

不同粒径橡胶集料混凝土工程特性试验

崔翰博¹, 周梅², 唐巨鹏¹, 郭胜豪², 姜昕彤¹

(1. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:用橡胶颗粒取代砂子,对橡胶集料混凝土进行工作性测定及单轴抗压试验、抗水渗试验、抗氯离子渗透试验、冻融循环试验。结果表明:存在最不利橡胶颗粒粒径0.63~1.25 mm,使混凝土流动性最差;混凝土抗压强度随橡胶颗粒粒径减小而下降,但掺入小粒径橡胶颗粒有助于保证混凝土完整性;存在最优取代粒径0.165~0.315 mm,使混凝土电通量、渗水高度、质量损失率、相对动弹性模量损失率分别为普通混凝土的53.15%、52.35%、16.35%、51.79%;利用耐久性最优配合比制备的橡胶集料钢筋混凝土简支梁起裂荷载高于普通钢筋混凝土简支梁,但极限荷载有所降低,降幅约为6.10%。

关键词:橡胶集料混凝土;橡胶颗粒粒径;工作性;力学特性;耐久性;简支梁

中图分类号:TV41;TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)04-0051-07

Experiments of engineering characteristics for crumb rubber concrete with different rubber grain sizes // CUI Hanbo¹, ZHOU Mei², TANG Jupeng¹, GUO Shenghao², JIANG Xintong¹ (1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Rubber particles of different sizes were used to replace sand in the concrete which was exposed to workability test, uniaxial compression test, water permeability test, chloride penetration resistance test and freeze-thaw test. The results demonstrate that the fluidity of the crumb rubber concrete is minimized at the rubber particle sizes from 0.63 to 1.25 mm. The compressive strength of the concrete degrades as the rubber particle size decreases, while the introduction of small rubber particles has a positive effect on the concrete integrity. There exists an optimized particle size in the range from 0.165 to 0.315 mm, in which the electric flux, seepage height, mass loss rate and relative dynamic elastic modulus loss rate are 53.15%, 52.35%, 16.35% and 51.79% respectively of those for conventional concrete. Additionally, the prepared simply supported beam of crumb rubber concrete according to the ratio for optimized durability has a crack initiation load higher than that of a simply supported beam made of conventional reinforced concrete, but its ultimate load is 6.10% lower than that of the latter.

Key words: crumb rubber concrete; rubber particle size; workability; mechanical performance; durability; simply supported beam

北方海洋环境下的水工结构多存在混凝土开裂、钢筋锈蚀等不同程度质量问题,究其原因是混凝土耐久性较差。橡胶集料混凝土是将废旧橡胶搅碎、研磨后代替混凝土中粗、细集料配制而成的一种新型混凝土,具备抗疲劳性好、收缩能力强等优势,符合水工结构对混凝土材料的需求。为拓展橡胶集料混凝土在北方沿海地区水利工程中的应用前景,有必要对橡胶集料混凝土耐久性、橡胶集料钢筋混凝土构件的力学特征进行研究。

目前,国内外学者对橡胶集料混凝土工作性、强度、耐久性方面进行了一系列研究工作。其中一些学者对橡胶集料混凝土工作性进行了研究。Zaher等^[1-2]提出利用橡胶颗粒取代碎石对混凝土坍落度影响较小,代替砂子会降低混凝土工作性,取代量超过40%,会完全失去流动性。刘峥等^[3]提出振捣时间较长,橡胶颗粒容易上浮,橡胶集料混凝土拌合物最适宜振捣时间在30~40 s。杨春峰等^[4]指出混凝土中掺入橡胶颗粒有引气效果,可以提高流动性。

基金项目:国家自然科学基金委员会与神华集团有限公司联合资助项目(U1261122)

作者简介:崔翰博(1988—),男,博士研究生,主要从事工程力学数值模拟和试验研究。E-mail:lgdchb@sina.com

通信作者:周梅(1964—),女,教授级高级工程师,硕士,主要从事土木工程新材料试验研究。E-mail:zhoumei1108@126.com

一些学者进行了橡胶集料混凝土力学特性研究。严智卓等^[5-6]指出橡胶颗粒粒径越大,混凝土抗压强度越低。Samiha 等^[7]提出了不同观点,指出橡胶集料取代率为 10% 时,混凝土抗压强度随橡胶颗粒粒径减小而增大。还有一些学者进行了橡胶集料混凝土耐久性的研究。Mavridou 等^[8]指出橡胶集料取代率为 12.5%,混凝土抗氯离子渗透能力最好。Zhu 等^[9]提出在混凝土中加入橡胶集料,其抗氯离子渗透、抵抗冻融循环破坏的能力均显著提高。

目前大多数研究内容集中于橡胶集料混凝土的工作性和强度,对橡胶集料混凝土耐久性的研究较为少见,将橡胶集料应用于钢筋混凝土构件的研究鲜有报道。此外,针对橡胶颗粒粒径的选取国内外并没有合适的标准,对橡胶集料混凝土从工作性、耐久性到力学特性并没有作系统的研究。本文以橡胶集料混凝土为研究对象,用不同粒径橡胶颗粒取代砂子,对橡胶集料混凝土进行了工作性测定试验、单轴抗压试验、抗氯离子渗透试验、抗水渗试验、冻融循环试验,得出了不同粒径橡胶颗粒对混凝土工作性、强度、耐久性的影响,并与普通混凝土进行了对比分析。利用耐久性最优配合比制备橡胶集料钢筋混凝土简支梁,进行抗弯性能试验,分析与普通钢筋混凝土简支梁间的差异,以期对橡胶集料混凝土在北方沿海地区水利工程中的应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试验原料和仪器

本文所采用的试验原料如下。水泥:阜新水泥厂生产的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥(密度 3 000 kg/m³);粉煤灰:阜新发电厂生产的 I 级粉煤灰;硅灰:沈阳金岗生产的硅灰粉(密度 2 710 kg/m³);矿渣:抚顺矿物局生产的 S95 磨细矿渣(密度 2 230 kg/m³);碎石:良好级配碎石(表观密度 2 710 kg/m³, 5 ~ 25 mm);砂子:良好级配天然细河砂(表观密度 2 587 kg/m³, 细度模数 2.8);橡胶:抚顺橡胶厂生产的橡胶颗粒(表观密度 1 110 kg/m³),不同粒径橡胶颗粒吸水率如表 1 所示;减水剂:自配萘系减水剂(掺量 2.4%,减水率 30%);水:自来水。

表 1 不同粒径橡胶颗粒吸水率 %

0.165 ~ 0.315 mm	0.315 ~ 0.630 mm	0.630 ~ 1.25 mm	1.25 ~ 2.50 mm	2.50 ~ 5.00 mm
87.21	56.28	18.92	9.63	5.84

表 2 试验配合比

混凝土	橡胶	水泥	粉煤灰	矿渣	硅灰	砂子	碎石	水	减水剂
C30 普通混凝土	0	271.13	88.96	50.84	12.71	662.50	1 126.25	163.1	10.17
橡胶集料混凝土	28.65	271.13	88.96	50.84	12.71	596.25	1 126.25	163.1	10.17

采用的主要试验仪器如下。含气量测定试验:含气量测定仪;烘干设备:电热鼓风干燥箱(101-1 型);单轴抗压试验、梁抗弯强度试验:微机控制电液伺服万能试验机(WAW-1000 型)、静态电阻应变采集仪(32 通道)、千分表;抗氯离子渗透试验:全自动真空饱水机(BSJ-A 型),混凝土氯离子电通量测定仪(DTL 型);抗水渗试验:混凝土抗渗仪(HS-4S 型);冻融循环试验:动弹性模量测定仪(DT-W18 型)、快速冻融试验机(KDR-V9)。

1.2 配合比设计

设计 6 组试验配合比。对照组:依据标准^[10]确定了 C30 混凝土配合比。试验组:通过绝对体积法(橡胶颗粒按照 10%^[7]等体积取代砂子)设计了橡胶集料混凝土配合比(表 2,其中两种混凝土的水胶比均为 0.385)。为方便在实际工程中应用,依据标准^[11],将橡胶集料粒径分为 5 组:H-1 组(0.165 ~ 0.315 mm)、H-2 组(0.315 ~ 0.630 mm)、H-3 组(0.630 ~ 1.25 mm)、H-4 组(1.25 ~ 2.50 mm)、H-5 组(2.50 ~ 5.00 mm)。

1.3 试验方案

本文系统地对不同粒径橡胶集料混凝土的工作性、耐久性、力学特性进行了研究,所采用的试验方案如下:

a. 混凝土工作性测定试验:依据标准^[12]进行混凝土拌和,测流动性;将拌和物装入量钵内,振捣混凝土(为预防橡胶颗粒上浮,振捣时间 30 s^[3]),依次擦净、抹平、密封量钵,利用注水阀注水,排气阀排气,待流出水后,关闭注水阀和排气阀,手动加压至 0.1 MPa,压力稳定后测含气量。

b. 试件成型:将剩余拌合物,振捣、装模、待成型后拆模,养护 28 d。

c. 试件孔隙率测定试验:将养护 28 d 试件(边长 100 mm 的正立方体),浸水 48 h 后擦净称重,再次浸水 12 h 称重,当差值低于较小值 0.5%,即为饱和;将试件置于 105℃ 干燥箱内,24 h 后冷却至室温称重,再次将其放于干燥箱内 12 h 后称重,两次差值低于较小值 0.5%,即为烘干。

d. 单轴抗压强度试验:依据标准^[13],将试件(边长 100 mm 的正立方体)置于万能试验机上,进行 28 d 抗压强度测试,以加载速度 0.5 MPa/s 施加压力至试件破坏。

e. 抗氯离子渗透试验:依据标准^[10],采用电通

量法,利用石蜡对试件(∅100 mm×50 mm)侧壁密封,然后置于真空饱水机中真空饱水,24 h 后连接氯离子电通量测定仪(负极为 3% NaCl 溶液,正极为 0.3 mol/L NaOH 溶液),每 30 min 记录电通量,通电 6 h 后结束试验。

f. 冻融循环试验。依据标准^[14],将试件(100 mm×100 mm×400 mm)置于 3% NaCl 溶液中浸泡 4 d,测试件质量、弹性模量;将试件置于快速冻融试验机上(-20 ~ 20℃)进行试验,冻融循环 200 次后试验终止,测试件质量、弹性模量。

g. 抗水渗试验。依据标准^[15],采用渗水高度法,将试件(175 mm×185 mm×150 mm)侧壁用石蜡密封后装入试模,测密封性,密封达到标准后进行抗水渗试验,试验结束后劈裂试件,测渗水高度。

h. 简支梁抗弯强度试验。简支梁制作:依次为绑扎钢筋笼、贴钢筋应变片、固定钢筋笼、浇混凝土、拆模养护 28 d、贴混凝土应变片。依据标准^[16],将梁固定在万能试验机上,支座一端固定、一端铰支,连接应变仪、万能表,预载并调整仪器,加载(采用分级加载,前期 2 kN,后期 3 kN),分别记录梁特征荷载(起裂荷载、屈服荷载、极限荷载),简支梁参数如表 3,简支梁抗弯强度试验如图 1 所示。分析过程涉及数据均为平均值。

表 3 简支梁参数

梁截面/mm		梁长/ mm	架立筋/ mm	纵筋/ mm	箍筋/ mm	配筋 率/%
长	宽					
100	150	1830	4∅8	2∅12	∅6@100	1.77

2 试验结果与分析

2.1 工作性测定试验

工作性直接影响了混凝土的质量和施工的难易程度,而含气量决定了混凝土工作性的优劣,因此有必要对橡胶集料混凝土的含气量与工作性进行检验。不同粒径橡胶集料混凝土含气量变化规律如图 2 所示。对照组、H-1 组、H-2 组、H-3 组、H-4 组、H-5 组的含气量依次为 1.19%、2.12%、1.92%、1.63%、1.57%、1.39%。由结果看出,掺入橡胶颗粒后,混凝土含气量均有不同程度的提升,颗粒粒径越小时,提高程度越明显,所得规律与文献[4]相近。不同粒径橡胶集料混凝土坍落度变化规律如图 3。对照组、H-1 组、H-2 组、H-3 组、H-4 组、H-5 组的坍落度依次为 215 mm、215 mm、185 mm、140 mm、185 mm、187 mm。当颗粒粒径小于 0.63 mm 或大于 1.25 mm 时,混凝土流动性较好;橡胶颗粒粒径在 0.630 ~ 1.25 mm 时,混凝土流动性明显降低。这是由于橡胶颗粒易吸附气体,可以起到引气作用;而表

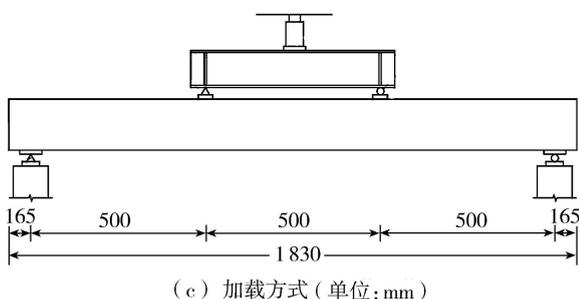
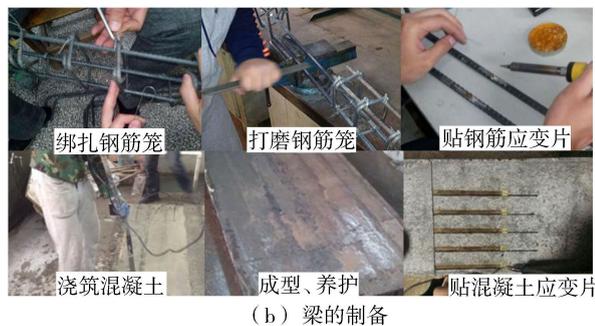
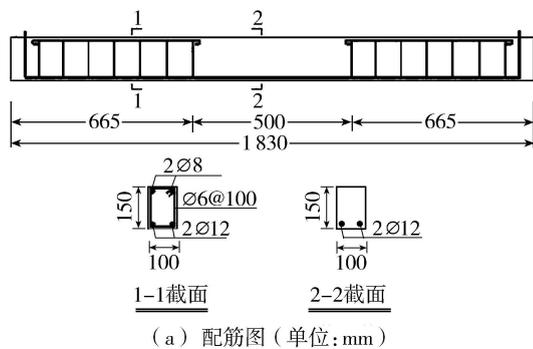


图 1 简支梁抗弯强度试验

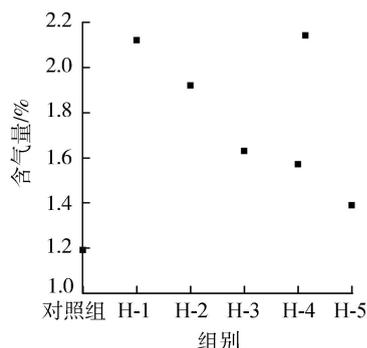


图 2 含气量变化

面凹凸不平,又能附着一定量的水。当橡胶粒径在 0.160 ~ 0.630 mm 或 1.25 ~ 5.00 mm 时,吸附水的能力小于引气作用,坍落度较大;粒径在 0.630 ~

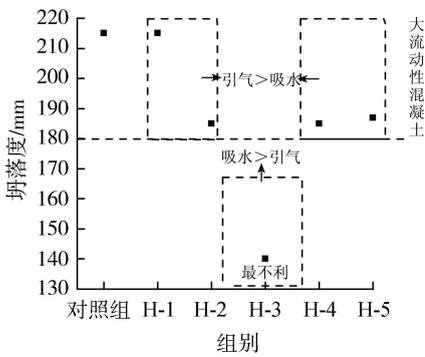


图3 坍落度变化规律

1.25 mm 时,吸附水的能力大于引气作用,坍落度有所减小。

2.2 孔隙率测定试验

混凝土的孔隙率与其力学特征、耐久性密切相关^[17],因此研究橡胶颗粒粒径对混凝土孔隙率变化规律的影响十分必要。不同粒径橡胶集料混凝土孔隙率变化规律如图4所示。由图4可见,试件孔隙率变化规律与拌和后混凝土含气量变化规律基本相同。对照组、H-1组、H-2组、H-3组、H-4组、H-5组的孔隙率分别为5.18%、5.77%、5.63%、5.52%、5.46%、5.33%。当颗粒粒径越小时,孔隙率越大。这是因为掺入橡胶颗粒可以对拌和过程中的混凝土产生引气效果,粒径越小,引入气体越多,成型后的混凝土孔隙率越大。

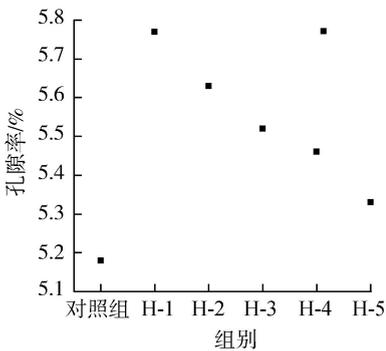


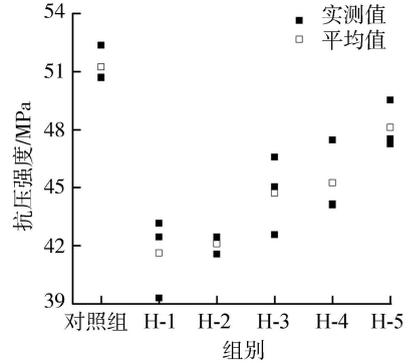
图4 孔隙率变化

2.3 抗压强度试验

力学特性是衡量橡胶集料混凝土是否可以在工程中应用的基本指标。不同粒径橡胶集料混凝土破坏后外观形态如图5(a)所示,抗压强度变化规律如图5(b)所示。与对照组相比,H-1组、H-2组、H-3组、H-4组、H-5组的28 d 抗压强度降幅分别为19.03%、18.12%、13.7%、12.01%、6.46%,粒径越小,强度降幅越大,结果与 Samiha 等^[7]结论相近。H-1组、H-2组试件受压破坏后,仍保持较好完整性。对照组、H-3组、H-4组、H-5组试件受压破坏后,表面出现明显裂缝,边角处伴随颗粒脱落。这是



(a) 破坏后外观形态



(b) 抗压强度变化规律

图5 抗压强度试验

由于橡胶的强度、弹性模量等力学特性均低于砂子,利用橡胶集料等体积取代砂子,混凝土抗压强度降低;橡胶属于有机材料,其他材料属于无机材料,两种材料相结合,相当于在试件中引入了薄弱点,橡胶粒径越小,薄弱点越多,这是导致橡胶集料混凝土强度下降的另一重要因素。此外,橡胶为弹性材料,混凝土中加入橡胶后,受力时收缩能力增强,粒径越小收缩能力越好,因此小粒径橡胶集料混凝土受压破坏后可以保持较好完整性。

2.4 抗氯离子渗透试验

氯离子侵入混凝土后,使其内部钢筋发生锈蚀,影响了水工混凝土结构的强度和耐久性。不同粒径橡胶集料混凝土电通量变化规律如图6所示。混凝土电通量与氯离子渗透性关系分为:电通量高于4000 C 渗透能力强、在2000~4000 C 的渗透能力中等、在1000~2000 C 的渗透能力低、在100~1000 C 的渗透能力很低、低于100 C 则不渗透^[10]。以28 d 龄期试件为例,对照组、H-1组、H-2组、H-3组、H-4组、H-5组的电通量依次为1205.33 C、640.67 C、700.23 C、814.76 C、923.06 C、1041.78 C。橡胶颗粒粒径越小,电通量越低,所得结论与文献^[18]相近。粒径为0.165~2.50 mm 时,橡胶集料混凝土渗透能力很低。粒径为0.165~0.315 mm 时,橡胶集料混凝土电通量仅为普通混凝土的53.15%。这是由于掺入橡胶集料后,气体滞留在毛细孔通道中,避免了

通道的连续。此外,橡胶颗粒粒径小于孔隙尺寸,同样起到阻碍毛细孔通道的作用,粒径越小阻碍效果越好,在两种因素共同影响下,橡胶集料混凝土抗氯离子渗透能力显著增强。

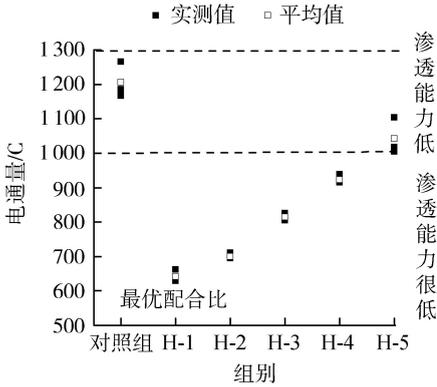


图6 电通量变化规律

2.5 抗水渗试验

水或其他有害液体向混凝土内部渗透,直接影响了其耐久性。不同粒径橡胶集料混凝土渗水高度变化规律如图7所示。以28d龄期试件为例,对照组、H-1组、H-2组、H-3组、H-4组、H-5组的渗水高度依次为69.05 mm、36.15 mm、44.01 mm、45.24 mm、52.12 mm、56.09 mm。橡胶颗粒粒径越小,阻碍渗透能力越好,粒径在0.165~0.315 mm时,橡胶集料混凝土渗水高度仅为普通混凝土的52.35%。这是由于橡胶是憎水性材料,与混凝土混合后形成很多防水膜,使水在流动过程中产生较大阻力;同时橡胶引入的气泡阻塞了孔隙通道,使水的流动路径更为曲折,两者共同作用下混凝土抗渗能力明显提高。此外,橡胶的存在还产生了一定负面影响,橡胶引入的气体会使混凝土孔隙率增大,反而减小了其耐久性。橡胶又使材料间黏结力下降,导致混凝土在成型过程中易产生微裂缝。但橡胶颗粒对抗渗能力的正面作用大于负面影响,因此掺入橡胶颗粒有助于提高混凝土的抗水渗能力,且颗粒越小阻碍渗透的能力越明显。

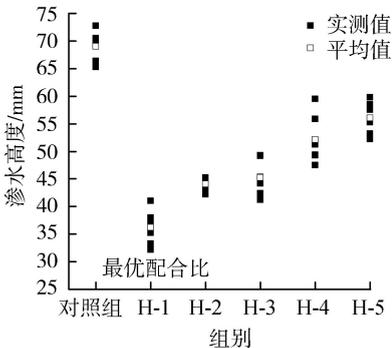


图7 渗水高度变化规律

2.6 冻融循环试验

冻融循环会使水工结构产生剥落现象,进而影响其安全性^[19]。不同粒径橡胶集料混凝土冻融循环后质量损失率变化规律如图8所示,相对动弹性模量损失率变化规律如图9所示。

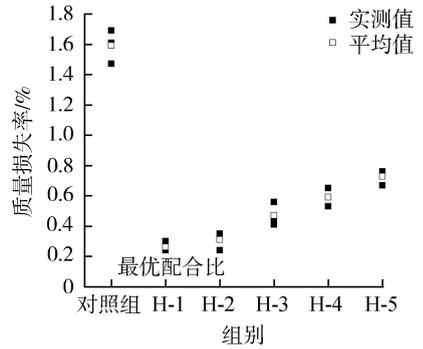


图8 质量损失率变化规律

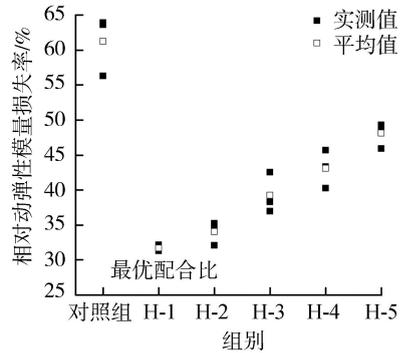


图9 相对动弹性模量损失率变化规律

质量损失率 ΔW_i 的计算公式为

$$\Delta W_i = \frac{W_0 - W_i}{W_0} \quad (1)$$

式中: W_0 为冻融循环前试件质量; W_i 为*i*次冻融循环试验后试件质量。

以200次冻融循环为例,对照组、H-1组、H-2组、H-3组、H-4组、H-5组的质量损失率依次为1.59%、0.26%、0.31%、0.47%、0.59%、0.73%。掺入橡胶颗粒后,质量损失率明显降低,橡胶颗粒粒径越小,质量损失率越低,粒径在0.165~0.315 mm时,橡胶集料混凝土质量损失率仅为普通混凝土的16.35%。

相对动弹性模量 E 的计算公式为

$$E = \frac{f^2}{f_0^2} \quad (2)$$

式中: f_0 为冻融循环前试件横向基频; f 为冻融循环试验后试件横向基频。

相对动弹性模量损失率 ΔE_i 的计算公式为

$$\Delta E_i = \frac{E_0 - E_i}{E_0} \quad (3)$$

式中: E_0 为冻融循环前相对动弹性模量; E_i 为*i*次

冻融循环试验后相对动弹性模量。

以 200 次冻融循环为例, 对照组、H-1 组、H-2 组、H-3 组、H-4 组、H-5 组的相对动弹性模量损失率依次为 61.23%、31.71%、34.05%、39.24%、43.08%、48.09%。掺入橡胶颗粒后, 相对动弹性模量损失率明显降低, 橡胶颗粒粒径越小, 相对动弹性模量损失率越低, 所得规律与文献[20]相似。粒径在 0.165 ~ 0.315 mm 时, 橡胶集料混凝土相对动弹性模量损失率仅为普通混凝土的 51.79%。这是由于掺入较小粒径的橡胶颗粒, 堵塞了孔隙, 阻碍了外界 Na^+ 、 K^+ 等有害物质进入混凝土内部, 降低了孔隙间浓度差, 抑制了水的流动。此外, 橡胶为弹性体, 橡胶集料增加了混凝土的延性, 吸收了冻融循环产生的膨胀力, 抑制了裂缝产生, 减小了混凝土剥落现象。因此橡胶集料混凝土质量损失和相对动弹性模量损失均低于普通混凝土。

2.7 简支梁抗弯试验

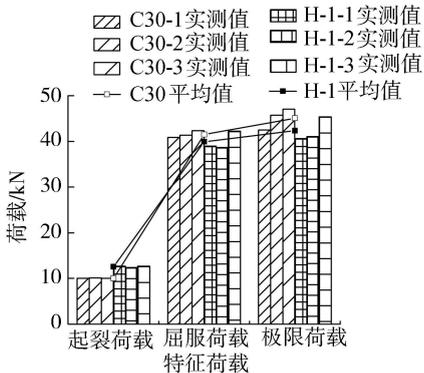
由上述试验结果可知, 橡胶颗粒粒径在 0.165 ~ 0.315 mm 时, 混凝土耐久性最好。因此根据耐久性最优配合比, 制备了橡胶集料钢筋混凝土简支梁, 进一步验证其在工程中的应用的可行性。

两种混凝土简支梁破坏后外观形态如图 10(a) 所示, 特征荷载(起裂荷载、屈服荷载、极限荷载)变化规律如图 10(b) 所示。对照组梁与 H-1 组梁加载后的变化规律基本相同。加载初期, 未达到起裂荷

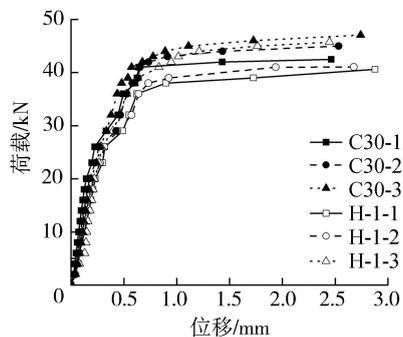
载, 梁处于弹性阶段, 跨中产生最大竖向位移。随荷载增加, 梁的跨中附近首先出现细微裂缝, 进入带裂缝工作阶段, 对照组梁、H-1 组梁起裂荷载分别为 10.04 kN、12.58 kN, H-1 组梁起裂荷载高于对照组梁 20.19%; 随荷载继续增加, 新裂缝产生, 原有裂缝扩展, 但扩展速率较为缓慢, 当荷载分别达到 41.52 kN、39.94 kN 时, 纵向钢筋屈服, 荷载完全由混凝土承受, 梁进入屈服阶段; 荷载继续增大, 混凝土裂缝快速延伸, 应变仪读数溢出, 千分表表针快速转动, 当荷载分别达到 45.09 kN、42.34 kN 时, 梁完全失去承载能力, H-1 组梁极限荷载比对照组梁低 6.10%。通过梁破坏后的外观形态可以看出, 对照组梁受压区混凝土出现较为严重的崩脱现象, 加载后期两条裂缝出现了交叉, H-1 组梁破坏后较为完整, 且裂缝分布更为均匀。荷载-位移曲线变化规律如图 10(c) 所示, 当荷载为 4 kN 时, 对照组梁、H-1 组梁位移分别为 0.048 mm、0.069 mm; 当荷载增至 20 kN 时, 位移分别为 0.169 mm、0.221 mm; 当荷载达到 38 kN 时, 位移分别为 0.557 mm、0.743 mm, 由此可见, 相同荷载作用时, 橡胶集料混凝土简支梁变形能力有所增加。这是由于掺入橡胶颗粒后, 梁的弹性明显提高, 受力时收缩能力增强。在橡胶集料混凝土开裂过程中, 裂缝开展遇到橡胶颗粒后, 尖端断裂能被橡胶颗粒吸收并消耗释放, 阻止了裂缝的延伸扩展。因此橡胶集料钢筋混凝土简支梁起裂荷



(a) 破坏后外观形态



(b) 特征荷载



(c) 荷载-位移曲线

图 10 简支梁抗弯试验

载高于普通 C30 钢筋混凝土简支梁,且没有发生严重的崩脱现象;而橡胶的强度、弹性模量等力学特性均低于砂子,因此加载后期其屈服荷载、极限荷载均低于普通 C30 钢筋混凝土简支梁,但橡胶集料混凝土与钢筋的协调工作能力明显优于普通混凝土,导致屈服荷载、极限荷载的降幅并不明显。综上所述,橡胶颗粒粒径在 0.165~0.315 mm 时,混凝土耐久性得到了明显提高,梁构件的完整性更好,且强度并没有产生明显削弱,因此 0.165~0.315 mm 为最优取代粒径,此种混凝土适于在工程中应用。

3 结 论

a. 随着橡胶颗粒粒径增大,橡胶集料混凝土含气量有所下降,坍落度则呈先减小后增大的趋势,存在最不利粒径使混凝土工作性最差,因此在实际工程中应注意平衡橡胶粒径引气作用和饱水能力间的关系。

b. 混凝土抗压强度随橡胶颗粒粒径减小而下降,但掺入小粒径橡胶颗粒有助于保证混凝土的完整性,由此可见小粒径橡胶集料混凝土适于应用在承载能力要求低的构件中。

c. 橡胶集料混凝土耐久性高于普通混凝土,存在最优取代粒径,使混凝土抗氯离子渗透能力、抗水渗能力、抵抗冻融循环破坏能力达到最好,因此小粒径橡胶集料混凝土可以应用在耐久性要求高的水利工程构件中。

d. 采用耐久性最优配合比制备的橡胶集料钢筋混凝土简支梁与普通钢筋混凝土简支梁相比,起裂荷载高,变形能力好,破坏后保持了较好完整性,且没有发生崩脱现象,同时屈服荷载与极限荷载并未出现明显降幅,因此采用粒径最优配合比配制的橡胶集料混凝土可以在工程中应用。

参考文献:

[1] ZAHER K K, FOUAD M B. Rubberized portland cement concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999, 11(3): 206-213.

[2] LI G Q, MICHAEL A S, GREGORY G, et al. Development of waste tire modified concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34: 2283-2289.

[3] 刘峥,周梅,白金婷,等. 振捣时间对橡胶集料混凝土强度及橡胶颗粒均质性的影响[J]. 工业建筑, 2012, 42(增刊1): 509-512. (LIU Zheng, ZHOU Mei, BAI Jinting, et al. Influence of vibration time on the strength and homogeneity of rubber concrete [J]. Industrial Construction, 2012, 42 (Supl): 509-512. (in Chinese))

[4] 杨春峰,王培竹,孙明博. 废旧橡胶集料混凝土拌合

物含气量及坍落度的试验研究[J]. 混凝土, 2014 (11): 53-55. (YANG Chunfeng, WANG Peizhu, SUN Mingbo. Experimental study on air content and slump of waste rubber aggregate concrete mixture [J]. Concrete, 2014(11): 53-55. (in Chinese))

[5] 严智卓,周金枝,周陈旭. 橡胶粒径及掺量对橡胶混凝土力学性能的影响[J]. 湖北工业大学学报, 2018, 33(4): 87-89. (YAN Zhizhuo, ZHOU Jinzhi, ZHOU Chenxu. Effect of rubber mesh number and content on mechanical properties of rubber [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2018, 33 (4): 87-89. (in Chinese))

[6] XIE J H, FANG C, LU Z Y, et al. Effects of the addition of silica fume and rubber particles on the compressive behaviour of recycled aggregate concrete with steel fibres [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 197: 656-667.

[7] SAMIHA R, ABDELHAMID G, BENMALEK M L, et al. Physical and mechanical performance of concrete made with waste rubber aggregate, glass powder and silica sand powder[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 21: 302-311.

[8] MAVRIDOU S, OIKONOMOU N. Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires [J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(6): 403-407.

[9] ZHU H, RONG B, XIE R, et al. Experimental investigation on the floating of rubber particles of crumb rubber concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 164: 644-654.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 混凝土结构耐久性设计规范: GB/T 50476—2008 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.

[11] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 试验筛技术要求和检验:GB/T 6003.2—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准:GB/T 50080—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

[13] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50080—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.

[14] 中华人民共和国交通部. 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程:JTG E30—2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.

[15] 国家能源局. 水工混凝土试验规程:DL/T 5150—2017 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (下转第 70 页)