AUREK
安睿克智能科技

AUREK ENGINEERING RESEARCH REPORT

AUREK-RC-AR-046

技术研究报告

重载立柱倾覆力矩、地脚螺栓与基础承载研究

Heavy-column overturning moments, anchor bolts and foundation bearing

江苏安睿克智能科技有限公司

V1.0 | 2026-10-25

www.aurek.cn/resources

摘要 ABSTRACT

AUREK-RC-AR-046 / V1.0 / 2026-10-25

针对 500 kg 额定工作负载固定立柱机械手，分别研究现有 R2.5 m 与假设扩展 R3.5 m 工况。基于现有 8×M24 L 型预埋图提取几何，建立工件、夹具、臂架、配重和立柱的完整载荷路径，并采用拉力单边锚杆与压缩单边接触求解底板及基础反力。质量、重心和动作参数作为明确研究假设，材料与地基未知量以需求反算和参数扫描处理。在代表组合工况下，两半径倾覆合矩为 25.39、34.83 kN·m，最大单杆拉力 9.65、14.11 kN；建议 1.5×1.5×0.8 m 基础对应地基峰值压力 113.4、214.7 kPa，接触面积 66.2%、34.0%。R3.5 m 的最不利地基压力方向约 24°，说明仅沿边或对角线验算可能遗漏方位峰值。报告分项讨论钢材、底板、混凝土锚固、基础本体与地基，核验正式标准版本，并通过 34 项独立复算和积分检查。研究结果用于条件化方案比较，不证明实际设备、8×M24 锚固或建议基础已满足承载要求。

关键词：固定立柱机械手；倾覆力矩；群锚；单边接触；基础偏压；参数化研究

Heavy-column overturning moments, anchor bolts and foundation bearing

This study evaluates a column-mounted manipulator with a rated working load of 500 kg at the existing 2.5 m end-joint radius and a hypothetical 3.5 m extension. Drawing geometry for eight M24 L-shaped cast-in anchors is separated from resistance evidence. A complete load path includes the payload, fixture, arm, counterweight and fixed column. Tension-only anchor springs and compression-only contact are solved with exact polygon integration. Unverified masses, centres of gravity and accelerations are explicit research inputs. Under the representative combined case, overturning moments are 25.39 and 34.83 kN m, and peak individual anchor tensions are 9.65 and 14.11 kN. For the suggested 1.5 by 1.5 by 0.8 m footing, peak soil pressures are 113.4 and 214.7 kPa, with contact fractions of 66.2% and 34.0%. The 3.5 m pressure maximum occurs near 24 degrees rather than necessarily along an edge or diagonal. Steel, plate bending, concrete anchorage, footing structure and ground bearing are assessed separately. Thirty-four numerical verification checks support the calculation implementation. The conditional results do not certify the actual equipment, anchorage or foundation, and do not authorize extending the existing machine to 3.5 m.

Keywords: column-mounted manipulator; overturning moment; anchor group; unilateral contact; eccentric footing pressure; parametric study

核心结论 KEY FINDINGS

- 代表组合工况：R2.5 m 与 R3.5 m 倾覆合矩分别 25.39、34.83 kN·m，含工件、夹具、臂架、配重及水平动态作用。
- 代表单边接触模型：最大单杆拉力 9.65、14.11 kN；8×M24 图纸本身不提供锚固或地基承载证明。
- 建议 1.5×1.5×0.8 m 基础在组合工况下地基峰值压力 113.4、214.7 kPa；R3.5 m 峰值约在 24°方位。
- 完成 34 项数值验证；真实材料、质量、配筋、地勘及实物试验仍未构成设备承载认证。

研究边界 SCOPE

> 500 kg 为额定工作负载；满载工件质量 500 kg 是研究取值，夹具与设备自重单列。
>
> R2.5 m 为现有末端回转中心半径；R3.5 m 仅为扩展假设，实际工件质心半径另计偏距。
>
> 主算例采用假设设备自重 900 kg、指定重心与等效动态输入，不代表实际称重/试验。
>
> 8×M24、720×720 布置及 600 mm 埋入段为图纸几何；建议基础与 C25 标注不是承载验证。
>
> 准静态、小变形、刚性底板/基础、无浮托；抗力与实物试验未闭合，不作施工或设备放行依据。

目录 CONTENTS

01 研究问题与适用范围 1
02 输入参数与研究方法 1
03 力学模型与推导过程 3
04 算例与计算结果 6
05 参数敏感性与工程讨论 11
06 结论与验证方法 14
参考文献 15
附录 A 计算复现与数据说明 16

01 研究问题与适用范围

本研究围绕额定工作负载 500 kg 的固定立柱机械手，分析载荷从工件质心经夹具、臂架和回转立柱传至地脚螺栓、混凝土基础及地基的过程。现有项目工作半径 R2.5 m 与扩展研究半径 R3.5 m 分别建模。研究问题不是单独判断一根 M24 螺栓能否承受拉力，而是识别载荷定义、底板接触、群锚效应及地基偏压之间的耦合关系。

现有项目资料将工作半径定义为立柱回转中心至末端回转中心的最大水平距离。工件质心通常不与末端回转中心重合，因此 500×g×R 只是一个局部重力矩项。夹具、臂架和配重均有独立质量及力臂；气动平衡缸在设备内部形成平衡力，不能消除整机对安装面的外部合力矩。基础自重只在基础底面评价时加入，不反向计入立柱底板的轴向压力。

几何基线采用 2026 年 10 月 25 日 V3 会签图。该图为水平气胀轴结构，无翻转机构，并明确采用 8 套 M24×700 L 型预埋固定。早期方案中的翻转机构和膨胀固定没有混入当前结构。图纸能证明标注的布置和尺寸，不能证明实物已经制造、混凝土已经达到强度或承载试验已经通过。[1]

> **研究边界** R3.5 m 是扩展研究工况，不是现有设备允许半径。本报告给出条件化载荷、所需抗力及尺寸敏感性，不签发设备、锚固或基础承载合格结论。质量、重心、材料、加速度、基础配筋和地基参数均按明确的研究输入处理。

本研究采用小变形、准静态等效惯性分析。涵盖静态满载、提升加速、回转/制动与外推组合，以及配重主导的反向弯矩示例。不模拟碰撞、落物冲击、气缸失效瞬态、结构共振、地震、风荷载、腐蚀损失或疲劳寿命。这些作用如成为工程设计条件，需与本文载荷路径一致地另行组合。

02 输入参数与研究方法

输入分为项目设计参数、图纸几何、图纸建议、研究假设及计算输出五类。参数登记表将绝对来源路径、页码/条目、单位和文件哈希保留在独立输入记录中；公开正文只保留与计算有关的匿名化定义。以额定 500 kg 建立满载工件算例不等于取得 500 kg 的称重实测记录。

表 1 项目几何与证据分类

项目	数值	证据含义	定位
额定工作负载	500 kg	设计参数，非整机自重	第 1 张参数表
现有工作半径	2.5 m	至末端回转中心	第 1 张参数及范围图
扩展研究半径	3.5 m	研究假设	本研究委托范围
底板外形/安装孔	800×800 mm / 8×Φ26	图示几何；厚度未识别	第 1 张孔位图
螺栓布置	720×720 mm；边中点间距 360 mm	四角与四边中点，共 8 点	第 1、2 张平面图
预埋杆/螺纹/弯钩	M24×700 / 200 / 100 mm	图示总长、螺纹段、弯钩标注	第 2 张详图
埋入/露出长度	600 / 100 mm	几何长度；不是锚固有效深度认证	第 2 张技术要求 4

项目	数值	证据含义	定位
基础建议尺寸	1500×1500×≥800 mm	建议值，按 0.8 m 厚试算	第 2 张技术要求 5
混凝土建议	不低于 C25	图注建议，非现场实测强度	第 2 张技术要求 5

注：图纸依据为文献[1]。材料牌号、底板厚度、锚固抗力和地基承载力没有由图纸外形推定。

表 2 代表质量与重心输入

组成	质量 kg	水平坐标 x / m	高度 z / m	取值性质和扫描范围
工件	500	R+0.35	1.8	满载研究值；0–500 kg
夹具及末端	100	R+0.15	1.8	50–150 kg；偏距 0–0.30 m
臂架及随动件	350	0.50R	2.5	200–500 kg；重心比 0.35–0.65
尾部配重	150	−0.60	2.5	0–300 kg；后伸 0.40–0.80 m
固定立柱与底座	300	0	1.2	200–500 kg；本算例位于中心

注：除额定工作负载外，本表质量与重心均为研究假设；代表设备自重 900 kg，含工件总质量 1400 kg。臂架前伸取共线姿态，配重位于反方向。

工件外伸 0.35 m 为代表假设，扫描 0–0.65 m。0.65 m 采用 1300 mm 管芯半长作为探索尺度，不能由管芯长度直接证明实际质心必定位于该范围内。实际轴法兰位置、插入深度和卷料偏心仍应通过装配模型或测量确定。R3.5 m 算例保持同一组质量，目的是隔离半径变化影响；真实加长臂架通常还改变自重、刚度及机构几何，不能将该对比当作直接改造方案。

表 3 准静态等效工况

工况	竖向系数：工件夹具/臂架/配重	ω / α（rad/s；rad/s²）	水平手力 N	物理含义
S 静态	1.00 / 1.00 / 1.00	0 / 0	0	所有部件静态
L 提升	1.25 / 1.10 / 0.90	0 / 0	0	前端上加速，配重下加速
C 组合	1.25 / 1.10 / 0.90	0.35 / 0.25	200	提升 + 共转惯性 + 径向外推
H 较高动态尺度	1.50 / 1.20 / 0.80	0.50 / 0.50	300	独立敏感性上档，不是实测极限

注：g=9.81 m/s²；手力高度 1.2 m。竖向系数为 1+a_z/g，固定立柱取 1。配重下加速时，其有利重力矩减小。

升降与共转惯性模型是瞬时载荷代理：各部件的竖向加速度独立给定，水平转动采用同一 ω 和 α。它不求解升降连杆的几何约束，也不把该工况声称为实际动作轨迹。实际存在升降和回转同步运动时，还应从机构运动学求出各质心加速度，包括径向运动和科里奥利项；本文结果仅在所列加速度定义下成立。主例按点质量计算绕柱惯量；各部件绕自身质心的附加总惯量另扫 0、150、300 kg·m²，0 只是点质量计算基线，不代表实物部件惯量为零。

底板采用刚体平面假设，锚杆只受拉、支承床只受压。代表锚杆弹性模量 200 GPa、假定 M24 粗牙有效面积 353 mm²、等效伸长长度 0.6 m，故单杆轴向刚度 117.67 MN/m。压床刚度 3×10^{10} N/m³是研究代理值；

扫描范围 1×10^{10}–1×10^{11} N/m³。此压床参数不等于地基土模量。地基接触计算只求压力合力与力矩，不根据未知土模量输出沉降。

基础按无覆土、无浮托的独立方形块研究，混凝土重度取 24 kN/m³，1.5×1.5×0.8 m 基础自重为 43.20 kN。75、100、150、200 kPa 仅作为地基压力比较刻度，不能代替勘察报告的承载力特征值。底板按连续支承考虑；图示螺杆露出 100 mm 并不等于底板悬空 100 mm。

表 4 正式标准现行版本与本研究适用层次

对象	核验版本	适用层次
工程结构	GB 55001-2021 [2]	可靠性、作用及组合原则
地基基础	GB 55003-2021；GB 50007-2011 [3,8]	地基承载、变形及稳定
钢结构/柱脚	GB 55006-2021；GB 50017-2017 [4,6]	钢材、连接、柱脚及疲劳接口
混凝土本体	GB 55008-2021；GB/T 50010-2010（2024 局部修订）[5,7]	混凝土、配筋及局部传力
后锚固	JGJ 145-2013 [9]	群锚内力、承载、构造及施工
地脚螺栓产品	GB/T 799-2020；GB/T 3098.1-2010 [10,11]	尺寸、产品及材料性能，不是基础承载证明
国际方法对照	BS EN 1992-4:2018 [12]	混凝土锚固方法与产品评定接口

注：核验截止 2026-10-25。主管部门公告或官方标准机构目录用于版本核验；通用规范与其他标准不一致时按通用规范适用要求处理。

本文不把目录核验等同于逐条完成规范设计。计算采用力学平衡、弹性板条和压缩接触自行推导，抗力侧未取得的材料设计值、锚固产品特征值及分项系数均不伪造。完整极限状态设计必须在工程适用规范下区分永久与可变作用，分别处理有利/不利项，并采用相应抗力及组合规则；本文 S、L、C、H 均为研究作用值。

03 力学模型与推导过程

取立柱底板中心为原点，z 竖直向上，代表伸展姿态位于 x–z 平面，向工件方向为正 x。各部件质量用 m_j 表示，位置 r_j=(x_j,0,z_j)。在指定瞬时转动方向下，将重力与达朗贝尔惯性力叠加为设备对支承结构的等效外载。

$$\mathbf{F}_j = m_j\left(\omega^2 x_j, -\alpha x_j, -g\phi_j\right) \qquad \text{式 (1)}$$

F_j 单位 N；x_j、z_j 单位 m，ω 单位 rad/s，α 单位 rad/s²。配重 x_j 为负，因此其水平惯性方向与前伸质量相反。

$$\mathbf{F} = \sum_j \mathbf{F}_j + \mathbf{H}, \mathbf{M} = \sum_j \mathbf{r}_j \times \mathbf{F}_j + \mathbf{r}_H \times \mathbf{H} \qquad \text{式 (2)}$$

H=(H,0,0)，r_H=(0,0,1.2 m)；M 单位 N·m。N=−F_z，V=√(F_x²+F_y²)，倾覆弯矩 M_o=√(M_x²+M_y²)，扭矩 T_z=M_z。

$$M_y = g\sum_j m_j\,\phi_j x_j + \omega^2 \sum_j m_j\,z_j x_j + H z_H \qquad \text{式 (3)}$$

共线代表姿态的主要倾覆分量；M_x=αΣm_jz_jx_j，点质量 M_z=−αΣm_jx_j²。若计入各部件绕自身质心的总惯量 J₀，扭矩再加−αJ₀；该标量展开式用于独立复算。

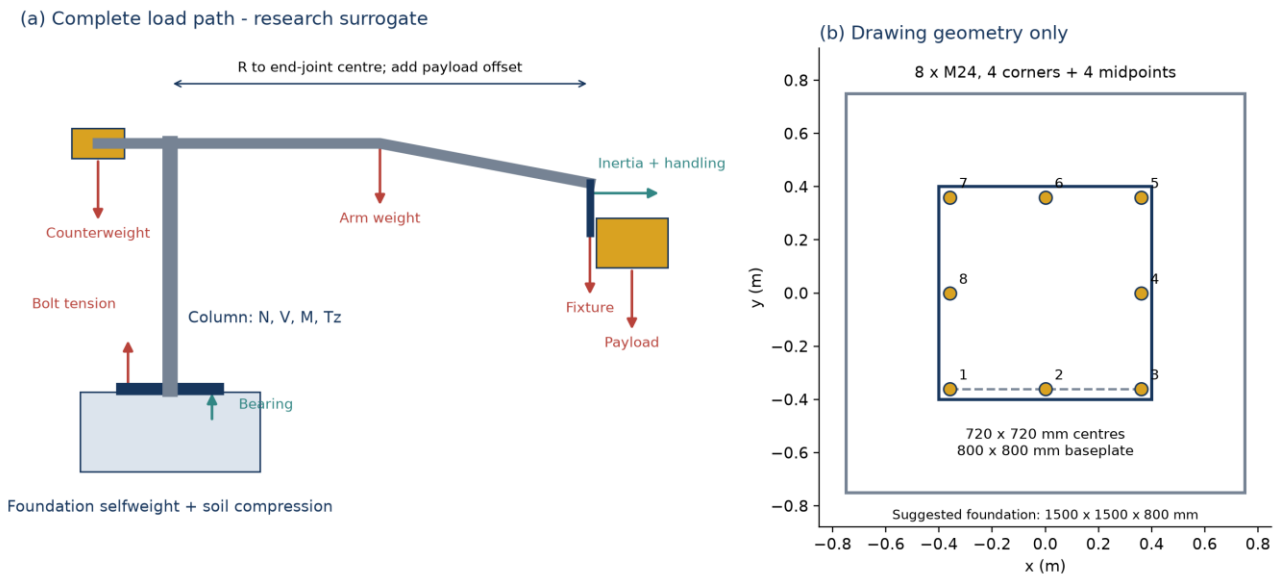


图 1 完整载荷路径及 8 点螺栓几何重绘。左图为力学研究示意，不是设备实拍或制造图；右图按已核对尺寸绘制。螺栓上拔箭头表示向混凝土传递的拉力。

切开底板接口后，不能同时令八根螺栓均匀受拉、混凝土全底面保持受压，并用单一固定力臂分配弯矩。底板向上位移为正，写成平面 $w(x,y)=w_0+\beta_x x+\beta_y y$。每根螺栓在相应位置只响应正向伸长，压床只响应负向位移。

$$w(x,y) = w_0 + \beta_x x + \beta_y y, T_i = k_b max(w_i, 0), q_b = k_c max(-w, 0) \quad \text{式 (4)}$$

w 单位 m；β 为无量纲转角近似；k_b 单位 N/m，k_c 单位 N/m³；q_b 单位 Pa。螺杆无初始预紧、无孔隙空行程、无局部撬力是此主模型假设。

$$\sum_i T_i \mathbf{d}_i - \int_A q_b \mathbf{d} dA = \begin{bmatrix} -N \\ -M_y \\ M_x \end{bmatrix}, \mathbf{d} = \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ y \end{bmatrix} \quad \text{式 (5)}$$

等式三行分别对应竖向力及两个倾覆广义力矩。计算方位扫描时以(M_o cosθ,M_o sinθ)替代右侧后两项，θ 是抬升方向而非 M 向量方向。

求解采用正负接触域分割与牛顿迭代。将矩形底面按 w=0 截线裁剪为凸多边形，再按三角形对面积、一阶矩和二阶矩精确积分；它避免粗网格在角部小接触区产生虚假方位峰值。另用 40、80、160、320 单元/边的独立离散压床交叉核对。该方法是力学研究接触求解器，不是规范验算软件。

$$\mathbf{V}_i = \frac{\mathbf{V}}{n} + \frac{T_z}{\sum_j (x_j^2 + y_j^2)} \begin{bmatrix} -y_i \\ x_i \end{bmatrix} \quad \text{式 (6)}$$

等剪切刚度、全部 8 孔同时传剪、对称布置且剪力作用于群锚中心时的弹性分配。先旋转剪力方向，再叠加扭矩分量；不能只用 V/8。

Φ26 孔与 M24 杆的公称直径差为 2 mm，但实际接触、孔位偏差、预紧和灌浆状态决定哪些螺栓先参与传剪。为显示该边界，另以 8 点、4 角点、2 个对角点传剪建立平移–扭转刚度方程，均满足力及扭矩平衡。后两种是接触参与的研究情形，不是假定其余螺栓已失效，也不含底板孔壁承压校核。默认不给底板摩擦或未证实抗剪键的抗力记账。

$$\sigma_{t,i}=\frac{\lambda T_i}{A_s},\tau_i=\frac{|\mathbf{V}_i|}{A_s},\sigma_{eq,i}=\sqrt{\left(\sigma_{t,i}+\frac{32|\mathbf{V}_i|e_s}{\pi d_r^3}\right)^2+3\tau_i^2}$$ 式 (7)

λ 为撬力放大研究系数 1–1.5，e_s 为无支承螺杆剪切力臂 0–100 mm，d_r 假定 M24×3 外螺纹小径 20.319 mm。该等效应力是材料屈服筛查代理，不替代螺纹缺口、疲劳及规范拉剪弯相互作用。

$$\sigma_p=\frac{6\lambda T_{\max}a}{bt^2},t_{req}=\sqrt{\frac{6\lambda T_{\max}a}{bf_{lim}}}$$ 式 (8)

底板局部弹性悬臂板条：a 为螺栓至有效支承线力臂，b 为有效宽度，t 为板厚。采用 N、mm、MPa 时量纲自洽；f_lim 仅为所选比较应力水平。

底板的刚体假设用于整体受力分配，板条模型用于检查局部柔度是否可能使该假设失真。若板条应力或变形过大，不能用增设一个 λ 就证明设计成立，应采用真实筋板、焊缝、垫圈接触和板面弯曲模型重新分配锚栓力。压侧板条若有悬伸 a_c，可由 σ=3q_b a_c²/t²建立同类弹性筛查；由于实际支承线和筋板尺寸不明，本文不报出单一最终选板厚。

$$p_{hook,req}=\frac{\lambda T_{\max}}{d\ell_{b,eff}},\tau_{bond,req}=\frac{\lambda T_{\max}}{\pi dh_{eff}}$$ 式 (9)

前式是弯钩投影面积上的所需平均局部传力压力，后式是纯粘结传力假设下所需平均界面剪应力。两者是不同机制的需求指标，不相加为预埋杆总抗力；也不能直接把 p_hook 与混凝土立方体抗压强度相比判定通过。

对于后锚固，产品评定中的钢材、拔出、锥体、劈裂及剪切参数分别控制不同破坏模式。[9,13] 国际方法中单锚锥体抗力具有√f_ck·h_eff^(3/2)尺度，且系数取决于锚固型式、裂缝状态和产品评定；f_ck 是圆柱强度，不能直接将图注中国 C25 的数值填入该式。[12,14] 本研究只反算所需综合系数，不能借用有头锚栓或膨胀锚栓系数认证 L 型弯钩。

$$K_{eff,req}=\frac{\lambda\sum T_i}{\sqrt{f_{ck}}h_{eff}^{3/2}(A_{union}/9h_{eff}^2)}$$ 式 (10)

单位约定：力 N，f_ck 用 N/mm²，h_eff 用 mm，投影面积用 mm²。K_eff 合并其他折减与抗力分项后的未知系数；本式是所需值反算，不给出可用抗力。

A_union 按受拉锚栓各自边长 3h 的方形投影求并集，再裁剪于 1.5 m 基础边界。该投影用于显示群锚重叠和边距影响，不是完整的 EN 或 JGJ 锥体验算；真实有效埋深、边缘修正、偏心、配筋和产品适用条件仍需单独处理。特别是图示 600 mm 埋入长度不能自动作为任意锚固模型的 h_eff。

$$W=N+\gamma_cB_f^2H_f,M_{x,f}=M_x-H_fV_y,M_{y,f}=M_y+H_fV_x$$ 式 (11)

将底板处六分量移至基础底面，加入基础自重；B_f、H_f 单位 m，γ_c 单位 N/m³。基础底面倾覆合矩 M_f=√(M_x,f²+M_y,f²)。

$$q_f(x,y)=max(a+bx+cy,0),\int_A q_f\begin{bmatrix}1\\x\\y\end{bmatrix}dA=\begin{bmatrix}W\\We_x\\We_y\end{bmatrix}$$ 式 (12)

方形基础采用刚性底面、线性压缩反力、土不受拉的接触代理。e_x、e_y 为压力合力偏心；积分按裁剪多边形完成。此模型不计算沉降模量、塑性土抗力或动力阻抗。

$$\frac{6(|e_x|+|e_y|)}{B_f} \le 1, (N+\gamma_c B_f^2 H_f) B_f \ge 6\sqrt{2} M_f \quad \text{式 (13)}$$

左式为方形底面全接触的双向核心条件。右式是在任意回转方位均不脱开时的方形边长条件，不是地基承载合格判据，也不是强制规定必须零脱开。

$$c = 3(B_f/2 - e), q_{\max} = \frac{2W}{B_f c} (B_f/6 < e < B_f/2) \quad \text{式 (14)}$$

单向偏心部分接触的三角形压力解，用作独立复核。若合力超出方形支承边界，土不受拉模型不再存在静力平衡解，不能输出负土压力来掩盖倾覆。

04 算例与计算结果

先按名义半径计算单独工件静态重力矩，R2.5 m 与 R3.5 m 分别为 12.263、17.168 kN·m。加入代表工件偏距、夹具、臂架及配重后，完整静态弯矩增至 19.988、27.591 kN·m。该差异说明载荷路径遗漏比螺栓个数的算术分配更早影响结论。

表 5 两半径下立柱底板总载荷

工况	轴向压力 kN	水平剪力 kN	倾覆合矩 kN·m	扭矩幅值 kN·m
R2.5 S	13.734	0.000	19.988	0.000
R2.5 L	15.402	0.000	24.650	0.000
R2.5 C	15.402	0.679	25.388	1.341
R2.5 H	17.069	1.301	30.712	2.682
R3.5 S	13.734	0.000	27.591	0.000
R3.5 L	15.402	0.000	33.896	0.000
R3.5 C	15.402	0.889	34.827	2.467
R3.5 H	17.069	1.727	42.006	4.935

注：研究作用值，未乘规范作用分项系数；N 不含混凝土基础自重。C 与 H 不是实测运动记录。

C 工况的竖向轴力均为 15.402 kN；R2.5 m 的 Mx=0.978、My=25.369 kN·m，R3.5 m 的 Mx=1.357、My=34.801 kN·m。倾覆合矩分别为 25.388、34.827 kN·m，扩大半径后增长 37.2%。扭矩幅值由 1.341 增至 2.467 kN·m，增长 83.98%，因为回转惯性扭矩含质量乘半径平方项。

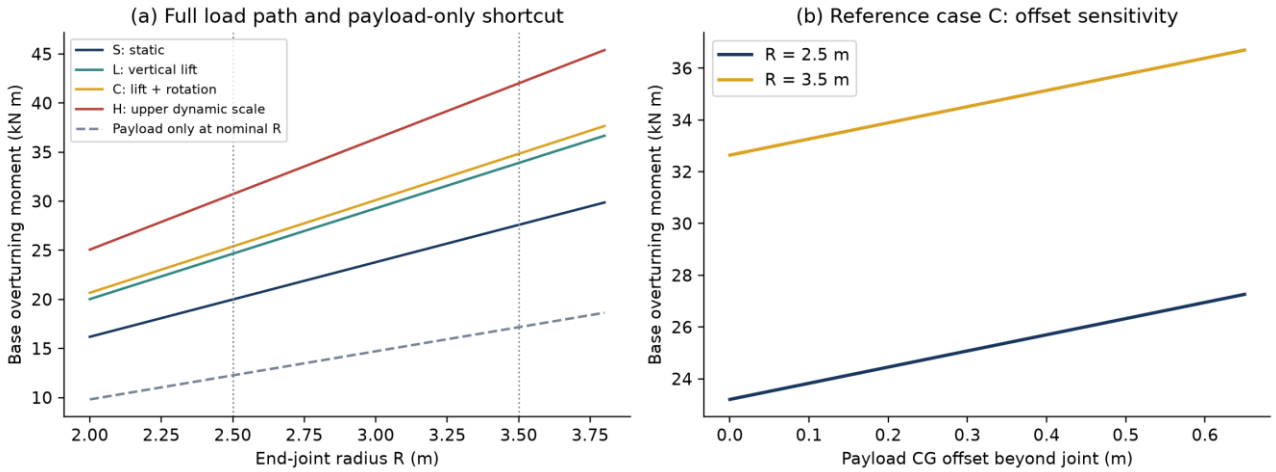


图 2 完整载荷路径的倾覆力矩随半径与工件偏距变化。曲线中的额外半径点用于连续性和敏感性研究；只有 R2.5 m 为现有项目标称半径。

表 6 组合工况螺栓组与底板需求

工况	最大单杆拉力 kN	受拉总力 kN	所需拉应力 MPa	板条阈厚 mm (λ=1)	板条阈厚 mm (λ=1.5)
R2.5	9.647	28.200	27.33	16.60	20.33
R3.5	14.113	41.676	39.98	20.08	24.59

注：板条比较条件 a=100 mm、b=150 mm、f_lim=140 MPa。该阈厚不含真实筋板、板屈服线、焊缝和孔壁，不是最终板厚选型。

表 7 45°抬升方向下各螺栓力

螺栓号	坐标 m	R2.5 拉力 kN	R3.5 拉力 kN	R3.5 同方位剪力 kN
1	(-0.36, -0.36)	0.000	0.000	0.896
2	(0.00, -0.36)	0.000	0.000	0.682
3	(0.36, -0.36)	2.968	4.483	0.883
4	(0.36, 0.00)	6.308	9.298	0.572
5	(0.36, 0.36)	9.647	14.113	0.726
6	(0.00, 0.36)	6.308	9.298	0.461
7	(-0.36, 0.36)	2.968	4.483	0.741
8	(-0.36, 0.00)	0.000	0.000	0.591

注：剪力含扭矩并满足平衡；上表的零拉力不代表不能传剪。编号对应图 1。最大拉力位于 5 号角点，不能将总拉力除以 8 分配。

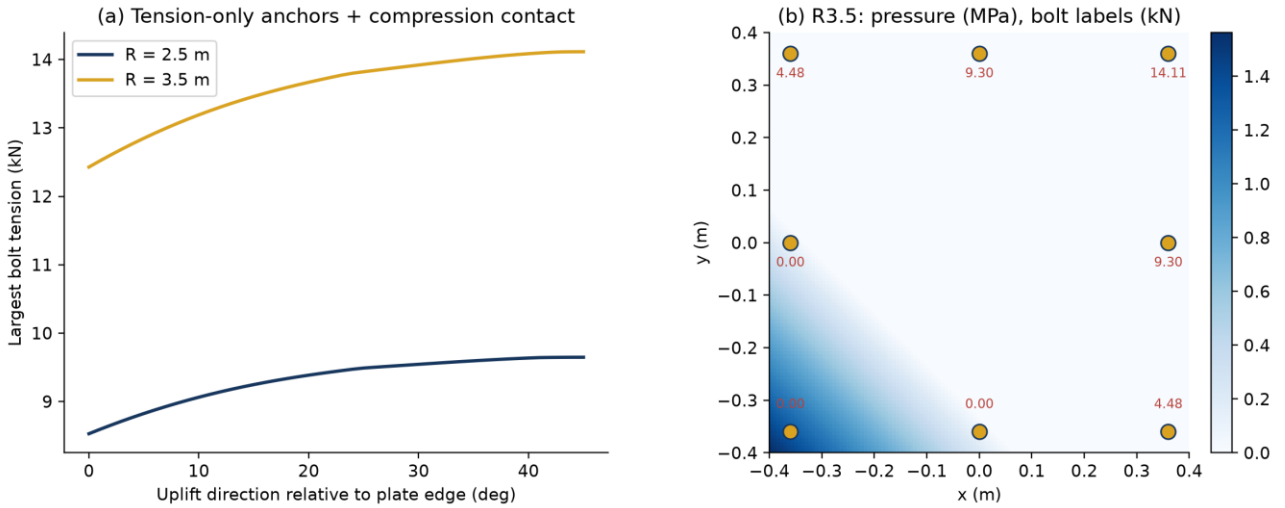


图 3 螺栓拉力方位扫描及 R3.5 m 组合工况底板接触压力。主模型最大拉力发生于 45°，压区与拉力区同时由相容条件求得。

R2.5 m 与 R3.5 m 组合工况的底板压床峰值分别为 1.135、1.585 MPa。仅 18.0%、16.9%的底板面积参与受压；其余区域的压力为零。压床总反力等于轴向压力加受拉螺栓总拉力，这是螺栓拉力与局部承压同时增大的原因。

表 8 剪切参与点数敏感性

半径 m	参与点数	参与编号	最大单点剪力 kN
2.5	8	1 2 3 4 5 6 7 8	0.524
2.5	4	1 3 5 7	0.828
2.5	2	1 5	1.657
3.5	8	1 2 3 4 5 6 7 8	0.919
3.5	4	1 3 5 7	1.434
3.5	2	1 5	2.868

注：对剪力方向扫描 0–360°；各情形均满足剪力及扭矩平衡。参与点减少只用于显示孔隙传力的不确定性，实际情况需接触与孔壁模型。

假定 M24×3 有效截面 353 mm²，C 工况单纯拉应力需求为 27.33、39.98 MPa。若拿 235 或 355 MPa 作假定首屈服对照，钢材应力看似尚低，但这不能证明锚固、底板或地基安全，也不能证明实物杆材具有这些屈服值。图纸仅写 M24，没有识别性能等级或材质。若存在 100 mm 无支承剪切力臂，在 λ=1 且 8 点传剪的同一研究方位，应力代理增至 73.74、128.19 MPa；图示 100 mm 露出量不被当成这种悬空状态的事实。

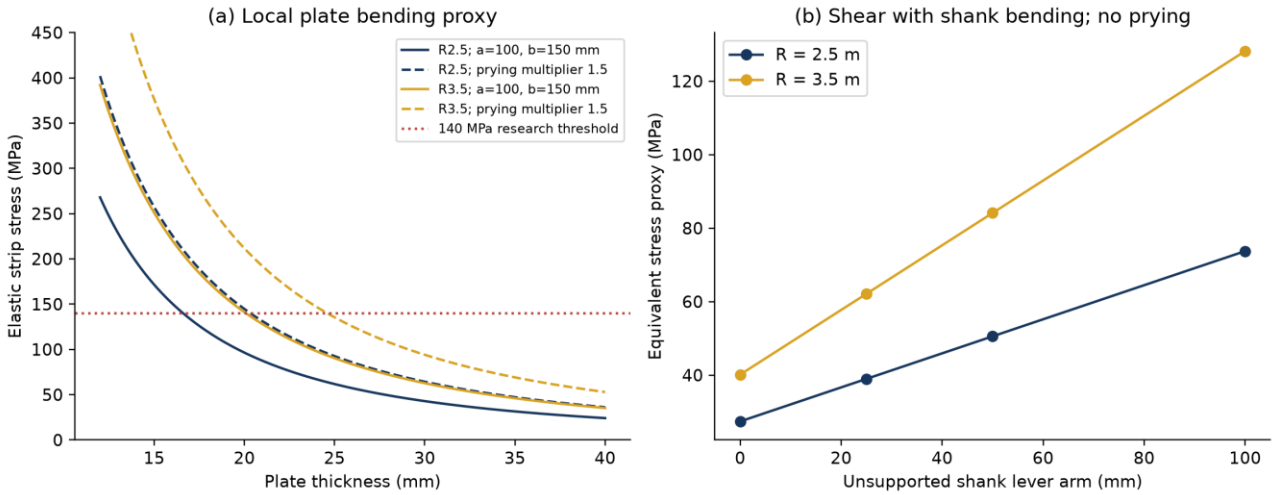


图 4 底板弹性板条应力与螺杆无支承剪切力臂敏感性。140 MPa 为研究比较水平；撬力系数及悬空长度均为独立假设。

L 型弯钩按 24×100 mm 投影面积反算，C 工况所需平均局部传力压力为 4.020、5.881 MPa；若有效弯钩长度只有 50 mm，需求分别翻倍至 8.040、11.761 MPa。这只是局部传力尺度，还必须处理弯钩变形、混凝土劈裂、侧面崩裂、锥体破坏及相邻锚栓的共同作用。不能用“该压力小于 C25”作通过判定。

表 9 界面传力与群锚投影的条件化反算

工况	研究深度 mm	平均粘结需求 MPa	并集/独立投影总和	所需 K_eff
R2.5	200	0.640	68.0%	0.656
R2.5	400	0.320	27.6%	0.570
R2.5	600	0.213	13.6%	0.630
R3.5	200	0.936	68.0%	0.969
R3.5	400	0.468	27.6%	0.843
R3.5	600	0.312	13.6%	0.931

注：λ=1；K_eff 表仅在假设圆柱强度 20 MPa 的尺度关系下反算，未给出产品可用 K_eff。埋深 200、400、600 mm 不是实际后锚产品允许范围。

C 工况抬升方向 45°时共有 5 个受拉点，基础边界至外侧锚杆中心的最小边距为 390 mm。在 600 mm 投影深度尺度下，3h=1800 mm 超过基础平面宽度，受拉点投影已大面积重叠且被边界裁切。其并集只占 5 个独立投影面积总和的 13.6%。这一几何事实足以否定“单锚抗力乘 8”等不考虑群锚和边距的推断，但不能单凭面积比例给出实际 L 型锚固抗力。

表 10 基础底面偏心与地基压力

工况	底面合矩 kN·m	偏心 m	峰值压力 kPa	峰值方位 °	该方位接触率	全方位不脱开边长 m
R2.5 S	19.988	0.351	83.0	45	80.9%	1.952
R2.5 L	24.650	0.421	106.5	45	69.5%	2.096
R2.5 C	25.766	0.440	113.4	45	66.2%	2.131
R2.5 H	31.420	0.521	155.4	45	51.7%	2.280
R3.5 S	27.591	0.485	128.6	45	58.3%	2.198
R3.5 L	33.896	0.578	190.5	30	39.7%	2.357
R3.5 C	35.289	0.602	214.7	24	34.0%	2.391
R3.5 H	42.893	0.712	738.2	5	8.1%	2.555

注：基础 1.5×1.5×0.8 m；自重 43.20 kN。压力方位为 1°扫描结果；最后一列只求全接触几何条件，不是施工推荐尺寸。

C 工况基础底面总压力 58.602 kN，两半径相同；底面合矩分别 25.766、35.289 kN·m。R2.5 m 最大地基压力为 113.4 kPa，接触面积约 66.2%；R3.5 m 为 214.7 kPa，接触面积约 34.0%。半径扩大导致峰值压力增加约 89.3%，明显超过倾覆弯矩增长率，原因是部分接触缩小了受压面积。R3.5 m 最不利压力方位约 24°，仅检查 0°或 45°会漏掉更高的峰值。

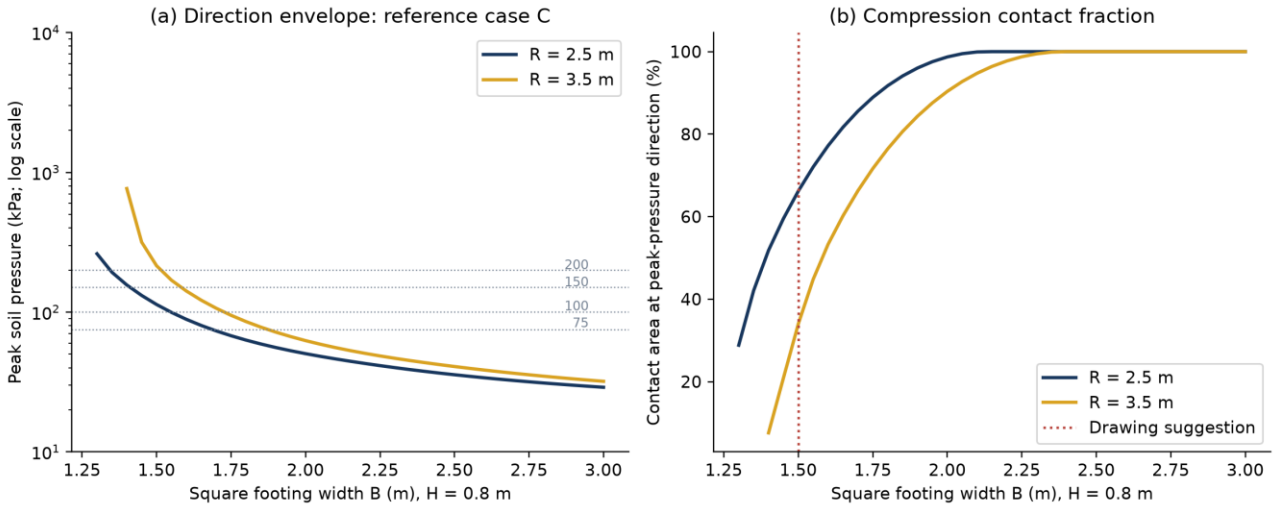


图 5 基础宽度对地基峰值压力及接触面积的影响。各宽度重算基础自重，曲线缺失处代表至少一个方位的合力超出支承边界；压力比较线不是实测土抗力。

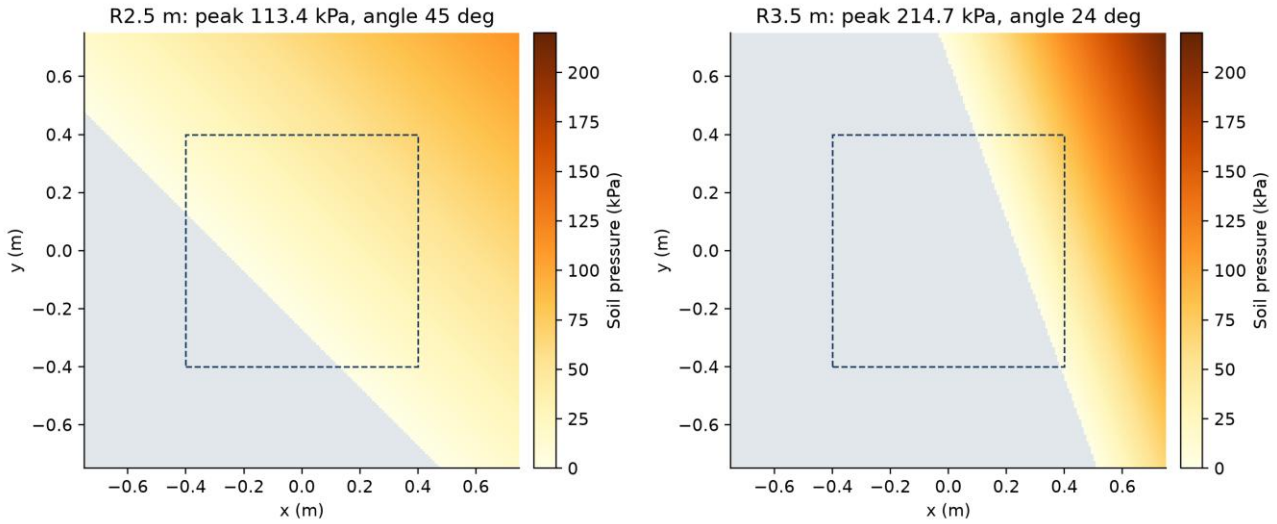


图 6 建议基础几何下两个半径的最不利地基压力分布。虚线方框为 800 mm 底板投影；灰色无反力区域表示接触脱开。

以同一模型采用任意方位均保持全接触作为研究目标，C 工况方形基础边长阈值为 2.131、2.391 m，厚度仍取 0.8 m；该数值只满足偏心核心条件，尚未涉及土强度、沉降、配筋或施工构造。反之，1.5 m 基础发生部分脱开也不自动等于结构已经失效，是否允许取决于经验证的地基变形、循环作用和结构设计要求。

沿 800 mm 底板边界建立单向条带，利用完整压力场积分得到基础本体的毛向上荷载弯矩需求上界为 3.54、6.60 kN·m/m。该指标不扣除条带基础自重，也没有将局部锚杆上拔、劈裂约束或最小配筋并入；它仅用于给混凝土基础结构模型提供一个可复核的弯曲尺度。配筋不能仅按这个小弯矩推定，更不能把建议基础当作已设计的素混凝土块。

在 C 工况干燥无浮托假设下，基础底面整体滑移所需摩擦系数 V/W 仅为 0.0116、0.0152。若另以 0.3–0.5 作为研究摩擦输入，平移滑移相较偏压不敏感；但这不覆盖底板与灌浆层之间的滑移、扭转摩擦、施工缝传剪或有水环境。基础底面的微小 V/W 不可以作为螺栓剪力取零的依据。

05 参数敏感性与工程讨论

单参数扫描固定其余代表输入，分别考察工件与夹具质量、臂架质量/重心、配重、工件偏距、提升系数、角速度和角加速度。不同参数范围按探索目的选择，并非概率分布或制造公差，不能将图中的条长解读为统计置信区间。额外角速度、角加速度研究必须同时观察扭矩；倾覆合矩对角加速度变化不大不代表制动负担小。

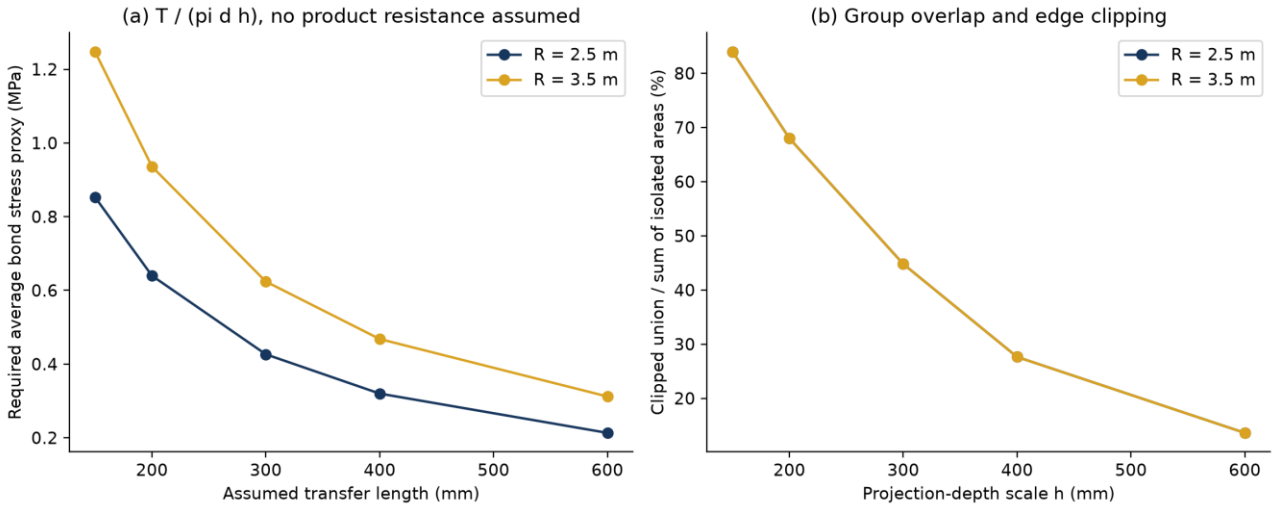


图 7 平均界面传力需求及群锚几何投影指标。两个半径在同一组受拉点下具有相同面积比，所以右图曲线重合；它不表示两工况承载裕度相同。

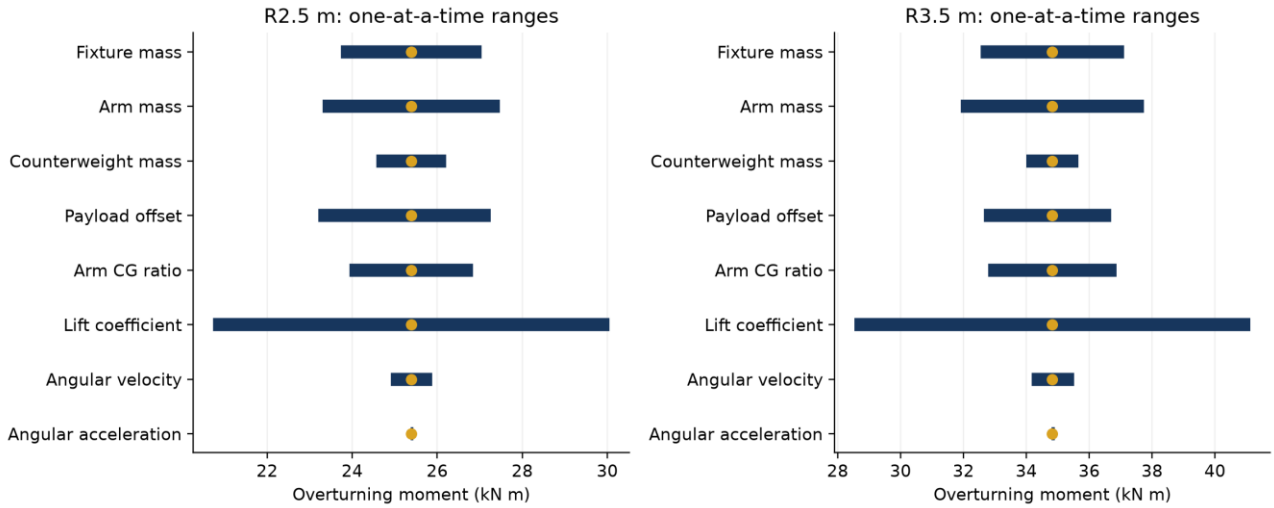


图 8 单参数变化引起的倾覆弯矩范围。黄色点为代表 C 工况；提升系数联动臂架和配重加速度，其他参数独立扫描。

将夹具质量、臂架质量、配重质量、工件偏距、臂架重心比、配重力臂及提升系数分别取两端，形成每半径 128 个参数角点，共 256 个组合；角速度固定 0.5 rad/s、角加速度 0.5 rad/s²、手力 300 N。在所选矩形参数域角点中，R2.5 m 倾覆合矩为 13.91–40.44 kN·m，R3.5 m 为 20.31–54.36 kN·m。此区间是规定参数角点结果，不是实际整机最小/最大载荷认证，也不是考虑全部关联参数后的概率区间。

提高配重有利于某些满载姿态，却增加轴力、回转惯量和空载反向倾覆风险。独立折叠示例取末端半径 0.35 m、工件 0 kg、夹具 100 kg、臂架 350 kg、配重 300 kg 且后伸 0.8 m，静态 My=−1.263 kN·m。该示例只证明弯矩方向可以反转；由于未建立真实折叠机构几何，不把 0.35 m 当作已验证的可达半径。

压床刚度与锚杆伸长长度同时影响分担。C 工况在 $k_c=10^{10}$–10^{11} N/m³、L_{eff}=0.3–0.9 m 的 9 组取值中，R2.5 m 最大单杆拉力约 7.95–13.81 kN，R3.5 m 约 11.72–19.63 kN。刚度扫描的方位步长为 3°，上述值仅为该离散扫描包络；高压床刚度下峰值方位还可能离开 45°。因此主算例 9.65、14.11 kN 并不是与结构细节无关的唯一答案。

若附加质心转动惯量总和取 300 kg·m²，C 工况的柱底扭矩幅值各增加 0.075 kN·m，而 N、V 和倾覆合矩保持不变。附加惯量数据与 8 点剪切需求已单列归档；因此本文点质量主例的扭矩也不能作为未知实物的包络上界。

螺杆等效伸长长度的取值用于弹簧刚度，不等于锥体有效锚固深度；两者在记录中分栏。预埋杆外形 600 mm 埋入段也不直接证明有 600 mm 均匀粘结有效长度。后锚固比较需在具体产品评定规定的深度、基材厚度和裂缝条件内进行。

表 11 预埋与后锚固适用性比较

形式	主要传力机制	控制参数与要求	工程适用条件
预埋 L 型	依靠杆身及弯钩周围混凝土的实际传力	核实材质、弯曲半径、弯钩有效长度、配筋及埋深；核验群锚/劈裂/侧崩	适合新建且可控制预埋的基础；图纸已选择的方案仍需结构设计
预埋有头或锚板型	明确承压头/锚板形成局部传力	头板面积、焊接/成形、混凝土锥体及配筋路径	与 L 型传力不同，不凭同径直接互换
机械后锚固	膨胀摩擦或扩底机械咬合	适用裂缝状态、边距、间距、板厚、钻孔及安装扭矩、产品评定	可用于既有混凝土改造；不能把普通膨胀螺钉等同合格重载结构锚栓
粘结后锚固	胶体及界面沿埋入段传力	产品允许埋深、孔壁清洁、含水、温度、固化、持续荷载/蠕变及群锚	适合有相应评定的条件；平均粘结需求不是产品可用抗力

注：标准适用范围见[6–12]；传力与失效机制按一手资料[13,14]核对。未选择或推荐某个具体后锚固产品。

预埋与后锚固的比较先统一 N、V、M 和扭矩，再按各自的传力机制与产品/构造抗力评价。不可因为直径均为 M24 就认为抗力相同，也不可只以总埋深比较优劣。GB/T 799 的产品符合性不等于混凝土基础符合性；JGJ 145 的后锚固范围不能自动覆盖任意自制 L 型预埋杆。对旋转机械还须辨识重复拉压、剪切反向、振动和安装长期松弛的作用。

表 12 破坏模式、控制量和本研究临界需求

评价对象	控制参数	R2.5 / R3.5 代表需求	仍需补足的实际抗力证据
螺栓拉/剪/弯	T_i、V_i、e_s、A_s、材料性能	C：拉应力需求 27.33/39.98 MPa；e_s=100 mm 应力代理 73.74/128.19 MPa	实际等级、腐蚀和疲劳谱未核验
底板局部弯曲与撬力	a、b、t、筋板/垫圈	a100/b150/f140：t 阈 16.60/20.08 mm；λ1.5 时 20.33/24.59 mm	实际板厚与支承线必须进入局部结构模型
L 型局部拔出与弯钩	d、有效弯钩长度、混凝土约束	100 mm 有效长度：平均压力需求 4.020/5.881 MPa	需局部承压、弯钩变形和劈裂的抗力模型
群锚/混凝土锥体	受拉合力、h_eff、边距、间距、裂缝和配筋	C：群锚受拉需求 28.20/41.68 kN（λ=1）	8×M24 几何不是抗力；需正式设计或相应评定
混凝土剪切边缘/撬出	V_i、扭矩、首排边距、锚深	采用表中各杆剪力分布，核查整个剪切传力路径	不能只核验杆材剪应力
地基承载/脱开	基础自重、M_f、土参数、方位	C：峰值压力 113.4/214.7 kPa，接触 66.2%/34.0%	承载力、沉降及循环倾斜需地勘与变形模型
基础本体与接口	配筋、保护层、局部上拔、弯矩和施工缝	毛条带弯矩 3.54/6.60 kN·m/m；全组上拔见表	最小配筋、劈裂及锚固构造不能省略

注：表中临界需求均绑定 C 工况和各行的模型假设；不是可直接用于制造/施工的许可值。λ 增加时，螺栓与混凝土需求应一致更新。

最优的工程改进方向由控制模式决定。若局部底板柔度主导，缩短螺栓至有效支承线的距离、合理布置筋板及改善连续支承可比单纯提高螺杆强度更直接。若地基偏压主导，扩大基础平面、改变厚度/自重或采用与主体基础可靠连接的设计方案才会改变整体支承条件。增加螺栓数量本身不会增加地基承载面积，也不会自动提供基础配筋。任何构造调整都应重新进行载荷与抗力闭合。

06 结论与验证方法

- 完整载荷路径是本研究首要控制条件。代表质量与重心假设下，R2.5 m、R3.5 m 静态倾覆弯矩分别 19.99、27.59 kN·m；组合工况分别 25.39、34.83 kN·m。名义工作半径不能替代工件质心半径。
- 8×M24 布置只能确定几何。刚体底板与单边接触模型在代表 C 工况给出单杆拉力 9.65、14.11 kN，受拉合力 28.20、41.68 kN；剪力还受扭矩和接触参与点数影响，不能将弯矩或剪力简单平均后宣布规范通过。
- 底板与混凝土锚固需独立评价。板条、弯钩压力和界面传力指标均为条件化需求；材料等级、配筋、裂缝与有效锚深未验证，故不报告实际承载裕度或安全系数。
- 建议 1.5×1.5×0.8 m 基础在代表 C 工况产生 113.4、214.7 kPa 地基峰值压力及 66.2%、34.0%接触面积。R3.5 m 最不利压力方向约 24°；全方位不脱开的几何边长阈值 2.131、2.391 m 不等于已完成基础设计。
- 脚本完成了明确参数域的载荷扫描、接触求解与独立复算，可用于补充质量、材料和地勘后的重算。它不能授权现有设备扩展至 R3.5 m，也不替代实际结构的工程审核。

表 13 已执行验证与未执行项目

验证项	实际方法	结果
载荷独立复算	两半径的标量质量矩、惯性矩与向量叉乘结果逐项核对	通过；绝对误差<10^{-8} N 或 N·m
螺栓独立解	0°方向以单一中性轴方程和三角压区手算形式求根	通过；各杆误差<10^{-6} N
接触离散复核	40/80/160/320 网格与精确多边形积分比较	通过；320 网格最大拉力相对差<10^{-4}
地基单向解析解	偏心三角形压力公式独立复核	通过；相对差<10^{-7}
地基双向积分	400×400 独立压力网格积分反力和力矩	通过；相对平衡差<5×10^{-5}
方位扫描精度	连续有界搜索复核 C 工况 1°峰值	通过；压力峰值相对差<0.1%
极限与对称性	零弯矩、90°旋转、合力越界拒绝、剪力/扭矩平衡	通过
实物承载及工程验算	材料、锚固拉拔、配筋、沉降与疲劳	未执行；不作为已验证结论

注：验证记录包含 34 项数值检查。这里的通过只证明相应计算实现一致，不扩大为实物通过。

从参数化研究转为工程承载评价时，首先按相同分项边界获得工件、夹具、臂架、配重和固定部分的质量/重心，测量动作与制动加速度；其次落实底板、筋板、焊缝、杆材及锚固构造，采用实际混凝土强度、配筋和现场地勘建立抗力与变形模型；最后在经审查的载荷程序下实施仪器化验证。加载程序应包含满载最大伸展、反向空载、主要回转方位和可预见动态工况，监测螺杆应变、底板开口、柱顶位移及基础沉降/转角。

锚固试验应依据具体预埋或后锚固体系选定目的、加载方式、抽样与判据，区分现场非破坏性检验、系统鉴定和极限破坏试验。试验点、配筋边界及加载装置应避免改变真实混凝土受力路径。试验尚未实施，因此本报告不声明拉拔、保载、疲劳或地基承载已经验证。

公开研究的可复算性来自明确输入、方程、数据和检验记录，而不是将未知量改写成肯定结论。本文保留的参数范围允许继续分析，现有证据不足以对实际设备的锚固和基础给出最终承载合格判断。

参考文献

[1] 项目技术资料. 500 kg 气胀轴气动助力机械手会签确认图，V3，2026-10-25，第 1、2 张；相关早期方案用于定义交叉核对.（访问日期：2026-10-25）

[2] 住房和城乡建设部. GB 55001-2021 工程结构通用规范. 2021 年第 70 号公告，2022-01-01 实施. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2021/art_17339_761192.html（访问日期：2026-10-25）

[3] 住房和城乡建设部. GB 55003-2021 建筑与市政地基基础通用规范. 2021 年第 62 号公告，2022-01-01 实施. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2021/art_17339_761185.html（访问日期：2026-10-25）

[4] 住房和城乡建设部. GB 55006-2021 钢结构通用规范. 2021 年第 69 号公告，2022-01-01 实施. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2021/art_17339_761191.html（访问日期：2026-10-25）

[5] 住房和城乡建设部. GB 55008-2021 混凝土结构通用规范. 2021 年第 167 号公告，2022-04-01 实施. https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/qtwj/202204/t20220408_2669587.html（访问日期：2026-10-25）

[6] 住房和城乡建设部. GB 50017-2017 钢结构设计标准. 2018-07-01 实施. https://ebook.chinabuilding.com.cn/zbooklib/book/detail/show?SiteID=1&bookID=105417（访问日期：2026-10-25）

[7] 住房和城乡建设部. GB/T 50010-2010 混凝土结构设计标准（2024 年局部修订）. 2024 年第 62 号公告，修订自 2024-08-01 实施. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2024/art_17339_778180.html（访问日期：2026-10-25）

[8] 住房和城乡建设部. GB 50007-2011 建筑地基基础设计规范. 2012-08-01 实施. https://ebook.chinabuilding.com.cn/zbooklib/book/detail/show?SiteID=1&bookID=61019（访问日期：2026-10-25）

[9] 住房和城乡建设部. JGJ 145-2013 混凝土结构后锚固技术规程. 2013-12-01 实施. https://ebook.chinabuilding.com.cn/zbooklib/book/detail/show?SiteID=1&bookID=57973（访问日期：2026-10-25）

[10] 国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会. GB/T 799-2020 地脚螺栓. 2021-06-01 实施. https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?hcno=C6366BFDF96A37B56F12F391E47E0C3C（访问日期：2026-10-25）

[11] 国家质量监督检验检疫总局、国家标准化管理委员会. GB/T 3098.1-2010 紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱. 2011-10-01 实施. https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/std_list?p.p1=0&p.p2=gb%2Ft3098.1&p.p90=circulation_date&p.p91=desc（访问日期：2026-10-25）

[12] British Standards Institution. BS EN 1992-4:2018, Eurocode 2: Design of concrete structures — Design of fastenings for use in concrete. Published 2018-10-19. https://landingpage.bsigroup.com/LandingPage/Undated?UPI=000000000030286968（访问日期：2026-10-25）

[13] Das, A. How post-installed anchors work under different loading conditions. Hilti Engineering Centre. https://www.hilti.co.uk/engineering/articles/post-installed-anchor-working-principle-failure-mode（访问日期：2026-10-25）

[14] Narayan, S. Hilti HST4: Performance that matches cast-in headed fasteners. Hilti Engineering Center. https://www.hilti.co.nz/engineering/articles/article-hst4（访问日期：2026-10-25）

附录 A 计算复现与数据说明

计算统一采用 SI 单位，螺纹截面及板条局部公式在显式转换后采用 N–mm–MPa。绘图直接读取计算输出；图示为数学模型重绘，不含需方标识。原始方案与图纸只读，输入哈希与版本选择保存在研究包的证据记录中。

1. 运行 make_inputs.py 生成研究输入记录；若已有经复核的新输入，应保留版本再更新输入。
2. 运行 analyze.py 重算 8 个主工况、方位扫描、单参数扫描、256 个载荷角点、底板/锚固/地基敏感性与剪切参与情形。
3. 运行 validate.py 执行独立标量、中性轴、接触积分和极限情形验证，同时生成基础条带需求。
4. 运行 plot_figures.py 生成 8 幅 PNG 及 SVG；运行 make_report.py 将数值写入完整正文及网页摘要。
5. 核对 validation.json 及文件哈希，再由统一排版流程生成 Word/PDF。研究包本身不包含已签署的工程设计审核。

表 14 输出数据的物理含义

数据集	内容与单位
cases	主工况 N/V 为 N；M/Mz 为 N·m；压力 Pa；厚度 mm
load_path	各组成的质量 kg、质心 m、三分力 N 与三分力矩 N·m
bolts / shear_engagement	各杆拉剪力 N；参与点组的剪力包络
azimuth / footing	方向扫描与基础边长扫描；压力 Pa、接触率无量纲
sensitivity / parameter_corners	单参数与角点输入；不是概率抽样
plate / standoff / stiffness	局部板条、螺杆弯曲及等效刚度敏感性
concrete	所需平均传力指标及投影并集；不是 L 型抗力
foundation_face	基础条带毛上拔压力弯矩指标及条件化截面反算

注：详细文件名、环境依赖与命令见研究包 BUILD.md。

标准版本核验与公式来源核验分开记录。国内标准采用主管部门公告或官方标准目录核实现行编号及范围；具体抗力条文没有获得可复核全文时，不把网络转述当作正式条文系数使用。锥体尺度式从制造商一手技术说明核对，并只用于反算需求而非产品选型。

AUREK
安睿克智能科技

关于本报告

ABOUT THIS REPORT

本报告属于安睿克技术研究报告系列。报告中的研究对象、输入、模型与结论以正文及其引用依据为准。适用于具体工程项目时，应结合实际工况、设计条件与验证记录进行评价。

发布单位

江苏安睿克智能科技有限公司

资料中心

www.aurek.cn/resources

AUREK-RC-AR-046