

地下水の水位変化予測を用いた地下構造物に対する浮力作用評価

○中央大学 学生員 國坂 健人
中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

日本では、戦前より工業用水として安価な地下水が利用されてきた。工業化の進む 1950 年代後半から 1960 年代ごろより、関東近辺の地域で広域な地盤沈下が確認され、海面よりも低い地域が出現した。これを受け行政は各地で地下水の揚水を規制したため、次第に地盤沈下は沈静化した。

一方、揚水規制以降、低下していた地下水の水位回復が見られ始め、地下水の水位が低い時期に地下に建設された構造物に問題が発生し始めた。地下構造物を対象とした駅地下ホームの浮上・水没である。例としては、1991 年に発生した、武蔵野線新小平駅におけるホームの水没事故である。原因として 8 月、9 月における記録的な長雨が影響している。

以上のような背景に基づき、降雨特性による地下水の水位変化が地下構造物に対して影響を及ぼすことは明らかである。

本研究では降雨特性から地下水の水位変化予測を行い、それに伴う地下構造物への浮力作用の影響について評価する。

地下水位上昇に対して地下駅の対策工事を進めている理由から、対象構造物としては、総武快速線東京地下駅と東北新幹線上野地下駅の二駅を指定する。

尚、本研究では浮力に対する対策は行われていないという仮定のもと研究を行った。

2. 地下水の水位変化予測

本研究では地下水位の設定方法の一つである降雨量と地下水位の変動に対し相関性を示し、再現確率降雨量を用いる事で地下水位の上昇予測を行う¹⁾。

(1) 周辺地下水位と降雨の相関関係

対象地下水位としては周辺観測井を用いている。対象は江東区の南砂 1,2、亀戸 1,2、墨田区の吾妻 A,B、両国 1,2、千代田区の千代田 1,2 の 5 ヶ所 10 地点とする²⁾。対象となる月別降雨量は江戸川臨海、東京の二箇所とする³⁾。対象期間は H19 年から H22 年である。以上の条件から周辺地下水位と観測降雨量について、各年度ごとに相関の見られた各月降雨量と、年度毎における最高地下水位の上昇量との相関関係を検討した。

図-1 のグラフは相関関係を検討した観測井 10 地点の中で、相関関係が良い吾妻 A,B、千代田 1 の 3 地点を表している。グラフから吾妻 A は 0.76、吾妻 B は 0.87、千代田 1 は 0.77 と高い相関係数を示すことがわかる。各対象構造物における予測地下水位として観測井との距離から、吾妻 A,B は上野駅、千代田 1 は東京駅とする。

(2) 再現確率降雨量の算定

再現確率降雨量については、公共観測降雨量を基に水文統計ソフト「水文統計ユーティリティ ver1.5」⁴⁾より作成した。使用したデータは東京における 1976 年

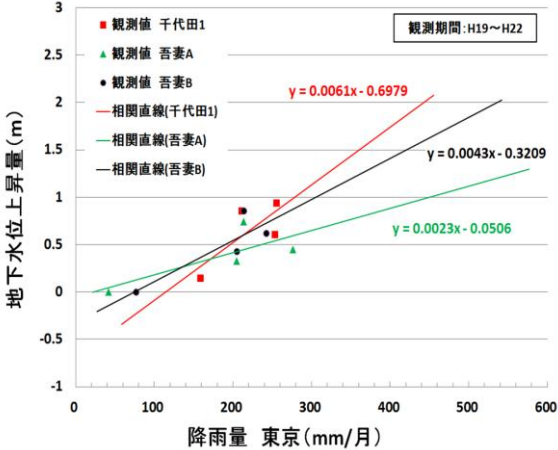


図-1 最高地下水位の上昇量と降雨量の相関関係
表-1 東京における再現確率降雨量(単位: mm/月)

観測地点	東京	東京	東京	東京	東京	東京	
月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	
確率分布	Gumbel	LN3Q	Gumbel	Gumbel	Gumbel	Iwai	
SLSC	0.035	0.046	0.035	0.037	0.033	0.035	
適合度	○	×	○	○	○	○	
確率年	5	78.7	86.4	147.1	163.5	180.7	216.8
	10	102.7	109.6	171.1	195.6	212.6	249.5
	50	155.6	161.7	223.9	266.1	282.7	311.5
	100	178	184.4	246.2	295.9	312.3	334.9
	150	191	197.8	259.3	313.3	329.6	348
観測地点	東京	東京	東京	東京	東京	東京	
月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
確率分布	Gumbel	Gumbel	Gumbel	SqrtEt	Gumbel	SqrtEt	
SLSC	0.026	0.039	0.029	0.038	0.023	0.027	
適合度	○	○	○	○	○	○	
確率年	5	207.1	254.2	276.9	268.5	137.1	79.5
	10	258.4	324.6	332.5	358.1	170.7	110.5
	50	371.2	479.4	455.1	593.8	244.6	193.6
	100	418.9	544.8	506.8	709.1	275.8	234.8
	150	446.7	583	537.1	780.5	294.1	260.4

から 2011 年まで 36 年間の各月降雨量を使用している。本研究では気象庁が発表している確率分布選択のフローチャート³⁾を合わせて用いることで、適切な確率年ごとの降雨量を求めている。

表-1 は対象構造物の耐用期間を考慮し、150 年確率を上限とした確率年別の再現確率降雨量である。

算出結果から 10 月における 150 確率年の降雨量が 780.5(mm/月)と、一番降雨量が多い月となった。本研究では 10 月の確率年降雨量を使用する。

3. 地下構造物に対する浮力作用評価

総武快速線東京地下駅・東北新幹線上野地下駅の躯体と地下水位状況を解析条件とする。それぞれの躯体に対する解析前の地下水位は対策工事開始以前の地下水位を適用する。東京駅が-15.0m、上野駅が-14.1m である⁵⁾。

(1) 浮力作用算定式

本研究では、安原一哉らの論文⁶⁾と Terzaghi の支持力公式を参考に、各躯体に対する沈下量(躯体上昇量)を求めていく。次に基礎式を示す。

キーワード：地下水、浮力作用、地下構造物、確率降雨量

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 tel.03-3817-1816 fax.03-3817-180

$$Se,nc = \frac{qf,nc \cdot q}{Ki,nc(qf,nc - q)} \cdots (1)$$

$$Ki,nc = \frac{Ei,nc}{(1 - \nu^2)B \cdot l\alpha} \cdots (2)$$

$$qf,nc = \alpha c N_c + \gamma_{t1} D_f N_q + \beta \gamma_{t2} B N_r \cdots (3)$$

$$q = \frac{qf,nc}{F_s}, \quad q = \frac{qf,nc}{F_s} - \gamma_w (\Delta h_w - d) \cdots (4)$$

ここで、 Se,nc ：地下水位上昇前の沈下量、 qf,nc ：Terzaghi の支持力、 Ki,nc ：地盤反力係数、 Ei,nc ：変形係数、 $l\alpha$ ：沈下影響係数、 B ：基礎底面幅、 D_f ：根入れ深さ、 α, β ：形状係数、 N_c, N_q, N_r ：支持力係数を表している。

式(1)は地下水位上昇前の沈下量計算式である。沈下量は載荷重／地盤反力係数から求める。これより式(2)、式(3)、式(4)を用いることから沈下量が求められる。

$$Se,oc = \frac{R_q}{R_k} \cdot \frac{qf,nc + q}{R_q \cdot qf,nc - q} \cdot Se,nc \cdots (5)$$

ここで、 Se,oc ：地下水位上昇後の沈下量、 R_q, R_k ：過圧密により発生する係数を表している。

(1)～(4)の式から式(5)の関係式が求められる。(5)の関係式は地下水位上昇比ごとの沈下量式である。

(2)各躯体に対するパラメーター設定

各構造物におけるパラメーターの設定材料として、東京都土木技術センターが調査をしている柱状図を用いた⁷⁾。各柱状図における N 値の加重平均を用いて各パラメーターを設定している。設定基準にはトンネル標準示方書と Terzaghi の支持力公式に用いられる内部摩擦角ごとの支持力係数を用いている。また沈下影響係数は、実際の浮力対策における各対策延長距離から $l\alpha = 1.05$ と定める。

(3)算出結果

結果を図-2、図-3 に示す。解析結果より、建設開始時から設定した現在地下水位までに浮力作用の影響から、東京駅では 1.0m、上野駅では 1.5m 上昇していることがわかる。また図-2 より、一度沈下する現象は水侵沈下が起きているとわかる。実際に下床版の変形、躯体の上昇が起きると予想されている地下水位の位置は JR 東日本のデータ⁵⁾から引用している。

(4)地下水の水位変化予測を用いた評価

図-1 のグラフと表-1 の再現確率降雨量の結果を、各解析結果に当てはめることで、地下水位の上昇による確率年ごとの構造物の災害を検証していく。災害の種類としては「下床版変形」「躯体の浮き上がりの実被害」の二つとする。

表-2 より、東京駅は確率年 5 年で災害が発生することがわかる。上野駅においては確率年 10 年で災害が発生する。東京駅・上野駅ともに「下床版変形」が発生する予測躯体浮き上がり量は 0.06m で発生している。「躯体の浮き上がりの実被害」が発生する予測躯体浮き上がり量は上野駅で 0.13m、東京駅で 0.19m の上昇により発生している。

4. おわりに

本研究では地下水と降雨量の相関関係を用いて予想躯体浮き上がり量と、災害の発生を確率年で表すことを

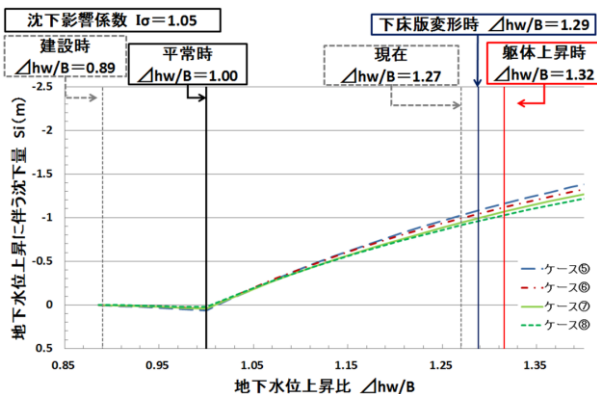


図-2 算定式を用いた解析結果(東京駅)

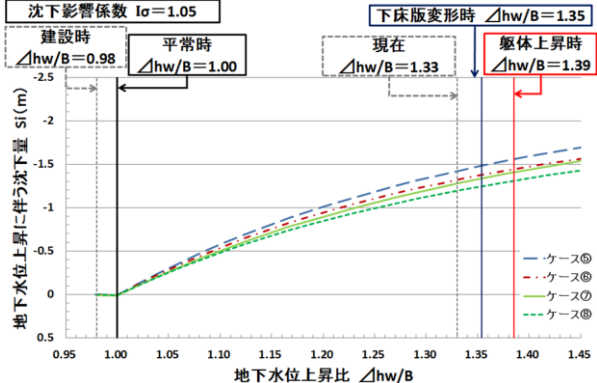


図-3 算定式を用いた解析結果(上野駅)

表-2 東京駅・上野駅の確率年ごとの評価

対象 構造物	現在 地下水位 (m)	対象 観測位	予測地下水位 (m)【確率年】				
			予測躯体浮き上がり量 (m)【確率年】				
			5年	10年	50年	100年	150年
東京駅 (ケース⑤)	-15	千代田1	-14.1	-13.5	-12.1	-11.4	-10.9
			0.06	0.10	0.19	0.23	0.26
上野駅 (ケース⑤)	-14.1	吾妻A	-13.5	-13.3	-12.8	-12.5	-12.4
			0.03	0.04	0.06	0.08	0.09
		吾妻B	-13.3	-12.9	-11.9	-11.4	-11.1
			0.04	0.06	0.11	0.13	0.15

※塗りつぶし(灰色)+下線…下床版変形
※塗りつぶし(赤色)+---枠…躯体の浮き上がり

行った。

確率年ごとの災害発生において両駅とも先に「下床版の変形」が起こる。そのため災害対策における予測躯体浮き上がり量の基準としては 0.06m の躯体上昇量と設定する。結果から、東京駅・上野駅とも地下水位の上昇が引き起こす浮力作用による災害発生確率の高い構造物であると認識できる。

東京都内における他の地下構造物に対しても検討を行うため、準備を進めている。

〈参考文献〉
1)木佐貫徹：東京周辺地盤における地下構造物の設計地下水位設定方法，土木学会論文集 NO.721/V1-57,167-176,2002,12
2)東京都環境局：http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/
3)気象庁：http://www.jma.go.jp/jma/index.html
4)国土技術研究センター：http://www.jice.or.jp/sim/t1/200608150.html
5)倉澤徳男：地下水位上昇に伴う構造物の浮き上がり防止対策事例-東北新幹線上野地下駅・総武快速線東京地下駅-，基礎工 29(11)，72-76，2001-11 総合土木研究所
6)安原一哉：地下水位の変動が構造物に与える影響と対策，地盤工学会誌：土と基礎 60(10)，52-58，2012-10 地盤工学会
7)東京都土木技術支援・人材育成センター：doboku.metro.tokyo.jp/