

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.06.019

泡沫混凝土与钢丝粘结性能试验与模拟

于 蕾,傅玉勇,张 君,王家赫

(清华大学 土木工程系,100084 北京)

摘要:为研究埋入深度与基材密度对钢丝拔出力的影响,试验制备3种不同容重泡沫混凝土,将3种埋入深度的镀锌钢丝垂直埋置在3种基材中.养护7 d,进行钢丝从泡沫混凝土中拔出试验,得到拔出力与拔出位移的关系曲线.结果分析表明:同容重等级泡沫混凝土,钢丝埋入深度越长,拔出力越大,拔出位移也越大;相同埋入深度下,泡沫混凝土容重等级越大,钢丝拔出力也越大,拔出位移也越大.为模拟钢丝拔出行为,基于试验数据建立了钢丝从泡沫混凝土中拔出的3阶段模型,模型计算结果与实测试验结果吻合良好.用该模型可模拟不同埋入深度的钢丝从不同容重的泡沫混凝土中拔出行为.基于模型计算,得到不同容重泡沫混凝土钢丝拔出力峰值与埋深的对应关系,以及钢丝数量与所能提供粘结强度的对应关系.

关键词:泡沫混凝土;钢丝;粘结强度;拔出位移;拉拔模型

中图分类号: TU528.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)06-0119-05

Test and simulation on pull-out behavior of steel wire in foam concrete

YU Lei, FU Yuyong, ZHANG Jun, WANG Jiahe

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, 100084 Beijing, China)

Abstract: Three kinds of foam concretes with different density were used and three different embedment lengths of wires were selected to study the pull-out behavior of steel wire from foam concrete. After 7 days of curing, steel wire was pull-out from the foam concrete. Test data including pull-out force and wire-end displacement were obtained. Experimental results show that pull-out peak load and corresponding wire end slippage increase with the embedment length and density of foam concrete. Based on the test results, a pull-out model of wire from foam concrete is developed with assumption of three stage bond strength assumptions. The model results are well agreed with the test results. The developed model can simulate pull-out behavior of steel wire with different embedment length. Base on this model, relationships of steel wire pull-out strength versus embedment length and pull-strength versus number of steel wires in foam concretes can be obtained.

Keywords: foam concrete; steel wire; bonding strength; pullout displacement; pullout model

中国北方地区新建居住建筑需满足在1980年住宅通用设计采暖能耗基准水平的基础上节能幅度75%以上^[1].在普通建筑中,通过维护结构向外耗散的热量约为能耗总量的70%,因而对结构使用新型高效保温技术,是达到要求建筑节能率的关键^[2].

一般建筑填充墙主要采用加气混凝土砌块^[3].外敷高效保温板,以使墙体总厚度与外保温现浇混凝土墙体相当.外部粘贴聚苯板易脱落,保温系统长期安全性、耐久性问题比较突出^[4-5].

目前比较可靠的做法是通过钢丝网腹丝拉结技术实现聚苯板与泡沫混凝土砌体一体化.因此,泡沫混凝土作为基材,与钢丝网架聚苯板上的金属腹丝的粘结力首先需要试验确定.

本文通过固定钢丝长度,从不同容重等级泡沫混凝土中拔出试验,量化基材对钢丝拔出力的影响;同时固定泡沫混凝土容重,变化钢丝埋入深度,量化埋入深度对钢丝拔出力的影响,进而为外墙保温体系中腹丝的设置提供参考.

1 钢丝拔出试验

1.1 原材料

为保证泡沫混凝土不易塌陷,以快凝为宜,试验采用快硬硫铝酸盐水泥,粉煤灰采用一级低钙灰,骨

收稿日期: 2015-04-08.

基金项目: 国家自然科学基金(51278278).

作者简介: 于 蕾(1985—),女,博士,助理研究员;

张 君(1962—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 张 君, junz@tsinghua.edu.cn.

料 100-200 目石英砂,减水剂采用粉状聚羧酸减水剂,发泡剂采用 FP-180 动物蛋白发泡剂,与水配置比例为 1:10;水泥砂浆拌合水为普通自来水;钢丝物理性能等指标见表 1. 钢丝采用热镀锌钢丝,长 130 mm,直径 2 mm,抗拉强度 1 370 MPa,伸长率 5%.

1.2 配合比

研究配置了 3 个容重等级的泡沫混凝土,分别为 500、700、1 000 kg/m³,配合比见表 1,3 个容重等级泡沫混凝土的 7、28 d 抗压强度见表 2.

表 1 泡沫混凝土配合比

ρ	kg · m ⁻³				
	水泥	粉煤灰	砂	水	泡沫
1 000	580	145	167	109	35
700	435	109	125	82	35
500	319	80	92	60	35

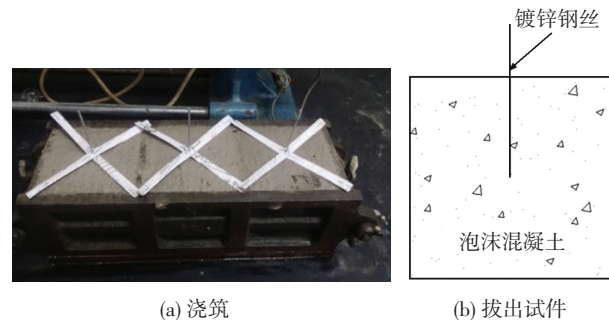
表 2 泡沫混凝土基材抗压强度

$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	抗压强度/MPa	
	7 d	28 d
1 000	4.499	5.914
700	2.673	3.920
500	0.519	0.698

用硫铝酸盐水泥制成的泡沫混凝土,其 7 d 龄期抗压强度已经达到 28 d 龄期的 75 % 左右,试验采用 7 d 龄期的泡沫混凝土用于钢丝抗拔分析.

1.3 试验方法

钢丝预先在 30 mm 处标记刻度;将钢丝用支架预先固定在 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体模具中心,使其垂直伸入模具 30 mm,将拌合均匀的泡沫混凝土浇入模具,振捣抹平;24 h 拆模,放入标准养护室养护 7 d,取出擦干表面水分.50、70 mm 埋入深度带钢丝试块的制备方法同埋深 30 mm 试块,见图 1.



(a) 浇筑

(b) 拔出试件

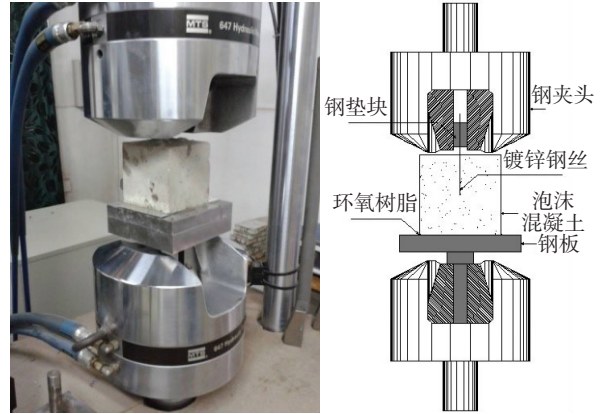
图 1 带钢丝拔出试块的制备

钢丝拔出试验采用美国 MTS810 材料试验机进行,试验装置见图 2. 试验采用位移控制,压头下降速率保持 0.002 5 mm/s,采集时间、位移、荷载数据.

2 钢丝拔出模型

为建立钢丝从混凝土中拔出模型,首先做如下假设:(1)钢丝和混凝土基材均为线弹性材料;(2)在钢丝拔出过程中,钢丝泊松比的影响忽略不计;(3)钢丝受力后,钢丝与混凝土基材间形成脱粘区,钢丝表面

的摩擦力、基材收缩以及骨料的机械咬合共同形成钢丝与基材之间的界面剪切应力 τ ,均匀分布在脱粘区域;(4)在钢丝与基材脱粘尖端到达钢丝端部后,钢丝开始从混凝土基材中拔出,钢丝拔出过程中界面剪切应力 τ 为钢丝拔出端位移的函数.



(a) 钢丝拔出试验照片

(b) 钢丝拔出试验简图

图 2 钢丝拔出试验装置

依据如上假设,钢丝与混凝土基材之间的界面剪切应力 τ 与拔出端位移 δ 的关系可表达为^[6]

$$\tau = \begin{cases} \tau_0, & \delta \leq \delta^* ; \\ \tau_0 + f(\delta), & \delta > \delta^* . \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ_0 为脱粘阶段最大粘结强度, $f(\delta)$ 为界面粘结强度衰减函数,与钢丝拔出段位移相关, δ^* 为钢丝完全脱粘时拔出端位移.

设直径为 d ,埋入深度为 L 的钢丝,端部受拉拔力 P .随着 P 的增大,在钢丝与混凝土基材之间将形成由拔出端向内的脱粘区,且脱粘区尺寸随荷载增加而逐渐增大.此阶段,即脱粘阶段,钢丝拔出示意图见图 3.

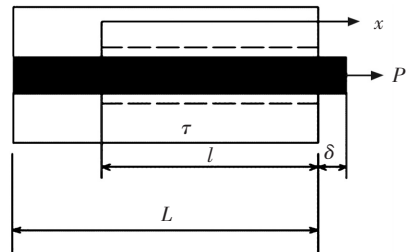


图 3 钢丝脱粘阶段示意

在脱粘区内,恒定的界面剪切阻力 τ 与外荷载 P 平衡.取脱粘尖端为坐标原点,在脱粘区域 l 内给定位置 x 处,钢丝所受拉力 $P(x)$ 可表达为

$$P_f(x) = \pi d \tau x + P_0, \quad (2)$$

其中 P_0 为脱粘阶段钢丝与混凝土基材之间的弹性粘结力^[7],其大小由钢丝与周围混凝土之间的物理化学作用决定,通常可表达为

$$P_0 = \sqrt{\pi^2 G_d d^3 E} / 2, \quad (3)$$

G_d 为化学粘结能,单位 J/mm². 钢丝拉拔应力分布为

$$\sigma(x) = \frac{4\tau}{d}x + \sqrt{\frac{8G_d E}{d}} \quad (4)$$

设钢丝弹性模量为 E ,则钢丝应变分布为

$$\varepsilon(x) = \frac{4\tau}{dE}x + \sqrt{\frac{8G_d}{dE}} \quad (5)$$

可见当钢丝与基体间粘结强度为常数时,钢丝内轴拉应变沿脱粘长度是线性分布。 $x=l$ 时,钢丝端部的拔出力 P 为

$$P = \pi d \tau l + P_0 \quad (6)$$

同时钢丝端部的拔出位移 δ 可表达为

$$\delta = \int_0^l \varepsilon(x) dx \quad (7)$$

把式(5)带入式(7)并积分有

$$l = \sqrt{\frac{Ed}{2\tau^2}} (\sqrt{G_d + \tau\delta} - \sqrt{G_d}) \quad (8)$$

将式(8)带入式(6),可获得钢丝拔出力 P 与拔出端位移 δ 的关系为

$$P = \sqrt{\frac{\pi^2 \tau E d^3}{2} \delta + \frac{\pi^2 G_d E d^3}{2}} \quad (9)$$

由式(8)亦可获得当脱粘长度达到钢丝锚固长度时($l=L$),钢丝端部位移 δ^* 为

$$\delta^* = \frac{2\tau_0 L^2}{Ed} + \sqrt{\frac{8G_d L^2}{Ed}} \quad (10)$$

当脱粘尖端到达钢丝锚固端点以后,钢丝进入拔出阶段,见图 4。在此阶段,钢丝拔出力与拔出位移关系为

$$P(\delta) = \pi d_l \tau (L - \delta + \delta^*) \quad (11)$$

式中 δ^* 为钢丝脱粘尖端恰好到达钢丝锚固端时的钢丝端部位移,可由式(2)计算。至此,钢丝由混凝土基材拔出的两阶段模型,即脱粘阶段与拔出阶段建立完成。

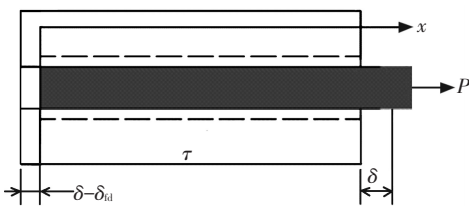


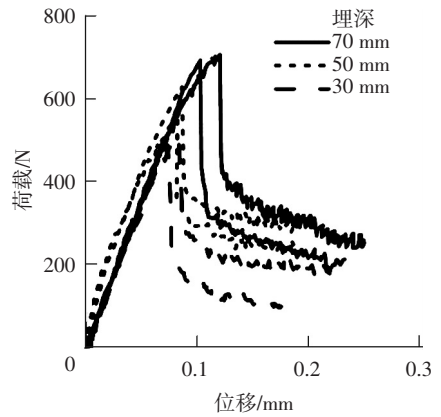
图 4 钢丝拔出阶段示意

3 结果及分析

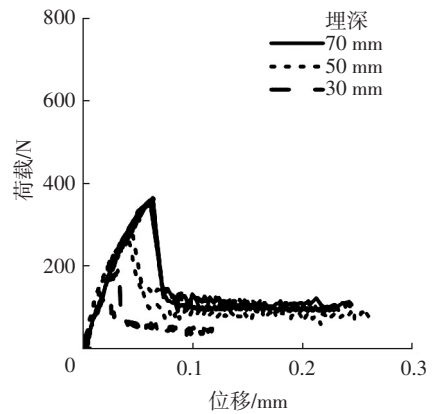
3.1 拟合模型的建立

实测钢丝拔出荷载与拔出端位移 δ 的关系见图 5。拔出力随钢丝端部位移 δ 的增加先上升后下降而后趋于平缓,拔出力与拔出位移呈非线性关系,峰值荷载对应于钢丝脱粘与拔出阶段分界点,峰值荷载之前为钢丝脱粘阶段,峰值荷载之后为钢丝拔出

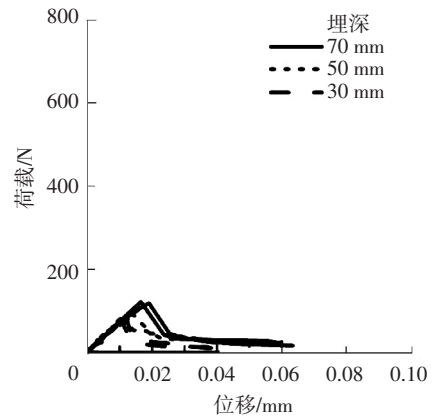
阶段。峰值荷载对应横坐标为钢丝完全脱粘时拔出端位移 δ^* 。



(a) $\rho=1\ 000\ \text{kg/m}^3$



(b) $\rho=700\ \text{kg/m}^3$



(c) $\rho=500\ \text{kg/m}^3$

图 5 钢丝拔出荷载随拔出位移变化曲线

首先可看出,钢丝埋入深度越长,其拔出力峰值越大,其次,泡沫混凝土容重越大,同样埋入深度钢丝拔出力越大,脱粘阶段拔出力随拔出位移增速越快。因此,在钢丝聚苯网架板设计中,可考虑增加钢丝埋入深度或提高基材密实度来提高钢丝的抗拔出能力。

钢丝拔出力快速增加时钢丝处于脱粘阶段,钢丝与泡沫混凝土基材之间粘结强度 τ 保持不变,记为 τ_0 ;钢丝与泡沫混凝土脱粘后进入拔出阶段,已知钢丝拔出端位移 δ 和拔出力大小,由式(11)计算

给定时刻粘结强度 τ 。

图 6 为 3 个容重等级泡沫混凝土与钢丝粘结强度与位移关系图。可见,在脱粘阶段,也即粘结强度 τ 为常数阶段,粘结强度 τ 不变,在拔出阶段,粘结强度 τ 随钢丝拔出端位移 δ 的增大先是快速减小,之后趋于缓和。根据图 6 所示 τ - δ 曲线,将其划分为 3 段,粘结强度 τ 为常数时为阶段 1,粘结强度 τ 随拔出端位移 δ 快速下降的过程为阶段 2,粘结强度 τ 随拔出端位移 δ 缓慢下降并趋于定值的过程为阶段 3,建立钢丝从泡沫混凝土中拔出的 τ - δ 模型:

$$\tau = \begin{cases} \tau_0, & \text{for } 0 < \delta \leq \delta^*; \\ \tau_0 + k_1(\delta - \delta^*), & \text{for } \delta^* < \delta \leq \delta_1; \\ \tau_0 + k_1(\delta_1 - \delta^*) + k_2(\delta - \delta_1)^{k_3}, & \text{for } \delta > \delta_1. \end{cases} \quad (12)$$

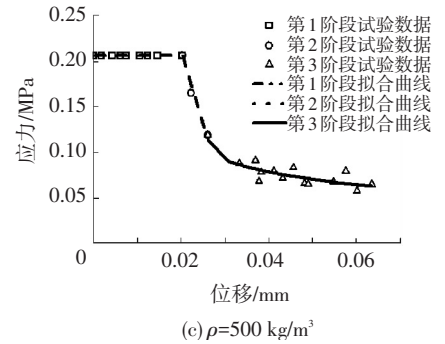
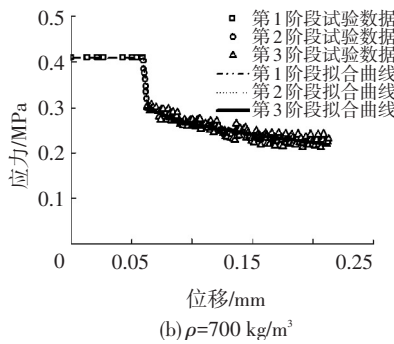
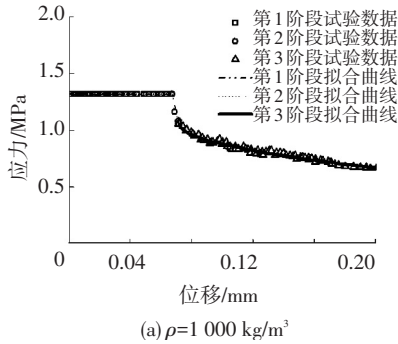


图 7 粘结强度模型值与试验结果对比

表 3 钢丝与混凝土粘结参数

$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	τ_0 / MPa	$k_1 / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-3})$	$k_2 / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-3})$	k_3	δ^* / mm	δ_1 / mm	$G_d / 10^{-3} (\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$
1 000	1.317	-61.4	-1.143	0.526	0.067 2	0.071 4	5.749
700	0.410	-29.5	-0.236	0.485	0.059 1	0.062 4	3.408
500	0.206	-15.6	-0.168	0.351	0.020 2	0.025 9	0.346

3.2 模型验证与应用

将表 2 拟合得到粘结模型参数,代入模型(12)得到粘结强度 τ ,将 τ 、 δ^* 代入式(11),计算钢丝拔出力,可获得不同埋入深度钢丝拔出力随拔出端部位移的计算结果,如图 8 中实线条所示;图 8 中的

离散点为试验结果。为比较,不同容重等级拔出力随拔出位移变化规律计算图与实测图的纵坐标统一。模型结果与实验结果吻合良好,表明所建模型及其相关粘结参数可较好模拟钢丝从泡沫混凝土中拔出。

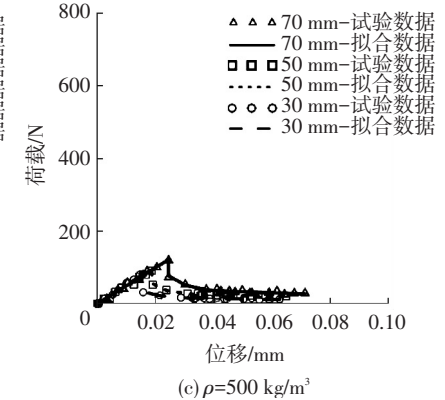
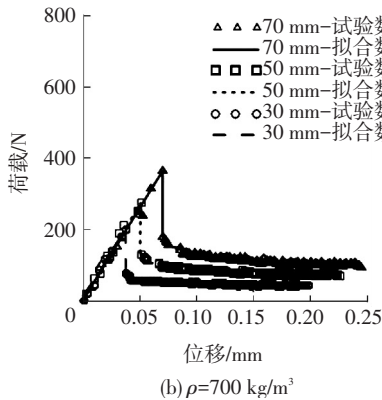
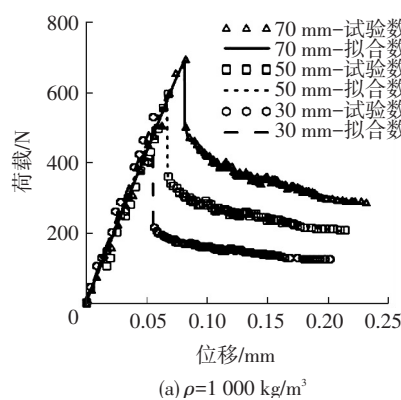


图 8 模型计算结果与试验结果对比

钢丝从不同容重等级泡沫混凝土中拔出,容重等级越高,脱粘阶段拔出力随拔出位移增长越快,

峰值拔出力随容重等级的增大而增大;500 容重等级埋深 70 mm 峰值拔出力 121 N,小于 700 容重等

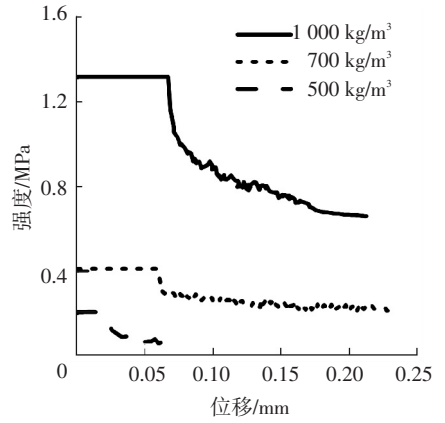


图 6 粘结强度随钢丝端部拔出位移变化曲线

结合图 6 和式(12),对曲线进行分段拟合^[8],可得不同容重等级泡沫混凝土与钢丝粘结应力 τ 与拔出段位移 δ 之间的关系模型,见图 7,相关参数见表 3。

级埋深 30 mm 峰值拔出力 202 N;700 容重等级埋深 70 mm 峰值拔出力为 363 N,小于 1 000 容重等级埋深 30 mm 峰值拔出力 515 N,可见,基材不同,钢丝拔出力随基材分级情况显著。

3.3 模型应用

依模型参数计算,不同容重等级泡沫混凝土,钢丝拔出力随埋入深度的变化规律见图 9。

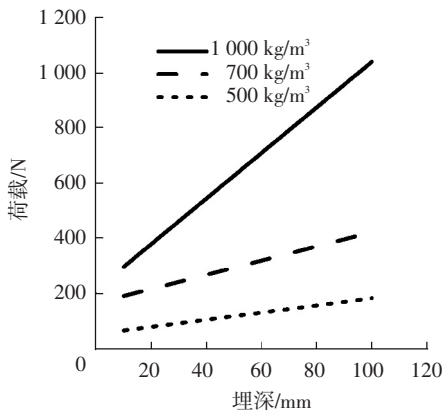


图 9 泡沫混凝土钢丝拔出力与埋深关系

由图 9 可知,随钢丝初始埋入深度的增加,钢丝拔出力增大;同样埋深下,钢丝从泡沫混凝土中的拔出力 1 000 容重大于 700 容重大于 500 容重;从图 9 容易读出不同埋深钢丝拔出力峰值,为钢丝网架板设计中的钢丝埋深提供参考。

由图 9 和模型参数,还可计算得到单位面积钢丝埋置根数同粘结强度之间的关系,见图 10。

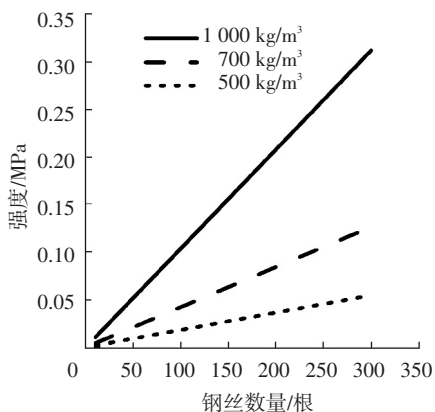


图 10 泡沫混凝土粘结强度与钢丝根数关系

由图 10 可发现,每平方米泡沫混凝土中,随着埋入钢丝根数的增加,粘结强度增大;从图 10 容易获得单位面积钢丝根数所对应的粘结强度值,因此可为钢丝网架板设计中的钢丝的埋入根数提供参考。

4 结 论

1) 钢丝从泡沫混凝土中拔出行为分 3 个阶段,即粘结强度为常数的脱粘阶段,粘结强度随拔出位移快速下降阶段和之后的平缓下降阶段.基于三阶段模式的钢丝拔出模型可较好预测钢丝从泡沫混凝土中的拔出行为。

2) 同容重泡沫混凝土,钢丝埋入深度越长,峰值拔出力越大,拔出位移也越大.相同埋入深度下,泡沫混凝土容重越大,峰值拔出力越大,拔出位移也越大。

3) 基于钢丝拔出试验获得的钢丝与不同容重泡沫混凝土界面粘结参数,为泡沫混凝土应用提供了基本参数取值。

4) 基于试验与模型计算,可确定钢丝在泡沫混凝土中最佳埋入数量与埋入深度。

参考文献

- [1] 北京市质量技术监督局. 居住建筑节能设计标准: DB11/891—2012[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2012.
- [2] 韩珀. 泡沫混凝土及其复合墙体材料性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [3] 中华人民共和国建设部. 外墙外保温工程技术规程: JGJ144—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [4] 王晓艳, 陈欣乐. 外墙保温系统脱落事故分析及加固修复方案[J]. 工程经济, 2014(8): 60-63. DOI: 1672-2442(2014)08-0060-04.
- [5] 张君, 高原, 黄振利. 内外保温墙体温度应力对比分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(7): 895-905. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7043.2011.07.011.
- [6] ZHANG Jun, STANG H, LI V C. Crack bridging model for fiber reinforced concrete under fatigue [J]. International Journal of Fatigue, 2001; 655-670. DOI: 10.1016/S0142-1123(01)00041-X.
- [7] LIN Z, TAKAYUKI K, LI V C. On interface property characterization and performance of fiber-reinforced cementitious composites [J]. Concrete Science and Engineering, 1999, 1: 173-174.
- [8] 方安平, 叶卫平. Origin7.5 科技绘图及数据分析[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 330-333.

(编辑 赵丽莹)