短 文

深厚软土地基上振动沉拔钢护筒对周围土体扰动影响的研究

聂庆科，胡建敏，商卫东
(河北建设勘察研究院有限公司，河北 石家庄 050031)

摘 要：根据现场测试结果研究深厚软土地基上振动沉拔钢护筒对周围软土的扰动影响。测试结果表明：护筒在振动沉拔过程中对土体的挤压位移（包括地表沉降、地表位移和深层水平位移）不大。随着钢护筒入土深度的增加，土体局部范围内产生较大的挤压应力和孔隙水压力，但挤压效应的影响主要集中在距离钢护筒中心半径为1.5 m的范围内。同时，产生深层水平位移最大值的位置随着钢护筒的入土深度增加而不断下移。

关键词：软土地基；扰动影响；水平位移；挤压应力
中图分类号：TU435 文献标识码：A 文章编号：1000－4548(2008)01－0128－05

作者简介：聂庆科(1965－)，男，硕士，教授级高级工程师，现主要从事岩土工程设计、施工与理论研究工作。E-mail: nieqingke2001@sina.com。

Disturbance effect on soft clay foundation due to steel tube driving by use of shaking method

NIE Qing-ke, HU Jian-min, SHANG Wei-dong
(Hebei Research Institute of Construction and Geotechnical Investigation Co., Ltd., Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: The disturbance effect on a very deep soft clay foundation due to steel tube driving was studied by use of in-situ tests. It was shown that the extruding displacement (i.e., ground surface settlement, ground surface displacement, and horizontal displacement of soil layer) caused by driving and drawing of a steel tube was not great. Extruding stress and pore pressure generated by driving and drawing of the tube in a local region surrounding the pile increased obviously with the increase of the driving depth of the steel tube; however, the extruding effect was mainly limited within a radial distance of about 1.5 m. In the meantime, the location of the maximum horizontal displacement of soil layer was also moving downward. Moreover, the maximum values of horizontal displacement were smaller than 5 mm when the radial distance was greater than 1.5 m.

Key words: soft clay foundation; disturbance effect; horizontal displacement; extruding stress

0 引 言

在深厚软土地基上用旋挖钻机施工超长灌注桩时，往往很难保证成孔的质量。为此需下入深长的钢护筒（如长度可达15 m以上）。利用这一新技术，已在多个重要工程中获得成功应用[1]。目前，关于软土地基中振动沉拔深长钢护筒的机理和扰动影响研究还十分少见。类似的现场测试研究主要涉及沉管桩施工[2]、预制桩打入引起的地基土的变形、孔压和土体挤压[3]及强夯冲击引起的振动效应和挤压影响[4]等问题。实际上，振动沉拔钢护筒采用的振动源可看作是循环变化的简谐波（强迫振动），而护筒的振动下沉和上拔过程是一个十分复杂的力学过程，不但涉及到振动和挤压作用对周围软弱地层的强烈的扰动作用，同时还涉及到护筒内、外侧壁与土体之间的循环剪切摩擦作用[2]。为此，本文选取安徽省芜湖电厂所在的典型第四系长江冲积物软土地基进行现场测试[1]。测试内容包括地表沉降、地表水平位移、地层深层水平位移、孔隙水压力、侧向土体挤压应力等。芜湖电厂所在位置的上部地层沉积韵律十分明显，且具有明显的水平层理，局部范围内有斜层理。地层自上而下大致为粉质黏土、淤泥质粉质黏土、粉细砂，局部地段逐渐过渡到中粗砂，厚度51～53 m，下伏基岩有侏罗系砂岩、三叠系灰岩和泥盆系石英长石砂岩。

本次现场测试的意义在于除可以研究振动沉拔深

收稿日期：2007－03－23

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

长钢护筒对周围软土的扰动影响外，还可以探讨振动沉拔深长钢护筒的施工工艺和参数。本文通过现场测试，重点分析沉拔钢护筒过程对周围软土的挤压效应，并就施工过程对周围软土地层的变形和力学特性的影响进行研究。

1　现场测试方案

沉拔护筒所用振动锤为普通振动打桩锤（型号DZ-45A），其基本性能参数为激振力360 kN，频率（转速）1150 r/min，功率45 kN，质量3800 kg。钢护筒是由厚度10 mm的钢板卷制而成，护筒直径0.9 m。

图1为测试传感器布置情况示意图。测试方法如下：①利用水准仪和经纬仪量测钢护筒沉拔过程中引起的桩周地表土的垂直沉降和水平位移（精度1 mm）；②利用测斜仪测量地层深层位移（精度0.01 mm/m），侧斜管埋设深度距桩顶均为20 m（护筒长度为12 m），保证测斜管底部无位移；③用振弦式孔隙水压力传感器和土压力传感器配合ZX-12型振弦式频率测定仪测定孔隙水压力和土体挤压应力（精度1 kPa）。

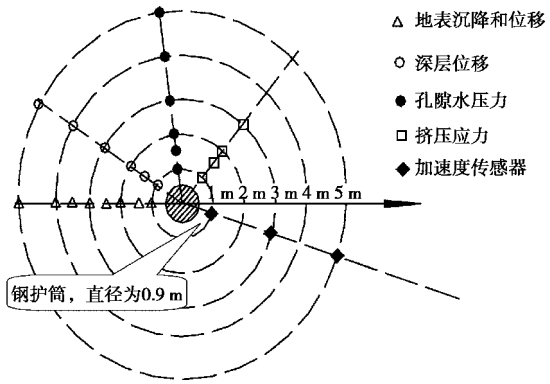


图 1　测试元件平面布置

Fig. 1 Plane layout of monitoring points

在钢护筒沉入过程中，每下沉 2 m 观测一次；在钢护筒振拔过程中每上拔 6 m 观测一次。沉拔结束后，进一步监测孔隙水压力的消散过程。

2　测试结果分析

2.1　地表沉降和位移

图2给出钢护筒沉入和上拔过程中地表沉降随距护筒中心径向距离的变化曲线。可见，在钢护筒振动沉入和拔出的过程中，周围地表有一定的沉降，最大沉降发生在距护筒中心大约1.0 m的位置，可达4 mm。随着距离护筒中心距离的增加，地表沉降量明显减小。而当距离护筒中心距离超过2 m后，沉降量已小于2 mm。由图2可以看出，在距离护筒中心2.5 m的位置处甚至出现少量的隆起（大约为0.5 mm，即为负值）。

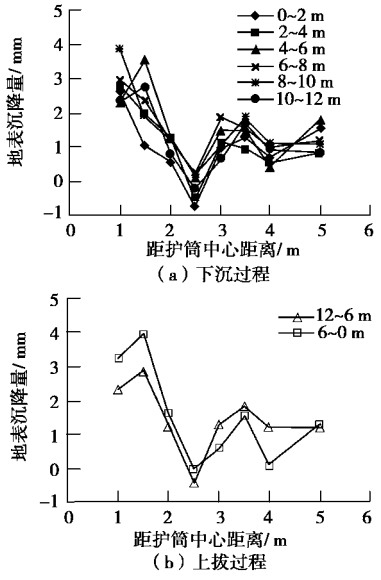


图 2　地表沉降量随径向距离的变化

Fig. 2 The variation of settlement of ground surface with the radial distance

实际上，地表沉降量主要受第一次沉入的影响（见图2（a），即由地表0 m处沉到2 m处深度时，记为0～2 m）。在此后的沉入过程中（即2～4 m，4～6 m，6～8 m，…），地表沉降量虽有一定波动和变化，但总体沉降规律基本不变。

另一方面，在上拔过程中（图2（b），即12～6 m，6～0 m），地表沉降量总体上呈现与沉入过程类似的变化规律。但在靠近护筒侧壁处（如距护筒中心1 m处），由于护筒的上拔作用，地表沉降量有减小的趋势。

由图3可以看出，地表径向水平位移随着离开护筒中心距离的增大有明显减小的趋势。例如，当径向距离大于3 m时，水平位移量小于3 mm。

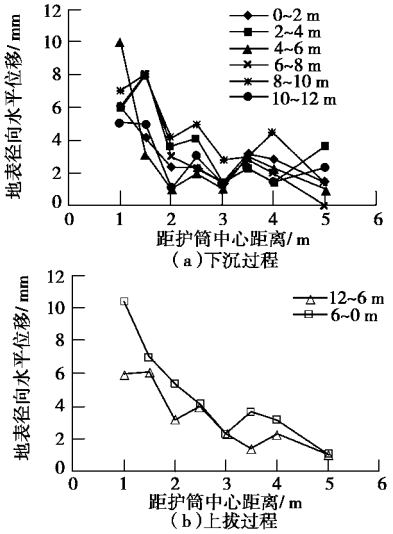


图 3　地表水平位移随径向距离的变化

Fig. 3 The variation of horizontal displacement of ground surface with the radial distance

由图2和图3的比较可以看出，地表水平位移与地

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表沉降量变化的趋势大致是一致的，而水平位移值相对较大（靠近护筒侧壁处，其最大值可达10.2 mm）。

2.2 土体挤压应力分布

图4，5分别给出距护筒中心不同距离处（如1 m，1.5 m），在护筒沉入和上拔的整个过程中，土体挤压应力的分布特征。以图4为例说明挤压应力的演变过程。可以看出，随着护筒沉入深度的增加，沿土层深度的挤压应力分布峰值基本呈现逐渐增大的趋势，即从起始阶段的20 kPa（由0 m沉入2 m深度处，记为0～2 m。最大值位于深度6 m处）逐渐增加到第5阶段的85 kPa（沉入深度8～10 m，最大值位于深度8 m处）。显然，挤压应力的峰值所在位置也逐渐由浅层向深层转移（第1阶段除外，即沉入深度0～2 m），表明随着护筒的不断沉入，其对周围土层的挤压应力逐渐由浅层向深层传递。

可以看出，当沉入深度超过8 m时，虽然深层的挤压应力不断增大，但大约6 m以上土层的挤压应力反而有减小的趋势，表现出明显的应力松弛效应。特别是,当护筒由10 m沉入到12 m时，这一现象更为明显。此时，6 m以上土层的挤压应力几乎恢复到初始应力状态。

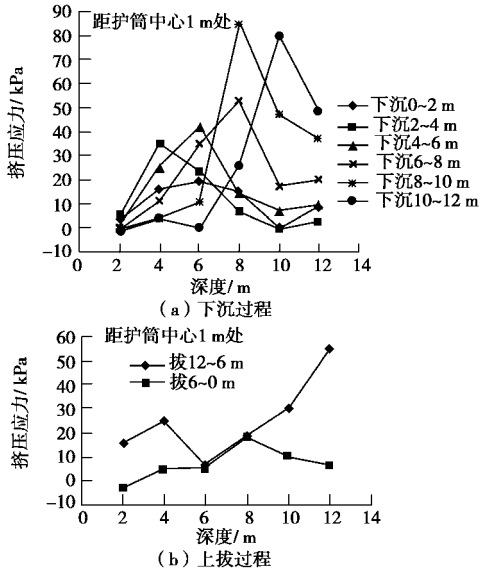


图 4 挤压应力沿地层深度分布（距护筒中心 1 m 处）

Fig. 4 Distribution of extruding stress along depth at the radial distance of 1 m

由图4（b）可看出，当护筒沉入到预定深度（即12 m处）并由12 m处上拔至6 m处时，6～12 m范围内的挤压应力明显减小，而0～6 m范围内的挤压应力却略有增大。当护筒由6 m处上拔至0 m处（即护筒拔出）时，挤压应力进一步减小，而在孔口处甚至由于土体向内的侧向变形及其相应的卸荷作用而出现负值（大约为4 kPa）。可看出一旦振动沉拔过程结束，沿整个深度范围内的挤压效应就会明显减小（小于20 kPa）。

由图5可知，在护筒振动沉拔过程中，离护筒中心不同距离处（如1.5 m）的挤压应力也大体呈现与离开护筒中心1 m距离处（图4）大致相同的演变规律。但是，随着离开护筒中心距离的增大，挤压应力向深处传递的波动过程趋于均匀化。特别需要指出，在离护筒中心3 m处的挤压应力出现负值，与前面的规律不同（图4）。但是，该负值的绝对值很小（最大值小于8 kPa），意味着此时土体的侧向挤压应力小于护筒沉拔前的初始值。分析其原因，这是由于振动效应使土压力传感器周围填埋砂体的疏松作用引起的。

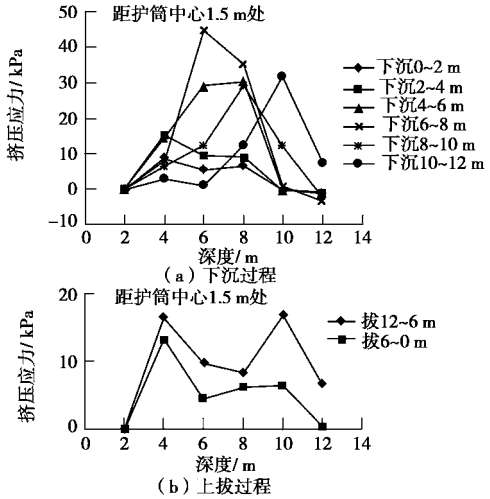


图 5 挤压应力沿地层深度分布（距护筒中心 1.5 m 处）

Fig. 5 Distribution of extruding stress along depth at the radial distance of 1.5 m

2.3 孔隙水压力分布

图6，7分别给出距护筒中心不同距离处（即1，3号孔，分别距护筒中心距离为1，2 m），在护筒沉入和上拔的整个过程中，孔隙水压力的分布特征。以图6为例，说明随护筒沉入深度的增加，孔隙水压力的演变过程。可以看出，在第1步沉入过程中（由0 m推进到2 m深度处，记为0～2 m），孔隙水压力峰值出现在大约6 m深度处。然后，随着护筒沉入深度的增加，沿土层的孔隙水压力峰值呈现向深层逐步推进的演变过程，即由第2次沉入过程中（由2 m推进到4 m，记为2～4 m）的4 m深度处（该处的孔隙水压力大小为34 kPa）逐渐到达第6次沉入过程中（由10 m推进到12 m）的10 m深度处（该处的孔隙水压力大小为44 kPa）。在整个过程中，孔隙水压力峰值先不断增大然后有一定减小，孔隙水压力峰值可达60 kPa（即由4 m下沉到6 m时，记为4～6 m）。实际上，孔隙水压力的发展变化是由于护筒下沉对周围土体的侧向挤压效应以及持续不断的振动波向外传播对周围土体的反复剪切扰动引起的，而后者的因素是十分重要的。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

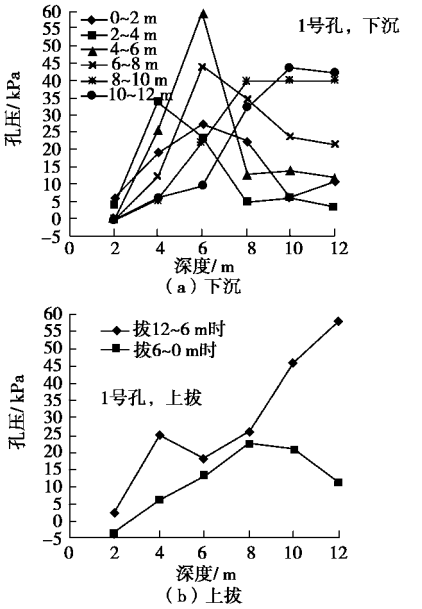


图 6 孔隙水压力沿地层深度分布（距护筒中心 1 m）

Fig. 6 Distribution of pore pressure along depth at the radial distance of 1 m

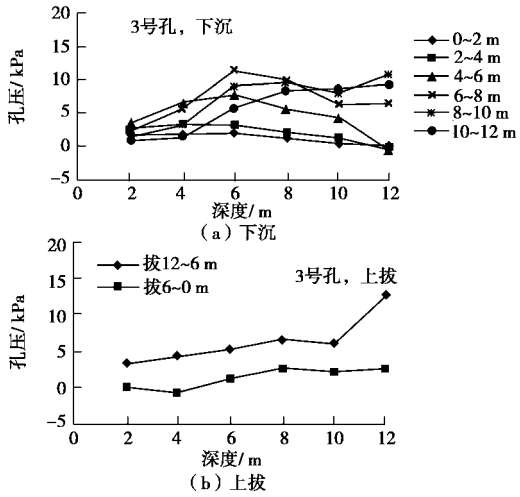


图 7 孔隙水压力沿地层深度分布（距护筒中心 2 m）

Fig. 7 Distribution of pore pressure along depth at the radial distance of 2 m

由图6（b）可以看出，当护筒由深度12 m处上拔至深度6 m处的过程中，在护筒底部的孔隙水压力仍有较大的增加，即由上拔之前的42 kPa（图6（a），曲线10～12 m）增加至59 kPa（曲线12～6 m）。可见，即使在上拔过程中有明显的径向卸荷效应，但是由于振动效应的存在，孔隙水压力的增加仍然是明显的。然而，当护筒由深度6 m上拔至0 m时，由于卸荷效应占主导地位，地层深度处的孔隙水压力明显减小。

由图7还可以看出，在离护筒中心较远处的孔隙水压力也大致呈现与图6类似的规律，尽管其峰值大小以及出现的位置有一定差异。由孔隙水压力沿深度分布特征（如图6）与土体挤压应力沿深度分布特征（如图4）的比较可发现，两者的演化形态和推进过程十分接近。这一结果印证了孔隙水压力和挤压应力测试结果的可靠性，同时也说明孔隙水压力与挤压效应的影响是密切关联的，是同一物理本质的两种不同表现。

图8给出同一地层深度（如6，8 m）处，不同径向距离（如1，1.5，2，3，4和5 m），沉拔后孔隙水压力随时间的消散过程。可以看出，沉拔刚刚结束后，尽管离护筒较近的位置处比在较远的位置处有更大的孔隙水压力（如图8（b），地层深度8 m处的孔隙水压力可达23 kPa），但经过17 h40 min的消散后，不同距离处的孔隙水压力均减小至很小的值。

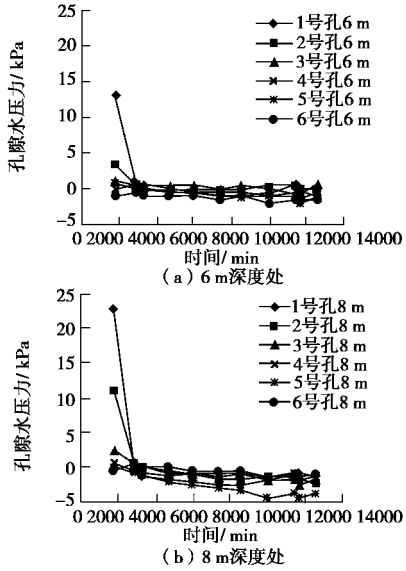


图 8 沉拔后孔隙水压力消散过程

Fig. 8 Dissipation process of pore pressure with time after drawing of the tube

2.4 地层深层水平位移

图9给出1 m距离处地层深层水平位移随护筒沉入和上拔过程时的发展变化。可见，在护筒下沉的初始阶段（如0～2 m，2～4 m，4～6 m，6～8 m），在整个深度范围内深层位移随护筒沉入深度的增大而不断增大。而且，深层水平位移峰值随护筒的沉入深度的增大不断下移，一般出现在沉入深度的附近位置（见表1）。当护筒沉入深度为8 m时，水平位移峰值为最大，达到23 mm（即曲线6～8 m）。该水平位移最大值大致位于沉入深度稍靠上的位置（大致7.8 m左右）。

表 1 深层位移最大值

Table 1 The maximum values of displacement along depth

沉入阶段/m	0~2	2~4	4~6	6~8	8~10	10~12
深层位移最大值/mm	3	12.5	21	31	20	23
最大值所在深度位置/m	2	3.5	5.8	7.8	8.4	7.8

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

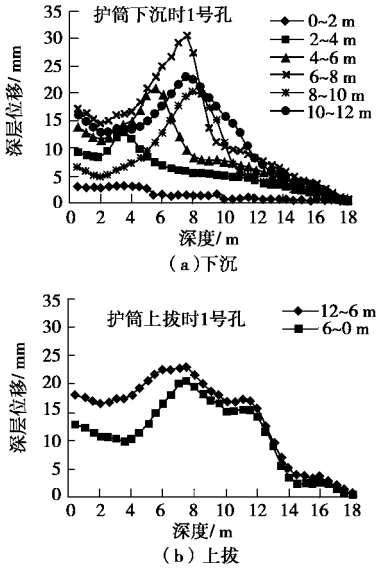


图 9 径向距离 1 m 处地层深层位移

Fig. 9 Displacement of soil layer along depth at the radial distance of 1 m

当护筒继续下沉时（如8～10 m，10～12 m），虽然深层位移曲线形态与前面类似，但侧向位移的量值有一定减小，而侧向位移峰值所在位置基本上处于8 m深度处（见表1）。这一结果表明，护筒沉入过程所引起的周围土层变形是复杂的，不但与地层的地质条件有关，而且可能还与护筒沉入时由于振动作用引起的护筒中心位置的少量偏移和倾斜有关。

由图9（b）可以看出，护筒在上拔过程中，深层位移曲线形态与护筒沉入时类似。但由于有一定的侧向卸荷作用，上拔结束后深层位移有一定程度的减小（最大值为20 mm）。

事实上，地层深层水平位移主要局限在护筒周围的一定范围内。测试结果表明，当距护筒中心距离超过1.5 m时，沿深度方向的深层水平位移值最大值小于5 mm，说明对周围软土层的挤压作用已经大大减弱。这一结果与前面土体挤压应力、孔隙水压力的测试分析结果是一致的。因此，对于本次测试的地质条件和施工条件（即直径0.9 m，深度为12 m的护筒，软土地层条件），可认为挤压效应的影响主要集中在距离护筒中心半径为1.5 m的范围内。当距离超过1.5 m时，对周围软土层以及已成桩体影响较小。

测试结果表明，当距离超过1.5 m时，沿深度方向的深层位移曲线形态稍显复杂些，在孔口处（护筒所在地表）甚至产生一定的负值（即向护筒方向产生位移）。这是由于护筒沉入时，其下沉轴线发生一定的偏移引起的。

3 结 论

（1）护筒在振动沉拔过程中对土体的挤压位移（包括地表沉降和水平位移）不大。在地表处，水平位移主要产生于下沉的第1阶段，其后水平位移增加（或减小）的幅度就很小了。当距护筒中心距离超过2 m时，地表水平位移迅速减小（小于5 mm）。

（2）随护筒沉入深度的增加，沿土层深度的挤压应力分布峰值基本呈现逐渐增大的趋势。挤压应力的峰值所在位置也逐渐由浅层向深层转移（第1阶段除外，即沉入深度0～2 m）。

（3）随护筒沉入深度的增加，沿土层的孔隙水压力峰值呈现向深层逐步推进的演变过程。在整个过程中，孔隙水压力峰值先不断增大然后有一定减小。由孔隙水压力与土体挤压应力沿深度分布特征的比较可发现，两者的演化形态和推进过程十分接近。

（4）沉拔结束后，尽管离护筒较近的位置处比在较远的位置处有更大的孔隙水压力，但经过较短的时间，不同距离处的孔隙水压力基本消散。

（5）深层水平位移值最大值随着护筒的入土深度不断下移。可以认为，挤压效应的影响主要集中在距离护筒中心半径为1.5 m的范围内。当距护筒中心距离超过1.5 m时，沿深度方向的深层水平位移值最大值小于5 mm。

参考文献：

[1] 聂庆科. 深厚软土地基沉拔钢护筒对周围环境影响研究[R]. 石家庄：河北建设勘察研究院有限公司，2006. (NIE Qing-ke. The disturbance effect on soft clay foundation due to steel tube driving by shaking method[R]. Shijiazhuang: Hebei Research Institute of Construction and Geotechnical Investigation Co., Ltd., 2006. (in Chinese))

[2] 刘汉龙, 郝小员, 费 康, 陈永辉. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(II)：工程应用与试验[J]. 岩土力学, 2003, **24**(3): 372－375. (LIU Han-long, HAO Xiao-yuan, FEI Kang, CHEN Yong-hui. Field pour concrete thin wall cased pile technology and its application (II): application and in-situ test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(3): 372－375. (in Chinese))

[3] 白 冰, 肖宏彬. 软土工程若干理论与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. (BAI Bing, XIAO Hong-bin. The theory and application of soft clay engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002. (in Chinese))

[4] 李福民. 排水固结处理后地基强夯加固的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(4): 499－502. (LI Fu-min. Experimental study on improving the drained and consolidated ground with DCM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(4): 499－502. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net