

文章编号: 1000-7598 (2010) 11-3423-07

浅层气地层对地铁隧道稳定性影响模型试验研究

王 勇, 孔令伟, 郭爱国, 周小生, 樊友杰

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 根据杭州地区地下浅层气的分布规律和赋存特点, 结合杭州地铁工程, 设计了一套模型试验系统。借助物理模型试验, 研究了浅层含气土层中气体释放和再回聚对地铁隧道受力稳定性的影响。试验结果表明, 在含浅层气地层中穿过的地铁隧道, 土中气体的释放和再回聚会使隧道产生附加变形与附加内力; 气体变化过程对隧道管片截面相对变形和内力的影响较弱, 而对隧道整体变形则具有显著影响; 气体释放后的再回聚过程对隧道结构变形和内力的影响明显小于前期的气体释放过程。处于含浅层气地层区域的地铁隧道, 应将隧道的整体稳定性作为控制重点, 并且施工前, 宜将地层中气体进行超前有控排放, 以减弱后期给地铁工程带来的不利影响。

关 键 词: 浅层气; 含气砂土; 地铁隧道; 稳定性; 地质灾害

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Model test research on influences of shallow gas stratum on stability of metro tunnel

WANG Yong, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, ZHOU Xiao-sheng, FAN You-jie

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on the distribution and occurrence characteristics of underground shallow gas in Hangzhou area, and combined with the Hangzhou Metro project, a model test system was established; and influences of gas release and re-accumulation of the shallow gassy soil on stabilities of metro tunnel were studied by the physical model test. Results show that gas actions of shallow gassy soil may cause the tunnel crossing gas reservoirs to generate additional deformations and internal forces; disturbances on relative deformation and internal force of the shield lining segments are little; but influences on the global deformation of tunnel structures are significant; values of the additional deformation and internal force caused in gas re-accumulation are much less than those in the former process of gas release. For the metro tunnel in regions buried shallow gas, global stability of tunnel structure should be as the control emphasis; and the gas in strata should be released under control before construction so as to reduce the later adverse effects on metro engineering.

Key words: shallow gas; gassy sand; metro tunnel; stability; geological disaster

1 引 言

正在兴建的杭州地铁 1 号线在工程勘察过程中遭遇到含有高压的浅层生物气地层, 多次发生气体喷发并燃烧的现象。经测定, 气体的主要成分是甲烷, 埋深较浅, 被称为浅层天然气, 也称沼气。杭州地铁规划线路在钱塘江及江南岸区段沿线普遍存在这种含浅层气地质条件, 工程难以避让, 给地铁的建造和安全运营构成极大的威胁。目前国内外在这种含有害气体地层中进行地铁轨道交通建设的

工程经验和研究成果较少, 且无规范、标准可循。如何把握含浅层气地层对地铁工程的影响和成灾机制, 采取有效措施消除或避免灾害发生, 确保地铁工程的安全施工和顺利营运, 成为当前地铁建设中亟待解决的难题。

长期以来, 人们对浅层气的研究主要将其作为一种传统能源, 集中于气体的分布、开采与利用等方面的研究, 而对于含浅层气地层对土木工程结构及构筑物影响的研究尚不多见。近年来, 随着工程建设领域的拓宽和地下空间的开发, 因遭遇浅层含

收稿日期: 2010-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 40372128)。

第一作者简介: 王勇, 男, 1977 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事特殊岩土力学与工程灾害防治技术研究。E-mail: wang831yong@163.com

气地层而诱发的工程灾害时有发生,如杭州湾大桥在建设过程中遇到浅层气喷发致使勘探作业受阻^[1];安徽沿江水利设施因浅层气地质导致不均匀沉降开裂事故^[2];上海在大规模的开发和利用地下空间过程中,因浅层气释放导致隧道、基坑与沉井施工的恶性工程事故发生,造成了重大经济损失等等^[3]。一些学者开始重视含浅层气地层对土木工程影响的研究,唐益群等^[4]开展了含浅层气土的变形规律与工程危害机制研究,并在工程建设中提出施工前预排气的防灾措施;孔令伟等^[5-6]研究了浅层气井喷对地层的扰动、地基强度变化以及对桩基工程的影响,认为浅层气喷发会导致桩基承载力下降、不均匀沉降或桩腿下沉和产生负摩阻力等危害,提出预先控制性放气与充分考虑不利因素相结合的防灾减灾措施,此外,还探讨了含浅层气砂土的孔压静力触探响应与识别方法^[7];杨静伟^[8]分析了浅层气对于桥梁施工的影响,提出了一些具体施工措施来防治浅层气工程灾害。从岩土工程角度而言,气体释放是浅层含气土层在工程中最常遇的应力路径之一,它对土木工程的危害性主要表现在孔隙中气相变化导致土体性状改变,进而对地下构筑物的受力和稳定性产生影响。为深入揭示这一影响规律,并把握其工程影响程度,以便在实践中采取有效措施来避免工程灾害发生,地铁建设前开展含气土层对隧道等地下构筑物影响的模型试验研究具有重要的意义。

本文以杭州地铁1号线隧道穿越的典型含浅层气地层区段为参考原型,通过室内模型试验,分析气体释放和再回聚条件下含气土层对隧道结构的影响规律,并把握其影响程度。从岩土工程角度,初步探讨浅层含气土地质条件对地铁隧道结构稳定性的影响,为含浅层气地区的地铁设计和施工提供借鉴。

2 浅层气的地质成因及赋存规律

浅层气是指地层沉积物中富含的有机质在还原环境下经厌氧微生物作用而形成的富甲烷气体,是天然气资源的一个重要部分。在我国主要分布于江浙沿海、长江三角洲、柴达木盆地、松辽盆地、渤海湾盆地与南方滇黔粤桂地区的中小型盆地等地区^[9]。杭州地铁所遇的浅层气地层是由杭州所处的独特地理和地质环境所形成的。

2.1 浅层气成因

杭州位于杭嘉平原和萧绍平原、太湖下切河谷和钱塘江下切河谷地带,该地区在地质历史进程中的持续沉降、快速沉积为浅层生物气的形成提供了

重要的条件^[10]。快速沉积作用使大量有机质得以较快埋存,并在持续沉降作用下进入还原环境,为微生物群落的生存和繁殖创造出有利的内部环境和物质条件。杭州地区温暖湿润的气候和温度条件以及近乎中性的水质也为浅层气的生成提供了良好的外部条件。该地区在第四纪的几次海侵、海退中,交替沉积了数套富含有机质的淤泥层和砂层,形成了许多超浅层气藏^[11]。

2.2 浅层气赋存状态

富含有机质的淤泥层是浅层生物气的主要生气层,气体产生后经地层水的溶解和黏土吸附饱和后,形成游离气,后经运移、富集,储集在附近有封闭条件的砂透镜体或砂层顶部聚集成藏。气藏原始剩余压力约为0.12~0.46 MPa,属常压气藏;埋深较浅、一般25~55 m,厚度不一。河漫滩中含砂质透镜体为浅层气的主要储集体,上覆淤泥质黏土层为主要的生气层和封盖层,储集体往往被渗透性较差的黏土所包围,呈大小不等的交叠层状扁豆体、条带状透镜体和薄层砂与黏土互层出现,单个气藏面积不大,在平面上错叠连片形成^[12]。

杭州地铁1号线穿钱塘江区段,勘察报告显示该区段分布有含气压力较高的储气层,气层顶板埋深22~25 m,气压最高达0.4 MPa,而该处隧道中心线位于地下23.5 m,恰在含浅层气土层中穿过。地层由上至下依次为砂质粉土层、砂质粉土夹淤泥质粉质黏土层、淤泥质粉质黏土层、粉质黏土层、粉细砂层和圆砾层,其中粉细砂层系主要的含气土层。

3 试验过程

含气土层是由固、液和气相组成的特殊封闭体,孔隙中的气体释放或重新回聚对隧道结构物的影响实际是一个十分复杂的土与结构相互作用过程,故模型试验以满足主要影响因素的相似性为基础来进行。

3.1 模型装置设计

结合杭州地铁穿越钱塘江区段的实际工况和隧道尺寸及埋深,选定本次试验的几何比尺为1:25,模型外尺寸选取为2.0 m×1.1 m×1.3 m。为模拟地下封闭气藏,模型装置必须对气体进行有效封闭,模型箱槽身设计成上下2部分,如图1所示。下槽填置含气砂土层,上槽填置淤泥质土封盖层,上下槽之间设置一层乳胶膜,以实现向下槽中含气层中气体的封闭。在下槽距离底板8 cm处铺设1层具有一定刚度的多孔板,上铺设多目滤网防止土粒漏失,多孔板与槽底之间构成水槽并与外部提供水源的水

箱相通。模型槽由钢框架组成，槽壁安装透明有机玻璃，便于观测隧道及土层变化。

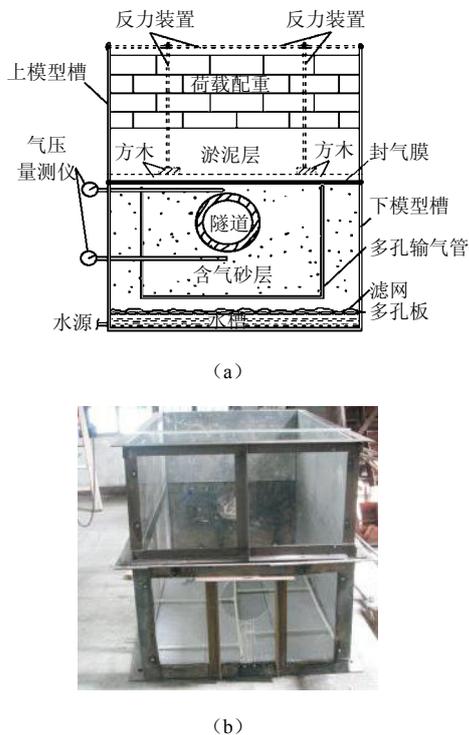


图 1 模型试验箱结构及实物
Fig.1 Structure of model testing box and the real

3.2 材料选择与制作

隧道原型设计管片环外径为 6.2 m，内径为 5.5 m，壁厚 350 mm，幅宽 1.2 m。管片结构由 1 个封顶块 (F 块)、2 个邻接块 (L 块) 和 3 个标准块 (B 块) 通过 M30 螺栓连接构筑成衬砌环，接缝采用遇水膨胀止水条防水。考虑到隧道衬砌刚度较大，整个受力变形应在弹性范围内，利用方程分析法可得出隧道模型应满足的相似条件， $C_l = 25$ ， $C_\rho = 1$ ， $C_E = 25$ 和 $C_\mu = 1$ 。选取外径为 250 mm，壁厚 12.5 mm 的成型 PVC-U 管材作为隧道模型材料。试验测得其抗拉 (压) 强度 $\sigma_m = 45$ MPa，弹性模量 $E_m = 3.138$ GPa，密度 $\rho_m = 14.6$ kN/m³，泊松比 $\mu = 0.34$ 。材料密度小于原型混凝土密度为 24.0 kN/m³，采用管外涂刷细铁粉增加配重的方法来满足 $C_\rho = 1$ 的要求。材料实际弹模 E_m 大于满足相似要求的理论弹模 E'_m (1.380 GPa)，为实现相似，在保持材料质量和长度满足相似条件下，通过减小管壁厚度满足截面刚度 EI 相似的方法来实现^[13]。将 PVC-U 型管按几何比尺加工成模型隧道管片，片与片之间预留钻孔，用 $\phi 4$ mm 钢丝连接并用硅胶灌缝粘结和密封，将管片拼装成整体隧道管段。模型管片加工及拼装如图 2 所示。

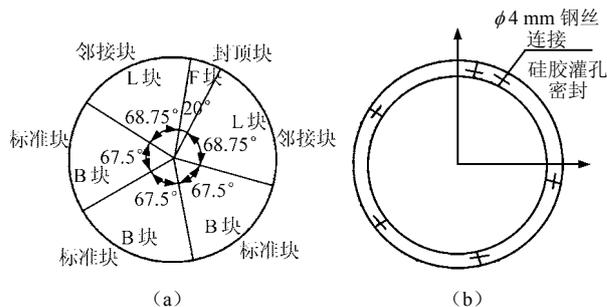


图 2 模型隧道管片加工与拼装
Fig.2 Model segmental ring processing and assembly

模型试验土层概化为 4 层，由上至下依次为砂质粉土、淤泥质黏土、含气粉细砂和圆砾。试验主要关注含气层中的隧道响应，地表变形不作为试验研究的重点，限于室内模型高度，将隧道上覆砂质粉土层和水压荷载采用等量配重替代。因气体释放过程中，外荷载不变，土体不会发生剪切破坏，同时为便于在土体孔隙中充入气体，拟用原型土具有较大的优越性，故试验中隧道外围岩采用现场取回的重塑砂土。根据室内测定含气土层中粉细砂土的土水特征曲线^[14]，推断规模气藏中砂土的初始含水率约在残余含水率 5% 附近，考虑含气土层中气体的连通性，模型试验中粉细砂层的初始含水率按 3% 控制。土层填筑时沿模型箱四周内壁划分网格，按每格填筑土体体积相等来控制土体均匀度。

根据土与隧道相互作用的静力学平衡方程、物理方程和位移方程，以几何相似比 1:25，重度相似比 1:1 为基础，由方程分析法可得各物理量之间应满足的相似指标^[15]，限于篇幅，本文直接给出各物理量的相似常数： $C_{\sigma_s} = 25$ ， $C_L = 25$ ， $C_{EL_s} = 25$ ， $C_{\varepsilon_s} = 1$ ， $C_{P_T} = 25$ ， $C_{\sigma_T} = 25$ ， $C_{E_T} = 1$ ， $C_{\mu_T} = 1$ ， $C_{c_T} = 1$ ， $C_{\phi_T} = 1$ ， $C_{\varepsilon_T} = 25$ ， $C_{\omega_T} = 625$ ， $C_p = 25$ ，其中： σ_s 、 ε_s 为隧道应力和应变； EL_s 为隧道截面刚度； L 为模型长； P_T 为围岩压力； σ_T 、 ε_T 为土中应力和应变； ω_T 为土层位移； C_p 为气藏压力。

3.3 边界控制及加载方式

原型隧道外部受含气土压力的作用，而内部则处于大气压环境中，为实现隧道受力的真实模拟，需将模型隧道伸出试验槽两端槽壁，同时在槽内距离两端槽壁各 20 cm 处将隧道截断，分成中间主体隧道和两端端头 3 部分。端头与槽壁固定，并用密封胶密封，防止漏气。中间主体隧道与端头采用乳胶膜进行柔性连接，确保隧道能自由变形，连接方式如图 3 所示。采用此种方式，既确保了对含气层中气体的有效封闭，也实现了对原型隧道压力环境和边界条件的模拟。同时，将量测隧道变形和内力

的元件布设在模型隧道内壁面，可不受土层中气压变化的影响。

由于浅层气主要成分为甲烷，为爆炸性气体，试验不易控制，故本次试验采用空气替代，气源通过空气压缩机提供。原始气藏压力按 400 kPa 考虑， $C_p = 25$ ，故试验中含气层中初始气压力设为 16 kPa。为尽可能减小铺设隧道上覆土层时对含气土体初始状态的扰动，采取如下措施予以控制：下模型槽中隧道和土层安设完成后，铺设封气隔膜并安装上模型槽、方木和荷载反力装置(图 1(a))，分级施加气压荷载，封气膜下部的气压力由上部铺设的方木及反力装置来平衡，防止气压突破封气隔膜，然后铺设与气压相当的上部土层；依此方式逐级施加气压和上覆土层荷载至预设值，拆除上铺方木及反力架装置，土层稳定 48 h，得到稳定的初始地层。

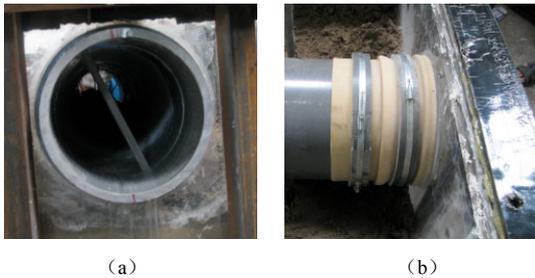


图3 隧道与模型槽连接和柔性边界
Fig.3 Installation of model tunnel and the flexible boundary

3.4 测点布置与量测

为研究含气砂层中气体释放和回聚对于隧道受力和变形影响，试验中含气层中沿深度布置 2 个气压传感器监控土中气压力的变化。为便于分析隧道的整体性能并保证良好的密闭性，在主隧道中部设置 1 个拼装截面，其余部分设为整体截面，两端各设 1 个量测边界效应截面，共计 5 个量测截面，如图 4 所示，图中 3-3 为管片拼接截面，其余为整体管段截面，截面内(外)分别布设土压力、应变和位移监测点。土压力盒 (S1~S11) 布置在隧道外壁，量测围岩压力的变化；应变片 (X1~X12) 贴在量测截面各管片的内壁，各截面对应测点以隧道中轴为中心，按相同角度布置在与中轴平行的直线上，便于各截面间对比；位移量测按拱顶、底和拱腰相间 90° 角布置 WYM-1 型位移计(D1~D10)，记录隧道径向相对变形和整体位移，传感器固定在 1 根独立的刚性杆上，模型隧道安装完毕后，将钢杆连同位移计一起送入隧道至预设截面。钢杆两端伸出隧道，用微调支架支撑，调整支架使其位于隧

道中轴线上，位移计量测的位移即为模型隧道测点产生的绝对位移，位移计安装如图 5 所示。试验数据采集采用 INV306 多通道并行采集，间隔为 120 s。

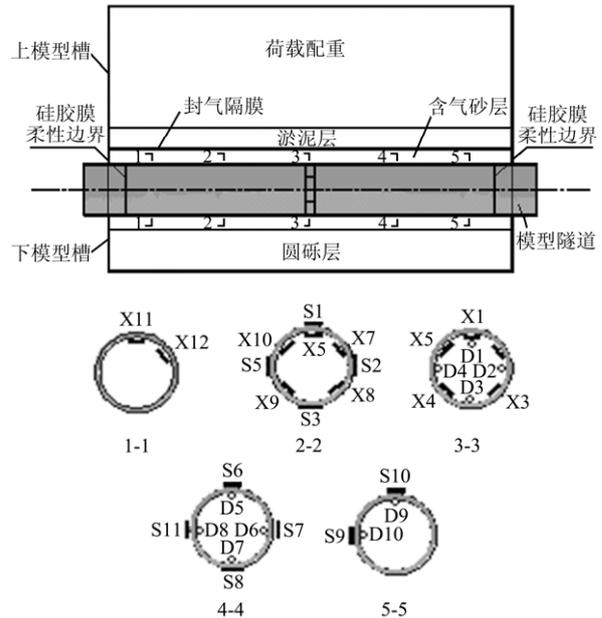


图4 模型试验截面测点布置
Fig.4 Locations of section measurement points

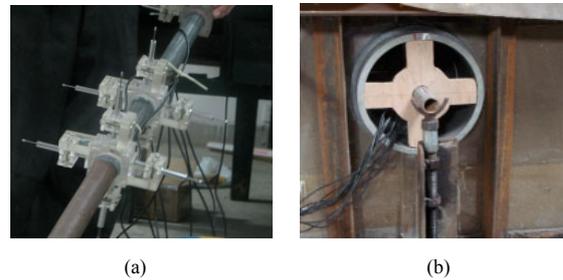


图5 位移计的安装与微调支架
Fig.5 Displacement meters installation and the fine-adjustment bracket

4 试验成果分析

4.1 气体释放和回聚对隧道变形的影响

试验将含气土层中的气体根据气压分 4 级释放完毕，即 16 kPa (原型气压为 400 kPa)~12 kPa (原型气压为 300 kPa)~8 kPa (原型气压为 200 kPa)~4 kPa (原型气压为 100 kPa)~0 kPa (原型气压为 0 kPa)。隧道埋置于含气土层中，由于气体释放将导致孔隙压力的减小，引起土体产生再固结变形，进而导致隧道结构产生附加变形，试验所测隧道截面典型测点位移见图 6 和表 1。由图 6 可以看出，隧道拱顶、底各测点随气压力变化规律一致，说明随着气藏压力的减小，隧道结构出现整体下沉。气体释放初期，伴随气藏压力的减小，隧道沉降速率

较小，随后进入快速增长阶段，当气压力小于 100 kPa 后，附加沉降趋于稳定。隧道拱顶、底测点最终沉降量有所区别，拱顶沉降量较大，而拱底相对较小，说明隧道管片结构产生了沿竖向的径向相对压缩变形，拱顶、拱底测点处管片向内侧变形，同时，量测到拱腰处隧道管片向外侧变形，产生水平方向的径向相对伸长变形。模型隧道整体截面各测点位移均小于管片拼装截面，但两类截面反映出的隧道变化规律是一致的。两类截面间拱底测点位移差距稍小，而拱顶测点位移差距较大，说明隧道截面刚度不同，对隧道拱顶变形影响较大，也即径向相对变形影响较大，而对整体结构沉降变形则影响较小。

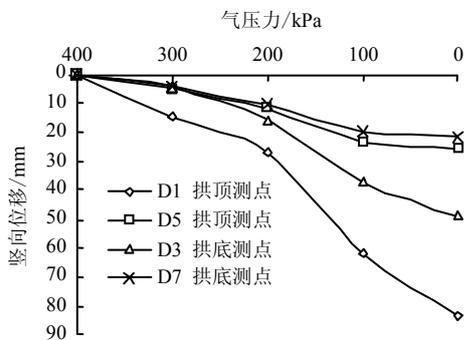


图 6 气体释放过程典型测点竖向位移曲线

Fig.6 Vertical displacement curves of typical measurement points during the gas release

表 1 气体释放引起的隧道变形

Table 1 Measured displacements and deformations of the tunnel during the gas release

气压过程 /kPa	3-3 截面测点位移/mm				4-4 截面测点位移/mm			
	D1	D3	D2	D4	D5	D7	D6	D8
400~300	14.4	-4.1	-11.8	-10.2	4.7	-4.2	-3.3	-3.6
300~200	27.2	-15.8	-17.6	-13.7	11.4	-10.2	-6.7	-5.5
200~100	61.7	-37.5	-19.3	-16.8	23.4	-19.5	-7.2	-6.0
100~0	83.1	-48.9	-20.2	-17.2	25.9	-21.5	-7.4	-6.1
隧道截面变形/mm	整体沉降 66.0				23.7			
管片相对变形/mm	竖向 2.6		0.9					
	水平向 -1.5		-0.5					

注：表中数据均为原型值；位移传感器压缩为正，伸长为负。

从表 1 的实测结果看，气体释放完毕后，隧道截面径向相对变形量并不大，竖向相对压缩量最大为 2.6 mm，水平向相对伸长量最大为 1.5 mm。因此，浅层气气体释放主要使隧道结构产生整体附加沉降，而隧道结构的附加径向相对变形量不大，其

中拱顶位移宜作为工程中变形监测的重点。

若气体释放不充分，后期经运移还可能产生重新回聚，故本次试验还进行了气体再回聚条件下的模型试验研究。基于极端工况考虑，气压重新回聚由 0 kPa（原型气压为 0 kPa）~8 kPa（原型气压为 200 kPa）~16 kPa（原型气压为 400 kPa），实测所得截面典型测点位移如图 7 和表 2 所示。

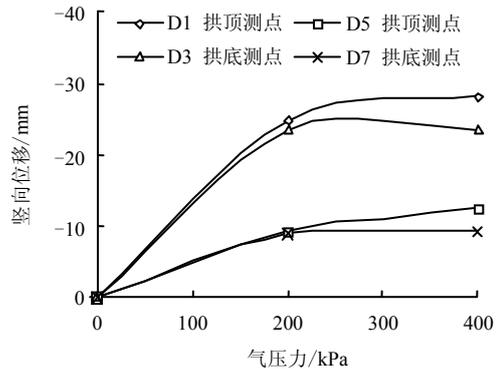


图 7 气体回聚过程典型测点竖向位移曲线

Fig.7 Vertical displacement curves of typical measurement points during the gas re-accumulation

表 2 气体回聚引起的隧道变形

Table 2 Measured displacements and deformations of the tunnel during the gas re-accumulation

气压过程 /kPa	3-3 截面测点位移/mm				4-4 截面测点位移/mm			
	D1	D3	D2	D4	D5	D7	D6	D8
0~200	-24.9	23.4	2.1	4.8	-9.1	9.0	1.3	0.1
200~400	-28.2	23.6	10.5	8.4	-12.3	9.2	4.9	3.3
隧道截面变形/mm	整体上移 25.9				10.8			
管片相对变形/mm	竖向 -1.0		-0.4					
	水平向 0.7		0.3					

注：表中数据均为原型值；位移传感器压缩为正，伸长为负。

从 7 图中各截面测点变化趋势可以看出，随着气压的增大，隧道结构产生了整体上移，主要原因是孔隙压力逐步增大，引起土体有效应力减小，土层产生卸荷回弹变形。隧道拱顶、拱底管片产生径向相对伸长变形，而拱腰处管片则产生了沿水平方向的相对压缩变形。但从表 2 试验实测结果看，无论是隧道结构整体上移变形，还是径向附加变形均小于气体释放过程，说明气体回聚对于隧道结构变形的影响较弱。

4.2 气体释放和回聚对隧道内力的影响

在浅层气气体释放引起隧道结构产生附加沉降的同时，也会使隧道结构产生附加内力，隧道典型

截面测点附加弯矩实测成果如图 8 所示。从图中 2-2 截面和 3-3 截面测点气压从 400 kPa 释放至 0 kPa 过程中的隧道结构附加弯矩变化情况可以看出，随着气压的减小，管片弯矩逐渐增大，2-2 整体截面的最大弯矩为 2.86 kN·m，3-3 管片拼装截面的最大弯矩为 2.01 kN·m。两类截面反映出的隧道响应规律基本一致，但拼装截面的弯矩普遍小于整体截面，说明隧道截面刚度对附加内力影响较大。由于拼装截面在管片铰接接头处刚度大幅减小，传递弯矩和剪力能力有所减弱，导致气体释放过程中管片产生的附加内力较小，但却增大了管片位移和连接螺栓的剪力。从各截面测点产生的附加弯矩值看，气体释放过程引起的隧道附加应力和附加弯矩并不大，均在工程许可范围内。

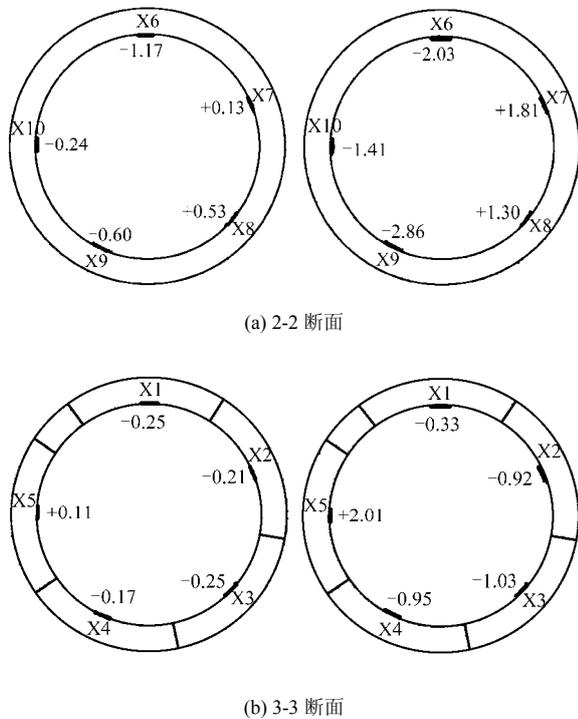


图 8 气体释放过程中隧道截面弯矩变化 (单位: kN·m)
Fig.8 Bending moment changes of tunnel cross-section during the gas release (unit: kN·m)

气体重新回聚条件下隧道结构产生的附加弯矩如图 9 所示。从图中管片拼装截面 2-2、3-3 测点在气压从 0 kPa 重新回聚至 400 kPa 过程中的隧道结构内力变化情况可以看出，随着回聚气压的增大，管片附加内力也逐渐增大，3-3 截面最大附加弯矩为 1.18 kN·m，2-2 截面最大附加弯矩为 1.91 kN·m。从量值来看，截面附加内力较小且均小于气体释放过程，说明气体回聚对于隧道管片内力的影响也不大，但应适度考虑连接螺栓的附加剪应力增量影响。

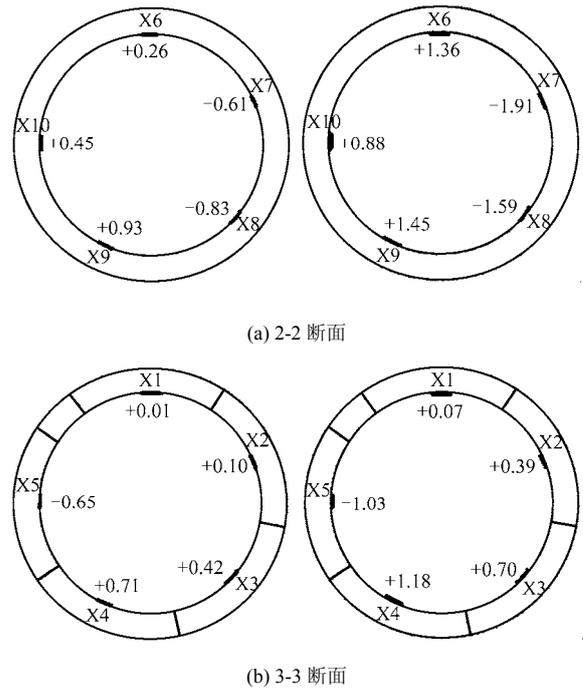


图 9 气体回聚过程中隧道截面弯矩变化 (单位: kN·m)
Fig.9 Bending moment changes of tunnel cross-section during the gas re-accumulation (unit: kN·m)

5 结论

(1) 在含浅层气地层中的地铁隧道，土中气体的释放或回聚将使隧道产生附加变形与附加内力。气体变化过程对隧道相对变形和结构内力的影响较弱，但对其整体稳定性的影响则不容忽视，易引起隧道产生差异沉降、管片环间出现错台或裂缝，导致渗水、渗气，甚至灾害事故的发生。工程设计中应将隧道的整体稳定性作为控制重点，必要时需进行纵向设计验算。

(2) 气体回聚对隧道截面相对变形和管片应力的影响小于气体释放过程且量值不大，但应适度考虑对管片连接螺栓附加剪应力的影响。

(3) 建议在含浅层气地层区间隧道施工前将土层中的浅层气预先有控排放，减小后期土层对地铁整体稳定性的影响。隧道设置必要的变形环，允许其在一定限度内变形；在隧道管片环间螺栓连接处设置弹性垫圈，以吸收轴向的不均匀沉降。加强地铁隧道在施工期和运营期的监测，隧道拱顶位移作为变形监测的重点。

值得说明是，本次试验模拟工况为含气土层中气体释放速度较快，气藏周边水分来不及补给的最不利条件下地铁隧道的响应，故试验中不考虑气藏中水位变化的影响。本文针对含气土层对地下构筑物稳定性的影响开展了初步的室内模型试验研究

尝试, 而对这种特殊地质条件中土与结构物间的复杂作用机制和试验方法还有待于进一步地深入探讨和完善。

致谢: 本次试验是在武汉大学土木建筑学院实验室中完成, 在此向试验室全体工作人员在试验期间给予的热心帮助和指导表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 朱瑶宏, 黄燕庆, 曾洪贤, 等. 杭州湾大桥南岸工程地质特征与浅层气分布[J]. 岩土力学, 2002, 23(增刊 1): 215—219.
ZHU Yao-hong, HUANG Yan-qing, ZENG Hong-xian, et al. Engineering geological features and shallow gas distribution in south bank of Hangzhou bay bridge[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(Supp.1): 215—219.
- [2] 谢承玉. 安徽省沿江软土浅层天然气及其对水工建筑物的影响[J]. 水利水电快报, 2000, 21(10): 11—16.
XIE Cheng-yu. Shallow gas along the Yangtze river in Anhui province and its effects on hydraulic structures[J]. **Express of Water Resources & Hydropower Information**, 2000, 21(10): 11—16.
- [3] 唐益群, 叶为民, 张庆贺. 长江口软土层中沼气与隧道安全施工技术研究[J]. 同济大学学报, 1996, 24(4): 465—470.
TANG Yi-qun, YE Wei-min, ZHANG Qin-he. Marsh gas in soft stratum at the estuary of the Yangtse River and safety measures of construction of the tunnel[J]. **Journal of Tongji University**, 1996, 24(4): 465—470.
- [4] 唐益群, 吕少伟, 叶为民, 等. 浅气层高孔压非饱和土固结规律研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(6): 100—104.
TANG Yi-qun, LU Shao-wei, YE Wei-min, et al. Experimental study on consolidation law of unsaturated soil containing high-pressure gas[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2001, 34(6): 100—104.
- [5] 孔令伟, 郭爱国, 陈守义, 等. 浅层天然气井喷对地层的损伤影响与桩基工程危害分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(4): 375—381.
KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, CHEN Shou-yi, et al. Influence of shallow natural gas blowout on stratum damage and hazard analysis of pile foundation[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2004, 24(4): 375—381.
- [6] KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, CHEN Jian-bin, LIU Guan-shi. On strength property of gassy fine sand and model tests of pile foundation[C]//Proc. of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Osaka, Japan: [s. n.], 2005: 2009—2012.
- [7] 郭爱国, 孔令伟, 陈建斌, 等. 孔压静力触探用于含浅层生物气砂土工程特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 27(8): 1539—1544.
GUO Ai-guo, KONG Ling-wei, CENG Jian-bin, et al. On engineering characteristics of shallow biogenetic gassy sand by piezocone test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 27(8): 1539—1544.
- [8] 杨静伟. 浅层天然气对桥梁施工的影响及施工措施[J]. 石家庄铁道学院学报, 2005, 18(增刊): 34—36.
YANG Jing-wei. Effects of shallow gas on bridge construction and construction measures[J]. **Journal of Shijiazhuang Railway Institute**, 2005, 18(Supp.): 34—36.
- [9] 丁国生. 我国浅层气资源及气藏类型[J]. 天然气工业, 1997, 17(3): 72—74.
DING Guo-sheng. Shallow gas resources and reservoir types in China[J]. **Natural Gas Industry**, 1997, 17(3): 72—74.
- [10] 陈少平, 孙家振, 沈传波, 等. 杭州湾地区浅层气成藏条件分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(2): 85—88.
CHEN Shao-ping, SUN Jia-zhen, SHEN Chuan-bo, et al. Reservoir formation condition of shallow gas in the area of Hangzhou Bay[J]. **Marine Geology & Quaternary Geology**, 2004, 24(2): 85—88.
- [11] 勇振明, 金柏范, 王旭东, 等. 杭州湾地区第四系超浅层气的开发及营销[J]. 天然气工业, 1997, 17(3): 36—38.
YONG Zhen-ming, JING Bo-fan, WANG Xu-dong, et al. Development and marking of the quaternary super shallow gas in Hangzhou Bay area[J]. **Natural Gas Industry**, 1997, 17(3): 36—38.
- [12] 林春明, 蒋维三, 李从先. 杭州湾地区全新世典型生物气藏特征分析[J]. 石油学报, 1997, 18(3): 44—50.
LING Chun-ming, JIANG Wei-san, LI Cong-xian. Analysis on the feature of the typical Holocene biogas pool at Hangzhou Bay area[J]. **Acta Petrolei Sinica**, 1997, 18(3): 44—50.
- [13] 林皋, 朱彤, 林蓓. 结构动力模型试验的相似技巧[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(1): 1—8.
LIN Gao, ZHU Tong, LIN Pei. Similarity technique for dynamic structural model test[J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2000, 40(1): 1—8.
- [14] 王勇, 田湖南, 孔令伟, 等. 杭州地铁储气砂土的抗剪强度特性试验研究与预测分析[J]. 岩土力学, 2008, 28(增刊): 465—469.
WANG Yong, TIAN Hu-nan, KONG Ling-wei, et al. Experimental study and predictive analysis of shear strength characteristics of gassy sand in Hangzhou metro project[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 28(Supp.): 465—469.
- [15] 李永盛, 夏才初. 地下工程测试理论与监测技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 1999.