

高速列车振动荷载下水泥改良黄土动力学试验^①

王家鼎, 彭淑君, 马 闫, 谢婉丽

(西北大学地质学系 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要:结合大同—西安高速铁路建设,选取该线路数个不同地貌单元的典型黄土路段采集试验样品,在GDS高级动态三轴测试系统上进行了水泥改良黄土的动力特性室内试验研究。采用正交试验法以优化试验方案。动荷载按照不同黄土层的埋深深度以火车振动衰减规律求取,土样按照不同水泥掺量经击实获得,经过长时间、多振次的动力学试验后获得水泥改良黄土的动弹模、动阻尼以及振陷量;进而探讨土层埋深、水泥掺和比、压实系数、浸水条件和振动次数对土样动力特性参数影响的主次顺序及显著性程度,找出工程最优化方案。结果表明:影响水泥改良黄土振陷量的各因素的主次顺序为:水泥比>浸水条件>振动次数>深度>压实系数,水泥比和浸水条件影响显著,其它因素无显著影响;动弹性模量影响因素主次顺序:深度>浸水条件>水泥比>振动次数>压实系数,深度和浸水条件影响高度显著;阻尼比影响因素主次顺序:浸水条件>水泥比>振动次数>压实系数>深度,水泥比和浸水条件影响高度显著。随着水泥比的增加水泥改良黄土动力特性越好,不存在最优水泥配合比。

关键词: 高速铁路; 水泥改良黄土; 振陷量; 动弹模; 阻尼比; 正交设计

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2013)01-0035-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.01.0035

Dynamic Tests on the Cement-improved Loess under the Vibratory Load

WANG Jia-ding, PENG Shu-jun, MA Yan, XIE Wan-li

(State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shanxi 710069, China)

Abstract: In this paper dynamic triaxial tests were performed to explore the order and contribution rate of experiment factors such as depth, cement commingle ratio, compacting factor, water-dipping conditions, and vibration frequency on the dynamic characteristics of cement-improved loess including dynamic deformation, dynamic elastic modulus, and damping ratio. On the basis of the foundation construction of the Datong—Xi'an high-speed railway, a large number of test samples have been obtained that include typical loess profiles of various geomorphic units. The dynamic parameters of cement-improved loess were tested on the GDS advanced dynamic triaxial test system at the State Key Laboratory of Continental Dynamics. The orthogonal test method was applied to optimize testing. The dynamic load was calculated according to the train vibration attenuation rule of various depths. Loess samples of various cement ratios were created through compaction tests. The dynamic characteristics of cement-improved loess such as dynamic deformation, dynamic elastic modulus, and damping ratio were determined from dynamic tests that included lengthy periods and a large number of cycles. The results showed that within the test factor level range, the primary and secondary order of factors that affected the vibrated subsidence

① 收稿日期: 2013-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(40972193); 高等学校博士点学科点专项科研基金(20116101130001)

作者简介: 王家鼎(1962—), 男(汉族), 教授, 博士生导师, 现从事地震工程教学和研究工作。

were cement ratio > water-dipping conditions > vibration frequency > depth > compacting factor. In addition, cement ratio and water-dipping conditions showed significant influence on dynamic deformation. The primary and secondary order of factors that affected the dynamic elastic modulus were depth > water-dipping conditions > cement ratio > vibration frequency > compacting factor. In addition, depth and submerged conditions showed significant influence. The primary and secondary order of factors that affected the damping ratio were submerged condition situation > cement ratio > vibration frequency > compacting factor > depth. In addition, cement ratio and submerged conditions showed highly significant influence. Therefore, an increase in cement ratio results in a significant improvement in the dynamic characteristics of cement-improved loess; no optimal ratio of cement was noted.

Key words: High-speed railway; Cement-improved loess; Vibrated subsidence; Dynamic elastic modulus; Damping ratio; Orthogonal experiment

0 引言

大同一西安高速铁路是继郑西高铁在黄土地区修建的又一条高速铁路,对路基强度及沉降变形要求十分严格,路基施工后沉降不宜超过 15 mm^[1]。而该铁路沿线路基填料多为黄土,属于 C 组填料,并属于特殊性岩土,不满足高速铁路路基填料的设计要求,需经过压实或改良处理。目前的主要施工方法有强夯法和改良土法(石灰改良土、水泥改良土、固化剂改良土)。

目前,国内外关于水泥改良土技术及其动静特性已有了较深研究。Osula^[2]等对比研究了石灰和水泥改良红土,改良效果受龄期的影响;AL-Abdul Wahhab^[3]等论证了石灰和水泥改良土在干旱地区高速公路修筑中的应用;杨广庆等^[4-5]通过水泥改良土的动三轴试验分析了水泥改良土在列车重复荷载作用下的动力特性,论证了水泥改良土作为高速铁路路基基床底层填料的可行性;蔡袁强等^[6]通过动三轴实验研究了水泥土复合试样的动弹模和阻尼比的变化规律,提出了计算复合试样动弹模和阻尼比的方法;王军等^[7]通过不排水三轴试验研究了水泥土的力学特性,重点分析了围压与水泥掺入比对水泥土体强度、孔压及刚度的影响;韩文斌等^[8]对不同配比的石灰、水泥、固化剂和粉煤灰土样的室内试验结果进行了研究;王炳龙等^[9]对京沪高速铁路路基水泥、石灰和固化剂改良土进行了土工离心试验研究,对改良后的路基稳定边坡破率,尤其是堤身的破坏机理进行了分析;蒋关鲁等^[10]对水泥改良黄土路基填料进行了现场填筑试验及检测,结果表明水泥改良黄土满足铺设无渣轨道铁路的设计要求;张军丽等^[11]通过三轴试验、无侧限抗压强度试验探讨了水泥掺入比、含水量、围压对水泥黄土力学特性

的影响,即水泥黄土的强度特性和水稳性;刘保健等^[12]利用实测资料,对水泥黄土的应力—应变本构关系进行了探讨。

以上学者研究大部分集中在单因素对水泥改良黄土强度的影响,而对各因素对强度影响的相对程度,即各因素之间的相对显著水平的研究相对较弱。为此,本研究拟结合大同一西安高速铁路工程,以正交试验原理为基础,对铁路沿线典型地段黄土路基填料进行水泥改良试验,并对改良填料在浸水条件、振动等条件下的沉降变形特性进行系统研究,探讨土层埋深、水泥配比、压实系数、浸水条件和振动次数对水泥改良黄土动力特性:如振陷量、动弹模、阻尼比的影响,分清各因素影响程度的主次顺序,找出工程最优化方案。研究成果将对大同一西安高速铁路填料设计及改良工艺等提供可靠的科学依据,并对黄土地区高速铁路黄土路基填料设计提供经验参考。

1 水泥改良黄土的动三轴试验

试验黄土取自大同一西安高速铁路运城段典型路基填料场地,并选用陕西秦岭水泥集团生产的 PO32.5 硅酸盐水泥。

采用正交试验研究深度、水泥配比、压实系数、浸水条件和振动次数对水泥改良黄土振陷量、动弹模、阻尼比的影响,各因素间水平不同(表 1)。结合以往研究结果,本试验中分别配制最优含水率(Wop)状态下水泥配比为 0%、3%、4%和 6%的重塑黄土样。又根据最新版《高速铁路设计规范》(试行)(TB10621—2009)^[1]规定,基床以下路堤压实系数 $K \geq 0.95$;基床底层压实系数 $K \geq 0.95$ 。因此试验中分别配制压实系数 $K = 0.93$ 、 $K = 0.96$ 的重塑

土样。

表 1 正交试验的因素及水平

Table 1 Factors and levels of orthogonal test

水平	振动次数	因素			
		水泥配比/%	深度/m	压实系数	浸水条件
1	300	0	3	0.93	未浸水
2	600	3	6	0.96	浸水
3	1 500	4	—	—	—
4	3 000	6	—	—	—
5	5 000	—	—	—	—
6	8 000	—	—	—	—

试件在试验室制作,标准条件下养护至一定龄期后在我校大陆动力学国家重点实验室的英国 GDS 高级动态三轴测试系统上进行动三轴试验,试样尺寸为 $\Phi 70\text{ mm}\times h 140\text{ mm}$,施加动荷载形式为正弦波。试验加载方案如下。

(1)初始压力加载:根据试样埋深、密度计算出水泥改良黄土的竖向荷载,围压根据固结比 k_0 计算:

$$k_0 = 1 - \sin \varphi$$

式中: k_0 为固结比; φ 为内摩擦角。

(2)动荷载确定:荷载参数按《高速铁路设计规范》(试行)(TB10621—2009)经计算获得。

①静荷载:

$$w_1 = \frac{(w_a + w_b + w_c + w_d + w_e)}{b} \quad (2)$$

式中: w_a 为钢轨自重(1.22 kN/m); w_b 为扣件自重(0.462 kN/m); w_c 为轨道板重(16.75 kN/m); w_d 为双块式轨枕重(6.216 kN/m); w_e 为钢筋混凝土基础自重(43.166 kN/m); b 为路基板宽(2.8 m)。由式(2)算得 $w_2=24.22\text{ kPa}$ 。

②动荷载

根据日本东海道新干线动荷载计算公式以及铁科院的系数取值有如下公式:

$$P_d = P_s(1 + 0.3v/100) \quad (3)$$

式中 P_s 为中活载,取值为 $220\times 5\text{ kN}$; v 为列车时速,据设计为 250 km/h 。

故

$$P_d = 220\times 5(1 + 0.3\times 250/100) = 1\,925\text{ kN}$$

假定动荷载在基础板上均匀分布,路基板宽 2.8 m,长 5~7 m,乘以小于 1 的扩散系数(考虑荷载扩散的影响),故作用在路基面上的动应力为 $0.98\times 1\,925\div(7\times 2.8)=96.25\text{ kPa}$ 。

我们对黄土地区数条高速铁路研究表明地面动荷载随着土层埋深增加呈衰减趋势,拟合方程为:

$$\lambda = 0.97e^{-H/1.13} + 0.013 \quad (4)$$

由式(4)推算出试样在不同埋深处的动荷载见表 2。

表 2 不同埋深处动荷载的衰减系数及动应力

Table 2 The attenuation coefficient of dynamic load and dynamic stress in different depths

埋深/m	衰减系数	地面振动荷载/kPa	试样动荷载/kPa	试样动应力幅值/kN
-1	0.413 4	96.25	33.07	0.153
-2	0.1782	96.25	14.26	0.066
-3	0.081 2	96.25	6.49	0.03
-4	0.041 1	96.25	3.28	0.015
-5	0.024 6	96.25	1.97	0.009
-6	0.017 8	96.25	1.42	0.006 6
-7	0.014 9	96.25	1.19	0.005 5

(2)动荷载加载:加压变形稳定后,不同深度(此处仅展示 3 m 和 6 m 深度)的试样按表 2 施加动荷载,分别模拟基床底层和基床以下路堤的动荷载情况。加载频率为:1 Hz、2 Hz、3 Hz。(此处仅展示 1 Hz 情况,如图 1 所示)

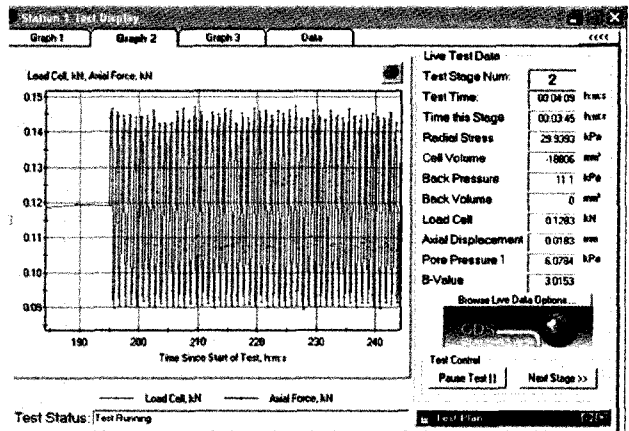


图 1 图 1 动三轴试验中的动荷载随时间变化曲线图

Fig.1 The diagram of dynamic load changing with time in dynamic triaxial test.

2 结果分析与讨论

2.1 试验数据处理

按正交设计表安排试验,不考虑各因素的交互作用,即假定它们之间相互没有影响,以探讨不同影响因素对水泥改良黄土动力特性的影响规律,优化并指导水泥改良黄土路基的设计。试验设计共 42 组,每组试样作平行试验以矫正结果,因此共开展了 84 组试验,其结果见表 3。并对试验结果分别进行了极差处理和方差处理。

2.1.1 极差分析

对所得到的数据进行极差分析拟达到以下几个目标:

- (1) 分清各因素对指标影响的主次顺序;
- (2) 找出最优化方案;
- (3) 分析各因素与指标间的关系,找出指标(振陷量、动弹模、阻尼比)随因素水平变化的规律和趋势。

在极差分析中分别计算出因素 的各水平指标值 $K_{A,n}$:

$K_{A,n} = A$ 元素相应水平对应的试验结果之和
其中 n 表示因素 A 的各水平。

表 3 动三轴试验结果

Table 3 Results of the dynamic triaxial tests

序号	振动次数/次	水泥配比/%	深度/m	压实系数	浸水情况	振陷量/mm	动弹模/MPa	阻尼比
1	300	0	3	0.93	浸水	0.932 4	31	0.145
2	300	3	3	0.96	未浸水	0.007 5	132.1	0.09
3	300	4	6	0.96	浸水	0.021 8	179.9	0.115
4	300	6	6	0.93	未浸水	0.003 3	284.2	0.083
5	600	0	6	0.96	未浸水	0.009 9	216.1	0.089
6	600	3	6	0.93	浸水	0.041 9	152.6	0.13
7	600	4	3	0.93	未浸水	0.02	138	0.087
8	600	6	3	0.96	浸水	0.044 1	108.1	0.111
9	150 0	0	3	0.93	未浸水	0.044 1	118.7	0.094
10	150 0	3	3	0.96	浸水	0.123 7	87.2	0.126
11	150 0	4	6	0.96	未浸水	0.007 5	267.5	0.08
12	150 0	6	6	0.93	浸水	0.013 3	210.4	0.112
13	300 0	0	6	0.96	浸水	0.374 5	93.8	0.134
14	3000	3	6	0.93	未浸水	0.007 5	257.8	0.093
15	300 0	4	3	0.93	浸水	0.121 3	91.8	0.121
16	300 0	6	3	0.96	未浸水	0.005 8	155.8	0.082
17	500 0	0	3	0.93	未浸水	0.101 1	124.9	0.093
18	500 0	3	3	0.96	浸水	0.159 5	87.3	0.126
19	500 0	4	6	0.96	未浸水	0.015 4	267.9	0.081
20	500 0	6	6	0.93	浸水	0.031 8	210.5	0.113
21	800 0	0	6	0.96	浸水	0.492 2	96.7	0.136
22	800 0	3	6	0.93	未浸水	0.018 8	257.6	0.089
23	800 0	4	3	0.93	浸水	0.152 6	91.9	0.12
24	800 0	6	3	0.96	未浸水	0.010 5	155.7	0.082

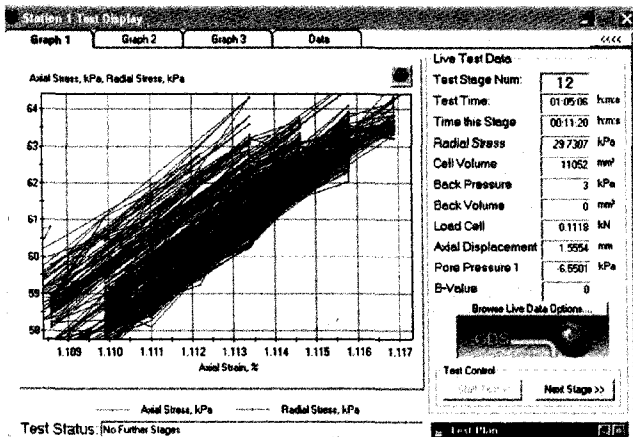


图 2 动三轴试验中的应力应变曲线图

Fig. 2 The stress—strain diagram of dynamic triaxial test.

通过下式计算出各水平的平均指标值 K'_A 。其中 N 为各因素的重复试验次数。

$K'_A = K_A / N$

极差值计算:

$R_A = \max(K_{A,n}) - \min(K_{A,n})$

为了消除由于各因素水平数的不同而对极差值的影响,必须对计算出的极差值进行折算,再由折算后的极差去决定各因素对指标影响的主次顺序。折算公式为

$R'_A = \sqrt{r_A} \times R_A \times d_A$ (7)

式中: R'_A 为折算后极差; r_A 为因素 A 的每个水平重复试验次数; R_A 为原极差; d_A 为折算系数,由表 4 查得。

通过对极差进行折算后,可以得到五个因素分别对振陷量 ϵ_p 、动弹性模量 E_d 、阻尼比 λ 的极差值。

表 4 折算系数表

Table 4 The conversion coefficient

r_A	4	5	6	7	8	9	10
d_d	0.45	0.40	0.37	0.35	0.34	0.32	0.31

2.1.2 方差分析

方差分析法就是将因素水平的变化所引起的试验结果的差异与误差的波动所引起的试验结果的差异区分开来的一种统计方法,同时对于影响的各因素的重要程度给予精确的数量估计^[14]。

因素 A 的方差

$$F_A = (S_A/f_A)/(S_e/f_e) \quad (8)$$

式中: S_A 为因素 A 的偏差平方和, S_A/Σ (各水平指标值)²/重复数-(所有数据之和)²/数据总个数; S_e 为总误差偏差平方和,等于全部数据中每个数据与总平均之差的平方和; f_A 为因素 A 的自由度,本文中 $f_{\text{水泥比}}=3$; $f_{\text{浸水条件}}=f_{\text{压实系数}}=f_{\text{埋深}}=2$; $f_{\text{振动次数}}=5$; f_e 为误差自由度,在本次试验中总自由度 $f_{\text{总}}=23$,误差自由度 $f_e=f_{\text{总}}-\Sigma f_A=12$ 。

由方差分析计算出各因素的 F_A 值后,按照下式判断因素 A 对结果的影响显著性^[12]: $F_A > F_{0.01}(f_A, f_e)$, 高度显著(★★); $F_{0.01}(f_A, f_e) \geq F_A > F_{0.05}(f_A, f_e)$, 显著(★); $F_{0.05}(f_A, f_e) \geq F_A > F_{0.20}(f_A, f_e)$, 有一定影响(▲); $F_A \leq F_{0.10}(f_A, f_e)$, 无显著影响(—)。

本次试验中查表^[12]得到: $F_{0.01}(1, 12) = 9.33$; $F_{0.01}(3, 12) = 5.95$; $F_{0.01}(5, 12) = 5.06$; $F_{0.05}(1, 12) = 4.75$; $F_{0.05}(3, 12) = 3.49$; $F_{0.05}(5, 12) = 3.11$; $F_{0.1}(1, 12) = 3.18$; $F_{0.2}(3, 12) = 2.61$; $F_{0.2}(5, 12) = 2.39$ 。

2.2 振陷量影响因素分析

水泥改良黄土振陷量的极差和方差分析结果如表 5 所示。在试验因素水平范围内,按照极差的大小,影响振陷量的因素主次顺序为:水泥比>浸水条件情况>振动次数>深度>压实系数。说明水泥掺和比是影响水泥改良黄土在动力条件下残余变形的最重要因素;试样的浸水条件情况对振陷量的影响其次;随振动次数增加,试样累积振陷量增加,在振动约 5 000 次以后振陷量趋于稳定;随深度增加,试样的累积振陷量减小;压实系数对水泥改良黄土的影响是最小的。

表 5 振陷量方差和极差计算结果

Table 5 Results of range and variance analysis on dynamic deformation

因素	极差折算值	F	显著性
振动次数	0.1910	1.01	—
水泥配比/%	0.2788	4.71	★
埋深	0.0613	0.76	—
压实系数	0.0193	0.08	—
浸水条件	0.2020	8.30	★

方差分析结果可知,水泥掺和比和试样浸水条件与否对水泥改良黄土的振陷量大小有显著影响,而振动次数、深度和压实系数对振陷量大小影响不显著。又由表 3 可知,随着水泥比的增加,振陷量逐渐减小,因此工程中不存在最优水泥配比。在浸水条件下水泥黄土振陷量大于不浸水条件下的振陷量,因此路基工程施工中应注意隔水排水工作。

2.3 动弹性模量影响因素分析

通过极差计算和方差计算得到动弹性模量影响因素的主次顺序和显著性水平如表 6 所示。在试验因素水平变化范围内,按照极差的大小,动弹性模量影响因素主次顺序为深度>浸水条件情况>水泥比>振动次数>压实系数;随着模拟深度增加,试样动弹性模量增大;浸水条件下试样动弹性模量比未浸水条件试样动弹性模量小;随着水泥含量的增高,水泥改良黄土的动弹性模量大幅度提高,不存在最优水泥掺和比;当振动次数达到 5 000 次以后,动弹性模量趋于稳定;随压实系数增加,动弹模增大。

表 6 动弹性模量方差和极差计算结果

Table 6 Results of range and variance analysis of dynamic elastic modulus

因素	折算极差值	F	显著性
振动次数	20.5650	1.50	—
水泥配比/%	66.9915	22.18	★★
埋深	104.9262	206.29	★★
压实系数	10.8551	2.21	—
浸水条件	83.6814	131.21	★★

按照方差计算,试样埋深、浸水条件情况和水泥掺和比对动弹性模量影响特别显著,而试样压实系数和振动次数对试样动弹性模量几乎无显著影响。

2.4 阻尼比影响因素分析

阻尼比的极差和方差分析结果如表 7 所示。在试验因素水平范围内,按照极差大小,影响阻尼比的因素主次顺序为:浸水条件情况>水泥比>振动次数>压实系数>深度。试样在浸水条件下的阻尼比比不浸水条件下大;随着水泥含量的增高,水泥改良黄土的阻尼比则逐渐变小,但变化较小。当振动次数达

表 7 阻尼比方差和极差计算结果

Table 7 Results of range and variance analysis of damping ratio

因素	折算极差值	F	显著性
振动次数	0.0047	1.19	—
水泥配比/%	0.0163	22.69	★★
深度	0.0020	1.15	—
压实系数	0.0025	1.87	—
浸水条件	0.0399	473.61	★★

到 5 000 次以后,阻尼比变化趋于稳定;由方差分析结果可知,水泥掺和比和浸水条件对水泥改良黄土的阻尼比影响高度显著,而振动次数、深度和压实系数对阻尼比无显著影响。

3 结 论

(1) 本次试验依据黄土地区高速铁路的特点进行设计,在经过不同改良剂的多次试验后确定水泥改良黄土作为高速铁路路基填料是适合的。由此对这种改良黄土施加实际高速铁路动荷载进行动力学试验,并已直接应用于该高速铁路的设计中,其效果良好。

(2) 在试验因素水平范围内,影响水泥改良黄土振陷量的各因素的主次顺序为:水泥比>浸水条件>振动次数>深度>压实系数;水泥比和浸水条件是主要因子,其他因素影响不显著。

(3) 试验因素水平范围内,动弹性模量影响因素主次顺序为:深度>浸水条件情况>水泥比>振动次数>压实系数;模拟深度和浸水条件影响高度显著,其他因素影响不显著。

(4) 试验因素水平范围内,阻尼比影响因素主次顺序:浸水条件情况>水泥比>振动次数>压实系数>深度。模拟深度和浸水条件影响高度显著,其他因素影响不显著。

(5) 随着水泥掺和比的增加,水泥改良黄土的振陷量和动弹性模量逐渐增大,阻尼比逐渐下降,没有最优水泥配合比。

(6) 由于浸水条件对水泥改良黄土的振陷量、动弹性模量和阻尼比影响很大,因此,在地基填料施工中应该注意工程防水及排水工作。

〔参考文献〕

- [1] 中华人民共和国行业标准. GB/T TB10621—2009, 高速铁路设计规范(试行)[S]. 北京: 中华人民共和国铁道部, 2009.
The industry standard of the People's Republic of China GB/T TB10621—2009 high-speed rail design specifications (for trial implementation)[S]. Beijing: Ministry of Railways of the People's Republic of China, 2009
- [2] Osula D O A. A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite[J]. Engineering Geology, 1996, 42(1): 71-81.
- [3] Al—Abdul Wahhab H I, Asi I M. Improvement of marl and dune sand for highway construction in arid areas[J]. Building, 1997, 32(3): 271-279.
- [4] 王军, 丁光亚, 潘林有, 等. 静三轴试验中水泥土力学特性及本构模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1407-1412.
- WANG Jun, WANG Guang-ya, PAN Lin-you, et al. Study of mechanics behavior and constitutive model of cemented soil under static triaxial tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1407-1412.
- [5] 韩文斌, 王元汉. 京沪高速铁路路基基床填料改良试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20: 1910-1916.
HAN Wen-bin, WANG Yuan-han. Testing Study on Modification of Railway Roadbed for Beijing—Shanghai High-Speed Railway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 20: 1910-1916.
- [6] 张军丽, 刘保健. 水泥黄土的力学特性试验研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1999, 19(2): 6-9.
ZHANG Jun-li, LIU Bao-jian. The Experiment Research on the Characteristics of Cement Loess[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1999, 19(2): 6-9.
- [7] 刘保健, 陈鹏郎, 达马. 水泥黄土的应力—应变本构方程[J]. 西安公路交通大学学报, 1999, 19(3): 27-30.
LIU Bao-jian, CHEN Peng-lang, DA Ma. The Stress—strain Constitutional Equation of Loess-cement[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1999, 19(3): 27-30.
- [8] 雷华阳, 刘景锦, 霍海峰. 不同应力水平下结构性黏土动力特性试验研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(3): 228-232.
LEI Hua-yang, LIU Jing-jin, Huo Hai-feng. Experimental Study on Dynamic Properties of Structural Soft Clay with Different Stress Level [J]. Northwestern seismological journal, 2011, 33(3): 228-232.
- [9] 王志杰, 骆亚生, 谭东岳, 等. 干密度对预剪应力下重塑黄土动力特性影响的试验研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(4): 349-353.
WANG Zhi-jie, LUO Ya-sheng, TAN Dong-yue, et al. Experimental Study on the Effects of Dry Density on Dynamic Properties of Remodeled Loess under Condition of Pre-shearing Stress [J]. Northwestern Seismological journal, 2011, 33(4): 349-353.
- [10] 闫春岭, 唐益群. 地铁荷载下粉性土动力特性研究进展[J]. 西北地震学报, 2011, 33(2): 200-205.
YAN Chun-ling, TANG Yi-qun. Advances in Researches on Dynamic Properties of Silty Soil under Subway Loading [J]. Northwestern Seismological journal, 2011, 33(2): 200-205.
- [11] 杨广庆. 水泥改良土的动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1156-1160.
YANG Guang-qing. Study of Dynamic Performance of Cement—Improved Soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1156-1160.
- [12] 杨广庆, 管振祥. 高速铁路路基改良填料的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 682-685.
YANG Guang-qing, GUAN Zhen-xiang. Experimental study on improved soil for high-speed railway subgrade [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(6): 682-685.
- [13] 蔡袁强, 梁旭, 李坤. 水泥土—土复合试样的动力特性[J]. 水利学报, 2003, 10: 19-25.
CAI Yuan-qiang, LIANG Xu, LI Kun. Dynamic characteristics of composite sample of cemented clay-clay [J]. SHUI LI

- XUE BAO, 2003, 10: 19-25.
- [14] 王炳龙, 卢德生, 等. 高速铁路路基填料改良离心试验研究[J]. 上海铁道大学学报, 1999, 20(10): 22-26.
WANG Bing-long, LU De-sheng, et al. Centrifugal Model Test for Improvement of Subgrade Filled Soil in High Speed Railway[J]. Journal of Shanghai Tiedao University, 1999, 20(10): 22-26.
- [15] 蒋关鲁, 房立凤, 张俊兵, 等. 高速水泥改良黄土路基填料填筑试验研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 1-7.
JIANG Guan-lu, FANG Li-feng, ZHANG Jun-bing, et al. Test Study on Cement Improved Loess as the Filling Material for Subgrade Construction of Passenger Dedicated Line[J]. China Railway Science, 2009, 30(1): 1-7.
- [16] 许海勇, 陈龙珠. 钢管水泥土围护墙等效弹性模量的有限元计算[J]. 西北地震学报, 2011, 33(3): 261-264.
- XU Hai-yong, CHAN Long-zhu. Finite Element Analysis on the Equivalent Elastic Modulus of Cemented Soil Retaining Wall Embedded with Steel Pipes[J]. Northwestern seismological journal, 2011, 33(3): 261-264.
- [17] 周中, 巢万里, 刘宝琛, 等. 岩石边坡生态种植基强度的正交试验[J], 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(6): 1112-1116.
ZHOU Zhong, CHAO Wan-li, LIU Baoshen, et al. Orthogonal test on strength of planting material for rock slope[J]. CENT. SOUTH UNIV. (Science and Technology), 2005, 36(6): 1112-1116.
- [18] 北京大学数学力学系数学专业概率统计组. 正交设计[M]. 北京: 人民教育出版社, 1976: 180.

(上接 34 页)

- [4] 赵挺生, 方东平, 张传敏. 施工阶段多(高)层建筑钢筋混凝土结构统一模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(12): 1680-1683.
ZHAO Ting-sheng, FANG Dong-ping, ZHANG Chuan-min. Unified model of reinforced concrete structures of multi-story or high-rise buildings during construction[J]. J. Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.), 2004, 44(12): 1680-1683.
- [5] 薛娜, 李鸿晶, 伍小平. 结构施工时变内力分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2005, 27(11): 73-77.
XUE Na, LIU Hong-jing, WU Xiao-ping. Time-dependent analysis of construction internal forces of structures[J]. Journal of Nanjin University of Technology, 2005, 27(11): 73-77.
- [6] 徐蓉, 贺明华. 混凝土结构施工过程的数值模拟分析[J]. 结构工程师, 2011, 27(1): 144-148.
XU Rong, HE Ming-hua. Numerical analysis for construction process of RC structures[J]. Structural Engineers, 2011, 27(1): 144-148.
- [7] 赵军, 杨绿峰. 钢筋混凝土框架结构施工力学分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2011, 36(1): 59-63.
ZHAO Jun, YANG Lu-feng. Mechanical analysis of the reinforced concrete frame structure during construction[J]. Journal of Guangxi University(Nat. Sci. Ed.), 2011, 36(1): 59-63.
- [8] 黄远中. 框架结构施工过程仿真分析[J]. 企业科技与发展, 2010, (14): 126-130.
HUANG Zhong-yuan. Simulation analysis on the construction process of framework structure[J]. Enterprise science and technology & development, 2010, (14): 126-130.
- [9] 杜永峰, 张尚荣, 李慧. 多级串联非比例阻尼隔震结构地震响应分析[J]. 西北地震学报, 2012, 34(4): 319-323.
DU Yong-feng, ZHANG Shang-rong, LI Hui. Seismic Response Analysis on Multistage Series Non-proportion Damping Isolated Structure[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(4): 319-323.
- [10] 汤华涛, 吴新跃. 体壳单元连接 MPC 法的计算精度分析[J]. 现代制造工程, 2011, (7): 62-65.
TANG Hua-tao, WU Xin-yue. Calculation precision of multipoint constraint technology used to solve combination model of solid element and shell element[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2011, (7): 62-65.