

预应力混凝土管桩与承台新型连接节点 受力性能分析

马传政¹, 谭雅文², 杨志坚¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 辽宁十方岩土工程有限公司, 辽沈 沈阳 110000)

摘要 为了改善预应力高强混凝土管桩与承台连接节点的受力性能, 开发一种新型连接节点。**方法** 笔者在原有 PHC 管桩和 PRC 管桩与承台连接节点基础上, 通过增设钢套模, 在桩端和承台交接处预留出锥形空隙, 避免桩端转动挤压承台造成承台破坏; 基于两个预应力高强混凝土管桩与承台连接节点试验, 采用 ABAQUS 对节点的受力性能进行分析。**结果** 在桩端和承台交接处预留锥形空隙, 节点的承载能力没有明显的降低; 桩端的压应力有所减小, 桩端周边承台混凝土压应力大幅减小; 桩端锚固钢筋、桩身预应力钢筋、普通钢筋应力状态与未加钢套模相比无明显变化; 节点的传力机理无明显变化。**结论** 在桩端和承台交接处预留锥形空隙, 可有效减小桩端转动对承台的挤压作用, 避免承台在桩端转动时出现破坏。

关键词 预应力混凝土管桩; 连接节点; 普通钢筋; 锥形空隙

中图分类号 TU473.1

文献标志码 A

Analysis on Mechanical Behavior of Novel Connection between Prestressed High Strength Concrete Pile and Cap

MA Chuangzheng¹, TAN Yawen², YANG Zhijian¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Liaoning Shifang Geotechnical Engineering Co. Ltd., Shenyang, China, 110000)

Abstract: A new connection was developed to improve the mechanical performance of the connection between prestressed high-strength concrete pipe pile and cap. On the basis of the existing PHC pipe pile and PRC pipe pile connections, a conical gap is reserved at the intersection of pile-end and cap by adding a steel sleeve, so as to avoid the cap damage caused by the pile-end rotating and squeezing cap. Based on the results of two prestressed high-strength concrete pile-cap

收稿日期: 2023-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178148); 辽宁省优秀青年基金项目(2021-YQ-10); 辽宁省教育厅面上项目(LJKMZ20220929)

作者简介: 马传政(1973—), 男, 副教授, 主要从事混凝土结构、钢-混凝土组合结构等方面研究。

connections, finite element models were used to analyze the mechanical properties of these two types of connections under monotonic loading with ABAQUS. When the conical gap is reserved, the bearing capacity of the pile-cap connection does not decrease significantly. The compressive stress of pile-end decreases, and the compressive stress of concrete surrounding pile-end is greatly reduced. The stress state of pile-end anchorage bar, pile-body prestressed bar and ordinary bar has no obvious change compared with that without reserved conical gap. The force transfer mechanism of the connection has no obvious change. The results illustrated that the conical gap is reserved at the intersection of pile-end and cap, which can effectively reduce the squeezing effect of pile-end rotation on cap and avoid the damage of cap when pile-end rotation.

Key words: prestressed high strength concrete pile; connection; ordinary steel bar; conical gap

预应力混凝土管桩(PHC管桩)是在工厂通过离心成型,高温高压蒸养的预制构件,具有单桩承载力高、桩身混凝土强度高、施工速度快、成桩质量可靠、设计选用范围广、对不同地质条件和不同沉桩工艺适应能力强等优点,在亚洲地区的基础工程中应用比较广泛,其中中国每年使用的管桩数量超过2亿延米。在地震作用下,桩需要同时承担竖向荷载和水平荷载,当桩的水平承载力不足或变形能力较差时,将会出现不同程度的破坏。日本是地震多发国家,历次震害调查表明^[1-5],PHC管桩与承台连接处桩端部位受力比较复杂,在压、弯、剪等作用下,易发生剪切破坏及压弯破坏。

为了避免地震中桩与承台连接节点的破坏,众多学者对其进行了研究。P. H. Joen等^[6]研究了按照新西兰设计标准设计的桩与承台连接节点的强度与延性。K. A. Harries等^[7]研究了方形预应力混凝土桩与承台简单的嵌入连接节点的受力性能。Y. Xiao^[8]研究了桩与码头或者桥梁承台连接节点的受力性能。黑正清治等^[9-10]进行了桩与承台连接节点的抗震性能试验,研究表明,节点的传力性能较好,并且有较好的延性,承台的钢筋锚固长度足够长。和智勝則等^[11]提出了一种桩与承台的简易连接方法,即桩头伸入承台100 mm,桩内1倍桩径范围内填充混凝土且不配置锚固钢筋。2007年,左夕木聡等^[12]提出一种桩与承台连接的半

刚性节点,锚固钢筋用无粘结的光圆钢筋,钢筋端部焊有锚固板,研究表明,当转角小于0.05rad时,节点能保证其抗弯承载力。J. B. S. Park等^[13]通过试验研究了两种PHC管桩与承台连接节点的受力性能,并对节点的配筋进行了优化。J. W. Bang等^[14]对桩端部位填芯的PHC管桩与承台连接节点进行的往复荷载试验表明,填芯可以改善桩端部位的性、刚度退化和耗能性能。倪国泉等^[15]对预应力混凝土空心方桩承台连接节点进行了低周往复荷载试验,考察了轴力、预应力筋配筋率、桩端嵌入承台长度等对节点抗震性能的影响。王铁成等^[16]研究了PHC管桩与承台连接节点在往复荷载作用下的受力性能。郭昭胜等^[17]通过不同的方式对PHC管桩端部进行了加强,并对其在往复荷载作用下的受弯性能进行了研究。

已有的研究结果表明,节点桩端转动能力越好,节点的耗能性能越好,但是承台会限制桩端的转动,且当桩端转角较大时,承台易受桩端的挤压而发生破坏,因此如何避免节点桩端转动较大时,承台不会发生破坏显得尤为重要。针对上述问题,笔者提出一种预应力高强混凝土管桩与承台新型连接节点,基于两个预应力高强混凝土管桩与承台连接节点试验,采用ABAQUS软件对提出的新型节点的受力性能进行分析。研究表明,该新型管桩节点可以避免桩端转动造成承台的挤压破坏,可以提高节点的可靠性。

1 模型验证

1.1 试验概况

笔者先对文献[16]中的两个足尺节点CT-7和CT-10进行有限元分析。试件CT-7和CT-10连接形式相同,在桩端焊接了6根直径为18 mm的HRB335锚固钢筋,锚固钢筋的倾斜角为105°,长度为700 mm。节点

参数见图1,其中CT-7为预应力高强混凝土管桩(PHC管桩),CT-10为配有非预应力的预应力混凝土管桩(PRC管桩)。管桩的直径为500 mm,壁厚为100 mm,长度2 m;与桩连接的承台长×宽×高为1 800 mm×1 100 mm×850 mm,桩身嵌入承台100 mm;承台上下层配置了间距为150 mm、直径18 mm的HRB335钢筋。

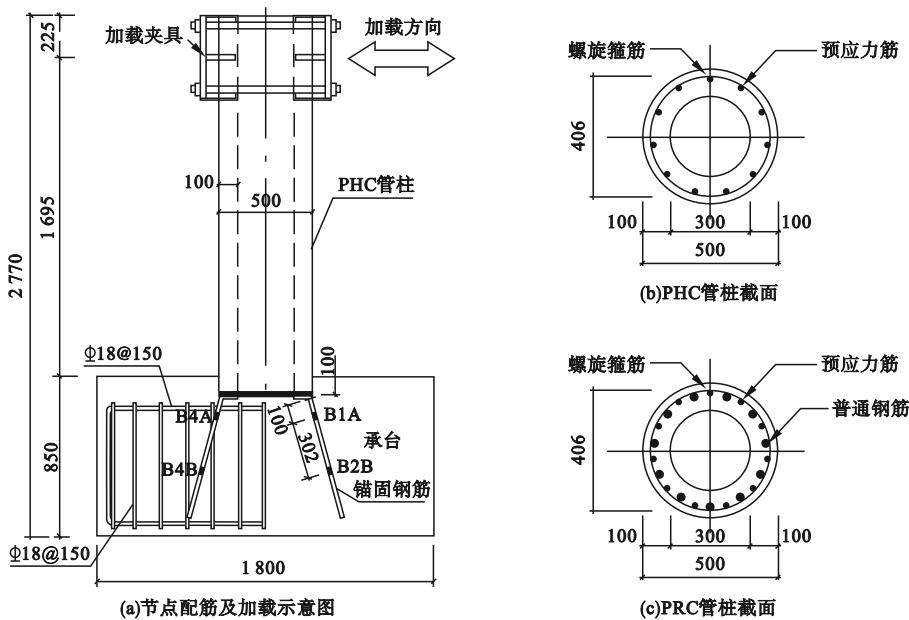


图1 节点参数

Fig.1 Details of specimen

1.2 模型建立

通过有限元软件ABAQUS建立足尺模型,对在静力作用下的PHC管桩与承台连接节点进行有限元分析。钢筋采用双线性模型(见图2),其中 $E_t = 0.1E_s$ 。弹性模量 E_s 和泊松比 ν_s 分别为 2.0×10^5 MPa和0.3。混凝土采用ABAQUS软件中自带的塑性损伤模型,应力-应变关系采用过镇海提出的单轴本构模型^[18],不考虑箍筋对混凝土的约束作用。混凝土采用C3D8R实体单元,钢筋采用T3D2桁架单元。文献[9]的试验研究表明,管桩内部填充混凝土与管桩内壁在试验过程中未出现粘结滑移破坏,因此,在有限元模型中假定两者之间的粘结良好,没有滑移,

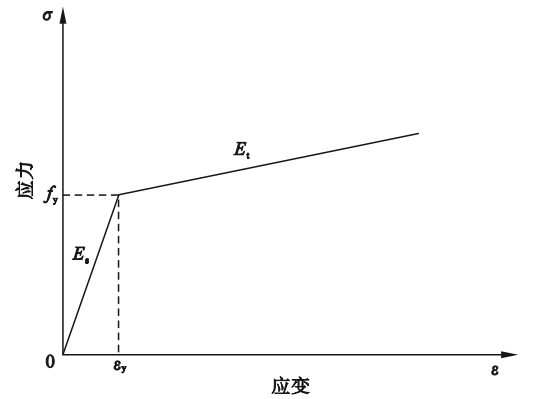


图2 钢筋的应力-应变关系曲线

Fig.2 Bilinear stress-strain relation model for steel rebar

采用“Tie”的约束关系。管桩端部的钢板套箍与承台之间采用“Hard”接触;管桩端板与

桩端、端板与承台之间均采用“Hard”接触。由于钢板套箍与桩身混凝土之间有良好的接触作用,两者之间采用“Tie”约束。为了模拟真实的加载情况,在模型中建立了加载夹具,夹具采用 C3D8R 实体单元,与桩身之间采用“Tie”约束。桩身预应力筋、普通钢筋以及箍筋,承台钢筋、锚固钢筋等均嵌入混凝土中,不考虑钢筋与混凝土之间的粘结滑移。

为了能较为准确的对试验进行模拟,有限元模型中的边界条件与试验条件保持一致,承台的底部固定(见图 3)。通过降温法对预应力高强混凝土管桩施加预应力,然后在桩顶施加竖向荷载,最后施加水平位移。

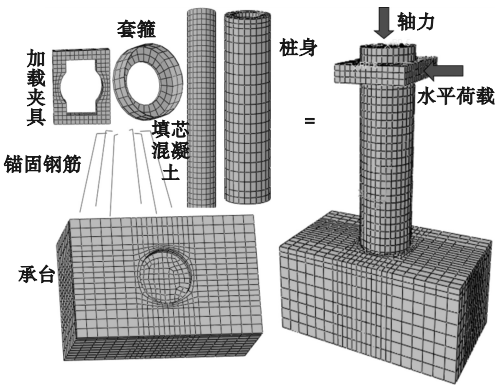


图 3 有限元模型及网格划分

Fig. 3 Finite element model and meshing

1.3 模拟结果与试验结果对比

节点 CT-7 和 CT-10 的荷载-位移($P-u_m$)曲线如图 4 所示。

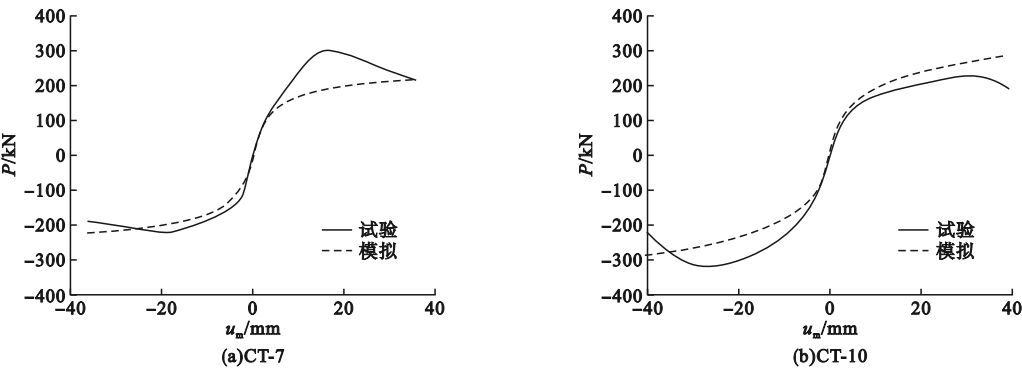


图 4 荷载-位移曲线

Fig. 4 Curves of load-displacement

由图 4 可知,节点 CT-7 正向加载的极限荷载试验值大于反向加载的极限荷载试验值,节点 CT-10 反向加载的极限荷载试验值大于正向加载的极限荷载试验值;节点 CT-7 和 CT-10 有限元模拟正反向加载时的极限荷载值大小一致。有限元模拟和试验得到的桩端弯矩见表 1。由表可知,节点 CT-7 和 CT-10 分别在正向和反向上桩端弯矩的模拟结果与试验结果相差较大。分析原因是在试

验中桩顶轴力无法保持一致,加载过程中发现 CT-7 的正向和 CT-10 的反向的实际轴力要比设计大,导致两个加载方向的荷载和刚度差异较大。在有限元模拟过程中,施加的轴力值始终保持不变,所以有限元模拟正、反向加载时极限荷载一致。经过对比分析,节点 CT-7 和 CT-10 有限元分析和试验结果总体上吻合较好,有限元建模方法可行。

表 1 模拟结果与试验结果对比

Table 1 Finite element analysis and test results

试件	试验弯矩/(kN·m)		有限元模拟弯矩/(kN·m)		模拟值/试验值	
	正向	反向	正向	反向	正向	反向
CT-7	529	-364	370	-370	0.70	1.01
CT-10	393	-549	476	-476	1.21	0.87

2 新型节点设计

文献[16]的研究结果表明,预应力高强管桩与承台连接节点桩端转动较大时,桩端会对承台产生挤压力,导致承台发生挤压破坏,此时管桩桩端可能仍未达到其极限承载力,从而造成节点失效。因此,在实际工程中,除了保证节点应该具有足够的承载力,还应有一定的转动能力,以减小桩端对承台的挤压。针对上述情况,笔者开发了一种预应

力高强混凝土管桩与承台连接新型连接节点,通过在桩端安装钢套模,使得桩端和承台交接处预留出锥形空隙,避免桩端在转动时挤压承台。节点设计如图5所示,锥形空隙最大处为20 mm,即为倾角为1/5,承台的设计参数与CT-7试件相同。为了进行对比分析,在节点模型CTN-1、CTN-2中放置钢套模,节点模型CTN-3、CTN-4中未放置钢套模。节点参数见表2。

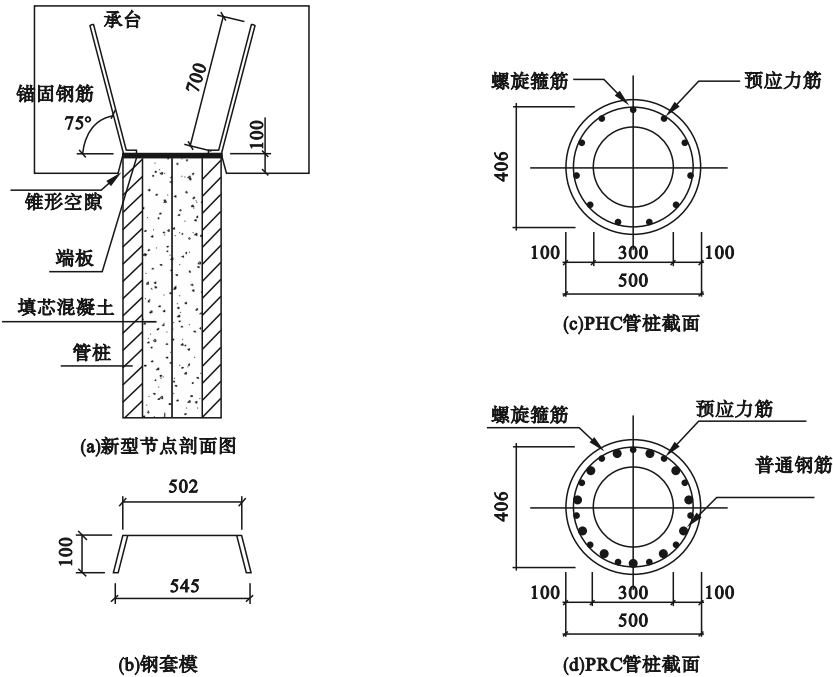


图5 新型节点设计

Fig. 5 Details of the novel connection

表2 新型节点参数

Table 2 Parameters of the connection							
节点编号	桩径/mm	壁厚/mm	预应力筋	箍筋	锚固钢筋	普通钢筋	钢套模
CTN-1	500	100	11φ9.0	φ5@45	6φ18	—	有
CTN-2	500	100	11φ9.0	φ5@45	6φ18	11φ14	有
CTN-3	500	100	11φ9.0	φ5@45	6φ18	—	无
CTN-4	500	100	11φ9.0	φ5@45	6φ18	11φ14	无

3 新型节点受力性能分析

3.1 荷载-桩顶位移关系曲线

有限元分析得到节点 CTN-1 ~ CTN-4

的荷载-位移曲线如图6所示。从图中可以看出,所有节点的刚度在弹性阶段基本一致。对于节点 CT-7、CTN-1 以及 CTN-3,在锚固钢筋发生屈服后,其承载力缓慢增长,到达峰

值荷载后,承载力逐渐降低;对于节点模型CT-10、CTN-2 以及 CTN-4,锚固钢筋屈服后的承载力快速增加,而且未出现下降段。另外,对于节点 CTN-1 以及 CTN-3,由于桩身先于承台发生破坏,预留锥形空隙对节点的承载力影响较小;对于桩身配置了普通钢筋的模型 CTN-2 以及 CTN-4,与 CT-10 相比,其极限承载力有所降低。

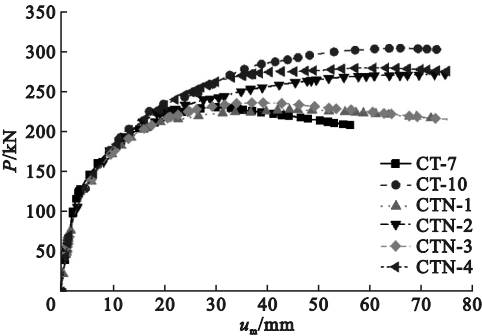
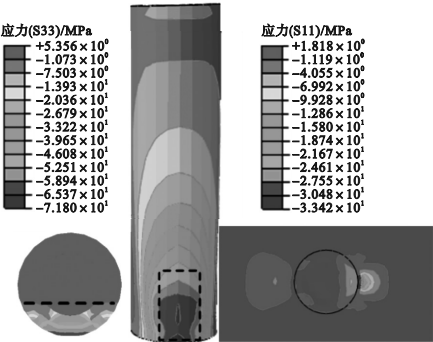


图6 新型节点荷载-位移曲线

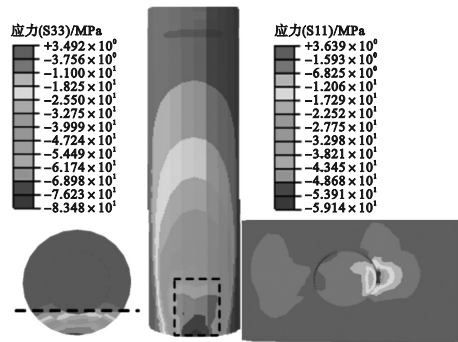
Fig. 6 Load-displacement curves of the novel connection

3.2 桩身及承台混凝土应力分析

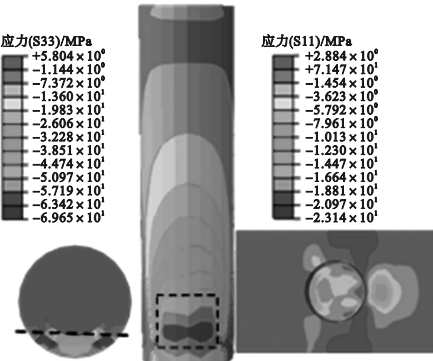
桩身及承台混凝土应力分布云图如图7所示。由图可知,桩端转动在 CT-7、CTN-1 和 CTN-3 承台上产生的最大挤压应力分别为 33.4 MPa、23.1 MPa、30.9 MPa,桩端混凝土最大压应力分别为 71.8 MPa、70.6 MPa、68.4 MPa;桩端转动在 CT-10、CTN-2 和 CTN-4 承台上产生的最大挤压应力分别为 59.1 MPa、21.1 MPa、28.7 MPa,桩端混凝土最大压应力分别为 83.5 MPa、70.6 MPa、69.7 MPa。这表明预留空隙之后,承台的挤压力以及桩端的压应力均有所减小,且承台承受的挤压力大幅减小。由节点模型 CTN-1 ~ CTN-4 承台挤压力可知,有钢套模的节点可以更好地发挥锥形空隙的作用。因此,设置锥形空隙可以保证节点桩端转角较大时,承台不会出现挤压破坏,同时保证了节点的完整性,对其承载力影响也较小。



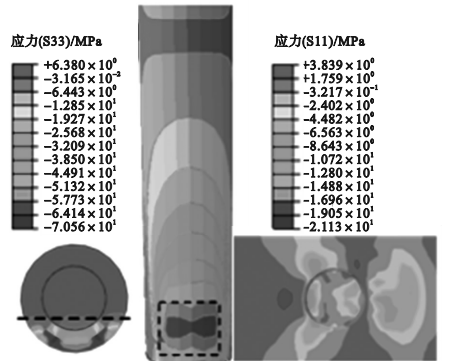
(a)CT-7



(b)CT-10



(c)CTN-1



(d)CTN-2

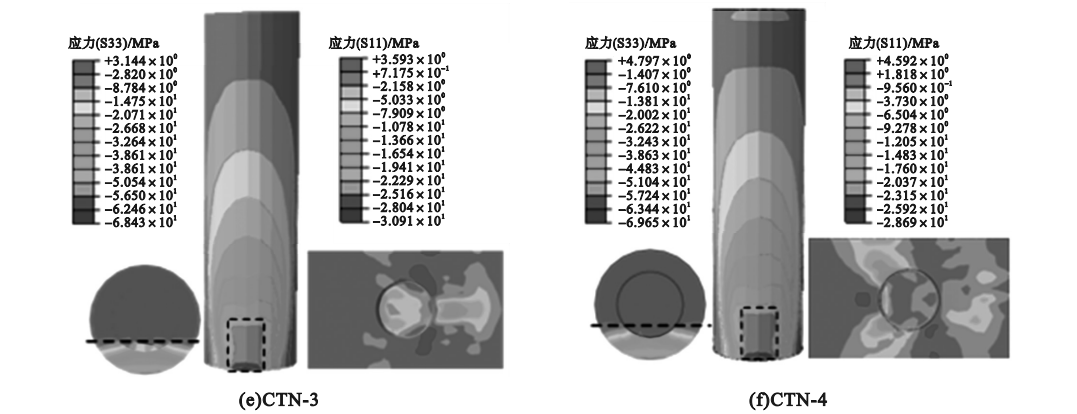


图 7 桩身及承台混凝土应力分布

Fig. 7 Numerical stress distributions of specimen

3.3 钢筋应力分析

节点的钢筋应力-位移曲线如图 8 ~ 图 11 所示。从图 8(a)可以看出,锚固钢筋具有三种应力状态,处于对称位置处的应力基本相同;受拉区的锚固钢筋均达到其极限抗拉强度,但是受压区锚固钢筋仅发生屈服。由图 8(b)可知,预应力钢筋的应力在加载前

均相同,随着水平位移的施加,受拉区预应力钢筋的应力在预拉应力的基础上继续增加,而受压区预应力钢筋的拉应力则不断地减小,有三根预应力钢筋几乎处于完全消拉状态,而受拉区预应力钢筋的最大拉应力接近极限应力状态。

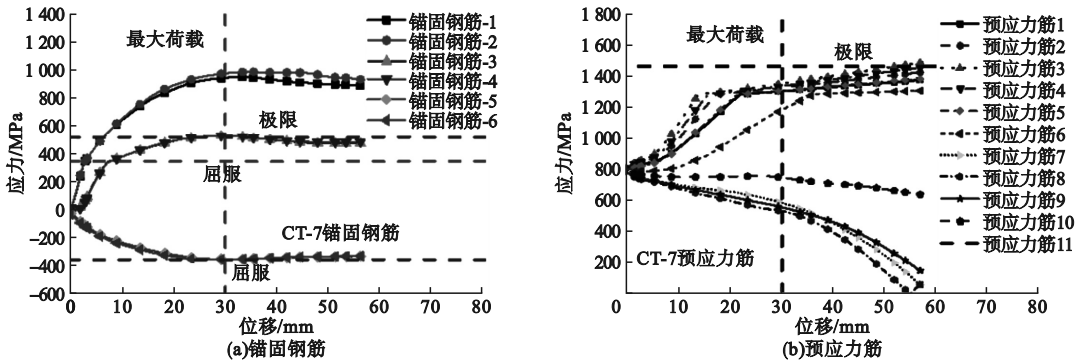


图 8 CT-7 钢筋应力-位移关系曲线

Fig. 8 Steel bars stress-displacement curves of CT-7

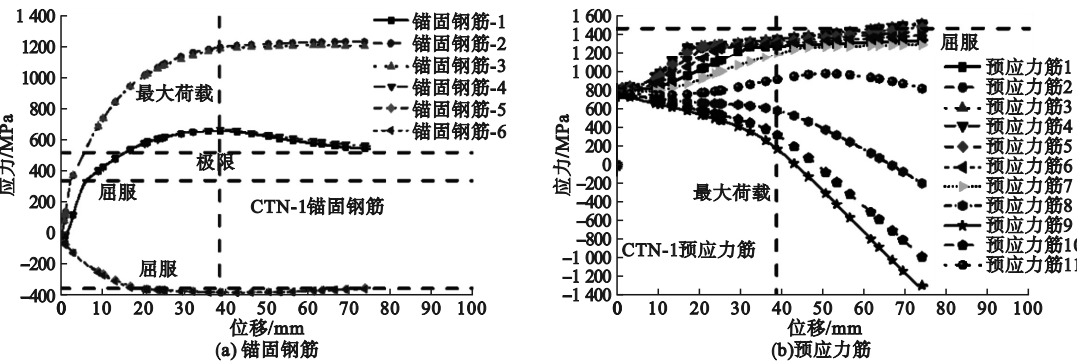


图 9 CTN-1 钢筋应力-位移关系曲线

Fig. 9 Steel bars stress-displacement curves of CTN-1

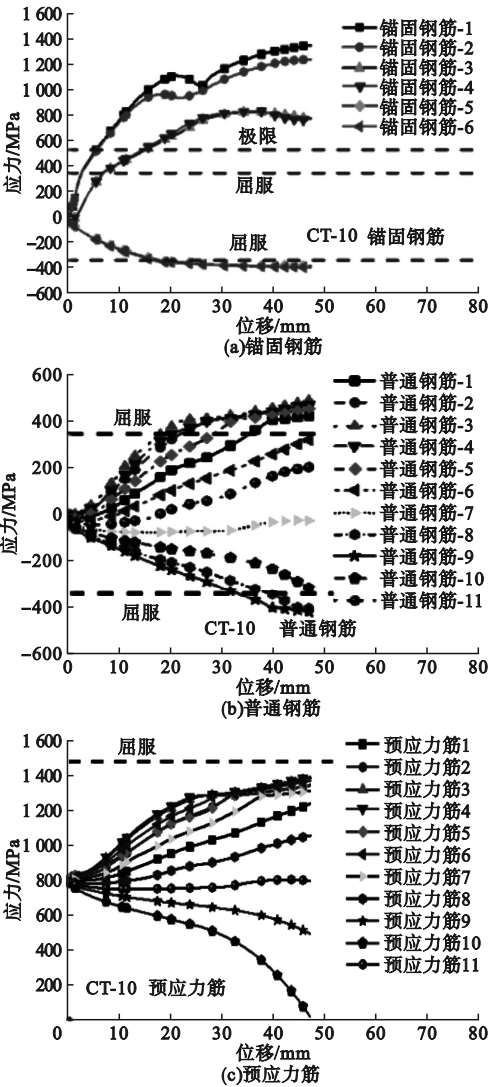


图 10 CT-10 钢筋应力-位移关系曲线
Fig. 10 Steel bars stress-displacement curves of CT-10

由图 7(a)和图 10(a)可知,极限状态下 CT-10 锚固钢筋的应力状态与 CT-7 相似,但 CT-10 的应力更大。从图 10(b)可以看出,施加了 500kN 的轴力后,普通钢筋均处于受压应力状态,但是应力较小。施加水平位移后,一部分普通钢筋开始受拉,所有的普通钢筋均发生屈服。由图 7(b)和图 10(b)对比可知,与 CT-7 相比,CT-10 预应力钢筋的拉应力有所减小,未达到其极限抗拉强度,这表明普通钢筋能够很好的与预应力钢筋协同工作,改善了桩身的延性。

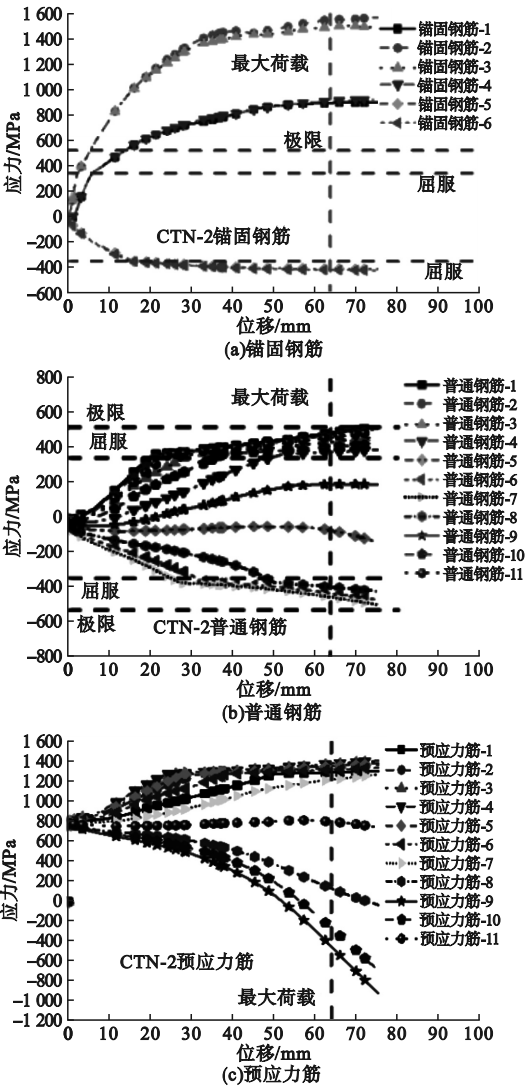


图 11 CTN-2 钢筋应力-位移关系曲线
Fig. 11 Steel bars stress-displacement curves of CTN-2

由图 9 和图 11 可以看出,CTN-1 和 CTN-2 的锚固钢筋、桩内预应力钢筋及普通钢筋的应力状态与 CT-7 和 CT-10 相似,表明预留锥形空隙并未改变节点的传力机理,但却可避免桩端转动造成承台的挤压破坏。

4 结 论

(1)采用 ABAQUS 对预应力高强混凝土管桩与承台连接节点的受力性能进行有限元分析,模拟结果与试验结果吻合较好,表明有限元模型可靠。

(2)设计了一种预应力高强混凝土管桩与承台新型连接节点,并对该新型连接节点进行了有限元分析,结果表明,在桩端和承台连接处预留锥形空隙,可以避免桩端转动造成承台的挤压破坏。

参考文献

- [1] HIDEAKI K. Damage to reinforced concrete buildings in Niigata city with special reference to foundation engineering [J]. Soils and foundations, 1966, 6(1): 71–88.
- [2] HIDEAKI K, HANAZATO T. Damage of reinforced precast piles during the Miyagi-Ken-Oki earthquake of June 12, 1972 [C]//Proceedings of the seventh world conference on earthquake engineering. Istanbul: Structural Aspects, 1980.
- [3] HATSUKASU M, IIBA M. Pile damage during the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake in Japan [C]//Proceedings of the 11th world conference on earthquake engineering. Acapulco: Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, 1996.
- [4] MASATOSHI Y, JOJI S, KAZUYA M, et al. Field investigation and dynamic analysis of damaged structure on pile foundation during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake [C]//Proceedings of the 15th world conference on earthquake engineering. Lisboa, Portugal: Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica, 2012.
- [5] TOKIMATSU K, TAMURA S. Building damage associated with geotechnical problems in the 2011 Tohoku Pacific earthquake [J]. Soils and foundations, 2012, 52(5): 956–974.
- [6] JOEN P H, PARK R. Simulated seismic load tests on prestressed concrete piles and pile-pile cap connections [J]. PCI journal, 1990, 35(6): 42–61.
- [7] HARRIES K A, PETROU M F. Behavior of precast, prestressed concrete pile to cast-in-place pile cap connections [J]. PCI journal, 2001, 46(4): 82–93.
- [8] XIAO Y. Experimental studies on precast prestressed concrete pile to CIP concrete pile-cap connections [J]. PCI journal, 2001, 48(6): 82–91.
- [9] 黑正清治, 堀井昌博, 和田章, 等. 高強度 PC 杭とパイルキャップとの接合に関する研究 (高強度 PC 杭の耐力変形性能向上に関する研究(3)) [J]. 日本建築学会構造系論文報告集, 1989, 398: 143–153.
(SEIJI K, MASAHIRO H, AKIRA W, et al. Shear transfer mechanism of PHC pile to pile cap connection: study of the improvement in the bearing capacity and ductility of the prestressed high strength concrete (PHC) pile (Part 3) [J]. Journal of structural and construction engineering, 1989, 398: 143–153.)
- [10] 黑正清治, 堀井昌博, 和田章, 等. 高強度 PC 杭とパイルキャップとの接合に関する研究 (高強度 PC 杭の耐力変形性能向上に関する研究(4)) [J]. 日本建築学会構造系論文報告集, 1990, 407: 97–107.
(SEIJI K, MASAHIRO H, AKIRA W, et al. Deformability of the PHC pile-to-pile cap connection: study of the improvement in the bearing capacity and ductility of the prestressed high strength concrete (PHC) pile (Part 4) [J]. Journal of structural and construction engineering, 1990, 407: 97–107.)
- [11] 和智勝則, 浅野真一郎. 簡易接合法を採用した既製コンクリート杭杭頭部の力学的性状 [J]. 日本建築学会構造系論文集, 2003, 570: 85–91.
(KATSUNORI W, SHINICHIRO A. Mechanical characteristics of simplified connection of pile head for precast concrete pile [J]. Journal of structural and construction engineering, 2003, 570: 85–91.)
- [12] 左タ木聡, 小林勝己. アンボンドアンカーを用いた既製コンクリート杭の杭頭半剛接合部の力学的挙動に関する研究 [J]. 日本建築学会構造系論文集, 2007, 620: 81–86.
(SSTOSHI S, KATSUMI K. Study on mechanical behavior of semi-rigid connection on pile head for precast concrete piles using unbonded anchors [J]. Journal of structural and construction engineering, 2007, 620: 81–86.)
- [13] PARK J B, SIM Y J, CHUN Y S, et al. Assessment of optimum reinforcement of rebar for joint of PHC pile and foundation plate [J]. Journal of land housing & urban affairs, 2010, 1(1): 67–73.
- [14] JIN W B, JUNG H H, BANG Y L, et al. Cyclic behavior of connection between footing and concrete-infilled composite PHC pile [J]. Structural engineering and mechanics, 2014, 50(6): 741–754.
- [15] 倪国泉, 杨军, 潘鹏, 等. 预应力混凝土空心方桩承台节点抗震性能试验研究 [J]. 地震工程学报, 2013, 35(2): 246–251.
(NI Guoquan, YANG Jun, PAN Peng, et al. Quasi-static tests of pile-cap connections for the prestressed spun concrete square piles [J]. China earthquake engineering journal, 2013, 35(2): 246–251.)
- [16] 王铁成, 杨志坚, 赵海龙, 等. PHC 管桩与承台连接节点试验研究与有限元分析 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2015, 47(2): 527–534.
(WANG Tiecheng, YANG Zhijian, ZHAO Hailong, et al. Experimental investigation and finite element analysis on the behavior of prestressed high strength concrete pile-pile cap connections [J]. Journal of Tianjin university (science and technology), 2015, 47(2): 527–534.)
- [17] GUO Zhaosheng, HE Wubin, BAI Xiaohong, et al. Seismic performance of pile-cap connections of prestressed high-strength concrete pile with different details [J]. Structural engineering international, 2017, 27(4): 546–557.
- [18] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系-原理与应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
(GUO Zhenhai. The strength and constitutive relations of concrete: theory and application [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1999.)
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)