

· 地基与基础 ·



# 广西航运枢纽工程新近系泥岩岩土参数取值<sup>\*</sup>

韦世贵

(广西交通设计集团有限公司, 广西 南宁 530029)

**摘要:** 由于第三系泥岩地层时代新、成岩差、岩性软弱、模量低、强度低、承载力不高, 特别是在卸荷或开挖暴露后易受环境条件影响, 岩体的工程地质性质变化大, 常规的岩石试验方法得到的指标往往比真实值低。依托广西航运枢纽工程, 现场开展岩体载荷试验、钻孔声波速测试和旁压试验, 研究广西新近系泥岩的地基容许承载力。采用 SPSS 数据分析软件, 对地基容许承载力、钻孔纵波波速、岩体完整性系数的相关性进行分析, 最终得出相关公式, 可通过钻孔声波速测试间接获取新近系泥岩的地基容许承载力。研究可为类似工程提供借鉴和参考。

**关键词:** 岩土参数; 载荷试验; 旁压试验; 地基容许承载力; 岩体完整性系数

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)11-0198-06

## Parameter values of Neogene mudstone rock in Guangxi shipping hub project

WEI Shigui

(Guangxi Traffic Design Group Co., Ltd., Nanning 530029, China)

**Abstract:** The engineering geological properties of the rock mass change greatly because of the neodiagenesis, diagenesis difference, lithology weakness, low modulus, low strength and low bearing capacity of the Tertiary mudstone strata, which are susceptible to environmental conditions especially after unloading or excavation exposure, and the index obtained by conventional rock test methods is often lower than the true value. In this paper, according to the rock mass loading test, borehole acoustic wave velocity test and side pressure test carried out on site in Guangxi shipping hub project, the allowable bearing capacity of the foundation of the Negene mudstone in Guangxi is studied. SPSS data analysis software is used to analyze the correlation between the allowable bearing capacity of the foundation, the longitudinal wave velocity of the borehole and the rock mass integrity coefficient, and finally the relevant formula is obtained. The allowable bearing capacity of Neogene mudstone foundation can be obtained indirectly through borehole acoustic wave velocity test. The research can provide reference for similar projects.

**Keywords:** rock and soil parameters; load test; side pressure test; allowable bearing capacity of foundation; coefficient of rock integrity

广西新近系泥岩主要分布于南宁、百色、宁明等地, 主要为内陆盆地湖泊沉积类型, 以灰色黏土岩富含哺乳动物和昆虫化石为主。广西古近系地层主要沉积类型有2种: 1) 干燥气候条件下

山间盆地的红色碎屑堆积, 以红色砂、砾岩为主, 常夹岩盐和石膏; 2) 湿润气候条件下凹陷盆地的含油、煤堆积, 是中国较重要的含油、煤地层。

广西那吉航运枢纽工程、广西右江鱼梁航运

收稿日期: 2023-02-07

\*基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52268062)

作者简介: 韦世贵(1979—), 男, 高级工程师, 从事岩土工程勘察设计工作。

枢纽工程、广西郁江老口枢纽工程均以新近系泥岩、粉砂质泥岩为主，在新近系泥岩极软岩的研究与利用方面，水电、航运枢纽工程涉及的问题更为复杂，主要反映在航运枢纽工程设计中必须对船闸、挡水坝闸、水电站等工程的地基抗滑稳定、地基应力与变形、开挖边坡稳定、地基渗透稳定等问题进行计算分析<sup>[1]</sup>。由于第三系泥岩地层时代新、成岩差、岩性软弱、模量低、强度低、承载力不高，特别是在卸荷或开挖暴露后易受环境条件影响，岩体的工程地质性质变化大。常规的岩石试验方法得到的指标往往不能反映真实环境条件，一般比真实值要低<sup>[2]</sup>。尤其对于中小型岩土工程，由于工程运转周期、资金投入以及试验人员数量问题，所取土样有限，进而导致针对某一特定场地而言，岩土力学参数数据非常有限<sup>[3]</sup>；而有些试样易受取土、运输及制样过程扰动，一般缺乏试验数据<sup>[4]</sup>。相关关系是获得岩土设计参数的另一个重要方式，也是可靠性分析中将岩土参数作为相关随机变量进行分析计算的前提，回归分析则是处理这类不完全确定的变量之间相关关系的重要而又常用的方法。本文依托广西航运枢纽工程，在现场开展岩体载荷试验、钻孔声波速测试、旁压试验，研究广西新近系泥岩的地基容许承载力，采用 SPSS 数据分析软件，对地基容许承载力  $f$ 、钻孔纵波波速  $v_p$ 、岩体完整性系数  $K_v$  相关性进行分析，最终得出相关公式，可通过钻孔声波速测试间接获取新近系泥岩的地基容许承载力。

## 1 广西新近系泥岩的研究现状

对广西第三系泥岩的研究主要集中在沉积环境、地基承载力及铁路边坡稳定等方面。如邓德贵等<sup>[5]</sup>从岩性岩相方面对南宁盆地早第三纪沉积特征进行研究，阐述了南宁盆地的沉积背景、探讨泥岩岩相成份复杂、性状软弱的原因；范秋雁等<sup>[6,7]</sup>、张信贵等<sup>[8,9]</sup>则从服务于工业与民用建筑的角度，对广西第三系泥岩的物理力学特性、地基承载力、桩基承载力等进行一系列的试验、模

拟分析研究；蒋忠信<sup>[10]</sup>、冯玉勇等<sup>[11]</sup>根据百色盆地膨胀岩土对南昆铁路路基、路堑边坡造成的危害，对百色盆地膨胀岩土的特性及路堤病害机理进行分析研究，总结出百色盆地膨胀岩土具有胀缩性、碎裂性和低强度 3 大特性，对我国目前岩土胀缩性划分标准进行了评述。

## 2 现场试验

### 2.1 试验方案

根据现场开挖揭露，除覆盖层外，试验场地岩性主要以新近系泥岩为主，中厚-厚层状，成岩作用差，属半成岩，力学强度低；局部含有软弱夹层，局部含贝壳化石。泥岩质软，失水易开裂，遇水易软化、崩解，岩体节理较发育，倾角多数在  $10^\circ \sim 15^\circ$ 。本次现场岩体试验依据中华人民共和国行业标准 SL/T 264—2020《水利水电工程岩石试验规程》<sup>[12]</sup> 相关条款进行。试验岩层及试验地点现场选定，结合地质勘察情况，分别在厂房及 3# 导墙、4# 溢流坝各开挖 1 块场地进行试验，试验点分布见表 1。

表 1 现场岩体试验点分布

| 试验点编号   | 试验项目         | 试验点位置 |
|---|--------------|-------|
| PY <sub>1</sub> 、PY <sub>2</sub> 、PY <sub>3</sub> | 旁压试验、钻孔声波速测试 | 4#溢流坝 |
| ZH <sub>1</sub>                                   | 载荷试验、钻孔声波速测试 | 4#溢流坝 |
| PY <sub>4</sub> 、PY <sub>5</sub>                  | 旁压试验、钻孔声波速测试 | 3#导墙  |
| ZH <sub>4</sub> 、ZH <sub>5</sub> 、ZH <sub>6</sub> | 载荷试验、钻孔声波速测试 | 3#导墙  |
| PY <sub>6</sub> 、PY <sub>7</sub> 、PY <sub>8</sub> | 旁压试验、钻孔声波速测试 | 厂房    |
| ZH <sub>2</sub> 、ZH <sub>3</sub>                  | 载荷试验、钻孔声波速测试 | 厂房    |

### 2.2 新近系泥岩岩体载荷试验

为进一步了解坝区岩体力学性质，取得较合理的岩体力学指标，为工程设计、施工复核地基稳定提供地质参数，选取代表性的部位进行现场岩体试验。试验采用千斤顶加载，承压板直径为 30 cm，试验点承压面积为 706.86 cm<sup>2</sup>，在承压板面上对称安装 4 个百分表测量岩体变形。试验采用逐级连续加载法，直至最大试验荷载或试点破坏。

### 2.3 新近系泥岩旁压试验

试验采用江苏溧阳戴埠仪器厂生产的 PY-5 型预

钻式旁压仪, 旁压器 1 外径 60 mm, 总长 800 mm, 测试段长度 250 mm; 旁压器 2 外径 74 mm, 旁压器总长 850 mm, 测试段长度 210 mm。旁压仪测管截面积为  $20 \text{ cm}^2$ , 测量腔初始体积  $V_c = 638 \text{ cm}^3$ , 对应测管水位降为 346 mm, 可达到的最大试验压力为 5.5 MPa。试验点垂直间距均大于 1 m, 加荷级数均大于 12 级, 每级压力下的观测时间为 3 min。

#### 2.4 钻孔声波速测试

由于岩层岩性及风化程度不同, 且岩石的致密程度和结构、岩石孔隙中的充填物质等存在差异, 形成明显的波阻抗界面, 具备开展声波测井工作的良好条件。选用中国科学院武汉岩土力学研究所生产的 RSM-SY5 声波测试设备, 采用一发双收声波探头。根据现场情况, 选择合适的增益和采样周期, 使振幅适当。为配合钻孔声波速测试分析岩土层完整性和风化程度, 需求得岩石纵波波速, 因此, 在代表性的钻孔和岩层取样, 并立即进行岩样声波速度测试。

### 3 试验成果

#### 3.1 新近系泥岩岩体载荷试验

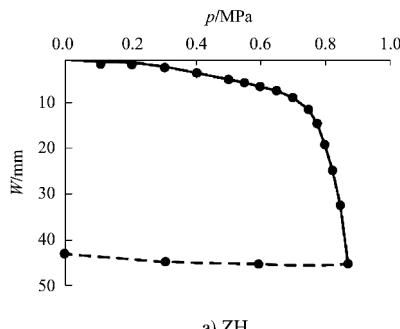
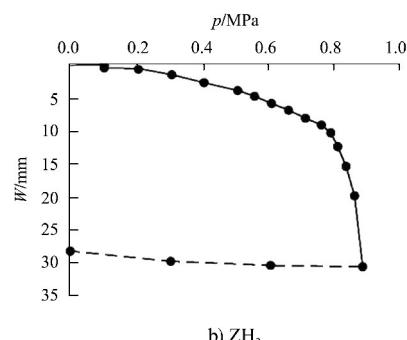
1) 按下式计算作用于试点上的单位压力:

$$p = \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中:  $p$  为作用于试点上的单位压力, MPa;  $F$  为作用于试点上的法向载荷, N;  $A$  为试点承压面积,  $\text{mm}^2$ 。

2) 根据测表读数计算各级压力下承压板上和板外岩体变形。

3) 绘制压力  $p$  与压缩变形  $W$  关系曲线, 确定各特征点的压力。代表性  $p-W$  关系曲线见图 1。

a) ZH<sub>2</sub>b) ZH<sub>3</sub>图 1 代表性新近系泥岩载荷试验  $p-W$  关系曲线

#### 3.2 新近系泥岩旁压试验

1) 初始压力  $p_0$ 。延长旁压曲线的直线段与纵轴相交, 其截距为  $V_0$ ,  $V_0$  所对应的压力即为近似初始压力  $p_0$ 。

2) 临塑压力  $p_f$ 。直线段的终点对应的压力值为临塑压力  $p_f$ 。

3) 极限压力  $p_L$ 。可通过作  $p-\frac{1}{V}$  曲线法求取。

4) 地基容许承载力  $f$ :

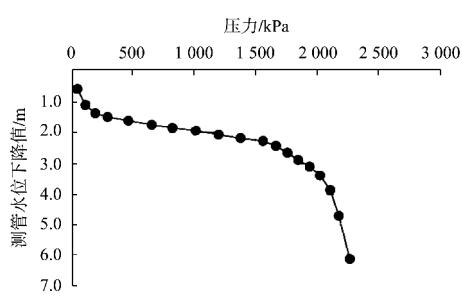
$$f = \lambda(p_f - p_0) \quad (2)$$

式中:  $\lambda$  为修正系数, 取 0.7~1.0。

各试验点旁压试验成果见表 2, 代表性旁压曲线见图 2。

表 2 各试验点旁压试验及钻孔声波速测试成果

| 试验点<br>编号       | 试验<br>深度/m | $p_0/$<br>kPa | $p_f/$<br>kPa | $p_L/$<br>kPa | $f/$<br>kPa |
|-----------------|------------|---------------|---------------|---------------|-------------|
| PY <sub>1</sub> | 20.0       | 266.9         | 1 634.9       | 2 600         | 1 094.4     |
| PY <sub>2</sub> | 27.6       | 364.0         | 1 734.7       | 2 550         | 1 096.6     |
| PY <sub>3</sub> | 29.4       | 568.0         | 2 044.9       | 3 320         | 1 033.9     |
| PY <sub>4</sub> | 12.8       | 153.0         | 1 116.0       | 2 180         | 674.1       |
| PY <sub>5</sub> | 14.6       | 175.2         | 1 094.8       | 2 250         | 643.7       |
| PY <sub>6</sub> | 17.5       | 245.0         | 1 240.0       | 2 100         | 796.0       |
| PY <sub>7</sub> | 20.2       | 205.0         | 1 094.0       | 1 700         | 800.0       |
| PY <sub>8</sub> | 33.5       | 336.2         | 1 249.2       | 2 750         | 730.4       |

a) PY<sub>1</sub>

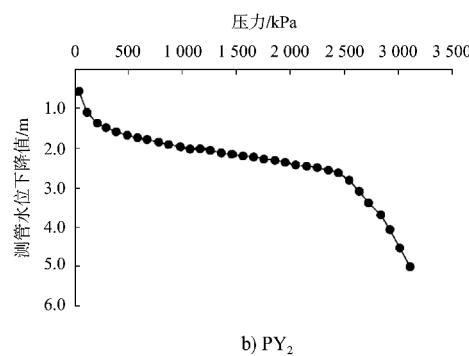


图 2 代表性旁压试验曲线

### 3.3 新近系泥岩钻孔声波速测试成果

根据钻孔内测得的岩体纵波速度  $v_p$  及室内岩块纵波速度  $v_{pr}$ , 计算出岩体的完整性系数  $K_v$ , 即岩体与岩块纵波速度之比的平方, 再由式(3)、(4)推导出  $f$ , 计算结果见表 3。

$$f = 0.7143v_p - 614.2857 \quad (3)$$

$$f = 833.3333K_v + 350 \quad (4)$$

表 3 岩体完整性系数成果

| 试验点<br>编号       | $v_{pr}/$<br>$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $v_p/$<br>$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $K_v$ | $f/\text{kPa}$ |          |
|-----------------|---|--|-------|----------------|----------|
|                 |   |  |       | 式(3)           | 式(4)     |
| PY <sub>1</sub> | 2 638   | 2 392                                      | 0.822 | 1 094.32       | 1 035.00 |
| PY <sub>2</sub> | 2 553   | 2 395                                      | 0.880 | 1 096.46       | 1 083.33 |
| PY <sub>3</sub> | 2 573   | 2 307                                      | 0.804 | 1 033.60       | 1 020.00 |
| PY <sub>4</sub> | 3 145   | 1 804                                      | 0.329 | 674.31         | 624.17   |
| PY <sub>5</sub> | 3 204   | 1 761                                      | 0.302 | 643.60         | 601.67   |
| PY <sub>6</sub> | 2 684   | 1 974                                      | 0.541 | 795.74         | 800.83   |
| PY <sub>7</sub> | 2 677   | 1 980                                      | 0.547 | 800.03         | 805.83   |
| PY <sub>8</sub> | 2 711   | 1 882                                      | 0.482 | 730.03         | 751.67   |

### 4 对比分析

#### 4.1 载荷试验成果分析

载荷试验及钻孔声波速测试成果见表 4, 岩体载荷越大, 岩体变形越大, 两者为递增关系; 岩体裂隙越发育, 岩体完整性系数  $K_v$  越小。

表 4 载荷试验及钻孔声波速测试成果

| 试验点<br>编号       | $p_L/$<br>$\text{kPa}$ | $f/$<br>$\text{kPa}$ | 裂隙发育情况                     | $K_v$ |
|-----------------|------------------------|----------------------|----------------------------|-------|
| ZH <sub>1</sub> | 1 200                  | 1 040                | 无节理发育                      | 0.820 |
| ZH <sub>2</sub> | 875                    | 750                  | 发育 3 条节理, 节理呈闭合状, 节理面为泥质充填 | 0.482 |
| ZH <sub>3</sub> | 875                    | 775                  | 发育 3 条节理, 节理呈闭合状, 节理面为泥质充填 | 0.541 |

续表 4

| 试验点<br>编号       | $p_L/$<br>$\text{kPa}$ | $f/$<br>$\text{kPa}$ | 裂隙发育情况                     | $K_v$ |
|-----------------|------------------------|----------------------|----------------------------|-------|
| ZH <sub>4</sub> | 760                    | 680                  | 发育 4 条节理, 节理呈闭合状, 节理面为泥质充填 | 0.392 |
| ZH <sub>5</sub> | 765                    | 675                  | 发育 4 条节理, 节理呈闭合状, 节理面为泥质充填 | 0.389 |
| ZH <sub>6</sub> | 840                    | 720                  | 发育 3 条节理, 节理呈闭合状, 节理面为泥质充填 | 0.432 |

#### 4.2 旁压试验成果分析

通过钻孔声波速测试成果, 依据 NB/T 10227—2019《水电工程物探规范》<sup>[13]</sup>, 同一个测区, 对于同类岩性使用新鲜完整岩石的同一波速, 用以计算同类岩性岩体的完整性系数及测试深度对地基容许承载力的影响, 三者关系见图 3。

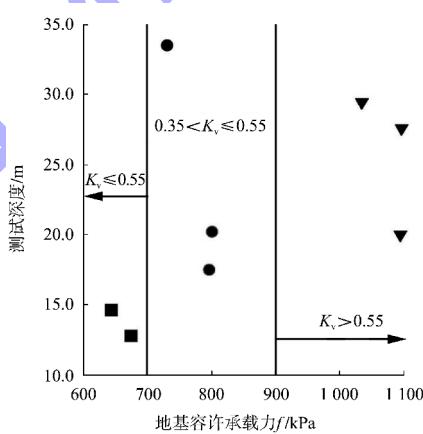


图 3 旁压试验地基容许承载力与测试深度关系

如图 3 所示, 本次旁压试验深度为 12.8~33.5 m, 测试深度与地基容许承载力并无特定的关联性, 但是根据岩体完整性系数可分为:

$$\begin{cases} f \subset [0, 700) & (K_v \leq 0.35) \\ f \subset [700, 900) & (0.35 < K_v \leq 0.55) \\ f \subset [900, +\infty) & (K_v > 0.55) \end{cases} \quad (5)$$

#### 4.3 两种试验手段对比分析

对比载荷试验和旁压试验成果, 对于工程地质性质相同的新近系泥岩, 测试结果差别不大, 如图 4 所示,  $K_v \leq 0.35$  时,  $f < 700 \text{ kPa}$ ;  $0.35 < K_v \leq 0.55$ ,  $700 < f \leq 900$ ;  $K_v > 0.55$  时,  $f \geq 900 \text{ kPa}$ , 试验成果在国家行业标准 JGJ 94—2008《建筑桩基

技术规范》<sup>[14]</sup>、地方标准 DBJ/T 45-066—2018《广西壮族自治区岩土工程勘察规范》<sup>[15]</sup>推荐岩土参数的范围内, 得到的参数指标基本反映岩体所处的实际环境和岩体工程特性。

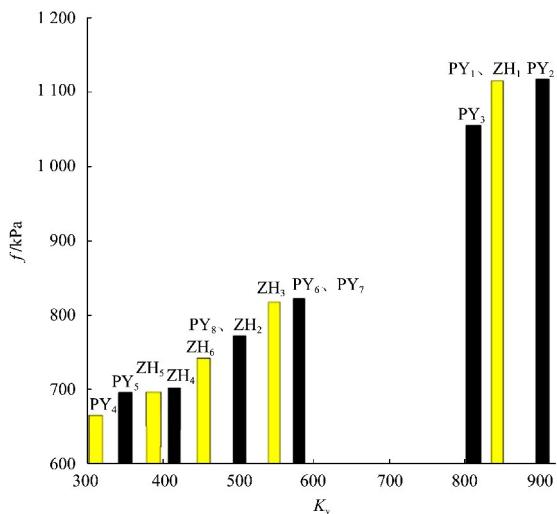


图 4 载荷试验与旁压试验成果

## 5 岩土参数相关性分析

采用 SPSS 数据分析软件对  $f$ 、 $v_p$ 、 $K_v$  相关性进行回归分析, 研究其变化趋势, 可得到表 5, 关系曲线见图 5。

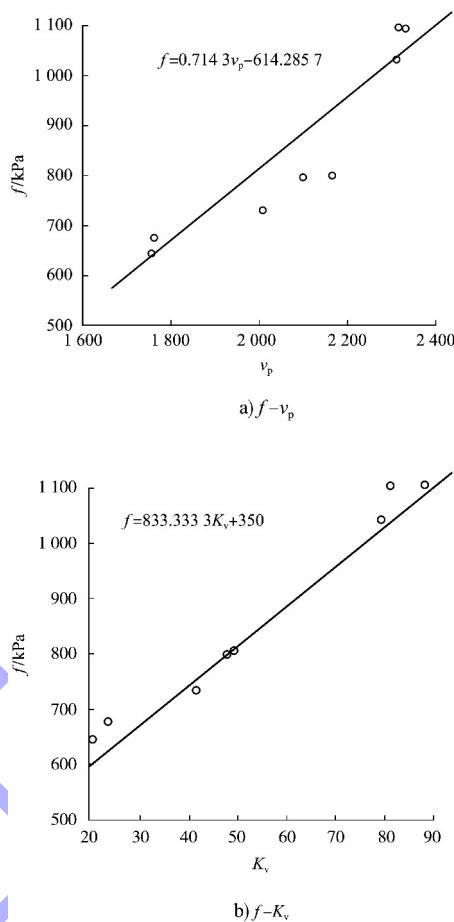


图 5  $f$  与  $v_p$ 、 $K_v$  关系曲线

表 5 模型相关性回归分析

| 模型    | 平方和   |             |           | $R$ 值       | Sig 值 | 共线性统计量 |        |
|-------|-------|-------------|-----------|-------------|-------|--------|--------|
|       | 回归    | 残差          | 总计        |             |       | 容差     | 方差膨胀因子 |
| $v_p$ | $f$   | -           | -         | -           | 0.000 | 0.002  | 0.560  |
|       | $v_p$ | 246 985.337 | 0.204     | 246 985.541 | 0.926 | 0.000  | 0.002  |
| $K_v$ | $f$   | -           | -         | -           | 0.000 | 0.021  | 42.502 |
|       | $K_v$ | 241 006.699 | 597 8.842 | 246 985.541 | 0.988 | 0.000  | 71.620 |

从图 5 和表 5 可以得出,  $f$  范围值为 640~1 100 kPa, 钻孔纵波  $v_p$  范围值为 1 700~2 400 m/s, 经过逐步回归分析, 相关系数分别为 0.926、0.988, 均大于 0.8, 说明对于广西新近系泥岩而言,  $f$  与  $v_p$ 、 $K_v$  等参数相关性显著, 模型具有较好的拟合程度, 利用式(3)、(4), 可通过钻孔声波速测试间接获取新近系泥岩的地基容许承载力。

从表 5 可以得出, 几个自变量的容差小于 0.1, 表示进入回归方程的自变量间共线性的问题

很明显; 检验回归方程模型的 Sig 值为 0, 说明该模型具有较好的拟合程度。

## 6 结语

1) 新近系泥岩地基容许承载力的试验成果在国家行业标准 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》、地方标准 DBJ/T 45-066—2018《广西壮族自治区岩土工程勘察规范》推荐的岩土参数范围内, 试验成果基本反映岩体所处的实际环境和岩体工程特性, 得到的参数指标反映真实环境条件。

2) 广西航运枢纽工程新近系泥岩岩体载荷试验、旁压试验所得的地基容许承载力相近, 地基容许承载力与钻孔纵波、岩体完整性系数等参数相关性显著。利用公式可通过钻孔声波速测试间接获取新近系泥岩的地基容许承载力。

### 参考文献:

- [1] 米德才, 陈宏明, 罗继勇, 等. 广西航运枢纽工程建设中的极软岩研究 [J]. 工程地质学报, 2006, 14(2): 200-205.
- [2] 万宗礼, 聂德新, 吴曾谋. 黄河上游新第三系红层工程地质特性研究 [J]. 西北水电, 2002(2): 60-63.
- [3] 赵腾龙, 赵晓妍. 岩土试验数据统计不确定性的量化与分析 [J]. 公路工程, 2018, 43(4): 283-286.
- [4] 尹松, 白林杰, 李新明. 花岗岩残积土的室内直剪与原位孔内剪切对比试验研究 [J]. 公路工程, 2020, 45(6): 66-72.
- [5] 邓德贵, 吴治. 广西南宁盆地早第三纪沉积相特征 [J]. 广西地质, 1992(2): 23-31.
- [6] 范秋雁, 吴起星, 周国贵. 广西第三系泥岩桩端承载力确定方法 [J]. 工程地质学报, 2004, 12(4): 408-411.
- [7] 范秋雁, 吴起星, 周国贵. 第三系泥岩桩端承载力计算机模拟研究 [J]. 地质与勘探, 2003, 39(5): 88-90.
- [8] 张信贵, 黄绍铿, 易念平. 南宁第三系湖相沉积泥岩特性试验研究 [J]. 广西大学学报(自然科学版), 1999, 24(2): 93-95.
- [9] 张信贵, 易念平, 黄绍铿. 南宁盆地泥岩承载性状研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 357-360.
- [10] 蒋忠信. 百色盆地膨胀岩的特性与堑坡工程 [J]. 铁道工程学报, 1996(2): 221-230.
- [11] 冯玉勇, 张永双, 曲永新, 等. 南昆铁路百色盆地膨胀土路堤病害机理研究 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 463-467.
- [12] 长江水利委员会长江科学院. 水利水电工程岩石试验规程: SL/T 264—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [13] 水电水利规划设计总院. 水电工程物探规范: NB/T 10227—2019[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [14] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社出版, 2018.
- [15] 广西华蓝岩土工程有限公司. 广西壮族自治区岩土工程勘察规范: DBJ/T 45-066—2018[S]. 南宁: 广西工程建设标准化协会, 2018.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 147 页)

- [4] 彭智祥. 三峡永久船闸人字门温度变形浅析 [J]. 水力发电, 2003(5): 27-29.
- [5] 郑卫力. 葛洲坝船闸人字门支枕垫块修补技术试验研究 [J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(5): 133-135.
- [6] YANG Y, MADARSHAHIAN R, TODD M D. Bayesian damage identification using strain data from lock gates [C]// PAKZAD S. Dynamics of civil structures, volume 2: Proceedings of the 37th IMAC, A Conference and

- Exposition on Structural Dynamics 2019. Cham: Springer International Publishing, 2020: 47-54.
- [7] HOSKERE V, EICK B, SPENCER B F, et al. Deep Bayesian neural networks for damage quantification in miter gates of navigation locks [J]. Structural health monitoring, 2020, 19(5): 1391-1420.

(本文编辑 王璁)