

橡胶混凝土低温抗折性能试验研究

薛 刚, 林大地

(内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 在水灰比分别为 0.35、0.40、0.45 中分别以 0、10%、20%和 30%的橡胶掺量配制橡胶混凝土, 分别在-30℃、20℃环境下进行橡胶混凝土抗折性能研究. 结果表明: 低温下橡胶混凝土破坏状态和常温下相比基本一致, 随着橡胶掺量增大, 破坏时试件显示出一定保持整体形态的能力. 常温 20℃时, 随着橡胶掺量的增加, 橡胶混凝土的抗折强度降低, 且下降趋势越来越快. 在低温环境下, 橡胶混凝土试件的抗折强度提高系数随着橡胶掺量的增加, 表现出先下降后上升的趋势. 在橡胶掺量相同的情况下, 随着橡胶混凝土的水灰比的增加, 抗折强度也提高, 同时提高系数也增加; 在低温环境下, 橡胶混凝土折压比变化情况与常温下的变化情况相似, 低温的折压比高于常温情况, 表明橡胶混凝土在低温仍具有良好的韧性.

关键词: 橡胶混凝土; 低温抗折; 橡胶掺量; 强度提高系数; 折压比

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)05-0623-06

Experimental study on flexural behavior of rubber concrete at low temperature

XUE Gang, LIN Dadi

(School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology,
Inner Mongolia Baotou 014010, China)

Abstract: Four kinds of rubber content concrete were prepared in three kinds of water-to-binder ratios of 0.35, 0.40 and 0.45, and the study of the flexural performance test was carried out at low temperature-30℃ and normal temperature at 20℃. Result shows that the failure feature of the rubber concrete at low temperature is basically the same as that under normal temperature. With the increase of rubber content, the test piece shows the ability to maintain the overall shape. At the temperature of 20℃, the flexural strength decreases with the increase of the rubber content, and the downward trend is accelerated. At low temperature, as the rubber content increases, the flexural strength increase coefficient appears to decrease first and then increase. When the rubber content is the same, the flexural strength of the rubber concrete increased as the water-to-binder ratio increases, and the coefficient of the flexural strength increases as well. With the increase of rubber content, the change trend of low temperature bend-press ratio of rubber concrete is similar to that of the normal temperature. The bend-press ratio at low temperature is higher than the normal temperature, which indicates that the rubber concrete still has good toughness at low temperatures.

Key words: rubber concrete; low temperature; water-to-binder ratio; flexural strength; bend-press ratio

我国的橡胶消耗量已位居世界第一^[1], 但作为橡胶主要原材料废旧轮胎的回收能力不高^[2]. 废旧轮胎属于工业有害废物, 应该加强对废旧轮胎的再利用^[3]. 将废旧轮胎破碎制成橡胶颗粒, 掺入混凝土中, 制成橡胶混凝土. 橡胶颗粒的掺入可提高混凝土的韧性、变形性能, 还具有抗冻、抗渗、抗冲击等诸多优势, 使其变成土木工程领域的绿色资源^[4]. 橡胶混凝土虽然提高了韧性以及耐久性

能, 但强度降低的缺点明显^[5-6], 仅适用于对材料强度要求不是很高的工程领域, 比如某些道路工程. 目前, 关于低温环境下的力学性能研究较少^[7-8]. 在低温环境下橡胶混凝土力学性能的研究, 无疑可拓展橡胶混凝土在工程中的应用范围, 也能为其后广泛的应用提供一些技术参考和依据.

在上世纪 70 年代, 国外开始了对混凝土低温环境下性能的研究^[9-10], 而我国的研究集中在近十

收稿日期: 2018-10-18 修改稿日期: 2019-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51868063)

第一作者: 薛刚(1968—), 男, 教授, 博士, 主要从事结构振动与控制、高性能混凝土的研究. xuegang-2008@126.com

通讯作者: 林大地(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事高性能混凝土、橡胶混凝土的研究. CooperLin92@163.com

余年^[11-13]。在低温环境下,橡胶混凝土材料因外界积蓄的应变而产生内应力,而冰雪融化的过程会导致混凝土内应力消失,与常温下的力学性能有很大不同。因此常温下橡胶混凝土性能无法在寒冷地区的应用。

抗折性能是反映材料韧性的指标,良好韧性是橡胶混凝土有别于普通混凝土材料的主要特点。本文主要对 12 组不同配合比的橡胶混凝土分别在低温环境与常温环境下进行抗折试验,对

比分析低温下抗折强度分别在水灰比、橡胶掺量等因素变化情况下的性能变化规律,并根据抗压强度与抗折的关系,探究低温下橡胶混凝土的韧性特点。

1 试验原材料及配合比

1.1 试验原材料

(1)水泥:为 P·O42.5 普通硅酸盐水泥,水泥物理性能见表 1。

表 1 水泥物理性能

Tab. 1 Physical properties of cement

项目	标准稠度 用水量/%	细度 /%	安定性	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
				初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
实测值	24	2	合格	120	171	26.9	53.8	5.9	8.8

(2)砂:细度模数 2.7,表观密度 2 620 kg/m³,堆积密度 1 512 kg/m³,质中砂。

(3)石子:表观密度 2 685 kg/m³的碎石,粒径 5~25 mm,压碎指标 9.6%的碎石。

(4)橡胶:5~10 目混合橡胶颗粒,堆积密度为 610 kg/m³。

(5)水:普通饮用水。

(6)粉煤灰为Ⅱ级,矿渣粉为 S95 级。

(7)减水剂:聚羧酸减水剂,减水率≥25%。

1.2 试验配合比设计

分别采用水灰比为 0.35、0.40、0.45 的普通混凝土作为基准混凝土,砂率分别为 38%、40%和 42%,采用等体积替代法分别以 0、10%、20%和 30%的掺量代替砂掺入混凝土中。以 50 kg/m³和 60 kg/m³两种掺量掺入粉煤灰和矿渣粉。橡胶混凝土的配合比设计均符合《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55-2011)相关规定。各组材料配合比见表 2。

表 2 橡胶混凝土配合比

Tab. 2 Rubber concrete mix ratio

编号	水泥 /kg·m ⁻³	粉煤灰 /kg·m ⁻³	矿渣 /kg·m ⁻³	橡胶 /kg·m ⁻³	砂 /kg·m ⁻³	石子 /kg·m ⁻³	水 /kg·m ⁻³
RC-0.35	290	50	60	0	770	1 153	140
CRC-0.35-10	290	50	60	31.3	693	1 153	140
CRC-0.35-20	290	50	60	62.6	616	1 153	140
CRC-0.35-30	290	50	60	93.9	539	1 153	140
RC-0.40	290	50	60	0	801	1 105	160
CRC-0.40-10	290	50	60	32.5	720	1 105	160
CRC-0.40-20	290	50	60	65.1	640	1 105	160
CRC-0.40-30	290	50	60	97.6	560	1 105	160
RC-0.45	290	50	60	0	832	1 056	180
CRC-0.45-10	290	50	60	33.8	749	1 056	180
CRC-0.45-20	290	50	60	67.6	666	1 056	180
CRC-0.45-30	290	50	60	101.5	582	1 056	180

2 试验方法

按照标准抗折试验过程进行常温抗折试验, 目前有两种混凝土低温力学性能的试验方法: 一种是将试件放置于低温箱内充分降温, 然后将其取出进行试验; 另一种则是直接在低温环境内进行力学试验. 研究表明^[14]: 低温下试验, 当温度在 0℃ 和 -40℃ 时, 两类方法之间的差别并不明显. 试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm, 本文按照第一类方法将试件放入低温箱后取出, 采用三分点弯曲法进行抗折试验. 抗折试验装置如图 1 所示.



图 1 抗折试验装置

Fig. 1 Flexural test

橡胶混凝土试件的抗折强度按式(1)计算.

$$f_{RF} = \frac{F_{\max} l}{bh^2} \quad (1)$$

式中: f_{RF} 为橡胶混凝土抗折强度(MPa); F_{\max} 为最大荷载(N); l 为支座间距(mm); b 为截面宽度(mm); h 为截面高度(mm).

定义橡胶混凝土试件的抗折强度损失 k 如式(2), 该指标可直观反映橡胶混凝土抗折强度较基准混凝土强度变化情况.

$$k = \left(1 - \frac{f_{RF}}{f_{CF}}\right) \times 100\% \quad (2)$$

表 3 常温下橡胶混凝土抗折强度与抗折损失

Tab. 3 Flexural strength and flexural loss of rubber concrete under normal temperature

试件编号	20℃抗折 强度/MPa	-30℃抗折 强度/MPa	20℃抗折 损失/%	-30℃抗折 损失/%	抗折强度 提高系数
CC-0.35	10.18	12.24	0	0	1.20
RC-0.35-10	9.92	11.36	2.55	7.19	1.15
RC-0.35-20	9.42	11.46	7.47	6.37	1.22
RC-0.35-30	7.65	9.92	24.85	18.95	1.30
CC-0.40	9.65	13.19	0	0	1.37
RC-0.40-10	9.26	12.22	4.04	7.35	1.32
RC-0.40-20	8.69	12.26	9.95	7.05	1.41
RC-0.40-30	7.41	10.58	23.21	19.79	1.43

式中, f_{CF} 为基准混凝土抗折强度(MPa).

3 试验结果及分析

3.1 试件破坏形态

水灰比为 0.4 的普通混凝土及橡胶混凝土抗折试件的破坏形态如图 2 所示. 可以看出, 抗折试件在中部区域断裂, 随着橡胶掺量增大, 破坏时试件未完全折断, 显示出具有一定保持整体形态的能力. 未掺橡胶的基准混凝土为明显的脆性断裂, 破坏时发出清脆的断裂声, 而橡胶混凝土断裂时有明显的形变, 并伴有碎裂声. 这是因为, 橡胶颗粒本身具有抗拉特性, 即多个微小的弹性体分布在混凝土内部, 试验进行中, 橡胶颗粒对其周围的水泥基体产生的应力集中起到了一定的阻碍作用, 提高了试件的变形能力.



图 2 试件抗折破坏状态

Fig. 2 Broken state of the specimens

3.2 抗折强度

常温 20℃ 及低温 -30℃ 的橡胶混凝土抗折强度试验结果如表 3 所示, 表中抗折损失按照本文(2)式计算, 抗折强度提高系数为同一配比的低温抗折强度与常温抗折强度的比值.

续表 3

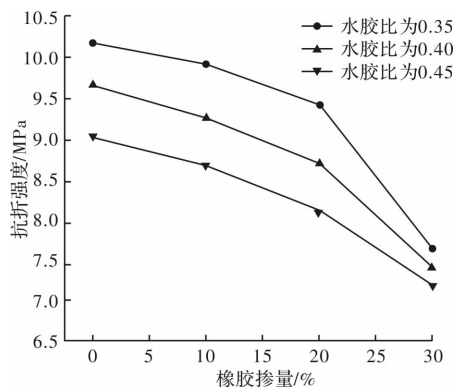
试件编号	20 ℃抗折强度/MPa	-30 ℃抗折强度/MPa	20 ℃抗折损失/%	-30 ℃抗折损失/%	抗折强度提高系数
CC-0.45	9.04	13.86	0	0	1.53
RC-0.45-10	8.69	12.52	3.87	9.77	1.44
RC-0.45-20	8.08	12.68	10.62	8.51	1.57
RC-0.45-30	7.17	10.96	20.69	20.92	1.53

由表3可知,橡胶掺量相同时,水灰比越大,橡胶混凝土无论在常温还是低温下抗折强度均减小,当橡胶掺量为10%时,3种水灰比的橡胶混凝土在常温下抗折强度依次为9.92 MPa、9.26 MPa、8.69 MPa。在低温-30℃时,随着橡胶掺量增加,橡胶混凝土抗折强度的降幅比常温情况小,当橡胶掺量超过20%以后,抗折强度下降幅度加快。比如:水灰比为0.35、橡胶掺量为30%时,橡胶混凝土常温抗折强度的降幅为24.85%,而低温抗折强度的降幅为18.95%。

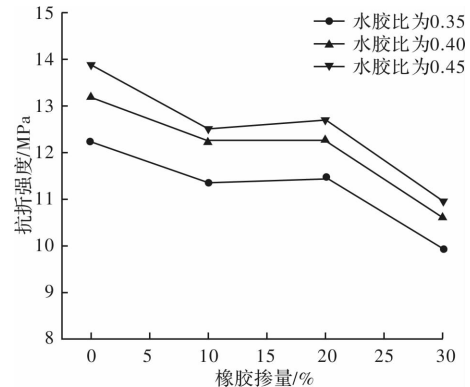
图3表示在常温20℃及低温-30℃下,各组试件的抗折强度在不同橡胶掺量及水灰比影响下的规律。根据表3和图3(a)可以看出,随着橡胶掺量由10%增至30%时,水灰比为0.35的橡胶混凝土抗折强度较基准混凝土的降幅由2.55%增至24.85%;水灰比为0.40的橡胶混凝土抗折强度较基准混凝土的降幅由4.04%增至23.21%。水灰比为0.45的橡胶混凝土的抗折强度较基准混凝土的降幅由3.87%增至20.69%。由此看出,随着橡胶掺量的增加,水灰比较大的橡胶混凝土抗折强度损失相对较小,即橡胶掺量较高情况下,水灰比对橡胶混凝土强度的影响效低。

图3(b)显示,-30℃时,橡胶混凝土抗折强度随橡胶含量的变化规律与常温情况略有区别,橡胶掺量为10%、20%时,橡胶混凝土的抗折强度变化不大。

低温-30℃下不同水灰比对橡胶混凝土抗折



(a) 常温20℃下橡胶混凝土抗折强度



(b) 低温-30℃下橡胶混凝土抗折强度

图3 常温20℃和低温-30℃下橡胶混凝土抗折强度

Fig. 3 Rubber concrete flexural strength at room temperatures 20℃ and -30℃

强度提高系数 f_t^T/f_t (低温抗折强度 f_t^T 与常温抗折强度 f_t 之比)的影响规律如图4所示。随着橡胶掺量的增加,抗折强度提高系数呈现出先下降后上升的趋势。以水灰比0.35为例,基准混凝土相对抗折强度为1.20,抗折强度较常温增加20%,橡胶掺量为10%、20%、30%时,对应的橡胶混凝土相对抗折强度分别为1.15、1.22、1.30,橡胶混凝土抗折强度较常温的增幅由15%增至30%。橡胶含量相同时,水灰比越小,橡胶混凝土抗折强度提高系数越小。例如,橡胶掺量为30%时,水灰比为0.35、0.40、0.45时的抗折强度提高系

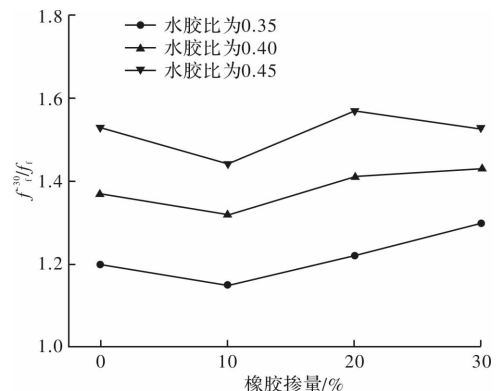


图4 -30℃橡胶混凝土抗折强度提高系数

Fig. 4 Rubber concrete flexural strength improvement coefficient at -30℃

数依次为 1.30、1.43、1.53。橡胶含量较低时,橡胶混凝土抗折强度提高系数相对普通混凝土更低,比如水灰比分别为 0.35、0.40、0.45 时的普通混凝土的抗折强度提高系数依次为 1.20、1.37、1.53,而橡胶含量为 5% 的橡胶混凝土的抗折强度提高系数依次为 1.15、1.32、1.44。

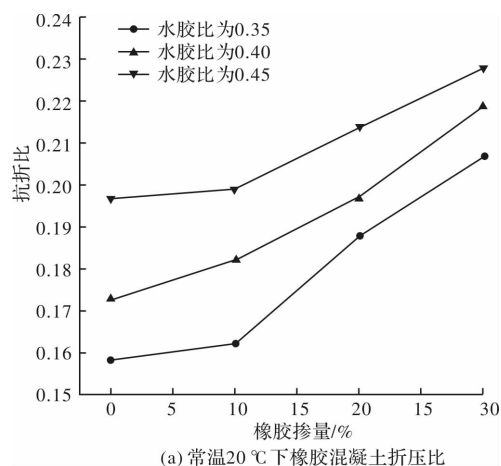
低温下,不同橡胶掺量的橡胶混凝土抗折强度较常温下提高原因在于,一是混凝土中的游离水凝结成冰,在整个混凝土试件中形成冰晶体网,冰晶体网犹如纤维作用,并且水结冰体积增大致使混凝土内部更加密实,空隙率降低,减少了试件内薄弱环,抗弯拉应力的能力会明显提高。二是随温度降低,橡胶颗粒硬度极大增加,增加了固体承载材料的数量,减少了橡胶颗粒边界处的应力集中,混凝土承受弯拉荷载的能力会提高。

3.3 折压比

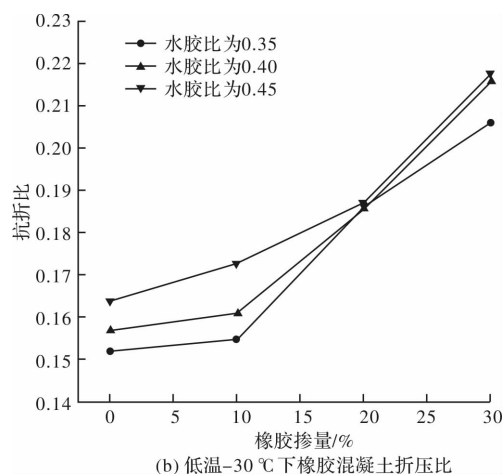
折压比即混凝土抗折强度和抗压强度的比值,可作为评价混凝土材料韧性的一个指标。混凝土折压比越大,韧性越好。在常温及低温下,测试相同配比的橡胶混凝土立方体抗压强度,进而得到橡胶混凝土折压比,图 5 所示。

由图 5(a)可以看出,常温下,随着橡胶掺量的增加,橡胶混凝土的折压比增大,混凝土的延性得到改善。橡胶掺量到达 20% 时,橡胶混凝土的折压比受水灰比的变化影响效小。当橡胶掺量为 30% 时,水灰比为 0.40 和 0.45 的橡胶混凝土折压比,明显高于水灰比为 0.35 的情况,说明高掺量橡胶的混凝土,水灰比越大,韧性和变形的提高程度越明显。

由图 5(b)可以看出,低温-30℃下,随着橡胶掺量的增加,各组橡胶混凝土折压比均增大,说明混凝土的脆性有所提高。橡胶掺量相同时,水灰比越小,折压比越大,表明脆性越强,延性越差。



(a) 常温 20℃ 下橡胶混凝土折压比



(b) 低温-30℃ 下橡胶混凝土折压比

图 5 常温 20℃ 和低温-30℃ 下橡胶混凝土折压比

Fig. 5 Rubber concrete folding ratio at normal temperatures 20℃ and -30℃

分析图 5 内容结果可知,随橡胶掺量的增加低温情况橡胶混凝土的折压比的变化趋势和常温情况类似,在低温-30℃ 时橡胶混凝土的折压比与常温相比有所提高,水灰比越大,提高幅度越明显,表明橡胶混凝土在低温下仍然保持良好的韧性。

4 结论

(1)低温下橡胶混凝土破坏形态和常温情况基本一致,随着橡胶掺量增大,破坏时试件呈现出保持完整形态的能力,即橡胶混凝土的延性越来越好。

(2)随着橡胶掺量的增加,低温及常温的抗折强度逐渐下降,且下降趋势加快;橡胶掺量相同时,随着水灰比的减小,橡胶混凝土的抗折强度增大。在低温下,橡胶掺量越大,抗折强度提高系数先下降后上升;橡胶掺量相同时,随着水灰比越大,橡胶混凝土的抗折强度越大,抗折强度提高幅度越大。

(3)低温情况橡胶混凝土折压比随着橡胶掺量的变化趋势和常温情况类似,随着橡胶掺量的增加,橡胶混凝土的折压比逐渐增大,说明橡胶的延性有所改善。低温环境下,相同掺量的橡胶混凝土折压比受水灰比的影响程度降低,具体表现为,配比相同的橡胶混凝土,低温时折压比的改变量低于常温情况。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国商务部. 中国再生资源回收行业发展报告 2017[J]. 资源再生, 2017(5):16-25.
Ministry of Commerce of P. R. C. China renewable

- resources recycling industry development report (2017)[J]. Resource Regeneration, 2017(5): 16-25
- [2] 梅大鹏. 废旧轮胎在道路工程中的应用[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2017(8): 31-34.
MEI Dapeng. Application of used tires in road engineering[J]. Comprehensive Utilization of China's tire resources, 2017(8): 31-34.
- [3] BISHT K, RAMANA P V. Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, (155): 811-817.
- [4] 李赞成, 许金余. 橡胶混凝土的基本力学特性的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(12): 2589-2594.
LI Zancheng, XU Jinyu. Experimental study on the basic mechanical properties of rubber powder[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2103, 32(12): 2589-2594
- [5] 杨春峰, 杨敏. 废旧橡胶混凝土力学性能研究进展[J]. 混凝土, 2011(12): 98-100, 109.
YANG Chunfeng, YANG Min. Research progress on mechanical performance of waste rubber concrete[J]. Concrete, 2011(12): 98-100, 109
- [6] 陈胜霞, 张亚梅. 橡胶颗粒细度、掺量及成型工艺对橡胶混凝土抗冻性能的影响[J]. 工业建筑, 2013, 43(增刊): 617-621.
CHEN Shengxia, ZHANG Yamei. Influence of rubber fineness, content and casting method on frost resistance of recycled rubber concrete[J]. Industrial Construction, 2013, 43(S): 617-621
- [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): 190-193.
ZHANG Yongming, ZHU Han, YANG Linhu. Brittleness of CRC of equal strength at low temperature[J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(3): 190-193.
- [8] MONFORE G E, LENTZ A E. Physical properties of concrete at very low temperatures [J]. J. PCA. 1962, 4(2): 33-39.
- [9] 山根昭. 超低温技术[J]. 低温建筑技术, 1980, 2(1): 57-60.
SHAN Genzhao. Ultra-low temperature technology[J]. Low Temperature Building Technology, 1980, 2(1): 57-60.
- [10] 李响, 谢剑, 吴洪海. 超低温环境下混凝土本构关系试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(增刊): 195-200.
LI Xiang, XIE Jian, WU Honghai. Experimental research on the constitutive relationship of concrete in a cryogenic environment [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(S): 195-200.
- [11] 王传星, 谢剑, 李慧杰. 低温环境下混凝土性能试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(增刊 II): 182-186.
WANG Chuangxing, XIE Jian, LI Huijie. Experimental research on the properties of concrete under low-temperature[J]. Engineer Mechanics, 2011, 28(S II): 182-186.
- [12] 时旭东, 居易. 混凝土低温受拉强度试验研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(16): 86-89.
SHI Xudong, JU Yi. Experimental study on tensile strength of concrete exposed to cryogenic temperature [J]. Building Structure, 2016, 46(16): 86-89.
- [13] 张楠, 廖娟. 混凝土低温力学性能及试验方法[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(11): 1404-1408.
ZHANG Nan, LIAO Juan. Testing method and mechanical properties of concrete at low temperature[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(11): 1404-1408
- [14] YANG Linhu, HAN Zhu, LI Chengfang. Strengths and flexural strain of CRC specimens at low temperature [J]. Construction and Building Materials. 2011, 25: 906-910.

(编辑 沈波)