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

表 1 混凝土材料配合比

组号	组成/(kg·m^{-3})					
	水泥	水	粗骨料	细骨料	CNT	减水剂
E0	535	150	1 012	801	0	2.1
E2	535	150	1 012	801	1.07	2.1
E4	535	150	1 012	801	2.14	2.1

0%、0.2%和0.4%，其物理参数如表 2 所示。

表 2 多壁碳纳米管的物理指标

长度/μm	直径/nm	纯度/%	比表面积/($m^2 \cdot g^{-1}$)	羧基含量/%
10～30	10～25	＞95	＞140	2

制备碳纳米管混凝土的方法：称取所需的碳纳米管材料加入拌和水中，手工初步搅拌后将碳纳米管水溶液放入频率为 50 kHz 的超声仪水槽中振动 25 min，待碳纳米管材料均匀分散在水溶液中，将其加入混凝土干料中进行搅拌，搅拌时间为 180 s，最后成型相应的测试试件，放在温度为(20±2) ℃，相对湿度为 95%的标准养护室内进行养护。

1.2 抗折强度试验

混凝土抗折强度试验的试件尺寸为 400 mm×100 mm×100 mm，在标准养护至 1、3、7 和 28 d 后进行测试，有关测试步骤根据 GB/T 50081－2016《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行操作。每组试验进行 3 次平行试验，取平均值为抗折强度。

1.3 收缩试验

收缩试验的试件尺寸为 400 mm×100 mm×100 mm，在标准养护 1 d 后，移置恒温恒湿条件[(20±2) ℃，50%±5%]下测试收缩应变，每组试验进行 3 次平行试验，采用千分表读取收缩应变值，千分表精度为 0.001 mm。

1.4 环形约束试验

混凝土环形约束试验依据 ASTM C1581 标准进行测试，试验设备如图 1 所示。其中钢环的内径为 305 mm，壁厚 15 mm。混凝土环的内径为 320 mm，壁厚 40 mm，高度 150 mm。混凝土环试件浇筑前，在钢环内壁距离底部 75 mm，4 等分点处贴应变片，通过测试钢环因混凝土挤压作用产生的变形来分析混凝土的抗开裂性能。混凝土环试件浇筑 1 d 后拆掉外钢环，并置于与收缩试验相同的环境进行测试。

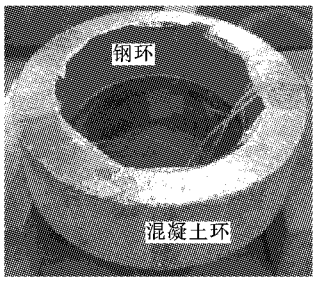

图 1 混凝土环形约束试验装置

2 试验结果与分析

2.1 抗折强度

不同掺量的碳纳米管混凝土的抗折强度随时间发展结果如图 2 所示。

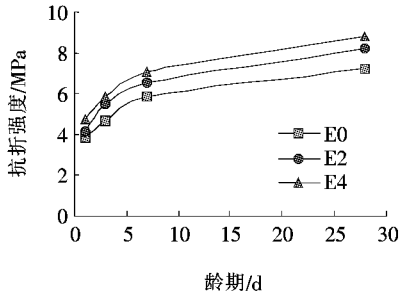

图 2 不同 CNT 掺量混凝土的抗折强度

由图 2 可以看出：① 碳纳米管掺量为 0%、0.2%和0.4%试验组的抗折强度均随着龄期的增加而增大，该现象主要与水泥水化反应随时间不断进行有关；② 在碳纳米管掺量为 0～0.4%的范围内，不同龄期下掺碳纳米管的混凝土的抗折强度均要大于素混凝土的抗折强度，且碳纳米管的掺量越大，混凝土的抗折强度越高。其原因与碳纳米管在混凝土中起到了预期的增强效果有关。此外，现有研究表明，碳纳米管材料在混凝土中存在一个最优掺量，一旦超过该掺量，碳纳米管混凝土的强度随着掺量的增加而下降。

由图 2 推测可知：对于此次研究采用的混凝土，0～0.4%的碳纳米管掺量仍位于最优掺量范围内，且超声振荡方式能将碳纳米管材料均匀地分散在混凝土中。

2.2 收缩应变

不同掺量的碳纳米管混凝土在相对湿度为 50%环境下的收缩应变如图 3 所示。

由图 3 可知：① 3 组试验的收缩应变均随着龄期的增加而增大，其原因与混凝土的水化反应消耗水分

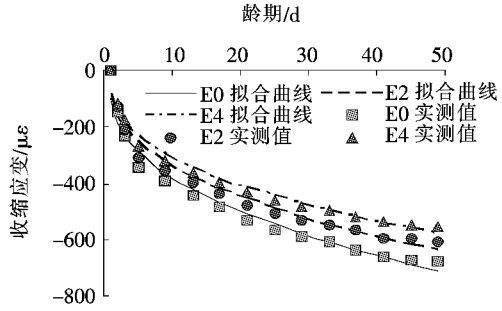

图 3　不同 CNT 掺量混凝土收缩应变

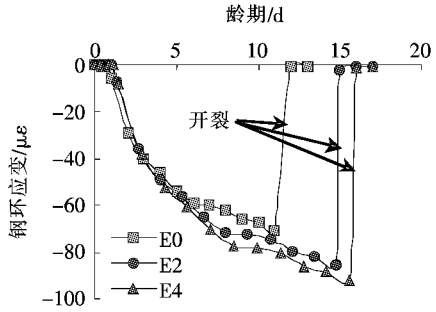

图 4　钢环应变发展

以及干燥失水有关；② 在 0～0.4%碳纳米管掺量范围内，碳纳米管的掺量越大，混凝土的收缩应变越小。当碳纳米管掺量从 0%增加至 0.4%时，混凝土 50 d 的收缩应变可减小 18.4%，这与已有研究成果基本吻合。究其原因，混凝土的收缩应变与混凝土内部的微孔（直径小于 20 nm）含量有关，微孔含量越高，混凝土的收缩应变越大。此次研究所用的碳纳米管的直径为 10～25 nm，碳纳米管在混凝土中能起到填充微孔的效果，减小微孔的含量，从而减小混凝土内部的毛细孔压力，因此混凝土的收缩应变减小。

暴露于干燥环境下的普通混凝土可采用式（1）来表征收缩应变的发展。研究采用该式对不同掺量混凝土的收缩应变进行拟合，结果如图 3 所示，可以看到拟合曲线与实测结果吻合较好，说明碳纳米管的掺入并不改变混凝土的收缩机理。

$$\varepsilon_{sh}=a_1(t-t_0)^{a_2}+a_3(t-t_d)^{0.5} \tag{1}$$

式中：ε_{sh} 为混凝土收缩应变；a_1、a_2 和 a_3 分别为拟合参数；t_0 为混凝土的终凝时间；t_d 为混凝土开始干燥的龄期。

2.3　环形约束开裂性能

不同碳纳米管掺量试验组的钢环应变发展如图 4 所示。当混凝土暴露于干燥环境时，混凝土将发生收缩，该收缩变形受到钢环的约束，混凝土产生拉应力，而钢环产生压应力。图 4 中负的钢环应变值代表钢环受到混凝土挤压而产生的压应变。虽然环形约束试验不能直接测量混凝土的拉应力发展，但是通过分析钢环的压应变发展可以评估混凝土在收缩和徐变等多因素作用下的抗开裂性能。

由图 4 可以看出：3 组试验的钢环压应变随着龄期的增加而增大，当钢环的压应变增大到一定值时，由于混凝土环的拉应力超过其抗拉强度，混凝土发生开裂，作用在钢环上的压应力被释放，因此钢环的应变恢复为零。

混凝土环的抗开裂性能可以根据 ASTM C1581 标准采用净开裂时间进行定量表征。图 5 汇总了 3 组试验的净开裂时间。

由图 5 可以看出：混凝土的净开裂时间随着碳纳米管掺量增加而增大，当掺量从 0%增大至 0.4%时，净开裂时间从 10.3 d 增加至 14.8 d，提高了 43.2%，该结果表明：碳纳米管的掺入有助提高了混凝土的抗开裂性能。其原因与碳纳米管在混凝土中起到桥联作用有关。这种桥联作用能够使均匀分散在混凝土中的碳纳米管承受一定的荷载，减小混凝土的受力，因此能有效地延缓混凝土的净开裂时间，提高混凝土的抗开裂性能。

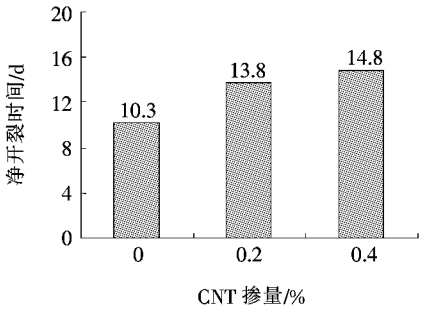

图 5　混凝土开裂时间与 CNT 掺量关系

研究还对混凝土环开裂后的裂缝宽度进行了分析。采用读数显微镜测量裂缝的宽度，3 组试验裂缝宽度的测试均在混凝土龄期达到 20 d 时进行。测点共计 5 个，沿高度方向等距分布，如图 6 所示，取平均值作为裂缝宽度，3 组试验的裂缝宽度如图 7 所示。

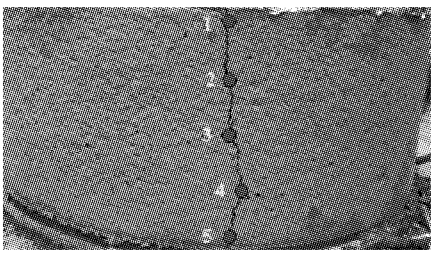

图 6　混凝土环裂缝宽度测试点

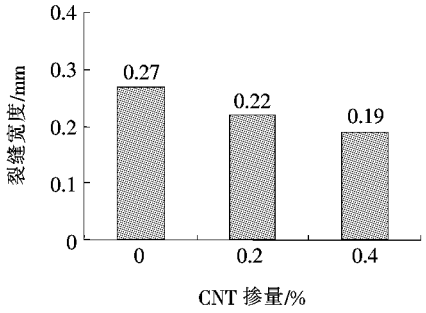

图 7 混凝土环裂缝宽度与 CNT 掺量关系

由图 7 可以看出：混凝土的裂缝宽度随着碳纳米管掺量的增加而减小。当碳纳米管掺量从 0%增大至 0.4%时，裂缝宽度从 0.27 mm 降低至 0.19 mm。该现象表明：碳纳米管不仅可以提高混凝土的抗开裂性能，还有利于减小裂缝宽度。

3 结论

(1) 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，28 d 抗折强度可提高 21.3%。

(2) 混凝土的收缩应变随着碳纳米管掺量的增加而减小，50 d 收缩应变可减小约 18.4%，其原因与碳纳米管的掺入填充混凝土中的微孔，降低混凝土内部的毛细孔压力有关。

(3) 碳纳米管的掺入有助于提高混凝土的抗开裂性能，碳纳米管的掺量越大，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。

参考文献：

[1] Li G Y, Wang P M, Zhao X. Mechanical Behavior and Microstructure of Cement Composites Incorporating Surface－Treated Multi－Walled Carbon Nanotubes[J]. Carbon, 2005, 43(6): 1 239－1 245.

[2] Konsta－Gdoutos M S, Metaxa Z S, Shah S P. Multi－scale Mechanical and Fracture Characteristics and Early－Age Strain Capacity of High Performance Carbon Nanotube/Cement Nanocomposites[J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(2): 110－115.

[3] Reales O A M, Toledo Filho R D. A Review on the Chemical, Mechanical and Microstructural Characterization of Carbon Nanotubes－Cement Based Composites [J]. Construction and Building Materials, 2017, 154: 697－710.

[4] 李庚英，王培铭.碳纳米管－水泥基复合材料的力学性能和微观结构[J].硅酸盐学报，2005(1).

[5] 罗健林，段忠东.碳纳米管的分散性及其增强水泥材料力学性能[J].建筑结构学报，2008(s1).

[6] 常利武，孙玉周，乐金朝.碳纳米管增强水泥砂浆梁弯曲性能试验研究[J].混凝土，2011(10).

[7] Li W W, Ji W M, Wang Y C, et al. Investigation on the Mechanical Properties of a Cement－Based Material Containing Carbon Nanotube under Drying and Freeze－Thaw Conditions[J]. Materials, 2015, 8(12): 8 780－8 792.

[8] 刘爱红，张兵，王辉，等.多壁碳纳米管增强水泥基复合材料力学性能的研究[J].湖北理工学院学报，2015(2).

[9] 王琴，王健，刘伯伟，等.多壁碳纳米管水泥基复合材料的压敏性能研究[J].硅酸盐通报，2016(9).

[10] 王建雷，赵云里，和晓博，等.碳纳米管对混凝土性能的影响研究[J].硅酸盐通报，2016(7).

[11] Rashad A M. Effect of Carbon Nanotubes (CNTs) on the Properties of Traditional Cementitious Materials[J]. Construction and Building Materials, 2017, 153: 81－101.

[12] Mohsen M O, Al－Nuaimi N, Al－Rub R K A, et al. Effect of Mixing Duration on Flexural Strength of Multi Walled Carbon Nanotubes Cementitious Composites[J]. Construction and Building Materials, 2016, 126: 586－598.

[13] American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM C 1581 Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage [S].

[14] 魏亚，梁思明，郭为强.基于水化度和约束状态下拉伸徐变特征的早龄期混凝土内应力预测[J].建筑结构学报，2016(10).

[15] 李庆华，徐松杰，徐世烺，等.采用碳纳米管提高纤维砂浆的起裂断裂韧度[J].建筑材料学报，2017(2).