

阜新一朝阳高速公路段湿陷性黄土路基

处理方法及效果

邢玉东^{1,2}, 王常明³, 张立新², 匡少华²

1_东北大学资源与土木工程学院, 沈阳 110004

2. 辽宁省交通勘测设计院, 沈阳 110005

3. 吉林大学建设工程学院, 长春 130026

摘要: 对辽西黄土进行强夯法、灰土挤密桩法和冲击碾压法加固路基的试验研究, 旨在确定辽西湿陷性黄土路基处理的技术方案和技术参数。以现场测试和室内试验相结合的方法, 对试验路段的不同处理方法处理前后的黄土物理力学性质进行了对比。结果表明: (1) 夯击能为 800~1 600 kN·m 夯击数不小于 8 击, 对处理深度 4~6 m 的黄土较为有效; (2) 灰土挤密桩法可以消除桩深范围内及桩端下一定范围内的黄土湿陷性, 较适合于深厚湿陷性黄土的处理; (3) 冲击碾压法适合处理黄土厚度较小和表层黄土的处理, 碾压遍数以 40 遍为最佳, 其处理深度在 1 m 左右。这些成果为该地区湿陷性路基处理提供了参考。

关键词: 湿陷性黄土; 路基处理; 强夯法; 冲击碾压; 灰土挤密桩

中图分类号: TU444 文献标识码: A 文章编号: 1671-5888(2008)01-0098-07

Subgrade Treatment Effects for Collapsible Loess Subgrade of

Fuxin- Chaoyang Freeway in West of Liaoning Province

XING Yu-dong^{1,2}, WANG Chang-ming³, ZHANG Li-xin², KUANG Shao-hua²

1. College of Resource and Civil Engineering, Northeast University, Shenyang 110004, China

2. Liaoning Jiaotong Investigation and Design Institute, Shenyang 110005, China

3. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: In order to determine the technical program and technical parameters for stabilizing collapsible loess of subgrade treatment in west of Liaoning, some experimental research of stabilizing subgrade, such as, dynamic compaction, impact-rolling and lime soil pile, has been carried out. Combining in-situ test with laboratory experiment, the physical and mechanical properties in experimental areas are compared before and after treatment, and some conclusions are drawn out such as: (1) It is effective to treat 4 m to 6 m in depth under 800 kN·m to 1 600 kN·m in compaction energy without with not less than 8 tamper times; (2) Lime soil pile is suitable to improve subgrade with thick loess, which can dispel the loess collapsibility either in the range of pile length or in a certain extent from pile end; (3) The method of impact-rolling is useful to treat loess with the less thickness of the layer and topsoil with about 1m in depth, and impact rolling is optimal in 40 times. The result mentioned above provided a tech-

收稿日期: 2007-05-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(40572153)

作者简介: 邢玉东(1963—), 男, 山东五莲人, 博士研究生, 教授级高级工程师, 主要从事工程地质与岩土工程方面的研究, E-mail: xingyudong2005@126.com

通讯联系人: 王常明(1966—), 男, 浙江绍兴人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事工程地质与岩土工程方面的教学和科学研究, E-mail: wang_chm@163.com。

0 引言

黄土在我国分布很广,主要分布在山西、陕西、甘肃大部分地区以及河南的西部,新疆、山东、辽宁、宁夏、青海、河北以及内蒙古的部分地区也有不连续分布^[1],一直以来受到国内外土力学与岩土工程从事人员的关注。我国对黄土工程特性的系统研究始于20世纪50年代,相对国外晚近20年,但四代湿陷性黄土地区建筑规范的形成与发展,则反映了我国对湿陷性黄土研究和工程应用的成果和现状。多年来主要对黄土的工程性状^[2-11]和黄土地基处理技术^[1,12-13]进行了研究,取得了一大批具有理论和实用价值的研究成果。这些研究成果主要集中在西北和中原黄土分布地区,对边缘地区黄土工程性质的研究则较少或很少。《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB50025-2004)^[14]中,首次将辽宁西部地区列为黄土边缘区。然而,目前对辽西黄土的研究资料相对很少,辽西黄土具有与其他地区不同的工程地质性质,工程处理上不能照办照抄西北地区的经验,对其基本性质和工程性状有待于进一步研究。

阜新一朝阳高速公路段近44%位于黄土状粉质粘土(后称黄土)地区。该黄土厚度一般在4~12 m,局部可达20 m,分布于高、低阶地,为 Q_4 冲洪积沉积物。该地区黄土垂直裂隙和大孔隙发育,且含有水平条带状碎石或砾石。据已有的勘察资料得到的黄土物理力学性质指标可知:该路段黄土的湿陷系数在0.010~0.108,湿陷性变化较大,自重湿陷系数平均为0.005。该路段黄土多具有I-II级非自重湿陷性,局部具自重湿陷性。其中:不具湿陷性路段占全长3%,非自重湿陷性等级为I级路段长度约占34%,非自重湿陷性等级为II级路段长度约占62%,自重湿陷性等级为II级的路段长度约占1%。

显然,辽西黄土的湿陷性对路基变形及稳定性具有重要的影响,尤其对于高等级公路,必须通过路基处理消除其湿陷性,以达到路基设计要求。国内处理湿陷性黄土地基的方法很多,目前最常采用的地基处理方法有灰土和素土垫层法、强夯法、灰土挤密桩法、冲击压实法、高压旋喷法、深层搅拌桩法等。在不同的地区,根据不同的地基土质和不同的拟建

结构物,应选用不同的处理方法。根据沿线黄土的分布情况,选择了5、15和27标段进行路基处理的试验研究。由于篇幅的限制,文中只对5标的强夯法和灰土挤密桩法以及15标的冲击碾压法的处理效果进行了分析。通过分析处理效果的分析以获得黄土路基处理的技术参数。

1 强夯试验及其结果分析

强夯法依靠夯击时产生的巨大冲击能量,使土体产生强烈的震动相应力,从而导致路基土体产生物理力学性质的变化,如土中孔隙压缩、土体局部液化、夯击点周围产生裂隙、土体渗透性能发生变化、孔隙水逸出而致使土体迅速固结等,以达到减少沉降提高承载能力的目的。这种处理方法适合于处理各类饱和土和非饱和土。强夯法加固路基土的作用一般可以概括为4个方面:土体压实挤密、局部液化、固结和土体触变的恢复。对于不同的地基土,强夯的作用不同。对于非饱和的黄土类土,强夯时压实挤密作用表现得更为显著。由于巨大的冲击能,使地基土中出现冲击波和很大的动应力,在提高土体的强度和降低压缩性的同时,消除黄土的湿陷性。

1.1 土质条件

根据对5标强夯试验区试验前取样试验的物理指标进行统计,该段黄土厚度4.5~6.8 m,压缩系数为0.2~0.4 MPa^{-1} ,为中等压缩性黄土;天然含水量为17%左右,饱和度在55%左右,黄土处于硬塑状态;其孔隙比在0.85左右;黄土干密度较大,为1.40~1.50 g/cm^3 ;湿陷系数 $\delta_s=0.032$,自重湿陷系数 $\delta_{zs}=0.0017$,湿陷起始压力 $p_{sh}=97.8 \text{ kPa}$,湿陷量 $\Delta s=84.6 \text{ mm}$,湿陷程度轻微,湿陷等级I级。

1.2 试验设计

试验设备选用“神钢7055”型号起重机,夯锤重10.36 t。为了确定合适的强夯参数,选择夯击能 E 为600、800、1000、1200、1400、1600和2000 $\text{kN}\cdot\text{m}$,每种夯击能单点夯击次数 n 为6击、8击和10击。

强夯的试验要求为:首先进行点夯2遍,夯点位置按正方形布置,夯点间距 $4 \text{ m}\times 4 \text{ m}$ 。单点夯击时,第一遍夯击点间距8 m,第二遍夯击点位于第一遍夯击点之间。点夯的夯击次数用最后两击的夯沉

量 $\Delta s \leq 5$ cm 作为控制标准^[15]。

按上述试验方案和技术要求对桩号为 K301+500 m~K301+770 m 的路段进行强夯试验,并进行现场的测量,强夯墙后按每隔 0.5 m 的深度间距取夯点间的土样进行室内物理力学试验,分析比较黄土经强夯后物理力学性质的变化规律。

1.3 结果分析

单击夯击能和夯击次数是强夯设计中的主要参数。根据夯击能可以确定地基处理的深度,而夯击次数又可决定夯后地基的处理效果。一般地,夯击次数可通过现场试夯确定,常以夯坑的压缩量最大、夯坑周围隆起量最小为确定的原则,可从现场试夯得到的夯击次数 n 和夯沉量关系曲线确定。图 1 给出了不同夯击能下的夯点前后两次夯击与夯点夯沉量之间的关系。可见,随着夯击次数的增加,前后两次夯击的地基下沉量差逐渐减小,在 $E=2\ 000$ 、 $1\ 600$ 、 $1\ 200$ 、 $1\ 000$ 、 800 和 600 kN·m 夯击能下 7—8 次夯击后,最后两击的夯沉量基本已小于 5 cm,所以可以确定最小的单点夯击数为 8 击。由于夯沉量与具体的地层条件有关,所以不同夯击能量的夯沉曲线有所不同,有的具有波动现象。

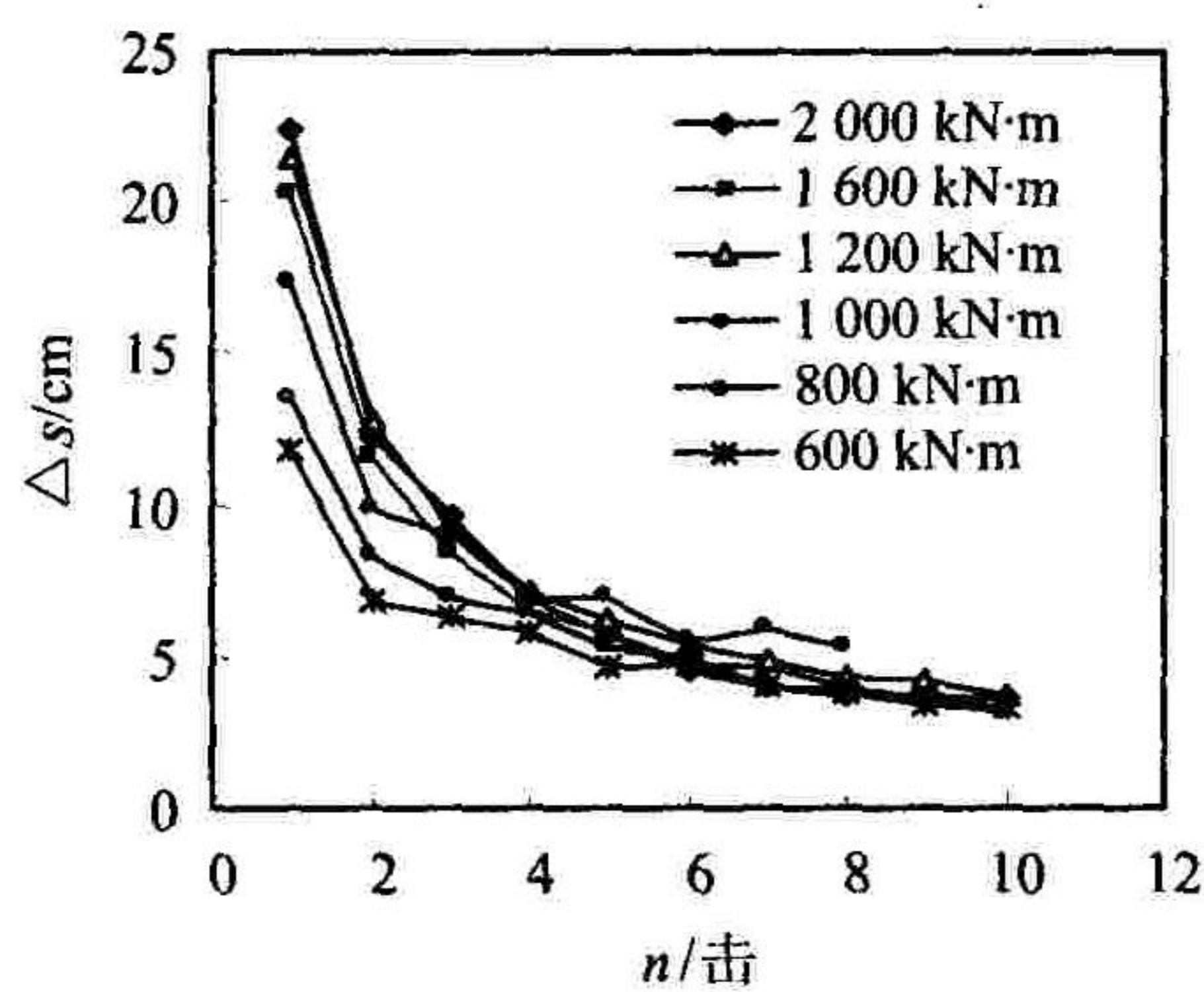


图 1 不同夯击能下前后两击夯沉量分布曲线

Fig. 1 Curves of settlement between two compact under different dynamic compaction energy

按单点击数为 8 击和 10 击强夯试验 2 周后取夯点间土进行物理力学试验。文中仅给出了黄土湿陷性、压缩性和孔隙比的变化规律。图 2(a)、(b)分别为不同夯击能 $E=800$ kN·m、 $1\ 200$ kN·m、 $1\ 600$ kN·m 下不同夯击次数的黄土湿陷系数随深度变化曲线。由图 2(a)、(b)可见,湿陷系数随着深度有所波动,这与试验误差有关,但总体上较处理前有较大的改善。图 2(a)中,单点击数为 8 击时,

$E=800$ kN·m 时的有效影响深度大致为 4.0 m, $E=1\ 200$ kN·m 的有效影响深度也大致为 4~4.5 m, $E=1\ 600$ kN·m 时的有效影响深度可大于 6.0 m; 而由图 2(b)分析可知,单点击数为 10 击时对应夯击能下,有效影响深度有所加深, $E=800$ kN·m、 $1\ 200$ kN·m、 $1\ 600$ kN·m 下的有效影响深度分别为 4.5 m、5.0 m、6.0 m,有效影响深度内的湿陷性系数有所降低。

图 3(a)、(b)为不同夯击能夯击次数分别为 8 击和 10 击时的压缩模量的变化规律,与夯前的压缩模量比较有了明显的增加,说明强夯对黄土的压缩性的影响明显。从图中也可以大致确定出不同夯击能和夯击次数下的影响深度。由图 3(a)可大致确定 $E=800$ kN·m、 $1\ 200$ kN·m、 $1\ 600$ kN·m 下的有效影响深度分别为 4.5~5.0 m、5.0 m、6.0 m; 而从图 3(b)中也可大致确定 $E=800$ kN·m、 $1\ 200$ kN·m、 $1\ 600$ kN·m,夯击 10 次时的有效影响深度分别为 4.0 m、5.8 m、6.0 m。与按湿陷性变化的情况确定的有效影响深度相比大致相当。

综合看来,夯击 8 次时,夯击能 $E=800$ kN·m、 $1\ 200$ kN·m、 $1\ 600$ kN·m 下的影响深度可以确定为 4.0 m、4.0~5.0 m、6.0 m。

根据上述确定的夯击影响深度,对比 Menard 的加固影响深度修正公式^[15],即 $z = \alpha \sqrt{wh}$ (式中: w 为锤重, t ; h 为落距, m ; α 为修正系数),可以确定 α 大致在 0.4~0.5 之间变化。

2 灰土桩处理路基的效果分析

灰土挤密桩法适用于处理地下水位以上的湿陷性黄土、素填土和杂填土等地基,可处理深度为 5~15 m。当以提高地基土的承载力和增强其水稳性为目的时,宜选用灰土挤密桩法。当地基土的含水量大于 24%、饱和度大于 65% 时,不宜选用灰土挤密桩法。灰土桩试验在 5 标采用设备为振动式沉管桩机和桩孔夯实机。灰土桩长 4.5 m,桩径 0.4 m,桩间距 1.1 m,选择的投料厚度范围为 0.5~2.6 m。灰土比采用 2:8。施工时的含水量约为 14.5%。

图 4 为不同的投料厚度时触探击数 N 随深度 H 的变化曲线。由图可知,投料厚度分别为 0.5 m 和 0.8 m 时触探击数的变化最为显著,投料厚度为 1.1 m 时触探击数有所提高,投料厚度大于 1.1 m 时触探击数变化不明显。图 5 为不同投料厚度时土

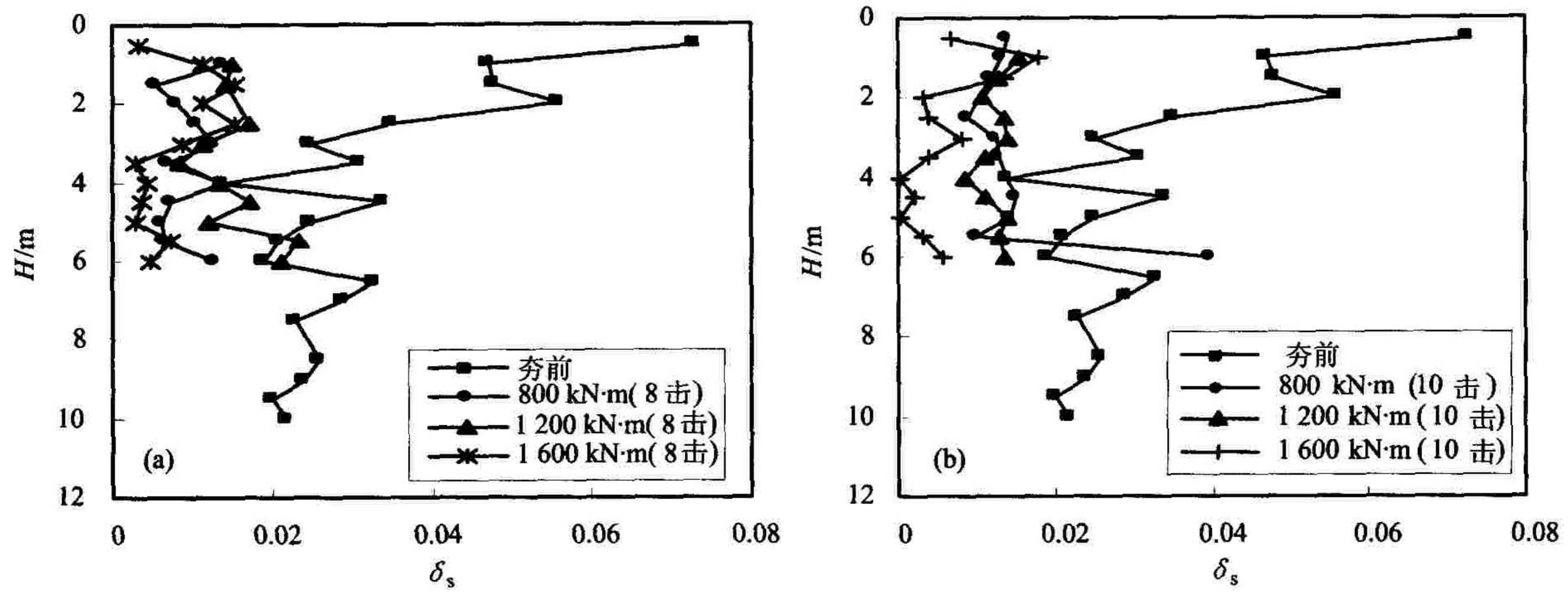


图2 不同夯击能作用下黄土湿陷系数随深度的变化

Fig. 2 Changes of collapsibility coefficient with depth under different compaction energy

(a)夯击次数8次;(b)夯击次数10次

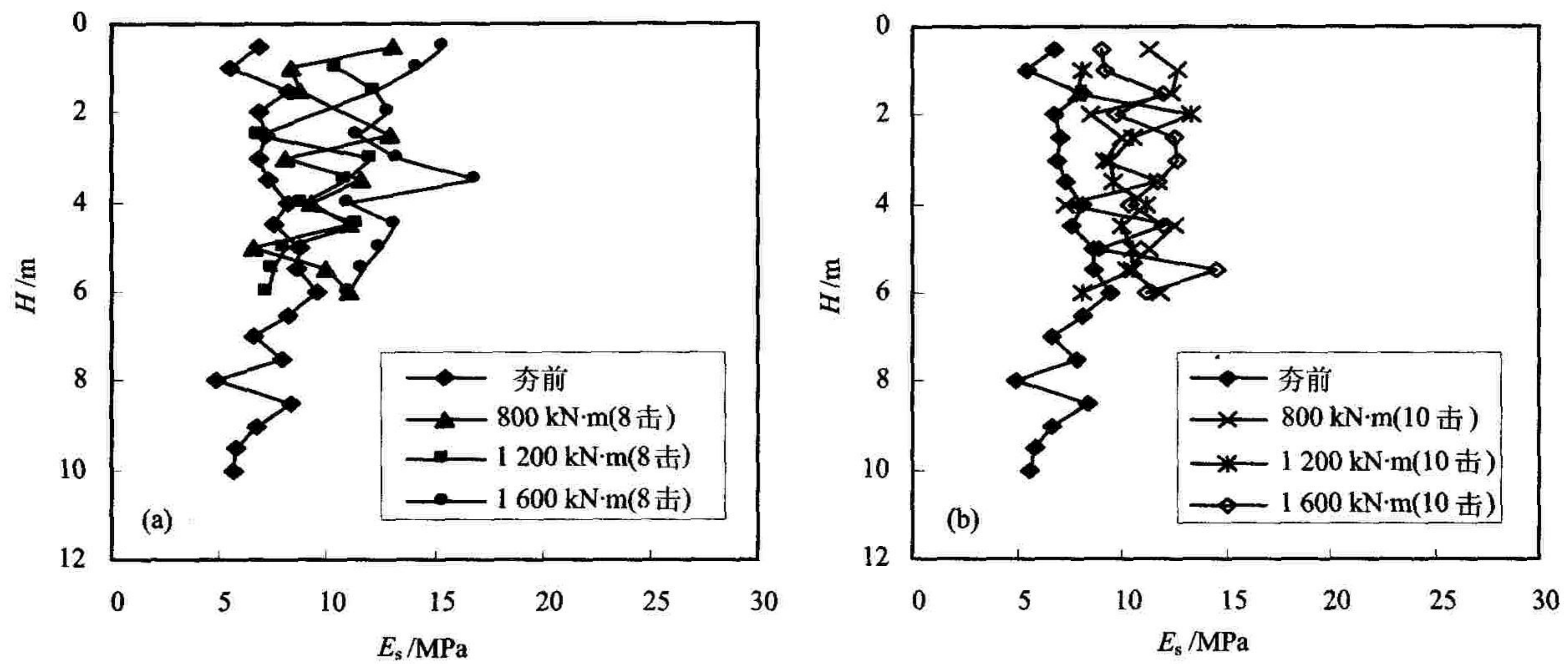


图3 不同夯击能作用下黄土压缩模量随深度的变化

Fig. 3 Changes of compression modulus with depth under different compaction energy

(a)夯击次数8次;(b)夯击次数10次

的湿陷系数随深度的变化曲线。由图可知,投料厚度分别为 0.5 m、0.8 m、1.1 m、1.4 m 和 1.7 m 时,土的湿陷系数都有较明显的改变;在 4~4.5 m 深度范围内,湿陷系数均小于、等于 0.015;其中投料厚度小于 1.1 m 时,基本可使深度 6 m 范围的黄土满足消除湿陷性的要求。

因此,综合不同投料厚度时土的湿陷系数的改变和触探击数的变化规律,认为施工中最适宜的投料厚度为 1.1 m 左右。在灰土桩桩长 4.5 m、桩径 0.4 m、桩间距 1.1 m 条件下,可消除深度达 6 m 的

黄土湿陷性。而在另一个试验标段的结果表明,桩长 8.0 m 时可消除 9.0 m 深度的黄土湿陷性。

3 冲击碾压处理效果分析

冲击碾压试验段位于 15 标 K397+400 m~K397+600 m 段进行。该段黄土厚度 3.3~12.0 m,土的压缩系数为 0.29~0.42 MPa⁻¹,天然含水量为 13%~23%,饱和度为 40%~50%,孔隙比为 0.9~1.1,干密度为 1.30~1.40 g/cm³。黄土的湿陷系数为 0.010~0.07,平均湿陷系数 $\delta_s=0.041$,

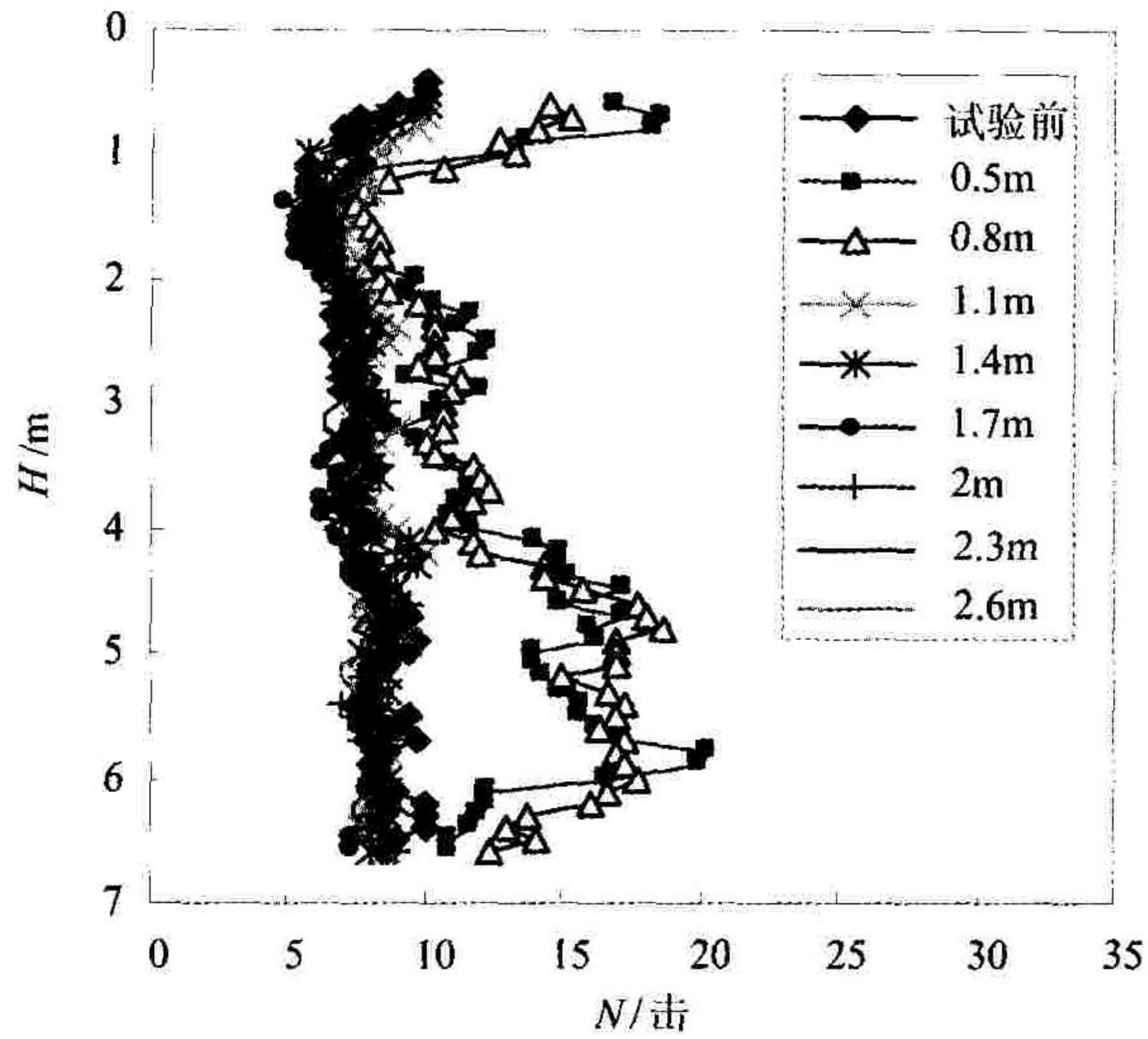


图 4 不同的投料厚度时触探击数与深度的关系

Fig. 4 Relation of dynamic penetration times vs. depth for different fill thickness

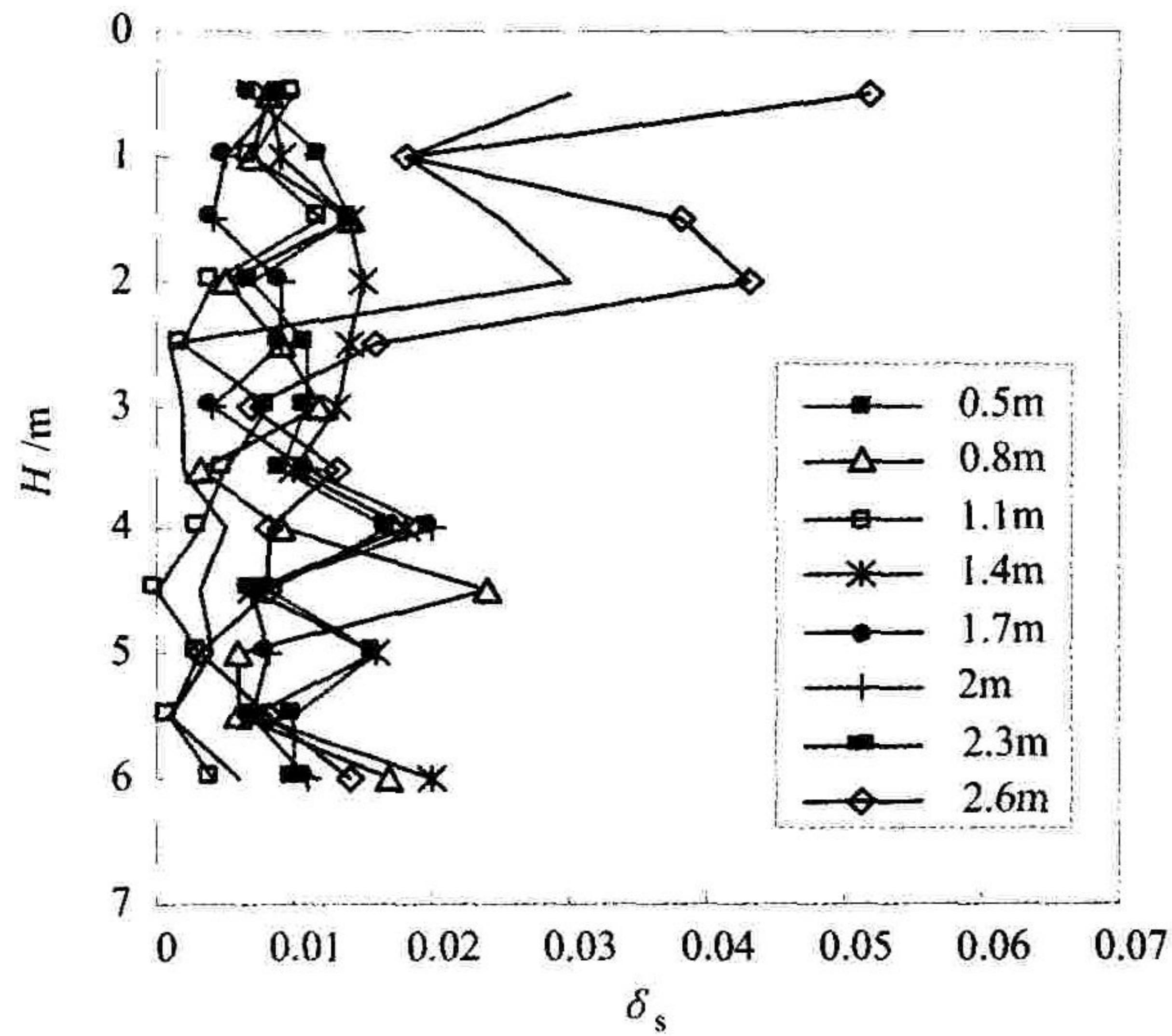


图 5 不同的投料厚度时湿陷系数与深度的关系

Fig. 5 Relation of collapsibility coefficient vs. depth for different fill thickness

湿陷量为 233.4 mm, 湿陷程度中等, 湿陷等级 II 级; 自重湿陷系数均为 0.015~0.05, 平均自重湿陷系数 $\delta_{zs}=0.024$, 起始湿陷压力为 55~110 kPa。可见, 黄土的湿陷明显, 必须通过路基处理消除其湿陷性, 以达到路基设计要求。

冲击碾压法具有压实和击实两种功效。冲击压实机由牵引车拖动, 靠凸轮瓣对土进行冲击压实, 碾压后土的密度超出了常规压路机的压实效果。试验

效果可以用压实系数的要求确定, 一般控制在 20~40 次为宜。试验过程采用 25 kJ 三边形冲击式压路机, 以 12 km/h 冲碾速度碾压; 按 10、20、30、40、50、60 遍进行冲击碾压; 每 10 遍在直线段测点处测定不同遍数的下沉量、压实度; 获得冲击遍数 m 与沉降 S 及压实度 D_r 的变化规律, 以确定路基处理的标准。

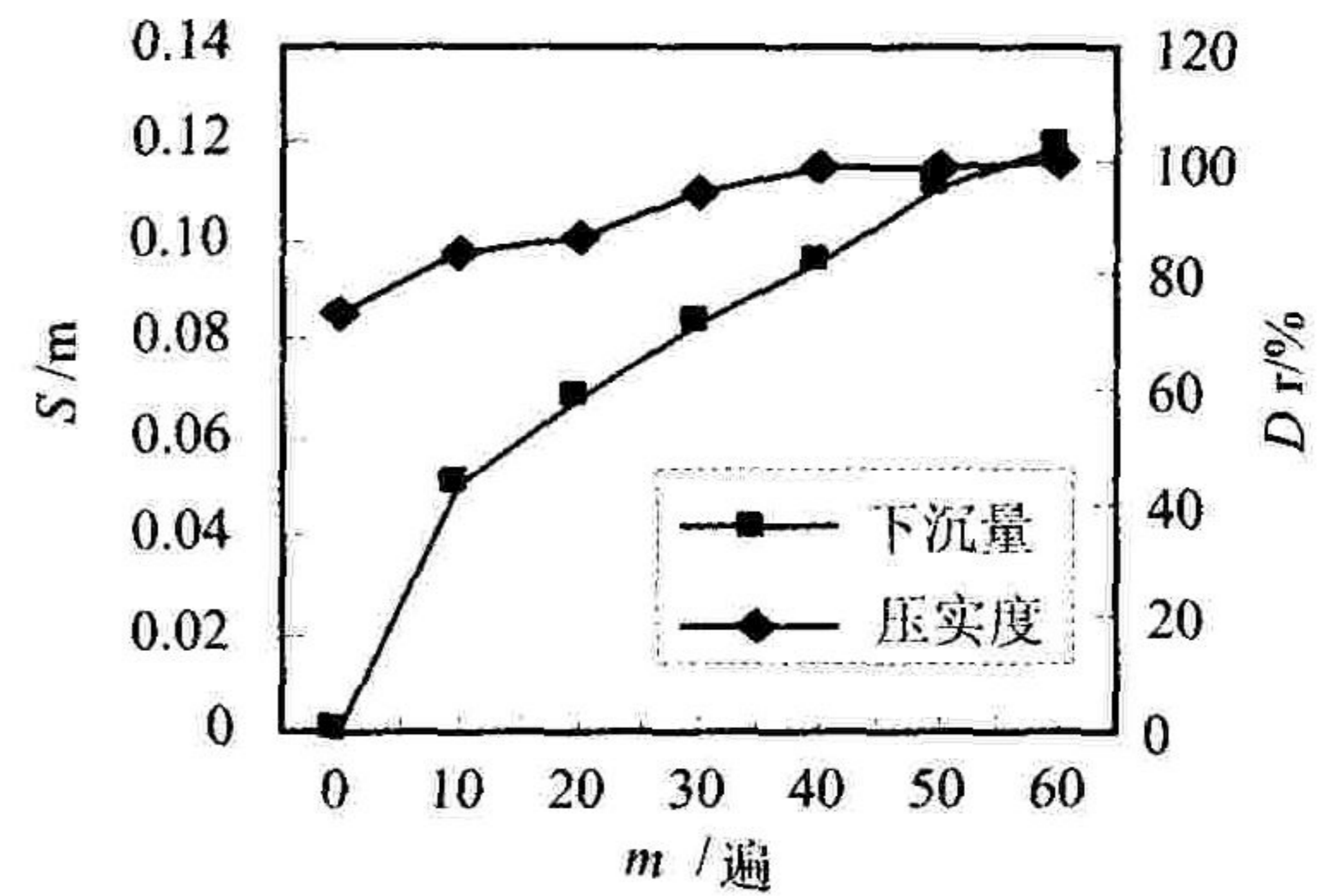


图 6 冲击碾压遍数与下沉量及压实度的关系曲线

Fig. 6 Relationship of surface settlement and degree of compaction to impacted rolling times

图 6 为施工完成后测得不同冲击碾压遍数 m 与地面下沉量 S 和压实度 D_r 的变化曲线。可见, 冲击碾压在 0~20 遍时冲碾造成的路基沉降增长较快, 30 遍以后变化缓慢; 60 遍后的下沉量为 0.12 m。从路基压实度变化来看, 冲碾 0~10 遍变化最大, 10~30 遍压实度增加缓慢, 压实度于 40 遍最大, 40 遍以后压实度变化不明显。

由图 7(a) 冲击碾压前后的动力触探曲线对比可知, 深度 0.6 m 内的触探击数 N 有所增加。冲击碾压对土层的湿陷性有影响的深度大致为 2.5 m, 而具有显著影响的深度应在 1.0 m 左右(图 7(b))。由处理前后的孔隙比比较可知, 黄土的孔隙比 e 在深度 3.0 m 左右范围内明显减小(图 7(c))。图 7(d) 则是黄土压缩系数 a 与深度的关系, 比较处理前后的压缩系数变化规律可知, 黄土的压缩性在深度 2.8 m 左右范围内有显著减小。

可见采用现有的施工机械和施工条件, 冲击碾压 40 遍为最佳冲击遍数, 冲击 40 遍的路基平均下沉量为 0.096 m, 路基表层压实度大于 97%。从黄土湿陷性系数随深度变化来看, 深度 1.0 m 处的湿陷系数已小于 0.015, 说明经冲击碾压处理, 在深度 1.0 m 范围内的湿陷性已被消除, 而在此深度范围内的土的孔隙比和压缩系数以及原位动力触探击数

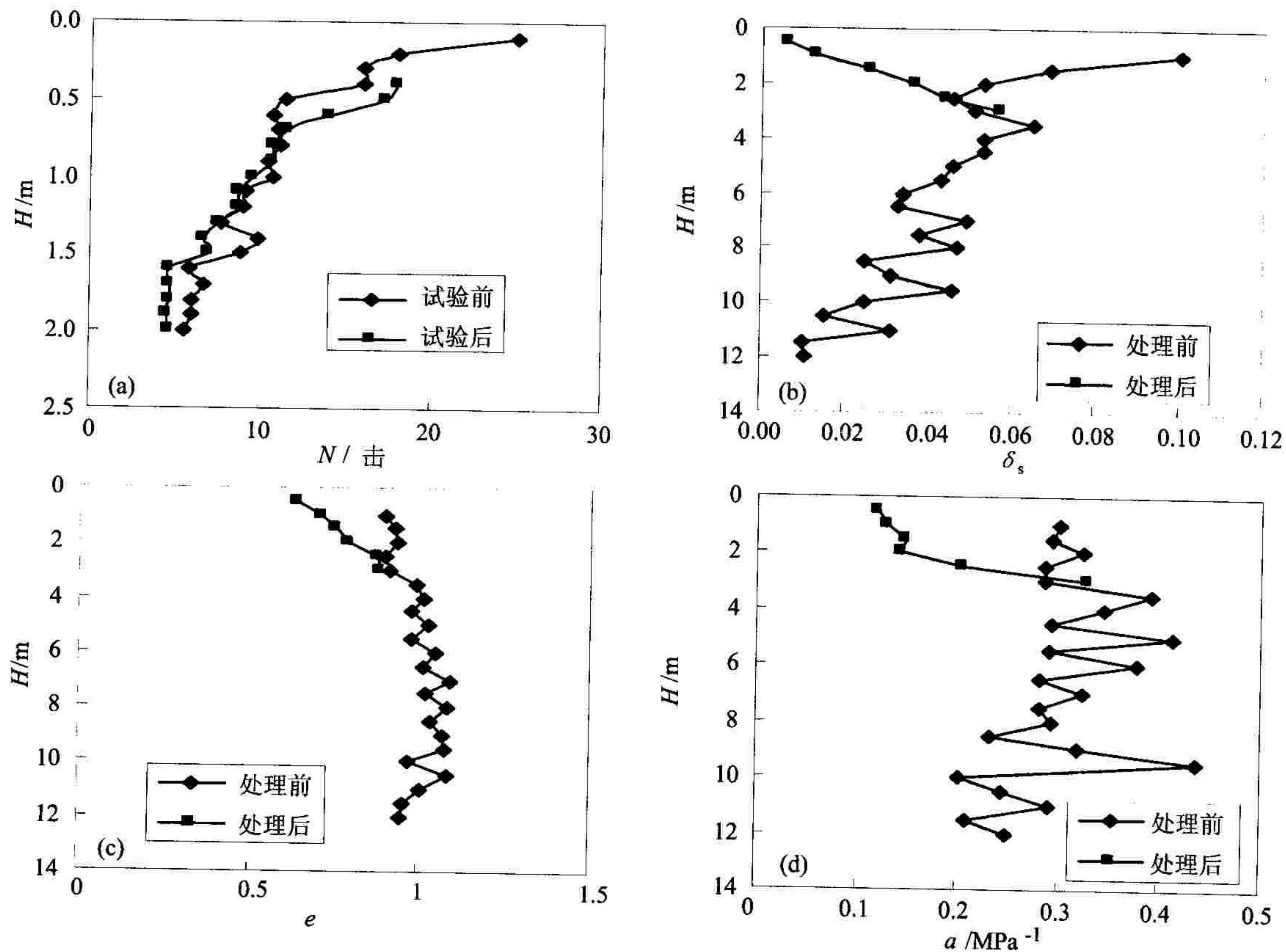


图 7 黄土处理前后物理力学性质的对比

Fig. 7 Physical and mechanical properties comparison before and after treatment in different depth

(a) 触探击数随深度的变化; (b) 湿陷系数随深度的变化; (c) 孔隙比随深度的变化; (d) 压缩系数随深度的变化

有了明显的改善,因此可以确定冲击碾压的有效影响深度为 1.0 m 左右。

4 结论

强夯法、冲击碾压法和灰土桩法作为处理湿陷性黄土地基的基本手段。通过对朝阳至阜新高高速公路黄土路基初步的试验研究,得出以下几点认识:

(1) 夯击能 800~1 600 kN·m 下的有效影响深度可以达到 4~6 m,可以满足高速公路湿陷性黄土路基的处理。在有效影响深度内黄土的孔隙比发生了较明显的变化,压缩性得到了显著的降低,湿陷性得到了有效的控制。建议黄土路基进行强夯处理时点夯击数不少于 8 击。

(2) 灰土挤密桩法不仅对桩深范围内的黄土湿陷性有明显的改变,而且在一定程度可改变桩端一定范围内的黄土的力学性质和消除湿陷性,适合于较深厚湿陷性黄土的路基处理。

(3) 冲击碾压法适合黄土厚度较小和表层黄土

的处理,冲击碾压 40 遍为最佳,其处理深度在 1 m 左右。

(4) 据强夯试验结果,强夯加固深度的 Menard 公式中的修正系数 α 值可取 0.4~0.5。

参考文献 (References):

- [1] 钱鸿绪,罗宇生. 湿陷性黄土地基[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1985.
QIAN Hong-xu, LUO Yu-sheng. Collapsible loess subsoil[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1985.
- [2] 陈正汉,刘祖典. 黄土的湿陷变形机理[J]. 岩土工程学报,1986,8(2):1-12.
CHEN Zheng-han, LIU Zu-dian. Collapsible deformation mechanism of loess[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(2):1-12.
- [3] 王永焱,林在贯. 中国黄土的结构特性及物理力学性质[M]. 北京:科学出版社,1990.
WANG Yong-yan, LIN Zai-guan. Structure and phy-

- sical and mechanical properties of Chinese loess[M]. Beijing: Science Press, 1990.
- [4] 苗天德, 刘忠玉, 任九牛. 湿陷性黄土的变形机理与本构关系[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(4): 383 - 387.
MIAO Tian-de, LIU Zhong-yu, REN Jiu-niu. Deformation mechanism and constitutive relation of collapsible loess[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(4): 383 - 387.
- [5] 罗宇生. 湿陷性黄土地基评价[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(4): 87 - 91.
LUO Yu-sheng. Evaluation for collapsible loess ground [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(4): 87 - 91.
- [6] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(1): 3 - 12.
XIE Ding-yi. On some new tendency in research of Chinese loess mechanics [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(1): 3 - 12
- [7] 张炜, 张苏民. 我国黄土工程性质研究的发展[J]. 岩土工程学报, 1995, **17**(6): 81 - 88.
ZHANG Wei, ZHANG Su-min. Development of engineering properties research for Chinese loess[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(6): 81 - 88.
- [8] 石玉成, 李兰, 刘红玫. 黄土的震陷性与其微结构特征的关系研究[J]. 西北地震学报, 2002, **24**(2): 129 - 134.
SHI Yu-cheng, LI Lan, LIU Hong-mei. A study on relationship between vibrated collapsibility and its microstructure character[J]. Northwestern Seismological Journal, 2002, **24**(2): 129 - 134.
- [9] 沈珠江, 胡再强. 黄土的二元介质模型[J]. 水利学报, 2003(7): 1 - 6.
SHEN Zhu-jiang, HU Zai-qiang. Two-element media model of loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(7): 1 - 6.
- [10] 雷胜友, 唐文栋, 王晓谋, 等. 原状黄土损伤破坏过程的CT扫描分析(II)[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, **2**(1): 53 - 56.
LEI Sheng-you, TANG Wen-dong, WANG Xiao-mou, et al. CT scan analysis for damage failure process of undisturbed loess(II)[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, **2**(1): 53 - 56.
- [11] 卢全中, 彭建兵. 黄土体工程地质的研究体系及若干问题探讨[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, **36**(3): 404 - 409.
LU Quan-zhong, PENG Jian-bing. Research on systematic frame and some problems of engineering geology of loess mass[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, **36**(3): 404 - 409.
- [12] 王生新, 韩文峰, 湛文武. 冲击压实法加固湿陷性黄土路基的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(增刊): 2848 - 2852.
WANG Sheng-xin, HAN Wen-feng, ZHAN Wen-wu. Application of impact-rolling method used to stabilize collapsible loess ground [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(Sup.): 2848 - 2852.
- [13] 张伯平, 席丁民, 张玉香. 关中西部黄土地基强夯处理工程效果研究[J]. 西北农业大学学报, 2000, **28**(5): 95 - 99.
ZHANG Bo-ping, XI Ding-min, ZHANG Yu-xiang. A study on compaction treatment effect for loess sugrade in west of Guanzhong[J]. Sci - Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition), 2000, **28**(5): 95 - 99.
- [14] 陕西省计划委员会. GB 50025 - 2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
Shaanxi Province Planned Committee. GB 50025 - 2004 Code for building construction in collapsible loess regions [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [15] 中国建筑科学研究院. JGJ 79 - 2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Chinese Architecture Science Academe. JGJ 79 - 2002 Technical code for ground treatment of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.