DOI:10.19701/j.jzjg.2014.06.007

带地下室或裙房高层建筑抗浮锚杆整体计算方法

孙仁范[1]， 刘跃伟[1]， 徐 青[2]， 蔡 军[1]， 魏 琏[1]
(1 深圳市力鹏建筑结构设计事务所，深圳 518034; 2 深圳万科房地产有限公司，深圳 518000)

[摘要] 对于带地下室或裙房的高层建筑，抗浮设计是重要的。现常用抗浮锚杆设计方法不能考虑锚杆受力的不均匀性。建立包含锚杆、基础和上部结构的整体有限元模型来进行抗浮计算，整体抗浮计算结果表明，锚杆和底板的变形和受力是相互影响的；锚杆的实际承载力可能明显大于按现常用方法设计的结果，而实际所需锚杆数量少于按现常用方法设计的结果。给出了整体模型中锚杆刚度的计算方法。

[关键词] 抗浮；整体计算方法；锚杆；锚杆刚度；基础
中图分类号：TU398.7 文献标识码：A 文章编号：1002-848X(2014)06-0027-04

Integral calculation method of anti-floating anchor of high-rise building with basement or podium

Sun Renfan[1], Liu Yuewei[1], Xun Qing[2], Cai Jun[1], Wei Lian[1]
(1 Shenzhen Li Peng Building Structure Design Institute, Shenzhen 518034, China;
2 Vanke Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: For high-rise building with basement or podium, anti-floating design is important. Current design method of anti-floating anchor takes no account of stress nonuniformity of the anchor. An integral FEM model, which contains the anchors, foundation and the upper structure, was established to carry out anti-floating calculation. The integral anti-floating calculation results show that the deformation and stress of the anchors and the base slab influence each other. Compared with the design result with the current method, the actual bearing capacity of the anchors are larger. Numbers of needed anchors in actual is less than that from results with current method. The calculation method to calculate the anchor stiffness in the integral model was provided.

Keywords: anti-floating; integral calculation method; anchor; anchor stiffness; foundation

0 引言

地下空间的开发利用日益受到重视，在地下室设计中抗浮设计是重要的。地下室较深，地下水位较高时，结构将受到较大的水浮力。由于抗浮设计不当而引发的典型事故有地下室隆起、底板破坏、地下室墙和基础梁板出现裂缝、地下室渗水以及上部结构出现裂缝等[1-2]。抗浮的措施有降水法、隔水法、压重法、增强结构刚度和强度、设置抗浮桩或抗浮锚杆等[3]。其中降水法和隔水法适用范围小，需长期控制和维护；压重法可能会加大基础埋深，影响建筑功能；增强结构刚度和强度的方法往往会造成上部结构的浪费；设置抗浮锚杆对控制结构整体或局部上浮、底板变形和裂缝都有效，但是由于结构荷载和变形比较复杂，并且锚杆与上部结构是相互作用的，因此，现常用锚杆设计方法过于简化。对于带有大面积地下室而高层塔楼偏置的结构，现常用锚杆设计方法所基于的假设与实际情况偏差极大，不能反映结构的实际受力和变形情况，不能合理、经济地设置锚杆。为此分析了水浮力作用下结构与锚杆的受力特点，提出建立包含锚杆、基础和上部结构的整体有限元模型进行抗浮设计的计算方法。

1 水浮力对结构的作用及影响

1.1 水浮力对底板的作用

根据结构基础形式和上部结构布置的不同，水浮力对底板的作用有以下3种情况：1) 情况1：基础为筏板基础，上部结构重量相差不大；2) 情况2：基础为桩筏基础，上部结构重量相差不大；3) 情况3：情况1和情况2的组合，即塔楼基础为桩筏，裙房基础为筏板，上部结构重量相差很大。对应上述3种情况，水浮力作用的特点为：1) 情况1：若水浮力大于上部结构重量，结构将整体上浮，理论上，结构上浮，水浮力减小，最终水浮力将等于结构重量，底板受向上的均布水浮力(等于结构重量)作用，而柱底相当于底板的弹性支座，底板变形如图1(a)所示(图中水位为抗浮水位)；2) 情况2：由于桩的变形较小，结构不会上浮，底板受向上的均布水浮力作用，桩相当于底板的固定支座，底板变形如图1(b)所示，其变形形态与情况1相同，但情况2的水浮力大于情况1的水浮力；3) 情况3：塔楼重量一般大于水浮力，且有桩的约束作用，塔楼基础不上浮，裙房重量较小，裙房基础可能上浮，从整体上看，基础类似

作者简介：孙仁范，硕士，高级工程师，Email: srf@163.com。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

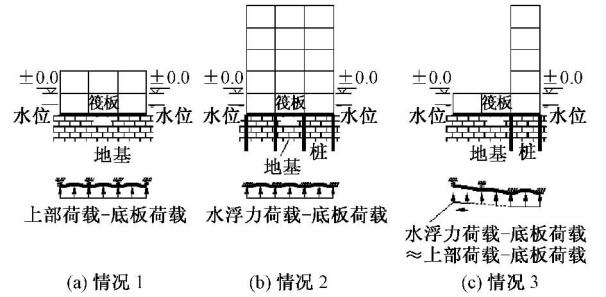


图 1 水浮力对结构的作用

悬臂梁，塔楼基础为固定端，裙房基础类似自由端，如图 1(c) 所示。

1.2 水浮力对上部结构的影响

水浮力较大时，对上述 3 种情况，底板都会因水浮力而产生较大内力。理论上，情况 1 中水浮力不会引起上部结构的不均匀变形，但是如果结构整体上浮过大，仍会对结构的适用性能造成不利影响。实际上，受诸多复杂因素影响，结构变形不完全均匀，结构可能开裂甚至破坏。对于情况 3，水浮力可能造成上部结构不均匀变形，对裙房和塔楼相接区域内的墙、梁造成不利影响。

2 现常用锚杆设计方法

现常用锚杆设计方法[4] 是地下水浮力属于可变荷载，地下室自重及地面回填土压力属于永久荷载，则荷载效应组合的设计值应根据其最不利荷载组合确定，即抗浮锚杆承受的荷载 q_f 为:

$$q_f = \gamma_Q f - \gamma_G G \tag{1}$$

式中: f 为水浮力; G 为上部结构自重; γ_Q 为可变荷载分项系数; γ_G 为永久荷载分项系数。

确定抗浮锚杆承载力后，抗浮锚杆面积和锚固长度分别由以下公式确定:

$$K_1 N_t \leqslant A_g f_{yk} \tag{2}$$

$$N_t \leqslant L_a R_t \tag{3}$$

$$N_t = q_f ab \tag{4}$$

式中: K_1 为抗力系数; N_t 为抗浮锚杆轴向拉力; A_g，f_{yk} 分别为抗浮锚杆截面面积和钢筋屈服强度标准值; L_a 为抗浮锚杆锚固段长度; R_t 为抗浮锚杆单位长度抗拔力; a，b 分别为抗浮锚杆的横向和纵向的间距。

上述方法的基本思想是将锚杆需承担的力作为水浮力减去恒荷载，锚杆受力均匀，再将锚杆需承担的力除以单根锚杆的承载力即为所需锚杆数量。一般均匀地布置锚杆可确定锚杆间距。

3 整体计算方法

3.1 整体模型的构成

合理设置锚杆，则锚杆可承担一部分水浮力，减小底板变形和内力。锚杆的受力与上部结构重量、基础和上部结构刚度等有关，设计锚杆时需合理考虑锚杆、基础和上部结构的刚度，可建立包含锚杆、基础和上部结构的整体有限元模型来计算。建立整体模型进行计算分析，可较合理地体现锚杆受力的不均匀性，也能较合理地体现底板变形的特点。基本的整体计算模型应包括上部结构(塔楼、裙房和地下室)、底板、锚杆和桩(当桩顶近似固定时可不建立桩，只在桩顶位置施加约束)，如图 2 所示。上部结构模型应与设计上部结构时的模型一致，底板和锚杆应按实际情况建模，需注意底板网格的划分。上部结构的荷载按规范[4] 可取 0.9 倍的恒荷载。另外，恒荷载中可适当计入地下室外侧土的重量或摩擦力。

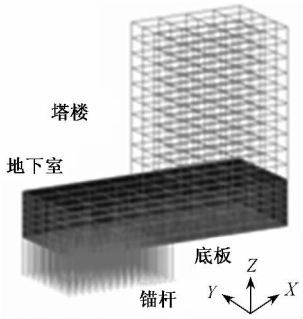


图 2 整体计算模型

3.2 锚杆线刚度

锚杆线刚度是整体计算模型中需确定的主要参数之一，为此提出计算锚杆线刚度的实用方法。如图 3 所示，锚杆顶部受到拉力，该拉力经锚杆周围土的摩擦作用逐渐传递到土中。因此，沿锚杆深度方向，锚杆轴力是逐渐减小的，且土的摩擦作用越大，轴力减小得越快。整体模型中不建立土的模型，锚杆作为底端固定、上端受力的杆件，需合理设置锚杆的刚度以考虑土的摩擦作用对锚杆刚度的贡献。在锚杆设计承载力以内，锚杆刚度接近弹性，若令整体模型中锚杆截面和材料为实际锚杆的截面和材料，则可适当确定锚杆的等效长度，使整体模型中锚杆的线刚度与实际相同。锚杆的弹性线刚度 K 和等效长度 l' 的计算方法如下:

$$K = F_0 \Big/ \sum_{i=1}^{n} \frac{2F_0 - 2\sum_{i=1}^{n} l_i q_i + l_i q_i}{2EA} l_i = \frac{EA}{l'} \tag{5}$$

$$l' = \frac{EA}{F_0} \sum_{i=1}^{n} \frac{2F_0 - 2\sum_{i=1}^{n} l_i q_i + l_i q_i}{2EA} l_i \tag{6}$$

式中: l_i 为锚杆存在轴力范围内第 i 层土的厚度; q_i 为单位长度内第 i 层土对锚杆的摩擦力; F_0 为锚杆顶端的轴拉力; F_i 为第 i 层土底锚杆内的轴拉力; n 为锚杆存在轴力的范围内土分层数; E 为锚杆截面抗拉刚度; A 为锚杆截面面积。

进行了 80 次不同场地上实际锚杆的刚度试验。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

部分试验场地的土层情况和锚杆参数见表 1。锚杆顶轴力-位移曲线见图 4。试验结果表明，锚杆刚度可简化为双折线，第一段为弹性，其刚度可按式(5)计算，根据锚杆设计理论[5]和试验资料，第一段末端对应的力为锚杆承载力；第二段的刚度可近似取第一段刚度的 1/4。按上述方法计算锚杆线刚度，并与试验结果比较，证明上述计算锚杆线刚度和等效长度的计算方法是合理的，满足工程精度要求。部分数据比较见表 1 和图 4。一般地，锚杆受力与变形在第一段范围内，锚杆受力小于锚杆承载力。

土层和锚杆试验参数　　表 1

试验编号		1	2	3
锚杆	长度/m	15	15	11
	直径/mm	165	165	165
	承载力/kN	490	490	490
	EA/MN	795	795	795
	线弹性刚度 K/(MN/m)	109	150	125
	等效长度 l'/m	7.3	5.3	6.3
土层	深度/m	0~15(黏土) —	0~6(全风化岩) 6~15(中风化岩)	0~4(黏土岩) 4~11(全风化岩)

3.3 整体计算方法的合理性

以图 2 所示的结构(塔楼基础为筏板，塔楼区域外基础为桩筏并设抗浮锚杆)为例进行抗浮计算。该结构地下室 3 层，塔楼 10 层，塔楼偏置，塔楼部分(含塔楼范围内地下室)重 92 190kN，纯地下室部分重 42 000kN。水浮力合力为 122 900kN，单独考虑纯地下室部分，其水浮力减去自重为 19 500 kN，纯地下室部分均匀布设置锚杆 208 根。按现常用锚杆设计方法计算，单根锚杆承载力约为 100kN(不考虑安全系数)。建立包含锚杆的整体模型计算，计算所得的地下室底板(不含塔楼部分)竖向变形如图 5 所示。从图中可见：1) 由于地下室重量较小，即使是柱脚下的底板也可能产生向上的位移；2) 远离塔楼的底板向上的位移有增大的趋势；3) 地下室外墙加强了地下室与塔楼的联系，大大减小了地下室整体向上的位移，说明地下室外墙对地下室抗浮起到较大的有利作用，同时地下室外墙内会产生一定的弯矩。

图 6 为锚杆轴力。由图可见，锚杆受力是不均匀的，锚杆最大轴力为 238kN(正值为受拉，负值为受压)，最小轴力为 −67kN，平均轴力为 126kN，最大轴力约为平均轴力的 2 倍。锚杆受力不均匀的原因为：一方面，因为柱脚、墙脚的恒荷载抵消了部分水浮力，柱脚、墙脚附近的锚杆轴力小；另一方面，因为远离塔楼，底板向上的位移有增大的趋势，所以远离塔楼，锚杆受力稍大。按整体模型计算结果进行结构设计，较多锚杆承载力为 250kN(不考虑安全系数)，远大于现常用锚杆设计方法计算的结果。另外，约有 45 根锚杆受压，对抗浮不起作用，可省去这些锚杆。图 7 为地下室底板(不含塔楼部分)的 X 向弯矩 M_x，图 7 与前述结果揭示的现象对应，最远离塔楼的底板跨中弯矩最大。

以上结果所反映的现象与实际和理论判断一致，整体计算方法是合理的。经整体计算分析，可更合理地布置锚杆、设计底板。

3.4 现常用结构抗浮计算方法及其缺陷

现常用底板抗浮计算方法为将柱底或桩顶简化为固定支座，认为锚杆受力均匀，且所有锚杆都发挥

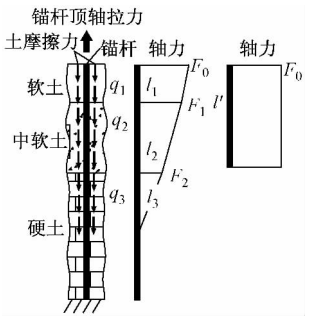


图 3　锚杆的受力

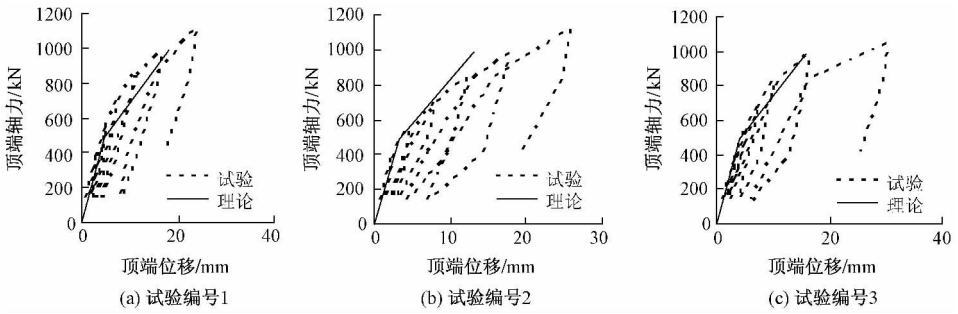


图 4　锚杆顶轴力-位移曲线

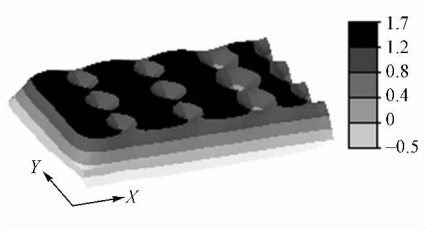


图 5　地下室底板竖向变形/mm

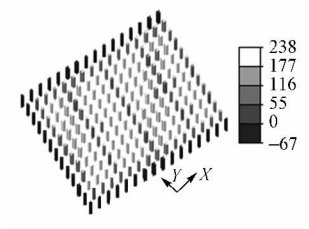


图 6　锚杆轴力/kN

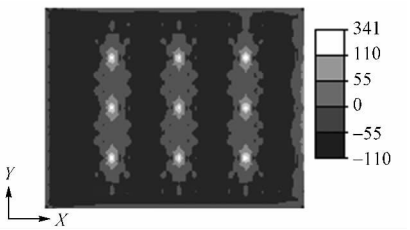


图 7　地下室底板 X 向弯矩 M_x/(kN·m/m)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

全部的抗浮能力。前述结果表明,底板变形是较复杂的,并且锚杆的受力是不均匀的。可见现常用底板抗浮计算方法的主要缺陷是:1)忽略了底板支座之间的变形差别,可能造成上部构件和底板承载力不足,也可能高估地底板跨中的内力;2)忽略了锚杆受力的不均匀性,可能造成结构和底板抗浮能力不足或锚杆布置浪费。比如在上例中,部分锚杆的承载力需为现行方法设计结果的 2 倍,而省去对抗浮不起作用的锚杆则锚杆数量可节约 20%。

4 整体计算方法的工程实践

案例工程为住宅与商业的综合体,4 栋高层住宅(塔楼)位于该项目地块边缘,多层裙房覆盖大部分地块。地下室将塔楼和裙房在地下连为一体,地下室平面尺寸为 315m×214m,几乎覆盖了整个地块。裙房中部局部和塔楼基础采用桩基础,其他采用筏板基础。抗浮水位为 -1.5m,地下室底板底(厚度 600mm)标高为 -14.9m,计算取水浮力为 140kN/m^2。裙房和地下室总重量平均为 100 kN/m^2。由于水浮力较大,筏板基础下需设置锚杆。根据常用方法初步计算并布置锚杆。根据土层不同,锚杆分为土层锚杆和岩层锚杆,其设计承载力分别为 220kN 和 440kN。土层锚杆间距为 1.3m,岩层锚杆间距为 1.8m。锚杆在桩基础以外范围内均匀布置,总锚杆数量达 9 170根。由于锚杆数量较多,有必要进行进一步分析以使锚杆设置得更合理、经济,因此建立了包括上部结构、底板、桩和锚杆的整体计算模型,如图 8 所示。

整体计算分析表明,水浮力作用下,裙房下底板大部分范围产生了向上的位移,如图 9 所示。锚杆平均轴力与现常用锚杆设计方法计算的结果接近,但较多锚杆受力小于平均轴力的 60%,也有部分区域的锚杆轴力超过其承载力,如图 10,11 所示。根据整体计算结果,对按现常用锚杆计算方法设计的

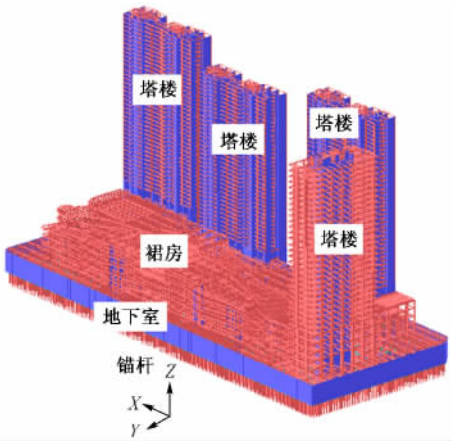


图 8 案例工程整体模型

图 9 考虑水浮力时底板向上的位移/mm

图 10 岩层锚杆的轴力/kN

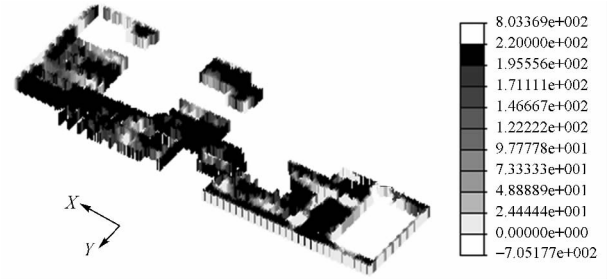
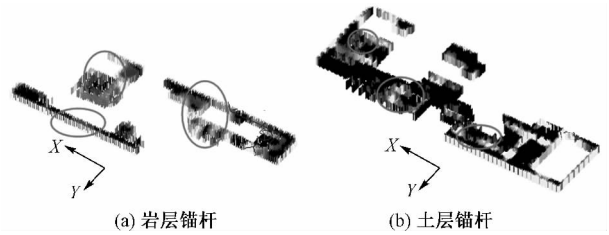


图 11 土层锚杆的轴力/kN



(a) 岩层锚杆 (b) 土层锚杆

图 12 可减少锚杆数量的区域

锚杆进行优化。

(1)适当减少锚杆受力较小区域内的锚杆数量。如将图 12 所示的框示区域内的土层锚杆间距修改为 1.4m,岩层锚杆间距修改为 1.9m,共减少了约 17% 的锚杆数量。

(2)锚杆受力较大区域的锚杆承载力增大了 25%,土层锚杆间距修改为 1.2m,岩层锚杆间距修改为 1.7m,共增加了约 2% 的锚杆数量。

优化布置后,既加强了结构的安全性,又减少了约 15% 的锚杆数量,节约了工程造价。

5 结论

分析了水浮力对结构的作用及影响、结构与锚杆的受力特点,指出现常用底板抗浮计算方法的缺

(下转第 41 页)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

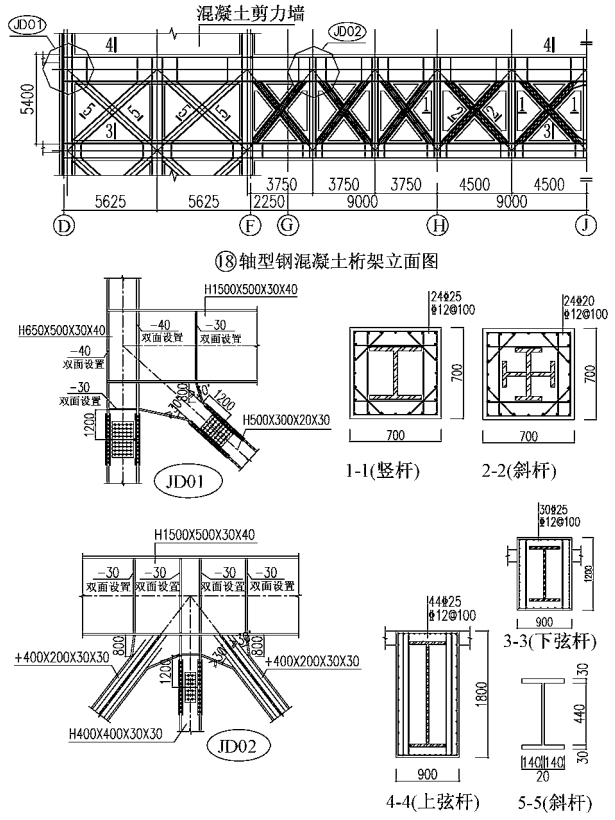


图 10　⑱轴型钢混凝土转换桁架设计详图

与进入支撑体系的转换桁架的上、下弦杆件及剪力墙端部和中部分别设置的型钢混凝土柱的钢骨部分焊接在一起，在混凝土剪力墙筒体中形成钢骨桁架。作为转换桁架下部支撑结构的混凝土剪力墙筒体成为内藏钢桁架的混凝土剪力墙结构。该结构形式的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载明显高于普通剪力墙结构，又由于内藏钢桁架的存在能够延缓裂缝的开展，使得混凝土在裂缝的开裂闭合过程中的耗能能力得以充分发挥，抗震性能更为优越。

5　结论

(1) 与实腹梁转换相比，桁架转换这一转换方式更加适合类似本工程这样的超大跨度转换结构。超大跨度的实腹梁转换构件因为截面巨大，大幅度增加了抗侧力构件的水平地震力，转换梁自身及其下部支撑结构很难满足相关规范的要求。转换桁架因为腹杆的存在大大削弱了其有效抗侧刚度，使转换构件及相关抗侧力构件分配的地震力相比实腹梁转换模型减小很多，抗震性能更为优越，相关计算的各项指标均非常合理。

(2) 空腹桁架模型(模型 1) 作为转换构件不适宜类似本工程这样的超大跨度转换结构。人字形腹杆模型(模型 2) 和人字形 + 竖杆模型(模型 3) 两种桁架的各项计算指标均非常接近，竖杆的设置没有必要。X 形 + 竖杆模型(模型 4) 无论在自身杆件内力控制、转换结构挠度和裂缝控制方面还是在底部支撑结构和整体结构受力等方面均具有其他模型不可比拟的优势，这种腹杆布置方式的桁架非常适宜类似本工程这样的超大跨度转换结构。

(3) 为了保证下部支撑结构既具有足够的承载力又具有很好的延性，作为转换桁架下部支撑结构的混凝土剪力墙筒体应设计成为内藏钢桁架的混凝土剪力墙。

致谢：在曲江国际会议中心结构设计过程中，得到了我院徐永基总工程师和刘大海总工程师的指导和帮助，在此谨表示衷心的感谢！

参　考　文　献

[1] 王进，荆罡，李春光，等. 西安曲江国际会议中心结构设计 [J]. 建筑结构，2014，44(6)：31-36.
[2] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范 [S]. 2008 年版. 北京：中国建筑工业出版社，2008.
[3] 张维斌. 钢筋混凝土带转换层结构设计释疑及工程实例 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，2008.
[4] 孔雅莎，张凌云. 北京大兴文图馆型钢混凝土桁架作为结构转换构件的设计 [J]. 工业建筑，2005，35(S1)：147-149.

(上接第 30 页)

陷，介绍一种较现常用抗浮计算方法有较大改进并可为工程设计方便采用的结构抗浮计算方法，即整体计算方法。主要结论如下：

(1) 裙房重量较小时，水浮力作用下，裙房底板可能产生复杂的向上或向下的位移。

(2) 锚杆受力是不均匀的，其不均匀性既与底板上柱脚、墙脚的恒荷载有关，也与裙房、塔楼的相对位置有关。

(3) 采用整体计算分析，可更合理布置锚杆、设计底板。相对现常用抗浮计算方法，整体计算方法可更合理保证结构的安全性，提高结构的经济性。

参　考　文　献

[1] 于德湖，程道军，张同波. 某工程地下室底板裂缝原因分析及处理 [J]. 施工技术，2007，36(11)：105-106.
[2] 郭秋菊，黄友汉. 某地下停车场整体上浮复位处理 [J]. 施工技术，2008，37(10)：87-90.
[3] 柳建国，刘波. 建筑物的抗浮设计与工程技术 [J]. 工业建筑，2007，37(4)：1-5.
[4] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2012.
[5] CECS 22：2005 岩土锚杆(索) 技术规程 [S]. 北京：中国技划出版社，2005.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net