

文章编号: 1004-4353(2016)03-0252-05

方中空夹层钢管再生混凝土组合柱 传热性能计算分析

宋兵, 李佰寿*

(延边大学工学院 结构工程学科, 吉林 延吉 133002)

摘要: 以煅烧硅藻土和玻化微珠掺量为主要变化参数,对玻化微珠再生混凝土试块的性能进行了试验研究. 采用有限元软件 ANSYS 分析了不同空心率 $\chi(0,0.35)$ 和混凝土(普通混凝土、玻化微珠再生混凝土)对组合柱传热性能的影响,并通过理论计算对比了单一墙体和考虑热桥后的方中空夹层钢管混凝土组合柱平均传热系数. 结果显示:煅烧硅藻土掺量为 3% 时,玻化微珠掺量为 130% 的试块抗压强度可达 32.45 MPa,导热系数仅为 0.243 2 W/(m·K);当采用方中空夹层钢管再生混凝土作为建筑的围护结构时,对外墙能耗影响不大,且组合柱平均传热系数较方钢管普通混凝土低 20%.

关键词: 方中空夹层钢管; 玻化微珠再生混凝土; 煅烧硅藻土; 热桥; 传热系数

中图分类号: TU375.3

文献标识码: A

Heat-transfer properties computational analysis on RC filled double skin square steel tube composite columns

SONG Bing, LI Baishou*

(*Department of Structural Engineering, College of Engineering, Yanbian University, Yanji 133002, China*)

Abstract: With calcined diatomite and vitrified micro bubbles (VMB) content as the main changing parameters, the properties of the VMB recycled concrete blocks was studied. By using ANSYS finite element analysis to analyze different hollow ratios $\chi(0,0.35)$ and concretes (ordinary concrete, VMB recycled concrete) influence on heat-transfer properties of the composite columns, and the article uses theoretical calculation to compare average heat-transfer coefficient between the single material wall and recycled concrete (RC) filled double skin square steel tube composite columns that are considered the thermal bridge. The result shows that: when calcined diatomite content is 3%, the compressive strength of the 130% VMB content test block can reach 32.45 MPa, and its heat conductivity is only 0.243 2 W/(m·K); when used as building palisade structure, RC filled double skin square steel tube composite columns impact feebly on energy consumption of the exterior wall, and its average heat-transfer coefficient is lower 20% than square steel tubes filled with ordinary concrete.

Keywords: double skin square steel tube; vitrified micro bubbles recycled concrete; calcined diatomite; thermal bridge; heat-transfer coefficient

0 引言

近年来,随着绿色建筑快速发展,玻化微珠

作为一种环保型新型无机轻质绝热材料被广泛研究使用. 2007 年,张泽平等研制出了符合建筑设

收稿日期: 2016-05-06

* 通信作者: 李佰寿(1954—),男,博士,教授,研究方向为混凝土结构理论及应用.

计强度需求的玻化微珠保温承重混凝土^[1];2012年,胡和平通过理论研究发现玻化微珠保温承重混凝土在耐久性方面优于普通混凝土^[2];2015年,孙恒等通过试验研究了玻化微珠再生混凝土柱的受压性能,并利用软件对比分析了构件用于建筑围护结构的优越性^[3]。

方中空夹层钢管混凝土组合柱由于具有承载力高、自重轻、抗震、延性、耐火性好等特点,近年来在工程中得到广泛使用,但其作为一种新型的结构形式,国内外对其热工性能方面的研究还相对较少。2015年,周婷等以河北省某方钢管混凝土组合异形柱钢结构住宅工程为研究对象,分析了钢管混凝土组合异形柱的结构角部的传热性能^[4]。鉴于此,本文选择导热系数及强度更优的玻化微珠再生混凝土用于方中空夹层钢管混凝土组合柱作为建筑的围护结构,选取热传导最薄弱的外墙角部位,通过理论计算和有限元 ANSYS 分析来探讨其在热桥能耗方面的特性。

1 玻化微珠再生混凝土

为选择导热系数更优、抗压强度满足工程设计要求的混凝土,在本课题组已取得的研究成果

基础上,取玻化微珠与混凝土体积比为 100% 和 130%,配制了强度等级为 C30 的 6 组玻化微珠再生混凝土。试验采用长春亚泰鼎鹿牌 42.5 级普通硅酸盐水泥;吉林省临江天元催化剂有限公司生产的 325 目煅烧硅藻土;凌海市龙岩建材厂生产的玻化微珠,堆积密度为 128 kg/m^3 ;延吉市方胜建材公司生产的聚羧酸高效减水剂,减水率 $\geq 25\%$,其中含有 0.8% 引气成分;再生粗骨料用颚式破碎机破碎,筛选粒径为 5~20 mm,经测定堆积密度为 1280 kg/m^3 ,吸水率为 4.8%;砂的细度模数为 2.9;粉煤灰采用延吉市供热站产生的原灰,细度基本达到 II 级粉煤灰要求;拌合水为普通自来水。28 d 的抗压强度和导热系数的测量结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出,当煅烧硅藻土掺量相同时,随着玻化微珠掺量的增加,或当玻化微珠掺量相同时,随着煅烧硅藻土掺量的增加,混凝土的抗压强度均呈提高的趋势;导热系数随着玻化微珠掺量的增加而降低。RC-130-3 组试块的 28 d 抗压强度达到 32.45 MPa,且导热系数仅为 $0.2432 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,所以本文选择此配合比的玻化微珠再生混凝土用于建筑围护结构的组合柱。

表 1 玻化微珠再生混凝土试验参数及测量结果

试块编号	材料用量/(kg/m^3)							水	抗压强度/ MPa	导热系数/ $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$
	水泥	粉煤灰	煅烧硅藻土	再生粗骨料	砂	玻化微珠	减水剂			
RC-100-3	458.18	122.6	18.4	1114.95	479.5	128	13.51	270	30.8	0.3609
RC-100-2	464.3	122.6	12.31	1114.95	479.5	128	13.51	270	26.49	0.3712
RC-100-0	476.49	122.6	0	1114.95	479.5	128	13.51	270	22.36	0.3805
RC-130-3	458.19	122.6	18.4	1114.95	479.5	154	13.51	270	32.45	0.2432
RC-130-2	464.25	122.6	12.31	1114.95	479.5	154	13.51	270	27.56	0.2634
RC-130-0	476.49	122.6	0	1114.95	479.5	154	13.51	270	25.95	0.2568

注:RC-130-3,RC 表示玻化微珠再生混凝土,130 表示玻化微珠与混凝土总体积比为 130%,3 表示煅烧硅藻土掺量为 3%,其他以此类推。

2 有限元建模与分析

本文运用有限元软件 ANSYS 进行稳态热分析以求解方中空夹层钢管再生混凝土组合柱的传热性能,并通过有限元计算确定由稳定热荷载引起的外墙角处温度、热梯度、热流率、热流密度等参数的变化。

2.1 有限元建模

1) 墙体的材料及尺寸。方中空夹层钢管混凝土的空心率分别为 0 和 0.35,钢管截面尺寸为 $160 \text{ mm}\times 160 \text{ mm}\times 2.5 \text{ mm}$,核心混凝土分别为普通混凝土和玻化微珠再生混凝土,柱子外圈用 50 mm 厚的防火材料包围,墙体选用新型复合自保温砌块。由于侧向散热的影响范围是墙体厚度的 1.5~

2.0 倍^[5],所以本文设定墙体长度为 450 mm.

2) 材料的导热系数及边界条件. 建筑钢材的导热系数为 $58.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,混凝土的导热系数为 $1.28 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[6],厚型防火涂料的导热系数为 $0.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[4]. 室内空气温度 $T_i = 293 \text{ K}$,室外空气温度 $T_o = 263 \text{ K}$;内表面换热系数 $\alpha_i = 8.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,外表面换热系数 $\alpha_o = 23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

2.2 ANSYS 分析

单元类型选取 SOLID55,采用上述参数建模进行求解,得到外墙角的温度场分布、温度梯度、热流密度和热流密度矢量云图,本文选取方钢管普通混凝土外墙角和方中空夹层钢管再生混凝土

外墙角部分进行分析.

从图 1 和图 2 (a)可见,组合柱外墙角处的温度分布层次分明且均匀,与外墙体部分衔接流畅,这说明热桥部分温度分布良好;由图 1 和图 2 (b)可看出,组合柱外墙角处方钢管普通混凝土温度梯度分布的范围大于方中空夹层钢管再生混凝土,说明其对墙体热桥部分的影响程度大于方中空夹层钢管再生混凝土;由图 1 和图 2 (c)和 (d)可见,热流密度除组合柱钢板部分较大外,其余部分均较小,但是对于内墙角处的热流密度,通过对比可看出,方中空夹层钢管再生混凝土的保温性能明显优于方钢管普通混凝土的保温性能.

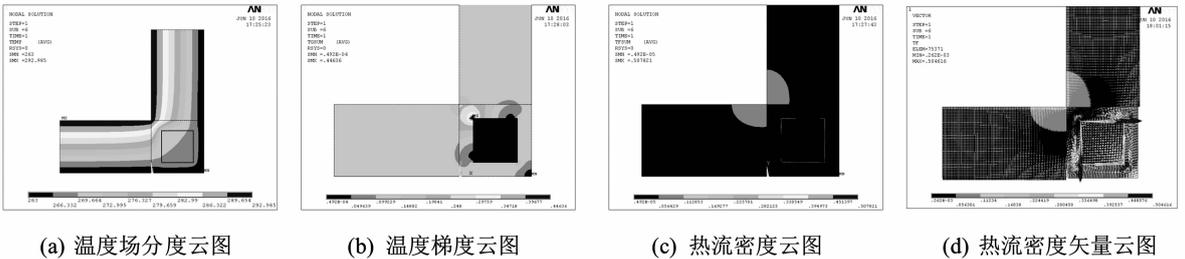


图 1 方钢管普通混凝土外墙角稳态热分析

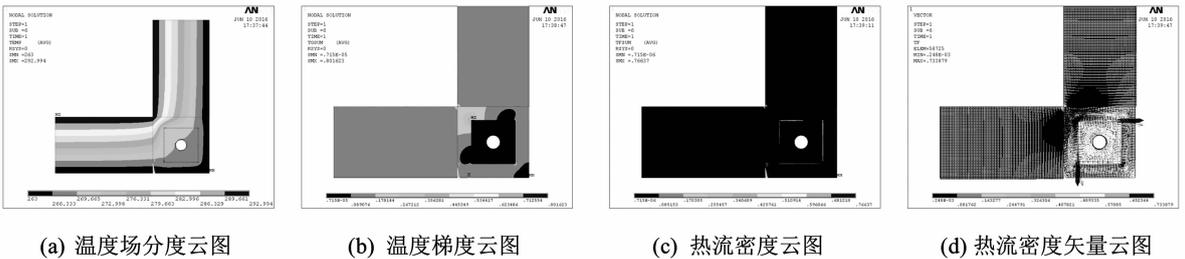


图 2 方中空夹层钢管再生混凝土外墙角稳态热分析

3 热桥能耗计算

在稳态传热中,传热系数 K 值是指围护结构两侧空气的温度差为 1 K 或 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,在 1 h 内通过 1 m^2 面积时传递的热量,其单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,此处 K 可用 $^\circ\text{C}$ 代替^[6]. 传热系数可以反映结构的能耗.

3.1 墙体传热系数

根据文献^[6],单一材料热阻 R 的计算公式为: $R = \delta/\lambda$,式中 δ 为材料层的厚度,单位为 m . 围护结构的传热阻计算公式为: $R_0 = R_i + R + R_e$,式中 R_i 为内表面换热阻; R 为围护结构热阻; R_e 为

外表面换热阻. 墙体的平均传热系数 $K_0 = 1/R_0$,新型复合自保温砌块墙体的传热系数 $K_0 = 0.46 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[7],满足严寒地区建筑节能 65% 的设计标准^[8].

3.2 考虑热桥后的组合柱平均传热系数

对于超过两种材料组成的围护结构,其平均传热阻^[5]为:

$$\bar{R} = \left[\frac{F_0}{\frac{F_1}{r_1} + \frac{F_2}{r_2} + \dots + \frac{F_n}{r_n}} - (R_1 + R_e) \right] \varphi, \quad (1)$$

式中: F_0 表示与热流方向垂直的总传热面积(m^2); F_1, F_2, \dots, F_n 分别表示按平行于热流方向划分的

各个传热面积(m²),见图 3; r₁, r₂, …, r_n 分别表示各个传热面部位的传热阻(m²·K/W); R_i 为内表面换热阻,取 0.11 m²·K/W; R_e 为外表面换热阻,取 0.04 m²·K/W; φ 为修正系数,本文取 φ = 1.

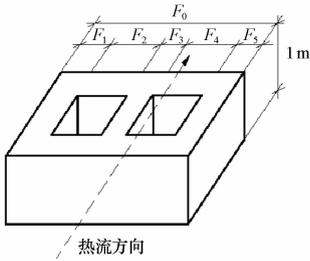


图 3 按平行于热流方向划分的各个传热面

由于对称性,取 1/2 方中空夹层钢管再生混凝土组合柱的热桥模型,按平行于热流方向划分的传热截面如图 4 所示.

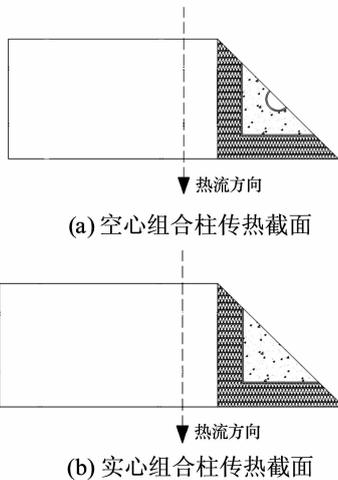


图 4 按平行于热流方向划分的组合柱 1/2 传热截面

利用上述方法计算空心玻化微珠再生混凝土组合柱的各部分传热阻为:

$$\begin{aligned}
 r_1 &= 1/0.46 = 2.17 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}, \\
 r_2 &= 0.04 + 0.05/2/0.1 + 0.21/0.1 = \\
 & 2.39 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}, \\
 r_3 &= 0.04 + 0.05/0.1 + 0.16/58.2 = \\
 & 0.54 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}, \\
 r_4 &= 0.04 + 0.05/0.1 + 0.107/0.2432 + \\
 & 0.053/2/0.2432 = 1.09 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}, \\
 r_5 &= 0.04 + 0.05/0.1 + 0.053/0.2432 + \\
 & 0.054/58.2 = 0.759 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}, \\
 r_6 &= 0.04 + 0.05/0.1 + 0.053/0.2432 + \\
 & 0.0025/58.2 + 0.18 = 0.939 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 r_7 &= 0.04 + 0.05/0.1 + 0.05/2/0.2432 = \\
 & 0.649 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}, \\
 r_8 &= 0.04 + 0.05/2/0.1 = 0.29 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}.
 \end{aligned}$$

平行于热流方向各部分面积为:

$$\begin{aligned}
 F_0 &= \frac{0.45 + 0.81}{2} \times 0.26 = 0.164 \text{ m}^2, \\
 F_1 &= 0.26 \times 0.45 = 0.117 \text{ m}^2, \\
 F_2 &= \frac{0.21 + 0.26}{2} \times 0.05 = 0.012 \text{ m}^2, \\
 F_3 &= 0.21 \times 0.0025 = 0.0005 \text{ m}^2, \\
 F_4 &= \frac{0.05 + 0.105 + 0.21}{2} \times 0.053 = \\
 & 0.009 \text{ m}^2, \\
 F_5 &= 0.025 \times 0.157 = 0.0004 \text{ m}^2, \\
 F_6 &= \frac{0.103 + 0.157}{2} \times (0.054 - 0.0025) = \\
 & 0.007 \text{ m}^2, \\
 F_7 &= \frac{0.05 + 0.103}{2} \times 0.053 = 0.004 \text{ m}^2, \\
 F_8 &= 1/2 \times 0.052 = 0.0013 \text{ m}^2.
 \end{aligned}$$

将所求数值代入式(1),可得考虑组合柱热桥后的平均传热阻 R₁ = 1.898 m²·K/W,从而得平均传热系数 K₁ = 1/R₁ = 1/1.898 = 0.52 W/(m²·K). 据此可计算得出考虑热桥后的实心普通混凝土和实心玻化微珠再生混凝土组合柱的传热系数,结果见表 2.

稳态热分析的能量平衡方程为:

$$[K]\{T\} = \{Q\}, \tag{2}$$

式中:[K]为传导矩阵; {T}为温度梯度矢量; {Q}为热流密度矢量.

ANSYS会自动结合材料属性定义边界条件,生成[K]、{T}和{Q}进行求解.参考文献[9]对总传热系数的定义,通过整理求得 ANSYS 分析值,结果见表 2.

由表 2 可知,对于考虑热桥后的实心组合柱的平均传热系数,玻化微珠再生混凝土的理论计算值和 ANSYS 分析值均小于普通混凝土,较单一墙体的平均传热系数 0.46 W/(m²·K)提高了 15%~39%;考虑热桥后的空心玻化微珠再生混凝土传热系数的理论计算值和 ANSYS 分析值均小于实心玻化微珠再生混凝土,较单一墙体的平

均传热系数相比提高了 13%~28%,这说明方中空夹层钢管再生混凝土作为建筑的承重围护结

构,虽增大了墙体的平均传热系数,增加了热桥能耗,但幅度较方钢管普通混凝土降低达 20%.

表 2 组合柱平均传热系数的 ANSYS 分析值与理论计算值 $W/(m^2 \cdot K)$

	实心普通混凝土	实心玻化微珠再生混凝土	空心玻化微珠再生混凝土
ANSYS 分析值	0.73	0.64	0.59
理论计算值	0.65	0.53	0.52

4 结论

通过对方中空夹层钢管再生混凝土组合柱传热性能的 ANSYS 分析和理论计算,本文得出以下结论:

1)当煅烧硅藻土掺量相同时,随着玻化微珠掺量的增加,或当玻化微珠掺量相同时,随着煅烧硅藻土掺量的增加,混凝土的抗压强度均呈提高的趋势;导热系数随着玻化微珠掺量的增加而降低.煅烧硅藻土掺量为 3%,玻化微珠掺量为 130%的试块抗压强度可达 32.45 MPa,导热系数仅为 0.243 2 $W/(m \cdot K)$;

2)不同空心率和混凝土的组合柱有限元 ANSYS 分析结果表明,组合柱外墙角处温度分布层次分明且均匀,与外墙体部分衔接流畅;方中空夹层钢管再生混凝土的保湿性能明显优于方钢管普通混凝土的保温性能;

3)考虑热桥后组合柱的平均传热系数的 ANSYS 分析和理论计算结果表明,当采用方中空夹层钢管再生混凝土作为建筑的承重围护结构时,对外墙能耗影响不大,且组合柱平均传热系数较方钢管普通混凝土低达 20%,该结果为今后实

际工程可提供理论参考.

参考文献:

- [1] 张泽平.玻化微珠保温混凝土及其结构的基本性能试验与理论分析研究[D].太原:太原理工大学,2009.
- [2] 胡和平.玻化微珠保温承重混凝土具有耐久性能优势的理论分析[J].建筑科学,2012(7):59-61.
- [3] 孙恒.玻化微珠再生混凝土柱外墙角部位的 P-Temp 计算分析[J].延边大学学报(自然科学版),2015,41(4):343-347.
- [4] 周婷,李晓斐,胥民扬.方钢管混凝土组合异形柱传热性能[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2015,48(增刊):74-80.
- [5] 温华.多层建筑围护结构外墙角热桥传热分析[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.
- [6] 中华人民共和国建设部.GB 50176—1993 民用建筑热工设计规范[S].北京:中国计划出版社,1993.
- [7] 岳志鑫.新型复合自保温砌块及其砌体强度研究[D].延吉:延边大学,2016.
- [8] 中国建筑科学研究院.JGJ 26—2010 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [9] 弗兰克 P·英克鲁佩勒,大卫 P·德维特,狄奥多尔 L·伯格曼.传热和传质基本原理[M].葛新石,叶宏,译.北京:化学工业出版社,2011.