

文章编号: 1000-7598-(2006)04-0621-04

柔性桩复合地基的系统可靠性分析方法研究

秦建庆¹, 陈建峰²

(1. 拜耳上海一体化基地技术管理部, 上海 201507; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 运用系统可靠度理论, 根据柔性桩复合地基分别按承载力设计和变形控制设计的不同计算方法, 将复合地基整体系统分为复合地基承载力子系统、变形子系统、差异变形子系统, 分别进行可靠性分析, 并计算整体系统失效概率。提出了复合地基的系统可靠性分析方法, 为复合地基的优化设计提供了一种思路。

关 键 词: 复合地基; 概率极限状态; 承载力; 变形; 系统可靠性

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

Study on system reliability analysis method for composite foundation improved by flexible piles

QIN Jian-qing¹, CHEN Jian-feng²

(1. Department of Technical Management, Bayer Integrated Site Shanghai, Shanghai 201507, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on bearing capacity and settlement control design methods for composite foundation improved by flexible piles, as well as the system reliability analysis theory, the system of reliability analysis for composite foundation can be divided into three sub-systems; that are bearing capacity sub-system, settlement sub-system and settlement difference sub-system. The system probability of failure for composite foundation can be obtained by calculating that of three sub-systems respectively. It provides a method of system reliability analysis for composite foundations.

Key words: composite foundation; probabilistic limit state; bearing capacity; settlement; system reliability

1 前 言

目前的复合地基设计规范提供的方法都属于定值设计法, 即总安全系数设计法。实际上, 复合地基需要考虑的不确定性因素很多, 尤其是上部结构按照概率极限状态设计已进入实用化阶段, 对复合地基按概率极限状态设计提出了迫切要求^[1]。

柔性桩复合地基的承载机理介于天然地基和桩基础之间, 桩体材料不同时, 其承载特性也不相同, 用于计算复合地基承载力和变形的的方法很多。柔性桩复合地基极限状态可分为承载力极限状态、变形极限状态、差异变形极限状态。在承载力极限状态的可靠性分析中, 包括桩间土承载力的可靠性、柔性桩桩体承载力的可靠性以及复合地基承载力的可靠性问题。在变形极限状态中, 包括复合模量法确

定复合地基变形的可靠性分析、考虑复合地基与基础共同作用的变形问题及可靠性分析。在差异变形极限状态中, 包括由地层的分布不均匀引起的差异变形的可靠性问题、考虑复合地基与基础共同作用的差异变形问题及可靠性分析。对应于每一种极限状态均可以得到相应的可靠性指标和失效概率。

若将整个复合地基的可靠性问题视为一个系统, 则该系统由 3 个子系统构成: 复合地基承载力可靠性子系统(子系统 I)、复合地基变形可靠性子系统(子系统 II)和复合地基差异变形可靠性子系统(子系统 III)。运用系统可靠性分析的基本原理^[2, 3], 将复合地基的失效概率与各子系统的失效概率, 乃至与各种极限状态的失效概率, 建立某种联系, 从而为复合地基的极限状态设计方法提供依据和设计思路。本文运用系统可靠度的理论, 对复合地基的可靠性作些初步探讨。

2 复合地基承载力可靠性子系统

复合地基承载力可靠性子系统中（即子系统 I）包括桩体承载力可靠性、桩间土承载力的可靠性和复合地基承载力的可靠性。

2.1 桩体承载力系统可靠性分析

柔性桩复合地基中的桩体极限承载力有两种确定方法^[4]：一种是由桩体材料强度确定的极限承载力，另一种是由桩周土对桩的支承力确定的极限承载力。

在确定性设计方法中两种承载力确定方法都要考虑。从工程安全的角度，考虑最不利的组合选用二者中的小值作为桩体极限承载力。根据这一思路，在系统可靠性分析中两种计算方法是 2 个独立事件，以串联方式联系，如图 1 所示。图中事件 A：由桩身材料强度确定桩体承载力极限状态；事件 B：由桩周土的支承力确定桩体承载力极限状态（后文各图事件意义均相同）。

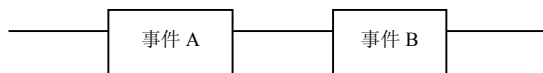


图 1 桩体承载力系统可靠性分析逻辑图

Fig.1 Logic diagram of bearing capacity reliability analysis for pile

由系统可靠性分析理论，桩体承载力的失效概率为

$$P_{\text{TP}} = 1 - (1 - P_{\text{fA}})(1 - P_{\text{fB}}) \quad (1)$$

式中 P_{fA} ， P_{fB} 分别为事件 A 和事件 B 的失效概率。

2.2 面积复合法确定复合地基承载力的系统可靠性分析

采用面积复合法确定复合地基的极限承载力时，复合地基承载力由桩体承载力和桩间土承载力两部分复合而成。只有当桩体和桩间土体均发生失效时，复合地基的承载力才失效。根据系统可靠性分析理论，桩体承载力可靠性事件和桩间土承载力可靠性事件为并联关系，如图 2 所示。图中事件 C：桩间土体承载力极限状态虚框内为桩体承载力极限状态。

由系统可靠性分析理论，面积复合法确定复合地基承载力的系统失效概率 P_{fSP} 为

$$P_{\text{fSP}} = P_{\text{fC}}[1 - (1 - P_{\text{fA}})(1 - P_{\text{fB}})] \quad (2)$$

式中 P_{fC} 为事件 C 的失效概率。

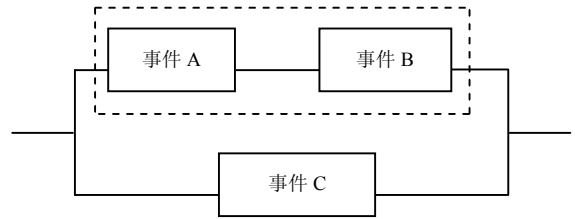


图 2 面积复合法确定复合地基承载力的系统可靠性分析逻辑图

Fig.2 Logic diagram of bearing capacity reliability analysis for composite foundation calculated by replacement ratio method

2.3 复合地基承载力的系统可靠性分析

确定复合地基极限承载力的方法有^[4, 5] 面积复合法和综合强度指标法。在确定性方法中，两种计算方法都可以考虑，与桩体承载力的计算值取用规则相同。从工程安全的角度，选用两种计算结果中的小值作为复合地基的极限承载力。因此，在系统可靠性分析中面积复合法与综合强度指标法是 2 个串联事件，如图 3 所示。图中事件 D：由综合强度指标法确定复合地基承载力极限状态，虚框内为由面积复合法确定复合地基承载力极限状态。

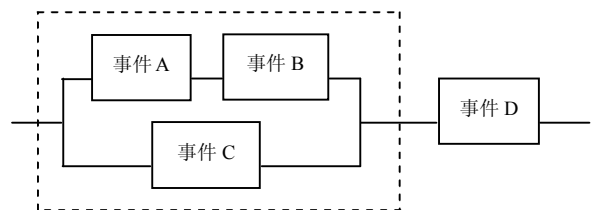


图 3 复合地基承载力的系统可靠性分析逻辑图

Fig.3 Logic diagram of bearing capacity reliability analysis for composite foundation replacement ratio method

由系统可靠性分析理论，复合地基承载力的系统失效概率，即复合地基承载力可靠性子系统的失效概率 P_{fi} 为

$$P_{\text{fi}} = 1 - (1 - P_{\text{fD}})\{1 - P_{\text{fC}}[1 - (1 - P_{\text{fA}})(1 - P_{\text{fB}})]\} \quad (3)$$

式中 P_{fD} 为事件 D 的失效概率。

3 复合地基变形可靠性子系统

复合地基的变形极限状态（即子系统 II）包括采用复合模量法计算复合地基的总竖向变形确定的变形极限状态以及考虑复合地基与基础共同作用的变形极限状态。在确定性分析中，从工程安全的角度，考虑最不利的组合可以分别采用两种方法进行分析，最后选用二者中较大的总变形值作为复合地

基的计算变形值。根据系统可靠性分析的原理, 将分析复合地基变形的两种方法视为相互独立事件, 二者以串联方式联系, 如图4所示。图中事件E: 由复合模量法分析复合地基的变形极限状态事件; 事件F: 由复合地基与基础共同作用理论分析复合地基变形极限状态。

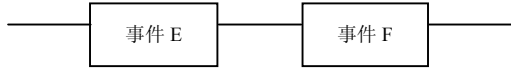


图4 复合地基变形的系统可靠性分析逻辑图

Fig.4 Logic diagram of settlement reliability analysis for composite foundation

由系统可靠性分析理论, 复合地基变形的失效概率, 即复合地基变形可靠性子系统的失效概率为

$$P_{\text{II}} = 1 - (1 - P_{\text{E}})(1 - P_{\text{F}}) \quad (4)$$

式中 P_{E} , P_{F} 分别为事件E和事件F的失效概率。

4 复合地基差异变形可靠性子系统

复合地基的差异变形极限状态(即子系统III)包括由于地基土层分布不均匀确定的复合地基差异变形极限状态^[6], 以及考虑复合地基与基础共同作用的差异变形问题及可靠性分析。在确定性分析中, 从工程安全的角度, 考虑最不利的组合, 可以分别采用上述两种方法进行分析, 最后选用二者中较大的总差异变形作为复合地基的计算差异变形值。根据系统可靠性分析原理, 将分析复合地基变形的两种方法视为相互独立事件, 二者以串联方式联系, 如图5所示。图中事件G: 由地基土层分布不均匀分析复合地基的差异变形极限状态事件; 事件H: 由复合地基与基础共同作用理论分析复合地基差异变形极限状态。

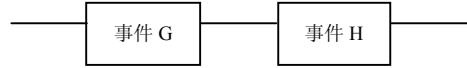


图5 复合地基差异变形的系统可靠性分析逻辑图

Fig.5 Logic diagram of settlement difference reliability analysis for composite foundation

由系统可靠性分析理论, 复合地基差异变形的失效概率, 即复合地基差异变形可靠性子系统的失效概率 P_{III} 为

$$P_{\text{III}} = 1 - (1 - P_{\text{G}})(1 - P_{\text{H}}) \quad (5)$$

式中 P_{G} , P_{H} 分别为事件G和事件H的失效概率。

当然, 也有地基土层分布不均匀和同时考虑地基基础共同作用的情况。此时, 在地基基础共同作用分析时已经考虑了地基土层分布不均匀的因素, 事件G和事件H似乎已不再是完全独立的。事实上, 事件G和事件H的意义在于两种分析方法, 从这个角度讲, 二者仍然是独立事件, 上述分析仍然成立。

5 复合地基的系统可靠性分析

通过对上述3个子系统的分析可以得到各子系统的失效概率。根据系统可靠性分析原理, 复合地基可靠性系统是由上述3个子系统串联构成的, 如果将上述3个子系统视为互相独立, 则复合地基的失效概率为

$$P_{\text{f}} = 1 - (1 - P_{\text{I}})(1 - P_{\text{II}})(1 - P_{\text{III}}) \quad (6)$$

将各子系统的失效概率表达式代入式(6), 得

$$P_{\text{f}} = 1 - \{ (1 - P_{\text{ID}}) \{ 1 - P_{\text{IC}} [1 - (1 - P_{\text{IA}})(1 - P_{\text{IB}})] \} \cdot [(1 - P_{\text{IE}})(1 - P_{\text{IF}})] [(1 - P_{\text{IG}})(1 - P_{\text{IH}})] \} \quad (7)$$

式中各符号意义同前。复合地基系统可靠性分析的逻辑图如图6所示。

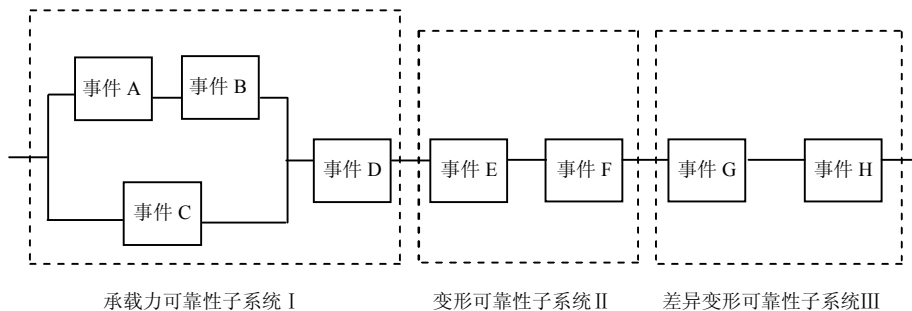


图6 复合地基系统可靠性分析逻辑图

Fig.6 Logic diagram of system reliability analysis for composite foundation

6 分析实例

上海某住宅工程为 6 层框架结构, 基础类型为条形基础, 横向承重, 基础埋置深度 $D=1.5\text{ m}$, 基础平面外包尺寸: 长度 $L=50.0\text{ m}$, 宽度 $B=15.0\text{ m}$ 。采用水泥土桩复合地基, 复合地基面积置换率 $m=0.164$, 设计桩长 $l=12.5\text{ m}$, 桩径 $d=500\text{ mm}$, 采用正方形布桩。水泥掺入比 $a_w=12\%$ 。按荷载长期效应组合值计算的作用于基础底面的附加应力为 140 kPa 。

根据复合地基承载力、变形、差异变形的计算方法, 分别运用一次二阶矩法、Monte Carlo 法、响应面法等进行可靠性分析^[2, 7, 8], 计算各种极限状态的可靠性指标和失效概率, 见表 1。受篇幅限制, 在此省去了各种极限状态方程及可靠性指标的计算过程。运用系统可靠性分析方法, 计算复合地基的整体系统失效概率 $P_f=12.096\%$ 。

表 1 复合地基系统可靠性分析结果
Table 1 Calculation results of system reliability analysis for composite foundation

No.	事件	可靠性指标	失效概率
1	事件 A: 由桩身材料强度确定桩体承载力极限状态	3.891	4.993×10^{-5}
2	事件 B: 由桩周土的支承力确定桩体承载力极限状态	4.534	2.896×10^{-6}
3	桩体承载力极限状态		5.283×10^{-5}
4	事件 C: 桩间土体承载力极限状态	3.374	3.704×10^{-4}
5	由面积复合法确定复合地基承载力极限状态		1.957×10^{-8}
6	事件 D: 由综合强度指标法确定复合地基承载力极限状态	5.100	1.701×10^{-7}
7	事件 E: 由复合模量法分析复合地基的变形极限状态	1.762	3.903×10^{-2}
8	事件 F: 由复合地基与基础共同作用理论分析复合地基变形极限状态	2.035	2.092×10^{-2}
9	事件 G: 由地基土层分布不均匀分析复合地基的差异变形极限状态	2.865	2.085×10^{-3}
10	事件 H: 由复合地基与基础共同作用理论分析复合地基差异变形极限状态	1.524	6.375×10^{-2}
11	复合地基承载力子系统		1.896×10^{-7}
12	复合地基变形子系统		5.914×10^{-2}
13	复合地基差异变形子系统		6.570×10^{-2}
14	复合地基整体系统		1.209×10^{-1}

7 结论与讨论

7.1 结论

(1) 运用系统可靠度理论, 根据柔性桩复合地基分别按承载力设计和变形控制设计的不同计算方法, 将复合地基整体系统分为复合地基承载力子系统、变形子系统、差异变形子系统, 分别进行可靠性分析, 并计算整体系统失效概率。提出了复合地基的系统可靠性分析方法。

(2) 从复合地基技术的经济的角度, 系统可靠性分析方法是优化复合地基设计一个发展方向, 它能够结合承载力设计和变形控制设计的方法, 能够定量描述安全余量, 解决了定值设计法中将承载力和变形分割开来考虑的问题。

7.2 讨论

本文仅是针对分析方法作了初步探讨, 尚需要进一步研究:

(1) 在复合地基的系统可靠性分析中, 复合地基可靠性的系统由 3 个子系统构成, 没有考虑各子系统之间的相关特性。实际上, 对复合地基而言, 承载力可靠性子系统和变形可靠性子系统, 承载力可靠性子系统和差异变形可靠性子系统不是完全独立的。复合地基的承载力问题和变形问题是不能完全分割开来的。而研究其相关特性, 是一项复杂而艰巨的任务。它涉及到建筑物的结构类型、使用功能、地基土层分布等很多复杂因素, 对每种类型及其组合形式都会得到一个不同的相关系数。

(2) 复合地基系统可靠性分析方法是复合地基的可靠性指标, 或失效概率作为复合地基设计的控制指标, 其适用的前提是复合地基的确定性设计、计算理论相对较为完善, 能给出有关参数的概率统计特征。

参 考 文 献

- [1] 高大钊. 地基基础工程标准化与概率极限状态设计原则[J]. 岩土工程学报, 1993, (1): 28—32.
GAO Da-zhao. Standardization of soil foundation engineering and principles of probability limit state design[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, (1): 28—32.
- [2] 高大钊. 土力学可靠性原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
- [3] 李云贵, 赵国藩. 结构体系可靠度的近似计算方法[J]. 土木工程学报, 1993, 26(5): 70—76.
LI Yun-gui, ZHAO Guo-fan. Approximate calculation method of reliability of structure system[J]. China Civil Engineering Journal, 1993, 26(5): 70—76.
- [4] 龚晓南. 复合地基[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992.
- [5] 宰金珉, 杨嵘昌. 复合桩基承台下土的极限承载力提高理论解[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 39—48.
ZAI Jin-min, YANG Rong-chang. The solution of increased ultimate bearing capacity of soil in composite pile foundation with Mat[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(4): 39—48.
- [6] 陈晓平, 俞季民. 地基非均匀沉降的可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(增刊): 56—62.
CHEN Xiao-ping, YU Ji-min. Reliability analysis of uneven settlement of foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(Supp.): 56—62.
- [7] 赵国藩. 工程结构可靠性理论与应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1996.
- [8] 秦建庆. 柔性桩复合地基的可靠性分析方法研究[博士学位论文 D]. 上海: 同济大学, 2001.