

文章编号: 1001-1986(2010)01-0045-05

天津滨海吹填土结构强度增长机理

成玉祥^{1,2}, 杜东菊³, 张 骏^{1,2}

(1. 长安大学, 陕西 西安 710054; 2. 西部地质资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 天津城市建设学院, 天津 300384)

摘要: 为了研究影响天津滨海吹填土结构强度增长的因素, 分析了等效荷载、有效应力增量、孔隙比和含水量与结构强度之间的关系, 得出随着等效荷载和有效应力增量的增大, 吹填土的结构强度呈增高的趋势。含水量和孔隙比越大, 吹填土的结构强度越低。研究认为, 吹填土结构强度的形成与吹填土的排水固结密切相关。吹填土在真空预压条件下, 排水固结过程分为早期空气排出、真空渗流场作用下的渗透固结和真空条件下的水分气化排出 3 个阶段。

关键词: 吹填土; 真空预压; 结构强度; 增长机理

中图分类号: TU411 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.01.011

Research on the structural strength growth mechanism of seashore hydraulic fill in Tianjin area

CHENG Yuxiang^{1,2}, DU Dongju³, ZHANG Jun^{1,2}

(1. Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China)

Abstract: The relationships among equivalent load, effective stress increment, water content, pore ratio and structure strength were studied to probe the factors influencing the structure strength growth, the result shows that with increasement of effective stress increment and equivalent load, structure strength of hydraulic fill tends to increase. The bigger the water content and the pore ratio are, the lower the structure strength of hydraulic fill is. It is considered that the formation of structure strength of hydraulic fill is closely related to its drainage concretion. The drainage concretion process of hydraulic fill includes forepart air discharge, penetrating concretion in vacuum seepage field and water gasification discharge under the vacuum condition.

Key words: hydraulic fills; vacuum preloading; structural strength; growth mechanism

吹填土是通过水力吹填而成的一种特殊的人造土。天津滨海地区的吹填土主要吹填物料为浅海淤泥, 其粘粒成分达到 47.6%, 使得天津滨海新区吹填土吹填后的泌水、落淤时间十分缓慢。经过落淤形成的吹填土, 在进行处理之前, 其含水量高, 压缩性强, 强度极低, 因此必须通过人工方法对其进行处理, 减小其含水量, 以提高强度。通过处理后吹填土的压缩试验、剪切试验和灵敏度试验研究表明, 经过处理后形成的吹填土具有强结构性^[1-3]。

对于天津滨海地区粘粒含量很高的吹填土, 在沉积固结过程中土颗粒之间可以形成接触连接、吸附水膜连接、胶结连接和链条连接等多种连接。有些连接在土体受到扰动后一定时间是可以恢复的, 如接触连接和吸附水膜连接。而后几种是属于结构破

坏后不能恢复的固化连接, 宏观上表现为结构强度, 它可定义为原状土(保持天然结构)的连结强度和扰动土(天然结构已破坏)的连结强度的差值^[4]。结构强度的增长除了受吹填土本身物质组成的控制外, 还与吹填土沉积固结环境, 如固结荷载和固结时间等因素有关。

1 吹填土结构强度的影响因素分析

由于天津滨海新区吹填土的粘土矿物成分变化不是很大, 本文主要模拟沉积环境对吹填土结构强度的影响。试验模型深度为 1.2 m, 取样和测试深度分别为 0.1 m、0.4 m、0.8 m。通过十字板剪切试验对真空—堆载预压处理后的吹填土强度进行测试。将十字板抗剪强度作为吹填土结构未破坏时的强度, 将

收稿日期: 2009-08-05

基金项目: 天津市社会发展重点资助项目(04311381); 天津市科技发展计划项目(06YFSZSF04000)

作者简介: 成玉祥(1978—), 男, 甘肃灵台人, 博士, 主要从事地质工程方面的教学与科研工作。

残余强度作为吹填土结构破坏后的强度，二者之差作为不同影响因素作用下吹填土的结构强度。另外，对影响吹填土结构强度增长的等效荷载、有效应力增量、孔隙比和含水量等因素进行测试分析，其中等效荷载为堆载荷载、抽真空所形成的等效荷载以及取样点以上土层自重所形成的荷载 3 者之和^[5]。有效应力增量包括抽真空产生的有效应力增量和堆载产生的有效应力增量^[6]。表 1 统计了不同影响因素作用下吹填土的十字板剪切强度和结构强度。

表 1 不同影响因素作用下吹填土的强度和结构强度
Table 1 The stress strength and structure stress of hydraulic fill under different effect

编号	等效荷载 /kPa	有效应力增量 /kPa	孔隙比	含水量 /%	抗剪强度 /kPa	结构强度 /kPa
1-1	75.74	76.8	0.712	24.65	32.77	26.01
1-2	62.66	55.2	0.796	26.12	10.30	6.69
1-3	60.83	26.4	0.783	27.82	8.38	5.73
2-1	80.7	81.8	0.728	25.85	43.92	32.88
2-2	67.73	60.2	0.764	26.45	15.54	11.27
2-3	65.87	31.4	0.784	27.24	5.77	2.30
3-1	85.72	86.8	0.730	24.63	31.00	19.50
3-2	72.72	65.2	0.768	26.10	8.60	3.80
3-3	70.7	36.4	0.837	28.33	4.65	0.15
4-1	90.74	91.8	0.707	24.27	42.73	31.93
4-2	77.8	70.2	0.749	26.03	15.13	9.78
4-3	75.81	41.4	0.839	29.11	7.35	2.05

1.1 等效荷载与结构强度的关系

有效应力的增大，其根源是土体受到了荷载的作用而产生了附加应力。而在真空-堆载联合预压过程中，产生附加应力的荷载主要来源于抽真空产生的压力、堆载产生的压力和土体本身的重力在土体中形成的压力。图 1 和图 2 分别为等效荷载与吹填土抗剪强度和结构强度的关系曲线。

从图 1 和图 2 中可以看出，等效固结荷载越大，吹填土固结过程中产生的抗剪强度和结构强度也越大。另外，等效固结荷载小于 85.72 kPa 时，吹填土的强度和结构强度增长幅度不大；等效固结荷载大于 85.72 kPa 时，吹填土的强度和结构强度迅速提

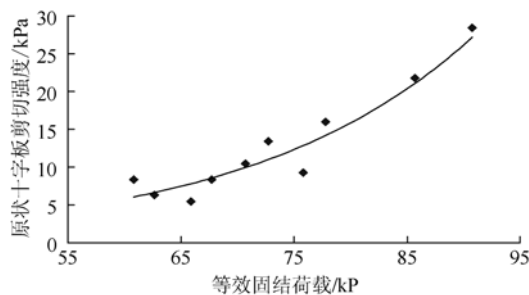


图 1 等效固结荷载与抗剪强度关系曲线

Fig. 1 The relationship curve of equivalent load to stress

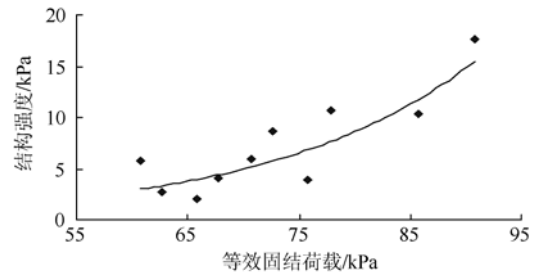


图 2 等效固结荷载与结构强度关系曲线

Fig. 2 The relationship curve of equivalent load to structure strength

高。其原因是土体的固结主要受有效应力的大小所决定。而有效应力的大小直接是由固结荷载所产生的超孔隙水压力的变化所决定。不同大小的固结荷载，不同形式的加载方式，吹填土的固结状态都是不同的。等效固结荷载越大，所产生的有效应力增量也越大，土体的固结程度就越高，因此吹填土的抗剪强度和结构强度也就越高。

1.2 有效应力增量与结构强度的关系

从有效应力原理可知，土体强度的增长、压缩量的发生，都是以有效应力的变化为前提的，只有土体的有效应力发生了变化，土体的变形才会发生，强度才会有变化。所以吹填土的强度与结构强度都与土体内有效应力的变化密切相关。图 3 和图 4 分别为不同有效应力增量条件下吹填土抗剪强度和结构强度的关系曲线。

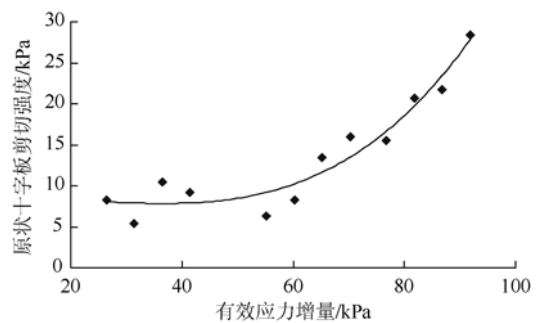


图 3 有效应力增量与抗剪强度关系曲线

Fig. 3 The relationship curve of effective stress increment to stress strength

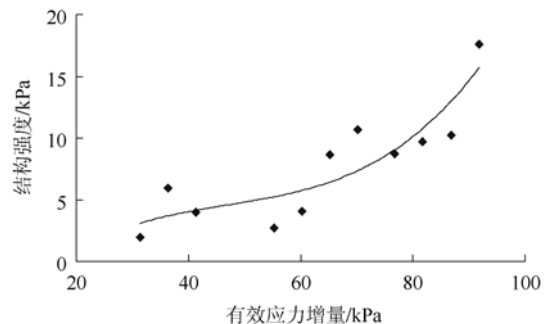


图 4 有效应力增量与结构强度关系曲线

Fig. 4 The relationship curve of effective stress increment to structure strength

从图 3 和图 4 可以看出, 随着有效应力增量的增大, 吹填土的抗剪强度和结构强度都呈增大的趋势。而且有效应力增量小于 76.8 kPa 时, 吹填土的强度和结构强度增长幅度不大, 有效应力增量大于 76.8 kPa 时, 吹填土的强度和结构强度迅速提高。其原因在于, 有效应力的增大是伴随着土体中超孔隙水压力的变化而发展的。有效应力的增量数值越大, 在吹填土固结过程中超孔隙水压力的变化量也越大。在有效应力的作用下, 土颗粒或团粒相互之间产生位移, 土体结构更加紧密, 所以吹填土的抗剪强度也就越大。

同时, 由于颗粒或团粒之间随着土体结构的形成, 它们之间的连接关系也越来越紧密。在它们的接触点或接触面上, 逐渐的产生了胶结作用。这种胶结作用的强弱除了与胶结类型有关外, 还与接触面面积和颗粒或团粒之间水膜的厚度有关。有效应力增量越大, 接触面面积越大, 颗粒或团粒之间水膜的厚度越小。而胶结类型、接触面面积和颗粒或团粒之间水膜的厚度都是土体结构强度的主要影响因素。所以, 随着有效应力增量的增大, 吹填土结构强度也呈增大的趋势。

1.3 含水量与结构强度关系

天津滨海地区吹填土中粘粒含量较高, 而粘土矿物具有较好的亲水性, 因此吹填土中的含水量对其强度有很大的影响。图 5 和图 6 分别为含水量与吹填土抗剪强度和结构强度的关系曲线。

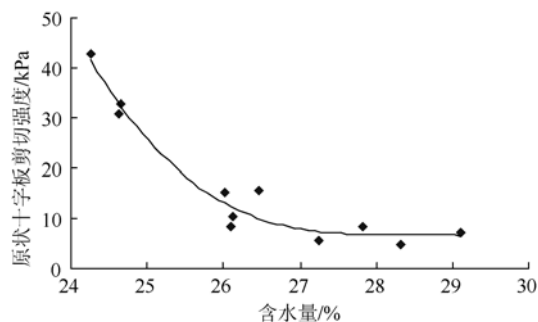


图 5 含水量与抗剪强度关系曲线

Fig.5 The relationship curve of water content to stress strength

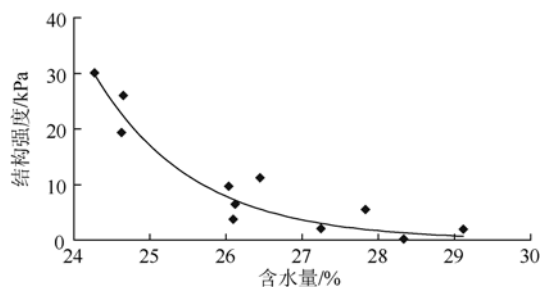


图 6 含水量与结构强度关系曲线

Fig. 6 The relationship curve of water content to structure strength

从图中可以看出, 随着含水量的增大, 吹填土的抗剪强度和结构强度都呈减小的趋势。含水量大于 26% 时, 吹填土的强度和结构强度都较低; 含水量小于 26% 时, 吹填土的强度和结构强度增大 1~2 倍。这主要是因为吹填土含水量很高时, 土粒间主要由自由水隔开, 含大量的自由水, 土呈泥浆状, 此时土处于流动状态。土颗粒(团粒)之间的接触很少, 相互之间的胶结作用相当微弱, 在宏观上体现为抗剪强度低, 结构强度低或还没有形成结构强度。当土中含水量减少到一定程度, 变成可塑的泥膏, 不能流动, 此时粘性土中的多数土粒由弱结合水隔开, 土中含大量弱结合水和部分自由水, 土粒在外力作用下可以滑动, 土处于可塑状态, 这时土颗粒(团粒)相互之间的胶结作用逐渐增强, 土体的强度逐渐增强, 并产生了一定的结构强度。处于可塑状态的土如进一步减少含水量, 土中含强结合水及部分弱结合水, 即弱结合水膜变薄, 粘滞性增大, 土就由可塑状态转化为半固体状态, 这时土的形状不变, 但体积因含水量的减少而减小。当土中含水量再进一步减小, 土中主要含强结合水时, 土由半固体状态变成了固体状态, 其体积和形态都保持不变。这时土体的抗剪强度较高, 而由土颗粒之间的胶结作用所形成的结构强度也较高。

1.4 孔隙比与结构强度的关系

土的孔隙比为土中孔隙体积与固体颗粒体积之比, 它反映了土的松密程度。无论对粘性土还是非粘性土, 孔隙比越小, 说明土颗粒之间的距离越近, 土颗粒之间的接触部分越多, 土体的强度就越高。图 7 和图 8 分别为孔隙比与吹填土抗剪强度和结构强度的关系曲线。

从图 7 可以看出, 随着孔隙比的增大, 土体的抗剪强度呈减小的趋势, 这与上述分析结果完全吻合。从图 8 可以看出, 随着孔隙比的增大, 土体的结构强度也呈减小的趋势。这主要是由于随着土体固结, 孔隙比的减小, 土颗粒之间的自由水和弱结

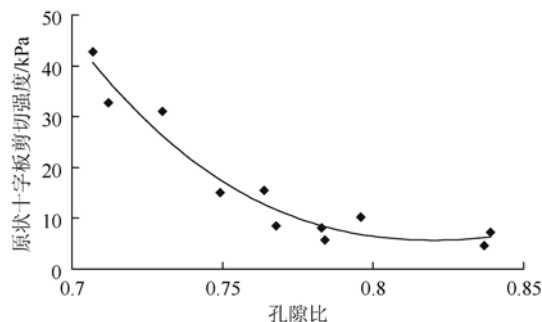


图 7 孔隙比与抗剪强度关系曲线

Fig. 7 The relationship curve of pore ratio to stress strength

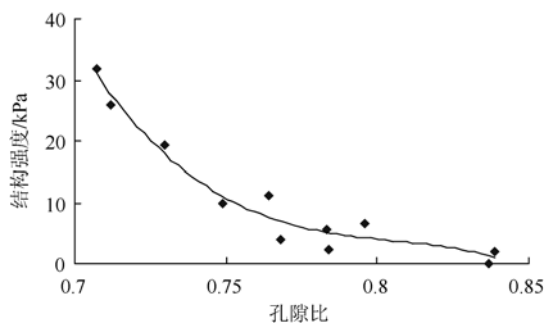


图 8 孔隙比与结构强度关系曲线

Fig. 8 The relationship curve of pore ratio to structure strength

合水逐渐被排出。在真空-堆载预压联合作用下,土颗粒发生移动重新排列,使得它们互相之间的接触面积逐渐增大,部分颗粒互相咬合,部分颗粒之间逐渐产生一定的胶结作用,进而形成具有一定结构的土体,所以土体的抗剪强度和结构强度都随着孔隙比的减小而逐渐增大。

2 吹填土结构强度增长机理

吹填泥浆经过早期的泌水过程,已经由呈液态的泥浆转变为半固态的吹填土。但是,此时的吹填土的强度极低,由于土颗粒(团粒)的连接还很弱,所以土体的结构强度也很弱。

吹填土结构强度的形成主要源于两方面的原因,一方面由于自由水、弱结合水的排出,土颗粒之间接触和连接逐渐加强,同时在接触面上还产生了一定的胶结作用;另一方面,根据有效应力原理,在荷载的作用下,使得土中产生了超孔隙水压力,超孔隙水压力的变化,引起了土体的固结,这个过程中,土体的胶结连接和链条连接都有了很大的提高,土体强度增大的同时,土体的结构强度也逐步提高。

在真空-堆载联合预压条件下,吹填土结构强度增长可以分为以下几个阶段:

a. 早期空气排出阶段

真空-堆载联合预压初期,由于土体本身是三相体,尤其对于非饱和土,土中的气体存在是必然的。在压力差的驱动下,首先,与表层排水层互相联通的气体被排出,土体同时发生固结变形,孔隙水受真空度的作用逐渐占据排出气体后的空间。其次,随着真空预压的发展,土体中的封闭气泡也被抽出。所以,在空气排出阶段,土体产生了一定的固结作用,但这种固结过程对土体强度和结构强度的贡献并不大,主要原因是土体的含水量仍很高,土颗粒(团粒)被自由水包围。其主要结果使得土体转变为固液两相体,孔隙水充填了所有孔隙。

b. 真空渗流场作用下的渗透固结阶段

随着真空预压作用,膜下真空度也上升到设计

要求,随着时间的推移,土体中的自由水在孔压差的作用下被排出,土体产生固结。随着自由水的排出,土颗粒(团粒)之间的距离快速缩短,并产生接触,土体的强度也迅速提高。同时,土体的结构逐渐形成,但是,形成的新结构并不是很稳固,在外力的作用下比较容易发生破坏。这主要是因为土颗粒(团粒)之间大部分仍然被弱结合水和强结合水充填。

由于只在垫层中抽真空,所产生的负压除在软土层顶部土层中产生直接影响外,还将沿竖向排水通道向深部传递。所有竖向排水通道相当于无数动态发展的抽水位置只在井口的“抽水井”。由于软土的超低渗透性、隔水性,井底可认为一直处于“含水层”的底部,即均为“完整井”。随着抽真空时间的延长,“完整井”不断向深处发展,形成“动态完整井”。所有“动态完整井”形成一个庞大的干扰井群,并在整个“真空预压区”形成无数以单个“动态完整井”为中心的、底部向下凸的降落漏斗,与通常抽取地下水所形成的降落漏斗不同,如图 9 所示。所有降落漏斗即构成了“真空渗流场”。

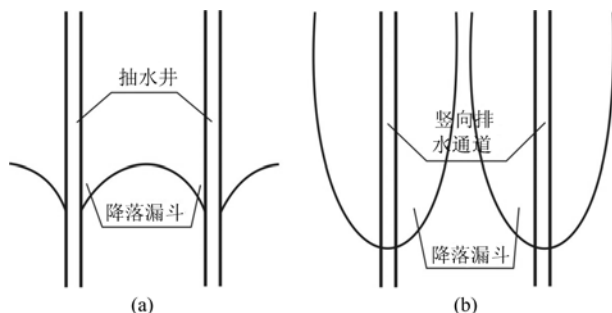


图 9 抽水井的降落漏斗与真空渗流场中降落漏斗对比图

Fig.9 Contrast diagram of pumped-funnels formed by normal pumping water and in vacuum seepage field
a——抽水井产生的降落漏斗; b——真空渗流场中的降落漏斗

水在土体中的渗透是水流在渗透力作用下的一种运动形式。水流能量的损失包括水分子相互之间的摩擦阻力与土骨架之间的摩擦阻力 2 个部分。在渗透流速很小的土中,因其本身的摩擦阻力很小,能量主要损失于水与土骨架的相互作用中,即使土颗粒做功,并产生位移,从而导致土体的压缩密实,称为渗透固结。

在真空渗流场中,可认为“水泵”的作用位置遍布整个“完整井”,且抽水吸力随深度的加深而减弱。因此,真空渗流场中的气水渗透力的方向是斜向上,并指向各中心的“动态完整井”,这与降水预压过程中气水渗透力的方向不同,后者方向是斜向下。这说明在气水渗透力的作用下,土颗粒的运动方向是斜向上,下一个土颗粒的运动方向与上一个土颗粒

的下沉方向相对,这将有助于加快土颗粒之间距离的缩短、有效应力的增加,从而使土体压密固结速度提高。

若密封膜的标高保持不变,则抽真空影响深度位置将产生一个分隔带,即此分隔带以上土体被真空负压向上吸起,然而实际上密封膜的标高不能保持不变,被吸向上的土颗粒仍将在其上整个土柱体的重力作用下产生向下压密固结效果,且其直接有效作用区域只是所有“动态完整井”所形成的降落漏斗。因此,真空渗流场作用下的渗透固结,使得吹填土颗粒之间的连接关系越来越紧密,宏观上表现为吹填土结构强度的增长^[7-10]。根据压力平衡,真空渗流场作用下的渗透固结作用可以排除地表以下10 m深度范围内的水分。

c. 真空条件下的水分气化排出阶段

随着自由水的排出,吹填土逐步产生固结。当土体中自由水完全排出后,由于真空作用,部分弱结合水和强结合水会产生气化,使得包围土颗粒的水膜厚度进一步减薄,土颗粒(团粒)之间的接触连接、胶结连接和链条连接更加突出,土体的强度也进一步提高,土体的结构强度增长速度很快。由于水分气化作用,深部的水分也可以通过塑料排水板,以水蒸气或水气混合物的形式排除到地表。

但是由于水分气化速度与温度和真空度有关,在常温条件下,真空作用下的水分气化排出阶段所用时间在整个真空预压过程中所占比重较大,这也是真空预压法处理吹填土成本较高的原因之一。

3 结 论

a. 通过真空预压可以提高天津滨海吹填土的强度,强度的提高过程也是结构强度的形成过程。

b. 吹填土结构强度的形成与吹填土的固结过程有关。等效荷载所产生的有效应力增量越大,吹填土固结过程中形成的结构强度越高。

c. 吹填土结构强度的大小与吹填土的固结程

度有关,宏观上表现为含水量和孔隙比越大,结构强度越低。

d. 真空预压条件下吹填土结构强度的形成过程本质上仍是土的固结过程,但与重力场下土的固结截然不同。真空预压条件下吹填土的排水固结过程可分为早期空气排出、真空渗流场作用下的渗透固结和真空条件下的水分气化排出3个阶段。

e. 在实际的真空预压过程中,上述3个阶段的界限往往是模糊的,早期空气排出往往已经产生了渗透固结作用,而真空渗流场作用下的渗透固结与气化作用同时产生。

f. 真空预压条件下吹填土的排水固结过程3个阶段的划分,很好的解释了真空预压的有效深度超过10 m,可以到达塑料排水板的底部这一现象。

参考文献

- [1] 李忠良. 天津滨海新区吹填土微观结构与工程特性研究[D]. 西安:长安大学,2005.
- [2] 成玉祥,杜东菊,李忠良. 结构性吹填土压缩变形微观机理试验[J]. 煤田地质与勘探,2008,36(4):46-53.
- [3] 成玉祥,杜东菊,李忠良. 结构性吹填土剪切破坏的微结构效应[J]. 水文地质工程地质,2008,35(1):32-48.
- [4] 刘莹,肖树芳,王清. 吹填土沉积固化后结构强度增长的机理分析[J]. 同济大学学报,2003,31(11):1295-1298.
- [5] 刘兵,蔡南树. 真空预压沉降计算的等效堆载法[J]. 西部探矿工程. 2005,17(8):24-26.
- [6] 成玉祥. 滨海吹填土结构强度形成机理与真空预压法关键技术研究[D]. 西安:长安大学,2008.
- [7] 李青松,吴爱祥,姚振玢,等. 真空渗流场的形成机理探讨[J]. 矿业研究与开发,2004,24(6):16-29.
- [8] 李青松,吴爱祥,黄继先,等. 真空渗流场作用下的渗透固结[J]. 中南大学学报(自然科学版),2005,36(4):689-693.
- [9] 王曰国,王星华. 真空预压加固地基机理及其渗流分析[J]. 西部探矿工程,2006,18(12):35-38.
- [10] 龚晓南,岑仰润. 真空预压加固软土地基机理探讨[J]. 哈尔滨建筑大学学报,2004,35(2):7-10.