

# 基于 Bentley 的路基支挡智能化设计方法

汤宏伟<sup>1</sup>, 耿昕钰<sup>1</sup>, 陈宏拓<sup>1</sup>, 谭弘灿<sup>1</sup>, 曾凡云<sup>1</sup>, 林佳瑞<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南长沙, 410014;

2. 清华大学土木工程系, 北京, 100084)

**摘要:** 为改善路基支挡设计低效, 人工布设繁琐的设计体验, 弥补 BIM 软件中模型携带属性不全的缺陷, 该文结合规范归纳了支挡布置边界条件与流程, 研究了模型属性交付的要求, 分析了传统设计软件中的痛点。提出了支挡自动布设算法, 可沿路线逐桩号复核挡墙布置条件, 匹配挡墙类型与墙高, 并对结果进行分段归并与墙底坡度平滑处理。同时, 基于 Bentley OpenRoads Designer 二次开发了支挡设计插件, 内置挡墙图集, 并实现了路基支挡智能化设计功能。应用表明, 本文方法可自动生成施工图表以及包含丰富属性信息的三维 BIM 模型, 相关成果完全符合行业标准要求, 可应用于施工运维全过程管理。该研究成果为提升设计效率, 实现三维可视化与模型信息交付等方面较现有设计方式具有明显优势。

**关键词:** 道路工程; 支挡设计; 二次开发; BIM 设计; OpenRoads Designer; 数字化; 智能化

**中图分类号:** U445.7 **文献标志码:** A

支挡结构是一种受力结构, 能够抵御原状岩土体和人工填埋和砌筑的结构体发生变形和破坏, 可有效抵挡土体产生的侧向土压力<sup>[1]</sup>。在公路、铁路等工程中应用非常广泛, 可收缩坡脚, 提高路基的边坡稳定性, 并有效控制断面填挖土石方量<sup>[2]</sup>与用地范围, 规避高边坡, 高路堑等不良现象的产生。我国幅员辽阔, 山地丘陵地质占据全国土地面积的 43%<sup>[3]</sup>, 当公路, 铁路等线型工程穿越该类地形时, 由于沟谷陡峭, 高差大, 水文条件复杂, 往往需要大量采用支挡结构<sup>[1]</sup>。

然而, 传统支挡设计过程需要对沿线断面进行逐个剖切以判断挡墙放置条件, 断面数量非常庞大, 需要反复核验挡墙底部入岩深度、墙趾埋置宽度等, 存在大量重复性的人工操作, 效率低下且易出错<sup>[4]</sup>, 存在反复迭代的可能, 同时仍需处理挡墙分段等细节问题, 十分繁琐复杂, 难以满足大型线型工程动辄几十甚至数百公里的支挡快速设计需求。

国内学者针尝试使用计算机软件开发的思路替代重复性的人工计算, 陆洋<sup>[4]</sup>利用可视化编程工具 Subassembly Composer 与 Dynamo for Civil3D 实现挡墙段落随边坡与地形的自适应贴合, 但仅支持单一类型的挡土墙布设, 实际公路项目一般为多种挡土墙类型组合使用。罗钧友<sup>[5]</sup>基于 Subassembly Composer 和 VB 编程语言提炼了挡土墙的参数化和可视化的设计方法, 并应用到横断面装配当中, 生成 BIM 道路模型, 但其仅可正向设置挡土墙高度,

无法复核该高度是否满足地形插入要求。靳猛<sup>[6]</sup>充分利用 Revit 软件平台的族库功能, 建立了包含支挡结构在内的参数化元件库, 为设计师直接调用相应元件进行拼装提供了方便, 但无法确保挡土墙底部平滑或阶梯连接的要求。因此, 现有研究成果仍难以实现路基支挡全线的智能布设, 缺乏完整的 BIM 模型创建与成果物输出成套正向设计解决方案。

本文针对线性工程中的路基支挡结构, 基于 Bentley 平台下的 OpenRoads Designer 进行了二次开发, 内置了挡墙国标图集, 并创造性地提出了支挡结构智能布设的算法, 可依据地形条件与规范图集自动判定挡墙放置位置, 并对其进行台阶划分或者坡度处理使其满足规范要求, 从而实现一键布设, 可显著提高设计效率。自动布设结果经实际项目验证误差较小, 可基于三维模型一键生成施工图纸与工程量表, 满足二维交付要求。三维模型携带有符合国家标准要求的属性信息, 可无缝对接施工运维管理平台, 支撑全生命周期的应用价值。本文所述方法在设计效率, 三维可视化与模型信息等方面较传统二维设计方式有相当的提升效果, 是交通行业中 BIM 正向设计的典型案例, 在公路, 铁路等工程行业具备较高的推广价值。

## 1 路基支挡设计与交付概述

### 1.1 路基支挡设计流程

路基支挡结构一般设计流程应先进行挡墙标准

收稿日期: 2023-mm-dd

基金项目: 国家自然科学基金重大项目课题(72091512)、面上项目(52378306)

作者简介: 汤宏伟(1993—), 男, 硕士

通信作者: 林佳瑞(1987—), 男, 副研究员, E-mail: lin611@tsinghua.edu.cn

图集准备。即根据抗震设防烈度, 填土内摩擦角, 基地摩擦系数, 挡墙类型等边界条件, 使墙高在一定范围内变化, 如取 2m、2.5m、3m 等, 构建上部土体与挡墙的计算力学模型, 理论求解土体中的破裂面, 并验算不同挡墙高度下满足抗滑稳定性与抗倾覆稳定性的断面尺寸。图集可同时保障边坡稳定性与支挡结构自身稳定性, 是支挡设计的前提基础。

实际项目中, 如某位置因遭遇不良地质或者高边坡等条件易发生边坡失稳, 或者用地范围侵占房屋等环境敏感区, 可在该位置布置挡土墙以达到加固边坡或收缩坡脚的目的。挡墙基本形式包括路肩墙, 路堑墙, 路堤墙, 护脚墙等, 根据《公路路基设计规范》(JTG D30-2015)<sup>[7]</sup>, 挡土墙布置规定地形需满足墙底襟边宽度  $W_{re}$  与挡墙埋深  $D_r$  的最小值要求, 如图 1, 图中  $H_r$  为挡墙高度,  $W_{p/2}$  为半幅路面宽度。后续仍需根据该处地质情况复核挡墙处地基承载力是否满足图集要求, 如不满足则应进行换填等地基处理措施。沿路线逐桩号复核是否需布置挡墙以及是否满足挡墙布设条件, 直至结束。

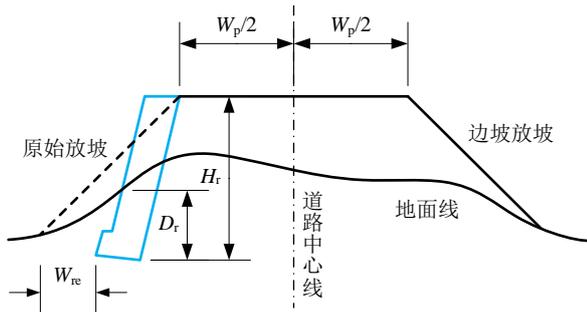


图 1 路基支挡示意图

## 1.2 设计 BIM 成果交付要求

建筑信息模型(building information modeling, BIM)是一种以 3D 数字技术为基础的, 集建设工程设计、施工、管理为一体的新方法<sup>[8]</sup>, 属性信息是 BIM 技术的重要要素, 胡振中<sup>[9]</sup>指出 BIM 可作为提取、交换与管理建筑信息的理想媒介, 在建筑行业的知识获取与管理中发挥重要作用。Justo<sup>[10]</sup>利用点云技术通过扫描成像生成了符合 IFC 工程数据交换标准的桁架桥梁模型。周一<sup>[11]</sup>基于 IFC 标准提出了一个地铁保护信息模型(MPIM), 实现了地铁保护项目的信息集成和辅助对地铁外部项目的快速评价。

交通运输部在 2021 年发布了《公路工程信息模型应用统一标准》(JTG/T 2420-2021)<sup>[12]</sup>、《公路工程设计信息模型应用标准》(JTG/T 2421-2021)<sup>[13]</sup>、《公路工程施工信息模型应用标准》(JTG/T 2422-2021)<sup>[14]</sup>三部公路工程 BIM 标准, 奠定了 BIM 技术在公路工程项目中大规模推广使用的基础, 规范了

BIM 设计交付成果的基本准则, 保障了三维模型在设计, 施工, 运维的全生命周期中的信息统一。

《公路工程设计信息模型应用标准》(JTG/T 2421-2021)<sup>[13]</sup>, 对不同模型精细度(LOD, Level of Definition, 简称 L)包含的信息内容和深度进行了较为详细的划分, 如表 1 所示。其中, L2.0 对应方案阶段或初步设计阶段, L3.0 主要对应施工图设计阶段, 表中“▲”表示“应包括的信息”, “△”表示“宜包括的信息”, “○”表示“可包括的信息”。

表 1 不同精细度下的属性信息

属性	信息类型	L2.0	L3.0
标识码	标识信息	○	○
分类编码	标识信息	△	▲
起点桩号	位置信息	▲	▲
终点桩号	位置信息	▲	▲
位置	位置信息	▲	▲
墙长	尺寸信息	▲	▲
墙高	尺寸信息	▲	▲
顶宽	尺寸信息	▲	▲
底宽	尺寸信息	▲	▲
衡重台宽	尺寸信息	▲	▲
墙趾宽	尺寸信息	▲	▲
墙趾高	尺寸信息	▲	▲
墙面坡率	尺寸信息	△	▲
墙背坡率	尺寸信息	△	▲
墙底坡率	尺寸信息	△	▲
片(块)石强度等级	设计信息	△	▲
片(块)石用量	设计信息	△	▲
混凝土强度等级	设计信息	△	▲
混凝土用量	设计信息	△	▲
钢筋牌号	设计信息	△	▲
钢筋用量	设计信息	△	▲

## 1.3 现有设计软件的不足

市面上已有针对路基支挡的设计或者建模软件, 如纬地<sup>[15]</sup>, ORD<sup>[16]</sup>等, 对其进行调研后梳理了各软件在正向设计功能以及模型图表输出的主要特点与缺陷, 如表 2 所示。

表 2 现有软件特点与缺陷

软件名称	软件类型	主要特点	主要缺陷
纬地	2D/3D	与 CAD 兼容, 支持各类挡墙图集定制, 可生成模型, 施工图表, 在国内市场已平稳运行二十余年	1 仅支持逐段手动布设, 无法全线自动布设 2 原生模板无法进行部分细部工程量输出, 如排水管, 锥坡填土等 3 属性信息输出不满足 BIM 交付标准, 如图 2
ORD	3D	Bentley 下道路设计的软件, 具有路线, 路基路面等专业的设计与建模功能, 专业齐全	1 挡土墙组件耦合在路基路面中, 定制复杂。 2 挡墙基于断面规则放置, 无法手动快速调整 3 无自动生成图表功能, 模型属性不满足 BIM 交付标准

基本信息	
项目名称	屏山至书楼
项目类型	101   公路主线
模型类型	路基
路幅	左幅
模型参数	
名称	路堤墙
部件参数	
起点桩号	K6+580
终点桩号	K6+586
类型	S215衡重式路肩墙
半幅宽度	5.000000
设计荷载	公路二级
内摩擦角	35.000000
地基承载力	470.000000
墙高	8.843934
BIM编码	
BIM编码	17b2b6e5-3767-4f40-b3b1-eb8

图2 纬地支挡三维模型挂接信息

## 2 路基支挡智能化设计

为解决现有支挡结构设计中的痛点以及配套设计软件的缺陷，经过完备的功能需求分析，基于 Bentley 平台下的 OpenRoads Designer，利用 C#与 C++语言，二次开发了支挡设计插件，内嵌了智能化布设算法，大大提高了批量布设路基挡墙的设计效率。

### 2.1 功能需求分析

前期已对路基支挡设计流程以及要点进行了系统性梳理总结，明确了 BIM 模型属性交付的要求，调研了常用设计软件的主要特点以及缺陷。汇总整合后，对软件需要具备的功能模块，以及各模块细致的功能点进行了策划与梳理，如图3所示。

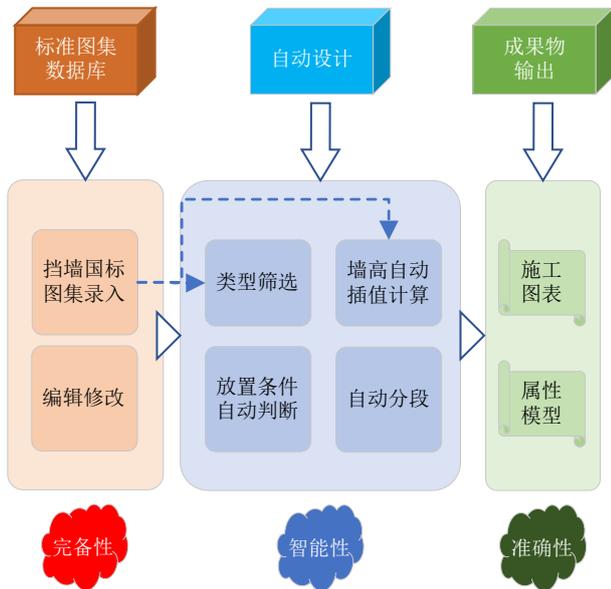


图3 需求分析与功能策划

挡墙标准图集是进行支挡自动设计的数据基础，故需包含标准图集数据库的功能模块，本模块需要提前将完备的挡土墙国家标准图集(17J008)的数据进行录入，以便于后期的挡墙类型筛选以及墙高自动插值计算。由于图集与规范会不断更新，且在具

体项目中可能对挡墙图集的尺寸进行调整，故在本模块中还需集成相应的编辑修改，以及数据管理的功能。

挡墙自动设计为本软件的核心功能模块，本模块旨在解决传统设计中的痛点，即需要处理逐桩切取断面并逐段手动布设挡墙造成的效率低下问题，突出智能特性。需通过布设规则对数据库的大量挡墙数据进行类型筛选与优先级排序，以明确项目中具体应使用的挡墙类型。由于挡墙图集中墙高均为整数，实际项目中的合适墙高需要进行插值精细处理。软件布设结果需满足规范中襟边宽度与埋深的要求，且应规避人工划分挡墙段落的工作量，设计结果应满足墙底纵坡的要求，且最终自动布设结果应支持手动编辑调整。

最后的成果物输出模块，应准确输出支挡的平、立、剖面图图纸与工程量表格，满足二维交付的要求，同时三维模型中需携带符合行业标准要求的属性信息，可应用于施工运维全过程管理。

### 2.2 智能化布设算法实现

自动设计为本软件的核心模块，挡墙自动布设算法流程如图4，下面对算法的实现进行详细解释说明。

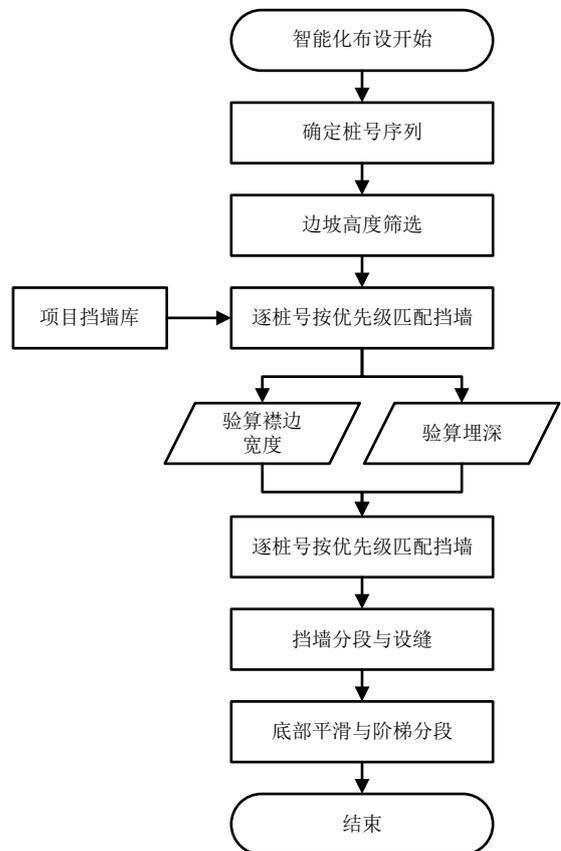


图4 挡墙自动布设算法流程图

#### 1) 连续挡墙布置的离散化处理

将道路全线进行离散化操作，按 1m 间距形成桩号序列，基于桩号序列中的位置进行剖切，可得到的每个位置的路基横断面，此为挡墙布置的基本边界条件。如图 5 所示，包含此位置的地形剖切线，原始路基路面以及边坡放坡的情况，其中  $H_s$  为边坡高度。

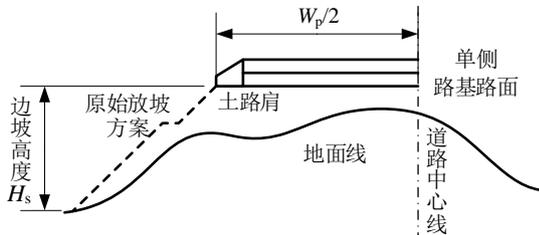


图 5 挡墙放置初始边界条件

### 2) 边坡高度筛选与二分法加速试算

公路设计中布置挡墙的一个主要目的为收缩坡脚，对放坡较远的边坡进行收坡处理，由于挡墙造价成本较高，当边坡高度较低或者放坡范围不远时可尽可能利用自然放坡方案，此时工程总造价较为经济合理。本系统中已内置边坡高度临界值  $H_{sc}$ ，用户可对于不同项目指定特定的  $H_{sc}$ 。记  $H_{si}$  为第  $i$  个桩号位置的边坡高度，对于高度小于  $H_{sc}$  的边坡，不纳入挡墙布置的范围，仅将高度大于  $H_{sc}$  的桩号序列纳入考虑集合范围。

对于已筛选出的项目挡土墙图集，在自动布设规则定制时已为每种类型的挡土墙指定了对应的优先级。记  $H_{vj}$  为项目挡墙库第  $j$  个图集集中的第  $k$  种高度，对于边坡高度符合要求的桩号序列，按优先级从高到低的类型匹配挡墙，并可根据襟边宽度与埋深要求判断挡墙图集集中的各类高度是否符合放置条件，如图 6。对于桩号序列  $S_i$  的位置，由于挡墙高度越高时放置条件越容易满足，故可使用二分法方式加速求解每个桩号断面满足布设条件的挡墙类型

与其临界墙高  $H_{ci}$ ，直至上下界之差满足精度要求为止，如图 7。桩号序列中的部分位置亦可能出现由于地形限制导致无任何匹配挡墙的情况，如  $S_2$  桩号位置。

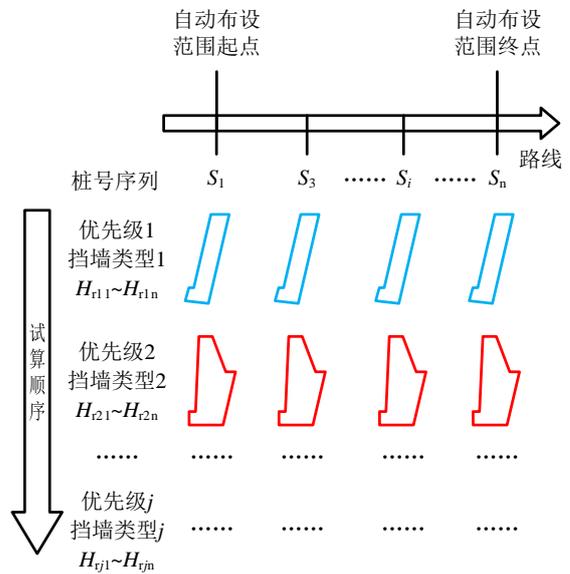


图 6 挡墙类型与高度匹配

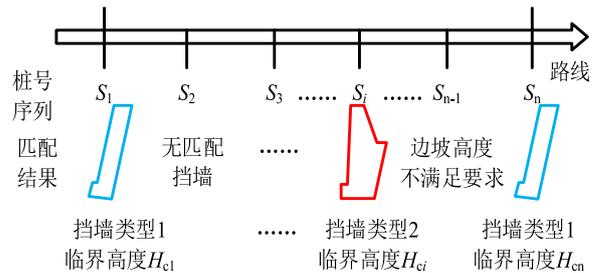


图 7 挡墙匹配与计算结果

### 3) 挡墙方案分段与设缝

依据各桩号上匹配的类型，可以划分出挡墙分段，基本原则为若连续桩号序列试算结果相同时可划分为同一分段，基于分段结果将桩号序列进行重新编号，如图 8 所示。

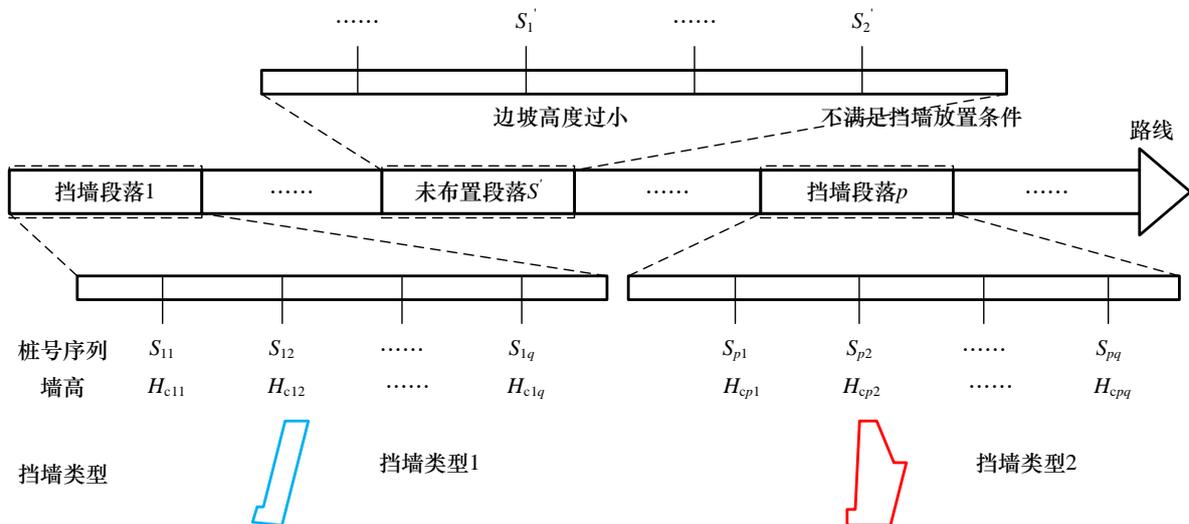
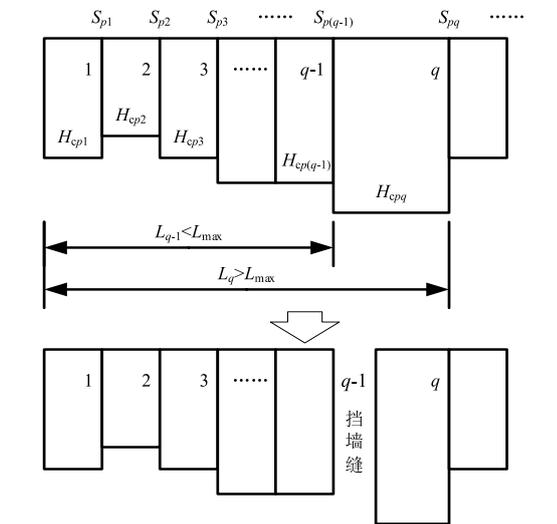


图 8 挡墙分段

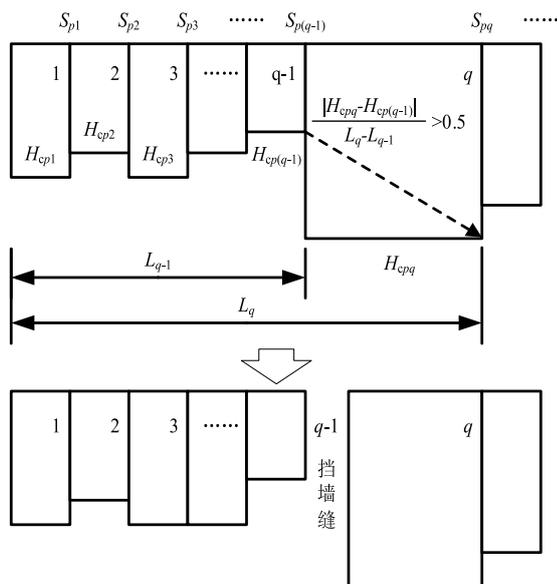
挡墙段落 1 中  $S_{11}$  至  $S_{1q}$  每个桩号挡墙试算结果均为挡墙类型 1, 算得的临界墙高为  $H_{c11}$  至  $H_{c1q}$ ; 挡墙段落  $p$  中  $S_{p1}$  至  $S_{pq}$  每个桩号挡墙试算结果均为挡墙类型 2, 算得的临界墙高为  $H_{cp1}$  至  $H_{cpq}$ 。部分桩号序列因边坡高度或无匹配挡墙原因已被筛选过滤掉, 如  $S'_1$  与  $S'_2$ 。

挡墙长度过长时应设置构造缝, 防止沉降不均匀。挡墙最大分段长度记为  $L_{max}$ , 本值已内置在交互界面中。以第  $p$  段挡墙为例, 如到第  $q$  个位置其累计长度已大于  $L_{max}$ , 则需要进行段落切分, 在  $q-1$  位置处设挡墙缝。如图 9 (a) 所示。

挡墙墙底坡度不宜过大, 若某两截面间墙底形成坡度发生较大变化, 亦应进行段落切分, 如图 9 (b) 所示, 需满足公式(1)的要求。



(a) 依据挡墙分段长度切分



(b) 依据坡度判断进行长度切分

图 9 挡墙段落切分

$$\frac{|H_{cpq} - H_{cp(q-1)}|}{(L_q - L_{q-1})} > 0.5 \quad (1)$$

#### 4) 基于包络线的底部平滑化与台阶处理

经过分段后每段计算的底部参差不齐, 不符合挡土墙段内墙底坡度的要求, 需要对底部进行平滑化或阶梯分段的处理, 如图 10 所示。将现有桩号段落从立面图角度对布设段进行平滑化处理, 以分段与设缝后的某段挡墙段落(第  $p$  段)为例进行说明。

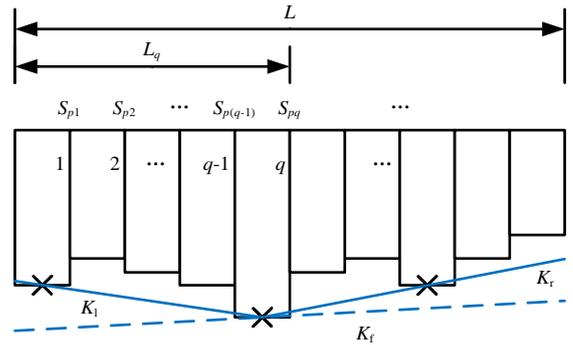


图 10 平滑化处理挡墙段落

找到本段挡墙段落中墙高最大的墙底位置, 记其在桩号  $S_{p(q-1)}$  与  $S_{pq}$  之间; 找到左右侧包络坡率  $K_l$  与  $K_r$ , 即保证所有墙底都位于包络线之内。利用桩号范围做加权平均得到平滑后坡率, 如公式(2)所示:

$$K_f = \frac{K_l \times L_q + K_r \times (L - L_q)}{L} \quad (2)$$

$K_f$  即为最终计算坡率, 若墙底纵坡依然大于限值, 则将其以  $K_f$  底部包络线中点为界划分为台阶式, 如图 11 所示。后续基于高度调整后的离散化断面结果放样形成最终连续的挡墙实体模型, 并赋予相应属性。

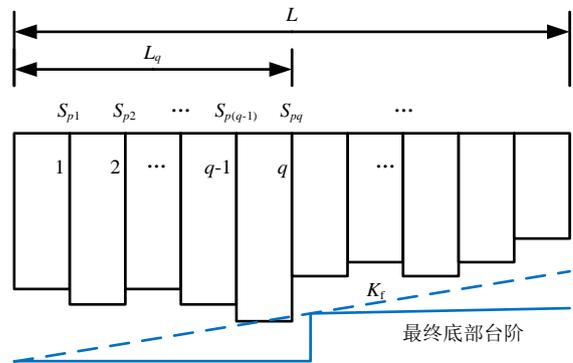


图 11 挡墙底部台阶处理

### 2.3 软件使用流程

软件使用流程如图 12 所示。构建项目挡墙库后, 将筛选后挡墙图集按一定优先级顺序添加进

入挡墙自动布置的原则，并可针对每种图集配置其设置参数，如埋深范围，分段范围，墙高与分段迭代步距等。

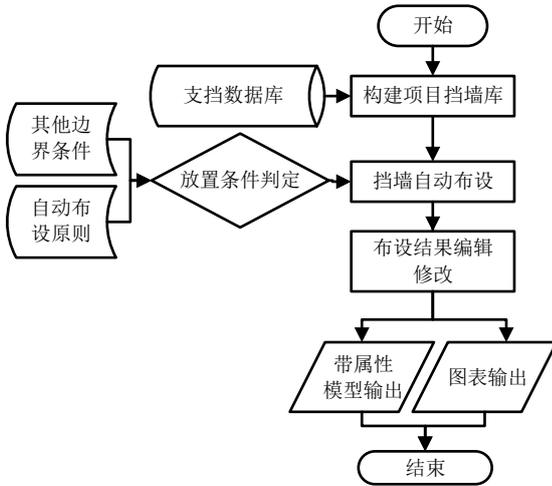


图 12 软件使用流程图

利用图集与布置规则完成支挡自动布置后，仍可能存在部分位置侵入房屋或基本农田等环境敏感区，挡墙段的实际地质数据亦可能不满足挡墙下地基承载力的要求，此时仍可对挡墙进行编辑调整，灵活控制其范围或高度。

编辑调整均满足各项要求后，即可进行相关成果物的输出。成果物包括传统二维设计成果图纸与工程量表，相关三维模型亦已按照 BIM 标准赋予了编码以及属性，具备进入各类施工运维管理平台的条件，详见本文第 3 节。

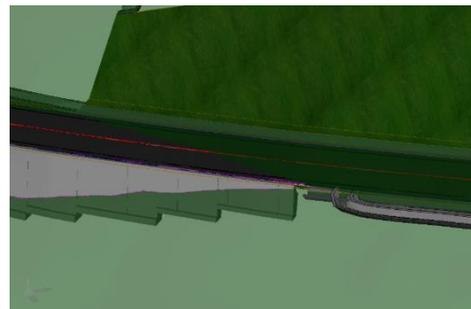
### 3 工程实例验证

#### 3.1 工程概况与设计成果

S215 屏山县屏山镇至书楼镇段新建工程，该项目由中国电建集团中南勘测设计研究院承担初步设计工作，路线起点位于国道 G353 与屏山县金沙江大道交叉口处，终点位于屏山县书楼镇，公路等级为二级公路，设计速度为 60km/h。利用屏山至鸭池 13.4km 的段落进行本文智能化算法实测，输出布置结果并与二维设计结果进行对比分析，二维设计为使用纬地挡土墙设计系统进行辅助设计以及图表输出，挡墙类型为使用频率较高的衡重式肩墙。

衡重式路肩墙  $H_r$  高度为 3-13 米。进行挡墙布置时，路线左右侧边坡高度临界值均取为 15 米，支挡段最小分段长度为 5 米，最大分段长度 15 米，墙高和分段迭代步距均为 0.5 米。

使用开发功能共自动布置挡墙 1386m，平均墙高 6.88m，局部自动布置模型以及模型携带属性信息如图 13 所示，属性为模型生成时自动附加，以红色三角标注了表 1 中陈列的具体数值，仍可对其进行进一步编辑修改。可知已根据工程情况自动赋予相应位置、尺寸、和材质等属性，减少了传统三维建模后大量的手动赋属性工作，满足了 1.2 节描述的 BIM 交付的要求，可继续应用于后期的施工运维全过程管理，弥补了纬地与 ORD 软件中的缺陷。



(a) 挡墙三维布置结果

布置数据	
标识信息	
▲ 标识码	111702
▲ 分类编码	18-02.03.01.01
绑定图集	
挡墙备注	衡重式路肩墙
挡墙类型	路肩墙
内摩擦角	30.0000
F 表特征值	6000
是否浸水	False
公路等级	公路 I、II 级
抗震烈度	7
摩擦系数	0.4000
道路中心线 SysID	{1E6AF44B-121F-4457-8240-E0812F460ED1}
▲ 道路左侧	True
地形交线 ID	
放坡线 ID	111701
几何参数	
▲ 墙长	5 m
▲ 墙高	5.046 m
▲ 起点墙高	5.0607 m
▲ 终点墙高	5.0313 m
▲ 墙顶宽	0.5 m
▲ 墙底宽	1.52 m
▲ 衡重台宽度	0.4 m
▲ 墙趾宽度	0.25 m
▲ 墙趾高度	0.5 m
▲ 墙面坡度	20.0000
▲ 墙背坡度	3.1250
▲ 墙底坡度	0.0000
GUID	a74bf449-c465-42a0-bdf6-6a631443c468
断面信息	
桩号范围	
▲ 起点桩号	K 1+179.000
▲ 终点桩号	K 1+184.000

(b) 布置数据，对应标识信息、位置信息和尺寸信息栏

施工信息	
挡墙墙身	
▲ 材料	C20 混凝土
▲ 体积	29.15 m³
台阶基础	
材料	C20 混凝土
体积	0
钢筋	
▲ 牌号	φ 200
▲ 数量	46
防排水	
砂砾反滤层	7.5 m³
土工布	30 m²
排水垫	0 m²

(c) 施工信息，对应设计信息栏

图 13 挡墙模型属性信息

#### 3.2 图表输出与工程量对比分析

对布设挡墙进行工程量表输出，开发成果与现有软件工程量种类对比如表3所示。可见开发成果涵盖了部分纬地以及 ORD 软件无法得到的条目，如排水管、锥坡填土、空心六角砖等数据。弥补了 1.3 节所指出的现有软件输出工程量不全的缺陷。

表 3 输出工程量种类对比

工程量名称	ORD	纬地	开发成果
片石砼	✓	✓	✓
砂砾反滤层		✓	✓
土工布		✓	✓
开挖土方	✓	✓	✓
回填土方	✓	✓	✓
PVC 排水管			✓
锥坡填土			✓
空心六角砖			✓
砂浆抹面		✓	✓

基于自动布设的结果，可以一键输出各段支挡的平、立，剖面图图纸，如图 14 所示。所出图纸可准确描述布设方案并满足行业二维交付要求。

全线支挡工程总量对比结果，如表 4 所示。由结果可以看出，本工程三维自动设计各项参数与二维设计的误差均普遍较小，布设长度、砂砾反滤层、土工布、开挖以及回填土方等物理量误差均控制在 6% 以内，软件自动布设结果已经较为十分贴近人工逐段布设的结果。平均墙高与 C20 片石混凝土的工程量误差也控制在 12% 以内。误差较小。分析三维 BIM 设计与纬地二维设计的工程量差异，主要原因如下：

1) 地质数据以及环境敏感区数据暂未接入，本文算法仅按边坡高度经验值进行判别，仍可能出现高度较低的边坡侵入河流或基本农田等环境敏感区的现象发生，利用开发功能进行手动编辑修改或者手动布设功能即可规避。原有二维设计结果为设计人员精细调整后的成果，故与一键布设结果有部分差异。

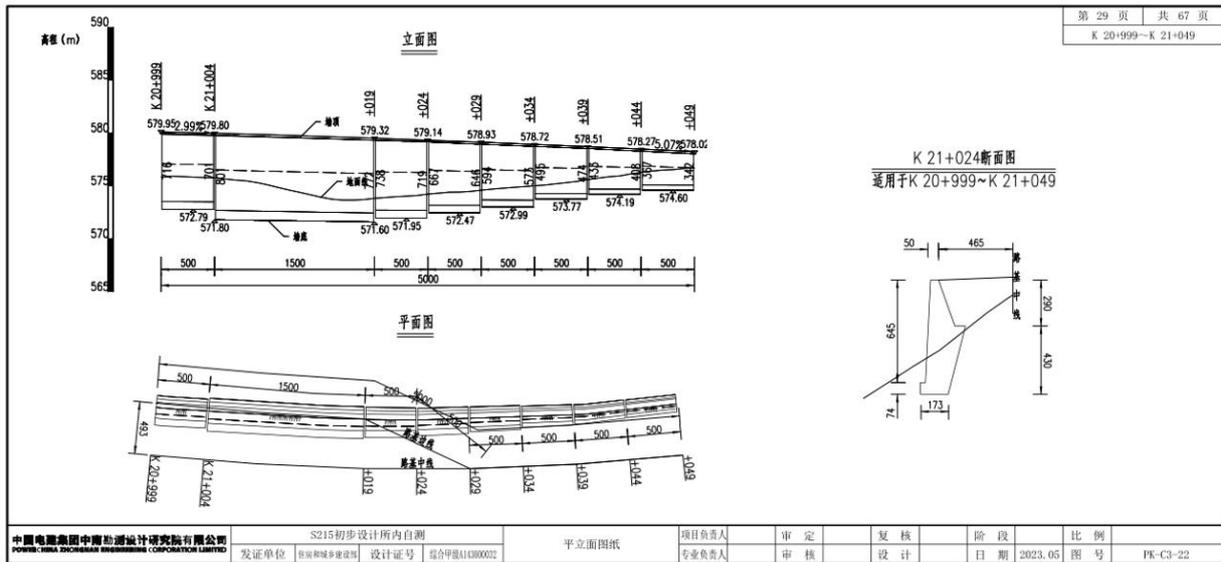


图 14 挡墙典型出图成果

表 4 全线支挡工程总量对比

挡墙类型	位置	设计方式	总长度 /m	平均墙高 /m	C20 片石砼 /m <sup>3</sup>	砂砾反滤层 /m <sup>3</sup>	土工布 /m <sup>2</sup>	开挖土方 /m <sup>3</sup>	回填土方 /m <sup>3</sup>
衡重式路肩墙	路线左侧	纬地	1364	6.18	13247.0	2044.5	10901.1	8359.2	3769.1
		本文算法	1314	6.99	14438.9	1971.0	11248.2	8935.1	3877.4
		误差/%	3.8	11.6	8.3	3.7	3.1	6.4	2.8
	路线右侧	纬地	75	4.76	522.4	119.2	461.7	709.2	370.1
		本文算法	72	4.88	548.4	112.0	433.5	685.5	352.1
		误差/%	4.2	2.5	4.7	6.4	6.5	3.5	5.1
合计	纬地	1439	6.11	13769.4	2163.7	11362.8	9068.4	4139.2	
	本文算法	1386	6.88	14987.3	2083	11681.7	9620.6	4229.5	
	误差/%	3.8	11.3	8.1	3.9	2.7	5.7	2.1	

2) 两种设计方式中对于地形的计算方式不同。二维设计中常使用等高线与高程点生成地形数模, 而三维中可结合三角面片构网技术辅助生成三维地形模型, 以表示地形的起伏变化。两种方式形成的基础地形数据与精度存在一定差异, 在部分断面中地形高程差距最大可以达到1~2m。本文算法挡墙截面桩号间距为1m, 已十分密集, 理论上对于与地形相关的数据如开挖与回填量相较二维而言更加精确。

3) 挡墙高度的确定为本文算法的关键, 由于C20片石砼、砂砾反滤层与土工布等数据与挡墙高度等数据成正相关, 且可根据支挡尺寸计算得出, 在挡墙高度数据偏大时会引发上述物理量偏大。本文设计算法中考虑到边坡约束、襟边宽度和埋深约束, 以及底部平滑化处理都容易使设计参数偏向保守, 在确保安全的情况下对逐桩号算得的挡墙高度进行了包络放大, 故最终计算结果挡墙高度偏大。

综合来看, 本文提出算法总体较为合理, 以墙高为代表的主要工程量数值较二维设计结果误差基本在12%以内, 各类工程量总体误差可控制在合理的范围内, 精度总体满足公路工程项目初步设计深度要求, 由于为一键智能布设, 且布设后仍可利用开发功能进行手动编辑修改, 可显著提高设计人员的工作效率。

## 4 结论

本研究提出了路基支挡结构的自动布设方法, 并基于三维平台 Bentley 下的 OpenRoads Designer 进行了针对支挡结构的二次开发, 在插件中内置了挡墙国家标准尺寸与图集, 通过将连续挡墙布置问题按桩号离散化实现高效的逐断面问题求解; 并引入二分法算法加速策略, 对每个横断面进行挡墙试算, 根据挡墙埋深, 襟边宽度限值等快速计算每个截面优先级最高的挡墙类型以及临界高度; 从而, 在此基础上进行归并分段与设缝处理, 并引入包络线算法自动进行底部平滑化或台阶处理, 在满足墙底坡度要求的同时实现墙高自适应调整, 显著提高设计效率。

所研发的插件可一键生成图表成果, 与二维设计结果误差较小。BIM 模型携带有符合国家标准要求的属性信息, 便于后期的施工运维管理, 具有明显的经济效益。本文成果在公路, 铁路等含有支挡结构的线型工程行业具备较高的推广价值。

限于时间等条件约束, 当前开发的功能仍存在一定局限性, 如未将地质信息录入, 无法完全避免

边坡侵入河流或环境敏感区, 也无法自动复核挡墙下的地基承载力是否满足图集要求, 依赖于设计人员手动检查, 后续若识别地质相关信息, 可简化此步骤, 使设计智能化程度进一步提高。

## 参考文献 (References)

- [1] 杨亮. 山区公路支挡结构特征及选型研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.  
YANG L. Research on characteristics and type selection of retaining structures in mountainous highways [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [2] 尚国萍. 公路建设技术指标对工程造价的影响研究 [J]. 交通科技与管理. 2022(14): 19-21.  
SHANG G P. Research on the influence of highway construction technical index on project cost [J]. The Technology and Management of Transportation System. 2022(14): 19-21. (in Chinese)
- [3] 廖路勇. 山地城市高填方条件下支挡结构体系应用研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.  
LIAO L Y. The application study of retaining structure system under the condition of high fill mountain city [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [4] 陆洋, 朱璨. 可视化编程工具 Subassembly Composer 与 Dynamo for Civil3D 在复杂路基 BIM 设计中的结合应用 [C]// 中国图学学会建筑信息模型 (BIM) 专业委员会. 第六届全国 BIM 学术会议论文集. 中国建筑工业出版社, 2020: 243-247.  
LU Y, ZHU C. The combined application of visual programming tool Subassembly Composer and Dynamo for Civil3D in complex roadbed BIM design [C]// China Graphics Society BIM Professional Committee. Proceedings of the 6th National BIM Conference. China Architecture and Building Press, 2020: 243-247. (in Chinese)
- [5] 罗钧友. BIM 技术在支挡结构设计中的应用研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2021.  
LUO J Y. Research on the application of Bim technology in the design of Retaining structure [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [6] 靳猛. 基于 BIM 技术的铁路路基设计应用研究 [J]. 铁路技术创新, 2020(04): 39-42.  
JIN M. Research on application of railway roadbed design based on BIM technology [J]. Railway Technical Innovation,

- 2020(04): 39-42. (in Chinese)
- [7] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范: JTG D30-2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for Design of Highway Subgrades: JTG D30-2015 [S]. Beijing: China Communication Press, 2015. (in Chinese)
- [8] 史海欧, 袁泉, 张耘琳, 等. 基于BIM交互与数据驱动的多专业正向协同设计技术 [J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(1): 176-181.  
SHI H O, YUAN Q, ZHANG Y L, et al. Multi-discipline forward collaborative design technology based on BIM interaction and data-driven [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(1): 176-181. (in Chinese)
- [9] HU Z Z, LENG S, LIN J R, et al. Knowledge extraction and discovery based on BIM: a critical review and future directions [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2021: 1-22.
- [10] JUSTO A, LAMAS D, SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ A, et al. Generating IFC-compliant models and structural graphs of truss bridges from dense point clouds [J]. Automation in Construction, 2023, 149: 104786.
- [11] ZHOU Y, HU Z Z, ZHANG W Z. Development and application of an industry foundation classes-based metro protection information model [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程信息模型应用统一标准: JTG/T 2420-2021 [S]. 北京: 人民交通出版社. 2021.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Unified Standard for Application of Building Information Modeling in Highway Engineering: JTG/T 2420-2021 [S]. Beijing: China Communication Press, 2021. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程设计信息模型应用标准: JTG/T 2421-2021 [S]. 北京: 人民交通出版社. 2021.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standard for Application of Building Information Modeling in Highway Engineering Design: JTG/T 2421-2021 [S]. Beijing: China Communication Press, 2021. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程施工信息模型应用标准: JTG/T 2422-2021 [S]. 北京: 人民交通出版社. 2021.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standard for Application of Building Information Modeling in Highway Engineering Construction: JTG/T 2422-2021 [S]. Beijing: China Communication Press, 2021. (in Chinese)
- [15] 赵锦. 基于纬地(HintCAD)互通式立交设计软件的辅助设计功能开发 [D]. 西安: 长安大学, 2013. 1-73.  
ZHAO J. Based on theWeft to Interchange Design Aided Design Functions of Software Development [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. 1-73. (in Chinese)
- [16] 谢先当, 刘厚强, 翟连吉. 基于Bentley 平台的铁路路基 BIM正向设计研究 [J]. 铁路技术创新, 2020(4): 43-49  
XIE X D, LIU H Q, ZHAI L J. Research on BIM forward design of railway roadbed based on Bentley platform [J]. Railway Technical Innovation, 2020(4): 43-49 (in Chinese)

## Intelligent design method of subgrade retaining based on Bentley

TANG Hongwei<sup>1</sup>, GENG Xinyu<sup>1</sup>, CHEN Hongtuo<sup>1</sup>, TAN Hongcan<sup>1</sup>, Lin Jiarui<sup>2</sup>

(1. PowerChina ZhongNan Engineering Corporation limited, Changsha 410014, China;

2. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** [Objectives] With the rapid development of informatization and digitization, traditional 2D design method is difficult to meet the requirements of tight time limitation and lifecycle modeling management, and manual assignment of model properties is rather complicated and time-consuming for designers. To improve the inefficiency and inconvenience of manual retaining design, and to enrich incomplete information generated of existing BIM software, [Methods]this paper summarizes boundary condition and process of deploying retaining according to specification, and studies the delivery requirements of BIM information as well as the challenges of traditional design software. Then, intelligent algorithm for deploying retaining is proposed, with which the condition for placing retaining can be checked on each station along the path. Automatic matching of types and heights of retaining, bottom slope smoothing, and merging of different segments are also achieved. A retaining software plug-in is redeveloped based on OpenRoads Designer of Bentley platform for validation and application. National standard drawings and structural size of subgrade retaining are embedded in

the system, which guarantee the structural security of the wall. The continuous highway is discretized into station sequence, dichotomy is used to rapidly find the most suitable height on each section in consideration of flap width and buried depth requirement. Location of retaining is filtered by side slope height along the highway to optimize the construction cost, various types of retaining contained in the software can be selected by custom priority, subgrade retaining walls are divided into different parts according to length and bottom slope restriction. Bottom edges of generated segments are finally readjusted to linear or stair-stepping state, and height of each section is recalculated due to the measure, thus, one-click intelligent design of subgrade retaining is completed. [Results]Several products are obtained by the system, including: 1) Plan, elevation and cross section drawing of each retaining segment, comprised of graphic shapes and size dimensions; 2) detailed-items-contained Engineering quantity sheets; 3) 3D retaining models attached with information in Level of Details (LOD) 3.0. The output provides accurate results and fulfills the industrial requirements, and can be further utilized in whole process management of construction, operation and maintenance. The method is validated by a practical highway project with total length of 13.4 kilometers, compared results with HintCAD (a popularly used software in highway) show that: 1) Deviation is less than 6% on total retaining length, gravel inverted filter layer, geotextile and earthwork volume, due to the ignorance of geology and environmental sensitive area, and terrain-calculation difference between 2D and 3D method; 2) Error of average retaining height and concrete volume is less than 12%, which is caused by manual and conservative bottom handling method. 3) the precision accuracy is fully acceptable for engineering projects on preliminary design stage. 4) calculated results can be further modified by users to fulfil the design intent. [Conclusions]Thus, this method offers a better option for retaining design and deployment and improves significantly on design efficiency, 3D visualization and property information compared with current design approach, which contributes to 3D forward design in railway and highway projects.

**Key words:** road engineering; retaining design; secondary development; BIM design; OpenRoads Designer; digitization; intelligentization