[文章编号] 1003－4684(2025)04-0090-06

微生物诱导碳酸钙沉淀固化砂土的试验研究

陈 前，胡其志

（湖北工业大学土木建筑与环境学院，湖北 武汉 430068）

[摘 要] 微生物诱导碳酸钙沉积技术(MICP)是一种新型的土体固化技术，砂土颗粒大小及胶结液浓度对固化效果存在影响。选取厦门标准砂，筛选出三种粒径大小的砂样(0.075～0.25 mm，0.25～1 mm，1～2 mm)，同时配制四种胶结液浓度(0.5 mol/L、1 mol/L、1.5 mol/L、2 mol/L)开展砂土的 MICP 固化试验，对固化后试样进行无侧限抗压、酸洗以及扫描电子显微镜(SEM)试验，从宏观和微观角度探究粒径大小及胶结液浓度对 MICP 固化砂土的影响。结果表明：不同粒径大小的砂土固化效果差异较大，中粒径砂土固化强度最高，小粒径砂土固化强度最低，当胶结液浓度为 1 mol/L 时，二者的强度峰值分别为 10 MPa 及 4.2 MPa；不同浓度胶结液会导致固化强度不同，试验结果表明胶结液浓度小于 1 mol/L 时，试样强度值逐渐增大，在 1 mol/L 时达到峰值，高于 1 mol/L 时强度值开始减小；酸洗试验结果表明粒径越大，生成的碳酸钙沉淀越多；扫描电子显微镜(SEM)试验显示中粒径试样的土颗粒间孔隙可以被完全填充，宏观上即表现出其强度值大且稳定，大粒径试样的土颗粒间碳酸钙沉淀最多但无法完全填充孔隙，宏观表现为强度值较低且有发生脆性断裂的可能性。

[关键词] 颗粒粒径；胶结液浓度；无侧限抗压强度；扫描电子显微镜(SEM)

分类号] TU411 [文献标识码] A

岩土工程领域常常会遇到不良地质土体，现有的地质改良方法大多伴随着对环境的破坏。微生物诱导碳酸钙沉积技术(MICP)是上个世纪 80 年代被提及的固土技术，其扰动性小、绿色环保等优点使得众多科研人员开始将其引入到工程地质研究中[1]。但实际上，自然界中早就已经存在由微生物矿化析出碳酸钙的先例，比如说钟乳石，其本质是由环境中析出的碳酸钙沉积而成[2]，MICP 的原理也类似钟乳石的形成，需要利用可以产生脲酶的微生物，加入钙源和尿素，脲酶分解尿素生成 $CaCO_3$，与钙源中的 Ca^{2+} 结合生成碳酸钙[3]，如：

$$CO(NH_2)_2+3H_2O \xrightarrow{\text{脲酶}} 2NH_4^+ + CO_3^{2-} \quad (1)$$

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \longrightarrow CaCO_3(\downarrow) \quad (2)$$

现阶段 MICP 的研究主要集中于砂土，程晓辉[4]等研究证明 MICP 技术对于处理液化砂土地基有良好的作用，刘汉龙等[5]研究表明微生物固化技术处理后的钙质砂的抵抗变形能力大大提高，李春等[6]发现砂土试样受微生物固化时间影响显著，卫仁杰[7-8]对淤泥土使用微生物进行固化，发现强度增加 24%；孔德成[9]利用 MICP 对黄土进行固化，发现强度能增加 150 kPa，余梦[10]对膨胀土进行微生物固化处理，结果显示强度最大增加了 379.4%，这说明 MICP 技术的应用面较广，但 MICP 用于固化砂土的结果会好于固化其他土样。

同时众多变量也在影响 MICP 固化砂土的结果，比如说菌种、钙源、颗粒级配等方面，但实际上对于固化砂土体来说，最重要的因素是颗粒级配和胶结液浓度，不同的级配砂土，其土颗粒间孔隙大小不一，就需要对其进行不同程度的固化，而含不同浓度胶结液的反应液，其含有的 CO_3^{2-} 的量也不同，这些因素都会影响最终的固化效果。郭红仙等[11]研究表明固化效果受土体粒径级配影响较大；李驰等[12]对风沙土进行微生物矿化处理，发现级配良好的土体微生物矿化更充分；梁仕华等[13]研究颗粒级配对微生物固化砂土的影响时发现级配良好土体的碳酸钙生成量均匀性会较好；赵茜等[14]研究发现尿素浓度和氯化钙浓度并非越高越好，其中高氯化钙浓度会抑制脲酶活性；李昊等[15]通过对不同尿素浓度进行微生物固土试验发现最优尿素浓度为 1.0 mol/L。

本试验结合了传统 MICP 固化土体的研究成

[收稿日期] 2023－05－18

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(52078195)

[第一作者] 陈 前(1997－)，男，安徽淮南人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为土木水利。

[通信作者] 胡其志(1970－)，男，湖北武汉人，湖北工业大学教授，研究方向为岩土工程。

果，引入了不同颗粒粒径的砂土体和不同浓度的胶结液，通过无侧限抗压试验强度试验、酸洗试验及扫描电子显微镜（SEM）试验对两种变量影响 MICP 固化土体的机理进行研究，为 MICP 技术固化不同粒径土体提供更多理论依据。

1　试验材料与方法

为探究颗粒粒径对 MICP 固化砂土的影响，本次试验将对不同粒径的砂土进行微生物固化试验，试验使用厦门标准砂，如图 1 所示，先利用过筛仪（型号分别为 0.075、0.25、1、2 mm）筛分出三种粒径的土体，后分别选取 1～2 mm、0.25～1 mm、0.075～0.25 mm 及标准砂进行试验。



图 1　标准砂及筛分后的砂土

1.1　菌液及胶结液

试验所用菌种为巴氏芽孢杆菌，菌种取回时为冻干粉状态。对菌种进行初始扩大培养，扩大培养时保持菌液为碱性状态，通过等比扩大培养，获得足量菌液后（图 2）测得菌液的 OD 值为 1.32，满足要求。



图 2　菌液

Gebhard Susanne[16] 等通过研究不同钙源对 MICP 固化土体的影响，发现采用氯化钙作为钙源会获得较为规则的碳酸钙结晶，此次试验采用的钙源为氯化钙。同时研究表明尿素浓度会影响 MICP 的进程，为研究高低浓度影响碳酸钙的生成机理，试验采用了四种不同浓度的胶结液，分别为 0.5、1、1.5、2 mol/L。

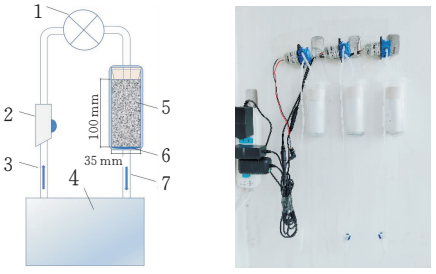
1.2　试样制备

该项工作包括前期试验方案的制订、中期试样制备以及后期试样养护。依据颗粒粒径及胶结液浓度两个变量制定试验方案如表 1 所示，共制作三组平行试样，且平行试样制作时不考虑环境温度及 PH 值等因素影响（默认在最佳外界影响因素下制作）。

表 1　各组试验配比

试样编号	胶结液浓度/(mol/L)	颗粒粒径/ mm
A0	0.5	标准砂
B0	1	
C0	1.5	
D0	2	
A1	0.5	0.075～0.25
B1	1	
C1	1.5	
D1	2	
A2	0.5	0.25～1
B2	1	
C2	1.5	
D2	2	
A3	0.5	1～2
B3	1	
C3	1.5	
D3	2	

试验使用灌浆法，其中灌浆机为自制，如图 3 所示，灌浆前先通水润滑管子内部，灌浆过程如下：灌浆仪器工作时，先灌入胶结液，待土样与胶结液充分接触后（一般静置 3 h），灌入少许清水（防止菌液和胶结液在进水管内部反应导致堵塞管体），再灌入菌液，3 h 之后再灌入少许清水，第一轮循环结束之后暂停 3 h，等砂土体内的反应进行后开始第二轮；整个灌浆流程反复进行 8 次，在灌浆过程中，出水管与进水管在同一个液体容器内，这能保证菌液与胶结液循环利用，避免浪费。



1－蠕动泵；2－变速器；3－进水管；4－菌液（胶结液）；5－砂样；6－透水石；7－出水管

图 3　灌浆机

待灌浆过程结束后，将试样静置 3 h 后脱模取出，如图 4 所示。



图 4　灌浆后试样

2 固化试验及强度影响分析

为了研究灌浆法后试样的宏观强度值，将试样在灌浆结束后原位放置 3 h，脱模取出后在烘箱中烘干 72 h，烘干后进行无侧限抗压强度试验。其中试验采用 TC-20C 型自动仪，如图 5 所示，为了观察到试样的破坏形态，应变控制速率不应过快，过快会导致试样突然破坏，有可能会使所测量试样强度值不准确，因而控制应变速率为 5 mm/min，测量完成后根据试验数据绘制强度数据图，利用 Origin 软件对数据进行拟合处理以达到较好的试验数据图。



图 5 无侧限抗压试验

2.1 不同粒径对土体强度的影响

对同一级配的平行试样进行不同浓度胶结液的土体固化试验，平均试验结果如图 6 所示，其中粒径在 0.25～1 mm 内的试样强度最高，峰值可达到 10 MPa；固化效果最差的为粒径在 0.075～0.25 mm 之间的试样，其强度最大值仅为 4.2 MPa，初步估计为颗粒间孔隙过小，试样上层生成碳酸钙沉淀阻挡了菌液继续下渗，这表明对于粒径较小的砂土不适用于常规的灌浆法，容易造成菌液的阻塞，继而影响最终强度值。同时可以观察到粒径范围在 1～2 mm 之间的试样强度值最大可达 6.5 MPa，相较于细颗粒试样，粒径较大的试样颗粒间孔隙较大，菌液容易下渗，然而过大的孔隙会造成生成的碳酸钙沉淀无法完全填充颗粒间孔隙，因而造成强度值也并不理想。

横向对比每一组试验数据，可以观察到一个明显的趋势，即强度值并不是一直增大，而是在增大到峰值后便逐渐回落，且粒径越大，强度保留值越低，当为标准砂时，强度保留率最大，详情参照图 6 及图 7，粒径较小时，随着胶结液浓度增加，强度涨落较稳定，粒径较大时，强度下落速度过快，初步分析是因为在合适的胶结液浓度下，生成的碳酸钙刚好可以填充颗粒间孔隙，这就使得原本颗粒间的无效应力变为有效应力，一旦碳酸钙含量少于某个值，那么这些有效应力便会瞬间变为无效应力，强度便会下落得相当快，由此可见，在对大粒径砂土进行灌浆时，高浓度胶结液可能会带来工程上的质量问题，建议取胶结液浓度在 1 mol/L。

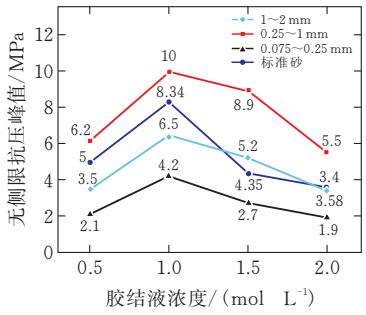


图 6 不同粒径试样强度

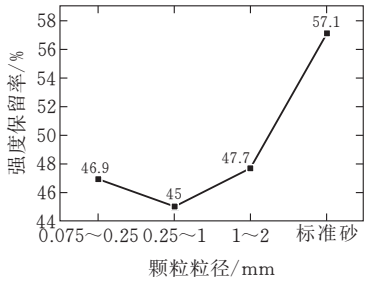


图 7 不同粒径试样强度保留率

2.2 不同胶结液浓度对土体强度影响

试样养护完成后对不同浓度胶结液下的平行试样进行无侧限抗压试验，试样的平均试验结果如图 8 所示。数据表明，强度峰值出现在胶结液浓度为 1 mol/L且粒径在 0.25～1 mm 之间的试样，达到 10 MPa。数据图表明，粒径差异在胶结液浓度不同时对土体固化的强度规律不会造成太大影响，几乎每一种粒径都有峰值，这说明，胶结液浓度大小影响的不是总的微生物浓度，而是提供脲酶的微生物的数量，过高的胶结液浓度如 2 mol/L 的试样，其强度峰值只有 5.5 MPa，说明这一部分微生物产生脲酶的过程被抑制了，因此强度较 1 mol/L 降幅较大，这进一步表明，在整个 MICP 进程中，过高的胶结液浓度确实会影响土体最终强度。

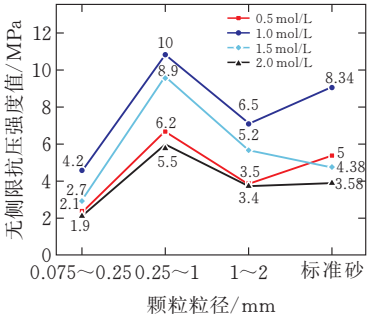


图 8 不同浓度胶结液的试样强度

3 酸洗试验

3.1 试验准备

酸洗试验的本质是利用盐酸溶解 MICP 过程中产生的碳酸钙，通过计算试样前后质量差占试样质量百分比，用此值来代表 MICP 产生碳酸钙的结果

好坏。试验前取得盐酸稀释溶液，浓度 3 mol/L，如图 9 左所示，反应过程中会产生大量气泡，通常表明盐酸溶解正在进行，如图 9 右所示，一切准备就绪后进行试验。



图 9　酸洗试验

试验前称取适量的试样样本进行称重，如图 10 左所示，再进行酸洗试验，反复三次后用清水清洗，烘干后称取质量，如图 10 右所示，前后质量差便为碳酸钙沉淀质量。

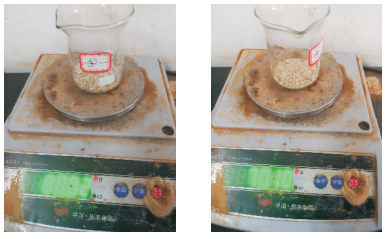


图 10　试样称量

3.2　试验结果

选取固化试验效果最佳的 B0、B1、B2、B3 以及相同质量砂土(M)试样进行酸洗试验，得出数据，绘制数据图(表 2)。

表 2　试样酸洗试验结果

试验编号	试验前质量/g	试验后质量/g	碳酸钙含量/%
B0	80	72.16	9.8
B1	80	73.44	8.2
B2	80	72.01	10.3
B3	80	71.04	11.2
M	80	75.68	5.4

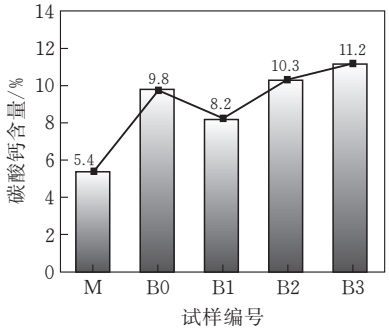


图 11　各试样碳酸钙含量

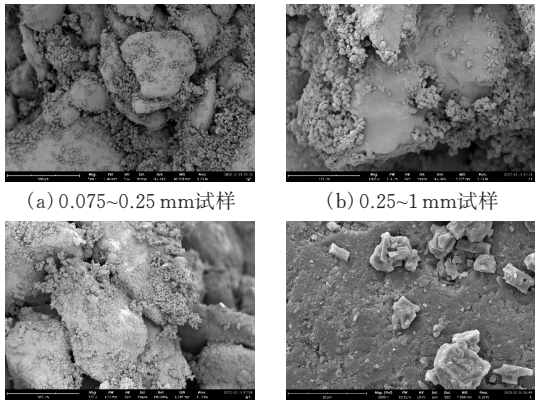
数据图 11 显示，基础砂样的碳酸钙含量为 5.4%，随着粒径的增大，MICP 过程中生成的碳酸钙含量占比也越多，这说明大粒径试样有助于微生物反应的进行；其中 B2 为大粒径试样，其无侧限抗压强度值较低，但碳酸钙含量较多，这表明试样内部的微生物固化进程更为充分，但其内部可能存在大孔隙导致碳酸钙无法连接，因而无法起到实质性的作用，因此对颗粒间孔隙较大的土体使用单一的灌浆法效果不佳。

4　扫描电子显微镜(SEM)试验

利用无侧限抗压试验及酸洗试验结果，选取强度值最高的试样进行扫描电子显微镜(SEM)试验，试验前将样品烘干并制成块体尺寸在 1 cm^3 左右适合电镜的大小，涂金后采用德国蔡司 sigma500 进行扫描，选择尺寸在 50、100 μm 的放大倍数进行扫描成像，对试样的微观结构机理及孔隙分布进行分析。

4.1　生成物的特征

下图为不同颗粒粒径下的试样扫描电子显微镜(SEM)图，图 12 为粒径较小时的扫描图，可以很清楚的看到砂土颗粒及生成的碳酸钙颗粒，这些沉淀分布在砂土颗粒表面。较少有生成于颗粒间的沉淀，初步分析为小粒径砂土颗粒间难以形成较大孔隙，菌液在渗透过程中无法渗进颗粒间，进而导致碳酸钙沉淀只能在表明生成，这导致小粒径砂土试样的强度值较小，这也从侧面证实了第二章节的无侧限抗压强度结论。



(a) 0.075~0.25 mm试样　(b) 0.25~1 mm试样

(c) 1~2 mm试样　(d) 标准砂试样

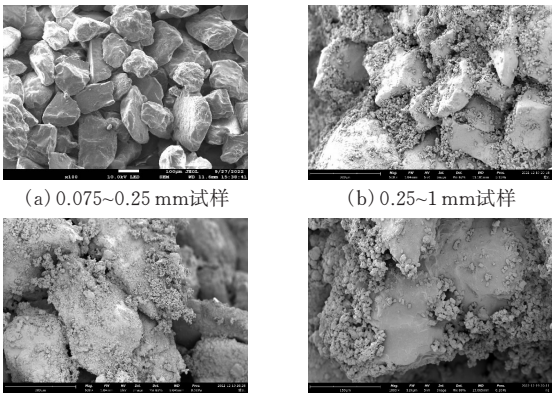
图 12　不同粒径试样生成物电镜图

图 12 中，碳酸钙分布最多且较为均匀的为粒径中等的砂土试样，可以观察到生成的碳酸钙颗粒将孔隙全部填充，且生成的量较大，因此其无侧限抗压强度值较高；同时大粒径试样的扫描图显示生成的碳酸钙沉淀量最多，其中有较大部分汇集在孔隙间，但是无法连接在一起的沉淀占据大多数，这就导致了沉淀为无效沉淀，因为其无法形成有效应力，所以大粒径下的砂土试样在强度测试中强度值也不是很高，而且会发生脆性断裂，需要注意其安全性。

4.2　孔隙特征

图 13 所示为各个级配下试样的孔隙分布，总体

而言，除了大粒径试样的孔隙较大，其余两组级配的试样孔隙较小，其中由于小粒径试样的孔隙过小，因此将其扫描电子显微镜(SEM)图放大至 10 μm，可以观察到其本身颗粒间孔隙就较小，因而在其扫描图上看不到较多的碳酸钙结晶；同时大粒径试样的扫描图显示，其孔隙大且分布广，生成的碳酸钙沉淀无法完全填充其孔隙，致使其颗粒间存在大量无效碳酸钙；相较于前两种级配，中粒径试样的扫描图显示：经过微生物固化后，其颗粒间孔隙几乎被碳酸钙沉淀填充，试样整体结构饱满，有效应力强，最终土体的强度值高，在实际的工程实践中，这种级配的试样在经过微生物处理后基本可以满足工程实践。



(a) 0.075~0.25 mm试样 (b) 0.25~1 mm试样

(c) 1~2 mm试样 (d) 标准砂试样

图 13 不同粒径试样孔隙电镜图

5 结论

通过对不同颗粒粒径的砂土进行不同浓度胶结液的微生物固化，并在多组平行试样制作完成后进行强度试验及电镜扫描，得到以下结论：

1)同一胶结液浓度下，级配对试样最终的强度有较大影响，其中级配在 0.25～1 mm 之间的试样强度值最高，峰值可达 10 MPa，级配在 0.075～0.25 mm的试样强度最低，最大值仅为 4.2 MPa；同一级配下，胶结液浓度对试样强度存在影响，胶结液浓度小于 1 mol/L 时，试样强度逐渐增大，浓度 1 mol/L时强度可达最大，峰值为 10 MPa，浓度超过 1 mol/L 时，强度逐渐减小，最低只有1.9 MPa；

2)对固化试样进行电镜扫描，结果发现级配在 0.075～0.25 mm 之间的试样只有表面碳酸钙，内部几乎没有沉淀生成；级配在 0.25～1 mm 之间的试样内部碳酸钙的生成规则且均匀分布在颗粒间孔隙内，级配在 1～2 mm 之间的试样内部虽然有大量碳酸钙生成，但是有较多的碳酸钙无法连接在一起，为无效碳酸钙，此时的试样安全性较差，可能会发生脆性断裂。

综上，在实际的工程实践中，可以选择胶结液浓度在 1 mol/L，粒径为中颗粒的土样进行固化，在选择较大粒径砂土进行固化时可能会发生脆性断裂，有安全隐患。

[参 考 文 献]

[1] 卫仁杰，彭劼，许鹏旭，等.铝离子絮凝剂对微生物加固砂土效果的影响试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文)，2025，47(01)：71-79.

[2] TAN L，KE X，LI Q，et al.The effects of biomineralization on the localised phase and microstructure evolutions of bacteria-based self-healing cementitious composites[J]. Cement and Concrete Composites，2022，128：104421.

[3] 刘汉龙，肖鹏，肖杨，等.微生物岩土技术及其应用研究新进展[J].土木与环境工程学报(中英文)，2019，41(01)：1-14.

[4] 程晓辉，麻强，杨钻，等.微生物灌浆加固液化砂土地基的动力反应研究[J].岩土工程学报，2013，35(08)：1486-1495.

[5] 刘汉龙，肖鹏，肖杨，等.MICP 胶结钙质砂动力特性试验研究[J].岩土工程学报，2018，40(01)：38-45.

[6] 李春，谭维佳.微生物诱导加固砂土的动力特性及微观试验研究[J].人民长江，2022，53(12)：173-178.

[7] 卫仁杰，彭劼，许鹏旭，等.铝离子絮凝剂对微生物加固砂土效果的影响试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文)，2025，47(01)：71-79.

[8] 刘建兴，李金柱，谢新宇，等.MICP 固化淤泥土的强度试验研究[J].低温建筑技术，2020，42(05)：17-20.

[9] 孔德成，孙治国，贾方方.微生物诱导碳酸钙沉淀技术改良黄土湿陷性研究[J].硅酸盐通报，2022，41(03)：969-975.

[10] 余梦，张家铭，周杨，等.MICP 技术改性膨胀土试验研究[J].长江科学院院报，2021，38(05)：103-108.

[11] 马瑞男，郭红仙，程晓辉，等.微生物拌和加固钙质砂渗透特性试验研究[J].岩土力学，2018，39(S2)：217-223.

[12] 李驰，刘世慧，周团结，等.微生物矿化风沙土强度及孔隙特性的试验研究[J].力学与实践，2017，39(02)：165-171.

[13] 梁仕华，曾伟华，龚星，等.颗粒级配对微生物固化砂土力学性能的影响[J].人民长江，2020，51(02)：179-183.

[14] 赵茜. 微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)固化土壤实验研究[D].北京：中国地质大学，2014.

[15] 李昊，唐朝生，刘博，等.模拟海水环境下 MICP 固化钙质砂的力学特性[J].岩土工程学报，2020，42(10)：1931-1939.

[16] TAN L，KE X，LI Q，et al. The effects of biomineralization on the localised phase and microstructure evolutions of bacteria-based self-healing cementitious composites[J]. Cement and Concrete Composites，2022，128：104421.

Experimental Study on Synergistic Reinforcement of Silty Clay with Glutinous Rice Slurry and MICP

CHEN Qian, HU Qizhi

(*School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: Microbial induced calcium carbonate deposition (MICP) is a new technology used to solidify soil. Different particle sizes of soil will lead to different solidification effects. In this paper, Xiamen standard sand is selected, and three particle sizes (0.075～0.25 mm, 0.25～1 mm, 1～2 mm) are screened out by a screening instrument for microbial solidification treatment. After that, unconfined compression test, acid washing test and electron microscope scanning test are carried out to explore the impact of particle size on MICP consolidated sand from macro and micro perspectives. The results show that the consolidation effect of sand with different particle size ranges is quite different. The unconfined compression test shows that when the concentration of cement is 1 mol/L, the consolidation strength of sand with medium particle size is the highest, with the peak strength of 10 MPa, and that of sand with large particle size is the lowest, with the peak strength of 3.1 MPa; The results of acid washing test showed that the larger the particle size, the more calcium carbonate precipitated; The scanning electron microscope test shows that the pore between soil particles of the medium-size sample can be completely filled, so its strength value is large and stable. The pore between soil particles of the large-size sample is large, and the generated calcium carbonate precipitation cannot completely fill the pore, so there is the possibility of brittle fracture.

Keywords: particle size; cement concentration; unconfined compressive strength; electron microscopy scanning

[责任编校: 裴　琴]

(上接第 89 页)

Experimental Study on the Performance of Iron Powder and Rubber Particle Modified Cement Mortar

WAN Xiangmiao, TAN Yan, ZHAO Ben, QIAN Kun

(*School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: In order to study the influence of iron powder and rubber particles on the frost resistance and thermal conductivity of road snow melting and ice melting backfill cement mortar, M30 cement mortar was used as the base material, and different types and amounts of iron powder and rubber particles with different mass fractions were added to study the frost resistance and thermal conductivity, and the thermal conductivity model of two-phase system materials was compared and analyzed. The results show that iron powder can improve the frost resistance and thermal conductivity of cement mortar. When 4% fine iron powder is added, the frost resistance of cement mortar is the best, and when 10% coarse iron powder is added, the thermal conductivity of cement mortar is the best; The addition of rubber particles reduces the compressive strength and thermal conductivity of cement mortar to a certain extent, but enhances the frost resistance. A series parallel hybrid model suitable for iron powder and rubber particles is finally established by comparing and analyzing the thermal conductivity models of two-phase system materials. The predicted value is consistent with the measured value.

Keywords: iron powder; rubber particles; melting snow and ice; frost resistance; thermal conductivity; thermal conductivity mode

[责任编校: 裴　琴]