

新近堆积黄土地基承载力计算

石 刚¹, 谢永利², 刘怡林³, 赵光海⁴

(1. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;
3. 交通部公路研究院, 北京 100088; 4. 长安大学 工程设计研究院, 陕西 西安 710064)

摘 要:针对新近堆积黄土(Q_4^{2-3})的特殊土质, 分析了确定该类黄土地基承载力常用方法存在的问题以及承载力受多因素影响的特点。基于统计理论, 以大量实测载荷试验数据为样本, 统计了承载力与影响承载力物理指标之间的关系, 建立了新近堆积黄土地基承载力的多因素综合计算方法。工程实例表明, 应用该计算方法确定的地基承载力, 相对误差小于 5%, 能满足公路建设的要求。

关键词:道路工程; 新近堆积黄土; 地基; 承载力

中图分类号:U416.169; TU444 **文献标志码:**A

Calculating method of foundation bearing capacity of recently deposited loess soil

SHI Gang¹, XIE Yong-li², LIU Yi-lin³, ZHAO Guang-hai⁴

(1. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
3. Research Institute of Highway, Ministry of Communications, Beijing 100088, China;
4. Institute of Civil Engineering Design, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: According to the special soil quality of recently deposited loess soil, this paper analyzes the existing problems of commonly used methods in determining the foundation bearing capacity of recently deposited loess soil and the multiple factors that affect it. Based on statistical theory, the relationship between bearing capacity and the physical indices is examined by using samples of actual plate loading tests data, the multi-factorial calculating methods of foundation bearing capacity of recently deposited loess soil are given. Actual examples show that the relative error of this method is less than 5%, which can meet the demand of highway construction. 2 tabs, 8 refs.

Key words: road engineering; recently deposited soil; foundation; bearing capacity

0 引 言

新近堆积黄土是全新世中期和晚期(Q_4^{2-3})堆积的黄土, 是近期形成发育的一层黄土。20 世纪 70

年代后期, 因在山西、陕西建设工程中先后发生地基事故, 工程界经过深入研究后, 新近堆积黄土才被逐渐发现并得到认识。新近堆积黄土发现较晚、堆积年代新、形成时间短、地层薄, 已知厚度多为 2~4 m,

收稿日期: 2007-02-01

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(200431822311)

作者简介: 石 刚(1972-), 男, 陕西富平人, 讲师, 博士研究生, E-mail: shigang_xa@126.com。

少数接近7 m,而目前在工程实践中遇到的主要分布于坡积、坡洪积、洪积和冲积等,分布不连续、层位不稳定是它在产状上的一个特点。由于新近堆积黄土沉积年代一般只有数十年或百余年,因而其固结压密的过程尚未完成,成分复杂,结构不稳定,使承载力的确定较为复杂。关于该类地基承载力的确定一般有现场原位试验、理论公式、查地基规范承载力表等方法,但各种方法都有一定的缺陷,至今还没有一个很完善的确定方法^[1-3]。为此,本文提出一种新近堆积黄土地基承载力的多因素综合计算方法。该方法建立在大量的实测载荷试验结果统计分析的基础上,运用精确的数学方法,从复杂的不确定性中寻找规律,进行了科学合理的定量分析^[4-8]。

1 理论公式计算法

自从1857年朗肯(Rankine W J M)提出结合地基极限承载力的计算公式后,各国学者对地基承载力的理论计算做了进一步的探索,提出了多种破坏模式与结构模型对应的计算公式。但各种地基极限承载力(f_u)计算公式都是基于普朗特极限承载力公式的修正与改进,它们可以用普遍的形式表示为

$$f_u = qN_1 + cN_2 + \frac{1}{2}\gamma BN_3 \quad (1)$$

式中: N_1 、 N_2 、 N_3 均为承载力系数,都是内摩擦角 φ 的函数; B 为基础宽度; q 为荷载; γ 为土的容重; c 为粘聚力系数。

各种公式的差别仅在于承载力系数和各种修正系数的不同。例如魏锡克极限承载力公式 $f_u = qN_1\xi_1 + cN_2\xi_2 + \frac{1}{2}\gamma BN_3\xi_3$ 。其中 ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 均为压缩性影响系数,考虑整体破坏模式时均取1.0,不进行压缩性修正。

现有的理论计算地基承载力的方法基本思路是一致的,即以式(1)为基础,以某种基本假定为前提,尚未纳入土体的非线性特性,仅局限于理想刚塑性材料的情况,同一方法可以求得不同的承载力系数。在传统计算方法中, N_1 、 N_2 、 N_3 是分别求得的,不具有相关性,彼此独立,主要难点在于 N_3 的获取往往采用经验或半经验公式的计算方法。由于3个系数都视为土的内摩擦角 φ 的函数,导致了 c 和 q 产生的承载力与 γ 无关的结论,从而有 $f_u = q_{12} + q_3$ 。其中, q_{12} 为与 c 、 q 有关的极限承载力; q_3 为有关的极限承载力。前者与 γ 无关,后者随 γ 线形增长。实际上 q_3 与 γ 并非线性关系,而是呈现一定的非线性。

由于新近堆积黄土相对其他土质在力学性质等方面具有特殊性,所以应用理论计算公式确定承载力系数是有一定难度的。

2 规范查表法

公路行业对新近堆积黄土地基承载力的确定主要借鉴建筑、铁路等行业的经验。建筑行业在《湿陷性黄土地区建筑规范》(GBJ 25-78、GBJ 25-90)中给出了承载力表(以下简称规范查表),虽然在《湿陷性黄土地区建筑规范》(GBJ 25-2004)中取消了该表,但该承载力表在工程界仍有广泛的影响。该表利用载荷试验资料与土性指标,并与其他现场测试指标结合,经统计分析得出经验公式。在进行承载力统计时,曾作过多方面的尝试,利用不同指标进行组合,结果是采用指标组合比较合理,对相关关系较好的统计关系式进行了编制,并对部分数据进行了专家修正。

由于实测数据量有限和统计手段的限制,最多只用了3个变量。规范查表法确定的地基承载力有时与实测值相差较大,它只能给出一个参考取值,至于最终的承载力取值还需要根据其他影响因素来综合推断。

3 多因素综合计算方法

3.1 统计分析

新近堆积黄土地基承载力变化规律复杂,而且影响承载力的因素较多,主要有微结构、颗粒组成、矿物成分、地形地貌和物理指标等。本文以实测承载力板试验数据和对应完整的120份土工试验资料为样本,应用SPSS大型数学统计软件对影响承载力的各因素以及承载力的分布情况进行统计分析,建立了承载力和各因素之间的关系。

3.1.1 建立指标集和评价集

根据统计结果和各影响因素的可靠性分析,最终确定 x_1 为含水质量分数, x_2 为孔隙比, x_3 为容重, x_4 为压缩系数, x_5 为液限,并以此作为评价指标,组成指标集 $X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ 。

设评价集为 Y ,其中样本为 m 个,将承载力的变化范围分为 m 格,即 $y_0 \sim y_1, y_1 \sim y_2, \dots, y_{m-1} \sim y_m$ 。以实测数据为依据进行划分,构成评价集 Y ,即 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ 。

3.1.2 建立关联函数

统计结果表明,绝大多数指标服从正态分布。因此,对新近堆积黄土地基承载力和各影响因素的分析采用正态分布形式,其计算式为

$$\mu_{ij} = \begin{cases} e^{-\frac{(z_i - \bar{z}_i)^2}{\sigma^2}} & \bar{z}_{i-1} < z_i < \bar{z}_{i+1} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: μ_{ij} 为第 i 个因子对第 j 个评语等级的关联度; z_i 为第 i 个因子的实测值; \bar{z}_i 为第 i 个因子所在区间的平均值; \bar{z}_{i-1} 、 \bar{z}_{i+1} 分别为第 i 个因子两相邻区间对

应的平均值; σ 为方差, 由区间的分布情况确定。

3.1.3 确定影响度集

(1) 采用主观法确定评价因子的影响度。根据评价目标和评价指标, 首先构建判断矩阵, 针对评价目标, h_i 为第 i 个评价指标 ($i = 1, 2, \dots, n$), h_m 为 h_n 对 h_m 的相对重要性, h_m 的取值见表 1。

表 1 判断矩阵标度及其含义

标度	1	3	5	7	2	4	6	8	倒数
含义	指标 h_n 与 h_m 相比同等重要	指标 h_n 与 h_m 相比稍微重要	指标 h_n 与 h_m 相比明显重要	指标 h_n 与 h_m 相比特别重要	相邻判断 1 ~ 3	相邻判断 3 ~ 5	相邻判断 5 ~ 7	相邻判断 7 ~ 9	指标 h_n 与 h_m 相比较得 h_m , 则 h_n 与 h_m 相比较判断 $h_m = \frac{1}{h_n}$

运用专家意见建立指标的判断矩阵 E , 见式 (3)。根据判断矩阵 E 的专家调查统计值, 求出最大特征根对应的特征向量, 即为评价指标的重要性量值, 也就是影响度。正规化处理后的特征向量即为指标的主观影响度 α , $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ 。

$$E = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ h_{n1} & \dots & h_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

(2) 采用客观法确定评价因子的影响度。取评价指标集 Y 的 P 次实测值与其 n 个因子的相应数值列成表格。绘制单因子与评价指标对应关系的二维点据图, 共有 n 张。在每张点据图上, 将因子的数值变化范围划分 L 个区间。并在每张点据图上, 沿 y 轴将评价指标在其变化范围内划分为 m 个格, 使各格与评价指标的集合 Y_k 相对应。若每张点据图上总点据数为 P , 则对于第 i 个因子 u_i , 可找出它的第 j 个区间的点据数 P_{ij} , 求出此因子区间内点数与总点数的影响度为 M_{ij} , 即有

$$M_{ij} = P_{ij} / P \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, L) \quad (4)$$

点数 P_{ij} 沿 y 轴向分割在 m 个格内, 设第 k 格内的点数为 P_{ijk} , 则此格内点数占此区间点数的影响度为 M_{ijk} , 即有

$$M_{ijk} = P_{ijk} / P_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, L; k = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

根据各单因子 u_i 值所在区间, 查出 M_{ij} 值, 再查出此区间各格的 M_{ijk} 值。设因子 u_i 值在 ij 区间, 则由 M_{ij} 各值可组成向量 F 。由各组数值组成的矩阵 G 和向量 F 的公式为

$$G = \begin{bmatrix} M_{1j11} & \dots & M_{1j1m} \\ \vdots & & \vdots \\ M_{njn1} & \dots & M_{njnm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$F = (M_{1j1}, M_{2j2}, \dots, M_{njn}) \quad (7)$$

对向量 F 作唯一化或正规化处理后所得的特征向量即为指标的客观影响度 β , $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ 。

(3) 综合影响度的确定。为了平衡主、客观因素的关系, 采用综合影响度向量 $A = (a_j) (j = 1 \sim n)$, a_j 的计算式见式 (8)。采用这种方法确定的影响度 A , 比单独使用一个更为合理。

$$a_j = (\alpha_j \beta_j) / \sum_{j=1}^n (\alpha_j \beta_j) \quad (8)$$

式中: a_j 为第 j 个因子的综合影响度; α_j 、 β_j 分别为第 j 个因子的主、客观影响度。

3.2 建立模型

在单因子评判时, 第 i 个因子的单因子评价为 $T_i = (t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{im})$, 其中 $t_{ij} = \mu_{ij}(u_i, u_j)$, ($0 \leq t_{ij} \leq 1$), 表示第 i 个因子对第 j 个评语等级的关联度。由全体单因子评价组成 $T_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 构成的总评判矩阵 T 见式 (9)。评价矩阵 $C = AT = (c_1, c_2, \dots, c_n)$, 其中 c_i 为第 i 个评价等级 Y_i 对 C 的关联度。在确定承载力时, 充分利用 C 的全部信息, 同时突出占优势等级的作用, 以各关联度 b_i 的幂值为权, 取加权平均的方法求承载力, 计算式为

$$T = \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & \dots & t_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ t_{n1} & \dots & t_{nm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$f = \sum_{i=1}^n c_i s_i / \sum_{i=1}^n c_i \quad (10)$$

式中: s_i 为每个分段区间的平均值; f 为承载力。

4 工程实例

本文选取部分具有代表性的实测数据, 将各种方法确定的承载力进行对比分析, 结果见表 2。

表 2 各种方法确定的承载力对比

地 点	指 标											
	含水质量 分数 $\omega/\%$	容重 $\gamma/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙 比 e	液限 $\omega_L/\%$	压缩 系数 a	实测 f 值/ kPa	查表 f 值/ kPa	相对误差/ %	理论计算 f 值 /kPa	相对误差/ %	综合计算 f 值 /kPa	相对误差/ %
青海西宁	21.6	17.3	0.92	31.1	0.43	140	123	12.1	118	15.7	143	2.1
陕西兴平	20.7	18.1	0.81	29.3	0.62	135	113	16.2	167	23.7	140	3.7
陕西耀县	21.0	16.4	1.02	26.4	0.11	120	133	10.8	144	18.3	126	5.0
甘肃武山	17.9	16.1	0.98	23.7	0.62	130	110	15.4	105	19.0	129	0.8

由表 2 数据可知,通过对 4 个试验点数据对比,用综合计算法计算的承载力相对误差最大为 5%,最小为 0.8%;而用其他两种方法计算的承载力相对误差均大于 10%。说明应用综合计算法计算的地基承载力精度较高,能满足公路工程建设的要求。

5 结 语

(1)针对新近堆积黄土的特殊工程性质,结合公路建设的特点,分析了该类黄土地基承载力的确定方法及各种方法的缺陷,并提出多因素综合计算承载力的方法。

(2)以大量的实测载荷试验资料为依据,应用专用的数学统计软件,对新近堆积黄土地基的承载力和影响承载力的因素进行了统计,分析了承载力和各因素之间的统计关系。

(3)针对新近堆积黄土地基承载力受多种因素影响的特点,建立了承载力与影响承载力比较显著的 5 个因素之间的定量计算方法。

(4)工程应用实例表明,运用综合计算法确定的地基承载力结果可靠,可以满足公路工程建设的精度要求。

参考文献:

References:

[1] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

[2] 钱鸿缙,王继唐,罗宇生,等. 湿陷性黄土地基[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1985.

[3] 张茂花,谢永利,刘保健. 湿陷性黄土变形的各向异性及与浸水路径的无关性[J]. 中国公路学报,2006,19(4):12-16.

ZHANG Mao-hua, XIE Yong-li, LIU Bao-jian.

Anisotropy of collapsible loess deformation and independence of deformation and soak paths [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4):12-16.

[4] 徐世强,折学森,刘怡林,等. 公路黄土坝式路堤稳定性计算方法[J]. 交通运输工程学报,2006,6(3):42-46.

XU Shi-qiang, SHE Xue-sen, LIU Yi-lin, et al. Stability computation method of highway loess dam-like embankment [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(3):42-46.

[5] 石 刚,支喜兰,马建秦,等. 黄土组分及微观结构特征与地基承载力[J]. 公路交通科技,2005,25(12):46-49.

SHI Gang, ZHI Xi-lan, MA Jian-qin, et al. Microstructure characteristics and foundation bearing capacity of loess [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 25(12):46-49.

[6] 彭小云,叶万军,折学森,等. 黄土沟壑区湿软路基沉降预测模型[J]. 交通运输工程学报,2007,7(2):70-75.

PENG Xiao-yun, YE Wan-jun, SHE Xue-sen, et al. Settlement prediction model of wettest-soft loess subgrade in ravine regions[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(2):70-75.

[7] 彭建兵,陈立伟,邓亚虹,等. 车辆动荷载作用下黄土暗穴对路基稳定性影响的数值分析[J]. 中国公路学报,2006,19(4):17-22.

PENG Jian-bing, CHEN Li-wei, DENG Ya-hong, et al. Numerical analysis of subgrade stability influenced by hidden holes in loess under dynamic load of vehicles [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4):17-22.

[8] Browzin B S. Granular loess classification based on loessial fraction[J]. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 1985, 22(2):217-227.