

基坑工程侧向卸、加载应力路径试验及模量计算

殷德顺^{1,2}, 王保田²

(1. 河海大学 工程力学系, 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 南京 210098)

摘要: 分析认为, 基坑支护外侧的土体有可能产生侧向卸载和加载两种应力路径, 因此进行了侧向卸载、加载的应力路径试验, 并根据邓肯-张模型的思路和试验结果, 推导了侧向卸载、加载的切线弹性模量公式。通过实例计算发现, 用推导的切线弹性模量公式, 可以得到很好的计算结果, 这说明考虑侧向卸载、加载的应力路径的模量公式能够更好地模拟基坑问题。

关键词: 侧向卸载、加载; 应力路径; 切线弹性模量

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Test and modulus formula for lateral unloading and loading stress paths during excavation in foundation pit

YIN De-shun^{1,2}, WANG Bao-tian²

(1. Department of Engineering Mechanics, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : Based on a preliminary analysis, it is estimated that the soil layer at outer of the retaining structure could produce lateral unloading and loading stress paths. Therefore, a series of tests were performed with different lateral unloading and loading stress paths. Based on Duncan-Chang model and result of experiments, formulas to calculate tangent elastic modulus were developed for lateral unloading and loading conditions. A good agreement was observed between test data and results from finite element analyses using the previously mentioned tangent modulus model. These results show that excavation of foundation pit can be better simulated on condition that lateral unloading and loading stress paths are considered.

Key words: lateral unloading and loading; stress paths; tangent elastic modulus

1 引言

土体具有复杂的变形特性, 如剪胀性、各向异性和受应力路径的影响等^[1, 2]。在一些土体的非线性弹性或弹塑性模型中, 对于一般加载情况能够获得较满意的结果, 但对特殊加载情况, 会出现不合理的情况。在基坑工程中, 随着开挖过程的不断进行, 支护结构前、后土体荷载作用方式不同于一般加载。为了能反映基坑工程特殊的加载方式, 建立更为适用的土体本构模型, 前人已经做了一些有益的工作^[3-5]。本文根据某种粉质黏土的 K_0 固结侧向卸、加载应力路径试验得到的试验曲线, 对邓肯-张模型的切线模量公式进行了改进, 并通过实例对基坑开挖进行了有限元模拟。

2 基坑开挖过程中土体的应力路径

为方便分析, 许多学者^[3]将基坑开挖影响区域划分为4个部分, 如图1所示。在这4个区域中, I区和II区对基坑变形的影响最大, 其中I区是侧向变形的主体, 随着基坑的开挖, 支护结构发生侧向位移, 土体单元的垂直向应力不变, 水平向应力减小, 并在静止土压力与主动土压力之间变化。II区为支护结构提供反力, 也对基坑变形产生重要影响, 其上部土体开挖后, 上覆压力减小, 土体单元的垂直向应力减小。在基坑开挖过程中, 随着支护结构的侧向位移和坑底隆起, 土体单元的水平向应力也发生变化。

上述基坑开挖影响区域的划分已得到很多学者

认同,但笔者对 I、II 两区水平向应力的变化有不同看法,认为支护受力后可能发生如图 1 虚线所示变形,所以 I 区土体单元的垂直向应力不变,但水平向应力可能减小或增大。同理,II 区土体单元在垂直向应力减小的同时,水平向应力也可能增大或减小。

从上述分析可见,基坑开挖过程中土体单元的应力路径不同于一般加载的应力路径,支护后土体可能存在侧向卸、加载两种应力路径,为了正确认识其变形特性,有必要进行相应的应力路径试验。

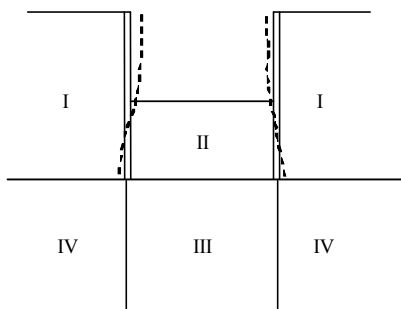


图 1 基坑开挖影响区域划分

Fig.1 Influence regions of foundation pit excavation

3 K_0 固结侧向卸、加载应力路径试验

通过应力路径试验模拟基坑开挖过程中支护结构后侧土体的应力路径,可以分析土体在侧向卸、加载条件下的应力-应变关系,揭示其内在规律。试验仪器采用应力控制三轴压缩仪,由于仪器的限制,试验时固结过程只模拟等应力比固结(即固结过程中只保持应力比不变而不限侧向变形),本文应力比取为 K_0 。考虑到基坑工程的深度通常都在 20 m 以内,在本次试验中选取固结周围压力 σ_{rc} 分别为 50, 100, 150, 200 kPa 进行应力路径试验。

3.1 K_0 固结侧向卸载排水剪试验

K_0 固结侧向卸载排水剪试验得到土样的黏聚力 c 、内摩擦角 φ 及参数 R_f 、 k 、 n , 见表 1, 其中 R_f 的含义见式 (2), $\lg k$ 、 n 分别为图 5 的截距和斜率。 K_0 固结侧向卸载排水剪试验的极限应力圆及摩尔-库仑强度包线如图 2 所示。

根据增量广义虎克定律,模拟邓肯-张模型确定切线弹性模量时,在侧向卸载情况下需要分析 $(2(\sigma_a - \sigma_r) - 2(\sigma_{ac} - \sigma_{rc})) - (\varepsilon_a - 2\varepsilon_r)$ 关系曲线见图 3, $(\varepsilon_a - 2\varepsilon_r) / (2(\sigma_a - \sigma_r) - 2(\sigma_{ac} - \sigma_{rc})) - (\varepsilon_a - 2\varepsilon_r)$ 关系曲线见图 4, $\lg(E_t / p_a) - \lg(\sigma_{ac} / p_a)$ 关系曲线见图 5, 图中 σ_a 、 σ_r 代表轴向压力和周围压力; σ_{ac} 、 σ_{rc} 分别为固结轴向压力和固结周围压力。为了方便,将这 3 种关系线简称为第一、第二和第三关系线,下文相同。

表 1 侧向卸载试验结果

Table 1 Mechanical parameters of lateral unloading stress paths

c / kPa	φ / (°)	R_f	k	n
22.4	12.4	0.89	34.9	0.76

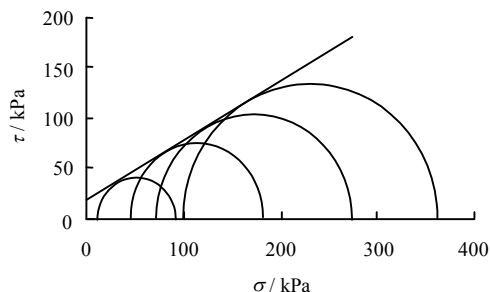


图 2 侧向卸载试验极限应力圆及强度包线

Fig.2 Absolute stress circle and strength envelope of lateral unloading test

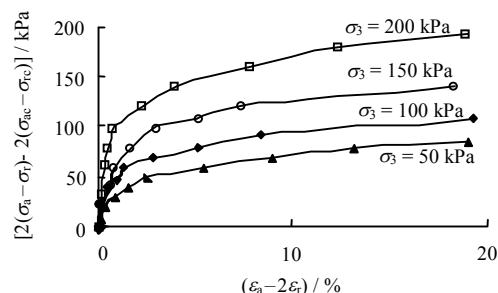


图 3 水平卸载第一关系曲线

Fig.3 The first relational curves of lateral unloading test

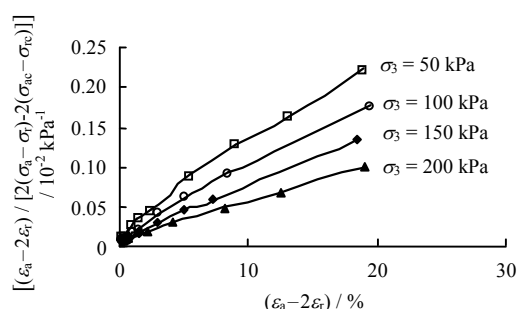


图 4 水平卸载第二关系曲线

Fig.4 The second relational curves of lateral unloading test

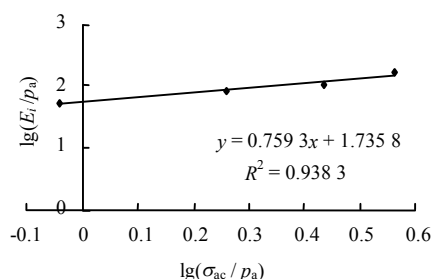


图 5 侧向卸载第三关系曲线

Fig.5 The third relational curves of lateral unloading test

由试验可知, K_0 固结侧向卸载排水剪试验得到的应力-应变关系类似于邓肯-张模型确定切线弹性模量 E_t , 即第一关系曲线中各点的斜率。

3.2 K_0 固结侧向加载排水剪试验

由于试验仪器的限制, K_0 固结侧向加载排水剪试验只是进行到周围压力等于轴向压力, 未使试样破坏, 所以不能得到土样的黏聚力 c 、内摩擦角 φ 及前面所定义的参数 R_f 、 k 、 n 等。只是得到第一关系曲线, 见图 6。至于第二关系曲线将出现在后面综合讨论中。由图 6 可以发现, 当围压较低时且周围压力不超过轴向压力, 侧向加载条件下的切线弹性模量 E_t 变化不大, 随着围压的不断增大 E_t 变化稍微大一些, 但总的来讲, 周围压力不超过轴向压力时, 第一关系曲线可以简化成直线。

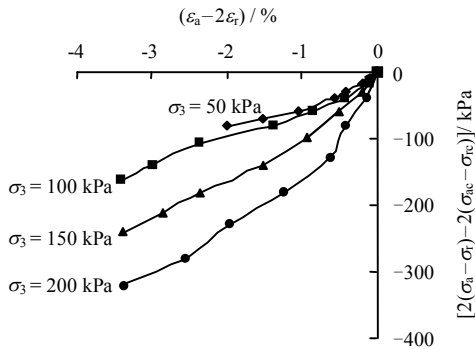


图 6 侧向加载第一关系曲线
Fig.6 The first relational curves of lateral loading test

3.3 K_0 固结侧向卸、加载排水剪试验结果综合分析

当把相同固结围压的侧向卸载、加载排水剪试验的第一关系曲线放到同一张图中时, 能够发现侧向卸载和侧向加载的该关系曲线是一条光滑连续的曲线, 如图 7 所示。同样, 把侧向卸载、加载的第二关系曲线放到同一张图中, 发现纵坐标左右的点能够连成截距几乎相同的两条直线, 如图 8 所示。

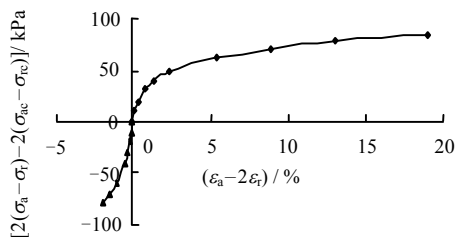


图 7 σ_{rc} 为 50 kPa 时侧向加卸载第一关系曲线
Fig.7 The first relational curves of lateral loading and unloading test ($\sigma_{rc} = 50$ kPa)

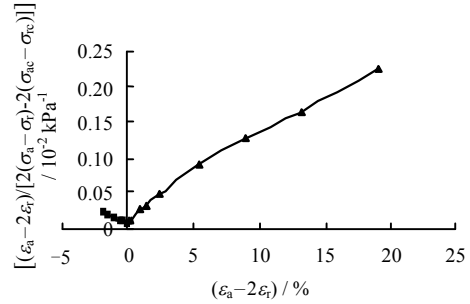


图 8 σ_{rc} 为 50 kPa 时侧向加卸载第二关系曲线
Fig.8 The second relational curves of lateral loading and unloading test ($\sigma_{rc} = 50$ kPa)

由于篇幅限制和避免不同围压情况在同一张图上混淆, 本文只以 $\sigma_{ac} = 50$ kPa 为例, 由图可以说明 K_0 固结侧向卸、加载条件下的初始切线模量 E_t 基本相同。这一点对于基坑开挖的模拟计算很有价值。在周围压力不超过轴向压力时, 如果认为侧向加载条件下第一关系曲线可以简化成直线, 则其切线模量就等于侧向卸载条件下的 E_t , K_0 固结侧向加载排水剪试验就没必要进行, 只要进行 K_0 固结侧向卸载排水剪试验即可。

4 侧向卸、加载条件下的切线弹性模量公式^[6]

根据试验结果, 同时为了方便有限元计算, 笔者采用非线性弹性本构模型, 并将土体的切线弹性模量分为以下 3 种情况:

(1) 根据增量广义虎克定律, 模拟邓肯-张模型, 对于 K_0 固结侧向卸载情况下切线弹性模量可以推导为

$$E_t = k p_a \left(\frac{\sigma_{ac}}{p_a} \right)^n \left\{ 1 - R_f \frac{[\sigma_a(1 - \sin \varphi) - \sigma_r](1 + \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + \sigma_a \sin \varphi - \sigma_a \sin^2 \varphi} \right\}^2, \quad \sigma_a(1 - \sin \varphi) \geq \sigma_r \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad R_f = \frac{[2(\sigma_a - \sigma_r) - 2(\sigma_{ac} - \sigma_{rc})]_f}{[2(\sigma_a - \sigma_r) - 2(\sigma_{ac} - \sigma_{rc})]_u} \quad (2)$$

式中下角标 u、f 的含义与邓肯-张模型相同, 在此不再赘述。

(2) 根据上文所述 K_0 固结侧向加载且周围压力不超过轴向压力情况下切线弹性模量为

$$E_t = k p_a \left(\frac{\sigma_{ac}}{p_a} \right)^n, \quad \sigma_a(1 - \sin \varphi) \leq \sigma_r \leq \sigma_a \quad (3)$$

(3) 如果出现 $\sigma_r \geq \sigma_a$ 的情况, 笔者在计算中采取邓肯-张模型的切线弹性模量。

在计算过程中,笔者把水平向应力作为 σ_r ,把垂直向应力作为 σ_a 。

需要指出,以上公式在应用到含水土层时,公式中的各参数应该由不排水剪试验获得。通过对文献[3]试验结果描绘前述的第一、第二和第三关系线,发现 K_0 固结侧向卸载不排水剪试验也能够得到与排水剪试验相类似结论。

5 算例

为验证本文提出的侧向卸、加载应力路径下邓肯-张模型的切线弹性模量公式的实用性,笔者编制了基坑开挖平面应变分析 4 节点等参单元非线性有限元程序,并对一工程实例进行了计算分析。

5.1 算例说明^[3]

南京某办公楼基坑大致呈长方形,长 89.0 m,宽 60.0 m,开挖深度为 9.00 m。工程采用钻孔灌注桩、人工挖孔桩作为支护结构,桩长 15.0 m;采用深层搅拌桩和树根桩作为止水结构;基坑东西向设置一道水平钢筋混凝土支撑,4 个角点设置一道水平钢筋混凝土角撑,支撑和角撑的顶面在地面下 1.0 m 处,支撑和角撑的高度均为 0.50 m。基坑支护平面图及施工过程中的部分测点布置见图 9。计算时,取基坑宽度为 60.0 m。计算区域在水平向支护以内(即基坑内)取 30.0 m,支护以外(即基坑外)取 89.0 m,计算深度从地面向下取 35.0 m。根据实际工程开挖情况,按 3 级开挖模拟整个开挖过程,开挖工况见图 10。开挖模拟采用中点增量法,水平支撑假设为绞接杆件单元。在计算时初始状态基坑内为地面以下 1.50 m 处(即支撑底面),基坑外为天然地面(即 0.0 m)。计算时假定坑内地下水位与支撑底面齐平,坑外地下水位在天然地面下 1.50 m 处。计算时所用参数由文[3]所做不排水剪试验获得。

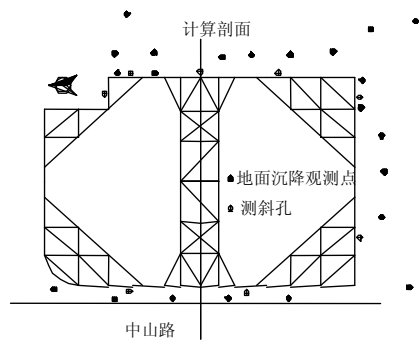


图 9 基坑支护平面及部分观测点布置图

Fig.9 Distribution of observation points in support structure

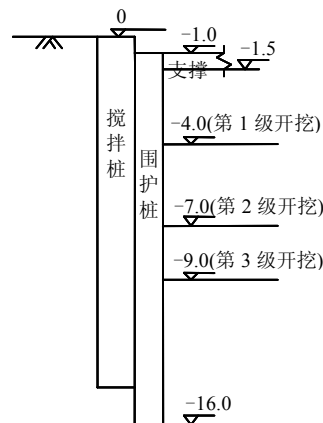


图 10 基坑开挖工况图(单位: m)

Fig.10 Excavation situation of foundation pit(unit: m)

5.2 计算结果

利用本文提出的侧向卸、加载路径下邓肯-张模型的切线弹性模量公式计算得到结果,对比实测的各级开挖支护后 4.0 m 处土体的水平位移,发现计算结果能够较好的与实测值相符,见图 11。

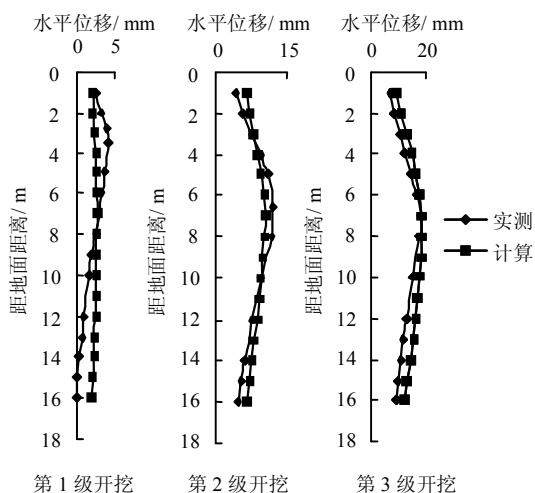


图 11 支护后 4.0 m 处土体的水平位移

Fig.11 Horizontal displacements of soil behind the support structure

6 结论

通过分析认为:

(1) 支护后土体可能存在侧向加载和卸载两种应力路径。

(2) 侧向卸载应力-应变关系可以类似邓肯-张模型推导切线弹性模量。

(3) 侧向加载和卸载具有相同的初始切线模量 E_i 。

(4) 实例计算表明,利用本文提出的侧向卸、加载路径下邓肯-张模型的切线弹性模量公式得到的结果,与实测结果相符。

参 考 文 献

- [1] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [2] 徐日庆, 龚晓南. 土的应力路径非线性行为[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(4): 56—60.
XU Ri-qing, GONG Xiao-nan. Nonlinear stress-path-dependent behavior of soils[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1995, 17(4): 56—60.
- [3] 张文慧. 基坑工程中应力路径对侧向变形的影响及土压力与侧向位移关系的研究[硕士论文 D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [4] 葛卫春. 基坑侧向卸荷应力路径及挡墙侧向变形研究[硕士论文 D]. 南京: 河海大学, 2001.
- [5] 李守德, 张士乔, 等. 天然地基土在基坑开挖侧向卸荷过程中的模量计算[J]. 土木工程学报, 2002, 35(5): 70—74.
LI Shou-de, ZHANG Tu-qiao, et al. Modulus formula for foundation soil under lateral unloading during excavation[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2002, 35 (5): 70—74.
- [6] 殷德顺. 基坑支护结构侧向变土压力的研究[硕士论文 D]. 南京: 河海大学, 2005.

2007 年《岩土力学》第 8 期被 EI 收录论文 (45 篇, 收录率 100 %)

序号	论文题名	作 者	页 码
1	结构性土的微观破坏机理研究	李建红, 沈珠江	1525—1532
2	原状冻土非线性断裂韧度测试与修正	刘晓洲, 王德刚, 李洪升, 等	1533—1538
3	孔压静力触探用于含浅层生物气砂土工程特性的试验研究	郭爱国, 孔令伟, 陈建斌, 等	1539—1543
4	加锚节理岩体的复合单元法研究	何则干, 陈胜宏	1544—1550
5	饱和击实黄土的动力特性研究	陈存礼, 杨 鹏, 何军芳	1551—1556
6	地震荷载作用下顺层岩体边坡变形特征分析	肖克强, 李海波, 刘亚群, 等	1557—1564
7	锦屏一级左岸导流洞出口边坡开挖支护有限元模拟	陈益峰, 周创兵, 余志雄, 等	1565—1570
8	基于剪切梁层间失效模型的断层冲击地压分析	赵扬锋, 潘一山, 于海军	1571—1576
9	急斜特厚煤层开采地表沉陷特征立体实验研究	邵小平, 石平五, 赵国梁, 等	1577—1580
10	关于土层相关距离计算方法的研究	闫澍旺, 朱红霞, 刘 润, 等	1581—1586
11	土压平衡盾构施工的顶进推力模型试验研究	朱合华, 徐前卫, 廖少明, 等	1587—1594
12	弹性波在流体与饱和孔隙固体界面上的反射	李 尧, 崔志文, 张玉君, 等	1595—1599
13	加劲水泥土地下连续墙中水泥土强度分析	孔德志	1600—1604
14	液压挖掘机振动掘削减阻机理研究	朱建新, 赵崇友, 郭 鑫	1605—1608
15	粗粒土料湿化变形三轴试验研究	魏 松, 朱俊高	1609—1614
16	岩石时效损伤模型及其在工程爆破中应用	王志亮, 郑田中, 李永池	1615—1620
17	溶洞顶板极限承载力研究	李仁江, 盛 谦, 张勇慧, 等	1621—1625
18	岩体初始地应力场分析方法研究	侯明勋, 葛修润	1626—1630
19	循环荷载作用下海床结构粉质土的液化渗流机理定性研究	陈友媛, 刘红军, 贾永刚, 等	1631—1635
20	重塑膨胀土的三向膨胀力试验研究	谢 云, 陈正汉, 孙树国, 等	1636—1642
21	带帽刚性桩复合地基荷载传递机理研究	雷金波, 黄 玲, 刘芳泉, 等	1643—1649
22	多元逐步回归分析应用于固化土强度与微结构参数相关性评价	王志强, 柴寿喜, 仲晓梅, 等	1650—1654
23	浅埋孔洞对地表反平面运动的影响	陈志刚	1655—1660
24	边坡安全系数的多解性讨论	刘华丽, 朱大勇, 刘德富, 等	1661—1664
25	土工袋加固地基新技术	刘斯宏, 松冈元	1665—1670
26	非饱和黏性土的电阻率特性及其试验研究	查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等	1671—1676
27	极限荷载作用下临近基坑 $c-\phi$ 土地基的破坏模式	王红雨, 杨 敏	1677—1681
28	露天地下开采隔离层稳定性研究	岩小明, 李夕兵, 郭 雷, 等	1682—1686
29	考虑筋材蠕变特性的加筋土流变模型	李丽华, 王 钊, 陈 轮	1687—1690
30	双圆盾构隧道施工中压重纠偏效果分析	蔡丰锡, 沈水龙, 张兆逵, 等	1691—1694
31	对 101 层上海环球金融中心桩筏基础性状预测	龚 剑, 赵锡宏	1695—1699
32	开挖边坡松动区的近似解析	肖世国, 周德培	1700—1704
33	降雨入渗下强风化软岩高填方路堤边坡稳定性研究	刘新喜, 夏元友, 蔡俊杰, 等	1705—1709
34	用改进的 DDA 方法模拟公路隧道的稳定性	张秀丽, 焦玉勇, 刘泉声, 等	1710—1714
35	考虑封闭作用和应力扩散的软土地基临塑荷载	问延煦, 周 健, 贾敏才	1715—1718
36	非贯通节理岩体直剪试验研究进展	刘远明, 夏才初	1719—1724
37	基于指数平滑法与回归分析相结合的滑坡预测	尹光志, 张卫中, 张东明, 等	1725—1728
38	任意三角形毛细管中水力传导率与形状因子关系研究	陶 军, 姚 军, 李爱芬, 等	1729—1732
39	动力沉桩桩基拉应力分布及其施工控制试验研究	陈建斌, 周立运	1733—1738
40	桩周土相似性模糊评判新方法及其应用	杨育文, 孙国庆	1739—1743
41	基于刚性承台群桩沉降的可靠性研究	吴 鹏	1744—1748
42	深基坑排桩支护结构空间共同变形分析	赖冠宙, 房营光, 史宏彦	1749—1752
43	软土地区土压盾构掘进施工风险模糊评估	姚 浩, 周红波, 蔡来炳, 等	1753—1756
44	地下连续墙施工力学机理三维数值分析	丁勇春, 王建华, 褚衍标, 等	1757—1761
45	高路堤沉降变形预测模型研究	景宏君, 苏如荣, 苏 霆	1762—1766