

# 大型桥梁墩柱模板侧压力计算与试验研究

陈明宇, 苏宁

(中交天津港湾工程设计院有限公司)

**摘要:**当前国内大型桥梁墩柱钢模板存在的设计和施工问题在一定程度上是由于现行规范中模板侧压力计算公式繁多、无法统一造成的。为了对现行各规范中的模板侧压力计算公式进行统一,文章首先对现行规范中的各公式进行了汇总整理与分析,随后依托长春环线高速公路项目开展了墩柱混凝土模板侧压力试验,根据试验结果并结合规范公式,归纳出了计算新浇混凝土对模板侧压力的分段包络公式,进一步明确了大坍落度混凝土模板侧压力的计算依据,有助于解决当前大型桥梁墩柱钢模板设计和施工中存在的问题。

**关键词:**模板侧压力;大坍落度混凝土;桥梁墩柱;侧模板设计;分段包络曲线

## 0 引言

大型桥梁墩柱混凝土对模板的侧压力是影响墩柱模板设计的关键因素,但由于大坍落度混凝土凝固过程中复杂的弹塑性变化,现有各规范对大坍落度混凝土模板侧压力的计算公式未有统一的规定,导致侧压力设计依据模糊。通过调研发现,设计依据的模糊导致模板设计人员对模板侧压力取值困难。在模板设计时,若要同时满足各个规范则过于繁琐和不便,若只依据个别规范计算则担忧模板承载力不足从而导致工程风险,故大幅提高模板材料用量。而提高材料用量又导致现场施工难度提升,且施工人员知道模板的设计冗余较大,故出现野蛮施工、偷工减料等现象。由此可知,设计依据的不清晰导致的后果是广泛的,现阶段有必要对大坍落度混凝土模板侧压力的计算公式进行统一。

为改善此现状,本文拟对现行规范中的各公式进行汇总整理与分析,依托长春环线高速公路项目,对大坍落度混凝土模板侧压力的取值进行试验与研究,最终获得较为统一的墩柱混凝土模板侧压力计算公式。

## 1 工程概述

长春环线高速公路项目是吉林省首条采用PPP模式建设的高速公路,路线全长31.65 km,该项目某跨河特大桥梁工程,下部结构采用钻孔灌注桩基础、圆形墩柱、肋板式桥台,上部结构采用30 m预应力混凝土简支转连续箱梁,其中墩柱采用大坍落度高强混凝土。在大桥桥梁墩柱模

板的设计中,面临着准确计算墩柱浇筑过程中混凝土对模板的侧压力的挑战。

## 2 国内现行规范中模板侧压力计算

目前,国内多部现行规范均提出了混凝土浇筑过程中模板侧压力的计算公式,但这些公式的适用范围和条件各不相同,计算出的结果也存在差异。为了进一步探究这些公式对于计算大型桥梁墩柱大坍落度混凝土模板侧压力的适用性和准确性,并立足于路桥工程实际对相关计算公式进行改进,本文首先对国内现行各规范中的公式进行了汇总、整理、比较、分析。

1) JGJ 162—2008《建筑施工模板安全技术规范》、JTG/T 3650—2020《公路桥涵施工技术规范》、DL/T 5110—2013《水电水利工程模板施工规范》对混凝土侧压力的计算规定基本相同,即浇筑速度在6 m/h以下时,新浇混凝土对模板侧压力标准值取式(1)、式(2)中的较小值:

$$F=0.22\gamma_c t_0 \beta_1 \beta_2 v^{1/2} \quad (1)$$

$$F=\gamma_c H \quad (2)$$

式中: $F$ 为模板侧压力计算值, kN/m<sup>2</sup>;  $\gamma_c$ 为混凝土重力密度, kN/m<sup>3</sup>;  $t_0$ 为新浇混凝土初凝时间, h;  $\beta_1$ 为外加剂影响系数,不掺外加剂时取1.0,掺缓凝剂时取1.2;  $\beta_2$ 为混凝土坍落度修正系数,根据《水电水利工程模板施工规范》,当坍落度小于30 mm取0.85, 30~90 mm时取1.0, 大于90 mm时取1.15, 而根据《建筑施工模板安全技术规范》和《公路桥涵施工技术规范》,当坍落度小于30 mm取0.85, 50~90 mm时取1.0, 110~150 mm时取

1.15;  $v$  为混凝土浇筑速度, m/h;  $H$  为模板侧压力计算位置至新浇混凝土顶面的总高度。

2) GB 50666—2011《混凝土结构工程施工规范》规定, 浇筑速度不大于 10 m/h、混凝土坍落度不大于 180 mm 时, 取式(3)、式(4)的较小值:

$$F=0.28\gamma_c t_0 \beta v^{1/2} \quad (3)$$

$$F=\gamma_c H \quad (4)$$

式中:  $\beta$  为混凝土坍落度修正系数, 当坍落度 50~90 mm 时取 0.85, 90~130 mm 时取 0.9, 130~180 mm 时取 1.0。当  $v>10$  m/h, 或坍落度大于 180 mm 时, 按式(4)计算。

3) 根据李增银<sup>[1]</sup>对《混凝土结构工程施工规范》的修正公式, 浇筑速度不大于 10 m/h、混凝土坍落度不大于 240 mm 时, 取式(5)、式(6)的较小值:

$$F=0.23\gamma_c t_0 \beta v^{1/4} \quad (5)$$

$$F=\gamma_c H \quad (6)$$

式中:  $\beta$  为混凝土坍落度修正系数, 当坍落度 50~90 mm 取 1.1, 90~180 mm 时取 1.25, 180~240 mm 时取 1.4。

4) 根据冶金研究院建议的计算方法<sup>[2]</sup>, 采用泵送工艺浇筑混凝土时, 对钢模板产生的最大侧压力为:

$$F=0.32\gamma T v^{1/4} \quad (7)$$

式中:  $\gamma$  为混凝土重力密度, kN/m<sup>3</sup>;  $T$  为新浇混凝土初凝时间, h。

5) JTS 202—2011《水运工程混凝土施工规范》, 采用插入式振捣器, 混凝土的浇筑速度在 6 m/h 以下时, 混凝土对模板的最大侧压力可按式(8)计算:

$$F_{\max}=8K_s+24K_t v^{1/2} \quad (8)$$

式中:  $F_{\max}$  为模板侧压力计算值, kN/m<sup>2</sup>;  $K_s$  为外加剂影响修正系数, 不掺外加剂时取 1.0, 掺缓凝作用外加剂时取 2.0;  $K_t$  为温度校正系数。

6)《水电水利工程模板施工规范》附录 A.1.6 给出了大体积混凝土模板侧压力的算法, 但由于按大体积混凝土计算侧压力安全性偏低, 故本文暂不考虑采用大体积混凝土理论进行计算。

通过对以上各规范公式对比分析, 可以发现混凝土浇筑速度是影响模板侧压力的关键因素之一, 故本文以混凝土浇筑速度作为自变量, 探究浇筑速度和侧压力之间的关系。本试验选用的试验参数为: 墩柱直径 1.6 m, 浇筑高度 11 m, 混

凝土强度等级 C40, 坍落度约 180 mm, 容重 24 kN/m<sup>3</sup>, 气温 15 ℃, 混凝土温度约 20 ℃, 初凝时间约 3 h, 添加缓凝剂。将各试验参数代入上述各规范的计算公式, 以浇筑速度为  $x$  轴、模板侧压力为  $y$  轴绘制图像, 如图 1 所示。

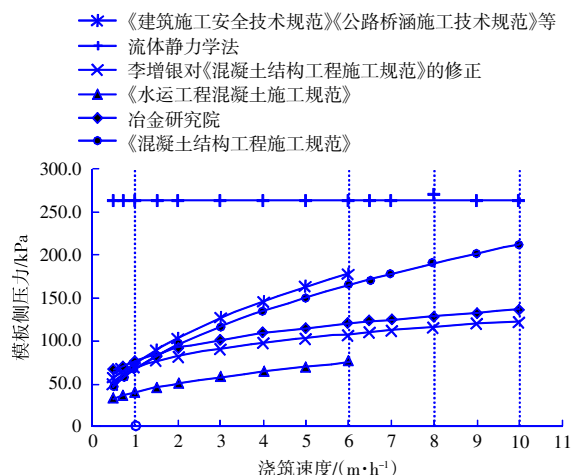


图 1 各规范计算模板侧压力结果曲线图

### 3 墩柱模板侧压力试验

#### 3.1 试验概述

本试验依托长春环线高速公路项目开展, 目的是通过现场测试, 获取现浇桥梁墩柱混凝土模板侧压力值, 同时研究侧压力的增长变化规律。为分析浇筑速度对侧压力的影响, 试验共设置 A、B 两组墩柱, 将 A 组墩柱的浇筑速度控制在 7 m/h, B 组墩柱的浇筑速度控制在 6.5 m/h。

#### 3.2 试验程序

##### 1) 测试点布置

分别在每组墩柱底部(模板最低处)以上 0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m 位置处布置传感器, 传感器均采用 BGK4810 型土压力计, 将传感器固定在模板内壁, 测试线缆通过模板上开孔引出至模板外侧并通过 BGK-Micro-40 自动化数据采集仪进行数据采集。

##### 2) 进行试验并采集数据

浇筑过程中, 试验人员需完整、准确地记录 2 组墩柱的过程数据, 包括开始浇筑时间、混凝土坍落度、初凝时间、浇筑速度、浇筑高度、振捣方式、温度、湿度等基本信息。侧压力数据经数据采集仪采集后由基康 BGKLogger 自动化管理软件进行记录和分析。

### 4 试验结果分析

对 A、B 组墩柱的试验数据进行收集、整理、

分析后,以模板侧压力为纵轴、时间为横轴,2组墩柱模板侧压力随时间变化的曲线见图2。

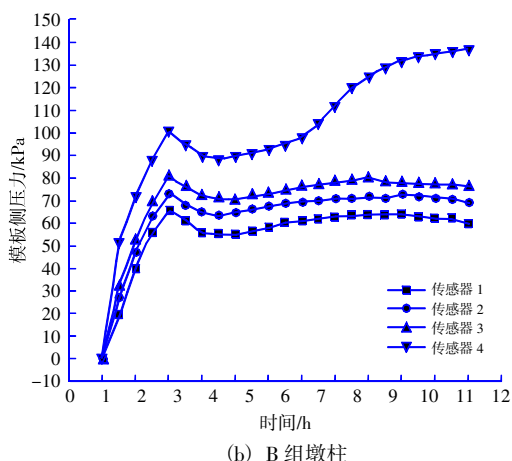
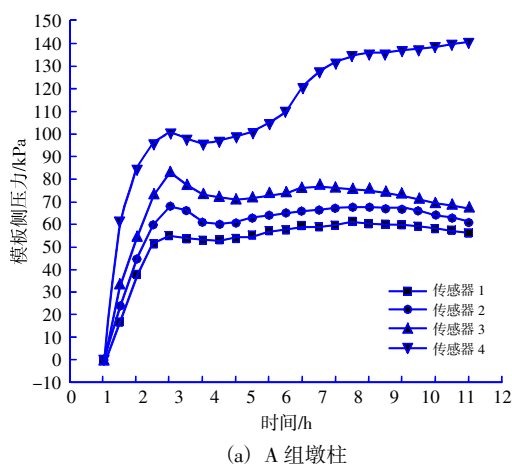


图2 2组墩柱模板侧压力随时间变化曲线图

在A、B两组墩柱的侧压力变化曲线图中,传感器4的数据均出现异常,经分析认为是传感器故障所致,故本文剔除传感器4的数据,仅对传感器1、2、3的数据进行分析。传感器1、2、3的数值存在微小偏差,经分析是传感器摆放标高的差异导致。

#### 4.1 模板侧压力变化趋势

在图2模板侧压力随时间变化的曲线图中,每条模板侧压力曲线都是先呈阶梯状上升,出现一个极大值,随后进入一个短暂的下降阶段,触底后再次上升,后趋于平稳,最后进入下降阶段。通过查阅相关资料,结合工程实际,对模板侧压力变化规律的成因分析如下:

1) 模板侧压力初始阶段阶梯状上升主要是因为随着混凝土浇筑的进行,墩柱浇筑高度逐渐增加,模板侧压力也随之不断增加,当浇筑完最后一斗混凝土时,模板侧压力达到最大值;

2) 模板侧压力在达到第1个极大值之后短暂地下降,主要是因为当混凝土初凝开始后,其状态逐渐由液态转变为半固态,在此过程中混凝土对模板产生的侧压力逐渐转变为混凝土内部应力,混凝土开始出现自持能力,表现为模板侧压力值的减小;

3) 模板侧压力在下降之后再次上升,是因为经过一段时间初凝后,在混凝土逐渐由半固态变为固态的过程中,混凝土的强度和弹性模量都在不断增长,同时水化热反应使得混凝土内部温度升高,造成混凝土膨胀,但侧模板的存在使混凝土膨胀受限,从而产生了模板侧压力增量,进而导致模板侧压力再度增加<sup>[3]</sup>;

4) 在终凝阶段,水化热反应接近完毕,随着混凝土内部具有黏性流动性质的水泥凝胶体不断产生黏性流动,混凝土失去塑性并产生收缩徐变,在此过程中,混凝土对模板的侧压力逐渐卸载至接近于0。在本阶段曲线中,由于传感器监测时间的限制,并未看到侧压力降至0,但能够观察到侧压力已产生下降的趋势。

通过上述4个阶段可归纳出模板侧压力的典型变化曲线,如图3所示。

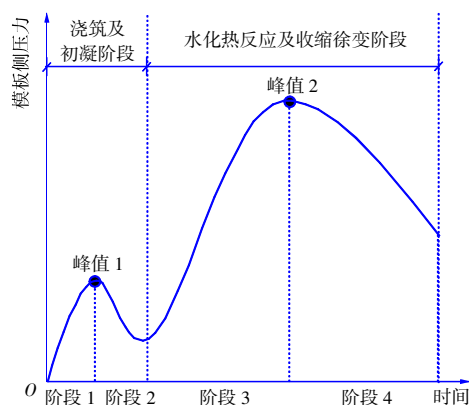


图3 墩柱模板侧压力典型变化曲线

#### 4.2 模板侧压力试验值与规范理论值对比

提取图2中的每条侧压力变化曲线在全过程中出现的侧压力最大值,剔除异常数据后,将有效数据绘制在图1的侧压力结果曲线图上,结果见图4。由图4可知,部分试验值已超出《水运工程混凝土施工规范》计算出的理论值,且接近李增银对《混凝土结构工程施工规范》的修正值;同时,试验值全部处在《建筑施工模板安全技术规范》《公路桥涵施工技术规范》《混凝土结构工程施工规范》及冶金研究院4种算法值的包络范围内。

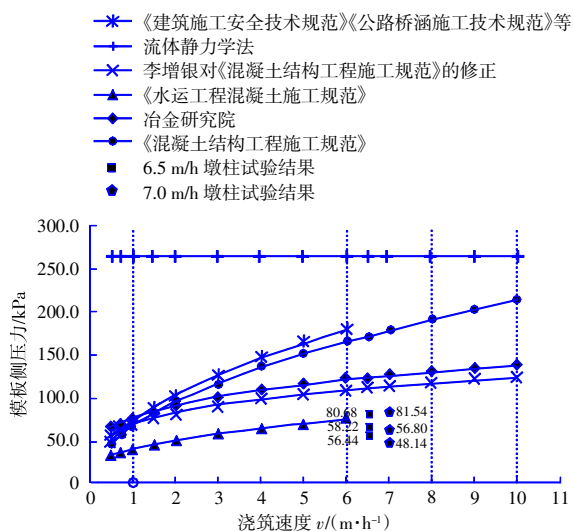


图4 模板侧压力试验值与规范计算值对比图

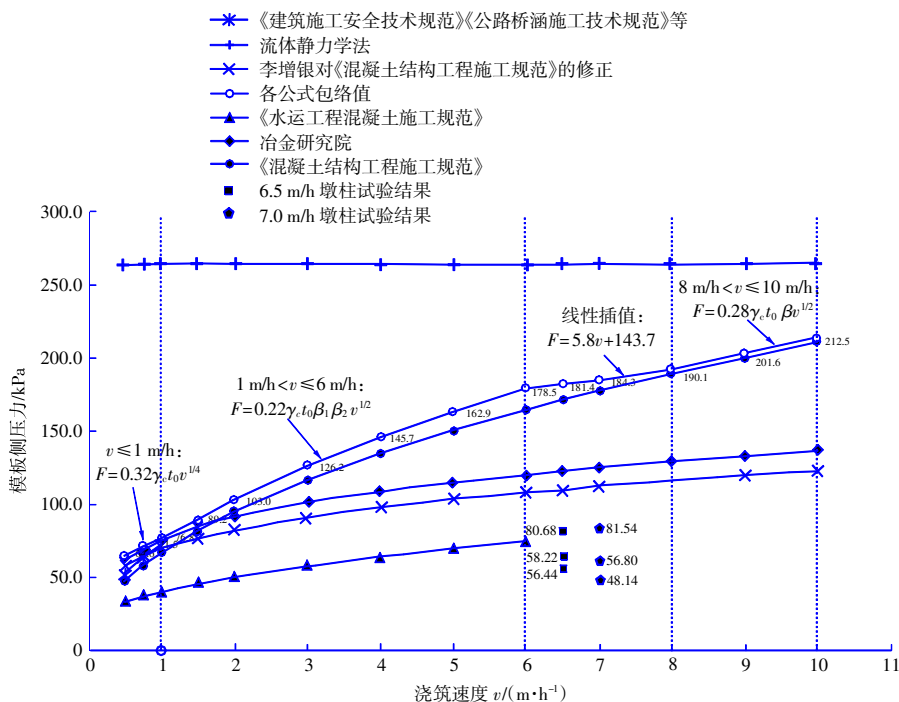


图5 模板侧压力包络公式曲线图

2) 根据孙喜峰<sup>[5]</sup>的研究,混凝土浇筑速度为 2.5 m/h 时,按《建筑施工模板安全技术规范》的计算值与试验值较为吻合;根据李增银<sup>[1]</sup>的研究,浇筑速度为 0.8~6.38 m/h 时,按《混凝土结构工程施工规范》的计算值与试验值较为吻合;根据杨伟等<sup>[9]</sup>的研究,浇筑速度  $< 6 m/h$  时,宜按《建筑施工模板安全技术规范》计算模板侧压力。结合本文试验数据,故浇筑速度为  $1 m/h < v \leq 6 m/h$  时,按《建筑施工模板安全技术规范》和《混凝土结构工程施工规范》包络取大值;浇筑速度为  $6 m/h < v \leq 8 m/h$

结果表明,使用个别规范计算模板侧压力是存在一定风险的,为安全起见,应采用各规范的包络曲线进行侧压力计算。

#### 4.3 模板侧压力包络曲线的构建

模板侧压力包络曲线应为以浇筑速度为自变量的分段函数,对其每段的表达式进行推导。模板侧压力包络公式曲线如图 5 所示。

1) 根据李核等<sup>[10]</sup>的研究,混凝土浇筑时终凝阶段水化热产生的侧压力大于初凝阶段流体压力,当浇筑速度较小时( $v=0.626 m/h$ ),冶金研究院公式计算值较接近试验值,而《建筑施工模板安全技术规范》计算值小于试验值,不满足要求。故当浇筑速度  $v \leq 1 m/h$  时,模板侧压力按冶金研究院公式(即式(7))进行计算。

时,按《建筑施工模板安全技术规范》和《混凝土结构工程施工规范》计算线性插值,线性插值公式为:  $F = 5.8v + 143.7$ 。

3) 根据杨伟等<sup>[10]</sup>的研究,浇筑速度为  $8 m/h < v \leq 10 m/h$  时,宜按《混凝土结构工程施工规范》计算侧压力。故此区段内模板侧压力计算应取式(5)、式(6)的较小值。

4) 根据裴新意等<sup>[7]</sup>的研究,泵送自密实混凝土模板侧压力计算中,将自密实混凝土视为理想的液态,参考流体静力学公式  $F = \gamma_c H$  计算,故当

浇筑速度大于 10 m/h、坍落度大于 180 mm、采用自密实混凝土、使用外部振捣器时,宜按照式(6)进行计算。

综上所述,在本文的试验条件下,混凝土侧压力分段包络公式为:

- 1) 当  $v \leq 1$  m/h 时,  $F=0.32\gamma_c t_0 v^{1/4}$ ;
- 2) 当  $1 \text{ m/h} < v \leq 6 \text{ m/h}$  时,  $F=0.22\gamma_c t_0 \beta_1 \beta_2 v^{1/2}$ ;
- 3) 当  $6 \text{ m/h} < v \leq 8 \text{ m/h}$  时,  $F=5.8v+143.7$ ;
- 4) 当  $8 \text{ m/h} < v \leq 10 \text{ m/h}$  时,  $F=0.28\gamma_c t_0 \beta v^{1/2}$ ;
- 5) 当  $v > 10 \text{ m/h}$  时,  $F=\gamma_c H$ 。

如试验条件变化,公式中参数亦可能不同。

## 5 结语

本文对国内现行各规范中的模板侧压力计算公式进行了整理与比较,并开展了大坍落度混凝土模板侧压力试验,以探究大型墩柱混凝土模板侧压力的变化规律,并通过试验验证了国内现行各规范包络值的合理性。根据模板侧压力试验结果,本文创新性地提出了混凝土对模板侧压力的分段包络公式,证实采用此包络公式进行大坍落度混凝土模板侧压力计算足够安全,可供模板设计人员计算侧压力时直接使用,有助于改善目前钢模板设计领域存在的规范繁多、随意放大的局

面;同时也有助于减轻模板重量、节约成本,并降低施工操作难度。

由于本工程实际条件限制,本试验数据样本量偏少,对于形成完善的理论尚需要更多的样本容量支撑。故下一步的研究方向应是提高试验对照组数量,进一步验证结论的准确性;同时引入其他自变量,如混凝土坍落度、浇筑高度、浇筑温度等,力求更加全面和系统地对墩柱模板侧压力进行研究。

## 参考文献:

- [1] 李增银.混凝土模板侧压力实验研究[D].北京:北京工业大学,2015.
- [2] 吴远东,郭正兴,包伟.新浇混凝土模板侧压力的测试与计算研究[J].江苏建筑,2012(4):66-69.
- [3] 王建华,侯永康,牛润明,等.某大桥倾斜塔柱新浇混凝土模板侧压力测试与分析[J].国防交通工程与技术,2019(4):18-21.
- [4] 李核,李海,尚文国,等.方墩模板侧压力试验研究与机理分析[J].施工技术,2015,44(S1):537-539.
- [5] 孙喜峰.现浇混凝土模板侧压力理论及公式研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2013.
- [6] 杨伟,王森,康元军,等.混凝土浇筑速度对模板侧压力的影响[J].施工技术,2014,43(S2):311-317.
- [7] 裴新意,陈立胜,王辉诚,等.泵送自密实混凝土浇筑侧压力试验研究[J].混凝土,2015(5):106-108,112.