

混凝土路面行车荷载疲劳应力影响因素的研究

赵乾文

(中冶南方城市建设工程技术有限公司,湖北 武汉 430223)

摘要:我国目前路面设计采用的力学经验法,在设计基准期内满足承载能力、耐久性、舒适性、安全性的要求。通过对现行《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D20—2011)的理解,结合工程经验,研究设计轴载、板底地基当量回弹模量、基层类型及厚度、面层混凝土弯拉强度等设计参数对路面结构的影响,结果表明:合理设计轴载对荷载应力影响较大;设置粒料层可有效提高地基回弹模量;半刚性基层不宜过厚,刚性基层需与面层协同设计,使二者受力最佳;提高面层材料弯拉强度,能承担较高荷载应力。本研究结论为路面设计提供合理建议,供设计参考。

关键词:设计轴载;基层类型;荷载应力;面层厚度

中图分类号: U416.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)09-0215-03

0 引言

路面结构组合设计是根据道路交通荷载情况,以及对材料、气候、水文等环境条件,结合当地实践经验,综合确定经济合理的路面结构组合,我国现行《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D20—2011)是以面层板在设计基准期内,行车荷载和温度梯度下不产生疲劳断裂作为设计标准;以最终轴重和最大温度梯度下不产生极限断裂为验算标准^[1]。为满足以上标准,需得到合适混凝土板厚、基层类型与厚度及对路基的要求,以满足交通荷载等级和环境作用。张海涛^[2]等通过对新颁布实施的《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)设计极限状态方程进行深入研究表明:新规范(JTG D40—2011)公式的设计板厚偏小,并提出了修正公式;张璇^[3]分析了水泥混凝土路面模量变化对水泥路面设计影响分析,得出提高土基模量减小土基顶面弯沉和路表弯沉,底基层模量不变前提下,土基回弹模量对基层顶面当量回弹模量影响比对混凝土板底荷载应力影响要大。尹磊^[4]认为交通荷载参数计算对沥青路面结构设计中材料类型与结构层厚度的确定十分重要;刘厚平^[5]认为基层材料的选取和厚度设计对保证路面整体稳定性和延长使用寿命有重大意义。

水泥混凝土路面设计参数较多,为在设计中把握关键设计参数,本文结合规范中的公式及路面结构计算软件(HPDS),分析设计参数对路面行车荷载

疲劳应力的影响,供设计借鉴与参考。

1 设计参数的选取

根据规范相关公式进行合并,得到弹性地基双层板计算荷载应力的式(1),以更明确路面结构组合设计的相关参数。

$$\sigma_{ps} = \frac{1.64 \times 10^{-3} \times D_c \times h_c^{-2} \times p_s^{0.94}}{E_t^{0.217} (D_c + D_b)^{0.783}} \quad (1)$$

$$D_b = \frac{E_b h_b^3}{12(1-\nu_b^2)} \quad D_c = \frac{E_c h_c^3}{12(1-\nu_c^2)} \quad (2)$$

$$\sigma_{pr} = k_r k_f k_c \sigma_{ps} \quad (3)$$

$$\gamma(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f_r \quad (4)$$

通过式(1)~式(4),影响行车荷载疲劳应力的主要因素包括:设计轴载 P_s 、板底当量回弹模量 E_t 、基层类型及厚度 H 、面层厚度 h_c 、混凝土弹性模量 E_c 与弯拉强度 f_r 。温度荷载应力与混凝土弹性模量及其板厚成正比关系,本文不再对其进行分析。

本文以城市次干路为例,采用路面结构:24 cm 水泥混凝土路面 +36 cm 水泥稳定碎石基层 +15 cm 级配碎石垫层为例,设计轴载为 100 kN,最重轴载为 180 kN,在累计轴载作用次数 2×10^7 作用下,分析设计参数对混凝土路面行车荷载疲劳应力的影响,参数取值见表 1。

2 设计参数影响分析

2.1 设计轴载 P_s 的影响

我国以 100 kN 的单轴-双轮组荷载作为标准轴载,当道路占主要份额的轴载超过 100 kN 时,需将轴载换算成标准轴载。其他参数不变,改变设计轴载

收稿日期:2021-11-23

作者简介:赵乾文(1990—),男,硕士,工程师,从事道路设计工作。

表 1 设计基本参数表

序号	项目	设计参数
1	轴载作用次数 N_s / 次	2.00E+07
2	标准轴载 P_s /kN	100
3	最重轴载 P_m /kN	180
4	混凝土模量 E_c /MPa	31 000
5	路床顶面综合回弹模量 E_0 /MPa	60
6	级配碎石 /MPa	220
7	水泥稳定碎石基层 /MPa	1 600/1 800
8	混凝土面层弯拉强度 /MPa	5

P_s 取值,其范围 100~140 kN,计算结果见表 2。

表 2 设计轴载对混凝土板厚及荷载应力的影响

序号	设计轴载 /kN	混凝土板厚 /mm	荷载应力 /MPa	轴载作用次数 / 次
1	100	250	4.17	2×10^7
2	110	264	4.26	9.2×10^7
3	120	277	4.35	3.7×10^8
4	130	无结算结果	无结算结果	1.3×10^9
5	140	无结算结果	无结算结果	4.4×10^9

由表 2 计算结果可知:路面结构一定,其所能承受的荷载作用次数也一定。设计轴载小于 120 kN 时,随着设计轴载增大,累计轴载作用次数增大,混凝土板厚度及荷载应力均增大,这是因为当设计轴载超过标准轴载 100 kN 时,需将其转化为标准轴载,二者转化关系为设计轴载与标准轴载比值的 16 次方,显然二者比值越大,累计轴载作用次数越大,如设计轴载 200 kN 相当于标准轴载作用 65 536 次;因此设计轴载超过 120 kN 时,累计轴载作用次数增长较快,接近特重交通上限(1010),此时路面结构无法承受累计荷载作用次数,需重新优化路面结构。

水泥混凝土路面的疲劳损伤量对轴重很敏感,与轴重比成 16 次方的关系,对于特重轴载采用标准轴载 100 kN 设计时,累计轴载作用次数会达到天文数字,为避免出现这种情况,在进行交通量及交通荷载调查分析时,选择路面承受车辆荷载占主要份额的特重车型的轴载作为设计轴载,使得计算较为合理。

2.2 板底地基当量回弹模量 E_l 的影响

其他参数不变,改变板底地基当量回弹模量 E_l ,其取值范围 30~90 MPa 计算结果见表 3。

板底地基当量回弹模量 E_l 与路床顶综合回弹模量 E_0 、粒料层当量回弹模量、厚度及层数相关。

在不考虑有粒料层的情况下,由表 3 计算结果可知:在重载交通荷载作用下,当 $E_l=E_0 \leq 30$ MPa 时,无法得到混凝土板计算结果,当 $E_l=E_0 > 30$ MPa 时,

表 3 板底地基当量回弹模量 E_l 对混凝土荷载应力的影响

序号	路床顶面综合回弹模量 E_0 /MPa	重载交通(2×10^7)		特重交通(2×10^8)	
		混凝土板厚 /mm	荷载应力 /MPa	混凝土板厚 /mm	荷载应力 /MPa
1	30	无结果	无结果	无结果	无结果
2	40	262	4.36	无结果	无结果
3	50	257	4.26	275	4.38
4	60	253	4.17	271	4.29
5	70	250	4.1	267	4.23
6	80	248	4.02	265	4.15
7	90	246	3.96	262	4.1

随着路床顶面回弹模量增大,混凝土板厚度越小,荷载应力也减少。特重交通荷载作用下,当 $E_l=E_0 \leq 40$ MPa 时。无法得到混凝土板计算结果,当 $E_l=E_0 > 40$ MPa 时,随着路床顶面回弹模量增大,混凝土板厚度越小,荷载应力也减少。

在考虑粒料层的情况下,粒料层做为路基改善层,可使板底地基当量回弹模量 E_l 有较大的提高,经过计算,当 15 cm 级配碎石与路床顶综合回弹模量 E_0 为 30 MPa 时, E_l 达到 60 MPa,可满足设计条件。

由此可知,对于较弱的路基,需要采取改善路基的措施,如更换填料、增设粒料层或低剂量无机结合料稳定层,以满足规定的最低模量要求;对于较强的路基,可以减少路面结构的强度与厚度。

2.3 基层类型及厚度的影响

目前常用基层主要有半刚性基层(水泥稳定碎石基层)及刚性基层(贫混凝土基层),其他参数不变,改变基层类型及厚度,半刚性基层厚度取值范围 150~360 mm,贫混凝土厚度取值范围 150~240 mm、弯拉强度取值范围 2.0~3.0 MPa,计算结果见表 4、表 5。

表 4 半刚性基层厚度对混凝土板厚及荷载应力的影响

序号	半刚性基层厚度 /mm	混凝土板厚 /mm	荷载应力 /MPa	温度应力 /MPa
1	150	250	4.27	0.14
2	200	250	4.21	0.18
3	300	251	4.21	0.17
4	360	250	4.17	0.22

由表 4 计算结果可知:半刚性基层厚度对面层厚度及荷载应力的影响均较小。刚性基层弯拉强度对面层板厚度影响较大。半刚性基层类混凝土路面,提高基层厚度虽然可以增加路面结构的弯曲刚度,降低面层板的荷载应力,但会增加温度变形与翘曲应力,对路面结构产生不利的影响,不能起到减薄面

表5 刚性基层厚度及强度对混凝土板厚及荷载应力的影响

序号	刚性基层厚度/mm	基层弯拉强度/MPa	混凝土板厚/mm	综合作用力/MPa	基层荷载应力/MPa
1	15	2	266	3.65	1.64
2	15	2.5	243	4.97	2.24
3	15	3	243	4.97	2.24
4	20	2	293	3.68	1.86
5	20	2.5	252	4.42	2.46
6	20	3	230	4.8	2.88
7	24	2	300	3.45	1.97
8	24	2.5	260	3.98	2.5
9	24	3	230	4.33	2.98

层厚度的作用。

由表5计算结果可知:贫混凝土基层厚度一定,随着基层弯拉强度增大,混凝土面层厚度减小,基层弯拉强度一定,刚性基层厚度增加,混凝土面层厚度增大。基层荷载应力均接近基层弯拉强度控制值(2~3 MPa),但面层荷载疲劳与温度综合作用力却远未达到弯拉强度控制值(5 MPa),随着基层混凝土厚度及弯拉强度增大,该情况越明显。刚性基层混凝土路面结构需同时考虑二者均不会产生疲劳断裂,在计算过程中,贫混凝土基层厚度越薄,面层与基层几乎都达到了弯拉强度,随着基层厚度的增加,基层荷载疲劳应力首先达到弯拉强度,而面层却有较大的富裕,造成面层板的不经济。

因此,半刚性基层混凝土路面与刚性基层路面均不是基层越厚越好,刚性基层混凝土路面需综合考虑基层、面层弯拉强度与厚度的共同作用,使得二者同时达到设计标准值,以获得经济适用的路面结构组合。

2.4 面层混凝土弯拉强度 f_t 及混凝土弹性模量 E_c 的影响

其他参数不变,改变混凝土弹性模量 E_c 及弯拉强度,混凝土弹性模量取值范围 29 000~33 000 MPa、弯拉强度取值范围 4.5~6.5 MPa,计算结果见表6和表7。

由表6、表7计算结果可知:在规范取值范围内,混凝土面层模量增大,面层厚度增大,荷载应力也增大,温度应力减少,但三者变化幅度均较小。混凝土板弯拉强度增大,板厚明显减小。面层底面所产生的弯拉应力小于混凝土弯拉强度是确定了面层所需要的厚度,当弯拉强度增大,混凝土所能承担的荷载应力会较大,所需面层厚度就较小。

3 结 论

基于弹性地基双层板荷载应力计算公式,采用

表6 面层弹性模量对混凝土板厚及荷载应力的影响

序号	弹性模量/MPa	混凝土板厚/mm	荷载应力/MPa	温度应力/MPa
1	29 000	271	4.29	0.09
2	30 000	271	4.33	0.09
3	31 000	272	4.34	0.08
4	32 000	275	4.31	0.06
5	33 000	275	4.35	0.06

表7 面层弯拉强度对混凝土板厚及荷载应力的影响

序号	弯拉强度/MPa	混凝土板厚/mm	荷载应力/MPa	温度应力/MPa
1	4.5	—	—	—
2	5	250	4.17	0.22
3	5.5	234	4.52	0.3
4	6	230	4.62	0.29
5	6.5	205	5.3	0.42

单一变量法对设计参数进行分析,得到设计对行车荷载疲劳应力的影响规律。

(1)确定合适的设计轴载做为标准值,是得到合理路面结构组合,保证路面结构使用寿命的前提,必须重视交通量及交通荷载调查。

(2)板底综合回弹模量表征路基对路面结构的支撑条件,其强弱影响路面结构组合是否经济合理;粒料层作为改善层可较大提高综合回弹模量;同时作为土基与基层之间模量过渡层,可有效减少基层应力。

(3)混凝土路面基层可选择半刚性基层与刚性基层,增加半刚性基层厚度并不能有效减少面层厚度,且过厚的基层会增大温度翘曲应力与变形,导致基层开裂,对路面结构产生不利影响;刚性基层与面层二者互相影响,为使二者均达到受力最佳点,需在二者厚度与强度上找到平衡点。

(4)混凝土面层是路面结构主要承重层,面层弯拉强度是材料本身属性,是影响路面结构厚度的一个重要因素,提高材料强度更有利于减薄面层厚度。

参考文献:

[1] JTG D40—2011,公路水泥混凝土路面设计规范[S].
[2] 张海涛,于腾江,吕丽华.水泥混凝土路面设计极限状态方程的研究[J].土木工程学报,2015,48(7): 123-128.
[3] 张璇.模量变化对水泥混凝土路面影响分析[J].黑龙江交通科技,2015(2):27-28.
[4] 尹磊,王琛,申爱琴.中法沥青路面设计交通荷载参数差异研究[J].中外公路,2021,41(2):35-40.
[5] 刘厚平.水泥混凝土路面设计规范使用过程中的几点思考[J].科技视界,2014,48(7):299-300.