

# 再生混凝土力学性能提升技术与应用

刘震宇<sup>1</sup>, 秦鸿根<sup>2</sup>, 刘冠国<sup>3</sup>, 马彪<sup>2</sup>, 张国荣<sup>3</sup>

(1. 江苏省无锡市航道管理处, 江苏 无锡 214031; 2. 东南大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 211189;  
3. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 211000)

**摘要:**针对大量混凝土废弃物造成生态环境日益恶化及天然骨料资源日益缺乏的问题,通过配制不同强度等级和不同再生骨料掺量的再生混凝土,并结合锡澄运河三级航道整治工程对再生混凝土力学性能及其提升技术进行试验研究。结果表明:再生骨料的掺量对C35及以下中低强度混凝土力学性能影响较小,而对C40及以上中高强度混凝土有较大影响,随再生骨料掺量的增加,再生混凝土力学性能降低;通过合理选用再生骨料级配、与天然骨料复掺、对再生骨料进行强化以及优化配合比参数等措施能提升混凝土力学性能;锡澄运河三级航道整治工程实际应用取得了很好的技术经济效益。

**关键词:**再生混凝土;废弃混凝土;再生骨料;力学性能;航道整治;锡澄运河

中图分类号:TU528.59

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2017)01-0090-05

**Technique for improvement of mechanical properties of recycled concrete and its application**///LIU Zhenyu<sup>1</sup>, QIN Honggen<sup>2</sup>, LIU Guanguo<sup>3</sup>, MA Biao<sup>2</sup>, ZHANG Guorong<sup>3</sup> (1. Channel Management Department in Wuxi City of Jiangsu Province, Wuxi 214031, China; 2. School of Material Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. Jiangsu Transportation Institute Group Co., Ltd., Nanjing 211000, China)

**Abstract:** In view of the ecological deterioration caused by massive concrete wastes and the lack of natural aggregate resources, an experimental study on mechanical properties of recycled concrete and the technique for their improvement was carried out for the Xicheng Canal three-class waterway regulation project through preparation of the recycled concrete with different strength grades and different recycled aggregate contents. The results show that the content of recycled aggregates has a weak effect on the mechanical properties of C35 concrete and concrete with even lower strength, but has a large influence on C40 concrete and concrete with even higher strength. With an increase of the recycled aggregate content, the mechanical properties of the recycled concrete degrade. The mechanical properties of the recycled concrete can be improved by rationally determining the recycled aggregate gradation, mixing in natural aggregates, strengthening the recycled aggregates, and optimizing the mix ratio. The application of the technique to the Xicheng Canal three-class waterway regulation project has achieved large economic benefits.

**Key words:** recycled concrete; waste concrete; recycled aggregate; mechanical property; channel regulation; Xicheng Canal

随着我国经济的快速发展,每年的基础建设需要消耗大量的混凝土,大量的消耗必然带来大量废弃混凝土的产生。据统计,近几年我国每年产生的建筑垃圾总量在15.5亿~24亿t,其主要部分为废弃混凝土;目前我国城市的存量建筑垃圾已超过30亿t,每年至少还有3亿t的增量<sup>[1]</sup>。作为混凝土主要组成材料,天然骨料如天然砂石资源趋于枯竭,其开采成本较高,对自然生态环境也有严重的破坏,此外垃圾处理用地不断减少,不断增长的垃圾处理费

用<sup>[2]</sup>也凸显对废弃混凝土的再生利用进行研究的重要性。日本于1977年就在全国各地建立了处理混凝土废弃物的加工厂,生产再生骨料和再生混凝土<sup>[3]</sup>。美国每年在道路维修和重建中回收约20亿t的混凝土废料,据推测,到2020年,这个数字将会上升到25亿t<sup>[4]</sup>。目前主要有3种处理废弃混凝土的方法:①开发降解废弃混凝土的技术以减少固体垃圾量;②将废弃混凝土作为原材料,进行破碎、粉磨、煅烧来生产制造水泥;③破碎并磨细废弃混凝土,使其

基金项目:江苏省交通科学研究计划(2011Z1-5)

作者简介:刘震宇(1970—),男,高级工程师,主要从事工程建设管理工作。E-mail: wxgz101@163.com

通信作者:秦鸿根(1955—),男,教授级高级工程师,主要从事土木工程材料研究。E-mail: qinhonggen@126.com

成为微细粉掺合料,替代部分水泥来配制混凝土<sup>[5]</sup>。

Mandal 等<sup>[6]</sup>研究发现再生混凝土抗压强度比普通混凝土低,多数研究者的试验也证实了这个结论;但 Salem<sup>[7]</sup>研究表明,再生混凝土的抗压强度比普通混凝土是提高了。Ahmad<sup>[8]</sup>则发现再生混凝土的抗拉强度与普通混凝土相差无几。肖建庄<sup>[9]</sup>经试验研究得出再生混凝土的弹性模量与普通混凝土相比有所下降。

陈宗平等<sup>[10-12]</sup>研究发现再生与天然粗骨料的配比问题是再生混凝土与普通混凝土的最大区别,即再生粗骨料掺量的变化是导致再生混凝土力学性能发生改变的原因。季天剑等<sup>[13]</sup>研究表明,采用再生混凝土骨料等量取代 70% 天然骨料配制的粉煤灰再生混凝土,其抗疲劳性能与普通混凝土相当,可用于水泥混凝土路面建设。Kong 等<sup>[14]</sup>采用新型搅拌工艺,先在再生骨料表面包裹一层火山灰材料再浇注,以提高再生混凝土的力学性能。为合理使用不同强度的再生骨料,同时提升再生混凝土力学性能,本文结合无锡市锡澄运河三级航道整治工程,将废弃构造物混凝土作为再生集料配制再生混凝土用于河道工程的改造,进行了再生混凝土力学性能提升技术与应用研究。

## 1 原材料与试验方法

### 1.1 试验原材料

a. 水泥、粉煤灰和矿渣微粉:水泥为中国水泥厂海螺牌 P·O42.5 水泥,依据 GB175—2007《通用硅酸盐水泥》来检测水泥的化学成分;粉煤灰为镇江谏壁电厂苏源公司产的 I 级粉煤灰;矿渣微粉采用江南粉磨公司生产的 S95 级矿渣微粉。胶凝材料化学成分测试结果见表 1。

表 1 胶凝材料化学成分各组分的质量分数 %

胶凝材料	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	其他
水泥	23.55	60.78	4.42	4.67	2.16	2.21	2.57
粉煤灰	54.88	4.77	1.31	26.89	6.49	1.16	4.50
矿渣微粉	28.15	34.54	6.00	16.00	1.10	0.32	13.89

b. 减水剂:采用江苏博特新材料有限公司生产的高性能聚羧酸减水剂,含固量 20%,减水率 30%,28 d 抗压强度比 145%。

c. 天然骨料:细骨料为赣江中砂,细度模数为 2.7;粗骨料为石灰岩碎石,压碎指标值为 7.4%,由 5~16 mm 和 5~31.5 mm 的碎石配制而成,干表观密度为 2710 kg/m<sup>3</sup>,堆积密度为 1490 kg/m<sup>3</sup>,吸水率为 1.9%。

d. 再生粗骨料:为现场河道整治废弃的 C30 混凝土经过颚式破碎机破碎、清洗与分级处理后,再筛

分出 5~16 mm 和 16~31.5 mm 这两个粒径,然后混合复配成 5~31.5 mm 连续级配的再生粗骨料。压碎指标值为 14.4%,洛杉矶磨耗率为 24.5%,干表观密度为 2460 kg/m<sup>3</sup>,堆积密度为 1310 kg/m<sup>3</sup>,吸水率为 5.1%。

e. 水:为自来水。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 试验方案设计

采用再生骨料等量取代天然骨料来进行对比试验,矿物掺合料采用 I 级粉煤灰与 S95 矿渣微粉按 1:1 等量取代 30% 水泥。试验配制了 C20、C30 和 C50 共 3 个不同强度等级的基准混凝土,设计的试验配合比如表 2 所示。再生粗骨料以 0%、20%、40% 和 60% 的掺量等量取代天然骨料,共制备出不同强度等级和不同再生骨料取代率的 12 组混凝土,通过测试混凝土工作性能、表观密度、抗压强度、抗折强度、劈裂抗拉强度以及静弹性模量等性能,研究不同再生骨料掺量对不同强度等级混凝土性能的影响规律。

表 2 混凝土试验配合比

设计等级	混凝土原材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )						减水剂
	水泥	水	粉煤灰	矿渣	砂	石	
C20	214	170	46	46	808	1116	3.06
C35	291	165	62	62	763	1100	4.15
C50	350	160	75	75	674	1096	5.25

注:试验中各等级配合比分 4 组,分别对应再生骨料 4 种掺量。

#### 1.2.2 力学性能试验

混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度依据 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行。按标准方法成型混凝土试件,拆模后进行标准养护,在规定的龄期进行混凝土的力学性能测试。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 再生骨料掺量对再生混凝土力学性能的影响

#### 2.1.1 对抗压强度的影响

图 1 为抗压强度试验结果,可以看出,再生骨料掺量对混凝土抗压强度的影响较大,但不同强度等级的再生混凝土抗压强度发展规律是不同的,对 C20 混

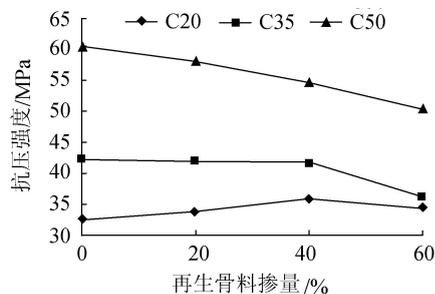


图 1 再生混凝土 28 d 抗压强度

凝土,随着再生骨料掺量的增加,再生混凝土抗压强度变化幅度不大,甚至有一定的增幅;对 C35 混凝土,掺量在 40% 以下时,再生混凝土抗压强度变化不大,而在 60% 掺量时抗压强度明显下降;而再生骨料掺量对 C50 强度等级的再生混凝土影响更为明显,随着再生骨料掺量的增加,混凝土抗压强度减小。

低水胶比的再生混凝土抗压强度低于普通混凝土,这是由于砂浆强度较高,新旧砂浆之间的黏结较为薄弱,再生骨料表面存在着较多的微裂缝,再生骨料孔隙率较高,在承受轴向应力时会形成应力集中,这些原因均导致混凝土抗压强度下降,且随着掺量的增加,强度逐步降低。掺 60% 再生骨料的混凝土其抗压强度降低幅度可达到 20% 以上。在发生破坏时,再生骨料内部先破坏,或是在新老砂浆界面先破坏,前者主要是由于再生骨料中砂浆与石子间的薄弱环节——界面过渡区发生破坏,后者主要原因是砂浆与再生骨料间黏结作用较弱。

C20 再生混凝土抗压强度反而会比普通混凝土抗压强度略有提高,可能是由于砂浆强度较低,再生骨料粗糙的表面与砂浆有更好的黏结性,此外,再生骨料吸水导致混凝土局部水灰比降低,同时再生骨料所吸收的水分缓慢释放促进混凝土的养护,使得再生混凝土后期抗压强度有所提高。

### 2.1.2 对抗折强度和劈裂抗拉强度的影响

图 2 和图 3 分别为抗折强度和劈裂抗拉强度试验结果,可以看出,对 C20 混凝土,再生骨料掺量越高,再生混凝土的抗折强度越高,劈裂抗拉强度也有所提高。但对于 C35 和 C50 混凝土,随着再生骨料掺量的增加,混凝土抗折、劈裂抗拉强度反而明显下降。由此可见,抗折、劈裂抗拉强度的变化规律与抗压强度总体上是一致的。

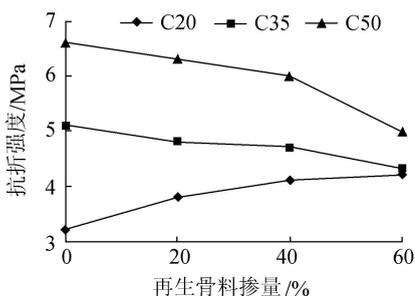


图 2 再生混凝土 28 d 抗折强度

### 2.1.3 对静压弹性模量的影响

图 4 为静压弹性模量试验结果,可以看出,随着强度等级的提高,混凝土静压弹性模量增大,但再生混凝土静压弹性模量要小于普通混凝土。对于 C35、C50 混凝土,随着再生骨料掺量的增加,再生混凝土静压弹性模量明显减小,其中再生骨料 60% 掺

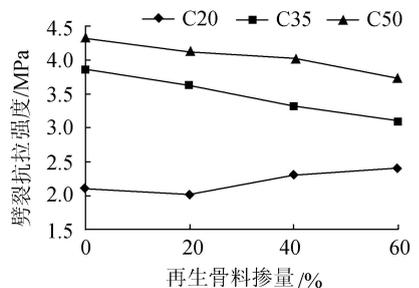


图 3 再生混凝土 28 d 劈裂抗拉强度

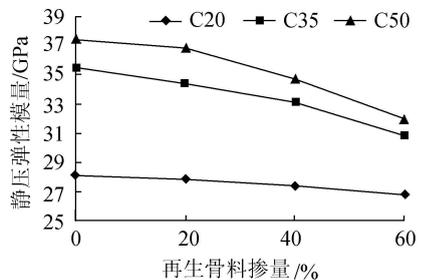


图 4 再生混凝土 28 d 静压弹性模量

量时分别降低 13.7% 和 14.1%。而再生骨料掺量对于 C20 混凝土的影响则不显著,静压弹性模量呈略下降趋势。

## 2.2 再生混凝土力学性能提升方法

以上试验结果表明,用再生粗骨料取代混凝土中的部分天然粗骨料,会对混凝土力学性能产生不良的影响,应根据混凝土强度选用相应强度等级的再生骨料,并采用必要的技术措施提升再生混凝土力学性能。为此,结合无锡市锡澄运河三级航道改造工程,配制了 8 组不同配合比的水工混凝土进行再生混凝土力学性能提升试验研究。试验分组编号中,R 后数字表示再生骨料掺量百分比,B 表示 16 ~ 31.5 mm 粒径的再生粗骨料与 5 ~ 16 mm 的天然骨料配制满足连续级配要求的粗骨料。试验通过改变再生骨料掺量、水胶比、粗骨料粒径来研究再生混凝土性能,试验结果如表 3 所示。

表 3 再生混凝土力学性能

试验分组 编号	水胶比	再生骨料 掺量/%	抗压强度/MPa		28 d 动弹性 模量/GPa
			7 d	28 d	
C30R60	0.45	60	19.3	34.6	
C30R60B	0.45	60	19.5	37.4	
C35R0	0.4	0	24.1	42.0	45.2
C35R30	0.4	30	25.5	42.3	43.5
C35R60	0.4	60	23.6	38.1	42.4
C35R100	0.4	100	20.2	35.9	37.5
C40R60B	0.36	60	26.3	46.8	

### 2.2.1 与天然骨料的掺配

天然骨料强度高于再生骨料,将再生粗骨料与天然骨料配制满足连续级配要求的粗骨料,此方法有利于再生混凝土力学性能的提高。由表 3 可

见,对 C35 混凝土,全再生粗骨料混凝土抗压强度明显低于普通混凝土,而当掺 30% 的 5~31.5 mm 再生骨料时,7 d 和 28 d 抗压强度与普通混凝土接近,比全再生骨料混凝土提高 25.6% 和 17.8%;当再生骨料掺量低于 30% 时,对再生混凝土抗压强度影响不大,随着掺量的提高混凝土抗压强度逐渐减小,当再生骨料掺量达到 60% 时,已明显低于普通混凝土。

不同龄期的动弹性模量能较好地反映混凝土力学性能的变化,图 5 为不同再生骨料掺量的再生混凝土动弹性模量随龄期变化规律,表明再生混凝土动弹性模量低于普通混凝土,且动弹性模量随着再生骨料掺量增加而降低。

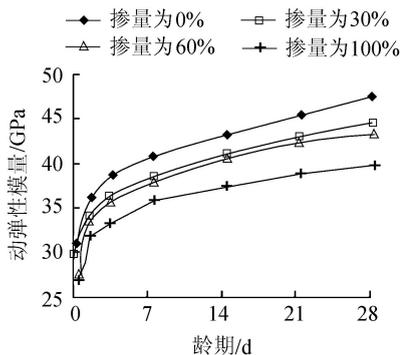


图 5 C35 再生混凝土动弹性模量变化规律

### 2.2.2 不同粒径骨料的复合

与大粒径再生骨料相比,小粒径再生粗骨料砂浆含量高,含气较高,强度较低。对 C30 母体混凝土的再生骨料进行洛杉矶磨耗试验的结果表明,5~31.5 mm 再生骨料的磨耗值为 28.5%,而 16~31.5 mm 再生骨料的磨耗值为 25.2%,降低 11.6%。天然骨料性能优于再生骨料,将二者混合掺加有利于提高再生混凝土力学性能。对 C30R60、C35R60、C30R60B 与 C40R60B 进行再生混凝土抗压强度试验,结果如表 3 所示。

C30R60 组与 C30R60B 组配合比是相同的,而后者 28 d 抗压强度明显较高,提高约 8.1%,甚至与 C35R60 组抗压强度相当,且 C40R60B 组 28 d 抗压强度增长率也较大。表明用 16~31.5 mm 的再生粗骨料与 5~16 mm 的天然骨料复掺,所配制的再生混凝土性能得到明显改善,抗压强度提高将近一个等级。

### 2.2.3 再生骨料化学强化

对再生骨料的强化可提高其抗压强度,主要强化方法有物理强化、化学强化和湿处理 3 种。本文采用丙乳水泥浆液强化再生骨料,其水胶比为 1:1,丙乳掺量为 5%,强化后的 C30 再生混凝土 7 d 抗压强度比为 112%,28 d 抗压强度比为 107%,抗折强度比为 114%,劈裂抗拉强度比为 119%,表明化学强化技术对再生混凝土的力学性能提升是有利的。

### 2.2.4 混凝土配合比优化

配合比参数对再生混凝土力学性能有重要影响,配制再生混凝土时,除了改善再生粗骨料性能外,对配合比参数的设计和优化同样重要,根据设计要求和再生骨料的性能优化用水量、水胶比、砂率,选用优质的掺合料和外加剂品种,可使配制的混凝土具有良好的工作性能、力学性能和耐久性能。

## 3 废弃构造物混凝土的再生应用

在无锡市锡澄运河三级航道整治工程中,为了充分利用废弃构造物混凝土,节约天然骨料资源,减少垃圾处理费用,按照工程设计要求,将经破碎强化后的再生混凝土骨料采用优化配合比设计方法制备出满足工程建设需要的再生混凝土,应用于护岸墙身、导流坝、桥面铺装、护栏等中低强度混凝土结构部位,取得了良好的效果,现场施工的 2 组 C25 再生混凝土抗压强度试验结果如表 4 所示。

表 4 现场施工的再生混凝土抗压强度

施工分组 编号	再生粗骨料 掺量/%	抗压强度/MPa	
		28 d	56 d
C25-1	40	29.8	37.0
C25-2	60	28.2	33.6

从表 4 可看出,2 组再生混凝土各龄期抗压强度均满足结构混凝土性能要求,且随着龄期的增加,混凝土抗压强度明显增加,这是胶凝材料继续水化的结果。

废弃构造物混凝土的再利用具有较高的经济效益,锡澄运河三级航道整治工程中使用再生混凝土 10 万 m<sup>3</sup>,按再生骨料掺量为 40% (即 1 m<sup>3</sup> 混凝土中粗骨料取代量约为 500 kg) 计算,共节省造价约 125 万元,同时还可节省废弃混凝土建筑垃圾填埋处理费用,减少对环境的污染,取得了较好的经济效益和社会效益。

## 4 结论

a. 对 C35 及以下的中低强度混凝土,再生骨料的掺量对混凝土力学性能影响不大,再生粗骨料取代 40% 以内的天然粗骨料时,再生混凝土抗压强度未见明显降低;再生骨料掺量在 40% 以上时,再生混凝土抗压强度下降。而对 C40 及以上的再生混凝土,其力学性能随再生骨料掺量的增加而降低。

b. 再生粗骨料性能劣于天然粗骨料,粗粒径再生骨料性能优于细粒径再生骨料,采用部分再生粗骨料与天然骨料掺配,且用 16~31.5 mm 再生粗骨料与 5~16 mm 天然骨料复掺,可明显改善混凝土的力学性能。

c. 采用优化混凝土配比等技术措施对再生骨料进行强化处理可明显提高再生混凝土力学性能。

d. 锡澄运河三级航道整治工程应用实践表明, 将废弃构筑物混凝土就地加工成再生骨料, 配制再生混凝土应用于水利工程中具有良好的经济效益和社会效益。

#### 参考文献:

[ 1 ] 黄蒙, 肖林源. 建筑垃圾循环利用现状的研究[J]. 资源节约与环保, 2016(6): 100-101. (HUANG meng, XIAO Linyuan. Research on the current situation of recycling utilization of construction waste[J]. Resource Saving and Environmental Protection, 2016(6): 100-101. (in Chinese))

[ 2 ] KOU S C, POON C S, ETXEBERRIA M. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete [J]. Cement & Concrete Composites, 2011, 33(2): 286-291.

[ 3 ] TOMOSAWA F, NOGUCHI T, TAMURA M. The way concrete recycling should be [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2005, 3(1): 3-16.

[ 4 ] 张昌波. 美国再生混凝土骨料的应用[J]. 建筑机械, 2008(8): 52-53. (ZHANG Changbo. The application of recycled concrete aggregate in the United States [J]. Construction Machinery, 2008(8): 52-53. (in Chinese))

[ 5 ] 张金兰. 地震灾区废弃混凝土用于建筑和道路重建的探讨[J]. 施工技术, 2008(增刊1): 55-57. (ZHANG Jinlan. Discussion on waste concrete for reconstruction of building and road in seismic disastrous area [J]. Construction Technology, 2008(Sup1): 55-57. (in Chinese))

[ 6 ] MANDAL S, CHAKARBORTY S, GUPTA A. Some studies on durability of recycled aggregate concrete [J]. The Indian Concrete Journal, 2002(7): 385-388.

[ 7 ] SALEM R M. Resistance to freezing and thawing of recycled aggregate concrete [J]. ACI Materials Journal, 2003, 100(3): 216-221.

[ 8 ] AHMAD S H. Properties of concrete made with North Carolina recycled coarse and fine aggregates[R]. Raleigh: North Carolina State University, 2004.

[ 9 ] 肖建庄. 再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(11): 1445-1449. (XIAO Jianzhuang. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(11): 1445-1449. (in Chinese))

[ 10 ] 陈宗平, 占东辉, 徐金俊. 再生粗骨料含量对再生混凝土力学性能的影响分析[J]. 工业建筑, 2015, 45(1): 130-135. (CHENG Zhanping, ZHAN Donghui, XU Jinjun. Research on mechanical properties of recycled concrete using different recycled coarse aggregate replacement[J]. Industrial Construction, 2015, 45(1): 130-135. (in Chinese))

[ 11 ] 吴瑾, 丁东方, 张闻. 再生骨料混凝土梁抗剪性能试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(1): 83-86. (WU Jin, DING Dongfang, ZHANG Wen. Experimental study on shear behavior of recycled aggregate concrete beams [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(1): 83-86. (in Chinese))

[ 12 ] 丁国庆, 蒋林华, 储洪强, 等. 膨润土种类及掺量对塑性混凝土性能的影响[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(2): 34-37. (DING Guoqing, JIANG Linhua, CHU Hongqiang, et al. Influence of types and dosage of bentonite on properties of plastic concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(2): 34-37. (in Chinese))

[ 13 ] 季天剑, 肖鹏, 高玉峰. 掺粉煤灰再生混凝土疲劳性能试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(3): 274-277. (JI Tianjian, XIAO Peng, GAO Yufeng. Fatigue performance of recycling concrete with fly ash [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(3): 274-277. (in Chinese))

[ 14 ] KONG D Y, LEI T, ZHENG J J, et al. Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(5): 701-708.

(收稿日期: 2015-11-16 编辑: 熊水斌)

(上接第 89 页)

[ 13 ] GENUCHTEN M T V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44: 892-898.

[ 14 ] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media [J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 513-522.

[ 15 ] COREY A T. The interrelation between gas and oil relative permeability [J]. Producers Monthly, 1954, 19(1): 38-41.

[ 16 ] PRUESS K. The TOUGH codes—a family of simulation tools for multiphase flow and transport processes in permeable media [J]. Vadose Zone Journal, 2004, 3(3): 738-746.

[ 17 ] PRUESS K, SPYCHER N. ECO<sub>2</sub>N—a fluid property module for the TOUGH2 code for studies of CO<sub>2</sub> storage in saline aquifers [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(6): 1761-1767.

[ 18 ] 李志伟. 咸水层 CO<sub>2</sub> 地质封存的长期稳定性分析及控制[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.

[ 19 ] 李亚美, 成建梅, 李敏敏, 等. 咸水在黏性土中迁移转化的试验研究[J]. 水资源保护, 2015, 31(3): 88-93. (LI Yamei, CHENG Janmei, LI Minmin, et al. Experimental study on migration and transformation in cohesive soil of salt water [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(3): 88-99. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-11-26 编辑: 郑孝宇)