

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.02.009

引用格式:王阳,于建磊,赵乾文.连续配筋混凝土路面纵向配筋率影响因素研究[J].公路与汽运,2025,41(2):40-44.

Citation: WANG Yang, YU Jianlei, ZHAO Qianwen. Study on influencing factors of longitudinal reinforcement ratio of continuous reinforced concrete pavement[J]. Highways &amp; Automotive Applications, 2025, 41(2): 40-44.

## 连续配筋混凝土路面纵向配筋率影响因素研究\*

王阳, 于建磊, 赵乾文

(中冶南方城市建设工程技术有限公司, 湖北 武汉 430077)

**摘要:** 结合理论计算及工程经验,分析气候条件、混凝土材料、钢筋布设、层间接触条件等设计参数对连续配筋混凝土路面纵向配筋率的影响,研究连续配筋混凝土路面纵向配筋率的影响因素。结果表明,纵向配筋率验算的主要控制指标为裂缝宽度;年平均空气相对湿度、最大温差、混凝土线膨胀系数、纵向钢筋直径、层间摩阻系数等设计参数对连续配筋混凝土路面纵向配筋率有较大影响,其中纵向钢筋埋置深度的影响最显著,埋置深度减小 1 cm,配筋率降低 0.02 个百分点及以上。

**关键词:** 公路;连续配筋混凝土路面;纵向配筋率;设计参数;裂缝宽度;钢筋拉应力

中图分类号:U416.216

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2025)02-0040-05

连续配筋混凝土路面横向不设伸缩缝,能克服普通水泥混凝土板由众多接缝引起的行车不适及各种病害,其整体性、耐久性更好,是当前重载交通长寿命路面的主要结构形式之一<sup>[1]</sup>。JTG D40—2011《公路水泥混凝土路面设计规范》借鉴 AASHTO—2002 的研究成果,以横向裂缝宽度、横向裂缝间距、钢筋所承受拉应力作为连续配筋混凝土路面纵向配筋率的设计指标<sup>[2]</sup>。李盛等对现行规范中连续配筋混凝土路面纵向配筋方法进行分析,发现规范中计算公式对温度效应考虑不够全面<sup>[3]</sup>。张洪亮等指出影响连续配筋混凝土路面裂缝间距的重要参数包括混凝土强度、线膨胀系数、干缩及摩阻系数等<sup>[4]</sup>。刘朝晖等通过正交试验分析温缩和干缩对连续配筋混凝土路面纵向配筋的影响,发现混凝土线膨胀系数和温降幅值是影响连续配筋混凝土路面纵向配筋的重要因素<sup>[5]</sup>。王骁帆等研究了部分设计参数对连续配筋混凝土路面配筋指标的敏感性水平<sup>[6]</sup>。连续配筋混凝土路面纵向配筋设计参数较多,计算公式基于半经验半理论方法,有较多经验取值。为把握关键参数,本文结合规范中公式及自行开发的路面结构计算软件(CRCD)分析设计参数对连续配筋混凝土路面纵向配筋率的影响,为连续配筋混凝土路面设计及施工提供参考。

## 1 设计参数的选取

连续配筋混凝土路面纵向配筋率 $\rho$ 的验算标准为纵向钢筋埋置深度处的裂缝平均宽度 $b_j$ 不大于 0.5 mm、横向裂缝平均间距 $L_d$ 不大于 1.8 m、纵向钢筋所受拉应力 $\sigma_s$ 不超过其屈服强度,验算公式如下:

$$b_j = 1\ 000 L_d \left( \epsilon_{sh} + \alpha_c \Delta T_\zeta - \frac{c_2 f_t}{E_c} \right) \quad (1)$$

$$L_d = \frac{f_t - C \sigma_0 (1 - 2\zeta_s / h_c)}{\mu \gamma_c / 2 + \sigma_{cg} \rho / (c_1 d_s)} \quad (2)$$

$$\sigma_s = 2 f_t \frac{E_s}{E_c} - E_s [\Delta T_\zeta (\alpha_c - \alpha_s) + \epsilon_{sh}] + \frac{0.234 f_c L_d}{d_s c_1} \quad (3)$$

式中: $\epsilon_{sh}$ 为混凝土干缩应变; $\alpha_c$ 为混凝土线膨胀系数; $\Delta T_\zeta$ 为钢筋埋置深度处混凝土温度与硬化时温度的最大温差; $c_2$ 为黏结-滑移特性相关系数; $f_t$ 为混凝土抗拉强度; $E_c$ 为混凝土弹性模量; $C$ 为翘曲应力系数; $\sigma_0$ 为翘曲应力; $\zeta_s$ 为纵向钢筋埋置深度; $h_c$ 为混凝土面层厚度; $\mu$ 为层间摩阻系数; $\gamma_c$ 为混凝土重度; $\sigma_{cg}$ 为混凝土与钢筋间的最大黏结应力; $c_1$ 为混凝土与钢筋之间的黏结-滑移系数; $d_s$ 为纵

\* 基金项目:2021年湖北省地方标准制修订项目(T-Z-03-2021084);中冶南方重大研发项目(1942C13R13)

向钢筋直径; $E_s$ 为纵向钢筋弹性模量; $\alpha_s$ 为钢筋线膨胀系数; $f_c$ 为混凝土抗压强度。

综合分析气候、材料、层间接触等参数,影响纵向配筋率的主要因素包括年平均空气相对湿度 $\varphi_a$ 、钢筋埋置深度处混凝土温度与硬化时温度的最大温差 $\Delta T_\zeta$ 、混凝土面层顶面与底面间的最大负温度梯度 $T_g$ 、混凝土单位用水量 $w_0$ 、混凝土线膨胀系数 $\alpha_c$ 、混凝土抗压强度 $f_c$ 、混凝土抗拉强度 $f_t$ 、混凝土弹性模量 $E_c$ 、纵向钢筋屈服强度 $f_{sy}$ 、纵向钢筋弹性模量 $E_s$ 、纵向钢筋直径 $d_s$ 、纵向钢筋埋置深度 $\zeta_s$ 、层间摩阻系数 $\mu$ 。

本文以武汉市某道路连续配筋混凝土路面结构(26 cm 连续配筋混凝土+36 cm 水泥稳定碎石+15 cm 级配碎石)为例,分析主要设计参数对连续配筋混凝土路面纵向配筋率的影响。设计参数取值见表 1。

表 1 武汉市某道路连续配筋混凝土路面设计参数取值

设计参数	参数取值
年平均空气相对湿度 $\varphi_a/\%$	75
最大温差 $\Delta T_\zeta/^\circ\text{C}$	30
最大负温度梯度 $T_g/(^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1})$	29
混凝土单位用水量 $w_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 600
混凝土线膨胀系数 $\alpha_c/(10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1})$	7
混凝土抗压强度 $f_c/\text{MPa}$	40
混凝土抗拉强度 $f_t/\text{MPa}$	3.22
混凝土弹性模量 $E_c/\text{GPa}$	31
纵向钢筋屈服强度 $f_{sy}/\text{MPa}$	400
纵向钢筋弹性模量 $E_s/\text{GPa}$	200
纵向钢筋直径 $d_s/\text{mm}$	18
纵向钢筋埋置深度 $\zeta_s/\text{cm}$	10
层间摩阻系数 $\mu$	8.9

## 2 设计参数影响分析

### 2.1 气候条件的影响

#### 2.1.1 年平均空气相对湿度的影响

年平均空气相对湿度对混凝土干缩应变有较大影响。不同地区年平均空气相对湿度差异较大,如上海、广州、武汉等城市的年平均空气相对湿度为 70%~80%,西安、昆明和郑州等城市的年平均空气相对湿度为 60%~70%,北京、济南、太原等城市的年平均空气相对湿度为 50%~60%,银川、呼和浩

特等城市的年平均空气相对湿度低于 50%。年平均空气相对湿度对连续配筋混凝土路面纵向配筋率的影响见表 2。

表 2 年平均空气相对湿度对连续配筋混凝土路面纵向配筋率的影响

年平均空气相对湿度/ $\%$	配筋率/ $\%$	裂缝宽度/ $\text{mm}$	裂缝间距/ $\text{m}$	钢筋拉应力/ $\text{MPa}$
75	0.72	0.491	1.570	375.855
65	0.75	0.486	1.244	348.565
55	0.77	0.492	1.092	328.855
45	0.79	0.488	0.989	312.471

由表 2 可知:年平均空气相对湿度对连续配筋混凝土路面纵向配筋率的影响较显著,其中裂缝宽度为配筋率验算的主要控制指标。年平均空气相对湿度增加 5 个百分点,配筋率约降低 0.01 个百分点,主要是由于湿度增大会减小混凝土的干缩应变,对横向裂缝控制有利。

#### 2.1.2 最大温差的影响

钢筋埋置深度处混凝土温度和硬化时温度的最大温差与混凝土的温缩应变成正比,其值可近似取路面施工月份日最高气温的月平均值与一年中最冷月份日最低气温的月平均值之差。高温季节施工时最大温差较大,低温季节施工时最大温差较小。最大温差对连续配筋混凝土路面纵向配筋率的影响见表 3。

表 3 最大温差对连续配筋混凝土路面纵向配筋率的影响

最大温差/ $^\circ\text{C}$	配筋率/ $\%$	裂缝宽度/ $\text{mm}$	裂缝间距/ $\text{m}$	钢筋拉应力/ $\text{MPa}$
40	0.74	0.496	1.310	372.972
35	0.73	0.493	1.427	374.556
30	0.72	0.491	1.570	375.855
25	0.71	0.491	1.747	376.704
20	0.72	0.446	1.788	368.765
15	0.74	0.386	1.777	356.573
10	0.77	0.322	1.739	340.622

由表 3 可知:最大温差大于 25  $^\circ\text{C}$  时,最大温差降低 5  $^\circ\text{C}$ ,纵向配筋率减小 0.01 个百分点;最大温差小于 25  $^\circ\text{C}$  时,降低最大温差,纵向配筋率增大。这与温差小使温缩效应减小、对混凝土开裂控制有

利的基本理论不符,也说明规范中包含最大温差参数的混凝土和钢筋之间黏结-滑移系数经验公式考虑温度效应不够全面,不适用于最大温差小于 25 °C 的情况,与文献[3]的结论一致。最大温差与路面施工月份有关,而设计阶段难以明确后续路面工程具体施工月份,同时连续配筋混凝土层的施工工期可能需要几个月及跨月。因此,设计阶段最大温差取值时可考虑路面在施工计划中最高温月份施工。

### 2.1.3 最大负温度梯度的影响

混凝土面层顶面与底面间的最大负温度梯度影响混凝土板顶面与底面间的当量应变差,进而影响混凝土板的翘曲应力<sup>[7]</sup>,其参数值可按工程所在地区最大正温度梯度的 1/3 取用。中国各公路自然区划的最大正温度梯度为 83~98 °C/m<sup>[8]</sup>,在该范围内调整最大负温度梯度取值,连续配筋混凝土路面的纵向配筋率见表 4。

表 4 最大负温度梯度对连续配筋混凝土路面纵向配筋率的影响

最大负温度梯度/(°C·m <sup>-1</sup> )	配筋率/%	裂缝宽度/mm	裂缝间距/m	钢筋拉应力/MPa
33	0.72	0.484	1.549	374.565
31	0.72	0.488	1.560	375.245
29	0.72	0.491	1.570	375.855
27	0.72	0.496	1.584	376.694

最大负温度梯度的取值范围较小。由表 4 可知:最大负温度梯度对连续配筋混凝土路面纵向配筋率及裂缝宽度、裂缝间距、钢筋拉应力的影响均较小。

## 2.2 混凝土材料的影响

### 2.2.1 混凝土单位用水量的影响

连续配筋混凝土路面混凝土配合比设计时单位用水量为 140~170 kg/m<sup>3</sup>。改变混凝土单位用水量,连续配筋混凝土路面的纵向配筋率见表 5。

表 5 混凝土单位用水量对连续配筋混凝土路面纵向配筋率的影响

混凝土单位用水量/(kg·m <sup>-3</sup> )	配筋率/%	裂缝宽度/mm	裂缝间距/m	钢筋拉应力/MPa
1 400	0.72	0.477	1.728	384.665
1 500	0.72	0.483	1.645	380.370
1 600	0.72	0.491	1.570	375.855
1 700	0.72	0.499	1.496	370.688

由表 5 可知:混凝土单位用水量对连续配筋混凝土路面纵向配筋率的影响较小,对裂缝宽度及裂缝间距有一定影响。单位用水量降低,会减小混凝土的干缩应变,有利于控制裂缝宽度,与增大湿度的作用类似。设计阶段难以准确选定混凝土单位用水量,可参考当地拌和站混凝土配合比设计经验选取。

### 2.2.2 混凝土线膨胀系数的影响

线膨胀系数作为混凝土的热工参数,与混凝土中粗集料的岩石类型直接相关,其值一般为  $7 \times 10^{-6} \sim 12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,其中石灰岩类粗集料的线膨胀系数较小,石英岩、砂岩类粗集料的线膨胀系数较大。混凝土线膨胀系数对连续配筋混凝土路面纵向配筋率的影响见表 6。

表 6 混凝土线膨胀系数对连续配筋混凝土路面纵向配筋率的影响

混凝土线膨胀系数/( $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )	配筋率/%	裂缝宽度/mm	裂缝间距/m	钢筋拉应力/MPa
7	0.72	0.491	1.570	375.855
9	0.73	0.495	1.340	357.925
10	0.74	0.489	1.229	346.712
11	0.75	0.484	1.133	335.131
12	0.75	0.499	1.090	327.983

线膨胀系数与混凝土温缩应变和最大温度应力成正比,对混凝土面层的厚度计算及配筋率验算均有较大影响。由表 6 可知:变化混凝土线膨胀系数,配筋率验算中裂缝宽度为主要控制指标,而钢筋拉应力指标有较大富余。混凝土中粗集料采用线膨胀系数较大的岩石类型,不仅对厚度计算不利,还会增大连续配筋混凝土路面的纵向配筋率。建议连续配筋混凝土选用线膨胀系数较小的石灰岩类粗集料。

### 2.2.3 混凝土抗压强度的影响

混凝土抗压强度、弯拉强度、抗拉强度、弹性模量等物理力学性能之间存在相关性,相关标准也给出了弯拉强度、抗拉强度、弹性模量与抗压强度对应关系的回归公式<sup>[9]</sup>。综合考虑指标的关联性,采用抗压强度作为混凝土物理力学性能指标的代表参数。连续配筋混凝土的弯拉强度标准值不小于 5.0 MPa,抗压强度一般为 35~45 MPa<sup>[10]</sup>,相应纵向配筋率见表 7。

抗压强度越大,混凝土与钢筋之间的黏结应力越大。由表 7 可知:混凝土抗压强度增大会对连续

表 7 混凝土抗压强度对连续配筋混凝土路面纵向配筋率的影响

混凝土抗压强度/MPa	配筋率/%	裂缝宽度/mm	裂缝间距/m	钢筋拉应力/MPa
35	0.72	0.480	1.513	321.891
40	0.72	0.491	1.570	375.855
45	0.73	0.395	1.268	399.336

配筋混凝土路面纵向配筋率产生不利影响。抗压强度不大于 40 MPa 时,裂缝宽度为配筋率验算的主要控制指标;抗压强度大于 40 MPa 时,钢筋拉应力为配筋率验算的控制指标,而裂缝宽度指标有较大富余。因此,连续配筋混凝土路面宜采用 C40 及以下强度等级的混凝土。

### 2.3 钢筋布设的影响

目前连续配筋混凝土路面纵向钢筋普遍采用 HRB400 普通热轧钢筋,其屈服强度特征值为 400 MPa,弹性模量参考值为 200 GPa。钢筋布设主要影响因素包括纵向钢筋直径和埋置深度。

#### 2.3.1 纵向钢筋直径的影响

规范推荐钢筋直径为 12~20 mm。在配筋率确定的情况下,钢筋直径与间距成正比。考虑连续配筋混凝土路面最小配筋率及混凝土充分振捣密实的要求,纵向钢筋间距应不大于 25 cm,同时不小于集料最大粒径的 2.5 倍或 10 cm。混凝土中粗集料最大粒径通常为 31.5 mm,最小间距按 10 cm 控制。采用直径 12 mm 的钢筋,按最小配筋率推算的钢筋间距难以满足要求。因此,重点分析钢筋直径为 14~20 mm 对纵向配筋率的影响(见表 8)。

表 8 纵向钢筋直径对连续配筋混凝土路面纵向配筋率的影响

纵向钢筋直径/mm	配筋率/%	裂缝宽度/mm	裂缝间距/m	钢筋拉应力/MPa
14	0.70	0.267	0.887	397.173
16	0.69	0.389	1.255	397.389
18	0.72	0.491	1.570	375.855
20	0.80	0.491	1.570	337.175

由表 8 可知:采用较小钢筋直径对降低连续配筋混凝土路面纵向配筋率更有利,主要是因为配筋率相同、钢筋直径较小时,钢筋间距、钢筋数量增多,钢筋表面与混凝土的接触面积增加,黏结力增大。

纵向钢筋直径为 14~16 mm 时,钢筋拉应力为配筋率验算的控制指标,裂缝宽度指标有较大富余。综合来看,采用直径 18 mm 的纵向钢筋较优。结合不同板厚连续配筋混凝土路面纵向配筋率验算结果,考虑最小间距要求,板厚为 22 cm 时,纵向钢筋直径宜为 16~18 mm;板厚为 24 cm 时,纵向钢筋直径宜为 16~20 mm;板厚为 26~28 cm 时,纵向钢筋直径宜为 18~20 mm。

#### 2.3.2 纵向钢筋埋置深度的影响

JTG D40—2011《公路水泥混凝土路面设计规范》要求纵向钢筋距板顶面不小于 90 mm<sup>[2]</sup>,主要是考虑到滑模摊铺机施工时钢筋网距离板顶面过近会造成振捣困难。CJJ 169—2012《城镇道路路面设计规范》要求纵向钢筋设在板顶面下 1/3~1/2 厚度内<sup>[11]</sup>。不同纵向钢筋埋置深度下连续配筋混凝土路面的纵向配筋率见表 9。

表 9 纵向钢筋埋置深度对连续配筋混凝土路面纵向配筋率的影响

纵向钢筋埋置深度/cm	配筋率/%	裂缝宽度/mm	裂缝间距/m	钢筋拉应力/MPa
6	0.63	0.491	1.570	375.855
8	0.68	0.478	1.531	373.430
10	0.72	0.491	1.570	375.855
12	0.77	0.481	1.538	373.875
13	0.79	0.486	1.554	374.875

纵向连续钢筋主要用于控制横向裂缝间距和宽度,其埋置深度对连续配筋混凝土路面纵向配筋率的影响较显著。由表 9 可知:钢筋埋置深度与横向裂缝宽度紧密相关,埋置深度减小 1 cm,配筋率降低 0.02 个百分点及以上;纵向钢筋的位置越靠近板顶,不仅可降低配筋率,横向裂缝宽度也越小。目前连续配筋混凝土路面多采用三辊轴施工工艺,布料后采用排式振捣机或手持式振捣棒穿过钢筋网,间歇插入混凝土内部进行振捣,振捣受钢筋网位置影响较小,纵向钢筋有条件往上布置,设计中可按照设置在板顶面下 1/3 厚度处控制。

### 2.4 层间接触条件的影响

连续配筋混凝土面层与基层间的摩阻系数因基层类型而异,采用沥青混合料基层或夹层时摩阻系数较小,采用水泥稳定碎石、贫混凝土基层时摩阻系数较大。层间摩阻系数对连续配筋混凝土路面纵向

配筋率的影响见表 10。

表 10 层间摩阻系数对连续配筋混凝土路面纵向配筋率的影响

层间摩阻系数	配筋率/%	裂缝宽度/mm	裂缝间距/m	钢筋拉应力/MPa
2.5	0.75	0.494	1.578	376.336
4.5	0.74	0.495	1.582	376.575
7.5	0.73	0.484	1.547	374.440
8.9	0.72	0.491	1.570	375.855
15.0	0.69	0.492	1.572	375.975
20.0	0.67	0.483	1.546	374.378

由表 10 可知:层间摩阻系数越大,连续配筋混凝土路面纵向配筋率越小,裂缝宽度为配筋率验算的主要控制指标。混凝土层底的摩阻力与层间摩阻系数成正比,混凝土自两端向中央收缩时,层底摩阻力为作用于混凝土截面的拉力,拉力越大,混凝土收缩开裂越困难,相应配筋率减小。

### 3 结论

(1) 年平均空气相对湿度、最大温差、混凝土线膨胀系数、纵向钢筋直径、纵向钢筋埋置深度、层间摩阻系数等设计参数对连续配筋混凝土路面纵向配筋率有较大影响,其中纵向钢筋埋置深度对配筋率的影响最显著,埋置深度减小 1 cm,配筋率降低 0.02 个百分点及以上。

(2) 仅在连续配筋混凝土抗压强度较大或纵向钢筋直径较小时,钢筋拉应力为连续配筋混凝土配筋率验算的控制指标,其余情况下配筋率验算的主要控制指标均为裂缝宽度。

(3) 连续配筋混凝土路面宜避开最高温月份施工。在满足弯拉强度标准的情况下,混凝土抗压强度不宜大于 C40,混凝土中粗集料宜选用线膨胀系

数较小的石灰岩。

(4) 推荐连续配筋混凝土路面采用直径 18 mm 的纵向钢筋,同时纵向钢筋尽可能往上布置,按照设置在板顶面下 1/3 厚度处控制,以充分发挥其控制裂缝的作用。

### 参考文献:

- [1] 张洪亮,左志武.连续配筋混凝土路面[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [2] 中交公路规划设计院有限公司.公路水泥混凝土路面设计规范:JTG D40—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [3] 李盛,刘朝晖,李宇峙.连续配筋混凝土路面纵向配筋方法分析[J].公路,2013,58(3):20-25.
- [4] 张洪亮,郝景贤,王衍辉,等.基于参数变异性的连续配筋混凝土路面横向裂缝分布预估方法[J].长安大学学报(自然科学版),2014,34(6):1-6.
- [5] 刘朝晖,王骁帆,李盛,等.温缩和干缩对连续配筋混凝土路面纵向配筋的影响[J].中国公路学报,2016,29(11):1-9.
- [6] 王骁帆,苏颖奇,刘朝晖,等.连续配筋混凝土路面配筋设计及敏感性分析[J].公路,2017,62(2):1-5.
- [7] 范红枝,麦研,王勇.混凝土构件温度与收缩应力敏感参数筛选方法[J].中国港湾建设,2024,44(6):14-20.
- [8] 徐向锋,马禄爱,张峰,等.混凝土单箱多室箱梁温度梯度地域差异性[J].交通运输工程学报,2024,24(1):185-201.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [10] 郭立贤,任彦飞,邱冰,等.C35 机制砂路面混凝土的制备及性能研究[J].公路与汽运,2022(5):44-46+73.
- [11] 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司.城镇道路路面设计规范:CJJ 169—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.

收稿日期:2024-02-27