邵长杰，吴为东，郑束宁，等. 基于浙江省地区岩溶发育规律的桥梁桩长设计辅助软件研究[J]. 灾害学，2018，33(S1)：143 －147. [SHAO Changjie, WU Weidong, ZHENG Shuning, et al. Auxiliary Software for Bridge Pile Length Design Based on Karst Development Law in Zhejiang Province[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(S1): 143 － 147. doi: 10.3969/j.issn.1000 －811X.2018.Z1.027.]

基于浙江省地区岩溶发育规律的桥梁桩长设计辅助软件研究*

邵长杰[1]，吴为东[2]，郑束宁[1]，陈侃福[1]，彭丁茂[1]

（1. 浙江省交通规划设计研究院，浙江 杭州 310006；2. 浙江杭宣高速公路有限公司，浙江 杭州 310024）

摘　要：在充分研究浙江省岩溶空间分布及发育规律的基础上，本文开展了省内现有岩溶区高速公路勘察资 料的统计分析，提取出桥址区岩溶发育规律特征，并以此为核心进行桥梁桩长设计辅助软件开发，实现了桥址区岩溶三维地质建模以及桩长自主计算。

关键词：岩溶；发育规律；三维；地质模型；桩长设计；辅助软件；浙江

中图分类号：X43；U442.2；P642；TB16　**文献标志码**：A　**文章编号**：1000 －811X(2018)S1 －0143 －05

doi：10.3969/j.issn.1000 －811X.2018.Z1.027

我国岩溶分布广泛，类型众多，是世界上岩溶面积最大的国家之一，以发育在碳酸盐岩 地区的岩溶计算，含裸露、覆盖、埋藏三个类型在内，其总面积为 344.3 万 km^2，占国土面 积的 1/3 以上，主要分布在南方的云南、贵州、广西、四川、湖南、湖北和广东一带以及北 方的山西、山东、河南、河北一带。

浙江省的碳酸盐岩主要分布于浙西北的钱塘江流域和太湖流域，即江山—绍兴断裂带北 西侧，扬子陆块东南缘钱塘复向斜之中。

浙江省岩溶虽不及贵州、广西等地区发育，但有其独特的自身特点，主要是以覆盖型岩 溶为主，岩溶地质灾害具有很强的隐蔽性、突发性。浙江省作为我国的经济发达地区，快速 发展的社会经济促使了对公路交通的巨大需求，其高速公路建设投入大、发展快。近年来，随着山区高速公路建设步伐的加快，大批高速公路穿越浙西北岩溶地区，工程中也遇到了一 系列的岩溶工程地质问题。当桥梁基桩不可避免地要跨越岩溶地区时，其涉及的关键问题就 是如何确定合理的桩长。桩长过长将极大增加施工难度，并直接影响工程进度及工程造价；而由于下伏溶洞的存在，桩长过短是否满足承载力要求及基桩安全要求，亦是工程设计人员 必须考虑的问题。

本文收集了浙江省地区已建成和在建大部分岩溶区高速公路勘察资料，总结分析其岩溶 发育规律，在此基础上进行了桥梁桩长辅助软件的开发，用于拟建桥梁区域的物探、钻探、调查、设计等信息的综合分析，辅助进行桥梁桩长设计。

1　区域地质背景

1.1　碳酸盐岩分布区

浙江省的碳酸盐岩主要分布于浙西北的钱塘江流域和太湖流域，碳酸盐岩的空间分布地区北起长兴，南至江山，东以江山 －绍兴深大断裂为界，西至浙皖省界，总面积约 3.95 万 km^2，为浙江总面积的 35.3%。包括湖州、绍兴、金华、衢州、杭州、绍兴在内的 6 个省辖市，与安徽和江西两省相邻。其中碳酸盐岩出露面积为 2 610 km^2，约占浙西北面积的 6.6%(图 1)。

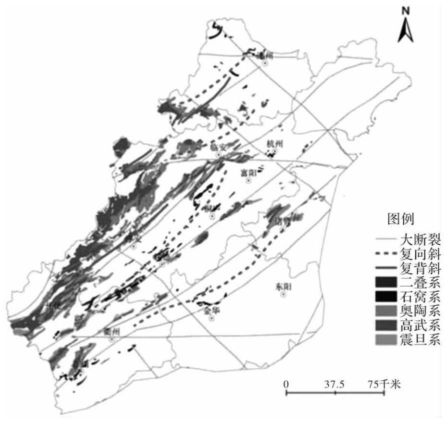

图 1　浙江省碳酸盐岩分布范围

区内地层从元古界到第四纪地层均有出露，主要包括中生界的白垩系、侏罗系地层，古生界的

* 收稿日期：2018 －04 －05　修回日期：2018 －07 －13

第一作者简介：邵长杰(1987 －)，男，山东青州人，工程师，主要从事水文地质、工程地质等研究工作.

E-mail：451231980@qq.com

二叠系、石炭系、志留系、奥陶系、寒武系地层，以及元古界震旦系和前震旦系地层等，岩性以沉积岩为主，岩体结构多呈层状，少量块状火成岩；第四纪地层主要包括残坡积、上更新统坡冲积、冲洪积和全新统冲积层。其中碳酸盐岩出露的地层有震旦系西峰寺组，寒武系大陈岭组、杨柳岗组、华严寺组、西阳山组，奥陶系砚瓦山组，石炭系黄龙组、船山组，二叠系栖霞组、茅口组，三叠系青龙组。受构造控制，研究区内碳酸盐岩呈条带状沿北东方向展布，由于构造破碎，碳酸盐岩的分布连续性较差。

研究区内寒武－奥陶系碳酸盐岩，在安吉－昌化－马金一带连续分布，分布面积较广；石炭－二叠系灰岩主要沿杭州、桐庐、建德一带断续分布，零散出露于长兴、吴兴、江山、金华一带。

1.2 岩溶发育情况

岩溶的发育程度多为地形地貌、水动力作用、岩性、构造等多种岩溶发育控制因素多样化耦合的结果，因此，浙西北地区岩溶发育也表现出不均一性和差异性。其中，起决定性的控制因素为岩性条件，其次为构造发育条件。

岩性条件即碳酸盐岩纯度、节理裂隙发育程度、沉积历史及其非灰岩夹层等，是直接控制岩溶发育强度的内在因素。浙西北地区主要碳酸盐岩地层有寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系五套地层，其中震旦系、寒武系、奥陶系地层中灰岩纯度不高，且多有炭质、硅质页岩、石英砂岩等夹层；石炭、二叠系均为纯度较高的灰岩，但灰岩中抗蚀物质含量、燧石结核及非灰岩夹层石炭系地层较二叠系低。在岩溶发育规律上体现为：石炭系＞二叠系＞寒武系＞奥陶系＞震旦系，大型溶洞大部分都分布于石炭二叠系灰岩出露的区域，如金华双龙洞、桐庐瑶琳仙境等。

区域上褶皱、断层的走向往往控制了岩溶空间上的分布格局。向斜盆地岩溶发育，尤以向斜核部昀强烈，岩溶水较丰富；向斜倒置成岭地区岩溶十分微弱，岩溶水水量贫乏，泉呈悬挂状；向斜槽谷地区岩溶发育程度与岩溶水水量等仅次于前者，而优于后者；北东向断层、灰岩与非灰岩接触带岩溶发育，往往是岩溶带，控制岩溶方向及岩溶水流向；北西、北北西向断层带岩溶现象也较普遍，一般控制短浅地下暗河的分布。

2 已建和在建高速岩溶发育规律分析总结

目前浙江省岩溶区内建成通车的高速有杭长、杭长北延、杭金衢、杭新景、黄衢南、绍诸、申苏浙皖等多条高速，在建的有千黄高速、杭州绕城西复线，设计阶段的有临建高速、杭金衢拓宽等工程。这些工程在勘察施工中积累了大量的地质资料，为本文展开岩溶规律的研究提供了坚实的基础。其中，杭长高速、杭长北延、申苏浙皖高速均位于浙江北部湖州境内，岩溶发育路段范围较少，零星分布，岩性以石炭－二叠系纯度较高的灰岩为主。杭金衢、杭新景、黄衢南高速主要位于浙西金华、衢州境内，岩溶发育路段范围大，揭示地层多样，各时代灰岩均有分布；杭金衢高速岩溶地层为寒武、奥陶系灰岩、白云岩，杭新景高速、黄衢南高速震旦、寒武、奥陶以及石炭、二叠系地层均有分布。千黄高速岩溶路段分布于杭州淳安境内，为寒武系灰岩。绍诸高速岩溶路段分布于绍兴城南路段，为震旦系灰岩。发达的高速路网基本覆盖了浙西北地区所有区市，沿线所揭示的岩溶发育类型齐全，其岩溶发育特征具有较好的代表性。

公路工程中，对于桥梁的勘察，有大量的钻探、物探工作，施工阶段更要进行逐桩钻探，因此桥梁的勘察资料非常丰富，有条件进行细化研究。桥址区多位于河谷、平原或山间盆地，单个结构物一般同属一个地貌单元，其地质、水文条件一致，在研究岩溶发育规律时可作为一个单元。在实际工程中也往往以每个桥梁为单位来评价其岩溶发育程度。本文以单个桥梁为单位，对高速公路桥梁勘察资料进行大量分析，并对27座中桥、大桥的逐桩钻探成果进行了统计(表1)。

研究区桥位场地岩溶类型均为覆盖型岩溶，岩溶的发育形态有以下特点：

(1)溶洞发育一般呈串珠状，垂直发育为主，多与地表溶隙、溶蚀沟槽连通，充填或半充填状，充填物较为单一，与上部覆盖层基本一致，水平向连通较少。许多钻孔表部揭示的溶洞实际为溶蚀沟槽的延伸。

(2)岩溶发育程度与深度密切相关，浅层岩溶发育，一定标高以下岩溶不发育，深度一般20～50 m(图2、图3)。

图2 浅层溶洞形态

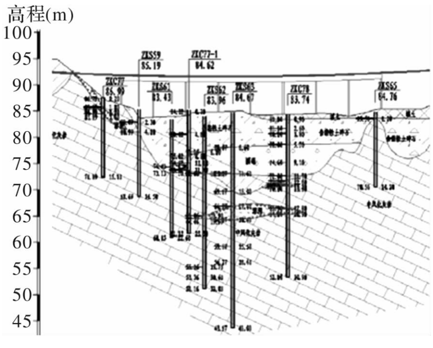

图3 东风水库大桥地质断面

(3)溶洞规模整体较小，目前钻孔揭示的最大单洞一般小于20 m，最大33.1 m，尚未发现有厅堂式大型岩溶洞穴。钻孔揭示岩溶率均在40%以下，大部分集中在20%以下，总岩溶率与最大单洞呈正相关。岩溶发育程度与地层年代相关性不强，寒武系地层样本最多，离散性也最大；石炭－

表 1　桥梁逐桩钻探揭示岩溶发育情况统计表

地质年代	所属项目	构筑物名称	钻孔数量	遇洞率/%	最大单洞/m	总岩溶率/%
三叠系	杭长北延	东风水库大桥	44	55	4.5	6.9
	杭长北延	化树坎 1 号桥	12	17	1.1	1.5
	杭长北延	胜庙堂大桥	10	90	10.8	20.4
二叠系	杭长北延	外山冲桥	50	56	9.4	18.4
	杭长北延	太平庙特大桥	57	75.4	30.3	33
	杭长	天子湖互通	53	24.5	8.6	4.1
石炭系	申苏浙皖	南太湖互通	97	89.7	18.3	26.8
	杭新景	铜山源高架桥	47	59.6	15.6	20.9
奥陶系	黄衢南	芳村互通	30	0	0	0
	杭新景	上徐桥	40	89.6	9.45	21.2
寒武系	黄衢南	何田溪 12 号大桥	48	66.7	29.2	24.5
	黄衢南	马金服务区	40	72.5	15.5	6.5
	黄衢南	下明濂大桥	14	21.4	2.1	1.3
	黄衢南	读经畈大桥	31	0	0	0
	黄衢南	开化互通	36	49	28.8	18.7
	黄衢南	马金溪大桥	44	29.5	5.1	3
	黄衢南	钨铁砂大桥	23	4.3	7.9	1.9
	杭新景	上方互通	24	58.3	10.8	18.3
	杭新景	河家边桥	12	33.3	2.1	10.8
	杭新景	柏林大桥	12	66.7	9	19.2
	杭新景	新源 2#桥	58	50	11.7	15.2
	杭新景	狮山村分离	12	50	11.9	7.8
	杭新景	池怀互通	40	35	6.1	18.4
	杭新景	杨林桥	15	90	24	38.6
	杭新景	上徐桥	5	40	8.6	17.8
	杭金衢	常山港特大桥	81	28.4	19.8	15
	千黄	汪宅互通	193	66	33.1	18.5

二叠系地层揭示单洞洞径在 8.5～30.3 m，而且总岩溶率不高的情况下单洞规模更大，但较寒武系地层来说并无明显的规模差异。

3　桥梁桩长设计辅助软件的设计实现

本文在总结现有岩溶发育规律的基础上，设计了一款用于岩溶桩长辅助设计的软件，用于实现对岩溶区拟建桥梁区域的勘察资料综合分析，帮助确定桥梁建设时的桩长。

3.1　软件功能设计

桩长设计辅助软件共设置文件编辑、桩长计算、二维仿真、三维仿真四大功能模块。其中文件编辑模块用于钻探、物探等资料的输入，其中钻探数据的为方便数据录入匹配了理正勘察软件数据库文件，可直接调取理正数据库文件。桩长计算软件参照《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63－2007)结合数据库读取的钻探数据进行桩力计算。二维仿真模块结合了 CAD 的二次开发技术，可辅助进行物探成果的人机交互解译，并将解译成果以虚拟钻孔的形式返回数据库。三维仿真模块为该软件的核心功能模块，用于将钻探以及物探解译的成果通过插值计算，获得岩溶体的三维形态，在输入桩基坐标及直径后，可根据岩溶形态与桩基的空间关系，获得建议桩长值(图 4)。

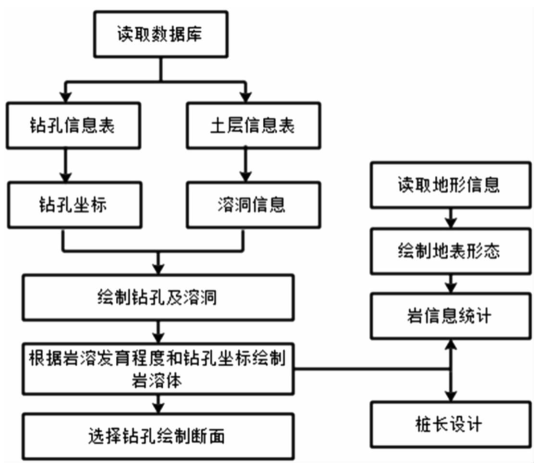

图 4　岩溶三维地质建模流程

软件采用 C/S 架构对整个系统进行功能实现，

部分功能基于 CAD 平台进行二次开发，系统架构主要分为交互层、功能逻辑层、模型算法层、数据管理层四部分(图 5)。

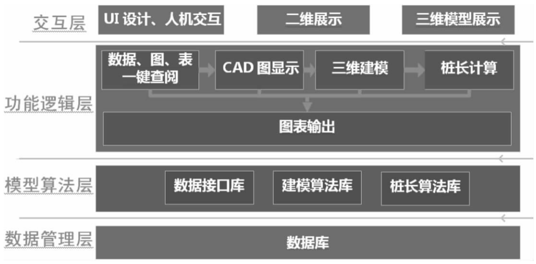

图 5 桥梁桩长设计辅助软件架构

(1)交互层：主要实现前台 UI 界面的设计和数据、图表的页面展示与人机的交互部分。包括数据的输入输出、三维地质模型的可视化展示等。

(2)功能逻辑层：主要包括各模块功能的具体实现。

(3)模型算法层：主要包括地质体三维建模的模型库以及桩长计算、建模等算法的库。

(4)数据管理层：主要利用数据库对所有涉及的数据进行统一分类的集中管理。

3.2 岩溶区三维地质模型

岩溶区三维地质模型的刻画是软件的核心功能，包括地表形态、基岩面以及溶洞的三维形态。

地表、基岩面的数据插值采用距离幂次反比法(IDW)，该方法是建立在区域化变量理论的基本原理基础上的，即假设待插值的空间点属性值在一定的研究范围内具有相关性。IDW 对于未采样点的估计值是未采样点属性真值的无偏估计。

对于溶洞三维形态刻画，基于钻探及物探解译的虚拟钻孔资料，边界以锥形尖灭，根据岩溶形态分布规律，进行以下条件的约束，使其更符合实际形态：

(1)钻孔揭示高度小于 20 m 的溶洞，相邻钻孔孔距小于 20 m，若标高相近可视为同一溶洞，孔距大于 20 m 则视为不同溶洞。(基于统计溶洞规模 80% 小于 20 m，以水平向为小规模岩溶发育主要方向的最不利因素考虑)

(2)钻孔揭示高度大于 20 m 的溶洞，相邻钻孔孔距不小于垂直洞高，标高在同一范围内，则视为相同溶洞，孔距大于垂直洞高，则视为不同溶洞。(基于岩溶发育呈串珠状，垂直方向为长轴方向的规律下，水平垂直长度一致的最不利因素考虑)

(3)基于岩溶发育呈串珠状，垂直方向为长轴方向的规律下，水平垂直长度一致的最不利因素考虑，纵向揭示大于 40 m 溶洞，横向若无约束边界，其延伸宽度最大等于纵向长度。

(4)基于实际岩溶形态(图 6)在桩基设计条件下的概化，对于连续溶洞间残留的夹层灰岩，由于其厚度薄，稳定性不足，无法作为桩基持力层，在溶洞刻画时将夹层上下溶洞归并为一层。图 7 为基于实际岩溶形态的桩基条件下的概化。

经运算后绘制的地层通过 DirectX 接口显示地

图 6 连续分布岩溶形态断面

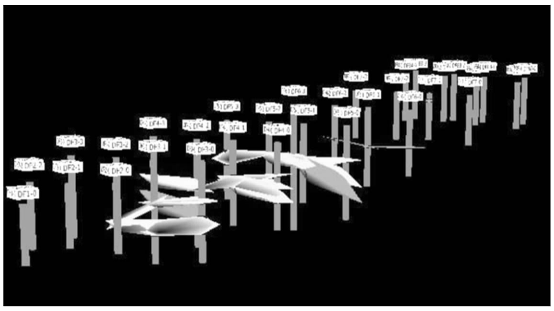

图 7 岩溶区三维地质模型(东风水库大桥)

层。DirectX，(Direct eXtension，简称 DX)是由微软公司创建的多媒体编程接口。由 C + +编程语言实现，遵循 COM。

4 结语

(1)浙江地区岩溶主要呈条带状分布于浙西北地区，按时代有三叠、二叠、石炭、奥陶、寒武、震旦系，岩溶发育程度受地形地貌、水文条件、地层岩性、构造等条件影响，从桥址区岩溶分析来看，整体岩溶发育规模均较小，最大可见溶洞仅 33.1 m，总体岩溶率大部分在 20% 以下，成因时代造成的差异性不明显。

(2)在桥梁桩长设计辅助软件的设计中，将浙江地区岩溶发育规律量化为具体参数，作为刻画岩溶三维地质建模的原则，在实际运行中，取得了较好的效果。对浙江地区岩溶区桥梁桩基设计的配跨长度选取、桩基类型选择、桩长确定有非常好的指导辅助作用，对于其它相似地区也具有指导意义。但该软件也有很多不足之处，比如由于钻孔数据密度有限，刻画的岩溶三维形态边角尖锐，与实际形态有差异；仅对浙江等岩溶发育规模较小的地区适用性较好，可通过更多地区的样本资料分析，拓展软件适用范围。

参考文献：

[1] 张军，周强新. 岩溶地区长嵌岩桩的优化设计[J]. 山西建筑，2010(7)：95 -96.

[2] 杭新景高速公路有限公司，浙江省交通规划设计研究院，中国地质大学(武汉). 浙江省高速公路建设岩溶勘察处置关键技术研究[R]. 杭州：浙江省交通规划设计研究院，2014：35 -37.

[3] 刘群安，康凯. 探究公路勘察设计与环境保护的关联[J]. 交通节能与环保，2017(2)：54－56.
[4] 曾斌，陈植华，罗明明，等. 衢南高速江山四都镇路基段隐伏岩溶发育特征及塌陷成因分析[J]. 安全与工程，2014(2)：23－26.
[5] 覃有军. 关于岩土工程勘察灰岩地区的浅层岩溶形态特征和对桩基勘察深度影响[J]. 地质勘测，2013(6)：272－273.
[6] 李章林，王平，张夏林. 距离幂次反比法的研究与应用[J]. 金属矿山，2008(4)：5－7.

Auxiliary Software for Bridge Pile Length Design Based on Karst Development Law in Zhejiang Province

SHAO Changjie[1], WU Weidong[2], ZHENG Shuning[1], CHEN Kanfu[1] and PENG Dingmao[1]
(1. *Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design & Research*, *Hangzhou* 310006, *China*; 2. *Zhejiang Hangxuan Highway Co. LTD.*, *Hangzhou* 310006, *China*)

Abstract: On the basis of fully studying the spatial distribution and development law of karst in Zhejiang Province, we carry out the statistical analysis of the expressway survey data in the existing karst areas in the province, and extract the characteristics of the karst development law in the bridge site area, and takes this as the core to develop the auxiliary soft parts of the bridge pile length design, and realizes the karst 3D in the bridge site area. Geological modeling and independent calculation of pile length.

Key words: karst; development law; 3D; geological model; pile length design; auxiliary software; Zhejiang