

考虑桩长影响的打桩公式 Pile length influences on piling formula

区秉光^{1,2}, M. S. Subrahmanyam²
(1. 澳门土木工程实验室, 澳门; 2. 澳门大学, 澳门)

摘要: 应用一维波动方程式探讨基桩长度对打击桩的影响。经数学模拟及以原型的桩静力荷载破坏试验及动力荷载试验的结果, 发现桩长明显地支配着桩在打设时的反应及桩受力作用下的破坏模式; 同时更影响打桩公式推算结果。综合上述的规律和影响, 建议一新的打桩公式。

关键词: 桩承载力; 打桩公式; 应力波; 一维波动方程式; 桩长效应

中图分类号: TU 473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2003)03-0264-04

作者简介: 区秉光(1958-), 男, 广东开平市人, 澳门土木工程实验室董事局主席, 澳门工程师学会会长, 澳门大学博士生。

AO Peng-kong^{1,2}, M. S. Subrahmanyam²

(1. Civil Engineering Laboratory of Macau, Macau, China; 2. University of Macau, Macau, China)

Abstract: This paper is to study how the lengths of foundation piles influencing driven piles by one-dimensional wave equation. It was found by numerical simulation and prototype load tests that the lengths of piles dominantly influence pile behaviour in driving and the failure mode under static load. These phenomena directly affect the prediction of piling formulas. A new piling formula is suggested in considering of the above observation.

Key words: pile bearing resistance; piling formula; transmission of stress waves; one-dimensional wave equation; pile length effect

0 引言^y

在确定桩承载力的常用方法中,“静力平衡法”是基于桩与土的塑性理论,常有的问题是一般较难估定土壤的强度参数,静力荷载试验则又十分昂贵而且耗时,一般工程只可对1%~2%的桩作静力荷载试验。故在工程中常以打桩公式在施工前估算桩的承载力及作为打桩验收的标准。打桩公式是十分简单经济的,而且所需的参数可直接地从打桩的过程中就可量度得到。我国在东南沿海一带特别是香港、澳门及广东省以致上海一带都有极广泛地采用打桩公式作为打击桩验收的标准。打桩公式配合柴油锤及离心混凝土管桩(PHC桩)几乎占澳门深基础市场90%以上,且每根桩都是以如Hiley Formula作为验收标准。外国一般都使用桩公式,美国有多个大型的研究专门研究打桩公式的应用。

1 打桩公式与桩的承载力

从物理学的角度来说,由锤桩碰撞的动量守恒推导的公式一般都较准确,但打桩公式却不够准确。因此未能有效应用在工程上以评估桩的承载力。几乎所有打桩公式都假定桩像是一质点(桩锤)撞击另一质点(桩),即假定锤击力可以在一瞬间作用在整根桩上。打桩过程中发现当一根基桩承受锤击时,应力波在桩身中产生,这种应力波包括压力波及拉力波并沿着桩身向上或向下传播。应力波的传播传递速度由桩材料

性质决定而入射及反射的情况则由桩身情况及周边土壤条件所决定。这现象有别于一般打桩公式的假定。应力沿桩身的传播可用一维波动方式以数学模拟。本文应用该方法研究桩长对打桩公式中两个最重要参数(桩头的之弹性及塑性位移)的影响,以及对应用打桩公式推算所得桩的承载力的精确度的影响^[1,2]。

打桩公式的有理通式是由能量守恒及动量守恒原理推导而来,并常辅以诸如效率、恢复系数等经验参数。而凯利公式(Hiley's Formula)是众多打桩公式中被公认为比较准确及简单的打桩公式,广泛地在国内外用于打击桩承载力的估算及打桩验收,特别是近十年来离心管桩配合柴油锤的应用,该公式几乎在设计及施工上占着主导地位。该公式主要是根据打击桩的有理通式,将桩的弹性变形兹列出凯利公式(Hiley 1930)如下

$$R_u = \frac{e_f W_h}{S + (C_c + C_p + C_q)/2} \cdot \left| \frac{W + n^2 W_p}{W + W_p} \right|, \quad (1)$$

C 分为桩帽的变形 C_c 及桩身与周围的土壤变形 $C_p + C_q$ 这两项。其中 C_c 为常数,而 $C_p + C_q$ 与 S 则可在打桩中直接量度得到。在很多工程研究的文献中指出其误差可达3~6倍。这类打桩公式一般均将桩的承载力与桩的沉陷量建立关系。计算的结果为桩在打击时的动力阻力(包括静力阻抗及动力阻尼)。所以这些公式在应用上只能假定桩的静力承载力等于打击时桩的动力阻抗。这类公式亦不可应用于黏性土壤,因其承载力

很重要的一部分来自土中超孔隙水压消散后的黏结力,其静力承载力并非完全来自打桩时的动力阻抗。

2 波动方程式与动载试验

打击能量以应力波形式沿桩身的传播,可以用一维波动方程作出足够准确的分析,从任一段长桩的力的平衡及连续性得其应力与应变对时间(t)及距离(x)的偏微分方程,表达如下^[3]

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \text{ 其中 } c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (2)$$

式中 c 为声波在桩中的传播的速度; E 为桩材的弹性模量; ρ 为桩材的密度; u 为桩上某一点的垂直位移; x 为桩上某一点的位置; t 为时间变量。

以上偏微分方程式可获得如下的通解

$$u = u^{\downarrow}(x - ct) + u^{\uparrow}(x + ct), \quad (3)$$

式中 $u^{\downarrow}$ 与 $u^{\uparrow}$ 分别代表上行波及下行波的位移的函数。分析中所采用的波动方程式软件(TNOPDP)计算桩在锤击过程中的反应^[4]。该软件是以有限差分法以下列方程式去计算式(4)的波动方程式^[5]:

$$f_{n,i}^{\downarrow} = \left| \frac{Z_N - Z_{N+1}}{Z_N + Z_{N+1}} \right| f_{n,i}^{\uparrow} + \left| \frac{Z_{N+1}}{Z_N + Z_{N+1}} \right| (2f_{n,i}^{\downarrow} - W_{n,i}), \quad (4)$$

$$f_{n,i}^{\uparrow} = \left| -\frac{Z_N - Z_{N+1}}{Z_N + Z_{N+1}} \right| f_{n,i}^{\downarrow} + \left| \frac{Z_N}{Z_N + Z_{N+1}} \right| (2f_{n,i}^{\uparrow} - W_{n,i}). \quad (5)$$

式中 $f^{\downarrow}$ 为在 $N = n - 1$ 与 $t = i - 1$ 入射下行波; $f^{\uparrow}$ 为在 $N = n - 1$ 与 $t = i - 1$ 入射上行波; $f_{n,i}^{\downarrow}$ 为在 $N = n$ 与 $t = i$ 射下行波; $f_{n,i}^{\uparrow}$ 为在 $N = n$ 与 $t = i$ 射上行波; i 为时间步幅数; Z_N 为桩第 N 段对应应力波之阻抗; Z_{N+1} 为桩第 $N + 1$ 段对应应力波之阻抗; N 为桩的段数; $W_{(n,i)}$ 为在时间 $t = i$ 及在 n 结点上(在 N 与 $N + 1$ 段之间)之土壤与桩相互作用力。

由式(4), (5)可计算应力波在任何一段桩身向前传递及反射的情形,再从桩身及其周围的土壤的弹簧强度及阻尼值计算而得到任一段桩身在任一时段内作用中的应力与应变情况。式中 $Z_N = E_N \cdot A_N / c$ 为桩的弹性模量与断面积的乘积除以应以波在桩材上的传递速度。

3 数学模拟

目前打桩公式都没考虑桩的长度远超其横断面尺寸,桩长与打桩公式的基本假设相差甚大。下面研究桩长在打桩时对桩头的塑性沉陷(S)与弹性变形($C_p + C_q$)的影响,分析此结果对用打桩公式估算桩承载力所产生的影响。应用波动方程式以数学模型方法模仿不同打桩情况。由不同桩长和土壤强度,得出桩之反应。

3.1 数学模拟中的土壤特征

先考虑一砂质土壤,其厚度与桩长(L)一致。土壤强度则以标准贯入试验(SPT)的锤击数 N 值表示。其顶层 N 值为零而线性渐增到底层(深度为 L)时 N 值为 60, 底层下另有一 5 m 厚的砂土层 N 值均为 60。标贯击数可按半经验值转化成土壤的弹簧强度及阻尼值^[5]。桩在此土层中的承载力为桩身侧面的摩擦力及桩底下端的端承力的总和。

3.2 数学模拟中的桩特征

研究中所选的桩是国内及澳门地区最常用的桩型,其中包括 $\phi 500 \times 125$ PHC 桩, PHC 为预应力高强混凝土离心管桩。它的外直径为 500 mm, 壁厚为 125 mm。桩长(L)设为由 5 m 到 100 m 长。研究中亦有分析不同的断面尺寸,如 $\phi 600 \times 150$, $\phi 800 \times 110$ 及 $\phi 1000 \times 130$ 等。这假设可以代表一般土壤的条件下打击桩的打设深度。计算中需输入一模仿常用柴油桩锤的数化模拟打击以激发应力波。

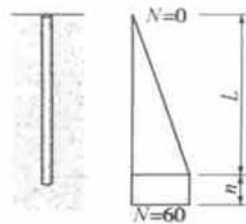


图1 桩与土壤示意

Fig. 1 Pile and soil model for the simulation

4 计算结果

由上数据,应用应力波一维波动方程式得出打桩过程中桩的反应,运算中,按不同桩长与土壤强度,得出力,速度,加速度,位移,上行波,下行波等与时间的关系,总阻抗,能量,力与速度乘阻抗等不同的关系。

打桩公式主要应用于打桩时的桩头之位移动分析。本文考虑模拟丹马牌柴油桩锤(Delmag D46, D62, D80 及 D100 等)以其率定能量分别打击不同长度的桩。打击效率为 0.9, 恢复系数 n 为 0.4。计算出桩头的塑性变形及弹性变形的记录: S 为桩顶之永久沉陷, 塑性变形 $C_p + C_q$ 为桩及土壤瞬间弹性变形。

由桩头塑性沉陷、弹性沉降数值,将其与桩长的关系绘于图 2, 3。发现与以前的研究有明显一致的趋势^[1,2]。由图 2 可见,在桩长 5 m 范围内的塑性沉陷量(S)明显增加;在 5~20 m 桩的塑性沉降渐减;20 m 以上又轻征的上升,但基本上为一常数。

这些现象与以前的研究结论一致。在本研究中,桩端均设在 SPT 的 N 值等于常数(60 击),所以桩的端承载力亦基本上为一常数。而桩愈长则桩身的阻抗总和

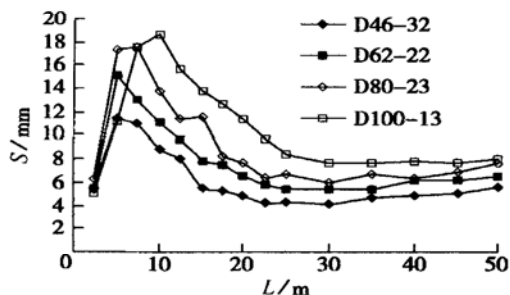


图2 不同桩长计算的桩头塑性沉降

Fig. 2 Computed plastic settlement of pile head vs pile length

愈大。即桩在土中的长度增加会明显地增加桩之总抗阻值,因此亦会明显地减小桩头的塑性沉降量。当桩长超过 20 m 时,桩头沉降量趋于稳定,且与桩长无明显关系。这种现象与使用一般的打桩公式预测承载力时的情况十分不同。

由图 3 亦可看出,桩长小于 5 m 时,桩身与土的弹性变形 ($C_p + C_q$) 随桩长的增加而明显减小。这个现象可被解释为当桩长增加时,周围土壤的合力亦增加,由撞击所产生的弹性变形因反作用力增强而增加,同时,塑性沉降会相应地减小。在 5~20 m 之间渐渐增加;可是弹性变形的增加趋势维持至桩的长度为 20 m 后变成一常数。这种现象亦非打桩公式所能描述。

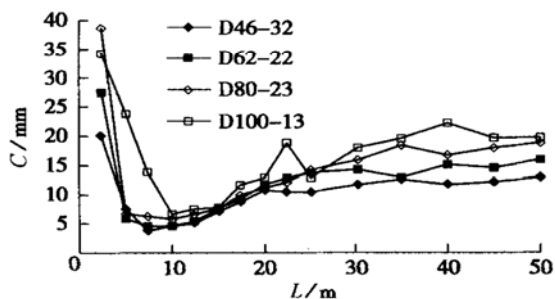


图3 不同桩长计算的桩头弹性沉降

Fig. 3 Computed elastic settlement of pile head vs pile length

5 分 析

由此可见,打桩公式不适用于太长或太短的桩,且使用时尚需对桩长加以修正,以上的现象可解释如下。

(1) 若桩长极短时,桩长小于 5 m,桩的表现如一般打桩公式的假设。应力波在极短的一瞬间已传达整根桩上,本文所讨论的效应作用不明显。

(2) 如图 4(a),若桩长很短时,桩长约为 5~20 m,桩长开始足分辨不同的应力波效应。柴油锤在打桩时一次锤击的主要撞击约需 3%~5% s 之间,应力波在混凝土的速度为 4000 m/s,所以应力波的波长约为 12~20 m。即当桩头仍然承受打击时先前的应力波已反射回到桩头。反射波一般是拉力波,当短时间内反射回至桩头后产生抵消部分锤击作用。这种现象将会减

小桩的塑性沉降量与弹性变形,这样将会导致高估桩的承载力。在长桩中由于反射波需要较长时间才反射回桩头,锤击已有充分时间完成,故这现象并不明显。

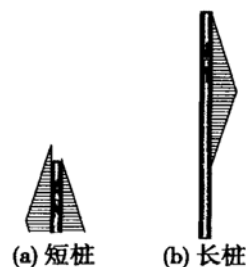


图4 同波桩长应力波作用在不同长度的桩上的分别

Fig. 4 A same wavelength stress acting on piles with different lengths

(3) 如图 4(b),若桩极长,应力在一瞬间只能集中在桩上部某一段中,桩的沉降与变形其实仅受由桩头至某一范围内的桩材及土壤的弹性及塑性特质所影响。当桩超过某一长度时(在本研究条件下为 20 m),无论桩的长度是多少,其影响相同,桩头的位移差不多为一常数。这与一般打桩公式的假设在同一时间应力已影响整根桩不同。这种现象显示,打桩公式亦不能应用于超过一定长度的桩。

(4) 若桩长在 10~50 m,则桩能有足够的长度去区别由桩底反射回来的拉力波,且又不致太长,以至变位为一常数。在大多数工程中,桩的长度大约亦在 10~50 m 之间。由于桩头的位移同时受到上述两种现象的影响,故此需对桩长进行修正。

由波动方程式的计算结果中,能够得出两种桩的极限承载力。

R_{ul} : 桩的极限承载力,由该桩与土的弹簧及阻尼强度用由静力承载力计算程序计算的 $P-s$ 曲线以类似大卫逊标准(Davison Criterion)推导出来的。

R_{uh} : 桩的表现极限承载力,是将波动方程式计算出来的桩头沉降量(S)与弹性变形($C_p + C_q$)代入打桩公式而算出的。定义 $A = R_{ul}/R_{uh}$ 为桩长修正系数。绘 A 值对桩长 L 于下列图 5 中。

对不同的桩长度及不同的桩径,可依同法计算出其 A 值。类似的 A 值曲线可以从不同的桩直径,不同的锤型,不同的桩材(混凝土桩、钢桩及木桩)得到 A 值与桩长的关系曲线或公式。

从分析不同长度的桩受力的情况,可以看到短桩的强度一般由其极限承载力所控制;另一方面长的桩则多由桩顶所受力而产生的总沉降量所决定。即桩的破坏机理与桩的长度有直接的关系。 A 值不单为桩长度的直接函数,同时亦可一起考虑到不同形态的受静力荷载的破坏型式。使用线性回归的方法可得到 A 值对桩长 L 的关系公式或关系图。同理, A 值亦可应用在一

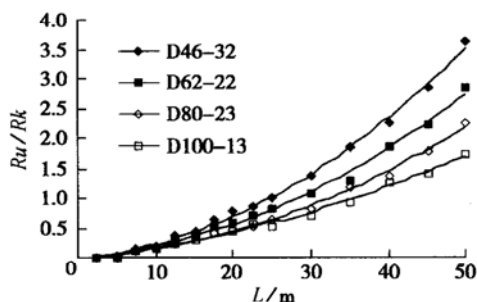


图5 A值 vs. LPHC/D46-32 柴油锤
Fig. 5 The A values for different pile length
for PHC/D46-32 diesel hammer

般打桩公式上推算对桩静力荷载的极限承载力。

若考虑到桩长对打桩的影响及长桩因沉降量的破坏形式,基于打桩的有理通式,建议一新打桩公式如下

$$R_{ua} = \frac{A \cdot e_f W_h}{S + (C_c + C_p + C_q)/2} \cdot \left| \frac{W + n^2 W_p}{W + W_p} \right|, \quad (6)$$

上式中的A值按前定义,可称为桩长系数。

本文建议的打桩公式桩长系数A中, R_u 及 R_{uh} 计算皆来自相同的桩和土壤的数学模型及相同打桩锤击的假设。这些相同的假设可以在A值的计算中相互抵消,所以由此可以推断A值只与桩长L有关,而与同土的强度参数(弹簧及阻尼的强度与屈服的应变量)无直接的关系。故本研究的结果理论上可以使用在任何相似土层分布的地区。

使用本文建议的打桩公式可以归纳有下列优点:

(1) 考虑了桩的长度对打桩公式的两个最主要参数S及C的影响,从而增加了其对桩极限承载力推算的精确度;同时亦可更有效地制定打桩的验收标准,避免超打的情况。

(2) 一般打桩公式只能计算桩的动力阻抗,而非桩的静力承载力。理论上,新公式可以除去土壤阻尼的动力阻抗部分而获得桩的静力承载力。

(3) 在类似土层情况下,不同桩的长短亦会有不同的破坏形式。一般来说短桩的破坏由桩的强度所决定而长桩则由沉降量;即桩的破坏形式亦为长度所控制。利用新的公式可考虑到桩在不同种类的破坏形式所对应的桩承载力的影响。

6 验证试验

因桩的极限承载力的静力测试资料相当缺乏。为验证本文建议公式,组织一组试验。试验地的土层情况与本文的假设大致相似。试验包括打设两根不同长度的PHC桩并记录其最后施打时桩的弹性及塑性沉降。跟着对该两桩进行动力荷载试验及至极限破坏的静力荷载试验,发现两种测试所得的结果基本相同,相对误差小于5%。利用本文建议公式进行计算,分析如下:

测试 1:

$\phi 500 \times 125$ PHC 桩, 桩长 33 m; 以 DELMAG D62 柴油桩锤打击该桩时量得 $S = 7.4$ mm 及 $C_p + C_q = 11$ mm; 利用凯利打桩公式计得 $R_h = 2.620$ MN; 对该桩作动力荷载试验得其极限承载力 $R_u = 3.283$ MN; 从桩长等于 33 m, 得 $A = 1.315$; 将上述数字代入本文建议公式得 $R_{ua} = 3.445$ MN; 比较 $R_u/R_h = 1.25\%$ 及 $R_u/R_{ua} = 95\%$ 即 $R_{ua}/R_u = 105\%$ 。

测试 2:

$\phi 500 \times 125$ PHC 桩, 桩长 34 m; 以 DELMAG D62 柴油桩锤打击该桩时量得 $S = 4.0$ mm 及 $C_p + C_q = 13$ mm; 利用凯利打桩公式计得 $R_h = 2.954$ MN; 对该桩作动力荷载试验得其极限承载力 $R_u = 3.951$ MN; 从桩长等于 42 m, 得 $A = 1.383$; 将上述数字代入本文建议公式得 $R_{ua} = 4.086$ MN; 比较 $R_u/R_h = 1.34\%$ 及 $R_u/R_{ua} = 97\%$ 即 $R_{ua}/R_u = 103\%$ 。

从上述的试验结果显示,采用一般打桩公式的误差较大,这与很多文献的结论相近。而采用本文建议的公式,其误差范围则明显收窄至 $\pm 10\%$ 左右。

7 结 论

由于一般打桩公式不考虑桩长的影响,以致这些公式高估了短桩的承载力而低估了长桩的承载力。本文提出了一条新的打桩公式。并通过试验证明本文建议的公式能用于改善打桩公式中的极限承载评估之准确性及作为打桩验收的标准。新的打桩公式推算得一合理地准确的承载力。这样就可以大大地节省传统试验所需的时间及昂贵的费用。

参考文献:

- [1] 区秉光. 以波动方程式改良打桩公式[A]. 中国科协第三届青年学术年会论文集, 材料科学与工程[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 1998. 498-501.
- [2] Ao P K, M S Subrahmanyam. Estimation of pile carrying capacity[A]. Proc 4th International Conference on Deep Foundation Practice Incorporating[C]. PILETALK, 1999, 107-116.
- [3] Frans B J, Barends. Application of Stress Wave Theory to Piles[M]. Rotterdam: Balkema.
- [4] Poulos H G, Davis E H. Pile Foundation Analysis And Design[M]. John Wiley & Son.
- [5] White J, Van Foeken R J. TNO building and construction research, pile driving analysis/dynamic load testing, user guide [A]. TNO Building and Construction Research, Foundation Pile Diagnostic System, TNOWAVE: Impact Hammer Pile Driving Prediction, User Guide[C]. TNO-IBBC.