

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2022.05.020

# 桥梁伸缩缝高性能混凝土抗冲击性能研究

丁楚志<sup>1</sup>, 高小华<sup>2</sup>, 李纲<sup>3</sup>, 池鹏<sup>3</sup>

(1. 西安公路研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 山东大学, 山东 济南 250002;

3. 陕西交通控股集团有限公司, 陕西 西安 710061)

**摘要:**介绍一种用于桥梁伸缩缝、以多种微纤维和聚合物为关键组分的高性能混凝土。试验研究表明:与桥梁伸缩缝常用的普通混凝土、钢纤维混凝土和聚丙烯纤维混凝土相比,桥梁伸缩缝高性能混凝土的抗冲击性能得到显著提高,对于解决或延缓伸缩缝混凝土的早期损坏、降低养护成本具有应用一定的价值。

**关键词:**桥梁; 伸缩缝混凝土; 抗弯拉强度; 落锤式冲击试验; 抗冲击性能

**中图分类号:** U444

**文献标志码:** A

伸缩缝作为桥梁结构的重要部分,直接关系到桥梁结构运营安全和行车舒适性。在公路建设养护中,因种种原因导致桥梁伸缩缝出现各种早期损坏已屡见不鲜。长期的实践经验和使用结果表明,混凝土的损坏(图1)基本成为伸缩缝损坏的常态,而且往往是由于受冲击时产生应力集中造成的。因此,提高伸缩缝混凝土的抗冲击性,对于克服伸缩缝混凝土的早期损坏、延长伸缩缝混凝土的使用寿命、保证桥梁结构运营安全、提高行车舒适性、降低养护成本具有重要的现实意义。



图1 桥梁伸缩缝混凝土的损坏

桥梁伸缩缝常用的混凝土包括普通混凝土、钢纤维混凝土及聚丙烯纤维混凝土,伸缩缝混凝土强度等级通常要求较高。普通混凝土应用广泛、取材方便、工艺简单、抗压性能好,但存在抗弯拉强度低、抗冲击韧性差、脆性大、易开裂等缺点,并且往往是强度越高、韧性越差、脆性越大、抗裂性能越差,用于桥梁伸缩缝时存在明显不足;纤维材料的加入,将抑制混凝土早期塑性裂缝的产生,并限制外力作用下水泥基材料中裂缝

的扩展,减少干缩,但钢纤维混凝土存在抗压强度、抗渗耐磨等方面不确定性的问题,聚丙烯纤维混凝土存在提高抗压强度、抗弯拉强度等方面不明显的问题,单一纤维混凝土用于桥梁伸缩缝时存在不足。通过将多种纤维和聚合物进行复合叠加,研发用于桥梁伸缩缝的高性能混凝土,既发挥单一纤维的作用,又充分发挥混合纤维的优势和叠加效应,显著提高伸缩缝混凝土的韧性和抗冲击性能,从而提升伸缩缝混凝土的使用品质,解决或延缓伸缩缝混凝土的早期损坏。

## 1 桥梁伸缩缝混凝土配合比设计

### 1.1 原材料

水泥:采用42.5号普通硅酸盐水泥,其性能符合规范要求。

细集料:采用中砂,含泥量为2.4%,细度模数为2.68。

粗集料:粒径5~10 mm碎石占30%,粒径10~20 mm碎石占70%,级配良好。

减水剂:HT-HPC聚羧酸高性能减水剂。

外掺聚合物:聚丙烯酰胺,为白色粉末状干粉。

纤维:KWS05-600铣削型钢纤维(图2)及聚丙烯网状纤维(图3)。

### 1.2 配合比设计

按强度等级C50、设计坍落度20~40 mm和砂率36%设计桥梁伸缩缝普通混凝土作为基准配合比,然

收稿日期:2020-09-16

基金项目:陕西交通科技项目(编号:15-23K)

作者简介:丁楚志,男,硕士,高级工程师, E-mail:117720316@qq.com



图 2 铣削型钢纤维



图 3 聚丙烯纤维

后按外掺法分别单独掺入钢纤维(钢纤维掺量为 50 kg/m<sup>3</sup>)、单独掺入聚丙烯纤维(聚丙烯纤维掺量为 0.9 kg/m<sup>3</sup>)、掺加钢纤维聚丙烯纤维和聚合物(钢纤维掺量为 50 kg/m<sup>3</sup>、聚丙烯纤维掺量为 0.9 kg/m<sup>3</sup>、丙烯酰胺掺量为水泥用量的 3%)进行伸缩缝钢纤维混凝土、伸缩缝聚丙烯纤维混凝土及伸缩缝高性能混凝土配合比设计,高性能减水剂掺量为水泥用量的 1%,具体配合比方案见表 1,配合比设计同时满足抗压强度和抗弯拉强度两项力学性能要求。

2 桥梁伸缩缝混凝土基本性能试验

对不同类型的桥梁伸缩缝混凝土分别进行抗压强度和抗弯拉强度试验,按 JTG E30—2005《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》规定的方法测定。取同龄试件为一组,保证每组有 3 个同时制作并养生的有效试件用于测试。

表 1 伸缩缝混凝土配合比设计

桥梁伸缩 缝混凝土 类型	配合比原材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )								水灰比 (W/C)	砂率/ %	坍落度/ mm
	水泥	砂	碎石	水	减水剂	钢纤维	聚丙烯 纤维	外掺聚 合物			
普通 混凝土	485	652	1 158	155	4.85				0.32	36	35
钢纤维 混凝土	485	652	1 158	155	4.85	50			0.32	36	30
聚丙烯纤 维混凝土	485	652	1 158	155	4.85		0.9		0.32	36	35
高性能 混凝土	485	652	1 158	155	4.85	50	0.9	14.55	0.32	36	28

2.1 抗压强度试验

试验采用 150 mm×150 mm×150 mm 立方体标准试件,按标准方法成型和养生,每种类型伸缩缝混凝土分别进行了 7 d、28 d、56 d、90 d 共 4 个龄期下的抗压强度测试。以每组 3 个试件测试值的算术平均值为测定值,计算精确至 0.1 MPa。3 个测试值中的最大值或最小值中如有一个与中间值之差超过中间值的 15%,则取中间值为测定值;如最大值和最小值与中间值之差均超过中间值的 15%,则该组试验结果无效。得到桥梁伸缩缝不同类型不同龄期的混凝土抗压强度对比曲线如图 4 所示。

由图 4 可以看出:

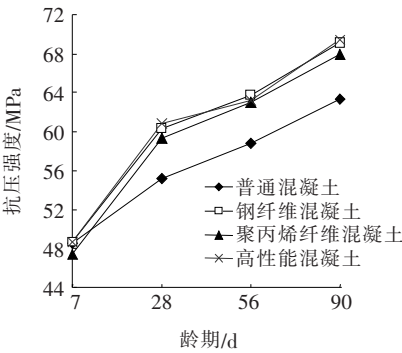


图 4 桥梁伸缩缝不同类型混凝土不同龄期抗压强度对比

(1) 桥梁伸缩缝普通混凝土、钢纤维混凝土、聚丙烯纤维混凝土、高性能混凝土的 7 d 抗压强度基本相

当。7 d 后抗压强度变化较大,普通混凝土 28 d 抗压强度增长超过 10%,钢纤维混凝土、聚丙烯纤维混凝土、高性能混凝土 28 d 抗压强度则增长了 20% 以上。28 d 后抗压强度增长放缓,与前一龄期值相比,56 d 和 90 d 抗压强度增长分别不超过 10%。与普通混凝土相比,钢纤维混凝土、聚丙烯纤维混凝土、高性能混凝土 28 d、56 d 和 90 d 抗压强度有所提高,虽幅度不是很大,但增大了混凝土压缩破坏时的延性。

(2) 高性能混凝土与钢纤维混凝土各龄期抗压强度接近,略高于聚丙烯纤维混凝土对应龄期的抗压强度,但三者总体在同一水平。

(3) 桥梁伸缩缝不同类型混凝土抗压强度随龄期增加而增长,且前期抗压强度增长率大于后期。钢纤

维混凝土、聚丙烯纤维混凝土、高性能混凝土抗压强度随龄期变化的规律与普通混凝土一致。

2.2 抗弯拉强度试验

试验采用 150 mm×150 mm×550 mm 棱柱体标准试件,按标准方法成型和养生,桥梁伸缩缝每种类型混凝土分别进行了 28 d 抗弯拉强度测试。测值平均值算法同抗压强度试验方法。3 个试件中如有一个断裂面位于加荷点外侧,则混凝土抗弯拉强度按另外两个试件的试验结果计算。如果这两个测值的差值不大于这两个测值中较小值的 15%,则以两个测值的平均值为测试结果,否则结果无效。如果有两根试件均出现断裂面位于加荷点外侧,则该组结果无效。得到桥梁伸缩缝不同类型混凝土抗弯拉强度如表 2 所示。

表 2 桥梁伸缩缝不同类型混凝土抗弯拉强度测试结果

桥梁伸缩缝 混凝土类型	试件破坏时极限荷载							抗弯拉强度/MPa
	最大值/ kN	中间值/ kN	最小值/ kN	最大值 偏差/%	最小值 偏差/%	平均值/ kN	采用值/ kN	
高性能混凝土	56.9	53.5	52.9	6.4	1.1	54.4	54.4	7.26
普通混凝土	45.9	44.9	44.6	2.2	0.7	45.1	45.1	6.02
钢纤维混凝土	57.5	55.8	52.1	3.0	6.6	55.1	55.1	7.35
聚丙烯纤维混凝土	50.8	48.1	45.7	5.6	5.0	48.2	48.2	6.43

由表 2 可以看出:

(1) 与普通混凝土相比,钢纤维混凝土、聚丙烯纤维混凝土、高性能混凝土对抗弯拉强度有所提高,但幅度不同,钢纤维混凝土、高性能混凝土的提高幅度明显大于聚丙烯纤维混凝土。

(2) 桥梁伸缩缝高性能混凝土的抗弯拉强度与钢纤维混凝土接近,但与普通混凝土的抗弯拉强度相比,增长 20% 以上,对抗弯拉强度的提高作用明显,有利于降低伸缩缝混凝土的受弯拉破坏风险,增强伸缩缝混凝土的耐久性。

3 桥梁伸缩缝混凝土抗冲击性能研究

3.1 落锤式冲击试验

参考美国混凝土协会 ACI 544 推荐的测试方法,并结合中国工程建设协会标准 CECS 13:2009《纤维混凝土试验方法标准》抗冲击性能试验设备要求,自主设计定制了一种用于测试桥梁伸缩缝混凝土抗冲击性能的试验机(见图 5),桥梁伸缩缝混凝土抗冲击试验示

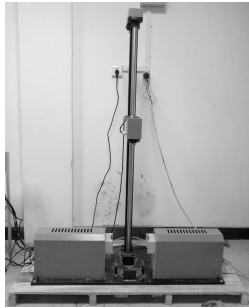


图 5 自制冲击试验机

意图见图 6。

3.2 桥梁伸缩缝混凝土落锤式冲击试验结果

落锤式冲击试验试件采用直径为 150 mm、厚度 (63±3) mm 的圆饼试件,对桥梁伸缩缝普通混凝土、钢纤维混凝土、聚丙烯纤维混凝土、高性能混凝土分别进行试件成型和养生,然后分别进行 28 d 龄期的冲击试验,每种类型桥梁伸缩缝混凝土每组有效试件不少于 3 个。以 3 个试件冲击次数的平均值作为测定值,并据此计算冲击耗能。

测试开始前,调节卡扣高度至 500 mm,并将冲击

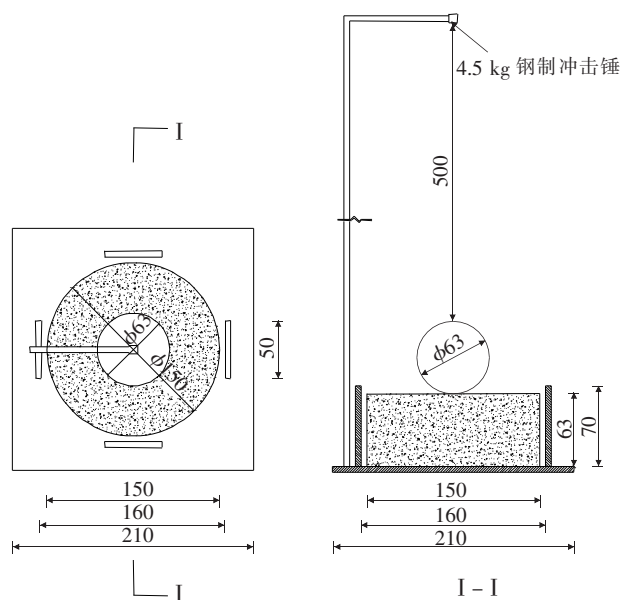


图6 桥梁伸缩缝混凝土抗冲击试验示意图(单位:mm)

锤固定到卡扣上。试验开始后,解除冲击锤的固定并让其自由下落,冲击放置在混凝土顶面的传力钢球,每完成一次冲击即被记录为一次冲击循环。每次冲击循环结束后需仔细检查试件,当发现试件出现第一条明显裂缝后,将该冲击次数记录为初裂冲击次数  $N_1$ 。然后移除试件与基板之间的泡沫,继续进行下一次冲击循环。当发现试件与4个基板固定支架中任意3个相接触时,将该冲击次数记录为终裂冲击次数  $N_2$ 。

根据测得的初裂冲击次数  $N_1$  与终裂冲击次数  $N_2$  计算初裂冲击耗能  $W_1$  与终裂冲击耗能  $W_2$ 。 $W_1 = N_1 mgh$ ,  $W_2 = N_2 mgh$ , 其中  $m$  为冲击锤的质量(取  $m = 4.5$  kg);  $g$  为重力加速度(取  $g = 9.81$  m/s<sup>2</sup>); 冲击锤下落高度取  $h = 0.5$  m)。

测试得到不同类型冲击次数及冲击耗能对比如图7、8所示。

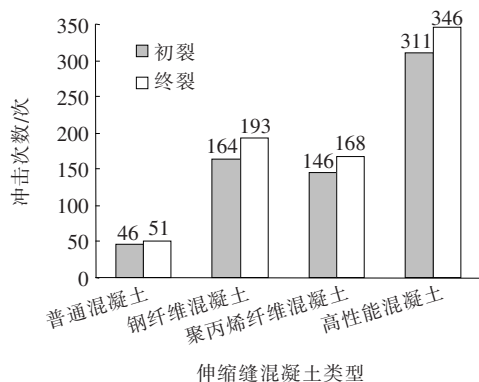


图7 桥梁伸缩缝不同类型混凝土的冲击次数对比

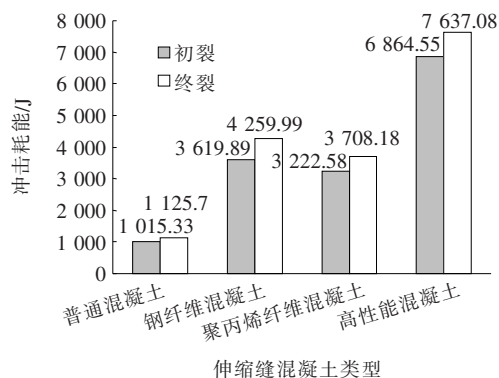


图8 桥梁伸缩缝不同类型混凝土的冲击耗能对比

从图7、8可以看出:

(1) 与桥梁伸缩缝普通混凝土相比,钢纤维混凝土、聚丙烯纤维混凝土、高性能混凝土的终裂冲击次数和终裂冲击耗能大大提高。其中钢纤维混凝土终裂冲击次数为普通混凝土的3.78倍,聚丙烯纤维混凝土终裂冲击次数为普通混凝土的3.29倍,高性能混凝土终裂冲击次数为普通混凝土的6.78倍。

(2) 桥梁伸缩缝高性能混凝土明显表现出复合叠加优势,具有极好的抗冲击性,终裂冲击次数为钢纤维混凝土的1.79倍,为聚丙烯纤维混凝土的2.06倍。桥梁伸缩缝钢纤维混凝土的终裂冲击次数高于聚丙烯纤维混凝土,但总体提高效率相当。

(3) 从桥梁伸缩缝混凝土初次开裂到终裂发展过程来看,普通混凝土脆性强,在初裂前基本没有预兆,裂缝一经出现便迅速产生破坏断裂;钢纤维混凝土和聚丙烯纤维混凝土则表现出一定的抗冲击韧性,但钢纤维混凝土在初裂后的冲击韧性比聚丙烯纤维混凝土更有效;高性能混凝土则表现出更好的抗冲击韧性,吸收冲击能量作用相当明显。

分析桥梁伸缩缝高性能混凝土极好的抗冲击韧性原因主要有以下几个方面:① 纤维材料能够有效抑制混凝土内部缝隙的产生。冲击锤掉落到传力球作用到混凝土表面,会产生巨大的瞬时荷载作用。而设置在混凝土表面的传力球将这种作用力聚集到了中心点较小范围内,会在该范围内产生大的冲击力作用。在这种反复的冲击作用下,混凝土逐渐产生脆性破坏而导致开裂。纤维材料可以很好地抑制这种开裂,减小冲击波被阻断引起的局部应力集中现象,从而提升了伸缩缝混凝土的抗冲击能力;② 纤维材料和聚合物可以提升混凝土的延性、有效吸收冲击能量,降低冲击作用。由于混凝土本身变形能力较小,冲击荷载作用到其表面的时间短,冲击作用力被放大。而纤维材料及



聚合物的加入,可以提升混凝土在冲击荷载作用下的变形性能,从而提高抗冲击韧性;③ 桥梁伸缩缝高性能混凝土利用了钢纤维、聚丙烯纤维和聚合物的混杂正效应和复合叠加效应,显著提高了伸缩缝混凝土的韧性和抗冲击性能。

#### 4 依托工程概况及应用

桥梁伸缩缝高性能混凝土先后在铜旬高速公路孙家山 3 号大桥左线伸缩缝工程(图 9)及渭玉高速公路关中环线分离式立交伸缩缝工程(图 10)分别进行了两道伸缩缝的工程应用。



图 9 孙家山 3 号大桥左线伸缩缝



图 10 渭玉高速公路关中环线分离式立交伸缩缝

桥梁伸缩缝高性能混凝土施工时,应加强伸缩缝混凝土与梁板混凝土的界面处理,以提升二者结合的可靠性和耐久性;同时在拌和工艺、拌和时间、浇筑、振

捣密实成型及养生等施工环节严格进行质量控制和精细化管理。

#### 5 结语

试验研究及工程实践表明,以钢、聚丙烯混合纤维和聚合物为关键组分的桥梁伸缩缝高性能混凝土具有优良的抗压、抗弯拉和抗冲击性能,与桥梁伸缩缝常用的普通混凝土、钢纤维混凝土和聚丙烯纤维混凝土相比,韧性和抗冲击性能得到显著提高,具有多种纤维和聚合物复合叠加、协同增强增韧效应,有利于延缓桥梁伸缩缝混凝土的早期损坏、降低维护成本,具有良好的工程应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 李光华,卓秋林,生墨海. 常见桥梁伸缩缝的病害原因分析与维修处理[J]. 公路交通科技(应用技术版),2007,3(9):108—110.
- [2] 林学干,陆云山. 桥梁伸缩缝损坏原因分析[J]. 公路交通技术,2009,25(S1):99—101.
- [3] 余廷禹. 桥梁伸缩缝纤维混凝土力学性能试验分析[J]. 公路交通科技(应用技术版),2014,10(5):220—221.
- [4] 张恒. 多尺度纤维混杂对水泥混凝土性能的影响[J]. 中外公路,2016,36(6):284—287.
- [5] 万惠文,韦鹏亮,陈超,等. 混杂纤维对混凝土性能的影响试验研究[J]. 混凝土,2013(10):79—82.
- [6] 袁明,贺文杰,颜东煌,等. 超高性能混凝土配合比优化研究[J]. 中外公路,2019,39(6):169—173.
- [7] 舒兴旺. 桥梁伸缩缝过渡区混凝土的应用现状与研究动向[J]. 山西交通科技,2014(4):85—87.
- [8] 冯仲仁,黄隆洋,郭蒙蒙,等. 不同钢纤维掺入率的混凝土疲劳试验研究[J]. 中外公路,2018,38(2):269—272.
- [9] 焦楚杰,孙伟,高培正,等. 钢纤维混凝土抗冲击试验研究[J]. 中山大学学报(自然科学版),2005,44(6):41—44.
- [10] 雷斌. 桥梁伸缩缝安装工艺及质量控制要点[J]. 交通标准化,2013(18):66—68.