

英美规范在沥青路面结构设计中的应用和比较

王艳萍, 刘强

(中交公路规划设计院有限公司, 北京市 100080)

摘要:目前对于英美规范在路面结构设计中的对比研究较少,但随着中国工程企业广泛参与国际竞争,这方面的分析研究对海外项目商务和技术决策很有意义。该文以文莱大摩拉岛大桥、道路与附属工程项目中的东西引路沥青路面设计为例,介绍了美国 AASHTO 1993 和英国 DMRB 规范路面设计方法,并基于英美规范进行了沥青路面结构分析和比较,可为海外项目商务和技术决策提供参考。

关键词:沥青路面; AASHTO; DMRB; 规范对比; 路面设计

20世纪50年代末、60年代初美国国家高速公路与运输协会(AASHTO)在渥太华州和伊利诺斯州进行了大规模道路测试,这是第一次系统地进行关于不同路面结构组成和累计当量轴次的路面性能测试。根据 AASHTO 的道路测试结果,AASHTO 于 1961 发布了针对柔性和刚性路面的路面结构设计经验设计公式,随后在 1972 年和 1993 年进行了更新和发布。虽然 2004 年,美国国家合作公路研究项目(NCHRP)及联邦公路管理局(FHWA)公布了力学-经验路面设计指南(MEPDG),但 AASHTO(1993 版本)的经验设计方法仍然是世界上很多国家路面设计的依据。

英国公路管理局(HA)2006 年发布的《道路与桥梁设计手册》(DMRB)是适用于英联邦及其殖民地国家及地区的道路桥梁设计综合性指导手册,适用于城市主干道及高速公路的设计。DMRB 的方法基于英国运输研究试验室(TRL)于 1984 年主编的研究成果,并在后期不断地丰富和完善。DMRB 是根据英格

兰、苏格兰、威尔士和北爱尔兰的监督组织发布的许多独立文件系列开发形成。这些文档以及以后的补充文档共分 15 卷(VOLUME),每卷有若干节(SECTION),每节又进一步分为若干个部分(PART),每一部分以 H、B 和 T 代号为开头,分别表示公路、桥梁和交通。

1 工程背景及特点

文莱大摩拉岛大桥、道路与附属工程项目连接文莱大陆侧的 Serasa 工业区与大摩拉岛(Palau Muara Besar),线路全长 5.95 km,分为西引路、西引桥、主桥、东引桥和东引路 5 个部分。该文研究的对象是该项目中的东西引路,共计 3.315 km,其路基标准断面图如图 1 所示,采用双向四车道,路基宽度 25.6 m,断面布置为:3 m 硬路肩+2×3.65 m 行车道+0.5 m 路缘带+4 m 中央分隔带+0.5 m 路缘带+2×3.65 m 行车道+3 m 硬路肩。该项目的特点为:

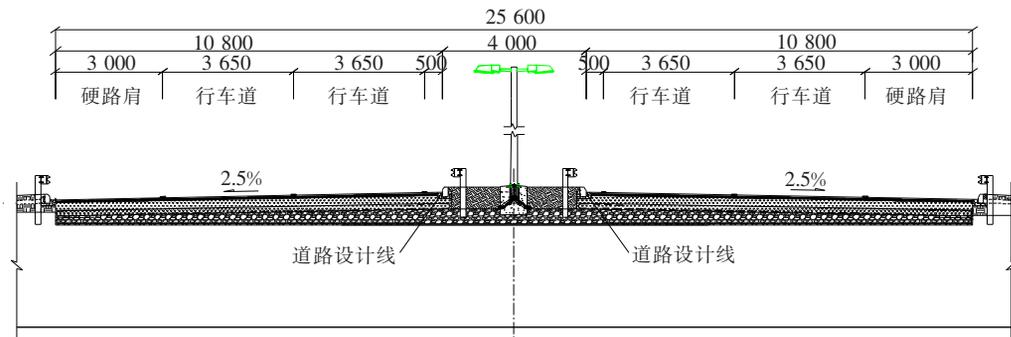


图 1 标准路基断面图(单位:mm)

(1) 位于热带雨林地区,常年气温高、降雨量大、空气湿度大。

(2) 道路等级高,按文莱一级公路设计,设计速度为 100 km/h。

(3) 日交通量大,预测项目建成运营 20 年后,即 2038 年的年平均日交通量(AADT)为 27 000 pcu/d。

(4) 道路主要服务于规划建设的化工园区,大型、重型车辆多。

2 规范选用

根据该项目合同要求(EMPLOYER REQUIREMENT),应采用文莱本国路面设计规范(GS-1, 1998)进行路面结构的设计。GS-1 规范未涵盖的内容,参考英国 DMRB 规范。GS-1, 1998 作为文莱本地规范,对指导该国道路工程设计具有一定的参考价值,但是其内容主要以道路施工工法及材料为主,对道路路面结构设计并未作任何说明。据了解,DMRB 规范在文莱的道路工程设计中尚未有先例。

由于文莱地处热带,因此当地道路工程师更习惯于采用英国 OVERSEA ROAD NOTE 31 (简称 ORN 31)作为路面结构设计的主要参考规范。ORN 31 由英国运输研究试验室编制,1962 年首次出版,1966、1977 和 1993 年修订,累积了超过 30 个热带和亚热带的建设经验,用于指导热带与亚热带气候国家沥青路面结构设计。由于 ORN 31 未列入到合同的业主要求中,且其只适用于交通量 ≤ 30 msa (million standard axles, 百万标准轴次)的道路。鉴于该项目交通量大,因而业主咨询工程师否定了采用 ORN 31 作为设计规范的要求,只允许设计时参考使用。

近年来,文莱的道路工程越来越多地使用美国的 AASHTO1993 规范进行新建道路工程的路面结构设计,取得了良好的经济效益和认知度。虽然 AASHTO1993 没有列入到合同的业主要求中,但其作为公认的道路路面结构设计的重要规范,且在文莱具有一定的认可度,因此经业主咨询工程师的特别许可,同意在该项目中使用 AASHTO1993 规范进行路面结构设计。

基于上述原因,该项目使用 AASHTO1993 和 DMRB HD 26/06 作为路面设计规范进行设计比选,为业主及其咨询工程师的最终抉择提供技术性依据。

2.1 AASHTO1993 路面设计方法

AASHTO1993 自颁布实施以来,不仅在美国,而

且在美国之外的其他国家和地区也获得了广泛的应用和认可,其主要特点如下:

(1) 首次将耐用性指数引进路面设计中,并且提出了不同道路等级应有不同的设计标准,使路面设计与使用要求形成密切的关系。

(2) 提出了路面结构数 SN 与加权轴载通过次数 N 的基本回归方程。

(3) 建立了不同轴载间的等效关系,使轴载轻重与交通量的多寡对路面的作用建立了合理的关系。解决了过去设计方法中未能解决的交通荷载问题。

(4) 初步确定了不同路面层材料的结构层系数。

AASHTO1993 的设计回归方程如下:

$$\log W_{18} = Z_R \times S_0 + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{4.2 - P_t}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \left(\frac{1.094}{SN + 1}\right)^{5.19}} + 2.32 \log M_R - 8.07 \quad (1)$$

式中: Z_R 为标准正态偏移; S_0 为均方差; P_t 为最终耐用性指数; M_R 为回弹模量; W_{18} 为累计标准单轴荷载 18 kip (约等于 80 kN) 作用次数; SN 为路面结构数,表示路面结构的强弱,可表示为:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad (2)$$

式中: a_1 、 a_2 、 a_3 分别为面层、基层和底基层的结构层系数,按表 1 选取; D_1 、 D_2 、 D_3 分别为面层、基层和底基层的实际厚度,以英寸计; m_2 、 m_3 分别为基层和底基层的排水系数,按表 2 选取。

表 1 结构数 SN 的结构层系数

层位	材料组成	a_1	a_2	a_3
面层	沥青混凝土	0.44		
	沥青稳定碎石		0.30	
	水泥稳定碎石		0.23	
基层	碎石		0.14	
	砂砾		0.07	
底基层	砂砾料			0.11

根据公式(1),AASHTO1993 在设计过程中,需要考虑以下几个基本要素:

(1) 设计年限:AASHTO 的设计年限并不固定,其受建设资金、寿命周期和费用等影响,使用性能期一般采用 15~20 年,分析期应至少包括一次修复,对于重交通城市道路,一般分析期取 30~50 年。

(2) 交通量:以标准单轴荷载 18 kip (约 80 kN) 为基准,道路上的各种轴载采用当量换算系数换算成标

准轴载数。

(3) 可靠度:根据道路的功能分类,按照表3选择可靠度水平。

表2 柔性路面中未处治的基层、底基层材料修正结构层系数的推荐值

排水质量	路面结构暴露在接近饱和状态湿度的不同时间百分比的结构层系数			
	小于1%	1%~5%	5%~25%	大于25%
极好	1.40~1.35	1.35~1.30	1.30~1.20	1.20
好	1.35~1.25	1.25~1.15	1.15~1.00	1.00
一般	1.25~1.15	1.15~1.05	1.00~0.80	0.80
差	1.15~1.05	1.05~0.80	0.80~0.60	0.60
极差	1.05~0.95	0.95~0.75	0.75~0.40	0.40

表3 根据道路的功能定位确定可靠度水平

道路功能	推荐的可靠度水平	
	城市道路	非城市道路
州际及其他高速公路	85.0~99.9	80.0~99.9
主干道	80.0~99.0	75.0~95.0
集散道路	80.0~95.0	75.0~95.0
地方道路	50.0~80.0	50.0~80.0

同时,根据路面的类型,选择能代表当地条件的均方差 S_0 。(建议值:刚性路面 0.35,柔性路面 0.45)。

(4) 服务能力:采用耐用性指数(P_{SI})作为衡量路面使用性能的指标。其值可通过对路面的使用性能进行客观量测和主观评价相结合的方法确定。初始耐用性能 $P_0=4.2$ (柔性路面), $P_0=4.5$ (刚性路面),最终耐用性指 $P_t=2.5$ (主要公路), $P_t=2.0$ (次要公路)。

(5) 有效路基回弹模量:推荐采用试验法进行测定,通过每个月或每半个月测定路基土回弹模量,按其对面服务能力的相对损伤程度,得到路基土的有效回弹模量值 M_R 。对于路基填料 $CBR \leq 10\%$ 时,可以通过经验公式 $M_R(\text{psi})=1\ 500 \times CBR$ 换算。

(6) 层系数:按表1进行选取。

(7) 排水系数:对于粒料基层和底基层,应根据排水的质量和含水量,采用表2的排水系数对层系数进行修正,其他材料排水系数可考虑为1。

2.2 DMRB 路面设计方法

DMRB关于新建沥青路面结构设计主要有以下3本规范:HD 24/06 交通量评估;HD 25/94 路基设计;HD 26/06 新建路面设计。

DMRB在路面设计过程中,需要考虑以下几个基

本要素:

(1) 设计年限:对于新建项目,DMRB认为40年的设计年限最为经济。如果能证明采用其他设计年限更经济,并取得监督部门认可亦可以采纳。根据实际使用状况,设计年限内需要进行1~3次罩面。

(2) 交通量:DMRB HD 24/06中可采用以下公式计算交通量等级:

$$T_i = 365 \times F \times Y \times G \times W \times P \times 10^{-6} \text{ msa} \quad (3)$$

式中: F 为起始年货车(≥ 3.5 t)交通量,表4列举了货车的车型、等级及分类; Y 为设计年限; G 为交通量增长率,国家道路交通预测部(NRTF)每8年发布一次未来交通量的趋势,1997年NRTF发布的预测结果可以从表5选取; W 为磨损系数,标准轴载采用80 kN,根据2003年从12个观测点所收集的数据从表6中选取; P 为设计车道重车比例,根据图2确定。

表4 商用车等级与分类

商用车(cv)	等级	分类
	公共汽车	公共服务车(PSV)
	2轴刚性接	其他货车(OGV1)
	3轴刚性接	
	3轴铰接	
	4轴刚性接	
	4轴铰接	其他货车(OGV2)
	5轴铰接	
	≥ 6 轴铰接	

表5 交通量增长率

设计年限/年	交通量增长率	
	OGV1+PSV	OGV2
10	1.04	1.12
15	1.06	1.19
20	1.09	1.27
25	1.11	1.36
30	1.17	1.45
35	1.17	1.56
40	1.19	1.67

表 6 磨损系数

高用车等级及分类	磨损系数	
	旧路维护	新建道路
公共汽车	2.6	3.9
2 轴刚性接	0.4	0.6
3 轴刚性接	2.3	3.4
4 轴刚性接	3.0	4.6
3 或 4 轴铰接	1.7	2.5
5 轴铰接	2.9	4.4
6 轴铰接	3.7	5.6
OGV1+PSV	5.6	1.0
OGV2	3.0	4.4

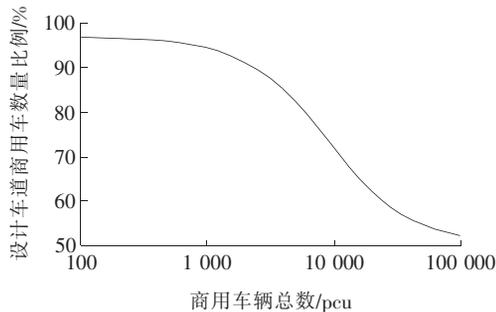


图 2 设计车道重车比例

(3) 路面结构类型和土基强度等级:路面结构类型的选择与土基强度等级息息相关。

① 全厚式路面:沥青面层+沥青稳定类基层。

② 半刚性路面:沥青混凝土面层(或上基层)+水泥稳定类基层(或下基层)。

③ 刚性路面:水泥混凝土面层+水泥混凝土基层。

④ 刚性组合式路面:沥青面层+连续配筋水泥混凝土基层。

(4) 土基强度等级:土基强度根据路基顶面的回弹模量采用动态平板试验测定,分为以下 4 个等级:

1 级: $M_R \geq 50$ MPa,适用于交通量 ≤ 20 msa;

2 级: $M_R \geq 100$ MPa,适用于交通量 ≤ 80 msa;

3 级: $M_R \geq 200$ MPa,底基层需采用水泥稳定材料或石灰稳定材料;

4 级: $M_R \geq 400$ MPa,底基层需采用水泥稳定材料或石灰稳定材料。

3 设计实例与比较

3.1 AASHTO 计算结果

(1) 设计年限:根据合同中的业主要求,文莱大摩拉岛大桥、道路与附属工程项目路面结构设计年限为 20 年。

(2) 交通量:根据交通量调查及预测,该项目建成并运营 20 年后的年平均日交通量(AADT)为 27 000 pcu/d,其中 PSV+OGV1 占总量的 4%,OGV2 占总量的 8%。其计算结果如表 7 所示。由于合同的业主要求中并未对具体车辆类型及其占比进行规定,因此在计算过程中,结合文莱道路的现状及摩拉岛工业园区的规划进行了假设。

表 7 AASHTO 交通量计算

车辆类型及其占比	日交通量/ (pcu · d ⁻¹)	设计交通量/ (pcu · d ⁻¹)	等效系数	标准轴载累计 作用次数/次
小汽车	23 760	173 448 000	0.000 8	138 758
PSV+OGV1	1 080	—	—	—
公共汽车 5%	54	394 200	0.681	268 293
2 轴 5%	54	394 200	0.189	74 504
3 轴 90%	972	7 095 600	0.131	924 557
OGV2	2 160	—	—	—
3 轴铰接 25%	540	3 942 000	0.865	3 408 253
5 轴铰接 75%	1 620	11 826 000	2.372	28 050 089
合计	27 000	197 100 000	—	32 864 454

考虑车道分布系数后($DL=90\%$),车道上设计累计当量轴次(ESAL)为 29.578×10^6 次。

(3) 可靠度:摩拉岛大桥引路作为城市干线公路,可靠度采用 92%,所对应的标准正态偏移 Z_R 为

-1.405。对于柔性路面,均方差 S_0 取值 0.45。

(4) 服务能力:初始服务能力指数 PSI_0 为 4.2 (柔性路面);最终服务能力指数 PSI_t 为 2.5 (主要公路);所以 $\Delta PSI = PSI_t - PSI_0 = 1.7$ 。

(5) 有效路基回弹模量:该项目 60 cm 路床采用 $CBR \geq 8\%$ 的材料填筑,土基模量 $M_R = 1\ 500 \times CBR = 12\ 000\ \text{psi}$ ($1\ \text{psi} = 0.00689\ \text{MPa}$,下同)。

(6) 结构层模量:沥青混凝土 $E_{AC} = 400\ 000\ \text{psi}$,级配碎石基层 ($CBR \geq 80\%$) 模量 $E_{BS} = CBR^{0.64} = 42\ 205\ \text{psi}$;级配碎石底基层 ($CBR \geq 30\%$),其模量 $E_{BS} = CBR^{0.64} = 22\ 529\ \text{psi}$ 。

(7) 层系数:查表 1,沥青混凝土 a_1 取值 0.42;级配碎石基层 ($CBR \geq 80\%$) a_2 取值 0.13;级配碎石底基层 ($CBR \geq 30\%$) a_3 取值 0.11。

(8) 排水系数:考虑到该项目排水条件有利,查表 2,级配碎石基层和底基层的排水系数均取 1.2。

将上述各项指标代入回归方程式(1)中,先计算面层厚度,通过反复迭代计算,最终得到 $SN = 5.044$ 。另外,假设面层厚度 $D_1 = 145\ \text{mm}$ (5.709 in),底基层 $D_3 = 200\ \text{mm}$ (7.874 in),代入式(2),得到基层厚度 $D_2 = 10.3\ \text{in}$,即 265 mm。

3.2 DMRB 计算结果

(1) 设计年限:20 年。

(2) 交通量: $AADT = 27\ 000\ \text{pcu/d}$ 。其中 PSV + OGV1 占总量的 4%,OGV2 占总量的 8%。交通增

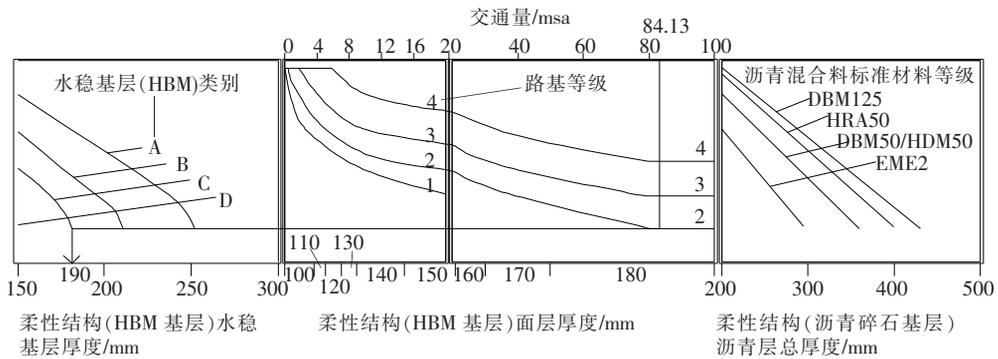
长率查表 5,PSV + OGV1 为 1.09;OGV2 为 1.27。磨损系数查表 6,PSV + OGV1 为 1.0;OGV2 为 4.4。交通量计算结果见表 8。

表 8 DMRB 交通量计算结果

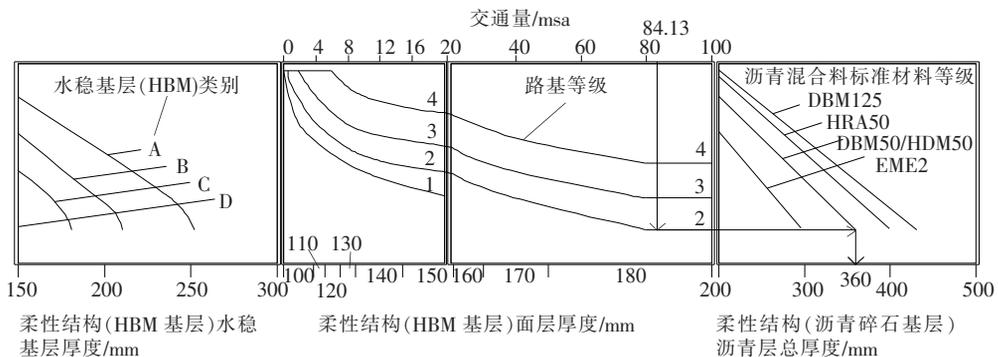
车辆类型及其占比	日交通量/ (pcu · d ⁻¹)	交通增 长率	磨损 系数	累计交通量/ msa
PSV+OGV1	1 080	1.09	1.0	0.429 678
OGV2	1 080	1.27	4.4	4.405 579
合计	3 240	—	—	4.835 257

根据图 2,设计车道重车比例为 $P = 87\%$ 。考虑 20 年设计年限,通过式(3),求得累计当量轴次为 84.13 msa。

根据 DMRB HD 26/06 计算图采用图 3 方法,即可得路面面层及基层的组成材料及相应的厚度。如选择路基强度等级为 2 级,并选用 C 类半刚性材料 CBGM B-C12/15 作为基层,则所需材料及其厚度为:180 mm 面层沥青混凝土 + 190 mm 基层水泥稳定材料 CBGM B-C12/15,如图 3(a) 所示。如选用柔性材料 DBM50 作为基层,则所需的沥青类材料的总厚度应为 360 mm,如图 3(b) 所示。



(a) 半刚性材料基层



(b) 柔性材料基层

图 3 DMRB 确定面层及基层材料和厚度

路基加强层的确定按照 DMRB IAN 73/06 进行。路基要求 $CBR \geq 8\%$, 路基强度等级为 2 级, 因此按图 4 所示, 路基加强层需要设置 280 mm 的级配碎石。同时根据 HD 26/06 第 2.8 章节的要求, 这种基础用在超过 80 msa 的道路上, 上部 150 mm 需要调整为稳定类材料。因此, 路基加强层考虑为: 150 mm 水泥稳定材料 CBGM B-C8/10 + 130 mm 级配碎石。DMRB HD26/06 其材料组成及计算厚度如表 9、10 所示。

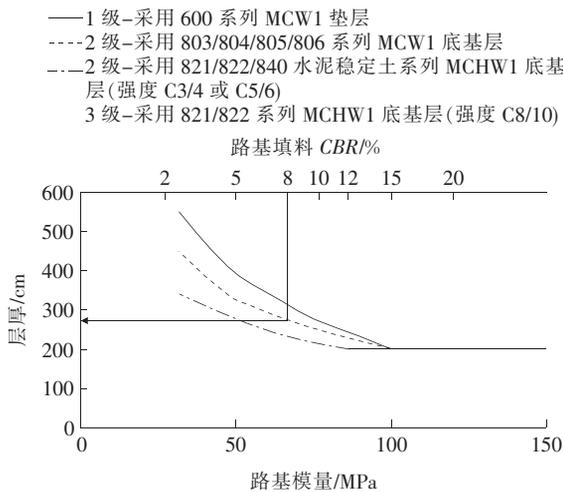


图 4 DMRB 确定路基加强层的材料和厚度

表 9 DMRB HD26/06 计算结果(基层为半刚性材料)

路面结构组成	材料	厚度/mm
面层	沥青混凝土	180
基层	水泥稳定材料	190
	CBGM B-C12/15	
路基加强层	水泥稳定材料	150
	CBGM B-C8/10	
	级配碎石	130
合计		650

表 10 DMRB HD26/06 计算结果(基层为柔性材料)

路面结构组成	材料	厚度/mm
面层	沥青材料 DBM50	360
基层		
路基加强层	水泥稳定材料	150
	CBGM B-C8/10	
	级配碎石	130
合计		640

3.3 结果比较与分析

(1) AASHTO1993 和 DMRB 均将各种车型的

同轴载换算为标准轴载的当量轴次, 然后通过经验公式或诺模图确定各层厚度, 设计方法均为经验法, 在标准轴载上, 美标采用 18 千磅(约 8 172 kg), 英标采用 80 kN, 基本相当。AASHTO1993 设计变量除了交通量, 还有可靠度、环境影响参数、服务能力指数, 设计输入参数更多。

(2) 英标 DMRB 推荐采用 40 年设计年限, 其主要适用于干线公路, 路面设计方法基于长寿命路面结构方案, 因此 DMRB 设计方法所确定的方案相对昂贵。AASHTO1993 设计方法适用于各种等级的道路工程, 设计年限也较为灵活, 应用范围更广。

(3) DMRB 结合英国本土的特点, 根据近年来的统计数据, 明确给定代表车型、交通量增长率、交通量转换系数等参数, 可依据诺模图直观地确定各结构层的材料及其厚度, 方法简便。而 AASHTO1993 计算过程较为复杂, 需要对回归方程进行反复迭代以确定路面结构数 SN, 同时 SN 还会影响计算输入的累计当量轴次, 因此 AASHTO1993 设计方法需要进行多次假设和迭代计算。

(4) 对于沥青路面结构, DMRB 只能选择全厚式路面结构和半刚性路面结构形式, 级配碎石等粒料类材料在 DMRB 中不作为路面基层, 只能用作底基层或路基加强层。而 AASHTO1993 可以采用级配碎石做基层, 因此 AASHTO1993 路面设计方法所适用的结构形式更丰富、材料更多样。

(5) 对于不同交通量等级的道路, DMRB 对应有路基最小强度要求, 如对于累计当量轴次 20~80 msa 的道路, 土基强度等级要求 ≥ 100 MPa, 相对于美标和中国标准, DMRB 对土基强度的要求相对较高。AASHTO1993 设计方法没有明确规定各级交通量下最小路基强度等级。

4 结语

基于以上结果与分析, AASHTO1993 在路面材料、结构形式、计算参数、设计输入方面相对 DMRB 适用性更强, 同时综合考虑施工工期、造价等各方面因素, 文莱大摩拉岛大桥、道路与附属工程项目最终采用了 AASHTO1993 的计算结果作为道路的路面结构。

海外项目在标准选择上有一定的灵活度, 随着中国工程企业广泛参与国际竞争, 对国际上主流规范的对比研究有较大的市场需求, 目前中国对 AASHTO 路面设计方法开展了较多研究, 但缺少计算实例, 对英