

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.05.023

引用格式:温建兴,武建中,彭奋态.陡坡堆土引起墩柱偏位原因分析及纠偏实例[J].公路与汽运,2024,40(5):129-133+150.

Citation: WEN Jianxing, WU Jianzhong, PENG Fentai. Analysis of causes for deflection of pier columns caused by steep slope pile and examples of correction[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(5): 129-133+150.

陡坡堆土引起墩柱偏位原因分析及纠偏实例

温建兴¹, 武建中², 彭奋态³

(1.广东和立土木工程有限公司, 广东 广州 511400; 2.广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510630; 3.茂名城建设计院有限公司, 广东 茂名 525000)

摘要: 结合某运营桥梁墩柱发生的偏位事故, 分析造成墩柱偏位的原因; 根据检测数据提出3种计算分析方法并对其验算结果进行对比, 以获得结构的真实受力状态; 对偏位墩采取桥墩周边卸土、边坡袖阀管注浆加固、应力释放孔解除、墩顶和墩底水平顶推及被动区高压旋喷加固等综合措施进行纠偏处治, 同时在纠偏施工过程中根据监测数据及时调整纠偏措施, 使墩柱成功复位。

关键词: 桥梁; 墩柱偏位; 软土; 陡坡堆土; 纠偏措施

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)05-0129-05

近年来, 中国城市桥梁建设快速发展, 桥下空间利用也越来越多。合理利用桥下空间有利于充分利用土地资源, 但开发利用过程中往往不够重视对桥梁结构的保护, 桥墩桩基发生倾斜偏位的故事时有发生。桥梁结构主要按承受竖向荷载进行设计, 对水平荷载非常敏感, 桥墩桩基偏位会导致结构水平向内力增大、承载能力降低, 影响桥梁运营安全^[1]。

对于桥墩桩基偏位事故的处理, 首先应分析评估桩基状况^[2], 在桥墩、桩基等结构损伤较小的情况下, 优先考虑对偏位墩柱进行纠偏加固。常见的纠偏加固方案主要有应力释放孔、水平顶推、高压旋喷桩挤土、地面填土堆卸载^[3]。本文以广东某大桥互通立交工程墩柱偏位事故为例, 研究墩柱偏位分析方法, 提出合理可行的纠偏措施, 为同类桥墩纠偏整治提供参考。

1 工程概况

广东某大桥互通立交由互通主线桥、A匝道、B匝道组成, 桥梁全长2 355.06 m, 主桥宽度为33.5 m, 双向六车道; 匝道桥宽度为9.0 m, 单向两车道。桥梁上部结构采用跨径25~28 m预应力混凝土连续箱梁, 下部结构采用花瓶墩、钻孔灌注桩基础。中间墩采用墩梁固结体系, 过渡墩设双向活动盆式支座。

桥址处地层由上至下分布有杂填土、淤泥质土、

粉质黏土、细中粗砂、强风化变质砂岩、中风化变质砂岩、微风化变质砂岩、强风化花岗岩、中风化花岗岩、微风化花岗岩, 桩基持力层为微风化变质砂岩和微风化花岗岩。粉质黏土标贯击数标准值为9.00~12.00, 边坡素填土呈稍压实~疏松状, 标贯击数标准值为3.02, 厚层压实度差的填土对边坡稳定性较不利。

桥梁周边拟新建美食城, 在原陡坡上填出一个30 m宽平台作为美食城停车场。现场填土取芯调查结果表明, 桥区填土分布不均, 填土厚度为2~8 m。B匝道桥填土前后见图1、图2。



图1 B匝道填土前状况

检测单位定检时发现主线50#墩柱、A匝道3#墩和B匝道12#墩墩柱顶向河侧偏移, 墩顶支座上钢板与钢盆相对最大位移量分别达15.0 cm、16.0 cm、11.6 cm, 墩柱最大倾斜率达7.82‰, 远超规范值3.00‰, 且伴随有墩梁间的相互位移。

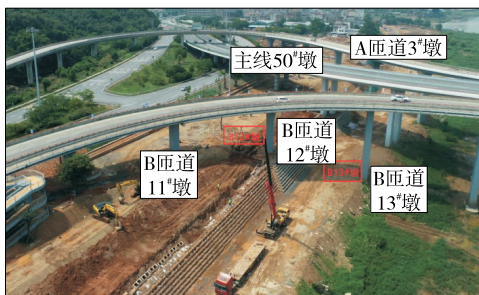


图 2 B 匝道填土后状况

本文以 B 匝道 12[#] 墩为例,研究墩柱偏位分析方法及纠偏措施。

2 墩柱偏位分析及验算

2.1 偏位原因分析

(1) 陡坡填土导致边坡稳定性下降,桥区软土层发生深层蠕动挤压桥桩;墩柱两侧填土高差引起不均匀土压力差,使墩柱形成偏位。

(2) 边坡填土压实度差,雨季时填土固结,表现出类似黄土“湿陷性”的特征,会对墩柱产生持续的水平挤压(见图 3)。

2.2 墩柱位移分析

图 4 为 B 匝道桥梁体和墩柱偏位示意图。B 匝

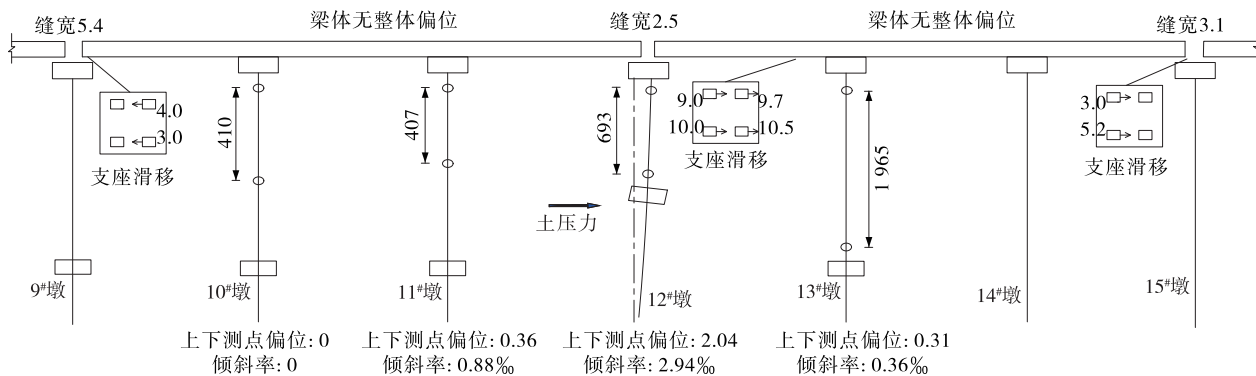


图 4 B 匝道桥梁体和墩柱偏位示意图(单位:cm)

大桩号侧偏位 9.8 cm。

(3) 墩柱偏位计算取值。墩柱偏位验算采用检测数据中最大位移值进行反算,以包络结构最不利受力工况。B 匝道桥 12[#] 墩位移计算采用值如下:墩顶位移 11.64 cm;墩身倾斜 3.68%;墩底位移 3.50 cm;倾斜方向为往河侧。

2.3 墩柱偏位验算

桥区堆载对桥梁主要有两方面不利影响:一是软土地区填土荷载引起地基土固结,使桩基受到负摩擦而下沉,容易引发相邻桥墩不均匀沉降;二是堆

载作用下软土土层发生水平位移,导致桩基发生挠曲带动墩柱偏位,降低桩基承载能力。

道梁体整体移位和墩柱偏位情况如下:

(1) 梁体整体移位情况。9[#] 墩、12[#] 墩、15[#] 墩墩顶伸缩缝宽度均在设计容许范围内,满足规范要求,且与 2020 年检测数据相比无明显变化,推定 9[#]~12[#] 桥联及 12[#]~15[#] 桥联未发生明显梁体整体偏移。

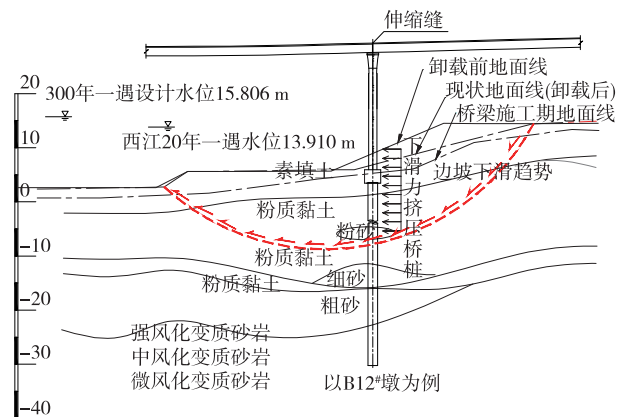


图 3 墩柱偏位机制示意图(单位:m)

(2) 墩柱偏位情况。12[#] 过渡墩大小桩号侧支座滑移值接近,分别为 10.0 cm、9.0 cm、10.5 cm、9.7 cm,且左右侧梁体均无明显偏位。因此,12[#] 墩墩顶偏位绝对值可近似取支座滑移的平均值,即向

载作用下软土土层发生水平位移,导致桩基发生挠曲带动墩柱偏位,降低桩基承载能力。

2.3.1 不均匀沉降敏感性分析

桥区桩基均按嵌岩桩设计,理论上不会发生沉降。将原设计 5 mm 不均匀沉降增大至 10 mm,分析上部结构对不均匀沉降的敏感程度,结果见表 1。

从表 1 可以看出:软土固结使桩基受到负摩阻力,桥墩不均匀沉降后主梁弯矩相比原设计时主梁弯矩的变化率在 4.1% 以内,主梁内力对不均匀沉降敏感性较差。

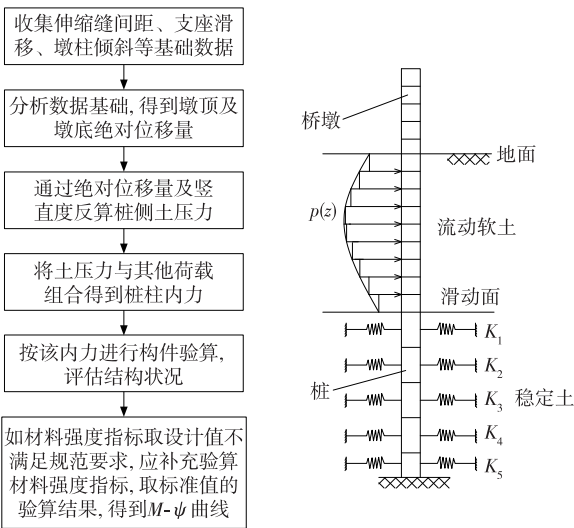
表 1 不均匀沉降后主梁承载能力极限状态验算结果

位置	最大弯矩/(kN·m)		弯矩增大比例/%
	5 mm 不均 匀沉降	10 mm 不均 匀沉降	
第 1 跨跨中	34 023.4	34 762.3	2.2
第 2 跨跨中	27 154.1	27 468.2	1.2
第 3 跨跨中	39 135.5	40 203.8	2.7
1# 墩墩顶	-43 024.0	-44 468.6	3.4
2# 墩墩顶	-37 567.0	-39 101.7	4.1

2.3.2 桩身内力计算

桥下后期堆土将导致软土向低处蠕动,进而在桩侧形成侧向土压力导致墩柱偏位,影响桥梁安全,需对桩基承载能力进行验算。由于桩-土相互作用边界条件复杂且难以获取,采用反向计算和正向计算方法进行推算,力求掌握桩柱的力学行为并验算其结构状态。其中正向计算方法有两种,分别为基于“被动桩”理论^[4]计算墩柱内力(正向计算方法 1)和数值模拟分析(正向计算方法 2)。

(1) 反向计算:基于现状测量数据推定墩桩内力。计算步骤(见图 5)如下:1) 滑动面以下用土弹簧 m 法模拟桩-土间相互作用,淤泥层底以上桩侧施加三角形或倒梯形线性变化的荷载模拟水平推力;2) 输入支座的剪切刚度模拟墩顶约束;3) 通过不断调整桩侧施加的线性荷载,使梁体位移、墩顶支座位移、墩柱位移计算值与实测值吻合,此时认为墩及桩的结构内力接近真实状态,按该内力进行桩柱



M 为弯矩; ψ 为曲率; $p(z)$ 为桩侧土压力;
 $K_1 \sim K_5$ 为沿深度方向土弹簧刚度

图 5 反向计算流程及图示

强度及裂缝宽度验算。

(2) 正向计算方法 1:基于“被动桩”理论计算墩柱内力。根据深厚软土区域堆载情况,应用无限堆载条件下水平附加应力计算公式及经验公式^[4],计算堆载情况下桩侧附加水平土压力值及分布范围,得到结构内力,进而进行结构强度和裂缝宽度验算(见图 6)。桩身被动荷载的计算是被动桩承载验算的核心和难点。

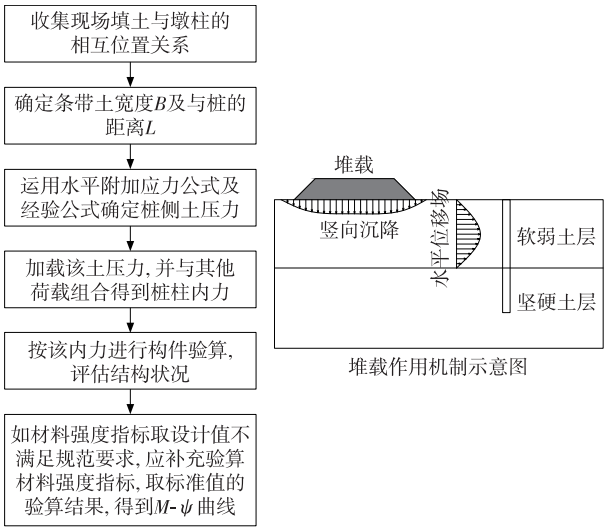


图 6 正向计算方法 1 的流程及图示

(3) 正向计算方法 2:数值模拟分析。利用实体有限元软件 MIDAS/Gts,按照实际填土顺序建立施工阶段,利用既有地质资料及经验值设置土体参数,偏不利地调整填土过程,直到墩柱偏位数据、支座剪切变形等数据与实测值吻合,此时认为所得墩及桩的内力接近真实状态,按该内力进行结构强度和裂缝宽度验算。图 7 为 B 匝道桥整体数值模拟分析模型。

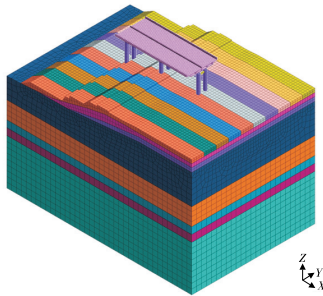


图 7 B 匝道桥整体数值模拟分析模型

综合以上 3 种计算分析方法进行计算,结果如下:1) 采用正、反向计算的桩柱内力特性基本一致,桩身弯矩最大值均出现在地面以下 12 m 左右;基

于“被动桩”理论的计算结果和反向计算结果基本相符,数值模拟分析方法的计算结果比反向计算结果偏小。2) 反向计算忽略了原有施工误差,认为墩柱偏位及倾斜均由后期填土造成,验算结果偏于保守。3) 采用基于“被动桩”理论的计算方法,土压力取值完全依赖理论计算公式,但被动桩受力复杂,目前尚无可供参考的规范条文,基础的理论分析也有待进一步完善。4) 数值模拟分析需要明确施工步骤及分层厚度,但桥下周边土体堆、填、挖的时间和空间顺序难以完全追溯,土体参数也采用经验值^[5]。综上,考虑到 3 种分析方法的局限,桩身内力验算取 3 种分析方法的包络结果(见表 2)。

表 2 桥梁桩基验算结果

墩号	验算截面	承载力极限状态(承载力富余系数)		正常使用极限状态	是否满足规范要求
		材料强度采用设计值	材料强度采用标准值	裂缝宽度/mm	
B 匝道 12 [#] 墩	D180 cm 桩身	1.38	1.65	0.13	是

3 纠偏方案及纠偏效果

3.1 边坡加固及纠偏方案

对桥墩范围内边坡采用袖阀管注浆提高边坡稳定性,然后进行墩柱纠偏处理。纠偏总体顺序如下:在承台岸侧施工大直径 D60 cm 应力释放孔,承台两侧施工 D30 cm 应力释放槽,应力释放槽深度为 23 m(桩基变形深度往下 3D,D 为桩基直径);对墩顶、墩底同步进行顶推^[6];纠偏完成后在桩基对应位置各施工 2 根高压旋喷桩加固地基,桩长 18 m(见图 8)。

3.2 纠偏前控制

纠偏是一个动态调整的过程,纠偏过程中需结

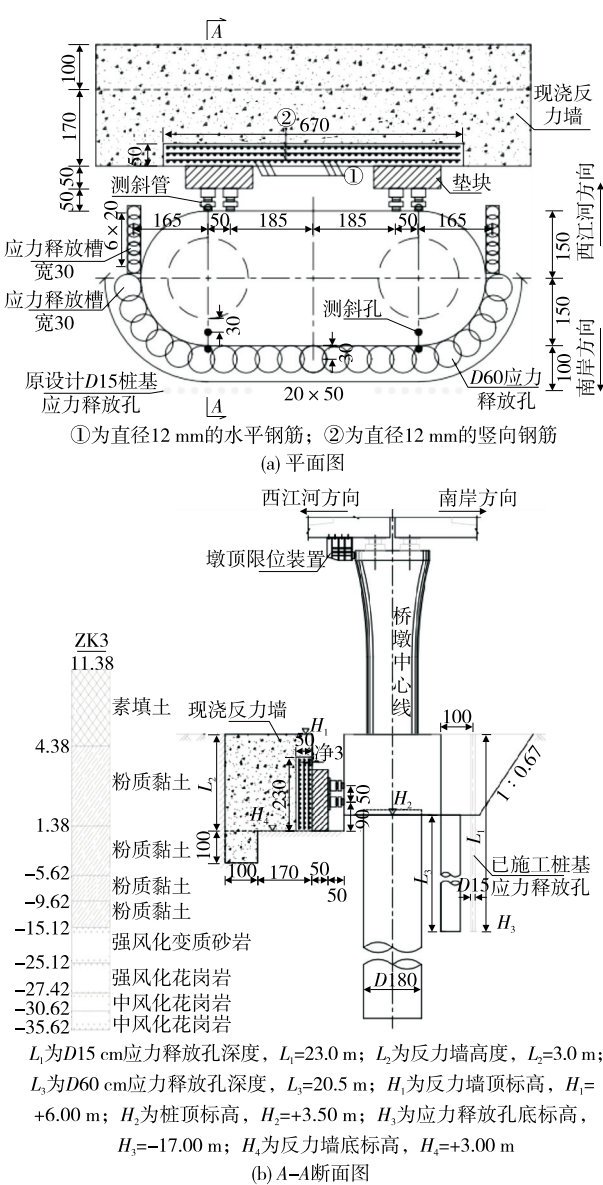


图 8 B 匝道 12[#]墩综合纠偏方案(单位:标高为 m, 其他为 cm)

合监测数据不断调整顶推参数^[7]。纠偏前,在保证结构安全的前提下设置顶推参数值(见表 3)。

表 3 B 匝道 12[#]墩顶推主要控制参数

项目	控制值/kN	备注	项目	控制值/kN	备注
桩顶抗剪	≤1 310	单根桩	承台	应力释放孔有效孔深 13 m	≤1 010 抗弯控制 ^[8]
反力墙提供的反力	≤3 830	—	顶推	应力释放孔有效孔深 9 m	≤1 250 抗弯控制
梁底钢结构反力装置	≤800	根据规范,安全系数取 1.8	力	应力释放孔有效孔深 6 m	≤1 600 抗弯控制

注:表中值已考虑 1.2(抗弯承载力)、1.3(抗剪承载力)的安全系数。

施工前结合应力释放孔实测深度提出图 9 所示顶推力-位移控制曲线。需说明的是,应力释放孔(槽)采用泥浆置换后,桩顶抗剪及承台顶推力计算按 13 m 无

约束考虑;纠偏过程中最大控制目标值考虑预留 1/4 回弹量,按现状偏位的 5/4 控制,即墩顶纠偏 129 mm、墩底纠偏 56 mm;图 9 中曲线最高点(56 mm,

1 011 kN)作为顶推最大控制目标值,顶推过程中实际绘制的力-位移曲线均应在图 9 所示曲线的下方。

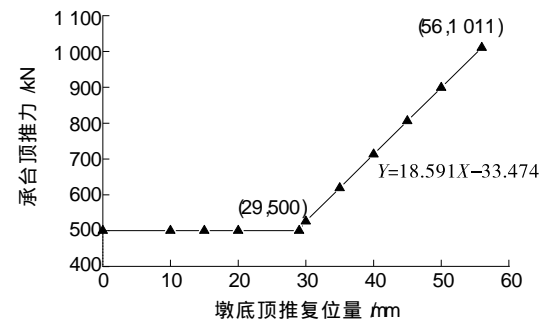


图 9 承台顶推力-位移曲线

3.3 纠偏过程控制

(1) 纠偏主要工序。墩柱纠偏工序为岸侧开挖至承台底面→在承台岸侧施工 $D60\text{ cm}$ 应力释放孔并连成槽,承台两侧施工 $D30\text{ cm}$ 应力释放孔并连成槽→在河侧现浇混凝土反力墙,为墩底顶推提供反力支撑→在河侧对应桩基位置承台底往上 0.4 m 处安装千斤顶→测试墩顶支座摩阻力(墩顶顶推主要克服支座摩阻力)→墩顶和墩底同步顶推→纠偏到位后,在墩顶和承台处安装临时限位装置→持荷时间不小于 48 h ,然后解除临时限位装置约束。

(2) 纠偏过程中的动态调整。由于大位移下

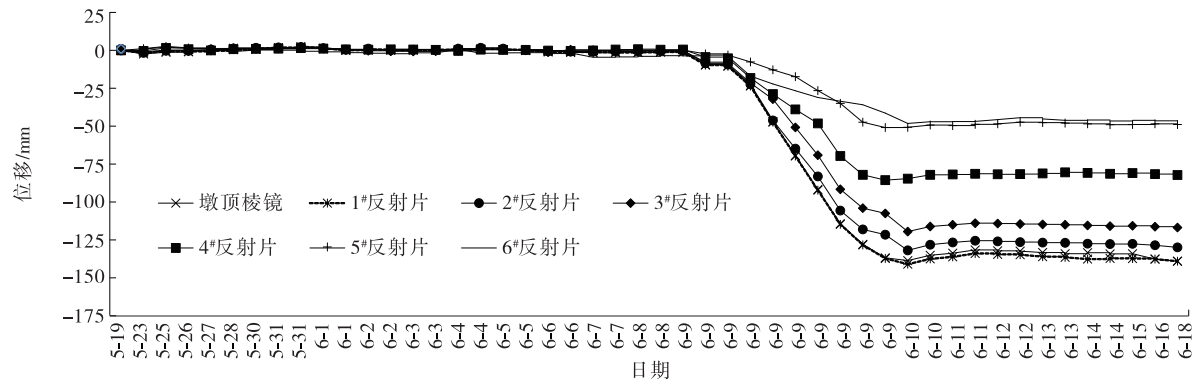


图 11 B 匝道 12# 墩各监测点纠偏量时间-位移曲线

表 4 纠偏前后各项验收指标对比

墩号	支座滑移量/cm		墩身竖直度/‰		验收要求	是否满足要求
	纠偏前	纠偏后	纠偏前	纠偏后		
主线 50# 墩	15.0	3.4	7.62	2.01	支座滑移量 $\leq 15\text{ cm}$, 竖直度 $\leq 3\text{‰}$	满足
A 匝道 3# 墩	16.0	3.2	3.68	0.28	支座滑移量 $\leq 10\text{ cm}$, 墩柱倾斜度 $\leq 3\text{‰}$	满足
B 匝道 12# 墩	11.6	2.8	4.62	0.40		满足

4 结论

本文以广东某大桥墩柱纠偏工程为依托,分析

桩-土相互作用边界具有不确定性,施工时结合实际顶推力-位移关系在图 10 中查找对应区间,分析桩基边界及对应的最大顶推力控制值,确保结构安全。结合现场实际顶推情况和图 9,确定应力释放孔有效孔深为 $6\sim 9\text{ m}$,对应最大顶推力为 $1\,250\text{ kN}$ 。现场实施的最大顶推力为 $1\,218\text{ kN}$,在控制范围内。

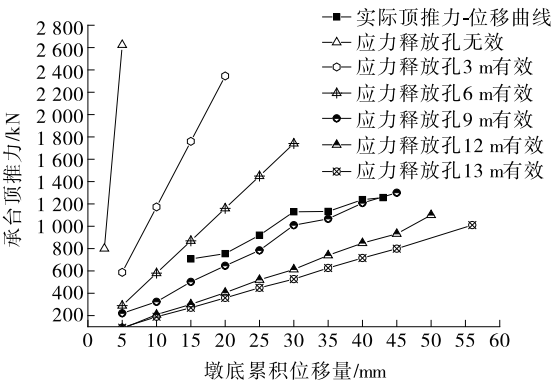


图 10 应力释放孔不同有效深度处力-位移曲线

3.4 纠偏效果

对 B 匝道 12# 墩墩顶、墩底进行顶推纠偏,墩顶最大纠偏量为 136 mm ,承台顶最大纠偏量为 43 mm 。图 11 为各监测点纠偏量时间-位移曲线,表 4 为纠偏前后各项验收指标对比。

墩柱偏位的原因,提出桩基偏位计算分析方法、纠偏措施及施工控制要求,使墩柱成功复位。结论如下:

(下转第 150 页)