

用 Orimet 法(漏斗法)评价高流动性 混凝土工作度的研究^{*}

安明哲 覃维祖
(清华大学土木工程系)

摘要 指出高流动性混凝土工作度与普通混凝土工作度的主要影响因素的区别,并用 Orimet 法流出速度、坍落度、坍落度流动值评价了高流动性混凝土的工作度,结果表明用 Orimet 流出速度与坍落度流动值可以综合评价高流动性混凝土的工作度。

关键词 高流动性混凝土; 工作度; Orimet 法流出速度
中图法分类号 TU 5

混凝土拌和物的工作度直接影响施工质量,因此改善拌和物工作度,从而改善混凝土硬化体的力学性能与耐久性能,是发展高性能混凝土的一个重要课题。

当前混凝土技术迅速发展,高效减水剂、抗分离剂及矿物掺合料在混凝土中的应用,不仅能配制出强度很高的高强混凝土和超高强度混凝土,而且还能配制出工作度良好的泵送混凝土、免振自流平混凝土及水中不分离的混凝土。

从建筑技术的发展来看,一方面建筑施工的规模不断扩大与建筑物向高层化发展,对工作度良好的泵送混凝土需求量不断增加(目前施工现场常用泵送混凝土的坍落度值均在 18 cm 以上);另一方面建筑造型的多样化与施工条件的改变,一些结构物施工时,如布筋很密的薄壁结构、造型复杂的结构及水中工程等,无法对新浇混凝土进行振捣。再者,建筑市场的不断扩大与熟练工人向其他行业的分流,不断由缺乏施工经验、素质较差的新工人来补充,因此混凝土施工过程中时有漏振、过振的现象,已成为影响工程质量不可忽视的因素;另外,在现代化都市里建筑施工过程中,混凝土振捣时发出的噪音已严重影响周围居民的日常工作与生活,亟待解决,因此高流动性混凝土应用的迫切性已显而易见了。

与普通混凝土相比,高流动性混凝土拌和物的流变参数中,屈服值 τ_y 降低,粘性系数 η_{pl} 却提高了(如图 1)。高流动性混凝土的这种特点,不仅使混凝土拌和物具备良好的流动性能,而且具备了良好的抗分离性能,在一定的范围内改善了钢筋间隙通过性。普通混凝土浇筑时,需要通过振捣使混凝土拌和物液化(其屈服值 τ_y 趋于零)、流动并填充到模板内各处;高流动性混凝土拌和物由于本身屈服值 τ_y 小,所以施工过程中只需短时间振捣或不用振捣,就能达到填充密实的效果。

由于高流动性混凝土拌和物的上述流变特性,传统的坍落度试验不能全面地对其工作度进行评价,因此需要探索建立一套有效的检测方法,为配合比设计与现场质量控制中比较与评价混凝土拌和物的工作度服务。

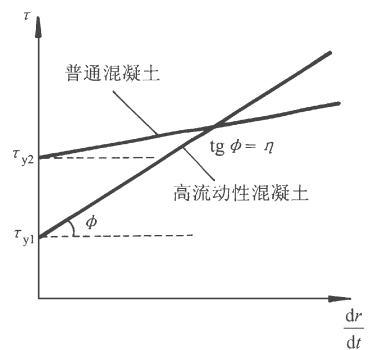


图 1 混凝土的流变特性曲线

收稿日期: 1997-04-12

第一作者: 男, 1970 年生, 博士生, 清华大学土木工程系, 北京, 100084.

^{*}国家自然科学基金资助项目。

1 高流动性混凝土工作度检测方法比较

目前施工过程中普遍用坍落度来评价混凝土的工作度,由图2可知拌和物坍落度主要取决于屈服值 τ_y ^[1]. 试验发现混凝土坍落度超过20 cm后,对工作度的变化不敏感,因此不适宜用坍落度来评价屈服值 τ_y 小的高流动性混凝土的工作度.

国内外在用坍落度检测高流动性混凝土的工作度时,也有用量取拌和物坍开后的纵横向平均直径,即坍落度流动值来综合评价.图3给出了厚径比(坍开后的厚度与坍落度流动值的比值)与坍落度流动值之间的关系^[2].由此可知坍落度流动值克服了坍落度超过20 cm后不敏感的缺点,较好地反映了拌和物在无配筋或配筋稀少模板内的填充性能.但是,坍落度流动值的大小依然主要取决于屈服值 τ_y ,还是无法准确反映出主要取决于粘性系数 η_{pl} 的高流动性混凝土拌和物工作度,如钢筋间隙通过性、布筋较密的模板填充性及可泵性等.试验发现不同配比的高流动性混凝土虽然坍落度流动值没有很大差异,但是由于粘性系数 η_{pl} 不同,其钢筋间隙通过性、可泵性等性能有很大的差别.

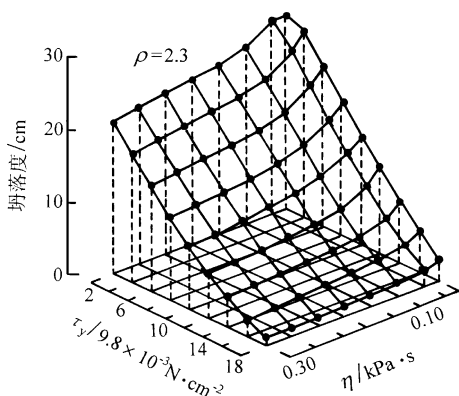


图2 坍落度值与流变参数的关系

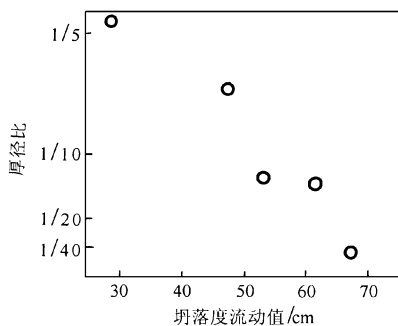


图3 厚径比与坍落度流动值关系

也有人建议用坍落度流动速度来评价高流动性混凝土的工作度.坍落度流动速度指坍落度试验时混凝土拌和物完全坍开所需要的时间,从流变学的角度看,由于拌和物的流动速度主要取决于拌和物的粘性系数 η_{pl} ,因此,从理论上它较好地反映高流动性混凝土的工作度,但是实际试验中发现,混凝土拌和物刚刚坍落时坍开速度很大,随着拌和物的流动,速度逐渐减小,最后极缓慢地流动直至停止,很难确定流动停止的时刻,因此测量误差较大.

此外还有很多混凝土工作度评价方法,如回转粘度计试验、小球上浮试验、压力泌水试验^[3]等,由于这些试验装置比较复杂或存在一些其他不足,也不适宜用来评价高流动性混凝土的工作度.

2 评价高流动性混凝土工作度的 Orimet 法试验

高流动性混凝土的浇筑和填充过程是拌和物的变形过程,由于其屈服值 τ_y 小、粘性系数 η_{pl} 大,因此变形过程主要取决于粘性系数 η_{pl} .笔者在参考国外有关资料^[4]的基础上,对快速而简便的 Orimet 法加以改进(主要是针对我国高流动性混凝土骨料粒径不稳定而对其上下口径的尺寸及其构造进行了一些改进),从而进行了评价高流动性混凝土工作度的尝试.

2.1 试验所采用的原材料与配比

水泥与粉煤灰分别采用了冀东 525 普通硅酸盐水泥与内蒙古元宝山 1 级粉煤灰,其化学组成¹⁾如表 1 所示;砂石骨料分别采用了北京龙凤山产细度模数为 3.1, 5 mm 以上颗粒含量为 7.0%

1) 本文涉及的化学组成、含量、掺量均为质量百分数.

的砂及北京卢沟桥产最大粒径为 20 mm 的碎卵石;外加剂采用了山东莱芜产 FDN 高效减水剂. 试验所用的配比如表 2 所示. 搅拌设备为 50 L 强制式搅拌机.

表 1 水泥与粉煤灰的化学组成(%)

| 样品 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | 烧失量 |
|-----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------|-------------------|------------------|------|
| 水泥 | 22.40 | 6.14 | 5.12 | 3.00 | 62.22 | — | — | — |
| 粉煤灰 | 58.64 | 19.78 | 9.56 | 2.08 | 4.42 | 0.87 | 2.64 | 0.52 |

表 2 高流动性混凝土的配合比

| 编号 | W /kg·m ⁻³ | C /kg·m ⁻³ | FA /kg·m ⁻³ | S /kg·m ⁻³ | G /kg·m ⁻³ | $FA/(C+FA)$ (%) | $W/(C+FA)$ (%) | S_p (%) | FDN 掺量 (%) |
|----|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|-------------------|--------------|---------------|
| A1 | 160 | 426 | 107 | 753 | 952 | 20 | 30 | 44 | 2.0 |
| A2 | 168 | 420 | 105 | 753 | 952 | 20 | 32 | 44 | 2.0 |
| A3 | 173 | 411 | 103 | 753 | 952 | 20 | 34 | 44 | 2.0 |
| A4 | 191 | 402 | 101 | 753 | 952 | 20 | 38 | 44 | 2.0 |
| B1 | 173 | 411 | 103 | 753 | 952 | 20 | 34 | 44 | 0.8 |
| B2 | 173 | 411 | 103 | 753 | 952 | 20 | 34 | 44 | 1.2 |
| B3 | 173 | 411 | 103 | 753 | 952 | 20 | 34 | 44 | 1.6 |
| B4 | 173 | 411 | 103 | 753 | 952 | 20 | 34 | 44 | 2.0 |
| C1 | 168 | 420 | 105 | 596 | 1 109 | 20 | 32 | 35 | 1.6 |
| C2 | 168 | 420 | 105 | 683 | 1 023 | 20 | 32 | 40 | 1.6 |
| C3 | 168 | 420 | 105 | 753 | 952 | 20 | 32 | 44 | 1.6 |
| C4 | 168 | 420 | 105 | 819 | 886 | 20 | 32 | 48 | 1.6 |
| D1 | 168 | 473 | 53 | 753 | 952 | 10 | 32 | 44 | 1.6 |
| D2 | 168 | 420 | 105 | 753 | 952 | 20 | 32 | 44 | 1.6 |
| D3 | 168 | 315 | 210 | 753 | 952 | 40 | 32 | 44 | 1.6 |
| D4 | 168 | 210 | 315 | 753 | 952 | 60 | 32 | 44 | 1.6 |

2.2 Orimet 法试验方法及试验结果

Orimet 试验仪的形状与尺寸如图 4 所示,主要由竖管、插口及三角架组成,竖管下部用螺栓固定插口,插口底部设置可以迅速打开的活动门,竖管与插口用三角架支撑和固定. 试验原理是混凝土拌和物在自重作用下从上下不同口径的圆筒形竖管全部流出来,流出速度主要取决于拌和物的粘性系数 η_{pl} . 通过流出速度(也就是变形速度)评价混凝土拌和物的工作度. 试验还需要备有秒表(精度为 0.2 s)、10 L 的容重筒、漏斗、刷子及勺子. 具体试验步骤如下:

(1) 把 Orimet 试验仪支撑在坚实的地面上,调整三角架使竖管保持垂直.

(2) 用刷子润湿竖管与插口内壁,打开活动门放出多余的水.

(3) 关上活动门,用勺子将拌和物装入竖管至距上缘 10 mm 处(拌和物体积为 11.2 L),把容重筒放在活动门的正下方.

(4) 打开活动门的同时用秒表计时,并从竖管上口观察,待拌和物流尽(管内见亮)即按下秒表,测出流下时间,计算流出速度.

(5) 将 Orimet 试验仪的内壁洗净,准备做下一次试验.

为了便于对比,笔者同时还测定了坍落度及坍落度流动值. 试验结果如表 3 所示.

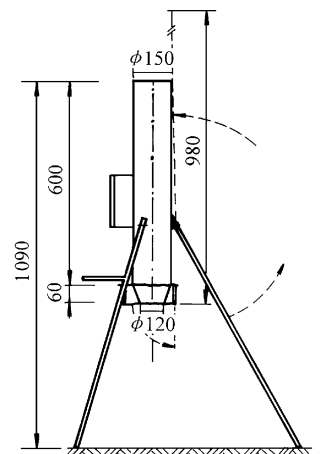


图 4 Orimet 试验仪示意图

表3 高流动性混凝土的工作度测定结果

| 编号 | 坍落度 / cm | 坍落度流动值 / cm | Orimet 流出速度 v / $L \cdot s^{-1}$ | 容重 / $kg \cdot m^{-3}$ | 备注 |
|----|-------------|----------------|---------------------------------------|---------------------------|--------|
| A1 | 21.5 | 50.0 | 0.457 | — | — |
| A2 | 22.0 | 56.0 | 2.240 | — | — |
| A3 | 22.5 | 56.5 | 2.800 | — | — |
| A4 | 22.0 | 56.0 | 2.040 | — | 有离析现象 |
| B1 | 22.5 | 51.0 | 2.667 | 2 370 | — |
| B2 | 22.5 | 56.0 | 3.027 | 2 380 | — |
| B3 | 23.0 | 62.0 | 3.733 | 2 390 | — |
| B4 | 23.0 | 60.0 | 2.800 | 2 414 | 略有离析现象 |
| C1 | 22.5 | 57.5 | 0.933 | 2 382 | — |
| C2 | 24.5 | 57.0 | 3.200 | 2 350 | — |
| C3 | 25.0 | 59.0 | 3.733 | 2 352 | — |
| C4 | 24.5 | 57.0 | 3.200 | 2 352 | — |
| D1 | 21.5 | 40.0 | 2.947 | 2 322 | — |
| D2 | 24.0 | 53.0 | 3.500 | 2 302 | — |
| D3 | 24.2 | 63.0 | 3.733 | 2 306 | — |
| D4 | 24.3 | 64.0 | 4.667 | 2 306 | — |

2.3 试验结果分析及探讨

众所周知,混凝土拌和物浆体的稠度的变化改变了拌和物的粘性系数 η_{pl} 及屈服值 τ_y , 从而影响其工作度, 而浆体的稠度又与水胶比有直接的关系, 因此为了确定水胶比对高流动性混凝土工作度的影响, 在不改变浆体总量的基础上, 通过改变拌和物的水胶比来测定拌和物的 Orimet 法流出速度(以下简称为流出速度)、坍落度流动值及坍落度. 图 5 给出了流出速度、坍落度流动值与水胶比的关系曲线. 由图 5 可知, 由于水胶比的增加降低了混凝土拌和物的粘性系数 η_{pl} , 因此拌和物的流出速度随水胶比的增大而增大. 但是水胶比超过 0.34 之后, 水胶比过大使拌和物发生离析, 导致拌和物从竖管流出来时粗骨料在出口处堆积, 反而降低了流出速度. 笔者在水胶比为 0.38 的混凝土坍落度试验过程中发现因材料的离析坍落后其中心部位有“鼓包”现象(如图 6). 坍落度流动值随水胶比的变化趋势也类似于流出速度, 但是变化幅度较小, 特别是水胶比超过 0.32 以后几乎没有变化. 此外, 不同水胶比的高流动性混凝土坍落度均保持在 22 cm 左右, 并不随试验范围内所取水胶比的变化而变化.

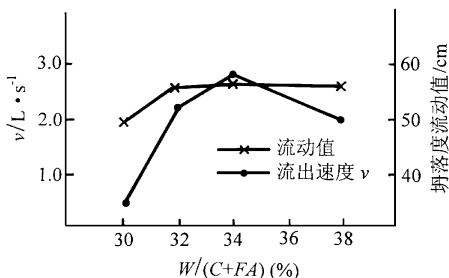


图5 Orime 流出速度与水胶比的关系

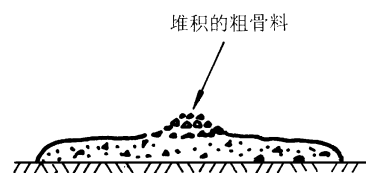


图6 混凝土坍落后的形状

高流动性混凝土中掺入高效减水剂的目的是通过高效减水剂的分子或离子在水泥颗粒表面的定向吸附, 形成扩散双电层, 使水泥颗粒相互排斥, 释放出“絮凝水”, 提高有限用水量的利用率. 为了明确高效减水剂掺量对拌和物工作度的影响, 在水灰比、砂率不变的基础上, 通过改变高效减水剂 FDN 的掺量测定拌和物的流出速度、坍落度流动值及坍落度, 图 7 给出了高效减水剂 FDN 掺量

与流出速度、坍落度流动值的关系曲线.由图 7 可知高效减水剂 FDN 的掺量低于 1.6%时,拌和物的流出速度随掺量的增加而增大,掺量高于 1.6%时与此相反.其主要原因是高效减水剂的掺入可降低拌和物的粘性系数 η_{pi} ,提高流出速度,但是掺量过大时因引起材料的离析反而降低流出速度.坍落度流动值的变化趋势也类似于流出速度.若混凝土拌和物中浆体的稠度与总量不变,砂率将直接影响拌和物的工作度.为了明确砂率对工作度的影响,在胶结料用量与水胶比不变的基础上,改变砂率测定其流出速度、坍落度流动值及坍落度.图 8 给出了高流动性混凝土的砂率与流出速度、坍落度流动值的关系曲线.在混凝土拌和物中砂浆起润滑作用,可以减少粗骨料颗粒之间的摩擦阻力,当砂率过小时砂浆粘性系数 η_{pi} 小而混凝土发生离析,因此流出速度变小.与此相反,当砂率过大时,由于骨料的总表面积过大,在浆体总量不变的情况下,水泥浆量相对来说减少了,因此减弱了水泥浆的润滑作用,致使整个体系的粘性系数 η_{pi} 增大,流出速度也随之变小.从图 8 中可以看出砂率小于 44%时,流出速度随砂率的增加而增大.砂率超过 44%后,拌和物的流出速度随砂率的增加而减小.另外由图 8 可知砂率对坍落度流动值的影响很小.

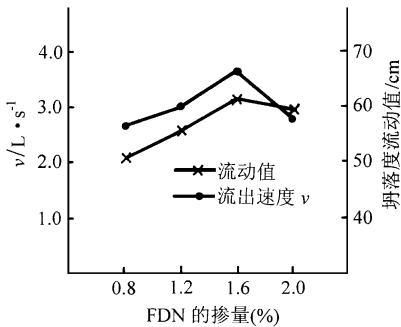


图 7 Orime 流出速度与高效减水剂 FDN 掺量的关系

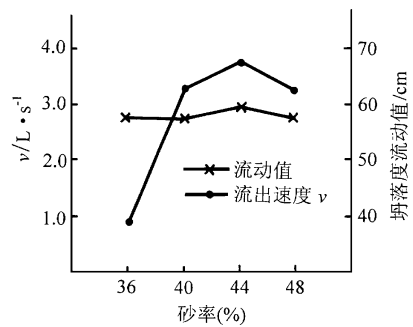


图 8 Orimet 流出速度与砂率的关系

掺入混凝土中的粉煤灰通过“形态效应”可以改善拌和物的工作度.为了明确粉煤灰掺量对工作度的影响,在胶结料总量不变的基础上,改变粉煤灰与胶结料总量的比值来测定拌和物的流出速度、坍落度流动值及坍落度.图 9 给出了粉煤灰掺量与流出速度、坍落度流动值的关系曲线.一级元宝山粉煤灰颗粒的形状不同于水泥颗粒的形状,基本上呈球状,因此不仅表面吸附水少,而且对浆体起到“滚珠”作用,明显地改善了拌和物的工作度.由图 9 可知,粉煤灰掺量增加时,拌和物的工作度得以改善,粘性系数 η_{pi} 降低,流出速度增大.坍落度流动值也呈类似的变化趋势.

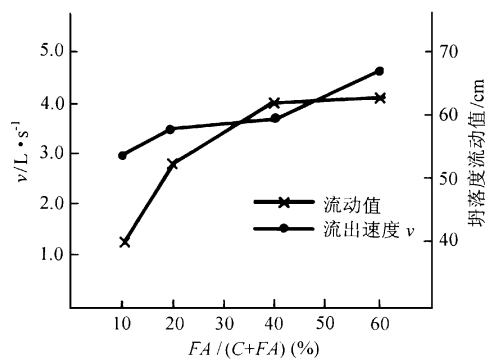


图 9 Orimet 流出速度与粉煤灰掺量的关系

通过以上的试验与分析可知,高流动性混凝土的 Orimet 法流出速度确实能较好地反映出拌和物的工作度随配比的变化情况,因此适用于做混凝土配合比设计的依据,也适用于施工现场混凝土拌和物的质量控制.

3 结束语

1. 高流动性混凝土拌和物的屈服值 τ_y 小、粘性系数 η_{pi} 大,因此拌和物的工作度主要取决于粘性系数 η_{pi} .对于坍落度大于 20 cm 的高流动性混凝土来说,适宜用 Orimet 法流出速度与坍落度流动值来综合评价其工作度.

2. 高流动性混凝土拌合物在不发生离析的情况下,流出速度在一定范围内随水胶比、高效减水

剂掺量的增加而增大.但当水胶比过大或减水剂掺量过多引起混凝土拌和物离析时,反而使流出速度降低.

3. 流出速度对高流动性混凝土砂率的变化比较敏感, 44% , 44% , Orimet 法试验确定高流动性混凝土的最佳砂率.

4. “ ” .

- 1 フレッシュコンクリートの . フレッシュコンクリートの : コンクリート , 1993. 177~198
- 2 , . ート を いたコンケリー トの . : No. 490/V-23. : , 1994. 61~70
- 3 , . , 1996 (3): 11~15
- 4 Peter J, Bartos M. Fresh concrete; properties and tests. London; Elsevier, 1992. 119~126

Study on the Evaluation of the Workability of High Fluidity Concrete with the Method of Orimet

An Mingzhe Qin Weizu

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

Abstract This paper presents the differences of the main factors affecting the workabilities between the NC (normal concrete) and HFC (high fluidity concrete), and evaluates the workability of HFC with the methods of Orimet-flowing rate, slump and slump-flow respectively. The results show that the workability of HFC can be evaluated comprehensively by the combined application of Orimet-flowing rate and slump.

Key words HFC (high fluidity concrete); workability; Orimet-flowing rate