

福州轨道交通建设中的岩土工程问题*

简文彬^{①②} 李 润^{①②}

(①福州大学岩土与地下工程研究中心 福州 350108)

(②福州大学资源与城乡建设系 福州 350108)

摘 要 由于福州盆地工程地质条件的复杂性以及隧道工程的特殊性,在福州轨道交通建设过程中将遇到大量环境岩土工程问题。主要的环境岩土工程问题有:(1)隧道掘进范围内的承压含水层。承压含水层富水性、透水性强,由于开挖深度大,必须考虑下部承压水的影响,避免产生基坑突涌问题。砂砾卵石层直接覆盖于基岩裂隙热水上,受热水构造带高温热水的直接补给以及热传导,地下轨道交通建设对地热场是否存在影响以及地热对轨道交通的影响需要深入研究。(2)软土的大变形与低强度。导致地基失稳与土体结构强度破坏。(3)深大基坑开挖施工引发的可能灾变。基坑开挖易产生滑塌、流泥、突水(涌)、地表沉陷等问题,必须采取有效的支护措施,避免基坑失稳而影响工程安全及周边环境。对这些环境岩土工程问题,应加强勘察新技术的应用,查明建设场地岩土工程地质条件;采用人工地层冻结法、桩基托换技术进行施工;开发和利用适合本地区岩土条件的新技术、新工艺,如新型桩、新的止水、降水措施等基坑支护新技术,以及采用信息化施工新技术。

关键词 福州轨道交通 工程地质条件 岩土工程问题

中图分类号:P642.1 文献标识码:A

GEOTECHNICAL ENGINEERING PROBLEMS IN FUZHOU RAIL TRANSIT CONSTRUCTION

JIAN Wenbin^{①②} LI Run^{①②}

(①Institute of Geotechnical and Geological Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108)

(②Department of Resources and Urban-Rural Development, Fuzhou University, Fuzhou 350108)

Abstract Due to the fact that the engineering geological conditions and particularity of tunnel projects in Fuzhou Basin are complicated, the corresponding environmental geotechnical problems are emerged in the process of construction for Fuzhou rail transit. The main environmental geotechnical engineering problems are: (1) the confined aquifer within the scope of tunneling boring: The water-bearing capacity and hydraulic conductivity of confined aquifer are strong. As the excavation is deep, the influences on lower confined water must be considered, so that inrush of foundation pit may be avoided. The gravel pebble bed is directly covered on the hot water of bedrock fissure, and it is directly supplied and conducted by high-temperature hot water at the hot water structural belt. The issues, whether the construction of underground rail transit brings impact on geothermal field and what influence does geothermy bring to rail transit, need to be further studied. (2) Large deformation and low intensity of soft soils lead to instability of foundation and damage of the soil structure strength. (3) Deep and large excavation for foundation pits may cause the disasters. The excavation for foundation pits is easy to bring the problems, such as slump, mudflow, water inrush, surface subsidence, etc. . So the effective preventive measures should be adopted to avoid the impact

* 收稿日期: 2010-04-06; 收到修改稿日期: 2010-06-18.

第一作者简介: 简文彬, 岩土工程与工程地质专业. Email: jwb@fzu.edu.cn

on engineering safety and surrounding environment. For these environmental geotechnical problems, new technologies for investigation shall be strengthened to find out geological conditions of the geotechnical engineering at building site; the ground freezing method and technology of pile underpinning shall be introduced for the construction; the new technologies, which are suitable for geotechnical conditions in the region, shall be developed and adopted, such as new piles, new water-seal, ground-water lowering measures and other foundation pit support technologies as well as new technology for information construction.

Key words Fuzhou rail transit, Engineering geological conditions, Geotechnical engineering problems, Tunnel, Foundation

1 引言

随着城市化进程的不断加快和构筑大都市理念的随之崛起,福州市正向地下拓展城市发展空间,已将开发利用城市地下空间纳入城市建设的总体规划,以此作为缓解城市人口、资源、环境三大危机的重要措施和实施可持续发展战略的重要途径。

考虑到建设投资和城市环境的保护,福州市未来的轻轨网络将采用地下、高架、地面相结合的模式进行建设。部分路段以地下轨道穿越福州市区,地铁隧道占位高度在 6m 左右,地下车站深度 15 ~ 20m,隧道埋深约 20m 左右,过江河隧道埋深一般 20 ~ 30m。

近年来,随着城市地铁工程建设的开展,在保证工程自身施工安全的同时,兼顾周围环境岩土工程的安全,已越来越被人们所重视。孙钧院士以上海近年来的地铁工程实践为例,将当前城市地下工程活动的环境岩土工程问题加以总结,归纳了最突出和困难的问题约 20 多处^[1-3]。徐岩等对沈阳地铁一号线建设过程中涉及的环境岩土问题也进行了分析^[4]。由于福州盆地工程地质条件的复杂性以及隧道工程的特殊性,在福州轨道交通建设过程中将遇到相应的岩土工程问题。岩土与建设相互依存、相互制约,因此,研究福州轨道交通建设中的环境岩土工程问题,对轨道交通建设具有重要的实际意义。

2 福州盆地岩土工程地质

2.1 地形地貌

福州市位于闽江下游福州盆地的中部,福州盆地是一山间断块盆地,盆地边缘属剥蚀中-低山地形,海拔高程均在 500m 以上,盆地内有丘陵、残积盆地及冲洪积、海积平原,剥蚀中-低山分布于盆地

的北部、东北部、西南部,高程在 200m 以下。冲洪积、海积平原,自北向南微倾斜且逐渐开阔,高程在 3 ~ 10m; 城区地势平坦,平均高程在 3 ~ 5m^[5]。

2.2 岩土层分布特征

2.2.1 地层结构与岩土特性

福州盆地的基底主要为花岗岩,其盖层主要为第四纪河-海沉积层。该盆地属河-海相沉积,盆地内沉积物种类繁多,结构复杂。根据对福州盆地岩土采样的分析研究,地层结构及其岩土特性大致归纳如下^[6]:

(1)上部为厚度为 20 ~ 30m 的黏性土、淤泥、泥质细砂、杂填土等。其又分为两层:上段为人工杂填土及黏土层,即“地表硬壳层”;下段是含水量为 60% ~ 80% 高压缩性的软弱淤泥层。

(2)中部为厚约 30 ~ 35m 的砂土、淤泥质土和黏性土等。本层埋深较浅,厚度也较大。且在砂土层中多夹有软弱土层。

(3)下部为厚度 20 ~ 30m 的受闽江古河道的影响的泥质砂砾卵石和含砾黏性土,含有碎石圆角砾、泥质圆角砾碎石和含碎石漂石层,且岩性结构变化较大。

福州盆地典型的工程地质剖面示意图 1。

2.2.2 软土及其物理力学性质

福州地区属沿海地带,有大量的软土层分布。根据软土的工程地质特征,福州地区主要是盆地海湾型,为黑色、灰色,质地细腻,厚度大,多在 10m 以上,主要包括淤泥及淤泥质土,对工程建设造成许多不利的影响。

软土的物理力学性质随着深度而变化,其特征具体如下^[7]:

(1)天然含水量高。淤泥的天然含水量多为 50% ~ 80%,液限一般为 40% ~ 70%;淤泥质土的天然含水量多为 35% ~ 60%,液限一般为 30% ~ 50%。

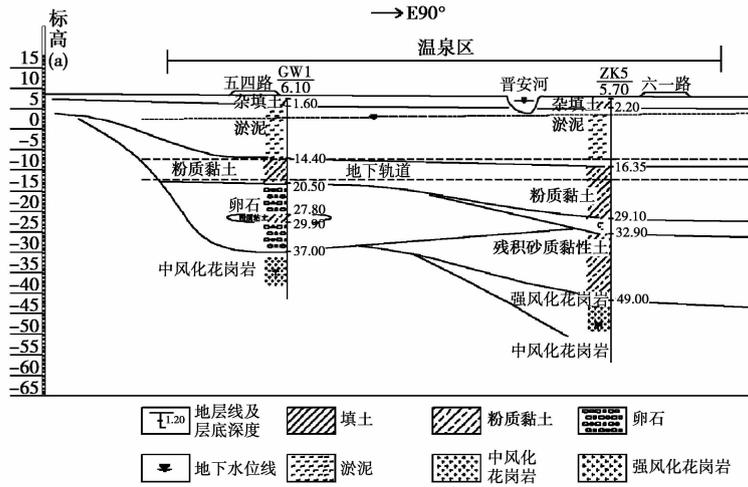


图1 福州盆地典型的工程地质剖面示意图

Fig. 1 Typical profile of Fuzhou Basin

(2)孔隙比大。淤泥的天然孔隙比一般为1.5~2.0。其饱和度一般大于90%，最大达105%；淤泥质土的天然孔隙比一般为1.0~1.5，其饱和度一般大于90%。

(3)压缩性大。淤泥的压缩系数一般为0.5~2.5MPa⁻¹，属高压压缩性土；淤泥质土的压缩系数一般为0.40~1.50MPa⁻¹，也属高压压缩性土。

(4)渗透性差。淤泥及淤泥质土的渗透系数一般为2×10⁻⁷~3×10⁻⁸cm·s⁻¹。

(5)抗剪强度低。以淤泥三轴固结不排水剪为例，黏聚力为10.0~18.0kPa，内摩擦角为8.0~13.0°。

(6)具有一定的膨胀性。淤泥自由膨胀率一般为12%~59%；淤泥质土一般则为12%~46%。

(7)前期固结压力大多比自重压力大，其超固结比值一般为1.1~2.0。

2.3 构造与地震

福州盆地地处我国东南沿海地震带东北端的长乐-诏安断裂带与闽江断裂交汇部位，具有发生中强地震的地质构造背景^[8,9]。长乐-诏安地震活动断裂带，对福州市区影响较大。基本平行于长乐-诏安主干断裂东约50km海中的牛山岛-兄弟屿断裂，它是福建近岸海域内最大的一条第四纪活动断裂，其地震活动强度、频度或地震活动密集地带的分布都远高于长乐-诏安断裂带。

盆地主要为北东东向压扭性断裂及北北西向张扭性断裂，沿断裂带见脉岩侵入，宽窄不一，延伸较

远，岩石破碎，北北西向张扭性断裂构造带内岩石破碎，节理裂隙发育，蚀变强烈，由构造角砾岩等构成，为福州市含热水的主要构造。

2.4 地热与地下水

福州气候温暖潮湿，雨量充沛，为地下水的补给、迳流提供丰富的水源。福州断陷盆地四周为中低山环抱，山区大部分基岩裸露，基岩上有薄层的风化残积层，地下水主要分布于结晶岩断裂带、上更新统洪积、冲积层以及全新统洪积-冲积、海积-冲积层。按照地下水埋藏条件可以区别出四个含水层(带)^[10]。

2.4.1 浅表含水层

这是盆地中部广为分布的，为地形所制约的表层地下水饱和带，其迳流循环深度5~10m，与湖塘及河网地表水混然一体。含水层主要是长乐组最上段具孔隙的冲积-海积相黏土、砂质黏土、淤泥，近闽江河岸及山前带则有洪积、冲积砂砾及残积层。

2.4.2 古断谷-古河道潜水、承压含水层

它局限于沿北北西断层发育的上更新世古河谷以及闽江北岸的埋藏古河道。含水层北部延伸入新店山前的洪积扇群。如果不受到来自深部上升水流的干扰，含水层中的地下迳流会自然的从新店地区流经古断谷，而后进入呈近东西向展布的古河道。后者具有双层承压水层并与闽江河水有不同程度的水力联系。从古断谷第四系之下结晶岩断裂带上升的十分强劲的热流，打乱了该含水系的迳流过程。

2.4.3 浅层脉状含水带系列

一系列与横贯盆地的北东东向断层及脉岩带有

关的裂隙密集带构成这个复杂的、近于平行的含水带系列。富水的裂隙带深度一般不超过200m。脉状水的运动不仅受断层的限制,也受控于地形,总的运动方向与地貌一致。在断谷带因开采而产生的漏斗形成后,闽江以北东西两侧山丘带的浅层脉状水均向古断谷的热热水开采区集纳。

3 主要的环境岩土工程问题

3.1 地热及地下水

地下水主要有上层滞水、浅层孔隙潜水、深部孔隙承压水,以及基岩裂隙承压水。承压水水头一般在地表下3~5m左右。隧道掘进范围内软黏土为不透水性地层,但隧道部分基底为卵石,该卵石层为承压含水层,其富水性、透水性强,部分路段隧道开挖将直接揭露该层。隧道掘进过程中必须及时衬砌,并做好注浆止水,以防砂土、卵石在水头差的作用下产生流砂、管涌、突涌等现象。地下水问题在地下车站基坑开挖中显得尤为突出,由于开挖深度大,必须考虑下部承压水的影响,避免产生基坑突涌问题。

福州市温泉区北起思儿亭,南至象园,西起五一路西,东到六一路东,长5km左右,宽约2km,呈北北西向长条带状展布,以孔深500m温度大于40℃范围计,面积约9km²。其储热层主要为燕山期的花岗岩岩体,上覆40~60m厚的第四系沉积物,由于该层具有隔热的特性,所以在地热田中起到了防止热量散失的作用。其中,砂砾卵石层直接覆盖于基岩裂隙热水上,受热水构造带高温热水的直接补给以及热传导。地下轨道交通建设对地热场是否存在影响以及地热对轨道交通的影响需要深入研究。

3.2 软土的大变形与低强度

福州盆地广泛分布第四系海相沉积的淤泥、淤泥质软土,其流变时效明显,在恒载下将产生较大差异沉降和工后沉降;如不作处理,工程地基的次固结和流变沉降将持续数十年,乃至几十年,或导致地基失稳与土体结构强度破坏。软土存在较高的灵敏度特性,有较明显的触变、流变特性,在施工动力作用下极易造成土体结构破坏,使强度降低,且土体排水固结需要很长时间,如施工不当极易造成工后沉降大和不均匀沉降。

隧道基底以淤泥等为主,强度低、高压缩性,必须验算基底土的强度与变形。软土存在蠕变特性,后期沉降量大,时间长,建成运营过程中会产生较大

变形。国内某些修建于软土地层中的地铁线路已有类似工程问题产生。因此设计施工中对于软土变形问题应该引起足够的重视。

3.3 地表沉降及穿越桩基地段

地下线路施工会引起周围土体内应力场发生变化,隧道基底土体产生回弹,软黏土的触变改变了土体的结构强度,降水引起土层再固结等,这些因素均会对周围环境产生影响。当隧道施工离地面建(构)筑物较近时,会引起地面沉降等问题。虽然盾构法可以将施工对周围环境的影响控制在很小的程度,但不可能完全消除。伴随着盾构推进,一般也会发生地基变形,如开挖面上土水压力不平衡造成开挖面失去平衡,过大的排泥量,盾构推进对周边地层的扰动,地下水位的下降及渗漏水等,这些影响均会在隧道上方一定范围产生松动区,从而引起地面沉降甚至坍塌。

福州轨道交通修建在饱和软土、砂土中,为确保周围环境和隧道施工安全,必须采用适当的施工工艺,控制推进路线和速率,尽量避免扰动周围土体。施工前应详细调查沿线建(构)筑物的使用及分布情况,特别是桩基及地下管线等情况,对影响范围内的邻近建(构)筑物、地面道路及地下管线进行全过程动态监测,尤其是市中心五四路、五一路等老城区。对可能受影响但又不能拆除的建(构)筑物应提前进行补强与保护。

3.4 深大基坑开挖施工引发的可能灾变

由于地下车站一般多集中在闹市区,周边建筑物密集,地下管线多,环境条件复杂,且地下车站埋深大,基坑深,岩土条件差,地下水位高。基坑开挖易产生滑塌、流泥、突水(涌)、地表沉陷等问题,必须采取有效的支护措施,避免基坑失稳而影响工程安全及周边环境。深开挖不良影响或灾害大多发生在施工阶段。主要有:周边地表沉陷导致邻近结构的变形、倾斜或管道破裂;支挡结构位移过大、弯曲,导致地层下陷,支撑系统破坏;地下水突涌、底板上浮;基坑隆起等。

4 对策

4.1 勘察新技术的应用

详细、全面、准确、可靠的岩土工程勘察资料对地铁建设是极其重要的,在此基础上可以对盾构掘

进过程中施工面前进方向可能遇到的不利因素进行超前预报,如地层、障碍物、地下水等情况能够预知,从而能够提前采取相应有效的措施,以保证施工顺利、安全进行。

福州地区应重点查明软土、砂层等的分布情况及其规律,强度及其变形特性,往复循环荷载作用下土的动力特性,砂土的颗粒组成及其渗透性,软土的结构及其蠕变性,砂土液化特性等。

由于室内土工试验的局限性,勘察应大量采用原位测试手段,如旁压试验、扁铲侧胀试验、十字板剪切试验、孔隙水压力量测、静力触探、动力触探等手段,以获取准确可靠的测试数据。由于沿线有大量已建或在建的工程项目,对这些工程资料应充分收集、分析,加以利用,提高勘察精度,也可由此进行分析和采取有效的保护这些邻近建筑物的措施。

此外,应查明和预报地热异常区的特点和分布,在掘进过程中注意高地温的影响,并对混凝土浇筑和养护预先采取防护措施。

4.2 人工地层冻结技术的应用

针对福州软土地层的特点,利用人工制冷技术,使地层中的水变冰,把天然土变成冻土,增加其强度和稳定性,隔绝地下水与地下结构的联系,以便在冻结壁的保护下进行通道施工。

制冷技术是用氟里昂作制冷剂的三大循环系统完成的。三大循环系统分别为氟里昂循环系统、盐水循环系统和冷却水循环系统。制冷三大循环系统构成热泵,将地热通过冻结孔由低温盐水传给氟里昂循环系统,再由氟里昂循环系统传给冷却水循环系统,最后由冷却水循环系统排入大气。随着低温盐水在地层中的不断流动,地层中的水逐渐结冰,形成以冻结管为中心的冻土圆柱,冻土圆柱不断扩展,最后相邻的冻结圆柱连为一体并形成具有一定厚度和强度的冻土墙或冻土帷幕。

4.3 桩基托换技术的应用

地铁线路穿越高层建筑密集区,建设中可能遇到桩基托换工程。桩基托换形式是我国托换技术应用的常见形式。桩基托换的核心技术在于新桩和旧桩荷载的转换,要求在转换过程中托换结构和新桩的变形限制在上部结构允许范围内。针对上述变形的控制,托换的机制可分为主动和被动托换。主动托换主要是在旧桩截桩之前,对新桩和托换结构加载,消除部分新桩和托换结构的变形,使得托换后桩

和结构的变形限制在允许范围内。该技术应用于大轴力、结构物对变形要求严的情况。被动托换是在旧桩切除过程中,将荷载传递到新桩,托换后的桩和结构变形难以控制,该技术适用于小吨位和对结构变形控制不严的情况。

4.4 基坑支护新技术的应用

对于福州市岩土条件复杂、大型的深大基坑,一般可采用排桩或地下连续墙支护,结合内支撑或锚拉,同时必须做好止水帷幕及排水工作。施工时必须对周边环境进行有效的监测工作。由于地下车站多,基坑工程量大,一般常规方法均费用高,周期长,因此,应尽量开发和利用适合本地区岩土条件的新技术、新工艺,如新型桩、新的止水、降水措施等。

桩墙合一技术,将基坑围护结构与地铁车站外墙通过预埋钢筋、接驳器等连接为一体,共同受力。基坑围护结构可以是钻孔桩、连续墙等,但为有效解决防水问题,除连续墙、咬合桩外,其他形式的围护结构外应设置止水帷幕。

由于部分地铁车站深大基坑坑底标高低于承压水水位标高,当下伏承压水的顶托力大于基坑底至承压含水层顶板间的土压力时,应考虑基坑发生突涌的可能,并采取地下水减压或坑底加固措施。

4.5 信息化施工新技术的应用

工程监测涉及的范围大致有三方面,即工程岩土性状受施工扰动影响而引起变化的监测;对施工中和使用中建筑物安全状态的监测;对工程环境,包括工程地质、水文地质、相邻构筑物及地下设施等可能发生变化的监测。

由于福州市地质条件和环境条件十分复杂,工程监测发挥的作用将更为突出。工程监测除了在施工期进行外,对有特殊要求的大型工程还需在运营使用期内继续监测。

应采用最新监测技术,如1)巴塞特收敛系统(Bassett Convergence System)。该系统是美国工程界于20世纪90年代中期推出的隧道断面收敛自动量测系统,由收敛测量、数据采集与传输、数据处理等三部分组成。可记录隧道或其他地下洞室在自身施工或环境施工影响下断面轮廓的变化过程;监测记录隧道受天然滑坡或其他自然力干扰下的变化过程;繁忙运行隧道在安全受到下伏工程施工严重影响时,实行实时跟踪监测,以控制下伏施工强度。2)电水平尺(EL Beam)。电水平尺是美国生产的精

密测倾(角)仪器。若将多支电水平尺串接使用,可准确测出建筑物或地面、道床等的不均匀沉降分布线。易于纳入自动化监测系统,并实现自动报警。

3)固定式测斜仪。可对定点进行连续的自动化监测,利用计算机和通讯技术可实现远距离的数据实时监测。

5 结 语

由于福州盆地工程地质条件的复杂性以及隧道工程的特殊性,在福州轨道交通建设过程中将遇到相应的岩土工程问题。

主要的环境岩土工程问题有:(1)隧道掘进范围内的承压含水层。承压含水层富水性、透水性,由于开挖深度大,必须考虑下部承压水的影响,避免产生基坑突涌问题。砂砾卵石层直接覆盖于基岩裂隙热水上,受热水构造带高温热水的直接补给以及热传导。地下轨道交通建设对地热场是否存在影响以及地热对轨道交通的影响需要深入研究。(2)软土的大变形与低强度。导致地基失稳与土体结构强度破坏。(3)深大基坑开挖施工引发的可能灾变。基坑开挖易产生滑塌、流泥、突水(涌)、地表沉陷等问题,必须采取有效的支护措施,避免基坑失稳而影响工程安全及周边环境。

对这些环境岩土工程问题,应加强勘察新技术的应用,查明建设场地岩土工程地质条件;采用人工地层冻结法、桩基托换技术进行施工;开发和利用适合本地区岩土条件的新技术、新工艺,如新型桩、新的止水、降水措施等基坑支护新技术,以及采用信息化施工新技术,加强施工和运营期间的监测,防患于未然。确保安全施工,尽可能地减小地铁建设对城市环境的影响和破坏。

参 考 文 献

[1] 孙钧. 城市地下工程活动的环境岩土工程问题(上)[J]. 地下工程与隧道, 1999, (3): 2~6.
Sun Jun. Research on environmental soil engineering works during underground construction activities in urban area (I). Undergroud Engineering and Tunnels, 1999, (3): 2~6.

[2] 孙钧. 城市地下工程活动的环境岩土工程问题(中)[J]. 地

下工程与隧道, 1999, (4): 7~9.
Sun Jun. Research on environmental soil engineering works during underground construction activities in urban area (II). Undergroud Engineering and Tunnels, 1999, (4): 7~9.

[3] 孙钧. 城市地下工程活动的环境岩土工程问题(下)[J]. 地下工程与隧道, 2000, (1): 2~7.
Sun Jun. Research on environmental soil engineering works during underground construction activities in urban area (III). Undergroud Engineering and Tunnels, 2000, (1): 2~7.

[4] 徐岩, 赵文, 李慎刚. 地铁建设中的环境岩土工程问题分析[J]. 工程勘察, 2007, (7): 11~14.
Xu Yan, Zhao Wen, Li Shengang, et al. Analysis on environmental geotechnical problems in subway construction. Geotechnical Investigation & Surveying, 2007, (7): 11~14.

[5] 吴振祥. 福州温泉区地下水三维有限元数值模拟与地面沉降研究(硕士论文)[D]. 福州大学, 2003.
Wu Zhenxiang. Three-dimension finite element numerical simulation on geothermal water and land subsidence research of geothermal area in Fuzhou. Fuzhou: Fuzhou University. 2003.

[6] 林晨. 福州盆地工程地质特征及其勘察与施工[J]. 矿产保护与利用, 2002, (5): 52~54.
Lin Chen. Engineering geology features of Fuzhou basin and its exploration and construction. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2002, (5): 52~54.

[7] 简文彬, 吴振祥, 童文德, 等. 静力触探判别软土固结历史[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2166~2168.
Jian Wenbin, Wu Zhenxiang, Tong Wende, et al. Consolidation state of soft soil differentiated by static cone sounding. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2166~2168.

[8] 丁祥焕. 福建东南沿海活动断裂与地震[M]. 福建科学技术出版社, 1999.
Ding Xianghuan. Active fault and earthquake in the southeast coast of Fujian Province. Fuzhou: Fujian Science and Technology Publishing House, 1999.

[9] 陈晨. 福建地区地震活动空间分布及活动断裂特点研究[J]. 地震, 2005, 25(3): 102~108.
Chen Chen. Study on special distribution characteristics of seismic activity and active fault in Fujian area. Earthquake, 2005, 25(3): 102~108.

[10] 杨意德. 福州地区地下室地下水压力计算初探[J]. 福建建筑, 2005, (91): 58~59.
Yang Yide. The study on calculating groundwater pressure on basement wall in Fuzhou. Fujian Architecture & Construction, 2005, (91): 58~59.