

水平荷载作用下群桩模型试验研究

王 梅 楼志刚 吴京平 (中国科学院力学研究所)

一、前 言

提要 本文通过水平荷载作用下群桩的模型试验及其结果分析,着重研究群桩相互作用对后桩 P - Y 曲线的影响。

随着近岸结构物的不断兴建,对桩基础在水平荷载作用下的反应特性研究显得越来越重要,尤其是小桩距群桩基础的设计与计算已成为目前迫切需要解决的问题之一。国内外在这一领域也进行了一些研究,并提出了一些计算方法。这些方法中较为合理简便的是通过引入折减系数修正单桩的 P - Y 曲线来得到群桩中各桩的 P - Y 曲线,再来进行群桩计算。这类方法的典型代表为:(1) Focht and Koch (1973) 提出的综合法。该方法应用较广,但还存在不合理假定及计算不便等缺点;(2) Dunnavant and O'Neill (1985) 提出的经验刚度法(简称 β 法)。该法是在试验研究基础上提出的群桩中各桩 P - Y 曲线修正系数 β 的计算方法。但该参数的计算未考虑深度的影响;(3) 汤克己等 (1990) 提出的群桩中后桩 P - Y 曲线折减系数的经验公式。该法考虑了深度与桩距的影响,却忽略了桩的位置与不同布置形式的影响因素,且由于该公式是基于粉质粘土中的试验结果得到的,对其他土类的适用性如何还有待探讨。

本模型试验拟对不同排列形式的群桩进行系统分析研究。本文所列为沿荷载方向排列的一系列单排群桩模型试验研究。为避免多种因素对试验结果分析的影响,本模型试验暂不考虑承台及桩头固定程度的影响,桩头一律设为自由头,无承台,着重研究桩距与桩数对群桩在水平荷载作用下的反应特性的影响。

二、模 型 试 验

模型试验在 $1.4 \times 0.8 \times 1.5\text{m}$ 的铁制模型槽内进行。模型地基为 30~80 目内蒙干砂。密度控制在 $1.62\text{t}/\text{m}^3$,内摩擦角 35° 。模型桩为直径 30mm 合金铝管,壁厚 1mm,平均弹性模量 $E=8.4 \times 10^4\text{MPa}$ 。桩长 120cm,入土深度 110cm,加载点高度 9cm。测量内容包括:桩顶荷载,桩身不同深度处弯矩,桩顶转角,桩顶、泥面下若干点的位移。群桩的排列形式为不同桩距的沿荷载方向呈单排排列的二根桩群桩及三根桩群桩。

三、试 验 结 果 分 析

1. 群桩效率系数

群桩效率系数是反映群桩与单桩相互关系的一个主要参数,也是研究者们极为关心的

参数之一。这一参数的确定,使人们可根据单桩承载力方便地推出群桩承载力。国内外研究者在这方面做了大量工作,得到了若干因素对群桩效率系数的影响,如桩距、桩数、承台高低及桩头固定度等。日本的玉置修等(1971)、我国的韩理安(1984,1986)及刘金砺(1992)还分别提出了群桩效率系数的计算方法。

图1所示为实测群桩效率系数随桩距的变化及由不同方法计算所得结果(三根桩群桩)。图中方法一为玉置修法,方法二为刘金砺法,方法三为韩理安法,方法四为 β 法。

从图中可以看出:第一, β 法与韩理安法的计算结果与实测值在随桩距的变化趋势上较为一致,且与实测值的相互关系也较为稳定。 β 法结果始终大于实测值,且误差在10%之内,是各种方法中误差最小的。韩理安法中由于 α 、 β 二个参数无法确定,对其计算结果有较大影响。第二,从实测结果可知,桩距达六倍桩径时,仍不能视为达到临界桩距,其群桩中各桩的相互影响不能忽略。

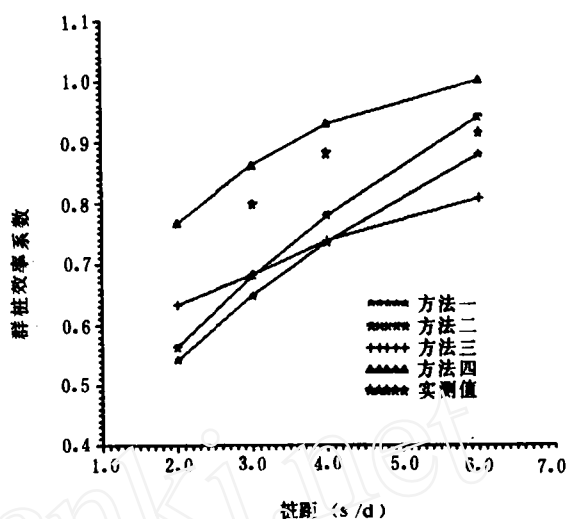


图1 群桩效率系数-桩距关系

2. 群桩中各桩荷载分担比

水平荷载在群桩中各桩上的分配不是均匀的。国内外研究者在这方面也进行了大量研究,得到了前排桩承受的水平力大,后排桩承受的水平力小的结论。这一规律反映了群桩中前桩对后桩的削弱作用,也已被国内外现场试验结果所证实。图2所示为群桩中各桩荷载分担比与桩距关系(三根桩群桩)。图中方法一为杨克己法,方法二为 β 法。

从图2可以看出:第一,实测前桩与后桩荷载分担比与桩距的关系与二种方法计算结

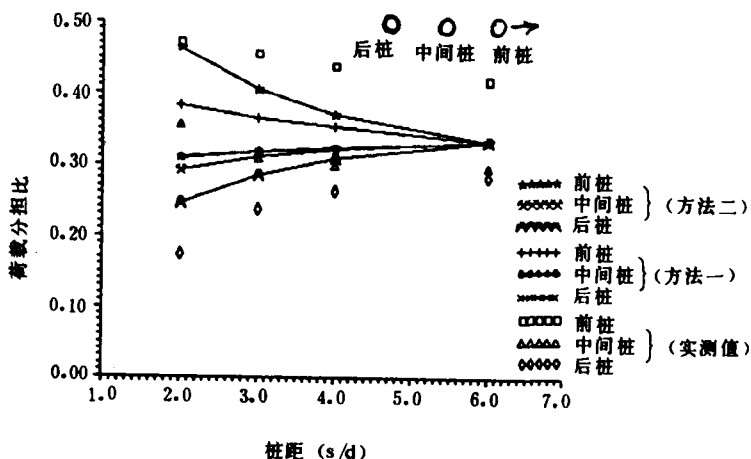


图2 群桩中各桩荷载分担比-桩距关系

果在趋势上一致，其中杨克己方法更接近于实测结果。二种方法计算的前、后桩荷载分担比之差都比实测结果小。从图中可看出，导致其计算结果偏小的原因之一是由于这二种方法均假定六倍桩径为临界桩距。但从实测结果可以看出桩距为六倍桩径时，其桩与桩的相互影响不能忽略；第二，实测中间桩荷载分担比随桩距的变化与计算值相差较大，在趋势上也不一致，如图 2 所示。这一现象说明了中间桩与后桩在群桩中所受的影响并不完全一样。一方面中间桩受前桩的削弱影响，这与后桩是一致的。另一方面中间桩还受后桩的影响，这种影响使中间桩荷载分担比大于后桩。其影响机理还有待进一步研究。

3. 群桩中前、后桩 P-Y 曲线分析

水平荷载作用下群桩反应特性不仅表现在群桩效率系数及群桩中各桩荷载分担比的不同，还表现在群桩中各桩 P-Y 曲线已不同于单桩 P-Y 曲线，群桩中各桩 P-Y 曲线的相互关系直接反映了桩-土-桩的相互影响。

图 3 所示为群桩中各桩 P-Y 曲线的关系随桩距、深度及桩数的变化而变化。其中，图 3(a) 所示为桩距变化对群桩中各桩 P-Y 曲线关系的影响。从中可以看出，随桩距增加，前、后桩 P-Y 曲线的差别在减小，但即使达到六倍桩径，在浅层前、后桩 P-Y 曲线仍相差较大。

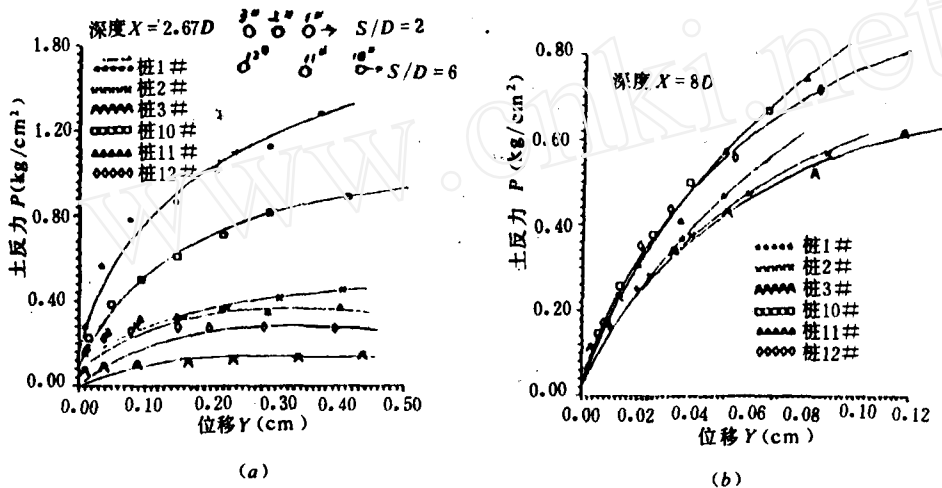


图 3 群桩 P-Y 曲线随桩距、深度及桩数变化关系
(a) P-Y 曲线 (深度 $X=2.67D$) (b) P-Y 曲线 $X=8D$

图 3(a) 与图 3(b) 所示为相同两组群桩在不同深度处的各桩 P-Y 曲线。从中可以看出，前、后桩 P-Y 曲线差值随深度增加而减小，在深度为八倍桩径处，三根桩的 P-Y 曲线已相当接近。这些规律与其他研究者所得结论一致。

鉴于前言中所提几种群桩计算方法各有长短，不能全面概括各种因素的影响，本文拟在群桩模型试验基础上，分析在受荷方向桩排中后桩、中间桩与前桩 P-Y 曲线关系受桩距、桩数、深度等影响的变化规律。暂不考虑前桩与单桩 P-Y 曲线的关系，将其视为等同。

为便于分析，这里先定义中间桩或后桩反力折减系数 f 为在相同位移条件下，某深度处后桩反力与前桩反力之比，即

$$f = P_{\text{后桩(中间桩)}} / P_{\text{前桩}}$$

根据模型试验结果，对各桩 f 值进行分析如下：

① f 随深度的变化

群桩中各桩 f 随深度的变化示于图 4。从图中可以看出, f 随深度增加而增大, 在双对数坐标上呈近似线性关系, 其斜率及大小则随桩距、桩数的变化而变化。

a. f 随深度增加而增大, 反映了群桩中桩-土-桩的相互影响随深度的增加而减小。这主要是由于在浅层, 无上覆荷重作用, 群桩位移较大, 前桩位移对桩间土产生的削弱作用导致桩间土变得松散, 砂密度降低较大, 故后桩 $P-Y$ 曲线较之前桩降低较多。随深度增加, 上覆荷重影响增强, 且深处桩的位移较小, 故深处桩间土的变化则变小, 甚至由于前桩的存在还略有增强, 因而后桩 $P-Y$ 曲线则随深度增加越来越接近甚至高于前桩 $P-Y$ 曲线。

b. 图中所示方法一为杨克己法。从中可以看出, 该法计算结果均比本次试验结果高。计算结果与实测结果在浅层相差较大, 误差高于 25%。在深层误差则很小。笔者认为这主要有二个原因: 第一, 该折减系数的计算以八倍桩径为临界桩距。由于浅层桩-土-桩相互作用较强, 其临界桩距要大于八倍径, 而深层桩-土-桩相互作用则较弱, 八倍桩径作为临界桩距已足够, 因此造成了计算结果在浅层偏高的现象。第二, 该方法是从小粉质粘土桩的试验得出的, 而深度的影响在砂土中比在粉土要大得多, 这也导致此结果的出现。

② f 随桩数与桩的位置的变化

从图 4 还可看出, 桩距相同, 二根桩群桩与三根桩群桩中的后桩折减系数并不相同, 二根桩群桩中的后桩与三根桩群桩中的中间桩的折减系数也不相同。这说明群桩中的相互作用不仅仅发生在相邻桩之间, 不相邻桩的影响也不能忽略。而且, 群桩中的相互作用不仅仅是前桩对后桩产生的, 后桩对前桩也有影响。另外, 随桩数增加, 其后桩折减系数要减小。这也是由于桩数增加, 对群桩中每根桩来说相互作用的影响也增大所致。

另外, 中间桩与后桩折减系数也不同。同一群桩中, 中间桩的折减系数往往大于后桩的折减系数, 若将其视为等同则会引起较大的误差。这也说明了群桩中的相互作用不仅是前桩对后桩的削弱作用, 后桩对前桩也有影响。

③ f 随桩距的变化

群桩中各桩折减系数 f 随桩距的变化如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 随桩距增加, 折

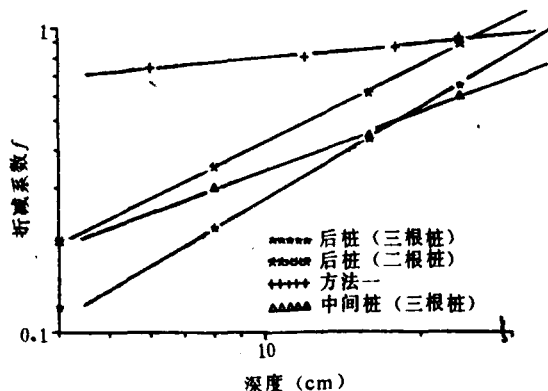


图 4 群桩中各桩 f 随深度变化关系

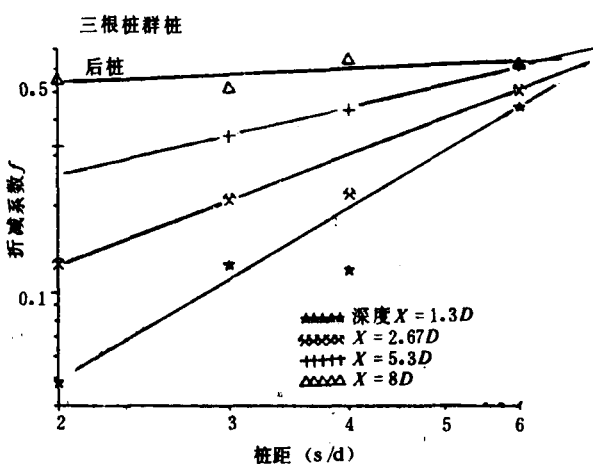


图 5 群桩中各桩折减系数 f 随桩距变化

减系数也增加,即群桩相互作用减弱。在双对数坐标中,各深度折减系数与桩距呈近似线性关系。且各线斜率在浅层变化较大,随深度增加渐趋稳定。各线截距则随深度增加而增加。另外,桩数与桩在群桩中的位置不同,在同一深度上其该线斜率也不同,尤其是在浅层,各线斜率差别更大。在本文折减系数分析中,为简化起见,所选 f 值均为 P - Y 曲线上位移为 $3\%D$ 处的 f 值。由于折减系数还随位移 y 的变化而变化,关于这一因素的影响留待以后讨论。

四、结 论

(1) 群桩效率计算时,在桩头自由条件下,六倍桩径作为临界桩距偏小。在前面提到的几种计算方法中, β 法与实测结果符合较好,误差在 10% 以内。

(2) 群桩荷载分担比计算中,杨克己方法与实测结果最接近。但其以六倍桩径作为临界桩距的假定成为导致误差的原因之一。另外,三根桩群桩中的中间桩的荷载分担比随桩距的变化规律还有待进一步探讨。

(3) 后桩反力折减系数 f 随深度增加而增加,在双对数坐标上呈线性关系。杨克己法所得结果在浅层大于本文结果,在深层则很接近。

(4) 反力折减系数 f 随桩的位置及群桩桩数的不同也有所差别。桩数越多,其折减系数越低。同一群桩中,中间桩与后桩的折减系数也不同,不能忽略其差别。

(5) f 随桩距增加而增加。在双对数坐标中呈近似线性关系,且各线斜率在浅层变化较大,在深层则较为接近。但桩的位置不同其该线斜率也不同。

(6) 本次试验结果仅为沿荷载方向单排布置的群桩试验结果。其他布置形式的模型试验将陆续进行。

参加试验和研究工作的还有李建乡、江礼茂、袁丕坚、黄锋同志及清华大学的王增梅、胡德贵和许洪涛老师等。

参 考 文 献 (略)