

消雪井戸を利用した雨水の地下水涵養に関する基礎的検討

地盤工学研究室 丸山達也

指導教員 豊田浩史

1. はじめに

近年、限られた地域に対して短時間に多量の雨を降らせる集中豪雨が多発している。集中豪雨は気象学的には明確な定義はないが、直径 10km から数 10km の範囲に時間雨量 50 mm を超える場合が目安となる。集中豪雨による豪雨災害は国内で 2003 年から現在までの 6 年間では毎年発生し、その数は 8 回にも上る。

県内での集中豪雨では、平成 16 年 7 月に発生した 7・13 水害(新潟・福島豪雨)が記憶に新しい。12 日夜から新潟県中越地方や福島県会津で非常に激しい雨が降り、旧栃尾市(現長岡市)や旧下田村(現三条市)では総雨量が 400 mm を越す記録的な雨量を観測した。被害にあった見附市では、近年の異常気象による局所的な豪雨の増加や市街化の進展で雨水を河川等へ排除できないため、浸水被害が頻発している。

見附市では、雨水貯留管の設備を行っているほか、平成 19 年度から新世代下水道支援制度を活用し、個人が設置する民間雨水貯留槽設置への助成を行い、雨水の流出抑制を推進している。また、見附市は豪雪地帯であることから、道路除雪の有効な手法である消雪パイプが普及しており、消雪用井戸が多数存在する。消雪パイプは克雪対策としては有効であるが、地下水の大量汲み上げによる地下水低下や地盤沈下などが問題となる。

以上の状況を考慮した結果、低コストで機動的な雨水対策であり、且つ地下水涵養や地盤沈下防止などの環境対策にもつながる手法として、雨水を消雪井戸へ注入することにより、「消雪井戸を利用した雨水の地下水涵養」を提案する。

2. 見附市について

見附市は新潟県のほぼ中央に位置し、面積 77.96km²、人口約 43,000 人、平成 20 年度一般会計予算 142 億 3 千万円である。豪雪地帯というこ

ともあり、見附市は消雪パイプの普及が進んでいる。消雪パイプで使用される消雪用井戸も多く有しており、地盤沈下の発生などの問題を抱えている。見附市に設置してある消雪井戸などの概要は表-1 のとおりである。市道と県道をあわせて 388 本もの井戸を見附市は有しており、単純に 1km² あたりに 5 本もの消雪井戸が存在することになる。個人で有するものも含めるとその数は 1,000 本を越える。それゆえに、降雪が観測されると多量の地下水が汲み上げられ、地下には涵養されずに下水に流されるために、地下水位の低下が引き起こされている。

見附市における近年(2004 年 4 月 1 日~2006 年 12 月 31 日)の地下水位の変動と降雨量・積雪量のグラフを図-1 に示す。積雪期には地下水位が大きく低下し(減少期間)、積雪が無くなると急激に地下水位が回復し、その後も次の積雪期までかけてゆっくりと地下水位が上昇しており(回復期間)、毎年同程度まで地下水位が回復している。2006 年から 2007 年にかけては小雪のため地下水の揚水量が減少したため、地下水位の低下も少なくなっている。回復期間と減少期間とでは地下水位差は 20~30m 近くある。

図-2 に 2004 年から 2007 年における地盤沈下量を示す。この 3 年間、地盤沈下量は毎年減少している。特に 2007 年の 1 月から 3 月は記録的な小雪のために地盤が膨張傾向を示している箇所もある。このことから、地下水位の低下と地盤沈下の低下には密接な関係があることがわかる。

図-3 に 7.13 水害時の地下水位と降水量の関係のグラフを示す。12 日の午後 10 時ごろから降雨が観測され、13 日の 8 時ごろには最大降雨量である 44 mm/時の降雨が観測された。それから約 18 時間前後に新町児童公園の地下水位が最大となっている。新町児童公園での地下水位の上昇量は最

も大きく、2mほど上昇している。16日と17日にも20~25mm/時の降雨が観測されたが、これからは大きな地下水位の変動は見られない。これらより、降雨時においても、雨水を井戸に涵養できる可能性があることがわかる。ここで、集中豪雨時に新町児童公園が他とは異なり、地下水位が2m近く上昇した理由として、刈谷田川との距離が近かったことが考えられる。刈谷田川の水位は最大で8.9m上昇しており、地図上では刈谷田川から新町児童公園、見附市役所、ふぁみりあ、見附高校の順で位置しており、地下水位上昇は2.24m、0.89m、0.83m、0.44mとなっている。これより距離が離れるごとに河川水位の影響が少なくなっていることが見てとれる。

3. 実験概要

3.1 実験概要

地下水の涵養とは降水・河川・その他の水源からの水の下方浸透による地下水の補充のことを指す。涵養には人による補助や促進なしに起こる自然涵養と人々が自然涵養のパターンを変化させたときに生ずる人工涵養の2つがある。自然涵養には森林のダム作用等が挙げられ、人工涵養には水田を利用して涵養させる水田法や井戸に注入をする井戸法等が挙げられる。本研究では人工涵養の中でも井戸法を用いている。

また、本研究で用いた井戸は井戸径が15~25cmと小さく、井戸深さが約100mと深い井戸を用いている。ストレーナと呼ばれる切れ込みは深さ37.4~58.6mの間にあり、どの井戸でも20m近く入っている。

3.2 実験手順

注入水である水道水を供給し、水タンクを満たす。

各井戸に水位計を設置し、動作確認を行う。

水タンクから水中ポンプを用いて注入井戸に直接注入・地下水位の計測を開始する。

所定の量・時間の水を注入する。

注入終了後も30分程度地下水位の計測を行う。

3.3 予備実験

見附市の消雪用井戸の適正揚水量は、1~1.5m³/min程度であるが、注入量は揚水量に比べて著しく悪くなるという指摘もあるため、実際の井戸の注入量(透水能力)を現場実験より確認しておく必要があり、2008年9月26日に予備実験を実施した。予備実験では注入水には水道水、注入井戸には見附市役所敷地内の消雪井戸(以後、well-4と称す)を使用した。また、計測には手動地下水位検知計を用いた。

また、透水係数の算出には「(社)地盤工学会：地盤調査の方法と解説」にある「単孔を利用した透水試験」の非常法:直線勾配法¹⁾を使用した。

3.4 本実験

2008年11月12日に消雪用井戸の定常的な注入容量の確認実験を行った。本実験では水位の計測を注入井戸の他、離れた3箇所(井戸)でも計測を行い、地下水の流れを追った(図-4参照)。本実験では実験を3回を行い、注入井戸として、1回目は見附市役所近傍の消雪井戸(以後、well-1)で揚水ポンプをはずした場合、2回目は同じくwell-1で揚水ポンプをつけた(通常時と同じ)場合、3回目は予備実験で使ったwell-4の場合である。本実験でも注入水には水道水を使用した。水位の計測には1・2回目は注入井戸であるwell-1、見附市役所職員駐車場(以後、well-2)、井戸番号107・昭和町消雪組合(以後、well-3)、well-4の4箇所、3回目はwell-2、well-3、well-4の3箇所で行った。また、well-1・well-4は自動記録水圧式水位計、well-2、well-3では手動地下水位検知計を用いて計測を行った。

本実験では注入井戸と他の観測井戸でも水位を計測したので単孔を利用した透水試験の非常法¹⁾・定常法²⁾の他、揚水試験での回復式による方法³⁾、定常状態での理論地下水位線より算出する方法の計4つの算出方法で算出した。また算出する際、消雪井戸の帯水層はストレーナの区間とし、ストレーナの下部を不透水層と透水層の境界とし、

そこから地下水面までの高さを水深とした。

3.5 水質試験

消雪井戸に水を注入し、どれくらいの容量の水を注入できるかという問題とは別に、地下水の水質が汚染されないかも問題となってくる。今回使用する試験方法は直接井戸に水を注入してしまうので、下方浸透による過作用が全く期待できず、水質の悪い注入水を井戸へ注入してしまうと地下水の水質に悪影響を及ぼしかねない。そこで、pH、COD(化学的酸素要求量)、亜硝酸・硝酸性窒素、塩素イオン、BOD(生物化学的酸素要求量)、濁度、色度、SS、VSS、一般細菌、大腸菌という調査項目を行った。今回は水質調査結果の基準として見附市の上水道の基準を参照した。

4. 試験結果と考察

4.1 予備実験

予備実験は注入流量を 214L/min と一定として、注入時間を 5 分、10 分、20 分の 3 ケースを行った。注入井戸は well-4 を使用した。図-5 に注入後の地下水位と経過時間の関係を示す。注入の回数を重ねるごとに地下水位は 1~2cm ほど増え、回復も多少遅くなっている。注入流量が 214L/min 程度であると注入後初期水位まで回復するには 15 分から 30 分要することが確認できた。しかし、総量 7.49 m³ もの水を注入しても問題が生じなかったことより、214L/min 程度の注入量であれば、総注入量が増えても、地下水位の回復・平衡水位との水位差からも、まだ余裕を持って注入を行えているということがわかった。

4.2 本実験

本実験では、注入流量を 1000L/min を目標とし注入をしたが、井戸から水があふれる恐れがあったために調節し、1 回目は平均 655L/min で 60 分、2 回目は平均 381L/min で 29 分、3 回目は平均 770L/min で 60 分注入を行った。図-6 に注入量および地下水位の変化を示す。結果として、ポンプがあることによりその処理能力は半減するといえる。また、注入を連続して行くと、水位の上昇が

続いており、1 回目の結果では、550L/min 程度の注水量で定常状態に至っているようである。しかし、単孔への注入であったため、1,2 時間間隔を空けると地下水位は回復し、再度注入を行うことができる。また、どの試験においてもいえることとして、以下のことがあげられる。注入を 1 時間程度行くと 100m 以上離れた位置でも地下水位が平衡状態になりつつあることが言える。各観測井の水位を比べると距離に応じて上がる地下水位が異なり、距離が遠くなるにつれてその影響が小さいことが見て取れる。注入停止後すぐに地下水位が低下していることから、透水性が良い帯水層であることが言える。このことより、単孔への注入ではあるが、集中豪雨対策にも十分適用可能であるポテンシャルが示された。

4.3 水質試験

消雪井戸より、汲み上げて採取した地下水について水質試験を実施した。試験結果(水道水の検査方法である「水質基準に関する法令の規定に基づき厚生労働大臣が定める方法」および上水試験方法(日本水道協会)などを用いて行った)を表-2 に示す。今回行った実験と見附市の基準の比較を行った項目は、一般細菌・大腸菌・硝酸性窒素および亜硝酸性窒素・ナトリウム・塩化物イオン・pH である。見附市の上水道の基準を多少超過する項目もあったが、水道水の水質に匹敵するくらいきれいなものであることが確認できた。これより、地下水を汚さないように、注入水の水質にも十分注意する必要がある。

4.4 透水係数

原位置注入試験より求められた透水係数の結果を表-3 に示す。揚水試験(回復法)を用いた場合、他の手法より大きな透水係数を算出した。透水試験の目安⁴⁾より、概ね砂や礫($k = 10^{-5} \sim 10^{-4} \text{m/s}$)ではないかと推測できる。

5. 注入できる降雨量の評価

今回の実験では地下への注入処理能力を検証したが、今後はこの注入水を雨水とすることで豪雨

対策として消雪井戸を利用していきたい。そこで、雨水を収集するとなると考えられるのが家屋などの建物の屋根に降った雨水を配管を利用して消雪井戸へ注入する案である。建物の屋根で雨水を収集し、それを 100%消雪井戸へ注入するという仮定の下、試算を行う。

今回は収集箇所には見附市役所の本館の屋根を用いた。ここで、見附市役所の屋根面積は地図を用いて敷地面積を測り、その値を屋根面積として計算した。見附市役所の本館の面積はおおよそ 1,550m²であった。計算に用いた注入水処理能力は予備・本実験ともに平均注入量が一番多かった well-4 (注入水処理能力：46.2m³/hr) を使用し、これを消雪井戸の最大注入水処理能力とし、以下の式で許容降水量を算出した。

$$\frac{\text{最大注入水処理能力}(m^3/hr)}{\text{屋根面積}(m^2)} = \frac{46.2}{1550} = 29.8(mm/hr)$$

ゆえに、30 mm/hr 程度以下ならば、見附市役所の屋上に降り注いだ雨を、十分に 1 つの井戸で処理することが可能であると言える。

1 つの井戸に水を注入すると周辺の地下水位が上昇する。地下水位の上昇具合はその注入井戸との距離が関係しており、近ければ近いほどその影響は大きく水位が上昇する。実際、消雪井戸に雨水の注入を行う場合は 1 つの井戸だけでなく多数の井戸を用いる。しかし、あまりにも距離が近いと本来の注入水処理能力が発揮されない。そこで、1 つの井戸に注入を行った場合、地下水位上昇の影響が及ばない距離 (影響半径 r) を算定してみる。well-4 において、水位が地表面まで上昇したと仮定して、定常状態時に水位上昇が well-4 での 5%となる位置を影響半径 r とすると、175.9m であった。注入井戸周辺は仕方ないとしても、あまりに地下水位が上昇しすぎないようにするには、この影響半径を考慮して、注入井戸を決定する必要がある。なお、実際に注入する場合には、地下水位の観測も行い、その地域の地下に貯められる

水量を把握する必要もあろう。

6. 結論

- 1) 消雪井戸の注入能力は雨水対策に十分に有効な能力を持っており、井戸・方向により大きな透水係数の違いは見られない。
- 2) 揚水試験 (回復法) を用いた場合、他の手法より大きな透水係数を算出した。この手法を用いるには、注入井戸にもっと近い位置での地下水位を計測する必要があると思われる (今回は 100m 以上離れていた)。
- 3) 見附市の地下水の水質は見附市基準の上水道の水質基準に適應するほど良質であるため、注入水の水質を考慮する必要がある。

以上の結果より、水質問題・注入方法については検討する必要があるが、消雪井戸を利用した雨水の地下水涵養は水害・地盤沈下対策として有効であるといえる。

7. 今後の課題

- 1) 今後定期的に雨水水質のモニタリングを実施し、雨水を注入した際に地下水の水質に影響を及ぼさないか検討する。
- 2) 複数井戸での同時注入試験を実施し、水位の挙動を確認し、解析を実施する。
- 3) 具体的な雨水収集方法・注入方法を検討する。

謝辞

水質試験においては、長岡技術科学大学環境・建設系水圏環境制御工学研究室 (山口准教授) の支援の下、実施することができた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，p.379，2004.
- 2) 同上 1)，pp.379-380.
- 3) 同上 1)，pp.397-399.
- 4) 地盤工学会：土質試験の方法と解説 (第一回改訂版)，pp.334-338，2000.

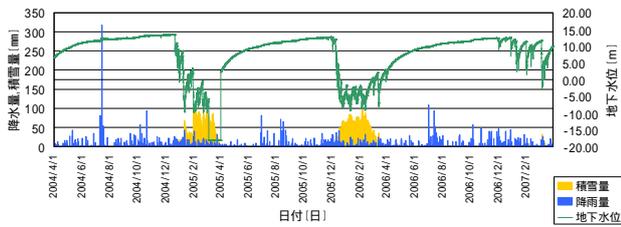


図-1 地下水位と降雨・積雪量(04.4.1～06.12.31)

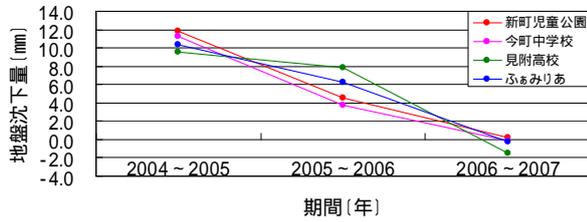


図-2 地盤沈下量(2004～2007)

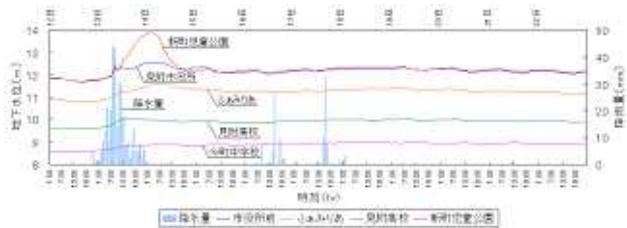


図-3 7.13 水害時の地下水位と降水量



図-4 井戸の配置

表-1 消雪井戸の概要

			H20.4.1現在	
	井戸本数(本)	延長(km)	水位・地盤沈下観測井戸	H19年度市役所水位(m)
市道	339	132	市役所内(水位のみ)・新町児童公園内・ふぁみりあ内・見附高校内・今町中学校内 : 計5箇所	最低水位(2月) : -7.40
県道	49	17		最高水位(12月) : 13.42
計	388	149		周辺地盤高: 20.326

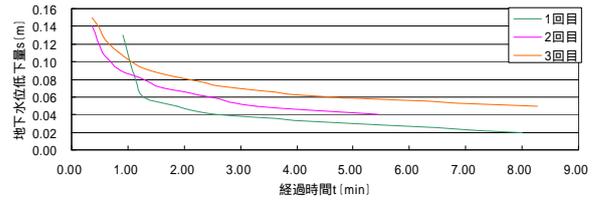


図-5 予備実験結果

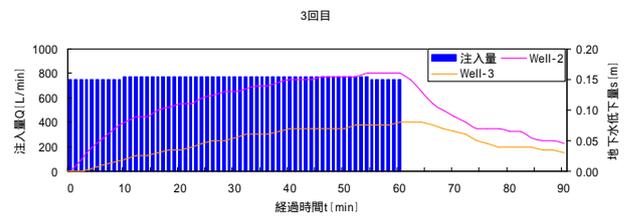
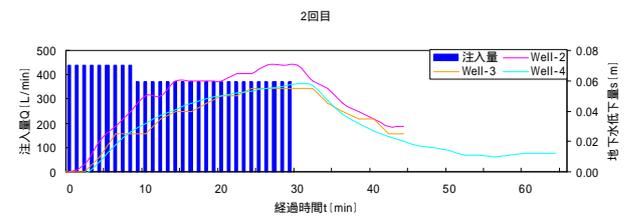
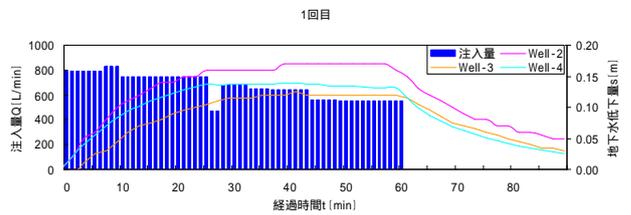


図-6 本実験結果

(上 : 1回目、中 : 2回目、下 : 3回目)

表-2 水質調査結果

No.		No.1	No.2	No.3	
採取箇所		注入水	well-1	well-4	
採取年月日		11月12日	11月12日	11月12日	
pH		6.194	6.539	7.330	
COD(mg/L)	ローレンジ	9	22	15	
	ローレンジ(ろ過)	12	18	19	
0~150					
BOD(mg/L)		1.1867	1.4867	1.1867	
濁度(°)		1.30	10.84	7.03	
色度(°)		14	22	40	
SS(浮遊物質)		3.000E-06	3.400E-05	7.500E-05	
VSS(強熱減量)		3.306E-06	1.254E-05	3.200E-05	
一般細菌(個/ml)		1倍	1.0000	106.5000	49.5000
LB培地(気泡数)		1倍	0(1)	5(0)	1(0)
BGLB培地(気泡数)		1倍	0	0	0
EC培地(気泡数)		1倍	0	0	3
ふん便性大腸菌郡数(MPN/100ml)		0	0	7.8	
イオンクロマトグラフィ(mg/L)		Cl ⁻	18.3	3.4	9.0
		NO ₃ ⁻ -N	1.0	1.1	0.2
		Na ⁺	15.6	11.2	24.8
		NH ₄ ⁺ -N	未検出	未検出	未検出
		Mg ²⁺	3.4	1.6	3.3
		K ⁺	2.3	2.9	9.2
		Ca ²⁺	13.5	4.1	24.6

太文字は基準超過値

表-3 透水係数の結果

注入実験	方法	ケース	対象井戸	k	注入実験	方法	ケース	経路	k
				m/s					m/s
予備実験	単孔 (非定常法)	1回目	well-4	4.358E-05	本実験	揚水試験 (回復法)	1回目	well-1 2	1.114E-03
		2回目	well-4	3.775E-05				well-1 3	1.388E-03
		3回目	well-4	2.782E-05				well-1 4	1.244E-03
本実験	単孔 (定常法)	1回目	well-1	8.620E-05			well-1 2	1.247E-03	
		2回目	well-1	4.932E-05			well-1 3	1.795E-03	
		3回目	well-4	1.085E-04			well-1 4	1.213E-03	
	単孔 (非定常法)	1回目	well-1	1.223E-05			well-4 2	1.065E-03	
			well-2	2.000E-06			well-4 3	1.360E-03	
			well-3	1.038E-06			well-1 2	1.057E-04	
		2回目	well-4	2.392E-06		well-1 3	1.041E-04		
			well-1	1.378E-05		well-1 4	1.049E-04		
			well-2	2.000E-06		well-1 2	5.937E-05		
			well-3	4.365E-06		well-1 3	5.878E-05		
			well-4	4.705E-06		well-1 4	5.904E-05		
			well-2	2.167E-06		well-4 2	1.262E-04		
3回目	well-3	1.528E-06	well-4 3	1.363E-04					
	well-4	2.556E-05							