

# 桥墩倾斜偏位的仿真分析与处治方法

查庆<sup>1</sup>, 崔珊珊<sup>2</sup>, 连俊峰<sup>2</sup>, 王之俊<sup>3</sup>

(1.安徽省高速公路试验检测科研中心有限公司, 安徽 合肥 230061; 2.安徽省交通控股集团有限公司, 安徽 合肥 230027;

3.中铁大桥(南京)桥隧诊治有限公司, 江苏 南京 210061)

**摘要:** 桥墩结构的运营状态直接影响桥梁整体结构的稳定与安全。文中结合安徽南陵县马元交通桥部分桥墩出现的倾斜和偏位现象, 提出针对桥墩倾斜偏位的桥梁结构安全分析评估方法, 通过有限元模型模拟现场环境, 计算不同工况下桥墩位移及内力, 分析桥墩结构受损原因, 评估桥墩倾斜偏位对桥墩与桩基结构安全的影响; 基于桥墩倾斜偏位原因对桥墩受损后的剩余承载能力进行分析, 研究桥墩倾斜偏位处治方案。

**关键词:** 桥梁; 桥墩; 倾斜偏位; 处治方案; 仿真分析

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)04-0128-04

桥墩是桥梁的主要承重结构, 直接承受上部结构传下的荷载, 其安全与否直接影响整座桥的安全。由于填土或其他原因导致桥墩倾斜或偏位, 使其从原轴心受压状态变为偏心受压, 桥墩承载能力将下降, 若倾斜量达到设计参数极限, 桥墩可能发生失稳破坏导致灾难性后果。为避免事故的发生, 需对桥墩运营状态进行详细检测评估, 掌握桥梁下部结构的受力性能。该文结合安徽南陵县马元交通桥部分桥墩出现的倾斜和偏位, 研究针对桥墩倾斜偏位的桥梁结构安全分析评估方法。

## 1 工程概况

马元交通桥跨径组成为  $4 \times 20 \text{ m} + 50 \text{ m} + 4 \times 20 \text{ m}$ 。20 m 跨主梁为预应力砼筒支空心板, 每跨横向布置 2 块中板和 2 块边板, 空心板高 0.9 m, 中板宽 1.5 m, 边板宽 1.75 m, 顶、底板厚 12 cm, 板间现浇湿铰缝宽 1 cm, 空心板和铰缝均采用 C40 砼。50 m 跨主梁为预应力砼筒支 T 梁, 每跨 3 片梁, T 梁腹板中心距为 2.30 m, 组合 T 梁高 3.0 m, 腹板厚 25 cm, 筒支 T 梁采用 C50 砼。

1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>~8<sup>#</sup>墩(见图 1)墩身为 2 根  $\phi 1.0 \text{ m}$  圆立柱, 柱身高 8.5~13.5 m, 柱间距 4.5 m。柱顶部为高 1.3 m、宽 1.6 m 的盖梁, 柱下为灌注桩基础, 一柱一桩。桩基础直径 1.2 m, 最大桩长 24 m, 均按摩擦桩设计。4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>墩为交界墩, 为圆端实体矩形墩, 墩身高 12.5 m, 顺桥向长 1.5 m, 横桥向长 5.0 m, 端部为半径 0.75 m 的半圆。墩身下为  $7.3 \text{ m} \times 5.2 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$  承台, 下接 4 根长 26.0 m 桩。

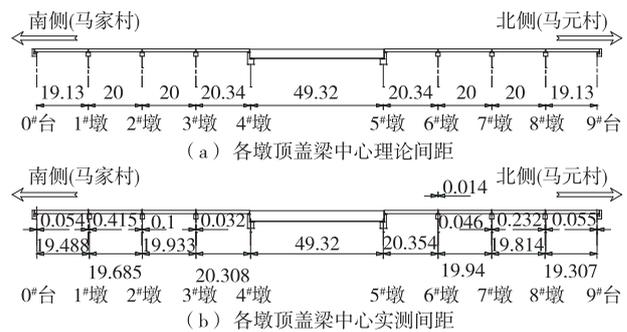


图 1 马元交通桥各墩位编号及中心偏位(单位:m)

## 2 现场实测数据

针对 0<sup>#</sup>台~2<sup>#</sup>墩、7<sup>#</sup>墩~9<sup>#</sup>台进行桥墩倾斜偏位检测, 结果如下:

(1) 桥面系及主梁部分未发现异常现象。

(2) 0<sup>#</sup>台有 3 个支座剪切变形严重; 1<sup>#</sup>墩有 3 个支座开裂破损, 其余 5 个完全脱落; 8<sup>#</sup>墩有 7 个支座开裂破损, 其余 1 个完全脱落; 9<sup>#</sup>台 8 个支座均出现底面局部脱空现象。

(3) 盖梁、墩柱及系梁未发现开裂现象; 0<sup>#</sup>台、1<sup>#</sup>~2<sup>#</sup>和 7<sup>#</sup>~8<sup>#</sup>墩盖梁顶中心、9<sup>#</sup>台相对设计位置向河侧分别偏移 0.054、0.415、0.1、0.046、0.232、0.055 m。

(4) 1<sup>#</sup>墩柱顶面相对地面向河侧倾斜 0.11 m, 倾斜度 1.7%; 8<sup>#</sup>墩墩柱顶面相对地面向河侧倾斜 0.045 m, 倾斜度 0.65%; 其余墩柱倾斜度均在《公路工程质量检验评定标准》限值 0.3% 以内。

(5) 对比实测地面纵断面与设计值, 南北侧大

堤在大堤顶部地面比设计值高 0.7~0.8 m,往河侧第一次斜坡段比设计值高 1.0~3.3 m;往岸侧第一次斜坡段比设计值高 0.6~2.0 m;其余部位与设计值基本一致。

(6) 第 1 跨空心板梁与 1# 墩盖梁重叠长度设计值为 77 cm,实际长度只有 35.6~36.5 cm。考虑到空心板梁梁端封锚长度 20 cm,真正受力的搭接长度只有 15 cm,若继续推移会有落梁危险。

### 3 数值仿真分析

根据现场实测结果,1# 墩偏位最大,故选取 1# 墩作为分析对象。

#### 3.1 设计资料

1# 墩左右墩高 8.5 m,直径 1 m;桩长 24 m,直径 1.2 m;盖梁高 1.3 m,宽 1.6 m;墩顶高程 16.795 m,桩土接触面处高程 8.5 m,桩底高程 -17.045 m;柱、盖梁及桩基础均采用 C30 砼。

#### 3.2 物理参数与工况分类

根据地质勘探资料,各层土的物理参数见表 1。

表 1 原位土体参数

土层编号	土类	容重/ (kN·m <sup>-3</sup> )	弹性 模量/ kPa	泊松 比	粘聚 力/ kN	内摩 擦角/ (°)
2	重粉质壤土	18.5	5 000	0.40	21	10
3	淤泥质粉质壤土	17.0	3 500	0.48	10	6
8	粉质黏土	19.0	6 500	0.35	32	10
11	黏土质砂砾卵石	20.0	12 000	0.30	5	30
填土	—	20.0	4 000	0.30	21	10

工况分为 3 种:工况 1 为施工结束;工况 2 为填筑大堤、挖河道后且土体受到扰动;工况 3 为堆载。

#### 3.3 有限元模型

采用 ANSYS 软件建模,使用实体单元 Solid45 模拟土层单元,采用 Drucker-prager 模型进行模拟,其材料特性包括粘聚力、内摩擦角和膨胀角。对土层进行划分,并赋予其不同材料性质与参数取值(见表 1)。下层规则性状土采用六面体划分,上层不规则填土则采用四面体划分,桩、柱、系梁及盖梁也采用四面体单元进行划分,共划分为 21 858 个节点、50 467 个单元。四周边界分别对 X、Z 方向采用垂直约束,底面采取全部约束。模型以桩为中心,横桥向两侧各取 40 m,靠近河岸侧取 40 m,靠近岸边取 80 m,尺寸比桩径大很多,以降低四周边界的影响。1# 墩与土层有限元模型见图 2。



图 2 有限元模型

### 3.4 数值分析

#### 3.4.1 位移计算

1# 墩桩基与柱体在工况 1(即堆载作用前)时,柱顶顺桥向与横桥向位移均非常小,桩身处于三向受压状态(见图 3),桩身承载力与应力状态均满足承载力要求。

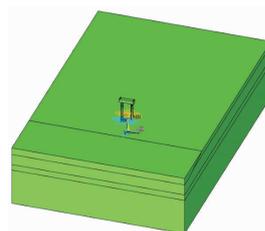


图 3 工况 1 时 1# 墩的位移(单位:m)

工况 2 时填筑大堤,开挖河道后形成大面积堆载,对 1# 墩桩产生一定水平推力。考虑后期接线工程搅拌桩施工和超载对第 3 土层淤泥质粉质壤土(高灵敏度土)的扰动,对土体参数进行修正。表 2 为考虑土体灵敏度进行修正后各层土的物理参数。考虑堆载及土体扰动后,墩帽顺桥向位移为 246.3 mm。此时已产生较大桩体位移,土层也产生相应滑动变形(见图 4)。

表 2 扰动后土体参数

土层编号	土类	容重/ (kN·m <sup>-3</sup> )	弹性 模量/ kPa	泊松 比	粘聚 力/ kN	内摩 擦角/ (°)
2	重粉质壤土	18.5	4 000	0.40	10	25
3	淤泥质粉质壤土	17.0	2 000	0.48	7	6
8	粉质粘土	19.0	6 000	0.35	21	7
11	粘土质砂砾卵石	20.0	14 000	0.30	5	30
填土	—	20.0	4 000	0.30	10	25

工况 3 进行小面积杂填土,以面荷载形式添加。此时 1# 墩帽顺桥向位移增加 1.9 mm,杂填土对 1# 墩桩基的影响不大(见图 5)。

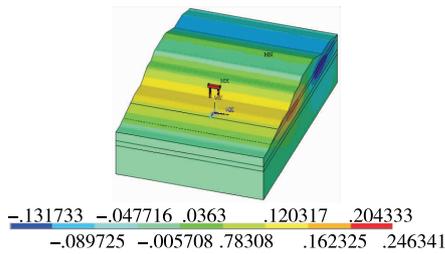


图4 工况2时1#墩的位移(单位:m)

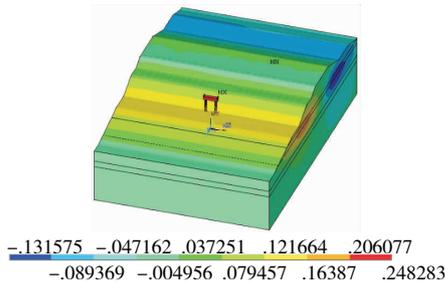


图5 工况3时1#墩的位移(单位:m)

### 3.4.2 内力计算

根据1#墩桩身位移,采用MIDAS/Civil,截取不同断面的位移施加在墩柱上,得出各点反力。1#墩桩身弯矩和剪力见图6。

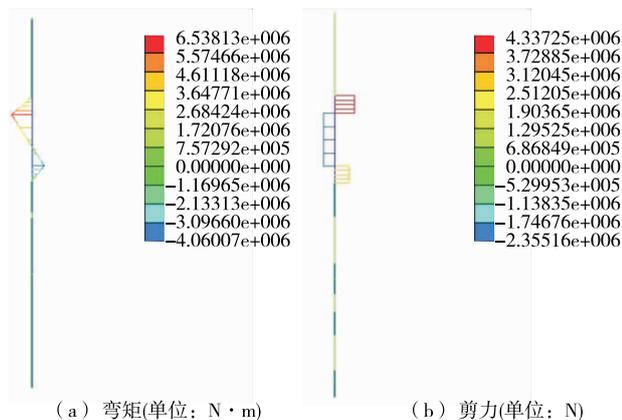


图6 1#墩桩身弯矩及剪力

### 3.5 剩余承载能力分析

采用基本组合对1#墩承载能力进行验算,基本组合取 $1.2 \times (\text{恒载} + \text{偏位}) + 1.4 \times \text{双孔汽车活载} + 1.4 \times 0.8 \text{汽车制动力}$ ,根据最不利布载。对两种组合效应进行验算,效应一为最大弯矩位置,效应二为最大轴力位置。

#### 3.5.1 效应一下剩余承载能力

效应一时,弯矩为 $8\,268 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,轴力为 $5\,231 \text{ kN}$ , $e_0 = 8\,268 / 5\,231 = 1.58 \text{ m}$ 。由于 $l_0/d = 24/1.2 = 20 > 4.4$ ,需考虑纵向弯曲对偏心距的影响。取 $r_s$

$= 0.9 \times 0.6 = 0.54 \text{ m}$ ,截面有效高度 $h_0 = 1.14 \text{ m}$ , $\eta = 1.196$ ,得 $\eta e_0 = 1.89 \text{ m}$ 。

$$N_u = 0.9\varphi(f_{cd}A_c + f_{sd}A_s) = 17\,764 \text{ kN}$$

$$\eta e_0 = \frac{Bf_{cd} + D\rho_g f_{sd}}{Af_{cd} + C\rho f_{sd}} r = \frac{8\,280B + 2\,047D}{13.8A + 3.41C}$$

取 $\xi = 0.028$ ,与 $\eta e_0$ 相差2%,得到承载力:

$$Br^3 f_{cd} + D\rho_g r^3 f_{sd} = 2\,808 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Ar^2 f_{cd} + C\rho r^2 f_{sd} = 1\,197 \text{ kN}$$

桩基的承载力不满足要求。

#### 3.5.2 效应二下剩余承载能力

效应二时,弯矩为 $5\,149 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,轴力为 $6\,592 \text{ kN}$ , $e_0 = 5\,149 / 6\,592 = 0.781 \text{ m}$ 。由于 $l_0/d > 4.4$ ,需考虑纵向弯曲对偏心距的影响。取 $r_s = 0.54 \text{ m}$ , $h_0 = 1.14 \text{ m}$ , $\eta = 1.196$ ,得 $\eta e_0 = 0.934 \text{ m}$ 。

$$N_u = 0.9\varphi(f_{cd}A_c + f_{sd}A_s) = 17\,764 \text{ kN}$$

$$\eta e_0 = \frac{Bf_{cd} + D\rho_g f_{sd}}{Af_{cd} + C\rho f_{sd}} r = \frac{8\,280B + 2\,047D}{13.8A + 3.41C}$$

取 $\xi = 0.024$ ,与 $\eta e_0$ 相差8%,得到承载力:

$$Br^3 f_{cd} + D\rho_g r^3 f_{sd} = 2\,875 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Ar^2 f_{cd} + C\rho r^2 f_{sd} = 3\,105 \text{ kN}$$

桩基的承载力不满足要求。

综上,在两种最不利弯矩与轴力效应组合下,1#墩桩基的剩余承载力均不满足要求,可能已发生结构破坏。

## 4 桥墩偏位原因分析

根据现场实测数据和有限元仿真分析结果,桥墩产生倾斜偏位的原因主要有:

(1) 桥梁所处土质条件差,由中等压缩性重~中粉质壤土、淤泥质重粉质壤土夹薄层细砂、粉质黏土~重粉质壤土、黏土质砂砾卵石层等组成,淤泥质土层厚度南岸比北岸大,导致南岸1#、2#墩倾斜比北岸8#、7#墩严重。

(2) 填筑大堤致使南岸大堤顶面相对1#墩地面的高差为 $7.83 \text{ m}$ ,北岸大堤顶面相对8#墩地面的高差为 $7.76 \text{ m}$ ,且1#和8#墩均处于边坡坡脚处,开挖河道后,1#和8#墩地面相对河底的高差为 $4.87 \text{ m}$ ,两者叠加后高差更大。

(3) 该桥两岸无称重限载设施,常有超载车辆通行;马元交通桥接线工程开工后,超载车通行更密集,且在两岸大堤附近开挖和施工搅拌桩。该桥墩覆盖层为粉质黏土和淤泥质粉质壤土,其中淤泥质粉质壤土为高灵敏度土,后期接线工程搅拌桩施工

产生的震动和超载车通行对该土层产生扰动,导致该土层土体抗剪强度急剧降低,淤泥层发生显著侧向挤出现象,产生巨大的侧向推挤作用,使桩基向河中心方向偏位,引起桥墩向河中心方向偏位。

## 5 桥墩倾斜偏位的处治

桥墩桩基纠偏处治方案如下:施工准备→应力释放孔施工→高压旋喷桩施工→新增桩基施工→新增桩基承台第1次浇筑→桥墩顶推纠偏→桥墩增大截面法加固→新增桩基承台第2次浇筑→桥墩桩基纠偏完成。再以新增承台为基础,安装钢管支承及分配梁,同步顶升梁体后即可开放行人通行。

(1) 设置应力释放孔。桥墩桩基偏位主要由不良地质与外荷载共同作用所致,鉴于桥墩桩基往河侧偏位,在偏位较大桥墩的岸侧布置9个应力释放孔(见图7)起到释放土层应力作用,使桥墩在土压力作用下向正确位置移动。应力释放孔距桥墩间距为1.5 m,孔间距为1~1.25 m,穿透淤泥质黏土,孔深12 m,直径30 cm,孔中填充袋装砂卵石。

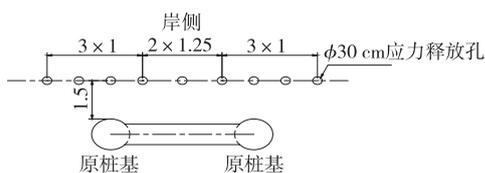


图7 桥墩应力释放孔的布置(单位:m)

(2) 设置高压旋喷桩。桥梁所处地质复杂,淤泥层较厚,采用高压旋喷桩既可对地基进行加固,又可实现桥墩桩基纠偏。在偏位较大桥墩周围布置115根高压旋喷桩,桩径50 cm,桩长14 m(见图8)。高压旋喷桩布置在桥墩偏位一侧,其施工将产生强大挤土效应,迫使桥墩桩基回位。

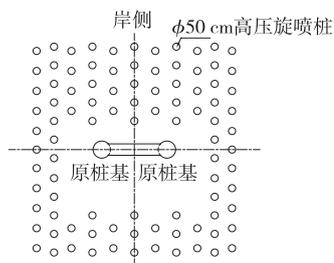


图8 桥墩高压旋喷桩的布置

(3) 新增桩基承台。由于桩基可能已开裂,对桩基承载能力影响较大,在应力释放孔、高压旋喷桩施工完成后,对偏位较大桥墩采用新增桩基承台对

原基础进行托换,以新增桩基受力为主。原桥墩两侧布置4根新桩,桩基直径为1.5 m,桩长与原桩长一致,新承台底面与原系梁底齐平,采用植筋方式与原桥墩连接(见图9)。新承台分2次浇筑,先浇筑外侧,待桥墩顶推纠偏完成后浇筑中间部分。

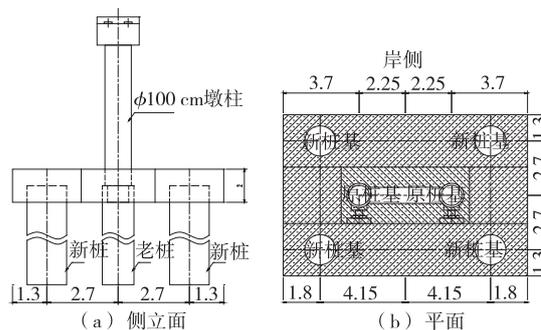


图9 桥墩新增桩基承台的布置(单位:m)

(4) 桥墩顶推纠偏。对偏位较大桥墩进一步采用顶推工艺进行纠偏。以新增承台为基础,安装钢管支承及分配梁,同步顶升梁体,顶升量为5 mm。以新增桩基为反力基础,采用2台200 t千斤顶同步顶推桥墩,先顶升主梁,再进行桥墩桩基顶推纠偏。以力与位移双控,分级顶推。

(5) 桥墩加固。桥墩桩基纠偏完成后,采用增大截面法对桥墩进行加固。

(6) 支座更换。桥墩加固完成后,同步顶升主梁,更换全部支座。

## 参考文献:

- [1] 赵明华.桥梁桩基计算与检测[M].北京:人民交通出版社,2000.
- [2] 李斌.软弱土体对工程桩的侧向作用分析[D].青岛:中国海洋大学,2006.
- [3] 梁治国,李吉勇.某桥梁下部结构纠偏施工技术[J].施工技术,2014,43(10).
- [4] 贺永明,田世清,李冀,等.超深软土地区桩基偏位复位受力分析[J].公路与汽运,2016(2).
- [5] 曾勇,田世清,唐赐明.连续梁桥桥墩纠偏顶推受力分析[J].中外公路,2013,33(3).
- [6] JTG D62-2012,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [7] 邱体军,崔方胜.软土地质条件对桥梁结构安全的影响[J].工程与建设,2016,30(4).
- [8] 李光辉,王鹏.金湾大道高架桥墩柱偏位分析与纠偏处理[J].公路交通技术,2015(4).