

# 路堤下等应变复合地基的固结分析

刘吉福<sup>1, 2</sup>

(1. 华南理工大学 建筑学院, 广东 广州 510640; 2. 广东省航盛建设集团有限公司, 广东 广州 511442)

**摘要:** 路堤下等应变复合地基固结沉降时, 桩间土承担的荷载向桩体转移, 桩土总应力不断变化, 超静孔压增减量不等于有效应力增减量。考虑桩土总应力的变化、竖向排水体的压缩和孔隙水压力、桩体的排水性能、桩与排水体的距离等对复合地基的固结产生的影响。推导考虑桩体排水性能、桩土荷载转移、排水体压缩性和井阻的路堤下复合地基孔压、固结度、桩土应力比的解析解。固结分析表明, 不透水桩可以加速地基固结, 透水桩可能减缓固结, 复合地基固结的快慢受桩身固结系数影响很大, 高固结系数桩复合地基固结度大于小固结系数桩复合地基。

**关键词:** 基础工程; 等应变复合地基; 固结; 荷载转移; 不透水桩

**中图分类号:** TU 470<sup>+.3</sup>

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)增 1 - 3042 - 09

## ANALYSIS OF CONSOLIDATION OF EQUAL-STRAIN COMPOSITE GROUND UNDER EMBANKMENT

LIU Jifu<sup>1, 2</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

2. Guangdong Province Hangsheng Construction Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511442, China)

**Abstract:** The load on the soil is transferred to piles, and the total stresses of pile and soil changed when the equal-strain composite ground under embankment is consolidated. The change of excess pore water pressure isn't equal to the change of effective stress of composite ground under including embankment. The influential factors of consolidation of equal-strain composite ground with piles, including total stress of soil or pile, compressibility and excess pore water pressure of vertical drain, permeability of pile and relative position of vertical drain and pile, are analyzed. The results of analytical solutions considering pore water pressure, degree of consolidation, stress ratio between pile and soil by which permeability of piles, transfer of load between piles and soil, compression and well resistance of vertical drains, is carried out. It shows that impermeable piles can increase the consolidation of ground but permeable piles maybe delay the consolidation; the consolidation of composite ground is highly influenced by the coefficient of consolidation of pile; the degree of consolidation of composite ground treated by piles with high coefficient of consolidation is larger than that with low coefficient of consolidation.

**Key words:** foundation engineering; equal-strain composite ground; consolidation; transfer of load; impermeable pile

## 1 引言

公路、铁路路基工程中经常采用砂石桩、搅拌桩、石灰桩、旋喷桩、混凝土桩等复合地基进行软

基处理。这些复合地基都会产生一定的沉降。砂石桩、石灰桩等本身具有一定的排水固结作用<sup>[1]</sup>。近几年, 复合地基与排水固结联合应用进行软基处理得工程越来越多<sup>[2~4]</sup>。因此, 应考虑路堤下复合地基的固结问题。

**收稿日期:** 2007 - 11 - 01; **修回日期:** 2008 - 02 - 04

**作者简介:** 刘吉福(1971 -), 男, 1993 年毕业于上海铁道学院土木工程系铁道工程专业, 现为华南理工大学博士研究生、高级工程师, 主要从事公路软基处理施工、监测方面的研究工作。E-mail: LIFMXY@163.com

复合地基桩土模量差异较大, 随着桩间土固结沉降, 桩间土承担的荷载通过拱效应等向桩体转移, 桩或桩间土的总应力不断变化。因此, 在路堤荷载不变的情况下, 桩间土超静孔压(本文中所有孔压均指孔隙水压力)减小不仅是土体固结造成的, 土体承担的总应力减少也会导致超静孔压减小。因此, 路堤下复合地基有效应力变化不一定等于孔压变化。这一特点与排水固结法不同。

目前已经有不少复合地基固结的研究成果。龚晓南<sup>[5]</sup>对碎石桩复合地基建议采用固结系数折算方法考虑应力集中现象, 但是没有考虑碎石桩压缩及桩中超静孔压对固结的影响。张土乔等<sup>[6]</sup>分析了水泥土桩施工产生的超静孔压的消散固结, 但是忽略桩的作用, 采用天然地基的固结系数。郑俊杰等<sup>[1]</sup>分析石灰桩复合地基固结时将石灰桩看作排水体, 即忽略了桩身模量对固结的影响。邢皓枫等<sup>[7~9]</sup>考虑桩土之间渗流关系, 推导得到碎石桩、搅拌桩和桩间土的固结度, 然后得到复合固结度。认为有效应力增减量等于孔压增加量, 造成固结度严重偏低。陈蕾等<sup>[3]</sup>推导了排水粉喷桩地基固结度公式, 按照固结完毕时的桩间土荷载确定孔压初值, 以排水体有效作用范围的平均孔压代替土体平均孔压, 没有扣除排水体所占的范围。杨涛和李国维<sup>[10]</sup>将复合地基视为均质复合材料, 考虑桩土相互作用, 推导了不排水端承桩复合地基固结度的解析解。但是假设桩土  $\partial^2 u / \partial z^2$  相等, 对不透水桩是不合适的, 而对不透水桩等价压缩模量采用压缩模量的实质仍然是等应变。由于桩渗透系数很小, 复合地基等价固结系数小于韩杰和叶书麟建议值。孙举等<sup>[11]</sup>推导了考虑涂抹效应的双层散体材料桩复合地基固结解析解, 但是没有考虑散体材料桩的井阻作用。

本文同时考虑桩体和排水体的排水功能, 合理考虑桩土之间荷载变化、排水体压缩性和井阻, 推导适用于各种等应变复合地基的固结度公式。

## 2 基本假定与模型

### 2.1 基本假定

(1) 大面积荷载: 荷载作用范围大, 附加应力在软土层不变化, 也没有侧向变形。

(2) 由于实际加载情况千变万化, 为简化分析过程, 假设荷载一次性瞬间施加。得到瞬时施加荷

载的固结度解析解后, 可采用半解析方法或积分方法分析变荷载情况。

(3) 考虑桩土沉降差时理论分析非常复杂, 目前对复合地基固结的理论分析基本是假设等应变<sup>[4~9, 11]</sup>。在路堤填料的拱效应等作用下, 常规复合地基基本为等应变, 即每个深度的变形都是相等的。桩顶设置大托板或设置较强的褥垫层后混凝土桩复合地基桩土沉降差异不大。因此, 将路堤下复合地基看作等应变是可行的。本文假设桩土等应变或等变形; 碎石桩等散体桩、搅拌桩等半刚性桩基本上是等应变; 混凝土桩等难以与土体等应变, 但总变形相等。

(4) 桩间土为均质饱和土。

### 2.2 模型

(1) 将桩分为两类: 透水桩和不透水桩。不透水桩具有全长传递有效应力的特点, 不同深度处桩、土荷载、孔压相等, 相当于理想排水体。因此, 不透水桩复合地基固结分析时桩身超静孔压视为 0, 且令处理深度内不同深度处的固结度、孔压、桩土应力及其应力比等于整个处理深度的相应平均值。混凝土桩、旋喷桩、石灰桩等连续胶结桩可以看作不透水桩。

透水桩孔压不为 0, 不能全长传递有效应力, 不同深度处桩土承担的荷载不同, 并与该处的固结度有关。碎石桩、砂桩等散体桩均是透水桩。如果搅拌桩分层明显或搅拌不均匀不能连续胶结也应看作透水桩。

(2) 透水桩单独应用且固结系数大于地基土时看作排水体; 透水桩单独应用且固结系数小于桩间土时, 桩体发生向外(土体)的径向排水固结, 桩周土成为竖向排水体。不透水桩具有与土体连通的连续的孔隙时(如无砂混凝土桩、混凝土芯砂石桩<sup>[2]</sup>), 即具有不透水桩全长传递有效应力的特点, 又可看作排水体。

(3) 由于复合地基客观上存在一定沉降, 为了减小工后沉降, 复合地基与竖向排水体联合应用的工程越来越多, 以便使沉降在施工期基本完成。桩体与排水体联合应用(见图 1(a))时, 桩体看作是土体的一部份, 如果位于排水体有效作用范围边界上, 可以均化为一个等面积的环(见图 1(b))。图中: W 为排水体; SW 为排水体涂抹区; S 为天然土体; P 为桩体;  $r_w$  为排水体半径;  $r_{sw}$  为排水体涂抹区半径;

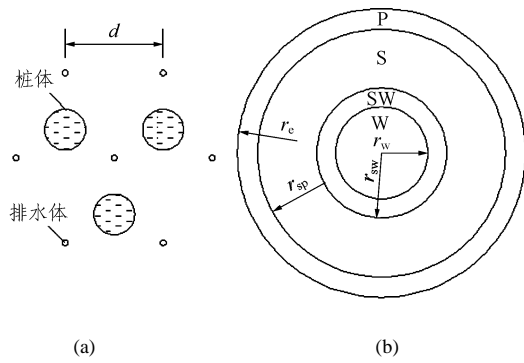


图1 复合地基平面布置示意图  
Fig.1 Arrangement plan of composite ground

$r_{sp} = r_c(1 - m_p)^{0.5}$ ,  $m_p$  为桩置换率。当然, 采用透水性较强的散体材料桩不会再和竖向排水体联合应用。当没有竖向排水体时, 将桩体 P 已移至图 1(b) 中排水体 W 处。

### 3 向内径向排水固结方程推导与求解

#### 3.1 基本方程

##### 3.1.1 平衡条件及应力 - 应变关系

$$\bar{\sigma}_w m_w + \bar{\sigma}_{sw} m_w (s^2 - 1) + \bar{\sigma}_s (1 - m_w s^2 - m_p) + m_p \bar{\sigma}_p = q \quad (1)$$

其中,

$$m_w = A_w / A_e, \quad s = r_{sw} / r_w, \quad s = r_{sw} / r_w \quad (2)$$

式中:  $\bar{\sigma}_w$ ,  $\bar{\sigma}_{sw}$ ,  $\bar{\sigma}_s$ ,  $\bar{\sigma}_p$  分别为排水体、涂抹区、天然土、桩体平均总应力;  $m_w$ ,  $m_p$  分别为排水体、桩体置换率;  $q$  为填土平均荷载;  $A_w$ ,  $A_e$  分别为排水体及其有效作用范围的面积。

$$\frac{\bar{\sigma}_w - \bar{u}_w}{E_w} = \frac{\bar{\sigma}_{sw} - \bar{u}_{sw}}{E_{sw}} = \frac{\bar{\sigma}_s - \bar{u}_s}{E_s} = \frac{\bar{\sigma}_p - \bar{u}_p}{E_p} \quad (3)$$

式中:  $\bar{u}_w$ ,  $\bar{u}_{sw}$ ,  $\bar{u}_s$ ,  $\bar{u}_p$  分别为排水体、涂抹区、天然土、桩体平均孔压;  $E_w$ ,  $E_{sw}$ ,  $E_s$ ,  $E_p$  分别为排水体、涂抹区、天然土、桩体压缩模量。

设排水体周围有孔压区半径为  $r_d$ ,  $\bar{u}_d$  为排水体周围有孔压区平均孔压,  $\bar{u}_w = \bar{u}_d \alpha_w$ 。由式(1), (3) 得桩间土体积应变为

$$\varepsilon_v = \varepsilon_z = \frac{q - \bar{u}}{E_c} = \frac{q - (1 - m_w - m_u + m_w \alpha_w) \bar{u}_d}{E_c} \quad (4)$$

式中:  $\bar{u}$ ,  $E_c$  分别为  $r_c$  圆内平均孔压和平均压缩模

量;  $m_u$  为无孔压区域的置换率。

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \frac{-1}{E_s \alpha_E} \frac{\partial \bar{u}_d}{\partial t} \quad (5)$$

其中,

$$\alpha_E = \frac{1 - m_w s^2 - m_p + N_w m_w + N_s m_w (s^2 - 1) + N_p m_p}{1 - m_w + m_w \alpha_w - m_u} \quad (6)$$

$$N_w = \frac{E_w}{E_s}, \quad N_s = \frac{E_{sw}}{E_s}, \quad N_p = \frac{E_p}{E_s} \quad (7)$$

##### 3.1.2 渗流条件

$$\left. \begin{aligned} \frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \bar{u}_d}{\partial z^2} + \frac{k_{hsw}}{\gamma_w} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) &= -\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \\ (r_w \leq r \leq r_{sw}) \\ \frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \bar{u}_d}{\partial z^2} + \frac{k_{hs}}{\gamma_w} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) &= -\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \\ (r_{sw} \leq r \leq r_{sp}) \\ \frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \bar{u}_d}{\partial z^2} + \frac{k_{hp}}{\gamma_w} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) &= -\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \\ (r_{sp} \leq r \leq r_d) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中:  $k_v$  为土体平均竖向渗透系数;  $k_{hsw}$ ,  $k_{hs}$ ,  $k_{hp}$  分别为涂抹区、天然土、桩身水平渗透系数。

$$k_v = \frac{k_{vsw} m_w (s^2 - 1) + k_{vs} (1 - m_w s^2 - m_p) + k_{vp} m_p \delta_2}{1 - m_w - m_p \delta_1} \quad (9)$$

式中:  $k_{vsw}$ ,  $k_{vs}$ ,  $k_{vp}$  分别为涂抹区、天然土、桩身竖向渗透系数;  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  为开关系数。

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 &= \frac{r_e^2 - r_d^2}{r_e^2 - r_{sp}^2} \\ \delta_2 &= \frac{r_d^2 - r_{sp}^2}{r_e^2 - r_{sp}^2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

### 3.2 求解条件

#### 3.2.1 初始条件

$$\left. \begin{aligned} u_d &= u_0 \quad (t = 0) \\ u_0 &= \frac{q}{1 - m_u} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中:  $u_0$  为初始孔压。

#### 3.2.2 边界条件

$$\left. \begin{aligned} u_r &= 0 \quad (z=0) \\ \frac{\partial u_r}{\partial z} &= 0 \quad (z=H) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中： $L$  为排水体长度，单面排水时  $H=L$ ，双面排水时， $H=L/2$ 。

$$\left. \begin{aligned} \pi r_w^2 k_w \frac{\partial^2 u_w}{\gamma_w \partial z^2} &= -2\pi r_w k_{hs} \frac{\partial u_r}{\gamma_w \partial r} - \pi r_w^2 \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (r=r_w) \\ \frac{\partial u_r}{\partial r} &= 0 \quad (r=r_d) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

当  $r=r_{sw}$ ， $r=r_{sp}$  时，孔压、流量连续。

### 3.3 求解结果

由式(5)，(8)和求解条件，可得

$$u_{sw} = \sum_{i=1}^{\infty} A \left[ \frac{k_{hs}}{k_{hsw}} \left( \ln \frac{r}{r_w} - \frac{r^2 - r_w^2}{2r_d^2} \right) + D_i \right] \quad (r_w \leq r \leq r_{sw}) \quad (14)$$

$$u_s = \sum_{i=1}^{\infty} A \left[ \ln \frac{r}{r_{sw}} - \frac{r^2 - r_{sw}^2}{2r_d^2} + \frac{k_{hs}}{k_{hsw}} \left( \ln \frac{r_{sw}}{r_w} - \frac{r_{sw}^2 - r_w^2}{2r_d^2} \right) + D_i \right] \quad (r_{sw} \leq r \leq r_{sp}) \quad (15)$$

$$u_p = \sum_{i=1}^{\infty} A \left[ \frac{k_{hs}}{k_{hp}} \left( \ln \frac{r}{r_{sp}} - \frac{r^2 - r_{sp}^2}{2r_d^2} \right) + \ln \frac{r_{sp}}{r_{sw}} - \frac{r_{sp}^2 - r_{sw}^2}{2r_d^2} + \frac{k_{hs}}{k_{hsw}} \left( \ln \frac{r_{sw}}{r_w} - \frac{r_{sw}^2 - r_w^2}{2r_d^2} \right) + D_i \right] \delta_2 \quad (r_{sp} \leq r \leq r_d) \quad (16)$$

其中，

$$A = \frac{u_0}{F_a + D_i} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H} e^{-\beta_i t} \quad (17)$$

$$F_a = \frac{F_{sw}(r_{sw}^2 - r_w^2) + F_s(r_{sp}^2 - r_{sw}^2) + F_p(r_d^2 - r_{sp}^2)}{r_d^2 - r_w^2} \quad (18)$$

$$F_{sw} = \frac{k_{hs}}{k_{hsw}} \left( \frac{r_{sw}^2}{r_w^2 - r_w^2} \ln \frac{r_{sw}}{r_w} - \frac{1}{2} - \frac{r_{sw}^2 - r_w^2}{4r_d^2} + \frac{r_w^2}{2r_d^2} \right) \quad (19)$$

$$F_s = \frac{r_{sp}^2}{r_{sp}^2 - r_{sw}^2} \ln \frac{r_{sp}}{r_{sw}} - \frac{1}{2} - \frac{r_{sp}^2 - r_{sw}^2}{4r_d^2} + \frac{r_{sw}^2}{2r_d^2} + \frac{k_{hs}}{k_{hsw}} \left( \ln \frac{r_{sw}}{r_w} - \frac{r_{sw}^2 - r_w^2}{2r_d^2} \right) \quad (20)$$

$$F_p = \left[ \frac{k_{hs}}{k_{hp}} \left( \frac{r_d^2}{r_d^2 - r_{sp}^2} \ln \frac{r_d}{r_{sp}} - \frac{1}{2} - \frac{r_d^2 - r_{sp}^2}{4r_d^2} + \frac{r_{sp}^2}{2r_d^2} \right) + \ln \frac{r_{sp}}{r_{sw}} - \frac{r_{sp}^2 - r_{sw}^2}{2r_d^2} + \frac{k_{hs}}{k_{hsw}} \left( \ln \frac{r_{sw}}{r_w} - \frac{r_{sw}^2 - r_w^2}{2r_d^2} \right) \right] \delta_2 \quad (21)$$

$$\beta_i = \frac{\frac{M^2 C_v}{H^2} \left[ F_a + \frac{2k_{hs} H^2}{k_w M^2} \left( \frac{1}{r_w^2} - \frac{1}{r_d^2} \right) \right] + \frac{2C_h}{r_d^2}}{F_a + \frac{2k_{hs} H^2}{k_w M^2} \frac{1}{r_w^2}} \alpha_E \quad (22)$$

$$D_i = \frac{2k_{hs} \frac{r_d^2 - r_w^2}{r_d^2 r_w^2} + \frac{\gamma_w}{E_s} F_a \beta_i}{k_w \frac{M^2}{H^2} - \frac{\gamma_w}{E_s} \beta_i} \quad (23)$$

$$M = \frac{2i-1}{2} \pi, \quad C_v = \frac{E_s k_{vs}}{\gamma_w}, \quad C_h = \frac{E_s k_{hs}}{\gamma_w} \quad (24)$$

当不考虑排水体压缩性时有

$$D_i = \frac{2k_{hs} H^2}{k_w M^2} \left( \frac{1}{r_w^2} - \frac{1}{r_d^2} \right) \quad (25)$$

$$\beta_i = \left[ \frac{M^2 C_v}{H^2} + \frac{2C_h}{(F_a + D_i)r_d^2} \right] \alpha_E \quad (26)$$

因此，与常规排水固结相比， $\beta_i$  中多了修正系数  $\alpha_E$ ；与陈 蕾等<sup>[3, 5]</sup>的研究成果基本相同，但是考虑的因素更全面。

不同区域  $z$  处平均孔压为

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_w &= u_0 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{D_i}{F_a + D_i} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H} e^{-\beta_i t} \\ \bar{u}_{sw} &= u_0 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{F_{sw} + D_i}{F_a + D_i} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H} e^{-\beta_i t} \quad (r_w \leq r \leq r_{sw}) \\ \bar{u}_s &= u_0 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{F_s + D_i}{F_a + D_i} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H} e^{-\beta_i t} \quad (r_{sw} \leq r \leq r_{sp}) \\ \bar{u}_p &= u_0 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{F_p + D_i}{F_a + D_i} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H} e^{-\beta_i t} \quad (r_{sp} \leq r \leq r_d) \\ \bar{u}_d &= u_0 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H} e^{-\beta_i t} \quad (r_w \leq r \leq r_d) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

井外渗流区域  $z$  处的平均固结度为

$$\bar{U}_d = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H} e^{-\beta_i t} \quad (r_w \leq r \leq r_d) \quad (28)$$

由于  $u_w \approx \frac{D_1}{F_a + D_1} \bar{u}_d$ ，可得

$$\alpha_w \approx \frac{D_1}{F_a + D_1} \quad (29)$$

不同区域整个处理深度的平均孔压为

$$\bar{u}_w = u_0 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{D_i}{F_a + D_i} \frac{2}{M^2} e^{-\beta_i t} \quad (30)$$

$$\bar{u}_{sw} = u_0 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{F_{sw} + D_i}{F_a + D_i} \frac{2}{M^2} e^{-\beta_i t} \quad (r_w \leq r \leq r_{sw}) \quad (31)$$

$$\bar{u}_s = u_0 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{F_s + D_i}{F_a + D_i} \frac{2}{M^2} e^{-\beta_i t} \quad (r_{sw} \leq r \leq r_{sp}) \quad (32)$$

$$\bar{u}_p = u_0 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{F_p + D_i}{F_a + D_i} \frac{2}{M^2} e^{-\beta_i t} \quad (r_{sp} \leq r \leq r_d) \quad (33)$$

$$\bar{u}_d = u_0 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-\beta_i t} \quad (r_w \leq r \leq r_d) \quad (34)$$

井外渗流区域整体平均固结度：

$$\bar{U}_d = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-\beta_i t} \quad (r_w \leq r \leq r_d) \quad (35)$$

由式(1)，(2)得

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_s &= \frac{q + [m_w N_w + m_w (s^2 - 1) N_s + m_p N_p] \bar{u}_s}{1 - m_w s^2 - m_p + m_w N_w + m_w (s^2 - 1) N_s + m_p N_p} \\ &\quad \frac{m_w \bar{u}_w + m_w (s^2 - 1) \bar{u}_{sw} + (m_p - m_u) \bar{u}_p}{1 - m_w s^2 - m_p + m_w N_w + m_w (s^2 - 1) N_s + m_p N_p} \\ \bar{\sigma}_w &= N_w (\bar{\sigma}_s - \bar{u}_s) + \bar{u}_w \\ \bar{\sigma}_{sw} &= N_s (\bar{\sigma}_s - \bar{u}_s) + \bar{u}_{sw} \\ \bar{\sigma}_p &= N_p (\bar{\sigma}_s - \bar{u}_s) + \bar{u}_p \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

井土应力比为

$$R_w = \frac{\bar{\sigma}_w (1 - m_w - m_p)}{\bar{\sigma}_{sw} m_w (s^2 - 1) + \bar{\sigma}_s (1 - m_w s^2 - m_p)} \quad (37)$$

桩土体应力比为

$$R_p = \frac{\bar{\sigma}_p (1 - m_w - m_p)}{\bar{\sigma}_{sw} m_w (s^2 - 1) + \bar{\sigma}_s (1 - m_w s^2 - m_p)} \quad (38)$$

求整个深度的平均桩(井)土应力及其比值的公式与式(36)~(38)相同，只是以各区域整个深度的平均孔压  $\bar{u}$  代替  $z$  处平均孔压  $\bar{u}$ 。

### 4 向外径向排水固结方程推导与求解

透水桩发生向外(土体)的径向排水固结，桩周土成为竖向排水体。此时，以桩体有效作用范围为研究对象，分析桩体的固结。渗流条件为

$$\left. \begin{aligned} \frac{k_{vp}}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \bar{u}_p}{\partial z^2} + \frac{k_{hp}}{\gamma_w} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \bar{u}_p}{\partial r} \right) &= - \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \\ \varepsilon_v &= \frac{N_p q - N_p (\alpha_w + m) \bar{u}_p}{E_p (N_p m + 1 - m)} \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

求解条件与节2类似，只是  $r = r_p$  时，有

$$\pi (r_e^2 - r_p^2) k_s \frac{\partial^2 u_s}{\gamma_w \partial z^2} = -2\pi r_p k_{hp} \frac{\partial u_p}{\gamma_w \partial r} - \pi (r_e^2 - r_p^2) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (40)$$

式(39)的解为

$$\bar{u}_p = \sum_{i=1}^{\infty} A \left[ \frac{2(r_p^2 - r^2)}{r_p^2} + D_i \right] \quad (41)$$

$$\beta_i = \frac{\frac{M^4 C_{vp} k_{vs} r_p^2}{H^4} + \frac{8M^2 C_{hp} k_{vs}}{H^2} + \frac{8M^2 C_{vp} k_{hp} r_p^2}{H^2 (r_e^2 - r_p^2)}}{\frac{M^2 k_{vs} r_p^2}{H^2} + 8k_{hp} + \frac{8k_{hp} r_p^2}{r_e^2 - r_p^2}} \alpha_E \quad (42)$$

$$D_i = \frac{8k_{hp} + \frac{r_e^2 - r_p^2}{E_p} \beta_i \gamma_w}{(r_e^2 - r_p^2) \left( \frac{M^2 k_{vs}}{H^2} - \frac{\beta_i \gamma_w}{E_p \alpha_E} \right)} \quad (43)$$

$$\alpha_E = \frac{N_p m + 1 - m}{(m + \alpha_w) N_p}, \quad \alpha_w \approx \frac{D_1}{1 + D_1} \quad (44)$$

$$C_{vp} = \frac{E_p k_{vp}}{\gamma_w}, \quad C_{hp} = \frac{E_p k_{hp}}{\gamma_w} \quad (45)$$

当不考虑桩周土压缩性时，

$$D_i = \frac{8k_{hp}H^2}{M^2k_{vs}(r_e^2 - r_p^2)} \quad (46)$$

$$\beta_i = \left[ \frac{M^2C_{vp}}{H^2} + \frac{8C_{hp}}{(1+D_i)r_p^2} \right] \alpha_E \quad (47)$$

z 处的平均固结度为

$$\bar{U} = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H} e^{-\beta_i t} \quad (48)$$

整体平均固结度:

$$\bar{\bar{U}} = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-\beta_i t} \quad (49)$$

桩土应力及其比值为

$$\bar{\sigma}_p = \frac{N_p q + (1 - m - N_p \alpha_w) \bar{u}_p}{N_p m + 1 - m} \quad (50)$$

$$\bar{\sigma}_s = \frac{q + m(N_p - \alpha_w - 1) \bar{u}_p}{N_p m + 1 - m} \quad (51)$$

$$R_p = \frac{N_p q + (1 - m - N_p \alpha_w) \bar{u}_p}{q + m(N_p - \alpha_w - 1) \bar{u}_p} \quad (52)$$

### 5 应用研究

图 2~5 为对天然地基、砂井地基、搅拌桩复合地基、搅拌桩+袋装砂井地基进行固结分析的结果 (图中 D 代表砂井, I 表示不透水, IDM 代表不透水搅拌桩, L 代表低固结系数, P 表示透水, LPDM 代表低固结系数透水搅拌桩, HPDM 代表高固结系数透水搅拌桩, OG 为天然地基. C 为采用陈 蕾

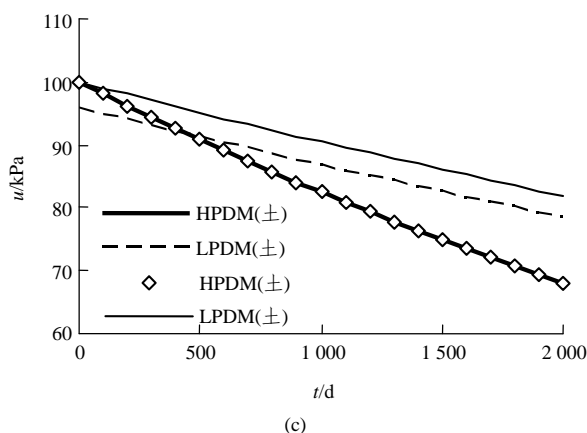
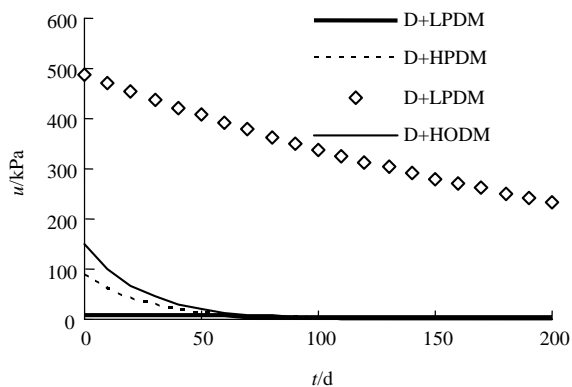
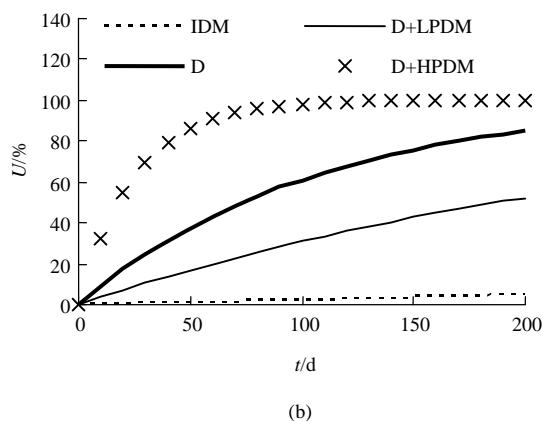
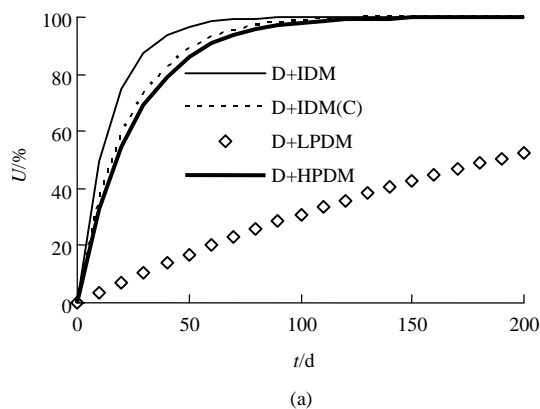
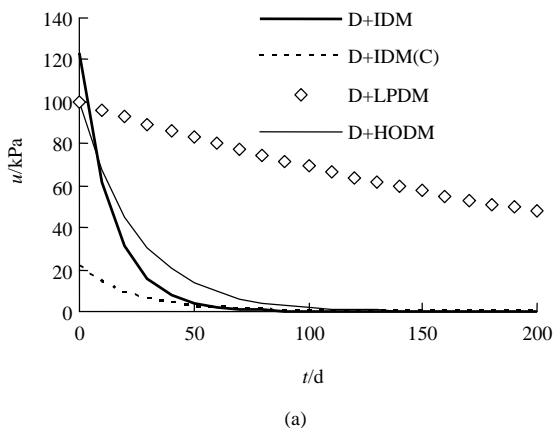


图 2 复合地基中土体的平均孔压  
Fig.2 Average excess pore water pressure of soil in composite ground



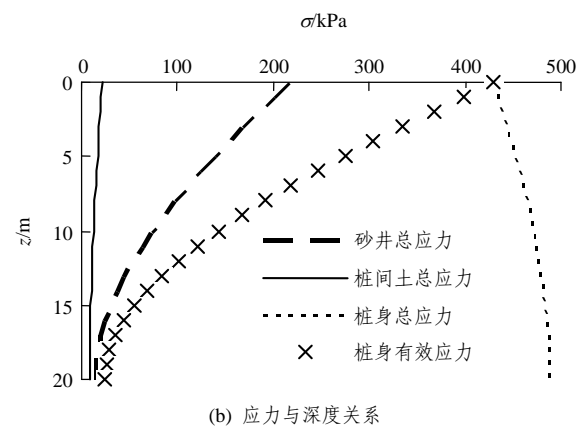
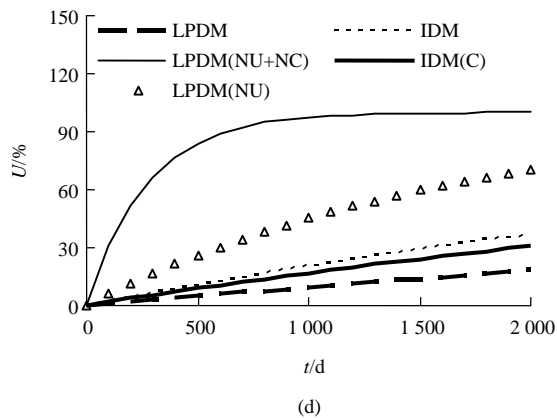
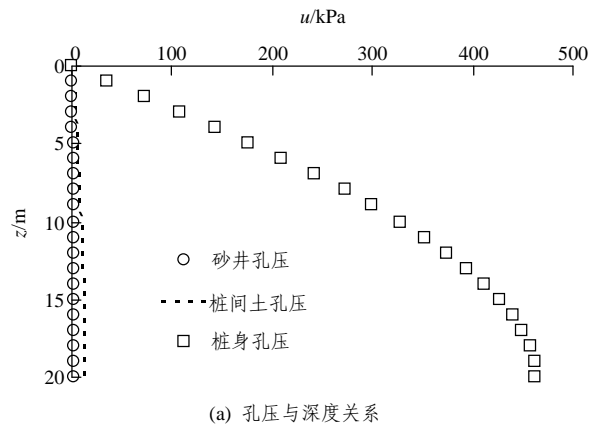
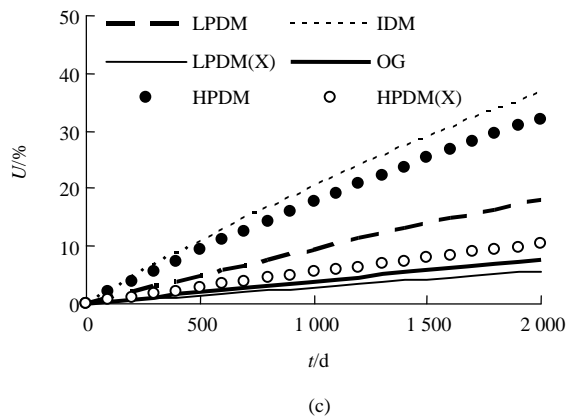


图3 不同方法处理的地基的固结度

Fig.3 Degree of consolidation of ground treated with different methods

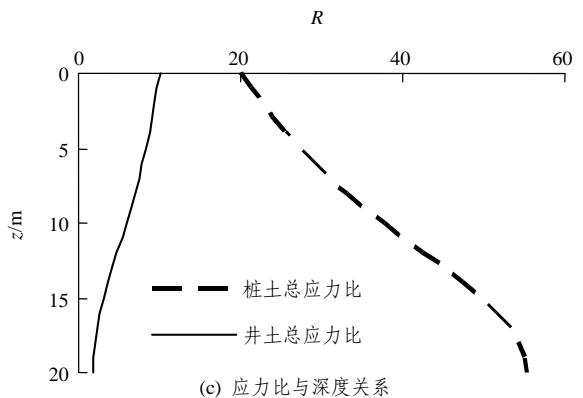
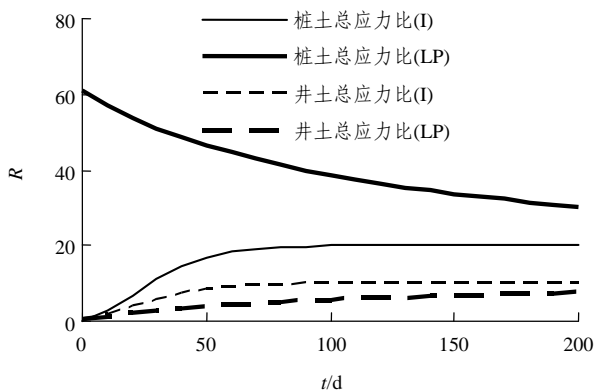


图4 砂井搅拌桩复合地基的应力比

Fig.4 Stress ratio of composite ground with sand sack and deep-mixing piles

等<sup>[3]</sup>公式得到的曲线, X 表示采用邢皓枫等<sup>[8]</sup>公式得到的曲线)。NC, NU 分别表示不考虑排水体压缩和孔压。固结分析时参数取值为: 搅拌桩直径为 55 cm, 袋装砂井直径为 7 cm, 桩(井)间距为 1.2 m(三角形布置), 处理深度为 20 m(单面排水),  $E_s=1.5$  MPa,  $E_w=15$  MPa,  $E_p=30$  MPa,  $k_{vs}=k_{hs}=5\times 10^{-8}$  cm/s,  $k_w=1\times 10^{-2}$  cm/s, 地面荷载为 100 kPa。

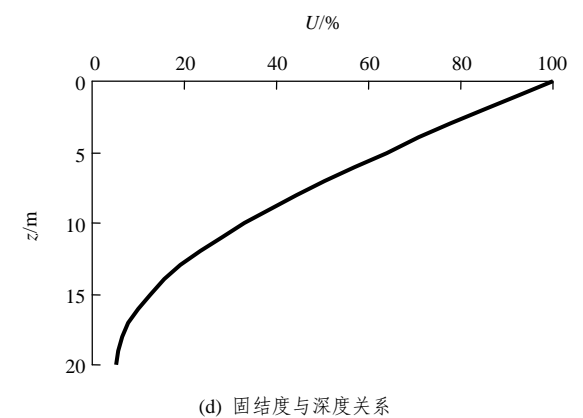


图5 砂井低固结系数搅拌桩复合地基各参数与深度的关系( $t=15$  d)

Fig.5 Relation curves between composite ground treated with sand sack and deep-mixing piles with low coefficient of consolidation( $t=15$  d)

工程实践中复合地基的桩体的排水性能差别较大, 为了对比桩的透水性对复合地基固结的影响, 本文对搅拌桩分别取较高的渗透系数和较低的渗透系数:  $k_p = 1 \times 10^{-8}$  (HPDM) 或  $1 \times 10^{-10}$  cm/s (LPDM), 固结分析时不考虑涂抹作用和砂井的压缩性。由图 2~5 可知:

(1) 本文方法计算的固结度与陈 蕾等<sup>[3]</sup>的研究成果接近, 但是由于没有考虑排水所占面积,  $\alpha_E$  更大, 因此计算的固结度也更大。孔压大于陈 蕾等<sup>[3]</sup>的研究成果中的孔压, 通过工程实例可知, 本文更加合理。

(2) 不透水桩能加快地基的排水固结, 透水桩能否加快地基的排水固结则取决于桩的固结系数与地基(包括排水体)的固结系数的关系, 即桩体不一定能加快排水固结。

(3) 其他条件相同时, 不透水桩复合地基的固结度大于透水桩复合地基, 高固结系数透水桩复合地基固结度大于低固结系数透水桩复合地基。

(4) 透水桩复合地基不同深度处的桩土应力、总应力比、孔压、固结度不同; 不透水桩复合地基则相同。

(5) 桩土总应力比除了与桩土模量比、深度、时间等因素有关外, 透水桩还与桩土渗透系数比、桩与排水体的相对位置等因素有关。

图 6, 7 是某碎石桩工程固结度分析结果。碎石桩直径为 40 cm, 桩间距为 1.2 m (三角形布置), 处理深度为 20 m (单面排水)。  $r_{sw} = 30$  cm,  $E_s = 1.5$  MPa,  $E_{sw} = 1$  MPa,  $E_w = 15$  MPa,  $k_{vs} = k_{ns} = 1 \times 10^{-7}$  cm/s,  $k_{sw} = 5 \times 10^{-8}$  cm/s,  $k_w = 1 \times 10^{-3}$  cm/s, 地面荷载为 100 kPa。可见, 碎石桩内孔压较大, 不考

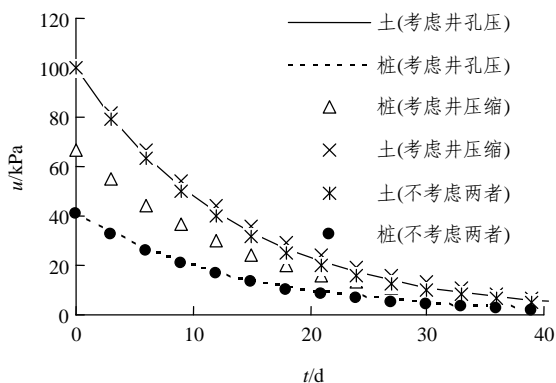


图 6 碎石桩及桩间土的孔压

Fig.6 Excess pore water pressure of gravel pile and soil

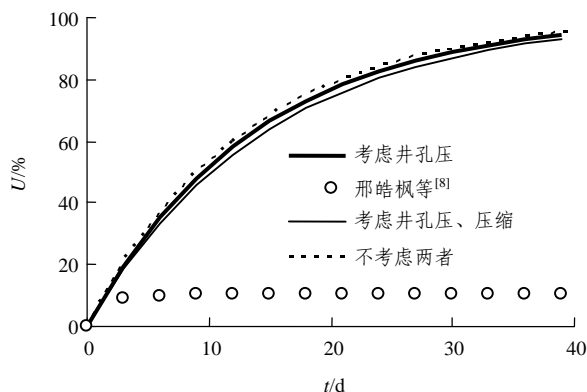


图 7 不同方法确定的碎石桩复合地基固结度

Fig.7 Degree of consolidation of ground treated with gravel piles by different methods

虑碎石桩压缩性时  $\alpha_w = 0.41$ , 不考虑碎石桩压缩性时  $\alpha_w = 0.67$ 。考虑碎石桩孔压、压缩的固结度小于理想井的固结度, 但是两者非常接近, 不考虑碎石桩的井阻和井压缩性产生的误差不大。考虑碎石桩孔压、压缩对桩间土孔压影响不大, 但是碎石桩压缩性对桩身孔压影响较大, 说明邢皓枫等<sup>[8]</sup>研究中的固结度存在明显错误。

## 6 结 论

(1) 路堤下复合地基固结时桩土之间荷载发生转移, 桩土应力不断变化, 孔压变化不等于有效应力变化。本文推导了考虑桩体排水性能、桩土荷载转移、排水体压缩性和井阻的路堤下复合地基孔压、固结度、桩土应力比的解析解。

(2) 分析表明, 不透水桩复合地基的固结度大于透水桩复合地基。高固结系数透水桩复合地基固结度大于低固结系数透水桩复合地基。

(3) 不透水桩能加快地基排水固结, 透水桩不一定加固排水固结。复合地基能否能够加速排水固结取决于桩土渗透系数比值、桩土模量比等。

(4) 忽略排水体的井阻和压缩性对固结度影响不大。

### 参考文献(Reference):

[1] 郑俊杰, 刘志刚, 吴世明. 石灰桩复合地基固结分析[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(6): 111 - 113.(ZHENG Junjie, LIU Zhigang, WU Shiming. Consolidation analysis of composite ground with



- lime-fly ash pile[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2000, 28(6): 111 - 113.(in Chinese))
- [2] 陈俊生, 唐彤芝, 赵维炳, 等. 混凝土芯砂石桩复合地基现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 957 - 962.(CEHN Junsheng, TANG Tongzhi, ZHAO Weibing, et al. Field tests on composite foundation with concrete-cored sand-gravel piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 957 - 962.(in Chinese))
- [3] 陈 蕾, 刘松玉, 洪振舜. 排水粉喷桩复合地基固结计算方法的探讨[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 198 - 201.(CHEN Lei, LIU Songyu, HONG Zhenshun. Study of consolidation calculation of soft ground improved by dry jet mixing combined with vertical drain method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2): 198 - 201.(in Chinese))
- [4] 吴燕开, 方 磊, 李新伟. 预应力管桩联合塑料排水板加固软土地基技术探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 3 572 - 3 576. (WU Yankai, FANG Lei, LI Xinwei. Technical discussion on tube pile combined with prefabricated strip drain to soft soil treatment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3 572 - 3 576.(in Chinese))
- [5] 龚晓南. 复合地基[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992: 167 - 168. (GONG Xiaonan. Composite foundation[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1992: 167 - 168.(in Chinese))
- [6] 张土乔, 龚晓南, 曾国熙. 水泥土桩复合地基固结分析[C]// 曾国熙教授科技论文选集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 105 - 110.(ZHANG Tuqiao, GONG Xiaonan, ZENG Guoxi. Consolidation analysis of composite ground with cement lay piles[C]// Selected Works on Soil Mechanics of Professor Zeng Guoxi. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997: 105 - 110.(in Chinese))
- [7] 邢皓枫, 龚晓南, 杨晓军. 碎石桩复合地基固结简化分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 521 - 523.(XING Haofeng, GONG Xiaonan, YANG Xiaojun. Simplified analysis for consolidation of gravel-pile composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 521 - 523.(in Chinese))
- [8] 邢皓枫, 龚晓南, 杨晓军. 碎石桩加固双层地基固结简化分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1 739 - 1 742.(XING Haofeng, GONG Xiaonan, YANG Xiaojun. Simplified analysis for consolidation of double-layered ground reinforced by gravel-piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1 739 - 1 742.(in Chinese))
- [9] 邢皓枫, 龚晓南, 杨晓军. 刚性基础下水泥土桩复合地基固结分析[J]. 浙江大学学报, 2006, 40(3): 485 - 488.(XING Haofeng, GONG Xiaonan, YANG Xiaojun. Consolidation analysis of cement-pile composite foundation under rigid foundation[J]. Journal of Zhejiang University, 2006, 40(3): 485 - 488.(in Chinese))
- [10] 杨 涛, 李国维. 路基荷载下不排水端承桩复合地基固结分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1 831 - 1 836.(YANG Tao, LI Guowei. Consolidation analysis of composite ground with undrained penetrating piles under embankment load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(12): 1 831 - 1 836.(in Chinese))
- [11] 孙 举, 谢新宇, 谢康和. 双层散体材料桩复合地基固结理论[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 321 - 326.(SUN Ju, XIE Xinyu, XIE Kanghe. Analytical theory for consolidation of double layered composite ground with granular columns[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 321 - 326.(in Chinese))