

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.02.017

冻融损伤对再生混凝土耐久性及其与钢筋粘结性能分析

王晨霞¹, 钱建勋¹, 王浩², 徐阔³, 曹芙波¹

(1. 内蒙古科技大学 建筑与土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 恒大地产集团有限公司, 内蒙古 包头 014010; 3. 包头青山宾馆, 内蒙古 包头 014010)

摘要:制作掺入引气剂和未掺入引气剂的 100% 粗骨料取代率的再生混凝土 RC1 和 RC2 两组试件以及掺入引气剂和未掺入引气剂的普通混凝土 NC1 和 NC2 两组试件, 并分别对经过不同次数冻融循环试件的抗压强度、质量损失率、动弹性模量损失率进行研究。结果表明, 冻融后各组试件的抗压强度、质量损失率及动弹性模量损失率均降低, 对于添加引气剂的 NC1 和 RC1 两组试件损失较小, 其中 RC1 组试件在 200 次冻融后抗压强度损失接近 40%, 质量损失率达 0.5%, 动弹性模量损失率 38.5%。100% 取代率并加入引气剂的 ZRC 组试件冻融后进行中心拔出实验, 发生劈裂破坏和钢筋拔出破坏 2 种形式。再生粗骨料混凝土与钢筋的极限粘结应力均随冻融次数的增加而降低, 200 次冻融后极限粘结应力下降 33.5, 荷载滑移曲线既有上升段也有下降段。

关键词:再生混凝土; 冻融循环; 粘结; 滑移

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2016)02-131-09

Effect of the freeze-thaw damage on the durability of recycled concrete and the bonding performance of steel

WANG Chenxia¹, QIAN Jianxun¹, WANG Hao², XU Kuo³, CAO Fubo¹

(1. Institute of Architecture and Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, P.R.China; 2. Evergrande Real Estate Group Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia, P.R.China; 3. Baotou Qingshan Hotel, Baotou 014010, Inner Mongolia, P.R.China)

Abstract: Four groups of concrete test-pieces were made. The first two group test-pieces, RC1 and RC2, were made from recycled 100% coarse aggregate concrete with and without air-entraining agent respectively. The second two group test-pieces, NC1 and NC2, were made from common concrete with and without air-entraining agent respectively. Then, we studied the compressive strength, the mass loss rate and the dynamic elastic modulus loss rate of the test-pieces after different times of freeze-thaw cycles. It is shown that the compressive strength, the mass loss rate and the dynamic elastic modulus loss rate of all groups reduce after freeze-thaw. While these parameters of NC1 and RC1 which contain air-entraining agent decrease less. After 200 times of freeze-thaw cycles, the loss of the compressive strength of RC1 is close to 40%, the mass loss rate is 0.5%, and the loss rate of the dynamic elastic modulus is 38.5%. Another group

收稿日期: 2015-10-03

基金项目: 内蒙古自然科学基金(2014MS0551, 2015MS0552); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY159); 包头市科技计划项目(2014X1009)。

Supported by Inner Mongolia Natural Science Foundation of China(2014MS0551, 2015MS0552), the Inner Mongolia Autonomous Region of Institutions of Higher Learning Scientific Research Project(NJZY159) and Baotou Science and Technology Plan Projects(2014X1009).

作者简介: 王晨霞(1977-), 女, 博士, 副教授, 主要从事再生混凝土耐久性研究, (E-mail)15949488601@139.com。

of test-pieces, ZRC, which has the same components as RC1, were used for center drawing tests. And it's found that there are two forms of damage, splitting failure and steel pull-out damage, after freeze-thaw cycles. The ultimate bond stress between recycled coarse aggregate concrete and reinforcing bar reduces as the times of freeze-thaw cycles increase. After 200 times of freeze-thaw cycles, the ultimate bond stress reduced 33.5%. There is a rising section and a descending section in the load-slip curve.

Keywords: recycled concrete; freeze-thaw cycle; bond; slip

据不完全统计,我国每年产生 3 000~4 000 万吨的废弃混凝土^[1],而这些废弃混凝土绝大部分被运往城市近郊露天堆放或直接填埋处理。处理方式不仅占用宝贵的土地资源而且对环境造成极大的污染,若将废弃混凝土循环再生,对整个社会尤其建筑行业的可持续发展具有重大意义。

耐久性混凝土的重要评判指标,抗冻性对混凝土的耐久性影响甚大,因此对再生混凝土抗冻性的研究就尤为重要。Malhotrah^[2]和崔正龙^[3]先后对不同水灰比的再生混凝土进行冻融循环试验,结果表明,再生混凝土的抗冻性能并不低于普通混凝土,在有些情况下甚至优于普通混凝土。Salem 等^[4]对再生混凝土抗冻性的研究表明饱和再生混凝土的抗冻性较差。而 Oliveira^[5]通过对不同饱和度的再生混凝土进行的冻融试验表明,再生粗骨料的水饱和度对再生混凝土的抗冻性影响很大,降低再生粗骨料的水饱和度可以使再生混凝土的抗冻性有所提高。张雷顺^[6]试验表明通过降低再生混凝土的水灰比可以很好地提高再生混凝土的抗冻性能。李叶^[7]对不同粗骨料取代率的再生混凝土研究发现,取代率越高,再生混凝土的流动性越差。王博^[8]对再生混凝土的研究给出了荷载—滑移曲线的特点并提出了合适的本构关系模型。文中以强度为 C30 的再生混凝土为研究对象,经一定的冻融循环后对其力学性能、质量损失及动弹性模量进行研究分析,对一定冻融循环后再生骨料混凝土与钢筋粘结性能进行试验分析,为以后再生骨料混凝土的进一步推广应用提供指导。

1 试验概况

1.1 试验原材料

再生粗骨料:原始强度 C30 废弃混凝土经破碎筛分得 5~31.5 mm 连续级配;天然骨料:5~31.5 mm 连续级配;水泥:草原牌 P.O42.5 水泥;砂:天然河沙,中砂,细度模数为 2.6,含泥量 1.2%;外加剂:包头安顺建材公司生产高性能引气减水剂;钢筋:直径 16 mm;水:普通自来水。

1.2 试验方法及各试验组混凝土配合比

试件均在 TDRI 型混凝土自动快速冻融实验设备上上进行冻融。该设备采用水冻水融的方法,把试件放入橡胶皮桶内,并加水浸泡 4 d 后放入设备内,使用防冻液做循环介质,周期性的把试件周围的水冻结融化。对经过 0、25、50、100、125、150、175 及 200 次冻融循环的试件,进行质量损失、动弹性模量损失与抗压强度进行测定。预埋钢筋中心拔出试件,锚固长度为 5d(80 mm),并对经过不同冻融循环后的试件,通过中心拔出试验测定再生粗骨料混凝土与钢筋的粘结滑移性能。依据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55—2011)并结合工程实际运用,再生骨料混凝土设计强度为 C30,试验组混凝土配合比见表 1。

表 1 混凝土配合比

Table 1 Proportions of concrete mix

编号	水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	碎石/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	再生粗骨料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	引气剂/kg	含气量/%
NC1	380	675	1 013	0	141	1.4	5.1
NC2	380	675	1 013	0	141	0	1.2
RC1	380	675	0	1 013	141	1.4	5.5
RC2	380	675	0	1013	141	0	1.5
ZRC1-8	380	675	0	1 013	141	1.4	5.5

注:试件成型 24 h 后拆模并在标准条件下养护,24 d 后取出在水中浸泡 4 d,进行冻融实验。其中 NC1-RC2 共 4 组试件做抗压性能、动弹性模量和质量损失实验,ZRC 组试件做中心拔出实验。为保证试验数据的准确性,每组试件均做 3 个相同的实验。

1.3 中心拔出试验的加载装置

中心拔出试验采用单端拔出的加载方法,在 600 kN 万能试验机上进行,如图 1 所示。为保证试验的顺利进行,将试件放在一个特定的夹具内。夹具由 4 根钢辊及上、下底板组成,钢辊上下端部为螺丝杆,并使用螺母与上下底板连接,便于试件的装卸,为避免受拉钢筋偏斜而引起中心拔出试件基体的破坏,夹具的底板使用球形钢铰。试验装置如图 1(b)所示。

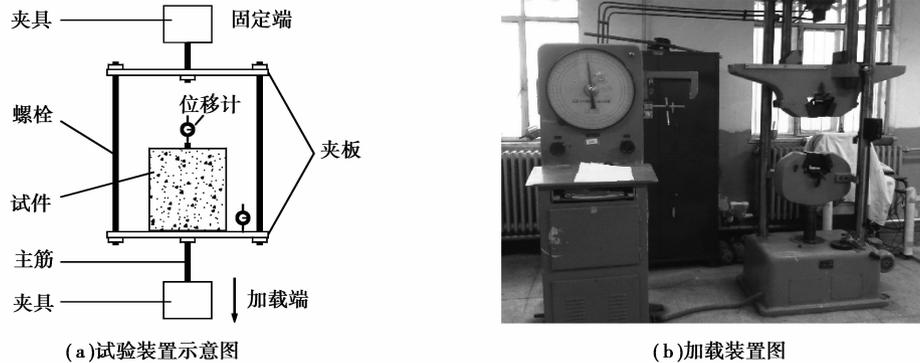


图 1 中心拔出试验装置

Fig.1 Center drawing test apparatus

中心拔出试验操作如下:

1) 自由端和加载端位移值。在中心拔出试件的自由端和加载端分别布置 1 个位移传感器,测量自由端和加载端的相对滑移值,其中自由端位移传感器量程为 10 mm,加载端位移传感器量程为 30 mm。位移传感器用特制的夹子固定于钢板端部,探头固定于试件表面的铁片上,并将位移传感器与 DH3816 数据采集系统相连,每隔 3 s 采集 1 次数据。

2) 试验荷载。中心拔出试验的试验荷载直接由试验机读出并人工记录,在 DH3816 采集滑移值的同时记录试验机上荷载读数。中心拔出试验采用控制荷载的加载方式,加载速率为 0.1 kN/s。中心拔出试件发生劈裂或钢筋被拔出破坏时停止试验。

2 试验结果

2.1 不同冻融循环次数后试件表现状态

经过 0、50、100、150、200 次冻融循环后的试件表现状态如图 2 所示。

由图 2 可知:经过不同冻融循环次数的试件表现状态相差较大,0 次冻融的试件整体表面光滑平整,水泥浆包裹密实。50 次冻融循环后,NC1、NC2 和 RC1 组试件变化不明显,试件表面混凝土有小部分脱落现象并出现较少的微小孔洞。RC2 组表面水泥浆脱落较为严重,试件表面变粗糙,平整度低于其他 3 组。经过 100 次冻融循环后,NC1 组试件表面变粗糙,出现密集的小孔,冻融破坏导致表面混凝土剥落量增加。NC2 和 RC1 组试块表面出现小部分粗骨料裸露且粗糙度大于 NC1 组,RC2 组试块表面混凝土剥落量最大且粗骨料裸露较多。150 次冻融循环后,NC1 组试块表面混凝土剥落量进一步增加,表面小孔数量增多面积增大,未出现粗骨料裸露现象。NC2 和 RC1 组试块表面混凝土剥落量增大,且粗骨料裸露量增多。RC2 组试块受冻融损伤最为严重。200 次冻融循环后,NC1 组表面出现碎石裸露且均匀分布,骨料与砂浆结合紧密;NC2 组粗骨料裸露程度大于 NC1 组并有部分碎石脱落;RC1 组粗骨料裸露量大于 NC2 组,混凝土剥落较 NC2 组严重,破坏处砂浆呈渣状;RC2 组混凝土完全破坏,两端出现明显裂缝。所有试件表面混凝土剥落量均随冻融次数的增加而增加。

2.2 冻融循环后抗压试件的破坏形态

进行抗压试验的 3 组试件,受压过程中破坏形态类似,文中取第 1 组破坏形态分析,如图 3 所示。

再生混凝土与普通混凝土相比,经过冻融循环后,破坏形态有所不同,初始受压过程中,未产生任何裂缝,随着荷载增加,试块内应力增大,两侧垂直方向开始出现呈对称分布的裂缝,由图 3(a)可以清晰地看出两侧垂直方向裂缝发展情况;荷载继续增加,裂缝向两边继续发展并上下边贯通,形成倒“八”字型,如图 3(b)所

示;明显裂缝出现后逐渐向试件内部发展使混凝土表层外鼓、剥落,如图 3(c)所示;最终破坏成正倒相连的四角锥型,与普通混凝土破坏形态有所不同。与其他学者^[9]的试验结论相似。

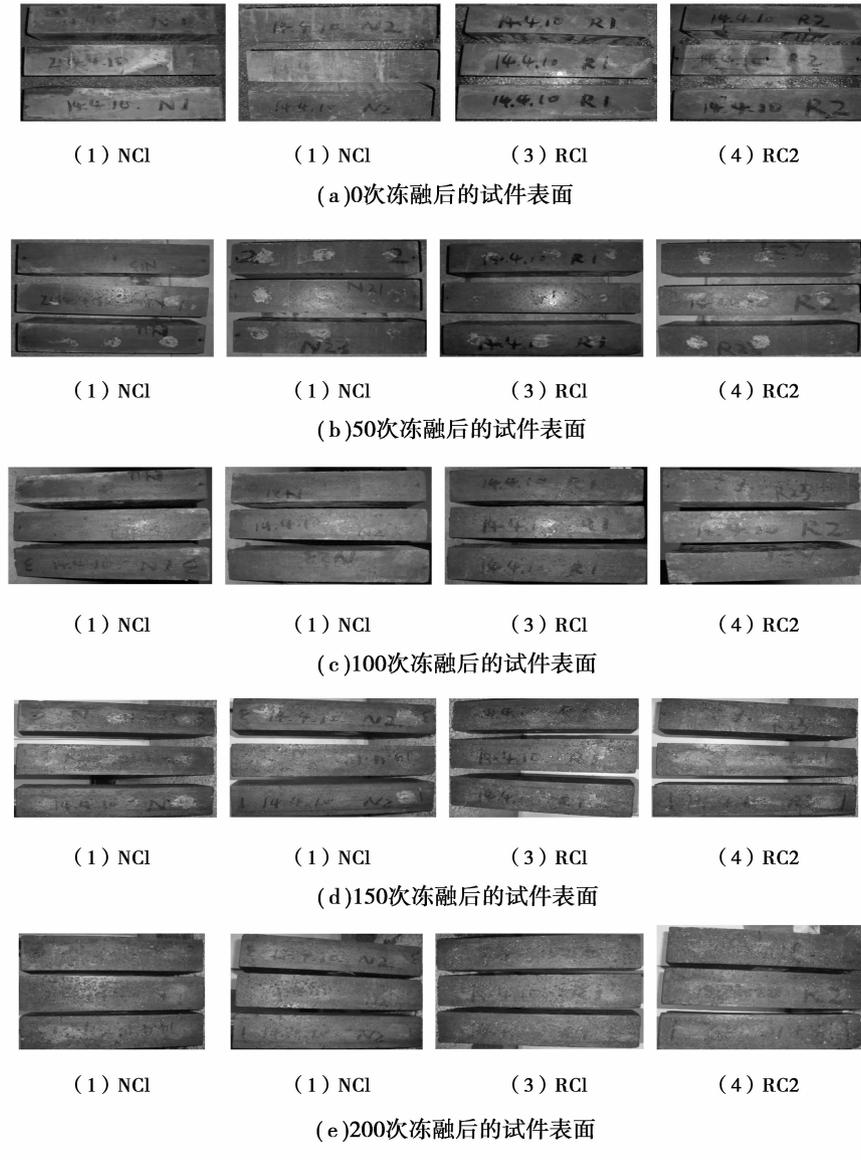


图 2 不同冻融循环试件表面状态

Fig.2 Different freezing and thawing cycle specimen surface state

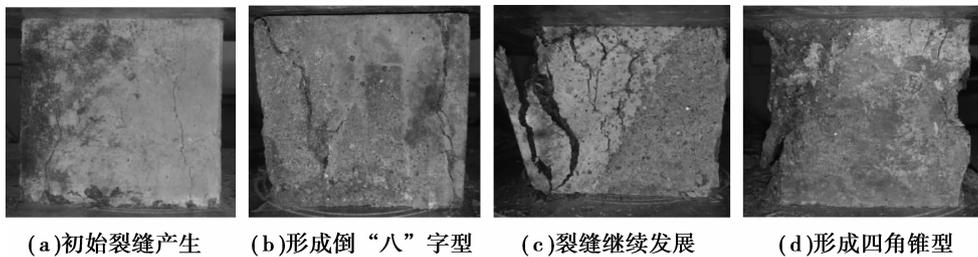


图 3 加载过程中试件的破坏形态

Fig.3 The destruction of the specimen in the process of loading

2.3 冻融循环后再生混凝土与钢筋粘结性能

通过中心拔出试验测定再生混凝土与钢筋粘结性能并观察加载过程中钢筋与混凝土接触面发生劈裂破坏的形态。中心拔出试件发生劈裂破坏和拔出破坏,破坏形态如图 4 所示。

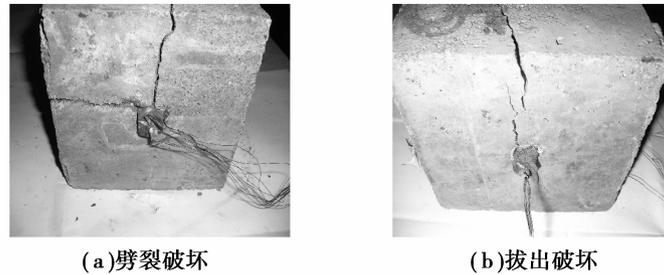


图 4 试件破坏形态

Fig.4 Specimen failure pattern

由图 4(a)可以看出:再生混凝土在加载过程中发生纵向劈裂破坏,钢筋与混凝土粘结面之间未发生明显位移现象,由于试件横向约束较小且混凝土脆性大,导致试件在加载过程中突然发生破坏,试件直接破裂为较大块,钢筋完好。由图 4(b)可以看出:在钢筋被拔出之前试件自由端处的钢筋发生较大滑移,钢筋被拔出的同时试件自由端处的混凝土表面出现微小裂缝。

2.4 各冻融循环下的极限粘结应力

利用下式进行极限粘结应力计算,计算结果见表 2。

$$\tau_u = \frac{P_u}{\pi d l_a}, \quad (1)$$

式中: τ_u 为钢筋与混凝土间的极限粘结应力,MPa; P_u 为最大拔出荷载值,kN; l_a 为锚固长度,mm。

表 2 极限粘结应力

Table 2 Ultimate bond stress

编 号	钢筋直径/mm	冻融次数	锚固长度/mm	极限荷载/kN	极限粘结应力/MPa
ZRC1	16	0	80	107.4	24.7
ZRC2	16	25	80	89.5	22.27
ZRC3	16	50	80	88.5	22.02
ZRC4	16	75	80	86.5	21.52
ZRC5	16	100	80	86.3	21.47
ZRC6	16	125	80	81.9	20.38
ZRC7	16	150	80	79.4	19.75
ZRC8	16	175	80	76.3	18.98
ZRC9	16	200	80	71.4	17.76

由表 2 可以看出,试件随着冻融循环次数增加,再生混凝土极限荷载和极限粘结应力不断减小;根据表 2 得出的极限粘结应力与冻融循环曲线图如图 5 所示。

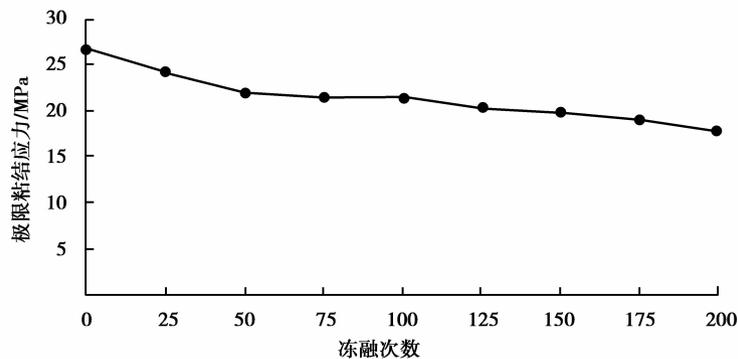


图 5 极限粘结应力与冻融循环曲线图

Fig.5 Ultimate bond stress and the freeze-thaw cycle

由图 5 可知,随着冻融循环次数增加,试件极限粘结应力不断下降,呈线性关系。200 次冻融循环后极限粘结应力下降 33.5%。再生混凝土冻融破坏是物理变化过程,由于水结冰体积膨胀,再生混凝土内部空隙内的水溶液中存在着盐离子,温度降低后,大孔中溶液先结冰,与小孔中产生浓度差,小孔中的水向大孔迁移,引起静水压力和渗透压力的共同作用,内部产生复杂的应力作用。混凝土中产生的拉应力超过混凝土抗拉强度,引起混凝土内部开裂,形成微裂缝。按照现有冻融破坏理论,冻融是加载和卸载的一个过程,相当于作用于微元的反复荷载,每次冻融循环都会对其产生损伤,这种作用周而复始,使微裂缝不断扩大,混凝土内部损伤累积,在宏观表现为力学性能和耐久性能的下降。

随着冻融循环次数增加,冻融损伤导致粘结界面过渡区剪切裂缝扩展和新剪切裂缝的产生,表现为化学胶着力降低或消失,再生混凝土与钢筋粘结界面摩擦力减小,钢筋与混凝土机械咬合力下降,极限荷载和粘结应力也同时下降。

3 试验结果与分析

经过不同次数的冻融循环,再生混凝土试件的质量损失率曲线、动弹性模量损失率曲线、抗压强度损失率曲线如图 6、图 7、图 8 所示。

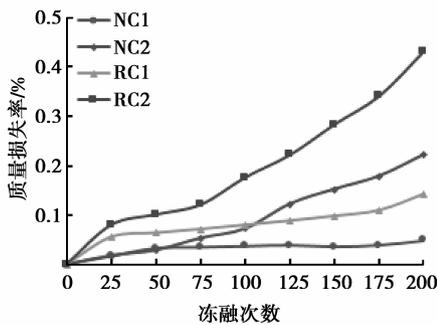


图 6 质量损失率曲线

Fig.6 Loss rate of mass loss curve

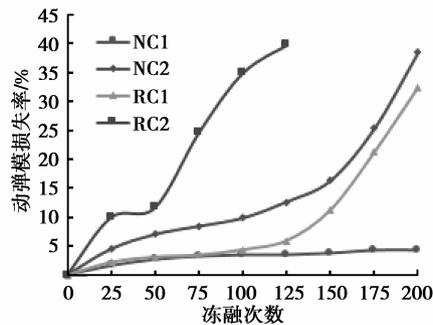


图 7 动弹性模量损失率曲线

Fig.7 The loss rate of dynamic elastic modulus

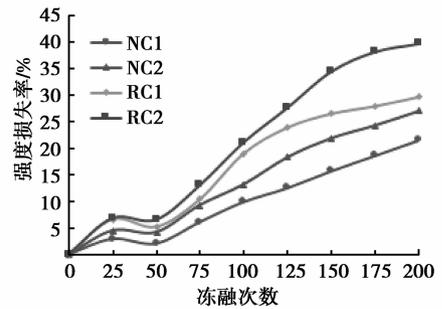


图 8 强度损失率曲线

Fig.8 Strength loss rate curve

由图 6 可以看出:普通混凝土与再生混凝土质量损失率都随冻融次数的增加而增加,当冻融次数达 25 次后,再生混凝土质量损失率均大于普通混凝土。在 75 次冻融循环后未掺入引气剂的再生混凝土和普通混凝土质量损失率均比掺入引起剂的试验组大。再生混凝土孔隙率大、裂缝多使其表面吸水率较大,当冻融次数较少时,导致其表面混凝土剥落量稍大。当冻融循环次数大于 75 次时,随着冻融次数的增加,RC1 和 NC1 两组试件的质量损失率接近,RC2 和 NC2 两组试件质量损失率变化较大。冻融次数大于 150 时各组试件的质量损失率差别较为明显,RC1 和 NC1 两组试件的质量损失率损失率小于 RC2 和 NC2 两组试件。总体来看,加入引起剂的再生混凝土和普通混凝土的抗冻性能均有较大的提高;各组试件的质量损失率均在要求范围之内。

由图 7 可以看出:普通混凝土与再生混凝土动弹性模量损失率均随冻融次数的增加而增加。当冻融次数低于 25 次时,动弹性模量损失均较小,冻融循环次数大于 50 次时,各试验组混凝土动弹性模量损失率随冻融循环次数的增加而明显增大,尤其是未掺入引气剂的实验组,动弹性模量损失最快。冻融次数低于 150 次时,再生混凝土动弹性模量损失率高于普通混凝土,冻融次数高于 150 次时,再生混凝土动弹性模量损失率与普通混凝土相比变化不大,掺入引气剂的试验组弹性模量损失率低于未掺入引气剂的试验组。

由图 8 可以看出:普通混凝土与再生混凝土抗压强度都随冻融次数的增加而不断降低。冻融次数低于 25 次时,未掺入引气剂的再生混凝土抗压强度下降较快,冻融次数大于 50 次时,抗压强度损失率相差不大,冻融次数大于 150 次时,各组试件的抗压强度损失率较大,再生混凝土抗压强度损失稍大于普通混凝土。

结合质量损失率、动弹性模量损失率、抗压强度损失率变化曲线可以看出:未掺入引气剂的混凝土与掺入适量引气剂的混凝土对照组相比,性能损失变化均较大,试件表面破坏严重。而掺入引气剂可以使再生混凝土抗冻性能有较为明显的提高,但由于再生骨料的自身缺陷使再生混凝土与普通混凝土相比在相同冻融条件下性能稍有降低。Nagatania^[10]发现再生混凝土动弹性模量损失率和质量损失率均较普通混凝土增大

较多,与实验的研究结果相吻合,表明其抗冻性能比普通混凝土差,因为再生骨料吸水率较高。

4 荷载—滑移曲线

4.1 劈裂破坏荷载—滑移曲线

不同次数冻融循环后,ZRC1-ZRC8 发生劈裂破坏,荷载滑移曲线如图 9 所示。

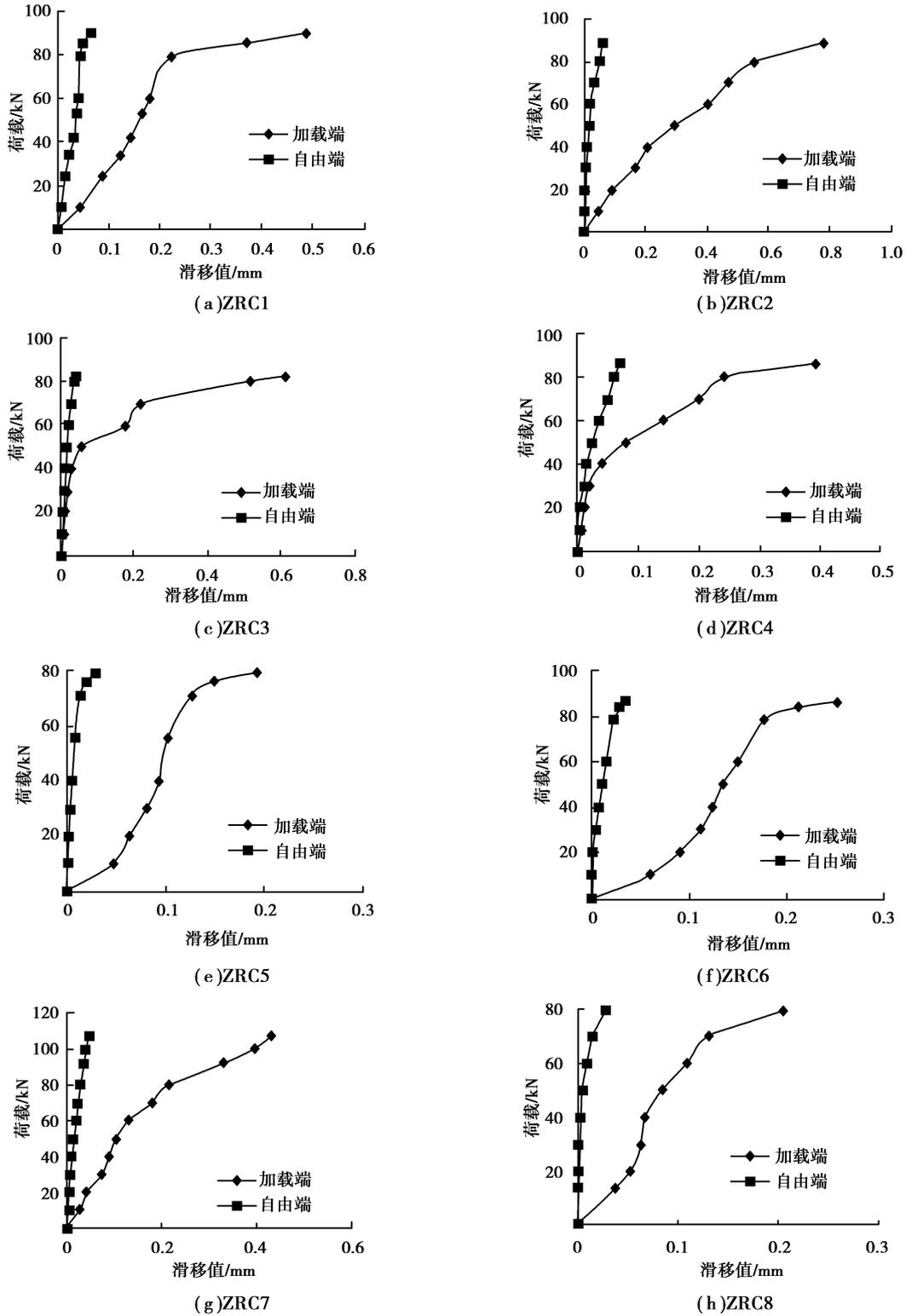


图 9 劈裂破坏的荷载—滑移曲线

Fig.9 Fracturing load-slip curve

由图 9 可以看出,随着荷载的增加,加载端和自由端的滑移值不断增加,随着冻融次数增加,极限荷载不断减小荷载达到极限值后,曲线接近平缓。加载初期混凝土与钢筋胶着力使钢筋未滑动。随着荷载增大,胶着力逐渐失效,钢筋开始滑动。加载初期钢筋未滑动之前取决于化学胶着力,随着荷载增大,胶着力失效后钢筋开始滑移,凸肋对再生混凝土的挤压作用和钢筋与周围混凝土摩擦力组成滑动阻力;凸肋对混凝土产生斜向挤压力,相当于楔的作用,挤压力径向分力使外围混凝土环向受拉;再生混凝土逐渐被挤压成粉末并密实嵌固在横肋间;斜向挤压力作用方向不断改变,当粉末物与钢筋横肋夹角大于 40° 时,形成新的滑移面;钢筋凸肋对混凝土的挤压作用使内部混凝土被压碎,同时外部混凝土也会产生斜裂缝或径向裂缝;裂缝发展使钢筋产生新的更大的相对滑移,荷载—滑移曲线也会相应增大;随着荷载继续增大,裂缝由内向外表面发展,滑移值继续增大,凸肋与再生混凝土挤压力和摩擦力增大,荷载较位移增加缓慢,荷载—滑移曲线斜率减小;随着挤压力增大,混凝土横向拉应变增大;当裂缝贯通到试件表面时,达到极限荷载,加载端出现纵向劈裂裂缝,向自由端迅速发展,发生突然的脆性破坏^[11]。由图 9 可知,荷载—滑移曲线只有上升段,而没有下降段,该现象是由于在制作试件时没有设置箍筋,使得试件在加载过程中,随荷载的增加,在达到钢筋滑移极限荷载前,试件发生劈裂破坏,故而得到的荷载—滑移曲线只有上升段,没有下降段。

由图 9 可知,未冻融的 ZRC1 组与其余 7 组经过不同冻融循环次数后的荷载—滑移曲线对比可知,曲线均随冻融次数的增加向横轴靠近。此现象的原因是冻融对再生混凝土试件造成损伤,随冻融循环次数的增加,这种损伤越严重,使再生混凝土与钢筋在很小的荷载下就发生较大的滑移。

4.2 拔出破坏荷载—滑移曲线

经过 200 次冻融循环后,ZRC9 发生拔出破坏,荷载—滑移曲线如图 10 所示。可以看出:微滑阶段时胶着力逐渐失效,加载端处的钢筋发生滑移,因加载初期荷载未传递到自由端,自由端未产生滑移。随荷载增大,达到滑移阶段,胶着力完全失效,自由端处的钢筋滑移增大,粘结力由钢筋肋与混凝土之间的摩擦力及钢筋肋与混凝土斜向挤压力组成。荷载持续增加进入裂缝阶段时,再生混凝土内部薄弱部位产生斜裂缝与径向裂缝,加载端位移突然出现明显增长,自由端滑移增大,两曲线近似同步增加,达到极限荷载,下降段内荷载缓慢下降,钢筋滑移速度加快。残余段时咬合作用下降,粘结力主要为钢筋与混凝土间摩擦阻力,外荷载比较稳定,滑移曲线下降平缓,加载端和自由端的滑移值曲线则继续增大,最后趋于同步,此荷载—滑移曲线的上升段与文献[12]的结果类似。

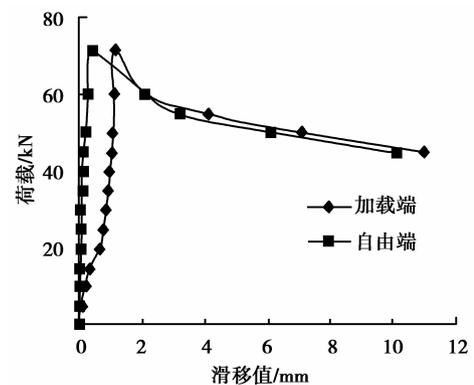


图 10 拔出破坏荷载—滑移曲线(ZRC9)
Fig.10 The load-slip curve of pull-out damage(ZRC9)

5 结 论

1) 掺入引气剂可明显提高再生混凝土的抗冻性能,降低再生混凝土在不同次数冻融循环后质量损失,但单独由质量损失率为评定再生混凝土冻融破坏的方法是不合适的。

2) 再生混凝土与普通混凝土经过冻融循环后的动弹性模量损失率变化一致,随着冻融循环次数的增加,再生混凝土动弹性模量的损失率逐渐变大,动弹性模量的损失率可以作为评定再生混凝土的冻融破坏指标。

3) 再生混凝土与普通混凝土的抗压强度均随冻融循环次数的增加逐渐降低,经过相同次数的冻融破坏,再生混凝土的抗压强度始终稍低于普通混凝土抗压强度。

4) ZRC1~ZRC8 组试件发生劈裂破坏,ZRC9 组发生拔出破坏,使得冻融后再生混凝土与钢筋的粘结滑移曲线只有 ZRC9 组试件既有上升段又有下降段,其余均只存在上升段,再生粗骨料混凝土与钢筋粘结性能说明再生混凝土可以运用到钢筋混凝土实际工程中。

参考文献:

- [1] 张喜金,张建华.再生混凝土和孔结构的研究[J].建筑材料学报,2006(4):142-147.
ZHANG Xijin, ZHANG Jianhua. Recycled concrete and pore structure research[J]. Journal of Building Materials, 2006(4): 142-147. (in Chinese)
- [2] Malhotra V M. Use of recycled concrete as a new aggregate[M]. Canada: Canada Center for Mineral and Energy Technology, Ottawa, 1976.
- [3] 崔正龙,大芳贺,袁喜.再生粗骨料混凝土耐久性能的试验研究[J].硅酸盐通报,2007(6):1107-1111.
CUI Zhenglong, Big fang He Yixi. The performance of recycled coarse aggregate concrete durability experimental study[J]. Portland, 2007(6): 1107-1111. (in Chinese)
- [4] Salem R M, Burdette EG. Resistance to freezing and thawing of recycled aggregate concrete[J]. ACI Materials Journal, 2003(3): 216-221.
- [5] Oliveira M B, Vazquez E. The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete[J]. Waste Management, 1996, 16(1): 113-117.
- [6] 张雷顺,王娟,黄秋凤,等.再生混凝土抗冻耐久性试验研究[J].工业建筑,2005(9):64-66.
ZHANG Leishun, WANG Juan, HUANG Qiufeng, et al. Recycled concrete frost resistance durability test study[J]. Industrial Construction, 2005(9): 64-66. (in Chinese)
- [7] 李叶.再生粗骨料混凝土的性能实验研究[D].重庆:重庆大学,2009.
LI Ye. The performance of recycled coarse aggregate concrete experiment research[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese)
- [8] 王博,白国良,代慧娟,等.再生混凝土与钢筋的粘结滑移性能的试验研究及力学分析[J].工程力学,2013(10):54-64.
WANG Bo, BAI Guoliang, DAI Huijuan, et al. The bond-slip performance of recycled concrete and reinforcing steel bar of experimental research and mechanics analysis [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013(10): 54-64. (in Chinese)
- [9] Xiao J, Li J, Zhang C. Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete under Uniaxial Loading[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(6): 1187-1194.
- [10] 张燕.冻融循环和氯盐腐蚀作用下钢筋与混凝土粘结锚固性能的试验研究[D].扬州:扬州大学,2007.
ZHANG yan. Under the action of freeze-thaw cycle and chlorine salt corrosion of reinforcement and concrete bonding anchorage performance test research[D]. Yangzhou: University of Yangzhou, 2007. (in Chinese)
- [11] Ardavan Y B, Lawrence C B. The effect of shear strength on load capacity of FRP strengthened beams with recycled concrete aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2016, 102: 956-971.
- [12] 杨海峰,邓志恒,李雪良,等.再生混凝土-钢筋黏结滑移本构关系研究[J].建筑材料学报,2013(3):429-436.
YANG Haifeng, DENG Zhiheng, LI Xueliang, et al. Recycled concrete-reinforced bond slip constitutive relation research[J]. Journal of Building Materials, 2013(3): 429-436. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)