

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.02.015

碳-玻璃混杂纤维改性橡胶混凝土抗冻性研究

孙杰, 孙明星, 冯川, 吴爽, 马稳

(武汉科技大学城市建设学院, 湖北武汉430065)

摘要:为研究碳-玻璃混杂纤维改性橡胶混凝土抗冻性,采用不同体积分数的碳纤维(CF)和玻璃纤维(GF)混杂纤维,通过力学性能试验和快速冻融试验,对其力学性能、相对动弹性模量、质量损失率进行了测定。研究表明:单掺碳纤维较单掺玻璃纤维更能减缓改性橡胶混凝土在冻融循环后的质量损失和相对动弹性模量的下降,且碳纤维和玻璃纤维两种纤维混杂后对改性橡胶混凝土的抗冻性能提升效果较单掺碳(玻璃)纤维和未掺纤维的普通改性橡胶混凝土更为明显;通过对碳-玻璃混杂纤维掺入提高改性橡胶混凝土的抗冻性能的机理进行分析,建立了抗冻耐久性评价参数和冻融损伤寿命预测模型,并对筛选出的六组配比进行相应力学性能测试,得出力学性能随所用纤维掺量的变化规律与最佳纤维配比,其规律与冻融试验结论相契合,可为寒冷地区混凝土建筑抗冻提供技术参考。

关键词:改性橡胶混凝土;碳-玻璃混杂纤维;最佳掺和比例;抗冻耐久性评价参数;力学性能

中图分类号: TU58⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)02-0101-07

Frost Damage Resistance and Durability of Carbon - Glass Hybrid Fiber Modified Rubber Concrete

SUN Jie, SUN Mingxing, FENG Chuan, WU Shuang, MA Wen

(School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430065, China)

Abstract: In order to analyze the frost resistance of carbon - glass hybrid fiber modified rubber concrete, we use different volume fractions CF and GF hybrid fibers to measure the mechanical properties, relative dynamic elastic modulus and mass loss rate through mechanical properties test and rapid freeze-thaw test. Research results are as follows. The single doped carbon fiber is the glass fiber can slow down the quality of the modified rubber concrete after freeze-thaw cycle reduced loss and relative dynamic elastic modulus, two fibers and carbon fiber and glass fiber hybrid of rubber modified concrete antifreeze performance improvement effect after a single (glass) of carbon fiber and not ordinary rubber modified doped fiber concrete is more obvious. Through the carbon mixed-glass fiber added to improve the performance of modified rubber concrete antifreeze mechanism is analyzed, established evaluation parameters of freeze-thaw durability and prediction model of freeze-thaw damage life, and the mechanical properties of the selected six groups were tested, the variation rule of mechanical properties with the fiber dosage and the optimal fiber ratio were obtained. Its rule agrees with the conclusion of freeze-thaw test. This paper can provide technical reference for concrete building frost resistance in cold area.

Keywords: modified rubber concrete; carbon - glass hybrid fiber; optimum incorporation ratio; evaluation parameters of frost resistance durability; mechanical property

我国北方地区冬季使用除冰盐清除路面积雪,冻融循环对混凝土结构的破坏,使结构大多不能达到服役寿命,对经济造成不可估量的损失并严重危

害了使用安全,因此对混凝土冻融耐久性的研究就显得尤为重要^[1-4]。国内外研究发现^[5-6],在普通混凝土中掺入橡胶粉与掺入引气剂的效果相似,使

得橡胶混凝土具有抗冻性和抗断裂韧性。吴安利等^[7]采用 NaOH 溶液对橡胶颗粒进行预处理,结果表明,经过 NaOH 预处理后的橡胶混凝土对抗复合盐冻融循环性能具有一定的改善作用,其原因在于改性橡胶颗粒的加入可以增强与混凝土基体的粘结作用,可抵抗弹性变形更大。通过以上研究我们知道改性橡胶颗粒能够通过增加混凝土的抗变形能力来降低冻融裂缝的产生。另一些学者研究发现可以通过在混凝土中掺加纤维来提高混凝土的耐久性,且不同纤维混掺效果更好;高丹盈等^[8]通过研究发现橡胶混凝土中掺入纤维能够有效的提高构件的力学性能。宁喜亮等^[9]研究发现不同纤维掺入对混凝土抗冻耐久性的影响,得出掺加纤维能够减轻混凝土的冻融损伤。潘书才等^[10]通过研究发现纤维及混杂纤维能显著提高膨胀混凝土的抗渗和抗冻性能,且混杂纤维优于单一纤维。碳纤维作为一种常见的混凝土掺入纤维,具有高强、高弹模的特点,其掺入混凝土中通过改善混凝土的微观机制,细化其孔隙结构,提高其整体性和密实度来显著改善混凝土的抗冻耐久性能^[11]。杨虹等^[12]通过分析碳纤维的掺入对混凝土力学性能的影响发现碳纤维的掺入可以细化混凝土内部的气孔结构,使其孔隙率明显降低。同样,耐碱玻璃纤维作为一种新型高延性、低弹模的纤维材料,掺入混凝土中也可以有效提高冻融后高性能混凝土的抗剥落能力^[13]。由以上研究可知碳纤维和玻璃纤维的掺入可以改善混凝土的抗冻性,但是对于如何控制这两种混杂纤维复合材料的工艺和合适的混杂比例是该材料保持优异性能的前提,其中尤为突出的便是最优的混杂纤维比例的确定。

因此,通过采用玻璃纤维(GF)和碳纤维(CF)按照不同比例混掺,改性橡胶粉以 10% 体积替代率替代细骨料的方式设计试验,采用正交配比制成混凝土标准试件,采集冻融前的力学性能,采集相应冻融次数后试件的质量损失率、相对动弹性模量,再通过引入相应评价指标进一步对数据进行分析,探究出相应规律,最后建立其二次函数损伤寿命预测模型,对我国北方地区混凝土冻融寿命进行预测,可为混凝土抗冻性研究提供实际参考。

1 原材料和试验内容

1.1 原材料

水泥:采用的水泥是由武汉华新水泥股份有限公司生产的 P. O42.5 普通硅酸盐水泥,物理力学性

能见表 1。细骨料:采用普通河砂(中砂),级配良好,性能指标表观密度为 2 600 kg/m³,堆积密度为 1 560 kg/m³,细度模数为 2.65。粗骨料:采用连续级配碎石,性能指标表观密度为 2 700 kg/m³,堆积密度为 1 620 kg/m³,级配 5 mm~20 mm。橡胶粉:采用都江堰市华益橡胶有限公司生产的 40 目橡胶粉,表观密度为 1 250 kg/m³,采用 5% NaOH 溶液(质量浓度)改性。纤维:采用短切碳纤维和耐碱玻璃纤维,各项性能指标见表 2。采用粉末状甲基纤维素作为分散剂,磷酸三丁酯作为消泡剂,采用陕西秦奋建材有限公司生产的 HPWRQ8011 聚羧酸高性能减水剂,其减水率为 26%。水选用武汉市自来水。

表 1 水泥的技术性能指标

型号	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
P. O42.5	160	210	29.7	47.7	6.4	8.7

表 2 纤维的技术性能指标

纤维种类	纤维长度/mm	直径/ μm	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	拉伸强度/MPa	弹性模量/GMP
短切碳纤维	10	7.0	1.75	3600	228
玻璃纤维	15	8.5	2.54	1700	75

1.2 试验配合比

以普通混凝土配比作为基准,依据《普通混凝土配合比设计规程》^[14](JGJ 55—2011)配制强度等级为 C40 的素混凝土。然后以 5% 的 NaOH 溶液改性后的 40 目的橡胶颗粒代替原配合比中的细骨料含量,体积替代率为 10%。具体的配合比见表 3。参考相关文献选取单掺碳纤维和玻璃纤维力学性能最优的掺量进行抗冻性能试验^[15-17]。

1.3 试验方法

混杂纤维改性橡胶混凝土的冻融循环试验以两种纤维的掺入量为基本变化数,按照预先制定的配合比来制备混凝土试件。冻融循环试验采用快冻法,根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[18](GB/T 50082—2009)中抗冻试验的要求,使用 100 mm×100 mm×400 mm 的试件,试验设备采用规格型号为 TDR-10 混凝土快速冻融试验机和 DT-16 动弹仪。每冻融循环 25 次取出试件用标准方法测定其质量损失率和相对动弹性模量。最后根据规范要求对数据进行计算和处理得到 12 组试验数据。从表 3 中随机抽出 6 组配合比开展冻融前

力学性能试验,根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》^[19](GB/T 50081—2019)测定其3种力学性能相关数据。

表3 混凝土的配合比

组号	试件编号	水泥量 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂量 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	石量 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水量 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	减水剂量 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	橡胶粉量 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	短切碳纤维掺量/%	玻璃纤维掺量/%
1	RC	359.43	517	1340.34	125.8	3.59	37.7	0.00	0.0
2	GF0.6	359.43	517	1340.34	125.8	3.59	37.7	0.00	0.6
3	CF0.24	359.43	517	1340.34	125.8	3.59	37.7	0.24	0.0
4	CF0.12 + GF0.3	359.43	517	1340.34	125.8	3.59	37.7	0.12	0.3
5	CF0.24 + GF0.3	359.43	517	1340.34	125.8	3.59	37.7	0.24	0.3
6	CF0.36 + GF0.3	359.43	517	1340.34	125.8	3.59	37.7	0.36	0.3
7	CF0.12 + GF0.6	359.43	517	1340.34	125.8	3.59	37.7	0.12	0.6
8	CF0.24 + GF0.6	359.43	517	1340.34	125.8	3.59	37.7	0.24	0.6
9	CF0.36 + GF0.6	359.43	517	1340.34	125.8	3.59	37.7	0.36	0.6
10	CF0.12 + GF0.9	359.43	517	1340.34	125.8	3.59	37.7	0.12	0.9
11	CF0.24 + GF0.9	359.43	517	1340.34	125.8	3.59	37.7	0.24	0.9
12	CF0.36 + GF0.9	359.43	517	1340.34	125.8	3.59	37.7	0.36	0.9

注:CF表示碳纤维,GF表示玻璃纤维。0,0.12,0.24,0.36,0.3,0.6,0.9表示体积率。

2 结果与讨论

2.1 部分试件不同冻融循环次数后的外观形态变化

外观形态变化
外观形态见图1。
由图1(a)中可以看出,当冻融循环次数为25次时,RC试件表面被破坏的不明显,表面有轻微的孔洞,取出试件后试件盒中有少许泥浆颗粒。当冻融循环次数为200次时,试件表面被严重冻坏,大面积的粗骨料裸露且有明显的裂缝和孔洞。对比图1(b)—图1(f)可看出,在冻融前期,试件能保持完

整,各边棱角也能保持垂直,试件盒中有脱落的少许砂浆。随着冻融循环次数的增加,到达冻融后期时,试件表面包裹的水泥砂浆剥落,碳纤维和玻璃纤维从基体中露出。从图1(d)—图1(f)可看出,由于纤维可以桥连裂缝,使得试件在被冻融破坏时,无明显孔洞和裂缝出现,粗骨料的裸露面积相比普通改性橡胶混凝土的小,试件盒底部有些许细骨料砂浆和少量分散的碳纤维和玻璃纤维,试件表面较为平整,这也证实了碳-玻璃混杂纤维的掺入有效的增强了橡胶改性混凝土的抗冻性能。

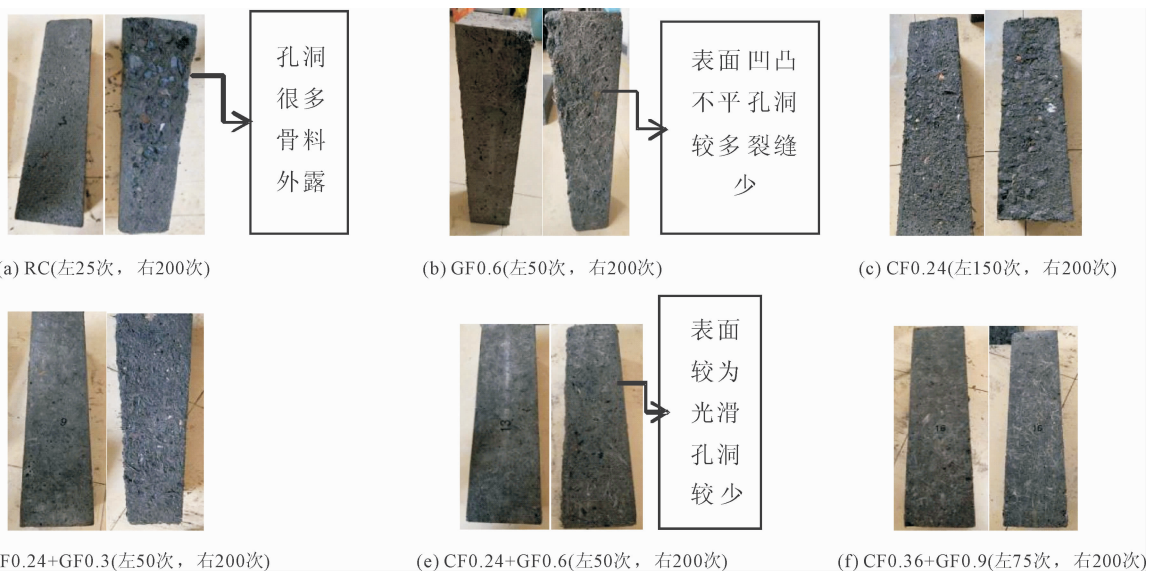


图1 部分试件在不同冻融循环次数后的外观形态图

2.2 部分试件冻融前力学性能试验分析

部分试件冻融前力学性能试验结果见图 2。

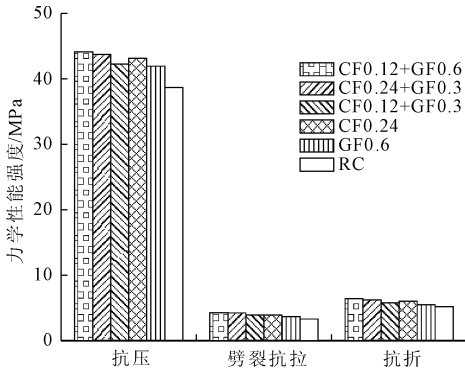


图 2 部分试件冻融前力学性能对比图

从图 2 中可以看出抗压强度表现最好的组是 CF0.12 + GF0.6, 相比 RC 提高了 14.04%, 其它几组分别相比 RC 提高了 11.51%、9.25%、11.53% 和 8.43%, 表明碳-玻璃纤维的加入可以提高改性橡胶混凝土的抗压强度。这主要是由于纤维的掺入可以细化混凝土基体内部的孔隙结构使其更加密实, 从而在受荷时能够使荷载在基体内部的传递更为均匀。CF0.24 的表现比 CF0.12 + GF0.3 更好的原因在于碳纤维的体积更小强度更高, 相同体积分数下能够更好的粘结砂浆桥连微裂缝, 抑制裂缝的开展。但前两组数据表明当 GF 的掺量达到一定比例后产生的增益效果将超过单掺 CF 纤维, 其原因在于玻璃纤维的延性更好, 当基体裂缝较大时碳纤维大多达到了极限抗拉强度, 这时玻璃纤维发挥作用, 粘结砂浆桥连较大裂缝, 抑制宏观裂缝的开展。因此控制好两种纤维的混掺比例很关键。从图 2 中可以看出劈裂抗拉强度表现最好的组是 CF0.12 + GF0.6, 所有不同纤维掺量的组相比 RC 劈裂抗拉强度分别提高了 28.92%、27.41%、18.07%、18.68% 和 10.84%, 表明碳-玻璃纤维的加入可以提高改性橡胶混凝土的劈裂抗拉强度, 其原因机理与抗压强度略有不同的地方在于 GF 纤维在基体的劈裂抗拉裂缝开展过程中发挥的裂缝桥连作用相比抗压试验更大, 因为该试验过程中产生的宏观裂缝更多, 更能发挥出 GF 纤维的优势, 能够在桥连裂缝时发挥作用占比更多。从图 2 中可以看出抗折强度表现最好的组同样是 CF0.12 + GF0.6, 所有不同纤维掺量的组相比 RC 抗折强度分别提高了 23.89%、20.04%、10.98%、16.19% 和 5.59% 表明碳-玻璃纤维的加入可以提高改性橡胶混凝土的抗折强度, 其原因在于纤维的掺入能够与砂浆粘接在一起在抗折裂缝出现时给予

桥连作用阻碍裂缝的扩张从而提高抗折强度。同时通过前三组的数据表明与劈裂抗拉试验类似的结论, GF 在劈裂抗拉与抗折试验中相比抗压试验更能充分发挥其高延性、低弹模的物理性质, 能够更好的抑制宏观裂缝的出现和开展。玻璃纤维主要负责抑制宏观裂缝的开展扩大, 通常在碳纤维达到极限拉伸强度后发挥作用, 劈裂抗拉和抗折相比抗压试验更易产生宏观裂缝, 此时 GF 的优势会稍微放大。力学性能试验结果说明一个优异配比下的碳-玻璃混杂纤维作为复合形式的材料更能在发挥作用时相互协调, 能够使其更好的发挥作用。

2.3 质量损失率与相对动弹性模量

评价混凝土冻融损伤的两个重要指标为质量损失率和相对动弹性模量。按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009) 和《纤维混凝土试验方法标准》^[20] (CECS 13—2009), 不同冻融循环次数作用时, 水冻融循环作用下各组试件的质量损失和相对动弹性模量变化分别如图 3 和图 4 所示。

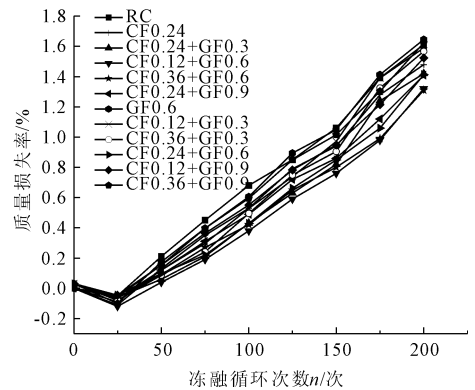


图 3 冻融循环质量损失率变化

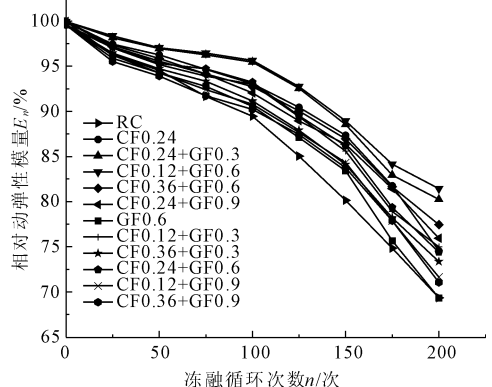


图 4 冻融循环相对动弹性模量变化

由图 3 可知, 各组试件的质量损失率均呈增长趋势。50 次冻融循环后, 单掺 0.6% 的玻璃纤维改

性橡胶混凝土和单掺 0.24% 的碳纤维改性橡胶混凝土的质量损失率较普通橡胶混凝土分别降低了 47.6% 和 38.1%;混掺碳纤维和玻璃纤维的改性橡胶混凝土的质量损失率较普通橡胶改性混凝土平均降低了 60.9%。随着冻融循环次数的增加,试件表面裂缝逐渐增多,冻融损伤不断增加,质量损失率也开始增大。150 次冻融循环后,未掺纤维的改性橡胶混凝土表面疏松、石子外露、砂浆大面积脱落,轻微触碰即成松散状态;而掺入碳纤维和玻璃纤维可有效抑制改性橡胶混凝土表面的剥蚀作用,表面无贯穿裂缝,仍然具有一定的抗压强度,试件完整性较好,与普通改性橡胶混凝土相比,碳纤维改性橡胶混凝土、玻璃纤维改性橡胶混凝土及碳-玻璃混杂纤维改性橡胶混凝土的质量损失率分别平均降低了 11.3%、13.2%、23.1%。200 次冻融循环后,相比之下碳-玻璃混杂纤维改性橡胶混凝土的质量损失率最低的 3 组为 CF0.12 + GF0.6、CF0.24 + GF0.6、CF0.36 + GF0.6,分别为 1.32%、1.25%、1.31%。掺入纤维的改性橡胶混凝土试件质量损失率较普通改性橡胶混凝土更低,且混杂纤维对降低改性橡胶混凝土质量损失率较单一纤维效果更加明显,同时结合图 1 可看出掺入碳纤维的试件孔洞较少,掺入玻璃纤维的试件裂缝较少,碳-玻璃纤维混掺的试件表面最为光滑。这是因为,碳纤维与玻璃纤维在改性橡胶混凝土基体内部粘结砂浆形成错乱分布网构骨架,且能碳纤维够细化基体内部的气孔结构粘结砂浆桥连微观裂缝,玻璃纤维能够抑制宏观裂缝的开展,能有效降低骨料以及砂浆的损失。

由图 4 可知,在冻融初期,各组纤维混凝土试件的相对动弹性模量降低速率较慢,随着冻融循环次数的增多,降低速率加快,普通改性橡胶混凝土的减小速率最快。150 次冻融循环后,普通改性橡胶混凝土、碳纤维改性橡胶混凝土、玻璃纤维改性橡胶混凝土以及碳-玻璃混杂纤维改性橡胶混凝土的相对动弹性模量平均值分别为 80.2%、87.4%、86.0%、87.4%;200 次冻融循环后,相比之下数值最高的 3 组试件相对动弹性模量由大到小的顺序为 CF0.12 + GF0.6 > CF0.24 + GF0.3 > CF0.12 + GF0.3。根据纤维混杂效应的量化分析理论^[21],这三组的纤维配比更接近于最佳纤维混杂比发挥的是正混杂效应作用,且相同体积分数下的 CF 的增益效果大于 GF,其原因在于单一碳纤维极限拉伸强度高于一玻璃纤维,而且体积更小,在基体内部分布的更为均匀能够更好的与砂浆粘接桥连微裂缝,提高混凝土

的耐久性。两种纤维拉伸强度、韧性、体积密度不同,在基体内部协同发挥作用产生一加一大于二的效果,在改性橡胶混凝土基体内部形成网构骨架,有效的抑制微裂缝的开展,提高了混凝土的弹性变形能力和密实度,从而改善了改性橡胶混凝土的抗冻性能。其中 CF0.12 + GF0.6、CF0.24 + GF0.3、CF0.12 + GF0.3 这 3 组抵抗冻融损伤效果更为显著。

2.4 混凝土冻融损伤因子

以混凝土试件的质量损失和动弹性模量变化作为冻融损伤判定因素,引入评价参数 W_1 与相对动弹性模量评价参数 W_2 ^[22] 作为两个损伤因子,见式(1)、式(2),分别从质量损失和相对动弹性模量变化两个方面来描述混凝土的冻融损伤。

$$W_1 = (M - 0.95) / 0.05 \quad (1)$$

式中: M 为相应冻融循环后试件的相对质量。 $W_1 > 1$ 时,相对质量较初始值增加; $0 < W_1 < 1$ 时,相对质量较初始值降低,未破坏; $W_1 < 0$ 时,相对质量小于 95% 即达到破坏。

$$W_2 = (E_n - 0.6) / 0.4 \quad (2)$$

式中: E_n 为相应冻融循环 n 次后试件的相对动弹性模量。 $W_2 > 1$ 时,相对动弹性模量较初始值增加; $0 < W_2 < 1$ 时,相对动弹性模量较初始值降低,未破坏; $W_2 < 0$ 时,相对动弹性模量小于 60% 时,即达到破坏。

图 5 和图 6 分别表示相对质量评价参数和相对动弹性模量评价参数。

根据图 5 与图 6 可知各组试件的冻融损伤变化规律与图 3、图 4 结论一致,CF0.12 + GF0.6 与 CF0.24 + GF0.3 这两组的数据曲线波动较小,作用效果将更好。但为了更加准确的描述改性橡胶混凝土的冻融损伤,以相对动弹性模量定义的损伤程度 D 来描述改性橡胶混凝土试件内部的损伤程度。

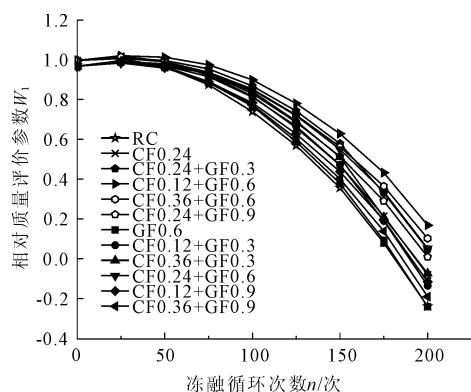


图 5 相对质量评价参数

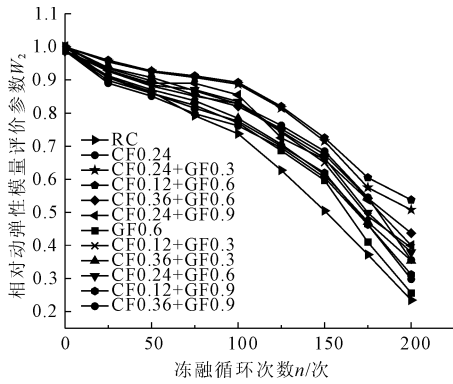


图 6 相对动弹性模量评价参数

基于相对动弹性模量的数据变化,根据混凝土损伤力学^[23-24],混凝土的冻融损伤程度 D 可以用式(3)表示:

$$D = 1 - E_n/E_0 \quad (3)$$

式中: E_n 为冻融循环 n 次后试件的动弹性模量; E_0 为试件的初始动弹性模量。

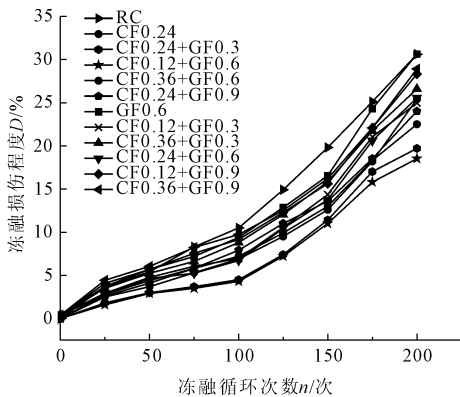


图 7 损伤程度与冻融循环次数的关系曲线

图 7 列出了混凝土损伤程度随冻融循环次数的变化曲线。由图 7 可知:冻融循环次数由 0 增至 200 次时,损伤程度的增长趋势较快,其中损伤最重的是 RC 试件,损伤最轻的是 CF0.12 + GF0.6。纤维改性橡胶混凝土试件损伤程度均小于 RC,且在抗冻性能上的优劣情况表现为碳-玻璃混杂纤维改性橡胶混凝土 > 单掺碳纤维改性橡胶混凝土 > 单掺玻璃纤维改性橡胶混凝土 > 普通改性橡胶混凝土。原因是高强、高弹模的碳纤维和用以提高裂后韧性的低弹模、高延性、高分布密度的玻璃纤维混杂产生正混杂效应,实现小尺寸碳纤维桥连微观裂缝,提高复合材料强度,大尺寸玻璃纤维限制宏观裂缝的扩展,提高复合材料的断裂韧性,使复合材料在受荷和冻融的各阶段不同结构层次上产生协同作用产生逐级阻裂和性能互补达到增强增韧的双重目标从而减轻

了橡胶改性混凝土的冻融损伤程度;由于单一碳纤维极限拉伸强度高于单一玻璃纤维,因此单掺碳纤维对改性橡胶混凝土的抗冻效果优于单掺玻璃纤维。

2.5 基于冻融损伤因子的寿命预测模型

为了更加准确描述混凝土的冻融损伤,把 W_1 、 W_2 作为两种冻融损伤因子进行拟合分析构建出碳-玻璃混杂纤维改性橡胶混凝土的二次函数的冻融损伤寿命预测模型^[25] 如式(4)所示。

$$Y = an^2 + bn + c \quad (4)$$

式中: a 、 b 、 c 为拟合参数; n 为冻融次数。

将质量损失率、相对动弹性模量的冻融损伤程度分别代入式(4)使用 Origin2021 软件进行拟合,处理拟合结果,得到衰减损伤模型见表 4、表 5。

表 4 质量损失率冻融循环损伤程度二次函数衰减系数

类型	a	b	c	R^2
RC	0.0000139	0.00574	-0.08412	0.98619
GF0.6	0.0000200	0.00393	-0.08879	0.98415
CF0.24	0.0000192	0.00426	-0.09909	0.98103
CF0.12 + GF0.3	0.0000288	0.00199	-0.07012	0.98744
CF0.24 + GF0.3	0.0000313	0.00141	-0.05739	0.98723
CF0.36 + GF0.3	0.0000295	0.00165	-0.07552	0.98474
CF0.12 + GF0.6	0.0000272	0.00150	-0.07588	0.98483
CF0.24 + GF0.6	0.0000257	0.00137	-0.05521	0.98957
CF0.36 + GF0.6	0.0000208	0.00263	-0.06115	0.98756
CF0.12 + GF0.9	0.0000194	0.00321	-0.06933	0.98772
CF0.24 + GF0.9	0.0000200	0.00344	-0.00786	0.98517
CF0.36 + GF0.9	0.0000190	0.00386	-0.09242	0.98109

表 5 相对动弹性模量冻融循环损伤程度二次函数衰减系数

类型	a	b	c	R^2
RC	-0.0004371	-0.06059	99.10609	0.99522
GF0.6	-0.0005370	-0.01387	98.67212	0.98270
CF0.24	-0.0005820	-0.02680	98.64060	0.97810
CF0.12 + GF0.3	-0.0004554	-0.01078	99.00788	0.98098
CF0.24 + GF0.3	-0.0005010	-0.01614	99.12667	0.97758
CF0.36 + GF0.3	-0.0004047	-0.02660	99.02606	0.98964
CF0.12 + GF0.6	-0.0004514	-0.01770	99.26667	0.98107
CF0.24 + GF0.6	-0.0005124	-0.01855	98.91333	0.98222
CF0.36 + GF0.6	-0.0003958	-0.02683	99.02424	0.98752
CF0.12 + GF0.9	-0.0004445	-0.02103	98.61152	0.97899
CF0.24 + GF0.9	-0.0004043	-0.03027	98.97697	0.98851
CF0.36 + GF0.9	-0.0004204	-0.02658	98.50303	0.97566

从表 4、表 5 中可以看出,拟合系数 R^2 最低为

0.975 66,大部分拟合系数均在 0.980 00 以上,表明建立的二次函数冻融损伤寿命预测模型具有很高的精度,与试验结果有较好的拟合程度,进一步说明了上述结论的准确性,对碳-玻璃混杂纤维改性橡胶混凝土的冻融循环损伤程度能够起到很好的预测效果,利用此函数模型对其冻融性能进行耐久性寿命预测,计算其相对动弹性模量降为初始的 50% (即损伤度为 0.5) 对应的冻融循环次数。根据中国西北、华北、东北地区每年的平均冻融次数以及试验冻融换算方法计算出三个地区在 CF0.12 + GF0.6 组合适用情况下耐久性寿命分别为 31.2 a、44.6 a、31.7 a,能够达到预期冻融耐久性使用寿命。

3 结 论

(1) 纤维对橡胶改性混凝土在冻融循环初期的质量损失率和相对动弹性模量损失的影响较小,冻融循环 200 次后,纤维的作用明显增加,碳纤维对减少改性橡胶混凝土质量损失和相对动弹性模量劣化的优势优于玻璃纤维。对随机抽出 6 组纤维配比的试件冻融前力学性能进行分析,得出与冻融试验相契合的结论,探究出了性能最优的碳-玻璃纤维掺和比例,总结出了两种纤维在混凝土基体内部的协同工作机理。

(2) 通过对比分析碳-玻璃纤维在不同体积率配比下对橡胶改性混凝土对抗冻性能的提升,综合试验结果得出:碳-玻璃混杂纤维改性橡胶混凝土的质量损失率更小、相对动弹性模量更大,即混掺碳-玻璃纤维的改性橡胶混凝土的抗冻性优于单掺碳(玻璃)纤维改性橡胶混凝土的抗冻性;其中 CF0.12 + GF0.6 组合的碳-玻璃混杂纤维改性橡胶混凝土的抗冻融耐久性最优,200 次冻融循环后质量损失率为 1.32%;相对动弹性模量为 81.5%;冻融损伤程度为 18.5%。

(3) 基于试验得到的质量损失率和相对动弹性模量相关损伤因子建立了冻融循环损伤寿命预测模型,根据数据拟合的二次函数衰减损伤模型,其拟合系数大部分均在 0.980 00 以上,可更加准确地反应碳-玻璃纤维改性橡胶混凝土冻融损伤变化规律;针对我国西北、华北、东北地区气候条件下的冻融损伤做了寿命预测,可为寒冷地区混凝土建筑抗冻防冻提供技术参考。

参考文献:

[1] 孙刚锋, 缙彦强. 冻融循环及硫酸盐侵蚀对混凝土耐

久性的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(6):140-144.

[2] 王海龙, 张 克, 额日德木. 改性橡胶对轻骨料混凝土改性作用分析[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(5):124-130.

[3] 张正亚, 严 勇. 超贫碾压混凝土力学及抗冻性影响因素分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(1):171-174.

[4] 赵小明, 王新科, 乔宏霞, 等. PVA 纤维混凝土冻融循环损伤规律及模型研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2022(1):53-57.

[5] Sofi A. Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete-a review [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2018, 9(4):2691-2700.

[6] Fantilli A P, Bernardino C. Mechanical performances of mortar prisms and concrete slabs incorporating rubber aggregates [J]. Mechanics Research Communications, 2018, 92:118-123.

[7] 吴安利, 高 峰, 郝负洪, 等. 改性橡胶混凝土在复合盐冻融循环-风沙冲蚀作用下损伤研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(11):3609-3619.

[8] 高丹盈, 陈嘉伟, 王一泓. 高温中纤维纳米改性橡胶混凝土力学性能试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(S1):65-72.

[9] 宁喜亮, 王万平, 郝 帅, 等. 不同纤维对混凝土在多重因素作用下抗冻耐久性的影响[J]. 工业建筑, 2020, 50(10):122-128.

[10] 潘书才, 岳 翎, 赵成喜, 等. 纤维种类对混凝土抗冻性能的影响[J]. 混凝土, 2021(7):75-77.

[11] 孟博旭, 许金余, 彭 光. 纳米碳纤维增强混凝土抗冻性能试验[J]. 复合材料学报, 2019, 36(10):2458-2468.

[12] 杨 虹, 王海龙, 王红珊, 等. 碳纤维轻骨料混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(11):108-112.

[13] 朱德举, 李新亮, 李安令. 经纬向纤维体积分数对耐碱玻璃纤维织物增强混凝土拉伸力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2022, 1(16):1-11.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

[15] Murugan R B, Natarajan C. Investigation on the use of waste tyre crumb rubber concrete paving blocks [J]. Computers and Concrete, 2017, 20(3):311-318.

[16] 王志杰, 徐 成, 徐君祥, 等. 混杂纤维混凝土耐久性及其混杂效应研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(11):53-56.

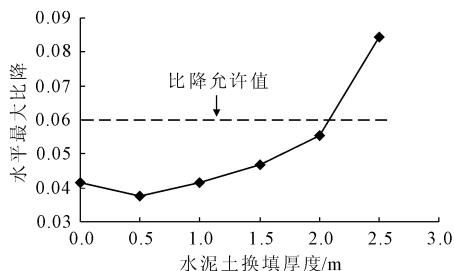


图 13 水平比降随水泥土换填厚度变化曲线

5 结 论

通过三维有限元渗流分析方法,对比分析了涡河移址新建蒙城枢纽工程节制闸闸基水泥土换填不同厚度的效果,从截渗效果和经济性考虑,提出水泥土的换填深度建议范围为 0.5 m ~ 1.5 m。

参考文献:

- [1] Dipti R B, Umesh C S, Suresh R D. Durability and shrinkage studies of cement stabilised granular lateritic soils[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019,20(12):1451-1462.
- [2] 王寅泽,章丽莎,张金红. 水泥土工程性能研究综述[J]. 低温建筑技术,2020(8):14-18,23.
- [3] 郭杰. 水泥土换填在淮水北调小龙沟口闸地基处理中的应用[J]. 建筑工程技术与设计,2020(14):2533.
- [4] 郭鹏飞. 水泥土换填在南水北调中线基础处理中的应用[J]. 人民黄河,2021,43(S2):195-196.

- [5] 李聪磊. 水泥土在涵洞式水闸基础防渗中的应用分析[J]. 广东水利水电,2021(6):26-29.
- [6] 高鹏飞,胡建林,叶勇,等. 不同土质水泥土力学特性的影响因素研究[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(3):131-136.
- [7] 胡建林,杨鑫,崔乃夫,等. 玄武岩纤维对水泥土力学性能的影响效应研究[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(6):138-142.
- [8] 冯卡,赵民. 公路路基水泥改良土强度与液性指数的关系研究[J]. 中外公路,2020,40(6):248-252.
- [9] 田旭,李娜,姜屏,等. 外掺材料对滨海水泥土压缩特性的影响研究[J]. 三峡大学学报,2021,43(5):80-84.
- [10] 焦德才,杨俊杰,董猛荣,等. 水泥土的长期渗透特性研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2021,51(2):112-118.
- [11] 任健华,陈峰. 水泥土抗渗性能的研究进展[J]. 福建建材,2018(1):25-26.
- [12] 陶高梁,吴小康,杨秀华,等. 水泥土的孔隙分布及其对渗透性的影响[J]. 工程地质学报,2018,26(5):1243-1249.
- [13] 童煜霄,魏松,陈清,等. 不同方法测定水泥土渗透系数的研究[J]. 硅酸盐通报,2021,40(2):407-414.
- [14] 刘建飞,任红侠. 某海堤与水闸连接段粉砂质地基处理方式研究[J]. 人民黄河,2020,42(1):138-144.
- [15] 颜红勤,陈学东,沈颖,等. 粉砂土地基水闸悬挂式防渗墙渗流分析[J]. 治淮,2020(6):18-20.

(上接第 107 页)

- [17] 张伟,张士萍,张建业. 混杂纤维抑制混凝土冻融损伤规律的试验研究[J]. 混凝土,2019(10):76-79.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T 50082—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [20] 中国工程建设标准化协会. 纤维混凝土试验方法标准:CECS 13—2009[S]. 北京:中国计划出版社,2010.
- [21] 李黎,曹明莉,冯嘉琪. 纤维增强水泥基复合材料的纤维混杂效应研究进展[J]. 应用基础与工程科学

- 学报,2018,26(4):843-853.
- [22] 乔宏霞,李奥阳,李江川,等. 基于 Wiener 退化过程的纤维混凝土耐久性研究[J]. 工业建筑,2021,51(6):165-169.
- [23] 赵燕茹,范晓奇,王利强,等. 不同冻融介质作用下混凝土力学性能衰减模型[J]. 复合材料学报,2017,34(2):463-470.
- [24] 张广泰,刘诗拓,耿天娇,等. 基于 Weibull 分布的冻融循环下纤维混凝土损伤模型[J]. 科学技术与工程,2020,20(29):12078-12084.
- [25] 赵小明,李奥阳,乔宏霞,等. 纤维混凝土抗冻性能及损伤劣化模型研究[J]. 硅酸盐通报,2020,39(10):3196-3202.