

法国建筑科学技术中心 CSTB

对 NaW3 的技术评估资料

中文翻译 BY 恒豪国际 2015.04.17

1 概述

拉法基 UHPFRC Na-FO 是超高性能纤维增强混凝土 (UHPFRC)。它之所以叫超高性能混凝土其特性主要是设计的抗压强度大于 100 兆帕 (MPa)，在拉伸荷载下它具有延性破坏模式，和极高的耐久性 (特别是低空隙率和渗透性)。这些性能的产生，主要是因为它的高凝胶含量，非常低的水/灰比(≤ 0.28 水/灰比)，使用纤维，进行科学性的研究和小心地选择适当的材料，和粒子大小的优化。

超高性能纤维增强混凝土 NaW3-FO 配比上，使用的纤维材料为有机纤维 (聚乙烯醇纤维) 增强。

这份材料技术评估涉及到两种 NaW3-FO 混凝土配方：

- NaW3-FO BA，
- NaW3-FO HA。

The BA and HA 名称是“低碱性”和“高碱性”的法国缩写。

在浇筑后，这两种配方的混凝土制品存放在特定条件下避免任何的失去水分，和一定的环境条件 (见 §3.4)。Na-FO 制品不经过热处理。

2 技术评估

关于拉法基超高性能纤维增强混凝土 Na-FO 在此文件中的特性描述基本上是根据拉法基中央研究实验室 (Laboratoire Central de Recherche de Lafarge – LCR)，法国建筑科学技术中心 (CSTB)，里尔中央理工学校 (ECL) 和 法国爱集思 (EGIS) 实验室的测试结果的分析，测试分析在此文件的第五章描述。

尺寸变化

关于拉法基超高性能纤维增强混凝土 Na-FO 配方的尺寸变化，使用了 40 mm x 40 mm x 160 mm 的试样，给出了下面的结果：

表 1 NaW3-FO 混凝土的尺寸变化

Na-FO 不同配方	NaW3-FO HA 预拌料	Ductal® FO B3 预拌料
收缩	-678 $\mu\text{m}/\text{m}$	-260 $\mu\text{m}/\text{m}$
自收缩	-77 $\mu\text{m}/\text{m}$	-210 $\mu\text{m}/\text{m}$

相反地,干收缩量的数值是比较高的, 大约和一般混凝土一致。

必须注意养护 Na-FO 构件确保减少干收缩产生的开裂, 其干收缩的数值比其他 Ductal® 的配方高出许多。

抗压强度

关于 Na-FO 抗压强度试样判定被陈列在表 4. 数值在 24 小时接近 75 兆帕, 而 28 天数值在 114 到 133 兆帕之间。

延性强度

延性强度测试在 Na-FO 试样上进行。 荷载-绕度曲线的例子在图 2 可见。

此材料显示了第一弹性阶段之后应变有少许的减少。 应力和应变数值决定在比例极限和破坏强度下, 结合弹性模量, 列于表 8 至 10。 应变在 10 到 15 兆帕之间遭遇比例极限。 应力在 12 到 17 兆帕遭遇破坏。 弹性模量在 37000 到 48000 兆帕之间。 拉法基 Na-FO 构件在破坏下的应变比比例极限下的应变高出许多。 这是极为有利的物理性能。

耐磨试验

耐磨试验(泰波尔法) 在 拉法基中央研究实验室 (LCR) 进行。 质量损失在 0.32-0.42 克。 为了提供对比, 以下为不同材质使用泰伯尔法测定的质量损失数值:

- Ductal®-FO (质量损失 : 1.0 g),
- 大理石(质量损失 : 0.7g)
- 瓷器 (质量损失 : 2.5g)
- 一般混凝土 (质量损失 : 3.5 to 8.5 g).

拉法基 Na-FO 建筑构件的耐磨试验是高于上述的四种材料。

耐久性

NaW3 FO 混凝土的耐久性是由实验室结果评估。进行了两种测试：特征测试测量了一般耐久指标和特定情形的性能测试

一般耐久指标

采用的方法是基于法国建设协会 AFGC 指南 [1] 有关混凝土设计制定结构的使用年限。以下为测量的指标：

- 水孔隙率
- 氧渗透性
- 氯离子扩散系数 (表观扩散系数使用迁移实验)。

替代性指标

- 水银孔隙率和孔大小分布
- 氯离子渗透性(RCPT, as per ASTM C1202).

特定情形的性能测试

- 碳化深度(在自然和加速老化的状态下)
- 冻融试验(严峻状态下) 和抵抗剥落。

表 2 (摘录于法国建设协会 AFGC 指南 [1])，提供不同的测试一个耐久性等级。需记得的是相应数值只是指示性的。该方法的适用性已在高性能混凝土 (HPC) 和超高性能混凝土进行测试。值得记录的是，其他测试混凝土的粒子直径是 20 mm。而拉法基 Na-FO, I concrete, 粒子直径是 5 mm。测试 NaW3-FO 混凝土在 90 天湿养护下的耐久指标结果列于表 3，可以对照表 2 进行比较。这个比较可以使我们定义 NaW3-FO 混凝土的耐久性等级。

表 2 : 法国建设协会 AFGC 指南[1]定义的混凝土的耐久性等级和相应数值

耐久等级和相应数值（指示性）的大纲涉及到一般耐久指标（G）或替代性指标（S），也就是电阻率，扩散系数，渗透性。这些数值对应本指南的方法，试样放置于水中三个月后进行测量。

		等级和相应数值				
耐久潜力		非常低	低	中	高	非常高
G	水空隙率% P_w	>16	14 到 16	12 到 14	9 到 12	6 到 9
S	压汞试验 ($P_{Hg \max}=400$ 兆帕和硅胶下烘 45°C 14 天的预处理) % P_{Hg}		13 到 16	9 到 13	6 到 9	3 到 6
G	氯离子的表观扩散系数 (迁移试验法测试) ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) $D_{app(mig)}$	>50	10 到 50	5 到 10	1 到 5	<1
G	表观空气渗透性 (在 $P_{intake}=0.2$ 兆帕和之后烘在 $T=105^\circ\text{C}$) (10^{-18} m^2) K_{gas}	>1000	300 到 1000	100 到 300	10 到 100	<10

表 3 : 拉法基 Na-FO 混凝土的耐久等级测定基于法国建设协会 AFGC 指南的相应数值 (在 90 天 20°C 下湿存放).

耐久指标	Premix NaW3 BA		Premix NaW3 HA	
	含有机纤维	无纤维	含有机纤维	无纤维
水孔隙率 (%)	10.9	11.2	10.9	11.2
压汞孔隙率 (%)	7.5	6.1	8.1	6.6
氯离子的扩散系数 ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.3 非常高耐久	-	0.1 非常高耐久	-
氧渗透性 (10^{-18} m^2) $S=0$; 在 28 天	4.7 到 32 (*) 非常高/高耐久 (*)	3.1 非常高耐久	22.5 (*)	2.9 非常高耐久

(*) 测试方法不适合因为含有机纤维干燥在 105° 。方法在无纤维下数值才有效。

水孔隙率

水孔隙率从 10.9-11.2%。尽管如此，它的浆体体积是远远高于表 2 定义的混凝土。已表 2 下的相应数值去评定 Na-FO 耐久性可能会引发争议。它的数值应该要表达依据浆体体积才能对比。The BHP 2000 项目做了耐久评估基于空隙体积，这也是说空隙体积/浆体体积比。NaW3-FO 混凝土的空隙体积/浆体体积比是 21%。此数值与 BHP 2000 项目其他混凝土评估测试数值的比较列于表 4。这数值是远低于其他混凝土。

表 4: BHP 2000 项目混凝土特性 [2]

Concrete (Dmax 20 mm)	W/Binder	Ec (28D) MPa	P(water) %	Durability level (x)	V(paste) kg/m ³	V(voids) / V(slurry) %
M25	0.84	24.5	16.1	非常低	266	60.5
M30CV	0.52	48.5	12.8	一般	273	46.8
M50	0.48	55.5	14.7	低	327	44.9
M75	0.32	75	11.4	高	292	39
M100FS	0.3	109	8.4	非常高	260	32.3
M120FS	0.24	127.5	7.4	非常高	298	24.8
NaW3-FO	0.28					21

(*) 耐久等级根据表 1 相应水孔隙率数值标准

附注: 这些是基于混凝土配合比和水孔隙度值计算得到的值 [2]. 混凝土浆体体积是同于胶粘材料的体积和有效水的总和。

压汞孔隙率

压汞孔隙率在 Na-FO 试样上测量结果为 0.034 在 0.042mL/g, 对应应在 7.5 到 8.1%之间。这些数值比水孔隙率低但也一致。

图 3 为 Na-FO 孔隙曲线与其他一般混凝土和高性能混凝土的比较。值得注意的是，Na-FO 的毛细管孔隙比其他两种混凝土低上许多。正是这些孔隙群半径大于 100nm，在运输侵略性的化学物质如 CO₂(气态) 和氯离子是占有优势。

气体渗透性

渗透性测试在试样预先干燥在 60°C 和 105°C 下进行。干燥温度对材料的空气渗透性有显著的影响。不同温度上有技术上的优点和缺点，也时常被各种团体拿来讨论。在这份技术评估的文件里，我们综合了所有结果。

抗氯离子的渗入

抗氯离子渗入数值按照 ASTM C 1202 标准测定，NaW3-FO BA 配比在 400 到 450 库仑（Coulombs），NaW3-FO HA 配比在 600 到 800 库仑（Coulombs）。这些数值根据表 5 描述的标准，可以把材料归为 "非常低的氯离子渗透性" 类。

表 5: 抵抗氯离子渗透 按照 ASTM C1202 标准

表：氯离子渗透性根据多少粒子通过

粒子通过（库仑）	氯离子渗透性	一般类型
>4000	高	高水灰比（>0.60）常规预制混凝土
2000-4000	中	中水灰比（0.40-0.50）常规预制混凝土
1000-2000	低	低水灰比（<0.40）常规预制混凝土
100-1000	非常低	乳胶改性混凝土或内部密封混凝土
<100	可忽略	注树脂混凝土，树脂混凝土

抗冻融循环和抗剥蚀

抗冻融循环的测试结果显示 NaW3-FO 试样在严峻状态的冻融循环下没有任何破坏。抗剥蚀测试显示试样的表面在除冰盐下没有受到影响。

抗碳化性能

抗碳化性能测试由试样 Na-FO 混凝土在自然条件和加速条件下进行。结果可以让我们总结拉法基超高性能 Na-FO 混凝土有非常高的抗碳化性。

温度影响

NaW3-FO 混凝土物理特性测试在 80°C 下在表 20 给出。测试结果显示 80°C 不会减少材料的物理特性当材料受到弯曲。

阻燃测试

在 UHPFRC Na-FO 试样下没有进行阻燃测试. 即便如此, Ductal®-FO 分类于 A2 – s1,d0 厚度在 10 到 100 mm。 Ductal®-FO 含有 4.3% 聚乙烯醇纤维。这个纤维含量是高于拉法基 UHPFRC Na-FO (3%)。

耐火性

在 UHPFRC Na-FO 试样下没有进行耐火性测试。NaW3-FO 构件的耐火性测试将需要所使用的产品构件测试代表。例如，耐火性测试在三种 Ductal®-FO 构件下进行了测试：墙板, 楼板和柱子。热应力按照 ISO 834-1 标准施行。技术手册提供了主要的测试结果。主要关注超高性能混凝土耐火表现下的剥落风险。当测试三种建筑构件可以观察到剥蚀现象，但是，剥落的程度有很大的差别. 因此，薄楼板和墙板现实些微的剥落，2 根柱子剥落比较广泛。

3 生产工厂的检验

生产拉法基 Na-FO 板材的厂观察于 Betsinor Composites 工厂在 Courrières, France, 时间为 6 月 27 号 2012.

4 检查

生产程序需经过检查，确保生产程序是兼容的。进行的检查在技术文件手册文 2 和文 3 描述。

5 结论

总体评估

在这份报告里提供的技术文件是根据在假设拉法基 Na-FO 混凝土会被使用制作为不是结构应用的预制产品。这些信息包含技术文件没有突出任何的不匹配从而阻止上述的应用。当产品有结构上的目的，将需要钢筋和或额外的测试，已确保材料有足够的性能应付遇到的应力。需要记得的是，这份评估，目的不是为了涵盖各种设想应用的产品适用性标准(例如，薄建筑装饰板和壳，模具, 室外家具, 等)。这是一般的技术评估，在本次评估的基础进行上，任何进一步的解释可能被需要。

申请人准备的技术文件

1 介绍

拉法基 Na-FO 是超高性能纤维增强混凝土 (UHPFRC)。这类混凝土不同于高性能混凝土 (HPC) 和非常高性能混凝土(VHPC) 因为它的抗压大于 100Mpa，在弯曲荷载下的延性破坏模式, 和非常高的耐久性 (特别是低孔隙率和渗透性)。这些性能的产生，主要是因为它的高凝胶含量，非常低的水/灰比(≤ 0.28 水/灰比), 使用纤维，进行科学性的研究和小心地选择适当的材料，和粒子大小的优化。

超高性能纤维增强混凝土 NaW3-FO 配比上，使用的纤维材料为有机纤维 (聚乙烯醇纤维) 增强。

NaW3-FO 的新拌混凝土浆料特性包含:

坍落度 (不加纤维) : ASTM 坍落度桶, 湿度测试装置无影响 (cm): 290+-30 mm，在离开坍落度桶 3 分钟达到最大值

密度 (kg/m³) 2350+-50，

最多操作时间在环境温度下: < 1 小时。

欧洲专利发表在 EP1958926A1。

生产可以在预制厂或是移动式搅拌站。

The Lafarge 超高性能纤维增强混凝土 Na-FO 混凝土由拉法基水泥集团许可使用其原材料的预制厂才可生产。产品的制备叫 "NaW3- FO 混凝土"。

这份材料技术评估涉及到两种 NaW3-FO 混凝土配方：NaW3-FO BA， NaW3-FO HA。

The BA and HA 名称是“低碱性”和“高碱性”的法国缩写。在接下来的文字里，我们会解释拉法基水泥集团生产"NaW3 预混料"混凝土和预制厂生产的拉法基超高性能纤维增强混凝土 Na-FO 的不同。

2 "预混料" 生产

2.1 原材料

原材料用于备置两种 "NaW3 预混料"混凝土配方如下:

NaW3-FO BA 配方

NaW3 预混料

F2 减水剂

A2 速凝剂

有机纤维

NaW3 预混料是胶凝材料由下面材料组成 :

白水泥, 拉法基 CEM I 52.5 N,

石灰

沙, 直径 \leq 5 mm.

它的特性为:

颜色: 白

松密度: 1090 kg/m³。

NaW3-FO HA 配方

Premix NaW3

Plasticizer F3

Accelerator A2

Organic fibres

NaW3 预混料是胶凝材料由下面材料组成 :

白水泥, 拉法基 CEM I 52.5 N,

沙, 直径 \leq 5 mm.

它的特性为:

颜色: 白

松密度: 1070 kg/m³。

2.2 制造

NaW3 预混料混合三种成分：沙，水泥，填料，在一个 3 立方的搅拌机里。在预混料配比里，允许各种成分的公差为其体积的百分之三。干预混料包装在桶, 袋, 大袋或散装。包装的材料打包放置在托盘和放置在库房，避免水分。

2.3 品质控管

NaW3 预混料的品质管控措施描述在内部程序 [3].

进行了以下的测试：

原材料

使用坦落桶进行的坦落度试验(ASTM C230)测试无纤维 NaW3 混凝土的流变

抗压强度测试在直径 7cm x 14 cm 高的无纤维 NaW3 圆柱试样 (叫 LC-matrix) ，存放在 20°C 下 48 小时然后在 90°C 相对湿度 95% 下 48 小时。

抗弯强度测试在 4 cm x 4 cm x 16 cm 无纤维 NaW3 试样(叫 LC-matrix), 存放在 20°C 下 48 小时然后在 90°C 相对湿度 95% 下 48 小时。

这些检查进行在每次原材料的到来和每制造 20 吨预混料。此程序包含测试的规范。

2.4 包装和运输

拉法基水泥集团提供 NaW3 预混料给预制厂，卡车散装 (存放在料仓)，大袋装和桶装, 或特殊情况下小袋装。NaW3 品牌名显示在送货单上。拉法基水泥集团提供添加剂随着预混料包装在小桶装，大桶装，或大袋装。袋装有机纤维随着拉法基水泥集团提供的预混料 T 一起运输。所有材料运输的数量是按建议制作 NaW3 混凝土的配比下备料。

3 生产 NaW3-FO 混凝土

3.1 混合和备料厂

介绍

Lafarge 超高性能纤维增强混凝土 Na-FO 备置于拉法基水泥集团授予 NaW3 许可的预制厂或移动式搅拌站。授权的预制厂在混合和生产混凝土拉法基 Na-FO 是预制厂的责任。

在资格验证阶段时，预制厂的生产组员是经过 NaW3 技术人员提供的生产流程培训。此程序提供了在特定的设施下生产 Lafarge UHPFRC Na-FO 混凝土，关于数量，时间和操作顺序的信息。预制厂也获得固化最佳实践的信息。

当给予 NaW3 生产许可，拉法基水泥集团会提供规范设置生产和质量规定。
获得 NaW3 授权许可的生产厂家清单可以从拉法基水泥集团获得。

NaW3 许可

装备水平适合生产 Lafarge 超高性能纤维增强混凝土 Na-FO 和 NaW3 合同的签章。拉法基水泥集团的技术人员给予生产设备 Lafarge 超高性能纤维增强混凝土 Na-FO 的混合比例(水灰比, 添加剂含量和速凝剂)。预制厂根据验证结果和检擦员的结论被授权 NaW3 许可

技术支持

拉法基水泥集团提供理论课程和实际的培训给任何使用 Lafarge UHPFRC Na-FO 的公司。授权公司需求下，拉法基水泥集团提供支持帮助。但，这不涵盖构件设计，模具确认，或任何制作实践。

生产设施的年检

拉法基水泥集团在授权许可的生产工厂做每年的检查。任何异常，观察和意见会在检查员的报告里体现，这些也需要即时的修正动作，使拉法基水泥集团的授权许可被保留。

当授权厂停止生产 NaW3 混凝土数个月，年检会延迟至下次生产开始。

设备需求

浇筑 Lafarge UHPFRC Na-FO 的需求条件如下:

- 封闭式建筑保护霜的产生，
- 环境和模具温度在 5°到 35°C。

3.2 搅拌

NaW3-FO BA 和 NaW3-FO HA 混凝土制作为搅拌其 NaW3 预混料。水必须遵守 EP1008 标准。搅拌站千万不能使用回收水。搅拌比例要满足以下条件：

水灰比少于或等于 0.28,

减水剂 F2 or F3 的比例在 水泥重量的 0.9 and 2.5%。

速凝剂 A1 or A2 的比例在 水泥重量的 0 and 2%

有机纤维的比例占水泥体积的 3%

各自的含量会在拉法基集团的技术人员检验后提供的生产流程给出。

3.3 生产

搅拌

搅拌机用于搅拌 Lafarge UHPFRC Na-FO 混凝土在投料前千万不能含有剩余的水分。计量斗, 搅拌机和卸料斗要完全清洁干净避免交叉污染。

NaW3-FO BA 搅拌流程如下：

NaW3 预混料: 搅拌时间 t1

水 + ½ 量的 F3 减水剂: 搅拌时间 t2

½ 量的 F3 减水剂: 搅拌时间 t3

有机纤维: 搅拌时间 t4

任何 A2 速凝剂: 搅拌时间 t5

NaW3-FO HA 搅拌流程如下：

NaW3 预混料: 搅拌时间 t6

水 + ½ 量的 F2 减水剂: 搅拌时间 t7

½ 量的 F2 减水剂: 搅拌时间 t8

有机纤维: 搅拌时间 t9

任何 A2 速凝剂: 搅拌时间 t10

有机纤维逐渐地加入到浆料中 (手动或是使用震动传输带避免堆积形成坨状。

搅拌时间 (t1 to t10) 是拉法基水泥集团的技术人员在初步检验阶段决定。这些时间根据生产设备确保符合 Na-FO 的坍落度要求，使用 ASTM 坍落度桶，3 分钟拿起坍落度桶在 260 mm 到 320 mm 间。这些细节包含在拉法基集团提供给预制厂的生产流程里。

浇筑在模具里

在一般平均的温度状态，Lafarge UHPFRC Na-FO 需要在最多一个小时内浇筑到模具里。

Lafarge UHPFRC Na-FO 混凝土如果不满足 §3.4.4 的条件将不能浇筑。浇筑从模具的一边开始为了在浇筑的过程中提供轻微连续的震动使其逐渐地驱除气泡。

3.4 养护状态和热处理

Na-FO 混凝土在模具里的养护状态必须保护它干燥直到完全固化。这可能涉及塑料膜盖在制品上或是喷上养护剂防止它水分蒸发。空气越干燥，越重要观察且持续养护过程。温度千万不能高于 40°C。在 30°C 到 40°C，F2 or F3 减水剂的剂量可以调整为了遵守新搅拌的料在加入纤维前的流变特性。

Na-FO 制品在固化后，必须防止雨水和阳光直射 48 小时。

3.5 检查和验收搅拌

新拌混凝土

新拌混凝土的流变会在搅拌后检查。在浇筑 Na-FO 进入模具内，他的流动性必须检查，按照 ASTM C230 进行坍落度测试。这试验是在静态下执行。Na-FO 混凝土指定的坍落度在 260 mm 到 320 mm 间。

制作好的混凝土

标准流程为下：每一次的生产运行，预制厂会制作三个 7 cm x 7 cm x 28 cm 试样。这些存放在工厂直到可以运输。存放包含防止 48 小时干燥(例如，用塑料膜覆盖)。他们会受到抗弯测试在 7 天的时候。制作每 10 立方的混凝土制品，至少要有一套试样被制作和测试。平均破坏模量（开裂后）必须大于 12Mpa。平均抗压至少大于 110Mpa。性能设计值在 100 MPa。

预制厂可要求不同的检查和规范根据其用途。

4 应用

Lafarge UHPFRC Na-FO 混凝土的主要应用为:

- 建筑面板和外壳，
- 模具，
- 室外家具。

5 试验结果

5.1 尺寸变化

试样为 4×4×16 cm 棱柱。使用钢模。钉子为了测量目的固定在 4x4 的中间。他们预制在混凝土内和当作基点用来测量试样长度。一次性填充。制作后，试样被存放在生产场所。脱模在 24 小时 +/-1 小时进行。

为了测量总收缩量，棱柱很快的放置在 20°C, 50% 相对湿度的房间。

为了测量内部收缩, 棱柱被两层铝箔覆盖后再存放在 20°C, 50% 50% 相对湿度的房间。

初始长度(L0)和初始重量 在放置它们进入干燥室后立即测量。材料使用收缩仪。长度和重量每天会做记录然后越来越长的时间间隔。测量 55 天后的结果在表 5 列出。

表 5: 结果摘要

种类	NaW3-FO HA (开始测试的龄期：1 天)
收缩 (mm/m)	0.68 (55 天)
自身收缩 (mm/m)	0.08 (55 天)

5.2 抗压强度

抗压强度测试拉法基中央研究实验室 LCR [4]进行，试样大小为直径 7 cm x 14 cm 高的圆柱。这些圆柱被存放 28 days 在 20°C，100% 相对湿度。结果列于表 7。

表 7: 抗压强度 (平均, 最小和最大值在括号中显示)

种类	NaW3-FO BA	NaW3-FO HA	NaW3BA (0% fibre)	NaW3 HA (0% fibre)
强度在 24 小时后	78.5 (6 sp.: 76.1-81.8)	74.6 (6 sp.: 73.3-75.9)	无测量	无测量
强度在 28 天, 20°C, 100%相对湿度	115.6 (7 sp.: 111.0-120.1)	114.3 (8 sp.: 111.5-118.7)	133.4 (3 sp.: 130.4-136.5)	129.5 (3 sp.: 125.9-131.5)
强度在 90 天, 20°C, 100%相对湿度	131.8 (4 sp.: 129.5-133.2)	132.7 (4 sp.: 128.0-135.7)	无测量	无测量

5.3 四点弯曲测试

养护 28 天四点弯曲测试在拉法基中央研究实验室 LCR [5], [6], [27], [28]和法国建筑科学技术中心 **CSTB** [19] 执行。进行了测试四种试样

- 70x70x280 mm : 表 8, [5].
- 450x100x20 mm: 表 9, [6]: 工业-实验室对比试验
- 450x140x20 mm: 表 10, [27].
- 450x140x25 mm: 表 10, [28].

测试 [6] 在对比试验中进行(LCR 实验室生产和 Betsinor 工业生产). 表 9 让我们比较试样结果生产于拉法基中央研究实验室 LCR 和 在 Betsinor 预制厂生产的试样。

考虑材料的弹性，等方向性，均匀下计算应力和应变。这些曲线的例子显示在图 2。

图 1 : 70 mm x 70 mm x 280 mm NaW3-FO 混凝土试样的抗弯强度曲线

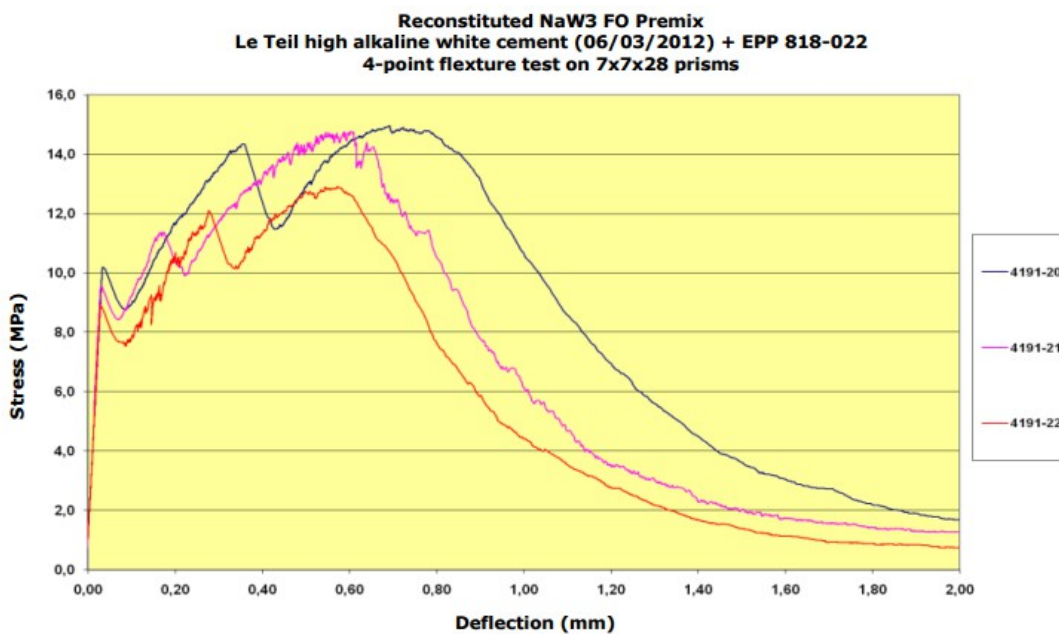


表 10: 70 mm x 70 mm x 280 mm 试样的四点弯曲测试结果

NaW3-FO 类型	NaW3-FO BA	NaW3-FO HA
	7x7x28 (9 specimens)	7x7x28 (9 specimens)
极限比例*变形(mm/(m))	3.40 ^{E-04} (1.85 ^{e-4} - 1.14 ^{e-3})	1.80 ^{E-04} (1.07 ^{e-4} - 2.40 ^{e-4})
极限比例*应力 (Mpa)	8.7 (8.0-10.1)	7.7 (5.5-9.9)
破坏变形(mm/(m))	5.46 ^{E-03} (2.82 ^{e-3} - 9.27 ^{e-3})	6.07 ^{E-03} (4.27 ^{e-3} - 8.07 ^{e-3})
破坏应力 (Mpa)	15.2 (13.0-16.9)	15.6 (12.9-18.6)
弹性模量 E (Mpa)	44,400 (39800-48400)	46,000 (42500-48600)

*极限比例 (LoP) = 极限比例或那个位置上曲线不再是线性

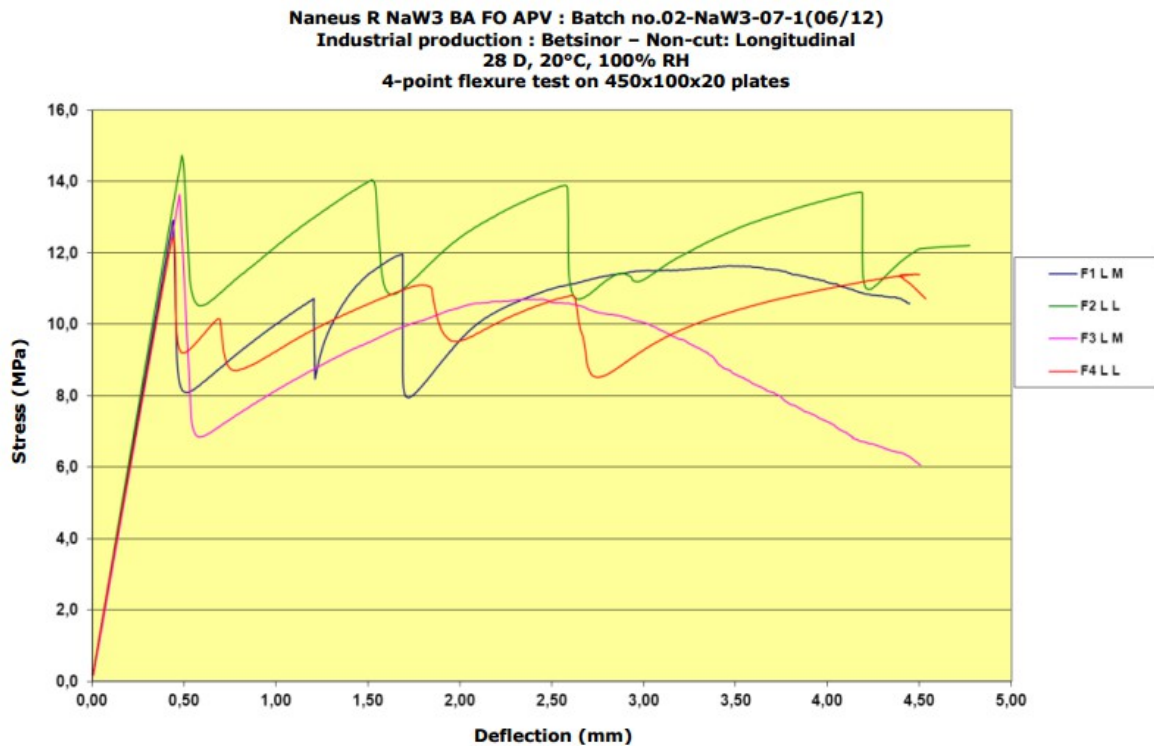
表 11: 试样在四点抗弯测试的结果

NaW3-FO 种类	NaW3-FO BA				NaW3-FO HA	
	450x100x20	450x100x20	450x140x25 (3 specimens) LCR	450x140x20 (2 specimens) LCR	450x140x25 (3 specimens) LCR	450x140x20 (3 specimens) LCR
	不同地方生产的对比测试					
	Betsinor(8 specimens)	LCR (7 specimens)				
极限比例*变形(mm/(m))	2.8 10 ⁻⁴ (2.5 to 3.2 10 ⁻⁴)	2.9 10 ⁻⁴ (2.5 to 3.5 10 ⁻⁴)	1.02 10 ⁻⁴ (7.6 10 ⁻⁵ - 1.5 10 ⁻⁴)	2.33 10 ⁻⁴ (2.22 to 2.4 10 ⁻⁴)	5.80 10 ⁻⁵ (2.12- 9.7 10 ⁻⁵)	2.30 10 ⁻⁴ (2.26 to 2.35 10 ⁻⁴)
极限比例*应力 (Mpa)	13.1 (11.2 to 14.7)	13.7 (12.2 to 16.1)	12.2 (11.2-14)	10.8 (10.3 to 11.3)	10.5 (8.9 - 12.3)	11,1 (10.6 - 11.3)
破坏变形 (mm/(m))	3.0 10 ⁻⁴ (2.5 to 4.3.10 ⁻⁴)	排除	6.31 10 ⁻³ (5.46 - 6.91 10 ⁻³)	排除	8.2, 10 ⁻³ (7.2 - 9.4 10 ⁻³)	排除
破坏应力 (Mpa)	13.1 (11.2 to 14.7)	14.7 (13.4 to 16.1)	15.6 (14.9-17.1)	14.3 (13.5 to 15.2)	17.5 (16.4-18.4)	12.4 (11.5 - 12.9)
弹性模量 E (Mpa)	46,700 (44,500 to 49,900)	47,500 (45,100 to 50,700)	排除	46,600 (46,300 to 46,900)	排除	48,200 (47,300 - 48,900)

*极限比例 (LoP) = 极限比例或那个位置上曲线不再是线性

“排除” 表示数值没被计算。

图 2: 450 mm x 100 mm x 20 mm NaW3-FO 混凝土试样的抗弯强度曲线



5.4 三点弯曲强度

养护 28 天三点弯曲强度测试在拉法基中央研究实验室 LCR [22] 执行. 测试进行在 40 mm x 40 mm x 160 mm 试样上。考虑材料的弹性，等方向性，均匀下计算强度。结果在表 12 给出。

表 10 : 试样的三点弯曲测试结果

NaW3-FO 种类	NaW3-FO BA	NaW3-FO HA
强度(MPa)	18.2 (3 specimens) (15.5 – 20.9)	20.2 (3 specimens) (19.3 – 21.6)

5.5 抗摩擦试验

由拉法基中央研究实验室 LCR [7] 提供在热处理的 NaW3-FO 混凝土试样上做抗摩擦试验结果显示表 11。试样为 100 mm 正方形中间带 12 mm 直径的孔为了安装在旋转台上。抗摩擦试验使用泰波尔法描述在 ASTM C 501- 84 标准。试样先被测量重量，精度在 0.01g 内，然后固定在旋转台上，一分钟旋转 60 圈。两个摩擦轮带有定义的荷载作用在试样上。试样经过 500 次旋转然后再一次测量重量。灰被以真空系统排除。耐擦性的表达为在定义的荷载和特殊类型的摩擦轮下 500 次旋转后的重量损失。

表 11: 抗摩擦试样实验结果

UHPFRC 种类	NaW3-FO BA (3 specimens)	NaW3-FO HA (3 specimens)	"Artévia" 装饰混凝土 (3 specimens)
重量失去 (g)	0.42 (0.3 - 0.60)	0.32 (0.31 - 0.33)	5.06 (4.79 - 5.49)
重量失去 (%)	0.09 (0.06 - 0.13)	0.07 (0.06 - 0.07)	1.08 (1.02 - 1.17)

5.6 耐久性 – 水可及孔隙率

由拉法基中央研究实验室 LCR [8] 在 NaFO 混凝土试样 (含纤维/不含纤维) 进行了水可及孔隙率测试, 在 20°C, 100% 相对湿度下放置 28 和 90 天。测量根据法国标准 NF P 18-459。拉法基中央研究实验室 LCR 结果列于表 14。

表 12: 拉法基中央研究实验室测试水可及孔隙率的测试结果

UHPFRC 种类	水孔隙率 (%) 28 天湿养护在 20°C 下	水孔隙率 (%) 90 天湿养护在 20°C 下
NaW-FO BA	11.4 (11.2 / 11.3 / 11.5)	10.9 (10.9 / 11.0 / 10.9)
NaW-FO HA	11.3 (11.3 / 11.3 / 11.3)	10.9 (10.9 / 10.9 / 10.9)
NaW3 BA (0%纤维)	11.4 (11.4 / 11.4 / 11.5)	11.2 (11.1 / 11.2 / 11.2)
NaW3 HA (0%纤维)	11.7 (11.7 / 11.6 / 11.7)	11.2 (11.2 / 11.2 / 11.2)

5.7 耐久性 - 压汞空隙率

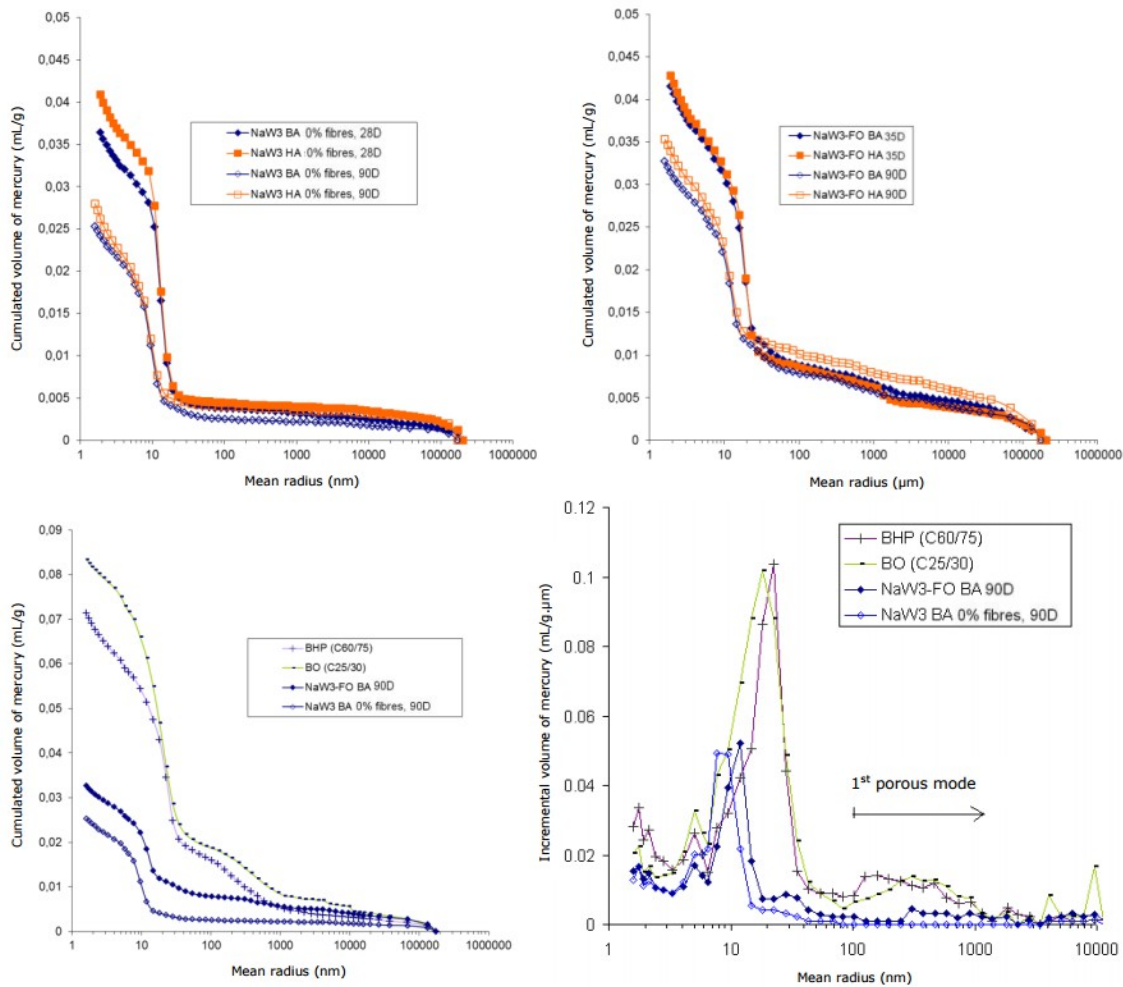
由拉法基中央研究实验室 LCR [10]进行了压汞空隙率测试。测量试样没有经过热处理, 存放在 20°C, 100%相对湿度 20 天和 90 天。结果列于表 13。

表 13: 总压汞空隙率

UHPFRC 种类	总孔隙率 (%) 28 天湿养护在 20°C 下	总孔隙率 (%) 90 天湿养护在 20°C 下
NaW-FO BA	9.3	7.5
NaW-FO HA	9.6	8.1
NaW3 BA (0%纤维)	8.4	6.1
NaW3 HA (0%纤维)	9.3	6.6

孔隙曲线显示在下面。第一组图右边曲线显示纤维增强 FO 孔径 的分布，左边则是不含纤维的样品。为了比较，相同环境下测量一般混凝土带有火山灰和高性能混凝土配方用了硅灰的孔大小分布。

图 1: 2 种 Na-FO 混凝土配方的压汞空隙率曲线。自身曲线(上图) 和跟一般混凝土比较 (下图)。



区别按[30]: 第一种孔隙(或毛细孔隙) 把孔大于 100 nm 半径归于一类,对应一开始被水占据的空洞。孔空洞的体积和大小逐渐减少当沉淀和水化物的产生. 第二总孔隙为水化。这个对应最小的空洞出现在水化物群之间。

第一种孔隙的条件控制主要为水灰比。他的消失对应渐变为不连续的粒间孔网络。第二总孔隙与水化物集群结构有关，是材料固有的特点。它增加的原因主要为硅酸钙水合物 CSHs 产生在水泥颗粒之外。当水化反应不再增加内部水化物(也就是说转化原来的无水颗粒为硅酸钙

水合物，新的孔隙不怎么，或是只有极少的可以通过压汞。

对于 Na-FO, 第一种空隙不存在 (请看最后一张图在图表三的右边)。这是因为极小的搅拌水灰比和最佳颗粒堆积在各种颗粒等级间。Na-FO 的第二种孔隙半径特性小于一般混凝土和高性能混凝土，大小在 10 nm 对比 25 nm。这在材料内部阻止运输侵略性的化学物质，是非常有优势的。

5.7 耐久性 – 氧渗透性测试

氧渗透性测试有里尔中央理工学校 (ECL) [9]和拉法基中央研究实验室 (LCR) [18] 在没经过热处理的 28 天 Na-FO 混凝土试样进行。在里尔中央理工学校，试样放置在一个密闭室受到 35bar 的压力。氧气在 16bar 的进气压力通过试样。在拉法基中央研究实验室，检验渗透性的标准测试根据 XP P 18-563 标准。结果在表 14 列出。

表 14: 氧气渗透性

UHPFRC 种类	渗透性在 20°C 下(m2)		渗透性在干燥的 105°C 下 (m2)		渗透性在干燥的 60°C 下 (m2)
	ECL	LCR	ECL	LCR	ECL
NaW3-FO BA	$0.195 \cdot 10^{-18}$ ($1.24 \cdot 10^{-19}$ to $2.70 \cdot 10^{-19}$)	$< 0.5 \cdot 10^{-18}$	$7.0 \cdot 10^{-18}$ ($5.0 \cdot 10^{-18}$ to $8.3 \cdot 10^{-18}$)	$32 \cdot 10^{-18}$ ($26.1 \cdot 10^{-18}$ to $36.2 \cdot 10^{-18}$)	$4.7 \cdot 10^{-18}$ ($4.2 \cdot 10^{-19}$ to $4.9 \cdot 10^{-19}$)
NaW3 BA (0% 纤维)	$0.0754 \cdot 10^{-18}$ ($0.57 \cdot 10^{-19}$ to $0.92 \cdot 10^{-19}$)	$< 0.5 \cdot 10^{-18}$	$3.1 \cdot 10^{-18}$ ($2.08 \cdot 10^{-18}$ to $4.9 \cdot 10^{-18}$)	$3.1 \cdot 10^{-18}$ ($2.8 \cdot 10^{-18}$ to $3.4 \cdot 10^{-18}$)	无测量
NaW3-FO HA	无测量	$< 0.5 \cdot 10^{-18}$	无测量	$22.5 \cdot 10^{-18}$ ($16.1 \cdot 10^{-18}$ to $26.9 \cdot 10^{-18}$)	无测量
NaW3 HA (0% 纤维)	无测量	$< 0.5 \cdot 10^{-18}$	无测量	$2.9 \cdot 10^{-18}$ ($2.9 \cdot 10^{-18}$ to $3.0 \cdot 10^{-18}$)	无测量

在无纤维的试样上，测量数值是非常低的，低于 $10 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ 。在含有纤维的情况下，氧气的渗透性些微高些。干燥在 105°C 导致一个现象：观察到纤维开始些微变色和渗透性变高。此现象，例如 105°C 干燥下的同试样间的数值变动，可以解释 ECL 和 LCR 测量之间的存在差异。纤维干燥造成的渗透性的增加在其他配方更明显(G3 FO and G3 0% 纤维)，看图 3 和 7 在 ECL 报告。即便如此，在 105°C 干燥后，含有纤维得到的测量数值还是极低的：在 3 和 $32 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ 间

5.8 氯离子扩散系数 (XP P18-462)

测量 NaW3-FO BA 和 HA 混凝土的扩散系数根据协议描述在 XP P18-462 标准。在 6 个月的湿养护后，一个 11 cm 直径和 5 cm 厚的 NaW3-FO HA 或 BA 圆盘放置在两个电解槽内，一个填满稀释的氢氧化钠溶液(NaOH0.1 M) 另一个填满氢氧化钠和一定数量的溶解盐 NaCl (NaOH0.1 M + NaCl0.5 M)溶液。 20 V 的电位差在两端产生为了加速试样的渗透。在经过一段时间，评估根据测量圆盘两面的电流，终止测试， 移除电解槽, 破碎圆盘喷上硝酸银液。这是为了快速可视化和测量氯离子渗透。之后计算扩散系数 [24]。

表 15:在迁移场的表观扩散系数 (XP P 18-462)

UHPFRC 种类	D_{appmig}
NaW3-FO BA	$0.04 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ (one reading)
NaW3-FO HA	$0.28 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ ($0.11 \text{ to } 0.38 \cdot 10^{-12}$)

5.9 抗氯离子穿透性

另外的测量根据 ASTM C 1202 (混凝土耐氯离子穿透能力电标试验方法)，测量电流根据 ASTM C 1202 标准。这测试给出混凝土材料抗氯离子穿透性的指标。它是常被北美使用。此方法包含记录 6 个小时内电流数量通过 50 mm 厚和 95 mm 直径 (3.75 英寸) 的试样。60 volts 的电位差在两端浸泡的圆柱试样。一边是氯化钠溶液 NaCl (3%)，另一边是氢氧化钠溶液 NaOH (0.3N)。总库仑负荷关系到抗氯离子的穿透性能。

Table 16: 测量电流根据 ASTM C1202

UHPFRC 种类	电流 (C)
NaW3-FO BA	704 (641 ; 767)
NaW3-FO HA	431.5 (423 to 440)

5.10 耐久性 – 抗冻融循环抗剥落

测试实施如下:

高饱和水的混凝土在严峻状态的抗冻融循环 (NF P 18-424)

抗剥落, 就是说混凝土当受到在除冰盐下的冻融循环(XP P 18-420)后的表面特性。没有热处理的 NaW3-FO 混凝土试样由拉法基中央研究实验室生产。试样在 20°C 和 100%相对湿度 28 天养护后, 在法国国家认可委员会 COFRAC 的核准下 [14]和 [15], 由法国爱集思 (EGIS) 实验室测试。

抗冻融循环 (NF P18-424)

试样为 10 cm x 10 cm x 40 cm 棱柱。经过 28 天 20°C 和 100% 相对湿度存放, 试样经过 300 水中冻融循环 (-18°C / +9°C, 降温: 6°C/小时, 1 天 4 循环)。

性能标准基于 300 循环后, 膨胀 ($d/l < 500\mu\text{m}/\text{m}$) 和固有频率的比 ($F/F_0 > 60\%$) [20]。

300 次循环完毕后的结果

- 固有频率的中央值大于或等于 100%
- 相对伸长的中央值为 65 $\mu\text{m}/\text{m}$.

抗剥落 (XP P18-420)

试样为 15cmx15cmx15cm 正方体。经过一定的时期 (标准里的规定), 正方体被切成一半和准备接受一体积的盐水溶液在他们的表面。样品然后受到冻融循环 (-20°C / +20°C, 降温: 4°C/小时, 降温: 8°C/小时, 1 天 1 循环)。

性能标准基于测试后的剥落混凝土重量变化 ; 实验研究, 中央值必须保持低于或等于 600 g/m^2 在 56 次循环后(参考指南 LCPC 2003 [21])。

56 次循环完毕后的结果

- 剥落的混凝土中央值为 9 g/m^2 ; 这个配方显示极为优异的抗剥落能力。

5.11 耐久性 – 自然条件下的碳化

实验室自然条件下的碳化测试在拉法基中央研究实验室 LCR [16] 对 NaW3-FO 混凝土试样实施。

第一批的和第二批试样各在 20°C 和 100% 相对湿度下存放 7 天和存放 28 天, 然后放在 20°C 和 65% 相对湿度的实验室环境里。在不同的时间间隔 (28, 90, 140 and 365 天), 样品遭受破坏和喷上酚酞测量碳化深度。

结果列于表 17。

表 17: 两种 NaW3 配方 (含纤维) 碳化深度的中央值

UHPFRC 种类	湿养护长度 20°C/100% rh	碳化深度
NaW3-FO BA	7 天	0 mm(140 天后)
	28 天	0 mm (140 天后)
NaW3-FO HA	7 天	0 mm(140 天后)
	28 天	0 mm(140 天后)

5.12 耐久性 -加速老化条件下的碳化

实验室加速老化条件下的碳化测试在拉法基中央研究实验室 LCR [16] 对 NaW3-FO 混凝土试样实施。

试样第一批存放在 20°C 和 100% 相对湿度 28 天，然后进行 14 天 45°C 干燥或 14 天 20°C 和 55% 相对湿度干燥。根据这一条件，试样曝露在一个充满二氧化碳的大气环境室里面(20°C, 55% RH 和 10% CO₂)。在不同的时间间隔，样品遭受破坏和喷上酚酞测量碳化深度。

结果列于表 18。

Table 18: 两种 NaW3 配方 (含纤维) 碳化深度的中央值

UHPFRC 种类	湿养护长度 20°C/100% RH	碳化深度
NaW3-FO BA	28 天湿养护，接着 2 星期 45°C 干燥	0 mm(112 天后)
	28 天湿养护，接着 2 星期 20°C 和 55%RH 干燥	0 mm (112 天后)
NaW3-FO HA	28 天湿养护，接着 2 星期 45°C 干燥	0 mm (112 天后)
	28 天湿养护，接着 2 星期 20°C 和 55%RH 干燥	0 mm (112 天后)

5.13 耐久性- 高温下 (80°C) 的影响

四点弯曲测试在拉法基中央研究实验室 [29]实施，实施在 NaW3-FO 试样经过 80°C 一定期间的烘烤。450mm x 100mm x 20 mm 长条存放在 20°C, 100% RH 28 天，然后放置在 80°C 干的大型恒温箱。他们被测试放置在 80°C 不同的时间间隔 (2, 7, 28, 56, 和 130 天) [29].

表 19: 4 点弯曲试验 450 x 100 x 20 mm 试验结果，试样（经过 28 湿养护后）存放在 80°C 干燥环境下。

时间间隔	28D 20°C 100% RH (8 specimens)	+ 2D 80°C Dry (4 specimens)	+ 7D 80°C Dry (4 specimens)	+ 28D 80°C Dry (4 specimens)	+ 56D 80°C Dry (8 specimens)	+ 130D 80°C Dry (4 specimens)
极限比例* 变形 (mm/(m))	2.9 10 ⁻⁴ (2.5 to 3.5.10 10 ⁻⁴)	2.1 10 ⁻⁴ (1.9 to 2.23 10 ⁻⁴)	2.6 10 ⁻⁴ (2.36 to 2.86 10 ⁻⁴)	3.5 10 ⁻⁴ (3.28 to 3.89 10 ⁻⁴)	4.0 10 ⁻⁴ (3.81 to 4.26 10 ⁻⁴)	4.0 10 ⁻⁴ (3.9 to 4.1 10 ⁻⁴)
极限比例* 荷载 (MPa)	13.7 (12.2 to 16.1)	8.7 (7.3 to 10.3)	10.8 (9.0 to 12.4)	16.6 (14.8 to 18.6)	19.4 (17.2 to 20.6)	19.3 (17.9 to 20.8)
破坏变形 (mm/(m))	排除	排除	排除	3.5 10 ⁻⁴ (3.28 to 3.89 10 ⁻⁴)	4.0 10 ⁻⁴ (3.81 to 4.26 10 ⁻⁴)	4.0 10 ⁻⁴ (3.9 to 4.1 10 ⁻⁴)
破坏应力(MPa)	14.7 (13.4 to 16.1)	9.2 (7.3 to 12.8)	11.2 (9.0 to 13.6)	16.6 (14.8 to 18.6)	19.4 (17.2 to 20.6)	19.3 (17.9 to 20.8)
弹性模量 E (MPa)	47,500 (45,100 to 50,700)	44,600 (42,000 to 47,800)	44,800 (41,300 to 48,700)	47,100 (45,000 to 49,900)	48,100 (44,100 to 51,400)	48,700 (44,700 to 52,400)

*极限比例 (LoP) = 极限比例或那个位置上曲线不再是线性

“排除” 表示数值没被计算。

5.14 防火测试

防火测试在法国建筑科学技术中心 CSTB [20] 实施，实施在 Ductal®-FO 试样，经过热处理。有效的防火类别，厚度在 10 到 100 mm 之间，是 A2-s1,d0。

5.15 防火性

防火性测试实施在 3 种 Ductal®-FO 制品：墙板，楼板，柱子。混凝土受过热处理。热应力热应力按照 ISO 834-1 标准施行。

防火特性 - 墙板

防火测试实施在 2.4 m x 2 m x 2 cm 厚直立的 Ductal®- FO 墙板 [25]。四层 50 和 75mm 厚的保温板粘结在没有曝露到火的面。

可以观察到墙板剥落在 13 和 27 分钟之间。测试在 132 分钟后停止。面板一直保持火焰和热气体的证明或易燃整个测试期间。因此，结果是 132 分钟。

热绝缘的结果是在 55 和 112 分钟之间根据不同区域。

测试后，做出了下面的观察：

迎火面：

- 墙板向火的方向弯曲，

- 墙板表面剥落和开裂，
- 在板片中央产生相当的侵蚀，
- 垂直与水平的大裂纹。

背火面：

- 试件向火的方向弯曲，特别是在第三区的地方，
- 一区和二区的背面层有很多一块块黑色和褐色的斑，特别在一区，
- 三区和四区的背面层完全变成褐色带有黑色斑，在四区黑色斑的数量和记号更多。

防火特性- 楼板

防火测试实施在 400 mm x 300 mm x 25 mm 厚的 Ductal®-FO 楼板 [26]。

42 kg 的荷载施加在楼板中间。

测试期间，做出了下面的观察：

- 可以在前面几分钟开始听到噪音和开裂，
- 8 分钟后可见施加荷载的地方开裂，
- 8 分钟后可以闻到强烈刺鼻的味道，
- 热绝缘 (温度高于 140°C 在被火面) 在 13 分钟的时候失效，
- 可燃烧的气体密封性在 44 分钟失效。

在 30 分钟的时候达到 4mm 的最大变形。直到测试结束没有显著变化，试件一直支撑着荷载。

测试后，做出了下面的观察：

迎火面：

- 表面剥落和易碎至 5 至 6 毫米的深度。

背火面：

- 褐色和开裂的表面

防火特性-柱子

防火测试在 Ductal®-FO 制成的 2 根柱子上进行，柱子尺寸为 20 cm x 20 cm x 70 cm 和 30 cm x 30 cm x 90 cm [26]。

他们被放置在烘箱内 4 面受到火为了决定质量失去和测试柱子的内部热能。

在 9 分钟和 1 个小时之间，主要观察到以下情形：

- 一件件剥落物掉落，
- 射出。

这测试结果为柱子完全破坏和倒塌。

7 参考资料

- [1] AFGC. Ultra high performance fibre reinforced concretes (UHPC) – Provisional recommendations (January 2002)
- [2] LPC publications: Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité évaluées en conditions de laboratoire ou en conditions naturelles, [Microstructure characteristics and properties relative to durability assessed in laboratory or natural conditions] Véronique Baroghel-Bouny, September 2004, 76 pages.
- [3] LAFARGE CEMENT Ductal. Procédure LC-Ductal® 000-01 : Contrôle qualité des premix Ductal-G2 et Ductal-B2 [Premix Ductal-G2 and Ductal-B2 quality control]
- [4] LCR. Rapport d'essais [Test report] n° LCR2012-Ductal®-0003. 19 November 2012
- [5] LCR. Rapport d'essais [Test report] n° LCR2013-Ductal®-0004. 06 February 2013
- [6] LCR. Rapport d'essais [Test report] n° LCR2012-Ductal®-0001. 19 November 2012
- [7] LCR. Rapport d'essais [Test report] n° LCR2013-Ductal®-000506 février 2013
- [8] LCR. Rapport d'essais [Test report] n° LCR2012-Ductal®-0010. 20 December 2012
- [9] Ecole Centrale de Lille (ECL). Rapport d'essais de perméabilité et de porosité sur béton NaW3 et NaW3-F. [Test report of the permeability and porosity on NaW3 and NaW3-F.] December 2012
- [10] LCR. Rapport d'essais [Test report] n° LCR2012-Ductal®-0011. 20 December 2012
- [11] LCR. Rapport d'essais [Test report] n° LCR2012-Ductal®-0002. 19 November 2012
- [12] LCR. Rapport d'essais [Test report] n° LCR2012-Ductal®-0012. 20 December 2012
- [13] LCR. Rapport d'essais [Test report] n° LCR2012-Ductal®-0013. 20 December 2012
- [14] Rapport d'essais [Test report] EGIS n° 2012-2000 01 October 2012
- [15] Rapport d'essais [Test report] EGIS n° 2012-2375 01 October 2012
- [16] LCR. Rapport d'essais [Test report] n° LCR2012-Ductal®-0014. 20 December 2012
- [17] LCR. Rapport d'essais [Test report] n° LCR2012-Ductal®-0015. 20 December 2012
- [18] LCR. Rapport d'essais [Test report] n° LCR2012-Ductal®-0016. 31st January 2013
- [19] CSTB. Rapport d'essais n° EEM 12 26039302
- [20] CSTB. Procès-verbal de classement de réaction au feu d'un matériau [Fire classification report] n° RA12-0333. 25 September 2012.
- [21] Technical guidelines LCPC 2003 « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel ». [Recommendations for the durability of set concretes subjected to freezing]
- [22] LCR. Rapport d'essais [Test report] n° LCR2012-Ductal®-0006. 6 February 2013
- [23] LCR. Rapport d'essais [Test report] n° LCR2012-Ductal®-0016. 31st January 2013
- [24] LCR. Rapport d'essais [Test report] n° LCR2012-Ductal®-0017. 6 February 2013
- [25] CSTB. Rapport d'essais n° RS00-022. 15 February 2000.
- [26] CSTB. Rapport d'essais n° RS00-023. 17 March 2000.
- [27] LCR. Rapport d'essais [Test report] n° LCR2013-Ductal®-0007. 8 March 2013
- [28] LCR. Rapport d'essais [Test report] n° LCR2013-Ductal®-0008. 8 March 2013
- [29] LCR. Rapport d'essais [Test report] n° LCR2013-Ductal®-0009. 11 March 2013
- [30] Baroghel-Bouny V. « Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons. Méthodes, Analyse, Interprétation », [Characterisation of cement and concrete pastes. Methods, analysis, interpretation] Publication LCPC, Paris, 1994, 468 pages.