

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2019.06.003

下伏土洞加筋地基条形荷载下应力扩散计算

周宏伟¹, 秦礼友¹, 叶世集², 林上顺²

(1. 中国中铁二局第三工程有限公司, 四川 成都 610000;
2. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 通过大变形有限元分析, 对下伏土洞加筋地基条形荷载下应力扩散的作用机理和沉降进行研究, 分析了条形基础置于土体上的土体附加应力扩散、土洞区内应力及沉降变化规律。结果表明, 土洞区内出现应力集中, 下伏土洞地基沉降主要是由于土洞区内软弱土体变形造成。加筋体会增强应力扩散从而减小沉降, 加筋体长度和埋深均存在最佳值; 多层加筋较单层加筋更利于应力扩散, 且层间会出现未完全拱形应力集中区域; 相同加筋范围, 层数增大对应力扩散影响较小; 增大加筋范围更有助于应力扩散。

关键词: 应力扩散; 土洞; 条形荷载; 土拱

中图分类号: TU431 文献标志码: A 文章编号: 1672-4348(2019)06-0524-08

Calculation of stress distribution of reinforced foundation in underlying soil caves under strip load

ZHOU Hongwei¹, QIN Liyou¹, YE Shiji², LIN Shangshun²

(1. 3th Engineering Co., Ltd. of China Railway No. 2 Engineering Group, Chengdu 610000, China;
2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Through finite element analysis of large deformation, the mechanism and settlement of stress distribution of the reinforced foundation in underlying soil caves under the strip load were studied; the additional stress diffusion of soil body, and the variation of stress and settlement in the soil cave were analyzed. Results show that stress concentration occurs in the soil cave, and the settlement of the underlying soil cave foundation is mainly caused by the deformation of the weak soil in the soil cave area. The reinforcement will enhance the stress diffusion and reduce the settlement, with optimum values for both reinforcement length and depth. Multi-layer reinforcement is more conducive to stress diffusion than single-layer reinforcement, and there is an area of incomplete arch stress concentration between the layers. In the same reinforced range, the increase in the number of layers has little influence on the stress diffusion, and the increase of the reinforced range is more conducive to stress diffusion.

Keywords: stress distribution; soil cave; strip load; arching soil

岩溶和土洞的破坏通常具有突发性、隐蔽性的特点, 且成因复杂多样包括自然形成和人类活动形成^[1]。工程上对于土洞的处理普遍采用物探为主、地质钻探为辅的勘探方法, 根据具体的地质情况采用注浆处理、梁板跨越、换填等保守方

法^[2], 这给工程设计及施工都增加了成本。

近年来, 国内外学者针对加筋地基进行了大量理论和试验研究, 尤其针对加筋地基的荷载传递。Cicek 等^[3]进行条形荷载在加筋砂土的试验, 研究不同加筋长度、材料、分布对承载力的影

响。Huckert 等^[4]建立原型试验,分析土洞上方加筋路堤的荷载传递机理。贺炜等^[5]针对岩溶塌陷多层加筋的变形特征、土拱效应问题建立大比例模型试验,提出“双层土拱效应”现象。Aleksandrov 等^[6]对加筋砂土的应力扩散进行研究。数值模拟方面,Benmebarek 等^[7]对局部软弱地基路堤变形问题进行了研究,说明大变形分析法才能体现土工格栅的膜效应,提出差异沉降的改善是土拱效应和膜效应的共同作用。Villard 等^[8]在 Huckert 原型试验上进行数值模拟,提出孔径增大造成的空洞,空洞上方加筋体竖向荷载分布为圆锥型,颗粒下降造成的土洞,空洞上方加筋体竖向荷载分布为中心处荷载恒定边缘处发生反转。Cicek 等^[9]也做了相类似的研究;理论研究方面,侯娟等^[10]通过弹性地基梁理论求解出横-竖立体加筋地基中任意一点竖向附加应力的计算表达式。针对加筋后土洞软弱区内的应力、土洞周围应力重分布、应力扩散机理研究还未能深入,本文采用大变形有限元分析方法,对下伏土洞加筋地基条形荷载下应力扩散的作用机理和沉降进行研究。

1 分析模型

1.1 计算假定与问题描述

条形荷载在下伏土洞的地基土附加应力扩散现象,考虑实际情况,采用淤泥质土填充,地基土认为是 Gibson 地基^[11]即土体模量随地基深度而增大,加筋体为单向土工格栅,加筋体上部采用与地基土相同土体,均采用有效应力指标,不考虑地下水的影响,分析长期工况。地基土天然重度 γ_1 ,强度参数为 c'_1 、 φ'_1 ,杨氏模量为 E'_1 。软土天然重度为 γ_2 ,强度参数为 c'_2 、 φ'_2 ,杨氏模量为 E'_2 。

条形荷载宽度为 B ,竖向荷载为 q ,加筋层数 N ,加筋体刚度为 EA 。几何尺寸均为 B 倍数关系,如加筋埋深 uB ,加筋范围 dB ,加筋层间距 hB ,加筋长度 lB ;土洞距基础中心垂直距离 αB ,水平距离 βB ,土洞高度 mB ,宽度 nB ,如图 1。为了表述方便,下文中均采用系数表示,如加筋埋深为 u 。

1.2 计算模型

采用有限元软件 Plaxis 2D(Ver.2017)建立下伏土洞的应力扩散模型,计算基本假定为:计算域内采用各向同性、均匀和连续土体,摩尔-库伦本

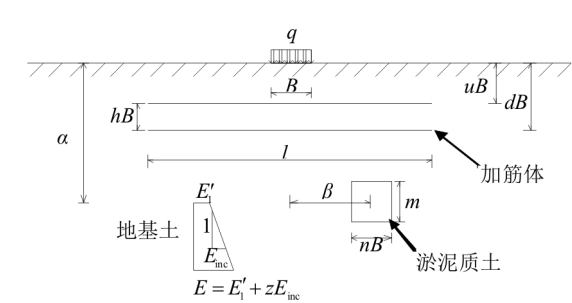


图 1 模型几何尺寸及参数(单位:m)
Fig.1 Geometric dimensions and parameters of the model (unit: m)

构模型,采用高精度 15 节点的三角形实体单元模拟土层;不考虑地下水影响,所有指标为有效应力指标,考虑长期工况;加筋体为弹塑性材料,采用 5 节点土工格栅单元进行模拟并增加界面单元;分析过程均采用拉格朗日描述的大变形有限元方法,即 Plaxis 中更新网格选项(updated mesh),实现土工格栅的膜效应^[7];边界条件选用标准边界,底部完全约束,两侧水平约束。

条形荷载取 $q = 100 \text{ kPa}$,土工格栅抗拉刚度取 $EA = 6\,000 \text{ kN/m}$,随地基深度增加变形模量,增加量为 $E_{\text{inc}} = 125 \text{ kPa/m}$,其余土体各部分物理力学项参数见表 1。

表 1 各部分土体物理力学参数					
Tab.1 Physical and mechanical parameters of each soil body					
土质	天然重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 c' /kPa	内摩擦角 $\varphi' /(^{\circ})$	泊松比 ν'	变形模量 E' / kPa
地基土	20	20	30	0.25	30 000
淤泥质土	15	10	10	0.35	1 000

图 2 为有限元网格划分及其边界设置,其中模型尺寸宽 $8B$,高 $5B$ 。采用渐进变化网格划分方式,以保证计算速度及精度,生成的网格数介于 $5\,320 \sim 6\,810$ 。分析步骤:激活加筋单元及界面单元,并重力加载;塑性零加载步,消除模型不平衡力;施加条形荷载。

2 分析结果与讨论

2.1 土洞对附加应力扩散的影响

在荷载 q 作用下,通过基础中心下竖向附加应力变化,对比有限元数值解与 Boussinesq 解。

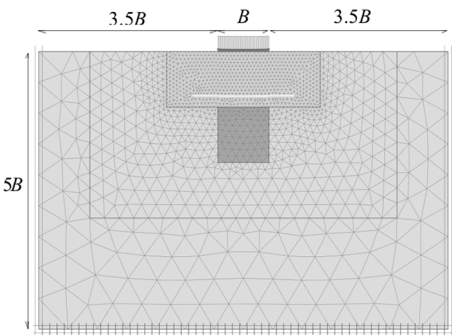


图 2 有限元网格和边界

Fig.2 Finite element mesh and boundary

图 3 中,当 $Z/B < 3.0$, Boussinesq 解与无土洞 FEM 解重合, $Z/B > 3.0$, Boussinesq 解开始小于无土洞 FEM 解,并随着深度增加两者差距越来越明显,应力随深度发生集中。Boussinesq 解是均质地基下的理论解, FEM 模型采用 Gibson 地基, Gibson 地基与均质地基相比会发生应力集中现象,这在实验和理论上都已证明^[12]。

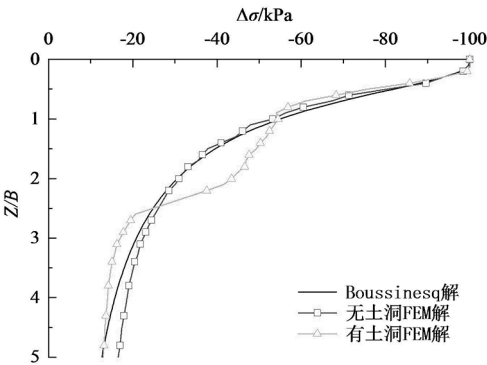


图 3 未加筋土体竖向附加应力

Fig.3 Additional vertical stresses for unreinforced soil

$Z/B < 1.0$, 无土洞 FEM 解与有土洞 FEM 解相差不大; $2.0 > Z/B > 1.0$, 有土洞 FEM 解明显大于无土洞 FEM 解, 土洞区的存在会使应力出现明显的集中。图 4 中, 无论有无土洞基础下方的竖向附加应力都是呈现向下的拱形, 但图 4(b) 中土洞区域上方会出现向上的拱形分布, 基础两侧边缘至土洞两侧边缘出现明显的应力集中, 土洞上侧拱形分布可以采用土拱效应来解释, 土拱效应实际上是一种应力迁移现象, 当土洞软弱区沉降与两侧支撑区沉降发生了相对位移, 土洞软弱区顶部所受附加应力会迁移至土洞两侧的支撑区, 形成拱形的竖向附加应力分布。图 4 中, 框内为

土洞区域, 存在土洞区的情况下, 土洞区域内的应力相比无土洞相同区域应力显著增大。土洞区内下部应力会重新出现向下拱形的应力扩散区, 这是由于土洞区内存在软弱土体, 应力在土洞区会逐渐均化, 向上的应力拱形在土洞区内逐步变成向下应力拱形, 洞区外下部区域出现八字形的分割区, 八字区内出现两侧的二次应力扩散分布, 八字区以外是附加应力扩散至土洞两侧支撑区的延续。

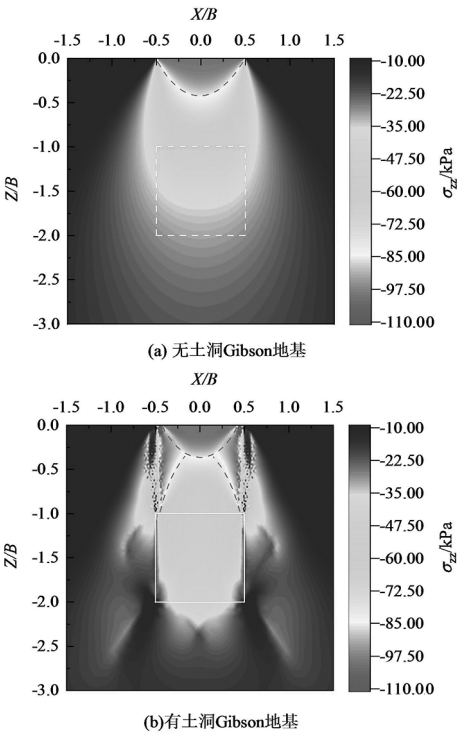


图 4 竖向附加应力分布

Fig.4 Additional vertical stress distribution

土洞区不仅会造成应力拱现象, 同时会引起应力向软弱区集中, 形成应力集中。图 5 中, $Z/B = -1.0$ 处, 竖向应力分布也体现出了一点, 土洞区内出现应力集中。而土洞区内填充物通常极其软弱, 无法承担荷载, 而且变形模量较小, 在小荷载下即发生明显的沉降, 这对于地基稳定性极其不利, 因此存在土洞区的地基必须加以处理。

2.2 单层加筋不同长度对应力扩散的影响

为了便于表述, 在分析中加筋长度、埋深、间距、范围等均采用系数表示, 即 l, u, h, d 。通过基础最大竖向位移评估加筋最佳长度 l_{opt} 和最佳加筋埋深 u_{opt} 。图 6 中, l 在 $1.0 \sim 1.5$ 段出现明显的下降, 加筋效果开始凸显, 随后 l 在 $1.5 \sim 2.0$ 下降

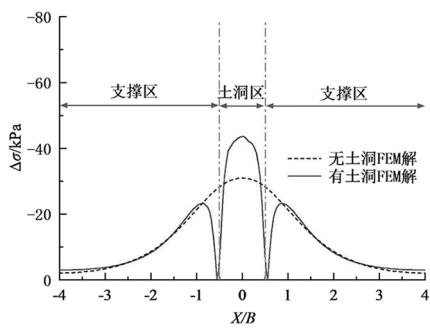


图 5 竖向附加应力分布($Z/B = -1.0$)

Fig.5 Additional vertical stress distribution($Z/B = -1.0$)

速率变缓,当 $l > 2.0$,最大竖向位移保持基本稳定,加筋效果保持稳定,对比不同加筋埋深,发现埋深在 0.7~0.8 时,基础最大竖向位移最小,确定 $l_{\text{opt}} = 2.0$, u_{opt} 在 0.7~0.8 之间。

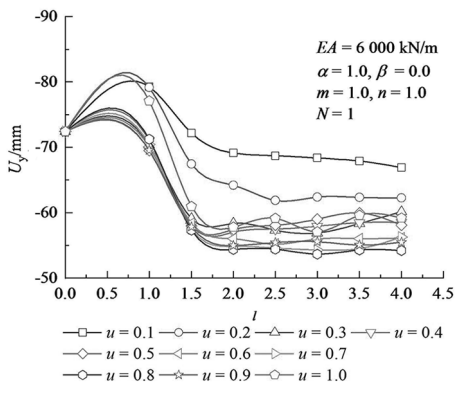


图 6 不同加筋长度基础最大竖向位移比较

Fig.6 Comparison of maximum vertical displacements of foundations with different reinforcement lengths

将位移分 3 部分进行分析,土洞顶部至基础底部设为 I 区,土洞区域为 II 区,土洞下部区域为 III 区。表 2 以 $u = 0.8$ 为例,不同 l 下影响最大应为 II 区, I 区和 III 区产生的沉降都较小,只占据总沉降的 10%~13%,在不同 l 下影响也不明显。地基沉降主要由土洞的沉降变化造成,要有效地控制地基沉降变化就要控制土洞区域内的应力。

为了更好地研究加筋后对土洞所受附加应力的影响,将土洞负载率 δ_s 定义为加筋后土洞所受应力与未加筋土洞所受应力的比值

$$\delta_s = \frac{\int_{-nB/2}^{nB/2} \sigma_{\text{加筋}} dx}{\int_{-nB/2}^{nB/2} \sigma_{\text{未加筋}} dx} \quad (1)$$

其中, $\sigma_{\text{未加筋}}$ 为未加筋土洞上侧所受竖向附加应

力; $\sigma_{\text{加筋}}$ 为加筋土洞上侧所受竖向附加应力。

同时将 II 区沉降比 δ_{dII} 定义为 II 区内加筋沉降量 $s_{\text{II,加筋}}$ 与未加筋沉降量 $s_{\text{II,未加筋}}$ 的比值

$$\delta_{\text{dII}} = \frac{s_{\text{II,加筋}}}{s_{\text{II,未加筋}}} \quad (2)$$

表 2 不同区域沉降量

Tab.2 Settlement in different areas

l	s_{I} / mm	$s_{\text{II}} / \text{mm}$	$s_{\text{III}} / \text{mm}$
0.0	-4.0	-64.0	-4.0
1.0	-4.2	-63.1	-4.0
1.5	-3.9	-50.0	-3.5
2.0	-3.8	-47.2	-3.4
2.5	-3.8	-47.3	-3.4
3.0	-3.7	-46.7	-3.3
3.5	-3.8	-47.2	-3.4
4.0	-3.8	-47.0	-3.4

将图 7 与图 4(b) 进行对比,其中 $l = 1.0$ 与未加筋情况,土洞区域和土洞两侧应力分布基本一致; $l = 1.5$ 时,土洞区域中应力明显减小,土洞两侧应力显著增大,加筋体至土洞两侧边缘出现月牙型应力集中,加筋体上部应力略有增加;这一趋势随着 l 增加而发展,当 $l > 2.0$ 时,应力分布变化趋于平缓。

随着 l 增加,八字区内两侧向外的二次应力扩散逐渐减弱,转而出现单一向下的二次应力扩散。这是由于加筋作用使得应力在扩散至土洞内更加均化,土洞区内向上拱形和向下拱形的分界线也逐渐下移,从图中 -35 kPa 等值线可看出,靠近土洞底部应力已经均化,向下凸起范围越来越小,也就是土洞内底部区域出现类均匀分布的条形荷载,因此土洞区外下部地基应力会出现类条形荷载分布。八字区以外由于受到加筋应力扩散作用,附加应力显著增大。

图 8 中, δ_{dII} 先于 δ_s 发生下降,当 $l > 1.0$,随着加筋体长度增加两者快速下降,当 $l > 2.0$, δ_{dII} 不再下降, δ_s 下降速率变缓。 $l = 2.5$, δ_{dII} 下降至 73.8%, δ_s 下降至 76.8%,说明 l 增加更有利于改善土洞区内峰值应力,使得应力分布更均匀,最大沉降下降。

加筋的存在破坏了原有附加应力扩散模式,

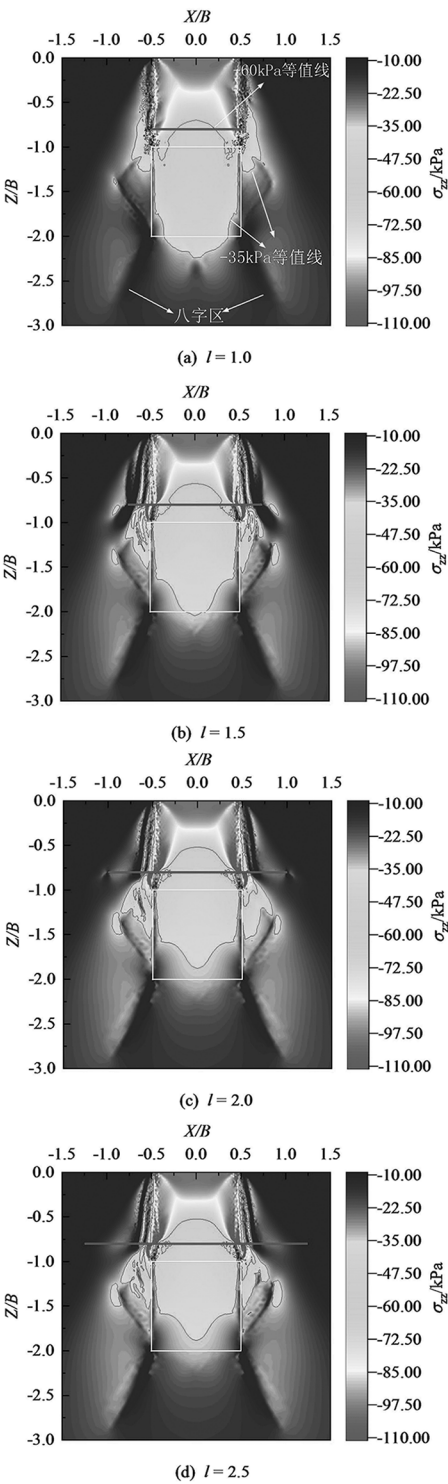


图 7 不同加筋长度附加应力分布比较
Fig.7 Comparison of additional stress distribution of different reinforcement lengths

加筋体上部应力分布与未加筋分布类似,当附加应力扩散至加筋体会出现外移的再次应力扩散,原有扩散至土洞区应力被转移至两侧支撑区,土

洞软弱区的竖向附加应力降低, δ_{dII} 也随之降低。

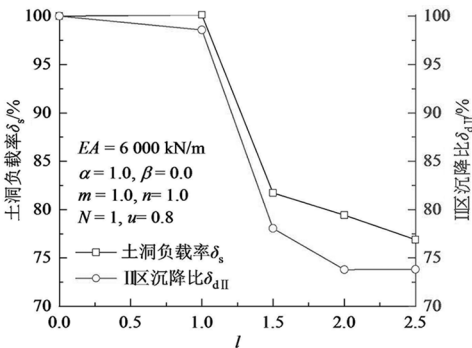


图 8 不同加筋长度土洞负载率及 II 区沉降比
Fig.8 Load rate of soil void and II zone settlement ratio with different reinforcement lengths

2.3 单层加筋不同刚度对应力扩散的影响
图 9 中,随着 EA 增长, δ_s 和 δ_{dII} 明显下降。 EA 增加,在相同变形下,可产生更大的拉力,需要更多摩擦力进行平衡,应力更多被传递至支撑区,土洞区内应力下降。

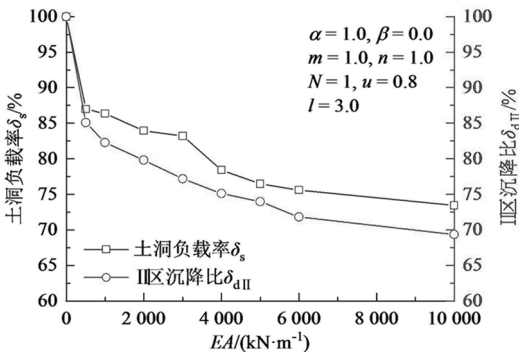


图 9 加筋体刚度对土洞负载率及 II 区沉降比影响
Fig.9 Effects of stiffness of reinforced body on load rate of soil cave and settlement ratio in area II

图 10 是不同 EA 下附加应力分布图。随着 EA 增大, -60 kPa 等值线逐渐向加筋体上部移动且拱脚向外扩,但不会超过土洞宽度。土洞区内 -35 kPa 等值线下凸不断降低,土洞内应力不断减小,在土洞两侧的支撑区 -35 kPa 等值线不断增大,即土洞两侧支撑区受到的附加应力增大,土洞区内附加应力不断减小, EA 增大可以阻止应力向软弱区的传递。

2.4 多层加筋不同间距对应力扩散的影响
保持 $l = 2.0$ 不变,研究不同 h 对应力扩散影响。图 11 和图 12 中, $h = 0$ 为单层加筋,当 $h > 0$

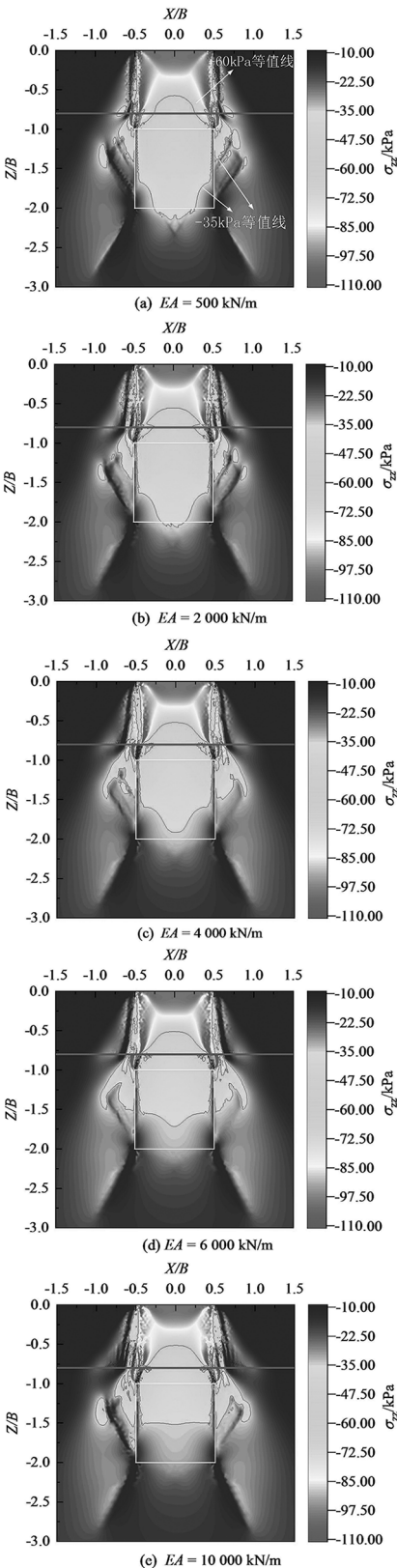


图 10 加筋体刚度对附加应力分布影响
Fig.10 Effects of stiffness of reinforced body on the distribution of additional stress

为双层加筋,双层加筋下 δ_{III} 会产生明显下降。当 h 为 0.3~0.4, δ_{III} 下降趋势趋于平缓。除 $u = 0.9$ 外,当 $u + h = 1.0$ 时, δ_{III} 都会上升,与单层加筋 $u = 1.0$ 情况类似,加筋体直接铺设在土洞软弱区效果不佳。图 12 更体现出这一点,第二层加筋体铺设至土洞, δ_s 会增大甚至超过单层加筋下的情况,加筋直接铺设至土洞区,减小了应力峰值,但不利于应力扩散,土洞仍会受到较大附加应力。 $u = 0.9$ 这一特殊情况是由于 $h = 0$ 为单层加筋, $h = 0.1$ 为双层加筋,第二层加筋体直接铺设至土洞区,双层较单层加筋有效降低应力峰值,从而减小 δ_{III} 。但对于应力而言,第二层加筋直接铺设至土洞区上仍会造成 δ_s 增大。

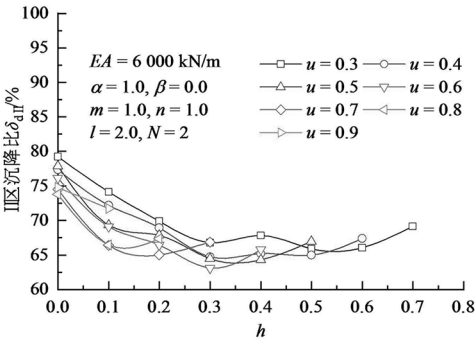


图 11 不同加筋间距 II 区沉降比
Fig.11 Settlement ratio of area II with different reinforcement spacings

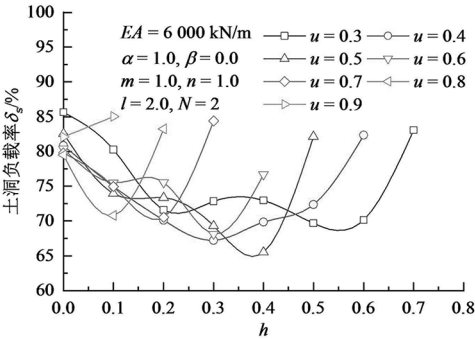


图 12 不同加筋间距土洞荷载率
Fig.12 Load rate of soil cave with different reinforcement spacings

研究不同 h 下附加应力分布情况。以 $u = 0.6$ 为例,图 13 中随着 h 增大,层间应力集中区外移趋势减弱,层间出现未完全拱形应力集中区域,与加筋体顶部形成拱形的应力区域,可称为“双层土拱效应”^[5]。加筋体底部至土洞区始终存在月牙形应力集中区域。

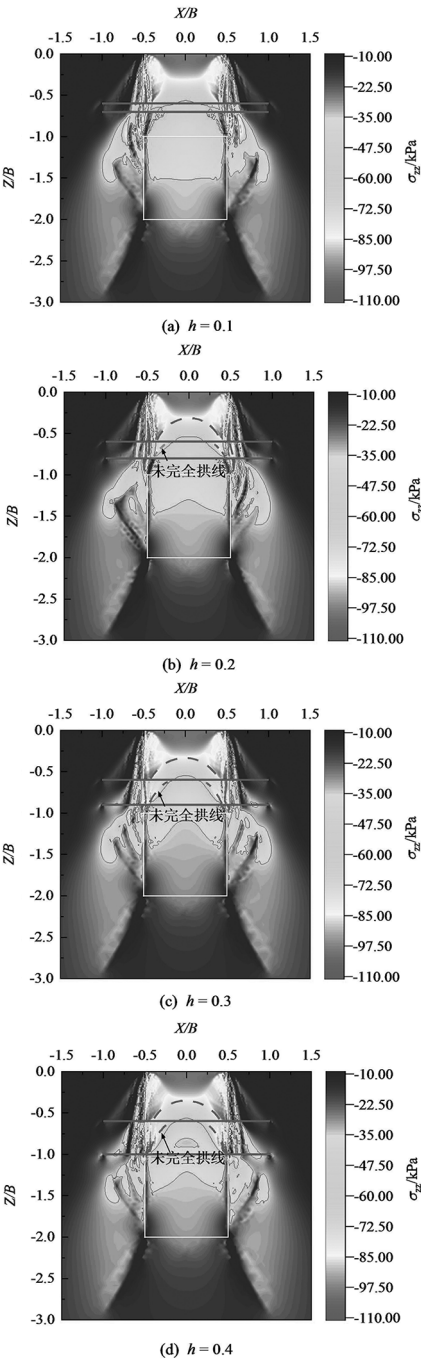


图 13 加筋间距对附加应力分布影响

Fig.13 Effects of reinforcement spacing on vertical stress distribution

2.5 多层加筋不同层数对应力扩散的影响

不同 N 对应力扩散的影响可分为:相同 h , 不同 N ; 相同 d , 不同 N 。

以 $h = 0.1$ 为例,研究相同 h , 不同 N 对应力扩散影响。图 14 中, N 为 1~3, δ_{III} 下降 13%~15%, N 为 3~6, δ_{III} 只下降 6%~8%。图 15 中,

N 为 1~3, δ_s 下降了 8%~16%, 而 N 为 3~6, δ_s 基本不变。在 N 较小, 增加 N 能够有效增强应力扩散, 改善应力峰值。但这两种情况并不会总是同时出现, 当 N 达到一定层数, 应力峰值仍会保持较缓的趋势下降, 但土洞总体受力不会再减小。其中 $u = 0.6, N = 5$ 时, δ_s 出现上升, 同样是加筋体直接铺设至土洞顶部导致的。

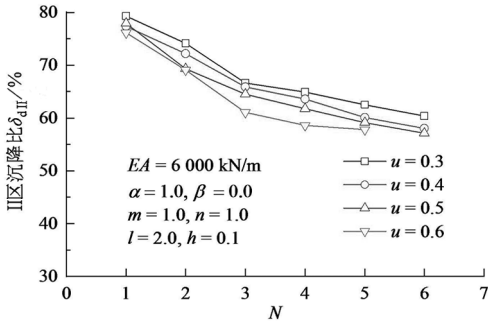


图 14 不同加筋层数 II 区沉降比 (相同加筋间距)

Fig.14 Settlement ratio of area II with different reinforcement layers (with the same reinforcement spacing)

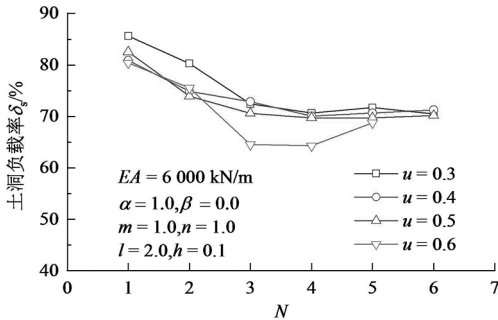


图 15 不同加筋层数土洞负载率 (相同加筋间距)

Fig.15 Load ratio of soil cave with different reinforcement layers (with the same reinforcement spacing)

按照表 3 建立模型, 将 d 固定为 0.6, 随着 N 的增加, 调整 h 。图 16 和图 17 中, N 由 2 层增加至 4 层, δ_{III} 下降 6%~8% 和土洞负载下降 1%~8%, 相比相同 h 的情况, 保持 d 不变, 增大 N 对改善土洞应力峰值及增强应力扩散效果不佳。

表 3 加筋层数及加筋间距分布表		
Tab.3 Number of reinforcement layers and spacing distribution of reinforcement		
加筋层数 N	加筋层间距 h	加筋范围 d
2	0.6	0.6
3	0.3	
4	0.2	

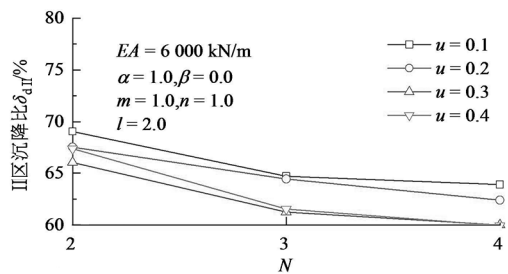


图 16 不同加筋层数 II 区沉降比 (相同加筋范围)
Fig.16 Settlement ratio of area II with different reinforcement layers (with the same area of reinforcement)

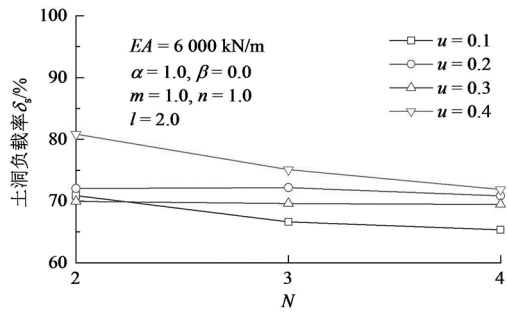


图 17 不同加筋层数土洞荷载率 (相同加筋范围)
Fig.17 Load ratio of soil cave with different reinforcement layers (with the same area of reinforcement)

3 结论

1) 下伏土洞地基在荷载作用下,土洞区内会产生应力集中现象,土洞区会产生较大变形,而在土洞上部区域与土洞下部区域变形较小,地表沉降主要是由于软弱土洞区的变形造成。

2) 采用单层加筋可以降低 δ_s 和应力峰值有助于减小沉降。 t 和 u 增大,一定范围内应力峰值减小, δ_s 降低,土洞区内应力会均化。但存在最佳加筋长度和最佳埋深,当超过最佳长度,加筋效果增加变得不明显,当超过最佳埋深,加筋效果会衰减。

3) 多层加筋相比单层加筋对于改善地基沉降,增强应力扩散有显著效果。 h 增大,加筋层间会出现未完全拱形应力集中区。保持相同 h , N 增大对于改善地基沉降和增强应力扩散并不明显。增大 d 更有助于改善地基沉降,增强应力扩散。

4) 针对下伏土洞加筋地基的应力分布特点,还应考虑不同荷载形式、土洞位置、土洞区域大小、土体参数等因素的影响。本文未对以上因素进行分析,这些问题有待进一步研究和探讨。

参考文献:

[1] LEE J, JEONG S, KO J. Undrained stability of surface strip footings above voids[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 62: 128-135.

[2] 李毅军. 高速公路岩溶地基稳定性分析及工程处理[D]. 长沙: 中南大学, 2013.

[3] CICEK E, GULER E, YETIMOGLU T. Effect of reinforcement length for different geosynthetic reinforcements on strip footing on sand soil[J]. Soils and Foundations, 2015, 55(4): 661-677.

[4] HUCKERT A, BRIANCON L, VILLARD P, et al. Load transfer mechanisms in geotextile-reinforced embankments overlying voids: experimental and analytical approaches[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(3): 442-456.

[5] 贺炜, 李昆, 王芳洪. 防岩溶塌陷加筋垫层大比例模型试验及设计理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 980-988.

[6] ALEKSANDROV A, KALININ A, TSYGULEVA M. Distribution capacity of sandy soils reinforced with geosynthetics[J]. Magazine of Civil Engineering, 2016, 66(6): 35-48.

[7] BENMEBAREK S, BERRABAH F, BENMEBAREK N. Effect of geosynthetic reinforced embankment on locally weak zones by numerical approach[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 65: 115-125.

[8] VILLARD P, HUCKERT A, BRIANCON L. Load transfer mechanisms in geotextile-reinforced embankments overlying voids: numerical approach and design[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(3): 381-395.

[9] CICEK E, GULER E, YETIMOGLU T. Stress distribution below a continuous footing on geotextile-reinforced soil[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(3): 06018005.

[10] 侯娟, 张孟喜, 张陶陶, 等. 横-竖立体加筋地基中附加应力的分析计算[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 702-708.

[11] GIBSON R E. Some results concerning displacements and stresses in a Non-Homogeneous elastic Half-space [J]. Géotechnique, 1967, 17(1): 58-67.

[12] 张克恭, 刘松玉. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.