

超高性能混凝土渗透性的三种电测方法比较

王增浩,魏宇桐,路新瀛
(清华大学 土木工程系,北京 100084)

摘要:利用 ASTM C1202 法、NT Build 492/RCM 法及 NEL 法对三种市售超高性能混凝土(UHPC)基体预混料的渗透性进行了检测,以分析其适用性。结果表明:ASTM C1202 电量法的测试结果均在 100 C 以下,难以进行更加细致的区分;NT Build 492/RCM 电迁移法即使在 60 V 下通电 500 h,试件中的氯离子显色深度也多在 2 mm 以内,由显色深度读数引起的测试误差较大;NEL 饱盐电导率法的测试结果与现有研究结果基本吻合,考虑测试结果的区分度,该法仍是 UHPC 渗透性检测的首选之法,但其可靠性仍需更多的实践检验;对于无需测试氯离子扩散系数的场合,可直接采用规定测试条件下的试件电导率(或电阻率)来比较材料的渗透性高低。

关键词:超高性能混凝土;渗透性;试验方法

中图分类号:TU528 文献标识码:A doi:10.19761/j.1000-4637.2020.12.079.05

Comparison of Three Electrical Testing Methods for Evaluation of Permeability of Ultra-high Performance Concrete

WANG Zeng-hao, WEI Yu-tong, LU Xin-ying

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The ASTM C1202, NT Build 492/RCM and NEL test methods were used to compare the permeability of three commercial ultra-high performance concrete (UHPC) matrix premixes, and the applicability of these methods was analyzed. The results show that the ASTM C1202 electric charge method is mostly below 100 C, and it is difficult to make a more detailed distinction. For the NT Build 492/RCM electric migration test method, the chloride penetration depths after 500 h at 60 V are mostly within 2 mm together with large reading errors causing unavoidable fluctuations. The results of the NEL salt saturated conductivity method are basically consistent with the data reported in the literature, and considering the principle and the resolution, the NEL method is currently the preferred method for UHPC permeability evaluation even though its reliability still needs further practical inspections. For those cases the chloride diffusivities unnecessary, the electrical conductivity or resistivity of the UHPC can be directly employed to compare its permeability under the same testing conditions.

Key words: Ultra-high performance concrete; Permeability; Test method

0 前言

超高性能混凝土(Ultra-high performance concrete,以下简称UHPC)中的总孔隙率通常小于5%,最可几孔径约为几至几十纳米^[1],胶孔占比相对较多,孔隙连通十分困难,使得UHPC拥有超低的渗透性,这一特点显著区别于高性能混凝土(High performance concrete,以下简称HPC)和普通混凝土(Ordinary Portland cement concrete,以下简称OPC)。

UHPC超低的渗透性(通常要比HPC和OPC低1~2数量级)^[2-4]为其长期耐久性提供了有力保障,但也给其渗透性的快速合理评价带来挑战。因此,寻找快速高效的渗透性试验方法对于UHPC材料设

计、质量检验和工程验收都十分重要。本文通过对比部分现行标准中的渗透性试验方法,以期筛选出具有应用前景或改进潜力的快速渗透性试验方法。

1 混凝土渗透性电测法对比

目前,国内外仍采用渗水法、透气法和电测法来评价UHPC的渗透性^[5-7]。但是,由于UHPC的渗透性很低,故通常需调整部分传统的控制参数或前处理工艺,比如:调高渗水(或气体)压力^[8]、延长施压时间^[9]、改变真空饱水溶液等^[9]。其中,电测法仍是目前最常用的试验方法。几种常用电测法及其特点见表1。

美国ACI239分会目前仍允许采用ASTM

表 1 几种常用的混凝土渗透性电测法

	ASTM C1202—2019 “Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration” ^[10]	XP P18-462 Juin 2012 “Chloride ions migration accelerated test in non-steady-state conditions - Determining the apparent chloride ions diffusion coefficient” ^[9]	NT Build 492 “Concrete mortar and cement-based repair materials-Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments” ^[11]	GB/T 50082—2009 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》 ^[12]	T/CBMBF 37/T/CCPA7—2018 《超高性能混凝土基本性能与试验方法》 ^[13]
指标	电量	氯离子扩散系数	氯离子扩散系数	氯离子扩散系数	氯离子扩散系数
原理	电迁移	电迁移	电迁移	电迁移	电导
试件尺寸	Ø100 mm×50 mm	Ø100 mm×50 mm	Ø100 mm×50 mm	Ø100 mm×50 mm 或 100 mm× 100 mm×50 mm	Ø100 mm×50 mm 或 100 mm× 100 mm×50 mm
前处理	①干抽:在<50 mmHg 压力下抽真空 3 h ②湿抽:导入脱氧蒸馏水,再抽真空 182 h	①干抽:在<25 mbar 压力下抽真空 4 h(最少 0.5 h) ②湿抽:导入 0.1 mol/L NaOH 溶液,再抽真空 68 h,总计 72 h	①干抽:在 10~50 mbar 压力下抽真空 3 h ②湿抽:导入饱和的 Ca(OH) ₂ 溶液,再抽真空 182 h	同 NT Build 492	①干抽:在<-0.08 MPa 下抽真空 6 h ②湿抽:导入 4 mol/L NaCl 溶液,再抽真空 18 h,总计 24 h
测试	①阴极室溶液:3%NaCl NaOH ②阳极室溶液:0.3 mol/L NaOH ③电极:铜网 ④电压:60 V ⑤时间:6 h	①阴极室溶液:0.5 mol/L NaCl+ 0.1 mol/L NaOH 或 1.0 mol/L NaCl+0.1 mol/L NaOH ②阳极室溶液:0.1 mol/L NaOH ③电极:不锈钢 ④电压:20~30 V ⑤时间:对于 UHPC 为 500 h ⑥显色:0.1 mol/L AgNO ₃ 溶液	①阴极室溶液:10% NaCl ②阳极室溶液:0.3 mol/L NaOH ③电极:不锈钢 ④电压:6~60 V ⑤时间:6~96 h ⑥显色:0.1 mol/L AgNO ₃ 溶液	同 NT Build 492	在 Ø50 mm 的现铜电极间施加 0~5.0 V 直流电压
测量值	电流值	氯离子渗入深度	氯离子渗入深度	同 NT Build 492	电导率
计算值	电量值	氯离子扩散系数	氯离子扩散系数	氯离子扩散系数	氯离子扩散系数

C1202 电量法对 UHPC 的渗透性进行评价^[14], 该法测得的结果大多小于 100 C, 有的甚至只有几个库仑^[3], 已无法区分渗透性的高低。

法国的 UHPC 设计与施工标准 NF P18-470—2016 “Concrete - Ultra-high performance fibre-reinforced concrete - Specifications, performance, production and conformity”^[15] 允许采用吸水孔隙率、气体渗透系数和氯离子扩散系数三种指标之一来评价 UHPC 的渗透性, 并规定 UHPC 的渗透性应满足以下要求:

(1) 利用 NF P18-459 法于 90 d 龄期测得的吸水孔隙率应 ≤9%, 有更高要求的可 ≤6%。

(2) 利用 XP P18-463:2011 法于 90 d 龄期测得的气体渗透系数应 ≤9×10⁻¹⁹ m², 有更高要求的可 ≤1×10⁻¹⁹ m²。

(3) 利用 XP P18-462 法于 90 d 龄期测得的氯离子扩散系数应 ≤5×10⁻¹³ m²/s, 有更高要求的可 ≤

1×10⁻¹⁴~2×10⁻¹⁴ m²/s。

日本混凝土协会超高强纤维增强混凝土结构设计施工指南草案^[16]对 UHPC 的水和气体渗透系数以及氯离子扩散系数提出了要求。由指南的附录 6 可知, 水和气体渗透系数的测试方法均与 NF P18-470—2016 相似, 而氯离子扩散系数测试却采用了自然浸泡法。根据自然浸泡法, 浸泡 0.5 年、1.5 年和 2.5 年的 UHPC 试件的表观氯离子扩散系数分别为 0.005 9 cm²/年、0.002 2 cm²/年、0.001 9 cm²/年, 即 1.9×10⁻¹⁴ m²/s、0.70×10⁻¹⁴ m²/s、0.60×10⁻¹⁴ m²/s。

表 1 中所列的 GB/T 50082—2009 中的 RCM 法与 NT Build 492 电迁移法一致, XP P18-462 法是 NT Build 492 电迁移法的改进版。实际应用时通常需对 NT Build 492 电迁移法进行一些调整来检测 UHPC 的渗透性^[17-18], 通常会注明通电时间, 如 500 h 或 21 d。表 1 中所列的 T/CBMBF 37/T/CCPA7—2018 中的 NEL 饱盐电导率法与传统操作方法的不同的

处在于试件要预抽真空 6 h。

本文拟选用三种市售 UHPC 基体预混料,对国内常用的 ASTM C1202 电量法、NT Build 492/RCM 电迁移法和 NEL 饱盐电导率法进行对比,以选出其中最好的方法。

2 试验方法

试验所用的三种 UHPC 基体预混料的部分技术指标见表 2。根据文献[10]~[13]中的要求,测试试件中不掺入钢纤维,只检验水泥基体材料的渗透性。

表 2 三种 UHPC 基体预混料的技术指标

编号	水泥品种	水胶比	抗压强度 /MPa	坍落扩展度 /mm
A	灰色硅酸盐水泥	0.18	146	630
B	灰色硅酸盐水泥	0.18	154	650
C	白色硅酸盐水泥	0.19	139	680

ASTM C1202 电量法和 RCM 电迁移法均采用北京某公司生产的设备进行测试,NEL 饱盐电导率法则采用自主研发的设备,该设备与过去的测试设备相比量程更宽、精度更高,满足 T/CBMBF 37/T/CCPA7—2018 的要求。

所有试件覆膜自然养护 1 d 后,于 90 °C 下蒸汽

养护 48 h,试验操作均按相应规范要求进行。

3 试验结果与讨论

3.1 ASTM C1202 电量法测试结果

表 3 为 ASTM C1202 电量法的测试结果。根据表 3, 仅从平均值来看,A、B 两种材料的渗透性接近,C 材料的测量值约是前两者的 7~9 倍。但是,综合考虑仪器和试验误差,A、B 两种材料的测量值基本在试验误差波动范围内,故其准确性存疑。若按 ASTM C1202—2019 中的评定分级来判断,A、B、C 三种材料的渗透性均处于“可忽略”的相同等级(电量<100 C)。

3.2 RCM 电迁移法测试结果

表 4 为 60 V 下通电 500 h 后的 RCM 电迁移法测试结果。试验过程中发现,由于 A、B 两种材料的显色深度均小于 1 mm,考虑读数误差,仍可认为 A、B 两种材料的渗透性相同;C 材料的渗透性约是前两者的 4 倍。

3.3 NEL 饱盐电导率法测试结果

表 5 为 NEL 饱盐电导率法的测试结果。由表 5 可知,A、B 两种材料的渗透性相近,C 材料的渗透性约是前两者的 5~7 倍。

表 3 ASTM C1202 电量法试验结果

材料	A				B				C			
	A-1	A-2	A-3	平均值	B-1	B-2	B-3	平均值	C-1	C-2	C-3	平均值
电量	8.2	5.4	5.0	5.2	7.7	6.7	6.7	7.0	38	52	46	49

注:试件 A-1、C-1 的测试结果偏离均值>15%,故舍去,不计入平均值的计算。

表 4 RCM 电迁移法测试结果

材料	A				B				C			
	A-1	A-2	A-3	平均值	B-1	B-2	B-3	平均值	C-1	C-2	C-3	平均值
D_{RCM}	2.0	1.9	1.8	1.9	1.8	1.7	1.7	1.7	9.0	8.5	6.1	8.7

注:试件 C-3 的测试结果偏离均值>15%,故舍去,不计入平均值的计算。

表 5 NEL 饱盐电导率法测试结果

材料	A				B				C			
	A-1	A-2	A-3	平均值	B-1	B-2	B-3	平均值	C-1	C-2	C-3	平均值
D_{NEL}	0.63	0.60	0.56	0.60	0.89	0.88	0.86	0.88	4.5	4.5	4.2	4.4

3.4 适用性分析

上述三种试验方法均表明:A、B 两种材料的渗透性相近,且约为 C 材料的 1/7~1/4。虽然三种试验方法看似基本可用,但从测试技术和区分精度来看,三者还是有显著差别的。

3.4.1 ASTM C1202 电量法

文献[3]简要总结了 UHPC 渗透性的 ASTM C1202 电量法测试结果。其中提到,RUSSELL 等^[3]测得蒸养

UHPC 试件在 28 d 时的电量值<40 C,未蒸养 UHPC 试件在 28 d、56 d 时的电量值分别是 360 C、76 C。其他学者对 UHPC 的测试结果则在 6~9 C、0~19 C 或 19~35 C 之间。总之,不论是自然养护的试件,还是蒸汽养护的试件,ASTM C1202 电量法测试结果大多小于 100 C,属于 ASTM C1202—2019 中的“可忽略”分级。

本文测试结果与文献[3]总结的规律相一致。也

就是说,ASTM C1202 电量法适用于对 UHPC 渗透性有规定限值(如 $<100C$)的快速检测场合,但难以更加细致地区分不同 UHPC 的渗透性差别。

3.4.2 RCM 电迁移法

文献[3]、[4]、[8]总结了由不同试验方法得到的 UHPC 中的氯离子扩散系数值,显示氯离子扩散系数可在 $4 \times 10^{-16} \sim 4 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间变化。但是,目前没有关于严格按照 NT Build 492/RCM 电迁移法来测试 UHPC 渗透性的研究报道,原因在于 96 h 内很难观测到氯离子的显色深度。国外多采用改进的电迁移法进行测量,一般是调整电压并延长通电时间。法国的 XP P18-462 法亦是如此。

王子玮^[9]为解决 RCM 电迁移法的氯离子显色深度测量问题,采用了由钻粉取样测得的氯离子浓度值来确定其渗入深度的方法,从而得到了不同活性粉末混凝土中的氯离子扩散系数在 $5.6 \times 10^{-13} \sim 8.1 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间。此外,他在研究中还发现,将 96 h 下的氯离子显色深度 $X_d=0.25 \text{ mm}$ 代入 RCM 电迁移法计算公式后得到了负值,说明 RCM 电迁移法存在缺陷。

SPIESZ^[20]对 NT Build 492/RCM 电迁移法的测试条件和测试误差进行了详细分析,认为当氯离子显色深度在 10 mm 以上时,测试结果才相对可靠。

图 1 是根据 NT Build 492 中的公式计算出的氯离子显色深度 X_d 与对应的氯离子扩散系数 D_{RCM} 之间的关系曲线。计算条件为:测试温度 $25 \text{ }^\circ\text{C}$,试样厚度 50 mm,施加电压为 30 V 或 60 V,通电时间 96 h、500 h、1 000 h。计算过程中发现,当 $X_d \leq 0.5 \text{ mm}$ 时, D_{RCM} 出现负值,也就是说,若采用该方法,则应要求氯离子显色深度不低于 1.0 mm 为宜。另外,从图 1 可以看出,NT Build 492/RCM 电迁移法适用于 $D_{RCM} \geq 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ 的情况,对于 $D_{RCM} < 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ 的 UHPC 来说,该方法能否适用仍需时间检验。

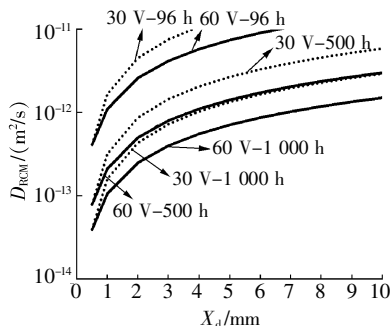


图 1 由 NT Build 492/RCM 电迁移法计算出的 X_d 与 D_{RCM} 之间的关系曲线

本文的测试结果显示,60 V 通电 500 h 后仍可获得 UHPC 的 D_{RCM} ,但因显色深度均 $<2 \text{ mm}$,故测试

结果的误差较大,加上通电时间超过 3 周,检测效率较低。

3.4.3 NEL 饱盐电导率法

本文按 NEL 饱盐电导率法得到的 UHPC 中的氯离子扩散系数与现有研究结果相接近。

NEL 饱盐电导率法与 NT Build 492/RCM 电迁移法不同之处在于:①采用的直流测试电压低($<5 \text{ V}$);②测量时间短($<10 \text{ min}$)。

另外,因 NEL 法所测的材料饱盐电导率与对应氯离子扩散系数之间呈比例关系,故其分辨率和区分度较高,即当试件的饱盐电导率相差一个数量级时,对应的氯离子扩散系数 D_{NEL} 也相差一个数量级。

图 2 是由 NEL 饱盐电导率法计算出的试样电阻 (R) 与氯离子扩散系数 D_{NEL} 之间的理论关系曲线。由图 2 可知,要想使 UHPC 中的氯离子扩散满足 T/CBMF 37/T/CCPA7—2018 中的 UD20 或 UD02 抗渗等级要求,即要求 $D_{NEL} \leq 20 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ 或 $D_{NEL} \leq 2 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ 时,只需要求得被测试样的电阻分别不低于 $8.5 \times 10^3 \text{ } \Omega$ 和 $85 \times 10^3 \text{ } \Omega$ 即可。由此也可推知,对于 UHPC 材料,如想排除人们对所计算的氯离子扩散系数值的疑问,也可直接采用规定测试条件下试样电导率(或电阻率)来比较材料渗透性的高低,NEL 饱盐电导率法只是其中一个特例。事实上,多年来也一直有人在尝试这么做^[21-22],但截至目前尚未建立起广泛认可的试验标准。

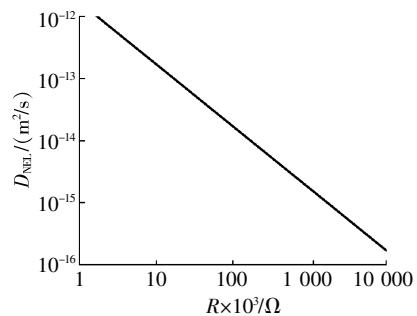


图 2 由 NEL 法计算出的 R 与 D_{NEL} 之间的关系

对比上述三种试验方法可知:

(1)在测试周期上:RCM 电迁移法最长,至少需要 500 h;ASTM C1202 电量法其次,至少需要 30 h;NEL 饱盐电导率法最短,最多需要 25 h。

(2)在渗透性区分度上:ASTM C1202 电量法和 RCM 电迁移法均较弱,NEL 饱盐电导率法最好。

综上所述,三种试验方法中,NEL 饱盐电导率法是目前最适用于 UHPC 渗透性快速评价的方法。

4 结论

(1)由 ASTM C1202 电量法得到的 UHPC 渗透

性测试结果通常属于 ASTM C1202—2019 规定的“可忽略”等级,难以进行更加细致的区分。

(2)根据 NT Build 492/RCM 电迁移法,在 60 V 下通电 500 h 后,UHPC 中的氯离子渗入深度通常小于 2 mm,显色深度的读数误差不可忽略,测试准确性存疑。

(3)NEL 饱盐电导率法的测试结果与现有研究成果基本吻合,加上测量时间最短,其仍是目前 UHPC 渗透性快速评价的首选方法。但是,其适用性和可靠性仍需进一步检验。

(4)为了更好地快速评价 UHPC 的渗透性,建议在改进现有试验方法的同时,还应继续寻找更合适的试验方法。

参考文献:

- [1] SCHMIDT M,FEHLING E.Ultra-high-performance concrete: research, development and application in Europe[J].ACI Special publication,2005,228:51-78.
- [2] ROUX N,ANDRADE C,SANJUAN M A.Experimental study of durability of reactive powder concretes[J].Journal of Materials in Civil Engineering,1996,8(1):1-6.
- [3] RUSSELL H G,GRAYBEAL B A.Ultra-high performance concrete: a state-of-the-art report for the bridge community[R].USA:Federal Highway Administration,2013.
- [4] ABBAS S,NEHDI M L,SALEEM M A.Ultra-high performance concrete: mechanical performance, durability, sustainability and implementation challenges [J].International Journal of Concrete Structures and Materials,2016,10(3):271-295.
- [5] HILSDORF H,KROPP J.Performance criteria for concrete durability[M].Florida:CRC Press,1995.
- [6] ABDULKAREEM O M,FRAJ A B,BOUASKER M,et al. Mechanical and durability properties of environmentally friendly ultra-high performance concrete (UHPC) [C]//AFGC-ACI-fib-RILEM Int.Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete.France:Montpellier,2017:21-28.
- [7] LI J Q,WU Z M,SHI C J,et al.Durability of ultra-high performance concrete -A review [J].Construction and Building Materials,2020,255:119296.
- [8] VINCLER J P,SANCHEZ T,TURGEON V,et al.A modified accelerated chloride migration tests for UHPC and UHPFRC with PVA and steel fibers [J].Cement and Concrete Research, 2019,117:38-44.
- [9] FR-AFNOR.Chloride ions migration accelerated test in non-steady-state conditions - Determining the apparent chloride ions diffusion coefficient:XP P18-462 Juin 2012[S].France:FR-AFNOR,2012.
- [10] ASTM.Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration:ASTM C1202-2019[S].USA:ASTM,2019.
- [11] NORDTEST.Concrete mortar and cement-based repair materials-Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments:NT Build 492 [S].Northern Europe: NORDTEST,1999.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T 50082-2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [13] 中国建筑材料联合会,中国混凝土与水泥制品协会.超高性能混凝土基本性能与试验方法:T/CBPMF 37/T/CCPA7-2018[S].北京:中国建材工业出版社,2018.
- [14] ACL.Ultra-high-performance concrete: an emerging technology report:ACI 239R-2018 [S].USA:American Concrete Institute,2018.
- [15] FR-AFNOR.Concrete-Ultra-high performance fibre-reinforced concrete - Specifications, performance, production and conformity:NF P18-470-2016[S].France:FR-AFNOR,2016.
- [16] JSCE.Recommendation for design and construction ultra-high strength fiber reinforced concrete structures-Draft:JSCE 113-2004[S].Japan:JSCE,2004.
- [17] ARORA A,AGUAYO M,KIANMOFRAD F,et al.First principles-based design of economical ultra-high performance concrete [C]//University of Leeds.Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures (ICDCS 2018).UK:Leeds, 2018:877-889.
- [18] SONG Q L,YU R,SHUI Z H,et al.Steel fibre content and interconnection induced electrochemical corrosion of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) [J].Cement and Concrete Composites,2018,94:191-200.
- [19] 王子玮.活性粉末混凝土抗氯离子侵蚀渗透性能研究[D].北京:北京交通大学,2011.
- [20] SPIESZ P R.Durability of concrete with emphasis on chloride migration [D].Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven,2013.
- [21] VIVAS E,BOYD A,HAMILTON H R.Permeability of concrete-Comparison of conductivity and diffusion methods[R].Florida:University of Florida,2007.
- [22] DOBIAS D,KOURIL M,NOVAKOVA R,et al.Measurement of chloride permeability in UHPC by accelerated method [J].Solid State Phenomena,2017,259:80-84.

收稿日期:2020-05-12

作者简介:王增浩(1995—),男,硕士研究生。

通讯地址:清华大学土木工程系

联系电话:010-62797702

E-mail:eric silica@foxmail.com

通讯作者:路新瀛(1966—),男,教授。

E-mail:luxy@mail.tsinghua.edu.cn