

不同配比下超早期混凝土与模板之间侧向作用

崔 激¹, 李 明¹, 吴甲一², 冀天竹¹

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘要: 超早期混凝土对模板的侧向压力直接影响到模板设计, 其大小受浇筑速度、混凝土配比、温度、模板表面性态、尺寸、形状、浇筑深度等诸多因素影响, 作用机制非常复杂。在理论分析的基础上, 设计了一个可以测量不同配比下混凝土对模板侧向压力的模型试验, 并对试验结果进行了分析。试验结果表明, 侧向压力竖向分布与静水压力相似, 但明显小于静水压力; 混凝土水灰比(质量比)越大, 模板初始侧向压力越接近静水压力, 侧向压力下降速度越快; 超早期混凝土侧向压力的消散发生在潜伏期之后的水化反应阶段, 此阶段水化产物的加速形成使材料具有自承载能力, 因此侧向压力迅速下降并最终消失。

关键词: 超早期混凝土; 模板; 侧向压力; 模型试验; 配比
中图分类号: TU528 **文献标志码:** A

Test Study of Lateral Interaction Mechanism at Different Concrete Mixes Between Very Early-Age Concrete and Structures

CUI Wei¹, LI Ming¹, WU Jiayi², JI Tianzhu¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: The lateral pressure of very early-age concrete on the formwork directly affects the formwork design, whose numerical size is controlled by the casting rate, concrete mix, temperature, surface characteristics, size and shape of formwork and the depth of the casting concrete and so on. Therefore, the influencing mechanism is quite complicated. Based on theory analysis, a model test which can obtain the lateral pressure under the condition of different concrete mix was designed, and the measuring results were analyzed. The test results show that the vertical distribution of lateral pressure is similar to the hydrostatic pressure, but significantly less than the hydrostatic pressure. As the concrete water-cement ratio increases, the initial template

lateral pressure gets closer to the hydrostatic pressure, and the lateral pressure drops faster. The cancellation of lateral pressure occurs after the end of the dormant period of cement hydration. The accelerated rate of formation of hydrates enables the material to become self-bearing, which leads the rapid decrease of lateral interaction towards zero.

Key words: very early-age concrete; formwork; lateral pressure; model test; concrete mix

混凝土是目前应用最广泛的建筑材料。近年来, 随着水工大体积现浇混凝土工程的迅速发展, 大型甚至超大型模板在施工中得到了大量应用。模板虽然是辅助性结构, 但在混凝土工程中, 模板工程的造价最多可达到整体结构造价的 40%^[1], 因此模板设计是水工混凝土施工中不容忽视的一个重要环节。其中超早期混凝土与模板之间的侧向压力被认为是影响模板设计的主要因素^[2]。一方面, 侧向压力的大小直接影响到混凝土结构质量与施工成本, 高估最大侧向压力会增加模板成本, 相反, 低估则往往会导致模板损坏及结构变形, 造成较大的经济和时间损失; 另一方面, 侧向压力的消散速度对于确定模板拆除时间有决定性作用。

近年来各国学者对超早期混凝土与模板之间的侧向压力进行了大量的试验研究, 普遍认为超早期混凝土与模板之间的侧向压力受诸多因素影响^[3-8]。首先是浇筑状况, 主要包括浇筑速度、浇筑方式和浇筑温度; 其次是模板性态, 如模板尺寸、弹性及表面粗糙度等; 第三个重要因素是混凝土属性, 如骨料特性、化学掺合料种类、配比等。由于影响因素众多, 很难用一个统一的数学模型来精确描述超早期混凝土与模板之间的侧向作用。一般情况下, 需要根据特定的研究问题采用简化的数学公式粗略估计。

本文设计了一个可以量测超早期混凝土与模板

之间侧向压力及混凝土温度变化的模型试验,通过分析不同配比混凝土侧向压力的变化,研究了不同水灰比(质量比)对超早期混凝土与模板之间初始侧向压力大小和侧向压力下降速度的影响,并分析了侧向压力消散时间与水泥水化进程的关系。

1 理论模型

1.1 传统理论模型

超早期混凝土与模板之间的侧向作用非常复杂。传统上,在计算流态混凝土对模板的侧向压力时,一般按照静水压力加以考虑,即

$$\sigma_{\text{lat}} = \rho g z \quad (1)$$

式中: σ_{lat} 为侧向压力,Pa; ρ 为混凝土密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; g 为重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; z 为浇筑混凝土高度,m。

式(1)有一个不合理的假设,假定混凝土为非黏性流体,浇筑时混凝土确实会表现出流体的性质,然而一旦浇筑完成,混凝土内部就会生成能够支撑自身的结构从而减小对模板的侧向压力,但是传统理论模型并没有对浇筑完成后侧向压力迅速下降做出合理解释^[9],而且该计算方法有比较大的安全裕度。Tchamba 等^[10]研究表明,即使在进行模板高度小于 2.5 m 的混凝土侧向压力计算时,结果也不够精确,而随着模板高度的增加,误差则被充分放大。

1.2 现行规范规定

在对超早期混凝土与模板之间的侧向压力影响因素的研究中,由于各国选取的影响因素不同,所提出的计算侧向压力的规范和标准也存在一定的差异。本文分别选取中国、美国、英国及德国的现行规范和标准进行对比分析。

我国现行规范 JGJ162—2008^[11]中超早期混凝土与模板间的侧向压力计算公式(取两式中较小值)为

$$p_{\text{max}} = \begin{cases} 0.22\gamma_c t_0 \beta_1 \beta_2 R^{\frac{1}{2}} \\ \gamma_c H \end{cases} \quad (2)$$

式中: p_{max} 为新浇筑混凝土对模板的最大侧向压力, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$; γ_c 为混凝土重度, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$; t_0 为混凝土初凝时间,h,实测确定,当缺乏试验资料时近似取 $t_0 = 200/(T+15)$, T 为混凝土入仓温度, $^{\circ}\text{C}$; R 为混凝土浇筑速度, $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$; β_1 为外加剂影响系数,不加外加剂时为 1.0,加入具有缓凝作用的外加剂时为 1.2; β_2 为混凝土塌落度影响系数,塌落度小于 30 mm 时为 0.85,塌落度为 50~90 mm 时取为 1.00,塌落度为 110~150 mm 时取为 1.15; H 为混凝土浇筑深度,m。

美国现行标准 ACI 347-04^[12]建议超早期混凝土与模板之间的侧向压力计算公式为

$$p_{\text{max}} = C_w C_c [7.2 + (1\,156 + 244R)/(T + 17.8)] \quad (3)$$

式中: C_w 为超早期混凝土密度的修正系数, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$; C_c 为水泥种类及外加剂影响系数; T 为混凝土浇筑温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

英国现行标准 CIRIA-108^[13]建议超早期混凝土与模板之间的侧向压力计算公式为

$$p_{\text{max}} = D[C_1 R^{0.5} + C_2 C_3 (H - C_1 R^{0.5})^{0.5}] \quad (4)$$

式中: D 为混凝土密度; C_1 为模板尺寸及形状影响系数; C_2 为混凝土成分影响系数; C_3 为浇筑温度影响系数。

德国现行标准 DIN 18218^[14]建议超早期混凝土与模板之间的侧向压力计算公式为

$$p_{\text{max}} = K_1 + K_2 R \quad (5)$$

式中: K_1 及 K_2 均为与超早期混凝土稠度的相关系数。

从以上公式可以看出,各国在计算流态混凝土对模板的侧向压力时,密度、浇筑速度和初凝时间被认为是最重要的影响因素,尤其是浇筑速度在 4 种规范中都是用来作为定量考虑的因素。但是中国侧重于浇筑速度,而且对混凝土本身性质变化也有所涉及;美国侧重于浇筑温度,同时考虑了水泥种类和外加剂的影响;英国除对浇筑速度侧重外,对模板状态和浇筑温度的影响也有考量;而德国侧重对浇筑速度的研究时也考虑了混凝土稠度的影响。但 Gallego 等^[15]研究表明,上述规范公式只是研究了一个或者单独几个方面的影响因素,并没有综合考虑不同因素之间的相互影响,因此这些公式与实测值都存在一定差异。在进行模板高度小于 2.5 m 的混凝土侧向压力计算时,公式结果往往大于实际侧压,而随着模板高度的增加,公式结果往往小于实际侧压,这样会给工程施工带来安全隐患;而且现行规范只是对最大侧向压力做了规定,对其随时间进程的消散过程却没有涉及。

1.3 理论研究现状

关于侧向压力随时间的消散过程,部分研究者认为混凝土水化反应产生水化产物使混凝土具有自承载能力,从而使得超早期混凝土的侧向压力迅速消散^[4-6]。但 Andriamanantsilavo 等^[16]观察到在混凝土完成浇筑之后,即使此阶段混凝土水化还没有发生,模板上的侧向压力也会迅速下降。因此单独使用混凝土水化理论来解释侧向压力的下降具有一定

的局限性,而且无法具体阐释浇筑状况和模板性态对于侧向压力的影响。文献[17-18]研究结果表明:当假设超早期混凝土是一个整体时,此阶段唯一能够发生的是絮凝,这种絮凝现象与早期混凝土的触变性密切相关,而超早期混凝土的流变性能类似于一个屈服应力模型^[19],该模型可使用下式来描述材料的流动剪切状态:

$$\tau = \tau_0 + f(\dot{\gamma}) \quad (6)$$

式中: τ 为剪应力; τ_0 为屈服应力; f 为剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的函数。

超早期混凝土的流变性能是随时间发展的,浇筑时超早期混凝土的剪切流动可以用屈服应力模型解释,但是当浇筑完成后静置一段时间,屈服应力就可能比流动时的屈服应力高一到两个数量级。Jarny等^[20]研究发现,超早期混凝土屈服应力的演变与其絮凝状态相关,当超早期混凝土流动时,在剪切作用下絮凝网络遭到破坏,超早期混凝土由黏稠状态变为流动性较大的状态,此时屈服应力较小;而在浇筑完成后静置一段时间后,剪切作用消失,絮凝作用重新发展,在混凝土内部形成网格状结构致使其屈服应力迅速提高。根据上述研究,Ovarlez等^[9]提出了使用弹性模型和特雷斯卡屈服准则计算矩形模板上侧向压力。

$$\sigma_{lat} = k \left(\rho g - 2\tau_0 \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{e} \right) \right) z \quad (7)$$

$$\tau_0 = \tau_{0,i} + A_{thix} t \quad (8)$$

式(7),(8)中: k 为詹森系数,与泊松比有关; L 和 e 与模板形态有关; z 为模板深度,m; $\tau_{0,i}$ 为初始屈服应力,Pa; A_{thix} 为絮凝参数; t 为浇筑时间。Kwon等^[21]发现通过絮凝理论对侧向压力的变化规律进行解释存在一定局限性:仅使用界面屈服应力来描述流态混凝土与模板之间的切向作用,忽略了黏性阻力和摩擦对侧向压力的影响。

总体来看,对超早期混凝土的侧向压力的影响因素非常复杂,现有的规范理论都不足以准确描述侧向压力大小和随时间的变化进程。为了得出不同配合比的混凝土侧向压力的变化规律,侧向压力试验研究势在必行。

2 试验概况

2.1 原材料

试验所用水泥为唐山奥成牌 PO42.5 普通硅酸盐水泥,密度为 $3\,099.91 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,细度为 $350 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,颗粒平均粒径为 $19.1 \mu\text{m}$;细骨料为海砂,II

区级配,细度模数为 2.3,表观密度为 $2\,560 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3}$;粗骨料为石灰岩碎石颗粒,堆积密度为 $1\,580 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,表观密度为 $2\,760 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,粒径组为 5~20 mm 连续级配,最大颗粒粒径为 20 mm;试验所用的拌合水均为可饮用自来水。

2.2 传感器

试验选用的传感器包括温度传感器和压力传感器两部分。由于超早期混凝土从流态转变成塑性状态再到固态的时间非常短暂,而常规传感器感应膜变形感应具有滞后性,且常规的压力传感器并没有考虑骨料粒径,同时也忽略了由于感应膜状态转变不及时造成的残余变形对测量的影响,导致对触变性材料的测量结果存在较大误差。Talesnick等^[22]发现,基于零点法的无变形感应膜传感器能较好地解决上述问题。因此,试验采用无变形感应膜传感器。产品型号为 JMZX-50XXB,测量范围为 0~300 kPa,灵敏度为 0.01 Pa。为了减小骨料粒径效应对测量结果的影响,选用的传感器直径为 120 mm,超出最大骨料粒径的 5 倍以上;试验采用的温度传感器为 JMT-36C 智能温度传感器,精度为 0.1 °C,量程为 -20~120 °C,两种传感器均能够满足试验对温度和压力精度的要求。

2.3 试验方案

为了能够达到令人满意的试验效果,试件的形状必须满足以下两点要求:①方便实验室内工作且易于浇筑;②试件必须能够产生足够的侧向压力和温度用于监测。按照要求,模型试验箱的尺寸拟定为 $1\,000 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$,如图 1 所示。

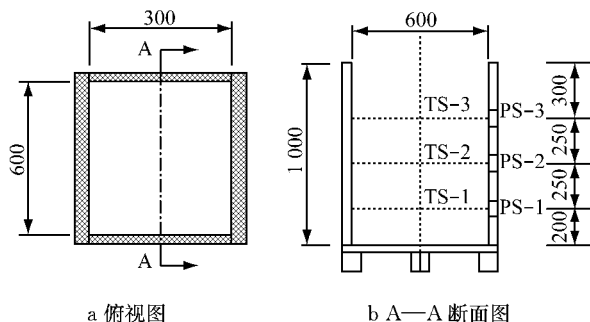


图 1 试验装置尺寸(单位:mm)

Fig.1 Size of test device (unit: mm)

在混凝土浇筑前,将 3 个压力传感器固定在模具内表面,使其与模板内表面齐平,将 3 个温度传感器固定在模具内部,具体布置位置详见图 1、图 2。其中 3 个压力传感器被布置在试件的侧面中轴线上不同的高度,从低到高依次记为 PS-1,PS-2,PS-3。传感器表面涂抹油脂,以防止其与混凝土黏结。3 个温

度传感器分别布置在与压力传感器同等高度的中心面处,用来测量试件的温度变化,从而反应试件水化发展进程,3个温度传感器从低到高依次记为 TS-1, TS-2, TS-3.

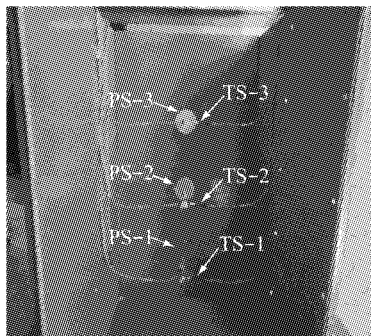


图 2 试验装置及传感器布设

Fig.2 Overview of test device and sensors

2.4 配合比设计

Assaad 等^[8]通过改变混凝土的配合比来检测配比对侧向压力的影响. 试验结果显示:混凝土比对混凝土的初始侧向压力和消散速度有显著影响. 张珑等^[23-24]的研究成果也表明混凝土比对侧向压力的影响较大. 此外,研究同时发现对比对超早期混凝土的稠度、内部摩擦值以及结构之间的切向作用也有较大影响^[19-20]. 因此,为得出对比对超早期混凝土与结构之间侧向作用及切向作用影响,根据以上学者的研究成果,设计本试验中的混凝土配合比,如表 1 所示.

表 1 混凝土配合比设计

Tab.1 Mix design of concrete

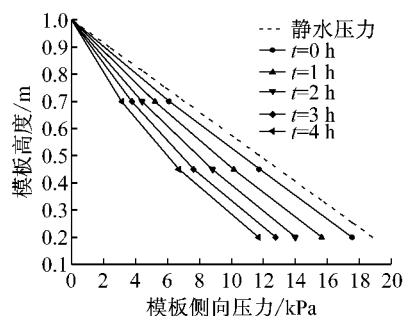
工况	水灰比	配合比/(kg · m ⁻³)			
		水泥	水	砂	石子
工况一	0.4	400	160.8	513	1 052
工况二	0.5	400	200.0	527	1 134

两种方案主要的区别在于水灰比不同,其中两种方案的砂率仅相差 1%,因此忽略砂率不同对侧向压力变化的影响. 完成准备工作以后,浇筑混凝土试件. 将混凝土充分搅拌后装入模具,同时使用小型振捣棒振捣混凝土. 浇筑完成后立即采集数据. 传感器、数据采集仪及电脑相串联,每 0.5 s 采集一次数据. 考虑到刚浇筑完成后混凝土与模板没有充分接触,测得的数据误差较大,因此最开始测得的几个数据会删去,仅从测得最大数据(最大侧向压力)开始进行分析. 后期压力数据达到零时会有部分时刻出现反弹甚至出现负值的现象,这部分数据也略去.

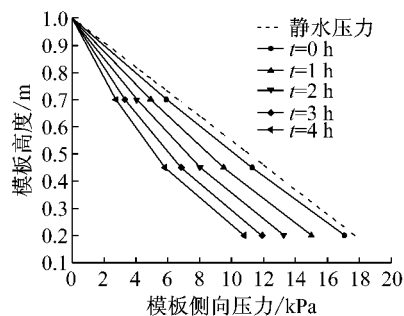
3 试验结果及讨论

3.1 侧向压力与静水压力的对比

图 3 给出了两种工况下混凝土浇筑完成后 0~4 h 侧向压力随时间的变化规律. 从图 3 可以看出,不同配合比的混凝土侧压随时间变化和随高度变化规律基本一致,即在刚浇筑完成时,混凝土更多呈现出流态的性质,其侧向压力竖向分布非常贴近静水压力值. 以水灰比为 0.5 的试件为例,刚浇筑完成时各测点侧向压力分别占同等高度静水压力的 88.72%, 92.53%, 96.19%. 然而,随着时间变化,模板上的侧向压力迅速下降,浇筑完成后前 2 h,侧压下降速度较快,2 h 后下降速度逐渐变慢. 以水灰比为 0.5 的试件的最底部测点为例,刚浇筑完成时以及随后 1, 2, 3 及 4 h 时实测侧向压力分别占同等高度静水压力的 88.72%, 73.82%, 60.86%, 51.64%, 42.34%, 越靠近底部偏离静水压力越大,并且侧向压力分布差异变大,即从竖向线性分布接近于非线性分布,越到后期这种差异越明显.



a 工况一



b 工况二

图 3 不同配比下模板侧向压力变化规律

Fig.3 Variations of lateral pressure at different concrete mixes

在混凝土刚浇筑完成时,其触变性和水化反应持续时间较短,此时超早期混凝土塑性状态发展处于初期,流动性较大,混凝土更多地呈现出流态的性

质,因此其侧向压力竖向分布近似于静水压力,表现为与浇筑高度成正比的线性分布;在侧向压力消散的初期,超早期混凝土的侧向压力受触变性及水化反应影响,但触变性起主导作用,因此絮凝作用初期,随着水泥颗粒的溶解,水中颗粒含量变大,有利于絮凝反应的发展,此时表现为浇筑完成后前2 h,侧压下降速度较快;随着絮凝作用对颗粒的吸附作用和水化作用对水泥颗粒的消耗,水中颗粒的含量变低,不利于颗粒间的碰撞,从而影响凝集,此时表现为侧压消散速度的略微降低。此外,底部的混凝土浇筑较早,其侧向压力消散时间较早,相较于上部混凝土侧向压力降低较大。

3.2 水灰比对侧向压力的影响

3.2.1 水灰比对初始侧向压力的影响

图4给出了两种工况下混凝土刚浇筑时初始侧向压力占静水压力的百分比。从图4可以看出,对于工况二,初始侧向压力占同等高度的静水压力的百分比 P 分别为88.72%,92.53%,96.19%;对于工况一,初始侧向压力占静水压力的百分比 P 分别为86.15%,90.47%,93.16%,即水灰比越大初始侧压越接近静水压力。

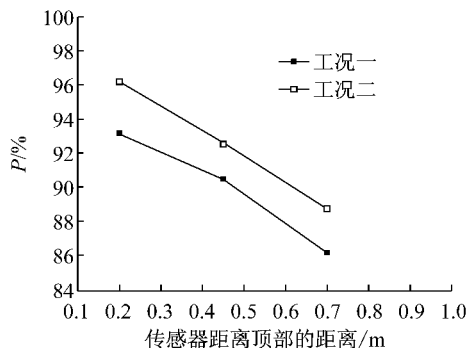


图4 不同配比下模板初始侧向压力占静水压力百分比

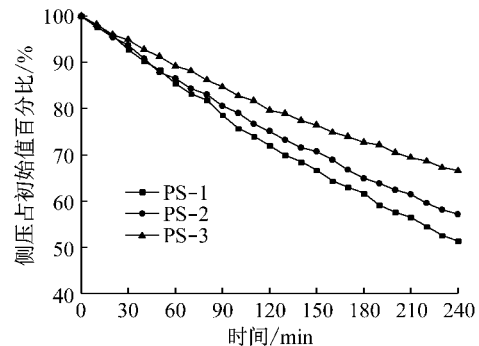
Fig.4 Percentage of formwork initial lateral pressure of hydrostatic pressure at different concrete mixes

随着水灰比的增大,水和砂浆的含量提高,粗骨料的含量降低,从而导致两方面变化:一是混凝土的流动性增大,减小了骨料之间的内摩擦及模板与混凝土之间的摩擦,二是水含量的增加导致了水泥颗粒周围的水层厚度增加,水泥颗粒之间距离的增加导致其内聚力下降,抗剪强度降低。从公式(7)可知,摩擦力及屈服应力的下降使得竖向荷载可以更加容易地转变成侧向压力。

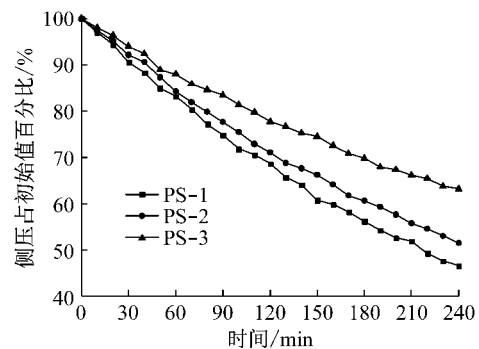
3.2.2 水灰比对侧向压力消散速度的影响

图5给出了两种工况下混凝土浇筑完成后4 h

内侧压下降规律图。从图5可以看出,对工况二,各个监测点的侧压下降速率要大于工况一监测点下降速率。截止到浇筑完成后4 h,工况二的试件各监测点侧压分别降到其初始侧压的46.6%,51.52%及63.21%;而工况一试件其各监测点的侧压分别降到其初始侧压的51.46%,57.2%及66.16%,即水灰比越大侧向压力下降越快。



a 工况一



b 工况二

图5 不同配比下模板侧向压力下降规律

Fig.5 Variation of lateral pressure over time at different concrete mixes

一般来说,超早期混凝土与模板之间的侧向压力的下降速度取决于混凝土的触变性、水化反应进程^[9]及混凝土与模板之间摩擦力的变化。一方面,水灰比较大时水化反应较为剧烈,因此混凝土由流态向可塑乃至固态演化过程越快,模板与超早期混凝土之间的初始黏结作用力及混凝土内部内聚力增长越快,从而导致侧向压力下降越快;另一方面,模板的变形也影响着侧向压力的变化过程,发生变形的模板随着侧向压力的逐渐减小有恢复其初始状态的趋势,但是这种变形恢复的过程受到其内部混凝土黏度的影响^[21]。因此不同配比的混凝土因其黏度不同导致其侧压消散速度也不同。

3.3 模板侧向压力消散随时间整体变化规律

图6给出了两种工况下混凝土PS-2处侧向压力及TS-2处温度的变化规律。从图6可以看出,两

组试件前期侧压下降及温度上升较为缓慢,其中工况一的试件在 300 min 时侧压 p 下降到其初始侧压 p_0 的 49.05%,其温度在此期间仅仅上升了 0.87 °C;工况二的试件在 240 min 时侧压 p 下降到其初始侧压 p_0 的 51.52%,其温度在此期间仅仅上升了 0.95 °C,后期随着水化反应速度的迅速提高,其温度上升速度也随之迅速升高。工况一的试件在 460 min 时侧压消散为零,其温度在此期间迅速上升了 2.1 °C,工况二的试件在 350 min 时侧压消散为零,其温度在此期间上升了 2.7 °C。从图 6 可以看出,混凝土侧向压力下降分为两个阶段,第一阶段是侧向压力主要受絮凝作用即触变性影响的物理和化学消散阶段,此阶段混凝土由流态向可塑态演化,超早期混凝土的侧向压力受触变性影响,但是触变性起主导作用,即以物理消散为主,物理效应主要是由触变性引起的,在一定程度上归功于固相颗粒的重组和内摩擦角的增大^[9]。此阶段是可逆的,当混凝土受到剪切作用时会导致混凝土内部的絮凝结构破坏,内聚力及内摩擦减小,使得侧压再次增大。第二阶段是化学消散阶段,此阶段混凝土的水化反应起主导作用,从图 6 可以看出,混凝土内部温度从第二阶段开始迅速升高,这说明混凝土的水化反应速度也迅速升高,从而导致混凝土内聚力及屈服

应力迅速提高,致使侧向压力迅速下降为零。

从图 6 可以看出,第一阶段混凝土温度上升缓慢,表明此阶段水化反应较为缓慢,因此第一阶段也可称为水化反应的潜伏期。此阶段,侧压下降速率比第二阶段小;在第二阶段,水化反应为主导的侧压下降阶段,此阶段水泥水化反应剧烈,水化产物加速形成使材料具有自承载能力,因此侧向压力迅速下降并最终消失。侧向压力消散为零的时间与混凝土的初凝时间一致,可见混凝土的侧压消散时间主要受水泥水化反应影响。因此,当水灰比较高时,水泥水化反应快,侧压消散较早。

3.4 混凝土浇筑过程中模板压力

图 7 给出混凝土完整浇筑过程中同一模板高度处竖向压力与侧向压力随时间的变化规律。从图 7 中可以看出,浇筑过程中混凝土竖向压力随时间变化分为两个阶段,从 t_0 到 t_1 为第一阶段,随浇筑进行,竖向压力逐渐增加,若浇筑强度不变则基本呈线性增加,浇筑停止后(t_1 到 t_3)则不再变化。而侧向压力随浇筑过程则分为三个阶段,第一阶段为 t_0 到 t_1 ,侧向压力基本呈线性增加,但数值小于竖向压力,也表明混凝土侧向压力并不能按照静水压力计算;从 t_1 到 t_2 为第二阶段,此阶段混凝土侧向压力逐渐呈曲线减小,属于物理消散阶段为主的阶段;从 t_2 到 t_3 为第三阶段,此阶段混凝土侧向压力持续呈曲线下降,但相比于第二阶段,由于水化反应剧烈,下降速率更快,并最终降低为零,此阶段属于化学消散阶段。

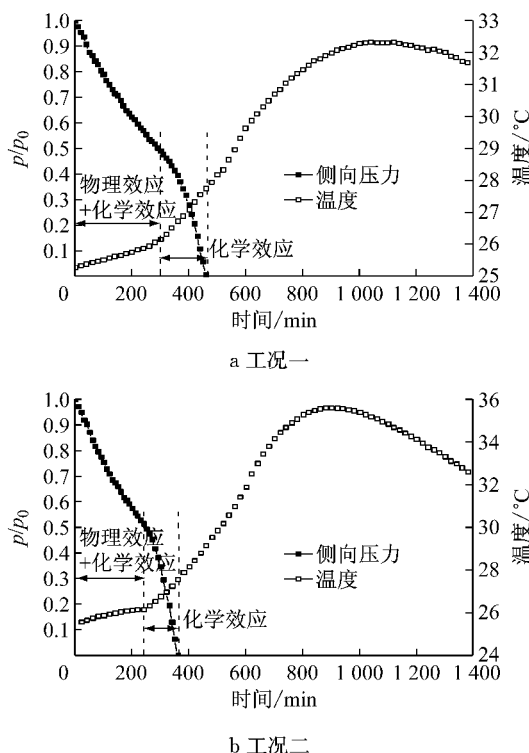


图 6 不同水灰比下模板侧向压力及混凝土温度变化规律

Fig.6 Variations of lateral pressure and temperature at different concrete mixes

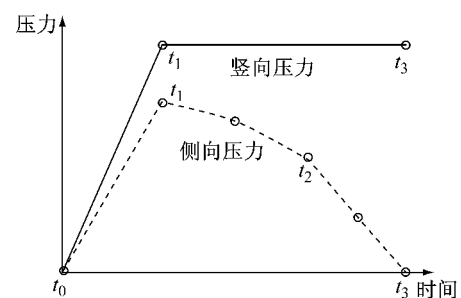


图 7 混凝土浇筑过程中侧向压力的变化

Fig.7 Variation of formwork pressure during casting

4 结论

本文设计了一个测量混凝土与模板之间侧向压力的模型试验,分析了不同水灰比下侧向压力的变化,主要结论如下:

(1)初始侧向压力竖向分布与静水压力相似,但明显小于静水压力。随着时间发展侧向压力分布差

异变大,从竖向的线性分布发展到接近于非线性分布,越到后期这种差异越明显。

(2)早期混凝土与模板之间的侧向作用受水灰比影响较大,混凝土水灰比越大,侧向压力越接近静水压力,其消散速度越快。

(3)超早期混凝土侧向压力的消散主要发生在潜伏期之后的水化反应阶段,此阶段水化产物加速形成使材料具有自承载能力,因此侧向压力迅速下降并最终消失。

(4)在进行模板设计和施工时,除应考虑混凝土自身的强度发展和上部荷载的变化情况外,还应特别注意混凝土配比,兼顾初始侧向压力及其消散速度,以节省工程成本。

参考文献:

- [1] Khayat K H, Assaad J J. Measurement systems for determining formwork pressure of highly-flowable concrete [J]. *Materials and Structures*, 2008, 41(1): 37.
- [2] Hurd M K. Formwork for concrete [M]. [S. l.]: Farmington Hills, 2005.
- [3] Santilli A, Puente I, Tanco M. A factorial design study to determine the significant parameters of fresh concrete lateral pressure and initial rate of pressure decay [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(4): 1946.
- [4] Pung H K, Shah S P, Phung Q T, et al. Intrinsic model to predict formwork pressure [J]. *ACI Materials Journal*, 2010, 107(1): 20.
- [5] Assaad J J, Khayat K H. Effect of casting rate and concrete temperature on formwork pressure of self-consolidating concrete [J]. *Materials and Structures*, 2006, 39(3): 333.
- [6] Caufin B, Papo A. The influence of the hydration process on the rheology of cement pastes [J]. *Zement Kalk Gips*, 1986, 39(7): 389.
- [7] 张海伟,蔡庆晓,李统彬. 自密实混凝土的研制与工程应用 [J]. *混凝土*, 2009 (11): 89.
ZHANG Haiwei, CAI Qingxiao, LI Tongbin. Development and engineering application of self-compactable concrete [J]. *Concrete*, 2009 (11): 89.
- [8] Assaad J, Khayat K H. Variation of formwork pressure with thixotropy of self-consolidating concrete [J]. *ACI Material Journal*, 2003, 100(1): 29.
- [9] Ovarlez G, Roussel N. A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork [J]. *Materials and Structures*, 2006, 39(2): 269.
- [10] Tchamba J C, Amziane S, Ovarlez G, et al. Lateral stress exerted by fresh cement paste on formwork: laboratory experiments [J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38 (4): 459.
- [11] 中国建筑工业出版社. JGJ162—2008 建筑施工模板安全技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
China Building Industry Press. JGJ162 — 2008 Safety technology criterion for building construction formwork [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2008.
- [12] American Concrete Institute. ACI 347-04 Guide to formwork for concrete [S]. [S. l.]: Farmington Hills, 2004.
- [13] Construction Industry Research and Information Association. CIRIA-108 Concrete pressure on formwork [S]. London: Construction Industry Research and Information Association, 1985.
- [14] Deutsches Institut für Normung. DIN18218 Pressure of concrete on vertical formworks [S]. Berlin: [s. n.], 1980.
- [15] Gallego E, Fuentes J M, Ramírez A, et al. Design of tall formworks by a finite-element model [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2009, 136 (7): 803.
- [16] Andriamanantsilavo N R, Amziane S. Maturation of fresh cement paste within 1-to 10-m-large formworks [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(11): 2141.
- [17] Assaad J, Khayat K H, Mesbah H. Assessment of thixotropy of flowable and self-consolidating concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 2003, 100(2): 99.
- [18] Khayat K, Assaad J, Mesbah H, et al. Effect of section width and casting rate on variations of formwork pressure of self-consolidating concrete [J]. *Materials and Structures*, 2005, 38 (1): 73.
- [19] Herschel W H, Bulkley R. Measurement of consistency as applied to rubber-benzene solutions [J]. *Proceeding of American Society of Testing Material*, 1926, 26(2): 621.
- [20] Jarny S, Roussel N, Le Roy R, et al. MRI measurements of steady state and transient behaviour of fresh cement pastes [J]. *Annual Transactions of the Nordic Rheology Conference*, 2004, 12: 6.
- [21] Kwon S H, Phung Q T, Park H Y, et al. Effect of wall friction on variation of formwork pressure over time in self-consolidating concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 4(1): 90.
- [22] Talesnick M, Katz A. Measuring lateral pressure of concrete: from casting through hardening [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 34(3): 211.
- [23] 张珑. 新浇墙体混凝土的侧向压力 [J]. *建筑技术*, 1976(Z2): 117.
ZHANG Long. Lateral pressure of new pouring concrete for wall body [J]. *Building Technology*, 1976(Z2): 117.
- [24] 张嘉新, 高小建, 王子龙, 等. 自密实混凝土模板侧压力测试方法研究 [J]. *低温建筑技术*, 2012, 9(9): 6.
ZHANG Jiaxin, GAO Xiaojian, WANG Zilong et al. Test method for lateral pressure of self-compacting concrete [J]. *Low Temperature Construction Technology*, 2012, 9(9): 6.