

复杂荷载作用下填埋场 HDPE 土工膜受拉计算

邓学晶, 孔宪京, 邹德高

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 采用 FLAC 程序对典型荷载作用下城市垃圾填埋场 HDPE 土工膜的受力状况进行了计算分析。3 种荷载条件包括: 36 m 高垃圾堆体自重荷载 (分层填埋); 下卧软弱黏土层不均匀沉降引起的荷载; 地震引起的动力荷载。计算结果显示: ①土工膜内的拉应力随着垃圾土分层填埋、基础不均匀沉降、地震荷载的作用而积累; ②基础不均匀沉降是影响衬垫层土工膜局部拉应力的主要因素; ③中等强度水平的地震动输入 (例如, 峰值加速度为 0.25g) 可使覆盖层土工膜端部锚固位置拉应力超过极限拉应力。

关键词: 填埋场; HDPE 土工膜; FLAC; 动力分析

中图分类号: X705

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)03-0447-05

作者简介: 邓学晶(1973-), 男, 山东日照人, 博士研究生, 主要从事环境土工方面的研究。E-mail: dxj506@hotmail.com。

Calculation of tension in HDPE geotechnical membrane under complicated loads

DENG Xue-jing, KONG Xian-jing, ZOU De-gao

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A finite difference analysis using the computer code FLAC was conducted for a landfill, in order to investigate the tensile stress level of HDPE geotechnical membrane under typical loading conditions in the landfill. The loading conditions considered were: (1) the deadweight of layer-built waste filled up to 36m; (2) the loads induced by potential differential settlement of base; (3) the dynamic loads caused by earthquake. The main conclusions were that (1) the accumulative tensile stress was developed in HDPE membrane by waste dumping, differential settlement, and earthquake, (2) the remarkable stress in liner HDPE membrane was induced by differential settlement primarily (3) the tensile stress in cover system HDPE membrane was higher than ultimate strength of HDPE geotechnical membrane under motion input with moderate intensity (e.g. peak acceleration was 0.25g).

Key words: landfill; HDPE geotechnical membrane; FLAC; dynamic analysis

0 引言

高密度聚乙烯 (HDPE) 土工膜以其良好的防渗性、耐腐蚀性等优点被广泛应用于城市垃圾填埋场。我国近年来建造的几十个现代卫生填埋场 (如深圳下坪、北京六里屯等) 都采用 HDPE 土工膜隔断渗滤液和防止气体外泄。HDPE 土工膜在填埋场的运用部位主要是底部衬垫系统和封顶覆盖系统等。在地震或不均匀沉降等荷载的作用下, 这些位于填埋场不同部位的土工膜都有遭到严重撕裂破坏、污染物发生泄漏的记录。例如, 1994 年美国 Northridge 地震后加利福尼亚州废弃物综合管理委员会 (Integrated Waste Management Board) 对受地震影响的填埋场进行调查时发现: 覆盖层土工膜撕裂是填埋场遭受地震破坏的主要形式之一。我国南方某填埋场采用 2 mm 厚的 HDPE 土工膜, 在垃圾土自重荷载作用下边坡顶部土工膜发生大面积断裂。因此, 在填埋场运行期间, 土

工膜是否能够承受来自外界和填埋场内部的复杂荷载条件是填埋场设计所关心的重要问题之一^[1]。

以往的研究大多集中在 HDPE 土工膜的力学特性、相关接触面的力学特性以及土工膜对垃圾边坡稳定性的影响等方面^[2]。针对典型荷载条件下 HDPE 土工膜受拉分析的研究还比较少。本文采用 FLAC 程序, 选用有代表性的垃圾填埋场构型, 考虑可能遭遇的不利荷载条件, 对土工膜内的拉应力进行了较详细的计算分析, 以验证填埋场运行期间土工膜是否能承受这些典型荷载的作用。3 种荷载条件分别为: ①分层填埋的 36 m 高垃圾堆体荷载 (每层 3 m); ②下卧软弱黏土层不均匀沉降引起的荷载; ③不同峰值加速度和频谱特性的地震荷载。

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (50538080)

收稿日期: 2005-12-27

1 填埋场的几何构型和材料参数

本文计算选用的填埋场几何构型如图 1 所示,按平面应变问题考虑。垃圾堆体高 36 m,分 12 层(每层 3 m)进行填埋,以模拟真实垃圾填埋的过程。垃圾堆体以上为 1.5 m 厚的黏土覆盖层,下卧黏土层厚度 18 m。覆盖层与垃圾堆体之间,以及垃圾堆体与基础之间设有 2 mm 厚的 HDPE 土工膜,土工膜采用直角三角形的平面应力杂交单元模拟,HDPE 土工膜服从线弹性本构关系,弹性模量为 0.65 GPa。土工膜与垃圾堆体之间设接触面,允许土工膜与垃圾土之间发生相对滑动。土工膜与黏土接触面的切向刚度为 126 MPa,摩擦角为 12° [3]。

下卧黏土和垃圾土均采用摩尔库伦弹塑性模型,硬黏土的剪切模量 G 随埋深而增加,最大为 154 MPa,最小为 30 MPa,软黏土剪切模量 G 取为 6.0 MPa;两种黏土的摩擦角分别取 38° 和 30° 。依据国内外对填埋场的现场测试和室内试验数据 [1-4] 选取垃圾土的材料参数,其中,密度随填埋深度的变化关系如图 2 所示,填埋场表面为 11.5 kN/m^3 ,底部为 14.4 kN/m^3 。剪切模量也随深度增加而增大,在填埋场底部为 2.3 MPa,顶部为 1.3 MPa。垃圾土的黏聚力和摩擦角分别为 16 kPa 和 25° [4-7]。

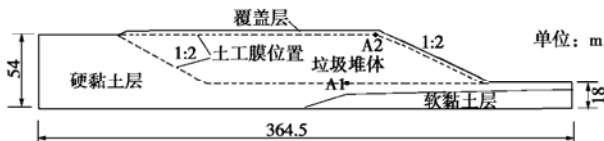


图 1 计算中选用的填埋场几何构型

Fig. 1 Typical geometrical configuration of solid-waste landfills used in this study

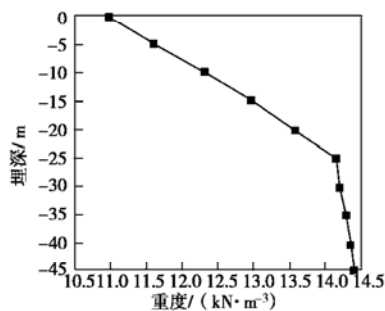


图 2 计算中采用的垃圾土重度随深度的变化关系

Fig. 2 Profile of waste density versus depth

2 土工膜单元与接触面性质

土工膜采用平面三角形应力杂交单元模拟,假定土工膜只能承受轴向力,不能承受剪力和弯矩,且垂直于膜中面的变形可以忽略。如图 3 所示,单元的 6 个自由度为: $\{u_i, v_i\}$, $i=1,2,3$ 。

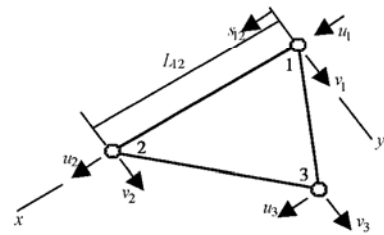


图 3 定义在局部坐标系统的平面应力杂交膜单元

Fig. 3 Stress-hybrid membrane element in local-xy plane

假定为常应力单元

$$\sigma_x = \beta_1, \sigma_y = \beta_2, \tau_{xy} = \beta_3 \quad (1)$$

单元的余应变能为

$$U = \int_{V_e} \{\sigma\}^T [D]^{-1} \{\sigma\} dV \quad (2)$$

将单元的应力代入上式积分得

$$U = \frac{1}{2} \{\beta\}^T [H] \{\beta\} \quad (3)$$

式中 $[H] = A t [D]^{-1}$, $[D]$ 为弹性矩阵; A 为单元面积; t 为单元厚度; $\{\beta\} = \{\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3\}^T$ 为广义参数。

下面来推导边界反力的势,作用在单元 12 边界的应力可以表示成

$$p_{12x} = \frac{y_2 - y_1}{L_{12}} \beta_1 + \frac{x_1 - x_2}{L_{12}} \beta_3, \quad (4a)$$

$$p_{12y} = \frac{x_1 - x_2}{L_{12}} \beta_2 + \frac{y_2 - y_1}{L_{12}} \beta_3. \quad (4b)$$

假定单元边界的位移线性变化,例如在 12 边界(为便于积分以广义坐标 s_{12} 表示)

$$u_{12} = \frac{L_{12} - s_{12}}{L_{12}} u_1 + \frac{s_{12}}{L_{12}} u_2, \quad v_{12} = \frac{L_{12} - s_{12}}{L_{12}} v_1 + \frac{s_{12}}{L_{12}} v_2.$$

同理,写出另两边界的反力和位移,则单元边界反力的总势能可以表示为

$$V = \int_s \{p\}^T \{u_b\} ds,$$

$$\{p\} = \{p_{12x}, p_{12y}, p_{23x}, p_{23y}, p_{31x}, p_{31y}\}^T,$$

$$\{u_b\} = \{u_{12}, v_{12}, u_{23}, v_{23}, u_{31}, v_{31}\}.$$

利用最小余能原理可以推导出单元刚度矩阵,本文推导了直角三角形单元的刚度矩阵:

$$K^e = \frac{E t}{2A(1-\mu^2)} \begin{bmatrix} (1-\mu)a^2 + 2b^2 & ab(1+\mu) & -2b^2 & -ab(1-\mu) & a^2(1-\mu) & -2ab\mu \\ ab(1+\mu) & 2a^2 + b^2(1-\mu) & -2ab\mu & -b^2(1-\mu) & -ab(1-\mu) & -2a^2 \\ -2b^2 & -2ab\mu & b^2 & -b^2(1-\mu) & -ab(1-\mu) & -2a^2 \\ -ab(1-\mu) & -b^2(1-\mu) & 0 & -ab(1-\mu) & -ab(1-\mu) & ab\mu \\ a^2(1-\mu) & -ab(1-\mu) & 0 & ab(1-\mu) & a^2(1-\mu) & 0 \\ -2ab\mu & -2a^2 & ab\mu & 0 & 0 & a^2 \end{bmatrix}.$$

3 计算结果

3.1 垃圾土自重荷载作用下土工膜内的拉应力

垃圾填埋场的形成是一个分层填埋与压实的过程,这一过程中,由于垃圾土的高压缩性以及垃圾边坡处覆盖层的下滑力等原因会使土工膜内产生拉应

力。首先对均匀基础的填埋场进行了静力分析, 模拟垃圾土分层填埋的加载过程, 计算土工膜内的拉应力; 垃圾土每层 3 m 共分 12 层进行填埋。图 4 给出了填埋场内的竖向沉降分布, 最大沉降为-1.9 m; 土工膜内拉应力分布见图 5 (a), 最大受拉点发生在垃圾边坡顶部, 拉应力为 5.1 MPa, 衬垫层土工膜的拉应力相对比较小, 仅为 1.5 MPa。注意到土工膜端部与土体固定的部位拉应力要比其它位置大, 这主要是锚固限制了土工膜与土体的相对变形。可以看出, 对于基础土层分布均匀的填埋场, 垃圾土自重荷载作用下土工膜的拉应力水平总体来看比较小(注: HDPE 土工膜极限拉应力为 14 MPa^[1])。

3.2 基础不均匀沉降对土工膜拉应力的影响

高密度聚乙烯 (HDPE) 土工膜作为填埋场衬垫

材料最明显的缺点是承受不均匀沉陷的能力较差。因此填埋场基础中存在软弱土层时, 应该演算不均匀沉陷在土工膜内引起的拉应力是否超过土工膜的极限抗拉强度。下面假定距离填埋场基础表面 6 m 以下是软弱黏土层 (见图 1), 其剪切波速为硬黏土的 1/5。图 6 是填埋场的竖向沉降等值线图, 最大沉降-2.1 m, 发生在填埋场的中部。图 5 (b) 给出了存在基础不均匀沉陷时土工膜内的拉应力分布, 与图 5 (a) 对比可见, 衬垫层土工膜的最大拉应力由 1.5 MPa 增大到 11.5 MPa, 发生在基础软弱黏土与硬黏土交界的位置, 这已经接近 HDPE 土工膜极限拉应力 14 MPa; 另外, 基础不均匀沉陷对覆盖层土工膜内的拉应力分布影响不大。

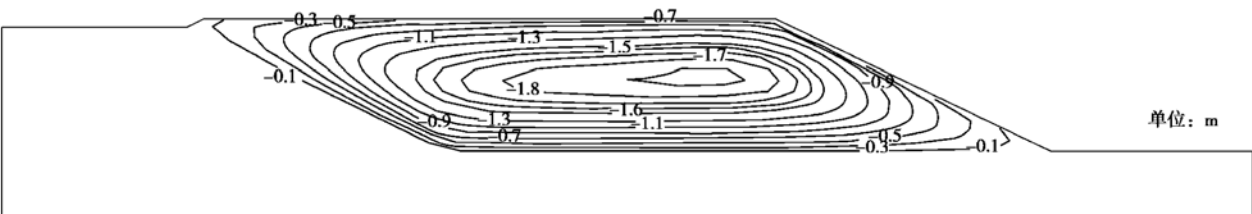


图 4 填埋场竖向位移 (基础均匀沉降)

Fig. 4 Vertical displacement in landfill (with uniform settlement of base)

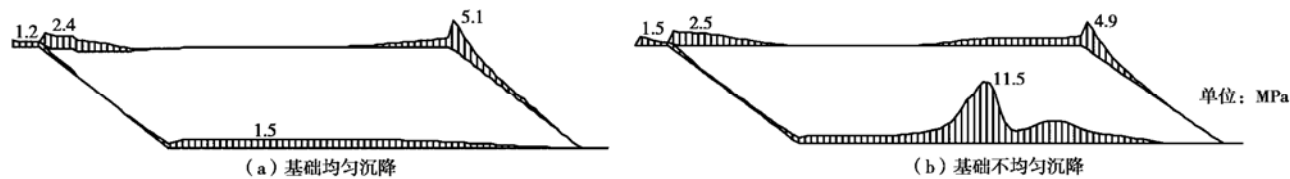


图 5 土工膜拉应力分布

Fig. 5 Distributions of tensile stress in HDPE membrane

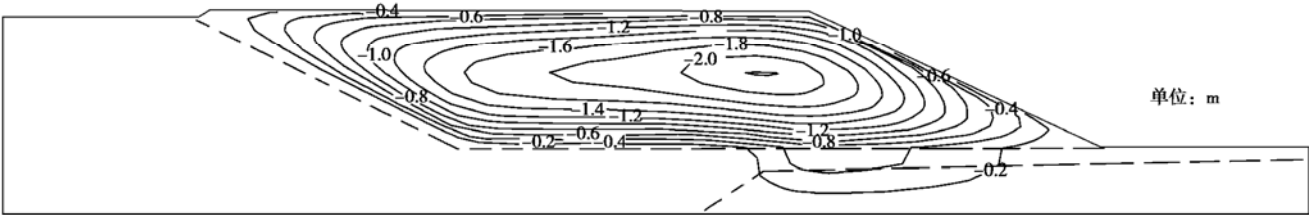


图 6 填埋场竖向位移 (基础不均匀沉降)

Fig. 6 Vertical displacement in landfill (with differential settlement of base)

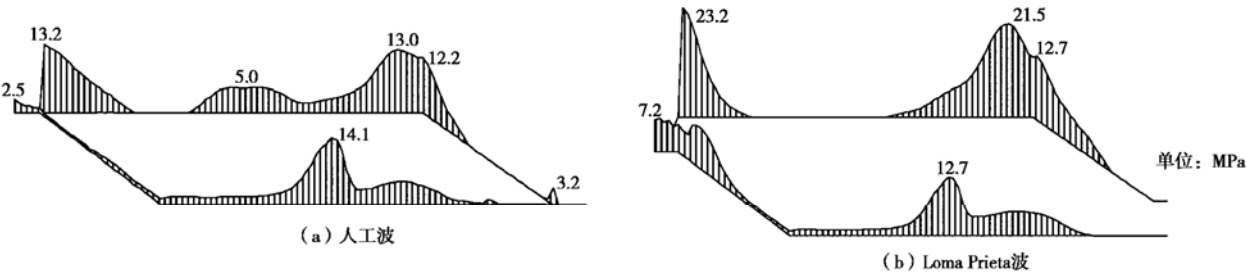


图 7 土工膜拉应力分布

Fig. 7 Distributions of tensile stress in HDPE membrane

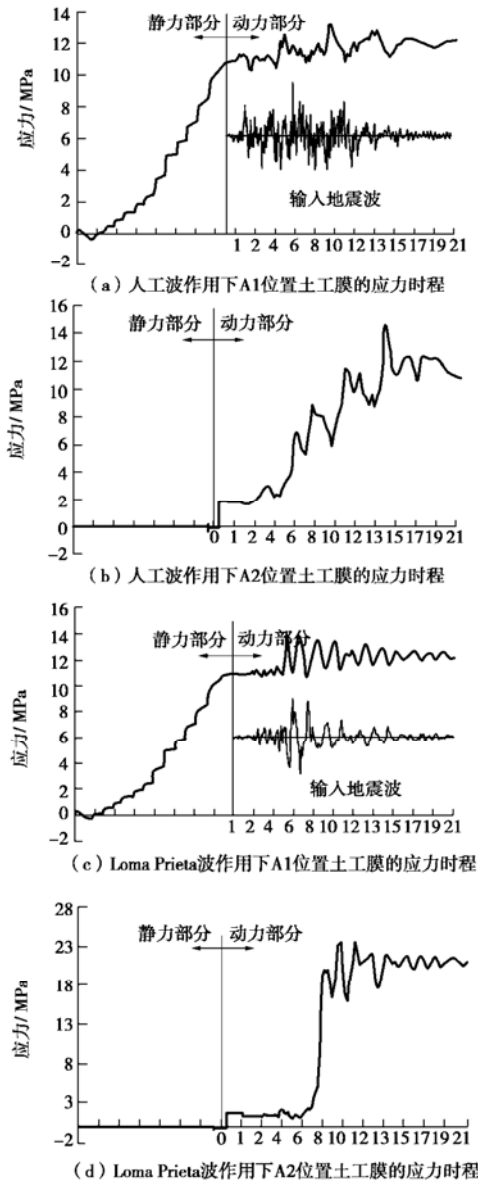


图 8 静、动力荷载 (Loma Prieta 波) 作用下 A1, A2 位置 HDPE 土工膜拉应力时程曲线

Fig. 8 Stress history in HDPE membrane under static and dynamic loading (Loma prieta)

3.3 地震荷载作用下土工膜受力分析

图 7 (a)、(b) 给出了输入不同峰值加速度和频谱特性的地震动土工膜内拉应力的分布。两条地震波中的一条是拟合某地区 100 a 超越概率为 2% 的基岩期望反应谱曲线得到的人造波, 卓越周期为 0.34 s、峰值加速度为 0.4g; 另一条是 1989 年美国 Loma Prieta 地震中 Emeryville 台站记录的实测波, 地震时有 4 个填埋场受到不同程度的破坏, 地震波的卓越周期是 1.18 s, 峰值加速度为 0.25g。两条地震波作用下覆盖层土工膜的拉应力都成倍增加, 这与填埋场顶部的地震响应较大一致。覆盖层土工膜端部锚固部位的拉应力都接近或者超过了 HDPE 土工膜的极限抗拉强度。

两条地震波卓越周期的差异造成土工膜内最大拉应力的不同; 值得注意的是, 输入实测波的峰值加速度虽然比人工波小接近 40%, 但使得覆盖层土工膜拉应力增加的幅度却超过了人工波, 可见, 地震波的自振周期是影响覆盖层土工膜拉应力的重要因素, 在进行填埋场抗震设计时, 选取合适的地震动, 尤其是合理预测地震波的自振周期尤为重要。另外, 人工波和实测波作用下衬垫层土工膜的最大拉应力都有所增加, 增加幅度分别为 22% 和 10%。图 8 给出了人工波和实测波作用下 A1, A2 (如图 1 所示) 处土工膜拉应力随时间的变化曲线。注意到: 震后残留在土工膜内的拉应力并不是整个地震过程中土工膜经历的最大拉应力, 这一点对于覆盖层的土工膜更为明显。

4 结 论

(1) 土工膜内的拉应力随着垃圾分层填埋、基础不均匀沉降以及地震荷载而累积发展; 对于基础土层分布均匀的填埋场, 土工膜的拉应力水平较低, 且最大拉应力发生在垃圾边坡的顶部。

(2) 基础不均匀沉降是影响衬垫层土工膜局部拉应力的主要因素; 本文算例显示, 发生不均匀沉降部位的土工膜局部拉应力从 1.5 MPa 增加到 11.5 MPa。

(3) 地震对覆盖层土工膜拉应力的影响显著, 加速度峰值为 0.25g 的地震动输入即可能使覆盖层土工膜端部锚固位置发生严重的破坏。

(4) 不同频谱特性的地震动输入可能造成土工膜内拉应力的较大差异, 因此合理的评价场地期望地震动的特性是进行填埋场抗震设计的重要工作。

参考文献:

- [1] 钱学德, 郭志平, 施建勇, 等. 现代卫生填埋场的设计与施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.(QIAN Xue-de, GUO Zhi-ping, SHI Jian-yong, et al. Design and construction of modern sanitary landfill[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.(in Chinese))
- [2] 徐光明, 章为民, 彭功勋. HDPE 膜的力学特性受损伤影响初步研究[J]. 河海大学学报, 2001, 32(1): 76 - 80.(XU Guang-ming, ZHANG Wei-min, PENG Gong-xun. Effect of damage on mechanical behavior of hdpe geomembrane[J]. Journal of HoHai University (Natural Sciences), 2001, 32(1): 76 - 80.(in Chinese))
- [3] MA F. Axial tension development in the liner of a proposed cedar hills regional municipal solid waste landfill expansion [C]// FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics. Tokyo: A A Balkema Publishers, 2003.

- [4] 冯世进, 陈云敏, 孔宪京, 邹德高. 城市固体废弃物动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005,27(7):750 - 754.(FENG Shi-jin, CHEN Yun-min, KONG Xian-jing, ZOU De-gao. Experimental research on dynamic properties of municipal solid waste[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005,27(7):750 - 754.(in Chinese))
- [5] 陈云敏, 柯瀚, 等. 城市垃圾填埋体的动力特性及地震响应[J]. 土木工程学报, 2002,35(3):66 - 71.(CHEN Yun-min, KE Han, et al. Dynamic properties and seismic response of municipal solid waste[J]. China Civil Engineering Journal, 2002,35(3):66 - 71.(in Chinese))
- [6] LING Hoe I, MOHRI Yoshiyuki, KAWABATA Toshinori. Tensile properties of geogrids under cyclic loadings[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998(8): 782 - 788.
- [7] 张涛. 中型动三轴仪的研制及城市垃圾土动力特性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.(ZHANG Tao. Design of medium scale dynamic triaxial test apparatus and the dynamic characteristics of municipal solid waste[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.(in Chinese))

上接第 435 页

《岩土工程学报》2006 年第 28 卷增刊被 EI 收录论文 (123 篇)

论文题目	作者	页码
直径 210 m 超大圆环支撑基坑设计分析	尹骥, 管飞, 李象范	1596~1599
芜湖地下人防工程异型基坑围护工程设计	刘文白, 王梦瑜, 车寿川	1600~1604
软土深基坑预应力重力式围护结构的设计与分析	管飞, 尹骥, 李象范	1605~1609
高架基础旁深基坑开挖的变形控制方法	贾坚, 罗发扬	1610~1613
多种围护结构在超大面积深基坑工程中的组合设计	宋青君, 王卫东, 翁其平	1614~1619
土钉墙与钢板桩加内支撑复合支护的设计及应用	郑少河, 金剑亮, 徐承鹏	1620~1622
某综合楼基坑围护设计	杨迎晓, 许钧陶, 靳建明	1623~1627
软土地基大型复杂基坑工程设计与施工	秦夏强	1628~1632
“中心岛顺作、周边环板逆作”的设计方法在单体 50000 m ² 深基坑工程中的实践	邸国恩, 王卫东	1633~1637
型钢水泥土搅拌墙围护结构在虹许路北虹路下立交工程的设计应用	朱宪辉, 汪贵平, 姚根洪	1641~1643
杭州市润和·紫庭花园地下室基坑围护设计	袁静, 刘兴旺, 高晓峰, 刘军军	1644~1649
一个小型复杂基坑支护工程	付文光, 冯申铎, 张俊	1650~1652
润扬长江公路大桥南汊悬索桥南锚碇基础工程监测	裴捷, 毛家跃, 曹晖	1653~1655
受承压水影响深基坑工程的若干技术措施探讨	戴斌, 王卫东	1659~1663
上海地铁明珠线二期西藏南路站地下连续墙施工技术	李耀良, 王建华, 丁勇春	1664~1672
复合土钉墙技术在深圳的应用与发展	杨志银, 张俊	1673~1676
由由国际广场工程深基础施工技术	邓文龙, 杜建军, 曾虹程, 谢凯	1677~1680
复合土钉墙的变形与稳定性分析	赵德刚, 蒋宏	1687~1690
特殊条件下地下连续墙的施工技术	李耀良, 任刚	1691~1693
福州世茂外滩花园深基坑支护及降水技术	赵剑豪, 陈振建, 方家强	1694~1698
某超深永久基坑的止水、降水设计和施工综合技术	王平	1699~1701
深基坑技术在大型水电站堰基中的应用研究	郭征红, 徐伟	1702~1706
上海地铁明珠线二期西藏南路站基坑施工技术	徐安军, 王建华, 丁勇春	1707~1711
长峰商城超大型基坑临近地铁侧的施工保护措施	孙洋波, 袁聚云	1712~1715
深基坑嵌岩支护技术应用研究	李劭晖, 徐伟	1720~1723
地下连续墙“二墙合一”技术在粉砂土地基中的应用研究	杨学林, 益德清	1724~1729
超大直径圆形无支撑深基坑施工技术	张具寿, 黄沛, 钱水江, 向海静, 杜立志	1737~1741
土钉墙支护技术在杭州某深基坑工程中的应用	陈东, 黄博, 刘兴旺, 曹国强	1748~1751
深埋地铁隧道的保护性切割与清理施工	肖晓春, 郭亮, 朱卫杰, 钱晖	1752~1755
超前钢管桩在深基坑支护中的应用	毕孝全, 喻良明, 赵明伦	1756~1759
上海某地铁车站深基坑周围土体沉降研究	卢礼顺, 刘建航, 刘庆华, 刘松樵	1764~1768
竖向土钉在基坑抢险中的应用	邵东明, 王镭, 谭跃虎, 刘大勇, 张凌辉	1769~1771
中洞法施工技术	龚胜	1772~1775
上海曹安商贸城逆作法施工技术	万志辉, 陆钟伟, 戴斌	1776~1780
黄河下游涵闸基坑的主要工程地质问题	尚锋, 周益民, 陈书涛, 李金都	1785~1788
关于深基坑施工期监测现状的一些探讨	王浩, 覃卫民, 汤华	1789~1793
长江中下游一级阶地地层结构特征及深基坑变形破坏模式分析	徐杨青, 朱小敏	1794~1798
福州新都会花园广场深基坑工程	张耀年, 刘锡安	1799~1801
北仑电厂循环水泵房基坑监测分析	周香莲, 王建华	1802~1805
软土地层咬合桩成桩施工引起的邻近建筑沉降分析	周学领, 廖少明, 宋博, 刘纯洁	1806~1810
温州世贸中心基坑工程施工监测	水伟厚, 杨刘柱, 孙斌	1811~1814
上海浦东国际机场二期登机长廊基坑监测分析	水伟厚, 李广, 李国章, 孙斌	1819~1822
江中超深基坑与围堰相互作用的分析与研究	林毅峰, 成卫忠, 朱合华	1826~1829
武汉团结小区商住楼工程基坑施工监测分析	覃卫民, 张照仪, 王浩, 黄胜生	1830~1833
超大型基坑开挖过程中的信息化监测	谭峰屹, 汪稔, 于基宁	1834~1837
复合土钉支护基坑的工程实例分析	庞晓明, 沈水龙, 许焯霜	1838~1841
上海软土深基坑有支撑暴露变形研究	刘涛, 杨国伟, 刘国彬	1842~1844
深基坑工程实例及系统开发	杨育文, 蒋涛, 刘秀萍, 敖晨霞	1845~1848

下接第 462 页