

地下室泄水减压抗浮技术的探讨与应用*

干泉¹, 杨博进², 刘伟², 李银平², 余飞²

(1 湖北天利建筑技术有限责任公司, 武汉 430064; 2 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

[摘要] 主要探讨了泄水减压法在地下室抗浮设计中的原理,研究了泄水减压技术在实际工程中的适用范围和主要特点。通过采用 FLAC3D 软件对五角西岸住宅项目的地下室进行抗浮分析,揭示了地下室侧面泄水孔间距大小对泄水减压效果的影响规律。通过模拟分析,探讨了地下室表层回填土夯实程度对泄水减压效果的影响。结果表明,表层回填土夯实与否是地下室抗浮安全的关键因素。最后,针对地下室侧面泄水孔布置情况开展多参数、多工况抗浮设计计算,提出了泄水孔的合理间距范围及有关地下室设计施工的建议。

[关键词] 地下室; 泄水减压抗浮技术; 泄水孔; 数值模拟; 回填土

中图分类号: TU46+3 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2016)02-0086-05

Discussion and application of the water-discharging pressure relief technology in the anti-floating design of basement

Gan Quan¹, Yang Bojin², Liu Wei², Li Yinping², Yu Fei²

(1 Hubei Tianli Building Technology Co., Ltd., Wuhan 430064, China;

2 Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The principle of water-discharging pressure relief method application in the anti-floating design of basement was mainly discussed. The application scope and main characteristics of the water-discharging pressure relief technology in practical engineering were studied. Through applying FLAC3D software in anti-floating analysis of the basement for Wujiaoxi'an Residential project, it reveals that the influencing laws of the spacing of drainage holes in basement on water-discharging pressure relief effect. The influence of compaction degree of surface backfill soil for basement on water-discharging pressure relief effect was discussed through simulation analysis. Results show that the compaction degree of surface backfill soil for basement is an critical factor for anti-floating design of the basement. Finally, anti-floating design calculations with multiple parameters and multiple working conditions were carried out for the arrangement of the drain holes at basement sides, and the optimal spacing between drainage holes was suggested along with advices on the design and construction of basement.

Keywords: basement; water-discharging pressure relief technology; drain hole; numerical simulation; backfill soil

0 引言

随着地下空间的开发,越来越多的问题伴随着地下工程的发展而产生,其中地下结构因为水浮力造成破坏的事例不乏少数,有些工程在施工过程中就出现地下室底板大面积的开裂,底板隆起;有些工程的地下建筑物整体浮起,造成了严重的经济损失;因此抗浮问题应该引起设计人员的足够重视^[1]。目前,针对地下室抗浮问题主要有“被动”和“主动”两种抗浮措施,其中“被动”抗浮措施有增加地下室工程自重、在地下室底板增设抗浮锚杆以及布置抗拔桩;相比于“被动”抗浮,“主动”抗浮主要是在地下室周围或者底部布置泄水孔,通过泄水减压降低地下室水位来实现地下室抗浮,泄水减压法是通过一个室内外相结合的排水系统,有效地将地下水位降低至目标水位以下,可主动解决建筑物在施工过程中和正常使用过程中不同工况下的抗浮要求,减小水浮力对结构的影响,达到地下室抗浮目的^[2]。

本文采用泄水减压法利用 FLAC3D 软件对五角西岸住宅项目的地下室进行抗浮分析,研究泄水孔间距、回填土的密实程度对地下室周围地下水位降低情况的影响,并进行泄水减压法抗浮设计验算,以期指导本工程地下室设计施工。

1 泄水减压法抗浮简述

1.1 抗浮原理及特点

泄水减压抗浮方法通过在地下室四周设置排水沟和在地下室外墙打泄水孔,让地下水有组织地进入室内排水系统来降低地下水水位,从而降低水浮力 F 。根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)^[3]可知,应使水浮力 $N_{w,k}$ 与结构自重 G_k 的关系满足:

$$G_k/N_{w,k} \geq 1.05$$

* 国家自然科学基金(41472285)。

作者简介:干泉,硕士,高级工程师,Email:7112731@qq.com。

通过上式进行验算抗浮设计,从而来实现抗浮的目的。

泄水减压法对地下室土体的要求较高,要求地下室周围土体为渗透性较小的黏土,适用于以孔隙水形式赋存于人工填土中、仅有上层滞水以及地表渗水的地质条件,而对于地下室周围土体为淤泥质土和地下水赋存为承压水地质条件不适用^[4]。泄水减压法较配重法和设置抗拔桩、抗拔锚杆法有明显的优势,其施工方便、经济性很好。另外,泄水减压法用于抗浮补救时能够很快将地下室底板下的地下水排出,降低地下室底板的孔隙水压力,因此在适宜的地质条件下,从经济性和安全性考虑采用该方法对地下工程进行抗浮设计效果更好。

1.2 泄水减压抗浮技术

由袁奕^[5]提出的泄水减压抗浮技术主要由泄水减压系统和汇排水系统构成,通过在地下室侧墙和底板一定位置按一定间距埋设直径为100mm的泄水孔,在泄水孔汇水端埋置一定面积的反滤层,其中反滤层主要由碎石构成,将渗入反滤层的水通过泄水孔引流到专门的室内排水沟中(图1),同时在泄水孔中布置钢丝球来过滤泄水孔中的水。排水沟中水通过在室内设置引流进入排水井或者用于其他用途,这样该系统能够将地下室周围较高的水位通过将地下水渗流进入泄水孔排出,从而降低了地下水水位,释放了地下室底板的基底水浮力,最大程度上减小了地下水对建筑物及环境的不利影响。

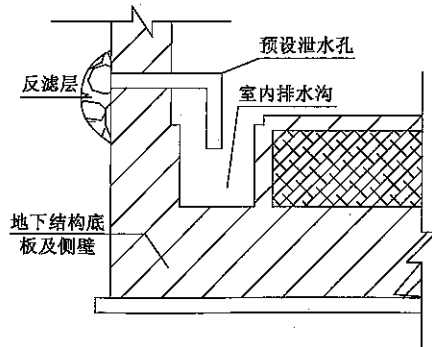


图1 泄水减压抗浮工程大样图

2 泄水减压法数值模拟分析

2.1 工程概况

五角西岸住宅项目由一栋45层住宅、一栋38层住宅、一栋38层SOHO和4层商业建筑组成,共有3层地下室,超高层采用框剪结构,灌注桩基础。其中3层地下结构为纯地下室抗浮工程,该地下室采用框架结构,最大柱网为8.4m×8.1m,框架柱下为独立基础,基础的持力层为③层残积黏土或④₁层强风化炭质泥岩。地下3层为设备用房和停车

库,建筑面积约为1.2万m²。本项目建筑±0.000标高为高程40.650m,独立基础顶面标高为-13.150m,地下室基坑与地下室侧墙的距离为1m,回填土的纵向宽度取为1m,上层回填的厚度与杂填土的厚度相同。

目前地下室已建设完成,在建设前对地下室上层滞水情况进行调查,建设场区地下水为赋存于①层杂填土中的上层滞水。上层滞水主要由大气降水、居民用水、地表水等补给,水位随季节变化较大,由于该场地位于居民聚集区,居民用水量大,地表补给水丰富,故水位较高。地下室顶板覆土厚度为0.4m,上层滞水稳定水位与顶板覆土顶面距离为0.80~2.80m(相当于高程35.74~36.99m)。

2.2 数值模拟中计算范围的选取及计算模型

在泄水减压法使用前,采用FLAC3D软件对本项目的地下室进行抗浮分析。本项目地下室西侧面长度近130m,为最大的泄压面,对应的地下水量也是最大,选取该面作为研究对象。由于地下室四周周长达130m,而泄水孔后面的反滤层的尺寸仅约为300mm×300mm,两者比例差别太大,若采用全部建模,生成的单元格超过1000万,使计算难以开展。故计算中仅截取了其中3个孔,泄压面长6m的单元范围用于计算,所涉及的计算单元超过了600000;为了便于计算中单元网格划分,反滤层的尺寸范围设为400mm×400mm;初步设计时6m范围内布置了3个泄水孔;其中本项目模型泄压面背后的土层宽度取为30m。

2.3 泄水减压系统设计中选取的地下水位深度

该项目所处位置上层滞水水量较大,抗浮设计时若基坑附近的地下水位按历史最高洪水位(为连续降雨而地表来不及排水情况),进行设计则偏于保守,会造成经济性不合理;另一方面,不能排除气候突变降雨量达到最高以及人工泄洪等偶然事件发生时地下水位突然升高的可能性,此时地下室抗浮将面临极大威胁。因此综合两方面考虑,地下室抗浮设计时,取地下室顶板上积水深度为0.3m^[6]。

2.4 泄水减压法的数值模拟各项参数

针对项目工程地下室拟采取泄水减压法解决地下室的抗浮问题,为论证抗浮效果,对工程设计方案进行优化设计,并建立数值分析模型对4种不同情况的施工工艺进行数值模拟分析,其中地下室周围填土密实程度如下:上层回填土(厚度与地下室周围杂填土厚度相同)夯实层夯实度较大,取渗透系数 $K=8.0 \times 10^{-7}$ cm/s;上层回填土受到扰动即夯填不密实时,取渗透系数 $K=8.0 \times 10^{-6}$ cm/s;取下层

回填土渗透系数 $K = 8.0 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ (比相邻黏土层密实程度高一个量级)。本次计算地下室基坑周围的土层基本参数如表 1 所示。

表 1 土层基本参数

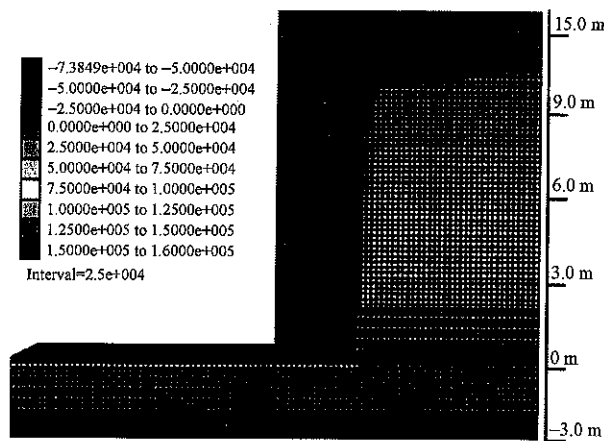
土层	土层厚度 /m	天然重度 $\gamma / (\text{kN/m}^3)$	孔隙比 e	弹性模量 E_s / MPa	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 $\phi / ^\circ$	渗透系数 $K / (\text{cm/s})$
①杂填土	2.4	19.2	0.728	5.2	12	10	4.0×10^{-4}
②黏土	8.4	19.2	0.756	10.3	40	15	4.0×10^{-7}
③残积黏土	5.0	19.2	0.795	12.86	45	18	4.0×10^{-6}

2.5 四种不同情况下的模型计算分析

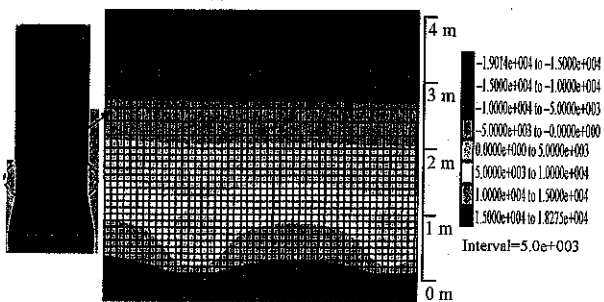
模型一为：地下室上层回填土夯填密实、渗透系数 $K = 8.0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 的情况下，侧面泄水孔间距为 3m (指两个孔水平间距)，即 6m 内布置 2 个孔。其渗透计算结果如图 2 所示。

从图 2 中可知，孔隙水压力零压力面位置距离地下室底板约为 1.3m，泄水孔周围零压力面范围为 0.6m × 0.8m，表明泄水孔的间距为 3.0m 时，排水效果较好；地下室底板的孔隙水压力大小约为 $1.3 \times 10^4 \text{ kPa}$ ，即地下室底板的水头大小约为 1.3m。

模型二为：地下室上层回填土夯填密实、渗透系数 $K = 8.0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 的情况下，侧面泄水孔间距为 2m，即 6m 内布置 3 个孔。其渗透计算结果如图



(a) 侧面孔隙水压力分布



(b) 正面孔隙水压力分布

注：单位为 m 的数据表示打开泄水孔后的地下水孔隙水头的变化情况，余同。

图 2 泄水孔间距 3m 时孔隙水压力分布/kPa

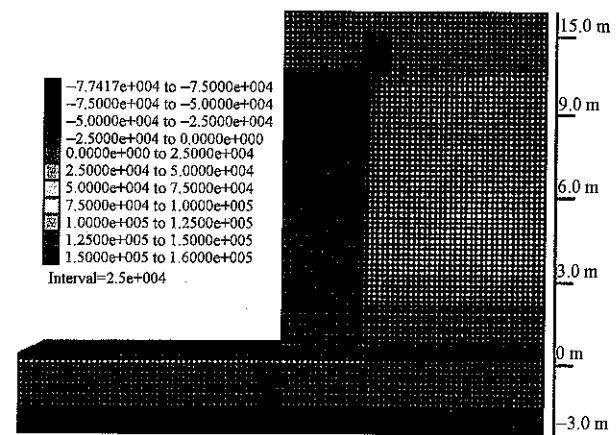
3 所示。

从图 3 中可知，孔隙水零压力面位置距离地下室底板约为 0.7 m 以下，排水孔周围零压力面与其上部零压力区较好地连通，表明泄水孔间距为 2.0m 时，排水效果非常好；地下室底板的孔隙水压力大小约为 $0.7 \times 10^4 \text{ kPa}$ ，即地下室底板的水头大小约为 0.7m。

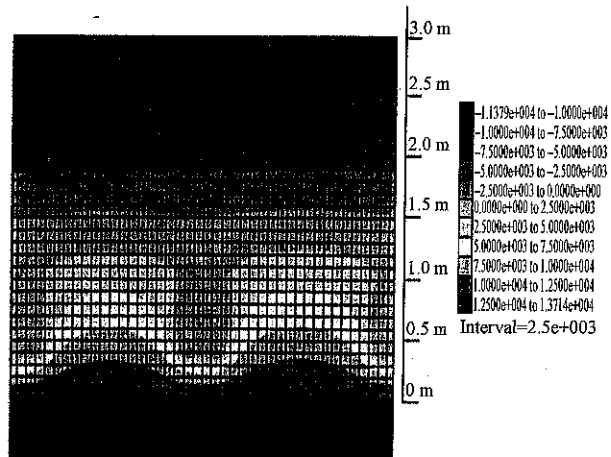
模型三为：在地下室上层回填土受到扰动、密实程度不足的情况下，黏土孔隙率增大，渗透系数升高为 $K = 8.0 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ，地下室侧面泄水孔间距为 3m，即 6m 内布置 2 个孔。

根据数值模拟计算结果中可知，模型三中孔隙水零压力面位置距离地下室底板约为 3.8m，此模型中上层回填土受到扰动渗透系数增大，雨水入渗流量增大，对基坑的影响非常大，相对于上层回填土夯填密实的情形，地下水位可以上升至近埋深 3.8m 即地下室底板的水头大小约为 3.8m。

模型四为：在地下室上层回填土受到扰动、密实程度不足的情况下，黏土孔隙率增大，渗透系数升高为 $K = 8.0 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ，地下室侧面泄水孔间距为 2m 孔，即 6m 内布置 3 个孔。



(a) 侧面孔隙水压力分布



(b) 正面孔隙水压力分布

图 3 泄水孔间距 2m 时孔隙水压力分布/kPa

根据数值模拟计算结果中可知,模型四中孔隙水零压力面位置距离地下室底板约为2.65m,相对于上层回填土夯填密实的情形地下水位可以上升至近埋深2.65m,即地下室底板的水头大小约为2.65m。

对以上四种模型的分析可知:地下室上层回填土的夯实程度直接关系回填土中水的入渗流量大小及地下水位的高低,回填土越密实,渗透系数越小,入渗流量越小,排水效果越好,地下室底板压力水头越小;相反,上层回填土受到扰动,密实程度越小,渗透系数越大,入渗流量越大,地下水水位越高,即地下室底板压力水头越大;地下室侧面泄水孔间距越小,泄水减压效果越好,地下室地板的水头越低,地下室底板越安全。

3 泄水减压法抗浮设计验算

依据地勘要求,地下室抗浮水位可按设计室外地面整平标高确定,取-0.15m。地下3层底板板面标高为-13.150m,底板厚500mm,水头高度为 $13.15 + 0.5 - 0.15 = 13.5\text{m}$,取最大的柱网 $8.4\text{m} \times 8.1\text{m}$ 进行验算。

3.1 地下室水浮力的计算

地下室水浮力 F 按下式计算:

$$F = \gamma_w HA$$

式中: A 为地下室柱网面积; γ_w 为水容重; H 为地下室在地下水中的高度,可取水头高度。

根据上式可计算得出该项目地下室的水浮力 $F = 13.5 \times 10 \times 8.4 \times 8.1 = 9\ 185.40\text{kN}$

3.2 地下室结构恒载计算

恒载包括地下室顶板覆土、结构自重,依据该工程实际情况计算得出地下室各个部分的恒载值如下:1)顶板覆土自重为479.00kN;2)楼板自重为1632.96kN;3)柱自重为116.10kN;4)垫层自重为136.08kN;5)独立基础自重为400.00kN。从而可得地下室结构恒载(即自重 G)为:

$$G = 479.00 + 1\ 632.96 + 116.10 + 136.08 + 400.00 \\ = 2\ 764.14\text{kN} < F = 9\ 185.40\text{kN}$$

由此可知,地下室结构自重远小于地下室水浮力的大小,因此地下室结构抗浮稳定性严重不足。

3.3 泄水减压法抗浮验算

地下室抗浮设计中的泄水减压系统设计,将泄水孔设置在地下3层侧面墙壁上,距离底板顶面为600mm,抗浮水位高程设为-12.55m,水头高度取2.5节数值模拟模型中数值,分别为:1.3,0.7,3.8,2.65m,根据以上数据并结合《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)中地下室抗浮稳定性相关规

定,分别对以下五种情况下的施工工艺进行地下室抗浮稳定性计算^[7]:

(1)地下室上层回填土密实情况下,地下室侧面设置泄水孔(孔间距为3.0m)的地下室水浮力 F_1 为:

$$F_1 = 1.3 \times 10 \times 8.4 \times 8.1 = 884.52\text{kN}$$

$$G/F_1 = 2\ 764.14/884.52 = 3.13 > 1.05$$

这说明在地下室上层回填土密实情况下,地下室侧面墙壁设置孔间距3.0m的泄水孔来降低地下水位,能够使地下室满足抗浮稳定性要求,且安全储备很高。

(2)地下室上层回填土密实情况下,地下室侧面墙壁上设置泄水孔(孔间距为2.0m)的地下室水浮力 F_2 为:

$$F_2 = 0.7 \times 10 \times 8.4 \times 8.1 = 476.28\text{kN}$$

$$G/F_2 = 2\ 764.14/476.28 = 5.80 > 1.05$$

这说明在地下室上层回填土密实情况下,地下室侧面墙壁设置孔间距为2.0m泄水孔来降低地下水位,能够使地下室满足抗浮稳定性要求,且安全储备极高。

(3)地下室上层回填土受到扰动、密实程度不足的情况下,地下室侧面墙壁上设置泄水孔(孔间距为3.0m)的地下室水浮力 F_3 为:

$$F_3 = 3.8 \times 10 \times 8.4 \times 8.1 = 2\ 585.52\text{kN}$$

$$G/F_3 = 2\ 764.14/2\ 585.52 = 1.07 > 1.05$$

这说明在地下室上层回填土受到扰动、回填土密实程度不足的情况下,上层滞水入渗流量增大,地下室侧面墙壁上设置孔间距3.0m的泄水孔来降低地下水位,虽能够使地下室基本满足抗浮稳定性要求,但安全储备极低。因此,为避免持续降雨及雨水滞留不能及时排出的特殊情况,建议泄水孔孔间距的布置小于3m。

(4)在地下室上层回填土受到扰动、密实程度不足的情况下,侧面墙壁上设置泄水孔(孔间距为2.0m)的地下室水浮力 F_4 为:

$$F_4 = 2.65 \times 10 \times 8.4 \times 8.1 = 1\ 803.06\text{kN}$$

$$G/F_4 = 2\ 764.14/1\ 803.06 = 1.53 > 1.05$$

这说明在地下室上层回填土受到扰动、密实程度不足情况下,上层回填土滞水入渗流量增大、地下室侧面墙壁上设置孔间距2.0m泄水孔来降低地下水位,能够使地下室满足抗浮稳定性要求。

4 结论及建议

(1)泄水孔的孔间距直接影响地下室抗浮中的泄水减压效果以及地下室工程底板水头的大小,地下室侧面墙壁上泄水孔间距越小,泄水减压效果越好,所得到地下室底板水头越小,且泄水孔周围零压

方面与上部零压力区能更好地连通。

(2) 回填土夯实程度直接关系回填土中水的入渗流量及地下水位的高低, 回填土越密实, 入渗流量越小, 排水效果越好, 地下室底板水头越小; 相反, 回填土受到扰动, 密实程度越小, 入渗流量越大, 地下水水位越高即地下室底板水头越大。夯实上层回填土, 能够较大幅度地减小地下室底板的水头, 降低地下室底板的水浮力, 故建议在地下室抗浮施工过程中尽量夯实上层回填土。

(3) 在地下室侧面设置泄水孔, 通过对地下室抗浮稳定性验算, 在选取一定孔间距时, 均能够满足抗浮要求, 但为了避免暴雨、洪水、持续降雨和上层滞水不能及时排出等突发状况发生对地下室抗浮安全造成影响, 综合工程经济考虑, 建议选择对抗浮工程相对安全、经济的孔间距 2~3m。

参 考 文 献

- [1] 刘文琰, 尤天直, 张涛. 大型地下停车库的抗浮设计[J]. 建筑结构, 2011, 41(S1): 1326-1330.
- [2] 居炜. 抗浮措施在某大型地下工程中的选择与应用[J]. 建筑结构, 2013, 43(10): 104-108.
- [3] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [4] 赵新, 王骏永, 王呈龙. 泄水减压法在地下室抗浮设计中的应用[J]. 浙江建筑, 2014, 32(2): 4-8.
- [5] 袁奕. 一种地下建筑抗浮的方法: 中国, ZL200710052439.9[P]. 2010-11-10.
- [6] 何涛, 严力军, 刘俊. 复杂条件下大型地下室抗浮锚杆设计[J]. 建筑结构, 2013, 43(S1): 902-905.
- [7] 于岷红, 梁立, 马志林. 某地下室抗浮设计[J]. 建筑结构, 2012, 42(12): 139-142.

《建筑结构》征订启事

2016 年全年期刊(24 本正刊 + 4 本减震技术通讯) 注: 因平邮丢失现象严重, 且后期无法跟踪, 建议选用挂号		432 元/套(每期挂号) 360 元/套(每期平邮)	
2015 年全年期刊(24 本正刊 + 6 本技术通讯)		432 元/套	
正刊合订本 (不含技术通讯)	2015 年(2016 年 4 月出版, 400 元, 上中下三册)		
	2014 年(2015 年 3 月出版, 400 元, 上中下三册)		
	2013 年(2014 年 3 月出版, 400 元, 上中下三册)		
	2012 年(2013 年 2 月出版, 200 元, 上下两册)		
	2010 年(2011 年 3 月出版, 160 元, 上下两册)		
	2009 年(2010 年 3 月出版, 160 元, 上下两册)		
	2008 年(130 元, 上下两册)	2007 年(130 元)	2006 年(95 元)
	2005 年(95 元)	2004 年(70 元)	2003 年(70 元)
光盘	2006~2010 年, 200 元/盘	2001~2005 年, 1991~2000 年, 1975~1990 年, 均为 150 元/盘	1975~2010 年一套(共 4 张盘) 优惠价为 530 元
2015 年下半年增刊(2015 城市地下空间综合开发技术交流会论文集)		300 元	
2015 年上半年增刊(第五届全国建筑结构技术交流会论文集)(上下册)		500 元	
2014 年下半年增刊(第四届建筑结构抗震技术国际会议论文集)		400 元	
2014 年上半年增刊(第二届大型建筑钢与组合结构国际会议论文集)		400 元	
2013 年下半年增刊(含城市地下空间综合开发研讨会论文专栏)		300 元	
2013 年上半年增刊(第四届全国建筑结构技术交流会论文集)(上下册)		500 元	
2012 年上半年增刊(建筑结构抗震技术国际论坛论文集)		300 元	
2012 年下半年增刊(建筑结构高峰论坛——复杂建筑结构弹塑性分析技术研讨会论文集)		200 元	
2011 年上半年增刊(第三届全国建筑结构技术交流会论文集)简刻光盘版		150 元	

汇款方式: 银行帐号: 110908001310606; 开户行: 招商银行北京东三环支行; 单位名称: 亚太建设科技信息研究院有限公司。

注: 也可直接在《建筑结构》网站上通过支付宝完成付款、订购等事宜。联系方式: 010-57368777。

银行汇款后请将下列信息撰写完整后, 连同汇款底单一起传真至 010-57368781 或 Email 至 faxing@cadg.cn。

姓名: _____; 通信地址: _____ 省 _____ 市
_____; 邮编: _____; 手机: _____;
Email: _____; 订阅内容: _____;
总金额: _____ 元; 发票抬头: _____
(如需增值税专用发票请特别说明)。

扫描下方二维码, 可直接订阅《建筑结构》2016 年全年
期刊: 432 元/套(挂号), 360 元/套(平邮)。

