

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202303015



衬塑钢管海水海砂混凝土短柱 轴压性能有限元分析

叶勇^{1,2}, 薛昱萱¹, 孙大为¹, 姜航¹, 赖顺颖¹

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 选择合理的建模方法, 建立衬塑钢管海水海砂混凝土短柱轴压有限元分析模型, 对构件的破坏形态、轴压荷载-变形关系、内力分配进行研究, 并以承载力折减系数的形式提出构件的极限承载力简化计算公式。结果表明: 衬塑钢管海水海砂混凝土短柱的外钢管与内衬塑料层可较好共同工作, 构件的轴压荷载-变形曲线可分为 3 种类型, 由约束效应系数决定; 随着塑料层厚径比的增大, 轴压荷载-变形曲线形状相似, 但极限承载力近似呈线性降低。

关键词: 衬塑钢管; 海水海砂混凝土; 轴压性能; 有限元分析; 简化计算模型

中图分类号: TU 392.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2023)04-0442-09

Finite Element Analysis of Axial Compression Behavior of Seawater Sea Sand Concrete-Filled Plastic-Lined Steel Tube Stub Columns

YE Yong^{1,2}, XUE Yuxuan¹, SUN Dawei¹,
JIANG Hang¹, LAI Shunying¹

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Key Laboratory for Structural Engineering and

Disaster Prevention of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: A reasonable modeling method is used to establish the finite element analysis model of seawater sea sand concrete-filled plastic-lined steel tube stub columns. The failure form, axial compressive load-deformation relationship and internal force distribution of the member are investigated, and the simplified calculation formula of the ultimate bearing capacity for the member is proposed by a reduction coefficient of bearing capacity. The results show that the outer steel tube and the inner plastic lining of seawater sea sand concrete-filled plastic-lined steel tube stub columns can work well together, and the axial compressive load-deformation curves of the member can be categorized into three types, determined by the confinement factor. With the increase of the plastic lining thickness to diameter ratio, the shapes of the axial compressive load-deformation curves are similar, but the ultimate bearing capacity decreases approximately linearly.

Keywords: plastic-lined steel tube; seawater sea sand concrete; axial compression behavior; finite element analysis; simplified computation model

收稿日期: 2023-03-17

通信作者: 叶勇(1985-), 男, 副教授, 博士, 主要从事钢-混凝土组合结构的研究. E-mail: qzyeyong@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278182); 福建省自然科学基金资助项目(2021J01286); 华侨大学大学生创新创业训练计划项目(202210385035)

近几十年来,我国基础设施与城镇化建设快速发展,消耗了大量混凝土材料. 目前,拌制混凝土所用的细骨料主要是河砂,大量开采已导致河砂供不应求,价格攀升,同时,也对河道保护、湿地修复、淡水供给产生负面影响. 我国海岸线漫长,海水海砂资源丰富,开采难度小、含泥量少,若能合理利用将是河砂的良好替代材料. 海砂及海水中含有大量游离氯离子,为防止氯离子腐蚀钢材,拌制海水海砂混凝土前,往往需要进行淡化处理. 海水海砂的淡化处理工序繁杂、成本较高,因此,在保证结构安全性和耐久性的前提下,合理、经济地利用海水海砂资源是缓解河砂资源紧缺、城镇淡水承载力不足等现状的有效途径.

国内外学者围绕海水海砂混凝土的材料性能及海水海砂混凝土-耐腐蚀材料组合结构力学性能等方面开展了系列研究. 已有研究表明,海水海砂混凝土与普通混凝土的力学性能并无明显差异,在不考虑氯离子腐蚀的情况下可等同使用^[1-3]. 针对海水海砂混凝土可能腐蚀钢材的潜在问题,学者将具有良好耐腐蚀性的纤维增强塑料(FRP)^[4-9]和不锈钢^[10-14]等材料与海水海砂混凝土进行结合,通过试验研究和理论分析提出相关的设计方法和构造措施. 然而,现阶段 FRP 和不锈钢的成本较高,组合结构的节点连接困难,抑制了此类组合构件的推广应用.

将海水海砂混凝土填入内衬塑料层的钢管形成衬塑钢管混凝土,是符合低碳节能发展要求的新型结构构件形式. 内衬塑料层能够阻隔海水海砂混凝土中的氯离子等腐蚀性物质,外钢管能够提高海水海砂混凝土的承载和变形能力,核心混凝土防止或延缓外钢管发生内凹屈曲. 相较于传统钢管混凝土,衬塑钢管中内衬塑料层的材料力学性能与钢材差异显著,可能影响外钢管与内填海水海砂混凝土之间的相互作用和共同工作,从而削弱整体构件的承载力和刚度. 为了研究衬塑钢管海水海砂混凝土短柱的轴压性能,本文建立精细化分析模型分析构件的破坏形态、轴压荷载-变形性能和内力分配机制,并提出构件的轴压极限承载力简化计算公式.

1 有限元模型的建立

1.1 建模方法

采用有限元程序 ABAQUS 建立衬塑钢管海水海砂混凝土短柱构件(图 1)的精细化模型. 其中,海水海砂混凝土采用程序自带的 8 节点减积分三维实体单元(C3D8R)进行模拟,衬塑钢管的外钢管和内衬塑料层采用 4 节点缩减积分壳单元(S4R)分开模拟,并在壳单元的厚度方向设置 9 个积分点. 为兼顾计算精度和成本,对建立的有限元模型进行网格敏感性分析,最终确定模型的网格尺寸约为 25 mm.

外钢管-内衬塑料层、内衬塑料层-海水海砂混凝土接触界面的法向力学行为采用“硬”接触(允许压力在界面间传递)进行模拟,切向力学行为采用 Coulomb 摩擦模型进行模拟(塑料-混凝土界面摩擦系数取 0.2^[15],钢-塑料界面摩擦系数取 0.3^[15],钢-混凝土界面摩擦系数取 0.6^[16]). 模型一端设置为固结,另一端约束除轴向位移外的其他自由度,采用位移控制模式对模型施加轴向压缩. 由于钢材和混凝土的硬度高于塑料,在钢管-塑料接触分析时,设置钢管表面为主控表面,塑料表面为从属表面;在塑料-混凝土接触分析时,设置混凝土表面为主控表面,塑料表面为从属表面. 采用结构化技术对模型进行网格划分,建立的衬塑钢管海水海砂混凝土短柱有限元模型,如图 2 所示.

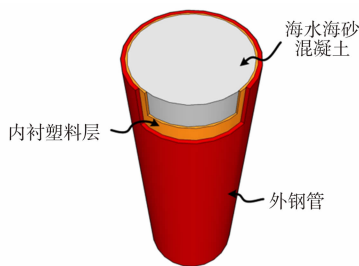


图 1 衬塑钢管海水海砂混凝土短柱构件
Fig.1 Member of seawater sea sand concrete-filled plastic-lined steel tube stub columns

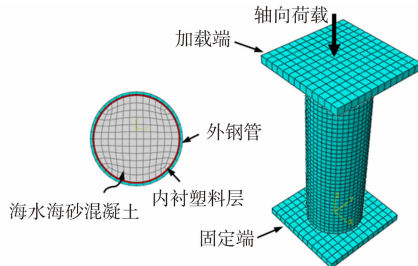


图 2 衬塑钢管海水海砂混凝土短柱有限元模型
Fig.2 Finite element model of seawater sea sand concrete-filled plastic-lined steel tube stub columns

1.2 材料本构模型

海水海砂混凝土采用有限元程序 ABAQUS 的混凝土塑性损伤模型进行模拟. 混凝土的受拉行为

采用基于断裂能(GFI)的方法进行模拟,以提高有限元模型计算的收敛性. 由于海水海砂混凝土的短期力学性能与同强度普通混凝土相近,故采用韩林海^[17]提出的考虑钢管约束的混凝土受压应力-应变模型,该模型充分考虑外部约束的存在对核心混凝土的约束作用(由于内衬塑料层的材料强度较小,故在计算过程中未考虑内衬塑料层的约束作用). 衬塑钢管海水海砂混凝土的约束效应系数(ξ)为

$$\xi=\frac{f_yA_s}{f_{ck}A_c}.$$

(1)

式(1)中: f_y 为钢材屈服强度; A_s 为钢管横截面面积(不包括内衬塑料层); f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值; A_c 为核心混凝土横截面面积.

钢材的材性采用二次塑流应力-应变模型进行模拟^[17];内衬塑料采用理想弹塑性模型进行模拟^[15].

1.3 有限元模型的验证

目前,缺乏衬塑钢管海水海砂混凝土结构的相关研究报道,故采用同为双层外管结构的不锈钢(外)-碳素钢(内)双金属复合管混凝土轴压试验结果^[18]对文中的有限元建模技术进行可靠性验证. 试件 CFST 为碳素钢管混凝土短柱,其余为双金属复合管混凝土(CFBT)短柱(试件编号为 t1c2, t2c2, t3c2, t2c1, t2c3),试件的参数信息详见文献^[18]. 试件 CFBT 的约束效应系数(ξ_{CFBT})为

$$\xi_{\text{CFBT}}=\frac{f_{yc}A_{sc}+\sigma_{0.2s}A_{ss}}{f_{ck}A_c}.$$

(2)

式(2)中: f_{yc} 为碳素钢屈服强度; A_{sc} 为碳素钢管横截面面积; $\sigma_{0.2s}$ 为不锈钢名义屈服强度; A_{ss} 为不锈钢管横截面面积.

每组参数采用两个相同的试件(试件 1,2)进行轴压荷载-变形($N-\Delta$)实验,计算值与试验值^[18]的对比,如图 3 所示. 由图 3 可知:计算值与试验值总体吻合良好,表明有限元建模技术可较好地模拟具有双层外管的钢管混凝土短柱的受力性能.

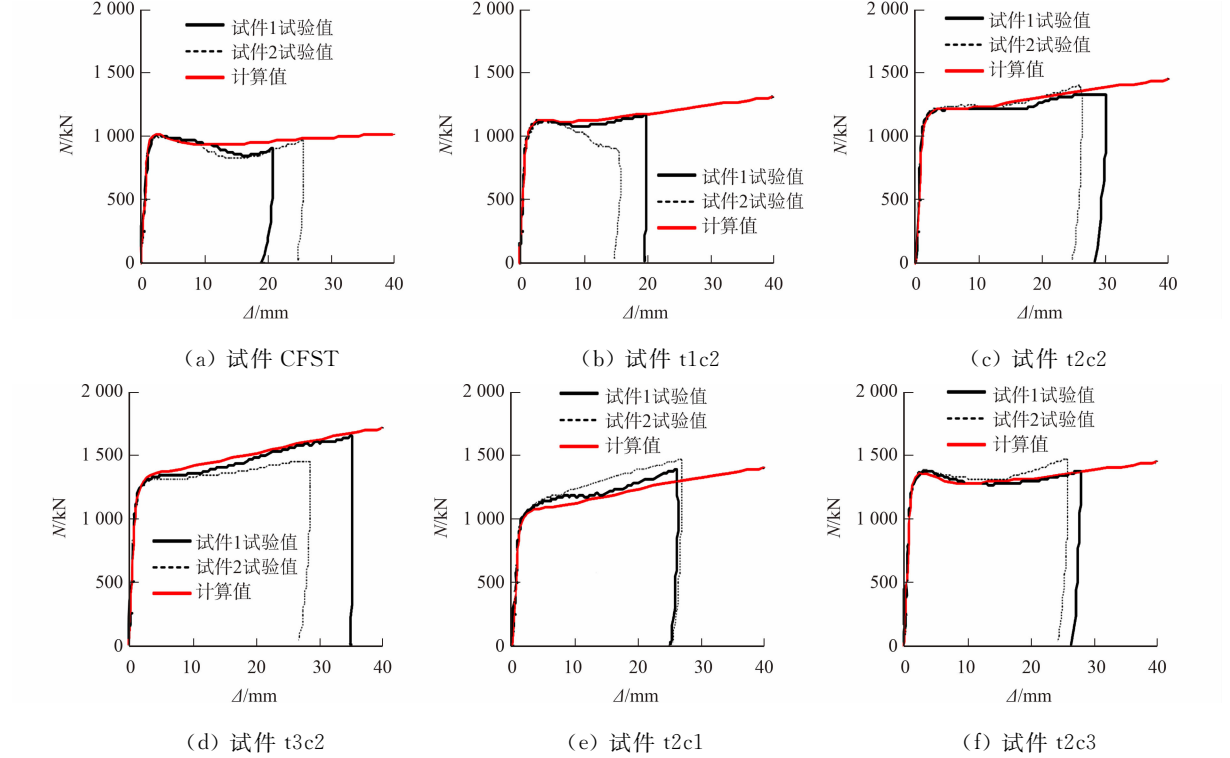


图 3 轴压荷载-变形计算值与试验值的对比

Fig. 3 Comparison between calculation values and test values of axial compressive load-deformation

2 有限元分析

2.1 有限元模型的试件参数

建立 3 个衬塑钢管海水海砂混凝土短柱有限元模型(试件编号为 LP-35, LP-50, LP-65),计算参数:

钢管的外径(D)为 165 mm,高度(h)为 495 mm,外钢管壁厚(t_s)为 4.25 mm,碳素钢的屈服强度(f_{yc})为 400 MPa,极限强度(f_u)为 500 MPa,弹性模量(E_s)为 206 GPa,泊松比(ν_s)为 0.3;内衬塑料层的厚度(t_p)为 2.5 mm,屈服强度(f_{yp})为 12 MPa,弹性模量(E_p)为 206 MPa,泊松比(ν_p)为 0.4^[15];试件 LP-35, LP-50, LP-65 的混凝土强度(f_{cu})分别为 35,50,65 MPa. 主要参数与极限承载力的计算结果,如表 1 所示. 表 1 中: N_u 为极限承载力.

表 1 主要参数与极限承载力的计算结果

Tab. 1 Calculation results of main parameters and ultimate bearing capacity

试件编号	f_y /MPa	f_{cu} /MPa	A_s /mm ²	A_c /mm ²	ξ	N_u /kN
LP-35	400	35	2 145	18 018	1.693	1 787
LP-50	400	50	2 145	18 018	1.490	1 903
LP-65	400	65	2 145	18 018	1.178	2 172

2.2 典型破坏形态

有限元计算结果显示,轴压条件下衬塑钢管海水海砂混凝土短柱具有良好的承载和变形性能,从开始受力直至加载结束,模型试件未出现剧烈破坏现象. 加载结束($\Delta=40$ mm)时,试件 LP-65 的破坏形态,如图 4 所示. 由图 4 可知:整体试件发生了较为明显的压缩变形,试件中部膨胀、两端出现局部环向鼓曲;外钢管与内衬塑料层的局部屈曲位置基本重合,且核心混凝土仅在钢管局部屈曲处压溃.

由此可知,外钢管与内衬塑料层可较好共同工作,受力过程中两者未出现分离现象,当整体试件轴压变形达到试件高度的 8%左右($\Delta=40$ mm)时,外钢管与内衬塑料层仅在两端发生局部屈曲.

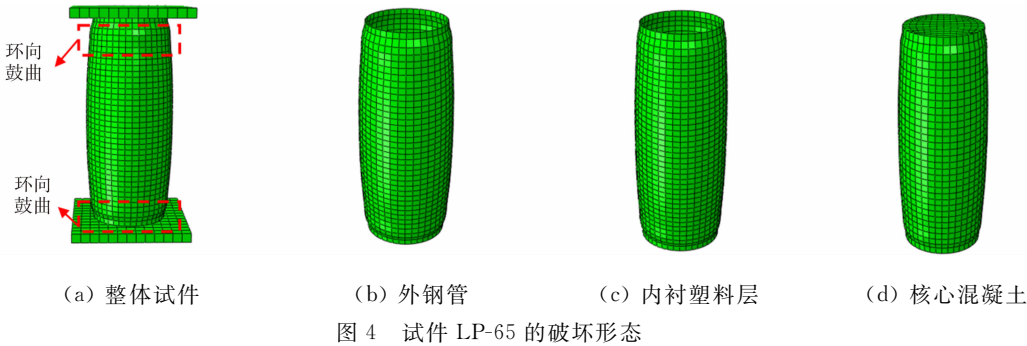


图 4 试件 LP-65 的破坏形态

Fig. 4 Failure modes of specimen LP-65

2.3 轴压荷载-变形关系

试件的轴压荷载-变形曲线,如图 5 所示.

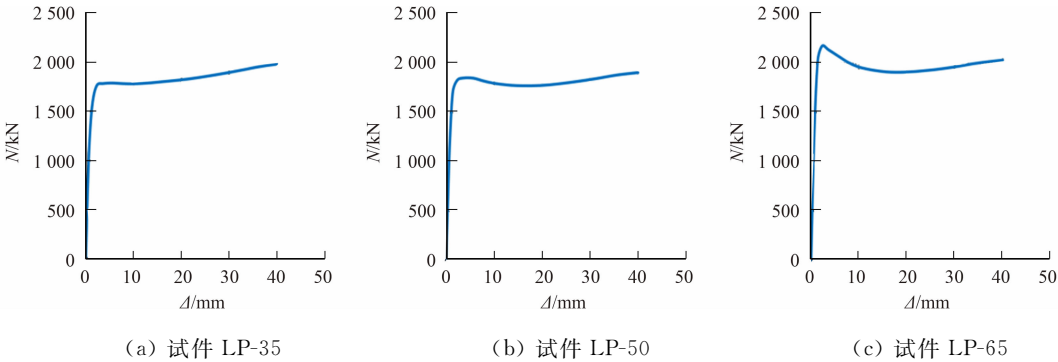


图 5 试件的轴压荷载-变形曲线

Fig. 5 Axial compressive load-deformation curves of specimens

由图 5 可得以下 3 点结论.

- 1) 混凝土强度较低($f_{cu}=35$ MPa)的试件 LP-35 的轴压荷载-变形曲线呈现出持续上升趋势,当变形从零增大至 3 mm 左右时,曲线的上升速度显著减弱,呈现类似“屈服”现象;当变形继续增大至 10 mm 左右时,曲线的上升速度有所回升,呈现类似“应变强化”现象.
- 2) 混凝土强度适中($f_{cu}=50$ MPa)的试件 LP-50 的轴压荷载-变形曲线呈现出持续上升一轻微下

降—二次上升趋势;当轴向变形从零增大至 3 mm 左右时,曲线达到首个峰值点并开始缓慢下降;当轴向变形继续增大至 15 mm 左右时,曲线达到谷值点并开始回升,呈现类似“应变强化”现象。

3) 混凝土强度较高($f_{cu}=65\text{ MPa}$)的试件 LP-65 的轴压荷载-变形曲线呈现出持续上升—显著下降—二次上升趋势;当轴向变形从零增大至 3 mm 左右时,曲线达到首个峰值点并开显著下降;当轴向变形继续增大至 15 mm 左右时,曲线达到谷值点并开始回升,呈现类似“应变强化”现象。

由此可知,衬塑钢管海水海砂混凝土短柱与传统钢管混凝土短柱的轴压荷载-变形曲线特征相似,可以分为以下 3 种类型:1) A 型,持续上升型;2) B 型,上升—稳定(或轻微下降)—二次上升;3) C 型,上升—显著下降—二次上升,且曲线类型主要由试件的约束效应系数决定.文中虽未考虑内衬塑料层对核心混凝土的直接约束作用,但整体构件呈现的力学行为接近传统钢管混凝土,与存在混凝土脱空缺陷钢管混凝土^[19]的行为存在显著区别。

2.4 内力分配分析

通过有限元模型可获得衬塑钢管海水海砂混凝土短柱各部件的受力情况.试件 LP-50 不同部件的轴压荷载-变形曲线(取加载过程中首个荷载峰值点作为试件的极限承载力($\Delta=3.65\text{ mm}$)),如图 6 所示.由图 6 可知:轴压荷载下试件的主要受力部分为核心混凝土,且核心混凝土受到了外钢管的有效约束,其轴压荷载-变形曲线呈现出良好的延性特征,即轴压荷载达到峰值点后并未出现急剧的下降,而是随着变形的增大几乎可维持恒定,此时,核心混凝土承担的轴压荷载占总荷载的 62.27%;外钢管承担的荷载在变形较小时由于钢材屈服而出现一定降低,且由于核心混凝土的支撑作用,外钢管的承载力并未快速丧失,当试件达到极限承载力时,外钢管承担的荷载占总荷载的 37.13%,当变形持续增大后,钢材进入应变强化阶段,外钢管承载的荷载又略有回升;内衬塑料层对承载力的直接贡献较小,当试件达到极限承载力时,内衬塑料层承担的荷载仅占总荷载的 0.60%,近似可忽略。

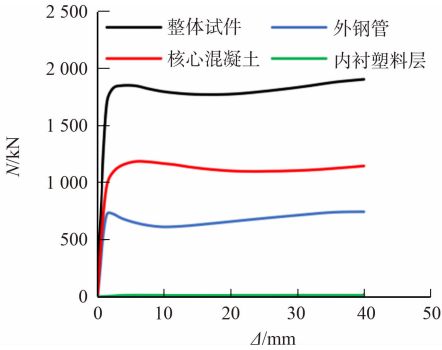


图 6 试件 LP-50 不同部件的轴压荷载-变形曲线
Fig. 6 Axial compressive load-deformation curves of different parts of specimen LP-50

3 轴压承载力分析

衬塑钢管海水海砂混凝土短柱在轴压荷载作用下的整体破坏形态和力学性能与传统钢管混凝土相近.同时,由于塑料的材性与钢材相差较大,内衬塑料层的设置难以避免地对钢管-混凝土的组合作用产生一定影响,从而导致衬塑钢管海水海砂混凝土短柱的力学性能与传统钢管混凝土有所区别.通过有限元模型开展参数分析,研究混凝土强度、钢材屈服强度、截面含钢率、塑料层厚径比对衬塑钢管海水海砂混凝土短柱轴压性能的影响规律。

3.1 混凝土强度

核心混凝土是衬塑钢管海水海砂混凝土短柱的主要受力部分,混凝土强度直接影响构件轴压承载力.混凝土强度对轴压承载力的影响,如图 7 所示.图 7 中:混凝土强度设置 30~90 MPa 等 7 个等级.由图 7(a)可知:随着混凝土强度的增大,衬塑钢管海水海砂混凝土短柱的初始刚度有所提高,峰值荷载逐渐增加,轴压荷载-变形曲线的类型逐渐由 C 型过渡至 A 型。

由图 7(b)可知:随着混凝土强度的增大,衬塑钢管海水海砂混凝土短柱的极限承载力近似呈线性上升,主要原因在于核心混凝土是整体构件的主要承载部分,其强度等级影响了整体构件的承载能力。

3.2 钢材屈服强度

在衬塑钢管海水海砂混凝土短柱中,外钢管除了对内填海水海砂混凝土产生约束作用之外,还直接承担了一部分轴压荷载.钢材屈服强度对轴压承载力的影响,如图 8 所示.图 8 中:钢材屈服强度设置 235~540 MPa 等 4 个等级。

由图 8(a)可知:随着钢材屈服强度的增大,衬塑钢管海水海砂混凝土短柱的初始刚度基本不变,而峰值荷载逐渐提高,轴压荷载-变形曲线的类型逐渐由 C 型过渡至 A 型。

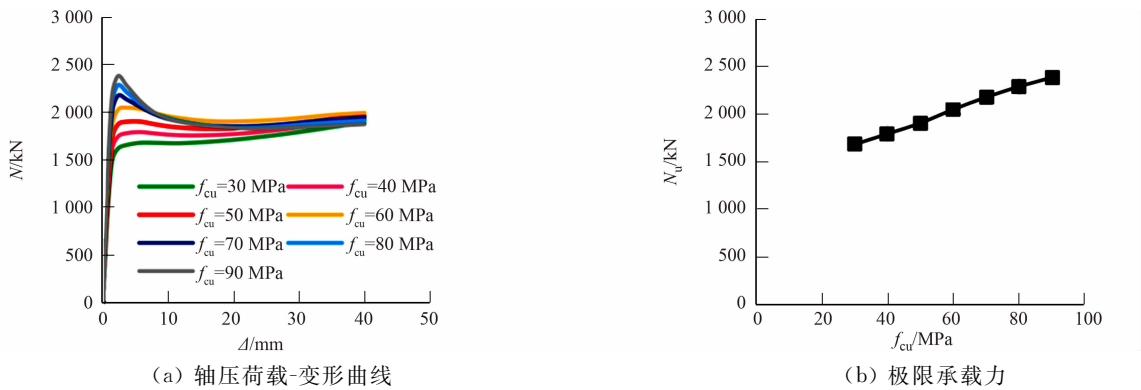


图 7 混凝土强度对轴压承载力的影响

Fig. 7 Effects of concrete strength on axial bearing capacity

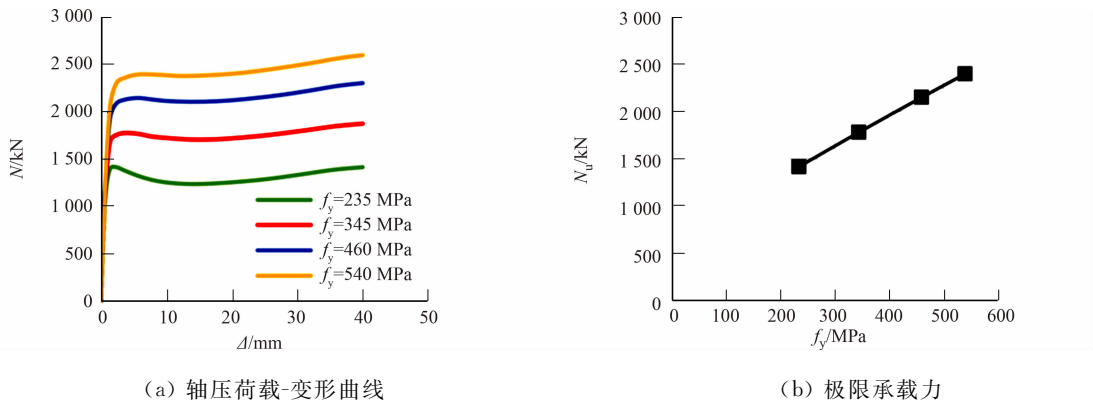


图 8 钢材屈服强度对轴压承载力的影响

Fig. 8 Effects of steel yield strength on axial bearing capacity

由图 8(b)可知:随着钢材屈服强度的增大,衬塑钢管海水海砂混凝土短柱的极限承载力近似呈线性上升,主要原因在于外钢管既直接承受外荷载,又对核心混凝土产生约束,从而提高混凝土部分的承载能力.因此,钢材屈服强度等级是影响整体构件承载能力的重要因素.

3.3 截面含钢率

除了钢材屈服强度之外,钢材用量也是影响钢管混凝土构件力学性能的主要因素.为了探究截面含钢率($\alpha=A_s/A_c$)对衬塑钢管海水海砂混凝土短柱轴压性能的影响,设置不同的外钢管壁厚的模型试件进行分析.截面含钢率对轴压承载力的影响,如图 9 所示.图 9 中:截面含钢率设置 0.055~0.199 等 6 个等级.

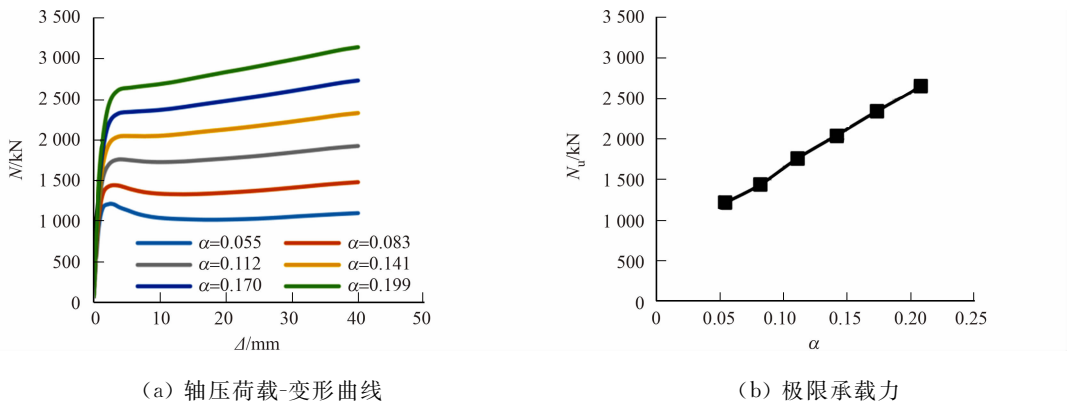


图 9 截面含钢率对轴压承载力的影响

Fig. 9 Effects of section steel ratio on axial bearing capacity

由图 9(a)可知:随着截面含钢率的增大,衬塑钢管海水海砂混凝土短柱的初始刚度有所增大,但不显著,峰值荷载逐渐提高,且轴压荷载-变形曲线的类型逐渐由 C 型过渡至 A 型.

由图 9(b)可知:随着截面含钢率的增大,衬塑钢管海水海砂混凝土短柱的极限承载力近似呈线性

上升.

3.4 塑料层厚径比

内衬塑料层是衬塑钢管海水海砂混凝土构件的重要组成部分,其厚度对构件力学性能的影响规律至关重要.塑料层厚径比对轴压承载力的影响,如图 10 所示.图 10 中:塑料层厚径比(t_p/D)设置了 0~0.030 等 11 个等级.

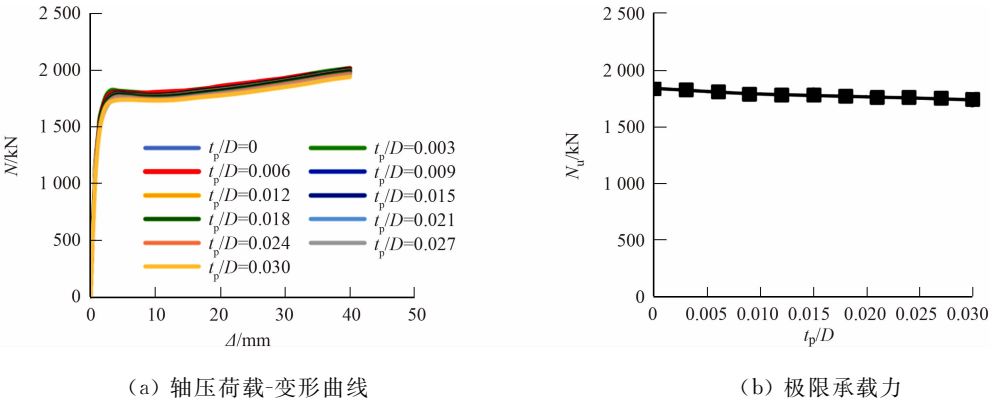


图 10 塑料层厚径比对轴压承载力的影响

Fig. 10 Effects of plastic lining thickness to diameter ratio on axial bearing capacity

由图 10(a)可知:随着塑料层厚径比的增大,衬塑钢管海水海砂混凝土短柱的轴压荷载-变形曲线形状相似,但曲线平台有所降低.

由图 10(b)可知:随着塑料层厚径比的增大,衬塑钢管海水海砂混凝土短柱的极限承载力近似呈线性降低,主要原因是内衬塑料层的强度低于钢材和混凝土,且内衬塑料层的设置在一定程度上削弱了外钢管对核心混凝土的约束作用.值得注意的是,内衬塑料层的存在虽然降低了整体承载力,但并未对轴压荷载-变形性能产生显著影响,构件仍呈现出较好的延性特征.

3.5 极限承载力简化计算模型

衬塑钢管海水海砂混凝土短柱的轴压承载力与钢材屈服强度、混凝土强度、截面含钢率和塑料层厚径比相关,且随着塑料层厚径比的增大,构件的极限承载力近似呈线性降低.为明确上述参数对构件极限承载力的影响并提出简化计算模型,通过有限元计算出不同参数对构件极限承载力的影响,结果如表 2 所示.表 2 中: $N_{u,no}$ 为无内衬塑料层的钢管混凝土极限承载力; $N_{u,FEA}$ 为有限元计算得到的有内衬塑料层的钢管混凝土极限承载力.

表 2 不同参数对构件极限承载力的影响

Tab. 2 Effects of different parameters on ultimate bearing capacity of member

参数	$N_{u,FEA}/kN$	$N_{u,no}/kN$	ξ	$N_{u,FEA}/N_{u,no}$	参数	$N_{u,FEA}/kN$	$N_{u,no}/kN$	ξ	$N_{u,FEA}/N_{u,no}$
$\alpha=0.055$	1 215	1 251	0.835	0.971	$f_y=345\text{ MPa}$	1 781	1 807	1.535	0.986
$\alpha=0.083$	1 442	1 485	1.261	0.971	$f_y=460\text{ MPa}$	2 149	2 180	2.047	0.986
$\alpha=0.112$	1 763	1 796	1.692	0.982	$f_y=540\text{ MPa}$	2 398	2 442	2.403	0.982
$\alpha=0.141$	2 049	2 081	2.128	0.985	$t_p/D=0.003$	1 826	1 842	1.709	0.991
$\alpha=0.170$	2 350	2 382	2.569	0.986	$t_p/D=0.006$	1 809	1 842	1.731	0.982
$\alpha=0.199$	2 648	2 685	3.016	0.986	$t_p/D=0.009$	1 795	1 842	1.754	0.975
$f_{cu}=30\text{ MPa}$	1 679	1 718	2.403	0.977	$t_p/D=0.012$	1 787	1 842	1.777	0.970
$f_{cu}=40\text{ MPa}$	1 790	1 830	1.802	0.978	$t_p/D=0.015$	1 779	1 842	1.800	0.966
$f_{cu}=50\text{ MPa}$	1 903	1 948	1.490	0.977	$t_p/D=0.018$	1 772	1 842	1.824	0.962
$f_{cu}=60\text{ MPa}$	2 046	2 093	1.252	0.977	$t_p/D=0.021$	1 765	1 842	1.849	0.958
$f_{cu}=70\text{ MPa}$	2 174	2 218	1.083	0.980	$t_p/D=0.024$	1 759	1 842	1.874	0.955
$f_{cu}=80\text{ MPa}$	2 285	2 321	0.960	0.985	$t_p/D=0.027$	1 750	1 842	1.899	0.950
$f_{cu}=90\text{ MPa}$	2 381	2 418	0.866	0.984	$t_p/D=0.030$	1 741	1 842	1.925	0.945
$f_y=235\text{ MPa}$	1 416	1 431	1.046	0.990					

将钢材屈服强度、混凝土强度和截面含钢率的影响统一至约束效应系数,并在传统钢管混凝土短柱

极限承载力的基础上引入承载力折减系数(β),以考虑约束效应系数和塑料层厚径比对构件极限承载力的影响.

约束效应系数和塑料层厚径比对承载力折减系数的影响,如图 11 所示.由图 11 可知:约束效应系对承载力折减系数的影响不明显;随着塑料层厚径比的增大,承载力折减系数逐渐降低.

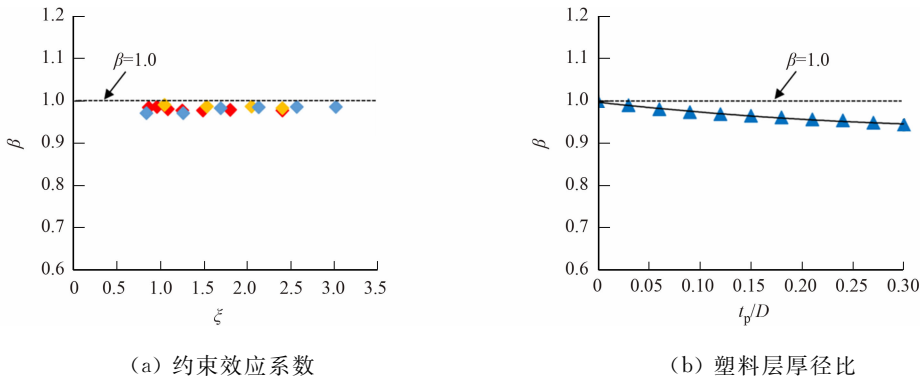


图 11 约束效应系数和塑料层厚径比对承载力折减系数的影响
Fig. 11 Effects of confinement factor and plastic lining thickness to diameter ratio on reduction coefficient of bearing capacity

经拟合可得承载力折减系数的表达式为

$$\beta=1+0.308\ 2x^2-0.262\ 8x.\tag{3}$$

式(3)中: $x=10t_p/D$.

因此,提出衬塑钢管海水海砂混凝土短柱的极限承载力的简化计算公式,即

$$N_u=\beta N_{u,no}.\tag{4}$$

式(4)中: $N_{u,no}$ 可采用已有的相关模型进行计算.

4 结论

建立衬塑钢管海水海砂混凝土短柱在轴压荷载作用下的精细化有限元分析模型,通过模型对构件的破坏形态、轴压荷载-变形关系、内力分配进行研究.经参数分析,提出衬塑钢管海水海砂混凝土的极限承载力简化计算模型.在研究参数范围内,可以得到以下 4 个结论.

- 1) 衬塑钢管海水海砂混凝土短柱的外钢管与内衬塑料层可较好共同工作,受力过程中两者未分离,且在整体构件轴压变形达到 8% 左右时,外钢管与内衬塑料层仅在局部发生屈曲.
- 2) 与传统钢管混凝土短柱的轴压荷载-变形曲线相似,衬塑钢管海水海砂混凝土短柱的轴压荷载-变形曲线也可分为 3 种类型,由约束效应系数决定.
- 3) 随着塑料层厚径比的增大,衬塑钢管海水海砂混凝土短柱的轴压荷载-变形曲线形状相似,但极限承载力近似呈线性降低.
- 4) 以承载力折减系数的形式提出衬塑钢管海水海砂混凝土的极限承载力简化计算公式,可为该结构构件的工程应用提供参考.

文中未考虑内衬塑料层对核心混凝土的直接约束作用,而整体构件所呈现的力学行为接近于传统的钢管混凝土,显著区别于带混凝土脱空缺陷的钢管混凝土.今后将进一步开展研究,采用试验、理论与数值模拟相结合的方法,系统探索内衬塑料层对衬塑钢管海水海砂混凝土构件的工作机理,推动该新型结构构件的工程应用.

参考文献:

[1] GUO Menghuan,HU Biao,XING Feng,*et al.* Characterization of the mechanical properties of eco-friendly concrete made with untreated sea sand and seawater based on statistical analysis[J]. Construction and Building Materials, 2020,234:117339. DOI:10. 1016/j. conbuildmat. 2019. 117339.
[2] XIAO Jianzhuang,QIANG Chenbing,NANNI A,*et al.* Use of sea-sand and seawater in concrete construction: Cur-

- rent status and future opportunities[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 155: 1101-1111. DOI: 10. 1016/j. conbuildmat. 2017. 08. 130.
- [3] 秦斌. 海水海砂混凝土基本力学性能研究[J]. *混凝土*, 2019(2): 90-91. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-3550. 2019. 02. 020.
- [4] ZHANG Yirui, WEI Yang, BAI Jiawen, *et al.* A novel seawater and sea sand concrete filled FRP-carbon steel composite tube column: Concept and behavior[J]. *Composite Structures*, 2020, 246: 112421. DOI: 10. 1016/j. compstruct. 2020. 112421.
- [5] AHMED A, GUO Shuaicheng, ZHANG Zuhua, *et al.* A review on durability of fiber reinforced polymer (FRP) bars reinforced seawater sea sand concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 256: 119484. DOI: 10. 1016/j. conbuildmat. 2020. 119484.
- [6] LI Yinglei, ZHAO Xiaoling, RAMANSINGHR K, *et al.* Tests on seawater and sea sand concrete-filled CFRP, BFRP and stainless steel tubular stub columns[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 108(3): 163-184. DOI: 10. 1016/j. tws. 2016. 08. 016.
- [7] YANG Junlong, WANG Jizhong, WANG Ziri. Axial compressive behavior of partially CFRP confined seawater sea sand concrete in circular columns-Part I: Experimental study[J]. *Composite Structures*, 2020, 246: 112373. DOI: 10. 1016/j. compstruct. 2020. 112373.
- [8] YANG Junlong, WANG Jizhong, WANG Ziri. Axial compressive behavior of partially CFRP confined seawater sea sand concrete in circular columns-Part II: A new analysis-oriented model[J]. *Composite Structures*, 2020, 246: 112368. DOI: 10. 1016/j. compstruct. 2020. 112368.
- [9] BAZLI M, ZHAO Xiaoling, SINGHRAMANR K, *et al.* Bond performance between FRP tubes and seawater sea sand concrete after exposure to seawater condition[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 265: 120342. DOI: 10. 1016/j. conbuildmat. 2020. 120342.
- [10] LI Yinglei, ZHAO Xiaoling, SINGHRAMANR K, *et al.* Axial compression tests on seawater and sea sand concrete-filled double-skin stainless steel circular tubes[J]. *Engineering Structures*, 2018, 176: 426-438. DOI: 10. 1016/j. engstruct. 2018. 09. 040.
- [11] LIAO Feiyu, HOU Chao, ZHANG Weijie, *et al.* Experimental investigation on sea sand concrete-filled stainless steel tubular stub columns[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 155: 46-61. DOI: 10. 1016/j. jcsr. 2018. 12. 009.
- [12] LI Yinglei, ZHAO Xiaoling, SINGH R K, *et al.* Experimental study on seawater and sea sand concrete filled GFRP and stainless steel tubular stub columns[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 106: 390-406. DOI: 10. 1016/j. tws. 2016. 05. 014.
- [13] SHAN B, XU C, LAID D, *et al.* Experimental research on compressive behavior of seawater and sea sand concrete-filled RPC tubes[J]. *Engineering Structures*, 2020, 222: 111117. DOI: 10. 1016/j. engstruct. 2020. 111117.
- [14] LI Yinglei, ZHAO Xiaoling. Hybrid double tube sections utilising seawater and sea sand concrete, FRP and stainless steel[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 149: 106643. DOI: 10. 1016/j. tws. 2020. 106643.
- [15] 赖顺颖. 衬塑钢管海水海砂混凝土短柱轴压性能与设计方法研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2022.
- [16] YE Yong, HAN Linhai, GUO Zixiong. Concrete-filled bimetallic tubes (CFBT) under axial compression: Analytical behaviour[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 119: 839-850. DOI: 10. 1016/j. tws. 2017. 08. 007.
- [17] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2016.
- [18] YE Yong, HAN Linhai, GUO Zixiong. Concrete-filled bimetallic tubes under axial compression: Experimental investigation[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 108: 321-332. DOI: 10. 1016/j. tws. 2016. 09. 004.
- [19] HAN Linhai, YE Yong, LIAO Feiyu. Effects of core concrete initial imperfection on performance of eccentrically loaded CFST columns[J]. *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 2016, 142(12): 04016132. DOI: 10. 1061/(ASCE)ST. 1943-541X. 0001604.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)