

# 公路工程混凝土超高泵送技术应用

贾宾<sup>1</sup>, 雷周<sup>2</sup>

(1. 中交一航局城市交通工程有限公司; 2. 中交天津港湾工程研究院有限公司)

**摘要:**为解决超高泵送混凝土浇筑过程中泵机损坏、输送管堵塞、爆裂等浇筑故障,从混凝土输送压力理论计算,泵机实际工作效率,混凝土流动性损失原理等方面进行研究,通过测试不同工况下混凝土流动性损失量,总结不同泵送高度下混凝土初始流动性要求,为超高泵送混凝土施工提供了技术参考依据,保障了项目超高泵送混凝土施工顺利进行,可为类似工程提供借鉴。

**关键词:** 超高泵送; 混凝土; 泵损; 输送压力

## 1 超高泵送混凝土性能要求

### 1.1 混凝土压力泌水率

超高泵送混凝土面临着持续自身重力和间歇性泵送压强,混凝土在压强作用下自由水析出,产生泌水现象,泌水量过大会造成混凝土流动性降低、黏聚性变差等,影响混凝土工作状态,压力泌水率是超高泵送混凝土拌合物性能的关键控制指标,规范 DB37/T 5234—2022《超高程泵送混凝土应用技术规程》<sup>[1]</sup>中混凝土压力泌水率要求见表 1。

表 1 不同泵送高度混凝土压力泌水率要求

泵送高度 $H/m$	$100 \leq H < 200$	$200 \leq H < 300$	$300 \leq H < 400$
压力泌水率/%	$\leq 30$	$\leq 25$	$\leq 20$

混凝土压力泌水率的影响因素主要有水胶比、骨料集配、外加剂。低水胶比混凝土黏聚性大,水分不易游离析出。骨料集配优良能减小空隙率,配比一定的情况下,空隙率越小包裹骨料的浆体用量越少,起润滑作用的浆体越丰富,泵送阻力减少,泵送压力降低可减少混凝土压力泌水率。外加剂中增加保水组分,提高酰胺、醚键等亲水基团,和水形成大量的交联结构,吸附大量的水分子,可以锁住浆体中水分,减少泌水。在配合比设计时需严格控制混凝土压力泌水率指标,在满足规范的前提下压力泌水率越小越有利于施工。施工过程中材料发生较大变化时,要重新调整配合比,检测压力泌水率指标,确保指标符合要求。

### 1.2 混凝土坍落度

随着泵送高度的增加,混凝土在输送管内路径延长,泵送压力会越来越大。泵压的作用致使骨料吸水率加大、加快,造成拌合物中游离水进

入骨料内部,拌合物中游离水减少,混凝土坍落度降低。压力作用下混凝土拌合物中微小气泡会发生变形,甚至破裂,气泡的减少造成“滚珠”效应消失,混凝土拌合物也发生坍落度损失。混凝土是一种具有固、液、气三相的混合体,固、液、气由于密度、状态的不同,在压力作用下会表现出不同的变化。混凝土拌合物在泵送压力下各组分运动速度的差异,导致在遇到弯头、接头时造成拌合物结合体分离与其它位置组分结合,多次结合与分离导致混凝土三相混合体改变,流动性降低,坍落度损失。因此,混凝土入泵坍落度要结合施工所需坍落度和泵送损失双重考虑。

采用 C50 混凝土配合比(表 2)进行试验,采用原材料相同、流动性一致的混凝土,泵送至不同高度后进行流动性测试,测试结果见表 3,测试以混凝土坍落度和扩展度结果进行双控。

表 2 C50 混凝土配合比及材料信息

材料名称	厂家	规格	用量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
水	董志水厂	饮用水	148
水泥	平凉海螺	P·O42.5	360
粉煤灰	宁夏宏建	F 类 I 级	48
矿粉	宁夏悦筑	S95	72
砂	平凉旭盛	中砂	712
碎石	平凉祁连山	5~20 mm	1 110
减水剂	广西中添	HPWR-R	5.76

表 3 混凝土流动性损失与泵送高度关系

入泵坍落度/mm	入泵扩展度/mm	泵送高度/m	泵送后坍落度/mm	泵送后扩展度/mm
220	500	80	210	460
220	500	120	195	435
220	500	160	165	370

注:表内所有数据均为 10 次试验的平均值。

通过泵损数据分析,随着泵送高度的增加混凝土流动性损失不呈线性关系,而是呈损失加大的趋势,验证了混凝土泵损主要受压力影响。泵送高度越高,混凝土承受的压力越大,导致混凝土流动性损失呈指数上升趋势。施工时需根据高度的增加考虑输送管长度增加和压强增加导致混凝土流动性损失。

结合泵送损失原理,混凝土气泡破损滚珠效应减弱和骨料压力作用下吸水增加的原理,混凝土内气泡量越大浆体越充裕,初始混凝土流动性越高,混凝土流动性损失越小,根据表2混凝土配合比进行试验,验证不同流动性混凝土在同一泵送高度下流动性损失,试验结果见表4。

表4 混凝土流动性损失与初始流动性关系

入泵坍落度/mm	入泵扩展度/mm	泵送高度/m	泵送后坍落度/mm	泵送后扩展度/mm
230	500	160	210	440
230	540	160	215	485
240	580	160	230	540

由表4可知,初始坍落度越大泵送过程中流动性损失越小,同一坍落度下,扩展度越大,坍落度和扩展度的损失越小,这是因为同一坍落度下扩展度越大混凝土黏聚性越小,泵送过程中浆体与泵管摩擦力减少,摩擦热降低,自由水损失率较小,混凝土坍落度损失减小。通过数据积累总结出常规施工混凝土泵送高度与流动性取值见表5。

表5 不同泵送高度混凝土流动性选择

泵送高度/m	入泵坍落度/mm	入泵扩展度/mm
120	230	500
160	230	540
200	235	580
240	235	610

## 2 混凝土输送设备的选择

### 2.1 混凝土泵最大理论输出压力的确定

混凝土泵最大理论输出压力需根据项目工况进行计算,因机械设备工作时有效效率衰减,确定最大理论输出压力时需根据理论计算值和工作效率系数进行计算。

#### 1) 混凝土泵理论工作压力

混凝土泵的工作压力决定着泵送高度和输送长度,工作压力大于输送时压力损失混凝土才能正常流动。混凝土输送时压力损失 $P^{[2]}$ 主要由3部

分组成,其中 $P_1$ 为混凝土在泵管内流动时到的沿程压力损失,这种压力损失包括混凝土的黏性所产生的阻力、泵机系统压力损失以及混凝土流动中所产生的摩擦阻力。 $P_2$ 为混凝土配管中设置的弯管、锥管、软管所产生的局部压力损失。而 $P_3$ 则为混凝土垂直泵送时因混凝土重力所产生的压力。由此可见混凝土泵送时总的压力损失 $P$ 为:

$$P=P_1+P_2+P_3$$

根据式(1)进行表6工况下的压力计算。

表6 C50泵送混凝土施工泵送压力损失

施工配置	参数
泵送高度/m	200
坍落度/mm	220
管径/mm	125
容重/(kg/m <sup>3</sup> )	2 456
泵送速度/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	40
水平输送长度/m	50
90° R1 000 mm 弯管数量/个	8
锥管数量/个	1
胶管数量/根	1
泵机系统压力损失/MPa	1.2
重力压力损失/MPa	4.81
总压力损失/MPa	13.9

按表6工况进行计算,同一浇筑工况下,不同浇筑速度对应的理论泵送压力见图1。同一理论泵送压力为13.6 MPa时,不同垂直高度对应的浇筑速度曲线见图2。

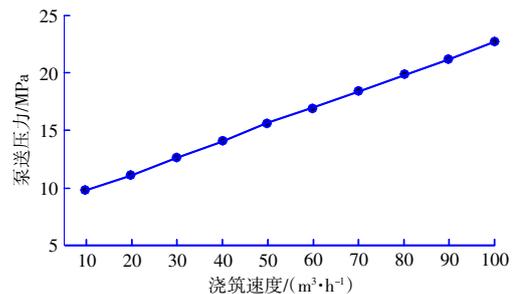


图1 泵送压力与浇筑速度关系曲线

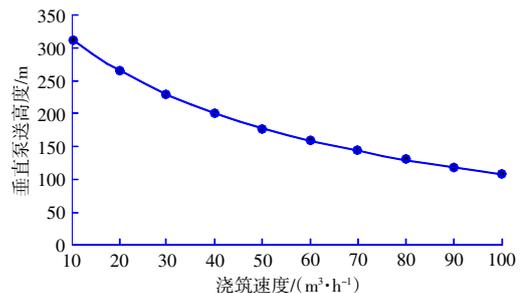


图2 额定压力下不同垂直高度对应浇筑速度曲线

由图1可知,混凝土浇筑速度越快,每米压力损失值越大<sup>[3]</sup>,所需理论最大输出压力越高。

由图2可知垂直高度越高混凝土浇筑速度越慢,随着输送高度的增加,重力压强增加,压力损失越大,浇筑速度降低。

因此,混凝土泵所能泵送的距离须根据混凝土浇筑速度精准计算,若计算的浇筑速度小于施工浇筑速度,选定的设备理论输出压力小,将造成现场施工缓慢,上层与下层浇筑间隔延长,易造成冷缝进而影响施工质量。

## 2) 混凝土泵工作效率

混凝土泵实际工作效率的影响因素很多,泵管接头处漏气、漏浆,泵管稳定性差,输送管同轴性差等都会造成混凝土泵工作效率降低,随着施工总压力损失的增大,工作效率逐渐降低,常规工况下混凝土泵的工作效率在60%~80%之间。零部件磨损、蓄能器压力不足、保养不到位也会导致混凝土泵工作效率持续降低。

因此,混凝土泵最大理论输出压力应综合考虑混凝土泵理论工作压力和工作效率进行确定。

## 2.2 混凝土输送管件的配置

### 1) 混凝土输送管的选择

混凝土泵管强度应与泵送条件相适应,以承受混凝土泵的输送压力,混凝土泵管不应有龟裂、孔洞、凹凸损伤和弯折等缺陷,管道内应无残渣杂物;当最大泵送垂直高度大于150 m时,混凝土泵管的选型应采用高压耐磨泵管,当新旧管配合使用时,应将新管布置在泵送压力较大处,宜设置1套备用泵管。混凝土输送时,为避免超高压作用下管路内部的安全隐患,对管道采取相应固定措施以避免超高压作用下管路的摆动,针对水平管道,通过主体预埋件连接固定。泵管最小内径应根据混凝土骨料最大粒径选择,骨料最大粒径25 mm时,输送管最小内径为125 mm,骨料最大粒径40 mm时,输送管最小内径为150 mm。

垂直高度超过100 m时,设置截止阀,安装在泵机出口1~2节输送管处,防止特殊情况下混凝土回流。垂直向上配管时,随着高度的增加,混凝土势能增加,混凝土存在回流的趋势,因此应在混凝土泵与垂直配管直之间铺设一定长度的水平管道,输送管水平方向与垂直方向长度比值以1:5为宜,以保证有足够的阻力阻止混凝土回流。管路设计时减少弯头数量,管道长度越长,

混凝土在管道中流动的阻力越大,输送速度会降低。过多的弯道会增加混凝土流动的阻力,容易造成堵塞。管道内壁不光滑、有磨损或变形会增加混凝土与管道的摩擦,降低输送效率。

### 2) 混凝土输送管件的安装

输送管接头保证密封良好,连接处漏浆将影响混凝土和易性,在压力作用下,水泥浆体会排出,混凝土浆体减少,造成配合比改变,流动性减小,影响泵送性能。浇筑过程中检查输送管道侧壁,若有浆体渗透应及时拧紧。

## 3 施工控制要点

### 3.1 设备管件的检查

定期检查更换输送管头部胶皮软管,随着使用磨损,胶皮管内钢丝有外露情况,多跟钢丝外露后会交叉结合,混凝土经过时受钢丝束缚会堵塞,泵机压力增大后导致输送管压力加大,严重时会造成橡胶管爆裂,影响施工安全。

### 3.2 泵送过程注意事项

#### 1) 混凝土均匀卸料

卸料前要将罐车内混凝土快速反转,保证混凝土搅拌均匀,超高泵送混凝土具有大流动性,浆体和骨料易分离,在运输及等待过程中石子容易沉积,快速搅拌能保证混凝土的匀质性,提高泵送性能。混凝土罐车卸料至1/3时,罐内混凝土需再次搅拌均匀,罐车内部为螺旋叶片构造,混凝土会沿着螺旋叶片的螺旋方向运动,出料时,转动搅拌筒,混凝土会沿着螺旋叶片向外卸出。螺旋叶片有一定高度,正常出料过程中,浆体处于混凝土上部,率先流出,因此卸料至此位置时需将混凝土再次搅拌均匀。浇筑过程中除混凝土试验指标测试外还要观察输送状态和泵压指标,从宏观外在指标验证混凝土状态。同一浇筑工况下,泵机输出压力的增大和减小均能反映混凝土流动性的变化,出料口混凝土饱满度的变化也可以反映其性能的波动,浇筑过程中做好多种信息综合判断以保障顺利施工。

#### 2) 浇筑间歇控制措施

浇筑途中有间歇情况时,间歇前保证混凝土泵料斗内混凝土量少于总容量的1/3,存料越多,搅拌过程中下沉石子越多,再次启动时泵体内石子过多易造成堵泵。间歇时间过长时,每5 min进行2个行程反泵、再进行2个行程正泵。因超高泵送混凝土自身重力压强较大,在压强作用下

气体和密度小的自由水上移,局部混凝土黏聚性、密实性和容重提高,与管壁的摩擦增大,再次泵送时容易在弯头处堵管,所以需进行反泵和正泵,使混凝土在管壁内移动,避免混凝土与管壁粘连。入泵前和出管后均需测试拌合物性能,入泵前检验混凝土泵送性能,出管后检验经泵损后混凝土是否仍满足施工要求,避免混凝土堵管或工作性不佳的情况发生。

### 3) 布料器操作要点

布料器在转换角度时应停止泵送,严禁浇筑过程中大角度转变出料方向。尤其在出料口与水平输送管呈 $90^\circ$ 变为 $180^\circ$ 时,要缓慢改变出料方向,否则混凝土受力方向的改变会引起输送压力突然增加导致泵机损坏。

## 4 结构养护

超高泵送混凝土均为大流动性混凝土,混凝土浆体量大,若养护不及时水分极易流失,导致混凝土强度大大降低。顶面混凝土凿毛后立即蓄水养护,其它部位混凝土先带模养护,达到一定强度拆除侧模后2 h内完成养护操作,且无漏喷漏涂现象,保证混凝土能持续保湿。

超高泵送混凝土多采用爬模工艺施工,操作平台随着施工节段向上移动。快节奏施工时,节

段浇筑后5 d需爬模进行下一节段施工,普通硅酸盐水泥要求养护龄期不少于7 d,且竖向结构混凝土养护时间宜适当延长,若采用单一洒水养护不能满足养护龄期的要求时可以采用先洒水养护后喷涂养护剂组合的方式和单一使用养护剂养护2种方式。冬期施工日均气温低于 $5^\circ\text{C}$ 时不得采用洒水养护方式。

## 5 结语

超高泵送混凝土因其复杂的浇筑环境,对混凝土、输送设备及施工技术要求极为严格,本文对各关键控制点进行论述,为超高泵送混凝土施工提供了科学的参考依据。本文仅对垂直工况下混凝土浇筑进行了说明,未系统全面地研究不同水平输送工况下的混凝土浇筑,在后续应增加不同水平输送距离工况下超高泵送混凝土浇筑施工技术的研究,为各种工况下超高泵送混凝土施工提供参考。

### 参考文献:

- [1] DB37/T 5234—2022,超高层泵送混凝土应用技术规程[S].
- [2] 郑捷. 混凝土泵送压力的几种计算方法[J]. 商品混凝土,2009(9):43-44.
- [3] 吴德龙,郑捷,陈尧亮,等. 高度492 m——上海环球金融中心超高泵送高强混凝土技术研究[J]. 建筑施工,2008(4):237-241.