

基于理正与 Autobank 对堤防稳定计算的对比分析

弓平平

长江勘测规划设计研究有限责任公司, 上海 200000

[摘要] 岩土工程中材料存在复杂性和变异性, 堤防的稳定性分析中计算工具的选用和参数的确定尤为重要, 水利行业常用的堤防的稳定性分析工具是理正和 Autobank 有限元分析软件。文中以长江勘测规划设计研究有限责任公司负责的某大型水利工程为背景, 针对其堤防的渗流及抗滑稳定问题, 利用理正和 Autobank 软件进行了计算分析。通过对工程概况、计算参数、边界条件及典型断面的详细阐述, 对比分析两款软件在处理相同问题时参数设定和计算过程的不同。经过比较分析发现, 尽管两个软件在计算方法、前处理和后处理等方面存在差异, 但它们在堤防稳定计算结果上表现出较高的一致性。文中的研究为类似水利工程的堤防稳定性分析提供了有益的参考, 并强调了有限元分析软件在岩土工程中的重要性。

[关键词] 堤防稳定计算; 理正软件; Autobank 软件; 有限元分析; 岩土工程; 水利工程

DOI: 10.33142/hst.v7i7.12847

中图分类号: TV139.14

文献标识码: A

Comparative Analysis of Embankment Stability Calculation Based on Lizheng and Autobank

GONG Pingping

Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Shanghai, 200000, China

Abstract: Materials in geotechnical engineering have complexity and variability, and the selection of calculation tools and parameter determination are particularly important in the stability analysis of embankments. The commonly used stability analysis tools for embankments in the water conservancy industry are Lizheng and Autobank finite element analysis software. The article takes a large-scale water conservancy project undertaken by Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd. as the background, and analyzes the seepage and anti sliding stability issues of its embankment using Lizheng and Autobank software. By elaborating on the engineering overview, calculation parameters, boundary conditions, and typical cross-sections, a comparative analysis is conducted on the differences in parameter settings and calculation processes between the two software when dealing with the same problem. After comparative analysis, it was found that although there are differences in calculation methods, pre-processing, and post-processing between the two software, they show high consistency in the calculation results of embankment stability. The research in the article provides useful references for the stability analysis of embankments similar to hydraulic engineering, and emphasizes the importance of finite element analysis software in geotechnical engineering.

Keywords: calculation of embankment stability; Lizheng software; Autobank software; finite element analysis; geotechnical engineering; water conservancy project

引言

岩土工程和结构工程不同, 结构工程涉及的材料大多是人工材料, 计算参数取值明确, 很多模型可准确分析结构的力学与变形性质; 而岩土工程所面临的材料则主要是岩土体, 各土层的基本参数主要根据现场试验、室内试验并结合以往工程经验取定的建议值, 且伴随着岩土材料的各种变异性, 使得对岩土的分析显得不是那么确定, 多采用有限元软件进行分析。目前进行相关分析的软件有 Abaqus、理正、Autobank、Geostudio、slide、GE05 等, 我国常用软件主要是理正、Autobank^[1]。

截至 2018 年, 我国已建成 5 级及以上江河堤防 31.2 万公里, 大部分堤防于上世纪修建, 主要以土质堤防为主, 工程质量难以保证, 渗流及抗滑稳定为该类型水利工程的主要病险问题。在实际工程中, 对于土质堤防的渗流及抗滑稳定问题的分析变得尤为重要。基于此, 本文利用水利行

业常用的理正与 Autobank 有限元分析软件对实际工程的渗流及抗滑稳定进行计算, 并对对比分析两款软件在计算结果中存在的区别及可靠性。

1 工程概况

工程湖区是以防洪、排涝及农业灌溉为主的大型水利工程。项目通过实施生态清淤, 清除湖泊表层底泥, 削减内源污染; 通过湖泊扩容, 增加湖泊水深, 增强湖泊水环境容量^[2]。

根据相关规划, 湖区 10 年一遇设计洪水位 11.09m。本工程为清淤疏浚工程, 工程自身无防洪需要, 但清淤疏浚工程量较大, 弃土需临时堆放于湖区周边圩区内。本工程周边现状圩堤长约 2.3km, 堤顶高程 11.60~12.70m, 堤顶宽 3~4m, 内坡 1:1.0~1:1.5, 外坡 1:1.2~1:1.5, 内外坡均为草皮防护。现状圩堤防洪能力不足 10 年一遇, 堤防等级为 5 级。

2 理正与 Autbank 软件的稳定分析

2.1 计算参数、边界条件及典型断面

2.1.1 材料参数及分区

根据对该段堤防的工程地质勘察工作及土工试验成果，堤身、堤基各土层的渗透变形试验指标见表 1。

表 1 土层渗透系数建议值及渗透性分级表

层号	土层	渗透系数(cm/s)	渗透性等级
A	素填土(粉质粘土、重粉质壤土)	4.75E-7	极微透水
③	粉质粘土、重粉质壤土	5.45E-7	极微透水
⑤	淤泥质黏土、粉质粘土	5.95E-7	极微透水
⑥	粉质粘土, 夹少量砂礓	3.22E-7	极微透水

2.1.2 土层参数

工程范围内的堤防已建成多年，堤身及堤基土均已完成固结排水，根据《堤防工程设计规范》(GB50286-2013) 堤防在稳定渗流期抗滑稳定计算均采用有效应力法，土的抗剪强度指标采用固结排水剪。

计算剖面各土层的基本参数根据现场试验、室内试验、地质建议值确定，各土层的物理力学指标见下表 2。

表 2 土层抗滑稳定计算参数表

层序	土层岩性	含水率 ω %	湿密度 ρ kN/m ³	干密度 ρ_d	孔隙比 e	固结快剪	
						凝聚力 C_{cq} kPa	内摩擦角 ϕ_{cq} °
A	素填土 (粉质粘土、重粉质壤土)	29.5	1.87	1.44	0.897	25.3	12.3
③	粉质粘土、重粉质壤土	29.8	1.92	1.48	0.852	27.0	13.4
⑤	淤泥质黏土、粉质粘土	42.2	1.79	1.26	1.177	13.8	7.8
⑥	粉质粘土, 夹少量砂礓	25.6	1.99	1.58	0.729	55.6	16.9

2.1.3 计算工况及水位组合

①特征水位

兴利水位 6.69m (非汛期); 10 年一遇水位 11.09m (汛期)。

②边界条件如下:

堤顶高程: 12.70m;

堤后地面标高: 5.90m (内堤脚外约 20m 范围, 即圩堤管理范围线外 10m 范围)。

③计算工况及水位组合

本工程湖区选取汛期 10 年一遇水位最不利工况进行计算, 临水侧水位 11.09m, 背水侧水位取堤内地面高程 5.90m。

2.1.4 安全系数

(1) 堤防渗流控制标准

本工程钻探所揭示的土层多为细粒土, 所以渗透变形定

为流土型。影响建筑物或基坑渗流稳定的各主要土层的垂向临界水力比降 J_{cr} 和允许水力比降 $J_{允许}$ 计算值见表 3。

表 3 土的渗透变形判别成果一览表

层号	孔隙比	孔隙率	土粒比重	临界水力比降	允许水力比降	破坏类型
	e_0	n	G_s	J_{cr}	$J_{允许}$	
A	1.587	0.613	2.74	0.67	0.34	流土型
③	0.989	0.503	2.74	0.87	0.44	流土型
⑤	1.581	0.612	2.74	0.67	0.33	流土型
⑥	0.850	0.459	2.74	0.94	0.47	流土型

(2) 堤防稳定控制标准

根据《堤防工程设计规范》(GB50286-2013), 对现状堤防的复核计算不存在施工工况, 仅复核正常运用工况, 因此, 工程范围内堤防均为非在册圩口堤防, 其防洪标准小于 10 年一遇, 堤防等级为 5 级。计算工况: 正常运用条件-瑞典圆弧抗滑稳定安全系数为 1.10; 非常运用条件 I-瑞典圆弧抗滑稳定安全系数为 1.05。

2.1.5 典型断面选取

根据现状堤防及临时堆场地质勘察及断面测量成果, 本工程湖堤沿线现状地质条件及堤防断面有所不同, 本方案计算选择堤身相对较高、堤基黏性土较薄且淤泥质黏土较厚的不利地质剖面及相应堤防断面进行渗流稳定性验算, 其断面如图 1 所示。

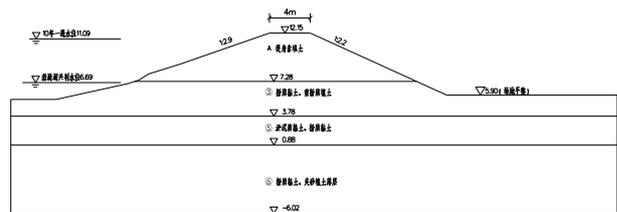


图 1 堤防典型计算断面图

2.2 理正软件稳定计算

2.2.1 堤防渗流稳定计算方法

堤防的渗流计算按平面稳定渗流、土层各向同性考虑, 采用理正有限元法电算求解, 绘制流网并计算渗流坡降。渗透稳定的判别采用表层土的出逸坡降控制, 即 $J \leq J_{允}$ 。

式中: J —表层土的实际出逸坡降;

$J_{允}$ —表层土的允许出逸坡降。

2.2.2 堤防渗流稳定计算成果

通过理正的渗流模块进行堤防渗流分析得出, 在设计洪水位工况下堤防典型断面渗流量为 0.00m³/s, 计算成果见表 4, 水头等值线见图 2, 准流网见图 3。

表 4 堤防典型断面渗流计算成果表

计算期	水位 (m)		渗流量 (m ³ /d)	出逸点高 程 (m)	控制点水力 比降 J	允许比降 $J_{允许}$ (③层土)
	迎水侧	背水侧				
汛期	11.09	5.90	0.00	6.55	0.37	0.45

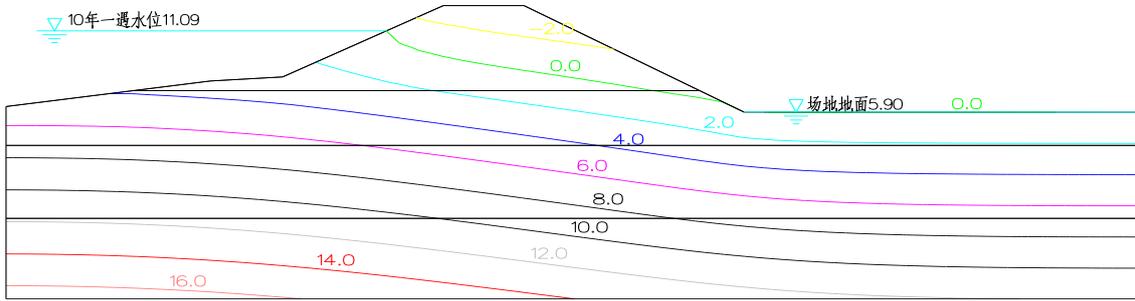


图2 典型断面压力水头计算简图

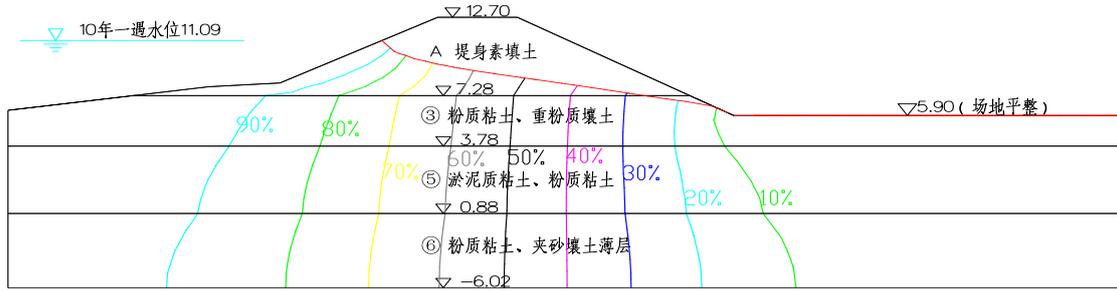


图3 典型断面准流网图

2.2.3 堤防抗滑稳定计算方法

工程范围内的堤防已建成多年,堤身及堤基土均已完成固结排水,根据《堤防工程设计规范》(GB 50286—2013)堤防在稳定渗流期抗滑稳定计算应采用有效应力法,施工期采用总应力法,土的抗剪强度指标采用固结排水剪,建立稳定分析模型,分析选定典型剖面。

按照《堤防工程设计规范》,堤身抗滑稳定计算采用瑞典圆弧滑动法,基本公式如下:

$$F_s = \frac{\sum W_i \cos \alpha_i \tan \phi_i + \sum c_i l_i}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad (1)$$

式中: F_s -堤身抗滑稳定安全系数;

W_i -土条重力(kN);

c_i -土的凝聚力(kPa);

l_i -条块圆弧长度(m);

ϕ_i -土的内摩擦角($^\circ$);

α_i -土条底面中点至圆心的连线与垂直线的夹角($^\circ$)。

2.2.4 堤防抗滑稳定计算成果

通过理正的稳定模块进行堤防抗滑分析得出,在设计洪水水位工况下堤防典型断面整体抗滑稳定计算成果见表5,断面滑动圆弧详见图4~5。

表5 典型断面抗滑稳定计算成果表

计算期	计算工况		堤防安全系数	
			计算值	允许值
汛期	正常运用条件	10年一遇洪水水位,稳定渗流(背水侧)	0.916	1.10
非汛期(施工期)	正常运用条件 I	兴利水位,稳定渗流(临水侧/背水坡)	1.196/1.004	1.05

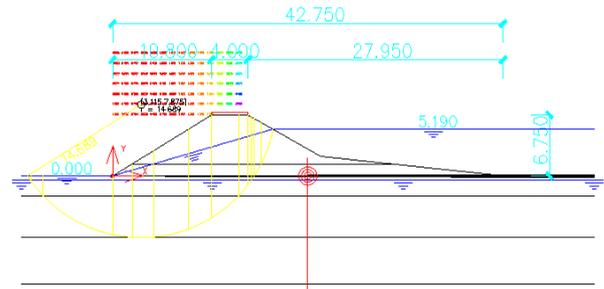


图4 典型断面圆弧滑动断面图(汛期)

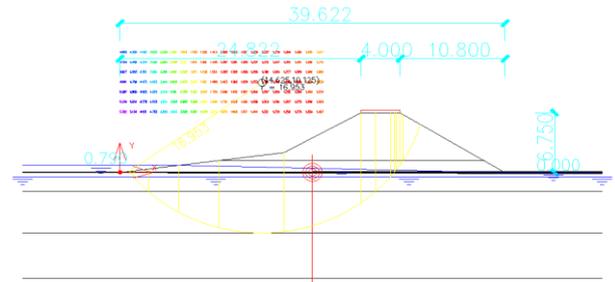


图5 典型断面圆弧滑动断面图(非汛期-临水侧)

2.3 Autobank 软件稳定计算

2.3.1 堤防渗流稳定计算方法

Autobank 软件依据非饱和土理论、基本的渗流理论一达西定律等,采用有限元方法分析稳定流及非稳定流,可用于多种边界条件、多种材料的堤坝或土体的渗流分析。渗流有限元分析基本方程为:

$$[K]\{H\} + [M]\left\{\frac{\partial H}{\partial t}\right\} = \{Q\} \quad (2)$$

式中: $[K]$ -透水系数矩阵

$\{H\}$ -总水头向量

$[M]$ —单元储水量矩阵
 $[Q]$ —流量向量
 t —时间

透水系数矩阵:

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:

$$[K] = [\lambda]^T \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \end{bmatrix} [\lambda] \quad [\lambda] = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: α —最大透水系数方向角,用于各向异性的材料中。

渗透稳定的判别采用表层土的出逸坡降控制,即 $J \leq J_{允}$ 。

2.3.2 堤防渗流稳定计算成果

通过 Autobank 的渗流模块进行堤防渗流分析得出,在设计洪水位工况下堤防典型断面渗流量为 $1.287e-8m^3/s$,计算成果见表6,水力坡降等值线见图6,水头等值线见图7。

表6 堤防典型断面渗流计算成果表

计算期	水位 (m)		渗流量 (m^3/d)	出逸点高 程 (m)	控制点水力 比降 J	允许比降 $J_{允}$
	迎水侧	背水侧				
汛期	11.09	5.90	$1.287e-8$	6.78	0.41	0.45 (③层土)

2.3.3 堤防抗滑稳定计算方法
同理正计算法。

2.3.4 堤防抗滑稳定计算成果

通过 Autobank 的稳定模块进行堤防抗滑分析得出,在设计洪水位工况下堤防典型断面整体抗滑稳定计算成果见表7,断面滑动圆弧详见图8。

表7 典型断面抗滑稳定计算成果表

计算期	计算工况		堤防安全系数	
			计算值	允许值
汛期	正常运用 条件	10年一遇洪水位, 稳定 渗流 (背水侧)	1.016	1.10
非汛期 (施工期)	正常运用 条件 I	兴利水位, 稳定渗流 (临 水侧/背水坡)	1.287/1.141	1.05

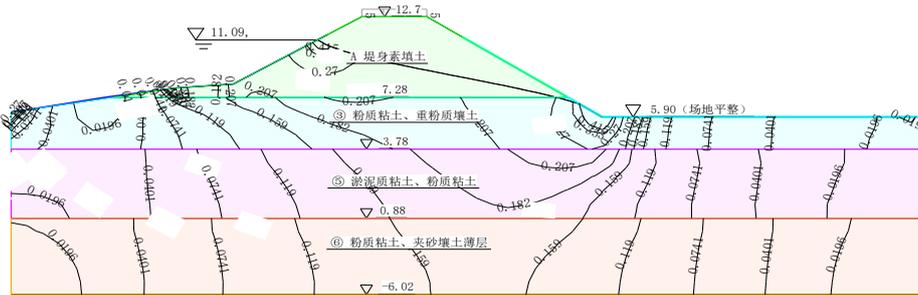


图6 典型断面水力坡降等值线图

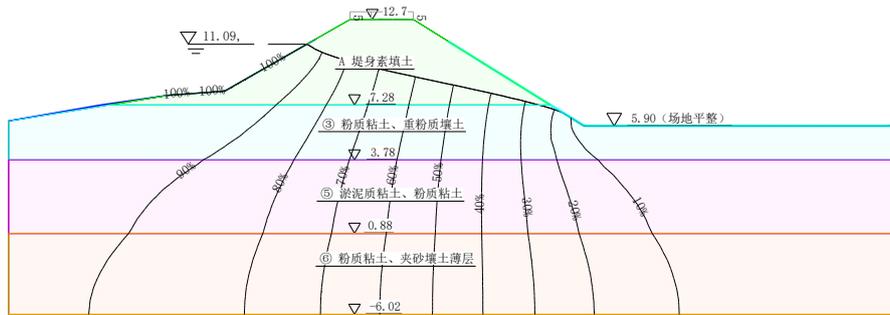


图7 典型断面水头等值线图

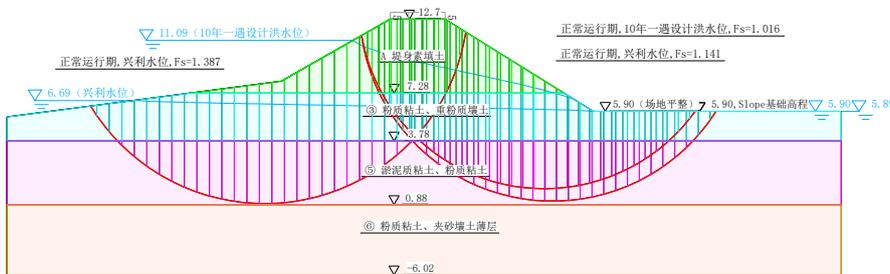


图8 典型断面圆弧滑动断面图

表 9 堤防典型断面抗滑稳定计算成果表

计算方法	计算期	计算工况		抗滑稳定安全系数	
				计算值	允许值
理正	汛期	正常运用条件	10 年一遇洪水位, 稳定渗流 (背水侧)	0.916	1.10
	非汛期 (施工期)	正常运用条件 I	兴利水位, 稳定渗流 (临水侧/背水坡)	1.196/1.004	1.05
Autobank	汛期	正常运用条件	10 年一遇洪水位, 稳定渗流 (背水侧)	1.016	1.10
	非汛期 (施工期)	正常运用条件 I	兴利水位, 稳定渗流 (临水侧/背水坡)	1.287/1.141	1.05

表 10 常用有限元计算软件比较分析表

软件类型	前处理差异			后处理差异	计算成果差异
	有限元建模	渗流分析模块	稳定分析模块		
理正	具有全自动划分三角形单元功能, 三角形单元边长尺寸不得小于 0.2 个单位尺寸; 利用模板的形式建立模型, 建模较为方便, 可以直接读入 DXF 文件格式中的连续封闭直线段作为模型框架, 材料分区及定义不如 Autobank 方便。	网格划分全局统一自动生成, 但不能对局部面域进行编辑。	稳定分析模块的建立需导入渗流分析模块成果后编辑, 不如 Autobank 方便。	主要是偏向模型整体分析, 渗流部分包括水压、水头、水力坡降及流网等结果; 抗滑稳定部分是最危险滑动面的结果; 但不能同时进行多工况、左右岸及非稳定渗流分析; 具有较为完善的出图功能; 不能自动生成渗流、稳定计算报告, 不如 Autobank 方便。	计算结果较 Autobank 安全余量偏低, 存在一定差别, 但差距不大。
Autobank	该软件界面友好, 具有全自动划分三角形、四边形单元功能; 可直接将 AutoCAD 作为输入输出界面, 实现了可视化操作; 建模及材料定义方便快捷, 并可通过控制网格的疏密, 调整计算精度; 便于建立复杂的二维有限元网格模型; 后处理功能强大。	网格划分全局统一自动生成后, 还可对局部面域网格进行修改编辑, 提高计算精度。	稳定分析模块的建立可直接利用渗流分析模块成果。	主要是偏向模型整体分析, 渗流部分包括水压、水头、水力坡降及流速等结果; 抗滑稳定部分是最危险滑动面的结果; 能够同时进行多工况、左右岸、非稳定渗流分析; 具有较为完善的出图功能; 可自动生成完整渗流、稳定计算报告	计算结果较理正安全余量偏高, 存在一定差别, 但差距不大。

2.4 理正与 Autobank 软件计算成果对比

通过对堤防的设计洪水位工况的计算, 两个有限元分析软件计算所得结论一致, 堤防渗流稳定系数均满足规范要求, 虽二者计算结果存在一定差别, 但差距不大。计算结果具体数据见表 8。

表 8 堤防典型断面渗流计算成果表

计算方法	计算期	水位 (m)		渗流量 (m ³ /d)	出逸点高程 (m)	控制点水力比降 J	允许比降 J 允许
		迎水侧	背水侧				
理正	汛期	11.09	5.90	0.00	6.55	0.37	0.45 (③层土)
Autobank	汛期	11.09	5.90	2.867e-8	6.78	0.41	0.45 (③层土)

通过对堤防的设计洪水位工况的计算, 两个有限元分析软件计算所得结论一致, 汛期堤防抗滑稳定系数均不满足规范要求, 虽二者计算结果存在一定差别, 但差距不大。计算结果具体数据见表 9。

(1) 通过分析不同工况下的水头等值线、浸润线、渗流量等结果, 发现正常蓄水位、设计洪水位工况下随着上下游水头差的增大, 渗流量与出逸点渗透坡降均有所增

大。水位骤降工况下, 随着上游水位降落速度增加, 坝体渗流量增大, 渗透坡降变化不大。

(2) 汛期高水位工况下堤防浸润线和出逸点的位置正常, 坝体满足渗透稳定要求, 抗滑稳定均不满足规范要求。

3 理正与 Autobank 软件对比分析

理正与 Autobank 软件虽然属同类型软件, 但通过运用软件对堤防进行渗流及抗滑稳定分析计算可以看出二者存在着一定的差异, 以下从软件的前处理及后处理部分论述二者的不同之处。见表 10。

[参考文献]

[1] 杜易杰, 张丹汝, 李龙. 基于 AutoBank 软件对堤防渗流稳定的计算应用 [J]. 水利科技与经济, 2014(12): 155-157.

[2] 杨江勇, 郑焯. 可靠度分析在堤防边坡稳定计算中的应用 [J]. 浙江水利科技, 2005(2): 3.

作者简介: 弓平平 (1983.10—), 女, 汉族, 毕业学校: 河北工程大学, 现工作单位: 长江勘测规划设计研究有限责任公司。