

青岛城市地下空间稳定性三度区域划分研究*

张自光^{1,2}, 仇文革^{1,2}

(西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031, 2. 西南交通大学
土木工程学院, 成都 610031)

摘要:针对青岛独特的上软下硬地层城市地质环境特征,文中采用基于有限元强度折减的数值计算方法和基于现场监测数据的统计分析方法,对青岛城市地下空间稳定性区域划分进行了系统研究。从围岩稳定性角度出发,提出了“难区域(R_{D1})—易区域(R_E)—难区域(R_{D2})”三度区域的概念,并指出上软下硬地层城市地下空间稳定性区域划分问题的研究重点是 R_{D1} 与 R_E 分布范围及分界覆岩厚度 $H_{r(D1-E)}$;软弱地层厚度 H_s 越大,开挖跨度 D 越大, R_{D1} 分布范围越大, R_E 分布范围越小, $H_{r(D1-E)}$ 越大,反之 $H_{r(D1-E)}$ 越小。研究成果为城市地下空间的合理开发利用提供了理论基础和依据。

关键词:上软下硬地层;城市地下空间;围岩稳定性;区域划分

中图分类号:TU924

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)04-0881-12

Research on the Stability Region Division of Urban Underground Space of Qingdao City

Zhang Ziguang^{1,2}, Qiu Wenge^{1,2}

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P.R.China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P.R.China)

Abstract: For the unique characteristics of urban geological environment in upper-soft and lower-hard stratum of Qingdao city, the stability region division of urban underground space of Qingdao is systematically studied adopting the numerical calculation method based on the finite element strength reduction, and the statistical analysis method by the field monitoring data. The conception of three degree regions which contain “Difficult Region (R_{D1})—Easy Region (R_E)—Difficult Region (R_{D2})” is proposed from the view of stability of surrounding rock. The distribution range of R_{D1} and R_E , and the boundary stratum thickness $H_{r(D1-E)}$ are the research core and key that the problem of the stability region division of urban underground space in upper-soft and lower-hard stratum. The greater H_s is as well as the greater D is, the greater the distribution range of R_{D1} is and the smaller R_E is, and the greater $H_{r(D1-E)}$ is; conversely the smaller $H_{r(D1-E)}$ is. The research result provides a theoretical basis for the reasonable development and utilization of urban underground space.

Keywords: upper-soft and lower-hard stratum; urban underground space; stability of surrounding rock; region division

* 收稿日期:2018-02-08(修改稿)

作者简介:张自光(1980-),男,安徽蒙城人,博士,工程师,主要从事城市地下空间开发与利用研究工作。

E-mail:907791108@qq.com

通讯作者:仇文革(1959-),男,山东烟台人,博士,教授(博导),主要从事隧道及地下工程领域教学与科研工作。

E-mail:qiuwen-qw@126.com

基金项目:青岛地铁集团科技项目(BX15035, BX15036)

0 引言

城市是人类社会经济发展到一定阶段的产物,在城市化快速发展的过程中,特大型、大型城市普遍存在空间饱和与交通拥堵等共性问题。合理开发与综合利用城市地下空间资源,已成为提高城市容量、缓解城市交通、改善城市环境的重要手段^[1-6]。围岩稳定性是地下空间开发利用首先要关注的问题,对整个地下工程建设的安全性、经济性等起着重要的制约作用^[7-8]。基于围岩稳定性要求的地下空间区域划分,对合理开发利用城市地下空间具有重要的工程实用价值和较大的现实意义。

本文针对青岛独特的城市地质环境特征,在青岛地铁沿线地层厚度统计分析的基础上,采用基于有限元强度折减法的数值计算手段,并结合江西路和海川路2座单拱大跨地铁车站隧道工程实例现场监测数据统计分析,对青岛城市地下空间稳定性划分进行了系统研究。从围岩稳定性角度出发,提出“难区域(R_{D1})—易区域(R_E)—难区域(R_{D2})”三度区域的概念,并指出上软下硬地层城市地下空间稳定性区域划分问题的研究重点是 R_{D1} 与 R_E 分布范围及分界覆岩厚度 $H_{r(D1-E)}$;软弱地层厚度 H_s 越大,开挖跨度 D 越大, R_{D1} 分布范围越大, R_E 分布范围越小, $H_{r(D1-E)}$ 越大,反之 $H_{r(D1-E)}$ 越小。研究成果为城市地下空间的合理开发利用提供了理论基础和依据。

1 青岛城市地下空间地质环境特征

青岛市地处胶东半岛西南部,东南濒临黄海,全市地形东高西低,中间凹陷,大部分水系由东向西注入胶州湾。所处大地构造位置为华北地台,“青岛—海阳”断块凸起的V级构造单元的南部。自太古代~元古代以来一直处在一个长期、缓慢、稳定的上升隆起状态,缺失华北型地层沉积。自中生代燕山晚期以来,区域性构造活动强烈,发生大规模、区域性酸性岩浆侵入,形成稳固的花岗岩岩基,以深成相似斑状中粗粒黑云母花岗岩为主要组成岩石。其后,酸性~中基性岩浆沿岩基内薄弱面入侵,形成煌斑岩、细晶岩和辉绿岩等浅成相岩脉,与花岗岩岩基组成复合岩体。无后期沉积夹层、溶洞等不良地质作用。在漫长的地壳抬升、风化、剥蚀、夷平作用的反复改造下,使燕山晚期稳固的花岗岩体,以基底形式分布于地表或地下一定深度

内,并在长期风化作用下形成了一定厚度的风化带,其上沉积了厚度不一的第四纪松散堆积物。根据青岛地铁2号和3号线49.2 km线路3 228个地质钻孔样本资料统计分析,第四系松散层厚度约66%处于6.0 m内,约80%处于10.0 m内,约90%处于12.0 m以内,平均厚度5.1 m;强风化层厚度平均值5.4 m;中风化岩层薄而不均,厚度一般0.0~9.0 m,平均5.3 m,如图1所示。

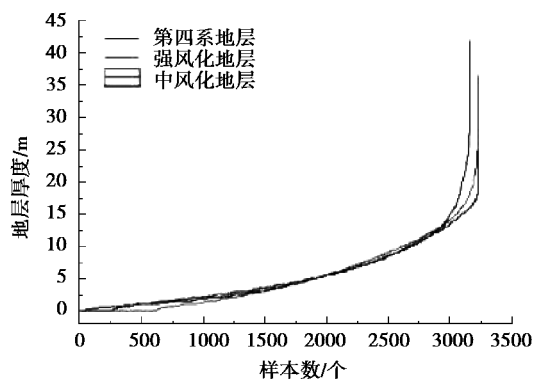


图1 地层厚度统计分布图

Fig. 1 Statistical thickness of the stratum

青岛市地下水类型主要包括基岩裂隙水和第四系松散层孔隙水,水位随季节性波动较大,变幅为1.5~2.0 m。基岩裂隙水均由大气降水补给,当基岩与第四系砂砾层直接接触时,存在一定的补给关系,以“浅部循环、短距离径流”为主要特征;主要分布在具有良好贯通性和有补给来源的张开型裂隙发育带、岩脉接触带附近及张开型断层带附近等部位,分布及富水性不均^[9-10]。第四系孔隙水主要赋存于山前及山间冲洪积成因的中粗砂中,水位埋深1~3 m,以潜水为主,局部存在微承压水。

2 青岛城市地下空间稳定性区域划分研究

2.1 研究方法、计算模型及参数

2.1.1 研究方法

有限元强度折减法具有严格的力学依据,具有可视、动态、定量计算的优点,是目前地下工程围岩稳定性分析中被广泛采用一种有效手段^[11-14]。具体实施过程如下:首先通过计算地下洞室开挖初始模型受力变形状态,然后对岩土体强度参数 c, φ 值按照公式(1)进行折减,再将折减后的强度参数输入初始模型重新进行开挖计算直至洞室破坏。计算过程中对洞室拱顶位移 S 进行记录, $S-k$ 曲线发生突变时所对应的折减系数 k 即为地下洞室安全

系数 K 。

$$c' = \frac{c}{k} \quad \varphi' = \arcsin\left(\frac{\tan\varphi}{k}\right) \quad (1)$$

式中: k 为折减系数。

2.1.2 计算模型及参数

数值计算采用 ANSYS 分析软件,按照平面应变问题处理,采用 PLANE82 平面 8 节点实体单元建模。计算模型左右边界长 120 m,施加水平位移约束,下边界取洞室拱底以下 80~100 m,施加竖直位移约束,上表面自由,外围单元网格纵横向均设定为 1.0 m,隧道周边网格为 0.5 m。岩土体均按理想弹塑性材料考虑,初始应力仅考虑岩土体自重,地表面施加 20 kPa 均布荷载。计算采用 DP4 屈服准则,仅考虑洞室一次性全断面开挖,应力释放系数 100%。根据青岛地铁沿线岩土体力学参数统计分析,同时考虑软弱结构面、地下水等因素的影响,各地层物理力学计算参数取值如表 1 所示。

表 1 岩土体物理力学计算参数

Table 1 Mechanical parameters of rock and soil

地层类型	重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	粘聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$
软弱地层	22.5	0.05	0.38	0.032	20
中风化层	24.5	5.0	0.25	0.600	35
微风化层	26.0	22.0	0.20	1.600	53

2.2 均质地层地下空间稳定性区域划分研究

本文主要依托青岛地铁隧道工程,以地铁车站单拱直墙大跨结构隧道作为地下洞室基本断面形式(如图 2 所示),首先对均质地层城市地下空间稳定性区域划分进行研究。研究过程中只单纯逐步改变洞室开挖深度,其他参数均保持不变。

2.2.1 均质岩石地层计算结果及分析

微风化和中风化均质岩石地层不同埋深条件下 S - k 曲线如图 3、图 4 所示,安全系数 K 计算结果如表 2 所示。

由表 2 可见,微风化均质岩层地下空间洞室开挖埋深从 0.2 m 开始,安全系数 K 从 2.35 先逐渐增大,在埋深 5.0 m 时安全系数 K 达最大值 5.05;此后随着埋深的继续增加,安全系数 K 在 4.45~2.01 范围内递减,埋深 100 m 时安全系数 K 为 2.01。中风化均质岩层地下空间洞室开挖埋深从 0.1 m 开始,安全系数 K 从 0.93 先逐渐增大,在埋深 5.0 m 时,安全系数 K 达最大值 2.92;此后随着

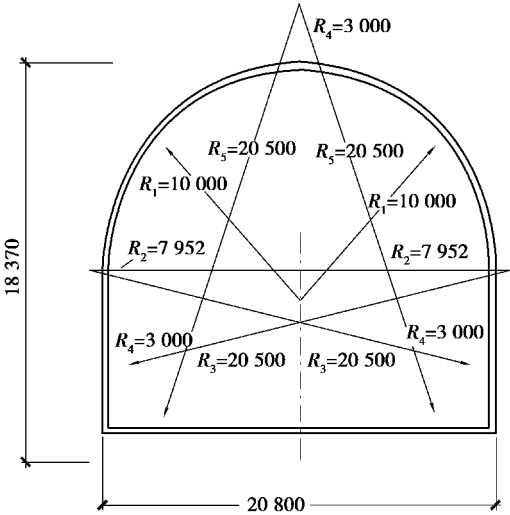
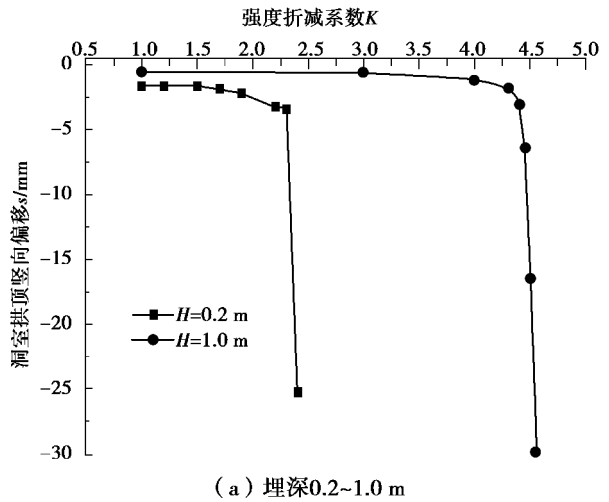
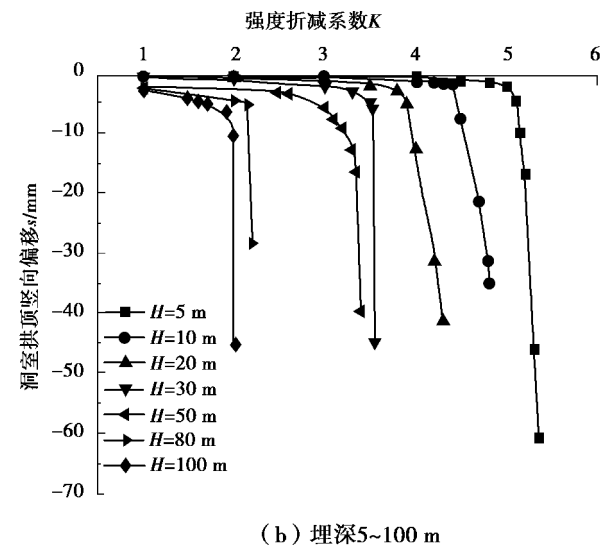


图 2 地下洞室开挖断面(单位:mm)

Fig. 2 The excavation section of underground cavern(unit:mm)



(a) 埋深0.2~1.0 m



(b) 埋深5~100 m

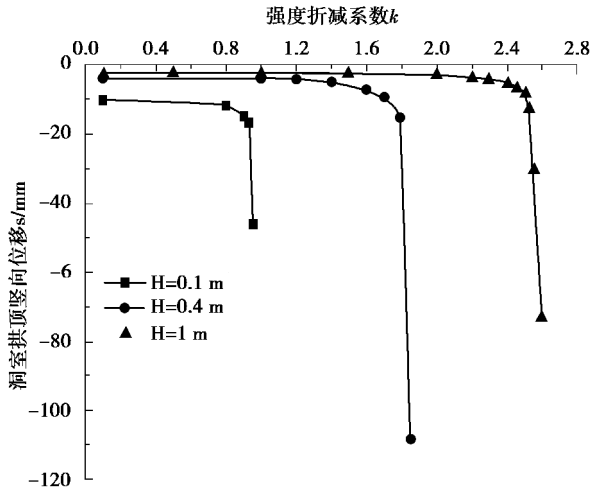
图 3 微风化均质地层地下洞室 S - k 图

Fig. 3 The S - k curves of underground caverns in slightly weathered homogeneous stratum

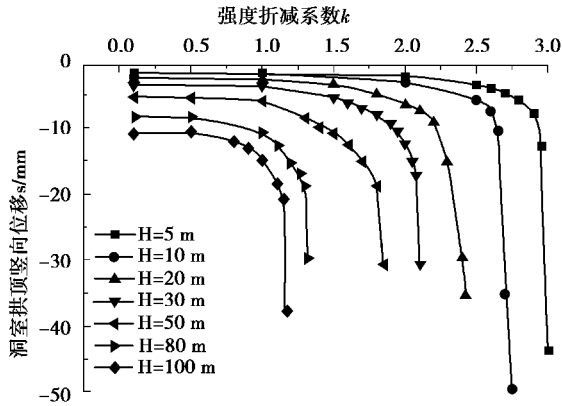
表 2 岩石地层安全系数计算结果

Table 2 Calculation results of safety factor of the rock stratum

埋深/m		0.1	0.2	0.4	1	5	10	20	30	50	80	100
安全 系数 K	微风化	—	2.35	—	4.42	5.05	4.45	3.90	3.52	3.05	2.18	2.01
	中风化	0.93	—	1.76	2.53	2.92	2.64	2.28	2.08	1.76	1.23	1.15



(a) 埋深0.1~1.0 m



(b) 埋深5~100 m

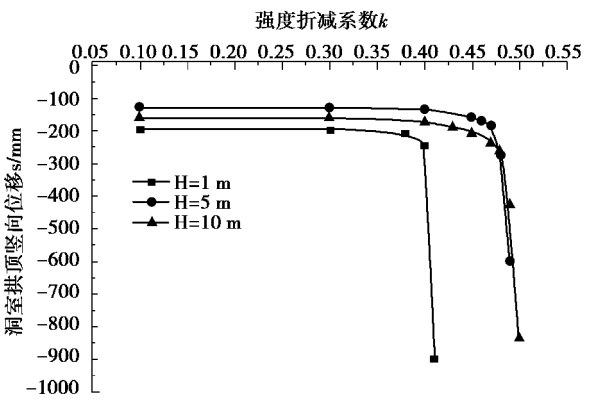
图 4 中风化均质地层地下洞室 $S-k$ 图

Fig. 4 The $S-k$ curves of underground caverns in moderately weathered homogeneous stratum

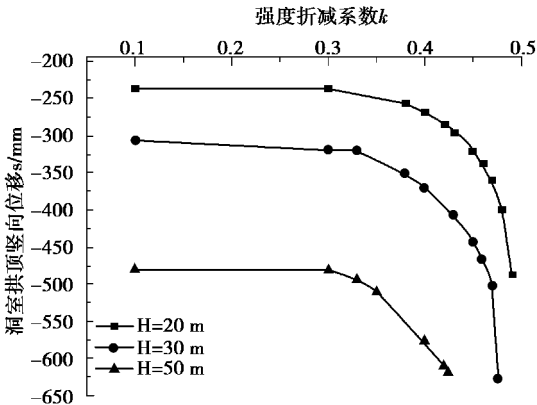
埋深的继续增加,安全系数 K 在 2.64~1.15 范围内递减,埋深 100 m 时安全系数 K 为 1.15。说明在微风化岩层中开挖地下洞室,洞室充分稳定,围岩具有较高的安全储备,在长时间内具有足够的自稳能力和自支护能力。在中风化岩层中开挖地下洞室,洞室稳定,围岩具有一定程度的自稳能力和自支护能力。

2.2.2 软弱围岩均质地层计算结果及分析

软弱均质地层各埋深条件下 $S-k$ 曲线如图 5 所示,安全系数 K 计算结果如表 3 所示。



(a) 埋深1~10 m



(b) 埋深20~50 m

图 5 软弱地层地下洞室 $S-k$ 图

Fig. 5 The $S-k$ Curves of underground caverns in soft homogeneous stratum

表 3 软弱地层安全系数计算结果

Table 3 Calculation results of safety factor of the soft stratum

埋深/m	1	5	10	20	30	50
K	0.39	0.46	0.47	0.42	0.39	0.34

由表 3 计算结果可知,软弱均质地层条件埋深从 1.0 m 开始,安全系数 K 从 0.39 先逐渐增大,在埋深 10.0 m 时,安全系数 K 达最大值 0.47;此后随着埋深的继续增加,安全系数 K 在 0.42~0.34 范围内递减,埋深 50.0 m 时安全系数 K 为 0.34。说明

在软弱地层中开挖地下洞室,洞室无自支护能力或自支护能力时间极短,围岩不能自稳。

2.2.3 均质地层地下空间稳定性区域划分

均质地层开挖地下洞室围岩安全系数 K 随埋深增加均呈现先迅速增大后逐渐减小的整体变化规律,说明自地表面垂直向下延伸至地层内部,地下空间稳定性依次表现为“低稳定区—高稳定区—低稳定区”3 个空间梯度,相应地开发利用程度可划分为“难区域(R_D)—易区域(R_E)—难区域(R_D)”3 个梯度。为叙述方便,本文将上述 3 个区域分别称为 R_{D1} 、 R_E 、 R_{D2} ,相应的分界深度分别称为 $H_{(D1-E)}$ 和 $H_{(E-D2)}$ 。分别以洞室围岩安全系数 $K=3.00$ 、 2.00 和 0.40 作为 $H_{(D1-E)}$ 和 $H_{(E-D2)}$ 分界标准,微风化、中风化和软弱围岩 3 种均质地层条件开挖跨度 20.8 m 的单拱直墙结构地下洞室, R_{D1} 、 R_E 、 R_{D2} 分布范围如表 4、图 6 所示。

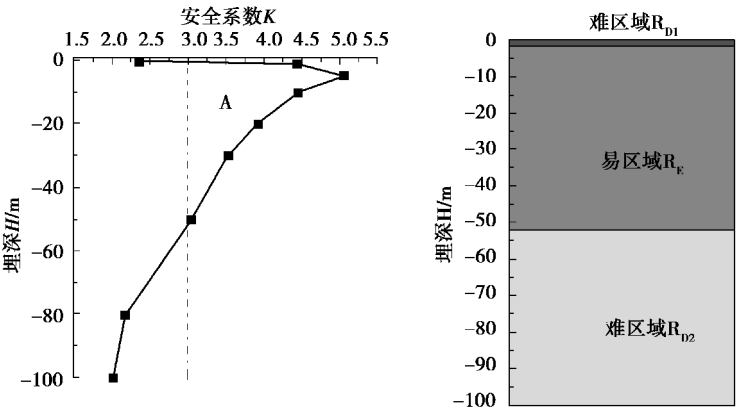
地层分布和洞室开挖断面相同条件下,城市地下空间稳定性划分各区域分布范围主要取决于分

界标准,分界标准越高(K 值越大), R_D 分布范围越大, R_E 分布范围越小;反之, R_D 分布范围越小, R_E 分布范围越大。洞室围岩安全系数 K 可定量反映其安全稳定程度,当 $K=1.00$ 时洞室围岩处于极限稳定状态,此时洞室围岩能够自稳,理论上无需采用人工措施,地下洞室开挖即可顺利完成。因此,立足于充分发挥围岩自承能力,可将 $K=1.00$ 作为“ R_D — R_E ”基本分界标准。同时,考虑到地质条件的复杂多变性及施工过程中诸多不利因素的影响,确保工程安全性,宜将分界标准适当提高。

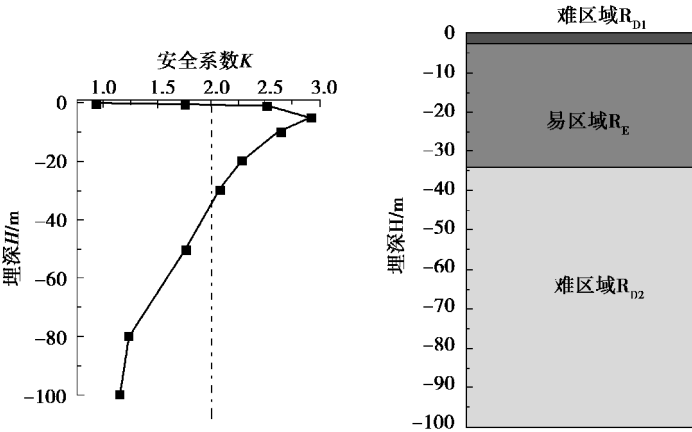
表 4 地下空间稳定性三度区域分布范围

Table 4 The stability region division of underground space

地层类型及划分标准		R_{D1}/m	R_E/m	R_{D2}/m
微风化地层	$K=3.00$	<0.4	$0.4\sim52$	>52
中风化地层	$K=2.00$	<0.6	$0.6\sim34$	>34
软弱地层	$K=0.40$	<1.2	$1.2\sim24$	>24



(a) 微风化均质地层 ($K=3.00$)



(b) 中风化均质地层 ($K=2.00$)

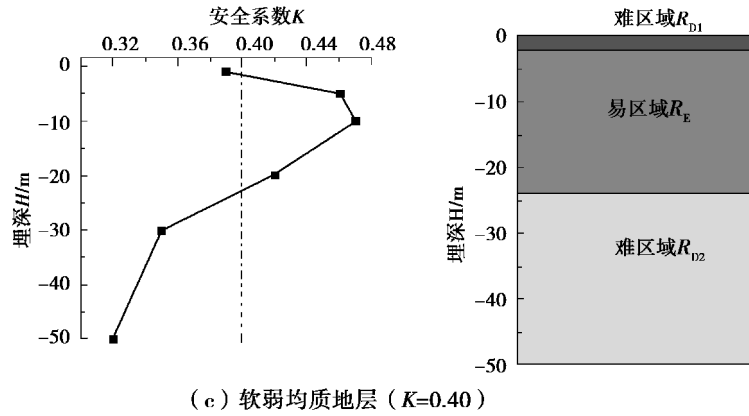


图 6 均质地层地下空间稳定性区域划分

Fig. 6 The stability region division of underground space in homogeneous stratum

2.3 上软下硬地层地下空间稳定性区域划分

为突出上软下硬地层结构特征并结合青岛地铁工程实际情况,建立如图 7 所示地下空间稳定性区域划分分析模型。其中, H 为总覆盖层厚度, H_s 为软弱地层厚度, H_r 为覆岩厚度, D 为隧道跨度, h 为隧道高度。地层参数依次取表 1 中的软弱地层参数和中风化岩层参数。

软弱地层厚度 H_s 为 12 m 和 24 m,不同覆岩厚度 H_r 的洞室围岩安全系数 K 计算结果如表 5、表 6 所示。

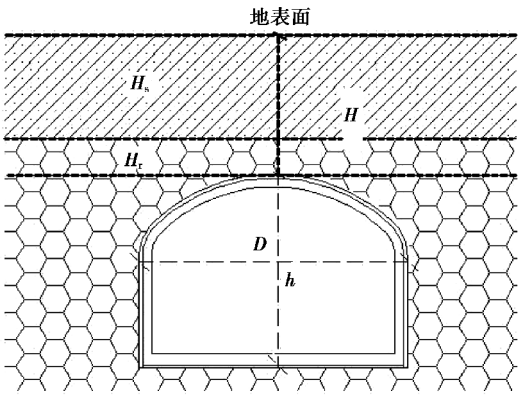


图 7 上软下硬地层地下洞室稳定性分析模型

Fig. 7 Stability analysis model of underground cavern in upper-soft and lower-hard stratum

表 5 软弱地层 12 m 安全系数计算结果

Table 5 Calculation results of safety factor with the thickness soft stratum is 12 m

H_r/m	0.5	1.0	1.3	1.6	1.9	2.2	3.0	6.0
K	0.70	0.85	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.60
H_r/m	9.0	12.0	24	30	50	80	100	
K	1.70	1.75	1.70	1.62	1.39	1.23	1.15	

表 6 软弱地层 24 m 安全系数计算结果

Table 6 Calculation results of safety factor with the thickness soft stratum is 24 m

H_r/m	2.5	3.0	3.5	4.0	6.0	12	20	30	50	80	100
K	0.95	1.05	1.08	1.16	1.25	1.40	1.64	1.54	1.30	1.23	1.15

地层厚度 H_s 为 0 m、12 m、24 m 时的洞室围岩安全系数随覆岩厚度 H_r 变化如图 8 所示。可见,

安全系数 K 均随覆岩厚度 H_r 增加均呈现先增大后减小的整体变化趋势; H_r 较小时对安全系数 K 值

影响较大, H_r 达一定程度后(一般 60~80 m),对安全系数 K 影响较小; H_r 较小时(一般在 3.0 m 以内), K 小于 1.00。

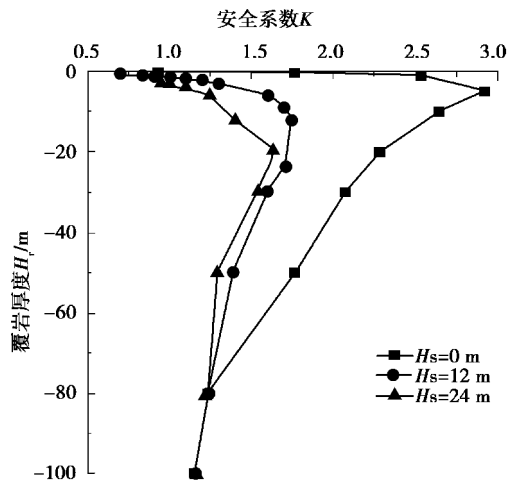


图 8 上软下硬地层围岩安全系数 K 随 H_r 变化图

Fig. 8 The safe factor K varying with H_r in upper-soft and lower-hard stratum

这是因为上软下硬地层在下覆坚硬地层中开挖洞室,由于两种地层刚度差异较大,可以将上覆软弱地层视作荷载并通过两地层接触面施加在下覆坚硬地层中。软弱地层荷载作用在下覆坚硬地层中产生的附加应力随 H_r 增加不断减小,坚硬地层自重应力随 H_r 增加不断增大,地下洞室围岩应力随 H_r 的变化必然存在一个由大变小的过程;围岩应力越小,对应的摩尔应力圆越靠近坐标原点,半径也较小,对应的安全系数较大;因此,安全系数

随 H_r 增加有个不断增大的过程,如图 9 所示。 H_s 越大,对应的相同 H_r 部位附加应力越大,因而安全系数 K 值越小;反之 H_s 越小,对应的 K 值越大。附加应力影响范围有限, H_r 达一定值后可忽略软弱地层荷载影响,并且洞室周边围岩应力受覆岩自重影响也逐渐降低,因而当 H_r 达一定值后安全系数趋于稳定。

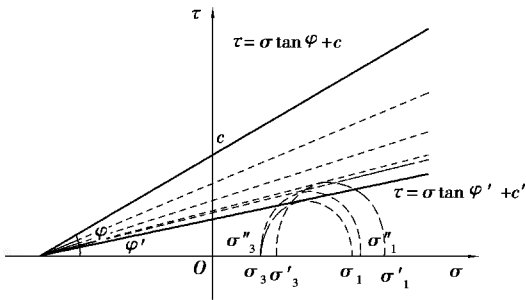


图 9 不同应力路径下安全系数表达式示意图

Fig. 9 The sketch map of safety factor in different stress path

分别以安全系数 1.00、1.10、1.20、1.30 作为地下空间稳定性“ R_{D1} — R_E ”及“ R_E — R_{D2} ”分界标准,上软下硬地层 H_s 分别为 12 m 和 24 m,洞室开挖跨度 20.8 m 时的 R_{D1} 、 R_E 、 R_{D2} 分布范围如表 7、图 10 所示。

可见,上软下硬地层上覆软弱地层厚度 H_s 越大,地下空间稳定性 R_{D1} 分布范围越大, R_E 分布范围越小,分界覆岩厚度 $H_{r(D1-E)}$ 越大;反之, H_s 越小, R_E 分布范围越大, $H_{r(D1-E)}$ 越小。说明上覆软弱地层厚度 H_s 对 R_{D1} 分布范围及 $H_{r(D1-E)}$ 有较大影响。

表 7 上软下硬地层地下空间稳定性区域划分覆岩厚度

Table 7 Overburden stratum thickness by the stability region division of underground space in upper-soft and lower-hard stratum

		各区域分布深度/m	R_{D1}/m	R_E/m	R_{D2}/m
H_r/m	$K=1.00$	$H_s=12$	<1.6	1.6~	—
		$H_s=24$	<2.7	2.7~	—
	$K=1.10$	$H_s=12$	<1.9	1.9~	—
		$H_s=24$	<3.8	3.8~	—
	$K=1.20$	$H_s=12$	<2.2	2.2~88	>88
		$H_s=24$	<4.8	4.8~88	>88
	$K=1.30$	$H_s=12$	<3.0	3.0~66	>66
		$H_s=24$	<7.5	7.5~50	>50

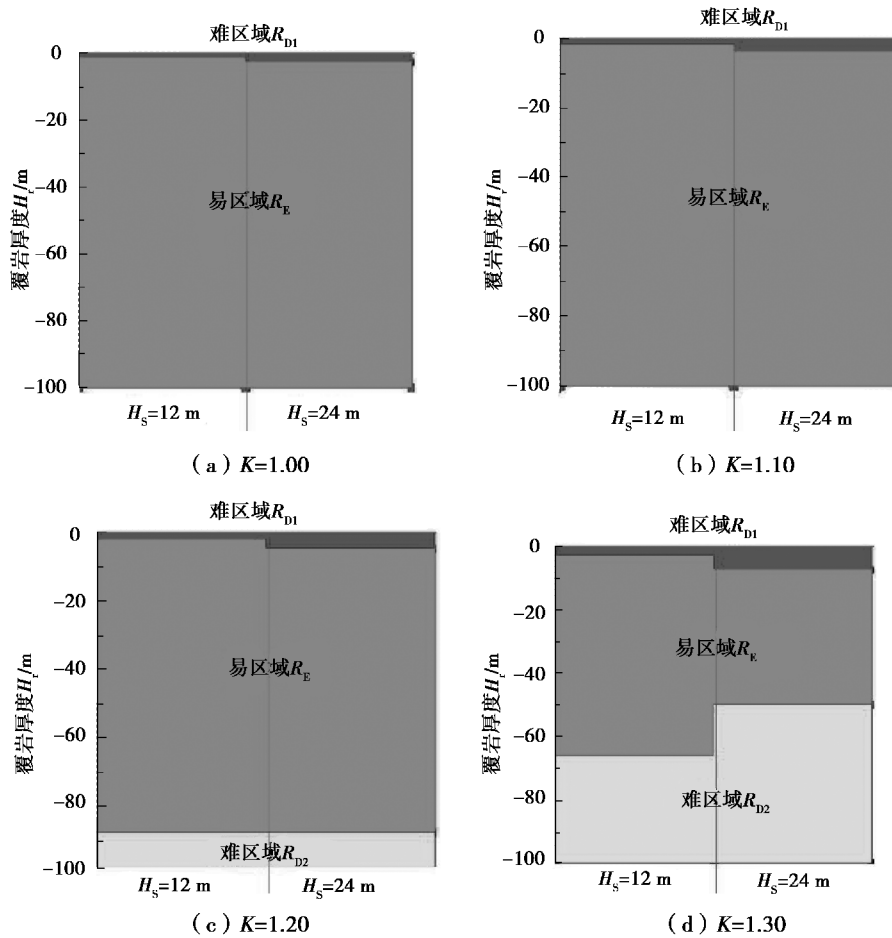


图 10 上软下硬地下空间稳定性区域划分

Fig. 10 The stability region division of underground space in upper-soft and lower-hard stratum

2.4 不同跨度下的地下空间稳定性区域划分研究

地铁暗挖隧道等城市地下空间除大跨车站外, 还有大量跨度不等的区间隧道、渡线、折返线、横通道、联络通道等断面型式。为系统研究不同开挖跨度(D)下的地下空间稳定性特征, 取软弱地层厚度 H_s 为 12.0 m, 开挖跨度 D 值依次为 10.4 m、20.8 m、31.2 m 的 3 种工况进行研究, 如图 11 所示。开挖跨度 D 为 10.4 m 和 31.2 m, 不同覆岩厚度 H_i 的洞室围岩安全系数 K 计算结果如表 8 所示。 D 为 10.4 m 和 31.2 m, 不同覆岩厚度 H_i 的洞室围岩安全系数 K 计算结果如表 8 所示。

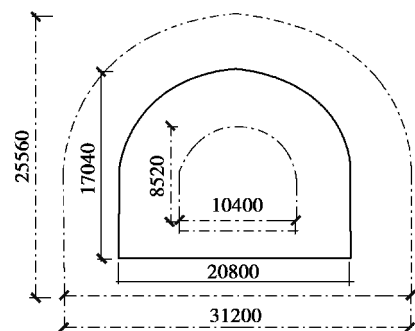


图 11 地下洞室开挖断面图(单位:mm)

Fig. 11 The excavation sectional of underground cavern (unit:mm)

表 8 不同 H_r 下围岩安全系数 K 计算结果

Table 8 Calculation results of safety factor under different H_r

H_i/m	0.2	0.5	1	2	3	4	5	10	20	30	50	80	100	
K	$D=10.4\text{ m}$	1.10	1.53	1.86	—	—	—	2.42	2.56	2.52	2.30	2.13	1.58	1.45
	$D=31.2\text{ m}$	—	—	0.82	1.03	1.15	1.24	1.32	1.45	1.52	1.42	1.25	1.10	1.00

软弱地层厚度 H_s 为 12 m,地下洞室开挖跨度 D 分别为 10.4 m、20.8 m、31.2 m 时洞室围岩安全系数随覆岩厚度 H_r 变化如图 12 所示。可见,不同开挖跨度 D 时的毛洞围岩安全系数 K 均随覆岩厚度 H_r 增加均呈现先增大后减小的整体变化趋势; D 越大,对应的 K 值越小;反之, D 值越小,对应的 K 越大。

分别以安全系数 1.00、1.10、1.20、1.30 作为地下空间稳定性“ $R_{D1}-R_E$ ”及“ R_E-R_{D2} ”分界标准,上软下硬地层 H_s 为 12 m,洞室开挖跨度 D 分别为 10.4 m、31.2 m 时的 R_{D1} 、 R_E 、 R_{D2} 分布范围如表 9、图 13 所示。

可见,上软下硬地层地下洞室开挖跨度 D 越大,地下空间稳定性 R_{D1} 分布范围越大, R_E 分布范围越小, $H_{r(D1-E)}$ 越大;反之, D 越小, R_E 分布范围越大, $H_{r(D1-E)}$ 越小。说明地下洞室开挖跨度 D 对 R_{D1}

分布范围及 $H_{r(D1-E)}$ 有较大影响。

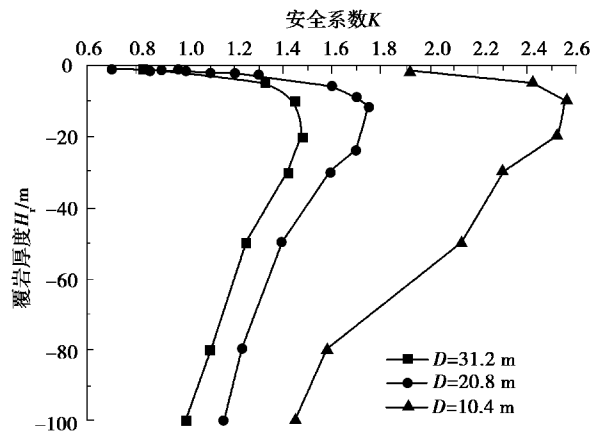


图 12 不同开挖跨度 D 下围岩安全系数 K 随 H_r 变化图

Fig. 12 The safe factor K varying with H_r in different D

表 9 不同开挖跨度下地下空间稳定性区域划分覆岩厚度

Table 9 Overburden stratum thickness by the stability region division of underground space in different excavation span

各区域分布深度		R_{D1}/m	R_E/m	R_{D2}/m	
H_v/m	$K=1.00$	$D=10.4\text{ m}$	<0.2	$0.2\sim$	—
		$D=20.8\text{ m}$	<1.6	$1.6\sim$	—
		$D=31.2\text{ m}$	<1.8	$1.8\sim 100$	>100
	$K=1.10$	$D=10.4\text{ m}$	<0.2	$0.2\sim$	—
		$D=20.8\text{ m}$	<1.9	$1.9\sim$	—
		$D=31.2\text{ m}$	<2.5	$2.5\sim 80$	>80
	$K=1.20$	$D=10.4\text{ m}$	<0.3	$0.3\sim$	—
		$D=20.8\text{ m}$	<2.2	$2.2\sim 88$	>88
		$D=31.2\text{ m}$	<3.6	$3.6\sim 68$	>68
	$K=1.30$	$D=10.4\text{ m}$	<0.4	$0.4\sim$	—
		$D=20.8\text{ m}$	<3.0	$3.0\sim 50$	>50
		$D=31.2\text{ m}$	<4.8	$4.8\sim 44$	>44

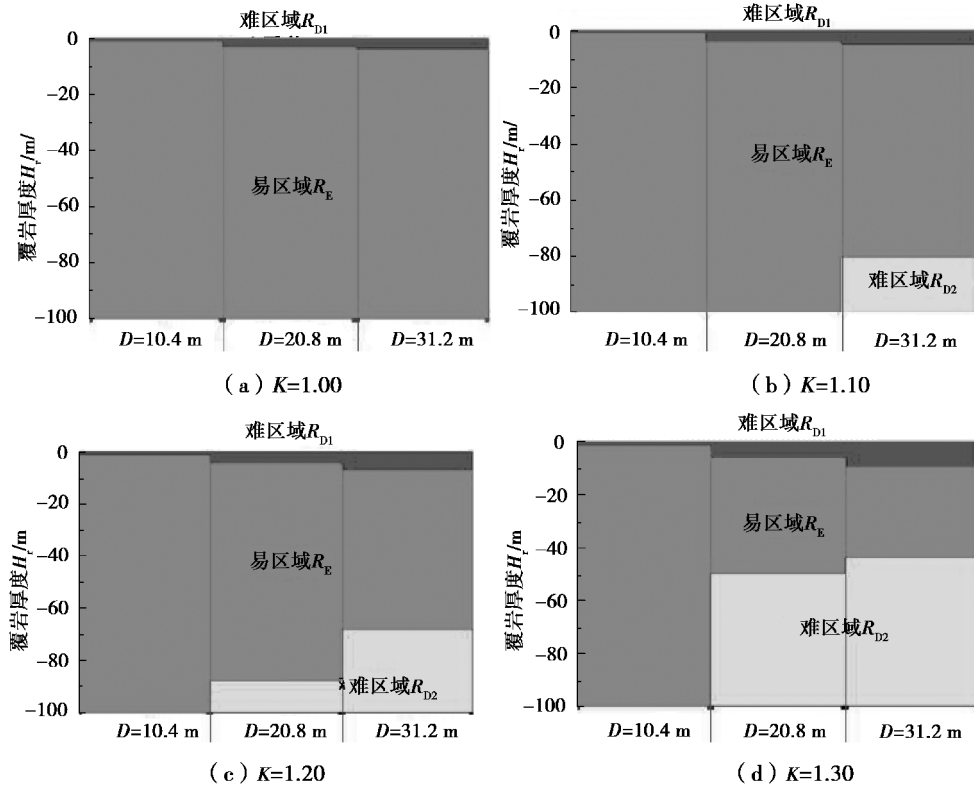
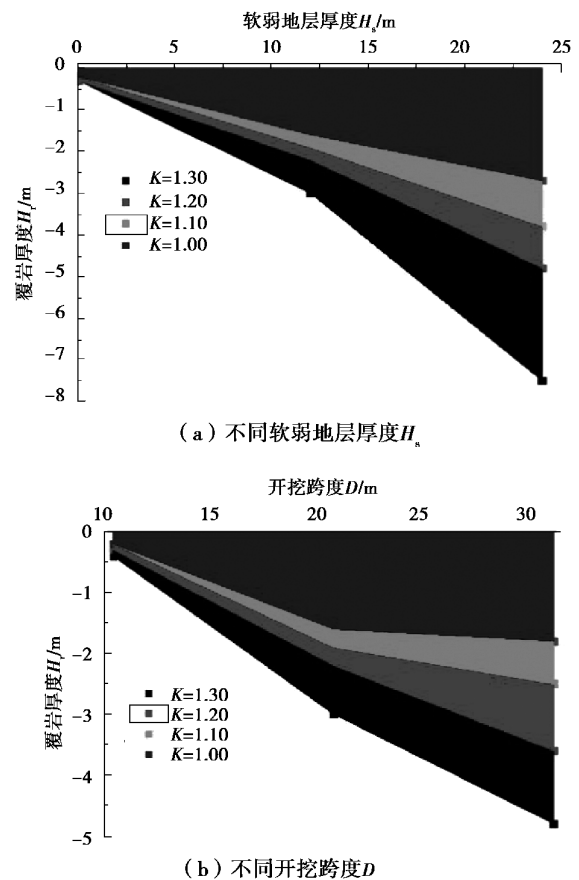
图 13 不同开挖跨度 D 地下空间稳定性区域划分

Fig. 13 The stability region division of underground space in different excavation span

2.5 青岛城市地下空间稳定性区域划分

青岛城市地层分布具有典型的上软下硬二元结构特征,软硬地层物理力学性质差异大。在上软下硬地层条件下开发地下空间,衡量洞室围岩稳定性问题一般参数的覆盖层厚度指标不再适用,从而将目标转移到洞室拱顶覆岩厚度对围岩稳定性的影响。地铁、地下停车场、地下管线等城市地下空间开发深度一般不超过 100 m,并且从地表向下延伸至地层内部,深度越大,岩土体物理力学性质一般越好。因此,城市地下空间的开挖主要分布在 R_{D1} 与 R_E 两个区域,一般不会进入 R_{D2} 部位;城市地下空间稳定性区域划分问题的研究重点是 R_{D1} 与 R_E 分布范围及分界覆岩厚度 $H_{r(D1-E)}$ 。

上覆软弱地层厚度 H_s 和开挖跨度 D 对 R_{D1} 及 R_E 分布范围及 $H_{(D1-E)}$ 有较大影响, H_s 越大, D 越大,地下空间稳定性 R_{D1} 分布范围越大, R_E 分布范围越小, $H_{(D1-E)}$ 越大;反之, H_s 越小, D 越小, $H_{(D1-E)}$ 越小。分别以洞室围岩安全系数 K 为 1.00、1.10、1.20、1.30 作为地下空间稳定性 $H_{r(D1-E)}$ 分界标准,青岛城市地下空间开挖 D 为 20.8 m 时的 $H_{r(D1-E)}$ 一般不超过 2.7 m、3.8 m、4.8 m 和 7.5 m; H_s 为 12 m 时的 $H_{r(D1-E)}$ 一般不超过 1.8 m、2.5 m、3.6 m 和 4.8 m,如图 14 所示。

图 14 城市地下空间稳定性分界覆岩厚度 $H_{r(D1-E)}$ Fig. 14 The stability boundary overburden stratum thickness $H_{r(D1-E)}$ of urban underground space

3 青岛城市地下空间开发地表沉降统计分析

目前技术条件下,地表沉降是反映浅埋地下空间开发最直观有效的手段。本文依托青岛地铁工程实例,以 2 座断面尺寸、埋深、开挖工法等相似但地层分布特征存在明显差异的芝泉路车站隧道和湛山路车站隧道,通过施工过程中车站主体上方地表沉降监测数据的对比统计分析,验证本文所得结论的合理性。车站概况如表 10 所示,地层沉降监测数据统计分析如表 11 所示。

表 10 地铁车站概况
Table 10 General situation of metro station

车站名称	$D \times h / (m \times m)$	埋深/m	覆岩厚度/m	施工方法	地层分布
芝泉路站	23.76×19.13	13.2~17.0	8.2~14.3	双侧壁导坑法	第四系地层厚 1.0~8.6 m,强风化层厚 0.5~2.2 m,中风化层厚 3.1~7.0 m
湛山站	20.52×18.18	13.0~15.1	0~1.5	双侧壁导坑法	第四系地层厚 0~12 m;强风化层厚 1~9.4 m,中风化层厚 1~12.7 m

表 11 地表沉降监测数据统计分析
Table 11 Statistical analysis on ground settlement

车站名称	样本数	最大值/mm	最小值/mm	平均值/mm	标准差/mm	变异系数
芝泉路站	19	6.22	1.37	2.29	1.18	0.36
湛山路站	41	80.96	21.19	54.75	16.97	0.31

4 结论

(1)从围岩稳定性角度出发,提出了“难区域(R_{D1})—易区域(R_E)—难区域(R_{D2})”三度区域的概念,并指出上软下硬地层城市地下空间稳定性区域划分问题的研究重点是 R_{D1} 与 R_E 分布范围及分界覆岩厚度 $H_{r(D1-E)}$;软弱地层厚度 H_s 越大,开挖跨度 D 越大, R_{D1} 分布范围越大, R_E 分布范围越小, $H_{r(D1-E)}$ 越大,反之 $H_{r(D1-E)}$ 越小。研究成果为城市地下空间的合理开发利用提供了理论基础和依据。

(2)青岛地区地层分布具有明显上软下硬特征,第四系松散层厚度约 90%处于 12.0 m 以内,平均厚度 5.1 m;强风化层厚度平均值 5.4 m;中风化

可见,上软下硬地层地下空间开发,洞室拱部保持合理的覆岩厚度时,地表沉降值均不超过 10 mm;反之,当洞室拱部覆岩较薄或处于软弱地层时,地表沉降值约 70%在 40 mm 以上,两者差异明显。以较为保守的围岩安全系数 K 为 1.30 作为分界标准,软弱地层厚度 H_s 按 12 m、开挖 D 按 20.8 m 考虑, R_{D1} 与 R_E 分界覆岩厚度 $H_{r(D1-E)}$ 为 4.8 m。芝泉路车站隧道和湛山路车站隧道 H_r 分别为 8.2~14.3 m 和 -12.0~1.5 m,因此,分别处于 R_E 分布范围和 R_{D1} 分布范围,验证了本文所得结论的合理性。

岩层薄而不均,厚度一般 0.0~9.0 m,平均 5.3 m。分别以 K 为 1.00、1.20 和 1.30 为 $H_{r(D1-E)}$ 分界标准,青岛城市地下洞室开挖跨度 D 为 20.8 m 时的 $H_{r(D1-E)}$ 一般不超过 2.7 m、4.8 m 和 7.5 m; H_s 为 12 m 时的 $H_{r(D1-E)}$ 一般不超过 1.8 m、3.6 m 和 4.8 m。

参考文献 (References)

[1] 潘丽珍,李传斌,祝文君. 青岛市城市地下空间开发利用规划研究[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(增1): 1093-1099. (Pan Lizhen, Li Chuanbin, Zhu Wenjun. Underground space exploitation planning of Qingdao city [J]. Chinese Journal of Underground and Space and Engineering, 2006, 2(Supp.1): 1093-1099.

- (in Chinese))
- [2] 袁红,戴志中,刘新荣,等.重庆主城区地下空间利用发展阶段研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(1):1-5,13.(Yuan Hong,Dai Zhizhong,Liu Xinrong,et al. Development Phase of Underground Space Utilization in Chongqing Urban District [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2014,10(1):1-5,13.(in Chinese))
- [3] 智庆玺,张可宗,栾永鹏,等.新空间格局下青岛城市地下空间开发战略研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(增1):1518-1525.(Zhi Qingxi,Zhang Kezong,Luan Yongpeng. Research on urban underground space development strategy of Qingdao city under new spatial pattern [J]. Chinese Journal of Underground and Space and Engineering,2014,10(Supp.1):1518-1525.(in Chinese))
- [4] 伏海艳,朱良成.善用地下空间资源——香港地下空间发展的经验和启示[J].地下空间与工程学报,2016,12(2):293-298.(Fu Haiyan,Zhu Liangcheng. Enhanced Use of Underground Space Resources——Experiences and Enlightenments of Underground Space Development in Hong Kong [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2014,10(1):1-5,13.(in Chinese))
- [5] 徐辉,李晓昭,车晶.不同阶段地下空间开发的功能配比研究[J].地下空间与工程学报,2016,12(3):573-580.(Xu Hui,Li Xiaozhao,Che Jing. A research on the function matching of underground space development in different stages [J]. Chinese Journal of Underground and Space and Engineering,2016,12(3):573-580.(in Chinese))
- [6] 杨新安,丁春林,徐前卫.城市隧道工程[M].上海:同济大学出版社,2014.(Yang Xinan,Ding Chunlin,Xu Qianwei. Urban tunnel engineering [M]. Shanghai: Tongji University Press,2014.(in Chinese))
- [7] Lunardi P. Design and Construction of Tunnels. Analysis of controlled deformations in rock and soils (ADECO-RS) [M]. Beilin: Springer-Verlin, 2008.
- [8] 郑颖人,朱合华,方正昌.地下工程围岩稳定分析与设计理论 [M]. 北京:人民交通出版社,2012.(Zheng Yingren, Zhu Hehu, Fang Zhengchang. The stability analysis and design theory of surrounding rocks of underground engineering [M]. Binjing: China Communications Press,2012.(in Chinese))
- [9] 赵战丰.青岛地铁防水问题浅析[J].现代隧道技术,2003,40(5):44-47.(Zhao Zhanfeng. Discussion on the waterproofing of Qingdao metro [J]. Modern Tunnelling Technology, 2003,40(5):44-47.(in Chinese))
- [10] 华福才.基于地下水动力学的地铁隧道裂隙水预测分析[J].现代隧道技术,2015,52(2):78-86.(Hua Fucui. Prediction analysis of fissure water in metro tunnel based on groundwater dynamics [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(2):78-86.(in Chinese))
- [11] 郑颖人,邱陈瑜.普氏压力拱理论的局限性[J].现代隧道技术,2016,53(2):1-8.(Zheng Yingren, Qiu Chenyu. On the limitations of Protodyakonov's pressure arch theory [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(2):1-8.(in Chinese))
- [12] 阿尔比特,郑颖人,冯夏庭,等.应力释放后隧道稳定安全系数研究[J].现代隧道技术,2016,53(2):70-76.(Abi Eedi, Zheng Yingren, Feng Xiating, et al. Study of the safety for tunnel stability considering the stress release effect [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(2):70-76.(in Chinese))
- [13] 孔超,仇文革,章慧健,等.基于岩石数值极限分析法的洞群围岩稳定性研究[J].现代隧道技术,2013,50(6):66-71.(Kong Chao, Qiu Wenge, Zhang Huijian, et al. A study of the rock mass stability of a tunnel group based on numerical limit analysis [J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(6):66-71.(in Chinese))
- [14] 李炎延,郑颖人,康楠.隧洞稳定性影响因素的敏感性分析[J].地下空间与工程学报,2015,11(2):491-498.(Li Yanyan, Zheng Yingren, Kang Nan. Sensitivity analysis on influencing factors of tunnel stability [J]. Chinese Journal of Underground and Space and Engineering, 2015,11(2):491-498.(in Chinese))