

DOI: 10.11779/CJGE2017S2022

# 软土地基平板载荷试验稳定标准的研究

秦振华

(上海申元岩土工程有限公司(上海地下空间与工程设计研究院), 上海 200011)

**摘要:** 从工程实践的角度, 对软土地基平板载荷试验的稳定标准问题进行了研究, 对比分析了不同尺寸荷载板慢速法、准慢速法、快速法载荷试验对承载力特征值和极限值判定的差异, 分析了《工程地质手册》中外推法公式对软土地基载荷试验的适用性, 改进了《工程地质手册》中外推法公式, 提出用外推法及拟合法来综合描述慢速法与快速法的相互关系。

**关键词:** 软土地基; 载荷试验; 承载力判定; 稳定标准; 外推法公式

**中图分类号:** TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2017)S2-0087-04

**作者简介:** 秦振华(1983-), 男, 主要从事岩土工程设计、检测、咨询工作。E-mail: zhenhua-qin@foxmail.com。

## Stability standards of plate load tests on soft foundation

QIN Zhen-hua

(Shanghai Shen Yuan Geotechnical Co., Ltd. (Shanghai Underground Space Engineering Design & Research Institute), Shanghai 200011, China)

**Abstract:** The stability standards for plate load tests on soft foundation are studied based on the engineering practice. The differences of determining the characteristic values of bearing capacity and the ultimate values of bearing capacity among the slow method, the quasi-slow method and the quick method under different loading plates are analyzed. Through the analysis, the applicability of the extrapolation formula to the plate load tests on soft foundation is investigated. The extrapolation formula is improved. The extrapolation formula and the fitting method are proposed to describe the interrelation between the slow method and the quick method.

**Key words:** soft foundation; plate load test; determination of bearing capacity; stability standard; extrapolation formula

## 0 引言

平板载荷试验方法需要探讨一系列问题, 包括平板尺寸<sup>[1-2]</sup>的选择、测读稳定标准<sup>[3]</sup>的确定、试验前的预压要求<sup>[4]</sup>及荷载的大小等问题。其中, 测读稳定标准问题关系到地基承载力特征值和极限值的判定以及沉降值的可靠性, 并直接影响试验的成本, 是诸多课题中较为重要的一个。

目前国内平板载荷试验均采用沉降相对稳定法(“慢速法”), 主流规范亦以慢速法为主。国外常用快速维持荷载法<sup>[6]</sup>(“快速法”), 最少持载时间为 1 h, 稳定标准较为宽松。从理论上讲快速法单级沉降和总沉降均小于慢速法。虽然快速法存在误差, 但并不是完全不可用。为了研究出适应本地区的快速静载荷试验方法, 开展了软土地基快速法及慢速法载荷试验的对比试验研究, 以期获得一些规律。

## 1 试验方案

本次试验对 0.5, 1, 2 m<sup>2</sup> 荷载板分别进行慢速法、

快速法以及准慢速法试验, 试验共计 3 组, 每组 3 个试验。荷载板均采用方形板, 板面积分别为 0.5, 1, 2 m<sup>2</sup>。测试区域表层土以素(杂)填土为主, 下卧淤泥质软土。测读方法如下:

(1) 慢速法: 荷载施加后按第 5, 15, 30, 45, 60 min 测读沉降量, 以后每半小时测读一次。稳定标准为: 沉降量小于 0.1 mm/小时并连续出现两次。

(2) 准慢速法: 在特征值对应的荷载之前, 荷载施加后按第 5, 15, 30, 45, 60 分钟测读沉降量, 以后每半小时测读一次, 稳定标准为: 沉降量小于 0.1 mm/小时。在特征值对应的荷载之后, 稳定标准为: 位移变形量小于 0.25 mm/h。

(3) 快速法: 每级荷载施加后维持 60 min, 按第 5, 15, 30, 45, 60 分钟测读沉降量, 然后施加下一级荷载, 不进行判稳。

基金项目: 现代建筑设计集团科研项目(15-1 类-0016-基; 15-1 类-0024-基)

收稿日期: 2017-08-02

## 2 试验结果分析

沉降量达到板宽的10%时, 试验终止。根据《建筑地基基础检测规范》(JGJ 340—2015) 4.4.3 条第4款, 取沉降量达到0.012倍板宽时对应的荷载值为地基承载力特征值; 根据上海市《地基基础设计规范》(DGJ08—11—2010) 16.2.3 条第3款, 取沉降量达到0.07倍板宽时对应的荷载值为地基承载力极限值。各组试验沉降曲线见图1~3, 各组试验特征值和极限值的判定见表1。

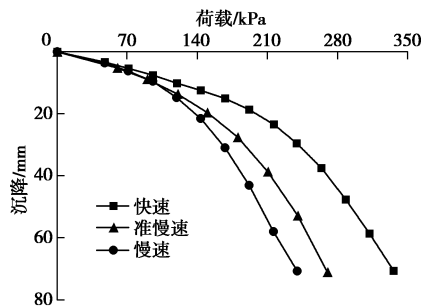


图1 0.5 m<sup>2</sup> 载荷板试验沉降曲线对比

Fig. 1 Comparison of settlement curves of plate load tests (0.5 m<sup>2</sup>)

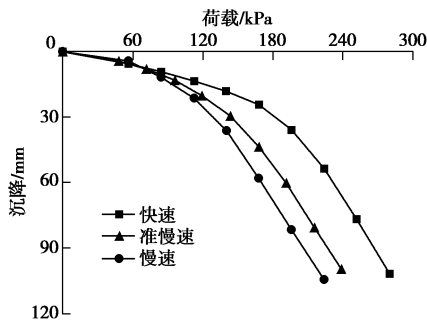


图2 1.0 m<sup>2</sup> 载荷板试验沉降曲线对比

Fig. 2 Comparison of settlement curves of plate load tests (1.0 m<sup>2</sup>)

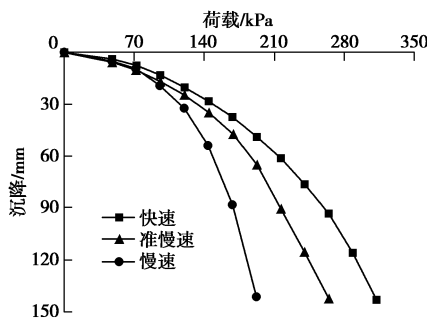


图3 2.0 m<sup>2</sup> 载荷板试验沉降曲线对比

Fig. 3 Comparison of settlement curves of plate load tests (2.0 m<sup>2</sup>)

根据试验数据对比可以看出, 在承载力特征值的判定上, 准慢速法与慢速法差别很小, 快速法与慢速法差别略大。这说明, 如果只需判定承载力特征值, 可采用准慢速法。

对于承载力的极限值, 准慢速法与慢速法的相差11.54%~29.48%, 快速法与慢速法相差34%~56.07%。这说明如需判定承载力极限值, 准慢速法及快速法与慢速法差异均显得过大, 需对结果进行修正。

表1 各组载荷试验特征值及极限值的对比分析

板面积 /m <sup>2</sup>	试验类型	特征值 /kPa	与慢速法差异百分比	极限值 /kPa	与慢速法差异百分比
0.5	慢速法	87	—	205	—
	准慢速法	88	1.15%	233	13.66%
	快速法	107	22.99%	292	42.44%
1.0	慢速法	85	—	182	—
	准慢速法	92	8.24%	203	11.54%
	快速法	103	21.18%	244	34.07%
2.0	慢速法	91	—	173	—
	准慢速法	97	6.59%	224	29.48%
	快速法	108	18.68%	270	56.07%

## 3 快速法与慢速法的换算研究

《工程地质手册》(第四版)中式3-5-6~3-5-10, 给出了根据快速法数据按外推法推算各级荷载下, 沉降达到稳定时所需时间和沉降量, 然后以推算的沉降量绘制  $p-s$  曲线。

为验证上述公式对上海地区软土地基平板载荷试验的适用性, 对金虹桥、虹梅苑、浦东园3个项目共计9个平板载荷试验点数据进行汇总分析。9个试验的载荷板面积均为0.5 m<sup>2</sup>, 每级荷载为40 kPa, 采用慢速维持荷载法。以每级荷载前1小时内的第5, 15, 30, 45, 60 min的沉降测量为样本点, 用上述公式计算出每个试验点的最终沉降量, 并将计算所得沉降量与实测值比较, 数据见表2~4, 曲线对比见图4~6。

表2 金虹桥载荷试验实测值与计算值对比

编号	荷载/kPa	计算值 /mm	实测值 /mm	差异百分比/mm
B2	80	4.28	4.3	0.52%
	120	6.8	7.16	4.98%
	160	13.16	14.25	7.64%
	200	23.48	28.09	16.41%
	240	39.93	45.05	11.36%
	280	63.72	70.73	9.92%
B12	80	6.47	6.51	0.61%
	120	14.91	14.31	4.21%
	160	24.49	25.56	4.20%
	200	39.83	46.61	14.55%
B14	80	5.04	5.08	0.69%
	120	8.22	8.35	1.60%
	160	12.1	13.42	9.82%
	200	19.06	22.13	13.87%
	240	30.57	34.78	12.11%
	280	54.9	46.8	17.31%

表 3 虹梅苑载荷试验实测值与计算值对比

Table 3 Comparison between measured and calculated values based on Hongmeiyuan plate load tests

编号	荷载 /kPa	计算值 /mm	实测值 /mm	差异百分比 /mm
B2	80	4.5	4.38	2.71%
	120	7.47	7.29	2.53%
	160	11.27	11.19	0.73%
	200	16.34	16.75	2.43%
	240	22.34	24.62	9.25%
	280	32.36	36.19	10.59%
	320	52.62	61.06	13.82%
B4	80	1.82	1.8	1.12%
	120	3.86	3.8	1.47%
	160	6.12	6.28	2.52%
	200	9.87	9.95	0.79%
	240	14.41	15.84	9.00%
	280	21.57	22.15	2.61%
	320	46.12	49.79	7.36%
B5	80	46.12	49.79	7.36%
	120	1.89	1.87	0.87%
	160	4.34	4.34	0.81%
	200	8.09	8.08	1.66%
	280	12.35	12.6	10.46%
	280	56.07	60.82	7.81%

表 4 浦东园载荷试验实测值与计算值对比

Table 4 Comparison between measured and calculated values based on Pudongyuan plate load tests

编号	荷载 /kPa	计算值 /mm	实测值 /mm	差异百分比 /mm
B1	80	4.82	4.78	0.82%
	120	7.8	7.8	0.04%
	160	11.84	12.13	2.38%
	200	18.77	19.43	3.38%
	240	24.62	26.98	8.75%
	280	32.61	35.35	7.76%
	320	48.12	53.33	9.76%
B3	80	4.97	4.92	1.02%
	120	8.37	8.35	0.24%
	160	13.45	13.63	1.33%
	200	20.81	22.64	8.08%
	240	29.98	33.3	9.97%
B6	80	5.6	5.61	0.21%
	120	10.12	9.95	1.70%
	160	15.52	15.94	2.62%
	200	23.34	25.82	9.59%
	240	41.67	50.58	17.61%

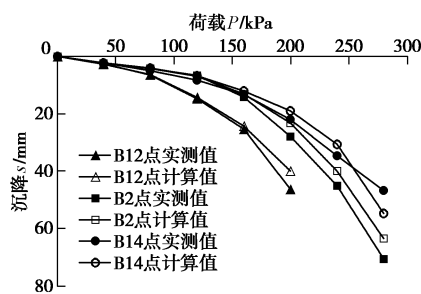


图 4 金虹桥载荷试验实测与计算曲线对比

Fig. 4 Comparison between measured and calculated curves based on Jinhongqiao plate load tests

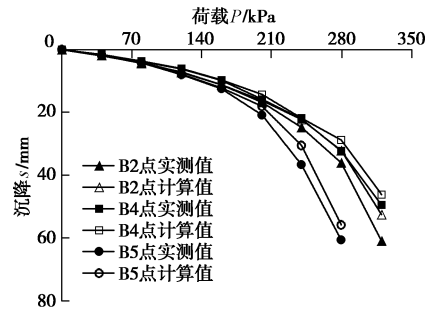


图 5 虹梅苑载荷试验实测与计算曲线对比

Fig. 5 Comparison between measured and calculated curves based on Hongmeiyuan plate load tests

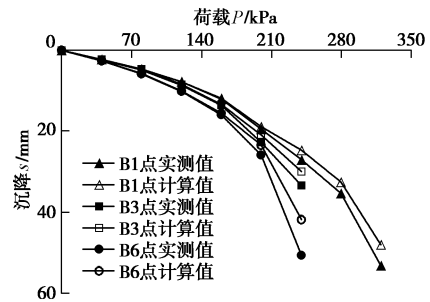


图 6 浦东园载荷试验实测与计算曲线对比

Fig. 6 Comparison between measured and calculated curves based on Pudongyuan plate load tests

通过以上的数据统计和对比分析发现, 荷载达到特征值以前, 用外推法公式计算值与实测值差异较小, 误差控制在 5%以内。荷载超过特征值以后, 计算值与实测值差异较大, 达 17.6%。这是因为, 特征值以前, 地基处于线弹性阶段,  $s - \ln t$  曲线的斜率没有太大变化, 由外推法公式计算的斜率与实际曲线斜率基本吻合。特征值以后,  $s - \ln t$  曲线的斜率有逐渐增大的趋势, 而由外推法公式计算的斜率是不变的, 这就导致了沉降差异逐渐增大。由于地基承载力特征值是由比例界限判定的, 因此通过外推法公式将快速法数据转换为慢速法数据, 并将转换后的数据用于地基承载力特征值的判定是可行的。

外推法公式中的斜率计算公式无法考虑  $s - \ln t$  曲线的斜率逐渐增大的趋势, 尤其是无法较准确计算最终沉降量。鉴于沉降差与荷载级数呈非线性关系, 采用式 (1) (拟合法) 来描述慢速法与快速法的相互关系。

$$s_n = s_{nk} + C \cdot n^2 + D \cdot n + E \quad (1)$$

式中:  $s_n$  为慢速法对应的沉降量 (mm);  $s_{nk}$  为快速法对应的沉降量 (mm);  $n$  为荷载级数  $C, D, E$  均为系数。

对荷载试验的最后两级加载采用非线性回归分析法, 得出  $C=-0.055, D=1.107, E=3.024$ 。两个变量的相关系数为  $r=0.988$ , 相关性较好。由拟合法计算的最

后两级荷载下的沉降量与实测沉降量的对比见表5, 6。

表5 拟合法计算值与实测值对比

Table 5 Comparison between measured and calculated values based on fitting method

试验点号	加载级数	$S_{nk}$	$S_{n\text{外推法}}$	$S_{n\text{拟合法}}$	沉降实测值	$S_{n\text{拟合法}}$ 与实测值差异/%
金虹桥	6	39.20	39.93	46.88	45.05	4.06
b2	7	61.72	63.72	69.79	70.73	1.33
金虹桥	6	28.49	30.57	36.17	34.78	3.99
b14	7	52.83	54.90	60.9	62.63	2.77
虹梅	7	30.11	32.36	38.18	36.19	5.49
新苑b	8	46.92	52.62	55.26	61.06	9.49

表6 拟合法计算值与实测值对比

Table 6 Comparison between measured and calculated values based on fitting method

试验点号	加载级数	$S_{nk}$	$S_{n\text{外推法}}$	$S_{n\text{拟合法}}$	沉降实测值	$S_{n\text{拟合法}}$ 与实测值差异/%
金虹桥	7	27.10	32.51	35.17	32.51	8.17
b4	8	43.95	49.79	52.29	49.79	5.03
金虹桥	6	28.16	30.62	35.84	36.75	2.48
b5	7	54.10	56.07	62.17	60.82	2.21
虹梅新	7	31.15	32.61	39.22	35.35	10.90
苑b2	8	44.34	48.12	52.68	53.33	1.21

对于特征值荷载以后, 至最后两级荷载之前的荷载作用下的沉降量计算, 可以将外推法计算所得的斜率 $\beta_n$ 乘以一个大于1的系数 $\varphi$ , 取值范围为1.1~1.5。

基于以上的分析, 结合上海市平板载荷试验的规定, 以分十级加载为例, 建议由式(2)来计算慢速法的沉降量。

$$s_n = \begin{cases} \alpha_n + \varphi\beta_n \ln(t_n) & (1 \leq n \leq 8, \varphi = 1.0 \sim 1.5) \\ s_{nk} - 0.06n^2 + 1.1n + 3n \geq 9 \end{cases}, \quad (2)$$

其中,  $n \leq 5$ 时,  $\varphi$ 取1.0,  $5 \leq n \leq 8$ 时,  $\varphi$ 取1.1~1.5。

## 5 结 论

(1) 在承载力特征值的判定上, 准慢速法与慢

速法差别很小, 快速法与慢速法差别略大。如只需判定承载力特征值, 那么采用准慢速法这种采集数据的方法也是可以的。

(2) 对于承载力的极限值, 准慢速法及快速法与慢速法差异均显得较大, 需对结果进行修正。

(3) 通过外推法公式将快速法数据转换为慢速法数据, 并将转换后的数据用于地基承载力特征值的判定是可行的, 而判断极限承载力时, 其误差较大。

(4) 鉴于特征值以后的沉降差与荷载级数呈非线性关系, 采用外推法及拟合法来综合描述慢速法与快速法的相互关系, 其结果的一致性较好。

## 参考文献:

- [1] 周 镜. 岩土工程中的几个问题[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 1 - 8. (ZHOU Jing. Some cases in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 21(1): 1 - 8. (in Chinese))
- [2] 张文龙, 张 辉, 陈国栋, 等. 内蒙古粉细砂地基平板载荷试验尺寸效应研究[J]. 岩土工程学报, 2010(增刊2): 492 - 495. (ZHANG Wen-long, ZHANG Hui, CHENG Guo-dong, et al. Plate loading test of fine silty sand ground in Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010(S2): 492 - 495. (in Chinese))
- [3] 毛水木, 周增明, 石苗灿. 复合地基载荷试验规范存在的问题及建议[J]. 岩土工程界, 2004, 8(6): 27 - 28. (MAO Shui-mu, ZHOU Zeng-ming, SHI Miao-can. The problems and suggestions existing in the composite foundation load test specification[J]. Geotechnical Engineering World, 2004, 8(6): 27 - 28. (in Chinese))
- [4] 刘陕南, 黄绍明, 梁志荣, 等. 上海软土天然地基极限承载力的试验研究与分析[J]. 建筑结构, 2009, 39(增刊): 746 - 749. (LIU Shan-nan, HUANG Shao-ming, LIANG Zhi-rong, et al. Loading test and analysis of the ultimate bearing capacity of foundation in Shanghai Area[J]. Building Structure, 2009, 39(S0): 746 - 749. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)