

预应力锚索桩板墙的地震响应及影响参数研究\*

曲宏略<sup>1</sup>,李瑞峰<sup>1</sup>,张建经<sup>2</sup>,胡焕国<sup>1</sup>

(1.西南石油大学 地球科学与技术学院,成都 610500;2.西南交通大学 土木工程学院,成都 610031)

**摘 要:**汶川地震震害调查表明,使用预应力锚索的桩板墙变形协调性更好,抗震性能提高,但目前在预应力锚索桩板墙的抗震设计理论研究方面仍比较落后。本文利用FLAC<sup>3D</sup>对预应力锚索桩板墙的地震响应特征进行了研究,包括桩身土压力分布、桩身变位及锚索内锚段应力的动力响应特性等,并通过改变地震动参数、材料参数和结构设计参数,进行了多种工况的分析,系统研究了影响参数对桩-土-锚动力耦合相互作用规律的影响。通过对FLAC<sup>3D</sup>的数据分析,其研究表明:锚索限制了桩板墙结构的运动,墙后土压力在锚索附近显著增大;桩前基础表面的土体易损坏,因此,应高度重视桩前位置,这对抗震设计有积极影响;随着内聚力和内摩擦角的增大,桩的位移、应力和锚固轴力等减小;锚索存在临界有效锚固长度,在临界范围内,通过减小桩间距来提高加固效果并不明显。研究成果加强了对预应力锚索桩板墙抗震表现的认识,也为深化抗震机理研究提供了可靠的依据。

**关键词:**预应力锚索桩板墙;地震响应;参数影响

中图分类号:TU473.1      文献标识码:A      文章编号:1673-0836(2018)02-0536-10

Research on Seismic Responses and Influence Parameters  
for Prestressed Anchor Sheet Pile Wall

Qu Honglue<sup>1</sup>, Li Rui Feng<sup>1</sup>, Zhang Jianjing<sup>2</sup>, Hu Huanguo<sup>1</sup>

(1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, P.R.China;  
2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P.R.China)

**Abstract:** The prestressed anchor sheet pile wall is a new type of light retaining structure, and has been widely used. Researches show that the sheet pile wall with prestressed anchor has been proved to have better performance due to advanced deformation compatibility. Whereas, the research on seismic design theory of prestressed anchor sheet pile wall is laggard at present. Therefore, FLAC<sup>3D</sup> was performed to study seismic responses of this structure, including distribution of seismic earth pressure along pile, deflection of pile, dynamic characteristics of cable stress in anchorage segment, etc. In addition, analysis of multiple cases were completed through changing parameters of ground motion, material, and structure, so the influence of parameters on dynamic interaction law of pile-soil-anchor was systematically discussed. Through data analysis from FLAC<sup>3D</sup>, some conclusions are obtained. Firstly, anchor cable limits the movement of sheet pile structure, and the increases the earth pressure near the anchor position. The soil on the surface of foundation before pile is easy to damage. Therefore, the position of fore shaft should receive a great of attention, which has a positive effect on seismic performance. Secondly, with the growth of cohesive force and angle of internal friction, the values of displacement, stress of pile, anchor axial force get smaller. Thirdly, within the critical

\* 收稿日期:2017-11-01(修改稿)  
作者简介:曲宏略(1984-),男,山东青州人,博士,讲师,主要从事岩土工程抗震方面的研究。  
E-mail:geoqhl@126.com  
基金项目:国家自然科学基金(41602332);国家安全生产监督管理局项目(2014\_3189);西南石油大学科研培育项目(2013XJZ020)

pile spacing, it is not obvious to improve the reinforcement effect through reducing the pile spacing. The results of analysis strengthen the understanding of this structure for seismic performance, and provide a reliable basis for further research of seismic mechanism.

**Keywords:** prestressed anchor sheet pile wall; seismic responses; influence of parameters

0 引言

边坡支护结构对保持边坡地震时的稳定性、减轻地震影响和抢险保通具有重要作用。震害调查结果表明,柔性支挡结构(如加筋土挡墙、桩板墙等)较刚性挡土墙具有更好的抗震表现<sup>[1]</sup>,特别是使用预应力锚索的锚索桩板墙,由于结构-土的动力耦合性更好,因此抗震性能更佳<sup>[2]</sup>。然而,由于结构发展较晚,受力体系更复杂,国内外对其认识仍不够全面。国外关于该结构的研究多集中于码头、基坑中的应用方面,如 Christie<sup>[3]</sup>、Zhai<sup>[4]</sup> 等。相比国外,锚索桩板墙在国内边坡抗滑中的应用更为广泛,研究也较多,如周德培等<sup>[5]</sup>、蒋忠信<sup>[6]</sup>、肖世国等<sup>[7]</sup> 都对结构的设计理论提出了自己的见解,对静力研究方面的推动较大,但目前在抗震机理方面的研究仍不够深入。鉴于此,本文利用 FLAC<sup>3D</sup>开展了锚索桩板墙地震下动力响应特性的分析工作,特别对不同结构设计参数和材料参数等的影响进行了研究。

1 数值分析模型

案例与文献[8]选用一致,而本文更侧重于参数变化对结构动力响应特性的影响。为了便于阅读,将数值计算模型简要介绍如下:所选案例为挖方路堑斜坡,上覆第四系全新统松散堆积层(Q<sub>4</sub><sup>cdl</sup>),下伏侏罗系上统遂宁组(J<sub>3</sub>sn),坡度约

27°,处于自然稳定状态,但在强降雨及工程扰动的情况下,有可能滑坡。锚索桩的桩长 28 m,嵌固 17 m,截面尺寸 2.5 m×3.5 m,锚索 2 排,下倾角约 20°,内锚段长 10 m,预应力 750 kN,理论破断力 1 554 kN。建立的计算模型如图 1 所示。

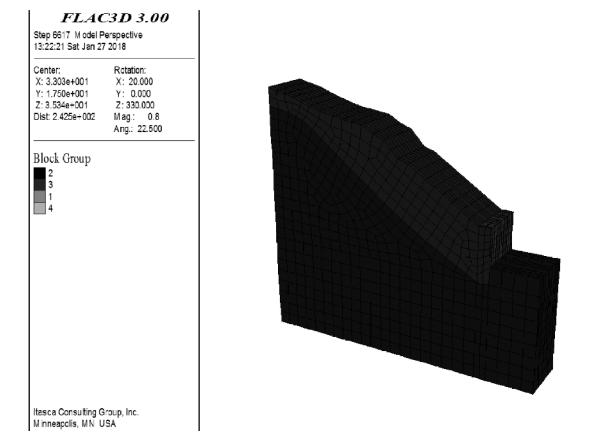


图 1 FLAC<sup>3D</sup>计算模型图

Fig. 1 Calculation model for FLAC<sup>3D</sup>

计算选用的材料参数和本构模型选取如表 1,锚索采用 Cable 结构单元模拟,弹性模量为 2.0×10<sup>11</sup> Pa,抗拉强度为 1 554 kN。模型底部施加 El Centro 地震应力时程为典型的地震加载时程,加载时间取为 30 s,四周采用自由场边界,土体在地震波传播过程中的阻尼作用采用 5%局部阻尼比来近似表征。

表 1 各分组材料参数<sup>[9]</sup>  
Table 1 Parameters of materials<sup>[9]</sup>

材料分组	计算模型	容重 /(kN·m <sup>-3</sup> )	粘聚力 /kPa	内摩擦角 φ/(°)	体积模量 /kPa	剪切模量 /kPa	弹性模量 /kPa	泊松比
堆积层滑体	Mohr-Coulomb	19	19	24	8.04×10 <sup>4</sup>	3.71×10 <sup>4</sup>	—	—
基岩滑床	Elastic	24	50	40	4.44×10 <sup>5</sup>	3.33×10 <sup>5</sup>	—	—
抗滑桩	Elastic	25	—	—	1.72×10 <sup>7</sup>	1.29×10 <sup>7</sup>	—	—
挡土板	Elastic	25	—	—	—	—	2.8×10 <sup>7</sup>	0.2

2 地震下动力响应分析

通过对上述计算模型在 3 种地震波和 PGA

0.1g、0.2g 和 0.4g 条件下进行加载,可得到模型的土压力、位移,以及内锚段拉力和剪应力的动力响应随地震动参数的影响规律。文献[8]进行

过详细论述,在此只通过规律曲线对规律性进行总结,以便后文进行参数分析时进行对比研究。

2.1 土压力

结构中锚索的设置会产生影响土压力分布的效果,由于限位作用,锚索附近桩背土压力出现增大,如图 2。

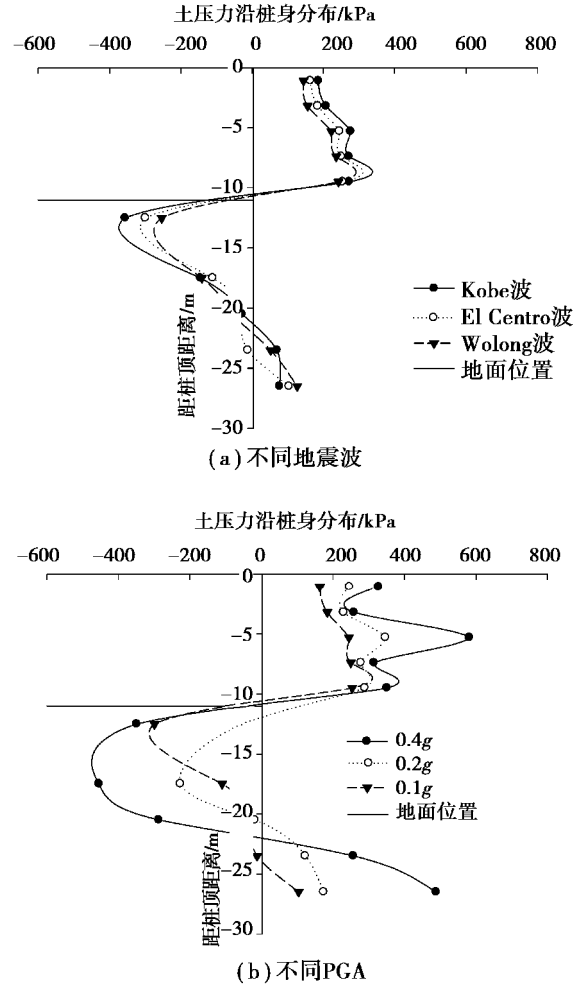


图 2 土压力沿桩身分布

Fig. 2 Distribution of earth pressures along pile

2.2 位移

锚索桩在地震作用下产生外倾,如图 3。虽然设计时考虑桩为柔性结构,但实际地震中的反应为刚性转动反应,转点在嵌固深度以下约 2 m 处,桩体本身产生的挠性变形可以忽略,运动模式与土压力曲线分布规律吻合。

2.3 锚索拉力与剪应力

锚索拉力在时程上很容易达到一定的数值附近就不再出现大幅的变化波动,说明按固定值对锚索拉力进行抗震设计具有一定的依据,如图 4。

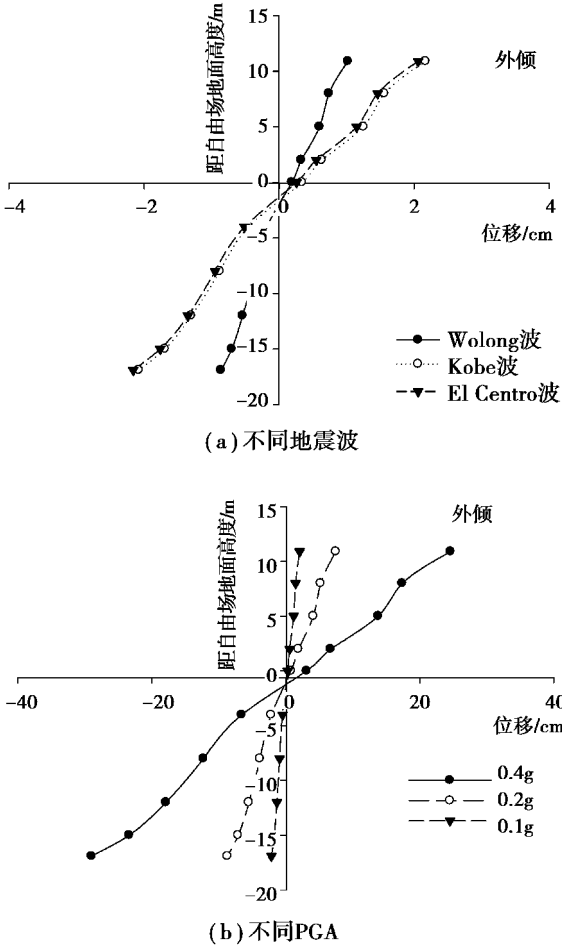


图 3 桩身实测位移

Fig. 3 Measured displacement of pile

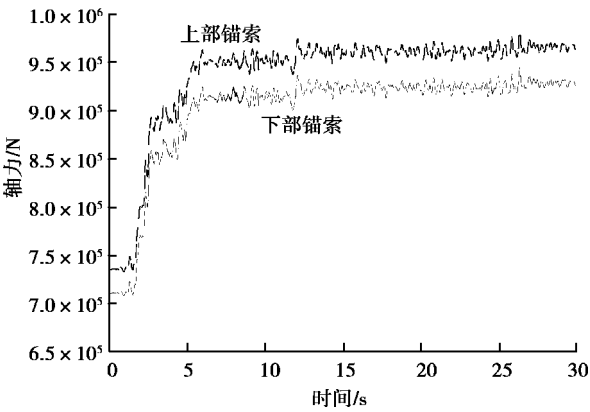


图 4 锚索自由段拉力动态响应规律

Fig. 4 Dynamic response regularity of axial force in free segment of upper cable

内锚段锚索拉力沿深度逐渐减小,呈“倒喇叭”曲线状分布<sup>[10]</sup>,如图 5。

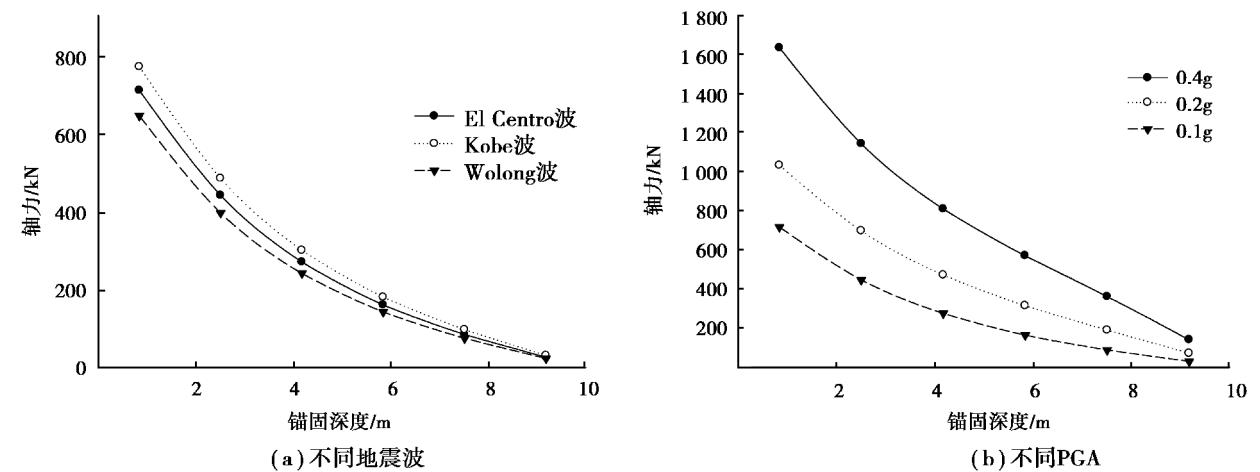


图5 预应力锚索内锚段拉力分布规律

Fig. 5 Distribution pattern of axial force in anchorage segment of prestressed cable

剪应力在内锚段端头附近急剧增大,且该模型下排锚索所受剪应力较上排略大,原因是下排锚索的倾角更大,如图6。

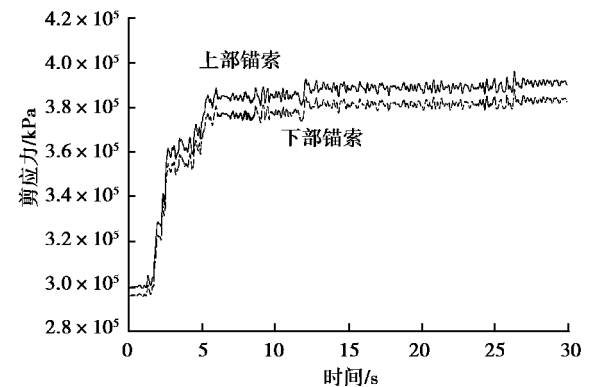


图6 锚索内锚段约2.5 m处剪应力动态响应规律  
Fig. 6 Dynamic response regularity of shear stress in about 2.5 m of anchorage segment of upper cable

剪应力呈“枣核”状高斯单峰曲线分布<sup>[6]</sup>,如图7,说明采用平均黏结强度来计算内锚段的长度偏于危险<sup>[7]</sup>。岩体越软,侧阻力在锚固深度上的分布越均匀<sup>[11]</sup>,盲目增加内锚段长度是无益的,与现场测试结果<sup>[12]</sup>和目前的剪切滞模型吻合<sup>[13]</sup>。

另外,通过将土压力、位移,锚索拉力及剪应力在不同地震波和不同PGA下的响应情况进行对比可以发现,PGA越大,地震响应越明显,在0.4g时,桩顶位移接近桩长的10%,桩背土压力剧增,锚索拉力已超过理论破断力。

另外,动力响应情况与自振周期附近加速度反应谱幅值的排序较为一致,在本模型中,即在结构自振周期0.248 s附近,谱幅值排序为Kobe>El Centro>Wulong,如图8。这充分说明了结构抗震设计时动力特性对抗震效果的影响。

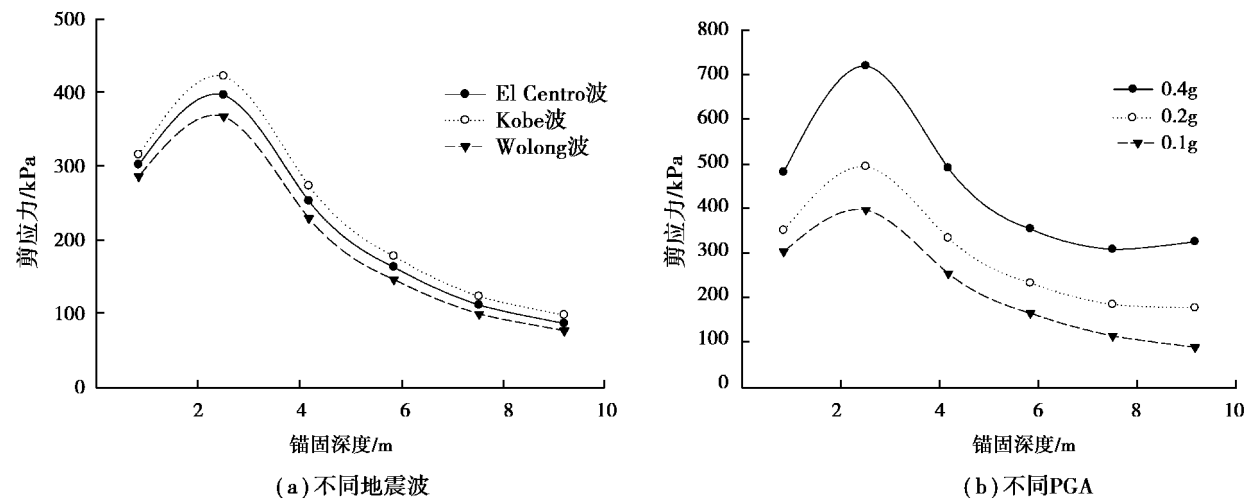


图7 预应力锚索内锚段剪应力分布规律

Fig. 7 Distribution pattern of shear stress in anchorage segment of prestressed cable

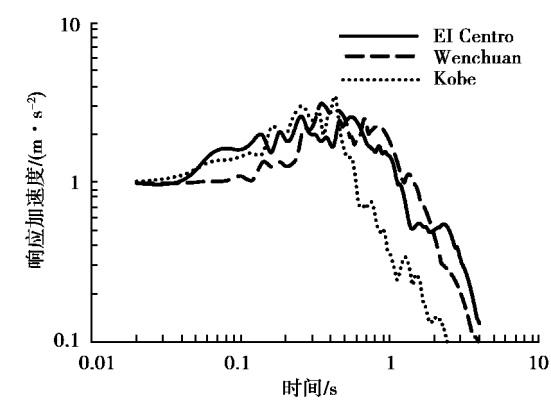


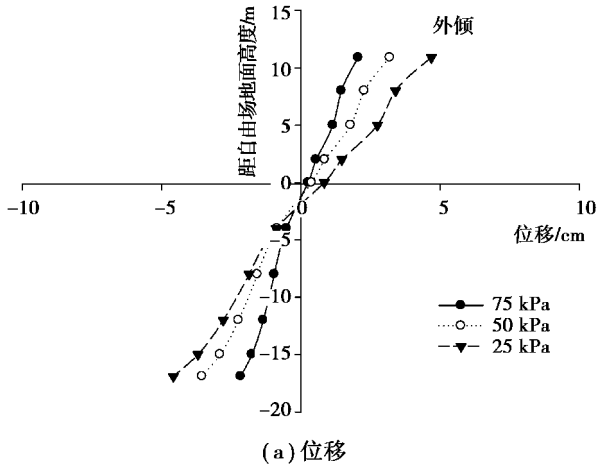
图 8 加速度反应谱对比

Fig. 8 Comparison of acceleration response spectrum

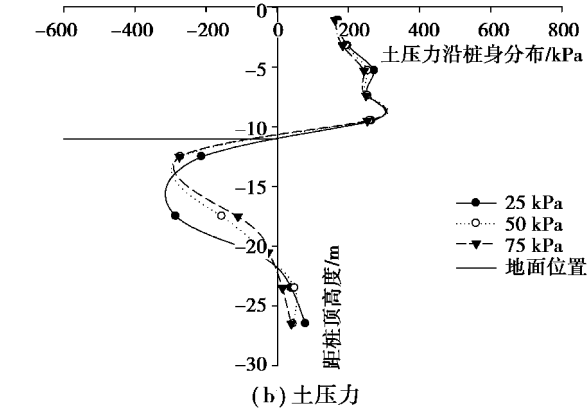
3 影响参数研究

3.1 材料参数影响

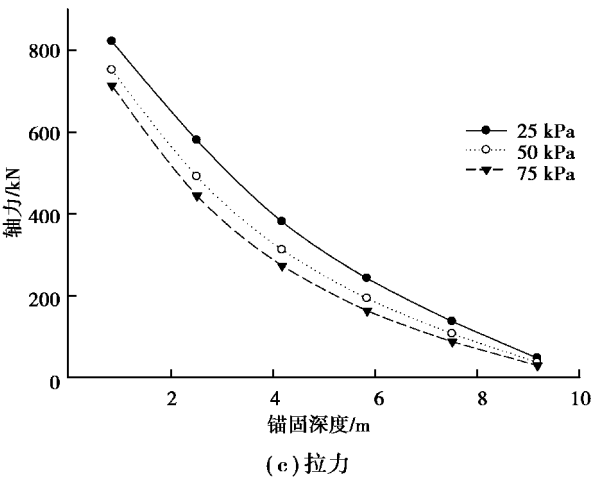
对于边坡抗滑结构而言,确定滑坡推力对抗震设计十分重要,而它的计算受滑带抗剪强度的影响特别敏感。因此,为了明确材料参数的影响,本文分别研究了  $c$ 、 $\varphi$  值对结构抗震响应特性的影响,分别如图 9 和图 10 所示。



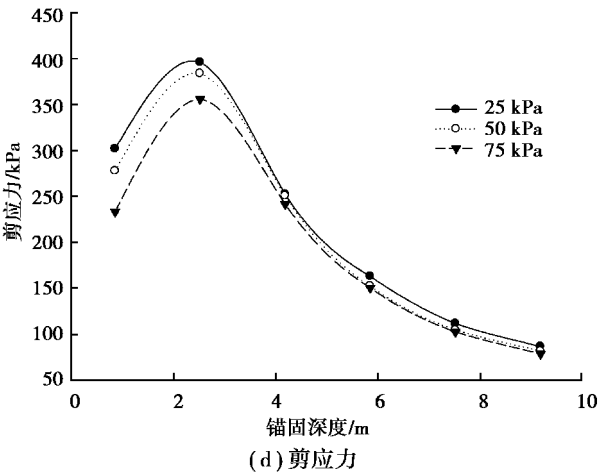
(a) 位移



(b) 土压力



(c) 拉力



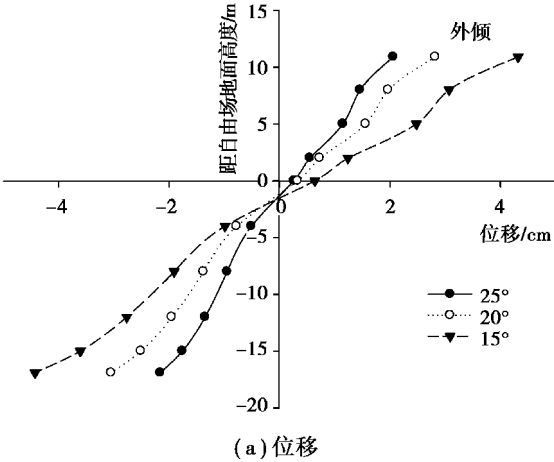
(d) 剪应力

图 9 不同滑床黏聚力  $c$  下结构地震响应情况

Fig. 9 Seismic response of structure with different cohesion  $c$  in sliding bed

3.1.1 黏聚力  $c$  的影响

通过图 9 可以看出,黏聚力  $c$  值增大时,锚索桩板墙在地震作用下的位移减小,结构受土压力的作用减小,锚索拉力与内锚段的剪应力分布包络面积变小。



(a) 位移

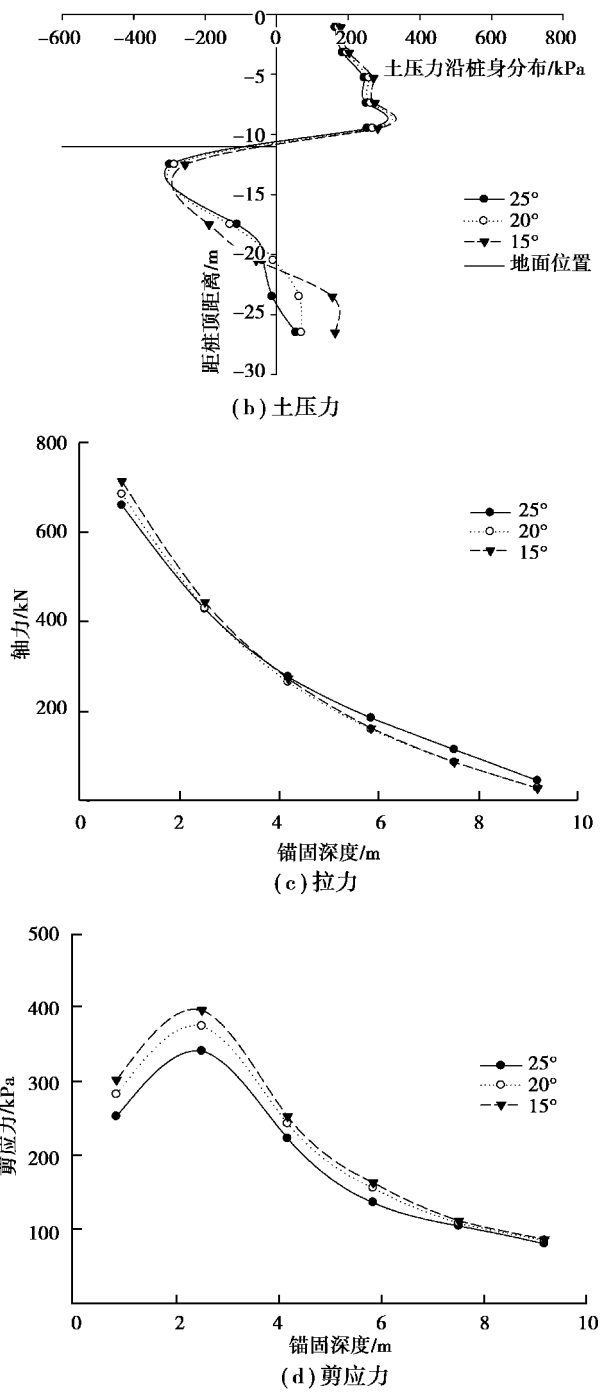


图 10 不同滑床内摩擦角  $\varphi$  下结构地震响应情况

Fig. 10 Seismic response of structure with different internal friction angle  $\varphi$  in sliding bed

3.1.2 内摩擦角  $\varphi$  的影响

通过图 10 可以看出,内摩擦角  $\varphi$  值增大时,锚索桩板墙在地震作用下的位移减小,结构受土压力的作用减小,锚索拉力与内锚段的剪应力分布包络面积变小。

3.2 结构参数影响

锚索桩板墙是由抗滑桩、锚索共同构成的结构

体系,又涉及结构-土之间的动力相互作用问题,因此,影响结构受力变形的因素较多,本文以与锁定结构相关的锚固下倾角、内锚段长度,以及与抗滑桩相关的嵌固深度、桩间距为变量,分析参数变化对动力响应特性的影响。分析之后发现土压力的分布情况、位移变形情况以及内锚段的应力对于参数变化并非都敏感,因此,为节约篇幅,在此只选取较敏感的部分进行阐述<sup>[9]</sup>。

3.2.1 锚——锚索锚固倾角

对比下倾角为水平、10°和 20°三种情况,发现下倾角度变小时,桩顶位移变大,转点略变深,说明此模型在 0.1g 工况下水平锚索的限位效果较倾斜锚索稍差,但位移总体差别不大,如图 11。

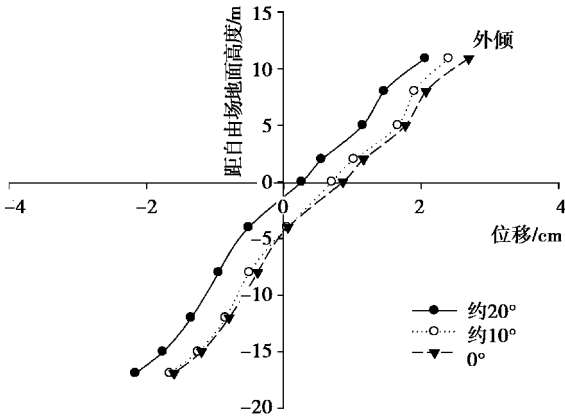


图 11 桩身变位对比

Fig. 11 Comparison of deflection of pile

产生上述现象的原因主要是因为锚索的设置会在滑动面上产生一定的限位抗滑效应,还会对滑动面产生法向作用力。该法向力的存在会导致抗滑摩擦的增大,因此,下倾角的减小虽然会导致抗滑拉力增大,但是也会导致法向力的减小,如图 12。因此,锚索倾角的选择应综合考虑抗滑拉力和法向力的共同作用,即以二者导致滑体抗滑摩擦力产生增量之和最大为宜。

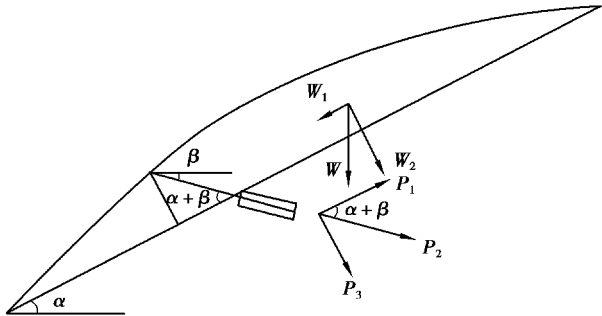


图 12 锚索对边坡抗滑的作用

Fig. 12 Anti-sliding effect of cable to slope



预应力锚索最佳倾角的确定,与滑动面倾角、滑带土的内摩擦角等相关性强。通常,锚固角不宜大于 45°,一般取为 15°~30°,也可参照式(1)计算<sup>[14]</sup>:

$$\beta = \frac{45^\circ}{A + 1} + \frac{2A + 1}{2(A + 1)}\varphi - \alpha \tag{1}$$

由式(1)可知,此时的最佳下倾角等于 18°。原型倾角与之接近,因此,倾角对于桩身内力的影响较小,如图 13。但是原型锚索的限位效果优于下倾角变小的锚索,并且在实际工程中直接采用水平锚索的方式进行加固也是不经济的<sup>[14]</sup>。

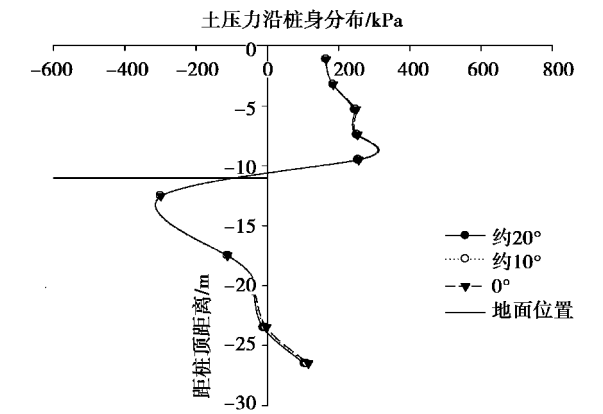


图 13 桩身土压力分布对比

Fig. 13 Comparison of distribution of earth pressures along pile

取上部锚索为例,拉力和剪应力分布如图 14~15,可以发现,在目前的几个下倾角度中,拉力和剪应力均随着下倾角度的增加而增大。而且,内锚段端头附近下倾锚固的拉力和剪应力峰值大于原型锚固的,但是随着嵌固深度的增加,二者的拉力值和剪应力值逐渐趋于相等。这是由于同等桩身变位使下倾锚索伸长量更大而导致的。

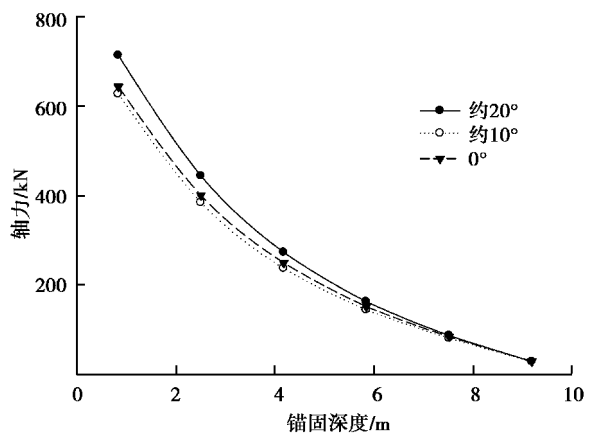


图 14 上部锚索拉力分布

Fig. 14 Distribution pattern of axial force of upper cable

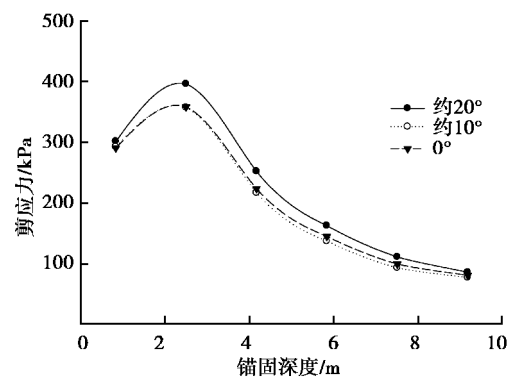


图 15 上部锚索剪应力分布

Fig. 15 Distribution pattern of shear stress of upper cable

3.2.2 锚——内锚段长度

当其他设计参数不变、研究锚索内锚段长度为 10、15 和 20 m 时,锚索拉力和剪应力随锚固深度的变化,如图 16~17。可发现不同长度锚索的拉力和剪应力均随着锚固深度的增加而减小。具体来说,在同一锚固深度时,锚段长度越小,其拉力值越小。随着长度的增加,剪应力峰值在端头附近逐渐变小,而随锚固深度减小的趋势变陡<sup>[15]</sup>。当锚固深度大于等于 6 m 时,减小趋势更为明显,末端应力值变小。

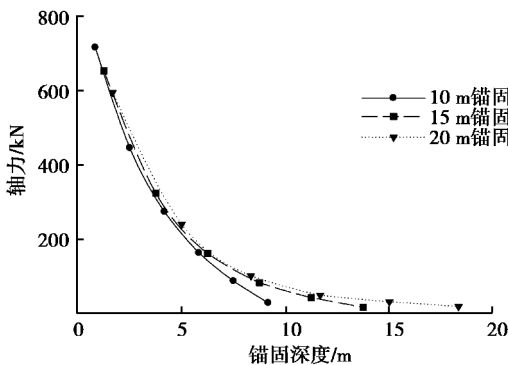


图 16 上部锚索拉力分布

Fig. 16 Distribution pattern of axial force of upper cable

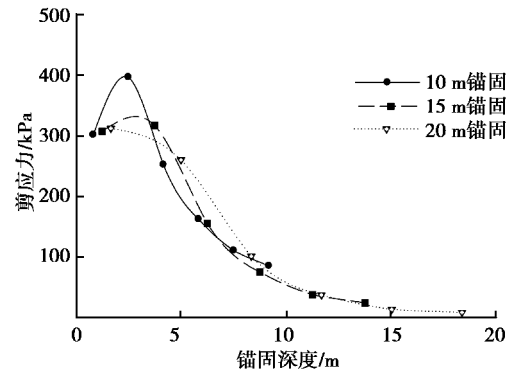


图 17 上部锚索剪应力分布

Fig. 17 Distribution pattern of shear stress of upper cable

3.2.3 桩——嵌固深度

桩嵌固深度的影响考虑 17、14.5 和 12 m,沿桩身分布的土压力如图 18。从图中可以看出,嵌固深度对悬臂段桩身的受力分布影响不大,而对于嵌固段的影响较大。随着嵌固深度的增加,土体抗力逐渐较小且转点深度逐渐变浅,即当嵌固深度较小时,结构需要产生更大的土体抗力与滑坡推力在嵌固处产生的剪力和弯矩平衡<sup>[16]</sup>。

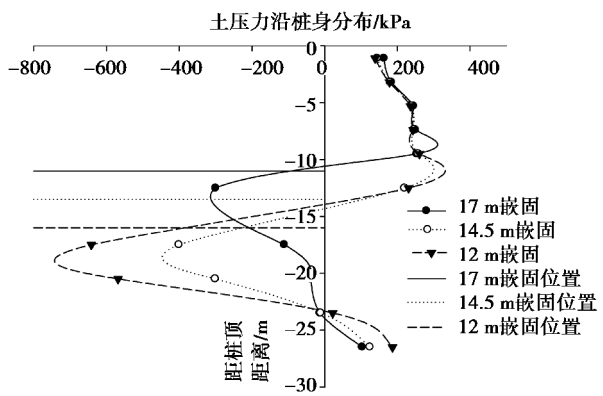


图 18 桩身土压力分布对比

Fig. 18 Comparison of distribution of earth pressures along pile

但是,在地震作用下,过分地增加桩的嵌固深度并不能直接有效地提高桩板式结构的抗震效果,反而会给施工增加工作量。根据文献可知,提高结构抗震效果的有效措施是阻止产生抗力的桩前土体出现塑性破坏,即加强其锁口效果<sup>[17]</sup>。

在不同的嵌固深度下,模型桩身的位移变化如图 19,随着嵌固深度的增加,桩身位移逐渐增大。另外,嵌固深度为 17 m 的桩顶位移是 12 m 嵌固深度的 2 倍,且在桩顶位移增大的过程中,转点深度加深 5 m 以上。因此,17 m 的嵌固深度时,该模型处于有效嵌固深度范围,且在此有效范围内,桩身变位对嵌固深度的敏感度较高。

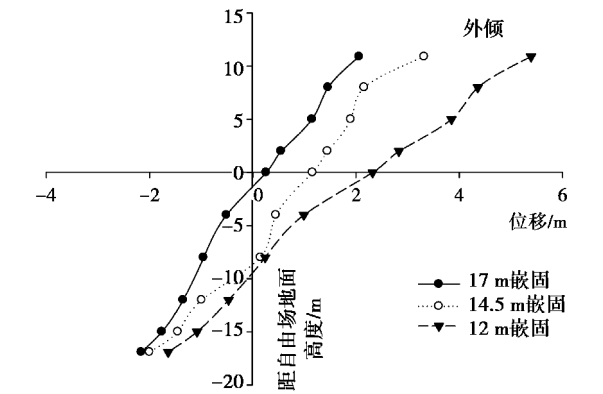


图 19 桩身变位对比

Fig. 19 Comparison of deflection of pile

对于上下排拉力和剪应力而言,嵌固深度的改变对其峰值有较大的影响,即 17 m 嵌固深度时的锚索拉力和剪应力峰值约为 12 m 工况时的 2 倍,如图 20~21,与图 19 结果相符,表明嵌固深度对于加固效果的影响较为明显。另外,上部锚索的拉力和剪应力随着锚固深度的增加而逐渐减小,且长悬臂模型的拉力和剪应力减小的速率更大,最终趋于相等。

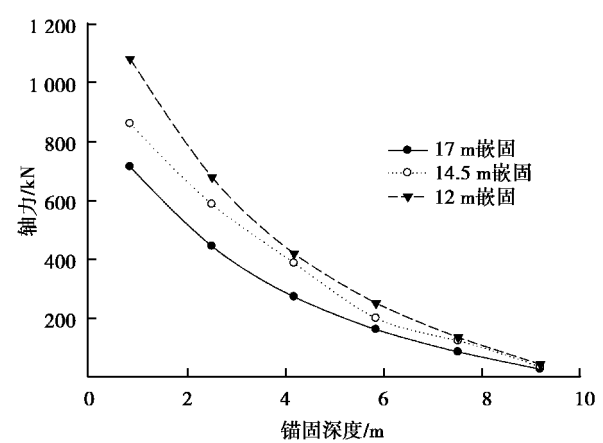


图 20 上部锚索拉力分布

Fig. 20 Distribution pattern of axial force of upper cable

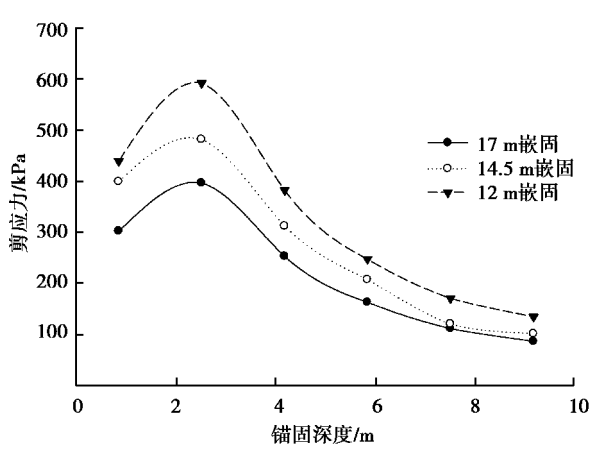


图 21 上部锚索剪应力分布

Fig. 21 Distribution pattern of shear stress of upper cable

3.2.4 桩——桩间距

在其他参数不变的基础上,取桩间距分别为 7.5 m 和 10 m,然后与原型相比较以研究桩间距对模型地震响应的影响,其桩身土压力分布对比如图 22。由于桩是滑坡推力的主要承载体,因此桩间距的不同直接导致了桩背土压力分布的不同,即滑坡推力和土体抗力会随着桩间距的减小而减小,但是减小幅度的较小。



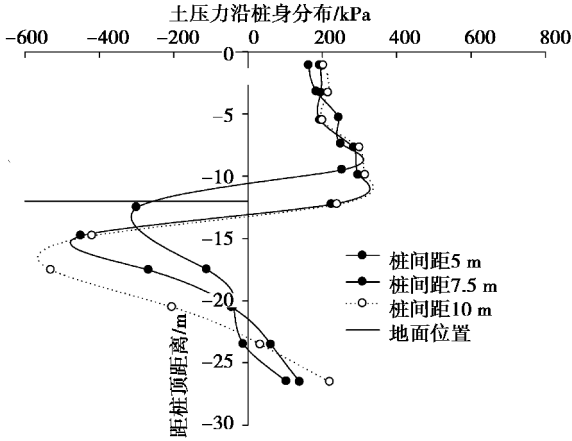


图 22 桩身土压力分布对比

Fig. 22 Comparison of distribution of earth pressures along pile

在此模型中,桩间距的改变对锚索拉力和剪应力的影响较小,如图 23~24 所示。随着嵌固深度的增加,桩间距为 10 m 时的拉力和剪应力减小速率大于桩间距较小的,最终趋于相等。

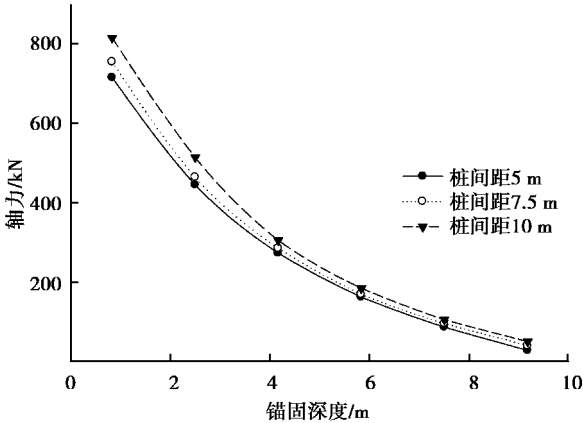


图 23 上部锚索拉力分布

Fig. 23 Distribution of axial force of upper cable

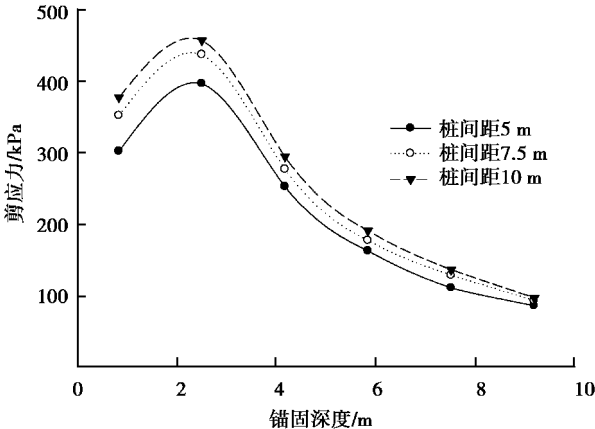


图 24 上部锚索剪应力分布

Fig. 24 Distribution of shear stress of upper cable

## 4 结论

基于结构-土相互作用,利用 FLAC<sup>3D</sup> 建立预应力锚索桩板墙模型,对其地震响应和参数影响进行了研究。经过对比分析,可以得到以下结论:

(1) 在地震作用下,锚索的存在限制了桩板墙结构的变位,且墙后土压力在锚索附近显著增大。锚索拉力在内锚段“倒喇叭”状逐渐减小,剪应力呈“枣核”状高斯单峰曲线分布。结构动力响应特性受 PGA 和频谱特性影响显著。

(2) 滑带抗剪强度越大时,结构位移越小,受力越小,锚索拉力与内锚段剪应力分布也相对变小。

(3) 由于锚索的抗滑拉力和法向力将导致滑体的抗滑摩擦力产生增量,因此考虑锚索倾角时,应使抗滑拉力和法向力之和达到最大。

(4) 锚索存在临界有效锚固长度。在同一锚固深度时,锚段长度越小,其拉力值越小。随着长度的增加,剪应力峰值在端头附近逐渐变小,而随锚固深度减小的趋势变陡,末端应力值小于原型。

(5) 桩的嵌固深度对于桩身变位和锚索的加固效果有较大影响。随着嵌固深度的增加,土体抗力逐渐减小且转折点深度逐渐变浅。嵌固深度越小,锚索拉力和剪应力增大,且沿锚固深度减小的趋势更明显。

(6) 在临界范围内,桩间距对于加固效果的影响较小。桩间距越小,锚索拉力和剪应力峰值越小。

## 参考文献 (References)

[1] Zhang J, Qu H L, Liao Y, et al. Seismic damage of earth structures of road engineering in the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Environment Earth Science, 2012, 65(4): 987-993.

[2] 蒋良淮, 黄润秋, 蒋忠信, 等. 锚索桩的主动支护作用及桩身初始内力分析 [J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2319-2324. (Jiang Liangwei, Huang Runqiu, Jiang Zhongxin, et al. Analysis of active supporting effect and primary internal force in anchored anti-sliding piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2319-2324. (in Chinese))

[3] Christie S R. Seismic design methods for anchored sheet

- pile bulkheads [A] // Proceedings of The Twelfth Triannual International Conference [C]. Jacksonville, Florida, 2010: 203-212.
- [4] Zhai Endi. A Comparison study of engineering approaches for seismic evaluation of anchored sheet pile walls[A] // Proceeding of 7th International Conference on Lifeline Earthquake Engineering [C]. Oakland, California, 2009: 1-9.
- [5] 周德培, 王建松. 预应力锚索桩内力的一种计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 247-250. (Zhou Depei, Wang Jiansong. Design method of retaining pile with prestressed cable [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 247-250. (in Chinese))
- [6] 蒋忠信. 拉力型锚索锚固段剪应力分布的高斯曲线模式[J]. 岩土工程学报, 2011, 23(6): 696-699. (Jiang Zhongxin. A gauss curve model on shear stress along anchoring section of anchoring rope of extensional force type [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 23(6): 696-699. (in Chinese))
- [7] 肖世国, 周德培. 非全长粘结型锚索锚固段长度的一种确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1530-1534. (Xiao Shiguo, Zhou Depei. Calculation method of length of anchoring segment for partial-cohesive cable [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9): 1530-1534. (in Chinese))
- [8] 曲宏略, 胡焕国, 张建经, 等. 地震动对锚索桩的响应特性研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(2): 317-323. (Qu Honglue, Hu Huanguo, Zhang Jianjing, et al. Dynamic response characteristics of anchor cable piles under ground motion[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(2): 317-323. (in Chinese))
- [9] 曲宏略. 桩板式抗滑挡土墙的振动台试验和抗震机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013. (Qu Honglue. Study of seismic mechanism of sliding sheet pile retaining wall based on large shaking table test[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese))
- [10] 杨自友, 顾金才, 杨本水, 等. 锚杆对围岩的加固效果和动载响应的数值分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2805-2809. (Yang Ziyou, Gu Jincai, Yang Benshui, et al. Numerical analysis of reinforcement effects and response to dynamic loads characteristics of rock bolts [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2805-2809. (in Chinese))
- [11] 尤春安. 锚固系统应力传递机理理论及应用研究[D]. 泰安: 山东科技大学, 2004. (You Chunan. Theory and application study on stress-transfer mechanism of anchoring system[D]. Tai'an: Shandong University of Science and Technology, 2004. (in Chinese))
- [12] 徐年丰, 牟春霞, 王利. 预应力岩锚内锚段作用机理与计算方法探讨[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(3): 45-48. (Xu Nianfeng, Mu Chunxia, Wang Li. Exploration on working mechanism and calculating method of innerbonding section of prestressed cables with in rock mass [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002, 19(3): 45-48. (in Chinese))
- [13] 何思明. 预应力锚索作用机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004. (He Siming. Study on mechanism of prestressed anchoring rope [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004. (in Chinese))
- [14] 蒋忠信. 预应力锚索最佳倾角的技术经济分析[J]. 路基工程, 1995(5): 10-12. (Jiang Zhongxin. Technical and Economic Analysis of Optimum Angle of Anchor [J]. Subgrade Engineering, 1995(5): 10-12. (in Chinese))
- [15] 战玉宝, 毕宣可, 尤春安. 预应力锚索锚固段应力分布影响因素分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(6): 49-53. (Zhang Yubao, Bi Xuanke, You Chunan. Analysis of factors influencing the stress distribution in prestressed cables [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(6): 49-53. (in Chinese))
- [16] 郭印, 赵刚, 孙元帝, 等. 桩锚式支护桩内力和变形测试研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 1020-1024. (Guo Yin, Zhao Gang, Sun Yuandi, et al. Test study on the internal force and deformation for anchored bracing pile [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(5): 1020-1024. (in Chinese))
- [17] 肖世国, 欧源. 硬岩边坡预应力锚索地梁坡体压力分析方法[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 655-659. (Xiao Shiguo, Ou Yuan. Analysis methods for slope pressure on prestressed anchor cable foundation beam in hard rocks slope projects [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(3): 655-659. (in Chinese))