

# 湿陷性黄土地基上灰土垫层质量评价方法探讨

刘明振, 王瑞科

(西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710055)

**摘要:** 对湿陷性黄土地基上灰土垫层质量的现行评价方法提出了异议, 认为采用载荷试验确定其承载力既不能反映垫层的实际质量, 又造成可观的浪费。建议以控制配料质量和各层压实系数为主, 在常用承载力条件下, 可通过室内试验和计算代替之。

**关键词:** 灰土垫层; 饱水无侧限抗压强度; 常用承载力; 配料; 配比

**中图分类号:** TU477.2

**文献标识码:** A

**Abstract:** The objection for the method of the quality assessment of lime-soil cushion on collapsible loess used in current code or standard is presented. It is considered that the bearing capacity from the plate loading tests couldn't represent the field quality of the cushion and that the high cost could be caused. So it is suggested that the main controlled factors are the quality of the batching and the coefficient of compaction, and under the common conditions the laboratory tests and the calculation could substitute the field tests.

**Key words:** lime-soil cushion; unconfined compression strength of saturated sample; bearing capacity commonly used; batching; ratio of batching

## 1 前言

灰土垫层是湿陷性黄土地区使用最早和最广泛的地基处理方法之一, 据不完全统计, 在陕西省 2003 年的建筑工程中, 有将近一半使用或联合使用了灰土垫层, 因此其质量评价方法的可靠性及经济性对这一地区的工程建设有着重要的意义。本文对现行的评价方法提出了看法并给出解决问题的思路。

## 2 现行方法存在的问题

### 2.1 现行规范关于评价标准的规定

现行国家及行业规范对灰土垫层质量的评价标准并不完全一致<sup>[1-4]</sup>, 文献<sup>[1]</sup>将垫层承载力检验作为强制性条文作了规定, 将压实系数、配合比作为其它主控项目; 文献<sup>[2]</sup>仅对压实系数作了规定, 对承载力是这样规定的: “对灰土垫层不宜超过 250kPa。当有试验资料时, 可按试验结果确定。”正是这项规定, 使得在湿陷性黄土地区的建筑工程设计中, 采用的承载力很少有超过 250kPa 的, 以下将其称为“常用承载力”; 文献<sup>[3]</sup>只对压实系数作了检测的规定; 文献<sup>[4]</sup>将

分层压实系数的检测作了强制性规定。

### 2.2 几处典型的载荷试验示例

目前进行灰土垫层承载力检测的常用方法有触探法和静载荷试验法, 由于垫层密实度大、强度高以及强度随时间增长, 使得触探法既困难又不可信, 因此静载荷试验成了最主要的检测手段。按文献<sup>[1]</sup>的规定, 垫层的承载力是必须检验的, 其检测数量, 每单位工程不得少于三个点; 1000m<sup>2</sup> 以上的工程, 每 100m<sup>2</sup> 至少应有一个点; 3000m<sup>2</sup> 以上工程, 每 300m<sup>2</sup> 至少应有一个点。每一独立基础下至少应有一点, 基槽每 20 延米应有一点。载荷试验数量之多, 可想而知。笔者认为, 在多数情况下, 它是没有意义的。下面给出几处典型的灰土垫层上静载荷试验的结果。

示例 1: 某住宅楼, 3:7 灰土垫层厚 1.8m, 设计要求的压实系数  $\lambda_c \geq 0.97$ , 承载力特征值  $f_{ak} \geq 180\text{kPa}$ , 垫层施工分 12 层, 12d 结束, 跟踪检测每层压实系数, 平均值达到了设计要求, 静载荷试验于垫层碾压结束后的第二天进行, 试验严格按文献<sup>[3]</sup>附录 C 进行, 圆形承压板直径  $d = 100\text{cm}$ , 表 1 给出第一点的板底压力  $P$  与相应的沉降量  $S$  的试验结果。

某住宅楼灰土垫层静载荷试验结果

表 1

$P$ (kPa)		0	80	120	160	200	240	280	320	360
$S$	$\Delta S$	0	1.233	0.620	0.583	0.485	0.441	0.442	0.433	0.395
(mm)	$\sum \Delta S$	0	1.233	1.853	2.436	2.921	3.362	3.784	4.214	4.612

示例 2: 某办公楼 2:8 灰土垫层厚 6.25m, 设计要求  $\lambda_c \geq 0.97$ ,  $f_{ak} \geq 210\text{kPa}$ , 分 32 层压实, 历时 40d, 垫层完工后又养护 7d 进行静载荷试验, 方法及压板大小同示例 1, 第一点试验结果如表 2。

收稿日期: 2004-06-15; 修订日期: 2004-09-02

作者简介: 刘明振 (1943-), 男 (汉族), 河南襄城人, 教授, 博士生导师。

某办公楼灰土垫层静载荷试验结果

表 2

P (kPa)		0	100	140	180	220	260	300	340	380	420
S	$\Delta S$	0	0.208	0.105	0.105	0.110	0.078	0.068	0.060	0.068	0.060
(mm)	$\sum \Delta S$	0	0.208	0.313	0.418	0.528	0.606	0.674	0.734	0.802	0.862

示例 3: 某住宅楼 2:8 灰土垫层厚 1.2m, 分两阶段施工, 第一阶段厚 0.6m, 第二阶段的 0.6m 是在 5 年后施工的, 设计要求  $\lambda_c \geq 0.95$ ,  $f_{ak} \geq 150\text{kPa}$ ; 检测结果达到设计要

求; 第二阶段施工结束后 3d 进行载荷试验, 压板  $d = 80\text{cm}$ , 其中一点试验结果如表 3。

某住宅楼灰土垫层静载荷试验结果

表 3

P (kPa)		0	55	90	125	160	195	230	265	300
S	$\Delta S$	0	0.400	0.275	0.240	0.217	0.177	0.153	0.155	0.150
(mm)	$\sum \Delta S$	0	0.400	0.675	0.915	1.132	1.309	1.462	1.617	1.767

求  $\lambda_c \geq 0.95$ ,  $f_{ak} \geq 200\text{kPa}$ , 检测结果达到了设计要求, 垫层完工第二天开始进行载荷试验, 压板  $d = 80\text{cm}$ , 其中一点试

验结果如表 4。

上述四例的 P~S 曲线见图 1, 由试验结果可以看出:

某办公楼灰土垫层静载荷试验结果

表 4

P (kPa)		0	80	120	160	200	240	280	320	360	400
S	$\Delta S$	0	1.311	0.630	0.628	0.579	0.590	0.572	0.585	0.651	1.227
(mm)	$\sum \Delta S$	0	1.311	1.941	2.569	3.148	3.738	4.310	4.895	5.726	6.953

(1) 垫层上载荷试验在常用承载力相应的荷载下的沉降量都非常小, 即使达到其两倍, 相对沉降量也达不到  $S/d = 0.01$ ;

(2) 灰土的强度及模量有很强的时效性, 养护时间不同, 其试验结果有很大差异;

(3) 垫层承载力及荷载作用下的沉降量与垫层的厚度有关;

(4) 在常用承载力的荷载范围内, P~S 关系曲线呈向上凹形, 与常见的 P~S 曲线弯曲方向相反, 原因在于灰土的时间效应;

(5) 由示例 3 和 4 可知, 上硬下软和上软下硬两种情况下的双层地基, 下卧层发挥显著作用时 (P~S 曲线的转折点) 所对应的荷载不同; 同时也说明, 在灰土垫层上进行载荷试验, 其影响深度远小于我们通常认为的 (1~2) d。

(1) 在天然含水量下, 黄土有较高的结构强度, 其天然地基承载力往往能满足建筑物的要求, 相当大一部分工程设置垫层的目的是不是承载力不足, 而是解决使用过程中可能浸水引起的湿陷问题。如示例 2 工程, 持力层的天然地基承载力特征值为 170kPa, 这对于 4 层办公楼来说是绰绰有余的, 但场地自重湿陷性土层厚约 20m, 不得不设置垫层来减少湿陷性土层的厚度并阻止或延缓上部水分的浸入。

(2) 静载荷试验与实际基础的作用机理不完全一致, 灰土垫层上静载荷试验结果与压板相对垫层的大小有关<sup>[5]</sup>, 这里包括平面尺寸及垫层厚度 H。若垫层的平面尺寸远大于压板, 且 H/d 远大于 1.0 时, 载荷试验的破坏模式如图 2 (a) 所示, 在垫层范围内发生的整体剪切破坏, 极限承载力由垫层材料的性质所决定; 当垫层平面尺寸远大于压板的大小, 但 H/d < 1.0 时, 极限荷载下垫层表现为图 2 (b) 所示的破坏模式, 承载力由冲切体周边阻力和其下的天然土层来决定; 若垫层的平面尺寸与压板大小接近, 垫层可视为压板的一部分, 承载力由下卧天然土层来决定。通常的载荷试验多属图 2 (a), 少数情况属图 2 (b), 而实际工程中基础与垫层的关系是三种情况都有, 可见试验结果直接用于工程设计是有一定问题的。

(3) 灰土时效性的影响: 灰土的强度和模量有一个随时间增长的过程<sup>[6]</sup>, 由于工期的需要, 载荷试验无法等待灰土达到全部强度时才进行, 使得试验所得承载力远低于实际使用时的承载力, 造成不小浪费。

(4) 大量的载荷试验结果表明, 在常用承载力下, 即使

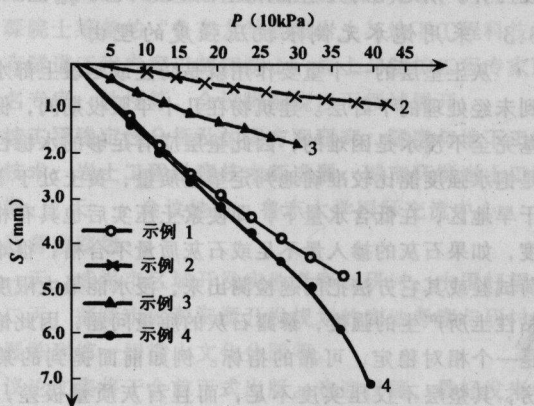


图 1 各示例 P~S 曲线

### 2.3 对承载力试验必要性的质疑

由上述示例及大量的现场试验说明, 在常用承载力范围内, 灰土垫层上的载荷试验是没有必要的, 其理由如下:

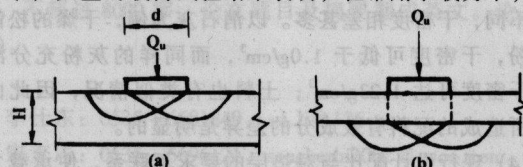


图 2 不同相对尺寸下垫层的破坏模式

压实系数低于通常设计的要求 ( $\lambda_c \geq 0.95$ ), 载荷试验所得承载力也能满足要求。例如某鼓风机房 3:7 灰土垫层厚 0.6m, 垫层压实系数  $\lambda_c = 0.85 \sim 0.99$ , 平均值为 0.91, 压板  $d = 1.0\text{m}$ , 三处载荷试验在  $P = 400\text{kPa}$  时的沉降量分别为: 7.76、7.89 和 8.51mm, 按现行规范判定, 其承载力特征值  $f_{ak} \geq 200\text{kPa}$ , 满足设计要求。出现这种现象的原因可能是: ①规范规定的压实系数与设计要求的承载力不匹配; ②载荷试验的压板与实际基础尺寸不相当, 由于灰土压实后具有较高的固化强度和很大的超固结比, 在发生图 2 (a) 和 (b) 所示的破坏模式时承载力很高。③试验是在不浸水条件下进行的。

(5) 由于灰土压实后载荷试验的影响深度非常有限, 特别是在上硬下软的情况下, 所以只要保证表面有 0.4 ~ 0.6m 厚的硬壳层, 载荷试验结果达到设计要求是没有什么问题的, 这是施工过程中经常出现的一种偷工减料现象, 不少工程事故就是这样造成的。

#### 2.4 压实系数检测中存在的问题

压实系数是控制灰土垫层质量的最重要条件, 无论是垫层的承载力、压缩性、止水能力以及扩散应力的能力都与压实系数密切相关, 工程实践证明, 垫层质量合格与否, 关键在于压实系数, 由于历史原因, 建筑类规范对压实系数的控制中存在着一些漏洞。

(1) 压实系数自身的缺陷: 因为消石灰的比重约为 2.10, 黄土的比重约为 2.70<sup>[7]</sup>, 压实系数为现场干密度与击实试验所得最大干密度之比, 因此在垫层施工时, 加入的石灰愈少, 愈容易达到设计要求的压实系数。目前还没有比较准确地判定灰土中石灰含量的方法, 这就在客观上鼓励了承包商去偷工减料。是施工中经常发生纠纷而又难以解决的问题, 因此, 设计人员不得不选用比实际需要高的石灰配比。

(2) 固定配比的不科学性: 黄土地区灰土的配比一直沿用 3:7、2:8、和 1:9 三种体积比。灰土经压实后产生强度的机理大体上是消石灰中的 CaO 和 MgO 与土中的粘土颗粒相互作用, 经离子交换和凝硬反应使土的强度显著提高, 并具有一定的水稳性, 因此石灰中的 CaO 和 MgO 以及土中的粘土颗粒应该是固化反应的有效成分, 它们之间的相对含量决定着灰土的质量, 而目前的所有关于灰土设计和施工的建筑规范都没有对它们作出明确规定, 常使加入的石灰与土中的粘土颗粒不相当, 造成相同配比的灰土, 由于土料或灰料的改变, 其模量和强度相差较大。目前在一些研究工作中也存在类似的混乱现象, 例如文献<sup>[6]</sup>认为 2:8 配比的灰土强度最高, 而文献<sup>[7]</sup>则认为 3:7 配比的最高, 其差别的原因可能就在于土料或灰料中有效成分含量的差异。

(3) 体积比的不准确性: 按松散体积配制压实料一直是黄土地区使用的方法, 实际上配合料会因种类、湿度及堆积方式不同, 干密度相差甚多。以消石灰为例, 干燥的松散消石灰粉, 干密度可低于  $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ , 而同样的灰粉充分洒水后, 干密度可达  $1.23\text{g}/\text{cm}^3$ ; 土料也有类似情况, 因此由体积比所造成的配料有效成分的差异是明显的。

(4) 现行设计配比与对垫层的要求不联系, 使承载力要求高的垫层的石灰加入量比承载力要求低的还少, 选用什么

样的配比, 完全是出于设计者的使用习惯, 不仅在技术上不合理, 还经常造成浪费。

### 3 解决问题的思路

由前面的分析可知, 灰土的质量应从配料的质量、配比及压实度三个方面进行控制, 最后给出一个综合简便而又符合工程实际的检测评定方法。

#### 3.1 配料的质量标准

灰料的要求应按 CaO 和 MgO 的含量来规定, 最低不应低于 55%, 这是建筑用石灰标准中规定的最低含量, 其细度按文献<sup>[4]</sup>的规定即可。对土料中的粘土颗粒含量进行准确的分析是很麻烦的, 不便于工程应用。考虑到塑性指数  $I_p$  能较好地反映土料的活性, 建议以  $I_p$  值来表征土料的质量, 当  $I_p$  值过小时灰土的强度偏低, 同时可靠地测定  $I_p$  值也比较困难, 而  $I_p$  值过大时均匀拌和困难且干缩现象严重, 建议取用  $I_p = 10 \sim 20$  的土料。如果取得上述土料确有困难时, 也可适当放宽。土料的细度可按文献<sup>[4]</sup>的规定, 其腐蚀性应符合规定要求。

#### 3.2 配比的确定方法

将施工可能取用的灰料和土料送至实验室, 确定其满足配料的要求后, 按干料质量比配制不同配比的混合料, 然后在相同含水量和能量下按规定进行击实, 击实含水量应接近最优含水量, 在黄土地区一般为 20% ~ 22%, 得到一批干密度接近最大干密度的击实试件, 这一步称配比击实试验。将这批试件养护 30d 后进行饱水试件的无侧限抗压强度试验, 取饱水无侧限抗压强度  $q_{uo}$  等于垫层设计承载力特征值 1.3 倍的试件的配比作为选定配比, 然后按这一配比进行不同含水量下的击实试验, 确定在该配比下的最优含水量  $\omega_{op}$  和最大干密度  $\rho_{d\max}$ , 若所得  $\omega_{op}$  或  $\rho_{d\max}$  与配比击实试验所用的含水量及干密度相差较大, 可重新进行, 反复上述过程, 一般一次即可。若工期紧迫, 也可将试件养护 7d 进行饱水无侧限抗压强度试验, 根据已经建立的相近配料和配比试件的强度与养护期之间的关系推算试件在 30d 时的  $q_{uo}$  值。

#### 3.3 采用饱水无侧限抗压强度的理由

灰土垫层的一个重要作用就是防止或延缓上部水分浸入到未经处理的下卧层。建筑物在几十年服役期间, 保证其地基完全不浸水是困难的, 因此垫层应有足够的水稳性。其次是饱水强度能比较准确地判定垫层质量, 黄土处于干旱和半干旱地区, 在低含水量下, 即使素土压实后也具有相当的强度, 如果石灰的掺入量不足或石灰质量不合格, 很难采用载荷试验或其它方法把问题检测出来, 浸水能最大限度地削减粘性土所产生的强度, 暴露石灰的质量问题, 因此饱水强度是一个相对稳定、可靠的指标。例如前面提到的某鼓风机房, 其垫层不仅压实度不足, 而且石灰质量极差, 在养护 28d 后, 取其中压实系数等于 0.95 的四个土样浸水, 在浸泡 10 ~ 15 分钟后, 有三个土样自行崩解, 另一土样  $q_{uo}$  仅 5kPa。其质量问题暴露无疑。

灰土饱水强度和浸水稳定性问题已引起工程界的重视<sup>[8]</sup>, 文献<sup>[7]</sup>认为软化系数约为 0.7; 而文献<sup>[8]</sup>给出的现场

取样试验结果表明, 饱水后的强度只有饱水前的 21.5% ~ 62.8%, 离散性如此之大, 除与龄期有关外, 石灰和土料的质量、配比以及压实度的影响都是存在的。目前这方面的研究工作还非常有限, 需要进行深入系统的工作。

### 3.4 选 $q_{uo} = 1.3f_{ak}$ 的理由

因灰土经压实和养护之后具有很高的超固结比及内聚力, 取灰土试件进行三轴压缩试验, 在常用应力范围内, 内摩擦角  $\varphi$  值很小, 作者的试验表明, 压实系数在 0.95 ~ 0.97 养护 30d 后的灰土, 在围压 50 ~ 300kPa 范围内, 试验所得的  $\varphi$  值仅为 7 ~ 10°, 从安全的角度出发, 取  $\varphi = 0$ ,  $c = q_{uo}/2$  是可行的; 此时承载力系数  $N_c = 5.14$ ,  $N_r = 0$ , 在垫层表面进行载荷试验时超载  $q = 0$ , 故极限承载力  $p_u = 2.57q_{uo}$ ; 令承载力特征值  $f_{ak} = p_u/3$ , 则  $q_{uo} = 1.17f_{ak}$ , 考虑工地施工与室内试验的差异, 再乘以 1.1 的系数后得  $q_{uo} = 1.3f_{ak}$ 。选用 1.1 系数来考虑现场与室内的差别是小了一些, 但考虑到灰土强度在 30d 以后仍有较大的增长, 研究表明, 30d 天与 90d 的室内强度可相差 (0.5 ~ 1.0) 倍, 因此仍然是安全的。

### 3.5 关于下卧层验算

垫层设计的重要内容之一是下卧层验算, 文献<sup>[2-4]</sup>都给出了验算方法, 但笔者认为具有一定刚度的材料形成的垫层和散体材料如砂石形成的垫层, 其验算方法不应该是相同的。另外, 如前所述, 灰土垫层的破坏模式与基础的相对大小、分布形式、离开垫层边沿的距离等因素有关, 因此下卧层的验算方法亦应不同, 限于篇幅, 另文讨论。本文所给出的方法仅用于计算垫层本身的承载力。

## 4 结论

(1) 当设计承载力特征值  $f_{ak} < 250\text{kPa}$  时, 不必强制性规定对灰土垫层进行静载荷试验。

(2) 压实系数是控制灰土垫层质量的重要指标之一, 必

需逐层进行检测。

(3) 配料的质量和配比是保证灰土垫层质量的另一重要条件, 建议以  $I_p$  值和 CaO 及 MgO 的含量作为土料和灰料质量的控制标准。

(4) 建议施工前对灰土进行配比试验, 按 30d 龄期灰土试样的饱水无侧限抗压强度  $q_{uo} = 1.3f_{ak}$  来确定施工配比, 取消传统的固定体积比法。

(5) 当对灰土的配料质量、配比及垫层质量有争议时, 可取样进行饱水无侧限抗压强度试验, 根据龄期和设计要求的工程实际情况进行评价。

(6) 关于配料质量、配比、龄期以及压实度对灰土饱和强度的影响, 还有很多研究工作有待进行, 本文是根据他人和本人的有限研究结果, 结合一定的工程实践提出的, 不足之处, 欢迎讨论补充。

## 参 考 文 献

- [1] GB 50202-2002, 建筑地基基础工程施工质量验收规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
- [2] GBJ 25-90, 湿陷性黄土地区建筑规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1991.
- [3] GB 50007-2002, 建筑地基基础设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [4] JGJ 79-2002, 建筑地基处理技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [5] 刘明振, 韩建刚. 也谈垫层上的载荷试验 [J]. 地基处理, 2001, (3): 68 ~ 69.
- [6] 韩晓雷等. 灰土强度影响因素的研究 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24 (5): 667 ~ 669.
- [7] 地基处理手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [8] 朱沈阳等. 关于灰土强度性能问题的探讨 [J]. 西北勘察技术, 2002, (1).