

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.02.014

基于气泡率的气泡混凝土密度和强度特性分析

贺国庆^{1,2}, 洪宝宁^{1,2}, 刘鑫^{1,3}, 栗金文^{1,2}, 徐奋强⁴

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;

3. 河海大学 隧道与轨道工程研究所, 江苏 南京 210098; 4. 南京工程学院 建筑工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 对不同气泡率的气泡混凝土密度、无侧限抗压强度的关系进行分析研究, 分析了气泡混凝土试样的制备方法, 通过密度试验和无侧限抗压强度试验结果表明: 气泡混凝土无侧限压缩试验破坏过程分为四个阶段, 分别为线弹性变形阶段, 塑性变形屈服平台阶段, 脆性破坏阶段和延性破坏阶段; 密度和无侧限抗压强度均随气泡率的增加而减小; 随着气泡率的增加, 其主要破坏形式由脆性破坏逐渐转变为延性破坏。试验结果为现场检测气泡混凝土强度指标提供了依据。

关键词: 气泡混凝土; 气泡率; 密度; 无侧限抗压强度; 应力应变曲线

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2014)02-0067-04

Analysis on Bubble Concrete's Density and Strength Characteristics Based on Bubble Rate

HE Guo-qing^{1,2}, HONG Bao-ning^{1,2}, LIU Xin^{1,3}, LI Jin-wen^{1,2}, XU Fen-qiang⁴

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Geotechnical Engineering Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3. Tunnel and Rail Project Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

4. College of Architectural Engineering, Nanjing Engineering Institute, Nanjing, Jiangsu 211167, China)

Abstract: In order to analyze and study the relationship between the unconfined compression strength and density of the concrete with different bubble ratio, the preparation method of bubble concrete specimens is described and analyzed here. The results from the density test and unconfined compression strength test show that the unconfined compression test of its decomposing process can be divided into four stages, such as linear deformation stage, plastic deformation yield platform stage, brittle failure stage and ductile failure stage; the density and unconfined compression strength are decreased along with the increasing of the bubble rate; along with the increasing of the bubble rate, the main failure mode is gradually transformed from the brittle failure into ductile failure. All these as mentioned above could provide the bases for the bubble concrete's strength index in the field testing by density.

Keywords: bubble concrete; bubble rate; density; unconfined compression strength; stress-strain curve

在公路软基路段, 常遇地基承载力不足或沉降变形较大等问题, 通常的做法是加固地基, 通过提高地基土的强度来降低沉降变形, 但是工程造价也相应增加。反之, 利用轻质化的特殊材料作为填土, 通过减小自重来减少地基的应力, 从而避免上述问题, 如此可以获得更经济合理的工程效益。

目前, 气泡混凝土的研究较多, 顾克达^[1]利用发

泡塑料碎粒制备的轻质土, 通过室内试验及理论分析的方法对发泡颗粒轻质土的强度、变形特性以及影响因素进行了分析, 并验证了轻质土的两相体特性; 朱伟^[2]利用疏浚淤泥作为原料土, 发泡聚苯乙烯气泡塑料(EPS)球粒(碎粒、片粒或废弃塑料)作为轻质材料制备的轻质土, 同样通过室内试验对轻质土密度、无侧限抗压强度与材料组成之间的关系进

行了研究,得到了制备 EPS 轻质土的配方公式。陈忠平^[3]、赵全胜^[4]等介绍了气泡混凝土的特性、施工方法和应用效果。以上研究的轻质土都是局限在改变不同原料土和轻质材料的轻质土,本文通过没有原料土,且用气泡代替轻质材料的轻质土,即由固化材料水泥和气泡群组成的两相材料,通过不同气泡率的试样,研究气泡混凝土的密度、强度特性。

1 原材料性质及试样制备

气泡混凝土是水泥和水形成水泥浆的同时,发

泡液稀释至适当的倍率后与压缩空气充分混合形成气泡,然后将两者混合,充分搅拌所形成的轻型土工材料。通过调整气泡和水泥的体积比例,即气泡率,气泡混凝土的密度可以在 $0.5 \text{ g/cm}^3 \sim 1.2 \text{ g/cm}^3$ 的范围内调整。气泡混凝土与一般轻质土不同,没有原料土,主要是由固化材料水泥和气泡组成。为使混合后的气泡混凝土有一定的强度,首先要配置适当密度的水泥浆,配合比见表 1。(表中单方材料组成是指 1 m^3 材料所占质量值)。

表 1 气泡混凝土的配比情况

编号	气泡混凝土单方材料组成		气泡率 / %	试配湿密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	水泥浆单方材料组成		水泥浆湿密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
	水泥 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	水 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$			水泥 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	水 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	
1	622.1	227.2	50.4	900	1109.2	650.9	1760.2
2	536.2	227.0	55.6	800	1109.2	650.9	1760.2
3	448.4	227.7	60.4	720	1109.2	650.9	1760.2
4	360.4	227.0	65.1	620	1109.2	650.9	1760.2
5	325.1	227.0	69.03	560	1109.2	650.9	1760.2

制样时按设计好的量加入水泥和水,通过机械拌和 5 min,然后将发泡装置制备的气泡群拌入水泥浆中,继续拌和 5 min 后,装入 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 立方体模具,由于气泡混凝土高流动性,在实际操作时,在气泡混凝土现浇至模具中轻轻振动模具,气泡混凝土就能充分密实,图 1 为制备试样流程^[5-7]。成形后的试件置于 20°C 的湿润恒温条件下养护。养护 24 h 小时后脱模,再养护至设计龄期。图 2 为已制备好的不同气泡率的气泡混凝土试样。湿密度采用特定量程的容器,用电子称求得质量。无侧限抗压强度采用长春机械厂生产的电子万能试验机 (CSS-44050),加载速率为 5 mm/min ,试验过程中测试试样的应力-应变曲线。



图 2 不同气泡率的气泡混凝土试样

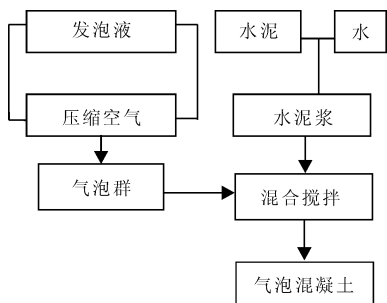


图 1 试样制备流程

密度试验和无侧限抗压强度试验为两组试样,每组试样均是五个上述不同气泡率的轻质土试件。

2 试验结果及分析

2.1 气泡混凝土的密度特性

气泡混凝土很显著的特点就是低密度性,也就是通常所说的轻质性。气泡混凝土的密度由两部分组成,第一部分是水泥浆的密度,第二部分是轻质材料气泡的密度^[8]。由于气泡密度远小于水泥密度,几乎可以忽略,气泡对轻质土的密度贡献很小。本实验按照相同湿密度的水泥浆,通过添加不同量的气泡含量制作成的试件,气泡混凝土的湿密度变化情况如图 3 所示(湿密度采用特定量程的容器,用电子称求得质量)。由图 3 可见,气泡混凝土的湿密度随水泥浆中加入的气泡含量的增大而减小,工程上

可以利用该特性来调整气泡混凝土的密度大小,以适应不同的工程要求。由此可见,如果气泡混凝土本身能满足一般土材料所要求的物理力学指标,则将气泡混凝土作为填土材料使用可以大幅度减小填土自身重量,有利于降低地基沉降量和墙后土压力^[9-10]。

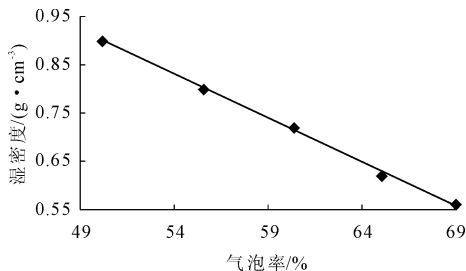


图 3 气泡混凝土湿密度试验值和气泡率的关系

定义 a 为气泡混凝土中气泡体积百分比,由于气泡混凝土可以看作水泥和气泡的两相材料,故可求得气泡混凝土的湿密度公式为:

$$\rho_L = \frac{m_C}{v} = \rho_C(1 - a) \quad (1)$$

式中: ρ_L 为气泡混凝土的湿密度; ρ_C 为水泥浆的密度,在本实验中, $\rho_C = 1.76 \text{ g/cm}^3$; m_C 为水泥浆的质量; v 为气泡混凝土体积; a 为气泡率。

表 1 气泡混凝土密度计算值和试验值对比

$a/\%$	$\rho_L/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	
	计算值	试验值
50.2	0.880	0.900
55.6	0.781	0.800
60.4	0.704	0.720
65.1	0.614	0.620
69.3	0.545	0.560

由表 1 可知,气泡混凝土密度计算值和试验值相差很小,因此在工程中,给定了设计密度,就可以计算出气泡率。

2.2 气泡混凝土的强度特性

利用室内无侧限压缩试验对气泡混凝土的强度特性进行了研究。水泥浆湿密度 1.76 g/cm^3 、养护龄期 28 d 的试件应力 - 应变曲线如图 4 所示。

根据曲线发展趋势,气泡混凝土压缩应力应变曲线呈现四个阶段^[11]:线弹性变形阶段,塑性变形屈服平台阶段,脆性破坏阶段和延性破坏阶段。下面取气泡率为 55.6% 的曲线为例,见图 5,具体叙述如下:

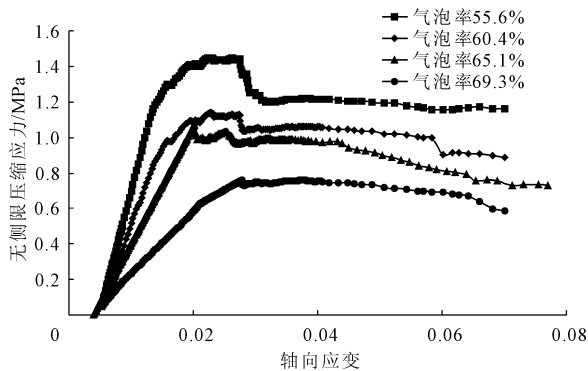


图 4 不同气泡率的应力应变曲线

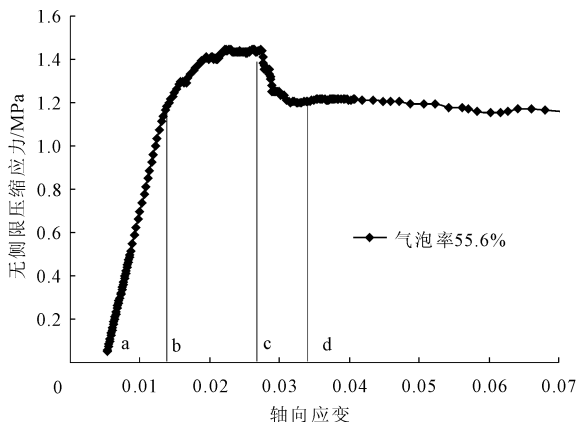


图 5 气泡率 55.6% 的应力应变曲线

(1) 线弹性变形阶段[a, b],气泡混凝土在开始阶段,应力应变曲线近似为一条直线。屈服点发生在直线末端。实验表明,随着气泡率的增加,直线增长斜率减小,即气泡混凝土的弹性模量减小。

(2) 塑性变形屈服平台阶段[b, c],当弹性应变增大到 b 点时,气泡混凝土的压缩应力应变曲线进入塑性变形阶段,应变的增长速度比应力快。随着荷载的进一步增加,应力应变曲线的斜率逐渐减小,气泡混凝土内部裂缝进入非稳定阶段。当到最高点时,应力达到屈服点,相应的应变为峰值应变。当超过峰值应变后,应力突然减小,到下屈服点后上升到另一高点,呈锯齿状。实验表明屈服平台较短,且随着气泡率的增加逐渐减小。

(3) 脆性破坏阶段[c, d],当屈服平台到一定程度后,应力急剧减小,气泡混凝土发生脆性破坏。实验表明,不同气泡率的气泡混凝土其屈服应力也不同,随着气泡率的增加,屈服应力逐渐减小,脆性破坏程度越不明显。

(4) 延性破坏阶段[d, ∞],当脆性破坏到一定程度后,随着应变增长应力相应的缓慢减小,应力应变曲线没有明显的变形,此时气泡混凝土处于延性破坏阶段。实验表明,不同气泡率的气泡混凝土,延

性破坏的程度不同。如图 4 可知,随着气泡率的增加,气泡混凝土的主要破坏形式由脆性破坏慢慢转变为延性破坏,当气泡率达到 70% 时全部为延性破坏。

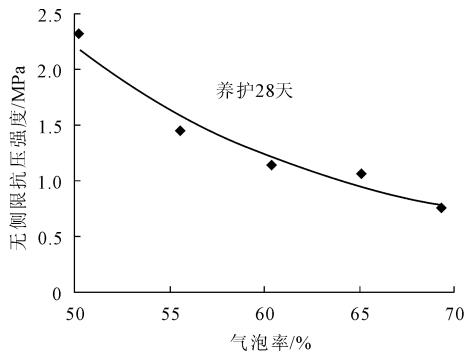


图 6 不同气泡率的抗压强度曲线

根据前述结果,随着气泡率的增加,气泡混凝土无侧限抗压强度相应减小,且其主要破坏形式由脆性破坏逐渐转变为延性破坏,见图 6。

2.3 气泡混凝土的密度与强度的关系

由图 3 可见,气泡混凝土密度随气泡率的含量增大而减小。而随着气泡率的增加,水泥骨架的总体积也随之减小,这将对气泡混凝土的强度特性产生影响^[12]。不同密度的实验结果如图 7 所示,由图 7 可看出,随着密度的增加,无侧限抗压强度随之增加,增加速率逐渐加快。

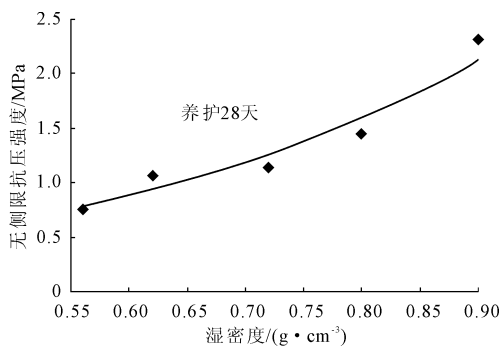


图 7 不同密度的抗压强度曲线

对图 7 中曲线进行指数关系拟合得到强度与密度之间关系如下:

$$q_u = 0.1517e^{2.9348\rho_L} \quad (2)$$

式中: q_u 为不同气泡率下气泡混凝土的无侧限抗压强度; ρ_L 为气泡混凝土的湿密度。拟合度 $R^2 = 0.986$ 。

3 结 论

通过室内压缩实验结果的对比和分析,了解和

掌握了气泡混凝土的密度和强度特性,为气泡混凝土的实际工程应用^[13]积累了理论和设计依据。根据上述实验和分析结果,可以得到如下结论:(1) 可以利用气泡率来调整气泡混凝土的密度;(2) 气泡混凝土的无侧限抗压强度应力应变曲线可以分为四个阶段,分别为线弹性变形阶段,塑性变形屈服平台阶段,脆性破坏阶段和延性破坏阶段,实验表明,随着气泡率的增加,其主要破坏形式由脆性破坏逐渐转变为延性破坏;(3) 气泡混凝土的强度随密度的增加而增加,可以通过密度直接得到强度指标,为气泡混凝土的现场检测提供依据^[14-15]。

参考文献:

- [1] 顾欢达,顾熙.发泡塑料颗粒轻质土的强度、变形特性研究[J].岩土力学,2006,27(11):1922-1926.
- [2] 朱伟,姬凤玲,李明东,等.轻质土密度、强度与材料组成的关系研究[J].岩土力学,2007,28(7):1411-1414.
- [3] 陈忠平,王树林.气泡混合轻质土及其应用综述[J].中外公路,2003,23(5):117-120.
- [4] 赵全胜,梁小勇.气泡混合轻质土变形特性三轴试验研究[J].公路,2010,(10):174-176.
- [5] 张志允.气泡混合轻质土的制作技术及基本力学性质的研究[D].南京:河海大学,2003.
- [6] 李明东,姬凤玲,马殿光.淤泥气泡塑料混合轻质土的开发研究[R].南京:河海大学,2004.
- [7] 何国杰,丁振洲,郑颖人.气泡混合轻质土的研制及其性能[J].地下空间与工程学报,2009,5(1):18-22.
- [8] 马时冬.聚苯乙烯气泡塑料轻质填土(SLS)的特性[J].岩土力学,2001,22(3):245-248.
- [9] 张小平,包承纲,李进军.泡沫轻质材料在岩土工程中的应用[J].岩土工程技术,2000,(1):58-62.
- [10] 陈永辉,石刚传,曹德洪,等.气泡混合轻质土置换路基控制工后沉降研究[J].岩土工程学报,2011,33(12):1854-1862.
- [11] 王展光,徐玉红,杨维汉.球形孔气泡铝合金准静态压缩力学性能[J].江西科学,2007,25(2):147-150.
- [12] 陈忠平,孙仲均,钱争晖.泡沫轻质土充填技术及应用[J].施工技术,2011,(10):59-61.
- [13] H I Park, Y T Kim. Prediction of strength of reinforced lightweight soil using an artificial neural network[J]. Engineering Computations, 2011,28(5):600-615.
- [14] 中国工程建设标准化协会. CECS249:2008. 现浇气泡混凝土技术规程[S].北京:中国计划出版社,2008.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. CJJ/T177-2012. 气泡混合轻质土填筑工程技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.