

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.030

临近既有线门式墩基础施工影响因素的正交分析

李明华¹,冯佳荟²,韩雯静³

(1.南昌交通学院 土木建筑学院,江西 南昌 330013;2.福建福铁地方铁路开发有限公司,福建 福州 350013;

3.华东交通大学 土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要:为研究临近既有线门式墩基础施工的影响因素,以数值仿真为基础的正交试验方法研究钻孔桩长度、钻孔桩施工顺序、承台基坑开挖深度、钢板桩长度和钢板桩个数共5个因素对既有线的影 响程度。结果表明:钻孔桩施工阶段,最重要的因素为钻孔桩施工顺序;基坑开挖和下部结构施工阶段,最重要的因素是基坑开挖深度,钻孔桩施工顺序与钢板桩长度也有明显影响,而钢板桩个数与钻孔桩长度的影响不明显。可见邻近既有线施工应尽量提高承台标高,减小基坑开挖深度,并适当增加钢板桩长度,实现对既有线较好保护。

关键词:铁路路基;沉降;数值计算;桥梁基础;正交试验

中图分类号:U443.2

文献标志码:A

0 引言

中国是世界上高速铁路发展最快、规模最大的国家,截至2019年底,已开通运营的高铁里程达到35 000 km,占世界高铁总里程的2/3以上^[1]。伴随着高速铁路的持续快速发展,出现了越来越多的新建项目临近或交叉既有营业线(既有线)的情形^[2-3]。考虑到土地成本和建设指标等因素,高铁修建过程中均频繁采用了“以桥代路”的建设模式,故桥梁基础开挖对既有线的影 响成为临近既有线施工中的一个重要研究课题^[4]。

截至目前,国内外学者针对临近既有线的桥梁基础施工开展了大量研究。高显平^[5]采用数值仿真深入研究了深基坑开挖中各施工步对临近既有高铁路基变形的影响;高立刚等^[6]采用FLAC^{3D}软件研究了承台基坑开挖深度对既有线变形的影响;方浩^[7]以软土地区某邻近运营高铁路基的基坑工程为例,采用数值仿真研究了降水方案、坑底加固、围护结构插入比以及基坑距路基坡脚距离等因素对高铁路基变形的影响;付长凯^[8]采用数值仿真手段分析了岩溶区桥梁桩基施工对邻近既有铁路路基的影响,发现距离大于6~8 m(3~4倍桩径)时,桩基施工对邻近路

基的影响很小;周希^[9]研究了隔离桩施工对铁路桥梁桥墩及桩基的位移影响,得到施工间隔越大,对邻近地层的影响越小的结论;谢小山等^[10]采用现场监测和数值模拟相结合手段研究了桩基邻近道路路基边坡施工的影响,得到桩基成孔及灌注两个施工过程影响最大。但已有研究大多侧重于基坑或桩基的单一开挖分析,鲜有对包括桩基施工、基坑开挖和下部结构施工在内的综合性影响因素的分析与研究。

综上,本文将以新建连云港特大桥138号门式墩基础施工为工程背景,基于正交试验方法,采用数值仿真的手段研究桩基施工、基坑开挖和下部结构施工3个阶段中,钻孔桩长度、施工顺序、承台基坑开挖深度、钢板桩长度和钢板桩个数5个因素对既有线影响程度,以期为既有线变形控制方案的制定提供综合参考。

1 工程背景与场地条件

既有陇海铁路为国铁I级客货共线铁路,线距5 m,设计速度(改造)140~200 km/h。新建连徐高铁连云港特大桥在K41+247.05上跨既有陇海铁路,其中,138#墩与既有线最接近,左、右承台基坑平面尺寸分别为7.1 m×9.8 m、7.1 m×8.4 m,距下、上行线中

收稿日期:2023-05-16(修改稿)

作者简介:李明华,男,大学本科,教授.E-mail:2700441755@qq.com

心(最近)距离为 6.99 m、6.16 m,承台基础采用“左 5+右 4”根 $\phi 1.25$ m 钻孔桩,具体平面布置如图 1 所示。

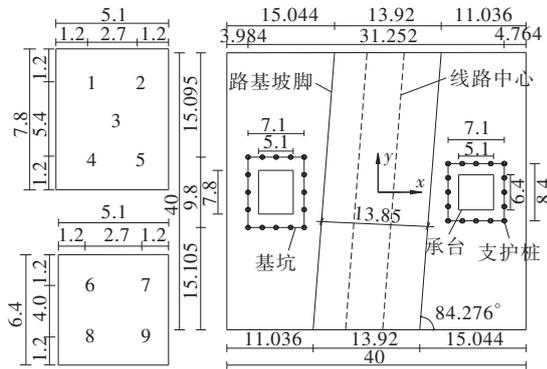


图 1 138#墩基础与陇海铁路平面示意图(单位:m)

根据 138#墩钻探揭露,钻孔施工区域内地层从地面向下主要有:素填土、粉质黏土、黏土、全风化片麻岩和强风化片麻岩,图 2 为 138#墩下部地质剖面示意图。

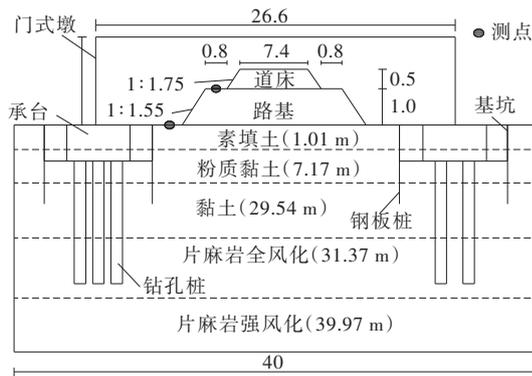


图 2 138#墩处地质剖面示意图(单位:m)

2 基础开挖对既有线影响因素的正交分析

2.1 正交试验简介

工程影响因素的评价问题中,考虑 2 个及以下影响因素对试验结果的显著性分析可选用一元或二元方差分析。对 2 个以上的影响因素,正交试验方法是合理且节约的评价方法^[11]。正交试验主要包括正交表确定、模型计算分析、极差分析、方差分析 4 个方面内容。

极差分析是对正交试验结果进行的分析。设 K_{ij} ($i, j=1, 2, 3, \dots$) 表示对第 i 个评价指标评价时, j 水平所对应的试验数据相加后取平均值;则极差 $= K_{ij_{\max}} - K_{ij_{\min}}$ 。极差越大,说明该因素影响越大,极差最大的

因素是最主要的影响因素,应当在设计中重点考虑。极差较小,说明该因素对指标影响不显著^[12]。

鉴于极差分析不能估计试验过程和结果测定中必然存在的误差大小,需进一步采用方差分析方法对试验结果进行分析。方差分析中,显著性水平 α 一般取 0.01、0.05、0.1、0.2,不同的显著水平表示使用相应的临界值表,而临界值表是根据不同自由度和显著性水平的要求制定的^[13]。以影响因素 A 为例,影响因素 A 的 F 值为 F_A , f_A 和 f_e 分别为影响因素和误差的自由度,通过查 F 表,得临界值 $F_\alpha(f_A, f_e)$,再比较 F_A 与 F_α ,从而做出以下显著性判断:若 $F_A > F_{0.01}$,说明因素 A 高度显著,可记为 **;若 $F_{0.01} > F_A > F_{0.05}$,说明因素 A 显著,可记为 *;若 $F_{0.05} \geq F_A > F_{0.1}$,说明因素 A 有影响,可记为 \odot ;若 $F_{0.1} \geq F_A \geq F_{0.2}$,说明因素 A 有一定影响,可记为 \triangle ;若 $F_{0.2} \geq F_A$,说明因素 A 无影响。

2.2 影响因素与因素水平确定

在施工平面布置已确定的基础上,结合已有单一桩基或基坑开挖对既有线影响的研究成果^[5-10],知钻孔桩长度 (A)、基坑开挖深度 (B)、钢板桩长度 (C)、钢板桩个数 (D)、钻孔桩施工顺序 (E) 等因素对既有线具有显著影响。考虑影响因素取值合理的情况下,设定试验因素水平取值,如表 1 所示。

表 1 因素水平表

水平	钻孔桩长度(A)/m	基坑开挖深度(B)/m	钢板桩长度度(C)/m	钢板桩个数(D)	钻孔桩施工顺序(E)
1	40	3.0	8	12	X_1
2	45	2.8	7	10	X_2
3	50	2.5	6	8	X_3
4	55	2.2	5	6	X_4
5	60	2.0	4	4	X_5

钻孔桩位置编号如图 1 所示, X_1 表示按“1—4—3—2—5—7—9—6—8”号桩依次施工, X_2 表示“7—9—6—8—1—4—3—2—5”号桩依次施工, X_3 表示“2—5—3—1—4—6—8—7—9”号桩依次施工, X_4 表示“(2\6)—(5\8)—(1\7)—(4\9)—3”号桩依次施工, X_5 表示“(1\7)—(4\9)—3—(2\6)—(5\8)”号桩依次施工;注:($x\backslash y$) 示意为 x, y 同时施工。

2.3 考核指标的选择

临近既有线的的基础施工,会对既有线产生多方

面的影响。参照《铁路营业线施工安全管理办法》(TG/CW106—2021)^[14]:施工期间必须做好既有线路路基变形观测。文中选择“路肩沉降”作为主要考核指标,且为完整地分析基础开挖全过程的影响,定义:桩基施工完成后的路肩沉降值为沉降1;基坑开挖完成后的路肩沉降值为沉降2;下部结构施工完成后的路肩沉降值为沉降3。

2.4 数值仿真模型

获取各因素对既有线的影响,评价各因素的影响程度,并为设计阶段选择适宜的支护参数提供依据。本文采用Ansys软件对基础开挖进行模拟,共计分析了25个计算工况,如表2所示。考虑边界效应影响^[15],即左右边界与临近钻孔桩中心间的距离不小于3~5倍桩径,计算模型宽度取40 m,建立的模型如图3所示。

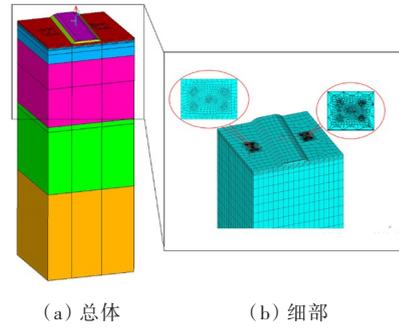


图3 数值计算模型

数值模拟过程中主要包含桩基施工、钢板桩施工、承台基坑开挖、下部结构施工4个步骤。模拟中,利用生死单元的激活和杀死模拟从桩基钻孔、承台开挖到墩身浇筑、横梁安装的全部施工过程,每一施工步的具体含义以1号正交试验为例,见表3。

表3 详细施工模拟步骤

施工步	仿真内容	施工步	仿真内容
1	地应力平衡	20	打入钢板桩
2	1号钻孔桩开挖	21	左侧开挖基坑1/4
3	1号钻孔桩回填	22	左侧开挖基坑2/4
4	4号钻孔桩开挖	23	左侧开挖基坑3/4
5	4号钻孔桩回填	24	左侧开挖基坑4/4
6	3号钻孔桩开挖	25	右侧开挖基坑1/4
7	3号钻孔桩回填	26	右侧开挖基坑2/4
8	2号钻孔桩开挖	27	右侧开挖基坑3/4
9	2号钻孔桩回填	28	右侧开挖基坑4/4
10	5号钻孔桩开挖	29	左侧承台浇筑1/2
11	5号钻孔桩回填	30	左侧承台浇筑2/2
12	7号钻孔桩开挖	31	左侧回填素填土
13	7号钻孔桩回填	32	右侧承台浇筑1/2
14	9号钻孔桩开挖	33	右侧承台浇筑2/2
15	9号钻孔桩回填	34	右侧回填素填土
16	6号钻孔桩开挖	35	左侧支护桩拔出
17	6号钻孔桩回填	36	右侧支护桩拔出
18	8号钻孔桩开挖	37	浇筑混凝土墩
19	8号钻孔桩回填	38	浇筑横梁

模型计算参数如表4所示。模型中土体、道砟、路基、钻孔桩、承台采用Solid 45六面体单元,板桩及围檩采用Beam 4梁单元,利用生死单元的激活和杀死模拟施工过程;土体(路基、道砟、土层)采用的是D-P本构;混凝土(钻孔桩)及钢材(钢板桩、围檩、横梁)采用线弹性体本构。

表2 正交试验方案工况

试验号	钻孔桩长度(A)/m	基坑开挖深度(B)/m	钢板桩长度度(C)/m	钢板桩个数(D)	钻孔桩施工顺序(E)
1	40	3.0	8	12	X ₁
2	40	2.8	7	10	X ₂
3	40	2.5	6	8	X ₃
4	40	2.2	5	6	X ₄
5	40	2.0	4	4	X ₅
6	45	3.0	7	8	X ₄
7	45	2.8	6	6	X ₅
8	45	2.5	5	4	X ₁
9	45	2.2	4	12	X ₂
10	45	2.0	8	10	X ₃
11	50	3.0	6	4	X ₂
12	50	2.8	5	12	X ₃
13	50	2.5	4	10	X ₄
14	50	2.2	8	8	X ₅
15	50	2.0	7	6	X ₁
16	55	3.0	5	10	X ₅
17	55	2.8	4	8	X ₁
18	55	2.5	8	6	X ₂
19	55	2.2	7	4	X ₃
20	55	2.0	6	12	X ₄
21	60	3.0	4	6	X ₃
22	60	2.8	8	4	X ₄
23	60	2.5	7	12	X ₅
24	60	2.2	6	10	X ₁
25	60	2.0	5	8	X ₂

表 4 模型计算参数

类别	变形模量/ MPa	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
钢材	206×10^3	0.310	7 850	—	—
混凝土	26×10^3	0.167	2 500	—	—
道砟	700	0.200	2 600	1	30
路基填土	80	0.300	1 780	30	28
素填土	50	0.350	1 850	8	24
粉质黏土	100	0.350	1 960	15	15
黏土	150	0.350	2 030	25	15
全风化片 麻岩	200	0.300	2 500	35	35
强风化片 麻岩	400	0.300	2 600	45	30

3 计算结果分析

3.1 沉降 1 分析

钻孔桩施工阶段相应正交试验结果见表 5。由表 5 可知:钻孔桩施工顺序对沉降 1 有较大影响,说明先开挖远离路基处的桩后开挖与路基距离较近桩的开挖方式引起的沉降量最小;而钻孔桩长度对沉降 1 的影响不明显。

表 5 沉降 1 极差分析结果

项目	A	B	C	D	E
K_{11}	5.021 4	5.027 6	5.025 3	5.022 1	4.982 8
K_{12}	5.031 3	5.030 3	5.029 4	5.028 2	5.036 5
K_{13}	5.024 0	5.022 2	5.026 8	5.027 9	5.016 4
K_{14}	5.026 7	5.024 1	5.018 9	5.023 2	5.055 0
K_{15}	5.024 2	5.023 4	5.027 3	5.026 3	5.037 0
极差	0.009 9	0.008 1	0.010 5	0.006 1	0.072 2
主次顺序	E>A				
优水平	A1	不作参考	不作参考	不作参考	E1
优组合	钻孔桩长度 40 m,施工顺序采用 X_1				

对沉降 1 进行方差分析, A、B、C、D、E 5 个影响因素的自由度 $n=4$ 与误差的自由度 $n=4$ 是相同的。对应的 F 分布表中查出 $F_{0.01}(4, 4)=15.98$, $F_{0.05}(4, 4)=6.39$, $F_{0.1}(4, 4)=4.11$, $F_{0.2}(4, 4)=2.50$ 。沉降 1 方差分析中, A、B、C、D、E 5 个因素对应的 F 值为 21.19、17.11、24.32、11.60、1149.70。可以看出 A 因素为**, B 因素为**, C 因素为**, D 因素为*, E 因素为**。鉴于沉降 1 指标为钻孔桩施工阶段指标, 故不涉及基坑开挖深度、钢板桩长度、钢板桩个数 3

个因素。根据 F 值的大小, 可进一步确认影响因素重要性排序为 $E>A$ 。

3.2 沉降 2 分析

承台基坑开挖后相应的正交试验计算结果如表 6 所示。

表 6 沉降 2 极差分析结果

项目	A	B	C	D	E
K_{21}	4.951 0	5.001 0	4.930 0	4.946 6	4.931 0
K_{22}	4.953 7	4.986 4	4.948 7	4.955 8	4.950 7
K_{23}	4.947 6	4.954 9	4.957 7	4.952 3	4.955 4
K_{24}	4.952 6	4.920 9	4.960 2	4.953 1	4.976 0
K_{25}	4.956 6	4.898 5	4.964 9	4.953 8	4.948 5
极差	0.009 0	0.102 5	0.034 9	0.009 2	0.045 0
主次顺序	B>E>C>D>A				
优水平	A3	B5	C1	D1	E1
优组合	钻孔桩长度 50 m; 基坑开挖深度为 2 m; 钢板桩长度 8 m; 钢板桩个数为 12 个; 钻孔桩施工顺序 X_1				

由表 6 可知: 基坑开挖越深, 沉降 2 越大, 两者呈正相关, 且基坑开挖深度对于沉降的影响远明显于其他因素; 采用钻孔桩施工顺序 X_1 对沉降 2 影响最小; 当钢板桩长度越长, 沉降 2 越小, 两者呈负相关; 而钢板桩个数及钻孔桩长度对沉降 2 影响不明显。

对沉降 2 进行方差分析, A、B、C、D、E 5 个因素对应的 F 值为 1.34、225.08、23.05、1.44、31.49。可以看出 A 因素为无影响, B 因素为**, C 因素为**, D 因素为无影响, E 因素为**。根据 F 值的大小进行影响因素重要性排序为 $B>E>C>D>A$ 。

3.3 沉降 3 分析

桥梁下部结构施工完成后相应的正交试验计算结果如表 7 所示。

表 7 沉降 3 极差分析结果

项目	A	B	C	D	E
K_{31}	4.497 7	4.588 5	4.473 7	4.489 5	4.479 4
K_{32}	4.499 5	4.557 5	4.492 8	4.500 7	4.496 5
K_{33}	4.493 5	4.500 8	4.503 1	4.498 3	4.502 8
K_{34}	4.498 9	4.442 1	4.507 9	4.502 0	4.521 5
K_{35}	4.503 4	4.404 1	4.515 4	4.502 5	4.492 8
极差	0.009 9	0.184 4	0.041 7	0.013 0	0.042 1
主次顺序	B>E>C>D>A				
优水平	A3	B5	C1	D1	E1
优组合	钻孔桩长度 50 m; 基坑开挖深度为 2 m; 钢板桩长度 8 m; 钢板桩个数为 12 个; 钻孔桩施工顺序 X_1				

由表7可知:基坑开挖越深,沉降 s 越大,两者呈正相关;采用钻孔桩施工顺序 X_1 对沉降 s 影响最小,钢板桩长度越长,沉降 s 越小,两者呈负相关;钢板桩个数及钻孔桩长度对沉降 s 影响不明显。说明对于钻孔桩开挖顺序积累的路肩沉降会继续影响到基坑开挖阶段及桥梁下部结构所有施工步完成后,且最优施工顺序与钻孔桩施工完成后阶段的相同。

对沉降 s 进行方差分析, A 、 B 、 C 、 D 、 E 5个因素对应的 F 值为1.84、846.93、37.20、4.08、33.90。可以看出 A 因素为无影响, B 因素为**, C 因素为**, D 因素为 Δ , E 因素为**。根据 F 值的大小进行影响因素重要性排序为 $B>C>E>D>A$ 。

3.4 综合分析

对比极差分析和方差分析结果,极差分析和方差分析结果基本相同,得出如下结论:

(1) 钻孔桩长度对桩基施工后路肩沉降值的影响为第2位,最优水平为 A_1 (对应钻孔桩长度40 m);对基坑开挖后路肩沉降值和下部结构施工后路肩沉降值的影响均为第5位。综合最优钻孔桩长度为40 m。

(2) 基坑开挖深度对基坑开挖后路肩沉降值和下部结构施工后路肩沉降值的影响均为第1位,综合最优基坑开挖深度为2 m。

(3) 钢板桩长度对基坑开挖后路肩沉降值的影响为第3位,对下部结构施工后路肩沉降值的影响为第2位,综合最优钢板桩长度为8 m。

(4) 钢板桩个数对基坑开挖后路肩沉降值和下部结构施工后路肩沉降值的影响为第4位,综合最优钢板桩数为12个。

(5) 钻孔桩施工顺序对桩基施工后路肩沉降值的影响为第1位,对基坑开挖后路肩沉降值的影响为第2位,对下部结构施工后路肩沉降值的影响为第3位。最优施工顺序为 X_1 ,即“1—4—3—2—5—7—9—6—8”。

4 结论

通过正交试验极差分析与方差分析,得出以下结论:

(1) 在桥梁基础施工的不同阶段,不同影响因素的重要性是不相同的。钻孔桩施工阶段,最重要的因素是钻孔桩施工顺序;基坑开挖阶段和下部结构

施工阶段,最重要的因素均是基坑开挖深度,钻孔桩施工顺序与钢板桩长度也有明显的影响,而钢板桩个数与钻孔桩长度的影响并不明显。

(2) 不同施工阶段的最优钻孔桩施工顺序均相同,宜优先考虑一侧桩基由远及近进行施工。

(3) 建议邻近既有线施工应尽可能地提高承台标高,减小基坑开挖深度;同时鉴于钢板桩的防护作用明显,应适当增加钢板桩长度。上述措施均可对既有有线有良好的保护效果。

参考文献:

- [1] 伍业君. 新中国铁路发展成就回顾、经验与展望[J]. 理论学习与探索, 2020(1): 66-69.
- [2] 沈宇鹏, 王辉煌, 荆鹏, 等. 临近既有线基坑支护影响因素的正交分析[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(2): 14-20.
- [3] 彭丽云, 李焱, 刘德欣. 两侧双基坑开挖对密贴既有线路基变形的影响[J]. 建筑结构, 2019, 49(S2): 942-948.
- [4] 左坤. 新建高铁对紧邻运营铁路路基服役状态影响研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [5] 高显平. 某深基坑施工对临近高速铁路路基影响的研究[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(3): 31-35.
- [6] 高立刚, 宁贵霞. 基坑开挖深度对既有铁路线变形的影响分析[J]. 南阳理工学院学报, 2016, 8(2): 102-105.
- [7] 方浩. 基坑开挖对邻近高铁路基变形影响的预测方法研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(3): 26-33.
- [8] 付长凯. 岩溶区公路桥梁桩基施工对邻近既有铁路路基稳定性影响分析及安全控制技术[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [9] 周希. 隔离桩施工对邻近高铁高架桥桥墩的影响分析[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2019.
- [10] 谢小山, 陈彦恒, 赵春彦. 桩基施工对邻近地铁隧道的影响分析[J]. 施工技术, 2018, 47(13): 32-35, 41.
- [11] 付宏渊, 刘建华, 张立, 等. 基于正交试验的岩质边坡动力稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(9): 2853-2859.
- [12] 何本贵, 高谦, 刘芳. 公路路堑边坡稳定性影响因素正交分析与数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 716-719.
- [13] 冯青松, 孙魁, 罗信伟, 等. 现代有轨电车短枕埋入式轨道路基优化分析[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(1): 23-28.
- [14] 国家铁路局. 铁路营业线施工安全管理办法: TG/CW 106—2021[S]. 北京: 国家铁路局, 2021.
- [15] 丁智, 张霄. 桩基施工对邻近既有地铁隧道影响的数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(2): 390-399.