

中国电力规划设计协会团体标准宣传系列

T/CEPPEA 5010-2021 《电力工程砂石垫层法地基处理技术规范》

标准起草单位：西北电力设计院有限公司

黑龙江省电力设计院有限公司

湖北省电力勘测设计院有限公司（已更名为：湖北省电力规划设计研究院有限公司）

标准起草人：刘志伟、杨生彬、程东幸、苏恩龙、段毅、胡昕、姜东、薛远峰、谭瑞山、彭斌、吕文军、樊柱军、智军、刘小东、李漪、饶虎、王成、王延辉

撰稿人：刘志伟

标准获取通道：协会官网（<https://www.ceppea.net/>）首页“中外电力工程技术标准数据管理平台入口”

中外电力工程技术标准数据管理平台离线客户端（会员单位）

一、编制背景

随着重型工业建筑、高层及超高层民用与公共建筑日趋增多，建筑物的荷载越来越大。当天然地基不能满足支撑上部荷载和控制建筑物变形时，必须对地基进行加固，形成人工地基。砂砾石属粗粒土，在自然界分布广泛、储量丰富。其具有压实性能好、透水性强、填筑密度大、抗剪强度高、沉陷变形小、承载力高等工程特性，是一种性能良好的天然建筑材料。

砂石垫层具有材料广泛、设备常见、过程可视、施工易控、性能稳固的特点。天然地基不能满足支撑上部荷载和控制建筑物变形时，采用砂砾石对地基进行换填处理，在提高地基承载力、减小沉降性、消纳膨胀量、增强水稳性等方面都能发挥较显著的作用。工程界还存在一些认识偏差，在一些砂石垫层地基具有明显技术经济比较优势的场合，出现了不敢用、不会用、打折用的情况。砂石垫层地基看似简单，在实际应用中会涉及原料选择、碾压工艺、参数取值、强度确定、变形验算等一系列技术问题。

目前，一般工业与民用建筑使用的砂石压实垫层承载力一般为 200kPa～300kPa。比如《建筑地基处理技术规范》条文说明中，碎石、卵石承载力特征建议值为 200kPa～300kPa，同时规定垫层厚度不宜大于 3m，垫层的分层铺填厚度 200mm～300mm。

在砂石垫层地基应用方面，西北电力设计院有限公司有着 30 多年、数十个大型工程应用经验，项目地点包括从北到南、从东到西全国各地，也覆盖“一带一路”沿线国家。在垫层设计和参数的取值方面已远远突破了现行规程规范的规

定和要求, 陕北神木、陕西彬长电厂 600MW 机组工程砂石垫层地基, 河南沁北、山东邹县、安徽铜陵 1000MW 机组工程砂石垫层地基承载力特征值达 700kPa, 分层铺填厚度 400mm~600mm, 垫层厚度超过 7m, 施工质量容易控制。这些工程投产以来, 地基变形较小, 运行效果良好, 为工程建设节约了大量的地基处理费用。

为推广砂石垫层法在电力工程中的应用, 促进砂石垫层法地基处理技术的发展, 确保地基处理的质量, 做到安全可靠, 合理控制工程投资, 使砂石垫层法地基处理的勘察设计和施工质量控制系统化、规范化以及更具可操作性, 特制定本标准。

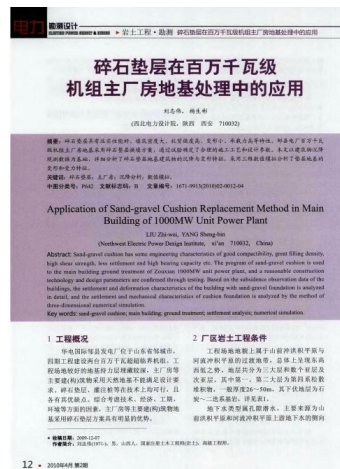
二、主要内容

标准规定了砂石垫层法地基处理勘察与评价、垫层材料、垫层设计、原体试验、施工、质量检验与验收、技术文件编制等内容。

标准适用于电力工程的砂石垫层法地基处理。标准具有普适性, 也可在电力工程以外的工业与民用建筑中推广应用, 并为今后国家、行业标准的修编提供参考依据。

三、支撑标准的重要研究成果

编制组全面调研总结了近三十年来电力工程砂石垫层法地基处理研究成果和设计、试验、施工、检测及建(构)筑物沉降观测等工程经验和资料, 完成了《砂砾石碾压垫层的工程性能与应用研究》科研课题和《砂石垫层工程应用调研报告》, 在《工程勘察》《电力勘测设计》《西部探矿工程》等期刊发表多篇学术论文, 并且编写完成专著《砂砾石垫层地基研究与工程应用》(中国建筑工业出版社, 2020 年 4 月), 从砂砾石垫层地基方案的选用、施工工艺确定、现场原体试验、检测结果、工程应用和效果等方面进行了研究总结, 这些研究成果(见图 1)为标准编制提供了重要的技术支撑。

[illegible][illegible][illegible]

为重要参数, 根据地质条件, 可得到:

① 一般地壳岩石的弹性模量 E (MPa)
 ② 一般地壳岩石的泊松比 μ (%)
 ③ 一般地壳岩石的密度 ρ (g/cm³)
 ④ 一般地壳岩石的膨胀系数 α (1/°C)
 ⑤ 一般地壳岩石的导热系数 λ (W/m·K)

2 等效粘弹性体的速率测试

根据速率等效原理可以证明, 当温度是地壳岩石中的弹性温度时, 地壳岩石的粘弹性体等效速率测试可以等效为地壳岩石的弹性速率测试, 即:

$$G_{eq} = G \quad (1)$$

① 计算地壳岩石的等效弹性模量, 地壳岩石的等效泊松比和等效的膨胀系数:

$$G_{eq} = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (2)$$

② 计算地壳岩石的等效速率:

$$\dot{\epsilon}_{eq} = \dot{\epsilon} \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (3)$$

③ 计算地壳岩石的等效泊松比:

$$\mu_{eq} = \mu \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (4)$$

④ 计算地壳岩石的等效膨胀系数:

$$\alpha_{eq} = \alpha \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (5)$$

⑤ 计算地壳岩石的等效导热系数:

$$\lambda_{eq} = \lambda \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (6)$$

⑥ 计算地壳岩石的等效密度:

$$\rho_{eq} = \rho \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (7)$$

⑦ 计算地壳岩石的等效泊松比:

$$\mu_{eq} = \mu \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (8)$$

⑧ 计算地壳岩石的等效膨胀系数:

$$\alpha_{eq} = \alpha \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (9)$$

⑨ 计算地壳岩石的等效导热系数:

$$\lambda_{eq} = \lambda \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (10)$$

⑩ 计算地壳岩石的等效密度:

$$\rho_{eq} = \rho \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (11)$$

⑪ 计算地壳岩石的等效泊松比:

$$\mu_{eq} = \mu \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (12)$$

⑫ 计算地壳岩石的等效膨胀系数:

$$\alpha_{eq} = \alpha \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (13)$$

⑬ 计算地壳岩石的等效导热系数:

$$\lambda_{eq} = \lambda \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (14)$$

⑭ 计算地壳岩石的等效密度:

$$\rho_{eq} = \rho \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (15)$$

⑮ 计算地壳岩石的等效泊松比:

$$\mu_{eq} = \mu \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (16)$$

⑯ 计算地壳岩石的等效膨胀系数:

$$\alpha_{eq} = \alpha \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (17)$$

⑰ 计算地壳岩石的等效导热系数:

$$\lambda_{eq} = \lambda \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (18)$$

⑱ 计算地壳岩石的等效密度:

$$\rho_{eq} = \rho \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (19)$$

⑲ 计算地壳岩石的等效泊松比:

$$\mu_{eq} = \mu \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (20)$$

⑳ 计算地壳岩石的等效膨胀系数:

$$\alpha_{eq} = \alpha \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (21)$$

㉑ 计算地壳岩石的等效导热系数:

$$\lambda_{eq} = \lambda \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (22)$$

㉒ 计算地壳岩石的等效密度:

$$\rho_{eq} = \rho \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (23)$$

㉓ 计算地壳岩石的等效泊松比:

$$\mu_{eq} = \mu \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (24)$$

㉔ 计算地壳岩石的等效膨胀系数:

$$\alpha_{eq} = \alpha \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (25)$$

㉕ 计算地壳岩石的等效导热系数:

$$\lambda_{eq} = \lambda \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (26)$$

㉖ 计算地壳岩石的等效密度:

$$\rho_{eq} = \rho \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (27)$$

㉗ 计算地壳岩石的等效泊松比:

$$\mu_{eq} = \mu \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (28)$$

㉘ 计算地壳岩石的等效膨胀系数:

$$\alpha_{eq} = \alpha \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (29)$$

㉙ 计算地壳岩石的等效导热系数:

$$\lambda_{eq} = \lambda \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (30)$$

㉚ 计算地壳岩石的等效密度:

$$\rho_{eq} = \rho \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (31)$$

㉛ 计算地壳岩石的等效泊松比:

$$\mu_{eq} = \mu \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (32)$$

㉜ 计算地壳岩石的等效膨胀系数:

$$\alpha_{eq} = \alpha \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (33)$$

㉝ 计算地壳岩石的等效导热系数:

$$\lambda_{eq} = \lambda \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (34)$$

㉞ 计算地壳岩石的等效密度:

$$\rho_{eq} = \rho \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (35)$$

㉟ 计算地壳岩石的等效泊松比:

$$\mu_{eq} = \mu \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (36)$$

㊱ 计算地壳岩石的等效膨胀系数:

$$\alpha_{eq} = \alpha \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (37)$$

㊲ 计算地壳岩石的等效导热系数:

$$\lambda_{eq} = \lambda \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (38)$$

㊳ 计算地壳岩石的等效密度:

$$\rho_{eq} = \rho \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (39)$$

㊴ 计算地壳岩石的等效泊松比:

$$\mu_{eq} = \mu \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (40)$$

㊵ 计算地壳岩石的等效膨胀系数:

$$\alpha_{eq} = \alpha \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (41)$$

㊶ 计算地壳岩石的等效导热系数:

$$\lambda_{eq} = \lambda \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (42)$$

㊷ 计算地壳岩石的等效密度:

$$\rho_{eq} = \rho \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (43)$$

㊸ 计算地壳岩石的等效泊松比:

$$\mu_{eq} = \mu \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (44)$$

㊹ 计算地壳岩石的等效膨胀系数:

$$\alpha_{eq} = \alpha \exp \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (45)$$

(2) 第 7.6 条和第 7.7 条给出了地基承载力取值: 对于地基承载力特征值

要求大于 350kPa 的砂石垫层，压实标准可按压实系数不小于 0.97 控制。当缺乏试验资料时，可按照以下取值满足常规项目设计需求：中粗砂料形成的垫层地基承载力特征值不宜大于 250kPa，圆砾、角砾料形成的垫层地基承载力特征值不宜大于 350kPa，卵石、碎石料形成的垫层地基承载力特征值不宜大于 500kPa。当地基承载力要求大于 500kPa 时，通过现场静载荷试验确定砂石垫层承载力。

（3）砂石垫层原体试验方面，从技术策划、资源准备、施工、试验项目与方法等提出了试验流程（图 2）、技术控制要点及试验大纲、试验报告、检测报告编制要点。

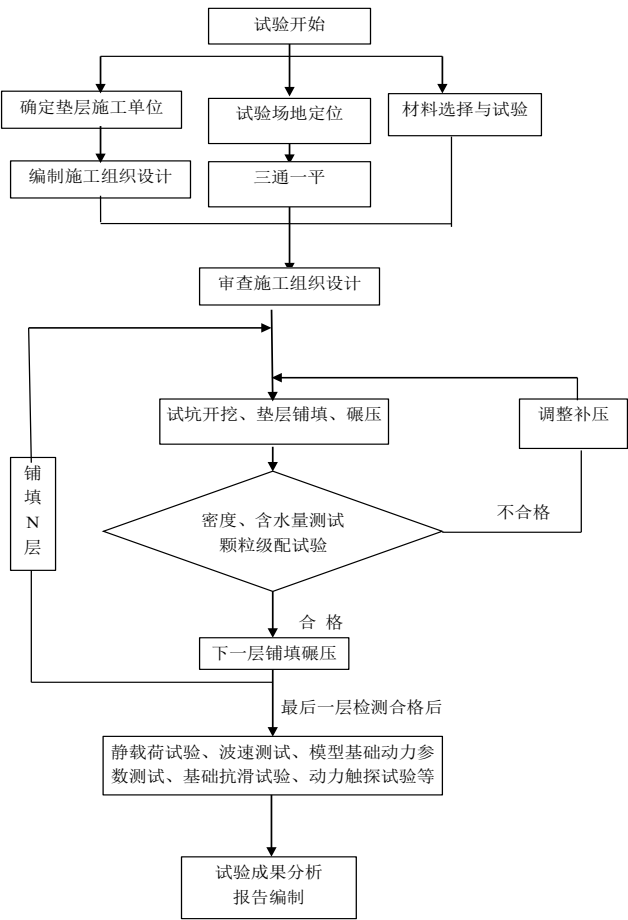


图 2 砂石垫层原体试验流程

（4）规定了分层铺填厚度和施工工艺。卵石、碎石料分层铺填厚度宜为 400mm~600mm，砂料分层铺填厚度宜为 250mm~300mm，对承载力要求较高时，分层铺填厚度取小值。对于圆砾、角砾、碎石、卵石垫层，采用 12t 及以上振动碾压机械时，碾压遍数宜为 6 遍~9 遍，碾压压茬为三分之一振动轮宽度，行驶速度宜为 2km/h~4km/h。

(5) 规范了砂石垫层设计、试验、施工、检测、技术文件编制以及建（构）筑物沉降监测要求等，以满足电力工程“高、大、重、深”的地基处理要求。

五、工程应用情况和应用效果

本标准编制中认真总结了多项大型电力工程砂石地基处理的实践经验，下面对各项工程的地基持力层以及地基处理方法和应用效果分别加以说明：

【工程 1】华电国际邹县电厂四期 2×1000MW 工程

工程地基主要持力层为粉质黏土及砾砂。地下水位埋深为 0.56~2.36m。主厂房、锅炉房、烟囱采用碎石垫层换填处理，厚度 3m。基坑开挖前，先进行施工降水；地基承载力特征值不小于 700kPa，变形模量不低于 80MPa（图 3）。

本工程在施工期间及投产后均进行了沉降观测，数据表明，施工期间的沉降量占总沉降量 90%以上，施工期间完成了大部分沉降且变形均匀，垫层的工后沉降变形很小。建（构）筑物总沉降量很小且沉降均匀，说明垫层的抗变形能力和应力扩散能力强，能有效的控制下卧层的压缩变形。建（构）筑物平均沉降及差异沉降远远小于规范允许沉降不超过 150 mm 的要求，说明地基处理效果明显。



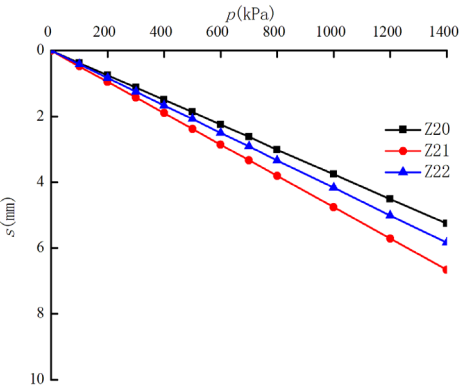
(a) 工程全景



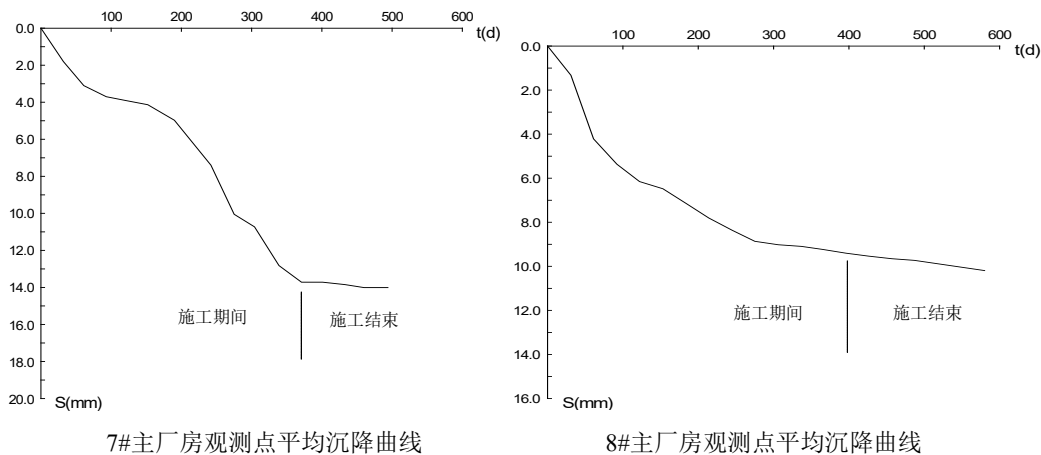
(b) 垫层施工



(c) 地层岩性



(d) 载荷试验曲线



(e) 建筑物沉降曲线

图3 华电国际邹县电厂四期 2×1000MW 工程

【工程 2】安徽铜陵发电厂六期 2×1000MW 机组工程

工程地基主要持力层为粉质黏土和含黏性土碎石。5#冷却塔地基采用本地区丰富的碎石料进行换填处理的方案。要求碎石垫层压实系数不小于 0.97，地基承载力特征值不小于 700kPa，变形模量不低于 80MPa。环基碎石换填最厚达 4.3m，最薄 0.5m。冷却塔人字柱支墩上共布设 12 个沉降观测点，最大累计沉降量 12.89mm，基础倾斜 0.00003，整体沉降均匀（图 4）。



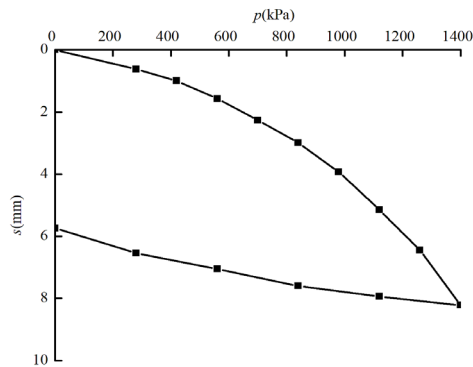
(a) 工程全景



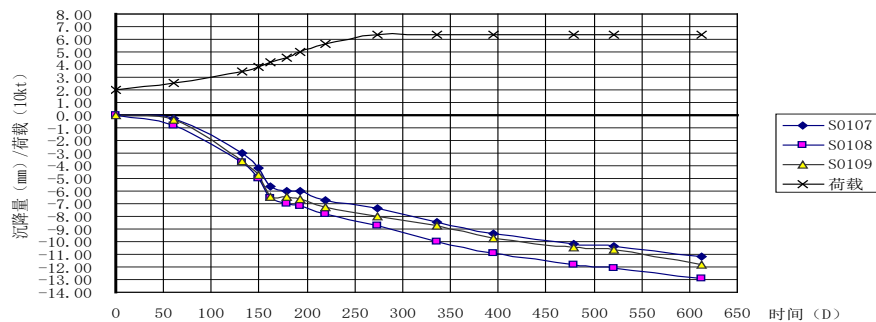
(b) 垫层施工



(c) 地层岩性



(d) 载荷试验曲线



(e) 建筑物沉降曲线

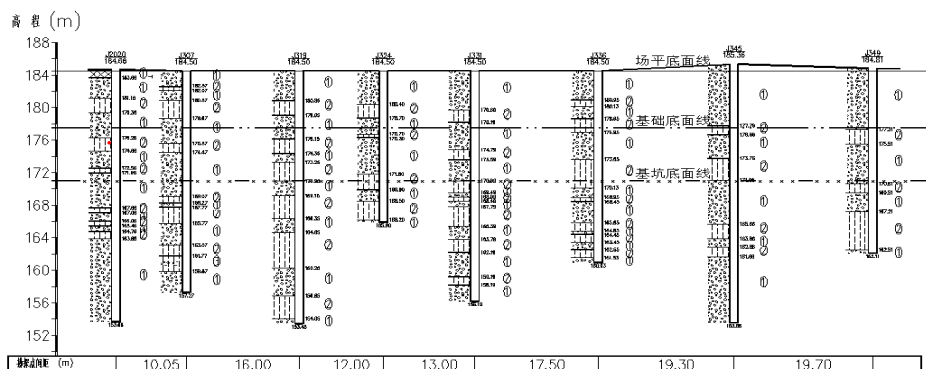
图 4 安徽铜陵发电厂六期 $2 \times 1000\text{MW}$ 机组工程

【工程 3】华能沁北发电有限公司 $4 \times 600\text{MW} + 2 \times 1000\text{MW}$ 机组

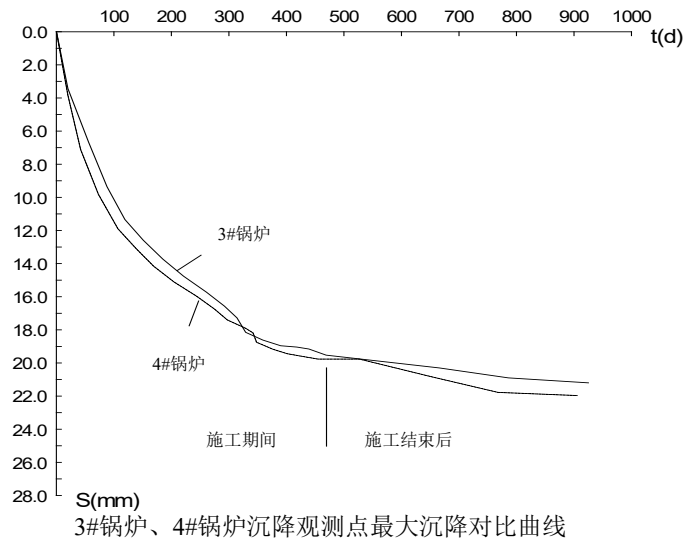
工程场地处于太行山山前洪积扇，黄土状粉土、卵石组成的互层土。本工程各期主厂房区砂石垫层设计基本相似。二期工程主厂房区大部分基础埋深为 7.0m，基坑开挖深度为 13.5m，设计砂石垫层厚度为 6.5m。砂石垫层地基承载力不低于 850kPa，变形模量不低于 85MPa。3#锅炉基础观测点累计最大沉降量为 19.53mm，4#锅炉基础观测点累计最大沉降量为 19.77mm，两个建筑物的沉降曲线几乎重合，施工期间沉降占总沉降量的 90%左右（图 5）。



(a) 工程全景



(b) 地层岩性



(c) 建筑物沉降曲线

图5 华能沁北发电有限公司 $4 \times 600\text{MW} + 2 \times 1000\text{MW}$ 机组

【工程4】陕西秦华发电有限责任公司 $2 \times 600\text{MW}$ 机组工程

该工程所处地貌单元属秦岭北麓山前冲洪积扇群的中上部，粗颗粒土层和黄土状土交互分布。主厂房、冷却塔区碎石垫层设计厚度 $4 \sim 6\text{m}$ ，垫层地基下卧层卵石层，超挖部分用 C10 毛石混凝土回填。地基承载力特征值不小于 600 kPa ，变形模量不小于 75MPa 。锅炉钢架最大累计沉降量为 28.95mm ，平均沉降速率为 $0.25\text{mm}/100$ 天，沉降趋于稳定（图6）。



(a) 地形地貌



(b) 地层岩性

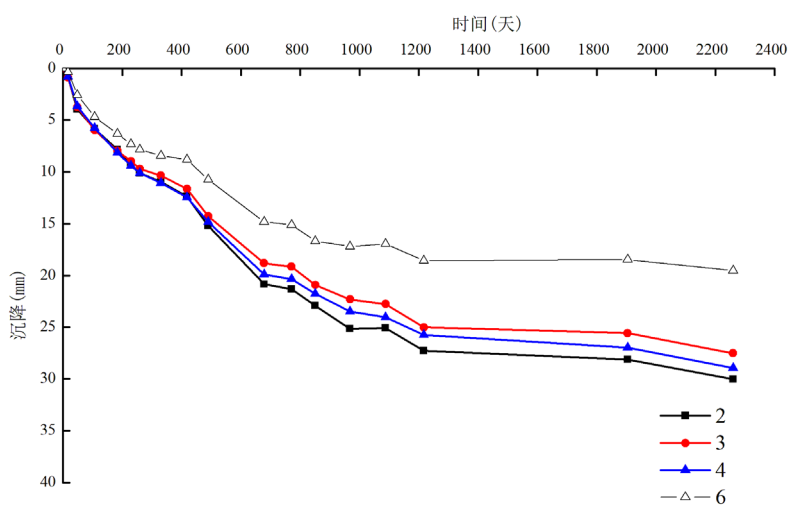


基坑开挖及毛石混凝土回填



冷却塔碎石垫层施工

(c) 垫层施工



(d) 建筑物沉降曲线

图6 陕西秦华发电有限责任公司 2×600MW 机组工程

【工程5】陕西国华锦界 4×600MW 煤电工程

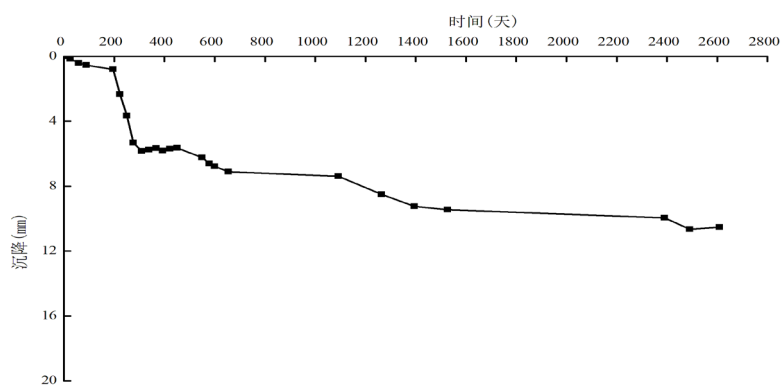
该工程为具典型意义的“煤电一体化”开发建设项目，位于我国毛乌素沙漠南缘的风沙草滩区，地基主要持力层为粉土，3#主厂房、4#主厂房采用碎石垫层方案。垫层厚度一般为 4m，隐伏古冲沟区垫层厚度加大为 6m。地基承载力特征值不小于 600 kPa，变形模量不小于 80MPa。坑底标高处于地下水位附近和以下，采取轻型井点降水和基坑内明沟排水结合的降水方案。建筑物总体沉降量小，施工期间沉降占总沉降量的 58.5%~64.2%，运行期间沉降曲线呈缓慢沉降变形的特点，达到了稳定状态（图 7）。



(a) 工程全景



(b) 降水及垫层施工



(c) 建筑物沉降曲线

图7 陕西国华锦界4×600MW煤电工程

【工程6】陕西大唐彬长发电厂2×600MW工程

项目的主厂区座落于泾河河谷的Ⅰ级阶地和高漫滩上，采用含泥量较高、级配差、细颗粒偏多的天然砂石垫层用于主厂房等大型建（构）筑物地基处理。砂砾石垫层地基承载力特征值不小于600kPa，变形模量不小于60MPa。主厂房A排柱最大累计沉降量为4.76mm，最后1次最大沉降速率为1.10mm/100天。B排柱

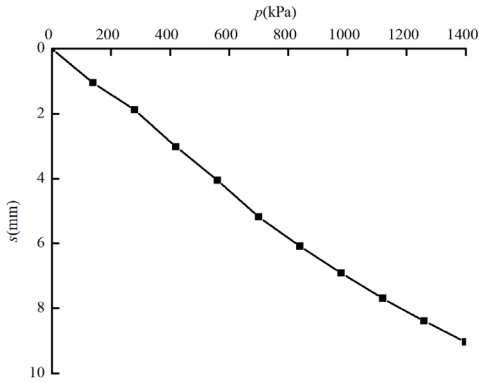
累计沉降量为 3.17mm。C 排柱最大累计沉降量为 10.58mm，最后 1 次最大沉降速率为 0.75mm/100 天（图 8）。



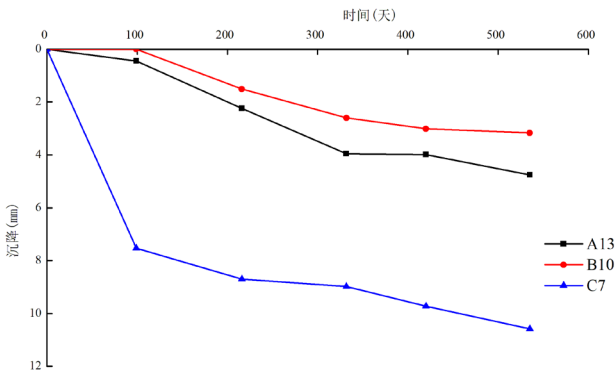
(a) 工程全景



(b) 垫层施工



(c) 载荷试验曲线



主厂房观测点沉降过程曲线

(d) 建筑物沉降曲线

图 8 陕西大唐彬长发电厂 2×600MW 工程

【工程 7】印尼国华穆印煤电项目 2×150MW 发电工程

中国公司在印尼的建设项目，采用 B00 模式。丘陵地貌，原始地形起伏较大。高塑性黏性土层垂向及平面分布均匀性很差，地基需考虑不均匀变形问题。烟囱地段上部土层工程性能差，设计砂石垫层厚度 7.0m，每层虚铺厚度 400mm，地基承载力特征值不小于 500kPa。

烟囱沉降最大值为 94.10mm，沉降均匀。本工程采用砂石垫层地基处理的建（构）筑物与其他同类工程相比沉降变形总体较大，分析主要为下卧层高塑性黏性土的变形。



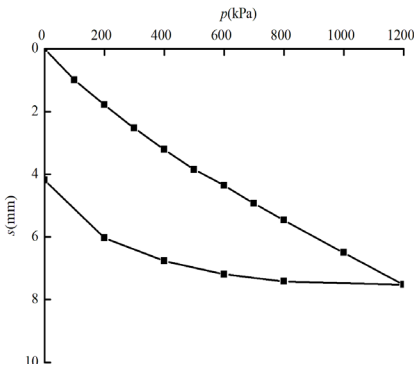
(a) 地形地貌



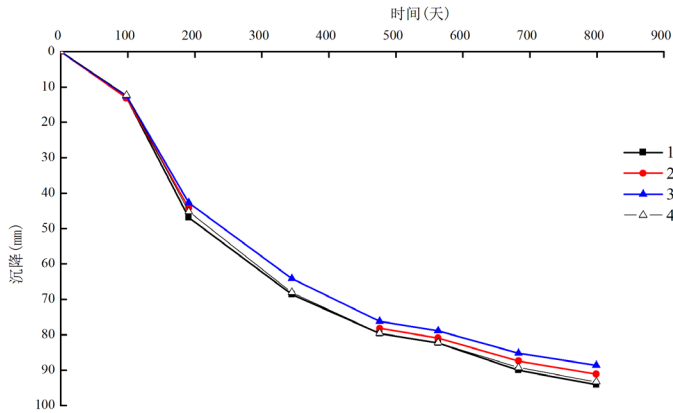
(b) 载荷试验曲线



(c) 垫层施工



(d) 载荷试验曲线



烟囱沉降观测过程曲线
(e) 建筑物沉降曲线

图 9 印尼国华穆印煤电项目 2×150MW 发电工程

这些应用成果表明，团体标准 T/CEPPEA 5010-2021《电力工程砂石垫层法地基处理技术规范》可为地基处理提供可靠的技术支持，有实际的社会和经济效益。