

DOI: 10.11779/CJGE2014S2047

东京地下水位上升对地下工程的危害警示

徐光黎¹, 马 郎^{1,2}, 张杰青³, 范士凯⁴, 屈若枫¹

(1. 中国地质大学岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430074; 2. 中南勘察设计院(湖北)有限责任公司, 湖北 武汉 430074;
3. 武汉市建设工程设计审查办公室, 湖北 武汉 430015; 4. 武汉华太岩土工程有限公司, 湖北 武汉 430070)

摘要: 地下工程的修建, 其支挡结构和止水帷幕会人为地改变地下水的环境地质条件。地下水位的变化又不可避免地危害地下工程的施工和运营状况。国内普遍重视施工期的地下水位的控制问题, 而对地下水位上升的影响则罕有研究。日本东京建具有世界上最复杂的地下工程系统, 地下水位在1970年前后发生了质的变化, 中心区地下水位平均上升了15 m, 最大上升了60 m。综合分析了地下水位上升对既有地下工程产生的一系列危害: 漏水、上浮、腐蚀等问题, 威胁工程运营安全, 缩短工程使用寿命。地下水位上升对地下工程的危害巨大, 影响深远, 且消弭难度极大; 应重视未来地下水位的预测及其应对措施。这对于我国沿海城市、内陆盆地、华北地区的地下空间开发利用具有重要的借鉴意义。

关键词: 地下工程; 地下水位上升; 漏水; 上浮; 腐蚀

中图分类号: TU470 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)S2-0269-05

作者简介: 徐光黎 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程、地质工程的教学与研究工作。E-mail: xu1963@cug.edu.cn。

Lessons from impact of rising of ground water level on underground engineering in Tokyo

XU Guang-li¹, MA Yun^{1,2}, ZHANG Jie-qing³, FAN Shi-kai⁴, QU Ruo-feng¹

(1. Engineering Research Center of Rock & Soil Drilling & Excavation and Protection of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Central Southern Geotechnical Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430074, China; 3. Wuhan City Construction Project Design Review Office, Wuhan 430015, China; 4. Wuhan Huatai Geotechnical Engineering Company, Wuhan 430070, China)

Abstract: The geological conditions of groundwater can be changed by the artificial retaining structures and waterproof curtains for underground engineering. In addition, change of groundwater level will impact the construction or operation of underground engineering. Much attention is paid to the dewatering and land subsidence problems, but little paid to the impact of rising of groundwater level. Tokyo has the most complicated underground engineering system in the world. The groundwater level had decreased before 1970 and has risen after 1970. The mean rising is 15 m, while the largest rising, about 60 m, is recorded in the central ward. The impacts on the existing substructures, such as leakage, floating and corrosion problems, are analyzed. It is concluded that it is more important to predict and control the groundwater under operation than that during the construction period because the hazards induced by the rising of water level are more urgent, and it is much more difficult to take countermeasures. The lessons are significant for the development and utilization of underground space, especially in the coastal cities, inland basins and northern regions in China.

Key words: underground engineering; rising of groundwater level; leakage; floating; corrosion

0 引言

随着都市化的快速进程, 兴建了大量的地下工程, 且其规模、深度均逐年增大。地下工程在开挖或运营过程中, 离不开挡土结构和止水帷幕。这些插入到含水层中的结构物, 人为地改变了地下水的环境地质条件。反过来, 地下水位的变化又不可避免地影响地下

工程的施工或运营状况。其影响可能是隐形的、长期的、深远的。地下水控制逐渐成为地下空间开发利用中的一个关键性问题之一^[1-2]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40572152); 武汉市建设科研项目(20123, 武城建[2012]308)

收稿日期: 2014-07-28

地下工程的设计与施工一般是基于现状岩土工程勘察，即现状水文地质条件下进行的，不考虑未来地下水位的变化情况。事实上，地下水位会随着人为工程活动的深度和广度、法规法律的颁布与实施、气候的变化等等因素而产生较大的变化。例如，三峡大坝的修建，在一定程度上改变了长江中下游水位，改变原有的地下水补给、径流、排泄的平衡，对基坑工程的设计、施工产生了一定的影响。由于水法的实施，限制了地下水的开采，目前日本东京的地下水，与1970年前相比平均上升了15 m，最大上升达到了60 m。媒体、研究机构有不少的报道与研究^[2-9]。另外，受全球温室效应影响，引起世界性气候变动。据IPCC预测，1990年—2100年海平面将上升9~88 cm^[10]。海平面的上升也会引起地下水位的上升。同时，随着都市化的进程，地表面被混凝土、沥青覆盖，雨水入渗受阻。暴雨期间，地下排水管网不能排泄大量的雨水，形成内涝。雨水就会对非承压水产生影响，导致地下工程地下水位上升。地下水位的上升，可引起地基的承载力下降、剪切沉降、结构性崩解沉降(collapse subsidence)；大幅度的水位上升，可造成地下构筑物渗漏水、上浮、腐蚀等一系列问题^[2]。

人们普遍重视基坑开挖时的地下水的控制、周边的地面上升问题，而对地下水上升对地下工程危害缺乏认识，没有引起足够的重视^[2]。迄今为止，国内尚无因地下水位上升产生对地下工程影响分析的先例，忽视了它的危害的严重性。

日本东京是世界上地下工程分布最密集、系统最复杂的大都市，在地下空间开发利用上，有很多值得我们借鉴的经验和教训。下文以日本东京地下工程为例，介绍东京地下水位变化概况，并分析地下水位上升对其产生的危害：地下工程漏水、上浮、腐蚀等危害，以期达到他山之石可以攻玉目的。惨重的代价告诫我们：把握环境水文地质条件的变化，对避免工程事故和后工程问题至关重要。

1 东京地下水位上升概况

与 1970 年前相比，东京的地下水平均至少上升了 15 m；市中心的墨田区立花上升约 45 m，新宿区百人町上升 39 m，板桥区富士见町最大上升达到了 60 m^[2-9]。

1.1 东京地层组成

东京处于日本最大的关东平原，周边山体隆起而中心部相对下降的盆地。其地形地貌是由地质构造运动、多次冰期与间冰期、海平面变动综合作用的结果。在地形地貌上可细分为丘陵、洪积扇台地和冲积低地^[6]。

图1为东京区域平面图。图2为从西往东地层横断面示意图。台地的主体是武藏野洪积扇。洪积扇顶最大标高约200m，前缘新宿约40m、洪积扇东端约20m。大型洪积扇中可见数个阶地和关东古土壤层。洪积扇与冲积低地之间存在较大的高差，所以东京地名中有很多带有“坂”的地名。东京低地位于武藏野台地和下总台地之间的江户川、荒川等河流形成的冲积平原区，由三角洲、砂堆、天然堤防、砂丘、人工填埋场等组成。低地标高小于2m；江东区标高为0m，为低地中心地带^[6]。



图 1 东京都辖区地形地貌及地下水观测孔分布^[8]

Fig. 1 Topography and groundwater monitoring wells in Tokyo^[8]

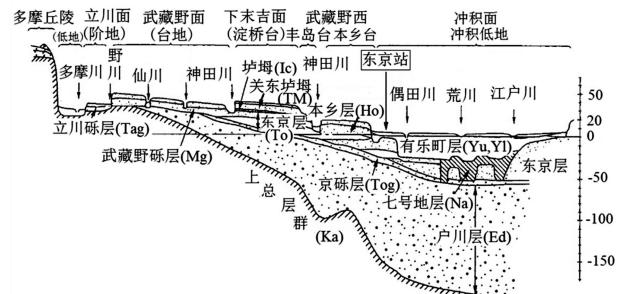


图 2 东京地层横断面示意图^[6]

Fig. 2 Stratum section in Tokyo region^[6]

1.2 地下水位变动概况

地下水位调查区域如图 1 所示区域，包括东京市区和多摩地域的 6 个东京都辖市，面积为 1020 km^2 。在 42 个地点分层布置了 91 口观测井。其中，在 42 口井中设置了连续观测的沉降标^[8-9]。

由观测井得出的承压含水层水位等值线如图 3 所示。2012 年底，足立区东北部地下水位最低，约为 TP-10 m (TP 东京湾平均海面高程)，市区最高+32.46 m；向西依次增高，在多摩地域的八王子市、瑞穗町附近为+80~90 m^[9]。

在 2012 年 1 年中, 全域 42 个地点中有 19 个点地下水位下降, 22 个点上升; 在 91 口观测井中, 有 38 口井水位下降, 最低下降量在调布市^{#3}井, 为 3.98 m,

有 52 口井水位上升, 最大在稻城市, 为 2.68 m。但在东京市区, 24 个地点中有 5 个下降, 18 个上升; 48 口观测井中, 有 7 口井水位下降, 40 口井水位上升^[9], 约 83% 水井水位处于上升状态。

图 4 为东京市区 6 个区的典型地下水位历年变化曲线。例如, 江东区、墨田区的地下水位在 1964 年之前逐年下降, 之后转为上升。1970 年—1983 年地下水位大幅度上升。这与 1971 年开始实行工业用水法, 停止使用一部分工业水源井密切相关。目前仍处在上升态势, 但上升趋势减缓。地下水位上升了 34~49 m, 现距地表以下 1.5~8.2 m 附近^[8]。

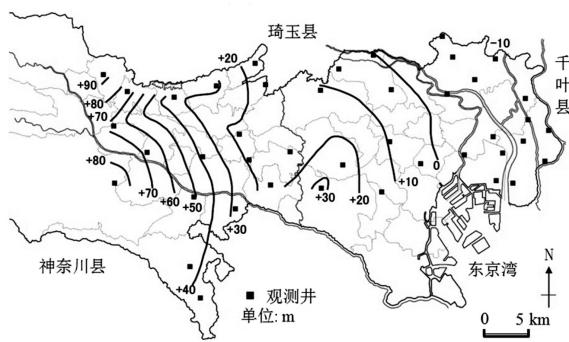


图 3 东京地下水位埋深(2012年底)^[8]

Fig. 3 Contours of underground water level in Tokyo region^[8]

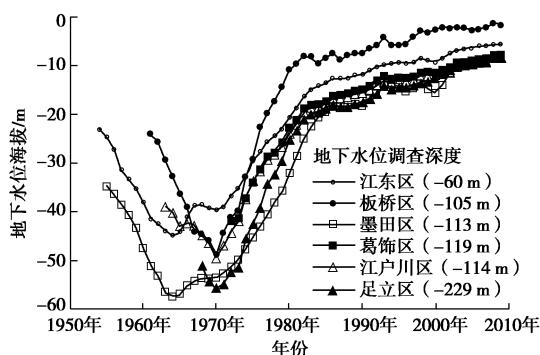


图 4 东京承压地下水位历年变化曲线^[2]

Fig. 4 Curves of underground water level in Tokyo City^[2]

图 5 为多摩地域东北部地下水位历年变化曲线。随着观测井的布设, 自 1973 年起, 对多摩地域的地下水情况逐渐有了了解。因抽取地下水水量的减小, 以及临近琦玉县改用地表水作为饮用水的缘故, 1974 年开始地下水位急剧上升。总体上来说, 地下水位目前处于上升状态。但是, 在 1978 年、1987 年、1990 年和 1994 年, 因严重干旱、地表水源不足而抽取地下水作为生活补充水源时, 地下水位则呈下降状态。由于多摩地域地下水的主要用途为自来水源, 所以容易受供水关系的影响。2012 年, 43 口观测井中, 有 31 口井水位下降, 12 口井水位上升, 但总体上变化幅度不大^[9]。

2 地下水上升的危害

在第二次世界大战结束前后—1970 年期间, 东京随着地下水位的急剧下降, 出现了急剧的地面沉降。最大地面沉降累积达到 4.5 m。但是, 随着地下水位的上升, 地面沉降得到了有效的控制, 甚至出现地面回弹。例如, 在 2012 年, 没有出现地面沉降大于 1 cm 的区域, 最大的沉降区也只有 0.73 cm。相反, 出现了地面回弹, 最大隆起量的多摩市达 0.98 cm^[9]。地下水位的上升, 可导致地下工程的渗水、上浮、开裂或腐蚀等问题。

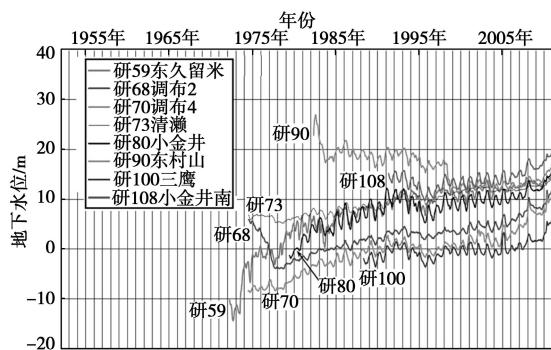


图 5 多摩地域地下水位历年变化^[8-9]

Fig. 5 Curves of underground water level in Tama region^[8-9]

2.1 地下工程渗水问题

当地下水位低于地下工程的底板时, 且对未来地下水上升预期不足时, 设计或施工时可能就会忽视内衬的防水设防。地下水位上升后, 就有可能导致既有地下工程渗水、漏水问题, 产生严重的后果^[2, 6], 增大工程的运营成本。

图 6 为 JR 武藏野线新小平站因水位上升造成挡墙开裂、大量泥水突入的照片。车站被淹没, 铁路停运达 2 个月之久^[2, 6]。据东京交通局 2013 年 3 月的紧急调查发现: 地铁漏水达 2100 处^[11]。



图 6 JR 武藏野线新小平站水灾状况^[6]

Fig. 6 Water inrushing hazard at JR Shin-Kodaira Station^[6]

例如, 东京总武快速线总武隧道, 施工期的地下水位在隧道下方。铁路运营后, 地下水位恢复超过了

隧道的拱顶。从 1970 年代后期开始，出现隧道漏水、轨道腐蚀、钢筋锈蚀等问题。为此，采取了灌浆止水，设置集水桶等临时性措施，以及二次衬砌的永久性措施^[2, 7]。又如，都营三田线每年渗入隧道内的地下水约为 $1.50 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ ，约为东京圆顶球场的 1.2 倍。为此设置的排水泵的电费、排水管等费用，需花费数亿日元之多^[5]。

针对地下工程漏水问题，东京都还专门颁布了《关于地下工程漏水的处治指导指针》。流入地下工程的地下水，无论清浊与否，原则上必须接入下水道。污水的处治费用由地下工程所有者承担^[7]。无疑，从律法角度增加了业主的地下工程运营成本。如 2012 年东京都下水道局处理的下水道水量近 $11 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，征收的费用达 1667.4 亿日元。征收对象主要为井水、施工现场的工程排水、既有地下工程的漏水等。其中，征收最多的就是既有地下工程的漏水处治费用^[11]。

2.2 地下工程上浮问题

随着地下水位的上升，既有的地下工程构筑物可能会因抗浮力不足而出现上浮的问题。

例如，日本东北新干线上野地下车站是最早实施多期抗浮工程措施的车站。隧道埋深 30 m，建设时的地下水位为 -38 m，1994 年上升至 -14 m，2002 年达到了 -12 m 左右，地下水位上升了 26 m。为针对地下水位上升、基础抗浮力的不足，已经实施了二期工程。一期工程在站台与基础之间设置了 $3.7 \times 10^4 \text{ t}$ 的铁块；二期工程在底板上设置了 650 根永久性锚索^[2, 7]。

再如，JR 东京站建于 1914 年，是一个具有日本国家象征意义的车站。随着新干线、地铁等的发展，数度扩建，形成非常复杂的地表、地下立体运输系统。总武线东京站台位于地下 -27 m，1965 年设计时地下水位为 -35 m；1972 年建成时，地下水位在站台之下 8 m。仅仅过了 25 年，1999 年水位就上升了 20 m，超过了站台底板 12 m^[11-13]。地下水漏水量达 $4000 \sim 5000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。同时，站台处于上浮、底板损伤的危险状态；计算结果表明：极限水位为 -14.3 m。为此，总武线东京站台设置了 130 根抗浮永久性锚索^[11, 13]。图 7 为东京车站抗浮锚索图示。钻机置于地下 B4 层，穿过站台的楼板和底板进行施工。锚索长 18 m，采用 9 索 $\Phi 12.7$ 钢绞线，按成孔、灌浆、布索、待注浆硬化后张拉预应力、锁定的顺序进行施工^[13]。与上野地下车站一样，在永久性锚索施工时，必须解决好高承压水条件下的止水问题^[2]。

可见，一旦对未来地下水上升问题认识不足，出现地下结构物上浮、底板损伤问题时，采取后工程的补求措施是相当困难的，不仅工程费用巨大，而且对工程的运营影响深远。

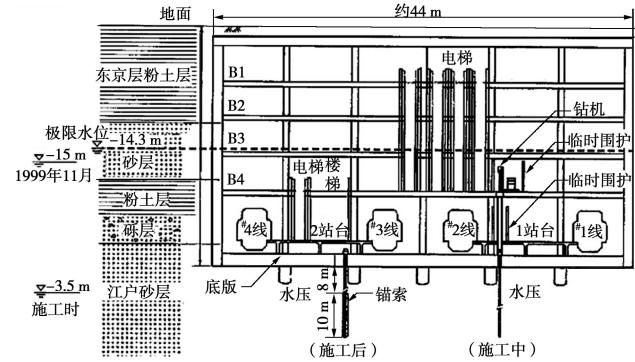


图 7 总武线东京站台抗浮锚索^[13]

Fig. 7 Anchors for rising of groundwater level at JR Tokyo Station of Sobu Line^[13]

2.3 地下工程腐蚀问题

地下水位上升会促进混凝土构筑物，如隧道的劣化、剥离、钢筋腐蚀，缩短工程的使用寿命。

结构物的腐蚀是与漏水相伴相随的。一般的规律是，在不漏水的情况下，混凝土的剥离问题需要 140 a 之后才会出现。但是，在有漏水的情况下，10 a 之后就会出现混凝土剥离问题^[6]。两者差别是非常巨大的。

图 8 为总武快线总武隧道因地下水位上升而造成的漏水腐蚀图示。隧道建于 1965 年—1972 年，施工时地下水位在隧道下方，未实施二次衬砌。之后，地下水位超过了拱顶，出现了渗水（漏）水、泥砂淤积、轨道腐蚀、电缆漏电、管片剥落、钢筋锈蚀等诸多问题。为防治混凝土剥离、钢筋腐蚀问题，确保地下工程的使用寿命，采取了灌浆止水，设置集水桶等临时性措施及二次衬砌的永久性措施^[2, 7]。

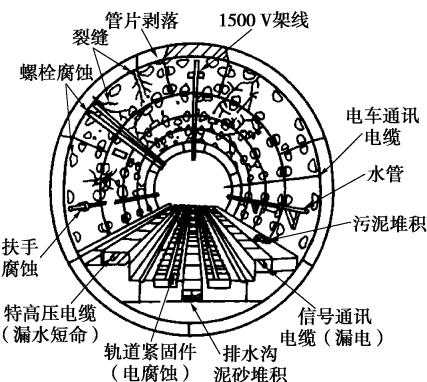


图 8 总武隧道因漏水引起的损坏^[2, 7]

Fig. 8 Tunnel corrosion problems induced by rising of groundwater level in JR Sobe Line^[2, 7]

由上可见，大幅度的地下水位上升对东京地下工程的影响是巨大的；在地下工程运营期间实施补救工程难度极大，而且风险极高。这对中国的地下空间开发利用具有重要的借鉴意义。特别是，在中国沿海城市、内陆盆地、华北平原城市的地下空间开发利用时，尤其需要注意未来地下水位的变动。例如，尽管华北平原地下水位多年来下降很大，但随着南水北调工程

效益的发挥, 地下开采量的减少, 预计将会较大幅度地改变地下水位。应引以为戒。

3 结 论

(1) 在近 100 余年的时间里, 日本东京的地下水位经历了快速下降与上升的变化过程。自 1970 年以来, 中心区的承压水头上升平均 15 m 左右, 最大达 60 m。地下水位的快速下降源于现代工业化的进展, 而地下水的快速上升则源于环保意识的增强、水法的颁布实施的结果。

(2) 地下水位上升可造成既有地下工程开裂漏水、上浮损坏、腐蚀漏电等问题, 极大地影响地下工程的运营安全、缩短结构的使用寿命。在人口密集的都市里, 在复杂的管线系统里, 在狭窄的地下空间里, 实施其补救工程措施是极其困难的, 不尽工期长、耗资巨大, 且工程风险也是巨大的。

(3) 从东京地下工程的经验中知道, 地下水位上升对地下工程的危害是当时设计、施工所始料不及的, 潜在的危害巨大, 影响深远, 且消弭难度极大。因此, 除了重视施工期地下水位下降控制的问题外, 不应仅局限于当前地下水位, 也应注重未来地下水位的预测及其应对措施。对于中国沿海城市、内陆盆地、华北地区, 特别是南水北调工程的受益地区, 更应警觉。

参考文献:

- [1] 范士凯, 杨育文. 长江一级阶地基坑地下水控制方法和实践[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 64 - 68. (FAN Shi-kai, YANG Yu-wen. Groundwater control and practice of deep foundation pits in 1st terrace along Yangtze River[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 64 - 68. (in Chinese))
- [2] 徐光黎, 徐光大, 范士凯, 等. 地下水位变动对地下工程的危害分析[J]. 工程勘察, 待刊. (XU Guang-li, XU Guang-da, FAN Shi-kai, et al. Impact analysis of groundwater flow changes by underground engineering[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, accepted. (in Chinese))
- [3] 産経新聞. 東京の地下水位の上昇が止まらない——東京駅は浮き、地下鉄は漏水[N]. 東京, 2013-6-17(1). (Sankei Daily. Groundwater levels in Tokyo do not stop rising—Tokyo Station uplift and subway leaks[N]. Tokyo, 2013-6-17(1). (in Japanese))
- [4] 読売新聞. 暴れる地下水、60m 上昇も——首都高・鉄道影響[N]. 東京, 2013-4-30. (Daily Yomiuri. Groundwater levels rising in Tokyo[N]. Tokyo, 2013-4-30. (in Japanese))
- [5] 渡辺実. 首都の地下水上升、漏水構造物浮揚の対策急げ[N]. Fuji Sankei Business, 東京, 2013-5-23(14). (Watanabe T. Rising of Tokyo groundwater level, need urgent countermeasures against leakage and uplift problems for substructures[N]. Tokyo Sankei Business, 2013-5-23(14). (in Japanese))
- [6] 東京都地質調査業協会. 技術ノート (No.30) 技術トピック「首都圏を支える鉄道網[R]. 東京: 東京都地質調査業協会, 2001. (Tokyo Geotechnical Consultant Association. Technical Topics (No.30): Railway networks in Tokyo Metropolitan area[R]. Tokyo: Tokyo Geotechnical Consultant Association, 2001. (in Japanese))
- [7] 東京都地質調査業協会. 技術ノート (No.43) 特集: 東京の地下[R]. 東京: 東京都地質調査業協会, 2010. (Tokyo Geotechnical Consultant Association. Technical Note (No.43): Underground of Tokyo [R]. Tokyo: Tokyo Geotechnical Consultant Association, 2010. (in Japanese))
- [8] 川合将文, 川島真一, 石原成幸, 等. 平成 23 年の地下水位変動の特徴[R]. 東京: 都土木技術支援・人材育成センター一年報, 2012. (KAWAAI, KAWASHIMA, ISHIHARA, et al. Characteristics of Groundwater Level Variation in 2011[R]. Tokyo: C.E.S.T.C. Annual Report, 2012. (in Japanese))
- [9] 東京都土木技術支援・人材育成センター. 平成 24 年地盤沈下調査報告書[R]. 東京: 都土木技術支援・人材育成センター一年報, 2013. (Tokyo C.E.S.T.C. Tokyo Subsidence in 2012[R]. Tokyo: Tokyo C.E.S.T.C. Annual Report, 2013. (in Japanese))
- [10] 気象庁ホームページ. IPCC 第三次評価報告書の要約 [DB/OL]. http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc_tar/spm/spm.htm, 2006. (The Meteorological Agency. IPCC 3th Assessment Report[DB/OL]. http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc_tar/spm/spm.htm, 2006. (in Japanese))
- [11] DAILY Yomiuri. Groundwater levels rising in Tokyo[DB/OL]. <http://141414.seesaa.net/article/357660048.html>.
- [12] 宮原啓彰. 地下水位上昇で“潤う”東京都の懐[N]. Tokyo: Daily Diamond Weekly, <http://dw.diamond.ne.jp/articles/-/6438>, 2013-8-2. (Miyahara. Tokyo gain from the groundwater level rising[N]. Tokyo Daily Diamond Weekly, <http://dw.diamond.ne.jp/articles/-/6438>, 2013-8-2. (in Japanese))
- [13] 東京都地質調査業協会. 技術ノート (No.44) 特集: 中央線[R]. 東京: 東京都地質調査業協会, 2013. (Tokyo Geotechnical Consultant Association. Technical Note (No.44): Chuo Line in Tokyo[R]. Tokyo: Tokyo Geotechnical Consultant Association, 2013. (in Japanese))