

试论泰安路基塌陷与稳定性分区

赵永骅 雷兴稚

(铁道部第一勘测设计院)

津浦铁路泰安段路基位于覆盖型岩溶地区,由于超量抽取岩溶水,导致1977年后不断发生地面塌陷,至今仍威胁着行车安全。为此,防止塌陷发生,保障安全行车就成为急待解决的问题。本文根据病害勘察资料,针对防治工程需要,试图对岩溶发育规律、形态特征、塌陷成因机理,以及稳定性评价等有关问题进行探索,为防治工程方案的选择提供依据。

一、地质概况

本区位于泰山背斜、徂徕山背斜之间的泰(安)莱(芜)向斜盆地的西北边缘。北侧泰山山前断层和南面徂徕山断层为本区两条主干断裂,两断层间表现为断块凹陷。东部岱道庵断裂和西侧北集坡断裂近于平行,从北西至南东方向横切盆地。地面塌陷恰处于四条断层所包围的近似菱形的断块构造内,地表均被第四系掩盖,下伏寒武系碳酸盐岩。

寒武系厚度大于486米,在工作区内分布完整。岩层走向北西 $30\sim 56^\circ$,倾向北东,倾角 $10\sim 20^\circ$,属单斜构造,各组岩性见表1。

第四系厚度20~30米,由上到下呈四层结构。第一、二层为全新统,第三、四层为更新统。

第一层:砂粘土,褐黄色,厚度7~12米。

第二层:粗、中砂,夹少量砾石、卵石,厚度2~3米,为本区主要潜水含水层。潜水面平均高程12.8米。渗透系数 $1.2\sim 75.6$ 米/天,单位出水量 $0.23\sim 0.92$ 升/秒·米。

第三层:强烈风化的卵石土,厚度4~12米,成份以花岗片麻岩为主,长石多已高岭土化或呈粉末状,含泥量大。一般20小时崩解量为60~80%,渗透系数 $1.08\sim 8.13\times 10^{-2}$ 米/天,属弱透水层。

第四层:含砾粘土,可部分相变为角砾土及碎、块石土,厚度5~15米。角砾土及碎、块石土成份单一,均由页岩组成,偶夹片麻岩和石英岩块。页岩块风化极严重,节理裂隙密集。渗透系数:含砾粘土为 $1.03\sim 3.98\times 10^{-4}$ 米/天,碎石土为 $2.1\sim 8.1\times 10^{-3}$ 米/天。

根据钻孔揭露,工作区主要发育北东向张扭性及北西向张性两组断裂。前者由 F_5 、 F_6 、 F_7 三条台阶式高角度断层组成,总断距250米;后者由 F_9 、 F_{10} 、 F_{11} 三条正断层组成地堑式构造,断距90余米(图1),两组断裂间及其邻近,有挤压错动和次一级断裂迹象,对岩溶的发育起到一定的控制作用。

表1 工作区寒武系地层特征表

Table 1 Characteristic of Cambrian stratum

统	组	段	厚度 (米)	岩 性 特 征	
下 寒 武 统	馒头组	E_1^{m-1}	> 8	泥灰岩, 紫灰色夹棕红色条带, 下部为钙质粉砂岩, 未到底。	
		E_1^m	E_1^{m-2}	23	页岩, 砖红色夹灰绿色条带, 页理不发育, 易碎裂。
	E_1	毛庄组	E_1^{m-1}	30	页岩, 暗紫色, 层面上有翠绿色晕状斑点, 偶夹薄层鲕状灰岩。
		E_1^{m-2}	E_1^{m-2}	>10	页岩, 淡棕色, 常有灰黄色条带, 页理面或含较多云母片。
中 寒 武 统	徐庄组	E_2^{-1}	28	砂质云母页岩, 灰黑、紫灰色, 夹鲕状灰岩、钙质石英粉砂岩。未见底。	
		E_2^{-2}	13	鲕状灰岩, 深灰色, 鲕粒直径0.5—1.0毫米, 富含海绿石。	
		E_2^{-3}	9	页岩, 黄绿及紫红色, 夹薄层鲕状灰岩。产毕雷氏虫 (Bailiella)。	
	E_2	张夏组	E_2^{-1}	63	鲕状灰岩, 青灰或灰黑色, 鲕粒直径>1毫米, 下部夹薄层灰岩与含灰质、结核的钙质页岩。
			E_2^{-2}	22	致密状灰岩, 灰色。下部夹薄层页岩。
			E_2^{-3}	37	致密状灰岩与页岩互层, 灰色及青灰色。
上 寒 武 统	崮山组	E_3^{-1}	45	页岩, 杂色, 夹薄层灰岩。产太子河辽宁虫 (Liaoningaspis taitzehoensis)。	
		E_3^{-2}	20	疙瘩状、致密状、豹皮状灰岩。底部夹黄绿色页岩。	
		E_3^{-3}	12	页岩, 灰黑色, 夹致密状灰岩。局部有薄层砾状或鲕状灰岩。	
	长山组	E_3^{-1}	7	大竹叶状、鲕状、致密状灰岩, 富含海绿石, 产庄氏虫 (Chuangia)	
		E_3^{-2}	37	页岩, 灰黑及兰灰色, 夹薄层灰岩、砾状灰岩。	
	E_3	风山组	E_3^{-3}	14	砾状或竹叶状灰岩, 砾石多有紫红色氧化圈。顶部有条带状灰岩或夹疙瘩状灰岩。
			E_3^{-1}	17	豹皮状、疙瘩状、致密状灰岩, 偶夹条带状、砾状灰岩及页岩薄层。
		E_3^{-2}	13	鲕状灰岩及细粒结晶灰岩。鲕粒细而密, 产满苏虫 (Mansuyia Sp.), 及济南虫 (Tsinania Sp.)。顶部或有薄层深灰色页岩。	
E_3^{-3}		28	薄层状页岩、灰岩互层, 夹薄层砾状或鲕状灰岩。		
E_3^{-4}		>50	豹皮状、致密状、条带状灰岩。产谭氏满苏虫 (Mansuyia Tani)、发状济南虫 (Tsinania Conens(Walcott))、亚球形褶盾虫 (Ptychaspis Subglobosa) 偶夹薄层鲕状或砾状灰岩, 未见顶。		

本区地下水除第四系潜水外, 基岩中有较丰富的岩溶裂隙水, 单井出水量2000~3000米³/天。勘察时水位已下降至高程90米左右, 较基岩面平均高程110米约低20米。岩溶裂隙水位随季节而变化, 年变幅8~12米, 局部地段波动于基岩面附近。

二、岩溶发育规律及特征

(一) 岩溶发育规律

本区可溶岩地段岩溶发育，据 230 个钻孔统计，未见岩溶化现象的钻孔只占 8.6%，在有岩溶化现象的钻孔中，线岩溶率（以强岩溶化发育深度，高程 90 米以上岩段计算）< 5% 者占 28.6%，5~15% 占 24.3%，> 15% 占 41.1%，最大为 82.6%。可见，岩溶发育具有明显的不均一性，表现在岩溶化强度和密度相差很大，但仍有以下规律性。

1. 岩溶发育主要受岩性控制，通过 72 组碳酸盐岩化学成份分析和参与统计的代表性地段 107 个钻孔资料（表 2）表明，碳酸盐岩结构比化学成份对岩溶作用具有更大意义。平均洞高和最大洞高都表明，

鲕状灰岩较其它结构的灰岩洞穴更为发育，其次为致密状及结晶灰岩。从图 1 看出，塌陷点的延伸方向，大致与上寒武统风山组第二段鲕状灰岩的分布相吻合。

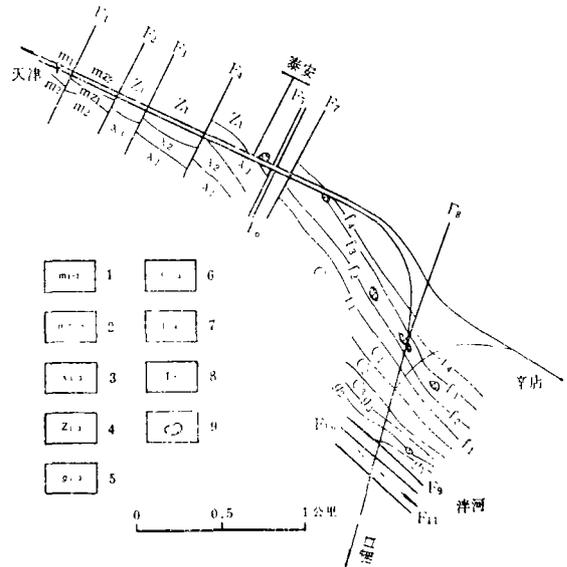


图 1 基岩地质图

Fig. 1 Geological map of bedrock

- 1. 馒头组 2. 毛庄组 3. 徐庄组 4. 张夏组 5. 崮山组
- 6. 长山组 7. 风山组 8. 断层及编号 9. 塌陷坑

表 2 洞穴与岩性关系统计表

Table 2 Statistical data of relationship between karst cave and lithological characters

岩石名称	溶洞个数	溶洞总高(米)	平均洞高(米)	最大洞高(米)	CaCO ₃ 含量(%)	
					数值范围	平均值
致密状及结晶灰岩	79	79.50	1.03	6.41	58.1~95.5	84.9
豹皮状灰岩	20	10.77	0.54	2.77	73.9~98.5	83.3
鲕状灰岩	49	71.49	1.46	8.75	74.9~95.8	87.2
砾状竹叶状灰岩	20	15.25	0.76	2.20	81.6~94.4	88.6
疙瘩状灰岩	19	11.92	0.63	0.82	77.1~93.6	85.1
条带状灰岩	10	7.36	0.72	1.20	62.0~84.8	74.6

2. 岩性相同时，沿断层挤压带岩溶较为发育。F₇ 东侧及 F₈ 与津浦线相交处，两个孔群

平均线岩溶率分别为18.8%及28.3%，明显高于相同岩性的其它地段（平均线岩溶率10%左右）。F₁北侧孔群平均线岩溶率虽仅9.1%，但也较其他相同岩性（页岩与灰岩互层）地段高（平均线岩溶率6.8%）。

3.岩溶发育强度随高程降低而减弱。以各钻孔相同高程截取每米范围的溶洞累计长度与相同高程段每米岩石总长之比作曲线（图2），看出岩溶现象主要发育在高程90米以上，这可能与侵蚀基准有关。钻孔揭示，本区岩溶最大发育深度在高程60米左右，但其岩溶化程度也很微弱，且形态多以溶痕、溶隙为主。

（二）岩溶主要形态特征

岩溶发育除上述因素外，水动力条件也起到控制作用。岩层中节理裂隙，多组断裂网状切割，成为地下水运动的良好通道，也是岩溶发育的部位。本区以岩溶裂隙系统为主要形态。据钻孔追索揭露，最大的裂隙型洞穴长50余米，最高13.16米，宽不足8米。地表则以溶蚀裂隙为特征，符合本区陡倾结构面的溶蚀特点。另外溶沟、溶槽也较发育，相邻钻孔岩层面高程常常相差数米，物探资料也显示本区古地貌存在北西向溶沟、溶槽。

（三）岩溶充填情况

本区岩溶空间大部份被后期物质充填，无充填者只占20~30%，充填情况具有以下特点。

1.已产生地面塌陷的，充填物质多为含水量较大的稀软泥沙混合物；未产生地面塌陷的，岩溶充填物一般为较紧密、含水量稍小的粘性土。

2.未产生塌陷地段，上部岩溶充填率高，下部则较低。这是由于上部距充填物质来源近，下部或因岩溶裂隙贯通不好，或因充填物质在运移中途被阻塞，致使充填率较低。在已产生塌陷地段，充填情况恰恰相反，这是由于原充填物质被冲蚀，洞体空间新近再次接受沉积的缘故。

3.岩溶充填物以外来物质为主，溶蚀残留物质极少见。从岩性对比分析，一种是基岩顶部第四系第四层沉积，为结构紧密的含砾粘土；另一种是近期地下水搬运沉积，略具成层性，与第四系基本对应。

（四）岩溶网络的发育

本区岩溶网络不甚发育，其发育强度随深度的加大而减弱。这主要表现在岩溶水水量的不均匀性和同期水位的差异性，岩溶水位动态观测资料（图3）表明，高程100米以下岩溶连通性欠佳，相邻钻孔同期水位相差7~8米。而高程100米以上则渐趋平稳、重迭，基本上形成自由水面，反映了岩溶连通性较好。物体充电试验也表明，高程100米以上和其下，地下水流速相差3倍，也证实了随高程变化，岩溶连通性有很大差异。

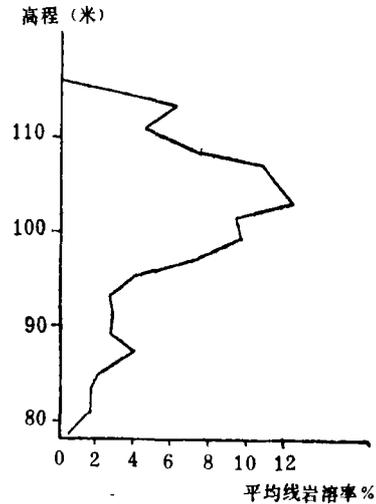


图2 岩溶发育深度图
Fig. 2 Depth of karst cavern development

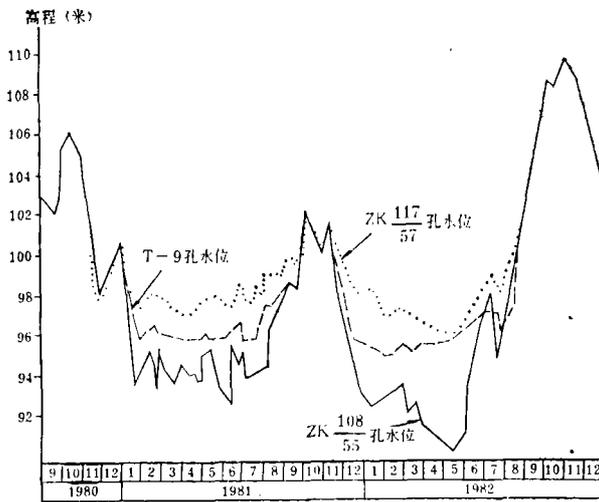


图 3 岩溶裂隙水水位
动态曲线

Fig. 3 Variation curve
of karst fissure
water level

(五) 钻孔线岩溶率分区

岩溶化现象及其发育程度，是产生地面塌陷的主要因素，在各种物探方法还不能反映覆盖型岩溶客观实际的情况下，我们采用钻孔线岩溶率来表示岩溶发育程度的定量值。根据已塌陷地方平均线岩溶率都在20%左右，而未塌陷地段一般都小于10%的实际情况，将工作区按线岩溶率 $>15\%$ 、 $5\sim 15\%$ 、 $<5\%$ 进行划分，作为岩溶发育、岩溶较发育、岩溶微弱三级分区的界限。

三、塌陷成因及产生塌陷的条件

泰安路基范围内共发生25次塌陷。塌坑平面略呈园形，上口直径一般3~6米，最大11米，剖面似坛子状，可见深度小于8米。塌陷始于1977年，恰是岩溶水下降至基岩顶面，由承压转为无压之时（图4）。无疑，塌陷是由于地下水动力条件的改变而引起。通过对五个塌陷坑洞的解剖资料分析，当岩溶水在下降过程中产生承压潜蚀和第四系潜水向下渗透产生重力潜蚀，特别当岩溶水位在基岩面上下摆动，使土层底部周期性吸水、脱水、松胀、剥落，加上地下水运动中被冲蚀掏空，遂使土洞形成。随着土洞顶部土体不断剥蚀坍塌，洞体逐渐向上迁移，一旦洞顶土体失去自拱力，地面就发生塌陷。（图5）为钻探中发现的尚未塌陷的土洞，经开挖观察，洞顶距地表3.85米，洞高2.5米，直径 11×7 米，洞底微向下凹略似锅底，堆积松软的坍塌土体。

根据以下一些现象，本文认为泰安地面塌陷潜蚀起主导作用，真空吸蚀加剧了潜蚀。

1. 许多钻孔中发现，第四系下部碎、块石土中夹有新近沉积的楔状砂层，砂粒均匀、纯净，呈淡黄色。这些砂粒非所在地层的原有物质，而是地下水沿通道携带砂粒在此沉积的结果。

2. 第四系第四层底部常发现有混合层存在，由流塑状粘土与变质岩成份的卵、砾石及页岩成份的碎石混杂组成。在塌陷处的44个钻孔中，有33个钻孔发现有这种现象。这表明，一方面原有物质向下流失，另一方面又不断接受由上部土层中潜蚀而来的物质，

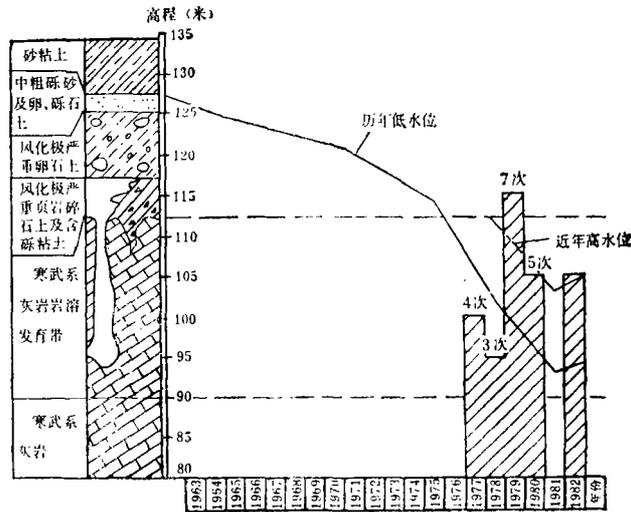


图4 泰安地区岩溶裂隙水位与塌陷次数、岩性相关图
(阴影线区示历年塌陷次数)

Fig. 4 Relationship between water table of karst fissure and times of subsidence in Taian region (shaded area showing times of subsidence)

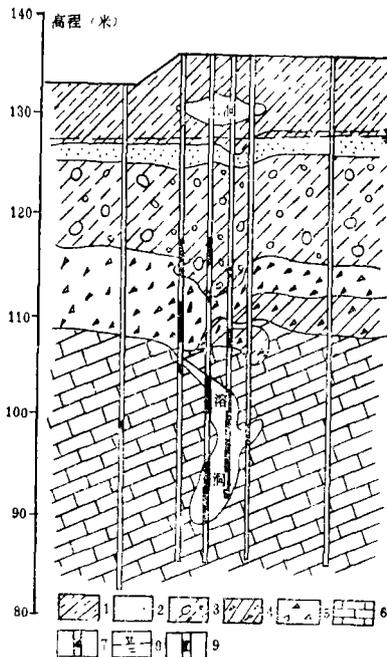


图5 土洞及地层剖面图

Fig. 5 Profile of soil cavern and layer

- 1. 砂粘土 2. 中粗砾砂 3. 风化极严重卵石土 4. 含页岩碎屑的粘土 5. 页岩碎块土
- 6. 寒武系灰岩 7. 钻孔中混合结构层 8. 第四系潜水 9. 钻孔水位(岩溶裂隙水)

3. 在已塌陷坑解剖钻孔中, 有的钻孔发现洞穴内新近充填物有明显层次, 层序基本与上覆第四系结构相对应。这种现象说明土洞起始于第四层底部, 同时说明潜蚀作用确实存在,

4. 塌陷多发生在雨季或雨季稍后一段时间, 据统计 60% 塌陷发生在 7、8 月份。这是由于当时潜水获得充足补给, 潜水位抬升, 潜蚀作用加剧, 同时雨水对土体浸润, 使土的强度降低, 自然拱容易遭到破坏的结果。

5. 在密封条件较好的观测孔中, 当打开孔口栓后, 孔口有“呼吸”现象。这是由于气温变化及岩溶水位升降所引起的。特别是雨季后, 岩溶水位上升较快, 岩溶空腔内气体受压, 密度增大, 压力增高, 故孔口出现较长时间的连续喷气, 当水位明显下降时, 则表现为吸气。岩溶空腔与大气间的压力差必然加剧潜水的重力潜蚀作用和对盖层的破坏。虽然目前还很难对这种作用的强度作出定量评价, 但根据观测, 本区岩溶水位年变幅 8~12 米, 最大升降量 2.0 厘米/小时, 瞬间变化幅度小于矿坑突水而引起的水位急剧下降数值。故吸蚀强度对地面塌陷不起主导作用。

从上述各点分析, 产生塌陷必须具备下列条件:

1. 岩溶裂隙发育。岩溶空洞及裂隙的存在, 是容纳上覆土层中被水流搬运物质的储存场所, 也是产生真空吸蚀的必要条件。如果没有岩溶空洞或者它被积满、堵塞, 潜蚀作用就会减弱甚至停止, 真空吸蚀也就无从发生。故当岩溶裂隙全被早期沉积物充填, 且充填物为较紧密的粘性土时, 虽然岩溶率较高, 但因缺乏储存空间, 而且减缓或阻止了地下水运动, 因此土洞就难以形成。

2. 覆盖层结构疏松水理性差。一般地说, 结构疏松, 水理性差, 裂隙发育的土层容易发生塌陷。根据本区第四系成层情况, 第 1~3 层均易产生潜蚀和崩解, 第四层岩性却差异很大, 故在其它条件相同时, 第四层岩性及其厚度就成为控制潜蚀作用或吸蚀作用强弱的主要因素, 从 20 余处塌陷资料分析, 发生在第四层为碎、块石土及角砾土分布区的共 15 处, 占 68%, 发生在含砾粘土区的共 7 处, 占 32%, 含砾粘土分布面积数倍于碎、块石土与角砾土, 而后者的塌陷次数却为前者的两倍多。显然, 塌陷与土的水理性质密切相关。

3. 第四系潜水丰富。当岩溶裂隙水水位下降后, 第四系潜水与岩溶裂隙水间产生水位差。若连接两层水的通道一旦形成, 则潜蚀作用就会沿微裂隙及孔隙的缓慢进行而强化, 其强度也随着水位差的增大而加强。因此, 第四系潜水是产生潜蚀作用必须具备的动力条件。

综上所述, 岩溶裂隙发育是酿成地面塌陷的基本条件, 第四系潜水则是产生土洞必不可少的动力因素, 但若存在良好的隔水地层, 那么土洞和塌陷的形成与发展, 都将受到很大的抑制。洞、土、水三者是互相制约又互相促进的, 只有在这三个条件同时具备时, 土洞的形成和地面塌陷的产生, 才成为最大的可能。

四、稳定性分区评价

在水文地质条件基本相同的情况下, 塌陷的可能性主要取决于工程地质因素。根据洞、土、水三者相互关系, 综合研究工作区内地层岩性、构造特征、岩溶化程度、水文地质条件等诸因素, 我们将场地划分为“稳定”、“较稳定”、“可能塌陷”三个区(图 6), 并初拟了如下分区技术指标。

I. 稳定区

1. 地层以页岩为主夹薄层灰岩, 岩溶裂隙不发育, 平均线岩溶率小于 5%。

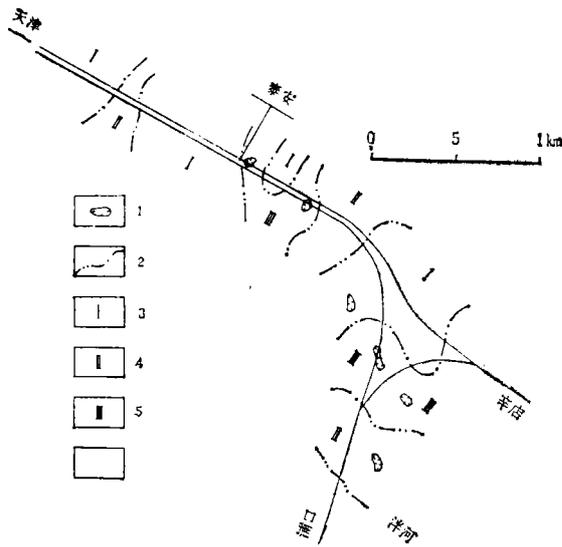


图6 稳定性分区图

Fig. 6 Diagram showing the division of stability

1. 塌陷坑 2. 分区界线 3. 稳定区
4. 较稳定区 5. 可能塌陷区

2. 地层以灰岩为主，虽然岩溶较发育，但洞隙均已被充填，且充填物为较紧密的粘土。

3. 第四系含砾土层厚度大于3.0米，且其中未发现有疏松带。

4. 岩溶裂隙水最低水位仍高于基岩顶面，且无第四系潜水或极其微弱。

II. 较稳定区

1. 地层以灰岩为主夹薄层页岩，层序稳定构造作用不强。

2. 岩溶较发育，形态以裂隙型洞穴、溶沟、溶槽为主，且大部分被紧密充填，线岩溶率一般为5~15%。

3. 第四系含砾粘土层厚度小于3.0米，土层中疏松带少且薄。

4. 岩溶裂隙水最高水位在基岩顶面以下，第四系潜水较发育。

III. 可能塌陷区

1. 厚层灰岩，构造作用强烈，岩层受挤压破碎。

2. 岩溶很发育，洞穴无充填或部分松散充填，线岩溶率大于15%。

3. 第四系含砾粘土层厚度小于1.0米或以碎、块石土及角砾土为主，土层中疏松带多且厚。

4. 岩溶裂隙水水位摆动于基岩面上下，第四系潜水较丰富。

五、防治塌陷的设想

通过稳定性分区，已明确防治的重点是可能塌陷区，虽然有的地方还没有发生塌陷，但塌陷条件已经基本具备，所以要预期防治，防患未然。稳定区不具备塌陷条件，可不予考虑。较稳定区介于两者之间，塌陷条件不完全具备，今后是否有塌陷的可能取决于外界条件的变化，特别是地下水动态的变化。

泰安路基塌陷的防治，经过两年多勘察，在初步分析塌陷成因和条件的基础上，结合已

有铁路建筑的实际情况，我们认为：堵塞岩溶洞隙，消除塌陷基本因素，以达到防止塌陷的目的，是较为有效可行的方法。

“堵洞防塌”就是通过钻孔往浅层洞穴、孔隙中灌注水泥浆等，填死赖以储存来自上部土层物质的空间，从而抑制土洞形成，防止塌陷产生。此法从产生塌陷原因和条件看应是有效的，同时根据本区岩溶发育深度不大，形态以裂隙为主，大型溶洞很少以及岩溶连通性欠佳，充填率较高等特点，故在实践中也将被认为是经济合理的防治方法。此外，岩溶注浆还具有不影响铁路行车，不污染地下水源的优点。目前，“堵洞防塌”已列为泰安路基塌陷病害防治工程措施的主要方案之一。

DISCUSSION ON THE COLLAPSE OF RAILROAD BED AT TAIAN, SHANDONG PROVINCE, AND DIVISION OF STABILITY ZONES

Zhao Yonghua Lei Xingzhi

(The First Survey and Design Institute of Ministry of Railway)

Abstract

The paper takes the example of a land collapse in the covered karst area of Taian along the Tianjin-Pukou railway line to illustrate on the basis of data obtained from the investigation, the following points: 1) the controlling factors of karst development, main features of karstification, and the conditions of the filling of and the connection between karst caves or fissures. According to the core-length karst-fissure ratio, the studied terrain is divided into three types of area, i.e. the well developed karst area, moderately developed karst area and weakly developed karst area. 2) The collapse mechanism inferred to be mainly caused by piping and intensified by suction, which is approached by dissecting the collapsed pits and the buried earth caves not yet collapsed. It is concluded that collapse will occur under three basic conditions: the intensity of karstification, the structure of the Quaternary covering, and the action of groundwater. 3) In order to meet the requirement of the engineering protection and treatment and provide the basis for the evaluation of the foundation stability, the division of stability zones and relevant criteria are proposed according to the combination of the above mentioned three conditions. 4) To prevent land collapse as the starting point, the measure of “blocking and filling the caves” will be relatively desirable.