咬合桩支护结构的抗弯承载特性研究

廖少明[1, 2]，周学领[1]，宋 博[3]，李文林[1]，范垚垚[1]

(1.同济大学地下建筑与工程系，上海 200092；2.同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室，上海 200092；3.上海申通集团有限公司，上海 200031)

摘 要：钻孔咬合桩作为一种较为新颖的基坑挡土墙形式，其抗弯承载力特性对于基坑挡墙的设计来说至关重要。在室内试验的基础上，根据缓凝时间要求，确定C30超缓凝混凝土的配比；通过相似模型试验对咬合桩支护结构在考虑素桩作用下的抗弯承载力特性进行研究，揭示了咬合桩从弹性到塑性破坏不同阶段荤素桩力学行为，提出了其抗弯承载力计算方法.进一步结合上海地铁某咬合桩试验段，通过实测钢筋应力和测斜曲线推算了不同工况下咬合桩抗弯承载力的发挥情况.实测情况表明,考虑素桩作用的抗弯承载力设计是合理的。

关键词：咬合桩；荤素桩;模型试验；抗弯承载力

中图分类号：TU476 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2008)01－0072－07

作者简介：廖少明(1966－)，男，博士，副教授，主要从事隧道及地下工程设计优化及信息化施工控制研究。E-mail: liaosm@online.sh.cn。

Study on the bending performance of secant pile retaining wall

LIAO Shao-ming[1,2], ZHOU Xue-ling[1], SONG Bo[3], LI Wen-lin[1], FAN Yao-yao[1]

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education P. R. China, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Shentong Group Co., Ltd., Shanghai 200031, China)

Abstract: The bending performance of the secant piles is crucial to the design of foundation pits. The mixture ratio of ultra-retardation concrete was determined in accordance with the requirements of strength and coagulation time by laboratory tests. Through model tests, the bending performance of the secant piles with intercrossing of reinforced concrete pile (RCP) and plain concrete pile (PCP) was studied and the mechanical behavior and the effect of PCP on the bending capacity of secant piles at different stages from elastic to plastic state had been achieved. Furthermore, the bending performance of secant piles in different cases had also been evaluated through field measurement of the stress of steel and displacement of the pile. It was shown by in-situ tests that it was reasonable to take the effect of plain concrete piles into consideration in design.

Key words: secant pile; reinforced and plain concrete pile; model test; bending performance

0 引 言

钻孔咬合桩是采用全套管灌注桩机（磨桩机）施工形成的桩与桩之间相互咬合排列的一种基坑支护结构。施工时，通常采用全混凝土桩排列（俗称全荤桩）及混凝土与素混凝土交叉排列（俗称荤素搭配桩）两种形式，其中荤素搭配桩的应用较为普遍。素桩（又称A桩）采用超缓凝型混凝土先期浇注；在A桩混凝土初凝前利用套管钻机的切割能力切割掉相邻A桩相交部分的混凝土，然后浇注荤桩（又称B桩），实现A、B桩的咬合[1]。其咬合方式如图1所示。

在A桩混凝土初凝前施作中间的钢筋混凝土B桩，消除了对A桩的损坏，只要施工工序连续、咬合时机合理，可使基坑围护桩形成没有施工缝的类地下连续墙结构，具有较好的止水效果[2]。

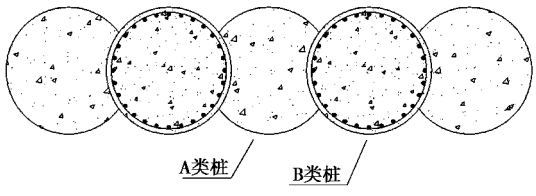


图1 咬合桩示意图

Fig. 1 View of secant piles

钻孔咬合桩的关键技术是桩身垂直度和混凝土缓凝时间的控制,前者主要与施工机械和施工工艺有关,后者受诸多因素影响，需要施工前反复试验后确定，

收稿日期：2007－02－05

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

因此超缓凝混凝土的配置和浇注是影响钻孔咬合桩的成功的主要因素。

钻孔咬合桩在我国的应用起步较晚，其施工方法并不是很成熟，施工机械的研制也落后于发达国家，咬合桩在各地的应用也或多或少的存在一些问题[2-4]。国内的相关研究主要集中在咬合桩的施工技术以及超缓凝混凝土的性能方面，对咬合面的抗弯承载力性能及素桩的作用的研究尚未见诸文献。另外，国内没有统一的施工工艺和质量检验评定标准，也影响了钻孔咬合桩的进一步推广。

为了在设计中合理考虑和评价咬合桩的抗弯承载力特性，本文结合上海地铁某工程咬合桩试验段的情况，通过模型试验、理论推导及现场实测数据的对比分析，对咬合面在抗弯时的承载力进行了研究，提出了随素桩开裂情况变化而不同的咬合桩临界弯矩承载力，提出了针对不同使用要求的承载力计算模式，现场实测了咬合桩在开挖阶段抗弯承载力的发挥情况，验证了考虑素桩作用的临界弯矩承载力计算方法的合理性。

1　模型试验

1.1　超缓凝混凝土的配制

依据工程要求，咬合桩的混凝土配置强度为 C30。超缓凝混凝土的凝结时间是混凝土配置的关键，它与水泥品种、缓凝剂等因素有关[5]，同时对不同时间的强度应满足一定的要求。通过室内缓凝剂的优选试验、水泥产筛选试验和缓凝剂掺量试验确定超缓凝混凝土的配制。根据试验结果，选择 RH559 型缓凝剂。配制的超缓凝混凝土具体配比指标为：水（清洁水）185 kg；水泥（嘉新京阳 PO42.5）250 kg；矿渣 70 kg；粉煤灰 70 kg；细骨料（细度为 2.4 的中砂）790 kg；粗骨料（5～25 mm 的碎石）1000 kg。

1.2　试验方案

原型桩直径为 1000 mm，先期浇注的 A 桩（素桩）和后期咬合的 B 桩（钢筋混凝土桩）之间咬合尺寸为 200 mm。模型桩的直径取 320 mm，咬合尺寸为 60 mm，长度取 1000 mm，几何相似比 $C_l=1/3$，材料相似比为 $C_E=1$。两边素桩为超缓凝混凝土桩，中间荤桩配筋为：纵向钢筋 17Φ12（HRB335），箍筋Φ4@100（HRB235）。模型桩分作 3 组，咬合时素桩浇注时间分别为：20，40 和 60 h。抗弯试验采用三分点加载，使用特殊加工的反力钢架装置进行加载。加载简图如图 2 所示，抗弯试验加载现场如图 3 所示，试件弯矩图见图 4。

根据模型试验相似定理可以得到该模型试验的相似常数和相似比。如表 1 所示。

表 1 模型试验相似常数和相似比

Table 1 Similarity constant and ratio of model test

类型	物理量	量纲	相似关系
材料特性	应力 σ	FL^{-2}	1
	应变 ε	—	1
	弹性模量 E	FL^{-2}	1
	泊松比 ν	—	1
	质量密度	FT^2L^{-1}	1
几何特性	长度 L	L	1/3
	线位移 x	L	1/3
	角位移 θ	—	1
	面积 A	L^2	1/9
	惯性矩 I	L^4	1/81
荷载	集中荷载 P	F	1/9
	线荷载 w	FL^{-1}	1/3
	面荷载 q	FL^{-2}	1
	力矩 M	FL	1/27

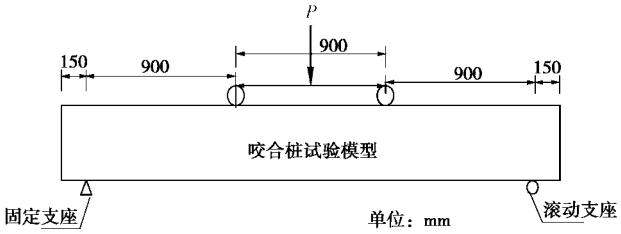


图 2 抗弯试验加载简图

Fig. 2 Loading model of the bending test



图 3 抗弯试验加载现场图

Fig. 3 In-situ loading of the bending test

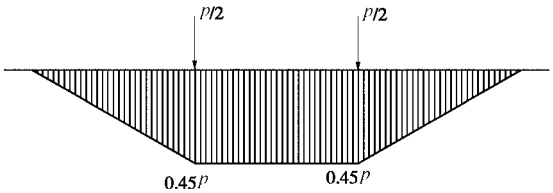


图 4 试件弯矩图

Fig. 4 Diagram of moment

1.3　试验过程及结果分析

抗弯试验一共做了 4 个试件，包括三个咬合桩试件和一个对比单桩试件，见表 2。所有试件均加载到极限破坏状态。咬合桩试件的试验过程为：在荷载逐

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

渐增大到 100 kN 时，素桩的腹部开始出现微裂缝，在荷载增加不大的情况下，裂缝宽度发展很快，在荷载增加到 120 kN 的时候，荤桩开始出现裂缝，此时素桩裂缝已发展到中轴线以上，随后荤素桩的裂缝继续增大，直到荷载不能增加达到极限破坏状态。在极限破坏时三个试件的咬合面均未破坏。对比单桩的破坏过程与咬合桩的破坏过程类似，但其出现裂缝时的荷载小，只有 80 kN 左右。

表 2 抗弯试验结果

Table 2 Results of bending test

试件编号	咬合间隔时间/h	裂缝出现时荷载/kN		咬合面破坏情况	破坏荷载/kN
		素桩	荤桩		
C-1	20	100	115	完好	24.5
C-2	40	100	120	完好	23.5
C-3	60	100	120	完好	220
C-4			90		220

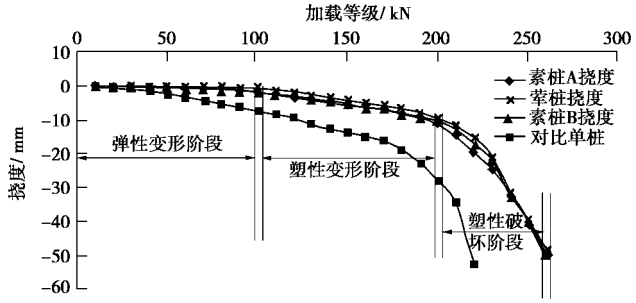


图 5 荷载－挠度曲线（中点最大挠度处）

Fig. 5 Deflection vs. load curves

根据抗弯试验结果，弯曲破坏过程分为弹性变形阶段、弹塑性变形阶段、塑性破坏 3 个阶段。试验结果表明，素混凝土桩构件的受力过程与普通矩形截面梁的弯曲过程类似，遵循平截面假定；比较钢筋混凝土单桩与咬合桩试件的开裂荷载，可以知道在开裂前，每根素混凝土桩分担了大约 12.5%的总荷载；咬合桩的抗弯承载力与咬合时间（>20 h）的关系较小；从荷载－挠度曲线（如图 5）可以知道，素混凝土桩与钢筋混凝土桩能同步变形共同抵御外加荷载，两者能很好的协同作用。

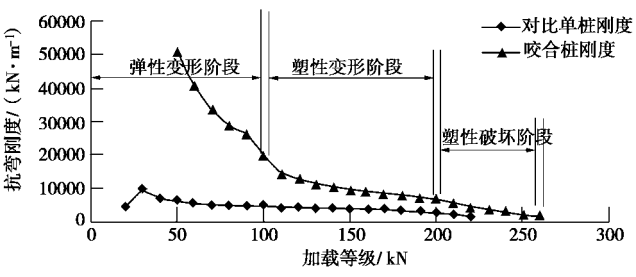


图 6 不同阶段荷载－抗弯刚度曲线

Fig. 6 Flexural rigidity vs. load curves

根据挠度曲线反算试件的抗弯刚度如图 6 所示，抗弯刚度变化曲线反映了随荷载增加截面抗弯刚度逐步减小，咬合桩受素桩的开裂影响刚度降低较快，单桩的刚度降低较为平缓。两类桩不同的刚度变化特征说明了素桩的开裂情况是影响咬合桩截面抗弯刚度变化的主要原因。

根据设置的钢筋应力计推算试件中点处荤桩最大弯矩的变化情况，并通过加载情况进而得知素桩弯矩的变化情况，荤素桩的弯矩分担曲线如图 7。分担曲线表明在素桩未出现或部分出现裂缝的情况下，素桩承担了相当比率的弯矩，素桩分担的比率在弹性变形阶段高达 75%，在弹塑性变形阶段仍达 35%，说明在咬合桩的工作阶段素桩的分担作用明显，设计时有必要考虑其作用。

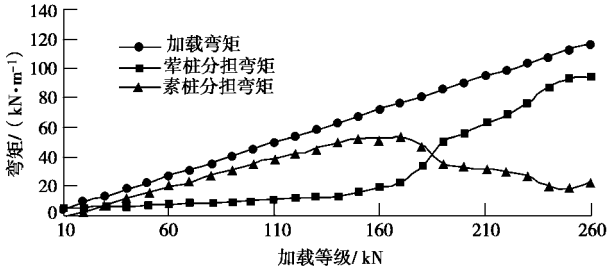


图 7 均匀加载下荤素桩的弯矩分担曲线

Fig. 7 Contribution of bending moment in reinforced and plain concrete piles

咬合桩和单桩的受压区高度变化曲线如图 8 所示，在弹性阶段，同一荷载等级下，单桩的受压区高度大于咬合桩的受压区高度；随着荷载的增加，逐步进入弹塑性变形阶段后，单根荤桩的受压区高度减小很快，而受素桩作用的咬合桩受压区高度减小相对较为缓慢，使得咬合桩的受压区高度在同等荷载条件下大于单根荤桩。

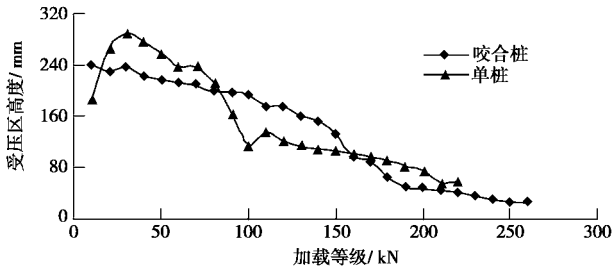


图 8 均匀加载下受压区高度变化曲线

Fig. 8 Height of compressive zone vs. load curves

2 咬合桩受力机理及承载特性

咬合桩不论用作临时结构还是永久结构，设计时主要关心的是 A 类桩的受力和 A、B 桩的共同作用情况。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

目前，国内主要使用的两种咬合桩搭配形式：荤素搭配和荤荤搭配。对于荤素搭配的咬合桩，如果不考虑素桩的作用，按一般灌注桩的设计方法进行设计时，是偏保守的和不经济的。因为在圈梁的整体箍固作用和 A，B 桩相互咬合嵌入情况下，素桩实际上是参与结构受力的，至于素桩对整体结构受力的贡献有多大是本文需要研究的问题。

由于基坑支护桩在受水土压力时，假定仅横向受力而产生弯曲，不发生扭转，根据以上抗弯试验验证的平截面假定及欧拉梁理论，A，B 桩之间不存在剪切传递作用，咬合面在整个受弯过程中也没有破坏，可见咬合桩作为挡土结构时可以考虑相邻荤素桩的共同作用。

2.1　不同使用目的下的咬合桩设计要求

荤素搭配的咬合桩受力时，需要考虑两个问题：素桩对整个结构受力的贡献和素桩的裂缝控制问题。不同的使用目的对咬合桩提出了不同的要求。

当荤素桩搭配咬合桩用作临时结构时，现行设计中是不考虑素桩的作用；而从试验的情况看，在两者在协调变形阶段，素桩的存在加大了钢筋混凝土桩受压区混凝土的面积，对整个结构承载力的提高有很大的作用，所以有必要讨论素桩的作用。

当荤素搭配咬合桩作为永久结构或永久结构一部分时，根据混凝土设计规范，设计时要控制素桩的裂缝宽度。

2.2　考虑素桩作用的咬合桩承载力

抗弯试验结果表明，当达到试验的最后一级荷载时，素桩在中途破坏而退出工作，最后只有中间的荤桩受力。根据试验时观察到的截面裂缝发展情况及荷载－挠度曲线可以知道，咬合桩变形历经了弹性变形阶段、弹塑性发展阶段和塑性破坏阶段可以分为以下 4 步。

（1）Ⅰ素桩未开裂阶段，相当的计算截面为一矩形，高度为 h_0。其中 h_0 根据刚度等效原则确定。

（2）Ⅱ素桩开裂阶段，荤桩未开裂，相当的计算截面为一 T 形，高度为 h_0，翼缘高为 h_1。该阶段是过渡阶段，h_1 不必确定。

（3）Ⅲ素桩裂缝继续发展，荤桩开裂，相当的计算截面为一 T 形，高度为 h_0，翼缘高为 h_2。

（4）Ⅳ素桩破坏，荤桩开裂，相当的计算截面为一圆形，半径为 R。

等效高度 h_0 根据刚度等效原则计算：

$$E_1I_1+E_2I_2=\frac{E_3(2d-2a)h_0^3}{12}\quad , \tag{1}$$

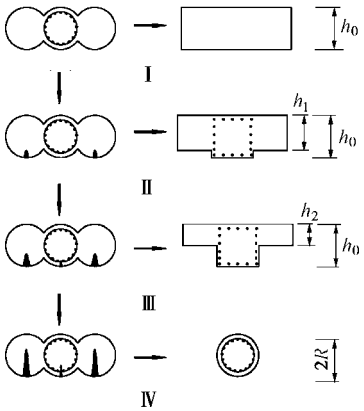
式中，E_1I_1 为素桩抗弯刚度，E_2I_2 为荤桩抗弯刚度。

$$\left.\begin{aligned}
&I_2=\frac{1}{4}\pi R^4,\\
&I_1=I_2-4I_3,\\
&=2\int_0^{y_1}y^2\sqrt{R^2-y^2}\,\mathrm{d}y-(2R-a)\int_0^{y_1}y^2\mathrm{d}y,\\
&=(R^4\arcsin\frac{y_1}{R}-y_1\sqrt{R^2-y_1^2}\,\frac{(R^2-2y_1^2))}{4}-\frac{(2R-a)y_1^3}{3},
\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中，R 为桩半径，a 为两桩的咬合量，y_1 为咬合面宽度的一半。

根据图 9 可以知道：①当荤素搭配的咬合桩作为永久结构使用时，不允许素桩出项裂缝，应该按照图 9 的状态 I 进行计算；②当荤素搭配的咬合桩作为临时结构使用时，可以允许素桩出现裂缝，故可以按图 9 的状态 III 进行计算；③当荤素搭配的咬合桩作为临时结构使用时，只考虑荤转的作用，把素桩的承载力作为对结构安全储备，故应按图 9 的状态 IV 进行计算。

根据钢筋混凝土结构基本原理，可以推导出上述 3 个状态的临界弯矩 M_{cr}。素桩桩惯性矩计算图如图 10 所示。



（a）截面的破坏情况　（b）相当的计算截面

图 9　不同状态裂缝发展情况和相应的等效截面

Fig. 9 Crack development and equivalent cross section

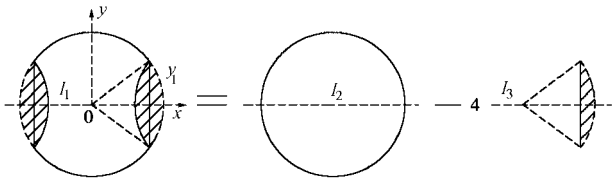


图 10　素桩桩惯性矩计算图

Fig. 10 Calculation of inertia moment of plain concrete pile

（1）状态 I 的临界弯矩推导

由于素桩不能出现裂缝，即其受拉区边缘最大应力达到混凝土抗拉应力 f_{tk}，拉应变达到 ε_{tk}，此时钢筋的应变很小，为方便计不考虑钢筋的作用。下面推

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

导图 11 计算截面的临界弯矩 M_{cr}。如图 11 所示，取一微元面积：$\mathrm{d}s = 2R^2\cos^2\theta\mathrm{d}\theta$，微元的应力为 $\mathrm{d}s\dfrac{f_{tk}}{R}x$，对 x 轴取矩有 $\mathrm{d}s\dfrac{f_{tk}}{R}xy = 2f_{tk}R^3\cos^3\theta\sin\theta\mathrm{d}\theta$，则积分有：

$$M_{cr} = 3\times 2\int_0^{\frac{\pi}{2}} 2f_{tk}R^3\cos^3\theta\sin\theta\mathrm{d}\theta \quad , \tag{3}$$

则 $M_{cr} = -3f_{tk}R^3$。

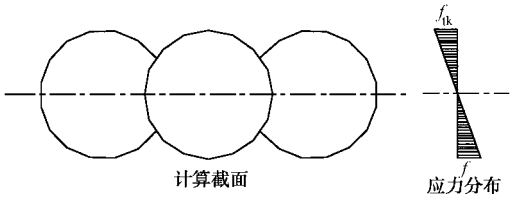


图 11 状态 I 计算简图

Fig. 11 Calculation of stage I

取 $f_{tk} = 2.01$ MPa，$R = 163.5$ mm，根据式（3）可以计算第一阶段的临界弯矩，其临界弯矩约为 $M_{crI} = 26.4$ kN·m，换算成试验加载的 P 为 58.6 kN，根据模型试验相似原理，根据表 1 知弯矩的相似常数为 1/27，换算为试验原型的弯矩为 711.6 kN·m。

（2）状态 III 的临界弯矩推导

III 状态的计算截面变为 T 形截面梁，根据刚度等效 h_0=286 mm，h_0=αh_0，其中α为受压区高度系数，通过圆形截面受弯构件的承载力公式预估，如式（2）所示。又因为该公式重复考虑咬合部分混凝土作用会导致设计偏不安全，须按 T 形截面梁设计。α与弯矩、配筋率的变化关系如图 12。

$$M = \frac{4}{3}\alpha_1(f_{c1}+f_{c2})Ar\frac{\sin^2\pi\alpha}{\pi} + f_yA_sr_s\frac{\sin\pi\alpha+\sin\pi\alpha_t}{\pi}。 \tag{4}$$

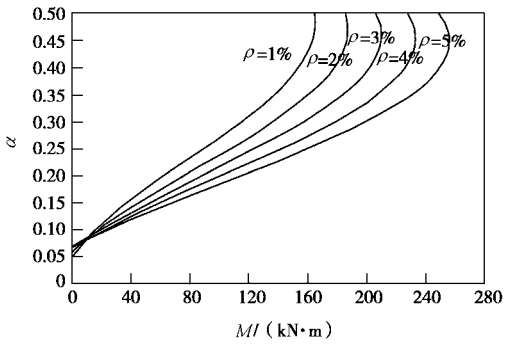


图 12 不同配筋率下的 M-α曲线（R=0.16 m）

Fig. 12 Curves of M-α under different ratios of reinforcement

根据混凝土基本原理，按第一类 T 形截面梁计算有

$$\left.\begin{aligned}\alpha_1 f_c b_f &= f_y A_s,\\ M_{cr} &= \alpha_1 f_c b_f x(h_0 - \frac{x}{2})。\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

根据试验结果（图 8），在 III 状态时的受压区高度系数为 $\alpha \approx 0.15$，则有临界弯矩 $M_{crIII} = 63.63$ kN·m，换算成试验加载的 P 为 141.4 kN，同理根据模型试验相似关系换算成试验原型的弯矩为 1718.01 kN·m。

（3）状态 IV 的临界弯矩推导

IV 状态的时，素混凝土完全退出工作，计算截面变为圆形。根据圆形截面受弯构件计算公式有

$$M_{cr} = \frac{2}{3}f_c r^3\sin^3\pi\alpha + f_yA_s\imath \quad , \tag{6}$$

$$\alpha f_c A(1-\frac{\sin\pi\alpha}{2\pi\alpha}) + (\alpha-\alpha_1)f_yA_s = 0 \quad , \tag{7}$$

$$\alpha_t = 1.25 - 2\alpha \quad 。 \tag{8}$$

则有临界弯矩为 $M_{crIV} = 41.66$ kN·m，换算成试验加载的 P 为 92.6 kN，同理根据模型试验相似关系换算成试验原型的弯矩为 1124.82 kN·m。

比较临界弯矩 M_{crIII} 和 M_{crIV} 可以知道，荤素搭配的咬合桩用作临时结构，计算考虑素桩作用下的 M_{crIII} 和不考虑素桩作用的 M_{crIV} 相差 52.7%，由此可见考虑素桩的作用明显。比较 M_{crI} 和 M_{crIII} 可以知道，如果不允许素桩出现裂缝，咬合桩的承载力只发挥了一部分，占 M_{crIII} 的 41.4%，由此可见荤素搭配的咬合桩作为主体结构的外墙时，应加上内衬作为复合结构使用。

当荤素搭配咬合桩只用作临时结构时，应考虑素桩受力贡献，通过计算可知考虑素桩作用比不考虑素桩作用下咬合桩承载力提高了将近 50%。

3 工程实测

3.1 工程概况

工程为上海地铁某咬合桩区间段深基坑，最大开挖深度为 12.3 m，围护采用 ϕ1000 荤素搭配咬合桩，咬合量 0.2 m，桩长 25 m。支撑体系采用四道 ϕ609 钢管支撑。施工场地地质条件为典型的上海软土地层，在成桩范围内，淤泥质土层厚达约 15 m。在 SK28+583.716 处设置一科研监测断面，通过对咬合桩的位移及钢筋应力监测，分析咬合桩支护结构在开挖阶段的的实际抗弯承载特性。

3.2 测点布置

通过在咬合桩荤桩内每隔一定深度布置一对钢筋应力计实测钢筋应力用以推算咬合桩弯矩，钢筋应力计埋设深度分别为地面以下 2，4，6.5，7.2，9，10，12.4，14，17，20 m（图 13）。同时在咬和桩中设置测斜管，孔深与咬合桩深度一致，长 20 m，通过测斜管测得的咬和桩变形曲线，也可间接推算其弯矩[6-7]。通过这两类数据推算的结果取得相互验证。桩身实测弯矩见图 14。

3.3 咬合桩实测弯矩分析

根据钢筋应力和测斜曲线推算的各工况咬合桩

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

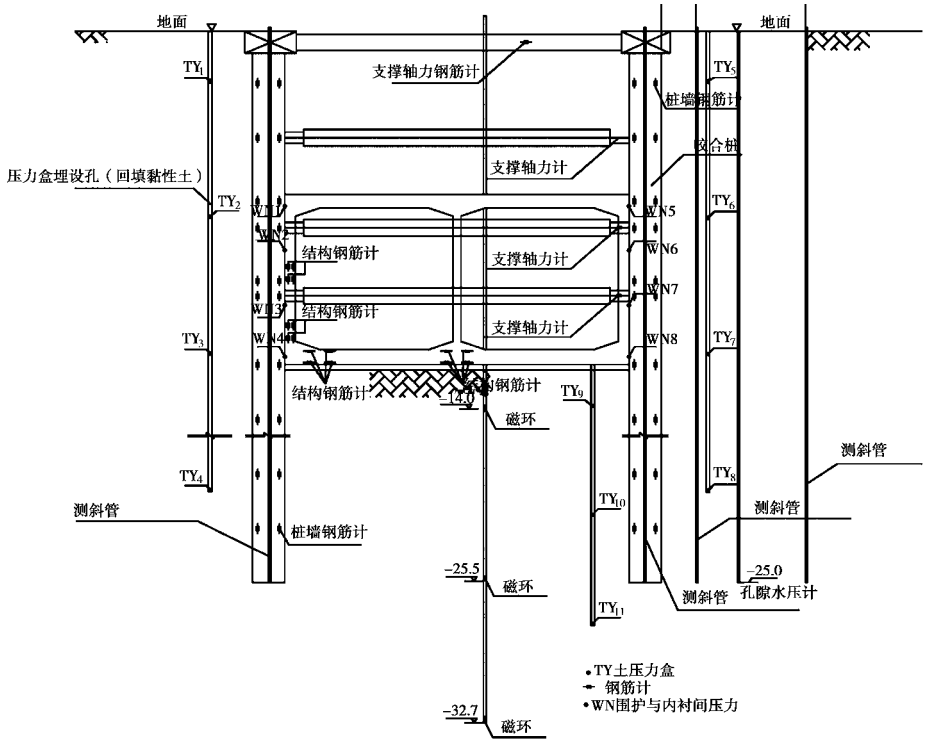


图 13 咬合桩实测断面

Fig. 13 Profile of secant piles

表 3 测点咬合桩各工况弯矩发挥情况

Table 3 Contribution ratio of bending moment in different cases

工况	6 次挠曲线拟合			旧方法			新方法		
	深度/m	最大值/(kN・m)	相对承载力发挥百分比/%	深度/m	最大值/(kN・m)	相对承载力发挥百分比/%	深度/m	最大值/(kN・m)	相对承载力发挥百分比/%
挖第一层土，深度 3.5 m	4	50.40	2.99	2	182.47	10.83	6.5	269.49	15.99
挖第二层土，深度 6.8 m	5	350.72	20.81	2	266.72	15.83	7.2	131.62	7.81
挖第三层土，深度 9.3 m	11	579.20	34.37	12.4	667.44	39.60	12.4	585.34	34.73
安装第四道支撑	11	991.84	58.85	12.4	771.33	45.77	12.4	645.67	38.31
挖第四层土，深度 12 m	11	1305.92	77.49	12.4	975.63	57.89	12.4	881.38	52.30
浇筑垫层	12	1481.44	87.90	14	1013.17	60.12	12.4	887.18	52.64

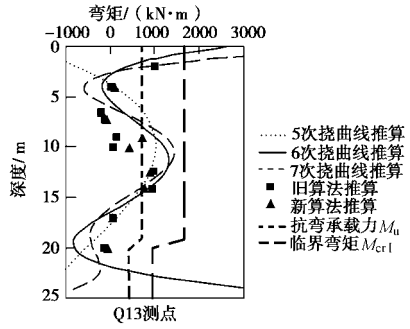


图 14 桩身实测弯矩(工况：挖第四层土，深度 12.3 m)

Fig. 14 Measured moments of the pile

桩身弯矩最大值一般出现在开挖面附近，随着开挖的不断进行，最大弯矩对应深度下移。开挖阶段最大弯矩出现在开挖第四层土时，在坑底位置处推算弯矩值超过临界弯矩 M_{crI}，但都小于承载力 M_u（即临界弯矩 M_{crIII}），这与开挖至 10～12 m 深时观察到的素桩水平裂缝（图 15）情况基本相一致（其中，采用曲线拟和法推算的弯矩比采用钢筋应力推算的弯矩略大）。咬合桩不同工况弯矩的发挥情况见表 3，实测弯矩发挥反映了与图 9 中假定一致的素桩逐步开裂的特性，同时也证明了考虑素桩作用的弯矩承载力计算方法的合理性。



图 15 咬合桩素桩水平裂缝

Fig. 15 Horizontal crack of plain concrete pile

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4 结 语

（1）根据抗弯试验结果，咬合桩在受弯时遵循平截面假定，咬合桩的极限荷载取决于荤桩的抗弯能力，咬合面在受弯过程中保持完好，荤素桩能很好的共同作用。

（2）咬合桩的抗弯受力特性与素桩的弹塑性工作状态或裂缝发展紧密相关，文中提出的基于不同破坏阶段的承载力计算假定同现场实测情况也基本一致。

（3）当荤素搭配咬合桩仅用作临时结构时，需考虑素桩受力贡献，并把咬合桩当作 T 形截面梁计算，此时考虑素桩受力贡献的咬合桩承载力提高了将近 50%。现场实测结果表明，咬合桩实际工作状态的最大发挥比例达到 52%。

（4）室内外试验均证明本文考虑素桩受力贡献的咬合桩设计方法是合理的。对于咬合桩荤素桩间的裂缝控制问题,以及桩间横向和竖向剪切的影响还需进一步研究。

参考文献：

[1] 刘富华, 沈保汗. MZ 系列摇动式钻机及工程应用[J]. 地基基础工程, 2001(2): 21－28. (LIU Fu-hua, SHEN Bao-han. MZ oscillatory casing drill and its application[J]. Foundation Engineering, 2001(2): 21－28. (in Chinese))

[2] 陈 斌, 施 斌, 林 梅. 南京地铁软土地层咬合桩围护结构的技术研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(3): 354－357. (CHEN Bin, SHI Bin, LIN Mei. A study on the secant pile in soft soil for Nanjing metro project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(3): 354－357. (in Chinese))

[3] 周学领, 廖少明, 宋 博, 刘纯洁. 软土地区咬合桩成桩施工引起的邻近建筑沉降分析[J]. 岩土工程学报(增刊), 2006, **28**(S0): 1806－1810. (ZHOU Xue-ling, LIAO Shao-ming, SONG Bo, LIU Chun-jie. Settlement analysis of adjacent buildings induced by secant pile construction in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S0): 1806－1810. (in Chinese))

[4] 王建山, 黄少群. 钻孔咬合桩的应用与施工[J]. 铁道标准设计, 2001, **21**(3): 35－36. (WANG Jian-shan, HUANG Shao-qun. Application and construction of secant pile[J]. Railway Standard Design, 2001, **21**(3): 35－36. (in Chinese))

[5] 李文林. 软土地层咬合桩挡土结构设计与施工技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2006. (LI Wen-lin. Study on design and construction technology of secant pile retaining structure in soft soil[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese))

[6] 吴小将, 刘国彬, 等. 基于深基坑工程测斜监测曲线的地下连续墙弯矩估算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **22**(3): 1086－1090. (WU Xiao-jiang, LIU Guo-bin, et al. Research on approximate method of calculating bending moment based on lateral deformation of diaphragm walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **22**(3): 1086－1090. (in Chinese))

[7] 毛朝辉. 基于监测数据的围护墙弯矩反分析及安全评估研究[D]. 上海: 同济大学, 2006, (MAO Zhao-hui. Study on back analysis for bending moment of retaining wall and safety evaluation based on monitoring data[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net