

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211019004

高速铁路采空区地基活化判据与工程实例分析*

任连伟^{1,2}, 牛 帅^{1,3}, 顿志林^{1,2}, 邹正盛^{1,2}, 宁 浩¹

(1. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南省采空区场地生态修复与建设技术工程研究中心, 河南 焦作 454000; 3. 宁波大学滨海城市轨道交通协同创新中心, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为探究高速铁路采空区地基活化问题, 基于附加应力分析法, 以引起叠加附加应力值等于5%岩土层自重应力的深度为附加应力影响深度, 推导出高速铁路有砟轨道双线路堤段及路堑段在无列车、有列车情况下的附加应力影响深度计算公式, 提出了以附加应力影响深度与垮落断裂带深度大小关系为依据的采空区地基活化判别标准, 并分析了高速铁路采空区稳定性影响程度的评价标准。以沁水煤田太焦高速铁路为工程实例, 研究表明: 高速铁路在采空区地基附加应力影响深度从大到小分别是列车交会、单车、无车; 路堤段在采空区地基中附加应力影响深度大于路堑段; 路堤段与路堑段在采空区地基中附加应力随深度衰减规律相同; 随着路堤高度的增加, 附加应力影响深度几乎成线性增加。

关键词: 高速铁路; 采空区地基; 活化判据; 影响深度

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0826-09

Analysis on Activation Criterion and Engineering Example of High-speed Railway Foundation in Goaf Site

REN Lianwei^{1,2}, NIU Shuai^{1,3}, DUN Zhilin^{1,2}, ZOU Zhengsheng^{1,2}, NING Hao¹

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Henan Engineering Research Center for Ecological Restoration and Construction Technology of Goaf Sites, Jiaozuo 454000, China; 3. Collaborative Innovation Center of Coastal Urban Rail Transit, Ningbo University, Ningbo 315201, China)

Abstract: In order to investigate the activation of the goaf ground under a high-speed railway, based on the additional stress analysis method, considering the depth where the superimposed additional stress value equals 5% of the self-weight stress of the geotechnical layer to be the additional stress influence depth, formulas for the additional stress influence depth of the embankment section and the graben section of the double-line ballast track of high-speed railway in the case of with or without train are derived. The standard for activation criterion in the goaf ground based on the size of the relationship between the influence depth of additional stress and the depth of collapse fracture zone is proposed. The evaluation criteria for the impact degree of the stability of the goaf under the high-speed railroad are analyzed. The results of an engineering example study on the Taijiao high-speed railroad in

* 收稿日期: 2021-10-19; 修回日期: 2021-12-08

基金项目: 国家自然科学基金山西煤基低碳联合基金重点项目(U1810203)、宁波大学滨海城市轨道交通协同创新中心开放基金项目(XT2022001)资助

作者简介: 任连伟(1980—), 男, 副教授, 硕导, 博士。主要从事地基基础相关的教学与研究。E-mail: renhpu@163.com

the Qinshui coalfield show that: the influence depths of additional stress in the goaf ground caused by high-speed railroad varying from large to small are train meet, single train and no train; the additional stress influence depth in the goaf ground of embankment section is greater than that of road graben section; the decay law of additional stress along depth is the same in embankment section and road cutting section in the goaf ground; with the increase of embankment height, the additional stress influence depth increases almost linearly.

Keywords: high-speed railway; goaf ground; activation criterion; influence depth

0 引言

高速铁路的运营对促进区域间经济、文化的交流起到了不可估值的作用,据中长期铁路网规划^[1]显示,截至2025年,我国高速铁路总里程将达到3.8万公里左右。然而随着高速铁路在例如山西晋城、江苏徐州等矿产资源丰富的地区修建,就不得不穿越采空区。经多方研究选线及勘察评价^[2],太焦高速铁路穿越采空区长度近50 km,不稳定性地基范围极大。采空区是一个立体的灾害源,空间上上覆岩体的松动和重组可能导致地表移动和变形,进而严重威胁高速铁路的安全运营,所以对高速铁路荷载下采空区地基活化判据进行研究分析对保证高速铁路的安全运行有重要意义。

目前对采空区地基的活化判别,主要以建筑荷载静荷载作为采空区活化的外界因素。郭广礼等^[3]分析得出建筑荷载作用引起地下采空区活化变形的扰动深度估算公式,并给出了临界深度的估算公式。任连伟等^[4]通过分别改变建筑荷载与判别系数的大小来提出一种采空区地基建荷载影响深度确定方法。随着高速铁路在采空区地基上方的建设,邓红卫等^[5]采用精密仪器及数值模拟等方法分析出采空区空间结构演化中的位移、应力场,为采空区地表新建高速铁路提供了一定的指导作用。部分专家学者^[6-7]通过理论分析、数值模拟的方式对交通荷载作用下的采空区路基的沉降变形及采空区地基的动力响应进行研究,但未涉及对高速铁路采空区的活化判别。任连伟等^[8]通过对采空区地表的变形预计来判断采动条件下公路桥梁是否安全。列车动荷载在土体内传播方面,申权等^[9]利用FLAC^{3D}研究了膨胀土地段新型路堑基床结构在列车荷载作用下动力响应规律,梁波等^[10]、商拥辉等^[11]、蒋红光等^[12]研究了列车动荷载在路基中的传播规律,都为高速铁路穿越采空区地基提供了必要

的理论基础。

上述研究取得了丰硕的成果,但高速铁路采空区地基活化判据相关研究较少。从高速铁路附加应力影响深度与垮落断裂带深度两者大小关系出发,研究高速铁路路堤段和路堑段采空区地基附加应力影响深度计算方法,并依据沁水煤田太原—焦作高速铁路进行工程实例分析。

1 高速铁路采空区地基活化判据

在采空区场地新建建筑附加应力较大时,会影响到采空区上覆岩层的稳定性^[13],从而引起上覆岩层的活化变形,对建筑物的安全使用造成严重威胁。当高速铁路穿越采空区时,采空区地基需要承受路基与列车静动荷载的双重作用。采空区地基中的高速铁路附加应力在向下传递的过程中有一定的边界,超过该边界的高速铁路附加应力对地基岩土体不会产生影响。

对拟建工程重要性等级不高的采空区地基,当地基中的竖向附加应力为地基岩土体自重应力的10%时,可认为竖向附加应力对该深度及其下的岩土层压缩影响忽略不计^[14]。在规范^[15]中,高速铁路的保护等级属于特等,与等级不高的工程相比,采空区地基移动变形的要求极其严格。鉴于采空区地基活化问题的复杂性及高速铁路路基沉降的严格要求,选用引起叠加附加应力值等于5%岩土层自重应力的深度^[3,16],方可认为高速铁路荷载对该深度处的影响不会引起地基沉降变形,故确定为附加应力影响深度 H_a 。

高速铁路附加应力影响深度在采空区地基中可能产生三种情况^[17],如图1所示:(1)高速铁路产生的附加应力的影响深度与垮落断裂带相离,采空区地基产生活化变形的可能性小。(2)高速铁路产生的附加应力的影响深度与垮落断裂带相切,处于应力平衡状态。(3)高速铁路产生的附加应力的影

响深度与垮落断裂带相交,采空区地基产生活化变形,路基会受活化变形的影响。

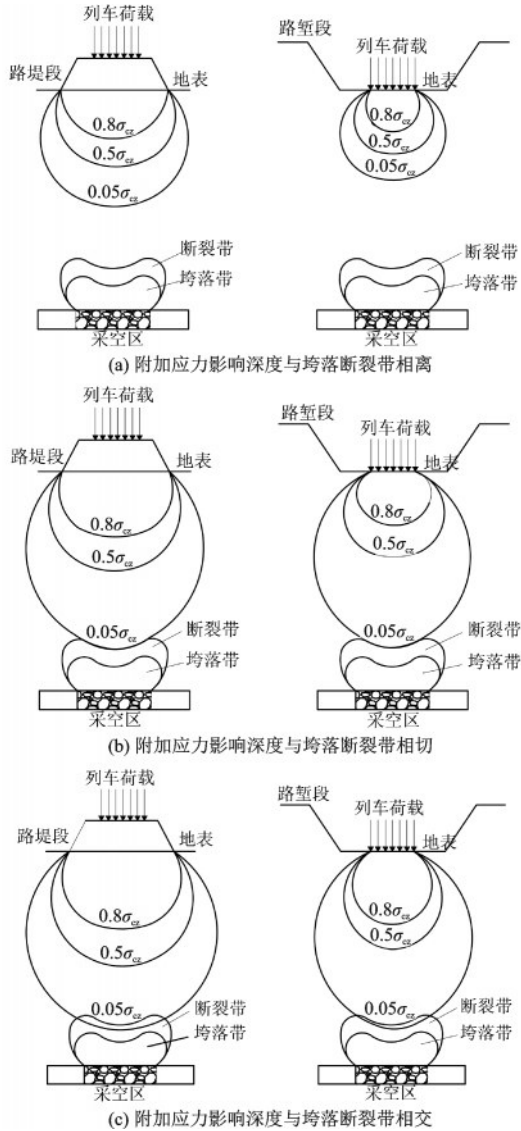


图1 采空区地基附加应力影响深度与垮落断裂带的位置关系
Fig.1 Location relationships between the influence depth of additional stress in the goaf ground and the collapse fracture zone

2 路堤段影响深度确定方法

高速铁路路基可视为半无限空间长结构,路基底边长宽比远大于10,假设路基为条形基础。当采空区地基受到路基竖向均布荷载作用时地基中任一点竖向附加应力为:

$$\sigma_z = \frac{2}{\pi} \left[\frac{2n}{1+4n^2} + \arctan \frac{1}{2n} \right] p \quad (1)$$

式中, $n=z/b$, z 为地基深度, m ; b 为条形基础宽度, m ; p 为路基地面的平均压力,kPa。

高速铁路有砟轨道双线路堤标准横断面尺寸如图2^[18]所示,均匀分布的路基地面接触压力为:

$$p = \frac{G+F}{A} \quad (2)$$

式中, G 为路基自重和轨道结构重量之和,kN; F 为上部车辆静荷载,kN; A 为基础底面积, m^2 。

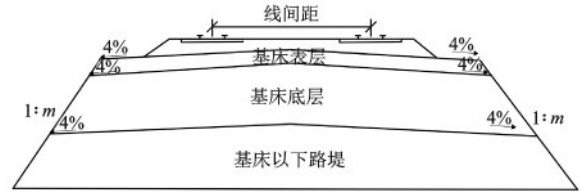


图2 有砟轨道双线路堤标准横断面示意

Fig.2 Schematic diagram of standard cross section for a ballast track double-line embankment

设地基岩土体的容重 γ ,则深度为 z 处的地基土自重应力为:

$$\sigma_{cz} = \gamma z \quad (3)$$

$$\sigma_z = 0.05\gamma H_a \quad (4)$$

结合上述公式(1)~(4)得出高速铁路路堤段上方无列车时对地基的影响深度公式为:

$$H_a = \frac{40}{\gamma\pi} \left[\frac{2n}{1+4n^2} + \arctan \frac{1}{2n} \right] p \quad (5)$$

在列车荷载的移动过程中,静应力保持不变,动应力具有时空瞬变特性,是随着时间不断变化的。列车产生的静应力与动应力,通过钢轨传递给轨枕,轨枕向下传递至路基。选取列车某一时刻来计算时,由于列车长宽比大于10,假设静应力均匀地传递至路基地面,在地基中以条形面积向下传递。动应力则随着深度的增加,沿横截面以 45° 向两侧迅速扩散,在路基地面可认为均匀分布^[19],列车动应力在地基中以条形面积向下传递。由此可得动应力在地基中的附加应力为:

$$\sigma_z = \frac{2}{\pi} \left[\frac{2n_1}{1+4n_1^2} + \arctan \frac{1}{2n_1} \right] p_1 \quad (6)$$

式中, $n_1=z/b_1$, b_1 为动应力在路基地面的影响宽度, m ; p_1 为路基地面的动应力,kPa。

用“叠加法”求地基中的附加应力,在考虑列车荷载情况下高速铁路路堤段对采空区地基影响深度公式为:

$$H_a = \frac{40}{\gamma\pi} \left[\frac{2n}{1+4n^2} + \arctan \frac{1}{2n} \right] \rho + \frac{40}{\gamma\pi} \left[\frac{2n_1}{1+4n_1^2} + \arctan \frac{1}{2n_1} \right] \rho_1 \quad (7)$$

2.1 列车动荷载的选取

列车实际运行过程中路基不仅承受列车静载

的移动作用,而且承受由轨道不平顺、钢轨的横向位移、车轮不圆滑等产生的循环动荷载作用。其中轨道不平顺是列车产生动应力的主要原因^[10]。蒋红光^[20]总结了国内外现场多次测试与模型试验中路基表面实测动应力峰值的分布范围见表1,其中无砟轨道结构坚硬、冲击韧性好,路基表面动应力比有砟轨道小,无砟轨道为13~20 kPa,而有砟轨道则为50~100 kPa。

表1 路基表面实测动应力

Table 1 Measured dynamic stress on the roadbed surface

铁路线	车型	轨道型式	$v/(km \cdot h^{-1})$	σ/kPa
武广客专	CRH-2		280~350	14.6~16.9
德国科隆-莱茵新线	ICE-3		140~326	15.0~20.0
德国纽伦堡-因戈尔斯达特线	ICE-3	无砟轨道	220~297	13.0~20.0
铁科院东郊环线双块式轨道	CRH-2		45~160	9.5~18.0
铁科院东郊环线板式轨道	CRH-2		45~160	10.2~17.6
浙江大学全比尺模型试验	CRH-3		5~360	18.2~19.6
秦沈客专	中华之星	有砟轨道	50~100	200~330
德国汉诺威-威尔斯堡	ICE-3		10~400	70.0~100

目前对路基动应力的计算方法包括拟静力法和数值方法,在采用拟静力法计算时,主要影响因素为轴重与列车运行速度。在2016年的铁路路基设计规范^[21]中提出了路基设计动应力幅值公式:

$$\sigma_{dl} = 0.26 \times P \times (1 + \alpha v) \quad (8)$$

式中, P 为机车车辆的静轴重,kN;时速300~350 km时, $\alpha=0.003$;时速200~250 km时, $\alpha=0.004$; v 为列车行驶速度,km/h。

列车动应力在路基内部结构中向下传递且呈衰减规律,一部分动应力被路基消耗,其它的传递到采空区地基^[16]。陈云敏等^[22]通过对有砟轨道与无砟轨道在路基中衰减规律的研究中发现,在路基深度3 m的位置处,有砟轨道路基动应力衰减80%,而无砟轨道仅衰减50%。并在此基础上提出描述路基动应力沿深度衰减的公式:

$$\eta = 1 - \frac{z}{a + b \times z} \quad (9)$$

式中, z 为路基内部土体深度; a 、 b 为拟合系数,具体数值见表2。

2.2 工程实例分析

根据沁水煤田太焦高速铁路某段相关数据,路堤段属于黄土梁、沟谷地貌,冲沟发育,地形起伏大,地表多为耕地。地面标高为895.22~914.84 m,

表2 路基动应力衰减系数方程拟合系数

Table 2 Fitting coefficients of attenuation coefficients equation of dynamic soil stresses

轨道类型	置信曲线	a	b
有砟轨道	95%置信区间下限-No.1	0.42	0.89
	95%置信区间上限-No.2	0.92	0.83
	均值-No.5	0.64	0.86
无砟轨道	95%置信区间下限-No.3	1.39	1.12
	95%置信区间上限-No.4	3.40	1.22
	均值-No.6	2.12	1.18

地形起伏较大。基底下覆岩土层主要为第四系新老黄土,第三系上新统粉质黏土,石炭系上统太原组。

高速列车车型为CRH2型动车组,设计时速250 km/h,质量为345 t,其中静轴重14 t。列车头车车辆长度为25 700 mm,中间车辆长度25 000 mm,共计201.4 m^[23]。路基双线线间距为4.6 m,路肩坡度1:m为1:1.5。将路基横断面假设为一梯形,上底长13.4 m,下底长22.4 m。

轨道结构尺寸及参数:钢轨质量为60 kg/m;采用2.6 m长混凝土轨枕,每根重360 kg,每千米铺设1 667根;道床厚度0.35 m,双线顶面宽度为8.2 m,道床边坡为1:1.75,密度为1 800 kg/m³。路基参数及下部采空区地基相关数据见表3。

表3 路基材料及地层相关数据

名称	H/m	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
级配碎石	0.7	1 950
非冻胀 A、B 组土	0.3	1 900
A、B 组土	2	1 850
新旧黄土	13	1 600
粉质黏土	6	1 886
泥岩	17	2 500
石灰岩	8	2 600
砂岩	12	2 500
采空区	2.5	—

通过公式(2)得路基及轨道结构对基底的平均压力为 48.04 kPa。代入公式(5)得高速铁路路基在无车辆行驶时最大影响深度约为 25.6 m。

由公式(8)得路基表面动应力幅值 σ_{dl} 为 72.80 kPa。根据表 2 分别取 a 、 b 拟合系数为 0.92、0.83,代入公式(9)得基底动应力衰减系数为 0.12,故路堤段动荷载引起基底竖向动应力为 8.74 kPa。依据前文分析得高速铁路单辆列车静荷载在基底的平均压力为 0.765 kPa。动应力在基底产生条形影响范围的宽度为 7.435 m。代入公式(7)得高速铁路路基在单车行驶时对采空区地基最大影响深度约为 26.6 m。

高速铁路路基在交会列车行驶时,两辆列车静荷载在基底的平均压力为 1.53 kPa。动应力在基底产生影响范围的宽度为 16.47 m,其中叠加应力宽度为 2.835 m。代入公式(7)得高速铁路路基对采空区地基最大影响深度约为 27.8 m。

路堤段在无列车行驶的高速铁路对采空区地基影响深度为 25.6 m,单车行驶时深度增加 1 m,达到 26.6 m。交会列车行驶时影响深度比无列车增加 2.2 m,达到 27.8 m。交会列车行驶比单车行驶增加 1.2 m,表明高速铁路路堤段影响深度随交会列车车辆数的增加而增加。

路堤段不同情况下的附加应力与 5% 的岩土层自重应力之间的关系如图 3 所示,高速铁路附加应力在采空区地基表层较大,但表层衰减速率较快,依次为交会列车、单车、无车时。高速铁路三种情况下的附加应力随着深度的增加衰减速率逐渐减小,最终在超过附加应力影响深度 H_k 后逐渐平缓。

根据地层土质得采空区垮落带与断裂带的高度计算公式^[14]为:

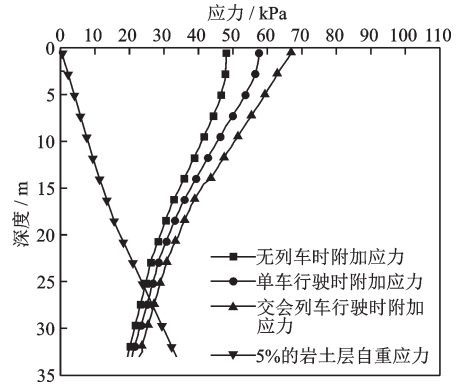


图3 路堤段附加应力与5%的岩土层自重应力随深度变化曲线

Fig.3 Additional stress and 5 % self - weight stress of rock and soil layer along depth in embankment section

$$H_k = \frac{100 \sum M}{4.7 \sum M + 19} \pm 2.2 \quad (10)$$

$$H_{li} = \frac{100 \sum M}{1.6 \sum M + 3.6} \pm 5.6 \quad (11)$$

式中, H_k 为垮落带高度, m; H_{li} 为断裂带高度, m; M 为采空区采深, m。

通过公式(10)、(11)及现场探查结果得垮落带高度为 6 m, 断裂带高度为 30 m, 煤层倾角为 3%, 故垮落断裂带深度为 22.5 m。经分析, 当无列车、单车及交会列车行驶时高速铁路影响深度与垮落断裂带相交, 采空区地基受到高速铁路附加应力影响, 产生活化变形。

2.3 路堤高度对附加应力影响深度的影响

高速铁路路堤对列车动应力具有衰减作用, 随着路堤高度的增加, 静动应力在基底的影响范围变大, 应力变小。通过公式(9)及工程实例, 列车在基底静动应力变化随路堤高度改变的情况如图 4 所示。从图中可以看出, 高速铁路静动应力是随着路堤高度的增加逐渐减小的, 动应力衰减较快, 在路堤高度为 2.4 m 时列车动应力趋近于 0。但列车静应力随路堤高度的增加衰减缓慢。

但路堤高度的增加, 也伴随着路基静荷载的增加。如图 3 所示, 当高速列车静动应力在传至附加应力影响深度时, 影响程度有限, 图 4 也看出路堤高度增加不多同样对列车总应力衰减明显。选择列车静动应力相对大的交会列车计算, 高速铁路在无车与交会列车附加应力影响深度随路堤高度变化如图 5 所示。高速铁路无车与交会列车行驶时附加

应力影响深度随路堤高度几乎成线性增加。两种情况下,在路堤高度较低时影响深度相差明显,路堤高度较高时列车应力对影响深度影响很小。

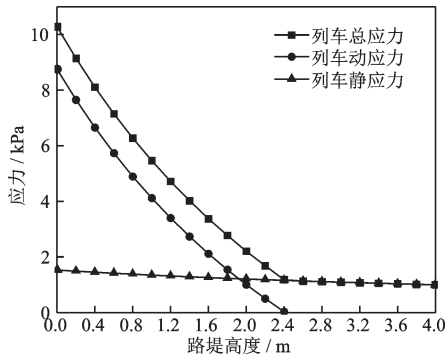


图4 列车基底静动应力随路堤高度的变化曲线

Fig.4 Variation curve of static and dynamic stresses in the train substrate with embankment height

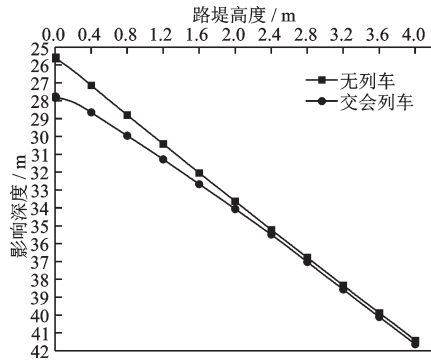


图5 采空区地基附加应力影响深度随路堤高度的变化曲线

Fig.5 Variation curve of influence depth of additional stress in the goaf ground with embankment height

3 路堑段影响深度确定方法

当高速铁路采空区地基出现路堑段,以有砟轨道双线非硬质岩路堑为例分析,如图6^[18]所示,探究高速铁路在有砟轨道采空区地基路堑段的影响深度。



图6 有砟轨道双线非硬质岩路堑横断面示意

Fig.6 Standard cross section diagram of non-hard rock cutting for double line ballast track

在路堑段设地基岩土容重 γ ,在开挖表面 z 深度处的地基岩土自重应力为:

$$\sigma_{cz} = (z + h_{挖})\gamma \quad (12)$$

$$\sigma_z = 0.05(H_a + h_{挖})\gamma \quad (13)$$

式中, $h_{挖}$ 为路堑开挖高度,m。

类比式(5)得出高速铁路路基在路堑段无列车时的附加应力影响深度公式为:

$$H_a = \frac{40}{\gamma\pi} \left[\frac{2n}{1+4n^2} + \arctan \frac{1}{2n} \right] p_3 - h_{挖} \quad (14)$$

式中, p_3 为路堑底面平均压力,kPa。

类比式(7)高速铁路路堑段考虑列车荷载的附加应力影响深度公式为:

$$H_a = \frac{40}{\gamma\pi} \left[\frac{2n}{1+4n^2} + \arctan \frac{1}{2n} \right] p_3 + \frac{40}{\gamma\pi} \left[\frac{2n_1}{1+4n_1^2} + \arctan \frac{1}{2n_1} \right] p_1 - h_{挖} \quad (15)$$

根据山西沁水煤田太焦高速铁路某段相关数据,路堑双线线间距为4.6 m,路肩坡度为1:1.5,总开挖路堑深度为3 m。路堑基底影响范围横截面宽度12.3 m,轨道结构尺寸及参数与路堤段相同,路堑及其下地层相关数据见表4。通过公式(2)得路基及轨道结构对基底的平均压力为50.85 kPa,代入公式(14)得高速铁路对采空区地基在无车辆行驶时影响深度约为17.9 m。

表4 路堑及其下地层相关数据

Table 4 Relevant data of road cutting and its underlying stratum

名称	H/m	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
级配碎石	0.7	1 950
改良土	1.5	2 100
粉质黏土	14	1 886
泥岩	8	2 500
石灰岩	6	2 600
泥岩	18	2 500
砂岩	8	2 500
采空区	2.7	—

根据上文得路基表面动应力幅值 σ_{dl} 为72.80 kPa。根据表2取拟合系数 a 、 b 为0.92、0.83,代入公式(9)得基底动应力衰减系数为0.2,故路堑段列车动荷载引起基底竖向动应力为14.56 kPa。

高速铁路路堑段在单车行驶时,单辆列车静荷载在基底的平均压力为1.39 kPa。动应力在基底产生条形影响范围的宽度为5.835 m。在不考虑地基土体的回弹作用下,代入公式(15)得高速铁路路堑

段对采空区地基影响深度约为19.5 m。

高速铁路路基在交会列车行驶时,单辆列车静荷载在基底的平均压力为2.78 kPa。动应力在基底产生条形影响范围的宽度为10.435 m,其中叠加应力宽度为1.235 m。在不考虑地基土的回弹作用下,代入公式(15)得高速铁路路堑段对采空区地基影响深度约为20.5 m。

路堑段在无列车行驶的高速铁路对采空区地基影响深度为17.9 m,单车行驶时深度增加1.6 m,达到19.5 m。交会列车行驶时影响深度比无列车增加2.5 m,达到20.5 m。交会列车行驶时比单车行驶增加1 m。表明高速铁路路堑段采空区地基影响深度随交会列车数量的增加而增加;虽路堑段存在应力历史,影响深度相比于路堤段小,但路堑段属于开挖路段,设计时应注意与采空区相对深度。

路堑段不同荷载附加应力与5%的岩土层自重应力之间的关系如图7所示。高速铁路路堑段附加应力衰减规律同路堤段相同,衰减速率由快到慢,在超过5%的岩土层自重应力后趋于一致。路堑段表层附加应力比路堤段较大,所以路堑段地基表层更应注意因附加应力较大引起的压缩变形,而引起路基的变化。

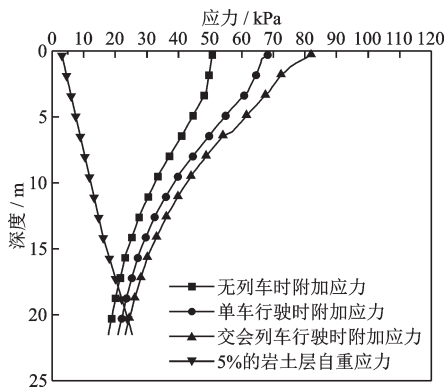


图7 路堑段附加应力与5%的岩土层自重应力随深度变化曲线

Fig.7 Relationships of additional stress in cutting section and 5% self-weight stress of rock and soil layer with depth

通过公式(10)、(11)及现场探查结果得垮落带高度为7 m,断裂带高度为31 m,煤层倾角为1.02%,垮落断裂带顶边界深度为18.7 m。经分析,在该高速铁路路堑段无列车、单车及交会列车行驶时高速铁路影响深度与垮落断裂带都相交,采空区地基受到高速铁路附加应力影响,产生活化变形。

将路堤段与路堑段附加应力随深度变化曲线进行对比分析如图8所示,从中可以看出路堑段在

地基表层由于高速铁路动应力的影响,在单车与交会列车时大于路堤段等情况下的附加应力。由于列车动应力在地基中衰减较快,故路堤段附加应力随深度的增加衰减率小于路堑段。

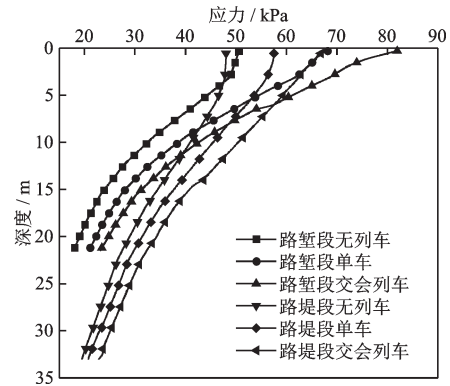


图8 路堤段与路堑段附加应力随深度变化曲线

Fig.8 Additional stress variation curve with depth in the embankment section and cutting section

4 采空区地基稳定性分析

在附加应力分析法中,高速铁路附加应力影响深度未进入垮落断裂带,也存在采空区地基有活化变形的可能性,影响其稳定性。因为在实际的工程建设中采空区地基的稳定性还受到采空区自身稳定性的影响。

当垮落断裂带压密程度较好、采深采厚比较大、活化效应小、荷载影响小时,采空区稳定性好。反之则影响大,稳定性差^[24]。所以,还需要根据附加应力影响深度、垮落断裂带岩体完整程度、本区经验综合判别。在传统的评价标准^[14]中,对一般拟建工程附加应力影响深度的2倍作为采空区稳定性的评价条件,未区分拟建工程的重要性等级。由于高速铁路对轨道平顺性要求较高,当采空区地基发生移动变形时,可能产生严重的安全事故。故对采空区地基进行稳定性评价时应采用更加严格的标准,具体评价标准详见表5。

由表5可以得出:当采空区垮落断裂带深度 $H_{II} < H_a$ 时,高速铁路的附加应力影响深度进入采空区垮落断裂带内部,产生活化变形,附加应力影响到采空区地基的稳定性,且影响程度大,上覆岩体会再次发生较大的移动变形造成危害,即采空区地基处于不稳定状态,严重影响高速铁路运行安全;当 $H_a \leq H_{II} < 2.5H_a$ 时,垮落断裂带深度大于高速铁路的附加应力影响深度但小于其2.5倍,采空区地

表5 高速铁路采空区稳定性影响程度的评价标准

Table 5 Evaluation criteria for the impact degree of the goaf stability under high-speed railroad

评价因子	采空区覆岩受荷载影响程度		
	大	中等	小
垮落断裂带深度			
H_{it} 和附加应力影响深度 H_a 关系	$H_{it} < H_a$	$H_a \leq H_{it} < 2.5 H_a$	$H_{it} \geq 2.5 H_a$

基产生活化变形的可能性小,影响程度中等,上覆岩体可能会发生不均匀移动变形,采空区地基处于相对不稳定状态,会威胁高速铁路运行安全;当 $H_{it} \geq 2.5H_a$ 时,垮落断裂带深度大于高速铁路荷载影响深度的2.5倍以上,采空区地基活化变形的可能性极小,影响程度小,高速铁路附加应力不会使垮落断裂带重新移动,即采空区地基处于稳定状态,高速铁路运行处于安全。

在山西沁水煤田太焦高速铁路实例分析中,在路堤段及路堑段所有情况下 $H_{it} < H_a$,高速铁路对采空区地基影响程度大,采空区地基处于不稳定状态,会严重威胁高速铁路运行安全,在上方建设铁路前必须对其进行处理。

5 结 论

在路基荷载和高铁动荷载作用下,采空区地基有可能产生活化。以附加应力影响深度判别标准为依据,提出了高速铁路有砟轨道双线路堤段与路堑段的采空区地基活化判别方法,并以山西沁水煤田太焦高速铁路为工程实例进行分析。主要结论如下:

(1)依据采空区地基附加应力为采空区上覆岩土体自重应力5%的判别标准,提出了高速铁路有砟轨道双线路堤段与路堑段的采空区地基附加应力最大影响深度计算公式。并依据高速铁路附加应力影响深度与垮落断裂带深度的大小关系,提出高速铁路采空区地基活化判别准则。

(2)高速铁路对采空区地基影响深度从大到小分别为列车交会、单车、无车,且路堤段影响深度大于路堑段。路堤段与路堑段附加应力衰减规律相同,衰减速率由快到慢,在超过附加应力影响深度后趋于一致。随着路堤高度的增加,路基底面动应力迅速减小,但高速铁路由于路堤荷载增加,附加应力影响深度几乎成线性增加。

(3)在工程实例计算中,高速铁路路堤段及路堑段附加应力影响深度与垮落断裂带都相交,采空区地

基易活化,高速铁路建设前应进行采空区地基处理。

参考文献:

[1] 中长期铁路网规划研究编委会. 中长期铁路网规划研究[M]. 北京:中国铁道出版社,2018:4-6.
Editorial Committee of Research on Medium and Long Term Railway Network Planning. Research on medium and long term railway network planning [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018: 4-6. (in Chinese)

[2] 关凤琚. 太焦铁路多维时空采空区选线及勘察评价[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(2): 11-16.
Guan F J. Line selection and survey evaluation of multi-dimensional space-time goaf of Taiyuan-Jiaozuo railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(2): 11-16. (in Chinese)

[3] 郭广礼, 张国信, 刘丙方. 地面荷载对地下采空区的临界扰动深度及其影响[J]. 矿山压力与顶板管理, 2004, 21(1): 72-77.
Guo G L, Zhang G X, Liu B F. The critical depth of disturbance and the influence of ground load of underground goaf [J]. Ground Pressure and Strata Control, 2004, 21(1): 72-77. (in Chinese)

[4] 任连伟, 周桂林, 顿志林, 等. 采空区建筑地基适宜性及沉降变形计算工程实例分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2922-2932.
Ren L W, Zhou G L, Dun Z L, et al. Case study on suitability and settlement of foundation in goaf site [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 2922-2932. (in Chinese)

[5] 邓红卫, 王远, 徐宜慧. 大型复杂采空区空间结构演化规律研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(3): 401-408, 418.
Deng H W, Wang Y, Xu Y H. Study on space structure evolution of large and complicated underground goaf [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(3): 401-408, 418. (in Chinese)

[6] 王长宝. 高速铁路采空区路基变形数值模拟分析[D]. 成都:西南交通大学, 2013.
Wang C B. Numerical simulation analysis of deformation of high-speed railway embankment overlying mined-out area [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese)

[7] 段纲. 列车荷载对老采空区稳定性的影响分析[D]. 青岛:青岛理工大学, 2013.
Duan G. Analysis of the stability of mined-out area under train load [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2013. (in Chinese)

- [8] 任连伟,刘鹏飞,顿志林,等.煤矿采动影响下国道桥梁基础变形规律及稳定性研究[J].岩土力学,2020,41(2):1-9.
Ren L W, Liu P F, Dun Z L, et al. Deformation law and stability of national highway bridge foundation under the influence of coal mining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2): 1-9.(in Chinese)
- [9] 申权,杨果林,胡敏,等.高速铁路新型路堑基床结构动力响应分析[J].地震工程学报,2017,39(6):1118-1125.
Shen Q, Yang G L, Hu M, et al. Numerical analysis of dynamic response on a new type of cutting bed in the expansive soil district on the Yun-Gui railway[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6): 1118-1125.(in Chinese)
- [10] 梁波,蔡英.不平顺条件下高速铁路路基的动力分析[J].铁道学报,1999,21(2):84-88.
Liang B, Cai Y. Dynamic analysis on subgrade of high speedrailways in geometric irregular condition[J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 21(2): 84-88. (in Chinese)
- [11] 商拥辉,陈钊锋.不同试验条件下高铁路基基床累积变形差异探究[J].防灾减灾工程学报,2021,41(2):357-362.
Shang Y H, Chen Z F. Study on accumulative deformation difference of high railwaysubgrade bed under different test conditions[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(2): 357-362.(in Chinese)
- [12] 蒋红光,边学成,徐翔,等.列车移动荷载下高速铁路板式轨道路基动力性态的全比尺物理模型试验[J].岩土工程学报,2014,36(2):354-362.
Jiang H G, Bian X C, Xu X, et al. Full-scale model tests on dynamic performances of ballastless high-speed railways under moving train loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36 (2) : 354-362.(in Chinese)
- [13] 张俊英.地表新增荷载对采空区上方覆岩的影响规律[J].煤炭学报,2008,33(2):166-170.
Zhang J Y. The laws of overlying strata influenced by newly increased load on the surface above worked-out area[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(2): 166-170.(in Chinese)
- [14] 煤矿采空区岩土工程勘察规范:GB 51044—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [15] 国家煤炭工业局.建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[M].北京:煤炭工业出版社,2017.
State Coal Industry Administration. Specification for coal pillar retention and coal compression mining for buildings, water bodies, railroads and major shafts[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2017. (in Chinese)
- [16] 任连伟,宁浩,邹友峰,等.采空区场地高速铁路路基变形控制研究现状与展望[J].煤炭学报,2021,46(8):2534-2547.
Ren L W, Ning H, Zou Y F, et al. Research status and prospect on deformation control of high-speed railway subgrade in goaf site[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2534-2547.(in Chinese)
- [17] 宁浩.高速铁路采空区地基“活化”分级评价方法及工程应用[D].焦作:河南理工大学,2021.
Ning H. Classification evaluation method and its application of goaf ground “activation” for high-speed railway [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2021.(in Chinese)
- [18] 高速铁路设计规范:TB 10621—2014[S].北京:中国铁道出版社,2014.
- [19] 薛富春,张建民.移动荷载作用下高速铁路路基动应力的空间分布[J].铁道学报,2016,38(1):86-91.
Xue F C, Zhang J M. Spatial distribution of dynamic stresses in embankment of high-speed railway under moving loads[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(1):86-91.(in Chinese)
- [20] 蒋红光.高速铁路板式轨道结构一路基动力相互作用及累积沉降研究[D].杭州:浙江大学,2014.
Jiang H G. Dynamic interaction of slab track structure-subgrade system and accumulative settlement in high-speed railways [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.(in Chinese)
- [21] 铁路路基设计规范:TB 10001—2016[S].北京:中国铁道出版社,2016.
- [22] 陈云敏,边学成.高速铁路路基动力学研究进展[J].土木工程学报,2018,51(6):1-13.
Chen Y M, Bian X C. The review of high-speed railway track foundation dynamics[J].China Civil Engineering Journal, 2018, 51(6): 1-13.(in Chinese)
- [23] 张晖.高速动车转向架动力学性能研究[D].长沙:中南大学,2011.
Zhang H. Study on dynamic performance of high speed EMU bogie[D]. Changsha: Central South University, 2011.(in Chinese)
- [24] 韩科明.荷载作用下采空区覆岩稳定性评价理论研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2020.
Han K M. Theoretical study on stability evaluation of goaf overburden under surface load[D]. Beijing: China Coal Research Institute CCRI, 2020.(in Chinese)

(本文编辑:池营营)