

文章编号:1673-2049(2007)04-0054-06

粗合成纤维混凝土抗弯冲击强度的分布规律

李建辉¹, 张科强², 邓宗才¹

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100022; 2. 陕西理工学院 土木工程与建筑系, 陕西 汉中 723001)

摘要:采用自制的落锤抗弯冲击试验装置,研究了改性聚丙烯、Barchip、Forta、巴奇粗合成纤维混凝土的抗弯冲击性能,并与钢纤维混凝土进行了对比。利用双参数 Weibull 分布理论分析了冲击次数的分布规律,回归得到了不同失效概率下的冲击次数方程。结果表明:Weibull 分布理论较好地描述了粗合成纤维混凝土冲击次数的分布特征;粗合成纤维能够显著改善混凝土的抗弯冲击性能。

关键词:粗合成纤维;混凝土;抗弯冲击强度;Weibull 分布

中图分类号:TU528.572 文献标志码:A

Distribution Regularity of Flexural Impact Resistance of Synthetic Macro-fiber Reinforced Concrete

LI Jian-hui¹, ZHANG Ke-qiang², DENG Zong-cai¹

(1. School of Architectural Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Department of Civil Engineering and Architecture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, Shaanxi, China)

Abstract: The flexural impact behaviors of synthetic macro-fibers reinforced concrete were measured by using a newly designed drop weight flexural impact machine, synthetic macro-fibers reinforced concrete included the modified polypropylene fiber, Barchip fiber, Forta fiber and Baqi fiber, and compared with that of steel fiber reinforced concrete performance. The distribution regularity of the impact numbers was analyzed by the theory of two-parameter Weibull distribution; meanwhile, the impact numbers equations were regressed for various failure probabilities. The results indicate that impact numbers of synthetic macro-fiber reinforced concrete can be modeled well by the theory of Weibull distribution; synthetic macro-fiber can improve the flexural impact behaviors of concrete significantly.

Key words: synthetic macro-fiber; concrete; flexural impact resistance; Weibull distribution

0 引言

纤维在受冲击、疲劳、振动的结构物中更能发挥其阻裂的优势。各国都对纤维混凝土冲击性能进行过研究,但大部分均采用抗冲击试验,而实际工程中的构件多处于受弯拉状态,因此研究纤维混凝土抗

弯冲击性能更具有实际意义^[1-2]。

已有的研究通常是采用正态分布描述混凝土的冲击寿命,但是由于混凝土材料本身的变异性,即使在严格控制试验条件下,混凝土的冲击次数也会呈现较大的离散性^[3-8]。本文中利用双参数 Weibull 分布理论研究了不同掺量下粗合成纤维混凝土抗弯

收稿日期:2007-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(50678011);北京市教委资助项目(KM200610005007)

作者简介:李建辉(1981-),男,江西丰城人,工学博士研究生,E-mail:lijh@emails.bjut.edu.cn。

冲击次数的分布规律。结果表明:Weibull 分布理论能较好地描述粗合成纤维混凝土冲击次数的分布特征。

1 试验

1.1 纤维材性

试验所用的改性聚丙烯纤维由宁波大成新材料股份有限公司生产;Barchip、Forta、巴奇粗合成纤维均为聚丙烯制成;钢纤维为两端带弯钩的哑铃型钢。它们均属于粗合成纤维(直径大于0.1 mm)^[9]。纤维材性见表 1。

表 1 纤维材性

Tab. 1 Material Properties of Fibers

纤维种类	密度/ (g · cm ⁻³)	抗拉强度/ MPa	延伸率/ %	弹性模量/GPa
改性聚丙烯	0.95	530	15.0	7.19
Barchip、 Forta、巴奇	0.91	624~758	15.0~ 25.0	3.50
钢纤维	7.80	890	3.5	154.00~168.00

1.2 混凝土配合比

试验所用混凝土配合比为:水 170 kg · m⁻³,水泥 360 kg · m⁻³,砂 647 kg · m⁻³,石灰岩碎石(粒径 5~20 mm)1 100 kg · m⁻³。水泥采用 P. O32.5 普通硅酸盐水泥。

1.3 试件

试件采用 100 mm × 100 mm × 400 mm 的模具浇注,浇注 24 h 后脱模,在标准养护室养护 28 d,试验前 3 h 从养护室取出晾干。

1.4 试验方法

试验采用笔者自制的自由落锤抗弯冲击装置,如图 1 所示。落锤是一个实心圆柱体,锤头部为球面,锤的质量为 2.5 kg。自由落锤的冲击高度为 400 mm。梁两端为简支,净跨 340 mm。梁从无裂缝至产生微裂缝,即当梁跨中底部混凝土应变值发生突变时的冲击次数定义为梁的初裂冲击次数 N_c ;

梁横向主裂缝贯穿至梁的上表面时的冲击次数定义为梁的破坏冲击次数 N_f 。

2 试验结果及讨论

粗合成纤维混凝土抗弯冲击试验结果见表 2。表 2 中 C 为素混凝土,DC 为改性聚丙烯纤维混凝土,BC 为 Barchip 纤维混凝土,FC 为 Forta 纤维混凝土

表 2 抗弯冲击试验结果

Tab. 2 Flexural Impact Test Results

混凝土类型	试件编号	N_c	N_f	混凝土类型	试件编号	N_c	N_f
C	1	1	2	BC13	1	5	33
	2	2	3		2	5	31
	3	2	3		3	3	19
	4	3	4		4	4	23
	5	3	4		5	8	70
DC6	1	3	7	FC6	6	4	21
	2	3	8		7	5	8
	3	3	9		1	2	24
	4	4	11		2	3	13
	5	3	7		3	4	17
	6	3	8		4	4	24
	7	3	7		5	3	18
	8	4	10		6	4	20
	9	4	8		7	3	16
DC9	1	5	12	FC9	8	3	18
	2	8	33		9	3	14
	3	5	16		10	5	15
	4	4	10		1	3	74
	5	7	27		2	3	25
	6	5	13		3	24	156
	7	6	29		4	6	24
	8	8	20		5	4	136
	9	8	22		6	3	21
	10	4	14		7	5	80
DC11	1	7	84	FC11	8	8	19
	2	7	88		9	4	21
	3	7	158		10	3	91
	4	6	116		11	4	92
	5	5	64		12	8	173
	6	7	78		1	6	144
	7	5	31		2	5	174
	8	4	15		3	6	48
	9	4	31		4	4	144
	10	4	37		5	4	187
	11	6	31		6	5	74
	12	3	20		7	4	96

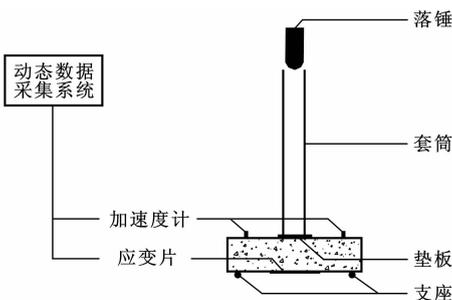


图 1 抗弯冲击试验装置

Fig. 1 Flexural Impact Test Equipment

续表 2

混凝土类型	试件编号	N_c	N_f	混凝土类型	试件编号	N_c	N_f
DC13	1	8	39	FC11	8	8	177
	2	12	111		9	6	171
	3	3	24		10	5	57
	4	7	57		11	4	55
	5	7	86		12	4	62
	6	4	46	QC6	1	5	13
	7	7(*)	224(*)		2	6	15
	8	5	46		3	8	17
	9	5	58		4	6	17
	10	6	29		5	6	18
BC6	1	5	14	QC9	6	5	13
	2	5	15		7	4	19
	3	3	11		1	7	38
	4	12	33		2	7	51
	5	6	11		3	8	28
	6	4	13	QC12	4	6	40
	7	5	13		5	6	25
	8	6	11		1	10	25
	9	10	20		2	7	32
	10	6	14		3	6	29
	11	4	9		4	6	30
	12	3	11		5	4	28
BC9	1	5	35	SC40	1	12	21
	2	5	16		2	12	18
	3	3	26		3	17	33
	4	4	13		4	8	17
	5	4	12		5	10	52
	6	3	10		6	3	12
	7	7	43		7	4	9
	8	3	18		1	11	18
BC11	1	4	10	SC60	2	14	31
	2	5(*)	164(*)		3	6	17
	3	4	29		4	8	23
	4	6	52				
	5	6	33				
	6	4	18				

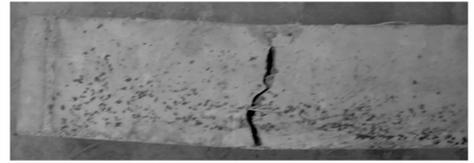
注: * 表示离散性太大, 在统计中去掉。

土, QC 为巴奇纤维混凝土, SC 为钢纤维混凝土。纤维混凝土名称后面的数字指纤维的质量掺量。

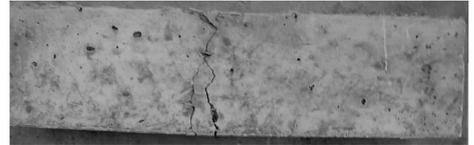
2.1 破坏形态

粗合成纤维(以改性聚丙烯纤维为代表)质量掺量为 $6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 梁破坏时只有 1 条裂缝, 宽度较大, 破坏面凹凸不平, 如图 2(a) 所示; 质量掺量为 $9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 主裂缝从梁的底部上伸到 2/3 梁横

截面, 分叉为 2 条微裂缝向上延伸; 质量掺量大于 $11 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 梁的底部先产生 2 条微裂缝, 在横截面约 2/3 处汇合为 1 条主裂缝向上延伸, 此时纤维大部分被拔出, 如图 2(b) 所示。



(a)DC6



(b)DC11

图 2 DC 破坏形态

Fig. 2 Failure Patterns of DC

2.2 冲击次数的概率分布

2.2.1 Weibull 分布

1939 年 Weibull 提出了说明疲劳数据的 1 种概率密度分布函数, 其优点在于存在有最小安全寿命, 即 100% 存活率的安全寿命, 因此, 这种失效分布理论被推广应用到许多其他问题的研究中。

双参数 Weibull 分布累积分布函数 $P_f(N)$ 为

$$P_f(N) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{N}{\mu}\right)^\alpha\right] \quad (1)$$

式中: α 为形状参数; μ 为尺度参数; N 为位置参数或纤维质量掺量下的冲击次数。

2.2.2 Weibull 分布检验

为检验粗纤维混凝土的抗弯冲击次数是否满足 Weibull 双参数分布, 对式(1)两边取 2 次对数, 得

$$\ln\left[\ln \frac{1}{1 - P_f(N)}\right] = \alpha \ln N - \alpha \ln \mu \quad (2)$$

用式(2)可以方便地检验该试验数据是否服从双参数 Weibull 分布。

令 $Y = \ln\left[\ln \frac{1}{1 - P_f(N)}\right]$, $X = \ln N$, 回归系数 $\beta = \alpha \ln \mu$, 则得

$$Y = \alpha X - \beta \quad (3)$$

由式(3)可以看出, 假如 X 与 Y 之间, 即 $\ln N$ 与 $\ln\left[\ln \frac{1}{1 - P_f(N)}\right]$ 之间呈现良好的线性关系(当相关系数 R^2 比较大时), 则试验数据服从双参数 Weibull 分布, 否则不成立。

$P_f(N)$ 的计算式为

$$P_f(N) = \frac{i}{K+1} \quad (4)$$

式中: K 为某一纤维掺量下测试试件的总数; i 为冲击试验数据从小到大按照顺序排序的序数。

表 3 为根据式(3)回归后的结果。从表 3 可见,相关系数均较大,这就证明了 $\ln[\ln \frac{1}{1-P_f(N)}]$ 与 $\ln N$ 之间有着良好的线性关系,即验证了粗合成纤维混凝土的抗弯冲击次数服从双参数 Weibull 分布。

表 3 冲击次数的回归参数

Tab. 3 Regression Parameters of Impact Numbers

混凝土 类型	α		β		R^2	
	N_c	N_f	N_c	N_f	N_c	N_f
C	1.654 3	2.643 8	1.849 5	3.658 2	0.943 0	0.968 0
DC6	8.467 7	7.124 5	11.553 0	15.828 0	1.000 0	0.921 6
DC9	3.631 1	2.386 1	7.139 9	7.417 3	0.955 9	0.948 5
DC11	3.334 3	1.433 6	6.280 0	6.180 6	0.985 7	0.967 7
DC13	2.376 9	1.988 1	4.773 2	8.284 9	0.969 5	0.956 0
BC6	2.979 7	5.029 0	5.464 6	13.510 0	0.952 5	0.903 1
BC9	3.712 5	1.749 7	6.025 9	5.643 8	0.941 6	0.907 0
BC11	4.429 6	1.400 7	7.842 7	4.943 4	1.000 0	0.987 4
BC13	2.903 1	1.376 7	5.166 4	4.879 4	0.980 7	0.916 5
FC6	4.013 3	4.346 2	5.744 9	13.006 0	0.914 1	0.923 0
FC9	3.170 5	1.163 8	5.556 5	5.113 2	0.869 0	0.861 6
FC11	5.707 1	1.807 1	10.191 0	8.888 7	0.914 9	0.885 3
QC6	4.085 2	6.840 0	7.734 2	19.534 0	0.994 5	0.973 3
QC9	8.074 4	3.011 2	16.141 0	11.184 0	0.996 4	0.949 7
QC12	2.638 4	9.572 6	5.430 4	32.594 0	0.926 4	0.979 1
SC40	1.404 4	1.538 5	3.469 9	5.070 5	0.960 0	0.928 3
SC60	2.274 9	2.884 2	5.512 1	9.309 7	0.991 9	0.874 8

2.2.3 冲击次数方程

根据式(2)可以计算不同失效概率下的冲击次数,即

$$N = \ln^{-1} \{ [\ln(\ln \frac{1}{1-P_f}) + \alpha \ln \mu] / \alpha \} \quad (5)$$

式(5)建立了冲击次数与失效概率之间的对应关系,当给定某一失效概率时,可根据式(5)计算出一定纤维掺量下对应的冲击次数。

为了获得不同失效概率下的纤维混凝土的抗弯冲击次数,假定寿命与纤维质量掺量 P_f 符合二次方程

$$\ln N = mP_f^2 + nP_f + l \quad (6)$$

式中: m 、 n 、 l 为系数。

根据式(5)的计算结果,采用最小二乘法对其进行拟合,系数 m 、 n 、 l 与相关系数 R^2 的拟合结果如

表 4~7 所示。

表 4 DC 冲击次数方程系数

Tab. 4 Coefficients of Impact Number Equations for DC

N	P	m	n	l	R^2
N_c	0.05	-0.024 7	0.429 0	-0.685 8	0.998 2
	0.10	-0.017 7	0.328 2	-0.223 2	0.997 3
	0.15	-0.014 8	0.288 8	-0.004 2	0.994 9
	0.20	-0.012 3	0.253 3	0.173 4	0.989 6
	0.25	-0.010 5	0.226 5	0.323 4	0.979 6
	0.30	-0.008 8	0.201 5	0.454 4	0.971 5
	0.35	-0.006 9	0.175 4	0.567 6	0.955 8
	0.40	-0.005 5	0.154 6	0.672 1	0.951 0
	0.45	-0.004 4	0.137 9	0.766 5	0.938 7
	0.50	-0.002 5	0.110 3	0.889 7	0.910 1
N_f	0.05	-0.005 6	0.245 9	0.306 5	0.963 8
	0.10	-0.002 2	0.218 5	0.550 4	0.987 2
	0.15	-0.000 2	0.202 3	0.698 1	0.988 3
	0.20	0.001 4	0.186 7	0.828 4	0.983 1
	0.25	0.002 6	0.178 4	0.902 7	0.978 3
	0.30	0.003 5	0.172 0	0.973 6	0.972 6
	0.35	0.004 4	0.164 1	1.038 9	0.967 0
	0.40	0.005 2	0.157 7	1.099 6	0.961 1
	0.45	0.006 0	0.150 7	1.157 3	0.955 4
	0.50	0.006 7	0.144 9	1.211 4	0.950 2

表 5 BC 冲击次数方程系数

Tab. 5 Coefficients of Impact Number Equations for BC

N	P	m	n	l	R^2
N_c	0.05	-0.018 5	0.353 4	-0.686 1	0.975 1
	0.10	-0.015 2	0.291 2	-0.212 8	0.972 9
	0.15	-0.013 7	0.265 9	0.016 2	0.962 6
	0.20	-0.013 0	0.249 3	0.199 4	0.957 9
	0.25	-0.011 6	0.226 8	0.355 3	0.955 5
	0.30	-0.010 7	0.209 9	0.489 6	0.946 1
	0.35	-0.010 2	0.198 1	0.607 8	0.938 1
	0.40	-0.009 5	0.185 3	0.714 8	0.928 4
	0.45	-0.008 9	0.174 3	0.811 5	0.917 6
	0.50	-0.007 9	0.154 4	0.938 8	0.898 6
N_f	0.05	-0.024 5	0.384 9	0.329 6	0.846 6
	0.10	-0.020 6	0.360 1	0.578 7	0.923 1
	0.15	-0.018 4	0.345 8	0.728 2	0.960 9
	0.20	-0.016 4	0.329 9	0.859 5	0.977 8
	0.25	-0.015 1	0.323 8	0.936 6	0.987 7
	0.30	-0.013 9	0.316 4	1.008 0	0.993 4
	0.35	-0.012 8	0.309 0	1.073 8	0.996 9
	0.40	0.011 8	0.301 7	1.135 8	0.998 3
	0.45	-0.011 1	0.297 0	1.194 4	0.998 8
	0.50	-0.010 1	0.289 4	1.248 8	0.998 5

表6 FC冲击次数方程系数

Tab. 6 Coefficients of Impact Number Equations for FC

N	P	m	n	l	R^2
N_c	0.05	-0.008 8	0.265 2	-0.678 4	0.980 2
	0.10	-0.005 8	0.204 1	-0.212 0	0.983 4
	0.15	-0.005 7	0.191 1	0.006 7	0.992 9
	0.20	-0.004 3	0.166 3	0.187 4	0.995 1
	0.25	-0.003 7	0.150 3	0.339 7	0.997 7
	0.30	-0.002 3	0.128 7	0.470 6	0.999 9
	0.35	-0.002 3	0.119 7	0.557 7	1.000 0
	0.40	-0.001 2	0.103 6	0.690 9	0.998 2
	0.45	-0.001 4	0.098 3	0.785 7	0.997 1
	0.50	-0.000 2	0.073 3	0.912 6	0.993 2
N_f	0.05	-0.004 8	0.289 9	0.326 2	0.832 6
	0.10	-0.001 7	0.278 4	0.574 8	0.925 2
	0.15	0.000 3	0.270 7	0.725 3	0.962 6
	0.20	0.002 0	0.260 7	0.856 3	0.980 8
	0.25	0.002 8	0.260 5	0.933 0	0.990 7
	0.30	0.003 8	0.257 4	1.003 9	0.996 4
	0.35	0.004 6	0.253 9	1.070 3	0.999 0
	0.40	0.005 3	0.251 4	0.132 4	1.000 0
	0.45	0.006 1	0.247 8	0.190 5	0.999 7
	0.50	0.006 8	0.244 5	1.245 2	0.998 4

表7 QC冲击次数方程系数

Tab. 7 Coefficients of Impact Number Equations for QC

N	P	m	n	l	R^2
N_c	0.05	-0.032 5	0.532 2	-0.716 9	0.979 7
	0.10	-0.026 1	0.437 1	-0.241 0	0.983 8
	0.15	-0.023 3	0.397 6	-0.012 4	0.990 9
	0.20	-0.020 6	0.358 7	0.172 8	0.993 7
	0.25	-0.018 4	0.327 0	0.329 6	0.996 2
	0.30	-0.016 8	0.313 1	0.465 0	0.997 8
	0.35	-0.015 1	0.278 6	0.583 6	0.998 2
	0.40	-0.013 4	0.255 1	0.690 7	0.999 3
	0.45	-0.012 6	0.240 2	0.788 3	1.000 0
	0.50	-0.010 9	0.213 9	0.910 3	1.000 0
N_f	0.05	-0.018 5	0.452 9	0.278 3	0.994 3
	0.10	-0.018 2	0.437 6	0.534 4	0.999 7
	0.15	-0.018 1	0.428 6	0.689 6	0.999 7
	0.20	-0.017 9	0.418 7	0.824 0	0.997 8
	0.25	-0.017 9	0.415 8	0.903 1	0.994 9
	0.30	-0.018 0	0.412 9	0.976 7	0.991 8
	0.35	-0.017 8	0.408 4	1.044 9	0.988 0
	0.40	-0.017 8	0.404 4	1.108 8	0.983 9
	0.45	-0.017 6	0.399 9	1.168 3	0.978 8
	0.50	-0.017 6	0.396 4	1.224 9	0.974 4

2.3 抗弯冲击性能分析

随着纤维掺量的增加,粗合成纤维混凝土初裂

冲击次数总体上服从先增加后减少的趋势,由于纤维掺量较大时,包裹纤维所需水泥浆增多,导致混凝土黏性降低,纤维不易于均匀分散;而破坏冲击次数一直增加,梁开裂后,纤维在脱黏拔出或拉断的过程中逐渐消耗能量,纤维根数越多,消耗能量越大。

根据式(6)计算可知:当失效概率为0.25,粗合成纤维质量掺量为 $6\sim 13\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,纤维混凝土梁的初裂、破坏冲击次数比素混凝土梁分别提高了1.2~3.5倍、2.1~12.8倍;钢纤维质量掺量为 $40\sim 60\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,纤维混凝土梁的初裂、破坏冲击次数比素混凝土梁分别提高了2.5~3.6倍、3.8~5.6倍。这表明粗合成纤维能够显著改善混凝土的抗弯冲击性能,对破坏冲击性能的改善作用显著优于钢纤维,但提高初裂冲击次数的作用差于钢纤维,这与钢纤维的高弹性模量有关。

3 结语

(1)用双参数 Weibull 分布验证了粗合成纤维混凝土抗弯冲击次数的概率分布,即粗合成纤维混凝土的抗弯冲击次数概率分布可以用双参数 Weibull 分布来描述。

(2)回归得到了粗合成纤维混凝土的抗弯冲击次数方程。

(3)随着纤维掺量的增加,粗合成纤维混凝土初裂冲击次数总体上服从先增加后减少的趋势,但破坏冲击次数一直增加。

(4)当失效概率为0.25,粗合成纤维质量掺量为 $6\sim 13\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,纤维混凝土梁的初裂、破坏冲击次数比素混凝土梁分别提高了1.2~3.5倍、2.1~12.8倍。这表明粗合成纤维能够显著改善混凝土抗弯冲击性能。

参考文献:

References:

- [1] 邓宗才,李建辉,孙宏俊,等.纤维混凝土的抗弯冲击性能[J].公路交通科技,2005,22(6):24-27.
DENG Zong-cai, LI Jian-hui, SUN Hong-jun, et al. Flexural Impact Performance of Fiber Reinforced Concrete Beams[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(6): 24-27.
- [2] 邓宗才,李建辉,孙宏俊,等.新型纤维增强混凝土梁的抗弯冲击特性[J].公路,2004,49(12):129-134.
DENG Zong-cai, LI Jian-hui, SUN Hong-jun, et al. Flexural Impact Behavior of Concrete Beams Reinforced with New Type Fibers[J]. Highway, 2004, 49

- (12):129-134.
- [3] SONG P S, WU J C, WANG S H, et al. Statistical Analysis of Impact Strength and Strength Reliability of Steel-polypropylene Hybrid Fiber-reinforced Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2005, 19(1): 1-9.
- [4] 高建明, 孙 伟. 钢纤维砼疲劳寿命分布规律的研究 [C]//李士恩, 杨朝礼. 全国第五届纤维水泥与纤维混凝土学术会议论文集. 广州: 广东科技出版社, 1994: 102-109.
- GAO Jian-ming, SUN Wei. Study on Distribution Regularity for Fatigue Life of Steel Fiber Reinforced Concrete [C]//LI Shi-en, YANG Chao-li. The 5th China Fiber Reinforced Concrete Academic Thesis Album. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1994: 102-109.
- [5] 孙晓燕, 黄承逵. 外贴纤维布加固超载后钢筋混凝土桥梁构件抗弯性能试验 [J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 82-87.
- SUN Xiao-yan, HUANG Cheng-kui. Test on Flexural Performance of RC Bridge Member After Overload Reinforced with Externally Bonded FRP [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 82-87.
- [6] 袁旭斌, 贺拴海, 宋一凡. 粘贴纤维布加固 RC 梁的受弯裂缝计算方法 [J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 54-58.
- YUAN Xu-bin, HE Shuan-hai, SONG Yi-fan. Calculation Method on Bending Crack in RC Beams Strengthened with FRP [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 54-58.
- [7] 罗立峰. 钢纤维增强聚合物改性混凝土的冲击性能 [J]. 中国公路学报, 2006, 19(5): 71-76.
- LUO Li-feng. Steel Fiber Reinforced Polymer Modified Concrete Impact Behaviors [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 71-76.
- [8] 薛伟辰, 王晓辉. 有黏结预应力 CFRP 筋混凝土梁试验及非线性分析 [J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 41-47.
- XUE Wei-chen, WANG Xiao-hui. Experiment and Nonlinear Analysis of Concrete Beams with Bonded Prestressing CFRP Tendons [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4): 41-47.
- [9] 邓宗才. 高性能合成纤维混凝土 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- DENG Zong-cai. High Performance Synthetic Fiber Reinforced Concrete [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 56-61.
- [11] 沈蒲生, 方 辉, 夏心红, 等. 考虑施工过程和收缩徐变的框架结构简化分析 [J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(2): 41-45.
- SHEN Pu-sheng, FANG Hui, XIA Xin-hong, et al. Simplified Analysis for Frame Structure Considering Construction Process, Shrinkage and Creep [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(2): 41-45.
- [12] 易伟建, 张 颖. 混凝土框架结构抗震设计的弯矩增大系数 [J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(2): 46-51.
- YI Wei-jian, ZHANG Ying. Moment Magnification Factor in Anti-seismic Design of Concrete Frame Structure [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(2): 46-51.
- [13] FISHMAN K L, MANDER J B, RICHARDS R. Laboratory Study of Seismic Free-field Response of Sand [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1995, 14(1): 33-43.

(上接第 53 页)

Large-span Underground Structure Under Earthquake [D]. Nanjing: Hohai University, 2002.

- [7] 陈跃庆. 结构-地基动力相互作用体系振动台试验研究 [D]. 上海: 同济大学, 2001.

CHEN Yue-qing. Shaking Table Testing on Dynamic Soil-structure Interaction System [D]. Shanghai: Tongji University, 2001.

- [8] 季倩倩. 地铁车站结构振动台模型试验研究 [D]. 上海: 同济大学, 2002.

JI Qian-qian. Research of Shaking Table Test of Subway Station [D]. Shanghai: Tongji University, 2002.

- [9] 樱井彰雄. 地盘耐震学 [M]. 东京: 丸善出版社, 1999.
- SAKURAI A. Aseismic Ground Engineering [M]. Tokyo: Maruzen Publication, 1999.

- [10] 赵明华, 肖 燕, 陈昌富, 等. 考虑土体蠕变特性的桥台软基变形分析 [J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 56-61.

ZHAO Ming-hua, XIAO Yan, CHEN Chang-fu, et al. Analysis of Deformation on Soft Subsoil Around Bridge Abutment Considering Soil Creep Property [J].