

基于田口方法的聚丙烯纤维增强混凝土 高温损伤后性能研究

张东华

(内蒙古交通职业技术学院, 内蒙古 赤峰 024005)

摘要: 采用 $L_9(3^3)$ 田口方法设计试验, 研究了聚丙烯纤维 (PPF) 掺量、温度及养护龄期 3 个因素对混凝土高温损伤后残余抗压强度及超声波速的影响, 并对试验中各因素水平的信噪比 (S/N) 进行了分析。结果表明: 当 PPF 掺量为 0.3%, 温度为 400 °C, 养护龄期为 28 d 时, 对聚丙烯纤维增强混凝土的力学性能损伤最低。此时, 其残余抗压强度为 52.24 MPa, 超声波速为 4.18 km/s, 高温损伤指数为 0.15。方差分析表明: 温度是影响混凝土高温损伤性能的最显著因素, 其贡献率达到 82.60%。

关键词: 混凝土; 聚丙烯纤维; 高温损伤; 超声波速; 田口方法

掺杂聚丙烯纤维能够有效抑制混凝土的收缩性能, 提高其耐火性能, 尤其是减少或消除混凝土历经高温时的爆裂现象。但是, 聚丙烯纤维对混凝土高温后残余力学性能的影响是否显著还存在一定的争议, 对于聚丙烯纤维增强混凝土的高温损伤性能的评价研究, 也多集中在抗压强度、质量损失及动弹性模量等物理指标的变化分析上面, 利用无损检测的方式对混凝土高温损伤力学性能评价的报道尚不多见。

针对上述问题, 在对高温后混凝土残余抗压强度分析的基础上, 通过超声波无损检测的方式分析历经高温前后混凝土试件超声波速的变化, 引入损伤指数指标来初步评价其高温损伤性能, 以期火灾后混凝土构件性能劣化情况的快速检测提供参考。同时, 采用田口方法 (Taguchi methods) 设计试验, 引入信噪比 (S/N) 来降低不可控因素对试验数据异变产生的影响, 分析聚丙烯纤维掺量、温度、养护龄期对混凝土高

温损伤性能的影响, 旨在丰富发展聚丙烯纤维增强混凝土高温性能的研究。

1 试验与方法

1.1 原材料及混凝土配合比设计

水泥采用强度等级为 42.5 级的普通硅酸盐水泥, 性能指标满足 GB 175—2007 的要求; 选用 II 级粉煤灰, 主要成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 以及 Fe_2O_3 的褐灰色粉末; 粗集料是粒径为 6~20 mm 的普通碎石; 细集料是细度模数为 2.6 的河砂; 减水剂为山东产 FDN—C 型萘系高效减水剂; 采用盐城产束状单丝聚丙烯纤维 (Polypropylene Fiber, PPF), 其密度为 0.91 g/cm³, 长度为 19 mm, 直径为 18 μm 。聚丙烯纤维增强混凝土配合比设计如表 1 所示。

表 1 混凝土配合比设计

试件编号	胶凝材料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粗集料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	细集料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	减水剂/ %	水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	PPF 掺量/ %
N1—N3	410	1145	690	1.8	164	0.2
N4—N6	410	1145	690	1.8	164	0.4
N7—N9	410	1145	690	1.8	164	0.6

收稿日期: 2018—05—26

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金资助项目 (编号: 2014MS0528)

作者简介: 张东华, 女, 讲师. E-mail: cherrydh851@souhu.com

1.2 试验方法

为了确定温度对聚丙烯纤维增强混凝土性能的具体影响情况,试验中采用 $L_9(3^3)$ 田口正交试验设计方法,重点考察了 PPF 掺量(A)、温度(B)和养护龄期(C)3 个因素对混凝土性能的影响。每个因素选取 3 个水平,即 PPF 掺量为 0.1%、0.2% 和 0.3%,温度为 400、600 和 800 $^{\circ}\text{C}$,养护龄期为 7、14 和 28 d,共计 9 组试验,其因素与水平设计表如表 2 所示。

表 2 因素与水平

水平	因素		
	PPF 掺量(A)/%	温度(B)/ $^{\circ}\text{C}$	养护龄期(C)/d
1	0.1	400	7
2	0.2	600	14
3	0.3	800	28

采用强制搅拌机拌和掺杂聚丙烯纤维的混凝土基料,倒入模具成型并经振动台密实后,于室内静置 24 h 后脱模、编号,并立即放入标准养护室中养护至指定龄期,取出后自然晾干,制备规格为 100 mm \times 100 mm \times 100 mm 的立方体试块。然后将试块置于箱式电阻炉中加热,其温度分别设定为 400、600 和 800 $^{\circ}\text{C}$,升温速率约为 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,达到目标温度后恒温处理 1 h,关闭加热系统,试块自然冷却至室温,进行抗压强度试验。

试验中,还利用超声波脉冲速率检测装置对混凝土升温前后的内部损伤情况进行探测,以期通过无损检测的方式进一步表征混凝土升温处理前后宏观力学性能的变化。超声波速(UPV)的主要原理是通过脉冲发射器发射超声波脉冲,通过发射和接收传感器,测量信号的传输时间,进而计算脉冲信号在混凝土试块中的超声波速,通过超声波速的大小来判断混凝土试件的内部损伤情况。

2 结果与讨论

基于田口方法的聚丙烯纤维增强混凝土试验设计及试验结果如表 3 所示。相比正交试验设计来说,田口方法引入信噪比(S/N)指标来降低噪声因子、误差等不可控因素对试验数据变异产生的影响,并以此作为试验结果质量特性的衡量指标。根据衡量指标的特性, S/N 分为越大越好的望大特性、越小越好的望小特性和越接近目标值越好的望目特性。该文中,以抗压强度和超声波速两个具有望大特性的指标来判断混

凝土性能的优劣,望大特性的信噪比计算公式如式(1)所示:

$$S/N = -10 \times \lg\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{Y_i^2}\right)$$
 (1)

式中: S/N 为信噪比; N 为试验重复次数; Y 为试验观测结果,即分别指此处的抗压强度和超声波速。

此外,文中利用 Minitab 15.0 软件进行田口设计、方差分析、主效应分析以及相关统计指标的计算。

2.1 抗压强度及超声波速信噪比(s/n)分析

田口方法试验结果见表 3。

表 3 田口方法试验结果

编号	A/ %	B/ $^{\circ}\text{C}$	C/ d	抗压强 度/MPa	超声波速/ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
N1	0.1	400	7	29.98	2.29
N2	0.1	600	14	35.15	3.14
N3	0.1	800	28	15.22	2.05
N4	0.2	400	14	48.49	3.31
N5	0.2	600	28	43.60	4.02
N6	0.2	800	7	11.03	1.56
N7	0.3	400	28	52.24	4.18
N8	0.3	600	7	32.17	2.48
N9	0.3	800	14	19.83	1.99

由表 3 可知:经高温处理后,不同养护龄期聚丙烯纤维增强混凝土的抗压强度为 11.03~52.24 MPa,超声波速为 1.56~4.18 km/s。结合表 3 和式(1),进一步分析可得聚丙烯纤维增强混凝土抗压强度及超声波速的信噪比响应(表 4)。

表 4 混凝土抗压强度及超声波速信噪比响应

水平	抗压强度/MPa			超声波速/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)		
	A	B	C	A	B	C
1	28.03	32.54	26.85	7.79	10.01	6.32
2	29.12	31.29	30.19	8.78	9.97	8.77
3	30.15	23.48	30.27	8.76	5.36	10.25
极差 R	2.12	9.05	3.42	0.99	4.65	3.93

由表 4 可知:影响聚丙烯纤维增强混凝土抗压强度及超声波速的 3 个因素的极差 R 由大到小的顺序均为:B(温度)>C(养护龄期)>A(PPF 掺量)。在田口方法中,极差的大小反映了因素作用的强弱,说明温度是损伤混凝土力学性能的主要影响因素,养护龄人次之,聚丙烯纤维掺量对其性能损伤的影响程度最弱。

聚丙烯纤维增强混凝土历经高温后的残余抗压强

度及超声波速信噪比主效应趋势图,如图 1、2 所示。不难发现,各因子对混凝土抗压强度及超声波速指标的影响规律基本一致。由图 1 可知:混凝土的抗压强度随聚丙烯纤维掺量的增加而增加,但 PPF 掺量(A)对混凝土高温损伤力学性能的影响程度远低于温度(B)和养护龄期(C)。表明尽管聚丙烯纤维的掺杂可以有效传递载荷且阻止混凝土内部微裂纹的产生和扩展,但是由于聚丙烯纤维本身的熔点较低(约 170℃),当混凝土试块经过 400~800℃的高温后,其内部纤维基本溶解了,使得由纤维阻裂效应带来的力学性能的改善作用并不明显。

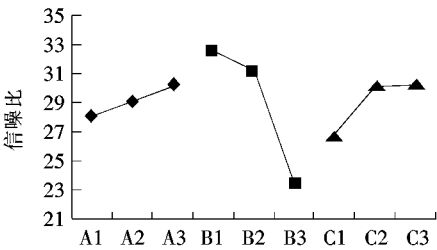


图 1 抗压强度的信噪比主效应趋势图

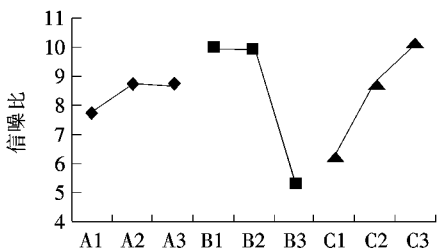


图 2 超声波速的信噪比主效应趋势图

随着温度的升高,混凝土抗压强度的信噪比显著降低。当温度为 400℃时,混凝土试块的表现颜色逐渐变浅,表面存在些许轻微的裂纹;当温度升高到 800℃时,试块表面呈现浅灰白色,裂纹数量及宽度显著增加。前人研究结果显示:400℃时,水泥浆体中的水化硅酸钙(C—S—H)等水化产物开始逐渐脱水,温度进一步升高时,空隙水含量降低,骨料与水泥浆体之间的缝隙增大,当温度上升至 800℃时,其宏观破坏现象显著,力学性能明显降低。表明混凝土力学性能的显著降低主要归因于温度升高,混凝土中的吸附水、毛细水、结晶水等逐渐丧失,使得原本均匀密实的水化产物分层并使微裂纹增大且渐至贯通,最终显著损伤了混凝土的力学性能。由图 1 还可知:养护龄期的延长,混凝土抗压强度的信噪比逐渐升高,表明随着养护时间的增加,水化反应进行得更加彻底,水化产物也更加致密化,进而可以在一定程度上影响混凝土的高温损伤性能。

综合信噪比的分析可得最优工艺参数组合为 A3B1C3,即当聚丙烯纤维掺量为 0.3%、温度为 400℃、养护龄期为 28 d 时,混凝土的力学性能损伤程度最低。

2.2 抗压强度及超声波速方差分析

为进一步评估各因素对聚丙烯纤维增强混凝土抗压强度及超声波速的影响程度,对试验数据进行方差分析,并得出各个因子的贡献度。表 5 为基于信噪比方差分析的各个因子对混凝土抗压强度及超声波速变化影响的显著性及贡献率。

表 5 混凝土抗压强度及超声波速方差分析

来源	自由度 (DF)	抗压强度响应/MPa				超声波速响应/(km·s ⁻¹)			
		偏差平方和(SS)	调整偏差均方和(MS)	P 值	因子贡献率/%	偏差平方和(SS)	调整偏差均方和(MS)	P 值	因子贡献率/%
A: PPF 掺量/%	2	6.726	3.363 1	0.105	3.91	1.929 4	0.964 7	0.201	2.80
B: 温度/℃	2	144.446	72.222 8	0.005	82.60	42.874 6	21.437 3	0.011	62.18
C: 养护龄期/d	2	22.906	11.453 0	0.033	13.09	23.664 5	11.832 3	0.020	34.32
误差	2	0.786	0.393 2		0.50	0.486 8	0.243 4		0.07
总和	8	174.864			100	68.955 4			100

由表 5 可知:除 PPF 掺量外,温度、养护龄期对混凝土残余抗压强度及超声波速的影响均是显著的,其 P 值均低于 0.05,即在 95%的置信区间上显著。其中,温度对于混凝土抗压强度的影响极为显著,其 P 值为 0.005,低于 0.01,即在 99%的置信区间上显著。

从因子贡献率来看,各变量对于混凝土损伤性能影响的贡献程度也有较大差距。对于抗压强度来说,PPF 掺量、温度和养护龄期的贡献率分别为 3.91%、82.60%和 13.09%;对于超声波速来说,3 个因素的贡献率分别为 2.80%、62.18%和 34.32%。其影响程度的

强弱与前文中 S/N 分析结果一致,均表明温度是损伤混凝土力学性能的最显著因素。

2.3 高温损伤指数分析

随着混凝土性能的劣化,其结构随时间的变化反映为脉冲速度的降低。试验中明显发现,高温损伤后的混凝土试块的超声波速要低于历经高温处理前的超声波速。脉冲速度的降低意味着传输时间的延长,即其所通过的路径更长,表明了内部裂缝增多。通过对高温损伤前后混凝土试块超声波速变化的检测,引入高温损伤指数(*Damage Index, DI*)指标来定量/半定量衡量温度对混凝土的损伤情况,其计算公式如下:

$$DI = 1 - v_{\text{damage}} / v_{\text{initial}} \quad (2)$$

式中: v_{initial} 、 v_{damage} 分别为初始未经温度损坏、高温损伤后的超声波速。

另外,还将高温损伤后的混凝土试块浸渍在乙酸乙烯酯单体溶液中 24 h,初步探讨了高温损伤后混凝土试件补强和性能修复的措施。图 3 为高温损伤后浸渍和未浸渍聚合物溶液聚丙烯纤维增强混凝土的高温损伤指数。混凝土经过高温损伤后的损伤指数为 0.15~0.80,以 N7(A3B1C3)为例,其损伤指数为 0.15,表明高温对混凝土性能的劣化影响程度为 15%;而 N9(A3B3C3)的损伤指数为 0.80,说明混凝土试块 80% 的部分受到了破坏。浸渍乙酸乙烯酯单体溶液后,一方面其损伤指数有所降低,为 0.12~0.78,表明浸渍聚合物溶液可以在一定程度上修复高温对混凝土性能造成的损伤;另一方面,浸渍聚合物溶液对编号为 N2、N5 和 N8 修复效果要优于编号为 N3、N6 和 N9 的混凝土试块,即对 600℃ 高温处理的修复效果优于 800℃。浸渍聚合物之所以能够降低混凝土的高温损伤度,可能是因为浸渍的乙酸乙烯酯单体溶液填补了混凝土基材中的许多孔隙和裂缝,再次强化了水泥/砂石结构之间的黏结,聚合物和水泥之间形成了互相贯穿的三维结构,从而有助于修复高温后的混凝土性能。

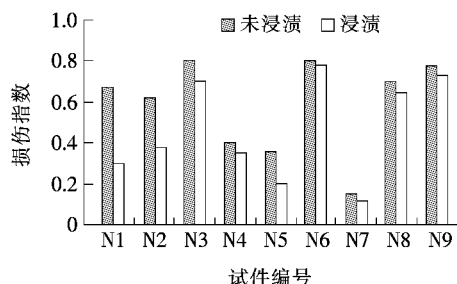


图3 高温损伤后浸渍和未浸渍聚合物溶液混凝土的损伤指数

3 结论

(1) 信噪比分析显示最佳工艺参数组合为 A3B1C3,即 PPF 掺量为 0.3%、温度为 400℃、养护龄期 28 d 时,混凝土的残余性能最佳。此时,其残余抗压强度为 52.24 MPa、超声波速为 4.18 km/s、高温损伤指数为 0.15。

(2) 随着温度的升高,混凝土损伤后的残余抗压强度逐渐降低,超声波速亦显著减小。方差分析表明:除 PPF 掺量外,温度和养护龄期对聚丙烯纤维增强混凝土高温损伤性能的影响均是显著的,其中温度是影响混凝土高温损伤后残余抗压强度和超声波速的最主要因素(贡献率分别达到 82.60% 和 62.18%)。

(3) 浸渍聚合物溶液可以在一定程度上降低聚丙烯纤维增强混凝土的损伤指数,为经历高温损伤的混凝土构件的性能修复提供初步参考。

参考文献:

- [1] Aslani F, Samali B. High Strength Polypropylene Fibre Reinforcement Concrete at High Temperature [J]. Fire Technology, 2014, 50(5): 1 229—1 247.
- [2] Xiao J, Falkner H. On Residual Strength of High-Performance Concrete with and Without Polypropylene Fibres at Elevated Temperatures [J]. Fire Safety Journal, 2006, 41(2): 115—121.
- [3] Akca A H, Zihnioglu N Ö. High Performance Concrete under Elevated Temperatures [J]. Construction & Building Materials, 2013, 44(44): 317—328.
- [4] 刘秋美,李彩玉,杨江红,等.聚丙烯纤维增强磷渣粉煤灰泡沫混凝土性能的试验研究[J].新型建筑材料,2017(5).
- [5] 邵莲芬,刘华伟.高温后纤维混凝土力学性能研究[J].新型建筑材料,2016(7).
- [6] 郝晓玉.聚丙烯纤维高强混凝土高温后的微观特性及其抗压性能研究[D].太原理工大学硕士学位论文,2012.
- [7] Chan Y N, Luo X, Sun W. Compressive Strength and Pore structure of High-Performance Concrete after Exposure to High Temperature up to 800℃ [J]. Cement & Concrete Research, 2000, 30(2): 247—251.
- [8] Poon C S, Shui Z H, Lam L. Compressive Behavior of Fiber Reinforced High-Performance Concrete Subjected to Elevated Temperatures [J]. Cement & Concrete Research, 2004, 34(12): 2 215—2 222.
- [9] 张凤宝,杨明义,李占斌.微小区土壤侵蚀试验中田口方法代替全因子设计的可行性分析[J].农业工程学报,2015(13).

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.02.051

聚合物改性沥青薄层修补料路用性能及力学性能试验研究

杨三强, 黄士周*

(河北大学 建筑工程学院, 河北 保定 071002)

摘要: 为快速解决与修补公路沥青路面出现的麻面、龟裂等问题,采用高黏性改性沥青和碎石为原材料制成的新型路面养护薄层修补料修补路面,不仅高效快速而且不会对交通造成任何影响。研究结果表明:方案1的总体性能优于其他方案,聚合物改性沥青薄层修补料所用的改性沥青采用方案1的配比设计,研究得出集料采用S12、S14级配碎石;通过薄层修补料路用性能试验研究可知,经薄层修补料处理过路面相对于原路面在平整度、构造深度、摩擦系数等方面均具有较大的改善与提高;对薄层修补料力学性能试验研究可知,薄层修补料结构层与原路面结合良好,黏结紧密,构成了完整的一体结构,薄层修补料与沥青混合料路面的黏结力平均值为5 MPa;使用探地雷达对路面进行探测可知,薄层修补料与原沥青混合料路面挤嵌良好,形成了整体结构。

关键词: 改性沥青; 薄层修补料; 路用性能; 力学性能; 试验研究

随着公路里程的不断增长、交通流量的快速增加,公众需求也随之日益提高,如何做好路面养护工作,使公路保持一个良好的运行状态,是中国广大公路工作者面临的重大问题。该文开展聚合物改性沥青薄层修补料性能试验研究解决公路养护问题,具有重要意义。

依托新疆G30高速公路路面养护项目,采取试验室内研究以及工厂加工生产,对基质沥青进行改性,得到性能优良的高黏改性沥青。采用探地雷达以及现场观测等研究方法,对比分析原路面与修补过路面的平

整度、构造深度、摩擦系数、层间黏结等指标的差异。

1 工程背景

G30连霍高速公路善鄯试验段位于中国北方具有火州之称的吐鲁番盆地,区域最高气温达49℃,降雨量分布极不均匀(吐鲁番—托克逊地区仅几毫米),试验路段裂缝、坑槽、车辙病害异常严重。

G30₁₂和库高速公路试验段位于南疆地区,地处

- *****
- [10] Dias W P S, Khoury G A, Sullivan P J E. The Thermal and Structural Effects of Elevated Temperatures on the Basic Creep of Hardened Cement Paste[J]. *Materials & Structures*, 1990, 23(6): 418—425.
- [11] 冯竟竟, 王强, 韩松, 等. 高温诱致水泥浆体微观结构劣化现象的研究[J]. *电子显微学报*, 2010(6).
- [12] 宁艳红. 聚丙烯纤维混凝土受高温作用后的渗透性能[D]. 北京交通大学硕士学位论文, 2009.
- [13] Hager I, Carré H, Krzemień K. Damage Assessment of Concrete Subjected to High Temperature by Means of the Ultrasonic Pulse Velocity—Upv Method[J]. 2013, 32(32): 197—211.
- [14] Al-Rousan R Z, Haddad R H, Swesi A O. Repair of Shear-Deficient Normal Weight Concrete Beams Damaged by Thermal Shock Using Advanced Composite Materials[J]. *Composites Part B Engineering*, 2015, 70: 20—34.
- [15] Okamoto, Kenji, Tsuruta, Ken, Naitou, Takafumi. Development and Application of PIC Form[J]. *Advanced Materials Research*, 2015, 1 129: 159—161.

收稿日期: 2018-08-27

基金项目: 河北省教育厅重点项目(编号: ZD2016073); 河北省高层次人才培养项目(编号: B2017005024); 河北省自然科学基金资助项目(编号: B2018201106)

作者简介: 杨三强, 男, 博士(后), 教授, E-mail: ysq0999@163.com

* 通信作者: 黄士周, 男, 硕士, E-mail: 1120231854@qq.com.