

粉土地区上部结构与地基基础共同作用有限元分析

张 曼¹, 曾长女¹, 田文礼²

(1. 河南工业大学土木建筑学院, 河南 郑州 450001; 2. 华优建筑设计院郑州分院, 河南 郑州 450000)

摘要: 结合郑州地区广泛分布的粉土及其特殊的工程特性, 采用 ABAQUS 数值模拟方法, 研究粉土地区上部结构与地基基础共同作用下, 上部结构分层施工、地基土含水率变化、筏板厚度等对筏板基础内力的影响。并对比了常规计算方法与共同作用方法的计算差异。计算结果表明, 考虑共同作用时, 筏板最大应力小于常规设计, 并且位置由筏板中部向筏板边缘发生移动。当地基土含水率在增加到最优含水率时, 在筏板外边缘出现局部弯曲变形, 产生应力集中现象。当超过最优含水率时, 随地基土含水率增大, 基底反力向周围扩散, 筏板应力分布较为均匀。

关键词: 筏板基础应力; 共同作用; 粉土地基; 有限元分析

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S1-0462-06

作者简介: 张 曼(1988-), 女, 河南滑县人, 硕士研究生, 主要从事岩土结构有限元分析。E-mail: zhangmanzxcv@163.com。

FEM analysis of interaction between upper structure and raft foundation in silty ground

ZHANG Man¹, ZENG Chang-nü¹, TIAN Wen-li^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. HuaYou Architecture

Design Institute of Zhengzhou Branch, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The interaction between upper structure and raft foundation in silty ground is analyzed based on the special silty ground in Zhengzhou using ABAQUS. The effects of upper structure, construction stage and content of the silty soil on the interaction are considered. The differences between the conventional method and the combination method are compared. The results show that when considering the interaction the maximum stress of raft is less than that of the conventional design, and it will move from the center to the edge of raft. When increasing the water content of silty soil to its optimum water content, local bending and stress-concentrated phenomena will occur at the edge of raft foundation. While the water content exceeds the optimum water content, the base reaction force spreads around and the stress becomes uniform.

Key words: stress of raft foundation; interaction; silty ground; FEM

0 引言

在工程运用中, 筏板基础具有承载力高、整体性好、刚度大、造价较低等优点。对筏板基础的设计计算研究也开展较多, 许多国内外专家学者采用不同的方法对筏板基础的特性进行了研究, 并取得了一些成果, 积累了宝贵经验。已有成果表明, 上部结构与基础地基的共同作用对筏板应力有很大影响^[1-2], 但对于这种影响在粉土地区上研究的开展还需深入。

郑州地处黄河中下游, 拥有大量的粉土。粉土是一类特殊的土质, 介于砂土和黏土之间, 强度和变形特性都比较特殊。当粉土含水率较小时, 强度较高, 压缩性小, 一旦遇水后, 强度降低较多, 压缩性较大。因此, 粉土具有较不稳定的工程性质。郑州西区地下水位较低, 很多小高层建筑直接采用筏板基础即能满足

足设计要求, 大大降低了工程造价, 但是需要进一步分析共同作用下筏板基础与粉土的共同作用机理。

共同作用概念是 1947 年 Meyerhof^[3]首先提出的。共同作用方法将上部结构、基础和地基三者应看成一个整体, 并满足地基、基础与上部结构三者之间的内力平衡与变形协调, 从整体的角度出发研究结构内力及位移变化。通过大量的数值模拟^[4-5]及现场试验^[6], 研究者发现共同作用方法可有效解决常规设计中的不足, 能较真实反映结构实际工作状态, 从而使结构设计得到优化也更趋合理。

本文以郑州豫花园实际工程为例, 采用 ABAQUS

数值模拟方法, 在考虑共同作用情况下分别对上部结构、上部结构的分层施工及粉土含水率变化对筏板应力的影响进行了研究。

1 计算模型的建立

1.1 工程概况

郑州市豫花园小区 28 号高层住宅楼: 工程地下 1 层, 地上 20 层, 均采用钢筋混凝土剪力墙结构, 地下室层高 4.2 m, 底层层高 3.9 m, 标准层层高 3.3 m。混凝土强度等级 C35, 弹性模量为 3.15×10^4 MPa, 泊松比 0.2, 筏板厚度为 1 m, 悬挑宽度为 0.9 m, 基础采用天然地基筏板基础, 筏板基础平面图如图 1 所示, 地基模型尺寸为 60 m×50 m×25 m。土层分布如下: 第①层, 杂填土, 层厚 0.50~8.00 m, 平均 1.80 m; 第①-1 层, 素填土, 厚度 0.00~3.10 m, 平均 1.21 m; 第②层, 粉土, 厚度 0.00~5.50 m, 平均 3.19 m; 第③层, 粉土, 厚度 0.90~3.30 m, 平均 2.00 m; 第④层, 粉土, 厚度 1.00~5.10 m, 平均 3.25 m; 第⑤层, 粉土, 厚度 0.00~3.50 m, 平均 1.32 m。根据地基持力层以粉土为主及影响深度确定地基模型取第③、④、⑤层土分析。

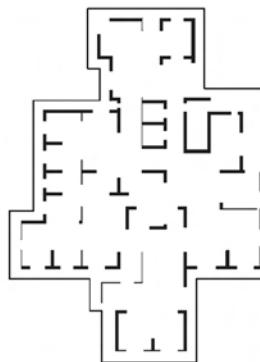


图 1 筏板基础平面图

Fig. 1 Plan of raft foundation

1.2 地基模型

考虑上部结构与基础地基共同作用的整体计算, 地基模型的选取十分重要, 合理的选择地基模型, 尽可能真实的反应地基土的实际性能, 对整个结构的受力及变形有显著影响。

扩展 D-P 弹塑性地基模型能很好地反映粉土的应力应变关系^[7], 其破坏面是 M-C 模型六边形锥体的内切圆锥, 可合理反映粉土的应力应变关系, 并有效解决有限元计算中 M-C 模型中奇异点难以收敛等问题, 同时, 还可考虑粉土的剪胀性、硬化规律, 物理意义明确, 所需参数少, 较容易确定, 理论计算结果与工程实测结果吻合较好, 故本文选用扩展 D-P 弹塑性计

算模型作为地基模型研究共同作用。具体模型参数取值如表 1 所示。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

层数	密度 /(g·cm ⁻³)	弹性模 量/MPa	摩擦角 /(°)	泊松 比	黏聚力 /kPa
3 层	1.76	12.5	14.9	0.35	27.9
4 层	1.83	19.1	19.0	0.35	17.2
5 层	1.85	25.1	28.8	0.35	48.6

1.3 上部结构模型

混凝土的本构模型主要包括弹性变形和塑性变形, 弹性本构适用于混凝土受荷的初始阶段。当混凝土的力学行为出现非线性时应采用塑性本构, 非线性弹性行为导致应力应变的非线性是次要的, 应力应变的非线性和非线性的不可逆影响是由于损伤导致^[8], 所以采用混凝土损伤模型能很好的描述混凝土材料的应变软化、刚度退化以及恢复等性能^[9]。本文选用混凝土损伤模型描述混凝土受力过程。

1.4 两种模型的对比

共同作用计算模型(图 2)是将上部结构、筏板与地基整体建立模型, 考虑结构部位之间的内力平衡与位移协调。常规计算模型(图 3), 是将结构各部位分离计算, 其只考虑部位之间的受力平衡, 不考虑位移协调, 即将计算出的支座反力作用到筏板上, 不考虑上部结构刚度的影响, 将结构底部用固定端约束, 计算结构底部内力, 并施加到筏板基础上, 计算筏板及地基的内力与变形。

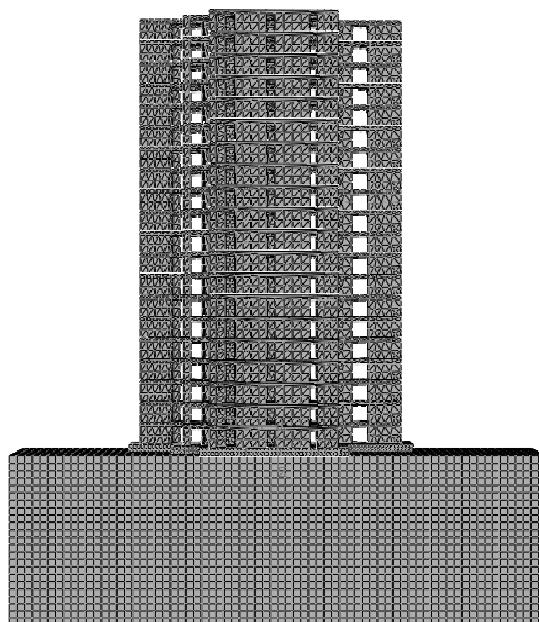


图 2 考虑共同作用计算模型

Fig. 2 Calculation model considering interaction

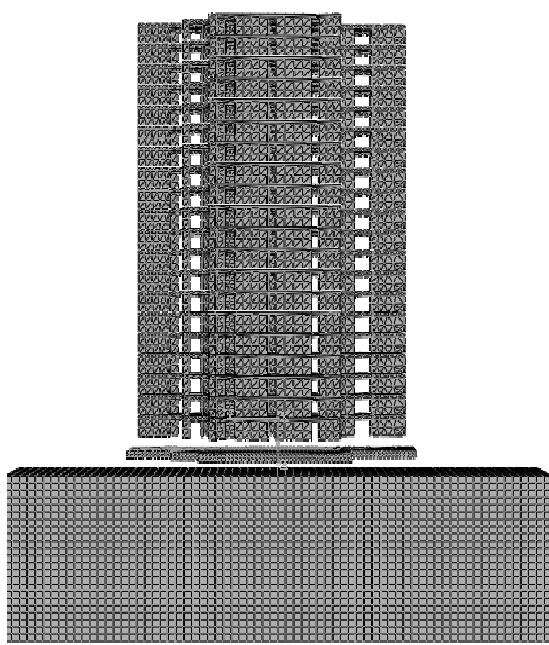


图 3 常规设计方法计算模型

Fig. 3 Calculation model for conventional design

2 两种模型对比研究

2.1 筏板应力对比分析

共同作用设计方法与常规设计方法的筏板应力计算结果分别如图 4, 5。由图可知, 共同作用设计方法的筏板应力比常规设计方法的小。由图得表 2。

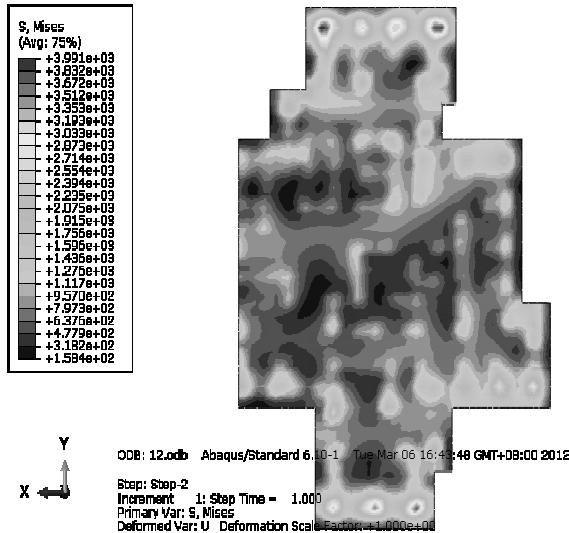


图 4 考虑共同作用时筏板应力云图

Fig. 4 Raft stress considering interaction

由表 2 可以得出: 在常规设计作用下筏板最大主应力是考虑共同作用时的 2.7 倍, 最小主应力则达到 9.1 倍。由此可知, 当采用共同作用设计方法时, 上部结构对筏板应力有显著作用, 当采用常规设计方法时,

由于没有考虑这种作用, 使设计偏于保守。

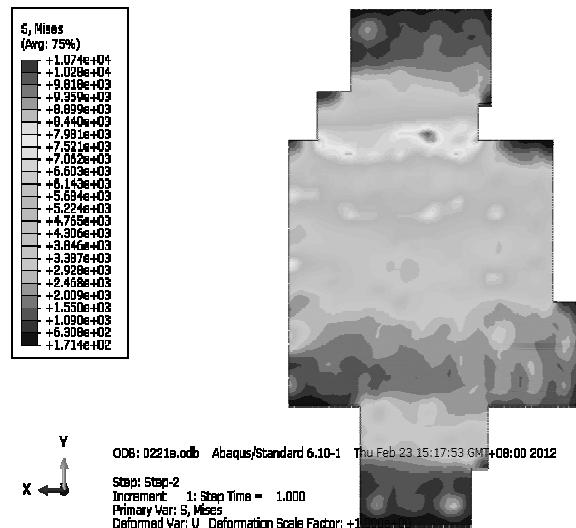


图 5 常规设计时筏板应力云图

Fig. 5 Raft stress of conventional design

表 2 筏板应力结果比较

Table 2 Comparison calculated stresses of raft foundation

参数	最大主应力/MPa	最小主应力/MPa
共同作用	3.91	0.15
常规设计	10.7	1.37

2.2 上部结构逐层施工对筏板应力影响分析

本文分别模拟当上部结构施工 0, 4, 8, 12, 16, 20 层时的筏板应力大小及分布情况。选施工到 0, 4, 8, 20 层的筏板应力云图分别如图 6~9 所示。

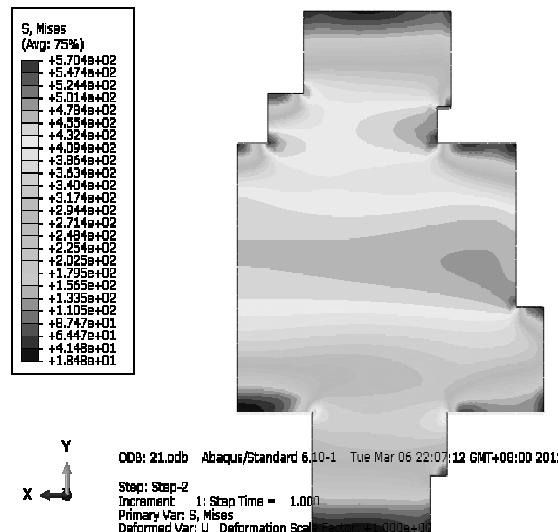


图 6 0 层时筏板应力分布云图

Fig. 6 Raft stress with zero floor

表 3 反应施工到不同层数的筏板应力, 可以看出, 当上部结构为 0 层时, 上部结构刚度较小, 对筏板的调节作用较弱, 筏板出现柔性变形, 内力分布受上部结构荷载影响较大, 以局部弯曲为主, 在筏板中部产

生较大的弯曲应力。当上部结构层数增加到 4 层时, 上部结构刚度对筏板的调节作用增强。筏板应力由中部向边缘移动, 边缘应力增加速度较快。结构超过 8 层时, 上部结构刚度作用基本发挥, 内力转移到筏板外边缘, 因此, 使得底层筏板边缘部位主应力较大, 随着层数增加, 这种现象更为明显。

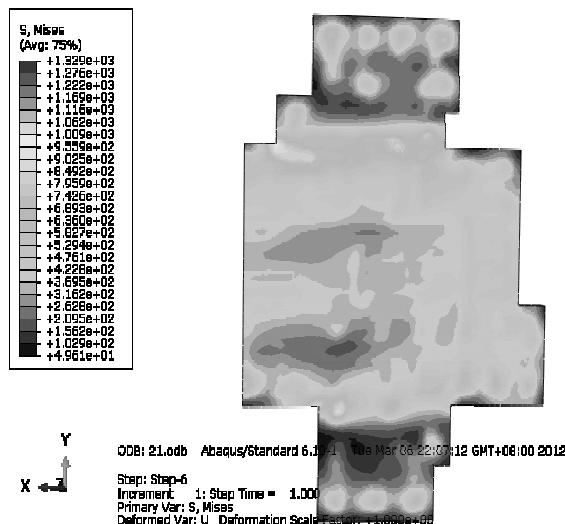


图 7 4 层时筏板应力分布云图

Fig. 7 Raft stress with four floors

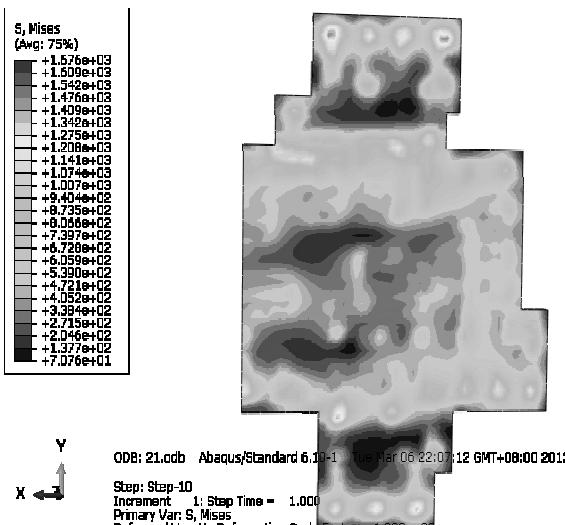


图 8 8 层时筏板应力分布云图

Fig. 8 Raft stress with eight floors

表 3 施工到不同层数下的筏板应力

Table 3 Raft stresses under different floors

应力	边缘/MPa	中部/MPa
0 层	0.06	0.46 (最大)
4 层	1.24	1.17
8 层	1.09	0.14 (最小)
20 层	3.79	0.25 (最小)

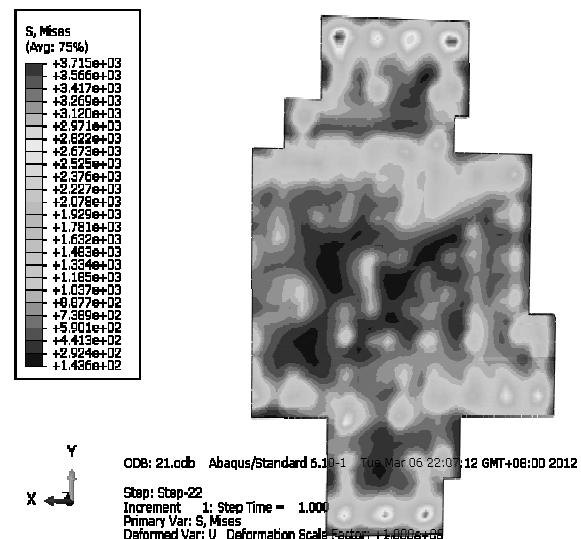


图 9 20 层时筏板应力分布云图

Fig. 9 Raft stress with twenty floors

上部结构刚度对筏板主应力影响较大。筏板的主应力是由筏板的弯曲应力与上部结构的压应力组成, 当结构较低时, 筏板的有效刚度较小, 表现为柔性变形, 以局部弯曲为主, 使得筏板局部弯曲较大的中部出现最大主应力; 当结构层数增加, 筏板有效刚度增大, 表现为刚性变形, 以整体弯曲为主, 筏板外边缘所承受的压应力增大, 中部所承受的弯曲应力减小, 使得筏板中部与边部的主应力都较大; 当结构层数超过 8 层时, 上部结构刚度对筏板的调节作用减小, 筏板的有效刚度不变, 在筏板边部产生的压应力较大, 使得筏板的主应力集中在筏板外边缘。

2.3 粉土含水率对筏板应力影响分析

粉土遇水软化过程中, 土体黏聚力、内摩擦角和变形模量随含水率增加而增大, 当土体含水率超过最优含水率后, 地基土的黏聚力、内摩擦角和变形模量随含水率增大而减小。由于 ABAQUS 不能模拟非饱和土体模型。在本文中根据文献[10]中含水率与地基土的变形模量、黏聚力、内摩擦角的关系, 分别推断出含水率为 15%, 17%, 18%, 19% 时的模型参数, 从而进行模拟分析。

粉土含水率的不同直接影响地基土的强度、刚度, 进而影响筏板应力的大小及分布, 图 10 显示了当含水率为 15% 时考虑共同作用的筏板应力分布云图。

表 4 不同粉土含水率下筏板应力

Table 4 Raft stresses under different water contents of silty soil

含水率/%	最大应力/MPa	最小应力/MPa
15	3.950	0.165
17	3.990	0.158
18	3.900	0.163
19	3.840	0.135

表 4 反应了含水率不同时的筏板应力, 表明当粉土含水率为 15% 时, 地基土刚度较大, 对筏板产生挤

压作用, 筏板外缘出现局部弯曲, 形成弯曲应力; 当含水率为 17% 时, 地基土刚度增大, 对筏板挤压作用增强, 筏板外边缘压应力增大, 筏板内部主应力波动较大; 当含水率达到 18% 时, 粉土软化, 地基土刚度减小, 对筏板外缘挤压减小, 筏板以整体弯曲为主; 当含水率达到 19% 时, 地基土刚度较小, 不能与筏板形成有效的挤压, 地基土产生较大的位移, 在筏板内部产生的次生应力较小, 筏板应力分布较为均匀。

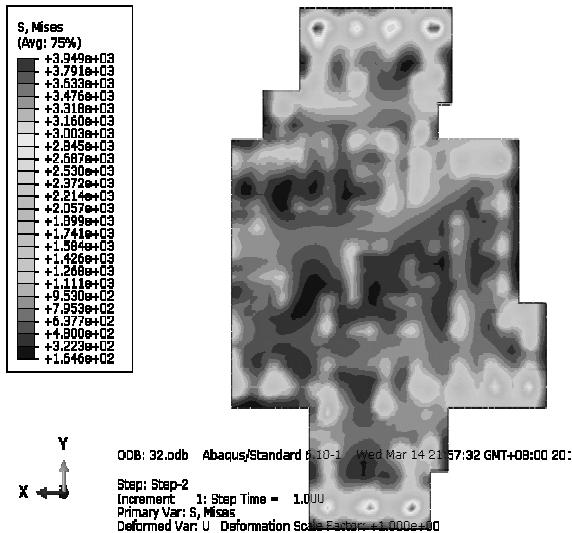


图 10 含水率为 15% 时筏板应力云图

Fig. 10 Raft stress under water content of 15%

2.4 筏板厚度对筏板应力的影响分析

图 11, 12 分别为随筏板厚度为 1 m、2 m 时筏板主应力变化云图。

表 5 反映了不同厚度下的筏板应力变化, 当筏板厚度为 0.5 m 时, 筏板较薄, 自身的架越作用较弱, 上部结构对筏板影响较大, 上部结构内力向筏板边缘转移明显, 筏板内部主应力波动较大; 当板厚为 1 m、1.5 m 时, 由于随筏板厚度增加, 筏板有效刚度变大, 缓解了上部结构内力影响, 使上部结构内力向边部剪力墙集中的趋势减缓, 可有效减小局部应力在筏板边缘集中, 使筏板内部主应力分布平缓; 当筏板厚度为 2.0 m, 筏板刚度在调节上部荷载时产生较大的次生应力, 反而使筏板内部主应力波动更大。

表 5 不同筏板厚度下筏板应力

Table 5 Raft stresses of rafts with different thicknesses

筏板厚度/m	最大应力/MPa	最小应力/MPa
0.5	12.00	0.41
1.0	3.94	0.11
1.5	2.56	0.11
2.0	15.0	0.32

筏板刚度既对上部结构内力分布有影响, 又能调节上部结构荷载的传递。随着筏板厚度增大, 筏板刚度的增强, 内部弯曲应力减小, 但当筏板厚度超过某一厚度时, 筏板内部会产生较大的次生应力。因此,

在考虑共同作用设计筏板时, 不能盲目的增加筏板厚度。

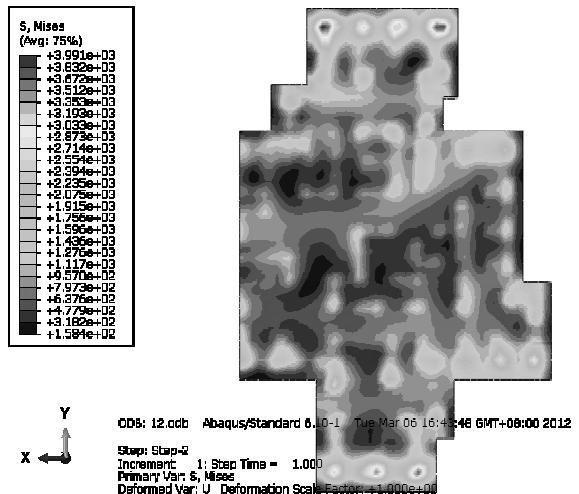


图 11 1.0 m 厚筏板应力

Fig. 11 Raft stress of rafts with thickness of 1.0 m

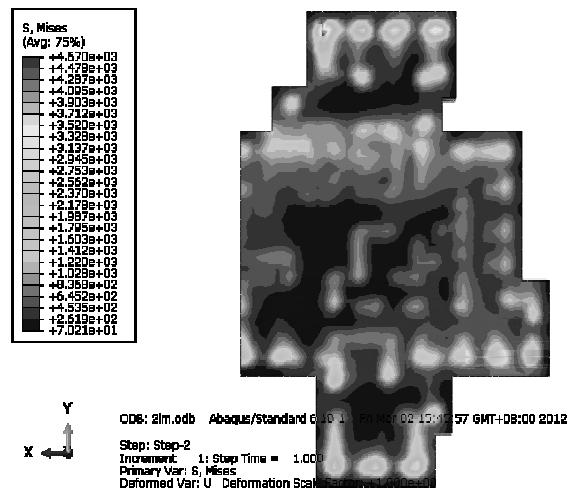


图 12 2.0 m 厚筏板应力

Fig. 12 Raft stress of rafts with thickness of 2.0 m

3 结 论

(1) 上部结构刚度对筏板的内力分布具有调节作用。常规设计时筏板最大主应力是考虑共同作用时的 2.7 倍, 因此, 考虑共同作用将使设计更合理。上部结构刚度对结构共同作用的影响有限。随着上部结构刚度增大, 当上部结构达到 8 层时, 上部结构层数对筏板应力调节作用减弱。共同作用下筏板应力主要集中在筏板边缘部位, 且分布较均匀, 常规设计时, 筏板内力主要集中在筏板中部, 且应力波动较大。

(2) 随着地基土含水率增加到最优含水率, 地基对筏板的挤压作用增大, 在筏板外边缘出现局部弯曲变形, 使局部主应力集中现象严重; 含水率继续增大, 地基土不能向筏板提供足够大的承载力, 基底反力向

地基土周围扩散, 使得边部基底反力减小, 中部基底反力增大, 分布曲线较为均匀。

(3) 筏板刚度影响上部结构内力的分布和传递, 随着筏板厚度增加到最优筏板刚度, 上部结构对筏板应力影响变小, 减缓了筏板应力集中, 筏板应力波动减缓, 随着筏板厚度继续增大, 筏板内部将产生较大的次生应力, 筏板应力波动变大。

参考文献:

- [1] 石 坚, 武 莹, 贺建辉. 上部结构、筏板基础和地基共同作用的有限元分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, **23**(2): 72 - 75. (SHI Jian, WU Ying, HI Jian-hui. FEA on interaction of super structure, raft foundation and ground base[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, **23**(2): 72 - 75. (in Chinese))
- [2] 朱杰江, 蔡 海. 土—桩—筏共同作用的混合分析法[J]. 地下空间与工程学报, 2009, **5**(6): 1151 - 1154. (ZHU Jie-jiang, CAI Hai. A hybrid analytical method for soil-pile-raft interaction[J]. Chinese Joual Of Underground Space and Engineering, 2009, **5**(6): 1151 - 1154. (in Chinese))
- [3] MEYERHOF G G. Some recent foundation research and its application to design[J]. The Structural Engineer, 1953, **31**: 151 - 167.
- [4] CHRISTIAN J T. Soil structure-interaction for tall buildings[J]. Planning and Design of Tall Buildings Lehigh U, 1972, **1**(1a): 967 - 983.
- [5] PRICE G, WARDLE I F. Queen Elizabeth II conference center monitoring of loading shearing between piles and raft[J]. Proc ICE, 1986, **80**(1): 1505 - 1518.
- [6] 张继成, 刘 飞. 上部结构与土体共同作用的影响因素[J]. 武汉工程大学学报, 2010, **32**(3): 62 - 68. (ZHANG Ji-cheng, LIU Fei. Study on influence factor of superstructure and subsoil interaction effect[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2010, **32**(3): 62 - 68. (in Chinese))
- [7] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1996. (QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Geotechnical principle and calculation[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996. (in Chinese))
- [8] 姜锡权, 方 秦. 混凝土本构描述的几个问题探讨[J]. 工程兵工程学院学报, 1999, **14**: 1 - 5. (JIANG Xi-quan, FANG Qin. Discussion on several problems of concrete constitutions[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 1999, **14**: 1 - 5. (in Chinese))
- [9] LEE J, FENVES G L. A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams[J]. Earthquake Engineering And Structural Dynamics, 1998, **27**(9): 937 - 956.
- [10] 罗 涛, 张训忠. 基于不同含水率粉土的邓肯-张模型参数试验研究[J]. 建筑科学, 2011, **11**(27): 44 - 48. (LUO Tao, ZHANG Xun-zhong. Test study on parameters of Duncan-Chang model for silt based on different water capacities[J]. Building Science, 2011, **11**(27): 44 - 48. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)