

加荷载是否“均布”需进一步论证。

以上是一些不成熟看法，笔者也在一直拜读原文作者的相关论文，每每学习，均有所获，在此，深表谢意与敬佩，也衷心地希望能够与原文作者进行有关探讨。

参考文献：

- [1] 张治国, 徐晨, 宫剑飞. 考虑桩侧土体三维效应和地基剪切变形的隧道开挖对邻近桩基影响分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 846–856. (ZHANG Zhi-guo, XU Chen, GONG Jian-fei. Influence of tunneling on deflection of adjacent piles considering shearing deformation of foundation and 3D effects of lateral soils beside piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 846–856. (in Chinese))
- [2] 同济大学数学教研室. 高等数学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 1996. (Mathematics Teaching and Research Section

of Tongji University. Higher mathematic[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 1996. (in Chinese))

- [3] TANAHASHI H. Formulas for an infinitely long Bernoulli-Euler beam on the Pasternak model[J]. Journal of the Japanese Geotechnical Society Soils & Foundation, 2004, 44(5): 109–118. (in Chinese))
- [4] VESIC A S. Bending of beams resting on isotropic elastic solid[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, 1961, 87(2): 35–53.
- [5] 梁发云, 李彦初, 黄茂松. 基于 Pasternak 双参数地基模型水平桩简化分析方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 1): 300–304. (LIANG Fa-yun, LI Yan-chu, HUANG Mao-song. Simplified method for laterally loaded piles based on Pasternak double-parameter spring model for foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 300–304. (in Chinese))

DOI: 10.11779/CJGE201807026

对“考虑桩侧土体三维效应和地基剪切变形的隧道开挖对邻近桩基影响分析”讨论的答复

张治国¹, 姜蕴娟¹, 徐晨¹, 宫剑飞²

(1. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)07-1360-03

作者简介: 张治国(1978-), 男, 博士, 副教授, 现主要从事地下工程施工对周边环境影响控制方面的研究与教学工作。E-mail: zgzhang@usst.edu.cn。

Reply to Discussion on ‘Influence of tunneling on deflection of adjacent piles considering shearing deformation of foundation and 3D effects of lateral soils beside piles’

ZHANG Zhi-guo¹, JIANG Yun-juan¹, XU Chen¹, GONG Jian-fei²

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. China

Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

1 对讨论稿问题的回复

首先, 感谢程康对“考虑桩侧土体三维效应和地基剪切变形的隧道开挖对邻近桩基影响分析”^[1] (以下简称“原文”) 的关注和讨论, 下面简要叙述一下原文的研究思路, 并针对程康提出的几个问题, 逐点答复如下:

原文从考虑土体剪切作用和三维作用效应两方面着手, 重点分析了 Pasternak 地基下的考虑桩基侧向土体三维作用效应的隧道开挖引起邻近桩基的水平反应。原文提出的简化解析方法的优势在于以下两点: ①Pasternak 地基模型可以考虑地基的

剪切特性, 避免了 Winkler 地基模型变形不连续的特性。②考虑了桩侧土体作用的三维效应, 规避了以往平面应变解法的弊端。

原文所提到的“侧向土体的作用”指的是桩土作用的三维效应, 既包括平面内的桩土相互作用, 还包括垂直于平面方向的 (即沿着隧道轴线方向的) 的土体变形对桩基的约束作用。原文中式 (18) ~ (36) 给出了详细的公式推导。

尽管在理论上 Pasternak 地基模型比 Winkler 地基模型有较

大的优越性，但是正如笔者在原文中所说，在实际工程应用中，Pasternak 地基模型剪切层厚度 t 参数确定存在一定困难。该参数与土体性质及状态密切相关，是研究的难点之一，国内外学者也正在积极完善该参数的确定方法。

(1) 关于原文公式中的量纲问题

笔者验证了原始计算公式及算例分析，有关地基梁地基系数的公式是基于 Vesic^[2]、Goh 等^[3]和 Tanahashi^[4]结果，但原文存在笔误：公式(2)包含 v_s 的平方项，应为 $(1-v_s^2)$ ，另外原文公式(2)右侧项实际上是原文公式(1)左侧第三项 w 的整体系数，故实际上应在原公式 k 值公式的基础上除以桩径 D 。综上，原文公式(2)修改后和既有文献结果相一致：

$$k = \frac{0.65}{D} \left(\frac{E_s D^4}{EI} \right)^{\frac{1}{12}} \frac{E_s}{1-v_s^2} \quad (1)$$

在编程过程中，笔者均是按照正确公式进行的，对应到式

$$(1) \text{ 中, } w \text{ 的系数取为 } kD = 0.65 \left(\frac{E_s D^4}{EI} \right)^{\frac{1}{12}} \frac{E_s}{1-v_s^2}, \text{ 笔者初衷是}$$

为了编程方便且体现平衡微分方程物理意义而刻意为之的，实际上在编程参数指代中，存在 K 和 k 两个参数，原文中实际为 $K=kD$ 。但为了与既有文献相一致，现统一为本文公式(1)形式。笔者对于原文笔误十分抱歉，今后力争规避此类笔误发生。

基于此，针对原文进行量纲分析，公式(2)中 k 的量纲为 $M \cdot T^2 \cdot L^{-2}$ ，公式(3)中 G 的量纲为 $M \cdot T^2$ ，则公式(4)中 $kS(z)$ 量纲为 $M \cdot T^2 \cdot L \cdot L^{-1}$ ， $GS''(z)$ 量纲为 $M \cdot T^2 \cdot L \cdot L^{-1}$ ，均为 $M \cdot T^2$ ，即可并列相加减并满足物理意义。

(2) 关于原文参数剪切层厚度 t 的问题

原文采用的 Pasternak 地基模型是在 Winkler 地基的基础上增加了一个剪切层（剪切刚度为 G ），在理论上弥补了传统 Winkler 地基模型不能反映土体连续性特性的缺陷，获得的土体变形更具有准确性。但仍属于简化计算，在实际应用时，Pasternak 地基模型较为突出的难点在于参数 t 的选取，即剪切层厚度。该参数与土体性质及状态密切相关，一般可通过现场试验或数值模拟进行确定，梁发云等^[5]根据数值模拟结果按照 $t=11D$ (D 为桩的直径) 进行取值。原文取值是在梁发云等^[6]基础上采用反分析法进行取值和研究，所以针对不同的桩径，即确定了不同的剪切层厚度。

笔者将针对剪切层厚度的取值问题进行更深入的研究，并将对更加符合工程实践的土体模型进行探索。

(3) 关于原文考虑“遮拦效应”的问题

桩基遮拦效应的定义是：由于桩基的存在，约束了盾构隧道施工在桩位处产生自由土体侧向位移的现象。如图1所示，由遮拦效应产生的桩1附近土体水平遮拦位移为：“隧道施工引起的桩1水平位移”与“隧道施工在桩1位置处产生的土体自由位移”之差。当针对群桩工况进行研究时，可根据遮拦效应研究桩1与桩2的相互作用，即群桩与单桩问题的本质区别。而研究隧道对单桩的影响效应时，只需计算隧道开挖引起的土

体变形对桩体的影响即可，无需计算该过程对周围其他土体的影响。由此可见，针对单桩工况，没有必要研究遮拦效应问题。

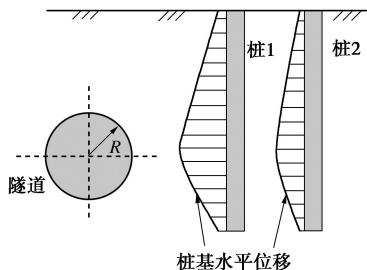


图1 群桩“遮拦效应”简化示意图

Fig. 1 Simplified view of shielding effects of group piles

(4) 关于原文中附加荷载 $p(z)$ 及剪切层变形问题

原文简化解析法采用两阶段分析方法：①第一阶段计算隧道开挖引起的土体自由场位移，该过程中不考虑桩基的存在，可简化为平面应变问题，可知 $p(z)$ 在 y 方向上是恒定的；②第二阶段将求得的土体三维变形通过公式转化为荷载，作用在桩基，求得该荷载引起的桩基变形。通过该过程的荷载 $p(z)$ 的转化及传递，完成了隧道开挖引发桩基变形的简化计算，由于土体及桩基的模量不同，所以引起的变形并非定值。

2 针对原文的几点说明

(1) 如图2所示，图2(a)为Winkler地基模型，由于该模型是由一系列的弹簧并联而成的，没有剪切层，土体位移在荷载边界处会有一个突变，因此该模型不能考虑地基的剪切变形，未反映出土体变形的连续性。而实际土体变形情况如图2(b)所示。

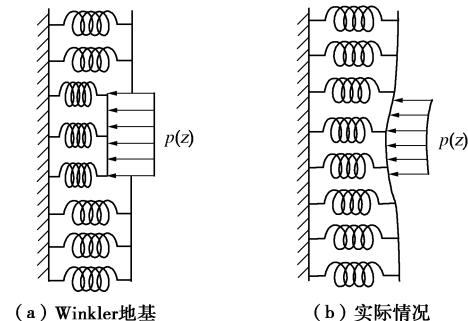


图2 荷载作用下的地基变形

Fig. 2 Deformation of foundation under loads

原文采用的 Pasternak 地基模型是在 Winkler 地基土弹簧上增加一个剪切层，该地基反映了土体剪切特性，可以体现土体变形的连续性。从一定程度上能将土体弹簧刚度、土体剪切刚度以及基桩抗弯刚度结合考虑。

如图3所示，Pasternak 地基模型在 Winkler 地基的基础上增加了一个剪切层（剪切刚度为 G ），弥补了传统 Winkler 地基模型不能反应土体连续性特性及剪切特性，不能较好地适用于剪切模量较大土体的缺陷。

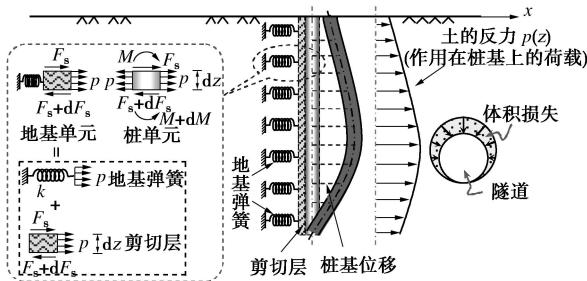


图 3 Pasternak 地基上桩-土相互作用模型

Fig. 3 Pasternak model for pile-soil interaction

(2) 目前,有关隧道开挖引起桩基变形影响的简化解析理论研究,还较少考虑到桩侧土体的三维作用效应。实际上,隧道与桩基的相互作用影响是一个典型三维空间问题,侧向地层也将对桩基变形产生影响,而既有解析方法在推导时往往从平面应变问题出发,忽略了桩侧土体对桩基作用的三维影响。

为说明该问题,如图 4 所示,图为桩与隧道位置关系三维空间示意图,坐标原点位于桩基中轴线的顶部,x 轴方向为隧道轴线方向,y 轴方向为垂直于隧道轴线方向,z 轴方向为沿深度方向。图 4 中曲面 A 为无桩时的地层变形情况,此时的位移即为土体自由场位移。由于桩基的存在限制了周围土体的变形,因此与无桩的情况相比,土体变形较小。曲面 C 为考虑桩基存在但不考虑桩侧土体三维作用效应的地层变形情况,这种情况下认为桩侧土体变形与桩基的变形完全相同,土体变形沿 x 轴方向(隧道纵向)不发生变化。然而这两种情况均为平面应变问题,并非完全符合实际情况。实际上,桩基的存在约束了其侧向一定范围内的土体位移,而距离桩基较远处侧向土体水平位移值接近无桩时的土体水平位移的大小,曲面 B 为实际情况下桩基-地层变形模式。

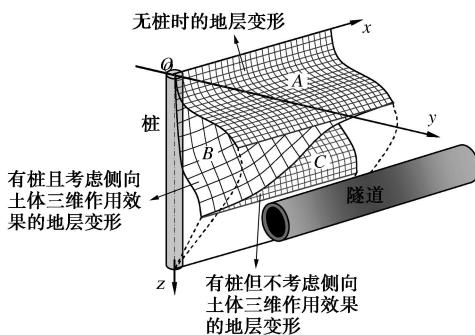


图 4 桩与隧道位置关系三维空间示意图

Fig. 4 Three-dimensional view of pile-tunnel location

在此基础上,原文将桩侧土体作用效应等效成集中力,通过剪切层传递到桩基两侧,推导了体现三维作用效应的群桩反应表达式。

(3) 原文采用了简化解析方法,考虑了土体剪切特性及三维效应,而在土体参数的选取、隧道掘进的三维效应(沿隧道方向的附加应力)等方面尚存在学术难点,在后续课题中将继续深入研究。笔者愿抛砖引玉,就地下工程开挖对周围构筑物影响效应课题进行进一步探索。

以上是对讨论文的答复和对原文的研究思路的补充,如有不妥望请指正。

参考文献:

- [1] 张治国,徐晨,宫剑飞.考虑桩侧土体三维效应和地基剪切变形的隧道开挖对邻近桩基影响分析[J].岩土工程学报,2016,38(5): 846 - 856. (ZHANG Zhi-guo, XU Chen, GONG Jian-fei. Influence of tunneling on deflection of adjacent piles considering shearing deformation of foundation and 3D effects of lateral soils beside piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 846 - 856. (in Chinese))
- [2] VESIC A S. Bending of beams resting on isotropic elastic solid[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, 1961, 87(2): 35 - 53.
- [3] GOH A T C, TEH C I, WONG K S. Analysis of piles subjected to embankment induced lateral soil movements[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(9): 792 - 801.
- [4] TANAHASHI H. Formulas for an infinitely long Bernoulli-Euler beam on the Pasternak model[J]. Journal of the Japanese Geotechnical Society Soils and Foundation, 2004, 44(5): 109 - 118.
- [5] 梁发云,李彦初,黄茂松.基于 Pasternak 双参数地基模型水平桩简化分析方法[J].岩土工程学报,2013,35(增刊 1): 300 - 304. (LIANG Fa-yun, LI Yan-chu, HUANG Mao-song. Simplified method for laterally loaded piles based on Pasternak double-parameter spring model for foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 300 - 304. (in Chinese))