

· 地基与基础 ·



强震作用下动孔隙水压力 对砂质边坡动力响应的影响*

黄 帅, 吕悦军

(中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

摘要: 基于砂质边坡的弹塑性有限元模型和室内振动台试验研究了动孔隙水压力对边坡动力响应的影响规律。研究表明, 坡脚位置的动孔隙水压力增大趋势明显, 为滑坡最易剪切滑出的位置, 在实际工程中应作为重点防护位置; 动孔隙水压力随着平均有效应力的增加呈现总体减小的趋势; 动孔压的存在使边坡在受较大动应力作用时破坏加速; 由平均主应力增量引起的孔压与土的非线性变形特性无关。无地下水时, 砂质边坡的坡顶首先发生拉裂破坏, 表现出明显的鞭梢效应; 有地下水时边坡的破坏首先出现在坡脚。地震作用下室内试验测得的动孔隙水压力整体上小于数值模拟值, 但最大误差均控制在 15% 以内, 验证了数值模拟结果的准确性。

关键词: 振动台试验; 砂质边坡; 地下水位; 动孔隙水压力; 平均有效应力

中图分类号: U 211.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)10-0158-010

Influence of dynamic pore water pressure on dynamic response of sandy slope under strong earthquake

HUANG Shuai, LYU Yue-jun

(Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China)

Abstract: Based on the elastic-plastic finite element model of the sandy slope and shaking table test, we study the influence laws of dynamic pore water pressure on the dynamic response. The results show that the dynamic pore water pressure of the slope toe increases obviously, and it is the destroyed position under the influence of dynamic pore water pressure, thus it should be taken as the key protection in the actual engineering location. The dynamic pore water pressure decreases with the increase of the average effective stress; The existence of dynamic pore pressure causes the destruction of the slope quickly. The pore pressure caused by the average principal stress increment has nothing to do with the nonlinear deformation characteristics of soil. Without considering the groundwater, the destruction of slope appears on the top of the slope and it shows the obvious lash effect, while the destruction appears on the slope toe. The dynamic pore water pressure values under the action of indoor test are greater than that under the numerical simulation values. However, the maximum deviation is controlled within 15% which verifies the accuracy of the numerical simulation results.

Keywords: shaking table test; sandy slope; underground water level; dynamic pore water pressure; average effective stress

收稿日期: 2015-01-26

*基金项目: 国家高技术研究发展计划专项经费资助 (2011AA11A102); 铁道科学技术研究发展中心科研项目 (J2014G006)

作者简介: 黄帅 (1987—), 男, 博士, 从事岩土工程抗震减灾。

近年来地震引发的滑坡灾害频繁发生, 尤其是降雨期间坡内地下水位骤然上升, 加之地震作用使得砂质边坡极易发生滑动破坏。据统计, 大约 90% 的自然边坡和人工边坡的破坏与渗流有关^[1-4]。例如 2008 年 5 月的汶川地震, 213 国道临近映秀镇处, 地震造成坡脚砂土液化, 挡墙严重坍塌, 路基发生较大程度的破坏。2012 年 9 月的云贵地震, 由于山高坡陡, 地震发生期间降雨频繁发生, 引发的滑坡损毁了大量民房和道路。2013 年 4 月雅安地震发生时, 降雨不断发生, 长期的雨水浸泡使得边坡地下水位骤然升高, 加上地震后土质疏松, 在余震作用下不断引发道路边坡滑坡、泥石流等地质灾害。因此, 在地震作用下有地下水的边坡将会表现出与无地下水时边坡不同的动力响应和破坏形式, 因此研究动孔隙水压力对边坡地震动力响应的影响具有重要的工程实际意义。

关于动孔压的研究, 国外最具代表性的主要有 Martin、Finn 和 Seed^[5-6] 等提出的孔压模型, 并详细介绍了土体内动孔隙水压力的变化规律。Nasser^[7] 将孔压与动荷载作用过程中消耗的能量结合起来, 并建立了相应的孔压增长的能量模式, 进行了动孔隙水压力研究。王艳丽等^[8] 对饱和砂进行不排水动三轴液化试验, 研究了液化进程中动孔压的发展规律。曾长女等^[9] 研究了黏粒含量和粉粒含量对重塑粉土动孔压发展的影响。国内外对动孔隙水压力的研究大多是基于土的等效线性黏弹性模型而并非实际的弹塑性本构模型, 并不能较为准确地反映真实的动孔隙水压力。本文基于砂质边坡的弹塑性有限元模型和室内振动台试验进行了不同地下水位下的边坡地震动孔隙水压力的研究, 明确地震动孔隙水压力对边坡应力和变形的影响规律, 最后通过室内振动台试验验证了数值模拟结果的准确性。

1 动孔隙水压力计算原理

当材料类型 (材料行为的类型) 被设置成不排水时, 将土看成一个整体 (土架 + 水), PLAXIS

自动地假定了一个隐含的体积模量 K_u , 同时区分总应力、有效应力和超静孔隙压力:

$$\text{总应力: } \Delta P = K_u \Delta \varepsilon_v \quad (1)$$

$$\text{有效应力: } \Delta P' = (1 - B) \Delta P = K' \Delta \varepsilon_v \quad (2)$$

$$\text{超静孔隙水压力: } \Delta P_w = B \Delta P = \frac{K_w}{n} \Delta \varepsilon_v \quad (3)$$

根据弹性 Hooke 定律自动计算不排水的体积模量值:

$$K_u = \frac{2G(1 + \nu_n)}{3(1 - 2\nu_n)} \quad (4)$$

$$G = \frac{E'}{2(1 + \nu')} \quad (5)$$

不排水中泊松比的某个特定值 ν_u , 意味着关于孔隙流体体积刚度 $K_{w,ref}/n$ 的一个相应的参考值:

$$K_{w,ref}/n = K_u - K' \quad (6)$$

$$K' = \frac{E'}{3(1 - 2\nu')} \quad (7)$$

$K_{w,ref}/n$ 的值通常比纯水的真实体积刚度 K_w^0 要小得多。

如果 Skempton B 参数的值未知, 但是饱和度 S 以及孔隙率 n 是已知的, 那么, 孔隙流体体积刚度值可以估计为:

$$\frac{K_w}{n} = \frac{K_w^0 K_{air}}{SK_{air} + (1 - S) K_w^0} \cdot \frac{1}{n} \quad (8)$$

其中对于一个大气压压下的空气 $K_{air} = 200 \text{ kN/m}^2$ 。Skempton B 参数的值可以由土骨架的体积刚度和孔隙流体的体积刚度之比计算得到:

$$B = \frac{1}{1 + nK'/K_w} \quad (9)$$

超静水孔隙压力的变化率可以根据 (小) 体积应变变化率计算:

$$\sigma'_w = \frac{K_w}{n} \varepsilon'_v \quad (10)$$

综上所述, PLAXIS 中使用的单元类型可以完全避免几乎完全不可压缩材料的网格闭锁现象。PLAXIS 程序中所有的材料模型都有基于有效模型参数来模拟材料的不排水行为的这个特殊选项。从而可用有效模型参数进行不排水计算, 明确区分有效应力与孔隙 (超静水) 压。

2 砂质边坡有限元模型的建立

2.1 工程概况

本文以准朔铁路某段为研究对象,选其典型的路堑断面为研究对象(图1),坡长为17 m,设计高度约为12 m,坡度35°,为砂质土。铁路沿线以黄绵土、红土、风砂土为主。水位一般在地面2.0 m以上,水位随季节的变化而变化。

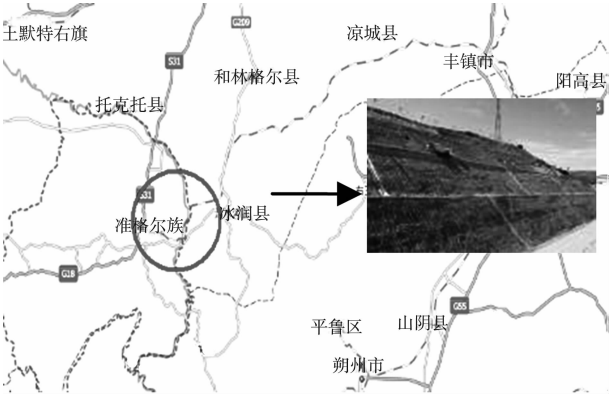


图1 边坡工程概况

2.2 边坡的有限元模型

建立边坡的仿真模型见图2,为保证计算的精度,有限元分析模型网格的最大尺寸小于输入地震波最短波长的1/10~1/8。模型采用莫尔-库仑本构模型。有限元模型底部和左右边界采用黏弹性动力人工边界,其它边界为自由边界。

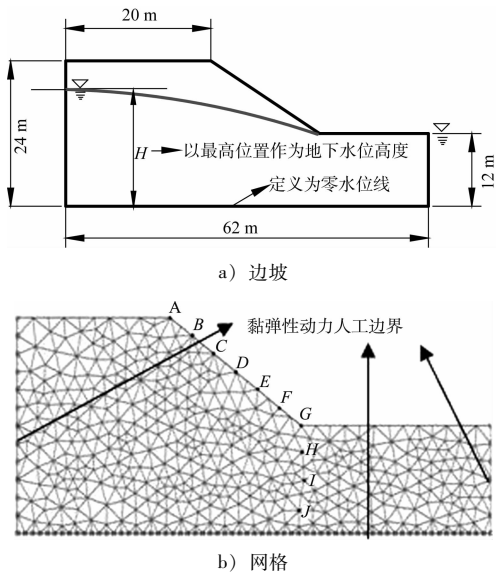


图2 边坡计算模型

采用筛分试验法对砂土颗粒进行级配分析,测出边坡所用砂土的颗粒分布特征见图3。

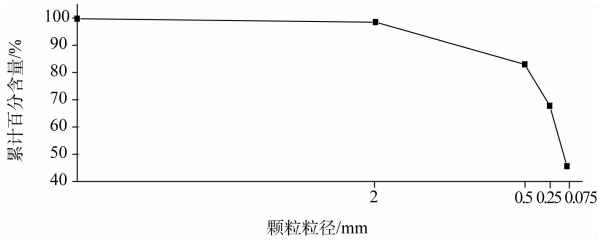


图3 砂土的筛分试验及颗粒分布曲线

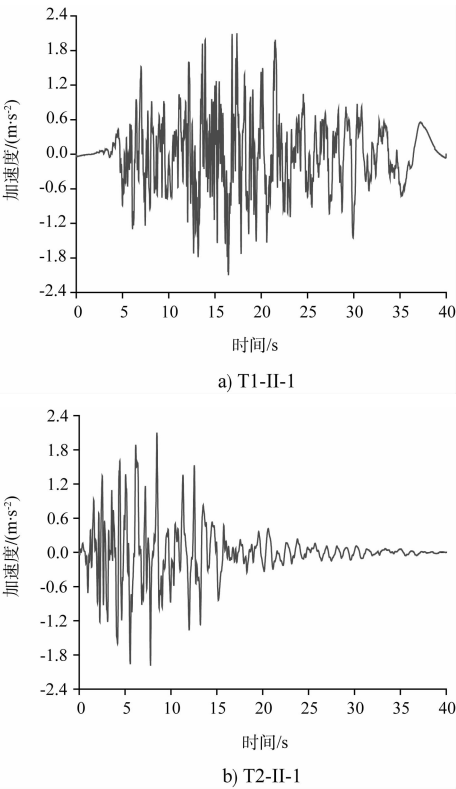
通过室内试验测得土体的饱和含水率为30%,渗透系数为 $5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}^{-1}$,其它物理参数见表1。

表1 砂质土的物理参数

岩层	泊松比	弹模/ MPa	天然密度/ ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)	饱和密度/ ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
砂质土	0.3	50.4	1.75	2.04	11.42	35.2

2.3 地震波的选取

边坡所在地区基本烈度为7度,所在场地为Ⅱ类场。参考日本《道路桥示方书》的规定取Ⅱ类场地的实测板块边界型地震波(T1-Ⅱ-1地震波)和内陆直下型地震波(T2-Ⅱ-1地震波)分别作为远场地震记录和近场地震记录进行计算,见图4。按照罕遇地震的基本加速度值0.21g进行地震波的调整,且由于边坡破坏主要受到水平地震的影响,本文只考虑水平地震的作用。



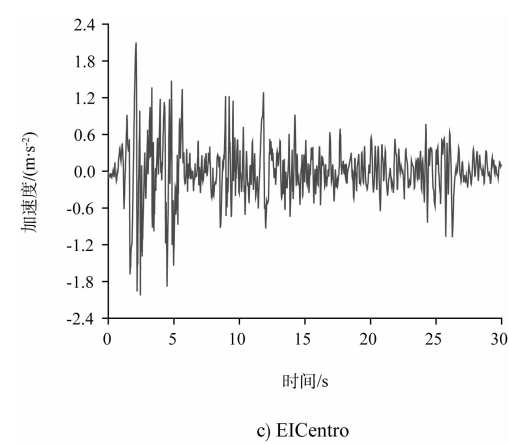


图 4 地震波加速度时程曲线

3 动孔隙水压力对边坡稳定性影响分析

3.1 地震作用下边坡的动孔隙水压力分析

本文列出了不同监测点的动孔隙水压力 (图 5~7)。

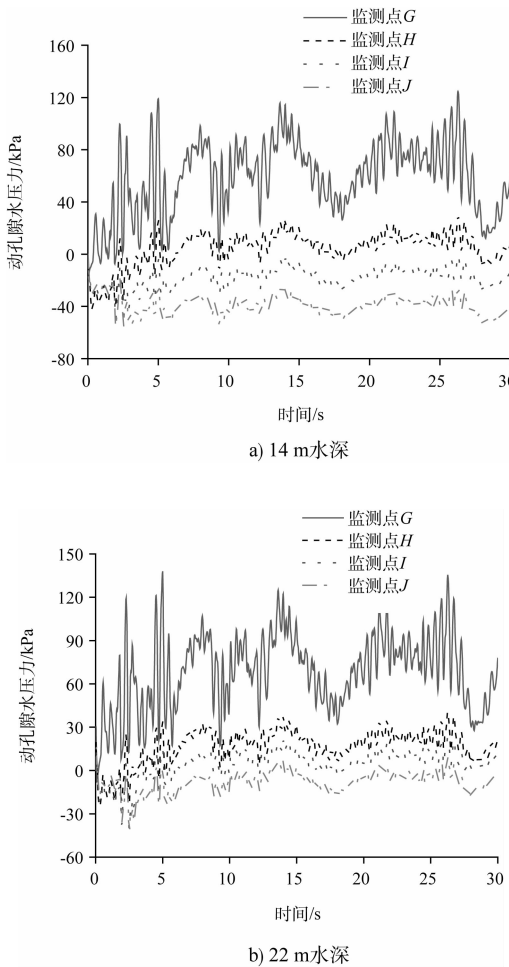


图 5 EICentro 地震作用下的动孔隙水压力

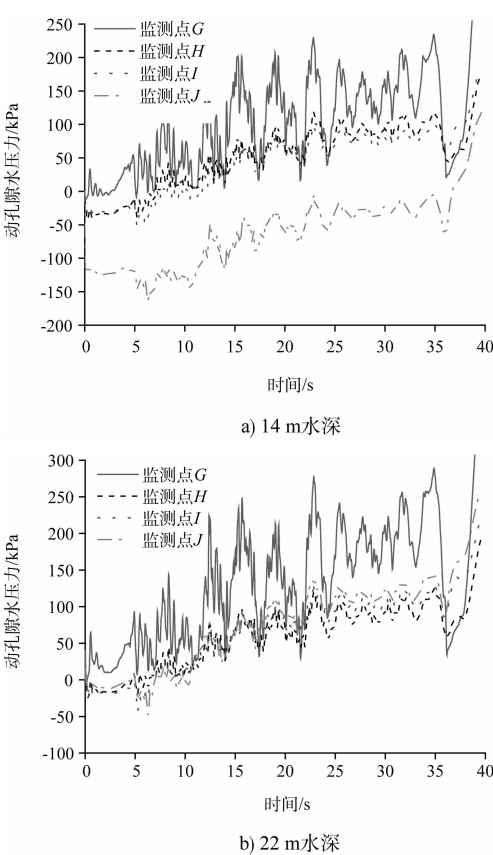


图 6 T1-II-1 地震作用下的动孔隙水压力

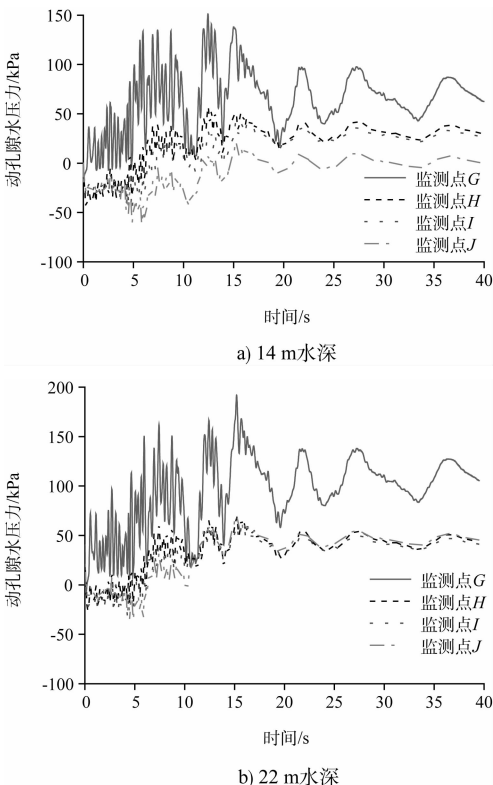


图 7 T2-II-1 地震作用下的动孔隙水压力

由图 5~7 可知,在不同地震作用下动态孔隙水压力表现出既波动变化又稳定增长的演化过程,在 EICentro 地震和近远场地震作用的短暂时间内,孔隙水压力骤然上升,而骤然上升的孔隙水压力来不及消散,表现出了较大的波动,尤其是边坡坡脚位置的动孔隙水压力在边坡渗流作用下,其动孔隙水压力比其它监测点的动孔隙水压力大。分析其原因,动孔隙水压力往往伴随着渗流和固结,在外部荷载作用下,边坡内部要产生相应的应力状态来维持颗粒骨架的平衡,地震属于突发荷载,其产生时砂土体内部或渗流边界的排水受阻,砂土就表现为孔隙水压力累积,导致孔隙水压力与土骨架应力之间的相互演化,并随荷载条件、起始条件、边界条件等不同表现出不同的破坏状态。

3.2 动孔隙水压力与应力的关系

本文计算了平均有效应力 p 和等效剪应力 q 与动孔隙水压力的关系 (图 8~10)。

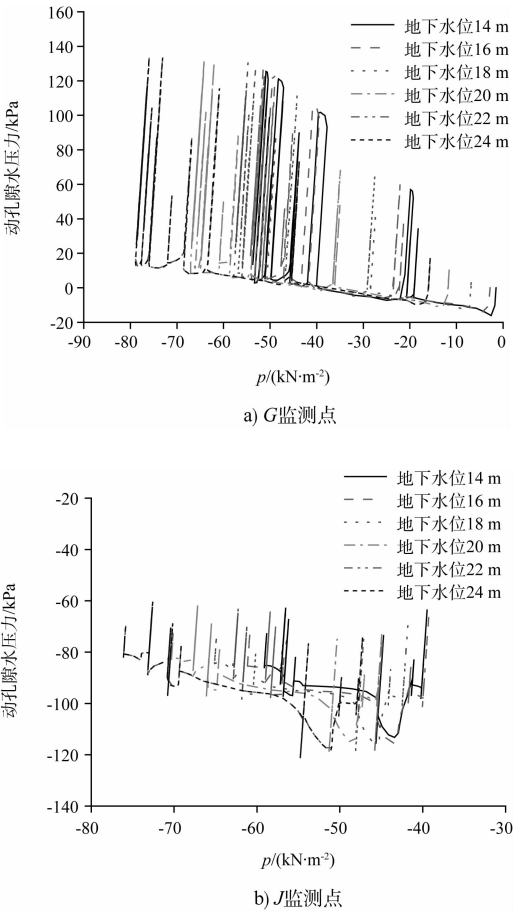


图 8 EICentro 地震作用下动孔隙水压力与平均有效应力

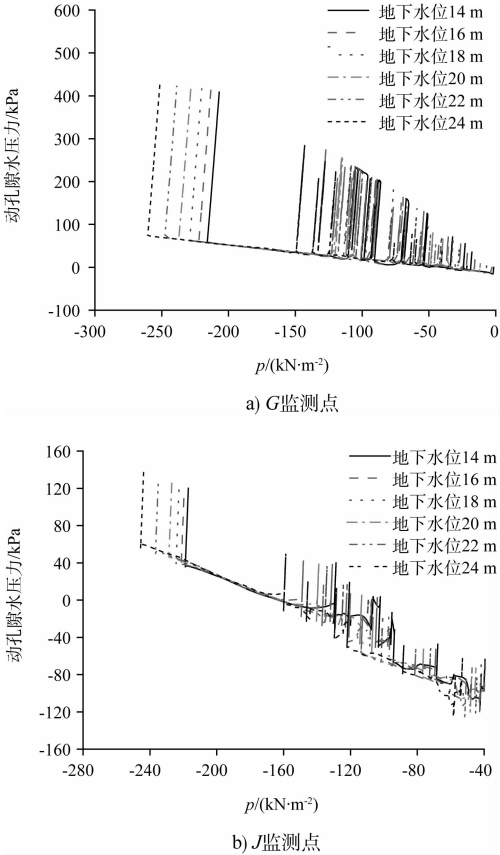


图 9 T1-II-1 地震作用下动孔隙水压力与平均有效应力

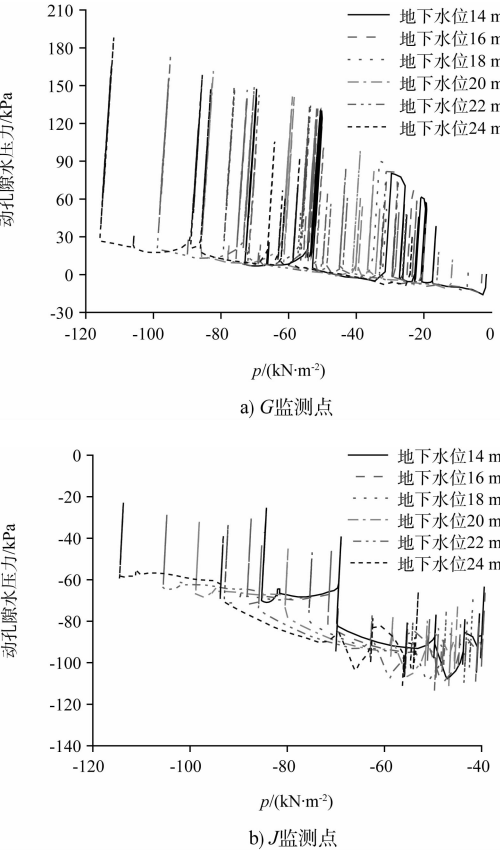


图 10 T2-II-1 地震作用下动孔隙水压力与平均有效应力

由图 8 ~ 10 可知, 随着地下水位的升高边坡不同监测点的动孔隙水压力和平均有效应力呈现增大的趋势, 而在同一水位高度不同地震作用下边坡不同监测点的动孔隙水压力随着平均有效应力的增加呈现总体减小的趋势。此外, 由于静水孔压与应力孔压不会引起土体动变形的积累和动强度的变化, 而动水孔压会对动态结构孔压发展过程有所影响, 出现渗透力的动力复活效应, 加速了土的动力破坏进程。

3.3 动孔隙水压力与水平位移的关系

分别计算了动孔隙水压力和边坡水平位移的关系曲线 (图 11 ~ 13)。

由图 11 ~ 13 可知, 在地震作用下随着动孔隙水压力的增加, 边坡不同位置的水平位移呈现增大的趋势。此外, 随着地下水位的增加, 边坡相同监测点的动孔隙水压力和水平位移均呈现出增大的趋势。分析其原因主要是不排水条件下地震作用时孔压迅速累积增加, 动孔压的存在使边坡在受较大动应力作用时塑性变形累积, 造成边坡

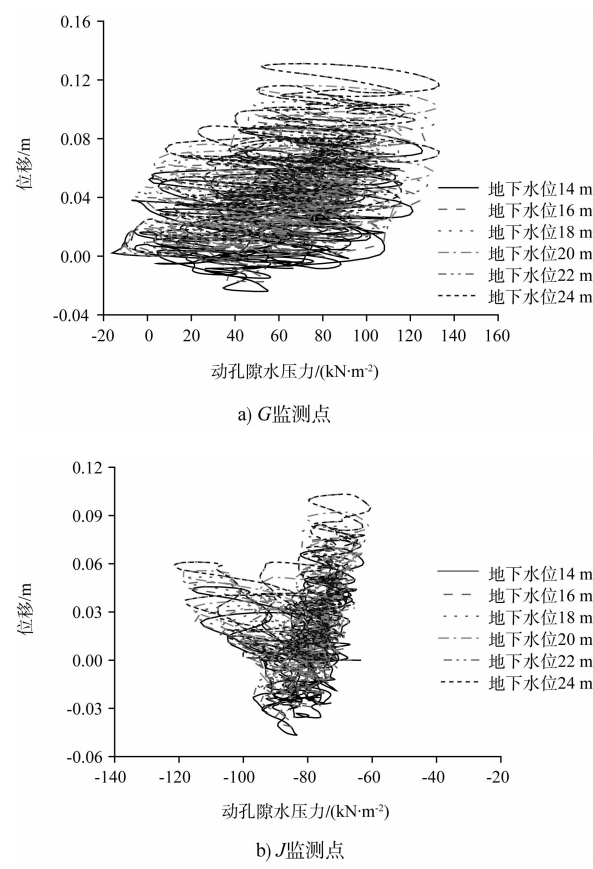


图 11 EICentro 地震作用下的动孔隙水压力与水平位移

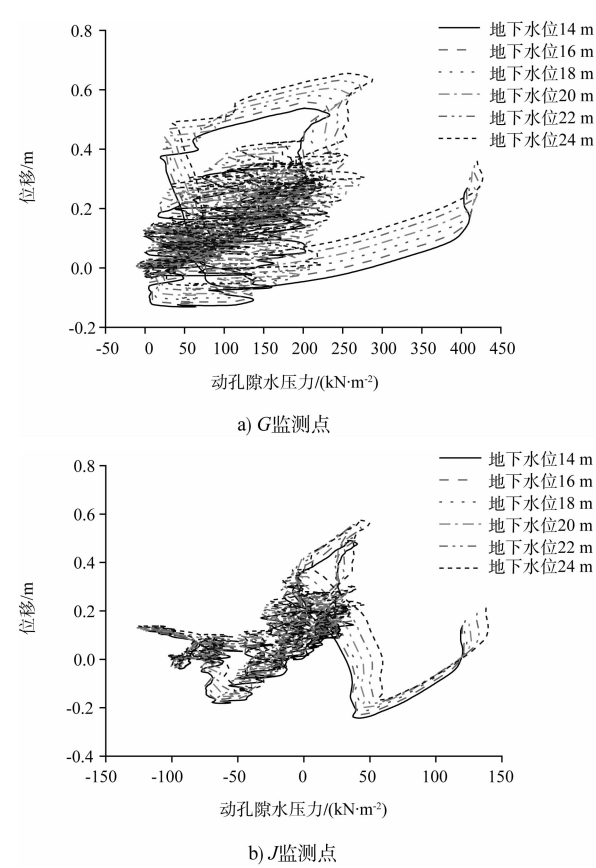


图 12 T1-II-1 地震作用下水平位移与动孔隙水压力

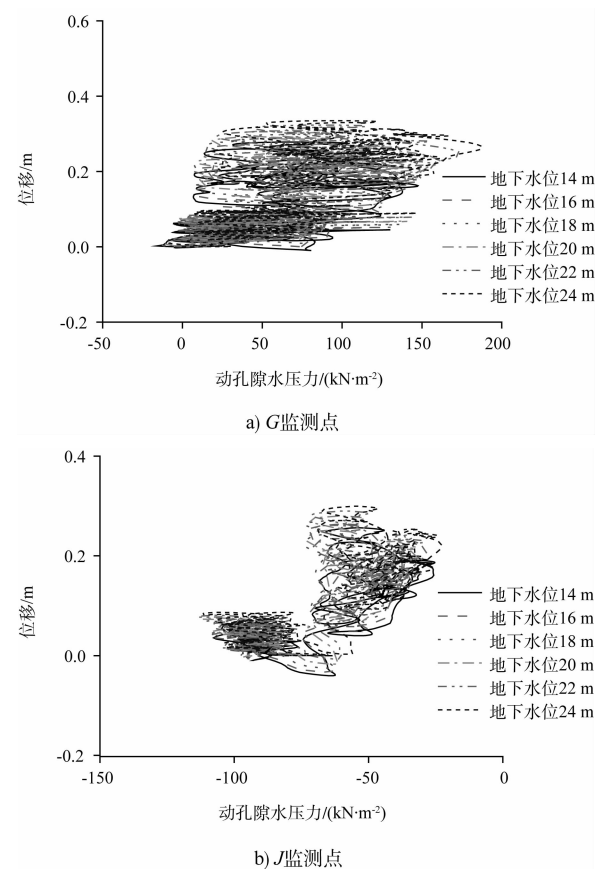


图 13 T2-II-1 地震作用下水平位移与动孔隙水压力

的破坏加速，图 11b)、12b) 和 13b) 中位移均发生了明显突变，说明边坡此时产生了塑性累积效应，随着地震峰值加速度的增大或者地下水位的升高，动孔隙水压力急剧增大，最终会导致边坡的破坏，因此，在进行动力反应分析时，动孔隙水压力的影响不可忽略。

4 数值模拟结果与室内试验的对比分析

4.1 试验模型的设计

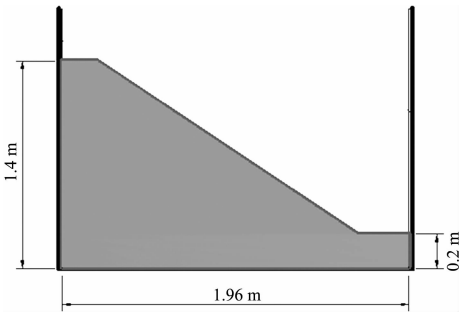
研究不同地下水位高度对边坡地震动力响应的影 响。根据振动台的尺寸以及模型箱的大小确定模型的尺寸。振动台面尺寸是 1.5 m × 1.5 m，模型箱尺寸为 1 m(宽) × 2 m(长) × 1.5 m(高)。取几何相似系数为 1:12，其它具体相似系数见表 2。试验设计边坡模型的长 × 宽 × 高为 1.96 m × 0.96 m × 1.2 m，试验模型见图 14。

4.2 地下水位的确定

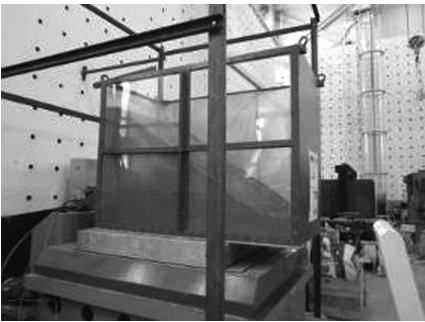
地下水位模拟的对与否则将制约着试验结果的精确性。本试验对地下水位的模拟采取的方案见图 15。

表 2 模型主要相似常数

物理量	相似关系	相似常数
动剪切强度	$C_{ \tau }$	4.85
长度 L	C_L	12.00
密度 ρ	C_ρ	1.00
加速度 a	$C_a = C_{ \tau } C_\rho^{-2/n} C_L^{-1}$	0.40
振动时间 T	$C_r = C_K^{-1/2} C_\rho^{1/2n} C_L^{(2n-1)/2n}$	6.45
应变水平 $\gamma/\bar{\gamma}$	$C_{\gamma/\bar{\gamma}}$	1.00
动位移 u	$C_u = C_{ \tau } C_K^{-1} C_\rho^{-1/n} C_L^{(n-1)/n}$	16.80
剪切模量 C_{Gmax}	$C_{Gmax} = C_K C_\rho^{1/n} C_L^{1/n}$	3.46



a) 几何图

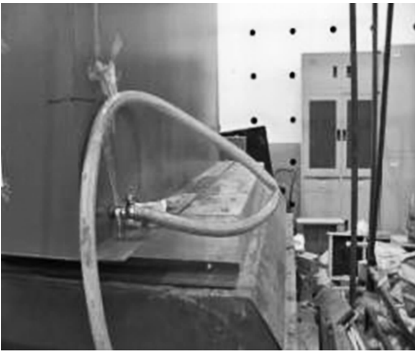


b) 试验模型

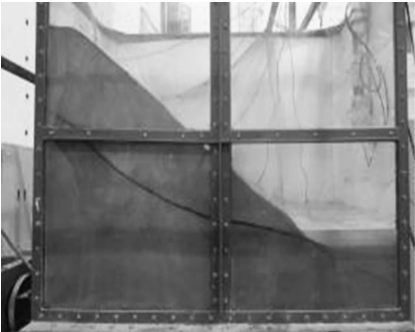
图 14 边坡几何图和试验模型



a) 边坡一侧加水



b) 底部水龙头



c) 边坡浸润线形状

图 15 边坡地下水的模拟

由图 16 可知，在边坡的一侧接入通水管道进行注水，使水位的高度控制在不同水位，来模

拟地下水位高度。在相应的模型箱另一侧的下部打开水龙头, 根据模拟连通器原理, 地下水的高度始终控制在坡脚高度处, 边坡内部形成稳定的渗流场后开始施加地震激励。根据边坡内部水位线的高度描绘出 0.6 m 水位时的浸润线的形状。

4.3 监测传感器的布置

坡和振动台模型箱上布置了较多的传感器, 试验模型的传感器布置见图 16。

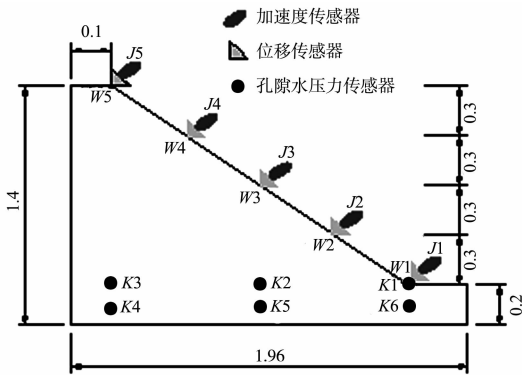


图 16 监测传感器的布置 (单位: m)

4.4 边坡的扫频试验

试验中采用扫频试验测得边坡模型在无地下水及 0.2、0.6、1 m 水位时的一阶自振频率(表 3)。

表 3 模型动力测试试验结果		
工况	自振频率/Hz	自振周期/s
无地下水	29.23	0.034
0.2 m 水位	17.54	0.057
0.6 m 水位	12.65	0.079
1 m 水位	10.20	0.098

通过测试结果(表 3)可知, 随着地下水位的升高, 边坡的自振周期逐渐增大, 边坡的自振频率由无水时的 29.23 Hz 减少到最高水位 1 m 时的 10.2 Hz, 而自振周期也由无水时的 0.034 s 延长至 0.098 s, 即由于地下水的存在, 最高地下水位是无水时的 2.88 倍, 故地下水的存在对边坡的动力特性的影响较大。

4.5 地下水位对边坡破坏模式的影响研究

EI Centro 地震波激励下 0 m 水位和 0.6 m 水位时的破坏模式进行分析见图 17、18。



图 17 无水时边坡的渐进性破坏



图 18 地下水位为 0.6 m 时边坡的渐进性破坏

由图 17、18 可知, 随着水位的升高, 边坡发生剪切破坏时的最大剪应变随着水位的升高逐渐增加, 且最大剪应变出现在坡脚位置。而有水(水位 0.6 m)时, 地震激励后, 孔隙水压力升高, 使边坡位于地下水下的砂土有效应力降低, 坡脚出现了明显的裂缝, 且随着孔隙水压力的继续升高, 坡脚前缘砂土有效应力降低, 由于地下水的影响边坡的破坏从坡脚先发生剪切破坏, 地震激励结束后, 可以发现边坡发生了明显的震陷现象, 且边坡滑坡体下滑位移大于无水时的下滑位移。无地下水时, 边坡的拉裂破坏首先出现在坡顶, 在地震和自重联合作用下发生拉裂破坏, 表现出明显的鞭梢效应, 之后随着地震的持续作用边坡裂缝逐渐增大, 直到在边坡坡脚处发生剪出破坏, 且边坡发生滑坡后出现了明显的圆弧形滑移面。本试验得出的边坡破坏规律与数值模拟的规律相似, 进一步验证了本文数值模拟的准确性。

4.6 动孔隙水压力的对比分析

为了对比数值模拟边坡动孔隙水压力值与室内试验监测动孔隙水压力的值, 分别进行了 EI Centro

地震、T1-II-1 地震和 T2-II-1 地震作用下边坡坡脚的动孔隙水压力对比（图 19 ~ 21）。

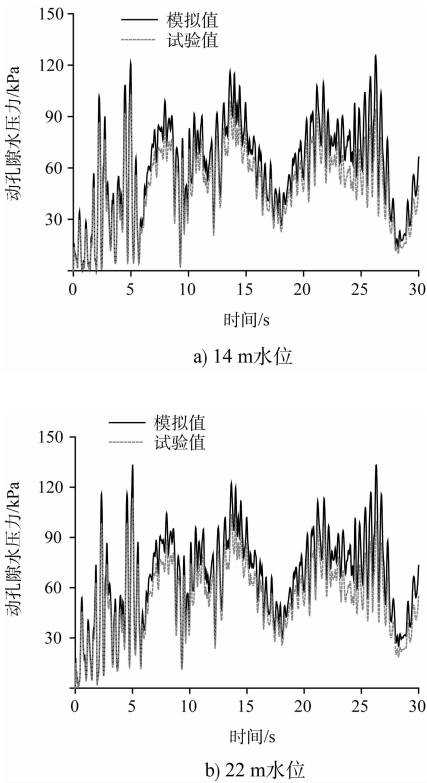


图 19 EICentro 地震作用下边坡动孔隙水压力对比

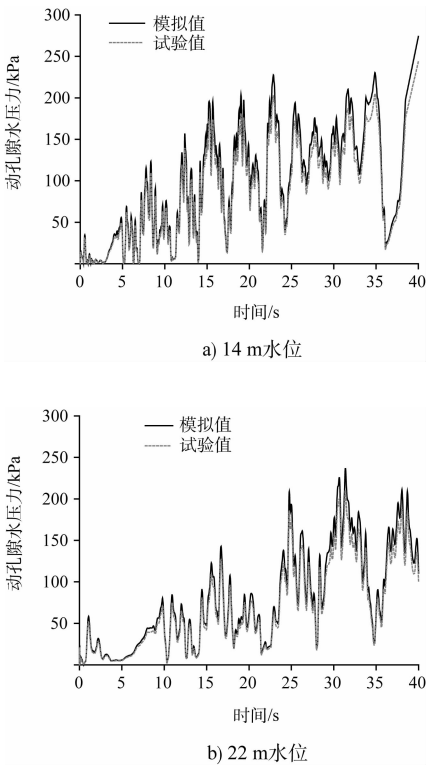


图 20 T1-II-1 地震作用下边坡动孔隙水压力对比

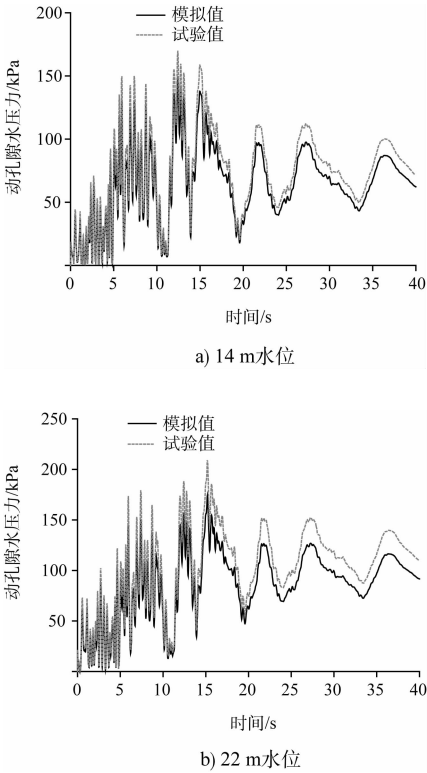


图 21 T2-II-1 地震作用下边坡动孔隙水压力对比

由图 19 ~ 21 可知，室内试验测得的边坡动孔隙水压力和数值模拟得到的动孔隙水压力的波动曲线呈现一致的波动规律，且在地震作用下，室内试验测得的动孔隙水压力整体上小于数值模拟得到的动孔隙水压力，且最大误差均控制在 15% 以内，主要是因为在进行数值仿真分析时软件同时含有土骨架和孔隙水两相介质的惯性力项。在饱和土动力问题中，用单相介质来代替，同时，超静孔隙水压力通过单相体的体积应变来近似求取，因此，其计算的边坡动孔隙水压力小于室内试验测到的动孔隙水压力值。

5 结论

本文采用数值仿真分析和室内振动台试验，研究了地震作用下边坡不同位置的动孔隙水压力变化发展规律，并分析了不同地下水位下动孔隙水压力与位移、应力和应变的关系，得到的主要结论为：

- 1) 坡趾位置的动孔隙水压力短时间内累积最大，也是较容易发生破坏的位置，在实际工程应作为重点防护位置。随着地下水位的升高边坡不

同监测点的动孔隙水压力和平均有效应力呈现增大的趋势,而在同一水位高度不同地震作用下边坡不同监测点的动孔隙水压力随着平均有效应力的增加呈现总体减小的趋势。动孔隙水压力的存在加速了边坡土体的动力破坏进程。

2) 在地震作用下随着动孔隙水压力的增加,边坡不同位置的水平位移呈现增大的趋势,不排水条件下地震作用时孔压迅速累积增加,动孔压的存在使边坡在受较大动应力作用时塑性变形累积,造成边坡的破坏加速,最终会导致边坡的破坏,因此,在进行动力反应分析时,动孔隙水压力的影响不可忽略。

3) 不考虑地下水时,边坡破坏首先出现在坡顶,表现出明显的鞭梢效应,随着地震的持续作用,坡脚出现破坏,直至边坡发生弧形滑坡。地下水的存在使得边坡坡脚位置超孔隙水压力骤然上升,其破坏首先出现在坡脚,直至发生剪切破坏。

4) 开展了不同地下水位下砂质边坡的振动台试验,且室内试验测得的边坡动孔隙水压力和数值模拟得到的动孔隙水压力的波动曲线呈现一致的波动规律,且在地震作用下,室内试验测得的动孔隙水压力整体上小于数值模拟得到的动孔隙水压力,但最大误差均控制在 15% 以内,验证了数值模拟结果的准确性。

参考文献:

[1] 杜守继, 职洪涛, 周枝华. 岩石节理剪切过程中应力与渗流特性的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(12): 2 473-2 474.

[2] 杜守继, 职洪涛, 周枝华. 岩石节理剪切过程中应力与渗流特性的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(12): 2 473-2 479.

[3] 何峰, 王来贵, 王振伟, 等. 煤岩蠕变-渗流耦合规律实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(6): 930-933.

[4] 李顺才, 陈占清, 缪协兴. 破碎岩体渗流的试验及理论研究综述[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2008, 27(3): 37-42.

[5] Seed H B, Martin P P, Lysmer J. Pore-water pressure changes during soil liquefaction[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1976(4): 323-346.

[6] Martin G R, Finn W D L, Seed H B. Fundamentals of liquefaction under cyclic loading [J]. Journal of The Geotechnical Engineering Division: ASCE, 1975, GT5: 423-438.

[7] Nasser S N, Shokooch A. A unified approach to densification and liquefaction of cohesionless sand in cyclic shearing[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979 (16): 659-678.

[8] 王艳丽, 王勇. 饱和砂的动孔压演化特性试验研究[J]. 同济大学学报, 2009, 37(12): 1 603-1 607.

[9] 曾长女, 刘汉龙, 陈育民. 细粒含量对粉土动孔压发展模式影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2 193-2 198.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

上航局中标江苏盐城港大丰港区航道施工项目

9月1日,上航局中标江苏盐城港大丰港区深水航道一期工程航道施工项目,中标价约4.8亿元,工期16个月。

盐城大丰港是新兴港口城市,为江苏苏北沿海三大深水海港之一,处于苏北海岸线港口空白带的中心位置。大丰港航道全长约79.9 km,以满足5万吨级散货船全潮单向通航标准建设,施工范围总长约46.7 km,航道通航宽度210~230 m,航道边坡1:10,转弯半径2 500 m,拟采用大型耙吸式挖泥船施工。

大丰港项目的实施,将极大地提升江苏沿江港口的发展空间,有效降低物流成本,在江苏省经济转型和产业升级进程中将发挥重要作用。

(来源:上航局)