

地震荷载作用下高速公路挖方高边坡稳定性研究

范喜安

(保定市张涿高速公路筹建处, 河北 保定 071051)

摘要:考虑到地震边坡破坏的机制,以京化高速公路挖方高边坡为研究背景,对地震荷载下的边坡稳定性进行了分析研究。详细分析了边坡的工程地质条件,结合实地采样试验,确定了边坡岩体的工程力学参数。利用有限元软件 ABAQUS,建立了三维数值仿真模型,在试验区地震特征研究的基础上,采用拟静力法+强度折减的方法,分别模拟了地震力作用下边坡的位移变形及主应力分布规律,计算了边坡的安全系数,为边坡的加固提供了依据。

关键词:地震荷载;挖方高边坡;工程地质力学参数;三维有限元数值仿真;ABAQUS;强度折减法;稳定性分析

中图分类号:U416.12 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-0373(2012)03-0073-05

地震荷载是触发边坡失稳的主要原因之一,我国是地震多发区,很多高边坡都面临着地震的影响。特别是2008年汶川特大地震导致了大量滑坡的发生,造成了重大损失。因此研究岩质边坡在地震力作用下的稳定性具有重要意义。

边坡地震稳定性分析的常用方法有规范推荐的拟静力法、Newmark分析法、动力分析方法等。Terzaghi最先提出了拟静力法,随后便广泛应用于岩土工程分析,因为拟静力法简单实用,在地震边坡分析中得到了广泛应用,从而积累了大量的工程经验并被编入有关规范^[1];郑颖人全面分析了边坡在地震荷载作用下稳定性问题^[2]。李海波等通过离散元分析了不同折减系数下边坡特性,以速度或者位移发散前的折减系数作为边坡的地震安全系数^[3];戴妙林对不同折减系数下边坡进行了分析,把边坡处于临界稳定的折减系数定义为边坡的稳定安全系数^[4]。郑颖人等考虑了地震荷载作用下的拉破坏,采用FLAC强度折减法,对地震边坡破坏机制进行了数值模拟^[5]。

一般认为,边坡的静力稳定性分析方法已较成熟,但边坡在地震荷载作用下的稳定性问题,尤其是工程应用,尚有探讨空间。

基于以上分析,考虑到地震边坡破坏的机制,以京化高速公路挖方高边坡为研究背景,根据实地采样试验所确定的边坡岩体物理力学参数,采用拟静力法+强度折减的方法,利用有限元软件 ABAQUS,通过对边坡在地震荷载作用下的稳定性进行了分析研究,进而为边坡的加固提供了依据。

1 边坡工程地质条件分析

土木至胶泥湾高速公路是北京至化稍营国家重点公路的重要组成部分,位于张家口市中南部。

1.1 地层岩性

边坡上覆岩层为第四系土层,主要为第四系松散堆积土层,成分以砂层、砂砾石和卵砾石为主,局部为粉土、软土,厚约10 m。

基岩主要为沉积岩和火成岩,沉积岩为中生界侏罗系的紫色安山岩以及凝灰质砂岩、凝灰岩、角砾岩。

火成岩为白垩纪花岗岩安山集块岩。

收稿日期:2012-05-29

作者简介:范喜安 男 1963年出生 工程师

基金项目:河北省交通厅科技计划项目(Y-2010131)

1.2 地质构造

区内大地构造特征及区域稳定性主要受中朝准地台控制,中晚元古代时期为地台型沉积,构造运动表现为以升降运动为主,且差异升降明显。整个燕山台褶带是构造运动较强烈的局部地槽区;新生代末期该区处于区域构造稳定活动的过渡地带。进入新生代以后,基地断裂重新活动和产生一些新的断裂和褶皱,有较强烈的岩浆活动与地震活动,地壳活动性显著加强。沿这些活动性断裂部位发生过多次地震活动,区内新构造活动较强烈,表现为大面积的升降活动及突发性的地震活动。

1.3 地震

线路区及附近区域断层发育,地震多次发生,历史上属中强地震多发生地区,有记载以来曾发生 5 级以上地震 10 次。最大一次发生在 1720 年,震中位于怀来附近,里氏震级 6.8 级,震中烈度达 IX。纵观上述特征,线路布线地区属于地壳稳定性较差地区。

2 边坡工程岩体力学参数研究

京华高速公路 K34+840~K35+100 段为深路堑段,最大挖方深度为 41 m,挖方地层上部为侏罗系九龙山组全风化安山集块岩,下部为九龙山组强风化、弱风化安山集块岩和燕山期全、强风化花岗斑岩,局部为强风化泥岩,岩体较完整,土石方施工等级为 III 级硬土、IV 级软石、V 级次坚石。

通过对工程地质条件调查,结合岩芯室内试验成果,利用 Hoek-Borwn 准则评价岩体所需的基本参数。结合地质力学分类以及地质强度指标 GSI 的确定方法,拟合《工程岩体质量分级》中 BQ 指标与 RMR 指标之间的关系,利用 BQ 指标估算岩体弹性模量。

首先用极大似然估计法对岩块的基本物理力学参数进行回归分析,再通过对岩体质量分级以及地质强度指标计算出 Hoek-Brown 强度准则所需基本物理量,进而确定边坡岩体的工程岩体力学参数,见表 1。

表 1 边坡工程岩体力学参数

岩石类型	E/GPa		泊松比 μ	$\varphi/^\circ$	c/kPa	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
	BQ 估计	GSI 估计						
安山集块岩	1.62	1.76	0.30	28	143	0.524	0.41	22
页岩	1.26	1.34	0.33	30	214	0.482	0.33	23
花岗斑岩	1.33	2.55	0.29	32	151	0.479	0.44	25

3 基于 ABAQUS 的三维数值模型的建立

借助有限元分析软件 ABAQUS 建立三维有限元仿真模型,对边坡在地震荷载作用下的坡的位移和应力进行分析,以便对边坡加固形式和参数提供依据。

3.1 地质模型

根据工程地质剖面图,考虑到风化作用对岩体参数的影响较大,将岩体以此分为强风化安山集块岩、强风化泥质页岩以及强风化花岗斑岩等力学单元,且各单元均概化为均质、各向同性介质。层内错动带和裂隙采用适当降低岩体力学参数的办法来考虑。

3.2 力学模型

根据边坡岩体的工程地质力学特性,岩体材料采用理想弹塑性模型,屈服准则采用 Mohr-Coulomb 强度准则,该模型不仅适用于破坏前后的岩体,而且能够很好地反映岩体的塑性、变形等重要特性,计算结果能更好地反映岩体的实际工作状态。

在主应力空间中, Mohr-Coulomb 屈服准则可以表示为一不等角的六棱锥体,在平面上为不等角的六边形,其屈服函数的表达式为

$$F = \frac{J_1}{3} \sin \varphi + \sqrt{J_2} \left(\cos \theta_\sigma + \frac{\sin \theta_\sigma \sin \varphi}{\sqrt{3}} \right) - c \cos \varphi = 0 \quad (1)$$

式中, J_1 为应力张量第一不变量; J_2 为应力张量第二不变量; θ_σ 为应力 Lode 角,其取值范围为

$$-\pi/6 \leq \theta_\sigma = \frac{1}{3} \arcsin \left(\frac{-3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \right) \leq \pi/6 \quad (2)$$

Mohr-Coulomb 准则充分考虑了岩土材料拉压不等的特性,适合该边坡的应力应变关系。

3.3 数学模型

模型边坡高度为 30 m,分为两层,每层边坡高度为 15 m,边坡坡度为 1:1,垂直边界总高为 50 m,水平边界长度为 75 m,在 Z 方向纵深取 25 m。模型各模块从上至下依次模拟强风化安山集块岩、强风化泥质页岩、强风化花岗斑岩。其模型如图 1 所示。

模型的纵深方向取 3 m 作为有限元分析模型,其模型图如图 2 所示。该模型有 6 303 个单元。模型底部为固定约束边界,左右两侧约束 X 方向自由度,前后面约束 Z 方向自由度。

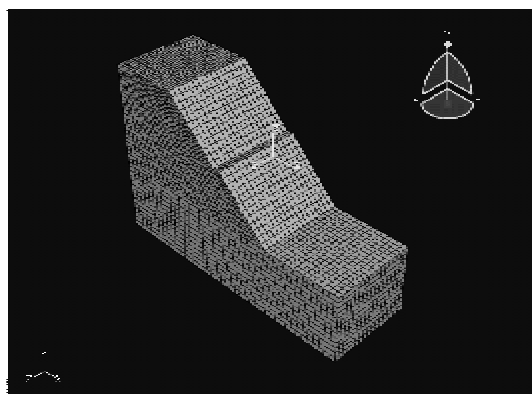


图1 边坡概化的有限元模型

4 地震荷载作用下边坡稳定性分析

4.1 地震荷载作用下边坡稳定性分析方法

地震边坡破坏的原因主要是因为岩土体的剪切破坏以及拉破坏,因此采用拟静力法+强度折减法对边坡稳定性进行分析。

基于拉-剪破坏的动力时程分析法是在动力有限元时程分析法的基础上,考虑边坡的剪切破坏与拉破坏,对抗剪强度参数与抗拉强度参数同时进行折减,得到边坡在地震力作用下的由拉裂缝和剪切滑移面共同组成的破坏面。其折减关系如下

$$c' = c/F \quad (3)$$

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{F}\right) \quad (4)$$

$$\sigma' = \sigma'/F \quad (5)$$

式中, c 、 φ 、 σ' 为折减前岩体粘聚力、内摩擦角、抗拉强度; F 为折减系数; c' 、 φ' 、 σ' 为折减后岩体粘聚力、内摩擦角、抗拉强度。

根据《建筑抗震设计规范》,线路所穿越的涿鹿县(K31+793~K33+981、K34+101~+250、K34+965~K38+080段)抗震设防烈度为8度,设计基本地震加速度值为0.20g;下花园区(K33+981~K34+101、K34+250~K34+968段)和宣化县(K38+080~K71+332段)抗震设防烈度为7度,设计基本地震加速度值为0.15g。

4.2 数值模拟结果

在地震力作用下边坡的位移变形规律如图2和图3所示。

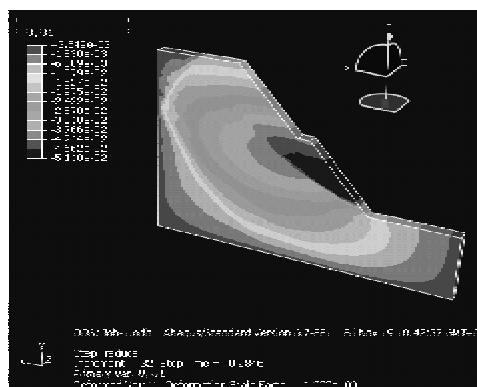


图2 X方向位移图

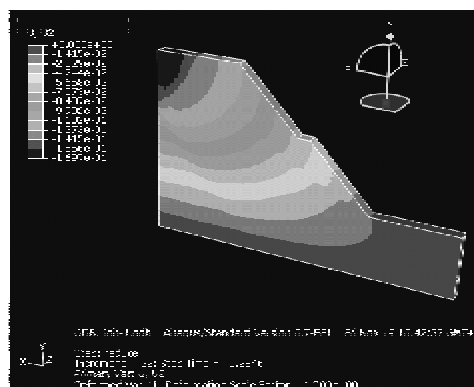


图3 Y方向位移图

由图2和图3可知,在地震力作用下,X方向的位移是边坡临近破坏时位移的1.29倍,出现最大位移区的范围也较破坏时增大了许多,各层位移的数值也随之增大,纵向位移略微增大。在地震力作用下主

要发生 X 方向位移的改变,对 Y 方向的位移影响较小。

在地震力作用下, X - Y 平面的剪应力、最小主应力与等效塑性应变图如图 4、图 5 和图 6 所示。

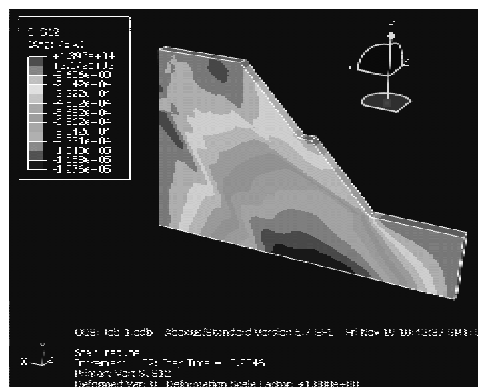


图 4 X - Y 平面剪应力分布图

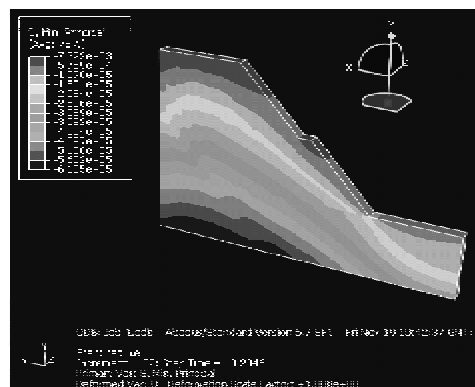


图 5 最小主应力分布图

由图 4、图 5 和图 6 可以看出,在地震力作用下, X - Y 平面内的剪应力是破坏时剪应力的 1.4 倍,最小主应力减小,岩层之间的横向位移增大,说明地震发生时边坡主要发生剪切破坏。此外,最大塑性区的分布范围也较以前广泛,在边坡岩体的上部内侧出现了塑性区的贯通,在岩体下部内侧也出现了塑性区。说明地震发生后,整个岩体的稳定性降低,边坡极易失稳。

由边坡的 X 方向位移与强度折减系数的关系可以得到边坡的安全系数,如图 7 所示。

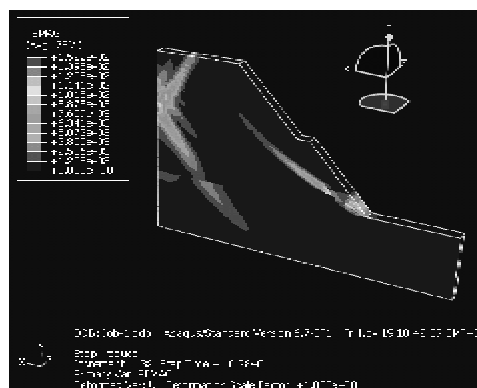


图 6 等效塑性应变图

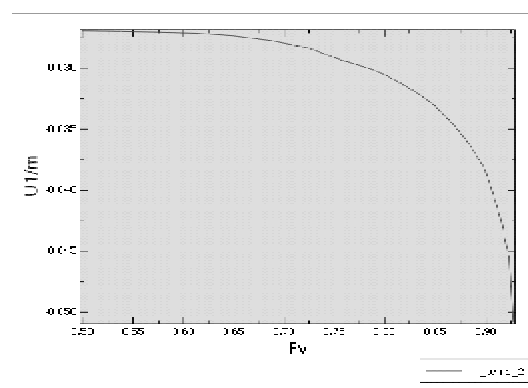


图 7 强度折减系数与 X 方向最大位移关系图

由图 7 可以看出,地震力作用下,安全系数在 0.65 以前边坡位移几乎不发生改变,在 0.65 与 0.80 之间边坡的位移增加缓慢,边坡开始出现塑性区破坏,在 0.80 与 0.85 之间位移迅速增长,边坡失稳,此时边坡的安全系数为 0.85,边坡处于失稳状态,需要进行加固。

5 结论

(1) 地震荷载是触发边坡失稳的主要原因之一,很多高边坡都受到地震影响。因此在地震高发区,在分析边坡稳定性进行边坡加固的时候需要考虑地震力的作用。

(2) 以京华高速公路挖方高边坡为例进行了研究。对其工程地质条件进行了详细的分析,在野外工程地质调查的基础上,结合典型工程地质单元,利用室内岩石力学实验,依此确定了岩体的工程岩体力学参数,为工程岩体力学参数的选取提供了正确思路和方法。

(3) 通过有限元软件 ABAQUS,建立了三维数值仿真模型。在试验区地震特点研究的基础上,取地震加速度值 $0.15g$,采用拟静力法+强度折减的方法,分别模拟了地震力作用下边坡的位移变形及主应力分布规律,计算了边坡的安全系数。

(4) 地震边坡破坏的原因主要是因为岩土体的剪切破坏以及拉破坏,在充分考虑边坡破坏机制的条件下,采用拟静力法+强度折减法对边坡稳定性进行分析是可行的,结论是可靠的。

参 考 文 献

- [1] 中国建筑科学研究院. GB50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国工业出版社, 2001.
- [2] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋, 等. 边坡地震稳定性分析探讨[J]. 地震工程与工程震动, 2010, 30(2): 173-180.
- [3] 李海波, 肖克强, 刘亚群. 地震荷载作用下顺层岩质边坡安全系数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2385-2394.
- [4] 戴妙林, 李同春. 基于降强法数值计算的复杂岩质边坡动力稳定性安全评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 2749-2754.
- [5] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋. 地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1714-1723.

Research of Excavation High-slope Stability of Highway Under Earthquake Load

Fan Xi'an

(Zhang-Zhuo Expressway Management Preparation Office, Baoding 071051, China)

Abstract: Considering slope destruction mechanism under earthquake, based on excavation high slope in Jing-hua highway, slope stability under earthquake is analyzed. Through analyzing engineering geology condition and combining sampling test on the spot, engineering mechanical parameters of rock slope are determined. By virtue of finite element software ABAQUS, three-dimensional numerical simulation model is established. Based on earthquake character of examination region, adopting pseudo-static method and strength reduction method, displacement and principal stress distribution of slope under the earthquake are simulated. Safety factor of slope is computed. This provides basis for slope reinforcement.

Key words: earthquake load; excavation high slope; engineering geology mechanical parameters; three-dimensional FEM numerical simulation; three-dimensional numerical simulation; strength reduction method; stability analysis

(责任编辑 车轩玉)

~~~~~

(上接第41页)

## Construction of Deck Arch Bridge Stiff Framework by Large Tonnage Crane

Feng Wenshan

(The Fifth Engineering Company of the 14th China Railway Bureau Group, Yanzhou 272117, China)

**Abstract:** Based on the Youxi Bridge in FJ-3A section during Xiang-Pu Railway, the assembly construction of the 1-140 stiff framework is introduced in this paper, with focus on the large tonnage tower crane hoisting jack sections and cable-stayed suspension method for cantilever erection of railway bridge with stiff skeleton construction technology.

**Key words:** stiff framework; crane; deck arch bridge; cantilever erection

(责任编辑 刘宪福)