

新拌混凝土可泵性的研究进展

阎培渝, 黎梦圆, 韩建国, 赵晓

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘要: 综述了新拌混凝土的可泵性的近期理论研究成果。介绍了新拌混凝土的稳定流动状态, 分析了对新拌混凝土与泵管壁之间的润滑层和剪切滑移层的状态与作用。讨论了新拌混凝土的流变性能。除对新拌混凝土的流变模型进行分析外, 还描述了新拌混凝土在泵送前后的流变性能的差异。对目前较为认可的新拌混凝土可泵性评估模型和测试方法作了评述。

关键词: 新拌混凝土; 可泵性; 流变学; 润滑层; 剪切滑移层; 评估模型; 测试方法

中图分类号: TQ178 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2018)02-0239-08

网络出版时间: 2017-11-02



Recent Development on Pumpability of Fresh Concrete

LI Mengyuan, HAN Jianguo, ZHAO Xiao, YAN Peiyu

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Recent theoretical studies on the pumpability of fresh concrete were summarized and analyzed. First, the steady flow states of fresh concrete (*i.e.*, lubrication layer and shear slip layer) were introduced. The rheological properties of fresh concrete were also presented. In addition to the analysis of the rheological models of fresh concrete, a phenomenon of variation on the rheological properties of fresh concrete before pumping and after pumping was described. An overview of generally recognized evaluation theory and the latest test equipment of pumpability of fresh concrete was given.

Keywords: fresh concrete; pumpability; rheology; lubrication; shear slip layer; evaluation models; testing methods

混凝土的泵送技术起源于 20 世纪 30 年代。现如今, 混凝土泵送技术已广泛应用于工程建筑领域, 在高层建筑和大跨桥梁建设领域使用尤为广泛。泵送混凝土施工不仅可以大幅度缩短工程建设时间, 减轻工人的劳动强度, 而且能够向待浇筑地点持续供应新拌混凝土, 还有利于混凝土浇筑到人工难以浇筑到的部位。经过多年的实践探索, 我国积累了丰富的混凝土泵送施工经验, 比如: 超高程泵送混凝土的配制与施工技术^[1-2]、混凝土泵送过程压力变化规律^[3-4]、简易的混凝土可泵性评价方法等^[5-6]。这为我国混凝土泵送施工的顺利实施提供了参考案

例和技术指导。

但是, 混凝土的泵送技术目前也存在不少问题, 比如: 在实际泵送过程中, 混凝土有可能产生分层或离析现象, 甚至发生堵泵现象; 到目前为止, 仍然没有能够准确评价和定量评估混凝土可泵性的装置和理论; 与入泵前新拌混凝土的流变性能比较, 长距离泵送后新拌混凝土的流变性能发生了较大改变, 其原因仍不清楚。

上述种种问题主要是由于对新拌混凝土泵送性能的理论研究仍不完备, 本文结合近些年来与新拌混凝土泵送性能相关的理论研究成果进行总结和评

收稿日期: 2017-04-12。 修订日期: 2017-11-02。

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2017YFB0310101), 国家自然科学基金基金项目(No. 51678343)

第一作者: 阎培渝(1955—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2017-04-12. Revised date: 2017-11-02.

First author: YAN Peiyu(1955—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: yanpy@tsinghua.edu.cn

述。考虑到关于不同水胶比、矿物掺合料的种类和掺量等材料因素对混凝土泵送过程影响的研究成果仅具有暂时性、区域性的工程参考价值,不利于彻底解决混凝土在泵送过程中遇到的实际问题,因此没有收集整理这一类的研究成果。要清晰表征混凝土泵送性能,须以流变学为基础,建立混凝土流变性能与可泵性能之间的关系。Feys等^[7]指出评估润滑层的流变性能与厚度,结合混凝土自身的流变性能,可以成功预测混凝土泵送过程中的压力损失。Kwon等^[8]指出要评估混凝土的可泵性,需首先测量润滑层的流变性能,然后利用润滑层与混凝土自身的流变性能为基础建立预测混凝土泵送过程参数的模型。因此综合了国内外对混凝土泵送理论的研究成果,展示了一种研究新拌混凝土可泵性理论的研究思路。首先介绍了混凝土在泵管内的稳定流动状态,对润滑层、剪切滑移层作了介绍与分析;接着讲述现有的流变模型以及混凝土流变模型研究的发展方向;最后介绍了表征新拌混凝土可泵性的泵压-流量关系式的现有研究成果。

1 泵压作用下管道内新拌混凝土的稳定流动状态

分析处于泵送状态的新拌混凝土的稳定流动状态是研究其泵送性能的基础。一般地,当新拌混凝土在泵管内处于稳定流动状态时,在靠近泵管壁附近会形成一层润滑层^[9]。研究表明:在泵送过程中,润滑层的生成能极大地促进新拌混凝土的泵送过程顺利进行^[10]。

新拌混凝土在泵管内稳定流动时,需满足受力平衡的原理。

$$\Delta P \cdot \pi r^2 = \tau \cdot 2\pi r \cdot \Delta L \quad (1)$$

其中: ΔL 为新拌混凝土在直管段的长度(m); ΔP 为新拌混凝土在泵管内的压力差(Pa); r 为距泵管中轴线的距离(m); τ 为距泵管中轴线的距离为 r 处的新拌混凝土所受的剪切应力(Pa)。

因此泵管内处于层流状态的新拌混凝土所受到的剪切应力:

$$\tau = \frac{r}{2} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \quad (2)$$

根据式(2)可知:靠近泵管中轴线的新拌混凝土所受的剪切应力要小于远离泵管中轴线的新拌混凝土;在泵管中轴线上,新拌混凝土所受的剪切应力为零;在靠近泵管壁附近的新拌混凝土所受的剪切应力最大。式(2)表明了不论泵管内的混凝土具有什

么样的流变性能,在泵管横截面上各点的剪切应力沿半径方向均呈线性分布。这是建立泵管横截面剪切应变速率分布、流速分布的基础,也是建立泵压与流量关系的基础。

一般地,新拌混凝土具有一定大小的屈服应力。在泵管中轴线附近,新拌混凝土受到的剪切应力小于自身的屈服应力。因此在泵送的过程中,这部分混凝土不会产生相对滑移。这部分混凝土会整体以柱塞流的形式沿着泵管方向向前运动^[1]。柱塞流的横截面半径可以根据下式求得:

$$r_p = \frac{2\tau_0 \Delta L}{\Delta P} \quad (3)$$

其中: r_p 为柱塞流的横截面半径(m); τ_0 为新拌混凝土的屈服应力(Pa)。

如果靠近泵管壁附近的新拌混凝土所受的剪切应力小于自身的屈服应力,那么新拌混凝土在泵送过程中仅会形成润滑层和柱塞流^[11]。这种情况下,如果忽略润滑层的厚度,柱塞流的横截面直径与泵管内径相近。塑性混凝土的屈服应力较大,在泵送时大多呈现这种稳定流动状态。如果靠近泵管壁附近的新拌混凝土所受的剪切应力大于自身的屈服应力,那么新拌混凝土在泵送过程中除了形成润滑层和柱塞流,还会在润滑层和柱塞流之间形成剪切滑移层^[12]。这种情况下,柱塞流的横截面半径可根据式(3)求得。大流态混凝土的屈服应力很小,在泵送时就能形成润滑层、剪切滑移层和柱塞流。

2 润滑层

2.1 润滑层及其对新拌混凝土可泵性的重要影响

如上所述,新拌混凝土在泵送过程中,在泵管壁附近会形成一层润滑层。润滑层的形成能够极大地促进泵送过程的顺利进行。从组成成分来看,润滑层普遍被看成砂浆层,而不是水膜或净浆层,原因有三:1)在泵送过程中,润滑层和新拌混凝土的剪切应变速率有明显的不同,因此对应的宏观层流流速有明显的不同,从这个意义出发,润滑层的厚度一般为1~5 mm,这个尺度范围内对应的是砂浆的范围。2)润滑层可以被看成“砂浆层”或“净浆层+砂浆层”或“水膜+净浆层+砂浆层”,但从多尺度方法来看,润滑层被看成“砂浆层”在处理问题上最为简便;3)从测量的角度来说,利用组成砂浆的性能来表征润滑层的性能是合理的,利用组成净浆或水来表征润滑层的性能是有极大的偏差的。

润滑层对新拌混凝土泵送性能的重要影响可从

以下两个角度来分析。

根据力与变形的关系, 泵压提供了新拌混凝土在泵送过程中所需的动力, 因此泵管内的新拌混凝土会产生沿着泵管方向的变形。这种变形确保了新拌混凝土在泵送过程中的压力传递。在新拌混凝土的组成中, 粗骨料不易变形, 因此砂浆组分在传递泵压方面起到主要作用。靠近管壁附近形成的润滑层完全由砂浆组成, 因此润滑层在传递泵压方面起到主要作用^[13]。

从流变学的角度来看, 新拌混凝土的屈服应力一般远远大于其组成砂浆的屈服应力, 新拌混凝土的塑性黏度也远远大于其组成砂浆的塑性黏度^[14]。在描述新拌水泥基材料流变性能时, 目前运用最多的模型仍然是 Bingham 模型, 如式(4)所示。根据式(4)可知, 当新拌混凝土的剪切应变速率与其组成砂浆的剪切应变速率相等时, 新拌混凝土所受到的剪切应力就会远远大于其组成砂浆的剪切应力。根据泵送过程的边界条件假设, 紧贴泵管壁的新拌水泥基材料在泵送过程中流速为零。如果新拌水泥基材料能够在泵压的作用下沿着泵管运动, 则在泵送的水泥基材料内部必然会产生剪切滑移。如果泵送过程中没有形成润滑层, 则泵压就需足够大以确保在新拌混凝土内部能够产生剪切滑移, 且需确保有适当大小的剪切应变速率。但式(4)表明这种情况下混凝土内部所受到的剪切应力非常大, 根据力平衡得知所需的泵压就会非常高。因此, 在没有润滑层形成的条件下通过泵压提供动力使新拌混凝土沿着泵管运动几乎是不可能的^[15]。实际上, 在泵送过程中剪切滑移的现象主要出现在润滑层中。由于润滑层的屈服应力与塑性黏度非常小, 因此所需的泵压不会很高, 这就使得新拌混凝土能够在泵管内运动。有学者指出: 在泵送过程中, 新拌混凝土的流动性能并不重要, 重要的是新拌混凝土在泵送过程中形成润滑层的能力^[16]。

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma} \quad (4)$$

其中: τ_0 为新拌混凝土的屈服应力(Pa); η 为新拌混凝土的塑性黏度(Pa·s); τ 为剪切应力(Pa); $\dot{\gamma}$ 为剪切应变速率(s^{-1})。

2.2 润滑层的性能

润滑层的屈服应力、塑性黏度以及厚度是目前关注较多的性能。但关注新拌混凝土的泵送性能时, 润滑层的性能与新拌混凝土在泵管内的流动性能的关系以及与新拌混凝土组成砂浆的性能的关系也十分重要。润滑层的性能主要有以下几点:

1) 新拌混凝土的屈服应力远高于对应润滑层的屈服应力, 新拌混凝土的塑性黏度远高于对应润滑层的塑性黏度。这也是润滑层的形成保证新拌混凝土泵送过程顺利进行的流变学原因。

2) 润滑层厚度一般介于 1 到 5 mm。大多数情况下, 润滑层的厚度大约为 2 mm^[16]。如果新拌混凝土在拌合的过程中加入适量的硅灰, 形成的润滑层的厚度一般会有所增加^[10]。目前, 工程上常用的两种泵管的内径分别为 125 mm 和 150 mm。因此润滑层的厚度远小于泵管的内径。

3) 新拌混凝土在泵管内的流速与润滑层的厚度无关, 仅与润滑层的流变性能相关^[14]。

4) 从组成来看, 润滑层其实是新拌混凝土在运动过程中产生的砂浆。因此, 润滑层的流变性能与新拌混凝土组成砂浆的流变性能相近, 但不相同^[11,17]。润滑层的流变性能与新拌混凝土组成砂浆的流变性能的细微差异主要体现在两个方面: ① 拌合混凝土所用的粗骨料是否处于饱和面干状态。不处于饱和面干状态的粗骨料会改变砂浆组分的含水量, 进而影响生成的润滑层的流变性能。② 拌合混凝土所用的粗骨料对外加剂的吸附作用。粗骨料含量越多, 比表面积越大, 对外加剂的吸附作用也越强, 这也会造成润滑层的流变性能与新拌混凝土组成砂浆的流变性能之间的差异, 且难以避免。

2.3 润滑层性能的测量

目前, 润滑层的流变性能可用流变仪或摩擦仪进行测量, 润滑层的厚度可用超声波测速仪进行测量。

由于润滑层是在泵送过程中在管壁附近产生的, 在泵送完毕后拆卸泵管并刮取管壁附着的润滑层进行测量是不现实的。基于润滑层的流变性能与对应的泵送混凝土同组成砂浆的流变性能相近, 可通过测量泵送混凝土同组成砂浆的流变性能来间接表征润滑层的流变性能。当已知泵送混凝土的配合比时, 可以根据配合比配置同组成的砂浆, 利用流变仪进行流变性能的测量; 当不知泵送混凝土的配合比时, 可以对工程现场的待泵送的混凝土取样, 并通过筛浆实验去除混凝土中的粗骨料进而得到同组成的砂浆, 利用流变仪进行流变性能的测量。

可用来测量流变参数的另外一个仪器是摩擦仪, 这是 Kaplan 等^[14,18]对流变仪改装而发明的。利用同轴双圆柱形的摩擦仪测量润滑层的流变性能时, 直接装入待测的混凝土, 在旋转过程中, 测量筒的边壁上会形成一层润滑层。摩擦仪测量原理如

(5)式所示^[19]。其中 η_{LL} 为黏性常数，总体反映了润滑层的黏度与润滑层的厚度。利用摩擦仪可以得到表征润滑层的黏度与厚度的物理量，但只有在已知润滑层厚度的前提下，才能确定润滑层的塑性黏度。

$$\tau_{Ri} = \tau_{0,II} + \eta_{II}V \tag{5}$$

其中： τ_{Ri} 为内筒壁处的剪切应力(Pa)； $\tau_{0,II}$ 为润滑层的屈服应力(Pa)； η_{II} 为黏性常数(Pa·s/m)； V 为内筒旋转的线速度(m/s)。

超声波测速仪(Ultrasonic Velocity Profiling, UVP)是一种可测量处于泵送状态的新拌混凝土所产生的润滑层厚度的装置^[11]。在泵管安装时加入一段超声波测速装置，其测头直接安装在管壁上。向处于泵送状态的新拌混凝土发射超声波，超声波达到层流状态的新拌混凝土时，一部分超声波透过该层混凝土继续传播，另一部分反射波被接收器接收，通过多普勒效应原理，即可得到处于层流状态的新拌混凝土每一层的流速。根据测得的数据可以得到流速与距泵管壁距离的关系，混凝土距离泵管壁越远，流速越快。随着与泵管壁的距离增加，流速的增长有一个明显的分界点。流速增长率突然变化的分界点说明了砂浆和混凝土两种不同物质在泵管内运动时的分界线，泵管壁到分界点的距离即为润滑层的厚度。另外需指出的是超声波测速仪的量程有限，一般仅能测到距离泵管壁十几毫米内的层流流速。因此超声波测速仪可以测量出润滑层的厚度，但不能用于测量整个泵管横截面上的混凝土流速分布。

3 剪应力诱导下的颗粒迁移与剪切滑移层

3.1 剪应力诱导颗粒迁移定律

新拌混凝土在泵送过程中形成的润滑层和剪切滑移层，可以根据剪应力诱导下的颗粒迁移定律来解释^[17]。根据力平衡原理，混凝土在泵压下在泵管中稳定流动时，由管壁向中心受到的剪应力会逐渐减小；在泵管壁附近，由于管壁效应，这种减小的趋势会更加明显；剪应力的这种分布情况所形成的剪应力梯度会使得混凝土中的粗骨料向管道中心迁移^[20]。

剪应力诱导下的颗粒迁移形式与泵送混凝土的流动特点相关。当泵送混凝土在管道内的流动符合 Poiseuille 流时，可用如下的方程来描述剪应力诱导颗粒迁移形式^[17]：

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial(u_z \phi)}{\partial z} = \nabla \cdot \left\{ a^2 K_c \phi \nabla \left(\phi \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + K_\eta \phi^2 a^2 \frac{\partial u_z}{\partial r} \frac{\nabla \eta}{\eta} \right\} \tag{6}$$

其中： ϕ 为颗粒浓度； t 为时间； u_z 为在流动方向上的速度分量； a 为颗粒半径； z 为流动方向； r 为径向方向； η 为颗粒悬浮体的表观黏度； K_c 与 K_η 为无量纲常数。

3.2 剪切滑移层对新拌混凝土可泵性的重要影响

根据剪应力诱导下的颗粒迁移定律，由管壁向中心的混凝土中粗骨料的含量由少变多，即粗骨料的含量在泵管内按环形分布。

研究表明：混凝土中粗骨料的含量对新拌混凝土的流变性能和泵送性能影响显著^[21]。因此泵送混凝土中的粗骨料含量在泵管内按环形分布将导致剪切滑移层的流变性能变化也按环形分布，且层与层之间的流变性能变化显著。因此，当泵送混凝土在泵管内有剪切滑移层生成时，剪切滑移层的性能同样对混凝土的泵送性能有较为显著的影响。尤其是在研究大流态混凝土的泵送性能时，除了要考虑润滑层性能的影响外，还需考虑剪切滑移层性能的影响。

3.3 测量泵送混凝土中粗骨料在泵管内重新分布的测试技术

目前，颗粒成像测速技术和彩色混凝土标记技术可用于研究泵压下泵管内骨料的重新分布。

颗粒成像测速(Particle Image Velocimetry, PIV)技术^[22]可以测量粗骨料分布和运动速率。它利用高频摄像机跟踪颗粒的运动过程，实时采集图像记录粗骨料分布和运动速率。由于新拌混凝土是不透明的物质，故 PIV 方法只能针对半开放的泵管内的混凝土流动。半开放的环境下与密闭泵管内混凝土的流动状态毕竟存在差异，PIV 方法在描述泵送混凝土运动状态时的可信度有待进一步考察。

彩色混凝土标记技术^[9]是另一种可以记录粗骨料分布和运动速率的方法。将不同颜色的混凝土导入管道中，使其利用自重管道中流动，当两种不同颜色的混凝土同时处于管道中时，停止管道中混凝土的运动。待混凝土硬化后，可将管道从中轴线剖开，得到骨料分布和速率分布的直观图像。但该方法过于复杂，而且仅靠自重的驱动无法使混凝土中的粗骨料颗粒向中轴线聚集，不能模拟泵送时的高压环境。

高压下泵送混凝土的骨料分布与运动速率是研究混凝土在压力作用下在泵管中流动规律的重点和难点，对建立泵送混凝土的流动机理和精准预测泵

压损失都至关重要。

4 新拌混凝土的流变性能与模型

4.1 新拌混凝土的流变性能

流变学是研究混凝土可泵性的强有力工具,也是研究混凝土可泵性的理论支柱。混凝土的流变性能直接影响到它在泵管内的流动行为。绝大多数的新拌混凝土均具有屈服应力。当混凝土克服屈服应力开始流动后,在剪切应力的作用下,表现出一定大小的塑性黏度。现在除极少数的新拌混凝土的塑性粘度不受剪切应变速率的影响外,绝大多数的新拌混凝土均存在明显的剪切增稠或剪切稀化现象^[23]。新拌混凝土的剪切增稠可用固体颗粒间的相互作用来解释^[24-26]。泵送混凝土的剪切增稠会使得新拌混凝土的表观粘度增加,体积膨胀,导致泵送压力加大,增加堵泵的风险。新拌混凝土的剪切稀化可归因于剪切应力对固体颗粒间的网状絮凝结构的破坏作用^[27]。混凝土的适度剪切稀化对泵送有利,但剪切稀化会增加混凝土分层离析的可能性,也会增加堵泵的风险。有研究表明:新拌水泥基材料在剪切应力的作用下究竟表现出剪切增稠还是剪切稀化,主要与固体相颗粒的体积分数和剪切应变速率有关^[27]。

4.2 新拌混凝土的流变模型

新拌混凝土的流变性能可以用流变模型来表征。下表 1 为一些常用的流变模型及其特征。

表 1 新拌混凝土流变模型
Table 1 Rheological models of fresh concrete

| Rheological models | Rheological equations | Number of parameters |
|----------------------------------|---|----------------------|
| Bingham ^[16] | $\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma}$ | 2 |
| Modified Bingham ^[28] | $\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} + c\dot{\gamma}^2$ | 3 |
| Herschel-Bulkley ^[29] | $\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$ | 3 |
| Casson ^[30] | $\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\eta\dot{\gamma}}$ | 2 |

Bingham 模型作为目前水泥基材料领域内最常用的模型,其流变学方程形式简单,计算方便,流变参数能利用流变仪进行测量,可以满足工程上对大部分普通水泥基材料流变参数测量的要求。但随着矿物掺合料与外加剂的普遍应用,Bingham 模型描述剪切稀化与剪切增稠现象明显的混凝土的流变性能时误差较大。

相较于 Bingham 模型,Modified Bingham 模型、Herschel-Bulkley 模型、Casson 模型在描述混凝土的剪切稀化与剪切增稠现象时更具优势。并且这些模型的表达式也较为简单,参数不多,因此在描述混

凝土的剪切稀化与剪切增稠现象时经常使用。但相较于 Bingham 模型,这些模型中的参数的物理意义不明确,在描述混凝土的流变性能时的误差也无法量化。

除表 1 中所列的流变模型外,目前已存在的水泥基材料的流变模型还有很多,表达式的形式也很丰富,不限于描述剪切应力与剪切应变速率之间的关系,参数也更多,描述混凝土的流变性能时的误差也更小。但混凝土流变性能及其模型的研究作为混凝土可泵性研究的一部分,研究的主要方向不是建立更为精确适用的混凝土流变模型,而是混凝土流变模型的选择标准与流变模型和实际流变性能间的误差量化。

5 新拌混凝土在泵送前后的流变性能差异

在泵送过程前后,新拌混凝土的性能会发生一些变化,这对新拌混凝土泵送性能的研究以及泵送过程中混凝土的质量控制都至关重要。这些变化主要指的是新拌混凝土塑性黏度与屈服应力的变化。

经过泵送过程,新拌混凝土的塑性黏度会有所下降。随着泵送时间的延长,泵送过程中混凝土流动速率增加,导致泵送后新拌混凝土的塑性黏度的下降幅度加大^[31]。原因可能是新拌混凝土在泵送过程中受到的剪切应力引起胶凝材料颗粒的再次分散以及外加剂分子作用表面积的增加。Feys 等通过流变仪、V 型漏斗流过时间测定等相关实验证实了胶凝材料颗粒再次分散会使得新拌混凝土塑性黏度下降^[32]。

对于泵送前后新拌混凝土屈服应力的变化,目前尚不能得出结论。据已有的研究结果,在泵送后,新拌混凝土屈服应力可能会下降,可能保持相对不变,也可能有所增加^[33]。关于泵送前后新拌混凝土屈服应力的变化及其原因还有待于进一步的研究。

除了这些流变性能的变化外,一些研究结果也表明在泵送后新拌混凝土的含气量也会有所变化,有研究表明泵送后新拌混凝土的含气量会降低^[34],也有研究表明泵送后新拌混凝土的含气量会增加^[35]。

关于泵送前后新拌混凝土性能的差异,后续的研究重心会逐渐从表象向机理转移。实际上,新拌混凝土在高剪切应力下的剪切增稠或剪切稀化的特性,在剪切作用下动态离析的性能,水泥颗粒的水化反应与自由水减少引起的工作性经时损失等均会造成泵送前后新拌混凝土性能的差异,需要综合考

虑这些不同的影响因素和不同的泵送环境下的主要影响因素。

通过这些研究结果,可以确认新拌混凝土在泵送前后的流变性能有很大变化。利用流变学理论来表征新拌混凝土泵送性能时需要考虑这些变化的影响。

6 新拌混凝土可泵性的评估模型

可泵性作为新拌混凝土重要的性能之一,在世界范围内目前还没有精准的定义解释。从工程应用的角度看,可泵性体现了新拌混凝土的一种状态,即能否满足既定工程泵送施工的要求、施工过程中泵送的难易程度、泵送后的混凝土能否满足施工要求与工程质量要求。因而想要对可泵性做出精准的定义,需首先解决混凝土的能否泵送的评价标准。

提出混凝土在泵送过程中泵压与流量的关系模型一直是新拌混凝土的泵送性能评价标准的重点研究内容。如前所述,混凝土在泵送过程中形成的润滑层对其泵送性能有较大的影响,因此不考虑润滑层性能的泵压与流量关系的预测模型必然会与实测值偏差较大。在考虑润滑层对混凝土泵送性能的影响的各种模型中^[36],Kaplan 模型是目前公认比较符合实际的模型^[14]。

Kaplan 将新拌混凝土在泵送过程中的流量分为两部分,一部分属于滑移流量,一部分属于剪切流量。当靠近泵管壁附近的新拌混凝土所受的剪切应力小于自身的屈服应力时,新拌混凝土以“润滑层+柱塞流”的形式在泵管内稳定流动,此时的流量完全属于润滑层滑移所产生的流量,泵压与流量间的关系可用式(7)表示:

$$\Delta P = \frac{2}{R} \left(\frac{Q}{\pi R^2} \eta_{ll} + \tau_{0,ll} \right) \tag{7}$$

其中: ΔP 为单位长度的压力降; Q 为流量; η_{ll} 为润滑层的黏性常数; $\tau_{0,ll}$ 为润滑层的屈服应力。

当靠近泵管壁附近的新拌混凝土所受的剪切应力大于自身的屈服应力时,新拌混凝土以“润滑层+剪切滑移层+柱塞流”的形式在泵管内稳定流动,此时的流量是润滑层滑移所产生的流量与剪切滑移层剪切滑移所产生的流量之和,泵压与流量间的关系可用式(8)表示:

$$\Delta P = \frac{2}{R} \left(\frac{\frac{Q}{\pi R^2} - \frac{R}{4\mu_p} \tau_{0,ll} + \frac{R}{3\mu_p} \tau_0}{1 + \frac{R}{4\mu_p} \eta_{ll}} \eta_{ll} + \tau_{0,ll} \right) \tag{8}$$

其中: τ_0 为新拌混凝土的屈服应力; μ_p 为新拌混凝土

土的塑性黏度。

Kaplan 模型作为目前描述新拌混凝土泵送过程中泵压与流量关系的经典模型,仍然存在一些问题:其一、对润滑层和新拌混凝土采用 Bingham 模型来描述其流变行为,该模型已被证实在描述具有剪切增稠或剪切稀化的新拌混凝土时存在较大偏差,而目前很多高性能混凝土均具有剪切增稠或剪切稀化的流变行为;其二、该模型并没有考虑剪应力诱导下发生的骨料迁移对泵压损失的影响,即没有很好地描述剪切滑移层和柱塞流的性能。

在 Kaplan 模型的基础上,Khatib 根据离泵管中轴线不同距离处新拌混凝土的剪切应变速率来推导泵管横截面上的新拌混凝土的速率分布图,并计算泵送过程中的流量,可得式(9)所示的表达式^[25]。Khatib 模型在描述剪切滑移层的性能时比 Kaplan 模型更为准确,但依然没有考虑剪应力诱导下发生的骨料迁移对泵压损失的影响。

$$Q = \frac{\pi}{24R^4 \Delta P^3 \mu_c \mu_{ll}} \left(-12\mu_{ll} \Delta P^4 R^7 t_{ll} + 18\mu_{ll} \Delta P^4 R^6 t_{ll}^2 - 12\mu_{ll} \Delta P^4 R^5 t_{ll}^3 - 8\tau_{0c} R^7 \mu_{ll} \Delta P^3 + 12\mu_c R^7 \Delta P^4 t_{ll} - 18\mu_c R^6 \Delta P^4 t_{ll}^2 + 12\mu_c R^5 \Delta P^4 t_{ll}^3 + 24\tau_{0c} R^6 \mu_{ll} \Delta P^3 t_{ll} - 24\tau_{0c} R^5 \mu_{ll} \Delta P^3 t_{ll}^2 + 8\tau_{0c} R^4 \mu_{ll} \Delta P^3 t_{ll}^3 - 24\mu_c \tau_{0l} R^6 \Delta P^3 t_{ll} + 24\mu_c \tau_{0l} R^5 \Delta P^3 t_{ll}^2 - 8\mu_c \tau_{0l} R^4 \Delta P^3 t_{ll}^3 + 16\tau_{0c}^4 R^4 \mu_{ll} + 3\mu_{ll} \Delta P^4 R^8 + 3\mu_{ll} R^4 \Delta P^4 t_{ll}^4 - 3\mu_c R^4 \Delta P^4 t_{ll}^4 \right) \tag{9}$$

其中: Q 为通过管道横截面的总流量; R 为泵管内半径; ΔP 为单位长度的压力降; μ_c 为新拌混凝土的塑性黏度; μ_{ll} 为润滑层的塑性黏度; τ_{0c} 为新拌混凝土的屈服应力; τ_{ll} 为润滑层的屈服应力; t_{ll} 为润滑层的厚度。

7 新拌混凝土可泵性的测试方法

长期以来,新拌混凝土的可泵性一直使用坍落度或坍落扩展度来表征,并且基于坍落度或坍落扩展度的实验数据制作了诺模图以供工程查询^[37]。但这一方法有很多不足之处:首先、诺模图很难涵盖所有的材料与施工范围,尤其是大流动性混凝土和超远程泵送的情况;其次、一些跟泵送性能密切相关的参数并没有纳入诺模图中,比如骨料形状、级配等;更为重要的是,对于自密实混凝土,诺模图预测的泵压与实际施工的泵压相差很大。从流变学的角度讲,坍落度或坍落扩展度只能表征新拌混凝土的屈服应力,并不能表征塑性黏度,即仅利用坍落度或坍落扩展度不能全面反映新拌混凝土的流动

状态。因此这一方法已不能适应成分复杂、性能多样的现代混凝土。

利用 Kaplan 模型的原理开发的滑管仪(Sliding Pipe Rheometer, Sliper)是目前用来评价混凝土可泵性的最新装置^[38]。该装置携带方便、操作简单,且所测得的数据可以直接绘制成“泵压-流量”关系图供工程参考。滑管仪在测试过程中会在管壁形成润滑层,这能够很好地体现出新拌混凝土在泵管内形成的润滑层的性能。

与摩擦仪相比,滑管仪具有非常明显的优势:

1) 利用蓝牙技术,可以在测量过程中实时传输数据并绘制“泵压-流量”计算图,更利于工程中泵送前对混凝土性能的快速评估;2) 测量过程中在管壁形成的润滑层更符合泵送过程的真实情况,而不像摩擦仪一样通过旋转的方式形成润滑层;3) 滑管仪在测量过程中,混凝土始终保持不动,这样不会因为动态测量而引发混凝土的动态离析,造成测量数据的误差。而摩擦仪通过旋转带动被测混凝土一起运动,容易造成混凝土动态离析,引起测量误差;4) 摩擦仪测量所得的黏性常数,只能总体反映润滑层的粘度与润滑层的厚度,而滑管仪测量所得的模拟曲线可以直接反映出润滑层对泵送过程的贡献程度。

但由于滑管仪在实验过程中,混凝土始终保持不动,管壁相对于混凝土滑动,因此混凝土在滑管仪滑动过程中不会形成剪切滑移层,这属于 Kaplan 模型中“润滑层+柱塞流”的流动模式的情形。需注意的是,滑管仪除了具有 Kaplan 模型的不足外,自身还存在不足之处:1) 实际工程中泵压往往较大,尤其对大流态混凝土,在泵送过程中很容易形成剪切滑移层,即使 Kaplan 模型完全正确,滑管仪在实验中也是利用泵压较小的情况(“润滑层+柱塞流”的流动模式)来预测泵压较大的情况(“润滑层+剪切滑移层+柱塞流”的流动模式)。也即是说,滑管仪在预测会形成剪切滑移层的混凝土泵送性能时,以泵压较小时得出的泵压-流量的直线关系的延长线来预测 Kaplan 模型中的泵压较大时的泵压-流量的直线关系。这显然是存在很大误差。2) 滑管仪在定性比较两种不同状态下的混凝土可泵性时,如果两种不同状态下的新拌混凝土所形成的润滑层性能大致相同,但剪切滑移层的性能相差较大,这时滑管仪给出的泵压-流量预测关系是大致相同的,实际上这两种不同状态下的混凝土可泵性存在较大的差异。

总的来说,滑管仪是一种评价混凝土泵送过程中润滑层性能的装置。虽然滑管仪仍然不能准确地

预测新拌混凝土在泵送过程中的泵压与流量的关系,但该装置的发明依然极大地推动了新拌混凝土泵送性能的研究。

8 结论

1) 新拌混凝土在泵管内的稳定流动状态包括 2 种模式:“润滑层+柱塞流”模式;“润滑层+剪切滑移层+柱塞流”模式。润滑层的性能对新拌混凝土的泵送性能有较大程度的影响。对于有剪切滑移层生成的流动模式,剪切滑移层的性能对新拌混凝土的泵送性能也有较大程度的影响。

2) 随着矿物掺合料与外加剂的普遍应用,绝大多数的现代混凝土均具有剪切增稠或剪切稀化现象,也相应地产生了很多流变模型。目前的研究重心应从建立各种流变模型转移到新拌混凝土流变模型的选择标准与流变模型和实际流变性能间的误差量化方面。

3) 经过泵送后,新拌混凝土的含气量会发生变化,塑性粘度会下降,这可以归因于新拌混凝土在泵管内受到的强烈的剪切作用。泵送前后新拌混凝土屈服应力的变化尚无定论,还有待于进一步研究。

4) Kaplan 模型很好地描述了润滑层对泵送过程中压力损失的影响。Khatib 模型对 Kaplan 模型进行了修正,加入了对泵管横截面速率分布的影响,使得所建立的模型更接近于实际泵送过程。但这些模型仍有待于从以下两点进行改善:其一、新拌混凝土的流变模型;其二、剪应力诱导下发生的骨料迁移对泵压损失的影响。

5) 滑管仪作为目前检测混凝土可泵性能最新的装置,能较好地用于研究润滑层的性能对新拌混凝土泵送性能的影响。

参考文献:

- [1] 余成行,刘敬宇,王磊. C60 超高泵送混凝土的配制与施工[J]. 混凝土, 2008(6): 71-76.
YU Chenghang, LIU Jingyu, WANG Lei. Concrete (in Chinese), 2008, (6): 71-76.
- [2] 张莉莉,吴华,黄天贵,等. 超高层混凝土泵送技术研究与应用[J]. 建筑技术, 2015, 46(4): 341-344.
ZHANG Lili, WU Hua, HUANG Tianguai, et al. Archit Technol (in Chinese), 2015, 46(4): 341-344.
- [3] 吴斌兴,陈保钢,徐建华,等. 高强高性能混凝土泵送压力损失分析[J]. 混凝土, 2011, (1): 142-144.
WU Binxiang, CHEN Baogang, XU Jianhua, et al. Concrete (in Chinese), 2011, (1): 142-144.

- [4] 李立辉, 陈喜旺, 李路明, 等. 自密实混凝土泵送压力变化规律分析[J]. 施工技术, 2016, 45(12): 52–56.
LI Lihui, CHEN Xiwang, LI Luming, et al. Construc Technol (in Chinese), 2016, 45(12): 52–56.
- [5] 余成行, 师卫科. 泵送混凝土技术与超高泵送混凝土技术[J]. 商品混凝土, 2011, (10): 29–34.
YU Chenghang, SHI WeiKe. Ready-mixed Concr (in Chinese), 2011, (10): 29–34.
- [6] 赵筠. 混凝土泵送性能的影响因素与试验评价方法[J]. 江西建材, 2014(12): 6–32.
ZHAO Jun. Jiangxi Build Mater (in Chinese), 2014(12): 6–32.
- [7] FEYS D, KHAYAT K H. Recent developments in evaluating pumping behavior of flowable and self-consolidating concrete[J]. J Sustain Cem-Based Mater, 2015, 4(3-4): 238–251.
- [8] KWON S H, JANG K P, Kim J H, et al. State of the art on prediction of concrete pumping[J]. Int J Concr Struct Mater, 2016, 10(3): 75–85.
- [9] JACOBSEN S, HAUGAN L, HAMMER T A, et al. Flow conditions of fresh mortar and concrete in different pipes[J]. Cem Concr Res, 2009, 39: 997–1006.
- [10] CHOI M S, PARK S B, KANG S T. Effect of the mineral admixtures on pipe flow of pumped concrete[J]. J Adv Concr Technol, 2015, 13: 489–499.
- [11] CHOI M, ROUSSEL N, KIM Y, et al. Lubrication layer properties during concrete pumping[J]. Cem Concr Res, 2013, 45: 69–78.
- [12] CHOI M S, KIM Y J, JANG K P, et al. Effect of the coarse aggregate size on pipe flow of pumped concrete[J]. Constr Build Mater, 2014, 66(9): 723–730.
- [13] YAMMINE J, CHAOUICHE M, GUERINET M, et al. From ordinary rheology concrete to self compacting concrete: A transition between frictional and hydrodynamic interactions[J]. Cem Concr Res, 2008, 38: 890–896.
- [14] KAPLAN D, LARRARD F D, SEDRAN T. Design of concrete pumping circuit[J]. ACI J, 2005, 102(2): 110–107.
- [15] MORINAGA M. Pumpability of concrete and pumping pressure in pipe line[C]. Proceedi RILEM Seminar Held in Leeds, 1973(3): 1–39.
- [16] SAKUTA M, YAMANE S, KASAMI H, et al. Pumpability and rheological properties of fresh concrete[C]. Proceeding of Conference on Quality Control of Concrete Structures, 1979(2): 125–132.
- [17] CHOI M S, KIM Y J, KWON S H. Prediction on pipe flow of pumped concrete based on shear-induced particle migration[J]. Cem Concr Res, 2013, 52: 216–224.
- [18] FEYS D, KHAYAT K H, PEREZ-SCHELL A, et al. Relation between Rheological and Tribological Properties of Highly-Workable Concrete, in view of Estimating Pumping Pressures[C]. Proceedings of the Fifth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, 2013.
- [19] KAPLAN D. Pumping of concretes[D]. French: LCPC, 2001.
- [20] INGBER M S, GRAHAM A L, MONDY L A, et al. An improved constitutive model for concentrated suspensions accounting for shear-induced particle migration rate dependence on particle radius[J]. Int J Multiphase Flow, 2009, 35: 270–276.
- [21] CHOI M S. Numerical Prediction on the Effects of the Coarse Aggregate Size to the Pipe Flow of Pumped Concrete[J]. J Adv Concr Technol, 2014, 12: 239–249.
- [22] LE H D, SCHUTTER G D, KADRI E H, et al. Velocity Profile of Self Compacting Concrete and Traditional Concrete Flowing in a Half Open Pipe[C]. Proceedings of the 3th International Conference on Concrete Repair, 2012: 1382–1387.
- [23] CYR M, LEGRAND C, MOURET M. Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behavior of cement pastes containing or not mineral additives[J]. Cem Concr Res, 2000, 30: 1477–1483.
- [24] YAHIA A. Shear-thickening behavior of high-performance cement grouts-Influence mix-design parameters[J]. Cem Concr Res, 2011, 41: 230–235.
- [25] YAHIA A. Effect of soild concentration and shear rate on shear-thickening response of high-performance cement suspensions[J]. Constr Build Mater, 2014, 53: 517–521.
- [26] FEYS D, VERHOEVEN R, SCHUTTER G D. Why is fresh self-compacting concrete shear thickening[J]. Cem Concr Res, 2009, 39: 510–523.
- [27] ROUSSEL N, LEMAITRE A, FLATT R J, et al. Steady state flow of cement suspensions: A micromechanical state of the art[J]. Cem Concr Res, 2010, 40: 77–84.
- [28] YAHIA A, KHAYAT K H. Analytical models for estimating yield stress of high-performance pseudo plastic grout[J]. Cem Concr Res, 2001, 31: 731–738.
- [29] FEYS D, VERHOEVEN R, SCHUTTER G D. Fresh self-compacting concrete: a shear thickening material[J]. Cem Concr Res, 2008, 38: 920–929.
- [30] SAKAI E, KAKINUMA Y, YAMAMOTO K, et al. Relation between the Shape of Silica Fume and the Fluidity of Cement Paste at Low Water to Powder Ratio[J]. J Adv Concr Technol, 2009, 7(1): 13–20.
- [31] TAKAHASHI K, BIER T A. Mechanisms for the Degradation in Rheological Properties of Mortars after Pumping[C]. Proceedings of the Fifth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, 2013.
- [32] FEYS D, SCHUTTER G D. Changes in rheology of self-consolidating concrete induced by pumping[J]. Mater Design, 2016, 49: 4657–4677.
- [33] KHATIB R. Analysis and prediction of pumping characteristics of high-strength self-consolidating concrete[D]. Canada: Sherbrooke, 2013.
- [34] 罗碧丹, 刘文利, 林伟才. 混凝土泵送前后性能的对比试验研究[J]. 混凝土, 2015(4): 123–126.
LUO Bidan, LIU Wenli, LIN Weicai. Concrete (in Chinese), 2015(4): 123–126.
- [35] RIDING K A, FEYS D, MALONE T. Best practices for concrete pumping[R]. K-TRAN: KSU-14-2, Kansas, 2016.
- [36] KWON S H, PARK C K, JEONG J H, et al. Prediction of Concrete Pumping: Part II—Analytical Prediction and Experimental Verification[J]. ACI J, 2013, 110: 657–667.
- [37] SINGH B B. Some issues related to pumping of concrete[J]. Indian Concr J, 2004: 41–44.
- [38] MECHTCHERINE V, NERELLA V N, KASTEN K. Testing pumpability of concrete using Sliding Pipe Rheometer[J]. Constr Build Mater, 2014, 53: 312–323.