

遮水壁打設による地下水かん養効果に関する研究
Recharge Effect of Groundwater with Penetration of Cut-Off Wall

徳島大学工学部 正 員 尾 島 勝
徳島大学大学院 学生員 石 川 稔 彦
愛 媛 県 庁 正 員 井 上 芳 孝

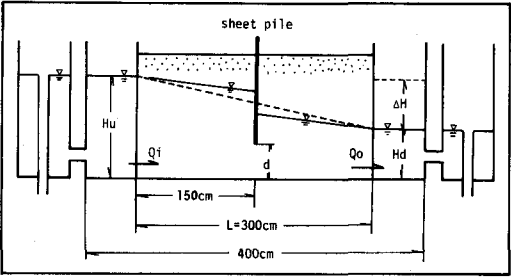
1. まえがき

生活水準の向上，生産活動の進展に伴い，水資源として地下水を利用する傾向は年々強まり，将来の水資源計画を考えると地下水は無視できない重要な位置を占めている。しかし，その反面，地下水利用量の増加は，過剰揚水による水位低下，地盤沈下，海岸部低平地における地下水の塩水化等の問題を発生させ，しだいにそのへい害が深刻化してきている。このような情勢のもとで水資源の確保とこれまでの地下水利用の反省から地下水の人工かん養・地下貯留構想等が打ち出され，地下水の保全と適正利用を図る策が論じられるようになってきた。すなわち，地下水開発は有害な水位低下を生ずることなく，長時間継続して揚水しうるものでなくてはならない。そのためには人工かん養に伴う地下水挙動を十分解明する必要がある，その成果に基づいた開発のあり方が決定されなければならない。

本研究は，不圧帯水層へ遮水壁を打設することによって生じる水位変動と地下水流動量の変化特性に着目して，地下水かん養を砂層モデルによる実験と理論解析の両面から考察したものである。著者らは地下水貯留効果を明らかにするために，砂層モデル実験によってすでにいくつかの成果を得ているが^{1),2)}，その総括として得られた知見を示す。

2. 実験装置および実験方法

砂層モデルは，図－1に示すような長さ400 cm，高さ90 cmの鋼製水槽の中央部の長さ300 cm，幅40 cm区間に高さ35 cmまでフルイ砂を均一に敷き詰めたものである。水槽本体と連結して水頭可変装置を上・下流端に設置し，この装置によって任意の境界水位条件を与えることができる。また，水槽の中央点に所定の開度が得られ，かつ打設速度を任意に制御できる遮水壁打設装置を設置した。なお，実験砂の物理特性は比重2.68，有効径0.34 mm，均等係数2.47，間隙率0.4である。



図－1 実験モデル

実験方法は，所定の動水勾配 $I = (\Delta H/L)$ を与えて初期定常流れを形成した後，遮水壁を所定の開度 d まで打設し，さらに新たな定常流れが形成されるまで通水を行う。水理量の計測は砂層内16測点の水位と上・下流境界水位をマノメータで取り出して，実験開始から8分までは20秒毎に，8分から10分までは30秒毎に，10分以降は1分毎に写真撮影を行う。また，上流側侵入流量 Q_i と下流側流出流量 Q_o を20秒間隔で連続的に計測する。

今回の実験タイプは，表－1に示すように合計6タイプである。A，B，Cタイプは $\Delta H = 10\text{ cm}$ ，すなわち $I = 1/30$ の初期動水勾配を，D，E，Fは $\Delta H = 15\text{ cm}$ ，すなわち $I = 1/20$ の初期勾配をもつ。また，遮水壁打設の開口幅 d は表に示すように打設

表－1 実験条件

実験タイプ	Hu(cm)	Hd(cm)	ΔH (cm)	d(cm)	L(cm)	$I = \Delta H/L$	$n = 1 - 2d/(Hu + Hd)$
A-1 A-2 A-3	29.0	19.0	10.0	10.0	300.0	1/30	0.583
B-1 B-2 B-3	29.0	19.0	10.0	5.0	300.0	1/30	0.792
C-1 C-2 C-3	29.0	19.0	10.0	2.0	300.0	1/30	0.917
D-1 D-2 D-3	29.0	14.0	15.0	10.0	300.0	1/20	0.535
E-1 E-2 E-3	29.0	14.0	15.0	5.0	300.0	1/20	0.767
F-1 F-2 F-3	29.0	14.0	15.0	2.0	300.0	1/20	0.907

完了後の値として10cm, 5 cm, 2 cmとした。

3. 実験結果の考察

3.1 地下水流の解析解

佐藤³⁾は、地下水流中に透水係数の小さい遮水壁を設けた場合、水面形、貯留量・減少量、地下水流流量に関する解析解を導いている。本論では、この解析解に修正を加え、実験への適応をはかる。

水平不透水基盤上の帯水層中に透水係数の小さい遮水壁を全断面で設けた場合、それぞれ遮水壁直上・直下流地点における流入・流出量 q_u' , q_d' は、

$$q_u' = q_d' = \frac{k'}{l_2} m (h_u' - h_d') \dots\dots\dots (1)$$

で示される。ここに、 k' : 遮水壁の透水係数、 l_2 : 遮水壁の厚さ、 m : 帯水層厚さ、 h_u' , h_d' : それぞれ遮水壁直上・直下流地点における水位である。

本実験に使用した遮水壁は、鉄板で地下水流を完全に遮るものである。そこで式(1)を修正して実験への適応をはかる。図-2に示すような遮水モデルを考える。遮水壁直下を通過する流量 q は写像解析から、

$$q = \frac{\pi k_o (h_u' - h_d') m'}{4 \log \cot \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{h_u} \right)} = k m' (h_u' - h_d') \dots\dots\dots (2)$$

で求まる。ここに、 k_o : 帯水層の透水係数、 d : 遮水壁の開口幅、 h_u : 上流側境界水位、 h_u' , h_d' : それぞれ遮水壁直上・直下流地点における水位、 m' : 平均水位、 k : 定数である。

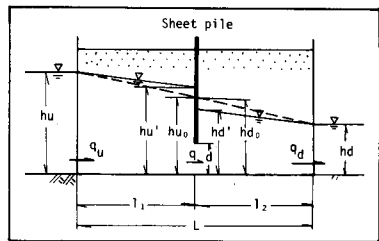


図-2 遮水モデル

解析解を導くための初期条件の設定は、遮水壁打設前の初期定常水面形状を直線分布と仮定した。すなわち、自由地下水流の場合はDupuitの流れになるが、上・下流境界水位差が小さい場合、水面形は直線で近似できるとされているからである。また、数値計算の条件は2節で述べた実験モデルの諸元と同一とし、帯水層の透水係数は $k = 0.18 \text{ cm/sec}$ とした。

3.2 定常状態における水理諸量の考察

(1) 水面形の比較

図-3は、各実験タイプの最終定常水面形を示したものである。縦軸に水位を、横軸に流下距離をとり、図の上部に水位測定点を示してある。

まず、実線で示している遮水壁打設前の初期定常水面形について考察する。水面形は遮水壁の上流側ではやや上に凸の形状を示し、下流側では直線に近い形状を示している。Dupuitの準一様流の仮定による水面形は砂層の下流側よりも上流側でよく適合するはずであるが、実験結果から得られた水面形は、むしろ逆である。次に、砂層上流端近傍(流下距離10cm測点)での水位低下について考察する。図から明らかとなおり、初期動水勾配 I が $1/30$ の各実験よりも

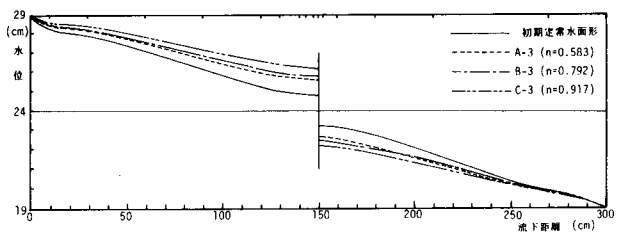


図-3(a) 定常水面形 ($I = 1/30$)

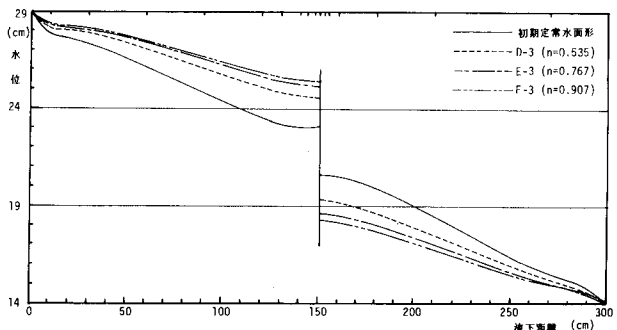


図-3(b) 定常水面形 ($I = 1/20$)

$I = 1/20$ の場合の水位低下量の方が大きいことがわかる。この水位低下は、浸透流が上流側水槽から砂層へ流入する際の形状損失によるものと考えられる。すなわち、初期動水勾配が大きいほど浸透流速は大きく、また最終定常水面形をみても遮へい率が小さくなるほど浸透流速が大きくなり、それだけ水位低下量が増大することを示している。初期水面形に段差が生じているが本研究の目的からすれば不都合な点であり、実験砂層と浸透流特性をよく検討した上で、このような現象の除去を計るように努めなければならない。

最終定常水面形は初期動水勾配が同じであれば打設深さが増すほど、すなわち遮へい率が大きくなるほど初期定常水面形からの変動量は大きくなり、遮水壁の上流側では上昇、下流側では低下する。最終定常水面形の曲率について述べる。図に示されたとおりいずれの水面形も上流側・下流側ともに上に凸となっている。Dupuitの準一様流の仮定では自由水面形状は放物線となるが、この流れの中に遮水壁を打設して流れを遮断しても水面形状はDupuitの仮定に従って変化するから、上・下流側の水面形は放物線形状を示すはずである。したがって、本実験結果についてはDupuitの準一様流の仮定がよく適合していると言える。

理論計算では初期水面形を直線近似と仮定しているが、実験結果の初期水面形は砂層上流端での水位低下、

遮水壁打設地点での段差があり、理論解と実験結果の初期定常水面形に相違が認められる。そこで、遮水壁直上・直下流地点における水位変化量を用いて検討する。図-4は遮水壁直上・直下流地点における水位変化量 $\Delta h_u'$ 、 $\Delta h_d'$ をとり、横軸に遮へい率 n をとって示している。実験値に着目すると、遮水壁直上・直下流地点における水位変化量は初期動水勾配が同じであれば遮へい率が大きくなるほど大きくなり、遮へい率が一定であれば初期動水勾配が大きくなるほど増大することがわかる。実験値と理論値を比較

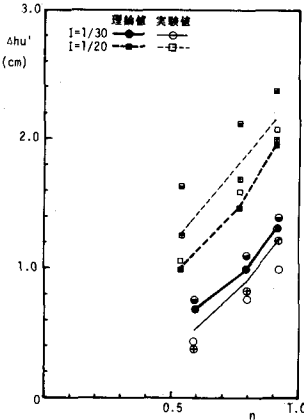


図-4 (a) 水位変化量
(遮水壁直上地点)

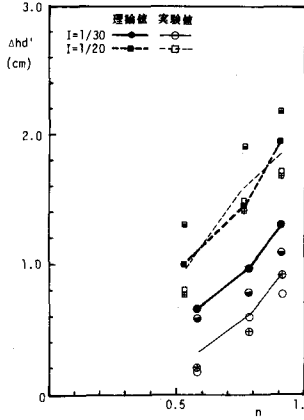


図-4 (b) 水位変化量
(遮水壁直下地点)

すると、実験値は理論値と同じ傾向を示している。上流側水位上昇量についてみると、初期動水勾配 $I = 1/30$ の場合、実験値が理論値に比べやや小さい値となっているが、逆に $I = 1/20$ の場合、理論値の方が実験値に比べ大きい値を示していることがわかる。しかし、実験ケースによっては理論値に近い値があることから、理論値と実験値は比較的良好に一致している。一方、下流側水位低下量についてみると、 $I = 1/30$ の場合、実験値は理論値より小さい値を示しているが、 $I = 1/20$ の場合、実験値と理論値はよく一致していることがわかる。

(2) 貯留量および減少量の評価

貯留量および減少量の定義は、初期定常水面形と任意時刻における水面形を描き、遮水壁打設部で分割されたそれぞれの面積差に帯水層幅の40cmを乗じた値としている。図-5は、定常に達したときの貯留量 S_s 、減少量 W_s を完全止水時の貯留量 S_t で無次元化して縦軸とし、遮へい率 n を横軸にとって初期動水勾配 I をパラメータとして示した

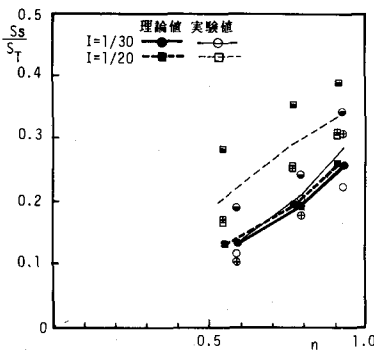


図-5 (a) 貯留量の変化特性

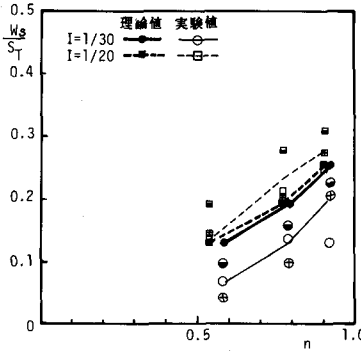


図-5 (b) 減少量の変化特性

図である。なお、 $St = 1/8 (H_u - H_d) \cdot B \cdot L$ である。

まず、実験結果に着目すると、貯留量および減少量は初期動水勾配が同じであれば遮へい率が大きくなるほど大きくなり、遮へい率が一定であれば初期動水勾配が大きくなるほど増大していることがわかる。初期動水勾配 $I = 1/20$ の場合、貯留量および減少量の変化は遮へい率に対してほぼ直線的に増加している。もし仮にその変化が直線式で近似できるならば、遮へい率と動水勾配を与えると貯留量と減少量が計算から求まり、大変実用的である。また、初期動水勾配が同じであれば、貯留量の割合は減少量の割合よりも大きくなり、この結果は実際の現場への適用を考えると好都合なことである。実験値と理論値を比較すると、理論値は実験値と同じ傾向を示しており、貯留量は初期動水勾配 $I = 1/30$ の場合に、減少量は $I = 1/20$ の場合によく合致している。これは、先に述べた遮水壁直上・直下流地点における水位変化特性と同様である。

(3) 地下水流量

図-6は、流出流量の変化特性を表わしたものである。図の縦軸には、初期流出流量 Q_{of} に対する最終定常状態における流出流量 Q_{os} との比 Q_{os}/Q_{of} をとり、横軸に遮へい率 n をとっている。ここでは1より小さくなるが、これは遮水壁による遅延効果を表わしている。

実験結果では、初期動水勾配 $I = 1/30$ の場合、流出流量は遮へい率 n が約58%で約12%、 n が約92%で約26%減少することがわかる。また、 $I = 1/20$ の場合、遮へい率 n が約54%で約18%、約91%で約33%減少している。すなわち、流出流量は初期動水勾配が同じであれば遮へい率が大きくなるほど減少する。これは、遮水壁を打ち込むことにより動水勾配が緩やかになるためである。また遮へい率が一定であれば初期動水勾配が大きいほど減少量は大きい。理論値に着目すると、流出流量は初期動水勾配が同じであれば遮へい率が大きくなるほど減少するが、初期動水勾配が異なっても減少量の割合はほとんど同じである。実験値と理論値を比較すると、初期動水勾配 $I = 1/30$ と小さい場合に良い一致を示しているが、 $I = 1/20$ とやや大きくなると実験値と理論値にへだたりがある。

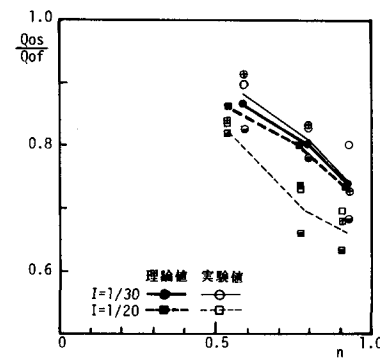


図-6 流出流量の変化特性

3.3 非定常過程における水理諸量の考察

(1) 水面形の比較

図-7は、非定常水面形の一例 ($I = 1/30$) を示したものである。まず、実験から得られた水面形に着目する。図に示されているとおり、遮水壁打設開始と同時にすべての測点で水位は上昇して最高水位に達した後、徐々に低下し、下流側では定常状態に達するまでさらに低下する。一方、上流側では遮水壁打設完了後水位は再び上昇して定常状態に至っている。遮水壁打設開始と同時に水位が上・下流側ともに上昇する現象は、遮水壁打設の際生じる過剰間隙水圧の発生によるものである。実験結果から過剰間隙水圧が消散し始めるのは、最高水位を示す時刻であると判断できる。また、過剰間隙水圧が消散する時刻には、遮水壁の根入れ深さが大きく、浸透水脈が遮水壁によって一時的に遮断されるために上流側では貯留による実質的な水位上昇が生じ、下流側では排水による実質的な水位低下が生じ

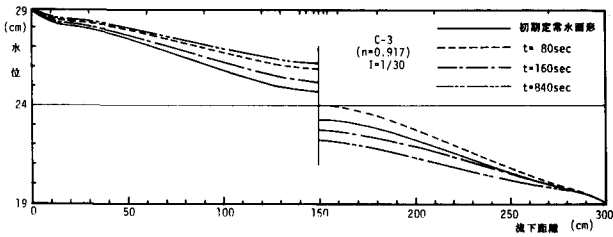


図-7(a) 非定常水面形 (実験値)

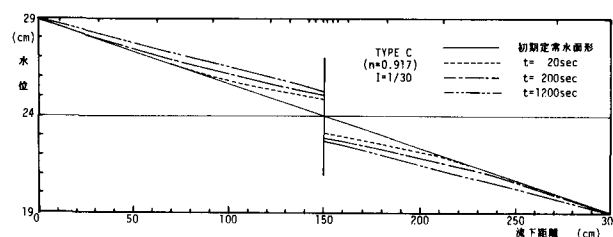


図-7(b) 非定常水面形 (理論値)

ることになる。

次に理論から得られた水面形に着目すると、遮水壁打設開始と同時に水位変化がみられ、時間の経過とともに上流側では水位が上昇し、下流側では低下していく。遮水壁直上・直下流地点における水位変化は、遮水壁打設開始20秒後に最終定常状態のほぼ7割となり、その後徐々に増加する。また、遮水壁打設開始20秒後の水面形は最大の曲率を示し、上流側では下に凸、下流側では逆に上に凸となっている。この時刻の水位変化は砂層全体に及んでおらず、遮水壁近傍の水位変化しかみられない。しかし、遮水壁打設開始200秒後には、砂層全体に水位変化がみられるようになり、水位変化率を徐々に小さくしながら、また水面形の曲率も小さくしながら定常状態に至っている。

実験における水面形の現象変化は実質流量の変化に伴う水位変化に過剰間隙水圧の発生による水位上昇とその消散による水位降下が付加されたものである。したがってさらに詳しく変動特性を考察するためには、遮水壁打設の際に生じる間隙水圧の大きさと実質の水粒子移動による水位上昇高との大きさを定量的に分離することが必要となる。

(2) 貯留量の評価

上述のとおり実験から得られた非定常水面形は、真の地下水面を表わすものではなく、遮水壁打設に伴う過剰間隙水圧の発生とその消散過程をも含んだ水頭分布であり、今回のような実験方法では厳密にこれら両者を分離することはできない。したがって、水面形から得られた貯留量・減少量の経時変化も見掛けのものにしかすぎず、その現象を定量的に評価し難い。ここでは、理論から得られた貯留量の経時変化図から現象を評価する。図-8は、 $I=1/30$ の遮へい率の異なる貯留量 $S_t/S_t \rightarrow 1200$ の経時変化を示している。この図より、貯留量は遮水壁打設開始20秒後に最終状態の約2割になり、その後徐々に増加し、その増加率は時間とともに減少していることがわかる。また、任意の時刻における貯留量の割合は、遮へい率が大きいほど小さい。これは、遮へい率が大きいほど定常状態に達する時間が長いことを示している。

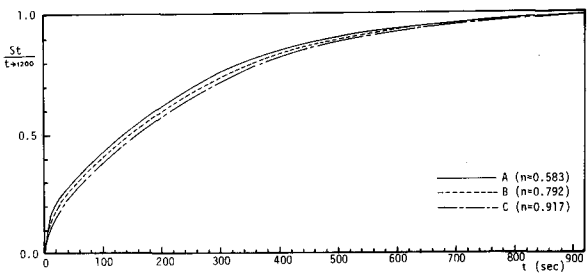


図-8 貯留量の経時変化 ($I=1/30$)

(3) 地下水流量

ここでは、侵入流量および流出流量の非定常過程における変化の様相について考察する。この地下水流量の経時変化は連続条件に基づくものであるから、遮水壁打設による非定常過程を定量的に評価できる。

図-9は、縦軸に初期定常流出流量 Q_{of} に対する任意時刻における侵入流量の比 Q_{it}/Q_{of} および流出流量の比 Q_{ot}/Q_{of} を、横軸に時間 t をとって経時変化を示したものの一例である。実験結果に着目すると次のようなことがわかる。A-2、B-3、D-1、E-2をみると、侵入流量は一度初期侵入流量よりも減少し、その後徐々に増加して定常状態に至っている。C-2、F-3ではそのような現象はみられず、侵入流量は時間の経過とともに徐々に減少して定常状態に至っている。C-2、F-3における侵入流量の減少は他のタイプより遅れており、この現象は遮へい率に関係していると考えられる。これは遮へい率が大きくなるほど地下水流の動水勾配は小さくなり、浸透流速

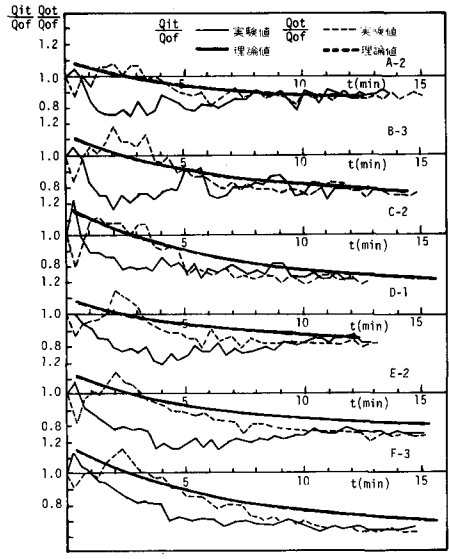


図-9 侵入流量および流出流量の経時変化

が小さくなるからである。一方、流出流量は実験開始後1分～4分間で一度初期流出流量より増加し、その後徐々に減少して定常状態に至っている。これらの現象は、遮水壁打設によって浸透水脈が一時的に遮断され、遮水壁上流側では堰上げ効果によって侵入流量が減り、遮水壁下流側では自由流出と同様の効果によって流出流量が増大するためと考えられる。

次に、各実験における定常到達時刻を図から読み取る。A-2は約8分、B-3は約9分、C-2は約10分、D-1は約9分、E-2とF-3は約12分である。すなわち、定常到達時間は遮へい率が大きくなるほど長くなることがわかる。これは、遮へい率が大きくなるほど浸透流の流下距離は長くなるから、定常状態に至るまでそれだけ多くの時間を要するためと考えられる。すなわち、遮へい率を大きくすることによって地下水流出の遅延効果が期待できる。また、遮へい率が同じであれば、初期動水勾配が大きいほど定常到着時間は長くなることがわかる。

理論値に着目すると次のようなことがわかる。侵入流量および流出流量は、遮水壁打設後、初期流出流量よりも増加し、その後徐々に減少して定常状態に至っている。また、定常到達時間は遮へい率が大きくなるほど長くなるが初期動水勾配には関係しないことがわかる。実験値と理論値の相違は、遮水壁打設時間の相違であると考えられる。すなわち、実験では遮水壁打設完了に約2分間ほど必要であるが、理論では遮水壁を瞬時に打ち込むように取り扱っているからである。

4. あとがき

本研究は遮水壁打設に伴う地下水貯留効果の定量評価という目的に対して、実験段階から一歩進んだ解析に到達できたと思う。しかし、理論解析にはいくつかの仮定があり、実際の生起現象と比較する場合の適合性については、なお十分検討する余地がある。実現象の把握は何よりも重要なことであり、今後とも十分緻密な実験結果の集積を継続するとともに理論的表現の改良に努めたい。

参考文献

- 1) 尾島, 石川, 井上: 遮水壁打設に伴う自由地下水の挙動に関する基礎的研究, 第39回年講
- 2) 尾島, 井上, 花田: 遮水壁打設による自由地下水の貯留効果に関する考察, 第37回中四支部年講
- 3) 佐藤: 遮水による非定常地下水流の厳密解, 土木学会論文報告集, 第330号, 1983
- 4) 佐藤: 部分貫入遮水による地下水挙動の水理解析, 応用地質, 23巻4号, 1982