

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.06.004

# 基于流变特性的滑模混凝土工作特性研究

屈允永, 田波, 刘英, 彭鹏, 李传平

(交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

**摘要:**从流变学的角度出发,通过测量等坍落度情况下,不同砂率的细粒式混凝土和粗粒式混凝土在搅拌过程中的相对塑性黏度和相对屈服应力,得出砂率对混凝土施工阻力和立模特性的影响。另外,分别测量等坍落度情况下不同砂率混凝土振捣拆模后的塌边高度,用于直接反映混凝土的立模特性。结果表明:在滑模施工过程中,坍落度不能较好地表征混凝土的施工阻力和立模特性;搅拌过程中随砂率的增大,混凝土的塑性黏度先减小后增大再减小,屈服应力先增大后减小;混凝土的塌边高度随着砂率的增大先增大后减小。

**关键词:**道路工程;施工阻力;立模特性;塑性黏度;屈服应力;砂率

中图分类号:U416.216

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2016)06-0020-05

## Study on Workability of Slip-formed Concrete Based on Rheological Property

QU Yun-yong, TIAN Bo, LIU Ying, PENG Peng, LI Chuan-ping

(Research Institute of highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

**Abstract:** Depended on the principle of rheology, the relative plastic viscosity and relative yield stress of fine grained concrete and coarse grained concrete with the same slump and different sand ratios are measured when they are mixed to obtain the effect of sand ratio on the slip-form construction resistance and the formwork erection characteristics of concrete. In addition, the edge collapse heights of the concrete with the same slump and different sand ratios are measured respectively after vibrated and the templates are dismantled to directly reflect the concrete's formwork erection characteristics. The result shows that (1) concrete slump is not good at reflecting the construction resistance and formwork erection characteristics of the concrete; (2) when concrete is mixed, with the increase of sand ratio of the concrete, its plastic viscosity decreases at first and then increases and then decreases, while its yield stress increases at first and then decreases; (3) with the increase of sand ratio of the concrete, the edge collapse height increases at first and then decreases.

**Key words:** road engineering; construction resistance; formwork erection characteristics; plastic viscosity; yield stress; sand ratio

## 0 引言

滑模施工是目前水泥混凝土路面施工的主流方式。在滑模施工中,为得到高质量的水泥混凝土路面,要求水泥混凝土在工作性方面应具有较低的施工阻力和良好的立模特性<sup>[1-2]</sup>。然而混凝土的施工阻力和立模特性这两个性能相互矛盾,对此传统的

以坍落度来评判混凝土工作性的方式难以适用<sup>[3-4]</sup>。本文从流变学的角度出发,来研究滑模施工中混凝土的相关工作性能。众所周知,材料是影响流变性的的重要因素<sup>[5]</sup>,在混凝土的配合比设计中,水泥用量受限,难以有较大变化<sup>[2]</sup>;砂率变化较大,且砂子相对于石子具有更高的比表面积,砂子质量的变化对混凝土的流变性影响更大<sup>[6]</sup>。因此,本文针对

收稿日期:2015-02-09

基金项目:国家国际科技合作专项项目(2014DFR81000);民航局重大专项课题项目(MHRD20130109)

作者简介:屈允永(1991-),男,山东滕州人,硕士研究生。(up0105@163.com)

砂率,通过一系列的流变性试验及立模特性试验来探究滑模施工中砂率对混凝土的施工阻力及立模特性的影响,同时希望得到具有低施工阻力与高立模特性的砂率,来提高混凝土的相关工作性能。

## 1 试验原材料、设备、原理、方案及配合比

### 1.1 试验材料

(1) 水泥选用金隅牌普通硅酸盐水泥, P. O42.5 级。

(2) 砂为河砂,相关技术指标详见表 1。

表 1 砂的相关技术指标

Tab. 1 Related technical indexes of sand

规格	表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	细度模数	泥块含量	含泥量/%
中砂	2.73	2.67	0	0.6

(3) 粗集料为石灰岩碎石,级配合格,粗集料的压碎值指标是 17.1%。

(4) 减水剂选用山东省产的奈系高效减水剂。

### 1.2 试验设备

(1) 水泥砂浆与混凝土涡轮式流变仪适用于集料粒径不超过 10 mm 的水泥砂浆及混凝土。转速范围在 0~140 r/min, 扭矩测量范围为 0.1~100 N·m。每间隔一秒采集一次数据,能够实现对砂浆及混凝土在不同转速下的扭矩与功率的实时测量。

(2) 水泥混凝土双卧轴流变仪,能够搅拌集料最大粒径为 50 mm 的混凝土。转速范围在 0~100 r/min, 扭矩测量范围为 0.1~300 N·m, 同样每间隔一秒采集一次数据。

(3) 立模特性试验槽,为方形钢槽,两侧钢板可以抽出,以两侧钢板抽出处混凝土的塌边高度表征其立模特性。

### 1.3 试验原理、方案及配合比设计

所谓材料的流变特性,指的是在适当的外力作用下,材料发生变形与流动的性能,其中塑性黏度和屈服应力是其重要指标。在流变特性的研究方面,一般是用某些理想的基本模型来模拟某些真实物体的流变特性,并导出其流变方程。经国内外研究表明道路混凝土流变学特性符合宾汉姆模型<sup>[7-9]</sup>,即道路混凝土在搅拌过程中的扭矩与转速存在线性关系,并且相应转速与扭矩拟合的一元线性方程的斜率与截距分别与混凝土的塑性黏度和屈服应力成正比<sup>[3,10]</sup>。相应的线性方程能够用式(1)表征:

$$T = g + hN, \quad (1)$$

式中,  $T$  为扭矩;  $N$  为转速;  $g$ ,  $h$  为常数。

根据上述原理,本文使用以上两种流变仪,分别设计等坍落度不等砂率的细粒式混凝土与粗粒式混凝土(本文将粗集料最大粒径为 10 mm 的混凝土定义为细粒式混凝土;粗集料最大粒径为 30 mm 的混凝土定义为粗粒式混凝土),各自测量其在搅拌过程中的转速与扭矩,以此推算出其相对的塑性黏度和屈服应力。同时,通过立模特性试验槽直接测量混凝土的立模特性,以此研究砂率对混凝土施工阻力与立模特性的影响。

依据《公路水泥混凝土路面滑模施工技术规范》分别设计细粒式与粗粒式混凝土的配合比。分别保持水灰比和水泥用量不变,改变砂率,砂率分别为 0.30, 0.35, 0.40, 0.45 (当砂率达到 0.50 时由于集料的比表面积过大,混凝土过于干涩,难以拌和,因此设定最大砂率为 0.45)。为保证各配比坍落度均适合滑模摊铺,通过调节减水剂的掺量来使不同砂率的混凝土坍落度保持一致,细粒式混凝土坍落度控制在 40 mm,粗粒式混凝土坍落度控制在 50 mm,具体配比见表 2、表 3。

表 2 细粒式混凝土配合比

Tab. 2 Mix proportions of fine grained concrete

序号	坍落度/mm	砂率	水泥/kg	水/kg	砂/kg	石/kg	减水剂/g
1	40	0.30	420	176	548.58	1 280.02	
2	40	0.35	420	176	640.01	1 188.59	
3	40	0.40	420	176	731.44	1 097.04	0~4 200
4	40	0.45	420	176	822.78	1 005.73	

表 3 粗粒式混凝土配合比

Tab. 3 Mix proportions of coarse grained concrete

序号	坍落度/mm	砂率	水泥/kg	水/kg	砂/kg	石/kg	减水剂/g
1	50	0.30	380	160	565.50	1 319.50	
2	50	0.35	380	160	659.75	1 225.25	
3	50	0.40	380	160	754.00	1 131.00	0~4 200
4	50	0.45	380	160	848.25	1 036.75	

## 2 细粒式混凝土施工阻力与立模特性检测

### 2.1 细粒式混凝土流变性能检测

试验采用水泥砂浆与混凝土涡轮式流变仪,在相同试验环境下分别测量表 2 中等坍落度不等砂率的细粒式混凝土在搅拌过程中的转速与扭矩值,其

结果见表4。

表4 等坍落度不等砂率细粒式混凝土转速与扭矩的关系

Tab.4 Relationship between rotational speed and torque of fine grained concrete with same slump and different sand ratios

转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	扭矩/(N·m)			
	砂率为 0.30时	砂率为 0.35时	砂率为 0.40时	砂率为 0.45时
30	55.03	53.10	43.38	48.94
40	57.58	56.14	45.47	51.85
50	59.72	58.95	47.20	53.08
60	63.21	60.18	50.07	54.21
70	65.49	63.61	53.34	56.27
80	67.48	65.85	55.77	57.93
90	69.59	67.28	57.98	60.79
100	72.62	69.64	60.91	63.38
110	75.01	72.87	63.12	65.42
120	77.24	74.39	65.91	67.48
130	80.92	76.12	67.47	70.24

## 2.2 细粒式混凝土立模特性检测

为更加直接地反映滑模施工中不同砂率混凝土的立模特性,本文采用交通运输部公路科学研究院自行设计的混凝土立模特性试验槽,在相同试验环境下,检测表2中等坍落度的细粒式混凝土在不等砂率情况下的立模特性。试验方法如下:将搅拌好的混凝土倒入立模特性试验槽,用棒振捣对混凝土进行充分振捣;因为滑模摊铺施工具有移动成型的特点<sup>[11-13]</sup>,因此振捣后立即抽出试验槽两侧的钢板,同时用抹子在抽出钢板的两侧各抹2~3下,用于修复抽板对混凝土两侧塌边高度的影响;待混凝土塌边高度稳定后测量混凝土两侧塌边高度,两边各测5处,共10处求平均值。试验结果见表5。

表5 不同砂率的细粒式混凝土的相对塑性黏度、相对屈服应力及塌边高度

Tab.5 Relative plastic viscosities, relative yield stresses and edge collapse heights of fine grained concrete with different sand ratios

序号	砂率	相对塑性黏度	相对屈服应力	塌边高度/mm
1	0.30	25.17	47.49	1.54
2	0.35	22.95	46.92	2.01
3	0.40	25.12	35.42	8.11
4	0.45	20.81	42.40	2.06

## 2.3 细粒式混凝土立模特性及施工阻力分析

根据表4中求得的结果,将等坍落度不等砂率的细粒式混凝土在涡轮式流变仪搅拌过程中的转速与扭矩的采集值进行线性拟合,求得细粒式混凝土在不同砂率下转速与扭矩的线性方程,见图1。

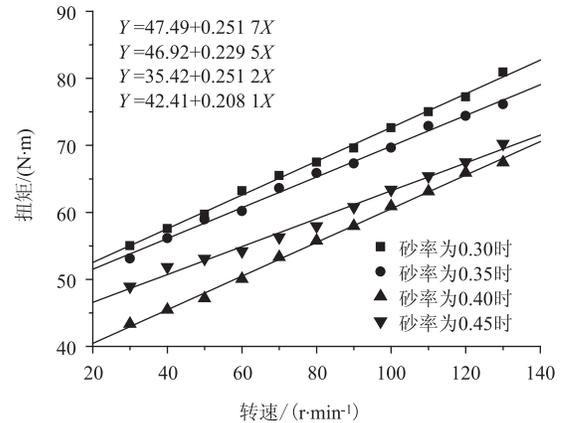


图1 不同砂率的细粒式混凝土转速与扭矩的关系

Fig.1 Relationship between rotational speed and torque of fine grained concrete with different sand ratios

根据上文所述的试验原理,以各线性方程的斜率和截距分别表征混凝土在搅拌过程中的相对塑性黏度和相对屈服应力,具体数值详见表5。

由试验结果可知,等坍落度不等砂率的细粒式混凝土在水泥砂浆与混凝土涡轮式流变仪检测下,随着砂率的增加,相对塑性黏度先减小后增大再减小;相对屈服应力先减小后增大;塌边高度先增大后减小,与相对屈服应力成反比。

塑性黏度是材料内部结构阻碍流动的一种性能参数,与施工阻力相对应,塑性黏度越大施工阻力越大,反之亦然;屈服应力是阻止发生塑性变形的最大应力,与立模特性相对应,屈服应力越大立模特性越好,反之亦然<sup>[14]</sup>。当砂率为0.45时,混凝土的相对屈服应力较大,塑性黏度较低,具有高立模特性和低施工阻力,同时塌边高度实测结果为2.06 mm,相对是可以接受的。

## 3 粗粒式混凝土施工阻力与立模特性检测

### 3.1 粗粒式混凝土流变性能检测

为更加贴近滑模施工,本文对粗粒式混凝土进行流变性试验。采用水泥混凝土双卧轴流变仪,在相同试验环境下,分别测量表3中的等坍落度不等砂率的粗粒式混凝土在搅拌过程中的转速与扭矩值,

测量结果见表 6。

**表 6 等坍落度不等砂率粗粒式混凝土转速与扭矩的关系**  
**Tab. 6 Relationship between rotational speed and torque of coarse grained concrete with same slump and different sand ratios**

转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	扭矩/( $N \cdot m$ )			
	砂率为 0.30 时	砂率为 0.35 时	砂率为 0.40 时	砂率为 0.45 时
30	46.50	43.92	49.50	49.89
40	48.94	44.12	49.98	50.24
50	50.91	45.90	50.72	51.82
60	52.07	46.14	52.02	51.89
70	53.04	47.13	53.45	52.72
80	55.31	49.25	54.60	53.78
90	56.64	50.05	56.43	54.49
100	58.18	52.74	58.37	57.56

### 3.2 粗粒式混凝土立模特性检测

同时在实测立模特性方面, 本文依然采用混凝土立模特性试验槽, 在相同试验环境下, 对表 3 中的粗粒式混凝土进行立模特性检测。试验测得的混凝土稳定后的两侧塌边高度均值见表 7。

**表 7 不同砂率的粗粒式混凝土的相对塑性黏度、相对屈服应力及塌边高度**

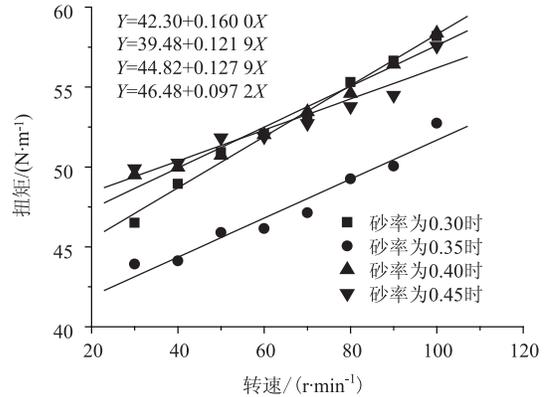
**Tab. 7 Relative plastic viscosities, relative yield stresses and edge collapse heights of coarse grained concrete with different sand ratios**

序号	砂率	相对塑性黏度	相对屈服应力	塌边高度/mm
1	0.30	16.00	42.30	4.67
2	0.35	12.19	39.48	9.83
3	0.40	12.79	44.82	2.17
4	0.45	09.72	46.48	1.17

### 3.3 粗粒式混凝土立模特性及施工阻力分析

将等坍落度不等砂率的粗粒式混凝土在搅拌过程中的转速与扭矩值进行线性拟合, 并得出相应的一元一次方程, 见图 2。以各方程的斜率和截距分别来表征粗粒式混凝土在搅拌过程中的相对塑性黏度和相对屈服应力, 具体数值详见表 7。

由表 7 可以看出, 等坍落度的粗粒式混凝土在使用混凝土双卧轴流变仪的情况下, 随着砂率的增加相对塑性黏度先减小后增大再减小; 相对屈服应



**图 2 不同砂率的粗粒式混凝土转速与扭矩的关系**

**Fig. 2 Relationship between rotational speed and torque of coarse grained concrete with different sand ratios**

力先减小后增大; 塌边高度与相对屈服应力相对应, 先增大后减小。当砂率为 0.45 时能够同时满足高屈服应力和低塑性黏度, 并且实测塌边高度相对最小, 此时, 混凝土具有低施工阻力和高立模特性。

当砂率为 0.30 时, 混凝土中粗、细集料单位面积上的水泥浆较多, 但水泥砂浆总量较小, 粗集料相互嵌挤在一起, 混凝土的塑性黏度和屈服应力较大; 随着砂率的不断增加, 粗、细集料单位面积上的水泥浆减少, 同时粗集料间的水泥砂浆增大, 粗集料间嵌挤力减弱, 混凝土塑性黏度和屈服应力减小; 随着水泥砂浆含量进一步增大, 粗集料逐渐悬浮于水泥砂浆之中, 此时混凝土流动性和黏聚性增大, 塑性黏度增大, 但屈服应力继续减小; 当砂率增大到 0.45 时, 粗、细集料表面的水泥浆持续减少, 混凝土黏聚性减小, 细集料与粗集料及细集料之间的嵌挤力与摩擦力增大, 混凝土塑性黏度降低, 屈服应力增大。因细粒式混凝土与粗粒式混凝土中粗集料的粒径选择不同, 集料的比表面积不同, 相应配合比设计及设备等亦有区别, 具体到同一砂率的相对屈服应力和塑性黏度不同, 但是不同砂率的屈服应力和塑性黏度的变化规律一致。

## 4 结论

本文运用水泥砂浆与混凝土涡轮式流变仪和混凝土双卧轴流变仪, 分别检测等坍落度不等砂率的细粒式混凝土和粗粒式混凝土在搅拌过程中的相对塑性黏度和相对屈服应力, 用以反映混凝土的施工阻力和立模特性。同时用混凝土立模特性试验槽测试振捣拆模后混凝土的塌边高度, 来验证其立模特

性,从而直接印证滑模施工中砂率对混凝土立模特性的影响。主要结论如下:

(1) 滑模施工中,坍落度难以反映混凝土的施工阻力和立模特性。相同坍落度的混凝土可以有不同的施工阻力和立模特性。

(2) 随着等坍落度混凝土中砂率的增加,混凝土在搅拌过程中的塑性黏度先减小后增大再减小;屈服应力先减小后增大。

(3) 随着混凝土砂率的增加,等坍落度混凝土的塌边高度先增大后减小。混凝土的屈服应力与塌边高度相对应,屈服应力越大塌边高度越小,反之亦然。

(4) 当砂率为0.45时,混凝土同时满足低塑性黏度和高屈服应力两个要求,此时混凝土具有较低的施工阻力和良好的立模特性。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 杨志达, 罗纲, 萧红光, 等. 滑模摊铺混凝土的配合比 [J]. 混凝土, 1995 (1): 19-24.  
YANG Zhi-da, LUO Gang, XIAO Hong-guang, et al. Mix Proportion of Slip-form Paving Concrete [J]. Concrete, 1995 (1): 19-24.
- [2] JTJ/T037.1—2000, 公路水泥混凝土路面滑模施工技术规程 [S].  
JTJ/T037.1—2000, Technical Specifications of Slipform Construction on Cement Concrete Pavement for Highway [S].
- [3] 袁野真. 水泥混凝土路面滑模施工平整度控制技术研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2012.  
YUAN Ye-zhen. Study on Cement Concrete Pavement Roughness Construct by Slip-form Paver [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2012.
- [4] 陈义荣. 混凝土工作性测定方法 [J]. 混凝土与水泥制品, 1987 (4): 17-21.  
CHEN Yi-rong. Method of Testing Workability of Concrete [J]. Concrete and Cement Products, 1987 (4): 17-21.
- [5] 孟祥龙. 道路水泥混凝土施工流变性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2009.  
MENG Xiang-long. Study of Construction Rheological Performance of Road Cement Concrete [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [6] 李海军. 砂对混凝土性能的影响 [J]. 粉煤灰, 2013 (5): 35-39.  
LI Hai-jun. Effect of Sand on Concrete Performance [J]. Coal Ash, 2013 (5): 35-39.
- [7] 杨静, 覃维祖, 吕剑峰. 关于高性能混凝土工作性评价方法的研究 [J]. 工业建筑, 1998, 28 (4): 5-9.  
YANG Jing, QIN Wei-zhu, LÜ Jian-feng. A New Method to Evaluate Workability of High Performance Concrete [J]. Industrial Construction, 1998, 28 (4): 5-9.
- [8] HU C, LARRARD F D. The Rheology of Fresh High-Performance Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26 (2): 283-294.
- [9] 冯乃谦. 高性能混凝土 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.  
FENG Nai-qian. High Performance Concrete [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1996.
- [10] TATTERSALL G H. The Rationale of a Two-Point Workability Test [J]. Magazine of Concrete Research, 1973, 25 (84): 169-172.
- [11] 徐定华, 徐敏. 混凝土材料学概论 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.  
XU Ding-hua, XU Min. Introduction to Concrete Material Science [M]. Beijing: Standards Press of Chinese, 2002.
- [12] NASSER K W. The K-slump Tester in Fresh Concrete: Important Properties and their Measurement [C] // Proceedings of a RILEM Seminar. Leeds: Leeds University, 1973.
- [13] 高久好. 水泥砼水平滑模成型力学机理的试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2000.  
GAO Jiu-hao. Study on Mechanical Mechanism of Cement Concrete Horizontal Sliding Molding [D]. Xi'an: Chang'an University, 2000.
- [14] 郑少鹏. 基于流变特性的新拌水泥混凝土质量控制技术研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2012.  
ZHENG Shao-peng. Research of New Cement Concrete Quality Control Technologies Based on Rheological Properties [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2012.