

浅谈超高混凝土泵送计算

徐维祥 雷昊然 刘秋阳
中建三局集团有限公司 北京 100097

摘要：本文以沈阳中心大厦项目T1塔楼为实例，构建超高层混凝土泵送计算模型，系统分析了泵送压力计算、泵送设备选型及泵管参数验算等关键技术。通过理论分析与设备能力匹配计算，系统阐述了超高混凝土泵送计算的原理和方法，验证超高压泵送系统的工程适用性，为类似超高层建筑混凝土泵送工程的计算提供参考。

关键词：超高层建筑；混凝土泵送；泵管参数；压力验算；设备选型

引言

我国工程建设领域正处于高速发展阶段，高层及超高层建筑呈现出体量规模化、结构复杂化的发展趋势，这对混凝土泵送工艺提出了新的技术挑战。在超高层建筑中，混凝土的泵送高度往往超过200米，泵送系统将面临设备功率适配、管路优化设计、混凝土工作性能调控等系列技术难题。在此背景下，压力系统验算、管道参数校核及设备配置优化构成保障泵送施工质量的核心技术体系。本文以沈阳中心大厦为研究对象，系统解析超高层混凝土泵送计算的关键技术要点。

1 工程概况

1.1 总体概况

沈阳中心大厦项目位于沈阳市沈河区，T1塔楼建筑高度388米，项目用地面积8170平米，为地上69层+地下

5层复合结构，地上建筑面积196390平米，地下建筑面积85371平米。结构采用多重抗侧力体系，以核心筒为抗震主体，外框巨柱协同受力，配合巨型斜撑与带状桁架构成三维传力体系。

1.2 混凝土工程概况

本工程屋面结构标高为338.8米，核心筒采用C60高强混凝土，外框巨型柱混凝土标号C50-C60，其中C50与C60混凝土最大泵送高程均达338.8米（按340米设计值核算）。施工难点集中于核心筒剪力墙、组合楼板及外框巨柱等关键部位，具有混凝土标号高、泵送高程大、结构体系复杂等显著特点。

针对核心筒与外框巨柱结构体系，混凝土浇筑采用车载泵+液压布料机的浇筑方式。

表1 沈阳中心大厦项目T1塔楼混凝土强度等级分布

起止楼层	核心筒剪力墙结构	水平梁板结构	标高/m
1-69	C60	C35	0-338.8
起止楼层	外框巨柱/框架柱	外框架组合楼板	标高/m
1-18	C70	C35	0-88.9
19-51	C60	C35	88.9-255.8
52-64	C50	C35	255.8-317.3
65-塔冠	C50	/	317.3-388.0

2 混凝土泵送设备选型

泵送系统的设备选型需综合考量高程参数、输送量级及混凝土配比参数等关键指标。具体而言，泵机出口压力需根据建筑高程进行分级匹配，输送管径规格需适配预期输送量级，混凝土工作性能指标将直接影响设备损耗率及施工连续性。

本工程混凝土泵采用开式回路液压系统，拟选用HBT9050CH-5M高压输送泵，最大出口压力为50MPa，为了提高整个泵送系统在施工时的安全系数，同时降低能耗，在出厂时将出口压力预调为45MPa。泵管拟选用

Φ150×12mm（内径×壁厚）规格的超高压耐磨管道进行混凝土输送。

3 输送泵压力验算

输送泵压力计算的准确性是确保混凝土能够顺利泵送至超高层目标高度的关键环节。根据《混凝土泵送施工技术规程》（JGJ/T10-2011）中建议的计算方法，水平输送管段内的混凝土流动的沿程阻力可通过以下公式进行量化计算：

$$P_1 = \Delta P_f \cdot l = \frac{4}{d} \left[k_1 + k_2 \times \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) V_2 \right] \alpha_2 \cdot l$$

式中:

ΔP_l —单位长度的沿程压力损失 (Mpa);

l —管道总长度, 包含垂直管道长度、水平管道长度、锥形管换算长度、弯管换算长度等。

k_1 —粘着系数, 按 $= (300-S)$ Pa, S 为混凝土坍落度, 根据本工程设计要求取240mm, 则:

$$k_1 = 300 - S = 60 \text{ pa}$$

d —混凝土输送管直径;

k_2 —速度系数, 取 $(400-S)$ Pa, 根据本工程设计要求取240mm, 则:

$$k_2 = 400 - S = 160 \text{ pa}$$

$\frac{t_2}{t_1}$ —混凝土泵分配阀切换时间与活塞推压混凝土时间之比, 本工程取0.3;

V_2 —混凝土在管道内的流速, 当排量40m³/h时, 流速约0.629m/s;

α_2 —径向压力与轴向压力之比, 其值取0.95;

本工程选择HBT9050CH-5M型固定泵, 其最大输送压力为45Mpa。其计算式中相关取值如下:

表2 沿程阻力压力计算取值表

序号	参数	数值
1	d	0.15
2	l	340m (竖向) × 5+84m (水平) + 9×8m (弯头) = 1856m
3	k_1	60Pa
4	k_2	160Pa
5	$\frac{t_2}{t_1}$	0.3
6	V_2	0.629
7	α_2	0.95

l 为管道总长度, 包含垂直管道长度、水平管道长度、锥形管换算长度、弯管换算长度等, 在计算时统一换算为水平长度, 其按下表中的规则进行换算计算。

表3 混凝土输送管水平换算长度表

管类别或布置状态	换算单位	管规格		水平换算长度（m）
向上垂直管	每米	管径 （mm）	100	3
			125	4
			150	5
倾斜向上管 （输送管倾斜角为 α ）	每米	管径 （mm）	100	$\cos\alpha+3\sin\alpha$
			125	$\cos\alpha+4\sin\alpha$
			150	$\cos\alpha+5\sin\alpha$
垂直向下及倾斜向下管	每米	—		1
锥形管	每根	锥径变化 （mm）	175→150	4
			150→125	8
			125→100	16
弯管 （弯头张角为 β , $\beta \leq 90^\circ$ ）	每只	弯曲半径 （mm）	500	$12\beta / 90$
			1000	$9\beta / 90$
胶管	每根	长3m~5m		20

本工程混凝土最大高度达到338.8m, 最大浇筑高度取340m, 即向上垂直管按340m计算, 泵管管径为150mm; 根据现场泵管平面布置图, 水平管道长度为

$$l = 340 \text{ (竖向)} \times 5\text{m} + 84\text{m (水平)} + 9 \times 90/90 \times 8\text{m (弯头)} = 1856\text{m}$$

根据以上数据取值, 可得沿程阻力如下:

$$P_1 = \frac{4}{0.15} [60 + 160 \times (1 + 0.3) \times 0.629] \times 0.95 \times 1856 / 1000000 = 8.97 \text{ Mpa}$$

混凝土泵送系统附件的估算压力损失根据下表计算:

表4 混凝土泵送系统附件的估算压力损失

序号	损失部位	数量	单个压力损失	损失
1	管路截止阀	1	0.1Mpa	0.1Mpa
2	分配阀	0	0.2Mpa	0
3	泵送损耗	1	1.0Mpa	1.0Mpa
总压力损失				1.1Mpa

84m; 另外泵管共设置8个弯管, 弯头张角为90°, 弯管的弯曲半径为1000mm。根据本工程泵管的实际布设情况, 混凝土输送管换算的水平总长度为:

经计算, 本工程混凝土泵送系统附件的估算总压力损失 P_f 为1.1Mpa。

考虑富余系数 (取1.5), 则最大需求泵送压力为:

$$P = P_1 + P_f = 8.97 \times 1.5 + 1.1 \text{ Mpa} = 14.56 \text{ Mpa} < 45 \text{ Mpa}$$

根据以上计算结果可知, 本工程混凝土泵选用HBT9050CH-5M泵, 其最大泵送压力能达45Mpa, 因此能够满足超高泵送混凝土施工要求。

4 泵管参数验算

泵管参数的合理选择与校核是确保超高混凝土泵送施工安全与质量的重要环节。泵管在承受高压混凝土泵送过程中,需要具备足够的强度和稳定性,以防止爆管、漏浆等问题的发生。

混凝土输送管所承受的最大压力集中于水平管道,即A150×12mm管道,故主要计算校核这一部分管道。

(1) 根据《压力管道规范 工业管道 第3部分:设计和计算》(GB/T 20801.3-2020)中提出的计算方法,混凝土泵管直管的最小计算厚度 t_0 采用下式计算:

$$t_0 = \frac{P_{max} D}{2 \times (S \Phi W + P_{max} Y)}$$

式中:

P_{max} —最大设计压力,单位为兆帕(MPa);

D —混凝土泵管的外径,取管道外径的名义值,或由实测所得,单位为毫米(mm);

S —设计温度下管道组成件金属材料的许用应力,单位为兆帕(MPa)。本工程选用的混凝土泵管管壁的材质为L555/X80钢管,查表可知其许用应力为625MPa;

Φ —焊件的纵向焊接接头系数或铸件质量系数,查表可知,电阻焊焊接直缝或螺旋缝时纵向焊接接头系数 Φ 取0.85;

W —焊接接头高温强度降低系数,查表取0.95;

Y —计算系数,由于 $t=12 < \frac{D}{6} = \frac{150+12 \times 2}{6} = 29$,查表得 $Y=0.7$;

带入上式可得:

$$t_0 = \frac{45 \times (150 + 24)}{2 \times (200 \times 0.85 \times 0.95 + 45 \times 0.7)} = 7.30 \text{ mm}$$

(2) 输送管壁厚选择:

为确保混凝土输送管在泵送过程中的安全性,保证其稳定可靠,因此在设计管道时,取安全系数 $k=1.6$ (1.5~3.0),故输送管理论最终壁厚为:

$$t = k \cdot t_0 = 1.8 \times 7.30 = 11.68 \text{ mm}$$

经上述计算,并结合供应商选择,确定选用壁厚12mm的高压耐磨输送管可满足要求。

(3) 管道支架强度

在泵送系统启动阶段(0~0.15秒),泵压呈现急速上升至峰值状态的特征。此间压力需同步克服管壁摩擦效应及混凝土加速产生的惯性阻力。根据流体动力学原理,可建立该瞬态过程中立管与水平管段的压力梯度比值计算如下:

$$K = \frac{(g+a)}{a} = \frac{9.81+3.66}{3.66} = 3.68$$

实验数据显示,C60混凝土在水平管段以35m³/h流速输送时,测得压力损失值为0.017MPa。基于流体力学连续方程,可计算垂直管段压力损失如下:

$$\Delta P_h = K \Delta P_v = 3.68 \times 0.017 = 0.063 \text{ MPa}$$

本项目泵送高度为340m,泵送压力 P 需要满足以下压力:

$$P_{340} = \beta H \Delta P_h = 0.8 \times 340 \times 0.063 = 17.14 \text{ MPa}$$

β —修正系数,取0.8;

H —泵送高度,取340m;

在瞬态加速阶段(0~0.15s),管道轴力主要由混凝土加速惯性力构成。按混凝土加速载荷模型,推导估算最大轴向压力理论值为:

$$P_{\text{轴max}} = \beta_1 \rho l (g + a)$$

计算得(β_1 为经验系数,取1.4):

$$P_{\text{轴max}} = 1.4 \times 0.0024 \times 340 \times (9.81 + 3.66) = 15.39 \text{ MPa}$$

根据管道输送力学平衡分析,在混凝土于管道中运输时,砼介质同时承受轴向推进力与径向约束效应,其中轴向应力约为径向约束应力的10倍量级。基于此力学关系,运用摩擦学理论可将管壁摩擦损失量表达为径向应力与摩擦系数的乘积函数。据此建立混凝土加速阶段(0-0.15s)管道沿程压力损失:

$$P_{\text{轴损}} = 0.05 \mu \pi d P_{\text{轴max}}$$

计算得:

$$P_{\text{轴损}} = 0.05 \times 0.1 \times 3.14 \times 0.150 \times 15.39 \text{ MPa} = 0.0362 \text{ MPa} / m$$

泵管安装支座的临界承载工况(最不利位置)出现在3m泵管采用中央单点支撑配置时,根据结构力学分析,该布设方式将导致混凝土输送管道承受最大荷载效应。需对此工况下3米长混凝土管道所受总力:

$$F_{\text{max}} = P_{\text{轴损}} \cdot l$$

计算得:

$$F_{\text{max}} = 0.0362 \times 3 = 108.6 \text{ kN}$$

工字钢抗弯强度验算:

混凝土泵管的连接通常采用20#工字钢,其计算受力矩为400mm。虑到动载荷系数 K_1 取1.2,计算工字钢的弯矩可以按下式计算:

$$M_{\text{拉, max}} = K_1 \times F_{\text{max}} \times 0.4 = 1.2 \times 108.6 \times 0.4 = 52128 \text{ N} \cdot \text{M}$$

最大应力 $\sigma_{\text{拉, max}}$ 可按经验公式计算:

$$\sigma_{\text{拉, max}} = \frac{M}{W} = \frac{52128}{1333} = 39.11 \text{ MPa} < 216 \text{ MPa}$$

根据以上计算结果可知,A150×12mm管道在当前的配置条件下,可以满足实际的泵送需求。

5 结语

超高混凝土泵送施工是一个复杂的系统工程,涉及

设备选型、管道布置、混凝土配合比设计和施工管理等多个关键方面。在这个过程中，精确计算泵送压力和合理验证泵管参数对于确保施工安全和质量至关重要。泵送压力计算不仅要考虑沿程阻力和局部阻力，还要考虑施工环境、混凝土性能和设备容量等综合因素。同时，验证泵管参数直接影响管道的稳定性和耐久性，确保高压混凝土运输过程中不会发生爆管或漏浆等问题。通过科学的计算方法和严格的施工管理，可以优化泵系统配置，最大限度地减少施工过程中的突发问题，降低施工风险；合理的设备选择和管道布局可以显著提高混凝土输送效率，确保工程质量和施工安全。

参考文献

- [1]牛章红.超高层建筑混凝土泵送施工技术研究[J].四川建材,2024,50(12):119-121
- [2]李文勤.高层住宅建筑混凝土浇筑施工技术研究[J].工程与建设,2023,37(1):299-302
- [3]袁科军.超高层混凝土泵送施工技术[J].城市建筑空间,2022,29(S1):289-290
- [4]中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土泵送施工技术规范:JGJ/T10-2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011
- [5]张富卷.超高层建筑混凝土泵送施工技术[J].山西建筑,2019.45(21):94-95