

基于既有墩柱偏位的损伤分析与加固设计

李乾坤^{1,2}, 梁雄^{1,2}

(1. 广东和立交通养护科技有限公司, 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 510440)

摘要: 桥下地面非对称性堆载将引起桩基偏位, 并产生附加弯矩, 严重时可能危及桥梁的安全使用。基于某桥梁因地面堆载导致墩柱偏位的应急处治项目, 结合桥梁现场的应急检测和测量数据, 通过已知的墩顶位移数据逆向推算桩基所承受的侧向土压力值, 利用 Midas Civil 软件进行数值模拟分析, 评估当前墩柱偏位状态下的承载能力, 以此制定了桩基础置换加固方案, 并采用桩基反顶压施工技术, 使新旧桩基能够协同受力分担荷载。验算结果显示, 该加固方案显著提升了桥墩的纵向抗推刚度和抗弯承载能力, 加固措施安全有效。

关键词: 桥下堆载; 墩柱偏位; 损伤分析; 加固设计; 桩基反压

中图分类号: TU 997

文献标识码: A

Damage Analysis and Reinforcement Design Based on Existing Pier Column Deviations

LI Qiankun^{1,2}, LIANG Xiong^{1,2}

(1. Guangdong Heli Traffic Maintenance Technology Co., Ltd., Guangzhou 511400, Guangdong, China;

2. Guangdong Communication Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510440, Guangdong, China)

Abstract: Asymmetrical heaped load beneath bridges can induce deviations in pile foundations, consequently generating additional bending moments. This can critically compromise bridge safety. This study is derived from an emergency intervention project that addresses the deviation of pier columns due to heaped load on a specific bridge. It incorporates emergency inspection and measurement data gathered onsite. The lateral earth pressures acting on the pile foundation are deduced by reversing calculations from known data on pier top displacements. Additionally, Midas Civil software is employed for numerical simulation analyses to evaluate the load-bearing capacity under the current deviation of the pier columns. A reinforcement strategy, involving the replacement of the pile foundation, is proposed based on these analyses. The use of counter-pressurization construction techniques allows the new and existing pile foundations to collaboratively share and distribute the loads. The validation results confirm that this reinforcement scheme effectively enhances the pile foundation's load-bearing capacity and the pier's longitudinal stiffness, ensuring both safety and efficacy.

Key words: sub-bridge heaped load; pier column deviation; damage analysis; reinforcement design; counter-pressurization of pile foundations

随着城市化进程的迅猛推进, 工程建设的规模不断扩大, 桥下空间的利用也变得愈发普遍,

随之而来的是堆载现象的显著增多。然而, 大面积堆载会对邻近桥梁的基础安全构成不利影

收稿日期: 2024-10-16

作者简介: 李乾坤, 工程师, 硕士, 研究方向为桥梁养护与维修加固设计

基金项目: 广东省交通集团科技项目公路桥梁通行大件运输车辆安全评价关键技术研究(编号: JT2024YB17)

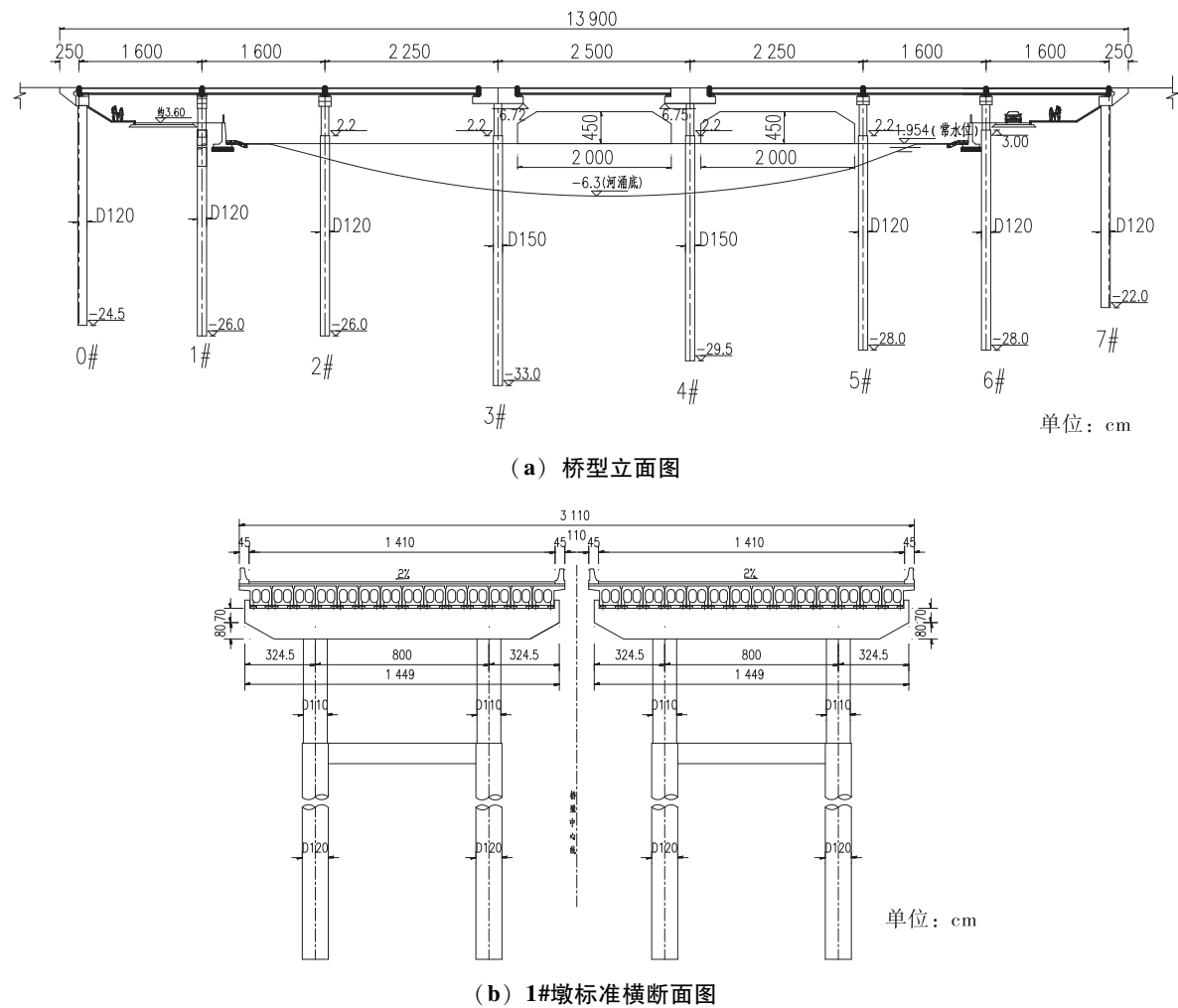
响^[1-2]。新增堆载使得下方软土层发生沉降,从而在桩基侧面产生了负摩擦阻力^[3],不仅增加了桩基的竖向外荷载,还削弱了其竖向承载能力,可能引发桩基下沉的风险^[4]。此外,堆载还促使软土土层发生水平方向的位移,进而带动桩身发生形变,不仅增加了桩基的附加内力,还可能导致墩柱发生偏位,对桥梁结构的整体稳定性造成不利影响^[5]。针对地面堆载对桩基的影响,国内学者进行了较多研究。温建兴^[6]对陡坡堆土引起墩柱偏位原因进行了研究分析并给出了纠偏案例;邱忠南等^[7]以某桥梁偏位为背景,对墩柱倾斜斜率和堆土厚度进行敏感性分析,并提出了加固措施;李志伟等^[8]以工程实例为背景,采用有限元法和现场检测相结合的方式,对高填方横桥向堆载作用下墩柱和桩基进行受力分析,并提出了纠偏措施;郭彤^[9]针对大纵坡柔性高墩墩柱偏位的结构受力性能进行非线性受力分析,并提出了采用导梁与千斤顶相结合的纠偏措施。上述研究成果着重于深入探讨地面堆载导致桥梁桩柱偏位的深层次原因。然而,目前针对桩土相互作用的

研究尚存在某些局限性,实际工程项目中,深厚软土地质条件下既有结构变形的成因异常复杂且多样。

本文结合实际工程案例,对墩柱偏位、支座滑移、桩柱间距等关键要素实施了全面且细致的检测与测量工作。采用 Midas Civil 软件对墩柱在偏位状态下的力学性能进行模拟分析,基于验算结果,提出了科学合理的加固方案,为同类型桥墩的纠偏加固工作提供借鉴及参考。

1 工程背景

该桥上跨水道,上部结构采用先张法预应力砼空心板,跨径组合为(2×16+22.5+25+22.5+20+16)m,下部结构采用普通钢筋混凝土盖梁,双柱式桥墩,轻型桥台,基础为 D120 cm 灌注桩基础,按嵌岩桩设计,设计荷载为汽车-20 级,挂车-100 级。桥墩支座采用球面橡胶支座,桥台支座采用聚四氟乙烯球冠板式橡胶支座,全桥未设置伸缩缝,在相应位置设置了沉降缝。桥型布置图如图 1 所示。



桥梁管养单位在巡查中，发现右幅 1#墩盖梁与上部梁板间存在显著的异常相对位移，同时确认 1#墩支座有滑移现象。此外，第 1 跨桥下通道的部分区域出现了开裂问题，且桥台护坡表现出明显的下沉迹象。经现场核查，1#墩紧挨河堤，外设河堤挡墙，河床临空面高约 6 m，第 1 跨桥底处约有 30 m 高的建筑材料堆载。

2 现场应急检测情况

在墩柱偏位事件发生后，交通主管部门及相关的桥梁管养单位迅速启动了应急响应程序。为确保公共安全，立即封闭了桥上交通，并清理桥下堆积的建筑材料堆载。同时，紧急协调并组织

专业检测单位对桥梁结构进行全面的应急检测及现场精确测量，以评估桥梁的安全状况。

2.1 外观检测

①右幅 1#墩盖梁外侧出现 205 mm 的偏位，内侧偏位则为 30 mm；同时，外侧墩顶偏位达到 165.8 mm，内侧墩顶偏位为 69.2 mm。左幅 1#墩盖梁外侧偏位为 85 mm，内侧偏位为 50 mm；外侧墩顶偏位为 77.2 mm，内侧墩顶偏位为 57.8 mm。而桥台及其他墩柱则未见明显偏位现象。②0#台护坡整体下沉了 13 cm。③1#墩支座存在 19 处的滑移现象，其中最大滑移距离达到了 19 cm。图 2 和图 3 分别展示了 1#墩实测偏位的示意图及偏位现场照片。

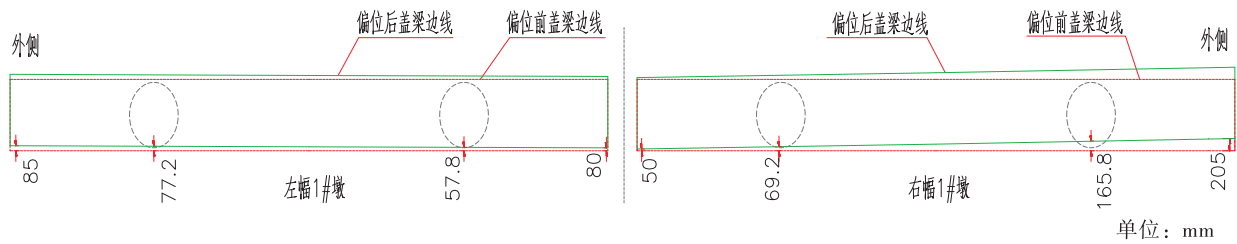


图 2 1#墩实测偏位示意图

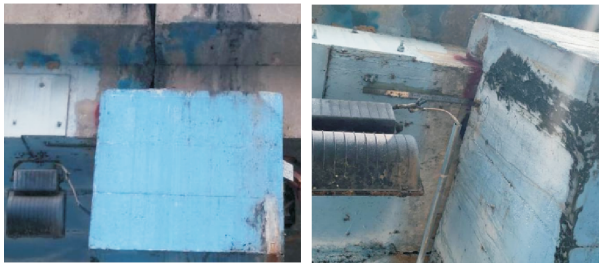


图 3 1#墩墩顶偏位现场照

2.2 测量情况

为深入掌握墩柱的实际位移状况，对 1#~6#墩柱上下位置、盖梁（台帽）四个角点及梁缝进行补充测量，以便对所获取的测量数据与原始施工图纸进行全面细致的对比分析。

根据表 1 所展现的测量数据，在 2#墩未发生偏移的条件下，可认为 1#墩已向大桩号（即河涌

表 1 实测柱间距与理论柱间距对比表

孔号	理论柱间距/cm	实测柱间距/cm				偏差/cm				备注
		柱 1	柱 2	柱 3	柱 4	柱 1	柱 2	柱 3	柱 4	
第 1 孔	1 573	—	—	—	—	—	—	—	—	
第 2 孔	1 607	1 583.2	1 874.4	1 593.8	1 599.7	-23.8	-19.6	-13.2	-7.3	0#台和 7#台桩基埋入地下无法测量
第 3 孔	2 243	2 246.7	2 246.9	2 244	2 241	3.7	3.9	1	-2	
第 4 孔	2 500	2 496.9	2 501	2 501.4	2 496.1	-3.1	1	1.4	-3.9	
第 5 孔	2 243	2 250.8	2 246.7	2 239.7	2 250.1	7.8	3.7	-3.3	7.1	
第 6 孔	2 007	1 997.8	2 004.3	2 008.8	2 002.9	-9.2	-2.7	1.8	-4.1	
第 7 孔	1 573	—	—	—	—	—	—	—	—	

方向）产生了偏移，偏移的具体数值依次为 23.8 cm、19.6 cm、13.2 cm 及 7.3 cm。对于第 3~5 孔范围内的墩柱，其实测值与理论值之间并未展现出显著的差异，且这些差值的变化并未呈现出任何规律性。在充分考虑了施工过程中可能存在的操作误差以及测量环节可能引入的精度影

响后，可以判断第 3~5 孔所涉及的墩柱并未发生偏移现象。

3 现状桩柱损伤分析评估

3.1 评估思路

桥梁加固前须进行详尽的结构计算分析，旨

在准确评估当前结构的承载状态, 以此制定科学合理的加固方案。为了明确在 1#墩发生墩顶移位情况下其桩柱所承受的力学状态, 基于检测报告及现场实地勘查资料, 采取逆向计算思路, 即利用已知的 2.1 节墩顶位移数据逆向推算桩基所承受的侧向土压力值, 进而计算出桩基及墩柱当前的受力状态。

(1) 数值模拟时, 对于淤泥层以下区域, 采用土弹簧模拟桩基础与土之间的相互作用; 在淤泥层以上区域, 通过施加线性变化的荷载模拟桩侧所受的水平推力。

(2) 基于支座检测情况, 在墩顶支座位置施加与支座滑动方向相反的摩擦力, 鉴于 1#墩支座已出现滑移现象, 其实际摩擦来源于混凝土与支座橡胶之间的相互作用。由于缺少球冠型支座与接触面之间摩擦系数, 本次计算暂按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015) 中的相关条款, 暂定板式橡胶支座与混凝土接触面的摩擦系数为 0.3。基于这一设定, 求得单支座摩擦力为 17.1 kN。

(3) 持续调整桩侧所施加的线性荷载, 直至墩顶位移值与实测数据相吻合, 此时桩柱的结构内力将趋近于实际损伤状态, 基于此内力进行结构承载能力验算。

3.2 数值模拟

结合 3.1 节所述评估思路, 计算采用空间有限元软件 Midas Civil 2022, 按实际截面尺寸分别建立右幅 1#墩和左幅 1#墩下部结构模型, 如图 4 所示。盖梁与桥墩采用刚性连接, 下部桩基按实际桩长建模, 采用土弹簧约束模拟桩基土体对桩基的作用, 桩身土弹簧刚度取值采用文献^[9]附录 L 规定的 m 法计算确定, 地基水平向抗力系数的比例系数 m 的取值依据文献^[10]表 L.0.2-1 ~ 表 L.0.2-2, 各桩基单元的桩侧土弹簧的水平刚度如表 2 所示。

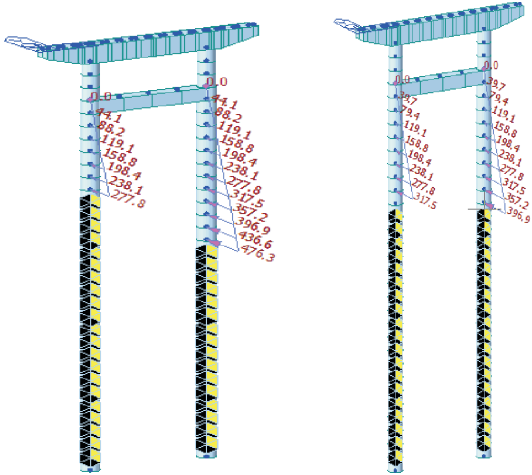


图 4 1#墩柱 Midas Civil 有限元模型

表 2 桩侧土弹簧水平刚度表

土层信息	土层至桩顶 深度/m	比例系数/ (kN/m ⁴)	抗力系数/ (kN/m ³)	桩计算宽度/m	桩身单元 高度/m	土弹簧水平刚度/ (kN/m)
淤泥质土	8	3 000	24 000	2.548	1	61 152
淤泥质土	9	3 000	27 000	2.548	1	68 796
淤泥质粉细砂	10	5 000	50 000	2.548	1	127 400
淤泥质粉细砂	11	5 000	55 000	2.548	1	140 140
淤泥质粉细砂	12	5 000	60 000	2.548	1	152 880
淤泥质土	13	3 000	39 000	2.548	1	99 372
淤泥质土	14	3 000	42 000	2.548	1	107 016
淤泥质土	15	3 000	45 000	2.548	1	114 660
淤泥质粉细砂	16	5 000	80 000	2.548	1	203 840
淤泥质粉细砂	17	5 000	85 000	2.548	1	216 580
淤泥质粉细砂	18	5 000	90 000	2.548	1	229 320
粉质黏土	19	10 000	190 000	2.548	1	484 120
粉质黏土	20	10 000	200 000	2.548	1	509 600
粉细砂	21	10 000	210 000	2.548	1	535 080
粉细砂	22	10 000	220 000	2.548	1	560 560
粉细砂	23	10 000	230 000	2.548	1	586 040
粉细砂	24	10 000	240 000	2.548	1	611 520
粉细砂	25	10 000	250 000	2.548	1	637 000
粉细砂	26	10 000	260 000	2.548	1	662 480
粉细砂	27	10 000	270 000	2.548	1	687 960
强风化泥质粉砂岩	28	30 000	840 000	2.548	1	2 140 320

由于桩土力学边界条件的复杂性,再详尽的

分析亦难以完全模拟结构真实的力学响应。经上述逆向计算方法的评估分析, 结果显示 1#墩桩基已发生塑性破坏。为确保结构安全, 本次设计决定对 1#桥墩桩基础实施置换加固措施。加固工作将遵循以下原则: ①维持原设计荷载标准, 即汽车-超 20 级、挂车-120 级。②以理论计算为依据, 同时考虑现场交通流量及施工难度采用“桩基础置换”方式进行加固, 恢复或提高结构承载能力, 保证桥梁安全。

4.2 新增桩基、承台加固方案

沿桥梁纵向在前后两侧分别增设一根直径为 D100 cm 的钻孔灌注桩, 并采用“骑马式一字承台结合横系梁”的构造方式, 共同构筑成“工字型”的复合结构体系, 以增强整体结构对纵桥向桩侧水平推力的抵抗能力。承台的尺寸为 650 cm (顺桥向) × 260 cm (横桥向) × 150 cm (高度), 新增的横系梁规格为 100 cm × 100 cm, 加固方案如图 8 所示。

4.3 盖梁、墩柱增大截面加固方案

原盖梁尺寸 1 449 cm (长) × 120 cm (宽) ×

140 cm (高), 由于 1#墩偏位, 梁端的间隙并未随之调整, 导致支座无法在盖梁顶面对称设置, 墩顶的支座已滑移至盖梁的边缘, 盖梁顶面的宽度未能达到抗震规范中防止落梁的构造标准。鉴于此, 设计采取在盖梁顺桥向的两侧实施不对称外包砼方案, 外包砼平均厚度为 30 cm。同时, 针对墩柱部分也采取外包砼处理, 其厚度为 25 cm, 以进一步提升整体结构的稳定性和安全性。根据盖梁跨中部分的跨高比 10.35 大于 5.0, 依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018), 盖梁应按照钢筋混凝土受弯构件进行计算。经计算验证, 截面增大后盖梁的承载能力提高了 8.96%, 具体数据详见表 5。具体的加固方案如图 8 所示。

表 5 加固前后盖梁承载力验算对比表

位置	弯矩效应/ (kN · m)	原设计		增大截面后		增量
		抗力 /(kN · m)	富余度	抗力 /(kN · m)	富余度	
盖梁跨中	2 030.6	4 072	50.13%	5 659	64.12%	13.98%
墩支点内侧	-3 215.9	-4 312	25.42%	-4 901	34.38%	8.96%

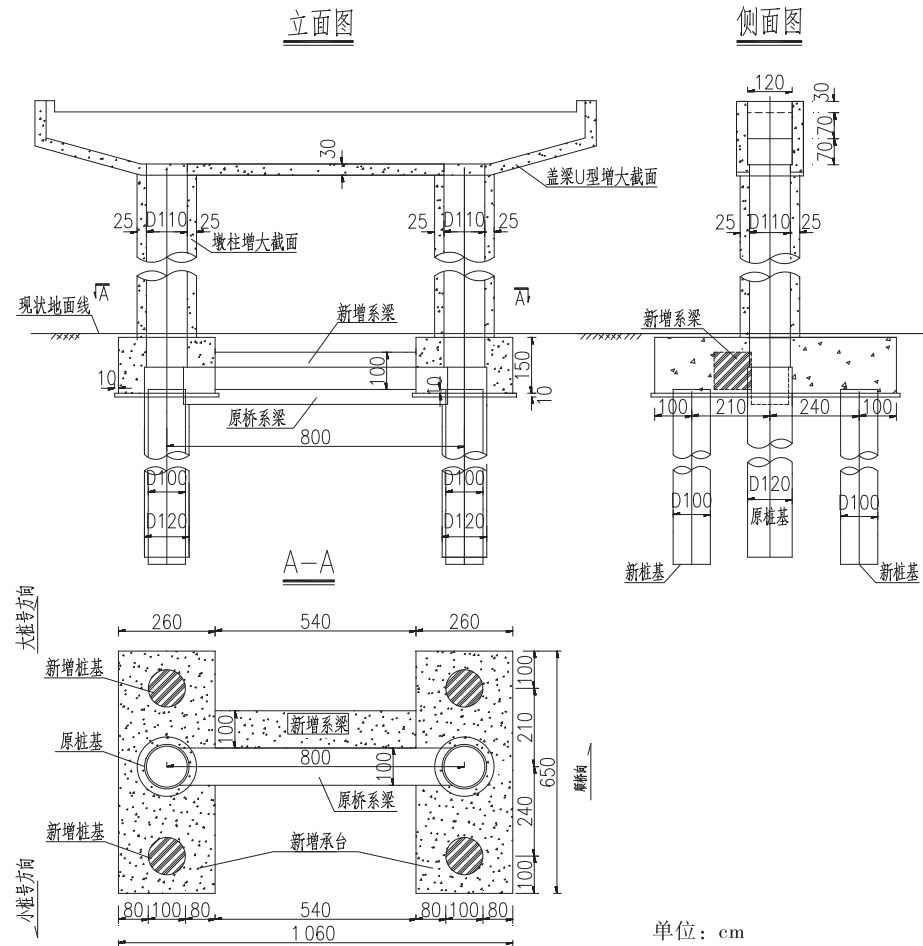


图 8 加固方案

4.4 施工技术要点

(1) 按设计尺寸和位置在新承台范围内桩柱四周（高度 1.5 m）及盖梁侧面刻剪力槽，槽宽 15 cm，槽深约为 5 cm（见图 9），刻槽时不应伤及墩柱钢筋。为了进一步强化新增结构与既有结构之间的粘结紧密度，同时对剩余的表面混凝土实施人工凿毛处理，凿毛深度 6 mm。

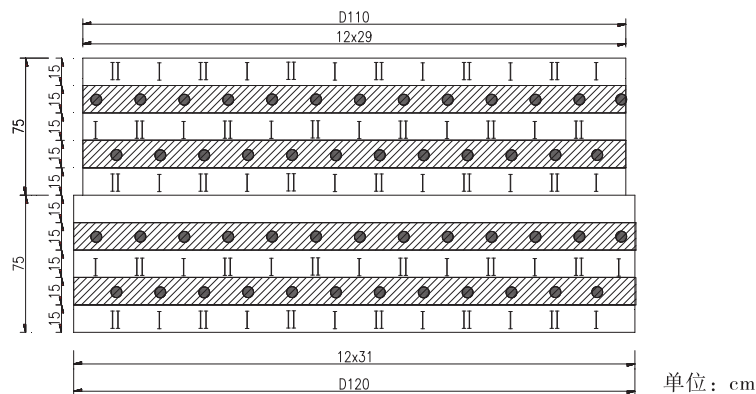
(2) 在植筋作业之前，务必采用钢筋探测仪对墩柱及盖梁的钢筋位置进行精确探测，并对植筋部位进行标记。若植筋位置与原结构钢筋存在冲突，应合理调整植筋位置以确保安全。

(3) 为减小对原结构截面的削弱，钻孔植筋工作应分阶段、分批进行。

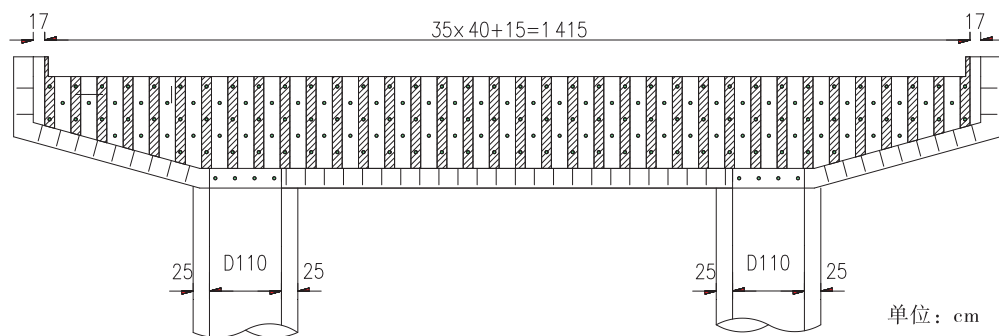
(4) 用刷子将配制好的界面胶均匀涂刷在已经处于干燥状态且经过表面处理的旧混凝土表面上，确保完全覆盖旧混凝土。在钢筋较为密集或进行大面积施工时，建议采用喷枪设备进行喷涂作业，以确保胶体喷涂均匀且全面覆盖喷涂面。

(5) 承台钢筋的布设工作应在确保不干扰植筋作业的前提下，力求同步进行。承台部分钢筋的施工须穿透现有系梁方可实施，承台主筋必须保持完整，不得截断，并严格按照设计要求布置。

(6) 墩柱增大截面工程实施时，主筋的底部与顶部必须分别延伸至承台与盖梁之中，以确保连接部分的牢固与稳定。



(a) 墩柱、桩基剪力槽立面展开及施工顺序示意图



(b) 立面植筋及剪力槽大样

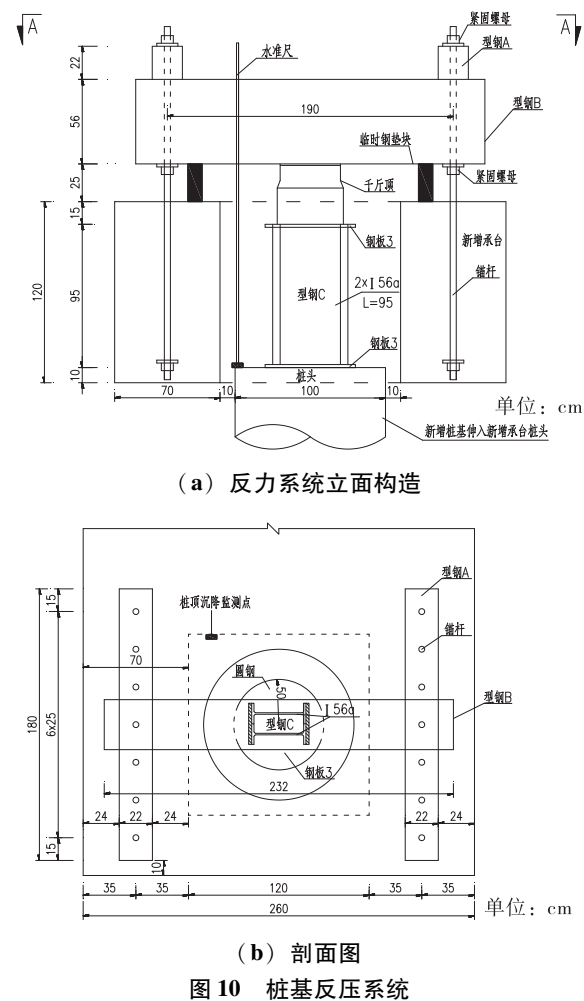
图9 新承台范围内桩柱四周（高度 1.5 m）及盖梁侧面刻剪力槽大样图

4.5 桩基反压施工技术

为了加速新桩基沉降的完成，尽快缩小新旧桩基之间的沉降差异^[11]，本次新增桩基的施工采用了创新的桩基反压技术，即通过新增承台将新增桩基与原桥桩基紧密相连，利用桩基反压技术来消除新增桩基的沉降，从而实现新增桩基与原桥桩基的协同受力。桩基反压系统见图 10，具体步骤^[12]：①在桥梁原桥桩基的两侧进行新增桩基的构筑作业。②新增桩基检测完成后，立模浇筑承台，用于连接原承台桩基与新增桩基。在新增桩基的桩头部位，暂不进行混凝土浇筑，以预留

出反压槽空间，并在桩顶埋设沉降观测水准尺，同时预埋锚杆。③待新增承台混凝土强度达到设计强度且龄期不少于 7 d 后，拆除槽口内模板，对槽口侧面进行凿毛处理，架设反力装置。利用反力装置对新增桩基的桩顶施加反压力，以此消除新增桩基的沉降，确保新增桩基与原桥桩基能够共同承受荷载。④新桩基反压到位后，进行第一层混凝土浇筑，即向槽口内浇筑混凝土至千斤顶底面位置，保证混凝土浇筑质量。⑤待槽口第一层混凝土强度达到设计强度后，同一承台两根新桩基同时卸压、拆除反力装置，对顶面混凝土

进行凿毛,将槽口承台顶层钢筋焊接补齐,浇筑第二层混凝土至槽口顶面,加强养护。



5 加固效果计算

为确保施工期间的安全性与稳定性,施工前部署了防落梁临时支架系统。同时在新增承台与新桩之间增设了桩基反压装置,以施加反向压力,确保新桩基能够完全承载旧桩既有的桩顶力。基于此,加固后的新旧桩基将协同工作,共同承担上部结构的恒载及活载作用。采用桩基置换方案后,新增桩基的承载能力已达到预期要求,且其安全系数显著提高,详见表 6。此外,桥墩的纵向抗推刚度在加固后大幅度增强,提升幅度高达 4.76 倍。综合考量施工条件与加固效果,本次加固方案被证实为最优选择,其实施成效极为显著,加固工程圆满完成。

表 6 加固后桩基承载力验算结果

验算位置	最不利效应组合		承载力		安全系数
	轴力/	弯矩效应/	轴力/	弯矩效应/	
	kN	(kN·m)	kN	(kN·m)	
新桩基	739	3 609	1 748	8 539	2.37

6 结语

本研究以某桥梁因地面堆载导致墩柱偏位的应急处治项目为背景,针对偏位后桩柱的力学性能及加固策略进行深入剖析,得出以下结论:

- (1) 通过已获取的墩顶偏位数据逆向推算桩基所承受的侧向土压力值,进而对桩柱偏位状态下的受力特性进行评估。此方法不仅简便易行,且具备较高的实用性。
- (2) 新增桩基、承台的桩基础置换方案可有效提高桩基的承载能力及桥墩的纵向刚度。
- (3) 盖梁增大截面加固后,不但满足了防落梁的构造标准,同时也提升了盖梁的承载能力。
- (4) 桩基反压施工技术的应用,实现了新旧桩基的协同受力,加固措施成效显著,不仅有效解决了当前偏位问题,更为今后类似桥梁结构的应急抢险与加固提供了宝贵的参考案例。

参考文献:

[1] 冯昌明,木林隆,孙志伟,等. 基于两阶段法的堆载对公路桥梁桩基础影响分析[J]. 岩土力学,2014,35(S2): 528-534.

[2] 周平. 软土地区铁路桥梁桥下堆载安全敏感性分析[J]. 世界桥梁,2023,51(2):97-103.

[3] 王晓佳,张启伟. 软土地区地面堆载对桥梁下部结构的影响分析[J]. 结构工程师,2020,36(4):145-150.

[4] 陈雪奖,周卫滨. 不平衡堆载对桥梁桩基影响试验研究[J]. 公路工程,2015,40(6):36-42.

[5] 张恒,廖鸿钧. 软土地区大面积堆载作用下邻近桥梁墩柱偏位分析研究[J]. 广东土木与建筑,2022,29(11): 77-80.

[6] 温建兴,武建中,彭奋杰. 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.

[7] 邱忠南,吕宏奎,齐秦,等. 不平衡堆土导致桥梁变位的安全评估及处治技术[J]. 世界桥梁,2023,51(5): 111-117.

[8] 李志伟,杨岳峰,赵剑豪,等. 高填方堆载对邻近桥梁桩基受力影响分析及处理[J]. 桥梁建设,2023,53(3): 143-150.

[9] 郭彤,汪建群. 大纵坡柔性高墩桥桥墩偏位处治及其安全性评估[J]. 中外公路,2016,36(2):172-177.

[10] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG 3363—2019[S]. 北京: 人民交通出版社,2020.

[11] 陈大江,李龙. 增补桩基法在桥梁桩基冲刷病害中的应用[J]. 工程与建设,2015,29(5):674-676.

[12] 李伟. 深层软基桥墩倾斜成因分析及加固方案[J]. 广东土木与建筑,2023,23(1):58-61.