

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.10.011

五星形桩截面尺寸优化及竖向承载机制试验研究

任连伟¹, 詹俊峰¹, 杨权威¹, 王新泉², 张敏霞¹

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 浙江大学城市学院 土木工程系, 浙江 杭州 310015)

摘要:五星形混凝土桩是一种新型截面异形桩, 由圆截面均匀内切5个圆弧形成, 其截面参数主要有被切割圆半径 R 、切割圆半径 r 、切割圆弧所对应的外包圆圆心角 2α 、外包圆弧对应圆心角 θ 。经截面尺寸优化分析, 推导出周长最大化五星形桩和周长面积比最大化五星形桩。为进一步掌握五星形桩承载性能, 以砂雨法制作土样, 在干砂中进行了4根单桩对比模型试验研究, 4根单桩为: 周长面积比最大化五星形桩 F_2 、周长最大化五星形桩 F_1 、与 F_2 等截面周长圆桩 C_1 、与 F_2 等截面面积圆桩 C_2 。试验结果表明: 与 F_1 相比, F_2 的桩侧表面积与其相近, 极限承载力大致相同, 但 F_2 混凝土用量是 F_1 混凝土用量的0.75倍, 单位体积混凝土承载力更高, F_2 为最优的截面尺寸; 与等截面面积小圆桩 C_2 相比, F_2 桩侧表面积是其1.53倍, 极限承载力是其2.4倍, 显示出在相同混凝土用量下五星形桩 F_2 具有良好的承载性能, 截面异性扩大效应明显; 与相同截面周长的大圆桩 C_1 相比, F_2 桩截面面积是其0.44倍, 极限承载力是其0.96倍, 但 F_2 桩单位体积混凝土承载力是 C_1 桩的2.21倍, 显示出更高的承载性价比。各级荷载作用下五星形桩侧摩阻力所占比例在80%以上, 特别是 F_2 桩, 在90%以上, 表现出摩擦桩的特性。研究成果可对五星形桩的工程应用提供一定理论支持。

关键词:五星形桩; 截面尺寸优化; 承载机制; 模型试验; 砂雨法

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)10-2855-10

Section optimization and model test study on bearing mechanisms of five-star-shaped pile

REN Lian-wei¹, ZHAN Jun-feng¹, YANG Quan-wei¹, WANG Xin-quan², ZHANG Min-xia¹

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;

2. Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou, Zhejiang 310015, China)

Abstract: The five-star-shaped concrete pile is a new type of pile with a special shaped cross-section. It is formed by cutting five circular arcs in a circle pile. The main parameters of the cross section include the radius of the circumcircle R and the corresponding circumcircle central angle θ , the radius of inward cutting circular arc r and the corresponding circumcircle central angle 2α . Through the optimization analysis of the section size, the maximum of the circumference of the five-star-shaped piles and a maximum ratio of perimeter to the area of five-star-shaped piles are derived. To further explore the vertical bearing capacity of five-star-shaped piles, experimental studies are carried out on the comparison of four single piles in the dry sand by the sand pouring method. These four single piles are the maximum ratio of perimeter to the area of the five-star-shaped pile F_1 , the maximum of the circumference of the five star-shaped pile F_2 , the round pile C_1 with the same perimeter of F_2 , and round pile C_2 with the same cross-sectional area of F_2 . The following conclusions are drawn from this study. The side surface area of F_2 gets close to that of F_1 , and the ultimate bearing capacity is approximately the same. The concrete dosage of F_2 is 0.75 times that of F_1 , the bearing capacity per concrete is higher, and thus F_2 is optimal cross-sectional pile. Compared with C_2 , the side surface area of F_2 is 1.53 times that of C_2 , and the ultimate bearing capacity of F_2 is 2.4 times that of C_2 . It shows that F_2 has better bearing capacity than that the same amount of concrete, and the expansion effect of cross-section is obvious. Compared with C_1 , F_2 pile cross section area is 0.44 times that of C_1 , the ultimate bearing capacity is 0.96 times that of C_1 , and the unit volume concrete bearing capacity of F_2 pile is 2.21 times that of C_1 , which exhibits higher load cost performance. At all levels of load, the ratio of the lateral friction of the five star-shaped piles is more than 80%, especially F_2 , and the proportion of side friction resistance is above 90%, which shows the characteristics of friction pile. This study provides theoretical support for the engineering application of five-star-shaped piles.

Keywords: five-star-shaped pile; section optimisation; bearing mechanism; model test; sand pour method

收稿日期: 2016-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51508166); 河南省教育厅科技攻关项目(No. 14A560015)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51508166) and the Science and Technology Project of the Education Department of Henan Province (14A560015).

第一作者简介: 任连伟, 男, 1980年生, 博士, 副教授, 主要从事地基与基础相关的教学与科研工作。E-mail: renhpu@163.com

1 引言

五星形混凝土桩是新研发的一种截面异形桩，区别于传统的圆桩和方桩，它是由圆形截面均匀内切5个圆弧构成^[1]。

与传统圆形桩相比，截面异形桩增加桩侧摩阻力提升桩的竖向承载力，并同时减少混凝土用量，有较高性价比，比如十字形桩、T形桩、Y形桩、X形桩等。陈永辉^[2]、王新泉^[3]等对Y形桩荷载传递机制进行了现场试验研究，理论分析结果表明，相对于同混凝土用量的圆形桩，其竖向承载性能明显提高。刘汉龙等^[4-7]首先对X形桩截面尺寸进行优化，然后通过足尺和现场试验对其荷载传递机制及承载性能进行了研究，结果表明，相对于同体积用量的圆形桩，X形桩竖向承载力优势明显。

模型试验是研究新形桩的一个重要手段，国内外学者利用该手段进行了多方面研究，取得一些规律性的研究成果^[8-12]。本文首先对五星形桩截面尺寸进行优化，提出周长最大化、周长面积比最大化五星形桩。然后在自主研发的多功能全机械式桩基模型试验系统中进行五星形桩与圆形桩对比模型试验研究，对五星形桩承载机制和荷载传递规律进行了分析，研究成果可对五星形桩的工程应用提供一定理论支持。

2 五星形桩截面尺寸优化

2.1 周长最大化五星形桩

周长最大化五星形桩是通过桩截面参数进行优化分析，以确定截面周长最大化时的五星形桩。设桩周长5等分，五星形桩由以下4个参数确定：被切割圆半径 R 、切割圆半径 r 、切割圆弧所对应圆心角 $2x$ 以及每段外包圆弧对应圆心角 θ ，如图1所示。

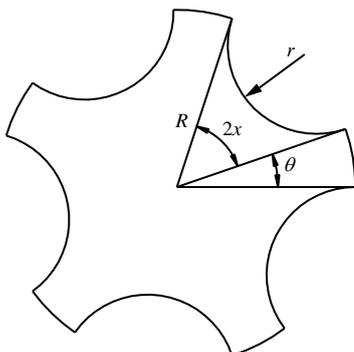


图1 五星形桩截面参数

Fig.1 Section parameters of the five-star-shaped pile

根据图示可以得出五星形桩相关几何关系式。

五星形桩截面周长公式为

$$l(x, R) = 5[R\theta + (\pi - 2x)r] \quad (1)$$

$$5(2x + \theta) = 2\pi \quad (2)$$

$$r = R \tan x \quad (3)$$

将式(2)、(3)代入式(1)计算桩截面周长为

$$l(x, R) = \left[\frac{2\pi}{5} - 2x + (\pi - 2x) \tan x \right] 5R = h(x)5R \quad (4)$$

用MATLAB作出式(4)的三维图形如图2所示。

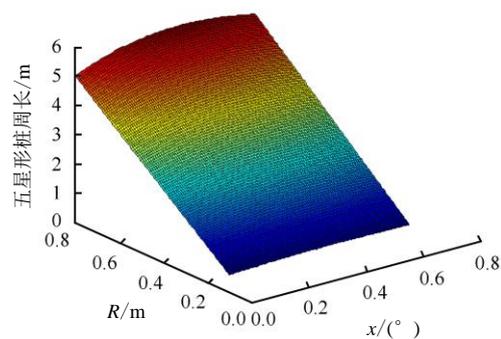


图2 截面周长随 R 和 x 变化图

Fig.2 Perimeters change with factors of R and x

结合图2以及式(4)，可以得出桩截面周长随着 R 单调递增，随着 x 先增后减。本文五星形桩被切割圆半径取常规半径 $R=0.4$ m进行研究。为探索五星形桩截面周长达到最大化时的 x 值，现作出 $h(x)$ 的曲线如图3所示。

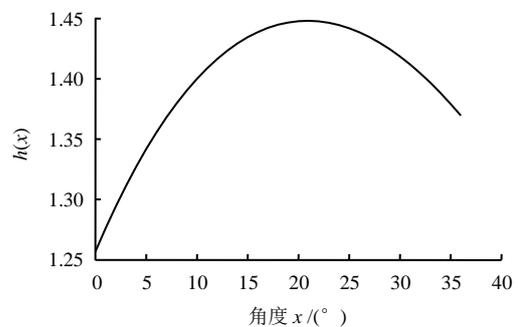


图3 $h(x)$ 随 x 的变化曲线图

Fig.3 The parameter $h(x)$ changing with the factor of x

由图3可知， x 在0.365 rad时取得最大值，因此，得出周长最大化五星形桩 S_1 截面尺寸如图4所示($R=0.4$ m)。

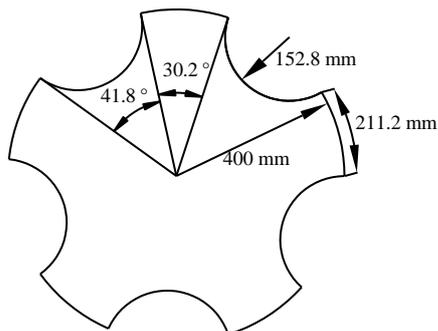


图 4 周长最大化截面尺寸
Fig.4 Section size of the maximum perimeter

2.2 周长面积比最大化五星形桩

异形桩的截面周长面积比是衡量其经济性的重要指标，周长越大，竖向承载力越高，截面面积越小，混凝土用料越省。周长面积比越大，材料利用率越高，也更符合现代异形桩的发展趋势，性价比越高。五星形桩截面面积 $s(x,R)$ 为

$$s(x,R) = \left[\tan x - \left(\frac{\pi}{2} - x \right) \tan^2 x + \left(\frac{\pi}{5} - x \right) \right] 5R^2 = t(x)5R^2 \quad (5)$$

由式 (4)、(5) 得出周长面积比公式为

$$\frac{l}{s}(x,R) = f(x)g(R) = \frac{\frac{\pi}{5} - x + \left(\frac{\pi}{2} - x \right) \tan x}{\tan x - \left(\frac{\pi}{2} - x \right) \tan^2 x + \left(\frac{\pi}{5} - x \right)} \frac{2}{R} \quad (6)$$

作出式 (6) 的曲线如图 5 所示。

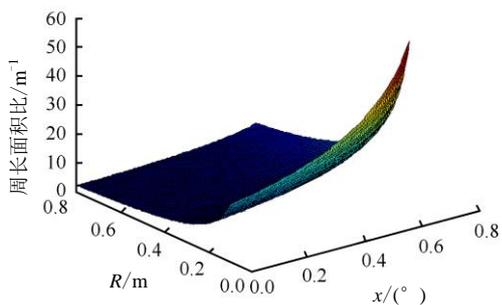


图 5 截面周长面积比随 R 和 x 变化
Fig.5 Ratio of perimeter to area change with factors of R and x

由式 (6) 和图 5 可以看出，周长面积比最大化随 x 增大而增大，随着被切割圆半径 R 的减小而增大。另外，由五星形桩的截面形状可知， x 增大使得五星形桩的外凸星角的弧长不断缩小，直至长度为 0 而形成完全内凹的五角星形状，而这种形状的 5 个外包圆弧段施工时成形困难，而且很容易折断，

桩身整体性不强。因此，从设计施工综合考虑，每个凸星角外包圆弧长应不小于 100 mm，以保证施工的可行性和桩身的整体性。由此可知，当外包圆弧长为 100 mm 时 x 取最大值，此时周长面积比 l/s 最大。周长面积比最大化五星形桩 S_2 截面尺寸如图 6 所示 ($R=400$ mm)。

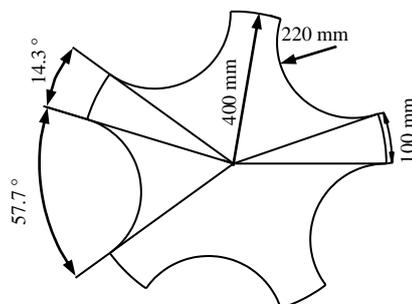


图 6 桩的周长面积比最大化尺寸
Fig.6 Section size of the maximum ratio of perimeter to area

表 1 为两类五星形桩 S_1 、 S_2 截面尺寸属性，由表 1 可以看出，两类五星形桩截面周长相近，但截面面积却相差很大。根据式 (5)、(6) 以及限定条件，随着被切割圆半径的增大，桩长的增加，桩身体积相差会更大， S_1 桩混凝土用量增加明显。但截面周长却增加不大，处于相近的状态， S_1 桩承载力增加不明显。因此，特以性价比较高的 S_2 类型的桩为主要研究对象，对五星形桩承载机制进行对比模型试验研究。

表 1 两类五星形桩截面属性

Table 1 Section properties of two five-star-shaped piles			
桩型	截面周长/m	截面面积/m ²	周长面积比/m ⁻¹
S_1	2.90	0.375	7.71
S_2	2.85	0.281	10.13

3 五星形桩与圆桩对比

3.1 相同截面周长

由式 (5) 可计算得相同截面周长下圆桩与五星形桩的面积比公式为

$$\frac{s_c}{s} = \frac{5}{\pi} \frac{\left[\frac{\pi}{5} - x + \left(\frac{\pi}{2} - x \right) \tan x \right]^2}{\tan x - \left(\frac{\pi}{2} - x \right) \tan^2 x + \frac{\pi}{5} - x} \quad (7)$$

s_c/s 的曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出， s_c/s 是一个大于 1 的数，随着 x 的增大而增大。也就是说在截面周长相同时，随着凹弧所对应的圆心

角角度的增大，圆桩面积与五星形桩的面积比也随之增大，这符合五星形桩截面尺寸规律。相同截面周长下， S_2 的凹弧所对应的圆心角角度较 S_1 更大一些，所对应的截面面积更小。在截面周长最大化时 ($x = 20.9^\circ$)， $s_c / s = 1.77$ ，即在相同周长情况下，圆桩截面面积是五星形桩 S_1 的 1.77 倍，五星形桩 S_1 截面面积是圆桩的 0.56 倍。与五星形桩 S_2 对比时 ($R=400\text{ mm}$ ， $x = 29^\circ$)，此时 $s_c / s = 2.3$ ，即圆桩截面面积是五星型桩的 2.3 倍，五星形桩 S_2 是圆桩截面面积的 0.44 倍。由此可见，在相同周长情况下，五星形桩 S_2 截面面积减少更显著，混凝土用量更少，能很大程度上节省工程造价。

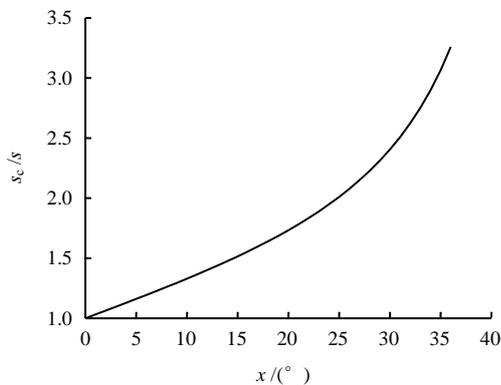


图 7 s_c/s 随 x 的变化曲线
Fig.7 Curve of s_c/s with a factor of x

3.2 相同截面面积

由被切割圆半径为 R 的五星型桩截面面积式 (5)，同截面面积下圆桩周长为

$$l_c(x, R) = 2\sqrt{\pi s} = 2R \sqrt{5\pi \left[\tan x - \left(\frac{\pi}{2} - x\right) \tan^2 x + \frac{\pi}{5} - x \right]} \quad (8)$$

所以周长比为

$$\frac{l}{l_c} = \sqrt{\frac{5}{\pi}} \frac{\frac{\pi}{5} - x + \left(\frac{\pi}{2} - x\right) \tan x}{\sqrt{\tan x - \left(\frac{\pi}{2} - x\right) \tan^2 x + \frac{\pi}{5} - x}} \quad (9)$$

作出 l/l_c 随 x 的变化曲线如图 8 所示。由图可知， l/l_c 是一个大于 1 的数，随着 x 增大而逐渐增大，也就是说，在一定的截面面积下，五星形桩凸角越尖周长越大，这也符合五星形桩截面特性。在截面周长最大化时 ($x = 20.9^\circ$)， $l/l_c = 1.33$ ，即在相同截面面积下，五星形桩 S_1 周长是圆桩周长的 1.33 倍。在截面周长面积比最大化时 ($x = 29^\circ$)， $l/l_c = 1.52$ ，五星形桩 S_2 截面周长增加更加明显。由此可见，与同截面的圆桩对比，五星形桩 S_2 体现出更高的承载

性能。

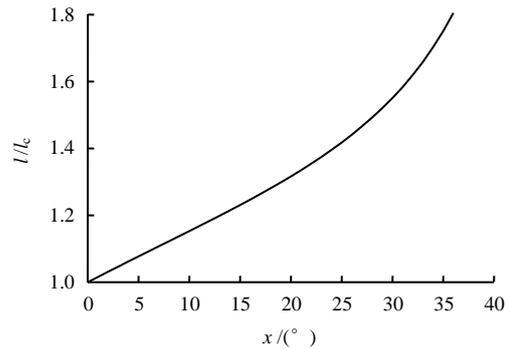


图 8 l/l_c 随 x 的变化曲线
Fig.8 The curve of l/l_c with a factor of x

3.3 对比分析

由图 7、8 可以看出，无论是相同周长下的面积比，还是相同面积下的周长比，都是 x 越大越好。对于五星型桩来讲，由于凸角圆弧长不小于 100 mm 的限制，所以被切割圆半径越大， x 角度越大，性价比越高，但同时应满足工程施工和设计要求。

4 模型试验

4.1 模型槽简介

模型试验在自主研发的多功能全机械式桩基模型试验加载系统内进行，模型槽尺寸为 2 m×2 m×2.5 m，具体描述详见文献[13]。

4.2 模型桩制作

本试验采用与 S_1 、 S_2 截面相似比为 1:8 的模型桩。第 1 根工程桩为截面被切割圆半径 400 mm、桩长为 16 m 的周长最大化五星形桩 S_1 ；所对应模型桩为截面被切割圆半径 50 mm、截面周长最大化、长度 2 m 的五星形桩 F_1 。第 2 根工程桩为截面被切割圆半径 400 mm、桩长为 16 m 的周长面积比最大化的五星形桩 S_2 ；所对应模型桩为被切割圆半径 50 mm、桩长 2 m 的五星形桩 F_2 。第 3 根与第 4 根为圆桩，分别是与桩 F_2 截面周长相等的半径为 56.7 mm 的大圆桩 C_1 ，与桩 F_2 截面面积相等的半径为 37.2 mm 的小圆桩 C_2 。表 2 列出 4 根桩的各项对比参数。

表 2 模型试验桩参数
Table 2 Parameters of model piles

桩型	凹弧 $x/(^\circ)$	桩被切割 圆半径 R/mm	截面周长 /mm	截面面积 /mm ²	与 F_2 周 长比	与 F_2 面 积比
F_1	20.9	50.0	362.0	5 869	1.02	1.33
F_2	29.0	50.0	356.4	4 397	1.00	1.00
C_1		56.7	356.4	10 107	1.00	2.30
C_2		37.2	233.6	4 397	0.66	1.00

4.3 模型试验准备

4.3.1 土样制作

模型试验用土为干砂，其参数如表 3 所示。通过砂土颗粒分试验测得结果如图 9 所示，由图可知，干砂属于级配不良砂。

表 3 模型试验砂基本参数

Table 3 Parameters of sand in model tests

密度 ρ /(g/cm ³)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)	压缩模量 E_s /MPa
1.65	0	42	15.31

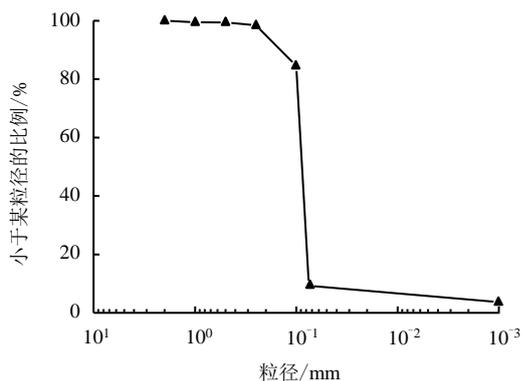


图 9 砂土颗粒分试验结果曲线
Fig.9 Results of dry sand gravel

4.3.2 测试仪器布置及预制成桩

本次试验模型桩均为预制桩，所用混凝土为细石混凝土，其强度等级为 C25，主筋为 3 ϕ 6 mm、主筋间距为 20 mm，呈三角形排列。箍筋为 ϕ 2 mm @200 mm、由钢丝作为箍筋。在两个五星形桩桩身 0.25、0.6、1.0、1.4、1.75 m 处布置 5 个钢筋计绑扎在钢筋笼上，在桩顶布置位移计，桩端处埋设土压力盒，浇筑好的模型桩及检测仪器布置如图 10 所示。

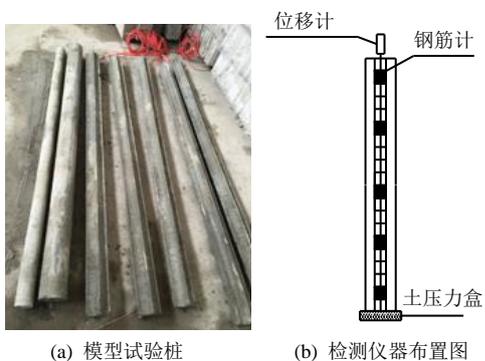


图 10 模型试验桩及检测仪器布置图

Fig.10 Image of model piles and layout of instruments

4.3.3 模型桩成桩步骤

(1) 平面布置

4 根桩平面布置如图 11 所示，为减少桩与桩、

桩与槽壁的相互影响，桩间距设置为 8 倍桩径左右，桩到槽壁的距离也在 6 倍桩径左右。

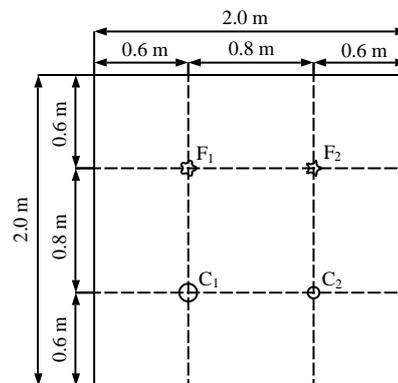


图 11 模型桩平面布置图

Fig.11 Layout plan of model piles in the model tank

(2) 成桩过程

采用砂雨法^[14-15]制作土样，砂雨法落距为 0.5 m，如图 12 所示。人工在模型槽内撒砂，漏斗口径为 1 m，高为 0.5 m，下连 2 m 长口径为 15 cm 的软管，软管与漏斗之间为阀门相连，阀门控制撒砂速度，漏斗下出口处连接出管滤网，网眼尺寸为 2 mm，滤网与模型槽内平铺砂土落距为 0.5 m，滤网上栓 0.5 m 长线吊坠，在撒砂过程中对落距进行实时控制。逐层埋设桩体，直至全部桩身埋设在砂土内。

通过室内击实试验测得砂土的最大孔隙比为 0.855，天然孔隙比为 0.653，砂雨法后的最小孔隙比为 0.522，从而得到密实度为 60.8%。可见，与一般填砂相比，砂雨法可以使砂土密实度更高，均匀性进一步得到保证，使模型试验结果更可靠。



图 12 砂雨法施工

Fig.12 Image of sand pour construction

4.3.4 加载方式

加载方式采用现行规范中静载荷试验逐级加载方法^[16-17]，测量每级荷载下桩顶位移、桩身轴力、

桩端阻力。模型试验荷载一般较小，所以根据试验需要对现有的全自动加载系统进行了改进，可实现每级荷载容差在 ± 0.1 kN的稳定标准，自动采集荷载和位移。该加载系统可实现无线遥测遥控，实验室可进行试验，受外界干扰少。另外还具有开创性的一带三功能，能同时进行3根桩试验或者对1根桩同时进行3个方向的加载，实现多功能加载。

4.4 试验结果对比分析

4.4.1 极限承载力

图13为4根单桩竖向荷载-沉降对比曲线，根据现行规范^[16-17]及相关计算方法，可得4根单桩的极限承载力如表4所示。

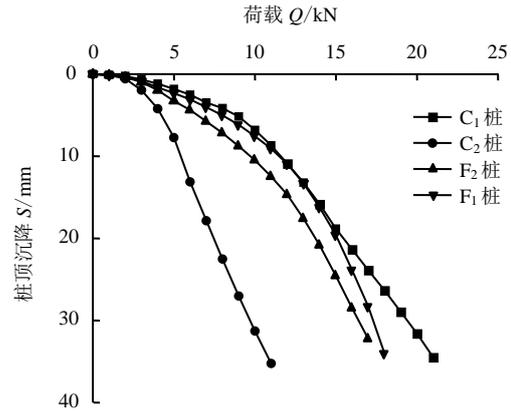


图13 4根单桩极限承载力

Fig.13 The ultimate bearing capacities of four model piles

表4 模型桩承载性能对比

Table 4 Bearing performance comparison of model piles

桩型	极限承载力 /kN	极限承载力比				桩身混凝土用量 /mm ³	桩身混凝土比				单位体积混凝土极限承载力 /(kN/m ³)	单位承载力比			
		与 F ₂	与 F ₁	与 C ₁	与 C ₂		与 F ₂	与 F ₁	与 C ₁	与 C ₂		与 F ₂	与 F ₁	与 C ₁	与 C ₂
F ₁	12.5	1.04	1.00	1.00	2.50	5 869	1.34	1.00	0.58	1.34	2 130	0.78	1.00	1.72	1.87
F ₂	12.0	1.00	0.96	0.96	2.40	4 397	1.00	0.75	0.44	1.00	2 729	1.00	1.28	2.21	2.40
C ₁	12.5	1.04	1.00	1.00	2.50	10 107	2.30	1.72	1.00	2.30	1 237	0.45	0.58	1.00	1.09
C ₂	5.0	0.42	0.40	0.40	1.00	4 397	1.00	0.75	0.44	1.00	1 137	0.42	0.53	0.92	1.00

由图13及表4可以看出，4根单桩极限承载力 F₂ 与 F₁、C₁ 相近，大于小圆桩 C₂，且呈现以下规律：

(1) 相同被切割圆半径下 F₂ 与 F₁ 极限承载力相近，其截面周长大致相同，但 F₁ 混凝土用量是 F₂ 混凝土用量的 1.34 倍，两者相比较，F₂ 较 F₁ 性价比高。

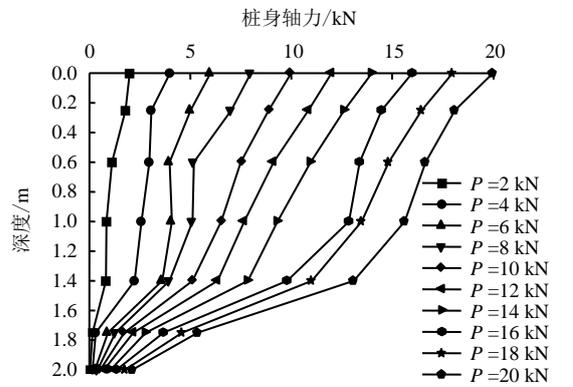
(2) 相同截面面积下，F₂ 周长是 C₂ 周长的 1.53 倍，极限承载力是 C₂ 极限承载力的 2.40 倍，说明随着桩侧表面积的增加，五星形桩极限承载力增加效果明显。另外，极限承载力的倍数是周长的倍数的 1.57 倍，可见截面异性扩大效应明显。

(3) 相同截面周长下，F₂ 截面面积是大圆桩 C₁ 的 0.44 倍，F₂ 极限承载力是 C₁ 的 0.96 倍，F₂ 单位混凝土承载力是 C₁ 的 2.21 倍，说明在相同混凝土用量下五星形桩 F₂ 竖向承载性能明显优于圆桩。在后期竖向荷载下，C₁ 桩沉降变形较五星形桩 F₁ 和 F₂ 平缓，抗变形能力增强，这与 C₁ 桩端面积大、桩端阻力大有关。

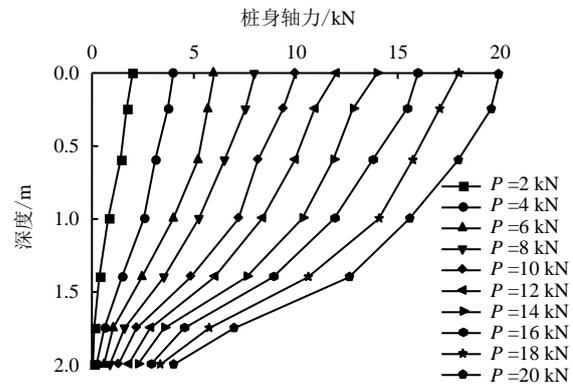
4.4.2 桩身轴力

桩身轴力是通过在桩身不同位置布置钢筋（如图11所示）计确定桩身不同位置处的桩身轴力，同时结合桩底土压力盒，来计算沿桩身侧摩阻力的分布情况。在不同荷载下 F₁ 和 F₂ 桩身轴力分布曲线

如图14所示。



(a) 五星形桩 F₂



(b) 五星形桩 F₁

图14 五星形桩 F₂ 和 F₁ 桩身轴力分布

Fig.14 Axial force distributions of piles F₂ and F₁

从图可以看出，桩身轴力总体上表现出上大下小的趋势，符合一般规律。但同时又可以看见， F_1 和 F_2 桩端轴力变化不大，可见桩顶荷载主要由桩侧摩阻力承担。

4.4.3 桩侧摩阻力

根据桩身轴力计算桩身各段平均侧摩阻力，如图 15 所示。

由图可以看出， F_2 和 F_1 桩平均侧摩阻力分布大致相同，总体上是先增加后减小，到 1.6 m 处达到最大，然后又变小。从图中又可以看见，首先浅部土体的桩侧摩阻力逐渐发挥，随着桩顶荷载的增加，荷载往深部土体传递，深部土体的侧摩阻力增大明显，在靠桩端处达到最大，表现出侧摩阻力逐渐发挥、荷载逐渐往下传递的过程。

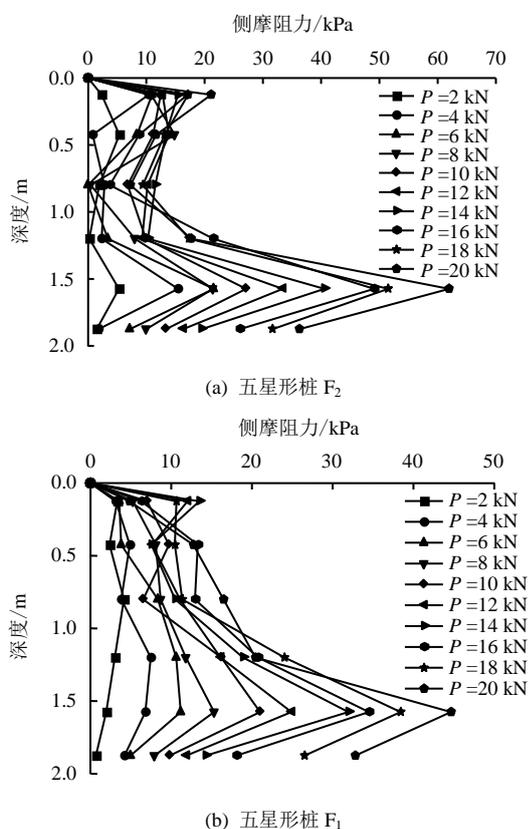


图 15 五星形桩 F_2 和 F_1 桩侧摩阻力分布图
Fig.15 Side resistance curves of piles F_2 and F_1

4.4.4 总侧摩阻力、端阻力分担比

根据计算结果作出总端阻力与侧总摩阻随荷载增加各自的分担比，如图 16 所示。

由图可以看出，两根五星形桩 F_1 与 F_2 表现出摩擦桩特性，其端阻力在整个加载中所占的比例在 20% 以下，在达到破坏状态时侧摩阻仍占据 80% 左右的承载比例。其中 F_2 端阻力所占的比例比 F_1 所占比例更低，在 10% 以下，由此可见，五星形桩主

要由侧摩阻力来承担荷载，表现出更强的异性扩大效应。

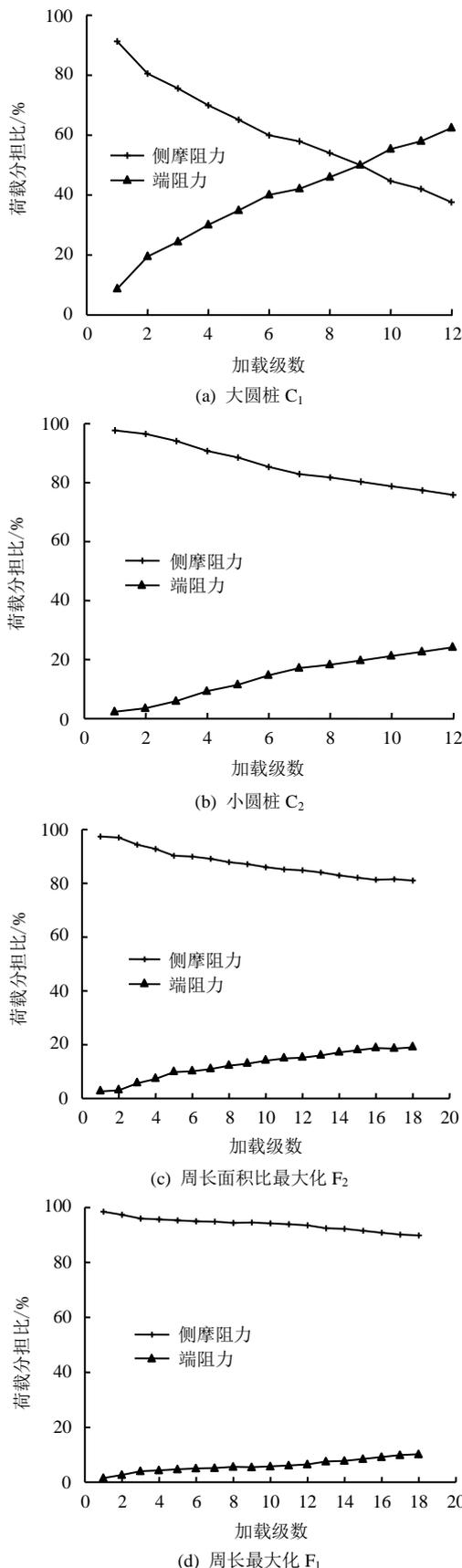


图 16 各类桩型荷载分担比
Fig.16 Load sharing ratio of different types of piles

同时还可以看出，圆桩 C₁ 由于尺寸相对较大，桩底截面面积大，在不断增大的荷载下，端阻力承担了更大的竖向荷载，表现出端承桩的特性。小圆桩 C₂ 由于直径小，长细比大，其极限承载力低，在桩顶受荷载增大的情况下，端阻力不能提供更大的竖向荷载，其侧摩阻力占据较大的荷载分担比例。因此，在研究五星形桩时，重点是研究侧摩阻力的分布规律以及荷载传递机制。

4.4.5 总侧摩阻力、端阻力随桩顶沉降变化

在不同荷载作用下，4 根桩的总侧摩阻力随沉降分布如图 17 所示，总端阻力随沉降分布如图 18 所示。

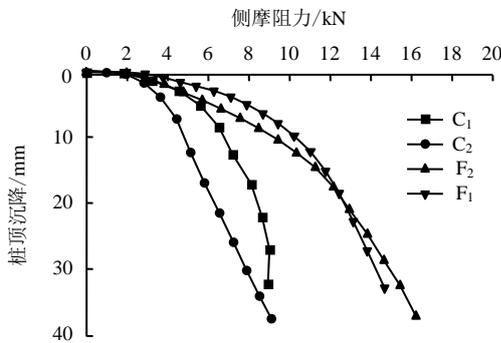


图 17 单桩侧摩阻-桩头沉降曲线
Fig.17 Side resistance curves of model piles with settlement

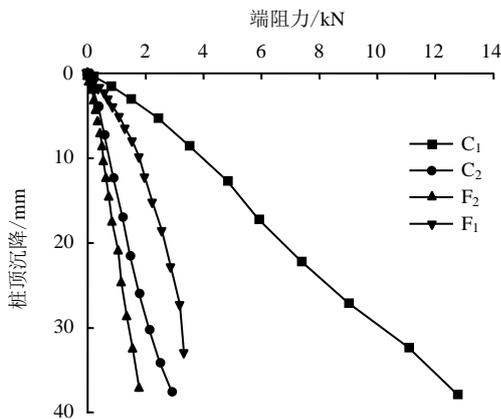


图 18 单桩端阻力-桩头沉降曲线
Fig.18 Tip resistance curves of model piles with settlement

由图 17 可以看出，4 根单桩在桩顶荷载作用下侧摩阻力与沉降表现出不同的对应关系，相同沉降下不同桩型所提供的侧摩阻力不同。其中五星形桩 F₁ 与 F₂ 相近，在前期加载中沉降缓慢，在 12 kN 后不断加快，这符合一般摩擦桩受荷下的桩土相对位移现象。大圆桩 C₁ 侧摩阻随沉降变化比较迅速，这与 C₁ 桩截面尺寸有很大关系，在模型试验里，C₁ 的横截面面积最大，在不同的沉降下侧摩阻承担比

例减小，端承力迅速增大；C₂ 桩为截面面积很小的圆桩，其端阻力难以提供较大的竖向承载力，故在桩头沉降增加的同时，侧摩阻力表现出与其等比例增加的趋势。取极限承载力对应的侧摩阻为极限侧摩阻，如表 5 所示，由表可以看出，五星形桩极限荷载主要由桩侧摩阻力提供。

由图 18 可以看出，4 根单桩端阻力均随桩头沉降线性增加。4 根单桩中，大圆桩 C₁ 在桩头沉降增加下，端阻力表现出较大的承载能力，小圆桩 C₂、五星形桩 F₁、F₂ 均表现出较小的承载能力。这与 4 根单桩截面面积的大小有很大关系，C₁ 桩端截面面积是另外 3 根单桩截面面积的 2~2.5 倍，因而提供了更大的端阻力。

表 5 极限总侧摩阻力-端阻力分担比

Table 5 Load sharing ratio of model piles

桩型	极限承载力/kN	极限侧摩阻/kN	极限端阻力/kN	极限侧摩阻分担比/%	极限端阻力分担比/%
F ₁	12.5	10.5	2.0	84.3	15.7
F ₂	12.0	11.2	0.8	93.1	6.9
C ₁	12.5	7.2	5.3	57.9	42.1
C ₂	5.0	4.4	0.6	88.0	12.0

由表 5 可以看出，4 根单桩中五星形桩 F₁ 与 F₂ 以及小圆桩 C₂ 的极限侧摩阻力均比端阻力大，极限端阻力占据的比例较小，表现出摩擦桩特性。然而，大圆桩 C₁ 由于桩端面积大，桩端阻力发挥效果明显，极限端阻力所占比例较大。由此可见，五星形桩主要由侧摩阻承担荷载，桩端阻力比例较小，异性截面扩大效应明显。实际工程设计中，在满足施工便利的条件下应尽可能提高桩侧表面积及其粗糙度。

5 结论

(1) 五星形桩是由圆形截面均匀内切 5 个圆弧所形成，根据周长最大化和周长面积比最大化进行了理论分析，推导出周长最大化五星形桩 S₁ 和周长面积比最大化五星形桩 S₂ (R=400 mm)。

(2) 进行了 1:8 相似比的 4 根单桩模型试验：周长最大化五星形桩 F₁，周长面积比最大化五星形桩 F₂，与 F₂ 同截面周长的圆桩 C₁，与 F₂ 同截面面积的圆桩 C₂。通过竖向载荷试验，相同被切割圆半径下 F₂ 与 F₁ 极限承载力相近，其截面周长大致相同，但 F₁ 混凝土用量是 F₂ 混凝土用量的 1.34 倍，两者相比较，F₂ 较 F₁ 性价比高。

(3) 相同截面面积下，F₂ 的周长是 C₂ 的 1.53 倍，极限承载力是 C₂ 极限承载力的 2.40 倍，五星

形桩极限承载力增加效果明显。另外, 极限承载力的倍数是周长的倍数的 1.57 倍, 截面异性扩大效应明显。

(4) 相同截面周长下, F_2 截面面积是大圆桩 C_1 的 0.44 倍, F_2 极限承载力是 C_1 的 0.96 倍, F_2 单位混凝土承载力是 C_1 的 2.21 倍, 说明在相同混凝土用量下五星形桩 F_2 竖向承载性能明显优于圆桩。

(5) 五星形桩主要由桩侧摩阻力来承担荷载, 尤其是五星形桩 F_2 , 侧摩阻所占比例在 90% 以上, 表现出较强的摩擦桩特性。大圆桩 C_1 由于截面面积大, 桩端阻力承担比例较高。

参 考 文 献

- [1] 任连伟, 潘文彦, 王光勇, 等. 一种五星形现浇混凝土桩: 中国, ZL 2011204077235[P]. 2012-07-04.
REN Lian-wei, PAN Wen-yan, WANG Guang-yong, et al. One situ-cast concrete pile of five-star-shaped section: China, ZL 2011204077235[P]. 2012-07-04.
- [2] 陈永辉, 王新泉. 公路软土地基处理中 Y 型沉管灌注桩异形特性研究[J]. 中国公路学报, 2008, 21(5): 19—25.
CHEN Yong-hui, WANG Xin-quan. Research on abnormality characteristic of Y-shaped tube-sinking cast-in-situ pile in highway soft ground[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2008, 21(5): 19—25.
- [3] 王新泉, 陈永辉, 刘汉龙. Y 型沉管灌注桩荷载传递机制的现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 615—623.
WANG Xin-quan, CHEN Yong-hui, LIU Han-long. In-situ study on load transfer mechanism of Y-shaped vibro-pile[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(3): 615—623.
- [4] 刘汉龙, 刘芝平, 王新泉. 现浇 X 型混凝土桩截面几何特性研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 17—23.
LIU Han-long, LIU Zhi-ping, WANG Xin-quan. Study on the geometric characteristics of the cast-in-place X-type vibro-pile section[J]. **China Academy of Railway Science**, 2009, 30(1): 17—23.
- [5] LIU Han-long, ZHOU Hang, KONG Gang-qiang. XCC pile installation effect in soft soil ground: A simplified analytical model[J]. **Computers and Geotechnics**, 2014, 62: 268—282.
- [6] 张敏霞, 刘汉龙, 丁选明, 等. 现浇 X 形混凝土桩竖向承载性状模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 389—394.
ZHANG Min-xia, LIU Han-long, DING Xuan-ming, et al. Model test of vertical bearing capacity of cast-in-situ X-shaped concrete piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(2): 389—394.
- [7] 丁选明, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 现浇 X 形桩桩-土荷载传递规律现场试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 489—493.
DING Xuan-ming, KONG Gang-qiang, LIU Han-long, et al. Field test study of pile-soil load transfer characteristics of X-shaped cast-in-place pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(2): 489—493.
- [8] GOIT C S, SAITOH M. Model tests on horizontal impedance functions of fixed-head inclined pile groups under soil nonlinearity[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2014, 140(6): 1—12.
- [9] XING Hao-feng, ZHANG Zhen, LIU Hua-bei, et al. Large-scale tests of pile-supported earth platform with and without geogrid[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2014, 42(6): 586—598.
- [10] REDDY K M, AYOTHIRAMAN R. Experimental studies on behavior of single pile under combined uplift and lateral loading[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2015, 141(7): 1—10.
- [11] 王新泉, 陈永辉, 安永福, 等. 塑料套管现浇混凝土桩倾斜对承载性能影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 834—842.
WANG Xin-quan, CHEN Yong-hui, AN Yong-fu, et al. Model test study of effect of inclination on bearing behaviors of plastic tube cast-in-place concrete pile[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(4): 834—842.
- [12] 曹兆虎, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 基于透明土的管桩贯入特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1564—1568.
CAO Zhao-hu, KONG Gang-qiang, LIU Han-long, et al. Model tests on pipe pile penetration by using transparent soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(8): 1564—1568.
- [13] 任连伟, 杨权威, 詹俊峰, 等. 基于多功能加载系统的全机械式桩基模型试验装置研发[J]. 河海大学学报(自

- 然科学版), 2016, 44(6): 519—524.
- REN Lian-wei, YANG Quan-wei, ZHAN Jun-feng, et al. Development of fully mechanical model test equipment for pile foundation based on multifunctional loading system[J]. **Journal of Hohai University (Natural Sciences)**, 2016, 44(6): 519—524.
- [14] 李浩, 罗强, 张正, 等. 砂雨法制备砂土地基模型控制要素试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1872—1878.
- LI Hao, LUO Qiang, ZHANG Zheng, et al. Experimental study on control element of sand pourer preparation of sand foundation model[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(10): 1872—1878.
- [15] 马险峰, 孔令刚, 方薇, 等. 砂雨法试样制备平行试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1791—1801.
- MA Xian-feng, KONG Ling-gang, FANG Wei, et al. Parallel tests on preparation of samples with sand pourer[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(10): 1791—1801.
- [16] 中华人民共和国建设部. JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- The People's Republic of China Ministry of Construction. JGJ 94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50007—2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
-
- 上接第 2854 页
- [20] 刘光启. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社工业装备与信息工程出版中心, 2002.
- LIU Guang-qi. Data sheets on the physical property of chemistry and chemical engineering[M]. Beijing: Industrial Equipment and Information Engineering Publishing Center, Chemical Industry Press, 2002.
- [21] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 基于应力-应变曲线的岩石脆性特征定量评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1114—1122.
- ZHOU Hui, MENG Fan-zhen, ZHANG Chuan-qing, et al. Quantitative evaluation of rock brittleness based on stress-strain curve[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(6): 1114—1122.
- [22] 中华人民共和国水利部. GB50218—94 工程岩体质量分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB50218—94 Engineering rock mass grading standards[S]. Beijing: China Planning Press, 1995.
- [23] 华彤文. 普通化学原理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- HUA Tong-wen. General chemical principle[M]. Beijing: Peking University Press, 2005.