

贮存核废料用混杂纤维混凝土弯曲性能试验研究*

李 艺¹, 赵 文¹, 梁 磊², 宫文娟¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004;
2. 盘锦市城乡规划建设委员会, 辽宁 盘锦 124010)

摘 要: 为确保核废料运输安全以及长期耐久性, 采用正交化配比设计, 在混凝土中单掺和混掺钢纤维、聚丙烯纤维、粉煤灰, 分别在常温下和受热 150℃ 后进行弯曲韧性试验, 通过极差和方差分析, 量化了各掺料类型和掺量对于混凝土韧性的影响效果: 纤维类型和掺量对于高性能混凝土开裂后力学性能改善效果更加明显, 受热后这一特征更为显著; 长度较长、剪切螺纹型的钢纤维 A 在受热前后阻裂增韧效果均最佳; 随着纤维掺量的增加, 混掺钢纤维混凝土的弯曲性能基本呈现增强趋势, 若总掺量相近, 常温下混掺钢纤维混凝土弯曲性能优于单掺, 受热后二者性能相近。

关键词: 混杂纤维混凝土; 弯曲性能; 钢纤维; 聚丙烯纤维; 粉煤灰

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2009)06-0143-04

Test Research of the Flexural Property of Hybrid Fiber Concrete Used for Store Nuclear Waste

LI Yi¹, ZHAO Wen¹, LIANG Lei², GONG Wenjuan¹

(1. College of Resource and Civil Engineering, North East University, Shenyang 110004, China;
2. Panjin Urban and Rural Committee for Construction, Panjin 124010, Liaoning, Chiina)

Abstract: To ensure the carrying safety and long-term durability of nuclear waste, the tests of flexural properties were carried out respectively at normal temperature and after being heated to 150℃ using orthogonal mix proportion design and incorporating steel, polypropylene hybrid fiber, fly ash or steel fiber solely in the concrete. Based on gradation and variance analyses, different kinds of admixtures and their effects on toughness of concrete are quantified. Fiber type and incorporation can improve the mechanical properties of high performance concrete effectively after cracking, which is more remarkable after being heated. Steel fiber A with sheared threads has the best effect on anti-cracking and toughening at pre-and post heating. With the increase of fiber incorporations, the flexibility of hybrid steel fiber concrete increases basically. The hybrid steel fiber is better than steel fiber with single incorporation in flexural properties at normal temperature, but no difference after being heated.

Key words: hybrid fiber concrete; flexural property; steel fiber; polypropylene fiber; fly ash

核废料贮存的长期安全性及其对地质环境、人类健康和生物圈的长期影响是人们十分关注和担忧的问题^[1]。我国现行标准《低、中水平放射性固体废物混凝土容器》(EJ914-2002)仅从水灰比、

抗渗等级等因素控制混凝土配合比设计, 没有充分考虑服役时间和衰变热量的长期影响。被储存的核废料还会长期衰变, 不断放出热量, 温度作用引起贮存容器的材料性能劣化和不均匀变形, 且随时间

* 收稿日期: 2008-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50508008); 辽宁省博士启动基金资助项目(20041014); 东北大学博士后科研基金资助项目(20060125); 辽宁省自然科学基金资助项目(20082024)

作者简介: 李艺(1972年生), 女, 副教授, 博士; E-mail: liyiyq@163.com

累积易使混凝土变质、容器受损, 逸出放射性物质; 核废料贮存温度通常限制在 150 °C 以下^[2], 而温度对水泥浆裂纹形成的最主要阶段是在 150 ~ 200 °C^[3], 在混凝土中掺入增强纤维, 能够阻止混凝土内部裂纹的产生和发展, 并有效地提高混凝土的韧性和延性^[4-7]。本文采用正交化配比设计, 在混凝土中单掺和混掺钢纤维、聚丙烯纤维、粉煤灰, 分别在常温下和受热 150 °C 后进行弯曲韧性试验, 通过极差和方差分析, 量化各掺料类型和掺量对于混凝土韧性的影响效果, 以寻求通过优化配合比设计协调各组份间的热工性能和力学特性, 提高贮存核废料用高性能混凝土阻裂增韧机制, 进而确保核废料运输安全以及长期耐久性。

1 试验设计与原材料

本文按照 RILEM 标准进行混凝土梁的弯曲韧性试验, 试件梁跨度为 500 mm, 在跨中位置进行一点加载, 位移控制速率为 0.2 mm/min。试验选用华日牌 42.5 普通硅酸盐水泥, 密度为 3 000 kg/m³; 中砂: 密度为 2 630 kg/m³, 细度模数为 2.6; 碎石: 密度为 2 930 kg/m³, 最大粒径为 31.5 mm; 汕特龙湖科技实业公司提供的粉状消泡剂 P803 以及花王萘系减水剂; 鞍山昌宏钢纤维厂生产的钢纤维, 其中钢纤维 A 为剪切螺纹型, 长度 32 mm,

长径比 31, 抗拉强度 600 MPa; 钢纤维 B 为超短超细高强型, 长度 13 mm, 长径比 64, 抗拉强度 2 000 MPa; 钢纤维 C 为剪切压痕型, 长度 34 mm, 长径比 32, 抗拉强度 1200 MPa; 常州利尔德通新材料科技有限公司提供的聚丙烯纤维, 长度 19 mm, 密度 0.91 g/cm³, 熔点 165 ~ 175 °C; 沈海热电厂提供的 I 级粉煤灰, 密度 2 059 kg/m³; 鞍山钢铁集团矿渣开发公司提供的矿渣微粉, 密度 2 910 kg/m³, 比表面积 430 m²/kg。混凝土基准强度为 C50, 正交化配比方案见表 1, 其中, SP-13 为文献 [8] 中抗渗性能最优的混凝土 E3, 基准强度为 C60。

弯曲韧性试验试件尺寸为 150 mm × 150 mm × 550 mm, 每组 3 个, 振捣前用厚度 2 mm 的钢板卡片在梁浇筑面跨中位置插入, 深度 25 mm, 初凝后拔出。常温试验的试件按照 GBJ81-85 养护成型后进行试验, 受热试验的试件在成型后放入电热鼓风干燥箱加热至 150 °C 恒温 12 h, 关电源; 12 h 后继续加热至 150 °C 恒温 12 h, 冷却至常温进行试验。

2 结果分析

13 组纤维混凝土梁的韧性评价指标见表 2^[9], 其中 f_u 为参照 RILEM 标准与试件承载力最大值 F_u 相对应的抗弯强度。

表 1 正交化配合比方案
Table 1 The orthogonal mix proportion

组号	水	水泥	粉煤灰	矿渣微粉	砂子	碎石	钢纤维 A	钢纤维 B	钢纤维 C	PP 纤维	减水剂	消泡剂
											%	
SP-1	180	450	50	0	593	1 202	40	8	0	0.3	0.6	0
SP-2	180	350	150	0	578	1 174	80	8	0	0.3	0.6	0
SP-3	180	350	150	0	578	1 174	40	24	0	0.3	0.6	0
SP-4	180	450	50	0	593	1 202	80	24	0	0.3	0.6	0
SP-5	180	350	150	0	578	1 174	40	8	0	0.9	0.6	0
SP-6	180	450	50	0	593	1 202	80	8	0	0.9	0.6	0
SP-7	180	450	50	0	593	1 202	40	24	0	0.9	0.6	0
SP-8	180	350	150	0	578	1 174	80	24	0	0.9	0.6	0
SP-9	180	400	100	0	585	1 188	100	26.8	0	0	0.6	0
SP-10	180	400	100	0	585	1 188	120	29.6	0	0	0.6	0
SP-11	180	400	100	0	585	1 188	140	32.4	0	0	0.6	0
SP-12	180	500	0	0	599	1 216	0	0	120	0	0.6	0
SP-13	158	428.7	0	183.7	618.5	1 145.1	0	0	0	0	2	0.01

表2 混凝土梁弯曲力学性能试验结果

Table 2 The test results of mechanical properties for concrete beam under bending

类别	F_L	F_U	D_{BZ}^b	$D_{BZ,2}^f$	$D_{BZ,3}^f$	f_L	f_U	$f_{eq,2}$	$f_{eq,3}$
	kN		(N·mm)			MPa			
SP-1	13.808	15.729	6 138	5810	16 264	4.419	5.033	3.718	2.082
SP-2	18.993	22.136	8 070	10461	29 703	6.078	7.084	6.695	3.802
SP-3	16.167	18.679	6 927	8229	22 459	5.173	5.977	5.267	2.875
SP-4	19.641	26.100	9 781	13081	43 391	6.285	8.352	8.372	5.554
SP-5	17.100	18.851	6 746	6660	14 893	5.472	6.032	4.262	1.906
加 SP-6	23.445	26.530	14 438	11931	31 136	7.502	8.490	7.636	3.985
热 SP-7	9.044	16.486	3 183	7644	25 994	2.894	5.276	4.892	3.327
前 SP-8	17.833	23.437	8 817	11654	44 051	5.707	7.500	7.459	5.639
SP-9	14.618	20.148	5 661	10115	36 936	4.678	6.447	6.474	4.728
SP-10	16.916	23.969	7 775	11795	54 253	5.413	7.670	7.549	6.944
SP-11	17.335	30.245	5 986	14230	62 379	5.547	9.678	9.107	7.985
SP-12	22.400	25.664	12 320	12880	56 677	7.168	8.212	8.243	7.255
SP-13	23.400	25.664	12 636	-	-	7.488	8.212	-	-
SP-1	12.400	14.508	4 518	5438	15 181	3.968	4.643	3.480	1.943
SP-2	16.412	21.702	7 537	10714	27 700	5.252	6.945	6.857	3.546
SP-3	16.221	18.576	6 791	6905	21 077	5.191	5.944	4.419	2.698
SP-4	14.081	23.567	5 938	11252	41 399	4.506	7.541	7.201	5.299
SP-5	15.507	17.641	7 301	5347	11 921	4.962	5.645	3.422	1.526
加 SP-6	16.916	19.007	9 821	7867	19 511	5.413	6.082	5.035	2.497
热 SP-7	18.543	20.526	8 814	7616	20 955	5.934	6.568	4.874	2.682
前 SP-8	20.256	23.006	11 743	10783	34 878	6.482	7.362	6.901	4.464
SP-9	17.775	22.866	9 742	11422	47 765	5.688	7.317	7.323	6.114
SP-10	21.412	23.004	14 709	11514	44 292	6.852	7.361	7.369	5.669
SP-11	16.489	23.741	8 783	11362	52 523	5.276	7.597	7.272	6.723
SP-12	14.171	25.212	6 444	11520	54 211	4.535	8.068	7.373	6.939
SP-13	12.455	17.041	4 479	2574	3 128	3.986	5.453	1.647	0.400

2.1 极差分析

(1) 抗弯强度 f_L : 加热前, 钢纤维 A > 粉煤灰, 钢纤维 B 和 PP 纤维为负作用; 加热后 4 因素均有增强作用, 影响效果相当;

(2) 极限抗弯强度 f_U : 加热前, 钢纤维 A > PP 纤维 > 钢纤维 B, 粉煤灰为负作用; 加热后, 钢纤维 A > 钢纤维 B > 粉煤灰 > PP 纤维;

(3) 等效抗弯强度 $f_{eq,2}$: 加热前, 钢纤维 A > 钢纤维 B > PP 纤维, 粉煤灰为负作用; 加热后钢纤维 A > 钢纤维 B > 粉煤灰, PP 纤维为负作用;

(4) 等效抗弯强度 $f_{eq,3}$: 加热前, 钢纤维 A > 钢纤维 B > PP 纤维, 粉煤灰为负作用; 加热后, 钢纤维 A > 钢纤维 B, 粉煤灰, PP 纤维为负作用, 但影响不大。

2.2 方差分析

(1) 常温和受热后, 各掺入物影响效果如下:

各掺入物对 f_L 的影响均不显著; 对于 f_U 和 $f_{eq,2}$, 仅钢纤维 A 影响显著; 对于 $f_{eq,3}$, 钢纤维 A 和钢纤维 B 均显著。

(2) 混掺钢纤维的 SP-9 ~ SP-11: ① 常温下, 随纤维掺量的增加, f_L 、 f_U 、 $f_{eq,2}$ 、 $f_{eq,3}$ 均提高; 且对于 f_U 、 $f_{eq,2}$ 、 $f_{eq,3}$ 混掺均优于单掺钢纤维 SP-12; ② 受热后, f_L 表现为先上升后下降; f_U 与 $f_{eq,2}$ 变化不明显; $f_{eq,3}$ 先下降后上升; f_U 和 $f_{eq,2}$ 与单掺钢纤维 SP-12 相当。

(3) 相对于 SP-13 (C60), SP-9 - SP-11 无论混掺或单掺钢纤维, 常温下由于基准强度 (C50) 低而 f_L 略低外, 其他指标均优于对方; 受热后弯曲韧性优势更为显著。

3 结 论

(1) 纤维类型和掺量对高性能混凝土极限抗

弯强度与弯曲韧性的提高效果远比抗弯强度来的显著,即纤维对高性能混凝土开裂后力学性能的改善效果更加明显,受热后这一特征更为显著。

(2) 长度较长、剪切螺纹型的钢纤维 A 与混凝土的粘结力更好,受热前后阻裂增韧效果均最佳。钢纤维 B 次之,PP 纤维和粉煤灰无论正负影响均不显著;

(3) 随着纤维掺量的增加,混掺钢纤维 A、B 混凝土的弯曲性能基本呈现增强趋势;若总掺量相近,常温下混掺钢纤维 A、B 混凝土弯曲性能优于单掺钢纤维 C 的混凝土,受热后二者性能相近;

(4) 相对于基准强度高的普通高性能混凝土,无论混掺和单掺钢纤维,受热后弯曲韧性优势更为显著。

参考文献:

- [1] 高红梅,梁冰,兰永伟.核废料地下处置过程中相关动力学问题及控制措施[J].地质灾害与环境保护,2004,15(2):52-56.
GAO Hongmei, LIANG Bing, LAN Yongwei. Mechanics problems in the handle of nuclear waste material underground and countrole measures[J]. Journal of geological hazards and environment preservation, 2004, 15(2): 52-56.
- [2] MARTA C, ABDELHAFID K, GEORGE C. Effects and interactions of temperature and stress-level related damage on permeability of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2006 (11): 1-10.
- [3] WANG Xishu, WU Bisheng, WANG Qingyuan. Online SEM investigation of microcrack characteristics of concretes at various temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2005 (35): 1385-1390.
- [4] BANTHIA N, NANDAKUMAR N. Crack growth resistant of hybrid fiber reinforced cement composite [J]. Cement and Concrete Composite, 2003, 25: 3-9.
- [5] 鞠杨,贾玉丹,刘红彬,等.活性粉末混凝土钢纤维增强增韧的细观机理[J].中国科学: E 辑, 2007, 37(11): 1403-1416.
JU Yang, JIA Yudan, LIU Hongbin, et al. Mecro-mechanics of increasing strength and toughness of reactive powder concrete mixed with steel fiber [J]. Science in China; series E, 2007, 37 (11): 1403-1416.
- [6] LI V C. On engineered cementitious composites (ECC) A review of the material and its applications [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003, 1(3): 215-230.
- [7] ROKOGO K, KANDA T. Recent HPRCC R&D Progress in Japan [C] // Proceedings of International Workshop on HPRCC in Structural Applications. Bagnaux: RILEM Publications SARL, 2005: 23-26
- [8] 鲍国强,叶青,王建东.用于核废料容器的高性能混凝土的研制[J].混凝土,2003,(8):4-52.
BAO Guoqiang, YE Qing, WANG Jiandong. Research on high performance concrete applied to nuclear waste container [J]. Concrete, 2003, (8): 49-52.
- [9] RILEM TC 162-TDF. Round-robin analysis of the RILEM TC 162-TDF Beam-bending TEST: Part 1 - Test Method Evaluation [J]. Materials and Structures, 2003, 36(263): 609-620.