

文章编号:1673-2049(2006)02-0072-04

上部结构、筏板基础和地基共同作用的有限元分析

石 坚,武 莹,贺建辉

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:考虑上部结构、筏板基础和地基的共同作用,运用 ANSYS 有限元计算方法,通过上部结构、筏板基础和地基之间在连接点处的静力平衡和变形协调条件,分析了上部结构对筏板基础变形、内力影响以及筏板基础对上部结构变形、内力的影响,探讨了共同作用的影响规律。计算结果表明,考虑共同作用时,上部结构承担了部分筏板基础荷载,使筏板基础内力、变形减小;考虑筏板基础的刚度时,由于整体弯曲的作用,使上部结构的应力产生重分布,梁产生了附加弯曲应力,增大了上部结构的内力,因此在工程设计中应考虑共同作用的影响,使工程更安全、更经济。

关键词:筏板基础;地基;共同作用;有限元分析

中图分类号:TU471.15

文献标志码:A

FEA on Interaction of Super Structure, Raft Foundation and Ground Base

SHI Jian, WU Ying, HE Jian-hui

(School of Architectural Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: Considering the interaction of super structure, raft foundation and ground base by using the calculation method of ANSYS procedure and the condition of the stationary balance of the linked point between super structure, raft foundation and the distortion harmony condition, the effects of super structure stiffness on the stress, strain of the raft foundation, and effects of raft foundation on the stress and strain of super structure were analyzed; the influence regularity of the interaction was discussed. Results show that when considering the interaction, super structure bears some load of raft foundation and reduces the stress and strain, however, when considering the stiffness of the raft foundation, because of whole bending, super structure stress is re-distributed; the added flexural stress is produced in beams, and the stress of super structure is increased. To make the projects more security and economical, the effects of interaction should be taken into consideration in the engineering design.

Key words: raft foundation; ground base; interaction; FEA

0 引言

在实际工程中,筏板基础具有承载力高、整体性好、刚度大等特点,目前在高层建筑结构中得到了广泛的应用,因此,对于筏板基础的设计计算已成为基础工程关注的课题之一。近年来,各国学者采用不

同手段对筏板基础的特性进行了研究,并取得了一些成果,但是这些成果大都局限于研究筏板基础与地基的共同作用方面。笔者根据上部结构、筏板基础和地基共同作用的实际情况,利用空间杆件结构的有限元对上部结构进行分析,再应用于结构凝聚技术将上部结构的有限元和弹性地基上筏板基础的

有限元耦合。通过 ANSYS 有限元计算,分析上部结构、筏板基础及地基的共同作用,并探讨共同作用的一些规律。

1 计算模型

考虑上部结构、筏板基础和地基相互之间共同作用的设计方法的基本原则是要求上部结构、基础和地基相互之间在连接点处不仅要满足静力平衡条件,而且必须满足变形协调条件,因此共同作用理论的核心问题是基础与地基接触面的反力计算^[1-4],笔者用空间子结构法解决。如图 1 所示,将整个结构分成 4 个子结构,以 I、II、III 和 IV 表示;子结构的边界有 4 个,用①、②、③和④表示。采用逐次消元法,依次逐个进行消元,直至上部结构刚度和荷载全部凝聚到基础上[图 1(d)]。此时子结构 IV 为以考虑上部结构效应的基础。根据图 1(d),写出子结构 IV 的平衡方程

$$(\mathbf{K}_F + \mathbf{K}_{b,III'})\mathbf{U}_{IV'} = \mathbf{S}_{b,III'} - \mathbf{R} \quad (1)$$

式中: \mathbf{K}_F 为子结构 IV 的刚度矩阵; $\mathbf{K}_{b,III'}$ 为上部结构的等效边界刚度矩阵; $\mathbf{U}_{IV'}$ 为子结构 IV 的广义变形列向量; $\mathbf{S}_{b,III'}$ 为上部结构的等效边界荷载列向量; \mathbf{R} 为基底反压力列向量。

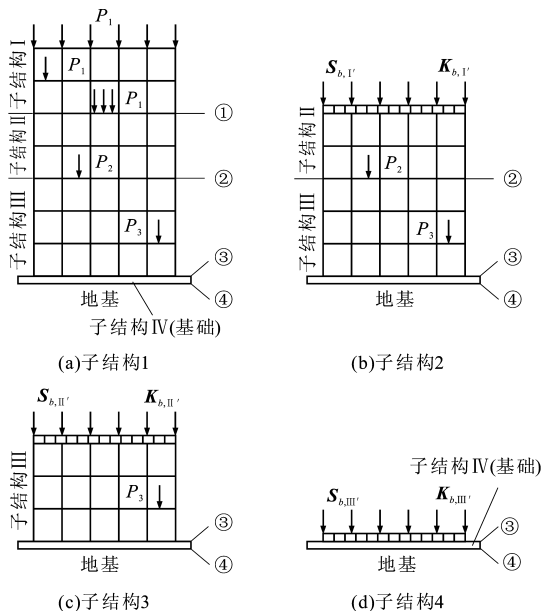


图 1 子结构分析法

Fig. 1 Sub-structure Analysis Method

至此可以把总共有 m 个子结构的结构体系在其第 i 个结构时($m > i$)的平衡方程表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_i^{(i)} + \mathbf{K}_b^{(i-1)} & \mathbf{K}_{ib}^{(i)} \\ \mathbf{K}_{bi}^{(i)} & \mathbf{K}_{bb}^{(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_i^{(i)} \\ \mathbf{U}_b^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_i^{(i)} + \mathbf{S}_b^{(i-1)} \\ \mathbf{P}_b^{(i)} - \mathbf{R}_b^{(i)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{K}_b^{(i-1)}$ 为在 $i-1$ 个子结构底部边界节点上的

凝聚等效边界刚度矩阵; $\mathbf{S}_b^{(i-1)}$ 为相应的等效边界荷载列向量; $\mathbf{P}_i^{(i)}$ 为内节点的荷载列向量; $\mathbf{P}_b^{(i)}$ 为边界节点的荷载列向量; $\mathbf{R}_b^{(i)}$ 为在 i 个子结构时边界节点的反力列向量;当 $i=m$ 时的 $\mathbf{R}_b^{(m)}$ 即为基底的列向量,整个 m 子结构的平衡方程为

$$\mathbf{K}_b^{(m)}\mathbf{U}_b^{(m)} = \mathbf{S}_b^{(m)} - \mathbf{R}_b^{(m)} \quad (3)$$

式(3)可简写为

$$\mathbf{K}_b\mathbf{U}_b = \mathbf{S}_b - \mathbf{R} \quad (4)$$

式中: \mathbf{K}_b 、 \mathbf{S}_b 分别为整个结构(包括基础)对基底接触面边界节点的等效刚度和等效荷载列向量; \mathbf{U}_b 为相应的边界节点位移列向量。

因为基础的边界位移列向量 \mathbf{U}_b 应该和地基的变形 \mathbf{S} 相等,所以对于确定的地基模型,地基的变形 \mathbf{S} 和地基反力 \mathbf{R} 可以建立确定的关系,利用接触面的变形协调条件 $\mathbf{U}_b = \mathbf{S}$,这样式(4)就只有一个未知数,即可求解。

本文中地基采用层状横向各向同性模型,假定筏板为弹性板,地基基础均采用 Solid45 号 8 节点实体单元,地基边界约束条件选取如下:侧向边界取为竖向滑动支座,即水平方向约束,竖向允许有位移;下边界取为固端约束,即水平方向和垂直方向均不允许有位移。板柱间设接触单元,不考虑柱截面的尺寸效应。

2 算例及计算结果

算例为一个 3×4 跨的 10 层框架,跨度为 6 m,层高三.4 m,梁截面尺寸为 $0.25 \text{ m} \times 0.50 \text{ m}$,柱截面尺寸为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$,结构承受的均布荷载 $q=12 \text{ kPa}$,其共同作用计算模型与框架结构的柱网及筏板基础平面如图 2、3 所示,筏板采用 C20 混凝土,泊松比 $\mu=0.3$,弹性模量 $E=2.8 \times 10^7 \text{ kPa}$,筏板基础厚度为 1.2 m;地基采用层状横向各向同性模型,地基各层的厚度 h 及各参数为:第一层, $h=8 \text{ m}$, $E_v=E_{ch}=15 \text{ MPa}$, $\mu_v=\mu_{ch}=0.25$, $G_v=12 \text{ MPa}$;第二层, $h=8 \text{ m}$, $E_v=E_{ch}=9 \text{ MPa}$, $\mu_v=\mu_{ch}=0.25$, $G_v=7.2 \text{ MPa}$;第三层, $h=8 \text{ m}$, $E_v=E_{ch}=15 \text{ MPa}$, $\mu_v=\mu_{ch}=0.25$, $G_v=12 \text{ MPa}$ 。

为分析共同作用的影响,计算方案选择如下:

(1)不考虑上部结构刚度时,计算筏板的变形、内力。

(2)考虑上部结构刚度时,计算筏板的变形、内力。

(3)不考虑基础刚度时,计算上部结构的变形、内力。

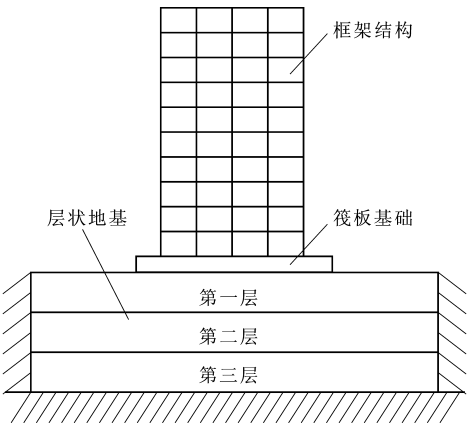


图 2 上部结构、筏板基础和地基共同作用计算模型

Fig. 2 Calculation Model of Interaction of Super Structure, Raft Foundation and Ground Base

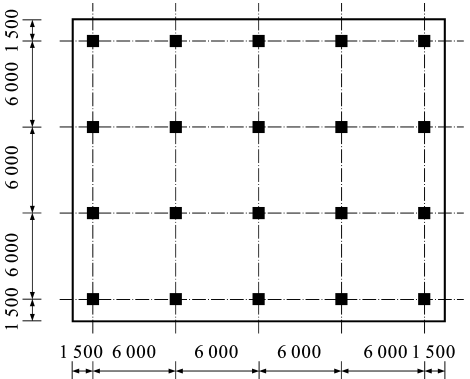


图 3 柱网及筏板基础平面 (单位: mm)

Fig. 3 Plan of Column Net and Raft Foundation (Unit: mm)

(4)考虑基础刚度时,计算上部结构的变形、内力。

2.1 上部结构刚度对筏板变形、内力的影响

考虑共同作用与不考虑共同作用筏板的变形、内力计算结果见图 4、5。由图 4、5 可知,不考虑共同作用时筏板的主应力、主应变均比考虑共同作用时的大。根据图 4、5 整理得表 1。

表 1 筏板计算结果比较

Tab. 1 Comparison of Raft Foundation Calculation Result

参 数	考虑共同作用	不考虑共同作用
最大主应变	9.36×10^{-5}	13.70×10^{-5}
最大主应力/Pa	2.85×10^6	3.16×10^6

由表 1 可知,筏板的最大主应变峰值,不考虑共同作用时比考虑共同作用时增大 46%,最大主应力相应地增大了 27%,这说明考虑共同作用时,上部结构分担了筏板的荷载,因此在常规设计中,不考虑共同作用来设计筏板基础是偏于保守的^[5-6]。

2.2 基础刚度对上部结构变形、内力的影响

当筏板厚度为 1.2 m 时,考虑共同作用计算的

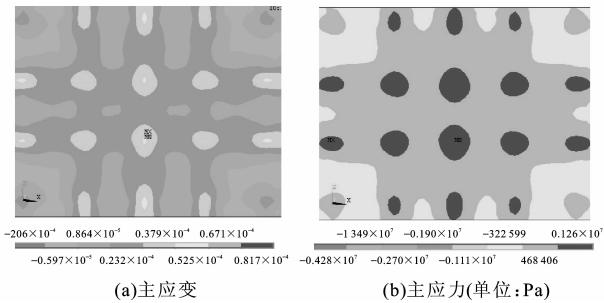


图 4 考虑共同作用时筏板的主应变、主应力

Fig. 4 Main Stress and Strain of Raft Foundation Considering Interaction

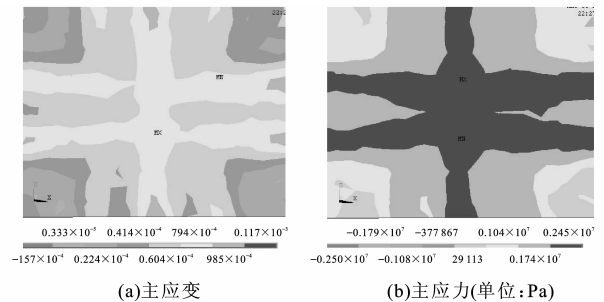


图 5 不考虑共同作用时筏板的主应变、主应力

Fig. 5 Main Stress and Strain of Raft Foundation Without Considering Interaction

上部结构内力与用常规法(沿框架柱脚切断,将上部结构视为柱底固定的结构,计算上部结构内力)计算的结果见表 2,表 2 中的梁柱编号如图 6 所示。

	519	520	521	522	
475	479	483	470	487	491
424	417	428	418	432	440
373	366	377	367	381	389
322	315	326	316	330	338
271	264	275	265	279	287
220	213	224	214	228	236
169	162	173	163	177	185
118	111	122	112	126	134
67	47	71	48	75	83
4	8	11		15	19

图 6 上部结构梁柱单元编号

Fig. 6 Number of Beam-Column Unit of Super Structure

表 2 为考虑共同作用(有限元法)与不考虑共同作用(常规算法)的峰值应力的计算结果。由表 2 可知,考虑共同作用时,由于筏板参与共同作用使柱主应力明显减小,且其影响随中柱距离的增大而减小,如编号为 4 的边柱考虑共同作用计算的压应力值比

常规算法计算的值减小了 10.7%,编号为 11 的中柱的压应力减小了 54%,框架梁则反之。由于筏板基础产生整体弯曲,使得上部结果发生应力重分布,对梁产生的附加弯曲作用增大了梁的弯曲应力,而

其影响随层高的增大而减小,如 520 号梁考虑共同作用的应力值是常规法应力值的1.8 倍。

由上述分析可知,基础刚度对上部结构的影响是十分明显的,在实际计算中应考虑这种影响。

表 2 上部结构局部单元梁弯曲应力及柱压应力峰值

Tab.2 Maximum Value of Beams Bending Stress and Columns Stress of Part Unit of Super Structure

Pa

梁柱编号	4	8	11	15	19	47	48	49	50
考虑共同作用	-3.10×10^6	-3.04×10^6	-2.96×10^6	-3.05×10^6	-3.12×10^6	2.34×10^4	3.96×10^4	3.95×10^4	2.32×10^4
不考虑共同作用	-3.47×10^6	-6.22×10^6	-6.44×10^6	-6.22×10^6	-3.47×10^6	0.30×10^4	0.65×10^4	0.65×10^4	0.30×10^4
梁柱编号	475	479	483	487	491	519	520	521	522
考虑共同作用	-2.92×10^5	-3.02×10^5	-2.94×10^5	-3.03×10^5	-2.94×10^5	-6.30×10^4	-9.91×10^4	-9.91×10^4	-6.30×10^4
不考虑共同作用	-3.57×10^5	-6.24×10^5	-6.58×10^5	-6.24×10^5	-3.57×10^5	-2.56×10^4	-5.39×10^4	-5.39×10^4	-2.56×10^4

注:负号代表受压。

3 结 语

(1)上部结构的刚度对筏板基础有明显影响。当考虑上部结构的刚度时,上部结构分担了筏板基础的荷载,使筏板基础主应力、主应变明显减小。就本研究而言,不考虑共同作用时,筏板最大主应力、主应变分别增大了 27%和 46%,因此在基础设计中应考虑上部结构的作用,使设计更趋合理,充分发挥基础材料的作用。

(2)基础刚度对上部结构也有明显影响。由于筏板基础的整体弯曲,使上部结构应力产生重分布,增大了其内力,尤其是使梁产生附加弯曲应力,因此常规设计对上部结构是偏于不安全的,在设计时应考虑共同作用的影响,以保证上部结构的安全。

参考文献:

References:

[1] 武 莹. 上部结构-筏板基础-地基共同作用的有限元分析[D]. 西安:长安大学,2004.
WU Ying. The FEA on Interaction of Super Structure Raft Foundation and Ground Base[D]. Xi'an:Chang'an University,2004.

[2] 刘 杰,张可能. 复合地基荷载传递规律及变形计算[J]. 中国公路学报,2004,17(1):20-24.
LIU Jie, ZHANG Ke-neng. Load Transfer Law and Deformation Calculating of the Composite Foundation

[J]. China Journal of Highway and Transport,2004,17(1):20-24.

[3] 冯瑞玲,谢永利,方 磊. 柔性基础下复合地基的数值分析[J]. 中国公路学报,2003,16(1):40-42.
FENG Rui-ling, XIE Yong-li, FANG Lei. Numerical Analysis of the Composite Ground Under the Flexible Foundation[J]. China Journal of Highway and Transport,2003,16(1):40-42.

[4] 石小平,姚祖康. TIacTepHax 基础上四边自由矩形厚板的解[J]. 同济大学学报:自然科学版,1989,17(2):173-184.
SHI Xiao-ping, YAO Zu-kang. The Solution of a Rectangular Thick Plate with Free Edges on a TIacTepHax Foundation[J]. Journal of Tongji University: Natural Science,1989,17(2):173-184.

[5] 宋启根,林 祥,徐 培. 双参数地基 Reissner 板局部荷载解[J]. 岩土工程学报,1993,15(5):48-58.
SONG Qi-gen, LIN Xiang, XU Pei. Solution of Reissner Thick Plates on Double-Parameter Foundation Under Local Load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1993,15(5):48-58.

[6] 吴 波. 弹性地基上不规则厚板的荷载应力分析[J]. 重庆交通学院学报,1992,11(4):1-9.
WU Bo. Stress Analysis of Nonregular Thick Plates on Elastic Foundations[J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute,1992,11(4):1-9.