

# 地震动对锚索桩的响应特性研究<sup>①</sup>

曲宏略<sup>1</sup>, 胡焕国<sup>1</sup>, 张建经<sup>2</sup>, 朱大鹏<sup>1</sup>

(1.西南石油大学地球科学与技术学院,四川 成都 610500; 2.西南交通大学土木工程学院,四川 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好,抗震性能高,但目前预应力锚索桩板墙的抗震设计理论研究方面仍比较落后。鉴于此,利用 FLAC3D 对预应力锚索桩板墙的地震动响应特征进行研究,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进行多种工况的分析,系统研究地震动参数对桩-土-锚动力耦合相互作用规律的影响。研究成果可加强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: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0317-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0317

## Dynamic Response Characteristics of Anchor Cable Piles under Ground Motion

QU Hong-lue<sup>1</sup>, HU Huan-guo<sup>1</sup>, ZHANG Jian-jing<sup>2</sup>, ZHU Da-peng<sup>1</sup>

(1.School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2.School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** Prestressed anchor sheet pile wall is a light-weight retaining structure. As a new style of retaining structure, the stressed form of a prestressed anchor sheet pile is similar to a beam-style structure. This is deemed to be more reasonable than the stressed form of a cantilever that is usually used for stabilizing piles. In addition, because of advanced deformation compatibility and better seismic performance, the prestressed anchor sheet pile is widely used in landslide treatment. An investigation of seismic hazards in the Wenchuan earthquake suggests that a stabilizing pile has many advantages in terms of landslide treatment. Because this structure plays an important role in landslide treatment, many researchers have performed analysis on static design and loading characteristics; however, there is limited research on the seismic design theory of prestressed anchor sheet pile walls. The FLAC3D model was used to study the seismic response of this structure, including the distribution of seismic earth pressure along the pile, deflection of the pile, and dynamic characteristics of cable stress in the anchor. In addition, the analyses of multiple cases were completed using various parameters of ground motion; thus, the influence of the parameters on the dynamic interaction law of pile-soil-anchor was systematically derived. Through FLAC3D and a contrasting calculation, some conclusions are obtained. First, the anchor cable plays a limited role in the displacement of a pile wall structure, and an increase in soil pressure appears near the

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 西南石油大学校级科研基金项目(2013XJZ020); 四川省教育厅科研项目(14ZB0056); 西南石油大学科研培育项目(2014PYZ014); 安全生产重大事故防治关键技术科技项目(2014-3189)

作者简介: 曲宏略(1984-), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程结构抗震方面的研究. E-mail: 93318620@qq.com

anchor cable. Because plastic deformation occurs in the soil on the surface of foundation before piling, paying attention to the embedded soil before piling is important as it has an active effect on the structural seismic performance. Second, the axial force is the largest in the free section of the anchor cable, and the value is an equivalent distribution. In the inner anchorage section, with an increase in anchorage depth, the axial force decreases. Shear stress increases sharply near the end of the inner anchorage section. The shear stress and anchorage depth curves are similar to a date pit, and with the increase of anchorage depth, the curve becomes gradually smoother. Moreover, the influence of ground motion characteristics on the seismic effect needs to be considered. Under ground motion, the seismic response order is consistent with the acceleration response spectrum near its natural period. The above research provides a basis for further details of prestressed anchor cable sheet pile walls in future. In addition, the results of this study strengthen the understanding of seismic performance and provide a reliable basis for further research.

**Key words:** prestressed anchor sheet pile wall; seismic response; parameter influence

## 0 引言

汶川地震的震害调查表明,加筋土挡墙、桩板墙等柔性支挡结构较刚性挡土墙的抗震性能好<sup>[1]</sup>,其中使用预应力锚索的桩板结构的抗震性能更为优越。然而,由于锚索桩板墙的结构形式新颖,受力体系复杂,国内外对其研究还较少,特别在抗震理论研究方面仍处于起步阶段,鉴于此,开展预应力锚索桩板墙地震下的动力响应研究具有重要意义。

对于此结构,国外多集中于码头、基坑中的应用研究,如 Samuel<sup>[2]</sup>利用有限元方法计算了基坑挡墙的地震土压力,并与传统的拟静力法进行了比较; Zhai<sup>[3]</sup>对某码头锚索桩的几种抗震设计方法进行了总结分析。总体上看,国外对于顺层及坡积体边坡的抗滑研究较少,而国内预应力锚索桩板墙在边坡抗滑中的应用更为广泛,如曾云华,郑明新<sup>[4]</sup>通过模型试验分析了预应力对边坡岩土材料的影响作用;周德培,王建松<sup>[5]</sup>利用变形协调原理推导出结构内力计算公式。除此之外,对于锚索锚固应力的研究也取得了一定的成果:蒋忠信<sup>[6]</sup>给出了拉力型锚索内锚段剪应力分布的高斯曲线模式;在此基础上,肖世国<sup>[7]</sup>提出了一种确定锚索内锚段长度的方法。但国内研究仍主要集中于静力方面,对地震情况下的研究较少。因此,本文借鉴前人的研究成果,利用 FLAC3D 软件开展预应力锚索桩板墙的地震响应分析工作,特别进行结构设计参数对其动力响应影响的研究。

## 1 数值分析模型

### 1.1 工程概况

所选模型为某高速公路靠江岸的斜坡,坡面发

育崩坡积层,崩坡积体主要为第四系全新统松散堆积层( $Q_4^{+dl}$ ),下覆侏罗系上统遂宁组( $J_3sn$ ),坡向 $245^\circ$ ,自然坡度约 $27^\circ$ ,紫红色中~厚层状泥岩,泥质结构,钙质胶结,夹少量砂岩,岩层走向 $N88^\circ E$ ,倾向近S,倾角 $15^\circ$ 。斜坡整体处于自然稳定状态,在强降雨及工程扰动的前提下有可能造成土体失稳滑动。拟建路线与岩层走向呈大角度相交,为挖方路堑,最大挖方高度为8.15 m。

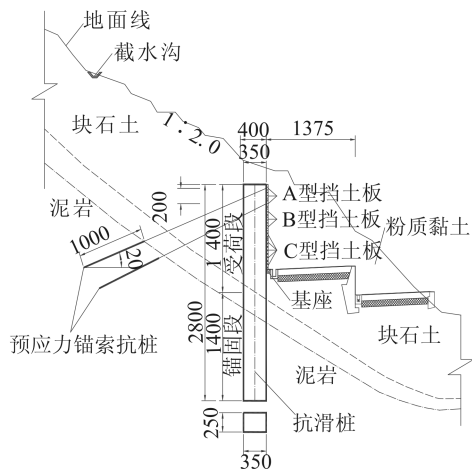


图1 预应力锚索桩板墙现场设计图

Fig.1 Design of the prestressed anchor sheet pile wall

根据现场工程背景,从机理分析的角度出发,计算模型取路基横断面(图1),建立计算模型(图2)。抗滑桩长28 m,截面尺寸 $2.5\text{ m} \times 3.5\text{ m}$ ,嵌固17 m,桩间安装挡土板,锚索采用6束 $\phi 15.2\text{ mm}$ 钢绞线制作,上下排锚索锚头到桩顶距离分别为0.5 m和2.5 m,锚固下倾角约 $20^\circ$ ,自由段长度分别为20 m和18 m,内锚段长10 m,锚固直径13 cm,锚索预

应力 750 kN,理论破断力 1 554 kN。

### 1.2 计算参数选取

根据工程地质勘探结果确定材料参数和本构模型选取(表 1),其中滑体、滑床和桩采用实体 Zone

单元模拟,挡土板采用结构 Shell 单元模拟,厚度 0.3 m。桩土界面采用无厚度接触面单元“interface 单元”进行模拟。

表 1 各分组材料参数

Table 1 Material parameters of each group

| 材料分组                            | 计算模型         | 容重/(kN·m <sup>-3</sup> ) | 黏聚力/kPa | 内摩擦角 φ/(°) | 体积模量/kPa | 剪切模量/kPa | 弹性模量/kPa | 泊松比 |
|---------------------------------|--------------|--------------------------|---------|------------|----------|----------|----------|-----|
| 滑体 Q <sub>4</sub> <sup>pl</sup> | Mohr-Coulomb | 19                       | 19      | 24         | 8.04E+04 | 3.71E+04 | -        | -   |
| 滑床 J <sub>3</sub> sn            | Elastic      | 24                       | 50      | 40         | 4.44E+05 | 3.33E+05 | -        | -   |
| 桩                               | Elastic      | 25                       | -       | -          | 1.72E+07 | 1.29E+07 | -        | -   |
| 挡土板                             | Elastic      | 25                       | -       | -          | -        | -        | 2.8E+7   | 0.2 |

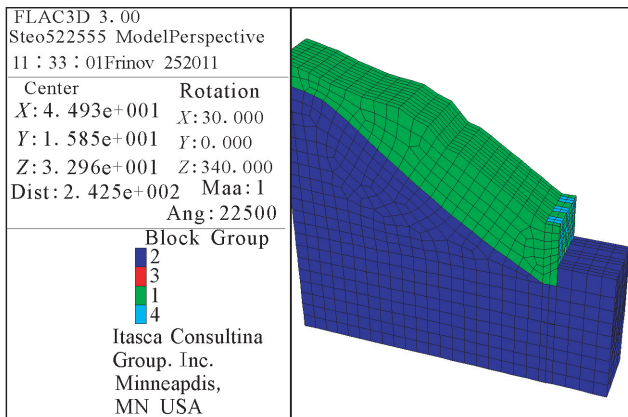


图 2 FLAC3D 计算模型图

Fig.2 The calculation model of FLAC3D

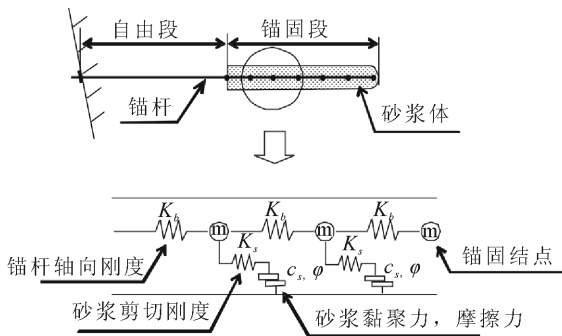


图 3 预应力砂浆锚杆力学特性的模拟体系

Fig.3 Simulation system of mechanics characteristics of prestressed mortar anchor

锚固体与岩体界面间的作用与锚杆体系相同,本质上说就是粘结作用和摩擦作用,分别对应图 3 中的弹簧和滑片的效应。该系统可以被理想化成图 4 的形式,采用 FLAC3D 特有的 cable 结构单元进行模拟,改变锚头默认的 link 设置,使之与实体单元建立刚性连接模拟托盘。锚索采用 15-6 锚具,配套 YCW100B 千斤顶张拉,弹性模量为 2.0E+11 Pa,抗拉强度为 1 554 kN,锚固段单位长度水泥浆

黏结力为 2.0E+6 N/m,水泥浆单位长度刚度为 2.0E+7 N/m<sup>2</sup>。

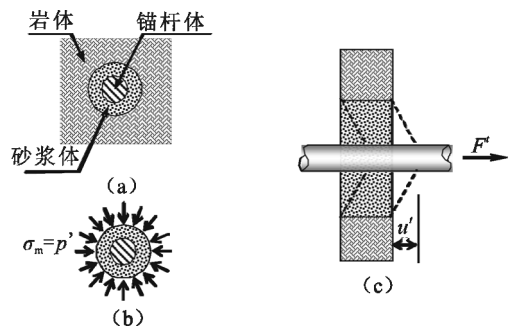


图 4 理想的砂浆锚杆体系

Fig.4 Ideal mortar anchor system

在模型底部施加静态边界条件,由底部沿 X 方向输入基线校正后的 El Centro 地震应力时程,PGA 调整为 0.1 g,应力时程由地震所记录的水平速度时程转换得到,即  $\sigma_s = -2(\rho C_s)v_s$ 。为节约计算时间,地震动加载时间取为 30 s,这段时间包括了地震速度时程中的较大振幅部分。人工处理后的速度时程见图 5。模型四周采用自由场边界,模型采用 5%局部阻尼比来近似表征土体在地震波传播过程中的阻尼作用。

## 2 地震作用下动力响应分析

### 2.1 土压力

土压力是引起桩板结构所受剪力和弯矩的起因,其大小及分布模式对抗震设计意义重大。保守起见,取地震土压力时程的峰值进行研究。分析测试结果发现,桩身所受土压力在锚索位置出现明显的增大,说明锚索对桩板结构变位起到了限位作用(图 6)。此外,桩前土体抗力在地震荷载作用下呈先增大后减小的非线性分布。出现这种分布的原因可能是由于输入地震荷载幅值较大,造成桩前路基表面土体出现塑性破坏。因此重视桩前土体的锁口

对桩板结构的抗震有积极作用。

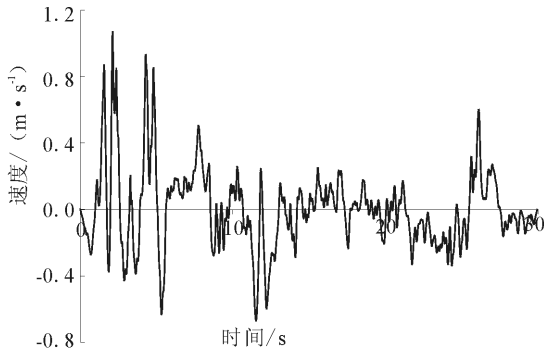


图5 施加 X 向速度时程

Fig.5 Velocity time history in direction X

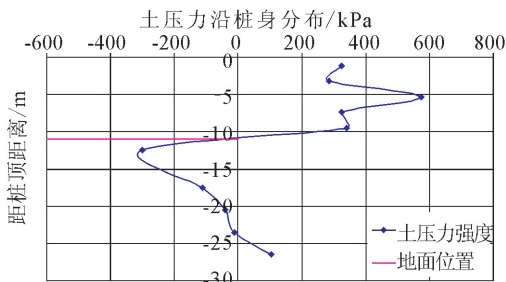


图6 土压力沿桩身分布

Fig.6 Distribution of earth pressures along pile

## 2.2 位移

桩身未发生明显的挠曲变形,抗滑桩发生刚体转动(图7),转点在嵌固深度以下约2 m处,属于埋深较浅部位,与土压力曲线分布规律吻合。

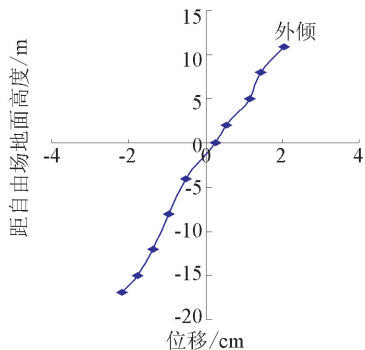


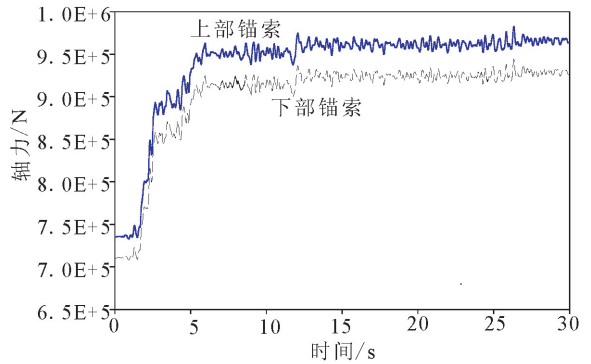
图7 桩身实测位移

Fig.7 Measured displacement of pile

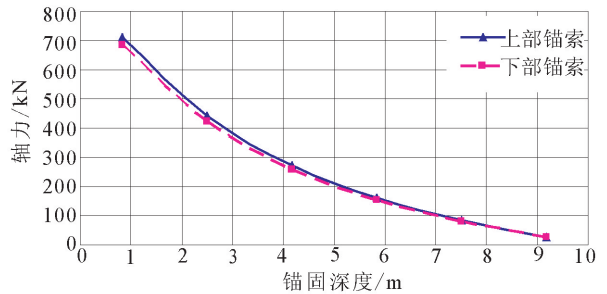
## 2.3 轴力和剪应力

由于胶结材料与预应力钢绞线或钢丝的黏结强度高于胶结材料与孔壁的黏结强度<sup>[8]</sup>,因此对预应力锚索桩板墙在地震情况下的锚索轴力分布和锚固体与孔壁剪应力分布开展分析研究。锚索轴力在自由段的动态响应规律和内锚段的分布见图8。可见,不论上排还是下排锚索,其轴力在锚索自由段最

大。由于预应力的作用,轴力处于动拉应力状态,在地震荷载作用下,上排锚索内锚段轴力增大到982.8 kN,下排锚索轴力增大到944.4 kN,在时程上5 s以后轴力浮动变化较小,这说明按拟静力对锚索进行抗震设计具有一定的依据。同时,下排锚索轴力比上排略小(见图8(b)),出现上述差异的原因是由于锚索轴力变化与桩身变位成正比。此外,在内锚段锚索轴力沿锚固深度逐渐减小,曲线呈“倒喇叭”状分布。



(a) 锚索自由段



(b) 内锚段

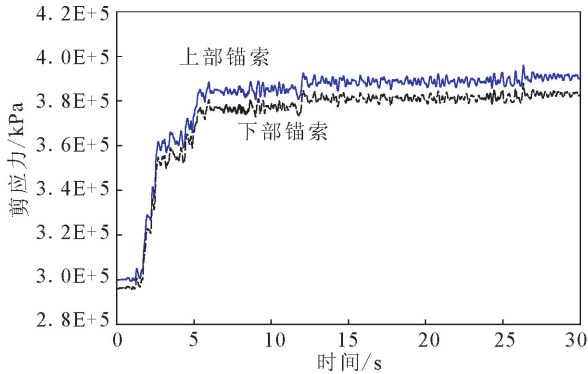
图8 锚索轴力在自由段的动态响应和内锚段分布规律

Fig.8 Dynamic response of axial force in free segment of anchor cable and distribution of axial force in inner anchoring section

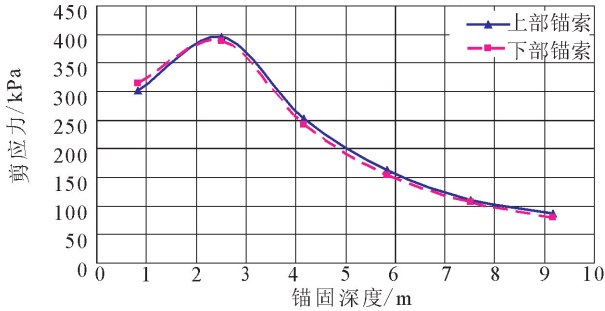
内锚段剪应力的动态响应规律和分布见图9。可见,剪应力在内锚段端头附近急剧增大,地震作用下上排锚索剪应力增大到395.9 kPa,下排锚索增大到387.9 kPa,下排锚索所受剪应力较上排略大的原因是下排锚索倾角更大。从剪应力分布可以看出,曲线在2.5 m深度(即锚固深度的1/4)附近出现明显凸起,然后逐渐慢慢减小,曲线呈“枣核”状单峰曲线分布,随着锚固深度的增加趋于平缓,符合高斯曲线分布模式<sup>[6]</sup>。然而,目前锚索设计中都是以剪应力在内锚段均布为前提,采用平均黏结强度来计算内锚段的长度偏于危险<sup>[7]</sup>。

此外,内锚段剪应力主要集中在5 m以内,这

一结果与前人研究结论中的“阻力分布主要集中在内锚段外端 3 m 范围内”有所差异,这与所选模型的基岩较软有关,即岩体越软,侧阻力在锚固深度上的分布越均匀<sup>[9]</sup>。但是此结果也同样证明了在预应力锚索设计中,盲目增加内锚段长度是无益的,这与三峡工程现场测试结果<sup>[10]</sup>和目前常用于预应力研究的剪切滞模型吻合<sup>[11]</sup>。



(a) 2.5 m 处剪应力动态响应



(b) 剪应力分布规律

图 9 内锚段剪应力动态响应和分布规律

Fig.9 Dynamic response and distribution of shear stress in inner anchoring section

### 3 地震动参数影响研究

#### 3.1 不同地震波

通过 FLAC3D 进行自振频率计算,自振周期约为 0.248 s,自振中心频率为 4.03 Hz,如图 10 所示。

对模型加载 El Centro、Kobe 和卧龙三个地震波,PGA 归一化为 0.1 g,三个地震波的加速度反应谱见图 11。可以看出,El Centro 波的加速度谱幅值在整个周期范围内的分布居中,因此常被选为典型地震波进行地震响应分析。Kobe 波短周期成分较强,长周期成分较弱;汶川卧龙波的短周期成分较弱,长周期成分较强。此外,在自振周期 0.248 s 附近,加速度反应谱幅值排序为 Kobe>El Centro>Wolong,与图 12 的结构位移、土压力、轴力以及剪应力的表现吻合。

从图 12 可以看出,桩身位移、土压力以及内锚

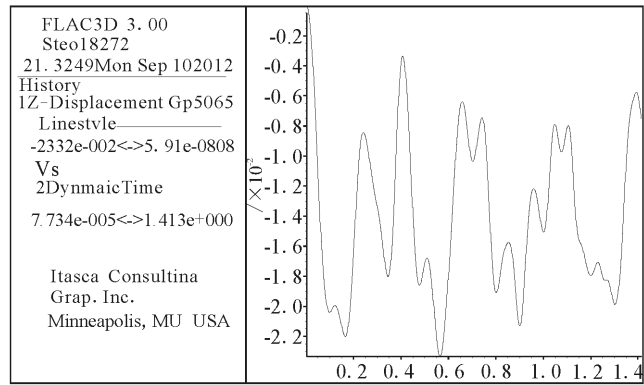


图 10 自振频率计算曲线

Fig.10 Calculated curve of the natural frequency of vibration

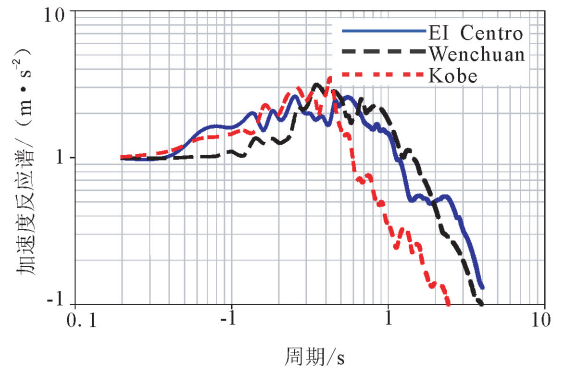


图 11 加速度反应谱对比

Fig.11 Comparison of the acceleration response spectrums

段轴力与剪应力的响应情况与结构自振周期附近加速度反应谱幅值排序的结果一致,充分说明了结构抗震设计时动力特性对抗震效果的影响。

#### 3.2 不同 PGA

选取 El Centro 波,将其 PGA 分别归一化为 0.1 g、0.2 g 和 0.4 g 进行加载,以模拟结构在地震基本烈度Ⅶ、Ⅷ和Ⅸ度区域的响应情况,对比情况见图 13。可以看出,在地震基本烈度Ⅶ度和Ⅷ度区,结构的受力和变位均较小,锚索轴力与剪应力分布的差距也不明显,随着 PGA 的增大,桩身变位和受力变大,转点变深,轴力和剪应力分布上升。而在Ⅸ度区,桩顶位移达到 24.6 cm,接近桩长的 10%,锚索位置桩背土压力剧增,内锚段剪应力分布的驼峰曲线更为明显,锚索轴力达到 1 630 kN,超过理论破断力。

### 4 结语

以预应力锚索桩板墙为对象,利用 FLAC3D 有限差分法建立三维模型并进行动力时程反应分析和地震动参数影响分析,经计算结果对比分析,得到以

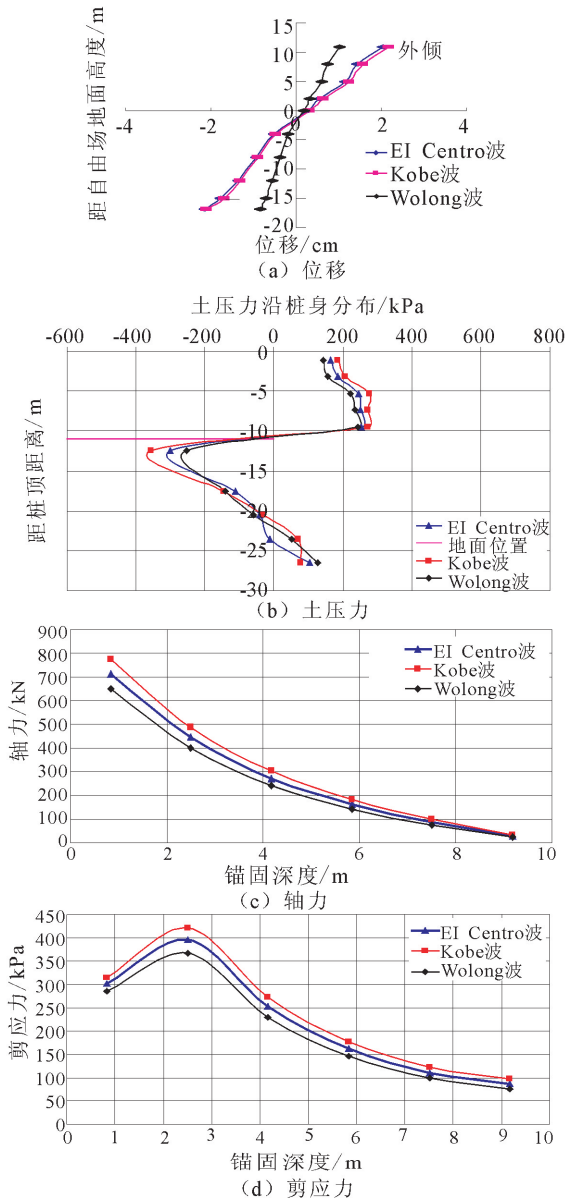


图 12 结构地震响应情况

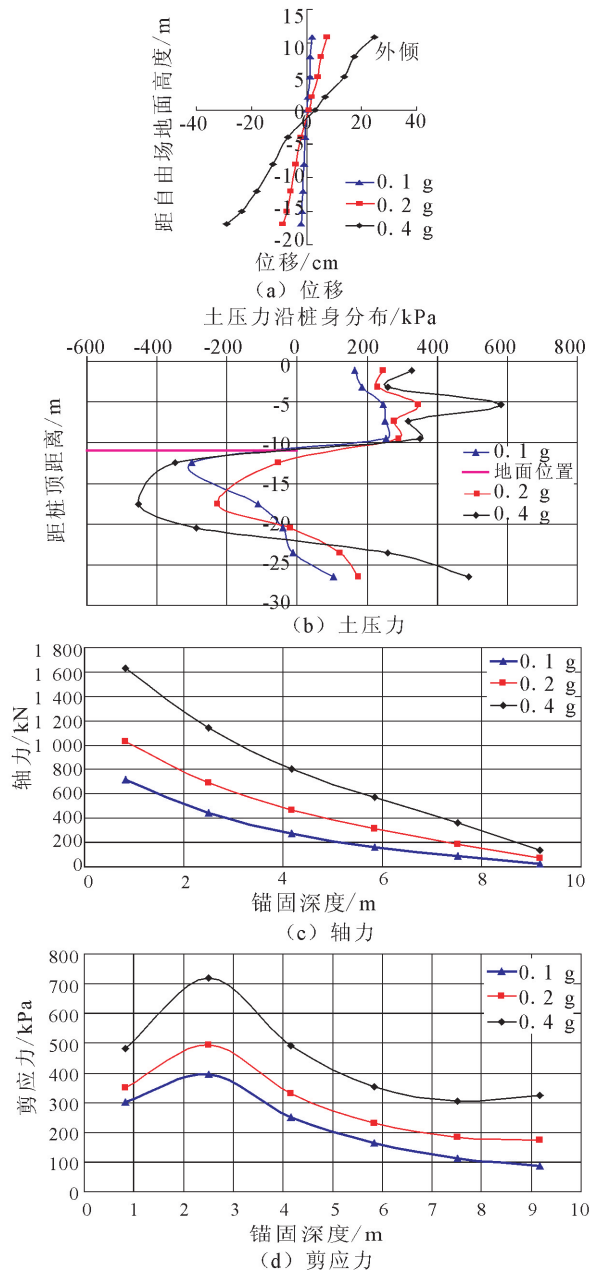
Fig.12 Seismic response of structure

下主要结论:

(1) 地震作用下,锚索对桩板结构变形起到了限位作用,在锚索位置土压力出现明显的增大,桩前地基表面的土体易出现塑性破坏。重视桩前土体的锁口对桩板结构的抗震有积极作用。

(2) 轴力在锚索自由段最大,且等值分布,下排锚索轴力比上排锚索略小,在内锚段随锚固深度的增加锚索轴力逐渐减小,曲线呈“倒喇叭”状分布。剪应力在内锚段端头附近急剧增大,曲线呈“枣核”状单峰曲线分布,随着锚固深度的增加趋于平缓。

(3) 结构抗震设计时应考虑地震动特性对抗震效果的影响。 $PGA$  越大结构地震响应越剧烈,在归

图 13 不同  $PGA$  加载下结构的地震响应情况Fig.13 seismic response of structure under different  $PGA$  loadings

一化  $PGA$  的情况下,结构地震响应情况与自振周期附近加速度反应谱幅值排序的结果一致。

预应力锚索桩板墙加固边坡的受力机理分析是一个涉及因素较多、关系复杂的课题。本文只是对锚索、抗滑桩、桩周土三者做了一些初步性的探讨,还存在许多不足之处,有待于在日后工作中进一步完善。

## 参考文献(References)

[1] ZHANG Jian, QU Hong-lue, LIAO Yi, et al. Seismic Damage

