

混杂纤维喷射混凝土的力学性能试验研究*

杨健辉¹ 李燕飞¹ 丁鹏¹ 赵红兵²

(1. 河南理工大学土木工程学院, 河南焦作 454000; 2. 焦作市住建局, 河南焦作 454000)

摘要: 为探讨混杂纤维对喷射混凝土的力学性能影响, 分别对双掺仿钢纤维与聚丙烯纤维、双掺钢纤维与仿钢纤维喷射混凝土的抗压强度、抗折强度和折压比进行试验研究, 并将其与基准组、单掺纤维组的力学性能进行比较。结果表明, 混杂纤维喷射混凝土较单掺纤维时的抗压强度、抗折强度及折压比均有明显提高, 并能充分发挥混杂纤维的叠加效应。其中, 掺量为 0.7% 的钢纤维与掺量为 0.3% 的仿钢纤维混掺时的强度及折压比为最优, 并能有效弥补钢纤维易锈蚀、质量大和造价高等不足。

关键词: 喷射混凝土; 仿钢纤维; 聚丙烯纤维; 钢纤维; 混杂纤维; 抗压强度; 抗折强度; 折压比

DOI: 10.7617/j.issn.1000-8993.2013.08.022

EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF HYBRID FIBERS REINFORCED SHOTCRETE

Yang Jianhui¹ Li Yanfei¹ Ding Peng¹ Zhao Hongbing²

(1. School of Civil Engineering of Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Housing & Constructing Bureau of Jiaozuo, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The experiments of the mixing of macro-synthetic fibers and polypropylene fibers, the mixing of steel fibers and macro-synthetic fibers reinforced shotcrete on the compressive strength and flexural strength were carried out, whose mechanical properties were compared with those of baseline group and single fibers group. The results show that the compressive strength, flexural strength, flexural compression ratio of hybrid fibers shotcrete are more obviously improved than those of single fibers shotcrete, and it can give full play to the superimposed effect. When the mixing contents are 0.7% of steel fibers and 0.3% of macro-synthetic fibers, the strength and flexural compression ratio of shotcrete are the best, and it is effective to make up for the disadvantages of steel fiber with its easy rust, heavy weight and high cost etc.

Keywords: shotcrete; macro-synthetic fiber; polypropylene fiber; steel fiber; hybrid fiber; compressive strength; flexural strength; flexural compression ratio

地下工程中喷射混凝土的质量与塌方现象密切相关, 因此研究具有速凝、早强、高强、抗渗性能强、和易性好、流动性好以及回弹率低等特点的优良喷射混凝土, 不仅可以提高工程质量, 而且还可以降低工程造价。但由于素混凝土的抗折性较差, 抗爆炸冲击性差, 抵抗沉降能力差, 并由此引起开裂、渗水等而导致结构劣化。为此, 引入加强筋材——单一纤维或混合纤维以改善这一缺陷。由于目前工程上大多采用单一纤维, 而不同纤维的物理力学性能差异又较大, 特别是混杂纤维的混杂效应所引起的性能差异, 因而不能充分发挥纤维喷射混凝土的综合性能。因此, 对混杂纤维喷射混凝土展开试验研究, 以为工程应用提供参考依据。

根据文献[1-5]的研究结论, 纤维混凝土的强度及耐久性较普通混凝土均有明显提高, 且能抑制

早期裂缝的开展。特别是钢纤维混凝土, 因其具有强度高、抵抗变形大且破坏后仍存在较高残余强度等特点, 显著改善了混凝土的抗裂性、延性、韧性和抗冲击性能等^[6], 因此在工程中得到了广泛应用。

对于聚丙烯纤维(简称 PP 纤维), 文献[7]认为聚丙烯粗纤维抗干缩的功能与钢纤维大致相近, 但回弹率较钢纤维喷射混凝土约降低 30%。此外, 文献[8]也证明了 PP 纤维优于钢纤维。当掺入占

* 国家自然科学基金项目(41172317); 深部矿井建设省重点学科开放实验室开放基金(2011KF-01); 河南省教育厅科技攻关资助项目(2010A560010)。

第一作者: 杨健辉, 男, 1969 年出生, 博士(后)教授。

电子信箱: yjh_dr@163.com

收稿日期: 2013-02-15

混凝土体积 0.05% ~ 0.20% 的 PP 纤维时,可有效抑制混凝土的塑性收缩开裂,改善混凝土的抗渗、抗冻和抗蚀等性能;还可提高混凝土的抗冲击性、柔韧性和抗疲劳等性能;并且 PP 纤维价格低廉,掺入工艺较简单且不损伤机具,因而得到了广泛应用^[9]。

而有机仿钢纤维作为一种新型混凝土强化材料,可替代或部分替代钢纤维^[10];而且与钢纤维相比,具有耐腐蚀性、易分散、易施工及其对拌和设备无损伤等特点。若用其替代钢纤维,同样可显著改善混凝土的性能,且具有经济性好,分散性好,耐久性好等特点,并能提高混凝土的耐火性能。目前,在我国一些工程领域中也得到了应用。

综上所述,不论是钢纤维还是上述的化学纤维都可明显地提高混凝土的抗拉强度、抗裂性能以及抗渗性能,并可增加混凝土的密实性、耐久性和质量稳定性^[11-12]。但由于单一纤维喷射混凝土也存在一些缺陷,如高模量纤维(钢纤维)虽可提高混凝土的强度,但分散性受到限制;而低模量纤维(PP纤维)虽可提高混凝土的韧性,但对其增强效果不明显;混杂纤维则可以弥补单一纤维的不足,并能充分发挥各种纤维的优点以达到逐级阻裂和强化的功能^[13]。因此,如果能以合理的体积比例混杂,即可在混凝土中不同结构层次和不同性能层次上,使纤维尺寸效应得到充分发挥、使之相互激励和相互补充,从而产生叠加效应^[14]。根据目前混杂纤维混凝土研究现状可知,不同尺度和不同性质的纤维混杂增强水泥基复合材料,因其在不同结构层次上抑制了裂缝的发生和扩展,减少和缩小了裂缝源的尺度和数量;与单一钢纤维增强效果相比,显著提高了阻裂能力,并产生了优异的限缩和抗渗效果^[15],故混杂纤维混凝土具有良好的发展前景。

1 试验原材料及配合比

1.1 试验原材料

水泥:焦作坚固牌 P·O 42.5 级水泥。

粗集料:碎石,粒径为 5 ~ 16 mm,针片状含量小于 10%,含泥量小于 1.0%。

细集料:中粗河砂,粒径为 0.3 ~ 1.18 mm,细度模数为 2.65,含泥量小于 1.0%。

减水剂:萘系高效复合减水剂,减水率大于 20%,掺量为水泥用量的 1.2%。

速凝剂:粉体速凝剂,碱金属含量小于 1%,初凝时间不大于 5 min,终凝时间不大于 10 min。

硅灰:青海蓝天环保有限公司产原态硅灰,其化学成分见表 1。

粉煤灰:焦作电厂产 II 级粉煤灰,物理性能指标见表 2。

纤维:钢纤维(郑州禹建钢纤维有限公司生产的端钩型钢纤维)、仿钢纤维(山东泰山工程材料有限公司生产的波浪形仿钢纤维)与聚丙烯纤维(山东泰安智荣工程材料有限公司生产的聚丙烯束状单丝纤维),其性能指标如表 3 所示。

水:普通饮用水。

表 1 硅灰化学成分

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	烧失量	水分
85 ~ 90	3.2	2.2	<1.8	<4.2	<2

表 2 粉煤灰物理性能指标

项目	细度 (45μm 筛余) / %	烧失量 / %	含水量 / %	SO ₃ / %	需水量 比 / %
测量值	10.8	4.16	0.26	0.88	92
国家标准	≤12	≤5.0	≤1.0	≤3.0	≤95

表 3 纤维性能指标

纤维 品种	密度 / (g·cm ⁻³)	长度 / mm	直径 / mm	长细 比	弹性模 量 / GPa	抗拉强 度 / MPa
钢纤维	7.80	20	0.5	40	200	1 132
仿钢纤维	0.91	30	0.5	60	7.1	>490
聚丙烯纤维	0.91	19	0.048	396	>3.5	287

1.2 试验配合比

首先,通过正交试验得到抗压、抗折、劈裂抗拉强度最优的强度等级为 C40 的喷射混凝土的最佳配合比,即:水泥:砂:石子:硅灰:粉煤灰:速凝剂:减水剂:水 = 1 : 2.2 : 1.8 : 0.06 : 0.2 : 0.04 : 0.02 : 0.5, 1m³ 混凝土水泥用量为 450 kg;其次,将其作为基准组,在其基础上分别掺入体积率为 0.3%、0.6%、0.9% 的仿钢纤维,再分别与质量密度为 0.6、0.9、1.2 kg/m³ 的 PP 纤维混掺;体积率为 0.1%、0.3%、0.5%、0.7%、0.9% 的钢纤维依次与体积率为 0.1%、0.3%、0.5%、0.7%、0.9% 的仿钢纤维混掺。通过改变纤维掺量和种类,以期研究不同种类纤维混杂时对喷射混凝土的力学性能影响。

1.3 试验方法

试验步骤参照 GB 50204—2002《混凝土结构工程施工质量验收规范》,坍落度控制在 80 ~ 120 mm,在温度为 (20 ± 3) °C,相对湿度为 90% 以上的潮湿环境或静水中养护 28 d,采用标准试验方法测得混凝土抗压强度与抗折强度。其中,抗压试件规格为 100 mm × 100 mm × 100 mm(每组 3 块,取平均值并

乘以换算系数 0.95),抗折试件规格为 100 mm × 100 mm × 400 mm(每组 3 块,取平均值并乘以换算系数 0.85)。

2 试验结果与分析

通过前期试验测定的 1、3、28 d 抗压和抗折强度及对比分析结果,见表 4。

表 4 单一纤维对喷射混凝土性能的影响

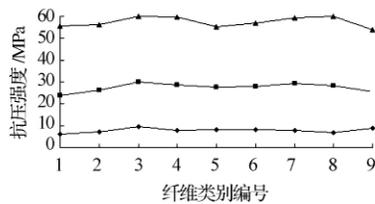
Table 4 The influences of single kind of fibers on the property of shotcrete

试件编号	坍落度/mm	凝结时间/s		抗压强度/MPa			抗折强度/MPa			28 d 折压比
		初凝	终凝	1 d	3 d	28 d	1 d	3 d	28 d	
J-0	110	251	538	5.4	23.7	58.6	1.1	4.5	8.3	0.142
F-0.5	105	208	490	5.0	22.8	59.8	1.2	4.4	9.2	0.154
PP-0.9	108	235	498	6.9	25.5	59.2	1.7	5.7	9.5	0.160
FP-0.3	103	224	500	5.8	26.1	62.6	1.5	5.5	9.2	0.147

注: J-0 为基准配合比; F-0.5 指钢纤维体积率为 0.5%; PP-0.9 指聚丙烯纤维掺量为 0.9 kg/m³; FP-0.3 指仿钢纤维体积率为 0.3%。

2.1 混掺仿钢纤维与聚丙烯纤维喷射混凝土试验结果分析

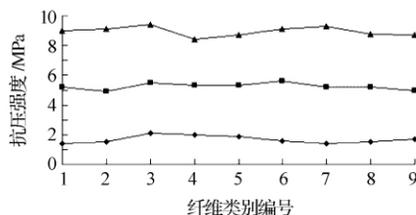
根据试验设计,分别测试其 1、3、28 d 抗压强度、抗折强度,结果如图 1、图 2 所示,折压比如图 3 所示。由图 1、图 2 可知,当仿钢纤维体积率为 0.3% 不变时,PP 纤维喷射混凝土的抗压、抗折强度随着 PP 纤维掺量的增加而增加;而当仿钢纤维体积率增加时,PP 纤维喷射混凝土的抗压、抗折强度



—○—1 d 龄期; —■—3 d 龄期; —▲—28 d 龄期

注: 图中纤维类别编号 1~9 分别表示 FP-0.3+PP-0.6、FP-0.3+PP-0.9、FP-0.3+PP-1.2、FP-0.6+PP-0.6、FP-0.6+PP-0.9、FP-0.6+PP-1.2、FP-0.9+PP-0.6、FP-0.9+PP-0.9、FP-0.9+PP-1.2。其中,FP-0.3+PP-0.6 表示体积率为 0.3% 的仿钢纤维与质量为 0.6 kg/m³ 的 PP 纤维混掺,其他与此类同。

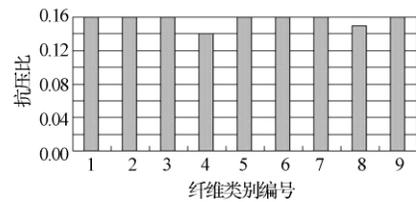
图 1 混杂纤维掺量对喷射混凝土抗压强度的影响
Fig. 1 The effect of hybrid fibers contents on shotcrete compressive strength



—○—1 d 龄期; —■—3 d 龄期; —▲—28 d 龄期

注: 纤维类别编号 1~9 说明如图 1。

图 2 混杂纤维掺量对喷射混凝土抗折强度的影响
Fig. 2 The effect of hybrid fibers contents on flexural strength of shotcrete



注: 纤维种类编号 1~9 说明同图 1。

图 3 混杂纤维掺量对喷射混凝土折压比的影响
Fig. 3 The effect of hybrid fiber contents on flexural compression ratio of shotcrete

随着 PP 纤维掺量的增加呈下降趋势。故当体积率为 0.3% 的仿钢纤维与质量为 1.2 kg/m³ 的 PP 纤维混掺时,纤维喷射混凝土的抗压强度与抗折强度为最优。其 1、3、28 d 抗压强度分别为 9.7、29.9、59.8 MPa; 1、3、28 d 抗折强度分别为 2.1、5.5、9.2 MPa。因仿钢纤维与聚丙烯纤维都属于低弹性模量纤维,二者混掺之后,可有效提高喷射混凝土的强度,这正是纤维叠加作用的结果。

由图 3 可知,不同掺量时,混杂纤维喷射混凝土折压比的变化幅度不大;只有掺量为 FP-0.6+PP-0.6、FP-0.9+PP-0.9 时的折压比相对较低,其他掺量下的折压比均为 0.16。由此可见,混杂纤维掺量对喷射混凝土的折压比影响不大,但仍比普通喷射混凝土的折压比(一般为 1/12~1/7)大些。

2.2 混掺钢纤维与仿钢纤维喷射混凝土试验结果分析

根据试验设计,分别测试其 1、3、28 d 龄期的抗压强度、抗折强度及折压比如表 5 所示。

由表 5 可知,随着钢纤维掺量增加,仿钢纤维掺量减小,喷射混凝土的抗压、抗折强度呈现先增后减,再增再减的趋势。但在第二次增点、第一次降点分别出现最大值与最小值,即掺量为 F-0.7+FP-0.3 时抗压、抗折强度最优,掺量为 F-0.5+FP-0.5 时抗压、抗折强度最差。28 d 折压比结果显示,

混杂纤维掺量对喷射混凝土的折压比影响不大,即抗折强度的增长幅度与抗压强度增长幅度趋于平稳。

表5 混掺钢与仿钢纤维对喷射混凝土强度性能的影响

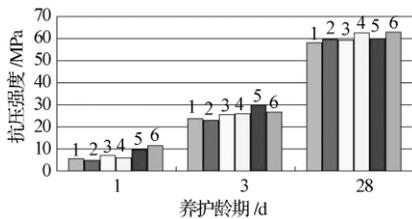
Table 5 The influences of macro-synthetic fibers and steel fibers on shotcrete strength

试件编号	抗压强度/MPa			抗折强度/MPa			28 d 折压比
	1 d	3 d	28 d	1 d	3 d	28 d	
F-0.1+FP-0.9	9.8	23.2	56.3	2.3	4.8	9.0	0.16
F-0.3+FP-0.7	10.8	26.0	56.0	2.1	5.3	9.7	0.17
F-0.5+FP-0.5	8.5	21.3	54.4	1.1	4.6	9.1	0.17
F-0.7+FP-0.3	11.5	26.8	63.0	2.5	5.7	10.4	0.17
F-0.9+FP-0.1	11.8	26.4	62.3	2.4	5.3	10.0	0.16

注: F-0.1+FP-0.9 表示体积率为 0.1% 的钢纤维与体积率为 0.9% 的仿钢纤维混掺,其他与此类同。

2.3 不同掺量纤维喷射混凝土试验结果对比分析

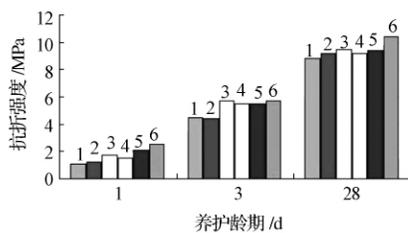
将基准组、单一纤维喷射混凝土、混掺纤维喷射混凝土的抗压、抗折强度及折压比进行对比分析,其结果分别如图4—图6所示。



1—J-0; 2—F-0.5; 3—PP-0.9; 4—FP-0.3; 5—FP-0.3+PP-1.2; 6—F-0.7+FP-0.3

图4 不同纤维掺量对喷射混凝土抗压强度对比

Fig. 4 Contrast of compressive strength of shotcrete of different kind of fibers contents



1—J-0; 2—F-0.5; 3—PP-0.9; 4—FP-0.3; 5—FP-0.3+PP-1.2; 6—F-0.7+FP-0.3

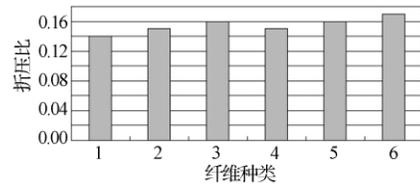
图5 不同纤维掺量喷射混凝土抗折强度对比

Fig. 5 Contrast of flexural strength of shotcrete of different kind of fibers contents

由图4、图5可知,混掺纤维喷射混凝土抗压、抗折强度优于普通喷射混凝土及单一纤维时的抗压强度。单一纤维时以掺量为FP-0.3的抗压强度为最优,而抗折强度以掺量为PP-0.9时为最优;混掺纤维以掺量为F-0.7+FP-0.3时抗压、抗折

强度为最优,其28d抗压强度较普通喷射混凝土、掺量为FP-0.3时、掺量为FP-0.3+PP-1.2时分别提高了8.1%、0.6%和5.4%。28d抗折强度则分别提高了18.2%、9.5%和13.0%。

由图6可知,不论是混掺纤维喷射混凝土,还是单一纤维喷射混凝土,其折压比均较基准组有一定程度的提高。其中,掺量为F-0.7+FP-0.3时的折压比达到0.17,高于基准组,即其增加了喷射混凝土的韧性,从而可有效阻止脆性破坏的发生。



注:横坐标1~6分别为J-0、F-0.5、PP-0.9、FP-0.3、FP-0.3+PP-1.2、F-0.7+FP-0.3。

图6 不同纤维掺量喷射混凝土的折压比

Fig. 6 Shotcrete flexural compression ratios of different kinds of fibers contents

通过试验对比分析可知,掺量为F-0.7+FP-0.3的喷射混凝土综合指标为最优,这正是高弹性模量的钢纤维与低弹性模量的仿钢纤维产生“混杂效应”的结果所致^[17]。因仿钢纤维能够阻止中微裂缝的开展,从而延迟了大裂缝的产生;而钢纤维则在裂缝扩展至仿钢纤维断裂或拔出时,起到桥接大裂缝的作用,从而可有效阻止喷射混凝土强度的损失。正是在这二者的协同作用下,喷射混凝土的强度及韧性得到了较大提高。由于钢纤维本身存在易锈蚀、质量大和造价高等问题,而部分仿钢纤维的替代可在一定程度上弥补这方面的不足;又因采用单一纤维时其掺量大且难以实现既增强又增韧的目的^[18],因此混杂纤维可作为一种新型纤维材料取代单一纤维。此外,掺量为FP-0.3+PP-1.2的喷射混凝土强度及折压比与其相差并不大,且成本低,易分散,不易锈蚀,因而也可取代单一纤维。

3 结语

1) 混掺纤维喷射混凝土较普通喷射混凝土的强度高,且折压比较大,韧性好,脆性破坏小。其中,掺量为F-0.7+FP-0.3时强度及折压比最优,28d抗压、抗折强度较普通喷射混凝土分别提高了8.1%、18.2%。

2) 最优混掺纤维喷射混凝土的强度及折压比均优于单一纤维,其28d抗压强度较掺量为FP-0.3时提高了0.6%;28d抗折强度较掺量为PP-

0.9 时提高了 9.5%。

3) 最优混掺纤维喷射混凝土与掺量为 FP - 0.3 + PP - 1.2 时的强度及折压比相差不大,且二者皆能弥补钢纤维易锈蚀、质量大和造价高的缺陷,故皆可取代单一纤维,并能实现不同纤维的“混杂效应”。

参考文献

- [1] 贺大荣,廖前密,洪良. 混杂纤维混凝土抗压强度试验及开裂机理研究[J]. 武汉工业学院学报,2010,29(3): 97-99.
- [2] 黄承逵,赵国藩. 纤维混凝土结构技术规程[M]. 北京: 中国计划出版社,2004.
- [3] 燕兰,邢永明. 混杂纤维增强高性能混凝土(HFHPC)高温力学性能及微观分析[J]. 混凝土,2012(1): 24-28.
- [4] 李哈. 高温后混杂纤维混凝土抗压强度[J]. 混凝土,2012(2): 93-95.
- [5] 黄承逵. 纤维混凝土结构[M]. 北京: 机械工业出版社,2004.
- [6] 陈希. 钢纤维混凝土性能与应用前景[J]. 中国水利,2003(10): 50-52.
- [7] 沈荣熹. 聚烯烃粗纤维增强混凝土的性能及应用[J]. 科技导航,2009(3): 42-50.
- [8] Cengiz O, Turanlı L. Comparative Evaluation of Steel Mesh, Steel Fibre and High-Performance Polypropylene Fibre Reinforced Shotcrete in Panel Test [J]. Cement and Concrete Research,

2004,34(8): 1357-1364.

- [9] 卢安琪,祝焯然,李克亮,等. 聚丙烯纤维混凝土试验研究[J]. 水利水运工程学报,2002(4): 14-19.
- [10] 焦红娟,金剑. 有机仿钢丝粗纤维与钢纤维在喷射混凝土中的性能研究[J]. 混凝土,2007(7): 54-56.
- [11] Christopher K Y Leung, ASCE M, Augustus Y F Lee, et al. A New Testing Configuration for Shrinkage Cracking of Shotcrete and Fiber Reinforced Shotcrete [J]. Cement and Concrete Research, 2006,36(4): 740-748.
- [12] Christopher K, Leung Y, Lai Raymond, et al. Properties of Wet-Mixed Fiber Reinforced Shotcrete and Fiber Reinforced Concrete with Similar Composition [J]. Cement and Concrete Research, 2005,35(4): 788-795.
- [13] 黄国栋,马芹永. 混杂纤维混凝土力学性能试验研究与分析[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(2): 329-333.
- [14] 夏广政,夏冬桃,何英明. 混杂纤维喷射混凝土在加固工程中的应用研究[J]. 湖北工业大学学报,2009,24(1): 89-92.
- [15] 孙伟. 纤维混杂及其与膨胀剂复合对水泥基材料的物理性能的影响[J]. 硅酸盐学报,2000,28(2): 95-104.
- [16] 黄利频,罗素蓉. 高等级公路混凝土实现高折压比的配合比设计[J]. 武汉理工大学学报,2008,30(12): 37-41.
- [17] 杨成蛟,黄承逵. 混杂纤维混凝土的力学性能及抗渗性能[J]. 建筑材料学报,2008,11(1): 89-93.
- [18] 王凯,张义顺,金祖权. 低掺量 S-P 混杂纤维对高性能混凝土增强增韧的作用研究[J]. 煤炭工程,2003(4): 28-30.

(上接第 47 页)

于工程安全。本文还提出了基于累积极限状态阈值的结构易损性分析方法,并将基于累积极限状态阈值的桥墩柱易损性曲线与各级破坏状态下的易损性曲线进行了对比。可检测构件是否过度老化或意外损坏,为桥梁结构安全评估和修复加固提供理论依据。

参考文献

- [1] Basoz N, Kiremidjian A S. Risk Assessment of Bridges and Highway Systems from the Northridge Earthquake [C] // Sacramento, California: Proceedings of the National Seismic Conference on Bridges and Highways. 1997: 65-79.
- [2] Shinozuka M, Feng M Q, Lee J, et al. Statistical Analysis of Fragility Curves [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2000,126(12): 1224-1231.
- [3] Tanaka S, Kameda H, Nojima N, et al. Evaluation of Seismic Fragility for Highway Transportation Systems [C] // Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. New Zealand: 2000: 2-6.
- [4] Cimellaro G P, Reinhorn A M, Bruneau M, et al. Multi-Dimensional Fragility of Structure Formulation and Evaluation [R]. Report No. MCEER-06-0002, New York: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 2006.
- [5] Hwang H, 刘晶波. 地震作用下钢筋混凝土桥梁结构易损性分析[J]. 土木工程学报,2004,37(6): 48-51.

- [6] Daniel S, Armen D K. Seismic Reliability Assessment of Infrastructure Systems Based on Fragility Models [C] // Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering—Proceedings of the 10th International Conference on Applications of Statistics and Probability. 2007: 435-436.
- [7] Williams D A. Extra-Binomial Variation in Logistic Linear Models [J]. Applied Statistics, 1982,31(2): 144-148.
- [8] Poortema K. On Modelling Overdispersion of Counts [J]. Statistica Neerlandica, 1999,53(1): 5-20.
- [9] 张新培. 钢筋混凝土抗震结构非线性分析[M]. 北京: 科学出版社,2003: 99-101.
- [10] Daniel S, Armen D K. Seismic Fragility Modeling from Empirical Data [J]. Structural Safety, 2008,30(4): 320-336.
- [11] Wang Q, Wu Z, Liu S. Seismic Fragility Analysis of Highway Bridges Considering Multi-Dimensional Performance Limit State [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012,11(2): 185-193.
- [12] Serdar S. Health Monitoring of Existing Structure [D]. California: University of California Irvine, 2007.
- [13] Shinozuka M, Banerjee S. Damage Modeling of Reinforced Concrete Bridges [D]. Las Vegas, NV: University of California, Irvine, 2005.
- [14] Dutta A, Mander J B. Rapid and Detailed Seismic Fragility Analysis of Highway Bridges [R]. New York: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 2001.