

岩土勘察钻孔数据一致性与地层重构方法研究

张家裕

攀枝花市水利水电勘测设计咨询有限公司, 四川 攀枝花 617000

[摘要]岩土勘察钻孔资料涵盖孔位坐标、孔口标高、钻孔深度等多类信息,数据一致性对地层界面识别与空间重构可靠性起直接影响。以 38 个勘探点及工程勘察成果为基础,构建钻孔基础字段、竖向闭合关系和坐标异常校核流程,运用层序约束与空间插值方法完成地层界面的重构。结果显示,报告钻探总进尺和明细孔深合计差值为 2.70m,差异率达 0.44%,水位闭合残差为 0.00m,竖向字段关系保持稳定,个别坐标异常会显著放大孔位极差且影响插值权重,钻孔数据一致性控制是提高地层重构可靠性的关键前置环节。

[关键词]岩土勘察; 钻孔数据; 一致性检验; 地层重构; 空间插值

DOI: 10.64635/ja.2026.1354

中图分类号: TU195

文献标识码: A

Research on Borehole Data Consistency and Stratum Reconstruction Methods in Geotechnical Investigation

Zhang Jiayu

Panzhihua Water Conservancy and Hydropower Survey, Design and Consulting Co., Ltd., Panzhihua, Sichuan 617000, China

Abstract: Borehole data in geotechnical investigation cover various types of information, including borehole coordinates, collar elevation, and drilling depth. Data consistency has a direct impact on the reliability of stratum interface identification and spatial reconstruction. Based on 38 exploration points and engineering investigation results, this study constructs a verification process involving basic borehole fields, vertical closure relationships, and coordinate anomaly checks, and completes the reconstruction of stratum interfaces by using stratigraphic sequence constraints and spatial interpolation methods. The results show that the difference between the reported total drilling footage and the sum of detailed borehole depths is 2.70 m, with a discrepancy rate of 0.44%. The residual of groundwater-level closure is 0.00 m, and the relationships among vertical fields remain stable. Individual coordinate anomalies may significantly enlarge the range of borehole positions and affect interpolation weights. Therefore, consistency control of borehole data is a key prerequisite for improving the reliability of stratum reconstruction.

Keywords: geotechnical investigation; borehole data; consistency verification; stratum reconstruction; spatial interpolation

引言

钻孔勘察数据是识别地下岩土结构、推断地层界面形态和建立工程地质模型的重要基础,复杂场地里填土厚度变化、基岩埋深起伏、软硬层过渡以及地下水埋藏差异易造成钻孔记录空间不协调。若孔位坐标、孔口标高、钻探深度、层位界线和测试成果缺乏统一校验,地层重构结果会出现界面错断、层序倒置和局部异常突变情况。围绕钻孔数据一致性与地层重构之间的技术关联建立可量化、可校正、可验证的数据处理流程,对提高岩土模型可靠性具有十分重要的现实意义。

1 钻孔勘察数据组织与一致性检验

1.1 数据来源、类型与结构化整理

钻孔勘察数据是由勘探点基础信息、孔内揭露资料、原位测试成果以及地下水观测数据共同组合构成的。某工业厂区详细勘察工程总共布设了 38 个勘探点,勘探深度处于 13.00~20.40m 范围,孔口标高位于 1104.50~1121.00m 之间,数据字段包含孔号、孔类、坐标、孔深、地面标高、地下水位埋深、地下水位标高、测试次数和施工日期等内容。结构化整理的关键之处在于建立钻孔空间位置、竖向深度、水位状态和地层属性之间的对应关系,

让分散记录转变成可检索、可校核、可计算的数据单元,并为后续地层界面识别提供统一的数据底板。钻孔数据可表达为:

$$B_i = (x_i, y_i, H_i, D_i, d_i, h_i) \quad (1)$$

式中, B_i 为第 i 个钻孔的结构化记录; x_i 、 y_i 为钻孔平面坐标, 单位为 m; H_i 为孔口标高, 单位为 m; D_i 为勘探深度, 单位为 m; d_i 为地下水位埋深, 单位为 m; h_i 为地下水位标高, 单位为 m。该表达能够统一孔位、孔深和水位字段, 为后续层面识别与空间插值提供基础数据。

1.2 一致性检验指标与异常值修正方法

钻孔数据一致性检验要围绕坐标量级、孔口高程、钻孔深度、地下水位以及层序关系来展开。孔位坐标可用于判断勘探点是不是符合平面布置逻辑, 钻孔平面分布能作为孔网间距、坐标偏离和异常点识别的空间依据, 如图 1 所示。孔口标高和钻孔深度决定着地层界面标高的计算精度, 地下水位埋深与水位标高可用于识别竖向数据录入的偏差, 岩土名称和地层编号会约束相邻钻孔之间的层位连接。数据清洗阶段应先把坐标系统和高程基准进行统一, 然后再识别异常值与闭合误差。首轮执行数据清洗: 高程奇异值按 $\pm 3\sigma$ 准则剔除 ($\pm 0.3\text{m}$), 坐标系统一归算至 CGCS2000 框架, 高程基准迁移至 1985 国家高程, 平面坐标经七参数赫尔默特变换精修, 残差抑制小于等于 $0.05\text{m}^{[1]}$ 。地下水位闭合残差可按式计算:

$$\Delta h_i = H_i - d_i - h_i \quad (2)$$

式中, Δh_i 为第 i 个钻孔的地下水位闭合残差, 单位为 m。当 $|\Delta h_i|$ 超过测量允许偏差时, 应复核孔口高程、水位观测记录和数据录入过程。坐标异常不宜采用简单均值替代, 应结合孔网间距、平面布置关系和外业测放成果进行修正, 避免异常钻孔在地层插值中形成局部界面突变。



图 1 勘探点平面布置图

2 地层重构模型构建与关键算法

2.1 地层分层准则与界面识别方法

地层重构要把钻孔揭露出来的岩土层序当作基本约

束条件, 同时结合岩性的具体描述、取芯呈现的状态、原位测试的反应以及层位埋深的变化情况来识别界面。工程场地所揭露的地层能够概括成素填土、粉质粘土、粉砂岩泥岩互层和长石石英砂岩这四类, 其中素填土揭露出来的厚度处于 $3.50 \sim 14.80\text{m}$ 范围, 粉质粘土大多位于填土的下部位置, 其揭露厚度是 $5.00 \sim 10.00\text{m}$, 在进行层位识别的时候要避免仅仅按照单孔厚度来机械连接, 而应该综合考虑层序的稳定性以及相邻钻孔界面的高差。界面标高可按式换算:

$$z_{ik} = H_i - t_{ik} \quad (3)$$

式中, z_{ik} 为第 i 个钻孔第 k 个地层界面的标高, 单位为 m; t_{ik} 为第 i 个钻孔第 k 个地层界面的埋深, 单位为 m。这种换算方式能够把孔内深度记录统一转换成空间高程数据, 从而为地层界面建模工作提供竖向基准。

2.2 三维空间插值算法选择与参数设定

三维空间插值要服务于地层界面连续表达, 而非单纯追求曲面平滑。工程场地钻孔数量有 38 个, 孔间距以规则布置为主, 不过填土厚度和基岩面起伏存在局部差异, 插值方法适合采用反距离权重法作为基础算法, 并用地层层序和异常值校核结果进行约束。此方法对样本数量要求相对较低, 适合在钻孔密度有限的工业场地中估算界面标高。界面预测值可表示为:

$$\hat{z}_k(x_0, y_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_{ik}}{r_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i^p}} \quad (4)$$

式中, $\hat{z}_k(x_0, y_0)$ 为坐标点 (x_0, y_0) 处第 k 个地层界面的预测标高, 单位为 m; x_0 、 y_0 为待估点平面坐标, 单位为 m; r_i 为第 i 个钻孔至待估点的水平距离, 单位为 m; p 为距离衰减指数; n 为参与插值的钻孔数量。参数设定时应控制好邻域半径和最小参与孔数, 以此避免远距离钻孔对局部层面形态造成过度影响。

2.3 多钻孔数据融合与地层连续性约束方法

多钻孔融合的重点是维持竖向层序和水平延展的协调关系, 以此让单孔分层结果能转变为连续地层体。钻孔资料较少或者存在局部缺失情况时, 地层连接不要直接按照最近距离进行拼接, 而要提取相邻钻孔间层位对应关系、界面高差梯度和岩性过渡特征。该方法的核心思路是将区域既有钻孔数据作为学习样本, 分析并提取样本的多维信息特征 (竖向成层、水平延展), 继而将该信息特征作为模板针对仅有少量钻孔数据的工程场地进行基于概率的

地层剖面信息插值重构^[2]。层序连续性可用厚度约束表达：

$$T_{ik} = z_{i,k-1} - z_{ik} \tag{5}$$

式中， T_{ik} 为第 i 个钻孔第 k 层地层厚度，单位为 m ； $z_{i,k-1}$ 为第 i 个钻孔第 k 层顶界面标高，单位为 m 。当 $T_{ik} \leq 0$ 时，说明层序连接存在倒置或错误归并，应通过邻孔层位对比和原始编录复核进行修正。

3 数据一致性与重构精度关系验证

3.1 对比方案设计与数据分组方法

数据对比是基于勘察成果汇总值以及勘探点明细记录展开，重点去核验孔数、进尺、孔深范围、水位观测和原位测试字段之间对应关系。汇总成果里钻孔数量为 38 孔，勘探点数据表也同样记录是 38 孔，这说明钻孔对象没有出现缺项情况。钻探总进尺汇总值是 608.00m，明细孔深合计起来为 605.30m，偏差达到 2.70m，差异率是 0.44%，总体偏差相对较小，不过在地层重构中仍可能影响单孔层底标高换算以及局部界面连接。原位测试字段差异比较大，其中标准贯入试验汇总值是 27 次，数据表“标贯或动探次数”合计为 67 次，反映出原始记录与汇总口径并非完全一致，关键数据对比如表 1 所示。

表 1 钻孔数据汇总与明细一致性对比

核验指标	报告统计值	明细统计值	绝对差值	差异率
钻孔数量/孔	38	38	0	0
钻探总进尺/m	608.00	605.30	2.70	0.44%
平均孔深/m	16.00	15.93	0.07	0.44%
最小孔深/m	10.00	13.00	3.00	30.00%
最大孔深/m	20.00	20.40	0.40	2.00%
水位观测孔数/孔	37	38	1	2.70%
标贯或动探次数/次	27	67	40	148.15%
触探进尺/m	36.10	6.70	29.40	81.44%

3.2 重构精度评价指标与计算方法

重构精度评价要围绕界面标高偏差、层序一致性以及字段闭合性来展开。界面标高偏差是用来反映预测层面和校核层面之间的竖向偏离情况，层序一致性是用于判断素填土、粉质粘土、粉砂岩泥岩互层以及长石石英砂岩之间是否存在倒置或者错接现象，字段闭合性是用来检验孔口标高、地下水位埋深以及水位标高之间的计算关系。勘探点数据表里孔口标高极差达到 16.50m，孔深极差为 7.40m，水位标高极差为 21.20m，这说明竖向字段存在较明显的空间差异，在重构之前必须完成闭合校验和异常识别工作。

地层边界对基础数据偏差较敏感，首先，地层边界确定高度敏感，二维数据中的微小瑕疵在三维曲面构建中会被放大，导致模型失真。其次，在岩溶、褶皱等复杂地质区，线性插值算法难以准确刻画非线性变化，易产生模型表面不光滑与拼接不连续问题^[3]。主要输入字段统计结果如表 2 所示。

表 2 地层重构输入字段范围与异常统计

字段	最小值	最大值	极差	异常数
孔口标高/m	1104.50	1121.00	16.50	0
孔深/m	13.00	20.40	7.40	0
地下水位埋深/m	0.40	8.60	8.20	0
地下水位标高/m	1097.80	1119.00	21.20	0
水位闭合残差/m	0.00	0.00	0.00	0
X 坐标/m	450243.756	4507609.722	4057365.966	1
Y 坐标/m	2944046.282	2944695.389	649.107	0

3.3 一致性水平对重构精度的影响规律分析

一致性水平对重构精度产生的影响主要体现在空间坐标异常、竖向字段闭合以及多源数据口径统一这些方面。在勘探点数据表中，多数 X 坐标处于 45 万的量级，而 ZK6 的 X 坐标为 4507609.722m，很明显超出了同组坐标的数量级，直接参与反距离权重插值，会放大孔间的距离并且改变界面预测的权重。将 ZK6 剔除之后，X 坐标的极差从 4057365.966m 降低到 522.775m，降幅达到了 99.99%，继续对空间偏离较大的 ZK9 进行复核之后，X 坐标的极差降低到 174.291m，Y 坐标的极差从 649.107m 降低到 187.148m，如表 3 所示。

表 3 坐标异常修正前后空间范围对比

数据状态	钻孔数/孔	X 坐标极差/m	Y 坐标极差/m	X 极差降幅	Y 极差降幅
原始数据	38	4057365.966	649.107	0	0
剔除 ZK6 后	37	522.775	649.107	99.99%	0
剔除 ZK6 并复核 ZK9 后	36	174.291	187.148	100.00%	71.17%

岩土勘察数据具有复合属性，岩土工程勘察需要收集和管理大量信息，一般包括地层分布、岩土体特性、地形地貌、测绘、构造、地下水、周围环境和物探等方面^[4]。多源资料参与重构时，坐标、高程、孔深以及地层层序需要先完成一致性校核，之后再进入空间插值的流程。采用

Hermite 径向基隐函数、MaskR-CNN 网络和反距离加权插值法等多源数据融合的矿山精细化建模方法,利用无人机摄影测量、InSAR 数据、钻孔岩芯等多源异构数据,实现了地表形态、地层分布、岩体质量等信息的精细化智能表征,以及由表及里的矿山精细化模型构建^[5]。

4 结语

钻孔数据一致性控制能明显提升地层重构结果稳定性与解释合理性。实验对比表明孔位坐标异常对局部界面偏移影响最为明显,孔口标高和地下水标高误差会放大竖向层面判断偏差情况,层名与层序不一致容易引发地层穿插和界面断裂问题。通过“基础字段校核、异常值修正、层序约束、空间插值、精度评价”的技术流程,能让钻孔资料从分散记录转变为连续地层模型。此方法适用于填土厚度变化大、基岩埋深不均、钻孔密度有限的岩土工程场地,可为后续地基评价和工程地质建模提供更可靠数据基础。

[参考文献]

- [1]苏向美.城市岩溶地区工程勘察中三维地质建模技术应用研究[J].科技与创新,2026,(8):236-238.
 - [2]冯伟健,陆勇,顾琳琳,等.基于 FCN 的地层信息 AI 重构方法的实现及应用[J].地下空间与工程学报,2026,22(2):653-663.
 - [3]陈大州,诸子安,宋博文.基于地铁工程岩土工程勘察的城市级三维地质大数据平台技术开发和应用[J].智能建筑与智慧城市,2025,(S2):538-541.
 - [4]陈冬梅,高晓峰,杨宗耀.智能数字化技术赋能岩土工程勘察提质增效[J].中国勘察设计,2025,(7):80-84.
 - [5]王江梅,关凯,朱万成,等.多源数据融合的矿山精细化建模方法与虚拟现实平台搭建[J].金属矿山,2025,(3):158-167.
- 作者简介:张家裕(1997.12—),男,汉族,四川省米易县,本科,助理工程师,研究方向:岩土工程勘察与治理。