

喷射混凝土试验方法述评

王胜辉, 袁勇

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 喷射混凝土是土木工程常用的加固增强措施之一. 试验测试方法是评价喷射混凝土工作性能和质量控制的手段. 本文对比研究国内外的试验方法和测试指标, 评述开展测试方法标准研究的重要性. 本文认为, 单纯的强度指标测试不能准确描述喷射混凝土及其结构的工作行为, 还应当考察其变形性能, 国外相关机构最近发布的测试方法也表明, 材料变形性能指标的测试已经成为重要指标. 本文在简要评述后重点讨论了板式弯折试验, 以推动试验测试标准和技术的发展.

关键词: 喷射混凝土; 抗压强度; 混凝土试件

中图分类号: U455 文献标识码: A 文章编号: 1007-855X(2005)04-0055-04

Reviews on Testing Methods of Shotcrete

WANG Sheng-hui, YUAN Yong

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract Shotcrete is a common reinforcing measure in civil engineering. Testing methods of shotcrete are very important for its performance appraisal and quality control. Different testing methods and testing indexes are compared and analyzed in detail in this paper. The urgency of research on standard testing method of shotcrete is also pointed out. The performance of shotcrete is difficult to be appraised merely through strength testing, therefore, its deforming performance should also be taken into account, which is also confirmed by the newly testing methods of shotcrete issued by foreign concerned organizations. After brief introduction, the panel bending test is discussed particularly to promote the development of testing standards and technologies.

Key words shotcrete; compressive strength; concrete test block

0 引言

喷射混凝土的历史可以追溯到 20 世纪 90 年代, 美国史密森学会的 Carl Akeley 申请了一种把砂浆喷射在网格骨架模型上以便附着动物外皮的专利, 1910 年美国的 Allentown Cement Gun 公司购买了 Carl Akeley 的专利, 开创了喷射混凝土的大规模商业应用的历史. 早期的喷射混凝土主要以砂浆为主, 仅仅用作防止土石风化的一种封闭措施. 经过整整一个世纪的发展, 如今喷射混凝土因施工迅捷方便、成本优势明显、结构性能具有显著的优越性等, 已成为公认的加固方法之一, 广泛应用于隧道、地下硐室、边坡等的支护, 以及建筑结构的加固、抗裂防渗工程等辅助结构措施^[1~5].

值得注意的是, 喷射混凝土工作性能的评价仍然局限于传统的材料强度观念. 文献检索表明, 当前评价喷射混凝土工作性能的试验测试方法大致可分为: 抗压强度测试方法; 梁试件弯折测试方法; 板试件弯曲测试方法. 本文比较全面地评价各测试方法的差异, 以作为进一步开展相关研究工作的基础. 分析表明, 国外的测试方法已经超越单纯的材料强度和材料性质测试, 而以具备构件特征的试件性能作为测试标准, 测试指标和测试方法的变化反映了素喷射混凝土向喷射混凝土结构的转变.

收稿日期: 2004-12-31

第一作者简介: 王胜辉 (1978.1~), 男, 在读博士研究生. 主要研究方向: 公路隧道结构优化设计及新型支护体系研究.

E-mail: wang4367@etang.com; yuan@tongji.edu.cn

1 强度型测试方法

用于评价喷射混凝土工作性能的强度型试验方法,主要包括各种尺寸规格试件的抗压强度试验、抗劈裂强度试验、喷射混凝土与受喷面的粘结强度试验、类似于针入度试验的抗刺入强度试验等^[4-9]。

另外,包括国内工程界常用的“喷大板试验”,也就是《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB 50086-2001)^[9]推荐的试验方法其实也是一种强度型试验方法。但是,这些试验方法不能合理地反映喷射混凝土实际工作性能,尤其是不能反映如钢筋网等增强、增韧材料的作用。

2 梁试件弯折试验方法

梁试件弯折试验(BEAM BEND TESTS)通常用来测定混凝土的开裂强度、极限强度、极限应变以及评价混凝土的弯曲性能。该试验方法能一定程度上反映喷射混凝土的工作性能,包括抗裂、抗折及其延性和塑性的性能,是一种比较常用的混凝土材料性能试验方法,国内外也用作喷射混凝土性能测试的参考方法。该方法相应的试验规范有美国 ASTM (American Society of Testing Materials) C1018 韧度指数法,日本 JCI (Japan Concrete Institute) SFRC 委员会的 JSCE-SF4 弯曲韧度系数法以及 EFNARC (European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures) 的“European Specification for Sprayed Concrete”的抗弯强度方法。这三种规范试验方法基本相同,只是整理结果的方法不同,ASTM C1018 得出的弯曲韧性是一个相对值,JSCE-SF4 得到的是绝对弯曲韧性值,EFNARC 的“European Specification for Sprayed Concrete”得到的是初裂抗弯强度和残余抗弯强度。

ASTM C1018 方法利用理想弹塑性体作为材料韧性的参考标准,选用初裂点挠度 δ 的倍数作为终点挠度,即 3 倍 (3δ)、5.5 倍 (5.5δ)、15.5 倍 (15.5δ),如图 1 所示。韧度指数用 I_5 、 I_{10} 、 I_{30} 等表示,即:

$$I_5 = \frac{A_1 + A_2}{A_1} \quad (1)$$

$$I_{10} = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{A_1} \quad (2)$$

$$I_{30} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{A_1} \quad (3)$$

该方法的优点在于:参数指标有明确的物理意义,能比较确切地反映喷射混凝土的工作性能;韧度指数类似于工程常用的延性比,便于在工程中的应用;不受试件形状、尺寸的影响;因制定挠度为初裂点挠度的倍数,故初裂点偏移、挠度点位置、支座变形对 I_5 、 I_{10} 、 I_{30} 等影响不大。

但是,该试验方法采用的梁试件与实际喷射混凝土受载作用机理存在较大的差别,其试验结果只能表明喷射混凝土材料所具备的某些性能,不便于直接用于设计和指导施工。另外,由于试件尺寸和试件形式的限制,梁试件弯折试验在用于评价钢筋网增强、增韧喷射混凝土工作性能时存在先天的不足,钢筋网在梁试件中如何考虑是一个突出问题,至今国内鲜有钢筋网增强、增韧喷射混凝土工作性能研究的报道。

3 板试件弯曲试验方法

板弯曲试验(SLAB BEND TESTS)是直接制作板试件来研究喷射混凝土的工作性能,因板试件比较符合喷射混凝土的实际工作形式,能更客观、全面、确切地反映喷射混凝土的实际工作性能,便于直接设计和施工,尽管起步较晚,已取得了很多有价值研究成果,该试验方式得应用也正不断扩大和逐步规范化。

3.1 初期的板弯曲试验

初期研究喷射混凝土的板弯曲试验直接参照喷射混凝土实际工作方式的模型试验,其实是构件性能试验。一般是制作比实际的锚杆间距(通常为 1m)稍大(如 1.6m)的方形喷射混凝土板试件,在板的中央 1m^2 的方格上用 4 个螺栓将试验板固定好,在试验板的上表面中央 1m^2 的方格上按要求分级施加均布荷

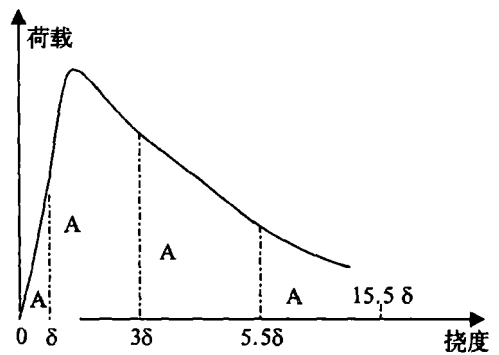


图1 ASTM C1018 韧度指数法
Fig.1 Toughness method of ASTM C1018

载(堆载或水袋的方式),在板底测量试验板中心点的挠度,以测取板的荷载-位移曲线为基础来评价喷射混凝土的工作性能^[10]。

由于试验板过于庞大,施加均布荷载等都造成试验的难度较大,另外由于仅靠 4 个螺栓来固定试验板,造成试验结果的离散性较大,这种试验方式逐步的被后期发展起来的试验方式所取代,包括均布荷载或集中荷载作用下的方形板(简支和固支)试验、均布荷载或集中荷载作用下的圆板(简支和固支)试验,这些后期发展起来的试验方式经过不断的验证比较,一些较好的试验方式被列为喷射混凝土规范的标准试验^[1,4]。

3.2 EFNARC 方板弯曲试验

EFNARC 的“European Specification for Sprayed Concrete”方板弯曲试验标准规定使用边长为 600mm × 600mm,厚 100mm,在边长为 500mm × 500mm 的方形面积四周支撑的方板试件。在板的中心 100mm × 100mm 的面积上按要求加载,量测板底中心点的挠度,得出荷载-挠度曲线,对荷载-挠度曲线积分计算板底中心挠度达到 25mm(相当于板的表面裂缝宽度达到 5~10mm 的情况)时试验板所消耗的功(焦耳),以此为指标评价喷射混凝土的工作性能,该试验的过程如图 2 所示。

该试验能比较合理地反映喷射混凝土的实际工作机理,而且比梁弯曲试验简便(尽管试件要重一些),试验结果的归一性也比梁弯曲试验好。但由于很难做到板试件四边支撑条件的完全一致,试验结果依然存在较大的离散性。

3.3 ASTM C1550-03 圆板弯曲试验

澳大利亚的 Bernard 最先提出三点对称支撑圆板弯曲试验方法,ASTM 已将其改进为“Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel)”(ASTM C1550-03)^[1,12,13],该试验方式有成为国际公认的喷射混凝土板试验标准的趋势。

ASTM C1550-03 的标准圆板弯曲试验如图 3 所示。试验使用的是直径为 800mm,厚 75mm,板底三点(三个支撑点在一个 750mm 的圆周上)对称简支的圆板试件。在板的中心按要求施加集中荷载,量测板底中心点的挠度,得出荷载-挠度曲线,对荷载-挠度曲线积分计算板底中心挠度达到 40mm(相当于喷射混凝土产生较大变形的情况)时试验板所消耗的功(焦耳),以此为指标评价喷射混凝土的工作性能^[12]。

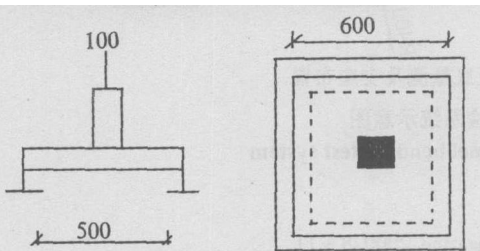


图2 EFNARC 方板弯曲试验示意图

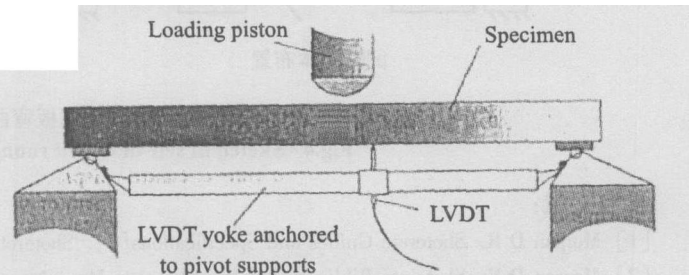


图3 ASTM C1550-03 圆板弯曲试验示意图

Fig.2 Sketch of square panel bending test of EFNARC Fig.3 Sketch of round panel bending test of ASTM C1550-03

该试验方式的简便合理,而且试验结果的归一性很好。该试验方式的发明者 Bernard 经过细致的比较后认为该方式是目前最合适、可靠的喷射混凝土工作性能评价方式。Bernard 还在大量的试验研究的基础上总结出圆板弯曲试验、方板弯曲试验、以及梁弯曲试验之间的关系^[4]：

1) EFNARC 方板弯曲试验板试件消耗的能量(板底挠度为 25mm 时)和圆板弯曲试验板试件消耗的能量(板底挠度为 40mm 时)之间存在如式(4)的换算关系:

$$EFNARC_{25mm}(J) = 2.5 \times RDP_{40mm}(J) \quad (4)$$

式中, $EFNARC_{25mm}(J)$ —EFNARC 方板弯曲试验板试件消耗的能量(板底挠度为 25mm 时);

$RDP_{40mm}(J)$ —圆板弯曲试验板试件消耗的能量(板底挠度为 40mm 时)。

2) JSCE SF4 梁弯曲试验的 F_{es} 值和圆板弯曲试验板试件消耗的能量(板底挠度为 10mm 时)之间存在如式(5)的换算关系:

$$F_{\text{es}}(\text{MPa}) = (RDP_{10mm}(J)/92) \times 1.33 \quad (5)$$

式中, F_{e3} (MPa) — JSCE SF4梁弯曲试验的 F_{e3} 值; RDP_{10mm} (J) — 圆板弯曲试验板试件消耗的能量 (板底挠度为10mm时).

4 结语

我国喷射混凝土的工程应用量很大, 不仅用作开挖工程的临时支护, 很多工程结构物还将其作为永久性结构物的重要组成部分. 因此, 研究恰当的喷射混凝土性能测试方法, 不仅有利于保障工程结构物的安全性, 也有利于开展新型喷射混凝土增强、增韧材料的基础性研究. 本文较全面地评述了当前国内外的测试方法和测试标准, 发现国外已经从单纯的强度指标发展为工作性能的多指标测试, 并且为新型喷射混凝土材料的应用提供了重要方向. 作者建议加快喷射混凝土试验方法和测试标准的研究, 研制开发相关的测试设备, 对于改进国内喷射混凝土性能评价体系、开展新材料和新技术研究、提高相关产业的技术水平都具有重要意义. 基于此作者根据 ASTM C1550-03 的相关要求设计了如图4所示的试验系统, 并在该试验系统上进行了素喷射混凝土板、钢筋网加强喷射混凝土板、FRP网片加强喷射混凝土板的工作性能评价试验, 限于篇幅, 相关试验结果将另文评述.

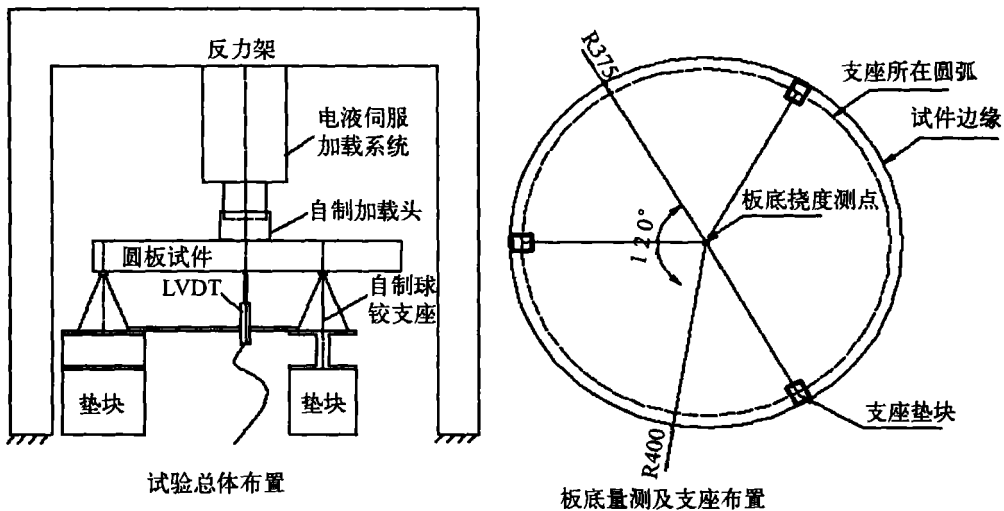


图4 自行设计的圆板弯曲试验系统示意图

Fig.4 Sketch of self-designed round panel bending test system

参考文献:

- [1] Morgan D R. Shotcrete Guides and Specifications[J]. Shotcrete Magazine, 2000, 8~11
- [2] Morgan D R. Shotcrete Bibliography[J]. Shotcrete Magazine, 1999, 1(1): 16~17
- [3] Morgan D R, Heere R. Evolution of Fiber Reinforced Shotcrete[J]. Shotcrete Magazine, 2000, 2(2): 8~11
- [4] Papworth F. Design guidelines for the use of fiber-reinforced shotcrete in ground support[J]. Shotcrete Magazine, 2002, 16~21
- [5] Barrett S V L, McCreath D R. Shotcrete Support Design in Borehole Ground Towards a Deterministic Approach[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1995, 10(1): 79~89
- [6] Morgan D R. 聚丙烯纤维增强高含量粉煤灰喷射混凝土的性能[J]. 李凤兰, 译. 国外建材科技, 1993, 14(2): 26~35
- [7] 张洁, 栾峰. 聚丙烯纤维网纤维喷射混凝土[J]. 铁道建筑技术, 1997(1): 53~54
- [8] 王维德. 长纤维喷射混凝土的可塑性[J]. 国外黄金参考, 1998(9): 1~13
- [9] (GB 50086-2001) 锚杆喷射混凝土支护技术规范[M]. 北京: 中国计划出版社, 2002
- [10] ASTM (American Society of Testing Materials). Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third Point Loading) [M], ASTM C1018-85
- [11] EFNARC (European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures). European Specification for Sprayed Concrete[M]. 1996
- [12] ASTM (American Society of Testing Materials). Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel) [M], ASTM C1550-03
- [13] Mathew Clements. Synthetics as concrete reinforcement[J]. CONCRETE, September, 2002, 37~38