

# 土工离心模型试验中动力破坏模拟能力分析

李荣建, 刘军定, 李海涛, 闫蕊

西安理工大学土木建筑工程学院, 西安 710048

**摘要** 针对土工离心模型试验中模型与原型在动力响应、动力破坏模拟方面的相似程度,研究了不同层次的相似比尺要求下模型结构材料的选择与设计方法;对所研制的4种不同桩径的抗滑桩缩尺模型,通过离心模型试验分析了缩尺模型在不同承载力条件下动力破坏模拟的规律及破坏特点。结果表明,小桩径抗滑桩在静力条件下因承载力不足而开裂,在动力作用下可导致桩底截面裂缝贯通;较大桩径抗滑桩在静力条件下稳定,但在动力作用下可发生开裂破坏;大桩径抗滑桩在静力和动力条件下均未发生开裂,表明其具有足够的静动抗弯能力,但在高水位时大桩径抗滑桩在动力作用下可发生断裂破坏。由于研制的缩尺模型严格满足原型的相似比尺要求,因此模型试验结果能够反映原型抗滑桩的破坏机理。

**关键词** 土工离心模型试验;缩尺模型;动力破坏;相似比尺

**中图分类号** TU411

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.27.006

## Analysis on Modeling Capability of Dynamic Failure in Centrifugal Modeling Test

LI Rongjian, LIU Junding, LI Haitao, YAN Rui

School of Civil Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

**Abstract** Aiming at different similar levels on the dynamic response and the simulation of dynamic failure between the model and the prototype in geotechnical dynamic centrifugal model test, the similar scale and the choice of model material for geotechnical centrifuge modeling were analyzed, and then the issues of principle and design on the simulation of dynamic response and dynamic failure in geotechnical dynamic centrifugal model test were proposed. Finally, the dynamic response laws and the failure characteristics of model concrete pile in geotechnical dynamic centrifugal model tests were discussed by means of the developed model piles with four kinds of diameters. Results show that the stabilizing piles with the small diameter under the condition of static cracking due to insufficient bearing capacity, can be led to pile section fracture penetration under dynamic action; the stabilizing piles with the larger diameter under the condition of static stability, but can show cracking destruction under dynamic action; the stabilizing piles with the largest diameter under static and dynamic conditions are not crazed, but the fracture damage can occur under dynamic action in the high water level. As a result of the scale of the model and the prototype strictly meet the similarity scale, so these model test results can reflect the failure mechanism of the prototype stabilizing piles.

**Keywords** geotechnical centrifuge model test; scale model; dynamic failure; similar scale

### 0 引言

土工离心模型试验将土工模型置于高速旋转的离心机中,让模型承受大于重力加速度的离心加速度作用,补偿因模型尺寸缩小而导致土工构筑物自重的损失,由于惯性力与重力等效,因而模型与原型的应力应变相等,变形相似,破坏机理相同,能再现原型特性<sup>[1-3]</sup>,从而可以较好地预测岩土工

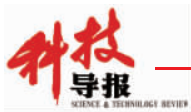
程结构的工作性能。

岩土与结构的地震动力响应是近年来土工离心模型试验的研究热点之一。Brandenberg等<sup>[4,5]</sup>利用动力离心模型试验研究了复杂条件下地基液化对土-桩基础的动力相互作用的影响。Ghosh等<sup>[6]</sup>利用动力离心模型试验研究了土与结构动力相互作用。Ishizaki等<sup>[7]</sup>利用动力离心模型试验研究了可液化

收稿日期:2013-04-28;修回日期:2013-07-09

基金项目:国家自然科学基金项目(11072193);中国博士后科学基金项目(20100481354);陕西省教育厅科学研究计划资助项目(12JK0907)

作者简介:李荣建,副教授,研究方向为黄土力学、土工抗震与边坡工程,电子信箱:lirongjian@xaut.edu.cn



地基土中桩基础的抗震性能和变形机理。Lee 等<sup>[8]</sup>研究了沉箱型码头挡墙在地震过程中的动力特性。Takahashi 等<sup>[9,10]</sup>设计了地震引起土体侧向流动的离心模型试验,并结合计算分析了地基液化和地震永久变形对码头桩受力的影响机理。李荣建等<sup>[11]</sup>采用铜质抗滑模型桩研究了地震作用下饱和砂土地基中动孔压、边坡变形与土体加速度和抗滑桩弯矩的动力响应特征。这些动力离心模型试验研究了地震作用下桩土间的相互作用及其动力响应,但仅能反映土与结构物的动力响应,还不能分析和模拟土中结构的破坏现象。

在动力模型破坏试验的模拟方面,周兵等<sup>[12]</sup>采用脆性材料制作了模型拱坝并进行了动力离心模型试验,研究了模型拱坝结构从完整到破坏的全过程,初步揭示了模型拱坝的动力反应特性和破坏机理。但该脆性材料强度较低,试验揭示的破坏现象并不严格符合原型结构的破坏问题。刘光磊等<sup>[13]</sup>基于有机玻璃制作的地铁模型结构对可液化地层中地铁隧道的地震反应进行了动力离心模型试验,研究了可液化地层中地铁隧道结构的上浮及变形特性等问题,但由于该模型结构采用有机玻璃制作,因此不能反映原型地铁结构的破坏问题。凌道盛等<sup>[14]</sup>采用动力离心模型试验模拟了地铁车站的地震破坏过程,虽然在强震作用下地铁车站结构立柱的柱底发生了破坏现象,但该模型混凝土中缺乏级配碎石,实质上是一种水泥砂浆,并不是一种真正意义上的微粒混凝土,由于水泥砂浆的强度较低,通过试验揭示的破坏现象与原型地铁车站结构的破坏问题仍有一定的差距。李荣建等<sup>[15]</sup>研制了一种可反映原型破坏特点的抗滑模型桩,随后通过动力离心模型试验进行了不同条件下的应用和分析<sup>[16,17]</sup>,但仍需要进一步探讨相应的模型比尺理论关系和技术实现机理,以便更为客观地评价原型抗滑桩。

## 1 结构模型材料的特性

### 1.1 离心模型试验中相似模拟原则

模型试验的相似关系设计,是根据相似条件确定原型与模型之间的所有相似常数的过程。基于 Buckingham $\pi$  定理,确定相似条件的具体方法有方程式分析法<sup>[18]</sup>和量纲分析法<sup>[19]</sup>。采用方程式分析法建立相似关系条件方便明确,但必须在试验结果与试验条件之间的关系方面具有明确的数学方程式,这却常常是需要通过试验研究才能提出的,尤其是当结构或荷载条件比较复杂时。而量纲分析法仅需明确影响所研究物理现象的物理量以及明确量测这些物理量所需要的量纲即可。

为确保在尺寸减小的离心模型中各种材料和原型材料的性状相似,应力和应变相等,模型试验测定的数据有明确的对应原型,原型和模型之间必须有一套相适应的比例缩放关系,因此,相似比尺的设计是整个动力离心模型破坏试验中的关键环节之一。

根据模型相似理论,在模型试验中存在 3 类相似关系,即模型结构与原型结构相似,模型土与原型土体相似,模型结构与模型土相似比尺匹配。模型土采用原型土,可保持模

型与原型土的力学特性一致,但能满足原型结构特性和缩尺要求的材料在现实中难以寻找,常采用替代材料;结构与土之间刚度之比及阻尼之比等直接影响接触面及土中结构的动力响应,但在以往的试验中这种相似关系常被忽略。

### 1.2 离心模型试验中可破坏的相似材料

模型结构材料的选择有 2 个不同的侧重点:若是侧重于土-结构体系在不发生破坏条件下的整体动态响应,那么高强度替代材料制作的模型结构即可以达到目的;但若侧重于寻找土-结构体系中的结构破坏规律,尤其是反映原型结构的动力破坏,那么就必须在强度和刚度方面使模型与原型更加严格地满足相似关系。

微混凝土是由几种微细骨料按一定配比组成的混凝土,其强度比单独采用一种砂的砂浆混凝土更接近原型混凝土的强度(图 1)。通过一系列配合比试配实验分析,可以确定一种微混凝土骨料粒径(表 1)。试验证明,该微混凝土可以做成与混凝土强度相似的模型结构,其力学性能与采用同样水泥用量的原型结构混凝土极其相近,可以反映原型混凝土结构的动力破坏。

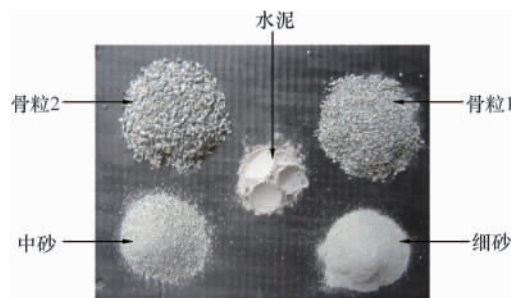


图 1 缩尺粒径示意

Fig. 1 Particles of model concrete

表 1 模型混凝土的配合比

Table 1 Mix proportion of model concrete

材料	粒径/mm	质量/g
水	—	69.59
水泥	—	124.89
细砂	0~0.5	105.47
中砂	0.5~1.25	52.74
骨料	1.25~5	247.30

对微混凝土来说,抗压强度是其最有代表性的基本特征之一,所以微混凝土的抗压强度也与一般普通混凝土一样,由立方体试块按照统一标准规定的试验方法进行试验,试验设备采用混凝土抗压试验机。可分为 4 组试验,每组 3 试块,分别测定 7、14、28 和 60d 龄期微混凝土的强度,试块均以标准条件养护。同一龄期试块的抗压强度值较为接近,试块破坏形状规律、整齐、均匀一致,均表现为锥形体破坏。不同龄期微混凝土的标准强度增长曲线如图 2<sup>[19]</sup>所示。

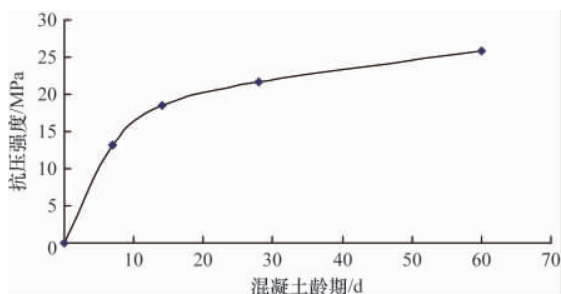


图2 微混凝土强度增长曲线

Fig. 2 Strength increase curve of model concrete

由图3可以看出,按照上述配合比制作的微混凝土强度可以达到C20原型混凝土的强度,并且可以根据试验时混凝土的实际龄期取对应的抗压强度。



图3 模拟钢筋抗拉试验

Fig. 3 Tensile test of model steel fiber

抗滑模型桩中的混凝土采用微粒混凝土,采用镀锌铁丝模拟混凝土结构中的钢筋。为了尽可能模拟原型结构中钢筋与混凝土的粘结情况,可采用直径为1.0mm的简单的压痕铁丝作为模拟钢筋的材料进行抗拉试验,如图3所示。确定的材料性能为屈服强度267MPa,极限强度427MPa。

## 2 缩尺模型的相似关系及承载特性

### 2.1 离心模型试验中结构的相似模拟关系

原型抗滑桩(图4)的控制微分方程为:

$$\frac{d^4 w_p}{dx_p^4} = \frac{b_p q_p}{E_p I_p} \quad (1)$$

式中,  $b$  为抗滑桩的宽度,  $x$  为抗滑桩轴线的坐标,  $q$  为抗滑桩的分布压力,  $w$  为抗滑桩的弯曲挠度,  $EI$  为抗滑桩的弯曲刚度,  $E$  为弹性模量,  $p$  表示原型。对于矩形截面,抗滑桩的惯性矩为  $I=bh^3/12$ ,其中  $h$  为抗滑桩的截面高度。

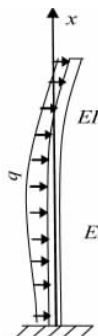


图5 抗滑桩受力示意

Fig. 5 Diagram of the bending beam

模型桩的控制微分方程为:

$$\frac{d^4 w_m}{dx_m^4} = \frac{b_m q_m}{E_m I_m} \quad (2)$$

式中,  $m$  表示模型,假定模型与原型各量间有以下比例关系:

$$\begin{cases} w_m = \lambda_w w_p \\ x_m = \lambda_l x_p \\ b_m = \lambda_b b_p \\ q_m = \lambda_q q_p \\ E_m = \lambda_E E_p \\ I_m = \lambda_I I_p \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\lambda_w, \lambda_l, \lambda_b, \lambda_l, \lambda_q, \lambda_E$  分别为模型桩的挠度、长度、宽度、惯性矩、分布荷载和弹性模量等物理量与原型抗滑桩相应物理量的相似比例系数。

将式(3)代入式(2)可得

$$\frac{\lambda_w}{\lambda_l^4} \frac{d^4 w_p}{dx_p^4} = \frac{\lambda_q \lambda_b}{\lambda_E \lambda_l} \frac{q_p b_p}{E_p I_p} \quad (4)$$

比较式(1)和式(4)可知

$$\lambda_w \lambda_E \lambda_l = \lambda_q \lambda_b \lambda_l^4 \quad (5)$$

在离心模型试验中,  $\lambda_q = 1$ , 且采用  $\lambda_w = \lambda_l = \lambda_b$ , 则由式(5)可得

$$\lambda_E \lambda_l = \lambda_b \lambda_l^4 = \lambda_l^4 \quad (6)$$

如果设  $\lambda_l = 1/n$ , 则有

$$E_m I_m = \frac{1}{n^4} E_p I_p \quad (7)$$

将  $I=bh^3/12$  代入式(7)可得

$$\frac{h_m^3}{h_p^3} = \frac{E_p b_p}{n^4 E_m b_m} = \frac{E_p}{n^3 E_m} \quad (8)$$

如果所选模型材料与原型材料不同,即  $E_p \neq E_m$ , 则有

$$h_m = \frac{h_p}{n} \left[ \frac{E_p}{E_m} \right]^{1/3} \quad (9)$$

如果采用  $E_p = E_m$ , 即模型材料与原型材料相同, 则有

$$h_m = \frac{h_p}{n} \quad (10)$$

表2给出了离心模型试验中模型桩与原型桩各物理量之间的相似关系,其中  $n$  为原型与模型的尺寸比值,模型的缩尺比例为  $1/n$ 。

表2 模型与原型的相似比尺

Table 2 Model scale in centrifuge test (model/prototype)

参数	物理量	模型/原型
长度	$L$	$1/n$
应力	$\sigma$	1
应变	$\epsilon$	1
位移	$u$	$1/n$
弯矩	$M$	$1/n^3$
弹性模量	$E$	1
弯曲刚度	$EI$	$1/n^4$

微混凝土的浇筑是微混凝土桩模型制作的关键技术之一,因为模型尺寸比原型尺寸大大缩小,所以模板尺寸必须

制作精确,表面应光滑并易于脱模,以保证模型的尺寸准确、表面光滑平整,便于安装观测传感器,观察裂纹、裂缝的出现和发展。

微混凝土灌注模板采用钢模板并涂脱模油。因为在混凝土灌注时,其骨料较小,排除空气的过程也就较慢,所以微混凝土灌注时应分薄层浇灌。试验也表明,微混凝土灌注层过厚时,会造成无数的大直径气泡,导致所灌注的混凝土密实度降低。同时,为保证所灌注的混凝土尽可能达到最大的密实度与均匀性,灌注时应采用振动台完成振捣。

### 2.2 缩尺模型的抗弯承载能力模拟分析

对4种桩径的模型桩进行了三点抗弯试验,试验条件如图5所示,试验结果(4种桩径的承载力)如图6所示。

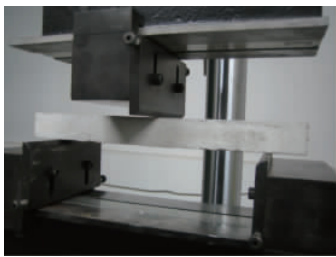


图5 三点抗弯示意

Fig.5 Three point bending test machine

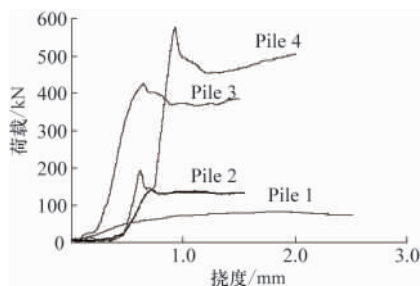


图6 模型桩(1~4)加载曲线

Fig.6 Curves of loading and deflection in piles (1~4)

表3给出通过三点抗弯试验得到的4种抗滑模型桩的极限承载力,以及根据表2中相似关系换算出的50倍原型桩的抗弯强度,两组数据均反映出桩径的变化对模型桩截面抗弯承载力的影响较大。经计算验证,4种抗滑模型桩模拟的50倍原型桩抗弯承载力与工程中相应尺寸的实际抗滑桩很接近。

表3 各桩径截面模型与反算原型的抗弯承载力

Table 3 Bending strength of piles in model and prototype

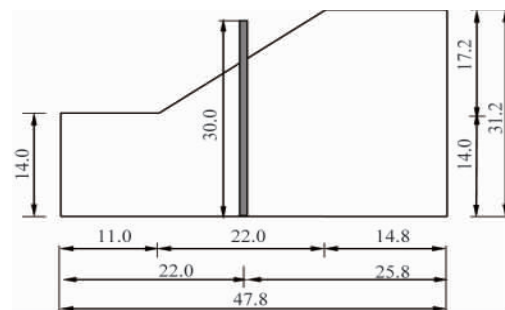
抗滑模型桩	截面边长/mm	配筋率/%	极限抗弯强度/(N·m)	50倍原型抗弯强度/kN·m	原型设计值/(kN·m)
Pile 1	10.0	1.09	3.5	437.5	463.4
Pile 2	16.0	0.41	8.0	1062.0	864.3
Pile 3	20.0	0.62	22.0	2750.0	2770.7
Pile 4	25.0	0.40	31.5	3937.0	3641.8

总之,在动力离心模型试验的破坏模拟研究中,最关键的问题是如何通过改进缩尺比例模型试验技术,选择、筛选

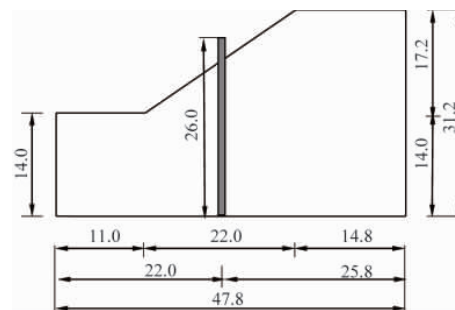
和研制严格满足相似比尺的模型材料,才能满足模型与原型在应力应变相等和强度相似等方面的要求,从而能够模拟各种模型的破坏模式及机理。

### 3 缩尺模型的破坏模拟验证分析

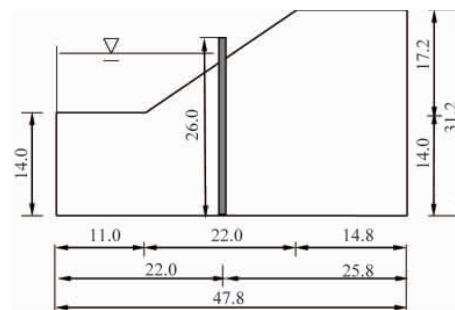
为使试验模型揭示的规律与原型桩接近一致,按照上述试验确定的微混凝土配合比和抗滑桩相似比尺关系,选择刻纹细铁丝模拟钢筋,混凝土模型材料由微混凝土构成,制作出不同桩径的钢筋混凝土模型抗滑桩,并设计了4个加固边坡模型如图7所示,采用不同桩径的模型抗滑桩加固边坡。边坡土体采用粉细砂,边坡模型制备采用砂雨法,高水位边坡模型(模型4)采用抽真空法达到饱和要求。



(a) 模型1  
(a) model 1



(b) 模型2和模型3  
(b) model 2 and model 3



(c) 模型4  
(c) model 4

图7 加固边坡模型(单位:cm)

Fig.7 Slope model reinforced with piles (unit: cm)

模型1~4中,抗滑桩均采用正方形截面的钢筋混凝土模型桩,其横截面边长依次为16、20、25、25mm,桩高分别为300、260、260、260mm,桩间距分别为48、55、60、60mm,地基厚

度为 140mm,模型边坡加固均采用单排抗滑模型桩,设置在边坡中部,桩底嵌固于模型箱底板。边坡加固模型放置于固壁式模型箱内,对主振方向的两壁采取了吸波措施,对其余两壁进行了一定的光滑处理以消除边壁摩擦。

在各个试验中,离心机的加速度为 50g ( $g$  为重力加速度)。在离心机运行稳定后,输入相应的地震波,通过对称设置于模型桩外侧的应变计测定了模型桩不同位置的轴向应变时程。根据该时程可按模型比尺计算出原型抗滑桩桩底位置的总弯矩时程曲线,如图 8 所示。

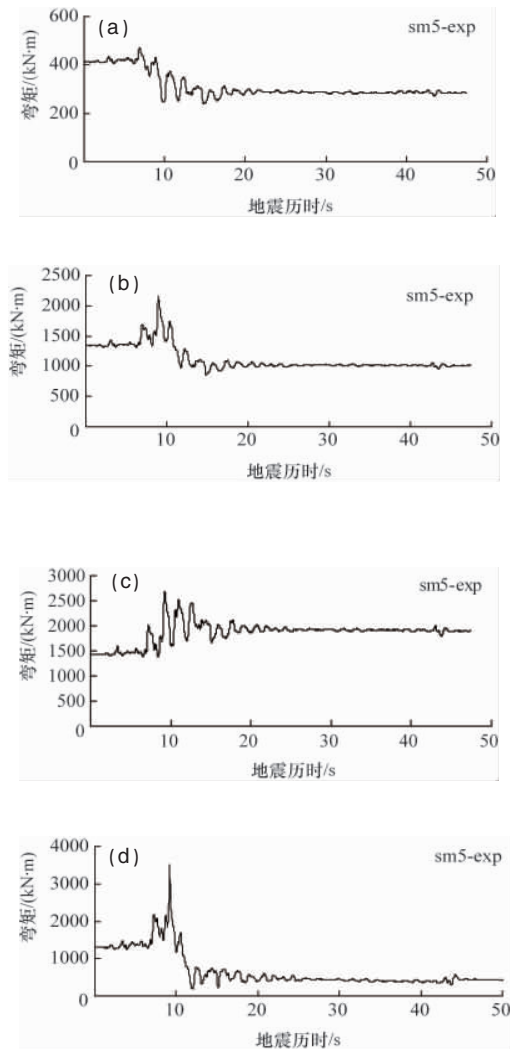


图 8 抗滑模型桩桩底弯矩时程曲线  
Fig. 8 Moment histories of piles near bottom

加固边坡模型 1 的抗滑桩弯矩时程分布如图 8(a)所示,说明地震输入期间总弯矩略微升高,但很快降至低于震前的静态弯矩值 408kN·m,而该弯矩又小于桩体的极限承载弯矩 1062kN·m,表明离心机升速过程中抗滑桩嵌固端已经开裂,导致弯矩重分布。这是典型的静力条件下的断桩破坏,断裂部位如图 9(a)所示。

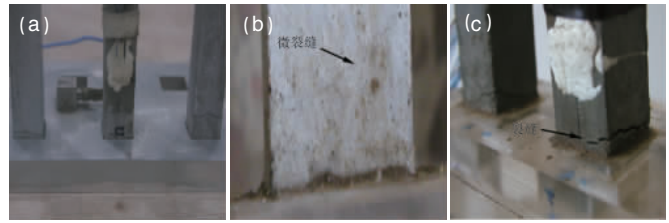


图 9 模型桩断裂部位  
Fig. 9 Fracture failure of piles at fixed ends in model piles

加固边坡模型 2 的抗滑桩弯矩时程分布如图 8(b)所示,在 9.0s 时刻地震输入达到峰值,静动总弯矩基本达到最大值 2152kN·m,在 9.0s 与 10.8s 之间地震加速度仍较大,但弯矩却明显减小,且小于震前的静态弯矩值,表明此时由于地震作用使得抗滑桩桩底附近产生裂缝,由于残余弯矩较大,裂缝并未贯通。这是典型的静力条件下稳定但在地震动力作用下的桩体开裂问题,震后桩体裂缝部位如图 9(b)所示。

加固边坡模型 3 的抗滑桩弯矩的时程分布如图 8 (c)所示,在 9.0 s 时刻地震输入达到峰值,静动总弯矩达到最大值 2651kN·m,峰值过后弯矩虽有减小,但仍大于震前的静态弯矩值,表明抗滑桩加固边坡的抗震性能较好。

加固边坡模型 4 的抗滑桩弯矩时程分布如图 8(d)所示,在 9.0s 时刻地震输入达到峰值,静动总弯矩达到最大值 3512kN·m,峰值过后弯矩迅速减小,均远小于震前的静态弯矩值,且最终接近于零,表明在高水位条件下边坡抗滑桩抗震加固失效,发生了桩体断裂破坏。桩体断裂部位如图 9(c)所示。

小桩径抗滑桩属静力条件下承载力不足而开裂,地震作用导致桩底截面裂缝贯通,桩底嵌固约束转化为活动铰约束。较大桩径抗滑桩在静力条件下稳定,但在动力作用下发生开裂破坏。大桩径抗滑桩在静力和动力条件下均未发生开裂,说明其具有足够的静动抗弯能力;但在高水位条件下大桩径抗滑桩在动力条件下发生断裂破坏。

#### 4 结论

(1) 由于研制的微混凝土模型材料与原型混凝土严格满足相似比尺,因此,观测到的模型试验破坏可以反映原型混凝土抗滑桩的破坏机理。

(2) 模型结构材料的选择原则,试验研究若侧重于土-结构体系在不发生破坏条件下的整体动态响应,那么高强度替代材料制作的模型结构即可以达到目的;但若侧重于寻找土-结构体系中的结构破坏规律,尤其是反映原型结构的动力破坏,则必须在强度和刚度方面使模型与原型更加严格地满足相似比尺条件。

(3) 接近原型材料的模型材料制作的模型结构可以更严格地满足模型相似比尺条件,更好地与原型结构相似一致,

同时,原型材料模型结构可以更好地揭示加固边坡的动力响应规律以及破坏现象。

### 参考文献 (References)

- [1] 黄志全, 王思敬. 离心模型试验技术在我国的应用概况[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(2): 199-203.  
Huang Zhiquan, Wang Sijing. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(2): 199-203.
- [2] 冯光愈. 离心模型在土工试验研究中的应用综述[J]. 土工基础, 1982(1): 86-91.  
Feng Guangyu. Soil Engineering and Foundation, 1982(1): 86-91.
- [3] 朱朝峰, 赵荣炼. 离心模型模拟法在若干土工工程中的应用性状[J]. 水利发电学报, 1993(1): 102-107.  
Zhu Chaofeng, Zhao Ronglian. Journal of Hydroelectric Engineering, 1993(1): 102-107.
- [4] Brandenberg S J, Boulanger R W, Kutter B L, et al. Observations and analysis of pile groups in liquefied and laterally spreading ground in centrifuge tests[J]. ASCE, Geotechnical Special Publication, 2006, 145: 161-172.
- [5] Boulanger R W, Curas C J, Kutter B L, et al. Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(9): 750-759.
- [6] Ghosh B, Madabhushi S P G. Centrifuge modelling of seismic soil structure interaction effects[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(8): 887-896.
- [7] Ishizaki S, Tokimatsu K, Nagao T. Seismic behavior of pile-supported building with semi-rigid pile head connections in liquefiable soil [J]. Journal of Structural and Construction Engineering, 2012, 77 (667): 1089-1097.
- [8] Lee C J. Centrifuge modeling of the behavior of caisson-type quay walls during earthquakes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(2): 117-131.
- [9] Takahashi A, Takemura J, Kawaguchi Y, et al. Stability of piled pier subjected to lateral flow of soils during earthquake [C]. Centrifuge 98, Tokyo, Japan, September 23-25, 1998.
- [10] Takahashi A, Takemura J. Liquefaction-induced large displacement of pile-supported wharf [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(11): 811-825.
- [11] 李荣建, 于玉贞, 吕禾, 等. 饱和砂土地基上抗滑桩加固边坡的动力离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 898-902.  
Li Rongjian, Yu Yuzhen, Lü He, et al. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 898-902.
- [12] 周兵, 金峰, 王进廷. 拱坝-坝肩整体动力稳定性的离心模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(1): 15-19.  
Zhou Bing, Jin Feng, Wang Jinting. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(1): 15-19.
- [13] 刘光磊, 宋二祥, 刘华北, 等. 饱和砂土地层中隧道结构动力离心模型试验[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2071-2076.  
Liu Guanglei, Song Erxiang, Liu Huabei, et al. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2071-2076.
- [14] 凌道盛, 郭恒, 蔡武军, 等. 地铁车站地震破坏离心机振动台模型试验研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(12): 2202-2209.  
Ling Daosheng, Guo Heng, Cai Wujun, et al. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(12): 2202-2209.
- [15] 李荣建, 于玉贞, 吕禾, 等. 动力离心模型试验中微混凝土抗滑模型桩的设计[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(9): 1498-1502.  
Li Rongjian, Yu Yuzhen, Lü He, et al. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2009, 49(9): 1498-1502.
- [16] 于玉贞, 李荣建, 李广信, 等. 抗滑桩静力与动力破坏离心模型试验对比分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 1090-1093.  
Yu Yuzhen, Li Rongjian, Li Guangxin, et al. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(7): 1090-1093.
- [17] 李荣建, 于玉贞, 吕禾, 等. 可液化地基上边坡加固桩地震动力破坏特点研究[J]. 水利学报, 2010, 41(4): 446-451.  
Li Rongjian, Yu Yuzhen, Lü He, et al. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4): 446-451.

(责任编辑 韩星明)

### ·学术动态·



## 中国科协与新疆生产建设兵团签订共建协议

2013年9月9日,中国科协与新疆生产建设兵团在北京正式签订《落实全民科学素质行动计划纲要共建协议》。中国科协常务副主席、党组书记、书记处第一书记申维辰会见新疆生产建设兵团党委常委、兵团副政委卢晓峰一行,并出席签约仪式。中国科协书记处书记徐延豪、新疆生产建设兵团副政委卢晓峰在共建协议上签字。

按照共建协议,到2015年,新疆生产建设兵团将实现本辖区公民具备基本科学素质比例超过3.1%。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/15003334.html>。