

# 多元复合地基的等效本构模型 及三维地震响应研究

冯小娟<sup>1</sup>, 吴炳军<sup>1</sup>, 胡伟<sup>2</sup>, 张频<sup>1</sup>, 寇宝明<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055; 2. 海南大学, 海南 570228; 3. 西安职业技术学院, 陕西 西安 710077)

**摘 要:**按照复合材料力学的处理方法将多元复合地基的桩-土体系作等效连续化处理, 将其视为横观各向同性体, 首次建立了多元复合地基桩土等效复合体的本构关系; 基于大型有限元软件 ABAQUS 操作平台, 采用有限元、无限元耦合的方法研究了多元复合地基的三维地震响应, 结果表明: (1) 等效复合体模型能很好地反映出多元复合地基的传力机理, (2) 天然地基、多元复合地基和基础在地表的加速度傅氏谱均呈多峰型, 对输入地震波均有滤波作用, 且多元复合地基和基础的滤波作用更为显著, (3) 褥垫层、筏板的增加能有效抑制地表加速度响应, 但并非越厚越好, 还要考虑建造的经济性, 计算结果可为工程抗震设计提供参考。

**关键词:**多元复合地基; 横观各向同性体; 本构关系; 三维地震响应; 有限元

**中图分类号:** TU470

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2013)01-0010-08

复合地基是为满足建(构)筑物的使用功能, 对自然条件下不能满足建(构)筑物地基承载力或变形控制要求的地基进行加固处理后得到的人工地基。龚晓南<sup>[1]</sup>根据竖向增强体的性质, 将复合地基分为 3 类: 1) 散体材料桩复合地基, 2) 柔性桩复合地基, 3) 刚性桩复合地基。将复合地基中的三种类型桩中的两种甚至三种桩综合应用于加固软土地基, 即形成多元复合地基, 以充分发挥各桩型的优势, 大幅度提高地基的承载能力, 减少地基的沉降。

随着多元复合地基在建筑工程中应用的迅速发展, 对多元复合地基的研究日益受到学者及工程技术人员重视。目前, 尽管国内外学者在多元复合地基的理论上进行了许多有益的探讨<sup>[2-11]</sup>, 并结合我国的工程实践, 提出了一些相应的设计计算方法。但是, 还有许多问题待研究, 特别是关于多元复合地基的地震响应问题研究成果甚少, 本文正是基于此问题, 首次给出了多元复合地基等效复合体模型的本构关系, 在此基础上利用大型计算软件 ABAQUS<sup>[12]</sup>平台, 采用有限元、无限元耦合的数值计算方法, 研究了由刚性桩和柔性桩构成的多元复合地基在地震荷载作用下的动力响应, 着重研究了以下几个问题: (1) 多元复合地基等效复合体模型本构关系的建立; (2) 天然地基、多元复合地基和基础的滤波作用比较; (3) 褥垫层、筏板对地震响应的影响。

## 1 多元复合地基等效复合体本构模型的建立

### 1.1 多元复合地基等效复合体模型

目前, 有限元法是求解各种固体力学和结构工程问题最有效的数值计算方法<sup>[13-14]</sup>之一, 但对多元复合地基进行静、动力分析时, 如果采用“分离分析模式”, 即将桩和土体分别划分单元, 甚至还在两种单元中设置界面单元, 所需要的单元数量巨大, 常常会因受到计算机软件或硬件的限制使分析难以进行。笔者认为可以考虑将多元复合地基中的桩与土体作等效连续化处理, 将桩弥散于土体中, 将其视为一种复合材料。根据复合材料力学的处理方法, 得到复合体材料的本构关系, 这样, 在使用有限元进行计算时, 仅采用连续体单元, 单元的尺度也可取得较大, 这种处理可大幅度减少单元的数量, 提高用有限元法研

收稿日期: 2012-03-26 修改稿日期: 2013-01-05

基金项目: 陕西省教育厅专项科研项目(08JK341); 西安建筑科技大学基础基金项目(JC0821)

作者简介: 冯小娟(1959-), 女, 陕西咸阳人, 教授, 博士, 主要从事地基基础动力响应研究。

究结构工程问题的实用性.

为了对多元复合地基作等效连续化处理,现对其作如下计算假设:(1)土体与桩体均为线弹性体.两种桩即刚性桩、柔性桩均弥散在土体中构成复合体.(2)桩土复合体中桩与土在复合前后性能没有改变;两种桩体纤维均匀分布于土体中;不考虑空隙的影响;不考虑桩体与土体的裂纹与缺陷.

根据以上假设,将多元复合地基视为横观各向同性的复合材料,在计算等效模量时,对模型考虑有代表性的体积单元,该体积单元作为多项材料的分区域在整个体积范围内处处相同,其应力场和变形场由它们的平均值给定.设多元复合地基由刚性桩体  $P_1$  和柔性桩体  $P_2$  及土体  $S$  三相材料组成,其在水平面的截面如图 1 所示,桩轴线平行于  $z$  轴.

由于三相材料均为线弹性体,平均应力为:

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{V} \left( \int_{V_{p_1}} \sigma_{ij}^{p_1} dV + \int_{V_{p_2}} \sigma_{ij}^{p_2} dV + \int_{V_s} \sigma_{ij}^s dV \right) \quad (1)$$

$$\text{平均应变为:} \quad \epsilon_{ij} = \frac{1}{V} \left( \int_{V_{p_1}} \epsilon_{ij}^{p_1} dV + \int_{V_{p_2}} \epsilon_{ij}^{p_2} dV + \int_{V_s} \epsilon_{ij}^s dV \right) \quad (2)$$

其中  $V$  为总体积;  $V_{p_1}$ 、 $V_{p_2}$ 、 $V_s$  分别为  $P_1$  相、 $P_2$  相、 $S$  相材料占据的体积;  $\sigma_{ij}^{p_1}$ 、 $\sigma_{ij}^{p_2}$ 、 $\sigma_{ij}^s$  分别为  $P_1$  相、 $P_2$  相、 $S$  相材料的应力;  $\epsilon_{ij}^{p_1}$ 、 $\epsilon_{ij}^{p_2}$ 、 $\epsilon_{ij}^s$  分别为  $P_1$  相、 $P_2$  相、 $S$  相材料的应变.

三相材料的体积比分别为:

$$m_{p_1} = \frac{V_{p_1}}{V} \quad (3)$$

$$m_{p_2} = \frac{V_{p_2}}{V} \quad (4)$$

$$m_s = \frac{V_s}{V} \quad (5)$$

$$\text{因} \quad V = V_{p_1} + V_{p_2} + V_s \quad \text{所以} \quad m_{p_1} + m_{p_2} + m_s = 1 \quad (6)$$

$$\text{应力、应变间的关系可表示为:} \quad \sigma_{ij} = D_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (7)$$

$$\text{或者} \quad \epsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (8)$$

式中  $D_{ijkl}$  为等效刚度张量,  $S_{ijkl}$  为等效柔度张量.

由前面假设,三种材料复合等效化处理后,视为横观各向同性材料,  $x-y$  平面内各向同性,  $z$  轴方向为各向异性,等效处理后的平均应力和平均应变之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{21}}{E_2} & -\frac{\mu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\mu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{13}}{E_1} & -\frac{\mu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix} \quad (9)$$

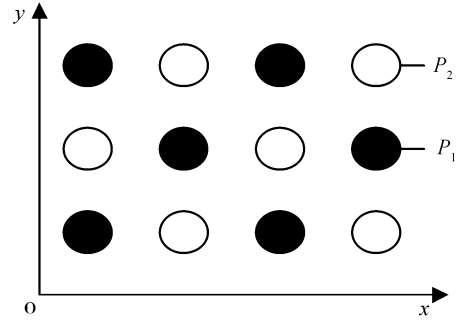


图 1 桩-土体系  
( $P_1-P_2-S$  三相材料)截面图

Fig. 1 The cross-section of  
pile-soil system ( $P_1-P_2-S$ )

式中弹性模量  $E_1 = E_2$ , 泊松比  $\mu_{12} = \mu_{21}, \mu_{13} = \mu_{23}, \mu_{31} = \mu_{32}$ , 剪切模量  $G_{12} = \frac{E_1}{2(1 + \mu_{12})}$ , 由矩阵系数的对称性可得  $\frac{\mu_{ji}}{E_j} = \frac{\mu_{ij}}{E_i}, (i, j = 1, 3)$ , 对于横观各向同性材料有 5 个独立弹性常数, 分别为  $E_1, E_3, \mu_{12}, \mu_{13}, G_{13} (= G_{23})$ . 如果这 5 个弹性常数给出, 式(9) 中的本构关系就完全确定. 本文采用复合材料力学的方法对 3 相材料构成的多元复合地基的 5 个弹性常数进行确定.

## 1.2 多元复合地基本构模型参数的确定

对多元复合地基, 设在某土层(该层内物理性质不变) 范围内, 桩均匀地分置于土中, 根据桩在土中的布置情况, 对复合材料和各相材料, 可假设:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \sigma_{11}^{p_1} = \sigma_{11}^{p_2} = \sigma_{11}^s & \sigma_{13} &= \sigma_{13}^{p_1} = \sigma_{13}^{p_2} = \sigma_{13}^s \\ \sigma_{22} &= \sigma_{22}^{p_1} = \sigma_{22}^{p_2} = \sigma_{22}^s & \sigma_{12} &= \sigma_{12}^{p_1} = \sigma_{12}^{p_2} = \sigma_{12}^s \\ \epsilon_{33} &= \epsilon_{33}^{p_1} = \epsilon_{33}^{p_2} = \epsilon_{33}^s & \sigma_{23} &= \sigma_{23}^{p_1} = \sigma_{23}^{p_2} = \sigma_{23}^s \end{aligned} \quad (10)$$

剪应力分量  $\sigma_{ij} (i \neq j \text{ 时})$ 、应变分量  $\epsilon_{ij} (i \neq j \text{ 时})$  可表示为:

$$\sigma_{12} = \tau_{12} \quad \sigma_{23} = \tau_{23} \quad \sigma_{31} = \tau_{31} \quad (11)$$

$$\epsilon_{12} = \frac{1}{2} \gamma_{12} \quad \epsilon_{23} = \frac{1}{2} \gamma_{23} \quad \epsilon_{31} = \frac{1}{2} \gamma_{31} \quad (12)$$

根据(1)、(2) 式可得:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{33} &= m_{p_1} \sigma_{33}^{p_1} + m_{p_2} \sigma_{33}^{p_2} + m_s \sigma_{33}^s \\ \epsilon_{11} &= m_{p_1} \epsilon_{11}^{p_1} + m_{p_2} \epsilon_{11}^{p_2} + m_s \epsilon_{11}^s \\ \epsilon_{22} &= m_{p_1} \epsilon_{22}^{p_1} + m_{p_2} \epsilon_{22}^{p_2} + m_s \epsilon_{22}^s \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{12} &= m_{p_1} \gamma_{12}^{p_1} + m_{p_2} \gamma_{12}^{p_2} + m_s \gamma_{12}^s \\ \gamma_{13} &= m_{p_1} \gamma_{13}^{p_1} + m_{p_2} \gamma_{13}^{p_2} + m_s \gamma_{13}^s \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

上两式中,  $m_{p_1}, m_{p_2}, m_s$  分别为在平行于  $x-y$  平面的截面上  $P_1$  相、 $P_2$  相、 $S$  相材料面积  $A_{p_1}, A_{p_2}, A_s$  与总面积  $A$  之比, 有:

$$m_s = 1 - (m_{p_1} + m_{p_2})$$

$P_1$  相材料分别以  $E_{p_1}, \mu_{p_1}, G_{p_1}$  表示其弹性模量、泊松比和剪切模量.  $P_2$  相材料分别以  $E_{p_2}, \mu_{p_2}, G_{p_2}$  表示其弹性模量、泊松比和剪切模量,  $S$  相材料分别以  $E_s, \mu_s, G_s$  表示其弹性模量、泊松比和剪切模量.

$$\text{对 } P_1 \text{ 相材料, 有 } \epsilon_{33}^{p_1} = -\frac{\mu_{p_1}}{E_{p_1}} \sigma_{11}^{p_1} - \frac{\mu_{p_1}}{E_{p_1}} \sigma_{22}^{p_1} + \frac{1}{E_{p_1}} \sigma_{33}^{p_1}$$

$$\text{利用(10), 得: } \epsilon_{33} = -\frac{\mu_{p_1}}{E_{p_1}} \sigma_{11} - \frac{\mu_{p_1}}{E_{p_1}} \sigma_{22} + \frac{1}{E_{p_1}} \sigma_{33}^{p_1} \quad (15)$$

$$\text{对 } P_2 \text{ 相材料, 有 } \epsilon_{33}^{p_2} = -\frac{\mu_{p_2}}{E_{p_2}} \sigma_{11}^{p_2} - \frac{\mu_{p_2}}{E_{p_2}} \sigma_{22}^{p_2} + \frac{1}{E_{p_2}} \sigma_{33}^{p_2}, \text{ 同理得: } \epsilon_{33} = -\frac{\mu_{p_2}}{E_{p_2}} \sigma_{11} - \frac{\mu_{p_2}}{E_{p_2}} \sigma_{22} + \frac{1}{E_{p_2}} \sigma_{33}^{p_2} \quad (16)$$

$$\text{对 } S \text{ 相材料, 有 } \epsilon_{33}^s = -\frac{\mu_s}{E_s} \sigma_{11}^s - \frac{\mu_s}{E_s} \sigma_{22}^s + \frac{1}{E_s} \sigma_{33}^s, \text{ 同理得: } \epsilon_{33} = -\frac{\mu_s}{E_s} \sigma_{11} - \frac{\mu_s}{E_s} \sigma_{22} + \frac{1}{E_s} \sigma_{33}^s \quad (17)$$

由(15)、(16)、(17), 结合(9) 式得:

$$\begin{aligned} E_3 &= E_{p_1} m_{p_1} + E_{p_2} m_{p_2} + E_s m_s \\ \mu_{13} &= \frac{E_1}{E_3} (m_{p_1} \mu_{p_1} + m_{p_2} \mu_{p_2} + m_s \mu_s) \end{aligned} \quad (18)$$

对  $P_1$  相、 $P_2$  相、 $S$  相材料, 另有

$$\epsilon_{11}^{p_1} = \frac{1}{E_{p_1}} \sigma_{11}^{p_1} - \frac{\mu_{p_1}}{E_{p_1}} \sigma_{22}^{p_1} - \frac{\mu_{p_1}}{E_{p_1}} \sigma_{33}^{p_1} \quad (19a)$$

$$\epsilon_{11}^{p_2} = \frac{1}{E_{p_2}} \sigma_{11}^{p_2} - \frac{\mu_{p_2}}{E_{p_2}} \sigma_{22}^{p_2} - \frac{\mu_{p_2}}{E_{p_2}} \sigma_{33}^{p_2} \quad (19b)$$

$$\epsilon_{11}^s = \frac{1}{E_s} \sigma_{11}^s - \frac{\mu_s}{E_s} \sigma_{22}^s - \frac{\mu_s}{E_s} \sigma_{33}^s \quad (19c)$$

再利用关系  $\sigma_{11} = \sigma_{11}^{p_1} = \sigma_{11}^{p_2} = \sigma_{11}^s$ ,  $\sigma_{22} = \sigma_{22}^{p_1} = \sigma_{22}^{p_2} = \sigma_{22}^s$ , 由(15)、(16)、(17) 式得:

$$E_1 = \left( \frac{m_{p_1}}{E_{p_1}} + \frac{m_{p_2}}{E_{p_2}} + \frac{m_s}{E_s} - \frac{m_{p_1} m_{p_2} (E_{p_1} \mu_{p_2} - E_{p_2} \mu_{p_1})^2}{E_{p_1} E_{p_2} E_s} - \frac{m_{p_1} m_s (E_{p_1} \mu_s - E_s \mu_{p_1})^2}{E_{p_1} E_s E_3} - \frac{m_{p_2} m_s (E_{p_2} \mu_s - E_s \mu_{p_2})^2}{E_{p_2} E_s E_3} \right)^{-1} \quad (20)$$

$$\mu_{12} = E_1 \left( \frac{m_{p_1} \mu_{p_1}}{E_{p_1}} + \frac{m_{p_2} \mu_{p_2}}{E_{p_2}} + \frac{m_s \mu_s}{E_s} + \frac{m_{p_1} m_{p_2} (E_{p_1} \mu_{p_2} - E_{p_2} \mu_{p_1})^2}{E_{p_1} E_{p_2} E_s} + \frac{m_{p_1} m_s (E_{p_1} \mu_s - E_s \mu_{p_1})^2}{E_{p_1} E_s E_3} + \frac{m_{p_2} m_s (E_{p_2} \mu_s - E_s \mu_{p_2})^2}{E_{p_2} E_s E_3} \right) \quad (21)$$

对  $P_1$  相、 $P_2$  相、 $S$  相材料, 分别有  $\gamma_{13}^{p_1} = \frac{\tau_{13}^{p_1}}{G_{p_1}}$ ,  $\gamma_{13}^{p_2} = \frac{\tau_{13}^{p_2}}{G_{p_2}}$  和  $\gamma_{13}^s = \frac{\tau_{13}^s}{G_s}$  再根据(14) 式有:

$$\gamma_{13} = m_{p_1} \gamma_{13}^{p_1} + m_{p_2} \gamma_{13}^{p_2} + m_s \gamma_{13}^s = \left( \frac{m_{p_1}}{G_{p_1}} + \frac{m_{p_2}}{G_{p_2}} + \frac{m_s}{G_s} \right) \tau_{13}$$

则有:

$$\frac{1}{G_{13}} = \frac{m_{p_1}}{G_{p_1}} + \frac{m_{p_2}}{G_{p_2}} + \frac{m_s}{G_s} \quad (22)$$

由此我们得出了多元复合地基等效的横观各向同性材料的 5 个弹性常数  $E_1, E_3, \mu_{12}, \mu_{13}, G_{13}$  ( $= G_{23}$ ) 与桩  $p_1$ 、桩  $p_2$  及桩间土  $S$  的材料参数之间的关系, 式(9) 中的本构关系就完全确定。

## 2 计算结果及讨论

### 2.1 计算模型

计算模型如图 2 所示, 计算区域为  $100 \times 100 \times 40 \text{ m}^3$ , 多元复合地基加固区为  $20 \times 20 \times 12 \text{ m}^3$ , 有限元计算区为  $60 \times 60 \times 30 \text{ m}^3$ , 其余为无限元计算区, 根据对称性取其二分之一区域计算. 考虑到结构的抗震性能及建造成本, 对加固区分为上部和下部两个不同的加固区, 其所用桩的材料及桩间距等都可有所不同. 上部加固区(同时存在刚性桩和柔性桩)6 m, 下部加固区(仅存在刚性桩)6 m; 土体为均质土, 变形模量  $E_s = 5 \text{ MPa}$ , 泊松比  $\mu_s = 0.3$ , 密度  $\rho_s = 1900 \text{ kg/m}^3$ ; 刚性桩长  $L_1$ (可调), 桩径  $d = 0.5 \text{ m}$ , 桩间距  $s = 2d$ , 弹性模  $E_{p_1} = 600 E_s$ , 泊松比  $\mu_{p_1} = 0.2$ , 密度  $\rho_{p_1} = 2200 \text{ kg/m}^3$ ; 柔性桩长  $L_2$ (可调),  $E_{p_2} = 10 E_s$ , 泊松比  $\mu_{p_2} = 0.3$ , 密度  $\rho_{p_2} = 2000 \text{ kg/m}^3$ ; 置换率  $m_{p_1} = 0.15, m_{p_2} = 0.1$ .

地震波的输入: 基岩上覆土层为 40 m, 在基岩处输入 Koyna 波, 调整后水平方向加速度峰值为 400 gal, 竖直方向峰值为 275.67 gal. 本研究仅输入垂直向上传播的水平方向地震波。

在计算中为了使有限元与无限元进行耦合, 有限元采用 8 节点六面体 3D8R 三维单元, 为便于与 3D8R 单元对接, 无限元采用 CIN3D8 三维单元对多元复合地基进行离散。

### 2.2 模型的验证

在采用等效模型计算复合地基地震响应之前, 先对本文提出的等效本构关系进行验证, 即对等效模型和桩土分离模型分别进行计算来检验等效模型的可靠性. 对 3.1 中模型取加固区面积为  $10 \times 10 \text{ m}^2$ , 建立等效模型和桩土分离模型, 在加固区上表面加压力  $P = 100 \text{ kPa}$ , 根据对称性取 1/4 计算. 等效模型与桩土分离模型沿加固区中心纵向的竖向位移随深度的变化曲线如图 3. 由图可见, 两种模型的计算结

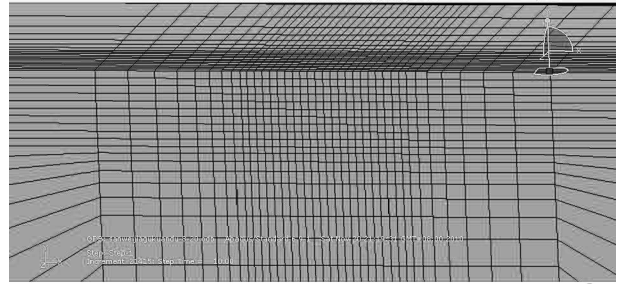


图 2 等效复合体的计算模型

Fig. 2 Model of the equivalent composite foundation

果一致性很好,最大相对误差不超过 5%,说明本文的等效体本构关系是有效的。

### 2.3 天然地基、多元复合地基和基础的滤波作用比较

目前地震动的选取方法主要有四种:一是利用拟建场地的强震记录;二是直接利用或进行简单处理的典型地震记录;三是利用规范反应谱合成人工地震波;四是根据场地条件来确定地震动时程。四种方法中实际工程设计用的是最多的是第三种,科学研究中比较常见的是第二种,但从考虑问题的全面性来看,第四种方法是最合理,最科学的,这也是今后研究的一个方向。本文采用第二种方法,选用 Koyna 波信号作为原始地震波,图 4 为输入的 koyna 水平地震波加速度时程调整曲线及相应的傅里叶频谱图,图 5 为计算模型中给出的均质土天然地基的地表水平加速度时程曲线及相应的傅氏频谱图,图 6 为刚性桩长  $L_1=12$  m,柔性桩长  $L_2=6$  m 的多元复合地基其上部褥垫层厚度为 0.2 m、筏板厚度为 0.8 m 的等效模型在地表的加速度时程曲线

比较图 4、5、6 的时程曲线可见,由基岩输入的地震波经均质天然地基、多元复合地基及基础传播到达地表,其加速度依次大幅衰减,有效降低了地震波对上部结构的影响。比较加速度傅里叶频谱图可见,天然地基和多元复合地基及基础在地表的加速度傅里叶频谱均呈多峰型,对输入地震波均有滤波作用,

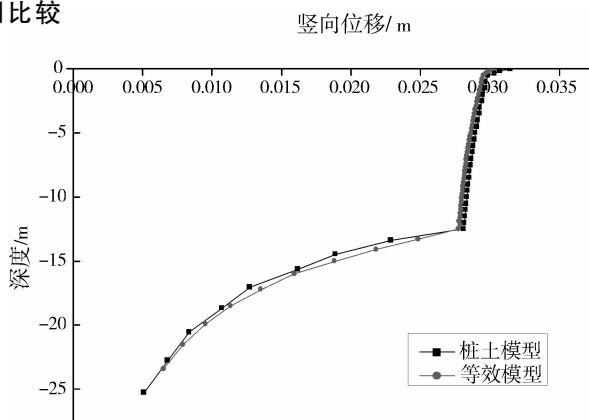


图 3 桩土分离模型和等效模型在加固中心竖向位移沿深度的变化曲线

Fig. 3 The vertical displacements of reinforced center of equivalent model and soil-pile separated model

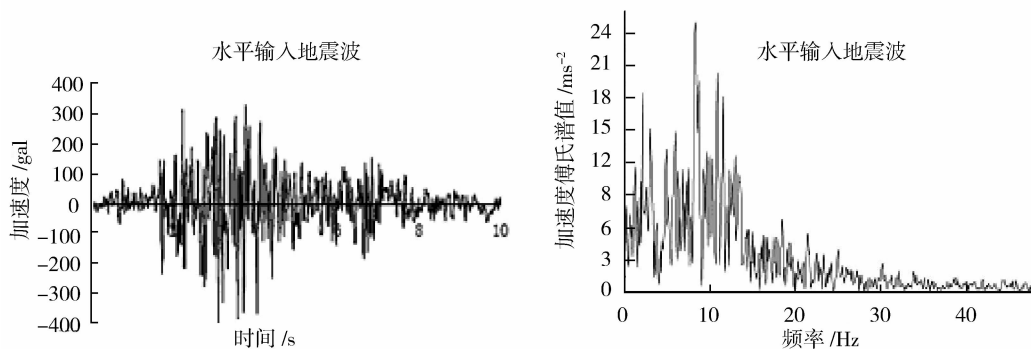


图 4 koyna 水平地震波加速度时程调整曲线及相应的傅里叶频谱图

Fig. 4 Koyna horizontal seismic acceleration time history curve and the corresponding Fourier spectrum diagram

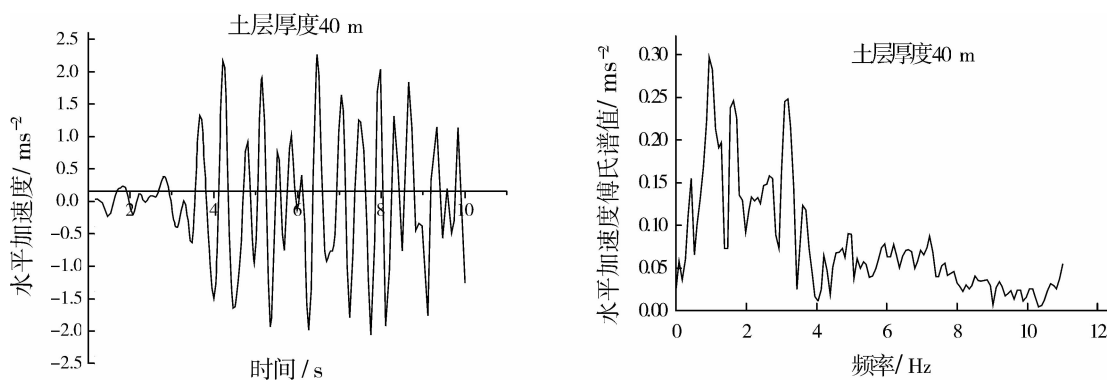


图 5 天然地基地表的加速度时程曲线及相应的傅里叶频谱图

Fig. 5 Natural ground surface acceleration time history curve and the corresponding Fourier spectrum diagram

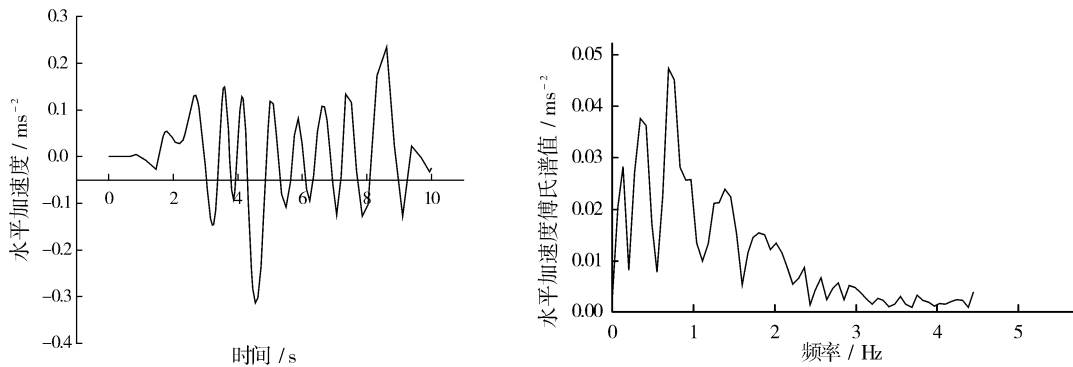


图 6 多元复合地基及基础地表加速度时程曲线及相应的傅里叶频谱图

Fig. 6 Multi-element composite foundation and foundation surface acceleration time history curve and the corresponding Fourier spectrum diagram

且多元复合地基及基础的滤波作用更为显著,基本滤掉了大于 2.5 Hz 的输入地震波,这将会对自振频率小于 2.5 Hz 的上部结构造成较大影响,因此,在设计上部结构时,应避免其自振频率与地表地震波响应的卓越频率相同,降低地震波对结构的破坏,计算结果为设计地震的完善提供了参考依据。

#### 2.4 褥垫层、筏板对地震响应的影响

图 7、8 为刚性桩长  $L_1 = 8$  m, 柔性桩长  $L_2 = 6$  m 的多元复合地基等效模型沿加固中心纵向的水平加速度、水平位移绝对最大值的地震响应曲线,图中黑色曲线对应褥垫层厚度为零、筏板厚度为零,红色曲线对应褥垫层厚度为 0.2 m、筏板厚度为零,蓝色曲线对应褥垫层厚度为 0.2 m、筏板厚度为 0.8 m。图 9、10 为以加固中心为参考点沿地表水平向的加速度、位移绝对最大值的地震响应曲线。

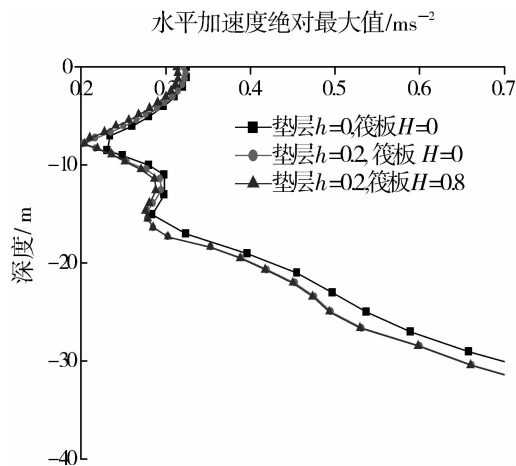


图 7 水平加速度绝对最大值与深度的关系曲线

Fig. 7 Max absolute value of horizontal accelerations

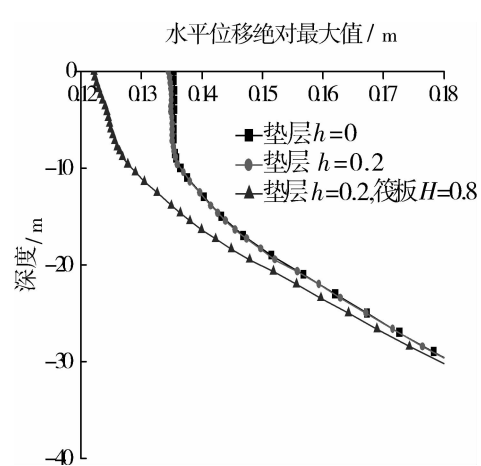


图 8 水平位移绝对最大值与深度的关系曲线

Fig8 max absolute value of horizontal alone depth displacements along depth

由图 8、9 可见,复合地基上部无褥垫层无筏板其水平加速度、水平位移响应大;加褥垫层其响应次之;若褥垫层上部加筏板其响应更小,这是由于褥垫层和筏板的介入使地基基础的刚度增加,约束力增大所致。在深度约 8 m 处,水平加速度和位移曲线均出现拐点,这是在 8 m 处地基材料特性出现突变所致。

由图 9、10 可见,在地表,随着多元复合地基上部增加垫层、筏板,其加速度、位移响应依次减小(加固区比非加固区显著),尤其是筏板的增加,其地震响应的变化尤为明显。在距加固区 10 m 左右(加固与非加固区分界处),响应曲线出现突变这是因为复合地基材料特性在该处突变而导致的。总之,褥垫层、筏板的增加能有效抑制地表加速度响应,但并非越厚越好,在保证满足要求的前提下还要考虑建造

的经济性,以适度为佳。

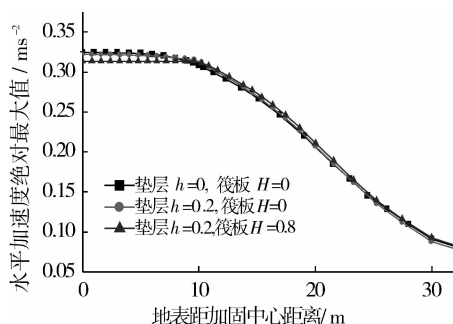


图9 地表水平加速度绝对最大值与加固中心距离的关系曲线

Fig. 9 The relation of the max absolute values of horizontal acceleration at surface to reinforced center

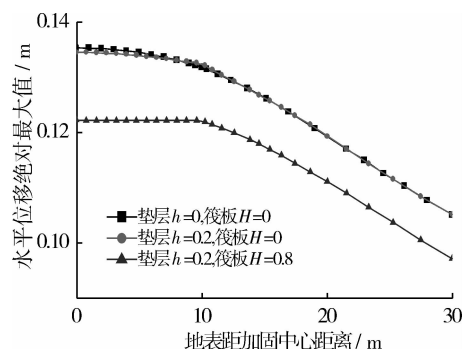


图10 水平位移绝对最大值与加固中心距离的关系曲线

Fig. 10 The relation of the max absolute values of horizontal displacement to reinforced center

### 3 结 论

通过以上研究,本文得出了以下结论:

1) 利用复合材料力学处理方法将多元复合地基的桩—土体系作等效连续化处理,视为横观各向同性体,首次建立了多元复合地基的桩—土等效复合体的本构关系,并验证了等效模型的有效性. 这种处理对用有限元法研究复合地基的地震响应问题可大幅度减少单元的数量,提高用有限元法研究结构工程问题的实用性.

2) 利用建立的横观各向同性等效复合体模型,研究了多元复合地基的地震响应,结果表明:

(1) 天然地基、多元复合地基和基础在地表的加速度傅氏谱均呈多峰型,对输入地震波均有滤波作用,且多元复合地基及基础的滤波作用更为显著,因此,在设计上部结构时,应避免其自振频率与地表地震波响应的卓越频率相同,降低地震波对结构的破坏.

(2) 褥垫层、筏板的增加能有效抑制地表加速度响应,但并非越厚越好,在保证建造要求的前提下应考虑建造的经济性,以适度为佳.

计算结果可为工程抗震设计提供参考

### 参考文献 References

- [1] 龚晓南. 复合地基[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992.  
GONG Xiao-nan. Composite Foundation[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1992.
- [2] 郑俊杰, 张建平. CFG 桩与石灰桩联合处理不均匀地基[J]. 施工技术, 2000(9): 31-32.  
ZHENG Jun-jie, ZHANG Jian-ping. CFG pile and lime pile joint processing uneven foundation[J]. Construction technology, 2000(9): 31-32.
- [3] MAHESHWARI Bal Krishna, TRUMAN Kevin Z, EI Naggar M Hesham, et al. Three-dimensional finite element nonlinear dynamic analysis of pile groups for lateral transient and seismic excitations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(1): 118-133.
- [4] XU Z G, SONG E X. Finite element analysis for seismic response of rigid pile composite foundations [J]. ROCK AND SOIL MECHANICS -WUHAN, 2004, 25(91): 179-185.
- [5] GE Xin-sheng, GONG Xiao-nan. Introduction about the design of the long-short-pile composite foundation[J]. Building structure, 2002, 32(7): 3-4.
- [6] XIE Kang-he, LU Meng-meng, HU An-feng, et al. A general theoretical solution for the consolidation of a composite foundation [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(1): 24-30.
- [7] ZHOU Q c, LI H b, LIU Y q. Treatment of pile foundation accident with replacement Method and rigid pile com-

- posite foundation [J]. ROCK AND SOIL MECHANICS -WUHAN, 2003, 24(86):845-849.
- [8] 郑俊杰, 区建华, 吴世明. 多元复合地基的理论与实践[J]. 土木工程学报, 2002, 24(2):208-212.  
ZHENG Jun-jie, QU Jian-hua, WU Shi-ming. Theory and practice of multivariate composite foundation[J]. China civil engineering journal, 2002, 24(2):208-212.
- [9] 葛忻声, 温育琳, 龚晓南. 刚柔组合桩复合地基的沉降计算[J]. 太原理工大学学报, 2002, 33(6):647-649.  
GE Xin-sheng, WEN Yu-lin, GONG Xiao-nan. Settlement calculation of firm soft composite pile composite foundation[J]. Taiyuan university of science and technology journal, 2002, 33(6):647-649.
- [10] 杨景龙, 丁璐. 长短桩复合地基数值分析[J]. 四川建筑科学研究, 2002, 28(4):38-40.  
YANG Jing-long, DING Lu. The length of pile composite foundation numerical analysis[J]. Sichuan building scientific research, 2002, 28(4):38-40.
- [11] 张俊发, 黄瑜, 闻建军, 等. 群桩基础的复合体模型建立与应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9):1064-1069.  
ZHANG Jun-fa, HUANG Yu, WEN Jian-jun, et al. The complex model establishment and application of pile group foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9):1064-1069.
- [12] Hibbitt, Karlsson, Sorensen. ABAQUS/Standard User's Manual [M]. American: HKS Company, 2002.
- [13] ZIENKIEWICZ O C. The generalized finite element method - state of the art and future directions[J]. Transactions of the ASME, 1983, 50:1210-1217.
- [14] 崔俊芝, 梁俊. 现代有限元软件方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.  
CUN Jun-zhi, LIANG Jun. The software method of modern finite element[M]. Beijing: national defense industry press, 1995.

## Research in equivalent constitutive relation and three directions seismic responses of multi-element composite foundation

FENG Xiao-juan<sup>1</sup>, WU Bing-jun<sup>1</sup>, HU Wei<sup>2</sup>, ZHANG Pin<sup>1</sup>, KOU Bao-ming<sup>3</sup>

(1. Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. University of Hainan, Hainan 570228, China; 3 College of Xi'an Vocational and Technical, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** The equivalent continuous processing is done to multi-element composite foundation by composite material mechanics method, the composite foundation is studied as transversely isotropic body, and the constitutive relation of equivalent complex is established at first time. On the ABAQUS platform, the three direction seismic responses of multi-element composite foundation are studied by finite-infinite element coupling method. The results show that: (1) the model of equivalent complex can reflect the working mechanics of the multi-element composite foundation; (2) The accelerations fourier spectrum at earth surface of natural foundation, multi-element composite foundation and ground are multi-peak types, and all of them have filter action to input earthquake wave, and the actions of multi-element composite foundation and ground are stronger than that of the natural foundation, and the (3) cushion and raft can limit the acceleration responses at earth surface, but the effect does not increase with the depth of cushion and raft. The economical efficiency should be considered too. The results can provide reference for the seismic design of engineering.

**Key words:** multi-element composite foundation; transversely isotropic body; constitutive relation; 3-d seismic response; finite element