

截面分层法计算不锈钢-混凝土-钢双壁管受弯承载力

卢召红¹, 闫亮¹, 张光明¹, 张文福¹, 于慧敏², 计静¹

(1. 东北石油大学 土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 中国石油 大庆石化公司, 黑龙江 大庆 163714)

摘要: 提出不锈钢(薄壁外层)-混凝土-钢双壁空心管(DSTM)新型构件。借鉴钢-混凝土组合结构构件的基本假定及材料本构关系, 分析 DSTM 正截面受弯承载力性能。利用截面分层法建立 DSTM 管纯弯构件承载力计算公式, 并采用有限元数值计算方法对截面分层法计算结果进行比较分析。结果表明, 两种方法所得结果基本吻合, 所建立的公式可为工程设计提供参考依据。

关键词: 空腹截面; 双壁空心管; 截面分层法

中图分类号: TU398.9

文献标识码: A

Calculation of the flexural capacity of double-skin-tubular members by section stratification method

LU Zhao-hong¹, YAN Liang¹, ZHANG Guang-ming¹, ZHANG Wen-fu¹, YU Hui-min², JI Jing¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Daqing Petroleum Institute, Heilongjiang Daqing 163318, China;
2. Daqing Petrochemical Co, China Petroleum, Heilongjiang Daqing 163714, China)

Abstract: A new type of stainless steel(Outer thin wall)-concrete-steel double walled hollow tube is presented in this paper. By using the basic assumption of the composite structural elements and the constitutive relation of the materials, this paper analyzed the bending bearing capacity of the normal section. Using the cross section method, the calculation formula of the bearing capacity of the bending members(DSTM) is established. Beside that, the finite element numerical method is used to analyze the results of the cross section method. The study show that the results of the two methods are basically consistent, and the formula can provide reference for engineering design.

Key words: hollow section; double-skin-tubular members (DSTM); cross-section stratification method

不锈钢(薄壁外层)-混凝土-钢双壁空心管是一种新型的结构构件,该双壁空心管具有防腐性能好、结构自重轻、节约钢材、承载力高、延性好等诸多优点。具有广泛的应用前景^[1-3]。近几年,国内外学者对双壁中空夹层混凝土组合结构构件进行了不同的研究。韩林海等对中空夹层钢管混凝土梁柱构件循环荷载作用下的受力性能及抗震性能进行了试验研究,提出了弯矩与曲率之间的关系及横向荷载对该构件承载力的影响^[3];刘学明等对 FRP-混凝土-钢双壁空心管利用试验和数值分析方法,提出 FRP-混凝土-钢双壁空心管受弯承载力简化计算公式,并建立了以弯

曲刚度表示的该种双壁空心管截面弯矩-曲率关系^[4];Uenaka, K、J. Zeghiche 等对该类型构件的小偏心受压采用试验的方法进行了分析研究。然而,对不锈钢(薄壁外层)-混凝土-钢双壁空心管构件在纯弯或大偏心受压作用下的理论研究较少,缺乏简便的理论计算公式。本文拟采用截面分层法对该类型截面进行受弯承载力计算,并采用有限元数值计算方法对截面分层法计算结果进行比较分析,建立简单适用的设计计算公式。

1 分层法计算模型

收稿日期:2015-09-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178087);黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12541068)

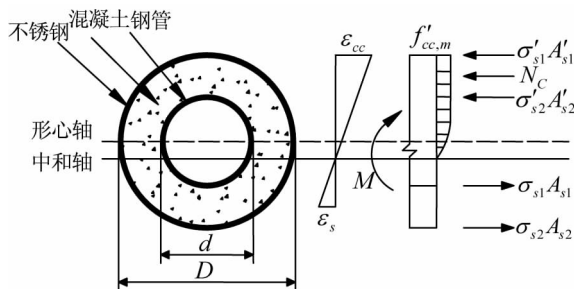
作者简介:卢召红(1976-),男,山东临沂人,硕士,副教授,从事组合结构、混凝土结构方面的研究。

1.1 截面形式及基本假定

该类型构件最外层是薄壁不锈钢层(厚度较薄),内部是钢管,两个管之间喷注混凝土,其结构截面形式如图1(a)所示。外层不锈钢管壁厚 t_1 ,内层钢管壁厚 t_2 ,混凝土夹层厚 h ,其他尺寸见图1所注。

$$h = \frac{D-d}{2} - t_1 \quad (1)$$

构件截面形式比较复杂,力学性能分析及承载力计算比普通的组合结构构件繁琐。为简化计算,将受弯构件(DSTM管)简化为两端简支的等直杆,并做如下假定^[5]:(1)平截面假定:构件正截面在弯曲变形后仍保持平面;(2)无滑移假定:不考虑钢管、不锈钢层与内填混凝土之间的滑移影响,两者之间变形协调;(3)无剪切假定:计算模型为纯弯构件,以弯曲变形为主,不考虑剪切变形的影响;(4)不考虑受拉一侧混凝土的抗拉力贡献:即认为混凝土抗拉力;(5)不考虑受压一侧外层不锈钢薄板的抗压贡献。临界状态时,混凝土与外层薄板由于裂缝较多,粘结差,易失稳,故忽略其抗压承载力贡献。



(a) 截面形式 (b) 应变关系 (c) 截面应力图形

图1 截面极限状态时应变应力图

Fig.1 The limit state stress-strain diagram of the cross section

1.2 材料本构关系

截面受压区混凝土的应力图形采用等效矩形应力分布。混凝土受压边缘达到极限压缩应变时,其等效抗压强度采用式(2)确定^[6]。

$$f'_{cm} = \frac{1 + 0.2 \frac{f_t}{f_c}}{f_c} \quad (2)$$

受压混凝土的本构关系如图2所示,加载时为曲线变化,卸载时为一段直线,卸载时的弹性模量等于加载时原点的切线模量^[7]。

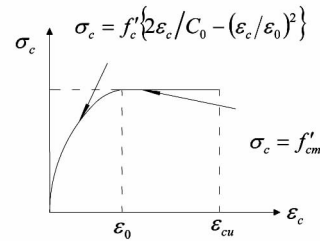


图2 受压混凝土本构关系

Fig.2 The constitutive relationship of compressive concrete

钢管本构关系:混凝土的极限压应变,或受拉侧钢材的极限拉应变,作为构件达到极限承载能力的标志之一。一般情况下,最外层薄壁钢管将先于内层钢管达到极限拉应变,其极限拉应变规定为0.01。外层不锈钢管采用延性性能较好的钢材,具有明显的屈服点,钢板应力取其应变与弹性模量的乘积,但其绝对值不大于其相应的强度设计值,其数学表达式:

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s (\varepsilon_s \leq \varepsilon_{e1}) \\ f_y (\varepsilon_{e1} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e2}) \end{cases} \quad (3)$$

1.3 分层法计算截面抗弯承载力

截面分层法计算模型如图3所示。

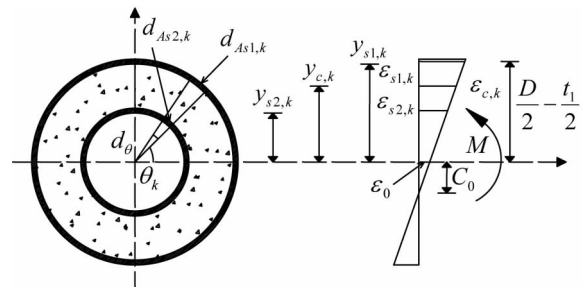


图3 DSTM管材纯弯状态下弯矩—曲率关系计算简图

Fig.3 Moment - curvature relationship calculation diagram of DSTM pipes under pure bending

以截面形心为圆点建立直角坐标系。由平截面假定,可得截面上任一点的应变计算公式^[5]。

$$\varepsilon_k = -\varepsilon_0 + \phi y_k \quad (4)$$

式中: ε_0 为截面形心处的应变; ϕ 为曲率; y_k 为计算总的纵向坐标; C_0 为中和轴距截面形心之间的距离。

$$C_0 = \frac{\varepsilon_{cu} - \frac{\sigma_s}{E_s}}{\varepsilon_{cu} + \frac{\sigma_s}{E_s}} \times \frac{D}{2} \quad (5)$$

极限状态 $\sigma_s = f_y$ 。

将截面划分为 $2n$ 等份,每一段对应的圆心角

$$\text{为 } d\theta = \frac{2\pi}{2n} = \frac{\pi}{n}$$

$$\theta_k = kd\theta (k=1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

$$dA_{s1,k} = \frac{D}{2} t_1 d\theta \quad (7)$$

$$dA_{s2,k} = \frac{D}{2} t_2 d\theta \quad (8)$$

$$dA_{c,k} = \frac{\pi d\theta}{360} \left(\frac{D}{2} - t_1 \right)^2 - \frac{\pi d\theta}{360} = \frac{\pi d\theta}{360} \left[\left(\frac{D}{2} - t_1 \right)^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right] \left(\frac{d}{2} \right)^2 \quad (9)$$

式中: t_1 为外层薄壁钢管厚度, mm; t_2 为内部钢管壁厚, mm。

由此可得, 该截面的内抵抗弯矩 M 为:

$$M = \sum M_k = 2 \sum_{k=0}^n (\sigma_{s1,k} y_{s1,k} + \sigma_{s2,k} y_{s2,k} dA_{s2,k} + \sigma_{c,k} y_{c,k} dA_{c,k}) \quad (10)$$

式中: $y_{s1,k} = \frac{D}{2} \sin(\theta - 0.5d\theta)$; $y_{s2,k} = \frac{d}{2} \sin(\theta_k - 0.5d\theta)$; $y_{c,k} = \left(\frac{D}{2} - t_1 \right) \sin(\theta_k - 0.5d\theta)$; $\sigma_{s1,k}$ 为外层钢管第 k 条分层带压应力; $\sigma_{s2,k}$ 为内层钢管第 k 条分层带压应力; $\sigma_{c,k}$ 为第 k 条分层带混凝土的压应力。

$$\sigma_{s1,k} = E \varepsilon_{s1,k} = E(-\varepsilon_0 + \phi y_{s1,k}) \quad (11)$$

$$\sigma_{s2,k} = E \varepsilon_{s2,k} = E(-\varepsilon_0 + \phi y_{s2,k}) \quad (12)$$

由边界条件: 当 $k=0$ 时, $\theta_k = 0$; $y_{s1,0} = y_{s2,0} = 0$, $y_{c,0} = 0$, 得: $M_0 = 0$ 。

当 $k=n$ 时, 极限状态条件下; $\varepsilon_{c,n} = \varepsilon_{cu}$;

由图3计算简图, 得

$$\varepsilon_{s1,n} = -\varepsilon_0 + \phi y_{s1,n} = -\varepsilon_0 + \phi \left(\frac{D}{2} - \frac{t_1}{2} \right) \quad (13)$$

$$\varepsilon_{s2,n} = -\varepsilon_0 + \phi y_{s2,n} = -\varepsilon_0 + \phi \left(\frac{D}{2} - \frac{t_2}{2} \right) \quad (14)$$

$$\varepsilon_c = \frac{C_0 \varepsilon_{cu}}{\frac{d}{2} + \frac{h}{2} - C_0} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\frac{d+h}{2C_0} - 1} \quad (15)$$

根据以上分析推导结果可编程计算求得截面弯矩的极限承载力。计算时, 当 n 的取值越大时, 其计算结果精度越高, 越接近截面的实际极限承载力。将分层计算法求得的结果与有限元数值方法求得的结果进行比较分析, 验证该方法的准确性。

2 截面分层法与有限元法结果对比

某钢-混凝土-钢双壁管夹心混凝土纯弯构件, 外钢管直径 $D = 159$ mm, 厚度 $t_1 = 2$ mm, 屈服强度 $f_y = 414$ MPa, 弹性模量 $E_s = 2.1 \times 10^5$ N/mm², 泊松比 $\mu = 0.29$; 内钢管 $d = 75$ mm, 厚度 $t_2 = 2$ mm, 屈服强度 $f_y = 414$ MPa, 弹性模量 $E_s = 2.1 \times 10^5$ N/mm², 泊松比 $\mu = 0.29$; 混凝土夹层厚度 $h = 82$ mm, 混凝土强度为 C60, 弹性模量 $E_c = 3.6 \times 10^4$ N/mm², 泊松比 $\mu = 0.2$ 。构件计算长度 $l = 1\ 200$ mm。

构件长细比 $\lambda = \frac{4l_0}{\sqrt{D^2 + d^2}} = 27.3$; 空心率 $x =$

$\frac{d}{D-2t} = 0.48$; 含钢率 $\alpha = \frac{A_s}{A_c} = 6.21$; 径厚比 $\frac{D}{t} = 79.5$ 。

2.1 截面分层法数值解

由公式(10)及边界条件, 当 n 分别取 5、10、50、100 和 1 000 时, 相应计算结果见表 1。由表 1 计算结果可看出, 随着分层数量的 n 的增加, 极限弯矩值差值越小, 当 $n > 1\ 000$ 后, 其极限弯矩值基本相等, 说明随着分层数量的增加, 计算误差越小。

表 1 截面分层法求解极限弯矩结果

Tab. 1 The results of the ultimate bending moment by using cross-section stratification method

n	5	10	50	100	1 000
极限弯矩 M_u /kN·m	7 903.1	7 908.3	7 912.2	7 913.4	7 913.4

2.2 有限元数值计算结果

借助 ANSYS 有限元分析软件, 建立有限元分析模型。混凝土、内部钢管采用 SOLID65 单元, 该单元具有 8 个节点, 其 6 个面可以是曲面, 12 条棱可以是曲线段, 单元可带有各向异性的材料增强, 最多可允许 3 种增强材料, 增强方向可任意定义^[8-9]。混凝土采用多线性等向强化 (MISO) 的材料类型, 其屈服准则为 Willam-Warnke 五参数破坏准则。外层不锈钢薄钢采用 SHELL63 单元。试件的有限元整体模型见图 4, 不锈钢板的有限元模型见图 5。钢材与混凝土之间的约束拉杆采用两节点线单元。并假设核心混凝土与钢管及拉杆之间不发生滑移^[10]。

模型按简支梁进行设置, 采用全构模型进行模拟计算, 固定试件一端, 即限制试件三个方向的位移, 另一端为限制试件两个方向的位移。在模

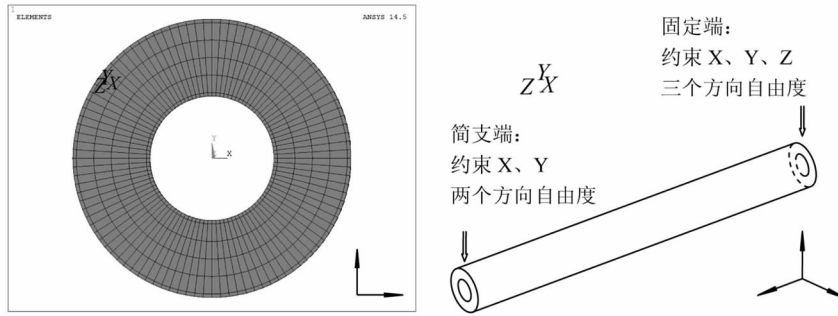


图4 试件的有限元模型

Fig.4 Finite element model of the specimen

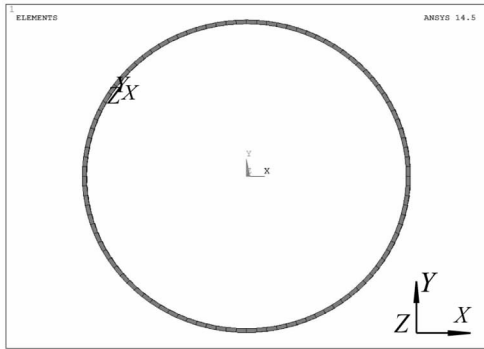


图5 外层不锈钢的有限元模型

Fig.5 Finite element model of outer stainless steel

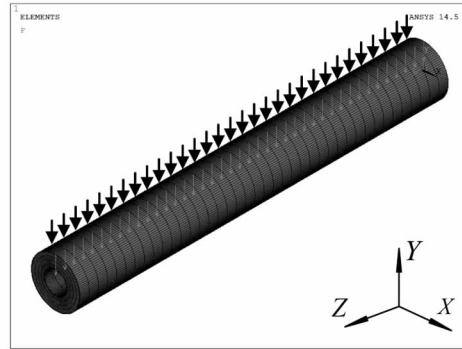


图6 线荷载施加图

Fig.6 The picture of applying a line load

表 2 截面分层法与有限元法结果对比

Tab.2 Comparison of the results of the cross - section stratification method and finite element method

	<i>n</i>	5	10	50	100	1 000
分层法	极限弯矩 <i>Mu</i> /kN · m	7 903. 18	7 908. 35	7 912. 29	7 913. 49	7 913. 49
	荷载 <i>qu</i> /kN	43. 906	43. 935	43. 957	43. 963	43. 963
有限元法	极限弯矩 <i>Mu</i> /kN · m			7 938. 50		

型顶端对模型施加线荷载,如图 6 所示。

将有限元计算结果与分层法计算结果对比分析如表 2,由表 2 可以看出,当分层法分层数量达到一定要求后(如 $n \geq 100$),其计算结果与有限元分析结果非常接近。有限元计算结果大于截面分层法计算结果,究其原因,分析认为截面分层法中忽略了外层不锈钢(薄钢)的抗压承载力贡献,而实际该薄钢仍具有一定的抗压承载力,其计算误差为 0.31%,远小于 5%。该方法在计算中空夹层的钢管混凝土截面形式的受弯承载力时具有很好的可靠性。

3 结论

1)采用截面分层法对不锈钢—混凝土—钢双壁空心管纯弯构件进行受弯承载力计算,建立了实用的理论计算公式: $M = \sum M_k = 2 \sum_{k=0}^n (\sigma_{s1,k} y_{s1,k} dA_{s1,k} + \sigma_{s2,k} y_{s2,k} dA_{s2,k} + \sigma_{c,k} y_{c,k} dA_{c,k})$ 。

2)采用有限元数值分析方法对分层法计算结果进行比较分析,认为该方法计算结果与有限元分析结果基本吻合,该公式具有很好的可靠性。

参考文献:

[1] UENAKA K, KITO H. Concrete filled double skin tubular members subjected to bending[J]. Steel and Composite Structures, 2008(8):297-312.
 [2] YOSHIHIDE NAGAI, HIDENORI FUKAMI. Ys500 N/mm² High Strength Steel for Offshore Structure with Good CTOD Properties at Welded Joints [J]. Nippon Steel Technical Report, 2004(90):14-19.
 [3] 谢志涛,孙 涵,黄文金.细长钢管混凝土构件混凝土应变测试[J].河北工程大学学报:自然科学版,2014,31(1):13-16.
 [4] 刘明学,稼 茹. RP-混凝土-钢双壁空心管的截面弯矩-曲率全曲线[J].清华大学学报:自然科学版,2007(12):2105-2110. (下转第 41 页)

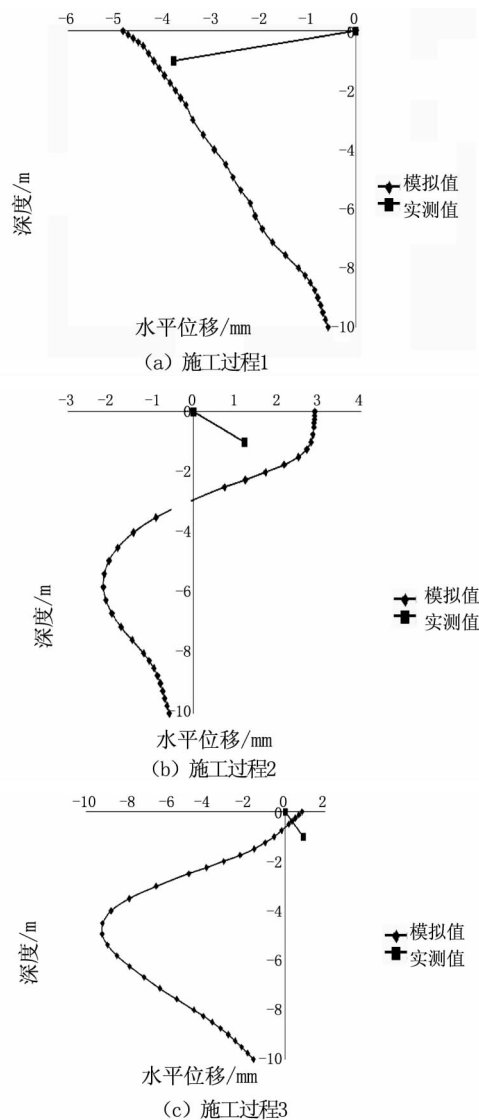


图4 板桩水平位移实测值与反演值对比分析

Fig.4 The analysis of measured horizontal displacement values and the inversion value

4 结论

1) 在第一个施工中,随着土体的开挖,钢板桩发生背离河岸的水平位移,在第二个施工过程中

由于施工锚杆,使得板桩位移向里发展,之后随着土体的继续开挖,板桩位移继续背离河岸发展,顶端位移逐渐为零,满足设计要求。

2) 根据每个施工过程的监测位移值进行动态的反演分析,得到合理的土体参数,以反演所得数据为依据,对钢板桩水平位移进行数值模拟,且模拟结果与监测结果吻合较好,表明反演结果具有可信性。

3) 采用钢板桩+锚杆的柔性结构作为护岸,在施工过程中,数值模拟以及实际监测数据均表明其具有良好的工程特性,但作为永久护岸结构,板桩位移的发展与传统刚性护岸结构的差异仍待进一步研究。

参考文献:

- [1] 许开成,袁志华. 钢板桩在深基坑支护中的应用[J]. 江西建材,2000(4):34-36.
- [2] 赵伏田,张福海,张永立. 钢板桩护岸结构数值模拟分析[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2014,31(5):12-16.
- [3] 余颖慧,刘明玉. 粉煤灰基坑支护结构的反演分析与实测研究[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(Z1):1336-1339.
- [4] 谢晓健,蒋永生,陈忠范等. 深基坑支护结构的反演分析与实测研究[J]. 工业建筑,2000,30(3):12-16.
- [5] 李晓龙,王复明,尚向阳. 支护结构荷载反演研究现状及相关问题探讨[J]. 人民黄河,2009,31(3):76-79.
- [6] 汤罗圣,殷坤龙,周丽,等. 基于数值模拟与位移监测的滑坡抗剪强度参数反演分析[J]. 水文地质工程地质,2012,39(4):32-37.
- [7] 王萍. 地铁基坑开挖中建筑物差异沉降影响分析[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2014,31(1):25-28.

(特约编辑 李军)

(上接第14页)

- [5] 张文福,赵文艳,张素梅. 混凝土双向压弯截面非线性分析算法[J]. 黑龙江工程学院学报,2001(2):13-16.
- [6] 伍凯,曹平周,薛建阳等. 型钢混凝土应力传递与黏结破坏机理分析[J]. 河海大学学报,2013(1):37-42.
- [7] 方志,IVAN T, Campbell. 不锈钢和CFRP混合配筋预应力混凝土梁的延性和变形性能[J]. 工程力学,2005(3):190-197.

- [8] 卢召红,王振,宫成欣. 高强钢筋混凝土梁裂缝性能有限元分析[J]. 大庆石油学院学报,2006(5):59-61.
- [9] 张智梅,白世桦,张振波. AFRP加固二次受力RC梁抗弯性能有限元分析[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2013,30(4):38-42.
- [10] 陈曦,周德源. 五种本构模型在钢管混凝土有限元中的比较[J]. 工程力学,2009(6):116-121.

(特约编辑 李军)