

塑料排水板加固软基三维 BIOT 固结分析探讨

宋 武

王惠勇

(苏州交通工程集团有限公司 苏州 215000)

(江苏省交通科学研究院 南京 210017)

摘 要 针对砂井加固地基沉降计算中常常将荷载假定是一次瞬时施加的缺陷,结合塑料排水板在某高速公路中的应用,采用基于分级加载的三维 Biot 固结有限单元法来分析路堤的沉降变形过程。计算模拟结果表明,有限元法能较好地反映软弱地基沉降变形随着孔隙水压消散的变化的过程和规律。

关键词 道路工程 沉降 BIOT 固结有限元 分级加载

0 引言

对于路堤荷载作用下砂井加固后的沉降计算问题,一般是假定荷载是一次瞬时施加,但实际上在路基加载过程中,荷载是分级逐渐施加的,以保证地基的稳定性。由于上述差别,如果按照全部荷载一次瞬时施加方式所计算的路基沉降,很难反映路基实际的沉降过程。同时,在软粘土地基处理砂井堆载预压法中,荷载一般可视为长条形,因而地基的变形是平面的,即沿荷载长度方向位移为零。但由于砂井的存在,地基中的渗流是空间的,因此应用三维 Biot 固结理论才能更佳的模拟软弱地基沉降变形随着孔隙水压消散的变化的过程和规律。基于此,笔者拟采用分级加载条件下的 Biot 固结有限单元法对塑料排水板加固软基后的特性作进一步探讨。^[1~2]

1 Biot 固结理论及其有限元法^[1]

对于平面变形问题,饱和土的 Biot 固结理论方程式如下:

$$\text{将本构关系及变形协调条件代入平衡方程得} \\ -\partial D \partial^T W + \partial M u = f \quad (1)$$

连续性方程

$$\nabla^T \frac{\partial}{\partial t} w - \frac{1}{\rho_w} \nabla^T k \nabla u = 0 \quad (2)$$

式中: w ——位移列向量;

u ——孔隙水压力;

ρ_w ——水的密度;

k ——渗透系数矩阵;

f ——体积力;

D ——应力应变关系矩阵; $M = [1 \ 1 \ 0]^T$; ∂ 和 ∇ 为微分算子,

$$\partial = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad \nabla^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}$$

由虚位移原理和饱和土的连续性可建立上述方程的有限元方程组:

$$\begin{bmatrix} \bar{K} & K' \\ K^T & \bar{K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R - R_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\Delta \delta$ ——节点位移增量;

β ——节点孔隙压力增量;

R ——节点荷载向量;

R_i —— t 时刻以前已发生的位移所对应的节点荷载;

$\begin{bmatrix} \bar{K} & K' \\ K^T & \bar{K} \end{bmatrix}$ ——刚度矩阵,由单元刚度矩阵组合

而成。

结合初始条件和边界条件,由式(3)可以求得结点位移和孔压。

2 计算模型及其物理力学指标的选取

江苏某高速公路路堤宽度为 26 m,原地面自上而下分为:1 层:耕植土,层厚 0.4~0.5 m;2 层:淤泥质粉质粘土 10.6~11.0 m。软弱地基处理采用塑料排水板,按正三角形布置,间距为 1.5 m。路基填

土高度为 8.4 m, 平均填土速率为 2.1 cm/d。由于对称, 取半幅路堤进行计算。横向取 80 m, 软弱地基厚度竖向取至原地面以下 11 m, 计算模型见图 1, 软弱地基、路堤填料的计算参数分别见表 1、表 2。

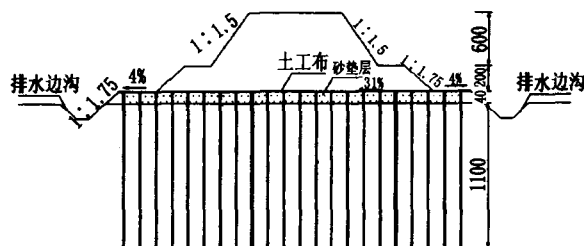


图 1 典型断面计算模型示意图

表 1 软弱地基主要物理力学性质指标

指标	单位	数值
容重 γ	g/cm^3	1.824
渗透系数 K_{20}	cm/s	1.29×10^{-7}
压缩模量 E_c	MPa	2.65
固结系数 C_v	cm^2/s	2.02×10^{-3}
排水固结 C'	kPa	38.18
强度 Φ'	°	23.30

表 2 路堤填料的物理力学性质指标

指标	单位	数值
容重 γ	g/cm^3	2.126
凝聚力 C	kPa	47.81
内摩擦角 Φ	°	36.28

考虑到非线性分析的试验参数确定困难, 且已有的许多的计算分析结果表明, 对软土路基沉降变形问题, 按线性变形分析也较接近实际, 因此, 本文用简单的线弹性模型来计算分析。该模型虽然不能反映土体加载屈服破坏过程, 但是可以近似模拟孔隙水压随时间逐渐消散的过程中地基沉降量的变化。

其中, 土层变形模量 E 由压缩模量 E_s 换算而来, 两者关系为 $E = \beta E_s$, 土的泊松比 μ 对计算的结果影响不大, 取 0.3。砂垫层的厚度为 40 cm。塑料排水板按正三角形布置, 间距 1.5 m, 分析时将塑料排水板折算成等周长的圆截面砂井, 再按面积转换成正方形砂井。同时, 将正三角形布置转化为正方形布置。砂井的渗透系数取为 $K_v = K_h = 1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, 不考虑砂井模量的影响。地基网格划分为 $1 \times 26 \times 6 = 156$ 个单元, 节点总数为 $2 \times 27 \times 7 = 378$ 个。

3 计算结果分析与评价

3.1 地基沉降随时间变化规律

从图 2 可以看到, 截至到路基填筑完成 (2003 年 7 月), 未加塑料排水板处理的地基施工沉降量为 23.0 cm, 而经过塑料排水板处理后地基沉降计算值 48.7 cm 左右 (工后 15 年的总沉降量为 72 cm 左右), 可见塑料排水板可以大大加速软土地基的固结。同时, 在塑料排水板处理软弱地基的情况下, 数值分析成果在规律上与实测数据基本一致。

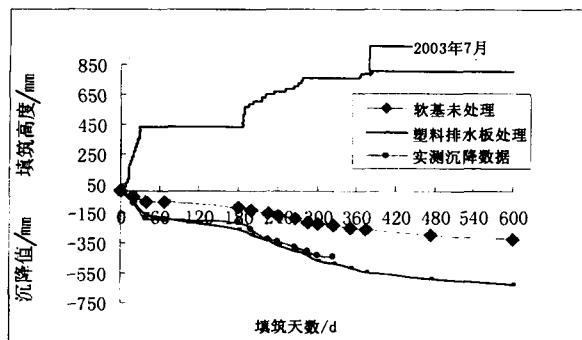
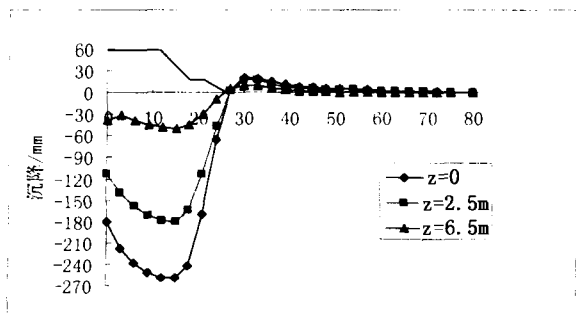
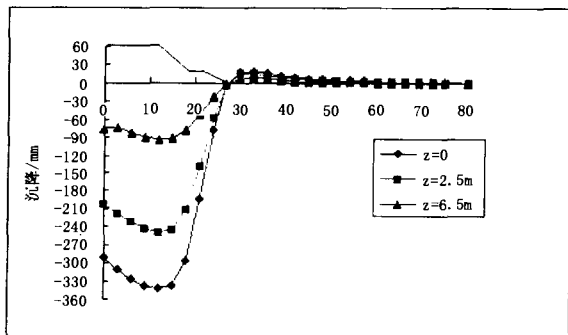
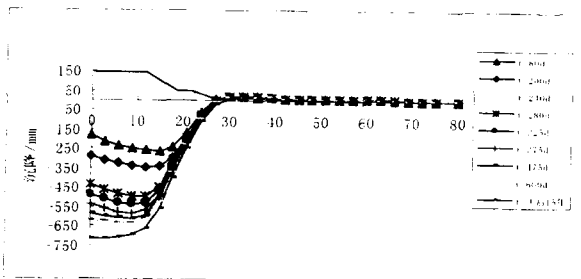


图 2 地表沉降 ~ 时间变化曲线图

经过 200 d 的预压期后 ($t \leq 600 \text{ d}$), 其中塑料排水板处理后地基沉降量计算值接近 62.1 cm, 而未加塑料排水板处理的地基沉降量计算值才达到 32.3 cm。可见, 塑料排水板可减小原软弱地基约 30 cm 的残余沉降, 大大提高软弱地基的固结速度以及减小因填土引起的软弱地基工后沉降量。同时, 可以看出地基沉降大部分都能在预压期结束之前完成, 由于填土引起地基残余沉降量才 10 cm 左右, 符合规范要求。

图 3、图 4 为不同时间 (60 d、200 d) 不同深度的计算沉降 (塑料排水板处理后) 沿右半幅地表宽度方向的沉降分布曲线。图中表明, 路堤区内的沉降曲线比较平缓, 沿路堤坡脚向外, 沉降值为正, 即发生地面隆起, 这是由于荷载集中在道路中部的缘故。同时, 总体上随着离地表深度的增加, 沉降量减小。

图 5 为地表 ($z = 0$) 沿右半幅宽度方向沉降分布随填筑时间的变化图, 从中可见, 路基未完全稳定以前, 高速公路宽路堤软弱地基沉降量并不一定是路基中心线处最大, 而是呈现出两头下陷的沉降形式。并且最大沉降量位置随着堆载厚度的增大逐渐向路堤中心线方向移动 (如 $t = 60 \text{ d}$ 、200 d、475 d、600 d 以及工后 15 年最大沉降对应的水平方向的位置分别距离路基中心线大约 15 m、12 m、9 m、6 m、0

图3 沿右半幅地表宽度方向的沉降分布曲线图($t=60d$)图4 沿右半幅地表宽度方向的沉降分布曲线图($t=200d$)图5 沿右半幅地表宽度方向沉降分布曲线图($z=0$)

m)。所以,路基沉降完全稳定以后,沿路基横断面方向最大的沉降点位置才在路基中心线上。

3.2 孔压变化随时间变化规律

图6为经过塑料排水板处理后距地表中心深度分别为8.5m以及2.5m处的孔压值随时间的变化计算结果可知,随着路堤高度的增加,孔隙水压力值不断升高,而当路堤停止填筑时,孔压值不断减小,表明孔隙水不断排出,土体开始慢慢固结。图中还表

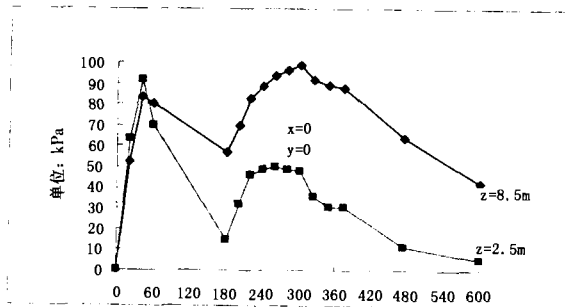


图6 不同深度处孔压计算值随时间的变化曲线图

明,距离地表越近,受加载速率的影响越大,孔压上升或消散速度均加快。

4 结论

(1)路基未完全稳定以前,高速公路宽路堤软弱地基沉降量并不一定是路基中心线处最大,而是呈现出两头下陷的马鞍式沉降形式。并且最大沉降量位置随着堆载厚度的增大逐渐向路堤中心线方向移动。路基沉降完全稳定以后,沿路基横断面方向最大的沉降点位置才在路基中心线上。

(2)在塑料排水板处理软弱地基的情况下,数值分析法得出的结果在规律上与实测曲线很相似,说明采用的弹性模型 Biot 固结有限元模拟方法是可靠的。

(3)为了提高路基的密实度及强度,加速软弱地基和路基在施工期的固结,减少工后沉降,建议采取碎石桩、塑料排水板、挤密砂桩、深层搅拌桩及碎石垫层等对软土地基进行处理。

参考文献

- [1] 俞亚南,张化萍,高文明. 分级加载条件下粉喷桩加固路基有限元分析[J]. 中国公路学报,2003. 16(4)
- [2] 谢康和. 砂井地基固结理论、数值分析与优化设计[D]. 杭州:浙江大学,1987
- [3] 王俊蒲. 高速公路软土地基沉降特性研究[D]. 石家庄:河北工业大学,2002
- [4] 李又云. 同时考虑加荷、变形和时间的公路软基固结沉降理论及仿真的研究[D]. 西安:西安公路交通大学,2000
- [5] 张诚厚,袁文明,戴济群. 高速公路软基处理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997
- [6] JTJ 017-96. 公路软土地基路堤设计与施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版社,1997