

岩溶路基溶洞顶板稳定性分析*

韩红艳^① 吴燕舞^② 黑亮^① 廖黎莉^①

(^①珠江水利委员会珠江水利科学研究院 广州 510635)

(^②佛山市地质局 佛山 528000)

摘要 可溶性碳酸盐岩类发生岩溶或岩溶现象是一种自然地质现象。我国的西南、华南地区地形地质条件复杂,岩溶地形分布相当广泛,给这些地区的公路建设带来许多困难。通过结构力学简化计算,半定量分析岩溶地区公路路基隐伏岩溶稳定性,得到稳定性和溶洞顶板、跨度、和覆盖层厚度之间的关系。并应用于乐广高速岩溶评价,能方便快速地分析溶洞顶板的稳定性。对我国岩溶地区的公路路基的稳定性分析评价,将具有一定的借鉴和参考价值。

关键词 岩溶 溶洞顶板 稳定性 计算

中图分类号:TU472.5 **文献标识码**:A

STABILITY ANALYSIS OF KARST CAVE ROOF BENEATH HIGHWAY SUBGRADE

HAN Hongyan^① WU Yanwu^② HEI Liang^① LIAO Lili^①

(^①Pearl River Water Conservancy Committee of the Pearl River Water Resources Research Institute, Guangzhou 510635)

(^②Foshan Geological Bureau, Foshan 528000)

Abstract Soluble carbonate rocks in karst or karst phenomena is a natural geological phenomenon. In South Southwest of China, the geological conditions of terrain are complex, and distribution of karst terrain is widely observed. It is difficulty to build highway road in these areas. The mode is approximately simplified by structural mechanics to quantitatively calculate the stability of the highway embankment in karst areas. It gives the relationship of stability between cave roof, span, and cover depth. It is a certain model. It has some reference value for stability analysis and evaluation of highway embankment in the future.

Key words Karst, Karst cave roof, Stability, Calculate

1 引言

岩溶塌陷是在自然环境和人为因素作用下导致洞顶的结构遭到破坏,并且在地面形成凹陷的坑。岩溶在我国的分布相当广泛,全国岩溶总面积达

$363 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 1/3 以上。据初步统计,有 20 多个省份发生过岩溶塌陷,其中以西南的贵州、云南、广西、四川、重庆等岩溶塌陷最为常见。而北方也有类似事件的发生,如河北、辽宁等地。

岩溶塌陷造成一些负面影响,不仅造成岩溶区水土流失并且造成环境恶化,而且使工程设施遭到

* 收稿日期:2012-03-15;收到修改稿日期:2012-11-18.

基金项目:水利部“948”项目(201106).

第一作者简介:韩红艳,主要从事地下水环境化学等方面的研究. Email: hhy1007@163.com

破坏,如建构物、道路交通线、矿山及水利水电基础设施等。典型实例有:广西玉林分界曾于1981年1月发生岩溶塌陷,共形成塌陷坑300多个,毁坏大面积农田;美国佛罗里达州的公园于1981年5月发生的巨型塌陷,塌陷坑直径约100多米、深度30m,造成超过几十万美元的损失;桂林市市中心的体育场于1996年1月发生塌陷,塌陷坑直径长约9m,深度6m,造成的经济损失近千万元;福建安溪县湖上乡2000年3月发生岩溶塌陷,造成多处梯田被毁,经济损失多达数百余万元^[1]。

1973年首届国际工程地质协会在西德汉诺举行^[2,3],会议探讨了与岩溶塌陷、沉陷密切相关的“与可溶性岩相关的工程地质问题”。1984年以来,在近15a的时间里美国先后举办了6届关于岩溶塌陷及其环境影响的国际性讨论会议^[4]。近20a来,国内外学者在岩溶塌陷方面的开了大量研究,取得了大量的成果^[5,6]。

20世纪80年代,我国逐渐展开了岩溶塌陷的专门研究。地质科学研究所进行了长江流域和南北方岩溶塌陷专题项目研究,掌握了我国岩溶塌陷发育的基本特征和分布规律,从而确定了岩溶的类型,提出了岩溶分类的方法,同时编辑部出版了1:600万《中国岩溶塌陷分布图》。20世纪90年代初,通过模型试验,进一步证实了岩溶塌陷的发育的全过程,为岩溶塌陷发育的机理研究提供了一种有效的方法。该方法为武汉、唐山、湘潭、玉林、铜陵、桂林等几个城市岩溶塌陷全面的治理起到了一定的作用^[5]。

众多专家一致认为,只有从根本上解决岩溶塌陷的问题,才能有效地预防和治理岩溶塌陷的发生。因此,控制地下水的开发和工程处理措施成为当前需要解决的主要问题。目前,钻孔技术在工程上的普遍采用是一种行之有效的方法^[5]。

2 岩溶路基稳定性分析

在岩溶地区修建公路,难免会遇到溶洞,使得公路工程与岩溶环境之间的相互作用极其显著。一方面,公路及其设施建设不可避免地沿线的岩溶地质和自然环境产生影响,另一方面,特殊的岩溶环境不仅大大增加了公路建设的难度,而且极易导致各种不同程度的公路工程病害。

影响路基稳定性的主要因素是岩溶发育程度、覆盖层厚度、溶洞的规模大小、溶洞中的充填特征、

岩溶地下水特征等,需要综合考虑这些因素以确定统一的评价标准,通过定性与定量计算的结果,来评判并确定路基的稳定性。

2.1 路基溶洞稳定性计算分析

当顶板岩层比较完整时,将溶洞围岩作为结构自承重体系,根据溶洞体形态、围岩完整程度、裂隙发育情况进行内力分析,进而分析其稳定性,常见的多种方法有:定性评价法,半定量评价方法,定量评价法等^[7~9]。现介绍另一种结构力学简化模型的定量计算方法。

假设溶洞为一个立方体,并且其顶板厚度均一,具厚度相同,于是可以将其看成一个梁板架在溶洞上面。分析其受力:溶洞的顶板面所受的荷载主要有路面汽车荷载、溶洞上覆土层的重量以及溶洞顶板岩石的重量(图1)。

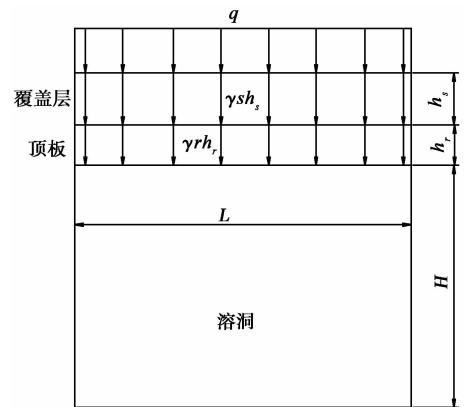


图1 路基溶洞结构力学计算简化模型

Fig. 1 Roadbed cave simplified model calculation of structural mechanics

2.1.1 顶板按抗弯结构力学模型计算

在岩溶洞顶的岩层比较完整,强度较大,跨度很宽时,弯矩是主要的影响因素,按照两端固定顶板抵抗弯度进行计算溶洞安全的最小顶板厚度和最大跨度。相比而言,单向板较双向板承载力小,安全方面考虑,采用单向板模型计算。将岩溶工程地质条件与结构力学相结合,其公式推导如下。

根据强度理论条件^[10]:

$$[\sigma] \geq \frac{M}{I} \cdot y_{\max} \quad (1)$$

两端固定梁板最大弯矩发生在其正中间,中轴线的正下方,即溶洞顶的正中间最危险,此时 $y_{\max} = \frac{h_r}{2}$,最大弯矩为^[11]:

$$M = \frac{bq'l^2}{12} \quad (2)$$

由于基岩上面还有一定厚度的覆盖土层, q 从路基底部, 传到溶洞顶板时候, 还有一定的折减。将汽车的动荷载看作均布的条形荷载, 计算其在基础底部一定深度处的竖直附加应力^[12]。整个条形荷载(图2)在M点引起的竖直附加应力 σ_z 为:

$$\sigma_z = \frac{p}{\pi} \left[\arctan \frac{m}{n} - \arctan \frac{m-1}{n} + \frac{mn}{m^2+n^2} - \frac{n(m-1)}{n^2+(m-1)^2} \right] = K_z p \quad (3)$$

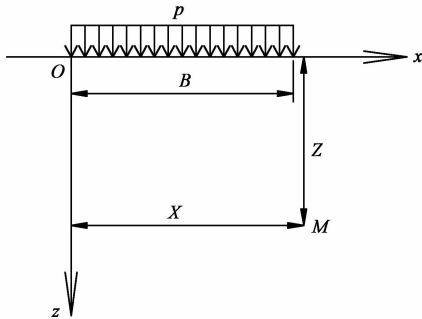


图2 附加应力计算简图

Fig. 2 Additional stress diagram

式中, σ_z 为作用于M点的竖直附加应力(kPa); p 为均布荷载集度($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$); B 为路基宽度(m); m 为 $\frac{X}{B}$, X 为M点到Z轴的距离; n 为 $\frac{Z}{B}$, Z 为M点到基底的距离; K_z 为条形面积受竖直均布荷载作用时的竖向附加应力分布系数。

由条形面积竖向均布荷载下地基中 σ_z 的分布规律, 在同一深度的水平面上, 地基中轴线上的竖直附加应力 σ_z 最大, 此时 $X = \frac{B}{2}$, 即 $m = 0.5$, 代入式(3)得:

$$\sigma_z = \frac{p}{\pi} \left(2\arctan \frac{1}{2n} + \frac{4n}{4n^2+1} \right) = K_z p \quad (4)$$

由上式可以看出: 在基础宽度确定的情况下, K_z 是一仅与埋深有关的常系数。于是作用于顶板上的荷载 q' 可以表示为:

$$q' = K_z q + \gamma_s h_s + \gamma_r h_r \quad (5)$$

式中, q' 为作用于顶板上的荷载($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$); K_z 为条形面积受竖直均布荷载作用时的竖向附加应力分布系数; q 为汽车荷载($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$); γ_s 为覆盖层容重($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$); h_s 为覆盖层厚度(m); γ_r 为顶板岩体容重($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$); h_r 为顶板岩体厚度(m)。

根据前面顶板看作梁板的假设, 其横截面为矩形, 得其惯性矩为 $I = \frac{bh_r^3}{12}$, 基于安全, 取 $[\sigma] = \frac{1}{20} R_c$,

并将 $y_{\max} = \frac{h_r}{2}$, 以及式(2)(5)代入(1)式可得:

$$h_r \geq \frac{5l^2 \gamma_r}{R_c} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2R_c(K_z q + \gamma_s h_s)}{5l^2 \gamma_r^2}} \right] \quad (6)$$

$$l \leq h_r \sqrt{\frac{R_c}{10(K_z q + \gamma_s h_s + \gamma_r h_r)}} \quad (6)$$

工程中, 代入顶板岩体抗压强度 R_c , 汽车荷载 q , 覆盖层容重 γ_s , 顶板岩体容重 γ_r , 基础宽度 B 值, 根据岩溶覆盖层厚度 $h_s = 1 \sim 30\text{m}$ 内变化, 路基段溶洞顶板厚度 $h_r = 1 \sim 25\text{m}$ 内变化, 路基段溶洞沿路线方向跨度 $l = 1 \sim 50\text{m}$ 内变化, 可以根据式(6)计算出岩溶路基抗弯条件下 $h_s \sim h_r \sim l$ 标准查寻表。

2.1.2 顶板按抗剪切结构力学模型计算

在岩溶洞顶的岩层比较完整, 强度较大, 但是跨度很窄时, 此时, 剪切是主要的影响因素, 按照抗剪切结构力学模型计算溶洞安全最小顶板厚度(h_r)与溶洞安全最大跨度(l)。其计算模型(图1)与理论公式推导如下: 依据静力极限平衡:

$$(K_z q + \gamma_s h_s + \gamma_r h_r) l b = 2(l+b) h_r \tau_f \quad (7)$$

式中, τ_f 为溶洞灰岩顶板抗剪强度(kPa)。

根据岩体力学库伦-纳维尔判据^[10]有:

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + c \quad (8)$$

式中, σ 为作用于剪切面上的法向应力(kPa); φ 为顶板岩体内摩擦角($^\circ$); c 为顶板岩体内聚力(kPa)。

根据岩体天然应力状态下, 自重应力和构造应力之间的关系, 可以得到

$$\sigma = \lambda (K_z q + \gamma_s h_s + \gamma_r h_r) \quad (9)$$

其中, λ 为天然应力比值系数, 可表示为:

$$\lambda = \frac{\mu}{1 - \mu} \quad (10)$$

式中, μ 为岩体泊松比。

联立式(7)~(10)可得:

$$h_r = \frac{2(l+b) [\lambda \tan \varphi (K_z q + \gamma_s h_s) + c] - b \lambda \gamma_r}{4(l+b) \lambda \gamma_r \tan \varphi} \times \left[\sqrt{1 + \frac{8lb \lambda \gamma_r (l+b) \tan \varphi (K_z q + \gamma_s h_s)}{\{2(l+b) [\lambda \tan \varphi (K_z q + \gamma_s h_s) + c] - b \lambda \gamma_r\}^2}} - 1 \right]$$

$$l = \frac{2bh_r [\lambda \tan \varphi (K_z q + \gamma_s h_s + \gamma_r h_r) + c]}{(b - 2h_r \lambda \tan \varphi) (K_z q + \gamma_s h_s + \gamma_r h_r) - 2h_r c} \quad (l \neq b)$$

$$l = \frac{4h_r [\lambda (K_z q + \gamma_s h_s + \gamma_r h_r) \tan \varphi + c]}{K_z q + \gamma_s h_s + \gamma_r h_r} \quad (l = b) \quad (11)$$

工程中,代入顶板岩体抗压强度 R_c , 汽车荷载 q , 覆盖层容重 γ_s , 顶板岩体容重 γ_r , 基础宽度 B , 顶板岩体内聚力 c , 顶板岩体内摩擦角 φ , 岩体泊松比 μ 值, 根据岩溶覆盖层厚度 $h_s = 1 \sim 30\text{m}$ 内变化, 路基段溶洞顶板厚度 $h_r = 1 \sim 25\text{m}$ 内变化, 路基段溶洞沿路线方向跨度 $l = 1 \sim 50\text{m}$ 内变化, 可以根据式(11) 计算出岩溶路基抗剪条件下 $h_s \sim h_r \sim l$ 标准查寻表。

通过相似模拟试验^[13], 设计了4个洞型, 外形均为方体, 洞型为半卧式椭球、半立式椭球、圆球、方体(图3)。通过试验, 模型内洞型、顶部厚度和跨度对洞体稳定性有较大的影响, 模型4所承受的最大荷载最小, 因此用此种方法计算溶洞顶板的稳定性是比较保守的, 是可行的。

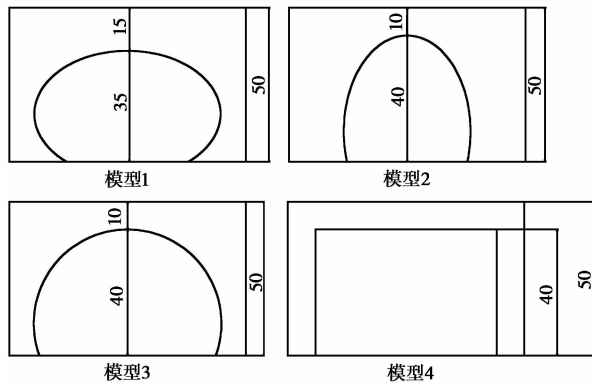


图3 试验模型
Fig. 3 Test model

2.2 路基段岩溶处治方案

根据拟建公路的线路走向, 探明溶洞的尺寸大小, 的覆盖层的厚度, 首先判明溶洞的顶板岩体的计算模型(一般当厚跨比 < 0.5 时用抗弯模型, 当厚跨比 ≥ 0.5 时用抗剪模型), 再查询岩溶路基抗弯或抗剪条件下 $h_s \sim h_r \sim l$ 标准查寻表, 判断溶洞的稳定性。若 h_r 小于表中给定的最小安全厚度或 l 大于表中给定的最大安全跨度, 则此溶洞不稳定, 在外荷载的作用下易发生灾害, 此溶洞需要处理。若覆盖层不是很厚, 一般采用强夯或爆破后强夯、注浆等提高覆盖层的抗塌性能, 若覆盖层较厚, 可采用桩基础、钢筋混凝土盖板等, 必要的时候可采取桥跨的方式跨越, 但是在处理的时候, 要特别注意地下水的影响。

3 工程实例

乐广高速全线隐伏岩溶较发育, 选取里程为

K51+400-K52+200, 全长 800m 的一段路基段进行分析。根据地质勘察资料, 区无大的活动性断裂通过, 区域稳定性较好, 主要不良地质现象为岩溶。此路段主要地层由上至下为:

- (1) 种植土: 褐黑色, 软塑, 饱和, 主要成分为黏性土, 含少许植物根系及角砾;
- (2) 坡洪积低液限黏土: 褐黑色, 软塑-流塑, 饱和, 混碎石, 碎石粒径 $5 \sim 8\text{cm}$;
- (3) 粉砂: 褐黄色, 稍密, 饱和, 混黏性土, 黏性土含量约占 20%, 含少许碎石, 粒径约 2cm , 个别 5cm ;
- (4) 微风化灰岩: 青灰色, 隐晶质结构, 中厚层状构造, 钙质胶结, 节理裂隙较发育, 岩芯多柱状及短柱状, 块状少, 断面新鲜, 见方解石细脉。

经物探方法勘察, 本段揭示有岩溶。根据勘察、物探和公路设计资料, 该段路面宽度为 34.5m , 经统计, 埋深小于 30m 溶洞信息见表 1^[14], 岩土体的参数及路面荷载取值见表 2。

表1 K51+400-K52+200 段溶洞统计表
Table 1 K51+400K-52+200 section cave statistics

| 里程编号 | 高/m | 宽/m | 估算长度/m | 顶板厚度/m | 覆盖层厚度/m | 溶洞编号 |
|-----------|-----|-----|--------|--------|---------|------|
| K51+475.9 | 2.2 | 4.2 | 6.3 | 1.1 | 5.1 | 1 |
| K51+520 | 4.4 | 4.5 | 6.8 | 3.9 | 10.4 | 2 |
| K51+603.6 | 3.1 | 9.5 | 14.3 | 2.1 | 16.0 | 3 |
| K51+640 | 3.7 | 4.0 | 6.0 | 2.8 | 16.0 | 4 |
| K51+674.7 | 1.8 | 4.0 | 6.0 | 1.4 | 25.4 | 5 |
| K51+732.5 | 4.6 | 4.2 | 6.3 | 2.4 | 19.6 | 6 |

表2 岩土体参数及荷载取值

Table 2 Rock and soil parameters and load value

| | | | | | | | |
|-------|--------|-----------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|
| R_c | 40MPa | p | $780\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ | γ_s | $18\text{kPa}\cdot\text{m}^{-3}$ | γ_r | $25\text{kPa}\cdot\text{m}^{-3}$ |
| C | 350kPa | φ | 35° | μ | 0.2 | B | 34.5m |

注: $[\sigma]$ 取 R_c 的 $1/15$ 。

因上述溶洞都是长度大于宽度, 故选用抗弯结构模型进行计算, 分 2 种工况分析:

工况一: 当施工及道路运营期间, 路面荷载以 $P = 780\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 计, 其顶板的临界厚度分别为 1.0m 、 1.2m 、 2.9m 、 1.1m 、 1.2m 、 1.2m ;

工况二: 施工前期, 以 $p = 0$ 计时, 其顶板的临界厚度分别为 0.5m 、 0.7m 、 2.2m 、 0.8m 、 1.0m 、 0.9m (表 3)。

由表 3 可以看出, 工况二, 即 $p = 0$ 时, 6 个溶

表3 1~6号溶洞顶板临界厚度

Table 3 The critical thickness of karst cave roof of 1~6

| 溶洞编号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
|--------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 临界顶板 厚度/m | $P=780\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ $p=0$ | 1.0 | 1.2 | 2.9 | 1.1 | 1.2 | 1.2 |
| 溶洞实际顶板厚度/m | | 1.1 | 3.9 | 2.1 | 2.8 | 1.4 | 2.4 |

洞,除3号溶洞比实际稍大以外,其他5个的临界顶板厚度都比实际的小,在此种状态下是安全。而在施工期和运营期,3号溶洞临界厚度比实际大0.8m左右,故而此处在施工期极易发生塌陷事故,需要治理;其他5个溶洞,都比实际的小,在施工期间是安全的,但是1号溶洞,仅仅只比实际大0.1m,在施工期间,安全起见,建议治理。

4 结 论

(1)本文介绍的这种结构力学简化模型定量计算方法一般应用于顶板较完整的岩体,对于破碎岩体,当顶板严重风化,裂隙发育,则应将溶洞围岩视为散体结构进行分析。

(2)此种计算方法采用是结构力学简化模型的一种方法,没考虑实际中溶洞的尺寸效应的影响,在实际工程中,还应充分考虑尺寸效应的问题。

(3)此种计算方法,在简化的过程中,没考虑气候和水流的影响,溶洞的充填情况,在重大重要工程中,还需建立气-水-土耦合机制。

(4)计算式中岩体的抗压强度 R_c ,岩体的内聚力 c ,内摩擦角 φ ,需要经室内试验得到,溶洞的覆盖层厚度、溶洞的规模大小等需要经过详细的物探才能得到,所以在使用此法计算之前必需做详细的勘查以得到必需的参数。

(5)岩溶地区病害的发生往往具不可预见性,还应防护优先、预防为主、防治结合,根据具体的工程,具体工程地质条件,采取最合理,最经济的方案处治。

参 考 文 献

[1] 张丽芬,曾夏生,等.我国岩溶塌陷研究进展[J].中国地质灾害与防治学报,2007,18(35):126~130.
Zhang Lifen, Zeng Xiasheng, et al. Research progress of Chinese karst collapse. Journal of Chinese Geological Hazard and Control. 2007,18(35):126~130.

[2] Mario Mejia-Navarro and Luis. Natural hazard and risk assessment using decision support systems, application: Glewood Springs, Colorado. Environmental & Engineering Geoscience, 1996, II:

299~324.

[3] Varnum Nick C. Geographical information system to assess natural hazards in the east central Sierras Nevada. Journal of Imaging Technology, 1991, 17, 57~61.

[4] Arnon Karnieli. Stepwise overlay approach for utilizing a GIS with a soil moisture accounting model. ITC Journal, 1991, 1~18.

[5] 雷明堂,蒋小珍.岩溶塌陷研究现状、发展趋势及其支撑技术方法[J].中国地质灾害与防治学报,1998,9(5):1~6.
Lei Mingtang, Jiang Xiaozhen. Research status, development trend and its supporting technology and methods of Karst collapse. Journal of Chinese Geological Hazard and Control. 1998,9(5):1~6.

[6] 康厚荣,罗强,凌建明,等.岩溶地区公路修筑理论与实践[M].北京:人民交通出版社,2008.
Kang Hourong, Luo Qiang, Ling Jianming, et al. Theory and Practice of Highway Construction in Karst Area. Beijing: China Communications Press, 2008.

[7] 孟庆山,陈勇,汪稔.岩溶洞穴工程地质条件与顶板稳定性评价[J].土工基础,2004,18(5):55~58.
Meng Qingshan, Chen Yong, Wang Ren. Stability evaluation of engineering geology condition and karst cave roof. Soil Engineering and Foundation. 2004,18(5):55~58.

[8] 赵瑞峰,赵跃平,王亨林,等.溶洞顶板安全厚度估算[J].工业建筑,2009,39:800~803.
Zhao Ruifeng, Zhao Yueping, Wang Henglin, et al. Estimation of cave roof safety thickness. Industrial Building. 2009,39:800~803.

[9] 陈勇鸿,陈志.高速公路路基岩溶顶板安全厚度确定方法[J].公路工程,2009,34(3):6~10.
Chen Yonghong, Chen Zhi. Expressway Subgrade karst roof safety thickness determination. Highway Engineering. 2009,34(3):6~10.

[10] 孙方训,方孝淑,关来泰.材料力学(第四版)[M].北京:高等教育出版社,2002.
Sun Fangxun, Fang Xiaoshu, Guan Laitai. Materials Mechanics. Beijing: Higher Education Press. 2002.

[11] 刘昌辉,时红莲.基础工程学[M].武汉:中国地质大学出版社,2005.
Liu Changhui, Shi Honglian. Foundation Engineering. Wuhan: China University of Geosciences Press. 2005.

[12] 陈仲颐,周星星,王洪瑾.土力学[M].北京:清华大学出版社,1994.
Chen Zhongyi, Zhou Xingxing, Wang Hongjin. Soil Mechanics. Beijing: Tsinghua University Press. 1994.

[13] 刘佑荣,唐辉明.岩体力学[M].武汉:中国地质大学出版社,1999.
Liu Yourong, Tang Huiming. Rock Mass Mechanics. Wuhan: China University of Geosciences Press. 1999.

[14] 李云安,余子桃.乐广高速岩溶稳定性评价[J].岩体力学,武汉,中国地质大学出版社,2005,24(1):89~93.
Li Yun'an, Yu Zitao. Evaluation of Yue Guang high speed Karst stability. Journal of Rock Mass Engineering. 2005,24(1):89~93.