

常、低温下橡胶集料混凝土抗冲击性能研究

朱涵^{1,2}, 李威¹, 朱学超¹

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:为了减小强度因素对混凝土材料抗冲击性能的影响, 配制了强度等级相同(等强)的素混凝土和橡胶集料混凝土, 橡胶的体积掺量分别为5%、10%和15%; 同时考虑温度因素的影响, 利用本课题组自行设计的U形试件和自主研发的落锤冲击试验装置, 分别测试了在常温(25℃)和低温(-20℃)下不同龄期的抗冲击性能。试验结果表明: 橡胶集料混凝土的抗冲击次数符合双参数威布尔分布, 并且在室温和低温下, 橡胶集料混凝土的抗冲击性能均随着橡胶掺量的增加而提高。

关键词:橡胶集料混凝土; 抗冲击; 等强; 常、低温

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2017)02-0024-07

0 引言

橡胶集料混凝土(Crumb Rubber Concrete, 简称CRC)是将橡胶颗粒加入普通混凝土之后形成的一种新型混凝土, 这种混凝土在常温下的力学性能与普通混凝土有着显著的不同^[1]。随着CRC的应用前景越来越广泛, 对它的研究也变得越来越深入。已有的研究表明, CRC具有弹性模量低、脆性低、极限拉应变大和阻尼系数高等特点^[2]。朱涵教授还报道了在美国亚利桑那州多个CRC项目实验段的施工情况^[3]。Khatib, Z. K.的研究得出了橡胶掺量的不同对CRC强度影响的关系, 并且建立了橡胶集料掺量—混凝土强度之间的量化数学模型^[4]。此外, 对于CRC在低温下的性能研究也已经卓有成效。陈波比较了普通混凝土和CRC的抗冻性, 结果表明: 为了提高混凝土的抗冻性, 掺加0.14 mm的橡胶粉时的效果比掺加引气剂时的效果明显, 掺加3~4 mm橡胶颗粒时的效果与掺加引气剂的效果相同^[5]。课题组的杨林虎和张永明对CRC在低温下的基本力学性能以及脆性进行了比较系统的研究, 结果表明: CRC的脆性随着橡胶掺量的提高而降低, 延性显著提高^[6-7]。然而, 由于混凝土材料抗冲击性能本身的复杂性和离散性, 目前对CRC抗冲击性能的研究较少, 为此采用课题组提出的U型试件落锤冲击试验装置(专利号: ZL201110415423.6), 分别对强度等级相同, 不同橡胶掺量的CRC进行了常温和低温冲击试验研究, 其中对于低温下的冲击试验采用的方法是: 在低温下进行试件的养护, 到达龄期后在室温下进行冲击试验。

1 试验

1.1 试验材料和配合比设计

试验所用水泥为“骆驼”牌42.5级普通硅酸盐水泥, 其化学成分以及相应的物理力学性能指标件见表1和表2; 砂采用天然河砂, 细度模数为2.65; 粗骨料采用的石子为天津市北辰区生产的主要成分为石灰岩质的碎石, 级配良好, 试验前用筛子筛出5~20 mm的粗集料, 表观密度2 680 kg/m³; 橡胶粒由废旧轮胎回收碾压所成, 粒径在1~2 mm, 表观密度为1 050 kg/m³; 本试验用水为自来水。所采用的减水剂为天津市建筑科学研究院研制的UNF5萘系系列减水剂, 外观为褐色粉末, 减水率≥15%, 比重为2 100 kg/m³。试验配合比设计参照《普通混凝土配合比设计规程》^[8](JGJ55—2011)规定, 要求所有立方体试件

收稿日期: 2016-06-25 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2017.02.05

基金项目: 国家自然科学基金(51078261)

作者简介: 朱涵(1956-), 男, 教授, 博士, 主要从事建筑材料耐久性研究。E-mail: 405224363@qq.com

朱涵, 李威, 朱学超. 常、低温下橡胶集料混凝土抗冲击性能研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2017, 30(2): 24-30.

的抗压强度均在 30 MPa 左右。试验配合比如表 3 所示,A、B、C、D 4 组配合比的橡胶掺量(按体积外掺)分别为 0%、5%、10%、15%。

表 1 水泥的化学组成

项目	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	烧失量
含量	61.24	21.20	4.64	3.13	4.60	1.76	3.43

表 2 水泥的物理力学性能

水泥品种	表示符号	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	抗压强度/MPa			抗折强度/MPa		
			3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
普硅	P.O42.5	361	23.0	34.8	46.7	5.5	6.8	9.0

表 3 试验组的配合比设计

试验组	橡胶	水泥	水	砂	石	减水剂	坍落度
A	0	295	168	664	1 083	0	110
B	50	336	168	575	1 168	3.36	87
C	100	480	168	416	1 070	4.8	95
D	150	600	168	312	935	6	105

1.2 试验方法

(1)抗压强度试验。CRC 抗压强度试验参照《普通混凝土力学性能试验方法》^[9](GB/T 50081—2002),在 NYL—2000D 型压力试验机上进行。其中,立方体抗压试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm。

(2)抗冲击试验。由于目前国内外对于混凝土材料的冲击试验还没有具体统一的试验方法,试验采用课题组自行设计的 U 型试件测试混凝土的抗冲击性能。U 型试件如图 1 所示,厚度为 65 mm。落锤试验装置如图 2 所示。落锤质量水平为 0.8 kg,冲击高度为 400 mm,落锤的形状尺寸分为两部分,上部为 50 mm×50 mm×50 mm 的立方体,下部为半径为 30 mm 的半球体。冲击试验的具体过程为:将 U 型试件放置在事先准备好的钢制底座上,以实现固定试件的作用,并将试件的中心对准落锤的中心,让落锤在固定高度上自由落下,使冲击头撞击试件直到完全静止,自此一个循环完成。当试件中部下表面第一次出现裂缝时,记录为初裂次数 N_1 ,继续试验,直至裂缝贯穿试件整个截面,记录为破坏冲击次数 N_2 。为了定义试件的延性指标,将破坏冲击次数 N_2 与初裂次数 N_1 的差值作为延性指标的代表值,记为 Δ ,即 $\Delta=N_2-N_1$ 。

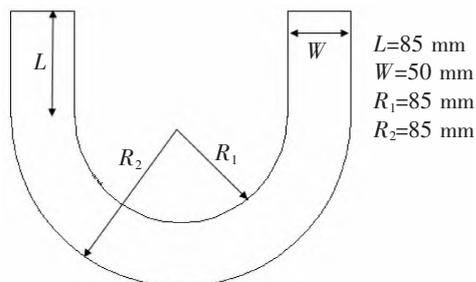


图 1 U 型试件示意图

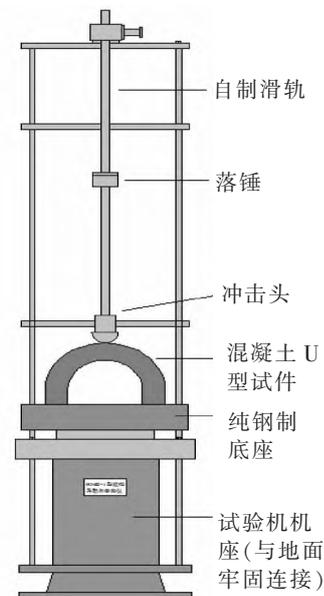


图 2 落锤试验装置

1.3 试件数量以及养护条件

试验养护条件分为两种:常温和低温。常温下的养护方法为分别将试件放在常温环境中 10 d 和 31 d,常温为 25 °C,标号分别为:A1-10、A1-31、B1-10、B1-31、C1-10、C1-31、D1-10、D1-31。低温下的养护方法分别为先放在室温环境中 7 d、28 d 之后再放入冰箱中冷冻 3 d,冰箱内温度设为-20 °C,标号分别为:A2-10、A2-31、B2-10、B2-31、C2-10、C2-31、D2-10、D2-31。

本试验每组标号需要 3 个立方体试件用于抗压强度试验,需要 12 个 U 型试件用于抗冲击实验。一共有 16 组试验组,因此共需要 48 个立方体试件和 192 个 U 型试件。

2 试验结果和分析

2.1 抗压强度试验结果

抗压强度试验结果如表 4 所示,表中数据为所得试验数据的平均值。从表中数据可以看到养护 10 d 之后试件强度就可以达到最终强度的 80%左右,符合实际情况。在常温下,养护 31 d 之后,试件均达到了 C30 混凝土的要求,基本满足了本试验所强调的“等强”条件。从数据还可以看出经过冷冻 3 d 的试件在抗压强度上都有一些提高,这可能的原因是混凝土所含的水分在低温条件下凝固结晶成冰,从而使混凝土的抗压强度有所提高;除此以外,还有一种原因是因为水分冻结成冰后,体积有所增大膨胀,填充了混凝土内部的空隙,使混凝土变得更加饱满充实,从而提高了抗压强度。

表 4 抗压强度试验结果

龄期/d	温度/°C	MPa			
		A	B	C	D
10	25	31.2	31.3	32.5	27.4
	-20	38.7	38.6	40.9	30.8
31	25	37.4	33.3	37.2	33.5
	-20	41.7	40.5	42.3	40.1

2.2 抗冲击试验结果

表 5 列出了每个试验组抗冲击试验结果的平均值。根据表中数据可知,常温下,橡胶掺量 5%、10%、15%的 CRC 在养护 10 d 的情况下相比普通混凝土终裂次数分别提高了 71%、117%和 260%。在养护 31 d 的情况下,终裂次数分别提高了 56%、220%、289%。低温下,养护 10 d(包括 3 d 的低温养护)的 CRC 终裂次数相比普通混凝土分别提高了 42%、132%、305%,在养护 31 d(包括 3 d 的低温养护)的情况下,终裂次数分别提高了 36%、151%和 279%。因此可以分析得到:无论是在常温和低温下,随着橡胶掺量的提高,混凝土的抗冲击性能在不断提高。这一结论通过图 3 所示的折线图可以更加直观的表现出来。除了橡胶掺量,其它因素也会影响混凝土的抗冲击性能,如养护条件、养护龄期等,这些研究在后续研究中会做更加具体的叙述。

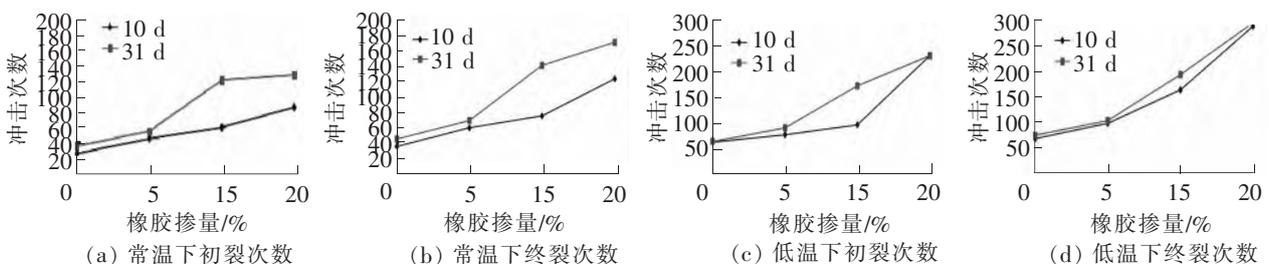


图 3 冲击结果折线图

除了终裂次数,还可以发现随着橡胶掺量的增加,橡胶混凝土的初裂次数也有相应提高,延性指标也优于普通混凝土,可能的原因是混凝土在承受动力荷载的时候,最开始的裂缝出现在混凝土的内部,后来慢慢发展到试件的表面,橡胶粒具有弹性模量大的特点,这种性能使得橡胶粒抑制了混凝土的内部裂缝的发展,从而提高了混凝土的抗冲击性能。从裂缝宽度上也可以发现这个现象,如图 4 所示,图 4(a)为未

掺加橡胶试件的终裂状态,图 4(b)为掺加橡胶试件的终裂状态,两个试件的试验养护条件一致,均为常温养护 31 d。

表 5 抗冲击试验结果

项目	\bar{N}_1	\bar{N}_2	次
A1-10	25	35	10
B1-10	45	60	15
C1-10	60	76	16
D1-10	87	126	39
A1-31	35	45	10
B1-31	55	70	15
C1-31	123	144	21
D1-31	130	175	45
A2-10	62	74	12
B2-10	77	105	28
C2-10	97	172	75
D2-10	235	300	65
A2-31	63	81	18
B2-31	91	11	19
C2-31	175	203	28
D2-31	256	307	51

2.3 抗冲击次数与威布尔分布

深入了解冲击破坏的机理可以发现:疲劳破坏与冲击破坏的机理具有相似性,文献 [10]中提到,疲劳破坏的试验数据符合威布尔分布,由此可以推断此次冲击试验的数据分布也符合威布尔分布,接下来就来验证这一规律。

假设冲击次数 N 服从威布尔分布,威布尔分布的概率密度函数 $f(N)$ 、失效分布函数 $F(N)$ 、可靠度函数 $R(N)$ 分别为

$$f(N) = \frac{b}{N_a - N_0} \left(\frac{N - N_0}{N_a - N_0} \right)^{b-1} e^{-\left[\frac{N - N_0}{N_a - N_0} \right]^b} \quad (N > N_0) \tag{1}$$

$$F(N) = 1 - e^{-\left[\frac{N - N_0}{N_a - N_0} \right]^b} \tag{2}$$

$$R(N) = 1 - F(N) \tag{3}$$

式中, N_0 、 N_a 、 b 分别代表最小冲击寿命参数、尺度参数和形状参数。

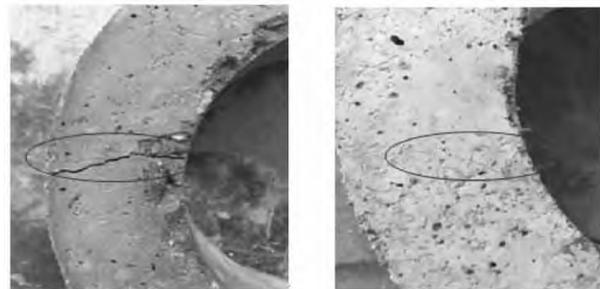
为了安全考虑,取 $N_0 = 0$,就可以得到双参数的威布尔分布,以上 3 个函数表达式就可改成

$$f(N) = \frac{b}{N_a} \left(\frac{N}{N_a} \right)^{b-1} e^{-\left(\frac{N}{N_a} \right)^b} \tag{4}$$

$$F(N) = 1 - e^{-\left(\frac{N}{N_a} \right)^b} \tag{5}$$

$$R(N) = e^{-\left(\frac{N}{N_a} \right)^b} \tag{6}$$

对公式(6)的两端取对数,可以得到 $\ln\{\ln[1/R(N)]\} = b\ln(N) - b\ln(N_a)$ 。令 $Y = \ln\{\ln[1/R(N)]\}$, $X = \ln(N)$, $C = -b\ln(N_a)$ 。则以上的函数表达式变为: $Y = bX + C$ 。在这里可以发现,如果可以证明 X 和 Y 之间线性关系成立,也就是说相关系数 R^2 比较大就可以证明橡胶集料混凝土 U 型试件冲击次数服从双参数的威布尔分布,验证过程如下:



(a) 未掺加橡胶试件的裂缝 (b) 掺加橡胶试件的裂缝

图 4 U 型试件承受冲击荷载破坏

第一步先将每种橡胶掺量的 12 个试件的冲击次数(N_1, N_2)从小到大排列,记下秩序数 i 。第二步利用函数 $F(N)$ 和 $R(N)$ 的期望来估计 $F(N)$ 和 $R(N)$ 的值。估计表达式如下^[11-13]: $F(N) = i/(n+1)$, $R(N) = 1 - i/(n+1)$, n 为每组试验的样本数,本试验为 12。第三步将每一组的试验结果(N_1, N_2)按照以上办法,以 $Y = \ln\{\ln[1/R(N)]\}$ 为纵坐标, $X = \ln(N)$ 为横坐标,利用最小二乘法进行线性回归分析,从而得到回归直线图以及相应的 $b, b\ln(N_a), R^2$,其中 b 就是所拟合直线的斜率,每组的回归直线图如图 5 与图 6 所示。

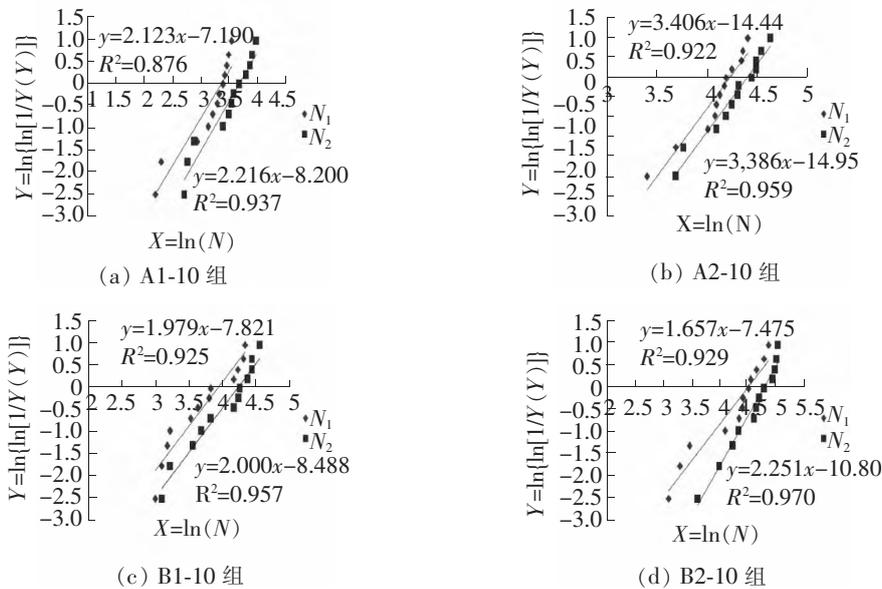


图 5 龄期 10 d 的 CRC 冲击次数 N_1, N_2 回归直线

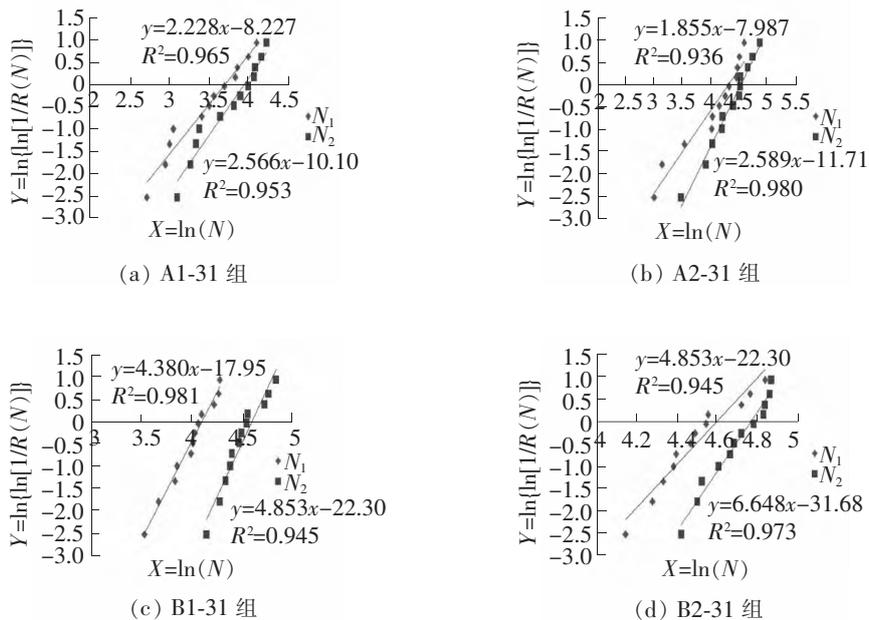


图 6 龄期 31 d 的 CRC 冲击次数 N_1, N_2 回归直线

图 5 与图 6 只列出了具有代表性的几组数据,其余数据如下:C1-10 中 N_1 的回归方程为 $Y = 2.187X - 9.262$,相关系数 $R^2 = 0.976$, N_2 的回归方程为 $Y = 2.623X - 11.71$,相关系数 $R^2 = 0.906$;C2-10 中 N_1 的回归方程为 $Y = 3.833X - 17.91$,相关系数 $R^2 = 0.973$, N_2 的回归方程为 $Y = 5.546X - 28.97$,相关系数 $R^2 = 0.946$;D1-10 中 N_1 的回归方程为 $Y = 3.027X - 13.87$,相关系数 $R^2 = 0.960$, N_2 的回归方程为 $Y = 2.922X - 14.48$,相关系数 $R^2 = 0.946$;D2-10 中 N_1 的回归方程为 $Y = 3.140X - 17.52$,相

关系数 $R^2=0.913$, N_2 的回归方程为 $Y=3.848X-22.32$, 相关系数 $R^2=0.911$; C1-31 中 N_1 的回归方程为 $Y=4.448X-21.82$, 相关系数 $R^2=0.928$, N_2 的回归方程为 $Y=5.807X-29.3$, 相关系数 $R^2=0.876$; C2-31 中 N_1 的回归方程为 $Y=2.660X-14.09$, 相关系数 $R^2=0.912$, N_2 的回归方程为 $Y=3.423X-18.57$, 相关系数 $R^2=0.923$; D1-31 中 N_1 的回归方程为 $Y=3.623X-18.02$, 相关系数 $R^2=0.947$, N_2 的回归方程为 $Y=5.320X-27.9$, 相关系数 $R^2=0.963$; D2-31 中 N_1 的回归方程为 $Y=5.280X-29.69$, 相关系数 $R^2=0.949$, N_2 的回归方程为 $Y=5.980X-34.84$, 相关系数 $R^2=0.891$ 。从上述数据中可以发现:10 d 的冲击次数回归数据中, 相关系数 R^2 的最小值与最大值分别为 0.876 与 0.973, 平均值为 0.937; 31 d 的冲击次数回归数据中, 相关系数 R^2 的最小值与最大值分别为 0.876 与 0.981, 平均值为 0.942, 总体相关系数平均值为 0.940。从这里就可以认为 $Y=\ln\{\ln[1/R(N)]\}$ 和 $X=\ln(N)$ 是线性相关的。从而就证明了橡胶集料混凝土 U 型试件冲击次数非常好的符合双参数威布尔分布。

3 结论

(1) 通过配合比设计, 可以实现对于等强的混凝土, 通过掺加橡胶来提高混凝土在常低温下的抗冲击性能; 在橡胶掺量 0%~15% 的情况下, 这种性能随着橡胶掺量的增加而提高。

(2) 双参数威布尔分布可以用来描述橡胶集料混凝土 U 型试件的冲击次数。说明抗冲击试验数据的离散性虽然很大, 但还是存在统计规律。

CRC 对比普通混凝土, 虽然具有多方面优越的性能, 但是橡胶的掺入会影响混凝土的强度, 并且在低温下橡胶集料混凝土的性能也存在很多盲点。研究目的就是在实现等强的前提下, 以橡胶掺量、养护温度和养护时间为变量, 研究橡胶集料混凝土的抗冲击性能。这对于在高寒高原地区橡胶集料混凝土的应用具有很重要的工程意义。研究表明: 在橡胶掺量 0%~15% 的情况下, 等强的橡胶集料混凝土的抗冲击性能随着橡胶掺量的增加而提高。

参 考 文 献

- [1] 朱涵. 新型弹性混凝土的研究综述[J]. 天津建设科技, 2004, 14(2): 35-37.
- [2] Zhu Han. Rubber Concrete [M]. United Kingdom: Rapra Technology Limited, 2005.
- [3] Zhu Han. On building crumb rubber concrete test sites[J]. Key Engineering Materials, 2006(302/303): 411-417.
- [4] Khatib, Z K, Bayomy, F M. Rubberized portland cement concrete[J]. Journal of Materials in civil Engineering, 1991, 11(3): 206-213.
- [5] 陈波, 张亚梅, 陈胜霞. 橡胶混凝土性能的初步研究[J]. 混凝土, 2004(12): 37-39.
- [6] Yang Linhu, Zhu Han, Li Chengfang. Strengths and flexural strain of CRC specimens at low temperature[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25: 906-910.
- [7] 张永明, 朱涵, 杨林虎. 低温下等强橡胶集料混凝土的脆性初探[J]. 天津大学学报, 2009, 42(3): 189-193.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 55—2011 普通混凝土配合比设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [9] 戎君明, 陆建文, 姚燕. GB/T 50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [10] 易成, 戴成琴. 纤维拔出时耗能机理对纤维混凝土力学性能的影响[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1998, 31(6): 88-93.
- [11] 蒋仁言. 威布尔模型族: 特性、参数估计和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [12] Nelson E W. Applied Life Data Analysis [M]. New York: Wiley, 1982.
- [13] Nelson W. Accelerated testing—statistical models, test plans, and data analysis[M]. New York: John Wiley & Sons, 1990.

Research on Performance of Crumb Rubber Concrete Under Room and Low Temperature Impact

Zhu Han^{1,2}, Li Wei¹, Zhu Xuechao¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Civil Engineering Structure & New Materials, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to reduce the influence of the strength on the impact resistance of concrete materials, this research prepared ordinary concrete and crumb rubber concrete of the same strength grade, with the volume of the rubber content of 5%, 10% and 15% respectively. At the same time, considering the influence of the temperature, using u-shape specimen designed by this research team and a newly designed drop weight impact machine, tests were conducted at room temperature (25 °C) and low temperature (-20 °C) under different age of impact resistance. The results show that, the number of the impact resistance of the crumb rubber concrete complies with the theory of double parameters Weibull distribution and linear regression theory, and at both room temperature and low temperature, the resistance of crumb rubber concrete increases with the increase of rubber content.

Key words: crumb rubber concrete; impact resistance; same strength grade; room and low temperature



(上接第 16 页)

The Hysteretic Behavior Research of a New Flexural-and-shear Buckling-Restrained Mild Steel Damper

Zheng Hong, Quan Kai, Ding Shuangjie

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: The energy dissipation potential of a metallic damper largely depends on the inelastic deformation and the hysteretic response of the energy elements under either axial or flexural or shear loading. In this study, a new type of mild steel damper called a shear-and-flexural buckling-restrained damper is proposed, which consists of three main parts, two end plates of X-configuration allowed to yield under flexural action, a mild steel web mainly subjected to shear loading, and two pieces of restraining steel plate with stiffener clamping the energy dissipation plate to prevent out-of-plane buckling. In this paper the three specimens of different damper are compared and analyzed using ABAQUS, which mainly focus on setting, or not setting, of the buckling plate and end plates of X-configuration. In order to further study the optimization of the new damper, the shear web is slotted to improve force form and failure mechanism, and increase the plastic deformation region to improve energy efficiency of the web, three specimens of different slot forms are analyzed using finite element software to find the optimal slot form. The results show that the new type of mild steel damper has full hysteretic curve, and the post yield bearing capacity and energy dissipation capacity are improved in different degrees compared with other structural forms, and the ductility increases obvious when the web is slotted.

Key words: mild steel damper; buckling-restrained; slot; hysteretic curve