

冻融循环后钢筋与再生混凝土黏结性能 梁式试验有限元分析

曹芙波¹, 卢志明¹, 王晨霞¹, 邵剑涛²

(1. 内蒙古科技大学土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 中交一公局第三工程有限公司, 北京 101102)

摘要 目的 研究钢筋与再生混凝土梁式试件在不同冻融循环次数下的黏结性能, 为再生混凝土结构的设计与使用提供借鉴. 方法 基于有限元软件 ABAQUS 中的接触法, 建立以再生混凝土冻融损伤变量为参数的冻融损伤模型, 以实际钢筋与再生混凝土黏结滑移梁式试验为基础, 扩大试验参数范围, 对冻融循环后的再生混凝土梁式试件进行黏结滑移数值模拟分析. 结果 使用接触法模拟钢筋与再生混凝土黏结滑移具有一定的可行性, 数值模型结果与试验结果基本吻合, 各模拟曲线与试验曲线整体趋势基本相似; 在扩大参数范围后的模拟中, 极限荷载随着冻融次数的增加而降低, 冻融次数每增加 50 次, 试件极限荷载下降约 7%. 结论 再生混凝土在同一强度等级下, 随着冻融循环次数的增加, 极限荷载逐渐降低, 冻融损伤逐渐增大, 强度越低, 冻融损伤越严重; 当冻融循环次数与测试钢筋直径一定时, 极限黏结荷载随钢筋锚固长度的增大而增大.

关键词 再生混凝土; 冻融循环; 黏结滑移; 梁式试验; 有限元模拟

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Finite Element Analysis of Bond Behavior between Steel Bars and Recycled Concrete after Freeze-Thaw Cycles in the Beam-Type Test

CAO Fubo¹, LU Zhiming¹, WANG Chenxia¹, SHAO Jiantao²

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China, 014010; 2. The Third Engineering Co. Ltd. of the First Highway Engineering Bureau of CCCC, Beijing, China, 101102)

Abstract: In order to study the bond behavior between steel bars and recycled concrete beam-type specimens under the different freeze-thaw cycles, and provide the reference for the design and use of the recycled concrete structures, this paper established the freeze-thaw damage variable model based on the actual bond-slip test of steel bars and recycled concrete beams by using the contact method in the finite element software ABAQUS to perform the numerical simulation analysis with the expanded range of test parameter. The results showed that the proposed method could simulate

收稿日期: 2019-02-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51868061); 内蒙古自然科学基金项目(2016MS0547)

作者简介: 曹芙波(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事组合结构及再生混凝土方面研究.

the bond-slip behavior of steel bars and recycled concrete. The results of the numerical model were basically consistent with the test results. The overall trend of each simulation curve is basically similar to the actual test curve. In the expanded parameter ranges simulation, the ultimate load decreases with the increase of the number of freeze-thaw cycles. For every 50 times of freeze-thaw cycles, the ultimate load is decreased about 7%. The damage of recycled concrete is gradually increased with the increase of freeze-thaw cycles, while the ultimate load is gradually decreased. The lower intensity level of the recycled concrete, the more serious of the damage. When the freeze-thaw cycles and the diameter of the steel bars are constant, the ultimate bond load increases with the increase of the anchorage length of the steel bars.

Key words: recycled concrete; freeze-thaw cycles; bond-slip; beam-type test; finite element simulation

随着建筑业高速发展,导致建筑材料中砂石骨料的需求量日益增大,同时老旧建筑拆除以及自然灾害损毁产生了大量建筑垃圾^[1].将建筑废弃混凝土通过破碎、筛分、清洗等工序加工制成再生集料,部分或全部替代天然集料配置而形成的再生混凝土^[2],不仅能够解决废弃混凝土如何处置的问题,同时还能够减少对天然骨料的开采,符合国家建筑资源可持续利用的政策,在我国具有很好的应用前景^[3].

钢筋与再生混凝土黏结性能及耐久性的研究是再生混凝土结构设计与推广的基础.国内外学者对冻融循环作用下钢筋与再生混凝土的黏结性能进行了大量研究^[4-9].孟祥鑫^[10]以不同再生粗骨料取代率为参数,研究了钢筋与再生混凝土间黏结性能随冻融循环次数的变化规律,并建立了黏结应力位置函数.卢晓梅^[11]通过对不同直径的钢筋与再生混凝土在冻融循环后进行拉拔试验,得到黏结强度随钢筋直径的增大而降低的结论.曹芙波等^[12-13]在100%再生粗骨料取代率下通过中心拉拔试验以不同钢筋直径、锚固长度及保护层厚度为参数,在不同冻融循环次数下的黏结性能进行了研究,并从微观角度分析了再生混凝土冻融破坏的原因,发现黏结强度随保护层厚度的增大呈线性增大,随相对锚固长度的增大而减小.曹芙波等^[14]通过9组试件的梁式试验,研究在不同冻融循环次数、混凝土类型、再生混凝土强度等级、

锚固长度、钢筋直径下的冻融损伤后钢筋与再生混凝土间的黏结滑移性能.

钢筋与混凝土黏结性能的研究方法,主要有试验研究法与有限元分析法.与试验研究法相比,有限元分析法可以克服试验法中试验周期较长、参数变化有限等困难^[15].目前,有关钢筋混凝土黏结滑移的有限元分析主要是在钢筋与混凝土界面采用接触法^[16]或在钢筋混凝土之间插入黏结单元^[17]进行分析.采用接触法时,虽计算结果不易于收敛,但计算结果的宏观表现为其黏结滑移的本构关系;当采用插入黏结单元时,力的传导容易收敛,但插入的黏结单元依赖于试验实测的黏结滑移本构关系.

基于此,笔者以文献[14]中试验为基础,选取冻融循环次数、再生混凝土强度等级、钢筋直径及锚固长度为参数,利用ABAQUS有限元软件,采用接触法,对冻融循环后的再生混凝土与钢筋梁式试验的黏结性能进行数值模拟分析,建立以再生混凝土冻融循环后的抗压强度损失量为参数的冻融损伤模型,并扩大参数范围,使模型具有通用性.

1 建立有限元分析模型

1.1 试件尺寸及加载方式

梁式试件由两个尺寸150 mm×150 mm×400 mm的半梁组成,如图1所示.两半梁之间用长度100 mm可拆卸的钢铰进行连接.钢铰可以在很好的限制其水平位移的同时保

证半梁在垂直方向上能够自由转动. 试验加载装置如图 2 所示. 试验梁一端为固定铰支座, 另一端为滚动铰支座, 梁上加载点位置设置刚性垫片, 以防止混凝土局部压坏.

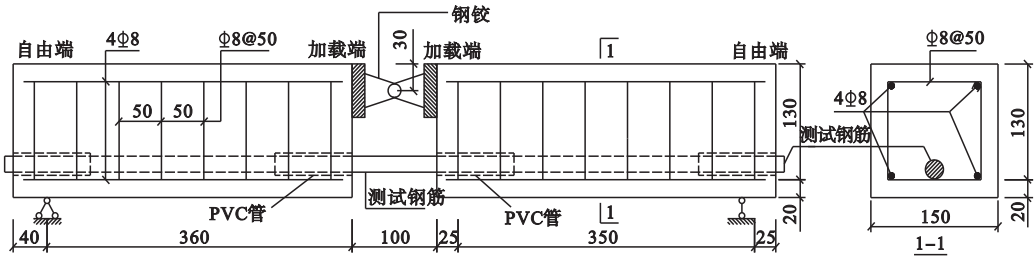
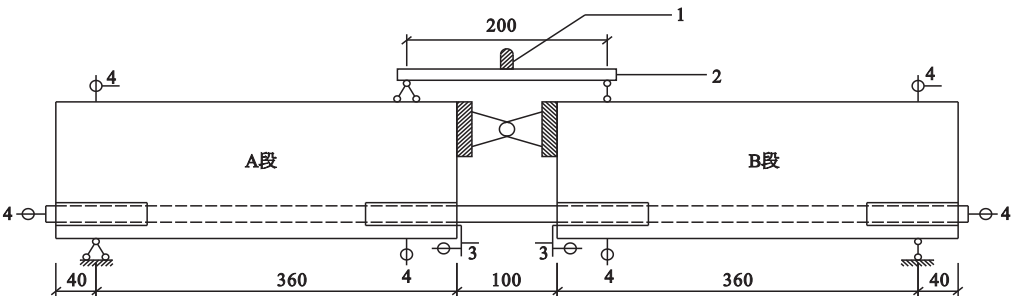


图 1 梁式试件几何尺寸及构造
Fig. 1 Dimensions and details of specimens



注: 1. 千斤顶和压力传感器; 2. 加载分配梁; 3. 测试钢筋加载端滑移量装置; 4. 百分表。
图 2 加载装置
Fig. 2 Loading device

1.2 建立再生混凝土单元

在有限元计算中, 由于减缩积分较完全积分的计算精度高且计算时间短. 因此, 笔者对再生混凝土选用线性缩减的 8 节点六面体三维实体单元 C3D8R. 在单元中, 各节点拥有三个自由度, 且每个自由度方向的位移均能承受沿此方向的拉压力, 故 C3D8R 单元具有塑性变形的能力, 能够较好的模拟出再生混凝土单元的受力特点.

根据文献[18]中建议的混凝土单轴受压、受拉本构关系来建立再生混凝土本构关系. 选用《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)中的材料塑性损伤模型来模拟再生混凝土在塑性阶段发生应变, 满足材料在荷载作用下的刚度退化的要求, 同时符合材料真实的工作状态. 再生混凝土材料属性设置参数如下: 膨胀角 15 度, 流动偏角 0.1, 双轴受压与单轴受压极限强度比为 1.16, 拉伸子午线和压缩子午线上的第二应

力不变量之比 K 为 0.667^[19], 黏滞系数 0.005 (为保证黏滞系数不影响计算结果的收敛性). 试验值再生混凝土的力学性能参数见表 1, 其中 n 为冻融循环次数.

表 1 再生混凝土的材料属性

Table 1 Mechanical properties of recycled concrete					
强度等级	n /次	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/ 10^4 MPa	泊松比
C20	0	18.47	1.91	2.25	0.20
C20	50	14.36	1.62	2.03	0.20
C20	100	10.94	1.36	1.79	0.20
C30	0	26.37	2.41	2.53	0.20
C30	50	25.00	2.32	2.49	0.20
C30	100	21.36	2.10	2.37	0.20
C30	150	19.38	1.97	2.29	0.20

1.3 钢筋单元

在非线性有限元分析中, 钢筋的性质对于构件性能有着至关重要的影响. 因此, 在建

立模型时将钢筋设置为软钢,不考虑其在应力-应变关系中硬化部分的影响,简化为理想的弹塑性材料.同时,为了使试验模型更有通用性,将测试钢筋直径取值范围扩大到 14~20 mm.在选择钢筋单元时,考虑到三维

桁架比二维桁架更适合模拟刚度较大的构件.因此,纵筋和箍筋形成的钢筋骨架采用 T3D2 单元,测试钢筋采用 8 节点六面体缩减积分单元 C3D8R.钢筋材料属性如表 2 所示.

表 2 钢筋的材料属性

Table 2 Mechanical properties of steel bars

钢筋类型	直径/mm	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	弹性模量/ 10^5 MPa	泊松比	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
HRB400	14	558	404	2.01	0.3	7 850
HRB400	16	558	404	2.01	0.3	7 850
HRB400	18	558	404	2.01	0.3	7 850
HRB400	20	558	404	2.01	0.3	7 850
HRB335	8	455	335	2.00	0.3	7 850

1.4 接触法

使用 ABAQUS 模拟钢筋再生混凝土黏结滑移时,常用的方法有:建立非线性弹簧单元 Spring2、接触法、插入粘结单元或者 Umat (用户子程序).但建立非线性弹簧单元 Spring2 只能通过修改 *.inp 文件进行添加,过程繁琐,工作量大,容易出错.而大部分工程问题都会涉及两个或多个部件之间的接触.当两个物体接触时,垂直于接触面的力作用在两个物体上.如果在接触面之间存在摩擦,接触面会产生剪力以阻止相对运动(滑动).

钢筋与再生混凝土之间的黏结作用也可视为一种剪切力的作用,作用力沿锚固长度分布.在接触法中,罚函数摩擦模型允许接触面有“弹性滑移”,适用于大多数的接触问题,且计算速度快,易收敛.因此,笔者选用接触算法来模拟钢筋与再生混凝土之间的黏结滑移.

1.5 模型建立

各试件建模过程相似,现以其中的一个模型的建立为例进行说明.在建立模型后对整个梁式试件进行分析求解时,由于中间钢铰的材料属性等原因,会导致计算结果不收敛,梁式试件模型如图 3(a) 所示.而试验梁是对称结构,同时荷载及受力也对称.因此,

取一半进行分析.具体建模流程如下:

(1)建立再生混凝土单元.以保护层厚度、钢筋直径、黏结(锚固)长度定义各结点位置,建立 C3D8R 单元,如图 3(b) 所示.

(2)建立钢筋单元.根据试验梁尺寸图,在相应的钢筋位置设置钢筋结点,用 T3D2 单元依次建立架立筋和箍筋,用 C3D8R 单元建立测试钢筋,如图 3(c) 所示.

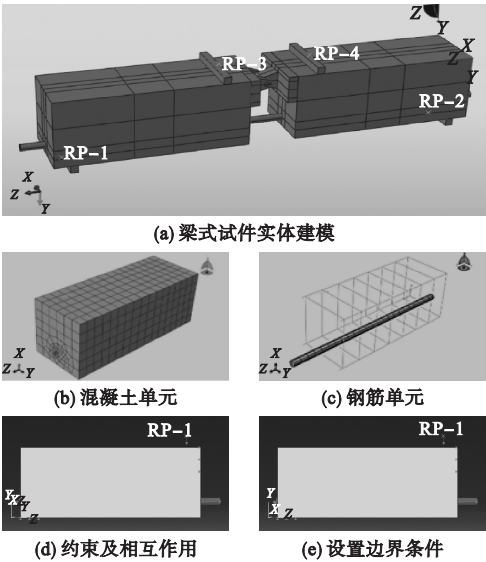


图 3 有限元计算模型

Fig. 3 Finite element calculation model

(3)对模型进行组装并设置相互作用及约束.其中,在钢筋与再生混凝土黏结区段内

设置接触,摩擦系数为 0.2,摩擦公式采用“罚函数摩擦模型”,如图 3(d) 所示。

(4) 设置荷载及边界条件,在支座处、钢铰处、钢筋处限制位移,如图 3(e) 所示。

(5) 在有限元求解过程中,当采用荷载控制的方法时,在弹性阶段是有效的,但当结构进入塑性阶段时,计算不易于收敛。故采用位移控制加载并使用增量迭代法进行非线性方程组求解。

2 再生混凝土冻融损伤模型

再生混凝土在经历冻融循环时,混凝土内部会反复遭受冻膨胀压力和渗透压力的联合作用,导致内部微裂缝不断产生和扩展,使再生混凝土的性能逐渐劣化,属于疲劳损伤累积的过程。因此,在建立冻融损伤模型的时候可引用混凝土疲劳损伤的相关理论来进行分析,根据文献[20]的混凝土材料疲劳寿命公式建立损伤模型:

$$S = \frac{\sigma_{\max}}{f_t} = 1 - \beta(1 - R) \lg N. \tag{1}$$

式中: S 为应力水平; f_t 为抗拉强度; σ_{\max} 、 σ_{\min} 分别为材料内部的最大应力、最小应力; β 为材料参数; R 为应力比($\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$); N 为疲劳寿命。

$$S = 1 - \beta \lg N. \tag{2}$$

由式(2)可知,在相同应力水平 S 下,若材料参数 β 越大,则冻融疲劳寿命 N 越短。因此,可将参数 β 作为评价再生混凝土抗冻能力的指标。在相同的冻融循环条件下 β 越小,则再生混凝土的抵抗冻融破坏能力越强,冻融疲劳寿命越长。

定义损伤变量 $D(n)$ 为实际应力比 $S'(n)$ 与初始应力比 S_0 的相对差值:

$$D(n) = \frac{S'(n) - S_0}{S'(n)}. \tag{3}$$

对于适用于疲劳寿命方程 $S = 1 - \beta \lg N$ 的再生混凝土试件,当在初始应力水平 S_0 作用下时,冻融循环寿命为 N 。当冻融循环 n 次

后,其剩余寿命为 $(N - n)$ 。此时再生混凝土所承受的实际应力比 $S'(n)$ 与疲劳寿命方程中 $(N - n)$ 相对应的应力比相同,即:

$$S'(n) = 1 - \beta \lg (N - n). \tag{4}$$

根据式(3)中的定义,可得再生混凝土的冻融疲劳损伤方程:

$$D(n) = 1 - \frac{S_0}{1 - \beta \lg (N - n)} = 1 - \frac{1}{1 - \frac{\beta}{S_0} \lg \left(1 - \frac{n}{N} \right)}, \quad 0 \leq n \leq N - 1. \tag{5}$$

由于式(5)中含有未知的材料参数 β ,因此需要将试验数据与该模型进行非线性拟合,采用相关系数 R^2 评估方法,得出材料参数的非线性表达式。

根据未冻融的再生混凝土抗压强度 P_0 及冻融 n 次后的再生混凝土抗压强度 P_n ,选用抗压强度损失率 D_n 的试验数据作为冻融损伤模型规律验算值, $D_n = 1 - P_n/P_0$,建立再生混凝土材料参数 β 与冻融次数 n 的关系式:

$$\beta = a + b \exp(n/c). \tag{6}$$

根据式(5)和式(6)对表 1 中的再生混凝土的抗压强度进行回归分析,得到不同强度再生混凝土材料参数 β ,见表 3。此时 β 为再生混凝土的抗压强度损失量。

表 3 材料参数 β 的回归系数

Table 3 Regression coefficient of β				
强度等级	a	b	c	R^2
C20	16.299	-16.332	-165.261	0.992
C30	-19.759	19.540	467.760	0.975

将表 3 中各强度等级下再生混凝土回归系数 a 、 b 、 c 及 n 分别代入式(6),可得材料参数 β 与 n 的变化关系图,如图 4 所示。

将式(6)代入式(5)得到损伤变量 $D(n)$ 的表达式:

$$D(n) = 1 - \frac{1}{1 - \frac{a + b \exp(n/c)}{S_0} \lg \left(1 - \frac{n}{N} \right)}, \quad 0 \leq n \leq N - 1. \tag{7}$$

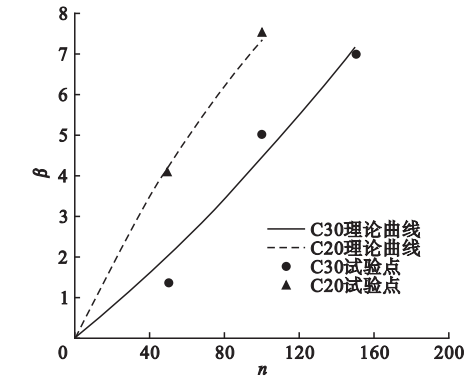


图4 材料参数 β 与 n 的关系

Fig. 4 Relationship between β and n

将 n 代入式(7),得到再生混凝土损伤变量 $D(n)$ 随冻融循环次数 n 变化趋势图,如图5所示.

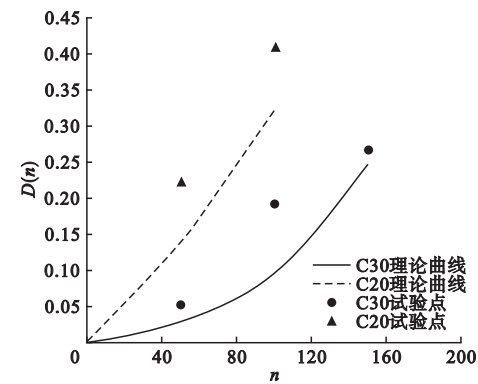


图5 损伤变量与冻融循环次数关系

Fig. 5 Relationship between damage variable and the freeze-thaw cycles

由上述分析可知,再生混凝土在同一强度等级下,随着冻融循环次数的增加,冻融损伤逐渐增大,强度等级越低,损伤越严重.通过拟合得到的理论曲线与试验数值相接近.

3 有限元结果分析

3.1 再生混凝土应力分析

再生混凝土表面的应力分布如图6所示.半梁模型在加载过程中,随着荷载的增加,梁的应力分部出现不均匀现象,在钢铰处发生应力集中.

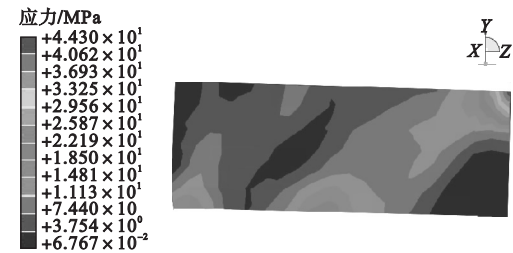


图6 再生混凝土表面应力分布

Fig. 6 Surface stress distribution of recycled concrete

3.2 荷载-自由端滑移值

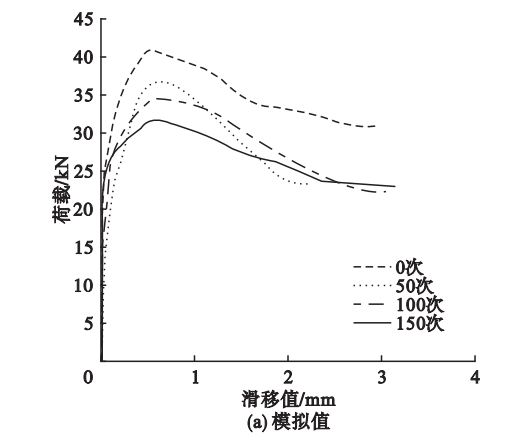
3.2.1 冻融循环次数

选取测试钢筋直径16 mm,锚固长度80 mm,再生混凝土强度等级C30,冻融循环次数分别为0、50、100、150次的模拟数据与文献[8]中的试验数据进行对比分析.极限荷载对比见表4,试验值与模拟值荷载-自由端滑移值曲线如图7所示,模拟值平均黏结应力-平均滑移值曲线如图8所示.

表4 不同循环次数下极限荷载对比

Table 4 The ultimate loads with different freeze-thaw cycles

n /次	极限荷载/kN	
	试验值	模拟值
0	41.35	40.81
50	36.78	37.12
100	32.41	34.53
150	27.95	31.61



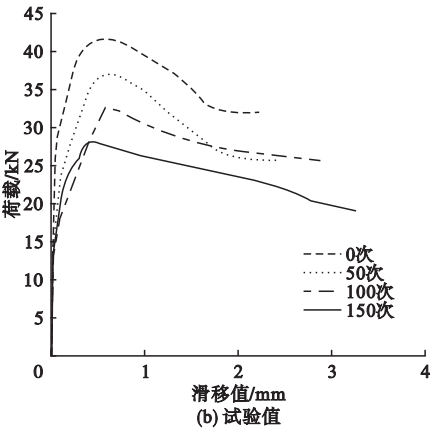


图7 荷载-自由端滑移值

Fig.7 Free end load-slip curves of the specimens

由图7可知,试件随着冻融次数变化的试验值与模拟值荷载-自由端滑移曲线整体变化趋势相似,且冻融循环次数每增加50次,试件极限荷载大约下降8%.在同等荷载下的自由端滑移量随着冻融循环次数增加逐渐增大.其原因是由于再生混凝土在反复遭受冻融循环时,试件内部空隙的游离水经过不断的凝固、融化,游离水的体积不断地变大缩小,对周围的再生混凝土反复的产生挤压力,导致周围的再生混凝土逐渐损害,使再生混凝土强度下降,削弱了钢筋与再生混凝土间的黏结作用.

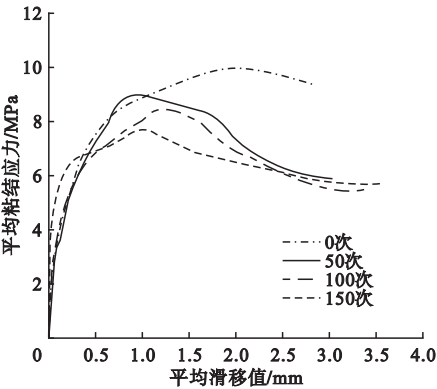


图8 平均黏结应力-平均滑移值

Fig.8 Average bonding stress and average slip curves

由图8可知,在冻融0~100次时,每增加50次冻融循环,平均黏结应力下降约10%左右.在冻融次数达到150次时,曲线逐渐向冻融循环100次逼近.这是由于冻融

150次时,试件表面再生混凝土出现严重脱落,在进行加载时,试件产生挠度较大,使得钢筋与再生混凝土之间的摩擦力增大,荷载下降量相比100次前的较少,从而导致黏结应力出现增大的现象.

3.2.2 锚固长度

选取测试钢筋直径 d 为18 mm,锚固长度90 mm ($5d$), 144 mm ($8d$), 180 mm ($10d$),再生混凝土强度等级C30,冻融循环次数为50次,分析不同锚固长度对黏结性能的影响.极限荷载见表5,试验值与模拟值的荷载-自由端滑移值曲线和模拟值平均黏结应力-平均滑移值曲线见图9、图10.

表5 不同锚固长度下极限荷载

锚固长度/mm	极限荷载/kN	
	试验值	模拟值
90(5d)	41.30	40.32
144(8d)	43.12	44.16
180(10d)	52.99	54.07

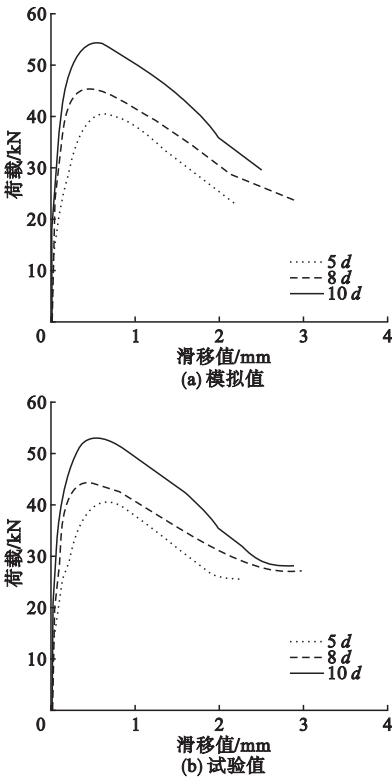


图9 荷载-自由端滑移值

Fig.9 Free end load-slip curves

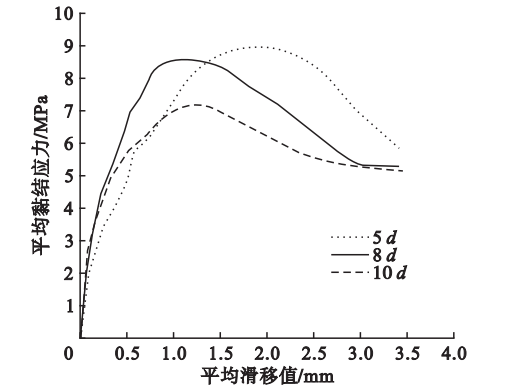


图 10 平均黏结应力 - 平均滑移值

Fig. 10 Average bonding stress and average slip curves

由图 9、图 10 可知:由锚固长度为变量的试验值与模拟值荷载 - 自由端滑移曲线整体变化趋势基本相似. 不同锚固长度钢筋发生拔出破坏时的平均黏结应力相差不大. 增大钢筋锚固长度,其初始滑移荷载、极限黏结荷载、自由端的滑移值也增大. 在进行模拟试验时,当锚固长度由 $5d$ 增大到 $8d$ 、 $10d$,其极限黏结强度分别增大 7.5% 和 23%.

3.2.3 测试钢筋直径

选取锚固长度 $5d$,再生混凝土强度等级 C30,冻融循环次数 50 次,对测试钢筋直径为 16 mm、18 mm、20 mm 这三种情况进行计算分析,极限荷载见表 6. 试验值与模拟值的荷载 - 自由端滑移值曲线和模拟值平均黏结应力 - 平均滑移值曲线的变化见图 11、图 12 所示.

表 6 不同测试钢筋直径下极限荷载

Table 6 The ultimate load with different steel bars diameters

钢筋直径/mm	极限荷载/kN	
	试验值	模拟值
16	36.78	37.12
18	41.30	40.32
20	43.79	44.83

由图 11 可知:试验值与模拟值荷载 - 自由端滑移曲线整体变化趋势相似. 测试钢筋直径越大,其极限荷载越大、拔出时自由端

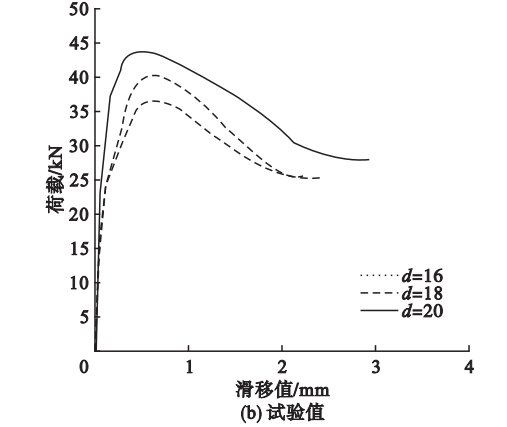
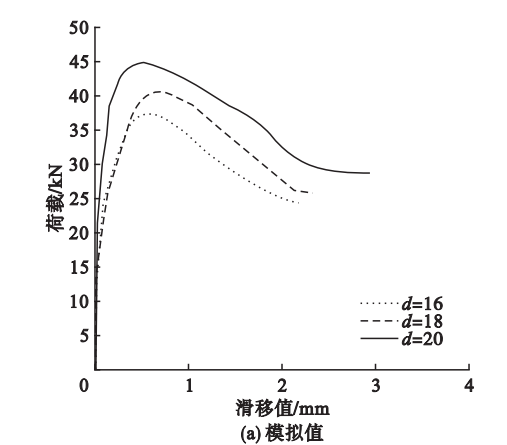


图 11 荷载 - 自由端滑移值

Fig. 11 Free end load-slip curves of specimens

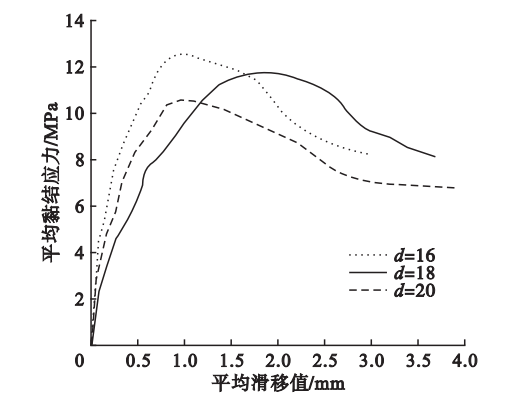


图 12 平均黏结应力 - 平均滑移值

Fig. 12 Average bonding stress and average slip curves

滑移越大. 测试钢筋直径从 18 mm 增大到 20 mm,其模拟值的极限荷载提高约 10%.

平均黏结应力为荷载与黏结面积的比值,是从宏观上反应钢筋与混凝土之间的抗

滑移能力,且不受位置影响.从图 12 可以看出,测试钢筋直径越小,其极限平均黏结应力越大.这是由于钢筋直径越大,钢筋与再生粗骨料混凝土之间的黏结面积越大,发生滑移与破坏时所需的初始黏结滑移荷载、极限黏结荷载越大.但当试件极限荷载的增大率小于其黏结面积的增大率时便会产生上述现象.

3.3 梁式试验荷载 - 挠度曲线

图 13 为不同参数在数值模拟下的梁式试验荷载 - 挠度曲线.随着再生混凝土冻融循环次数的增加,结构承载能力、跨中挠度逐渐下降.不同锚固长度下,跨中挠度随锚固长度的增加而增大.当钢筋直径增大时,结构承载力增加,跨中位移减小,且钢筋直径越小,跨中位移变化率越大.

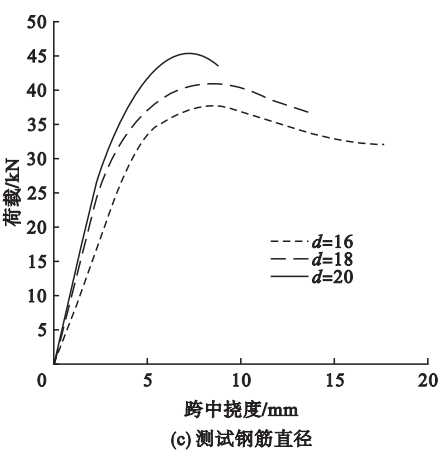
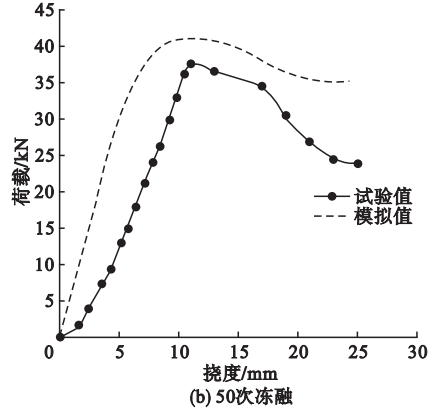
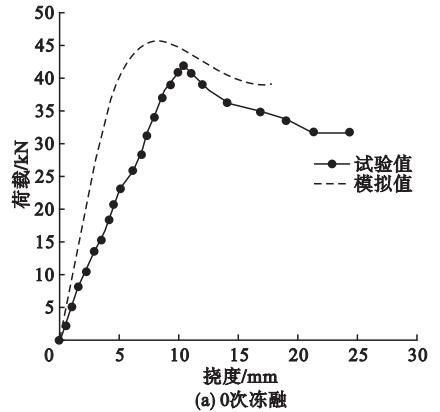
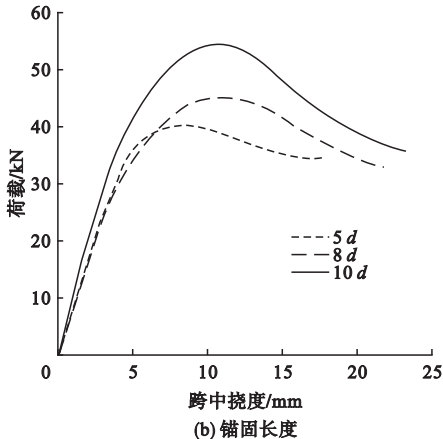
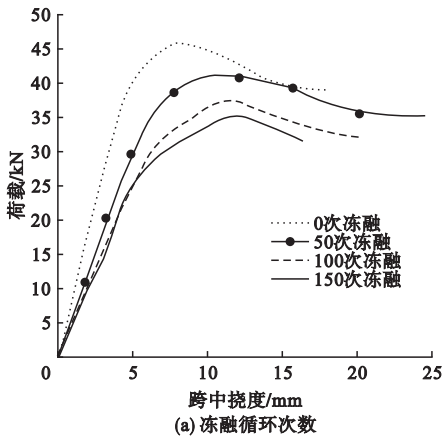


图 13 梁式试验荷载 - 挠度曲线

Fig. 13 Load-deflection curves of beam-type test

选取参数为直径为 18 mm,锚固长度 90 mm,再生混凝土强度等级 C30,冻融次数为 0、50、100、150 次的梁式试件.将位移计设置在梁体中部,测量梁体在模拟试验受力过程中的挠度值,并与文献[17]中的试验数据进行对比.图 14 为不同冻融循环次数下再生混凝土梁式构件试验值与模拟值荷载 - 跨中挠度曲线.



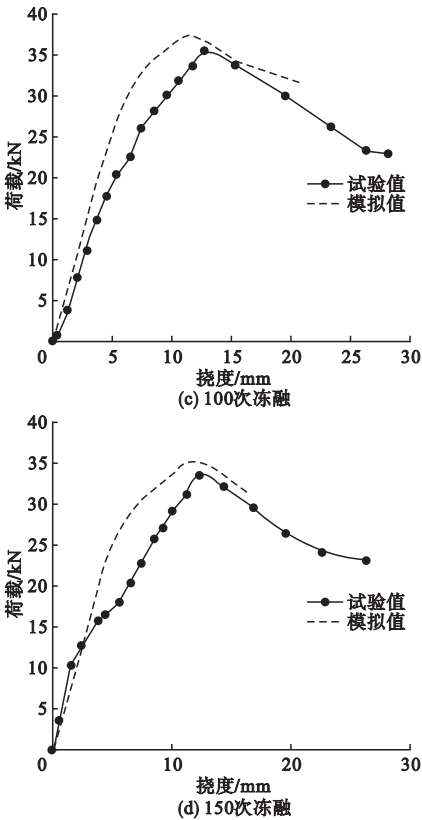


图 14 荷载-跨中挠度曲线的试验值与模拟对比

Fig. 14 The comparison between the test and the simulated results of load-deflection curves

由图 14 可知,模拟曲线与试验曲线变化趋势基本相似.在数值模拟的加载初期,梁挠度与荷载呈线性变化;当荷载达到极限荷载后,梁体挠度增大程度逐渐减小.在试验值中,冻融 50、100、150 次后,挠度分别增大 22%、32.6%、34.5%.随着冻融循环次数的增加,再生混凝土内部损伤逐渐累积,峰值荷载逐渐减小.在达到极限荷载后,荷载-挠度曲线下降段开始出现分离,模拟曲线下降平缓,延性表现较好,而试验曲线下降段斜率较大,数值在短时间内变化较大.其原因是由于试验与模拟中裂缝的发展情况不同所导致.

3.4 试验参数拓展

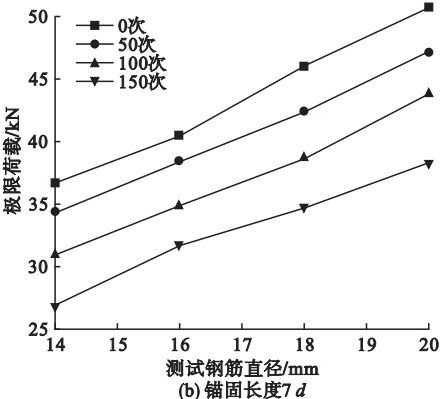
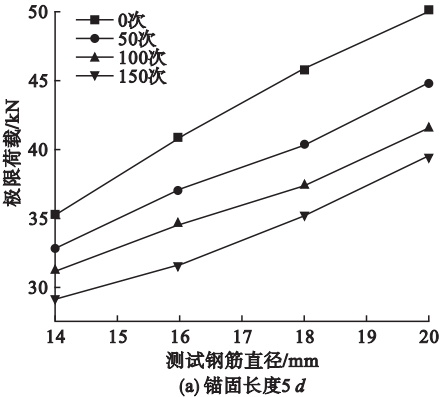
为了使建立的数值模型具有通用性,选取钢筋直径 14~20 mm,锚固长度为 5*d*、7*d*、8*d*、10*d* 为参数重新建模.求解得到各因素下试件的极限荷载,如表 7 所示.极限荷载的变化曲线,如图 15 所示.模拟的结果与试验结

果基本相似.随着冻融循环次数的增加,再生混凝土梁式试件的性能逐渐下降.

表 7 不同因素下的模拟值极限荷载计算结果

Table 7 Calculation results of ultimate load with different factors

锚固长度/mm	<i>n</i> /次	荷载/kN			
		<i>d</i> = 14 mm	<i>d</i> = 16 mm	<i>d</i> = 18 mm	<i>d</i> = 20 mm
5 <i>d</i>	0	35.280	40.810	45.838	50.055
	50	32.796	37.120	40.320	44.830
	100	31.150	34.530	37.344	41.564
	150	29.129	31.610	35.163	39.509
7 <i>d</i>	0	36.702	40.380	46.101	50.802
	50	34.337	38.435	42.413	47.206
	100	30.897	34.867	38.697	43.843
	150	26.894	31.743	34.780	38.405
8 <i>d</i>	0	37.096	40.261	46.480	52.520
	50	35.247	38.746	44.160	49.427
	100	31.411	36.097	39.302	44.745
	150	29.321	31.712	35.760	39.275
10 <i>d</i>	0	45.413	49.825	58.140	64.588
	50	42.965	48.275	54.070	59.214
	100	39.743	43.310	49.744	56.099
	150	35.157	37.806	45.267	51.581



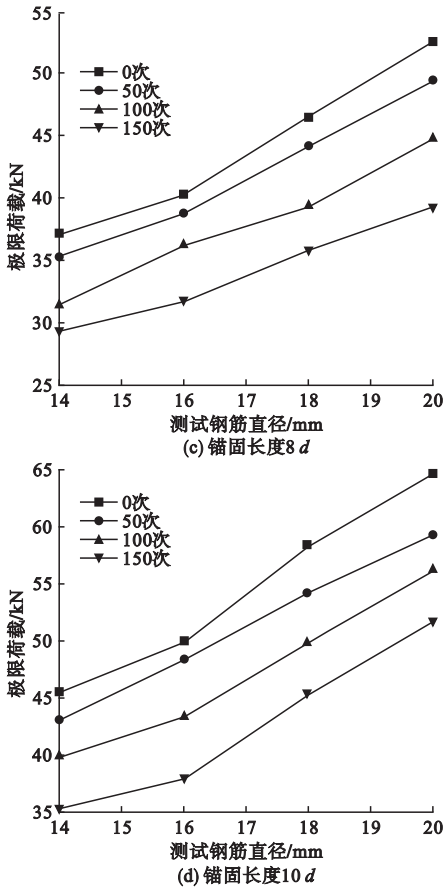


图 15 极限荷载变化曲线

Fig. 15 The ultimate load change curves

由图 15 可以得到:在测试钢筋直径与锚固长度相同时,随着冻融循环次数的增加,试件的极限荷载逐渐降低,并且冻融循环数每增加 50 次,试件极限荷载下降约 7% 左右.在冻融循环次数与钢筋直径相同时,极限荷载随钢筋锚固长度的增大而增大,锚固长度由 5d 增大到 7d、8d、10d,其极限荷载分别增大 2.3%、3% 和 21%.当锚固长度一定时,随着钢筋直径的提高,其极限荷载提高约 6% 左右.

4 结 论

(1)采用接触法分析冻融循环后钢筋与再生混凝土黏结性能时,模拟值与试验值相差不大,模拟曲线与试验点基本吻合,具有一定的可行性.

(2)由冻融损伤模型可知,再生混凝土在同一强度等级下,随着冻融循环次数的增

加,损伤逐渐增大.强度等级越低,损伤越严重.

(3)当测试钢筋直径与锚固长度相同时,随着冻融次数的增加,试件的极限荷载逐渐降低,并且冻融次数每增加 50 次,试件的极限荷载大约下降约 7%.

(4)当冻融循环次数、测试钢筋直径相同时,极限黏结荷载随钢筋锚固长度的增大而增大,锚固长度由 5d 增长到 7d、8d,再到 10d,其分别增大 2.3%、3% 和 21%.

(5)当锚固长度、冻融循环次数相同时,随着钢筋直径的增大,极限荷载逐渐增大.

参考文献

[1] 董宏英,孙文娟,曹万林,等. 钢筋-再生混凝土黏结滑移性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2017,49(12):82-90.
(DONG Hongying, SUN Wenjuan, CAO Wanlin, et al. Experimental study on bond slip behavior between steel bars and recycled concrete [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2017, 49 (12): 82-90.)

[2] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
(XIAO Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.)

[3] 曹芙波,王晨霞,刘龙刚,等. 锈蚀钢筋再生混凝土梁试验研究及刚度分析[J]. 建筑结构, 2015, 45(10): 49-55.
(CAO Fubo, WANG Chenxia, LIU Longgang, et al. Experimental study and rigidity analysis on corroded reinforced recycled concrete beams [J]. Building structure, 2015, 45 (10): 49-55.)

[4] SHANG Huaishuai, ZHAO Tiejun, CAO Weiqun. Bond behavior between steel bar and recycled aggregate concrete after freeze-thaw cycles [J]. Cold regions science and technology, 2015, 118: 38-44.

[5] SEARA-PAZ S, GONZÁLEZ-FONTEBOA B, EIRAS-LÓPEZ J, et al. Bond behavior between steel reinforcement and recycled concrete [J]. Materials and structures, 2014, 47: 323-334.

[6] REN Guosheng, SHANG Huaishuai, ZHANG Peng, et al. Bond behavior of reinforced recycled concrete after rapid freezing-thawing cycles [J]. Cold regions science and technology, 2019, 157: 133-138.

[7] 安新正,易成,王小学,等. 冻融后钢筋再生混凝土粘结性能研究[J]. 实验力学, 2013, 28 (2): 227-234.
(AN Xinzheng, YI Cheng, WANG Xiaoxue, et al. Study of bond performance between steel

- bar and recycled aggregate concrete subjected to freeze-thaw cycling [J]. Journal of experimental mechanics, 2013, 28(2): 227 - 234.)
- [8] 李新明, 商怀帅. 盐冻循环对变形钢筋与再生混凝土黏结性能的影响[J]. 青岛理工大学学报, 2015, 36(4): 23 - 29.
(LI Xinming, SHANG Huaishuai. Influence of deicer-frosting cycles on bond property of deformed bar and recycled concrete[J]. Journal of Qingdao university of technology, 2015, 36(4): 23 - 29.)
- [9] 安新正. 腐蚀环境下再生混凝土结构耐久性试验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012.
(AN Xinzhen. Experimental study on durability of recycled concrete structure exposed in corroded environment [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2012.)
- [10] 孟祥鑫. 冻融循环后钢筋与再生混凝土粘结性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
(MENG Xiangxin. Experimental study on bond behavior between steel rebars and recycled concrete after freeze-thaw cycles [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.)
- [11] 卢晓梅. 冻融后再生混凝土钢筋粘结性能试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.
(LU Xiaomei. The experimental study on the bond behavior between recycled aggregate concrete and steel bar after freezing and thawing [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2014.)
- [12] 曹芙波, 唐磊杰, 丁兵兵, 等. 冻融损伤后钢筋与再生混凝土黏结滑移性能试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(增刊1): 244 - 251.
(CAO Fubo, TANG Leijie, DING Bingbing, et al. Study on bond-slip properties between steel bars and recycled concrete after freeze-thaw cycles [J]. Engineering mechanics, 2017, 34(S1): 244 - 251.)
- [13] 曹芙波, 侯玉良, 田忠刚, 等. 冻融后再生混凝土与钢筋黏结性能试验研究及微观结构分析[J]. 混凝土, 2016(2): 17 - 20.
(CAO Fubo, HOU Yuliang, TIAN Zhonggang, et al. Study of bonding performance between steel bar and recycled concrete and the analysis of microstructure of recycled concrete after freezing and thawing [J]. Concrete, 2016(2): 17 - 20.)
- [14] 曹芙波, 尹润平, 王晨霞. 冻融损伤后再生混凝土与钢筋黏结滑移性能梁式试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(4): 141 - 148.
(CAO Fubo, YIN Runping, WANG Chenxia. Beam-type experimental study on bond-slip behavior between recycled concrete and steel bar after freeze-thaw damage [J]. Journal of building structures, 2017, 38(4): 141 - 148.)
- [15] ALMUSALLAM A A, AL-GAHTANI A S, AZIZ A R, et al. Effect of reinforcement corrosion on bond strength[J]. Construction & building materials, 1996, 10(10): 123 - 129.
- [16] 牟小光. 高强预应力钢筋粘结性能试验研究及数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
(MU Xiaoguang. Experimental study and numerical simulation of bond behavior of high-strength prestressed reinforcement [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.)
- [17] 赵卫平. 基于 ANSYS 接触分析的粘结 - 滑移数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(2): 44 - 51.
(ZHAO Weiping. Bond-slip numerical simulation based on ANSYS contact analysis [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2011, 28(2): 44 - 51.)
- [18] 沈新普, 冯金龙, 郭丽丽. 混凝土塑性损伤 ABAQUS 用户子程序开发[J]. 沈阳工业大学学报, 2008, 30(6): 693 - 699.
(SHEN Xinpu, FENG Jinlong, GUO Lili. Development of ABAQUS UMAT for plastic damage of concrete [J]. Journal of Shenyang university of technology, 2008, 30(6): 693 - 699.)
- [19] 高歌, 肖建庄. 再生混凝土叠合梁板受弯性能数值分析[J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(1): 1 - 4.
(GAO Ge, XIAO Jianzhuang. Numerical study on bend performance of recycled concrete composite beams and slabs [J]. Sichuan building science, 2014, 40(1): 1 - 4.)
- [20] 姚武. 纤维混凝土的低温性能和冻融损伤机理研究[J]. 冰川冻土, 2005(4): 545 - 549.
(YAO Wu. Property of fiber reinforced concrete at low temperature and its damage mechanism under freezing-thawing cycles [J]. Journal of glaciology and geocryology, 2005(4): 545 - 549.)

(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)