

文章编号:1674-2869(2010)03-0062-07

上部结构与土体共同作用的影响因素

张继承¹, 刘飞²

(1. 长江大学城市建设学院, 湖北 荆州 434023; 2. 北京市建筑设计研究院, 北京 100045)

摘要:采用通用有限元软件 ANSYS, 建立了框架结构、筏基和土体共同作用的分析模型, 分析了上部结构尺寸、筏板基础刚度、地基土材料对共同作用体系的影响. 通过比较共同作用的分析方法与常规计算方法的结果, 研究了结构体系在外荷载作用下, 各组件之间的内在联系, 得到了地基沉降、反力的分布, 以及基础和上部结构的内力变化规律. 共同作用的分析结果符合工程实际, 最后提出了一些设计建议.

关键词:共同作用; 有限单元法; 地基模型; 基础刚度; 内力重分布

中图分类号: TU470

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2010.03.016

0 引言

高层建筑的常规设计中, 将上部框架看成是柱底固定的独立结构进行计算, 不考虑上部结构、基础和地基之间的共同作用, 与实际结构的受力与变形存在较大差异, 使设计出的结构不安全或不经济. 现在对结构的计算方法已发展到将上部结构、基础和地基三者视为一个完整的体系来计算, 这是共同作用分析方法. 上部结构和地基土之间相互作用和共同工作问题的研究是土木工程中重要的课题之一, 国内外研究已经取得了一定的成果^[1-8], 然而由于问题的复杂性, 共同作用分析作为一种结构设计方法, 其工程实践尚处在初级阶段.

本文结合文献[9]的研究成果, 采用通用有限元软件 ANSYS10, 建立了 9 层框架结构—筏板基础—地基土体系共同作用的分析模型. 通过上部结构尺寸、筏板基础刚度、地基土材料参数的变化, 比较共同作用的分析方法与常规计算方法的结果, 研究上部结构及基础的内力、应力变化规律, 以及地基土反力的空间分布规律, 为改进和提高结构设计的安全、经济性提供依据.

1 分析模型

1.1 四种结构体系

上部结构框架层数较少, 基础刚度不大时, 整个结构体系刚度较弱, 易于发生不均匀沉降, 且不均匀沉降对上部结构的内力重分布影响较大. 本文分析 9 层空间框架—筏基—地基结构体系的共同作用, 建立了四种结构体系: 基准型结构体系、

弱梁型结构体系、板强型结构体系、土硬型结构体系. 根据规范构造要求、实际工程经验确定梁、柱和筏板的尺寸, 形成基准结构型体系; 在基准型体系的基础上, 减少框架梁的截面尺寸, 形成弱梁型结构体系, 了解梁截面刚度在上部结构总刚度中所占的比例及内力重分布规律; 提高筏板混凝土材料的标号, 通过弹性模量的提高来实现基础刚度的提高, 形成板强型结构体系; 提高地基土的硬度, 减少其压缩性, 形成土硬型结构体系. 框架梁、柱和筏板的尺寸、材料见表 1, 结构的平面布置见图 1. 通过对比四种体系的计算结果, 研究上部结构与土体共同作用的影响因素.

表 1 框架结构参数

Table 1 Frame structure parameter

类别	梁/mm $b \times h$	柱/mm $a \times a$	板材料	地基土初始模量 E_i / kPa
基准型	300×600	500×500	C30	5 410
弱梁型	300×300	500×500	C30	5 410
板强型	300×600	500×500	C70	5 410
土硬型	300×600	500×500	C30	13 030

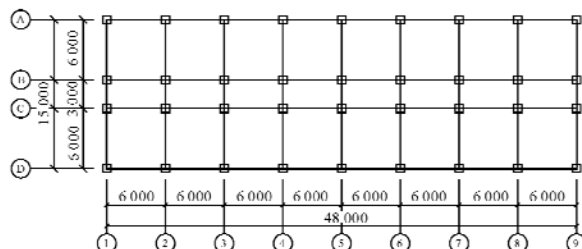


图 1 框架结构平面 (mm)

Fig. 1 Plan of the frame structure

1.2 模型的建立

采用 ANSYS10 建立了数值分析模型, 上部结

收稿日期: 2010-01-05

作者简介: 张继承(1976-), 男, 湖南平江人, 讲师, 博士研究生. 研究方向: 结构抗震.

构的框架梁、柱采用 beam188 单元模拟,梁柱配筋对于结构刚度的增强通过增大混凝土弹性模量的方式来考虑,楼板和筏基选用 shell63 单元模拟,分析时假设框架梁、柱与筏板的材料均为弹性。

土体的力学性能与其受力水平关系密切:在受力水平较低时,可采用线性的力学模型;中等受力水平时,采用非线性模型或弹塑性模型;而在高等受力水平时,土体处于流动或破坏状态。在实际工程中,基础不同部位的土的力学性质不同,总体来说可采用中等受力水平时土体的力学性质。另外,本文主要研究地基变形对上部结构的影响,忽略了固结比、应力途径和主应力方向对土体性质的影响,以及土体的剪胀性能。根据以上各方面的考虑,采用 Duncan-Chang 模型,地基采用单一均匀粘性土,参考上海地区典型土层试验结果的统计分析,本文基准型与土硬型结构体系分别采用褐黄色粘性土与暗绿色粉质粘土。土体的非线性采用多线性等向强化模型来模拟, Duncan 和 Chang 采用双曲线方程模拟三轴试验得到的应力—应变曲线关系:

$$E_t = E_i \frac{R_f (s_1 - s_3)^2}{(s_1 - s_3) f} \quad (1)$$

在该模型中,未将弹性变形与塑性变形区分开来,未能考虑土体的剪胀性,即虎克定律中体积变形与剪应力没有关系。在荷载不太大,即不很靠近破坏条件时,以及荷载单调增加时,可以较好地模拟地基土的非线性应力—应变关系,适用于土体各种变形状态的分析。本实验地基土采用的褐黄色粘土与暗绿色粉质粘土,其材料特性见表 2 所示,两种土体的初始弹性模量分别为 $E_1 = 5\ 410\ \text{kPa}$ 、 $E_2 = 13\ 030\ \text{kPa}$,泊松系数均取 0.25。

表 2 地基土的材料特性

Table 2 Mechanical property of groundfill soil

褐黄色粘土				暗绿色粉质粘土			
ϵ	σ/kPa	ϵ	σ/kPa	ϵ	σ/kPa	ϵ	σ/kPa
0.01	54.10	0.06	138.12	0.01	130.30	0.06	331.95
0.02	85.23	0.07	144.51	0.02	205.12	0.07	347.25
0.03	105.43	0.08	149.71	0.03	253.60	0.08	359.68
0.04	119.59	0.09	154.01	0.04	287.55	0.09	369.97
0.05	130.06	0.10	157.63	0.05	312.65	0.10	378.64

选取适当尺度的有限体积域来代表土体空间,体域的尺度长、宽和高的数值按荷载作用范围选取,以使边界上的位移、反力对计算结果的影响可以忽略。根据规范方法所确定的地基压缩层厚度,取深度 $H = 30\ \text{m}$;在平面上,地基土体从筏板边缘向外延伸一倍的筏板宽度,取长 $a \times$ 宽 $b = 45 \times 80\ \text{m}$ 。建立的整体模型如图 2(b) 中所示。在正

式分析前,对模型进行了试算,以确认土体有限空间域选取的合理性。分析结果表明,在土体的约束边界处,支座反力很小,且土体区域的应力水平很低,说明该处的土体受到共同作用体系的影响已经很小,体域尺度的选取是科学有效的。

模型筏板与土体的作用采用表面接触单元来模拟,一个目标单元和一个接触单元构成一个接触对^[10],分析模型如图 2 所示,图 2(a) 是不考虑共同作用的纯框架模型、图 2(b) 是考虑共同作用的整体结构体系模型。该有限元模型的准确性与合理性,已经在参考文献[9]中得到了验证。除了竖向的恒、活荷载外,考虑抗震设防烈度为 7 度多遇,采用底部剪力法计算框架结构受到的水平地震荷载,施加沿宽度方向呈倒三角形分布的地震荷载。

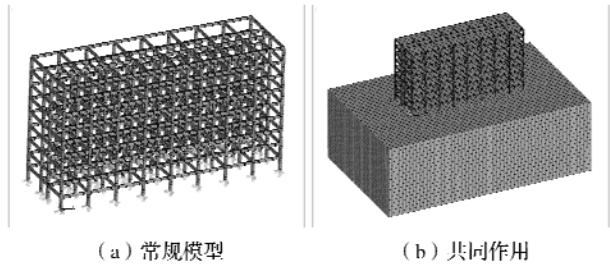


图 2 结构分析模型

Fig. 2 The structure analysis model

2 分析结果

基于以上有限元模型,分别采用两种方法对结构进行了静力分析。常规法:假定框架柱底刚接,分析得到柱脚反力,将此反力传递给筏基,单独分析筏基与地基土的反应。共同作用法:考虑上部结构刚度,将上部结构、筏板基础及地基看作一个整体进行分析。以下从基础沉降、基底反力、筏板内力和上部结构内力重分布四个方面来研究分析的结果。

2.1 基础沉降规律

由于地基土在基础荷载作用下产生压缩变形,使基础产生沉降。不均匀的沉降对建筑物的危害较大,可使建筑物的主体结构中产生附加内力,导致结构开裂甚至局部构件的断裂,危及建筑物的安全。

图 3 中为各类体系的基础沉降变形模式,从图中可以看出均呈现为下凹的盆式沉降。由考虑共同作用与常规方法计算所得四种结构体系的各轴线处的沉降曲线,有着相同的特点。地基刚度不变各类体系计算所得的地基的平均沉降量几乎相等,以 D 轴为例,前三种体系基础的平均沉降约

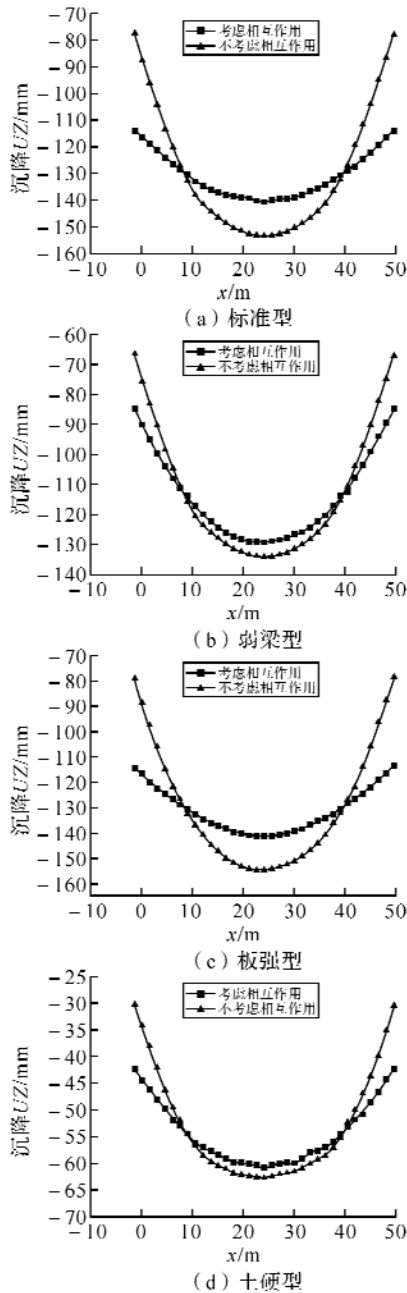


图 3 D 轴基础沉降比较 (mm)

Fig. 3 Comparison of foundation settlement in D axis

为 130 mm, 土硬体系为 54 mm。上部框架结构对基础的不均匀沉降或挠曲有一定的抵抗能力, 考虑上部结构刚度时四种体系的最大沉降差都减小: 基准型结构体系减少 49.1 mm, 弱梁型体系减少 23.3 mm, 土硬型体系减少 13.9 mm, 板强型体系减少 48.9 mm。

对比基准型体系与弱梁型体系, 当梁的截面由 300 mm×600 mm 减小到 300 mm×300 mm 时, 考虑上部结构刚度时的地基最大沉降差由 27 mm 增大到 44.9 mm, 相对增大了 66.3%, 可以看出上部结构对基础不均匀沉降的抵抗能力与框架梁和柱的截面密切相关, 尤其是梁的截面对上部结构的刚度影响较为显著, 当梁截面刚度减小

时, 上部结构的整体刚度随之减少, 所以地基的不均匀沉降加剧; 地基的不均匀沉降取决于地基土的压缩性, 压缩性越大, 地基的沉降越不均匀, 加大地基刚度时, 可以减少建筑物的整体挠曲, 调节地基的不均匀沉降, 对比土硬型结构体系与基准型结构体系, 考虑上部结构刚度时的地基最大沉降差由 27 mm 减小到 18.5 mm, 减小 31.5%。改变梁截面面积、筏板刚度、地基土的压缩性, 总的来说就是改变上部结构与地基土的刚度比, 当上部结构与地基土的刚度比发生变化时, 地基沉降的不均匀性也随之改变。

分析表明, 常规设计中不考虑上部结构与地基基础共同工作, 计算得到的基础沉降差较大, 实际结构中结构体系基础沉降差将明显小于设计计算值。这说明不考虑上部结构与地基基础共同工作计算基础结构内力偏于安全。这也表明实际结构体系上部结构内力明显大于常规设计计算值, 其安全储备则要明显小于常规设计计算值。

2.2 基底反力规律

通过设置面一面接触单元, 计算得到土体与筏板接触面上的压力, 研究基础底部反力的分布情况和规律。图 4、5 是基底压强分布 3 维曲面, 水平坐标 (X, Y) (m 为单位) 分别对应的是筏板网格位置, 竖向坐标 (Z) (kPa 为单位) 对应该网格处的地基反力。限于篇幅, 只列举了两种体系的图形结果。

对比四种体系, 当考虑上部结构刚度时, 按邓肯一张非线性弹性地基模型分析, 在基础边缘, 尤其是角点, 出现高度应力集中的现象: 基准型结构体系角点与中心应力之比达到 $90.1/37.7=2.39$; 弱梁型结构体系角点与中心应力之比为 $64.3/33.4=1.93$; 板强型结构体系的角点与中心应力之比为 $90.8/37.7=2.41$; 土硬型结构体系角点与中心应力之比为 $79.4/39.0=2.04$ 。常规方法不考虑上部结构刚度时, 基准型结构体系最大与最小地基反力之比 $64.5/35.0=1.84$; 弱梁型结构体系最大与最小地基反力之比为 $56.3/29.7=1.90$; 板强型结构体系最大与最小地基反力之比为 $66.7/35.8=1.86$; 土硬型结构体系最大与最小地基反力之比为 $56.3/29.7=1.90$ 。总的说来, 常规方法在基底内部的应力分布比较匀称平缓。

对比四种体系考虑上部结构刚度时的基底反力分布图, 当框架梁截面刚度减小, 上部结构总刚度也随之减少, 基底反力的分布较为缓和, 与基准型结构体系的基底反力分布相比较, 角点附近网格中地基反力由 90.1 kPa 减少到 64.3 kPa, 基底中部反力由 37.7 kPa 减少到 33.4 kPa; 地基土的

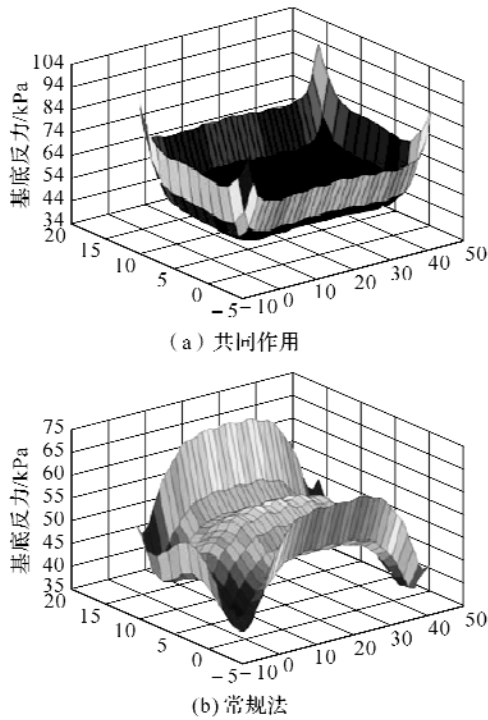


图 4 板强型结构体系地基反力
Fig. 4 Foundation reaction of rigid raft plate structure system

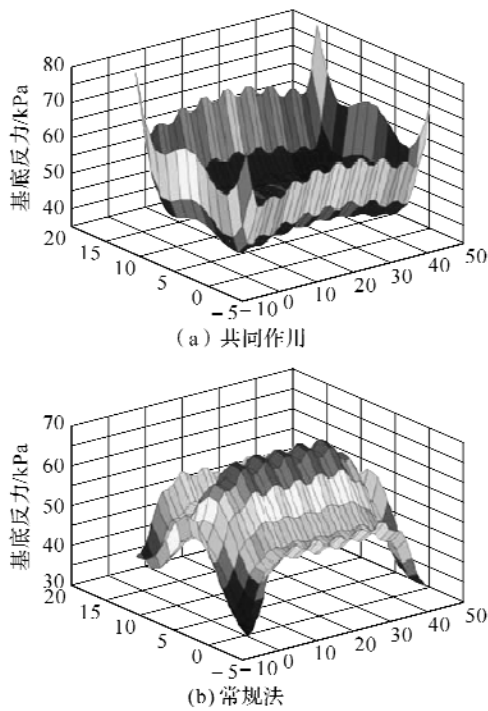


图 5 土硬型结构体系地基反力
Fig. 5 Foundation reaction of firmsoit structure system

压缩性也影响了基底反力的分布,地基压缩性较小时,基底角点与中心应力之比减小,基底反力趋于平缓;当基础刚度增大时,这种对荷载传递的跨越作用也相应增大,基底角点与中心应力之比相对于基准型结构体系有所增加。

总而言之,当按常规设计方法,不考虑上部结

构刚度计算基底反力时,基底反力的分布趋于均匀,还可以得到这样的规律,土体上方的结构:包括筏板和框架相对土体的刚度越小(即上部结构越柔),基底反力的分布越均匀。

2.3 基础内力分布

筏形基础由于具有一定的结构刚度,因此在地基变形协调的过程中基底反力呈不均匀分布,与之相应,基础不仅产生了节间的局部弯曲应力,同时也将产生整体弯曲应力。

常规方法先视基础刚度为无穷大,求出上部结构在基础顶面处的固端反力,再把该反力作用于基础,在考虑基础与地基共同作用的条件下分析基础内力,但却又完全忽视上部结构的存在。常规方法的不足之处是明显的,结构形式不同,上部结构的刚度差别就很大。图 6 为基准体系中,筏基 A 轴线上沿长边跨的弯矩分布云图,可以看出,常规法由于把结构柱底端当成完全固结,导致计算出筏板基础的弯矩比共同作用法大许多,要说明的是输出结果根据 SIHEL.63 的单元坐标系,筏板上表面受拉为正弯矩,下表面受拉为负,与工程意义上的弯矩符号相反。从图 6 中看出,常规方法计算得到筏板在轴 A 位置几乎全是负弯矩,共同作用法分析筏板部分区域的弯矩发生变号,但总体上弯矩的幅值变小。

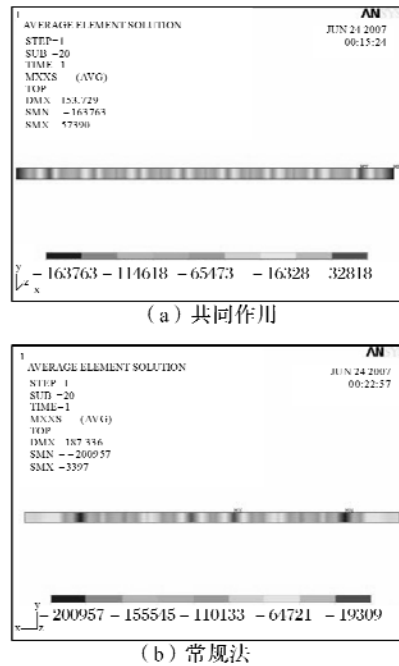


图 6 基准型筏基 A 轴线弯矩分布云图(单位: N·m/m)
Fig. 6 Raft foundation moment of basic structure system in axis A

为了更清楚地表示弯矩的分布情况,对于另外三种结构体系,提取了 A 轴的弯矩分析结果,绘

制弯矩图如图 7 所示。

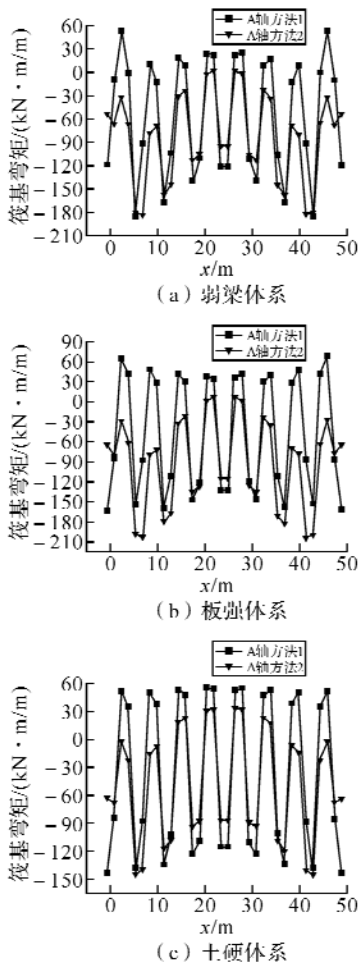


图 7 筏基 A 轴线弯矩图

Fig. 7 Raft founding moment in axis A

从图 7(a) 可知,与常规方法相比,当考虑上部结构刚度时,筏片基础 A 轴位置的部分弯矩发生变号,在 $X=1.5\text{m}$ 位置,方法 1(共同作用) A 轴的正弯矩 $60\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$,方法 2(常规法) A 轴的负弯矩为 $-30\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$,两者的差值为 $90\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ 。

对比基准体系和板强体系,可看出方法 1 计算时,筏基的刚度增大对于自身弯矩分布没有产生很大的影响;而对于方法 2 来说,弯矩结果对于板刚度的变化较敏感,板强体系的弯矩幅值较基准体系有较大的提高,特别在 1 轴跨中位置,板强体系为 $-380\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$,基准体系为 $-150\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$,增加了 $230\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ 。所以在设计筏基时,如果采用方法 2,当板刚度较大时,往往会导致设计配筋量偏大。

当地基较硬时,基础的正弯矩减少,负弯矩(上表面受拉)增大,并且当地基刚度增加至相当大的程度时,上部结构刚度对基础内力已没有什么影响,因为这时基础沉降变形较小,同时不均匀沉降也很小,已不需要上部结构来帮助减少不均匀沉降。由此可知,考虑共同作用的分析,对于软

弱地基上的结构物要比坚硬地基上的结构物具有更重要的意义。在上部结构刚度与地基条件不变的情况下,基础中弯矩随其刚度的增大而增大。可见,整个体系的弯曲内力在基础与上部结构之间是按刚度分配的,故基础内力在数值上取决于结构体系刚度与地基刚度的比例和荷载的大小。一般弹性地基的方法由于忽略了上部结构的影响,而单纯考虑地基的变形协调,得出正弯矩偏大的结果。

2.1 上部结构内力重分布

在实际工程中,基础的刚度是有限的,也就是说,基础存在着相对挠曲,从而导致各柱沉降不均,基础的受力状态得到了相应的改善,但是梁、柱受到差异沉降的影响,上部结构产生了较大的附加内力,内力进行重新分布^[11]。为了解共同作用对上部框架结构的影响,以下对四种体系考虑共同作用时结构的内力重分布规律进行研究。图 8 为弱梁型体系框架纵向 D 轴线的弯矩图,可以看出,其和文献[9]中基准型体系的结果在数值上虽然有所不同,但是考虑共同作用时,它们的内力重分布规律是相同的。由于柱脚相对位移的影响,各柱弯矩明显增大,尤其是底层柱,其它各层柱相对于底层受到的影响较小。按常规方法设计时,边柱偏于不安全,中柱却过于浪费。

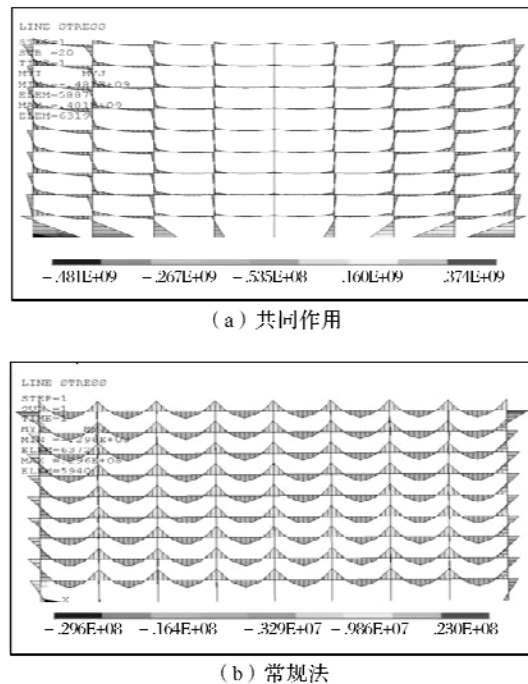
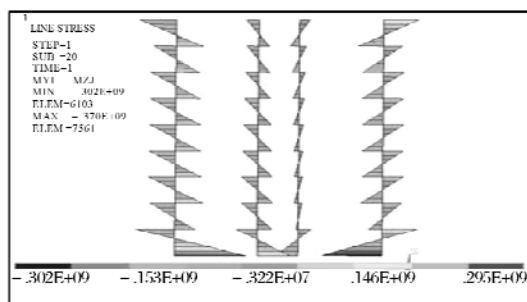


图 8 弱梁体系框架 A 轴线弯矩图

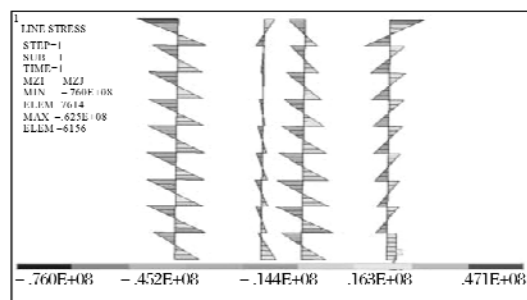
Fig. 8 Frame moment of weak beam structure system in axis A

从水平荷载作用的角度看,沿宽度方向的横向框架是主要的抗侧力结构,以下取框架中部轴线 5 上的一榀进行分析。图 9 为基准体系该榀框

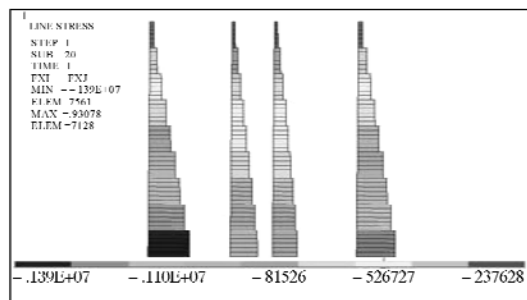
架柱的弯矩和轴力图。



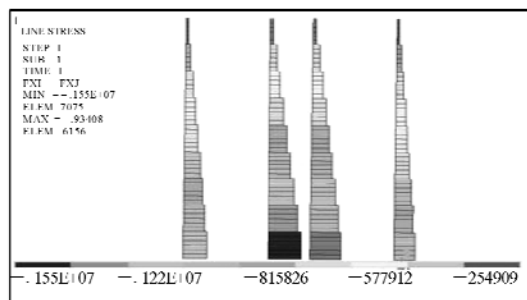
(a) 柱弯矩 (共同作用)



(b) 柱弯矩 (常规法)



(c) 柱轴力 (共同作用)



(d) 柱轴力 (常规法)

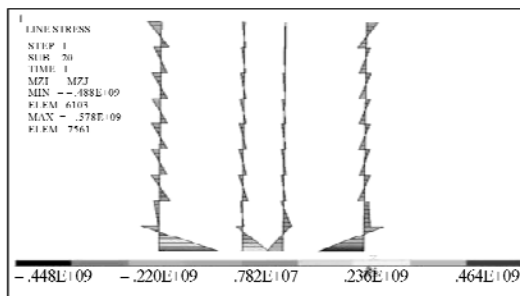
图 9 基准体系框架轴线 5 内力

Fig. 9 Internal force of basic structure system in axis 5

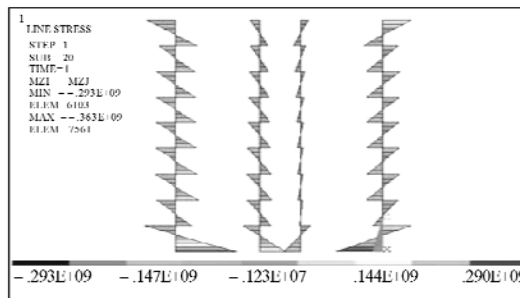
从图 9 中看出,不考虑共同作用时,在水平荷载作用下,底层柱脚部的弯矩符号均相同,考虑共同作用后,由于柱脚相对位移的影响,柱脚部的弯矩发生变号,且幅值明显增大.轴 5 框架柱的轴力分布也发生了较大的变化,考虑共同作用时,最大轴力出现在边柱,为 1 390 kN,而常规方法最大轴力出现在中柱,为 1 550 kN.其它各柱的轴力也有所变化,随层数的增加,柱轴力变化逐渐减小.

图 10 列出了其它体系框架轴线 5 的弯矩,可以看到,对于四种体系来说,考虑共同作用因素

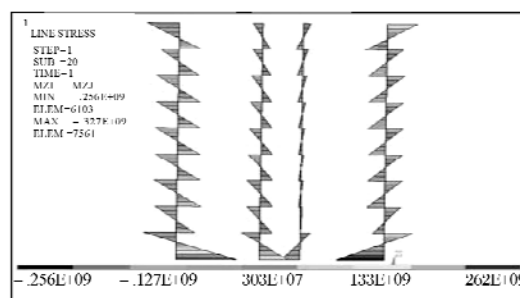
后,弯矩的内力重分布规律都是相同的,只是变化的幅度不同,这取决于上部结构与基础的相对刚度关系.基准体系的最大弯矩为 370 kN·m,弱梁体系的最大弯矩为 578 kN·m,板强体系的最大弯矩为 363 kN·m,土硬体系的最大弯矩为 327 kN·m.弱梁体系由于梁、柱的刚度比发生变化,导致弯矩主要集中在柱端,幅值急剧上升;板强体系和土硬体系中,通过改变下部结构的刚度,对框架结构的弯矩幅值起到一定作用,但没有上部结构自身刚度变化的影响显著.所以合理的结构设计实现结构的内力优化分布非常重要.



(a) 弱梁体系



(b) 板强体系



(c) 土硬体系

图 10 其它体系框架轴线 5 的弯矩(N·m)

Fig. 10 Frame moment of other structure system in axis 5(N·m)

比较四种体系的计算结果,可以发现框架梁的截面刚度和地基土的压缩性对上部结构内力重分布的影响较大,忽略共同作用效应给上部结构内力分析带来一定的误差.

3 结 语

对框架结构—筏基—地基土组成的建筑结构

体系工作性能进行了数值模拟分析和研究,得到的主要结论如下:

a. 地基土的压缩性降低时,即地基刚度增大时,基础的沉降量就会减小,基础沉降差也会随之减小.基础和上部结构内的附加内力降低,使结构的造价降低. b. 基础刚度对结构体系共同作用具有重要的影响.在上部结构刚度与地基条件不变的情况下,基础内力随其刚度的增大而增大,由于基础刚度增大,使其沉降差随之减小,相应上部框架结构的附加内力将减小. c. 上部结构刚度对共同作用有一定的影响.结构刚度的增加能显著改善基础的纵向弯曲变形.随着结构刚度的增加,地基反力向基础边缘转移.与此同时,上部结构中产生了很大的附加内力.框架柱轴力并不是竖向楼层荷载的简单叠加,而是向结构两端转移,并且框架柱和梁的弯矩、剪力会发生变化. d. 在实际工程设计中,考虑共同作用时,底层柱,特别是角柱、次边柱轴力变化较大,所以在设计中应注意这些构件,适当提高配筋;当地基土的压缩性较大时,可以通过提高梁的截面刚度、筏片基础的刚度等措施来提高上部结构的整体刚度,减少地基的不均匀沉降差;考虑共同作用时,应适当提高框架梁外端截面承受负弯矩的受力钢筋数量,及内端截面处受力钢筋伸入支座内的钢筋数量.

参考文献:

[1] 杜永峰,兰倩,李慧,等.筏形基础—地基共同作用非

线性数值分析[J].兰州理工大学学报,2005(2):107-110.

- [2] 陈震,陈劲蕾,张海涛.地基基础与上部结构的共同作用研究[J].江汉大学学报:自然科学版,2004(12):86-89.
- [3] 王伟,杨尧志.地基基础与上部结构共同作用抗震性能分析[J].武汉水利电力大学学报,2000(8):59-63.
- [4] 李玉杯,熊峰.高层建筑上部结构、基础与地基土共同作用的地震时程分析[J].四川建筑科学研究,2005(4):98-102.
- [5] 董建国,赵敏宏.高层建筑地基基础——共同作用理论与实践[M].上海:同济大学出版社,1996:1-364.
- [6] 宰金珉,宰金璋.高层建筑基础分析与设计[M].北京:中国建筑工业出版社,1993:1-639.
- [7] 尚守平,杜运兴,周芬.桩箱基础与地基土共同作用的分析研究[J].土木工程学报,2001,34(4):93-97.
- [8] Abdul Hayir, Maria I Todorovska, Mihailo D Trifunac. Antiplane response of a dike with flexible soil-structure interface to incident SH waves [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001 (21): 603-613.
- [9] 鹿迎波.框架结构-筏基-土体共同作用数值模拟分析[J].2009,25(7):25-29.
- [10] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [11] 孙更生,郑大同.软土地基与地下工程[M].北京:中国建筑工业出版社,1979:26-50.

Study on influence factor of superstructure and subsoil interaction effect

ZHANG Ji-cheng¹, LIU Fei²

(1. School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, China;

2. Beijing Institute of Architectural Design and Research, Beijing 100045, China)

Abstract: The analysis model consisting of a frame, raft foundation and subsoil was established using general FEM ANSYS. The effect of superstructure dimension, raft foundation rigidity and subsoil property on the interaction system was studied. The results from interaction analysis method and common method were compared. The internal relation of each structure component was investigated, and the subsoil settlement and reaction distribution rule, internal force redistribution regulation of foundation and superstructure was attained. The results of interaction analysis accorded with practical engineering, and some design suggestion was proposed finally.

Key words: interaction effect; finite element method; ground sill model; foundation rigidity; redistribution of internal force

本文编辑:龚晓宁