

Trapdoor 位移相关土压力及抗沉陷加筋设计新方法

朱 斌¹, 陈若曦^{1, 2}, 陈云敏¹, 陈仁朋¹

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江省电力设计院, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 传统考虑土拱效应的 Trapdoor 松动土压力与位移无关, 已逐渐不能满足工程设计需要。通过综合分析 Trapdoor 表面土压力随位移变化的规律, 提出了 Trapdoor 与位移相关土压力的表达式。对于不同的土性参数和 Trapdoor 尺寸, 计算土压力与模型试验及 FLAC 数值分析结果吻合良好。利用所提出的 Trapdoor 位移相关土压力, 建立了抗局部沉陷加筋设计新方法, 克服了传统 Giroud (1990) 设计方法不能考虑沉陷区上方土压力随沉陷位移变化的不足, 从而更符合实际情况。通过扩建填埋场封顶系统及中间衬垫系统的抗局部沉陷分析及设计发现, 对于封顶系统传统 Giroud (1990) 设计方法偏保守; 而对于中间衬垫系统, 上覆堆体厚度明显影响加筋体的允许张拉强度, 当上覆堆体厚度 H 较大时 (沟渠型沉陷: $H > 32$ m, 圆形沉陷: $H > 50$ m), 传统 Giroud (1990) 设计方法偏不安全。

关键词: 土拱效应; 沉陷; 加筋; 位移

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)12-1895-07

作者简介: 朱 斌 (1977-), 男, 副教授, 主要从事基础工程、环境土工等方面的研究, E-mail: binzhu@zju.edu.cn。

Trapdoor deflection-related earth pressure and new design method of reinforcements to resist local subsidence

ZHU Bin¹, CHEN Ruo-xi^{1, 2}, CHEN Yun-min¹, CHEN Ren-peng¹

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Zhejiang

Electric Power Design Institute, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The traditional Trapdoor loose earth pressure taking into account the soil-arching effect is independent of the Trapdoor deflection, which can not fully satisfy the requirements of the present engineering design. The expression of deflection-related Trapdoor normal earth pressure is presented by analyzing the relationship between earth pressure normally acting on the surface of Trapdoor and the Trapdoor deflection. For various parameters of overlying soil and the width of Trapdoor, Trapdoor normal earth pressures calculated by the proposed expression are in good agreement with those of the available model tests and FLAC numerical analyses. A new design method of reinforcements to resist the local subsidence is established using the proposed deflection-related Trapdoor earth pressure. In comparison with the traditional Giroud (1990) design method which can not consider the relationship between the normal earth pressure and the vertical deflection of reinforcements, the present design method is in more accordance with the actual engineering situation. Analysis and design to resist local subsidence for covering system and intermediate liner of an expanded landfill are carried out, showing that the thickness of the overlying soil can heavily influence the allowable tensile strength of reinforcements, and that the traditional Giroud (1990) design method is not recommended if the thickness of the overlying soil H is large enough (trench subsidence: $H > 32$ m, circular subsidence: $H > 50$ m).

Key words: soil-arching effect; subsidence; reinforcement; deflection

0 引 言

由于喀斯特地形、潜蚀、管道腐蚀、盾构掘进、地下结构暗挖等原因, 工程建设中经常遇到地基中局部沉陷甚至空洞的情况, 如何经济有效地处理局部沉陷和空洞是这类工程中的关键问题之一^[1]。另外, 现代卫生填埋场中, 含有土工合成材料的衬垫系统和封顶系统是其防渗的重要屏障, 然而由于衬垫系统下卧

地基中的空洞及垃圾的不均匀性和降解, 经常会发生局部沉陷情况, 可能导致衬垫系统破坏。填埋场衬垫系统造价较高, 最大可占总造价的 1/3, 因而衬垫系统的抗局部沉陷设计是填埋场设计的一项重要内容,

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2007CB714001); 国家自然科学基金项目 (50538080); 国家自然科学基金项目 (50629802)
收稿日期: 2008-08-12

特别是对于扩建垃圾填埋场。

土拱效应是这类问题研究的关键点。如图1所示, Terzaghi^[2]通过著名 Trapdoor 试验揭示了土力学领域的经典问题——土拱效应现象的存在, 并建立了土拱效应完全发挥后作用在 Trapdoor 表面竖向应力(松动土压力)的表达式, 该表达式较好地反映了土拱效应中应力转移现象, 此后广泛应用于计算地下管道竖向土压力、路堤桩间土压力、地基局部沉陷竖向压力等, 极大程度地完善了相关工程设计理论。近年来随着隧道工程的快速发展, 土拱效应的研究越来越受到重视。然而, 模型试验及数值分析均发现 Trapdoor 表面土压力在达到一稳定值(松动土压力)前随竖向位移逐渐减小^[3-5], 现今工程设计中采用松动土压力作为 Trapdoor 表面土压力有时偏不安全, 因而研究 Trapdoor 表面与 Trapdoor 竖向位移相关的土压力具有重要的科学意义及工程实用价值。

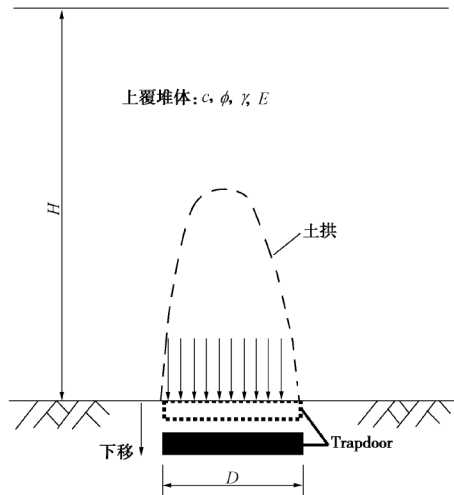


图1 Trapdoor 模型

Fig. 1 Trapdoor model

在盾构掘进、地下结构暗挖等工程中, 进行注浆加固、采用衬砌管片和支撑等手段可有效处理地基中空洞问题, 防止地基塌陷。而对于地基中的局部沉陷, 水平加筋处理则显示了极大的优点^[6], 这种处理方式既经济又有效, 已成为一个国际研究热点^[7-14], 并广泛应用于路基及垃圾填埋场的抗局部沉陷及空洞处理^[6-8]。由于较复杂的解析及数值分析方法难以应用于工程实际^[8-11], Giroud 等^[12]首先基于 Terzaghi 传统松动土压力及加筋体允许应变和张拉应力之间的半经验关系, 建立了简单易行的抗局部沉陷工程设计方法(Giroud (1990) 法), 随后 Qian 等^[7]及 Kuo 等^[13]在此基础上分别修正了 Trapdoor 松动土压力计算公式及给出了相应的设计图表, 使得这一设计方法的应用更为广泛。然而, 正如前文所述, 加筋体表面的竖向

土压力是与加筋体竖向位移相关的, 采用与竖向位移无关的松动土压力作为加筋体表面竖向土压力进行抗局部沉陷设计势必带来一定的误差, 甚至造成工程安全隐患。因而考虑位移相关的加筋体表面竖向土压力进行抗局部沉陷加筋设计, 突破传统工程设计方法无法考虑土拱应力位移相关性的缺陷, 对于抗局部沉陷设计具有重要的工程意义。

本文将通过综合分析不同参数条件下 Trapdoor 表面土压力随位移变化的规律, 提出 Trapdoor 与位移相关的土压力计算模型。利用所提出的 Trapdoor 位移相关土压力, 进而建立抗局部沉陷加筋设计新方法, 并应用于实际工程。

1 Trapdoor 位移相关土压力

Terzaghi^[2]给出了如下土拱效应完全发挥后作用在 Trapdoor 表面竖向应力(松动土压力)的表达式:

$$\sigma_{vl} = \frac{D(\gamma - \frac{2c}{D})}{2K_h \tan \varphi} (1 - e^{-2K_h \frac{H}{D} \tan \varphi}) \quad (1)$$

式中, c , φ , γ , H 分别为 Trapdoor 上覆土的有效黏聚力、有效内摩擦角、重度及土层厚度, D 为 Trapdoor 宽度, K_h 为侧向土压力系数。目前, 模型试验及数值分析均发现 Trapdoor 表面竖向土压力在达到一稳定值(松动土压力)前随竖向位移逐渐减小^[3-5], 现今工程设计中普遍采用这一稳定值作为 Trapdoor 表面土压力有时偏不安全(此时 Trapdoor 表面土压力尚未达到松动土压力)。为研究 Trapdoor 位移相关的土压力, 可建立 Trapdoor 的 FLAC 有限差分数值分析模型^[15], 通过指定 Trapdoor 的竖向位移, 获得了 Trapdoor 表面竖向应力随位移变化的规律, 研究不同模型参数, 如上覆土体有效黏聚力 c 、有效内摩擦角 φ 、弹性模量 E 、重度 γ 、厚度 H 及 Trapdoor 宽度 D 等参数对 Trapdoor 表面竖向土压力的影响。

本文 Trapdoor 位移相关土压力的分析思路为: 首先通过综合的参数分析, 发现 Trapdoor 表面无量纲土压力 $\sigma_v/(\gamma H)$ 与竖向位移比 y/D 及无量纲参数 $E/(\gamma H)$ 的关系, 求得相应的比例系数, 并提出 Trapdoor 位移相关土压力的表达式, 最后得到已有模型试验及不同参数条件下数值分析结果的验证。

不同模型参数情况下, $\ln[\sigma_v/(\gamma H) - \alpha]$ 与 $\ln(1 - \alpha)$ 的差值随竖向位移比 y/D 的变化如图2所示, 其中 σ_v 为 Trapdoor 表面竖向位移相关土应力, y 为 Trapdoor 竖向位移, $\alpha = \sigma_{vc}/(\gamma H)$ 为 Trapdoor 松动土应力比, σ_{vc} 为修正 Terzaghi 松动土压力^[15]。由图2可知, 不同上覆堆体强度及泊松比下, $\ln[\sigma_v/(\gamma H) - \alpha] - \ln(1 - \alpha)$ 基本随

y/D 呈线性关系。图 3 为不同竖向位移比 y/D 下 $\ln[\sigma_v/(\gamma H) - \alpha]$ 与 $\ln(1 - \alpha)$ 随无量纲参数 $E/(\gamma H)$ 的变化。在一定 y/D 情况下, $\ln[\sigma_v/(\gamma H) - \alpha]$ 与 $\ln(1 - \alpha)$ 的差值随 $E/\gamma H$ 基本上也呈线性关系。

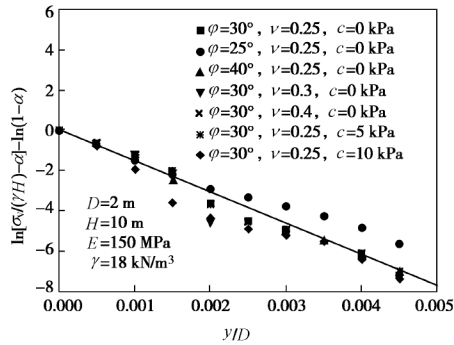


图 2 $\ln[\sigma_v/(\gamma H) - \alpha] - \ln(1 - \alpha)$ 与竖向位移比的关系

Fig. 2 Relationship between $\ln[\sigma_v/(\gamma H) - \alpha] - \ln(1 - \alpha)$ and vertical displacement ratio

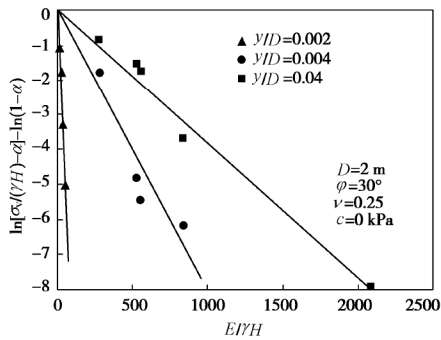


图 3 $\ln[\sigma_v/(\gamma H) - \alpha] - \ln(1 - \alpha)$ 与 $E/(\gamma H)$ 的关系

Fig. 3 Relationship between $\ln[\sigma_v/(\gamma H) - \alpha] - \ln(1 - \alpha)$ and $E/(\gamma H)$

根据以上规律分析, 可构造如下 Trapdoor 位移相关土压力比的表达式

$$\frac{\sigma_v}{\gamma H} = (1 - \alpha)e^{-\lambda \frac{y}{D} \frac{E}{\gamma H}} + \alpha \quad (2)$$

式中, λ 为无量纲系数。Trapdoor 位移相关土压力比与松动土压力比 α 、竖向位移比 y/D 及无量纲参数 $E/(\gamma H)$ 有关。当 Trapdoor 竖向位移 $y=0$ 时, $\sigma_v = \gamma H$; 当 Trapdoor 位移 $y \rightarrow \infty$ 时, $\sigma_v = \sigma_{vc}$ 。由式 (2) 可知,

$$\lambda = \frac{D}{y} \cdot \frac{\gamma H}{E} \cdot \left[\ln(1 - \alpha) - \ln\left(\frac{\sigma_v}{\gamma H} - \alpha\right) \right] \quad (3)$$

图 4 给出了不同参数情况下 λ 值与 Trapdoor 松动土压力比 α 的关系, 可以发现这些 λ 值的平均值为 1.76。对于加瑞等^[5]给出的 Trapdoor 模型试验, 将 $\lambda=1.76$ 代入式 (2) 计算得到的 Trapdoor 竖向土压力随位移变化的曲线与模型试验结果之间的比较如图 5 所示, 两者之间吻合良好。图中还给出了 Giroud (1990) 抗沉陷

设计方法中所采用的松动土压力值, 其值与修正松动土压力值^[15]相比偏保守。

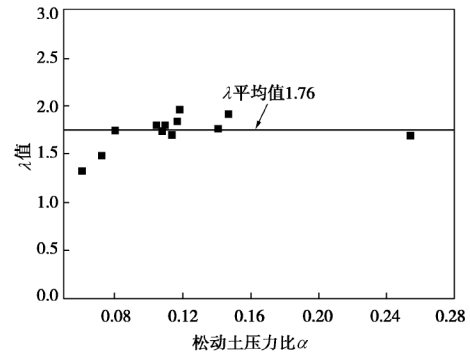


图 4 无量纲参数 λ 值与松动土压力比的关系

Fig. 4 Relationship between nondimensional parameter λ and loose earth pressure ratio

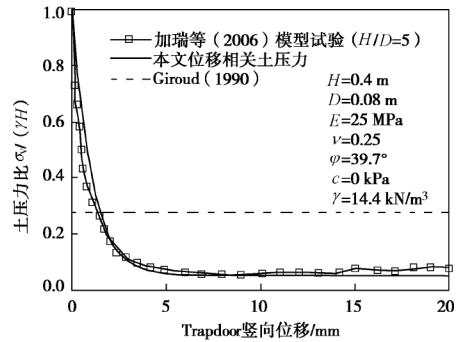


图 5 土压力比与 Trapdoor 竖向位移的关系

Fig. 5 Relationship between earth pressure ratio and Trapdoor vertical displacement

图 6~8 给出了平面应变和轴对称条件下, 不同沉陷宽度及上覆堆体弹性模量和厚度条件下本文位移相关土压力计算结果、FLAC 数值分析结果及 Giroud (1990) 设计方法所采用的松动土压力比。可以发现, 本文 Trapdoor 位移相关土压力计算结果能较好反映不同参数条件下 Trapdoor 表面竖向土压力随位移变化的趋势。

2 抗沉陷加筋设计方法

加筋是地基抗局部沉陷的一种有效方法, 相关数值及解析分析方法仍难以在工程中应用, 而 Giroud (1990) 抗沉陷加筋设计方法至今在工程上已得到了普遍应用, 其关键参数是沉陷区加筋体表面的竖向土压力 (可看作 Trapdoor 松动土压力)。如图 9 所示, Giroud (1990) 设计方法仍基本沿用 Terzaghi (1943) 松动土压力^[2], 认为当沉陷区上覆堆体足够厚时, 土拱效应充分发挥, 松动土压力趋于一稳定值。然而,

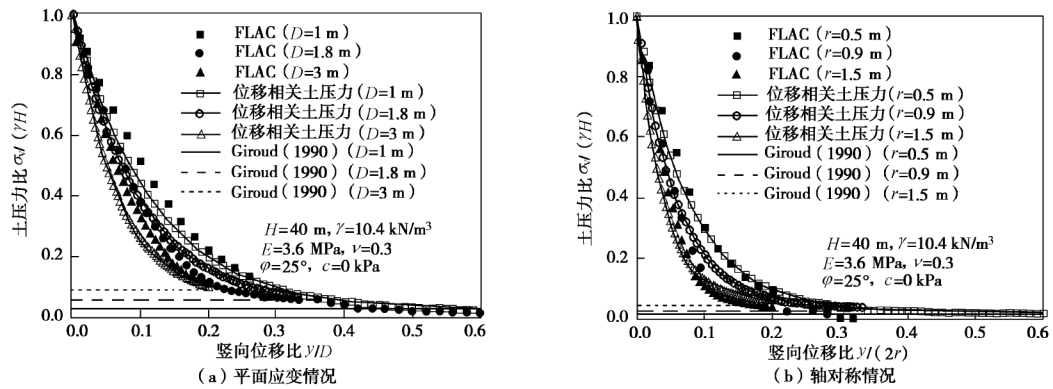


图 6 不同沉陷宽度条件下土压力比与竖向位移比的关系

Fig. 6 Relationship between earth pressure ratio and vertical displacement ratio under different subsidence widths

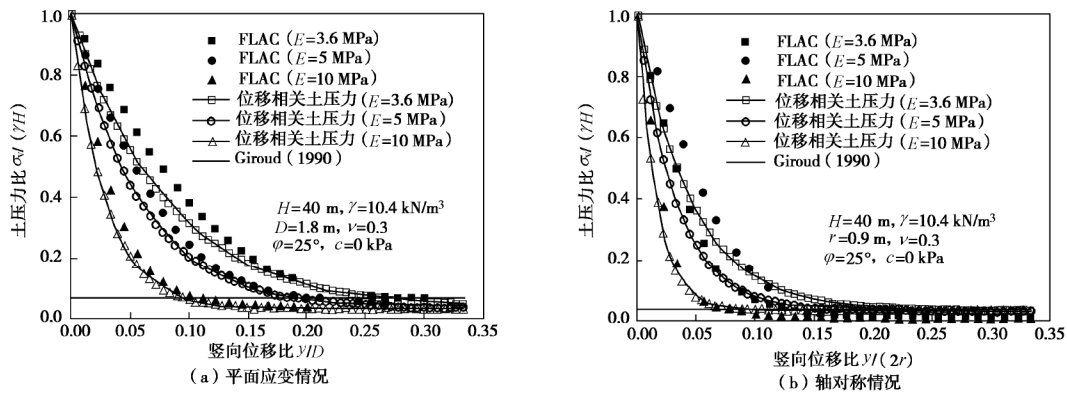


图 7 不同土体弹性模型条件下土压力比与竖向位移比的关系

Fig. 7 Relationship between earth pressure ratio and vertical displacement ratio under different elastic moduli of soils

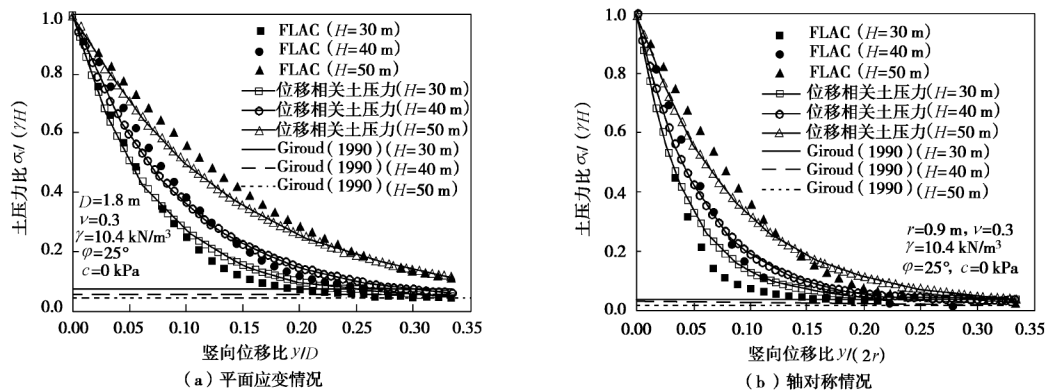


图 8 不同上覆堆体厚度条件下土压力比与竖向位移比的关系

Fig. 8 Relationship between earth pressure ratio and vertical displacement ratio under different thicknesses of overlying soils

已有理论及模型试验均发现, 该松动土压力在上覆堆体厚度较小时偏保守^[3-5, 15]。另外, Giroud (1990) 设计方法未考虑与位移相关的加筋体表面土压力, 而实际上, 当加筋体刚度较大时加筋体的沉降量小于达到松动土压力所需的竖向位移量, 因而加筋体表面竖向

土压力将较大。

图 9 给出了平面应变条件下采用不同刚度加筋体时加筋体表面竖向土压力平均值的数值分析结果。可以看出, 当上覆堆体厚度较小时, 加筋体沉降量超过了达到松动土压力所需的竖向位移量, 因而不同加筋

体刚度条件下加筋体表面的竖向土压力基本相同; 而当上覆堆体厚度较大时, 加筋体沉降量小于松动土压力所需的竖向位移量, 特别是加筋体刚度较大的情况, 因而加筋体表面竖向应力随上覆堆体厚度增加而增加, 并不像 Giroud (1990) 传统设计方法那样趋于一稳定值, 且刚度较大的加筋体的表面竖向土压力随上覆堆体厚度增加而快速增加。因而按 Giroud (1990) 传统工程设计方法进行设计对于加筋体上覆堆体厚度较小的情况将偏保守, 而对于上覆堆体厚度较大的情况将可能偏不安全。本文在 Giroud (1990) 传统设计方法的基础上, 结合所提出的 Trapdoor 位移相关土压力的表达式, 建立了一套工程实用的抗局部沉陷加筋设计新方法。

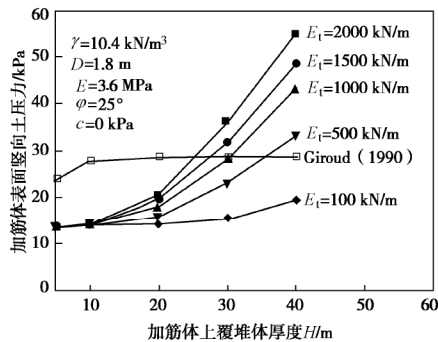


图 9 加筋体表面竖向土压力与上覆堆体厚度的关系

Fig. 9 Relationship between vertical earth pressure on surface of reinforcements and thickness of overlying soils

基于 Giroud (1990) 设计方法中关于张拉膜的计算假设, 考虑加筋体表面位移相关的竖向土压力, 给出如下抗局部沉陷加筋设计步骤:

(1) 假定加筋体的允许应变 ε_g 。

(2) 根据张拉膜理论, 由允许应变 ε_g 确定无量纲参数 Ω 及加筋体的竖向位移比 y/D , Ω , ε_g 及 y/D 之间的对应关系见 Qian 等^[7]。

(3) 根据加筋体上覆堆体的物理力学参数 c , φ , E , γ , H 和沉陷区的宽度 D 以及竖向位移比 y/D 确定加筋体表面的竖向土压力

$$\sigma_v(y) = (\gamma H - \sigma_{vc}) e^{-\lambda \frac{y}{D} \frac{E}{\gamma H}} + \sigma_{vc} \quad (4)$$

(4) 计算加筋体的允许张拉强度 T_{allow} 及设计张拉强度 T_{ult} :

$$T_{allow} = \sigma_v(y) D \Omega \quad (5)$$

$$T_{ult} = T_{allow} R_{FCR} R_{FID} R_{FCBD} \quad (6)$$

式中 R_{FCR} 为考虑荷载长期效应的折减系数, 一般取 2.0~2.5; R_{FID} 为考虑施工引起的折减系数, 一般取 1.1~1.5; R_{FCBD} 为考虑生物化学腐蚀引起的折减系

数, 一般取 1.1~1.2。以上三个系数的取值可见文献 [7] 及 [17]。轴对称情况下的抗局部沉陷工程设计只需将宽度 D 替换成 $2r$ 即可。

3 抗局部沉陷加筋设计方法的工程应用

苏州七子山垃圾填埋场是我国目前最大的山谷型扩建填埋场^[16]。为了满足日益增长的垃圾产量需要及节约用地, 拟在老填埋场上再竖向扩建 40 m。由于老填埋场采用垂直防渗系统, 因而在进行竖向扩建时, 需在扩建堆体底部增设水平防渗系统, 以降低老填埋场渗滤液水头高度并保护周围环境。封顶系统及新老填埋体之间中间衬垫系统的抗局部沉陷加筋设计是扩建设计中的一项重要内容。

(1) 封顶系统加筋设计

覆盖层设计厚度为 1.2 m, 重度 $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ 。按国外文献设计沉陷宽度通常取 1.8 m^[7], 覆盖层土体弹性模量取 $E = 8 \text{ MPa}$, 有效黏聚力 $c = 0$, 有效内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$, 泊松比 $\nu = 0.35$ 。取土工膜允许张拉应变 $\varepsilon = 7\%$ ^[7], 对于平面应变问题查表得 $\Omega = 0.84$, $y/D = 0.165$, 计算得封顶系统土工合成材料层的竖向位移 $y = 0.297 \text{ m}$, 代入式 (4) 得土工合成材料层表面的竖向应力 $\sigma_v(y) = 14.3 \text{ kPa}$; 根据式 (5) 计算土工合成材料层的允许张拉强度 (平面应变) $T_{allow} = \sigma_v(y) \cdot D \Omega = 14.3 \times 10^4 \times 1.8 \times 0.84 = 21.6 \text{ kN/m}$ 。由于封顶系统土工合成材料所处环境一般较中间和底部衬垫系统理想, 因而考虑适中的安全系数得土工合成材料层的最终张拉强度: $T_{ult} = T_{allow} R_{FCR} R_{FID} R_{FCBD} = 21.6 \times 2.2 \times 1.3 \times 1.15 = 71.0 \text{ kN/m}$ (平面应变); $T_{ult} = T_{allow} R_{FCR} \cdot R_{FID} R_{FCBD} = 7.6 \times 2.2 \times 1.3 \times 1.15 = 25.0 \text{ kN/m}$ (轴对称)。仅考虑常见的轴对称沉陷情况时, 封顶系统中一层 1.5 mm 厚 HDPE 土工膜的自身张拉强度即可满足设计要求。

(2) 中间衬垫系统加筋设计

中间衬垫系统上覆扩建垃圾堆体厚度 $H = 40 \text{ m}$, 重度 $\gamma = 10.4 \text{ kN/m}^3$, 弹性模量 $E = 3.6 \text{ MPa}$, 有效黏聚力 $c = 0$, 有效内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$ ^[16], 泊松比 $\nu = 0.35$ 。同样选择沉陷宽度 1.8 m 进行设计。由于中间衬垫系统所处环境较为恶劣, 考虑较大的安全系数:

$$T_{ult} = T_{allow} R_{FCR} R_{FID} R_{FCBD} = 72.5 \times 2.5 \times 1.5 \times 1.2 = 326 \text{ kN/m} \text{ (平面应变)},$$

$$T_{ult} = T_{allow} R_{FCR} R_{FID} R_{FCBD} = 31.4 \times 2.5 \times 1.5 \times 1.2 = 141.3 \text{ kN/m} \text{ (轴对称)}。$$

根据计算, 衬垫系统中土工膜、GCL、土工布、土工复合排水网等土工合成材料自身的张拉强度不足以满足中间衬垫系统的抗局部沉陷要求, 可采用两层

(平面应变沉陷形式)或一层(轴对称沉陷形式)强度合适的土工格栅进行加筋保护。

正如图9所示,当上覆堆体厚度较大时,加筋体表面竖向应力随上覆堆体厚度增加而增加,并不像 Giroud (1990) 传统设计方法那样趋于一稳定值。因而,如图10所示,按 Giroud (1990) 传统设计方法进行设计对于加筋体上覆堆体厚度较小的情况偏保守;而对于上覆堆体厚度大于一定值(沟渠型沉陷: 32 m, 圆形沉陷: 50 m)的情况偏不安全,此时衬垫系统沉降小于达到松动土压力所需的竖向位移量。由此可见,当沉陷区上覆堆体厚度较大时,如填埋场扩建工程,采用松动土压力值进行工程设计将偏不安全,应引起设计人员的重视。

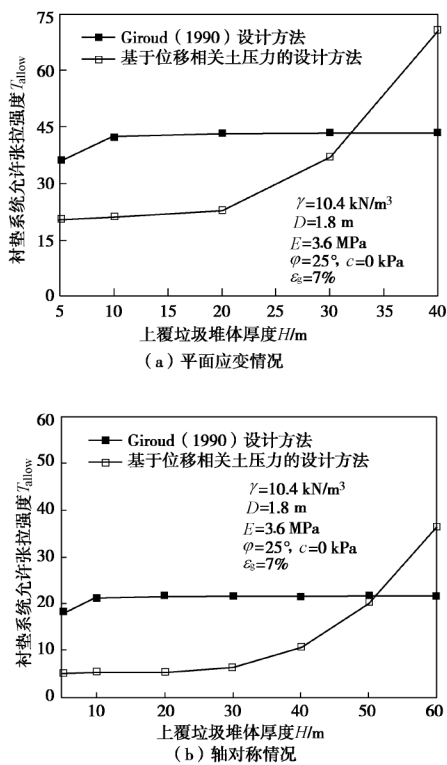


图10 衬垫系统允许张拉强度与上覆堆体厚度的关系

Fig. 10 Relationship between allowable tensile strength of liner and thickness of overlying waste mass

4 结论与建议

基于 Trapdoor 模型分析,结合修正的 Terzaghi 松动土压力公式,提出了 Trapdoor 位移相关土压力的表达式,计算结果与模型试验和 FLAC 数值分析结果吻合良好。利用所提出的 Trapdoor 位移相关土压力,基于张拉膜理论建立了考虑位移相关土压力的抗局部沉陷加筋设计新方法,更符合工程实际情况。通过相应

的分析与工程应用,得出以下结论和建议:

(1) Trapdoor 表面竖向土压力在达到松动土压力前随 Trapdoor 竖向位移的增大而减小,且与 Trapdoor 宽度及上覆堆体的强度参数、弹性模量、重度及厚度有关,上覆堆体弹性模量越小、厚度越大,则 Trapdoor 达到松动土压力所需的竖向位移量越大。

(2) 采用 Giroud (1990) 传统工程设计方法进行设计对于加筋体上覆堆体厚度较小的情况偏保守;而对于上覆堆体厚度较大的情况偏不安全,此时建议采用本文基于位移相关土压力的抗局部沉陷加筋设计新方法进行工程设计。

(3) 加筋体与上覆堆体及下卧地基间的切向相互作用一定程度上影响其张拉应力分布,且局部沉陷条件下加筋体表面竖向应力影响因素较为复杂,需开展进一步的理论及模型试验研究。

参考文献:

- [1] JAMEI M, VILLARD P, ZAGHOUBANI K, et al. Prevent of risk due to karstic cavities detected in a recent motorway in Tunisia using geotextiles[C]// Proceedings 8ICG, Geosynthetics. 2006: 809 - 812.
- [2] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1943: 69 - 76.
- [3] KOUTSABELOULIS N C, GRIFFITHS D V. Numerical modelling of the trap door problem[J]. Geotechnique, 1989, 39(1): 77 - 89.
- [4] ADACHI T, KIMURA M, KISHIDA K. Experimental study on the distribution of earth pressure and surface settlement through three-dimensional trapdoor tests[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18: 171 - 183.
- [5] 加瑞, 朱伟, 钟小春. 砂土拱效应的挡板下落试验及机理研究[J]. 岩土力学, 2006, 12(27): 687 - 692. (JIA Rui, ZHU Wei, ZHONG Xiao-chun. On baffle drop test and mechanism of sand arching effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 12(27): 687 - 692. (in Chinese))
- [6] 王孝存, 周建. 土工格栅处理基础空洞和群桩基础的应用研究[J]. 建筑技术, 2006, 37(4): 277 - 278. (WANG Xiao-cun, ZHOU Jian. Research on application of soil to treatment of foundation holes and grouped pile foundation[J]. Architecture Technology, 2006, 37(4): 277 - 278. (in Chinese))
- [7] QIAN X D, KOERNER R M, GRAY D H. Geotechnical aspects of landfill design and construction[M]. Upper Saddle

- River, N J: Prentice Hall, 2002.
- [8] 陈云敏, 陈若曦, 朱 斌, 等. 下卧土体局部沉陷条件下复合衬垫系统的受力变形性能及设计[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(1): 21 - 27. (CHEN Yun-min, CHEN Ruo-xi, ZHU Bin, et al. Deformation characteristics and design of geosynthetic liner system subjected to local subsidence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(1): 21 - 28. (in Chinese))
- [9] VILLARD P, GOURC J P, GIRAUD H. A geosynthetic reinforcement solution to prevent the formation of localized sinkholes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**: 987 - 999.
- [10] VILLARD P, BRIANCON L. Design of geosynthetic reinforcements for platforms subjected to localized sinkholes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, **45**: 196 - 209.
- [11] FINLEY C A, HOLTZ R D. Investigation and modeling of two composite landfill covers[J]. Geosynthetics International, 2001, **8**(2): 97 - 112.
- [12] GIROUD J P, BONAPARTE R, BEECH J F, et al. Design of soil layer-geosynthetic systems overlying voids[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1990, **9**(1): 11 - 50.
- [13] KUO S S, DESAI K, RIVERA L. Design method for municipal solid waste landfill liner system subjected to sinkhole cavity under landfill site[J]. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, 2005, **9**(4): 281 - 291.
- [14] SHIOU S K, KARISHMA D, LYMAR R. Design method for municipal solid waste landfill liner system subjected to sinkhole cavity under landfill site[J]. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, 2005, **9**(4): 281 - 291.
- [15] 陈若曦. 垃圾填埋场衬垫系统沉陷机理及抗沉陷设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. (CHEN Ruo-xi. Effects of subsidence on geosynthetic liner system of landfill and anti-subsidence design methods[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese))
- [16] ZHAN L T, CHEN Y M, LING W A. Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China[J]. Engineering Geology, 2008, **97**: 97 - 111.
- [17] SL/T225—98 水利水电工程土工合成材料应用技术规范[S]. 1998. (SL/T225 — 98 Standard for application of geosynthetics in hydraulic and hydro-power engineering[S]. 1998. (in Chinese))

勘 误

本刊 2009 年第 9 期刊登的张华等作者的“基于有限差分与离散元耦合的支挡结构数值计算方法”一文中:

图 2 (a) 名称“球—球接触”, 应为“颗粒—颗粒接触”;

公式 (8) $f_i(t) = (m^i)\ddot{x}_i(t) - (m^i)g_i$, 应为 $F_i(t) = (m^i)\ddot{x}_i(t) - (m^e)g_i$;

公式(9) $M_i(t) = I\ddot{\varphi}_i(t) = \frac{1}{2}(m^i)R^2\varphi_i(t)$, 应为 $M_i(t) =$

$I\ddot{\varphi}_i(t) = \frac{1}{2}(m^i)R^2\ddot{\varphi}_i(t)$ 。

特此勘误, 并向作者及读者致歉!

(本刊编辑部)