

高含水率条件下水泥土强度影响因素

项彦茂, 叶子健

(广东省长大公路工程有限公司, 广东 广州 511431)

摘要:对高含水率条件下影响水泥土强度的因素进行了无侧限抗压强度试验,并利用灰色关联度法分析了各影响因素的敏感度,研究表明:在高含水率情况下水泥掺入比与土体含水率对水泥土强度的影响最为显著;增加水泥掺入比,可以有效地提高水泥土的抗压强度,因此在实际工程中若遇到高含水率的情况时,应在可能的范围内使用较高的水泥掺入比,以提高粉喷桩的成桩质量。

关键词:水泥土;强度变化;敏感度;高含水率

中图分类号:TU411.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)S2-0010-04

利用水泥搅拌桩加固软弱路基是高速公路中最常用的一种处理方法,其基本原理是通过水泥的水解和水化反应、水泥水化物与土颗粒之间的离子交换和团粒化作用、凝硬作用、碳酸化作用等一系列化学反应形成具有整体性、水稳定性和一定强度的水泥土桩体^[1-3]。加固处理的最终效果与处理后形成的桩体质量密切相关,但由于实际工程中土体的性质十分复杂,不同的水泥掺入比、不同的龄期都有可能对水泥土的物理力学性质造成很大的影响。另一方面,从水泥搅拌桩的应用情况看,当路基土体含水率在30%~60%时,成桩和处理效果相对较好;而当路基土体含水率超过60%时,成桩和处理效果较差。在实际工程中,特别是在江、河、湖、海临近或周边地区进行路基施工时,其软土的含水率常常远高于60%,甚至有的可以达到90%~100%^[4-5]。本文拟在高含水率条件下,对影响水泥土强度增长的因素进行基础性试验研究,并利用灰色关联度分析方法,对各影响因素的敏感度进行分析。该研究不仅有利于掌握高含水率条件下各因素对水泥搅拌桩成桩质量的影响,而且对施工工艺的改善和施工质量的提高等均有明显的指导意义。

1 水泥土强度试验

1.1 试验方案

试验采用的原状土取自广东省佛山市某高速公路路基,土样的主要物理力学特性指标如表1所示。

试验采用32.5P·O普通硅酸盐水泥,其主要技术指标如表2所示。目前水泥土的物理力学特性室内试验还没有形成统一的操作规程,本文以水泥土试块密度为控制指标,在试模中人工分层捣实,试件尺寸为70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm。试件在标准条件下养护。通过进行室内试验,分析水泥土在不同含水率、不同水泥掺入比、不同龄期等情况下,其强度与变形的相互关系,总结其强度随含水率、水泥掺入比和龄期变化的规律。

表1 土样的物理力学特性指标

天然密度/ (g·cm ⁻³)	天然 含水 率/%	初始 孔隙比	液限/ %	塑限/ %	无侧限抗 压强度/ kPa	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/ (°)
1.54	51.3	1.34	63.5	38.6	44.1	17.5	13.4

表2 水泥的主要技术指标

凝结时间/h		胶砂抗折强度/MPa				胶砂抗压强度/MPa			安定性
初凝	终凝	3 d	7 d	28 d		3 d	7 d	28 d	
2	3.5	4.17	5.32	6.42	22.4	29.9	38.76		合格

将试验土样烘干后过2 mm筛,分别加水配置成含水率 w 为60%、70%、80%、85%与90%的土样,并拌和均匀,静置24 h后进行水泥掺入比 α_w (水泥质量与土质量的比值)为14%、18%、21%、25%、30%、龄期 T 为3 d、7 d、14 d、28 d的配合比试验,配合比试验的水泥土密度(均值)如表3所示。将试样放置于温度为(20±3)℃的环境下进行养护,待试样养护到规定龄期后,对试样进行无侧限抗压强度

基金项目:广东省交通运输厅科技项目(科技-2012-02-013);广东省交通运输厅科技项目(科技-2013-02-003)
作者简介:项彦茂(1984—),男,湖南桃江人,高级工程师,主要从事路基工程研究。E-mail:feixiangcat@163.com

试验,将应力-应变曲线记录下来,同时检测试样的相关物理力学特性(含水率、孔隙比等)。试验时,取3个平行试样测值的算术平均值作为该小组试样的指标值。当试样测值与平均值之差超过均值的±15%时,该试验数据视为不合格应将其剔除,数据标准值按剩余试样测值进行试验;当试验组试样个数不足两个时,该组试样须重新制作。水泥土无侧限抗压强度计算公式为

q_u = \frac{P}{A_u} = \frac{P}{A_0 / (1 - \epsilon)} \tag{1}

式中:q_u 为试验龄期的水泥土无侧限抗压强度,MPa;P 为破坏荷载,N;A_u 为试样校正后的面积,mm²;A_0 为试样面积,mm²;ε 为轴向应变。

表 3 水泥土密度汇总

w/%	水泥土密度/(g·cm ⁻³)				
	α _w = 14%	α _w = 18%	α _w = 21%	α _w = 25%	α _w = 30%
60	1.731	1.751	1.768	1.811	1.828
70	1.678	1.703	1.719	1.738	1.774
80	1.626	1.647	1.659	1.671	1.695
85	1.609	1.628	1.649	1.666	1.684
90	1.584	1.607	1.629	1.648	1.671

1.2 应力-应变关系

为了掌握高含水率条件下,水泥土的应力-应变关系,本文进行了20余组试验,图1为水泥土不同龄期的应力-应变关系曲线。通过对试验数据的分析可知:在掺入比相同的情况下,水泥土强度随着龄期的增长而增大,由图1看出,在强度形成的前期即龄期为3d左右时,变形随强度的上升而不断增大,这个阶段的破坏形式基本上属于塑性破坏。随着龄期的增长,水泥的硬化反应逐渐趋于完成,水泥土开始变得坚硬,破坏时强度增长迅速而变形则很小,这时属于脆性破坏。伴随着土体含水率的增大,水泥土显示出向塑性变形发展的趋势,出现这种现象的原因是由于软土自身强度很小,而固化土的强度主要由水泥水化产物提供。当含水率较小时,水泥水化产物在单位体积固化土中的量就相对多,表现出

强度较大、塑性较小的特点。而当含水率较大时,在单位体积的固化土中水泥水化产物的量就少,表现出强度小而变形大的塑性变形特征。在掺入比偏小时,水泥土的强度并未得到明显的提升。

2 影响因素分析

通过水泥土室内强度试验,可以掌握在高含水率情况下,水泥土强度随着各影响因素的变化规律;通过对水泥土强度变化情况的分析,可以掌握各种因素对水泥土强度的影响情况,进而为在高含水率条件下提高水泥搅拌桩质量提供依据。本文将影响水泥土强度的因素分为以下3个方面^[6]:①不可控因素:土体性质;②可控因素:土体含水率、水泥掺入比、龄期;③环境因素:外掺剂、水泥品种、试验过程中非人为的各种不确定因素。为了使试验更具针对性,选取了现场典型土层的土样,这样就可以更具代表性地与现场情况进行对比分析。通过试验数据总结水泥土的强度增长规律,分析含水率、水泥掺入比以及龄期等因素与强度之间的关系。

2.1 含水率对强度的影响

图2为T=14d时水泥土无侧限抗压强度与含水率的关系曲线,可以看出,随着含水率的逐步增大(特别在含水率大于70%后),水泥土的强度出现较大的下降。当含水率超过70%以后,在水泥掺入比较小时,与原土样相比水泥土的强度并没有很大的提高;在水泥掺入比较大时,水泥土强度随含水率增大而降低的速率也很大。从图2可以看出,在水泥掺入比相同时,水泥掺入量对强度的影响在低含水率时要比高含水率时明显许多。造成这种现象的主要原因是水泥土强度的形成是依靠水泥水化生成的水化产物的胶结和填充作用来完成的,在这个过程中水泥的水化离不开水分,但是水分并不是越多越好,当土体中的水分过多,超过水泥水化需要的水分时,一方面水的流动性会造成水泥有效成分的流失,另一方面多余出来的水分大大降低了水泥土的稳定

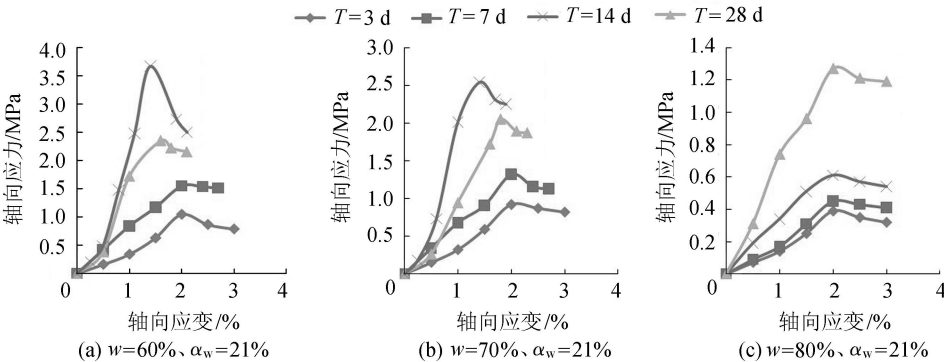


图 1 不同龄期的应力-应变关系曲线

性与均匀性,多余的水分越多,强度降低的也就越多。因此在实际工程中,若遇到高含水率的情况时,应适当增加水泥的掺入比例,或者采取其他的工程措施以降低土体中的含水率,对提高工程质量、降低成本具有重要意义。

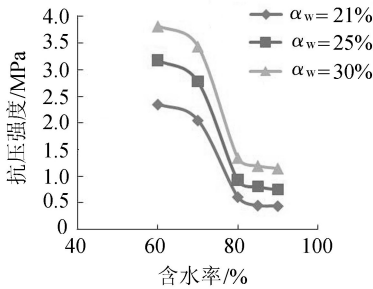


图2 抗压强度与含水率的关系曲线

图3为 $\alpha_w=21\%$ 、 $T=28\text{ d}$ 时水泥土不同含水率的应力-应变关系曲线。从图3可以看出,含水率越高,水泥土的塑性变形特性越明显,试样破坏后仍具有一定的残余强度。同时,含水率越高,曲线的初始斜率也越小,含水率为60%的变形模量要远高于含水率为80%的变形模量。

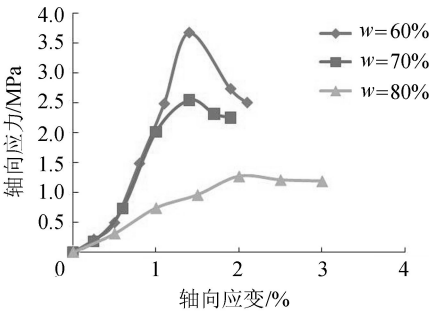


图3 不同含水率的应力-应变关系曲线

2.2 水泥掺入比对强度的影响

水泥掺入比与龄期都会对水泥土的强度产生很大影响,表4为 $w=70\%$ 时,不同龄期、不同水泥掺入比的水泥土无侧限抗压强度。

表4 不同龄期、不同水泥掺入比的水泥土无侧限抗压强度

$\alpha_w/\%$	抗压强度/MPa			
	3 d	7 d	14 d	28 d
14	0.53	0.71	0.94	1.12
18	0.71	0.99	1.43	1.88
21	0.92	1.32	2.05	2.54
25	1.18	1.76	2.78	3.45
30	1.43	2.27	3.44	4.28

图4为 $w=70\%$ 时水泥土无侧限抗压强度与水泥掺入比的关系曲线,可以看出随着水泥掺入比的增大,相同养护时间的水泥土的抗压强度不断增大,当水泥掺入比为18%~25%时,水泥土的强度增幅最大;继续增大水泥的掺入比,水泥土强度仍有增长,但增长幅度并不明显。当含水率大于60%时,

14%的常用水灰比对水泥土强度的提高作用已经非常有限,因此建议当含水率较大(大于60%)时,应适当提高水泥的掺入比,以保证软基处理的质量。

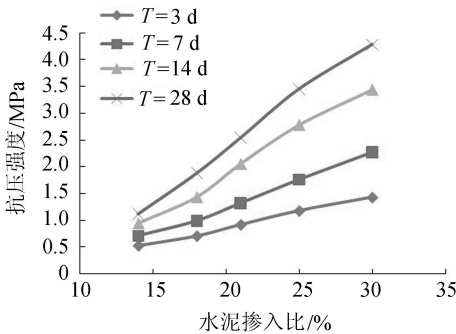


图4 抗压强度与水泥掺入比的关系曲线

图5为 $w=70\%$ 、 $T=28\text{ d}$ 时不同掺入比的应力-应变关系。可以看出,水泥掺入比对应力-应变关系曲线的形态有很大的影响。水泥掺入比越大,曲线初始阶段的斜率就越大,试样的抗压强度也有了较大的提升,试样破坏后强度的下降幅度也随之增大,试样逐渐由塑性破坏转向脆性破坏,与之相应的是试样的峰值应变逐渐减小,也说明了试样的塑性随着掺入比的增大而降低。

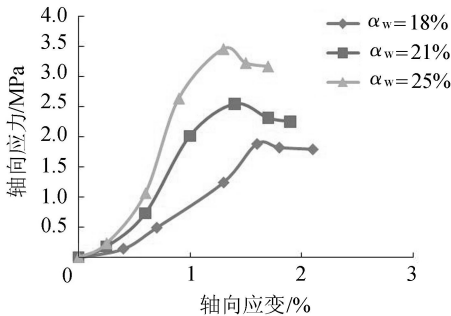


图5 不同水泥掺入比的应力-应变关系

2.3 龄期对强度的影响

图6(a)为 $w=70\%$ 时水泥土无侧限抗压强度与龄期的关系曲线。由图6(a)可以发现,随着龄期的增长,水泥土的无侧限抗压强度逐渐增大。水泥掺入比较小时,早期强度并没有很大提高,后期强度的增大也很有限;水泥掺入比越大,则需要较长时间才能使水泥与软土之间的反应完全。随着龄期的增长,强度逐渐增大到某一临界值时趋于稳定。由图6(a)可以看出水泥土的强度在前28 d内增大较快,其后强度仍持续增大,但需要较长的龄期才能形成。有研究表明,水泥土的强度在龄期达到120 d时就基本上趋于稳定。

图6(b)为 $\alpha_w=21\%$ 时水泥土无侧限抗压强度与龄期的关系曲线。由图6(b)可以看出,当含水率小于70%时,水泥土的强度增大出现前快后慢的特点;当含水率大于70%后,水泥土强度基本维持在

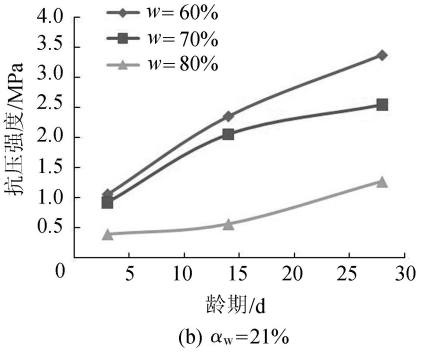
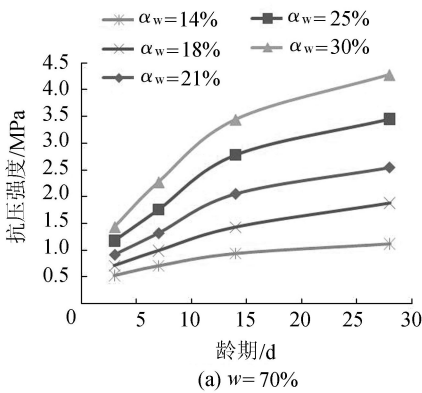


图6 抗压强度与龄期的关系曲线

一个较低的水平上。分析其原因,主要是在掺入比一定的情况下,即使水泥水化产物的量相同,当含水率较小时,试样孔隙率比较小,密实度较大,试样单位体积中含有的水化产物的量就大,水泥水化物逐渐替代水份占据孔隙,将土颗粒、砂颗粒胶结成紧密的整体,所以强度较高;反之,当含水率较大时,试样孔隙率较大,虽然水泥水化物填充一部分孔隙,但在水化反应基本完成后,土体含水率仍然较高,在水泥土单位体积中水泥水化产物的量相对较少,土体孔隙内仍含有大量的水分,使水化产物与土颗粒之间的胶结作用减弱,从而造成强度较小。但随着龄期的增长,土体内的水分逐渐消散,水泥水化产物与土颗粒间进一步发生反应,水泥土的强度仍会有一定的增大。

3 水泥土强度影响因素的敏感度分析

影响水泥土强度的因素很多,主要有土体含水率、水泥掺入比与龄期等相关因素,采用灰色关联度法对这几种因素进行敏感度分析。

3.1 灰色关联度法

目前实际应用的关联度模型有很多种,通过对比分析本文采用由邓聚龙教授提出的邓氏关联度^[7-8]来对水泥强度影响因素的敏感度加以分析。邓氏关联度的主要思路是对于两个需要计算关联度的参考序列 $X_0 = (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n})$ 与比较序列 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ 可以求得第 i 个被评价对象的第 k

个指标与第 k 个指标最优指标的关联系数,即

$$\xi_{ik} = \frac{\min_i \min_k |X_{0k} - X_{ik}| + \rho \max_i \max_k |X_{0k} - X_{ik}|}{|X_{0k} - X_{ik}| + \rho \max_i \max_k |X_{0k} - X_{ik}|} \quad (2)$$

式中: $X_{0k} - X_{ik}$ 是在 k 处 X_0 与 X_i 的差值, $\min_i \min_k |X_{0k} - X_{ik}|$ 是两者之间绝对值的最小值, $\max_i \max_k |X_{0k} - X_{ik}|$ 是两者之间绝对值的最大值; ρ 为分辨系数,常取 0.5。当两个比较对象的单位不同时一般采用均值化的方法将其无量纲化,再进行计算。

3.2 结果分析

考虑土体含水率、水泥掺入比与龄期三者对水泥土强度的影响大小,本文选取了 9 组试验数据,部分无侧限抗压强度试验数据见表 5。

表5 部分无侧限抗压强度试验数据

组号	强度/ MPa	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率/%	水泥 掺入比/%	龄期/d
1	1.92	1.751	60	18	7
2	2.35	1.768	60	21	14
3	4.27	1.828	60	25	28
4	1.32	1.703	70	21	7
5	2.05	1.719	70	25	14
6	1.88	1.774	70	18	28
7	0.67	1.628	85	25	7
8	0.44	1.649	85	18	14
9	0.96	1.684	85	21	28
均值	1.76	1.720	71.7	21.3	16.3

利用均值化的方法(试验数据与平均值相除)对数据进行无量纲化处理。在进行无量纲化处理后分别进行序列求差计算,即用无量纲处理以后的各组强度值分别与对应的含水率、水泥掺入比以及龄期的无量纲值相减,并取绝对值,找出绝对差的最大值与最小值。考虑到所分析的含水率、水泥掺入比、龄期与水泥土无侧限抗压强度的实际情况,可将式(2)简化为

$$\xi_{0ik} = \frac{m + \rho M}{\Delta_{ik} + \rho M} \quad (3)$$

其中

$$m = \min_i \min_k |X_{0k} - X_{ik}|$$

$$M = \max_i \max_k |X_{0k} - X_{ik}|$$

$$\Delta_{ik} = |X_{0k} - X_{ik}|$$

式中:分辨系数 ρ 的大小取 0.4。通过式(3)可得到各试验组的关联系数值,其计算结果列于表 6。

表6 关联系数计算结果

组号	含水率	水泥 掺入比	龄期	组号	含水率	水泥 掺入比	龄期
1	0.72	0.73	0.50	6	0.89	0.75	0.50
2	0.57	0.65	0.58	7	0.45	0.45	0.94
3	0.29	0.34	0.48	8	0.41	0.52	0.52
4	0.74	0.74	0.67	9	0.50	0.60	0.36
5	0.78	1.00	0.68				

(下转第 39 页)

报,2005,24(7):1173-1177.

[4] 张有,欧阳永龙. 浅议岩土注浆加固技术的发展与应用[J]. 中国矿业,2005,14(6):70-72.

[5] 韩立军,宗义江,韩贵雷,等. 岩石结构面注浆加固抗剪特性试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(9):2570-2576,2622.

[6] 王晓亮,侯伟清,叶子剑,等. 北京地铁 10 号线二期某区间粉细砂地层帷幕注浆效果评价研究[J]. 施工技术,2014,43(1):114-117.

[7] 许岩. 袖阀管劈裂注浆在道路工程软基处理中的应用[J]. 山西建筑,2011,37(20):156-157.

[8] 闻生. 软基注浆加固技术研究综述[J]. 山西建筑,2005,31(20):102-103.

[9] 周予启,史春芳,任耀辉,等. 袖阀管注浆技术在深圳平安金融中心深基坑工程中的应用[J]. 施工技术,2013,42(7):9-11.

[10] 李团. 城市水泥混凝土道路加铺改造的设计方法和修复方案[J]. 河南科技,2014(1):68.

[11] 刘朝权,李国维. 软基路堤等载超载预压模拟室内试验研究[J]. 公路,2007(8):90-95.

[12] 吴景海,王德群,陈环,等. 土工合成材料加筋砂土三轴试验研究[J]. 岩土工程学报,2000,22(2):199-204.

[13] 孙锋,张顶立,王臣,等. 劈裂注浆抬升既有管道效果分析及工程应用[J]. 岩土力学,2010,31(3):932-938.

[14] 吴顺川,金爱兵,高永涛,等. 袖阀管注浆技术改性土体研究及效果评价[J]. 岩土力学,2007,28(7):1353-1358.

[15] 李文. 路基沉陷劈裂注浆处治试验研究及力学参数计算[D]. 长沙:长沙理工大学,2013.

[16] 张忠苗,邹健. 桩底劈裂注浆扩散半径和注浆压力研究[J]. 岩土工程学报,2008,30(2):181-184.

(收稿日期:2014 - 09 - 29 编辑:胡新宇)

(上接第 13 页)

在上述计算的基础上,分别对 3 种因素与水泥土抗压强度的各个关联系数进行算术平均即可得到该因素与水泥土抗压强度的关联度数值。表 7 中列出了相关的计算结果,水泥土密度与这些因素的关联度计算与上述过程基本一致,在此不再赘述。通过表 7 可以直观地看出各个因素对水泥土抗压强度与密度大小的影响程度,可以看出在这 3 种因素中,对水泥土抗压强度影响较大的因素是土体含水率与水泥掺入比,这与水泥土抗压强度试验的结果相吻合的。因此,在实际工程中要想提高水泥土的成桩质量,可以在考虑成本因素的同时从降低土体的含水率与增加水泥掺入比这两个方面来进行改良,能够起到事半功倍的效果。

表 7 各因素关联度计算结果

项目	含水率	水泥掺入比	龄期
水泥土抗压强度	0.59	0.64	0.58
水泥土密度	0.71	0.76	0.45

4 结 论

- a. 在高含水率情况下水泥土的强度受到多种因素的影响,在土体含水率、水泥掺入比与龄期 3 个因素中,水泥掺入比与土体含水率对水泥土强度的影响最为显著。
- b. 在相同的水泥掺入比与龄期情况下,水泥土强度随土体含水率增大而减小,特别在土体含水率超过 70% 后,水泥土的强度下降幅度超过 50%,因此,在实际工程中粉喷桩不宜在土体含水率超过

70% 的地区使用,若必须使用则需要采取相应的处理措施。

c. 增加水泥掺入比,可以有效地提高水泥土的抗压强度,因此在实际工程中若遇到高含水率的情况时,应在可能的范围内使用较高的水泥掺入比,以提高粉喷桩的成桩质量。

参考文献:

[1] 李国维,姜微,吴玉财,等. 预置管法静力触探检测水泥搅拌桩现场试验[J]. 岩土工程学报,2013,35(7):1289-1296.

[2] 李善梅,陈先华,蒙剑坪. 水泥搅拌桩在桂林红粘土地基处理中的应用[J]. 路基工程,2011(2):132-134.

[3] 王保田,宋为广,赵辰洋,等. 水泥含量测定法控制水泥搅拌桩施工质量研究[J]. 长江科学院院报,2014,31(7):109-113.

[4] 朱家祥,吴继敏. 混凝土芯水泥土搅拌桩在基坑支护中的应用[J]. 河海大学学报:自然科学版,2006,34(2):185-188.

[5] 丁海涛,杨保全. 水泥土搅拌桩时间效应与质量检测评分方法探讨[J]. 水利水电科技进展,2005,25(1):48-50.

[6] 向玮,刘松玉,朱志铎,等. 变径水泥土搅拌桩加固桥头软基的试验分析[J]. 解放军理工大学学报,2009,10(5):478-482.

[7] 张岐山,郭喜江,邓聚龙. 灰关联熵分析方法[J]. 系统工程理论与实践,1996,(8):7-11.

[8] 刘思峰,蔡华,杨英杰,等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践,2013,33(8):2041-2046.

(收稿日期:2014 - 09 - 28 编辑:周红梅)