

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.01.002

动力试验模型用橡胶集料微粒混凝土力学性能初步试验研究

柳春光^{1,2}, 张士博¹, 张继伟³

(1.大连理工大学 建设工程学部水利工程学院 工程抗震研究所, 辽宁 大连 116024;

2.大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

3.沈阳碧桂园房地产开发有限公司 成本管理部, 辽宁 沈阳 110000)

摘 要:大型跨海桥梁结构模型试验材料的选择对于模型动力试验至关重要。试验室可实现的微粒混凝土的弹性模量限制了模型的几何比尺。采用橡胶集料等质量比例代替微粒混凝土中砂骨料的方法,通过控制变量法,研究了多种因素影响下的橡胶集料微粒混凝土的抗压强度和弹性模量。试验结果表明:对于骨料含量不变的微粒混凝土,水灰比的增大可显著降低其抗压强度和弹性模量。橡胶集料微粒混凝土的抗压强度和弹性模量随橡胶集料代替微粒混凝土中砂骨料质量比的增加而呈现一定规律降低。研究成果可用于大型跨海桥梁工程大比尺动力试验模型材料相似关系设计和结果分析。

关键词:动力模型试验;橡胶集料微粒混凝土;抗压强度;弹性模量

中图分类号: TU502.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)01-0008-05

Experimental Research on the Mechanical Properties of Crumb Rubber Microconcrete Based on Dynamic Test Model

LIU Chunguang^{1,2}, ZHANG Shibo¹, ZHANG Jiwei³

(1. Institute of Earthquake Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China; 3. Cost Management Department, Shenyang Country Garden Real Estate Development Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110000, China)

Abstract: It is important to select the proper materials to get perfect result of large sea-crossing bridge scale model dynamic test. The model's geometric scale is determined by elastic modulus of microconcrete. Compressive strength and elastic modulus of crumb rubber microconcrete under effect of multiple factors were studied through controlling variables method which employ the method of substituting crumb rubber for the same mass sand. The results show that compressive strength and elastic modulus of crumb rubber microconcrete reduce approximately as a certain law when the amount of crumb rubber increased. To the microconcrete and crumb rubber microconcrete, the water increase is helpful to reduce the compressive strength and elastic modulus. The research results can be used in the design of material similitude relations of large sea-crossing bridge scale model dynamic test.

Keywords: dynamic test model; crumb rubber microconcrete; compressive strength; elastic modulus

随着科学技术的发展和社会文明的进步,人们对出行的质量和效率提出了更高的要求。在沿海地区,大型跨海桥梁工程可实现城市异地之间以及城际间的直接连接,提升了出行质量和效率。近年来,

我国跨海桥梁的建设速度呈现空前增长的趋势,在自主创新的背景下,大跨度跨海桥梁建设方面已取得诸多惊人的成就,并仍在不断发展,苏通大桥、东海大桥、舟山连岛大桥、杭州湾大桥和青岛海湾大桥

收稿日期:2016-10-11

修稿日期:2016-11-07

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助“973计划”项目(2011CB013605-4);国家自然科学基金项目(51678107);辽宁省优秀人才基金项目(2014020012);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130041110036)

作者简介:柳春光(1964—),男,黑龙江牡丹江人,博士,教授,博士生导师,主要从事生命线地震工程及城市防灾减灾信息技术研究工作。
E-mail: liucg@dlut.edu.cn

通讯作者:张士博(1978—),男,河北邢台人,博士研究生,研究方向为结构抗震理论与性能设计。E-mail: drzhang0102 - @163.com

等跨海大桥已成功建成并投入使用中,珠港澳大桥即将建设完工,琼州海峡跨海大桥已进入可行性建设方案论证阶段,我国高速公路网规划方案中的台湾海峡和渤海海峡等规模更大的跨海通道工程,不同程度地进行着前期探索和研究工作。鉴于我国建设的跨海大桥时间比较短,在理论和经验上的知识储备都显得比较缺乏^[1]。

目前对于规模较大的深水大跨桥梁结构动力分析主要包括数值仿真研究和物理模型仿真研究两种类型。由于数值模拟常常受到工程规模和建模过程中模型精度的影响,对于大尺寸、结构复杂的工程结构的动力响应研究,通常采用基于缩尺度试验模型全面系统了解大跨桥梁结构在复杂环境荷载下的动力特性,以及结构从弹性变形阶段再到弹塑性响应阶段,直至最终发生破坏的全过程。

微粒混凝土的骨料级配同普通的混凝土极为相似,且力学指标和破坏机理等方面也同普通混凝土很相似。所以,微料混凝土可以作为一种相对比较理想的动力模型试验仿真材料^[2]。从 20 世纪 70 年代起,国内外^[3-10]对微粒混凝土从宏观材料试验到微观材料构造等方面,对微粒混凝土的力学特性即弹性模量和抗压强度等指标受应变率、尺寸效应和其他不同材料掺量的影响做了相关的试验研究。虽然微混凝土的力学性能与采用同样水泥用量的原型结构混凝土极相近,但是试验室可实现的微粒混凝土弹性模量相似比仅为 1/5 ~ 1/3,这就限制了模型的几何比尺。

近 20 年来,国内外^[11-16]对于橡胶集料混凝土的力学性能研究较多,得出在混凝土中加入橡胶集料后能显著减低抗压强度和弹性模量并改善混凝土脆性。但截止目前还没有对橡胶集料微粒混凝土相关的力学性能研究。本文提出采用橡胶集料等质量代替微粒混凝土中砂骨料的方法,通过测试橡胶集料微粒混凝土的抗压强度和弹性模量力学特性,观察橡胶集料对微粒混凝土脆性的改善情况。

1 试验研究

本文在参考前人微粒混凝土研制试验的基础上,进行了有针对性的材料试验。此外,在整理分析试验数据时,发现了一些有价值的规律。这些规律对后人研究橡胶集料微粒混凝土的力学性能和材料特性有一定的借鉴价值。

1.1 试验原材料

水:大连地区深层地下水,确保水质纯净,无化学污染。水泥:大连水泥厂生产的 325 号普通型硅

酸盐水泥。橡胶集料(图 1):废旧橡胶处理厂生产的粒径在 1 mm ~ 3 mm 之间橡胶集料,主要是由废旧的汽车外轮胎磨制而成。试验材料中所用砂(图 2):取自当地的自然河滩沉积砂,试验之前进行筛分为具有连续级配的两组骨料:细砂粒径为 0.16 mm ~ 2.50 mm;粗砂粒径为 2.5 mm ~ 5.0 mm。



图 1 橡胶集料



图 2 自然河滩沉积砂

1.2 试验方案

为了探究橡胶集料微粒混凝土弹性模量和抗压强度的影响因素,通过控制变量法,进行多组试件的材料试验。通过查阅相关文献^[17],初步确定试验研究的变量为:水灰比、骨料级配、橡胶集料添加量。

1.2.1 配合比

根据相关资料^[18],材料试验以水泥:骨料:水 = 1.0:7.3:1.0 为初始基础配合比。以橡胶集料和水灰比作为变量,设计分组试验方案。其中橡胶集料添加量由替换相应配合比中砂骨料的质量比例表示,细砂与粗砂的质量比例按规定选取。根据变量的不同,设计 30 组配合比方案。每种配合比组成方案分别浇筑制作 3 块 100 mm × 100 mm × 100 mm 正方体和 3 块 100 mm × 100 mm × 300 mm 长方体试件。

首先选定第一部分方案拌合物骨料中细砂和粗砂的质量比例为 3.3:4.0。水灰比依次为 1.0、1.2、1.4。橡胶集料添加量为 0%、5%、10%、15%、20%。试验方案如表 1 所示。

第二部分方案中拌合物骨料采用细砂。通过这

种方式,可以对比研究骨料级配对微粒混凝土力学性能的影响。第二种方案如表 2 所示。

表 1 第一部分骨料配比试验方案编号

水灰比	不同橡胶集料(%)试件编号				
	0	5	10	15	20
1.0	第 1-1 组	第 1-2 组	第 1-3 组	第 1-4 组	第 1-5 组
1.2	第 2-1 组	第 2-2 组	第 2-3 组	第 2-4 组	第 2-5 组
1.4	第 3-1 组	第 3-2 组	第 3-3 组	第 3-4 组	第 3-5 组

表 2 第二部分骨料配比试验方案编号

水灰比	不同橡胶集料(%)试件编号				
	0	5	10	15	20
1.4	第 4-1 组	第 4-2 组	第 4-3 组	第 4-4 组	第 4-5 组
1.6	第 5-1 组	第 5-2 组	第 5-3 组	第 5-4 组	第 5-5 组
1.8	第 6-1 组	第 6-2 组	第 6-3 组	第 6-4 组	第 6-5 组

1.2.2 试件制作

参考普通混凝土力学性能试验的规范^[19],按设计方案要求的微粒混凝土配料用量,配制微粒混凝土拌合物,采用实验室专用搅拌机进行拌合物搅拌,保证各组分混合均匀。将拌合物浇筑到模具中并放到机械振动台上振捣密实。使用塑料薄膜将拌合物表面覆盖,防止水分流失导致微粒混凝土水灰比改变。将刚浇筑的试件放在恒定室温环境下静置,24 h 后拆除模具并编号。将拆模整理后的试验试件放到专用的恒温、恒湿的养护室中进行 28 d 标准养护。

1.2.3 材料试验过程

材料试验在 CMT5000 型电子材料试验机上进行。该试验机最大压力 100 kN,位移速率的变化范围 0.001 mm/min~500 mm/min。材料大变形测量范围 10 mm~800 mm,大变形分辨能力为 0.008 mm,采样速率为 50 次/秒,位移分辨能力达到 0.025 μm。可以进行恒力或恒速率加载控制。本文试验以 0.2 mm/min 恒定速率加载,计算机自动记录位移和加载作用力之间的关系,保证了试验的精确性。

2 试验结果与分析

橡胶集料微粒混凝土抗压强度大小采用试验测得的立方体试件的抗压强度。因为橡胶集料微粒混凝土受压的应力-应变曲线同普通混凝土相应曲线极为相似,所以应力-应变曲线中出现的最大应力,即可作为微粒混凝土的抗压强度。橡胶集料微粒混凝土的弹性模量由长方体试件测量并计算得到。根据文献^[20-21]采用长方体受压应力-应变曲线中应力为 0.5 MPa 的点和应力为试件抗压强度的 40% (0.4 f_c)的点之间连线的割线斜率作为橡胶集料微粒混凝土试件的弹性模量。为了减小材料离散性对材料试验数据和最终结果的影响。每个测点试验数据使用三个试验试件结果的平均数。若试验测量出来三个数据中最大值或最小值波动范围超出中间数值的 15%,则将最小值和最大值一起剔除,把中间数值作为该组数据的测量值。最后分析整理得到橡胶集料微粒混凝土抗压强度和弹性模量的试验数据如表 3 和表 4 所示。

表 3 试件抗压强度

序号	骨料配比	水灰比	不同橡胶集料(%)试件抗压强度/MPa				
			0	5	10	15	20
第一组	细+粗	1.0	8.58	8.01	7.98	6.87	6.34
第二组	细+粗	1.2	7.67	6.37	5.46	5.68	4.37
第三组	细+粗	1.4	6.16	5.85	4.55	4.27	3.57
第四组	细	1.4	3.75	3.27	2.57	2.37	2.67
第五组	细	1.6	2.88	2.43	2.23	2.17	2.43
第六组	细	1.8	2.46	2.61	2.03	2.42	2.23

表 4 试件弹性模量

序号	骨料配比	水灰比	不同橡胶集料(%)试块弹性模量/MPa				
			0	5	10	15	20
第一组	细+粗	1.0	4512	4380	4446	4060	3580
第二组	细+粗	1.2	3990	3624	3456	3560	3264
第三组	细+粗	1.4	3468	3506	3228	3176	2988
第四组	细	1.4	2340	2232	2094	2118	2025
第五组	细	1.6	2136	1890	1830	1926	1953
第六组	细	1.8	1954	1906	1695	1983	1832

橡胶集料微粒混凝土的抗压强度随水灰比和橡胶集料添加量的变化情况如图 3 所示。从图 3 中可以看出,抗压强度随着水灰比的减小大致呈现降低的趋势。橡胶集料的含量增加时,微粒混凝土的抗压强度相对降低,总体呈现梯度逐级递减的规律。但是当水灰比增加到 1.8 时,材料的抗压强度出现非规律性的离散数据点。出现这种现象的原因可能是,相比于微粒混凝土中的骨粒,橡胶集料的弹性模量非常小,数量上相差多个数量级。橡胶集料分布于在微粒混凝土之中,每个颗粒其所占体积相当于一个孔隙。橡胶集料含量增多相当于微粒混凝土之中的孔隙相应增多。这增加了微粒混凝土的离散性。而且橡胶集料本身吸水性差,表面比较光滑,和胶凝材料的黏聚力不佳。这些原因都影响到微粒混凝土最后力学特性表现的规律性。

此外,当骨料只采用细砂时微粒混凝土试件的力学性能随水灰比和橡胶掺量的变化不如使用混合级配骨料时的变化明显。原因可能是因为骨料的粒径范围减小,粒径的种类变少,使得骨粒之间相互填充更加松散,材料内部更容易产生缺陷。所以当材料受力时材料内部的受力点更加离散,材料内部很容易产生受力不均匀的现象。

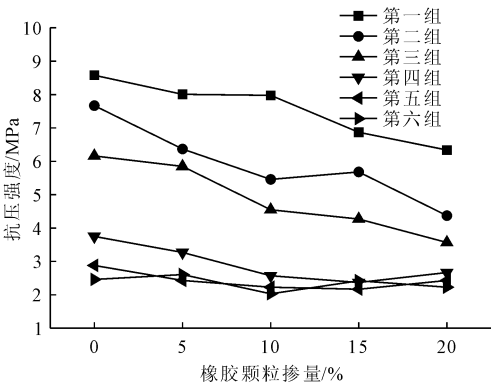


图 3 微粒混凝土试件的抗压强度

橡胶集料添加量的变化情况如图 4 所示。从图 4 中同样可以看出,骨料的颗粒级配对橡胶集料微粒混凝土相应的弹性模量影响很大。在相同水灰比情况下,当采用粗砂和细砂共同作为微粒混凝土骨料时,弹性模量都比只采用细砂作为骨料时大 2 倍以上。

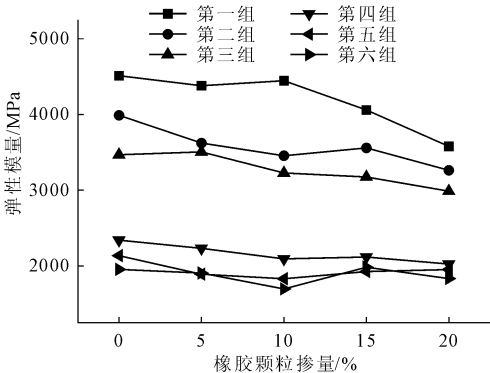


图 4 微粒混凝土试件的弹性模量

由以上试验数据分析可以得出,骨料级配、水灰比、橡胶集料含量对抗压强度和弹性模量都有影响。其中水灰比的影响最为明显。但是当水灰比增加到 1.8 时,材料的抗压强度出现非规律性的离散数据点。所以动力试验模型选用橡胶集料微粒混凝土时的水灰比不易高于 1.6。

3 结 论

橡胶集料微粒混凝土是应用于动力试验模型的重要仿真材料。特别在研究大型工程结构受到随机荷载作用时,从弹性变形阶段到弹塑性变形阶段,再到破坏阶段的全过程动力响应问题时起到很关键的作用。文中通过对多组不同配合比的橡胶集料微粒混凝土试件进行单轴受压试验,测定不同配合比条件下橡胶集料微粒混凝土相应的材料性能。得出如下结论:

(1) 当微粒混凝土的骨料仅为砂且其他材料质量比不变时,抗压强度和弹性模量随水灰比的增加显著降低。当水灰比相同时,混合级配骨料试件比

细砂骨料试件的抗压强度和弹性模量明显要高。

(2) 当水灰比相同时,橡胶集料微粒混凝土的抗压强度和弹性模量随橡胶集料添加量的增加显著降低。当橡胶集料添加量相同时,抗压强度和弹性模量随水灰比的增加显著降低。需要注意的是当水灰比较大时,橡胶集料加入过多时,材料的离散性会变大。

(3) 本文提出的橡胶集料微粒混凝土抗压强度和弹性模量较小,且取材方便,价格便宜,为制作大比尺动力结构试验模型提供了可行性。

参考文献:

- [1] 孙国帅.深水桥梁下部结构体系振动台模型试验研究及理论分析[D].大连:大连理工大学,2013:1-4.
- [2] 楼康高.微粒混凝土受压时应力应变全曲线研究[D].上海:同济大学,1988:1-2.
- [3] Felekoglu B, Tosun K, Baradan B. Effects of fibre type and matrix structure on the mechanical performance of self-compacting micro-concrete composites[J]. Cement and Concrete Research, 2009,39(11):1023-1032.
- [4] Colston S L, O'Connor D, Barnes P, et al. Functional micro-concrete: The incorporation of zeolites and inorganic nano-particles into cement micro-structures[J]. Journal of Materials Science Letters, 2000,19(12):1085-1088.
- [5] Lorca P, Calabuig R, Benlloch J, et al. Microconcrete with partial replacement of Portland cement by fly ash and hydrated lime addition[J]. Materials & Design, 2014,64:535-541.
- [6] Felekoglu B. Effects of PSD and surface morphology of micro-aggregates on admixture requirement and mechanical performance of micro-concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2007,29(6):481-489.
- [7] 杨政,廖红建,楼康禹.微粒混凝土受压应力应变全曲线试验研究[J].工程力学,2002,19(2):90-94.
- [8] 沈朝勇,周福霖,黄襄云,等.动力试验模型用微粒混凝土的初步试验研究[J].广州大学学报,2005,4(3):249-253.
- [9] 沈德建,吕西林.模型试验的微粒混凝土力学性能试验研究[J].土木工程学报,2010,43(10):14-21.
- [10] 张皓,李宏男,王伟东.地震作用应变率下微粒混凝土动态受压力学性能试验与本构模型研究[J].建筑结构学报,2014,35(2):303-310.
- [11] Kaloush K, Way G, Zhu H. Properties of crumb rubber concrete[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2005(1914):8-14.
- [12] Sukontasukkul P, Chaikaew C. Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber[J]. Construction and Building Materials, 2006,20(7):450-457.
- [13] Zhu W X. Ultrasonic prediction of 28 - Day compressive strength of crumb rubber concrete during early age[J]. Key Engineering Materials, 2016,680:378-381.
- [14] 董建伟,袁琳,朱涵.橡胶集料混凝土的试验研究及工程应用[J].混凝土,2006(7):69-71.
- [15] 周梅,张晓帆,薛忠泉.橡胶集料混凝土配合比设计及强度试验研究[J].硅酸盐通报,2010,29(4):798-803.
- [16] 龙广成,马昆林,谢友均.橡胶集料对混凝土抗压强度的降低效应[J].建筑材料学报,2013,16(5):758-762.
- [17] 朱彤,林皋,马恒春.混凝土仿真材料特性及其应用的试验研究[J].水力发电学报,2004,23(4):31-38.
- [18] 柳春光,孙国帅,张士博,等.深水桩墩结构振动台试验及地震响应预测分析[J].大连理工大学学报,2013,53(1):114-121.
- [19] 中华人民共和国建设部.普通混凝土力学性能试验方法标准:GB50081-2002[S].北京:中国建筑出版社,2003:3-18.
- [20] 张宇,冯新,周晶,等.仿真混凝土不同龄期单轴动态压缩全曲线试验研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(4):77-84.
- [21] 白国立,窦宝松.塑性混凝土弹性模量的试验研究[J].北京水务,2012(3):17-21.