

# 复杂地质条件下综合地基处理技术的研究与应用

阮虹<sup>1</sup> 石长元<sup>1</sup> 王晓峰<sup>1</sup> 唐丹<sup>1</sup> 郭娇<sup>1</sup> 钱俊豪<sup>2</sup>

1. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041;

2. 中冶赛迪建筑市政设计有限公司, 四川 成都 610041

**摘要:**随着经济发展和社会进步,在工程建设领域,地基处理技术得到了广泛应用。针对某储备基地厚度严重不均的Ⅳ级(最高级)自重湿陷性黄土和8度地震设防烈度地质的综合地基技术在工程中的应用进行了研究,通过对初勘地质资料的分析,本着安全经济、方便施工操作及监测的原则,选取初步方案,经过强夯试夯、桩基试验,综合运用多种地基处理技术,节省工程投资4600万元。通过实践证明,综合运用多种地基处理技术可行,而且经济、社会效益显著。

**关键词:**Ⅳ级自重湿陷性黄土;综合地基处理技术;应用研究;技术经济分析

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2018.04.019

## Research and Application of Composite Foundation Treatment Technology Under Complicated Geological Conditions

Ruan Hong<sup>1</sup>, Shi Changyuan<sup>1</sup>, Wang Xiaofeng<sup>1</sup>, Tang Dan<sup>1</sup>, Guo Jiao<sup>1</sup>, Qian Junhao<sup>2</sup>

1. China Petroleum Engineering & Construction Corp. Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China;

2. CISDI Architectural & Municipal Design Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610041, China

**Abstract:** With the economic development and social progress, the foundation treatment technology has been widely used in engineering construction. In this paper, the application of comprehensive ground technology in engineering is studied for severely uneven grade IV (highest grade) self-weight collapsible loess in certain reserve base and 8 degree seismic fortification geology. Through the analysis of the geological data of the preliminary survey, a preliminary plan was selected based on the principle of safe and economic, convenience of construction operation and monitoring. After a series of dynamic compaction and trials compaction, based on the testing result of pile foundations, a variety of foundation treatment technologies were used. Finally, a foundation treatment plan was confirmed, and a project investment of 46 million yuan was saved. Through the practice of this project, it has been fully proved that the comprehensive use of multiple foundation treatments is not only technically feasible, but also has significant economic and social benefits.

**Keywords:** Grade IV self-weight collapsible loess; Composite foundation treatment technology;

收稿日期:2017-12-22

基金项目:中国石油天然气集团公司重点工程项目(Z2009-3)

作者简介:阮虹(1967-),女,湖北武汉人,工程师,学士,主要从事建筑结构设计工作。

## 0 前言

随着经济发展和社会进步,在工程建设领域,地基处理技术不断发展并被广泛应用。通常情况下,在国家能源储备工程中,基于战略的考量,基地选址受限较多,地质条件比较复杂,地基处理难度大。本文以某储备基地工程为例,针对厚度严重不均的Ⅳ级自重湿陷性黄土地质条件,介绍了多种地基处理技术和地基基础方案综合应用的技术,突破了以往单一的处理方式,具有良好的经济和社会效益,为该类地区地基及基础综合处理提

供了借鉴。

## 1 工程地质条件

### 1.1 地质构造

某储备基地工程建设  $10 \times 10^4 \text{ m}^3$  钢制双盘式外浮顶储罐 30 座。基地场区在大地构造上位于祁连褶皱系祁连中部隆起之东部,区域上褶皱轴向和断裂走向主要以 NWW、NNW 向为主。拟建场区次一级构造单元隐伏基地隆起剖面图见图 1。

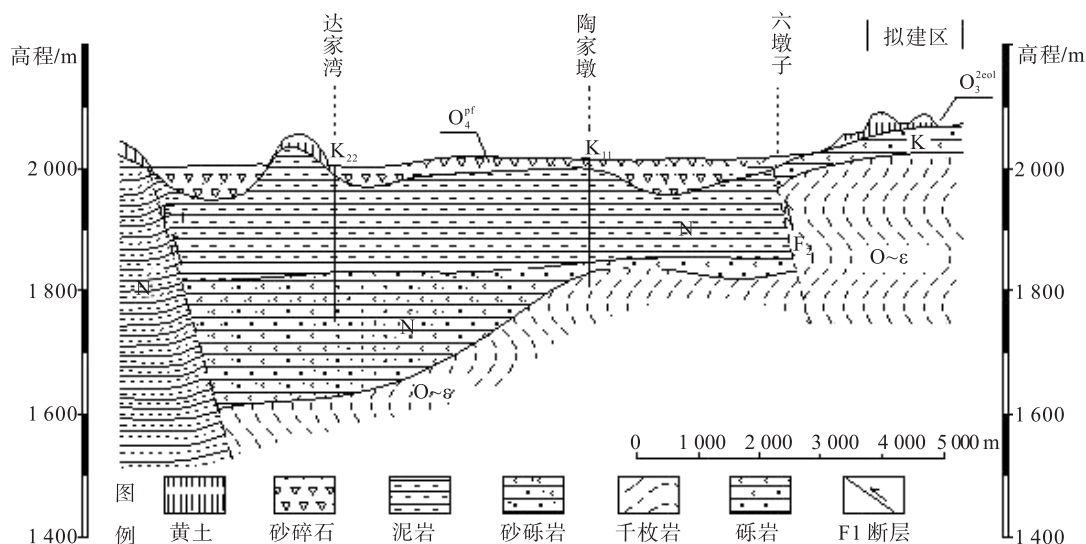


图 1 场地隐伏基地隆起剖面图

### 1.2 地层分布

原始自然地貌高低不平,上部土层为Ⅰ级非自重湿陷性场地至Ⅳ级自重湿陷性黄土场地,黄土层厚薄不均<sup>[1]</sup>。回填土厚度变化大且力学性质不均匀,具湿陷性。黄土下部基岩为强风化砂砾岩和强风化千枚岩,基岩埋深不一,坡度有缓有陡。强风化千枚岩,是比较好的地基持力层。3个台阶状罐区的设计地坪距离岩石表面高度有深有浅,多数罐设计地坪下黄土厚度不均,约 6~15 m,相邻两钻孔岩石高差 3~5 m 或 6~9 m,岩石坡

度高低不平。部分罐设计地坪下黄土厚度较大,约 5~23.7 m,岩石坡度较陡,岩石坡度起伏较大。另外罐区自然地坪起伏不平,使同一个罐地基土有挖方也有填方。有个别罐岩石有外露,同时还覆盖  $\leq 4.5 \text{ m}$  黄土,岩石埋深  $\leq 4.5 \text{ m}$ ,相邻两钻孔岩石高差一般为 2~3 m,岩石坡度较平缓。有个别罐岩石虽有外露或接近外露,但该罐的其他钻孔显示岩石埋深  $> 4.5 \text{ m}$ ,即黄土厚约 5~10 m,基岩倾斜度相当大。场区各土层主要力学指标和建议采用值见表 1~2。

表 1 场区各土层主要力学指标

层号	土层名称	土粒比重 $G_s$	含水量 $W$ / (%)	湿密度 $\rho_o$ / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	孔隙比 $e_o$	饱和度 $S_r$ / (%)	孔隙度 $n$ / (%)	液限 $W_L$ / (%)	塑限 $W_P$ / (%)	塑性指数 $I_P$
(2)	黄土	2.70	8.8	1.53	0.925	26.26	47.86	24.4	16.9	7.5
(2) <sub>1</sub>	黄状粉土	2.70	10.7	1.45	1.090	27.41	51.54	25.2	17.0	8.2
(3)	黄土	2.70	10.6	1.66	0.810	37.38	44.35	25.0	17.4	7.6

### 1.3 地基土湿陷性

场区第(1)层人工填土具湿陷性,湿陷系数 $\delta_s$ 值0.036~0.171,73.3%为严重湿陷性。第(2)层黄土也具湿陷性,湿陷性土湿陷系数 $\delta_s$ 值0.002~0.620,36.4%为严重湿陷性<sup>[2]</sup>。由于场区湿陷性土厚度变化较大,最大湿陷土层深度21 m左右<sup>[3]</sup>,因此地基湿陷量变化较大<sup>[4]</sup>,按照GB 50025-2004《湿陷性黄土地区建筑规范》中第4.4节规定,场区地基湿陷性等级从I级非自重湿陷性场地至IV级自重湿陷性场地全部涵盖,其中大部分地段为III~IV级自重湿陷性场地。

表2 场区各土层主要力学指标建议采用值

层号	土层名称	直剪粘聚力 $C$ / kPa	压缩系数 $E_{s,0.1-0.2}$ / MPa	压缩模量 / 内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	承载力特征值 $f_{ak}$ / kPa
(1)	人工填土	-	-	-	70
(2)	黄土	28.21	0.14	15.0	135
(2) <sub>1</sub>	黄土状粉土	26.98	0.31	10.0	120
(3)	黄土	29.50	0.11	20.0	170
(4)	砂砾岩	-	-	-	400
(4) <sub>1</sub>	泥岩	-	-	-	400
(4) <sub>2</sub>	中等风化砂砾岩	-	-	-	800
(5)	强风化千枚岩	-	-	-	300
(6)	中等风化千枚岩	-	-	-	1 000

### 1.4 地质条件分析

根据详勘地质资料,该储备基地工程地质条件较复杂,所在场地为山丘,场地属抗震设防烈度8度区,基本地震加速度值0.20 g,设计特征周期0.40 s。由于场地经过平整存在大范围填土区,且填土力学性质及其分布很不均匀,故基岩面起伏过大,土层厚度0~26.3 m,最大湿陷性土层厚度21.30 m,填土层最大厚度7.5 m。单个储罐场地基岩顶面坡度均大于10%,为不均匀地基。场地上部黄土和黄土状粉土层厚薄不均,西南较厚,东北较薄,场地大部分为IV级自重湿陷性场地,罐下钻孔的湿陷深度、湿陷程度不一样<sup>[5]</sup>。各罐区经挖方填方平整后,罐区地坪与岩石顶部有0~23 m厚湿陷性黄土或

回填土。部分罐处于挖方区,而部分罐处于既有挖方区,又有填方区的状态,回填土最厚处约7.5 m。对于填方区,一方面存在填方区下自然表层土或多或少都有程度不等的湿陷土;另一方面由于大面积回填平整场地,回填厚度不等,回填土达不到构筑物要求的均匀密实程度。黄土的地基承载力特征值为120~150 kPa,不能满足地基承载力特征值 $\geq 250$  kPa的承载力要求和限制不均匀沉降要求。

罐区普遍存在同一个罐下原状湿陷性黄土和回填土混杂,湿陷土的湿陷程度、厚度不一;同一个罐下的基岩性质不同,有砂砾岩也有强风化千枚岩,二者的极限端阻力不一样;基岩埋深不一,基岩坡度有缓有陡,不少坡度起伏较大,个别罐下有基岩外露出设计地坪以上等情况。

## 2 地基处理

### 2.1 初步方案

通过对详勘地质资料的分析,基于储罐荷载大(250 kPa),对不均匀沉降要求高,地质条件复杂,原状黄土含水率低、承载力低、湿陷性、黄土层较厚土层厚薄不等、湿陷土与回填土同时存在、土质不均匀、基岩持力层坡度有缓有陡、不少坡度起伏较大等因素,本着安全经济、方便施工操作及监测的原则,该储备基地工程拟采用高、低能级强夯,强夯+钢筋混凝土钻孔扩底灌注桩,强夯+灰土挤密桩复合地基以及天然地基等方式<sup>[6]</sup>。

### 2.2 强夯试夯情况

#### 2.2.1 强夯试夯

按设计要求,强夯后地基承载力特征值 $\geq 250$  kPa,黄土最深处压缩模量 $\geq 25$  MPa,在有效影响深度范围内完全消除湿陷性影响<sup>[7]</sup>。为保证强夯处理地基的效果,根据场地含水情况,强夯前对地基进行预增湿处理<sup>[8]</sup>。根据不同覆土厚度和不同增湿方式在有代表性区域设置面积为24 m $\times$ 24 m试夯区(1区、2区、3区、4区)<sup>[9]</sup>。各高能级试夯区情况见表3。

#### 2.2.2 试夯检测结果

各高能级试夯区检测情况见表4。

表3 高能级试夯区情况

高能试夯区	强夯能级 / (kN $\cdot$ m)	覆土厚度 / m	区域	增湿方式	含水率改善情况
1区	16 000	15	挖方	单孔	3、4号探井含水率普遍 $< 10\%$ ,1、2号探井上部4 m含水率较高,下部土层含水量基本没有改善
2区	12 000	14	填方	单孔地膜	上部4 m含水率较高,下部含水率偏低,下部土层含水量不均
3区	8 000	11	挖方	单孔地膜	7 m以下存在低含水率区域,下部土层含水量不均
4区	16 000	16	挖方	打孔灌砂	表层3 m土层含水率偏高,下部土层基本在设计含水率范围内,含水率 $> 10\%$ ,强夯有效影响深度达14 m

表4 各高能级试夯区检测情况

试夯区	布点方式	湿陷系数	压缩模量	平板载荷试验
1区	8 m × 8 m	<0.015	离散性较大,部分 >20 MPa	不满足设计要求
2区	8 m × 8 m	<0.015,但仍有未消除区域	大部分 <20 MPa	出现大面积橡皮土
3区	8 m × 8 m	<0.015	离散性较大,部分 >20 MPa	浅层平板载荷试验达到设计要求
4区	8 m × 8 m	<0.015	离散性较大,部分 >20 MPa	浅层平板载荷试验达到设计要求

### 2.2.3 试夯结论

强夯地基处理后,粉土层各深度地基承载力估算值 181 ~ 282 kPa;由于储罐载荷较大覆土层范围均为主要持力层<sup>[10]</sup>;通过载荷试验和标准贯入判定强夯后表层承载力离散性较大<sup>[11]</sup>,深层土承载力不能满足设计要求。综合判定强夯后地基承载力不能满足设计要求。

### 2.3 桩基试验情况

根据不同岩性和基岩标高共选定4个试桩试验区总计12根桩,试验桩桩径800 mm干作业钢筋混凝土钻孔灌注桩<sup>[12]</sup>。通过低应变检测,12根试桩桩身完整全部为I类桩;通过高应变检测,单桩竖向承载力特征值均>3 000 kN,满足设计要求;通过载荷试验检测,单桩竖向承载力特征值均大于3 000 kN,满足设计要求。桩身完整性和单桩竖向承载力特征值均满足设计要求。

### 2.4 最终方案

#### 2.4.1 采用处理方式

由于地基情况复杂,虽然采取了多种注水方式及保证措施,注水试验效果并不理想,无法达到预期效果。说明在特别复杂地质条件下,在不能保证大面积注水成功的前提下,单纯的强夯地基处理存在不确定性。同时由于场区平整前大部分地段位于缓丘区,地势西高东低、北高南低,下部基岩面起伏很大,局部存在基岩突变,即使通过强夯地基处理,对压缩模量、湿陷性消除情况进行改善,仍然存在不均匀沉降的可能。因此,为确保工程质量和安全,统筹考虑工期因素,针对各罐不同的地质情况,综合应用不同的处理方式。

#### 2.4.1.1 天然地基

7座储罐基础下部分岩石外露,部分覆盖一定厚度的黄土层(黄土厚≤5 m),采用天然地基处理方式。具体方法是对外露岩石部分清至环墙基础底<sup>[12]</sup>,储罐基础下环墙范围内覆盖的黄土层全部挖除<sup>[13]</sup>,环墙下砌筑毛石混凝土挡墙,挡墙充分考虑罐体上部荷载对挡墙的推力,进行抗滑移验算<sup>[14]</sup>;挡墙内回填天然级配砂石,分层夯实,要求均匀密实,挡墙为外平齐内放坡,可以减少开挖土方量和砂石回填料量<sup>[15]</sup>。与环墙和毛石挡墙接触的岩石面环向设计为台阶状。毛石混凝土挡墙中毛石掺入量≤25%<sup>[16]</sup>。

天然地基处理方式的设计思路来源于换填垫层法

和“木桶”受力模型,混凝土挡墙相当于桶壁,混凝土挡墙外侧土层相当于桶箍。该处理方式在国内同类工程中首次使用,使用前仔细分析研究了其受力模型、受力特点,计算了储罐的侧压力、土的推力、挡墙底部的摩擦力以及风和地震作用等产生的水平力,在此基础上反复验算了基础的抵抗能力<sup>[17]</sup>;经过多次优化,挡墙由开始的外台阶式优化为内台阶式。经专家论证认为该处理方式能够确保储罐的安全,换填量减少约10 000 m<sup>3</sup>,土方开挖量减少约4 000 m<sup>3</sup>,缩短工期约30 d。

#### 2.4.1.2 天然地基+桩基

4座储罐基础下部分岩石外露或接近外露,但另一部分覆盖一定厚度的黄土层(黄土厚5~12 m),采用一半天然地基一半桩基的处理方式。具体方法是黄土层部分先低能级强夯再打桩做钢筋混凝土承台,承台与天然地基进行搭接,并在承台内设计部分锚拉钢筋与天然地基进行拉结,岩石外露部分凿掉至环墙底部标高。

根据GB 50011-2010(2016年版)《建筑抗震设计规范》“同一结构单元不宜部分采用天然地基部分采用桩基”的规定,因场地土类型对抗震有利、开挖工程量浩大、施工难度大,设计时综合计算风荷载、地震作用等产生的水平力以及基础的抵抗能力,竖向荷载由基岩和嵌岩桩基共同承担,水平荷载由承台周边回填土、基岩与承台板的摩擦力、抗剪墩和嵌岩桩共同抵抗。该处理方式避免了石方爆破与重新回填、布桩等工序,缩短了工期,节约了投资<sup>[18]</sup>。

#### 2.4.1.3 全部桩基

18座储罐基础下黄土层覆盖厚度最深处超过10 m,底部基岩面高差也较大,岩石坡度较陡,采用全部桩基处理方式。该类储罐基岩坡度为1:7或1:6,岩石坡度起伏变化较大,同一个储罐地基土有挖方也有填方,且局部填方很厚。具体方法是湿陷性黄土较厚、基岩埋深大、基岩坡度大的罐,先高能级强夯,再做桩基加钢筋混凝土承台,承台上做钢筋混凝土环墙基础。

由于大部分桩基桩身长度较短,无法作为提供反力的锚桩,为达到抽检的效果,根据要求不能提前指定桩号,这使得单独做锚桩也存在困难。同时由于当地依托条件较差,试验设备数量不足,采用堆载方式全部试验需要时间较长。根据JGJ 106-2003《建筑基桩检测技术



规范》，经计算分析，在桩基检测中采用高应变辅助检测法进行承载力检测。

#### 2.4.1.4 强夯

1座储罐部分基础下黄土覆盖层厚度5~10 m，土层厚度相对均匀，回填土相对不厚，采用增湿+高能级强夯的方式处理<sup>[19]</sup>。具体方法是先进行高、低能级强夯，然后进行检测，合格后再进行计算预抬高尺寸，最后直接做钢筋混凝土环墙基础。

通过仔细分析强夯和同类工程强夯数据，论证了大型储罐基础强夯处理的适用范围以及预增湿强夯法地基处理方案。如果储罐的地基土层相对均匀，厚度适中，基岩坡度平缓，地基土含水率合适，预增湿效果较好，运用强夯技术是合适的<sup>[20]</sup>。但对复杂地质条件下厚度严重不均的高等级湿陷性黄土，如存在预增湿注水工程量、预增湿均匀难度大、控制难度大等不确定性因素，单纯的强夯很难达到设计要求。对于地基覆土较浅

且基岩起伏较小情况，通过周密的预增湿技术措施，加上设计和施工控制措施到位，强夯能满足设计要求。

#### 2.4.2 未采用方式

未采用灰土挤密桩的原因：一是地基土含水量较低为5%~7%，而灰土挤密桩适宜含水率为14%，因此施工前需要对地基土进行预增湿，但场区地基土覆土厚度和含水率不均难以保证注水均匀性，而且从强夯试夯增湿效果来看，即使采取注水措施，也难保土层含水率能够达到灰土挤密桩要求的适宜含水率；二是底部基岩坡度相对较大，灰土挤密桩复合地基整体稳定性差；三是场地回填土厚度不均，灰土挤密桩置换率难以控制，复合地基的承载力难以保证。

#### 2.4.3 最终方案汇总

最终地基处理方案汇总见表5。该储备基地工程通过综合应用多种地基处理技术和基础处理方式，节省工程投资4600万元。

表5 最终地基处理方案汇总表

罐号	地基处理方案	土层厚度 /m	基岩最大坡度 / (%)	备注
G-11001	强夯+钢筋混凝土灌注桩	12.90~17.20	14.3	填土分布少
G-11002	强夯+钢筋混凝土灌注桩	10.10~15.00	14.0	填土分布少
G-11003	强夯+钢筋混凝土灌注桩	3.20~8.80	20.0	填土分布少
G-11004	强夯+钢筋混凝土灌注桩	8.30~13.60	10.4	填土最大厚度2.2 m
G-11005	强夯+钢筋混凝土灌注桩	6.60~15.90	19.6	填土分布少
G-11006	强夯+钢筋混凝土灌注桩	4.40~11.70	20.2	填土分布少
G-11007	强夯+钢筋混凝土灌注桩	7.90~14.70	15.6	填土最大厚度5 m
G-11008	普夯+钢筋混凝土灌注桩	5.40~9.50	10.8	填土最大厚度3 m
G-11009	天然地基	2.60~7.00	10.9	填土分布少
G-11010	强夯+钢筋混凝土灌注桩	5.90~13.00	13.4	填土最大厚度4.1 m
G-11011	强夯+钢筋混凝土灌注桩	8.20~14.00	18.9	填土最大厚度6.2 m
G-11012	强夯+钢筋混凝土灌注桩	1.80~11.60	38.5	填土最大厚度5.6 m
G-11013	天然地基	1.50~5.00	11.8	填土分布少
G-11014	天然地基+钢筋混凝土灌注桩	1.10~10.80	24.1	填土分布少
G-11015	天然地基+钢筋混凝土灌注桩	0~14.30	37.3	填土最大厚度4 m
G-11016	天然地基	4.20~7.00	11.8	填土最大厚度4.6 m
G-11017	天然地基	1.00~6.80	15.3	填土最大厚度1.7 m
G-11018	天然地基+钢筋混凝土灌注桩	0.60~12.00	42.5	填土最大厚度4.8 m
G-11019	强夯+钢筋混凝土灌注桩	15.50~20.20	20.8	填土分布少
G-11020	强夯+钢筋混凝土灌注桩	8.20~15.50	18.7	填土最大厚度3.7 m
G-11021	强夯+钢筋混凝土灌注桩	8.50~16.70	25.1	填土分布少
G-11022	强夯+钢筋混凝土灌注桩	18.20~26.30	25.4	填土分布少
G-11023	强夯+钢筋混凝土灌注桩	15.80~19.70	13.9	填土分布少
G-11024	强夯+钢筋混凝土灌注桩	11.40~16.00	18.2	填土最大厚度7.1 m
G-11025	增湿后高能级强夯	4.40~8.90	17.3	填土最大厚度5.7 m
G-11026	天然地基	0~3.80	10.9	填土分布少
G-11027	天然地基	0~5.00	16.2	填土局部分布
G-11028	强夯+钢筋混凝土灌注桩	3.50~21.30	50.1	填土最大厚度6.6 m
G-11029	天然地基	1.00~4.70	10.1	填土最大厚度1.7 m
G-11030	天然地基+钢筋混凝土灌注桩	0~12.70	54.5	填土局部分布

### 3 结论

1) 针对复杂地质条件,综合运用多种地基处理技术和基础处理方式,不但技术上可行,而且社会、经济效益显著。

2) 采用预增湿强夯法处理土层含水量偏低的湿陷性黄土,技术上可行,但大面积不均匀土层的预增湿效果难以保证。

3) 通过试夯,提供工程所需的最优强夯参数,编制可操作性强的强夯施工技术规定,对大面积强夯施工质量极为重要。

4) 强夯法对于处理不均匀地基效果明显。

5) 在湿陷性黄土地基尤其是土层含水量较低时,在桩基前采用强夯进行预处理,无论是对桩基施工质量还是桩基受力都极有利。

6) 根据建构筑物对地基的不同要求,同时考虑各种地基处理方式对设备机具、场地等施工条件的要求,有区别地选用最优地基处理方式。

#### 参考文献:

- [1] 陈海军. 兰州新区湿陷性黄土地基处理[J]. 西安科技大学学报, 2014, 34(2): 204-209.  
Chen Haijun. Loess Foundation Treatment for Lanzhou New District [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2014, 34(2): 204-209.
- [2] 贾嘉陵, 孙国富, 邓坤. 湿陷性黄土地层二元结构本构模型[J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(2): 180-184.  
Jia Jialing, Sun Guofu, Deng Kun. Constitutive Model of Dualistic Structure of Collapsed Loess [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(2): 180-184.
- [3] 陈存礼, 高鹏, 胡再强. 黄土的增湿变形特性及其与结构性的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1352-1360.  
Chen Cunli, Gao Peng, Hu Zaiqiang. Moistening Deformation Characteristic of Loess and Its Relation to Structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1352-1360.
- [4] 汪东林, 栾茂田, 杨庆. 非饱和土体变试验研究及其在地面沉降中的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(3): 307-311.  
Wang Donglin, Luan Maotian, Yang Qing. Experimental Study on Volume Change of Unsaturated Soils and Its Application to Estimation of Subsidence [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27(3): 307-311.

- [5] 高国瑞. 兰州黄土显微结构和湿陷机理的探讨[J]. 兰州大学学报, 1979, (2): 123-134.  
Gao Guorui. Study of the Microstructures and the Collapse Mechanism in Loess Soil from Lanzhou [J]. Journal of Lanzhou University, 1979, (2): 123-134.
- [6] 史宏民. 湿陷性黄土工程性质及其地基处理方法简述[J]. 山西水利, 2010, 26(2): 47-48.  
Shi Hongmin. Brief Description of Engineering Properties and Foundation Treatment Method of Collapsible Loess [J]. Shanxi Water Resources, 2010, 26(2): 47-48.
- [7] 颜海. 冲击压实技术在湿陷性黄土地区应用的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2010: 57.  
Yan Hai. Research and Application of Impact Compaction Technology in Collapsible Loess Area [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2010: 57.
- [8] 刘宇峰, 陈开圣. 强夯法在湿陷性黄土地基处理中的应用[J]. 山西建筑, 2005, 31(1): 71-72.  
Liu Yufeng, Chen Kaisheng. The Application of Dynamic Consolidation Method for the Treatment of Collapsible Loess Foundation [J]. Shanxi Architecture, 2005, 31(1): 71-72.
- [9] 张引平, 郭变梅. 强夯处理湿陷性黄土的应用[J]. 山西建筑, 2003, 29(2): 32-33.  
Zhang Yinping, Guo Bianmei. The Application of Strong Tamping in Collapsible Loess Treatment [J]. Shanxi Architecture, 2003, 29(2): 32-33.
- [10] 高蓉. 强夯法处理地基的问题探讨[J]. 山西建筑, 2006, 32(17): 100-101.  
Gao Rong. Discussion on Treating Foundation by Heavy Tamping [J]. Shanxi Architecture, 2006, 32(17): 100-101.
- [11] 梁虎. 湿陷性黄土地基的处理方法[J]. 四川水利, 2016, 37(6): 49-50.  
Liang Hu. Handling Method of Collapsible Loess Foundation [J]. Sichuan Water Resources, 2016, 37(6): 49-50.
- [12] 孟宇. 钢筋混凝土灌注桩在地基处理中的应用[J]. 水利规划与设计, 2016, (3): 89-92.  
Meng Yu. Application of RC Cast-in-situ Bored Pile in Foundation Treatment [J]. Water Resources Planning and Design, 2016, (3): 89-92.
- [13] 龚安苏. 钢制储罐基础设计探讨[J]. 四川建筑, 2017, 37(5): 119-121.  
Gong Ansu. Discussion on the Basic Design of Steel Tank [J]. Sichuan Architecture, 2017, 37(5): 119-121.
- [14] 贡广民. 大型钢储罐环墙基础设计探讨[J]. 化工设计, 2005, 15(1): 36-39.  
Yun Guangmin. Foundation Design for Ring Wall of Large Steel Tank [J]. Chemical Engineering Design, 2005, 15

- (1): 36-39.
- [15] 陈敬洪. 谈钢储罐环墙基础的设计与构造[J]. 山西建筑, 2012, 38(15): 72-73.  
Chen Jinghong. Design and Structure for Steel Tank Ring Wall Foundation [J]. Shanxi Architecture, 2012, 38 (15): 72-73.
- [16] 王全国. 立式储油罐基础的特点及型式[J]. 油气田地面工程, 1993, 13(1): 67-68.  
Wang Jinguo. Features and Types of Foundation for Vertical Oil Storage Tank [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 1993, 13 (1): 67-68.
- [17] 徐至钧. 大型储油罐基础的优化设计[J]. 石油库与加油站, 2002, (6): 28-32.  
Xu Zhijun. The Optimized Design of the Groundwork of Large Oil Tank [J]. Petroleum Exploration and Gas Station, 2002, (6): 28-32.
- [18] 沈 鸣. 灌注桩基础设计与施工的优化选择[J]. 岩土工程界, 2001, 4(5): 17-19.  
Shen Ming. The Optimum Choice of Design and Construction for Cast-in-place Pile Foundation [J]. Geotechnical Engineering World, 2001, 4 (5): 17-19.
- [19] 齐银川, 刘 晨. 强夯法在处理地基中的应用分析[J]. 山西建筑, 2009, 35(4): 154-155.  
Qi Yinchuan, Liu Chen. Application Analysis of Dynamic Consolidation Method on Foundation Treatment [J]. Shanxi Architecture, 2009, 35 (4): 154-155.
- [20] 张海生, 田 水, 张海涛. 强夯加固深度影响因素的灰色关联分析[J]. 山西建筑, 2011, 37(3): 46-47.  
Zhang Haisheng, Tian Shui, Zhang Haitao. On Grey Relevant Analysis of Influential Factors of Deeper Consolidation of Foundation [J]. Shanxi Architecture, 2011, 37 (3): 46-47.

## 中国成为推动全球能源转型关键力量

2018年7月30日,《BP世界能源统计年鉴》(以下简称《年鉴》)2018年中文版发布。2017年,世界总体能源、石油和天然气消费量均实现5年来最快增长,减排压力相应增加。石油市场供给不确定性将影响中期市场油价走势。中国能源消费量与前两年相比增长显著,贡献世界能源消费增量1/3,已经成为全球能源低碳转型的关键力量。

去年,随着世界经济复苏,一次能源消费总量增长达2.2%,高于2016年的1.2%。BP首席经济学家戴思攀将2017年全球能源发展概括为“前进两步,后退一步”,即可再生能源和天然气大幅增长,而煤炭和碳排放出现反弹,能效提升步伐放缓。但《年鉴》认为,煤炭消费和碳排放量反弹是周期性调整,不会影响长期转型趋势。

油气市场同样出现新变化。石油市场“强需求、弱供给”格局形成,石油需求继续保持170万桶/d的强劲增长,但地缘政治及减产因素使得供给方面增长不及需求增长。供需基本回归平衡面,未来油价走势主要看供给的不确定因素。全球天然气消费增长3%,为7年来最高增速,其中亚洲市场价格和欧洲市场价格逐渐趋同,天然气市场全球化程度明显提升。

电力和可再生能源领域是技术变革和能效提升的主角。去年,可再生能源占新增发电量的近一半,风电和太阳能是主力。氢能作为储能形式,钴和锂作为电池的原材料受到重点关注。但《年鉴》同时指出,20年来,煤炭、可再生能源在发电结构中的占比基本没变,转型发展依旧任重道远。

作为全球最大能源消费国,中国能源转型的努力和成就举世瞩目。2017年,中国天然气消费增长15%,是世界天然气消费最大驱动力。太阳能消费增长76%,碳排放增长速度降为过去10年均速的一半,电动汽车保有量快速增长。戴思攀表示,中国在能源转型方面的决心和力度超过任何一个国家,而且还有大量潜力,可以在碳排放及储存等更多领域引领全球转型趋势。

(曾 妍 摘自中国石油网)