DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.044

固化剂改良铁尾矿基层强度影响因素敏感性分析

刘晶磊[1,2,3]，王一峰[1,2]，房建宏[3]，于川情[1,2]，仉健[1,2]

（1.河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室，河北 张家口 075000；
2.河北建筑工程学院；3.青海省交通科学研究院）

摘要：为了明确影响固化剂改良铁尾矿基层强度的敏感参数，以无侧限抗压强度试验为基础，通过正交试验建立水泥、土凝岩两种固化剂改良铁尾矿的7 d无侧限抗压强度简化预报模型，并对各敏感因素进行逐步回归分析，明确各敏感因素所占权重。结果表明：掺量为8%的固化剂改良铁尾矿满足低等级公路强度要求；掺量相同的条件下压实度越大固化剂改良铁尾矿强度越大；压实度相同的条件下固化剂掺量越大固化剂改良铁尾矿强度越大；影响固化剂改良铁尾矿7 d无侧限抗压强度的因素按其权重大小排序为：固化剂掺量、压实度、固化剂掺量和压实度交互作用。

关键词：路面基层；铁尾矿；抗压强度；预报模型；敏感参数

1 引言

铁尾矿是铁矿石选矿过程中产生的固体废物，由于技术水平的限制很难再对铁尾矿中的金属元素进行回收利用，因此各大矿山企业采用尾矿坝的形式将铁尾矿集中堆积，铁尾矿的大量堆积不仅占用耕地还会对周围环境、水源造成污染，且尾矿坝连年增高也对周围居民的安全构成威胁。另一方面，道路工程的建设严重依赖石料资源，石料资源的开采、运输、环境成本居高不下。因此，若能在道路工程中大规模应用铁尾矿，不仅可以解决铁尾矿堆积问题，又能节省企业成本，具有很强的经济、环境效益。

国外将铁尾矿应用于道路工程的研究起步较早且技术较成熟，其中，应用最早、技术最成熟的是美国，20世纪70年代，铁尾矿被应用在从双子星城到梅萨比地区的沥青罩面层中，并且直到现在，这些道路性能依然良好。2003年应用铁尾矿碎石修建了布雷纳德国际汽车拉力赛的赛道。与国外相比，中国在公路工程中使用铁尾矿时间相对较晚。1991东北大学与马鞍山矿山研究院合作项目铁尾矿做路面材料的研究通过了冶金部鉴定，该研究在一级公路慢车道路面使用了铁尾矿与石、黏土、固化剂、粉煤灰、河砂等配料混合的材料，养护后可达到国家规范要求；杨青以辽宁朝阳地区铁尾矿为研究对象，通过在铁尾矿中加入石灰、水泥等固化剂对铁尾矿进行改良试验研究，结果表明石灰、水泥改良的铁尾矿强度满足相关规范要求；时彦宁通过比较不同的沥青混合料的设计方法，提出了一种新的铁尾矿砂沥青混合料的组成设计，并以此方法为基础进行了试验路段的铺筑，实践结果表明铁尾矿砂沥青混合料性能良好，适宜在低等级道路路面工程中使用；王兴义通过试验比较了砂混凝土和掺入减水剂的铁尾矿砂混凝土的抗弯拉弹性模量、耐磨性、抗冻性、干缩系数等指标，研究表明将铁尾矿砂应用于水泥混凝土路面具有很高的可行性；杨永浩等以光学显微技术和图像处理技术为基础，对铁、金、锡、铜4种尾矿的颗粒形状进行系统量化分析，探究建筑用砂与铁尾矿的力学性能差异，为金属尾矿的应用提供技术支持。

上述研究成果对铁尾矿作为添加材料应用于路基、路面中起到了良好的推动作用，而对于以铁尾矿为主要材料的研究相对较少，考虑到铁尾矿存量巨大，仅作为添加材料使用很难解决实际问题。因此，该文以张家口地区铁尾矿为主要材料，以水泥和土凝岩为固化剂，探究改良铁尾矿路用性能。通过采用二次回归正交旋转组合设计，建立固化剂改良铁尾矿的7 d无侧限抗压强度敏感参数量化分析模型，深入探讨影响固化剂

收稿日期：2018－10－23（修改稿）

基金项目：河北省青年拔尖人才计划项目（编号：BJ2016018）；河北建筑工程学院研究生创新基金项目（编号：XA201803）；河北省研究生创新基金资助项目（编号：CXZZSS2018135）

作者简介：刘晶磊，男，博士（后），副教授.E－mail:kingbest_1118@163.com

改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度的因素，为固化剂改良铁尾矿基层的大规模工程应用提供理论基础。

2　材料与方法

2.1　试验材料

试验用铁尾矿砂取自张家口宣化区，主要矿物成分为石英、角闪石、辉石和黏土，化学成分分析表明：主要化合物 S_iO_2、CaO 、TFe 、Al_2O_3、MgO 占百分比分别为 63.32%、3.21%、11.21%、15.02%、4.25%。

现场取用的铁尾矿有较多大颗粒物质，为便于研究，试验前将铁尾矿过 2.5 mm 筛。铁尾矿颗粒组成见表 1。由表 1 可知：试验用铁尾矿细度模数为 1.36，属特细砂。

表 1　铁尾矿颗粒组成

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
4.75	100	0.3	55.53
2.36	98.80	0.15	33.42
1.18	95.83	0.075	18.20
0.6	80.16		

试验所用水泥为普通复合硅酸盐水泥，SO_3、MgO 含量分别为 3.24%、2.20%，初、终凝时间分别为 180、600 min，抗压强度为 32.5 MPa，抗折强度为 7.0 MPa。试验用土凝岩是一种利用赤泥、粉煤灰和煤矸石等工业废弃物研制而成的新型绿色材料，为粉末状固体，密度为 2.80～3.20 g/cm^3；初、终凝时间分别为 480、720 min，抗压强度为 34.5 MPa，抗折强度为 9.4 MPa。在山东地区，土凝岩被广泛应用于公路工程和水利工程，相关学者对土凝岩改良土的工程特性也有深入研究。

实际工程中路面基层材料含水率均以最优含水率为准，为此，参考文献[14]对各掺量下固化剂改良铁尾矿进行重型击实试验，试验结果见表 2。

表 2　击实试验结果

掺量/%	水泥改良铁尾矿		土凝岩改良铁尾矿	
	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm^{-3})	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm^{-3})
8	8.61	2.084	8.17	2.073
10	8.86	2.103	8.48	2.078
12	9.13	2.108	8.72	2.081

2.2　试验方法

无侧限抗压强度试验参考文献[14]，用压力机制作 50 mm(直径)×50 mm(高度)试件，脱模后放入标准养护室中[温度(20±2) ℃，湿度≥95%]进行养护。无侧限抗压强度试验前将试件放入水中[温度(20±2) ℃]饱和 24 h，取出试件后将水擦干，用压力机进行强度测试。养护龄期参考文献[15]中对公路路面基层、底基层 7 d 无侧限抗压强度的强制性要求，选择龄期为 7 d；试件含水率以各掺量的最优含水率为准；压实度参考文献[15]中对公路路面基层、底基层压实标准取 93%～97%；固化剂掺量参考土凝岩厂家意见取 8%～12%。

2.3　分析方法

常规分析对试验数据的处理较为简单，无法深入挖掘试验数据所包含的信息。因此，该文采用二次回归正交旋转组合设计进行试验方案的安排，并通过 SPSS 软件对试验结果进行处理。

回归正交旋转组合设计是一种将回归分析与正交试验相结合的试验方法，它以数理统计为基础，通过在预定试验因素中选取特定的水平进行试验，应用这种试验设计方法既可以减小试验量，又不影响回归方程的准确性。

SPSS 是一款统计软件，该文主要应用它的回归分析和数学建模功能。回归正交旋转组合设计中默认了一种非线性回归模型，通过 SPSS 不仅可以将模型求解，而且可以对其进行优化，并以逐个将变量引入模型的方式明确不同变量对模型影响的权重。

根据二次回归正交设计原理，2 因素回归正交旋转组合试验应进行 16 组试验，试验因素水平见表 3。

表 3　试验因素水平

项目	固化剂掺量(Z_1)/%	压实度(Z_2)/%
上星号臂 γ	12	97
上水平 1	11.414	96.414
零水平 0	10	95
下水平－1	8.586	93.586
下星号臂－γ	8	93
变化间距 Δ	1.414	1.414

3　固化剂改良铁尾矿简化预报模型

3.1　试验结果分析

图 1 为正交试验结果。文献[15]中对二级及二级以下公路路面基层材料的压实度要求控制在 95%以

上，且对用于不同交通等级的基层材料有不同的强度要求。该文第 6 组试验条件为固化剂掺量 8%，压实度 95%时水泥改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度为 2.48 MPa，土凝岩改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度为 2.13 MPa，符合文献[15]中对二级及二级以下公路，交通等级为中、轻交通的基层材料强度要求。

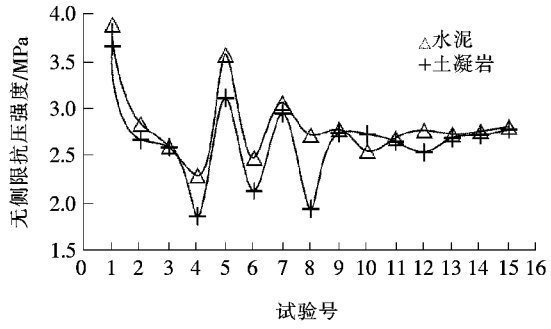


图 1 正交试验结果

比较两种固化剂改良铁尾矿可知，水泥改良铁尾矿强度更高，因此其更适用于交通等级较高的公路路面基层；比较同种固化剂的第 7 组和第 8 组试验可知，掺量相同的条件下压实度越高强度越高。原因为，混合料压实度越大，改良铁尾矿颗粒间距越短，颗粒间距离越短凝胶骨架越稳定，其强度也越大；比较同种固化剂的第 5 组和第 6 组试验得，压实度相同的条件下水泥掺量越大 7 d 无侧限抗压强度越大，分析原因，铁尾矿颗粒间距离相同条件下水泥掺量越大其水化产生凝胶数量越多，随着凝胶数量的增加凝胶骨架结构越来越稳定，其强度也越来越大。

3.2 预报模型及敏感因素分析

表 4 为二次回归正交旋转组合设计计算表，表 5 为固化剂改良铁尾矿方差分析表。表 4 中 x_i、x_ix_j、x_i'分别为一次项、一次项交互作用与二次项 x_i^2 的中心化编码因素，$x'_i=x_i^2-(2^p+2\gamma^2)/n$，$p$ 为未知量个数，n 为试验次数，γ 为星号臂长度(根据二次回归正交原理，$\gamma=1.414$)，$i=1,2$。

由表 4 可得固化剂改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度的中心化回归方程[式(1)]：

$$\begin{cases} y_1=2.803+0.407x_1+0.230x_2+0.185x_1x_2+ \\ \quad 0.024x_1'+0.094x_2'(R^2=0.908) \\ y_2=2.661+0.408x_1+0.394x_2+0.065x_1x_2- \\ \quad 0.004x_1'-0.091x_2'(R^2=0.950) \end{cases} \tag{1}$$

式中：y_1、y_2 分别为水泥、土凝岩改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度预测值；R^2 为判定系数。

表 4 二次回归旋转正交设计计算

试验号	x_1	x_2	x_1x_2	x_1'	x_2'	7 d 无侧限抗压强度/MPa	
						水泥改良铁尾矿	土凝岩改良铁尾矿
1	1	1	1	0.5	0.5	3.89	3.66
2	1	−1	−1	0.5	0.5	2.84	2.67
3	−1	1	−1	0.5	0.5	2.60	2.59
4	−1	−1	1	0.5	0.5	2.29	1.86
5	1.414	0	0	1.499	−0.5	3.57	3.11
6	−1.414	0	0	1.499	−0.5	2.48	2.13
7	0	1.414	0	−0.5	1.499	3.06	2.95
8	0	−1.414	0	−0.5	1.499	2.72	1.94
9	0	0	0	−0.5	−0.5	2.78	2.74
10	0	0	0	−0.5	−0.5	2.55	2.73
11	0	0	0	−0.5	−0.5	2.69	2.65
12	0	0	0	−0.5	−0.5	2.77	2.54
13	0	0	0	−0.5	−0.5	2.73	2.69
14	0	0	0	−0.5	−0.5	2.76	2.72
15	0	0	0	−0.5	−0.5	2.81	2.78
16	0	0	0	−0.5	−0.5	2.86	2.82

为使该文所建立的模型更具有工程应用价值，对式(1)进行简化，具体方法为将式(1)中未达到显著性水平($F_{0.05(1,10)}=4.96$)的因素剔除。以水泥改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度中心化回归模型为例，表 5 中 x_1'、x_2'的回归系数分别为 0.244 和 3.665，均小于 $F_{0.05(1,10)}=4.96$，因此将这两个因素剔除后重新进行回归计算，同理也可将土凝岩改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度中心化回归模型简化。

表 5　方差分析结果

参数	水泥改良铁尾矿				土凝岩改良铁尾矿			
	偏回归平方和	自由度	均方和	F 值	偏回归平方和	自由度	均方和	F 值
x_1	1.294	1	1.294	68.081	1.377	1	1.377	91.808
x_2	0.414	1	0.414	21.786	1.28	1	1.280	85.316
x_1x_2	0.134	1	0.134	7.041	0.017	1	0.017	1.164
x_1'	0.005	1	0.005	0.244	0	1	0.000	0.008
x_2'	0.070	1	0.070	3.665	0.069	1	0.069	4.585
回归	1.917	5	0.383	20.158	2.743	5	0.549	0.110
残差	0.194	10	0.019	0.145	10	0.015		
总和	2.111	15		2.888	15			

简化后的固化剂改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度中心化回归方程见式(2)，根据二次回归正交旋转设计原理，由简化修正后的方程(2)可得固化剂改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度实际值方程，见式(3)：式中：z_1、z_2 分别为水泥、土凝岩实际掺量(%)；z_1z_2 为因素实际水泥用量和实际压实度的交互作用。

$$\begin{cases} y_1=2.838+0.423x_1+0.230x_2+0.185x_1x_2 \\ \quad (R^2=0.908) \\ y_2=2.661+0.408x_1+0.394x_2(R^2=0.950) \end{cases} \tag{2}$$

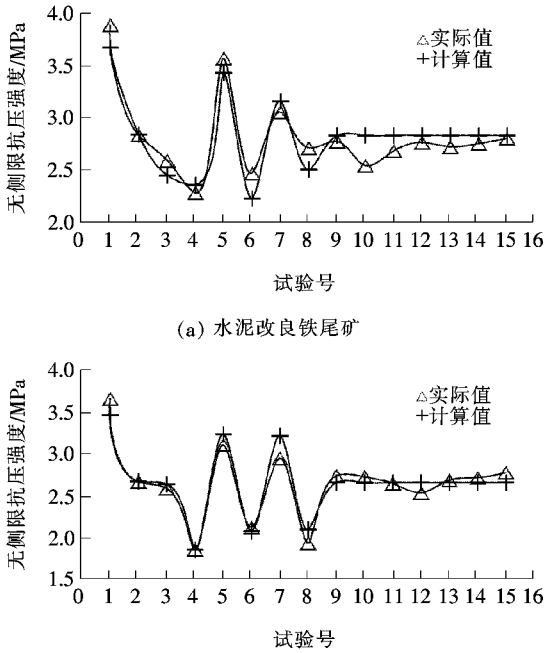
$$\begin{cases} y_1=72.530-8.516z_1-0.765z_2+0.093z_1z_2 \\ \quad (R^2=0.856) \\ y_2=-26.698+0.289z_1+0.279z_2(R^2=0.918) \end{cases} \tag{3}$$

固化剂改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度实际值与方程(3)所得计算值的比较如图 2 所示。

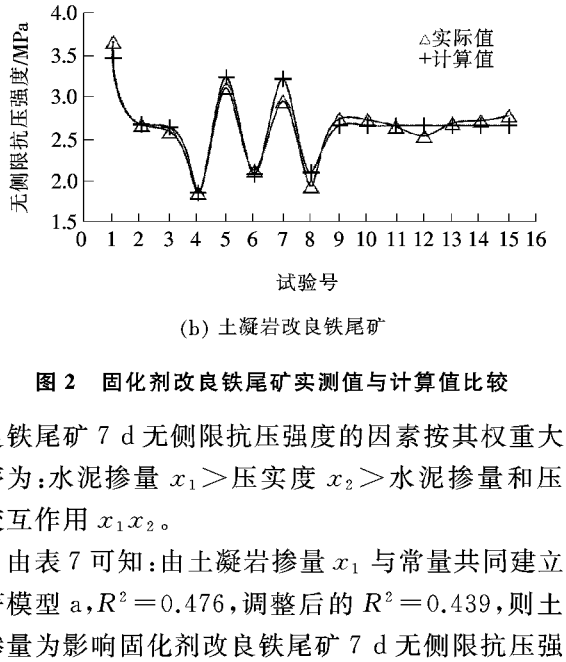
从图 2 中可得出计算值与实测值契合度较高，水泥改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度最大误差值约为±11.27%，土凝岩改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度最大误差值约为±9.10%，可以看出该文所建立的简化预报模型非常稳定。

通过 SPSS 软件对影响固化剂改良铁尾矿敏感因素进行逐步回归分析，构建所有可能的显著性模型，分析各敏感因素的影响权重，模型汇总见表 6、7。

由表 6 可知：由水泥掺量 x_1 与常量共同建立的显著模型 a，$R^2=0.535$，调整后的 $R^2=0.501$，则水泥掺量为影响固化剂改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度的主要因素，同时，由 R^2 更改量数值大小可知影响固化剂改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度的因素按其权重大小排序为：水泥掺量 x_1＞压实度 x_2＞水泥掺量和压实度交互作用 x_1x_2。



(a) 水泥改良铁尾矿



(b) 土凝岩改良铁尾矿

图 2　固化剂改良铁尾矿实测值与计算值比较

由表 7 可知：由土凝岩掺量 x_1 与常量共同建立的显著模型 a，$R^2=0.476$，调整后的 $R^2=0.439$，则土凝岩掺量为影响固化剂改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度的主要因素，同时，由 R^2 更改量数值大小可知各影响因素权重大小依次为：土凝岩掺量 x_1＞压实度 x_2。

表 6 水泥改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度敏感因素模型汇总

模型 1	R	R^2	调整 R^2	估计的标准误差	更改统计量				
					R^2 更改	F 更改	$df1$	$df2$	Sig.F 更改
a	0.731	0.535	0.501	0.327	0.535	16.084	1	14	0.001
b	0.879	0.773	0.738	0.237	0.238	13.595	1	13	0.003
c	0.916	0.840	0.800	0.207	0.067	5.052	1	12	0.044

注：a 模型预报变量：水泥掺量 x_1。b 模型预报变量：水泥掺量 x_1；压实度 x_2。c 模型预报变量：水泥掺量 x_1；压实度 x_2。

表 7 土凝岩改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度敏感因素模型汇总

模型 2	R	R^2	调整 R^2	估计的标准误差	更改统计量				
					R^2 更改	F 更改	$df1$	$df2$	Sig.F 更改
a	0.690	0.476	0.439	0.324	0.476	12.717	1	14	0.003
b	0.958	0.918	0.906	0.133	0.442	70.393	1	13	0.000

注：a 模型预报变量：土凝岩掺量 x_1。b 模型预报变量：土凝岩掺量 x_1；压实度 x_2。

从权重分析结果可知：以压实度相比，固化剂掺量对固化剂改良铁尾矿强度影响更显著。对于水泥改良铁尾矿，水泥掺量对强度的影响远远大于压实度，因此在施工中应保证足够的水泥掺量；模型 1 中虽然包含了水泥掺量和压实度交互作用，但与水泥掺量和压实度相比数值过小，可忽略不计。对于土凝岩改良铁尾矿，土凝岩掺量和压实度对强度的影响相差不大，因此在施工中除了要保证足够的土凝岩掺量，还应保证足够的压实度以保证工程质量。

4 结论

基于正交试验结果建立了简化的固化剂改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度预报模型，分析了各敏感因素权重，为固化剂改良铁尾矿的工程应用提供理论基础，得出以下主要结论：

(1) 掺量为 8%的固化剂改良铁尾矿符合 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》中对二级及二级以下公路路面基层材料的强度要求，适宜用作路面基层材料。

(2) 固化剂改良铁尾矿掺量相同的条件下压实度越大 7 d 无侧限抗压强度越大；压实度相同的条件下水泥掺量越大固化剂改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度越大。

(3) 影响水泥改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度的因素按其权重大小排序为：水泥掺量(0.535)、压实度(0.238)、水泥掺量和压实度交互作用(0.067)；影响土凝岩改良铁尾矿 7 d 无侧限抗压强度的因素按其权重大小排序为：土凝岩掺量(0.476)、压实度(0.238)。

(4) 固化剂掺量对固化剂改良铁尾矿强度的影响比压实度更显著；对于水泥改良铁尾矿，水泥掺量对强度的影响远大于压实度；对于土凝岩改良铁尾矿，土凝岩掺量对强度的影响与压实度相近。施工时应针对固化剂种类的不同严格把控施工条件，保证工程质量。

参考文献：

[1] 张玉柱，邢宏伟，雷云波，等.高碱度钢渣添加铁尾矿消解 f—CaO 的机理研究[J].环境工程学报，2012(5).

[2] 陈虎，沈卫国，单来，等.国内外铁尾矿排放及综合利用状况探讨[J].混凝土，2012(2).

[3] 张莹莹，程志豪，周沛延，等.电石渣改良土的无侧限抗压强度预测方法[J].中外公路，2017(3).

[4] 宋学庆.石灰粉煤灰黄土工程性质试验研究[J].中外公路，2017(5).

[5] 张映雪，雷强，罗润洲，等.掺入煤矸石及煤矸石灰的再生沥青混合料性能分析研究[J].中外公路，2016(3).

[6] 王晶.铁尾矿在国内外道路工程中的应用[J].环境与发展，2014(7).

[7] 李荣海，汪建，周志华，等.铁尾矿在公路工程中的应用[J].矿业工程，2007(5).

[8] 杨青.无机结合料改良铁尾矿砂的路用性能研究[D].大连理工大学硕士学位论文，2008.

[9] 时彦宁.铁尾矿砂在沥青混合料中的应用研究[D].大连理工大学硕士学位论文，2015.

[10] 王兴义.铁尾矿砂水泥混凝土路用性能研究[D].大连理工大学硕士学位论文，2014.

DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.045

碳纳米管混凝土抗开裂性能试验研究

翁梅[1]，王焱[1]，王东炜[2]
（1.河南工业职业技术学院，河南 南阳 473000；2.郑州大学 土木工程学院）

摘要：在水灰比为0.28的水泥混凝土中掺入掺量为水泥质量0%、0.2%和0.4%的多壁碳纳米管，开展抗折强度试验、收缩试验和环形约束试验，研究碳纳米管掺量对混凝土抗开裂性能的影响。结果表明：在0～0.4%掺量范围内，混凝土的抗折强度随着碳纳米管掺量的增加而增大，当碳纳米管掺量为0.4%时，抗折强度可提高21.3%；混凝土的收缩应变随着碳纳米管掺量的增加而减小，收缩应变可减小约18.4%；碳纳米管的掺入有助于提高混凝土的抗开裂性能，其掺量越大，混凝土的抗开裂性能越好，其原因与碳纳米管的桥联作用有关。

关键词：工程材料；开裂风险；试验研究；碳纳米管混凝土；收缩应变

水泥混凝土是目前运用最为广泛的建筑工程材料，但其本身存在抗拉强度低、韧性差等缺点，近年来随着超高强混凝土的推广使用，工程结构物发生裂缝是一个普遍性的现象，严重影响混凝土结构的耐久性和安全性。目前世界各国因混凝土结构物开裂问题带来的维修费用居高不下，严重制约了土木行业的可持续发展。

碳纳米管（Carbon Nanotube，CNT）是改善水泥混凝土力学性能的有效组分之一。1991年，Lijima首先通过透射电子显微镜发现碳纳米管材料，该种材料属于一维纳米材料，具有优异的力学性能，其抗拉强度最高可达200 GPa，弹性模量可达1 TPa。根据结构的不同，碳纳米管可分为单壁结构和多壁结构。多壁碳纳米管由于制备和提纯技术要求不高，且价格相对较低，目前已经得到大规模的生产和运用。自被发现以来，碳纳米管材料被广泛地运用于增强陶瓷、合金、聚合物等复合材料，取得了很多实用性的成果。但碳纳米管在增强水泥基材料的研究中起步相对较晚。现有研究表明，碳纳米管材料的掺入，可以不同程度地提高水泥基材料的抗拉强度、抗压强度、弹性模量、断裂韧性、抗冻性和抗渗透性等。然而，当前有关碳纳米管对水泥混凝土的抗开裂性影响的研究还相对较少。

针对水灰比为0.28的水泥混凝土，掺入质量分数为水泥质量的0%、0.2%和0.4%的多壁碳纳米管，开展抗折强度试验、收缩试验和环形约束收缩试验，分析碳纳米管掺量对混凝土开裂性能的影响规律。

1 原材料和试验方法

1.1 原材料

试验所用的混凝土材料配合比见表1，混凝土的水灰比为0.28。水泥为普通硅酸盐水泥P.O.42.5级。粗骨料为连续级配的石灰石碎石，粒径范围为5～12.5 mm。细骨料的细度模数为2.7，属于中砂。拌和水为自来水。为提高拌和料的工作性，采用聚羧酸盐系高效减水剂。多壁碳纳米管的掺量分别为水泥质量的

[11] 杨永浩，魏作安，陈宇龙，等.基于图像处理技术的尾矿颗粒形态研究[J].岩石力学与工程学报，2017(S1).
[12] 朱建华.一种土凝岩及其制备方法：中国：ZL.2015 1 0119590.4[P].2016.03.02.
[13] 荣云杰.DHT土凝岩土壤固化剂稳定细粒土的固化特性研究[D].山东农业大学硕士学位论文，2016.
[14] JTG E51－2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
[15] JTG/T F20－2015 公路路面基层施工技术细则[S].
[16] 李云雁，胡传荣.试验设计与数据处理[M].2版.北京：化学工业出版社，2015.

收稿日期：2018－09－10
基金项目：国家自然科学基金资助项目（编号：51278468）
作者简介：翁梅，女，硕士，讲师.E－mail：wengmei_1983@outlook.com