

采用不同失效准则的桩基可靠度分析

周建方¹, 李典庆²

(1. 河海大学 机电工程学院, 常州 213022; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 桩基的极限承载力通常是根据失效准则来确定的。由于各国采用的失效准则不同, 得到的极限承载力也不同, 从而获得的可靠指标也不同。因此, 有必要分析和比较不同失效准则对桩基可靠性的影响, 以及根据桩基技术规范采用的 $S\text{-lgt}$ 失效准则确定可靠指标的状况。为此, 以 $S\text{-lgt}$ 失效准则为基准, 引进了失效准则的偏差系数的概念, 根据一组实测钻孔桩数据对另外 6 种失效准则的偏差系数进行了评估, 进而进行了可靠度分析。结果表明, 不同失效准则具有不同的偏差系数, 桩基可靠度明显地受失效准则的影响。根据 $S\text{-lgt}$ 失效准则确定的可靠度在 7 种失效准则中是偏大的, 不同失效准则确定的相同名义可靠指标的桩基的实际可靠性是不一样的。

关 键 词: 钻孔桩; 失效准则; 极限承载力; 偏差系数; 可靠度

中图分类号: U 416

文献标识码: A

Reliability analysis of pile foundations considering different failure criteria

ZHOU Jian-fang¹, LI Dian-qing²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The ultimate capacity of piles is always determined using a failure criterion. Due to the differences in failure criteria, the ultimate capacity of piles and the reliability index obtained using different failure criteria may not be the same. It is necessary to analyze the reliability levels corresponding to various failure criteria, especially $S\text{-lgt}$ criterion used in Chinese technical code for building pile foundations. For this purpose, a bias factor defined with respect to $S\text{-lgt}$ criterion is introduced; and one database for static load tests of bored piles is utilized for detailed evaluation of the bias arising from failure criteria, the corresponding reliability are further analyzed. The results indicate that there is a considerable bias of different failure criteria. Moreover, the failure criteria have a significant influence on the reliability of pile foundations. The reliability index based on $S\text{-lgt}$ criterion is on the high side among seven failure criteria used in this paper. The actual safety levels of designs with the same nominal reliability index are not the same.

Key words: bored pile; failure criterion; ultimate capacity; bias factor; reliability

1 引 言

Tang^[1]和 Bea^[2]详细研究了单桩竖向极限承载力的不确定性因素, 这些不确定性因素主要包括土质勘测、抽样调查、现场试验、试验室测试、时间效应及荷载效应等。上述这些不确定性因素都是客观的, 因而产生了许多不同的失效准则来确定桩基的极限承载力^[3], 对于确定桩基极限承载力的失效准则的选择就具有一定的主观不确定性因素。而不同的失效准则确定极限承载力是具有明显差别的, 因此, 失效准则的确定也成为桩基极限承载力不确

定性的一个因素。在桩基的可靠度分析中, 如何考虑这种不确定性因素, 以及这种不确定性对桩基可靠度影响程度如何, 目前国内还没有这方面的研究。为此, 本文首先以建筑桩基技术规范采用的 $S\text{-lgt}$ 失效准则^[4]为基准, 定义了其他各种失效准则的偏差系数, 并采用一组实测钻孔桩数据进行了算例分析。最后, 研究了失效准则对桩基可靠度的影响程度。

2 失效准则及其偏差系数

桩基极限承载力的分析和确定被认为是桩基

设计最困难的问题之一，为了解决这一问题，研究人员做了大量的理论研究、室内模型试验和现场试验。有关的试验资料表明，单桩在轴向荷载下的变形和破坏形状随桩侧和桩底土质、桩型、桩径、桩长和成桩方法等因素而异。在许多情况下，桩的荷载-沉降($Q-S$)曲线无明显的陡降和破坏特征点。因此，关于桩极限承载力的定义和判定标准在各国也不尽相同。国内习惯把桩出现明显增大的塑性贯入荷载定义为破坏荷载，破坏荷载的前一级荷载定义为极限承载力，即建筑桩基技术规范采用的 $S-lgt$ 失效准则^[4]。在国外也有许多确定极限承载力的标准，如确定打入桩极限承载力常用的 Davisson^[5]准则，美国联邦公路管理局 FHWA(Federal Highway Administration, FHWA)失效准则^[6]及国际土力学及基础工程协会(International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering (ISSMFE)提出的失效准则^[7]。表 1 给出了 7 种确定钻孔桩失效准则的简单说明，详细介绍见相应的参考文献。

表 1 确定桩基极限承载力的失效准则

Table 1 Summary of commonly used failure criteria for interpreting pile ultimate capacity

失效准则	说明
$S-lgt$ 法 ^[4]	取 $Q-S$ 曲线尾部陡降的前一级荷载为极限承载力
$Q-S$ 曲线法 ^[8]	取 $Q-S$ 曲线相应于陡降段起点的荷载为极限承载力
$S-lgQ$ 法 ^[8]	取 $Q-S$ 曲线出现陡降直线段的起始点所对应的荷载为极限承载力
沉降稳定时间法 ^[9]	取沉降相对稳定时间超过 8 h 的前一级荷载为极限承载力
波兰规范法 ^[10]	桩顶的设计荷载 $Q \leq mN$
FHWA 准则 ^[6]	失效荷载对应的沉降量 $S = 5\% D$
ISSMFE 准则 ^[7]	失效荷载对应的沉降量 $S = 10\% D$

注： S 为沉降量； D 为桩直径； Q 为荷载； t 为沉降时间； m 为修正系数； N 为桩的设计承载力。

为了考虑不同失效准则对桩基可靠度的影响，在进行可靠度计算时除了根据不同的失效准则确定的承载力不同外，其余的统计参数都必须相同，本文将这些参数取为建筑桩基技术规范^[4]所采用的参数，因此，这里以建筑桩基技术规范所采用的 $S-lgt$ 失效准则为基准，对其他不同的失效准则定义一个偏差系数，即以 $S-lgt$ 失效准则对应的失效荷载为参考荷载，该失效荷载与其他失效准则对应的失效荷载的比值为该失效准则的偏差系数^[3]，即

$$\lambda_F = \frac{Q_{S-lgt}}{Q_F} \quad (1)$$

式中： λ_F 为失效准则的偏差系数； Q_{S-lgt} 和 Q_F 分别为 $S-lgt$ 失效准则的失效荷载和其他失效准则对应

的失效荷载。

下面采用一个实例来分析上述的偏差系数。以文献[9]给出的实测数据进行分析，桩试验场地位于济南市洛口小鲁庄黄河南岸堤侧，桩持力层范围内土质属于砂质粉土，共测试了 24 根干作业钻孔桩。文献[9]根据测试结果给出了几种国内常用的失效准则及波兰规范规定的失效荷载。由于 FHWA 失效准则^[6]及 ISSMFE 失效准则^[7]是美国和欧洲规范常用的失效准则，作为比较，有必要将这两个失效准则也进行分析。但文献[9]并没有给出 FHWA 和 ISSMFE 失效准则的失效荷载，为此本文对这些数据进行了进一步处理，进而求出了 FHWA 及 ISSMFE 失效准则的失效荷载。图 1~6 给出了根据式(1)确定的 $Q-S$ 曲线、 $S-lgQ$ 曲线、沉降稳定时间法、波兰规范法、FHWA 及 ISSMFE 失效准则的偏差系数的统计值(图中 n 是桩数； λ_F 和 COV_F 分别是偏差系数的均值和变异系数)。同时，还对由 $S-lgt$ 法确定的失效荷载的数值和由 $Q-S$ 曲线、 $S-lgQ$ 曲线、沉降稳定时间法、波兰规范法确定的失效荷载的数值的相关性分别进行了分析，其相关系数均在 0.99

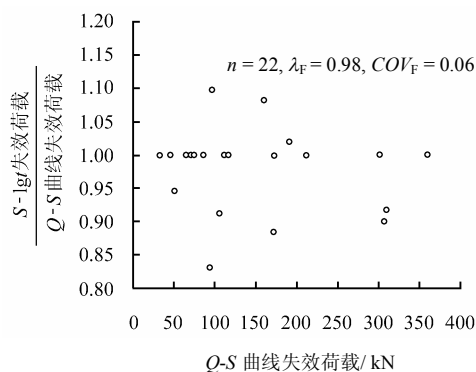


图1 $Q-S$ 曲线法失效荷载相对于 $S-lgt$ 失效荷载的偏差系数
Fig.1 Bias factor of $Q-S$ curve failure load with respect to the $S-lgt$ failure load

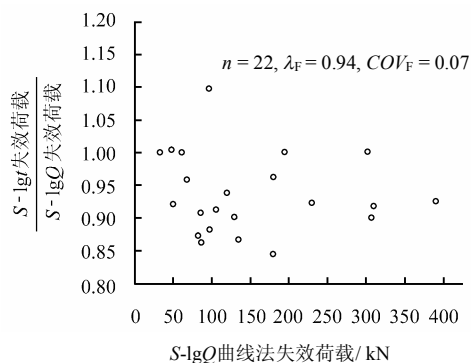


图2 $S-lgQ$ 曲线法失效荷载相对于 $S-lgt$ 失效荷载的偏差系数
Fig.2 Bias factor of $S-lgQ$ curve failure load respect to the $S-lgt$ failure load

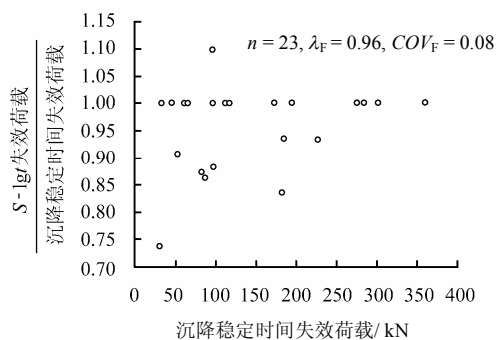


图3 沉降稳定时间失效荷载相对于S-lgt失效荷载的偏差系数

Fig.3 Bias factor of time of steady settlement failure load with respect to the S-lgt failure load

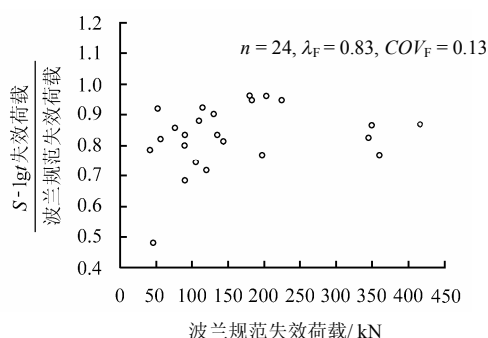


图4 波兰规范失效荷载相对于S-lgt失效荷载偏差系数

Fig.4 Bias factor of the Polan code failure load with respect to the S-lgt failure load

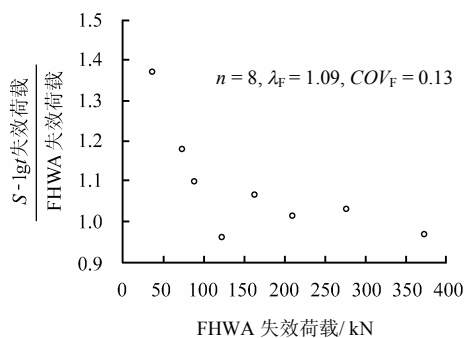


图5 FHWA失效荷载相对于S-lgt失效荷载的偏差系数

Fig.5 Bias factor of FHWA failure load with respect to the S-lgt failure load

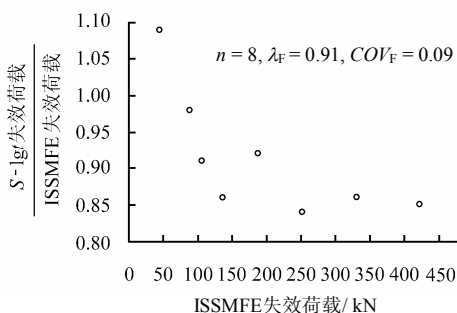


图6 ISSMFE失效荷载相对于S-lgt失效荷载的偏差系数

Fig.6 Bias factor of ISSMFE failure load with respect to the S-lgt failure load

以上,说明由这些方法确定的失效荷载是一致的。

由图1~6可以看出:(1)不同失效准则的偏差系数是不相同的,对于FHWA失效准则,偏差系数为1.09,而波兰规范的偏差系数为0.83,两者具有明显的差别。但是对于Q-S曲线、S-lgQ曲线、沉降稳定时间法及ISSMFE的偏差系数差别不大;

(2)偏差系数的变异系数都比较小,大部分值在0.1左右;(3)经过K-S检验法知,上述偏差系数近似服从对数正态分布。

3 可靠度分析

当求出各种不同失效准则的偏差系数的统计参数后,如果已知设计方法的试计比的统计参数,那么就可采用下述公式求得综合试计比的统计参数:

$$\lambda_R = \lambda_M \lambda_F \quad (2)$$

$$COV_R = \sqrt{COV_M^2 + COV_F^2} \quad (3)$$

式中: λ_R 和 COV_R 分别是单桩抗力试计比的均值和变异系数; λ_M 和 COV_M 分别是单桩设计方法的试计比的均值和变异系数; λ_F 和 COV_F 分别是失效准则偏差系数的均值和变异系数。根据试桩的具体情况,本文选取钻孔桩的统计参数为^[4]: $\lambda_M=1.005$ 和 $COV_M=0.351$ 。根据式(2)及式(3)可得抗力综合试计比 λ_R 和 COV_R 的统计参数,结果见表2。

表2 相对于S-lgt失效准则的偏差系数

Table 2 Summary of bias factors with respect to S-lgt failure criterion

参数	FHWA	Q-S 曲线	沉降稳定 时间法	S-lgQ 曲线	ISSMFE	波兰规 范法
试桩数	8	22	23	22	8	24
λ_F	1.09	0.98	0.96	0.94	0.91	0.83
COV_F	0.13	0.06	0.08	0.07	0.09	0.13
λ_R	1.10	0.99	0.97	0.95	0.92	0.83
COV_R	0.37	0.36	0.36	0.36	0.36	0.37

为简明起见,荷载效应组合仅考虑永久荷载和一种活荷载组合情况。此时,对于轴向受压桩,桩基中单桩的功能函数基本变量由3部分组成,即单桩竖向承载力 R 、永久荷载 S_D 及可变荷载 S_L ,桩基功能函数的极限状态方程表示如下:

$$Z = R - S_D - S_L = 0 \quad (4)$$

当荷载效应和承载力都是对数正态分布时,根

据文献[11]可得可靠指标 β 的计算公式如下:

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{\lambda_R(\gamma_D \frac{Q_D}{Q_L} + \gamma_L) \sqrt{\frac{1 + COV_{QD}^2 + COV_{QL}^2}{1 + COV_R^2}}}{\frac{1}{\gamma_R}(\lambda_{QD} \frac{Q_D}{Q_L} + \lambda_{QL})}\right)}{\sqrt{\ln((1 + COV_R^2)(1 + COV_{QD}^2 + COV_{QL}^2))}} \quad (5)$$

式中: COV_{QD} 和 COV_{QL} 分别为永久荷载和可变荷载的变异系数; γ_R 为抗力分项系数; γ_D 和 γ_L 分别为永久荷载和可变荷载的分项系数; λ_{QD} 和 λ_{QL} 分别为永久荷载和可变荷载的试计比; Q_D/Q_L 为永久荷载和可变荷载的比值。文献[4, 12]中规定了荷载的分项系数及其统计参数的取值, 具体见表3。

表3 荷载分项系数及其统计参数
Table 3 Partial factors and statistics for loads

荷载类型	荷载效应	试计比	变异系数	分项系数
永久荷载	不利荷载效应	1.06	0.07	1.2
	有利荷载效应	1.06	0.07	1.0
楼面活荷载	一般情况	0.70	0.29	1.4
	>4 kPa	0.70	0.29	1.3

为了便于比较不同失效准则下的可靠指标, 这里对荷载仅考虑不利永久荷载和楼面活荷载的一般情况, 即采用下列参数: $\gamma_D = 1.2$, $\gamma_L = 1.4$, $\lambda_{QD} = 1.06$, $\lambda_{QL} = 0.7$, $COV_{QD} = 0.07$, $COV_{QL} = 0.29$ 。

计算中假定永久荷载和可变荷载的比值 $\rho = Q_D/Q_L$ 取5个常遇值: $\rho = 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0$ 。

有了上述的统计参数及表2中的 λ_R 和 COV_R , 根据式(5)即可得不同失效准则下的可靠指标, 结果见图7。

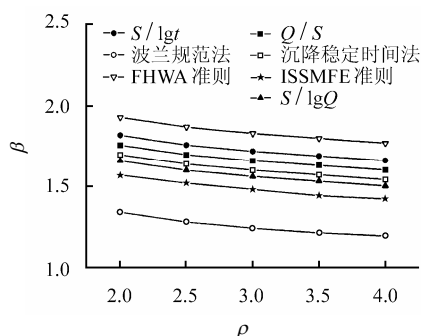


图7 不同失效准则的可靠指标

Fig.7 Reliability indexes for different failure criteria

由图可以看出:

(1) 不同失效准则对可靠指标有较大的影响。

从 FHWA 失效准则到波兰规范失效准则, 可靠指标差值在 0.6 左右。这是由于 FHWA 失效准则的 λ_F 最大, 波兰规范失效准则的 λ_F 最小, 而它们的变异系数基本相同, 所以 FHWA 失效准则的综合抗力试计比 λ_R 也最大; 同理, 波兰规范失效准则的综合抗力试计比 λ_R 最小。由式(5)可以看出, 在其他参数不变的条件下, 可靠指标是随 λ_R 的增大而增大的, 所以 FHWA 失效准则的可靠指标最大, 波兰规范失效准则的可靠指标最小。

(2) 根据建筑桩基技术规范采用的 S-lgt 失效准则^[4]所得到的可靠指标与其他失效准则所得到的可靠指标相比, 是偏大的, 处于第2位。

(3) 对于各种不同的失效准则, 可靠指标值随永久荷载和可变荷载的比值变化都不明显。当 ρ 从2.0变化到4.0时, 可靠指标仅下降0.1左右。

4 结 论

(1) 不同失效准则确定的单桩极限承载力是不相同的, 这种不确定性可以采用偏差系数来描述, 偏差系数近似服从对数正态分布。

(2) 不同失效准则对单桩可靠度有明显的影响, 失效准则的偏差系数越大, 变异系数越小, 则所得到的可靠指标越大。

(3) 不同失效准则的可靠度由大到小的规律是: FHWA 准则、S-lgt 准则、Q-S 曲线、沉降稳定时间法、S-lgQ 曲线、ISSMFE 准则、波兰规范法, 我国规范采用的 S-lgt 准则处于第2位。

(4) 当比较不同桩基的可靠度时, 应该首先清楚所采用的失效准则, 不能仅从名义可靠指标来判断桩基安全水平的高低。

参 考 文 献

- [1] Tang W H. Uncertainties in offshore axial pile capacity[A]. **Proceedings of Foundation Engineering: Current Principles and Practices**[C]. New York: American Society of Civil Engineers, 1989, 27(2): 833—847.
- [2] Bea R G, Jin Z, Valle C, et al. Evaluation of reliability of platform pile foundations[J]. **Journal of Geotechnical and Environmental Engineering**, 1999, 125(8): 696—704.
- [3] Zhang L M, Tang W H. Bias in axial capacity of single bored piles arising from failure criteria[A]. **International Conference On Structural Safety and Reliability**[C]. California: Balkema A A, 2001.
- [4] JGJ94-94, 建筑桩基技术规范[S].

-
- [5] Davisson M T. High capacity piles[A]. **Proceeding of ASCE Lecture Series, Innovations in Foundation Construction**[C]. New York: American Society of Civil Engineers, 1972.
- [6] Reese L C, O'Neill M W. Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods[M]. Publication No. FHWA-HI-88-042, Washington D C: Federal Highway Administration, 1988.
- [7] ISSMFE. Axial pile loading test —— part I: static loading[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 1985, 8(2): 79—89.
- [8] 林天健, 熊厚金, 王利群. 桩基础设计指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [9] 刘金砺, 袁振隆, 张国平. 钻孔群桩工作机理与承载能力的研究[R]. 北京: 中国建筑科学研究院, 1984.
- [10] PN-83/B-02482 VKD 624.154.624.042, Foundations, bearing capacity of piles and pile foundations[S].
- [11] Withiam J L. Load and resistance factor design(LRFD) for highway bridge substructures[R]. Report No. FHWA HI-98-032, Washington D. C: Federal Highway Administration, 2001.
- [12] GB 50009-2001, 建筑结构荷载规范[S].