

扬州瘦西湖隧道湖东段基坑工程设计与实测分析

陈 健

(中铁十四局集团有限公司, 山东 济南 250014)

摘 要: 扬州瘦西湖隧道湖东段基坑全长 580 m, 宽度 10.2~22.6 m, 深度 1.24~25.9 m, 是典型的狭长且深度差异大的基坑工程。本工程作为扬州市重点城市规划项目, 工期紧张, 工程造价控制严格。针对基坑特点及周边环境特点, 随着基坑深度的增加, 依次采用地下连续墙、钻孔灌注桩+止水帷幕、SMW 工法桩、水泥土搅拌桩挡墙、放坡作为围护结构形式, 结合水平内支撑体系, 达到了较好的支护效果。基坑工程支护系统设计方案的顺利实施为保证基坑安全、节省工程造价及实现预定的工期目标创造了有利条件。

关键词: 穿湖隧道; 狭长基坑; 深度; 支护设计

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0590-05

作者简介: 陈 健(1973-), 男, 山东省泗水县人, 工程硕士, 高级工程师, 主要从事隧道与地下工程施工技术研究及管理工作。E-mail:

Design and observation of deep excavation of eastern section of Slender West Lake tunnel

CHEN Jian

(China Railway 14th Construction Bureau Co., Ltd., Ji'nan 250014, China)

Abstract: The excavation of the eastern section of Slender West Lake tunnel is a typical long-narrow one and the excavation depth varies greatly. As a major urban planning project in Yangzhou, this project has a strict time limit. Several retaining systems are adopted considering the excavation depth in different districts. As the excavation depth increases, this excavation adopts diaphragm walls, cast-in-situ bored piles and waterproof curtains, SMW piles, soil-cement retaining walls and slope excavation in turn. The design of excavation supporting system has provided convenience for its safety, saved the cost and also guaranteed the construction period of the whole project.

Key words: wear lake tunnel; long-narrow excavation; depth; bracing design

1 工程概况

扬州瘦西湖隧道为目前国内在建的第一座位于国家 5A 级风景名胜区内双层双向行车的隧道。隧道由湖东明挖段、湖东风塔、湖东工作井(始发井)、盾构段、湖西工作井(接收井)、湖西风塔、湖西明挖段等组成。目前在建的湖东段包括工作井、明挖段两部分。湖东工作井(K2+160.0—K2+183.4)位于长春路东侧, 基坑长 23.4 m, 宽 22.6 m, 深 25.9 m, 顶板覆土约 1.7 m。湖东明挖段(K2+183.4—K2+740.0)全长 556.6 m, 宽 10.2~15.3 m, 深 1.24~22.3 m, 基坑深度随里程增大呈阶梯状减小。

本工程景观、环保、文化保护要求较高, 且作为扬州市重点城市规划项目, 工期要求紧, 工程造价控制严格, 基坑支护设计在保证基坑安全的前提下, 既要体现基坑造价的经济性又必须实现工期目标要求。

湖东段基坑平面布置示意图见图 1。

2 工程地质条件

隧道所经场地为一级阶地和高砂平原过渡带, 地貌类型为长江三角洲平原中的古河口沙嘴, 场地地势较平坦。根据地质勘察报告^[1], 工程所在地层自上而下分别为①填土、②₁粉土、②₂粉砂、③₁黏土、③₃砾砂、粗砂, 其下为④₁泥质砂岩全风化层、⑤₁泥岩全风化层。地下水主要为裂隙水和潜水。基坑设计应针对上述地层采取针对性措施^[2], 地层分布情况见表 1。

3 基坑支护设计方案

3.1 基坑支护总体设计方案

结合本基坑工程的特点及周边环境条件, 本基坑

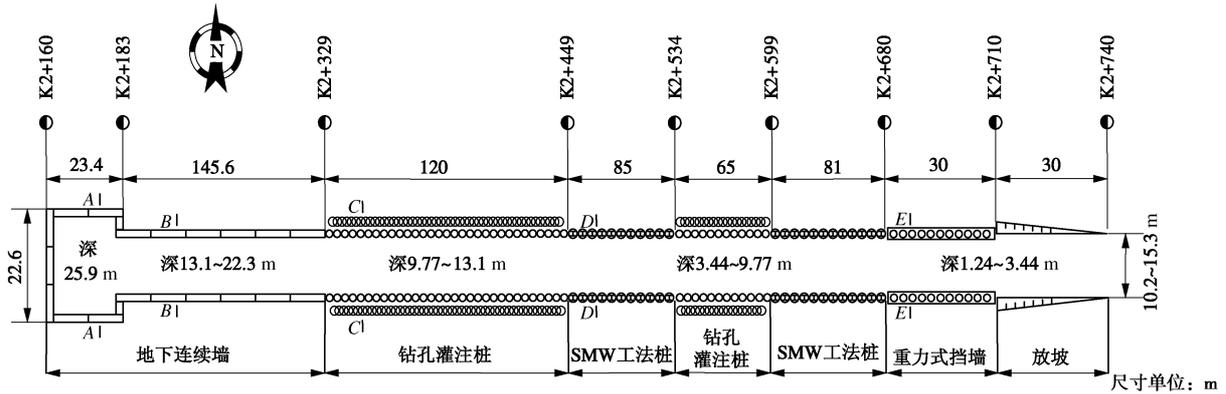


图 1 湖东段基坑平面布置示意图

Fig. 1 Plan view of excavation site

工程采用了板式支护体系结合坑内水平支撑的围护形式^[3]。由于不同功能区域内基坑开挖深度差异较大，基坑支护设计针对不同区域灵活采用了多种不同的支护形式。

表 1 基坑设计地层分布表

Table 1 Distribution of soil strata

层号	土层名称	分布情况	层厚/m	可挖性
① ₁	杂填土	普遍	1.7~2.8	I
② ₁	粉土	局部	1.6~4.6	I
② ₂	粉砂	普遍	0.9~4.5	I
③ ₁	黏土	普遍	32.8~48.0	III
⑤ ₁	泥质砂岩	普遍	7.1	III

本着安全和经济的原则，不同的基坑设计深度，需要不同强度的支护体系与之匹配。对于本工程，随着工程里程的增加，分别采用了地下连续墙、钻孔灌注桩、SMW工法桩、水泥土搅拌桩挡墙、放坡等多种围护结构类型，具体情况见表 2。支撑体系选用钢筋砼支撑和 Φ609 mm 钢管支撑相结合的形式。

表 2 湖东段基坑围护结构类型表

Table 2 Types of retaining structures

工程段	里程	基坑深度/m	围护类型	基坑等级
工作井	K2+160—183	25.9	1200 mm 地连墙	一级
	K2+183—283	22.30~15.40	1000 mm 地连墙	一级
	K2+283—329	13.10~15.40	800 mm 地连墙	一级
明挖段	K2+329—449	9.77~13.10	钻孔灌注桩	一级
	K2+449—534	9.77~8.68	SMW工法桩	二级
	K2+534—599	8.68~7.13	钻孔灌注桩	一级
	K2+599—620	7.13~6.43	SMW工法桩	二级
	K2+620—680	6.43~3.44	SMW工法桩	三级
	K2+680—740	3.44~1.24	搅拌桩挡墙、放坡	三级

3.2 湖东工作井支护设计

湖东工作井位于长春路东侧，基坑长 23.4 m，宽 22.6 m，深 25.9 m，顶部覆土约 1.7 m，基坑安全等级

定为一级。围护结构采用 1200 mm 厚地下连续墙，插入深度 41.5 m，采用 C35 混凝土。在基坑深度范围内设置 4 道钢筋混凝土支撑，从上到下截面尺寸分别为 1.0×1.0 m、2.5×1.2 m、2.0×1.2 m、2.0×1.2 m，基坑边角设置斜钢筋砼支撑。结构采用顺作法施工，支护结构剖面图见图 2。

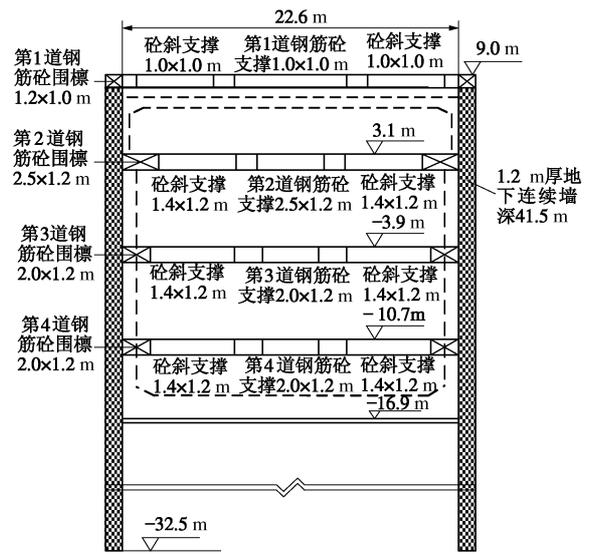


图 2 湖东工作井支护结构剖面图 (A-A)

Fig. 2 Section of retaining structures in shield work shaft (A-A)

3.3 湖东明挖段支护设计

湖东明挖段基坑的设计深度随着里程的增加呈阶梯状减小，其围护结构的插入深度也随之逐渐减小。为方便施工，湖东明挖段根据围护结构的类型及变形缝的位置分为 17 节，分别为 D1~D17 节。

(1) D1~D3 节支护设计

D1~D3 节全长 145.6 m (K2+183—K2+329)，深度 13.1~22.3 m，基坑安全等级定为一级，围护结构均采用地下连续墙。

D1、D2 节选用 1000 mm 厚地下连续墙，插入深

度在长度方向阶梯状均匀减小, 分别为 34.5, 32.5, 28.5, 26.5 m, 采用 C35 混凝土。在基坑深度范围内自上而下分别设置一道钢筋砼支撑 (1.0 m×1.0 m) 和四道 (或三道) 钢管支撑 (Φ609 mm, δ=16mm)。结构采用顺做法施工, 典型支护结构剖面图见图 3。

D3 节选用 800 mm 厚地下连续墙, 插入深度为 24.5 m, 采用 C35 混凝土。由于 D3 节北侧联通泵房基坑, 南侧连接风机房基坑, 支撑体系选用 3 道钢筋砼支撑, 截面尺寸均为 1.0×1.0 m。

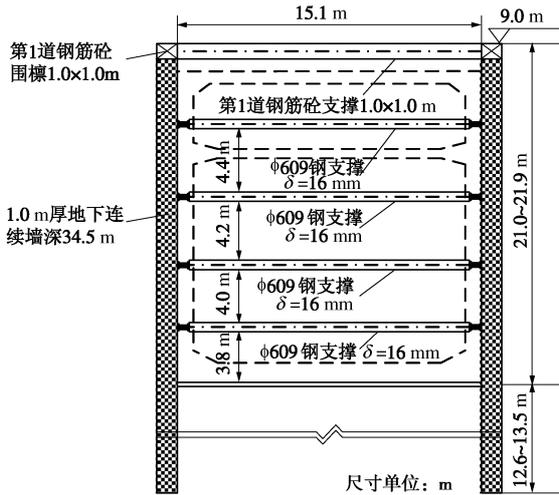


图 3 D1 节支护结构典型剖面图 (B-B)

Fig. 3 Section of retaining structures in D1 (B-B)

(2) D4~D7 节支护设计

D4~D7 节全长 120 m (K2+329—K2+449), 深度 9.77~13.1 m, 基坑安全等级定为一。围护结构均采用 Φ800@1000 钻孔灌注桩的形式, 插入深度以节为单位呈递减形式, 分别为 22.0, 19.0, 17.0, 16.0 m。排桩外侧设置 Φ700 双轴搅拌桩作为止水帷幕, 间距为 1 m, 深度均为 12.0 m。

在基坑深度范围内, 自上而下设置 1 道钢筋砼支撑 (1.0 m×1.0 m, 纵向间距 9 m) 和 2 道钢管支撑 (Φ609 mm, δ=16mm)。结构采用顺做法施工, 典型支护结构剖面图见图 4。

(3) D8~D10 节支护设计

D8~D10 节全长 85 m (K2+449—K2+534), 深度 8.68~9.77 m, 基坑安全等级定为二级。围护结构均采用 Φ850@600 三轴 SMW 型钢搅拌桩 (HN700×300×13×24) 的形式, 型钢隔一插一, 其中 D8、D9 节有效桩长为 17 m, D10 节有效桩长为 16.0 m。

在基坑深度范围内, 自上而下设置 1 道钢筋砼支撑 (1.0 m×1.0 m, 纵向间距 9 m) 和 1 道钢管支撑 (Φ609 mm, δ=16 mm)。结构采用顺做法施工, 典型支护结构剖面图见图 5。

(4) D11~D12 节支护设计

D11、D12 节全长 65 m (K2+534—K2+599), 深度 7.13~8.68 m。由于工期有限, 且该段与友谊路改移道路和周边居民房屋相距较小, 为了确保基坑安全, 该段采用钻孔灌注桩围护, 并将该基坑的安全等级提升至一级。

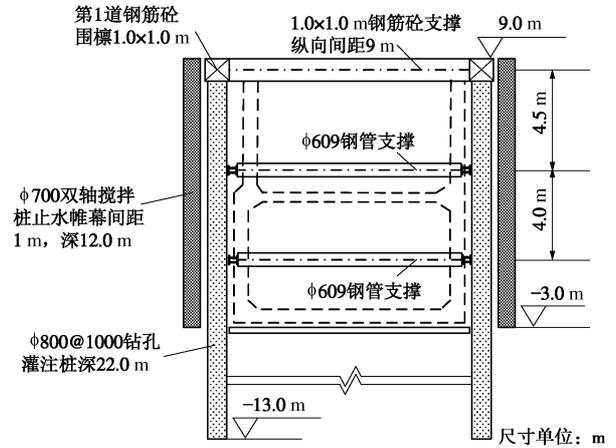


图 4 D4 节支护结构典型剖面图 (C-C)

Fig. 4 Section of retaining structures in D4 (C-C)

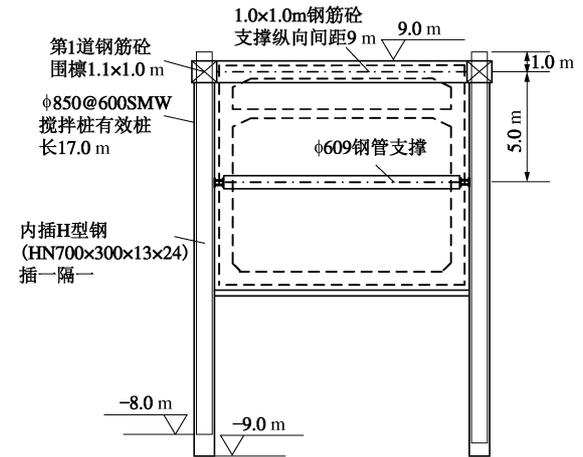


图 5 D8 节支护结构典型剖面图 (D-D)

Fig. 5 Section of retaining structures in D8 (D-D)

D11、D12 节的围护结构采用 Φ800@1000 钻孔灌注桩的形式, 桩长 14.0 m, 沿基坑四周设置。排桩外侧设置 Φ700@1000 双轴搅拌桩作为止水帷幕, 深度均为 11.0 m。基坑内设置 3 道钢管支撑 (Φ609 mm, δ=16 mm)。结构采用顺做法施工, 支护结构剖面图参看图 4。

(5) D13~D15 节支护设计

D13~D15 节全长 81 m (K2+599—K2+680), 深度 3.44~7.13 m。D13 节基坑北侧设置泵房, 基坑安全等级设置为二级, 北侧采用 Φ850@600 三轴 SMW 型钢搅拌桩 (HN700×300×13×24) 围护, 有效桩长 17.0 m; 南侧采用 Φ650@450 三轴 SMW 型钢搅拌桩 (HN500×200×10×16) 围护, 有效桩长 13.0 m, 型钢隔一插一。D14、D15 节围护结构与 D13 节南侧相

同,有效桩长 11.0 m。

D13、D14 节在基坑内自上而下设置 2 道 $\Phi 609$ 钢管支撑, D15 节设置 1 道。结构采用顺做法施工, 支护结构剖面图参看图 5。

(6) D16、D17 节支护设计

D16、D17 节长度各为 30 m, 深度为 1.24~3.44 m, 基坑安全等级定为三级。该段属于隧道的引道段, 深度较浅, 未设置水平支撑。D16 节选用 3.2 m 宽水泥搅拌桩挡墙作为围护结构, 桩长随开挖深度的减小从 7.0 m 减至 5.0 m, 典型支护结构剖面图见图 6; D17 节采取 1:1.25 放坡开挖。

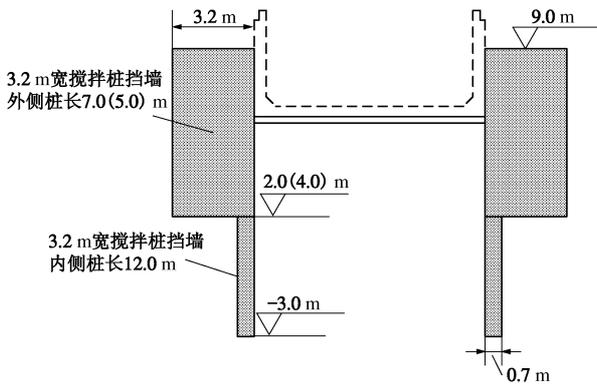


图 6 D16 节支护结构典型剖面图 (E-E)

Fig. 6 Section of retaining structures in D16 (E-E)

4 实测数据分析

扬州瘦西湖隧道湖东段于 2012 年初进入基坑工程的施工, 基坑开挖由西向东进行。为实现本工程的信息化工, 施工全程对基坑本身及周边环境的变形进行了监测。监测项目包括测斜、桩顶水平位移、地表沉降、支撑轴力、侧向土压力等。

图 7 为湖东明挖段 D1 地下连续墙的侧向位移图。由图可以看出, 测斜曲线呈大肚状, 随着开挖深度的增大, 墙体变形逐渐增大。由于暴露时间短, 支撑架设及时, 到第 3 道钢支撑时, 变形相对较小, 最大水平位于约 4.5 mm。在第四道钢支撑到挖至坑底期间, 变形逐渐增大, 为最大变形发展阶段。在基坑浇筑底板后, 测斜曲线变形量达到峰值, 之后趋于稳定。最大变形量为 40.41 mm, 深度 16 m。

图 8 为湖东明挖段 D1 节南侧的侧向土压力变化曲线。由图可以看出, 侧向土压力值总体随着基坑施工的进行逐渐减小。基坑开挖后, 随着土方开挖的进行, 坑内侧移增大, 主动土压力减小, 其中位于坑底位置的主动土压力减小幅度最大。数据表明, 随着开挖的进行, 以牺牲土体侧向位移为代价, 侧向土压力在一定程度上得到了释放, 土压力值有减小的趋势。

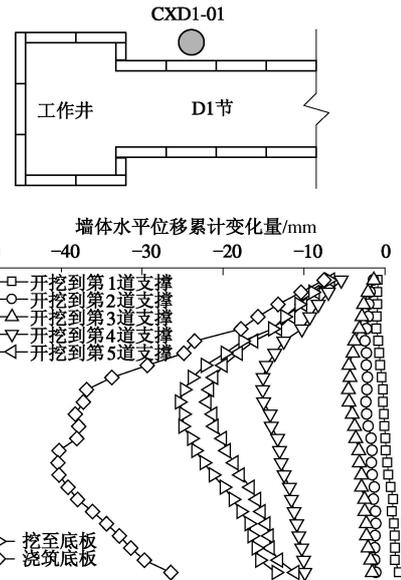


图 7 D1 节围护墙体测向位移图

Fig. 7 Lateral displacement of retaining structure

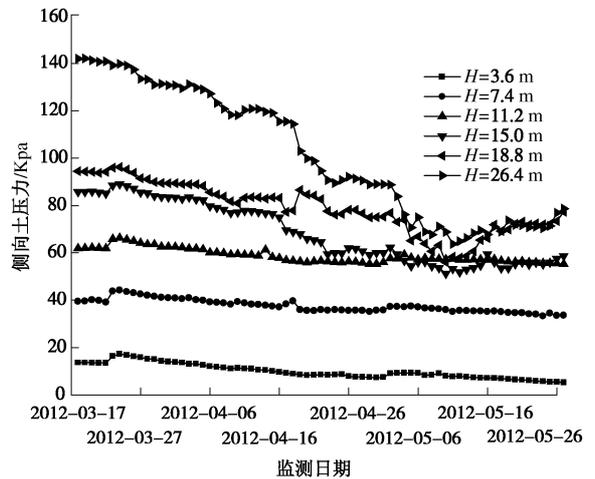


图 8 D1 节侧向土压力变化趋势图

Fig. 8 Trend of soil lateral pressure

由于工作井的持续开挖, 第 1 道钢筋砼支撑轴力不断增大, 后随着第 2、3 道钢筋砼的及时架设, 支撑轴力趋于稳定。第 1 道钢筋砼支撑轴力稳定后的最大值约 5400 kN。图 9 为湖东工作井钢筋混凝土支撑轴力的变化趋势图。

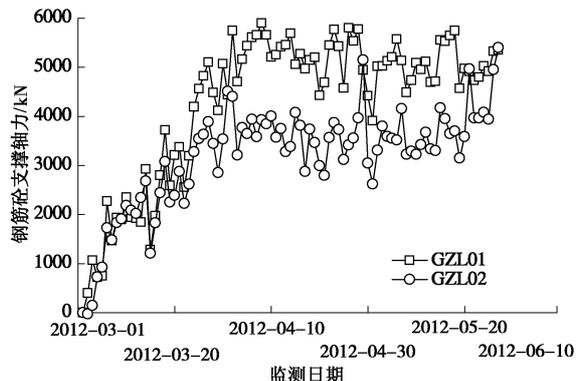


图 9 工作井钢筋砼支撑轴力变化趋势图

Fig. 9 Trend of axial force of reinforced concrete strut

整个湖东工作井开挖期间，工作井南侧地下水位变化较大，水位升高约 1.2m，北侧地下水位波动较小。图 10 为湖东工作井的南北两侧地下水位高程变化趋势图。

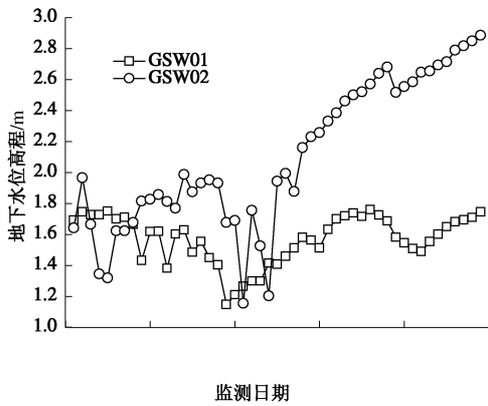


图 10 工作井地下水位变化趋势图

Fig. 10 Trend of ground water level

在基坑明挖段 D3 节南侧，距基坑边 10m 位置处为苏果超市仓库，属于本次工程重点监测建筑物，共布设 6 个监测点，分别位于建筑物的四角及中间，测点间距不大于 15m。图 11 为苏果超市仓库沉降变化趋势图。由图可以看出，仓库最大沉降量约 5mm，沉降差不明显，因此可以表明基坑开挖对其周边建筑物的影响较小。

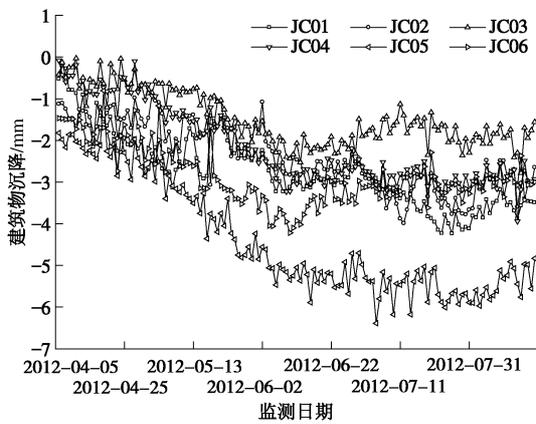


图 11 周边建筑物沉降变化趋势图

Fig. 11 Trend of building settlement

监测结果表明基坑施工对周边环境影响不明显，

未出现不良状况，基坑围护结构和周边环境变形均在可控范围之内。

5 结 语

扬州瘦西湖隧道工程作为市重点城市规划项目，工程工期有着较高要求，且工程造价控制严格。基坑支护设计时结合基坑狭长且不同区域内基坑深度差异较大的特点，采用了多种支护结构相结合的做法：湖东工作井与明挖段 D1~D3 节采用地下连续墙围护；D4~D7、D11~D12 节采用“钻孔灌注桩+止水帷幕”的围护形式；D8~D10、D13~D15 节采用 SMW 工法桩进行围护；D16 节采用水泥土搅拌桩挡墙围护；D17 节放坡开挖。灵活地采用多种支护形式，不仅有效节省了工程造价，同时还提高了施工便利性，保护了周边环境。

对基坑的监测结果表明，基坑开挖引起的围护结构变形值均在可控范围内，周边环境也处于安全状态。这说明对于基坑支护形式的设计是成功的，尤其是 SMW 工法桩在硬黏土地层锚固的成功应用，为类似狭长且深度差异较大的基坑工程设计提供借鉴。

参考文献:

[1] 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 扬州瘦西湖隧道工程岩土工程勘察报告[R]. 扬州: 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 2011. (China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Geotechnical investigation report of the Yangzhou Slender West Lake tunnel[R]. Yangzhou: China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd, 2011. (in Chinese))

[2] DBJ 08—61—97 基坑工程设计规范[S]. 1997. (DBJ 08—61—97 Code for design of excavation engineering[S]. 1997. (in Chinese))

[3] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering handbook[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)