

振动台模型试验相似理论分析

郭明珠, 邹玉, 孙海龙

(北京工业大学城市建设学部, 北京 100124)

摘要目的 研究强震作用下边坡模型与原型之间的相似关系, 为材料配比试验和振动台试验提供相似依据, 有利于实现振动台边坡试验动力响应特征。**方法** 通过对相似三定律进行研究, 以量纲分析法为主, 分离相似设计和重力相似理论为辅, 完善量纲分析法的不足, 对参与模型试验的物理量进行分级定性。**结果** 在静力相似设计中, 以 L, ρ, g 作为控制量, 将物理量分为关键参数、相关参数和无关参数, 其中控制量 L, ρ, g 和关键参数 τ, c, σ, φ 的相似比分别为 $C_L = 1\ 000, C_\rho = 1, C_g = 1, C_\tau = C_c = C_\sigma = 1\ 000, C_\varphi = 1$; 在动力相似设计中, 振动台输入的地震波需按时间相似比 $C_t = 32$ 进行压缩。**结论** 基于相似理论分析, 确定了贡扎滑坡相似设计关系和各物理量相似比, 为顺利开展振动台试验打下基础。

关键词 振动台试验; 相似理论; 量纲分析法; 重力相似律

中图分类号 TU13

文献标志码 A

Analysis of Similarity Theory of Shaking Table Model Test

GUO Mingzhu, ZOU Yu, SUN Hailong

(Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing, China, 100124)

Abstract: In order to study the similar relationship between the slope model and the prototype under the action of strong earthquake provides a similar basis for the material ratio test and the shaking table test, which is conducive to the realization of the dynamic response characteristics of the shaking table slope test. Through the study of the three laws of similarity, the dimensional analysis method is the main method, and the separation of similar design and the gravitational similarity theory are supplemented to improve the deficiencies of the dimensional analysis method, and the physical quantities participating in the model test are classified and qualitatively determined. In the static similar design, L, ρ, g are used as the control variables, and the physical quantities are divided into key parameters, related parameters and irrelevant parameters. Among them, the control variables L, ρ, g and the key parameters τ, c, σ, φ are similar. The ratios are $C_L =$

收稿日期: 2021-01-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1505001)

作者简介: 郭明珠(1963—), 男, 教授, 博士, 主要从事防灾减灾工程与防护工程等方面研究。

1 000、 $C_\rho = 1$ 、 $C_g = 1$ 、 $C_\tau = C_c = C_\sigma = 1 000$ 、 $C_\varphi = 1$; in the dynamic similar design, the seismic wave input from the shaking table needs to be compressed according to the time similarity ratio $C_t = 32$. Based on the analysis of similarity theory, the similar design relationship of Gonzalandslide and the similarity ratio of various physical quantities are determined, which lays the foundation for smoothly carrying out the shaking table test.

Key words: shaking table test; similarity; dimensional analysis method; gravity similarity law

在2020年发布的“十四五规划和二〇三五年远景目标的建议”中,川藏铁路重大工程成为我国未来西部工程建设重点之一。铁路建设沿线途中经过许多高山峡谷河流,面临众多地质灾害。滑坡在工程建设中的影响不可忽视,已成为研究热点讨论。

振动台作为研究边坡动力响应的手段之一,能够较为真实地模拟边坡在地震作用下的破坏过程和动力特性^[1-3]。实际中,直接了解原型的响应机制需要耗费大量的人力物力,且原型响应机制的出现具有偶然性,依托振动台试验,通过相似理论分析,让模型更大限度的反应原型的特点,了解和分析原型的动力特性和破坏响应机制。但在传统的振动台相似设计中,参与振动台试验的各物理量的权重不能很好区分,导致材料配比试验中工作量较大;在地震波的输入上选用实际时长的地震波,不符合相似设计,会对振动台试验中破坏过程和动力特性造成影响^[4-5]。

笔者以西藏自治区昌都地区芒康县索多西乡贡扎滑坡为例,详细介绍贡扎滑坡振动台模型的相似设计方法;采用量纲分析法,通过分离相似设计确定了各物理量的权重,对输入的地震波采用重力相似理论进行分析和处理,为顺利开展振动台试验打下基础。

1 相似理论

模型和原型的几何学、动力学和运动学都相似,认为原型和模型真正相似。相似的背后是现象中多个物理量之间存在某种特定的表达形式,它们不是孤立存在的而是相互联系的。几何相似是指原型的尺寸(长宽高)按一定比例缩小成模型。动力学相似是

指作用在模型和原型上的力相似,在振动台试验中主要强调重力相似^[6]。运动学相似是指模型中产生运动的点,与原型中对应点的情况相似,即模型中运动点的速度、加速度和运动时间与原型中的点对应成比例,且速度和加速度对应的方向相同^[7]。

在模型试验中,实现几何相似容易。在保证模型和原型的形状相同的同时,保证对应角度相等,对应长度成比例。

在满足几何相似的前提下,实现动力学相似,则模型的运动学也应相似。在三种相似中,动力学相似最为重要。相似理论的基础是相似三定律,是从相似现象的物理方程出发,总结出的三条公认的结论。相似三定律在模型试验中具有很好的指导作用,对复杂的原型进行理论分析,建立相对简单的模型来反映事物本质^[8]。

1.1 相似第一定理

相似第一定理是指两个物体所表现的现象相似,则规定其相似指标为1。第一定理是现象相似的必要条件,揭示了两个相似的现象在数量和空间的相互关系^[9],下面用牛顿第二定理来解释。

牛顿第二定理:

$$f = m \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

$$\begin{cases} f_p = m_p \frac{dv_p}{dt_p}, \\ f_m = m_m \frac{dv_m}{dt_m}. \end{cases} \quad (2)$$

式中:下标 p、m 分别表示原型(prototype)和模型(model)物理量。

因模型和原型运动现象相似,可由式

(2) 推出:

$$\begin{cases} \frac{v_p}{v_m} = C_v, \\ \frac{t_p}{t_m} = C_t, \\ \frac{m_p}{m_m} = C_m, \\ \frac{f_p}{f_m} = C_f. \end{cases} \quad (3)$$

式中: C_v 、 C_t 、 C_m 、 C_f 分别为速度、时间、质量和力的相似比。

将式(3)代入式(2)中,可得:

$$C_f f_m = C_m m_m \frac{C_v dv_m}{C_t dt_m}. \quad (4)$$

通过式(2)、(4)可知,必定存在

$$C_f = C_m \frac{C_v}{C_t}. \quad (5)$$

或

$$\frac{C_v C_m}{C_t C_f} = C = 1. \quad (6)$$

式中: C_i 为相似比,即在两个彼此相似的运动现象中,其相似指标为1。由式(6)可知,原型和模型中的各物理量的相似比必须受到“相似指标为1”的严格限制。

1.2 相似第二定理(π 定理)

相似第二定理是白金汉在1914年所提出,是现象相似的必要条件。

π 定理的定义如下,某一物理现象中存在 n 个物理量,即 $\beta_1, \dots, \beta_k, \dots, \beta_n$, 物理量之间存在着如下的完整关系:

$$\varphi(\beta_1, \dots, \beta_k, \dots, \beta_n) = 0. \quad (7)$$

或

$$\beta = f(\beta_1, \dots, \beta_k, \dots, \beta_n). \quad (8)$$

如果上式中 n 个物理量中有 k 个基本物理量($\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$)的量纲是相互独立的,则通过单位尺度的变换,就可将上述关系式化为无量纲 π 方程,即:

$$\pi = f(1, 1, \dots, \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-k}). \quad (9)$$

式中: $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-k}$ 是由 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 中 k 个量纲独立的物理量所组成的无量纲参数。

1.3 相似第三定理

相似第三定理是指模型和原型的现象表现出同一特征。如果单值条件相似,由单值条件的物理量所组成的相似准则在数值上相等,则认为物理现象一定相似。单值条件是物理现象相似的充要条件^[10],是指从多个物理现象中把某个具体现象挑选出来的条件。单值条件可概述为以下四个:几何条件、物理条件、边界条件和初始条件。

(1) 几何条件是指现象中的几何尺寸给出的单值条件。

(2) 物理条件是指现象均是由物质所引起的,且每种物质具备相应的物理性质,参与现象的物理性质需给出单值条件,如密度、泊松比。

(3) 边界条件是指周边环境的存在会对现象产生作用,在考虑边界的影响下,对边界的情况也应给出单值条件,如约束条件,底部摩擦。

(4) 初始条件是指现象的初始状态会影响发展过程,初始状态也应给出单值条件,如初速度、岩体结构特征。

在相似分析中以相似理论为基础,满足相似三定律是可行的,但在现实模型试验中,很难达到所有相似条件都满足。为了更好地进行模型试验,减轻相似设计工作量,在相似设计中普遍采用量纲分析法。

2 量纲分析法

2.1 由量纲分析法导出的相似关系

两个相似现象之间的关系可以通过量纲分析法来建立。当一个现象可以用某物理方程来表达,即也能用量纲方程来表达。但要解决不能用物理方程来表达的某些现象,量纲方程的出现就起到很大作用。量纲分析法的重大作用在于通过 π 定理减少了问题中物理量的个数,减轻了任务量,便于很快了解未知的复杂现象,这对试验安排有着难以估量的重要性。

根据传统的量纲分析法,建立原型和模型的静力相似物理关系。在模型试验过程中,与岩质边坡有关的参数分别是:高度 L 、材料密度 ρ 、重力加速度 g 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、弹性模量 E 、剪切模量 G 、应力 σ 、剪应力 τ 、应变 ε ;与输入地震波有关的参数分别是:持时 t 、加速度时程幅值 a 、频率 ω 。

$$f(L, \rho, g, c, \varphi, E, G, \sigma, \tau, \varepsilon, t, a, \omega) = 0. \quad (10)$$

以质量 M 、长度 L 及时间 T 作为基本量纲的 MLT 量纲系统,其他物理量量纲可由 MLT 表示,即:

$$\rho = ML^{-3}. \quad (11)$$

$$g = LT^{-2}. \quad (12)$$

$$c = ML^{-1}T^{-2}. \quad (13)$$

$$E = G = ML^{-1}T^{-2}. \quad (14)$$

$$\sigma = \tau = ML^{-1}T^{-2}. \quad (15)$$

$$a = LT^{-2}. \quad (16)$$

$$\varphi = \varepsilon = 1 \quad (17)$$

$$\omega = T^{-1}. \quad (18)$$

在以 MLT 的基本量纲的系统中,要选定多个物理量作为控制量。首先需要考虑模型与原型之间的尺寸,试验装置为北京工业大学抗震与结构诊治试验室振动台,该振动台台面长 3 m,宽 3 m。通过振动台的尺寸大小,确定模型箱的尺寸为长 2.7 m,宽 1.1 m,高 1.5 m 的钢结构模型箱,如图 1 所示。



图1 振动台模型箱

Fig.1 Model box of the shaking table

试验以贡扎滑坡为原型,滑坡体高度 270 m,滑坡后缘高程 3 320 m,前缘高程

2 600 m,倾角为 $55 \sim 70^\circ$,倾向 $N 30^\circ E$ 。滑坡后缘最高点至左岸冲击区最高点总长度为 1 802 m,左右边界最大宽度 725 m,如图 2 所示。



图2 边坡原型图

Fig.2 Prototype drawing of slope

通过滑坡剖面图模型箱尺寸确定原型和模型的几何相似比为 $C_L = 1\ 000$,如图 3 所示。

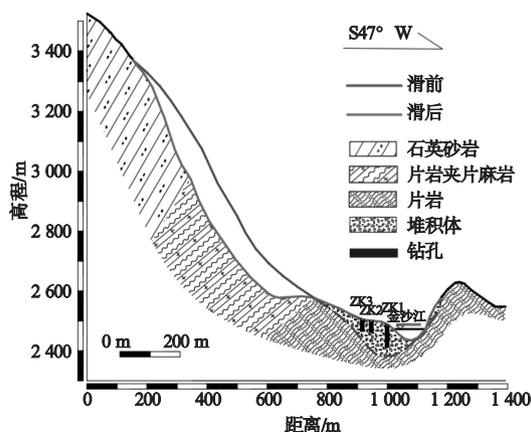


图3 贡扎滑坡剖面图

Fig.3 Sectional view of Gongza landslide

在模型试验中,边坡的自重荷载无法由施加外力来实现,需要材料自重来满足,因此取原型与模型的密度相似比为 $C_\rho = 1$ 。模型、原型处于同一个重力场作用下,则重力加速度相似比为 $C_g = 1$ 。基于上述分析,选取 L, ρ, g 作为其他参数的相似判据。

由式(8)改写成无量纲方程,则任意无量纲项可以表示为^[11]

$$\pi = L^{\alpha_1} \rho^{\alpha_2} g^{\alpha_3} c^{\alpha_4} \varphi^{\alpha_5} E^{\alpha_6} G^{\alpha_7} \sigma^{\alpha_8} \tau^{\alpha_9} \varepsilon^{\alpha_{10}} a^{\alpha_{11}} t^{\alpha_{12}} \omega^{\alpha_{13}} \quad (19)$$

式中: $\alpha_1 \sim \alpha_{13}$ 为各物理量的因次。将式(11)~式(18)带入式(19)中可得其余物理量的相互关系,如式(20)~式(27)所示。

$$\pi_4 = \frac{c}{L\rho g} \quad (20)$$

$$\pi_6 = \frac{E}{L\rho g} \quad (21)$$

$$\pi_7 = \frac{G}{L\rho g} \quad (22)$$

$$\pi_8 = \frac{\sigma}{L\rho g} \quad (23)$$

$$\pi_9 = \frac{\tau}{L\rho g} \quad (24)$$

$$\pi_{11} = \frac{a}{g} \quad (25)$$

$$\pi_{12} = \frac{t}{L^{\frac{1}{2}} \rho^{-\frac{1}{2}}} \quad (26)$$

$$\pi_{13} = \frac{\omega}{L^{-\frac{1}{2}} \rho^{\frac{1}{2}}} \quad (27)$$

令无量纲的相似比为1,即 $C_\varphi = C_g = 1$,

则由相似判据可得其他物理量与三个基本物理量的相似关系,如式(28)~(35)所示。

$$\frac{C_c}{C_L C_\rho C_g} = 1 \quad (28)$$

$$\frac{C_E}{C_L C_\rho C_g} = 1 \quad (29)$$

$$\frac{C_G}{C_L C_\rho C_g} = 1 \quad (30)$$

$$\frac{C_\sigma}{C_L C_\rho C_g} = 1 \quad (31)$$

$$\frac{C_\tau}{C_L C_\rho C_g} = 1 \quad (32)$$

$$\frac{C_t}{C_L^{\frac{1}{2}} C_g^{-\frac{1}{2}}} = 1 \quad (33)$$

$$\frac{C_a}{C_g} = 1 \quad (34)$$

$$\frac{C_\omega}{C_L^{-\frac{1}{2}} C_g^{\frac{1}{2}}} = 1 \quad (35)$$

基于 π 定理和量纲分析法确定的量纲和相似系数表如表1所示。

表1 量纲和相似系数表

Table 1 Dimension and similarity coefficients

| 类别 | 物理量 | 量纲 | 相似关系 |
|-----------|------------------|-----------------|---|
| 材料 参数 | * 密度 ρ | ML^{-3} | $C_\rho = 1$ |
| | 内摩擦角 φ | 无量纲 | $C_\varphi = 1$ |
| | 黏聚力 c | $ML^{-1}T^{-2}$ | $C_c = C_L C_\rho C_g$ |
| | 剪切模量 G | $ML^{-1}T^{-2}$ | $C_G = C_L C_\rho C_g$ |
| | 弹性模量 E | $ML^{-1}T^{-2}$ | $C_E = C_L C_\rho C_g$ |
| | 应力 σ | $ML^{-1}T^{-2}$ | $C_\sigma = C_L C_\rho C_g$ |
| | 剪应力 τ | $ML^{-1}T^{-2}$ | $C_\tau = C_L C_\rho C_g$ |
| | 应变 ε | 无量纲 | $C_\varepsilon = 1$ |
| | * 重力加速度 g | LT^{-2} | $C_g = 1$ |
| 几何参数 | * 长度 L | L | $C_L = 1$ |
| 运动学 参数 | 时长 t | T | $C_t = C_L^{\frac{1}{2}} C_g^{-\frac{1}{2}}$ |
| | 幅值 a | LT^{-2} | $C_a = 1$ |
| | 频率 ω | T^{-1} | $C_\omega = C_L^{-\frac{1}{2}} C_g^{\frac{1}{2}}$ |

注: * 表示控制量。

2.2 由分离相似设计导出的相似关系

在上述静力相似设计中,通过量纲分析法进行相似分析,所有的物理参数由一个特征方程所表示,无法显示各物理量的权重比例。利用分离相似设计对量纲分析法进行优化,在多级特征方程中对所有参数进行筛选,从而确定关键参数、相关参数和无关参数。在试验材料配比上,必须率先满足关键参数相似,对相关参数进行调整。

采用王志佳^[12]提出的分离特征方程法,根据边坡和地震波的物理量,进行相似设计。将边坡控制参数 L, ρ, g 作为控制量,得出一级特征方程:

$$f(L, \rho, g | c, \varphi, E, G, \sigma, \tau, \varepsilon, t, a, \omega) = 0. \quad (36)$$

通过分离特征方程,得出边坡和地震波的二级特征方程:

$$f'_{\text{边坡}}(L, \rho, g | c, \varphi, E, G, \sigma, \tau, \varepsilon) = 0. \quad (37)$$

$$f'_{\text{地震波}}(L, \rho, g | t, a, \omega) = 0. \quad (38)$$

由二级特征方程推导出的相似常数表如表2、表3所示。

表2 模型边坡的相似常数表

Table 2 Similarity constants of model slopes

| 量名称 | 物理量符号 | 相似常数 |
|-------|---------------|-----------------------------|
| 长度 | L | $C_L = 1\ 000$ |
| 密度 | ρ | $C_\rho = 1$ |
| 重力加速度 | g | $C_g = 1$ |
| 黏聚力 | c | $C_c = C_L C_\rho C_g$ |
| 内摩擦角 | φ | 1 |
| 弹性模量 | E | $C_E = C_L C_\rho C_g$ |
| 剪切模量 | G | $C_G = C_L C_\rho C_g$ |
| 应力 | σ | $C_\sigma = C_L C_\rho C_g$ |
| 剪应力 | τ | $C_\tau = C_L C_\rho C_g$ |
| 应变 | ε | 1 |

表3 地震波的相似常数表

Table 3 Similarity constants of seismic wave

| 量名称 | 物理量符号 | 相似常数 |
|-------|----------|---|
| 长度 | L | $C_L = 1\ 000$ |
| 密度 | ρ | $C_\rho = 1$ |
| 重力加速度 | g | $C_g = 1$ |
| 时长 | t | $C_t = C_L^{\frac{1}{2}} C_g^{-\frac{1}{2}}$ |
| 幅值 | a | $C_a = 1$ |
| 频率 | ω | $C_\omega = C_L^{-\frac{1}{2}} C_g^{\frac{1}{2}}$ |

在地震波的二级特征方程,式(38)中,由边坡控制参数 L, ρ, g 作为推导地震波方程中待确定参数的控制参数,对于地震波本身没有实际意义。

为更好地了解控制模型和原型的关键参数,可以发现在边坡模型振动台试验中,通常采用土和其他材料混合制成的土坯来模拟边坡。岩土体的破坏准则为摩尔库伦准则 $\tau = c + \sigma \tan \varphi$, 则影响模型破坏的关键参数为 τ, c, σ, φ 。通过再次分离特征方程,可以得出边坡的三级特征方程为

$$f''_{\text{边坡}}(L, \rho, g | \tau, c, \varphi, \sigma) = 0. \quad (39)$$

参数 G, ε 为相关参数,由三级特征方程推导出的关键参数相似常数如表4所示。

表4 关键参数相似常数表

Table 4 Similarity constants of key parameter

| 量名称 | 物理量符号 | 相似常数 |
|-------|-----------|-----------------------------|
| 长度 | L | $C_L = 1\ 000$ |
| 密度 | ρ | $C_\rho = 1$ |
| 重力加速度 | g | $C_g = 1$ |
| 剪应力 | τ | $C_\tau = C_L C_\rho C_g$ |
| 黏聚力 | c | $C_c = C_L C_\rho C_g$ |
| 内摩擦角 | φ | 1 |
| 应力 | σ | $C_\sigma = C_L C_\rho C_g$ |

通过4个特征方程,确定各物理量在模型试验中的权重,并依此划分为控制参数、关键参数、相关参数和无关参数。在以 L, ρ, g 作为控制参数的相似设计中,关键参数直接反映模型的动力响应特性,在试验始终都应严格保证关键参数的相似,物理参数权重划分如表5所示。

表5 物理参数权重划分

Table 5 Physical parameters

| 物理参数 | 边坡 | 地震波 |
|------|----------------------------|---|
| 控制参数 | L, ρ, g | L, ρ, g |
| 关键参数 | τ, c, φ, σ | t, a, ω |
| 相关参数 | G, ε | — |
| 无关参数 | E | $c, \varphi, E, G, \sigma, \tau, \varepsilon$ |

3 重力相似律

在弹性结构体系中,振动方程如下:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \quad (40)$$

式中: M 、 C 、 K 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。

从岩石大变形来看,土石混合料连续弹性体的性质不明显。在边坡振动台试验中,随着输入加速度的增大,土石混合料的强非线性愈发显著,进而需放弃弹性恢复力相似,保持惯性力和重力相似。

在分离相似设计中,通过边坡参数 L 、 ρ 、 g 作为推导地震波的控制量,无法很好地反应模型边坡在地震作用下的响应特征。振动体系中,由于惯性力、重力和弹性力的作用,土石混合物不能作为纯粹的弹性体。在相似设计中,只需考虑惯性力和重力对振动的影响,保持重力相似,不考虑弹性恢复力相似。在动力相似中,对输入地震波进行相似设计^[13-14],能够真实地模拟边坡在地震波作用下的响应特性。

在重力作用下,边坡原型和模型的重力相似关系式为

$$\frac{F_p}{F_m} = \frac{\rho_p L_p^3}{\rho_m L_m^3} = C_\rho C_L^3 \quad (41)$$

在惯性力作用下,边坡原型和模型的惯性力相似关系式为

$$\frac{F_p}{F_m} = \frac{a_p M_p}{a_m M_m} = \frac{\frac{L_p}{t_p^2} \rho_p L_p^3}{\frac{L_m}{t_m^2} \rho_m L_m^3} = C_\rho C_L^4 C_t^{-2} \quad (42)$$

在动力相似中,只考虑重力和惯性力的影响,保持动力相似,即

$$\frac{F_p}{F_m} = C_\rho C_L^3 = C_\rho C_L^4 C_t^{-2} = K \quad (43)$$

在动力相似中,所有作用力的比例系数都应保持一致,同时满足重力与惯性力相等,则由式(37)、(38)、(39)可得相似关系表达式:

$$C_\rho C_L^3 = C_\rho C_L^4 C_t^{-2} \quad (44)$$

简化后相似指标:

$$C_t = \sqrt{C_L} \quad (45)$$

在振动台试验中,输入的地震波需要按时间相似比 $C_t = 32$ 进行压缩^[15-16],可模拟出原型边坡在地震波作用下的响应特性。

4 结论

(1)传统的量纲分析法无法确定各物理量的重要程度,对下一步进行的材料配比试验造成很大的工作量;采用分离相似设计解决了各物理量权重的问题,在相似配比试验中可优先满足控制量 L 、 ρ 、 g 和关键参数 τ 、 c 、 φ 、 σ 相似下,进而满足相关参数 G 、 ε 相似,在一定程度上减轻了相似材料配比时的工作量。

(2)在动力相似中,模型需满足重力和惯性力相似,在振动台地震动的输入上采用重力相似率推导出的相似准则,对输入的地震波进行处理,按时间相似比 $C_t = \sqrt{C_L} = 32$ 进行压缩。

(3)根据相似三定律、量纲分析法、分离相似设计和重力相似理论,确定了贡扎滑坡振动台模型的相似设计及各物理量相似比: $C_L = 1\ 000$ 、 $C_\rho = 1$ 、 $C_g = 1$ 、 $C_t = 32$ 、 $C_c = 1\ 000$ 、 $C_\varphi = 1$ 、 $C_\sigma = C_\tau = 1\ 000$ 、 $C_G = 1\ 000$ 、 $C_\varepsilon = 1$,同时为相似的振动台模型试验提供一定参考。

参考文献

- [1] 杨国香,伍法权,董金玉,等.地震作用下岩质边坡动力响应特性及变形破坏机制研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(4):696-702.
(YANG Guoxiang, WU Faquan, DONG Jinyu, et al. Study of dynamic response characters and failure mechanism of rock slope under earthquake [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2012, 31(4): 696-702.)
- [2] 侯红娟,许强,吴金辉.岩质斜坡动力响应特性的结构面效应研究[J].世界地震工程,2015,31(1):224-231.
(HOU Hongjuan, XU Qiang, WU Jinhui. Research on

- structural plane effect of rock mass slope's dynamic response characteristics [J]. World information on earthquake engineering, 2015, 31(1):224-231.)
- [3] 言志信,刘春波,龙哲,等.含软弱层顺倾岩体边坡锚固地震响应试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(12):2180-2188.
(YAN Zhixin, LIU Chunbo, LONG Zhe, et al. Experimental study on seismic response of anchorage of bedding rock slope with weak layer [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2020, 42(12):2180-2188.)
- [4] 徐光兴,姚令侃,高召宁,等.边坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(3):624-632.
(XU Guangxing, YAO Lingkan, GAO Zhaoning, et al. Large-scale shaking table model test study on dynamic characteristics and dynamic responses of slope [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2008, 27(3):624-632.)
- [5] 张琳,邱文亮,姜涛.相似比不严格成比例情况下振动台模型设计[J].沈阳大学学报(自然科学版),2014,26(5):421-425.
(ZHANG Lin, QIU Wenliang, JIANG Tao. The design of shaking table model with similar ratio is not strictly proportional [J]. Journal of Shenyang university (natural science), 2014, 26(5):421-425.)
- [6] 侯伟龙.陡倾层状岩质边坡的大型振动台物理模拟试验研究[D].成都:成都理工大学,2011.
(HOU Weilong. Research on large-scale shaking table physical simulation experiment of steep-dipping stratified rock slope [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.)
- [7] 李晓红,卢义玉,康勇,等.岩石力学实验模拟技术[M].北京:科学出版社,2007.
(LI Xiaohong, LU Yiyu, KANG Yong, et al. Experimental simulation technology of rock mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2007.)
- [8] 邹威.强震作用下均质斜坡动力响应的大型振动台试验研究[D].成都:成都理工大学,2011.
(ZOU Wei. Large-scale shaking table test on dynamic response of homogeneous slopes under the effect of strong earthquake [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.)
- [9] 江宏.振动台模型试验相似关系若干问题研究[D].武汉:武汉理工大学,2008.
(JIANG Hong. The study of some similitude law problems in shaking table model test [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.)
- [10] 罗先启.滑坡模型试验理论及其应用[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
(LUO Xianqi. Landslide model test theory and its application [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.)
- [11] 柴少峰,王平,郭海涛,等.大型振动台试验土质边坡模型材料相似性及评价[J].地震工程学报,2019,41(5):1308-1315.
(CHAI Shaofeng, WANG Ping, GUO Haitao, et al. Model material similarity and associated evaluation for soil slopes in a large-scale shaking table test [J]. China earthquake engineering journal, 2019, 41(5):1308-1315.)
- [12] 王志佳,张建经,付晓,等.模型试验的分离相似设计方法:以锚索格构加固边坡模型试验为例[J].岩土力学,2016,37(9):2617-2623.
(WANG Zhijia, ZHANG Jianjing, FU Xiao, et al. Separation and similarity design method of model test: taking model test of anchor rope lattice reinforced slope as an example [J]. Rock and soil mechanics, 2016, 37(9):2617-2623.)
- [13] 田志昌,张安康,郝润霞.简单易自由度振动台设计[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(3):437-444.
(TIAN Zhichang, ZHANG Ankang, HAO Runxia. Design of shaking table with simple single degree of freedom [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(3):437-444.)
- [14] 林皋,朱彤,林蓓.结构动力模型试验的相似技巧[J].大连理工大学学报,2000(1):1-8.
(LIN Gao, ZHU Tong, LIN Bei. Similarity technique for dynamic structural model test [J]. Journal of Dalian university of technology, 2000(1):1-8.)
- [15] 叶海林,郑颖人,杜修力,等.边坡动力破坏特征的振动台模型试验与数值分析[J].土木工程学报,2012,45(9):128-135.
(YE Hailin, ZHENG Yingren, DU Xiuli, et al. Shaking table model test and numerical analysis on dynamic failure characteristics of slope [J]. China civil engineering journal, 2012, 45(9):128-135.)
- [16] 凌贤长,王臣,王成.液化场地桩-土-桥梁结构动力相互作用振动台试验模型相似设计方法[J].岩石力学与工程学报,2004(3):450-456.
(LING Xianzhang, WANG Chen, WANG Cheng. Scale modeling method of shaking table test of dynamic interaction of soil-pile-bridge structure in ground of soil liquefaction [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2004, 23(3):450-456.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)