

# 高性能混凝土拌和物流变性能测试方法探讨

亢景付

(天津大学建工学院, 天津, 300072)

**内容提要:** 本文对开展拌和物流变性能研究在高性能混凝土研究中的重要性和迫切性进行了分析和探讨, 在总结研究了国内外现有测试技术和现有实验仪器的基础上, 设计了一种结构紧凑, 整体性好, 体积也不大的新型混凝土流变仪, 该仪器既可用于高性能混凝土流变性能研究, 又可用于工地实验室的质量控制, 还可用于研究拌和物流变性能的经时性变化。

**关键词:** 高性能混凝土 流变特性 流变仪

## 1. 研究的意义

自从 1990 年高性能混凝土的概念<sup>[1]</sup>问世以来, 高性能混凝土的研究就一直是世界各国混凝土材料与工程界科学研究的热门课题。大量的科研和开发主要集中在高性能混凝土的组成材料、工艺原理与配制技术、力学性能与耐久性能等方面, 并已取得了丰硕的科研成果, 大量的文章和专著相继发表, 高性能混凝土的工程应用也越来越普遍。

混凝土的流变性能是评价其质量和可施工性的重要指标, 对于干硬性混凝土, 我们有维勃稠度, 对于普通混凝土有坍落度, 但对大流动性混凝土, 目前尚无合适的评价方法。特别是对于目前广泛应用的泵送混凝土, 如何根据泵送距离、泵送高度和混凝土泵的工作性能参数来确定适宜的配合比, 已成为亟待解决的一个重要课题。如能准确测定混凝土的流变参数, 并把这些参数与泵送性能结合起来, 从而解决目前只能根据经验来确定混凝土配合比的问题, 必将对泵送混凝土的推广和应用起到积极的作用。

高效减水剂和超细矿物掺和料是高性能混凝土的重要组成材料, 同时也是高性能混凝土在材料组成上与普通混凝土不同的重要特征, 正是由于高效减水剂和超细矿物掺和料的加入, 使高性能混凝土不仅在微观结构、力学和耐久性能方面得到改善, 而且拌和物的流变性能也发生了根本性的变化。高性能混凝土水灰比小但坍落度大, 粘性也大, 在坍落度和振捣条件相同的情况下, 高性能混凝土粗骨料下沉速度慢, 下沉距离短, 稳定性和均匀性都比普通混凝土要好。据文献<sup>[6]</sup>介绍, 普通混凝土的坍落度试验, 2 秒钟内即可稳定, 但高性能混凝土则需 6 秒钟以上。

许多学者都指出<sup>[7-10]</sup>, 尽管坍落度试验仍是目前世界各国广泛应用的实验室和现场测试方法, 但该方法难以正确反映高性能混凝土的流变性能, 高性能混凝土的工作性是一种综合性能, 至少应当包括两个指标, 即流动性和粘聚性, 对于泵送混凝土还应包括可泵性。研制开发一种即使用方便, 又能比较科学地反映高性能混凝土流变性能的测试仪器和测试方法具有非常重要的现实意义。

## 2. 高性能混凝土的流变学参数

国内外学者都认为<sup>[7-10]</sup>, 与普通混凝土相比, 高性能混凝土更接近宾汉姆体 (Bingham), 可用宾汉姆模型的流变参数来描述高性能混凝土的工作性。宾汉姆模型由牛顿 (Newton) 液体模型和圣维南 (St. Venant) 固体模型并联, 再与虎克 (Hooke) 固体模型串联而成, 如图 1 所示, 其流变方程为:

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (1)$$

式中

$\tau$  - 剪切应力

$\tau_0$  - 屈服剪切应力

$\eta$  - 粘性系数

$\frac{d\gamma}{dt}$  - 切应变速率

在式 (1) 中, 剪切应力  $\tau$  和切应变速率

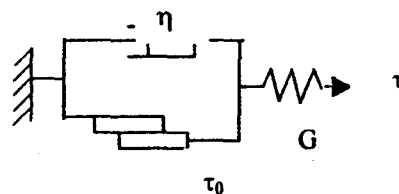


图 1 宾汉姆模型

$dy/dt$  是变量, 屈服剪切应力 $\tau_0$ 和粘性系数 $\eta$ 是常量, 通过仪器测定在不同切应变速率下的剪切应力, 即可回归得出 Bingham 模型的两个流变参数: 屈服剪切应力 $\tau_0$ 和粘性系数 $\eta$ 。

Bingham 模型的应用条件是假定固体粒子的分散是比较均匀的。新拌水泥浆的流变特征接近 Bingham 体, 用旋转粘度计可满意地测出其流变参数<sup>[7]</sup>。但普通新拌混凝土是不同粒径的固体粒子(水泥、砂、石)不均匀地分散于水中的多组分材料, 研究它的流变特性就比较困难。高性能混凝土由于粉状材料用量较大, 固体粒子的分布较普通混凝土要均匀的多, 用类似旋转粘度计的设备有可能较好地测定其流变参数。

### 3 高性能混凝土拌和物的流变性能的试验方法

高性能混凝土的外加剂和胶凝材料之间以及胶凝材料各组分之间存在相容性问题, 这种相容性具体表现在混凝土拌和物的流动性、稳定性和经时性的差异。长期以来, 人们一直在探寻简便、准确测定高性能混凝土流变特性的试验方法, 但到目前为止尚无能被普遍接受的或已形成标准或规范的科学方法。

吴中伟院士在其专著《高性能混凝土》中, 对目前各种探索的十几种方法进行了介绍<sup>[9]</sup>, 其中比较典型的几种方法包括:

(1) 坍落流动度试验。进行坍落度试验时, 同时测定拌和物扩展到直径50cm 时的时间或扩展终止时的时间或扩展直径, 根据拌和物的坍落流动度判断其可施工性能。

(2) L-流动试验。根据拌和物的流动速度评价混凝土的粘度, 根据流动铺展值评价混凝土的剪应力。

(3) BTRHEOM (叶片式流变仪)。该仪器是由法国路桥实验中心研制, 用于测量高性能混凝土流变性能, 其原理与旋转粘度计相同, 只是将内筒用叶片代替, 已用于高性能混凝土的配合比设计<sup>[6]</sup>。但仪器价格昂贵, 且须由经专门训练的人员使用, 不便于现场使用。

(4) 改良坍落度试验<sup>[5]</sup>。日本的谷川小组根据坍落度与屈服应力相关性很好的事实, 将标准坍落度筒进行改造, 测定坍落度与时间的关系曲线, 用拌和物坍落的平均速率来表征塑性粘度。美国的 Chiara F Ferraris 对这种装置进行了改良, 在坍落度筒中轴位置的棒上装一个可滑动的圆盘, 用停表记录圆盘随拌和物的坍落下降到 100mm 位置的时间。根据如此确定的拌和物坍落速率和坍落度值推算混凝土的屈服应力和塑性粘度, 据说结果还比较理想。

瑞典的水泥和混凝土研究所<sup>[21]</sup> (CBI) 近年来用改进了的同轴式双筒粘度计研究高性能混凝土的流变性能, 仪器的原理与旋转粘度计相同, 但拌和物的石子最大粒径不得大于 16mm。

上海建材学院的陈健中教授曾研制过一台旋转叶片式混凝土流变仪, 用以研究各种工艺因素和减水剂对混凝土流变特性的影响和泵送混凝土流变特性<sup>[3-4]</sup>, 取得了比较满意的结果。他得出的结论是,

① 新拌混凝土流动曲线下降段的流变特征符合 Bingham 流变方程; ② 在坍落度大于 8cm 时, 坍落度与测得的屈服切应力有很好的相关性, 但与结构粘度的相关性不显著, 传统的坍落度实际上表征了屈服切应力, 不能反映结构粘度; ③在一般配比条件下, 结构粘度随屈服应力的增大而增大, 两者同方向变化, 但在某些特殊情况下, 如用粉煤灰等量取代水泥时, 拌和物的屈服切应力降低, 而结构粘度增大。传统的坍落度试验无法反映这种变化, 说明用两个流变参数比单一的坍落度能更好地表征拌和物的流变特征。

### 4 混凝土流变仪的设计

本文作者在高性能混凝土研究过程中, 深感没有合适的仪器和参数来比较高性能混凝土流变性能之不便。因此在查阅了大量参考资料的基础上, 设计了一种能用于研究高性能混凝土和泵送混凝土流变性能的流变仪, 其工作原理图如图 2 所示。

装料筒 10 的直径为 30cm, 高 30cm, 用卡销固定在旋转圆盘 11 上, 交流电机带动旋转圆盘, 转速控制器安装在仪表盘 5 内, 搅拌叶片 9 与轴 8 相连, 料筒工作时, 作用在轴 8 上的扭矩由传感器 7 测定, 其数据由仪表盘 5 中的仪表直接读出。

仪器工作时, 旋转圆盘 11 转动而轴 8 不动, 卸料时向上提起轴 8, 取下装料筒 10 即可。

测试方法与陈健中先生的旋转叶片式混凝土流变仪基本相同, 试验时装入拌和料 30kg, 开启电机并将转速固定在 20 转/分钟, 待传感器读数稳定后记录下读数, 然后将转速依次逐级增加到 30、40 和 50 转/分钟, 分别记录对应于每级转速的稳定的传感器读数。从而可得到速度上升段的扭矩-转速关系曲线。

然后按同样的方法, 将转速由 50 转/分钟依次减小, 分别记录对应于每级转速的稳定的传感器读数, 又可得速度下降段的扭矩-转速关系曲线。

速度上升阶段和下降阶段的  $T-N$  曲线如图 3 所示, 速度下降阶段的  $T-N$  曲线符合下列方程:

$$T = a + bN \quad (2)$$

式中  $a$  和  $b$  为常数, 由于扭矩  $T$  与作用于拌和料的切应力成正比, 转速  $N$  与切应变速率  $dy/dt$  成正比, 对比式 (1), 可知  $a$  和  $b$  与屈服切应力  $\tau_0$  和粘度系数  $\eta$  存在比例关系。

$$\text{令 } \tau = \alpha T, \quad dy/dt = \beta N \quad (3)$$

$$\text{则有: } \alpha T = \tau_0 + \eta \beta N \quad (4)$$

用典型的 Bingham 流体 (如水泥浆、砂浆) 并以标准的旋转粘度计测得它们的  $\tau_0$  和  $\eta$  值, 再用本仪器测得  $a$  和  $b$  的值, 此时有:  $\alpha T_1 = \tau_0 + \eta \beta N_1$

$$\alpha T_2 = \tau_0 + \eta \beta N_2$$

注意到式中除  $\alpha$  和  $\beta$  外, 其余均为已知值, 联立方程求解即可求出  $\alpha$  和  $\beta$  的值。把  $\alpha$  和  $\beta$  值代入式 (3) 并与式 (2)

$$\text{对比, 可得: } \tau_0 = a\alpha \quad (5)$$

$$\eta = ab/\beta \quad (6)$$

这样, 知道了  $a$  和  $b$ , 就可计算出拌和物的  $\tau_0$  和  $\eta$  值。

本仪器由于结构紧凑, 整体性好, 体积也不大, 既可用于标准实验室最大骨料粒径  $\leq 20\text{mm}$  的高性能混凝土、泵送混凝土流变性能研究, 又可用于工地实验室的质量控制, 还可用于研究拌和物流变性能的经时性变化。在用于工地实验室质量控制时, 可根据标准实验室的测试结果, 只选择 1~2 个转速, 然后根据传感器的稳定读数变化情况, 即可对混凝土的工作性做出评价。

## 5 小结

1 混凝土拌和物流变特性的研究还处于起步阶段, 随着高性能混凝土研究的深入和新型高效外加剂的发展, 流变特性的研究变得越来越重要, 特别是对于目前广泛应用的泵送混凝土更有重要的实用意义。

2 高性能混凝土更接近于 Bingham 体, 其流变特性可用屈服切应力  $\tau_0$  和粘度系数  $\eta$  来表征, 传统的坍落度无法正确地反映高性能混凝土的流变特性。

3 本文提出的混凝土流变仪结构紧凑, 整体性好, 体积也不大, 既可用于高性能混凝土、泵送混凝土流变性能研究, 又可用于工地实验室的质量控制, 还可用于研究拌和物流变性能的经时性变化。

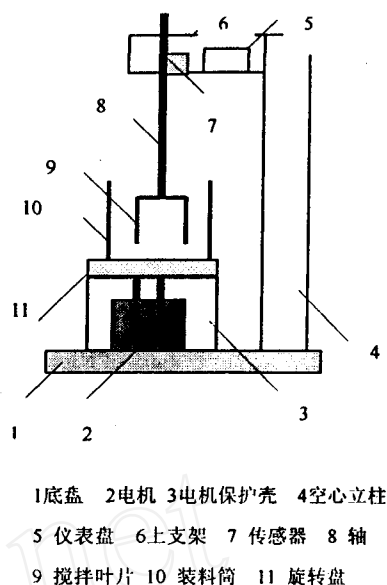


图 2 流变仪工作原理图

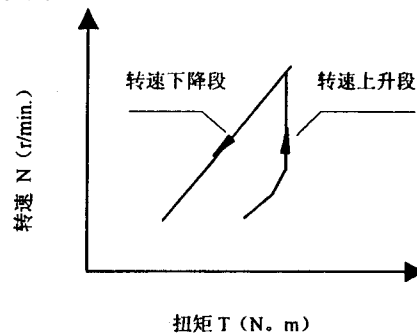


图 3 新拌混凝土流动曲线

## 参考文献

- [1] Mehta P K, Aitcin P C, Principle on Preparation of High Performance Concrete. Cement, Concrete and aggregate, 1990.
- [2] Norberg J Farsk betongs reologiteon och matematodik. CBI Report, 1994.2.
- [3] 陈健中. 用旋转叶片式流变仪测定新拌混凝土流变性能[J], 上海建材学院学报, 1992 (5) .
- [4] 陈健中. 泵送混凝土的流变学特性[J], 混凝土与水泥制品, 1992 (2) .
- [5] Ferraris C F, de Larrard F., Testing and Modeling of Fresh Concrete Rheology, NISTIR 6094, 1998 (2).
- [6] de Larrard F. A., Survey of Recent Researches Performed in the French "LPC" Network on High Performance Concrete. Proceedings of High Strength Concrete, Norway, 1993 (6).
- [7] 黄士元, 蒋家奋等. 近代混凝土技术[M], 西安: 陕西科学技术出版社, 1998, pp131-147.
- [8] 冯乃谦, 邢锋. 高性能混凝土技术[M], 北京: 原子能出版社, 2000, pp206-213.
- [9] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M], 北京: 中国铁道出版社, 1999, pp183-211.
- [10] 覃维祖, 安明哲. 高流动性混凝土工作度评价方法研究[J], 混凝土与水泥制品, 1996 (3) .

# The Approach to the Measuring Methods of Rheological Properties of HPC Fresh Concrete

by Jingfu Kang

(Tianjin University Tianjin China 300072)

**ABSTRACT:** The importance and the urgency to study comprehensively the rheological properties of HPC fresh concrete are discussed in the paper. Based on the investigations to the apparatus used up to date, the author puts forward a new design of concrete rheologic apparatus, which is an apparatus with compact design, better integrity and smaller dimensions. The apparatus can be used to study rheological and time-dependent properties of fresh concrete with maximum aggregates 20mm in laboratories, as well as the quality control on construction sites.

**Key words:** High Performance Concrete; Rheological properties; Concrete Rheologic apparatus

**作者简介:** 亢景付 (1955~) 男, 工学博士, 天津大学建工学院土木系。

**联系地址:** 天津大学新园村 1-6-403, 300195 电话: 022-87894373