

堤坝复合地基的计算参数研究

Research on the parameters of composite ground of the dam

李广信, 余斌, 宋二祥
(清华大学土木水利学院岩土工程研究所, 北京 100084)

摘要: 在常规三轴试验的基础上得出了用复合试样、混和试样、曲线叠加、数值试验、参数叠加和分层试样确定的堤坝复合地基的 Duncan-Chang 模型参数, 并用这些参数进行了有限元计算。结果表明: 在复合地基非线性有限元计算参数的选取时应考虑桩土间的相互作用, 采用复合试样和复合试样数值试验的参数是合理的, 并在复合地基局部水平应力大于竖直应力的区域改用分层试样参数。

关键词: 复合试样; 邓肯-张模型; 有限元方法; 复合地基

中图分类号: TU 473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2003)01-0018-05

作者简介: 李广信(1941-), 男, 黑龙江省宾县人, 博士, 教授, 博士生导师。现任中国土木工程学会土力学及岩土工程分会副理事长、中国土工合成材料协会常务理事, 主要从事土的本构关系、基础工程和土工合成材料等方面的研究。

LI Guang-xin, YU Bin, SONG Er-xiang

(Institute of Geotechnical Engineering of Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on a series of triaxial compression tests, the writers get the Duncan-Chang model parameters of the composite sample, the mixed sample, the curve-added method, the parameter-added method and the layered sample. The results of the tests and computation show that the pile-soil interaction should be considered in the study of the composite ground by FEM. It is shown that the parameters of composite sample and numerical tests in FEM are reasonable and they should be replaced by that of layered sample in the area where horizontal stress is greater than vertical stress.

Key words: composite sample; Duncan-Chang model; FEM; composite ground

0 前言*

复合地基通常是由不同材料的两种载体组成。其核心问题是二者的相互作用和共同作用的问题。使复合地基中加固体与基土间互补与互助是正确设计与应用的关键。这包括加固体在施工过程中对基土的加密、胶结、加筋和弥补缺陷等; 也包括在荷载作用下的荷载扩散、相互约束及尽可能同时发挥两种载体的承载能力^[1-3]。但不合理地使用其效果可能适得其反^[4]。

云南某土坝拟采用振冲碎石桩加固其 20 m 左右的粘性土覆盖层。坝体与地基采用 Duncan-Chang 双曲线模型进行有效应力的应力变形分析。若采用碎石、基土和界面三种模型及其参数, 在碎石桩及桩间土中分割单元来计算, 其地基的单元及节点就太多了, 有限元的分析过程会变得很复杂, 实用性比较差。比较实用的方法是将复合地基均一化成一种材料, 用一种双曲线模型的参数进行计算^[5]。经讨论, 提出如下几种方案:

(1) 复合试样法: 按质量比 0.15:0.85 制成含碎石圆柱芯的复合圆柱试样, 对碎石部分采用相似模拟缩小, 用此复合试样进行各种围压下的三轴排水试验, 确定有关模型参数^[6]。

(2) 复合试样数值试验法: 考虑原型料复合试样尺

寸可能很大, 很难进行复合试样试验。可以通过两种材料的三轴试验确定弹塑性模型的参数, 用能较好反映碎石剪胀性的弹塑性模型及界面单元, 通过有限元法计算复合试样这样的边值问题。计算其在 $\sigma_3 = 100, 200, 300$ kPa 下的三轴试验条件下应力应变体应变关系曲线, 然后用计算得到的应力应变曲线确定 Duncan-Chang 模型的参数^[7]。

(3) 混和试样法: 按碎石桩的实际置换率计算后, 将质量比为 0.15:0.85 的碎石与基土充分混和, 进行三轴排水试验。

(4) 参数叠加法: 分别进行基土和碎石桩的三轴排水试验; 然后将参数按 0.15:0.85 的比例加权平均。

(5) 曲线叠加法: 在同一围压下, 将相同 ε_1 所对应的基土与碎石排水三轴试验曲线上的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 和 ε_2 按 0.15:0.85 叠加, 从而得到各种围压下叠加后的应力应变体应变曲线, 根据这些曲线确定模型参数。

(6) 分层试样法: 它是考虑大主应力与碎石桩接近垂直时的情况, 按质量比 0.15:0.85 将碎石放在中间形成夹层。

* 基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (1999000336)

表 1 碎石的物理力学性质(1997, 田海等)
Table 1 Physical properties of gravel(1997, TianHai)

比重 G_s	平均粒径 D_{50} / mm	不均匀系数 D_{60} / D_{10}	最大干密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	最小干密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	试验干密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	相对密度 $D_r / \%$
2.67	3.66	1.95	1.84	1.39	1.70	75

表 2 白河堡土料物理力学性质(1997, 田海等)
Table 2 Physical properties of Baihepu soil(1997, TianHai)

比重 G_s	最优含水量 $w / \%$	最大干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	液限 $w_L / \%$	塑限 $w_P / \%$	塑性指数 I_P	压缩系数 a_v / kPa^{-1}	渗透系数 $K / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
2.71	16	1.70	26.6	16.5	10.1	1.7×10^{-7}	1.6×10^{-7}

本文主要对以上各种参数确定方法的合理性进行讨论。并用土坝典型断面的有限元计算进行分析比较。

1 试验及结果

1.1 试样的制备

碎石采用某建筑工地所使用的碎石料, 分为 1~ 2 mm, 2~ 3 mm, 3~ 5 mm, 5~ 7 mm 四级进行筛分, 然后每级分别按 10%, 20%, 55%, 15% 的比例配置并混和均匀, 这一级配相当于对碎石桩原型料的相似模拟, 模型比为 10~ 20, 其物理性质见表 1。所有试样中的土, 选用白河堡黏土, 其物理力学性质见表 2。

素土、碎石按照常规方法制样。复合试样如图 1(a) 所示, 制样时, 在压力室底座中央放一根薄铜管, 铜管外径为 38 mm, 厚为 1.0 mm, 然后分层击实基土形成外径为 101 mm, 内径为 38 mm 厚壁筒。然后, 取出铜管, 加入碎石芯击实。混和试样的制备方法如下: 先计算复合试样中碎石和素土的干质量比, 然后按照这个质量比将碎石和素土充分混合。分层试样中碎石和素土的质量比同复合试样, 试样上下分三段, 中间是碎石, 上下是素土, 如图 1(b) 所示。

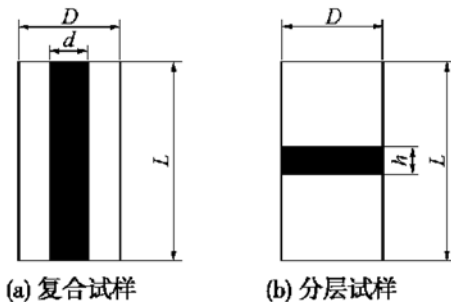


图 1 复合试样和分层试样示意图

Fig. 1 The composite sample and the layered sample

1.2 试验方法

碎石、复合试样三轴试验是田海、李广信 1997 年进行的^[8], 试样外径 100 mm, 内径 20 mm。加载过程采用应变控制, 加载速率为 0.24 mm/min。素土、混和试样、分层试样三轴试验是由本文作者进行的, 试样直径

39 mm, 加载速率为 0.08 mm/min。碎石为干燥状态, 素土为不饱和状态。试样在整个试验过程中保持与大气相通, 通过压力室量测试样体变。试验围压分别为, $\sigma_3 = 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300 \text{ kPa}$, 当试样的轴向应变大于 15% 时, 停止试验。

1.3 试验结果

通过以上试验, 能得到碎石、素土、复合试样、混和试样以及分层试样的应力应变及体应变曲线。根据素土和碎石的曲线能计算得到曲线叠加的曲线, 进一步可整理出各种 Duncan- Chang $E - B$ 模型参数。还可以直接将素土和碎石的参数叠加得到参数叠加结果。李广信、田海、黄文峰(1999) 还采用复合试样数值试验法求出了复合试样的有限元计算参数^[5]。这些参数见表 3 所示:

表 3 各种试样的 Duncan- Chang $E - B$ 模型参数表

Table 3 Duncan- Chang $E - B$ model parameters of different samples

试样种类	c / kPa	$\varphi / (^\circ)$	R_f	K	n	K_b	m
素土试样	37.9	30.5	0.83	77.6	0.39	30.5	-0.24
碎石试样	19.9	44.0	0.83	664.0	0.58	1054.0	-0.47
复合试样	43.9	28.8	0.87	268.5	0.39	66.1	-0.01
数值试验	55.0	25.8	0.88	310.0	0.00	60.0	0.38
参数叠加	35.4	32.4	0.83	159.7	0.42	173.8	-0.27
曲线叠加	36.7	31.2	0.86	154.9	0.19	57.7	-0.21
混和试样	26.0	32.9	0.63	59.3	0.63	23.3	0.31
分层试样	42.7	31.6	0.69	84.3	0.46	35.1	0.26

2 几种确定参数方法的分析讨论

(1) 复合试样法: 这种试样的试验能反映桩土间的相互作用及在承担荷载时的共同作用。碎石强烈的剪胀使复合试样的两种材料界面处发生了约束和反约束作用, 使碎石实际上的约束围压大大高于施加在复合试样上的围压 σ_{3c} 。这种桩间土横向的约束使碎石的作用得以加强; 但碎石桩的剪胀性造成桩周土的 $\sigma_3 = \sigma_0$ 小于施加在复合试样上的围压 σ_3 ^[9]。李广信等(1999) 通过数值试验计算得出了复合试样围压 100 kPa 时, 复合试样中碎石和素土的最小主应力与应变

关系,如图 2 所示^[5]。

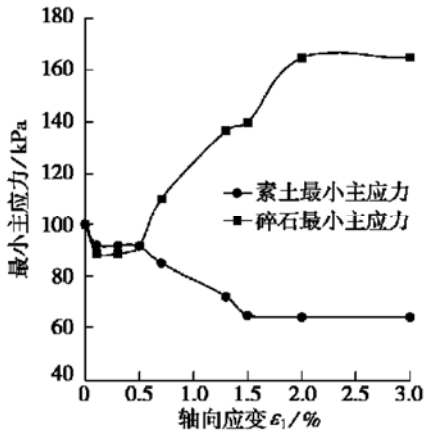


图 2 围压为 100 kPa 时复合试样中碎石和素土的最小主应力与应变关系图

Fig. 2 $\sigma_3 - \epsilon_1$ curves of gravel and soil in the composite sample under $\sigma_{3c} = 100$ kPa

(2) 复合试样数值试验: 从表 3 的结果可以看出, 数值试验法得到的参数与复合试样法大体上是一致的^[3], 但指数 n, m 有差别。

(3) 曲线叠加法: 曲线叠加考虑了加固体与基土间的共同变形, 亦即在相同的 ϵ_1 下二者加权平均, 但是并没有考虑二者的相互作用。因而得到的 K 及 K_b 参数偏小。

(4) 参数叠加法: 这种方法得到的参数突出问题是 K_b 比复合试样高几倍。这是由于碎石极小的体积压缩性及随 ϵ_1 增加的剪胀性, 使其 K_b 很大(1000 左右), 其 15% 的权重亦将大大提高了复合的 K_b 值。假如: 复合试样中以一个体积不可压缩的小圆柱代替碎石, 亦即其 $K_b = \infty$ 。尽管它只占 15%, 但叠加的 $K_b \rightarrow \infty$ 。 K_b 从参数整理来分析, 通常是用应力水平 70% 时的主应力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 及此时的体积应变 ϵ_v 来求的。而试验结果表明: 在围压 100 kPa 时, 碎石和素土达到 70% 应力水平时的轴向应变分别是 0.13% 和 7%, 二者相差很大。参数叠加实际上是将两者处于不同轴向应变时的参数进行了叠加, 它没有考虑两种载体的共同变形。可见参数叠加的不合理性。

(5) 混和试样法: 用这种混和试样模拟复合地基, 忽视了两种载体之间的相互作用, 是相当荒唐的形而上学思想与做法。另外, 尽管其密度与复合试样完全一样, 但碎石被基土个个包围, 形不成骨架。由于每个碎石颗粒是以 G_s, v_w 的形式被土包围, 所以混和试样中的黏土部分比天然地基土更疏松。其 c, K, K_b 甚至比素土的值更小。

(6) 分层试样法: 试样中的碎石夹层起一定的约束作用, 与素土比较: c, φ, K, K_b 均有少量的增加。

3 有限元分析

3.1 有限元计算过程

本文采用清华大学水利系 1998 年 9 月为堤坝及基础工程结构分析而编写的通用程序软件包 THGEA 来进行计算。有限元采用 Duncan-Chang $E - B$ 模型参数进行非线性静力分析, 着重计算了复合地基的位移和应力。堤坝是平面应变问题, 且坝体和地基是镜面对称的, 故可取其一半进行平面二维有限元计算。土坝地基有限元计算的网格划分、计算坝体及复合地基的尺寸如图 3 所示, 均采用四节点四边形单元, 共计 821 个节点, 750 个单元。距离坝体坡脚 4 m 以内采用不同的试样参数进行比较, 4 m 以外用素土的参数。加荷共分 10 级, 均采用施工增量来计算。

运用以上方法, 作者分别采用下列参数进行了有限元分析: 复合试样、数值试验、参数叠加、曲线叠加、混和试样。为了考虑大主应力与碎石桩接近垂直时的情况, 笔者又在复合地基局部 $\sigma_x > \sigma_y$ 的区域用分层试样参数代替复合试样参数进行了计算。

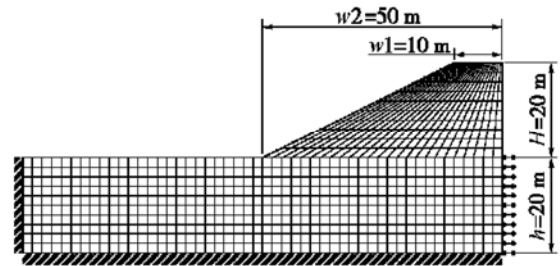


图 3 土坝地基有限元计算的网格划分图

Fig. 3 Mesh of the ground of the earth dam

3.2 计算结果分析

(1) 对地基沉降的影响

如图 4 所示是复合试样参数计算得出的地基沉降等值线。

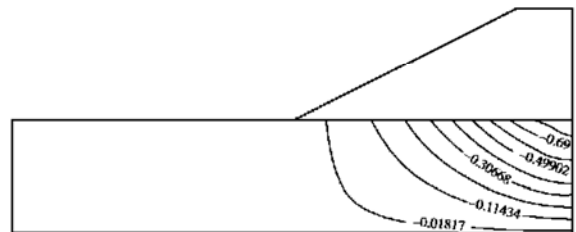


图 4 复合地基沉降等值线

Fig. 4 Contour lines of settlement

几种参数计算得出的沉降等值线的形状大致相同。计算坝体中轴线下地基内各点的沉降列于表 4。从表 4 可以看出, 各种参数得出的最大沉降的大小顺序是: 混和试样、曲线叠加、复合试样结合分层试样、复合试样、数值试验、参数叠加。在表 3 中, 不同方法确

定的参数中, 相差比较大的是 K 和 K_b 。 K 为 $\alpha_3 = 100$ kPa 时的初始模量 E_i , 无量纲, 它对沉降变形的结果影响较大。文献[10]指出, K_b 反映了土体的体积压缩性, 对沉降计算是比较敏感的, K_b 越大, 沉降越小。结合表 3 的试验计算参数和表 4 的沉降的计算结果看出:

a) 数值试验和复合试样的 K 、 K_b 相差不大, 两者的沉降也比较接近。

b) 混和试样和复合试样相比较, $K_{复合} = 269$, $K_{混和} = 59.3$, 两者相差近 4 倍。从表 4 可以看出, 后者的沉降是前者的两倍多。可见在用 Duncan-Chang 参数计算堤坝的沉降时, K 是比较敏感的。

c) 比较参数叠加和复合试样的参数, 虽然前者的 K 值较后者小, 但 K_b 约为后者的 3 倍, 因此前者计算出的沉降值小于后者。

d) 对曲线叠加来说, 其 K 值明显小于复合试样, 故计算所得沉降较大。

表 4 坝体中轴线下地基内各点的沉降

Table 4 Settlement of ground in different depth m

深度	复合试样	数值试验	混和试样	参数叠加	曲线叠加	复合试样加分层试样
0	0.884	0.756	1.980	0.690	1.248	0.890
8	0.556	0.464	1.260	0.419	0.785	0.560
16	0.183	0.152	0.354	0.138	0.263	0.184

从表 4 中还可看出: 在复合地基中 8 m 深处, 用不同参数计算的沉降值的大小顺序与最大沉降值的大小顺序是相同的; 16 m 深处也有相同的结论。亦即, 不同参数对复合地基的最大沉降和地基内部的沉降的影响都是比较大的。

对土坝来说, 在坡脚附近的地基一定深度范围内存在水平应力大于竖直应力的区域。根据有限元计算结果, 绘制 $\sigma_x - \sigma_y$ 的等值线, 如图 5 所示。

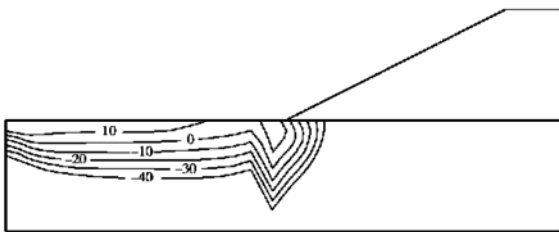


图 5 复合地基 $\sigma_x - \sigma_y$ 的等值线

Fig. 5 Contour lines of $\sigma_x - \sigma_y$

在 $\sigma_x > \sigma_y$ 且距离坡脚 4 m 范围内的区域里单元参数采用分层试样的参数(分层试样如图 1(b) 所示), 计算结果如表 4 所示。当水平应力大于竖直应力时, 大主应力方向偏向水平, 分层试样实际上是模拟水平方向为大主应力的碎石桩的, 此时改用分层试样参数显然更合理。如图 5 所示, 采用分层参数的区域深度

为 10 m, 宽度为 6 m(为坝体下半底宽底 12%), 且距离坝体轴线比较远, 因此, 对于深度较大的点而言, 是否采用分层参数对沉降计算结果的影响较小。这和表 4 的结果是一致的。

(2) 对地基水平位移的影响

由复合试样参数计算的水平位移等值线如图 6 所示, 其他参数计算的等值线形状与此大致相同, 几种方法得出的最大水平位移如表 5 所示。

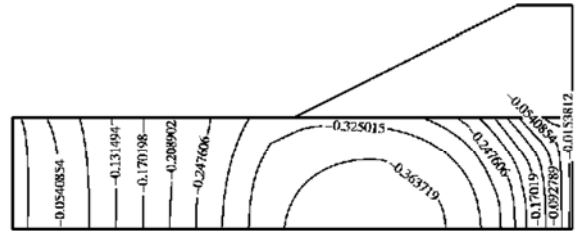


图 6 复合地基水平位移等值线

Fig. 6 Contour lines of horizontal displacement

表 5 最大水平位移计算结果

Table 5 Maximal horizontal displacements

参数类型	复合试样	数值试验	混和试样	参数叠加	曲线叠加	复合加分层
最大水平位移/m	0.389	0.374	0.598	0.483	0.517	0.393

由于采用了不同的参数, 最大水平位移的差别也比较大。从以上分析可以看出, 采用不同的参数对复合地基水平和竖直位移的影响都比较大。

(3) 对地基应力及应力水平的影响

用复合试样参数计算的复合地基中的大主应力 σ_1 、小主应力 σ_3 和应力水平的等值线如图 7, 8, 9 所示, 其他参数计算得到的等值线形状大致相同。

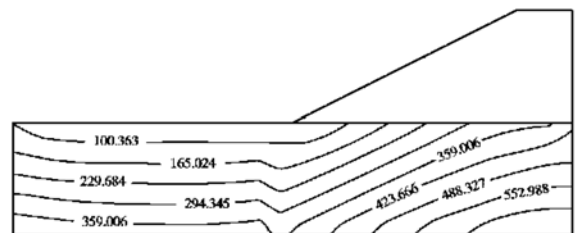


图 7 复合地基 σ_1 等值线

Fig. 7 Contour lines of σ_1

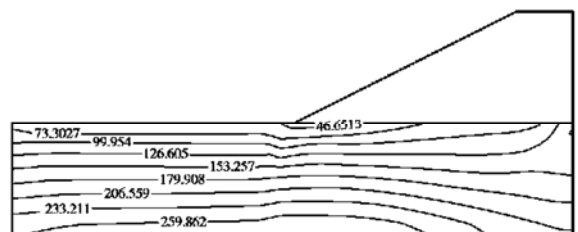


图 8 复合地基 σ_3 等值线

Fig. 8 Contour lines of σ_3

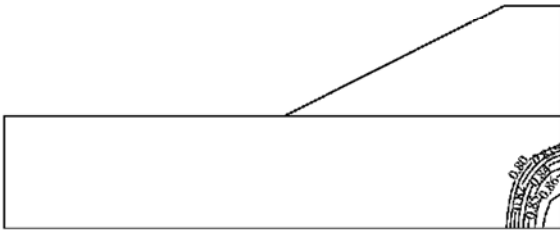


图9 复合地基应力水平等值线

Fig. 9 Contour lines of stress level

从图中可以看出,在复合地基中,大主应力 σ_1 的最大值出现在堤坝中轴线下的计算地基最深处,小主应力 σ_3 的最大值也出现在计算地基最深处,应力水平的最大值出现在中轴线附近的计算地基深处。各种方法计算得到的应力和应力水平最大值如表6所示。

表6 复合地基中最大主应力、最小主应力和应力水平的最大值

Table 6 Maximal σ_1 , σ_3 and stress level in composite ground

	复合 试样	数值 试验	混和 试样	参数 叠加	曲线 叠加	复合试样加 分层试样
σ_1 最大值/kPa	682	684	689	689	687	682
σ_3 最大值/kPa	287	297	300	305	297	290
最大应力水平	0.880	0.823	0.870	0.706	0.787	0.882

从表中可以看出,不同的方法计算出的应力及应力水平最大值相差不大。而且它们在地基中对应的位置也差不多。可见,采用不同的参数,对复合地基的应力及应力水平的计算结果影响不大。

(4) 小结

a) 数值试验和复合试样的参数比较接近,二者有有限元计算结果也很接近。两种方法的计算结果都是合理的。

b) 采用不同的参数对位移计算结果影响比较大,尤其是最大沉降,与复合试样相比:混和试样由于没有考虑碎石和土之间的作用,试验参数 K 偏小,所以其最大沉降明显偏大;参数叠加在计算 Duncan-Chang 参数时,将处于不同应变水平的碎石参数和素土参数进行了叠加,导致参数 K_b 偏大,故其所计算的最大沉降偏小;曲线叠加考虑了碎石和土的共同变形,却没考虑两者之间的相互作用,所计算的最大沉降是偏大的。

c) 采用不同的参数,对复合地基的应力及应力水平的计算结果影响不大。

4 结 论

(1) 复合试样考虑了桩土之间的相互作用,具有明确的物理意义,因此用它的参数来进行复合地基有限元计算是合理的。

(2) 数值试验可避免复合试样模拟原型料而导致试样过大的缺点,将复杂的反映剪胀性的弹塑性模型计算

问题集中在简单的复合试样计算中,用以确定参数来进行有限元计算也是合理的,是一种很有前途的方法。

(3) 混和试样完全没有考虑碎石和土间的相互作用,用它的参数来进行有限元计算,结果偏差较大。

(4) 参数叠加实际上是将两种载体在不同轴向应变水平时的参数进行了叠加,没有考虑两者之间的相互作用,计算结果也有较大偏差。

(5) 曲线叠加并未考虑碎石和素土的相互作用,因而得到的 K 及 K_b 参数偏小,从而导致沉降计算值偏大。但它是在相同的 ε_1 下将二者加权平均,考虑了加固体与基土间的共同变形。

(6) 在堤坝坡角附近的地基的一个区域内水平应力大于竖直应力,其最大主应力偏离竖直方向,因此在进行有限元分析时应将这一区域内的单元应改用分层试样的参数。

(7) 在 Duncan-Chang 模型中, K 和 K_b 对位移计算结果是比较敏感的^[11,12]。而不同方法确定的 K 、 K_b 相差较大,因此选择合适的试样参数对位移计算很重要。

参考文献:

- [1] 介玉新,李广信,黄文峰.复合地基中的桩土应力比[A].复合地基理论和实践学术讨论会文集[C].杭州,1996.
- [2] 田海,黄文峰,李广信.复合地基中桩土相互作用初探[A].全国第五届地基处理学术讨论会文集[C].杭州:浙江大学出版社,1997.
- [3] 李广信.有关土的相互作用问题[J].岩土工程学报,1996,18(6):111-114.
- [4] 李广信,余斌.黏土中挤密灌浆的效果[J].地基处理,2002,13(1):55-56.
- [5] 李广信,田海,黄文峰,等.复合地基桩土相互作用及其变形分析的参数确定[A].'98水利水电地基与基础工程学术交流会议论文集[C].天津:天津科学技术出版社,1999.493-495.
- [6] 黄文峰,李广信,陈轮.碎石桩复合地基中桩土横向相互作用研究的一种室内试验方法[A].第八届全国土力学及岩土工程会议论文集[C].1999.205-208.
- [7] 杨光华,介玉新,李广信,等.土的多重势面模型及其验证[J].岩土工程学报,1999,21(5):579-582.
- [8] 田海.复合地基中桩材与土的相互作用试验研究[D].北京:清华大学,1997.
- [9] 黄文峰.复合地基中桩与基土的相互作用[D].北京:清华大学,1999.
- [10] 恩戈科.堆石坝材料参数的灵敏度分析[J].河海大学学报,1999,27(5):94-99.
- [11] 何昌荣,杨桂芳,邓肯-张模型参数变化对计算结果的影响[J].岩土工程学报,2002,24(2):170-174.
- [12] 李惟,姜淑慧,罗庆玲.正义峡水库土石坝心墙土料变形参数计算[J].水利水电工程设计,2000,19(1):33-35.