

## 考虑泥皮及径厚比影响下 钢混组合桩的抗弯性能试验研究

戴国亮<sup>1,2†</sup>,冯升明<sup>1,2</sup>,钮佳伟<sup>3</sup>,龚维明<sup>1,2</sup>

(1. 东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育重点实验室,江苏 南京 210096;  
2. 东南大学 土木工程学院,江苏 南京 210096;3. 国家电网苏州供电公司,江苏 苏州 215000)

**摘要:**为研究灌注桩施工过程中残留的泥皮厚度及不同钢管径厚比对钢管混凝土抗弯性能的影响,采用模拟水下浇筑混凝土的方法制备了6根钢管混凝土组合桩试件,对其进行了纯弯试验及截面测量,得到了各试件的弯矩-跨中挠度曲线、弯矩-曲率曲线、受弯承载力及抗弯刚度等。试验结果表明:泥皮的存在会削弱钢混组合桩的抗弯性能,使其抗弯刚度降低5%~25%,极限受弯承载力降低5%~10%,且径厚比越小受泥皮的影响越明显;当泥皮存在时,径厚比的减小使得钢混组合桩受弯承载力及抗弯刚度的提升幅度不如无泥皮状态;存有残留泥皮的钢混组合桩在受弯过程中截面不再符合平截面假定;采用统一理论所计算的抗弯承载力与试验值吻合较好,但随泥皮厚度增长,逐渐较试验值偏大,导致设计预留的安全储备降低;抗弯刚度的计算公式组合系数出现明显下降,组合系数在0.1~0.4左右。

**关键词:**钢管混凝土;钢混组合桩;泥皮;径厚比;抗弯性能;受弯承载力

**中图分类号:**TU473

**文献标志码:**A

## Experimental Study on Flexural Behavior of Steel Tubular-concrete Composite Pile Considering Influence of Mud and Radius-thickness Ratio

DAI Guoliang<sup>1,2†</sup>, FENG Shengming<sup>1,2</sup>, NIU Jiawei<sup>3</sup>, GONG Weiming<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structure of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;  
2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;  
3. State Grid Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215000, China)

**Abstract:** In order to study the influence of residual mud during construction process and steel pipe with different radius-thickness ratio on the flexural behavior of concrete filled steel tube, six steel tubular composite pile specimens were prepared by simulating underwater pouring of concrete for bending experiment and cross-section measurement. Through the test,  $M-u_m$ ,  $M-\Phi$  curves, flexural resistance and stiffness of these specimens were obtained. The test results show that the existence of mud weakens the stiffness and flexural resistance of concrete-filled steel

\* 收稿日期:2019-03-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0703408), National Key Research and Development Program of China(2017YFC0703408);国家自然科学基金资助项目(51478109, 51678145), National Natural Science Foundation of China(51478109, 51678145)

作者简介:戴国亮(1975—),男,湖南安化人,东南大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: daigl@seu.edu.cn

tube by approximately 5%~25% and 5%~10%, respectively. The smaller the radius-thickness ratio is, the more obvious the influence of mud is. The steel tube and concrete no longer meet the section assumption under the influence of the mud. The flexural capacity calculated by the unified theory agrees well with the test value, but with the increase of mud thickness, it gradually becomes larger than the test values, which leads to the reduction of the reserve for safety in design. The coefficient of the stiffness formula is about 0.1~0.4.

**Key words:** concrete filled steel tube; steel tubular composite pile; mud; radius-thickness ratio; bending properties; bending bearing capacity

钢管混凝土不仅有质量可控性高、可受冲击力强、耐疲劳、塑性能力强、耐火性好等优点<sup>[1]</sup>,而且在施工过程中,可直接使用钢护筒作为模板,还具有施工简单快速等施工优势<sup>[2]</sup>.

在一些桥梁工程中,钢管混凝土作为基础构件已被广泛使用<sup>[3]</sup>,此时钢管混凝土在承受竖向荷载的同时还会承受因波浪力、物体冲击以及地震作用等一系列水平荷载,因此对钢管混凝土的抗弯性能应予以重视.目前对钢管混凝土的研究多集中在受压性能研究<sup>[4-11]</sup>,关于钢管混凝土抗弯性能的研究较少,且很少涉及泥皮、径厚比等因素的影响.施工时残留的泥皮会减弱钢管与混凝土之间黏结及整体性,从而对钢混组合桩的抗弯性能产生影响.同时施工过程中需对钢护筒进行合理选取以便使施工更快速高效,而钢管径厚比的选择是钢管混凝土构件设计的关键,直接关系到构件的承载能力和经济性<sup>[12]</sup>.

因此,本文主要在钢管和混凝土之间模拟添加了施工过程中产生的泥皮,并设置了不同径厚比的钢管,采用纯弯试验分析了泥皮及径厚比对钢管混凝土组合桩抗弯性能的影响规律,并在内部设置应变片观察了存在泥皮时钢混组合桩在受弯过程中截面应变分布,最后通过理论计算与实测数据对比给出了泥皮存在对理论公式计算的影响及抗弯刚度组合系数.

## 1 试验研究

### 1.1 试验概况

本次试验旨在通过四点纯弯试验研究钢混组合桩的抗弯性能.试验制作的试件共计6根,长为

4 000 mm,对比试验分为两大类,一类用来研究泥皮的影响,另一类用来研究径厚比的影响.试件的具体参数如表1所示.

表1 试验试件参数

Tab.1 Configuration of test specimens

试块编号	几何尺寸	径厚比 $D/t$	泥皮
	$D \times L \times t / (\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm})$		
A-1	426×4 000×5	85.2	无泥皮
A-2	426×4 000×10	42.6	无泥皮
A-3	426×4 000×5	85.2	薄泥皮
A-4	426×4 000×10	42.6	薄泥皮
A-5	426×4 000×5	85.2	厚泥皮
A-6	426×4 000×10	42.6	厚泥皮

注: $D$ 为钢混组合桩的外直径, $L$ 为试件长度, $t$ 为钢管壁厚.

为尽可能模拟现场施工环境下钢混组合桩的力学性能,试验采用的试件全部为施工现场制作,使用的钢管为国标 Q235b 螺旋焊管,钢管直径均为 426 mm,壁厚分别为 5 mm 与 10 mm.钢管的力学性能参数如表2所示.浇筑试件所采用的混凝土为现场浇筑桩基的 C60 混凝土,试件浇筑采用同批次混凝土,采用相同方式浇筑,其具体配合比如表3所示.制作试件时,对同一批次试件留制 150 mm×150 mm×150 mm 混凝土材性试块,并将此材性试块与构件在同等养护条件下养护 28 d,用以测定混凝土的力学性能,混凝土的力学性能指标如表4所示.管内纵筋采用 16 mm 的 HRB400 热轧螺纹钢筋,箍筋采用 10 mm 的 HPB300 热轧光圆钢筋.

表2 钢管材料参数

Tab.2 Configuration of steel pipes

弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\nu$	屈服强度 $f_y/\text{MPa}$	抗拉强度 $f_u/\text{MPa}$
210	0.286	235	412

表 3 混凝土配合比

Tab.3 Concrete mix proportion

材料	规格	用量/(kg·m <sup>-3</sup> )
水泥	P.II52.5	223
砂	中砂	759
碎石	5~25 mm	1 049
粉煤灰	F 类 II 级	147
矿渣粉	S95	50
水	—	147
减水剂	GTS-102	4.2

表 4 C60 混凝土试块材性试验结果

Tab.4 Test results of concrete blocks MPa

立方体抗压强度	轴心抗压强度	抗拉强度	弹性模量
$f_{cu}$	$f_c$	$f_t$	$E_c$
62.6	48.8	3.4	$3.63 \times 10^4$

### 1.2 泥皮制作及混凝土浇筑

泥皮使用现场泥浆制作,泥皮的厚度通过泥浆密度控制.制作薄泥皮所采用的泥浆为第二次清孔时的泥浆,即钢混组合桩现场施工时下放钢筋笼之后清孔时的泥浆,泥浆密度约为 1.15 g/mm<sup>3</sup>;制作厚泥皮所采用的泥浆为第一次清孔时的泥浆,即旋挖机钻孔完毕后孔内的泥浆,泥浆密度约为 1.2 g/mm<sup>3</sup>.

泥皮制作过程将模仿钢混组合桩泥浆护壁水下浇筑混凝土的方式,尽量使制作过程和现场施工接近,具体流程如下:

- 1)从钢混组合桩现场施工孔内取得泥浆,并将泥浆灌满钢管;
- 2)采用 PVC 管进行导流,将准备好的 PVC 管插入钢管,使 PVC 管下部距钢管底部有 30~50 cm 的距离,并将集料漏斗置于 PVC 管上方,使漏斗口能够卡进管口,同时用塞子将漏斗口堵住;
- 3)在集料漏斗内灌满混凝土并快速拔出塞子,使斗内的混凝土全部倒入钢管内,同时将泥浆从钢管管口挤出;
- 4)当混凝土灌入而泥浆不再排出时,把 PVC 管稍微上提,见有大量泥浆流出后接着灌注混凝土.按照这种方法边浇筑边拔管,直到将钢管内灌满混凝土为止,其间轻敲钢管壁以使混凝土均匀分布.

### 1.3 试验加载及布置方案

采用图 1 所示的加载装置进行钢混组合桩的四点纯弯试验.抗弯试验加载方式为双向进油液压千斤顶单调分级静力加载.试验加载台为 4 m × 5 m × 4 m 的混凝土加载池,反力架的加载上限为 2 000

kN.受弯试件长 4 m,支座之间的距离为 3.6 m.加载段长为 3.6 m,两端各有 0.2 m 搭接在支座上.支座与试件之间的连接为铰连接.通过荷载分配梁分配从千斤顶传递下来的竖向荷载,荷载分配梁使用 U 型卡座与试件相连.荷载分配梁的长度为 1.2 m,分配梁的加载点位于试件加载段的三分点处.在试件的跨中及荷载分配梁的加载点下方放置 3 个百分表用于测量试件的挠度.试件内部纵筋及钢管表面分别贴有应变片用于研究钢混组合桩受弯过程中的应变情况.加载过程初期阶段,每级加载为预估极限荷载的 10%,每级加载后记录百分表数值及应变数值,荷载持续时间为 2~3 min 之后再下一级记录.当试件出现非线性变化时,每级荷载变为预估极限荷载的 5%,每级荷载持续时间为 2 min.在试件非线性变化接近破坏时,采用缓慢连续加载直至试件破坏.

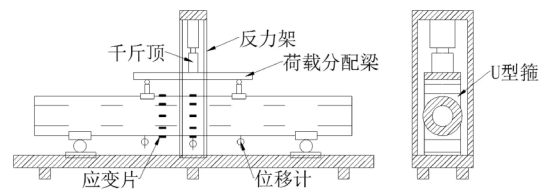


图 1 试验加载装置示意图

Fig.1 Load scheme of test

试验现场加载装置布置如图 2 所示.试验时每根试件共布置了两个测试截面,每个测试截面中混凝土内部的钢筋上共布置了 4 个应变片,钢管外壁上共布置了 5 个应变片,内外总共布置 9 个应变片,具体布置如图 3 所示.图 3 中,编号以 G 开头的应变片为布置在钢管表面的应变片;编号以 J 开头的应变片为布置在主筋上的应变片.图中标注的尺寸为各个应变片距测量截面底部的距离,分别为 0 mm、33 mm、63 mm、213 mm、363 mm、393 mm 和 426 mm.



图 2 试验现场加载装置布置图

Fig.2 Actual layout of loading scheme

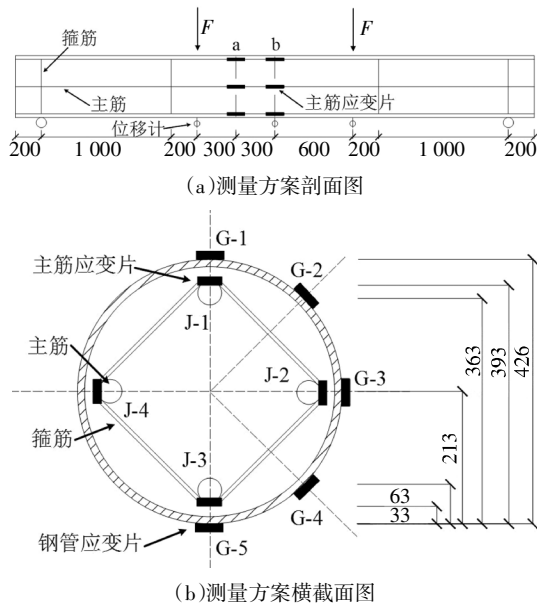


图3 测量截面应变布置图(单位:mm)

Fig.3 Measurement scheme of the section strain(unit:mm)

### 1.4 加载过程

在加载初期,试件跨中与加载点的挠度发展并不明显.随着荷载的增大,百分表的读数均匀增加.当荷载值接近最大加载值的20%~30%时,加载过程中可以听到清脆的混凝土开裂声;荷载继续增大至最大加载值的50%时,混凝土开裂的声音越来越明显,跨中挠度的读数也开始非线性增大;当荷载加载至最大加载值的75%附近时,试件会发出“咚”的声音,可以推测此处受压区混凝土由于受到三向压力的作用最终发生了受压破坏,试件的非线性显著增强;随着荷载继续增加,试件的挠度迅速发展,表层残留的锈迹脱落严重.油压千斤顶维持荷载变得越来越困难,最终试件无法继续承担荷载,此时可以认为试件已经发生了弯曲破坏.

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验现象

在纯弯试验结束后,对试件进行了切割以观察核心混凝土的受弯破坏特征.内部混凝土的破坏情况如图4所示.

从图4中可以看出,虽然外部的钢管没有出现明显的变化,但是内部的混凝土已经产生了大量的裂缝.在钢混组合桩受弯时,由于受拉区混凝土会迅速开裂并丧失承载力,试件的中和轴会上移.随着荷载的不断增大,混凝土受拉裂缝不断向上发展,混

凝土的受压区会不断地减小.观察裂缝的位置可知,裂缝均分布在纯弯段部分,混凝土的受拉区已经全部开裂,竖向裂缝已经延伸至形心轴上方.

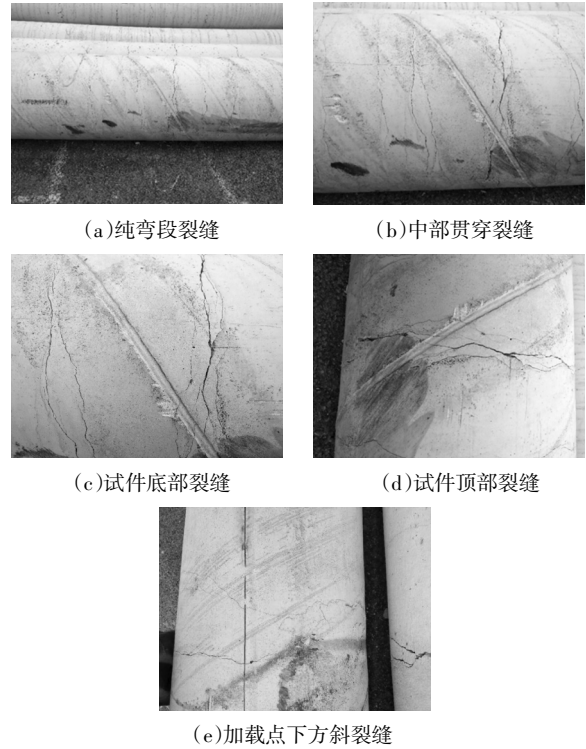


图4 核心混凝土裂缝形态

Fig.4 Fracture morphology of the core concrete

裂缝中存在三条贯穿整个试件的裂缝,一条为跨中裂缝,另外两条为加载点截面处的裂缝.跨中截面的贯穿裂缝宽度较宽,且周围分布着无数的小裂缝.加载点截面处的裂缝宽度较跨中截面裂缝要小,但贯穿试件的程度更大.因为加载点下方的混凝土承受局部压力较大,此处有明显的混凝土受压破坏的痕迹.按照力学分析方法,加载点处的荷载将会成45°向周围扩散,故加载点截面处的部分裂缝会与竖向截面呈现一定的夹角,形成斜裂缝.

### 2.2 弯矩-挠度及弯矩-曲率曲线

将试验中测得的跨中挠度  $u_m$  与跨中弯矩  $M$  绘制成  $M-u_m$  曲线如图5所示,将试件跨中截面曲率  $\Phi$  与跨中弯矩  $M$  绘制成  $M-\Phi$  曲线如图6所示,其中曲率  $\Phi = \pi^2 u_m / L^2$ .

由图5、图6可以看出,各试件的弯矩-挠度及弯矩-曲率曲线形态基本一致,即泥皮的存在对钢混组合桩受力形态的影响并不明显,其受力变形明显地呈现出3个阶段:弹性阶段、弹塑性阶段以及强化阶段.加载初期弯矩与位移近似为线性关系,此时试件受到的弯矩较小,弯矩的增长速度要大于变形

的增长速度,钢管与混凝土两种材料均处于弹性阶段,受压区的钢管与混凝土由于荷载作用较小,紧箍力作用不强,仍处于单轴受压状态,钢混组合桩为弹性工作阶段.随着弯矩的逐渐变大,钢管开始屈服,混凝土受压区不断减小,中和轴不断上移,部分钢管已经超过弹性范围,受拉区混凝土开裂不断发展,挠度增长开始加快,弯矩增长速度减慢,试件的承载性能开始减弱,进入弹塑性工作阶段.当荷载进一步变大,受压区混凝土破坏严重,受拉区与受压区钢管逐渐发生屈服,随着中和轴的进一步上移以及钢管与核心混凝土逐渐达到各自的承载力极限,此时变形急剧增大弯矩仍保持缓慢增长.由此可知,钢混组合桩具有良好的延性.

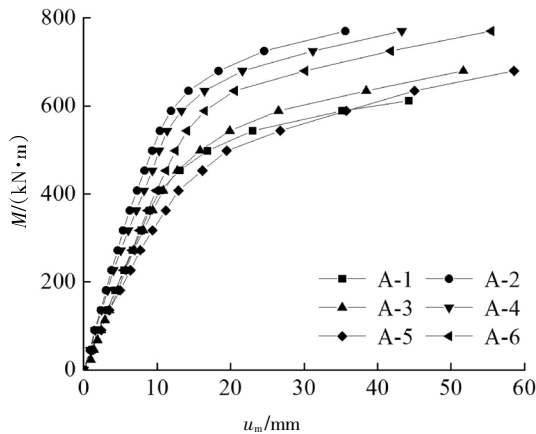


图 5 试件  $M-u_m$  曲线

Fig.5  $M-u_m$  relationship curves

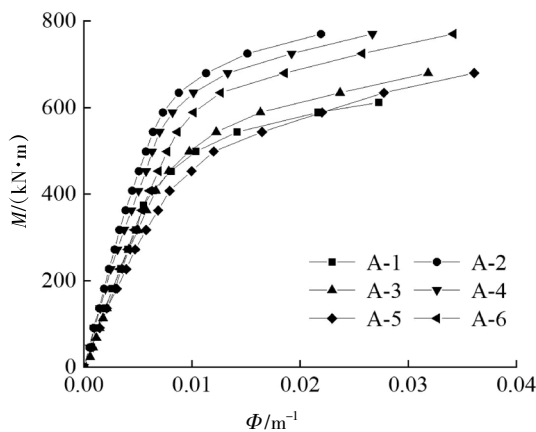


图 6 试件  $M-\Phi$  曲线

Fig.6  $M-\Phi$  relationship curves

### 2.3 泥皮对抗弯性能的影响

本次试验中采用  $M-u_m$  曲线的拐点作为钢混组合桩受弯承载力极限值  $M_u$ . 文献[13]建议采用  $M = 0.2M_u$  时  $M-\Phi$  曲线上对应的割线斜率作为钢管混

凝土初始抗弯刚度,  $M = 0.6M_u$  时  $M-\Phi$  曲线上对应的割线斜率作为钢管混凝土使用阶段的抗弯刚度. 本次试验中各试件的受弯承载力极限值及抗弯刚度如表 5 所示.

表 5 各试件受弯承载力及抗弯刚度试验值

Tab.5 Bending capacity and stiffness test values

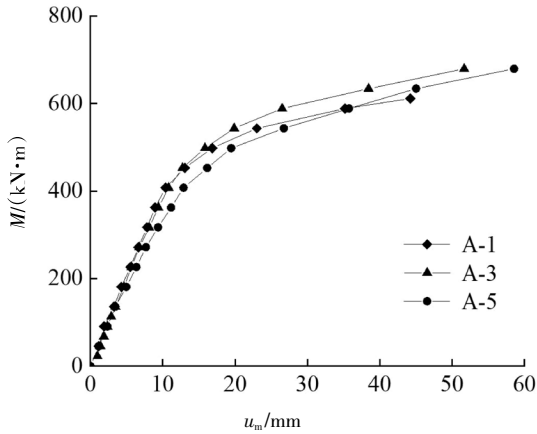
试件编号	受弯承载力 /kN	初始抗弯刚度 /(kN·m <sup>2</sup> )	使用阶段抗弯刚度 /(kN·m <sup>2</sup> )
A-1	539.08	72 513.62	65 077.95
A-2	706.30	95 313.16	91 243.65
A-3	552.57	63 623.59	62 633.41
A-4	679.92	89 994.04	82 886.93
A-5	500.77	62 545.18	56 342.14
A-6	634.54	69 537.83	67 082.82

综合表 5 和图 7 可知, 相较无泥皮试件 A-1, 存在泥皮的试件 A-3、A-5 的抗弯刚度分别降低了 3.7% 与 13.4%. 3 个试件的  $M-u_m$  曲线在弹性阶段几乎重合, 但仍可看出在同挠度下无泥皮试件 A-1 所能承受的弯矩要略高于有泥皮试件 A-3、A-5. 在进入弹塑性阶段后试件 A-1 出现不正常的强度降低, 薄泥皮试件 A-3 的受弯承载力反而相较 A-1 出现上升, 原因可能是后期加载试件 A-1 时仪器出现问题, 厚泥皮试件 A-5 的受弯承载力相较 A-1 下降了 7.1%. 但从薄泥皮试件 A-3 对比厚泥皮试件 A-5 同样可以看出, 试件 A-5 要较 A-3 受弯承载力下降了 9.4%, 即泥皮越厚试件的抗弯性能越差, 但在进入强化阶段后试件 A-5 的  $M-u_m$  曲线有向试件 A-3 曲线靠拢的趋势.

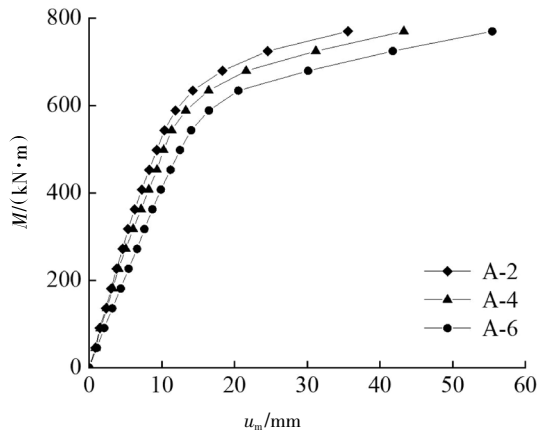
钢管壁厚为 10 mm 的 3 个试件中, 相较无泥皮试件 A-2, 有泥皮试件 A-4、A-6 的抗弯刚度分别下降了 9.2% 与 26.5%, 极限受弯承载力分别下降 3.7% 与 10%. 3 个试件的  $M-u_m$  曲线形态仍旧一致, 其中无泥皮试件 A-2 与薄泥皮试件 A-4 的曲线在弹性阶段差距不大但都高于厚泥皮试件 A-6, 在进入弹塑性阶段之后试件 A-2 与试件 A-4、A-6 的曲线逐渐出现较明显的差距, 在进入强化阶段后差距开始稳定, 3 条曲线几乎平行.

综合上述 2 组对比试件的结果可知, 泥皮的存在对钢管混凝土的受力变形性状影响不大, 但会削弱钢混组合桩的抗弯性能, 其中抗弯刚度降低范围在 5%~25% 之间, 极限受弯承载力降低范围在 5%~10% 之间, 且泥皮厚度越厚试件的抗弯性能越差, 径

厚比越小泥皮的削弱影响越明显。



(a) 5 mm 试件



(b) 10 mm 试件

图7 试件泥皮影响对比图

Fig.7 Effects of the mud cake on  $M-u_m$  relationship curves

### 2.4 径厚比对抗弯性能的影响

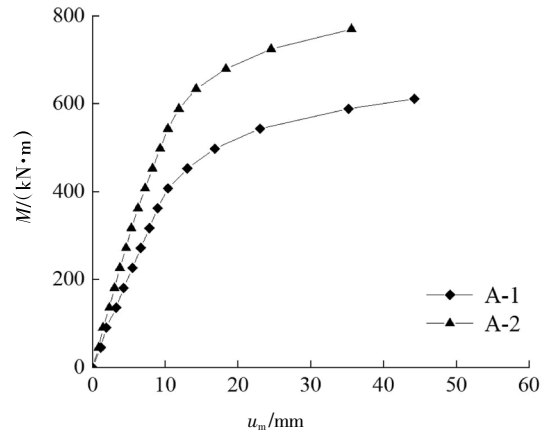
由表5和图8可知,试件A-2的受弯极限承载力较试件A-1提升了31%,抗弯刚度提高了40%。从两者 $M-u_m$ 曲线上看,在弹性加载范围内,试件A-2与A-1差距不大,但A-1更早进入屈服阶段,之后在相同挠度下试件A-2能承受的弯矩要明显大于A-1,在进入强化阶段后差距逐渐稳定。

薄泥皮组试件A-4的 $M-u_m$ 曲线在整个过程中都明显高于试件A-3,其受弯极限承载力较试件A-3提高了23.0%,抗弯刚度提高了32.3%。

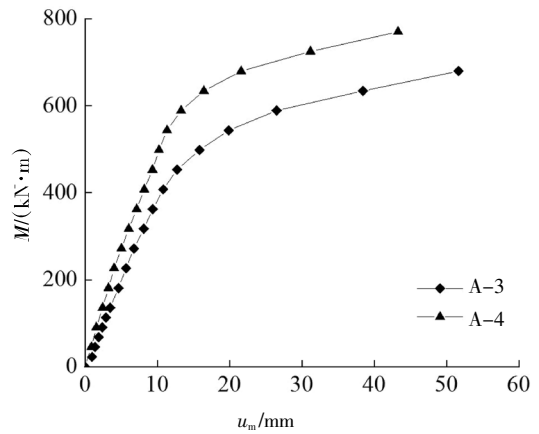
厚泥皮组试件A-6相较试件A-5的受弯极限承载力提升了26.7%,抗弯刚度提高了19%。从两者 $M-u_m$ 曲线上看,在弹性工作阶段承载力相近,随着荷载的增大,试件A-6所表现出来的抗弯性能要明显优于试件A-5。

由上述3组对比试验可以看出径厚比较小的试件的抗弯性能更好,但当泥皮存在时,径厚比的减小

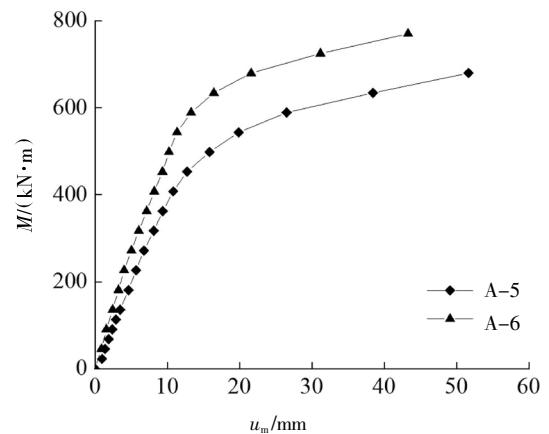
使得受弯承载力及抗弯刚度的提升不如无泥皮状态。



(a) 无泥皮试件



(b) 薄泥皮试件



(c) 厚泥皮试件

图8 各组试件径厚比影响对比图

Fig.8 Effects of radius-thickness ratio on  $M-u_m$  relationship curves

### 2.5 截面应变分布

将粘贴在钢管上的5个应变片数据与粘贴在主筋上J-1、J-3的2个应变片数据绘制成钢混组合桩截面应变曲线。各试件截面应变分布如图9所示。

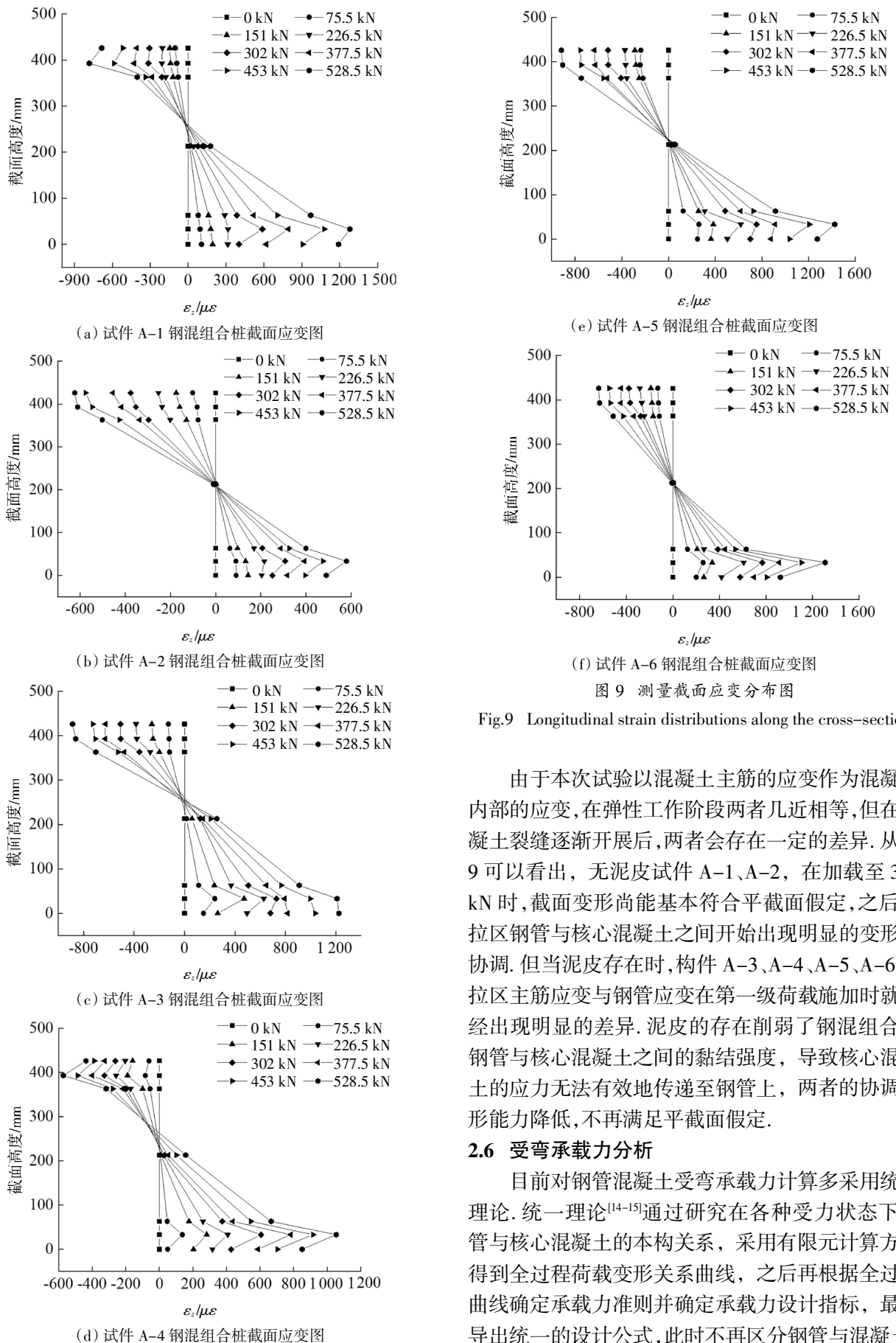


图 9 测量截面应变分布图

Fig.9 Longitudinal strain distributions along the cross-section

由于本次试验以混凝土主筋的应变作为混凝土内部的应变,在弹性工作阶段两者几近相等,但在混凝土裂缝逐渐开展后,两者会存在一定的差异.从图 9 可以看出,无泥皮试件 A-1、A-2,在加载至 302 kN 时,截面变形尚能基本符合平截面假定,之后受拉区钢管与核心混凝土之间开始出现明显的变形不协调.但当泥皮存在时,构件 A-3、A-4、A-5、A-6 受拉区主筋应变与钢管应变在第一级荷载施加时就已经出现明显的差异.泥皮的存在削弱了钢混组合桩钢管与核心混凝土之间的黏结强度,导致核心混凝土的应力无法有效地传递至钢管上,两者的协调变形能力降低,不再满足平截面假定.

### 2.6 受弯承载力分析

目前对钢管混凝土受弯承载力计算多采用统一理论.统一理论<sup>[14-15]</sup>通过研究在各种受力状态下钢管与核心混凝土的本构关系,采用有限元计算方法得到全过程荷载变形关系曲线,之后再根据全过程曲线确定承载力准则并确定承载力设计指标,最后导出统一的设计公式,此时不再区分钢管与混凝土,

而是将两者作为一个整体考虑.文献[15]中建议的圆钢管混凝土构件受弯承载力计算公式如下:

$$M_0 = \gamma_m W_{sc} f_{sc}^y \quad (1)$$

式中: $\gamma_m$ 为截面塑性发展系数, $\gamma_m = -0.483 2\xi + 1.926 4\xi^{0.5}$ ,当 $\xi < 0.85$ 时,可取 $\gamma_m = 1.2$ ,当 $\xi > 0.85$ 时,可取 $\gamma_m = 1.4$ ; $\xi$ 为套箍作用系数, $\xi = A_s f_y / A_c f_{ck}$ ;  $W_{sc}$ 为组合截面模量, $W_{sc} = \pi r_0^3 / 4$ ;  $f_{sc}^y$ 为组合抗弯强度标准值,计算公式如下:

$$f_{sc}^y = (1.212 + B\xi + C\xi^2) f_{ck} \quad (2)$$

$$B = 0.175 9 f_y / 235 + 0.974 \quad (3)$$

$$C = -0.103 8 f_{ck} / 20 + 0.030 9 \quad (4)$$

式中: $f_y$ 、 $f_{ck}$ 分别为钢材和混凝土的强度标准值;含钢率 $a = A_s / A_c$ ,  $A_s$ 及 $A_c$ 为钢管和混凝土的截面面积.公式计算结果与实测值如表6所示.由表6可知,采用统一理论公式计算值相较各试件试验值误差较小,均在10%以内,其值相较无泥皮构件偏于保守,当泥皮存在时,理论计算值逐渐与试验值接近并相较试验值偏大,因此在实际工程中,施工残留的泥皮会导致设计预留的安全储备降低,带来一定隐患.

表6 钢混组合桩弯曲承载力极限值对比表

Tab.6 Comparison of bending capacity between theoretical and test values

试件编号	试验值/(kN·m)	统一理论值/(kN·m)	误差/%
A-1	539.08	535.8	-0.6
A-2	706.30	636.9	-9.8
A-3	552.57	535.8	-3.0
A-4	679.92	636.9	-6.3
A-5	500.77	535.8	7.0
A-6	634.54	636.9	0.3

## 2.7 抗弯刚度分析

国内外相关现行规范中钢管混凝土抗弯刚度的计算公式形式一致,只是组合系数 $\eta$ 不同,其基本计算公式为:

$$EI = E_s I_s + \eta E_c I_c \quad (4)$$

式中:组合系数 $\eta$ 的取值,《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)<sup>[16]</sup>与《钢管混凝土结构设计与施工规范》(CECS 28—2012)<sup>[17]</sup>中建议取值为1;《福建省工程建设标准》(DBJ13—51—2010)<sup>[18]</sup>中建议取值为0.8;日本规程《AIJ—1997》<sup>[19]</sup>中建议取值为0.2;欧洲规程《EC4—2004》<sup>[20]</sup>取值为0.6.

各试件试验测得的抗弯刚度与基本公式相对应的组合系数如表7所示.由表7可以看出,在初始阶

段,本次试验中无泥皮试件的组合系数在0.8左右;在使用阶段,无泥皮试件的组合系数在0.65左右,与欧洲规程较为接近.但当存在泥皮时,在两个阶段组合系数都出现了明显的下降,以使用阶段为主,考虑在工程应用中适当留有一定安全储备,结合本次试验有泥皮构件的组合系数,建议当泥皮存在时组合系数取0.1~0.4左右.

表7 各试件试验抗弯刚度

Tab.7 The composite stiffness calculation results and coefficients

试件编号	初始阶段抗弯刚度/(kN·m <sup>2</sup> )	初始阶段组合系数 $\eta$	使用阶段抗弯刚度/(kN·m <sup>2</sup> )	使用阶段组合系数 $\eta$
A-1	72 513.62	0.79	65 077.95	0.65
A-2	95 313.16	0.75	91 243.65	0.66
A-3	63 623.59	0.62	62 633.41	0.60
A-4	89 994.04	0.64	82 886.93	0.49
A-5	62 545.18	0.60	56 342.14	0.48
A-6	69 537.83	0.21	67 082.82	0.16

## 3 结论

1)钢混组合桩在施工过程中无法避免会在钢管与混凝土之间残留泥皮,由本次试验结果可知,泥皮的存在会削弱钢混组合桩的抗弯性能,使其抗弯刚度降低5%~25%,极限受弯承载力降低5%~10%,径厚比越小泥皮的削弱影响越明显.

2)径厚比越小,试件的抗弯性能更好,但当泥皮存在时,径厚比的减小使得受弯承载力及抗弯刚度的提升不如无泥皮状态.

3)由本次试验结果可知,存有残留泥皮的钢混组合桩在受弯过程中截面不再符合平截面假定.

4)当泥皮存在时,采用统一理论公式计算值虽然与试验值接近但随泥皮厚度增长,逐渐较试验值偏大,导致设计预留的安全储备降低.抗弯刚度的计算公式组合系数出现明显下降,组合系数在0.1~0.4左右.

## 参考文献

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 第3版.北京:科学出版社,2016:23—24.  
HAN L H. Concrete-filled steel tube structures—Theory and practice[M]. 3rd. Beijing: Science Press, 2016: 23—24. (In Chinese)



- [2] 许岩剑,钟德明.钢管混凝土施工技术探讨[J].山西建筑,2010,36(31):116—118.  
XU Y J,ZHONG D M. Exploration on construction technology of concrete-filled steel tube[J]. Shanxi Architecture,2010,36(31):116—118.(In Chinese)
- [3] 陈宝春,韦建刚,周俊,等.我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J].土木工程学报,2017,50(6):50—61.  
CHEN B C,WEI J G,ZHOU J,*et al.* Application of concrete-filled steel tube arch bridges in China:current status and prospects[J]. China Civil Engineering Journal,2017,50(6):50—61. (In Chinese)
- [4] YU Z W,DING F X,CAI C S. Experimental behavior of circular concrete-filled steel tube stub columns [J]. Journal of Constructional Steel Research,2007,63(2):165—174.
- [5] 刘劲,丁发兴,龚永智,等.圆钢管混凝土短柱局压力学性能研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(11):33—40.  
LIU J,DING F X,GONG Y Z,*et al.* Mechanical behavior of concrete-filled steel tubes stub columns with circular section under local compression [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2015,42(11):33—40. (In Chinese)
- [6] 徐鹏飞,张公,李晓璐,等.不同壁厚钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[J].北京工业大学学报,2017,43(10):1514—1520.  
XU P F,ZHANG G,LI X L,*et al.* Experiment study of axial compression performance of concrete filled steel tube short column with different wall thickness [J]. Journal of Beijing University of Technology,2017,43(10):1514—1520. (In Chinese)
- [7] 柯晓军,陈宗平,应武挡,等.钢管高强混凝土柱轴压性能试验研究[J].建筑结构,2014,44(16):46—49.  
KE X J,CHEN Z P,YING W D,*et al.* Experimental study on the axial compression performance of high-strength concrete filled steel tube columns[J]. Building Structure,2014,44(16):46—49. (In Chinese)
- [8] WAN C Y,ZHA X X. Nonlinear analysis and design of concrete-filled dual steel tubular columns under axial loading [J].Steel and Composite Structures,2016,20(3):571—597.
- [9] 王志滨,张万安,池思源,等.复式薄壁方钢管混凝土构件受弯性能研究[J].建筑结构学报,2017,38(7):78—84.  
WANG Z B,ZHANG W A,CHI S Y,*et al.* Flexural behavior of composite concrete-filled square thin-walled steel tubular specimens[J]. Journal of Building Structures,2017,38(7):78—84. (In Chinese)
- [10] 陈庆军,黎哲,蒙何彬,等.钢套管再生混凝土加固钢筋混凝土柱偏压性能[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(3):29—38.  
CHEN Q J,LI Z,MENG H B,*et al.* Behavior of steel-jacket retrofitted column with recycled aggregate concrete under eccentric loading[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),2018,45(3):29—38. (In Chinese)
- [11] 王志滨,魏飞豹,池思源,等.复式薄壁方钢管混凝土柱的偏压力学性能研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(9):20—29.  
WANG Z B,WEI F B,CHI S Y,*et al.* Study on behaviour of composite concrete-filled square thin-walled steel tubular columns under eccentric compression [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2018,45(9):20—29. (In Chinese)
- [12] 张耀春,曹宝珠.轴心受压薄壁圆钢管混凝土柱临界径厚比的确定[J].工程力学,2005,22(1):170—174.  
ZHANG Y C,CAO B Z. Critical limit of diameter to thickness ratio for axially loaded concrete filled thin-walled circular steel tubes [J]. Engineering Mechanics,2005,22(1):170—174. (In Chinese)
- [13] VARMA A H,RICLES J M,SAUSE R,*et al.* Seismic behavior and modeling of high-strength composite concrete-filled steel tube (CFT) beam-columns [J]. Journal of Constructional Steel Research,2002,58(5/8):725—758.
- [14] 钟善桐.钢管混凝土统一理论[J].哈尔滨建筑大学学报,1994,27(6):21—27.  
ZHONG S T. The unified theory of concrete filled steel tube[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture,1994,27(6):21—27. (In Chinese)
- [15] 钟善桐.钢管混凝土统一理论:研究与应用[M].北京:清华大学出版社,2006:37—40,71—72.  
ZHONG S T. The unified theory of concrete filled steel tube—research and application [M]. Beijing:Tsinghua University Press,2006:37—40,71—72. (In Chinese)
- [16] GB 50936—2014 钢管混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2014:135—136.  
GB 50936—2014 Code for design of concrete structures [S]. Beijing:China Architecture and Building Press,2014:135—136. (In Chinese)
- [17] CECS 28—2012 钢管混凝土结构设计与施工规范[S].北京:中国计划出版社,2012:15—16.  
CECS 28—2012 Technical specification for concrete-filled steel tubular structures [S]. Beijing:China Planning Press,2012:15—16. (In Chinese)
- [18] DBJ/T13—51—2010 钢管混凝土结构技术规程[S].福州:福建省住房和城乡建设厅,2010:17.  
DBJ/T13—51—2010 Technical specification for concrete-filled steel tubular structures[S]. Fuzhou:Housing and Urban-rural Development of Fujian,2010:17. (In Chinese)
- [19] 马欣伯,张素梅,孙玉平.日本 AIJ 关于圆钢管混凝土构件承载力设计方法介绍[J].工业建筑,2004,34(2):69—74.  
MA X B,ZHANG S M,SUN Y P. Introduction to AIJ method of load-carrying capacity of concrete-filled circular steel tubes[J]. Industrial Construction,2004,34(2):69—74. (In Chinese)
- [20] Euro code 4 (EC4). Design of steel and concrete structures—Part-1:General rules and rules for building [S]. Brussels:European Committee for Standardization,2004:69.