

文章编号: 1000-7598-(2008) 06-1589-04

桩-土相互作用影响的模型试验研究

王 涛

(中国建筑科学研究院地基基础研究所, 北京 100013)

摘 要: 通过将模型试验、现场实测的结果与弹性理论解进行对比, 指出弹性理论解夸大了桩-桩、桩-土、土-土相互作用影响, 造成沉降计算值偏大和过高估计桩顶反力的不均匀性(或筏底地基土反力的不均匀性), 并提出对弹性理论解进行修正的途径和方法。

关 键 词: 桩-桩; 桩-土; 土-土; 相互作用影响系数; 弹性理论

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

Research of model tests on pile-soil interaction influence

WANG Tao

(China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: Through the model experiment, the in-situ actual result and the theoretical solution of elasticity are compared each other; and it is pointed out that the theoretical solution of elasticity exaggerated the pile - pile, pile - soil, soil - soil interaction influence and created the predicted subsidence value to be big and overestimated the nonuniformity of pile head reactions (or nonuniformity of raft bottom foundation soil reactions). Finally, the solution way and method for revising the theoretical solution of elasticity are pointed out.

Key words: pile-pile; pile-soil; soil-soil; interaction influence coefficient; theory of elasticity

1 引 言

在群桩的沉降计算分析当中, 如何准确地计算桩-桩、桩-土、土-土的相互作用影响系数是一个关键的环节。Poulos 基于弹性理论解, 通过大量的试验研究和计算机分析, 提供了许多图表^[1]。这些图表为在工程设计中应用弹性理论分析桩基沉降及其他性状成为可能, 受到各国学者的重视。但是, 人们在长期实测资料的比较中, 发现常规弹性理论解过高估计了桩与桩之间的相互影响, 这通常会导致以下两个结果:

(1) 常规弹性理论解预估的相互作用系数远大于实测相互作用系数, 这将导致预估的群桩沉降往往大于实测值。

(2) 由常规弹性理论解预估的群桩荷载分布的不均匀性比实测值要大。室内群桩模型试验和现场群桩试验的结果表明: 实测群桩荷载分布的总趋势与常规弹性理论的分析是一致的, 即两者都得到

角桩荷载最大、边桩荷载次之和中心桩荷载最小的总趋势, 但实测的群桩荷载分布要比理论计算更均匀些。

笔者认为, 导致上述现象的根本原因是土体介质碎散组成的非连续性。

2 Poulos 关于相互作用影响的表述

Poulos 基于 2 根桩竖向位移相互影响的分析(一般用 Mindlin 解)^[1], 采用叠加原理扩展至群桩的沉降计算(Poulos, 1968 年; Poulos 和 Mattes, 1971 年), 并用相互影响系数 α_{ij} 来表述两桩沉降的相互影响:

$$\alpha_{ij} = \frac{\delta_{ij}}{\delta_{ii}} \quad (1)$$

式中: δ_{ij} 为由 j 桩上单位荷载对 i 桩所引起的沉降; δ_{ii} 为由 i 桩上单位荷载对自身引起的沉降。

据此类比分析, 也可以得出桩-土、土-土作用的相互影响系数。Poulos 等人也正是通过用 Mindlin

收稿日期: 2006-07-31

基金项目: 建设部科技项目 (No. 97-07-02); 十一·五国家科技支撑计划课题: 城市地下空间建设关键技术与工程示范 (No. 2006BAJ27B02)。

作者简介: 王涛, 男, 1978 年生, 工学博士, 国家注册土木工程师(岩土), 主要从事桩基工程方面的研究。E-mail: taow715@sina.com

位移解来计算桩之间的相互作用系数, 然后利用叠加原理, 把 2 根桩的计算结果按相互作用系数的方法扩展到群桩, 从而计算群桩沉降的方法, 亦即位移法。

3 试验研究

刘金砺^[2]通过大型模型试验得出: 在粉土(压缩模量为 8 MPa)中桩侧土的变形范围仅为 $(4\sim6)d$ (d 为桩径)。Cooke 等^[3]在伦敦黏土中实测桩对土的影响范围为 $(10\sim11)d$, 伦敦黏土较硬, E_s 约为 20~30 MPa。由此可见, 影响范围随土的模量增大而增大。

为研究高层建筑地基基础的变刚度调平设计, 中国建筑科学研究院与河北省建筑科学研究院合作在石家庄某现场进行了大型模型试验^[4], 期间对桩-土影响范围进行系列现场模型试验研究。

试验土层为粉质黏土层(压缩模量为 5.5 MPa)和粉土层(压缩模量为 12 MPa)。试验单桩分别为: S-1 ($d = 150$ mm, $L = 2$ m, L 为桩长), S-2 ($d = 150$ mm, $L = 3$ m), S-3 ($d = 150$ mm, $L = 4$ m), S-4 ($d = 250$ mm, $L = 2$ m), S-5 ($d = 250$ mm, $L = 3$ m)。试桩 S-1 对距其加载桩边 $(1\sim6)d$ 处地表沉降影响如图 1 所示。

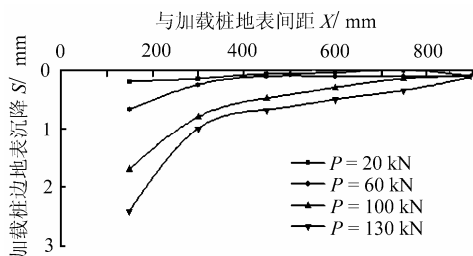


图 1 S-1 桩顶荷载对桩周地表沉降影响

Fig.1 The influence of earth surface settlement produced by S-1 pile load

从图中可以看出, 单桩受荷对桩周地表沉降的影响随与桩间距的增大而很快减小。当桩顶荷载为承载力特征值时, 桩顶沉降为 2.06 mm, 距试桩 $1d$ 处的地表沉降为 0.67 mm, 距试桩 $3d$ 处的地表沉降为 0.11 mm, 而距试桩 $6d$ 处的地表沉降仅为 0.06 mm, 不足桩顶沉降的 3%; S-2~S-5 试桩对桩周土地表沉降的影响程度和范围与 S-1 大致相同。如果将这种影响的程度与试桩的桩顶沉降的相对值表示, 则可以得到桩-土相互作用系数 α_{ps} 如图 2 所示。经本次试验若干组平行试验测知, 桩-土相互作用影响系数随荷载水平的提高而增大。

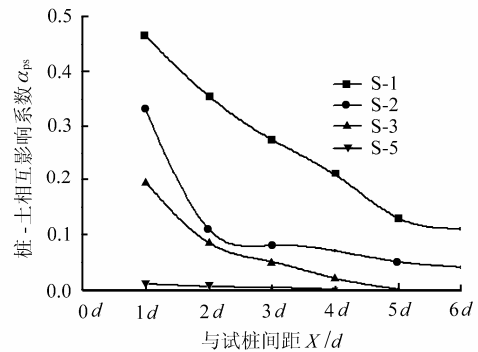


图 2 桩-土相互作用影响系数与距离的关系

Fig.2 The relationship between pile-soil interaction influence coefficient and distance

取 S-1, S-2, S-3, S-5 进行桩-桩相互影响试验, 桩距为 $3d$, 其相互作用影响系数 α_{pp} 如图 3 所示。由图可知, 桩-桩相互影响随荷载水平的提高而削弱。

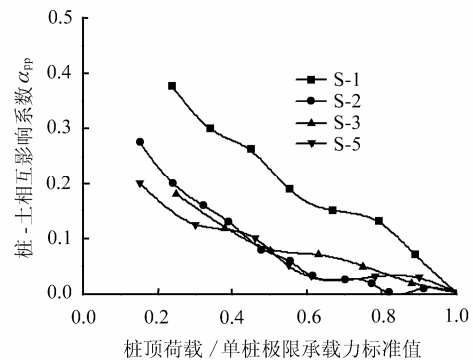


图 3 桩-桩相互作用影响系数与荷载水平关系

Fig.3 The relationship between pile-pile interaction influence coefficient and load level

从上述实测结果可以看出, 其实际相互作用影响系数均大于按弹性理论解算出的影响系数, 从而再次证明了对桩-土相互影响和桩-桩相互影响的程度, 弹性理论解较试验测试值大得多。

对于土-土相互作用影响系数, 取方形平板 ($0.681\text{ m} \times 0.681\text{ m} \times 0.15\text{ m}$) 试验板顶荷载与沉降关系, 取承压板对其边缘 $150\sim1400$ mm 处地表沉降的影响, 并将其影响的程度以与板顶沉降的相对值表示, 则土-土相互作用影响系数 α_{ss} 如图 4 所示。从图中可以看出: 土-土相互影响与板顶的荷载水平有关, 尽管承压板对其周边地表沉降的影响随板顶荷载的增大而加剧, 但土-土相互作用影响系数 α_{ss} 却随荷载水平的提高而减小, 在与地基土的承载力特征值相对应的荷载作用下, 土-土相互作用影响系数 α_{ss} 在距板边 150 mm 处为 0.165, 距板边 400 mm 处为 0.099, 距板边 900 mm 处为 0.006 9, 而距板边 1400 mm 处仅为 0.002 3; 而与地基土的极限承

载力特征值相对应的荷载作用下, 土-土影响系数 α_{ss} 在距板边 150 mm 处为 0.078, 距板边 400 mm 处为 0.036, 距板边 900 mm 处为 0.000 4, 而距板边 1 400 mm 处仅为 0.000 2, 即土-土相互作用影响仅为 1.5 倍板宽范围内。

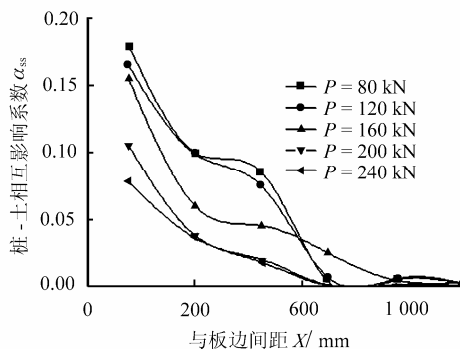


图4 土-土相互作用影响系数与板边距离关系

Fig.4 The relationship between soil-soil interaction influence coefficient and the distance from the brim of board

以上结果与 Boussinesq 解相比小得多, 这也说明了弹性理论解过高地估计了土-土相互影响的范围与程度。

4 桩筏基础中群桩基桩桩顶反力

图 5 所示为武汉某大厦桩箱基础⑬~⑲轴线桩反力实测结果。该大厦为 22 层框剪结构, 基桩为 $\phi 500$ mm PHC 管桩, $L = 22$ m, 均匀布桩, 桩距为 $3.3d$, 桩数为 344 根, 箱底面积为 $42.7 \text{ m} \times 24.7 \text{ m}$, 箱底土层为粉质黏土, 桩端持力层为粗中砂。由图 5 看出, 桩顶反力在底板自重作用下近似呈均匀分布, 随着结构刚度与荷载增加, 外缘的增幅大于内部, 最终发展为中、边桩反力为 1: 2.3。以上反力的不均匀性远远小于弹性理论解。

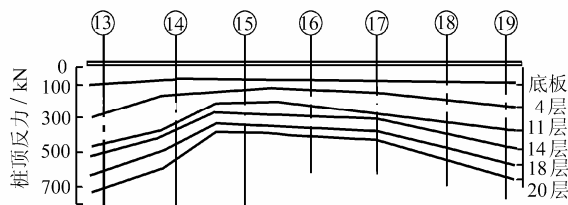


图5 武汉某大厦桩箱基础桩反力测试结果

Fig.5 Wuhan some building pile box foundation pile reaction test result

文献[2]中给出不同结构刚度建筑物桩基桩顶荷载实测值 (Q_{av} 为平均值) 与弹性理论值, 如表 1 所示。从表中可以看出, 实测的桩顶反力的不均匀

性远比弹性理论计算值要小。

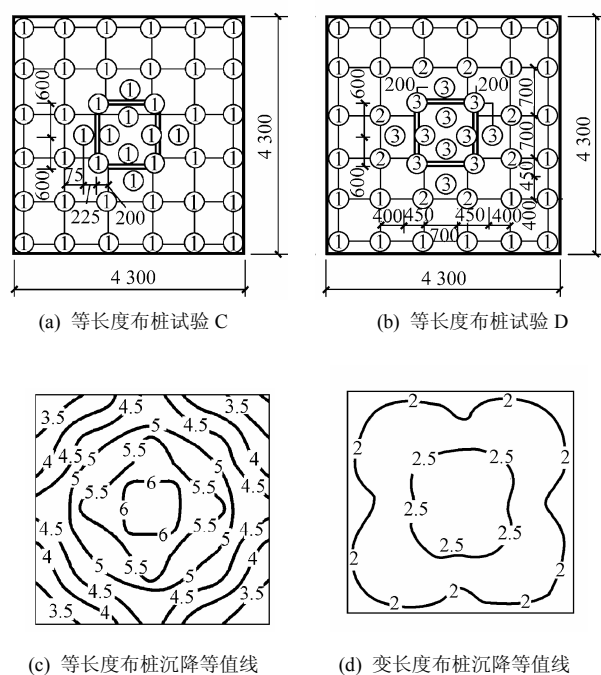
表1 桩顶反力实测值与理论值对比

Table 1 The top of pile reaction contrast between actual value and theory value

位置	实测值	理论值
角桩	$Q_c/Q_{av}=1.32\sim1.50$	$Q_c/Q_{av}=2.10\sim3.00$
边桩	$Q_b/Q_{av}=1.05\sim1.42$	$Q_b/Q_{av}=1.15\sim1.50$
内部桩	$Q_i/Q_{av}=0.40\sim0.86$	$Q_i/Q_{av}=0.05\sim0.35$

注: Q_i 为中心桩反力; Q_b 为边桩反力; Q_c 为角桩反力。

图 6 所示为石家庄试验场地在粉质黏土地基上的 20 层框架—核心筒结构 1/10 现场模型试验。从中看出, 其中等桩长布桩 ($d = 150 \text{ mm}$, $L = 2 \text{ m}$)、变桩长 ($d = 150 \text{ mm}$, $L = 2, 3, 4 \text{ m}$) 布桩。由表 2 桩顶反力测试结果看出, 等桩长桩基桩顶反力呈内小外大马鞍形分布, 变桩长桩基转变为内大外小碟形分布。后者可使承台整体弯矩、核心筒冲切力显著降低, 其反力分布的不均匀性远比弹性理论小。



注: ① $d = 150 \text{ mm}$, $L = 2 \text{ m}$; ② $d = 50 \text{ mm}$, $L = 3 \text{ m}$; ③ $d = 150 \text{ mm}$, $L = 4 \text{ m}$

图6 桩基模型试验 (单位: mm)

Fig.6 Pile foundation model tests (Unit: mm)

表2 桩顶反力比 ($F = 3\ 250 \text{ kN}$)

Table 2 Ration of head of pile reaction ($F = 3\ 250 \text{ kN}$)

试验项目	内部桩 Q_i/Q_{av} / %	边桩 Q_b/Q_{av} / %	角桩 Q_c/Q_{av} / %
等长度布桩试验 C	76	140	115
变长度布桩试验 D	105	93	92

5 结 语

通过现场的模型试验结果与弹性理论解的简单对比,以简短的分析和论述旨在说明由于土体系非连续介质。所以,按常规连续介质弹性理论计算会导致偏大的结果,导致估算的沉降值偏大,同时也过高地估计了桩顶反力的不均匀性。笔者认为只有通过大量的工程实测来逐渐总结经验,不断地对弹性理论解在不同工程地质环境中进行修正,使其逐渐接近真实的情况。目前,不少学者也曾提出了一些修正模型,但对不同类别的土,很难用一种模型进行统一修正。以上现象也引发我们的思考,在土工数值计算领域应考虑用非连续介质有限元进行分析。此外,应该加大对土体损伤的研究和分析力度,不断使其研究结果接近土体的真实情况。

参 考 文 献

- [1] POULOS H G, DAVIS E H. Pile Foundation Analysis and Design[M]. New York: Wiley, 1980.
- [2] 刘金砺. 桩土变形计算模型和变刚度调平设计[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 151—157.
LIU Jin-li, CHI Ling-quan. The modified model of pile-soil deformation calculation and variable rigidity design method for balance settlement[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(2): 151—157.
- [3] COOKE R W, PRICE G, TARR K. Jacked piles in London clay: a study of load transfer and settlement under working condition[J]. **Geotechnique**, 1979, 29(2): 113—147.
- [4] 张武. 高层建筑桩筏基础模型试验研究[博士学位论文D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2002.

第二届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会征文通知 (第一号)

(2008 年 11 月 14~16 日 湖北 武汉)

由中国水利学会岩土力学专业委员会主办,武汉大学、南京水利科学研究院、中国水利水电科学研究院、长江科学院、中科院武汉岩土力学研究所和三峡大学等联合承办的“第二届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会”,定于 2008 年 11 月 14~16 日在湖北省武汉市举行。大会将邀请著名专家介绍水利水电岩土力学与工程领域的最新发展动态,组织专家学者和工程技术人员交流最新研究成果。论文以《岩土力学》和《武汉大学学报》(工学版)增刊出版。会议评选优秀论文,并推荐到《岩土工程学报》发表,欢迎国内外同行踊跃投稿和参会。

一、会议主题与会议专题

大会主题为“重大水利水电工程中的岩土力学科技前沿”。会议专题:(1) 岩土的工程性质和测试技术;(2) 高土石坝工程中的岩土力学问题;(3) 高坝复杂岩基变形与稳定性分析方法;(4) 高陡边坡变形机理、稳定性分析和加固新技术;(5) 深埋超长隧洞和超大大地下洞室稳定性分析、评价标准和施工新技术;(6) 特殊土(黄土、膨胀土、高液限土、冻土)工程技术;(7) 岩土体安全评价、控制标准与加固支护新技术;(8) 土动力学与抗震工程;(9) 岩土体地质灾害致灾机理与防治新技术;(10) 岩土体安全监测技术与预测预报方法;(11) 环境岩土工程;(12) 重大岩土工程实录。

二、论文格式及提交时间

本次会议学术论文要求尚未公开发表,论文篇幅一般要求控制在 6 页内(含图表),论文格式参照《岩土力学》投稿要求(登陆《岩土力学》网站: <http://ytlx.chinajournal.net.cn/>, 点击“投稿须知”一栏, 下载论文模板);或登陆 <http://www.cgejournal.com/>, 点击“征稿简则”, 文稿暂不分栏。

请于 2008 年 7 月 15 日前,将论文正式稿件(纸质一式 1 份)寄到会议秘书处:武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,同时请将论文电子文档(Word 或 PDF 格式)发至 E-mail 地址 jqh1972@yahoo.com.cn。

三、重要日期

2008 年 7 月 15 日前提交论文全文;2008 年 8 月 15 日发论文录用通知;2008 年 9 月 15 日前返回论文全文修改稿;2008 年 11 月 14~16 日举行会议。

四、联系方式

联系人:姜清辉、吴运卿

地址:湖北省武汉市武昌东湖南路 8 号 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室(水利水电学院内)

邮编:430072;电话:027-68772275;传真:027-68772275;手机:姜清辉 13507118529;吴运卿 13971326855;

电子邮箱: jqh1972@yahoo.com.cn; wuyq@whu.edu.cn

第二届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会组委会

2008 年 4 月 28 日