

文章编号:1674-2974(2016)03-0008-07

预制 RPC 柱降低大跨 PC 刚构桥跨中长期下挠分析*

张阳^{1†}, 鲍超¹, 刘榕²

(1. 湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 湖南长沙 410082;

2. 湖南省交通规划勘察设计院, 湖南长沙 410008)

摘要:为解决大跨 PC 刚构桥跨中长期过度下挠的问题,提出了在刚构桥负弯矩区箱梁底板、跨中顶板加入预制 RPC(活性粉末混凝土)柱形成局部 RPC-NC(普通混凝土)复合截面的方法.对 RPC-NC 复合截面柱进行有限元分析,探讨了 RPC 对减小复合截面柱收缩徐变效应的作用以及 RPC 与 NC 间应力重分布规律,同时分析了剪力键受力性能.提出预制 RPC 柱应用于实桥的设计方案,并通过有限元对比分析加入预制 RPC 柱对全桥应力、跨中下挠等的影响.结果表明,加入预制 RPC 柱能明显降低负弯矩区结构转角和 RPC 附近 NC 的压应力,使结构成桥后的跨中长期下挠减小 53.9%.

关键词:长期下挠;收缩徐变;活性粉末混凝土;RPC-普通混凝土复合截面;内力重分布

中图分类号:U443.35

文献标识码:A

Analysis of Precast RPC Column on Reducing Long-term Mid-span Deflection of Rigid Frame Bridge

ZHANG Yang^{1†}, BAO Chao¹, LIU Rong²

(1. Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China;

2. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute, Changsha, Hunan 410008, China)

Abstract: To reduce long-term and excessive mid-span deflections of long-span PC rigid frame bridges, a method of adding precast RPC (reactive powder concrete) columns into the bottom plate of the negative moment region and the mid-span roof of the rigid frame bridge to form RPC-NC (Normal Concrete) composite section was proposed. The RPC-NC composite column was analyzed to investigate the influence of RPC on reducing creep and shrinkage effects of the composite column and the stress redistribution between RPC and NC as well as the mechanical capability of shear bond. Based on the above research, design scheme of prefabricated RPC column used in actual bridge was put forward, and then the influence of the precast RPC column on the whole bridge stress and the mid-span deflection was analyzed by finite element method. The results demonstrate that the added precast RPC obviously reduces the rotation of the negative moment region and the compression stress of NC near RPC, which decreases the long-term mid-span de-

* 收稿日期:2015-02-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578226), National Natural Science Foundation of China (51578226); 湖南省交通运输厅科技进步与创新项目(201425); 广东省交通运输厅科技项目(2011-02-036)

作者简介:张阳(1971-),男,辽宁辽阳人,湖南大学副教授,博士

† 通讯联系人, E-mail:448665466@qq.com

flection after the construction of the rigid frame bridge by 53.9%.

Key words: long-term deflection; creep and shrinkage; reactive powder concrete; RPC-NC composite section; internal force redistribution

大跨PC刚构桥由于跨越能力强、经济性较好、行车平顺等优点得到广泛应用,但其长期下挠的问题十分突出^[1],同时还与开裂形成恶性循环,严重影响了结构的耐久性和运营安全性.研究表明受压混凝土收缩徐变、腹板斜裂缝是刚构桥长期下挠的主要原因^[2-3],而腹板斜裂缝问题已经通过二次张拉竖向预应力技术得到有效的解决^[4],因此有效降低受压混凝土收缩徐变变形是解决大跨PC刚构桥长期下挠的“治本”方法.

RPC是一种具有超高强度的水泥基复合材料,高温蒸养后收缩极小、徐变系数仅为普通混凝土的10%~20%^[5-7].由于RPC与普通混凝土在收缩徐变性质上的巨大差异,RPC-NC复合截面必然会发生内力重分布的现象^[8].本文在详细分析RPC-NC复合截面柱徐变变形、应力重分布、界面剪力的基础上,以某实桥为例提出了在刚构桥受压高应力区加入预制RPC柱形成局部RPC-NC复合截面的方案,研究了加入RPC对全桥跨中长期下挠的影响.研究表明,该方案不仅有效降低了RPC附近NC的

压应力,同时也大幅减小了结构的长期下挠.

1 有限元模型及收缩、徐变的模拟

1.1 有限元模型

为了分析RPC对收缩徐变效应的影响,设计了5根270 mm×250 mm×1 000 mm混凝土柱(图1),采用ANSYS软件进行有限元分析.不同混凝土柱的构造与加载压力如表1所示.复合截面柱有限元模型如图1所示.RPC弹性模量 4.2×10^4 MPa,泊松比0.2,容重25 kN/m³.有限元采用Solid45单元模拟预制RPC柱、外包C50混凝土,Beam188单元模拟钢筋剪力键.有限元模型中,预制RPC柱、外包C50混凝土界面分离,剪力键钢筋节点耦合附近的RPC、C50混凝土单元.边界条件:在复合截面柱的纵向一端施加UX,UY,UZ 3个方向的平动自由度约束,另一端根据复合截面C50、RPC的抗压刚度(EA)分配压力并在复合截面C50、RPC上分别施加均布面荷载.

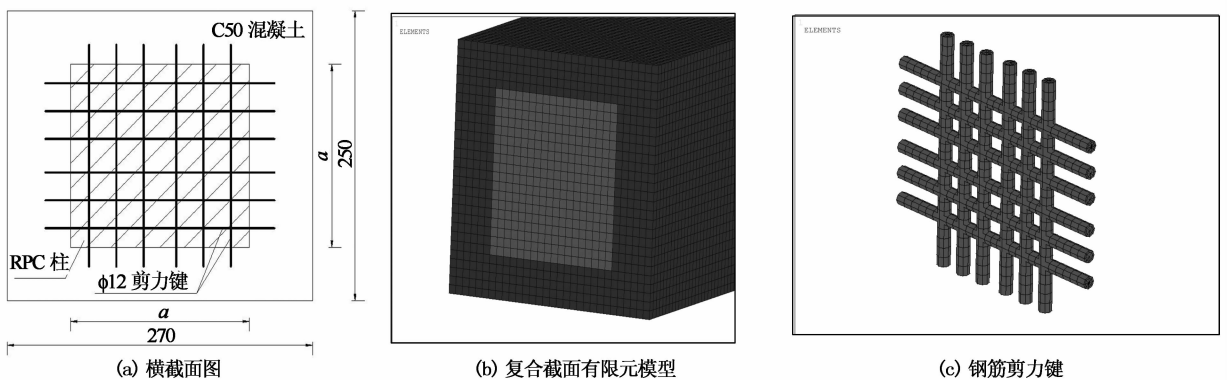


图1 复合截面柱横截面图及有限元模型图(单位:mm)

Fig. 1 Cross section and finite model of the composite section column (unit: mm)

表1 各柱参数表
Tab. 1 Parameters of each column

柱编号	RPC 占总面积比例/%	压力/kN	C50 初始应力/MPa	a/mm	剪力键数目	加载龄期/d	
						C50	RPC
1#	50	1 050	14.0	184	28	28	42
2#	40	1 050	14.3	164	24	28	42
3#	30	1 050	14.6	142	20	28	42
4#	20	1 050	14.9	116	20	28	42
5#	0	1 050	15.6	—	—	28	—

1.2 收缩和徐变的模拟

在 ANSYS 软件现有的功能中,没有专门针对混凝土徐变的计算,可以利用 ANSYS 的金属蠕变 Creep 准则来考虑^[9]. ANSYS 蠕变分析有“隐式 implicit creep”和“显式 explicit creep”两种方法,本文采用 $C_6=0$ 显式方程进行混凝土徐变分析.

$$\dot{\epsilon} = C_1 \sigma^{C_2} t^{C_3} e^{-C_4/T} \quad (1)$$

式中: ϵ 为 t 时刻混凝土应变; σ 为 t 时刻混凝土应力; T 为 t 时刻环境温度; $C_1 \sim C_4$ 为常系数. 取 $C_2=1, C_3=0, C_4=0$ 代入式(1),得

$$\dot{\epsilon} = C_1 \sigma \quad (2)$$

由徐变系数定义式知:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\sigma d\varphi}{E dt} \quad (3)$$

式中: φ 为混凝土徐变系数; E 为混凝土弹性模量. 将式(3)代入式(2),可得:

$$C_1 = \frac{d\varphi}{dt} \frac{1}{E} = \frac{\varphi_{n+1} - \varphi_n}{t_{n+1} - t_n} \frac{1}{E} \quad (4)$$

在每个时间步长 $t_{n+1} - t_n$ 内,假定徐变应变化速率为常数,这样通过改变材料参数 C_1 来实现对混凝土徐变的模拟. 分析中普通混凝土徐变系数基于国际预应力混凝土协会和欧洲混凝土协会 CEB-FIP(1990)模式,由文献[10]得到. RPC 的徐变系数取为同条件下 C50 混凝土徐变系数的 15%.

C50 混凝土的收缩采用降温法来模拟^[11],RPC 的收缩可忽略不计. 施加的温降荷载计算公式为:

$$\epsilon_{cs} = \alpha \Delta T \quad (5)$$

式中: ϵ_{cs} 为普通混凝土收缩应变; α 为普通混凝土膨胀系数; ΔT 为降温值.

2 有限元结果分析

2.1 徐变变形与名义徐变系数

有限元分析得到各柱徐变变形量(考虑了混凝土收缩徐变和应力重分布,相当于加载后的后期变形,复合截面柱中 C50,RPC 的徐变变形均列出)和名义徐变系数分别如图 2、图 3 和表 2 所示. 其中名义徐变系数计算如下式:

$$\varphi = \Delta c / \Delta e \quad (6)$$

式中: Δc 为徐变变形量; Δe 为初始弹性变形量. 对于复合截面柱 1#-4# 均取 C50 的变形量.

由图 2、图 3 和表 2 可知:

1)5# 柱(全 C50 柱)前 200 d 徐变变形发展较快,约占 448 d 徐变变形的 83%,448 d 时徐变仍有

一定的发展;1#-4# 柱(复合截面柱)前 200 d 的徐变变形约占 448 d 的 90%,448 d 时徐变趋于平缓. 这表明加入 RPC 柱后,复合截面柱的徐变将更快地趋于平缓,对于后期的徐变变形起到一定的控制作用.

2)普通混凝土加入预制 RPC 柱形成复合截面后,其徐变变形和名义徐变系数大幅降低并且当 RPC 面积占复合截面总面积的 20%~40%时,复合截面柱徐变变形、徐变系数基本随着 RPC 比例的增加而线性减小,当 RPC 面积占 50%时,徐变变形和徐变系数下降速率减小.

3)有限元结果表明 1#-4# 复合截面柱的 RPC 和 C50 的竖向压缩量值很接近. 在约 15 MPa 的应力水平下,1 m 长的复合截面柱 RPC 和 C50 竖向压缩量差值最大仅为 0.04 mm,说明 RPC 和 C50 界面滑移量很小,剪力键工作正常.

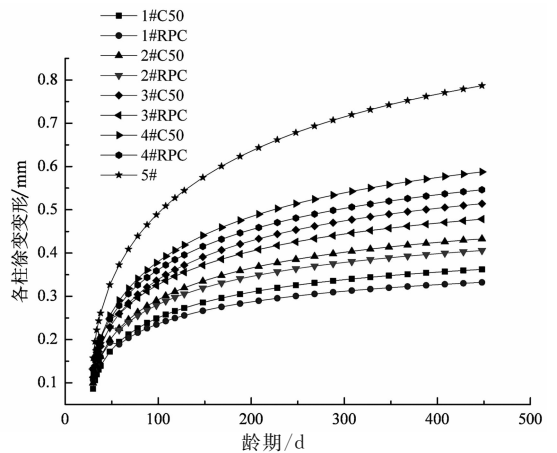


图 2 各柱徐变变形曲线
Fig. 2 Curve of creep deformation of each column

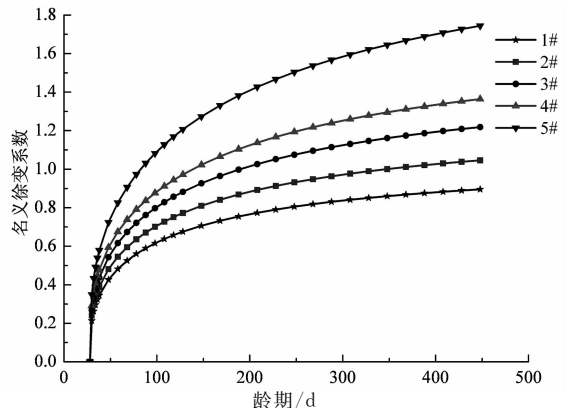


图 3 名义徐变系数
Fig. 3 Nominal creep coefficient

表 2 龄期 448 d 时各柱徐变变形和徐变系数
Tab.2 Creep deformation and creep coefficient of each column when concrete age equals 448 d

编号	徐变变形 /mm	降幅 /%	徐变系数	系数降幅 /%
1#	0.362	53.9	0.89	48.7
2#	0.432	45.0	1.04	40.0
3#	0.514	34.6	1.22	30.1
4#	0.587	25.3	1.36	21.8
5#	0.786	0	1.74	0

注:徐变系数和变形降幅均相对于 5#(全 C50 柱).

2.2 复合截面内力重分布及界面剪力

复合截面柱的应力及钢筋剪力键剪应力分别如图 4、图 5 和表 3 所示。

1)由于收缩徐变引起的内力重分布,复合截面中 C50 的应力会逐渐减小.当 RPC 面积占复合截面总面积的 20%~40%时, RPC 面积比例每增加 10%, C50 应力减小 1.7 MPa,而 RPC 面积占 50%时相对于 40%的 C50 应力仅减小 1.3 MPa,下降速率略有减小。

2)复合截面柱重分布内力全部由剪力键承担.按照图 1 所示布置剪力键(此时剪力键钢筋横截面积占复合柱横截面积的 4%)时,龄期为 448 d 时刻 1#—4# 柱剪力键钢筋剪应力最大值分别为 82.4, 84.5, 96.4, 91.7 MPa,应力较小。

由以上分析可知,当 RPC 占复合截面总面积的 40%时, RPC 降低普通混凝土徐变效应的作用较为明显,同时也较为合理、经济,而且超过 40%时在实桥应用中也不易布置(普通钢筋、预应力束的干扰);剪力键钢筋横截面积占复合截面柱横截面积的 4%时,复合截面 RPC 和 C50 混凝土界面无明显滑移,剪力键最大剪应力较小,剪力键工作正常。

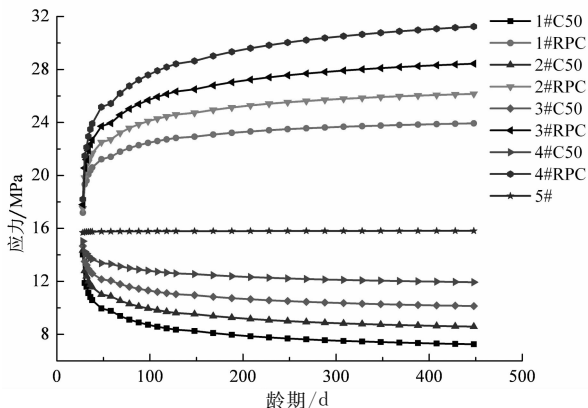


图 4 应力时程曲线

Fig. 4 Time-history curve of stress of the column

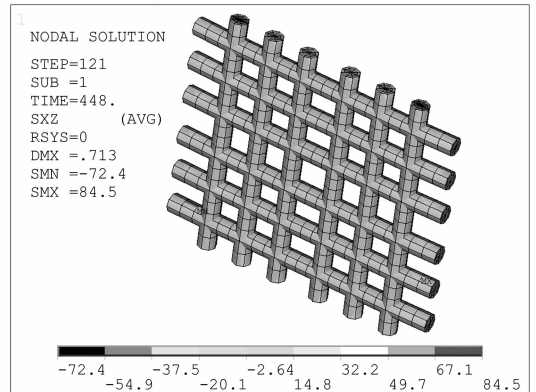


图 5 龄期为 448 d 钢筋剪应力图示例(2# 柱)
Fig. 5 Shear stress of the steel when concrete age equals 448 d (column 2#)

表 3 龄期 448 d 时各柱应力与剪力键剪应力
Tab.3 Stress of each column and the shear stress of the steel shear bond when concrete age equals 448 d

柱编号	C50 应力 /MPa	相对于初始应力 降幅/%	RPC 应力 /MPa	相对于初始应力 增幅/%	剪力键最大剪应力 /MPa
1#	7.3	47.9	23.9	40.2	82.3
2#	8.6	39.9	26.2	50.5	84.5
3#	10.1	30.8	28.4	60.0	96.4
4#	11.9	20.1	31.2	72.0	91.7
5#	15.6	0	—	—	—

3 实桥算例分析

显然大跨 PC 刚构桥全部采用 RPC 降低收缩徐变效应的效果最好,但 RPC 存在造价较高(约 7 000 元/m³)、需高温养护等施工中不易实现的问题.所以为了最大限度地达到理想效果并降低造价,本文采用在大跨 PC 刚构桥受压高应力区加入若干 RPC 预制柱的方案以期降低该部位的后期变形。

3.1 方案设计

以某高速公路的一座特大桥为依托进行方案设计.该桥跨径布置为 120 m+230 m+120 m,共分 27 个悬臂节段,单箱单室截面,顶板宽 12 m,梁高 4.4~13.8 m,顶板厚 0.3~0.6 m,底板厚 0.32~1.2 m.主梁采用 C55.全桥纵向预应力布置为:0—21 号块布置 88 束 25φ^s15.2 前期腹板下弯束,0—27 号块布置 132 束 27φ^s15.2 前期顶板束,中跨 16 号块—中跨合拢段布置 22 束 25φ^s15.2 后期底板束,2 束 19φ^s15.2 后期顶板束,边跨布置 16 束 19φ^s15.2 后期底板束,8 束 27φ^s15.2 后期顶板束。

加预制 RPC 柱的方案如图 6 所示,在 0—9 号

块的箱梁底板及 25—27 号块、跨中合拢段的箱梁顶板加预制 RPC 柱面积比为 40%。这样这些区域的底板、顶板形成了局部的 RPC-NC 复合截面。RPC

按悬臂节段分段预制,相邻节段的 RPC 之间为受压接头,安全性较高,两者拟采用胶粘连接。RPC 和 C55 混凝土之间拟采用钢筋剪力键连接。

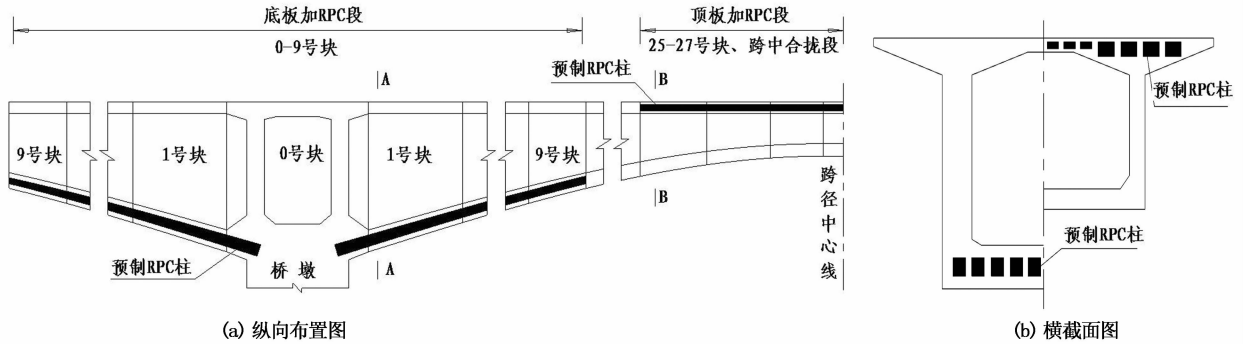


图 6 预制 RPC 柱布置示意图

Fig. 6 Longitudinal, cross-sectional diagram of precast RPC column arrangement

3.2 全桥分析有限元模型

采用桥梁空间软件 Midas Civil 分别建立了全普通混凝土、采用上述加预制 RPC 柱方案的混凝土刚构桥有限元模型,并进行对比分析。如图 7 所示,两模型均采用梁单元模拟。成桥边界条件:墩底固结,两边跨支点处仅约束竖向平动自由度。预制 RPC 柱与普通混凝土之间的耦合采用程序提供的施工阶段联合截面的方法模拟,先激活预制 RPC 截面,再激活普通混凝土截面形成联合截面。这种方法既实现了预制 RPC 柱与普通混凝土之间的耦合,又考虑了混凝土的收缩徐变等时间依存效应^[12]。

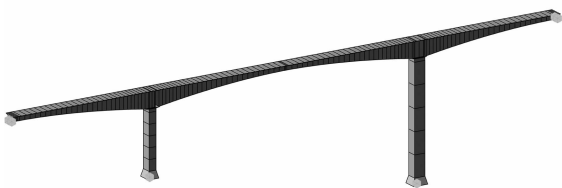


图 7 全桥有限元模型

Fig. 7 Finite model of the whole bridge

3.3 计算结果与分析

由于成桥前结构的竖向位移可以通过施工预拱度调节,所以比较结构总竖向位移没有明显工程意义,本文仅比较成桥后 10 年收缩徐变引起的竖向位移。结构转角与应力等由于不是桥梁线形的主控因素,为了表现加入 RPC 柱后结构的总变化,所以比较成桥后结构的总转角与应力。

3.3.1 位移结果(竖向位移与转角)比较

全普通混凝土及加 RPC 柱混凝土刚构桥 10 年收缩徐变引起的竖向位移、10 年收缩徐变后结构转角 R_y (R_y 为绕有限元模型整体 Y 轴即结构横桥向

的转角,且逆时针转动为正)分别如图 8 和图 9 所示。最大位移及转角比较如表 4 所示。

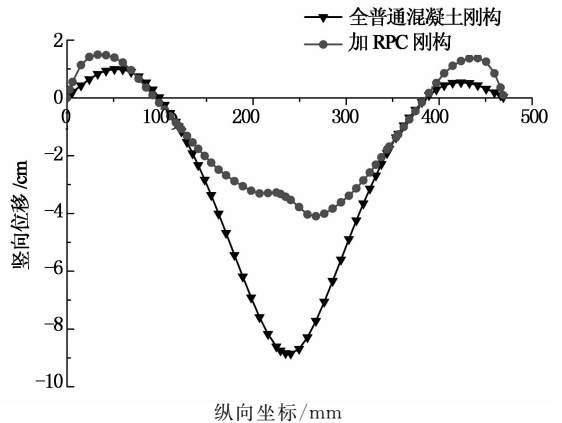


图 8 10 年收缩徐变引起的刚构桥竖向位移

Fig. 8 Vertical displacement of the rigid frame bridge caused by ten years' creep and shrink of concrete

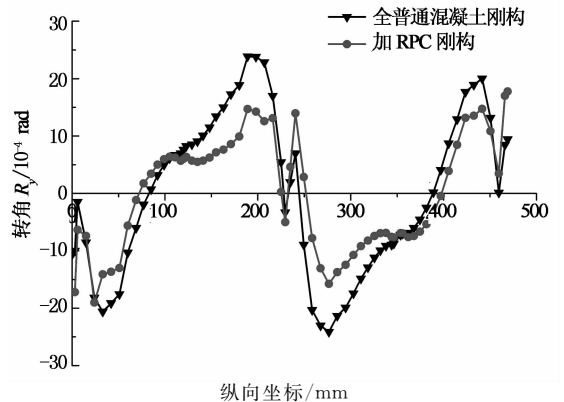


图 9 10 年收缩徐变后刚构桥转角

Fig. 9 Rotation R_y of the rigid frame bridge after ten years' creep and shrink of concrete

表4 10年收缩徐变后刚构桥位移及转角比较
Tab.4 Comparison of displacement of the rigid frame bridge after ten years' creep and shrink

	收缩徐变引起的位移/cm	负弯矩区结构转角 $R_y/10^{-4}$ rad
全普通混凝土刚构	-8.9	25.2
加RPC刚构	-4.1	14.9
降低比例/%	53.9	40.9

由图8和图9可知,加入RPC柱后,10年收缩徐变引起的结构竖向位移和收缩徐变后负弯矩区结构转角均大幅减小.由表4可知,全普通混凝土刚构桥、加RPC柱刚构桥收缩徐变引起的竖向位移最大分别为-8.9和-4.1 cm,负弯矩区结构转角 R_y 最大分别为 25.2×10^{-4} 和 14.9×10^{-4} rad.加入RPC柱后,刚构桥收缩徐变引起的竖向位移和10年收缩徐变后负弯矩区结构转角分别减小了53.9%和40.9%.这是由于加入RPC后,在刚构桥负弯矩区箱梁底板、跨中附近箱梁顶板形成了局部的RPC-NC复合截面,此区域结构的有效弹性模量变大,受

压徐变变形减小,进而减小了刚构桥负弯矩区的结构转角、跨中附近的竖向位移,从而导致了跨中长期徐变下挠的减小.

3.3.2 应力比较

表5为10年收缩徐变后刚构桥压应力比较.由表5可知,对于中跨跨中梁顶普通混凝土压应力,由于此处局部RPC-NC复合截面发生应力重分布,故此处压应力减小了41.7%,而梁底普通混凝土应力略有增加;中跨1/4跨梁顶普通混凝土压应力略有减小,梁底普通混凝土压应力减小了17.3%;0号块梁顶普通混凝土应力基本不变,而对于梁底普通混凝土压应力,由于此处加入RPC柱发生应力重分布,故此处压应力减小了22.3%变为11.8 MPa.由以上分析可知,加入RPC后,全桥中跨跨中梁底普通混凝土压应力略有增加,1/4跨、0号块梁底普通混凝土压应力减小,中跨应力分布更加均匀,结构受力得到改善,同时也充分发挥了RPC材料的高抗压强度特性.

表5 10年收缩徐变后刚构桥压应力比较
Tab.5 Comparison of compressive stress of the rigid frame bridge after ten years' creep and shrink

截面	梁顶普通混凝土应力/MPa		梁底普通混凝土应力/MPa		RPC应力/MPa
	全普通混凝土模型	加RPC柱模型	全普通混凝土模型	加RPC柱模型	
中跨跨中	-7.2	-4.2	-5.8	-6.0	-16.3
中跨1/4跨	-10.8	-10.3	-11.0	-9.1	-
0号块	-7.6	-7.5	-15.2	-11.8	-24.2

3.3.3 预应力损失比较

由于负弯矩区顶板束、中跨底板后期束对于控制刚构桥的长期下挠较为重要,同时它们的后期预应力损失主要是混凝土的收缩徐变导致的,所以本文重点查看10年收缩徐变后负弯矩区顶板束、中跨后底板束由于混凝土收缩徐变引起的预应力损失.两模型收缩徐变引起的预应力损失比较如表6所示.

由表6可知,加入RPC后,中跨后底板束由于收缩徐变引起的预应力损失减少了约5%,负弯矩区顶板束增加约6%,可见加入预制RPC柱对中跨后底板束、负弯矩区顶板束由收缩徐变引起的预应力损失变化较小.这是因为加入预制RPC柱后,跨中底板、负弯矩区顶板普通混凝土的压应力以

及收缩应变并没有发生明显改变.

表6 收缩徐变引起的预应力损失
Tab.6 Prestress loss caused by shrinkage and creep

中跨后期底板束	预应力损失/MPa	负弯矩区顶板束	预应力损失/MPa
ZX1	122.5(115.9)	2C	87.8(94.6)
ZX2	123.0(116.0)	3C	88.7(95.8)
ZX3	122.6(115.6)	4C	90.7(96.2)
ZX4	123.4(114.7)	5C	91.4(98.8)
ZX5	121.5(113.5)	6C	91.3(98.4)
ZX6	117.0(114.5)	7C	91.2(98.0)
ZX7	122.0(115.4)	8C	91.5(97.1)
ZX8	124.0(116.8)	9C	90.6(96.6)
ZX9	121.8(115.2)	10C	90.0(96.1)

注:括号内数据为加RPC柱刚构桥模型预应力损失.

4 结 论

1)当RPC占复合截面总面积的40%时,RPC降低普通混凝土徐变效应的作用较为明显,同时也较为合理、经济,此时复合截面名义徐变系数可以降低40%,普通混凝土应力降低39.9%;剪力键钢筋横截面积占复合截面总面积的4%时,复合截面RPC和C50混凝土界面无明显滑移,剪力键工作正常。

2)对于大跨刚构桥全桥来说,加入预制RPC柱后,跨中梁底普通混凝土压应力略有增大,支点梁底普通混凝土压应力减小,中跨的应力分布更加均匀,结构受力得到改善;10年收缩徐变后收缩徐变引起的竖向位移、负弯矩区的转角 R_y 均减小,尤其是收缩徐变引起的竖向位移降低了53.9%,成桥后的跨中长期下挠得到明显改善;中跨后期底板束、负弯矩区顶板束由收缩徐变引起的预应力损失变化较小。

3)加入预制RPC柱后,刚构桥跨中长期下挠减小的主要原因是负弯矩区箱梁底板、跨中附近箱梁顶板普通混凝土的压应力减小,受压徐变变形减小,该区域有效弹性模量变大,从而降低了刚构桥负弯矩区的结构转角、跨中附近的竖向位移,最终导致了跨中长期下挠的减小。通过以上分析可知,加入RPC柱确实可以改善大跨刚构桥的跨中长期下挠,对于实际工程有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 楼庄鸿. 大跨径梁式桥的主要病害[J]. 公路交通科技, 2006, 23(4): 84-87.
LOU Zhuang-hong. Main faults in large span beam bridges [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(4): 84-87. (In Chinese)
- [2] 陈宇峰. 大跨PC连续刚构桥跨中持续下挠成因及预防措施[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2007, 26(4): 6-8.
CHEN Yu-feng. Causes and precautionary measures to long-term deflection of long span prestressed concrete box girder of continuous rigid frame bridge[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2007, 26(4): 6-8. (In Chinese)
- [3] 谢峻, 王国亮, 郑晓华. 大跨径预应力混凝土箱梁桥长期下挠问题的研究现状[J]. 公路交通科技, 2007, 24(1): 47-50.
XIE Jun, WANG Guo-liang, ZHENG Xiao-hua. State of art of long-term deflection for long span prestressed concrete box-girder bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(1): 47-50. (In Chinese)
- [4] 张阳. 二次张拉绞线箱梁腹板竖向预应力损失研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2012, 39(6): 14-18.
ZHANG Yang. Study of the vertical prestress loss in box girder webs with twice-tension strand[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2012, 39(6): 14-18. (In Chinese)
- [5] 邵旭东, 詹豪, 雷薇, 等. 超大跨径单向预应力UHPC连续箱梁桥概念设计与初步实验[J]. 土木工程学报, 2013, 46(8): 84-88.
SHAO Xu-dong, ZHAN Hao, LEI Wei, et al. Conceptual design and preliminary experiment of super-long-span continuous box-girder bridge composed of one-way prestressed UHPC[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(8): 84-88. (In Chinese)
- [6] 王飞, 方志. 大跨活性粉末混凝土连续刚构桥的性能研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2009, 36(4): 6-12.
WANG Fei, FANG Zhi. Performance research on long-span RPC concrete continuous rigid frame bridge[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(4): 6-12. (In Chinese)
- [7] GARAS V Y. Creep of UHPC in tension and compression: effect of thermal treatment[J]. Cement & Concrete Composites, 2012, 34(4): 493-502.
- [8] 顾建中, 刘西拉. 轴向载荷作用下钢管混凝土的徐变[J]. 中国公路学报, 2001, 14(4): 60-62.
GU Jian-zhong, LIU Xi-la. Creep analysis of concrete filled with steel tube under uniaxial load [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(4): 60-62. (In Chinese)
- [9] 冷文华. 预应力钢壳混凝土桥塔受力分析[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2012: 31-34.
LENG Wen-hua. Structural analysis of prestressed steel-concrete composite pylon[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2012: 31-34. (In Chinese)
- [10] JTGD62-2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 118-120.
JTGD62-2004 Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2004: 118-120. (In Chinese)
- [11] 刘扬, 陈海锋, 李宇鹏, 等. 基于ANSYS的桥梁结构收缩徐变效应仿真计算[J]. 交通科学与工程, 2013, 29(3): 19-22.
LIU Yang, CHEN Hai-feng, LI Yu-peng, et al. The calculating simulation on shrinkage and creep effects of bridge structures with ANSYS[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2013, 29(3): 19-22. (In Chinese)
- [12] 曹飒飒. 大跨径钢管混凝土拱桥仿真计算与控制[D]. 西安: 长安大学, 2008: 36.
CAO Sa-sa. Study on the simulation analysis and control of long-span concrete-filled steel tubular arch bridge[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008: 36. (In Chinese)