

杨晓华, 张建伟, 张莎莎, 等. 黄土地区高速公路地基处理技术研究进展[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022, 42(1): 16-32.

YANG Xiao-hua, ZHANG Jian-wei, ZHANG Sha-sha, et al. Research progress on foundation treatment techniques of expressway in Loess Area[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2022, 42(1): 16-32.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2022.01.002

## 黄土地区高速公路地基处理技术研究进展

杨晓华, 张建伟, 张莎莎, 晏长根

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**公路基础设施建设规模的扩大和速度的加快推动着中国地基处理技术持续蓬勃地发展, 为了满足工程建设的需要, 黄土地区高速公路地基处理技术与相关理论研究也不断深入。简述了黄土的概念、分类及分布, 在综合概括黄土工程特性的基础上, 介绍了由于地基的强度、变形、稳定性及渗透问题而引起的黄土地区公路路基各种病害类型。针对湿陷性黄土地基和湿软黄土地基处理, 以既有传统地基处理手段为基础, 各种地基处理技术交叉综合应用, 地基处理方法得到不断改进和创新, 并不断涌现出具有特色的和代表性的地基处理新技术。结合相关工程经验与研究资料, 总结了黄土地区高速公路地基处理技术研究进展, 为黄土地区高速公路地基处理提供一定的参考。

**关键词:**道路工程; 岩土工程; 高速公路; 黄土地基; 地基处理; 研究进展

中图分类号: U419.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-8879(2022)01-0016-17

### Research progress on foundation treatment techniques of expressway in Loess Area

YANG Xiao-hua, ZHANG Jian-wei, ZHANG Sha-sha, YAN Chang-gen

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** With the scale expansion and speed acceleration of highway infrastructure construction, the development of foundation treatment technology were promoted vigorously and continuously. In order to satisfy the needs of engineering construction in Loess Area, the foundation treatment technology and related theoretical researches of expressway were also in-depth. The paper briefly describes the concept and distribution of loess. On the basis of comprehensively summarizing the engineering characteristics of loess, various types of subgrade diseases of the highway in Loess Area caused by the strength, deformation, stability and the permeability of foundation were introduced. Aiming at the treatment of collapsible loess foundations and wet soft loess foundations, on the base of the existing traditional foundation treatment methods, a variety of foundation treatment technologies were applied comprehensively. At the same time, the foundation treatment methods were constantly improved and innovated, and the characteristic and representative new technologies were emerging. Combined with relevant engineering experience and research data, the review of expressway foundation improvement techniques in Loess Area

收稿日期: 2021-08-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077265)

作者简介: 杨晓华(1961-), 男, 河北唐山人, 教授, 博士研究生导师, E-mail: xiaohuay@126.com.

was summarized, which provides a certain reference for expressway foundation treatment in loess area. 9 figs, 89 refs.

**Key words:** road engineering; geotechnical engineering; expressway; loess foundation; foundation treatment; research progress

## 0 引言

黄土古称“黄壤”,是一种主要发育在干旱半干旱地区,以粉粒为主、富含可溶盐、大孔隙发育,呈弱胶结、黄色状,具有显著结构性的第四纪陆相沉积物。中国黄土的分布面积约64万 $\text{km}^2$ ,黄土的沉积具有分选作用,黄河中游地区黄土分布最为广泛,发育最好,地层全、厚度大、分布连续,古土壤层清晰<sup>[1]</sup>。湿陷性黄土约占黄土地区总面积的3/4,主要在陕西、山西、甘肃等。黄土受水充分浸泡后成为湿软黄土,其大部分处于地势低洼、底层为不透水层、排泄条件差、地下水位高的区域,厚度在4.5~22 m之间<sup>[2]</sup>。

随着基础设施建设力度的加大和交通网的不断完善,穿越中国西北部黄土区的高速公路工程逐步增多。湿陷性黄土面广量大,地基土在天然状态下具有一定的承载力,在外因(如水、荷载)的影响下,其结构易遭到破坏,强度丧失,严重威胁着工程安全,同时,湿软黄土地基的承载力不足及其沉降变形不均匀等工程问题也亟待解决。因此,根据黄土的特殊性和地区差异性合理高效地处理地基,这对于保证工程质量和运营安全、发挥公路功能等具有积极意义。近年来,黄土地区高速公路地基处理技术研究涌现出很多新技术和新工艺,方法得到改进和创新,形成了富有特色的黄土地基处理体系,并在工程实践中取得成功应用<sup>[3]</sup>。

## 1 黄土的工程特性

### 1.1 湿陷性黄土的工程特性

在一定压力下受水浸湿,土结构迅速破坏,并产生显著附加下沉的黄土为湿陷性黄土<sup>[4]</sup>。不同区域内湿陷性黄土厚度、物理力学性质差异明显,对于其工程特性已进行了大量的研究。

#### 1.1.1 湿陷性黄土物理特性

湿陷性黄土孔隙和垂直节理发育,以粉土为主,含多种易溶盐,土体各向异性明显,水敏感性<sup>[5]</sup>。

(1)孔隙比。湿陷性黄土的天然孔隙比一般

较高,多为0.9~1.1,最大可达1.30以上,随着埋深增加,孔隙比逐渐减小。

(2)含水率。湿陷性黄土的天然含水率一般较低,当湿陷性黄土的天然含水率大于24%(西安)或25%(兰州)时,湿陷性通常就不存在<sup>[6]</sup>,大多数湿陷性较高的黄土处于半固体-硬塑状态。

(3)重度。黄土的相对密度一般为2.51~2.84,由西北向东南呈逐增趋势。湿陷性黄土的天然容重一般为13.5~19.0 $\text{kN/m}^3$ ,干容重一般为11.0~16.0 $\text{kN/m}^3$ ,干容重超过15.0 $\text{kN/m}^3$ 时,湿陷性很弱或无湿陷性。

(4)渗透性。湿陷性黄土的渗透性呈明显的各向异性。影响黄土渗透性的因素很多,如孔隙比、颗粒级配等,越向西土粒越粗,渗透系数越大<sup>[2]</sup>。

#### 1.1.2 湿陷性黄土力学特性

湿陷性黄土在外荷作用下表现出变形和强度特性,常用的力学指标有抗剪强度、压缩系数、湿陷系数等。

##### (1)抗剪强度

固结快剪试验测得的天然状态下湿陷性黄土黏聚力一般为15~30 $\text{kPa}$ ,内摩擦角为 $17^\circ\sim 30^\circ$ 。高含水率条件下,黄土表现出一定的塑性变形特征,在干燥条件下,土体的变形表现出一定的脆性特征。

##### (2)压缩性

天然含水率时湿陷性黄土压缩性较低,遇水后压缩性增高。地层年代越新,压缩性越高。

##### (3)湿陷性

黄土颗粒呈镶嵌分布,以点接触为主,架空孔隙十分明显,土体在水、压力作用下结构迅速被破坏,产生湿陷变形,呈突变性、非连续性和不可逆性<sup>[2]</sup>。工程中经常遇到的湿陷往往发生在沿土层达到不同增湿含水量时的增湿变形<sup>[7]</sup>。一般来说,地层年代越新,黄土湿陷性越强。湿陷性黄土的湿陷系数用于地基土的湿陷性评价,总体来说,全国范围内自西北向东南黄土湿陷性由大变<sup>[8]</sup>。

## 1.2 湿软黄土的工程特性

黄土在地下水或雨水的聚积浸泡下会发生软化,呈软塑甚至流塑状态,在工程上表现出湿软性。湿软黄土具有一定的饱和度,但又不一定饱和;其工程性质类似于软土,但优于软土。

### 1.2.1 湿软黄土物理特性

通过对陕西、甘肃、宁夏、青海等地的公路湿软黄土资料的统计,参考相关试验研究成果<sup>[9]</sup>,归纳出湿软黄土地基物理特性。

(1)含水率高,湿软黄土含水率一般为25%~33%,饱和度一般大于80%。

(2)液性指数大,湿软黄土天然含水量与液限比较接近,多为软塑或流塑状态。

(3)孔隙比大,湿软黄土孔隙比往往大于0.8接近1,天然容重为14.2~15.2 kN/m<sup>3</sup>。

(4)弱渗透性,软黄土的渗透系数可达10<sup>-6</sup>数量级,在自重或荷载作用下固结较慢;在初始加荷阶段,地基中常因积聚较高的孔隙水压力而影响其强度<sup>[2]</sup>。

(5)不均匀性,湿软黄土地层土体中常含有分布不均的植物根茎和腐殖质,且无规律,导致地基易产生差异沉降。

### 1.2.2 湿软黄土力学特性

结合黄土地区高速公路沿线湿软黄土力学性质指标以及文献中的有关湿软黄土的试验研究资料,概括了湿软黄土地基的力学特性如下。

(1)强度低,无侧限抗压强度为15.7~33.8 kPa,内摩擦角一般小于15°,黏聚力一般小于20 kPa。

(2)高压缩性,甘肃中部黄土湿陷性强,因受水浸泡湿陷性消失,转化的软黄土压缩性大、变形量大,并随黄土的液限和天然含水率的增大而增高。早期浸水饱和的黄土经过较大和长期覆盖压力的充分压密作用,黄土结构强度增大,承载力有所提高<sup>[2]</sup>。一般来说,湿软黄土地基不仅压缩变形量大,而且持续时间长。

(3)触变性敏感,湿软黄土一旦受到扰动,原有的结构迅速破坏,土的强度会有明显的降低,甚至呈流动状态,地基在振动荷载下,易产生土体侧滑、沉降、基底向两侧挤压的现象,静置一段时间后强度又有所增长,因此现场不易测定湿软黄土地基承载力。

(4)承载力低,湿软黄土标准贯入试验N<sub>63.5</sub>击数大多为2~3击,局部7~8击,地基承载力一般

为50~80 kPa<sup>[2]</sup>。

(5)无湿陷性,由于湿软黄土长期受水浸泡,湿陷性已经消失<sup>[2]</sup>。

## 2 黄土地区高速公路路基病害类型

黄土地区公路因黄土地基自身的特点,普遍存在着较大下沉变形,在雨水及交通荷载等作用下,极易产生各种病害,造成较大的经济损失。国内外学者也针对黄土地区病害展开了研究,黄土地区路基病害可分为路基沉陷、路基边坡损坏、路基失稳。

### 2.1 路基沉陷

湿陷性黄土地基在地表积水入渗以及地下水位上升等因素的影响下,土体结构迅速破坏,在自重及外荷的作用下,黄土湿陷变形而引起路基不均匀沉降,造成路面基层和沥青面层的拉裂,裂缝面粗糙呈弧形分布,开启性良好,表现出明显的拉张性<sup>[10]</sup>,易发展为更严重的路基病害,见图1。



图1 硬路肩沉陷

Fig. 1 Hard shoulder subsidence

路基陷穴是指湿陷性黄土在自身重力及水流冲刷作用下,形成的破坏原有路基结构的不同类型和形式的暗沟、暗穴。在地形和土质有利条件下,水向路基低洼处汇集,并沿着黄土的垂直节理和大孔隙,未夯实回填土的裂缝、孔隙向路基内渗透,在水浸泡和重力作用下,地基发生湿陷<sup>[11]</sup>,引起局部下沉,随着暗洞不断发展扩大,路基不能承受上部荷载时会突然塌陷,见图2。

湿软黄土地基土层含水率过高,在路基自重及交通荷载作用下产生较大压缩变形,引起局部路基整体或纵、横向不均匀沉降,路面结构层出现裂缝、车辙、路面波浪等,可导致构造物断裂破坏,影响行车舒适性并存在安全隐患。在公路竣工后的长期使用过程中,地基和路堤不均匀沉降将持续发展,并且软土路基与桥台的差异沉降会导致



图 2 路基陷穴引发塌陷

Fig. 2 Collapse caused by subgrade collapse

桥头跳车<sup>[2]</sup>,见图 3。

图 3 软基引起路面沉降

Fig. 3 Pavement settlement caused by soft foundation

## 2.2 路基边坡破坏

坡面冲刷和剥落是黄土路堑边坡坡面破坏的主要形式<sup>[12]</sup>,是一种严重的边坡病害,常见且多发。降雨击溅和坡面径流会对边坡造成冲刷破坏;黄土天然含水率较低,具有一定的结构强度,边坡可保持较陡的坡度,当土体反复浸水时,坡体中水分增大,黄土开裂会出现边坡剥落,严重时造成土质边坡坍塌、路基下沉,影响工程的使用,见图 4、图 5。采用聚丙烯纤维加筋黄土的坡面防护效果明显,可以在公路黄土边坡坡面防护中推广使用<sup>[13]</sup>。

公路地基局部压缩过大而导致路基变形不均匀,地基在路堤填土荷载的作用下,湿软黄土土体向外挤出,路基在交通荷载作用下发生侧向膨胀挤出滑动,边坡鼓凸变形<sup>[2]</sup>。雨水侵蚀造成坡脚处脱空,路堤坡脚处地基水平位移较大,牵动坡脚及边坡外移,路基填土侧移蠕变,最终导致路堤边坡坍塌。

## 2.3 路基失稳

湿软黄土地基承载力不足时,当路堤及路面



图 4 边坡整体浅层滑塌

Fig. 4 Overall shallow landslide of slope



图 5 边坡冲刷破坏

Fig. 5 Erosion destruction of slope

外荷载达到地基土的极限抗剪强度,地基发生局部或整体剪切破坏,表现为路堤快速陷入软土地基中,或路堤整体快速下沉,或路堤土体大幅度变形、破裂、坍塌,或是路堤的一部分地基失稳,使部分路堤和软土地基沿破裂面发生位移<sup>[2]</sup>,见图 6。



图 6 路堤失稳

Fig. 6 Embankment instability

## 3 黄土地区高速公路地基处理技术及研究进展

公路路基病害的根源是地基变形,在黄土地

基上进行公路建设,必须先对黄土地基进行处理,增强地基稳定性及承载能力。为了解决各种复杂工程问题以满足建设需要,近几年中国高速公路黄土地基处理是在既有传统地基处理方法的基础上,各种地基处理技术交叉综合应用,同时不断发展了一些地基处理新技术,并在工程实践中不断丰富其理论。

### 3.1 湿陷性黄土地基处理

当湿陷性黄土地基的湿陷变形、压缩变形或承载力不满足设计要求时,需要考虑黄土湿陷等级和水流特征来采取处理措施破坏黄土的大孔结构,减小土的渗水性、压缩性,消除基底下全部或部分湿陷量,保证结构物的安全<sup>[4]</sup>。对于一般路基,地基处理以防为主(主要是防排水),防治结合;对于桥台、涵洞、挡墙等构筑物,以治为主,防治结合。常用的处理方法包括:垫层法、夯实法、挤密法、预浸水法、化学加固法等,在工程应用与研究中这些方法也得到不断创新和发展。

#### 3.1.1 垫层法

垫层法是指挖除基础底面下1~3 m范围内浅层湿陷性黄土,回填其他性能稳定、无侵蚀性、强度高的材料,分层夯实回填材料形成局部(或整片)垫层以消除地下水位以上浅层地基的湿陷性<sup>[14]</sup>。采用垫层换填并用机械压实处理后,地基黄土的密实度增大、透水性降低、变形减小、承载力提高。垫层材料可采用土、灰土、水泥石等,也可将垫层与土工防渗膜联合使用,以有效消除湿陷性黄土的湿陷性或有效阻隔水<sup>[15]</sup>,不应使用透水性强的材料。试验研究发现,用聚丙烯纤维<sup>[16]</sup>、废旧轮胎颗粒<sup>[17]</sup>等材料加筋灰土均能提高灰土强度;水泥黄土垫层较素土或灰土垫层强度大、水稳性和抗渗性好,并且掺加粉煤灰等材料可提高压实水泥黄土的最大干密度、强度和弹性模量<sup>[18-19]</sup>。

#### 3.1.2 预浸水法

预浸水法是在施工前对地基大面积浸水,使浸润土体在饱和自重压力作用下产生压缩变形,可在中等~强烈的自重湿陷性场地处理地表6 m深度以下的湿陷性土层,将预浸水法与DDC法、挤密桩法结合使用能达到很好的地基处理效果。针对浸水入渗过程缓慢、作用于深部地层耗时较长和用水量过大等不足,熊凯成提出了一种改良的浸水方法—钻孔预浸水法,该法是在浸水试坑底部钻井形成多个浸水井,通过对多个浸水井同

时注水使入渗水可直接作用于预处理范围内的湿陷性黄土层<sup>[20]</sup>。利用酸能迅速溶解碳酸钙等盐晶胶结这一特点,一些学者在预浸水法的水中添加适量的乙酸、硝酸,研究表明加酸预浸水法处理后的黄土湿陷性降低程度要明显大于常规预浸水法,并可有效缩短施工时间<sup>[21-22]</sup>。当在浸水中掺加乙酸时,由于乙酸的“催化作用”使得黄土发生湿陷时对压力的要求降低,从而使得该方法可以推广应用于非自重湿陷性黄土<sup>[21]</sup>。

中国多个现场预浸水试验已经取得很多有益成果,对于湿陷性黄土地区建筑规范的修编起到了重要作用。现场预浸水可以真实地反映土体实际的入渗状态,有助于掌握不同深度土层水分入渗规律、黄土湿陷变形规律。同时按照水分入渗后土体的实际含水率来计算湿陷量更符合工程实际,《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB 50025—2018)中增加了不同深度地基土浸水概率系数 $\alpha$ 用于场地土受水浸湿饱和后湿陷量的计算,以此来控制剩余湿陷量更为合理,从而避免不必要的工程浪费<sup>[23]</sup>。

#### 3.1.3 夯实法

夯实法包括强夯法和重锤夯实法,主要通过动力密实处理湿陷性黄土地基,利用夯锤反复从高处落下产生的夯击能量破坏黄土结构,使土颗粒排列趋于密实,显著消除黄土的湿陷性并提高地基承载力,同时提高土层的均匀程度,增强地基土变形协调性。重锤夯实法可处理基底以下1~2 m黄土的湿陷性,强夯法夯实深度一般为3~9 m。

强夯处理在实际工程中应用广泛,效果良好,已经具备了相对成熟的体系与一系列完善的技术标准与工程规范。国内外对于强夯加固机理研究大多集中在宏观机理上,如对夯能沿土层深度的分配、强夯加固深度、强夯地基承载力和沉降理论研究,及依托实际工程强夯试验结果得出针对性强,但推广有限的结论<sup>[24]</sup>,对于微观机理如土颗粒之间的动力学特征与相互作用研究较少。针对强夯过程地基土变形特性、动力特性,许琨建立了基于非完全弹性碰撞原理的强夯加固湿陷性黄土地基振动模型,可求解出其最大位移、最大速度和最大加速度以及其对应的时间<sup>[25]</sup>。关于R波在强夯加固地基时是否有利问题存在不同观点,牛志荣等研究发现,R波为强夯法的有效加固波形在强

夯加固地基中有较大的贡献,R波在传播过程中对锤底土能起到加密作用,对夯坑以外的土表面有变松作用,其影响深度约为一个波长<sup>[26]</sup>,可通过波长科学估算强夯影响深度。

为了满足工程实践的需要,强夯施工工艺在应用与试验研究中不断取得突破<sup>[27]</sup>。在中石油庆阳石化公司搬迁改造项目中,中国首次在湿陷性黄土地区引进了 15 000 kN·m 超高能级强夯,有效地消除了 15 m 深度范围内地基黄土湿陷性,提高了地基承载力。目前强夯能级最高可达 30 000 kN·m。

含水量对于强夯处理效果影响非常大,当采用强夯法处理含水率低于 10% 的湿陷性黄土地基时,宜对其增湿至最优含水率,随即逐渐发展了“增湿高能级强夯法”,但在施工过程中需多次增湿,全过程控制,同时也会大幅增加造价;对于湿陷性黄土而言,干密度越大,湿陷性消除效果越好,夯击功能是影响击实效果的重要因素,由于超高能级强夯所达到的夯击功已超过重型击实试验击实功的 1 倍<sup>[28-29]</sup>。郭伟林等将 10 000 kN·m 以上超高能级强夯用于低含水量湿陷性黄土的处理,提出了增湿超高能级(10 000 kN·m)处理 25 m 深度以上湿陷性黄土地基施工方法专利并应用于实际工程,此方法超过了不增湿超高能级强夯最大处理深度的极值<sup>[30]</sup>。

### 3.1.4 振密挤密法

挤密桩法是利用沉管、冲击等在土中挤压成孔,再向孔内分层夯填素土或灰土等材料挤密土体,形成稳定桩体。根据成孔工艺,可分为挤土成孔挤密法和预钻孔夯扩挤密法,常用于处理 5~25 m 深度范围内饱和度  $S_r \leq 65\%$ ,含水量  $w \leq 22\%$  的湿陷性黄土。为研究如何合理控制大厚度自重湿陷性黄土地区地基处理深度与剩余湿陷量,杨校辉等进行了不同深度的挤密桩处理地基深层浸水载荷试验,研究结果表明:深度大于一定值时的土体根本达不到湿陷起始含水率和湿陷起始压力,基本没有发生湿陷,可将深度 22.5~25.0 m 作为大厚度自重湿陷性黄土地基处理和湿陷性评价的临界深度;大厚度自重湿陷性黄土地基在采取有效的地基处理、防水措施、结构措施之后,建议适当放宽对剩余湿陷量的要求<sup>[31-32]</sup>。《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB 50025—2018)增加了大厚度湿陷性黄土地基上建筑物地基处理深度及外放的规定。

为处理高填方湿陷性黄土地基,李金奎等选取建设区 60 m 的高填方场地作为试验区进行传统的挤密桩加固试验,结果表明,桩心距在 2.5 倍桩径范围内不仅可以解决承载力问题,还可以完全消除回填黄土的湿陷性,桩孔填料为灰土时的处理效果明显优于素土<sup>[33]</sup>。付海山提出土挤密桩-CFG 桩复合地基处理高应力水平下湿陷性黄土地基,采用慢速维持荷载法对土挤密桩-CFG 桩复合地基进行了试验研究,结果表明,挤密桩法对黄土挤密加固作用明显,基本消除了黄土湿陷性,复合地基承载力得到显著提高<sup>[34]</sup>。

为解决低净空情况下湿陷性黄土的挤密处理,中铁西北科学研究院有限公司研制了无振动挤密设备,能够实现设备的小型化、轻便化和无振动,特别适合空间狭小、需严格控制振动的特殊场地。贾黎明进行无振动挤密处理现场参数试验和处理效果评价,指出当桩间距为 0.6、0.7 m 时,桩间土的湿陷性完全消除,平均挤密系数均大于 0.9,最小挤密系数均大于 0.88<sup>[35]</sup>。孙兵采用无振动挤密设备进行现场试验,结果表明无振动挤密桩设备的成桩性能良好,在黄土隧道基底加固中具有较好的适用性<sup>[36]</sup>。

孔内深层强夯法(DDC)是挤密法在工艺上的一种创新,是地基处理和环境工程领域内一次创新性的变革<sup>[37]</sup>。DDC 法采用机具先成小直径孔至预定深度,然后分层填料强夯形成密实桩体并通过振密挤密桩间土,消除湿陷性,提高地基承载力,最大处理深度可达 30 m,处理后地基承载力可达 600 kPa。DDC 法机理独特,用料广泛,工艺新颖,集高动能、高压强、强挤密等效应于一体,可节约钢材水泥,充分利用渣土等无机固体垃圾,在处理大面积、大厚度湿陷性黄土方面有着明显的技术优势<sup>[38]</sup>。孔内深层强夯的实质是动力固结问题,王雪浪通过现场对比试验发现 DDC 桩处理大厚度湿陷性黄土要优于石灰桩,并建立了孔内深层强夯动力简化计算模型,获得了强夯夯锤质量与距离的函数关系,及强夯深度和桩周土体有效密度的关系,提出了 DDC 法复合地基承载力及变形计算公式<sup>[39]</sup>。DDC 法桩长和桩间距的合理控制直接关乎工程的安全性与经济性,孔洋等采用浸水载荷试验研究 DDC 法复合地基承载特性与湿陷特性,对合理桩间距与桩长进行了优化设计,建议 DDC 桩的合理间距为 1.1 m,合理桩长为

20 m<sup>[40]</sup>。

近年来,各地工程技术人员根据工程地质条件,就地取材,因地制宜,发展了多种孔内夯扩技术。孔内夯扩法的成孔方法主要有:振动沉管法、人工挖孔法、螺旋钻取土成孔法、柱锤冲击成孔法、爆破成孔法等。采用孔内夯扩法加固地基的回填料主要有灰土、二灰土、水泥土、由水泥和建筑垃圾制备的渣土、碎石、砂石、矿渣,以及其他材料<sup>[41]</sup>。同时,夯扩自动化施工新技术条件下的DDC法克服了旧技术导致的设备操作工作繁重,自动化程度低,安全隐患大,夯实速度慢的缺点,新技术夯扩后预成孔直径从目前的400 mm,可达到600甚至800 mm,处理深度可增加到40 m<sup>[42]</sup>。

孔内深层超强夯法(SDDC)在填夯过程中采用特制重锤进行高压强、强挤密施工,处理深度宜为3~15 m,与DDC工法相比,SDDC桩有更大的成桩直径,从而满足苛刻的变形和承载力要求,综合效益好,SDDC法自动脱挂钩新技术使桩长直接增加至30 m以上或者更长<sup>[43]</sup>。

东南大学在国内外首次提出采用振杆密实技术处理湿陷性黄土地基,并使用自主研发施工装备进行现场试验研究,提出了边喷气边振动下沉的气动振杆密实法施工工艺。振杆密实法通过振动杆的高频振动和高压喷气作用破坏振点周围黄土的结构,提高土层密实度,处理后黄土平均湿陷系数可降至0.003,与传统挤密法、强夯法等相比,该法造价低,工效高、节能、环保,具有显著的经济效益和环境效益,是处理湿陷性黄土地基的一项全新技术<sup>[44]</sup>。

### 3.1.5 黄土固化材料研究进展

张登良等指出,加固土的目的在于提高土的水稳性和结构强度,是以物理-化学力学的理论为基础,研究结构形成过程的机理和规律性,从而制定方法以获得坚强稳定的结构<sup>[45]</sup>。在该理论基础上,可在天然黄土中添加性能稳定的改性材料进行固化来减少孔隙体积,改变内部颗粒接触情况、提高黄土的力学性能和稳定性以解决地基的变形、强度及稳定性问题<sup>[46]</sup>。物理改良材料多选择黏粒含量高的黏土类物质,如膨润土、高岭土等,其原理是通过增加黏粒含量改善黄土内部颗粒间的黏结作用,并使微小的黏粒落入黄土颗粒间的架空孔隙中,使土体更加趋于密实,降低其渗透性<sup>[47]</sup>。彭宇等利用抗疏力固化剂对甘肃地区黄土

进行改性处理,抗疏力固化剂能显著提高改性黄土强度、抗崩解性,其在改善黄土力学、水力性质的基础上,还一定程度上解决了传统固化剂在提高阻水性的同时通透性降低的矛盾<sup>[48]</sup>。刘钊钊等选取工业副产品木质素作为黄土改良材料,通过试验研究分析发现,木质素改良黄土持水性和水稳性的微观作用主要在于有效填充土体孔隙、胶结颗粒和疏水基斥水作用,且当木质素掺量(质量分数)为1%时,改良黄土强度达到最优<sup>[49]</sup>。在化学改性加固方面,针对硅化法自渗效果差、离子反应不完全、经济成本较高等问题,吕擎峰等研究了温度改性水玻璃固化黄土,发现固化黄土的强度随温度的升高而增大<sup>[50]</sup>。方晟等将硅化法和电渗法结合对黄土地基进行联合处理,发现电场改性水玻璃能较快提升黄土地基强度且能节约水玻璃用量,改良黄土强度随电压的增大和通电时间的延长而增大<sup>[51]</sup>。Pei等以石灰桩对黄土进行了固化,结果显示其能提高湿陷性黄土的性能及稳定性,石灰改性处理经济实用<sup>[52]</sup>。高立成研究发现,SH固化剂改性黄土的力学性质优于水泥、石灰改性黄土,且随固化剂配比不同,其对改性黄土的土体强度影响程度也具有差异<sup>[53]</sup>。程瑶佳等采用微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)技术对黄土进行改性处理,发现MICP改性黄土的作用机制是微生物诱导产生的碳酸钙对土颗粒形成有效胶结,能极大提升土颗粒之间的联接强度<sup>[54]</sup>。Zhao等通过不同比例的海藻酸钠对黄土进行固化,发现海藻酸钠可改变黄土的液塑限及颗粒级配,提高其抗压抗剪强度及水稳性,认为海藻酸钠可作为取代水泥、石灰的一种环保绿色固化剂<sup>[55]</sup>。Li等经过大量试验研究发现,木质素磺酸钙能提高阿太堡极限和抗压强度,增加结构致密性,降低能量耗散,黄土中黏土矿物的水解和化学反应增加了二氧化硅和碳酸盐胶结物,处理后黄土的强度随着木质素磺酸钙含量的增加而增加,木质素磺酸钙是一种新型的环保稳定剂,值得在黄土工程中进一步应用推广<sup>[56]</sup>。大部分物理、化学改性材料仍处于试验研究阶段,未广泛推广应用。强夯处理过的黄土地基抗水性较差,物理、化学材料固化黄土能提高抗水性,但耗资更高,如果将强夯时表层松土与改性材料搅拌混合并夯实,可有效消除黄土湿陷性,降低处理成本并提高工程耐久性,可对夯击固化黄土机理进行更深入的研究<sup>[57]</sup>。

### 3.2 湿软黄土地基处理

湿软黄土地基具有渗透性小、强度低、压缩性高、触变性敏感、承载力低、无湿陷性、富含酸根离子及腐蚀性等特点<sup>[2]</sup>。目前对高速公路湿软黄土地基的处理主要是借鉴了软土地基的处理措施,也逐渐从单一加固技术向多方法联合技术方向发展,形成了多种施工技术和方法,并不断推陈出新,取得成功应用。

#### 3.2.1 土工格室加筋垫层

在湿软黄土地基中铺设三维立体结构的土工格室并填入颗粒排水材料(级配良好的碎石、砂砾、石屑等)形成加筋土垫层,可以有效扩散上部荷载,增加土体的模量,提高地基承载力,加速湿软黄土排水固结,相比于传统加筋材料,可施加强大的侧向约束作用限制土体侧向位移,减小地基土不均匀沉降。

目前,国内外学者主要采用试验、理论分析和数值模拟的方法,研究土工格室的工作性状。在试验研究方面,杨晓华通过系统的室内正交设计试验,全面地研究了土工格室加筋层压缩、剪切、拉伸工程性状,并根据室内试验结果提出了湿软黄土地基常用的土工格室性能指标<sup>[58]</sup>。晏长根等通过三轴剪切试验,分析不同加筋方式下的加筋效果,并讨论了不同土工格室层数加筋的加固机理,指出土工格室加筋后黄土具有应变强化特征<sup>[59]</sup>。在理论分析方面,杨晓华基于温克尔弹性地基梁理论,推导出了土工格室结构层加固后的湿软黄土地基承载力计算公式,且该公式计算值与试验实测值比较接近<sup>[58]</sup>。赵明华等充分考虑土工格室受力变形时加筋体的水平摩阻效应,将土工格室视为小挠度薄板,得到了考虑摩阻效应的土工格室变形表达式<sup>[60]</sup>。在数值模拟方面,杨晓华采用土工格室对饱和黄土地基进行局部换填加固,将 MARC 有限元软件计算结果与现场实测数据进行对比,指出土工格室垫层加固湿软黄土地基可明显改善地基表面所受竖向应力;竖向应力在土工格室加筋层出现较明显的应力集中,而且路基底面的竖向应力分布比未设置土工格室时均匀,同时最大竖向应力值减小 40% 左右;土工格室垫层加固湿软黄土地基时,其加固效果受土层厚度制约,对于厚度小于 4 m 的浅层湿软黄土地基加固效果较好<sup>[61-62]</sup>,见图 7。土工格室加筋土界面特性的研究有利于揭示其加筋机理,同时为加筋

土工结构提供设计参数<sup>[63-64]</sup>。土工格室的加筋效果是通过其与周围土体之间的接触及相互作用表现出来的,常用的有限元数值模拟方法可反映材料宏观的应力和变形分布,但不能反映颗粒之间的相对运动,结合筋土界面特性的室内试验数据及试验过程的高速高清摄像成果,进行加筋土的颗粒流数值模拟可从细观角度进一步认识筋土界面作用机理<sup>[65]</sup>。

土工格室在加筋体路堤中应用广泛,有利于控制工后沉降。同时,土工格室楔形柔性搭板处治山区高速公路填挖过渡段差异性沉降具有很好适用性,三维结构的土工格室可以柔性过渡和协调半填半挖路基顶面的沉降<sup>[66]</sup>;在新、老路堤的拓宽工程中,土工格室的加筋作用可以减小土中的竖向应力和剪应力,增强拓宽部分路基的稳定性,有效解决由于新、老路基之间不均匀沉降而引起的路面裂缝等病害<sup>[67]</sup>。

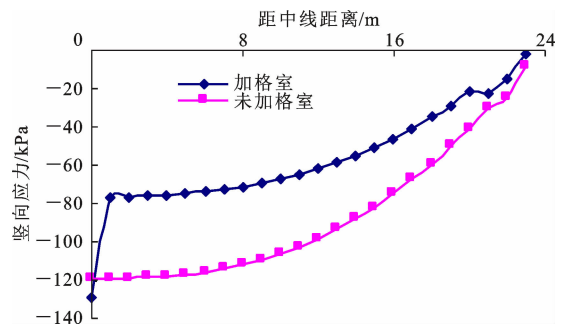


图 7 路基底面竖向应力曲线<sup>[61]</sup>

Fig. 7 Vertical stress curves of embankment bottom<sup>[61]</sup>

#### 3.2.2 强夯置换法

强夯置换分整式置换和墩柱式置换 2 种。强夯置换墩利用强夯对原软黄土层结构造成破坏,向夯坑填入坚硬粗颗粒材料形成置换墩,通过置换挤密和排水固结作用可加固 5~8 m 深度的湿软黄土地基。当置换率要求较大时,采用整式强夯置换,处理深度在 3~5 m。张汉舟对尹中高速公路湿软黄土地基强夯试验段试验研究发现,软黄土最佳夯击数为 7~9 击,强夯影响范围为 8 m,有效加固深度为 5 m 左右,强夯置换墩可大幅度提高桩间土承载力,但强夯处理软黄土时仅在软黄土厚度较小时适用,在厚度较大时应慎用<sup>[2]</sup>。此试验段湿软黄土中易溶盐含量高,表现出明显的盐渍土特性,通过强夯并置换为粗粒料,可大幅度减小由于盐胀量变化而引起的路基沉降。强夯置换碎石墩的墩长很难由施工过程控制,只能通过

间接估算或夯后检测得到,强夯置换深度估算公式可分为三类,经验预估法,拟静力法和波能传播理论法,但应用时都有一定的局限性和误差。滕凯以单锤夯击能,夯锤直径及土质条件为自变量,通过优化拟合的方法,确定了强夯置换深度估算公式,工程实测资料验证该公式具有较高拟合精度,对于湿软黄土地区强夯置换墩设计计算有指导意义<sup>[68]</sup>。置换墩的鼓出效应使复合地基的实际置换率增大,梁燕使用墩体的体积与周围加固土体的体积之比作为复合地基的体积置换率,用于减小设计墩径的计算以缩减工程造价<sup>[69]</sup>。

强夯夯击能的增加可加大置换深度,提高处理后地基承载力和抗变形能力。置换锤的锤形(置换柱锤,异形锤、锤体直径变化的组合锤等)不断优化改进,在提高效率的同时实现变截面的强夯置换体以充分利用有利地层;对于置换墩深度与直径的检测,也从传统的挖坑、斜钻孔探测发展到使用地质雷达和瑞利波等方法。

### 3.2.3 水泥土搅拌桩

在中国,水泥土搅拌桩一直是复合地基的主要形式,分为浆喷桩(湿法)和粉喷桩(干法),可大大缩短工期,解决高速公路地基沉降过大问题,被广泛用于处理深度20 m以内的湿软黄土地基<sup>[70]</sup>。水泥土搅拌桩将软土与水泥等固化剂就地强制搅拌形成水泥土加固体,水泥水解水化过程有利于软黄土中含水率的降低和地基土强度的增加。受黄土的颗粒成分、矿物成分和盐分的种类及含量等影响,水泥加固黄土具有显著的区域性特点,施工前必须进行室内水泥黄土的抗压强度试验。许多学者深入系统地研究了不同地区水泥黄土的强度与破坏特性。丁兆民探讨了在不同的水泥掺入量、含水量和围压情况下,陇西水泥黄土的应力-应变关系、抗剪强度等特性<sup>[71]</sup>。俞永华等开展了甘肃地区水泥黄土的无侧限抗压强度试验和三轴固结不排水试验,揭示了多因素对水泥黄土强度、应力-应变特征、破坏特征的影响,研究结果可用于指导水泥搅拌桩处治湿软黄土地基的设计和施工<sup>[72]</sup>。杨有海等系统地研究和总结了水泥与粉煤灰(二灰)掺入比、龄期、粉煤灰掺入量、水泥强度等级、有机质含量、搅拌均匀程度等因素对兰州地区水泥搅拌湿软黄土强度特性的影响,为湿软黄土地基处理设计及施工参数选择提供依据<sup>[73]</sup>。

在适应性分析与应用研究方面,周建民等通

过单桩载荷试验与群桩载荷试验,验证了水泥土搅拌桩处理湿软黄土地基的可行性<sup>[74]</sup>。为研究柔性基础下复合地基的承载特性,杨晓华等选取尹中高速公路湿软黄土试验段进行了粉喷桩复合地基的单桩、桩间土、单桩复合、双桩复合和多桩复合地基的静载荷试验,研究结果指出:路堤柔性基础下粉喷桩复合地基的破坏形式应为桩间土体先破坏,继而引起整个复合地基破坏,且水泥粉喷桩也会产生一定的群桩效应;粉喷桩复合地基中桩对桩间土承载力影响较大,桩体的侧限作用使得地基土体承载力提高<sup>[61,71]</sup>。冯瑞玲等通过数值计算及现场实测分析了水泥粉喷桩复合地基加固湿软黄土和淤泥质土地基的受力性状,认为粉喷桩复合地基的桩体对湿软黄土承载力影响程度、桩顶应力与桩土应力比均大于同样置换率的淤泥质土<sup>[75]</sup>。丁兆民根据单桩载荷试验结果、湿软黄土地基和水泥黄土的特性,调整了规范中软土复合地基承载力计算的部分参数,如桩间土承载力折减系数,桩间强度折减系数,桩端天然地基土的承载力折减系数等<sup>[71]</sup>,使该式适用于柔性基础下湿软黄土复合地基承载力计算,为研究成果的推广起到了积极作用。

2010年以来,中国研发了多种新型搅拌桩,其复合地基稳定分析与计算方法也在应用与研究不断完善<sup>[76]</sup>,为水泥土搅拌桩用于深层软土加固提供了技术与理论保障。与单向搅拌桩相比,双向搅拌技术能有效提高搅拌的均匀性,保证水泥浆在桩体均匀分布,确保成桩质量,减小桩体施工时对桩周土的扰动,可加快地基固结速率<sup>[77]</sup>。湿软黄土地区土层复杂,对不同压缩性土层采用相同的桩体置换率往往会造成工程浪费,变径水泥土搅拌桩可形成变截面的桩体,对成层软弱地基形成针对性的加固以获得更高的经济效益<sup>[78]</sup>。双向变截面搅拌桩智能化监控系统的开发提升了搅拌桩智能化施工水平<sup>[79]</sup>,可有效控制关键施工参数,通过土层的自动识别实现优化变频喷浆,有效保证成桩质量,同时节省水泥用量。

水泥土搅拌桩常采用水泥或石灰等传统无机固化剂的能耗大、CO<sub>2</sub>排放多、造价高,近年来国内外很多学者尝试基于工业副产品/废料(如钢渣、碱激发矿粉等)开发新型节能、环保固化剂,同时MgO碳化固化土具有较好的抗硫酸盐侵蚀性,可更加深入研究新型固化剂处理湿软黄土的适用

性,以便进一步应用推广<sup>[80-82]</sup>。

### 3.2.4 旋喷桩

高压旋喷注浆法由化学注浆技术结合高压(20~40 MPa)射流切割技术发展起来,是利用钻机把带有喷嘴的注浆管钻进至土层的预定深度,以高压浆液冲切土体,同时钻杆以一定速度渐渐向上提升,将浆液与土粒强制搅拌混合,形成均匀的圆柱状水泥土固结体以加固地基。湿软黄土土层含水率大,地下水位高,压缩性强,旋喷桩复合地基有良好的加固补强和止水防渗效果,在固结时间和控制沉降方面都有利,加固深度可达 20~30 m<sup>[83]</sup>。旋喷基本工艺类型有单管法、双重管、多重管等,从日本引进的 MJS 工法可以“全方位”进行高压喷射注浆施工,RJP 系列工法通过水气、浆气二次切削土体的方式可短时间内形成大直径的水泥土固结体,从不同角度提高了传统高压喷射注浆工艺的施工能力,拓宽了其应用范围<sup>[84]</sup>。杨碧峰等将高压旋喷技术用于加固高速公路土家湾隧道湿软黄土地基,旋喷深度达 50 m,并通过试验研究提出了相应的设计控制指标、施工工艺参数,填补了该技术在中国公路隧道软黄土地基应用领域的空白,为类似工程的设计与施工提供借鉴经验<sup>[85]</sup>。

### 3.2.5 桩-筏复合地基

杨晓华课题组提出桩-土工格室柔性筏基复合地基处理深厚湿软黄土地基,土工格室垫层与桩体及桩间土在荷载作用下共同作用,形成由路堤-土工格室加筋体-竖向加固体-桩间土组成的多元复合地基,可充分发挥竖向增强体复合地基与水平向增强体复合地基各自的作用,具有施工方便、工期短、侧向变形和工后沉降小等优点,土工格室与内部填料组成的垫层结构体构成具有一定抗弯、抗剪和抗压能力的柔性筏板基础,能有效扩散上部荷载<sup>[61,86]</sup>,可均化作用于软基顶面的应力作用,当竖向增强体抗弯强度不足时,也有助于提高地基整体稳定性。工程中常用桩型包括散体材料桩(如振动沉管挤密砂石桩),低-中等黏结强度桩(如水泥土搅拌桩),(半)刚性桩(如 CFG 桩)等。

在大量理论与试验研究基础上,桩-筏复合地基已成功应用于处理高速公路湿软黄土地基。杨晓华等本着变废为宝的原则,采用长短桩(水泥粉煤灰搅拌桩+建筑垃圾桩)+土工格室柔性筏基处理渭蒲高速公路段饱和黄土地基,并通过大量

的室内试验数据来分析二灰土的强度随二灰总掺入比、水泥与粉煤灰的比例及养护龄期的变化规律,最终确定二灰总掺入比为 15%,水泥:粉煤灰质量比为 2:1 时,二灰土强度既能满足工程要求又能取得经济合理的效果,见图 8。由于竖向应力随深度递减,长短桩可以对地基在竖向实现变强度、变刚度加固,既经济有效,也减小了长加固体对可压缩性土层的下端刺入量,复合地基的承载力可满足上覆荷载要求。

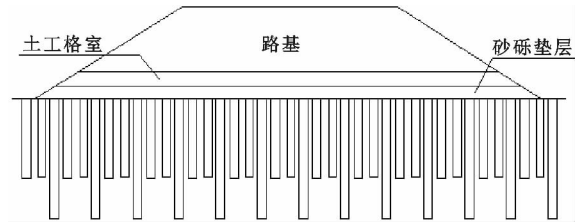


图 8 长短桩+土工格室柔性筏基复合地基示意<sup>[87]</sup>

Fig. 8 Schematic of long and short piles & geocell composite foundation<sup>[87]</sup>

张汉舟根据室内和现场试验,系统地分析了高速公路高填路堤下湿软黄土复合地基承载能力及受力和变形特性,建立了柔性基础下水泥粉喷桩复合地基的计算模型,基于弹性理论分析了桩土受力性状,计算了桩土变形量,定义了土体准模量和桩体准模量,并推导出复合地基承载力与桩土沉降差计算公式,通过在粉喷桩复合地基顶部铺设土工格室并进行试验与监测,发现垫层对地基受力状态的改善十分明显,地基未出现类似单桩复合试验的整体剪切破坏,而是缓变形的局部剪切破坏形态,铺设土工格室后在竖向荷载作用下,能有效降低软基顶部峰值应力,铺设土工格室时的桩土应力比大于不铺设时的计算结果,铺设土工格室可以约束地基的侧向位移,使应力向桩体集中,见图 9<sup>[2]</sup>。根据研究成果,水泥粉喷桩-柔性筏基方案成功地加固了尹中(尹家庄—中川机场)、兰海(兰州—海口)高速公路湿软黄土地基。

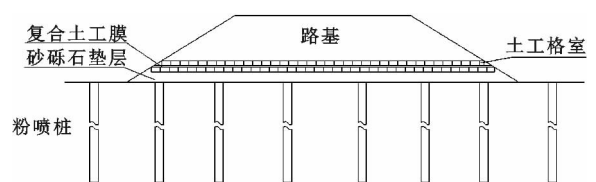


图 9 水泥粉喷桩+土工格室柔性筏基复合地基示意<sup>[2]</sup>

Fig. 9 Schematic of cement powder spraying piles & geocell flexible raft foundation composite foundation<sup>[2]</sup>

土工格室的变形对于计算双向增强体复合地基的沉降、桩土应力比等参数十分重要<sup>[88]</sup>。加筋体受力变形时不仅会受到路堤竖向荷载及桩土的支撑力,也会在界面处受到填料位移时产生的摩阻力,但传统的弹性地基梁方法无法体现桩土变形刚度的差异以及加筋体的水平摩阻效应,沉降计算结果偏于保守。改进后的薄板理论充分考虑桩土刚度差异,但均未考虑水平摩阻力<sup>[89]</sup>。赵明华等结合土工格室柔性筏板效应、摩阻效应及格室体与桩土加固区协调变形等因素,将土工格室视为小挠度薄板,得到了考虑摩阻效应的土工格室变形表达式与路堤中心区域内桩土应力比、沉降以及桩土差异沉降的计算公式,并通过土工格室+碎石桩大比例室内模型试验验证了计算结果的正确性与合理性<sup>[60]</sup>。

## 4 结论与展望

(1)高速公路湿陷性黄土地基处理技术取得了长足发展,不断研制和引进了湿陷性黄土地基处理新机械,各种工法的施工能力和处理效果得到提高,强夯技术已处于国际领先水平。

(2)物理改性加固如夯实法、振密挤密技术和预浸水法等,这类方法通过改善湿陷性黄土结构以提高土体承载力,但其对强度提高有限,仍存在一定的局限性;化学改性加固相较于物理改性加固具有更好的固化效果与更强适用性,固化剂逐渐向生态环保的生物化学类固化剂转变,将物理改良手段和物理、化学固化相结合的改性方法有很好的研究与应用前景。

(3)湿软黄土地基处理主要借鉴软土处理措施,原有地基处理技术在新应用环境中不断发展,但理论研究往往是落后于工程实践的,应对地基处理新技术、复合型加固技术及多元、多功能化的复合地基加固体的加固机理、设计计算方法进一步研究,以实现处理技术的规范化,完善检测和监测标准。

如何合理确定沉降控制标准、地基处理方法、处理深度仍是采用复合地基处理大厚度地基应综合考虑的问题。

(4)为确保工程建设活动与自然协调统一,也应合理利用工业废渣、固体废弃物、建筑垃圾和当地材料,注重新型环保黄土改性材料的研发和使用,实现黄土地基改性处理施工的精细化控制,提高施工管理智能化、信息化程度,促使黄土地区地基处理技术逐渐向节能减排、绿色环保、科技创新的岩土工程可持续发展要求转变。

(5)综合性的地基处理技术成为今后中国黄土地区公路地基处治的主要发展方向。应合理地将不断创新和成熟的地基处理技术与工艺相互组合、综合应用,以满足复杂工程需要,追求效益的最大化。

## 参考文献:

### References:

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1997.  
LIU Zu-dian. Mechanics and engineering[M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press,1997.
- [2] 张汉舟. 高填土路堤下软黄土地基处理技术研究[D]. 西安:长安大学,2008.  
ZHANG Han-zhou. Study on treatment technique of soft loess foundation under high embankment[D]. Xi'an:Chang'an University,2008.
- [3] 刘松玉,周建,章定文,等. 地基处理技术进展[J]. 土木工程学报,2020,53(4):93-110.  
LIU Song-yu, ZHOU Jian, ZHANG Ding-wen, et al. State of the art of the ground improvement technology in China[J]. China Civil Engineering Journal,2020,53(4):93-110.
- [4] GB 50025—2004,湿陷性黄土地区建筑规范[S].  
GB 50025—2004, Code for building construction in collapsible loess regions[S].
- [5] 李保雄,牛永红,苗天德. 兰州马兰黄土的水敏感性特征[J]. 岩土工程学报,2007,29(2):294-298.  
LI Bao-xiong, NIU Yong-hong, MIAO Tian-de. Water sensitivity of Malan Loess in Lanzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2): 294-298.
- [6] 熊昌. 宁东黄土工程特性试验研究[D]. 西安:西安理工大学,2009.  
XIONG Chang. The engineering properties of Loess in Ningdong[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2009.
- [7] 姜涛. 湿陷性黄土地区公路防排水技术研究[D]. 西安:长安大学,2006.  
JIANG Tao. Highway drainage techniques in collapsible Loess Areas[D]. Xi'an:Chang'an University,2006.
- [8] 李瑞娥. 黄土地区公路工程分区及指标体系研究[D]. 西安:长安大学,2009.  
LI Rui-e. Study on highway engineering zoning and zoning index system in Loess Area [D]. Xi'an: Chang'an University,2009.

- [9] 于国新,白明洲,许兆义. 西安地区饱和软黄土工程地质特征研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(2): 196-199.  
YU Guo-xin, BAI Ming-zhou, XU Zhao-yi. Engineering characteristics of saturated soft loess in Xi'an region[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(2):196-199.
- [10] 庞江波. 禹阎高速公路湿陷性黄土地基处理技术研究[D]. 西安:长安大学, 2009.  
PANG Jiang-bo. Study on foundation treatment for Yuyan Highway collapsible loess[D]. Xi'an:Chang'an University, 2009.
- [11] 楚华栋,裴章勤,马周全,等. 黄土的工程特性、筑路技术和病害处理[J]. 铁道工程学报, 2005, 22(增1): 340-347.  
CHU Hua-dong, PEI Zhang-qin, MA Zhou-quan, et al. Engineering characteristics, railway construction technique and disaster treatment of loess[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005, 22(S1): 340-347.
- [12] 卢浩. 黄土公路边坡冲刷机理及草泥防护适应性试验研究[D]. 西安:长安大学, 2014.  
LU Hao. Study on the loess highway slope erosion mechanism and experimental adaptability of grass-mud protection[D]. Xi'an:Chang'an University, 2014.
- [13] 卢浩,晏长根,贾卓龙,等. 聚丙烯纤维加筋黄土的抗剪强度和崩解特性[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2):82-92.  
LU Hao, YAN Chang-gen, JIA Zhuo-long, et al. Shear strength and disintegration properties of polypropylene fiber-reinforced loess[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(2):82-92.
- [14] GB 50025—2018, 湿陷性黄土地区建筑标准[S].  
GB 50025—2018, Standard for building construction in collapsible loess regions[S].
- [15] 付兵彬,言志信,雒亿平. 大厚度湿陷性黄土场地灰土垫层与防渗膜联合地基[J]. 建筑技术, 2019, 50(12): 1462-1465.  
FU Bing-bin, YAN Zhi-xin, LUO Yi-ping. Operation on thick collapsible loess foundation combining with lime soil cushion and impervious membrane[J]. Architecture Technology, 2019, 50(12):1462-1465.
- [16] 施利国,张孟喜,曹鹏. 聚丙烯纤维加筋灰土的三轴强度特性[J]. 岩土力学, 2011, 32(9):2721-2728.  
SHI Li-guo, ZHANG Meng-xi, CAO Peng. Triaxial shear strength characteristics of lime-soil reinforced with polypropylene fiber inclusions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9):2721-2728.
- [17] 闫铁成. 废旧轮胎颗粒二灰土改良大厚度湿陷性黄土的工程特性研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2018.  
YAN Tie-cheng. Study on engineering characteristics of large thickness collapsible loess modified by waste tire particles two lime soil [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.
- [18] 万清琦,崔自治,杨宁宁,等. 压实水泥湿陷性黄土的力学特性[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1): 119-123, 130.  
WAN Qing-qi, CUI Zi-zhi, YANG Ning-ning, et al. Mechanical properties of compacted cement loess[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(1):119-123, 130.
- [19] 崔自治,郝佳兴,潘鹏,等. 掺砂水泥黄土的力学特性和抗冻性[J]. 兰州理工大学学报, 2017, 43(4): 122-126.  
CUI Zi-zhi, HAO Jia-xing, PAN Peng, et al. Mechanical characteristics and frost resistance of sand doped cement loess[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2017, 43(4):122-126.
- [20] 熊凯成. 钻孔预浸水法处理深厚湿陷性黄土地基试验研究[D]. 西安:西安科技大学, 2020.  
XIONG Kai-cheng. Experimental study on the treatment of deep and collapsible loess foundation with drilling immersion water method [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [21] 陈昊. 酸性环境下黄土的微观结构及物理特性研究[D]. 西安:西安理工大学, 2018.  
CHEN Hao. Study on microstructure and physical characteristics of loess under acid environment[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2018.
- [22] 张耀,胡再强,陈昊,等. 酸性溶液对黄土结构改良的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(4): 681-688.  
ZHANG Yao, HU Zai-qiang, CHEN Hao, et al. Experimental study on evolution of loess structure using acid solutions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(4):681-688.
- [23] 黄雪峰,杨校辉. 湿陷性黄土现场浸水试验研究进展[J]. 岩土力学, 2013, 34(增2):222-228.  
HUANG Xue-feng, YANG Xiao-hui. A study progress on in situ soaking test on collapsible loess[J].

- Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2): 222-228.
- [24] 周世良, 王江, 张明强. 强夯加固机理研究现状及展望[J]. 重庆交通学院学报, 2006, 25(1): 65-70.  
ZHOU Shi-liang, WANG Jiang, ZHANG Ming-qiang. The actuality and prospect of the mechanism research in dynamic consolidation[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2006, 25(1): 65-70.
- [25] 许琨. 强夯法处理湿陷性黄土地基试验研究与数值计算[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.  
XU Kun. Research on dynamic compaction test and numerical calculation of collapsible loess foundation[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.
- [26] 牛志荣, 路国运. 土体受冲击时 Rayleigh 波作用机制探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1583-1589.  
NIU Zhi-rong, LU Guo-yun. Discussion on mechanism and effect of Rayleigh wave on soil subjected to impact loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1583-1589.
- [27] 杨印旺. 强夯法在黄土地区某高填方工程中的应用[J]. 施工技术, 2012, 41(1): 56-58.  
YANG Yin-wang. Application of dynamic compaction in high fill project in Loess Area[J]. Construction Technology, 2012, 41(1): 56-58.
- [28] 肖华只, 郭伟林, 安明. 超高能级法处理低含水量湿陷性黄土地基的应用[J]. 施工技术, 2015, 44(增2): 101-103.  
XIAO Hua-zhi, GUO Wei-lin, AN Ming. Application of super-high energy method in collapsible loess foundation with low water content[J]. Construction Technology, 2015, 44(S2): 101-103.
- [29] 李保华, 郭伟林, 安明. 超高能级强夯处理低含水量湿陷性黄土原理研究[J]. 施工技术, 2015, 44(9): 112-114.  
LI Bao-hua, GUO Wei-lin, AN Ming. Research on principle of ultra-high energy level dynamic compaction treating low water content collapsible loess[J]. Construction Technology, 2015, 44(9): 112-114.
- [30] 郭伟林, 安明, 王学军, 等. 增湿超高能级处理 25 m 以上湿陷性黄土地基施工方法: 中国, CN108374403A[P]. 2018-08-07.  
GUO Wei-lin, AN Ming, WANG Xue-jun, et al. Construction method for performing humidification and ultra-high energy level treatment on collapsible loess foundation with height of 25 m or more; China, CN108374403A[P]. 2018-08-07.
- [31] 杨校辉, 黄雪峰, 朱彦鹏, 等. 大厚度自重湿陷性黄土地基处理深度和湿陷性评价试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 1063-1074.  
YANG Xiao-hui, HUANG Xue-feng, ZHU Yan-peng, et al. Experimental study on collapsibility evaluation and treatment depths of collapsible loess upon self weight with thick depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 1063-1074.
- [32] 张世径, 黄雪峰, 朱彦鹏, 等. 大厚度自重湿陷性黄土地基处理深度和剩余湿陷量问题的合理控制[J]. 岩土力学, 2013, 34(增2): 344-350.  
ZHANG Shi-jing, HUANG Xue-feng, ZHU Yan-peng, et al. Foundation treatment depth and reasonable control on remnant collapse in area of dead weight collapse loess with great thickness[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2): 344-350.
- [33] 李金奎, 吴凯. 挤密桩处理高填方湿陷性黄土地基的现场试验分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(1): 197-204.  
LI Jin-kui, WU Kai. A field experimental analysis of compaction piles in high embankment collapsible loess foundation[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2018, 43(1): 197-204.
- [34] 付海山. 土挤密桩-CFG 桩复合地基在湿陷性黄土地基处理中的应用研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.  
FU Hai-shan. Research on application of ground treatment with earth pile & CFG pile composite foundation in collapsible loess regions[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014.
- [35] 贾黎. 湿陷性黄土地基的无振动挤密处理新技术研究[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(9): 48-51.  
JIA Yun. A new vibration-less compaction technology for collapsible loess foundation[J]. Railway Standard Design, 2014, 58(9): 48-51.
- [36] 孙兵. 无振动挤密地基处理技术在湿陷性黄土隧道中的应用[J]. 铁道建筑, 2017, 57(3): 70-72.  
SUN Bing. Application of non-vibration compaction technology of foundation treatment in collapsible loess tunnel[J]. Railway Engineering, 2017, 57(3): 70-72.
- [37] 邢泉. 孔内深层超强夯复合地基加固机理及在市政道路中的应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.  
XING Quan. Reinforcement mechanism of deep super strong concrete composite foundation in hole and its application in municipal roads[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.

- [38] 李锋科,韩军强,胡炳国,等.黄土地区孔内深层强夯法复合地基测试研究[J].施工技术,2009,38(增2):76-78.  
LI Feng-ke, HAN Jun-qiang, HU Bing-guo, et al. Study on test of compound basement strengthened by down hole deep compaction method in Loess Regions [J]. Construction Technology, 2009, 38(S2):76-78.
- [39] 王雪浪.大厚度湿陷性黄土湿陷变形机理、地基处理及试验研究[D].兰州:兰州理工大学,2012.  
WANG Xue-lang. Study on characteristics of collapse deformation for collapsible loess, foundation treatment method and tests [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012.
- [40] 孔洋,阮怀宁,黄雪峰. DDC法复合黄土地基的原位浸水试验研究[J].土木工程学报,2017,50(11):125-132.  
KONG Yang, RUAN Huai-ning, HUANG Xue-feng. In-situ soaking test on composite loess foundation with down-hole dynamic compaction(DDC)[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(11):125-132.
- [41] 刘汉龙,赵明华.地基处理研究进展[J].土木工程学报,2016,49(1):96-115.  
LIU Han-long, ZHAO Ming-hua. Review of ground improvement technical and its application in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(1):96-115.
- [42] 张康宁.夯扩自动化施工新技术条件下的DDC复合地基承载力研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.  
ZHANG Kang-ning. Study of DDC composite foundation bearing capacity under the condition of new technology about compaction of automation in the construction [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [43] 郭志勇,杨震,聂风玲,等.黄土地区超级孔内深层强夯桩复合地基应用测试研究[J].建筑科学,2010,26(9):100-103.  
GUO Zhi-yong, YANG Zhen, NIE Feng-ling, et al. Research on the testing and application of composite ground with SDDC pile in Loess Area [J]. Building Science, 2010, 26(9):100-103.
- [44] 刘松玉,杜广印,毛忠良,等.振杆密实法处理湿陷性黄土地基试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(8):1377-1383.  
LIU Song-yu, DU Guang-yin, MAO Zhong-liang, et al. Field tests on improvement of collapsible loess by vibratory probe compaction method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(8):1377-1383.
- [45] 张登良.加固土的电化学基础[J].长安大学学报(自然科学版),1986,4(1):1-7.  
ZHANG Deng-liang. Electro-chemical basis for stabilization of soil [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 1986, 4(1):1-7.
- [46] 李娜,孙军杰,王谦,等.黄土地基改性处理技术研究进展评述与展望[J].地球科学进展,2017,32(2):209-219.  
LI Na, SUN Jun-jie, WANG Qian, et al. Progress review and perspective problems on loess foundation reinforcement by means of modification treatment [J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(2):209-219.
- [47] 张虎元,赵天宇,吴军荣,等.膨润土改性黄土衬里防渗性能室内测试与预测[J].岩土力学,2011,32(7):1963-1969,1974.  
ZHANG Hu-yuan, ZHAO Tian-yu, WU Jun-rong, et al. Laboratory measurement and prediction to the permeability of bentonite-modified loess as a landfill liner [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7):1963-1969,1974.
- [48] 彭宇,张虎元,林澄斌,等.抗疏力固化剂改性黄土工程性质及其改性机制[J].岩石力学与工程学报,2017,36(3):762-772.  
PENG Yu, ZHANG Hu-yuan, LIN Cheng-bin, et al. Engineering properties and improvement mechanism of loess soil modified by consolid system [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3):762-772.
- [49] 刘钊钊,王谦,钟秀梅,等.木质素改良黄土的持水性和水稳性[J].岩石力学与工程学报,2020,39(12):2582-2592.  
LIU Zhao-zhao, WANG Qian, ZHONG Xiu-mei, et al. Water holding capacity and water stability of lignin-modified loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(12):2582-2592.
- [50] 吕擎峰,吴朱敏,王生新,等.温度改性水玻璃固化黄土机制研究[J].岩土力学,2013,34(5):1293-1298.  
LU Qing-feng, WU Zhu-min, WANG Sheng-xin, et al. Mechanism of temperature-modification silicification grouted loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5):1293-1298.

- [51] 方 晟,黄雪峰,张彭成,等. 电场改性水玻璃固化黄土机理研究[J]. 材料导报,2017,31(22):135-141.  
FANG Sheng, HUANG Xue-feng, ZHANG Peng-cheng, et al. A mechanism study of loess reinforcing by electricity-modified sodium silicate[J]. Materials Review,2017,31(22):135-141.
- [52] PEI X J,ZHANG F Y,WU W J, et al. Physicochemical and index properties of loess stabilized with lime and fly ash piles[J]. Applied Clay Science,2015,114:77-84.
- [53] 高立成. 固化剂改良黄土力学特性试验研究[D]. 太原:太原理工大学,2013.  
GAO Li-cheng. Experimental research on mechanical properties of loess improved by solidified agents[D]. Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2013.
- [54] 程瑶佳,唐朝生,谢约翰,等. 微生物诱导碳酸钙沉积技术改性黄土结构强度试验研究[J]. 工程地质学报,2021,29(1):44-51.  
CHENG Yao-jia, TANG Chao-sheng, XIE Yue-han, et al. Experimental study on structure strength of loess improved by microbial induced calcite precipitation [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(1):44-51.
- [55] ZHAO Y,ZHUANG J Q,WANG Y, et al. Improvement of loess characteristics using sodium alginate [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2020,79(4):1879-1891.
- [56] LI G Y,HOU X,MU Y H, et al. Engineering properties of loess stabilized by a type of eco-material, calcium lignosulfonate [J]. Arabian Journal of Geosciences,2019,12(22):1-10.
- [57] 王银梅. 湿陷性黄土地基处理新途径的探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报,2008,19(4):106-109,124.  
WANG Yin-mei. A new improved method of foundation treatment for collapsible loess[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(4):106-109,124.
- [58] 杨晓华. 土工格室工程性状及应用技术研究[D]. 西安:长安大学,2005.  
YANG Xiao-hua. Study on engineering character and applied technique of geocell[D]. Xi'an:Chang'an University,2005.
- [59] 晏长根,顾良军,杨晓华,等. 土工格室加筋黄土的三轴剪切性能[J]. 中国公路学报,2017,30(10):17-24.  
YAN Chang-gen, GU Liang-jun, YANG Xiao-hua, et al. Triaxial shear property of geocell reinforced loess[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017,30(10):17-24.
- [60] 赵明华,刘 猛,龙 军,等. 双向增强复合地基土工格室加筋体变形分析[J]. 中国公路学报,2014,27(5):97-104,124.  
ZHAO Ming-hua, LIU Meng, LONG Jun, et al. Deformation analysis of geocell-reinforcement in bidirectional reinforced composite foundation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(5):97-104,124.
- [61] 杨晓华. 土工格室加固饱和黄土地基性状及承载力[J]. 长安大学学报(自然科学版),2004,24(3):5-8.  
YANG Xiao-hua. Bearing capacity and behavior of saturated loess foundation reinforced by geocell[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2004, 24(3):5-8.
- [62] 杨晓华,李新伟,俞永华. 土工格室加固浅层饱和黄土地基的有限元分析[J]. 中国公路学报,2005,18(2):12-17.  
YANG Xiao-hua, LI Xin-wei, YU Yong-hua. Finite element analysis of shallow saturated loess reinforced with geocell [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2):12-17.
- [63] VIBHOOSHA M P, BHASI A, NAYAK S. A review on the design, applications and numerical modeling of geocell reinforced soil[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39(6):4035-4057.
- [64] GARCIA R S, AVESANINETO J O. Stress-dependent method for calculating the modulus improvement factor in geocell-reinforced soil layers[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(1):146-158.
- [65] 陈建峰,李辉利. 土工合成材料加筋土界面特性研究现状及展望[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(5):1049-1054.  
CHEN Jian-feng, LI Hui-li. Status and prospect of research on geosynthetics/soil interface properties[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(5):1049-1054.
- [66] 谢永利,俞永华,杨晓华. 土工格室在处治路基不均匀沉降中的应用研究[J]. 中国公路学报,2004,17(4):7-10.  
XIE Yong-li, YU Yong-hua, YANG Xiao-hua. Application study of treating differential settlement of subgrade with geocell[J]. China Journal of Highway and

- Transport, 2004, 17(4): 7-10.
- [67] 郑刚, 龚晓南, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 127-146.  
ZHENG Gang, GONG Xiao-nan, XIE Yong-li, et al. State-of-the-art techniques for ground improvement in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 127-146.
- [68] 滕凯. 关于强夯置换深度估算公式的评价及改进[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 994-998.  
TENG Kai. Evaluation and improvement of formulas for replacement depth under dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(7): 994-998.
- [69] 梁燕. 强夯置换碎石墩复合地基承载机理及稳定评价[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.  
LIANG Yan. Bearing mechanism and stability evaluation for dynamic replacement gravel pier composite foundation[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [70] 《中国公路学报》编辑部. 中国道路工程学术研究综述·2013[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 1-36.  
Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's road engineering research: 2013 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 1-36.
- [71] 丁兆民. 水泥粉喷桩复合地基在软黄土区公路工程中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2001.  
DING Zhao-min. Study on dry-jet-cement-pile composite foundation of highway engineering in soft loess area, Xi'an: Chang'an University, 2001.
- [72] 俞永华, 杨晓华. 水泥黄土力学特性试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003, 23(6): 29-32.  
YU Yong-hua, YANG Xiao-hua. Experiments of mechanic property of cement-loess [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2003, 23(6): 29-32.
- [73] 杨有海, 刘永河, 任新. 水泥搅拌饱和黄土强度影响因素试验研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(1): 21-25, 64.  
YANG You-hai, LIU Yong-he, REN Xin. Experimental research on the factors influencing strength of cement mixed saturated loess[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(1): 21-25, 64.
- [74] 周建民, 张国澍. 深层搅拌桩处理饱和黄土地基的应用研究[J]. 甘肃工业大学学报, 2001, 27(1): 89-92.  
ZHOU Jian-min, ZHANG Guo-shu. Investigation of applicability of deep-whisking-stake to handling saturated loess groundwork[J]. Journal of Gansu University of Technology, 2001, 27(1): 89-92.
- [75] 冯瑞玲, 谢永利. 粉喷桩处理淤泥质土及饱和黄土地基的应用研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(3): 5-8.  
FENG Rui-ling, XIE Yong-li. Study on mud ground and saturated loess ground treatment with deep jet cement pile[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(3): 5-8.
- [76] 闫超. 变截面搅拌桩复合地基稳定分析方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.  
YAN Chao. Research on the stability analysis of variable deep mixed column composite foundation[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [77] 刘松玉, 易耀林, 朱志铎. 双向搅拌桩加固高速公路软土地基现场对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2272-2280.  
LIU Song-yu, YI Yao-lin, ZHU Zhi-duo. Comparison tests on field bidirectional mixing column for soft ground improvement in expressway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2272-2280.
- [78] 刘松玉, 易耀林, 杜延军, 等. 变径搅拌桩处理成层软弱地基的现场试验[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2): 1-8.  
LIU Song-yu, YI Yao-lin, DU Yan-jun, et al. Field test on variable diameter deep mixed column for layered soft ground improvement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(2): 1-8.
- [79] 万瑜, 朱志铎, 高波, 等. 水泥土搅拌桩智能化施工控制研究[J]. 施工技术, 2019, 48(13): 43-47.  
WAN Yu, ZHU Zhi-duo, GAO Bo, et al. Research on the Intelligent construction control for cement soil mixing pile [J]. Construction Technology, 2019, 48(13): 43-47.
- [80] YI Y L, LISKA M, UNLUER C, et al. Carbonating magnesia for soil stabilization[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(8): 899-905.
- [81] 刘松玉, 蔡光华, 杜广印, 等. 活性氧化镁碳化搅拌桩模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增2): 136-139.  
LIU Song-yu, CAI Guang-hua, DU Guang-yin, et al. Model tests on carbonated reactive MgO mixing piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S2): 136-139.

- [82] 秦川,刘松玉,杜广印,等.淤泥质土的整体碳化固化模型试验研究[J].工程地质学报,2019,27(6):1302-1310.  
QIN Chuan,LIU Song-yu,DU Guang-yin,et al. Model tests on mass carbonation stabilization of mucky soil[J]. Journal of Engineering Geology,2019,27(6):1302-1310.
- [83] 郭喜平.高压旋喷注浆法在黄土地区公路软基处理中的应用研究[D].重庆:重庆交通学院,2004.  
GUO Xi-ping. The application and research of the high pressure jet grouting method in the Loess Areas highway soft foundation treatment[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2004.
- [84] 张帆.二种先进的高压喷射注浆工艺[J].岩土工程学报,2010,32(增2):406-409.  
ZHANG Fan. Two advanced jet grout methods[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(S2):406-409.
- [85] 杨碧峰,杨晓华.超长旋喷桩在黄土隧道软基加固中的应用[J].公路交通科技,2007,24(5):16-18.  
YANG Bi-feng,YANG Xiao-hua. Application of super long jet grouting pile in soft foundation reinforcement of loess tunnel[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2007,24(5):16-18.
- [86] 赵明华,张玲,邹新军,等.土工格室-碎石桩双向增强复合地基研究进展[J].中国公路学报,2009,22(1):1-10.  
ZHAO Ming-hua,ZHANG Ling,ZOU Xin-jun,et al. Research progress in two-direction reinforced composite foundation formed by geocell reinforced mattress and gravel piles[J]. China Journal of Highway and Transport,2009,22(1):1-10.
- [87] 鞠兴华.水泥粉煤灰搅拌桩处理饱和黄土地基试验研究[D].西安:长安大学,2010.  
JU Xing-hua. Study on the saturated loess foundation improved by fly-ash cement mixing pile[D]. Xi'an: Chang'an University,2010.
- [88] ZHANG L,ZHAO M H,HU Y X,et al. Semi-analytical solutions for geosynthetic-reinforced and pile-supported embankment[J]. Computers and Geotechnics,2012,44:167-175.
- [89] 郑俊杰,张军,马强,等.双向增强体复合地基桩土应力比三维分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2010,38(2):83-86.  
ZHENG Jun-jie,ZHANG Jun,MA Qiang,et al. Three dimensional analysis of pile-earth stress ratio of biaxial reinforcement composite foundation[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition),2010,38(2):83-86.