第 48 卷第 11 期
2020 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 11
November，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200165

超高性能混凝土钢桥面铺装层收缩约束应力分析

韩方玉[1]，刘建忠[2,3]，刘加平[1]，万红燕[1]，沙建芳[2,3]，林 玮[2,3]，万 赟[2,3]，郑晓博[2,3]

(1. 东南大学材料科学与工程学院，南京 211189；2. 高性能土木工程材料国家重点实验室，南京 211103；3. 江苏苏博特新材料股份有限公司，南京 211103）

摘 要：通过建立的收缩约束应力计算方法和设计的收缩约束试验评估了超高性能混凝土(UHPC)钢桥面铺装结构的收缩约束应力发展行为。结果表明：钢桥面对 UHPC 收缩约束作用占据主导，约束度可达 0.41，配筋率对 UHPC 收缩约束作用呈指数增长趋势；UHPC 收缩约束应力水平与约束度基本呈线性相关，但 UHPC 收缩约束应力水平增长幅度随着配筋率的提升逐渐降低；用于钢桥面铺装的 UHPC 材料收缩变形宜控制在 300×10^{-6} 以内，且具备应变硬化特性；密配筋(≥3%)会显著增加结构开裂风险，但也可以有效提高等效结构刚度。

关键词：超高性能混凝土；钢桥面铺装；收缩约束应力；开裂风险
中图分类号：TU528.31; TB301　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)11–1700–06
网络出版时间：2020–09–23



Shrinkage Restraint Stress in Ultra-high Performance Concrete Surface of Steel Bridge Deck

HAN Fangyu[1], *LIU Jianzhong*[2,3], *LIU Jiaping*[1], *WAN Hongyan*[1], *SHA Jianfang*[2,3], *LIN Wei*[2,3], *WAN Yun*[2,3], *ZHENG Xiaobo*[2,3]

(1. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. State Key Laboratory of High Performance Civil Engineering Materials, Nanjing 211103, China; 3. Jiangsu Sobute New Materials Co., Ltd, Nanjing 211103, China)

Abstract: The development behavior of shrinkage restraint stress on ultra-high performance concrete (UHPC) surface of steel bridge deck was investigated by theoretical method and restrained shrinkage experiment. The results show that steel bridge deck plays a leading role in restraining shrinkage deformation of UHPC and its restrained degree reaches to 0.41. An exponential growth trend occurs for reinforcement ratio regarding the restrained degree. Also, the restrained degree is linearly correlated to the generated stress in UHPC. The increment of the generated stress induced by reinforcement decreases as reinforcement ratio increases. In addition, a shrinkage value below 300×10^{-6} and feature of strain harideing for UHPC applying on bridge deck surface for cracking control were also proposed. A dense reinforcement (≥3%) can have a greater cracking risk in UHPC and equivalent stiffness in structure.

Keywords: ultra-high performance concrete; steel deck surfacing; shrinkage restraint stress; cracking risk

随着高性能混凝土制备技术的发展，一种新型的高技术材料—超高性能混凝土(UHPC)已引起学术界和工程界的广泛关注。UHPC 具有比强度高、负荷能力大、抗弯拉性能突出以及耐久性优异等一系列技术优势和性能特点，能满足土木工程轻量化、高层化、大跨化和高耐久化的要求，是混凝土科技发展的主要方向之一[1–3]。

得益于超高的弯拉强度与耐久性能，UHPC 为梁桥病害控制和结构体系创新提供了重要载体，因而大量的 UHPC 桥梁结构在世界范围内得以实践[4–5]。我国虽然起步较晚，但 UHPC 在钢桥面铺装层的应用已成为热点，典型的结构特点之一为高配筋率，最小钢筋间距可小至 33 mm[6]。然而 UHPC 水胶比极低、胶凝材料用量高、掺加超细粉体等制备特点，导致其收缩大的问题突出，无粗骨料 UHPC 的收缩率可达万分之十[7–8]，且以自收缩为主[7]。此外，UHPC1 d 的收缩量就达总收缩的 45%[9]。在外部约束作用下，12~15 h 的自收缩约束应力就可达

收稿日期：2020–03–12。　修订日期：2020–04–26。
基金项目：国家自然科学基金(51978318，51978246)。
第一作者：韩方玉(1988—)，男，博士，工程师。
通信作者：刘建忠(1976—)，男，博士，研究员。

Received date: 2020–03–12.　**Revised date:** 2020–04–26.
First author: HAN Fangyu (1988–), male, Ph.D., Engineer.
E-mail: hanfangyu@cnjsjk.cn
Correspondent author: LIU Jianzhong (1976–), male, Ph.D., Researcher.
E-mail: ljz@cnjsjk.cn

UHPC 抗拉强度的 70%以上[10]，且实际工程调研结果也表明现浇 UHPC 结构很容易出现早期开裂问题[11]。因此，在钢桥面和密配钢筋的强约束作用下，养护过程中 UHPC 收缩约束应力过大导致的开裂问题已不容忽视[12]。当收缩裂缝存在时，随着残余变形的不断增大，UHPC 结构渗透系数跨越尺度将超过 3 个数量级[13]，极大地影响 UHPC 结构的服役耐久性和钢桥面的腐蚀破坏速率。因此，如何评估 UHPC 钢桥面铺装结构的收缩约束应力发展行为，从 UHPC 收缩行为调控和结构设计角度降低开裂风险，是 UHPC 钢桥面铺装结构长寿命的有效保障。

因此，将设计测试钢桥面铺装结构中 UHPC 的收缩约束行为，并借助黏塑性模型建立 UHPC 收缩约束应力计算方法，分析结构参数和收缩变形对 UHPC 收缩约束应力的影响规律并评估开裂风险，为 UHPC 钢桥面铺装结构设计和材料开发提供建议和指导。

1　收缩约束应力计算方法

近些年，黏塑性理论被成功应用于 UHPC 材料的徐变、自收缩等变形研究中[14–15]。鉴于本研究的 UHPC 收缩约束应力是由材料收缩变形导致的一种较低变形速率约束作用下的内应力发展行为，将采用一组具有不同延迟时间 Maxwell 链的 Duvaut-Lions 粘塑性模型计算收缩约束应力，如图 1 所示，E_k 为第 k 个 Maxwell 链的刚度，τ_k 为第 k 个 Maxwell 链的延迟时间。同时为了评估钢桥面顶板和配筋率对 UHPC 铺装层约束作用的大小，引入等效结构刚度指标 E_0 来表征不同参数下的结构约束程度，如图 1 所示。

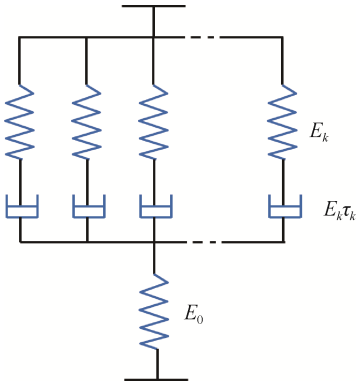


图 1　基于结构刚度的黏塑性模型

Fig. 1　Viscoelastic model with a spring charactering equivalent structural stiffness

假设在时间 Δt 内产生在 Maxwell 链 E_k 和约束链 E_0 内的变形分别为 $\Delta\varepsilon_k$ 和 $\Delta\varepsilon_0$，对应的应力分别为 σ_k 和 σ_0，i 和 i+1 分别表示 Δt 两端的时间节点，因此：

$$\Delta\varepsilon^i=\Delta\varepsilon_k^i+\Delta\varepsilon_0^i \tag{1}$$

$$\sigma^{i+1}=\sigma_k^{i+1}=\sigma_0^{i+1}=E_0\Delta\varepsilon_0^i \tag{2}$$

通过式(1)和式(2)可得：

$$\Delta\varepsilon_0^i=\frac{\sigma_0^{i+1}}{E_0}=\frac{\sigma_k^{i+1}}{E_0} \tag{3}$$

基于 Boltzmann 叠加原理，单个 Maxwell 链的收缩约束内应力可通过式(4)计算，若处于完全约束状态，即约束变形量与材料收缩变形量相等，则 $\Delta\varepsilon_0^i$=0，$\Delta\varepsilon^i$=$\Delta\varepsilon_k^i$。

$$\sigma_k^{i+1}=\frac{\tau_k}{\Delta t}\left(\frac{E_k^{i+1}+E_k^i}{2}\right)\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}}\right)(\Delta\varepsilon^i-\Delta\varepsilon_0^i)+\sigma_k^i \tag{4}$$

则 UHPC 铺装层的收缩约束应力可以通过 Maxwell 链叠加获取：

$$\sigma^{i+1}=\sum_{k=1}^{m}\left[\frac{\tau_k}{\Delta t}\left(\frac{E_k^{i+1}+E_k^i}{2}\right)(1-\mathrm{e}^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}})\right],(\Delta\varepsilon^i-\Delta\varepsilon_0^i)+\sigma^i \tag{5}$$

其中 m 为 Maxwell 链的数量，当获得 UHPC 的约束变形量，即 $\Delta\varepsilon_k^i$，等于 $\Delta\varepsilon^i$–$\Delta\varepsilon_0^i$，就可以通过式(5)计算 UHPC 内部收缩约束应力。

进一步，若在获得结构的约束刚度和 UHPC 材料收缩变形量情况下，通过式(2)、式(3)和式(4)即可获得在不同约束度下的 UHPC 收缩约束应力发展行为，其中 μ 可以理解为结构对 UHPC 铺装层的约束程度：

$$\sigma^{i+1}=\frac{\sum_{k=1}^{m}\frac{\tau_k}{\Delta t}\left(\frac{E_k^{i+1}+E_k^i}{2}\right)\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}}\right)\Delta\varepsilon^i+\sigma^i}{1+\frac{\sum_{k=1}^{m}\frac{\tau_k}{\Delta t}\left(\frac{E_k^{i+1}+E_k^i}{2}\right)\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}}\right)}{E_0}} \tag{6}$$

$$\mu=\frac{1}{1+\frac{\sum_{k=1}^{m}\frac{\tau_k}{\Delta t}\left(\frac{E_k^{i+1}+E_k^i}{2}\right)\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}}\right)}{E_0}} \tag{7}$$

2　实验

2.1　原材料

胶凝材料采用江苏苏博特新材料股份有限公司

生产的活性粉末，包括水泥与多组分高活性掺合材，其中水泥为 P.II52.5 硅酸盐水泥，水泥与掺合材质量比为 1∶0.58。活性粉末表观密度为 2.94 g/cm^3，0.08 μm 和 0.045 μm 粒径筛余分别为 18.0%和 27.0%，需水量比为 105%，3、7 d 和 28 d 抗压强度分别为 24.5、35.2 MPa 和 48.1 MPa；细骨料为天然洁净河砂，表观密度为 2.82 g/cm^3；粗骨料为玄武岩碎石，颗粒尺寸为 5~10 mm；外加剂为聚羧酸高性能减水剂，其减水率大于 30%；钢纤维为长度 13 mm、直径 0.2 mm 的镀铜微细钢纤维。

2.2 试件制备

试件配合比：活性粉末用量 1 031 kg/m^3、细骨料用量 737 kg/m^3、粗骨料用量 397 kg/m^3、外加剂用量 20.62 kg/m^3、水胶比为 0.16，纤维掺量为 2%。按配合比称取原材料，先将活性粉末、骨料干拌 30 s，将外加剂和水加入干混料中，搅拌 3 min 以获得匀质浆体，最后均匀洒入钢纤维继续搅拌 2 min。待搅拌结束后，将 UHPC 浆体装入抗压强度、弯曲强度、拉伸强度、收缩约束变形、自由收缩变形等测试模具中。抗压试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm；弯曲试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm；抗拉试件为狗骨头状，腰部尺寸为 50 mm×100 mm×220 mm；收缩约束变形试件尺寸为 2 600 mm×1 200 mm×276 mm，截面如图 2 所示。UHPC 铺装层厚度为 55 mm，钢筋直径为 12 mm，钢筋网布置 UHPC 厚度方向中心位置，纵向钢筋布置在上层，并通过 50、75、100 mm 3 种钢筋间距来研究配筋率(2.05%、2.91%和 3.94%)的影响；UHPC 自由收缩变形试件尺寸为 ϕ110 mm×500 mm。

2.3 方法

UHPC 材料的力学性能测试依据国标 GB/T31387—2015 执行；单轴拉伸性能测试采用 instron-8803 电液伺服疲劳试验机进行加载。测试区域标距为 300 mm，加载方式为位移加载，加载速率为 0.03 mm/min，左右两侧各安装 1 个线性可变差动变压位移传感器(LVDT)用于实时记录试验过程中的拉伸位移；UHPC 约束收缩变形采用埋入式应变计进行采集，应变计位于纵向居中对称位置，距边约 175 mm，采用爱福特 AFT-CM-32 应变采集仪进行实时采集，7 d 内数据采集间隔为 4 h，之后间隔为 8 h，同步采用埋入式应变计测试 UHPC 自由收缩变形，作为对比样。

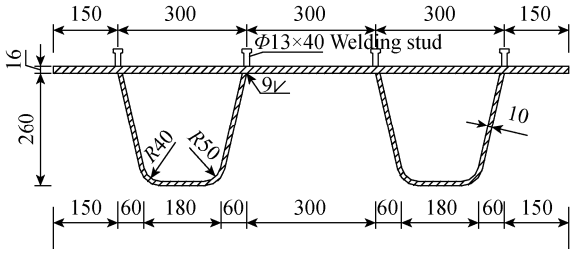


图 2 约束收缩变形测试设计示意图(mm)

Fig. 2 Schematic of mould for restrained shrinkage deformation test

3 结果与讨论

3.1 收缩约束变形

表 1 为 UHPC 的基本工作性能和 28 d 力学性能。从表 1 可以看出：UHPC 具有自密实特性，良好的流变性能可以有效促进内部气泡缺陷的排除[16]，以便获得良好的力学性能，尤其是拉伸性能。该 UHPC 具有典型的应变硬化效果，拉伸应变量可达 1 300×10^{-6}，说明裂缝稳态扩展过程中仍可以有效保障结构的承载性能。

表 1 UHPC 材料工作性和力学性能

Table 1 Workability and mechanical properties of UHPC

Fludity/mm	Compressive strength/MPa	Elastic modulus/GPa	First-crack tensile strength/MPa	Tensile strength/MPa	Tensile strain
650	156.0±3.5	47.3±1.2	8.92±0.3	9.21±0.3	1 300

UHPC 收缩约束变形监测结果如图 3 所示。从图 3 可以看出：无约束状态下 UHPC 的收缩变形为 185×10^{-6} 左右，这得益于膨胀补偿和粗骨料限制收缩作用，较低的收缩变形可以有效抑制裂缝的产生[10]，尤其在大幅面薄层结构中[17]。钢桥面及不同配筋率下的 UHPC 收缩约束变形量如图 4 所示。钢桥面对 UHPC 的收缩约束变形量为 75×10^{-6}，且随着配筋率的提升，约束作用进一步加强，收缩约束变形量得到显著增大，分别达到 86×10^{-6}、109×10^{-6} 和 150×10^{-6}，相应的约束度分别达到 0.41、0.47、0.59 和 0.81。测试结果表明，结构中钢桥面的约束作用占据主导，同时相比于两端限制约束试验[17]，钢桥面通过剪力键的约束度显著降低，这有利于结构连续浇筑下的裂缝控制。同时从图 5 可以发现，除去钢桥面的约束作用，配筋率单一变量因素对 UHPC 收缩变形约束

作用基本呈现指数增长趋势，表明了密配筋将会显著提高 UHPC 的收缩开裂风险。

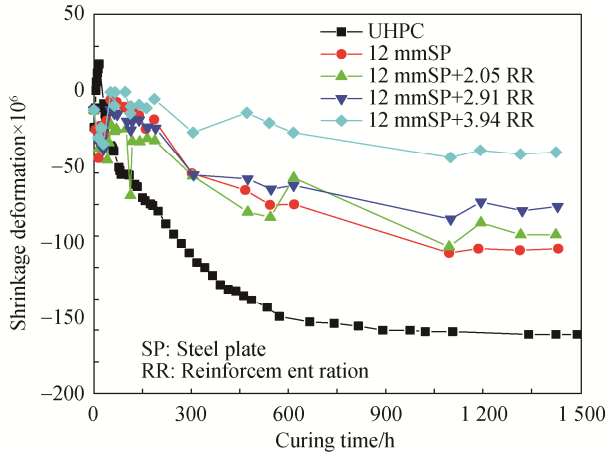


图 3　UHPC 收缩变形监测结果

Fig. 3　Monitoring results of shrinkage deformation of UHPC

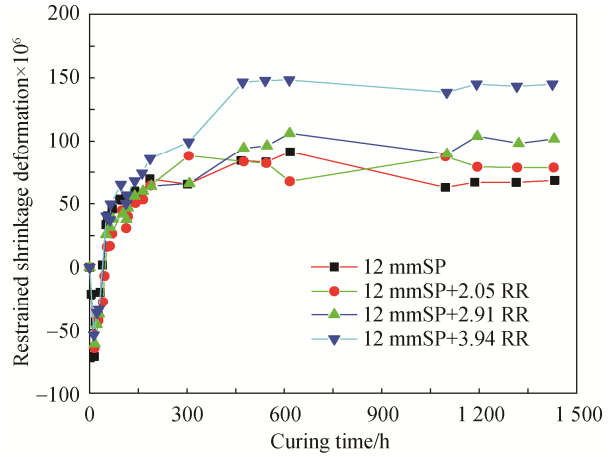


图 4　UHPC 收缩约束变形量

Fig. 4　Restrained shrinkage deformation of UHPC samples

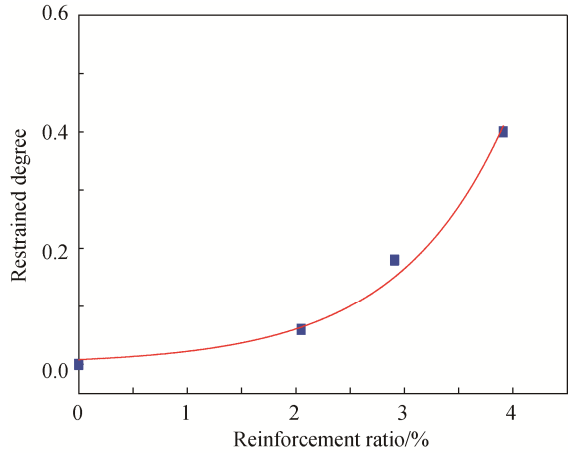


图 5　配筋率对 UHPC 收缩变形的约束影响

Fig. 5　Dependence of reinfocement ratio on restrained degree of UHPC samples

3.2　收缩约束应力

基于收缩约束变形监测结果和收缩约束应力计算方法，不同钢桥面铺装结构参数下的收缩约束应力计算结果如图 6 所示。可以看到，在钢桥面的约束作用下 UHPC 收缩约束应力可达 2.82 MPa，且随着配筋率的提高，UHPC 收缩约束应力逐渐增长到 3.71、3.92 MPa 和 4.86 MPa，对比图 7 中 UHPC 完全约束状态下的收缩约束应力值(FR-1.0-180)，分别达到其 0.49、0.65、0.69 和 0.85 倍，略高于试验获得的相应约束度数值。从图 8 可以看到，UHPC 收缩约束应力幅与约束度基本呈现线性相关，但仅考虑配筋率单一因素影响情况下，随着配筋率的提升，收缩约束应力幅增长幅度逐渐降低，这主要受到配筋率下 UHPC 收缩约束应力幅增长规律影响，如图 9 所示。不同于约束度的影响规律，UHPC 收缩约束应力随着配筋率的提高呈现线性增长趋势，进而

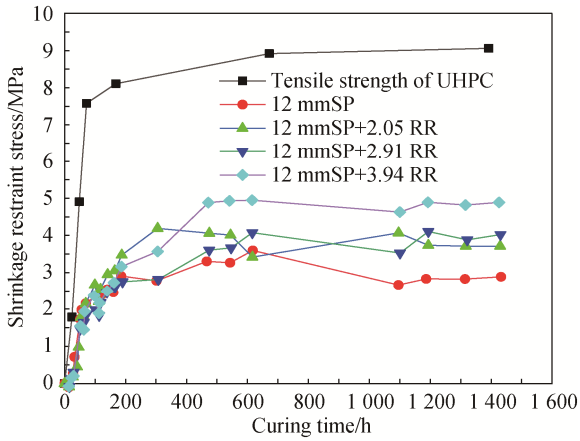


图 6　不同结构参数下 UHPC 收缩约束应力的计算结果

Fig. 6　Calculation results of UHPC shrinkage restraint stress with varying structural parameters

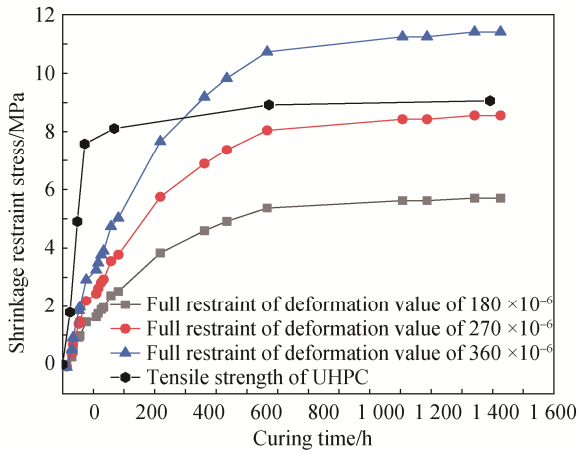


图 7　收缩变形对收缩约束应力的影响

Fig. 7　Dependence of shrinkage deformation on shrinkage restraint stress

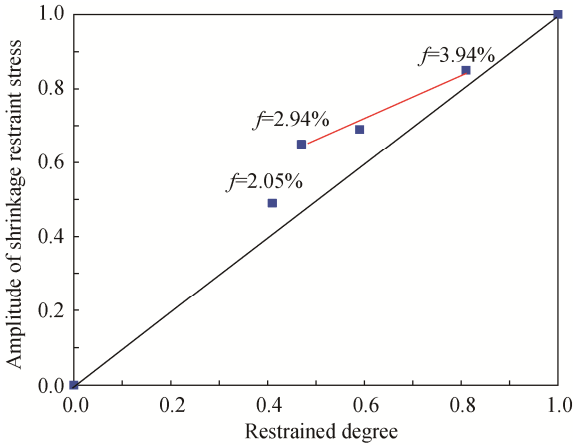


图 8 不同结构参数下的约束度与收缩约束应力幅相关性

Fig. 8 Correlation between restrained degree and amplitude of shrinkage restraint stress under different structural parameters

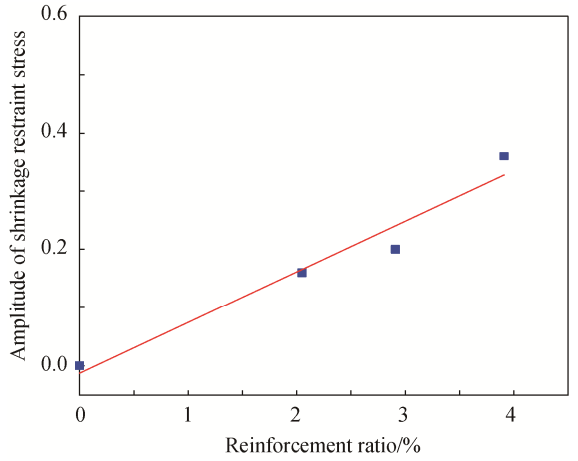


图 9 配筋率对收缩约束应力幅的影响

Fig. 9 Dependence of reinforcement ratio on amplitude of shrinkage restraint stress

造成收缩约束应力幅的提升作用低于约束度。此外，对比图 5 和图 9 可以发现，该结构在低配筋率下，即使对 UHPC 约束度的提升幅度不大，但产生的收缩约束应力提升幅度却依然不容忽视。因此，从 UHPC 钢桥面铺装层开裂风险角度出发，应在结构承载能力许可内合理设置配筋率。

同时，从图 6 可以发现，在 UHPC 的性能发展过程中，所有结构参数下 UHPC 收缩约束应力都远低于初裂拉伸强度，说明并不会出现收缩约束开裂的现象，这主要得益于 UHPC 较低的收缩变形。进一步对比完全约束作用下，具有不同收缩变形的 UHPC 收缩约束应力发展规律，如图 7 所示。可以看到随着 UHPC 收缩变形提升 1.5 倍和 2 倍，完全约束下 UHPC 收缩约束应力显著提升，从 5.79 MPa 提高到 8.55 MPa 和 11.41 MPa，呈线性增长趋势，如图 10 所示。以应力破坏作为判据，UHPC 收缩变形提高到 2 倍时(360 × 10^{-6})，在龄期达到 16.4 d 其收缩约束应力将超过 UHPC 初裂抗拉强度，造成收缩裂缝的产生。从 UHPC 收缩约束应力与收缩变形数据相关性可知完全约束作用下 UHPC 临界开裂收缩值为 282×10^{-6}。因此，考虑到实际有限约束情况下，建议用于钢桥面铺装用的 UHPC 材料收缩变形可控制在 300×10^{-6} 以内。当然，UHPC 材料的应变硬化特性可以有效抑制裂缝的宽度，在许可变形量下并不会降低结构承载能力[18]，进而在 UHPC 结构开裂风险高的应用场景下建议采用应变硬化型 UHPC 材料来减缓开裂风险带来的性能劣化。同时密配筋虽然会提高 UHPC 的收缩约束应力，并显著提高开裂风险，但由于钢筋的存在会实现裂缝数量的增多，达到细化裂缝宽度的作用，但需要重点关注裂缝宽度对 UHPC 材料的性能劣化影响程度。

基于监测的收缩变形约束度和式 7 可以获得不同结构参数下的等效结构刚度，如图 11 所示。从结果可以看到，结构等效刚度随着约束程度的提高而提升，在配筋率达到 3.94%下等效刚度提升约 460%。由于等效刚度是基于监测的收缩变形约束度计算，除去钢桥面板的作用，配筋率单一变量因素对等效刚度的影响规律与对 UHPC 收缩变形约束作用规律一致，呈指数增长趋势，如图 12 所示。等效刚度可以为后续相关结构约束应力的计算模拟提供依据，同时也间接反映了密配筋可以有效提高钢桥面铺装结构的刚度。

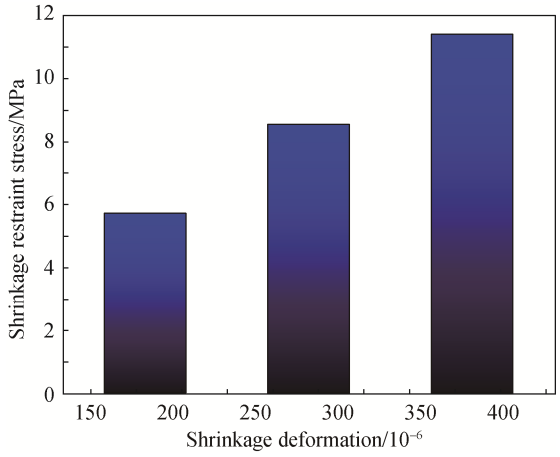


图 10 收缩变形与收缩约束应力相关性

Fig. 10 Correlation between shrinkage deformation and shrinkage restraint stress

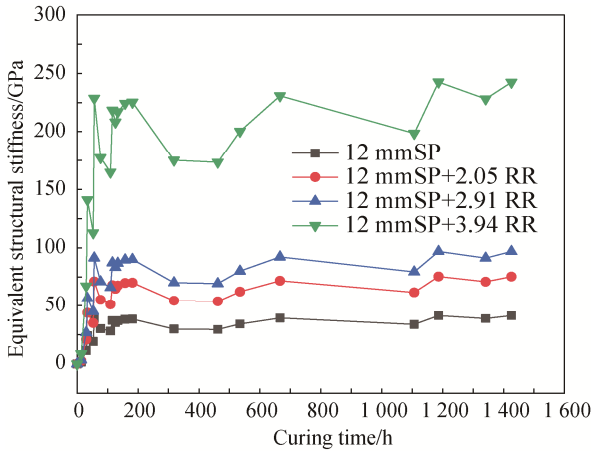


图 11　不同结构参数下的等效结构刚度

Fig. 11　Equivalent stiffness of structures with varying parameters

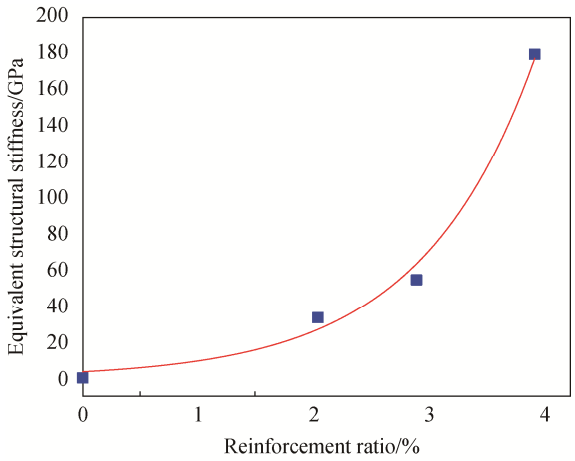


图 12　配筋率对等效刚度的影响

Fig. 12　Dependence of reinforcement ratio on equivalent structural stiffness

4　结论

1) 钢桥面对 UHPC 铺装层的收缩约束占据主导地位，约束度可达 0.41，配筋率对 UHPC 收缩约束作用呈现指数增长趋势。

2) UHPC 铺装层的收缩约束应力水平与约束度基本呈现线性相关，且 UHPC 收缩约束应力随着配筋率的提高呈现线性增长趋势，造成收缩约束应力水平增长幅度随着配筋率的提高逐渐降低；低配筋率虽然对 UHPC 铺装层约束度的提升幅度不大，产生的收缩约束应力提升幅度却不容忽视。

3) UHPC 材料的收缩变形与收缩约束应力呈现线性相关，从应力判据准则出发建议用于钢桥面铺装的 UHPC 材料收缩变形控制在 300×10^{-6} 以内，且宜具备应变硬化特性。

4) 密配筋将会显著提高 UHPC 铺装层开裂风险，但也可以有效提高钢桥面铺装结构的等效刚度，在配筋率达到 3.94%下等效刚度提升约 460%。

参考文献:

[1] 刘建忠. 超高性能水泥基复合材料制备技术及静态拉伸行为研究[D]. 南京: 东南大学, 2013.
LIU Jianzhong. Preparation and static, dynamic mechanical behavior of ultra-high performance concrete (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2013.

[2] 张文华. 超高性能水泥基复合材料微结构形成机理与动态力学行为研究[D]. 南京: 东南大学, 2013.
ZHANG Wenhua. Investigation of microstructure formation mechanism and dynamic mechanical behavior of UHPC (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2013.

[3] 张云升, 张文华, 刘建忠. 超高性能水泥基复合材料[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

[4] GRAYBEAL B. Ultra-high performance concrete[R]. No. FHWA-HRT-11-038. 2011.

[5] RESPLENDINO J, LYON C. First recommendations for Ultra-High-Performance Concretes and examples of application[C]//Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel University Press, Kassel, Germany. 2004: 79–90.

[6] 邵旭东, 曹君辉, 易笃韬等.正交异性钢板-薄层 RPC 组合桥面基本性能研究. 中国公路学报, 2012, 25(2): 40–45
SHAO X D, CAO J H, YI D T. China J Highway Transport (in Chinese), 2012, 25(2): 40–45.

[7] KOH K, RYU G, KANG S, et al. Shrinkage properties of ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. Adv Sci Lett, 2011, 4(3): 948–952.

[8] AHMED L, KHELIDJ A, RICHARD P. Hydration kinetics, change of relative humidity, and autogenous shrinkage of ultra-high-strength concrete[J]. Cem Concr Res, 1999, 29(4): 577–584.

[9] SCHACHINGER I, SCHMIDT K, HEINZ D, et al. Early-Age Cracking Risk and Relaxation by Restrained Autogenous Deformation of Ultra High Performance Concrete[C]//Sixth International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Leipzig. 2002: 1341–1353.

[10] SHIM J M. Prediction of early-age cracking of UHPC materials and structures: A thermo-chemo-mechanics approach[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2005.

[11] SOLIMAN A M, NEHDI M L. Effect of partially hydrated cementitious materials and superabsorbent polymer on early-age shrinkage of UHPC[J]. Constr Build Mater, 2013, 41: 270–275.

[12] YOO D Y, PARK J J, KIM S W, et al. Influence of reinforcing bar type on autogenous shrinkage stress and bond behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete[J]. Cem Concr Compos, 2014, 48: 150–161.

[13] CHARRON J P, DENARIÉ E, BRÜHWILER E. Transport properties of water and glycol in an ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under high tensile deformation[J]. Cem Concr Res, 2008, 38(5): 689–698.

[14] XU Y, LIU J P, LIU J Z, et al. Experimental studies and modeling of creep of UHPC[J]. Constr Build Mater, 2018, 175: 643–652.

[15] YOO D Y, KIM S , KIM M J . Comparative shrinkage behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete under ambient and heat curing conditions[J]. Constr Build Mater, 2018, 162(20): 406–419.

[16] OVARLEZ G, BERTRAND F, COUSSOT P, et al. Shear-induced sedimentation in yield stress fluids[J]. J Non-Newton Fluid Mech, 2012, 177/178: 19–28.

[17] YOO D Y, MIN K H, LEE J H, et al. Shrinkage and cracking of restrained ultra-high-performance fiber-reinforced concrete slabs at early age[J]. Constr Build Mater, 2014, 73: 357–365.

[18] 刘建忠, 韩方玉, 周华新, 等. 超高性能混凝土拉伸力学行为的研究进展. 材料导报. 2017, 31(23): 24–32.
LIU Jianzhong, HAN Fangyu, ZHOU Huaxin, et al. Mater Rev (in Chinese), 2017, 31(23): 24–32.