

# HME-V 混凝土抗裂剂在水泥砂浆中的力学特性研究

陈彦红<sup>1,2</sup>, 陈季<sup>2</sup>, 杨建新<sup>1</sup>, 窦建瑜<sup>1</sup>, 黄钰程<sup>2</sup>, 史培新<sup>2</sup>, 唐强<sup>2\*</sup>

(1. 中铁十局集团第五工程有限公司, 江苏 苏州 215011; 2. 苏州大学 轨道交通学院, 江苏 苏州 215131)

**摘要:**城市地下隧道在投入使用后出现诸如开裂、渗漏乃至坍塌等因混凝土裂缝引起的隧道常见病害,使得对补偿收缩混凝土技术的深入研究成为解决地下工程混凝土裂缝问题的一项重要措施。该文从砂浆着手研究 HME-V 膨胀剂应用于补偿收缩砂浆技术的可行性,对水泥砂浆的基本性能进行研讨。对 0.45 水灰比条件下、不同 HME-V 膨胀剂掺量(0%、4%、8%、12%、16%)和不同粉煤灰掺量(15%、20%、25%)的水泥砂浆试块进行抗压、抗折试验与稠度试验。试验结果表明:少量膨胀剂与粉煤灰掺量的增加能够得到高达 40% 的早期强度增量,过高的掺量导致水泥胶结作用下降带来微小裂隙的发展。当膨胀剂掺量为 8%、粉煤灰掺量为 20% 时强度达到峰值,该掺量下的砂浆兼备良好的和易性,28 d 抗压强度能够超过 55 MPa。最后,对水泥砂浆试块进行 Realistic Failure Process Analysis (RFPA) 数值模拟,模拟结果与实际试验破坏过程不尽相同,揭示裂缝发展至试件破坏的全过程。

**关键词:**膨胀剂; 补偿收缩砂浆; 力学性能; RFPA 数值模拟

**中图分类号:** U414

**文献标志码:** A

地下隧道是一个复杂的体系,由于地层条件的复杂性、隧道设计和施工的难度大,往往在投入使用后会出现许多问题,其中,较为常见的为隧道渗漏水。中国 60% 以上的隧道存在不同程度的病害,其中 29.4% 的隧道由于漏水严重而不能继续使用。病害形式多与隧道漏水、结构开裂密切相关,常被称为“十隧九漏”<sup>[1-5]</sup>。

由于混凝土制备过程中会发生变形、膨胀和收缩,混凝土在养护成型之后就不可避免地出现许多微小的孔洞和裂缝。这些孔洞和裂缝通常是没有危害的,不会对混凝土的日常使用造成影响,但当它们受到外界因素包括荷载、温差等影响后,这些微小的裂缝就会不断增加,相互之间也会发生连通,最后往往会形成影响建筑物安全性和耐久性的宏观裂缝。地下工程的侧墙、顶板、底板等由于考虑到其长期结构可靠性,内部钢筋密集,一方面使结构体内约束大,整体刚度大,不利于混凝土抗裂;另一方面过密的钢筋布置给混凝土的施工浇筑及振捣带来一定的困难,极易造成混凝土不密实,而出现开裂渗水现象<sup>[6-7]</sup>。

补偿收缩混凝土技术在现浇大规模结构建筑中应

用较为普遍,运用于抑制养护过程中由于内部温度应力产生的先期裂缝。限制膨胀并弥补混凝土的部分收缩<sup>[8-10]</sup>。对补偿收缩混凝土技术的深入研究是解决地下工程混凝土裂缝问题的一项重要措施。砂浆作为混凝土中不可或缺的成分,不仅包裹住混凝土中的粗骨料,还填充粗骨料的间隙,所以砂浆性能的影响因素同样也会直接对混凝土的性能造成影响<sup>[11-13]</sup>。该文先从研究补偿收缩砂浆技术着手,运用不同配合比的砂浆,通过稠度试验、抗折强度试验、抗压强度试验以及数值模拟分析,研究抗裂剂在砂浆中的补偿收缩、提高强度、抑制裂缝的效果。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

试验选用 42.5 级普通硅酸盐水泥、试验用标准砂。试验中,抗裂剂选自江苏 HME-V 膨胀剂,粉煤灰为试验室用 I 级粉煤灰,粉煤灰与抗裂剂的主要化学成分见表 1。

试验选用砂浆搅拌机为 JJ-5 型砂浆搅拌机,砂

收稿日期:2020-10-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52078317);江苏省自然科学基金资助项目(编号:BK20170339);江苏省建设系统科技项目(编号:2020ZD05);苏州市建设系统科研项目(编号:2020-15)

作者简介:陈彦红,男,高级工程师。E-mail:360889350@qq.com

\* 通信作者:唐强,男,博士,教授。E-mail:tangqiang@suda.edu.cn

表 1 粉煤灰和抗裂剂的主要化学成分

材料	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	NiO
粉煤灰	53.97	4.16	31.15	1.01	4.01	2.04	0.89	0.73	1.13	0.67	0.11
膨胀剂	1.23	0.66	12.61	2.05	54.37	0.60	0.16	27.06			

浆装模振动挤密选用 380 V 型混凝土振动台。试验制备阶段所用的仪器如图 1(a)所示。恒温干燥箱用于粗砂的干燥,标准养护箱用于试块制备后的先期标准条件养护,先期养护结束即可进行室内常温养护。

如图 1(b)所示,测试试件抗折强度的仪器为 50 kN 压力试验机,深圳三思纵横 200 kN 电子万能试验机用于测试试件的抗压强度,另有试验用试件夹具。



(a) 制备仪器



(b) 测试仪器

图 1 试验仪器

1.2 试验方案及测试方法

参考 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法》,使用水泥、砂、粉煤灰以及 HME-V 抗裂剂按照不同的配合比搅拌、振捣密实,在温度为(20±3)℃、相对湿度为 60%~80%的条件下养护 7 d 和 28 d 后脱模。该文试验除水砂比保持 0.20、水灰比保持 0.45 不变外,HME-V 膨胀剂掺量和粉煤灰掺量为主要变量,每组配合比有 3 个平行试件,具体配合比见表 2。

表 2 试验配合比

水灰比	粉煤灰掺量/%	HME-V 膨胀剂掺量/%
0.45	15,20,25	0,4,8,12,16

(1) 稠度试验

稠度试验所用仪器为 SC—145 型砂浆稠度仪,主要用来考究水泥砂浆的流动性以及施工和易性,通过试验研究水灰比、粉煤灰和膨胀剂对水泥砂浆稠度的影响以及稠度对后续抗裂性能与强度的影响。

(2) 抗折强度试验

抗折试验所用仪器为 FBS—10KNW 型压力试验机以及抗折夹具。试验中,试件尺寸为 40 mm 40 mm 160 mm 的长方体试件。抗折试验以 0.01 mm/min 的加载速度进行连续加载,直至压断试块并记录损坏时的荷载和位置。抗折强度试验旨在测试水泥砂浆试块的抗折强度,作为比较抗裂剂对强度影响的因素之一。试件抗折强度按下式计算:

$$f_b = \frac{3PL}{2bh^2} \tag{1}$$

式中: $f_b$  为水泥砂浆抗折强度(MPa); $P$  为破坏荷载(N); $L$  为支撑点间距(mm); $b$  为试件截面宽度(mm); $h$  为试件截面高度(mm)。

(3) 抗压强度试验

抗压试验采用 UTM5105 型电子万能试验机。试验中,试件尺寸为 70.7 mm 70.7 mm 70.7 mm。抗压强度试验加载速度设置为 0.15 mm/min,当应力曲线达到峰值下降时停止加载以防碎块飞溅。抗压强度试验主要测试水泥砂浆试块的抗压强度,作为比较抗裂剂对强度影响的主要因素。水泥砂浆试块的抗压强度按下式计算:

$$f_{m,cu} = K \times \frac{N_u}{A} \tag{2}$$

式中: $f_{m,cu}$  为水泥砂浆立方体抗压强度(MPa); $N_u$  为破坏荷载(N); $A$  为试块承压面积(mm<sup>2</sup>); $K$  为换算系数,取 1.35。

(4) RFPA 数值模拟

RFPA 是 Realistic Failure Process Analysis 的简称。是基于有限元应力分析和统计损伤理论的材料破裂过程分析数值计算方法,能够模拟材料损伤与破坏过程的数值模拟手段。该文模拟主要运用 RFPA—2D 软件,RFPA—2D 能够进行岩石、混凝土等脆性材料受载的变形破坏分析,能够模拟混凝土损伤与裂缝

发展的全过程。主要通过此软件来对最优配合比的水泥砂浆试块进行受压破坏的分析模拟<sup>[14-15]</sup>。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 砂浆稠度

水灰比为 0.45 时,HME-V 膨胀剂掺量和粉煤灰掺量对水泥砂浆的稠度影响试验结果如图 2 所示。

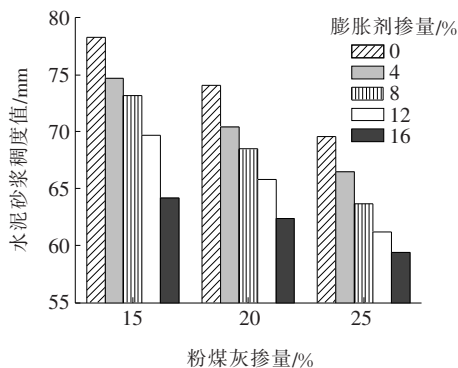


图2 稠度变化图

由图 2 可知:当 HME-V 膨胀剂掺量或粉煤灰掺量增加时,稠度值逐步降低。这是因为相同质量的 HME-V 膨胀剂或粉煤灰需水量大于水泥,过高的稠度以及过低的稠度都不利于实际施工的运用,也不能充分发挥砂浆在混凝土中的黏结、润滑作用,导致裂缝发展较早、较快。当 HME-V 膨胀剂掺量为 8% 且粉煤灰掺量为 20% 时,水泥砂浆的稠度值适中,和易性较好。

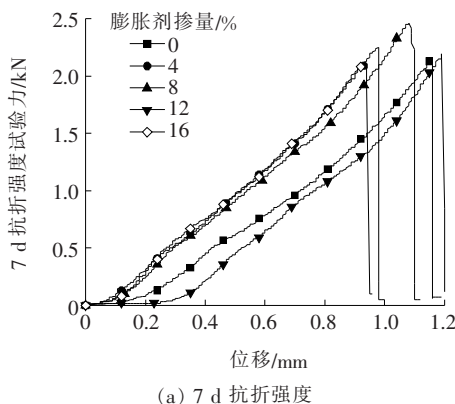
### 2.2 砂浆抗折强度

#### (1) 膨胀剂掺量影响

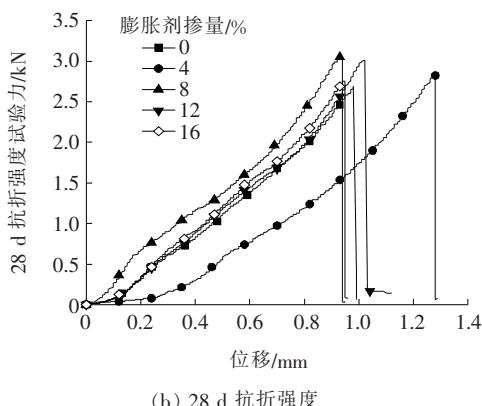
当粉煤灰掺量为 20% 时,砂浆强度最大,抗折强度与抗压强度均选取水灰比 0.45、粉煤灰掺量 20% 条件下的试验结果。HME-V 膨胀剂掺量变化对水泥砂浆 7、28 d 的抗折强度影响结果如图 3 所示。由图 3 可知:掺入 HME-V 膨胀剂可以有效提高水泥砂浆试块的 7、28 d 抗折强度,但当 HME-V 膨胀剂掺量过大时,水泥砂浆抗折强度增量不明显,由于膨胀剂的量较大,使得砂粒黏结较为润滑,更加明显的膨胀效果使得孔隙变多,潜在的裂缝成因也随之增加。当 HME-V 膨胀剂掺量为 8% 时,水泥砂浆试块的 7、28 d 抗折强度均为最高<sup>[16-17]</sup>。

如图 4 所示,比较 7、28 d 的砂浆抗折强度,膨胀剂掺量的增加使得抗折强度在后期自然养护条件下的强度提升有很大的作用。当掺量为 8% 时,强度增幅

最大;而在 8% 时的抗折强度达到 7 MPa 以上,且增幅较为稳定<sup>[18]</sup>。8% 掺量的膨胀剂使得试件在成型养护阶段有了良好的膨胀特性,不渗水也没有干裂和出现过度的气泡,这对后期的强度有举足轻重的作用。



(a) 7 d 抗折强度



(b) 28 d 抗折强度

图3 抗折强度—膨胀剂掺量关系图

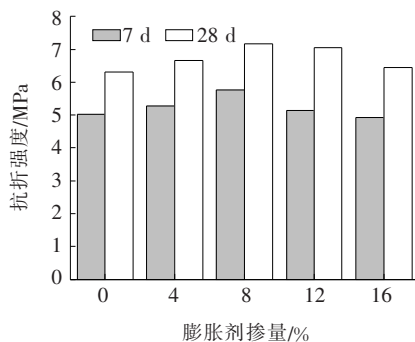


图4 7、28 d 抗折强度对比图

#### (2) 粉煤灰掺量影响

当水灰比为 0.45,膨胀剂掺量为 8% 时的砂浆抗折强度如图 5 所示。

由图 5 可知:7、28 d 的砂浆抗折强度峰值均出现在 20% 粉煤灰掺量条件下,而 15% 和 25% 粉煤灰配比试件的早期抗折强度与养护 28 d 的后期抗折强度有所变化。具体表现在,15% 粉煤灰的试件早期强度较 25% 粉煤灰试件稍高,而 28 d 抗折强度恰好相反,

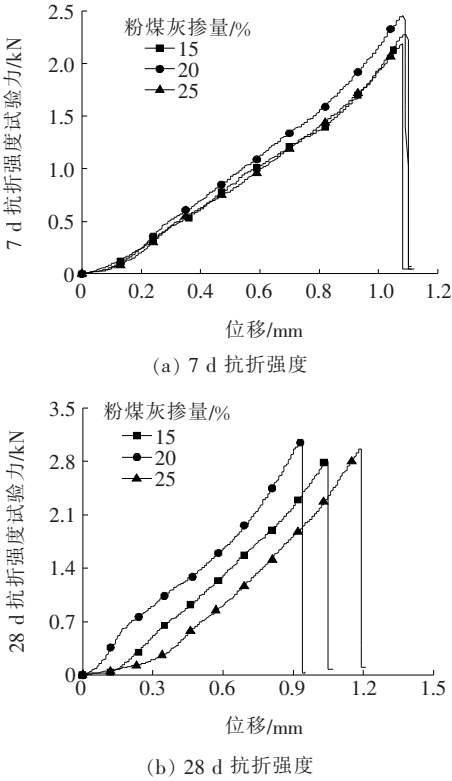


图 5 抗折强度—粉煤灰掺量关系图

且极限荷载差值均在 0.2 kN 以内。这表明:粉煤灰对水泥的水化有一定抑制作用,使得 25%粉煤灰试件的早期强度略低。另一方面得益于抗裂剂的效果,在 28 d 标准养护的时程累计上减缓了水化过程,减少早期体积膨胀并使后期试件收缩得到限制,相比 15%掺量一定程度上提高了后期抗折强度。

2.3 砂浆抗压强度

(1) 膨胀剂掺量影响

图 6 为水灰比 0.45、粉煤灰掺量 20%以及不同膨胀剂掺量试验所得的 7、28 d 砂浆抗压强度曲线。7 d 抗压强度曲线趋势相对一致,但相比于 28 d 抗压强度曲线,显示出些许的趋势差异。28 d 的应力曲线强化阶段趋势几乎一致。造成这种现象的原因可能是 7 d 时,试件的内部仍然处于黏合状态,由于膨胀剂掺量的差异,硬化的过程也有所区别。如图 6 所示,7 d 与 28 d 抗压强度都在 8%膨胀剂掺量的条件下达到了峰值,并且曲线斜率最大<sup>[19]</sup>。

如图 7 所示,与抗折强度的结果类似,当膨胀剂掺量为 8%时,抗压强度达到 70 MPa 以上,相比没有膨胀剂以及 4%掺量膨胀剂的试件抗压强度提升超过 10%<sup>[20-21]</sup>。膨胀剂使水泥作为“胶水”将砂与其他组分黏结,从 7 d 砂浆抗压强度看出,试件弹性阶段的模

量有了些许提升,达到屈服点后,有更明显的塑性发展。这样的趋势表明试件中潜在的细小裂缝较少,实际工程中也不易被液体穿透,兼备抗渗性与高强度。

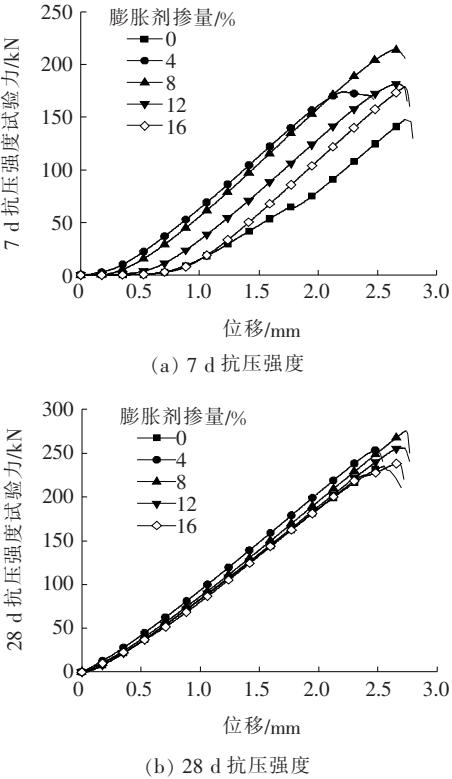


图 6 抗压强度—膨胀剂掺量关系图

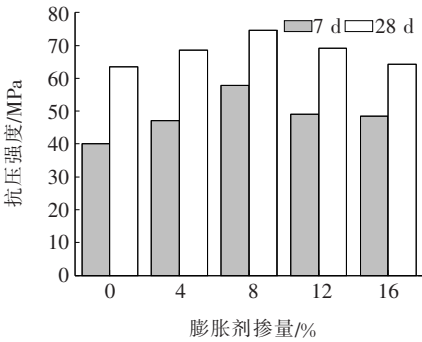


图 7 7、28 d 抗压强度对比图

(2) 粉煤灰掺量影响

砂浆抗压强度变化受粉煤灰掺量的影响与砂浆抗折强度类似,而 28 d 的抗压强度趋势与 7 d 几乎相同。如图 8 所示,随着粉煤灰掺量的提高,抗压强度升高,而 25%掺量的试件抗折强度低于 15%抗折强度。这使得过量粉煤灰降低砂浆抗压强度更加明显。粉煤灰的强度低于水泥,过量的粉煤灰不仅不能有效降低水泥水化热,相反成为水泥黏结作用的阻塞,夹杂在组分中,同时也影响了膨胀剂的补偿收缩作用。因此,在此



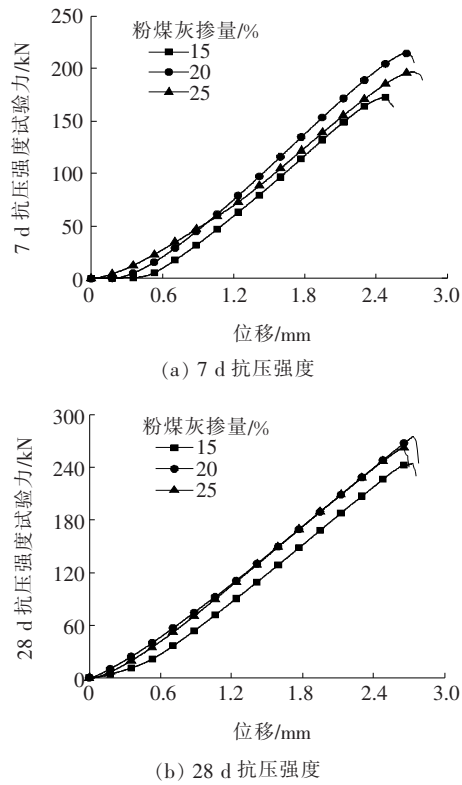


图8 抗压强度—粉煤灰掺量关系图

次试验中,20%掺量的粉煤灰最为合适。

2.4 RFPA 试件压缩模拟

试件压缩模拟的二维云图如图 9 所示。通过该模型的最大主应力的后处理分析可以得出,水泥砂浆模型的受压破坏大致可以分为 3 个阶段:第一阶段,随着计算步数的增加,模型内部逐渐产生了细小的斜裂缝;

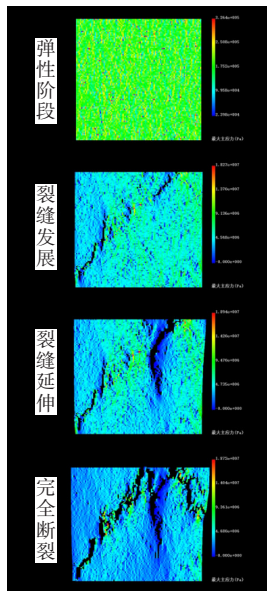


图9 试件模拟破坏过程

第二阶段,模型内部的细小裂缝继续发展并且开始连通,连通的裂缝沿竖向继续发展;第三阶段,裂缝在模型的内部微细发展,逐渐贯通形成多条裂隙,从而将模型分成若干个小柱体,最后模型四侧隆起直至破坏。

抗压强度试验中,试块的破坏形式如图 10 所示。和 REPA 数值模拟对比,试件压缩数值模拟较好地模拟了最优配合比的水泥砂浆试块的破坏过程,裂缝发展部位几乎相同,发展的趋势与形式不尽相同。可以对抗压强度试验以及裂缝的发展进行模拟预测。



图10 试件试验破坏图

3 结论

试验研究表明:HME-V 膨胀剂确保了砂浆先期强度的可靠性,具有足够抗压与抗折强度的同时兼具良好的和易性,能有效防治裂缝的发展。该文试验所得水泥砂浆最优配合比对以后研究混凝土补偿收缩技术以及将来的工程实践具有很好的指导意义。具体结论如下:

- (1) 水泥砂浆的流动性会随着 HME-V 膨胀剂和粉煤灰的掺入而增加,当 HME-V 膨胀剂掺量为 8%、粉煤灰掺量为 20% 时,砂浆和易性适中。
- (2) 掺入适量的 HME-V 膨胀剂能够有效提高水泥砂浆的抗压、抗折强度。当膨胀剂掺量过量时,水泥砂浆的抗压、抗折强度提高幅度下降,甚至低于未掺入膨胀剂的水泥砂浆的强度;当掺入 8% 的 HME-V 膨胀剂时,水泥砂浆的抗压、抗折强度达到峰值。
- (3) 掺入适量的粉煤灰能够增加水泥砂浆的抗压强度和抗折强度。在一定范围内,其试块的抗压强度和抗折强度均会因粉煤灰掺量的增加先上升后下降,且当掺入 20% 的粉煤灰时,水泥砂浆的抗压强度和抗折强度达到最大值。
- (4) 膨胀剂的掺入对于砂浆的先期强度有不小的提升,一定程度上增加了水泥对于砂粒的黏结作用,并减少了气泡孔隙,对于后期强度也有不小的提升,从而有效地抑制了裂缝的产生与发展。

(5) RFPA-2D 通过数值模拟可以很好地模拟出水泥砂浆试块的破坏过程,弥补了实际试验中无法仔细观察试件内部裂缝发展的不足,和试验破坏试件对比不尽相同。这使得对裂缝的试验研究、理论分析乃至实际工程的预测都具有参考价值。

### 参考文献:

- [1] WEST R P, HOLMES N. Predicting Moisture Movement during the Drying of Concrete Floors Using Finite Elements[J]. Constr. Build. Mater., 2005, 19(9): 674—681.
- [2] 黄凯健, 邓敏, 何大贵, 等. 高海拔地区新型养护技术对道面混凝土早期性能影响[J]. 混凝土, 2013(3): 124—127.
- [3] TANG Q., SHI P X, ZHANG Y, et al. Strength and Deformation Properties of Fiber and Cement Reinforced Heavy Metal-Contaminated Synthetic Soils[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019(2): 1—9.
- [4] TANG Q, ZHANG Y, GAO Y F, et al. Use of Cement-Chelated, Solidified, MSWI Fly Ash for Pavement Material: Mechanical and Environmental Evaluations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(11): 1 553—1 566.
- [5] MEDDAH M S, SUZUKI M, SATO R. Influence of a Combination of Expansive and Shrinkage-Reducing Admixture on Autogenous Deformation and Self-Stress of Silica Fume High-Performance Concrete [J]. Constr. Build. Mater., 2011, 25(1): 239—250.
- [6] TANG Q, GU F, CHEN H, et al. Mechanical Evaluation of Bottom Ash from Municipal Solid Waste Incineration Used in Roadbase[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2 018(2): 1—8.
- [7] MO L W, DENG M, WANG A. Effects of MgO-Based Expansive Additive on Compensating the Shrinkage of Cement Paste under Non-Wet Curing Conditions [J]. Cem. Concr. Compos., 2012, 34 (3): 377—383.
- [8] HUANG K J, DENG M, MO L W, et al. Early Age Stability of Concrete Pavement by Using Hybrid Fiber together with MgO Expansion Agent in High Altitude Locality[J]. Constr. Build. Mater., 2013, 48: 685—690.
- [9] HUANG Y, GUAN Y, WANG L, et al. Characterization of Mortar Fracture Based on Three Point Bending Test and XFEM[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2018, 11(4): 339—344.
- [10] HUANG Y C, CHEN J, SHI S J, et al. Mechanical Properties of Municipal Solid Waste Incinerator (MSWI) Bottom Ash as Alternatives of Subgrade Materials[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2 020(1): 1—11.
- [11] COMMREP. Expansive Cement Concretes Present State of Knowledge[J]. JACI, 1970, 67(8): 583—610.
- [12] ASSOCIATION C. Proceedings of the Third International Symposium on the Chemistry of Cement, London 1952[M]. London: Cement and Concrete Association, 1954.
- [13] American Concrete Institute. Klein Symposium on Expansive Cement Concretes[M]. Detroit: American Concrete Institute, 1973: 415.
- [14] FU Yan, XIE Ping, BEAUDOIN J J. Effect of Chemical Admixture on the Expansion of Shrinkage-Compensating Cement Containing a Pre-Hydrated High Alumina Cement-Based Expansive Additive[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(1): 29—38.
- [15] TANG Q, KATSUMI T, INUI T, et al. Membrane Behavior of Bentonite-Amended Compacted Clay Towards Zn(II) and Pb(II) [J]. Membrane Water Treatment, 2015, 6(5): 393—409.
- [16] HAN Y. Tests of Vacuum-Aided Casting of Concrete in Tubes of a CFST Arch Bridge and Application of the Casting to Actual Bridges [J]. Bridge Construction, 2015, 45(2): 19—25.
- [17] TANG Q, TANG X W, LI Z Z, et al. Zn(II) Removal with Activated Firmiana Simplex Leaf: Kinetics and Equilibrium Studies[J]. Journal of Environmental Engineering, 2012, 138(2): 190—199.
- [18] 李长成, 贾福杰, 白效良, 等. HCSA 膨胀剂制备 C50 微膨胀自密实钢管柱混凝土[J]. 混凝土与水泥制品, 2018 (8): 45—48.
- [19] CHEN Xia, YANG Huaquan, ZHOU Shihua. Sensitive Evaluation on Early Cracking Tendency of Concrete with Inclusion of Light-Burnt MgO[J]. J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed., 2011, 26(5): 1 018—1 022.
- [20] LI H, TIAN Q, ZHAO H T, et al. Temperature Sensitivity of MgO Expansive Agent and its Application in Temperature Crack Mitigation in Shiplock Mass Concrete[J]. Constr. Build. Mater., 2018, 170: 613—618.
- [21] GAO Peiwei, XU Shaoyun, XIONG Chen, et al. Research on Autogenous Volume Deformation of Concrete with MgO[J]. Constr. Build. Mater., 2013, 40: 998—1 001.