

北京环球主题公园项目 Z5 区场地沉降分析

北京市勘察设计研究院有限公司 孙立超（邮箱 sunlichao@126.com）

1. 项目概述

北京环球主题公园项目是集国际一流的主题游乐和城市休闲度假于一体的大型国际旅游度假区，场地位于北京市通州区南部，东至六环路，南邻京哈高速、通马路，北至万盛南街、群芳南街。北京环球主题公园总用地面积 1006387.138m²，根据不同设计主题及功能分为 8 个区。本项目所涉及的 Z5 区（哈利波特）位于整个场地的东侧，具体位置如图 1~图 2 所示。



图1 项目场区的地理位置示意图

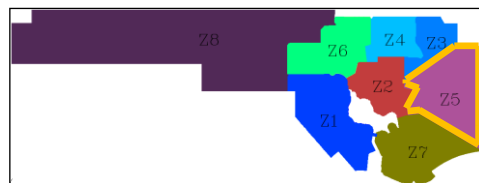


图2 北京环球主题公园工程分区示意图

2. 项目分析难点

- (1) 场地面积大，约 93400m²，地层分布不均匀；
- (2) 地层性质较差；
- (3) 场地填筑高度不同，厚度为 1.90~5.50m；
- (4) 如何合理反演固结分析参数取值；

3. 分析工作内容

根据现场勘察、各个阶段的实时监测与检测成果，采用 PLAXIS 3D 软件，利用现有的沉降监测成果，对填土及地基土的计算参数进行反演分析，建立合理的场地沉降预测分析模型。在此基础上，根据分析需求，对 Z5 场区在场地形成过程中上部填土堆载条件下的各个阶段（包括最终）的地基沉降进行全过程的动态预测分析。主要的工作内容包括：

- (1) 地基沉降动态数值预测模型的建立，包括：填土及地基土、施工过程的模拟等。
- (2) 地基沉降计算模型的标定，包括：利用实测监测结果，对填土及地基土的模型计算参数进行反演分析，从而优化调整地基沉降计算模型。
- (3) Z5 场区在上部填土堆载条件下的各个阶段的地基沉降分析，包括：场区地基的最终沉降分析以及长期沉降过程中各个施工阶段的地基沉降预测分析，为场区内建筑物的设计、施工及后期安全使用提供建议。

4. 本项目场区工程地质条件

4.1. 场地填筑的设计施工条件

场地形成工程包括场地初步平整竖向设计、场地清表、场地开挖、场地填筑、施工检测等。

(1) 回填要求

本次场地现场整体设计目标是将场地内杂填土和素填土挖除，并且采用合适的填料分层回填至设计标高。压实度检测要求为：槽底处理后压实系数 0.85，回填第一、二、三层压实系数分别为 0.87、0.90、0.93，其余回填层压实系数均为 0.95，其中最大干密度计算均采用重型击实试验。

(3) 分层碾压回填方案

场地回填的施工方法、施工工序、每层压实遍数宜通过现场试验确定，场地回填具体参数可根据现场实际情况适当调整，以满足设计要求，分层验收以压实系数进行控制。

4.2. 填土岩土工程性质及参数

场地形成进行土方填垫的土层主要为黏质粉土素填土、砂质粉土素填土①层及卵石素填土①₁层，其厚度为 1.90~5.50m。场地形成填土概述如下：

黏质粉土素填土、砂质粉土素填土①层：主要为外来黏质粉土、砂质粉土夹粉质黏土等的混合料，经分层碾压而成，局部含灰渣、砖渣等；

卵石素填土①₁层：外来天然级配砂石，经碾压而成，钻探揭示： $D_{天}=7\sim 9\text{cm}$ ， $D_{长}=9\sim 12\text{cm}$ ， $D_{一般}=4\sim 7\text{cm}$ ，亚圆形，含细砂、圆砾及黏性土约 20%~30%。

根据标准贯入试验及动力触探试验成果、室内试验成果、物探成果分析、填垫施工阶段压实系数检测结果、场地形成压实填土载荷试验结果表明填土材料整体上达到相应要求指标，局部范围微超指标。

4.3. 工程地质条件

本项目场区地形基本平坦，现场详细勘察期间（2016 年 8 月下旬~9 月上旬）实测各勘探钻孔孔口地面标高介于 19.42~21.49m 之间。

根据现场勘探、原位测试及室内土工试验成果，按地层沉积年代、成因类型，将本工程最大勘探深度 55.00m 范围的土层划分为人工堆积层、新近沉积层及第四纪沉积层三大类，并按地层岩性及其物理力学数据指标，进一步划分为 9 个大层及亚层。与本次分析相关的土层岩性特征如表 1 所述。

表1 地层岩性特征一览表

成因年代	大层编号	地层序号	岩性	各大大层顶标高变化范围 (m)	颜色	稠度/密实度	压缩性
人工堆积层	1	①	粉质粘土素填土、粘质粉土素填土	19.42~21.49	黄褐~褐黄	可塑（局部硬塑）	/
		① ₁	房渣土-碎石填土		杂	稍密	/
新近沉积层	2	②	粘质粉土、粉质粘土	17.01~20.31	褐黄~褐黄（暗）	中密	中高~高压缩性
		② ₁	粘质粉土、砂质粉土		褐黄~褐黄（暗）	中密	中~中高压缩性
		② ₂	粘土、重粉质粘土		褐黄~褐黄（暗）	可塑	中高~高压缩性
		② ₃	粉砂、细砂		褐黄~褐黄（暗）	中密~稍密	中低压缩性
第四纪沉积层	3	③	粘质粉土、砂质粉土	11.64~15.55	灰~黄灰	密实~中密	低~中低压缩性
		③ ₁	粉质粘土、粘质粉土		灰~黄灰	可塑~硬塑	中高压缩性

		③ ₂	有机质重粉质粘土、有机质粘土		灰~黄灰	可塑	中高压压缩性
		③ ₃	粉砂、细砂		灰~黄灰	中密	低压缩性
	4	④	细砂、粉砂	7.14~13.21	灰~黄灰	密实~中密	低压缩性
		④ ₁	粘质粉土、砂质粉土		灰~黄灰	密实~中密	中低~中压缩性
		④ ₂	有机质粘土、有机质重粉质粘土		灰~黄灰	可塑	中高压压缩性
		④ ₃	粉质粘土、粘质粉土		灰~黄灰	可塑	中~中高压压缩性
		⑤	细砂、中砂	1.22~5.66	灰~黄灰	密实	低压缩性
	5	⑤ ₁	粉质粘土、粘质粉土		灰~黄灰	可塑~硬塑	中低~中压缩性
		⑤ ₂	砂质粉土、粘质粉土		灰~黄灰	密实	低~中低压缩性
		⑤ ₃	有机质粘土、有机质重粉质粘土		灰~黄灰	可塑~硬塑	中压缩性
	6	⑥	细砂、中砂	-7.02~-0.54	灰~黄灰	密实	低压缩性
		⑥ ₁	粉质粘土、粘质粉土		灰~黄灰	可塑~硬塑	中低~中压缩性
		⑥ ₂	粘质粉土、砂质粉土		灰~黄灰	密实	低压缩性
		⑥ ₃	有机质粘土、有机质重粉质粘土		灰~黄灰	可塑~硬塑	中低~中压缩性
	7	⑦	细砂、中砂	-12.74~-10.81	灰~黄灰	密实	低压缩性
	8	⑧	细砂、中砂	-18.00~-16.26	灰~黄灰	密实	低压缩性
		⑧ ₁	粘质粉土、粉质粘土		灰~黄灰	中密	低压缩性
		⑧ ₂	有机质粘土、有机质重粉质粘土		灰~黄灰	硬塑~可塑	低~中低压缩性

4.4. 现场详细勘察期间实测地下水位

现场详细勘察期间（2016年8月下旬~9月上旬）于钻孔中实测到3层地下水。具体地下水水位情况参见表2。

表2 地下水情况一览表

序号	地下水类型	钻孔量测的地下水水位(承压水测压水头)		含水层
		埋深 (m)	标高 (m)	
1	潜水	10.90~12.90	8.01~9.41	第4 大层, 岩性以细砂、粉砂为主
2	承压水	12.10~15.00	5.40~8.65	第5 大层, 顶板位于标高 1.22~5.66m, 底板位于标高-7.02~-0.54m, 岩性以细砂、中砂为主, 该相对含水层在场区普遍分布, 含水层平均厚度约 5.0m
3	承压水	13.00~13.70	5.81~8.05	第6、7 大层, 顶板位于标高-9.59~-0.68m, 底板位于标高-18.00~-16.26m, 岩性以细砂、中砂为主, 该相对含水层在场区普遍分布, 含水层平均厚度约 11.0m

5. 计算模型的建立及参数的确定

5.1. 基本模型概况

基于本项目的工程勘察、设计以及施工资料,建立的场地沉降数值分析模型如图3所示,模型模拟范围约为450m×400m×45m(模型长×宽×地基土计算深度),单元数约20万。

本次分析中,首先利用场地的勘察成果以及实时的现场沉降监测资料,对地基土及人工填筑土体的模型参数进行了反演分析。在此基础上,基于对场地形成工程中土方工程和场地准备工程的设计、施工参数的分析,考虑人工填筑堆载作用所引起的地基土长期固结过程的影响,对整个场地的填筑施工过程,包括场地清表、分层填筑至设计地形等工序,进行了分阶段全过程的模拟计算,以获得对场地沉降的有效预测。

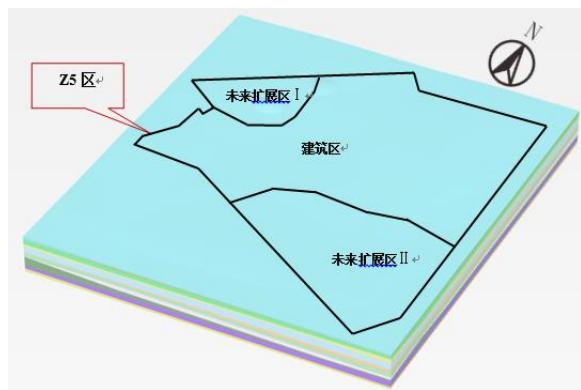


图3 Z5区场地形成工程的整体模型

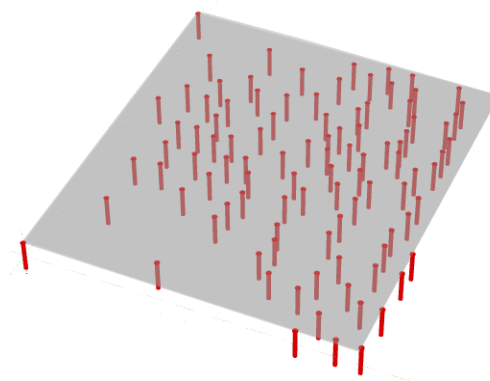


图4 建立地层模型所选取的代表性钻孔分布图

5.2. 地层条件的模拟

本次分析中，将工程场地内地层进行概化，划分为 11 层，并根据场地以及分析对象的特点选取具有代表性的 91 个钻孔及 8 个辅助性钻孔（位于模型边界处），即总共有 99 个钻孔资料生成地层模型（钻孔分布情况如图 4 所示）。

各层土体参数取值按照勘察报告中的土工试验、现场测试的指标以及北京地区经验确定。土体本构关系采用硬化土模型，主要的模型参数取值情况如表 3 所示。

表3 土体模型参数取值

土体类别	压缩模量 E_s (kN/m ²)	侧限压缩模量 E_{oed} (kN/m ²)	割线模量 E_{50} (kN/m ²)	卸载加载模量 E_{ur} (kN/m ²)	重度 γ (kN/m ³)	饱和重度 γ_{sat} (kN/m ³)	孔隙比 e_o	x/y 向水平 渗透系数 k_x (m/d)	竖向渗透 系数 k_z (m/d)
模拟地层 1 (黏质粉土素填土、 砂质粉质素填土① 层)	8700	(12000)	(12000)	(36000)	19.1	20.3	0.59	(8.6×10^{-4})	(8.6×10^{-4})
模拟地层 2 卵石素填土① ₁ 层	30000	30000	30000	120000	20.5	20.6	0.60	(50.0)	(50.0)
模拟地层 3 (黏质粉土、粉质黏 土②层)	4900	(9500)	(11400)	(45600)	19.0	20.2	0.69	(8.6×10^{-4})	(8.6×10^{-4})
模拟地层 4 (黏质粉土、砂质粉 土③层)	15400	(16200)	(19440)	(77760)	19.5	20.4	0.66	(1.5×10^{-4})	(1.5×10^{-4})
模拟地层 5 (细砂、粉砂土④ 层)	(35000)	(53000)	(53000)	(212000)	(20.5)	(20.6)	(0.60)	(9×10^{-2})	(9×10^{-2})
模拟地层 6 (粉质黏土、黏质粉 土⑤ ₁ 层)	10500	13700	16440	65760	19.7	20.4	0.68	(1.5×10^{-4})	(1.5×10^{-4})
模拟地层 7 (细砂、中砂⑤层)	(45000)	(80000)	(80000)	(240000)	(20.5)	(20.6)	(0.65)	(5.0)	(5.0)
模拟地层 8 (粉质黏土、黏质粉 土⑥ ₁ 层)	14500	(19400)	(23280)	(93120)	(20.0)	(20.6)	(0.65)	(1.5×10^{-4})	(1.5×10^{-4})
模拟地层 9 (细砂、中砂⑥层)	(55000)	(90000)	(90000)	(360000)	(20.5)	(20.6)	(0.65)	(10.0)	(10.0)
模拟地层 10 (细砂、中砂⑦层)	(65000)	(118000)	(118000)	(472000)	(20.5)	(20.6)	(0.65)	(10.0)	(10.0)
模拟地层 11 (细砂、中砂⑧层)	(75000)	(120000)	(120000)	(480000)	(20.5)	(20.6)	(0.65)	(10.0)	(10.0)

注：(1) 括号内数值为工程经验值或加权平均值。对于在分析计算中，将多个土层简化为一层土模拟时，采用各土层参数的加权平均值。

(2) 侧限压缩模量 E_{oed}^{ref} 代表固结试验中参考围压为 100kPa 时应力-应变曲线 ($\sigma_1 - \varepsilon_1$) 的切线斜率；割线模量 E_{50}^{ref} 代表三轴排

水试验中参考围压为 100kPa 应力应变曲线 ($\sigma_1 - \sigma_3 \sim \varepsilon_1$) 中 $1/2q_f$ (极限偏应力) 与原点连线的斜率; E_{ur}^{ref} 代表三轴固结排水试验中参考围压为 100kPa 时弹性卸载/重加载模量。

5.3. 施工过程的模拟

本次分析中, 场地填筑形成过程的模拟如表 4 所示。

施工过程的模拟考虑了填土自身压缩以及地基的沉降随时间的关系及其对建筑物的影响, 对从填土开始填筑到最终沉降稳定进行了分阶段全过程的模拟。其中, 自现状标高 (约 24.12m 左右) 施工至场地设计标高的施工工期 (场地内预留约 50cm 的土体待建筑施工前填筑), 暂时确定开始填筑日期为 2019 年 2 月 1 日, 工期为 20 天。

表4 工程实施过程的模拟

序号	工况	工程进度 (工期)	日期
1	人工清表	/	/
2	场地开始填筑至现状标高 (约 24.12m 左右)	开始填筑~第 78 天 (78 天)	2017-4-30~2017-7-16
3	场地自身固结沉降	第 79 天~第 642 天 (564 天)	2017-7-17~2019-1-31
4	自现状标高施工至场地设计标高	第 643 天~第 662 天 (20 天)	2019-2-1~2019-2-20
5	填筑完毕至地基固结沉降稳定	第 663 天至稳定	2019-2-21 至稳定

场地形成工程包括场地初步平整竖向设计、场地清表、场地开挖、场地填筑等。在分步施工模拟过程中, 需要建立原始场地标高、清表标高、设计标高等曲面。由于目前 PLAXIS 3D 2017 版本支持 NURBS 面的导入, 所以将上述标高在 Civil 3D 中处理成三角形面, 再利用犀牛软件将三角形面处理成 NURBS 面, 最终导入 PLAXIS 3D 中。

6. Z5 区场地的沉降分析

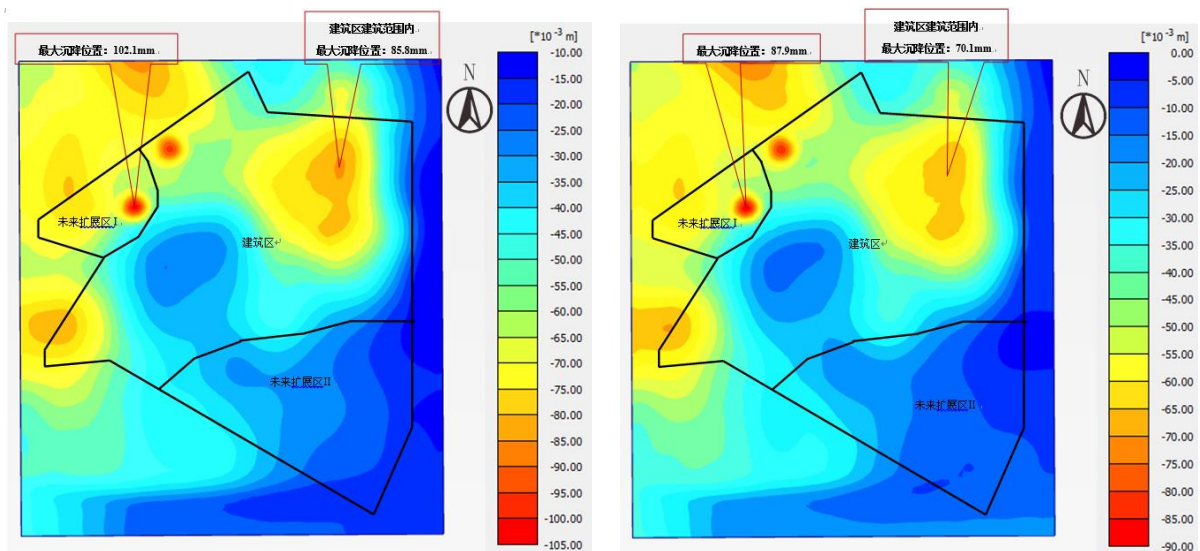
6.1. 场地土方填筑引起的沉降情况

(1) 场地从开始填筑至最终稳定时地基所产生的总体沉降

场地从开始填筑至最终沉降稳定时地基所产生的总体沉降情况如下 0a 所示。由图 5a 可见, 场地从开始填筑至最终沉降稳定时, 场区地基所产生的最大沉降约为 102.1mm, 位于场地未来扩展区 I 的东侧位置。建筑区建筑范围内最大沉降约为 85.8mm, 位于场地东北侧。

(2) Z5 区场地从开始填筑至 2017 年 12 月 18 日时地基所产生的沉降

场地从开始填筑至 2017 年 12 月 18 日时地基所产生的沉降情况如下图 5b 所示。由图 5b 可见, 场地从开始填筑至 2017 年 12 月 18 日时, 场地地基所产生的最大沉降约为 87.9mm, 位于场地未来扩展区 I 的东侧位置。建筑区建筑范围内最大沉降 70.1mm, 位于场地东北侧。



a) 从开始填筑至最终沉降稳定时 Z5 场区地基的总体沉降云图

b) 从开始填筑至 2017 年 12 月 18 日时 Z5 场区地基的沉降云图

图5 沉降云图

(3) 场地自 2017 年 12 月 18 日至最终稳定时地基所产生的沉降情况

场地自 2017 年 12 月 18 日至最终稳定时地基所产生的沉降情况如下图 1 所示。由图 6 可见，场地自 2017 年 12 月 18 日至最终稳定时，由于土方填筑等引起的地基最大沉降约为 16.0mm，位于建筑区东北部分。

6.2. 场地沉降随时间的变化情况

Z5-48 监测点位于建筑区，采用预埋沉降板的方法进行监测，截至 2017 年 12 月 18 日，在场区填土厚度为 3.90m (标高至约 24.12m 左右)，由于堆土填筑所引起的累积沉降值约为 53.1mm。场地沉降监测点 Z5-48 的沉降实测值和计算值随时间变化的对比曲线如下图 6 所示。由图 7 可见：

(1) 通过监测点实测值 (Z5-48) 与数值模拟计算结果 (从开始填筑至 2017 年 12 月 18 日时间段) 的对比，可以看到，在利用实测数据对填土及地基土的模型计算参数反演分析的基础上，计算得到的地基沉降与现场实际监测情况较为吻合，计算模型能够较好地反映场地的实际沉降情况，也保证了基于本模型进行未来场地沉降预测的可靠性。

(2) 由于场地填土的面积较大，场地地基完全稳定的时间相对较长。根据目前的初步估算，从场地开始填筑到地基最终固结沉降稳定所持续的时间约为 906 天。(稳定判断标准按最后 100 天的沉降小于 1mm 考虑)。自开始填筑剩余土方 (厚度约 50cm) 到场地设计标高 (约 2019 年 2 月份) 至最终沉降稳定所持续的时间约为 264 天。

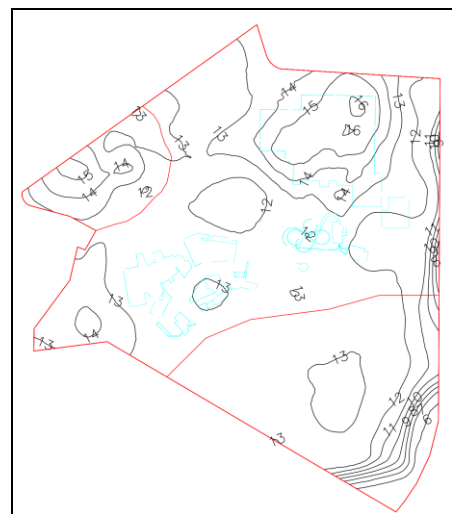


图6 自 2017 年 12 月 18 日至最终稳定时 Z5 场区沉降等值线图



图7 从开始填筑到最终沉降稳定时 Z5 区监测点位置沉降的发展变化图

7. 工程结论

在目前现有的勘察、设计、监测等资料以及对施工工序、工期估计的基础上，针对 Z5 区土方填筑条件下场区的地基沉降分析，可以得到以下结论：

(1) Z5 区场地从开始填筑至最终沉降稳定时，场区地基所产生的最大沉降约为 102.1mm，位于场地未来扩展区 I 的东侧位置。建筑区建筑范围内最大沉降 85.8mm，位于场地东北侧。Z5 区场地从开始填筑至 2017 年 12 月 18 日时，场区地基所产生的最大沉降约为 87.9mm，位于场地未来扩展区 I 的东侧位置。建筑区建筑范围内最大沉降 70.1mm，位于场地东北侧。

(2) 由于场地填土面积较大、填方高度较高，场地内分布有较厚的粘性土和粉土，以及考虑施工工期进度的影响，场地地基完全固结沉降稳定的时间相对较长。根据初步估算，从场地开始填筑到地基最终固结沉降稳定所持续的时间约为 906 天。（稳定判断标准按最后 100 天的沉降小于 1mm 考虑）。自开始填筑剩余土方（厚度约 50cm）到场地设计标高（约 2019 年 2 月份）至最终沉降稳定所持续的时间约为 264 天。

(3) 自目前沉降监测时间节点（2017 年 12 月 18 日）至最终稳定时，由于土方填筑等引起的地基最大沉降约为 16.0mm，位于场地东北侧。

8. PLAXIS 3D 在项目应用中的几点心得

8.1. 复杂曲面的建立

PLAXIS 3D 2017 版本支持 NURBS 面的导入。因此，无论使用哪种软件，dxf 格式的 NURBS 面都可以导入到 PLAXIS 3D 中。关于 Civil 3D 生成三角形面以及 Rino 转换为 NURBS 曲面的更多内容，请参阅筑信达知识库文档《[高程点+高程等高线→NURBS 曲面→PLAXIS 3D](#)》。

下面简要介绍从高程点（源数据为 cad 点（块）坐标+文本高程属性）处理成 NURBS 面的过程。由于个人对 Civil 3D 软件比犀牛软件更熟悉，所以利用 Civil 3D 中曲面工具将高程点处理成三角形面，再利用犀牛软件 drape 命令将三角形面处理成 NURBS 面（要注意 drape 命令中精度的选择），最终导入 PLAXIS 3D 中。当原始数据是点云数据时，可以直接利用犀牛软件处理成 NURBS 面。

(1) Civil 3D 中生成三角面

- 1) 视图空间选择 Civil 3D，默认菜单中显示工具空间（命令 showTS），如图 8 所示。
- 2) 将文字移动到点的标高（前提文字是单行文字，如果是多行文字，需要将多行文字炸开）。
- 3) 只显示点、高程属性及轮廓图层。
- 4) 在工具空间属性框中，右击【曲面】标签，选择创建曲面。弹出创建曲面对话框：

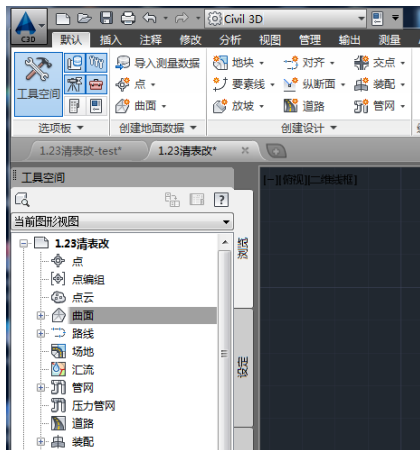


图8 Civil 3D 工具空间窗口



图9 创建曲面窗口

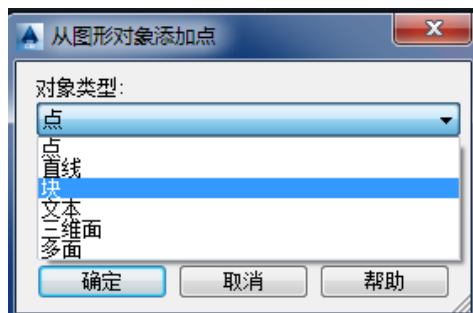


图10 添加点窗口

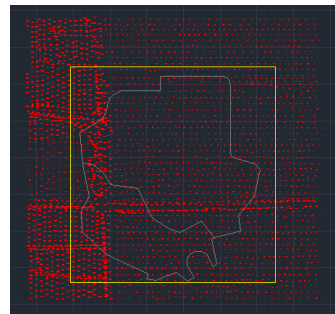


图11 高程点数据及曲面轮廓范围

5) 选择边界，右键选择添加，弹出添加边界，输入名称（如图 122 所示），单击确定，然后选择关心区域的多段线，在边界内生成网格（如图 13 所示）。

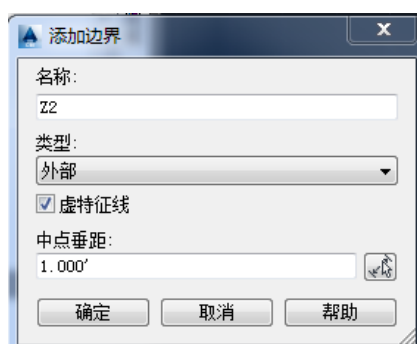


图12 添加边界

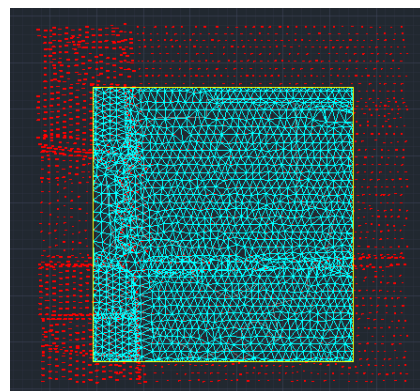


图13 边界内生成网格

6) 利用快速选择工具只保留三角面。

(2) 犀牛软件中 drape 命令生成 NURBS 面

1) 导入三角面模型

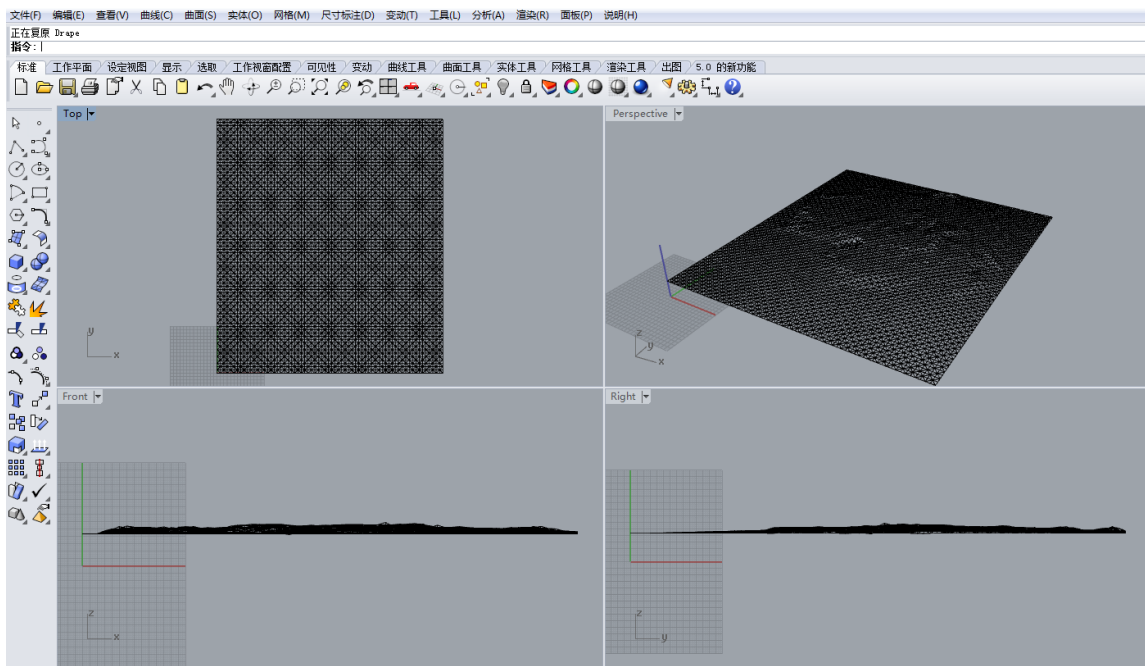


图14 导入的三角面模型

2)在命令行中输入 drape 命令，选择间距 S=10。

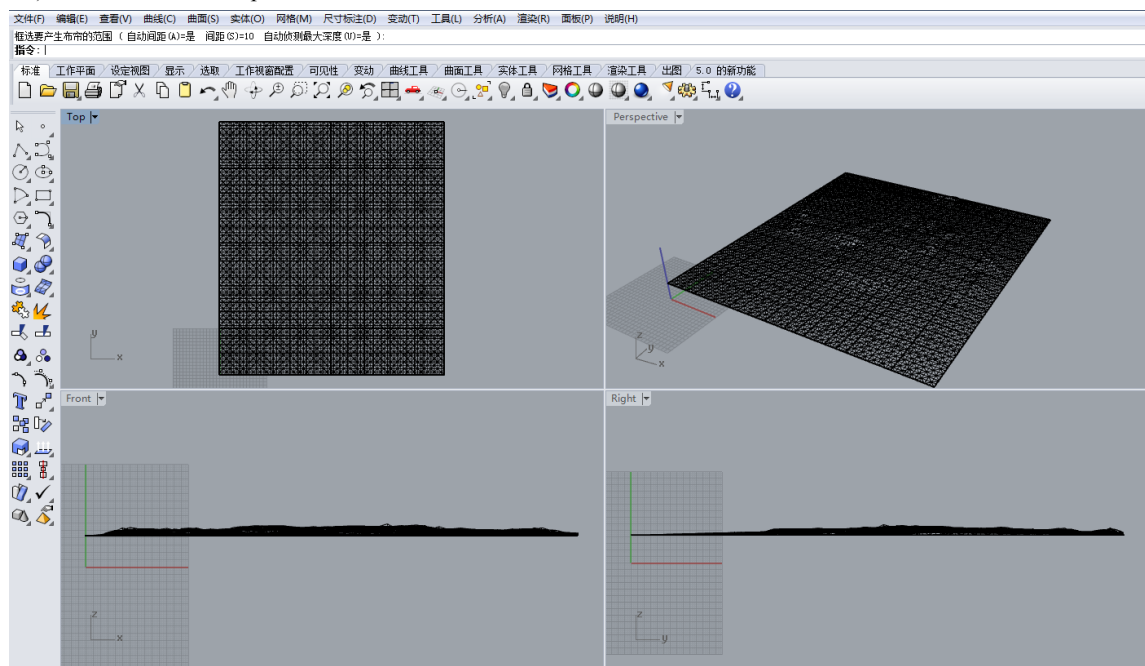


图15 利用 Drape 命令生成 NURBS 面

3)只保留 NURBS 面，删除三角形面，保存为 dxf 格式。

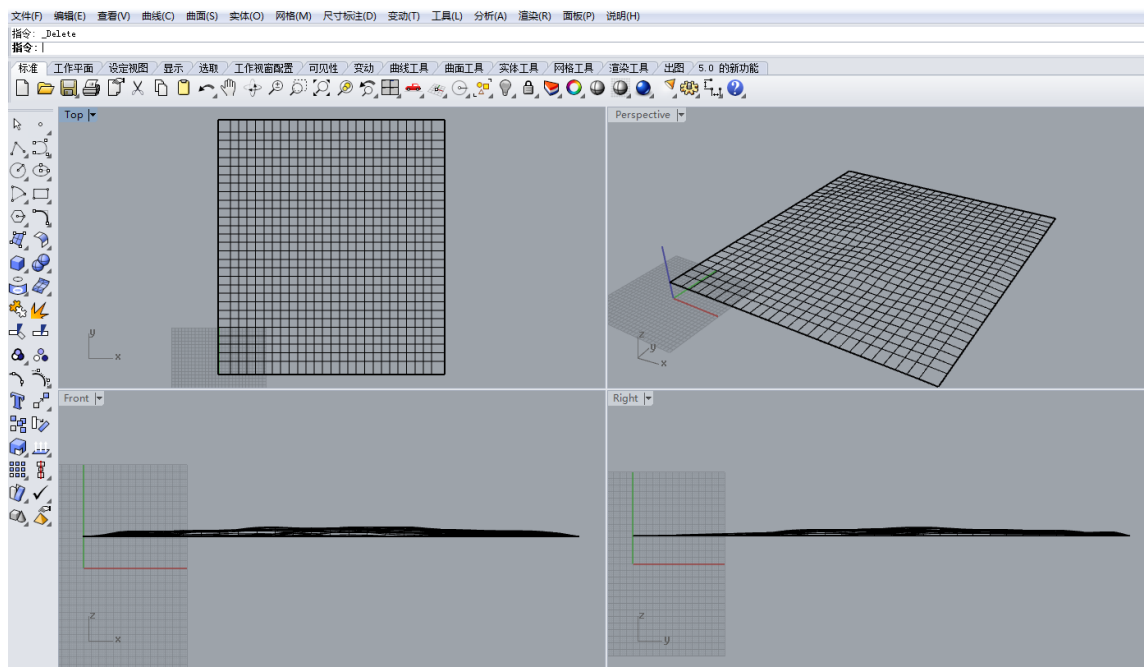


图16 NURBS 面

8.2. 复杂地层的模拟

利用钻孔工具可以生成复杂地层，但是在使用过程中要注意，当场地范围较大且存在不连续地层时，要对土层进行概化合并，否则自动插值生成的地层是错误的。因此，生成后的地层一定要进行检查。

当输入的钻孔数量较多时，会出现软件反应迟钝的现象，非常影响工作效率。主要原因是每输入一个钻孔标高，视图窗口都会更新模型，这会导致软件占用很大资源。有一个小技巧是将模型边界范围输入一个较小的值。

8.3. 计算不通过的解决办法

项目计算过程中出现了错误提示 Error247。以下分享下我的分析流程和处理方法。

247	Complex error. For more details see the .lxx or .Dxx file. <Params>	See the details in these files, or send to support.
-----	---	---

(1) 分析流程

一般来说，要根据错误提示查找原因。参考手册-附录 H-错误代码提示，根据阶段窗口信息提示框的提示，未能找到对应的文件，所以只能根据软件使用经验解决。

(2) 解决方法

以下解决方法不一定适合所有情况。但是可以按照以下列表顺序的优先级逐步尝试解决：

- 1) 检查网格质量，当低于 10^{-5} （这个值不是绝对的量化值），对网格质量差的部位进行处理，重新划分网格；
- 2) 默认迭代计算方法为 Picos（multicore direct），更改为 Pardiso（multicore direct）（该算法对计算机内存要求较高，建议在工作站中使用）再进行计算；
- 3) 增大全局误差（可能导致后续阶段同样计算不通过）；
- 4) 将一个固结阶段分为两个阶段加载；
- 5) 修改固结计算加载类型，比如固结至最小孔压（只适用特定的计算工况）。

8.4. 固结参数的确定

根据实测数据反分析固结参数，基本规律是：模量决定最终沉降值，渗透系数（包含 C_k ）决定沉降速率。其中硬化土模型模量参数的确定，要注意根据北京地区建筑地基基础勘察设计规范，北京地区的勘察报告中土体压缩模量按照 $P_z-P_{z+100\sim 200}$ 等形式给出。