

## 机制砂/海砂复合砂浆养护方法与力学性能研究

黄甲才<sup>1</sup>, 赵瑞宇<sup>2</sup>, 文双寿<sup>3</sup>

(1. 广东交科检测有限公司, 广东广州 510550; 2. 中冶天工集团有限公司, 天津 300308,  
3. 广东华路交通科技有限公司, 广东广州 510420)

**摘要:** 为解决机制砂吹洗石粉污染环境与河砂砂源不足的问题, 利用机制砂与海砂按不同配比组合成复合砂, 通过堆积密度、空隙率、亚甲蓝值(石粉含量)、氯离子含量、筛分实验与含泥量试验, 对复合砂浆试件采取5种不同养护方式进行物理力学试验对比研究。结果表明: 当机制砂与海砂二者比例为6:4(质量比)时, 细度模数为2.97, 级配类别属于I类, 复合砂的氯离子含量为0.02%, 亚甲蓝值为0.6%, 含泥量为0.89, 均在规定的限值以内; 在多种养护方式下, 采用内外复合养护时砂浆力学性能最优。

**关键词:** 机制砂; 海砂; 养护方式; 力学性能; 微观结构

中图分类号: TU528

文献标识码: A

## Study on the Curing Methods and Mechanical Properties of Composite Mortar Made of Mechanism Sand and Sea Sand

HUANG Jiakai<sup>1</sup>, ZHAO Ruiyu<sup>2</sup>, WEN Shuangshou<sup>3</sup>

(1. Guangdong Jiaotong Testing Co., Ltd., Guangzhou, 510550, Guangdong, China;  
2. MCC Tiangong Group Co., Ltd., Tianjin 300308, China;  
3. Guangdong Hualu Transportation Technology Co., Ltd., Guangzhou 510420, Guangdong, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of pollution of stone powder and insufficient source of river sand by blowing stone powder with manufactured sand, the composite sand was combined into composite sand by combining different ratios of manufactured sand and sea sand, and the physical and mechanical tests of five different curing methods were carried out on the composite sand specimens through the bulk density, porosity, stone powder content, chloride ion content, gradation composition and mud content tests. The results show that when the ratio of manufactured sand to sea sand is 6:4 (mass ratio), the fineness modulus is 2.97, the gradation category belongs to class I, the chloride ion content of composite sand is 0.02%, methylene blue value is 0.6%, and mud content is 0.89, all of which are within the specified limit.

**Key words:** machine-made sand; sea sand; maintenance methods; mechanical properties; microstructure

随着我国基础设施建设的大力开展, 砂石材料消耗量巨大, 许多地方开始出现乱采、乱挖现象, 导致天然河砂资源日渐稀缺, 市场价格也逐渐走高<sup>[1-2]</sup>。为解决上述问题, 中共中央印发了“砂石二十三条”, 全面梳理砂石行业发展方向, 文中除了提及河道采砂管控外, 还着重阐述了砂源的替代方案, 要求逐步有序推进海砂开采利用

与推动机制砂石产业高质量发展<sup>[3]</sup>。在此背景下, 许多企业开始用海砂与机制砂代替天然河砂投入生产。但是, 由于现阶段机制砂存在吹洗石粉污染环境、表面粗糙、棱角过大与级配不合理等缺陷, 这些缺陷限制了其在实际工程中取代天然河砂的使用范围, 加上细集料约占混凝土材料的30%, 如此庞大的需求量也使得机制砂想完全

收稿日期: 2025-06-23

作者简介: 黄甲才, 工程师, 本科, 研究方向为路面检测与养护

取代天然河砂变得极为困难<sup>[5-8]</sup>。王圣洁等<sup>[9]</sup>学者在近海砂石资源潜力的可视化评价中指出,我国近海海砂总量约为 $(67.96 \sim 68.94) \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,海砂淡化旨在去除其中的盐分与氯离子等杂质,常用方法包括自然堆置、机械冲洗、混合法或掺加阻锈剂等。若淡化后能有效利用,将对我国工程建设大有裨益。因此,若能将机制砂和海砂合理混合,即发挥互补效应,这不但有利于砂料资源的多样化与可持续利用,提高建筑材料的质量稳定性,有效解决现阶段工程用砂的供需矛盾问题,还能对环境保护起到积极作用。

此外,传统养护方式如覆盖薄膜、洒水养护与填埋养护等,越来越难适应现代复杂的施工工况,这种养护方式不仅费时费力、效果不佳,还会导致胶凝材料水化不充分,与骨料结合密实程度降低,进而造成混凝土体系的各项性能下降<sup>[10-14]</sup>。因此,当前除了解决混凝土材料中细集料的资源化利用问题外,在构件成型后的养护阶段,也亟需找到与之配套的解决方案。这不仅对于延长砂浆体系服役寿命与降低实际工程养护维修成本具有重要意义,也可积极响应国家绿色低碳与可持续发展的宏观政策<sup>[15-16]</sup>。

基于此,本文使用机制砂加堆置晾晒后的淡化海砂取代天然河砂作为细集料,探究复合砂浆

的各项物理力学性能,优化两者混合比例,以期解决砂源短缺的问题,并在养护阶段,探究外养护(高分子乳液)和内养护(高吸水树脂)等便利的几种养护方式,比较分析得到具有良好养护效果和绿色节能环保的最佳养护方式。

## 1 原材料及方法

### 1.1 原材料

#### 1.1.1 水泥

采用42.5级普通硅酸盐水泥,其化学成分组成如表1所示。

表1 水泥化学组成

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>	f-CaO
含量/%	21.75	4.61	2.73	65.336	3.62	0.47	0.574	0.91

根据《水泥比表面积测定方法(勃氏法)》(GB/T 8074—2008)<sup>[17]</sup>、《水泥标准稠度用水量、凝结时间与安定性检验方法》(GB/T 1346—2024)<sup>[18]</sup>,对所用水泥物理性能进行测试,结果见表2。

#### 1.1.2 砂石

复合砂、机制砂、淡化海砂三种砂的示意图见图1。

表2 水泥的物理性能

细度/ %	密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	比表面积/ (m <sup>2</sup> /kg)	标准稠度/ %	安定性/ mm	凝结时间/min		抗压强度/MPa	
					初凝	终凝	3 d	28 d
0.9	3.14	350	25.1	0.4	136	217	28.5	57.1



图1 三种砂示意图

#### 1.1.3 养护材料

本文使用高吸水树脂(SAP)作为内养护材料,图2为SAP使用过程中的干燥状态、加清水后SAP吸水迅速膨胀状态、最终达到饱和状态,分别如图2(a)~图2(c)所示;图3为本文使用的外养护剂,为不透明水乳状,干燥成膜时间小于4h。

### 1.2 试验方法

(1) 进行筛分试验、含泥量试验、表观密度试验、堆积密度试验、石粉含量测定试验、氯离子含量测定试验:依据《建设用砂》(GB/T 14684—2022)<sup>[20]</sup>中的相关试验规定进行。其中根据公式(1)计算出砂的表观密度。



(a) SAP 干燥状态 (b) SAP 吸水状态

(c) SAP 饱和状态

图2 SAP 的不同状态



(a) 外养护剂 (b) 外养护剂成膜状态

图3 外养护剂示意图

$$\rho_0 = \left( \frac{G_0}{G_0 + G_2 - G_1} - a_t \right) \times \rho_w \quad (1)$$

公式(1)中,  $\rho_0$  为表观密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_w$  为水的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $G_0$  为烘干质量,  $\text{g}$ ;  $G_1$  为试样和水及容量瓶的总质量,  $\text{g}$ ;  $G_2$  为水及容量瓶的总质量,  $\text{g}$ ;  $a_t$  为水温对表观密度影响的修正系数, 取 0.002。

根据公式(2)计算出砂的空隙率。

$$V_0 = \left( 1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \times 100 \quad (2)$$

公式(2)中,  $V_0$  为孔隙率, %;  $\rho_1$  为试样的松散堆积密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_2$  为试样的表观密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

根据公式(3)计算出亚甲蓝表示石粉含量。

$$\text{MB} = \frac{V}{G} \times 10 \quad (3)$$

公式(3)中, MB 为亚甲蓝值,  $\text{g}/\text{kg}$ ;  $G$  为试样质量,  $\text{g}$ ;  $V$  为所加入亚甲蓝总量,  $\text{mL}$ 。

依据公式(4)计算出氯离子含量。

$$Q_f = \frac{N(A - B) \times 0.0355 \times 10}{G_0} \times 100 \quad (4)$$

公式(4)中:  $Q_f$  为氯离子含量, %;  $N$  为硝酸银标准溶液浓度,  $\text{mol}/\text{L}$ ; 样品滴定时消耗的

硝酸银标准溶液的体积,  $\text{mL}$ ; 空白试验时消耗的硝酸银标准溶液的体积,  $\text{mL}$ ; 0.0355 为换算系数; 10 为全部试样溶液与所分取试样溶液的体积比;  $G_0$  为试样质量,  $\text{g}$ 。

(2) 进行强度检验试验。依据《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—2021)<sup>[21]</sup> 试验规定, 用电子万能试验机测试试件相应龄期的力学强度。

(3) 进行电镜扫描试验。将试验后的试件破碎成片状小块, 置于无水乙醇中浸泡防止其继续水化; 采用 SEM-S4800 型扫描电镜, 在高真空模式下观察不同养护方式下试样大小约为 10 mm 的微观结构特征。

## 2 复合砂配比设计结果分析

### 2.1 细度模数

复合砂需满足细度模数适配多数使用场景、颗粒级配良好、有害物质含量低于规范限值的要求, 在此基础上, 更多地使用海砂, 发挥其储量丰富的优势和天然砂的优良性能。依据《建设用砂》(GB/T 14684—2022) 中的试验规定, 砂的细度模数公式(5), 得出不同混合比例砂的细度模数, 表3为筛分试验所得结果。

$$M_x = \frac{(A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6) - 5A_1}{100 - A_1} \quad (5)$$

公式(5)中:  $M_x$  为砂的细度模数;  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_5$ 、 $A_6$  分别为 4.75 mm、2.36 mm、1.18 mm、600  $\mu\text{m}$ 、300  $\mu\text{m}$  与 150  $\mu\text{m}$  筛的累计筛余百分率, %。

表3 筛分试验表

复合砂比例	筛孔/mm						细度模数
	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	
5 : 5	0	64.23	106.87	134.20	103.32	24.21	2.76
6 : 4	0	69.58	108.88	168.21	87.77	22.61	2.97
7 : 3	0	70.35	122.03	149.34	99.34	17.45	3.01
8 : 2	0	72.47	122.22	160.1	110.29	14.24	3.13

经筛分试验可以发现(见表3), 随着淡化海砂的比例增加, 复合砂的细度逐渐增大。根据《建设用砂》(GB/T 14684—2022) 的细度模数和颗粒级配原则, 当淡化海砂与机制砂的比例为 5 : 5 和 6 : 4 时, 细度模数在 2.3 ~ 3.0 之间, 级配类别属于 I 类, 符合规定要求, 因此选用淡化海砂与机制砂的比例为 5 : 5 与 6 : 4 的复合砂进行进一步堆积密度、空隙率、亚甲蓝值(石粉含量)、氯离子含量, 以及含泥量试验。

## 2.2 物理性能参数

表4 砂的物理性能参数表

名称	堆积密度 kg/m <sup>3</sup>	空隙率/ %	亚甲 蓝值	氯离子 含量/%	含泥量/ %
淡化海砂	1 485	43	—	0.03	1.1
机制砂	1 590	44	1.5	—	0.6
复合砂5:5	1 510	35	0.4	0.02	0.84
复合砂6:4	1 550	37	0.6	0.02	0.89

结合堆积密度、空隙率、亚甲基蓝值(石粉含量)、氯离子含量、含泥量试验结果(见表4),发现复合砂5:5与复合砂6:4均能满足细度模数和颗粒级配的要求,同时有害物质含量(氯离子含量、亚甲基蓝值、含泥量)也均在限值(氯离子含量 $\leq 0.02$ ,亚甲基蓝值 $\leq 1.0$ ,含泥量 $\leq 1.0$ )以内,因此优先选用淡化海砂更多的比例,最终选定混合比例为6:4的复合砂进行不同养护方式下砂浆试件力学性能试验。

## 3 力学试验结果与讨论

### 3.1 养护方式及配比

本节探究的不同养护方式共5种,其中1.0 SAP为采用Montanari<sup>[22]</sup>等总结研究的混凝土内养护SAP掺量公式(6),计算得到的标准掺量;1.5 SAP是标准掺量的1.5倍。具体如下式:

$$SAP = \frac{CL\alpha}{\theta} \quad (6)$$

式中,SAP为SAP的干掺量;C为水泥用量;L为水泥的化学收缩率; $\alpha$ 为预期水泥最大水化度; $\theta$ 为30 min时SAP在干燥孔溶液中的吸水倍率。

参照《砌筑砂浆配合比设计规程》(JGJ/T 98—2011),本节砂浆配合比如下表5所示。

表5 砂浆配合比表

组别	水泥/ (kg/m <sup>3</sup> )	水/ (kg/m <sup>3</sup> )	砂/ (kg/m <sup>3</sup> )	SAP/ (kg/m <sup>3</sup> )
复合砂浆	310	270	1 550	—
淡化海砂	310	270	1 485	—
机制砂	310	270	1 590	—
1.0 SAP 复合砂浆	310	270	1 550	0.372
1.5 SAP 复合砂浆	310	270	1 550	0.563

### 3.2 抗折性能

下文中1.0 SAP代表的是标准掺量的内养护、1.5 SAP为标准掺量1.5倍的内养护;内外养护采用的是1.5倍SAP配合养护剂养护;外养

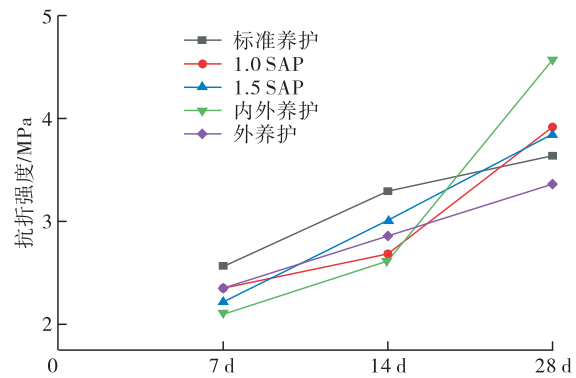
护为仅采用养护剂养护;标准养护为20℃、95湿度的养护箱进行。图4为不同养护方式下试件抗折强度试验结果。由图4(a)可知,标准养护条件下复合砂砂浆试件的抗折强度在前期发育较快,在14 d之后开始趋于缓慢增长。采用内外养护的试件在前期强度较低,在14 d后的抗折强度增长迅速,抗折强度增长为几种养护组里最高的。1.0 SAP和1.5 SAP抗折强度在28 d时高于标准养护组,外养护组的抗折强度在28 d龄期时最低。

经分析,标准养护组在养护室中,湿度和温度条件较好,砂浆的抗折强度在前期外部发育快,内部发育较慢,当外部发育完毕后,外部水分较难进入内部,因此在14 d龄期之后,抗折强度发育减缓。外养护则在砂浆表面形成有机薄膜,减缓内部水分蒸发速度,但也隔绝了外部的水分进入,因此外养护的强度发展较为规律,呈现一定的线性关系。内养护在养护过程中延缓了水泥石的水化进程,同标准养护相比,前期的强度较弱,强度发育在后期逐渐增快<sup>[23-24]</sup>。此外,内养护在一定程度上提高了试块的塑性变形能力,相对于外养护与标准养护组的抗裂程度更高。张珈碧课题组<sup>[24]</sup>也发现利用高吸水树脂作内养护剂,可有效提高基体抗裂能力,失稳断裂韧性也有所提升。

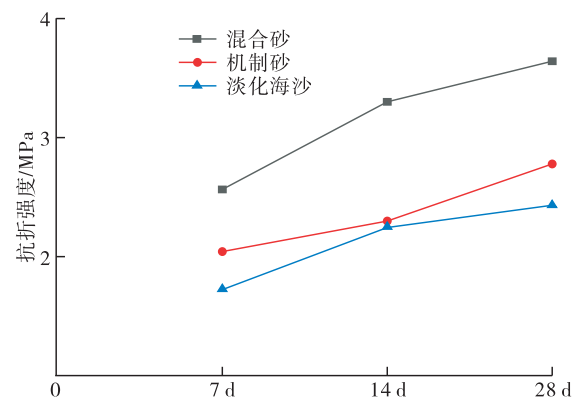
图4(b)为三种砂在标准养护下的抗折强度变化规律图。由图4(b)可以看出,复合砂试验组的抗折强度明显高于淡化海砂和机制砂试验组的抗折强度。这是由于淡化海砂属于粗砂,机制砂属于细砂,且两者的颗粒级配均较差;而复合砂的颗粒级配较好,因此其内部结构更为密实,抗折强度更佳。

### 3.3 抗压性能

图5为不同养护方式下试件抗压强度试验结果。由图5(a)可知,淡化海砂的抗压强度在28 d时,为试验组最高,混合砂组次之。图5(b)反映出外养护28 d龄期的抗压强度很高,但抗折强度没有对应很高,这是由于外养护后的试件强度较高,同时其韧性更低,脆度进一步提升。内外养护组的抗压强度低于外养护组但高于1.0 SAP和1.5 SAP组,内外养护组抗折强度高于外养护组。这是由于内部释水、外部锁水充分保障了水泥水化所需要的湿度和水分条件,因此对于复合砂砂浆的养护方式而言采用内外养护,能获得最佳力学性能。

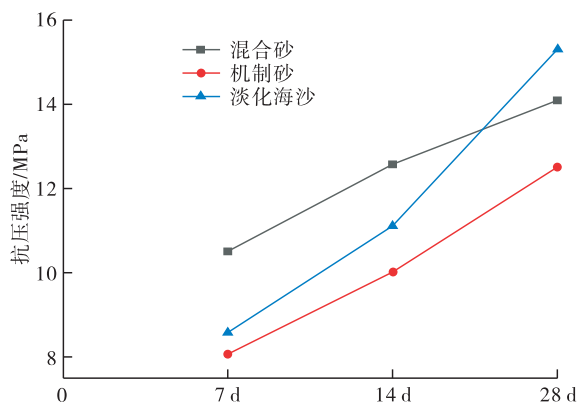


(a) 不同养护方式抗折强度变化规律

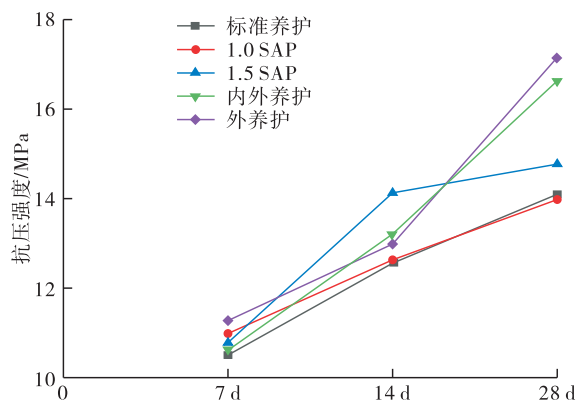


(b) 标准养护下三种砂抗折强度变化规律

图4 不同养护方式下试件抗折强度变化规律图



(a) 三种砂标准养护下抗压强度变化规律

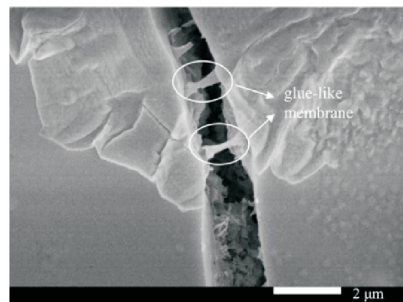


(b) 不同养护方式抗压强度变化规律

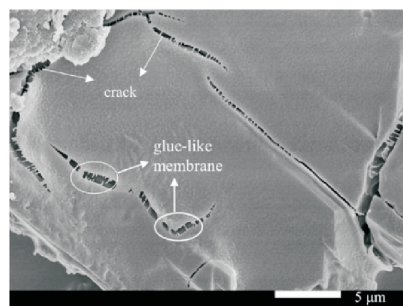
图5 不同养护方式下试件抗压强度变化规律图

### 3.4 微观结构

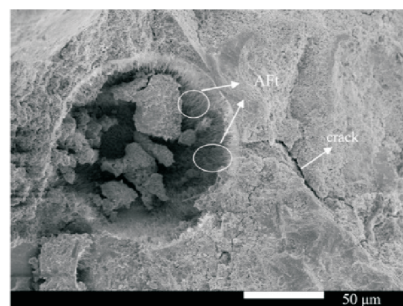
为了进一步说明内外养护剂与力学性能变化规律的内在联系,采用扫描电镜对结束力学试验后的试件进行观测。本文选取内外养护组的试件进行试验,其扫描电镜图如图6所示。



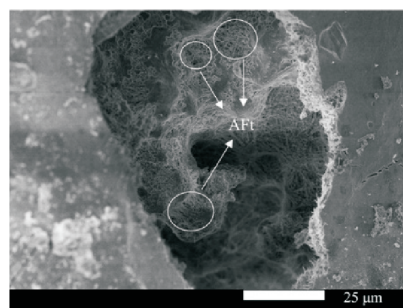
(a) 外养护成型试件表面 I



(b) 外养护成型试件表面 II



(c) 内养护残留孔洞 I



(d) 内养护残留孔洞 II

图6 内外养护组微观表征图

外养护体系的微观形貌如图6(a)、(b)所示,试件表面经外养护处理后形成了一层连续性

薄膜结构,但该薄膜存在明显的拉丝状裂隙。这一现象的形成与水泥硬化过程中的自干燥收缩特性密切相关:外养护剂在试件表面成膜阶段,水泥基体尚未发生显著干缩,而随着水化反应的持续进行,基体因水分消耗产生自干缩效应,导致先期形成的薄膜受拉应力作用而开裂。

值得注意的是,透过薄膜裂隙可观察到其下方水泥基体内部的微观结构特征——针棒状钙矾石(Aft)晶体与絮状水化硅酸钙(C-S-H)凝胶呈现出良好的发育状态。这一微观现象揭示了外养护剂的核心作用机制:其在水泥基体表面形成的膜性物质能够有效阻隔外界环境与基体内部的水分交换,通过物理屏障作用抑制基体表面水分的蒸发,实现“外部锁水”。这种锁水效应不仅减少了基体内部水分向外界的迁移损失,更为水化反应的持续进行保留了必要的水分环境,从而为水泥基体强度的稳步发展提供了有利条件。

内养护体系的微观作用特征则呈现出不同的机制,如图6(c)、(d)所示。通过对采用内养护技术(SAP掺加)的试件进行显微观测可以发现,高吸水树脂(SAP)的微尺度养护作用显著促进了水泥基体的水化进程:一方面,SAP在水化过程中通过其水分释放特性为周围基体提供了持续的湿度环境,促使大量水化产物(如C-S-H凝胶、Aft晶体等)生成;另一方面,当基体内部湿度因水化消耗或环境蒸发出现下降趋势时,SAP能够通过水分缓释作用实现基体内部的湿度补偿,避免了因湿度骤降导致的水化中断。这种内养护机制直接作用于水泥基体内部,使得基体中各水化产物薄膜之间的间隙显著缩小,有效优化了微观结构的致密性。

综合分析两种养护方式的作用特征可知,外养护剂的表面锁水功能与内养护剂的内部湿度调控作用具有显著的协同效应。外养护通过物理屏障减少外部水分散失,内养护通过主动释水实现内部湿度补偿,二者形成的“组合锁水系统”能够全方位优化水泥基体的水化环境:既保证了水化反应的持续进行,又有效缓解了因水分分布不均导致的收缩应力集中现象,从而在微观层面减少了基体内部的孔隙与裂隙,在宏观层面则表现为水泥基体系的抗压强度、抗折强度等力学性能指标得到显著提升。

## 4 结论

(1) 当复合砂浆比例为海砂:机制砂6:4

时,其级配类别属于I类,且氯离子含量、亚甲基蓝值、石粉含量与含泥量均处于规范限定值以内。

(2) 外养护与内养护均可提升复合砂浆力学强度,在外养护下,复合砂浆的抗压强度最佳,抗折强度相较于标准养护组有所降低;单独采用SAP进行内养护时,抗折强度提升明显,而采取内外养护进行复合养护时,复合砂浆抗压强度相较于外养护组提升效果相近,抗折强度最优。

(3) 外养护能够在试样表面形成一层薄膜,这层薄膜对基体内部自然水分蒸发具有抑制效果,且其在基体湿度下降收缩过程中产生拉丝裂隙,并具有一定延展韧性,同时进行内养护的复合砂浆的裂隙更小,表明内养护从基体内部进行湿度补偿,维持基体内部湿度稳定,加上外养护抑制水分蒸发效应,使得复合养护的水泥基材料宏观上表现出更优异的物理力学性能。

## 参考文献:

- [1] 王雪艳,刘明辉,刘莹,等. 沙漠砂+机制砂混凝土力学性能及碳排放研究[J]. 土木工程学报,2022,55(2): 23-30.
- [2] 褚洪岩,蒋金洋,李荷,等. 环保型细集料对超高性能混凝土力学性能的影响[J]. 材料导报,2020,34(24): 24029-24033.
- [3] 中央印发“砂二十三条”全面梳理砂行业发展方向[J]. 商品混凝土,2020(4):7-10.
- [4] 赵有明,韩自力,李化建,等. 我国铁路工程机制砂混凝土应用现状及存在问题[J]. 中国铁路,2019(8):1-7.
- [5] LI H, HUANG F, CHENG G, et al. Effect of granite dust on mechanical and some durability properties of manufactured sand concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 109: 41-46.
- [6] 徐潘宏. 机制砂在商品混凝土中的应用[J]. 绿色环保建材,2017(12):150,153.
- [7] 马昆林,莫文波,徐占军,等. 细骨料对SCC等效砂浆工作性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023,54(1):156-168.
- [8] 汪保印,张洁,熊金伟,等. 废弃石粉对混凝土的性能影响及碳排放分析[J]. 建筑材料学报,2023,26(11): 1151-1157.
- [9] 王圣洁,刘锡清,戴勤奋,等. 中国海砂资源分布特征及找矿方向[J]. 海洋地质与第四纪地质,2003(3): 83-89.
- [10] 黄杰,吴瑾,赵林. 养护制度对高性能混凝土抗压强度影响的试验研究[J]. 硅酸盐通报,2019,38(8):2680-2682,2687.

(下转第32页)

区域位移降低 13.0% ~ 33.3%，相较于原工况，建议第二道支撑预加轴力增至 70% 设计轴力，第一、第三道钢支撑保持原工况 60% 设计轴力。

(6) 钢支撑下移，桩体水平位移减小，尤其是 8 ~ 18 m 水平位移下降了 5.8% ~ 17.3%；钢支撑下移 0.5 m，第二、第三道钢支撑最大轴力减小，第一道钢支撑最大轴力增大，在原工况的基础上钢支撑下移 0.5 m 以内可以更好地降低桩体水平位移，减小钢支撑轴力。

#### 参考文献:

- [1] 吴龙恩, 林欣燕, 刘智勇, 等. 城市轨道交通对我国城市空间的影响研究[J]. 建设科技, 2019(21): 27-30.
- [2] 赵长伟. 基于映射关系与影响中心度的地铁深基坑施工风险识别[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2024, 23(4): 31-35, 48.
- [3] 夏梦雷. 地铁车站施工中的深基坑工程管理与安全控制策略[J]. 工程技术研究, 2024, 6(1): 152-154.
- [4] 吴意谦, 朱彦鹏. 兰州市湿陷性黄土地区地铁车站深基坑变形规律监测与数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 404-411.
- [5] 邵权, 徐学连, 徐松, 等. 深基坑桩锚撑组合支护结构变形影响因素的三维数值分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 87-91.
- [6] 侯亚彬, 陈玉, 王新胜, 等. 山地城市某地铁深基坑监测与特性分析[J]. 测绘通报, 2020(S1): 91-95.
- [7] 乔世范, 蔡子勇, 张震, 等. 南沙港区软土狭长深基坑围护体系性状[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(8): 1473-1484.
- [8] 倪小东, 王琛, 唐栋华, 等. 软土地区深基坑超大变形预警及诱因分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(6): 2245-2254.
- [9] 许四法, 周奇辉, 郑文豪, 等. 基坑施工对邻近运营隧道变形影响全过程实测分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 804-812.
- [10] 程康, 徐日庆, 应宏伟, 等. 杭州软黏土地区某 30.2m 深大基坑开挖性状实测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(4): 851-863.
- [11] 魏仕锋, 谭勇, 廖少明, 等. 钱江隧道顺逆结合合法深基坑变形性状实测分析[J]. 土木工程学报, 2014, 47(8): 112-119.
- [12] 孙武斌. 地铁车站偏压基坑围护结构变形影响因素研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 86-91.
- [13] 张戈, 毛海和. 软土地区深基坑围护结构综合刚度研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1467-1474.
- [14] 贾霄, 张金柱, 夏瑞萌, 等. 太原地区地铁车站深基坑变形特性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(6): 172-178.
- [15] 梅源, 张苗苗, 周东波, 等. 西安湿陷性黄土地区狭长深基坑变形分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(7): 17-25.
- [11] 张鹏, 张文生, 韦江雄等. 养护温度对赤泥-矿渣碱激发胶凝材料强度和水化产物的影响[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(10): 1-3, 11.
- [12] 徐翔波, 于泳, 金祖权, 等. 养护制度对超高性能混凝土微观结构和力学性能影响的研究综述[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(9): 2856-2870.
- [13] 蒋睿. 早期养护方式对超高性能混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(10): 1659-1668.
- [14] ATSBHA T G, ZHUTOVSKY S. The effect of external curing methods on the development of mechanical and durability-related properties of normal-strength concrete [J]. Construction and Building Materials, 2022, 324: 126706.
- [15] 习近平. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[N]. 人民日报, 2020-09-23(1).
- [16] 邹鹏. 推动科技创新引领低碳发展: 低碳水泥和混凝土材料分论坛侧记[J]. 中国材料进展, 2021, 40(10): 840-841.
- [17] 中国国家标准化管理委员会. 水泥比表面积测定方法(勃氏法): GB/T 8074—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 3.
- [18] 中国国家标准化管理委员会. 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法: GB/T 1346—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 3.
- [19] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 建设用砂: GB/T 14684—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [20] 肖忠明, 颜碧兰, 刘晨, 等. 水泥胶砂强度检验方法(ISO法): GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 13.
- [21] 姜玉丹, 金祖权, 陈永丰, 等. 高吸水树脂对混凝土水化及强度的影响[J]. 材料导报, 2018, 31(24): 40-44.
- [22] MONTANARI L, SURANENI P, WEISS W J. Accounting for water stored in superabsorbent polymers in increasing the degree of hydration and reducing the shrinkage of internally cured cementitious mixtures [J]. Advances in Civil Engineering Materials, 2017, 6(1): 583-599.
- [23] 高新文, 何锐. 高吸水树脂对混凝土强度与水化过程的影响[J]. 公路交通科技, 2018, 35(8): 34-39.
- [14] 张珈碧. 高吸水树脂对混凝土断裂性能影响的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [25] 赵瑞宇. 不同养护方式对混合砂砂浆性能影响研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2023.

(上接第 21 页)