

基于 FLAC3D 预应力锚杆抗滑桩 支护边坡地震响应分析*

黄士奎¹, 赵杰², 刘道勇²

(1. 国核电力规划设计研究院, 北京 100095; 2. 大连大学 土木工程技术研究与开发中心, 辽宁 大连 116622)

摘要: 建立预应力锚杆抗滑桩支护边坡三维模型, 通过坡面监测点分析地震作用下边坡坡面监测点位移、加速度响应以及地震过程中抗滑桩所受剪力与弯矩的受力规律。结果表明: 地震作用下边坡坡面产生永久位移, 最大水平位移发生在边坡中下部; 与无支护边坡相比, 预应力锚杆抗滑桩支护边坡能有效抑制坡面峰值加速度 PGA 放大系数。地震作用下抗滑桩随地震历时的增加受力不断变大, 最后趋于稳定, 其中剪力呈现倒“S”型, 桩身弯矩呈现“S”型。研究结论对预应力锚杆抗滑桩支护边坡的抗震设计有一定参考价值。

关键词: 预应力锚杆抗滑桩; FLAC3D; 地震响应; 抗滑桩受力; 加速度

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)01-0074-05

0 引言

我国拥有占国土面积 2/3 的山地, 自然地理环境导致了我国有相当数量的边坡。近年来全国范围内都在进行大规模的工程建设, 高速公路、铁路、隧道、采矿和建筑工程等的施工, 迫使我们对这些边坡进行加固。其中, 抗滑桩支护技术自 1860 年开始得到应用 (刘德功, 2011)。近年来, 在抗滑桩基础上发展起来的预应力锚杆抗滑桩技术作为一种新型的支护形式能有效提高边坡的抗震稳定性, 被广泛应用于工程实践中。

随着社会的发展, 边坡及其加固相关的抗震问题得到研究者越来越多的重视。但预应力锚杆抗滑桩的设计方法并不成熟, 特别是地震作用下桩体的受力及其加固效果还不是很明确 (于玉贞, 邓丽军, 2007)。近年来国内学者从不同的角度做了大量的研究工作, 陶云辉等 (2010) 对地震作用下抗滑桩的支护原理进行了数值模拟研究; 肖晓春等 (2002) 对地震过程中支护结构与土体相互作用问题进行了归纳总结; 于玉贞等 (2008) 借助土工试验离心机和专用振动台对砂土边坡进行了动力试验, 研究抗滑桩支护下边坡的地震响应分析以及支护结构与土体相互作用规律; 王谊

(2012) 借助 FLAC3D 有限差分软件, 在地震作用下对预应力锚索支护边坡的应力影响因素进行了研究, 重点对锚索的各个设计参数开展一系列研究, 为边坡的加固设计和施工提供理论依据; 周德培等 (2010) 通过对汶川地震引起的道路边坡工程破坏进行实例考察, 分析了各类边坡的破坏机理及相应支护结构的破坏形式, 调查发现锚索 (杆) 抗滑桩支护的边坡破坏相对较小, 这是因为这些支护结构能够与岩土体较好地形成一个统一的整体, 在地震作用过程中这些支护结构能够与坡体的变形很好地协调一致。本文基于 FLAC3D, 建立边坡三维模型, 得出地震作用下预应力锚杆抗滑桩支护边坡坡面位移、坡面加速度峰值放大系数以及支护结构受力等规律, 对该支护下边坡的破坏机理进行探讨。

1 计算方法

1.1 动力响应分析方法

地震响应分析采用拉格朗日差分法。同静力计算问题相似, 动力计算过程将模型离散为有限个单元体, 单元体受到地震动荷载作用时, 考虑单元的惯性力和阻尼力等因素的影响。动力计算中, 动应力平衡方程为 (何刘等, 2013)

* 收稿日期: 2015-11-16.

基金项目: 辽宁省教育厅项目 (L2015035) 和大连市科技计划项目 (2014E13SF145) 联合资助.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \quad . \tag{1}$$

式中， M 为系统的总质量矩阵； C 为系统的总阻尼矩阵； K 为系统的总刚度矩阵； \ddot{u} 为系统的加速度向量； \dot{u} 为系统的速度向量； u 为系统的位移向量； $F(t)$ 为系统的荷载向量。

1.2 动力边界条件

采用粘性边界条件来吸收边界上的入射波，在模型的法向和切向分别设置自由的阻尼器，从而实现吸收入射波的目的，阻尼器提供的法向和切向粘性力的计算公式分别为

$$t_n = -\rho C_p v_n, \tag{2}$$

$$t_s = -\rho C_s v_s. \tag{3}$$

式中， v_n 、 v_s 分别为模型边界上法向和切向的速度分量， ρ 为介质密度， C_p 、 C_s 分别为 P 波和 S 波的波速。

2 计算模型

2.1 模型建立

某均质边坡高 20 m，坡角为 45°，坡脚距左端边界 30 m，坡顶到右边界的距离为 50 m，模型总高度为 40 m，边坡厚度取 30 m。边坡土体采用弹塑性材料模型和 Mohr – Coulomb 屈服准则（韩万东等，2013）。边界采用粘性边界加自由场边界，施加局部阻尼，阻尼系数为 0.15。节点总数为 12 243，由 10 400 个单元组成。为探究边坡地震作用下的动力响应，自坡脚处沿坡高每 5 m 选取一监测点。利用 FLAC3D 建立的边坡动力响应分析模型如图 1 所示，模型材料物理力学参数如表 1 所示。

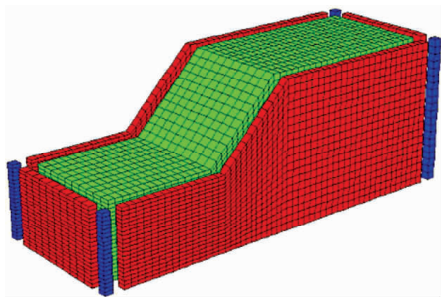


图 1 边坡动力响应分析模型
Fig. 1 Dynamic response simulation model of the slope

表 1 模型物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of the model

重度 /kN · m ⁻³	内聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	剪切模量 /MPa	体积模量 /MPa	弹性模量 /MPa
2 200	20	27	23	50	0. 004

2.2 地震动输入

地震波采用 RG1.60 时程地震波，其地震动持续时间为 28 s，地震动时程曲线如图 2 所示。该地震波频率成分比较均匀，振幅比较饱满，频率成分基本都包含在 20 Hz 以内，主要的频率成分在 10 Hz 以内，其傅氏谱曲线如图 3 所示。

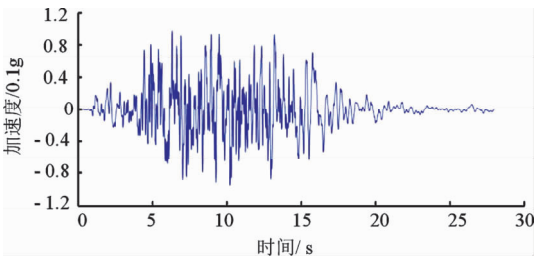


图 2 地震时程曲线
Fig. 2 Time-history curve of the earthquake

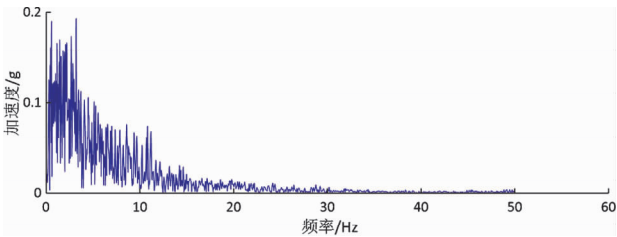


图 3 地震波傅氏谱曲线
Fig. 3 Fourier spectrum curve of the seismic wave

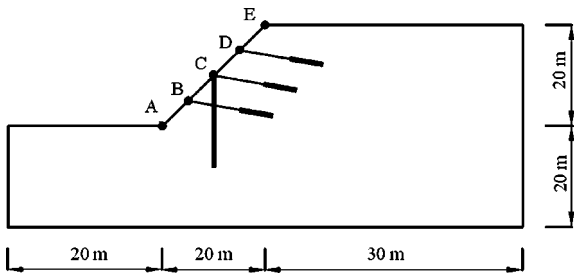


图 4 边坡支护剖面图
Fig. 4 Profile of the slope support

2.3 支护方案设计

边坡采用预应力锚杆抗滑桩支护方式，抗滑桩桩长 18 m，桩截面面积 1.5 m²，桩间距为 3 m。增设三排预应力锚杆，预应力锚杆长 16 m，自由

端 10 m, 锚固段 6 m, 预应力大小为 150 kN。边坡支护剖面如图 4 所示, A、B、C、D、E 为边坡支护点, 设计参数如表 2 所示。

表 2 抗滑桩物理力学参数

Tab. 2 Physical and mechanical parameters of anti-slide pile

耦合刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$		耦合内聚力/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$		耦合摩擦角/ $(^\circ)$	
切向	法向	切向	法向	切向	法向
5.2×10^9	5.2×10^9	8.0×10^{10}	8.0×10^{10}	20	20

3 地震响应结果分析

3.1 位移响应分析

图 5 为预应力锚杆抗滑桩支护边坡位移时程曲线。通过坡面监测点位移时程曲线可以发现, 边坡坡面各监测点在地震作用下, 均发生临空面方向的位移, 位移曲线在地震作用峰值加速度 8 s 附近发生较大的突变, 地震作用前 16 s 内, 位移振荡显著, 且不断增大, 地震作用 $T=16$ s 时达到最大值。地震作用临近结束, 位移增速缓慢, 位移曲线趋于平缓, 边坡产生永久位移。

图 6 为地震过程中边坡坡面在 $T=16$ s 和地震作用完成后 $T=28$ s 水平方向位移云图。地震作用下, 锚杆抗滑桩支护边坡最大水平位移在边坡中下部位, 地震作用过程中最大水平位移为 -0.39 m, 地震作用完成后水平位移变为 -0.17 m。

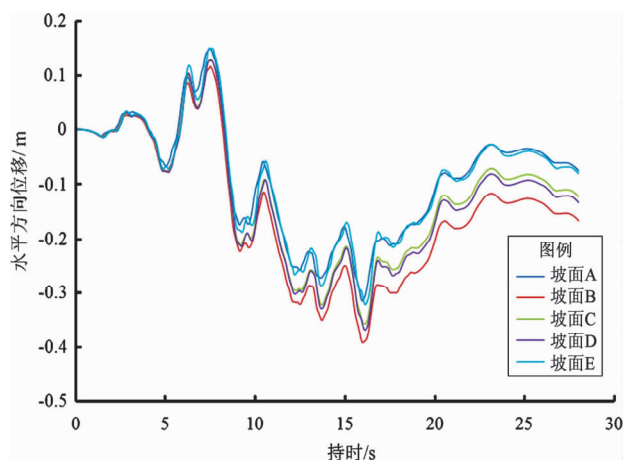


图 5 预应力锚杆抗滑桩复合支护边坡位移时程曲线
Fig. 5 Time-history curve of displacement of pre-stressed anchor anti-slide pile supporting slope

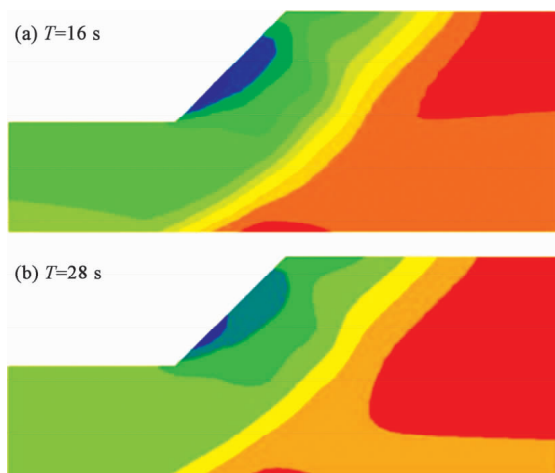


图 6 预应力锚杆抗滑桩复合支护边坡水平位移云图
Fig. 6 The horizontal displacement nephogram of the slope of pre-stressed anchor anti-slide pile supporting slope

3.2 加速度响应分析

定义各监测点动力响应加速度峰值与输入地震动加速度峰值的比值为 PGA 放大系数。本文输入加速度峰值为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。分析了无支护情况下与预应力锚杆抗滑桩支护在地震作用下 PGA 放大系数的变化。坡面各点 PGA 放大系数如图 7 所示, 无支护边坡坡面各点峰值加速度随坡高的增加而增大, 考虑支护后后边坡各点峰值加速度随坡高增加呈现波动变化, 到坡肩附近急剧增大, 在坡顶处 PGA 放大系数达到最大值。

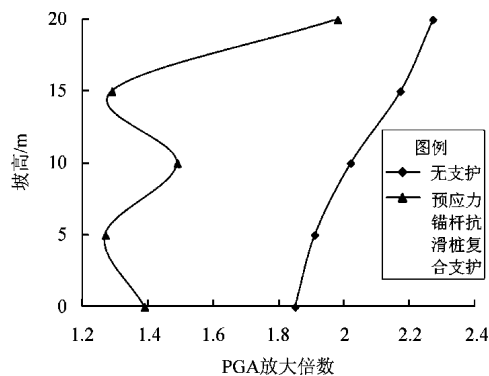


图 7 坡面各点 PGA 放大系数
Fig. 7 Amplification factors for PGA of each point of the slope

表 3 为各测点峰值加速度放大系数汇总, 从表中可以看出: 边坡支护后坡面峰值加速度放大系数较无支护边坡显著降低, 可见预应力锚杆抗滑

桩支护能有效抑制坡面加速度的放大作用。

3.3 抗滑桩受力分析

图 8a 为地震过程中桩身所受剪力的变化。随地

表 3 坡面各点峰值加速度及 PGA 放大系数
Tab. 3 Peak ground acceleration and PGA amplification factor of each point along the slope

监测点	无支护 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	PGA 放 大系数	预应力锚杆滑抗 桩支护/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	PGA 放 大系数	差值 (%)
A	-3.696	1.85	-2.783	1.39	24.86
B	-3.813	1.91	-2.539	1.27	33.51
C	-4.040	2.02	-2.981	1.49	26.24
D	-4.344	2.17	-2.582	1.29	40.55
E	-4.541	2.27	-3.968	1.98	12.78

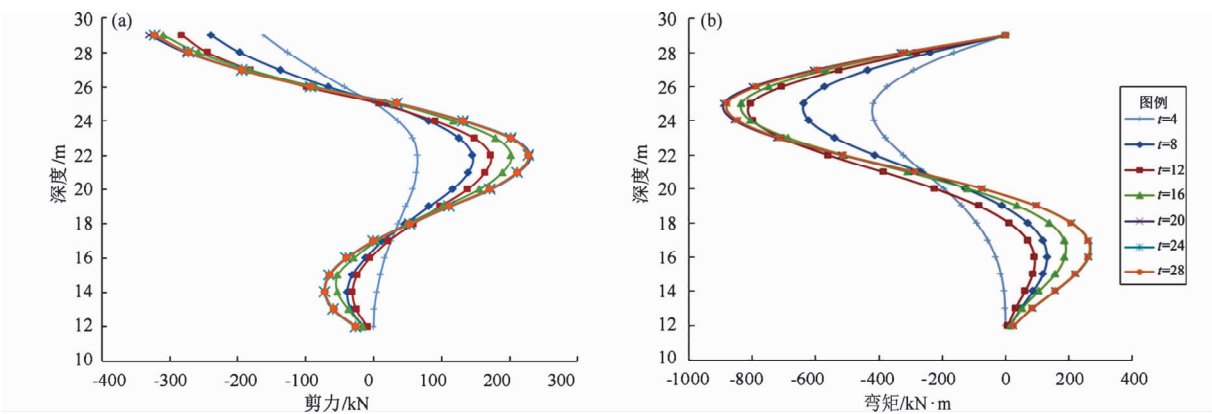


图 8 预应力锚杆支护抗滑桩剪力 (a)、弯矩 (b) 分析

Fig. 8 Analysis on the shear (a) and moment (b) Analysis of anti-slide pile with pre-stressed anchor support

4 结论

本文研究了地震作用下预应力锚杆抗滑桩复合支护边坡，通过坡面监测点的位移、峰值加速度放大系数以及支护结构受力规律。分析可得到如下结论：

由边坡位移时程曲线可知，地震作用完成后边坡产生永久性位移，预应力锚杆抗滑桩支护最大水平位移发生在边坡坡面中下部，有效抑制了边坡坡面的变形，地震作用后坡面最大位移为 -0.17 m。

无支护情况下，边坡坡面 PGA 放大系数随坡高增大不断变大，预应力锚杆抗滑桩复合支护边坡坡面 PGA 放大系数随坡高增大，且出现波动，

震持时的增加，桩身剪力不断增大，但增加幅度越来越小，当持时超过 16 s 后，由于地震波衰减，桩身剪力变化不再明显。预应力锚杆抗滑桩复合支护，抗滑桩桩身剪力大致也呈现倒“S”型，由于顶部预应力锚杆的存在，桩顶出现一定的负剪力。桩身承受的最大正剪力为 227.9 kN，最大负剪力为 -321.4 kN。

图 8b 为地震过程中桩身弯矩的分布图，桩身弯矩同剪力一样呈现明显的规律变化。随地震持时的增加，弯矩不断增大，但增加幅度越来越小，当持时超过 16 s 后，由于地震波衰减，弯矩变化不再明显。预应力锚杆抗滑桩复合支护抗滑桩桩身弯矩呈现“S”型，桩身正负弯矩最大值出现在深度 26 m、18 m 附近。桩身承受最大正弯矩为 263.2 kN·m，最大负弯矩为 -846.0 kN·m。

PGA 放大系数较无支护边坡更小，说明其能有效抑制坡面加速度的放大作用。

由预应力锚杆抗滑桩支护结构受力分析可知，地震作用过程中预应力锚杆抗滑桩桩身剪力大致呈现倒“S”型，但桩顶出现负剪力；预应力锚杆抗滑桩桩身弯矩呈现“S”型；抗滑桩受力随地震作用不断增大，最后趋于稳定。

参考文献：

韩万东,谷明宇,杨晓云等. 2013. FLAC3D 数值模拟的边坡稳定性[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版,32(9):1204-1208.
何刘,吴光,谢驰等. 2013. 三维实体边坡地震动力响应规律[J]. 西南交通大学学报,48(1):55-61.
刘德功. 2011. 高烈度地震区高陡边坡支撑结构[D]. 重庆:重庆交通大学.
陶云辉,周勇波,王伟峰. 2010. 地震条件下双排抗滑桩受力分析

- [J]. 路基工程, (2): 163 - 166.
- 王谊. 2012. 桩板抗滑结构中预应力锚索锚固段受力动态响应特性研究[J]. 路基工程, (3): 137 - 140.
- 肖晓春, 林皋, 迟世春. 2002. 桩 - 土 - 结构动力相互作用的分析模型与方法[J]. 世界地震工程, (4): 123 - 130.
- 于玉贞, 邓丽军. 2007. 抗滑桩加固边坡地震响应离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 29(9): 1320 - 1323.
- 于玉贞, 李荣建, 柴霖等. 2008. 铜质模型桩加固边坡的动力离心模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, (5): 41 - 46.
- 周德培, 张建经, 汤涌. 2010. 汶川地震中道路边坡工程震害分析[J]. 岩石力学与工程学报, 29(3): 565 - 576.

Seismic Response Analysis for the Prestressed Anchor Anti-slide Pile Supporting Slope Based on FLAC3D

HUANG Shikui¹, ZHAO Jie², LIU Daoyong²

(1. State Nuclear Electric Power Planning Design & Research Institute, Beijing 100095, China)

(2. The R&D Center of the Civil Engineering Technology, Dalian University, Dalian 116622, Liaoning, China)

Abstract

A3D model of prestressed anchor anti-slide pile supporting slope was built, and the displacement and acceleration response of monitoring points on the surface of side slope, and the law between the forces and bending moment of anti-slide pile under the earthquake was analyzed through the monitoring points on the side slope. The result shows that the perpetual displacement of the surface of side slope was produced under the action of earthquake, and the maximum horizontal displacement occurred in the lower-middle part of the slope. Compared with the slope without support, the prestressed anchor anti-slide pile supporting slope could control the amplification factor of slope surface peak acceleration PGA actively. Under the action of earthquake, the stress of anti-slide pile constantly became larger with the increasing of the diachronic earthquake, and became stable finally. The shear force appeared reverse "S" shape, and the bending moment of pile was appeared "S" shape. The obtained conclusion has the certain reference value for the seismic design of the prestressed anchor anti-slide pile.

Key words: prestressed anchor anti-slide pile; FLAC3D; seismic response; anti-slide pile stress; acceleration