

成层软土地区高层建筑 PHC 管桩抗震性能研究

戴 轩¹ 郑 刚^{2,3} 张 楠⁴ 刘景锦²

(1. 中国民航大学, 天津 300300; 2. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072;

3. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 4. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142)

摘要:以天津成层软土地质条件下采用桩筏基础的高层建筑为背景,利用有限元方法建立上部结构-桩-土相互作用模型,对 PHC 管桩在地震荷载下的内力进行研究。研究表明,桩筏基础在地震荷载作用下,角桩将产生较大的内力,减少承台对管桩转动自由度的约束可有效改善其抗震性能。有地下室的结构在地震荷载下的桩顶内力将小于无地下室的结构,但其影响范围在桩顶以下 10 倍桩径范围内,此外,桩顶周围软弱土层的存在也会对桩顶内力产生较大影响,因此在进行设计时,应充分考虑地下室和桩顶周围软弱土层的综合作用,仅考虑地下室的影响可能会使管桩在地震荷载下处于不利的受力状态,改良桩顶周围土体的性质可明显降低地震荷载作用下的管桩顶部内力。

关键词: PHC 管桩; 抗震性能; 高层建筑; 桩筏基础; 成层软土

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2019)S1-0248-09

Seismic performance of PHC pipe piles of high-rise building in layered soft soils

Dai Xuan¹ Zheng Gang^{2,3} Zhang Nan⁴ Liu Jingjin²

(1. Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. MOE Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

4. China Railway Design Corporation, Tianjin 300142, China)

Abstract: Considering the high-rise building which is supported by piled raft foundation with PHC pipe piles in layered soft soils of Tianjin, a structure-pile-layer soil model was built using finite element method to ascertain seismic performance of the piles. The research shows that the piles around the corner of the pile group suffer larger internal force under earthquake load. Reducing the constraint of cap on pile top at rotational degree of freedom can effectively improve the seismic performance of PHC piles. The structure with basement generates lower internal force of pile top than the structure without basement during the earthquake, and the influence zone of basement is in the range of 10 times of pile diameter from the pile top. Besides, the PHC pipe piles with soft soil layer around the top suffer larger internal force under seismic load. Both the effect of basement and soft soil layer around pile top should be considered in the foundation design. Only considering the influence of the basement is likely to make the pile under adverse stress state during earthquake. Improving the soil properties around pile top can reduce the internal force of top of the PHC pipe piles under earthquake load significantly.

Keywords: PHC pipe pile; seismic performance; high-rise building; piled raft foundation; layered soft soils

E-mail: tianjindaixuan@126.com

引 言

PHC 管桩即预应力高强混凝土管桩,属于先张法预应力混凝土管桩的一种,其以可靠的质量和良好的经济效益,在我国沿海软土地区得到了广泛的应用^[1]。然而,我国多个省市的地方标准对 PHC 管

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0805407)、国家自然科学基金(51808548)和中央高校基本科研业务费项目(3122018C017)

作者简介: 戴轩, 博士, 讲师

收稿日期: 2019-02-27

桩在抗震设防烈度不低于 7 度的软土地区的应用进行了严格限制^[2-4]。由于 PHC 管桩推广应用时间尚短,其在地震荷载下的受力情况尚存在不明确之处,仍需进行系统深入研究。

在对 PHC 管桩进行建筑物基础设计时,关于水平地震力均考虑为静力分析,不考虑桩-土相互作用,地震作用下的管桩受力性能与静载有很大不同。地震作用时,地震波通过场地土体的传播作用在桩基础上,桩基础将该地震波传递给上部结构,使上部结构产生振动;反之,上部结构产生的惯性力又如同新的震源,反作用于桩基础并向场地土体传递。因此地震作用下存在着上部结构-桩-土的相互耦合作用。

刘慧珊^[5-6]通过对阪神大地震的调查分析,总结了各类地基土的桩基破坏特点。易伟建^[7]、吕西林^[8]、姜忻良^[9]、李建文^[10]等学者通过振动台试验、现场试验研究了上部结构-桩-土在地震荷载下的相互作用,其研究成果有较高参考价值,但均主要分析了上部结构的动力响应,对桩本身的受力分析较少。在数值模拟方面,Kavvadas 等^[11]利用有限元方法及动态温克尔地基梁的方法研究了单桩在桩顶自由情况下的响应,研究发现桩身弯矩在软硬土层交界处较大;管晔^[12]、王平^[13]、杨小卫^[14]等学者利用 ANSYS 软件进行了上部结构-桩-土的模拟分析,但是其研究均针对实心桩,针对 PHC 管桩尚缺乏考虑上部结构-桩-土相互作用的系统模拟研究。

针对 PHC 管桩,杨树标等^[15]进行了振动台试验研究,刘春原等^[16]在振动台试验的基础上进行了数值模拟工作,但其试验和数值模拟均采用了均质土,得到的桩身内力分布情况与实际情况并不相符;李曰辰^[17]、付鑫^[18]等对成层土中的结构-PHC 管桩-土相互作用体系进行了振动台试验,但其在上部结构层数增加的时候,仅增加了配重,并没有调整桩数,这与实际设计中的情况并不相符。近年来唐孟雄等^[19]针对填芯的 PHC 管桩,研究了管桩自身的抗压承载能力;王维俊等^[20]研究了 PHC 管桩在岩溶区地基的应用。郑刚等^[21]建立了上部结构-桩-土整体模型,分析了成层土条件下的 5 层框架结构 PHC 管桩在地震作用下的受力情况,并考虑了上部结构层数增加后桩数的增加情况,计算结果有一定参考意义。

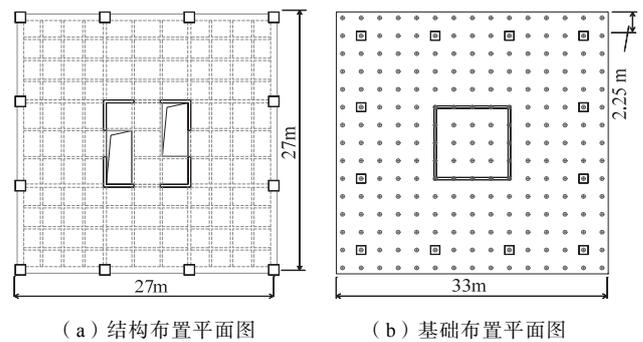
本文以天津典型成层软土地基上的 18 层框架-剪力墙结构为研究背景,通过有限元方法建立了上部结构-桩-土相互作用模型,研究了桩顶与承台的

连接方式、有无地下室、桩顶周围土体性质对于地震荷载下 PHC 管桩受力情况的影响,分析了提高管桩抗震性能的措施。

1 有限元模型的建立

1.1 框架-剪力墙结构概况

有限元计算的上部结构为一十八层框架-剪力墙结构,地上总高度 59.4m,带有一层地下室,各层层高均为 3.3m,各层楼板厚度为 100mm,屋面结构厚 120mm。结构分为三跨,其平面布置基本对称,中间为走廊和楼梯间,楼梯间四面布置 300mm 厚的剪力墙,剪力墙四面均开 2.8m×2.7m 的门洞,楼板上两楼梯洞口的尺寸为 3m×6m。每一层四周设置截面尺寸 700mm×1000mm 的封边梁。上部结构的平面布置如图 1 所示。



(a) 结构布置平面图

(b) 基础布置平面图

图 1 结构及基础布置平面图

Fig.1 Plan of structure and foundation layout

结构一至十二层的混凝土强度等级为 C40,十三至十六层为 C35,十七、十八层为 C30。基础采用桩筏基础,筏板埋深为 4.3m,筏板厚度 1m,采用 C35 混凝土。桩基础为 500(100)AB 型 PHC 管桩(桩径 500mm,壁厚 100mm),桩距为 4.5 倍桩径,即 2.25m,经计算此种形式下共布置 225 根管桩,基础布置如图 1 所示。结构的梁、板、柱及布桩形式均满足现行规范的要求,其尺寸见表 1。

1.2 模型的二维简化

二维模型的简化参照 Desai^[22]提出的简化方法,即用降低了弹性模量的板桩来代替长度方向上每隔一定间距布置的圆柱形的桩,并保证桩基的竖向总刚度相等。对于上部结构的框架柱采用同样的原则进行简化,对于剪力墙结构,将剪力墙筒近似看成四个“异形柱”和同一列的框架柱一起等效计算。结构两片剪力墙之间的连梁则与框架部分主梁一起等效为二维结构中的中跨梁,框架-剪力墙结构

的等效如图 2 所示。对于地下室结构，考虑到其具有较大刚度，采用刚体进行模拟，将其实际质量等

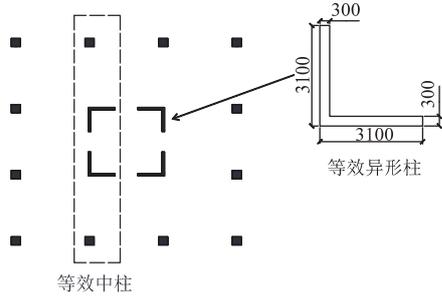


图 2 框架-剪力墙结构的简化方法(单位: mm)

Fig.2 Simplified method of frame-shear wall structure (Unit: mm)

效为刚体的密度进行计算。

梁、柱、桩的等效参数见表 1。PHC 管桩作为主要研究对象，其与普通挖孔桩或钻孔桩（如钻孔

灌注桩）的工作性状有所不同，存在土塞效应和挤土效应，这部分效应在进行基础设计时进行了考虑。PHC 管桩的桩身刚度是决定其抗震性能的较为重要的因素，与普通桩并不同，因此计算时，根据不同的预应力钢棒布置形式，采用抗弯等效的原则^[22]，对其弹性模量进行提高，如式(1)所示：

$$E_0 = \frac{E_c I_x + \sum E_p I_{px_i}}{I_x} \quad (1)$$

式中： E_0 为等效后的弹性模量， E_c 为截面混凝土的弹性模量， E_p 为截面预应力钢棒的弹性模量， I_x 为环形截面对主轴的惯性矩， I_{px} 为预应力钢棒对主轴的惯性矩。模型中的其余构件近似取为混凝土弹性模量，由于各层混凝土强度等级不同，因此梁的弹性模量没有一一列于表中。计算时，忽略楼板和填充墙的刚度，将其等效为集中质量，加在柱子的节点及各梁跨三分之一位置处。

表 1 框架-剪力墙结构尺寸及等效参数

Table 1 Structure size and equivalent parameter of frame-shear wall structure

梁、柱及桩	截面尺寸 (m)	弹性模量 (MPa)	等效面积(m ² /m)	等效截面惯性矩(m ⁴ /m)
边跨梁	0.35×0.9	—	(0.35×0.9×2+0.7×1×2) /27	(0.35×0.9 ³ ×2+0.7×1 ³ ×2) /12/27
	0.7×1.0			
中跨梁	0.3×0.6	—	(0.3×0.6×2+0.7×1×2) /27	(0.3×0.6 ³ ×2+0.7×1 ³ ×2) /12/27
	0.7×1.0			
一至六层边柱	1.2×1.2	3.25×10 ⁴	1.22×4/27	1.2 ⁴ ×4/12/27
一至六层中柱	1.2×1.2	3.25×10 ⁴	(1.22×2+ A_L ×2)/27	(1.2 ⁴ ×2/12+ I_L ×2)/27
	A_L			
七至十二层边柱	1.0×1.0	3.25×10 ⁴	1.02×4/27	1.0 ⁴ ×4/12/27
七至十二层中柱	1.0×1.0	3.25×10 ⁴	(1.02×2+ A_L ×2)/27	(1.0 ⁴ ×2/12+ I_L ×2)/27
	A_L			
十三至十六层边柱	0.8×0.8	3.15×10 ⁴	0.82×4/27	0.8 ⁴ ×4/12/27
十三至十六层中柱	0.8×0.8	3.15×10 ⁴	(0.82×2+ A_L ×2)/27	(0.8 ⁴ ×2/12+ I_L ×2)/27
	A_L			
十七、十八层边柱	0.7×0.7	3.0×10 ⁴	0.72×4/27	0.7 ⁴ ×4/12/27
十七、十八层中柱	0.7×0.7	3.0×10 ⁴	(0.72×2+ A_L ×2)/27	(0.7 ⁴ ×2/12+ I_L ×2)/27
	A_L			
桩	0.5(0.1)	3.95×10 ⁴	$\pi \times (0.5^2 - 0.3^2) \times 15 / 4 / 31.5$	$\pi \times (0.5^4 - 0.3^4) \times 15 / 64 / 31.5$

注： A_L 为剪力墙等效异形桩的面积，值为 1.77m²； I_L 为剪力墙等效异形桩的截面惯性矩，值为 1.06m⁴。

1.3 单元的选取与模型的建立

综合以上考虑，二维模型中土体与筏板及地下室采用平面四节点单元（Plane42 单元），梁、柱及桩采用平面二节点单元（Beam3 单元），集中质量采用 Mass21 单元。桩土单元的连接采用耦合自由度的方法，使桩土在水平与竖直方向上位移协调。

根据承台对桩顶不同的约束情况采用刚性连接和铰接分别计算。

对无限场地的模拟是结构-桩-土相互作用问题模拟的关键，这就要求在模拟时选取合适的边界条件，以免地震波在边界发生反射。在模型边界的处理上，很多学者都提出了使用黏弹性边界吸收地震

波的方法^[23-24]，基本思想是在边界的法向和切向上引入阻尼。其中刘晶波等^[23]提出了一种一致黏弹性边界，其通过在已有模型的边界上沿法向延伸一层相同类型的单元，等效边界单元的材料性质由场地土体参数计算得到，此种单元精度较高且应用方便，因此本文采用一致黏弹性边界来模拟无限场地的作用。

为得到较为准确的模拟结果，在正式计算前，本文分别对场地宽度为基础宽度的 4 倍、5 倍、6 倍、7 倍的情况进行试算，以确定对计算结果无明显影响的临界场地宽度。将变化场地宽度后桩身同一位置处的弯矩值和剪力值与 4 倍场地宽度的计算结果进行比较，结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出，当场地宽度取为 6 倍基础宽度后，内力变化趋于平缓，场地宽度对于计算结果的影响在 3% 以内，因此本文计算模型的场地边界取为 6 倍基础宽度。有限元计算模型如图 4 所示。

本文选取天津站场地的典型土质剖面进行计算，土层分布情况及其物理力学指标见表 2，土体泊松比参照文献^[25]推荐的值选取，暂未考虑参数的各向异性。

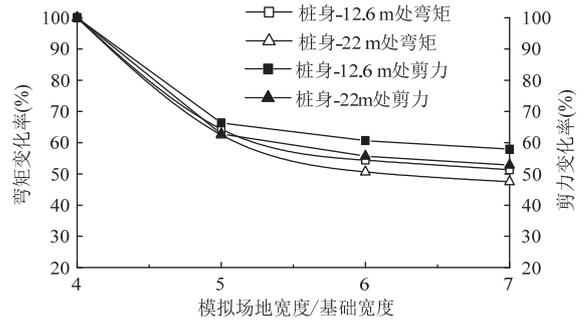


图 3 场地宽度对模拟结果的影响

Fig.3 Influence of field width on the numerical calculation result

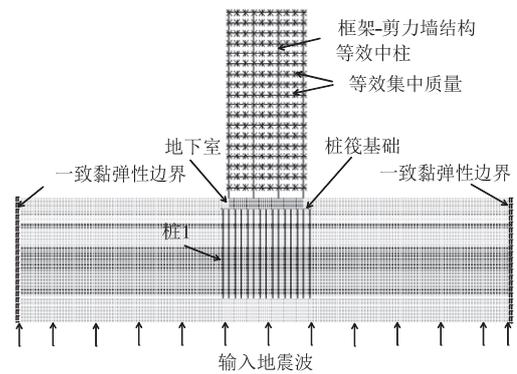


图 4 数值计算模型图

Fig.4 Model diagram for the numerical calculation

表 2 数值模拟土层参数

Table 2 Soil layer parameters for numerical simulation

土层号	名称	厚度 (m)	密度 (kg/m ³)	压缩模量 (MPa)	内摩擦角 (°)	黏聚力 (kPa)	泊松比
① ₂	素填土	3.5	1918.37	4.57	9.9	30.5	0.42
③ ₁	粉质黏土	1.5	1989.80	5.10	18.2	18.3	0.3
③ ₂	粉土	0.8	2000.00	8.51	24.8	8.7	0.25
④ ₂	粉土	2.6	1979.59	8.53	24.7	9.3	0.25
④ ₄	淤泥质粉质黏土	1.5	1846.94	3.04	3.1	13.7	0.35
④ ₂	粉土	4.7	1979.59	8.53	24.7	9.3	0.25
⑤ ₁	粉质黏土	0.9	2030.61	5.63	17.0	20.0	0.3
⑥ ₁	粉质黏土	3.8	2051.02	5.83	19.0	21.0	0.3
⑦ ₁	粉质黏土	4.7	2061.22	6.41	19.9	27.5	0.3
⑦ ₄₁	粉砂	5	2122.45	14.98	30.5	5.0	0.25
⑧ ₂	粉土	2	2122.45	10.93	29.0	14.6	0.25
⑨ ₁	粉质黏土	4	2051.02	8.72	21.4	43.9	0.3
⑨ ₄	粉砂	5	2071.43	17.57	30.7	4.8	0.25

1.4 地震波的选取

时程分析方法是《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)推荐的一种分析方法，在选取地震记录时，要选取与工程场地特征周期、场地类别及震中距相近的地震记录，并进行调幅。由于天津站场

地为三类场地，因此选择了 Taft 波从模型底部输入。对于振幅，根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(2016 版)中 8 度 0.20g 地区罕遇地震的水平进行调整，最终地震波加速度的峰值调整为 400cm/s²；对于地震波输入的时长，一般要求不短

于结构基本周期的 5~10 倍，考虑到计算各结构的基本周期均不超过 2s，因此地震波的输入时间选为 20s。最终输入的地震波如图 5 所示。

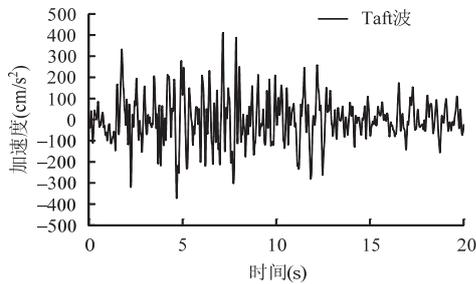


图 5 Taft 波加速度时程曲线

Fig.5 Acceleration time history curve of Taft wave

2 计算结果与分析

2.1 桩与承台连接方式对管桩内力影响

多次震后调查显示，地震作用下桩顶与承台的连接处为桩的薄弱点之一，较容易发生破坏。实际情况下，桩端与承台的连接介于铰接与刚接之间，为简化分析，本文首先假设承台与桩完全刚接，进而研究桩顶与承台不同的连接方式对于管桩内力的影响。

为便于分析，将图 4 中最外侧的桩命名为桩 1，并向内侧依次命名为桩 2~桩 5。各时刻下桩 1~桩 5 的桩身峰值内力包络图如图 6 所示。图中弯矩与剪力最大值并不能同时取得，弯矩最大值发生在 7.8s，剪力最大值发生在 8.1s。图中沿桩身每一位置处的内力为整个振动过程中该位置桩身内力的最大值，为便于分析，桩身内力均取正值。

从图 6 中可以看出，在桩顶以下 5m 范围内，桩 1 的内力明显大于其他桩；桩顶以下 5m 范围外，各桩的内力基本相同。分析其原因，18 层框架-剪力墙结构由于采用桩筏基础，桩间距为 4.5 倍桩径，会产生一定的群桩效应，群桩本身即可看成等效的“实体”。在地震作用下，最外侧的桩将会与周围土体发生明显的相互作用，产生“角部效应”，因此最外侧桩极易产生较大内力，从而发生破坏。

桩顶与承台的连接处可以看成是一个节点，此节点既承受土体对桩身的作用，又承受上部结构传递下来的惯性力，是整个管桩受力最复杂的部位。为分析桩与承台连接方式对于管桩受力的影响，在上述计算模型上，将边桩与承台的连接方式设为铰接，得到各时刻桩身内力的包络图如图 7 所示。由图 7 可以看出，当边桩与承台连接方式改为铰接后，边

桩在地震作用下的受力性能明显改善，这主要是由于承台对管桩顶部转动自由度约束的减弱可大大削弱图 6 中的“角部效应”，减少桩顶所受弯矩。

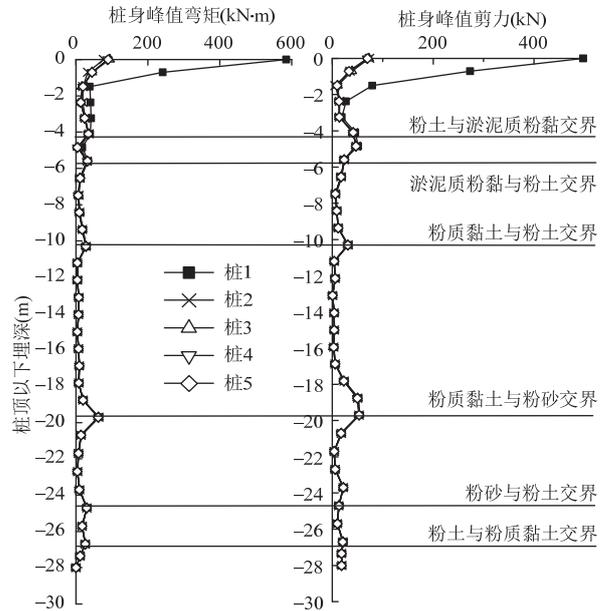


图 6 桩与承台均刚接情况下桩身内力

Fig.6 Internal forces of piles at condition of rigid connection between piles and cap

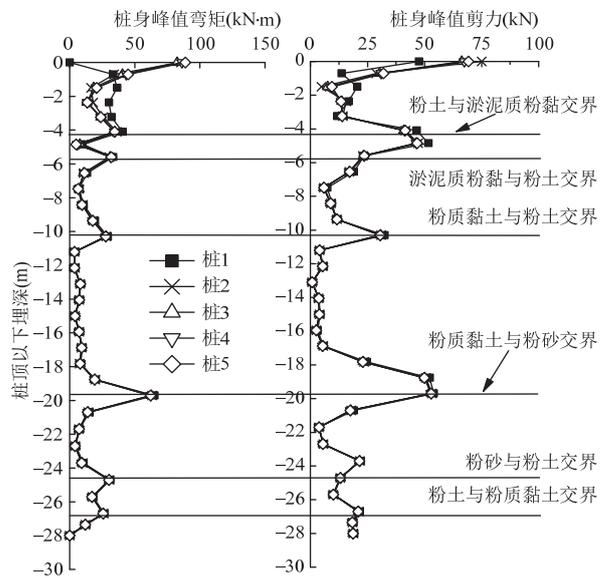


图 7 边桩与承台铰接情况下桩身内力

Fig.7 Internal forces of piles at condition of hinge connection between side pile and cap

为进一步分析管桩与承台的连接方式对管桩受力性能的影响，将管桩与承台的连接方式全部设为铰接进行同样的计算。三种不同连接方式下桩 2 的桩身内力对比如图 8 所示。从图 8 可以看出，管桩与承台的连接方式仅对桩顶以下 5m (10 倍桩径)

范围内的桩身内力有所影响,对于桩身大部分而言,其内力基本不受桩顶连接方式的影响。随着桩顶转动自由度约束的减弱,桩顶在地震荷载下产生的弯矩和剪力逐渐减小。从上述分析可以看出,减小承台对管桩桩顶转动自由度的约束,尤其是减少承台对边桩桩顶转动自由度的约束对于提高管桩的抗震性能十分重要。

由图 6~图 8 可明显看出除了桩顶位置外,各桩的桩身内力最大值基本出现在软硬土层交界处,可见 PHC 管桩在地震作用下,其桩身内力除受上部结构影响以外,土层刚度差别也对其有较大影响。其中,靠近桩顶的软硬土层交界面(图中未画出)并未产生峰值内力,这是由于其距桩顶较近,受桩顶惯性力产生的影响较大所致;图中第二软弱土层交界面的桩身剪力没有出现峰值,这可能与该处软土层厚度较小有关。

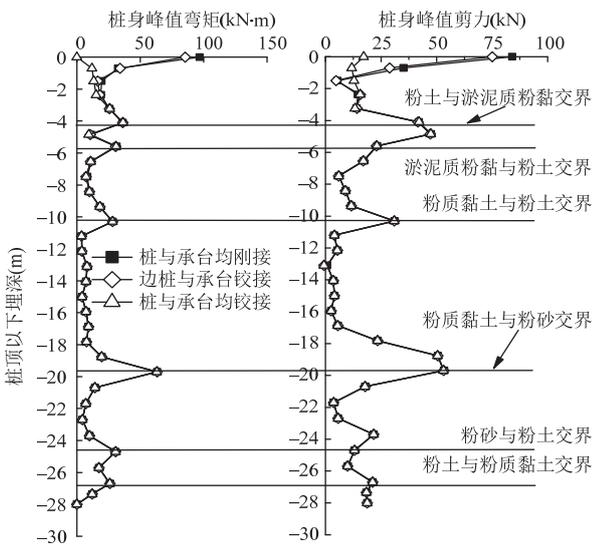


图 8 桩与承台连接方式对管桩内力的影响

Fig.8 Influence of different connection type between piles and cap on internal forces of PHC piles

2.2 地下室对管桩内力的影响

《天津市管桩技术规程》(DB29-110—2010)^[2]规定对于软土层厚度小于 5m 的地区,有地下室的 18 层及以下的建筑可以使用管桩基础,无地下室的 9 层及以下的建筑物可以使用管桩基础。为研究有无地下室对于管桩抗震性能的影响,本文在图 4 计算模型的基础上,保持其他参数不变但不设地下室,以此分析地下室的具体影响。图 9 为是否存在地下室对于桩 2 内力的影响,由于两种工况下的桩顶埋深不同,因此绘图时将坐标的零点选在了地表。

由图 9 可以看出,对于有地下室的结构,其桩

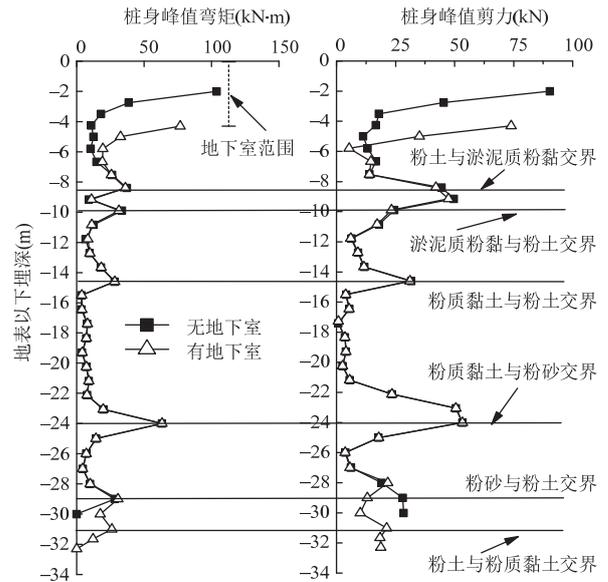


图 9 地下室对管桩内力的影响

Fig.9 Influence of basement on internal forces of PHC piles

顶的弯矩和剪力比无地下室的情况分别降低 26%和 18%,地下室对于降低管桩桩顶附近内力的作用较为明显,但其影响范围仅限于桩顶以下 10 倍桩径范围内的桩身内力。10 倍桩径范围以外的桩身内力更多的受到桩土相对刚度比以及相邻土层刚度比的影响,与有无地下室无关。

刘慧珊^[5-6]指出,桩在地震荷载下的受力可以分解为两部分:第一部分为桩顶惯性力产生的分量,其使桩的上部受力最大;第二部分为地层剪切运动分量,它使桩身的深部及桩顶受力较大,如图 10 所示,图中 Q 为桩顶惯性力。通过上述分析可以看出,地下室的存在主要减小了惯性力分量引起的桩身内力,对于地层剪切运动分量的影响则较小。

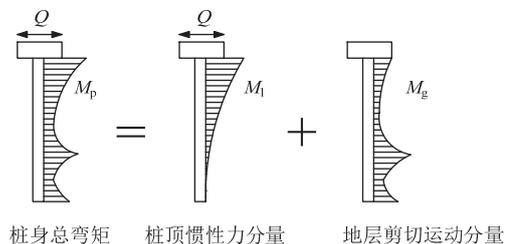


图 10 地震对桩作用的分解

Fig.10 Decomposition of internal force of pile under seismic load

2.3 桩顶周围土体刚度对管桩内力的影响

管桩在地震作用下的内力不仅受地下室的影响,还受到桩周土体的影响。在进行设计和选用桩型时,若仅关注是否存在地下室而不关注桩周土体,

很可能使管桩在地震荷载下处于不利的受力状态。为了分析桩顶周围土体对桩身内力的影响，将有地下室结构的桩顶附近土层③₁粉质黏土和③₂粉土用④₄淤泥质粉质黏土进行置换，置换后桩顶附近淤泥质土的厚度为 2.3m（小于 5m），属于非厚层软土^[2]；将③₁粉质黏土、③₂粉土、④₂粉土用④₄淤泥质粉质黏土进行置换，置换后桩顶附近软土层厚度为 6.4m，属厚层软土。置换前后桩 2 的桩身内力对比如图 11 所示。

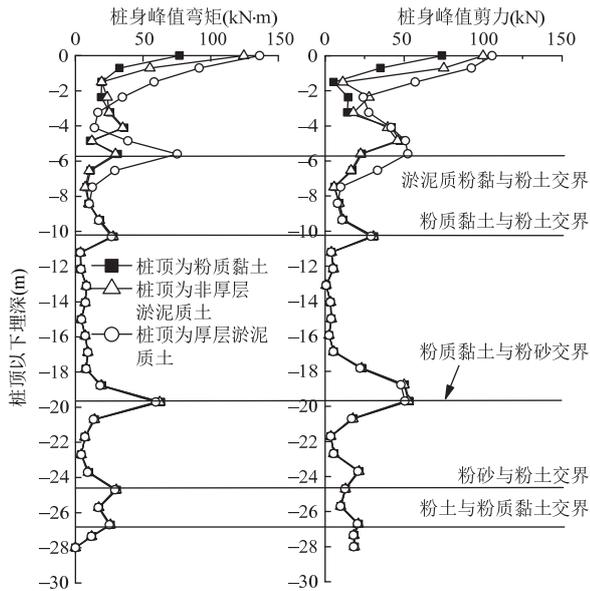


图 11 桩顶周围土质对管桩内力的影响

Fig.11 Influence of soil property around pile top on internal forces of PHC piles

从图 11 中可以看出，桩顶周围土体即使为非厚层的软土，桩顶在地震荷载作用下的弯矩和剪力仍比在刚度较大的土层中增大 62%和 35%，500(100) AB 型管桩的开裂弯矩为 125kN·m，极限弯矩为 210kN·m，计算结果表明，有地下室的高层建筑，如果管桩顶部存在软弱土层，桩顶可能发生开裂。当桩顶周围土层为厚层软土时，不仅桩顶的弯矩和剪力增加，软硬土层交界面处的桩身内力也大为增加，此时需对厚层软土进行地基处理。

在计算工况下，存在地下室可使桩顶弯矩和剪力分别下降 26%和 18%，而桩顶非厚层软土土层的存在使桩身内力增加 62%和 35%，软弱土层带来的不利影响超过了地下室存在带来的有利影响。在进行设计时，若仅考虑地下室的影响，而使管桩桩顶处于软弱土层中（即使为非厚层软土），将有可能使管桩在地震作用下处于不利的受力状态，产生开裂甚至破坏。

王启铜^[26]定义了桩土相对刚度比如下式所示：

$$K_p = \sqrt{\frac{E_p r_0}{G_s L}} \tag{2}$$

式中： E_p 为桩的弹性模量， r_0 为桩的半径， L 为桩长， G_s 为土的剪切模量。

改变桩顶附近土层（③₁粉质黏土和③₂粉土）的桩土相对刚度比，可得到桩顶弯矩和剪力随 K_p 的变化如图 12 所示。

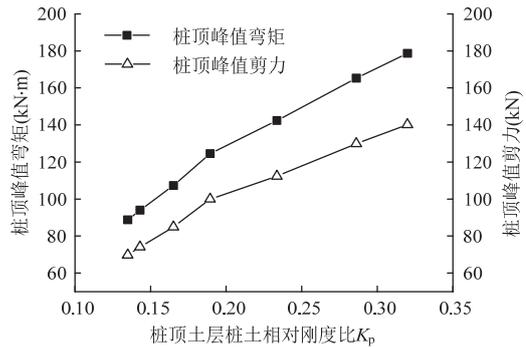


图 12 桩顶周围土层桩土相对刚度比对桩顶内力的影响

Fig.12 Influence of pile-soil stiffness ratio around the pile top on the internal forces of the PHC piles

由图 12 可以看出，在地震荷载作用下，桩顶峰值弯矩和剪力随桩顶所在土层的桩土相对刚度比的增加明显增加。在进行设计时，可通过对桩顶附近土体进行处理，降低桩顶附近土层的桩土刚度比，从而减小管桩顶部在地震荷载作用下的内力。

3 结论

本文基于天津典型成层软土地质条件，通过建立上部结构-桩-土相互作用整体有限元模型，对地震作用下框架-剪力墙结构的 PHC 管桩基础的受力情况进行了分析，主要结论如下。

(1) 桩筏基础在地震荷载下将产生较为明显的“角部效应”，群桩中位于角部的桩在地震作用下受力最为不利，尽量减少承台对于角桩转动自由度的约束可明显改善 PHC 管桩的抗震性能，消除“角部效应”。

(2) 在地震荷载下，桩身内力的最大值将在桩顶和软硬土层交界面产生。计算结果表明，对于天津地区典型土层，桩顶以下 10 倍桩径以外的桩身内力基本不受桩顶连接方式以及有无地下室的影响。

(3) 在天津典型软土层中，对于采用桩筏基

础的高层结构,有地下室的结构在桩顶产生的内力要小于无地下室的结构,地下室主要减少了地震荷载下桩身内力的桩顶惯性力分量。

(4) 桩顶周围土体性质对于地震荷载下桩顶内力同样有较大影响,桩顶软弱土层带来的不利影响可能超过有地下室带来的有利影响。因此在设计和选用管桩时,应综合考虑桩顶周围土体性质和地下室的影响。提高桩顶附近土层的桩土相对刚度比可以明显降低管桩顶部在地震荷载作用下的内力。

PHC 管桩在地震荷载下的受力情况较为复杂,本文所建立的上部结构-桩-土相互作用模型仅从定性角度为了解其受力状态提供参考,针对数值模拟进行一系列试验研究是今后研究的一个方向。

参 考 文 献

- [1] 张仕,李欢秋,王爱勋.提高 PHC 管桩在深基坑支护中应用的技术途径[J].地下空间与工程学报,2011,12(增 2):1643-1647 (Zhang Shi, Li Huanqiu, Wang Aixun. Technical approaches to improvement of application of PHC pile in deep foundation pit [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 12(S2): 1643-1647 (in Chinese))
- [2] DB29-110—2010 预应力混凝土管桩技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2010 (Tianjin Construction and Traffic Committee. DB29-110—2010 Technical specification for prestressed concrete pipe pile foundation [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010 (in Chinese))
- [3] DB33/1016—2004 先张法预应力混凝土管桩基础技术规程(浙江)[S].北京:中国建筑工业出版社,2004 (DB33/1016—2004 Specification for pretensioned spun concrete pile foundation [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004 (in Chinese))
- [4] DGJ32/TJ 109—2010 预应力混凝土管桩技术规程(江苏)[S].南京:江苏科学技术出版社,2010 (DGJ32/TJ 109—2010 Technical specification for prestressed concrete pipe pile foundation [S]. Nanjing: Phoenix Science Press, 2010 (in Chinese))
- [5] 刘惠珊.桩基震害及原因分析-日本阪神大地震的启示[J].工程抗震,1999(1):37-43 (Liu Huishan, Damage of pile foundations and the analysis of its results—the revelations of Hyogoken-Nanbu earthquake in Japan [J]. Earthquake Resistant Engineering, 1999(1): 37-43 (in Chinese))
- [6] 刘惠珊.桩基抗震设计探讨-日本阪神大地震的启示[J].工程抗震,2000(3):27-32 (Liu Huishan. Discussion on seismic design of pile foundation—the revelations of Hyogoken-Nanbu earthquake in Japan [J]. Earthquake Resistant Engineering, 2000(3): 27-32 (in Chinese))
- [7] 易伟建,夏玲琼.近场地震下考虑桩-土-框架结构相互作用的拟动力试验[J].土木工程学报,2014,47(4):1-8 (Yi Weijian, Xia Lingqiong. Pseudo dynamic experimental analysis of pile-soil-frame interaction in near-fault earthquakes [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(4): 1-8 (in Chinese))
- [8] 吕西林,陈跃庆,陈波,等.结构-地基动力相互作用体系振动台模型试验研究[J].地震工程与工程振动,2000,20(4):20-29 (Lv Xilin, Chen Yueqing, Chen Bo, et al. Shaking table testing of dynamic soil-structure interaction system [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2000, 20(4): 20-29 (in Chinese))
- [9] 姜忻良,李岳.土-桩-偏心结构相互作用体系振动台试验研究[J].建筑结构学报,2010,31(8):106-111 (Jiang Xinliang, Li Yue. Shaking table test of soil-pile-eccentric structure interaction system [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(8): 106-111 (in Chinese))
- [10] 李建文.非饱和砂土动力特性与桩-土-框架结构抗震性能研究[D].长沙:湖南大学,2016 (Li Jianwen. Testing study of the unsaturated sandy soil dynamic characteristic and pile-soil-framed structure seismic performance research [D]. Changsha: Hunan University, 2016 (in Chinese))
- [11] Kavvadas M, Gazetas G. Kinematic seismic response and bending of free-head piles in layered soil[J]. Geotechnique, 1993, 43(2): 207-222
- [12] 管晔.考虑土与结构相互作用的天津站交通枢纽工程地震反应分析[D].天津:天津大学建筑工程学院,2010 (Guan Ye. The seismic responds analysis of Tianjin Station Transport Junction considering the soil-structure interaction [D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2010 (in Chinese))
- [13] 王平.桩-土-承台体系动力相互作用的数值模拟[D].天津:河北工业大学土木工程学院,2006 (Wang Ping. Numerical modeling of pile-soil-cap dynamic interaction under seismic loading [D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, 2006 (in Chinese))
- [14] 杨小卫.桩-土-结构动力相互作用的数值分析[D].武汉:武汉理工大学土木工程与建筑学院,2006 (Yang Xiaowei. Numerical analysis of pile-soil-structure [D]. Wuhan: School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, 2006 (in Chinese))
- [15] 杨树标,唐伟,贾剑辉.管桩模型振动台试验的应变测试分析研究[J].建筑科学,2012,28(3):34-37 (Yang Shubiao, Tang Wei, Jia Jianhui. The analysis on strain testing of tube pile shaking table test [J]. Building Science, 2012, 28(3): 34-37 (in Chinese))
- [16] 刘春原,李光宏,李兵.预应力管桩振动台试验的数值分析[J].岩土力学,2012,33(增 1):265-269 (Liu Chunyuan, Li Guanghong, Li Bing. Numerical analysis of shaking table test for prestressed pipe piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S1): 265-269 (in Chinese))
- [17] 李曰辰,邢克勇,刘浩,等.考虑土-桩-结构相互作用的 PHC 管桩抗震性能试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(2):401-410 (Li Yuechen, Xing Keyong, Liu Hao, et al. Experimental study of seismic performance of PHC pipe pile considering soil-pile-structure interaction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 401-410

- (in Chinese))
- [18] 付磊, 黄福云, 陈宝春, 等. 沿海软土地区 PHC 管桩-土-结构模型振动台试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(10): 81-92 (Fu Cui, Huang Fuyun, Chen Chunbao, et al. Shaking table test on structure-soil-pile of PHC in coastal soft-soil area [J]. China Journal of Highway and Transport. 2017, 30(10): 81-92 (in Chinese))
- [19] 唐孟雄, 戚玉亮, 周治国, 等. 填芯 PHC 管桩桩身抗压承载力试验与理论计算方法研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(1): 67-71 (Tang Mengxiong, Qi Yuliang, Zhou Zhiguo, et al. Study on experiment and theoretical calculation method of compressive bearing capacity of filled PHC pipe piles [J]. Building Structure. 2015, 45(1): 67-71 (in Chinese))
- [20] 王维俊, 张立, 李伟科, 等. 岩溶地区复合地基静压 PHC 管桩应用分析[J]. 建筑结构, 2018, 48(9): 112-115 (Wang Weijun, Zhang Li, Li Weike, et al. Application analysis of static pressure PHC pipe pile in composite foundation in karst district [J]. Building Structure, 2018, 48(9): 112-115 (in Chinese))
- [21] 郑刚, 张楠, 巴振宁, 等. 成层软土地基 PHC 管桩抗震性能研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增 2): 506-510 (Zheng Gang, Zhang Nan, Ba Zhenning, et al. Seismic performance of PHC pipe piles in layered soft soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 506-510 (in Chinese))
- [22] Desai C S. Numerical design-analysis for piles in sands[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1974, 100(6): 613-635
- [23] 刘晶波, 谷音, 杜义欣. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1070-1075 (Liu Jingbo, Gu Yin, Du Yixin. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1070-1075 (in Chinese))
- [24] Kouroussis G, Verlinden O, Conti C. Finite-Dynamic model for infinite media: corrected solution of viscous boundary efficiency [J]. Journal of Engineering Mechanics. 2011, 137(7): 509-511
- [25] 顾晓鲁. 地基与基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003 (Gu Xiaolu. Ground and Foundation[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2003 (in Chinese))
- [26] 王启铜. 柔性桩的沉降(位移)特性及荷载传递规律[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 1991 (Wang Qitong. Characteristic of settlement (displacement) and load transmission mechanism of the flexible pile [D]. Hangzhou: College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 1991 (in Chinese))

戴 轩 (1988—), 男, 博士, 讲师。主要从事岩土工程、基坑工程及场道工程研究。

郑 刚 (1967—), 男, 博士, 教授。主要从事土力学与岩土工程研究。

张 楠 (1989—), 女, 硕士, 工程师。主要从事岩土工程研究与设计。

刘景锦 (1988—), 女, 博士, 工程师。主要从事岩土与地下工程研究。