1 (4.5 N/mm ² 最小7 d立方体抗压强度)		1.60
	CBM2 (7.0 N/mm ² 最小7 d立方体抗压强度)		1.20
	CBM3 (10.0 N/mm ² 最小7 d立方体抗压强度)		1.00
	CBM4 (15.0 N/mm ² 最小7 d立方体抗压强度)		0.80
	CBM5 (20.0 N/mm ² 最小7 d立方体抗压强度)		0.70
	无细颗粒贫混凝土透水铺面		1.00
沥青稳定材料	英国公路工程施工规范定的重型碎石 (HDM)		0.82
	英国公路工程施工规范定的密集配沥青碎石 (DBM)		1.00
	英国公路工程施工规范定的热拌沥青 (HRA)		1.25
粒料类材料	级配碎石底基层材料 (CBR ≥ 80%)		3.00
混凝土块铺面	混凝土块面层 (80 mm厚混凝土块和30 mm厚垫层)		1.00

3) 其他类型面层结构厚度的确定。

通过有限元模型分析, 发现连锁块和沥青稳定材料的性能接近等同, 即连锁块面层组合、沥青稳定材料与标准材料CBGM C_{8/10}的MEF接近1.0。因此, 对于通过设计图表得到的连锁块面层, 也可采用等厚的沥青面层(如50 mm磨耗层+60 mm下面层)的形式进行等值替换。

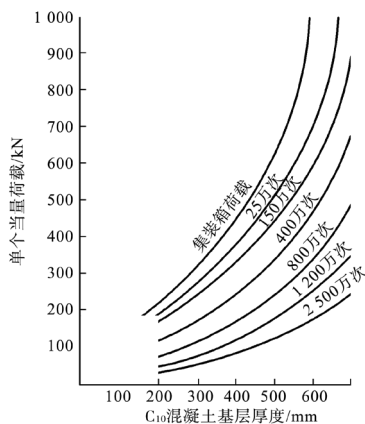
对于水泥混凝土路面, 与我国《道堆规范》采用抗弯拉强度作为控制标准不同的是, 英国《重型铺面》混凝土面层采用的是抗压强度, 其厚度同样可通过MEF换算得到。另外, 为控制不规则裂缝, 通常加设钢筋网, 钢筋网根据BS 4483设置。

1.2.3 美国

与连锁块铺面在英国和欧洲得到广泛的应用相比, 自20世纪80年代开始, 连锁块铺面才在美国的港口和其它工业开始大面积运用。《连锁块铺面设计》综合指南由美国连锁块协会(ICPI)出版, 现行的第2版于2012年5月份进行了修订和更新。

1) 设计原理。

第2版的设计原理及计算过程与英国《重型铺面》基本相同, 同样以弹性层状体系理论为基础, 以基层层底拉应变作为有效控制约束条件。采用轴对称理想化有限元进行模拟分析, 借助有限元进行铺面设计分析的精华在于只需要通过一个设计图表(图4)就可以快速准确地得到所需的基层厚度。



注: C₁₀基层最小厚度为200 mm。

图4 美国《连锁块铺面设计》设计图

2) 计算方法。

美国《连锁块铺面设计》认为, 重型铺面失效包括结构失效和面层或功能失效, 通常失效原因是地基承受了过多的垂直应力或者基层承受了过多的水平应力。因此, 铺面结构设计同样分为基础和基层两大设计要点。

① 基础厚度的确定及材料要求。

基础设计包括底基层和覆盖层设计。与英标相似, 厚度根据地基CBR值按表5确定。

表5 不同地基CBR值的粒料类底基层和覆盖层厚度

地基CBR/%	覆盖层厚度/mm	底基层厚度/mm
1	600	150
2	350	150
3	250	150
5~7	不需要	225
>7	不需要	150

② 基层厚度的确定及材料要求。

基层的计算过程与英国《重型铺面》基本相同, 其设计图采用抗压强度为10 MPa的Cement-treated base (CTB) 作为标准材料。其它合适的材料可通过表6换算。需注意的是, 其标准材料类型、材料转换系数及设计图与英国《重型铺面》略有不同。

表6 不同基层、底基层及覆盖层材料相对于CTB (10 MPa) 的转换系数

铺面层	模量/MPa	抗压强度/MPa	相对于CTB 10 MPa的转换系数
高等级混凝土面层		29	0.80
高等级混凝土面层		38.6	0.70
沥青处置基层	2 414		0.93
沥青处置基层	1 172		1.40
沥青处置基层	621		2.80
水泥处置基层	7 586	10	1.00
水泥处置基层	5 655	5.5	1.27
水泥处置基层	4 276	2.9	1.75
水泥处置基层	3 241	1	2.80
粒料类底基层	145	100% CBR	2.00
粒料类底基层	94	22% CBR	2.80
粒料类底基层	83	15% CBR	3.00
粒料类底基层	48	6% CBR	4.67

注: 高等级混凝土面层的强度采用28 d龄期强度; 水泥处置基层的强度采用7 d龄期强度。

英国《重型铺面》有2个设计图, 分别为集

装箱荷载作用和流动机械轮载作用,需根据不同的荷载类型选择相应的设计图。而美国《联锁块铺面设计》则将两种作用荷载合并在一个图中。例如,某堆场堆高5层重箱,假定堆放方式为多列成组箱,集装箱荷载为914 kN,地基CBR为5%,查设计图,所需的基层厚度均为580 mm;对于流动机械轮载作用,如集装箱牵引半挂车,假设计算得到当量作用次数总和为400万次,最大当量轮压(SEWL)为250 kN、查设计图,所需的基层厚度分别为410 mm(美标)和370 mm(英标)。

3) 联锁块面层材料要求。

美国《联锁块铺面设计》推荐常用的联锁块面层组合为80 mm厚联锁块+30 mm垫层材料,并

通常还在垫层砂底部铺设一层土工布防止垫层砂的流失。

4) 其它类型面层结构的设计。

美国《联锁块铺面设计》主要用于联锁块铺面的设计,而对于水泥混凝土刚性路面或沥青路面,手册并未做过多介绍。因此,在采用美标进行上述铺面结构设计时,建议分别参考文献[6-7]。

2 中、美、英重型铺面设计的差异对比

通过上述分析比较得出,中、美、英3种标准在重型铺面的荷载系数选取、基层材料要求以及计算结果等方面存在一些差异(表7)。

表7 中美英重型铺面设计差异对比

规范名称	荷载系数		常用的基层材料	强度/MPa	计算结果/mm		联锁块面层	推荐厚度/mm
	车轮靠近系数	动力系数			集装箱荷载 (堆高5层重箱)	流动机械轮载 (集装箱拖挂车)		
中国规范	不考虑	不考虑	水泥稳定类	2.5~5	460	300	联锁块+垫层材料	130
英国规范	考虑	考虑	CBGM	10	580	370	联锁块+垫层材料	110
美国规范	考虑	考虑	CTB	10	580	410	联锁块+垫层材料	110

3 结语

中、美、英3种标准虽然在港口重型铺面设计上原理相同,但在荷载系数选取、计算结果及基层材料要求等方面存在差异。对于荷载系数,国标未单独考虑其影响,而英美标准考虑了车轮靠近系数和动力系数的影响,但其车轮靠近系数未考虑铺面结构层强度的影响,动力系数由于研究得不够细致亦过于保守,使得英、美标准的计算结果要比国标厚;对于基层材料及强度要求,英、美标准较国标更高且更严格。这些差异导致了3种标准的工程造价存在较大差距。对于从事海外港口码头建设工作,特别是EPC项目的工程师,建议要充分了解合同要求或雇主需求,弄清项目执行何种规范标准,避免由于规范标准的差异给项目带来经济风险。

参考文献:

- [1] John Knapton. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries[M]. 4th ed. UK: Interpave, 2007.
- [2] John Knapton. Port and Industrial Pavement Design with Concrete Pavers, A Comprehensive Guide[M]. 2nd ed. USA: ICPI, 2012.
- [3] JTJ 296—1996 港口道路、堆场铺面设计与施工规范[S].
- [4] JTG D50—2006 公路沥青路面设计规范[S].
- [5] 邓学均. 路基路面工程[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [6] AASHTO. Supplement to the AASHTO Guide For Design of Pavement Structures[M]. USA: AASHTO, 1998.
- [7] Asphalt Institute. Thickness Design - Asphalt Pavements for Heavy Wheel Loads[M]. 2nd ed. USA: Asphalt Institute, 2006.

(本文编辑 武亚庆)