

武广铁路客运专线超载预压路基沉降评估技术

乐红, 余飞, 韩卓, 周伟

(中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 以武广铁路客运专线实测数据为基础, 分析了超载预压路基沉降规律及特征, 总结了与之相适应的评估技术要求和经验。在此基础上, 分别采用有效应力面积比法和基于实测数据回归拟合的分析方法, 对超载预压路基的卸载时机和工程沉降进行分析, 为铁路客运专线超载预压路基的沉降变形评估提供一条有效的途径。

关键词: 武广铁路客运专线; 超载预压路基; 沉降变形; 卸载时机

中图分类号: U238 TU441 文献标识码: A

文章编号: 1004-2954(2010)02-0011-04

1 概述

超载预压法是处理土层的方法之一。超载作为临时荷载, 在持续作用一定时间满足使用荷载下的工后沉降要求后, 须卸荷到使用荷载水平, 其效果可以从超载卸除后地基在建筑物荷载作用下的后续变形大小得到反映, 后续变形小, 则处理效果好^[1~2]。由于铁路客运专线无砟轨道铺设对工后沉降提出了严格的要求, 设计上多采用 CFG 桩、注浆、旋喷桩等措施对原软土地基进行加固处理, 然后再通过超载预压来加速地基土层的压缩变形, 以减小工后沉降。另外, 超载预压路基的一个关键问题是卸载时机的确定, 它直接影响了超载预压的工程效果^[3~4]。

高速铁路超载预压路基的沉降变形评估与一般路基在控制标准上是一样的, 均要满足《客运专线铁路无砟轨道铺设条件评估技术指南》的相关要求^[5], 但由于超载预压路基经历了二次堆载、预压和卸载的过程, 基底沉降变形观测曲线会随着荷载的变化而出现转折, 其卸载时机的合理性和工程沉降的计算分析较常规路基要复杂得多。

本文以武广铁路客运专线堆载预压路基沉降实测数据为基础, 总结分析超载预压路基的沉降变形规律和特征, 分别采用有效应力面积比法和基于实测数据回归拟合的卸载控制方程, 对超载预压路基的卸载时机和沉降进行分析, 探讨与高速铁路超载预压路基沉降特征相适应的沉降评估技术。

2 典型超载预压段的变形特征

实测数据表明, 大多数超载预压路基段的沉降变形发展过程基本相同。其典型断面的沉降变形过程曲线如图 1 所示。

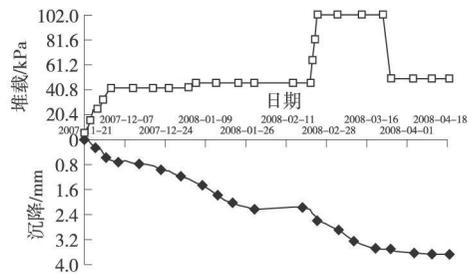


图 1 DK1 671+426 46 典型堆载预压后卸载断面的沉降变形过程曲线

从图 1 中可以看出, 路基从填筑到卸载可分为三个阶段:

第一阶段: 为堆载阶段, 堆载后沉降变形明显增长, 沉降速率增大, 在沉降过程曲线上表现为下凹曲线。

第二阶段: 为预压阶段, 此时停止加荷载, 但沉降变形继续增长, 沉降速率变缓, 在沉降过程曲线上表现为上凸曲线。

第三阶段: 为卸载阶段, 卸载后沉降速率明显减小, 沉降变形趋于稳定, 且未出现明显的回弹迹象, 在沉降过程曲线上表现为一条平缓的曲线。

从以上变形规律可以看出, 超载预压路基的变形特征主要体现为: 对于填筑完成后有较长恒载期的观测断面, 超载施加时, 基底沉降变形发生突变, 沉降过程曲线出现明显的拐点; 对于路基本体和超载连续填筑完成的观测断面, 沉降过程曲线相对光滑, 与常规路基无明显的差异; 卸载后, 沉降变形速率明显减小, 沉降变形很快趋于稳定; 对于填筑完成后有较长恒载期的观测断面, 由超载引起的沉降增量与超载之比, 一般要小于路基本体填筑引起的沉降增量与本体荷载之比。上述变化规律反应出堆载预压措施能加速基底压缩土层的变形, 从而减小工后沉降是有效的。

3 沉降变形分析评估的技术要求和经验

超载预压路基段的沉降变形分析评估应充分考虑以上变形特征, 在满足常规路基评估技术条件的基

收稿日期: 2009-12-30

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (kzcx2-yw-150); 岩土力学与工程国家重点实验室重点项目 (SKL08032)。

作者简介: 乐红 (1986-), 女, 硕士研究生。

。线路 路基。

上, 还应充分考虑以下控制要求:

(1) 超载高度和预压时间

超载高度和预压时间均要达到满足设计要求, 设计预压时间一般不小于 6 个月。

(2) 沉降预测方法

在沉降预测方法的选择上, 不建议采用拓展双曲线法。这主要是由于拓展双曲线法引入了荷载系数的概念来反映荷载的变化, 但其前提是加载量和加载速率基本相同, 而超载浮土的填筑速度一般与路基本体填筑速度存在明显差异, 若采用拓展双曲线法进行预测分析, 可能带来较大的误差。故不建议采用, 可以选择三点法、常规双曲线法进行预测。

(3) 预测时间起点和时间段

对于路基本体填筑完成后直接进行堆载的路段, 沉降预测起点和时间段与一般路基无明显的差异, 即取填筑完成后或沉降曲线出现突变后的观测数据, 进行分析预测; 对于路基本体填筑完成后有较长恒载期的观测断面, 由于超载会引起沉降曲线出现明显的拐点, 因此建议采用拐点之后的观测数据进行预测分析。

(4) 最终沉降量的预测计算

最终沉降量是指设计荷载条件下路基最后的沉降量, 对于超载预压路基, 原则上应根据卸载以后的观测数据进行预测分析。但由于铁路客运专线路基已进行过处理, 在经过堆载预压后, 其沉降变形量很小, 甚至有可能发生回弹变形, 采用卸载后的数据进行预测分析的难度较大。若采用荷载系数来对前期观测数据进行修正, 卸载后会出现明显的回弹变形, 这与实际变形观测结果存在较大的差异。因此, 建议采用超载预压阶段的数据预测的最终沉降量代替设计荷载条件下的最终沉降量, 很显然超载条件下的最终沉降量要大于设计荷载条件下的最终沉降量, 这对于工程是偏于安全的。

(5) 工后沉降的计算

工后沉降是由铺设无砟轨道结构自重引起的沉降和铺轨后至运营完成所发生的沉降两部分组成, 即

$$s = s(T_3) - s(T_0) + s_0 \quad (1)$$

式中: T_0 为预计铺设无砟轨道时间点; T_3 为预定运营完成的时间点 ($T_3 = T_0 + 100$ 年); $s(T_3) - s(T_0)$ 为路基在铺轨后至运营完成所发生的沉降; s_0 为铺设无砟轨道结构自重发生的沉降。

对于超载预压路基而言, 超载一般明显要大于结构层荷载, 在经过较长时间的预压并趋于稳定后, 其历史荷载水平已经超过了使用荷载水平, 按超载条件下观测数据预测的最终沉降量实际已包含了结构层引起的沉降量。因此, 对于超载预压路基, 当采用超载预压阶段的数据预测最终沉降量时, 不再计入结构层引起

的沉降量。而按超载阶段的数据来预测铺轨时间点沉降时, 应将其转换为路基本体荷载条件下的预测值, 因此, 应在预测时间段的选择上考虑卸载后的观测数据, 实际操作过程中, 当卸载阶段沉降已趋于稳定或有回弹的情况下, 可以取铺轨前的最终观测值代替。

根据以上原则, 超载预压路基的工后沉降按下式计算

$$s = s(T_3)^{\text{超}} - s(T_0)^{\text{卸}} \quad (2)$$

式中: $s(T_3)^{\text{超}}$ 为按超载阶段观测数据计算的运营完成时间点的沉降量; $s(T_0)^{\text{卸}}$ 为按卸载阶段计算的预计铺轨时间点的沉降量, 当卸载阶段沉降已趋于稳定或有回弹的情况下, 可取铺轨前的最终观测值。

4 超载预压路基沉降评估方法

根据武广铁路客运专线到目前为止沉降变形观测数据来看, 除部分软土路基堆载预压段的地基沉降变形量级在 40~50 mm, 大部分路基基底沉降变形小于 15 mm, 即总体而言, 武广铁路客运专线路基的沉降变形量级相对较小。鉴于目前缺乏对高速铁路超载预压路基沉降评估方法的研究经验, 建议分别采用有效应力面积比分析方法和基于实测曲线回归拟合的分析方法来对卸载时机的合理性和工后沉降进行对比研究, 以保证超载预压路基的沉降变形评估的准确性和可靠性。

4.1 有效应力面积比分析方法

有效应力面积比 R 定义为: 受压土层范围内结构物荷载引起的附加总应力面积与卸载前相同厚度土层内预压荷载引起的有效应力面积之比。在对软土地基、机场跑道等以沉降控制的结构物长期观测研究基础上, 《建筑地基处理技术规范》(JGJ9-2002)^[6] 给出了有效应力面积比分析方法。

大量超载预压地基处理的工程实践表明, 卸载后土体残余变形不仅与卸载前土体的平均固结度有关, 而且与预压荷载的超载比即超载量与设计荷载之比有关。一维压缩变形条件下, 有效应力面积比 R 可简化为

$$R = \frac{P_f}{(P_f + \Delta P) \cdot U(\tau)} \quad (3)$$

式中: P_f 为设计荷载; ΔP 为超载; $U(\tau)$ 为卸载时 (τ) 压缩层内土的平均固结度。

对于基底总沉降量级 $s(\infty) \leq 15$ mm 的情况, 软土地基 20 年土层残余变形和有效应力面积比 R 的相关关系见图 2。由图 2 可知, 当 $R \leq 0.80$ 时, 卸载后土层的残余变形为 0 或发生少量回弹。

应该指出, 图 2 的相关关系主要来自沿海软黏土砂井地基超载预压的工程经验。武广铁路客运专线路

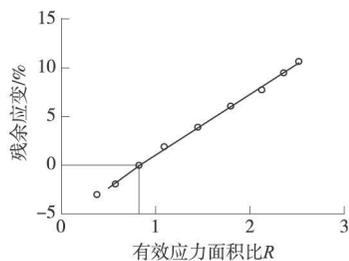


图 2 软土地基 20 年土层残余变形和有效应力面积比 R 的相关关系

基大量采用了 CFG 桩加固和换填等其他处理方式, 其变形机理与传统的固结过程不完全相同。但是, 作为一种对工后沉降直接分析的补充, 是值得尝试的。而且以往大量实际工程表明, 这是一种偏于保守的估算方法, 预估的卸载时间要大于实际需要的时间, 对于武广铁路客运专线而言, 是偏于安全的。

另外, 使用荷载条件下的荷载比为

$$\xi_f = P_f / (P_f + \Delta P) \quad (4)$$

当 ξ_f 确定后, 有效应力面积比 $R \leq 0.80$ 条件实际上变为

$$U(\eta) = \frac{\xi(\eta)}{\xi(\infty)} \geq \xi_f / 0.8 \quad (5)$$

即时实际发生的沉降 $\xi(\eta)$ 和预测最终沉降 $\xi(\infty)$ 的比应 $\geq \xi_f / 0.8$ 。对于路基沉降和变形观测分析评估的强制性要求 $\xi(\eta) / \xi(\infty) \geq 75\%$, 由于 $\xi(\eta) / \xi(\infty) \geq \xi_f / 0.8$ 的条件一般情况高于 75% 。所以, 此种情况只需用 $\xi(\eta) / \xi(\infty) \geq \xi_f / 0.8$ 的条件来控制, 但应核准 $\xi(\eta) / \xi(\infty) \geq 75\%$ 。

4.2 基于实测数据曲线回归的分析方法

此种分析方法直接利用沉降变形观测数据, 采用回归拟合曲线预测计算工后沉降量, 以评价当前堆载或卸载条件下基底沉降变形是否满足工后沉降控制标准。

在计算工后沉降时, 建议对拟合曲线预测设计荷载 (包括上部轨道结构自重) 作用下的最终沉降值采

用加权系数 $\eta = 1.1$, 而在用拟合曲线预测卸载时的沉降变形值则采用加权系数 $\eta = 0.91$, 以减小由于拟合曲线的不确定性引起的偏差。

根据铁路客运专线路基沉降控制标准和要求, 卸载时预测工后沉降应满足以下要求

$$\xi \leq [\xi_p] = 15 \text{ mm} \quad (6)$$

即

$$\xi = \eta \cdot \xi(\xi_f, \infty) - \frac{1}{\eta} \cdot \xi(\xi_{\max}, t) \leq 15 \text{ mm} \quad (7)$$

式中: ξ 为根据拟合曲线计算的工后沉降值; $[\xi_p]$ 为工后沉降控制值 15 mm ; ξ_f 为地基在铺轨完成后 (设计荷载下) 的荷载水平, ξ_{\max} 为地基最大荷载水平, 即预压阶段 $\xi_{\max} = 1.0$; $\xi(\xi_f, \infty)$ 为设计荷载条件下的最终沉降量, $\xi(\xi_{\max}, t)$ 为堆载预压条件下沉降观测值。

式 (6) 即为基于工后沉降控制的卸载时机控制方程, 即设计荷载条件下的最终沉降变形预测值 (加权后) 与超载条件下沉降观测值 (加权后) 之差小于 15 mm 。

5 工程应用

选取武广铁路客运专线 DK1 671+426 ~ DK1 672+850 区间内 2 段典型堆载预压路基为分析对象, 该路段地形以丘坡和谷地相间为主, 地形起伏较大, 丘坡自然坡度一般为 $10^\circ \sim 25^\circ$, 植被较发育, 谷地地形狭长, 地势较低洼, 多辟为水田, 分布水塘及居民。基底地层情况基本类似: 丘坡上、谷地上覆黏土、粉质黏土, 软塑~硬塑, 下伏全风化花岗岩。堆载预压地段设计堆载高度分别为 2.5 m 和 3.0 m , 设计预压时间为 6~10 个月, 基底采用 CFG 桩和搅拌桩进行地基处理, 桩底持力层为全风化花岗岩, 现采用上述 2 种分析方法分别进行具体分析与评估。

采用有效应力面积比分析方法, 对路基工点的计算结果列于表 1, 其中 $\xi(\eta)$ 为超载条件下实际观测沉降量, $\xi(\infty)$ 为超载条件下预测最终沉降量。

表 1 路基工点分析结果汇总 (有效应力面积比法)

观测断面桩号	基底处理方式	H/m	$\Delta H/m$	$\gamma / (\text{kN/m}^3)$	P_s / kPa	$\xi(\eta) / \text{mm}$	$\xi(\infty) / \text{mm}$	$\frac{\xi(\eta)}{\xi(\infty)}$	ξ_f	$\xi_f / 0.8$
DK1 671+426	冲击压实	2.938	2.72	20	15	2.88	3.23	0.88	0.68	0.850
DK1 671+440	冲击压实	2.306	2.77	20	15	3.64	4.25	0.86	0.60	0.750
DK1 671+475	CFG 桩	2.770	2.72	20	15	4.72	5.39	0.88	0.64	0.800
DK1 672+810	CFG 桩	2.166	3.15	20	15	6.96	8.03	0.87	0.55	0.687
DK1 672+834	CFG 桩	2.586	3.28	20	15	8.12	9.30	0.87	0.57	0.712
DK1 672+850	CFG 桩	3.047	3.04	20	15	7.49	9.02	0.83	0.62	0.775

从表 1 所列分析结果可以看出, 堆载 2~3 个月后卸载, 实际观测总沉降量 $\xi(\eta)$ 为 $2.88 \sim 8.12 \text{ mm}$; 预测最终沉降量 $\xi(\infty)$ 为 $3.23 \sim 9.30 \text{ mm}$, 其比值

$\xi(\eta) / \xi(\infty)$ 为 $0.83 \sim 0.88$, 而实际荷载比 $\xi_f / 0.8$ 为 $0.712 \sim 0.850$, $\xi(\eta) / \xi(\infty)$ 明显要大于 $\xi_f / 0.8$ 且 $\xi(\eta) / \xi(\infty) > 75\%$ 。因此, 根据有效应力面积比的

。线路 路基。

析结果, 目前卸载后路基的工后沉降是能满足控制要求的。

以下直接采用观测数据计算工后沉降量, 进行定量分析以进一步校验上述分析结果, 计算结果列于表 2。

表 2 路基工点工后沉降分析结果汇总

观测断面桩号	基底处理方式	H /m	ΔH /m	$\xi_{m(t)}$ /mm	$\xi_{(\infty)}$ /mm	η	s_R /mm
DK1+426.46	冲击压实	2.938	2.72	2.88	3.23	1.1	0.932
DK1 671+440	冲击压实	2.306	2.77	3.64	4.25	1.1	1.363
DK1 671+475	CFG桩	2.770	2.72	4.72	5.39	1.1	1.634
DK1 672+810	CFG桩	2.166	3.15	6.96	8.03	1.1	2.499
DK1 672+834	CFG桩	2.586	3.28	8.12	9.30	1.1	2.841
DK1 672+850	CFG桩	3.047	3.04	7.49	9.02	1.1	3.106

从表 2 所列分析结果可以看出, 计算工后沉降量为 0.932 ~ 3.106 mm, 明显小于容许工后沉降控制值 15 mm。另外, 上述计算工后沉降的过程中, 已引入了加权系数 (安全系数) $\eta = 1.1$ 。因此, 直接采用观测数据来分析得到的工后沉降量远小于 15 mm, 满足工后沉降控制要求, 这与有效应力面积比法分析的结果是一致的。

(上接第 3 页)

5 沉降量 < 1 mm 观测断面的评估

从武广铁路客运专线的观测资料来看, 在满足沉降变形观测期要求的前提下, 桥梁墩台、隧道等部分刚性结构物的实测沉降量小于 1 mm 的断面占有一定的比重。由于沉降水准的测量精度为 ± 1 mm, 沉降实测值与水准观测误差接近, 系统误差成为观测误差的主要来源。

建议对于沉降变形观测期满足《评估技术指南》的要求, 实测沉降量小于 1 mm 的观测断面, 在整体变形趋势稳定的条件下, 可以不进行计算分析, 判定其满足评估要求。在分析相邻过渡段时, 从偏于安全的角度, 工后沉降取 0 计算过渡段差异沉降和折角, 分析其是否满足评估要求。

6 结 论

沉降变形分析评估是我国铁路客运专线建设中的一个特有的技术环节, 缺乏可资借鉴的经验, 探讨沉降变形评估标准与合理控制具有重要意义。

针对沉降变形评估指标分类及其控制标准、观测期合理控制、曲线回归相关系数的控制标准和沉降量 < 1 mm 观测断面的评估等进行了深入讨论。

铁路客运专线沉降变形评估指标主要有: 工后沉

6 结 论

以武广铁路客运专线实测数据为基础, 分析了超载预压路基沉降规律及特征, 系统地总结了与之相适应的评估技术要求和经验。在此基础上, 建议分别采用有效应力面积比法和基于实测数据回归拟合的分析方法, 对超载预压路基的卸载时机和工程沉降进行对比验证分析, 以提高沉降变形评估的准确性和可靠性, 最后结合工程实例验证了上述超载预压路基评估技术的有效性和可行性, 为铁路客运专线超载预压路基的沉降变形评估提供一条有效的途径。

参考文献:

- [1] 潘秋元, 朱向荣, 谢康和. 关于砂井地基超载预压的若干问题[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(2): 1-12
- [2] 张光永, 王靖涛, 卫 军, 等. 超载预压法的卸载控制理论研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1250-1254
- [3] 张光永, 吴玉山, 李彰明. 超载预压法阈值问题的室内试验研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(1): 79-83
- [4] 钟才根, 张 序. 高速公路软基路堤沉降速率控制[J]. 苏州城建环保学院学报, 2001, 14(4): 48-53
- [5] 铁建设[2006]158号, 客运专线铁路无砟轨道铺设条件评估技术指南[S].
- [6] GB9-2002 建筑地基处理技术规范[S].

降、稳定性、相关系数、观测期、可靠性、 $S(t)/S(\infty)$ 、设计总沉降量和预测总沉降量的吻合性、观测频次、最终沉降量、观测数据一致性等 10 项指标, 并将 10 个评估指标细分为核心指标、基本指标和一般指标等 3 个等级, 对于核心指标, 要求严格满足, 任何一个指标不满足要求, 不能通过评估; 对于基本指标, 要求整体满足, 个别指标超限不大时, 可以基本通过评估, 同时提出完善意见; 对于一般指标, 要求基本满足。

根据沉降变形的发展趋势, 将沉降—时间曲线可分为 3 种类型, 并提出了相应的观测期控制标准。

建议曲线回归相关系数的最低标准可以由 0.92 放宽至 0.85。

建议对于沉降变形观测期满足《评估技术指南》的要求, 实测沉降量小于 1 mm 的观测断面, 在整体变形趋势稳定的条件下, 直接判定其满足评估要求。

参考文献:

- [1] 铁建设[2006]158号, 客运专线铁路无砟轨道铺设条件评估技术指南[S].
- [2] 吴明友. 客运专线无砟轨道铁路工程测量和铺设条件评估关键技术[J]. 中国铁路, 2006(10): 28-32
- [3] 尤昌龙. 无砟轨道工后沉降变形观测、评估的集成理念[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 102(3): 25-28
- [4] 陈善雄, 王小刚, 姜领发. 铁路客运专线路基面沉降特征与工程意义[J]. 岩土力学, 2010, 31(3).