

Doi:10.3969/j.issn.1003-5060.2016.02.011

桥梁高桩承台基础抗震性能研究

韩振峰¹, 叶爱君²

(1.合肥学院 建筑工程系,安徽 合肥 230601; 2.同济大学 土木工程防灾国家重点实验室,上海 200092)

摘要:文章通过 3 个钢筋混凝土群桩试件在低周反复荷载作用下的受力性能试验研究,讨论了群桩基础破坏形态及滞回特征,解释了其破坏机理,分析了土体参数、密实度及桩身自由段长度等对其延性的影响。结果表明,极限状态时,群桩结构受力模式会由地基梁模型转变为悬臂柱模型;减小自由长度和提高土体含水率都会增加其抗震性能。在 OpenSees 有限元框架中建立了群桩基础有限元模型,使用弹塑性纤维梁柱单元模拟桩体,采用非线性 p-y 单元模拟桩土相互作用;对模型进行了单调 Pushover 分析,并且对分析结果与试验结果进行了比较,结果表明该模型能很好地模拟试验数据。

关键词:桥梁工程;高桩承台;群桩基础;抗震性能;拟静力试验

中图分类号:U442.55 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-5060(2016)02-0199-07

Study of earthquake-resistant performance of high pile cap foundation of bridge

HAN Zhen-feng¹, YE Ai-jun²

(1.Dept. of Architectural Engineering, Hefei University, Hefei 230601, China; 2.State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Firstly, based on an experimental research on three reinforced concrete pile foundation specimens tested under low cyclic loads, the destroy pattern and hysteretic characteristic of pile group foundation were discussed, the destroy mechanism was explained, and the effect of soil parameters, compactness, and free length of the pile on the foundation ductility was analyzed. The results show that the mechanical pattern of the foundation may change from the foundation beam model to the cantilever column model at the ultimate state, and reducing free length of the pile and raising the moisture content of the soil can improve the earthquake-resistant performance of the foundation. Secondly, a finite element model of this foundation was built in the OpenSees framework. In the model, the fiber element was used to simulate the pile shaft, and the non-linear p-y element was used to simulate the soil-pile interaction. Thirdly, the monotonic Pushover analysis was performed on the model, and the results were compared with the test results. The results show good coherence with the experimental data.

Key words: bridge engineering; high pile cap; pile group foundation; earthquake-resistant performance; quasi-static test

桥梁高桩承台基础的抗震性能评价是一个较为复杂的问题。目前多数研究仅局限于理论分析和数值模拟,而且不同的理论和模拟方法有不同的假设和前提,使得各种方法给出的结果不尽相

同,甚至差别很大。这些假设是否合理、模拟方法是否正确,都需要通过试验进行验证。

研究桩基和土体材料进入塑性范围后的群桩基础结构的抗震性能,最好的试验手段是大比例

收稿日期:2015-07-21;修回日期:2015-09-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50878147);安徽省高校自然科学研究重点资助项目(KJ2015A249)和合肥学院人才科研基金资助项目(15RC01)

作者简介:韩振峰(1976-),男,安徽巢湖人,博士,合肥学院讲师;
叶爱君(1968-),女,浙江丽水人,博士,同济大学教授,博士生导师。

尺拟静力试验,迄今这方面的研究成果较少。文献[1]对美国加州常用的钢筋混凝土桩柱式基础进行了现场足尺试验以研究其弯曲强度和延性能力。试验观察到所有试件均表现出弯曲延性反应行为;试件水平承载能力对砂土密实度不敏感,主要取决于桩身的弯曲强度;最大弯矩所在深度即塑性铰位置与自由长度和砂土密实度均有关。文献[2]对大直径灌注桩基进行了抗震性能原型试验研究。试验通过锚固于墩柱顶的斜拉索实现循环加载,轴压通过拉索的竖向分力施加,结果表明试验中的大直径灌注桩基表现出很好的延性性能。上述 2 个试验都是针对单个基桩而言的。文献[3]采用拟静力试验对一埋置于黄土地基中的低桩承台基础进行了模型试验研究,通过在墩顶施加水平往复荷载,获得了桩、土及桥墩整体结构的滞回曲线,得到了结构的抗震性能,但其研究对象是低桩承台基础。

为研究桥梁高桩承台基础的抗震性能,本文通过 3 个钢筋混凝土群桩试件在低周反复荷载作用下的受力性能试验研究,讨论其破坏形态及滞回特征,探寻群桩基础的破坏机理,分析土体参数、密实度及桩身自由段长度等对基础延性的影响。在 OpenSees 有限元框架中建立了群桩基础有限元模型,使用弹塑性纤维梁柱单元模拟桩体,采用非线性 $p-y$ 单元模拟桩土相互作用。对模型进行单调 Pushover 分析,并且对分析结果与试验结果进行了比较。最后,对同类型的基础结构给出了研究方法建议。

1 试验设计

1.1 试件设计

群桩基础设计为 2 根 \times 2 根,单桩截面为 15 cm \times 15 cm 正方形,桩中心间距为 3 D (桩径 $D=15$ cm);承台平面为 100 cm \times 100 cm,承台厚度为 40 cm。试验使用了 3 个试件,它们的桩尖长度均为 20 cm,试件 1 和试件 3 的桩身长度为 450 cm,自由长度为 80 cm;试件 2 的桩身长度为 400 cm,自由长度为 30 cm。

模型桩体混凝土采用 C40,承台混凝土采用 C30。桩体主筋为 4 Φ 12 mm,布置在矩形桩的四角,桩体纵向配筋率为 2%,保护层为 2 cm;箍筋为 Φ 8 mm,承台底部以下 1.5 m 范围内的桩身箍筋间距为 5 cm,其余桩身段箍筋间距为 10 cm,伸入承台内的纵筋的箍筋间距为 2.5 cm,桩身钢筋设计图如图 1 所示,承台内钢筋按规范设计。模

型土采用一定级配的中砂,土体的平均粒径为 0.48 mm。

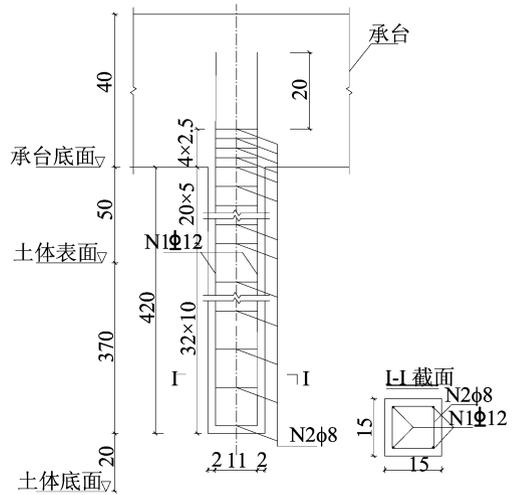


图 1 桩身钢筋设计图

1.2 土箱设计

土箱尺寸设计:平面 3.0 m \times 1.5 m,高度 4.0 m,土箱的四边由焊接热轧等边角钢制成支撑框架,其内采用木板(厚 3 cm)作为箱体侧壁,箱体底部为开口,直接放置在混凝土底座(厚 20 cm)上;在与加载方向垂直的方向上,箱体内壁面衬厚 10 cm 的聚苯乙烯泡沫塑料板;在沿加载方向上,箱体内壁面粘贴光滑的聚氯乙烯薄膜。土箱实物如图 2 所示。



图 2 土箱实物

土箱支撑框架采用等边角钢制作,角钢之间以角焊连接,框架通过底部角钢上的预留锚栓固定在土箱基础底座上;土箱基础底座为 C30 混凝土,20 cm 厚;土箱基础底座与试验室地面之间通

过地锚进行固定。试验观察发现,土箱边缘附近的土体基本没有被扰动,因此土箱平面尺寸是合理的。对于土箱的高度,设计为4 m,桩体埋入土体深度为3.7 m,埋深与桩径比为25,桩体的第1个反弯点位于土体中部,符合设计要求。

1.3 试验材料特性

C40 混凝土材料的立方体抗压强度为 51.41 MPa,弹性模量为 28.4 GPa;对 3 次试验使用的砂土进行了土性试验,结果见表 1 所列。

表 1 土体材料试验参数

试件	摩擦角/ (°)	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	相对密度	含水率/ %
试件 1	30	1.61	0.70	2.59
试件 2	28	1.63	0.76	0.29
试件 3	32	1.61	0.70	0.40

1.4 试验方法与试验数据采集

试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室进行。竖向加载利用铁块(重量 22.15 kN)压在承台顶面,铁块置于固定在承台顶面的铁箱内;水平加载利用液压加载器进行低周往复加载,加载千斤顶通过预留在承台侧面的 4 根 M42 锚栓进行加载,试验加载装置如图 3 所示(单位为 cm)。因为没有使用反力梁,所以没有采用球铰装置。

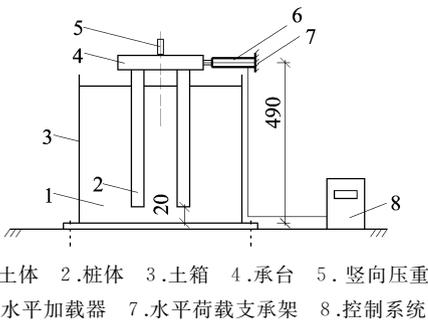


图 3 试验加载装置

循环加载采用混合变幅和等幅位移控制,每个量级循环加载 3 次,试验采用 2 个工况,试件 1 采用工况 1,试件 2 和试件 3 采用工况 2。工况 1 和工况 2 加载幅值序列如图 4 所示。

试验设计采集的数据主要有承台中心的荷载-位移曲线和钢筋应变计的数据。试验设计的测点有:承台加载位置布置拉线式位移传感器;桩身地面下 1.5 m 范围内纵向钢筋每隔 50 cm 布置应变片 1 个,并且桩尖处纵向钢筋布置应变片 1 个。另外,在整个试验过程中,利用刻度放大镜观察裂缝的发展情况。

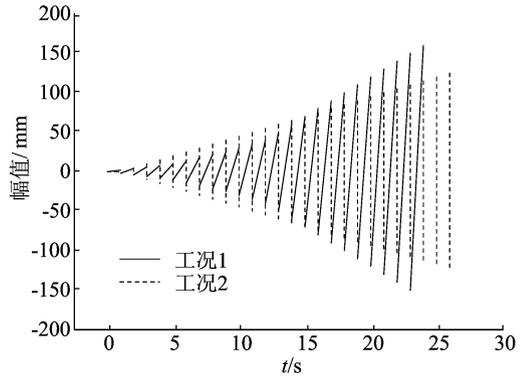


图 4 试验加载工况

2 主要试验结果及分析

2.1 破坏过程及破坏形态

3 个试件均以弯曲破坏为主,裂缝主要出现在承台与桩身的交接处以及桩身中部区域。群桩屈服时的桩土状况如图 5a 和图 5b 所示,群桩卸载时的桩土状况如图 5c 和图 5d 所示。

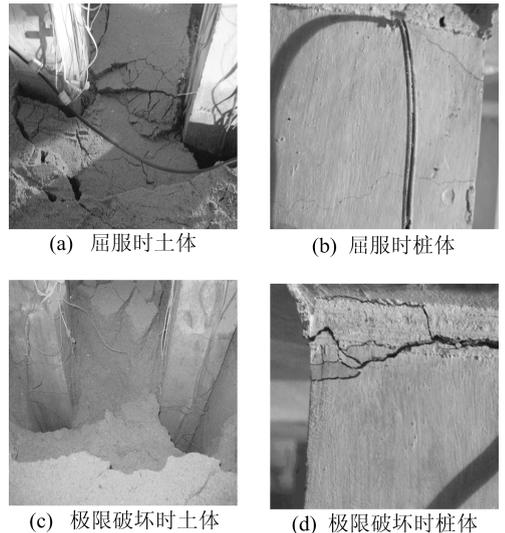


图 5 模型破坏状况

试件 1 的破坏现象:位移幅值达到 35 mm 前桩土基本没有发生变化,只有承台下方 15 cm 左右出现 1 条细裂缝;位移幅值达 80 mm 时桩土之间出现脱离,土面下最大脱空长 80 cm、宽 20 cm;位移幅值达 110 mm 时桩土之间出现塌陷,桩头出现 1 条 0.2 mm 的裂缝;位移幅值达 140 mm 时,加载至峰值,构件与土体的损伤进一步加大;随后位移幅值增大至 180 mm,卸载至峰值的 70%,终止试验。试件 2 与试件 3 的情况与试件 1 基本类似。

2.2 试验结果

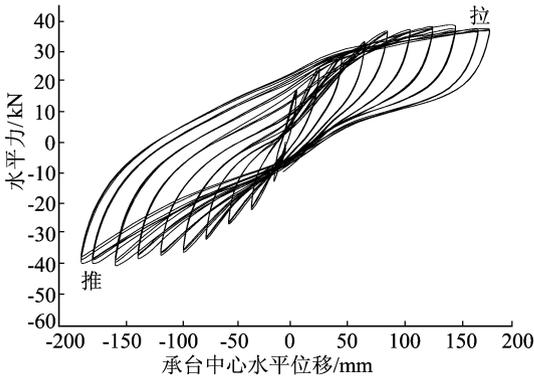
主要试验数据见表 2 所列(取推拉方向的平

均值),拟静力试验时,荷载数据采集的是水平加载力,位移数据是承台中心位置处的水平位移。

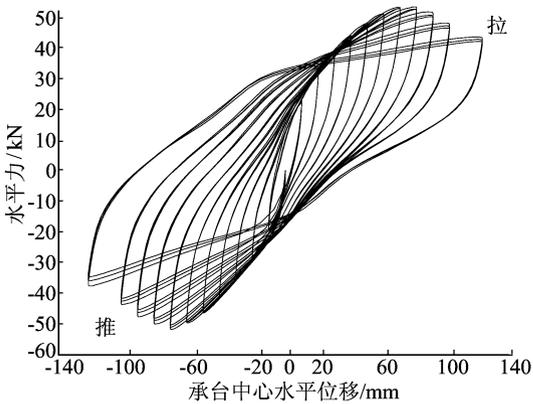
表 2 主要试验结果

试件	屈服时		最大荷载时		极限变形时		延性系数 μ
	水平位移/mm	水平力/kN	水平位移/mm	水平力/kN	水平位移/mm	水平力/kN	
试件 1	62	29.541	120	38.696	160	37.598	2.58
试件 2	51	44.161	75	53.931	105	46.546	2.06
试件 3	52	34.775	80	47.161	105	43.853	2.02

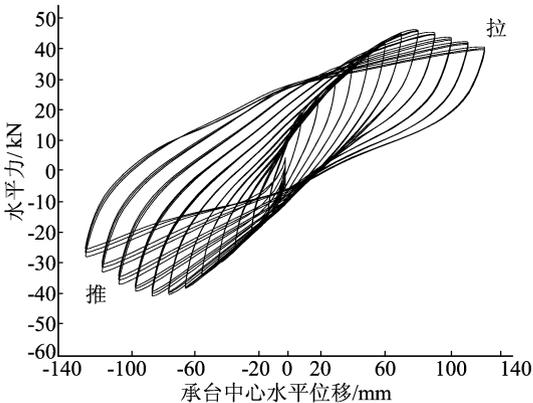
试件 1~试件 3 的荷载-位移滞回曲线如图 6 所示,相应的骨架曲线如图 7 示。



(a) 试件1



(b) 试件2



(c) 试件3

图 6 滞回曲线

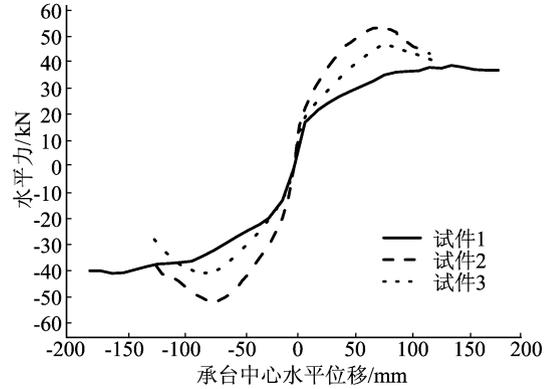


图 7 骨架曲线

2.3 滞回曲线及骨架曲线分析

试件 1 的骨架曲线下降段不明显(土体含水率较大,桩在土体内发生轻微转动造成),试件 2 与试件 3 的骨架曲线出现了明显的下降段。

3 条骨架曲线的初始切线刚度近似相同,在进入非弹性变形阶段,3 条曲线才发生分离,屈服后刚度不相同。群桩结构的初始刚度对设计参数的小范围变化不是很敏感。

相同自由长度情况下,含水率越小,屈服后刚度越大;相同含水率情况下,自由长度越小,屈服后刚度越大。试验表明,在相同轴压比下,自由长度和土体含水率对构件的变形能力(刚度)有一定的影响。

试件 2 的自由长度最短,含水率最低,但其滞回曲线最饱满,累积滞回耗能也最大。此结果表明,在相同轴压比下,高桩承台基础的耗能能力受自由长度和土体含水率的影响很大,可以预见低桩承台基础的耗能能力要高于高桩承台基础,桥梁高桩承台基础的设计对抗震来说是不利的。试验的滞回曲线,3 个试件正向(拉)加载卸载为 0 时的残余变形远小于反向(推)加载卸载为 0 的残余变形,产生差异的原因与水平荷载施加前构件的初始状态有关(加载器的位置),并且与构件的施工质量以及土体的密实度都有关。残余变形的偏差为相对值,不影响对试验规律的总结。

2.4 试件的延性

延性是评价结构抗震性能的一个重要指标,延性越大,结构的抗震能力就越强^[4-6]。群桩结构的整体延性可以用位移延性来表征,位移延性系数 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$,其中 Δ_u 为群桩结构破坏时的极限位移, Δ_y 为群桩结构的屈服位移。屈服位移指群桩结构屈服时的承台中心水平位移,用等能量法在骨架曲线上通过几何作图得到;极限位移定义为水平加载力下降至峰值的 85% 时的承台中心水平位移(试件 1 由于土体含水率较大,水平力下降得很慢,取试验终止时的位移作为极限位移)。从表 2 中可知:

(1) 自由长度的较小变化对整体位移延性影响不显著,含水率的增大会导致位移延性的增大。

(2) 各试件的位移延性系数均不超过 3.0,表明试件基础的抗震能力不是很强。桥梁高桩承台基础的位移延性由自由段桩体和非自由段桩土 2 部分组成,自由段桩体(即混凝土)的位移延性被非自由段桩土之间的运动学效应削弱了,从而导致总体延性与混凝土结构相比偏小。

2.5 破坏机理

通过高桩承台基础拟静力试验的现象观察和数据分析以及综合文献^[7-9],对试验高桩承台基础的破坏机理给予假设性的解释。桩基受到侧向荷载作用后,一侧土体受压,另一侧土体与桩体产生脱离;随着桩体侧移的增大,桩侧土体坍塌,桩体混凝土参与工作;当桩体侧移继续增大时,桩体混凝土结构发生屈服,桩体中下部形成了塑性铰,结构绕塑性铰旋转,群桩受力模式发生改变,由地基梁模型转变为悬臂柱模型;最后桩体侧移再继续增大,结构在悬臂柱状态下发生破坏。

3 OpenSees 有限元模拟分析

3.1 OpenSees 有限元建模过程

在 OpenSees 有限元框架^[10]中建立了群桩基础的有限元模型,该模型主要由弹塑性纤维梁柱单元、p-y 单元和刚臂单元 3 种单元构成,三维模型示意如图 8 所示,部分桩体单元没有绘出。冲刷线位置以下桩体节点处设置非线性 p-y 单元,单元两端的节点坐标相同,一端连接桩身,另一端为固定。每根单桩桩底固结,桩顶节点之间采用刚臂连接,刚臂用以模拟承台。图 8 中的 A 点为承台圆心,B 点为承台底部。承台重量及上部结构反力通过在 B 点施加集中力来模拟,水平荷载施加在 A 点,加载沿 x 方向。

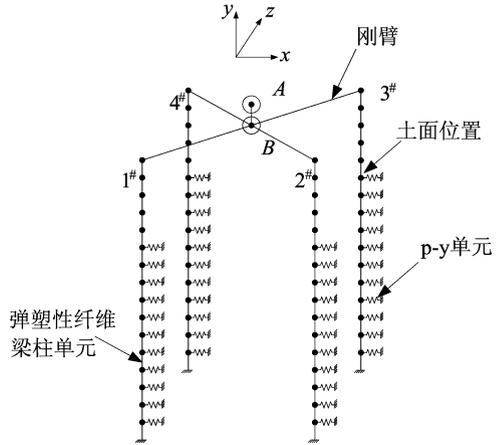


图 8 三维有限元模型

桩体单元采用弹塑性纤维梁柱单元,该单元是一种非线性分布塑性单元,单元沿轴向被离散成许多段,每一段的特性由中间横截面来代表,而该横截面又进一步被离散成许多纤维。每一根纤维可以是混凝土的,也可以是钢筋的。本文模型中,桩体单元长度为 0.2 m;对于核心约束混凝土,沿桩基周长方向划分为 20 个纤维,沿半径方向划分为 8 个纤维;对于保护层混凝土,沿桩基周长方向同约束混凝土,沿半径方向划分为 1 个纤维;对于纵向钢筋,每根钢筋划分为 1 个单元。

纤维截面的钢筋材料采用的是 Giuffr-Menegotto-Pinto 钢筋本构公式^[11];混凝土材料采用的是 Kent-Park 混凝土本构公式^[12],不考虑混凝土受拉;p-y 单元参数结合土性参数和 API 规范^[13]确定。非线性有限元方程的求解采用混合法,求解控制方法使用位移控制法,控制节点为图 8 中的点 A,求解迭代算法使用 Newton Raphson 方法^[14-15]。

通过群桩基础的有限元模拟分析,发现 OpenSees 模拟的单调荷载-位移曲线、开裂荷载和最大荷载等与试验结果吻合得较好^[16-17]。

3.2 单调荷载-位移曲线的数值模拟

本次高桩承台基础试件只考虑了桩身自由长度和土体含水率的变化,因此仅对自由长度和含水率进行参数分析。

不同自由长度时高桩承台基础的单调荷载-位移曲线如图 9 所示,可以看出,随着自由长度的增加,荷载-位移曲线的下降段越来越缓,水平承载力亦相应降低,符合试验观察结果。

不同含水率时高桩承台基础的单调荷载-位移曲线如图 10 所示,可以看出,随着含水率的减小,荷载-位移曲线的下降段越来越陡,水平承载力

力亦相应增大,也符合试验观察结果。

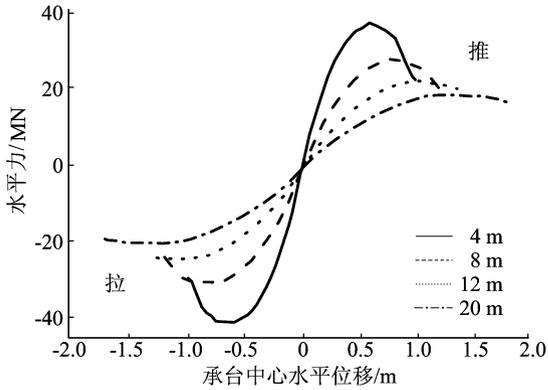


图 9 不同自由长度时单调荷载-位移曲线

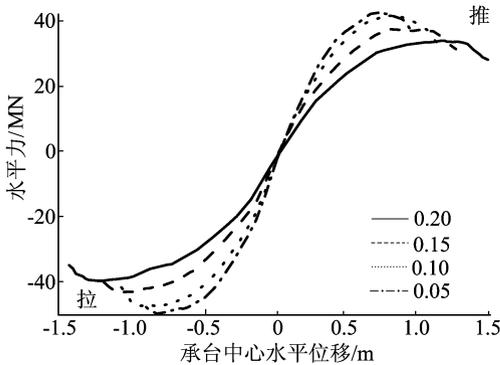


图 10 不同含水率时单调荷载-位移曲线

模拟结构的位移延性系数见表 3 所列,可以看出,自由长度的小幅变化对位移延性影响不大,自由长度的较大增长会使位移延性减小;另外,含水率的增大会导致位移延性增大。这些都说明,减小自由长度和适量提高土体含水率都会增加群桩结构的抗震性能。各模拟结构的位移延性系数均在 3.0 附近,表明由于非自由段桩土之间的运动学效应的影响,群桩基础的延性能力不如预计的能力强。

表 3 模拟结构的延性系数

自由长度/m	延性系数	含水率	延性系数
4	3.41	0.05	3.14
8	3.35	0.10	3.22
12	2.22	0.15	3.24
20	2.23	0.20	3.25

4 结 论

高桩承台基础在侧向荷载作用下,破坏以弯曲破坏为主,裂缝主要出现在承台与桩身的交接处以及桩身中部区域。极限状态时,其受力模式

会由地基梁模型转变为悬臂柱模型。减小自由长度和适量提高土体含水率都会增加群桩结构的抗震性能。

进一步的高桩承台基础试验应该重点研究不同土体条件、不同桩型布置以及承台受压弯耦合作用情况下的抗震性能。另外,试验的数值模拟可以使用本文给出的有限元模型。

参 考 文 献

- [1] Chai Y H, Hutchinson T C. Flexural strength and ductility of reinforced concrete bridge piles, Report No. UCD-STR-99-2 [R]. Davis: Department of Civil and Environmental Engineering, UC Davis, 1999.
- [2] Wallace J W, Fox P J, Stewart J P, et al. Cyclic large deflection testing of shaft bridges: part I - background and field test results [R]. Caltrans: California Department of Transportation, 2001.
- [3] 张永亮, 陈兴冲, 丁明波. 黄土地基-群桩基础-桥墩滞回特性模型试验研究[J]. 兰州交通大学学报: 自然科学版, 2007, 26(1): 48-51.
- [4] Priestly M J N, Seible F, Calvi G M. Seismic design and retrofit of bridges [M]. New York: John Wiley & Sons, 1996: 307-312.
- [5] 卓卫东. 桥梁延性抗震设计研究 [D]. 上海: 同济大学, 2000.
- [6] 叶爱君, 鲁传安. 基于 Pushover 分析的群桩基础抗震性能分析方法[J]. 土木工程学报, 2010, 43(2): 88-94.
- [7] 王 凯, 钱德玲. 液化场地的桩-土-上部结构振动台模型试验的研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2011, 34(11): 1687-1691.
- [8] Brown D A, Reese L C, O'Neill M W. Behavior of a large scale pile group subjected to cyclic lateral loading [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1987, 113(11): 1326-1343.
- [9] Banerjee S, Stanton J F, Hawkins N M. Seismic performance of precast prestressed concrete piles [J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(2): 381-396.
- [10] OpenSees Development Team. Open system for earthquake engineering simulation [EB/OL]. [2014-05-01]. <http://opensees.berkeley.edu/>.
- [11] Filippou F C, Popov E P, Bertero V V. Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints, Report UCB/EERC-83/19 [R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Centre, University of California, 1983.
- [12] Kent D C, Park R. Flexural members with confined concrete [J]. Journal of the Structural Division, 1971, 97(7): 1969-1990.

(下转第 216 页)

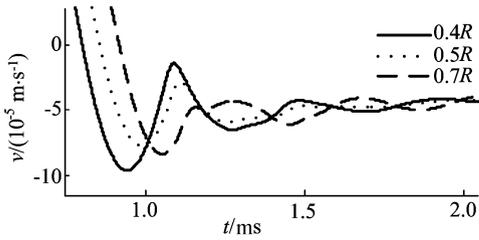


图 11 桩顶 $0.5R$ 处附近速度对比图

从图 11 可以看出,在 $0.5R$ 处三维干扰最小,波的振荡也最平缓,说明在此位置拾振会最大限度地排除干扰,提高信噪比。这与文献[11]提出的在三维轴对称模型下拾振位置在 $0.55R$ 处所受到的三维干扰最小基本一致,说明了桩土的黏弹性对桩顶最佳拾振位置的选取影响不大。

6 结 论

(1) 本文通过建立三维黏弹性桩土模型,利用交错网格有限差分法计算了三维直角坐标系下桩-土系统的振动问题,得到了瞬态纵向激振力作用下的桩顶低应变数值模拟响应,通过与实测曲线对比,证明了三维黏弹性桩土模型与实际较吻合,取得了良好的应用效果。

(2) 三维黏弹性桩土模型可以有效反映桩土在不同黏弹性参数下的桩顶速度振动响应。随着桩土黏性的增大,桩底反射到达时间会出现滞后,反射点峰值降低,反射波幅度变宽。

(3) 对三维大直径桩最佳拾振位置进行了研究,证明了弹性条件下桩顶最佳拾振位置在 $0.5R$ 左右处所受到的三维干扰较小,波形较平缓。

(4) 引入吸收边界,对三维黏弹性模型边界处的反射波进行吸收处理,使计算模型的尺寸减小,同时又保证计算机运算的精度。

[参 考 文 献]

- [1] 刘东甲.完整桩瞬态纵向振动的模拟计算[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2000,23(5):683-687.
- [2] 卢志堂,刘东甲,龙丽丽,等.桩基低应变检测三维问题的数值计算[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2011,34(6):905-909.
- [3] 刘华瑄,刘东甲,卢志堂,等.桩基三维弹性波动方程变步长交错网格有限差分数值计算[J].岩土工程学报,2014,36(9):1754-1760.
- [4] Jiang J,Liu D J,Lu Z T,et al. A study on low strain integrity testing of platform-pile system using staggered grid finite difference method[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2014,67:345-352.
- [5] 阙仁波,王奎华.考虑土体三维波动效应时黏性阻尼土中桩的纵向振动特性及其应用研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2):381-390.
- [6] 骆文和,闫启方.考虑桩-土相互作用的粘弹性土中管桩的纵向动力阻抗分析[J].昆明理工大学学报:理工版,2010,35(5):28-32,36.
- [7] 李魁彬,王安稳,胡明勇,等.确定 Kelvin 模型粘弹性材料参数的一种实验方法[J].海军工程大学学报,2007,19(6):26-29.
- [8] 杨冬英,王奎华,丁海平.三维非均质土中粘弹性桩-土纵向耦合振动响应[J].土木建筑与环境工程,2011,33(3):80-87.
- [9] Higdon R L. Absorbing boundary conditions for difference approximations to the multi-dimensional wave equation[J]. Mathematics of Computation,1986,47(176):437-459.
- [10] 段 军,刘东甲,程晓东,等.桩的一维纵向振动问题的交叉网格有限差分法数值计算[J].工程地球物理学报,2008,5(1):54-59.
- [11] 柯宅邦,刘东甲.低应变反射波法测桩的轴对称问题数值计算[J].岩土工程学报,2006,28(12):2111-2115.

(责任编辑 胡亚敏)

(上接第 204 页)

- [13] API recommended practice for planning, designing, and constructing fixed offshore platforms[Z]. American Petroleum Institute,1993.
- [14] May I M, Naji J H, Ganaba T H. Displacement Control for the non-linear analysis of reinforced concrete structures[J]. Eng Comput,1988,5:266-273.
- [15] Zheng H, Liu D F, Lee C F,et al. The displacement-controlled method and its applications to material non-linear-

ty[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2005, 29:209-226.

- [16] 韩振峰.桥梁高桩承台基础拟静力试验和抗震能力研究[D].上海:同济大学,2011.
- [17] 龙丽丽,刘东甲,蒋 红.水平瞬态荷载下基桩的动力响应分析[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2012,35(7):951-956.

(责任编辑 张淑艳)