文章编号:1673-9469(2023)02-0071-06 DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.02.011

不锈钢渣掺量对碱矿渣-不锈钢渣砂浆抗裂性能的影响

张 华[1],傅大宝[1],王本俊[2],季 韬[2]

(1.福州市规划设计研究院集团有限公司,福建 福州 350003;2.福州大学 土木工程学院,福建 福州 350108)

摘要:将不锈钢渣应用于碱激发水泥,对其资源化利用起到了重要作用。采用氧化钙、碳酸钠和水玻璃作为复合激发剂,固定总碱当量为6%(即氧化钙+碳酸钠的碱当量为4%,水玻璃的碱当量为2%),研究不锈钢渣掺量(0%、10%、20%、30%和40%,即不锈钢渣与(矿渣+不锈钢渣)的质量比)对碱矿渣-不锈钢渣砂浆(ASLm)抗压强度、抗折强度、劈裂抗拉强度、内钢环应变、环向拉应力和抗裂性能的影响,并通过抗裂评价指标 $A_{cr}(t)$ 来表征 ASLm 的抗裂性能。研究发现:随着不锈钢渣掺量从0%增加到40%时,ASLm 的抗压强度、抗折强度、劈裂抗拉强度、内钢环应变和环向拉应力均降低,抗裂性能先提高后降低;当不锈钢渣掺量为30%时,ASLm 的 $A_{cr}(t)$ 最大,即抗裂性能最优。

关键词:碱矿渣-不锈钢渣砂浆;不锈钢渣掺量;强度;抗裂评价指标;抗裂性能

中图分类号:TU528 **文献标识码**:A

Effect of Stainless Steel Slag Content on Cracking Resistance of Alkali Slag-Stainless Steel Slag Mortar

ZHANG Hua[1], FU Dabao[1], WANG Benjun[2], JI Tao[2]

(1. Fuzhou Planning Design and Research Institute, Fuzhou, Fujian 350003, China;
2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: The use of stainless steel slag in alkali-activated cement plays an important role in its resource utilization. Calcium oxide, sodium carbonate and water glass are used as composite activators, and the total alkali equivalent is fixed at 6% (the alkali equivalent of calcium oxide and sodium carbonate is 4%, the alkali equivalent of water glass is 2%). The effect of stainless steel slag content (0%、10%、20%、30% and 40%, the effect of the mass ratio of stainless steel slag to the summation of slag and stainless steel slag) on the compressive strength, flexural strength, splitting tensile strength, strain of interior steel ring, circumferential tensile stress and cracking resistance of alkali-activated slag-stainless steel slag mortar (ASLm) is investigated, and the crack resistance of ASLm was characterized by crack resistance evaluation index $A_{cr}(t)$. The study found that with the increase of stainless steel slag content from 0% to 40%, the compressive strength, flexural strength, splitting tensile strength, strain of interior steel ring and circumferential tensile stress decrease, while the cracking resistance first increases and then decreases. When the content of stainless steel slag is 30%, the $A_{cr}(t)$ of ASLm reaches the largest, i.e., the crack resistance is the best.

Key words: Alkali-activated slag-stainless steel slag mortar; stainless steel slag content; strength; cracking resistance evaluation index; cracking resistance

不锈钢渣作为一种工业固体废弃物,年产量近1 000万吨,利用率低[1-4],占用土地资源,对环境造成了污染。将不锈钢渣高效应用于碱激发水泥中,同时减少普通硅酸盐水泥用量,这对促进我

收稿日期:2022-10-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878179)

作者简介:张华(1985-),男,湖南岳阳人,硕士,高级工程师,从事市政工程方面的研究。

国“双碳”目标实现有积极意义。

近年来,有许多学者对碱矿渣水泥的各方面性能进行了研究,发现其具有高强和高耐久性等优点。与普通硅酸盐水泥相比,碱矿渣水泥的生产过程能大幅度降低 CO_2 排放量[5],是一种新型的绿色环保材料[6],但碱矿渣水泥有收缩大、易开裂的缺点,严重影响结构的耐久性[7]。然而,不锈钢渣的活性比矿渣低,能降低碱矿渣水泥的反应速率[8],缓解水泥砂浆开裂的风险。此外,不锈钢渣中含有的 f-CaO 和 f-MgO 使碱矿渣水泥具有微膨胀的特性,能对碱矿渣水泥的收缩进行补偿[9],使其抗裂性能增强。因此,为缓解碱矿渣水泥易开裂的缺点,考虑用不锈钢渣替代部分矿渣来制备碱矿渣-不锈钢渣砂浆,并对其抗裂性能进行研究。

综上,以 $CaO+Na_2CO_3$+水玻璃作为复合激发剂,矿渣和不锈钢渣为前驱体制备碱矿渣-不锈钢渣砂浆(ASLm),研究不锈钢渣掺量对 ASLm 的抗压强度、抗折强度和劈裂抗拉强度,并使用环形部分约束装置来研究不锈钢渣掺量对 ASLm 抗裂性能的影响。

1 试验

1.1 原材料

(1)前驱体:矿渣为巩义市龙泽净水材料有限公司生产的 S 95 级粒化高炉矿渣,比表面积为 429 m^2/kg,密度为 3.10 g/cm^3。不锈钢渣粗颗粒来自福建吴航不锈钢制品有限公司,使用行星式球磨机将不锈钢渣粗颗粒球磨 45 min 后取大于 200 目的粉末(不锈钢渣)进行试验,获得的不锈钢渣比表面积为 425 m^2/kg,密度为 3.32 g/cm^3。矿渣和不锈钢渣的化学成分见表 1。

(2)激发剂:Na_2CO_3、CaO 和 NaOH(水玻璃调模时使用)为西陇科学股份有限公司提供的分析纯试剂;水玻璃来自山东优索化工科技有限公司,用 NaOH 调至 1.5 模数(固含量为 38.84%)后使用。

表 1 矿渣和不锈钢渣的化学成分 (单位:wt%)

Tab. 1 Chemical composition of slag and stainless steel slag (unit:wt%)

化学成分	SiO_2	Fe_2O_3	MgO	Al_2O_3	CaO	Cr_2O_3	其他
矿渣	31.59	1.13	5.85	13.99	39.91	0.15	7.38
不锈钢渣	21.26	3.76	5.88	5.83	56.82	1.39	5.06

(3)细骨料:采用厦门艾思欧标准砂有限公司生产的 ISO 标准砂,具体性能指标见表 2。

表 2 标准砂的性能指标

Tab. 2 Technical indexes of standard sand

目数/目	SiO_2/%	烧失量/%	泥含量/%
80~100	≥98	<0.4	<0.18

1.2 试验配合比

采用复合激发剂 $CaO+Na_2CO_3$+水玻璃,固定 $CaO+Na_2CO_3$ 的碱当量为 4%,水玻璃掺量为 2%(水玻璃中的 Na_2O 与碱激发水泥的质量比,其中碱激发水泥包括不锈钢渣+矿渣+$CaO+Na_2CO_3$+水玻璃中的固含量)。水灰比为 0.45(水是由水玻璃中的水和外加水组成),胶砂比为 1∶2。研究不锈钢渣掺量(0%、10%、20%、30%、40%,即不锈钢渣与(矿渣+不锈钢渣)的质量比)对碱矿渣-不锈钢渣砂浆(ASLm)抗裂性能的影响。

1.3 试验方法

(1)参照规范《水泥胶砂强度检验方法》GB/T 17671—1999,制备尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的 ASLm 试件进行抗压、抗折强度测试,分别测试 3/7/14/28 d 龄期时的抗压和抗折强度。

(2)参照规范 ASTM C496/C496 M-17《Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens》制备直径 100 mm、高度 200 mm 的圆柱形试件进行 3/7/14/28 d 龄期的劈裂抗拉强度测试。

(3)抗裂性能试验方法

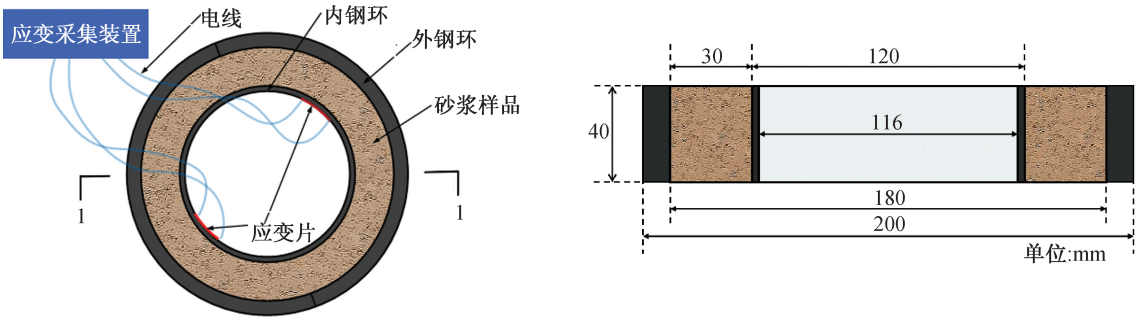
本研究中对已有文献[10-11]中提出的带隔板的

表 3 ASLm 的配合比 (单位:kg/m^3)

Tab. 3 Mix proportion of ASLm (unit: kg/m^3)

组别	不锈钢渣	矿渣	水玻璃	CaO	Na_2CO_3	标准砂	外加水
CN4W2-0	0	571.35					
CN4W2-10	57.14	514.22					
CN4W2-20	114.27	457.08	85.24	24.39	46.16	1 350	251.63
CN4W2-30	171.41	399.95					
CN4W2-40	228.54	342.81					

注:编号“CN4W2-Y”中“CN4”表示 $CaO+Na_2CO_3$ 的碱当量为 4%,“W2”表示水玻璃掺量为 2%,“Y”表示不锈钢渣掺量。



(a) 俯视图　　(b) 截面图

图 1　环形部分约束装置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of annular part restraint device

环形部分约束装置做部分改装,考虑到碱激发水泥的自收缩较大,抗裂性能相对较差,因此本研究中将隔板去除。研究表明[12],环形部分约束装置中内钢环越薄,砂浆环开裂时间越长,因此将钢环的厚度减小以使测试周期延长。使用改进后的环形部分约束装置(图 1)进行内钢环应变的测试,测试数据采用应变采集箱收集。

1.4　抗裂性能评价方法

Ji 等[13]的研究结果表明:开裂系数 $\zeta_t(t)$ 和抗裂评价指标 $A_{cr}(t)$ 可以表征水泥的抗裂性能,计算方法如式(1)和(2)所示:

$$\zeta_t(t)=\frac{\sigma_m(t)}{f_{sp}(t)} \tag{1}$$

$$A_{cr}(t)=\int_0^t \zeta_t(t)\,dt \tag{2}$$

式(1)中:$\sigma_m(t)$ 为龄期 t d 时 ASLm 的环向拉应力,由式(3)、(4)和(5)计算而得[13-14]:

$$\sigma_m(t)=[-\varepsilon_{st}(t)]\cdot E_{st}\cdot C_1C_2 \tag{3}$$

$$C_1=\frac{R_{os}^2-R_{is}^2}{2R_{os}^2} \tag{4}$$

$$C_2=\frac{R_{om}^2+R_{os}^2}{R_{om}^2-R_{os}^2} \tag{5}$$

式(3)、(4)和(5)中:$\varepsilon_{st}(t)$ 为内钢环应变;E_{st} 为内钢环的弹性模量(193 GPa);C_1 与 C_2 分别为与钢环和砂浆环本身有关的几何常数;R_{is} 和 R_{os} 分别为钢环的内外半径,R_{om} 为砂浆环的外半径。

式(1)和(2)中:$f_{sp}(t)$ 为 ASLm 的劈裂抗拉强度,参照已有的规范 CEB-FIP Model Code 1990[15]对相应龄期 ASLm 的劈裂抗拉强度 $f_{sp}(t)$ 进行拟合以获得任一龄期的劈裂抗拉强度值,拟合公式如式(6)和(7):

$$f_{sp}(t)=\sqrt{\beta_m(t)}f_{sp}(28) \tag{6}$$

$$\beta_m(t)=\exp\left(c-c\sqrt{28/t}\right) \tag{7}$$

式(6)和(7)中:$\beta_m(t)$ 为砂浆在龄期 t d 的力学性能发展系数;c 取决于水泥的类型。

采用 ASLm 在龄期 3 d 和 28 d 的劈裂抗拉强度计算发展系数,计算方法如式(8):

$$\beta_m(3)=\frac{f_{sp}(3)}{f_{sp}(28)} \tag{8}$$

由式(8)计算相应龄期的 $\beta_m(3)$,将 $\beta_m(3)$ 代入式(7)中计算 c,由式(6)计算得到所需龄期的劈裂抗拉强度。

2　试验结果及分析

2.1　抗压强度和抗折强度

图 2 为不锈钢渣掺量对 ASLm 抗压强度和抗折强度的影响。随着不锈钢渣掺量从 0%增加到 40%时,抗压强度和抗折强度均降低。这是由于不锈钢渣的活性比矿渣低,导致 ASLm 内 C-A-S-H 凝胶等水化产物的生成量减少,孔隙率增大[8]。

当不锈钢渣掺量为 10%、20%、30%和 40%时,28 d 龄期时 ASLm 的抗压/抗折强度相较于未掺入不锈钢渣(0%)分别降低了 9.0%/5.1%、11.8%/7.6%、19.3%/10.1% 和 32.6%/30.4%。根据抗压/抗折强度的降低幅度,当不锈钢渣的掺量从 10%增加到 30%时,强度降幅较小,这是因为少量的不锈钢渣掺入会与矿渣起到相互填充的作用[16-17];当不锈钢渣掺量为 40%时,强度降低幅度较大。

2.2　劈裂抗拉强度

图 3 为不锈钢渣掺量对 ASLm 劈裂抗拉强度的影响。28 d 龄期时,随着不锈钢渣掺量从 0%增加到 40%时,ASLm 的劈裂抗拉强度下降,当不锈钢渣掺量为 40% 时,劈裂抗拉强度最低。根据

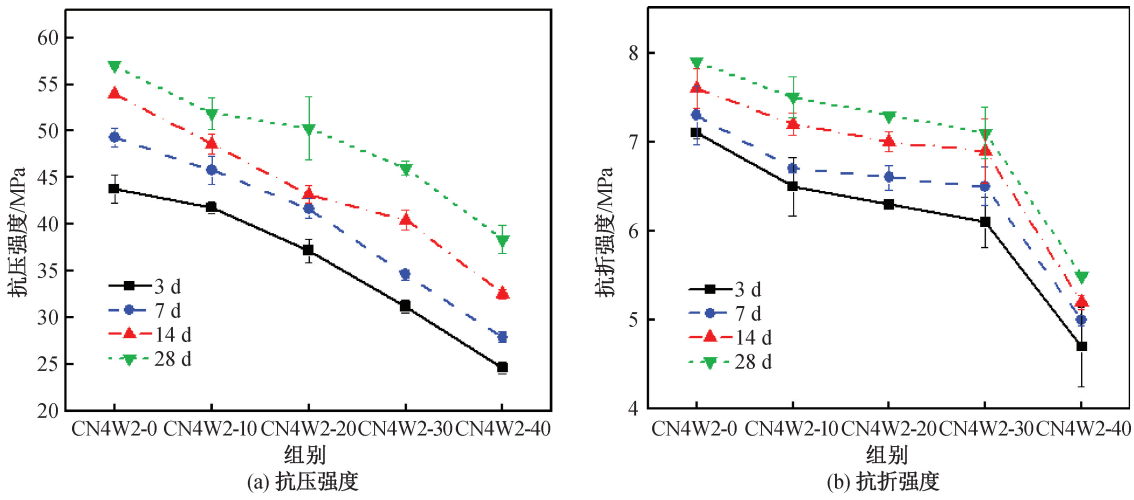


图 2 不锈钢渣掺量对 ASLm 抗压强度和抗折强度的影响

Fig. 2 Effect of stainless steel slag content on compressive strength and flexural strength of ASLm

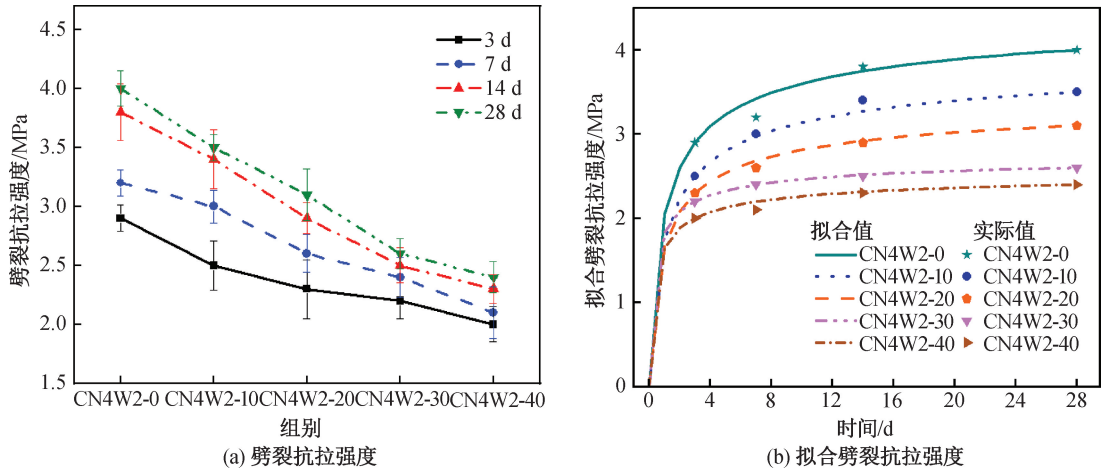


图 3 不锈钢渣掺量对 ASLm 劈裂抗拉强度的影响

Fig. 3 Effect of stainless steel slag content on splitting tensile strength of ASLm

式(6)和(7)对不同不锈钢渣掺量下 ASLm 的劈裂抗拉强度进行拟合,拟合结果见图 3(b),该劈裂抗拉强度拟合结果与各试验组在 3、7、14 和 28 d 龄期测得的实际值吻合较好。

2.3 内钢环应变

不锈钢渣掺量对 ASLm 内钢环应变的影响规律如图 4 所示。内钢环应变在 14 d 龄期内均出现突变,说明 ASLm 砂浆均发生开裂。开裂前,随着不锈钢渣掺量从 0%增加到 40%时,内钢环最大应变减小,这是由于不锈钢渣的活性低于矿渣,其掺量的增加使体系的水化反应减弱,水化产物数量减少,砂浆环的收缩减小,从而导致内钢环压应变减小。

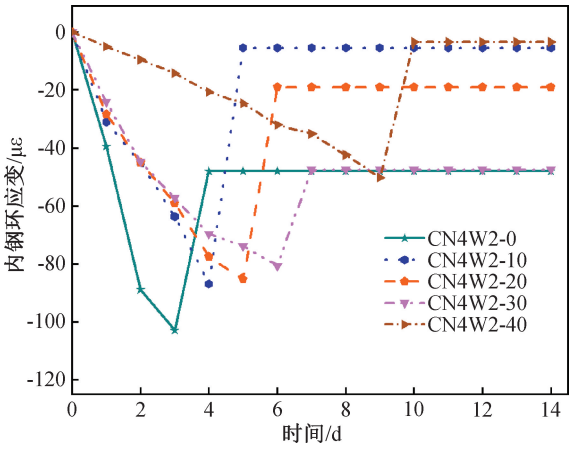


图 4 不锈钢渣掺量对 ASLm 内钢环应变的影响

Fig. 4 Effect of stainless steel slag content on interior steel ring strain of ASLm

2.4 环向拉应力

不锈钢渣掺量对 ASLm 的环向拉应力影响规律如图 5 所示。各组 ASLm 的环向拉应力在 14 d 内均发生突变,说明由约束收缩引起的环向拉应

力使 ASLm 开裂,开裂后的环向拉应力(图 5 中的灰色部分)不作讨论。开裂前,随着不锈钢渣掺量从 0%增加到 40%时,ASLm 的水化反应速率下降,C-A-S-H 凝胶等水化产物的生成量减少,收缩降低,导致 ASLm 的最大环向拉应力减小。

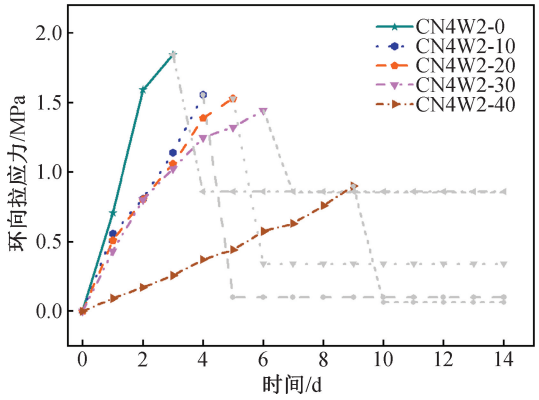


图 5　不锈钢渣掺量对 ASLm 环向拉应力的影响

Fig. 5　Effect of stainless steel slag content on circumferential tensile stress of ASLm

2.5　抗裂性能

不锈钢渣掺量对 ASLm 开裂系数随时间的变化规律如图 6 所示。随着不锈钢渣掺量从 0%增加到 40%时,开裂系数不断下降。不锈钢渣掺量为 0%时,开裂系数最大,开裂时间最短;不锈钢渣掺量为 10%、20%和 30%时开裂系数近似相等;不锈钢渣掺量为 40%时,开裂系数最小,开裂时间最长。

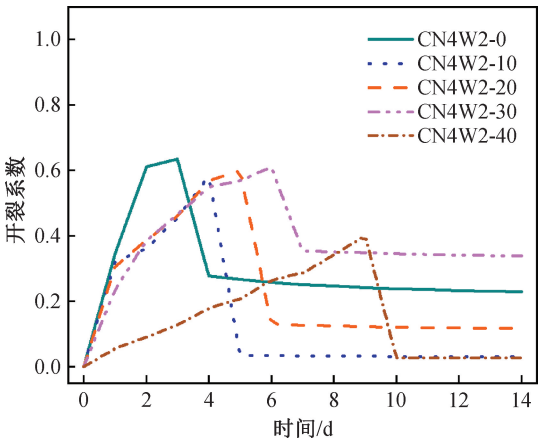


图 6　不锈钢渣掺量对 ASLm 开裂系数的影响

Fig. 6　Effect of stainless steel slag content on cracking coefficient of ASLm

不锈钢渣掺量下 ASLm 的抗裂评价指标见表 4。抗裂评价指标 $A_{cr}(t)$ 越大,ASLm 的抗裂性能越好[10]。随着不锈钢渣掺量从 0%增加到 40%时,抗裂评价指标 $A_{cr}(t)$ 先增大后降低,ASLm 的抗裂性能先提高后降低。当不锈钢渣掺量为 30%时,抗裂评价指标为 $A_{cr}(t)$ 为 2.508,即抗裂性能最好。随着不锈钢渣掺量从 0%增加到 30%时,使得水化程度下降,C-A-S-H 凝胶等水化产物的生成量减少,进而导致收缩减小,环向拉应力减小,抗裂性能增强;当不锈钢渣的掺量为 40%时,其抗折强度及劈裂抗拉强度最低,体系抵抗拉应力的能力减弱,因此造成其抗裂性能变差。因此,不锈钢渣的最优掺量为 30%。

表 4　不锈钢渣掺量下 ASLm 的抗裂性能评价指标　(单位:d)

Tab. 4　Evaluation index of cracking resistance of ASLm with different stainless steel slag content　(unit: d)

组别	CN4W2-0	CN4W2-10	CN4W2-20	CN4W2-30	CN4W2-40
$A_{cr}(t)$	1.274	1.429	2.020	2.508	1.753

3　结　论

1)28 d 龄期时,随着不锈钢渣掺量从 0%增加到 40%,碱矿渣-不锈钢渣砂浆(ASLm)的抗压强度、抗折强度、劈裂抗拉强度均下降,而当不锈钢渣掺量为 40%时,ASLm 的强度降幅最大。

2)随着不锈钢渣掺量从 0%增加到 40%,环向拉应力和内钢环应变均减小,并且当不锈钢渣掺量为 40%时,环向拉应力和内钢环应变的减小幅度较大。

3)随着不锈钢渣掺量从 0%增加到 40%时,ASLm 的抗裂性能评价指标 $A_{cr}(t)$ 先增大后减小,抗裂性能先增强后降低。当不锈钢渣掺量为 30%时,ASLm 的抗裂评价指标为 2.508 d,即抗裂性能最优。为将不锈钢渣进行资源化利用,即不锈钢渣最优掺量为 30%。

参考文献:

[1] 吴春丽,陈 哲,谢红波,等. 不锈钢渣的资源处置研究进展[J]. 材料导报,2021,35(S1):462-466.

[2] 吴跃东,彭 犇,吴 龙,等. 国内外钢渣处理与资源化利用技术发展现状综述[J]. 环境工程,2021,39(1):161-165.

[3] 黄 维,秦子然,曲余玲,等. 2021 年钢铁行业运行分析与 2022 年展望[J]. 冶金经济与管理,2022(1):19-21.

[4] 何锦云,贾 青,李清扬. 钢渣矿渣代替细骨料配制混凝土的试验研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2008,25(2):6-8.

[5] THOMAS R J, YE H, RADLINSKA A, et al. Alkali-Activated Slag Cement Concrete[J]. Concrete International, 2016,38(1):33-38.

[6] PROVIS J L, PALOMO A, SHI C. Advances in Understanding Alkali-Activated Materials[J]. Cement and Concrete Research,2015,78:110-125.
[7] ZHENG X Y, LIU H H, YOU S J, et al. Cracking Resistance and Sustainability Assessment of Alkali-Activated Slag Concrete Incorporating Lightweight Aggregate[J]. Cement and Concrete Composites,2022,131:104556.
[8] 王 强,黎梦圆,石梦晓. 水泥-钢渣-矿渣复合胶凝材料的水化特性[J]. 硅酸盐学报,2014,42(5):629-634.
[9] 仪桂兰,史永林. 钢渣和高炉渣微粉技术研究[J]. 中国资源综合利用,2017,35(2):90-94.
[10] 林旭健,季 韬,黄丹青,等. 混凝土新型环形约束收缩试验装置的研制及应用[J]. 福州大学学报:自然科学版,2010,38(1):110-115.
[11] JI T, CHEN C Y, CHEN Y Y, et al. Effect of Moisture State of Recycled Fine Aggregate on the Cracking Resistibility of Concrete[J]. Construction and Building Materials,2013,44:726-733.
[12] HOSSAIN A B, WEISS J. Assessing Residual Stress Development and Stress Relaxation in Restrained Concrete Ring Specimens[J]. Cement and Concrete Composites,2004,26(5):531-540.
[13] JI T, ZHANG B B, CHEN Y B, et al. Evaluation Method of Cracking Resistance of Lightweight Aggregate Concrete[J]. Journal of Central South University,2014,21(4):1607-1615.
[14] ZHUANG Y Z, CHEN C Y, JI T. Effect of Shale Ceramsite Type on the Tensile Creep of Lightweight Aggregate Concrete[J]. Construction and Building Materials,2013,46:13-18.
[15] FAVRE R, CHARIF H. Basic Model and Simplified Calculations of Deformations According to the CEB-FIP Model Code 1990[J]. ACI Structural Journal,1994,91(2):169-177.
[16] ROSALES J, CABRERA M, AGRELA F. Effect of Stainless Steel Slag Waste as a Replacement for Cement in Mortars. Mechanical and Statistical Study[J]. Construction and Building Materials, 2017, 142(1):444-458.
[17] 张 涛,陈铁军,陈永亮,等. 机械活化和不锈钢渣掺量对矿渣胶凝材料性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2022,41(2):553-561.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第20页)

[12] 铁道部第二勘察设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京:中国铁道出版社,1983.
[13] HASSIOTIS S, CHAMEAU J L, GUNARATNE M. Design Methods for Stabilization of Slopes with Piles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,1997,123(4):314-323.
[14] ITO T, MATSUI T, HONG W P. Design Method for Stabilizing Piles Against Landslide-One Row of Piles[J]. Soils and Foundations,1981,21(1):21-37.
[15] LIU X R, KOU M M, FENG H, et al. Experimental and Numerical Studies on the Deformation Response and Retaining Mechanism of H-type Anti-sliding Piles in Clay Landslide[J]. Environmental Earth Sciences,2018,77(5):1-14.
[16] 欧孝夺,唐迎春,崔 伟,等. h型抗滑桩模型试验及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(9):1936-1943.
[17] 李 兵,赵如雄,马洪生,等. 圆截面h型抗滑桩受力与变形分析[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(S2):1023-1027.
[18] 吕俊磊. 陡坡填方路基h型桩板墙受力机理研究[J]. 路基工程,2020,3:140-145.
[19] 廖 超. 高速铁路陡坡路基h型桩板墙关键设计参数分析[J]. 铁道标准设计,2021,65(2):36-41.
[20] ZHAO B, WANG J L, WANG Y, et al. Retaining Mechanism and Structural Characteristics of h Type Anti-slide Pile (hTP Pile) and Experience with its Engineering Application[J]. Engineering Geology,2017,222:29-37.
[21] HASSIOTIS S, CHAMEAU J L, GUNARATNE M. Design Method for Stabilization of Slopes with Piles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,1997,123(4):314-323.
[22] 横山幸满. 桩结构物的计算方法和计算实例[M]. 北京:中国铁道出版社,1984.
[23] 张海洋,刘 润,袁 宇,等. 海上大直径单桩基础 *p-y* 曲线修正[J]. 水利学报,2020,51(2):201-211.
[24] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 第4版. 北京:高等教育出版社,2006.
[25] 张海洋,刘 润,贾沼霖. 自升式平台插桩对邻近平台桩基础的影响研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(5):867-876.

(责任编辑 周雪梅)