

文章编号:1673-9981(2022)02-0214-08

低收缩地质聚合物混凝土的配制及在海堤工程中的应用研究

张芸齐¹,刘丹萍²,雷羨盈²,刘炳岳²,唐昀超²,杨永民^{2,3*}

(1. 仲恺农业工程学院机电工程学院,广东广州 510225; 2. 仲恺农业工程学院城乡建设学院,广东广州 510225;
3. 广东省岭南乡镇绿色建筑工业化工程技术研究中心,广东广州,510225)

摘要: 为了研究如何应对海洋环境下建筑物的损伤问题,以广东省某海堤为研究对象,将菱镁石煅烧制备成三种不同活性的MgO,再将不同活性的MgO进行搭配,与地质聚合物胶凝材料均匀混合制备成低收缩地质聚合物混凝土。然后基于标准测试方法测量其不同龄期的自收缩,利用万能试验机获得其不同龄期的力学性能,重点关注了补偿收缩后的低收缩地质聚合物混凝土的服役性能、抗压强度、混凝土内部温升与应变等指标对施工效果的影响。研究表明:补偿体积收缩后,地质聚合物混凝土自收缩大幅降低;地质聚合物混凝土相对普通混凝土而言,快硬、早强的特点更适合处于潮汐水位海堤的快速施工;与普通水泥混凝土相比,地质聚合物混凝土温升和内外温差均较小,开裂风险较低。因此,将低收缩地质聚合物混凝土应用在海堤工程中有重要的研究价值,其可替代普通混凝土以达到更好的施工效果。

关键词: 地质聚合物混凝土;收缩补偿;温度监测;海堤工程应用;潮汐水位

中图分类号: TU528

文献标志码: A

引文格式:张芸齐,刘丹萍,雷羨盈,等. 低收缩地质聚合物混凝土的配制及在海堤工程中的应用研究[J]. 材料研究与应用, 2022,16(2):214-221.

ZHANG Yunqing, LIU Danping, LEI Xianying, et al. Fabrication of Low-shrinkage Geological Polymer Concrete and Its Application in Seawall Engineering[J]. Materials Research and Application, 2022,16(2):214-221.

海洋工程大多远离陆地,建设过程中材料与淡水短缺并受潮汐作用影响较大,建筑物在服役过程中会遭受海水有害离子腐蚀及台风、海浪等的影响。因此,根据海洋工程建设和服役特点,迫切需要一种抗海水腐蚀性优良的胶凝材料^[1-3]。地质聚合物^[4-6]是以烧粘土、工业废渣为主要原料,经适当的工艺处理,通过化学反应得到的一类新型无机聚合物。其与普通水泥基材料相比具有以下优异性能:快硬快凝、早强高强和耐腐蚀,可利用潮汐间歇快速施工,而且可就地取材使用海砂做集料^[7]。

地质聚合物水化产物稳定、浆体结构致密^[8],但是由于地质聚合物早期体积收缩较大,制约了其广泛应用^[9-10]。地质聚合物的化学收缩和自收缩均比

硅酸盐水泥硬化体的要大得多,对于化学收缩,有研究^[11]指出矿渣基地质聚合物的收缩大约是硅酸盐水泥浆体的2倍。目前国内外减少地质聚合物体积收缩主要有以下几种措施:(1)通过调整地质聚合物原材料和激发剂的配比减小收缩,如与NaOH相比,采用水玻璃作为激发剂对地质聚合物减少收缩的效果更明显,且随水玻璃模数的提高减缩效应逐渐增强^[12];(2)利用减缩剂减少地质聚合物的体积收缩,原因是减缩剂降低了硬化浆体孔中水的表面张力,导致孔结构中毛细压力降低,从而降低了地质聚合物的收缩^[13];(3)在地质聚合物中加入膨胀剂进行补偿收缩^[14-15],以及使用高温蒸汽养护降低地质聚合物的收缩^[16]。由于上述这些减缩措施的作用

收稿日期:2022-03-14

基金项目:中国博士后科学基金面上基金项目(2021M690765);广东省自然科学基金面上项目(2021GXNSFAA220045)

作者简介:张芸齐(1998-),黑龙江省七台河市,硕士,主要研究方向为计算机视觉,E-mail:1405377673@qq.com。

通信作者:杨永民(1981-),内蒙古赤峰人,博士,教授,研究方向为水工建筑材料,E-mail: yangyongmin@zhku.edu.cn。

用效果有限,因此需要进一步的系统研究。此外,大部分收缩补偿试验仅限于实验室,暂未见将其应用于大体积混凝土中。

为了进一步推广地质聚合物的应用,重新设计了低收缩的地质聚合物浆体与混凝土的配合比,将低收缩的地质聚合物混凝土应用于实际海堤工程中。以广东省西港海堤为研究对象,选取 1.2 km 的新建海堤,分别用低收缩地质聚合物混凝土和普通硅酸盐混凝土浇筑海堤面板,比较普通硅酸盐水泥混凝土和低收缩地质聚合物混凝土在真实海水环境中的工作性能、抗压强度、混凝土内部温升与应变,为地质聚合物混凝土的工程应用提供技术支持。

1 试验部分

1.1 试验原材料

地质聚合物胶凝材料主要由韶钢粒化高炉矿渣(S95)、黄埔电厂粉煤灰、艾肯硅灰、固体硅酸钠和碳酸钠混合的激发剂及缓凝增强剂硼砂($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)组成,其中 m (韶钢 S95 矿渣): m (黄埔电

II 级粉煤灰): m (硅灰): m (模数为 1.4 的固体硅酸钠和碳酸钠混合激发剂): m (缓凝增强剂硼砂)=70:12:5:8:5,在此比例下的地质聚合物胶凝材料稳定性最高,且物理特定性能达到最好的状态。地质聚合物胶凝材料的化学组成和物理力学性能分别列于表 1 和表 2。此外,试验所用材料还有珠江水泥厂生产的 P·II42.5 水泥。韶关钢铁集团生产的粒化高炉矿渣(S95)的化学组成列于表 3。

起到膨胀作用的活性 MgO 由菱镁石煅烧制备而成。菱镁石的主要矿物组份为 MgCO_3 ,其烧失量超过 50%(表 4),分解温度约为 650 °C 且 700 °C 下可完全分解。将粉磨至一定细度的菱镁石分别升温至 800、900 和 1000 °C(升温速率为 10 °C·min⁻¹),保温 1 h,随即炉内冷却,制备出的三种活性 MgO 分别以 MgO(60 s)、MgO(150 s)和 MgO(220 s)表示。采用柠檬酸变色法(YBT 4019-2006)测定 MgO 的化学活性,根据反应变色时间衡量 MgO 活性,时间越短活性越高。参考 GBMF 19-2017 标准,基于反应时间对 MgO 活性进行划分。0~100 s 为快速型 MgO,即为高活性 MgO;100~200 s 为中速型 MgO,即为中活性 MgO;200~300 s 为低速型 MgO,即为低活性 MgO。

表 1 地质聚合物胶凝材料的化学组成

Table 1 Chemical compositions of geopolymer binder

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	烧失量
含量 $w/\%$	30.56	19.56	2.22	0.85	34.40	3.23	1.23	0.05	2.09	4.88	0.93

表 2 地质聚合物胶凝材料的物理力学性能

Table 2 Physical and mechanical properties of geopolymer binder

标准稠度用水量 /(mL·g ⁻¹)	比表面积 /(m ² ·kg ⁻¹)	密度 /(g·cm ⁻³)	抗折强度/MPa			抗压强度/MPa		
			3天	7天	28天	3天	7天	28天
0.224	375	2.91	4.5	6.5	7.8	30.6	35.2	50.2

表 3 高炉矿渣的化学组成

Table 3 Chemical compositions of GBFS

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	烧失量
含量 $w/\%$	35.07	12.15	0.32	0.74	37.08	11.27	1.19	—	0.49	0.25	-0.61

表 4 菱镁石化学组成及基本性质

Table 4 Chemical compositions and characteristics of magnesite

含量 $w/\%$							密度/(kg·m ⁻³)	平均粒径/ μm
SiO ₂	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	烧失量		
0.14	46.94	0.70	0	0	0.10	51.72	3.16	11.96

相比于地质聚合物胶凝材料粉体,MgO 具有较大的比表面积和较小的颗粒粒径(D_{50} 约为 10 μm ,表 5),其粒径较地质聚合物胶凝材料(D_{50} 约为 23.46 μm)的小。MgO 与地质聚合物胶凝材料混合

后可以均匀填充至地质聚合物胶凝材料颗粒堆积的孔隙中,从而实现颗粒紧密堆积,为快速、均匀补偿收缩创造了有利条件。

表5 不同煅烧工艺制备的MgO粉体特性
Table 5 Properties of MgO powders prepared by different calcination processes

MgO活性	处理温度/°C	活性时间/s	比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	D ₅₀ /μm
高活性	800	60	37.42	9.05
中活性	900	150	32.52	12.59
低活性	1000	220	20.92	13.41

1.2 胶凝材料净浆配合比

以净浆为研究对象,确定MgO的活性搭配及掺量,后续再配制地质聚合物混凝土。针对地质聚合物浆体收缩较大的特点,拟采用活性MgO对地质聚

合物浆体的体积收缩进行补偿。改变MgO的掺量、活性,以及将不同活性的MgO进行搭配,与地质聚合物胶凝材料均匀混合,按照水胶比为0.38加水搅拌均匀(控制流动度为180±20 mm),制备地质聚合物净浆,具体配比列于表6。

表6 胶凝材料净浆配比数据
Table 6 Data of net slurry ratio of cemelling material

原料	添加量/g								
胶凝材料	96	94	92	88	94	94	94	94	94
MgO(60 s)	4	6	8	12	—	—	3	—	3
MgO(150 s)	—	—	—	—	6	—	3	3	—
MgO(220 s)	—	—	—	—	—	6	—	3	3
水	38	38	38	38	38	38	38	38	38

1.3 试验方法

1.3.1 自收缩

依据Gao等^[17]改进的方法进行自收缩测试。首先将浆体密封在波纹管内,其体积变形由波纹管转化为长度变形,通过位移传感器将长度变形转化为电压信号,然后由模数转换器转化为数字信号传输给电脑,最后通过采集软件实时记录数据。

1.3.2 抗压强度

根据GB/T 50081-2019 混凝土物理力学性能试验方法标准^[18],使用意大利Matest C088-01万能试验机以0.5 MPa·s⁻¹的加载速率对边长150 mm立方体进行压缩,以确定试样的立方体抗压强度 f_{cu} 。每组测试三个立方体,以确保数据离散性不超过15%(每个试样的强度不超过中间值的15%),并计算平均值。

2 试验结果及分析

2.1 MgO对胶凝材料净浆自收缩的影响

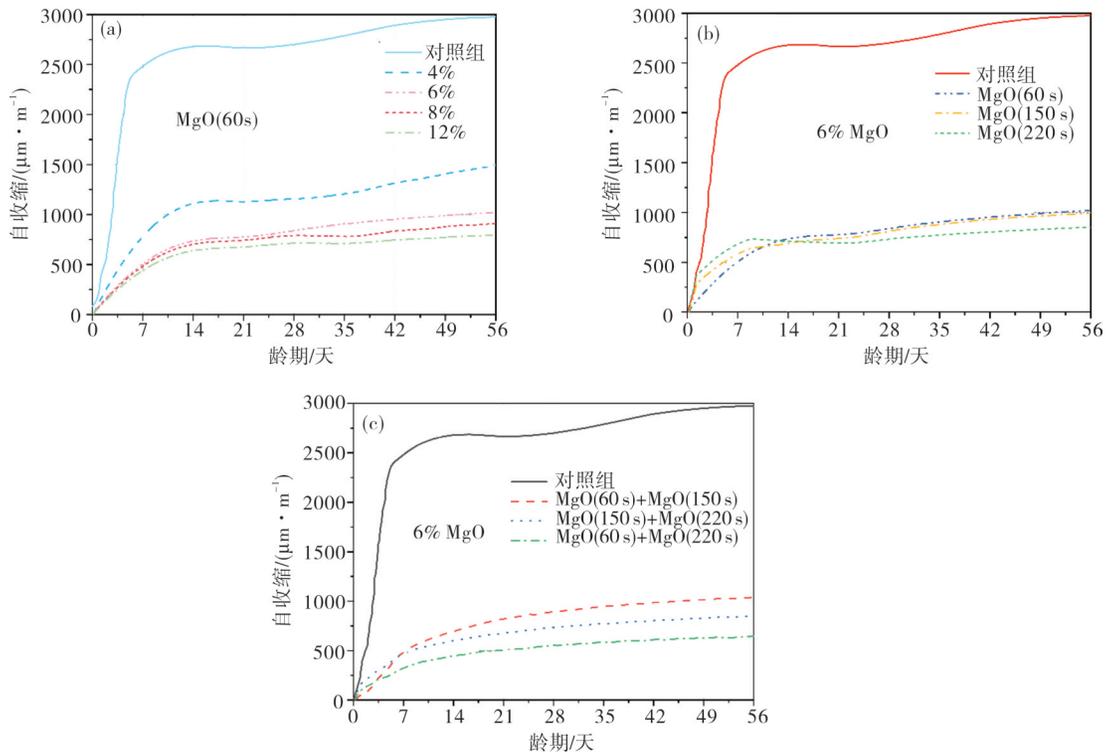
图1为MgO对地质聚合物浆体自体积收缩的影响。从图1(a)可见:地质聚合物浆体自收缩较大,1天自收缩高达1500 μm·m⁻¹,且7天后自收缩仍有增长;随着MgO掺量的增加,地质聚合物浆体自收缩逐渐降低,而且14天后的浆体自收缩趋于平

缓。当MgO掺量为4%时,后期(35天后)的自收缩增大趋势稍有增加,即MgO对地质聚合物浆体自收缩的补偿能力有限;当MgO的掺量为6%,相比未掺MgO地质聚合物浆体的3天及7天自收缩(1237和2490 μm·m⁻¹)分别降低65%和72%;当MgO的掺量为12%,龄期为3天及7天的地质聚合物浆体自收缩分别降低71%和78%,说明MgO可有效补偿地质聚合物浆体的自收缩。由此可知,MgO掺量小于6%时各龄期地质聚合物浆体的自收缩随着MgO掺量的提高明显降低,当掺量超过6%后补偿自收缩的程度降低。

从图1(b)可见,加入MgO的地质聚合物浆体自收缩均显著降低。当使用高活性MgO(60 s)时,地质聚合物浆体的早期(0~14天)自身收缩较小,但14天后浆体的自收缩较大,最终与掺入MgO(150 s)的地质聚合物浆体自收缩大体相同,即高活性的MgO可有效的补偿地质聚合物浆体的早期自收缩;当掺入低活性的MgO(220 s)时,地质聚合物浆体早期(0~13天)自身收缩较大,但可有效补偿地质聚合物浆体后期的自收缩。

从图1(c)可见,不同活性搭配的MgO掺入地质聚合物浆体中,浆体的自收缩均较小,其中MgO(60 s)和MgO(220 s)活性搭配MgO的地质聚合物浆体早期自收缩和后期自收缩最小。表明,可以通过搭配使用不同活性MgO,充分利用不同活性MgO的膨

胀作用,使地质聚合物浆体的体积收缩在不同的阶段得以补偿。



(a) MgO 掺量; (b) MgO 活性; (c) MgO 活性搭配。
 (a) amount of MgO; (b) activities of MgO; (c) matches of MgO with different activities.

图 1 MgO 对地质聚合物浆体自体积收缩的影响

Fig. 1 Effect of MgO on the autogenous shrinkage of geopolymer pastes

2.2 MgO 对地质聚合物净浆抗压强度的影响

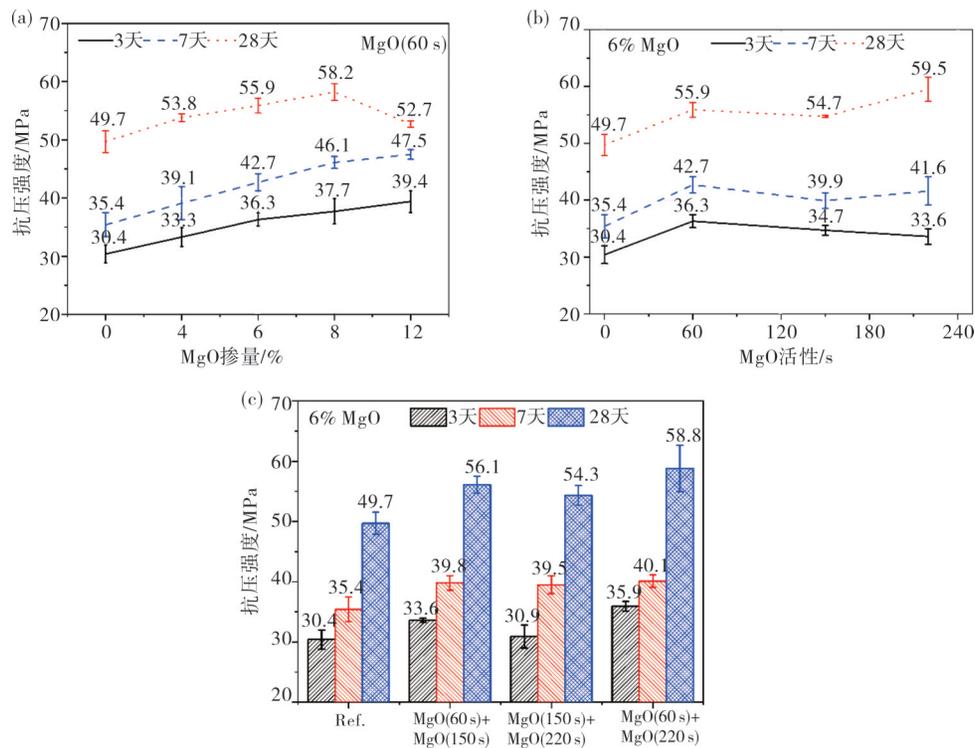
图 2 为 MgO 活性搭配对地质聚合物净浆抗压强度的影响。从图 2(a) 可见, 随着 MgO(60 s) 掺量的增加, 地质聚合物净浆抗压强度(早期 7 天前)均得到提高, 28 天后净浆强度呈现先增大后减小的趋势。当 MgO 掺量为 6% 时地质聚合物净浆的抗压强度(3、7 和 28 天)相对未掺 MgO 地质聚合物的分别提高 24.0%、30.2% 和 17.1%; 与 MgO 掺量为 8% 的地质聚合物相比, MgO 掺量为 12% 的地质聚合物净浆抗压强度(28 天)降低。表明, 过高的 MgO 掺量对地质聚合物净浆的强度不利, 应控制 MgO 掺量在 4%~8%。

从图 2(b) 可见: 掺入活性 MgO(60 s) 时, 地质聚合物净浆 3 天和 28 天的抗压强度分别提高 19.4% 和 12.5%; 掺入活性 MgO(150 s) 时, 其 3 天及 28 天的抗压强度分别提高 14.1% 和 10.1%; 掺入活性 MgO(220 s) 时, 3 天及 28 天的抗压强度分别提高 10.5% 和 19.7%。表明, 高活性 MgO(60 s) 有

利于提高地质聚合物净浆早期(3 天)抗压强度, 低活性的 MgO(220 s) 有利于地质聚合物净浆后期(28 天)抗压强度的发展。

从图 2(c) 可见, 采用活性 MgO(60 s) 和 MgO(220 s) 搭配使用时, 净浆的抗压强度均得到显著提升。相比未掺 MgO 的地质聚合物砂浆, 3 天及 28 天的抗压强度分别提高 18.1% 和 15.3%; 与单掺活性 MgO(60 s) 的地质聚合物相比, 早期的强度稍有降低, 但 28 天后的强度显著提升, 与单掺 6% 的活性 MgO(220 s) 的地质聚合物相比, 早期强度显著提升, 但对 28 天的强度基本无影响。表明, 不同活性 MgO 适宜搭配使用可以提高地质聚合物的净浆强度, 且各龄期的强度发展更为协调。

综合 MgO 补偿地质聚合物浆体体积收缩与净浆强度的结果, 通过对地质聚合物(G1)掺入 6% 的 MgO(MgO(60 s) 与 MgO(220 s) 质量比为 1:1) 进行补偿, 可有效减小地质聚合物净浆的体积收缩, 获得强度较高的改性地质聚合物胶凝材料。



(a) MgO掺量; (b) MgO活性; (c) MgO活性搭配。

(a) amount of MgO; (b) activities of MgO; (c) matches of MgO with different activities.

图2 MgO活性搭配对地质聚合物净浆抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of MgO on the compressive strength of geopolymer pastes

2.3 MgO补偿收缩机理

MgO在地质聚合物混凝土拌合物中可迅速生成大量 $Mg(OH)_2$,产生均匀的体积膨胀。因此,高活性的MgO可在早龄期有效地补偿地质聚合物混凝土在硬化过程的自收缩。而在反应中期,中、低活性的MgO可在此阶段生成较多的 $Mg(OH)_2$,显著地补偿地质聚合物的自收缩。故采用不同活性搭配的MgO补偿收缩效果更佳。

3 地质聚合物混凝土大体积应用

选取1.2 km的新建海堤用地质聚合物混凝土浇筑海堤面板,并选取两个长度大约10 m的分隔缝

进行浇筑质量抽检、混凝土结构温度和应变的监测、现场混凝土结构实体抽芯试验,以验证地质聚合物混凝土可应用于海堤工程中。

3.1 原材料及配合比

惠来县西港海堤加固达标工程环境类别为三类,按照混凝土结构设计规范(GB50010-2010)^[19]要求,应采用C35或以上强度等级的混凝土,故工程应用段采用强度等级为C35的改性地质聚合物混凝土(G35)。混凝土的原材料采用广东揭阳当地的天然海砂、5~31.5 mm的石灰岩碎石,拌合水为自来水,碎石和海砂物理性能列于表7和表8。制备普通混凝土(C35)时采用聚羧酸减水剂,地质聚合物混凝土的配合比列于表9。

表7 碎石的物理性能

Table 7 Physical properties of aggregate

针片状颗粒含量/%	压碎指数/%	堆积密度/($kg \cdot m^{-3}$)	表观密度/($kg \cdot m^{-3}$)	孔隙率/%
7.5	9.1	1560	2750	43.3

表 8 海砂的物理性能
Table 8 Physical properties of sea sand

堆积密度/(kg·m ⁻³)	表观密度/(kg·m ⁻³)	细度模数	含泥量/%
1520	2590	2.5	0.2

表 9 海堤试验段中地质聚合物及硅酸盐水泥混凝土的配合比
Table 9 Mix ratios of geopolymer and Portland cement concretes used in seawall construction

编号	水灰比	添加量/(kg·m ⁻³)				
		胶凝材料	海砂	碎石	减水剂	水
C35	0.40	440	760	1050	7.92	176
G35	0.40	440	720	1000	0	176

3.2 抽芯强度

海堤混凝土面板浇筑 25 天后,对地质聚合物混凝土面板和普通混凝土面板的不同位置进行实体抽芯,各抽取 3 组 9 个芯样,切割磨平后泡水养护 2 天,取出静放 1 天后进行芯样抗压强度试验。

对地质聚合物混凝土面板和普通混凝土面板的芯样进行观察发现,二者表面结构致密,未发现骨料外露和蜂窝孔洞等表观缺陷,两种混凝土均达到了设计强度等级,结果如图 3 所示。从图 3 可见:地质聚合物混凝土芯样 28 天的抗压强度为 48.1~57.0 MPa,抗压强度平均值为 52.8 MPa;混凝土芯样的 28 天抗压强度平均值为 48.8 MPa,相对较低。

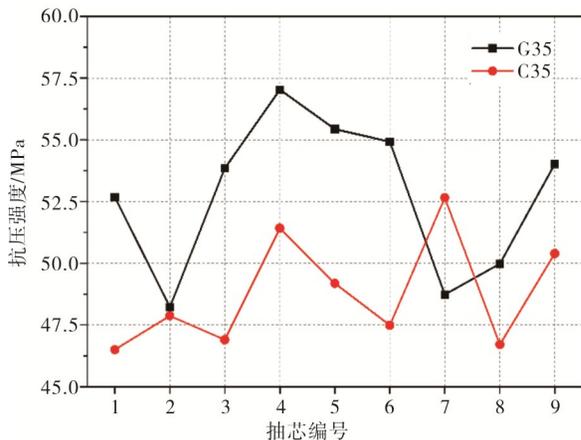


图 3 地质聚合物混凝土和硅酸盐水泥混凝土的抽芯强度
Fig. 3 Compressive strengths of core-drilling samples of geopolymer and Portland cement concrete

3.3 温度监测

3.3.1 测点布设

工程试验段地质聚合物混凝土和普通水泥混凝土

土的温度与变形监测的测点布置见图 4。海堤面板沿边坡长 5.0 m,结构分缝长度为 10.0 m,测点采用四个断面布设传感器。在断面①,上中下位置分别布设 3 根温度传感器,即为 T1,T2 和 T3;在断面②,左右位置分别布设 2 根温度传感器,即为 T4 和 T5。

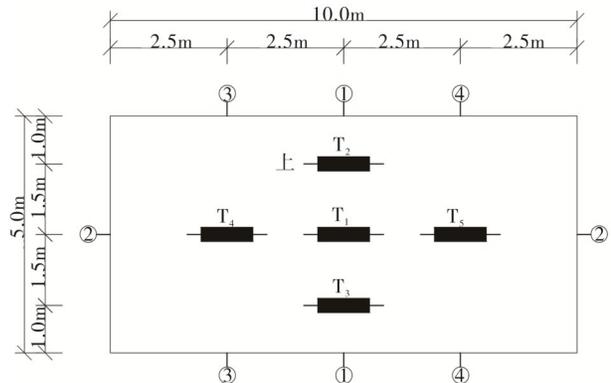


图 4 混凝土面板温度监测点布置图

Fig. 4 Locations of temperature measurement in seawall geopolymer concrete panel

3.3.2 监测结果

自混凝土浇筑开始,对试验段所在地的气温进行记录。工程试验段期间气温比较高(24~34℃),早晚温差较大,最高温度达 38.5℃,最低气温为 17.6℃。温度监测结果表明,地质聚合物混凝土在初始 10 h 内,各测点温度增加较快,30 h 左右温达到峰值(各测点最高温度为 43~49℃),随后混凝土温度下降,龄期为 120 h 左右达到稳定,稳定后受气温影响有所波动。在断面①中,中间测点温度最高,底部其次,上部最低;在断面②中,三个测点的温度相差不大,中间测点温度最高,左右两侧温度测点稍低。

表 10 为地质聚合物混凝土浇筑及监测期间的最大温度。由表 10 可知,地质聚合物混凝土测点温度较普通混凝土相对应测点的温度低,其中 T₁ 测点的最高温度低于 53℃。普通混凝土测点温度和地质聚合物混凝土测点温度类似,即中间测点温度最高,左右和上下温度测点较低,上部温度测点温度最低,各测点的温度在 43~53℃ 范围内。按照大体积混凝土施工规范(GB 50496-2018)^[20]要求,混凝土模内温升值不宜大于 50℃,内外温差不宜大于 25℃。温度监测结果表明,地质聚合物混凝土与普通水泥混凝土相比,地质聚合物混凝土温升和内外温差均较小,开裂风险低。

表 10 地质聚合物混凝土浇筑及监测期间的最大温度
Table 10 Maximum temperatures of sea wall geopolymer concrete during casting and monitoring stages /°C

混凝土类型	T1	T2	T3	T4	T5
G35	48.75	43.52	测点损坏	45.95	48.35
C35	52.96	47.95	48.32	47.95	49.35

4 结论

(1) MgO在地质聚合物浆体中可以补偿地质聚合物的体积收缩。采用低活性 MgO(220 s)和高活性 MgO(60 s)搭配,可以起到协调改善地质聚合物早期和后期体积收缩的效果。在地质聚合物中掺入 6% 的 MgO,即 MgO(60 s)与 MgO(220 s)质量比为 1:1,可得到体积收缩较小及满足实际工程需要的地质聚合物。

(2) 不同活性搭配的 MgO 补偿收缩效果更佳,不同活性搭配的 MgO 可在地质聚合物混凝土整个硬化期间持续实现补偿收缩。

(3) 将海砂制备的地质聚合物混凝土应用于 1.2 km 的新建海堤中,工程试验结果表明地质聚合物混凝土具有较高的抗压强度,均值为 50.1 MPa。工程监测结果表明,地质聚合物混凝土最大温升为 48 °C,较普通混凝土最大温升低了 4 °C 左右,地质聚合物混凝土具有较低的开裂风险。

参考文献:

- [1] GANESH A C, MUTHUKANNAN M. Development of high performance sustainable optimized fiber reinforced geopolymer concrete and prediction of compressive strength[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 282: 124543.
- [2] NUAKLONG P, JONGVIVATSAKUL P, POTHISIRI T, et al. Influence of rice husk ash on mechanical properties and fire resistance of recycled aggregate high-calcium fly ash geopolymer concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 252: 119797.
- [3] ZAKKA W P, ABDUL SHUKOR LIM N H, CHAU KHUN M. A scientometric review of geopolymer concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 280: 124353.
- [4] 徐方, 顾功辉, 黄晓明, 等. 地质聚合物泡沫混凝土气孔结构形成机理研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(5): 1024-1029.
- [5] 曲阳威, 韩凤兰, 邢质冰, 等. 粉煤灰地质聚合物多孔材料的制备及其性能研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(11): 144-147.
- [6] 杨世玉, 赵人达, 靳贺松, 等. 粉煤灰地聚物砂浆早期强度的影响参数研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(6): 162-169.
- [7] 姜正平, 明维. 蒸压养护碱激发矿渣混凝土中钢筋早期锈蚀状况[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2): 222-227.
- [8] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A, PALOMO A. Geopolymers[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2006.
- [9] KHAN I, XU T, CASTEL A, et al. Risk of early age cracking in geopolymer concrete due to restrained shrinkage [J]. Construction and Building Materials, 2019, 229: 116840.
- [10] HASNAOUI A, GHORBEL E, WARDEH G. Effect of curing conditions on the performance of geopolymer concrete based on granulated blast furnace slag and metakaolin [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(3): 04020501.
- [11] BAKHAREV T. Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(6): 1224-1232.
- [12] 杨长辉, 刘先锋, 刘建. 碱矿渣水泥及混凝土化学外加剂的研究进展[J]. 混凝土, 2006(4): 17-28.
- [13] PALACIOS M, PUERTAS F. Effect of superplasticizer and shrinkage-reducing admixtures on alkali-activated slag pastes and mortars [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(7): 1358-1367.
- [14] 卢都友, 郑彦增, 刘永道, 等. 轻烧氧化镁对地质聚合物变形行为的影响及机理[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(11): 1625-1630.
- [15] JIA Z, YANG Y, YANG L, et al. Hydration products, internal relative humidity and drying shrinkage of alkali activated slag mortar with expansion agents[J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 198-207.
- [16] NOUSHINI A, CASTEL A, GILBERT R I. Creep and shrinkage of synthetic fiber reinforced geopolymer concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 2018, 71(20): 1-43.
- [17] GAO P, ZHANG T, LUO R, et al. Improvement of autogenous shrinkage measurement for cement paste at very early age: Corrugated tube method using non-contact sensors [J]. Construction and Building Materials, 2014, 55: 57-62.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50081-2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010-2010

混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011

大体积混凝土施工规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.

[20] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB 50496-2018

Fabrication of Low-shrinkage Geological Polymer Concrete and Its Application in Seawall Engineering

ZHANG Yunqing¹, LIU Danping², LEI Xianying², LIU Bingyue², TANG Yunchao², YANG Yongmin^{2,3*}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 2. College of Urban and Rural Construction, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 3. Guangdong Lingnan Township Green Building Industrialization Engineering Technology Research Center, Guangzhou 510225, China)

Abstract: In order to reduce the damage of buildings in the marine environment, magnesite was calcined into three types of MgO with different chemical activities, which were evenly mixed with geological polymer gel materials to form low-shrinkage geological polymer concretes. Then, the shrinkage properties of different geological polymer concretes were measured based on the standard testing method. The mechanical properties of different geological polymer concretes were tested by the universal testing machine. The influence of the compressive strength, internal temperature rise and strain of the low-shrinkage geological polymer concretes on the construction effectiveness were studied in detail. The results showed that the self-shrinkage of the geological polymer concrete was greatly reduced after the shrinkage compensation. Besides, geological polymer concrete is more suitable for rapid construction of seawalls compared with the ordinary cement concrete, which is due to the temperature rise and temperature difference of the geological polymer concrete are smaller, and cracking risk is lower. Therefore, it is important to study the applications of low-shrinkage geological polymer concretes in seawalls, which can replace ordinary concrete to achieve better construction results.

Key words: geopolymer polymer concrete; shrinkage compensation; temperature monitoring; seawall engineering application; tidal water level

(学术编辑:孙文)