

超高性能混凝土（UHPC）应用技术规范

Technical specification for ultra-high performance concrete

2023 - 03 - 28 发布

2023 - 05 - 01 实施

目 次

前言..... III

引言..... IV

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 2

4 符号和缩略语..... 3

5 分类、性能等级和标记..... 3

 5.1 分类..... 3

 5.2 性能等级..... 4

 5.3 标记..... 5

6 结构性能和耐久性能..... 5

 6.1 结构性能..... 5

 6.2 耐久性能..... 6

7 原材料..... 6

 7.1 水泥..... 6

 7.2 掺合料..... 6

 7.3 骨料..... 6

 7.4 外加剂..... 6

 7.5 纤维..... 6

 7.6 水..... 7

8 配合比设计..... 7

 8.1 一般规定..... 7

 8.2 配合比..... 7

 8.3 试配、配合比调整和确定..... 8

 8.4 拌合物性能测定方法..... 8

 8.5 力学性能测定方法..... 8

 8.6 耐久性测定方法..... 9

9 施工..... 9

 9.1 一般规定..... 9

 9.2 原材料贮存..... 9

 9.3 原材料计量..... 9

 9.4 搅拌..... 9

 9.5 拌合物运输..... 10

 9.6 浇筑..... 10

 9.7 养护..... 10

 9.8 高温低湿环境下施工特殊规定..... 11

 9.9 低温环境下施工特殊规定..... 11

 9.10 桥梁湿接缝施工特殊规定..... 11

9.11 钢桥面铺装施工特殊规定	11
10 检验与评定	12
10.1 一般规定	12
10.2 超高性能混凝土原材料质量检验	12
10.3 超高性能混凝土拌合物质量检验	13
10.4 取样与抽检频率	13
10.5 预制构件检验	14
10.6 判定规则	15
11 包装、运输和储存	15
11.1 一般规定	15
11.2 包装	15
11.3 运输	16
11.4 储存	16
附录 A（规范性） 超高性能混凝土本构关系	17
附录 B（规范性） 超高性能混凝土抗拉性能测试方法	20
附录 C（规范性） 早龄期自收缩实验方法	24
附录 D（规范性） 板类构件抗裂性及承载能力检验方法	27
附录 E（规范性） 六棱块类构件承载能力检验方法	29
附录 F（资料性） 条文说明	31

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由甘肃省交通运输厅提出并监督实施。

本文件由甘肃省交通运输标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司、甘肃交设智远实业有限公司、甘肃公航旅路业有限公司、甘肃省公路交通建设集团有限公司。

本文件主要起草人：魏定邦、缪路文、任涛鹏、郭海贞、赵静卓、任国斌、李宁、温得成、李晓民、武维宏、艾杰、唐维斌、胡立恩、张军林、杨小森、段晓伟、车俊、李光明、朱小明、李子特、孙强盛、张彩霞、张明轩、武旭、张富强、王晖、白龙、苏凯、刘宏、吴来帝、王亚鹏、邵敏刚、李登科、秦宏涛。

本文件由甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司负责解释。

引 言

超高性能混凝土（Ultra-High Performance Concrete），简称UHPC，因其具有优异的力学性能和耐久性能而广泛应用于公路工程，甘肃省相应工程案例也逐渐增加，对超高性能混凝土的应用也逐渐趋于成熟。为进一步规范超高性能混凝土设计和施工，根据甘肃省市场监督管理局《关于下达2020年度第4批地方标准制修订计划的函》（甘质监函〔2020〕147号）文件要求，由甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司、甘肃交设智远实业有限公司、甘肃公航旅路业有限公司、甘肃省公路交通建设集团有限公司负责编制《超高性能混凝土（UHPC）应用技术规范》。

在编制过程中，根据甘肃省超高性能混凝土的应用现状和桥梁建设特点，结合国内外资料调研和大量室内研究实验，总结工程经验、吸收相关研究成果，广泛征求相关单位和专家的意见和建议，编制了本规范。

超高性能混凝土（UHPC）应用技术规范

1 范围

本文件规定了超高性能混凝土的分类、性能等级及标记、原材料及要求、配合比设计、试验方法、结构性能、检验与评定、包装和运输。

本文件适用于公路工程用超高性能混凝土，市政工程、建筑工程和其他工程可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 175 通用硅酸盐水泥
- GB/T 1596 用于水泥和混凝土中的粉煤灰
- GB/T 3159 液压式万能试验机
- GB 8076 混凝土外加剂术语
- GB/T 14685 建设用卵石、碎石
- GB/T 18736 高强高性能混凝土用矿物外加剂
- GB/T 21120 水泥混凝土和砂浆用合成纤维
- GB/T 22271 塑料 聚甲醛（POM）模塑和挤出材料
- GB/T 27690 砂浆和混凝土用硅灰
- GB/T 31387 活性粉末混凝土
- GB/T 50080 普通混凝土拌合物性能试验方法标准
- GB/T 50081 混凝土物理力学性能试验方法标准
- GB/T 50082 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准
- GB/T 50107 混凝土强度检验评定标准
- GB 50119 混凝土外加剂应用技术规范
- GB 50164 混凝土质量控制标准
- GB/T 51003 矿物掺合料应用技术规范
- JC/T 572 耐碱玻璃纤维无捻粗纱
- JGJ/T 10 混凝土泵送施工技术规范
- JGJ 52 普通混凝土用砂、石质量和检验方法标准
- JGJ 63 混凝土用水标准
- JGJ/T 221 纤维混凝土应用技术规范
- JG/T 351 纤维增强复合材料筋
- JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- DB62/T 2917 机制砂混凝土应用技术规范
- T/CBMF 37 超高性能混凝土基本性能与试验方法
- T/CECS 10107 超高性能混凝土（UHPC）技术要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

超高性能混凝土 ultra-high performance concrete

由水泥、矿物掺合料、外加剂、骨料、纤维和水等原材料拌合后水化而成的具有超高强度、超高耐久性的高韧性水泥基复合材料。

3.2

预混料 premix

由水泥、矿物掺合料、骨料按超高性能混凝土配合比配制成的干混料，其中可包含粉状减水剂和纤维。

3.3

纤维体积掺量 volume of fiber

纤维在超高性能混凝土中占据的体积比。

3.4

抗拉性能 tensile performance

超高性能混凝土在单轴拉伸荷载作用下表现出的力学和变形特性。

3.5

拉伸应变 tensile strain

单轴拉伸实验过程中试件达到最大应力时对应的拉应变。

3.6

应变硬化 strain hardening

当拉应力超过弹性极限抗拉强度后，拉应力随应变增大而持续上升的现象。

3.7

应变软化 strain softening

当拉应力超过弹性极限抗拉强度后，拉应力随应变增大而持续下降的现象。

3.8

工作性能 work ability

超高性能混凝土拌合物运输和浇筑的难易程度。

3.9

热养护 heat curing

从热源产生热能，将热量传输于超高性能混凝土，并对周围湿度加以控制的养护方法。

3.10

早龄期自收缩 early-age autogenous shrinkage

在与外界无水分交换条件下，超高性能混凝土从初凝开始后72 h，由于胶凝材料水化引起内部相对湿度降低和毛细孔负压导致超高性能混凝土宏观体积减小。

3.11

高温低湿环境 environment of high temperature and low humidity

环境温度高于35℃且相对湿度低于30 %的环境。

3.12

型式试验 type test

验证超高性能混凝土能否满足设计文件和相关标准的全面要求所进行的系列试验，是超高性能混凝土产品鉴定必不可少的环节。

4 符号和缩略语

下列符号和缩略语适用于本文件。

D_{Cl} : 超高性能混凝土氯离子扩散系数;

d : 超高性能混凝土受拉极限拉应变 (ε_{tu}) 时对应最大裂缝宽度;

E_c : 超高性能混凝土压缩弹性模量;

E_t : 超高性能混凝土拉伸弹性模量;

f_{cm} 、 $f_{cu,k}$ 、 $f_{cu,0}$: 边长100 mm的超高性能混凝土立方体抗压强度平均值、标准值、配置强度;

f_{ck} 、 f_c : 超高性能混凝土轴心抗压强度标准值、设计值;

f_{tk} : 超高性能混凝土抗弯拉强度标准值;

f_{tm} 、 f_{tk} 、 f_t : 超高性能混凝土弹性极限抗拉强度平均值、标准值、设计值;

f_{tu} : 超高性能混凝土极限抗拉强度平均值;

G_c : 超高性能混凝土剪切变形模量;

q : 分布模量常数;

S : 超高性能混凝土扩展度;

T_{500} : 超高性能混凝土扩展度达到500 mm时间;

USF2: 扩展度等级为2级的超高性能混凝土拌合物;

UC120: 边长100 mm的立方体抗压强度标准值为120 MPa的超高性能混凝土;

ΔL : 超高性能混凝土拉伸过程位移变化量;

ΔS : 超高性能混凝土1 h扩展度经时损失;

α_c : 超高性能混凝土线膨胀系数;

ε_0 、 ε_{cu} 、 ε_{cm} : 超高性能混凝土受压弹性极限应变、极限应变和下降至0.85 f_c 对应应变;

ε_{tk} 、 ε_{tm} 、 ε_{tu} : 超高性能混凝土受拉弹性极限拉应变、极限拉应变和下降至0.85 f_t 对应应变;

ρ : 超高性能混凝土密度;

ε_{cs} : 超高性能混凝土收缩应变;

φ : 超高性能混凝土徐变系数;

γ : 材料分项系数;

μ_c : 超高性能混凝土泊松比;

δ : 超高性能混凝土强度变异系数。

5 分类、性能等级和标记

5.1 分类

5.1.1 超高性能混凝土按用途分为结构类和非结构类超高性能混凝土，并采用表 1 规定的代号。

表1 按用途分类超高性能混凝土代号

种类	结构类超高性能混凝土	非结构类超高性能混凝土
代号	ST	NST
应用场景	工程结构	小型预制构件

5.1.2 超高性能混凝土按养护方法分为自然养护类超高性能混凝土和热养护类超高性能混凝土，并采用表 2 规定的代号。

表2 按养护方法分类超高性能混凝土代号

种类	自然养护类超高性能混凝土	热养护类超高性能混凝土
代号	N	H

5.2 性能等级

5.2.1 超高性能混凝土的工作性能等级应符合表3规定。

表3 超高性能混凝土工作性能等级

等级	USF1	USF2	USF3	USF4
S/mm	<550	$550\leq S<650$	$650\leq S<750$	≥ 750
$\Delta S/\text{mm}$	>150	$150\geq \Delta S>100$	$100\geq \Delta S>50$	≤ 50
T_{500}/s	>35	$35\geq T_{500}>25$	$25\geq T_{500}>15$	≤ 15

5.2.2 超高性能混凝土的单轴抗压性能应符合表4规定。

表4 超高性能混凝土单轴抗压性能

等级	UC100	UC120	UC140	UC160	UC180	UC200
$f_{cu,k}/\text{MPa}$	$100\leq f_{cu,k}<120$	$120\leq f_{cu,k}<140$	$140\leq f_{cu,k}<160$	$160\leq f_{cu,k}<180$	$180\leq f_{cu,k}<200$	$f_{cu,k}\geq 200$
f_{ck}/MPa	$70\leq f_{ck}<84$	$84\leq f_{ck}<98$	$98\leq f_{ck}<112$	$112\leq f_{ck}<126$	$126\leq f_{ck}<140$	$f_{ck}\geq 140$
f_c/MPa	-	$58\leq f_c<67$	$67\leq f_c<77$	$77\leq f_c<87$	$87\leq f_c<97$	$f_c\geq 97$
注1：立方体抗压强度标准值（ $f_{cu,k}$ ）与轴心抗压强度标准值（ f_{ck} ）关系为 $f_{ck}=0.88\times 0.80\times f_{cu,k}$ 。						
注2：轴心抗压强度设计值计算中取材料分项系数 $\gamma=1.45$ ，则超高性能混凝土轴心抗压强度设计值为 $f_c=f_{ck}/1.45$ 。						

5.2.3 超高性能混凝土的单轴抗拉性能应符合表5规定。

表5 超高性能混凝土单轴抗拉性能

等级	UT1	UT2	UT3	UT4	UT5	UT6
f_{tk}/MPa	≥ 5	≥ 5	≥ 7	≥ 7	≥ 8	≥ 10
f_t/MPa	≥ 3	≥ 3	≥ 4	≥ 4	≥ 5	≥ 6
f_{tu}/MPa	≥ 5	≥ 7	≥ 8	≥ 8	≥ 10	≥ 14
f_{tu}/f_{tk}	≥ 1.00	>1.00	≥ 1.1	≥ 1.2	≥ 1.25	≥ 1.25
$\varepsilon_{tu}/\%$	<0.1	≥ 0.1	≥ 0.15	≥ 0.20	≥ 0.35	≥ 0.60
$\alpha_m/\%$	<0.1	≥ 0.4	≥ 0.6	≥ 0.6	≥ 1.0	≥ 1.2
d/mm	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.07	≤ 0.10	≤ 0.17	≤ 0.30
注1：UT1级代表超高性能混凝土在单轴拉伸实验过程中无显著应变硬化或应变软化现象，UT2、UT3、UT4、UT5和UT6代表超高性能混凝土在单轴拉伸实验过程中表现出不同程度的应变硬化现象。						
注2：同一等级中所列指标应该同时满足，否则应降级。						
注3：弹性极限抗拉强度设计值计算中取材料分项系数 $\gamma=1.45$ ，则超高性能混凝土弹性极限抗拉强度设计值为 $f_t=f_{tk}/1.45$ 。						
注4：达到极限拉应变（ ε_{tu} ）时对应最大裂缝宽度（ d ）宜采用三维数字图像测量系统（DIC）或视频引伸计测量。						
注5：最大裂缝宽度（ d ）的说明可参考附录F中F.2.6条文。						

5.2.4 超高性能混凝土的抗弯拉强度应符合表 6 规定。

表6 超高性能混凝土抗弯拉强度

分类	结构类	非结构类
f_{tk} / MPa	≥ 18	≥ 12

5.3 标记

超高性能混凝土应按下列顺序进行标记：

- a) 产品用途代号；
- b) 养护方法代号；
- c) 产品简称 UHPC；
- d) 工作性能等级代号；
- e) 抗压性能等级代号；
- f) 抗拉性能等级代号。

示例1：

自然养护的非结构类超高性能混凝土，扩展度等级为 USF3 级，抗压强度等级为 UC120，抗拉性能等级为 UT2，标记为：

NST-N-UHPC-USF3/UC120/UT2

示例2：

热养护的结构类超高性能混凝土，扩展度等级为 USF4 级，抗压强度等级为 UC180，抗拉性能等级为 UT3，标记为：

ST-H-UHPC-USF4/UC180/UT3

6 结构性能和耐久性能

6.1 结构性能

6.1.1 超高性能混凝土弹性模量应按照 GB/T 31387 规定进行实测。若无实验数据，可取表 7 数值。

表7 超高性能混凝土弹性模量

等级	UC120	UC140	UC160	UC180	UC200
$E_c (\times 10^3)$ /MPa	41	43	45	47	48
注1：弹性模量测试尺寸应参考GB/T 31387。					
注2：无实验资料时，弹性模量（ E_c ）与立方体抗压强度标准值（ $f_{cu,k}$ ）的关系可根据 $E_c=10^5/(1.5+110.1/f_{cu,k})$ 计算。					

6.1.2 超高性能混凝土的剪切变形模量 G_c 可取本规范 6.1.1 条规定 E_c 值的 0.4 倍。

6.1.3 超高性能混凝土的泊松比 μ_c 应取 0.2。

6.1.4 超高性能混凝土的温度线膨胀系数 α_c 应取 $1.1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。

6.1.5 超高性能混凝土密度与纤维掺量关系应符合表 8 相关规定。

表8 超高性能混凝土密度与纤维掺量

纤维掺量/%	≤ 2.0	2.0~2.5	2.5~3.0	> 3.0
$\rho (\times 10^3)/(kg/m^3)$	2.3	2.4	2.5	2.6

- 6.1.6 超高性能混凝土本构关系应符合附录 A 相关规定。
- 6.1.7 超高性能混凝土结构承载能力极限状态和正常使用极限状态验算应参考 JTG 3362 相关要求。

6.2 耐久性能

- 6.2.1 超高性能混凝土收缩应变和徐变系数终值应按表 9 取值，计算方法可按本规范附录 F 中 F.2.15 和 F.2.16 执行。

表9 超高性能混凝土的收缩应变和徐变系数终值

养护方式	早龄期自收缩/ $\mu\epsilon$	干燥收缩/ $\mu\epsilon$	徐变系数终值
热养护	≤ 500	0	0.2
自然养护		≤ 400	0.8
注1：实际应用的超高性能混凝土应采取必要的减缩措施，因此本规范要求早龄期自收缩小于500 $\mu\epsilon$ 。			
注2：无实验资料时，不同龄期（t）的早龄期自收缩（ ϵ_{cs} ）可按 $\epsilon_{cs}(t)=500\times e^{-2.49\sqrt{(-0.86+t)}}$ 。			

- 6.2.2 超高性能混凝土的抗渗性能应由氯离子扩散系数表示，氯离子扩散系数应小于等于 $60\times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ ，实验方法应符合 T/CECS 10107 规定。
- 6.2.3 超高性能混凝土 200 次单面冻融循环后质量损失应小于 1.0 %，动态弹性模量损失应小于 10.0 %。

7 原材料

7.1 水泥

- 7.1.1 水泥宜选用普通硅酸盐水泥、硅酸盐水泥，应符合 GB 175 的有关规定。
- 7.1.2 当采用水泥种类发生变化时，应通过实验验证，满足超高性能混凝土的要求时方可使用。

7.2 掺合料

- 7.2.1 超高性能混凝土用粉煤灰应为 I 级粉煤灰，应满足 GB/T 1596 要求。
- 7.2.2 超高性能混凝土用硅灰应满足 GB/T 27690 要求。
- 7.2.3 超高性能混凝土用矿渣粉应满足 GB/T 51003 要求。
- 7.2.4 当超高性能混凝土采用其他矿物掺合料时，矿物掺合料应满足 GB/T 18736 要求，且应通过实验验证，满足超高性能混凝土的要求时方可使用。

7.3 骨料

- 7.3.1 超高性能混凝土用骨料宜为石英砂，也可使用天然砂或机制砂，机制砂应满足 DB62/T 2917 要求，单颗粒最大粒径不宜超过 2.36 mm。
- 7.3.2 超高性能混凝土采用粗骨料时，其最大颗粒粒径不应超过 9.5 mm，且应满足 GB/T 14685 相关规定，通过实验验证满足超高性能混凝土要求时方可使用。

7.4 外加剂

- 7.4.1 超高性能混凝土宜选用减水率不小于 30 % 的聚羧酸减水剂，且应符合 GB 50119 的规定。
- 7.4.2 超高性能混凝土采用其他外加剂时应符合现行标准的相关规定，外加剂应与胶凝材料有良好的适配性。

7.5 纤维

7.5.1 超高性能混凝土宜掺入圆形截面的钢纤维，钢纤维性能指标应满足 GB/T 31387 要求。

7.5.2 超高性能混凝土可掺入有机合成纤维或者玻璃纤维，有机合成纤维应满足 GB/T 21120 的规定，玻璃纤维应满足 JC/T 572 的规定。

7.6 水

超高性能混凝土拌合用水应符合 JGJ 63 的规定。

8 配合比设计

8.1 一般规定

8.1.1 超高性能混凝土配合比设计适用于预制和现浇超高性能混凝土设计。

8.1.2 超高性能混凝土应根据工程形式、施工工艺和环境因素进行配合比设计，宜采用绝对体积法。

8.1.3 超高性能混凝土水胶比应小于 0.25，钢纤维体积掺量应大于 0.6%，其他纤维体积掺量应大于 0.2%。

8.1.4 超高性能混凝土降低钢纤维掺量时，应进行专门实验验证或参考其他相关规范。

8.1.5 超高性能混凝土需要改善密实性时，宜增加粉体材料用量；需要改善浆料工作性能时，宜调整水胶比和外加剂掺量。

8.1.6 超高性能混凝土配合比应综合考虑超高性能混凝土的强度、工作性能、耐久性和其他必要的性能要求，计算的初始配合比需要经过实验室试配和调整，得出满足工作性能的基准配合比，在经过强度等技术指标验证复核后确定最终配合比。

8.2 配合比

8.2.1 超高性能混凝土的配置强度应按式 (1) 计算：

$$f_{cu,0} \geq 1.15 f_{cu,k} \quad (1)$$

式中：

$f_{cu,0}$ ——超高性能混凝土的配置强度，单位为兆帕 (MPa)；

$f_{cu,k}$ ——要求超高性能混凝土力学等级对应的立方体抗压强度标准值，单位为兆帕 (MPa)。

8.2.2 超高性能混凝土中，水泥用量宜大于胶凝材料体积总量的 50.0%。

8.2.3 超高性能混凝土中骨料体积应为总体积减去胶凝材料、水、钢纤维体积和含气量所得。骨料总用量应由骨料总体积乘以骨料密度得到。

8.2.4 超高性能混凝土配合比设计应符合颗粒最紧密堆积理论，应采用激光粒度仪测定所有原材料粒度，得到原材料粒度范围后，最紧密堆积状态下颗粒堆积目标曲线函数 $P(D)$ 应按式 (2) 计算：

$$P(D) = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \quad (2)$$

式中：

$P(D)$ ——最紧密堆积状态下颗粒堆积目标曲线函数，无单位；

D ——超高性能混凝土原材料实际颗粒粒径，单位为毫米 (mm)；

D_{max} ——超高性能混凝土原材料中最大颗粒粒径，单位为毫米 (mm)；

D_{min} ——超高性能混凝土原材料中最小颗粒粒径，单位为毫米 (mm)。

q ——分布模量常数，原材料最大粒径大于 2.36 mm 时取 0.25，小于等于 2.36 mm 时取 0.23。

8.2.5 超高性能混凝土不同配合比堆积密实程度应通过颗粒最紧密堆积目标曲线函数 $P_{tra}(D)$ 和实际合成曲线函数 $P_{mix}(D)$ 的残差平方和 (RSS) 表示，计算公式如式 (3)：

$$RSS = \sum_{i=1}^n (P_{mix}(D_i^{i+1}) - P_{tra}(D_i^{i+1}))^2 \quad (3)$$

式中：

RSS ——残差平方和，表征颗粒堆积密实程度，数值越小表示密实程度越高，无单位；

$P_{tra}(D)$ ——颗粒最紧密堆积目标曲线函数，无单位；

$P_{mix}(D)$ ——颗粒堆积实际合成曲线函数，无单位。

8.3 试配、配合比调整和确定

8.3.1 超高性能混凝土试配时，首先应进行试拌，检测拌合物工作性能指标。当拌合物工作性能不能满足要求时，应在水胶比不变、胶凝材料用量和外加剂用量合理的原则下，调整胶凝材料和外加剂用量，根据试拌结果，提出超高性能混凝土基准配合比。

8.3.2 进行超高性能混凝土强度实验时，应至少采用三个不同配合比。其中一个为 8.3.1 提出的基准配合比，另外两个配合比的水胶比宜较基准配合比分别增加和减少 0.01，骨料的体积分数可分别增加和减少 1.0 %。

8.3.3 进行超高性能混凝土强度实验时，每种配合比应至少制作一组（六块）试件。如耐久性有要求时，还应制作相应的试件并检测相应耐久性指标。

8.4 拌合物性能测定方法

8.4.1 扩展度和经时损失

超高性能混凝土拌合物的扩展度和扩展度 1 h 经时损失应按照 GB/T 50080 的相关规定进行测定，应测试超高性能混凝土拌合物不再扩展或持续时间达到 90 s 的扩展度。

8.4.2 扩展时间

超高性能混凝土拌合物的扩展时间应按照 GB/T 50080 的相关规定进行测定，坍落度筒提离地面时开始计时，测试超高性能混凝土拌合物扩展度达到 500 mm 的时间即为扩展时间。

8.5 力学性能测定方法

8.5.1 抗压强度

超高性能混凝土的抗压强度应按 GB/T 50081 的相关规定进行测试，并符合下列规定：

——应采用 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件，每组 6 个试件；

——加载速率应为 1.20 MPa/s～1.40 MPa/s；

——取与平均值偏差小于 10 % 的试件强度平均值作为测定值。当 6 个测试值中有 1 个或 2 个与平均值的差值超过 10 % 时，将超出平均值 10 % 的测试值舍去，取剩余测试值的平均值为该组试件的抗压强度值；当有 3 个或 3 个以上试件强度值与平均值的偏差大于 10 % 时，则该组试件实验结果无效。

8.5.2 抗拉性能

超高性能混凝土的抗拉性能应按附录 B 进行测定。

8.5.3 弹性模量

超高性能混凝土的弹性模量应按照 GB/T 50081 的相关规定进行测定，试件应采用 100 mm×100 mm×300 mm 的棱柱体试件，加载速率为 1.20 MPa/s～1.40 MPa/s。

8.5.4 抗弯拉强度

超高性能混凝土的抗弯拉强度应按照GB/T 50081中抗折强度实验方法的相关规定测定，并符合下列规定：

- 试件应采用 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱体试件，每组试件 3 个；
- 应采用四点加载方式，试件支座跨度为 300 mm，采用双点加荷使两相等的荷载同时垂直作用于试件跨度的两个三分点处；
- 应对试件进行均匀加载，初裂前加载速率应为 1.20 MPa/s~1.40 MPa/s，初裂后采取位移控制，加载速率应为 0.1 mm/min，继续加载至荷载低于最大荷载的 30 %时完成测试；
- 应以实验过程中的最大荷载计算超高性能混凝土的抗弯拉强度。

8.6 耐久性测定方法

8.6.1 超高性能混凝土的氯离子扩散系数应按照 T/CECS 10107 中的规定进行测定。

8.6.2 超高性能混凝土的单面盐冻质量损失率应按照 GB/T 50082 中相关规定进行测定。

8.6.3 超高性能混凝土早龄期自收缩和干燥收缩测试应符合下列规定：

- 超高性能混凝土的早龄期自收缩测试应按照附录 C 进行测定；
- 超高性能混凝土的干燥收缩应按照 GB/T 50082 中收缩实验（接触法）的相关规定进行测试。自然养护超高性能混凝土干燥收缩测试应从养护 3 d 后开始测试，测试时长为 28 d；蒸汽养护超高性能混凝土干燥收缩测试的开始时间为蒸汽养护结束，测试时长为 28 d。

9 施工

9.1 一般规定

9.1.1 超高性能混凝土材料宜预混后供应。

9.1.2 根据超高性能混凝土水化热和早期收缩等特点，应采取必要措施防止早期开裂。

9.2 原材料贮存

9.2.1 超高性能混凝土原材料应按品种、规格和生产厂家分别标识，并应贮存于干燥、通风、防尘、防潮和防雨的场所，应符合 GB/T 31387 规定。

9.2.2 超高性能混凝土预混料应袋装储存，不同批次超高性能混凝土材料不宜混放。

9.3 原材料计量

9.3.1 超高性能混凝土原材料计量应采用电子计量设备，计量设备应具有法定计量部门签发的有效检定证书，并按要求定期检验。

9.3.2 超高性能混凝土粉体原材料、预混料应按质量计量，水和液体外加剂可按质量或体积计量。

9.3.3 超高性能混凝土拌合物应根据施工配合比，准确计量各原材料的重量，计量允许偏差不应超过表 10 的规定。

表10 原材料计量允许偏差

原材料种类	预混料	水泥	矿物掺合料	骨料	纤维	外加剂	水
每盘计量允许偏差/%	±2	±2	±1	±3	±1	±1	±1
累计计量允许偏差/%	±2	±2	±1	±3	±1	±1	±1

9.4 搅拌

9.4.1 超高性能混凝土的搅拌应根据工程类型、工程规模、施工工艺和进度要求合理配置搅拌设备，宜采用可调速的强制式或行星式搅拌机，加料过程中宜有纤维分散装置，搅拌量宜控制在搅拌机最大搅拌量的40%~70%。

9.4.2 超高性能混凝土搅拌前，应检查搅拌设备状态，确保搅拌设备清洁、干燥，首次搅拌前应对搅拌设备进行润湿但不应渍水。

9.4.3 搅拌时应先将粉料预拌1 min~2 min，后加入水进行湿拌，湿拌时间宜大于5 min；缓慢加入纤维，待纤维完全加入后继续搅拌2 min~4 min，使纤维分散均匀。

9.4.4 同一盘超高性能混凝土的均质性应符合GB 50164规定，应对同一盘超高性能混凝土中纤维含量随机进行检测，检测方法应符合JGJ/T 221规定，检测次数不少于三次，所有检测值与纤维含量的设计值相对误差均不应不大于5%。

9.5 拌合物运输

9.5.1 超高性能混凝土运输宜采用有搅拌装置的运输车或采用泵送方式输送。

9.5.2 在温度高于35℃时运输超高性能混凝土应采取防止水分散失的措施，下雨时运输超高性能混凝土应采取覆盖篷布等遮雨措施。

9.5.3 应及时清理黏附在运输设备内壁的超高性能混凝土残留物，清洗搅拌和运输设备后的水应对纤维进行过滤。

9.5.4 超高性能混凝土拌合物运输应合理安排运输车的数量和时间间隔，保证浇筑的连续性。

9.5.5 超高性能混凝土拌合物运输过程中，应保证搅拌车正常运转，不得停转。搅拌运输车卸料前，罐体宜快速搅拌20 s后再进行卸料。

9.6 浇筑

9.6.1 超高性能混凝土现场浇筑应保证纤维分散的均匀性和结构的整体性，且符合下列规定：

- 浇筑前要检查模板、支架、钢筋、预埋件位置和尺寸；
- 超高性能混凝土的浇筑应从一侧以均匀的速率浇筑，宜一次性浇筑完毕，浇筑后可用橡胶锤敲击侧模；
- 超高性能混凝土可采用平板振捣或模外振捣，不应采用插入振捣。所采用的振捣设备和工艺应避免拌合物离析、分层以及纤维下沉或裸露；
- 超高性能混凝土拌合物浇筑时倾落高度应小于1.5 m；
- 超高性能混凝土泵送施工时，应符合JGJ/T 10的相关规定；
- 超高性能混凝土浇筑过程中应随机成型试件，同条件养护后用于强度和耐久性能测试。

9.6.2 超高性能混凝土预制构件浇筑应符合下列规定：

- 预制构件模具应根据构件要求、生产工况进行设计，模具应有足够的承载力和刚度；
- 模具部件之间应连接牢固，并有防漏浆措施；
- 成型前应检查模具清洁度，模具表面应清洁干燥；
- 宜使用效果良好的脱模剂对模具进行处理，确保预制构件外观品质良好；
- 预制构件制作过程应连续成型，拌合物从加水至浇筑完毕宜不超过60 min；
- 对于工作性能为USF2级及以下的超高性能混凝土拌合物，浇筑完成后宜通过振动排出拌合物中气泡。

9.7 养护

9.7.1 超高性能混凝土可采用蒸汽养护或自然养护等方式，推荐采用蒸汽养护。

9.7.2 超高性能混凝土自然养护宜按照GB/T 50081的规定进行。

9.7.3 超高性能混凝土现场浇筑时自然养护应符合下列规定：

- 浇筑完成后，应及时喷水雾保证浇筑完成的超高性能混凝土表面湿润，并及时覆盖塑料膜；
- 覆膜过程中，不应扰动破坏已浇筑的超高性能混凝土；
- 养护过程中，应及时巡查，发现有塑料膜破损应及时更换，且应保证超高性能混凝土表面湿润；
- 自然养护时间不宜少于 7 d。

9.7.4 超高性能混凝土预制构件蒸汽养护时，应符合下列规定：

- 超高性能混凝土预制构件蒸汽养护条件应依据设计性能确定；
- 蒸汽养护过程分为升温、恒温 and 降温三个过程，宜采用温度自动控制系统对养护棚内的升温、恒温 and 降温过程进行控制，养护过程棚内相对湿度应高于 95.0 %；
- 蒸汽养护时，升温速度应小于 12℃/h；养护结束后，降温速度应小于 15℃/h。

9.8 高温低湿环境下施工特殊规定

9.8.1 高温低湿环境下，宜在早晨或晚上进行超高性能混凝土施工，避免高温对超高性能混凝土影响，夜间施工应配备良好的照明措施，确保施工安全。

9.8.2 高温低湿环境下，应随时检测原材料和拌合物温度，拌合物温度高于 40℃ 时不可继续施工。

9.8.3 高温低湿环境下，应加快浇筑速率，防止高温加速水分蒸发对拌合物性能影响。

9.8.4 高温低湿环境下，应及时调整搅拌车运转周期和速率。

9.8.5 高温低湿环境下，应提升拌合物扩展度和扩展度达到 500 mm 时间等工作性能指标检测频率，浇筑前拌合物扩展度低于 500 mm 时应重新调整拌合物工作性能。

9.8.6 高温低湿环境下，超高性能混凝土施工完成后应在表面喷水雾，并覆盖塑料膜和土工布以减缓水分蒸发。

9.8.7 高温低湿环境下，覆膜后应间隔 1.5 h 检查膜破损情况，发现破损后应在表面喷水雾并重新覆膜，防止干裂。

9.9 低温环境下施工特殊规定

9.9.1 环境温度低于 15℃ 的环境，称为低温环境。

9.9.2 超高性能混凝土施工温度不应低于 5℃，当温度范围为 5℃~15℃ 时，应先制定保温措施，再进行施工。

9.9.3 低温环境下，应加快搅拌运输车搅拌速率，避免低温导致拌合物工作性能损失。

9.9.4 低温环境下，覆膜后应采取必要的升温措施。

9.9.5 低温环境下，超高性能混凝土终凝后宜采取蒸汽养护措施，养护温度宜高于 20℃，不应采用电热风等干热养护措施。

9.10 桥梁湿接缝施工特殊规定

9.10.1 超高性能混凝土浇筑前应将湿接缝接触范围内的混凝土凿去 2 mm~3 mm，清洗干净，保持表面湿润且不得留有积水。

9.10.2 湿接缝处的模板应具有足够的强度和刚度，与梁体的接触面应做到紧密粘结并设置一定的搭接长度，各个接缝周围应贴高强止浆橡胶条。

9.10.3 一联湿接缝应一次性浇筑完成，浇筑过程中可采用钢筋插捣辅助密实，不应采用插入式振捣棒。

9.10.4 湿接缝浇筑完成后，应覆膜自然养护 7 d 以上，同条件成型试件抗压强度超过 50 MPa 后可进行下道工序。

9.11 钢桥面铺装施工特殊规定

- 9.11.1 超高性能混凝土桥钢面铺装宜使用专用摊铺机和覆膜机协同作业完成。
- 9.11.2 超高性能混凝土钢桥面铺装前钢桥面结构制作应包括焊接全断面锚钉、绑扎钢筋网片、安装桥面板侧模及端模、布置超高性能混凝土摊铺机和覆膜机等工序。
- 9.11.3 超高性能混凝土钢桥面铺装应由中间开始向两端铺装。
- 9.11.4 超高性能混凝土钢桥面铺装时泵车和搅拌车应停放在开阔地带，浇筑后应及时使用覆膜机覆盖塑料保湿膜和土工布。
- 9.11.5 超高性能混凝土钢桥面铺装时拌合物层间不应出现冷缝。对于扩展度高于 750 mm 的拌合物，应一次性浇筑完毕，不宜振捣；对于扩展度为 550 mm 至 750 mm 的拌合物，应采用分层浇筑，层间界面应加强振动，每层厚度不应超过 30 mm，厚度应采用水平仪进行控制。
- 9.11.6 超高性能混凝土钢桥面铺装时，对于坡度为 0 的位置，宜采用扩展度为 600 mm 至 700 mm 的拌合物；对于坡度不为 0 的位置，拌合物扩展度应根据实验进行调整，保证拌合物在满足施工性能的基础上在坡度面上不流动，坡顶和坡底厚度之差不应超过 5 mm。
- 9.11.7 超高性能混凝土钢桥面铺装完成后应封闭桥面板前后 20 m 道路，并自然养护时间 7 d 以上。

10 检验与评定

10.1 一般规定

- 10.1.1 超高性能混凝土的质量检验应根据成型方式分为预制构件检验和现场拌合检验。
- 10.1.2 超高性能混凝土预制构件质量检验和现场拌合质量检验均应进行原材料质量检验、半成品和成品质量检验。
- 10.1.3 超高性能混凝土应根据设计文件或相关标准对超高性能混凝土质量的要求，建立质量管理和保证体系。

10.2 超高性能混凝土原材料质量检验

- 10.2.1 原材料质量检验应包括以下内容：
- 原材料厂家、品牌、规格和数量等信息；
 - 原材料质量检测报告。
- 10.2.2 原材料进厂后应按设计文件要求和相关标准进行性能检验，满足要求后方可使用。
- 10.2.3 超高性能混凝土预混料质量检验应同时称量原材料制备相同配比试件，并与预混料在同条件下检测相同指标，各指标差异应不超过 $\pm 5.0\%$ 。
- 10.2.4 预混料、水泥、掺合料、骨料、外加剂和纤维等超高性能混凝土原材料质量检验及评定应符合表 11 要求。

表11 超高性能混凝土原材料质量检验及验收要求

原材料名称		检测项目	检验频次	检测方法和评定标准
预混料		扩展度、经时损失、抗压强度、抗拉强度	100 t/次	T/CBMT 37、GB/T 50107
原材料	水泥	标准稠度需水量、细度、凝结时间、强度	20 t/次	GB 175
	掺合料	标准稠度需水量、细度和烧失量	20 t/次	GB/T 1596、GB/T 27690
	骨料	颗粒级配、含泥量	30 t/次	JGJ 52、DB62/T 2917
	外加剂	固含量、减水率	10 t/次	GB 8076

表 11 超高性能混凝土原材料质量检验及验收要求(续)

原材料名称		检测项目	检验频次	检测方法和评定标准
纤维	钢纤维	抗拉强度、长度偏差、有害物质	10 t/次	JG/T 31387
	玄武岩纤维			JG/T 351
	玻璃纤维			JC/T 572
	短切聚乙烯纤维			GB/T 21120
	短切聚甲醛纤维			GB/T 22271

10.3 超高性能混凝土拌合物质量检验

10.3.1 超高性能混凝土拌合物质量检验分为型式试验、出厂检验和交货检验。

10.3.2 下列情况应进行型式试验：

- 新产品投入或新产品定型鉴定；
- 正常生产时，每年应大于等于一次；
- 主要原材料、生产工艺或配合比发生较大变化；
- 出厂检验结果与上次型式试验差异较大；
- 停产六个月恢复生产。

10.3.3 超高性能混凝土拌合物出厂前应进行出厂检验，出厂检验的取样和测试工作应由供货方负责，并提供相关出厂报告。

10.3.4 超高性能混凝土拌合物型式试验、出厂检验和交货检验的检验项目应符合表 12 规定。

表12 超高性能混凝土检测项目

项目	型式试验	出厂检验	交货检验
扩展度	√	√	√
扩展度经时损失	√	×	○
扩展时间	√	×	○
抗压强度	√	√	√
抗拉性能	√	×	√
弹性模量	√	×	○
抗弯拉强度	√	√	○
氯离子扩散系数	√	×	○
干燥收缩	√	×	○
早龄期自收缩	√	×	○

注：“√”为必检项目，“×”为无需检验项目，“○”为可选检验项目，并由供需双方协商确定。

10.4 取样与抽检频率

10.4.1 超高性能混凝土拌合物取样与抽检应符合下列规定：

- 出厂检验的超高性能混凝土拌合物，应在搅拌地点随机取样，每 50 m³ 相同的超高性能混凝土取样应不少于 1 次，批量不足 50 m³ 的超高性能混凝土按 50 m³ 计算；

- 交货检验的超高性能混凝土拌合物，应在交货地点进行随机抽取。在搅拌运输车中取样时，应在同一车卸料的 1/4 和 3/4 之间取样。拌合物扩展度和抗压强度检测的取样检验，每 50 m³ 相同的超高性能混凝土取样应不少于 1 次；批量不足 50 m³ 的超高性能混凝土按 50 m³ 计算；抗拉性能检测的取样检验，每 200 m³ 相同的超高性能混凝土取样应不少于 1 次；
- 供需双方应商议确定其他的检验项目，同一工程、同一配合比的拌合物应至少检验一次。

10.4.2 超高性能混凝土预混料取样与抽检应符合下列规定：

- 出厂检验的预混料，应在出料口随机取样，按超高性能混凝土配合比拌制成拌合物后检验。每 100 t 相同的超高性能混凝土取样应不少于 1 次，批量不足 100 t 按 100 t 计算；
- 交货检验的预混料，应在交货地点随机取样，按超高性能混凝土配合比拌制成拌合物后检验。拌合物扩展度和抗压强度检测的取样检验，每 100 t 超高性能混凝土取样应不少于 1 次，批量不足 100 t 按 100 t 计算。抗拉性能检测的取样检验，每 500 t 超高性能混凝土取样应不少于 1 次；
- 供需双方应商议确定其他的检验项目，同一工程、同一配合比的预混料应至少检验一次。

10.5 预制构件检验

10.5.1 超高性能混凝土预制构件可分为小型预制构件和结构类预制构件，其中小型预制构件包括盖板类预制构件、六棱块类预制构件和排水槽类预制构件等，结构类预制构件包含工字梁、T 型梁和 π 型梁等。

10.5.2 超高性能混凝土小型预制构件检验应包含尺寸偏差检验、外观质量检验和承载能力检验等，超高性能混凝土结构类预制件检验应包含尺寸偏差检验和设计要求检验。

10.5.3 超高性能混凝土尺寸偏差检验和方法应符合表 13 规定，其中，粗糙面尺寸允许偏差应放宽至相应要求的 1.5 倍。

表13 超高性能混凝土构件尺寸偏差检验和方法

编号	检查项目			允许偏差/mm	检验方法
1	长、宽、高度	<1 m		±2	用尺测量两端及中间，取其中偏差绝对值较大值
		≥1 m且<6 m		±3	
		≥6 m且<12 m		±4	
2	截面尺寸			±2	用尺测量两端及中间，取其中偏差绝对值较大值
3	对角线差			±3	用尺量测构件表面两对角线长度，取其绝对值差值
4	外形	表面平整度	清水面	±2	用2 m靠尺安放在构件表面，用楔形塞尺量测靠尺与表面之间的最大缝隙
			非清水面	±3	
		侧向弯曲		≤5	拉线，钢尺量最大弯曲处
		翘翘		≤5	四对角拉两条线，量测两线交点与构件表面距离，取其2倍值
5	预埋部件	中心线位置偏移		±3	用尺量测纵横两个方向中心线位置，取较大值
		平面高差		(0, -2)	靠尺安放在构件表面，用楔形塞尺量测预埋件平面与混凝土面最大缝隙
6	预留孔洞	中心线位置偏移		±2	用尺量测纵横两个方向的中心线位置，取较大值
		孔尺寸		±3	用尺量测纵横两个方向尺寸，取较大值

表 13 超高性能混凝土构件尺寸偏差检验和方法（续）

编号	检查项目		允许偏差/mm	检验方法
7	吊环、吊钉	中心线位置偏移	±5	用尺量测纵横两个方向的中心线位置，取较大值
		留出高度	(0, -3)	用尺量测

10.5.4 超高性能混凝土预制构件成品外观质量检验应符合表 14 的规定。

表14 构件外观质量检验方法

编号	检查项目	控制指标	检验方法
1	裂缝	预制产品表面不应出现裂缝	目视检测
2	孔洞	孔洞面积应小于0.8 mm²/m²，且孔径应小于2 mm	-
3	色差	△E _{Lab} 应小于等于3.0	色差仪
4	黑斑	构件表面应无明显黑斑	目视检测
5	掉角	构件掉角面积应不高于总面积的1.0 %	拍照法

10.5.5 超高性能混凝土板类预制构件的承载能力检测应符合附录 D 要求。

10.5.6 超高性能混凝土六棱块类预制构件承载能力检测应符合附录 E 要求。

10.5.7 超高性能混凝土结构类预制构件检测应符合相关设计要求。

10.5.8 超高性能混凝土预制构件成品在设计载荷作用下不应出现肉眼可见的裂纹，且破坏载荷应不小于设计载荷的 1.5 倍。

10.6 判定规则

10.6.1 对于超高性能混凝土原材料和拌合物质量检验，若全部检验项目符合本规范要求，则判定该产品合格。若 3 项或 3 项以上检验项目不符合本规范要求时，则判定该产品不合格。若 2 项检验项目不符合本规范要求时，可重新加倍取样，对不符合的检验项目进行二次检验判定，若二次检验符合本规范要求，则判定产品合格；若不符合本规范要求，则判定产品不合格。

10.6.2 对于超高性能混凝土预制件质量检验，若全部检验项目符合本规范要求，则判定该产品检验合格；若判定有检验项目不符合本规范要求，则判定产品不合格。

11 包装、运输和储存

11.1 一般规定

11.1.1 超高性能混凝土应根据工程形式、施工工艺和环境因素等分为干混料、拌合物、小型预制构件和结构类预制构件的包装、运输和储存。

11.1.2 干粉料、拌合物包装、储存和运输前，生产单位应根据超高性能混凝土的强度等级、生产工艺等确定超高性能混凝土相应的配合比。

11.1.3 小型预制构件、结构类预制构件包装、储存和运输前，应组织设计、生产和施工单位进行技术交底。如预制构件生产无法满足设计要求，应重新优化设计和施工验算，避免在预制构件生产和施工过程中，出现错、漏、碰、缺等问题。对预制构件的预留孔洞和预埋件，应在生产前进行认真核对，避免出现现场剔凿，造成损失。

11.2 包装

11.2.1 超高性能混凝土干混料供应时，宜采取袋装包装。外加剂、纤维可预拌于干混料统一供应，也可单独独立包装供应。

11.2.2 袋装超高性能混凝土干混料包装袋应标注名称、商标、净含量、使用说明、储藏条件、生产日期、产品批号、生产单位、地址和电话等信息。

11.2.3 小型预制构件和结构类预制构件脱模后应在表面醒目位置按设计要求编码。

11.2.4 小型预制构件和结构类预制构件编码应包含构件型号、质量情况、使用部位、外观、生产日期（批次）及“合格”字样等信息。

11.2.5 小型预制构件和结构类预制构件编码宜采用水性环保涂料或塑料贴膜等不易清除材料。

11.3 运输

11.3.1 超高性能混凝土干混料运输时，应有防尘措施，不应污染环境。

11.3.2 超高性能混凝土干混料运输过程中，不宜混入杂物，并应有覆盖篷布等防雨和防潮措施。

11.3.3 超高性能混凝土拌合物运输时，搅拌运输车装料前应保持装料口清洁、筒体干燥、不应有其他浆料和杂物。

11.3.4 小型预制构件和结构类构件运输前应制订运输计划和方案，并应进行实际运输路线勘查。预制构件的运输应在超高性能混凝土强度达到设计要求后进行。构件运输的总高度不宜超过 4.5 m，总宽度不宜超过运输车辆车宽；超高、超宽、形状特殊的大型构件运输应有质量安全保证措施。

11.3.5 小型预制构件及结构类构件的运输车辆应满足构件尺寸和载重要求，且运输车辆应符合下列规定：

- 装卸构件时应考虑车体平衡；
- 运输时应采取绑扎和固定措施，防止构件移动或倾倒；
- 运输竖向薄壁构件时应设置临时支架；
- 构件角部或与紧固装置接触处的超高性能混凝土，宜采用垫衬保护；
- 运输线路有限高要求时，构件堆放高度不应超过限高要求。

11.3.6 小型预制构件及结构类构件运输宜选用低平板车，且应有可靠的稳定构件措施。

11.3.7 小型预制构件及结构类构件采用装箱方式运输时，箱内四周应采用木材、泡沫等作为支撑物，构件接触部位应用柔性垫片填实。

11.3.8 小型预制构件及结构类构件宜采用插放架、靠放架或直立堆放。插放架、靠放架应满足设计要求并具有足够的强度、刚度和稳定性；平板应叠层平放，层间宜采用泡沫填充。

11.3.9 对于存在缺陷但不影响结构承载力和耐久性的预制构件，宜进行缺陷修补和重新检验后运输。

11.4 储存

11.4.1 超高性能混凝土干混料在储存过程中应防潮，不同品种、不同型号的干混料应分开储存。

11.4.2 袋装干混料应储存在干燥环境中，储存过程中包装不应破坏。

11.4.3 袋装干混料的保质期自生产日期起为 6 个月；超过 6 个月应进行复检，复检合格可继续使用。

11.4.4 小型预制构件及结构类构件的储存场地宜为混凝土硬化地面或经人工处理的自然地坪，应满足平整度和地基承载力要求，并应有排水措施。

11.4.5 小型预制构件及结构类构件应按型号、出厂日期分开储存。

11.4.6 小型预制构件多层叠放时，每层构件间的垫块应上下对齐；板类和六棱块等构件宜平放，叠放层数不宜超过 10 层；长期存放时，应防止预应力构件起拱和翘曲变形。

附录 A
(规范性)
超高性能混凝土本构关系

A.1 说明

本附录规定了超高性能混凝土在单轴受压和单轴受拉状态下的应力-应变关系。

A.2 单轴受压和受拉强度计算

超高性能混凝土单轴受压和受拉状态下，立方体抗压强度平均值 (f_{cm}) 和弹性极限抗拉强度平均值 (f_{tm}) 计算公式如式 (A.1) 和 (A.2)：

$$f_{cm} = f_{cu,k} / (1 - 1.645\delta) \quad (A.1)$$

$$f_{tm} = f_{tk} / (1 - 1.645\delta) \quad (A.2)$$

式中：

- f_{cm} ——立方体抗压强度平均值，单位为兆帕 (MPa)；
- $f_{cu,k}$ ——立方体抗压强度标准值，单位为兆帕 (MPa)；
- f_{tm} ——弹性极限抗拉强度平均值，单位为兆帕 (MPa)；
- f_{tk} ——弹性极限抗拉强度标准值，单位为兆帕 (MPa)；
- δ ——超高性能混凝土强度变异系数，宜根据实验统计进行确定；

A.3 单轴受压状态

超高性能混凝土单轴受压应力-应变关系应按式 (A.3) ~ (A.6) 确定，设计受压应力-应变曲线和参数取值如图A.1和表A.1所示。

$$\sigma_c = f_{ck} \times (\varepsilon / \varepsilon_0) \quad (\varepsilon < \varepsilon_0) \quad (A.3)$$

$$\sigma_c = f_{ck} \quad (\varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu}) \quad (A.4)$$

$$\varepsilon_0 = f_{ck} / E_c \quad (A.5)$$

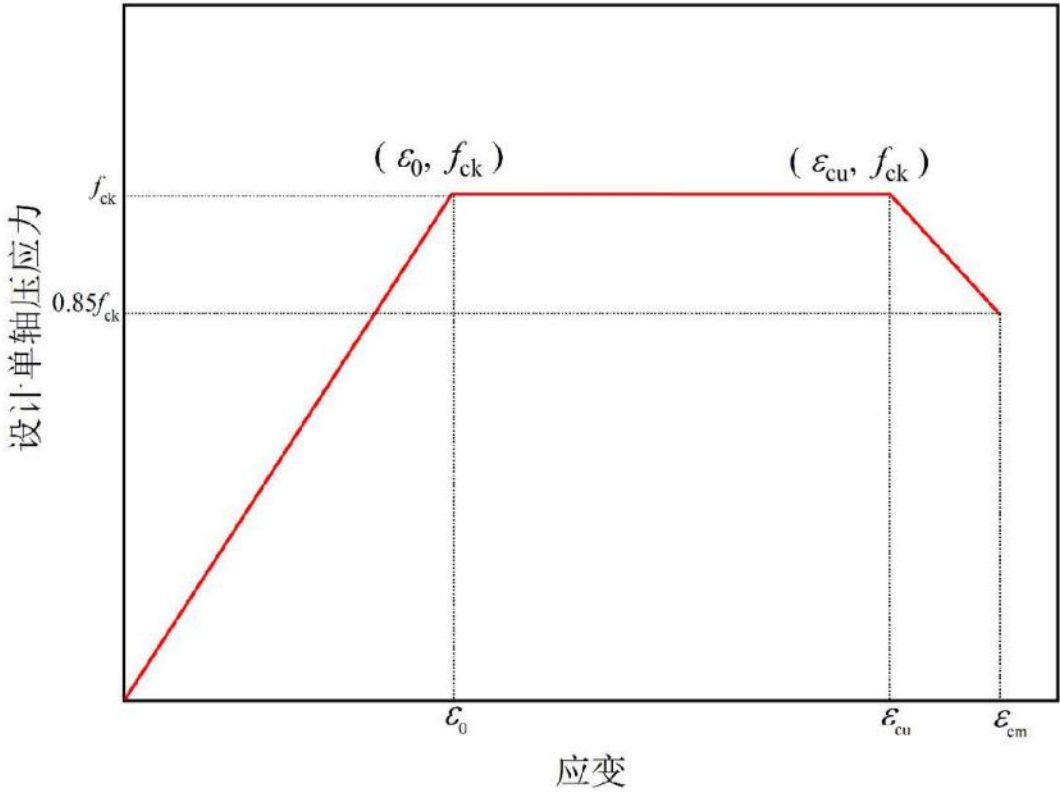
$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_0 + (f_{cu,k} - 120) \times 10^{-5} \quad (A.6)$$

式中：

- σ_c ——压应力，单位为兆帕 (MPa)；
- f_{ck} ——轴心抗压强度标准值，单位为兆帕 (MPa)；
- $f_{cu,k}$ ——立方体抗压强度标准值，单位为兆帕 (MPa)；
- ε_0 ——超高性能混凝土达到轴心抗压强度 f_{ck} 对应的压应变；
- ε_{cu} ——超高性能混凝土极限压应变，当处于轴心受压时取为 ε_0 ；
- ε ——实际压应变；
- E_c ——压缩弹性模量，单位为兆帕 (MPa)。

表A.1 超高性能混凝土受压应力-应变参数取值

$f_{cu,k}$ /MPa	120	130	140	150	160	170	180	190	200
f_{cm} /MPa	125.1	135.1	145.1	155.1	165.1	175.1	185.1	195.1	205.1
f_{ck} /MPa	84.5	91.5	98.6	105.5	112.6	119.7	126.7	133.8	140.8
f_c /MPa	58.2	63.1	68.0	72.7	77.6	82.5	87.3	92.2	97.1
$E_c / (\times 10^3 \text{MPa})$	41	43	44	45	46	47	47	48	49
$\varepsilon_0 (\times 10^{-6})$	2060	2127	2240	2344	2447	2546	2695	2787	2873



图A.1 单轴受压应力-应变关系

A.4 单轴受拉状态

超高性能混凝土单轴受拉应力-应变关系应按式（A.7）～（A.9）确定，设计受拉应力-应变曲线和参数取值如图A.2和表A.2所示。

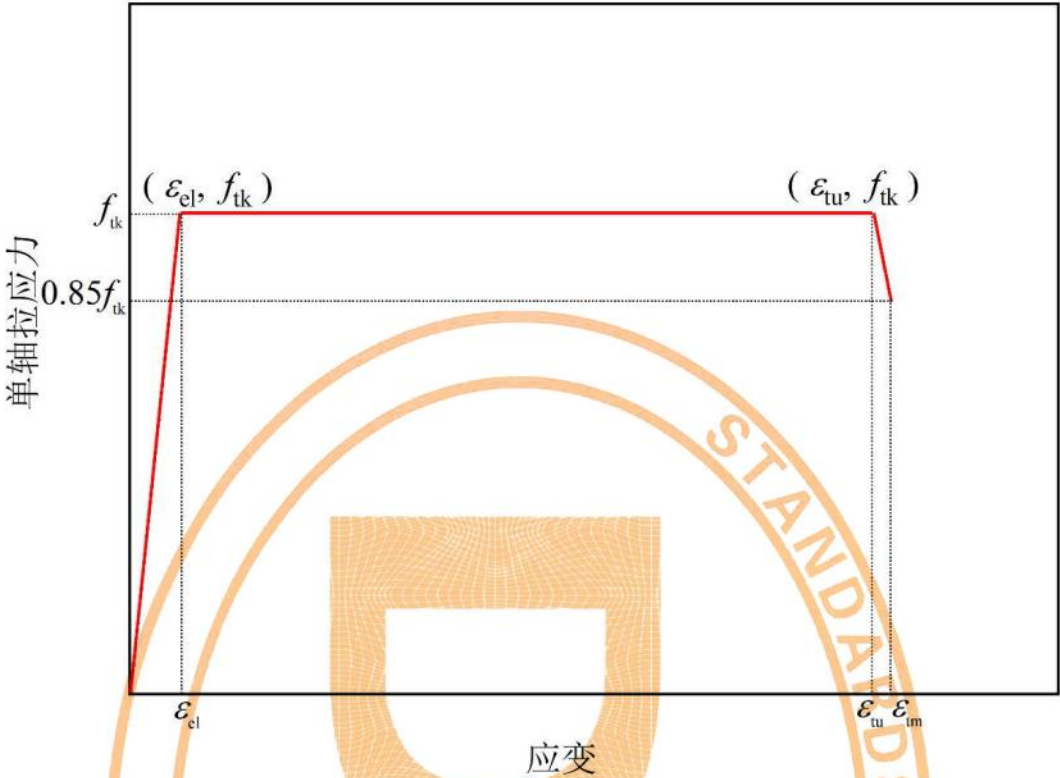
$$\sigma_t = f_{tk} \times (\varepsilon / \varepsilon_{el}) \quad (\varepsilon < \varepsilon_{el}) \quad \cdots \cdots \cdots (A.7)$$
$$\sigma_t = f_{tk} \quad (\varepsilon_{el} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{tu}) \quad \cdots \cdots \cdots (A.7)$$
$$\varepsilon_{el} = f_{tk} / E_t \quad \cdots \cdots \cdots (A.9)$$

式中：

- σ_t ——拉应力，单位为兆帕（MPa）；
- f_{tk} ——抗拉强度，单位为兆帕（MPa）；
- ε_{el} ——超高性能混凝土达到抗拉强度 f_{tk} 对应的拉应变，无单位；
- ε_{tu} ——超高性能混凝土极限拉应变，无单位；
- ε ——实际拉应变，无单位；
- E_t ——拉伸弹性模量，单位为兆帕（MPa）。

表A.2 超高性能混凝土受拉应力-应变参数取值

f_{tk} /MPa	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
f_{tm} /MPa	6.0	7.0	7.9	8.9	9.9	10.9
f_t /MPa	2.9	3.4	4.0	4.6	5.1	5.7
E_t /($\times 10^3$ MPa)	40	43	45	47	48	50
ε_{el} /($\times 10^{-6}$)	71	81	89	98	106	114



图A. 2 超高性能混凝土轴拉应力-应变关系

附录 B
(规范性)

超高性能混凝土抗拉性能测试方法

B.1 说明

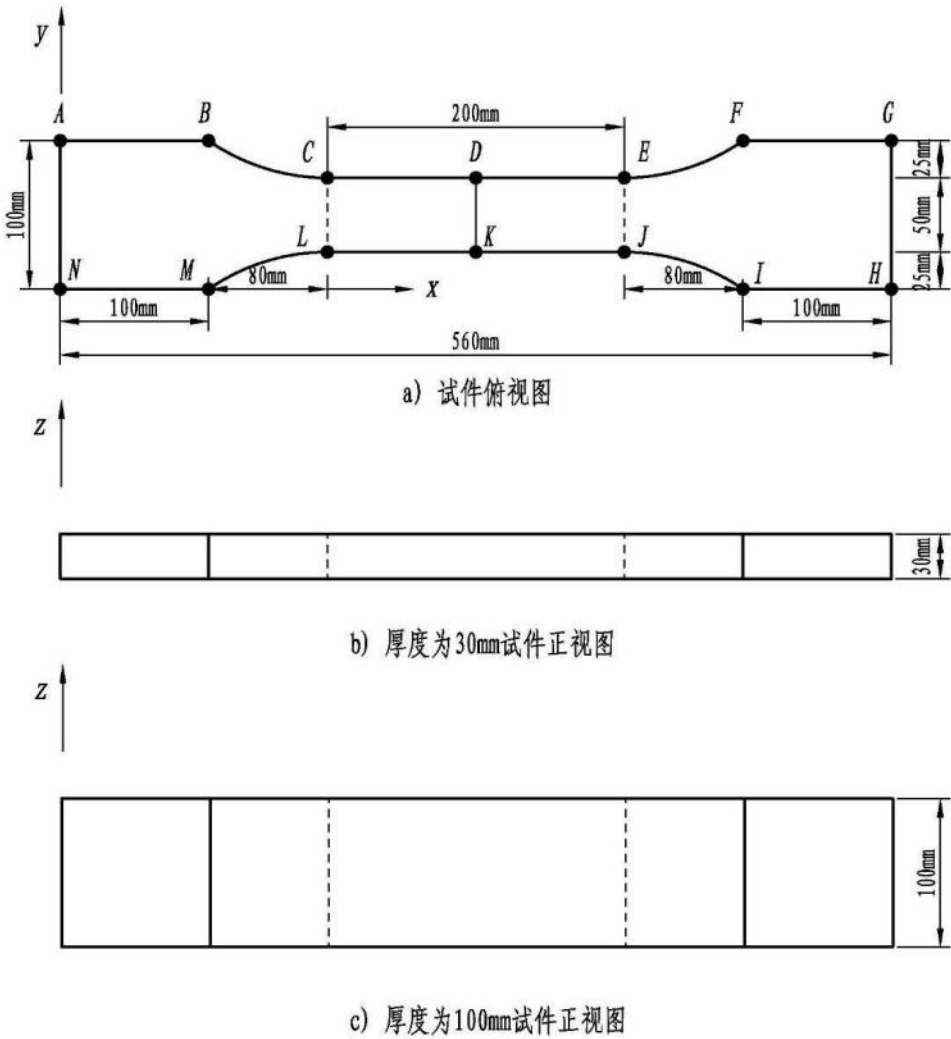
本实验方法适用于测定超高性能混凝土在单轴拉伸实验条件下的弹性极限抗拉强度、弹性极限抗拉应变、弹性拉伸模量、极限抗拉强度和极限抗拉应变，以评价超高性能混凝土的抗拉性能。

B.2 试件尺寸和数量

B.2.1 抗拉性能测试试件尺寸如图B.1所示，其中B~C弧段由包括点B、点C在内的21个点连接而成的20条线段组成，每个点的坐标见表B.1，F~E、I~J、M~L弧段构成与B~C弧段相同。

B.2.2 抗拉性能试件厚度分为100 mm和30 mm两种，供需双方可根据需要选择合适厚度的抗拉性能试件。当超高性能混凝土中纤维长度不大于13 mm且不含粗骨料时，宜采用厚度为30 mm的试件；当超高性能混凝土中纤维长度大于13 mm或含有粗骨料时，宜采用厚度为100 mm的试件。不同厚度试件的测试结果在进行合格评定时不考虑尺寸效应。

B.2.3 每组试件数量为6个。



图B.1 抗拉性能测试试件尺寸示意图

表B.1 B-C 弧段内各点连接坐标

点	X/mm	Y/mm	点	X/mm	Y/mm	点	X/mm	Y/mm
1 (B点)	100.0	100.0	8	128.0	79.1	15	156.0	75.6
2	104.0	94.4	9	132.0	78.2	16	160.0	75.4
3	108.0	90.0	10	136.0	77.4	17	164.0	75.3
4	112.0	86.6	11	140.0	76.8	18	168.0	75.2
5	116.0	84.0	12	144.0	76.4	19	172.0	75.1
6	120.0	81.9	13	148.0	76.0	20	176.0	75.0
7	124.0	80.4	14	152.0	75.8	21 (C点)	180.0	75.0

B.3 实验仪器

B.3.1 拉力实验机应符合下列规定：

- 试件破坏荷载宜大于拉力机最大量程的 20.0 % 且宜小于拉力机最大量程的 80.0 %；
- 示值相对误差应为 $\pm 1.0\%$ ；
- 拉力机应具有加载速率指示装置或加载速度控制装置，并能均匀连续的加载；
- 拉力机拉伸间距不应小于 800 mm；
- 其他要求应符合 GB/T 3159 的有关规定。

B.3.2 用于应变测量的仪器装置应符合下列规定：

- 用于应变测量的仪器应采用位移传感器，也可以采用激光传感器和引伸计。采用位移传感器时应备有用于微变形测量的固定骨架，试件的变形通过微变形固定骨架传递到位移传感器。采用位移传感器测量试件应变时，应备有数据自动采集系统；
- 采用位移传感器时，其测量精度应为 0.001 mm；采用激光传感器和引伸计时，其测量精度应为 0.001%；
- 应变测量的标距宜为 200 mm。

B.4 实验步骤

B.4.1 超高性能混凝土抗拉性能测试时，应同时确定弹性极限抗拉强度、弹性极限抗拉应变、弹性拉伸模量、极限抗拉强度和极限抗拉应变 5 个参数。

B.4.2 到达实验龄期前，将制作的试件从养护室取出，将试件放置于实验机上下夹具中，保证上下夹具与试件中轴线对齐并一致。在试件弧形段与夹具接触部位放置 0.5 mm~1.0 mm 的橡胶垫片。将试件上端与实验机上夹头固定，升降拉力实验机至合适高度，调整试件方向，将试件下端固定。

B.4.3 当采用位移传感器测定变形时，应将位移传感器固定在变形测量架，并由标距定位杆进行定位，然后将变形测量架通过紧固螺丝固定在试件中部。从试件取出至实验完毕，不宜超过 4 h。应提前做好变形测量准备工作。

B.4.4 启动实验机进行预拉，其荷载相当于破坏荷载的 15 %~20 %。预拉时应测量应变值，计算偏心率，计算方法应参考 GB/T 50081 的轴向拉伸实验方法。当试件偏心率大于 15 % 时，应对试件重新进行对中调整。

B.4.5 预拉完毕后，应重新调整测量仪器，进行正式测试。拉伸实验时，对试件进行连续均匀加荷，宜采用位移控制加荷，加荷速率宜控制在 0.2 mm/min。当采用位移传感器测量变形时，试件测量标距内的变形应由数据采集系统自动记录，绘制荷载-变形曲线。

B.4.6 当满足下列条件之一时，应终止加载，停止实验：

- 试件进入拉伸应变软化阶段后拉应力低于抗拉强度 30 % 时；

- 试件的拉应变达到 10000×10^{-6} 时；
- 拉断。

B.5 计算结果和确定

B.5.1 在计算结果前，首先应确定抗拉弹性极限点。在位移传感器和数据采集系统绘制的荷载-变形曲线中，由线性阶段转变为非线性阶段的点为弹性极限点。当弹性极限点不明显时，应取拉应变为 200×10^{-6} 对应曲线上的点作为弹性极限点。

B.5.2 弹性极限抗拉强度应按式 (B.1) 进行计算：

$$f_{tk} = F_{tk} / A \quad \text{..... (B.1)}$$

式中：

f_{tk} ——弹性极限抗拉强度，单位为兆帕 (MPa)，计算结果应精确至 0.01MPa；

F_{tk} ——弹性极限荷载，取弹性极限点处的荷载，单位为牛 (N)；

A ——抗拉试件中部截面积，单位为平方毫米 (mm²)。

B.5.3 弹性极限拉应变应按式 (B.2) 进行计算：

$$\varepsilon_{tk} = l_{tk} / L \quad \text{..... (B.2)}$$

式中：

ε_{tk} ——弹性极限拉应变，计算结果应精确至 10×10^{-6} ，无单位；

l_{tk} ——弹性极限点处变形，单位为毫米 (mm)；

L ——抗拉试件标距，单位为毫米 (mm)。

B.5.4 拉伸弹性模量应按式 (B.3) 进行计算：

$$E_t = f_{tk} / \varepsilon_{tk} \quad \text{..... (B.3)}$$

式中：

E_t ——拉伸弹性模量，单位为兆帕 (MPa)，计算结果精确至 0.1MPa；

f_{tk} ——弹性极限抗拉强度，单位为兆帕 (MPa)；

ε_{tk} ——弹性极限拉应变，计算结果应精确至 10×10^{-6} ，无单位。

B.5.5 极限抗拉强度应按式 (B.4) 进行计算：

$$f_{tu} = F_{\max} / A \quad \text{..... (B.4)}$$

式中：

f_{tu} ——极限抗拉强度，单位为兆帕 (MPa)，计算结果精确至 0.01MPa；

$F_{\max}$ ——抗拉实验加载过程中的最大荷载，单位为牛 (N)；

A ——抗拉试件中部截面积，单位为平方毫米 (mm²)。

B.5.6 极限拉应变应按式 (B.5) 进行计算：

$$\varepsilon_{tu} = l_{tu} / L \quad \text{..... (B.5)}$$

式中：

ε_{tu} ——极限抗拉应变，计算结果应精确至 10×10^{-6} ，无单位；

l_{tu} ——最大拉应力处变形，取荷载-位移曲线中最大拉应力处的试件变形，单位为毫米 (mm)；

L ——抗拉试件标距，单位为毫米 (mm)。

B.5.7 下降至 $0.85f_{tu}$ 时应变应按式 (B.6) 进行计算：

$$\varepsilon_{tm} = l_{tm} / L \quad \text{..... (B.6)}$$

式中：

ε_{tm} ——下降至 $0.85f_{tu}$ 时应变，计算结果应精确至 10×10^{-6} ，无单位；

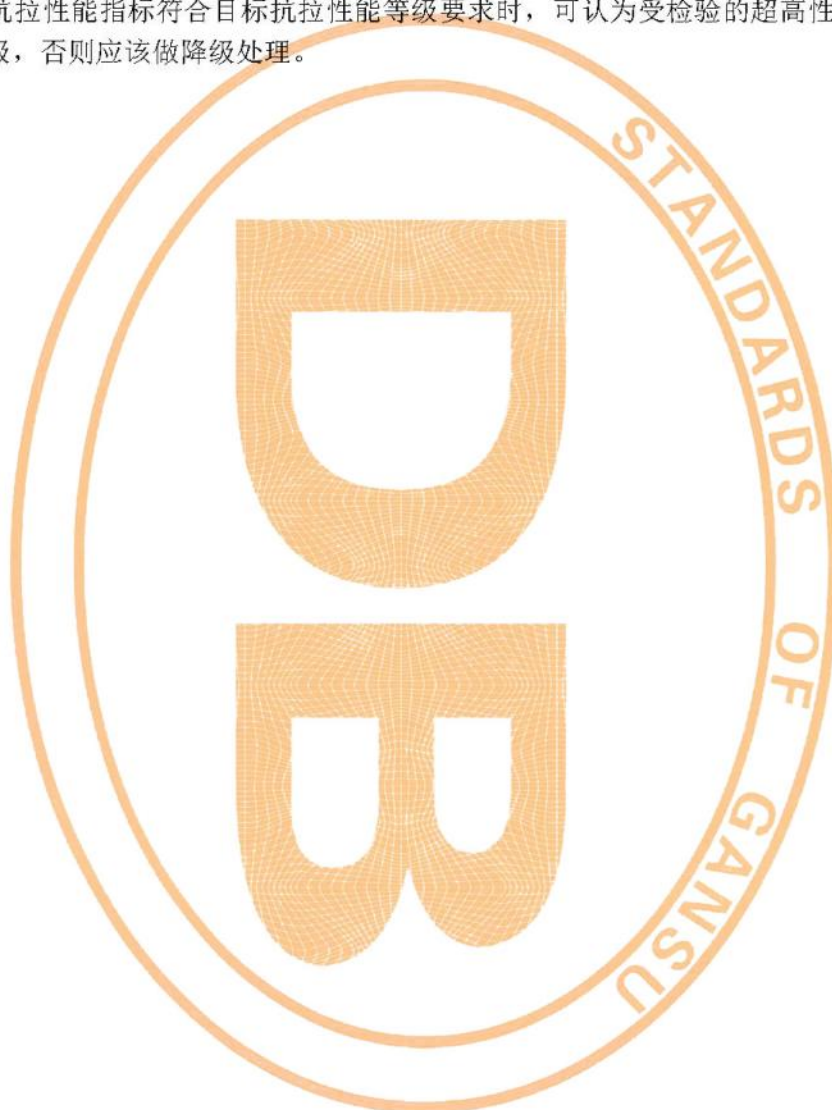
l_{tm} ——下降至 $0.85f_{tu}$ 时变形，取荷载-位移曲线中最大拉应力处的试件变形，单位为毫米 (mm)；

L ——抗拉试件标距，单位为毫米 (mm)。

B.5.8 开裂位置位于标距内的试件为有效拉伸试件，一批中有效拉伸试件数量不应少于4个。当有效拉伸试件数量少于4个时，该组试件无效。以所有有效拉伸试件测量的平均值确定弹性极限抗拉强度、弹性极限抗拉应变、弹性拉伸模量、极限抗拉强度和极限抗拉应变的最终实验结果。

B.6 拉伸性能等级评定

进行拉伸性能等级评定时，应根据单根有效拉伸试件的弹性极限抗拉强度、弹性极限抗拉应变、弹性拉伸模量、极限抗拉强度和极限抗拉应变的结果按表 5 分别进行评级，当有 3 个或者 3 个以上有效拉伸试件的各项抗拉性能指标符合目标抗拉性能等级要求时，可认为受检验的超高性能混凝土达到相应的抗拉性能等级，否则应该做降级处理。



附录 C
(规范性)
早龄期自收缩实验方法

C.1 说明

本附录规定了超高性能混凝土早期变形与自收缩的测试方法。
本方法适用于超高性能混凝土的流体、凝结和硬化阶段的变形和自收缩测定。

C.2 实验原理

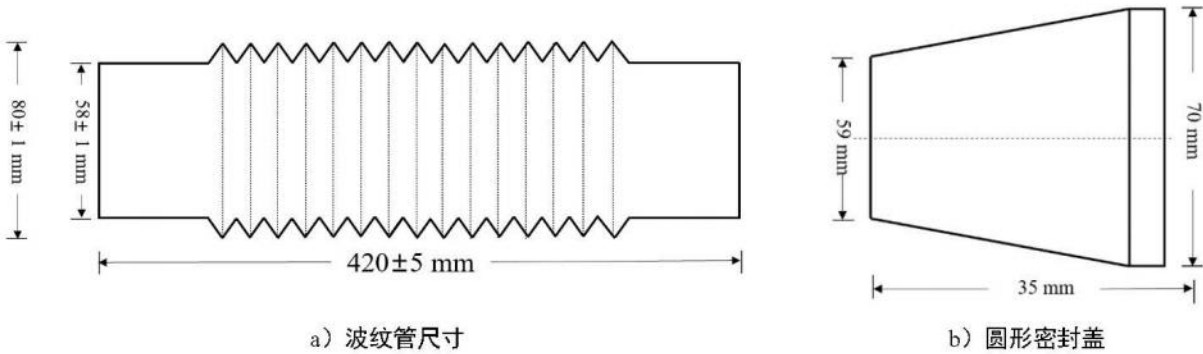
采用水平放置、两端密封的聚乙烯 (PE) 波纹管来测量超高性能混凝土的早期变形, 波纹管对超高性能混凝土的变形约束影响可以忽略, 从而可准确测定超高性能混凝土从新拌流体状态至凝结硬化全过程中的单向自由体积变形过程。超高性能混凝土的流体、凝结和硬化阶段分别对应超高性能混凝土的初凝前、初凝到终凝和终凝之后三个阶段, 各阶段对应的时间分段点可由凝结时间测试仪上连续记录的曲线拐点来确定。结合凝结时间测试和收缩应变仪测试, 即可确定超高性能混凝土在各阶段的自收缩变形。

C.3 试件模具、试件尺寸和数量

C.3.1 试件模具: 试件模具为不透气的增强聚乙烯 (PE) 波纹管, 其内外径尺寸分别为 $58\pm 1\text{ mm}$ 和 $80\pm 1\text{ mm}$, 长为 $420\pm 5\text{ mm}$; 波纹管尺寸和两端圆形密封盖尺寸见图C.1。

C.3.2 试件尺寸: 试件为注入波纹管内且密封性良好的超高性能混凝土波纹柱, 密封好的试件初始长度应不小于 400 mm , 直径不应大于 58.5 mm 。

C.3.3 试件数量: 每组试件数量为3个。



图C.1 超高性能混凝土早龄期收缩模具尺寸

C.4 试件制备

- C.4.1 实验采用的拌合物为不含纤维的超高性能混凝土, 其搅拌应符合本规范9.4要求。
- C.4.2 实验所用的波纹管尺寸应符合C.3.1规定, 实验前应先将波纹管一端密封盖缠绕合适的止水胶带并涂抹凡士林, 以确保波纹管完全密封。
- C.4.3 将一端密封好的波纹管垂直放置于震动平台, 分3次将超高性能混凝土拌合物浇筑入波纹管, 震动 $10\text{ s}\sim 20\text{ s}$ 以排出气泡, 确保波纹管内混凝土充填密实, 制备成长度 $420\pm 5\text{ mm}$ 的早龄期收缩试件。
- C.4.4 用另一端密封盖堵塞波纹管, 并涂抹凡士林确保密封。
- C.4.5 剩余试件应按步骤C.4.1~C.4.4制作, 整个制件过程应控制在 15 min 内完成。

C.5 测试步骤

- C.5.1 调整测试环境温度应稳定在 $20\pm2^{\circ}\text{C}$ ；测试过程应在无震动的桌面或地面进行测试。
- C.5.2 测试时首先应将试件支架平直放置于台面，调整试件支架位置，使得试件支架两端密封盖与位移传感器探头相垂直且接触良好。
- C.5.3 将制备的波纹管试件平直放置于试件支架，使得一端的堵头与吸盘相连接，前后微调吸盘位置，使得自收缩测试仪靶心距离为 $2.0\pm0.1\text{ mm}$ ，后固定磁力吸盘；若试件膨胀较大，应将测试靶心距离适当扩大至 $2.8\text{ mm}\sim3.0\text{ mm}$ ；若试件收缩过大，则应将测试靶心距离适当减小至 $0.5\text{ mm}\sim1.0\text{ mm}$ 。
- C.5.4 调整好试件位置静置10 min后，应开始记录试件自收缩数据。
- C.5.5 采用长千分尺测量试件初始长度 L_0 ，测量值应准确至 0.02 mm 。
- C.5.6 连续记录试件两端长度变化量 ΔL_1 和 ΔL_2 。
- C.5.7 测试过程总时长不小于3 d，数据采样间隔时间宜小于5 min。用同一试件测量超高性能混凝土的自收缩时，总测量时长宜达90 d以上，14 d龄期后的数据采集间隔可适当调大至30 min；测量过程中，应注意观察试样的平直性，如发现试件弯曲，应拍照、重新量测并记录。

C.6 测试结果与分析

C.6.1 测试结果计算方法

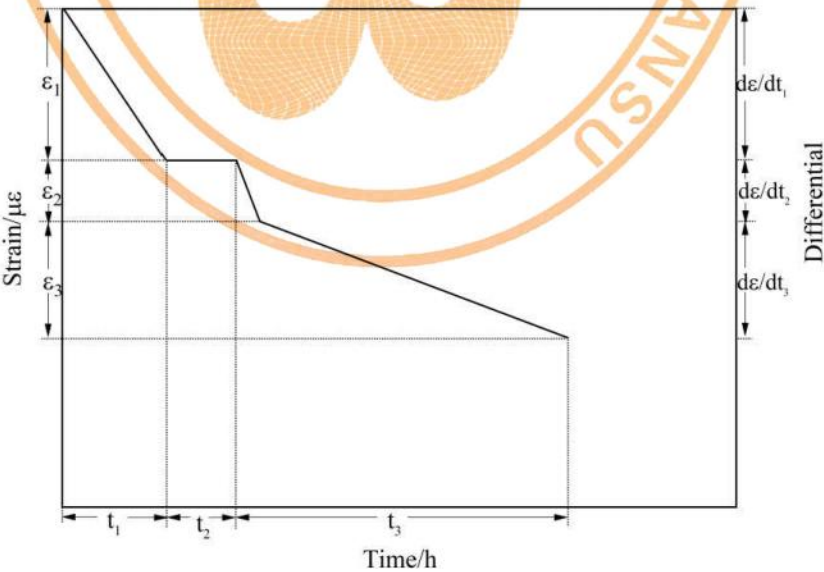
计算测试试件的变形值(ϵ)时应该取同一批三个试件的平均值为计算依据，具体计算公式如式(C.1)：

$$\epsilon=(\Delta L_1+\Delta L_2)/L_0\cdots\cdots\cdots(C.1)$$

- 式中：
- ϵ ——超高性能混凝土早龄期自收缩，换算为微应变应 $\times 10^6$ ，无单位；
 - ΔL_1 ——测试试件一端长度变化，单位为毫米（mm）；
 - ΔL_2 ——测试试件另一端长度变化，单位为毫米（mm）；
 - L_0 ——测试试件长度初始值，单位为毫米（mm）。

C.6.2 测试结果计算

可根据超高性能混凝土拌合物初凝时间、终凝时间和曲线中应变的变化分布，结合图 C.2 相关参数，即可得到超高性能混凝土早龄期自收缩数据和变形速率。



图C.2 超高性能混凝土早龄期自收缩示意图

图 C.2 中, t_1 为初凝时间; t_2 为初凝时间至终凝时间; t_3 为终凝时间至硬化后时间; $d\varepsilon/dt_1$ 为流体阶段变形速率; $d\varepsilon/dt_2$ 为凝结阶段变形速率; $d\varepsilon/dt_3$ 为硬化阶段变形速率; ε_1 为流体阶段自收缩变形量; ε_2 为凝结阶段自收缩变形量; ε_3 为硬化阶段自收缩变形量。

C.7 实验报告

- C.7.1 超高性能混凝土早龄期自收缩实验报告应包含平均变形~时间 ($\varepsilon \sim t$) 曲线和自收缩变形值。
- C.7.2 结合实验测试数据和图C.2可计算出超高性能混凝土试件的平均变形~时间 ($\varepsilon \sim t$) 曲线。
- C.7.3 结合变形~时间 ($\varepsilon \sim t$) 曲线可得到超高性能混凝土的各个阶段的自收缩变形值。

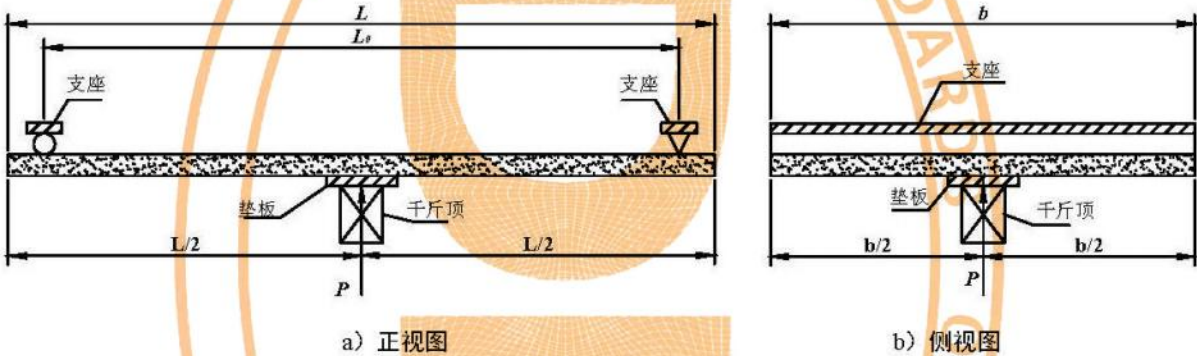
附录 D
(规范性)
板类构件抗裂性及承载能力检验方法

D.1 范围

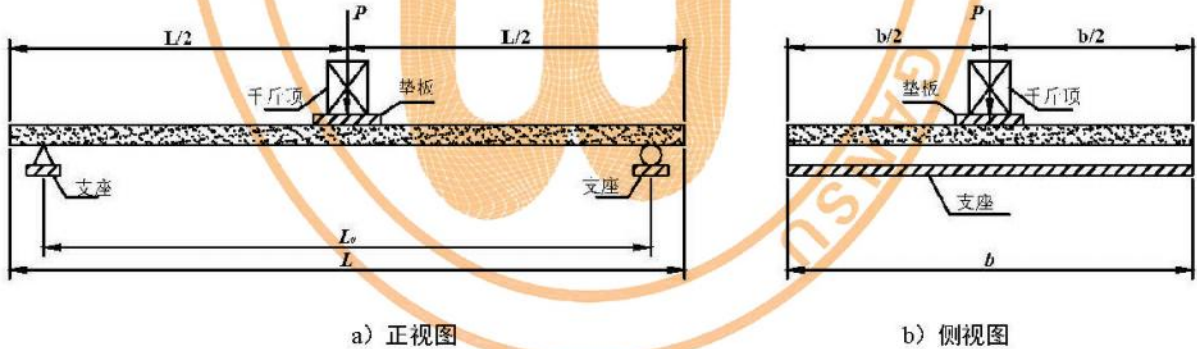
本附录规定了超高性能混凝土板类预制构件抗裂性和承载能力的测试方法。
本方法适用于超高性能混凝土隧道盖板、桥面板和其他预制板承载能力测定。

D.2 加载方式

- D.2.1 宜采用单点集中加载进行模拟实验。加载设备宜用液压千斤顶，同时采用压力传感器精确测定荷载值。
- D.2.2 可采用图D.1或图D.2所示加载方式，建议采用图D.1所示的反向加载方式。板背面向上有利于观察受拉面开裂现象；也可采用图D.2所示的正向加载方式，板正面向上，不利于观察受拉面开裂现象，因此试件下部空间要求以能够方便观测到裂缝的产生与开展为宜。



图D.1 加载示意图 1



图D.2 加载示意图 2

图 D.1 和 D.2 中，L 为盖板沿跨度方向的长度； L_0 为盖板计算跨度；b 为盖板宽度；P 为荷载；垫板应采用 60 mm × 60 mm × 20 mm 钢板；支座可采用长度与盖板宽度相等，宽为 50 mm 厚为 20 mm 的钢板和宽为 50 mm 厚为 20 mm 木板双层放置，木板放置在靠近钢板侧。

D.3 设计荷载和集中等效荷载

- D.3.1 在盖板中点施加集中等效荷载，集中荷载（下设钢垫板）的分布面积为 60 mm × 60 mm，集中等效荷载与设计竖向静活载的作用效应相近，即板底受到的最大拉应力相等为原则来确定其等效集中荷载。

D.3.2 设计竖向静活载：电缆槽盖板、人行道步板的承载能力应满足集中荷载大于2.5 kN和下弯挠度为10 mm时集中荷载大于2.0 kN的要求；隧道、站场盖板可采用桥梁盖板的竖向活载。

D.4 实验步骤和报告

D.4.1 试件安装就位后，对实验设备、支座距离及垫板等应进行仔细检查，确认正确后开始加载，加载速度要求缓慢均匀，速率不大于100 N/s。荷载级别建议分为：0、0.5、1.0、1.2、2.0倍等效集中荷载。

D.4.2 盖板加载到各级荷载后，持荷3 min，并在整个加载过程中用照明加放大镜观测盖板底部，出现裂纹时的荷载即为开裂荷载；板不能继续增加荷载时即为盖板的极限荷载。

D.4.3 检验盖板抗裂性能时，可以加载至1.2倍等效集中荷载即可；检验盖板承载能力时，可以加载至2.0倍等效集中荷载即可；如有必要可继续加载，直至盖板破坏。

D.4.4 实验报告单应包括如下内容：

- 盖板类型及尺寸、生产单位、生产日期、实验日期；
- 实测开裂荷载或1.2倍等效集中荷载时是否开裂；
- 实测破坏荷载或2.0倍等效集中荷载时是否已丧失承载能力；
- 实验检测单位、人员签字盖章。

附录 E
(规范性)
六棱块类构件承载能力检验方法

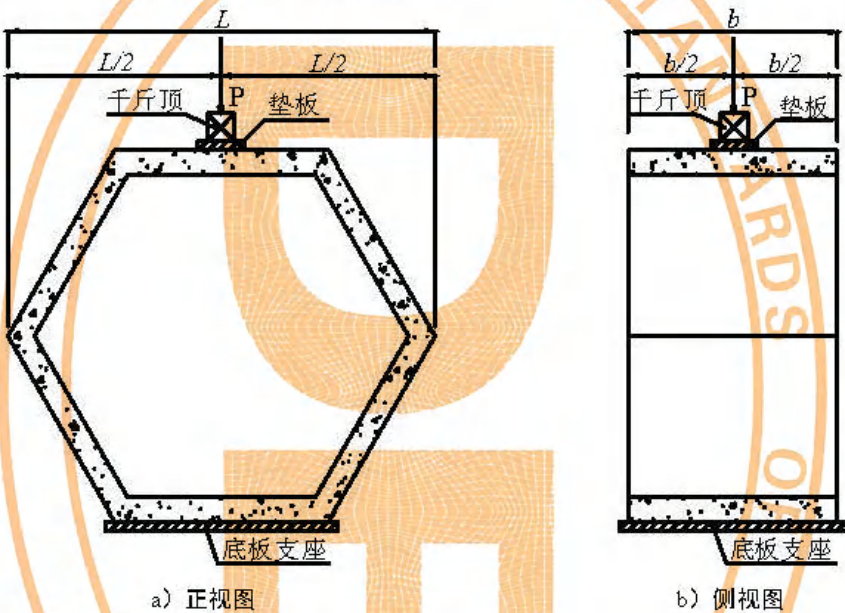
E.1 说明

本附录规定了超高性能混凝土六棱块类预制构件承载能力的测试方法。

E.2 加载方式

E.2.1 采用单点集中加载进行加载实验；加载设备宜采用液压千斤顶或，同时采用压力传感器精确测定荷载值。

E.2.2 六棱块承载力测试加载方式可采用图E.1所示方式。



图E.1 加载示意图

图E.1中， L 为六棱块沿跨度方向的最大长度； b 为六棱块宽度； P 为实验荷载。垫板采用 $60\text{ mm}\times 60\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的钢板。

E.3 集中等效荷载

E.3.1 应在六棱块某一面中点施加集中等效荷载，集中荷载（下设钢垫板）的分布面积为 $60\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ ，集中等效荷载与设计竖向静活载的作用效应相近。

E.3.2 设计竖向静活载要求：六棱块的承载力应满足 1.2 kN 集中荷载.当设计有要求时按设计进行。

E.4 实验步骤和报告

E.4.1 试件安装就位后，对实验设备、支座距离及垫板等进行仔细检查，确认正确后开始加载，加载速度要求缓慢均匀，速率不大于 100 N/s 。荷载级别建议为 0 、 0.5 、 1.0 、 1.2 、 1.5 倍等效集中荷载。

E.4.2 六棱块加载到各级荷载后，持荷 3 min ，并在整个加载过程中用照明放大镜观测六棱块各表面及拐角处，出现裂纹时的荷载即为开裂荷载；当试件不能继续增加荷载时即为六棱块的极限荷载。

E.4.3 检验六棱块抗裂性能时，可以加载至 1.2 倍等效集中荷载即可；检验六棱块承载能力时，可以加载至 1.5 倍等效集中荷载即可；如有必要可继续加载，直至六棱块破坏。

E.4.4 实验报告单应包括如下内容：

- 盖板类型及尺寸、生产单位、生产日期、实验日期；
- 实测开裂荷载或 1.2 倍等效集中荷载时是否开裂；
- 实测破坏荷载或 1.5 倍等效集中荷载时是否已丧失承载能力；
- 实验检测单位、人员签字盖章。

附录 F
(资料性)
条文说明

F.1 说明

本附录对超高性能混凝土的分类、性能和标记给出相应的条文解释说明和计算方法。
本附录针对甘肃省特有的典型气候环境和超高性能混凝土的典型应用案例，提供了相应的数据支撑。

F.2 条文解释说明和计算方法

F.2.1 参照JTG 3362和《瑞士 UHPFRC设计指南》(SIA 2052)中混凝土轴心抗压强度的计算方法，超高性能混凝土轴心抗压强度标准值(f_{ck})按式(F.1)计算确定：

$$f_{ck} = 0.88\alpha_1\alpha_2f_{cu,k} \dots\dots\dots (F.1)$$

式中：
 $f_{cu,k}$ ——立方体抗压强度标准值，单位为兆帕 (MPa)；
 f_{ck} ——轴心抗压强度标准值，单位为兆帕 (MPa)；
 α_1 ——为脆性折减系数，超高性能混凝土中掺入了2.0%左右钢纤维，脆性明显低于普通混凝土，故取为1.0；
 α_2 ——棱柱体与立方体试件抗压强度比值，合作单位西南交通大学统计多组棱柱体与立方体试件抗压强度数据，其取值范围为0.78~0.82，95%保证率的数值为0.80，因此本规范取0.80。

F.2.2 超高性能混凝土轴心抗压强度设计值(f_c)是考虑材料分项系数的设计值，用于构件设计。对于超高性能混凝土，材料分项系数取(γ)取1.45，因此超高性能混凝土轴心抗压强度设计值(f_c)计算公式为式(F.2)：

$$f_c = 0.88 \times 0.80 \times f_{cu,k} / 1.45 \dots\dots\dots (F.2)$$

式中：
 f_c ——轴心抗压强度设计值，单位为兆帕 (MPa)；
 $f_{cu,k}$ ——立方体抗压强度标准值，单位为兆帕 (MPa)。

F.2.3 UT1级代表超高性能混凝土在单轴拉伸实验过程中无显著应变硬化现象或表现出应变软化现象，UT2、UT3、UT4、UT5和UT6代表超高性能混凝土在单轴拉伸实验过程中表现出不同程度的应变硬化现象。

F.2.4 超高性能混凝土同一等级中所列指标应该同时满足，否则应降级。

F.2.5 综合国外相关规范(指南)和纤维掺量实验数据，认为超高性能混凝土弹性极限抗拉强度(f_{tk})和弹性极限拉应变(ϵ_0)与基体材料接近，因此可将弹性极限看做基体的开裂，不同纤维掺量下超高性能混凝土拉伸性能对比如表F.1。

表 F.1 不同纤维掺量超高性能混凝土拉伸性能

纤维掺量/%	f_{tk} /MPa	$\epsilon_{el} (\times 10^{-6})$	$E_t/\times 10^{-3}$ MPa	f_{tu} /MPa	$a_{tu} (\times 10^{-6})$
0	7.6	155	49.1	7.6	-
2.5	8.0	160	49.3	11.2	12780

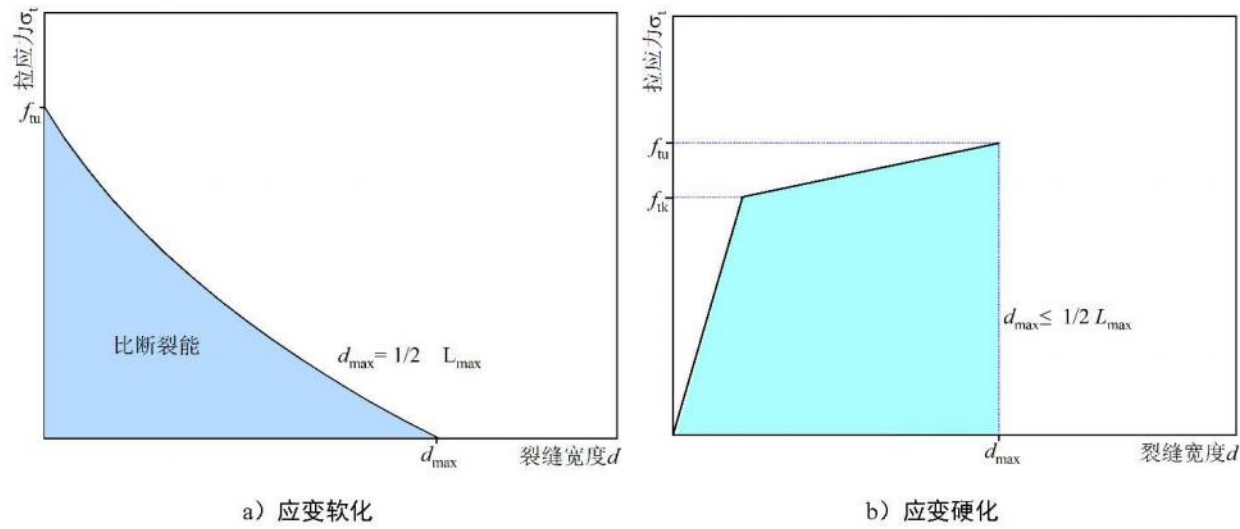
F.2.6 综合国内外规范(指南)，只有瑞士规范(SIA 2052)中提到超高性能混凝土拉伸过程，应变软化过程中最大裂缝宽度(d)和拉伸过程位移变化量(ΔL)关系如式(F.3)：

$d_{\max} = 1/2 \Delta L_{\max}$ (F.3)

因此，应变硬化过程中最大裂缝宽度（ d ）和拉伸过程位移变化量（ ΔL ）关系如式（F.4）：

$d_{\max} \leq 1/2 \Delta L_{\max}$ (F.4)

应变硬化和应变软化过程中，拉应力（ σ_t ）与最大裂缝宽度（ d ）关系如图 F.1 所示。



图F.1 拉应力与最大裂缝宽度示意图

F. 2. 7 丹麦Bache教授将UHPC、R-UHPC和结合预应力可达到的范围，概括形成表F.2。

表 F.2 高强混凝土、UHPC、CRC-UHPC 和高强韧性钢材性能对比

性能	高强 混凝土	UHPC		R-UHPC	高强韧性钢材
		0 %~2 %纤维	4 %~12 %纤维		
$f_{cu,k}$ /MPa	80	120~270	160~400	160~400	-
f_{tk} /MPa	5	6~15	10~30	100~300	500
f_k /MPa	-	-	-	100~400	600
抗剪强度/MPa	-	-	-	15~150	-
ρ /($\times 10^3 \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2.5	2.5~2.8	2.6~3.2	3~4	7.8
E_c /($\times 10^3 \text{MPa}$)	50	60~100		60~110	210
断裂能/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	150	150~1500	5000~40000	$2\times 10^5\sim 4\times 10^6$	2×10^5
$(f_k/\rho) / (\text{m}^2/\text{s}^2)$	-	-	-	$3\times 10^4\sim 1\times 10^5$	7.7×10^4
$(E_c/\rho) / (\text{m}^2/\text{s}^2)$	-	-	-	$2\times 10^7\sim 3\times 10^7$	2.7×10^7
抗冻性	中等	绝对抗冻			-
抗腐蚀性能	中等	抗腐蚀优良			差

F. 2. 8 超高性能混凝土弹性模量测试尺寸应参考GB/T 31378相关条文。

F. 2. 9 根据国内外统计超高性能混凝土立方体抗压强度和弹性模量实验结果，抗压强度范围为100 MPa~205 MPa，弹性模量范围为32.9 GPa~51.8 GPa。

F. 2. 10 当无实验资料时，超高性能混凝土的压缩弹性模量可根据式（F.5）取值：

$E_c = 10^5 / (1.5 + 110.1 / f_{cu,k})$ (F.5)

式中：

E_c ——压缩弹性模量，单位为兆帕（MPa）；

$f_{cu,k}$ ——立方体抗压强度标准值，单位为兆帕（MPa）。

F.2.11 对于超高性能混凝土承载能力极限状态受压应力-应变关系，综合对比《法国 UHPC 结构设计规范》（NFP 18-710 2016）、《瑞士 UHPFRC 设计指南》（SIA 2052）、日本 UHPC 结构设计和施工指南《Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures (Draft)》（JSCE, 2006）中关于 UHPC 设计受压应力-应变曲线的规定，各国 UHPC 指南（规范）对于 UHPC 设计受压应力-应变曲线普遍采用简化的双折线模型和三折线模型。综合考虑，本规范采用三折线模型，极限压应变 ε_{cu} 偏安全取 0.0034~0.0042。其中弹性极限压应变（ ε_0 ）计算公式为式（F.6）：

$$\varepsilon_0 = f_{ck} / E_c \dots\dots\dots (F.6)$$

式中：

ε_0 ——弹性极限压应变，计算结果应精确至 10×10^{-6} ，无单位；

f_{ck} ——轴心抗压强度标准值，单位为兆帕（MPa）；

E_c ——压缩弹性模量，单位为兆帕（MPa）。

F.2.12 对于超高性能混凝土泊松比取值，对比国内外相关规范（指南），其值较为统一，均为0.2。

F.2.13 对于超高性能混凝土的线膨胀系数，国内外相关规范（指南）规定值介于 $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C} \sim 1.35 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 间。一般认为，超高性能混凝土中高线性膨胀系数的胶凝材料含量高、低线性膨胀系数的粗骨料含量低，故超高性能混凝土的线性膨胀系数应高于普通混凝土（ $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ）且低于钢筋（ $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ）。

F.2.14 对于蒸汽养护的超高性能混凝土，其后期收缩应变应取为0。

F.2.15 对于自然养护的超高性能混凝土，不同龄期的收缩应变终值可按式（F.7）计算：

$$\varepsilon_{cs}(t) = \varepsilon_{cs,0} \times e^{c/(t+d)} \dots\dots\dots (F.7)$$

式中：

$\varepsilon_{cs}(t)$ ——同龄期的超高性能混凝土收缩应变，计算结果应精确至 10×10^{-6} ，无单位；

$\varepsilon_{cs,0}$ ——名义终极收缩应变，数值取 $500 \mu\text{E}$ ，无单位；

t ——超高性能混凝土龄期，单位为天（d）；

c ——拟合系数，数值取-2.48，无单位。

F.2.16 当压力小于0.4倍超高性能混凝土抗压强度标准值时，超高性能混凝土为线性徐变，其徐变系数终值可按式（F.8）计算：

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0(t_{\infty}, t_0) \times \{(t-t_0)^a / [(t-t_0)^a + b]\} \dots\dots\dots (F.8)$$

式中：

$\varphi(t, t_0)$ ——加载龄期为 t_0 ，计算龄期为 t 时的超高性能混凝土徐变系数终值，无单位；

$\varphi_0(t_{\infty}, t_0)$ ——加载龄期为 t_0 时的超高性能混凝土终极徐变系数终值，其取值应参照表F.3；

t ——计算徐变系数时超高性能混凝土龄期，单位为天（d）；

t_0 ——加载时超高性能混凝土龄期，单位为天（d）；

a ——拟合系数，取值应参照表F.3，无单位；

b ——拟合系数，取值应参照表F.3，无单位。

表F.3 超高性能混凝土徐变系数终值和拟合系数取值

加载龄期 t_0 (d)	养护方式	徐变系数终值 $\varphi_0(t_{\infty}, t_0)$	系数a	系数b
4	自然养护	1.2	0.6	3.2
7	自然养护	1.0	0.6	4.5
28	自然养护	0.8	0.6	10
-	热养护	0.2	0.6	10

F. 2. 17 超高性能混凝土具有良好的耐久性，因此大部分普通混凝土的耐久性指标（如抗水渗透性、抗冻性、碳化性和抗硫酸盐腐蚀性等）和方法已不适用于超高性能混凝土的耐久性评价。

F. 2. 18 中国水泥与混凝土制品协会统计不同强度等级混凝土中氯离子扩散系数参考值如表F.4。

表 F.4 不同强度等级混凝土中氯离子扩散系数参考值

抗压强度等级	氯离子扩散系数（ $\times 10^{-14}$ ）/（ $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ）
C30 - C40	≥ 500
C40 - C80	500 - 100
C80 - C100	100 - 50
C100 - C120	50 - 20
C120 - C150	20 - 2
C150 - C180	≤ 2

F. 2. 19 超高性能混凝土、高性能混凝土和普通混凝土的耐久性指标对比如表F.5。

表 F.5 超高性能混凝土、高性能混凝土和普通混凝土耐久性对比

耐久性指标		UHPC指标		高性能混凝土（HPC）		普通混凝土（NC）	
		指标		与UHPC倍数		指标	
盐冻表面质量损失（28个循环）		50 g/m ²		150 g/m ²		3	
氯离子扩散系数		$2.0 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$		$6.0 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$		30	
氯离子侵入深度		1 mm		8 mm		23 mm	
氯离子侵入性（电量法）		10 C~25 C		200 C~1000 C		34	
氧气渗透性		$1 \times 10^{-20} \text{ m}^2$		$1 \times 10^{-19} \text{ m}^2$		10	
氮气渗透性		$1 \times 10^{-19} \text{ m}^2$		$4 \times 10^{-17} \text{ m}^2$		400	
表面吸水率		0.20 kg/m ²		-		11	
碳化深度（3年）		1.5 mm		4.0 mm		-	
钢筋锈蚀速率		<0.01 $\mu\text{m}/\text{年}$		0.25 $\mu\text{m}/\text{年}$		7.0 mm	
耐磨性（相对体积损失指数）		1.1 - 1.7		2.8		2	
抗冻性（1000次冻融循环后相对弹性模量）		90%		78%		0.87	
电阻率		137 k $\Omega \cdot \text{cm}$		96 k $\Omega \cdot \text{cm}$		16 k $\Omega \cdot \text{cm}$	
耐酸性（80周酸蚀深度）	pH = 5	993 μm		-		-	
	pH = 3	1217 μm		-		-	

F. 2. 20 国外UHPC相关标准性能对比如表F.6。

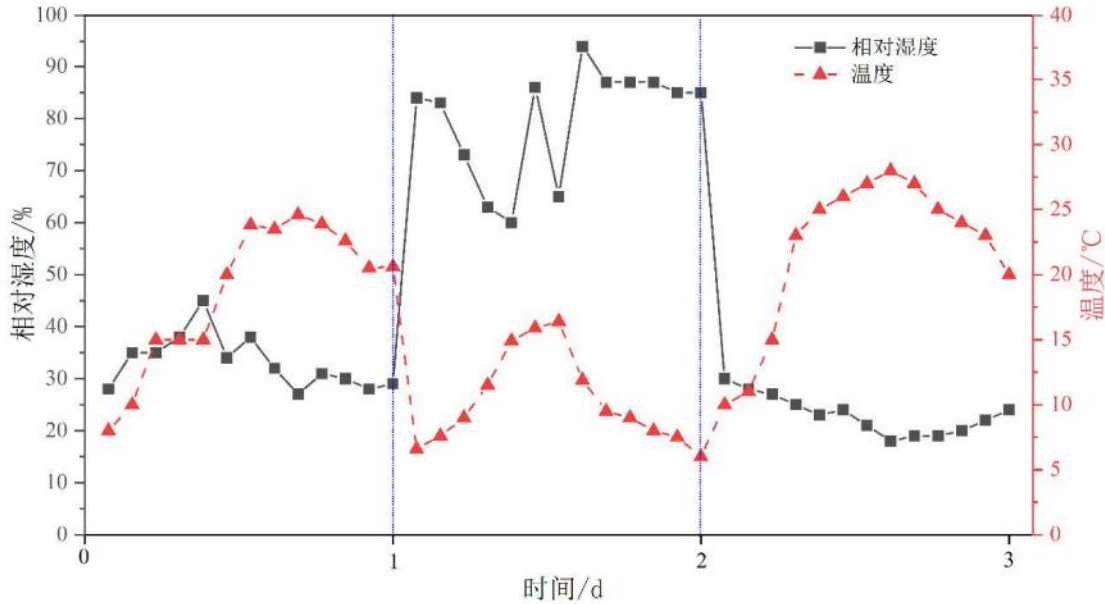
表 F.6 国外 UHPC 相关标准性能对比表

项目	法国标准 NF P18-470	瑞士标准 SIA 2050	日本标准 JSCE	德国标准 DAfStb
拌合物工作性能	Ca级：扩展度大于760 mm，自密实； Cv级：扩展度大于660 mm，粘性； Ct级：扩展度小于660 mm，具有稠度；	扩展度按 EN12350-8 测试； 浇筑坡度大于2 %时应进行斜向长3 m、宽1 m的斜板实验； 工作性能保持时间大于2 h；	现场采用流动度指标确定，是质控检验指标； 非自密实采用合适方法评定；	分为自密实和非自密实两大类，无具体规定；
抗压强度	轴心抗压强度为130~250 MPa； 立方体抗压强度为145~265 MPa； 结构类 $f_{cu,k}$ 大于145 MPa； 非结构类 $f_{cu,k}$ 大于130 MPa；	$f_{cu,k}$ 大于120 MPa； 分为UC130、UC160和UC200； 圆柱体试件和立方体试件转化系数为0.95；	$f_{cu,k}$ 大于150 MPa； 未进行等级分级；	轴心抗压强度为130~175 MPa； 立方体抗压强度为140~185 MPa；
抗拉性能	f_{tk} 大于6.0 MPa；开裂至0.3 mm时的抗拉强度需大于3 MPa且大于 $0.4f_{tk}$ ； 分为3个性能等级，T1为应变软化、T2为低应变硬化、T3为高应变硬化； K_{global} 和 K_{local} 纤维定向系数；	分为3个性能等级： U0： $f_{tk} \geq 7$ MPa、 $f_{tu}/f_{tk} > 0.7$ 、应变软化； U1： $f_{tk} \geq 7$ MPa、 $f_{tu}/f_{tk} > 1.1$ 、应变硬化； U2： $f_{tk} \geq 10$ MPa、 $f_{tu}/f_{tk} > 1.2$ 、高应变硬化；	f_{tk} 大于4.0 MPa； f_{tu} 大于5.0 MPa；	无
最大裂缝宽度	无	取最大拉应力变形的0.5倍	无	无
抗弯拉性能	无要求			
弹性模量	只给出测试方法	给出测试方法和范围为40 GPa~60 GPa	参考值50 GPa	无
密度	$2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \sim 2.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$2.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \sim 2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	2%纤维体积掺量为 $2.55 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	无
泊松比	给出测试方法和参考值0.2		弹性范围取0.2	无
温度线膨胀系数	$(80 \sim 140) \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$	$100 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$	$135 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$	无
收缩	合格养护条件下只计算自收缩； 经过蒸汽养护后认为收缩已经完成；	常温养护收缩范围为0.06%~0.08%； 蒸汽养护收缩为0；	常温养护收缩为0.055 %； 蒸汽养护收缩为0.005 %；	无
徐变系数	蒸汽养护后徐变系数为0；	常温养护徐变系数为1.0； 蒸汽养护徐变系数为0.2~0.4；	给出徐变系数估算方法，一般情况取0.4；	无

F.3 超高性能混凝土在 A 高速桥梁伸缩缝应用案例

F.3.1 A 高速项目具有典型的高温和高旱气候特征，具有高温、大温差、大湿度差和风力大等特殊气候形式。

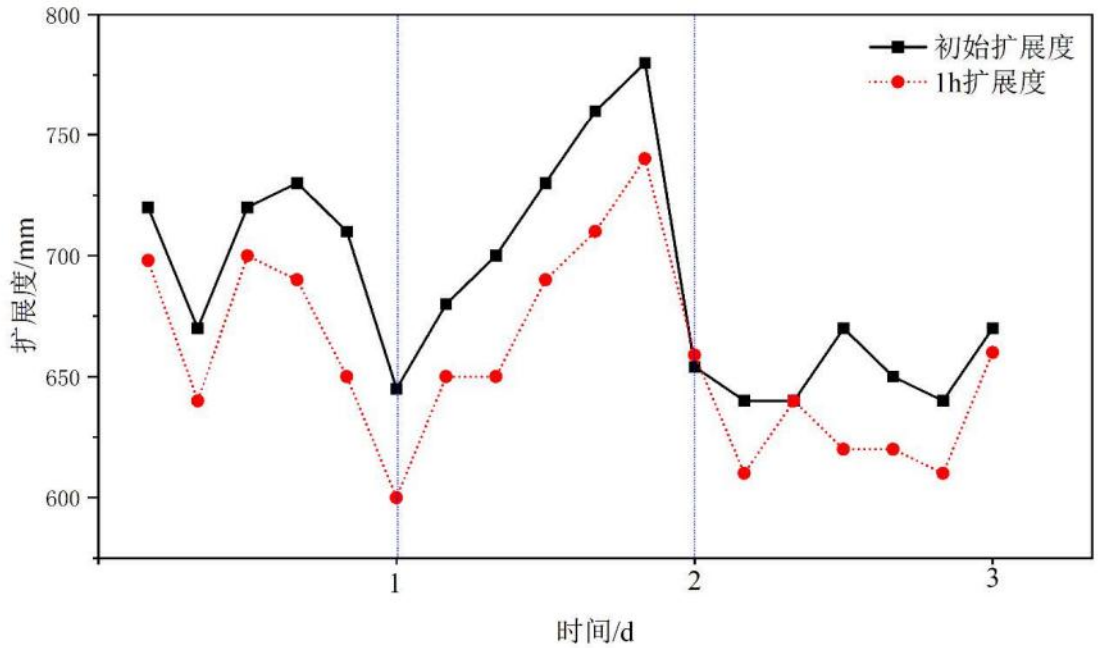
F.3.2 图F.2为项目检测3 d的温湿度记录图，其中，最高温度为27.1℃，超过25℃的施工时间占52%，平均温度为16.9℃，平均湿度为45.35%，最大温差为21.4℃，最大湿度差为76.0%。



图F.2 A 高速温度和湿度记录图

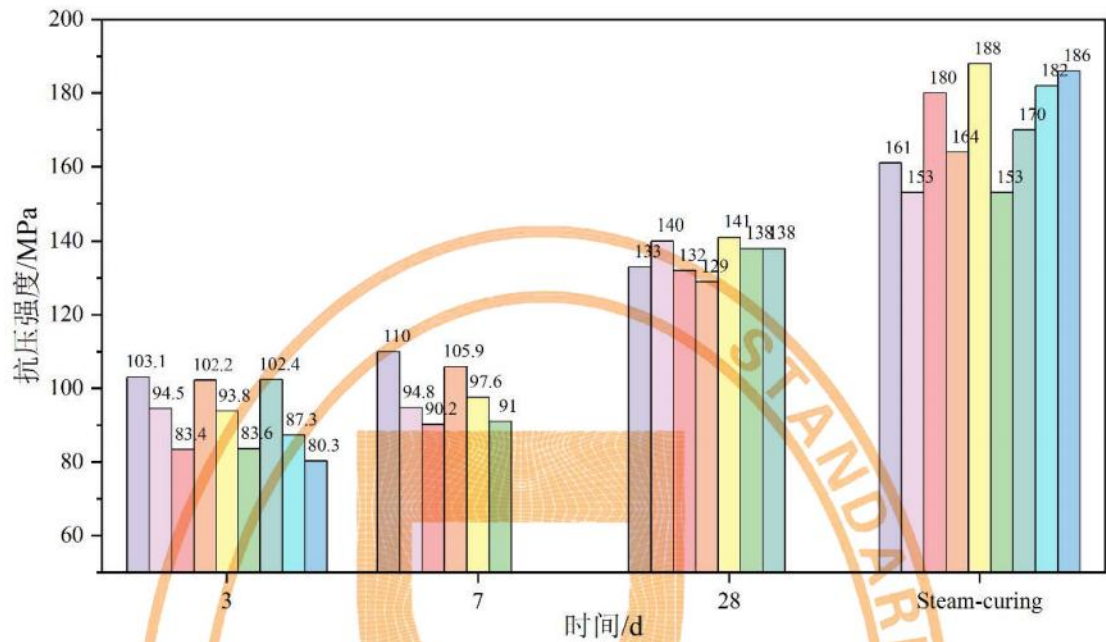
F.3.3 超高性能混凝土实测扩展度如图F.3所示，实测扩展度最大值为780 mm，最小值为640 mm，扩展度平均值为690 mm；其中，USF4级满足率为11.1%，USF3级满足率为77.8%。

F.3.4 超高性能混凝土应测量1 h扩展度，以避时间、温度和湿度对工作性能影响。



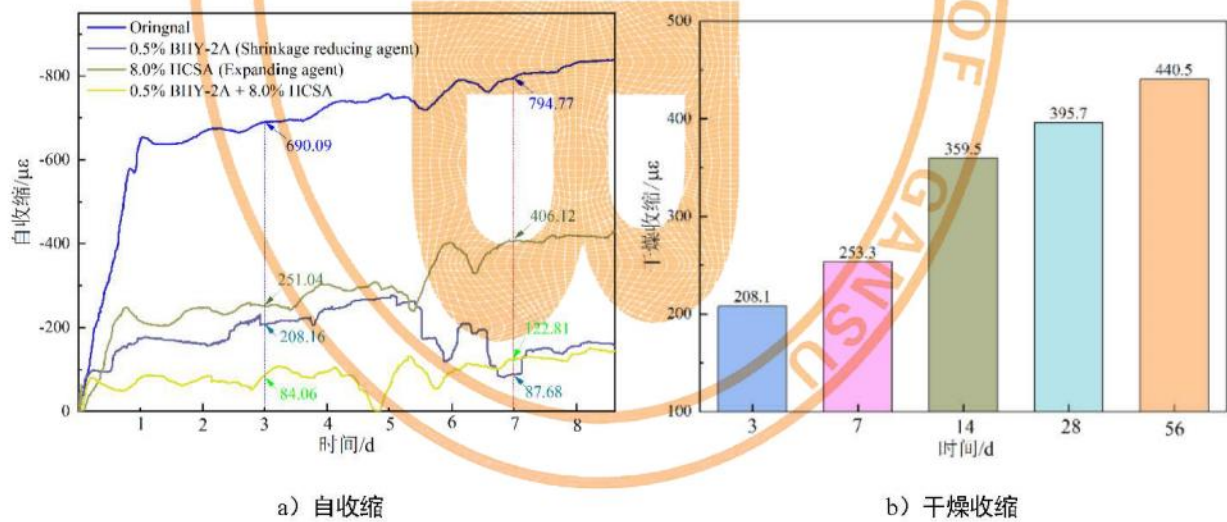
图F.3 A 高速扩展度数据

F. 3. 5 超高性能混凝土实测抗压强度如图F.4所示，实测3 d抗压强度平均值为92.3 MPa、7 d抗压强度平均值为99.3 MPa、28 d抗压强度平均值为135.8 MPa、70℃蒸汽养护3 d抗压强度为167.8 MPa。



图F.4 A 高速抗压强度数据

F. 3. 6 超高性能混凝土实测自收缩和干燥收缩如图F.5所示，实测3 d早龄期自收缩范围为84.06 $\mu\epsilon$ ~690.09 $\mu\epsilon$ ，选取3 d自收缩为208.1 $\mu\epsilon$ 的试件，测得其28 d干燥收缩为359.7 $\mu\epsilon$ 。

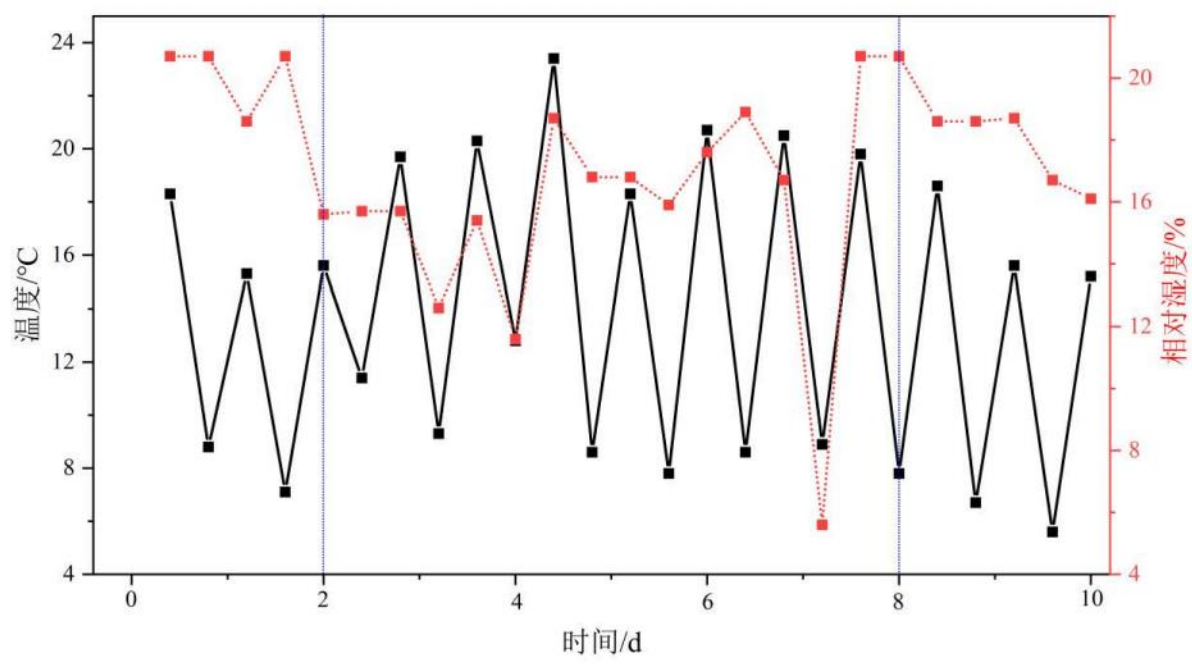


图F.5 A 高速收缩数据

F. 4 超高性能混凝土在 B 高速湿接缝应用案例

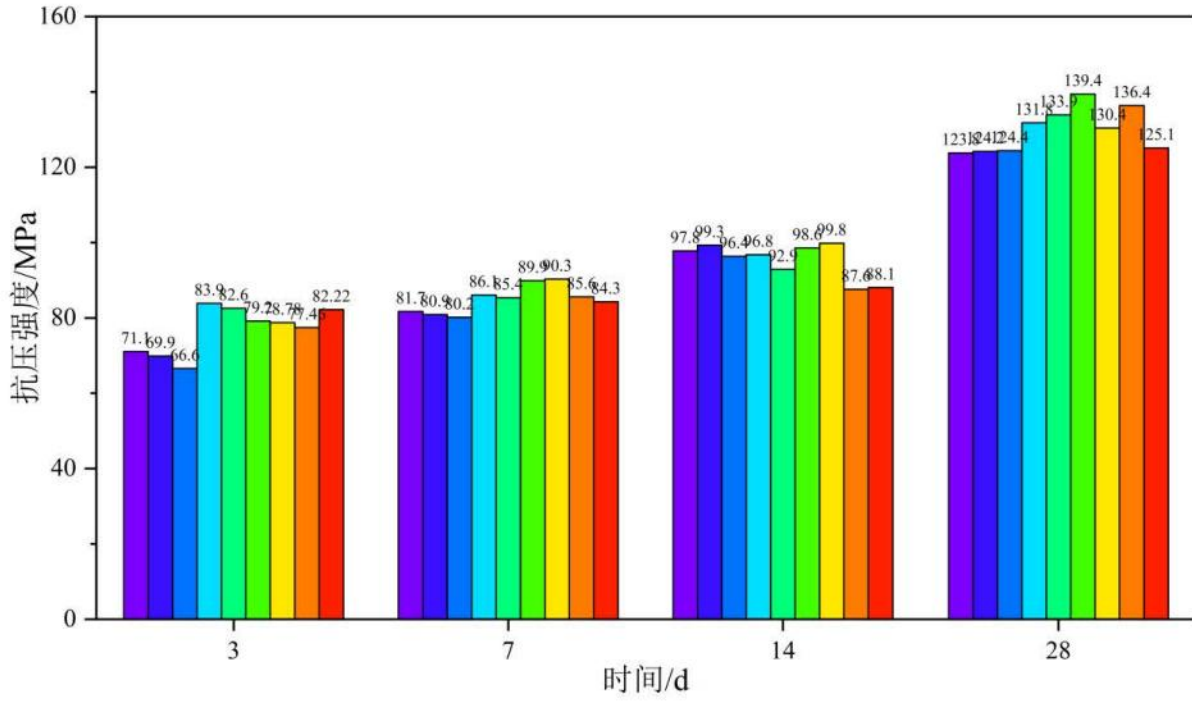
F. 4. 1 B高速湿接缝项目具有典型的高寒和高旱气候特征，项目具有施工温度低、施工湿度低、风力大等典型高原干旱气候特征。

F. 4. 2 图F.6为项目施工10 d内的温湿度记录图，其中，最高温度为23.1℃，施工温度低于15℃的施工时间占60 %，施工温度低于10℃的施工时间占40 %，施工平均温度为13.7℃，平均相对湿度为16.9 %。



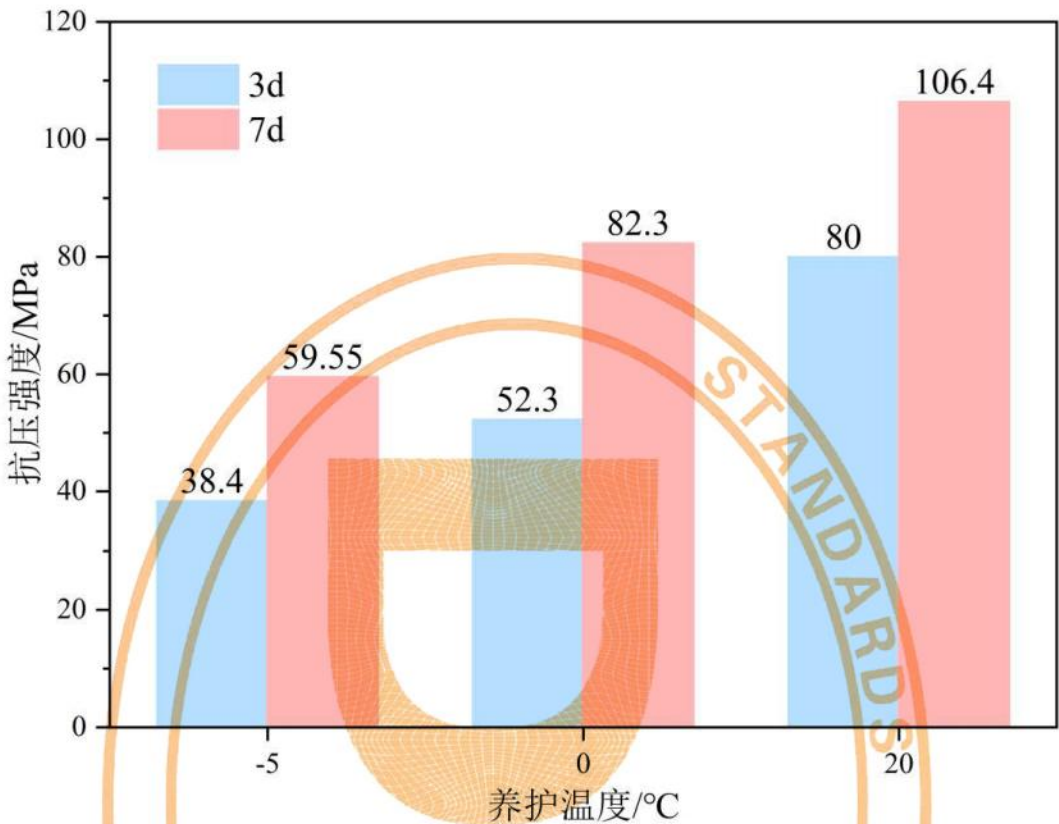
图F.6 B 高速项目温度和湿度记录图

F. 4. 3 图F.7为超高性能混凝土同条件养护不同龄期抗压强度实测值，实测3 d抗压强度平均值为76.8 MPa，7 d抗压强度平均值为84.9 MPa，14 d抗压强度平均值为95.2 MPa，28 d抗压强度平均值为129.9 MPa。



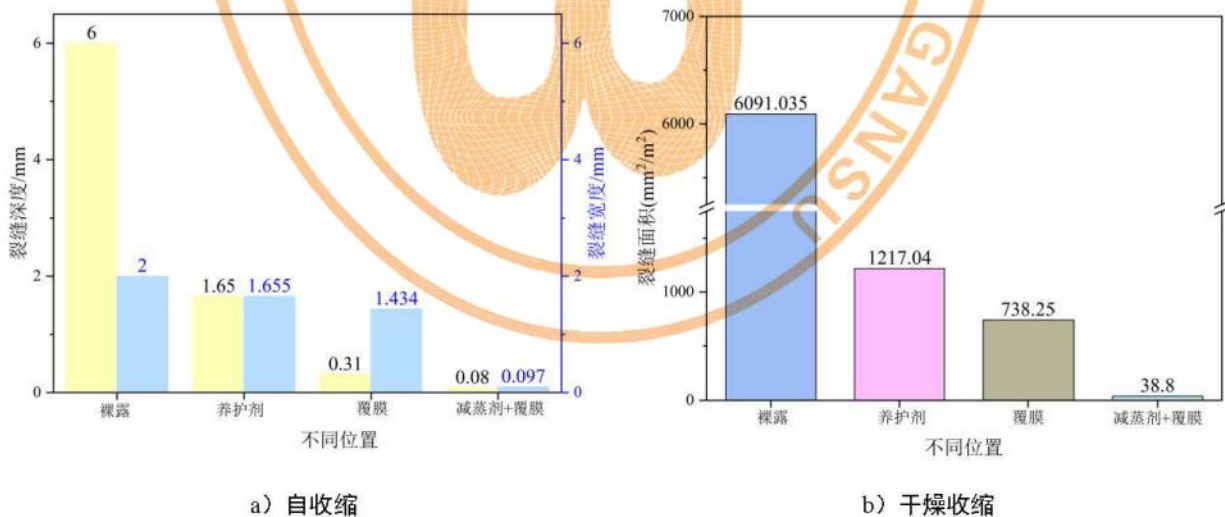
图F.7 B 高速项目抗压强度数据

F. 4. 4 为进一步说明环境温度对超高性能混凝土材料性能影响，同配比验证了不同养护温度对超高性能混凝土抗压强度影响，如图F.8。相较于标准养护条件，0℃和-5℃的养护条件下，超高性能混凝土材料抗压强度分别下降25.9 MPa和44.2 MPa。



图F.8 不同养护温度条件抗压强度

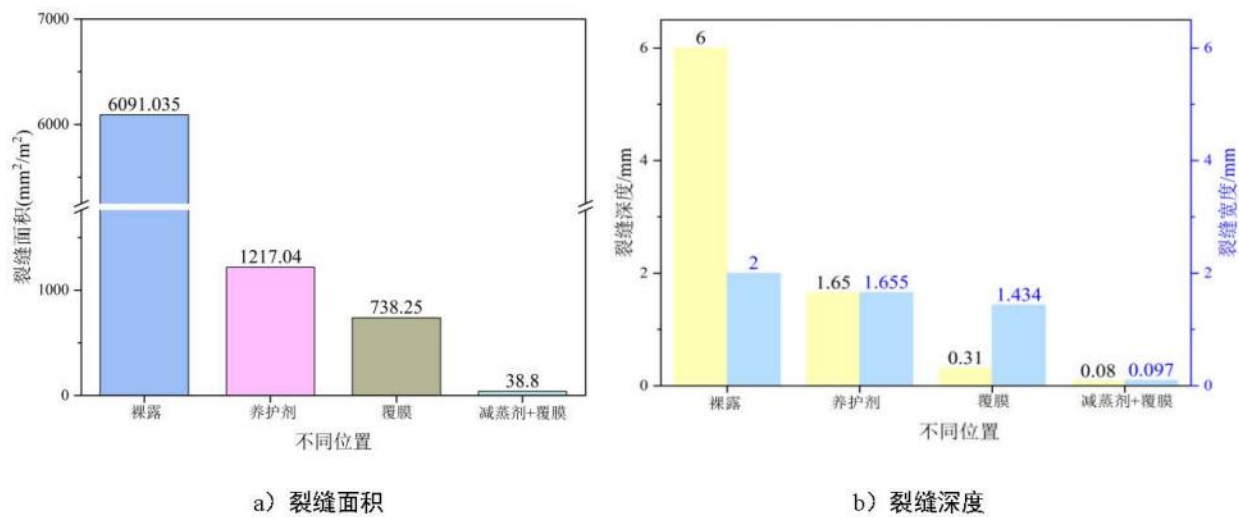
F.4.5 项目使用超高性能混凝土材料早龄期自收缩和同条件养护干燥收缩数据如图F.9，实测3 d收缩范围为 $609\ \mu\epsilon\sim 725\ \mu\epsilon$ ，平均早龄期自收缩为 $667\ \mu\epsilon$ ，28 d干燥收缩为 $395\ \mu\epsilon$ 。



图F.9 B 高速项目收缩数据

F.4.6 实测项目施工完成养护期间平均风速为6 m/s，结合项目平均温度为13.7℃，平均相对湿度为

16.9 %，针对养护裸露、喷射养护剂、覆膜和减蒸剂等4种情况下裂纹情况进行统计。分析可知，裸露出来的超高性能混凝土位置裂缝面积达6091.035 mm²/m²，最大裂缝深度和宽度可达6 mm和2 mm；通过喷减蒸剂和覆膜后裂缝面积、最大裂缝深度和宽度分别为38.8 mm²/m²、0.08 mm和0.097 mm。

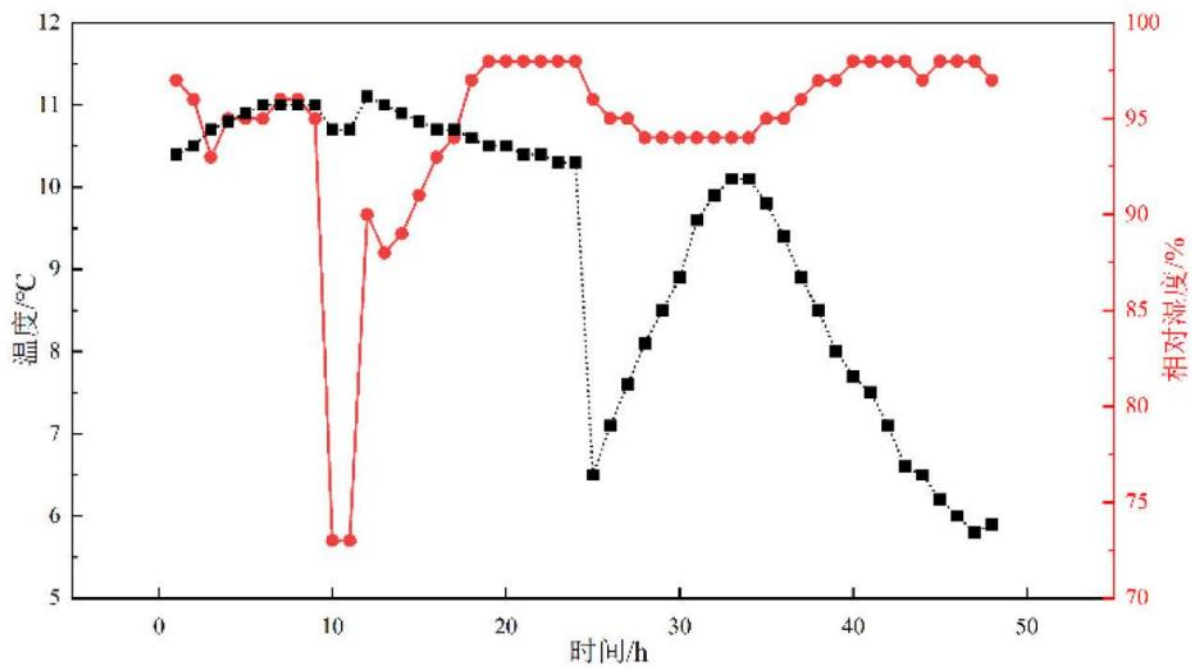


图F.10 不同养护位置裂缝情况

F.5 超高性能混凝土在 C 高速钢桥面铺装应用案例

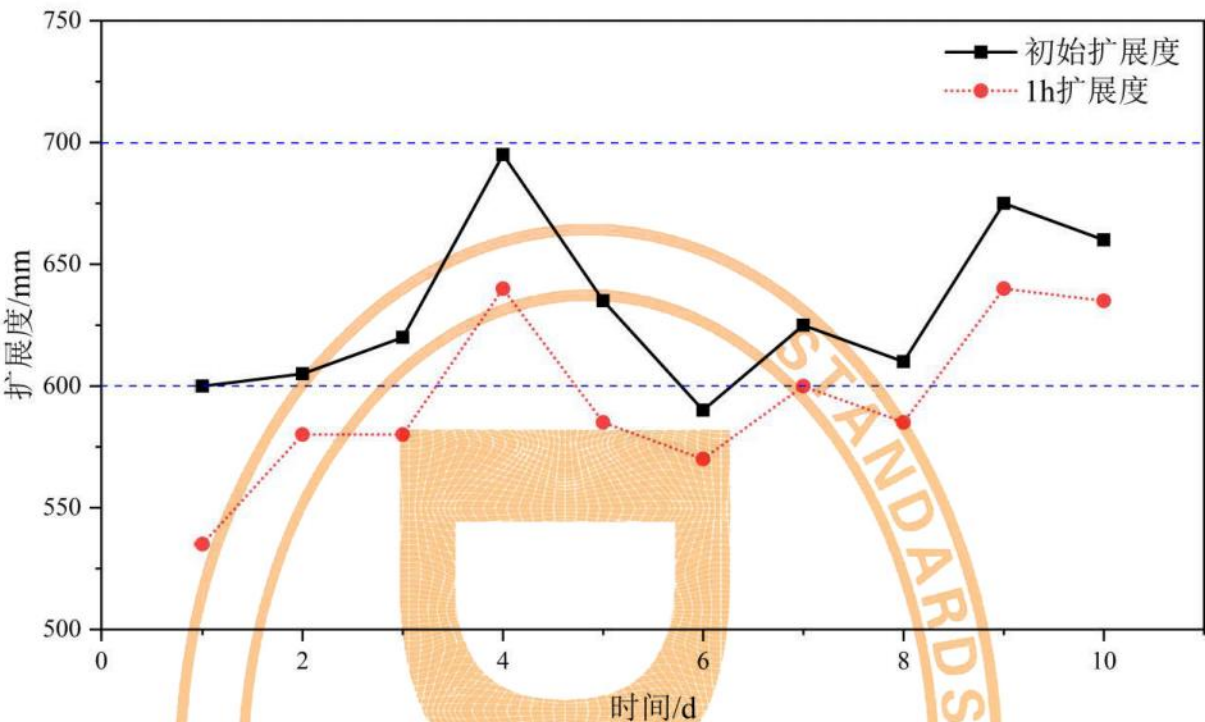
F.5.1 C 高速钢桥面铺装项目具有典型的高寒和高湿气候特征，项目具有施工温度低、施工湿度高等典型低温高湿气候特征。

F.5.2 图F.11为项目施工50 h内的温湿度记录图，其中，最高温度为11.2℃，施工温度范围为9℃~11℃的施工时间占78.1%，施工温度低于9℃的施工时间占31.2%，施工平均温度为10.3℃，平均相对湿度为85 %。



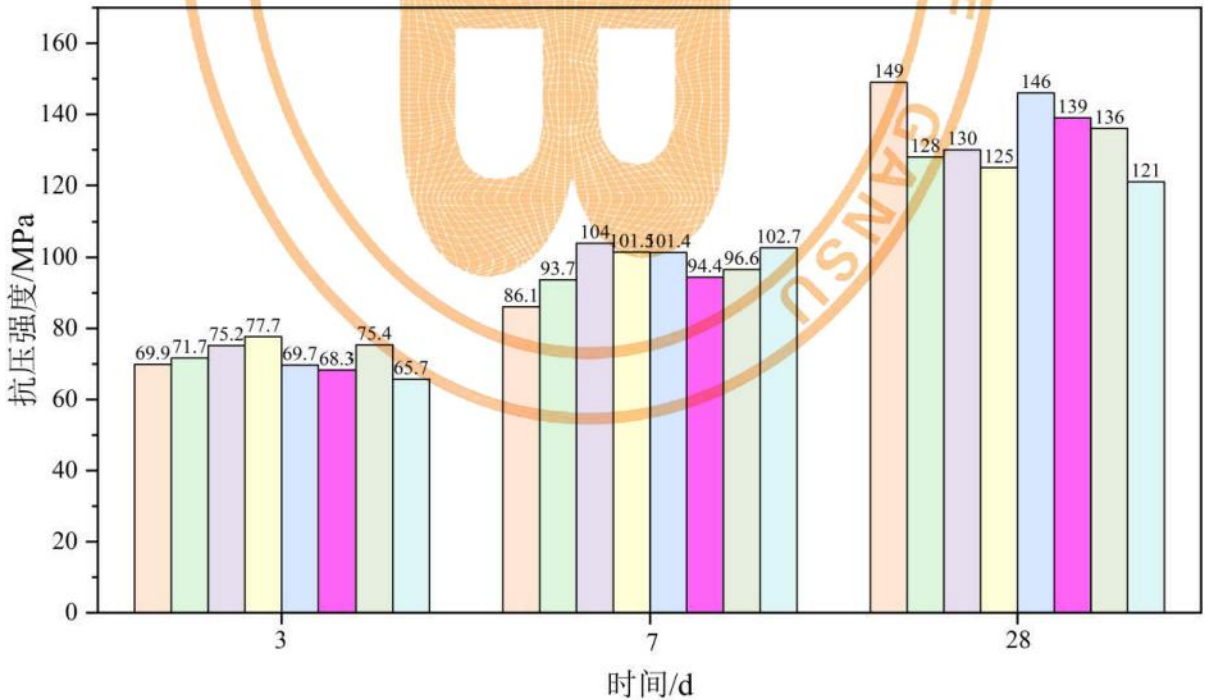
图F.11 C 项目温度和湿度记录图

F. 5. 3 图F.12为项目施工期间实测扩展度数据，初始扩展度最大值为695 mm，初始扩展度最小值为585 mm，平均扩展度为635 mm；1 h经时损失后，最大扩展度为640 mm，平均扩展度降低38 mm。



图F.12 C 项目扩展度数据

F. 5. 4 图F.13为项目施采用超高性能混凝土材料同条件养护不同龄期抗压强度数据，实测3 d抗压强度平均值为71.7 MPa，7 d抗压强度平均值为97.6 MPa，28 d抗压强度平均值为134.3 MPa。



图F.13 C 项目抗压强度数据

F.5.5 项目使用超高性能混凝土材料实测拉伸性能如表F.7所示，

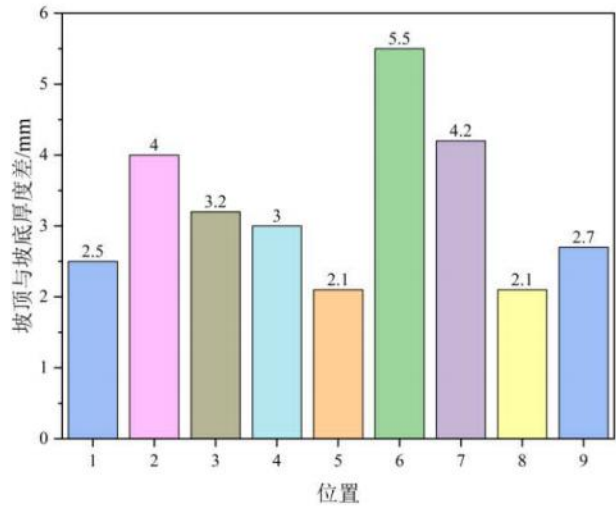
表 F.7 项目使用超高性能混凝土材料拉伸性能

项目	f_{tk} / MPa	ε_{el} ($\times 10^{-6}$)	$E_t/\times 10^3$ MPa	f_{tu} / MPa	ε_{tu} ($\times 10^{-6}$)
数据	8.14	198	45.1	9.61	2100

F.5.6 C项目钢桥面铺装要求坡顶与坡底部存在2°角度，实际摊铺完成后，坡顶与坡底之间厚度差异情况如图F.14所示，不同位置厚度差范围为2.1 mm～5.5 mm之间，平均厚度差为3.2 mm。



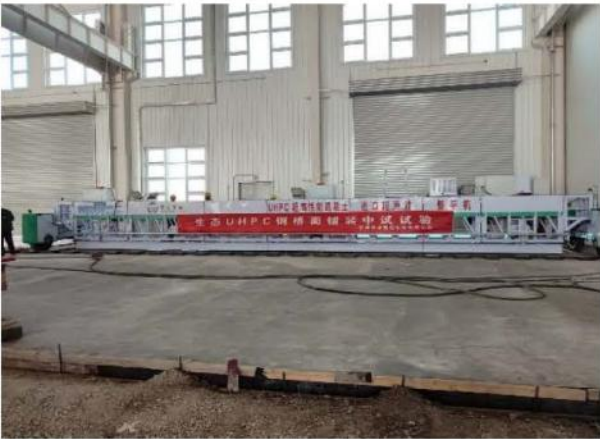
a) 钢桥面铺装坡度验证



b) 坡顶与坡底厚度差

图F.14 超高性能混凝土在钢桥面铺装项目坡度为 2° 情况

F.5.7 项目应用超高性能混凝土钢桥面铺装设备情况如图F.15所示。



a) 摊铺整平一体机



b) 整平机

图F.15 超高性能混凝土钢桥面铺装设备情况

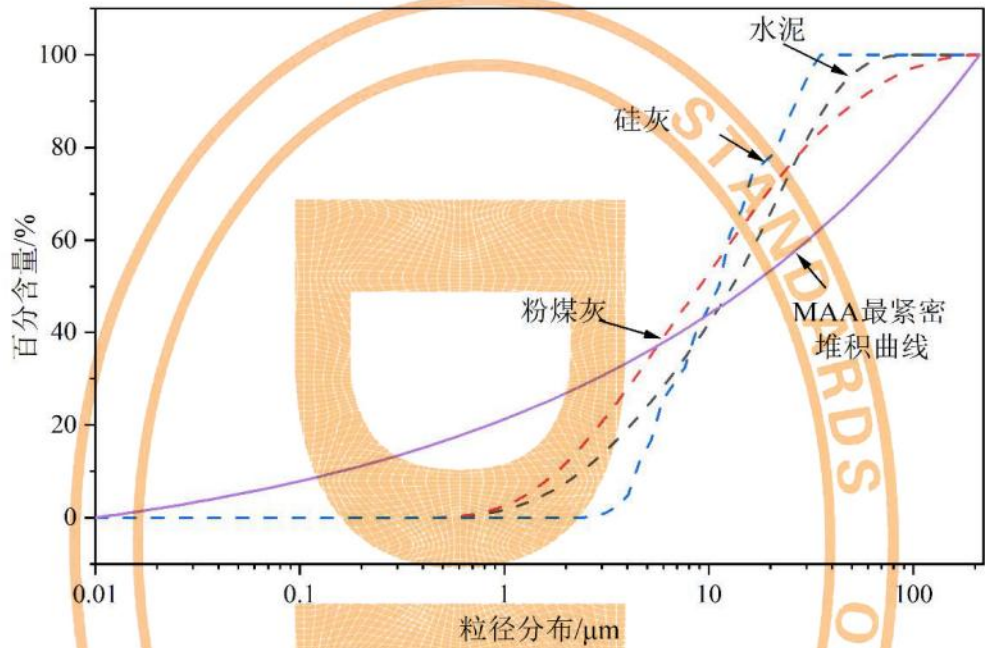
F.6 超高性能混凝土最紧密堆积模型算例

F.6.1 超高性能混凝土原材料粒径分布如表F.8所示，最大颗粒粒径取98.1 μm。

表 F.8 超高性能混凝土原材料粒度分布

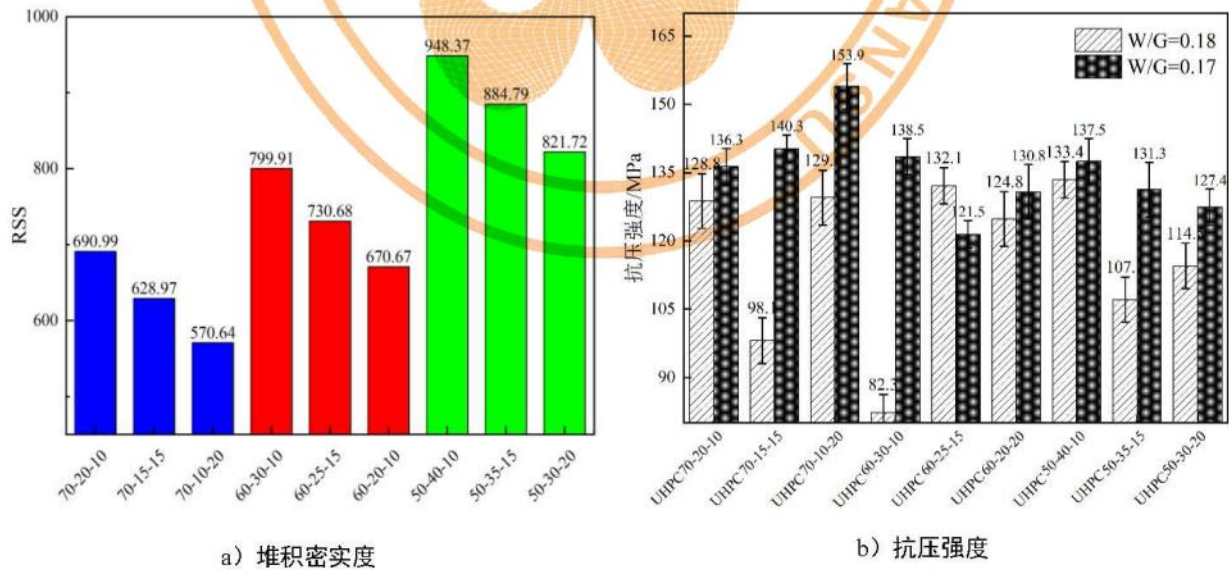
粒径/ μm	0.46	1.13	2.75	5.21	9.86	14.5	21.1	31.3	51.8	98.1
水泥	0.0	2.3	12.2	25.0	41.5	53.7	68.2	82.9	96.2	100.0
粉煤灰	3.6	18.5	35.0	52.4	62.8	72.5	81.0	89.7	97.1	100.0
硅灰	2.9	33.9	43.1	47.5	53.8	59.0	66.6	77.9	91.1	100.0

F. 6. 2 根据原材料粒度分布和MAA模型建立最紧密堆积级配曲线示意图如图F.16所示。



图F.16 最紧密堆积级配曲线示意图

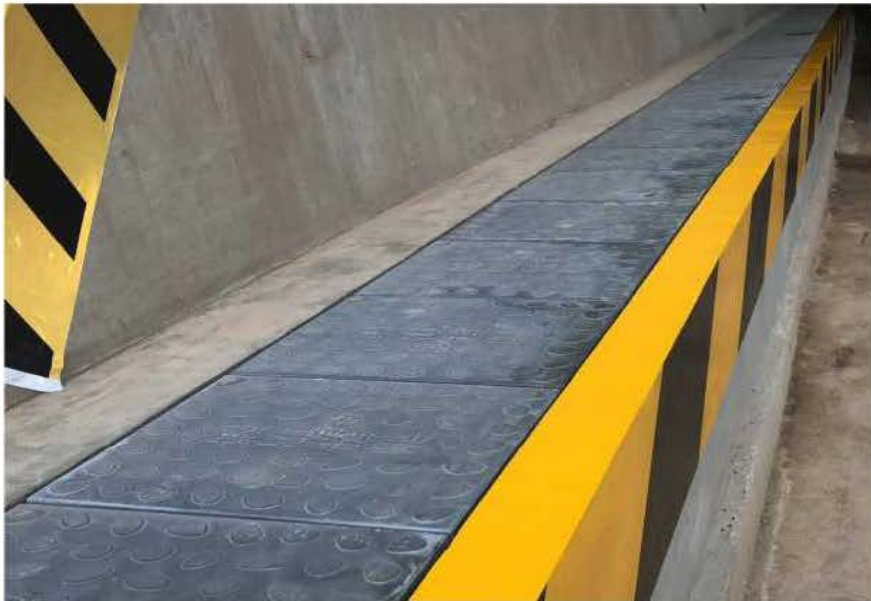
F. 6. 3 不同配合比堆积密实情况 (RSS) 和抗压强度分布如图F.17所示，其中RSS最小值570.64对应的配合比具有最高的抗压强度153.9 MPa。



图F.17 最紧密堆积模型抗压强度验证

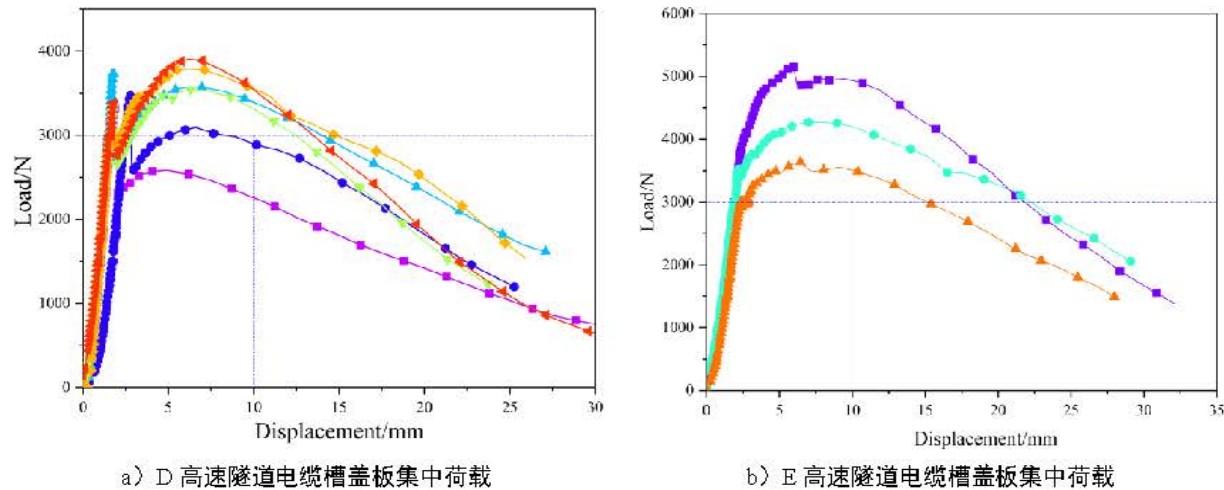
F.7 超高性能混凝土隧道盖板应用案例

F.7.1 超高性能混凝土隧道电缆槽盖板目前已成功应用于王夏高速、甜永高速和渭武高速等省内多条高速公路项目，如图F.18，实现了超高性能混凝土盖板在多种环境气候因素、多种温湿度环境的复杂条件应用。



图F.18 超高性能混凝土隧道电缆槽盖板应用

F.7.2 超高性能混凝土隧道电缆槽盖板的集中荷载数据如图F.19。测试不同项目隧道盖板的集中荷载可知，其最大极限承受荷载超过2.5 kN；挠度为10 mm情况下，隧道电缆槽盖板集中荷载承受力均超过2.0 kN。



图F.19 超高性能混凝土隧道电缆槽盖板集中荷载