

文章编号:1673-0291(2013)01-0067-06

强夯块石墩法处理软弱土地基的试验

李华伟,白冰

(北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044)

摘要:根据现场测试结果,对强夯块石墩法处理软弱土地基的施工参数和效果进行了分析,对强夯置换法施工过程中孔隙水压力的发展和消散过程及施工影响范围进行了研究,并通过现场试验给出经过强夯块石墩处理后地基承载力变化.研究表明,对于所处理的软弱土地基,当采用块石(或碎石)填料后,地层中的排水性能得到显著改善,使强夯动力荷载作用下的孔隙水压力消散很快.此外,强夯块石墩处理地基所引起的孔隙水压力,在水平方向一般局限在距离强夯置换点小于4 m的水平距离范围内,而其深度方向的影响则比较大,即比之常用的强夯法有较大的加固深度.

关键词:块石墩法;软弱土;孔隙水压力;承载力

中图分类号:TU473 **文献标志码:**A

Field test on treatment of soft ground using stone block by dynamic compaction

LI HuaWei, BAI Bing

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Combining with a typical field test on the treatment of soft soil ground using stone block by dynamic compaction, this paper analyzes the treatment techniques and its mechanism such as the processes of dynamic compaction and packing method, etc. This paper discusses the development and dissipation of pore pressure induced by dynamic loading and the affecting ranges in horizontal and vertical direction. Besides, the variation of bearing capacity of the soft ground is investigated. The study shows that, the drainage conditions of the soft soil layers can be improved greatly by using block stone (or crushed stone) columns, and the pore pressure induced by dynamic compaction are localized within a range of 4 m in radial direction, while the effect of pore pressure is greater in depth.

Key words: block stone column; soft soil; pore pressure; bearing capacity

强夯块石墩法处理软弱土地基,已经在一些沿海地区的填海工程、高速公路的路基工程、大型建筑物地基等方面获得应用^[1].它是利用强大的夯击荷载在待加固地基中形成夯坑,然后在夯坑内回填块石(或碎石)材料,最终形成由块石(或碎石)构成的具有较高强度的墩体,来置换原来较为软弱的土层,故也为强夯置换法.这一方法可将强度性能较好的回填材料送至软弱土层的深部,有的甚至穿透所加

固的软弱土层而到达比较坚硬的持力层.实际上,强夯块石墩法兼有强夯压密效果和复合地基整体性好的特点.然而,它的加固机理、施工过程和质量控制又与一般的强夯法或者常规的复合地基施工过程显著不同^[2],特别是一些关键技术问题还需进行深入的研究.例如,在强夯置换夯击能量的选择、强夯置换施工的程序和遍数、强夯置换成桩过程对周围土层的挤压效应、孔隙水压力的消散速率、强夯置换所

收稿日期:2011-12-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51279002)

作者简介:李华伟(1971—),男,山东聊城人,高级工程师,博士生.研究方向为软土地基加固工程及应用. email: hbjklhw@126.com.

引起的孔隙水压力的范围、地基的加固深度及加固后地基承载力的估算等方面仍然有不同的认识^[3-4].

目前,关于强夯块石墩法的现场研究和理论分析还不多见^[5-6].以下一些文献值得关注:王保田等^[7]较早分析了强夯置换法的成桩机理.罗嗣海^[8]曾经提出了一个模拟夯击过程的一维波动过程的理论模型,并由此来估算强夯置换的加固深度.曾庆军等^[9]考虑了土体对强夯作用波的吸收系数和现场施工状况,并对它的加固效果及置换深度加以讨论.此外,秦宝和等^[10]研究了强夯置换法在高速铁路地基处理中的一些应用实例和加固机理.

本文作者根据强夯块石墩法处理软弱土地基的现场试验,重点讨论应用这一方法时由强夯动力荷载所引起的地层中孔隙水压力的产生和消散过程,以此来分析该法的加固机理和效果.

1 工程地质特征与现场测试

1.1 工程地质条件

现场试验的场地地形比较平坦,该场地原为耕地,其表层深度范围主要为黏土或者粉质黏土,土层的厚度在4.4~8.3 m之间,其下为砂岩或泥岩等较为坚硬的地层.施工降水前的场地地下水位位于地表以下1.1 m深度.

土性分析表明,该软弱土层的液限 $w_L = 43.7\%$,塑限 $w_p = 24.9\%$,塑性指数 $I_p = 18.8$,含水率 $w = 20.5\%$,孔隙比 $e = 0.72$,容重 $\gamma = 18.7 \text{ kN/m}^3$,干容重 $\gamma_d = 16.0 \text{ kN/m}^3$,土颗粒比重 $G = 2.67$,液性指数 $I_L = -0.25$.

1.2 施工方案

施工过程如下:强夯置换的前两遍为点夯,在每个点夯处将形成置换块石墩.为保证置换点布置位置紧凑,置换块石墩的排与排之间相互错落而至.对于每一遍的强夯置换点,其夯点之间的距离为7 m.亦即,强夯置换施工两遍后,置换块石墩之间形成正方形布置方式,因此前两遍夯点之间的距离为3.5 m.最后,采用满夯施工对整个场地进行夯实处理.进行点夯时,其夯锤的重量为220 kN,直径为1.2 m,高度为2 m.第1遍和第2遍的单点夯击能取为中等能量大小,即3 000 kN·m.而满夯时,采用直径较大的扁平夯锤(直径为2.5 m,重量为140 kN),而每次夯击的能量比点夯时要小,取为1 500 kN·m,且要求每点2击,夯点之间彼此搭接.

1.3 传感器的布置和量测

图1给出强夯置换试验区域内的传感器布置形

式和施工次序.其中,小圈代表强夯置换点,大圈代表距离强夯置换点1的距离.

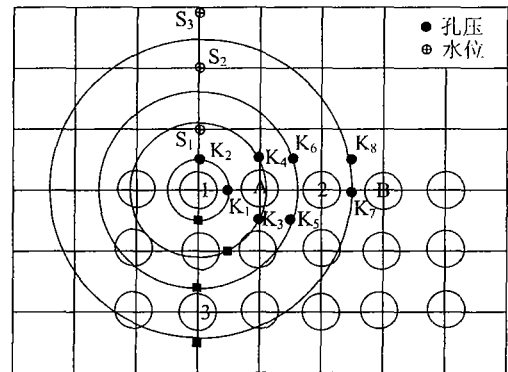


图1 强夯置换块石墩点位和测点布置

Fig. 1 Drop pattern and monitoring point distributions

1) 强夯置换引起的沉降量.

使用水准仪量测强夯置换所引起的地表沉降变化量及所形成的夯坑沉降量.利用这些量测结果可以分析加固以前及强夯置换加固过程中地表的隆起量或沉降量的变化过程,并配合孔隙水压力的演化过程来综合分析该法的加固效果.

2) 孔隙水压力量测.

现场试验时,需要量测强夯荷载作用下离开强夯置换点不同的水平距离和距离地表不同的深度处的孔隙水压力发展变化.这里,重点观测基准点进行强夯置换时地基的动力响应.为此,在地表面上共布置8个孔隙水压力观测孔(即图1中的标记 $K_1, K_2, K_3, \dots, K_8$),每个孔沿地层深度向下每间隔2 m布设一个传感器,最大量测深度可达7 m.根据地层深度和可能产生的孔隙水压力大小,选用0.3 MPa和0.4 MPa两种规格的孔隙水压力传感器.

通过气压打孔机在地层中形成直径约10 cm的孔洞,然后将孔隙水压力计小心置入其中,并沉入到预定深度.然后,用现场粉质黏土填充至孔中来充满孔隙水压力计周围的空隙,同时用透水性很小的胶泥把不同深度的孔隙水压力计之间的通道封闭,其目的是保证孔隙水压力计之间互不通透,以反映孔隙水压力计所在地层的孔隙水压力变化.

3) 地下水位观测孔的量测.

现场水位观测点的布置见图1.在距离试验区域(以基点为中心,如以强夯置换点1为准)不同的水平距离处布置水位观测孔共3个,深度均为8 m,标记为 S_1, S_2, S_3 ,水平距离分别为4 m,12 m,20 m.先通过气压打孔机在地层中形成冲孔,然后放置直径为53 mm的PVC水位管,为防止细颗粒土堵

塞水位管侧壁上的滤孔,在水位观测管底部包裹滤布.然后,在水位管周围充填现场粉质黏土,使得水位管与周围的地层形成一体,保证水位的观测精度.

2 强夯置换施工过程

2.1 强夯块石墩形成过程

强夯块石墩的施工次序见图1中的1,2,3点.首先在施工场地上铺设碎石垫层(厚度为30cm),并将强夯的夯锤置于强夯置换点处(图2).然后进行第1次强夯置换,则可形成较大深度的夯坑.此时,将块石(或碎石)填入夯坑中.然后,再继续夯击(可根据夯坑深度确定夯击次数,如2次或3次),形成一定深度的夯坑(如2m深度,即与夯锤高度大致相同),之后再继续进行第2次填料.这样,所填入的块石(或碎石)逐渐向地层深处移动并趋于密实,最终达到设计的填料深度,并形成完整的块石墩体.

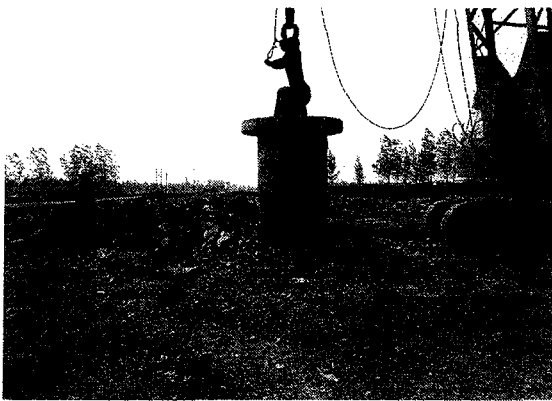


图2 施工实例

Fig. 2 Photo of a practical engineering example

为保证所形成的块石墩体具有较为密实的状态和强度,规定当最后两击的平均沉入深度不大于10cm时,该块石墩体的施工就完成.为保证所形成的块石墩体完整、不倾斜,应该使得每次填料的密实度保持均匀,而填料厚度也应大致相同.此外还应该保证地下水位较低(如地下水位为3m以下),即尽量保持施工场地的干燥.为此,施工前先在路基的一侧开挖集水沟进行降水施工.

在第2遍强夯置换施工时,单点夯击能与第1遍相同,即为3000 kN·m.而强夯置换过程及填料要求与第1遍置换施工过程也相同.施工次序见图1中的A、B点.当第2遍强夯置换施工完成后,必须用推土机整平场地,并清除场地上由于强夯置换挤压隆起的泥浆.

最后进行满夯施工,满夯施工的能量比前两遍的点夯的施工能量要小,此次施工采取每点夯击能为1500 kN·m.每个强夯点击2次,并且夯点与夯

点之间搭接长度不小于10cm.实际上,满夯施工的作用是保证所形成的块石墩体之间比较松软的土处于更为密实状态,这样其压缩性会很小,而抗剪强度将更高,最终使得地基的承载力得到明显提高.为保证场地的承载力均匀,等满夯施工完成后,将场地重新进行平整,并及时清除场地内被挤到地表的泥浆等.

2.2 块石(或碎石)填料质量

为保证墩体的施工质量,对用做填料的块石(或碎石)材料有一定要求.为此,施工要求其颗粒级配良好,即大于30cm粒径的石料不超过30%.

按照《普通混凝土用砂、石质量及检测方法标准》(JGJ 52—2006)检测评定,所选用石料的抗压强度为112~174 MPa(可用于混凝土粗骨料).这样,所选用的块石(或碎石)填料具有较高的强度,最终使得所形成的柱体亦具有较高的密实度和抗剪强度,并具有一定的承载能力.表1给出施工中几个墩体形成过程的填料控制方法.由表1可见,其填料次数一般为3~5次,其累计下沉量可达974cm.同时,为保证所形成墩体的密实度,要求最后两击的平均下沉量小于10cm.

表1 墩体的下沉量及控制标准

Tab. 1 Accumulated settlements of piles and controlling standards

夯点编号	填料次数	每点夯击次数	夯点累积下沉量/cm	最后两击平均下沉量/cm
1	5	21	974	8.5
2	4	14	876	4.5
3	3	14	730	9.5

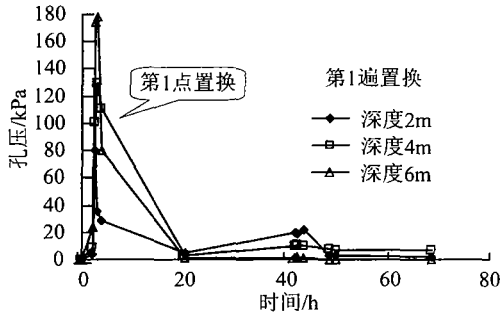
3 现场测试结果与分析

3.1 孔隙水压力

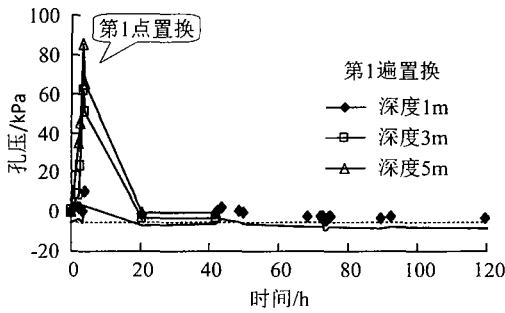
1) 孔隙水压力演化过程.

图3给出第1遍强夯块石墩施工过程中,离开块石墩施工点的不同水平距离和不同地层深度处孔隙水压力的增长和消散变化过程.图3表明,在第1遍强夯置换施工过程中(夯击能量为3000 kN·m),块石墩施工点附近的孔隙水压力的增长非常明显.由图3(a)可以看出,当对第1个块石墩进行置换施工时,距离块石墩施工点水平位置为1.75m,深度分别为2m、4m和6m处的孔隙水压力,其最大值分别为80.5 kPa, 129.2 kPa和178.2 kPa.而由图3(c)、图3(d)可以看出,在离开强夯置换点水平位置为3.9m的地方,其孔隙水压力上升速率则比较小,在地表下深度为1m、3m和5m处的孔隙水压力最大值小于5 kPa.

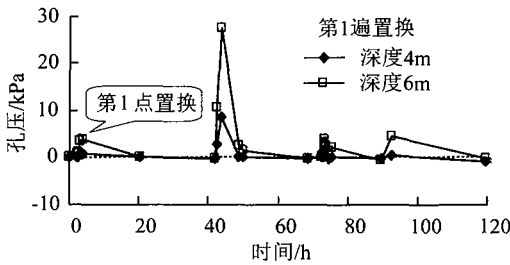
图3表明,在第1遍强夯置换后,在较短的时间内(例如24 h),所产生的孔隙水压力就已经消散至接近施工前的值,消散速率达到95%.可以看出,当用块石(或碎石)填料后,地层中的排水通道得到明显改善,使得地层中的部分孔隙水能够很快排出.实际上,根据有效应力原理,此时地层中的孔隙水压力转化为有效应力而使得地层的抗剪切强度得到明显增大,并使得地基的承载力得到提高.



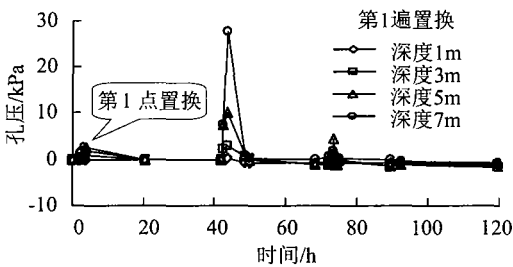
(a)距强夯点中心 1.75 m



(b)距强夯点中心 1.75m



(c)距强夯点中心 3.9m



(d)距强夯点中心 3.9m

图3 强夯置换施工引起的孔隙水压力(第1遍)

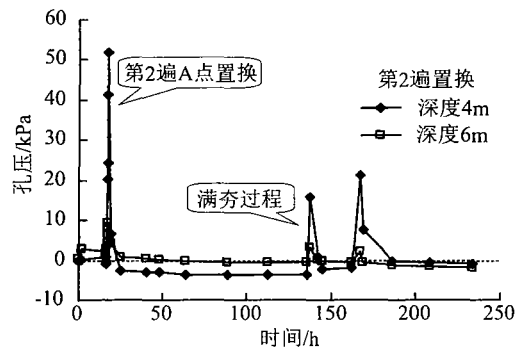
Fig.3 Pore water pressure with time (the first pass)

从孔隙水压力消散的程度来看,第1遍强夯置

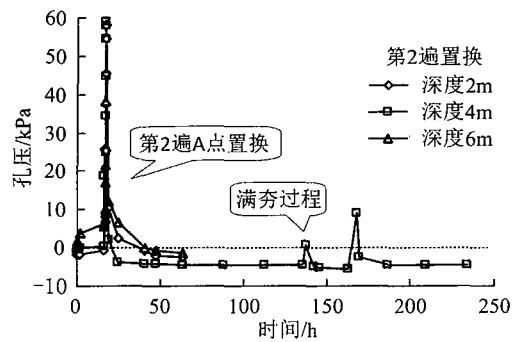
换施工完成后,静置较短的时间就可进行第2遍强夯置换施工.此时,由于强夯动力荷载作用,使得受到扰动的土层结构性得到一定程度的恢复.考虑到施工过程和步序的影响,笔者认为当第1遍强夯置换块石墩施工完成后的72 h,就可进行下一遍的块石墩施工.

图4给出第2遍强夯置换块石墩施工过程中,在块石墩A(参见图1)周围土层的不同水平距离及不同的深度处孔隙水压力的演化过程.这表明,在第2遍强夯置换施工过程中,地层中仍然会激发出较高的孔隙水压力.然而,孔隙水压力的消散也很快,一般在24 h内即可消散到95%以上.

图4中还给出在第2遍强夯置换施工完成后,由于满夯施工(此时,夯击能量为1 500 kN·m)所引起的孔隙水压力的发展和消散过程.可见,满夯施工所引起的孔隙水压力主要局限在地表下深度为4 m的浅层范围内,孔隙水压力一般小于20 kPa,而且消散也很快.



(a)距强夯点中心 1.75m



(b)距强夯点中心 2.47m

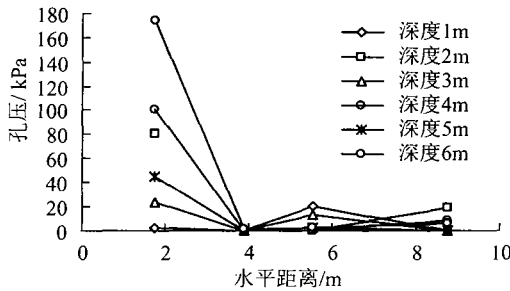
图4 孔隙水压力分布特征(第2遍)

Fig.4 Pore pressure distribution (the second pass)

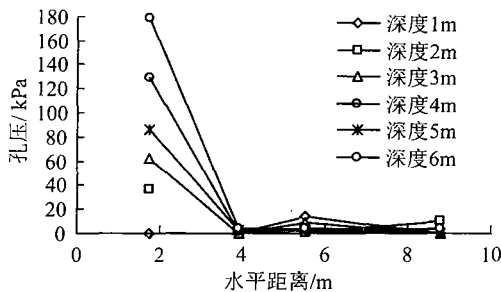
2) 孔隙水压力的影响范围.

图5给出强夯块石墩施工时,在第1次填料并进行连续夯击作用后及第3次填料并进行连续夯击后,夯点周围土层不同深度处的孔隙水压力沿着水平距离的分布规律.

由图 5 可见,在离开强夯置换块石墩施工点水平距离小于 4 m 的范围内,其孔隙水压力增长非常显著,但随水平距离的增大,孔隙水压力就显著减小.例如,在离开块石墩较远处(如 4 m 处),孔隙水压力迅速降为零.这表明,强夯动力荷载作用下,水平方向的影响范围并不大(小于无置换条件下强夯荷载作用下的影响范围).实际上,这主要与所使用的夯锤的直径有关(强夯置换一般采用较大直径的夯锤,如本次试验直径为 1.2 m).此时,强夯荷载作用力主要影响地层的深度方向.另一方面,由图 5 (a)可以看出,在地层的较深处(如深度 6 m 处)的孔压反而比浅层的孔隙水压力大,也反映了强夯置换主要在深度方向产生影响.例如,在地表下深度 6 m 处的孔隙水压力可以达到 175 kPa,该值比一般强夯施工影响深度大得多.



(a)第 1 次填料并连续夯击



(b)第 3 次填料并连续夯击

图 5 不同深度处孔隙水压力的分布特征

Fig. 5 Pore pressure distributions with various deep layers

3.2 水平位移变化

强夯试验表明,在靠近地表的一定深度范围内(例如 3 m 深度范围内),块石墩形成过程对周围的地层有较大的侧向挤压作用,在水平方向其位移甚至可以达到 47 mm.但所形成的块石墩比较完整,且墩体底部也能达到较大的深度.总体上看,侧向水平位移随着填料的连续进行而有增大的趋势.同时,由于夯击作用次数较多,使得夯锤有一定偏移,也使得土体在水平方向呈现反复挤压的过程,对施工产生一些不利影响.

4 现场荷载板试验

现场荷载板试验的荷载板尺寸为 1 m×1 m,面积为 1 m².对复合地基墩体之间的土体进行测试,试验结果反映了块石墩体间土体的地基承载力.

本次试验根据预估的地基承载力特征值,设定每级施加的荷载增量为 60 kPa,且施加的最大荷载为 480 kPa.由图 6 可以看出,在施加荷载范围内,荷载-沉降关系曲线并未出现明显的转折点,而是呈沉降速率逐渐增大的连续变化过程.按照“建筑地基基础设计规范(GB 50007—2002)”的规定,可按一定量的地基沉降值(如取沉降值 $s = 0.012b$, $b = 1$ m 为承压板边长)所对应的荷载作为地基承载力特征值.由此,现场试验所确定的地基承载力特征值可达 240 kPa.

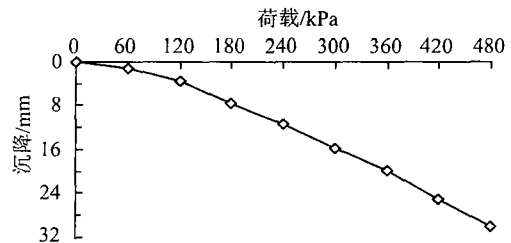


图 6 现场荷载板试验结果

Fig. 6 Field test results obtained by loading plate

5 小结

1)利用“强夯块石墩法”处理软弱土地基所采用的参数为:排与排之间错落布置,强夯置换点之间的间距为 7 m;对于第 1 遍和第 2 遍强夯作用,夯锤直径取 1.2 m,单点夯击能量为 3 000 kN·m;对于后面的满夯作用,夯锤直径为 2.5 m,单点夯击能量为 1 500 kN·m.根据现场荷载板试验结果,经过处理后的地基其墩体之间土体的承载力特征值可以达到 240 kPa,加固效果好.

2)现场试验表明,在第 1 遍和第 2 遍强夯荷载作用后,土层内会产生明显的孔隙水压力.但孔隙水压力消散很快,24 h 内即可消散 95% 以上.为保证扰动土层结构的恢复,在第 1 遍和第 2 遍置换施工完成后 72 h,即可进行后面的置换施工.

3)在距离强夯块石墩施工点的水平距离 4 m 范围内,孔隙水压力增长较为显著,但孔隙水压力随着水平距离的增大而迅速减小,即强夯置换施工对水平方向的影响较小.

4)当采用较小的满夯夯击能量后(如 1 500 kN·m),强夯荷载所引起的孔隙水压力增长一般局

限在地下深度 4 m 的浅层范围内,其值小于 20 kPa,且消散也比较快。

参考文献(References):

- [1] 吴道祥,刘刚,王国强. 强夯与强夯置换碎石桩复合地基承载力的试验研究[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2008, 31(4): 622 - 630.
WU Daoxiang, LIU Gang, WANG Guoqiang. Field test research on the bearing capacity of dynamic consolidation ground and compound foundation consolidated dynamically and soil-replaced by gravel piles[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2008, 31(4): 622 - 630. (in Chinese)
- [2] López-Querol S, Fernández-Merodo J A, Mira P, et al. Numerical modeling of dynamic consolidation on granular soils [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2008, 32(12): 1431 - 1457.
- [3] 刘惠珊,饶志华. 强夯置换的设计方法与参数[J]. 地基基础工程, 1996, 6(2): 6 - 13.
LIU Huishan, RAO Zhihua. Design and parameters on dynamic replacement method[J]. Ground and Foundation Engineering, 1996, 6(2): 6 - 13. (in Chinese)
- [4] Perucho A, Olalla C. Dynamic consolidation of a saturated plastic clayey fill [J]. Ground Improvement, 2006, 10(2): 55 - 68.
- [5] Chen Z, Steeb H, Diebels S. A time-discontinuous Galerkin method for the dynamic analysis of porous media [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006, 30(11): 1113 - 1134.
- [6] López-Querol S, Blázquez R. Liquefaction and cyclic mobility model for saturated granular media[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006, 30(5): 413 - 439.
- [7] 王保田,唐劲柏. 强夯碎石桩的发展及成桩机理分析[J]. 河海大学学报, 1999, 27(6): 30 - 34.
WANG Baotian, TANG Jinbai. Development of DRM and analysis of column-formation mechanism [J]. Journal of Hehai University, 2002, 27(6): 30 - 34. (in Chinese)
- [8] 罗嗣海,潘小青,黄松华. 置换深度估算的一维波动方程法[J]. 地球科学, 2002, 27(1): 115 - 119.
LUO Sihai, PAN Xiaoqing, HUANG Songhua. One-dimensional wave equation model for estimating replacement depth of dynamic replacement[J]. Earth Science, 2002, 27(1): 115 - 119. (in Chinese)
- [9] 曾庆军,李茂英,李大勇. 强夯置换深度的估算[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 608 - 611.
ZENG Qingjun, LI Maoying, LI Dayong. Estimation of the displacement depth in dynamic replacement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 608 - 611. (in Chinese)
- [10] 秦宝和. 强夯及强夯置换技术在客运专线复合地基处理中的应用[J]. 铁道工程学报, 2007(7): 33 - 37, 66.
QIN Baohe. Application of strong tamping and its replacement technology in reinforcing composite subgrade of railway passenger dedicated line [J]. Journal of railway Engineering Society, 2007(7): 33 - 37, 66. (in Chinese)