

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.03.014



建筑垃圾细料生产流动化回填材料的性能

魏建军^{1,2}, 张金喜¹, 王建刚¹

(1. 北京工业大学北京市交通工程重点实验室, 北京 100024;

2. 黑龙江工程学院土木与建筑工程学院, 哈尔滨 150050)

摘要:以灰砂比 0.03、0.05 和 0.08, 粉砂比 0、0.05、0.1、0.15 和 0.2 为设计参数, 对建筑垃圾回填材料进行设计。通过试验对回填材料的流动性(流动度、泌水率)、无侧限抗压强度以及应力应变曲线、本构关系模型和弹性模量等进行研究。研究结果表明: 回填材料的流动度受水固比影响较大, 两者接近线性关系; 流动度在 200~250 mm 范围, 泌水率在 4%~8% 之间; 回填材料抗压强度与灰砂比和水固比之间存在很好的幂指数关系; 回填材料应力应变曲线形状与普通混凝土的相似, 在此基础上提出回填材料的本构关系模型; 回填材料无侧限抗压强度与弹性模量之间存在很好的指数关系。

关键词:建筑垃圾细料; 流动化回填材料; 本构关系; 应力-应变曲线; 弹性模量

中图分类号: TU52; U416.212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)03-0096-08

Properties of flowable backfill materials using recycled fine aggregates of brick and concrete waste

Wei Jianjun^{1,2}, Zhang Jinxi¹, Wang Jiangan¹

(1. Beijing Key Laboratory of Traffic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China;

2. Department of Civil and Architecture Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, P. R. China)

Abstract: A new type of backfill materials using recycled brick and concrete waste as fine aggregates was designed with three cement-to-sand ratios (C/Sa) and five fly ash-to-sand ratios (FA/Sa). A series of measurements were conducted to investigate the fluidity and bleeding and mechanical properties including uniaxial compressive strength, stress-strain relationship, constitutive relation model and elastic modulus. The results showed fluidity had linear correlation on water-to-solid ratios (W/So); the range of the bleeding rates was in 4%~8% when the fluidity was within 200~250 mm. The compressive strengths had an exponential relationship to the cement-to-sand ratios and water-to-solid ratios. A constitutive relation model was put forward to describe the stress-strain relationship curve of backfill material on the base of the

收稿日期: 2015-12-15

基金项目: 国家科技支撑计划(2014BAC07B03); 国家自然科学基金(51278016)

作者简介: 魏建军(1973-), 男, 博士(后), 主要从事路面结构与材料研究, (E-mail) weijianjun1116@163.com。

张金喜(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) zhangjinxi@bjut.edu.cn。

Received: 2015-12-15

Foundation item: The National Science-Technology Support Plan (No. 2014BAC07B03); National Natural Science Foundation of China (No. 51278016)

Author brief: Wei Jianjun (1973-), post doctorate, main research interests: pavement structure and material, (E-mail) weijianjun1116@163.com.

Zhang Jinxi (corresponding author), professor, PhD supervisor, (E-mail) zhangjinxi@bjut.edu.cn.

model of the concrete. The relationship between the unconfined compressive strength and elastic modulus was established, which could be used to calculate the modulus of backfill materials by the compressive strength directly.

Keywords: recycled fine aggregates of brick and concrete waste; flowable backfill materials; constitutive relation; stress-strain relationship curve; elastic modulus

建筑垃圾细料是建筑垃圾在回收利用过程中经分拣、破碎、筛分后得到的粒径范围在 0~5 mm 的集料。目前,建筑垃圾细料主要来源有两个:一是拆迁后的废砖混结构,二是废弃的混凝土或钢筋混凝土结构。砖混结构生产的建筑垃圾细料主要是破碎的粘土砖和水泥砂浆颗粒和粉末,其中粘土砖的成分较多。废弃混凝土结构生产的建筑垃圾细料中主要是破碎的水泥砂浆颗粒和骨料颗粒以及粉末等(如图 1、图 2 所示)。由砖混结构生产的建筑垃圾细料因其强度低,吸水量大等原因多用于生产再生砖。



图 1 砖混结构生产的建筑垃圾细料

Fig. 1 Recycled brick and concrete waste

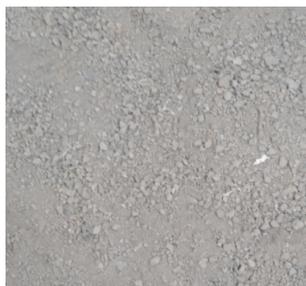


图 2 混凝土结构生产的建筑垃圾细料

Fig. 2 Recycled concrete waste

流动化回填材料是以 0~5 mm 细料为基础,加入适当比例的水泥、粉煤灰,加水制备出可以实现自流平和自密实功能的材料。与传统回填材料土相比,流动化回填材料具有无需压实,无沉降的优点。美国混凝土协会(ACI)定义了一类材料称为可控低强度材料(Controlled low-strength materials,简称 CLSM),它具有自流平、自密实性特点,主要用于管沟回填、桥台背回填等工程。CLSM 属于流动化的回填材料。目前对流动化回填材料的研究主要集中在

在对细料选用上。文献[1-5]研究了以粘土为细料制备流动化回填材料的流动性、湿密度和强度性能。Du^[6]研究了天然砂(concrete sand)、铸砂(foundry sand)、底灰(bottom ash)制备的 CLSM 在流动性、需水量和强度方面的不同。鲍远琴^[7]、Sivakumar^[8]研究了利用炉底灰制备流动化回填材料的流动性、沉降性、收缩性和强度等性能。邵钰清等^[9]、贾东东^[10]对建筑垃圾细料用于回填材料的工作性和抗压强度与 CBR 之间的关系进行了研究。目前对流动化回填材料性能研究主要集中在流动性和强度方面,而对流动化回填材料在荷载作用下的破坏形式、应力应变关系,模量大小等力学性能研究较少。本研究采用建筑垃圾细料制备流动化回填材料。通过试验对这种回填材料的流动性(流动度、泌水)和力学性能(强度、模量、破坏形态、应力-应变关系等)进行研究。研究成果对建筑垃圾细料回填材料在工程中应用有重要意义。

1 原材料和配合比

文中的建筑垃圾细料流动化回填材料(以下简称回填材料)主要由建筑垃圾细料、水泥、粉煤灰和水组成。建筑垃圾细料来自某建筑垃圾处理厂中砖混结构经处理后得到的 0~5 mm 的细料。通过现场取样,利用德国产 X 射线衍射仪(型号:BRUKER D8 Advance)对其成分进行分析,结果见图 3。

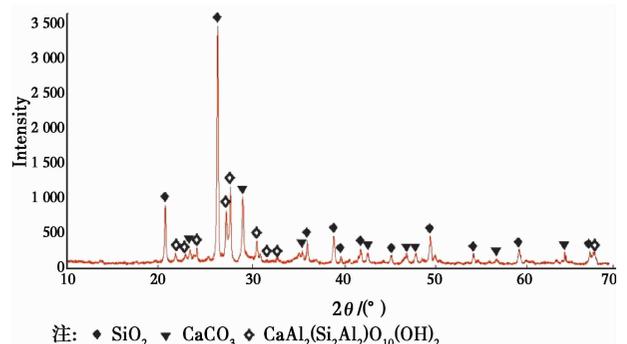


图 3 建筑垃圾的 X 射线衍射图

Fig. 3 X-ray diffraction pattern of brick and concrete waste

由图 3 可见样品中 SiO_2 的衍射峰最高,这主要是因为砖混结构中含有大量的粘土砖所致。其次是 CaCO_3 ,说明细料中含有水泥砂浆或水泥浆磨碎颗

粒成分较多。表 1 列出建筑垃圾细料的筛分试验结果。

表 1 建筑垃圾细料通过百分率

Table 1 Percent passing							%
4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm	Fineness modulus
98	76	56	42	25	16	10	2.52

试验中的水泥采用河北燕新建材有限公司生产的钻牌 P. O42.5R 普通硅酸盐水泥;粉煤灰为山东德州华能电厂生产的 F 类 III 级粉煤;水是自来水。

采用灰砂比、粉砂比和水固比 3 个参数对建筑垃圾回填材料进行配合比设计。灰砂比(cement-to-sand ratio, C/Sa)是指回填材料中水泥质量与建筑垃圾质量之比。灰砂比与回填材料中水泥用量有关,对回填材料的强度影响较大。粉砂比(fly ash-to-sand ratio, FA/Sa)指回填材料中粉煤灰质量与建筑垃圾质量之比。粉砂比表达了回填材料中粉煤灰的用量。粉煤灰对回填材料的黏聚性有一定影响。水固比(water-to-solid ratios, W/So)是指回填材料中水的质量与水泥、粉煤灰和建筑垃圾质量总和之比。水固比大小与回填材料的用水量有关。根据对具有后期可开挖性回填材料强度的规定^[11],试验中设计了 3 个灰砂比:0.03、0.05、0.08,同时设计了 5 个粉砂比:0、0.05、0.1、0.15、0.2 和 3 个水固比:0.31、0.32、0.33。

2 试验过程

2.1 流动度和泌水试验

进行流动度和泌水试验的目的是分析回填材料流动度与水固比之间的关系、流动度与泌水率之间的关系。以一个配合比的试验过程为例说明:取烘干的建筑垃圾细料 2 000 g。按灰砂比、粉砂比加入水泥和粉煤灰。将混合料倒入砂浆搅拌机中低速搅拌 1 min。向搅拌机中逐渐加水进行搅拌。当混合物的流动状态接近目标流动度时,对混合物进行流动度测试,记录用水量和水固比。取出一部分拌合料放入烧杯中进行泌水量测定,计算泌水率。按回填工程对回填材料流动度的要求^[11-13],试验中设计的流动度范围在 200~300 mm 之间。试验中按流动度 200、240 和 300 mm 进行了测试。

流动度测试方法是按 ASTM D6103,“Standard Test Method for Flow Consistency of Controlled

Low Strength Material”进行(如图 4)。ASTM D6103 中用于测试流动度的圆筒尺寸为 75 mm×150 mm。泌水试验按《公路工程水泥与水泥混凝土试验规程》JTG E30—2005 中 T0528 试验方法进行。

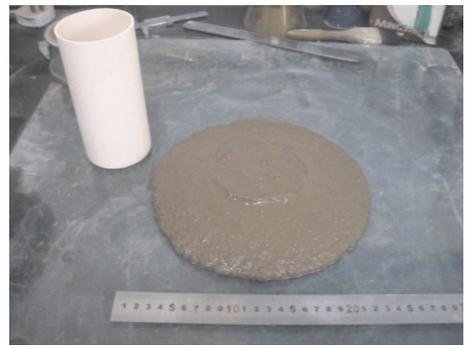


图 4 流动度测试试验

Fig. 4 Fluidity test of CLSM

2.2 单轴压缩试验

以一个配合比的试验过程为例说明:取烘干的建筑垃圾细料 2 000 g。按灰砂比、粉砂比和水固比加入水泥、粉煤灰和水。拌合均匀后直接倒入 $\varphi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 圆柱体试模中,无需振捣。48 h 后试件脱模,放入标养室养生 28 d 后进行单轴抗压试验。为了得到抗压试件的应力-应变全曲线,采用 UTM-100 型万能材料试验机进行加载,测试试件的应力应变曲线和破坏荷载。加载方式按《公路土工试验规程》JTG E40—2007 中 T0148 中的规定进行。

3 试验结果分析

3.1 流动度与水固比的关系

流动度试验共得到 56 组水固比与流动度的数据。将试验结果先绘出图 5 中的流动度与水固比关系曲线。可以看出,每个灰砂比的关系图中,5 个粉砂比下的流动度与水固比关系曲线基本呈线性变化。曲线变化的趋势相同,彼此之间很接近。当流动度在 200~300 mm 之间,3 个关系图中水固比的

变化范围也相同,在 0.31~0.38 之间。这说明灰砂比和粉砂比对流动度与水固比的关系,没有产生很大的影响。因此,可以将这 56 组数据放到一起进行分析(如图 6)。将图 6 中数据进行相关分析,发现

流动度与水固比之间有很好的线性关系,相关系数达到 0.82。说明这种回填材料的流动度受水固比影响较大,两者之间接近线性关系。流动度受灰砂比和粉砂比的影响较小。

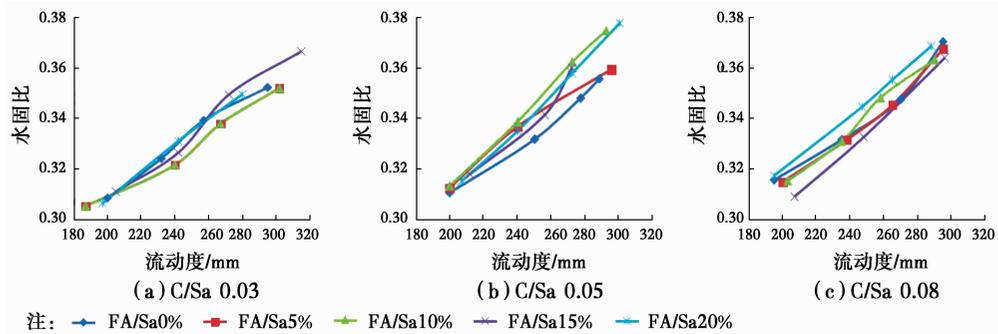


图 5 3 种灰砂比时流动度与水固比关系

Fig. 5 Relationship of fluidity and water-to-solid rate with different cement-to-sand rates

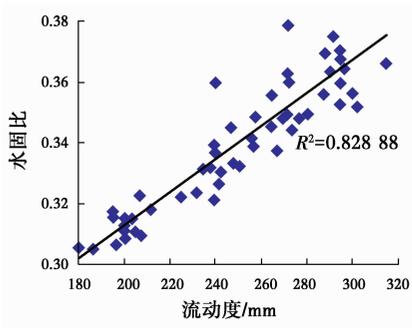


图 6 流动度与水固比关系图

Fig. 6 Relationship of fluidity and water-to-solid rate

3.2 流动度与泌水率的关系

图 7 为回填材料不同流动度的泌水率分布情况。由图 7 可见,各个粉砂比回填材料测得的泌水率值与流动度之间没有很好的数学规律可循。因此,可以考虑按统计规律对这些数据进行处理。首先,将泌水率按 4%~6%、6%~8%、8%~10%、10%以上划分成 4 个范围;流动度按 2.1 节中设计的目标流动度划分成 3 个范围:190~220 mm、220~250 mm 和 250~270 mm。然后,统计出落在不同流

动度范围和泌水率范围内的泌水率值出现次数(见表 2)。最后,根据表 2 中相应次数的多少确定出流动度与泌水率的关系表(见表 3)。

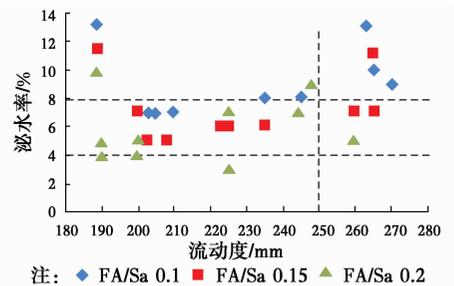


图 7 不同流动度下泌水率试验结果分布图

Fig. 7 Distribution of bleeding test results with different fluidity

关于流动化回填材料的泌水性能,目前对泌水的大小没有一个明确限值,根据经验通常认为 8% 以下的泌水率是可以接受的。按图 7 中泌水率与流动度的分布情况,可以看出流动度在 200~250 mm 以内,建筑垃圾回填材料的泌水率是可以控制在 8% 以内。

表 2 不同流动度范围泌水率出现次数统计结果(次)

Table 2 Occurrence number of bleeding rate with different fluidity range

Bleeding rate	Fluidity 190~219/mm			Fluidity 220~249/mm			Fluidity 250~270/mm		
	FA/Sa 0.1	FA/Sa 0.15	FA/Sa 0.2	FA/Sa 0.1	FA/Sa 0.15	FA/Sa 0.2	FA/Sa 0.1	FA/Sa 0.15	FA/Sa 0.2
0.04~0.06			3			1			1
0.06~0.08	3	3			3	1		2	1
0.08~0.10				3			1		1
0.10 以上							2	1	

表 3 泌水率与流动度关系表

Table 3 Relationship of fluidity and bleeding rate

Fluidity/ mm	Bleeding rate/%		
	FA/Sa 0.1	FA/Sa 0.15	FA/Sa 0.2
190~220	6~8	6~8	4~6
220~250	8~10	6~8	6~8
250~270	>10	8~10	8~10

3.3 灰砂比、水固比与抗压强度关系

强度试验中回填材料中粉煤灰用量按粉砂比 0.1 进行掺配。表 4 中列出 9 个配合比 52 个试件的

强度测试结果。将抗压强度数据与灰砂比和水固比进行多元回归分析。利用 Matlab 软件对 3 种回归关系:线性关系、幂指数关系、e 指数关系进行了分析和验证。结果表明:3 种回归方程的计算值与实测值之间的标准偏差 S 分别为 0.18(线性)、0.05(幂指数)和 0.36(e 指数)。因此,可以考虑采用幂指数形式建立回填材料无侧限抗压强度与灰砂比和水固比之间的关系方程(如式(1))。

$$f_c = ax^{by} \quad (1)$$

式中: f_c 为无侧限抗压强度; x 为灰砂比(C/Sa); y 为水固比(W/So); a, b 为回归系数, $a = 245.5, b = 5.955$ 。

表 4 回填材料强度试验结果

Table 4 Results of the uniaxial compression tests

C/Sa	W/So	28-day unconfined compressive strength/MPa						Average value/MPa	Coefficient of deviation/%
		1	2	3	4	5	6		
	0.31	0.36	0.35	0.37	0.35	0.36	0.33	0.35	4
0.03	0.32	0.28	0.25	0.28	0.26	0.25	0.31	0.27	9
	0.33	0.23	0.24	0.22	0.17			0.22	14
	0.31	0.94	0.92	0.94	0.93	0.94	0.92	0.93	1
0.05	0.32	0.91	0.89	0.87	0.76	0.76	0.81	0.83	8
	0.33	0.72	0.75	0.73	0.70	0.68	0.69	0.71	4
	0.31	2.25	2.38	2.21	2.37	2.35	2.25	2.30	3
0.08	0.32	1.94	2.09	2.00	2.04	1.98	1.98	2.01	3
	0.33	1.67	1.70	1.75	1.74	1.81	1.88	1.76	4

3.4 应力-应变全曲线分析

图 8 中曲线是对 52 个试件的试验曲线整理后得到的回填材料典型应力-应变曲线。根据曲线特点可将其分成 5 个阶段:OA、AB、BC、CD 和 D 段后。A 点是过 O 点切线与曲线的交点;B 点是曲线的峰值点;C 点和 D 点为曲线下降段中直线部分延伸与下降段曲线的交点。OA 段中应变与应力按比例增加,材料表现为弹性。AB 段中,应力随应变的增加而增加,应变增加速率大于应变的。材料表现为弹塑性。在接近峰值点 B 时,会有裂缝出现。BC 段中,应力随应变增加而下降,但下降缓慢。试件中裂缝数量不断增加。CD 段为应力随应变按比例下降阶段。此时裂缝数量基本恒定但裂缝宽度

不断增加(如图 9(b))。曲线过了 D 点以后,试件裂缝已经张开到一定程度,应力随应变增加变化很小,但试件没有完全破碎(如图 9(c)),仍有很小的残余强度。

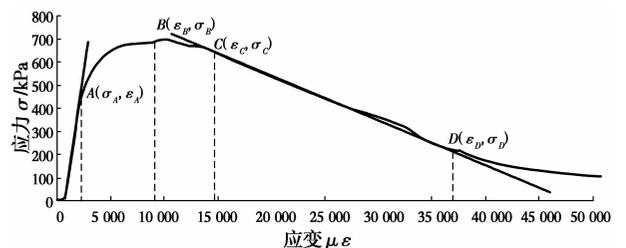


图 8 建筑垃圾回填材料典型应力-应变全曲线

Fig. 8 Typical total stress-strain curves of backfill materials

为了更好的描述应力-应变曲线形式,需要给出

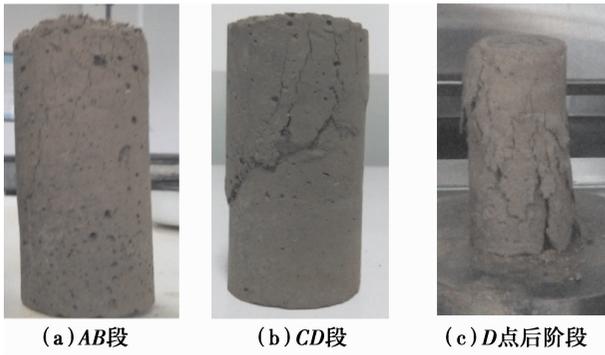


图 9 不同阶段试件的破坏形式

Fig. 9 Failure mode of different stages

曲线中各个特征点与峰值点之间的关系。用 ϵ_A/ϵ_B 、 ϵ_C/ϵ_B 、 ϵ_D/ϵ_B 表示特征点 A、C、D 的应变与峰值点 B 应变的比值； σ_A/σ_B 、 σ_C/σ_B 、 σ_D/σ_B 表示 A、C、D 3 点的应力与峰值点 B 应力的比值。根据这些比值的大小可以确定 A、C、D 3 点在曲线中的位置。表 5 是列出了不同灰砂比回填材料的各特征点比值。

表 5 各特征点的应变与峰值应变比、应力与峰值应力比

Table 5 Strain and peak strain ratio and stress and peak stress ratio of the failure points

C/Sa	ϵ_A/ϵ_B	σ_A/σ_B	ϵ_C/ϵ_B	σ_C/σ_B	ϵ_D/ϵ_B	σ_D/σ_B	Modulus/ MPa
0.03	0.3	0.45	1.7	0.75	2.9	0.3	100~150
0.05	0.3	0.5	1.65	0.8	2.6	0.3	260~385
0.08	0.8	0.7	1.55	0.8			300~400
Concrete ^[14]	0.5	0.4	1.35	0.91	3	0.4	30 000

根据表 5, 灰砂比 0.03 和 0.05 的 ϵ_A/ϵ_B 、 σ_A/σ_B 比灰砂比 0.08 的小。说明这两个灰砂比的弹性阶段比灰砂比 0.08 的短, 弹塑性段比 0.08 的长。因此, 灰砂比 0.03 和 0.05 的回填材料在曲线上升阶段弹塑性比较明显, 而灰砂比 0.08 的则表现出很好的弹性。此外, 表 4 中混凝土特征点 C 的 ϵ_C/ϵ_B 比回填材料的小, σ_C/σ_B 比回填材料的大, 说明混凝土材料在达到峰值点后应力下降很快。而回填材料的应力在达到峰值点应力后随着应变的增加而保持一段时间后才缓慢下降。因此, 回填材料因水泥用量较小而表现出明显的塑性特征。

3.5 本构关系模型

材料的本构关系是利用数学模型对材料受力过程的应力应变曲线进行描述。根据表 4, 回填材料应力应变曲线上各特征点的位置与混凝土应力的比

较接近。因此, 可以采用混凝土材料的本构关系对回填材料进行模拟。目前常见的混凝土的本构方程为分段函数形式^[14]。

$$\text{上升段: } y = a_a x + (3 - 2a_a)x^2 + (a_a - 2)x^3 \quad x \leq 1 \quad (2)$$

$$\text{下降段: } y = x/[a_d(x-1)^2 + x] \quad x \geq 1 \quad (3)$$

式中: x 为 ϵ/ϵ_B ; y 为 σ/σ_B ; a_a 、 a_d 为参数; 其中 $a_a = E_0/E_p$; E_0 为初始切线弹性模量; E_p 为峰值割线变形模量; a_d 为描述曲线上 C 点和 D 点位置的参数。

采用式(1)、(2)中的分段函数对建筑垃圾回填材料的应力应变曲线进行拟合。首先对试验曲线进行无量纲化处理, 建立横坐标 $x_{测} (\epsilon/\epsilon_B)$, 纵坐标 $y_{测} (\sigma/\sigma_B)$ 的关系曲线。将横坐标 $x_{测}$ 代入式(1)和(2)中, 得到计算值 $y_{计}$ 。利用最小二乘原理计算 $y_{测}$ 与 $y_{计}$ 之间的标准偏差 S。调整方程中的参数改变计算值 $y_{计}$ 使得标准偏差 S 最小。最后根据 S 最小时参数 a_a 和 a_d 确定方程的形式。

表 6 中列出 3 种灰砂比回填材料的本构方程。可以看出: 灰砂比 0.03、0.05 方程中参数比较接近。灰砂比 0.08 的上升段参数 a_a 与前两个灰砂比的相差较大。各个灰砂比计算的标准偏差 S 比较小, 说明经过参数调整的本构方程与应力应变曲线拟合效果很好。图 10 是 3 个灰砂比的试验曲线与表 5 中方程的拟合情况。本构方程的建立为定量分析建筑垃圾回填材料应力应变关系提供了依据, 在数值模拟该材料的力学性能上将起到重要作用。

表 6 3 种灰砂比回填材料的本构方程

Table 6 Constitutive relation model of the backfill materials

C/Sa	Constitutive relation model	stress-strain curve parameters and standard deviation			
		a_a	S_a	a_d	S_d
0.03	$y = 3.4x - 3.8x^2 + 1.4x^3$	3.4	0.07	0.9	0.04
	$x \leq 1$				
	$y = x/[0.9(x-1)^2 + x]$				
0.05	$y = 3.5x - 4x^2 + 1.5x^3$	3.5	0.07	0.95	0.07
	$x \leq 1$				
	$y = x/[0.95(x-1)^2 + x]$				
0.08	$y = x + x^2 - x^3$	1	0.04	0.95	0.04
	$x \leq 1$				
	$y = x/[0.95(x-1)^2 + x]$				
	$x \geq 1$				

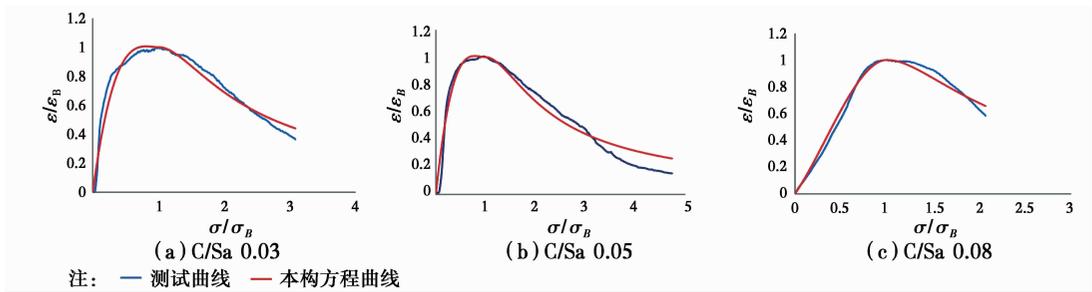


图 10 拟合的应力-应变曲线与试验曲线

Fig. 10 Fitted stress-strain curves and test curves

3.6 弹性模量

材料弹性模量由材料在荷载作用下的应力应变曲线的斜率确定。混凝土材料采用应力应变曲线原点和 σ/σ_B 为 0.4 (峰值应力的 40%) 所对应点的连线斜率确定静弹性模量。从表 4 中不同灰砂比特征点 A 的 σ_A/σ_B 比值看, 不同灰砂比回填材料中 A 点位置有差别。因此, 考虑采用起始点 O 与 A 点连线的斜率确定回填材料的弹性模量。根据文献[15]中论述, 低压缩土的变形模量 E_0 大约在 32~80 MPa 左右。试验中 3 个灰砂比回填材料的弹性模量范围在 100~400 MPa 之间(见表 5)。可见, 即使灰砂比 0.03 的建筑垃圾回填材料, 其弹性模量也是土的 1.25~3 倍。因此, 利用本文中设计的建筑垃圾回填材料在承载力上会高于压实土。

通常, 材料的弹性模量与抗压强度存在一定关系。将试验中每个配比的强度和弹性模量建立关系, 经过不同形式的回归, 发现采用幂指数形式时强度与弹性模量之间有很好的相关性, 相关系数 R^2 为 0.863 7。因此, 建立了回填材料 28 d 无侧限抗压强度与弹性模量之间的关系方程(式(4))。实际应用中可以先得到回填材料抗压强度, 再通过该方程计算回填材料的弹性模量。

$$E_0 = 283.86 f_c^{0.56} \quad R^2 = 0.863 7 \quad (4)$$

式中: E_0 为初始切线弹性模量; f_c 为回填材料 28 d 无侧限抗压强度。

4 结 论

利用试验手段对建筑垃圾流动化回填材料的流动性(流动度、泌水率), 力学性能(无侧限抗压强度、应力应变曲线、本构方程、弹性模量)进行研究, 具体结论如下:

1) 建筑垃圾回填材料的流动度受水固比影响较大, 两者接近线性关系。

2) 回填材料泌水率受水固比和流动度影响较大, 流动度在 200~250 mm 以内, 回填材料的泌水率变化范围在 4%~8% 之间, 流动度超过 250 mm, 泌水率在 8% 以上。

3) 回填材料抗压强度与灰砂比和水固比之间存在幂指数形式的关系。

4) 利用混凝土的本构关系模型对回填材料的应力-应变曲线进行拟合, 通过调整参数得到适用于回填材料的本构关系模型。

5) 试验设计的 3 个灰砂比建筑垃圾回填材料的弹性模量范围在 100~400 MPa 之间, 承载力高于压实土。

6) 建立了回填材料 28 d 无侧限抗压强度与弹性模量之间的关系方程, 为利用抗压强度计算回填材料模量提供了依据。

参考文献:

- [1] ANAND J P. Flowability and density characteristics of controlled low-strength material using native high-plasticity clay [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 14: 485-495.
- [2] RAAVI A K. Design of controlled low strength material for bedding and backfilling using high plasticity clay [D]. The University of Texas at Arlington, 2012.
- [3] DU L X. Laboratory investigations of controlled low strength materials [D]. University of Texas at Austin, 2011.
- [4] 范猛. 非压实回填土基本性能及应用研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
FAN M. Research on properties and applications of self-compacting backfill [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [5] LEE K H. Performance evaluation of modified marine dredged soil and recycled in-situ soil as controlled low strength materials for underground pipe [J]. KSCE

- Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 17(4): 674-680.
- [6] DU L X. Effects of constituent materials and quantities on water demand and compressive strength of controlled low-strength material [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 14: 485-495.
- [7] 鲍远琴. 自流平回填材料的研制及其在检查井中的应用 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
BAO Y Q. Development of self-leveling backfill material and its application in the check well [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [8] SIVAKUMAR N. Effect of quarry dust addition on the performance of controlled low-strength material made from industrial waste incineration bottom ash [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2012, 19(6): 536-541.
- [9] 邵钰清, 贾冬冬. 基于北京市建筑垃圾细料生产再生回填材料的研究 [J]. 新型建筑材料, 2014(11): 36-40.
SHAO Y Q, JIA D D. Study on performance of low-strength flowable backfill materials made of construction waste in Beijing district [J]. New Building Material, 2014(11): 36-40. (in Chinese)
- [10] 贾冬冬. 低强度流动性建筑垃圾回填材料基本性能研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
JIA D D. Study on performance of low-strength flowable backfill materials made of construction waste [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [11] 邬曙光, 张宏, 王智远. 可控性低强度回填材料性能研究 [J]. 内蒙古公路与运输, 2012, 12(4): 10-13.
WU S G, ZHANG H, WANG Z Y. Study of controlled low-strength backfill materials [J]. Highways & Transportation in Inner Mongolia, 2012, 12(4): 10-13. (in Chinese)
- [12] KANESHIRO J. Controlled low strength material for pipeline backfill-specifications, case histories and lessons learned [J]. Pipelines, 2011: 1-12.
- [13] ALIZADEH V. Rapid-construction technique for bridge abutments using controlled low-strength materials [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 28: 149-156.
- [14] 过镇海. 混凝土的强度与本构关系 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 31-38.
GUO Z H. Concrete strength and constitutive relation [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2009: 31-38. (in Chinese)
- [15] 张克恭, 刘松玉. 土力学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 120-125.
ZHANG K G, LIU S Y. Soil mechanics [M]. Beijing: China Architecture & Building Industry Press, 2009: 120-125. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)