

DOI: 10.7672/sgjs2025040014

自密实混凝土模板侧压力计算及应用条件研究

汪峰¹, 陈天彦², 李坤², 吴淑康³, 张文学³(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 中国铁路北京局集团科信部, 北京 100040;
3. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124)

[摘要] 自密实混凝土模板侧压力计算研究受多种因素影响,且理论计算值与实测值相差较大。为完善该方面的研究,在 Janssen 理论的基础上,提出自密实混凝土模板侧压力计算模型,并推导出了侧压力计算公式。首先,对比研究 12 组混凝土浇筑试验在不同模板材料、表面处理工况、浇筑速度和浇筑高度等因素影响下的试验结果。其次,基于第 4 组试验结果,探究了自密实混凝土与模板之间的摩擦系数和侧压力折减系数的时变效应,并由此对推导出的公式进行参数修正。最后,对比修正后的模型与国外计算模型计算结果,结果表明,不同模型计算偏差较小,但修正后计算公式具有清晰的自密实混凝土延展度范围、浇筑速度等实际适用条件。

[关键词] 自密实混凝土;模板;侧压力;摩擦系数;折减系数

[中图分类号] TU758.11

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)04-0014-06

Study on Calculation and Application Conditions of Lateral Pressure on Self-compacting Concrete Formwork

WANG Feng¹, CHEN Tianyan², LI Kun², WU Shukang³, ZHANG Wenxue³

(1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China;

2. Ministry of Science and Information Technology, China Railway Beijing Group Co., Ltd., Beijing 100040, China;

3. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The calculation of lateral pressure of self-compacting concrete formwork is affected by many factors, and the theoretical calculation value is quite different from the measured value. In order to improve the research in this field, on the basis of Janssen theory, the calculation model of lateral pressure of self-compacting concrete formwork was proposed, and the calculation formula of lateral pressure was derived. Firstly, the test results of 12 groups of concrete pouring tests under the influence of different formwork materials, surface treatment conditions, pouring speed and pouring height were compared and studied. Secondly, based on the results of the fourth set of tests, the time-varying effects of the friction coefficient and the lateral pressure reduction coefficient between the self-compacting concrete and the formwork were explored, and the derived formula was modified. Finally, the calculation results of the modified model and the foreign calculation model were compared. The results showed that the calculation deviation of different models was small, but the modified calculation formula had clear practical application conditions such as self-compacting concrete ductility range and pouring speed.

Keywords: self-compacting concrete; formwork; lateral pressure; friction coefficient; reduction coefficient

0 引言

自密实混凝土的使用可降低现场浇筑时的劳动强度并提高混凝土浇筑质量^[1-4]。然而,自密实混凝土浇筑产生的模板侧压力理论计算值与实测

数据离散性较大,这导致该材料在实际工程中应用受限^[5]。同时,在国内外的规范中,计算模板侧压力所采用的模型和参数方面也存在较大差异。模板土体对侧压力的影响因素多,主要包括材质特点、施工方法、模具特点^[6],多参数影响耦合作用使计算难度增大^[7]。多数计算模型仅考虑了其材料特性,但对摩擦系数等外部影响考虑甚微,这也是

[作者简介] 汪峰,高级工程师, E-mail: 185748882@qq.com

[通信作者] 张文学,教授, E-mail: zhwx@bjut.edu.cn

[收稿日期] 2024-09-15

导致其计算值和测量结果有较大差异的原因之一^[8]。普通混凝土与自密实混凝土主要区别在于材料特性及浇筑方法。由于现行规范考虑因素不全面,自密实混凝土侧压力计算结果与实测数据拟合精度较差。

近年来,国内外专家针对模板土体侧压力计算开展了大量试验。张文学等^[9]利用墙柱模板定义了超深振捣,并探究其对模板侧压力大小的影响。李文广^[10]基于试验研究了浇筑速度、混凝土坍落度及振捣方式对侧压力的影响。王德利^[11]和 Beitzel^[12]则通过 Janssen 模型对混凝土侧压力展开了深入研究,但并未考虑外部影响在浇筑中的时变效应。已有研究表明,自密实混凝土与模板间的摩擦系数随浇筑过程会产生变化,且混凝土粗细骨料、外加剂及相关浇筑条件对浇筑时产生的摩擦尤为重要^[13-15]。本文以 Janssen 理论为基础,通过开展自密实混凝土侧压力试验研究浇筑过程中关键参数的时变效应,并通过回归拟合修正已有理论公式,与国外的现有理论计算模型进行了分析和对比。

1 Janssen 理论计算模型

根据 Janssen 理论研究结果可知,散体颗粒和仓壁之间的纵向摩擦力使仓壁能较均匀地承受散体颗粒的质量。揭示出侧向压应力 P' 与竖向压应力 P 之间的关系:

$$P'(h) = KP(h) \quad (1)$$

式中: K 为侧压力相对折减系数,取决于材料内摩擦角 φ 。

仓壁内散体颗粒向上的侧向摩擦应力:

$$\tau = \mu P'(h) \quad (2)$$

式中: μ 为散体颗粒与仓壁间的摩擦系数。

由 Gardner^[16]的研究可知,现浇筑混凝土的弱结合颗粒与散体颗粒受力状态相似,可假定现浇筑混凝土为散体颗粒,可将 Janssen 理论应用于自密实混凝土模板侧压力计算^[12],模板内现浇筑混凝土的受力情况如图 1 所示。

混凝土受力平衡状态如下:

$$AdP + \mu KP(2b + 2L)dh = \rho g Adh \quad (3)$$

当 $h=0$ 时, $P(h)=0$, 即可得出混凝土模板侧压力计算公式:

$$P'(h) = \frac{\rho g A}{\mu(2b + 2L)} \times \left(1 - e^{-\frac{\mu K(2b+2L)h}{A}}\right) \quad (4)$$

式中: $P'(h)$ 为 h 位置处现浇筑混凝土的侧压力 (kPa); b 为模板截面宽度 (m); L 为模板截面长度 (m); h 为混凝土浇筑高度 (m); K 为侧压力折减系数; μ 为混凝土与模板间的摩擦系数。

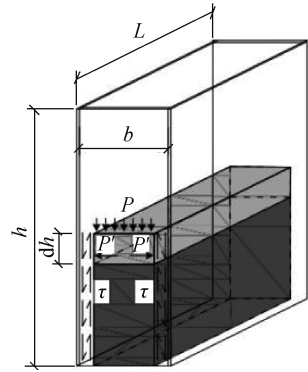


图 1 模板内现浇混凝土受力状况

Fig. 1 Force condition of cast-in-place concrete in formwork

2 自密实混凝土关键参数试验

由式(4)可知,混凝土与模板之间摩擦系数 μ 和侧压力折减系数 K 为计算模板侧压力的关键参数,在浇筑过程中存在一定变化规律。为求得 μ 和 K 在浇筑过程中的变化规律,本文设计并开展 12 组自密实混凝土浇筑试验,对试验结果进行回归拟合分析,描述 μ 和 K 在不同模板材料及表面处理工况,以及不同浇筑速度和浇筑高度下的时变特性。

2.1 试验装置设计

试验装置包括混凝土装盛装置、牵引装置和模板条,如图 2 所示。混凝土装盛装置的侧向模板预留有孔道,以便模板条能滑行。通过摇动手摇杆,模板条被匀速拉动,并记录了拉力计的数据。

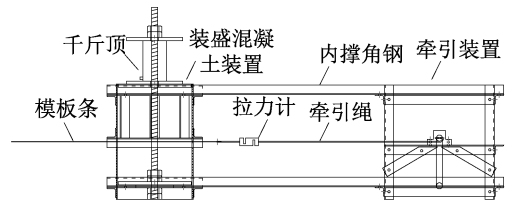


图 2 侧压力试验装置

Fig. 2 Lateral pressure test device

将 1 个竖向压力盒 S-2 及 3 个侧向压力盒 C-1, C-3, C-5 装在距底部约 20cm 高位置处,以测得试验中混凝土所产生的竖向压应力和侧向压应力,压力盒布置如图 3 所示。

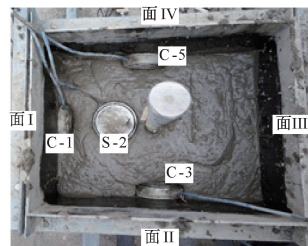


图 3 压力盒布置

Fig. 3 Distribution of pressure boxes

本试验装置可同时进行4种不同类型模板块与混凝土之间摩擦系数 μ 和混凝土侧压力折减系数 K 的测试。摩擦系数的计算基于模板块对应拉力计的拉力、混凝土模板块的接触面积和混凝土的竖向

压力,即 $\mu_i(t) = \frac{T_i(t)}{P_i(t) \cdot A_i}$;而侧压力折减系数的计算则基于试验过程中侧向压力与竖向压力的关系,

即 $K_i(t) = \frac{P'_i(t)}{P_i(t)}$ 。

2.2 试验方案设计

试验中混凝土强度等级均为C30,坍落度有600,700,800mm。使用I级粉煤灰作为掺合料,采用聚羧酸高性能减水剂QS-8020作为外加剂。根据不同的延展度、浇筑速度和高度,将试验具体分为12组,详细数据如表1所示。

表1 自密实混凝土试验条件分组情况

Table 1 Grouping of self-compacting concrete test conditions

编号	组号	设计延展度 D/mm	浇筑速度/ (m·h ⁻¹)	浇筑高 度/m	是否 振捣
SCC1	1	600	2	5.5	否
	2	600	4	7.5	否
	3	600	6	6.0	否
SCC2	4	700	2	5.5	否
	5	700	4	8.0	否
	6	700	6	6.0	否
SCC3	7	800	2	7.5	否
	8	800	4	6.5	否
	9	800	6	5.5	否
SCC4	10	700	6	6.0	否
	11	—	6	6.0	否
	12	—	6	6.0	否

为体现出不同模板材料相应参数在试验中的变化特性,共选用钢材、木材和塑料3种材料。两条钢材做成的模板,其中一条涂抹了脱模油(So),另一条涂抹了脱模漆(Sp)。模板块被设计成板条状,以方便在试验装置内滑动。

2.3 试验数据采集

本试验采用JMZX-5006A数码压力盒与综合测试仪进行侧压力值记录,压力盒的灵敏度为0.1kPa,最大量程为0.6MPa。拉力记录仪器采用HP-5K外置测力仪,数据采集频率为600次/min。并使用液压千斤顶对装置顶板部位施压,模拟混凝土的浇筑位置高度,并调节施压速率以模拟混凝土的实际浇筑速度。

试验开始前,测量并记录混凝土性能。将装置组装后,开始试验并记录基本参数。整个试验过程共耗用了3.2m³混凝土。

3 试验数据分析

3.1 摩擦系数 μ 回归拟合分析

由于自密实混凝土的常规延展度范围差异较小,将浇筑速度作为主要变量,用回归拟合的方法分析摩擦系数。将相同速度、相同模板块包含3组延展度的摩擦系数按照时间顺序排列,在考虑延展度、浇筑速度、浇筑时间、模板材料和浇筑高度等因素的情况下,对摩擦系数进行时变效应回归拟合分析。摩擦系数的计算数据以第4组(700mm,2m/h)为例,计算结果如表2所示,2m/h下的摩擦系数拟合结果如图4所示。

表2 第4组各模板块摩擦系数计算结果

Table 2 Calculation results of friction coefficient of each formwork in group 4

时间/ min	模板			
	So	Sp	PLw	PVC
0	0.055	0.104	0.178	0.069
7.5	0.054	0.099	0.173	0.065
30	0.050	0.096	0.195	0.066
45	0.058	0.097	0.168	0.062
60	0.048	0.076	0.128	0.053
75	0.058	0.091	0.178	0.058
90	0.067	0.091	0.196	0.055
105	0.074	0.118	0.236	0.083
120	0.077	0.147	0.293	0.112
135	0.077	0.176	0.321	0.130
150	0.083	0.200	0.380	0.155
165	0.115	0.191	0.351	0.134

注:PLw表示木胶合模板不涂脱模剂;PVC表示PVC塑料模板不涂脱模剂

由图4可知,混凝土与模板块之间的摩擦系数随时间呈线性增长。考虑时变特性的摩擦系数拟合公式如表3所示。

表3 延展度摩擦系数拟合公式

Table 3 Fitting formula of ductility friction coefficient

模板 种类	浇筑速度/(m·h ⁻¹)		
	2	4	6
So	0.000 2t+0.023 6	0.000 5t+0.016 6	0.000 2t+0.028 7
Sp	0.000 5t+0.043 5	0.000 9t+0.029 6	0.000 5t+0.044 5
PLw	0.001 5t+0.066 7	0.002 6t+0.014 9	0.001 9t+0.077 9
PVC	0.000 7t+0.010 5	0.001 4t+0.011 4	0.001 0t+0.030 2

注:表中t为每组试验所对应的时间

3.2 折减系数 K 回归拟合分析

试验中将测出的侧向压力除以竖向压力即可算出侧压力折减系数 $K(t)$,其中延展度和浇筑速度是主要考虑的因素。由拟合分析可知,当折减系数时变效应回归拟合公式的主要变化因素是浇筑速度时,该公式相关性较弱。将每种延展度下包含的3种浇筑速度的折减系数按时间顺序排列,进行折

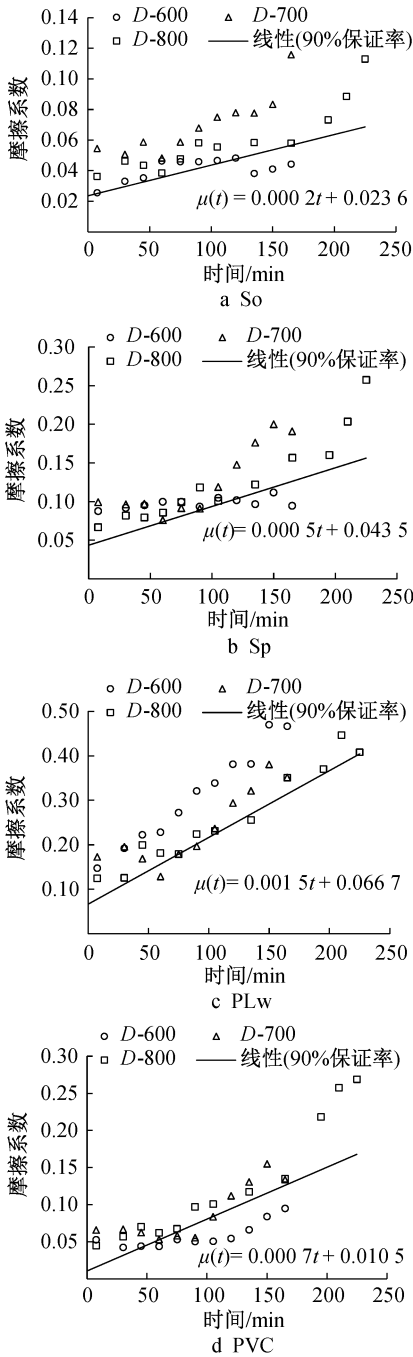


图4 摩擦系数时变效应回归拟合

Fig. 4 Regression fitting of time varying effect of friction coefficient

减系数时变效应回归拟合分析。以第4组为例,具体拟合结果如表4所示,而各延展度下的折减系数拟合数据如图5所示。

通过拟合分析可知,自密实混凝土与模板间的折减系数随浇筑时间的增加呈线性减小趋势,折减系数所满足的函数形式如下:

$$K(t) = k_0 - \eta t \text{ 且 } k_0 \leq 1 \quad (5)$$

式中: t 为各组试验浇筑时间(min); k_0, η 为折减系数时变效应回归拟合参数。

表4 第4组折减系数计算结果

Table 4 Results of reduction coefficient of group 4			
时间/min	折减系数	时间/min	折减系数
0	0.731	90	0.889
7.5	0.771	105	0.884
30	0.788	120	0.812
45	0.983	135	0.714
60	0.871	150	0.676
75	0.919	165	0.618

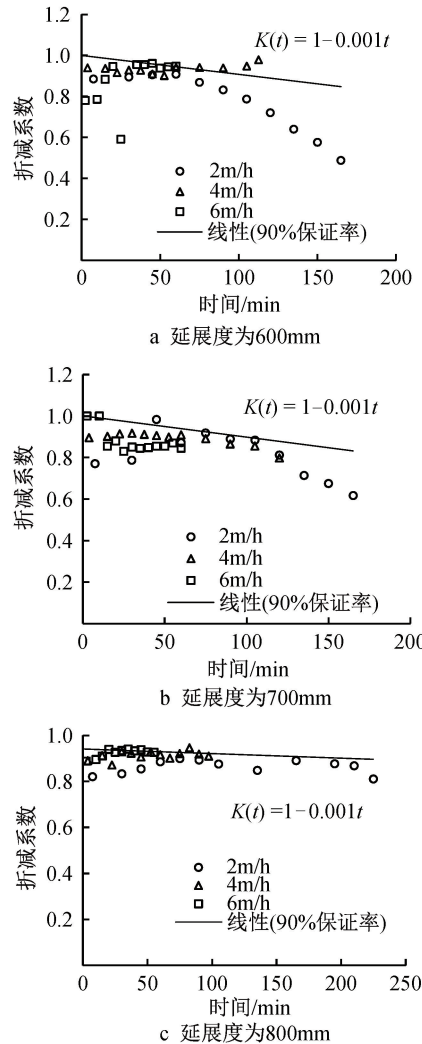


图5 各延展度折减系数拟合结果

Fig. 5 Fitting result of each ductility reduction coefficient

通过拟合分析可知,3种延展度的折减系数拟合公式均可用 $K(t) = 1 - 0.001t$ 表示, η 取值为0.001,将折减系数时变参数与自密实混凝土延展度建立关系。

3.3 计算模型公式修正

将摩擦系数和折减系数的时变特性进行回归拟合分析,且对 Janssen 理论的侧压力计算公式进行参数修正:

$$P'(h) = \frac{\omega \rho g A}{\mu(t)(2b + 2L)} \times$$

$$(1 - e^{-\frac{\mu(t)k(t)(2h+2L)h}{A}}) \quad (6)$$

式中: ω 为安全系数,取1.2; $\mu(t)$ 为修正后的时变效应摩擦系数; $K(t)$ 为修正后的时变效应折减系数。

3.4 不同模型对比分析

基于混凝土触变性 A_{thix} 创立模板侧压力计算模型, Billberg 等^[18] 推导出侧压力计算公式:

$$P_{max} = \left(1 - \frac{HA_{thix}}{\rho g e R}\right) \rho g H = \rho g H - \frac{H^2 A_{thix}}{eR} \quad (7)$$

式中: P_{max} 为模板侧压力; ρ 为自密实混凝土密度 (kg/m^3); H 为浇筑高度 (m); 试验各试件的参数取值见文献^[17]。

Billberg^[17] 从模板内混凝土的受力平衡角度推导出自密实混凝土模板侧压力计算公式:

$$P(h) = \rho g H - \frac{C_{thix} H}{R} \left(2 + \frac{H}{d}\right) \quad (8)$$

式中: $P(h)$ 为模板侧压力; ρ 为自密实混凝土密度 (kg/m^3); H 为浇筑高度 (m); d 为模板宽度 (m); C_{thix} 为混凝土触变性, 试验参数取值见文献^[15]。

将 Billberg 等^[17] 得出的 8 个现场墙体自密实混凝土模板侧压力实测数据作为计算公式验证对象, 试验分组概况如表 5 所示。

表 5 现场试验概况分组

Table 5 Field test overview grouping

组号	模板尺寸/m	延展度/mm	浇筑高度/m	浇筑速度/(m·h ⁻¹)	浇筑时间/h	实测值/kPa
1	2.4×0.2×6.6	610	3.26	3.63	0.90	45
2	2.4×0.2×4.2	710	3.61	5.13	0.70	49
3	2.4×0.2×6.6	600	6.01	5.06	1.19	82
4	2.4×0.2×4.2	630	3.66	2.71	1.35	65
5	2.4×0.2×6.6	615	5.02	6.44	0.78	87
6	2.4×0.2×4.2	650	3.71	3.27	1.13	74
7	2.4×0.2×6.6	710	5.02	5.09	0.99	97
8	2.4×0.4×4.2	620	3.65	3.19	1.14	52

由表 5 可知, 试验中的浇筑速度为 2~7m/h, 延展度为 600~800mm, 与关键参数试验条件相符。在这些条件下, 通过使用本文的修正公式进行计算误差分析, 并将结果与 Ovarlez & Roussel 及 Beitze 的

表 6 实测数据与不同模型计算对比分析

Table 6 Comparison and analysis of measured data and calculation of different models

项目	试件编号								相对误差标准差	
	1	2	3	4	5	6	7	8		
实测值/kPa	45	49	82	65	87	74	97	52		
修正公式	计算值/kPa	64.45	63.94	83.62	68.89	5.96	6.97	4.92	2.46	
	相对误差/%	0.432	0.304	0.02	0.06	-0.126	0.04	-0.124	0.586	0.245
Ovarlez & Roussel 模型	计算值/kPa	58.91	77.31	114.69	82.01	99.2	71.76	90.14	78.65	
	相对误差/%	0.309	0.578	0.399	0.262	0.14	-0.03	-0.071	0.513	0.222
Beitzel 模型	计算值/kPa	57.18	76.82	113.27	81.64	98.15	70.45	87.95	77.4	
	相对误差/%	0.271	0.568	0.381	0.256	0.128	-0.048	-0.093	0.488	0.223

模板侧压力计算公式进行对比分析。各模型的计算误差和标准差对比如表 6 所示。各试件计算的相对误差及标准差对比如图 6, 7 所示。

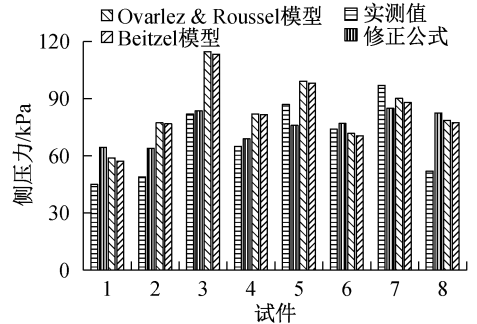


图 6 计算压力对比分析

Fig. 6 Comparative analysis of theoretical pressure

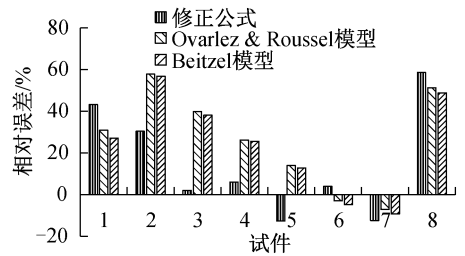


图 7 相对误差对比分析

Fig. 7 Comparative analysis of relative error

1) 修正公式计算值与实测值相对误差的标准差为 24.5%, Ovarlez 计算模型相对误差的标准差为 22.2%, Beitzel 计算模型相对误差的标准差为 22.3%。

2) 模型试验中得出的试件测量数据较按修正公式计算得出的数据小, 试件的实测值与计算值的相对误差最大值为 58.6%, Ovarlez 计算模型相对误差的最大值为 57.8%, Beitzel 计算模型相对误差的最大值为 56.8%。3 种计算模型的计算结果较接近, 计算偏差不大。

3) 本文修正公式与 Ovarlez & Roussel, Beitze 侧压力计算模型对验证试件的计算相对误差及标准差结果偏差不大, 但修正后的自密实混凝土模板侧

压力计算公式具有清晰的自密实混凝土延展度范围、浇筑速度等实际适用条件;而 Ovarlez & Roussel, Beitze 计算模型将自密实混凝土触变性参数作为主要计算参数,该性能参数测试过程繁琐且误差不可控,计算公式的实际适用条件不够明确。因此,该修正公式的适用性更强,可与模板侧压力计算规范作为模板工程设计的参考依据。

4 结语

1) 国内外规范在模板侧压力计算时考虑的理论模型及参数选择方面有较大差异,多数计算模型仅考虑了其材料特性,模型计算结果与实测数据表现出显著的离散性。

2) 通过修正公式的计算误差结果可反映设计试验装置的相对准确性。根据拟合结果修正后的公式可较准确地预测模板侧压力。与对比的计算模型相比,本文推导的修正公式适用条件相对明确,更适合作为混凝土模板设计时的参考依据。

3) 自密实混凝土模板侧压力受较多因素影响,且各因素对其作用的过程和机理复杂。本文未考虑混凝土材料触变性及钢筋分布在侧压力形成过程中的作用,后续仍需进一步研究以更贴合实际工程需要。

参考文献:

[1] 童炳丰. 混凝土外加剂的实际应用现状及未来发展路径[J]. 绿色环保建材, 2020(10): 20-21.
TONG B F. Practical application status and future development path of concrete admixtures[J]. Green environmental protection building materials, 2020 (10): 20-21.

[2] 王学成,姜凤传. 混凝土外加剂的应用分析[J]. 工程技术研究, 2020, 5(16): 143-144.
WANG X C, JIANG F C. Application analysis of concrete admixtures [J]. Engineering technology research, 2020, 5 (16): 143-144.

[3] 韩立祥. 锚具槽回填微膨胀自密实混凝土试验研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(10): 19-23.
HAN L X. Experimental study on micro-expansion self-compacting concrete for backfilling of anchorage slots [J]. Construction technology, 2024, 53(10): 19-23.

[4] 武亚,夏芬,揭双全,等. 纳米 CSH-PCE 溶液处理再生骨料对再生骨料自密实混凝土力学性能与耐久性的影响[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(16): 78-84,96.
WU Y, XIA F, JIE S Q, et al. Effect of nano-CSH-PCE solution treatment of recycled aggregate on mechanical properties and durability of self-compacting concrete with recycled aggregate [J]. Construction technology, 2023, 52(16): 78-84,96.

[5] BENAICHA M, BELCAID A, HAFIDI A A, et al. Evolution of pressure generated by self compacting concrete on a vertical

channel[J]. Engineering structures, 2019, 191: 432-438.

[6] 任凯博,侯永康,牛润明,等. 倾斜塔柱新浇混凝土模板侧压力试验研究[J]. 公路, 2020, 65(2): 108-114.
REN K B, HOU Y K, NIU R M, et al. Experimental study on lateral pressure of newly poured concrete formwork for inclined tower column[J]. Highway, 2020, 65 (2): 108-114.

[7] TEIXEIRA S, SANTILLI A, PUENTE I. Analysis of casting rate for the validation of models developed to predict the maximum lateral pressure exerted by self-compacting concrete on vertical formwork[J]. Journal of building engineering, 2016, 6: 215-224.

[8] 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, 41(1): 90-101.

[9] 张文学,李云开,谢全懿. 振捣深度对新浇筑混凝土模板侧压力影响研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(12): 110-115.
ZHANG W X, LI Y K, XIE Q Y. Study on the influence of vibration depth on the lateral pressure of newly poured concrete formwork[J]. Industrial construction, 2016, 46 (12): 110-115.

[10] 李文广. 新浇筑混凝土模板侧压力影响因素试验研究[J]. 铁道建筑, 2019, 59(11): 37-40,45.
LI W G. Experimental study on influencing factors of lateral pressure of new concrete formwork [J]. Railway engineering, 2019, 59 (11): 37-40,45.

[11] 王德利. “贮仓法”计算混凝土侧压力[J]. 水运工程, 1990(7): 15-17.
WANG D L. ‘Storing method’ to calculate the lateral pressure of concrete [J]. Port & waterway engineering, 1990 (7): 15-17.

[12] BEITZEL M. Modeling fresh concrete pressure of normal and self-compacting concrete[J]. RILEM bookseries, 2010: 243-254.

[13] 计均,黄耕,张文学,等. 基于分层总和法的混凝土模板侧压力计算[J]. 工业建筑, 2022, 52(4): 179-185.
JI J, HUANG G, ZHANG W X, et al. Lateral pressure calculation of concrete formwork based on layerwise summation method[J]. Industrial construction, 2022, 52 (4): 179-185.

[14] 吴淑康,张文学,计均,等. 考虑时变特性的自密实混凝土模板侧压力试验研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(8): 120-125.
WU S K, ZHANG W X, JI J, et al. Experimental study on lateral pressure of self-compacting concrete formwork considering time-varying characteristics [J]. Industrial construction, 2021, 51 (8): 120-125.

[15] VANHOVE Y, DJELAL C, MAGNIN A. Prediction of the lateral pressure exerted by self-compacting concrete on formwork[J]. Magazine of concrete research, 2004, 56(1): 55-62.

[16] GARDNER N. PRESSURE of concrete on template-a review [J]. Journal of the american concrete institute, 1985, 82: 744-753.

[17] BILLBERG P H, ROUSSEL N, AMZIANE S, et al. Field validation of models for predicting lateral form pressure exerted by SCC[J]. Cement and concrete composites, 2014, 54: 70-79.