

地下水浮力对地下建筑结构安全的影响

简 斌, 卢铁鹰, 李少巍, 阴 可

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要:为研究地下水浮力对地下建筑结构产生的损伤特征和机理,通过一典型工程实例的结构变形和裂缝原因分析,并结合有限元程序对结构变形和变形后刚度变化的模拟计算,对地下水浮力作用下造成的结构变形机理,混凝土梁、柱、墙裂缝特征,以及对结构安全的影响进行研究。研究结果表明:当地下水浮力超出地下建筑自身重量,地下建筑在浮力作用下产生隆起变形和整体上移的趋势,而在周边挡墙处该上移趋势受土体约束,致使各柱、墙竖向变形不一致,导致结构构件开裂甚至局部破坏。损伤后的结构刚度大大降低。结构的总体损伤程度与平面尺寸相关,并受平面短边尺寸的控制,且结构构件损伤呈现周边大于中部的特征。

关键词:地下建筑结构;结构分析;变形;裂缝;地下水;模拟计算

中图分类号:TU354 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2010)01-0056-05

Effect of Underground Water on Safety of Underground Structure

JIAN Bin, LU Tie-ying, LI Shao-wei, YIN Ke

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: In order to study the damage characteristics and mechanism of underground water on underground structure, factors of structure deformation and cracks based on a case study had been investigated. Meanwhile, finite element method had been used to simulate the deformation and decrease of stiffness. And structure deformation mechanism had been investigated, together with cracks characteristics and the effect on the structure's safety. It was found that the underground structure would be swollen up and floated as the float was larger than the structure's weight. And the uptrend of boundary retaining wall was restrained by soil, which made vertical displacements in columns and concrete walls different and resulted in structure cracks and the decrease of structural stiffness. The general structural damage was depended on the plan size and controlled by the short side. And the damage was more serious in central than that in boundary.

Key words: underground structures; structure analysis; deformation; cracks, underground water; simulation

伴随城市地下建筑的增多,由地下水浮力引起的工程质量事故、造成严重经济损失的案例也逐步增多^[1-2],房屋的抗浮问题也因此得到研究人员更多的重视。目前研究工作多集中在地下水水位取值、浮力折减系数、抗浮设计以及地下水-土体-地下结构共同作用等方面^[1-4]。而与此相对应,针对地下水浮

力对地下建筑结构产生的损伤特征和机理的研究却少见报导,而这一研究工作既有助于在设计阶段预见可能的结构损伤,也有助于对地下水浮力造成的工程事故进行合理判断和处理。

地下水浮力对地下钢筋混凝土建筑结构的影响,主要体现在结构隆起变形、混凝土构件开裂以至

收稿日期:2009-04-21

基金项目:国家杰出青年科学基金(50625824)

作者简介:简斌(1967-),男,副教授,博士,主要从事混凝土及预应力混凝土结构研究,(E-mail)bjian@cqu.edu.cn。

局部破坏上。由不同原因引起的结构裂缝的特征是不同的,虽然国内外学者对包括温度、收缩、冻胀在内的荷载和作用引起的混凝土结构裂缝和结构损伤已进行较多研究^[5-8],但其中涉及到地下水浮力引起的结构损伤分析却很少。这是因为早期这方面的典型案例较少,同时地下水浮力引起的结构损伤与具体工程关系紧密,普通研究人员较少涉及。

该文结合重庆大学在新疆完成的一典型地下水浮力造成工程事故的原因调查,并采用有限元程序进行相关模拟计算,对地下水浮力引起的建筑结构损伤特征和机理,以及变形和刚度变化等进行研究,该研究工作可以作为同类工程分析的参考。

1 工程概况

1.1 工程简介

新疆某 1 大型车库为地下一层建筑,由轴线分区号为 1 的矩形区和轴线分区号为 2 的近似方形区 2 部分组成(图 1),结构平面布置如图 1 所示。该车库于 2006 年开工修建,屋面混凝土浇筑后,因冬季气候寒冷原因,于同年 11 月下旬暂停施工。停工时,将尚未浇注混凝土的后浇带和车库大门封闭保温。2007 年 4 月准备复工时,发现该地下室轴线 2 分区屋面中部明显隆起,中部与周边的相对高差近 500 mm,并有增加趋势。进一步检查发现,该区地下室的梁、柱、墙普遍严重开裂,造成结构构件损伤甚至破坏。与轴线 2 分区相比,1 分区未见结构明显变形和构件开裂现象。论文将对该事故原因进行分析研究。除说明外,讨论的区域均指轴线 2 分区。

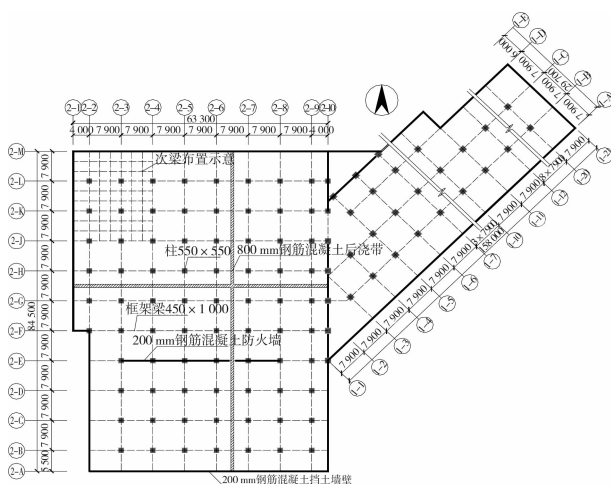


图 1 地下车库结构平面布置示意图

1.2 场地条件及相关荷载取值

场地标准冻深 1.630 m,设计地下水位标高为 -1.200 m。地下车库屋面使用活荷载 3.5 kN/m²,

屋面覆土厚度 0.9 m。

1.3 结构设计

参见图 1,屋面框架梁、次梁截面尺寸分别为 400 mm×1 000 mm 和 300 mm×700 mm;柱截面尺寸 550 mm×550 mm;周边混凝土挡土墙及内部防火墙厚 200 mm。车库顶板厚 200 mm,双层双向钢筋网,板面标高 -1.20 m;基坑开挖至 -6.10 m,底板垫层为 150 mm 厚 C15 素混凝土,垫层以上设 50 mm 厚防水层,其上即为覆盖全场、厚 300 mm 的钢筋混凝土车库底板,板底标高与柱下独立基础底面标高相同,板中配置 14@200 双层双向钢筋网。顶板、底板及墙体(含挡墙)混凝土强度等级为 C30,梁、柱混凝土强度等级为 C40。

2 现场调查

2.1 裂缝

板:屋面板有大量不规则裂缝发生,此类裂缝除极少数外,绝大部分未贯穿至板底面;底板的局部区域出现裂缝,且有地下水渗出,如 4~6 轴线与 K~L 轴线所围区域有可见裂缝,地表见浸水。现场勘查过程中发现,车库顶板上的 0.9 m 厚绿化土层和车库底板上的 0.5 m 厚回填层和地面均未施工。

梁:屋盖框架梁和次梁沿梁长均有裂缝出现,裂缝主要为竖向走势,局部有斜裂缝。在端部靠近周边墙体附近的梁端裂缝宽度较大,其中 J 轴线梁在靠近 10 轴线防火墙处的 1 条斜裂缝宽度达到 3.0 mm,该梁段内其余部位的裂缝仍以竖向走势为主。

柱:框架柱普遍开裂,裂缝位于柱脚和柱顶部位,柱中段基本完好,裂缝宽度总体较梁裂缝大。在靠近车库中部的框架柱裂缝数量较少,宽度较窄;在靠近车库的周边区域,框架柱裂缝发育,裂缝宽度较大,如:2×F 柱顶有多条宽度达到 10 mm 以上的斜裂缝,沿裂缝可将混凝土剥落(图 2)。



图 2 2×F 柱顶裂缝

墙:E轴线上 3~8 轴段防火墙裂缝发育充分,

该片墙体东西两端裂缝数量较多,中段裂缝数量逐渐减少,裂缝宽度逐渐减小至无。裂缝均为斜向走势,靠近 3 轴线处裂缝为西高东低(图 3),8 轴线处裂缝为东高西低(图 4)。3×E 柱顶严重开裂,柱纵筋弯曲,已达破坏。

在 A~M 轴与 1~10 轴所围矩形区域内,屋面结构中部长隆起变形最大,周边梁柱开裂明显较中部严重,裂缝分布和破坏程度也是呈现中心对称分布。

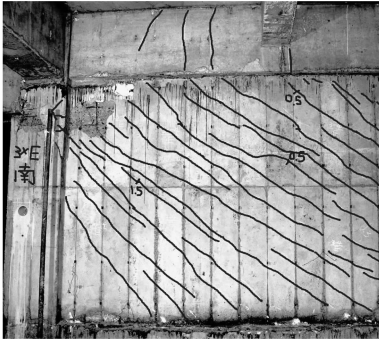


图 3 E 轴线上 3~4 轴线段墙体裂缝

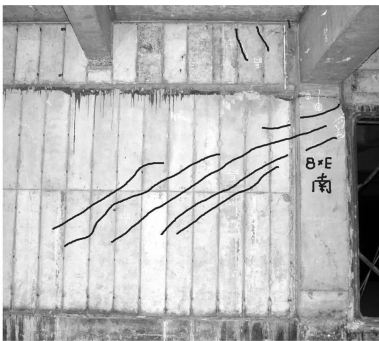


图 4 E 轴线上 7~8 轴线段墙体裂缝

2.2 屋盖变形

将地下车库的柱中心线投影到顶板板面,采用全站仪对其高程进行测量。结果表明:地下室屋面板周边高程最低,如 1×M 轴线测点处;中部高程最高,如 6×H、5×H 轴线等测点处。对底板板面高程测量结果表明,其高程变化规律与屋面板相同。

3 原因分析

由该工程场地分析,该工程地处新疆,冬夏温差大、位于冻融地区,且地下水位高;由结构自身特点分析,该车库结构平面尺寸大,易受温度和混凝土收缩等因素的影响。经初步分析,造成事故的原因可能包括:场地土冻胀的影响、温度变化及混凝土收缩的影响、地下水浮力的影响等。相关文献也指出,温度、混凝土收缩^[5-7]对混凝土开裂有显著影响,冻胀^[8]及地下水^[9]也可能造成结构损伤,对这些裂缝应进行有效控制^[10]。

3.1 排除冻胀、温度及混凝土收缩的影响

首先,排除场地土冻胀的影响。一方面,虽然该建筑场地位于冻土地带,同时地下水位高,具备建筑基础冻胀的条件;但另一方面,建筑物基础位于地面以下 6 m,且 2006 年 11 月暂停施工时对建筑物采取了较好的保温措施,现场勘查未见车库地面存在明显冻融破坏迹象,周边相邻其他建筑也未见冻融灾害。更重要的是,自 2007 年 4 月发现屋盖变形后,随着气温的显著升高,屋盖中部的隆起不减反增,这与冻融灾害完全不同。

其次,排除温度变化、混凝土收缩的影响。虽然,轴线 2 分区平面尺寸大(63.3 m×84.5 m),存在温度变化、混凝土收缩引发结构变形的可能,从柱裂缝的分布规律看,也与温度变化、混凝土收缩产生的裂缝分布规律有部分相似之处^[11]。然而,同步施工的轴线 1 分区纵向尺寸达 158 m,在同样的工程条件下,未见明显结构变形和损伤。同时,当四月发现屋盖变形最大时,其当时气温与 2006 年结束施工时的温差已很小,且未见同类损伤导致的边柱柱顶明显侧移^[12]。

3.2 地下水浮力的影响

1) 场地条件

场地自然地下水位在 -1.20 m 处,地下水位较高。地下车库底板垫层底部标高 -6.10 m,远低于地下水位标高。若设计或施工对地下水浮力产生的作用估计不足或处理不当,则可能对结构造成影响。

2) 设计和施工组织

虽然该车库采用柱下独立基础,但车库底板为刚性防水底板,由前文可见,包括垫层在内,该车库底板总厚度达到 500 mm,实际上类似形成一筏板基础,这一结构形式对地下水的作用将非常敏感。

施工过程中,在场地周边设有排水沟和集水井。集水井抽水至 12 月下旬,地下水结冰,停止排水。

3) 屋面结构变形原因分析

至此,事故产生原因逐渐明朗,地下水浮力的作用是造成本次工程事故的真正原因。

首先,经计算分析,在自然地下水位标高状态下,若车库顶板上的 0.9 m 厚绿化土层和车库底板上的 0.5 m 厚回填土层未施加,该地下室自重是无法抵抗地下水的浮力的。设计人员对此未予足够重视,未明确施工阶段应采取的抗浮措施。

该工程 2006 年 11 月停工前,由于基坑开挖排水,有效地降低了地下水位标高,无意间避免了地下水浮力作用对结构的不利影响,故未产生隆起和开裂现象。2006 年 12 月因地下水结冰而停止施工和

排水,但到来年冰雪融化,地下水位回升,而此时尚未复工,也未重新组织排水。随地下水位升高,车库底板所受地下水浮力大大超过了结构自重,导致该车库底板上升,从而带动车库屋面隆起变形。与此同时,车库周边挡土墙受土体约束大,其向上的变形受到约束,因此屋面不是整体向上平移,而仅表现为中部隆起,周边挡墙几乎没有向上位移。

与轴线 2 分区相比,轴线 1 分区没有出现明显的隆起变形和结构损伤。这是因为 1 分区为一矩形布置,短向仅为 29.7 m,不到 2 分区的短边尺寸的一半。而对于 1 分区这样短边远小于长边的四边约束矩形平面,在浮力的作用下,就类似一均布荷载作用下的单向板,其隆起变形的幅度是由短向尺寸控制的,这一点也为表 1 中的模拟计算所证明。

4) 构件裂缝原因

计算分析表明各柱竖向变形不一致,这使得框架梁两端存在相对竖向位移,导致梁、柱内产生内力,并最终引起框架梁、柱开裂。同时,从竖向变形的平面分布看,越靠近周边,竖向变形的梯度越大,即相邻柱的相对竖向位移越大,这也正是周边梁柱开裂明显严重的原因。此外,构件开裂又减小了构件的刚度,刚度降低则进一步降低了结构抵抗变形的能力,两者相互促进,致使结构严重开裂、变形,甚至破坏,这一观点为众多研究所证实^[13-16]。

由此可见,造成车库屋面结构变形的原因是地下水浮力的作用;而导致梁、柱、墙等结构构件严重开裂的原因是在浮力作用下,周边挡墙上移趋势受土体等约束,各柱(墙)向上的变形不一致,产生相对竖向位移而造成的。如果计算分析时未考虑周边挡墙受到约束,简单判断结构整体上移,将不能预见结构可能遭受的损伤。

事故原因明确后,立即采取了排水措施。5 月 11 日,当实际地下水位降至 $-2.50\sim-3.50$ m 左右时,效果非常明显,端部竖向位移基本不变,中部最大相对位移降至 350 mm。

4 模拟计算

为模拟构件开裂对结构刚度降低的影响,仍以上述工程为例,在构件刚度折减的基础上,采用通用有限元软件 SAP2000 对该工程进行等效弹性计算分析。模拟计算的主要目的是为了检验结构刚度的总体折减程度。模拟计算时混凝土材料强度、弹性模量等取实测值,构件截面尺寸取设计值。梁、柱杆件采用 FRAME 单元,墙、板采用 SHELL 单元。后浇带根据刚度等效的原则,将钢筋等效替换为混凝土梁。

土梁。

表 1 计算结果表明,当结构的等效刚度折减到弹性刚度的 0.15 倍左右时,屋面测点竖向位移的最大计算值(299 mm)与 2007 年 5 月 11 日的实测值(331 mm)基本一致,沿平面布置变化规律完全相同。在 ACI318-05^[17] 规范中,当框架结构临近其设计极限承载力时,梁刚度取 $0.35EI$ 、柱刚度取 $0.7EI$ 。文献[15]的模拟计算和试验研究表明,当接近极限荷载的 80% 时,梁、柱刚度折减到 45%~50% EI 和 55%~65% EI 。该工程计算的折减后刚度较 ACI 规范等均小较多,其原因是由于部分构件已严重开裂至局部破坏。

表 1 测点竖向位移计算及实测值/mm

计算值/实测值	测点位置						
	L/2	L/6	J/6	H/2	H/4	H/6	C/7 (轴线 1 区)
计算刚度取 EI	1.0	9.3	36.4	2.2	24.2	44.9	8.8
计算刚度取 $0.15EI$	6.4	61.7	243	15	161.2	299.2	58.4
实测值	35	141	319	78	275	331	/

注:表中实测值为 2007 年 5 月 11 日的实测值;表中测点位置 L/2 代表 L 轴交 2 轴处柱中心点。

在弹性刚度未折减时,轴线 1 分区中部竖向位移仅为 8.8 mm。实际情况是轴线 1 分区构件几乎未见明显裂缝,也未见该分区屋面明显隆起变形。这是因为 1 分区纵向尺寸虽达 158 m,但横向不足 30 m,计算分析表明结构竖向变形主要由短边尺寸决定,这就犹如一块均布荷载作用下的四边约束的矩形板。

值得注意的是,表 1 中的实测值为 2007 年 5 月 11 日的实测值,已较最大时的 500 mm 左右下降较多。可见,当地下水浮力作用在结构上,并接近或超出结构构件的承载能力时,将导致结构刚度迅速下降,其等效的弹性刚度仅相当于其未折减弹性刚度的几分之一或十几分之一。此时,如果还依据未折减弹性刚度计算结构的变形,将大大低估结构可能产生的变形,从而忽视可能产生的结构损伤。

5 结 论

1)当地下水浮力超出地下建筑自身重量时,地下建筑在浮力作用下产生向上隆起变形或整体移动趋势,而周边挡墙上移趋势受土体约束,致使各柱、墙竖向变形不一致,产生相对竖向位移,导致结构构件在弯矩、剪力作用下开裂。

2)计算分析模型应考虑周边挡墙受到的实际约

束,若简单认为结构整体上移,将不能预见结构可能遭受的损伤。对于四边约束的矩形平面结构,其短边长度对整体结构损伤起控制作用。同时,周边相对竖向变形大,周边结构构件损伤更为严重。

3)在较大地下水浮力作用下,当结构接近其设计极限承载能力时,其刚度折减非常大,仅相当于其未折减弹性刚度的几分之一或十几分之一,这对确定浮力引起的结构变形将产生很大影响。

参考文献:

- [1] 应高飞. 从工程事故谈地下室抗浮问题[J]. 福建建筑, 2007(11): 49-51.
YING GAO-FEI. The anti - buoyancy problem of ground floor sees from some engineering accidents[J]. Fujian Architecture & Construction, 2007(11): 49-51.
- [2] 张莉, 杨桦, 虞兴福. 某筏板基础地下车库上浮事故原因调查及补救处理[J]. 地质与勘探, 2008, 44(4): 93-96.
ZHANG LI, YANG HUA, YU XING-FU. Investigation and remedy on a buoyed underground-garage of raft foundation basement[J]. Geology and Prospecting, 2008, 44(4): 93-96.
- [3] 杨瑞清, 朱黎心. 地下建筑结构和施工设防水位的选定与抗浮验算的探讨[J]. 工程勘察, 2001(1): 43-46
YANG RUI-QING, ZHU LI-XIN. Study on the option of defence water level for structure design and construction of underground buildings and anti-floating computation [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2001(1): 43-46.
- [4] 张彬, 李广信, 杨俊峰. 地下水浮力作用机理模型试验设计与实施[J]. 岩土工程技术, 2006, 20(3): 128-131.
ZHANG BIN, LI GUANG-XIN, YANG JIU-FENG. The design and actualization for the model experiment on underground water uplift action mechanism [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2006, 20(3): 128-131.
- [5] HYO-GYOUNG KWAK, SOO-JUN HA, JIN-KEUN KIM. Non-structural cracking in RC walls Part I. Finite element formulation [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36: 749-760.
- [6] SHI BIN-TANG, CHUN AN-TANG, ZHENG ZHAO-LIANG, et al. Numerical model for thermal cracking of concrete[J]. Key Engineering Materials, 2007(2): 941-944.
- [7] KWAK H G, HA S J. Plastic shrinkage cracking in concrete slabs. Part I; a numerical model[J]. Magazine of Concrete Research, 2006, 58(8): 505-516.
- [8] HAYASHI, KEIJI, SUZUKI, TERUYUKI, TOYOTA, KUNIO. Study on the shape of freezing front and frost heave damage of C-box structure[C]// Proceedings of the International Conference on Cold Regions Engineering, p37, held in Orono, Maine, on July 23-26, 2007, Cold Regions Engineering 2006: Current Practice in Cold Regions Engineering. Publisher: American Society of Civil Engineers.
- [9] YUAN Y. Challenges in underground construction[J]. Municipal Engineer, 2008, 161(1): 25-34.
- [10] ALEXANDER, STUART J. Why does our concrete still crack and leak[J]. Structural Engineer, 2006, 84(23/24): 40-43.
- [11] 董军峰, 李刚. 某框架楼混凝土裂缝鉴定[J]. 混凝土, 2003(7): 66-68.
DONG JUN-FENG, LI GANG. The appraisal of concrete cracks in a frame structure[J]. Concrete, 2003(7): 66-68.
- [12] 李志磊, 干钢, 唐锦春. 超长框架结构在温度场作用下的空间变形特性和内力研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(4): 36-39.
LI ZHI-LEI, GAN GANG, TANG JIN-CHUN. Research on internal force and spatial deformation of an overlong frame structure under temperature effect[J]. Industrial Construction, 2004, 34(4): 36-39.
- [13] CENGIZ DUNDAR, ILKER FATIH KARA. Three dimensional analysis of reinforced concrete frames with cracked beam and column elements [J]. Engineering Structures, 2007, 29(9): 2262-2273.
- [14] BALEVICIUS, ROBERTAS. An effective stiffness model for RC flexural members [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2006, 24(5): 601-620.
- [15] KARA, ILKER FATIH, DUNDAR, CENGIZ. Three dimensional analysis of reinforced concrete frames considering the cracking effect and geometric nonlinearity[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2009, 31(2): 163-180.
- [16] 吴京, 武俊燕, 孟少平. 混凝土结构间接应力及其裂缝控制研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(5): 13-15, 98.
WU JING, WU JUN-YAN, MENG SHAO-PING. Research on indirect stress and crack control of concrete structures[J]. Industrial Construction, 2006, 36(5): 13-15, 98.
- [17] Building code requirements for structural concrete(ACI 318-08) and commentary (ACI 318R - 08) [S]. Reported by ACI Committee 318.

(编辑 王秀玲)