

Study on the Impact of Vertical Support Uplift on the Safety of Concrete Strut in Subway Station Excavation

Chaoming Liu¹, Zhengyuan Yang^{2*}, Yanbin Gao²

¹Construction Administration Center of Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., Shanghai

²College of Civil Engineering of Tongji University, Shanghai

Email: liu_zhao_ming@163.com, *ric8123@163.com, yanbin_gao@tongji.edu.cn

Received: Apr. 3rd, 2020; accepted: Apr. 22nd, 2020; published: Apr. 29th, 2020

Abstract

In braced excavation, pillars are usually used as vertical supports to maintain the stability of the struts. In this paper, the bending moment and safety of concrete strut under the pillar uplift in subway station excavation are studied. The concept and analysis method of the ultimate uplift are presented. With a case study, the influence of boundary conditions and parameter values on the analysis results of the ultimate uplift is discussed. The bending moment at the middle of the pillar can be used to calculate the ultimate uplift and evaluate the safety of the strut. In the case of fixed ending, the critical uplift is smaller and the vertical force is larger. It is suggested to use the results of fixed ending model in the design. Using short-term stiffness B_s , instead of elastic bending stiffness EI , can give reasonable results. The calculation results are consistent with the field observations, which can explain the obvious cracks on some concrete struts. Finally, the control measures of pillar uplift are also discussed.

Keywords

Foundation Excavation, Vertical Support, Concrete Strut, Uplift, Safety

地铁车站基坑立柱隆起对混凝土支撑安全性的影响研究

刘朝明¹, 杨正园^{2*}, 高彦斌²

¹上海申通地铁集团有限公司建设管理中心, 上海

²同济大学土木工程学院, 上海

Email: liu_zhao_ming@163.com, *ric8123@163.com, yanbin_gao@tongji.edu.cn

收稿日期: 2020年4月3日; 录用日期: 2020年4月22日; 发布日期: 2020年4月29日

*通讯作者。

摘要

基坑内支撑支护体系中通常用立柱来保证内支撑的整体稳定性。本文研究了典型地铁基坑开挖过程中立柱隆起造成的混凝土支撑的弯矩以及对安全性的影响。首先结合结构力学计算模型提出了立柱临界隆起量的概念以及计算方法。并结合一个工程案例,讨论了边界条件和参数取值对临界隆起量计算分析结果的影响。结果表明,混凝土支撑中部的弯矩可用来计算临界隆起量、评估支撑的安全性。固接情况下的临界隆起量较小而竖向作用力较大,设计计算中建议采用固接分析的结果。采用短期刚度 B_s 替代弹性抗弯刚度 EI 计算得到的结果更为合理。计算结果与现场情况较为吻合,能够很好的解释现场部分混凝土支撑出现明显裂缝的现象。最后对立柱隆起控制措施也进行了探讨。

关键词

基坑开挖, 立柱, 混凝土支撑, 隆起, 安全性

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

深基坑开挖中,立柱作为竖向承载结构承担支撑的自重荷载,并与系杆联合成为一个约束支撑自由度的体系,避免因压杆稳定问题造成的支撑失稳,从而起到提高支撑整体稳定性的作用。而通常平衡立柱隆起的仅有支撑自重,造成软土地区深基坑开挖过程中坑底隆起的现象较为普遍(布兰德[1], Terzaghi 等[2])甚至导致工程事故(Chen 等[3],李忠超等[4])。坑底土体隆起带动立柱桩产生向上的位移,对基坑支撑和围护结构的整体稳定性产生不利影响。Tanaka [5]讨论了日本软土基坑工程中观测到的立柱隆起现象,以及对工程造成的危害。目前来讲,在基坑工程的相关规范和设计手册中,也未给出立柱隆起对支撑安全性影响的分析方法[6] [7] [8]。在立柱隆起对支撑体系安全性影响方面,冯虎[9]等研究立柱隆起对钢支撑承载力和拼接面受力特性的影响、初始安装偏心距对钢支撑承载力的影响。研究表明,钢支撑承载力随立柱竖向位移的增大而明显减小,设计轴力越大,允许的立柱竖向位移越小。于宁[10]针对立柱隆起对立柱承载力、混凝土支撑稳定性的影响进行了分析,指出立柱隆起对混凝土支撑的影响非常显著。

典型的地铁车站基坑多为宽度约 20 m 左右的狭长基坑,由于基坑宽度较窄,一般采用对撑方式,并在支撑中部位置设置立柱。由于立柱与混凝土支撑浇筑在一起,因此设计计算中正确评价立柱隆起对混凝土支撑的影响就显得尤为重要。在上海地区,按照设计要求,地铁车站基坑立柱桩的隆起量要求控制在 20 mm 以内。但一些工程中有多个车站出现 50 mm~80 mm 的立柱隆起,影响到混凝土支撑的安全。以往的分析中大多集中在立柱隆起对钢支撑的承载力的影响方面,结合算例详细分析立柱隆起下混凝土支撑的弯矩以及安全性的研究还较为匮乏。本文结合结构力学分析模型,详细分析了混凝土支撑自重、支撑轴力和立柱隆起三部分弯矩的大小,根据混凝土支撑的承载力提出了临界隆起量的概念以及计算方法,并对比分析了边界条件以及参数取值对分析结果的影响。研究结果对立柱隆起下地铁车站基坑围护体系的安全性评估和保障有重要的意义。

2. 计算模型与方法

2.1. 计算模型

立柱隆起情况下地铁车站基坑混凝土支撑的计算分析可简化为图 1 所示的两跨连续梁模型。假定立柱位于支撑的中部，混凝土支撑与地下连续墙连接的边界考虑为铰接和固接两种极端情况(后面会结合计算结果讨论边界的影响)。图中均布荷载 q 为作用于混凝土梁上的自重 q_1 以及活荷载 q_2 ， N 为支撑轴力。立柱的隆起量为 δ ，对混凝土支撑产生竖直向上的作用力为 P 。这种情况下，混凝土支撑的总弯矩 M 为：

$$M = M_{\delta} + M_N + M_q \tag{1}$$

其中： M_{δ} 为立柱隆起产生的弯矩， M_g 为均布荷载 q 产生的弯矩， M_N 为轴力 N 产生的弯矩。

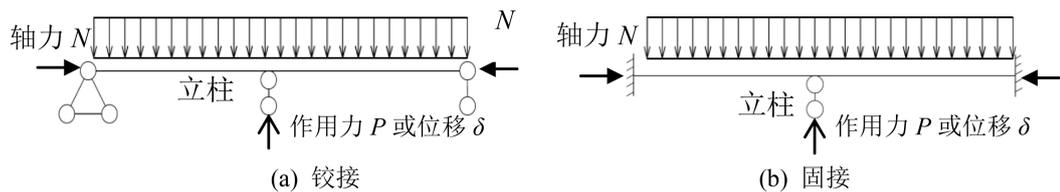


Figure 1. Analysis model of the concrete strut under column uplift
图 1. 立柱隆起情况下混凝土支撑计算模型

2.2. 混凝土支撑弯矩与立柱隆起量的关系

在图 1 所示的计算模式下，混凝土支撑属于偏心受压受力状态，因此首先需要分析混凝土支撑的弯矩，而立柱隆起造成的弯矩是其中的重点。采用如图 2 所示的半结构分析法对图 1 所示的两种边界条件下的混凝土梁的变形和弯矩进行分析。取半结构的长度为 l' ，即 $l' = l/2$ ，跨中位置为半结构的固定边界。根据结构力学方法得到均布荷载 q 作用下以及立柱隆起量为 δ 情况下的弯矩图见图 2 所示。支撑轴力 N 产生的跨中弯矩按照 $M_N = N\delta$ 计算。这样得到跨中和端部的各部分弯矩以及总弯矩见表 1 所示。

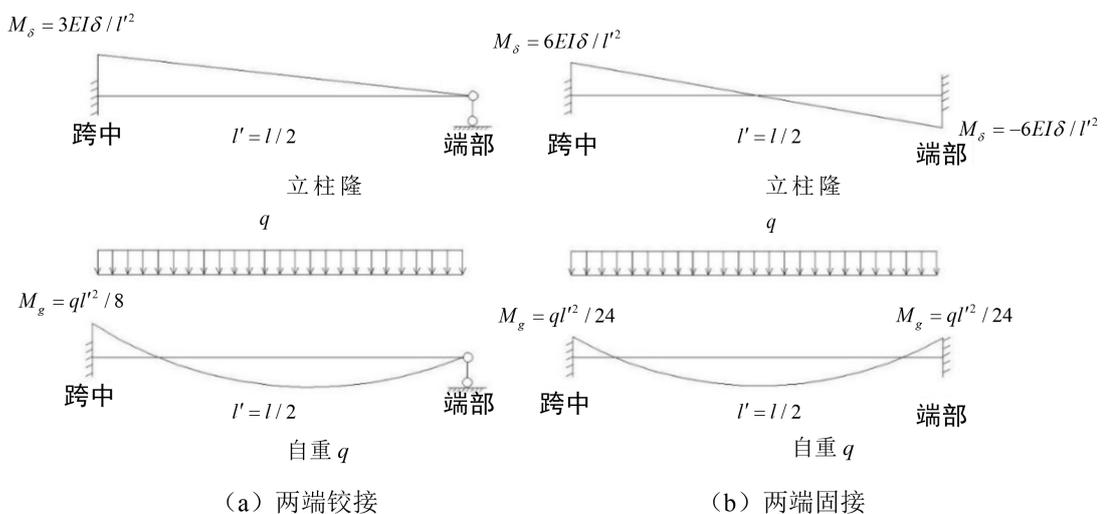


Figure 2. Semi structural analysis model and bending moment diagram
图 2. 半结构分析模型及弯矩图

Table 1. Bending moment at the middle and end of concrete strut ($l' = l/2$)**表 1.** 混凝土支撑中部和端部弯矩表($l' = l/2$)

弯矩分类	边界条件	
	铰接	固接
立柱隆起 M_δ	$M_{\delta跨中} = \frac{3EI\delta}{l'^2} = \frac{1}{2}Pl'$ $M_{\delta端部} = 0$	$M_{\delta跨中} = \frac{6EI\delta}{l'^2} = \frac{1}{4}Pl'$ $M_{\delta端部} = -\frac{6EI\delta}{l'^2} = -\frac{1}{4}Pl'$
自重荷载 M_g	$M_{g跨中} = \frac{ql'^2}{8}$	$M_{g端部} = M_{g跨中} = \frac{ql'^2}{24}$
轴力 M_N	$M_{N跨中} = N\delta$	$M_{N跨中} = N\delta$
总弯矩 M	$M_{跨中} = \frac{3EI\delta}{l'^2} + \frac{ql'^2}{8} + N\delta$ $M_{端部} = 0$	$M_{跨中} = \frac{6EI\delta}{l'^2} + \frac{ql'^2}{24} + N\delta$ $M_{端部} = -\frac{6EI\delta}{l'^2} + \frac{ql'^2}{24}$
竖向作用力 P	$P = \frac{6EI\delta}{l'^3} + \frac{5ql'}{4} = 2M_{\delta}/l' + \frac{5ql'}{4}$	$P = \frac{24EI\delta}{l'^3} + ql' = 4M_{\delta}/l' + ql'$

2.3. 临界隆起量

可以看出, 混凝土支撑最大弯矩产生在中部。在无立柱隆起的情况下, 支撑的弯矩主要由均布荷载 q 造成, 由于弯矩 M_g 较小, 支撑整体上属于小偏心受力状态。随着立柱隆起量的增大, 混凝土支撑的跨中弯矩 M_δ 和 M_N 均增大, 混凝土支撑由小偏心受力状态转化为大偏心受力状态; 随着隆起量 δ 的进一步增大, 混凝土支撑中部(也就是弯矩最大的位置)首先达到极限状态, 然后中部的弯矩维持在其极限抗弯承载力 M_u 。对于两端固接的情况, 随着隆起量 δ 的进一步增大, 端部最终也达到极限状态。将当混凝土支撑的中部抗弯承载力时达到极限状态时的立柱隆起量定义为临界隆起量 δ_u 。显然, 当立柱隆起量时 $\delta < \delta_u$, 混凝土支撑的弯矩 M 与隆起量 δ_u 呈线性关系; 当立柱隆起量 $\delta > \delta_u$ 时, 混凝土支撑中部的弯矩 M 维持在极限状态, 即 $M = M_u$ 。

根据混凝土支撑中部的弯矩 M 达到其抗弯承载力 M_u 时的条件, 就可以根据表 1 来得到两种不同边界条件下的临界隆起量。

a) 铰接情况下:

由 $M_{跨中} = \frac{3EI\delta}{l'^2} + \frac{1}{8}ql'^2 + N\delta = M_u$, 可得到临界隆起量

$$\delta_u = \frac{M_u - \frac{1}{8}ql'^2}{\frac{3EI}{l'^2} + N} \quad (2)$$

b) 固接情况下: 由 $M_{跨中} = \frac{6EI\delta}{l'^2} + \frac{1}{24}ql'^2 + N\delta = M_u$, 可得到临界隆起量

$$\delta_u = \frac{M_u - \frac{1}{24}ql'^2}{\frac{6EI}{l'^2} + N} \quad (3)$$

3. 工程实例分析

3.1. 工程背景

某地铁车站的开挖深度为 17 m。采用地下连续墙加内支撑的支护体系。共 5 道支撑，第一道为混凝土支撑，其余 4 道均为钢支撑。设计采用的混凝土支撑的典型截面见图 3 所示。混凝土支撑总长度 $l=20.4\text{ m}$ ，截面宽度 $b=700\text{ mm}$ 、高度 $h=900\text{ mm}$ ，混凝土为 C30（混凝土轴心抗压强度 $f_c=14.3\text{ N/mm}^2$ ），钢筋为 HRB400（钢筋抗拉强度和抗压强度 $f_y=f'_y=360\text{ N/mm}^2$ ），计算得到的混凝土支撑抗弯承载力 M_u 为 1187 kN·m。立柱为钢格构柱，立柱桩为长 30 m、直径为 800 mm 的灌注桩。开挖到坑底时，现场观测到的立柱隆起量多在 40 mm~80 mm。个别混凝土支撑的顶面出现了横向裂缝，见图 4 所示。

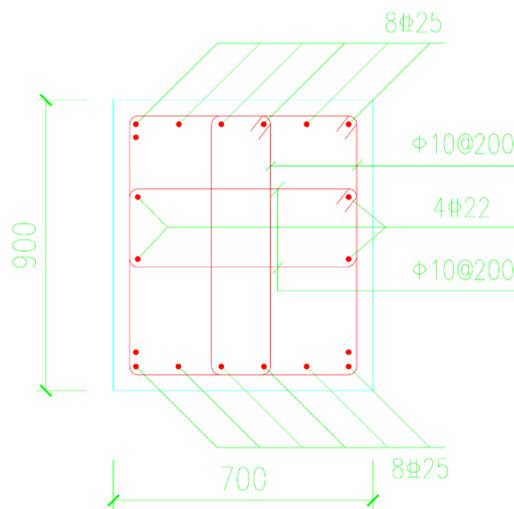


Figure 3. Concrete support section

图 3. 混凝土支撑截面



Figure 4. Cracks in concrete strut

图 4. 混凝土支撑出现的横向裂缝

3.2. 计算分析

支撑上自重荷载 q_1 为 16 kN/m，活载 q_2 近似取 4 kN/m， q 总计为 20 kPa，考虑一定的不确定性(分项系数)，总的均布荷载 q 取 25 kPa。根据设计单位给出的围护结构计算书，第一道支撑轴力为每延米 191 kN。

第一道混凝土支撑的间距大约为 8 m，因此混凝土支撑轴力 $N = 191 \times 8 = 1528 \text{ kN}$ ，计算取 $N = 1600 \text{ kN}$ 。混凝土支撑的弹性模量 $E = 3 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ，截面惯性矩 $I = 4.3 \times 10^{10} \text{ mm}^4$ ，抗弯刚度 $EI = 1.29 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ ，均布荷载 $q = 25.3 \text{ kN/m}$ ， $l = 20.4 \text{ m}$ ， $l' = l/2 = 10.2 \text{ m}$ 。

表 2 中给出了计算得到的跨中位置自重产生的弯矩 M_g 以及轴力产生的弯矩 M_N 。在 $\delta = 10 \text{ cm}$ 的情况下，支撑轴力 N 在跨中产生的弯矩 M_N 为 $160 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ，可见支撑轴力产生的弯距较小，一般情况下小于 $160 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。 M_g 与 M_N 的和约在 $500 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 以内，远小于抗弯承载力 M_u 。因此，对混凝土支撑安全性影响最重要的是立柱隆起造成的弯矩 M_δ 。

Table 2. Bending moment M_δ and M_N at the middle of concrete strut ($l' = l/2$)

表 2. 混凝土支撑中部的弯矩 M_δ 和 M_N ($l' = l/2$)

弯矩分类	边界条件	
	铰接	固接
自重荷载产生 M_g	$M_{g\text{跨中}} = \frac{ql'^2}{8} = 329 \text{ kN} \cdot \text{m}$	$M_{g\text{跨中}} = \frac{ql'^2}{24} = 109.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$
轴力 N 产生 M_N	$M_{N\text{跨中}} = N\delta < 1600 \text{ kN} \times 10 \text{ cm} = 160 \text{ kN} \cdot \text{m}$	$M_{N\text{跨中}} = N\delta < 1600 \text{ kN} \times 10 \text{ cm} = 160 \text{ kN} \cdot \text{m}$

下面分析临界隆起量 δ_u ，也就是混凝土支撑中部的弯矩达到其抗弯承载力 M_u 时的隆起量。

$$\text{a) 铰接情况下: } \delta_u = \frac{M_u - \frac{1}{8}ql'^2}{\frac{3EI}{l'^2} + N} = \frac{1113 - 329}{\frac{3 \times 1.29 \times 10^6}{10.2 \times 10.2} + 1600} = 0.020 \text{ m} = 20 \text{ mm}$$

$$\text{b) 固接情况下: } \delta_u = \frac{M_u - \frac{1}{24}ql'^2}{\frac{6EI}{l'^2} + N} = \frac{1113 - 110}{\frac{6 \times 1.29 \times 10^6}{10.2 \times 10.2} + 1600} = 0.0132 \text{ m} = 13.2 \text{ mm}$$

即当立柱隆起 20 mm (铰接)或 13.2 mm (固接)时，混凝土支撑中部达到极限状态。

3.3. 考虑钢筋混凝土结构非线性分析

需要注意的是，抗弯刚度 EI 对计算结果有直接的影响。以上计算分析是建立在弹性分析基础上的，采用的抗弯刚度是混凝土支撑的弹性抗弯刚度，未考虑混凝土开裂的影响。实际上，随着弯矩的增大与混凝土开裂的发展，钢筋混凝土杆件的抗弯刚度会逐渐减小。由于现场立柱的隆起量较大，混凝土支撑的弯矩可能会接近极限状态，这种情况下的抗弯刚度会显著小于弹性抗弯刚度 EI 。因此，为了提高计算结果的可靠性，有必要考虑由于非线性变形特性导致的抗弯刚度的衰减。

下面采用考虑非线性特性的抗弯刚度 B_s 替代弹性抗弯刚度 EI 来计算极限隆起量 δ_u 。抗弯刚度 B_s 的计算采用《钢筋混凝土设计规范》[11]中给出的短期刚度计算公式：

$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2}{1.15\psi + 0.2 + \frac{6\alpha_E \rho}{1 + 3.5\gamma_f'}} \quad (4)$$

式中：

E_s —钢筋的弹性模量，HRB400 钢筋， E_s 取 $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ；

E_c —混凝土的弹性模量，C30 混凝土， E_c 取 $3.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ；

A_s —受拉钢筋截面面积, 8Φ25 配置, A_s 取 3927 mm²;

h_0 —截面有效高度, 取 856 mm;

ψ —钢筋应变不均匀系数, $\psi > 1.0$ 时, ψ 取 1.0

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\sigma_{sk} \rho_{te}} \quad (5)$$

f_{tk} —混凝土轴心抗拉强度标准值, C30 混凝土, f_{tk} 取 2.01 N/mm²;

σ_{sk} —受拉钢筋的应力, 与弯矩 M 有关;

ρ_{te} —以有效受拉混凝土截面面积计算的受拉钢筋配筋率, $\rho_{te} = A_s / A_{te} = 0.0125$;

A_{te} —有效受拉混凝土截面面积, 对受弯构件, $A_{te} = 0.5bh + (b_f - b)h_f$, 其中 b_f 是翼缘宽度, 对于矩形截面 $b_f = b$, 因此 $A_{te} = 0.5bh + (b_f - b)h_f = 0.5bh = 31500 \text{ mm}^2$;

α_E —钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值, $\alpha_E = E_s / E_c = 6.67$;

ρ —钢筋配筋率, $\rho = A_s / (bh_0) = 0.0656\%$ 。

下面计算当弯矩达到极限状态(即 $M = M_u$)时的抗弯刚度 B_s 。这种情况下, 受拉钢筋的应力 σ_{sk} 取抗拉强度, 即 $\sigma_{sk} = f_y = 360 \text{ N/mm}^2$, 计算得到参数

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\sigma_{sk} \rho_{te}} = 1.1 - 0.65 \times \frac{2}{360 \times 0.0125} = 0.81$$

将各参数值代入公式可得:

$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2}{1.5\psi + 0.2 + \frac{6\alpha_E \rho}{1 + 3.5\gamma'_f}} = 3.44 \times 10^{14} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

从上式可以看出, 影响 B_s 的计算结果的最重要的是受拉钢筋的面积 A_s 以及代表荷载水平的参数 ψ 的大小。与弹性刚度 $EI = 1.29 \times 10^{15} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ 相比, 达到极限状态时的刚度 B_s 约为弹性刚度的 1/3.75, 即 0.27 倍。可见, 这种非线性特性会对计算结果产生显著影响。

下面采用抗弯刚度 B_s 替代弹性抗弯刚度 EI 来计算极限隆起量 δ_u 采用分析极限隆起量 δ_{us} 。

$$\text{a) 铰接情况下: } \delta_u = \frac{M_u - \frac{1}{8}ql'^2}{\frac{3B_s}{l'^2} + N} = \frac{1113 - 329}{\frac{3 \times 0.344 \times 10^6}{10.2 \times 10.2} + 1600} = 0.068 \text{ m} = 68 \text{ mm}$$

$$\text{b) 固接情况下: } \delta_u = \frac{M_u - \frac{1}{24}ql'^2}{\frac{6B_s}{l'^2} + N} = \frac{1113 - 110}{\frac{6 \times 0.344 \times 10^6}{10.2 \times 10.2} + 1600} = 0.047 \text{ m} = 47 \text{ mm}$$

这样得到极限隆起量 δ_u 约为前面给出的采用弹性刚度计算结果的 3.5 倍。考虑到地下连续墙的刚度较大, 固接情况下的计算结果可能更符合实际情况, 但是也会产生一些复杂性。如在开挖至坑底时, 地下连续墙底部有向坑内的较大的变形下, 墙顶会出现向外转动的趋势, 这样也不完全是固定边界而是具有一定转角的边界条件。

现场观测到的立柱隆起多在 40 mm~80 mm 之间, 隆起量大较大的位置部分混凝土支撑产生了开裂现象。与采用考虑结构非线性的短期刚度计算得到的立柱临界隆起量(47~68 mm)较为一致, 而要远大于弹性刚度计算得到的立柱临界隆起量(13.2~20 mm)。因此, 应该采用考虑钢筋混凝土结构非线性的短期刚度, 以提高计算分析的准确度与精度。

现场有些支撑出现了顶部开裂的现象,但未出现极端的险情。表明混凝土支撑的中部虽然接近或达到了极限状态,但端部并未达到极限状态,因此整个构件仍然能够继续正常工作。

3.4. 立柱与混凝土支撑的相互作用力分析

按照图 1 所示的计算模型,分析立柱隆起过程中混凝土支撑与立柱的相互作用力 P 。

(a) 铰接情况下:

当 $\delta < \delta_u = 68 \text{ mm}$ 时,支撑处于弹性状态,此时竖向作用力 P 与隆起量 δ 的关系为

$$P = \frac{6EI\delta}{l'^3} + \frac{5ql'}{4} \quad (6)$$

当然,其中的抗弯刚度 EI 应该考虑非线性。

当 $\delta = \delta_u = 68 \text{ mm}$ 、 $M_{\text{跨中}} = M_u = 1113 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 时,立柱的作用力 P_u 为:

$$P_u = \frac{6B_s\delta_u}{l'^3} + \frac{5ql'}{4} = 132 + 319 = 451 \text{ kN}$$

b) 固接情况下:

当 $\delta < \delta_u = 47 \text{ mm}$ 时,支撑处于弹性状态,此时竖向作用力 P 与隆起量 δ 的关系为

$$P = \frac{24EI\delta}{l'^3} + ql' \quad (7)$$

当 $\delta = \delta_u = 47 \text{ mm}$ 、 $M_{\text{跨中}} = M_u = 1113 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 时,立柱的作用力 P_u 为

$$P_u = \frac{24B_s\delta_u}{l'^3} + ql' = 364 + 255 = 619 \text{ kN}$$

以上计算结果表明,当跨中出现塑性铰时的立柱作用力 P_u 分别为 451 kN 和 619 kN,二者相差 150 kN 左右(约 1/3)。总的作用力中有一半左右是由于混凝土支撑的重量(计算式中的第二项)造成的,由于立柱隆起造成的立柱轴力(计算式中第一项)分别为 132 kN 和 364 kN。

4. 控制措施

本文涉及的立柱隆起计算均是立柱相对围护结构的隆起量。在工程实践中,地下连续墙围护结构在承压水作用下也有隆起,而极个别墙趾注浆不到位的地下连续墙还会产生下沉的现象,建议用立柱隆起的相对隆起量进行控制。可以按混凝土支撑极限承载力或者有害裂缝的临界指标作为立柱隆起控制的依据,计算得到临界隆起量。

由现场立柱隆起监测数据的统计规律,立柱隆起的大小与基坑的开挖深度和放置时间密切相关。在常规的设计和施工措施下,软土基坑的立柱隆起不可避免。而增加支撑自重来减少立柱隆起显然不够经济,通常设计单位采取加长立柱桩长度措施,增加立柱桩抗隆起的能力,有个别车站基坑的立柱桩长度甚至达到 2 倍基坑开挖深度,需要深化分析计算。而在施工措施方面,可以根据开挖深度和立柱隆起量,适当加强基坑的疏干降水,可以缓解立柱隆起的趋势。

此外,为减少压杆稳定的计算长度,当前地铁基坑的立柱普遍布置在基坑中部,而该位置是立柱隆起的最大位置,成为基坑的安全隐患。在保障 16 m 计算长度前提下[8],适当调整立柱位置,也可作为有效避免立柱隆起问题的一个措施。

5. 结论

1) 立柱隆起情况下混凝土支撑中部的弯矩最大,可用来评估支撑的安全性。总弯矩包括自重荷载产

生弯矩 M_g 、支撑轴力产生的弯矩 M_N 以及立柱隆起造成的弯矩 M_δ 三部分, 其中对混凝土支撑安全性影响最重要的是立柱隆起造成的弯矩 M_δ 。实际工程中建议用立柱隆起的相对隆起量分析 M_δ , 按混凝土支撑极限承载力或者有害裂缝的临界指标计算得到临界隆起量。

2) 固接情况下的临界隆起量较小而竖向作用力较大, 设计计算中建议采用固接分析的结果。采用弹性抗弯刚度 EI 计算得到的临界隆起量 δ_u 偏小, 计算准确性差; 采用考虑钢筋混凝土结构非线性的短期刚度 B_s 替代弹性抗弯刚度 EI 计算得到的结果更为合理, 计算准确性更高。

3) 一个典型地铁基坑的典型实例表明, 当立柱隆起量约 47 cm 时, 混凝土支撑跨中就会达到极限状态, 此时的立柱轴力约为 619 kN。计算结果与现场情况较为吻合, 现场部分混凝土支撑出现了明显的裂缝, 验证了本文提出的分析方法的适用性。另外, 地铁车站混凝土支撑结构的设计与本文的设计方案相近的情况下, 可以参考这个典型案例, 尽量将立柱隆起量控制在 40 mm 以内, 以保证混凝土支撑的安全。

参考文献

- [1] 布兰德, 布伦纳. 软黏土工程学[M]. 叶书麟, 等, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- [2] Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, New York.
- [3] Tanaka, H. (1993) Behavior of Braced Excavation Stabilized by Deep Mixing Method. *Soils and Foundations*, **33**, 105-115. https://doi.org/10.3208/sandf1972.33.2_105
- [4] Chen, R.P., Li, Z.C., Chen, Y.M., et al. (2015) Failure Investigation at a Collapsed Deep Excavation in Very Sensitive Organic Soft Clay. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **29**, Article ID: 04014078. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000557](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000557)
- [5] 李忠超, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 软黏土中某内支撑式深基坑稳定性安全系数分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 769-775.
- [6] 冯虎, 高丹盈, 徐春蕾. 立柱隆起对深基坑钢支撑受力特性的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(4): 926-932.
- [7] 于宁. 轨道交通基坑工程立柱异常隆起分析与对策[J]. 隧道与轨道交通, 2018(1): 18-22.
- [8] 上海市勘察设计行业协会. DGTJ08-61-2018 J11577-2018 基坑工程技术规范[S]. 上海: 上海市城乡建设和交通委员会, 2010.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ120-2012 中华人民共和国行业标准建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [10] 刘建航, 侯学渊, 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 第2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.