

高层建筑结构层侧向刚度计算方法的研究

魏 璉, 王 森, 孙仁范

(深圳市力鹏工程结构技术有限公司, 深圳 518034)

摘要 对高层建筑结构层侧向刚度的计算方法进行了讨论,提出了新的高层建筑结构层侧向刚度计算方法。对剪力墙、框筒及部分框支剪力墙结构的工程案例采用不同方法进行了侧向刚度、侧向刚度比的对比分析。建议的计算方法较好地反映了层竖向构件截面、层高和材料的刚度特征及两端转动约束的实际状况,其计算结果能较好地反映结构的真实侧向刚度,可供工程师在设计高层建筑结构时参考。

关键词 高层建筑结构; 层侧向刚度; 侧向刚度比; 层间位移

中图分类号: TU318.1, TU973 **文献标识码**: A **文章编号**: 1002-848X(2014)06-0004-06

Study on calculation methods of story lateral stiffness of high-rise building structure

Wei Lian, Wang Sen, Sun Renfan

(Shenzhen Li Peng Structural Engineering Technology Co., Ltd., Shenzhen 518034, China)

Abstract: Calculation methods of story lateral stiffness of high-rise building structure were discussed and new calculation methods were put forward. The lateral stiffness and lateral stiffness ratio of shear wall structure, frame-core wall structure and partial frame-supported shear wall structure were analyzed and compared by using different methods. The proposed calculation method well reflected the actual condition of story vertical member section, story height, stiffness characteristics of materials and rotation restraints at both ends of the story. The results of proposed calculation method well reflected the actual lateral stiffness of the structure, providing reference for structural design of high-rise building structure.

Keywords: high-rise building structure; story lateral stiffness; lateral stiffness ratio; story drift

0 前言

《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2002)^[1](简称老高规)和《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[2](简称新高规)分别在第4.4.1条和第3.5.1条规定“结构的侧向刚度宜下大上小,逐渐均匀变化”,给出了相应的计算公式,并分别规定了楼层侧向刚度不宜小于相邻上层侧向刚度或其上相邻三层侧向刚度平均值的限值,当不满足上述规定时,判定该楼层为薄弱层,要求设计采取相应的增大内力和有效的抗震构造措施。由此可见,如何准确合理地求出高层建筑结构楼层的侧向刚度是保证结构设计安全和经济的重要问题,但由于高层建筑结构的复杂性,寻出楼层侧向刚度的合理计算方法是较为困难的。

早在20世纪70年代,由于当时科学技术发展水平的限制,为了将弹塑性时程分析应用于大震下结构抗震设计,往往不得不对整个高层建筑结构采取近似剪切型或剪弯型层模型的计算方法,即在分析中假设楼层变形符合平截面假定,从而简化计算及相应的软件编制工作,这一方法要求给出楼层的层侧向刚度。实际上这是延续了当时日本抗震界倡导的剪切型楼层平截面假定,但它其实不符合结构受力变形的实际状况。历时数十年,目前高层建筑

结构的弹性和弹塑性分析均已摒弃了剪切型楼层平截面假定,而成功进入了三维空间分析的时代,并已开发出多款实用软件,因而,继续在高层建筑结构抗震设计中采用楼层为剪切型变形的平截面假定是不必要的。

下面通过对高层建筑结构楼层侧向刚度的计算方法的研究,指出现行方法存在的一些问题,并提出能反映结构实际受力和变形状况的层侧向刚度计算方法,供工程界及今后修订规程时参考。

1 现行层侧向刚度计算方法存在的问题

目前,对高层建筑结构的层侧向刚度常采用下式计算:

$$K_i = V_i / \Delta_i \quad (1)$$

式中: K_i 为 i 层侧向刚度; V_i 为在水平地震作用(外侧力)下的 i 层剪力; Δ_i 为在外侧力作用下 i 层相对于 $i-1$ 层的层间位移。

从理论上分析,这一计算高层建筑结构的层侧向刚度的计算方法存在以下问题:

(1) 结构的构件或层侧向刚度应是仅与构件及其组成结构的物理几何特性有关的参数,即一旦结构形成,它是结构自身固有的一种特性,仅与自身物理几何特性有关而与外荷载无关,但式(1)中的 V_i

作者简介: 魏璉,研究员,Email: wl2002111@163.com。

的影响,造成层间位移计算结果偏大很多,从而导致层侧向刚度计算结果大大偏低,从下到上大约差 2.7 ~ 16 倍。

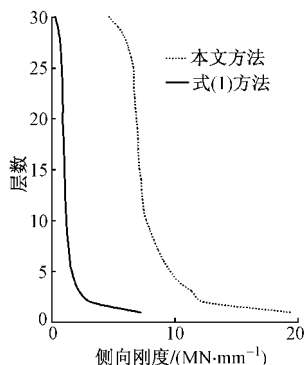


图4 两种方法计算得到的楼层侧向刚度比较

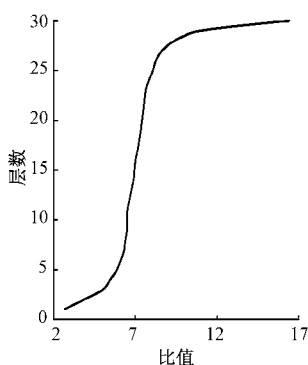


图5 楼层侧向刚度比计算结果

3 层侧向刚度比 γ_i (简称层侧刚比) 的比较

在老高规关于高层建筑结构层侧向刚度的计算中,规定采用下式求出下一楼层 (i 层) 与相邻上一层楼 ($i+1$ 层) 的层侧刚比 γ_i :

$$\gamma_i = \frac{V_i}{V_{i+1}} \frac{\Delta_{i+1}}{\Delta_i} \quad (5)$$

通过层侧刚比 γ_i 的大小,按老高规规定的限值判断 i 层是否因刚度偏低形成薄弱层,并需采取相应的抗震加强措施,因此层侧刚比的计算结果将直接对结构设计产生影响。

在执行上述规定的过程中,广东省高规补充规定^[9]采用美国 UBC 规范的方法,即层间位移角的比值作为判定 i 层是否出现薄弱层的依据,具体见下式:

$$\gamma_i = \frac{\Delta_{i+1}}{\Delta_i} \frac{h_i}{h_{i+1}} \quad (6)$$

式(5)和式(6)计算结果在一定情况下有明显甚至定性上的差别,这经常造成广东地区设计工程师们的困惑。在新高规中对框剪、剪力墙、框筒等结构,将原层侧刚比公式(式(5))增加了层高比作为修正,改为采用下式计算层侧刚比:

$$\gamma_i = \frac{V_i}{V_{i+1}} \frac{\Delta_{i+1}}{\Delta_i} \frac{h_i}{h_{i+1}} \quad (7)$$

将新老高规中的式(5)与式(7)作比较,不难看出两者的差别仅在于式(5)中的层剪力比 V_i/V_{i+1} 被式(7)中的层高比 h_i/h_{i+1} 作了修正,由此可见:

(1) 当层高均匀,结构中下部楼层的层剪力比接近时,两者的计算结果基本一致;

(2) 出于建筑功能的需要,在高层建筑结构的底层往往因大空间布局使其层高远大于上部楼层,此时两式的计算结果将出现很大差异,式(7)中求

得的 γ_i 值偏大甚至为式(5)求出结果的 h_1/h_2 倍,这就夸大了底层的层侧向刚度,易导致对底层薄弱产生误判;

(3) 两种方法对于高层建筑结构的中上部楼层均可能出现误判,由于该部位的层间位移 Δ_i 远远大于层间竖向构件的受力变形,因而当某楼层的竖向刚度明显减弱时,两式计算结果变化甚微,因而不能反映该楼层刚度减弱可能带来的不利影响。

将式(6)与新高规的式(7)作比较,两式只差层剪力比 V_i/V_{i+1} 的影响,在结构的中下部层剪力比接近时,两种方法的结果基本一致,但在结构的顶部,因层剪力比相差较大,使两种方法的计算结果出现较大差别。因而新高规中的方法同样存在美国 UBC 规范方法的不足。

本文方法对层侧刚比的计算结果能较好地解决以上存在的问题。仍以图3高层建筑结构为例,采用本文方法求得三种不同情况下层侧刚比的计算结果及与新老高规和美国 UBC 规范方法计算结果的比较曲线如图6~8所示。

图6表明,当层高均匀时,新老高规层侧刚比的计算结果是一致的,但与美国 UBC 规范方法计算的结果相比,在结构上部出入很大;新老高规方法与美国 UBC 规范方法计算结果均与本文方法计算结果在结构上部及下部相差较大。

图7表明,在中部楼层(20层)竖向构件刚度明显削弱时,新老高规方法和美国 UBC 规范方法对该层层侧向刚度和层侧刚比的降低虽有一些反映,但变化甚微,而本文方法计算结果则明显反映出该楼层侧向刚度的削弱及其造成层侧刚比的减小。

图8表明,当底层层高增大一倍(由3m增高至6m)时,新高规方法与美国 UBC 规范方法计算结果在底层基本一致,本文方法在底层计算结果最小,充分反映了底层层高增大对该层层侧向刚度减弱的影响,而新高规与美国 UBC 规范方法的计算结果显著偏大,似过高估计了底层层高增大后该层的层侧向刚度。

4 部分框支剪力墙结构转换层层侧向刚度的计算方法

带转换层的部分框支剪力墙在高层建筑结构中的应用十分广泛,由于部分转换层上的剪力墙不能落地,使转换层下剪力墙的数量减少,使得楼层的层侧向刚度削弱,因此需要得出转换层上下层侧向刚度的计算方法,从而正确判断转换层下是否会出现薄弱层以及采取怎样措施予以加强,这对保证结构的抗震安全性是十分重要的。

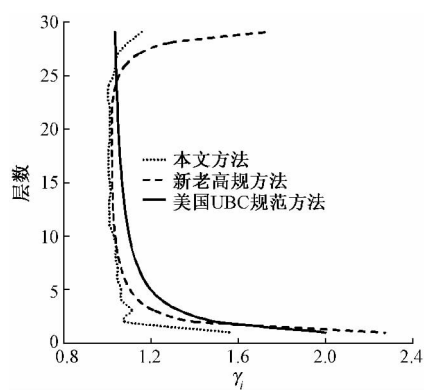


图6 层高均匀时高层建筑结构层侧刚比的比较

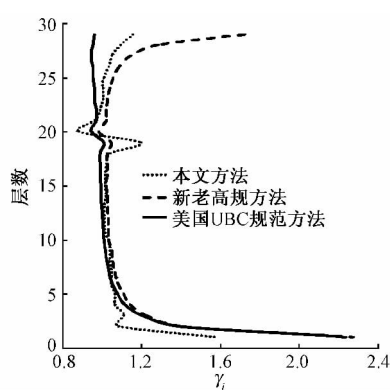


图7 20层剪力墙减薄后层侧刚比的比较

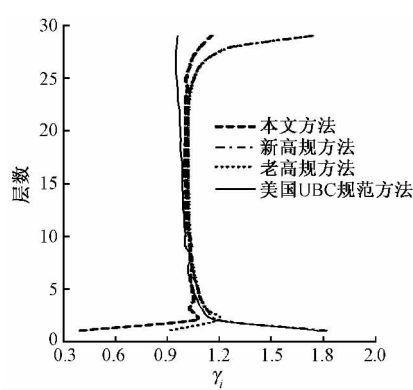


图8 底层层高加大后层侧刚比的比较

目前转换层上下结构层侧向刚度计算一般只考虑剪力墙的剪切变形和假设柱两端无转动只考虑弯曲变形的近似层总侧向刚度 k_i 计算公式:

$$k_i = \frac{GA_i}{h_i} \quad (8)$$

式中: $A_i = \sum_j A_{wji} = A_{wi}$, A_{wi} 为 i 层全部剪力墙在计算方向的有效截面面积(不包括翼缘面积); h_i 为 i 层层高; G 为 i 层剪力墙混凝土的剪切弹性模量。

当楼层内有柱时, A_i 中尚应包括假设柱两端无转动时的侧向刚度, 近似用下式表示:

$$A_i = A_{wi} + \sum_j C_{ij} A_{cij} \quad (9)$$

$$C_{ij} = 2.5 \left(\frac{h_{cij}}{h_i} \right)^2 \quad (10)$$

式中 h_{cij} 为 i 层第 j 根柱沿计算方向的截面高度。

新老高规明确规定, 当转换层在 1, 2 层时可采用转换层与其相邻上层结构的等效剪切刚度比表示转换层上、下层结构刚度的变化。

当转换层在 1 层时,

$$\gamma_1 = \frac{G_1 A_1 h_2}{G_2 A_2 h_1} \quad (11)$$

式中 h_1, h_2 分别为 1, 2 层的层高。

当转换层在 2 层时,

$$\gamma_2 = \frac{G_2 A_2 h_3}{G_2 A_3 h_2} \quad (12)$$

式中 h_3 为 3 层的层高。

式(8)~(12)表明, 转换层层侧向刚度是假定该楼层所有剪力墙竖向构件仅考虑剪切变形求得的, 其中假设柱两端无转角产生相对单位侧移时的剪力为其侧向刚度。

这一计算方法的优点是把结构层侧向刚度以仅与结构层竖向构件自身几何物理属性有关的形常数来表达, 而与外荷载无关, 这是正确的, 但此法实质

上是将层竖向构件两端的转动约束假设为无限刚约束, 且假设整个水平构件为无转动状态, i 层产生单位侧移 $\Delta_i = 1$ 时, 所需施加的水平力 k_i , 如图 9 所示, 这与实际情况不相符合, 尤其是在转换层的上层和下层(当转换层在 2 层时), 其水平构件的抗弯刚度一般都不大, 与假设无限刚相去甚远, 即使转换层梁板自身抗弯刚度较大, 也和无限刚假设有较大差距, 因此这一计算方法的合理性和准确性尚需进一步研究。

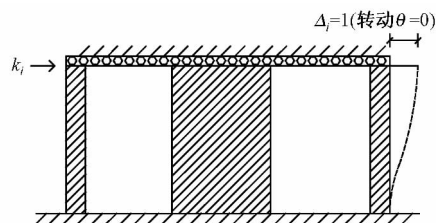


图9 新老高规侧向刚度计算模型

上述计算方法用于转换层设置在 1, 2 层时高层建筑结构转换层上下层侧向刚度的计算也是可行的。如图 10(a) 所示, 当转换层在 1 层, 转换层处产生单位侧移 $\Delta_1 = 1$ 时, 所需施加的水平力即为该层的侧向刚度 k_1 (底端为嵌固端)。如图 10(b) 所示, 当转换层在 2 层时, 1 层无侧移 $\Delta_1 = 0$, 转换层处产生侧移 $\Delta_2 = 1$ 时, 所需施加的水平力即为该层的侧向刚度 k_2 (仅 1 层底部为嵌固端)。

该方法既考虑了层竖向构件的受力特性, 也考虑了竖向构件两端实际的转动约束, 因而是比较合理的。考虑到转换层上下层竖向构件两端的约束与无限刚假定相差甚远, 可以判定按新高规计算方法求得的层侧向刚度计算结果必然偏大, 有时会偏大很多, 这是设计时值得注意的, 为了更清楚地阐明这个问题, 可对两种方法作进一步的比较。

式(1)计算转换层层侧向刚度时, 将转换层及

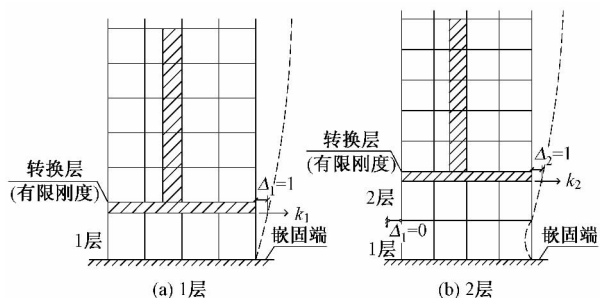


图 10 转换层位于不同楼层的计算模型

相连上层或下层水平构件假定为无限刚,并只计算层剪力墙竖向构件的剪切变形(即楼层转动角为0),见图9导出的层侧向刚度计算公式,而本文方法则不但计入了转换层自身及相邻上下层水平构件弯曲变形,还计入了层竖向构件的弯曲变形影响,不但在理论上较为合理,而且适当简化后还可以与新老高规方法相互均通。现以转换层在1层时为例进行说明,当转换层在1层时,假设转换层水平构件弯曲刚度为无限刚,图10计算模型可简化为图11,此时由于并未制约各竖向构件轴向变形,转换层水平构件整体转角 $\theta_1 \neq 0$,由此求得的层侧向刚度 k_1 与新老高规方法仍会略有差异,但可以判断此项影响很小,与用式(1)求得的结果应较接近。如在图11模型基础上,对转换层水平构件施加竖向变形约束,则此时转换层下各竖向构件的变形状态将与式(1)方法所作假定(图9)计算模型完全一致,从理论上分析,两者计算结果应完全一致,但式(1)近似将剪力墙作为构件处理,而现有程序均将剪力墙按有限单元法计算,所以二者实际计算结果仍会有一定差别,表1为某高层框支剪力墙结构按新方法(图12模型)与新老高规方法的层剪切模型计算的层侧向

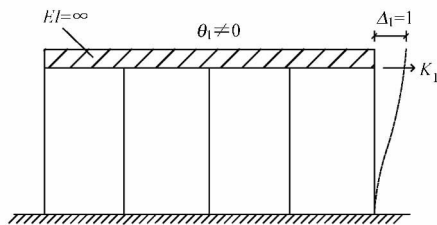


图 11 转换层侧向简化模型一

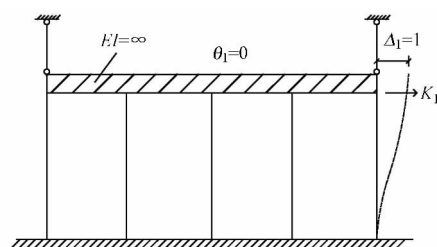


图 12 转换层侧向简化模型二

两种方法计算层侧向刚度结果的比较(转换层在1层) 表 1

方法	X 向		Y 向	
	刚度	与层剪切刚度法计算值之比	刚度	与层剪切刚度法计算值之比
新老高规方法(层剪切刚度法)	1.96	100%	2.18	100%
新方法(假设转换层无限刚)	1.89	96.4%	2.31	106.0%
新方法(按转换层梁实际刚度)	0.73	37.2%	1.08	49.5%

注:刚度的单位为 $\times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

刚度结果。

由表1可见,新方法按转换层梁实际刚度计算时,层侧刚比新老高规层剪切刚度法小许多,X向和Y向的层侧刚比分别为后者的0.372或0.495倍。但当假设转换层梁刚度为无限刚时,两种方法的计算结果基本一致,误差在5%以内,从理论上说明两种方法在一定条件下是可以互相沟通的。

为了进一步分析新方法的应用及其与新老高规方法结果的差别,下面举两个算例。

算例一:某30层框支转换层结构,转换层设置在1层,结构平面布置见图13。转换层下部柱截面均为 800×800 ,墙厚为500mm;转换层上部墙厚均为200mm。采用新老高规方法与新方法计算转换层上下层的侧向刚度及相应的层侧刚比,计算结果见表2。

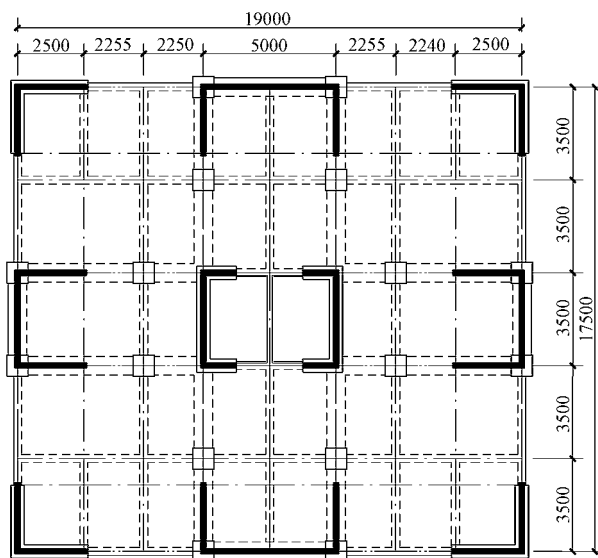


图 13 转换层结构布置示意图

算例一的计算结果(转换层在1层时) 表 2

计算方法	X 向			Y 向		
	层侧向刚度 ($\times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)		层侧刚比	层侧向刚度 ($\times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)		层侧刚比
	1 层	2 层		1 层	2 层	
(1) 新高规方法	1.96	3.36	0.58	2.19	3.26	0.67
(2) 新方法	0.73	1.46	0.50	1.08	1.52	0.71
(1)/(2)	2.68	2.30	1.17	2.03	2.14	0.95

算例二: 同例一的框支转换层结构,在底层增设 1 层,层高 5.4m,则转换层在 2 层,采用新老高规方法与新方法计算转换层上下层的侧向刚度及相应的层侧刚比,计算结果见表 3。

算例二的计算结果(转换层在层 2 时) 表 3

计算方法	X 向			Y 向		
	层侧向刚度 /($\times 10^4 \text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)		层侧 刚比	层侧向刚度 /($\times 10^4 \text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)		层侧 刚比
	2 层	3 层		2 层	3 层	
(1) 新老高规方法	1.96	3.36	0.58	2.19	3.26	0.67
(2) 新方法	0.77	1.54	0.50	0.98	1.59	0.61
(1)/(2)	2.55	2.18	1.17	2.23	2.05	1.09

两个算例清楚表明,由于假设转换层及上下相邻层水平构件刚度为无限刚,按新老高规层剪切刚度计算方法求得的层侧向刚度计算结果比按新方法计算结果偏大 2.03~2.68 倍,由此引起层侧刚比计算结果偏小 5% 或偏大 17%,当结构构件情况变动时,误差有可能更大,事前也难以预判是偏大或是偏小,这将给设计带来颇为不利的影响。

5 结语

讨论了高层建筑结构层侧向刚度和层侧刚比的计算方法,指出了其中存在的一些问题,在此基础上提出了建议的方法。另外指出,现有转换层结构侧向刚度计算方法实质上是假定转换层及其相邻上下

层水平构件刚度为无限刚时的层剪切刚度计算方法,虽然它反映了层竖向构件截面、层高和材料的刚度特征,但两端转动约束均设为无限刚的假定是与实际不符的,导致层侧向刚度计算结果偏大,不同情况下偏大的幅度也不相同,因而会导致层侧刚比的计算结果偏小或偏大,而且事先也难以预判,这对结构设计的准确性与可靠性是不利的,采用建议的计算方法则较好地反映了层竖向构件截面、层高和材料的刚度特征及两端转动约束的实际状况,因而计算结果能较好地反映转换层结构的真实侧向刚度,解决工程界对此问题现存的一些困惑。

参 考 文 献

[1] JGJ 3—2002 高层建筑混凝土结构技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2002.
[2] JGJ 3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2011.
[3] 魏琰. 高层建筑结构位移控制研讨 [J]. 建筑结构, 2000,30(6): 27-30,40.
[4] 蔡方荫. 变截面刚构分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社,1958.
[5] DBJ/T 15-46—2005 高层建筑混凝土结构技术规程 (JGJ 3—2002) 补充规定 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2005.

百度筹建新总部

由于人员扩充迅速,百度已将办公大楼扩建计划提上日程。百度已拿下北京中关村软件园二期(西扩) C-1,N-2,N3,N4,N5 地块,建设新的总部大楼。



百度公司筹建的新总部大楼著名设计公司维思平 (WSP ARCHITECTS) 担任项目设计,为五栋地上 7 层,地下 2 层的办公楼;另有一栋地上 1 层,地下 2 层的报告厅;占地面积 68 000m²;其建筑面积达 300 000m²,相当于现有百度大厦建筑面积的 3.3 倍。包括有研发中心、办公室、会议室、展示厅、报告室、图书室、多功能

厅、员工休息室、洽谈室、员工餐厅、网络机房、设备用房、锅炉房等设施,设有 2 层地下停车库及设备用房,车库停车数为 1 295 辆,内部将进行精装修。

伴随着百度的高速发展,其员工总数也迅速增长,办公区紧张的问题突出。2010 年 11 月底,启用刚刚 1 年的百度大厦就已经人满为患,随后百度先后租用了鹏寰大厦、奎科大厦、首创空间大厦三座写字楼进行办公,以解决工位不足的问题。

扩建的新百度总部计划于 2015 年 8 月竣工启用,届时租用写字楼办公的百度员工将全部迁入,总数近万人。

2012 年 1 月初开工建设,位于深圳市南山区高新技术产业园的百度国际大厦,预计也将于 2015 年竣工启用。公开资料显示,百度国际大厦为双塔楼,建筑面积超过 22 万 m²,投入使用后,亦可以容纳万名员工。该楼还扮演着百度国际总部、华南总部、深圳研发中心的角色。

2012 年后,百度位于深圳、北京所新建的办公楼,总耗资超过 60 亿人民币。

(摘编自:深圳勘察设计院网)