

# 板柱结构预应力筋铺设顺序拓扑优化与工程应用<sup>\*</sup>

王 庆<sup>1</sup>,董欢涛<sup>2</sup>,来朝辉<sup>1</sup>,李明隽<sup>1,3</sup>,刘生煜<sup>1</sup>

(1. 陕西省建筑科学研究院有限公司,陕西 西安 710082;  
2. 中国建筑一局(集团)有限公司陕西分公司,陕西 西安 710075;  
3. 西安建筑科技大学土木工程学院,陕西 西安 710055)

**[摘要]** 钢筋混凝土板柱结构凭借其空间利用率高、施工经济性好等优势,在现代大跨度建筑中应用广泛。然而,传统预应力筋铺设方式在多跨密集区域易引发摩擦力增大、线形移位、护套磨损及施工效率低等问题,严重制约工程质量与进度。针对这一难题,提出一种基于图论与拓扑排序的预应力筋铺设顺序优化方法。通过建立标高差矩阵将纵横向钢绞线的空间关系抽象为有向加权二分图模型,并采用 Kahn 算法生成无冲突的铺设序列。工程实践表明,该方法显著减少了交叉干扰,使施工效率提升约 83%,同时有效保障了预应力筋线形精度与结构耐久性。

**[关键词]** 板柱结构;预应力筋;拓扑排序;图论;施工效率

**[中图分类号]** TU757      **[文献标识码]** A      **[文章编号]** 2097-0897(2025)24-0109-07

## Topological Optimization and Engineering Application of Prestressing Tendon Laying Sequence in Slab-column Structures

WANG Qing<sup>1</sup>, DONG Huantao<sup>2</sup>, LAI Zhaohui<sup>1</sup>, LI Mingjun<sup>1,3</sup>, LIU Shengyu<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Architecture Science Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710082, China;

2. Shaanxi Branch of China Construction First Group Co.,Ltd.,Xi'an, Shaanxi 710075, China;

3. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

**Abstract:** Reinforced concrete slab-column structures are widely used in modern long-span buildings due to their advantages of high space utilization and economic efficiency in construction. However, traditional prestressing tendon laying methods in multi-span dense areas often lead to some problems such as increased friction, linear displacement, sheath wear, and low construction efficiency, which severely constrain project quality and progress. To address these challenges, this paper proposes an optimization method for the prestressing tendon laying sequence based on graph theory and topological sorting. By constructing an elevation difference matrix, the spatial relationships between longitudinal and transverse steel strands are abstracted into a directed weighted bipartite graph model, and Kahn's algorithm is employed to generate a conflict-free laying sequence. Engineering practice shows that this method significantly reduces cross-interference, improves construction efficiency by approximately 83%, and effectively ensures the precision of tendon alignment and structural durability.

**Keywords:** slab-column structures; prestressing tendon; topological sorting; graph theory; construction efficiency

## 0 引言

钢筋混凝土板柱结构是一种由楼板和柱组成主要承重体系的结构形式。该结构的特点是楼板

直接支承于柱上,除周边区域外不设置次梁,荷载通过楼板传递至柱,再经由柱基础传递至地基。这种结构形式不仅能有效降低建筑物层高、提高空间利用率与使用灵活性,还具有模板用量少、施工速度快等经济与技术优势<sup>[1]</sup>。

随着现代建筑功能需求的不断提升,大跨度、大空间、优良整体性及较高经济性已成为结构设计

\* 陕西省重点研发计划(2025YS-01);陕西省省级国有资本经营预算科技创新专项资金项目(ZXZJ-2024-015);陕西省建筑科学研究院科研项目(2023-11-458,2024-1-503,2025-1-545)

[作者简介] 王 庆,高级工程师,E-mail: 389471800@qq.com

[收稿日期] 2025-04-01

的重要发展方向<sup>[2]</sup>。预应力技术作为一种有效提升板柱结构性能的方法,被广泛应用于实际工程中。该技术可显著增强板柱节点的抗冲切承载力,抑制裂缝的产生与扩展,提高整体结构的稳定性与可靠性。同时,预应力技术可降低结构自重、减小上部荷载引起的挠度<sup>[3]</sup>。因此,在楼面荷载>5kN/m<sup>2</sup>、柱距6~8m的地下车库应用场景时,预应力板柱结构具有明显的技术和经济优势<sup>[4]</sup>。

而相比于有粘结预应力混凝土,无粘结预应力混凝土的预应力筋伸缩变形自由,不与周围混凝土或水泥浆体产生黏结,具有无须预留孔道、无须灌浆等优点,保留了更换预应力筋的可能性<sup>[5]</sup>。此外,无粘结预应力筋表面涂覆专用防腐油脂并外包高密度聚乙烯护套,具备良好的独立防腐性能,进一步提升了结构的耐久性<sup>[6]</sup>。

在无粘结预应力板柱结构中,预应力筋通常采用双向布置,并设置于板内上、下部不同位置,其外形尽可能与弯矩图一致,以抵抗正负弯矩<sup>[7]</sup>。其线形多采用多波连续曲线布置,波峰位于柱顶附近,靠近板顶;波谷位于跨中,靠近板底。由于靠近柱的预应力筋分担的承载力更多,设计中将板面按划分柱上板带和跨中板带的方式布置。柱上板带预应力筋间距更小,预应力筋布置如图1所示。

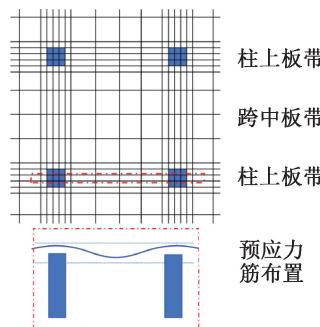


图 1 板内预应力筋布置

Fig. 1 Prestressing tendons arrangement in slab

然而,传统施工流程为完成一个方向预应力筋铺放后再进行另一方向预应力筋铺放,在一些交点处存在“穿束”现象,即后铺方向的预应力筋需从先铺方向的预应力筋下方穿过。此种铺设工艺在多跨密集区域易引发摩擦力增大、线形移位、护套磨损、操作低效及标高失准等问题,严重制约预应力工程的施工质量与效率。

为此,本文基于某小区地下车库工程案例,建立预应力筋铺设顺序模型,并提出了一种基于Kahn算法的拓扑排序,旨在通过优化设计减少穿插干扰,保障线形精度,提高施工效率。

## 1 工程概况与问题分析

### 1.1 工程概况

本文研究案例为某住宅小区地下车库工程,地下1层,总建筑面积约21 424m<sup>2</sup>。该车库共设置停车位601个,其中I区地下车库面积约为7 600m<sup>2</sup>,纵向最大长度达169.95m,层高3.3m,顶板覆土厚度为1.2m(见图2)。该结构区域的柱网布置跨度多样,主要采用8 100mm跨度,另有5 100,6 000,6 600mm等若干组合。柱截面统一为600mm×600mm,柱帽尺寸为2 700mm×2 700mm,2 300mm×2 300mm 2种;楼板厚度为300mm。本工程层高高、单层面积较大、柱距较大。为满足项目无梁板顶棚、空间布局灵活的要求,采用后张法无粘结预应力无梁板施工技术。

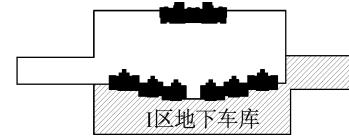


图 2 总平面布置

Fig. 2 General plan layout

本工程结构设计中,楼板内采用双向预应力布置方式,预应力钢绞线选用φ15.24低松弛无粘结钢绞线,抗拉强度标准值为1 860MPa,钢绞线结构采用1×7束,钢绞线公称直径为15.24mm,直径允许偏差为4.0,-0.15mm,钢绞线工程横截面面积为140mm<sup>2</sup>,理论质量为1 101g/m(GB/T 5224—2023《预应力混凝土用钢绞线》)。外包润滑脂和高密度聚乙烯护套后,其整体成品直径为17.0~17.3mm。

预应力钢绞线在板内采用双向布置,线形选用“C4”型四段抛物线布置形式,在每跨中部形成波谷,位置距板底边缘50mm;在柱上区域形成波峰,位置距板顶边缘50mm。每跨板面划分为柱上板带(两端各占1/4跨长)和跨中板带(中部1/2跨长):柱上板带钢绞线布置密集,间距为150mm,用于抵抗支座区域较大的负弯矩;跨中板带间距250mm,用于抵抗跨中区域正弯矩。板的保护层厚度≥40mm。张拉端锚具选用YM15-1J型夹片锚,固定端锚具选用DZM15-1P型挤压锚。

### 1.2 传统工艺存在的问题

传统施工工序一般为:①绑扎板底钢筋;②设置控制预应力标高的架立筋;③铺设纵向(长向)钢绞线;④穿梭铺设横向(短向)钢绞线;⑤安装马凳筋;⑥绑扎板面钢筋。

此类穿插式铺设施工工艺在多跨结构中会出现,如图3所示上下交错情况。由于每根钢绞线在

每跨内均需与垂直方向钢绞线完成 2 次上下交换(即 2 次波峰与波谷转换),后铺设方向在交错处需频繁穿插。

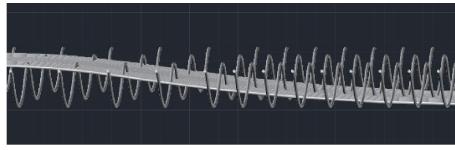


图 3 双向预应力筋上下交错布置

**Fig. 3 Vertical staggered arrangement of bidirectional prestressing tendons**

穿插式铺设工艺在施工时易产生多种问题:  
①摩擦力显著增加,钢绞线拖拽困难;②已铺设钢绞线易被带动移位,导致线形错乱;③外保护套反复摩擦磨损,影响钢绞线防护性能;④人工穿梭操作繁琐,施工强度大、效率低;⑤控制点标高难以精准复核,线形精度难以保障。这些问题在多跨交错密集区域尤为突出,已成为制约预应力施工质量与效率的重要因素。

因此,亟需一种科学高效安排预应力筋铺设顺序编排技术手段,在保持设计线形精度的基础上,提高施工效率,减少交叉干扰,降低人工操作强度和误差率。

## 2 数值模型与优化方法

### 2.1 模型抽象与形式化定义

在双向设置的板柱结构中,纵横向钢绞线在板面上形成大量交点。在每个交点处,纵向与横向钢绞线的高程不同,决定了它们在该位置的上下叠放关系。为系统描述这些关系,本文将该问题抽象为如图 4 所示有向加权二分图模型。

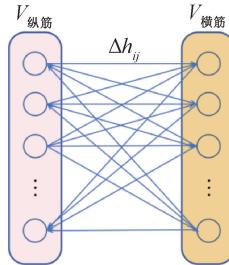


图 4 预应力筋铺设抽象模型

**Fig. 4 Abstract model for prestressing tendon laying**

1) 节点定义。将每根预应力筋抽象为 1 个图节点。根据其空间排列方向,所有节点可划分为 2 个互不相交的子集,即纵向与横向预应力筋子集。即顶点集合  $V$  可形式化划分为  $V = V_{\text{纵筋}} \cup V_{\text{横筋}}$ , 其中  $V_{\text{纵筋}} \cap V_{\text{横筋}} = \emptyset$ 。

2) 边的构建规则。在任一纵筋与横筋的交点处,若纵筋位于下方(即其标高较低),则创建 1 条

从该纵筋指向横筋的有向边。此有向边定义了二者间的优先关系,即纵筋需优先于横筋铺设。由此构建的图满足二分图的核心性质,即所有边的 2 个顶点分别属于  $V_{\text{纵筋}}$  与  $V_{\text{横筋}}$  这 2 个互不相交的顶点子集,且同一子集内的顶点间不存在直接的边连接<sup>[8]</sup>。

3) 边权表示。边的存在取决于 2 根预应力筋在该交点的标高差,由式(1)计算:

$$\Delta h_{ij} = hH(j) - hL(i) \quad (1)$$

式中:  $hL(i)$  为第  $i$  根纵筋在交点处的标高;  $hH(j)$  为第  $j$  根横筋在交点处的标高;  $\Delta h_{ij}$  为该交点处 2 根预应力筋的标高差,若  $\Delta h_{ij} > 0$ , 表示纵筋在下方。

该预应力筋铺设模型的核心目标可形式化表述为:在对应的有向无环图(directed acyclic graph, DAG)中寻找一个拓扑序列。此序列即代表了一种能满足所有高程约束、无交叉干扰的优化铺设顺序。

### 2.2 基于 Kahn 算法的拓扑排序

拓扑排序是针对有向无环图顶点的一种线性排序方法,其核心特性为:对于图中任意 1 条有向边  $u \rightarrow v$ , 顶点  $u$  在排序序列中始终位于顶点  $v$  之前。在本研究构建的预应力筋铺设顺序模型中,依据“低标高优先铺设”原则建立有向边后,拓扑排序能直接生成 1 组满足所有空间约束条件、无冲突的施工序列。

在多种拓扑排序算法中,Kahn 算法因其逻辑直观性、计算高效性及内在的环检测机制,成为工程实践中的优选方案。该算法通过迭代识别并移除图中  $\lambda$  度(即指向顶点的边的数量)为 0 的节点,逐步构建拓扑序列<sup>[9]</sup>。其算法流程如下。

1) 初始化阶段:计算图中所有顶点的  $\lambda$  度。

2) 顶点选择阶段:将当前所有  $\lambda$  度为 0 的顶点加入处理队列。

3) 序列构建与图更新阶段:从队列中取出顶点并入序列,遍历其所有邻接顶点并将其  $\lambda$  度减 1;若某邻接顶点  $\lambda$  度变为 0,则将其加入队列。

4) 终止判断阶段:重复上述过程直至队列为空。若最终序列包含所有顶点,则排序成功;否则,表明图中存在环,即依赖关系存在矛盾。

图中各顶点初始  $\lambda$  度可由所有交点的上下关系反映,因此本文建立了预应力筋铺设标高差矩阵,其行代表纵向钢绞线,列代表横向钢绞线,矩阵元素即为对应交点处的标高差  $\Delta h_{ij}$ 。

进一步,基于 Kahn 算法提出了分层优化策略。

1) 第 1 层筛选(最底层纵筋):查找矩阵中标高

差全为正值的行(即该根纵筋在所有交点处均位于横筋之下),将其作为最底层优先铺设筋。

2)更新与标记:标记该筋为已铺设,并在矩阵中删除其所有相关交点(即更新剩余依赖关系)。

3)第 2 层筛选(次底层横筋):在更新后的矩阵中,查找剩余列中标高差全为负值的横筋(即该根横筋在剩余交点处均位于纵筋之下),作为下一层铺设对象。

4)循环迭代:重复执行 1)~3)筛选与更新步骤,直至所有钢绞线均被标记完毕。

该拓扑排序通过矩阵遍历实现,排序结构清晰、实现简便,时间复杂度为  $O[(m \times n)^2]$  ( $m, n$  分别为矩阵行、列数量),适用于各类平台下的自动化计算,便于工程一线人员使用。

### 3 预应力筋铺设优化工程应用

为在工程中实现预应力筋铺设优化,本研究基于 Python 语言,构建了一个用于自动计算预应力筋交点标高差及铺设优先级的简明模型,核心包括以下内容。

#### 3.1 预应力筋排布计算

由预设的结构参数计算预应力筋线形函数,建立如式(2)所示单跨内预应力筋与板底标高距离  $y$  和与支座边缘水平距离  $x$  的关系:

$$y = \begin{cases} -\frac{2(H - L - d_2)}{L^2\beta}x^2 + H - d_1 & (0 \leq x < 0.5H) \\ \frac{2(H - d_1 - d_2)}{(0.5 - \beta)L^2}(x - 0.5L)^2 + d_2 & (0.5H \leq x < H) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $L$  为柱间跨度; $H$  为板厚; $d_1$  为曲线最高点与支座板顶距离; $d_2$  为曲线最低点与跨中板底距离; $\beta$  为曲线反弯点系数,可取为 0.15。

进一步,根据跨度  $L$ 、柱上板带宽度  $A_1$ 、跨中板带宽度  $A_2$ 、预应力筋间距  $l$  计算得到预应力筋数量及与支座边缘水平距离  $x$ 。其中,  $A_1, A_2$  按照 JGJ 92—2016《无粘结预应力混凝土结构技术规程》<sup>[10]</sup> 中规定设置,本工程中取  $A_1 = 0.25L, A_2 = 0.5L$ ;预应力筋间距  $l$  由结构施工图得到。

#### 3.2 建立预应力筋铺设标高差矩阵

根据式(2),按跨中板带和柱上板带分别计算各根预应力筋在交点处的理论标高。进一步,将各跨度的施工参数计算完成后便可根据设计图纸进行组合,最终形成多跨预应力筋布设区域的标高差矩阵。

本工程中,以③~⑩轴/⑥~⑪轴区域施工区为

例进行铺设设计。该区域纵向为 6 跨,跨度组合从左到右依次为 4 个 8.1m 跨、1 个 6.3m 跨、1 个 6.6m 跨。最后一跨支座处为剪力墙,所以跨中板带和最后一个柱上板带合并,预应力筋在此区域的间距均为 300mm。横向共 4 跨,跨度组合自下而上分别为 7.2, 8, 8, 5.2m。<sup>③~⑩</sup> 轴/<sup>⑥~⑪</sup> 轴单跨区域标高差矩阵如图 5 所示,施工区总标高差矩阵如图 6 所示。

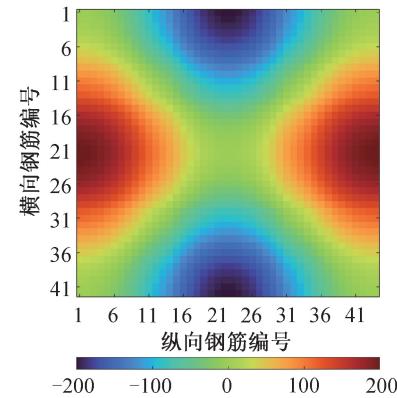


图 5 单跨区域标高差矩阵

Fig. 5 Elevation difference matrix in the single span area

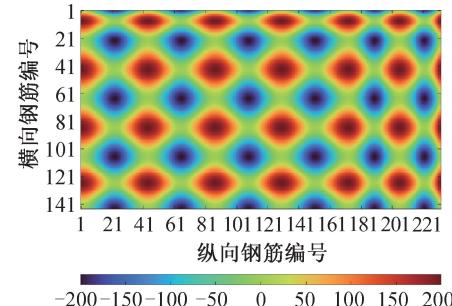


图 6 施工区域总标高差矩阵

Fig. 6 Total elevation difference matrix in construction area

#### 3.3 预应力筋铺设顺序优化

本文基于 2.2 节所建立的拓扑排序模型,采用 Python 语言编写了预应力筋铺设顺序优化算法(见图 7)。该算法以标高差矩阵作为输入,通过矩阵遍历与分层筛选策略,逐步求解局部最优铺设顺序,最终生成 1 组满足全部空间约束条件的无冲突施工序列。

预应力筋铺设顺序的优化结果如图 8 所示。图 8a 显示了编号 1~225 的纵向筋及其对应铺设顺序,图 8b 显示了编号 1~141 的横向筋及其铺设顺序。整体而言,纵、横向预应力筋的铺设顺序均呈现明显的分段波动规律,各出现多个连续波峰,分别对应不同板跨内优先铺设的预应力筋。纵向筋的波

**Algorithm 1** 预应力筋铺设顺序优化

```

1: 输入标高差矩阵  $\rightarrow data$ 
2: if  $data$  为空 then
3:   提示「无数据」, Return
4: end if
5:  $n_{rows}, n_{cols} \leftarrow$  行数、列数
6:  $marked_{rows}, marked_{cols} \leftarrow [False] \times n_{rows}/n_{cols}$ 
7:  $priority \leftarrow 1, changed \leftarrow True$ 
8: 创建  $result (n_{rows} + 1 \times n_{cols} + 1)$ , 复制  $data$  到左上角
   While  $changed = True$ 
9:    $changed \leftarrow False$ 
   For  $j \leftarrow 0$  to  $n_{cols} - 1$ 
10:  if  $\neg marked_{cols}[j] \wedge$  列  $j$  未标记行元素全负 then
11:     $marked_{cols}[j] \leftarrow True$ 
12:     $result[n_{rows}, j] \leftarrow priority$ 
13:     $changed \leftarrow True$ 
14:  end ifEndFor
   For  $i \leftarrow 0$  to  $n_{rows} - 1$ 
15:  if  $\neg marked_{rows}[i] \wedge$  行  $i$  未标记列元素全非负 then
16:     $marked_{rows}[i] \leftarrow True$ 
17:     $result[i, n_{cols}] \leftarrow priority$ 
18:     $changed \leftarrow True$ 
19:  end ifEndFor
20:  if  $changed$  then
21:     $priority \leftarrow priority + 1$ 
22:  end ifEndWhile
23: 显示标注完成信息
24: 输出带优先级的结果矩阵  $result$  (含原始数据及行列优先级)

```

图 7 预应力筋铺设顺序优化算法

Fig. 7 Optimization algorithm for prestressing tendon laying sequence

峰大致位于编号 17, 49, 81, 113, 145, 177, 209 附近, 横向筋的波峰位于编号 11, 31, 51, 71, 91, 111, 131 附近, 表明算法成功识别出应在各跨区域内优先铺设的底层筋材。

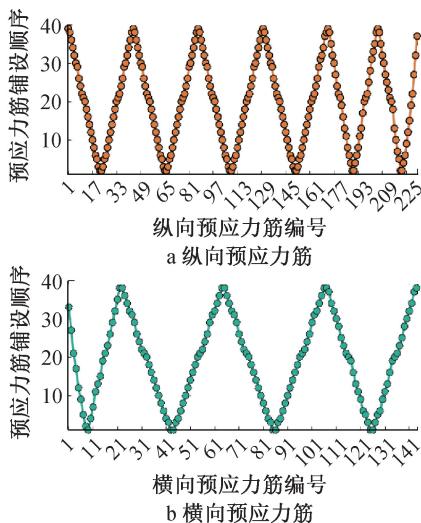


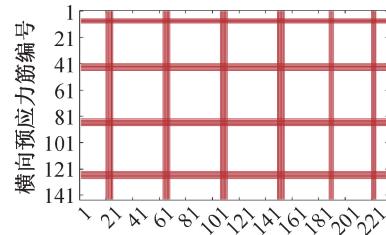
图 8 预应力筋铺设排序结果

Fig. 8 Ranking results for prestressing tendon laying

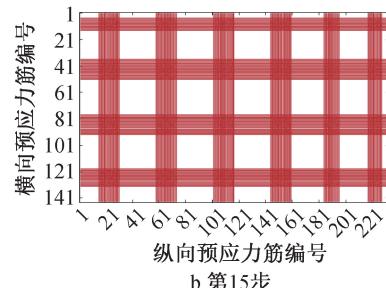
基于优化排序结果进行预应力筋铺设的第 5, 15, 25 步施工如图 9 所示, 该结果验证了本文所提出的预应力筋铺设顺序优化算法的有效性。输出预应力筋铺设序列具有良好的单调性和局部连续性, 符合“先下后上、逐层推进”的施工逻辑, 能显著减少施工过程中的交叉干扰, 为实际工程中预应力筋的高精度、高效率铺设提供了可靠依据。

**4 施工质量控制****4.1 线形精度控制**

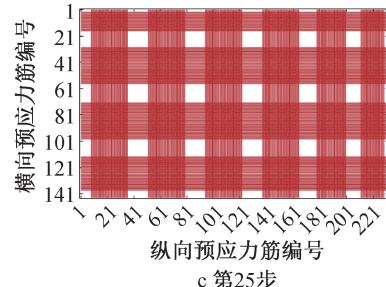
预应力筋的铺设线形直接决定了其受力路径



a 第5步



b 第15步



c 第25步

图 9 根据优先级进行预应力筋铺设

Fig. 9 Prestressing laying according to priority level

和施加张拉力的有效性, 必须严格按前述设计要求的曲线布置。

在双向多跨连续配筋板柱体系中, 对于各预应力筋的曲线高度控制点, 垂直位置宜用支撑钢筋或马凳筋控制, 间距为 1~2m。由于波峰、波谷等控制点附近铺设精度对预应力筋线形的变化有显著影响, 在支座部位, 可直接将预应力筋绑扎在板或墙的顶部钢筋上; 在跨中部位, 可直接将无粘结预应力筋绑在底部钢筋上。

此外, 整个预应力布束区域在平面上呈直线, 预应力筋铺设时必须保持直线布置, 不得出现 S 形弯曲<sup>[11]</sup>, 并以各柱所在轴线作为参照, 根据预先计算得到的编排顺序及位置进行下料。

**4.2 高密度区段布设优化**

在柱上板带高密度区域的波峰、波谷等关键部位, 钢绞线上、下层间的标高差往往很小, 甚至小于钢绞线直径(约 20mm), 若完全按程序给出的优先级铺设, 将导致后铺设钢绞线被不断叠加垫高, 造成多种问题: ①局部堆叠过厚, 影响板厚控制; ②张拉过程中外护套管压扁变形; ③现场实际无法实现的标高差异。

针对这一问题,在施工前需结合现场实际采取以下优化措施。

1) 预设分层优先级:对于标高相近的同类型钢绞线,明确其在穿插部位的上下关系,作为硬性铺设约束。

2) 合并铺设批次:将多批次标高差在 10mm 以内的钢绞线优先级合并,统一铺设。

3) 动态调整标高:在不影响结构性能的前提下,调整该批钢绞线控制点标高,设置为相邻最低层标高与 1 个钢绞线直径(20mm)之和,确保结构厚度合理。

### 4.3 现场施工与效率分析

本工程案例中,采用优化后铺设方式进行施工。当预应力筋标高与普通钢筋冲突时,应以优先定位预应力筋标高为原则。

本工程板面预应力筋的整体铺设情况如图 10 所示,纵、横向预应力筋已按设计间距铺设完成,形成规整的双向网格,绑扎牢固、线形顺直,整体平整度控制良好。



图 10 双向板面预应力筋铺设

Fig. 10 Laying for bidirectional plate surface prestressing tendons

柱顶区域预应力筋铺设如图 11 所示,由于节点处钢筋较密,预应力筋在柱上板带间距较小,为保证节点区域传力有效性,普通钢筋绑扎时位置必须准确到位,预应力施工时应先穿设预应力钢绞线,然后再绑扎柱箍筋。



图 11 柱顶区域预应力筋铺设

Fig. 11 Laying for prestressing tendons in column top area

在图 12 所示剪力墙边缘张拉端先穿设预应力筋,并放置预应力张拉端铁板,然后再绑扎固定柱箍筋。



图 12 剪力墙边缘预应力筋张拉端

Fig. 12 Tension end of prestressing tendons at shear wall edge

传统预应力筋铺设施工中,虽铺设顺序简单,但在铺设中需多次上下穿插,施工效率较低,完成单位数量(质量为 1t)的预应力筋铺设需 22 人工工日。而优化后预应力筋铺设方式可实现“先下后上、分层铺设”,做到精细化施工,避免了后铺设预应力筋多次穿插引起的施工困难,完成单位数量的预应力筋铺设需 12 人工工日,效率提高 83%。

### 5 结语

本文以某小区地下车库为工程背景,系统研究了无粘结预应力板柱结构中钢绞线铺设顺序的优化问题。通过将实际施工问题抽象为图论中的拓扑排序任务,构建了基于标高差矩阵的有向加权二分图模型,从而实现了预应力筋铺设依赖关系的量化描述。在此基础上,引入 Kahn 算法生成符合“低标高优先”原则的无冲突铺设序列,为施工顺序的科学安排提供了理论依据与方法支撑。

工程实践表明,本文所提出的优化方法能有效减少交叉干扰,提高钢绞线铺设的精度与效率,施工人工消耗降低约 83%,并显著降低人工操作强度与返工率。针对高差不足的密集区段所提出的结合施工工艺的调整策略,在保障铺设顺序可行性的同时,也兼顾了结构厚度控制与实际可操作性,体现出良好的工程适用性。

本方法逻辑清晰、操作简便,可基于 Python 等常见平台实现,具备较强的推广适用性。然而,研究仍存在一定局限性,如对高密度区段较小高差(< 10mm)的处理仍依赖人工经验,自动化程度不高,也未系统考虑非预应力筋布置、材料变形等实际因素对拓扑序列稳定性的影响。后续研究可进一步引入动态规划、群智能优化等算法,提升对复杂线形与施工扰动的适应能力,并推动 BIM 平台集成,实现预应力施工全过程的智能化优化。

### 参考文献:

- [1] 邹磊. 无粘结预应力板—柱结构抗震性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.

- ZOU L. Study on aseismic performance of unbonded prestressed slab-column structures [ D ]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [ 2 ] 魏玉锁. 无粘结预应力混凝土施工技术研究 [ D ]. 天津:天津大学, 2004.
- WEI Y S. Study on construction technology of unbonded prestressed concrete [ D ]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [ 3 ] 陈建伟, 吴山, 霍永刚. 基于分层壳模型的无粘结预应力板柱结构抗冲切性能分析 [ J ]. 施工技术, 2018, 47(22): 131-135.
- CHEN J W, WU S, HUO Y G. Punching shear performance analysis of unbonded prestressed slab column based on layered shell model [ J ]. Construction technology, 2018, 47(22): 131-135.
- [ 4 ] 杜旭. 混凝土板柱结构地下车库设计方法的若干讨论 [ J ]. 结构工程师, 2024, 40(2): 211-217.
- DU X. Critical thinking on design methods for reinforced concrete plate-column structures used in underground garages [ J ]. Structural engineers, 2024, 40(2): 211-217.
- [ 5 ] 王崇杰. 后张法无粘结预应力无梁板施工技术在大跨度体育场馆建设中的应用 [ J/OL ]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024(30): 145-147.
- WANG C J. Application of post-tensioned unbonded prestressed beamless slab construction technology in the construction of long-span stadiums and gyms [ J ]. Theoretical research in urban construction, 2024(30): 145-147.
- [ 6 ] 李晨光, 王泽强, 张开臣. 预应力工程施工技术发展与展望 [ J ]. 施工技术, 2018, 47(6): 33-40.
- LI C G, WANG Z Q, ZHANG K C. Development and expectation on construction technology of prestressed projects [ J ]. Construction technology, 2018, 47(6): 33-40.
- [ 7 ] 杭丽. 板柱结构中钢筋的布置与构造问题研究 [ J ]. 科技视界, 2013(28): 77, 143.
- HANG L. Study on arrangement and construction of steel bars in slab-column structure [ J ]. Science & technology vision, 2013(28): 77, 143.
- [ 8 ] 王树禾. 图论 [ M ]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2009.
- WANG S H. Graph theory [ M ]. 2nd Edition. Beijing: Science Press, 2009.
- [ 9 ] Robert Sedgewick, Kevin Wayne. 算法 [ M ]. 4 版. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
- SEGEWICK R, WAYNE K. Algorithms [ M ]. 4th Edition. Beijing: Posts & Telecom Press, 2012.
- [ 10 ] 中国建筑科学研究院. 无粘结预应力混凝土结构技术规程: JGJ 92—2016 [ S ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- China Academy of Building Research. Technical specification for concrete structures prestressed with unbonded tendons: JGJ 92—2016 [ S ]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [ 11 ] 赵敬法, 王晓明, 张健. 无粘结预应力混凝土结构工程施工技术及其应用 [ J ]. 施工技术, 2016, 45(S1): 580-582.
- ZHAO J F, WANG X M, ZHANG J. Construction technology and application of unbonded prestressed concrete structure engineering [ J ]. Construction technology, 2016, 45(S1): 580-582.

## (上接第 86 页)

- [ 3 ] LI Z L, GUO Y T, RAO S H, et al. On the investigation of modular high-rise concrete buildings in the Asia Pacific region: engineering application analysis and future directions [ J ]. Results in engineering, 2025, 26: 104830.
- [ 4 ] 李泽乐, 郭宇韬, 朱怀涛, 等. 国内高层混凝土模块化建筑实践与探索 [ C ]//2024 年建筑结构技术交流会——第三届粤港澳大湾区工程创新技术交流会暨项目观摩会论文集, 2024.
- LI Z L, GUO Y T, ZHU H T, et al. Practice and exploration of high-rise concrete modular construction in China [ C ]// Proceedings of 2024 Conference on Building Structure Technology—The 3rd Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Engineering Innovation Technology Exchange Conference & Project Observation Symposium, 2024.
- [ 5 ] 赵宝军. 由建造到智造, 加速现代建筑业高质量发展 [ J ]. 施工企业管理, 2023(8): 44-46.
- ZHAO B J. From construction to intelligent manufacturing: accelerating high-quality development of modern construction industry [ J ]. Construction enterprise management, 2023(8): 44-46.
- [ 6 ] 孟辉, 周彪. 国内混凝土结构高层住宅模块化建筑发展研究 [ J ]. 广州建筑, 2024, 52(2): 120-122.
- MENG H, ZHOU B. Research on the development of modular building of high-rise residential building with concrete structure in China [ J ]. Guangzhou architecture, 2024, 52(2): 120-122.
- [ 7 ] 韩玉, 李洋. 以监理数字化改革提升水利水电工程资料工作 [ J ]. 浙江档案, 2024(4): 53-55.
- HAN Y, LI Y. Research on data work supervision of water conservancy and hydropower projects based on digital reform [ J ]. Zhejiang archives, 2024(4): 53-55.
- [ 8 ] 覃荣武, 黄本锐, 卢大林. 基于 BIM 技术的档案数字化管理研究及应用 [ J ]. 大众标准化, 2024(11): 161-163.
- QIN R W, HUANG B R, LU D L. Research and application of digital archive management based on BIM technology [ J ]. Popular standardization, 2024(11): 161-163.
- [ 9 ] 刘申, 余子丰. 探索建设工程档案数字化转型的杭州范例——以杭州市工程建设电子档案单套接收及管理试点为例 [ J ]. 浙江档案, 2021(12): 47-49.
- LIU S, YU Z F. An exploration of construction engineering archives digital reform: taking Hangzhou as examples [ J ]. Zhejiang archives, 2021(12): 47-49.
- [ 10 ] 刘越男, 王红敏, 贺谭涛. 数字化转型进程中档案与业务双向赋能的框架与路径研究——以建设项目电子文件归档和电子档案管理为例 [ J ]. 档案学研究, 2025(1): 105-112.
- LIU Y N, WANG H M, HE T T. A research on the framework of mutual empowerment between archives and business and its pathways in digital transformation: taking electronic records archiving and management of construction projects as examples [ J ]. Archives science study, 2025(1): 105-112.