

加筋间距对加筋挡土墙工作性态的影响

常倩倩¹, 束一鸣¹, 黄松², 刘军³, 周维垣⁴

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 山东省水利勘测设计院, 山东 济南 270013;
3. 国务院南水北调办公室, 北京 100053; 4. 清华大学水力发电工程系, 北京 100084)

摘要 在应用有限差分软件 FLAC^{3D}对某工程实例挡土墙成功模拟的基础上, 通过改变加筋间距, 分析其对挡土墙工作性态的影响。结果表明, 挡土墙面板侧向位移及加筋层拉应力随着加筋间距的减小而减小。与极限平衡原理分析的结果比较表明, 采用 FLAC^{3D}数值模拟能更加精确合理地分析不同的加筋间距对挡土墙稳定性的影响。

关键词 加筋挡土墙; 工作性态; 加筋间距; FLAC^{3D}数值模拟

中图分类号 :TU413.6 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2007)05-0557-06

加筋间距对加筋挡土墙工作性态的影响很大^[1]。当间距较小时, 加筋区会形成一个整体, 这时需着重考虑加筋挡土墙的整体稳定性; 反之, 当间距较大时, 加筋区未能形成一个整体强度, 需首先考虑加筋挡土墙的内部稳定性。目前关于这方面的研究还比较少。

本文针对模拟工程实例, 使用 FLAC^{3D}模拟加筋间距分别为 0.25 m、0.50 m、0.75 m、1.00 m 时的工况, 分析加筋间距对加筋挡土墙工作性态的影响。

1 FLAC^{3D}数值模拟分析

1.1 原理

数值分析模型采用考虑土工格栅与土体相互作用的分离式计算模型^[2-3], 计算中利用“生死”单元来考虑土体逐层填筑、荷载逐级施加的过程。模型由土体单元、面板单元、土工格栅单元和接触面单元组成。本文主要介绍土工格栅计算单元和接触面计算单元。

FLAC^{3D}软件中内嵌了土工格栅单元, 用来模拟与土发生相互剪切作用的柔性膜。与土体耦合的土工格栅结构单元一般由有限元单元加接触面单元(耦合弹簧)组成, 有限元单元一般服从弹性(如果某处定义了塑性铰, 则为理想弹塑性)的库仑接触条件, 接触单元(耦合弹簧)一般服从理想弹塑性的库仑接触条件。土工格栅结构单元是三节点、平面有限单元, 能抗张力而不能抗弯矩荷载, 在切向上其与土体相互摩擦, 在法向上其节点随土体网格的运动而运动。

土工格栅结构单元内部各力的计算过程如下: 首先在结构单元内存储一个内力矢量, 在每一个计算时间步内, 内力矢量被单元刚度矩阵乘以结点位移增量(结点速度乘以时间步)更新。程序算完时, 调用应力恢复命令作后处理时, 通过力的平衡原理来计算合力 N_x, N_y, N_z 和 M_x, M_y, M_z , 再用公式计算应力。土工格栅结构单元与土体的耦合联结接触产生的力称之为耦合应力, 接触界面剪切强度准则采用库仑准则, 即

$$\tau_{\max} = c + \sigma_n \tan \varphi$$

当界面剪应力小于剪切强度时, 接触面之间为弹性黏结状态, 一旦超过剪切强度, 接触面之间为刚性摩擦滑动状态, 即剪切破坏为理想弹塑性的。

用接触面单元(interface element)来模拟土工格栅加筋挡土墙结构时, 土体与墙面板之间、填料与地基之间是非连续接触问题。接触面单元是由 3 个界面节点(interface node)组成的三角形平面单元, 接触面单元附着在接触面一侧, 通过界面节点与另一侧目标面(target face)的相互作用来模拟界面的接触作用。接触面单元的屈服准则采用 Mohr-Coulomb 抗剪强度准则和抗拉强度准则。

1.2 工程实例的数值模拟^[4-5]

为了验证计算模型的合理性和有效性,首先模拟具有原型观测资料的一座建造在分层地基上墙高 8 m 的加筋挡土墙.挡土墙地基从上到下依次为 0.8 m 的硬土层,2.95 m 的壤土层,1.3 m 的硬黏土层,1.75 m 的细砂层,最后为砂壤土层并延伸到墙基 10 m 以下.地下水位线在 4 m 左右.墙面板由 16 块高度为 0.5 m 的模块混凝土构成.填料为密实的砂砾土;加筋采用 16 层 5 mm 厚的高分子聚合物土工格栅,其抗拉强度为 98 kN/m,屈服伸长率小于或等于 10%.格栅层间距为 0.5 m,加筋长度分为 6 m 和 1 m 两种,各为 11 层和 5 层.短筋与长筋间隔布置在挡土墙上部,设置短筋的目的是改善上部挡土墙的局部稳定性.在挡土墙结构中一些典型断面埋设了位移计、沉降计、应变计、土压力计等电子元件,用以观测挡土墙的工作性能.

1.2.1 计算网格剖分及参数选取

计算单元网格剖分如图 1 所示.该挡土墙各个单元的计算参数见表 1 和表 2.

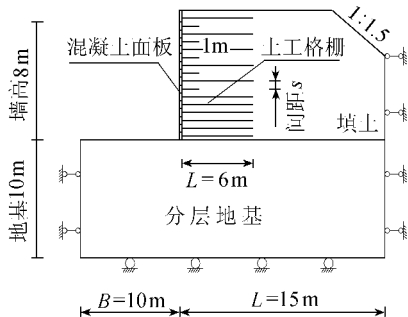


图 1 实例挡土墙模型示意图

Fig.1 Sketch of retaining wall model in case study

表 1 地基土体单元计算参数

Table 1 Calculation parameters of foundation soil element

土 层	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	黏聚力/kPa	剪胀角/($^{\circ}$)
硬 土 层	2000	30.8	17.58	35.5	40	3
壤 土 层	2000	24.1	13.80	35.5	11	3
硬黏土层	2000	160.5	3.23	0	64	5
细 砂 层	1800	16.3	5.41	30.0	0	0
砂壤土层	1800	18.4	6.15	30.0	10	0

表 2 其他单元计算参数

Table 2 Calculation parameters of other elements

单元类型	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/($^{\circ}$)	剪胀角/($^{\circ}$)	切向刚度/($\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$)	法向刚度/($\text{GPa}\cdot\text{m}^{-1}$)	黏聚力/kPa	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
填料土体	50.04	0.34	29	7			2	1800
土工格栅	200	0.40	30		2		0	
接触面 A			20		2	220	0	
接触面 B			30		2	1.12	0	
面 板	25 250	0.15	45				3 000	2 000

注 接触面 A,B 分别指土体与面板、土体与地基之间的接触面.

1.2.2 计算结果与分析

a. 墙面板侧向位移.本文计算的是实例挡土墙施工完成后墙面板的侧向变形,实测数据为挡土墙未出现明显变形情况下的观测资料.整个墙面板计算和实测的侧向变形如图 2 所示.从图 2 可以看出,计算所得墙面板侧向变形的变化趋势与实测情况基本一致,整个墙面板的侧向变形量呈现明显的抛物线形状(即典型的“鼓肚”形态),而且预测的墙面板侧向变形量仅比实测值略微大一些,这可能是挡土墙侧向变形还未充分发展所致.以上分析表明,本文所采用的数值分析方法能够合理地预测实例挡土墙的侧向变形.

b. 基底竖向压力.图 3 描述了基底竖向压力的分布情况,数值计算所得的变化趋势与实测情况是一致的,从图 3 可以看出,墙趾处竖向压力达到最大值,出现了较大的应力集中现象,其后竖向压力减少并达到最小值.

c. 加筋层拉应变分布.由于加筋层层数较多,因而选取了有代表性的高度(0.65 m,1.65 m,3.65 m,5.65 m,7.65 m 共 5 层加筋层)进行计算并与实测的拉应变分布对比,见图 4.从图中 4 可以看出,数值计算得到的拉应变分布趋势与实测的比较接近,且各层拉应变最大值相差不大,所有的拉应变值均小于 2%,说明土工格栅在加筋挡土墙中所受的拉力远小于其抗拉强度.

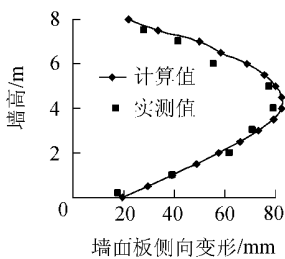


图 2 面板侧向位移比较
Fig.2 Comparison of lateral displacement of face slab

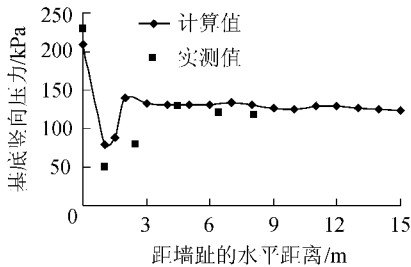


图 3 基底竖向压力分布比较
Fig.3 Comparison of vertical pressure distribution in base of foundation

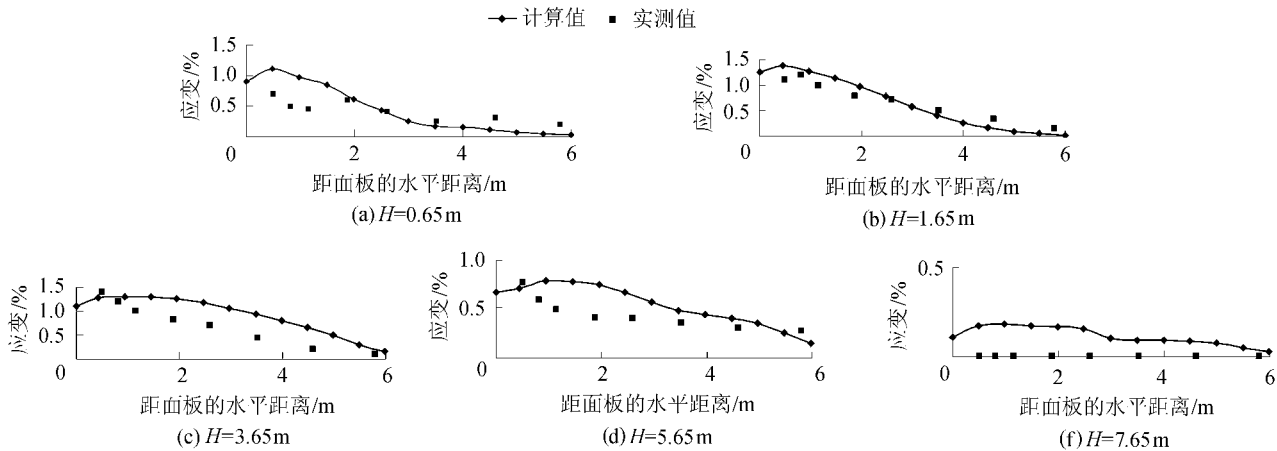


图 4 不同加筋层高度加筋层应变分布

Fig.4 Strain distribution in reinforced layers at different heights

由此可见,对工程加筋挡土墙数值模拟分析得到的各项特性与实测结果基本吻合,说明计算模型可以用于研究土工格栅加筋挡土墙的工作性态。

2 FLAC^{3D}数值模拟分析

下面分析加筋间距对土工格栅加筋挡土墙工作性态的影响,计算模型及参数选取均与工程挡土墙一致。变动加筋方式,模拟加筋长度取 5.6m(0.7 倍的挡墙高),间距分别为 0.25 m、0.50 m、0.75 m、1.00 m 时的 4 种工况。

2.1 加筋间距对面板侧向位移的影响^[6]

4 种工况下,挡土墙面板都呈现出中间大两头小的变形曲线,如图 5 所示。顶部的变形量与底部的变形量大致相同。随着加筋间距的增大,面板侧向位移逐渐增大,侧向最大位移大致出现在墙高 4.0~4.5 m 处。

2.2 加筋间距对加筋层拉应力的影响

加筋挡土墙的加筋层拉应力分布如图 6 所示。最大拉应力出现在靠近面板的底部区域,加筋层拉应力随着加筋间距的增大而逐渐增大。由于地基和填土深度及其强度等因素的综合影响,各加筋层的拉应力从面板向填土方向由大逐渐变小。4 种情况的加筋层最大拉应力分别为 1.02 MPa、2.76 MPa、4.05 MPa、5.45 MPa。若筋材的容许抗拉安全系数取 5,则间距为 0.75 m 和 1.00 m 的情况拉应力已超出筋材的容许应力 3.92 MPa,需重新选择抗拉强度更高的格栅^[7]。

2.3 两种加筋间距下加筋挡土墙的稳定性的分析

2.3.1 FLAC^{3D}数值分析加筋挡土墙的稳定性的分析

FLAC^{3D}中以拉应力为正,所以 3 个主应力关系如下: $\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3$,破坏准则由图 7 中的平面(σ_1, σ_3)表示。破坏包面 $f(\sigma_1, \sigma_3) = 0$ 由 A 点到 B 点(剪切破坏准则 $f^s = 0$)和 B 点到 C 点(受拉破坏准则 $f^t = 0$)的包线组成。

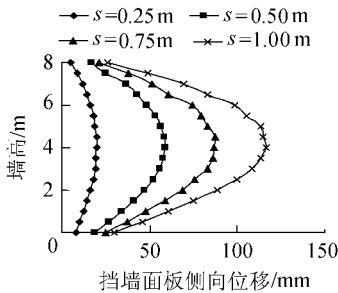


图 5 4 种加筋间距面板侧向位移
Fig.5 lateral displacement of face slab at 4 different bar spacings

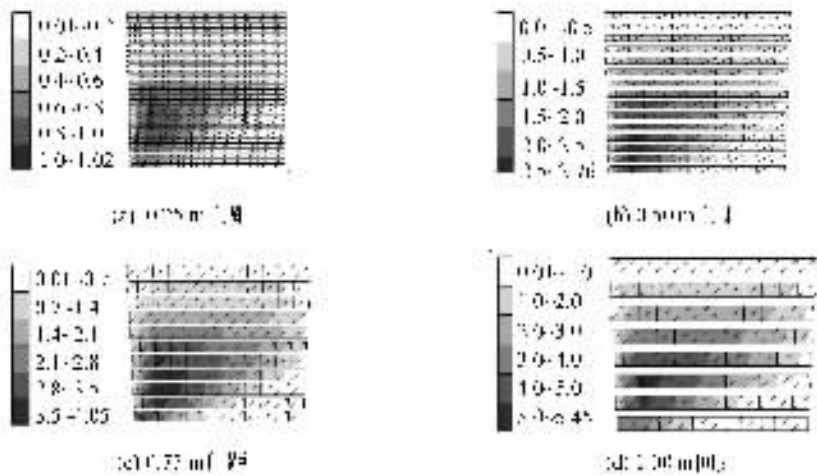


图 6 不同加筋间距加筋层拉应力分布(单位 MPa)

Fig.6 Tensile stress distribution in reinforced layer for different bar spacings(unit MPa)

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c \sqrt{N_\varphi} \tag{1}$$

$$f^t = \sigma_3 - \sigma^t \tag{2}$$

$$N_\varphi = \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} \tag{3}$$

式中： φ ——摩擦角； c ——黏聚力； σ^t ——抗拉强度。

因为材料的抗拉强度不能超过相应于直线 $f^s = 0$ 和 $\sigma_1 = \sigma_3$ 在 (σ_1, σ_3) 面上交点的 σ_3 值，所以有最大值 $\sigma^t_{\max} = c/\tan\varphi$ 。

在间距为 0.25 m 时，整个挡土地基和加筋区的 $f^s > 0$ ，都未出现剪切破坏，仅在未加筋区出现了 $f^s = \alpha$ （即临界剪切破坏状态）的情况，说明在此间距下，加筋区已形成一个整体，剪切破坏容易发生在未加筋区域；在间距 1.00 m 时，地基处的 $f^s > 0$ ，在挡土墙上部未加筋区和加筋区内都出现了 $f^s = 0$ 的情况，说明加筋间距过大，容易造成筋材间土体的剪切破坏，导致区域失稳，见图 8。整体上 2 种间距下加筋挡土墙的 $f^t < 0$ ，都没有出现受拉破坏，间距 0.25 m 时的 f^s 要比间距 1.00 m 时的小，说明前者比后者要稳定，见图 9。

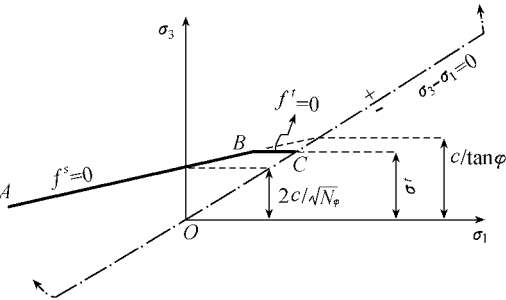


图 7 摩尔-库伦模型的破坏准则

Fig.7 Failure criterion for Mohr-Coulomb model

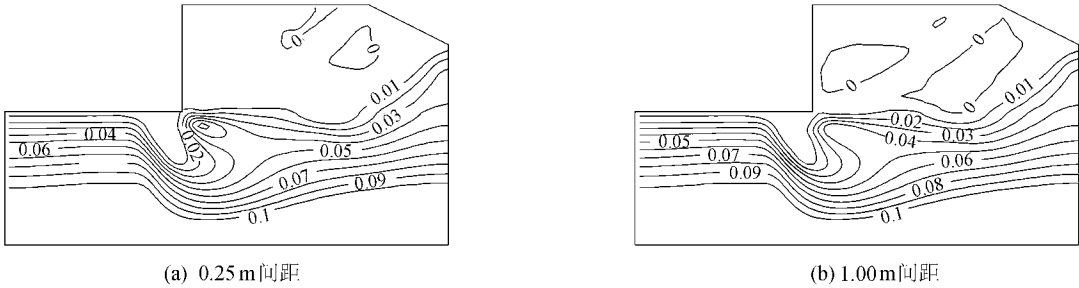


图 8 0.25 m、1.00 m 间距时 f^s 等值线

Fig.8 Contours of f^s for bar spacing of 0.25 m and 1.00 m

在 FLAC^{3D} 中，土工格栅的耦合应力间接反映了土工格栅与土的相对位移情况。间距 0.25 m 和 1.00 m 时，土工格栅与土体之间的最大耦合应力为 0.0327 MPa 及 0.174 MPa（图 10），均小于界面的剪切强度 0.5008 MPa，说明 2 种间距下，土工格栅与土之间都没有发生相对摩擦滑移，处于弹性黏结状态。而且，随着间距的增大，耦合应力逐渐增大，说明土工格栅与土的相对位移趋势逐渐增大^[38]。

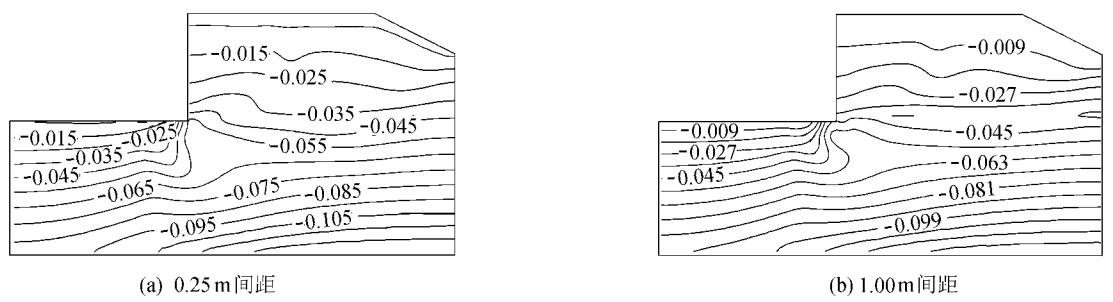


图 9 0.25 m 1.00 m 间距时 f' 等值线
Fig.9 Contours of f' for bar spacing of 0.25 m and 1.00 m

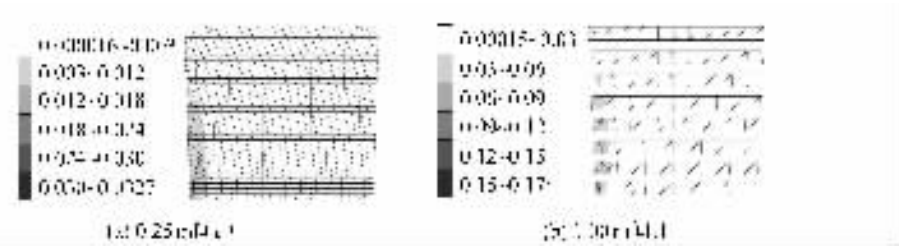


图 10 0.25 m 1.00 m 间距时耦合应力云图(单位 MPa)

Fig.10 Geogrid of coupling stress contour for bar spacing of 0.25 m and 1.00 m(unit MPa)

2.3.2 极限平衡原理分析挡土墙的稳定性

为了比较与分析,采用传统的极限平衡分析方法对间距 0.25 m 和 1.00 m 的 2 种工况进行分析,因筋材最大拉力出现在挡土墙底部,故分析底部第 1、第 2 层的内部稳定性^[7],见表 3 和表 4。

2 种分析方法结果比较接近,两者相比,极限平衡分析方法只能大致地估计筋材所提供的抗力,在此基础上利用极限平衡原理估算加筋土体的安全系数,尽管该方法简便实用,但无法揭示筋材与土各自的应力、应变及二者相互作用机理,无法评价结构的变形等,也无法精确判断间距不同时挡土墙的工作特性的差别,且结果过于保守,而用 FLAC^{3D}数值模拟可以克服上述的不足,使计算结果更加精确合理。

表 3 加筋挡土墙外部稳定性验算
Table 3 External stability checking
for reinforced soil retaining wall

间距 s/m	抗滑安全 系数	抗倾安全 系数	地基容许承载 力系数
0.25	5.99	2.53	6.32
1.00	5.99	2.53	6.32

表 4 加筋挡土墙内部稳定性验算

Table 4 Internal stability checking for reinforced soil retaining wall

间距 s/m	底部第 1 层				底部第 2 层			
	筋材拉力/ (kN·m ⁻¹)	容许抗拉 强度条件	抗拔力/ (kN·m ⁻¹)	抗拔验算 条件	筋材拉力/ (kN·m ⁻¹)	容许抗拉 强度条件	抗拔力/ (kN·m ⁻¹)	抗拔验算 条件
0.25	12.097	满 足	534.1	满足	11.707	满 足	501.8	满足
1.00	48.390	不满足	534.1	满足	42.148	不满足	414.9	满足

3 结 论

- a. 分离式数值分析模拟土工格栅加筋挡土墙施工与运行性态需通过原型模型率定。
- b. 挡土墙面板侧向位移与加筋层拉应力受加筋间距的影响很大,在其他条件相同时,层间距越小,侧向位移与加筋层拉应力越小。
- c. 加筋间距影响挡土墙的稳定模式,间距较小时,加筋区形成整体刚度;间距较大时,加筋区容易发生内部破坏,且随着间距的增大,土工格栅与土体之间的相对滑移趋势逐渐增大。
- d. 通过与极限平衡原理分析的结果比较,显示用 FLAC^{3D}数值分析能更精确合理地反映加筋间距不同时挡土墙的工作性态。
- 本文仅限于考虑加筋间距对挡土墙工作性态的分析,未涉及地基等因素对挡土墙工作性态产生的影响。

参考文献:

- [1] 顾慰慈.挡土墙土压力计算[M].北京:中国建材工业出版社,2001:340-349.
- [2] Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions user's guide ,version 2.1[R].Minneapolis:Itasca Consulting Group Inc,2002.
- [3] 刘波,韩彦辉.FLAC原理、实例与应用指南[M].北京:人民交通出版社,2005:16-21,79-81.
- [4] ROWE R K,SKINNER G D.Numerical analysis of geosynthetic reinforced retaining wall constructed on a layered soil foundation[J].Geotextiles and Geomembranes,2001,19:387-412.
- [5] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].2版.北京:中国水利水电出版社,1996:401-451.
- [6] BATHURST R J,HATAMI K. Seismic response analysis of a geosynthetic-reinforced soil retaining wall[J].Geosynthetic International,1998,5(1/2):127-166.
- [7] 土工合成材料工程应用手册编写委员会.土工合成材料工程应用手册[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2000:179-217.
- [8] LESHCHINSKY D,KALIAKIN V,BOSE P,et al. Failure mechanism in geogrid-reinforced segmental walls[C]//Experimental Implications Soils and Foundations.Tokyo:Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering,1994:33-41.

Effect of bar spacing on performance of reinforced soil retaining walls

CHANG Qian-qian¹, SHU Yi-ming¹, HUANG Song², LIU Jun³, ZHOU Wei-yuan⁴

- (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy, Jinan 270013, China;
3. Office of the South-to-North Water Diversion Project of the State Council, Beijing 100053, China;
4. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A finite differential program FLAC^{3D} was successful used for simulation of the reinforced soil retaining wall of a practical project, and the effects of bar spacing on the performance of the retaining wall were analyzed. The result shows that with the decrease of bar spacing, the lateral displacement of the face slab and tensile stress in the reinforced layer of the retaining wall decrease. The comparison of the analyzed result with that of the method of limiting equilibrium principle shows that FLAC^{3D} is accurate and appropriate for analysis of the effects of bar spacing on the stability of reinforced soil retaining walls.

Key words reinforced soil retaining wall; working performance; reinforced spacing; FLAC^{3D} numerical simulation