

现浇混凝土模板侧压力理论与试验

刘莉¹,孙喜峰²,贾世龙¹,佟舟³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168; 2. 黄河科技学院建筑工程学院,河南 郑州 450006;
3. 沈阳城市建设学院土木工程系,辽宁 沈阳 110167)

摘要 目的 根据现浇混凝土模板侧压力试验结果,对现行模板规范中的侧压力计算公式进行验证,为实际工程模板搭设提供可靠的计算依据.方法 采用高精度振弦式压力盒对现场浇筑混凝土柱和剪力墙进行压力监测,通过对实测数据分析,验证现行模板规范公式的适用性.结果 部分监测点的最大压力值超过模板规范系数影响公式计算值,模板规范液体压强公式计算值与监测点最大压力值较接近.结论 按目前模板规范给出的计算公式进行模板支撑的搭设,规范系数影响公式计算结果与实际侧压力值相差较大.采用液体压强公式进行工程模板压力计算偏于安全.

关键词 模板侧压力;现浇混凝土;模板支撑;理论计算公式

中图分类号 TU775.2 文献标志码 A

Theory and Experimental Research on Cast-in-place Concrete Formwork under Lateral Pressure

LIU Li¹, SUN Xifeng², JIA Shilong¹, TONG Zhou³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering, Huanghe Science & Technology College, Zhengzhou, China, 450006; 3. Department of Civil Engineering, Shenyang Urban Construction University, Shenyang, China, 110167)

Abstract: According to the results of cast-in-place concrete formwork lateral pressure test, to verify the formula for calculating the side pressure in the current template specification, to provide reliable calculation basis for the actual project template erection. The methods employed is high precision vibrating string pressure box for pressure monitoring of concrete column and shear wall, Through the analysis of the measured data, the applicability of the current template specification formula will be verified. The result is that the maximum pressure value of some monitoring points exceed the formula calculation value of template specification coefficient, the calculation value of the liquid pressure formula according to the template specification is close to the maximum pressure value of the monitoring points. According to the calculation formula given by the current template specification to carry out the erection of formwork support, The formula calculation results of the for-

收稿日期:2016-03-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51578347);辽宁省自然科学基金项目(201602617);辽宁省高等学校创新团队项目(LT2015023)

作者简介:刘莉(1971—),女,副教授,主要从事建筑施工技术及结构工程研究.

mula coefficient influence is difference from the actual side pressure value. Using the liquid pressure formula to calculate the pressure of the project template is safe.

Key words: lateral pressure of formwork; cast-in-place concrete; formwork support; theoretical calculation formula

随着我国建筑业快速发展,现代建筑规模向大跨度、大空间、多功能化的方向发展. 在一些工程中,大尺寸现浇混凝土构件的应用也越来越多. 在施工过程中,因为模板工程支撑措施不当,引起工程中模板坍塌事故屡屡发生,造成经济损失、人员伤亡. 对混凝土浇筑过程中模板侧压力的研究具有实际意义,可以为施工方案设计提供可靠的理论依据,保障施工安全和达到经济节约的目的.

国外对现浇混凝土模板侧压力方面的研究较少,大部分使用经验公式. 在欧洲、美国和日本规范中的公式影响系数和我国规范基本相同. 通过对具体项目进行分析,使用国外规范公式所得的结果,比使用国内规范结果大,国外规范在模板侧压力的计算方面与我国规范相比偏于安全^[1]. 近年来,很多专家学者针对混凝土侧压力进行了研究^[2-4]. 李春生^[5]对高大模板混凝土浇筑侧压力和钢模构件应力进行了试验研究,结果表明现有规范中混凝土侧压力计算公式在高大模板体系中有一定的局限性. 潘剑云^[6]通过试验研究得出了振动作用、坍塌度、模板侧压力间相互关系. 张文学^[7]以实际工程为例,考虑混凝土坍塌度、环境温度和浇筑速度等参数对混凝土模板侧压力的影响,提出目前混凝土模板侧压力计算中存在的问题. 余逊克^[8]通过对中国、美国、德国和澳大利亚规范中现浇混凝土模板侧压力计算公式进行对比分析,提出了我国规范公式的可改进之处. 黄斌^[9]通过分析 C55 钢纤维混凝土对模板产生侧压力,总结钢纤维混凝土不同高度、不同方向的模板侧压力随时间的变化规律,为钢纤维混凝土的模板施工方案设计提供理论依据. 赵翀^[10]分别选取污泥和低分子量高分子聚

合物作为增稠剂,研究混凝土掺加增稠剂后对模板侧压力的影响. 国外学者也对现浇混凝土模板侧压力进行了相关研究^[11-17]. 其中 Omran A F^[18-19]研究了混凝土温度、浇筑深度、浇注速度等因素对模板侧向压力的影响.

现浇混凝土模板工程作为建筑工程的一项重要工序,直接影响到施工质量和模板支撑的可靠性^[20]. 随着现代施工工艺的改变、添加剂种类的增多,目前混凝土的性能指标已经大为改变. 影响混凝土对模板侧压力的主要因素有混凝土的浇筑速度、浇筑高度、塌落度等,特别是添加剂的加入大大影响了混凝土的塌落度. 另外,目前的混凝土振捣式完全采用机械式,强度大、功率高. 这些混凝土性能指标的改善及施工技术的提高都影响了现浇混凝土对模板产生的压力. 为了进一步研究模板侧压力计算方法,笔者进行了现浇混凝土模板侧压力试验,采用高精度振弦式压力盒对现场浇筑混凝土柱和剪力墙进行压力监测,通过对实测数据分析,验证现行模板规范公式的适用性,对现行模板规范中的侧压力计算公式进行验证,为实际工程模板搭设提供可靠的计算依据.

1 试验概况

为了研究现浇混凝土模板压力的受力机理,在某施工现场,笔者进行了现浇柱和剪力墙模板侧压力试验,试验现场见图 1. 在现场支模板时,木楞、钢管的间距按规范的要求设定,防止模板涨模. 在实际施工过程中,现浇混凝土柱和墙的模板支撑竖楞分布在整个模板的表面,保证在施工中柱和墙的竖向垂直度. 试验柱配筋见图 2.



图1 试验现场

Fig. 1 Test site map

柱和剪力墙高度为 5 m, 其中大柱截面尺寸为 $2.3\text{ m} \times 2.3\text{ m}$, 小柱截面尺寸为



图2 现场柱配筋

Fig. 2 Support pattern test site column

$1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$, 剪力墙截面尺寸为 $3\text{ m} \times 0.5\text{ m}$, 试件参数见图3.

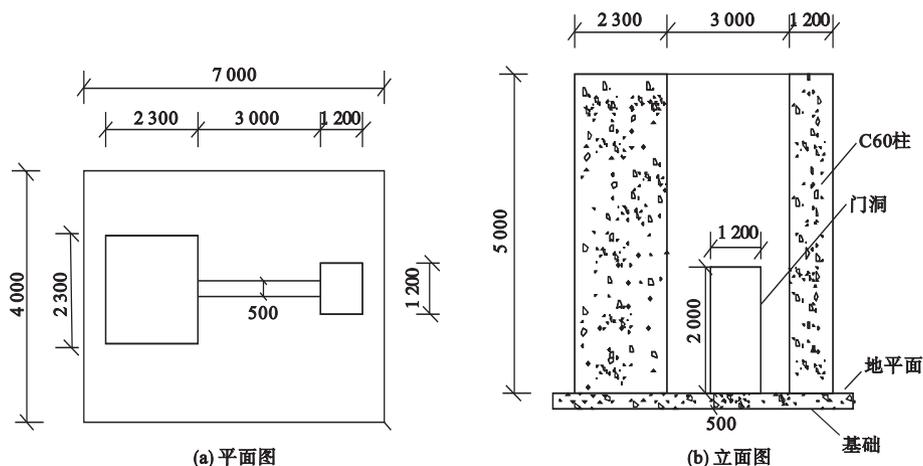


图3 试件尺寸详图

Fig. 3 Component size detail

监测对象为柱和剪力墙, 监测点布置如图4所示. 监测点一共设置15个, 最上部监测点距离混凝土上边界1 m, 最底层监测点距离基础0.5 m. 试验采用高精度振弦式土压力盒, 压力盒的采集数据的一面紧靠在模板的表面, 以便支模板之后让压力盒与模板有良好的接触, 使压力盒精确地采集数据.

试验进行时, 室外最高温度在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 混凝土也将释放热量, 在混凝土凝固的过

程中容易因温度变化出现裂缝. 为了保证试验准确性, 每隔半个小时浇水, 同时在混凝土表面覆盖草帘进行养护. 混凝土浇筑速度为 2.5 m/h , 浇筑时间约2 h. 为了浇筑方便, 同时掺加了减水剂, 混凝土塌落度为150 mm. 压力盒从浇筑开始起进行监测, 频率为10 min/次, 在48 h后, 压力盒频率为30 min/次, 因为48 h后, 压力很小且基本保持不变.

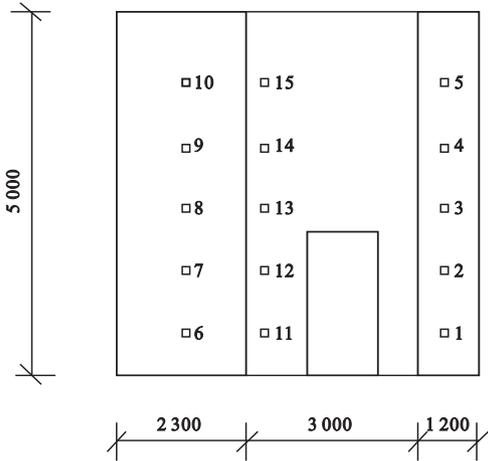


图4 土压力盒监测点布置图

Fig. 4 Earth pressure box layout of monitoring points

2 结果分析

2.1 监测点压力分析

为了明确小柱、大柱及墙体模板不同高度处压力值,在小柱从下至上依次选取1~5号测点,在大柱从下至上依次选取6~10号测点,在墙体从下至上依次选取11~15号测点.监测点1压力变化曲线见图5,从开始浇筑到压力达到最大值54.7 kPa大约经历1h.由图5可以看出,模板侧压力在开始浇筑混凝土1h内迅速增加,说明混凝土的初凝时间大约为1h,在这段时间里混凝土释放大热量,此时混凝土受热体积膨胀,对模板产生的侧压力达到最大值.此后侧压力逐渐减小,

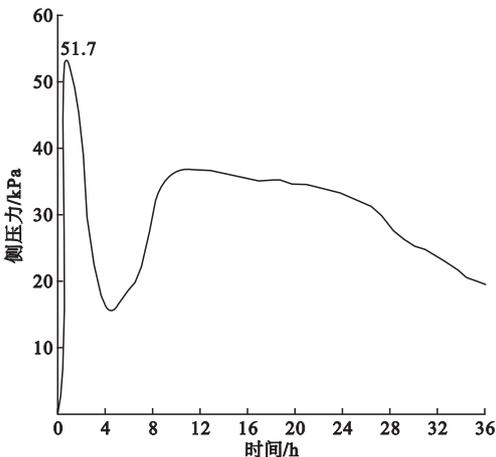


图5 监测点1压力变化

Fig. 5 Pressure variation monitoring Point 1

在20 kPa左右时稳定2~3h,因为混凝土初凝后要暂停放热一段时间,此时压力也相对比较稳定.随后混凝土压力又开始逐渐增大,因为混凝土终凝时又放出热量,所以压力也随之增大,达到40 kPa后侧压力趋于稳定.

监测点6位于大柱的底部,距离柱的底部0.5 m.模板侧压力随试件变化曲线见图6.从图中可以看出,与监测点1大致相同,侧压力在很短时间内达到最大值72.9 kPa,即在初凝时间内,混凝土释放的热量较多,产生较大的膨胀力,混凝土的模板侧压力达到最大值.同时表明在实际工程中,大尺寸柱的现浇混凝土模板侧压力要比小尺寸柱的侧压力值大,在进行模板支撑搭设时,支撑强度需要加强.监测点6在混凝土浇筑8h之后压力趋于稳定.

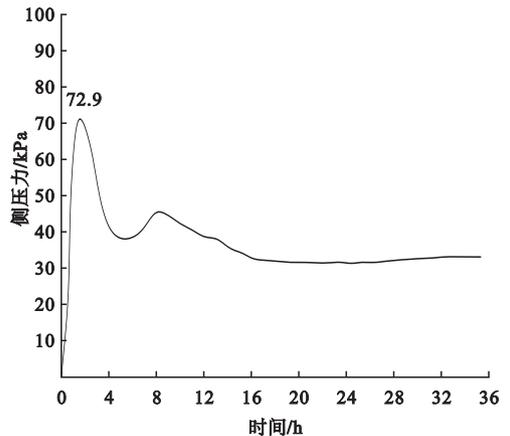


图6 监测点6压力变化曲线

Fig. 6 Pressure variation monitoring point 6

监测点11和监测点6、监测点1位于同一高度位置处,监测点11位于剪力墙内,其位置距离剪力墙底部0.5 m.侧压力随时间变化曲线见图7.从图中可以看出,模板侧压力在初凝时间内达到最大压力值104.7 kPa.监测点11的侧压力值和监测点1、监测点6相比,虽然高度位置相同,其压力值要比其他两个监测点大.由此得出,墙体的侧压力值比柱的要大,在实际模板工程中,墙体的支撑构造措施需要加强.

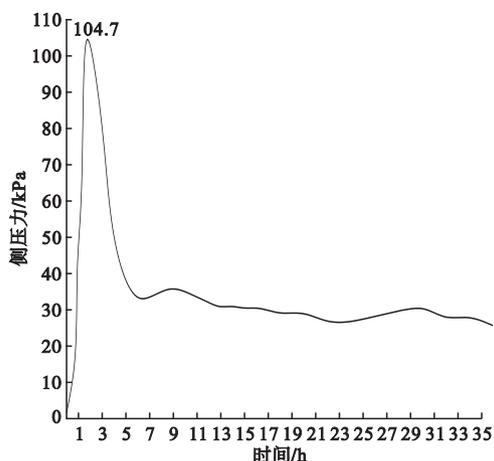


图7 监测点11压力变化曲线

Fig. 7 Pressure variation monitoring point 11

监测点4的压力变化曲线见图8.从图中可以看出,和其他监测点相比,监测点4曲线变化较大.因为本次混凝土的浇筑时间为2 h,监测点的位置比较高,在最初的1个多小时内,现浇混凝土模板侧压力为零,当浇筑混凝土的高度达到监测点高度时,侧压力值迅速增大,达到51.4 kPa.从图中可以看出,混凝土初凝时间大约也是1 h,在初凝阶段达到最大侧压力值,在终凝阶段,压力值变化较大.在终凝之后,侧压力值逐渐较小,在混凝土浇筑12 h后,侧压力值变为零,说明模板和混凝土表面脱离.

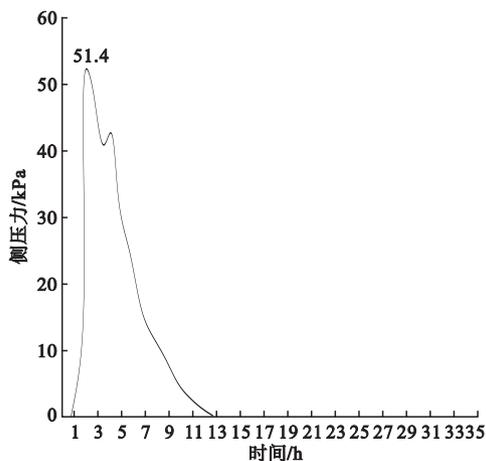


图8 监测点4侧压力变化曲线

Fig. 8 Pressure variation monitoring point 4

监测点12的侧压力变化曲线见图9.从图中可以看出,在混凝土初凝时间段,侧压力

达到最大值106.4 kPa,为15个监测点中压力值最大值.在以后的时间内其变化曲线和同一高度位置的其他监测点大致相同.可见在剪力墙下部现浇混凝土模板侧压力的最大值要比柱大很多,在实际的施工过程中,应该考虑到这方面的影响.

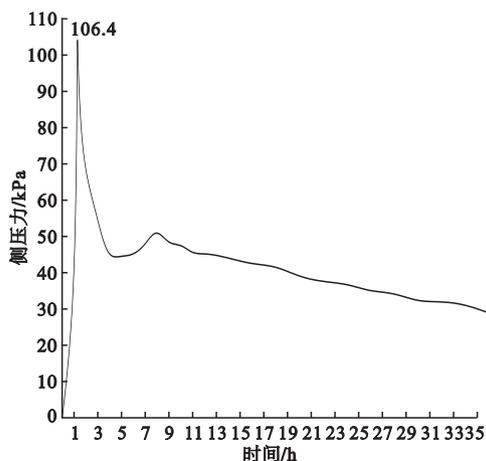


图9 监测点12侧压力变化曲线

Fig. 9 Pressure variation monitoring point 12

2.2 公式验证

试验共布置15个监测点,各个监测点的最大压力值见表1.对各个监测点的试验数据分析得出,每个监测点的最大侧压力值均发生在混凝土的初凝时间段内.

表1 各监测点最大侧压力值

Table 1 The maximum lateral pressure test point

小柱监测 点编号	最大压 力/kPa	大柱监测 点编号	最大压 力/kPa	墙体监测 点编号	最大压 力/kPa
1	51.7	6	72.9	11	101.5
2	68.4	7	104.7	12	106.4
3	85.1	8	69.0	13	74.1
4	51.4	9	47.3	14	49.5
5	40.7	10	25.1	15	21.4

混凝土水化热引起的热膨胀力是影响现浇混凝土模板侧压力的主要因素.现浇混凝土模板最大侧压力试验值是和规范两个公式计算值对比的依据.《建筑施工模板安全技术规范》(JGJ 162—2008)给出了两个现浇混凝土模板侧压力计算公式,式(1)为系数影

响公式,式(2)为液体压强公式:

$$F = 0.22\gamma_c t_0 \beta_1 \beta_2 \sqrt{V}, \quad (1)$$

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

式中: β_1 为外加剂影响修正系数,不掺外加剂时取1.0,掺具有缓凝作用的外加剂时取1.2; β_2 为混凝土坍落度影响修正系数,当混凝土坍落度小于30 mm时取0.85,5~9 cm时取1.0,110~150 mm时取1.15; t_0 为混凝土的初凝时间计算公式, $t_0 = 200/(T + 15)$,其中 T 为混凝土的入模温度.试验中混凝土添加了外加剂,添加的外加剂主要是缓凝减水剂,所以取外加剂影响修正系数 $\beta_1 = 1.2$.混凝土的坍落度为150 mm,根据规范的规定,取影响系数 β_2 的值为1.15. γ_c 为混凝土的重力密度,试验采用的混凝土是C60混凝土,取混凝土的重力密度 $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$; H 为混凝土侧压力计算位置处至新浇混凝土顶面的总高度.

混凝土的浇筑时间大约为2 h,在浇筑过程中没有出现间断,浇筑高度5 m,浇筑速度2.5 m/h.现场测得混凝土的入模温度为20 °C,计算可得 t_0 为5.7 h.将以上参数代入式(1)得 $F = 68.4 \text{ kPa}$.试验得出大柱的最大侧压力值是监测点7,其值为104.7 kPa,小柱的模板最大侧压力值是监测点3,其值为85.1 kPa,剪力墙中最大侧压力是监测点12,其值为106.4 kPa,同时和式(1)计算值相比,均大于计算值.从表1可得,大部分监测点的实际压力值均超出了计算值.

根据式(2)得出现浇混凝土模板侧压力最大值为125 kPa,对比表1数据可得,计算值均大于实测值.说明如果根据规范规定取两个公式中的较小值,虽然偏于经济,但是承载力达不到要求,而液体压强公式偏于安全.

3 结 语

由试验可得,混凝土浇筑过程中,混凝土初凝时间和浇筑速度为模板侧压力主要影响因素,混凝土浇筑完毕后,温度为主要因素.

柱和墙的模板最大侧压力值不在构件的最底部,而是在距底部1~2m处,施工中在此处模板支撑要加强,防止产生涨模.由试验结果得出,有些部位模板的实际压力值已经远远超出了根据规范系数影响公式计算出的设计值,在实际工程模板设计中宜采用液体压强公式.

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑施工模板安全技术规范:JGJ 162—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
(The People's Republic of China Housing and Rural Construction. Technical code for safety of forms in construction:JGJ 162—2008[S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2008.)
- [2] 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.
(LI Zengyin. Experimental study on lateral pressure of concrete formwork[D]. Beijing: Beijing University of Technology,2015.)
- [3] 薛琪. 高性能混凝土模板侧压力分析[J]. 铁道建筑技术,2012(2):61-64.
(XUE Qi. Side pressure analysis of high performance concrete formwork[J]. Railway construction technology,2012(2):61-64.)
- [4] 汪水清,刘方. 现浇混凝土模板侧压力研究[J]. 世界桥梁,2012,40(2):42-45.
(WANG Shuiqing, LIU Fang. Study on lateral pressure of cast in place concrete formwork[J]. World bridges,2012,40(2):42-45.)
- [5] 李春生,刘人怀,黄小妙,等. 泵送混凝土浇筑侧压力机理现场试验研究[J]. 工业建筑,2013,43(4):122-126.
(LI Chunsheng, LIU Renhuai, HUANG Xiaomiao, et al. Experimental study on the mechanism of pumping concrete pouring side pressure mechanism[J]. Industrial construction, 2013, 43(4):122-126.)
- [6] 潘剑云. 混凝土模板侧压力试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
(PAN Jianyun. Experimental study on lateral pressure of concrete formwork[J]. Hangzhou:

- Zhejiang University, 2014.)
- [7] 张文学,李增银,刘龙. 混凝土模板侧压力公式对比分析[J]. 工业建筑, 2014(7):132 - 136.
(ZHANG Wenxue, LI Zengyin, LIU Long. Comparative analysis of lateral pressure formula of concrete formwork [J]. Industrial construction, 2014(7):132 - 136.)
- [8] 余逊克,龚剑,赵勇. 国内外规范中的新浇混凝土对模板侧压力公式对比研究[J]. 建筑施工, 2014(12):1402 - 1405.
(SHE Xunke, GONG Jian, ZHAO Yong. Comparative study on the formula of the lateral pressure of the new cast in place concrete in the domestic and international standards[J]. Building construction, 2014(12):1402 - 1405.)
- [9] 黄斌. 钢纤维自密实混凝土模板侧压力试验初探[J]. 福建交通科技, 2014(6):33 - 36.
(HUANG Bin. Preliminary study on lateral pressure test of steel fiber self compacting concrete formwork [J]. Fujian jiaotong keji, 2014(6):33 - 36.)
- [10] 赵翀. 流变调控外加剂对自密实混凝土模板侧压力的影响[J]. 杭州:浙江工业大学, 2015.
(ZHAO Chong. Effect of rheological additives on the lateral pressure of self compacting concrete formwork [J]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015.)
- [11] SANTILLI A I, PUENTE M T. 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 - 1955.
- [12] DHIR R K, MCCARTHY M J, CALISKAN S, et al. Concrete pressure on formwork: influence of cement combinations and super plasticising admixtures [J]. Magazine of concrete research, 2009, 61(6):407 - 417.
- [13] CARTHY M, MICHAEL J. Influence of self-compacting concrete on the lateral pressure on formwork [J]. Structures and buildings, 2012, 165(3):127 - 138.
- [14] SANTILLI A, PUENTE I. An empirical model to predict fresh concrete lateral pressure [J]. Construction and building materials, 2013, 47(10):379 - 388.
- [15] PERROT A, AMZIANE S, OVARLEZ G, et al. SCC formwork pressure: influence of steel rebars [J]. Cement and concrete research, 2009, 39(6):524 - 528.
- [16] KANNAN M R, SANTHI M H. Constructability assessment of climbing formwork systems using building information modeling [J]. Procedia engineering, 2013, 64:1129 - 1138.
- [17] LIU Xiaoyong, HU Yiming, CHEN Daoyang, et al. Safety control of hydraulic self-climbing formwork in south tower construction of Taizhou bridge [J]. Procedia engineering, 2012, 45(2):248 - 252.
- [18] OMRAN A F, ELAGUAB Y M, KHAYAT K H. Effect of placement characteristics on SCC lateral pressure variations [J]. Construction and building materials, 2014, 66(5):507 - 514.
- [19] OMRAN A F, KHAYAT K H. Portable pressure device to evaluate lateral formwork pressure exerted by fresh concrete [J]. Journal of materials in civil engineering, 2013, 25(6):731 - 740.
- [20] HUANG Peng, PENG Xinlai, GU Ming. Aerodynamic devices to mitigate rooftop suction [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2014, 135(1):90 - 104.