

文章编号: 1000-7598-(2006)02-0193-06

冻结井钢筋混凝土弧形板井壁力学特性研究

荣传新^{1,2}, 程桦¹

(1. 安徽理工大学 土木工程系, 安徽 淮南 232001; 2. 中国科学技术大学 中科院材料力学行为和 Design 重点实验室, 合肥 230026.)

摘 要: 通过实验和有限元计算, 对在均匀荷载作用下新型冻结井高强钢筋混凝土弧形板井壁的变形特性、混凝土和钢筋应力的分布规律、极限承载力及其压碎区的位置进行了分析。研究表明, 弧形构件的径向变形较小, 可通过选择合适的可缩接头材料使该井壁结构起到“先柔后刚”的作用; 弧形构件的内排钢筋总是比外排钢筋先屈服, 并且钢筋发生屈服时对应荷载值一般为该构件极限承载力的 60 % 左右; 构件的极限承载力随混凝土单轴抗压强度的增大而增大, 混凝土的强度等级提高 10 MPa, 其极限承载力提高 1.26 MPa; 弧形构件的压碎区位于其端部附近, 因此, 在设计该种井壁结构时弧形构件的两端应该加强, 可在弧形构件的两端采用钢纤维混凝土以提高整体结构的承载能力。

关 键 词: 冻结井; 冲积层; 弧形板井壁; 力学特性; ANSYS; 有限元

中图分类号: TO 263.6⁺⁴

文献标识码: A

Study on mechanical characteristics of reinforced concrete arc shaft wall in frozen shaft

RONG Chuan-xin^{1,2}, CHENG Hua¹

(1. Department of Civil Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, CAS, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: For the high strength reinforced concrete arc shaft wall, its mechanical characteristics including the radial displacement, the concrete stress, the reinforcing steel bar stress, the load carrying capacity and the position of crushing zone are analyzed by experiment and finite element calculation under uniform load. The results show that the radial displacement of the arc component is very small. The load under which the reinforcing steel bar is beginning to yield is 60 % of its load carrying capacity. The larger the ultimate uniaxial compressive strength of concrete, the higher is the carrying capacity of the high strength reinforced concrete arc shaft wall. As the strength grade of concrete increases 10 MPa, its carrying capacity raises 1.26 MPa. The crushing zones are both end of the arc component. So we design the arc shaft wall, both end of the arc component must be strengthened with the steel fiber concrete for enhancing the load carrying capacity of the shaft wall.

Key words: frozen shaft; alluvium; arc shaft wall; mechanical characteristics; ANSYS; finite element

1 引 言

对冻结法凿井而言, 随着穿越冲积层厚度和冻结深度的增加, 特别是冻结深度超过 400 m 的井筒, 目前尚没有一种公认的设计计算理论可用于冻结壁设计, 因此, 随着冻结井深的加大, 寻求一种高强且满足冻结深井冻结压力和永久地压变化规律的新型冻结井壁结构已成为决定深冻结井筒施工成败的关键。

传统的现浇混凝土外层井壁虽具有施工工艺简单、造价低等优点, 但易产生冻胀压力、早期承载

能力低, 尤其是如采用的高强混凝土是在低温受载下养护时混凝土强度不易保证。高强钢筋混凝土弧形板井壁由弧形钢筋混凝土构件及构件间可缩接头所组成, 如图 1 所示。这种新型冻结井壁, 具有弧形构件地面预制、混凝土质量易于保证, 在井下装配后即可满负荷工作, 并能避免产生冻胀压力, 整体结构具有先柔后刚、承载能力大等优点, 可满足深厚冲积层冻结井要求。早在 19 世纪 70 年代俄罗斯、波兰等国曾采用低强度等级的钢筋混凝土弧形板外层井壁, 收到了较好的效果^[1, 2]。我国虽然没有使用这种高强钢筋混凝土弧形板井壁的经验, 但具

表 1 计算模型参数

Table 1 Physical parameters of calculation model

材质	编号	弹性模量 E/MPa	泊松比	单轴抗压强度 $/\text{MPa}$	单轴抗拉强度 $/\text{MPa}$	剪切传递系数	
						裂缝张开时 β_t	裂缝闭合时 β_c
混凝土	1	35 300	0.23	54.28	6.38	0.45	0.9
	2	38 600	0.23	59.45	6.54	0.45	0.9
	3	42 410	0.23	65.28	7.18	0.45	0.9
	4	40 600	0.23	71.82	7.90	0.45	0.9
	5	44 400	0.23	77.98	8.43	0.45	0.9
	6	44 800	0.23	81.24	8.58	0.45	0.9
	7	48 820	0.23	85.62	9.42	0.45	0.9
钢筋		210 000	0.285	240			

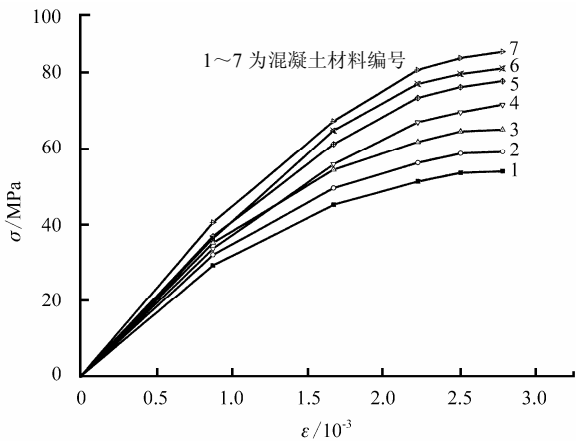


图 4 混凝土材料的单轴受压的应力-应变关系

Fig.4 Stress-strain curves of concretes under uniaxial compression

4 力学特性分析

利用 ANSYS 有限元分析软件^[13]，对 7 种不同混凝土材料高强钢筋混凝土弧形构件进行了数值模拟，其配筋率为 0.873 %，混凝土选用 Solid65 单元，钢筋选用 Link8 单元，共划分 2 006 个单元，其中 Solid65 单元 1 856 个，Link8 单元 150 个（图 2(b)）。边界条件处理如图 5 所示。弧形构件实验共进行两次，混凝土单轴抗压强度为 81.28 MPa（混凝土材料编号为 6），配筋率为 0.873 %。

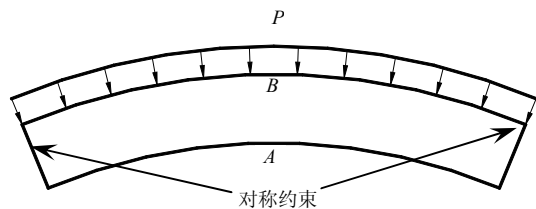


图 5 边界条件示意图

Fig.5 Illustration of boundary conditions

4.1 有限元计算与实验结果对比

图 6 和图 7 为荷载 $P=10.439\text{ MPa}$ 时构件混凝土等效应力和径向位移 u_r 的等值图。由图可知，此

时构件混凝土已达到屈服极限，最大径向位移为 6.371 mm。

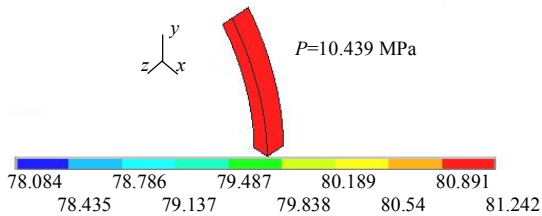


图 6 构件混凝土等效应力的等值图(单位: MPa)

Fig.6 The contour map of equivalent stresses of concrete for component (unit: MPa)

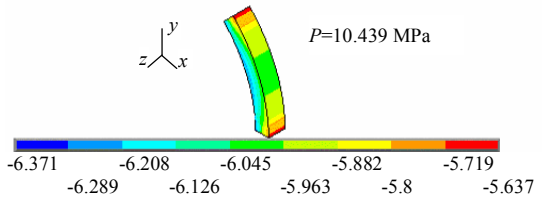


图 7 构件混凝土径向位移 u_r 的等值图 (单位: mm)

Fig.7 The contour map of radial displacements u_r of concrete for component (unit: mm)

图 8 为弧形构件（混凝土单轴抗压强度为 81.24 MPa，配筋率为 0.873 %）A 点（图 5）环向应力 σ_θ 与荷载 P 之间的关系图。图 9 为弧形构件 A 点（见图 5）径向位移 u_r 与荷载 P 之间的关系图，由图可见，实验结果与数值计算结果的变化规律基本一致，且在相同荷载下实验值得到的环向应力 σ_θ 和径向位移 u_r 均大于有限元计算值，但差别不大；第一次实验，高强钢筋混凝土弧形板构件的破坏荷载为 8.95 MPa，对应的 A 点环向应力 $\sigma_\theta=80.98\text{ MPa}$ ，径向位移 $u_r=5.4\text{ mm}$ 。第二次实验，其破坏荷载为 9.25 MPa，对应的 A 点的 $\sigma_\theta=82.12\text{ MPa}$ ， $u_r=5.82\text{ mm}$ ；而 ANSYS 计算的破坏荷载为 10.44 MPa，对应的 A 点的 $\sigma_\theta=80.022\text{ MPa}$ ， $u_r=5.79\text{ mm}$ 。实验结果（2 次实验结果平均）与计算结果之间相差的百

分比分别为: σ_θ 相差 1.91 %, u_r 相差 -3.11 %, 破坏荷载相差 -12.83 %。图 10 为高强钢筋混凝土弧形构件破坏图。由图可见, 实验时的破坏位置与有限元计算的破坏部位完全相同, 在弧形构件的端部附近。由此可以说明, 高强钢筋混凝土弧形构件的两端是整个构件的薄弱区域, 设计时弧形构件的两端应该加强, 可在弧形构件的两端采用钢纤维混凝土以提高整体结构的承载能力。

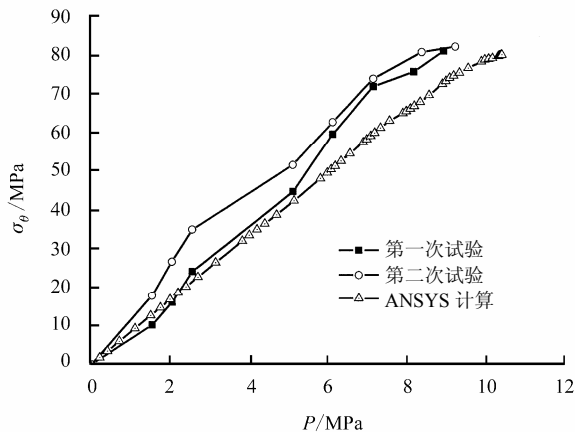


图 8 构件 A 点混凝土环向应力与荷载 P 之间的关系

Fig.8 Relations between pressure load P and stress σ_θ at plot A of component's concrete

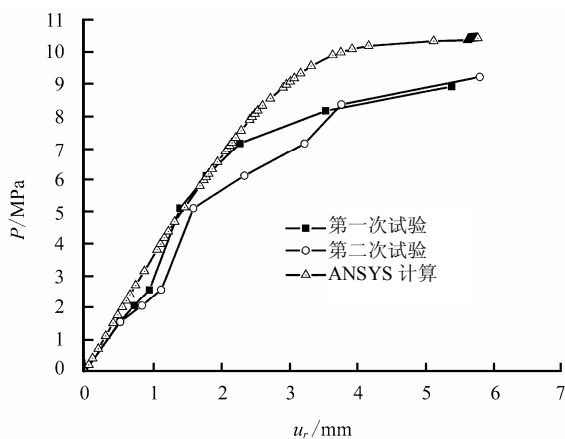


图 9 构件 A 点径向位移与荷载之间的关系

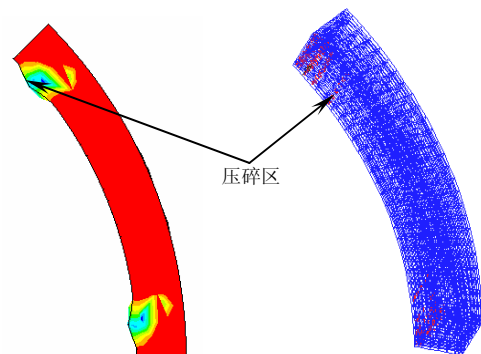
Fig.9 Relations between pressure load P and radial displacement u_r at point A of component

4.2 有限元计算结果分析

图 11 为不同混凝土材料的弧形构件在构件的 A 点的径向位移 u_r 与荷载 P 之间的关系图。图中, 编号 1 对应表 1 中的混凝土材料编号 1, 其余类推, 可见混凝土的强度等级越低, 在相同的荷载作用下, 构件在 A 点产生的径向位移越大, 但弧形构件破坏时其最大径向位移均在 4.5~6.5 mm 之间。



(a) 实验破坏图



(b) 数值计算破坏图

图 10 高强钢筋混凝土弧形构件破坏图

Fig.10 The failure patterns of high strength reinforced concrete arc component

图 12 为不同混凝土材料的弧形构件内、外排钢筋应力与荷载 P 之间的关系曲线图。图中 1 (内侧) 和 1(外侧) 分别表示混凝土材料编号为 1 时构件的内排和外排钢筋的应力与荷载 P 之间的关系曲线, 其余类推。可见内排钢筋总是比外排钢筋先屈服, 并且混凝土的强度等级越低, 钢筋发生屈服时对应荷载 P 值越小; 钢筋发生屈服时对应荷载 P 值一般为该构件极限承载力的 60 % 左右。

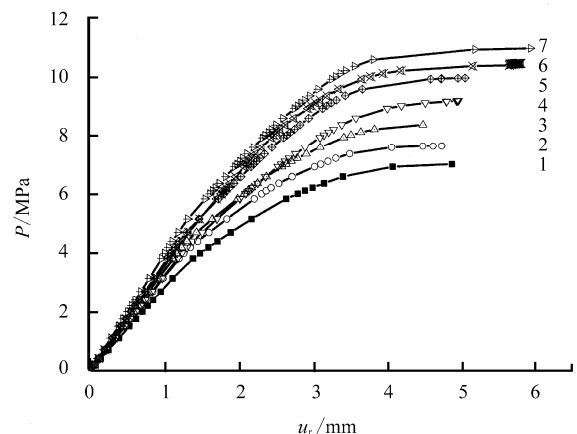


图 11 构件 A 点径向位移 u_r 与荷载 P 之间的关系

Fig.11 Relations between pressure load P and radial displacement at point A of component's different concretes

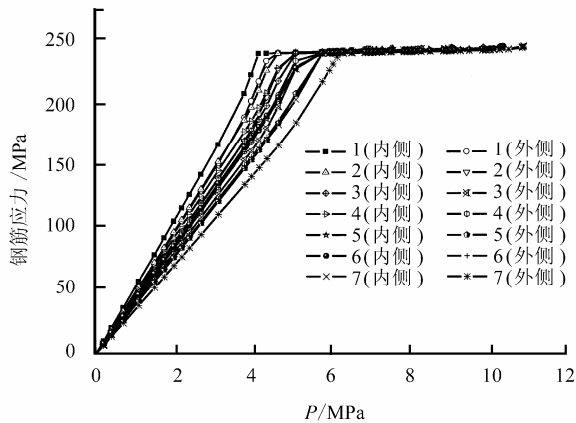
图12 构件中钢筋的应力与荷载 P 之间的关系Fig.12 Relations between pressure load P and stress for steel reinforcements

图13为不同混凝土材料的弧形构件混凝土内、外环向应力与荷载 P 之间的关系曲线图, 图中1(内侧)和1(外侧)分别表示混凝土材料编号为1时, 构件A点和B点的环向应力 σ_θ 与荷载 P 之间的关系曲线, 其余类推。可见在破坏之前构件的内外缘(A点和B点)混凝土的环向应力与荷载 P 呈线性关系, 并且在相同的外荷载 P 的作用下, 内缘(A点)混凝土的环向应力大于外缘(B点)混凝土的环向应力, 只有在弧形构件混凝土应力均达到屈服极限时, 外缘混凝土的环向应力大于内缘混凝土的环向应力。

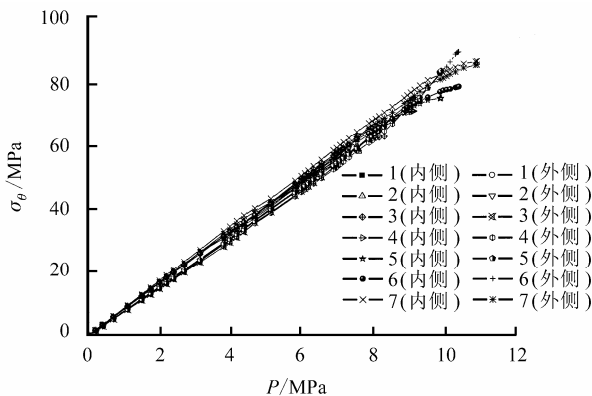
图13 构件中混凝土环向应力 σ_θ 与荷载 P 之间的关系Fig.13 Relations between pressure load P and stress σ_θ for different components

图14为混凝土的单轴抗压强度与高强钢筋混凝土弧形构件(配筋率为0.873%)的极限承载力之间的关系曲线图, 由图可见, 混凝土的单轴抗压强度越高其极限承载力越大, 混凝土的强度等级提高10 MPa, 高强钢筋混凝土弧形构件的极限承载力提高1.26 MPa。

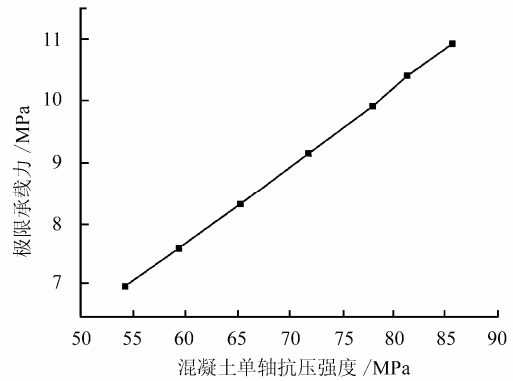


图14 构件的混凝土单轴抗压强度与极限承载力的关系

Fig.14 Relation between ultimate carrying capacity and compressive strength of concrete for component under uniaxial compression

5 结 论

(1) 对于新型冻结井高强钢筋混凝土弧形板井壁, 本文通过实验和有限元计算对其力学特性进行了分析研究表明实验结果与数值计算结果基本一致, 选用的计算模型是合适的。

(2) 实验和计算结果表明, 在弧形构件压碎区均位于其端部附近, 设计该种井壁结构时弧形构件的两端应该加强, 可在弧形构件的两端采用钢纤维混凝土以提高整体结构的承载能力。

(3) 弧形构件破坏时最大径向位移均在4.5~6.5 mm之间, 表明弧形构件本身变形较小, 可通过选择合适的可缩接头材料, 使该井壁结构起到“先柔后刚”的作用。

(4) 弧形构件的内排钢筋总是比外排钢筋先屈服, 并且钢筋发生屈服时对应的荷载值一般为该构件极限承载力的60%左右。

(5) 混凝土的单轴抗压强度越高、高强钢筋混凝土弧形板井壁极限承载力越大, 混凝土的强度等级提高10 MPa, 其极限承载力提高1.26 MPa。

参 考 文 献

- [1] 陶柏祥, 李和群, 胡学文. 建井工程结构[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1986.
- [2] 沈正芳, 王德民. 立井井壁[M]. 郑青林译. 北京: 煤炭工业出版社, 1981.
- [3] 杨俊杰. 深厚表土层冻结井筒外层井壁结构选型分析[J]. 建井技术, 2003, 24(5): 27-29.
YANG Jun-jie. Analysis of choosing type for the outer shaft lining in deep frozen surface soil[J]. **Mine Construction Technology**, 2003, 24(5): 27-29.
- [4] Damian Kachlakev, Thomas Miller, Solomon Yim. Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates[R]. California: California Polytechnic State University, 2001.

- [5] Padmarajaiah S K, Ananth Ramaswamy. A finite element assessment of flexural strength of prestressed concrete beams with fiber reinforcement [J]. **Cement & Concrete Composites**, 2002, 24: 229—241.
- [6] Barzegar, Maddipudi, Srinivas. Three-dimensional modeling of concrete structures, I : plain concrete[J]. **Journal of Structural Engineering**, 1997, 123(10): 1 339—1 346.
- [7] Samir A A, Khalid M, Faisal F W. Influence of steel fibers and compression reinforcement on deformation of high-strength concrete beams[J]. **American Concrete Institute Structural Journal**, 1997, 94(6): 611—624.
- [8] Ramzi B A A, Omer Q A. Flexural strength of reinforced concrete T-Beams with steel fibers[J]. **Cement & Concrete Composites**, 1999, 21(2): 263—268.
- [9] Samir A A, Faisal F W. Flexural behavior of high-strength fiber reinforced concrete beams[J]. **American Concrete Institute Structural Journal**, 1993, 90(3): 279—286.
- [10] 姚直书, 程桦, 孙文若. 深厚表土层中高强复合井壁结构的试验研究[J]. **岩土力学**, 2003, 24(5): 739—743.
YAO Zhi-shu, CHENG Hua, SUN Wen-ruo. Experimental study on high strength composite shaft lining in deep alluvium[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(5): 739—743.
- [11] 程桦, 孙文若, 姚直书. 高强钢筋混凝土井壁模型试验研究[J]. **建井技术**, 1995, 16(6): 26—27.
CHENG Hua, SUN Wen-ruo, YAO Zhi-shu. Experimental study on high strength reinforced concrete shaft lining[J]. **Mine Construction Technology**, 1995, 16(6): 26—27.
- [12] 杨俊杰. 弧形大板块井壁设计的探讨[J]. **煤炭工程**, 2003, 50(2): 35—38.
YANG Jun-jie. Discussion of precast arc shaft lining designing[J]. **Coal Engineering**, 2003, 50(2): 35—38.
- [13] Peter Kohnke. ANSYS Theory Reference[M]. [s.l.]: [s. n.], 2000.

《岩土力学》2005年第10期被EI收录论文（34篇，收录率100%）

No.	论文题名	作者	页码
1	圆弧滑动有限元土坡稳定分析	殷宗泽, 吕肇峰	1525—1529
2	6节点无界元及其应用	史贵才, 葛修润, 王水林	1530—1534
3	砂井地基固结的概率设计	李小勇, 钟文华, 周英才	1535—1540
4	非线性粘弹性基桩纵向混沌运动	胡春林, 程昌钧	1541—1544
5	降雨入渗条件下边坡岩体饱和和非饱和渗流计算	荣冠, 张伟, 周创兵	1545—1550
6	Theis井流注水导致的含水层水平位移与应变	冉兴龙, 李宗平, 夏斌	1551—1556
7	横观各向同性饱和土体三维粘弹性动力分析	祝彦知, 李冬霞, 方志	1557—1564
8	巷道裂隙围岩稳定性影响因素的数值分析	王鲁明, 赵坚, 万德连	1565—1569
9	混凝土结构损伤的分形特征实验分析	曹茂森, 任青文, 翟爱良, 等	1570—1574
10	基坑降水引起周围土体沉降性状分析	金小荣, 俞建霖, 祝哨晨, 等	1575—1581
11	基坑抽水引起周围地面沉降机理及防治措施	仵彦卿, 张建山, 李哲	1582—1586
12	求前期固结应力的数学模型研究及应用	王志亮, 郑明新, 李永池	1587—1590
13	水库蓄水对库底沉降影响的数值分析	王俊杰, 朱俊高, 王克东, 等	1591—1596
14	液化土层中桩基水平承载特性分析	王建华, 冯士伦	1597—1601
15	基于间隙参数模型的盾构隧道周围土体位移分析	杨冠天, 项彦勇, 张峰	1602—1606
16	群桩荷载位移特性研究	石名磊, 战高峰	1607—1611
17	天津地铁盾构施工地层变形实测及动态模拟	姜忻良, 崔奕, 李园, 等	1612—1616
18	基于统一强度理论的地基极限承载力公式	范文, 白晓宇, 俞茂宏	1617—1622
19	低围压下冻结粉质粘土的三轴强度及变形分析	孙星亮, 汪稔, 胡明鉴, 等	1623—1627
20	厦门砂土的动力特性研究	王权民, 李刚, 陈正汉, 等	1628—1632
21	扁铲侧胀试验在软土地基评价中的应用研究	徐超, 罗松, 董天林, 等	1633—1636
22	裂隙性粘土边坡渐进性破坏的FLAC模拟	王志伟, 王庚荪	1637—1640
23	E.Hoek法在节理化岩体力学参数评价中的应用——以长江三峡库区白衣庵滑坡为例	廖秋林, 李晓, 张年学, 等	1641—1644
24	南阳膨胀土的工程地质特征和填筑适宜性	冯玉勇, 徐卫亚, 王思敬, 等	1645—1651
25	双桥静力触探判别上海薄夹层粘土地基液化研究	张继红, 顾国荣	1652—1656
26	降雨因子对湖北省山地灾害影响的分析	毛以伟, 周月华, 陈正洪, 等	1657—1662
27	饱和粉土振动液化分析	李立云, 崔杰, 景立平, 等	1663—1666
28	挤扩支盘支护桩试验研究	李启民, 何满潮, 唐业清	1667—1670
29	现浇薄壁管桩在威-乌高速公路软基加固中的应用	周云东, 刘汉龙, 李明生, 等	1671—1674
30	深埋单线铁路隧道衬砌高水压分界值研究	高新强, 仇文革	1675—1680
31	淤泥质地层地铁隧道施工地表沉降预测及分析	刘志春, 李文江, 朱永全	1681—1684
32	大面积软弱地基浅层处理技术研究	周健, 姚浩, 贾敏才	1685—1688
33	探地雷达应用于城市固体废弃物填埋场的构想	闫长斌, 徐国元	1689—1691
34	高压压水试验在深钻孔中的应用	殷黎明, 杨春和, 罗超文, 等	1692—1694