

耐久性复合式 路面技术

任贵明 编著



人民交通出版社
China Communications Press

耐久性复合式路面技术

Naijiuxing Fuheshi Lumian Jishu

任贵明 编著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书全面详细地介绍了张石高速公路一期工程 AC(沥青混凝土) + CRCP(连续配筋混凝土路面)复合式路面的结构、材料以及路用性能的研究成果。全书共六章,分别为:CRCP 结构设计和检测方案、水泥混凝土配比设计及性能试验研究、水泥混凝土施工工艺及检测、沥青混合料面层和黏结层材料试验研究、AC + CRCP 复合式路面力学分析、AC + CRCP 性能观测及经济性分析。

本书具有较高的工程使用价值,可供公路路面工程相关技术人员参考,还可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

耐久性复合式路面技术 / 任贵明编著. —北京:人民交通出版社,2009.7

ISBN 978 - 7 - 114 - 07834 - 7

I. 耐… II. 任… III. 耐用性 - 路面 - 结构设计 IV. U416.224

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 108257 号

书 名: 耐久性复合式路面技术

著 作 者: 任贵明

责任编辑: 卢仲贤 黎小东

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 廊坊市长虹印刷有限公司

开 本: 787 × 960 1/16

印 张: 9

字 数: 129 千

版 次: 2009 年 7 月 第 1 版

印 次: 2009 年 7 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 114 - 07834 - 7

定 价: 27.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

我国高速公路的建设已有十多年的历史,对高速公路的内在质量要求也越来越高。随着工程经验的不断累积,通过精心设计、优良施工,我国高速公路的使用性能得到大幅提升,但由于我国幅员辽阔、地区环境差异大,同时也由于超载严重,导致绝大多数高速公路在使用数年后出现了大面积的病害,使得高速公路提前进入大规模养护维修期。因此,如何提高高速公路的服务年限和服务水平成为道路工作者关心的话题。

连续配筋混凝土路面(CRCP)是道路工程师为了克服接缝水泥混凝土路面的各种病害和改善路用性能而采用的一种混凝土路面结构形式,其主要方法为在路面纵向配有足够数量的钢筋,以控制混凝土路面板纵向收缩产生的裂缝。因此,CRCP 在施工时完全不设胀、缩缝,形成一条完整而平坦的行车表面,消除了普通水泥混凝土路面的薄弱环节,增强了路面板的整体刚度,改善了汽车行驶的平稳性。

在国外,由于 CRCP 耐久性好,行车舒适平顺,养护量小,因此虽然初期投资额较高,但在其整个使用寿命期内具有良好的经济性,从而广泛应用于高速公路、机场道面和已有路面的加固上;在国内,由于经济、地域等方面的限制,CRCP 的大量修筑局限于广西、湖南、山西等省份以及机场部门,总体设计、施工水平与国际先进水平还有一定的差距。

AC + CRCP 路面则是在连续配筋水泥混凝土(CRCP)面板上铺设沥青混凝土(AC)上面层的复合式路面结构。由于 CRCP 路面较强的板体性,在承受重载交通方面具有明显的优势,可以作为提高高等级道路使用性能和服务年限的有益尝试,而沥青混凝土上面层又可以进一步改善行车舒适性并改善 CRCP 的工作环境。因此,针对我国重载、超载严重,水泥资源丰富而沥青资

耐久性复合式路面技术

源匮乏的现状,结合实际工程,研究这种新型的 AC + CRCP 复合式路面的关键技术,具有很好的应用价值。

本研究以张石高速公路一期为工程依托,对 AC + CRCP 复合式路面的结构、材料以及路用性能进行了深入的研究和分析,取得了如下成果:

(1) CRCP 路面结构设计,包括板厚、配筋、端部锚固 3 个方面的设计。

(2) CRCP 路用水泥混凝土配合比设计和施工技术研究。

(3) 沥青混合料面层和黏结层材料的室内外试验研究。

(4) AC + CRCP 复合式路面力学分析,包括承载力分析和反射裂缝疲劳寿命研究。

(5) AC + CRCP 试验路性能观测,包括:CRCP 的裂缝、位移,复合式路面的温度场。

本研究成果将为解决我国目前超载现象普遍、高速公路早期损坏严重提供一个有效的解决方案,为 AC + CRCP 复合式路面的推广和应用提供理论依据。

本书对上述研究成果进行了系统详细的总结。本书在编写过程中,得到了河北交通职业技术学院田平、马彦芹两位教授和东南大学副教授、博士顾兴宇先生的大力支持与帮助,在此深表谢意。

由于作者水平所限,难免有不当之处,敬请读者批评指正。

作 者

2009 年 6 月

目 录

第 1 章 CRCP 结构设计和检测方案	1
1.1 国内外研究现状	1
1.2 试验路概况	2
1.3 CRCP 板厚设计	2
1.4 配筋设计	7
1.5 端部约束设计	11
1.6 试验路检测方案	25
第 2 章 水泥混凝土配比设计及性能试验研究	28
2.1 原材料技术指标检验	28
2.2 混凝土配合比设计	35
2.3 混凝土性能试验研究	41
2.4 小结	47
第 3 章 水泥混凝土施工工艺及检测	48
3.1 施工准备	48
3.2 钢筋安装	50
3.3 混凝土施工	54
3.4 端部锚固施工	55
3.5 测点埋设	59
3.6 小结	61
第 4 章 沥青混合料面层和黏结层材料试验研究	62
4.1 上面层沥青混合料配合比设计	62
4.2 中面层沥青混合料配合比设计	75

耐久性复合式路面技术

4.3 黏结层材料试验研究·····	82
第5章 AC + CRCP 复合式路面力学分析 ·····	90
5.1 研究方法背景·····	90
5.2 CRCP 荷载应力分析·····	92
5.3 CRCP 温度翘曲应力分析·····	107
5.4 复合式路面受力分析·····	118
5.5 本章小结·····	128
第6章 AC + CRCP 性能观测及经济性分析 ·····	129
6.1 CRCP 裂缝观测·····	129
6.2 CRCP 面板位移观测·····	130
6.3 CRCP 温度检测·····	131
6.4 经济性分析·····	132
参考文献 ·····	134

第1章 CRCP 结构设计和检测方案

作为沥青混凝土(AC) + 连续配筋混凝土路面(CRCP)复合式路面的承重层,CRCP 的强度和耐久性对整个复合式路面的性能起到了决定性的作用,必须通过结构计算,选择合适的方案。在调查分析国内外大量工程实践的基础上,结合我国新颁《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2002),根据交通量和气候条件,进行了 CRCP 的板厚设计、配筋设计和端部锚固设计,并根据工程实际情况对各种板厚、配筋和端部锚固方案进行分析比选,确定了试验方案。

1.1 国内外研究现状

在国外,由于 CRCP 耐久性好,行车舒适平顺,养护量小,虽然初期投资额较高,但整个使用寿命期内具有良好的经济性,从而广泛应用于高速公路和机场道面。美国是 CRCP 路面应用最早、最多的国家,并进行了长期的观测和研究,多数工程经多年使用,性能依然良好。1970 年以后,许多国家开始将 CRCP 应用于汽车专用路面、城市道路和机场道面。至 1980 年已建成的 CRCP 折合成双车道,日本为 10 697km、比利时为 500km、西班牙为 80km;此外,澳大利亚、瑞典、荷兰、英国、德国也有相当多的试验研究。

在国内,1989 年在江苏盐城修筑了第一条 CRCP 试验路;1996 年在陕西铜川境内的 210 国道上修筑了 CRCP 试验路;1997 年在河南许昌境内 107 国道上修筑了 10km 的 CRCP 路面;此外,山西、湖南等地也铺筑过几段试验路。由于经济、地域等方面的限制,国内 CRCP 的应用还很少,研究深度和施工技术与国际水平有一定的差距。

1.2 试验路概况

试验路位于张(家口)石(家庄)高速公路张北至旧罗家洼段,桩号为 K44 + 740 ~ K45 + 837,长 1 100m。这一段路填挖方量不是很多,比较适合于试验段的修筑。

张石高速公路路基宽为 24.5m,中央分隔带宽为 3m,为双向四车道,行车道宽度为 $2 \times 3.75\text{m}$,硬路肩宽度为 2.5m,另有 0.75m 的土路肩,最大纵坡 5%。设计 CRCP 板宽为 10m,包括两条行车道和硬路肩。

试验路所在区地处中纬度偏北部位,受内蒙古高原气候影响较大,属温带大陆性气候,冬季寒冷干燥,夏季短促炎热,且雷雨和冰雹较多,春季和秋季风沙频繁发生。年度极端最高气温为 39.4°C ,极端最低气温为 -28°C ;1 月气温最低,平均为 -10°C ;7 月气温最高,平均为 22°C ,属坝下凉温区,平均冻土深度为 1.4 ~ 1.5m。按照《公路自然区划标准》(JTJ 003—86),试验路所处地区为 III₁a 区,即黄土高原干湿过渡区,必须提高其混凝土材料的抗冻性,需要进行以高寒混凝土为目标的配合比设计。

试验路所处路段第四系黄土分布范围广泛,根据实地系统取样调查:上层主要有亚黏土组成,中层主要有碎石土 + 砾砂 + 粉细砂组成,下层由亚黏土组成,该段黄土普遍具有湿陷性,湿陷深度为 3 ~ 5m,且 0 ~ 3m 范围内黏性土和砂性土的承载力普遍较低。根据具体情况的不同,分别采用强夯和冲击碾压的方法,加固深度为 2 ~ 4m。由于 CRCP 端部地锚梁的高度一般不会超过 1.5m,故在进行地锚梁设计时,土体的各项力学参数取为处理后土体的平均值。

1.3 CRCP 板厚设计

由于 CRCP 的钢筋并非按承受荷载应力进行设计的,因此,它的厚度仍可采用与普通混凝土路面相同的计算方法确定。有些资料认为钢筋对 CRCP 的

受力有较大的贡献,其路面厚度比普通水泥混凝土路面可以薄一些,一般为水泥混凝土路面的0.9倍。但随着大量试验路的铺筑,道路工程师发现较薄的CRCP出现了明显的破坏;同时,理论分析也表明CRCP中钢筋的加劲作用并不明显,主要是约束裂缝的发生发展,因此CRCP的厚度更倾向于采用与传统水泥混凝土路面相同的厚度。

1.3.1 交通量计算

交通量分析是路面结构设计的基础。对于包括CRCP在内的任何路面结构,都要考虑设计年限内车辆对路面的综合累计损伤作用,必须对现有的交通量、轴载组成和增长规律进行调查和预估,并通过适当的方式将它们换算成当量标准轴载累计作用次数。

已知的交通量统计分析预测如表1-1所示。

交通量预测表(pcu/d)

表 1-1

年 度	2007	2010	2015	2020	2026
交通量(pcu/d)	11 921	14 858	20 013	25 359	31 793
年增长率 g_r (%)	7.62	6.14	4.85	3.84	

注:表中的pcu/d是指以小客车为代表的轻型车当量,即交通流中不同车型的交通量按照相应的车辆折算系数换算成轻型车交通量的当量值,路面结构设计荷载必须换算为标准轴载作用次数。

设计车道使用初期标准轴载日作用次数 N_0 和设计基准期内标准轴载累计作用次数 N_e 之间的关系见下式:

$$N_e = \frac{N_0 \times [(1 + g_r)^t - 1] \times 365}{g_r} \eta \quad (1-1)$$

式中: t ——设计基准期,对于沥青路面为20年,而水泥路面为30年;

g_r ——交通量年平均增长率(%),可根据表1-1中的数据加权平均求得,为5.31%;

η ——临界荷位处的车辆轮迹横向分布系数,按经验定为0.22^[1]。

以设计弯沉值为指标时,沥青路面的轴载换算公式如式(1-2)所示,凡

耐久性复合式路面技术

轴载大于 25kN 的各级轴载的作用次数均应换算为标准轴载的当量作用次数:

$$N = \sum_{i=1}^K C_1 C_2 n_i \left(\frac{P_i}{P} \right)^{4.35} \quad (1-2)$$

式中: N ——标准轴载的当量轴次(次/d);

n_i ——被换算车型的各级轴载作用次数(次/d);

P ——标准轴载(kN);

P_i ——被换算车型的各级轴载(kN);

C_1 ——轴数系数,小客车为单后轴,取为 1;

C_2 ——轮组系数,小客车为单轮组,为 6.4。

根据《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2002),凡是单轴轴载大于 40kN 的各级荷载均应按式(1-3)换算为标准轴载的作用次数。

$$N_s = \sum_{i=1}^n \delta_i N_i \left(\frac{P_i}{100} \right)^{16} \quad (1-3)$$

或
$$\delta_i = 2.22 \times 10^3 P_i^{-0.43} \quad (1-4)$$

或
$$\delta_i = 1.07 \times 10^{-5} P_i^{-0.22} \quad (1-5)$$

或
$$\delta_i = 2.24 \times 10^{-8} P_i^{-0.22} \quad (1-6)$$

式中: N_s ——100kN 的单轴—双轮组标准轴载的作用次数;

n ——轴型和轴载级位数;

δ_i ——轴—轮型系数,单轴—双轮组时, $\delta_i = 1$; 单轴—单轮时,按式(1-4)计算;双轴—双轮组时,按式(1-5)计算;三轴—双轮组时,按式(1-6)计算;

N_i ——各类轴型 i 级轴载的作用次数;

P_i ——单轴—单轮、单轴—双轮组、双轴—双轮组或三轴—双轮组轴型 i 级轴载的总重(kN)。

根据式(1-1)和已知的沥青路面标准轴载累计作用次数 1.661×10^7 次,就可以计算出设计初期标准轴载的日作用次数为 6 055 次/d;再根据标准轴载 100kN、初始交通量 11 921 次/d 和式(1-2)计算出相应小客车的轴载为

55.85kN;然后就可以根据式(1-3)和式(1-1)计算出水泥路面设计年限内的标准轴载作用次数 $N_s = 2.4 \times 10^6$ 次。

1.3.2 板厚设计

按照《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2002)中给出的普通水泥混凝土路面的设计方法对板厚进行了计算,设计流程如图 1-1 所示。

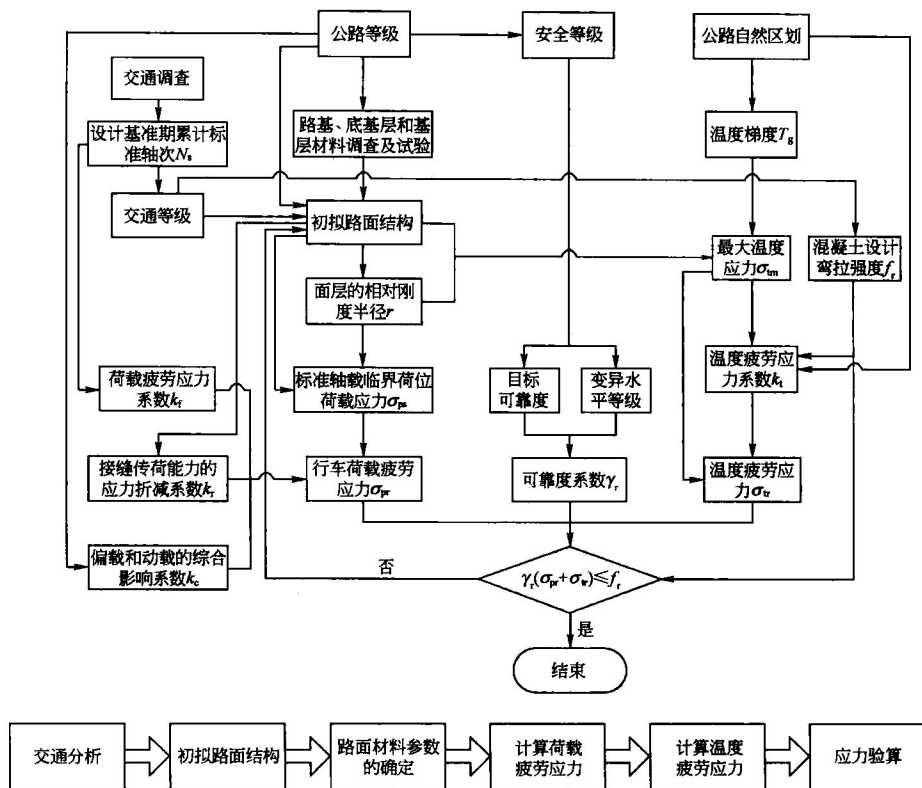


图 1-1 板厚设计流程图

经过计算,当板厚为 27cm 时,荷载疲劳应力为 2.37MPa,温度疲劳应力为 1.46MPa,取可靠度系数为 1.30,则有:

$$(\sigma_{tr} + \sigma_{pr})\gamma_r = (1.46 + 2.37) \times 1.30 = 4.979(\text{MPa}) < f_t = 5\text{MPa}$$

因此,所选连续配筋混凝土面层厚度(0.27m)可以承受设计基准期内的荷载应力和温度应力的综合作用。

1.3.3 板厚范围计算

计算了 21 ~ 29cm 共 9 种板厚的情况,如表 1-2 所示。结果表明:随着板厚的增加,荷载疲劳应力下降很快,虽然温度疲劳应力会略有增大,总的疲劳应力是减小的;能够满足设计规范要求的、最小可靠度系数 1.20 的最小板厚为 22cm。

不同板厚下的疲劳应力

表 1-2

板厚 h (cm)	21	22	23	24	25	26	27	28	29
荷载疲劳应力 σ_{pr} (MPa)	3.37	3.15	2.96	2.79	2.64	2.50	2.37	2.25	2.14
温度疲劳应力 σ_{tr} (MPa)	0.914 5	0.990 5	1.07	1.16	1.25	1.35	1.46	1.56	1.67
总疲劳应力 σ_r (MPa)	4.28	4.14	4.04	3.95	3.89	3.85	3.82	3.81	3.82
可靠度系数 γ_r	1.16	1.20	1.23	1.26	1.28	1.29	1.30	1.31	1.31

对于翘曲应力,计算了板长 L 对计算结果的影响,如图 1-2 所示。从图 1-2 可以看出,当板长在 3 ~ 7m 之间变化时,翘曲应力会随着板长的增大而迅速增大。但当板长大于 12m 时,板长的变化对翘曲应力的影响就很小了。普通水泥混凝土路面板的板长一般在 5m 左右,本试验路路面板宽度(即计算板长)为 10m。

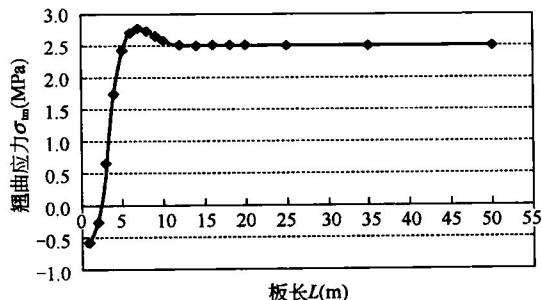


图 1-2 板长与温度翘曲应力的关系

1.3.4 试验路结构

张石高速路面结构厚度为70cm,为方便施工,试验路底基层、基层、封层采用与毗连路段相同的结构,板厚为27cm;对于沥青层的厚度,《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)复合式路面沥青上面层的厚度为2.5~8cm,对于高速公路为10cm,因此确定试验路沥青罩面层的厚度为10cm,分两层铺筑。试验路方案如图1-3所示。

4cm AC-13I
6cm AC-20I
1~2mm黏结层、找平层
27cmCRCP面板
1~2mm改性乳化沥青下封层
17cm水泥稳定碎石基层
16cm水泥稳定砂砾底基层

图1-3 初定路面结构

1.4 配筋设计

配筋设计是CRCP设计的关键环节,其主要内容是:选择合适的钢筋规格以及确定合适的配筋率和钢筋位置。由于横向裂缝的宽度和间距是影响CRCP使用性能的重要因素,而它是通过纵向钢筋来控制的,因此可以通过估算裂缝的宽度和间距来确定纵向钢筋配筋率,在此基础上纵筋应力也应满足要求。横向钢筋的作用主要是控制纵向钢筋间距,稳固钢筋网,其布置只要满足构造要求即可。纵、横向钢筋均采用螺纹钢,以保证混凝土与钢筋之间足够的握裹力。

1.4.1 纵向钢筋

纵向钢筋配筋设计的基本原则如下:

(1)裂缝间距:主要是为了考虑剥落和冲断破坏的可能性。为了减少剥落,相邻裂缝的最大间距为2.5m,为了减少冲断破坏的可能性,理想的最小间距为1.0m,即在设计中裂缝间距应控制在1.0~2.5m的范围内。

(2)裂缝宽度:为了防止剥落和渗水,设计时控制最大裂缝宽不超过1mm,一般应控制为0.5~0.7mm,且裂缝宽度越小越好。

(3) 钢筋应力:一般建议采用钢筋极限拉伸强度的 75% 作为极限应力,至少不大于钢筋极限拉伸强度。

根据计算得到的配筋率,就可以进一步确定纵筋的根数和间距,其布置具体满足以下要求:

(1) 纵向钢筋一般选用直径为 12 ~ 20mm 的螺纹钢筋,在满足纵向钢筋间距要求 ($100\text{mm} \leq d \leq 250\text{mm}$) 的条件下,尽量选择直径较小的钢筋。

(2) 纵向钢筋一般设在面层表面下 $1/3 \sim 1/2$ 的厚度范围内,距边缘为 100 ~ 150mm。

(3) 纵向钢筋的焊接长度一般大于 500mm 或 25 倍钢筋直径,焊接位置应错开,焊接段连线与纵筋夹角小于 60° 。

纵向钢筋配筋设计的流程如图 1-4 所示。

选取 0.6% ~ 0.8% 共 5 种不同的配筋率和 12 ~ 20mm 共 5 种不同的钢筋直径进行配筋率的计算,分析了不同的钢筋直径和配筋率下的裂缝间距、裂缝宽度、钢筋应力和钢筋间距,据此来选择合适的配筋率和钢筋直径,结果如图 1-5 ~ 图 1-8 所示。

从以上图中可以看出:

(1) 对于一定的钢筋直径,随着配筋率的增大,裂缝间距、裂缝宽度、钢筋应力和钢筋间距均会减小。

(2) 对于一定的配筋率,随着钢筋直径的增大,裂缝间距、裂缝宽度和钢筋间距均会减小,而对钢筋应力没有影响,这和各种钢筋混凝土表面裂缝的理论分析结果一致。

(3) 裂缝间距、宽度和钢筋应力均与面板厚度无关,只有钢筋间距与面板厚度有关,当钢筋直径和配筋率确定后,钢筋间距随面板厚度的增大而减小。

根据以上分析结果,按照《公路水泥混凝土路面施工技术规范》(JTG F30—2003) 中裂缝间距 1.0 ~ 2.5m 的要求、裂缝宽度 0.5 ~ 0.7mm 的要求、钢筋应力小于 335MPa 的要求,以及钢筋间距 $100\text{mm} \leq d \leq 250\text{mm}$ 的要求,综合确定钢筋直径为 16mm,配筋率为 0.72%,此时钢筋间距为 103mm。

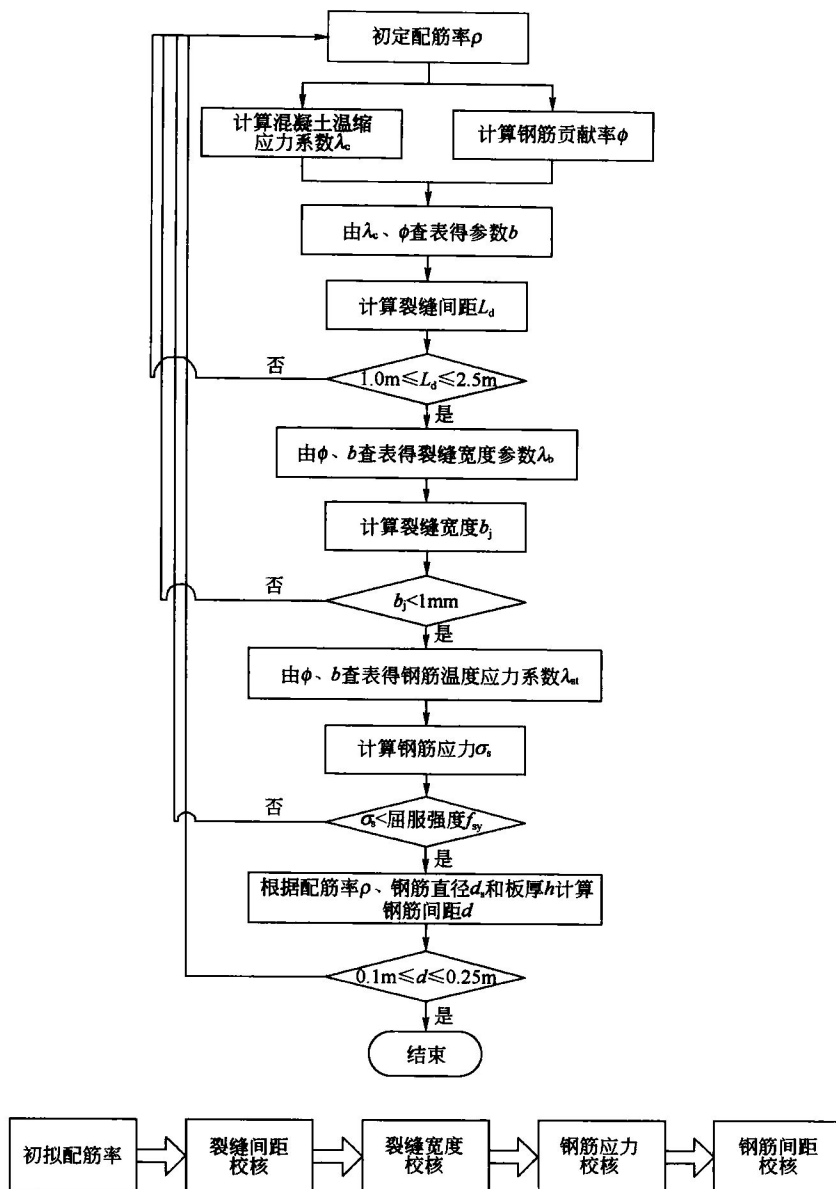


图 1-4 纵向配筋率计算流程

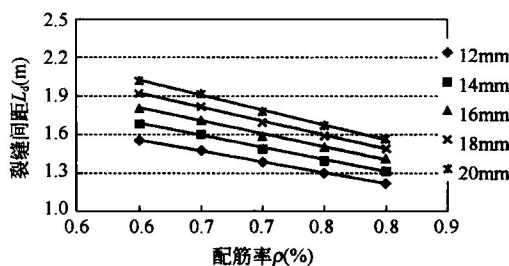


图 1-5 不同配筋率和钢筋直径下的裂缝间距

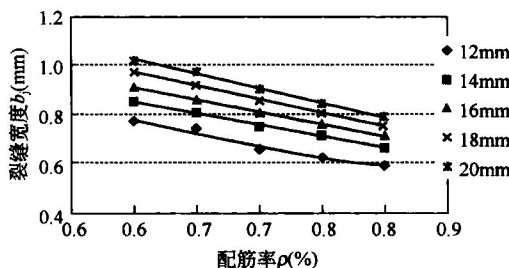


图 1-6 不同配筋率和钢筋直径下的裂缝宽度

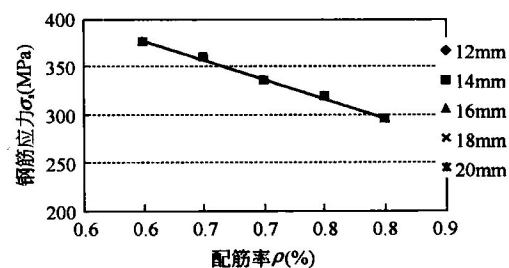


图 1-7 不同配筋率下的钢筋应力

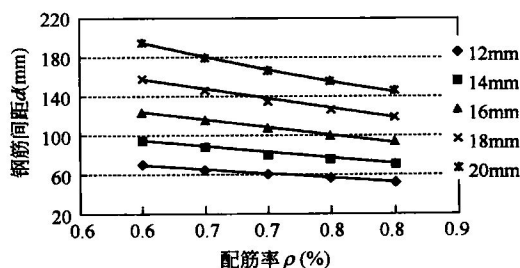


图 1-8 不同配筋率和钢筋直径下的钢筋间距