

DOI: 10.11779/CJGE202003009

# 上部结构-土-隧道相互作用体系振动台试验模型土的设计与试验研究

谢 军<sup>1, 2</sup>, 包淑贤<sup>2</sup>, 胡英飞<sup>2</sup>, 倪雅静<sup>2</sup>, 李延涛<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300400; 2. 河北建筑工程学院土木工程学院, 河北 张家口 075000)

**摘 要:** 为使上部结构-土-隧道相互作用体系各部分的加速度相似比相匹配, 真实还原地震作用下整个体系的动力响应, 采用理论分析和试验相结合的方法, 设计了一种以锯末、河砂、粉质黏土以及水为成分模型土。对试配的不同材料配比的模型土进行了大量 30 kPa 围压下的共振柱试验, 并以此为基础设计进行了正交试验, 创建  $Y(S_{\gamma}, S_a, Q)$  函数以判定模型土与原型土  $G/G_{\max} - \gamma$  动力特性曲线的相似性。正交试验结果表明: 模型土的材料锯末、河砂与粉质黏土最优质量比为 18% : 27% : 55%, 含水率为 50%; 最优方案模型土基本满足了其与原型土加速度相似比  $S_a$  等于 3、动剪切模量比  $G/G_{\max}$  随剪应变  $\gamma$  变化的关系曲线相似的预期目标; 并获得了各添加材料对模型土相关动力参数的影响规律。另外, 进行了 50, 70 kPa 围压下的最优配比模型土的共振柱试验, 验证了其基本满足与原型土在不同围压  $G/G_{\max} - \gamma$  动力特性曲线的相似性, 同时对比二者的阻尼比  $\lambda$  随剪应变  $\gamma$  的变化关系曲线, 得出二者关于阻尼比的相似性尚可; 并基于卓越周期相似分析再次验证模型土与原型土的相似性。研究结论可为今后有关振动台试验模型土的配制提供一定的参考。

**关键词:** 振动台试验; 模型土; 共振柱试验; 正交试验

中图分类号: TU317.1; P315.93

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2020)03 - 0476 - 10

**作者简介:** 谢 军(1979—), 男, 副教授, 主要从事工程抗震与振动控制等方面的教学和科研工作。E-mail: xiejun79@126.com。

## Design and experimental research on model soils used for shaking table tests of superstructure-soil-tunnel interaction system

XIE Jun<sup>1, 2</sup>, BAO Shu-xian<sup>2</sup>, HU Ying-fei<sup>2</sup>, NI Ya-jing<sup>2</sup>, LI Yan-tao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300400, China; 2. School of Civil Engineering,

Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China)

**Abstract:** In order to match the similitude ratio of acceleration of a superstructure-soil-tunnel interaction system and truly restore its dynamic response under earthquake action, a kind of model soil composed of sawdust, river sand, silty clay and water is designed by combining the theoretical analysis with experiments. A large number of resonant column tests on the model soils with different material ratios are carried out at confining pressure of 30 kPa, then the orthogonal test scheme is designed and conducted, and  $Y(S_{\gamma}, S_a, Q)$  function is created to judge the similitude about dynamic shear modulus ratio-shear strain curves between model and prototype soils. The orthogonal test results show that the optimal mass ratio of sawdust, river sand and silty clay is 18% : 27% : 55%, and the moisture content is 50%. The model soil with the optimal proportion basically satisfies the expected target that its similitude ratio of acceleration to the prototype soil is 3 and its correlation curve of dynamic shear modulus ratio-shear strain is similar to that of the prototype soil. The influence laws about dynamic parameters of model soils are obtained for various additive materials. In addition, the resonant column tests on the model soil with the optimal proportion are carried out at confining pressures of 50 and 70 kPa. It is verified that the similitude between the model and prototype soils at different confining pressures is basically satisfied, their correlation curves about damping ratio and shear strain are compared, and it is obtained that their similitude about damping ratio is reasonable. Based on the similarity analysis of the predominant period, the similitude between the model and prototype soils is verified again. The research conclusions may provide some reference for the preparation of model soils in shaking table tests in the future.

基金项目: 河北省科技计划项目 (16275406D); 河北建筑工程学院研究生创新基金项目 (XY202016)

收稿日期: 2019 - 05 - 05

\*通信作者 (hblytao@163.com)

**Key words:** shaking table test; model soil; resonant column test; orthogonal test

0 引 言

近年来,为满足人们的生活需求,国家在各大城市广泛开发地下空间,如城市地铁隧道、地下商场等地下结构,其中很多都建于城市已有建筑基础下部。地震发生时地下结构由于埋置于土中且受到上部结构的影响,其受力特点和振动反应与上部建筑相比较为复杂,因此有关地下结构的抗震问题亟待解决。目前为止地震作用下地下结构与土、上部结构的相互作用理论并未成熟,在相关结构抗震设计时常常需要进行地震模拟振动台试验而提供一定试验资料。上部结构-土-隧道相互作用体系的振动台模拟试验中的一个关键问题是体系各部分之间的加速度相似比应相互匹配,因此模型土的设计至关重要。多年来国内外相关学者从物理性态、力学性态相似等方面对模型土进行设计研究:Robb 等<sup>[1]</sup>为研究地震作用下某地铁-结构相互作用,以动强度为主要相似参数进行了模型土的设计,采用高岭土、膨润土、粉煤灰和水按一定比例混合模拟软黏土,试验结果达到预期强度范围;Keizo 等<sup>[2]</sup>采用原型土进行地下结构振动台试验;Hamid<sup>[3]</sup>以剪切波速作为相似指标,以高岭土,膨润土、F 级粉煤灰、石灰和水混合制作模型土,用以模拟软土地基下的土-结构振动台试验;魏宝华等<sup>[4]</sup>以控制原型土的含水率和干密度来配制模型土;窦远明等<sup>[5]</sup>从物理性态相似方面考虑配制模型土,采用洗衣液、石英砂等材料,以摩擦角、黏聚力等作为相似指标;尚守平等<sup>[6]</sup>、燕晓等<sup>[7]</sup>以动剪切模量做为主要相似指标,采用在原型土里添加锯末来降低动剪切模量,其中文献<sup>[6]</sup>加速度相似比  $S_a$  的目标值为 1,而实际值为 4.65;文献<sup>[7]</sup>的  $S_a$  目标值为 5,实际值为 4.4;陈红娟等<sup>[8]</sup>基于结构与土周期相似比一致的原则,以土的卓越周期作为相似指标,场地土的卓越周期  $T=4h/v_s$ ,由相似理论得模型土的剪切波速比原型场地小很多,故在原型土里添加锯末以降低剪切波速,目标值  $S_t S_p / S_E = 1$ ,实际结果为 0.15。

土的复杂多样性以及物理、力学性态参数较多导致模型土的配制较为困难,目前为止有关振动台动力特性试验模型土的配制方面,多数研究者<sup>[6-8]</sup>所得试验结果未能较好满足预期目标,尤其在模型土与原型土的  $G/G_{\max} - \gamma$  动力特性曲线的相似性方面考虑较少。

本文以天津某场地粉质黏土为原型土,地勘报告见表 1 所示。以模型土与原型土的加速度相似比  $S_a$  应与上部结构、隧道与对应模型结构的  $S_a$  相匹配以及模

型土与原型土的  $G/G_{\max} - \gamma$  动力特性曲线相似为目标,实施上部结构-土-隧道振动台试验模型土的设计与试验研究。

表 1 天津某场地地勘报告

Table 1 Geological survey report of a site in Tianjin					
土层类别	土层厚度 $d/\text{m}$	埋深 $h/\text{m}$	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	剪切波速 $v_{\text{se}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	最大动剪 切模量 $G_{\text{max}}/\text{MPa}$
杂填土	3.1	3.1	1.85	132	32.23
粉质黏土	1.6	4.7	1.90	147	41.06
粉土	2.8	7.5	2.00	152	46.21
粉质黏土	3.1	10.6	1.90	168	53.63
粉质黏土	2.0	12.6	1.90	194	71.51
粉质黏土	2.0	14.6	2.00	223	99.46
粉质黏土	3.4	18.0	2.00	231	106.72
粉质黏土	7.5	25.5	2.00	240	115.20
粉土	2.6	28.1	2.00	242	117.13
粉质黏土	4.0	32.1	2.06	270	150.17
粉质黏土	2.4	34.5	2.06	285	167.32
粉质黏土	4.7	39.2	2.06	296	180.49
粉质黏土	2.8	42.0	1.99	311	192.47

1 模型土设计

1.1 模型相似关系

上部结构-土-隧道相互作用体系振动台试验的相似关系包括:①上部结构模型、隧道模型与对应原型结构的相似;②原型场地土与模型土的相似;③上部结构模型、隧道模型与模型土的相似比的匹配。

考虑到试验的可行性,对模型进行如下相似设计:①根据振动台承载能力和台面尺寸等参数,确定上部结构、隧道和场地土模型几何相似比为 1:30;②上部结构和隧道尺寸较小,无法完全配重,且模型土与原型土加速度相似比  $S_a$  无法达到 1<sup>[6-8]</sup>,故采用重力失真模型;③天津地区设防烈度为 8 度,对应的罕遇地震加速度为 0.4g,本次试验振动台最大输出加速度为 1.2g,为还原罕遇地震下体系的响应情况,将振动台上部结构-土-隧道相互作用体系加速度相似比定为 3。

本次振动台试验根据 Buckingham  $\pi$  定理确定各物理量之间的相似关系<sup>[9]</sup>。以几何尺寸  $L$ 、密度  $\rho$  和弹性模量  $E$  为基本物理量,土、上部结构及隧道的原型与对应的模型各物理量的相似比及其相似关系如表 2 所示。本次振动台试验是上部结构-土-隧道相互作用体系模型的动力响应试验,土的动剪切模量为土的重要动力特性参数,因此本文有关模型土的设计研究以模型土与原型土的动剪切模量比作为主要相似参数,相似关系控制方程如下:

$$S_a = S_G / S_p S_l \quad (1)$$

式中,  $S_a$ ,  $S_G$ ,  $S_p$ ,  $S_l$  为模型土与原型土的相似参数,  $S_a$  为加速度相似比,  $S_G$  为动剪切模量相似比,  $S_p$  为密度相似比,  $S_l$  为几何尺寸相似比。

表 2 模型相似关系

Table 2 Similitude relations of model				
物理量	相似关系	上部结构	隧道	土
长度 $l$	[L]	$S_L = 1/30$	$S_L = 1/30$	$S_L = 1/30$
线位移 $\delta$	[L]	$S_\delta = S_L$ $= 1/30$	$S_\delta = S_L$ $= 1/30$	$S_\delta = S_L$ $= 1/30$
弹性模量 $E$	[FL <sup>-2</sup> ]	$S_E = 0.3$	$S_E = 0.265$	$S_E = S_G$
等效质量密度 $\rho_e$	[FL <sup>-4</sup> T <sup>2</sup> ]	$S_{\rho_e} = 3$	$S_{\rho_e} = 2.65$	$\rho_m / \rho_p$
频率 $\omega$	[T <sup>-1</sup> ]	$S_\omega = 1/S_T$ $= 9.523$	$S_\omega = 1/S_T$ $= 9.523$	9.523
时间 $t$	[T]	$S_T = S_L \sqrt{S_{\rho_e} / S_E}$ $= 0.105$	0.105	0.105
加速度幅值 $a$	[LT <sup>-2</sup> ]	$S_a = S_E / (S_L S_{\rho_e})$ $= 3$	3	$S_G / S_p S_l$ $= 3$

1.2 相似材料

振动台试验能否真实还原地震作用下上部结构-土-隧道相互作用体系的响应取决于相似材料的选择。为使原型土与模型土满足本次试验所设定的主要相似条件, 相似材料在选用方面需遵循以下原则: ①应考虑选择获取方便且成本较为合理的材料; ②相似材料的性质应比较稳定, 在模型土配制及向模型箱装填过程中不随周围温度等环境的变化而发生变化; ③模型土便于配制及振动台装填; ④有关模型土与原型土动力学参数的相似比可通过改变模型土各材料的配比进行调控。

本次试验模型土与原型土的加速度相似比  $S_a$  的目标值为 3, 可通过降低模型土与原型土的刚质比相似系数  $S_G/S_p$  以达到目标值。通过以下方法可调节土的相关参数: ①向土中掺加锯末能够降低剪切模量及密度等参数<sup>[6-8]</sup>; ②加入河砂能够在一定程度上调节土的  $G/G_{\max} - \gamma$  曲线<sup>[9]</sup>; ③原型土不添加其他材料配制模型土时, 可通过改变土的干密度和含水率来调节土的  $S_p/S_G$ <sup>[4]</sup>。锯末与河砂这两种材料性质稳定, 成本低且取材较易。本文以天津某场地粉质黏土为原型土, 将粉质黏土、河砂、锯末和水按比例均匀混合以配制上部结构-土-隧道相互作用体系振动台试验所需模型土, 以下简称为模型土。

1.3 土体动应力-动应变非线性相似关系

文献[10]提出模型土与原型土的动应力-动应变关系的相似性是动力模型试验设计的重要因素。循环荷载作用下土体的动应力-动应变关系的骨干曲线形状最接近双曲线模型。国内外常用于描述土体骨干曲线的双曲线模型有 Hardin 模型、Davidenkov 模型、

Stokoe 模型等<sup>[9]</sup>。王志佳<sup>[9]</sup>采用以上列举的 3 种模型对黏性土与砂性土进行拟合, 通过对比分析模型的拟合参数及拟合标准差结果后得出结论: Hardin 模型在拟合精度方面较差, Stokoe 模型参数较少且拟合精度与 Davidenkov 模型较一致。本次试验土的动应力-动应变关系的双曲线模型选用 Stokoe 模型, 其表达式为

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + (\gamma/\gamma_r)^\alpha}, \quad (2)$$

式中,  $G$  为动剪切模量,  $G_{\max}$  为最大动剪切模量,  $\gamma$  为动剪应变,  $\gamma_r$  为参考剪应变,  $\alpha$  为曲率系数。

1.4 试验目标

(1) 使上部结构-土-隧道相互作用体系各部分的原型与模型的加速度相似比相匹配, 模型土与原型土的加速度相似比  $S_a$  的目标值为 3。

(2) 以天津某场地粉质黏土为原型土, 参考天津地区不同深度土层粉质黏土的动剪应变与动剪切模量比的平均值<sup>[11]</sup>, 采用 Stokoe 模型拟合得到天津粉质黏土不同深度土层的  $G/G_{\max} - \gamma$  曲线。本次试验所配制模型土采用 Stokoe 模型拟合所得  $G/G_{\max} - \gamma$  曲线应与天津粉质黏土相似。

2 共振柱试验

2.1 试样制作

将粉质黏土和河砂分别烘干, 用木碾将粉质黏土碾碎, 采用匀质干燥杨木锯末。锯末、河砂和粉质黏土分别过 2 mm 筛后, 将粉质黏土、锯末、河砂和水按照一定质量比例混合均匀后装入密封袋中闷料 24 h, 闷料完成后, 选用模具规格为 39.1 mm×80 mm, 按照土工试验方法标准<sup>[12]</sup>制样。制样完成后, 将滤纸片和透水石依次贴在土样上下两端, 制成土样饱和器, 然后装入真空缸中进行 1 h 抽气, 抽气完成后向真空缸中注水对试样进行饱和, 饱和时间为 12 h。

试验所用锯末、河砂、粉质黏土、土样及共振柱如图 1 所示。

2.2 试验仪器、方法与数据分析

共振柱试验是被公认为测定土力学参数最可靠的方法, 美国测试与材料协会 (ASTM) 就将其纳入行业标准<sup>[8]</sup>。本次试验所采用仪器为河北工业大学土木工程岩土实验室的 GZZ-50B 型自由振动式共振柱, 采用自由振动法测量模型土的有关土动力学参数。将饱和完成的土样脱模安装到共振柱上后, 施加 30 kPa 围压固结 8 h, 固结完成后按照 GZZ-50 型共振柱仪操作说明进行共振柱试验, 得到不同配比的模型土在 30 kPa 围压下的动剪应变、动剪切模量与阻尼比的试验数据。使用 origin 软件对试验数据进行处理分析, 创

建 Stokoe 模型函数, 以  $G_{\max}$ ,  $\gamma_r$  和  $\alpha$  作为参数进行拟合, 得到不同配比的模型土的  $G_{\max}$  拟合参数值及  $G/G_{\max} - \gamma$  动力特性曲线。



图 1 试验仪器及土样

Fig. 1 Test instrument and soil sample

2.3 试配试验

为找出满足本次试验所设定相似目标的模型土的最优配比, 进行了大量的试配试验。图 2 中的 B~P 代表前期试配的部分不同配比模型土的  $G/G_{\max} - \gamma$  曲线, Q 代表原型粉质黏土的  $G/G_{\max} - \gamma$  曲线。

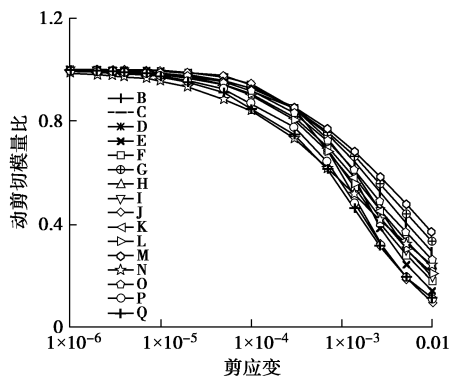


图 2 原型土及试配方案  $G/G_{\max} - \gamma$  曲线

Fig. 2 Curves of  $G/G_{\max} - \gamma$  of prototype soil and test schemes

通过试验结果得出: 由方案 P 的模型土 (其成分锯末、河砂、粉质黏土质量比为 18% : 27% : 55%, 含水率为 50%) 所得的加速度相似比  $S_a$  等相关参数较符合所设定的相似目标。

3 正交试验设计及结果分析

在试配试验的方案 P 的基础上设计并进行 30 kPa 围压下的模型土正交试验, 以确定满足设定目标的模型土中各添加材料的最优比例, 并研究各添加材料对模型土的动力学参数以及  $G/G_{\max} - \gamma$  动力特性曲线的影响规律。

3.1 正交试验设计及部分结果

通过改变含水率, 或控制锯末、河砂和粉质黏土各材料所占这三者总质量百分比可以调节模型土的部分动力学参数。选取锯末含量  $A$ 、含砂量  $B$  和含水率  $C$  这 3 个影响因素, 每种因素设置 3 个水平, 采用正交表  $L_9(3^4)$  确定正交方案配比组合, 各方案配比及部分结果见表 3 所示。

表 3 正交试验方案及部分结果

Table 3 Orthogonal test schemes and partial results

方案	锯末 $A/\%$	河砂 $B/\%$	含水率 $C/\%$	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	最大动剪切 模量 $G_{\max}/\text{MPa}$	加速度 相似比 $S_a$
1	18	21	35	1.42	9.516	3.51
2	18	27	50	1.49	8.283	2.91
3	18	33	60	1.56	6.799	2.28
4	23	21	50	1.33	9.165	3.60
5	23	27	60	1.46	7.402	2.64
6	23	33	35	1.20	8.751	3.81
7	28	21	60	1.25	6.318	2.64
8	28	27	35	1.06	6.350	3.12
9	28	33	50	1.09	6.319	3.00

注: 因素  $A$  为锯末含量, 即锯末占锯末、河砂和粉质黏土总质量的百分比 ( $m_{\text{锯末}}/m_{\text{总}}$ ), 因素  $B$  为河砂含量, 即河砂占锯末、河砂和粉质黏土总质量的百分比 ( $m_{\text{河砂}}/m_{\text{总}}$ )。

对表 3 中 9 组不同配比的模型土分别进行共振柱试验, 每组模型土至少做 3 个试样以减小误差的影响。试验测得各组模型土在 30 kPa 围压下的动剪应变和对应的动剪切模量。对每组模型土的动剪切模量-动剪应变数据采用本文 2.2 节的数据处理方法进行拟合, 得出各方案模型土的 Stokoe 模型相关参数及  $G/G_{\max} - \gamma$  曲线动力特性曲线。依据相关参数评判得出模型土各添加材料的最优配比, 并采用极差法和方差分析法分析各材料掺量对模型土动力特性参数的影响规律。

3.2  $G/G_{\max} - \gamma$  曲线相似性分析

图 3 中 m1~m9 分别代表方案 1 到方案 9 的  $G/G_{\max} - \gamma$  动力特性曲线; p 为粉质黏土即原型土的  $G/G_{\max} - \gamma$  动力特性曲线, 此曲线是由文献[11]中统计的天津地区 0~50 m 深度处的粉质黏土动剪应变  $\gamma$  与对应的动剪切模量比  $G/G_{\max}$  的平均值采用 Stokoe 模型拟合所得。

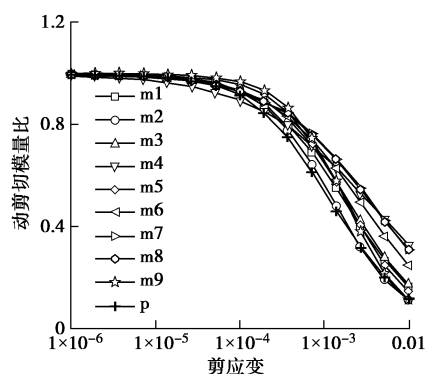


图3 原型土及正交方案  $G/G_{\max} - \gamma$  曲线

Fig. 3 Curves of  $G/G_{\max} - \gamma$  of prototype soil and orthogonal schemes

本次判定模型土与原型土  $G/G_{\max} - \gamma$  曲线的相似问题借鉴最小二乘法原理：将原型土拟合的 Stokoe 模型作为回归函数  $F(\gamma_r, \alpha)$ ，引入二元函数，见下式：

$$\left. \begin{aligned} Q(\gamma_r, \alpha) &= \sum_{i=1}^n (F_i^p - F_i^m)^2, \\ F_i^p &= \frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + (\gamma_i / \gamma_r^p)^\alpha}, \\ F_i^m &= \frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + (\gamma_i / \gamma_r^m)^\alpha}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中  $F_i^p$  为原型土采用 Stokoe 模型拟合所得剪应变（区间为  $10^{-6} \sim 10^{-2}$ ）下的  $G/G_{\max}$  值， $\gamma_r^p$  为原型土参考剪应变； $F_i^m$  为各方案模型土采用 Stokoe 模型拟合所得剪应变下的  $G/G_{\max}$  值， $\gamma_r^m$  为模型土参考剪应变。

$Q(\gamma_r, \alpha)$  函数的直观意义是表示各方案模型土与原型土相同剪应变（区间范围为  $10^{-6} \sim 10^{-2}$ ）下对应的  $G/G_{\max}$  的距离的平方和，以下简称为  $Q$  函数。 $Q$  函数值越小，说明该方案模型土偏离原型土  $G/G_{\max} - \gamma$  动力特性曲线程度越小。

$Q$  函数只能反映模型土与原型土动力特性曲线选取的比较点的偏离程度，不能反映出两者之间的曲线形状相似程度。而 Stokoe 模型中曲率系数  $\alpha$  和参考剪应变  $\gamma_r$  决定着曲线的形状，为综合考虑 Stokoe 模型中参考剪应变  $\gamma_r$  和曲率系数  $\alpha$  对曲线相似性的影响，因此创建一个新的三元  $Y(S_{\gamma_r}, S_\alpha, Q)$  函数：

$$Y(S_{\gamma_r}, S_\alpha, Q) = (S_{\gamma_r} - 1)^2 (S_\alpha - 1)^2 \cdot Q \quad (4)$$

式中， $S_{\gamma_r}$  为参考剪应变相似比， $S_\alpha$  为曲率系数相似比。

$S_{\gamma_r}$  值和  $S_\alpha$  值越接近 1、 $Q$  值越小， $(S_{\gamma_r} - 1)^2 (S_\alpha - 1)^2$  与  $Q$  乘积值即  $Y(S_{\gamma_r}, S_\alpha, Q)$  函数值越小，该方案模型土与原型土的  $G/G_{\max} - \gamma$  动力特性曲线偏离程度越小、曲线形状相似程度越高，曲线整体的相似程度就越高。 $Y(S_{\gamma_r}, S_\alpha, Q)$  函数同时结合  $Q(\gamma_r, \alpha)$  函数值与 Stokoe 模型拟合参数值，从两个方面综合评判模型土与原型土  $G/G_{\max} - \gamma$  动力特性曲线的相似性。由表 4 得方案 2 模型土与原型土的  $G/G_{\max} - \gamma$  动力特性

曲线相似度最高。

表 4 正交方案 Stokoe 模型拟合参数及  $Q$  值、 $Y$  值

Table 4 Fitting parameters of Stokoe model and values of  $Q$  and  $Y$  for orthogonal tests

方案	参考剪应变 $\gamma_r$	曲率系数 $\alpha$	$Q(\gamma_r, \alpha)$	$Y(S_{\gamma_r}, S_\alpha, Q)$
P	0.00118	0.943	0	0
1	0.00174	0.925	0.033	$2.71 \times 10^{-6}$
2	0.00130	1.015	0.003	$1.80 \times 10^{-7}$
3	0.00195	0.954	0.055	$3.18 \times 10^{-6}$
4	0.00320	0.628	0.179	0.0585
5	0.00191	1.075	0.062	0.0004
6	0.00266	0.834	0.134	0.0028
7	0.00349	0.750	0.219	0.0351
8	0.00343	0.748	0.217	0.0337
9	0.00181	1.201	0.063	0.0013

注：P 代表粉质黏土。

3.3 加速度相似比分析

由式（1）得模型土与原型土的刚质比相似系数  $S_G/S_p$  目标值为 0.1，各正交方案模型土的密度  $\rho$  的变化区间为  $1.06 \sim 1.56 \text{ g/cm}^3$ ，原型土密度  $\rho$  为  $2.0 \text{ g/cm}^3$ ，对应的动剪切模量比  $S_G$  目标值区间为  $0.053 \sim 0.078$ 。由相似理论可知围压相似比应与动剪切模量相似比相等，正交方案模型土围压均为 30 kPa，因此对应原型土的围压区间为 385~556 kPa。根据天津场地地勘报告得该围压区间的最大动剪切模量约为 115 MPa，故将各正交方案对应的原型土的  $G_{\max}$  定为 115 MPa。

由表 3 可知方案 1、方案 4 与方案 6 的加速度相似比  $S_a$  明显偏高目标值 3，方案 3、方案 5 与方案 7 的  $S_a$  低于目标值 3，方案 2、方案 8 与方案 9 的  $S_a$  值最为接近目标值。

3.4 各因素对试验结果影响分析

（1）极差法分析各因素对  $G/G_{\max} - \gamma$  曲线相似性影响

极差分析法是通过对比各因素的最大值和最小值之差来分析各因素对所选指标影响问题。极差越大，说明该因素对所选指标影响越显著。以  $Y(S_{\gamma_r}, S_\alpha, Q)$  函数值为指标，以下简称为  $Y$  函数。采用极差分析法评价锯末、河砂的含量以及含水率对  $G/G_{\max} - \gamma$  曲线相似性的影响。极差分析结果见表 5 和图 4。

表 5 各因素对曲线相似性影响极差分析

Table 5 Range analysis of influences of various factors on similitude of curves

项目	因素		
	锯末 A	河砂 B	水 C
$K_1$	$6 \times 10^{-6}$	0.093	0.036
$K_2$	0.061	0.034	0.059
$K_3$	0.070	0.004	0.035
极差	0.070	0.089	0.024
主→次	B→A→C		

注： $K_i$  为正交方案任一列上水平号为  $i$  时所对试验结果之和。

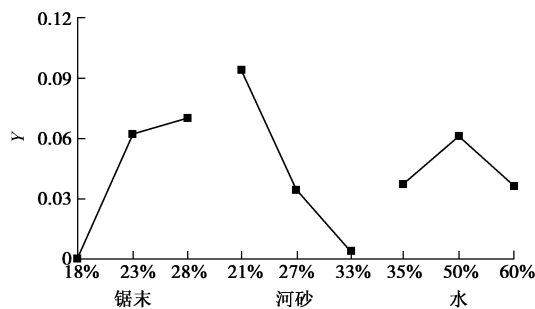


图 4 各因素含量对曲线相似性影响趋势图

Fig. 4 Influences of factors on similitude of curves

从表 5 及图 4 可以得出一些结论:

a) 由表 5 可得因素  $B$  的极差值大于因素  $A$  和因素  $C$  的极差, 说明河砂含量对  $Y(S_{\gamma}, S_{\alpha}, Q)$  值的影响最为明显, 即对模型土与原型土二者的  $G/G_{\max} - \gamma$  动力特性曲线的相似性影响最大, 其次是锯末含量, 含水率对模型土与原型土动力特性曲线的相似性的影响作用最小。

b) 由图 4 可得, 当模型土中的锯末含量在 18%~28% 之间时, 锯末含量越多,  $Y$  值越大, 表明模型土偏离原型土  $G/G_{\max} - \gamma$  曲线程度越大, 导致模型土与原型土动力特性曲线的相似度越差。

c) 由图 4 可得, 在一定范围内, 即模型土中的河砂含量在 21%~33% 之间时,  $Y$  值随着河砂含量的增加而减小, 模型土偏离原型土  $G/G_{\max} - \gamma$  的曲线程度就越小, 说明河砂含量的改变能在一定程度上调节模型土的动力特性曲线, 降低模型土与原型土的  $G/G_{\max} - \gamma$  曲线之间的偏离程度, 改善模型土与原型土的动力特性曲线之间的相似性。

d) 模型土的含水率在不同范围内变化对模型土与原型土动力曲线的相似性影响效果有所差异。从图 4 中可以看出当含水率在 35%~50% 之间时,  $Y$  值随着含水率的增加而增加, 即模型土偏离原型土动力曲线的程度越大, 二者相似度越差; 当含水率在 50%~60% 时,  $Y$  值随着含水率的增加而减小, 说明在此区间内含水率越高, 模型土与原型土二者的  $G/G_{\max} - \gamma$  曲线相似程度越好。

(2) 方差分析法分析各材料对模型土  $G_{\max}$ ,  $G_{\max}/\rho$  的影响规律

方差分析法可用于检验有关因素对试验结果有无显著影响。以模型土的最大动剪切模量  $G_{\max}$ 、最大动剪切模量  $G_{\max}$  与密度  $\rho$  之比  $G_{\max}/\rho$  作为试验指标。在置信水平  $\alpha = 0.01$ ,  $\alpha = 0.05$  条件下, 从  $F$  分布表查得因素显著性临界值  $F_{0.05}(2,6) = 5.14$ ,  $F_{0.01}(2,6) = 10.92$ 。由表 6, 7 得出锯末含量对模型土的  $G_{\max}$  有显著影响, 含水率对模型土的  $G_{\max}/\rho$  有显著影响。

表 6 模型土的  $G_{\max}$  的方差分析

Table 6 Variance analysis of $G_{\max}$ of model soils			
项目	因素		
	锯末 A	河砂 B	水 C
组间均方 MSA	4.249	2.525	1.559
组内均方 MSe	0.820	1.539	1.715
F 值 ( $F=MSA/Mse$ )	5.181	1.641	0.908
单因素显著性	显著	不显著	不显著

表 7 模型土的  $G_{\max}/\rho$  的方差分析

Table 7 Variance analysis of $G_{\max}/\rho$ of model soils			
项目	因素		
	锯末 A	河砂 B	水 C
组间均方 MSA	0.722	0.350	2.717
组内均方 MSe	1.001	1.125	0.432
F 值 ( $F=MSA/Mse$ )	0.721	0.311	6.289
单因素显著性	不显著	不显著	显著

### 3.5 综合判定模型土最优配比

本次试验关于模型土与原型土的相似性判定标准如下:

(1) 由表 4 可知正交试验方案 2 的模型土与原型土的  $G/G_{\max} - \gamma$  曲线在相同剪应变下 (区间范围为  $10^{-6} \sim 10^{-2}$ ) 对应点的动剪切模量比  $G/G_{\max}$  的距离的平方和即  $Q$  值等于 0.003,  $Y$  值等于  $1.80 \times 10^{-7}$ , 均为各正交方案中的最小值,  $Q$  值越小说明两曲线距离越近,  $Y$  值越小说明两曲线形状越接近。故方案 2 的模型土与原型粉质黏土的动力特性曲线最相似。

(2) 本次试验模型土与原型土的加速度相似比  $S_a$  目标值为 3, 方案 2 的  $S_a$  值为 2.9, 接近目标值 3。

综合判定得出方案 2 为本次试验模型土的最优方案, 模型土各材料锯末、河砂和粉质黏土所占固体颗粒总质量的比例为 18% 锯末 27% 砂 55% 粉质黏土, 含水率为 50%。

## 4 不同围压下模型土的验证

为进一步验证方案 2 模型土是否满足不同围压下与对应深度处原型土的  $G/G_{\max} - \gamma$  动力特性曲线的相似性, 以及不同围压下模型土与原型土的加速度相似比  $S_a$  是否满足预期目标值 3, 对方案 2 模型土另外进行了 50 kPa 与 70 kPa 围压下的共振柱试验。

由表 8 可知加速度相似比  $S_a$  在 2.54~2.9 之间, 与目标值 3 较为接近。由图 5 及表 9 可知不同围压下的模型土与对应深度的原型土的  $G/G_{\max} - \gamma$  动力特性曲线基本相似: 3 个围压下的  $S_{\gamma}$ ,  $S_{\alpha}$  值都接近 1,  $Q$  值在 0.003~0.007 之间,  $Y$  值在  $1.11 \times 10^{-7} \sim 8.44 \times 10^{-7}$  之间, 说明两曲线的形状相似、距离接近, 可认为曲线相似。方案 2 基本满足不同围压下本次试验所设定



模型土与原型土的相似目标,确定作为本次上部结构-土-隧道模型振动台试验所用模型土。

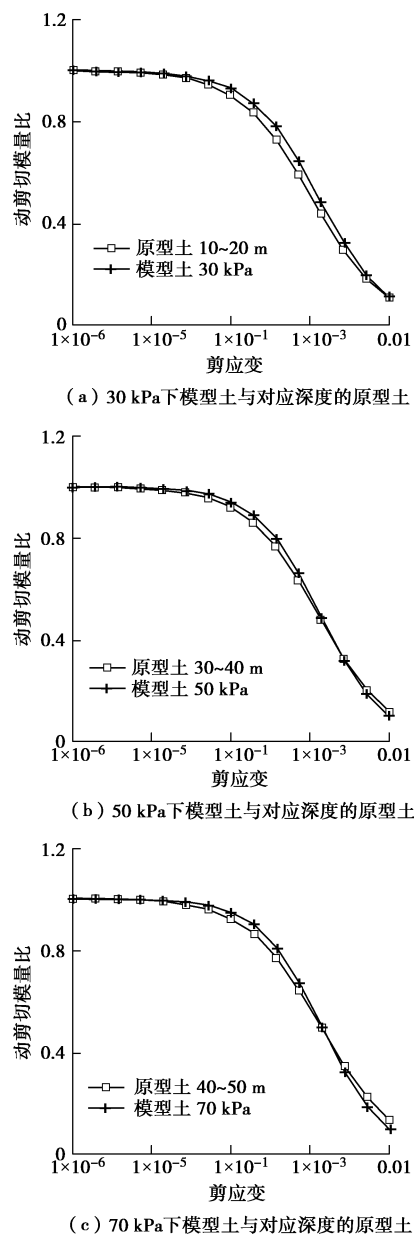


图 5 不同围压下模型土与对应深度原型土的  $G/G_{\max} - \gamma$  曲线

Fig. 5 Curves of  $G/G_{\max} - \gamma$  of model soils and corresponding depths of prototype soils at different confining pressures

表 8 模型土与原型土的加速度相似比相关参数

Table 8 Correlation parameters about similitude ratio of acceleration of model and prototype soils			
类别	围压 $\sigma/\text{kPa}$	最大动剪切模量 $G_{\max}/\text{MPa}$	加速度相似比 $S_a$
原型土	402	115	2.9
模型土	30	8.3	
原型土	670	150	2.76
模型土	50	10.3	
原型土	940	192	2.54
模型土	70	12.0	

表 9 模型土与原型土  $G/G_{\max} - \gamma$  曲线相似性相关参数

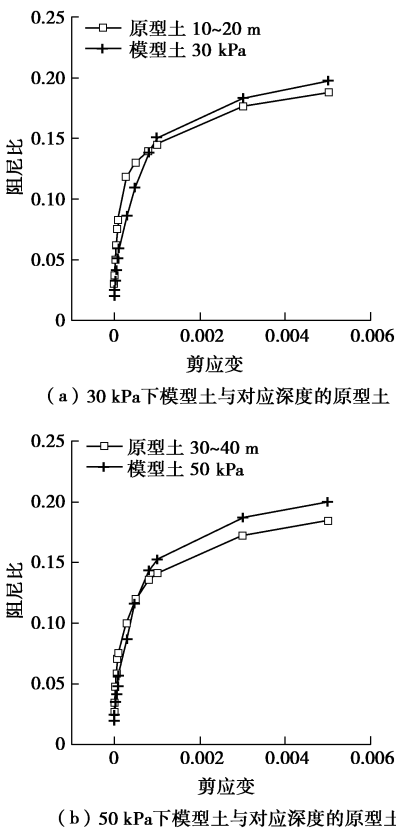
Table 9 Correlation parameters about similitude of  $G/G_{\max} - \gamma$  of

model and prototype soils					
类别	围压 $\sigma/\text{kPa}$	参考剪应变 $\gamma_r$	曲率系数 $\alpha$	$Q$	$Y$
原型土	402	0.00106	0.945	0.003	$8.44 \times 10^{-7}$
模型土	30	0.00130	1.015		
原型土	670	0.00127	0.961	0.004	$1.68 \times 10^{-7}$
模型土	50	0.00134	1.074		
原型土	940	0.00136	0.935	0.007	$1.11 \times 10^{-7}$
模型土	70	0.00139	1.104		

另外,阻尼比也是土的动力特性中的一个重要参数,由于它是无量纲量,所以模型土和原型土应该具有相同的阻尼比  $\lambda$  随剪应变  $\gamma$  的变化关系曲线<sup>[6]</sup>。

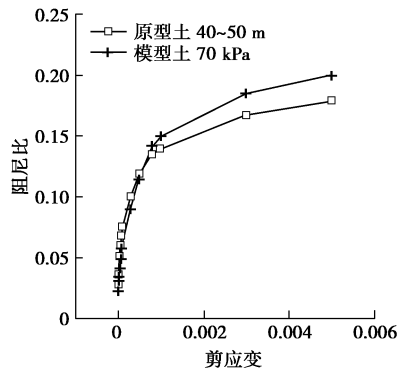
原型土的阻尼比  $\lambda$  随剪应变  $\gamma$  变化的  $\lambda - \gamma$  曲线由天津地区不同深度土层粉质黏土的动剪应变与阻尼比的平均值<sup>[11]</sup>拟合得到,最优配比模型土在不同围压下的  $\lambda - \gamma$  曲线由每组试样进行共振柱试验得到的所有数据拟合所得。

由图 6 可得最优配比模型土与原型土在不同围压下的  $\lambda - \gamma$  曲线趋势相同:阻尼比  $\lambda$  都随着剪应变  $\gamma$  的增大而增大,两者的阻尼比随着剪应变的增大都逐渐趋于定值。两者  $\lambda - \gamma$  曲线的形状虽有一定差别,但是整体的变化趋势基本一致,最优配比模型土与原型土的阻尼比 - 剪应变曲线相似度尚可。



(a) 30 kPa 下模型土与对应深度的原型土

(b) 50 kPa 下模型土与对应深度的原型土



(c) 70 kPa下模型土与对应深度的原型土

图6 不同围压下模型土与对应深度原型土的 $\lambda - \gamma$ 曲线

Fig. 6 Curves of  $\lambda - \gamma$  of model soils and corresponding depths of prototype soils at different confining pressures

## 5 卓越周期相似分析

抗震设计中,场地的卓越周期对结构的地震响应影响较大<sup>[8,13]</sup>。根据相似理论,土的卓越周期相似比应与上部结构及隧道的周期相似比一致,可基于土的卓越周期相似的原则设计模型土<sup>[8,13-14]</sup>。

为进一步保证设计的方案2模型土与原型土在地震响应时的相似性,需比较方案2模型土与原型土的卓越周期相似系数 $S_T$ 是否达到预期目标值0.105。

由天津场地地勘报告可得原型场地土的剪切波速随深度不断变化,故采用等效剪切波速计算原型土的周期。

$$\left. \begin{aligned} T &= 4h/v_{se} \\ v_{se} &= d_0/t \\ t &= \sum_{i=1}^n d_i/v_{si} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, $h$ 为总土层厚度, $v_{se}$ 为土层等效剪切波速(m/s), $d_0$ 为计算深度(m), $t$ 为剪切波在地面至计算深度之间的传播时间, $d_i$ 为计算深度范围内第 $i$ 土层的厚度(m), $v_{si}$ 为计算深度范围内第 $i$ 土层的剪切波速(m/s), $n$ 为计算深度范围内土层的分层数。

根据式(5)计算得到天津原型场地土的等效剪切波速 $v_{se}$ 为214.998 m/s,卓越周期 $T$ 为0.781 s。根据方案2模型土在不同围压下的最大动剪切模量值,代入式(6)<sup>[15]</sup>,采用origin软件拟合得到式(6)中的系数 $k$ 与 $n$ 的值(如图7),即可以得出模型土在不同围压下的 $G_{max}$ 计算公式。

$$G_{max} = k \cdot p_a \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n, \quad (6)$$

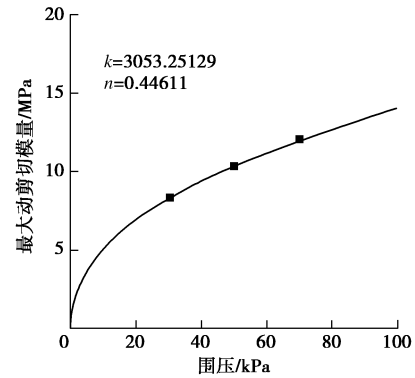
式中, $k$ , $n$ 为常数, $\sigma_3$ 为围压, $p_a$ 为大气压力,等于 $1.01 \times 10^5$  Pa。

模型土深度根据模型箱深度取1.4 m,围压为

$$\sigma = \rho gh = 1.49 \times 10 \times 1.4 = 20.86 \text{ kPa} \quad (7)$$

按模型箱深度将模型土分为14层,模型土的等效剪切波速计算式如下:

$$\left. \begin{aligned} v_{se} &= h/t \\ t &= \int_0^h \frac{dx}{v_s} = \int_0^h \frac{dx}{\sqrt{G_{max}/\rho}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

图7 模型土拟合 $G_{max} - \sigma_3$ 曲线Fig. 7 Fitting curve of  $G_{max} - \sigma_3$  of model soils

根据式(6),(8)及采用origin软件拟合得到式(6)中的系数 $k$ 与 $n$ 的值,编程计算得到方案2模型土的等效剪切波速为82.285 m/s,卓越周期为0.068 s,故方案2模型土与原型土的卓越周期相似比为0.087。卓越周期相似比预期目标为0.105,表明本次研究所得模型土与原型土不仅与结构体系保持一致的加速度相似比,在 $G/G_{max} - \gamma$ 动力特性曲线和卓越周期方面也具有较高的相似性。

## 6 结 论

本文以天津某场地粉质黏土为原型土,基于土与上部结构、下部隧道加速度相似比一致的原则,设计了一种以锯末、河砂、粉质黏土和水为成分模型土;对不同配比的模型土进行共振柱试验,找到满足设计目标的较优配比模型土,并以此为基础进行正交试验,研究得出各添加材料对模型土有关动力参数的影响规律;同时验证了不同围压下最优配比的模型土与原型土是否满足设定的相似目标,并且对比探讨了模型土与原型土关于阻尼比的相似性;并基于土、上部结构与隧道周期相似比一致的原则验证了模型土与原型土的卓越周期相似性。本次试验为今后有关振动台模型土的配制研究提供了一定的参考。主要结论有:

(1) 本文试验采用Stokoe模型拟合参数,同时引入 $Q(\gamma_r, \alpha)$ 函数,创建三元 $Y(S_{\gamma_r}, S_a, Q)$ 函数,从Stokoe模型拟合参数值、 $Q$ 函数值和 $Y$ 函数值三方面综合判定得出正交试验方案2的模型土与原型土的



$G/G_{\max} - \gamma$  动力特性曲线最为相似, 且其与原型土的加速度相似比非常接近  $S_a$  等于 3 的相似目标, 由此将其确定为最优配比模型土, 作为本次关于上部结构-土-隧道振动台试验所需模型土。最优配比方案模型土材料中锯末、河砂与粉质黏土质量比为 18% : 27% : 55%, 含水率为 50%。

(2) 模型土中的河砂含量对模型土与原型土的  $G/G_{\max} - \gamma$  的动力曲线相似性影响程度最大, 其次是锯末含量, 含水率对二者的动力曲线相似性影响最小。3 种材料的添加对  $G/G_{\max} - \gamma$  动力特性曲线的调节范围较广, 对其它土质的  $G/G_{\max} - \gamma$  曲线也可以通过添加并调节锯末、河砂的含量及含水率进行模型土的配制。

(3) 模型土中锯末含量对最大动剪切模量  $G_{\max}$  影响显著, 锯末掺量越多,  $G_{\max}$  越小, 但同时  $Y$  值越大, 导致模型土  $G/G_{\max} - \gamma$  动力特性曲线偏离原型土较多, 二者的动力曲线相似性越差; 含水率对模型土的  $G_{\max}/\rho$  值有显著影响, 可在一定范围内改变含水率以调节原型土与模型土的加速度相似比。

(4) 进行了不同围压下方案 2 模型土的共振柱试验, 进一步验证了不同围压下最优配比的模型土满足本次试验的预期相似目标。

(5) 同时对比探讨模型土与原型土关于阻尼比的相似性, 得出二者的  $\lambda - \gamma$  曲线趋势大致相同, 二者的阻尼比相似度尚可。

(6) 基于土、隧道与上部结构周期相似比一致的原则, 采用土的卓越周期相似系数验证模型土与原型土的相似性, 计算所得结果为 0.087, 与目标值 0.105 较为接近, 表明本次研究所得模型土与原型土关于卓越周期方面有较好的相似性。

## 参考文献:

- [1] ROBB E S M, VIC C, STEVEN K. Shake Table Testing to Quantify Seismic Soil-structure Interaction of Underground Structure[C]// Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. San Diego, 2010: 1 - 5.
- [2] KEIZO O, TOSHIO S, TADASHI K, et al. Research on streamlining seismic safety evaluation of underground reinforced concrete duct type structures in nuclear power stations. -Part2. Experimental aspects of laminar shear sand box excitation test with embedded RC models[C]// Transactions, SMIRT 16. Washington D C, 2001.
- [3] HAMID R T. Development of synthetic soil mixture for experimental shaking table tests on building frames resting on soft soils[J]. Geomechanics and Geoengineering-An International Journal, 2017, 12(1): 28 - 35.
- [4] 魏宝华, 邓亚虹, 慕焕东, 等. 动力模型试验模型土配制初探[J]. 工程地质学报, 2015, 23(5): 937 - 942. (WEI Bao-hua, DENG Ya-hong, MU Huan-dong, et al. Study on preparation of model soil in dynamic model test[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(5): 937 - 942. (in Chinese))
- [5] 窦远明, 王建宁, 朱旭曦, 等. 软弱土质类相似材料的配比试验结果分析[J]. 水利水电技术, 2017, 48(5): 128 - 135. (DOU Yuan-ming, WANG Jian-ning, ZHU Xu-xi, et al. Analysis of results of the mixture ratio test of soft soil similar material[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(5): 128 - 135. (in Chinese))
- [6] 尚守平, 刘方成, 卢华喜, 等. 振动台试验模型地基土的设计与试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(4): 199 - 204. (SHANG Shou-ping, LIU Fang-cheng, LU Hua-xi, et al. Design and experimental study of a model soil used for shaking table test[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2006, 26(4): 199 - 204. (in Chinese))
- [7] 燕晓, 袁聚云, 袁勇, 等. 大型振动台试验模型场地土的配制方法[J]. 结构工程师, 2015, 31(5): 116 - 120. (YAN Xiao, YUAN Jun-yun, YUAN Yong, et al. Study on model soil of large-scale shaking table test[J]. Structural Engineers, 2015, 31(5): 116 - 120. (in Chinese))
- [8] 陈红娟, 闫维明, 陈适才, 等. 小比例尺地下结构振动台试验模型土的设计与试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(3): 59 - 66. (CHEN Hong-juan, YAN Wei-ming, CHEN Shi-cai, et al. Design and experimental research on model soil used for shaking table test of a small scale underground structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(3): 59 - 66. (in Chinese))
- [9] 王志佳. 岩土工程振动台试验理论及在地下管线动力响应研究中的应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2016. (WANG Zhi-jia. Theory of geotechnical shaking table test and its application in study of dynamic response of buried pipeline[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese))
- [10] 王志佳, 张建经, 闫孔明, 等. 考虑动本构关系相似的模型土设计及相似判定体系研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1328 - 1332, 1338. (WANG Zhi-jia, ZHANG Jian-jing, YAN Kong-ming, et al. Model soil design considering similitude of dynamic constitutive model and evaluation of similarity level[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1328 - 1332,

1338. (in Chinese))
- [11] 董 亮, 夏 峰. 天津地区土动力学参数变异性对地表地震参数的影响[J]. 地震工程学报, 2017, **39**(6): 1062 - 1069. (DONG Liang, XIA Feng. Effect of variability in soil dynamic parameters on the ground motion parameters of a site surface in the Tianjin Area[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, **39**(6): 1062 - 1069. (in Chinese))
- [12] 土工试验方法标准[M]. 北京: 中国计划出版社, 1999. (Standard for Geotechnical Testing Method[M]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese))
- [13] 徐炳伟. 大型复杂结构-桩-土振动台模型试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2010. (XU Bing-wei. Shaking Table Test Studying Large-scale Soil-pile-complex Structure Interaction [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese))
- [14] 吴薪柳. 桩-土-复杂结构振动台试验与数值模拟及桩-土相关参数研究[D]. 天津: 天津大学, 2013. (WU Xin-liu. Pile-soil-complex Structure Shaking Table Test and Numerical Simulation and Study on Related Parameter of Pile-Soil[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese))
- [15] 张克绪, 谢君斐. 土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 1989. (ZHANG Ke-xu, XIE Jun-fei. Soil Dynamics[M]. Beijing: Seismological Press, 1989. (in Chinese))

## 标准摘录: 出版物上数字用法 (GB/T 15835—2011) 选用阿拉伯数字情形

### (1) 用于计量的数字

在使用数字进行计量(将数字用于加、减、乘、除等数学运算)的场合, 为达到醒目、易于辨识的效果, 应采用阿拉伯数字。

示例 1: -125.03      34.05%      63%~68%      1:500      97/108

当数值伴随有计量单位时, 如: 长度、容积、面积、体积、质量、温度、经纬度、音量、频率等等, 特别是当计量单位以字母表达时, 应采用阿拉伯数字。

示例 2: 523.56 km (523.56 千米)      346.87 L (346.87 升)      5.34 m<sup>2</sup> (5.34 平方米)  
567 mm<sup>3</sup> (567 立方毫米)      605 g (605 克)      100~150 kg (100~150 千克)  
34~39℃ (34~39 摄氏度)      北纬 40° (40 度)      120 dB (120 分贝)

### (2) 用于编号的数字

在使用数字进行编号(将数字用于为事物命名或排序, 但不用于数学运算)的场合, 为达到醒目、易于辨识的效果, 应采用阿拉伯数字。

示例: 电话号码: 9888

邮政编码: 100871

通信地址: 北京市海淀区复兴路 11 号

电子邮件地址: x186@186.net

网页地址: http://127.0.0.1

汽车号牌: 京 A00001

公交车号: 302 路公交车

道路编号: 101 国道

公文编号: 国办发[1987]9 号

图书编号: ISBN 978-7-80184-224-4

刊物编号: CN11-1399

章节编号: 4.1.2

产品型号: PH—3000 型计算机

产品序列号: C84XB—JYVFD—P7HC4—6XKRJ—7M6XH

单位注册号: 02050214

行政许可登记编号: 0684D10004—828

### (3) 已定型的含阿拉伯数字的词语

现代社会生活中出现的事物、现象、事件, 其名称的书写形式中包含阿拉伯数字, 已经广泛使用而稳定下来, 应采用阿拉伯数字。

示例: 3G 手机    MP3 播放器    G8 峰会    维生素 B<sub>12</sub>    97 号汽油    “5·27”事件    “12·5”枪击案