

減圧井戸の効率に関する実験的研究

正員 箭内 寛 治*

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFICIENCY OF RELIEF WELL SYSTEM

By Kanji Yanai, C.E. Member

Synopsis : This paper describes the results of experiments which were carried out with a hydraulic model to find out the lowering of the artesian pressure at the mid point between well to well and the discharge from a well by setting of the relief well system.

There were differences between these test results and the analytical conclusions and the results of electro analogical tests which had been reported by T.M. Middlebrooks and W.H. Jervis. The author's data were obtained about 25~30% on safety side in $P&D/Q$ curve than their results.

Moreover, he suggested another two methods to raise the efficiency of the well system (setting of the partial drainage layer and utilization of relief pile), and estimated their effects basing on his model test.

要 旨 減圧井戸設置による、不透水層真下の間げき水圧の低下率、井戸よりの排水量のようすを知るために、堤防模型を作成して実験を行なった。今までに報告された解析による理論値、および電気的相似模型実験による値とは多少異なる値となることを確かめ、さらに減圧井戸の効率を高めるために二つの提案（部分排水層の設置、減圧杭の利用）を行ない、それぞれの効果も実験によつて検討した。

1. ま え が き

透水性地盤の上に築造された堤防の法先に、洪水時決潰を導びく危険のある噴砂をとまらぬ漏水の生ずることがあるのはよく知られている¹⁾。一般にアースダムや締切り工事にも、このようなパイピングが起こることがあり、これらを制御する方法の一つとして、透水性地盤中に多数の slit を有する減圧井戸系²⁾ (relief well system) をそう入して、被圧により自噴させ、パイピングを起こす原因となつている間げき水圧を減少させる工法がある。

減圧井戸の構想は、最初インドの Punjab 灌漑局で試験的に実施したものを Middlebrooks, T.A. と Jervis, W.H.³⁾ が、これに追加補正をしてまとめ上げたものである。Middlebrooks たちは、減圧井戸の透水層に対する貫入度 100% の場合は Muskat, M. の計算式⁴⁾ を整理して利用し、貫入が部分的な（たとえば 50% 貫入、25% 貫入など）場合は、解析がなされていないために、電気的相似模型から得られた実験結果を利用して、減圧井戸設計のための参考曲線を作り上げた。しかし容易に想像のつくように、理論曲線には多くの仮定がふくまれている。すなわち境界は半無限であるとか、透水性地盤の上は完全不透水層でおおわれているといつたことである⁵⁾。さらに電気的相似模型実験の場合にも、溶液の拡散⁶⁾、減圧井戸の模型である wire の自己インダクション⁷⁾、実際の井戸なら生ずるであろう各種の損失水頭が現われないなど、多くの要素が複雑に組合わさつて誤差を与える原因となつている。

著者は Middlebrooks たちによつて得られた設計参考曲線を、堤防模型による水理実験を行なつて検討し、ついで同模型を利用して

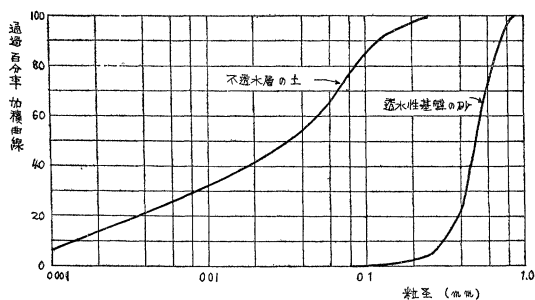
(i) 不透水層中に、減圧井戸の周囲のみ透水性地盤との交流をゆるす人工排水層を設け、減圧井戸の長尺化節減をはかりつつ井戸効率の増加を計画した。

(ii) 減圧井戸の下部に、数多くの針金を束ねた杭を直結し、杭の誘導による透水層下部の集水を試み、その経済的効率の増加を検討した。

2. 試料, 実験装置および方法

堤防模型本体、および不透水層の土として 甲府市

図-1



* 山梨大学助教授, 工学部土木工学教室

郊外のローム、透水性地盤の試料として山梨県釜無川の砂を用いた。その粒度加積曲線を 図-1 に示してある。透水係数は、実は水浸時間によつて変化するので便宜的に、通水し始めてから 5 分, 10 分, 20 分経過した時のそれぞれの値の算術平均をとり、 $2.82 \times 10^{-5}(\text{cm}/\text{sec})$, $4.46 \times 10^{-2}(\text{cm}/\text{sec})$ (17°C) とした。

模型は 図-2 のごとき水槽に、上記ロームで堤防模型を作り、左側から水を供給し右端で排出させている。右端で地表が斜面になっているのは、法尻に高い間げき水圧を生ぜしめる必要があるからで、また解析上の仮定にそうよう、左右端ともに透水層は水の浸入に対し鉛直面にて接するようにする。堤防の法勾配は表、裏法ともに 2 割である。減圧井戸の模型は、直径 5 mm および 8 mm の銅パイプと直径 10 mm のビニールパイプを使用した。またこれらのパイプにはそれぞれ 2.5 mm, 3.0 mm, 3.6 mm の孔を、表面積のほぼ 10% あけ、これに 85 メッシュのスクリーンを巻いた⁹⁾。

減圧井戸は最もパイピングの起きやすい堤防裏法尻線に沿つて、それぞれ貫入度 100%, 50%, 25% の割合で、透水層にそう入する。ここで貫入度とは透水層厚さに対する減圧井戸のそう入深さであつて、本実験では 15 cm そう入すれば、透水層全深さ 20 cm ゆえ 75% 貫入ということになる。次いで減圧井戸には径 4 mm 以下のごく細いガラスパイプを入れて、堤内地地表と同じレベルに井戸水位を保ちつつサイフォンにて排水する。また不透水層真下の間げき水圧を井戸設置点と井戸中間点にて測定するマンメータを埋込む。減圧井戸の位置は、その間隔による効率の変化を知るために 80 cm, 40 cm, 26.7 cm, 20 cm の 4 種の間隔について行い、それぞれの場合の減圧井戸からの排水量、および井戸中間点における間げき水圧を測定していつた。図-2 の平面図に示す点線は

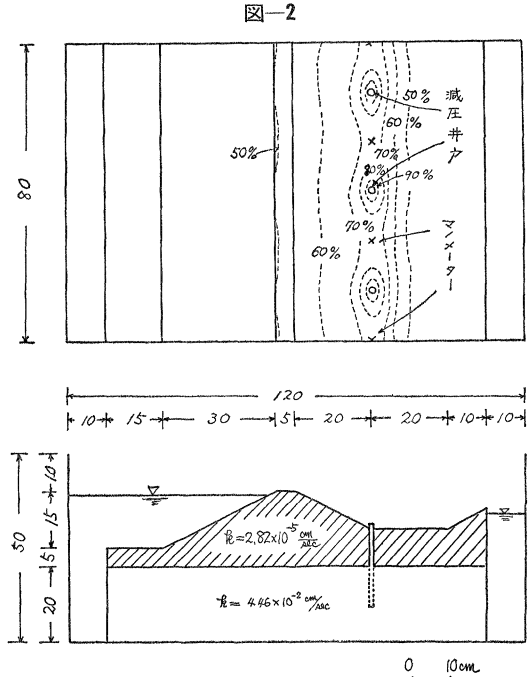


図-2

$$\text{間げき水圧低下率} = \frac{(\text{減圧井戸作用させぬ時の任意地点の水圧}) - (\text{作用させた時の任意地点の水圧})}{(\text{減圧井戸作用させぬ時の井戸地点の水圧}) - (\text{作用させた時の井戸地点の水圧})} = \frac{h' - P}{h'} \times 100\%$$

(ただし記号については 3. 実験結果および考察の項参照)

の等位線を連らねたものである。

3. 実験結果および考察

実験結果を整理し検討して得た結果は次のとおりである。なお、主として使用する記号を次のように決める。

- a : 減圧井戸の間隔
- r_w : 減圧井戸の半径
- Q : 減圧井戸一本当りの排水量
- P : (減圧井戸の作用する時の井戸中間点における不透水層真下の間げき水頭) - (減圧井戸作用する時の井戸地点の間げき水頭)
- h : (堤外地水位) - (減圧井戸の作用する井戸地点の間げき水頭)
- h' : (減圧井戸の作用させぬ時の任意地点の間げき水頭) - (減圧井戸の作用する時の井戸地点の間げき水頭)
- D : 透水性地盤の厚さ
- S : 透水の入口から減圧井戸線までの距離

(1) 単純な減圧井戸について

図-2 および 図-3 は、井戸設置前および井戸を作用させた時の不透水層真下の間げき水圧およびその低下率を、平面と縦断面とで示したものである。これらから、不透水層が模型のように均一な厚さを持つとすれば、井戸設置前にパイピングの危険があるのは、堤防の裏法尻であるし、設置後にそれが問題となるのは、井戸の中間点における間げき水圧であることが明らかとなる。従つて本項では主として井戸中間点に焦点を当てながら減圧井戸の効率に大きな影響をおよぼす要素を追求してみよう。

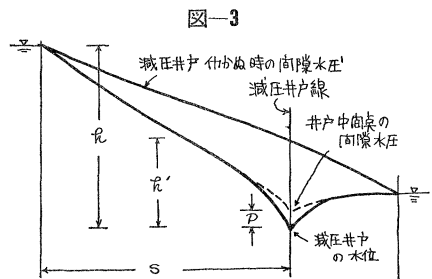
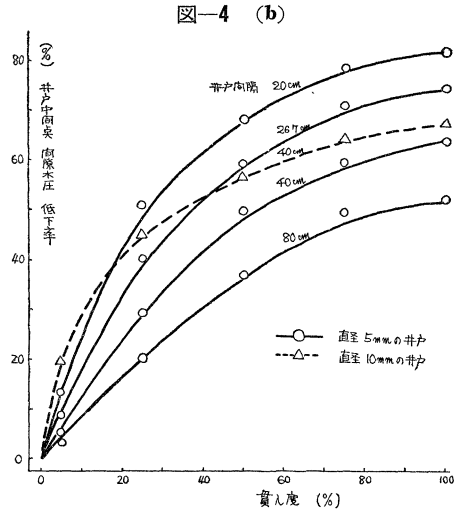
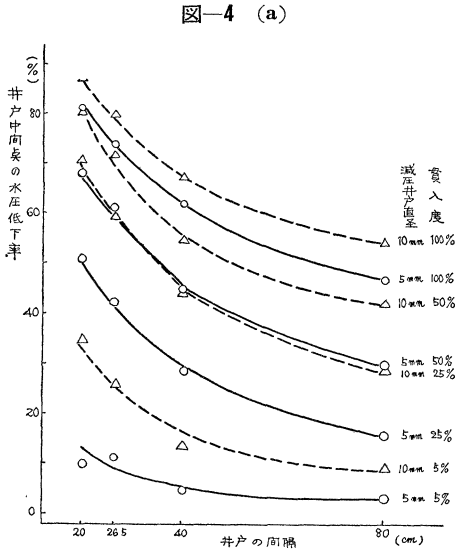


図-3

図-4 (a) は、中間点の間げき水圧低下率と井戸間隔の関係を、直径 5 mm および 10 mm の井戸についてまとめたものである。図-4 (b) は、(a) をもとにして中間点の間げき水圧低下率と貫入度の関係を、それぞれ井戸間隔、井戸の直径をパラメータとして示したものである。これらから次のことが明らかとなる。



(i) 同一貫入度ならば、井戸の間隔が狭くなるほど中間点の水圧低下率は急激に増加し、事情の許す限り間隔を密にすることが減圧効果を高めることになる。

(ii) 貫入度の増加はその前半において、かなり減圧効率を増加させるが、後半だんだん飽和状態に近づく。とくに井戸間隔が等しい場合の 75% 貫入と 100% 貫入とではほとんど差異がない。

(iii) 減圧井戸の太さの増加は必ずしも比例して減圧効果を高めはしない。貫入度が大なるところではその割合は漸減する傾向がある。

(iv) 以上の結果と実際の施工および経済的事情もあわせて考慮すると、貫入度の増加は井戸内径の増加や井戸間隔の接近などにくらべて不利であると考えられる。

さて減圧井戸からの流出量は、堤内地に越水するので、その処理は大きな問題であり、これを正確にとらえることは重要である。図-5 に井戸間隔と排水量との関係を、貫入度および井戸内径をパラメータとしてまとめる。これから

(i) 排水量は貫入量増加、井戸内径増大にともなうて増加するが、その増加割合は漸次飽和状態に近づくこと水圧低下率の場合と同様である。

(ii) 井戸の間隔は広がると井戸 1 本当りの影響範囲大になるため排水量は増加する。ただし貫入量小なるところではほとんど増加しない。

さらにこれらのデータを整理して、Middlebrooks たちの設計参考曲線と対比させたのが 図-6 (a) である。実線がそれぞれ貫入度 100% の Muskat 理論曲線、貫入度 50%、25% の電氣的相似実験曲線である。○、△、×は著者が求めたこれら設計曲線に対応する実験値である。この図から

(i) いずれの実験値もすべて設計曲線の下側に落ちる。もし a/r_w 、 k 、 D に誤差がないものとすれば、 P/Q は約 25~30% 下まわっている。

(ii) P/Q の減少度は a/r_w が大きくなるにつれて漸減する。すなわち実験値は設計曲線に接近する。

そこで P 、 Q それぞれの差を知るために、実験値と設計曲線からの逆算値とを图示したのが 図-6 (c) である。

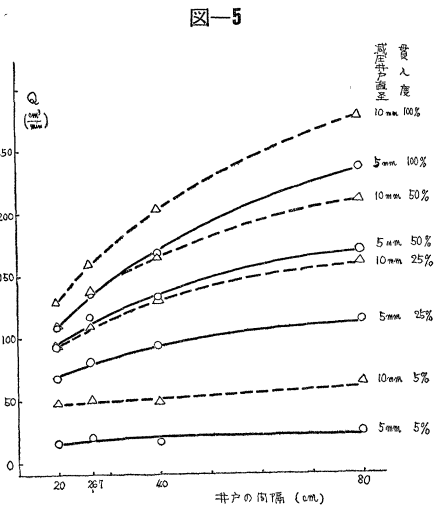


図-6 (a)

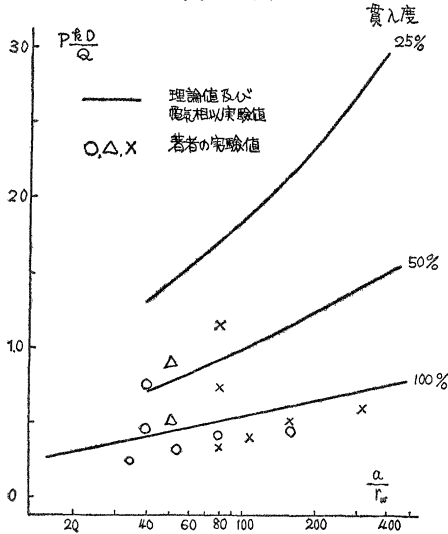
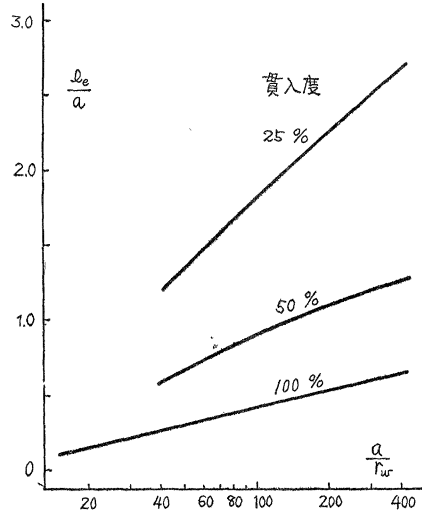


図-6 (b)



ここで Q, P の理論値を分離して求めるには, Middlebrooks⁵⁾ によれば次の式から出すことができる。

$$Q = \frac{k \cdot h \cdot a \cdot D}{S + l_e}$$

ただし l_e : 図-6 (b) から求められる値

また P は上式から求めた Q を 図-6 (a) の $P \cdot k \cdot D / Q$ に代入して求めている。図-6 (c) から次のことがわかる。

(i) 理論値と実験値との差は, P の方が Q よりも大きくそれぞれ 35~50%, 20~35%であつて, いずれも実験値の方が小さい。またそれらは a/r_w の増加にともない増加するという傾向を示す。

(ii) P の方が Q よりも実験値と理論値の差の割合が大きいため, $P \cdot k \cdot D / Q$ が理論値の下に落ちることは容易にわかる。

なお実験値が理論値より小さくなる原因としては,

(i) 減圧井戸の水利的な各種損失水頭があること, とくに本実験では透水性地盤に対して不透水層厚さを大きくとつている。

(ii) 解析の基礎となる仮定が合わないこと。たとえば上部不透水層が完全不透水層ではないし, 境界の半無限限性やまた土の等方性なども保証されていない。

(iii) ここに使用した透水係数はこの模型で実験して求めたが, 側面の影響その他で過大になつている恐れのあること。また減圧井戸のスリットの間詰まりなど実験そのものによる誤差もふくまれてはいないか。

(2) 排水層設定による効率の増加

減圧井戸の効果に大きく影響する因子としては, 上述のごとく井戸の貫入度と間隔であることがわかつた。従つて井戸効率を増そうとすれば, その貫入度を増すかまたは間隔をせばめることが上策となる。その一つとして上部不透水層の一部に, 減圧井戸設置に際しておろすケーシングを利用して, 図-7 のように A の部分に不透水性土のかわりに現地盤の透水性の砂を埋めもどす方法を考えた。井戸の埋込み長さは同一にして, 実質的な貫入度を増してやろうという考えである。この場合 図-8 を参考にして

$$\frac{h}{L} < \frac{G-1}{1+e}$$

図-6 (c)

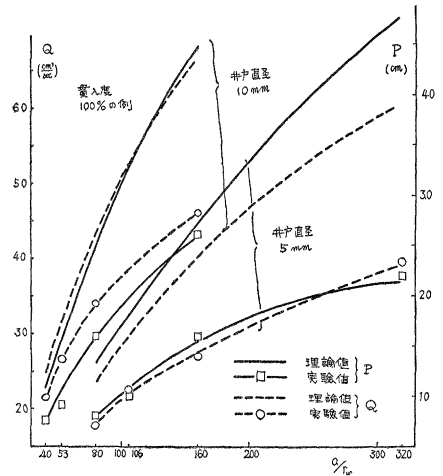


図-7

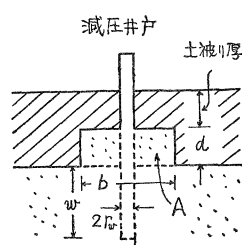
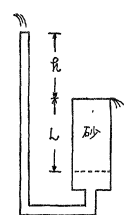


図-8



ただし h : 水頭差, L : 土層の厚さ, G : 土粒子の比重, e : 間げき比
 であればボーリングは防ぐことができるはずで, さらに $G=2.65, e=0.65$ とすれば上式は

$$k/L < 1$$

となり, すなわち上部不透水層の土かぶり厚さが, おおよそ減圧井戸の地表面上にでている高さと同じであれば, ボーリングの危険は防げる。同時にそれが安全であるための最小限界土かぶり厚さになる。

部分排水層の厚さおよび断面は, どれくらいが最も効果的であるかということになるが, 一応厚さは上述のごとき限界厚さがあるし, 断面はケーシングの形で円形であるから, その直径を決めればよい。そこで実際の施工例^{(10),(11)}を参考にして, 排水層の厚さは透水層全厚の 10%, 25%, 35% 断面直径は井戸直径の 3.2 倍, 5.6 倍, 8.2 倍について実験を行った。今部分排水層の厚さ d として, $d/D=25\%$, 直径 $5.6 r_w$, $a/r_w=80$ の場合 (図-9 参照) についてみると,

(i) 中間点の間げき水圧低下率および井戸排水量ともに貫入度少ないほど排水層設置の効果はいちじるしい。たとえば貫入度 5% の所では, 単純貫入にくらべ低下率 20%, 排水量 30% の増加であるが, 貫入度 50% の所では低下率 4%, 排水量 12% の増加に過ぎない。従つて自然透水層への貫入度大になれば (とくに 75% 以上), 排水層は効果を発揮しなくなる。

(ii) (i) の結果からまた地表浅い所での減圧井戸利用は排水量のわりには, 間げき水圧の低下効率よく部分排水層はきわめて有効であることがわかる。

さらに部分排水層の半径および厚さを変えて, 効率の変化を調べた結果をそれぞれ 図-10 (a), (b) に示す。 $b/2 r_w$ は部分排水層の直径と減圧井戸直径の比である。従つて $a/r_w=80$ について考えると, $b/2 r_w=1$ は排水層なし, $b/2 r_w=20$ は排水層の面積が井戸線に沿つて連続的につながる状態に対応する。ゆえに $b/2 r_w=20$ は近似的に不透水層が最初より部分排水層の分だけ薄くさせられた場合の貫入に匹敵するが, 依然として地下水の流動方向には部分排水層にすぎないから, 貫入効果はそれより低目に出るはずである。図-10 (a), (b) から次のことが明らかとなる。

図-9

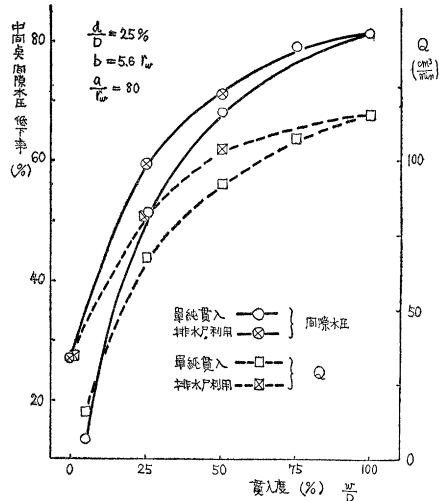


図-10 (a)

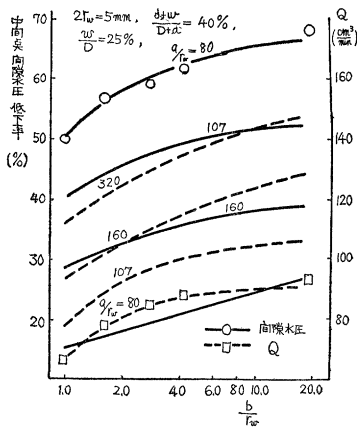
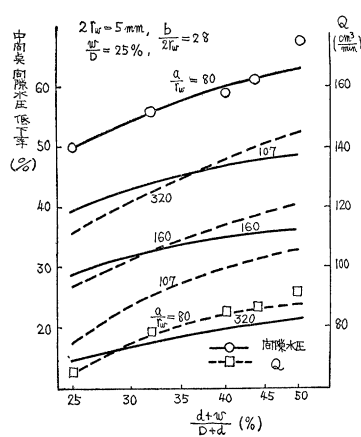


図-10 (b)



(i) a/r_w が比較的小さいところでは, 従来のケーシングの直径に等しい排水層直径で ($b/2 r_w=2\sim 3$), 期待できる全効率の約 60% (低下率)~90% (排水量) に達することがわかる。また a/r_w なるに従い低下率, 排水量ともに排水層の直径に比例して変化する傾向になる。

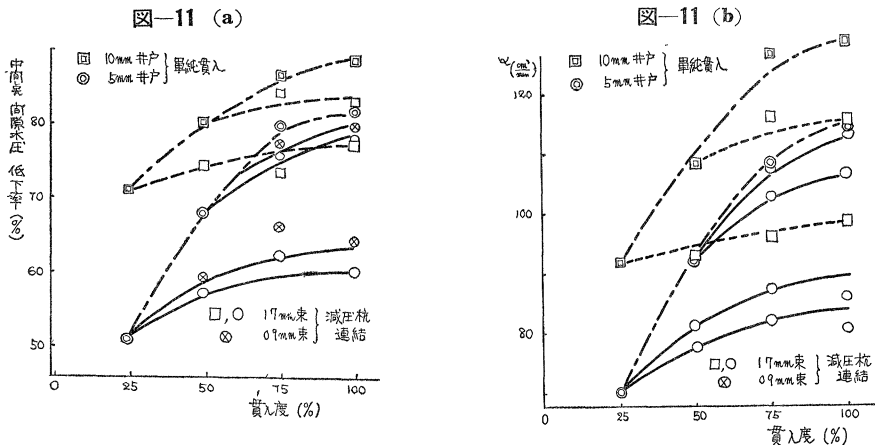
(ii) 排水層の厚さ比 ($d+w/D+d$) を変えることは, 直径比 ($b/2 r_w$) を変えることに傾向としてよく似ているが, より一層曲線がゆるやかになる。従つて排水層は直径をふやす方が厚さを増すより有効である。ことに厚さは限界土かぶり厚さで制限されていることからもうなずける。

(3) 減圧杭による効率の増加

部分排水層は減圧井戸の効率を上げるために、地表面に向つて工作したが、それと反対に、透水層深部の比較の間げき水圧の高い部分からの排水増加を企図したのが、排水の誘導を目的とする補助減圧杭の設置である。減圧井戸の設置には衆知のごとく、ケーシングを打込んで内部の土砂を取りのぞき、しかるのち井戸を埋設しながら、ケーシングを抜取つてゆく。したがつて地表下深部の施工は相当単価がかさむわけで、完全貫入が困難となる原因の一つとなつている。この代用として地中深部の一部分を細い棒の束による杭でおきかえ(従つて打込むだけでよい)、主として杭の表面および断面にある間げきを伝わつて上昇する排水が期待できれば、しかもそれが相当の効果を上げれば好都合と考えた。

杭の模型として使用したのは直径 0.9 mm, 1.7 mm の針金を束ねたものである。これを減圧井戸の先端に取り付け、中間はバンドで拘束し、杭先端にはシューをはかせて透水層に打込む。

図-11 (a), (b) にその効率増加のようすを示す。破線が単純貫入曲線で 図-4 (b) から取つたものである。この破線の 25%, 50% 貫入点から傾斜ゆるやかに右にはう実線および点線が減圧井戸に杭を付設して合計 50%, 75%, 100% の貫入度に達した減圧井戸の効率曲線である。前記の二実験にくらべてこの実験値はばらつきが多く、減圧効果にも多少むらのあることが懸念される。これらの図からわかることは、



(i) 細い方の針金束による減圧杭(表面積 f)は太い針金束の杭にくらべて効率はよいが、その差はわずかに 1~2%程度に過ぎない。

(ii) 井戸の半径が小さいほど減圧杭設置による効率増加は大きいようで、25%貫入、50%貫入いずれも 2~3%方 5mm 井戸の方が 10mm 井戸よりも効率の増加が大きい。

(iii) 総体的にみて、減圧杭による効率の増加は高高 10% 止まりであつて、部分排水層の設置におよばない。

4. 結 論

以上減圧井戸の水利模型実験を行い、総合検討した結果次のことが明らかになつた。

(1) Middlebrooks 達の設計参考曲線は、実際に適用しようとする場合相当の減少率を見込んでよい。たとえば著者の実験によく相似しているときには、減圧井戸の中間点における間げき水圧、および井戸からの排水量はそれぞれ設計曲線の値よりも約 35~50%, 20~35% ほど少ない安全側に生ずることがわかつた。

(2) 自然不透水層が厚いときにはその中に、ケーシングを利用した部分排水層を設置することは有効である。経済性も考慮すると、井戸直径の 3~4 倍の直径を持ちその上面に、最小限界上かぶり厚さを持つた排水層を設定することが望ましい。

(3) 表面不透水層が薄く、透水層厚いときは部分貫入の井戸先端に補助的な減圧杭を設けることは有効であるが、その効率は比較的小さく最良の状態でも 10% 程度の効率増加が期待されるのみである。杭の構造としては、細い針金(または竹)を数多く束ねたものが有効である。

最後に本研究は昭和 33 年度文部省科学研究費による研究の一部であり、また常々かわらぬ御激励、御指導を賜つた東大教授 最上武雄博士、道路公団 久野悟郎博士に深く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 福岡正巳・久野悟郎:阿賀野川堤防基礎の漏水調査について,土木研究所報告 第95号の1(昭和31年)

- 2) 減圧井戸の具体的な実例として邦文では次の“土木学会誌文献抄録”を参照されたい、排水井系による堤防漏水対策川法の実例(久野悟郎訳), 第42巻3号(昭32) p.36, トレンチ漏水の井戸による減圧(館内寛治訳), 第43巻5号(昭33) p.43
- 3), 9) Middlebrooks, T.A. and W.H. Jervis : Relief Well for Dams and Levees, A.S.C.E. Transaction vol.112 1947
- 4) Muskat, M. : The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media, McGraw-Hill 2nd. Ed. 1946 p.181~192 p.524~530
- 5) 7) Bennett, P.A. and R.A. Barron : Design Data for Partially Penetrating Relief Wells, Pro. 4th. International Conf. of Soil Mechancs and Foundation Engineering Vol. II
- 8) Terzaghi, K. and R.B. Peck : Soil Mechanics in Engineering Practice, John Willy and Sons 4th. Printing 1949 p.334
- 10) Mansure, C.I. and R.I. Kaufman : Control of Underseepage, Mississippi River Levees, St Louis Districts, A.S.C.E. vol.82 No. SM 1 1956
- 11) Thorfinnson, S.T. : Underseepage Control at Fort Randall Dam, A.S.C.E. vol.85 No. SM 1 1959

(昭. 34. 7. 18)

土木学会論文集編集委員

委員長	最上武雄	委員	佐藤裕	委員	田島二郎	委員	松原健太郎
委員	芦田和男	委員	齋藤諱太郎	委員	竹内俊雄	委員	丸安隆和
委員	伊東茂富	委員	齋藤義治	委員	竹下春見	委員	三野栄三郎
委員	伊藤文人	委員	鳩裕之	委員	原口好郎	委員	光易恒
委員	伊藤和幸	委員	鈴木信太郎	委員	平嶋政治	委員	森波麟
委員	大久保忠良	委員	千秋信一	委員	藤井敏夫	委員	山口柏樹
委員	奥村敏恵	委員	多谷虎男	委員	藤波哲二	委員	渡辺隆
委員	木村俊晃	委員	高橋国一郎	委員	細井昌晴	幹事	西脇威夫
委員	君島博次	委員	高橋彦治	委員	松崎彬磨		

昭和 35 年 3 月 10 日 印刷
 昭和 35 年 3 月 15 日 発行

土木学会論文集第 67 号 定価 120 円 (〒 10 円)

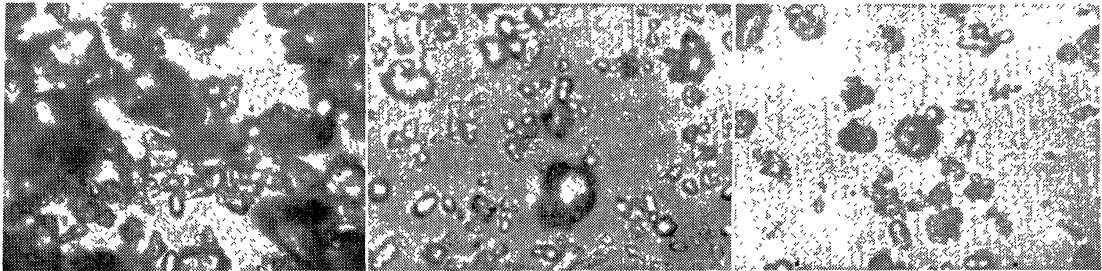
編集兼発行者 東京都新宿区四谷一丁目 社団法人 土木学会 末森 猛 雄
 印刷者 東京都港区赤坂溜池 5 株式会社 技報堂 大沼 正 吉

発行所 社団法人 土 木 学 会 振替東京 16828 番
 東京都新宿郵便局区内 新宿区四谷一丁目 電話四谷(351) 代表 5138 番

ポゾリスによるセメント粒子の分散性について



セメント粒子の分散度写真 (620 倍) (日本曹達株式会社高岡工場研究所撮影)



セメント粒子の集塊状態

ポゾリスによつて分散されたセメント粒子の状態

ポゾリスによつて分散されたフライアッシュ+セメント粒子の状態

上図顕微鏡写真は、セメント粒子並にフライアッシュ粒子（円形を示すもの）の分散されていない状態と、ポゾリスによつて、良く分散されている状態を示したものであります。

ポゾリスは分散によつて、セメント効率を高め、不用になつた水を追い出し、単位水量の約 15% を減少させますので、コンクリートの諸性質が改良される、最も優れたコンクリート混和剤であります。



日本曹達株式会社

本社 東京都千代田区大手町 新大手町ビル
支店 大阪市東区北浜 2 の 9 0



高度の材質
独特の設計



日本オイルシール工業株式会社

本社・工場 東京都大田区桃谷町 5-1222 Tel(041)代表0775-9 直0770
 関西支社 大阪市北区堂島船大工町 31-1 Tel(04)6615-7・6620
 東京営業所 東京都中央区銀座東 4-1 Tel(041)1761-3・7461・2788
 名古屋営業所 名古屋市中村区笹島町1-221豊田ビル701号 Tel(05)代表5111-5121・3181直3096
 中部営業所 広島市埴屋町 56 小松ビル Tel(2) 6750
 広島出張所 福岡市天神町 8 西日本ビル 509号 Tel(4)代表6731-9
 九州出張所 北海道札幌市北二条3-1 越山ビル406号 Tel(3)代表1324