

doi:10.3963/j.issn.1671-4431.2023.11.015

# 地下室上浮引起的结构破坏及加固方法研究

符晶华<sup>1</sup>, 邓效荣<sup>2</sup>, 刘跃<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学光纤传感技术与网络国家工程研究中心, 武汉 430070;  
2. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 武汉 430070)

**摘要:** 湖北某广场地下室上浮引起一罕见工程质量事故——地下室底板最大上浮量 280 mm, 地下室结构的柱、梁、底板与顶板均严重开裂。通过检测及有限元模拟分析指出地下室覆土没有完成、地下水上升导致地下室抗浮不足是引起该工程事故的主要原因。根据不同的破坏程度研究采用相应的加固处理方法, 实施效果良好。它为处理类似抗浮不足引起的工程事故提供了较好的解决办法与全新的处理思路, 具有较大的工程应用价值。

**关键词:** 地下室底板; ABAQUS; 抗浮; 加固; 有限元模拟

**中图分类号:** TU 93

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-4431(2023)11-0099-07

## Research on Basement Structural Damage and Strengthening Methods Caused by the Basement Floating

FU Jing-hua<sup>1</sup>, DENG Xiao-rong<sup>2</sup>, LIU Yue<sup>2</sup>

(1. National Engineering Research Center of Fiber Optic Sensing Technology and Networks,  
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Civil Engineering and  
Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** A rare engineering quality accident caused by the basement floating of a square building happened in Hubei, China. The basement floor was risen by 280 mm. The columns, beams, bottom and roof plates of the basement structure were seriously cracked. Through testing, limited element simulation and analysis, it was pointed out that the main reason for the engineering accident was the insufficient anti floating capacity of the basement caused by the rise of groundwater when the basement soil covering was not finished. Corresponding strengthening methods were adopted based on different degrees of damages, and the implementation effect is good. It provides a good solution and a brand-new approach for handling similar accidents, and has great engineering value.

**Key words:** basement floor; ABAQUS; anti floating; strengthening; limited element simulation

近几十年来, 地下空间在中国的应用越来越广泛, 随即出现了地铁、隧道、停车库等地下建筑。地下结构的病害也不短涌现, 如漏水、渗水、开裂较为普遍, 严重时甚至发生地下室整体上浮的重大事故。

简斌等<sup>[1]</sup>通过对新疆一典型地下水浮力造成的工程事故分析以及数值模拟计算, 对地下水浮力作用下的结构变形机理进行了分析研判, 但是并未对构件加固后的变形及承载能力等情况作模拟分析。张俊萍等<sup>[2]</sup>对某地下室防水板经历极端暴雨天气后发生开裂的原因进行了研究讨论, 多种填缝方式依据裂缝宽度的不同适当选取, 但是加固修复方法单一且没有进行理论分析。李泽泽等<sup>[3]</sup>结合某工程地下室上浮事故, 研究构件开裂损伤特征并根据损伤情况提出增设抗浮锚杆、粘贴碳纤维布及混凝土置换等加固措施, 但是加固处理措施未进行详述。于贵等<sup>[4]</sup>以某地下室上浮整治为工程背景, 深入分析其变形特征、整治设计参数, 并

收稿日期: 2023-08-26.

基金项目: 国家自然科学基金(51978549).

作者简介: 符晶华(1974-), 男, 博士, 教授级高工. E-mail: foryoufirst@163.com

提出泄水降压等整治措施,但是没有对既有混凝土结构提出加固方案。目前,国内外不少学者对地下结构上浮的机理进行了深入的研究。刘海燕等<sup>[5-7]</sup>对各类地下结构的上浮从不同角度展开全面分析。Buse Emirler等<sup>[8-10]</sup>利用 ABAQUS 软件对土体及桩等进行了数值模拟分析。这些学者与工程人员对地下室上浮原因或处理措施进行了一定有益的探索,但未能从根本上提出经得住工程考验的系统性加固处理解决方案。

2020年,湖北某广场地下室发生罕见的结构破坏工程质量事故。6月28日上午7时15分,发现项目A区④-⑪×⑥-⑭轴地下室底板有开裂现象。上午8时30分,发现该区域顶板最高隆起部位已达300.0 mm,底板隆起高度达280.0 mm,地下室整体仍在不断上升。开孔泄压时,地下水冲出底板板面1.5 m高。该事故造成的损伤区域面积约1400 m<sup>2</sup>,剪力墙破损开裂,框架柱受损开裂,砌体墙受损开裂,底板出现较大裂缝,顶板裂缝开裂严重。作者以此工程质量事故为工程背景,通过对项目的全面调查、检测、理论分析,找出事故发生的根本原因。最后提出有效加固修复方法,从近3年的使用情况来看,使用情况良好。这为以后处理类似工程事故提供了全新的有效的处理思路,具有较大的工程价值。

## 1 地下室结构破坏全面调查与检测

### 1.1 工程勘察设计情况调查

建筑场地处于一个地质构造运动相对稳定的地带,从上至下的土层分别为:淤泥质粉质粘土、粉质粘土、强风化泥岩/泥灰岩互层、中风化泥岩/泥灰岩互层。工程场地自然地下水主要是上层滞水,水位随季节变化较大,水位在地面以下1.30~20.90 m之间。

该项目于2018年设计,在④-⑪×⑥-⑭轴范围内发生单层地下室结构上浮事故,如图1所示。该区域上部无结构,基础采用单柱单桩基础。地下室底板底标高为513.950 m,板厚300 mm,坐落在杂填土层。因建筑场地室外地面有高差,设计抗浮水位标高根据相关要求,综合分段选取为④~⑨轴为517.000 m,⑨~⑪轴为516.200 m。

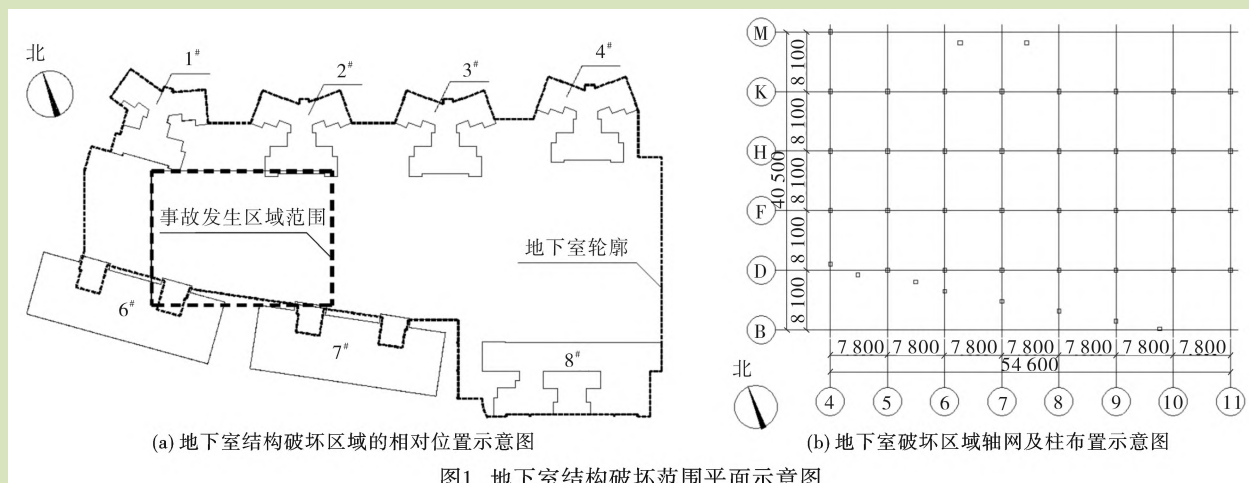


图1 地下室结构破坏范围平面示意图

### 1.2 现场检测结果

出现地下室结构整体上浮事故后,对地下室底板进行开孔放水泄压,最终地下室整体已缓慢下降至安全稳定高度。检测结果表明,部分剪力墙上存在破损,如图2所示。柱角混凝土破损现象较为普遍,如图3所示,结构裂缝大多发生在柱顶以及与柱交接的梁底附近,部分在柱脚,柱中间段基本完好。

地下室底板和顶板均存在明显的上浮,如图4所示,底板最大上浮量为161 mm(降水稳定时的上浮量比最高水位的上浮量280 mm下降119 mm),顶板最大上浮量为98 mm(降水稳定时的上浮量比最高水位的上浮量300 mm下降202 mm)。此时发现顶板上尚未覆土,出现大量水渍,并存在多处裂缝。

按《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB50204—2015)的要求对42根框架柱垂直度进行了测量,结果表明,有6根垂直度偏差超过规范要求,柱端最大水平距离达到27 mm。柱的倾斜与地下室整体倾斜方向一致。

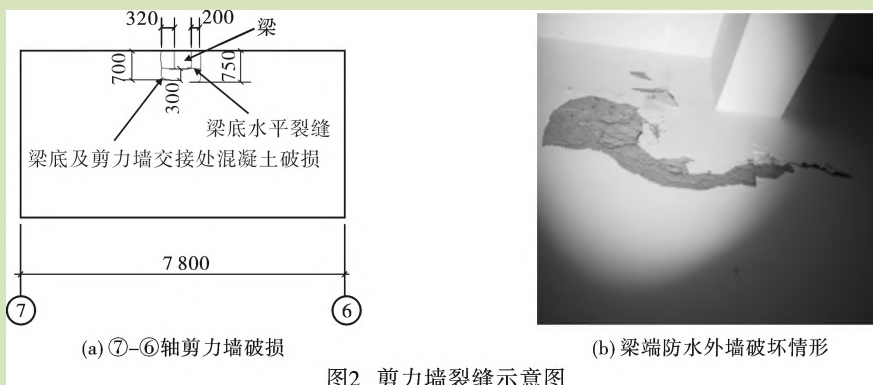


图2 剪力墙裂缝示意图

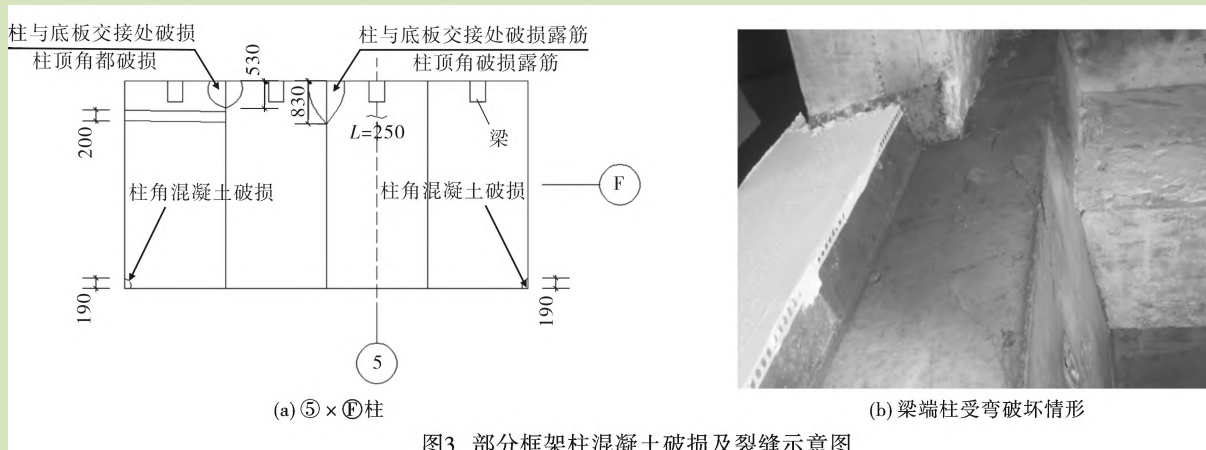


图3 部分框架柱混凝土破损及裂缝示意图

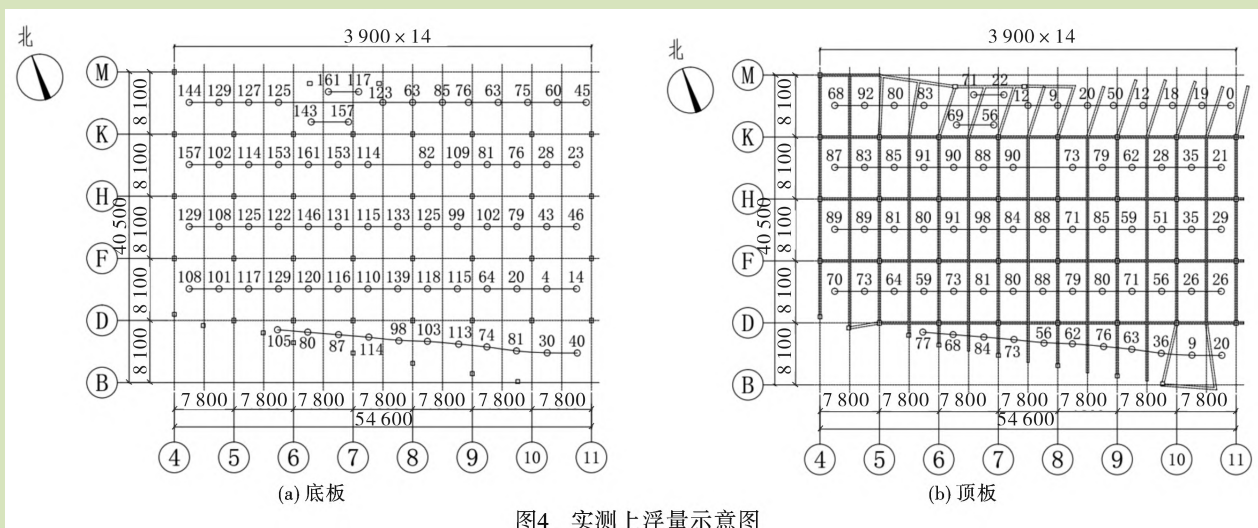


图4 实测上浮量示意图

## 2 地下室结构破坏原因综合分析

国内外学者长期以来一直在探索地下结构损伤的成因, 诸如温度变化、混凝土收缩<sup>[11]</sup>、地基不均匀沉降<sup>[12]</sup>、地下结构上浮、边界约束等等<sup>[13]</sup>。根据项目工程场地地质条件、上浮情况、开裂情况, 不易排除温差、地基不均匀沉降、混凝土收缩和边界约束等因素。

现按《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)第 5.4.3 条对地下结构进行整体抗浮验算和局部抗浮验算, 以查明地下结构上浮破坏原因。地下室建筑总面积 25 688.02 m<sup>2</sup>, 经计算, 该项目地下室结构整体抗浮满足规范要求。

现进行局部抗浮稳定性验算。在④-⑪×⑧-⑭轴部分地下室属于单层框架结构, 没有上部结构, 而且地下室上方还没有覆盖土层等其他永久荷载。该部分底板面积为 2 211.30 m<sup>2</sup>, 底板与顶板分别厚 300 mm、400 mm, 层高 4 m, 柱尺寸为 500 mm×600 mm, 其结构自重为  $G_k=38\ 697.7$  kN。当地下水位按抗浮设计

标高 516.200 m 时,浮力作用值  $N_{w,k} = 48\ 759.2\text{kN}$ 。 $K = G_k/N_{w,k} = 38\ 697.7/48\ 759.2 = 0.79 < K_w = 1.05$ ,  $K_w$  为抗浮稳定安全系数。故未覆土时该区域地下结构的抗浮稳定性不满足规范要求。事实上,如前所述,最高时的水位高于抗浮设计标高 516.200 m。经计算,即使考虑桩的抗拔力,其地下室的抗浮稳定性也不满足规范要求。

综上所述,造成此次工程事故的根本原因是抗浮不足引起的地下室结构破坏。强暴雨带来的降水使地下水水位上升,致使地下室发生局部抗浮失效,进而使无覆土区域的地下结构发生严重的损伤破坏。

### 3 有限元模拟

#### 3.1 模型建立

采用 ABAQUS 软件进行数值模拟,如图 5 所示。⑥-⑦×⑩-⑪轴(7.8 m×8.1 m)附近区域土层较为均匀,且处在较为中心的事故区域,有利于减少模拟误差,方便模型建立与计算,故模型选取该区域土体、底板、桩、桩帽建立模型。为消除边界对计算的影响,土体模型取 24 m×24 m×60 m,选用 Mohr-Coulomb 模型。地下室 C35 的底板尺寸取一个柱网的受力面积,即 15.6 m×16.2 m,厚 300 mm;C35 的桩帽 2.6 m×2.6 m,厚 700 mm;C40 桩长 31 m,直径 800 mm。

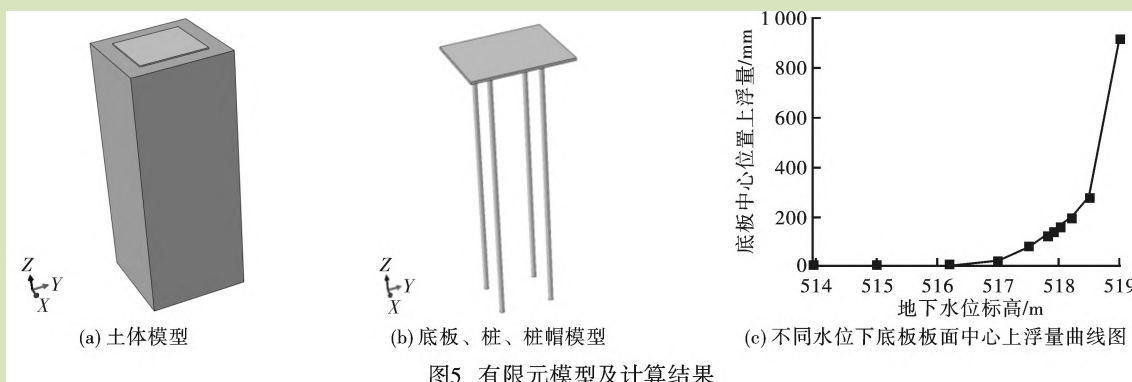


图5 有限元模型及计算结果

底板等构件的配筋均参考原设计图纸进行布置。利用 Embedded region 将钢筋与混凝土约束,混凝土土构件与土体之间的相互作用采用接触。底板上的框架柱位置布置垫块,以压强形式将框架柱与顶板的自重荷载加载到模型;水浮力通过公式(1)计算得到,以压强的形式加载在底板与桩帽底面。

$$P = \rho_w g h = \rho_w g (h_1 - h_2) \quad (1)$$

式中, $P$  为水浮力,Pa; $h_1$  为地下水位绝对标高,m; $h_2$  为地下室底板板底绝对标高,m。

#### 3.2 检测数据与模拟数据对比

1)不同地下水位对底板上浮量的影响 地下室状态有两种工况,现对其进行受力分析。工况 1 为地下室静止未上浮,这时工况 2 为地下室上浮至平衡。对两种状态做受力分析,工况 1 地下室静止未上浮,这时

$$F_{\text{浮实}} + F_{\text{支}} = G + F_c \quad (2)$$

式中, $F_{\text{浮实}}$  为实际抵抗浮力,kN; $F_{\text{支}}$  为土体对地下室的支承力,kN; $G$  为结构自重,kN; $F_c$  为其他抗浮合力,kN。

工况 2 地下室上浮至平衡,这时

$$F_{\text{浮实}} = G + F_c = \rho_w g V_{\text{排实}} \quad (3)$$

式中, $V_{\text{排实}}$  为实际排开水的体积, $\text{m}^3$ 。

根据以上力学模型,以地下室底板底部压强荷载为变量,通过 ABAQUS 软件模拟对应的地下水位的工况后,可采用模型沿竖直方向的位移  $U_3$  来表征地下室结构不同位置的上浮量,借此验证地下水位对结构上浮的影响。

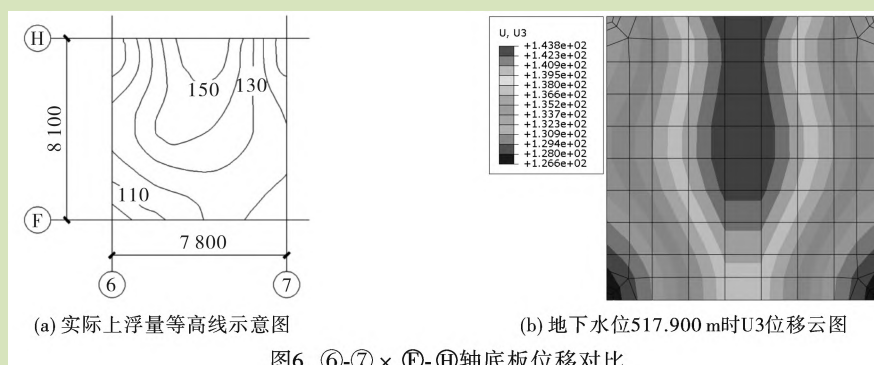
经过有限元分析,不同水位下底板板面中心上浮量如图 5(c)所示。由图 5(c)可知,地下水位越高,则底板板面中心位置处的上浮量越大。地下水位标高在 516.200 m 及以下时,上浮量非常小。即使地下水位达到抗浮设计水位(516.200 m)时,也只上浮了 4.6 mm,这说明结构抗浮效果良好。但是地下水位超过抗浮设计水位时,底板板面中心位置的上浮量随地下水位上升而迅速增加,这说明结构已经开始上浮。

模拟地下水位标高为 518.500 m 情形时, 该位置处上浮量的模拟结果为 280.0 mm。该地下水位标高与地下室底板板底高差为 4.55 m, 结合事故发生时上游河道积水面与地下室底板板底的水位有超过 4 m 高的水头差, 且底板部分区域在泄压前隆起高度不低于 280.0 mm 的实情, 这进一步证明事故发生时地下结构上浮的原因是地下水浮力。

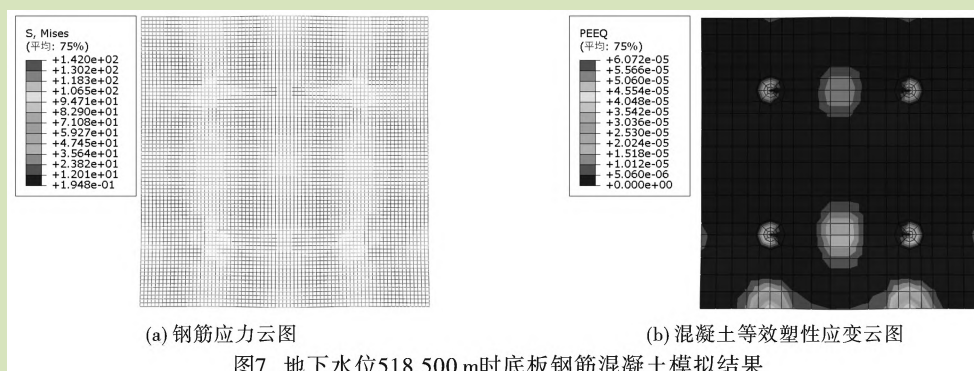
通过对⑥-⑦×⑩-⑪轴区域进行标高检测发现, 底板板面中心位置的上浮量为 140.0 mm 左右。对比模拟计算, 地下水位标高为 517.900 m 时该位置处的上浮量为 143.7 mm。由此推断, 此时已通过开孔泄压等措施使得地下水位下降至 517.900 m 处。

除此之外, 从模拟结果来看, 地下水位达到 519.000 m 时, 底板板面中心的上浮量达到 914.7 mm。这说明发生该事故时, 开孔泄压等措施有效地避免了损失的进一步扩大。

2) 地下水位对底板板面不同位置上浮量的影响 依据底板板面上浮的检测数据绘制出⑥-⑦×⑩-⑪轴区域等高线示意图, 如图 6(a)所示。总体来说, 底板板面中心处上浮量最大, 框架柱所在的 4 个角落位置上浮最小, 这是由于水浮力遍布底板板底, 但是起到抗浮作用的灌注桩与柱子只分布在四周。地下水位为 517.900 m 时的模拟结果也与实际相同, 见图 6(b)。



3) 地下水浮力对底板钢筋混凝土的影响 对地下水位标高为 518.500 m 时的底板钢筋与混凝土进行模拟分析, 如图 7 所示。在地下水浮力的作用下, 底板钢筋仍然受力良好, 应力最大处仍仅 142 MPa, 远未达到屈服强度 400 MPa。混凝土底板的最大等效塑性应变(PEEQ)仅为 0.000 06, 出现在柱底位置, 混凝土的塑性损伤非常小。这与事故区域柱底发生破坏较少且底板裂缝很少的情况十分吻合。



## 4 地下室结构加固修复处理方法

地下结构上浮造成结构损伤, 致使结构受力情况发生不良改变。因此, 在抗浮处理完成后, 需要对破坏的梁柱进行加固。结合该工程实例以及《混凝土结构加固设计规范》(GB50367—2013), 指出全面处理流程与系统性加固处理方法。

1) 采取泄水降压法防止再次出现水位上升引起地下室结构破坏。用于抗浮加固时, 按图 8 在室内设置泄水孔, 使它变成永久性泄水孔。对地下室底板钻取圆孔, 并使之贯穿整个混凝土层后, 在孔内填充 250 mm 厚的粗砂等过滤材料, 使之形成渗透性能良好的泄水结构。这种方法的最大好处, 在于以后如果出现偶然水位上升, 不会再出现地下室抗浮失败问题, 从构造上保证地下室结构在突发地下水位变化时安全与稳定。

2)采取粘贴碳纤维法修复破坏不严重的构件。对于破坏不严重的柱构件,拟采取粘贴碳纤维法恢复其承载力、提高其延性。项目采用I级碳纤维布,按文献[14]的公式计算需缠绕3层碳纤维布。其施工工艺为:基层处理→清洗→修补→涂胶→粘碳纤维布→涂胶→固化养护。

3)采用后注工结构胶粘钢加固法修复破坏较严重的构件。对于破坏较严重的结构构件,拟采取大幅提高承载力的包钢加固修复方法。包钢加固也称后注工法结构胶粘钢加固,是通过在原构件外围采用粘贴的方式增加型钢和钢板,使原构件与之共同工作,从而大幅提高原构件的承载力。项目中在原有梁柱结构表层粘贴8mm厚Q35B钢板,并用对拉螺栓进一步锚固,按图9采用包钢法对框架柱和梁进行修复加固。其施工工艺为:基层处理→安装钢板→封边试压→灌注密实→固化养护。

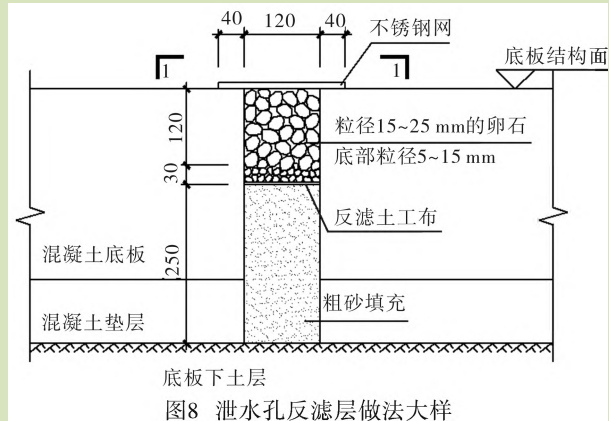


图8 泄水孔反滤层做法大样

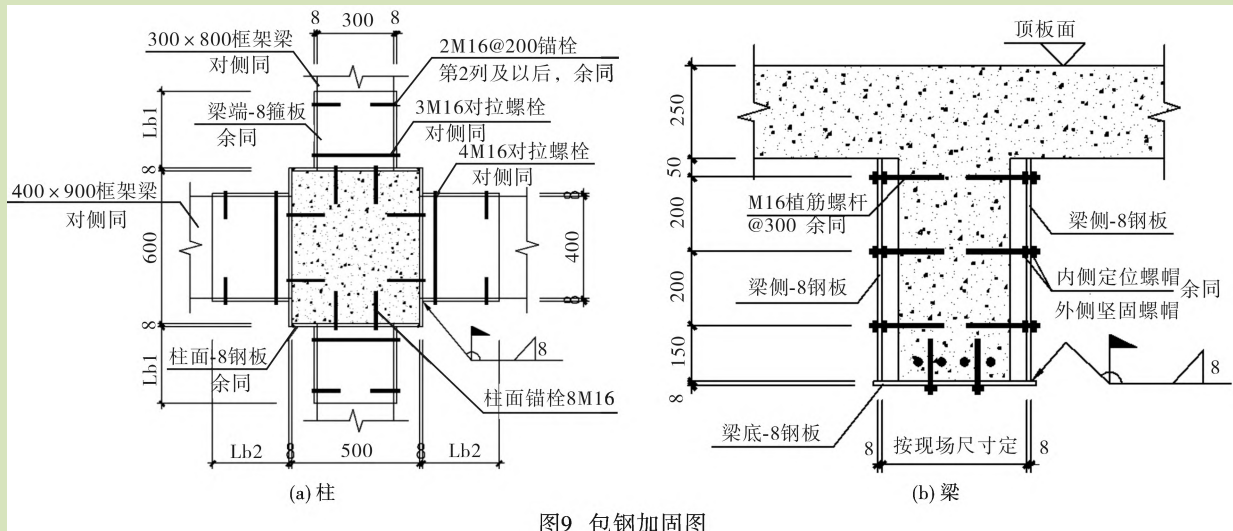


图9 包钢加固图

4)破碎混凝土修复法。该工程存在混凝土破损的情况,拟采用环氧砂浆置换法处理。先将破损混凝土铲除,用鼓风机吹干后,再采用M60高强度环氧砂浆置换处理。

5)裂缝处理。工程中还存在混凝土开裂的情况。这些结构裂缝的存在会影响到结构的耐久性。因此,对不同宽度的裂缝需要采取相适应的处理措施,见图10。对于最大裂缝宽度不超过0.20mm的裂缝,采取裂缝封闭法处理。其施工工艺为:混凝土表面打磨处理→裂缝涂胶→养护→表面处理→涂装。对于最大裂缝宽度在0.20mm及以上的裂缝,采取裂缝灌缝法处理。其施工工艺为:开凿“V”形坡口→清理→埋设灌浆嘴→“V”形坡口封闭→贯穿裂缝对侧打磨、封闭→压入灌封胶→养护→表面处理→涂装。

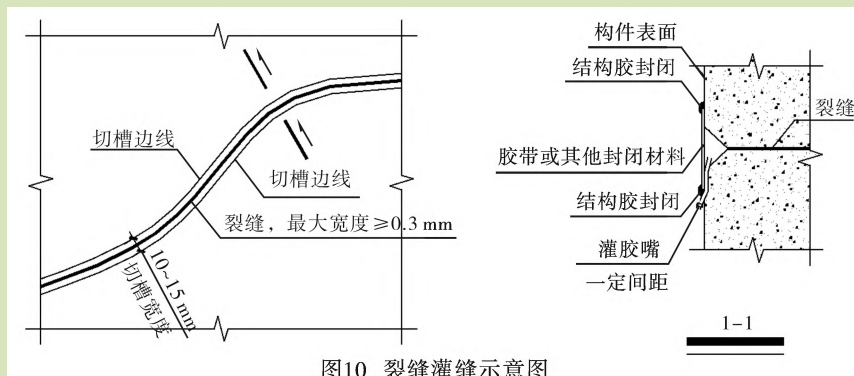


图10 裂缝灌缝示意图

## 5 结 语

要精确分析导致地下室抗浮不足是引起该工程事故的主要原因,就需知道实际的地下水位而不是设计水位。采用有限元模拟反推当时的实际地下水位,印证了理论水位与实际水位计算结果的基本一致性,表明该模拟方法是有效的。针对地下室抗浮不足引起的构件破坏,从构造上和理论计算上提出了加固处理的系统解决方案,实践已证明能满足实际工程的需要。为解决以后类似问题提供了系统的有效的解决方法。

现行国家和各地方标准规定的设计水位是不尽相同的,有的地区甚至规定一律采用建筑物室外自然标高,无疑是更安全的。但这种不需知道水文地质条件和地下水位就可直接进行抗浮设计是偏保守的,同时对于埋深较大的地下室在构造处理上也是比较困难的,应引起工程界重视。

### 参 考 文 献

- [1] 简 斌,卢铁鹰,李少巍,等.地下水浮力对地下建筑结构安全的影响[J].土木工程与环境工程,2010(1):56-60.
- [2] 张俊苹,戴夫聪,黄 强,等.地下室防水板开裂原因与抗浮措施研究[J].施工技术:中英文,2022,51(21):50-53,88.
- [3] 李泽泽,张炳焜,张明明.某工程地下室上浮开裂损伤特征与加固措施研究[J].施工技术:中英文,2022,51(9):32-36.
- [4] 于 贵,李 星,舒中文,等.高层建筑地下室上浮变形特征及处置措施研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(1):211-218.
- [5] 刘海燕,孟伟新,王振清,等.“二八灰土”回填地下粮仓浮力预警试验研究[J].农业工程学报,2019,35(11):299-305.
- [6] 刘庭金,林少群.盾构隧道病害分析及上方架空轻质回填研究[J].铁道工程学报,2019,36(7):64-69.
- [7] 王文章,廖晨聪,周香莲,等.可液化土层中地下结构上浮及其控制措施[J].地震工程与工程振动,2019,39(3):159-167.
- [8] Buse Emirler. Investigation on Determining Uplift Capacity and Failure Mechanism of the Pile Groups in Sand[J]. Ocean Engineering, 2018.
- [9] Emirler B, Tolun M, Yildiz A. 3D Numerical Response of a Single Pile Under Uplift Loading Embedded in Sand[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2019.
- [10] Faizi K, Armaghani D J, Sohaei H, et al. Deformation Model of Sand Around Short Piles Under Pullout Test[J]. Measurement, 2015, 63: 110-119.
- [11] 尹 韬. 与已建地下室连接的新建超长地下室温度效应分析[D]. 湘潭:湘潭大学,2019.
- [12] 范明明,裴向军,王文臣,等.岩溶地区某高层建筑不均匀沉降地基基础加固案例分析[J].土木工程与管理学报,2021,38(1):163-168,182.
- [13] 傅 睿. 地下车库梁柱损伤成因分析及加固处理[D]. 长沙:中南林业科技大学,2020.
- [14] 符晶华,卢哲安,符 蓉,等.粘贴碳纤维布加固混凝土圆柱的应力分析与研究[J].武汉理工大学学报,2006,28(9):60-63.