

井戸理論の一進展 (第3報)

横井の揚水開始及び停止後の附近水位變化*

理學博士 野 滿 隆 治
理學士 中 目 廣 安

I. 緒 言

(1) 前論文の堅井揚水開始及び停止の影響論に準じて横井の場合に於ける理論を作り、模型實驗を行ひ其の檢證をしたのが本報告である。影響範囲や水位最急降下點などの對應事情が發現する時刻 t と距離 x の自乗とは比例し、又不壓地下水の場合には水面の高さと底壓頭とが強揚水時には同一でなく、井壁内外の水面は不連続階段状をなすことなど、悉く堅井の場合に類似の結果が得られた。勿論數量的には兩者の場合多少の差あるは當然である。

II. 理 論

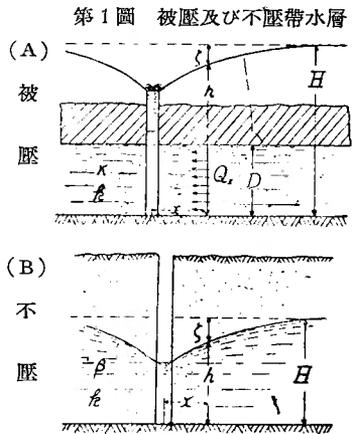
1. 被壓帶水層に於ける横井

第1圖(A)に於て、厚さ D なる帶水層内の原水頭を H 、井戸より距離 x に於ける現水頭を h 、水頭降下を $\zeta = H - h$ にて表はせば、

$$\text{運動法則 } Q_x = -kD \frac{\partial h}{\partial x} = kD \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (1)$$

$$\text{連続式 } \frac{\partial Q_x}{\partial x} = -x D \frac{\partial h}{\partial t} = x D \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (2)$$

茲に Q_x は x 断面の單位幅を通過する流量で、井戸の揚水量 Q (片側のみによる) とは異なり、 x の函數である。又 k は帶水層の透水係數、 x は單位水柱の壓力に應ずる帶水層の壓縮率を表はす。水及砂粒の壓縮率は之に比して無視する。(前論文の結果参照)



* 本論文は昭和9年中目が京大在學中に於ける卒業課題實驗と野滿の理論とを對照したもので、大要は前論文第二報と共に昭和10年京都に於ける陸水學會に講演した。

(1) 野滿隆治、山下馨： 堅井の揚水開始及び停止に伴ふ附近水位變化と地層の彈性率、本誌、本號20頁。

此の兩式より Q_x を除去すれば

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{k}{x} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \quad (3)$$

[1] 透水層が無限に広い場合 揚水條件を

$$\left. \begin{array}{l} \text{初期} \quad t=0, x \geq 0 \quad \text{にて} \quad h=H \quad \text{即ち} \quad \zeta=0 \\ \text{境界} \quad x=0, t > 0 \quad \text{にて} \quad h=h_0 \quad \text{即ち} \quad \zeta=(H-h_0) \equiv \zeta_0 \end{array} \right\} \quad (4)$$

とすれば、(3) 式の解は周知の如く公算積分 Φ にて表はされ

$$\left. \begin{array}{l} \zeta = \zeta_0 \{1 - \Phi(\xi)\} \\ \text{但し} \quad \xi = \frac{x}{2\sqrt{(k/x)t}}, \quad \Phi(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi e^{-\mu^2} d\mu \end{array} \right\} \quad (5)$$

茲に注意すべきは、 ξ が $\xi = \frac{x}{2\sqrt{(k/x)t}}$ のみの函數で表はされ、 x と t とが ξ の一團となることである。従つて ξ の特異點例へば水位降下速度の最急點などは $x \propto \sqrt{t}$ の如き關係を以て傳播し行く筈である。影響限界距離 R も同様 \sqrt{t} に比例して擴大するであらう。先づ一定點 ($x = \text{定數}$) に於ける最急降下時は $\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = 0$ であるから、(5)式より

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} &= \frac{2\zeta_0}{\sqrt{\pi}} e^{-\xi^2} \cdot \frac{x}{4\sqrt{(k/x)t^3}} \\ \therefore 0 &= \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = -\frac{2\zeta_0}{\sqrt{\pi}} e^{-\xi^2} \left[2\xi \frac{x^2}{16(k/x)t^3} - \frac{3x}{8\sqrt{(k/x)t^3}} \right] \end{aligned}$$

即ち 最急降下時 $t = \frac{x^2}{6k/x}$, 或は $\frac{x}{k} = \frac{x^2}{6t}$ (6)

であつて、數係数が縦井の場合と違つて6になるだけである。

又影響限界距離 R は、我々の水位觀測精度 (例へば $\zeta = 1 \text{ cm}$) に應ずる ξ を (5) 式より求めて之を b とすれば

$$R = 2b\sqrt{(k/x)t} \quad (7)$$

によつて決定し得る。即ち影響範圍も時間の平方根に比例して擴大する。

次に(4)の條件下に於ける井戸揚水量 Q は一定でなく時間と共に遞減する。何となれば

$$Q = kD \left| \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right|_{x=0} = kD\zeta_0 \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left| e^{-\xi^2} \frac{1}{2\sqrt{(k/x)t}} \right|_{x=0} = \frac{D\sqrt{kx}}{\sqrt{\pi}} \frac{\zeta_0}{\sqrt{t}} \quad (8)$$

それで揚水量一定なる場合をも考究して置く必要がある様にもあるが、然し實際の水平井では縦井の場合と異なり井戸自身の容量が大なる爲め、假令ポンプ汲水は一定でも其の初期には在來からの溜り水が主となつて、砂層から來る $|Q_x|_{x=0}$ とは異なる。其の上(8)式

の Q は初めこそ急減するが、多少時間たてば其の遞減率は甚だ緩となるから、以上の結果を一定量揚水の場合に準用しても間に合ふのが普通である。依つて一定揚水の場合は其の論究を省略する。

揚水停止後の恢復は、揚水繼續時間を t_1 、停止後の時間を t とし條件を

$$\left. \begin{aligned} t=0 \quad \text{で} \quad \zeta &= \zeta_0 \left[1 - \Phi \left(\frac{x}{2\sqrt{(k/x)t_1}} \right) \right] \\ x=0, t > 0 \quad \text{で} \quad Q &= 0 \quad \text{従つて} \quad \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

となる様に解けば、井戸が極めて狭い幅を有し容量が甚小な場合の解になる筈である。然し実際には横井の容量は相當に大きくそれを満たすにも可なり時間を要するので、斯かる解よりは恢復が甚だ遅れ實用にならぬと思はれるから略する。

〔2〕 距離 $x=R$ にて水位を一定に保持する場合 横型實驗などではどうしても有限距離で水位を一定にする外はない。それで揚水時の條件を

$$\left. \begin{aligned} t=0, 0 < x < R \quad \text{で} \quad \zeta &= 0 \\ x=0, t > 0 \quad \text{で} \quad \zeta &= \zeta_0 \\ x=R, t > 0 \quad \text{で} \quad \zeta &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

とした(3)式の解を作らう。それには ζ を二部分に分ち

$$\zeta = \zeta_1(x) - \zeta_2(x, t) \quad (11)$$

とし、 ζ_1 は x のみの函數であつて

$$0 = \frac{k}{x} \frac{\partial^2 \zeta_1}{\partial x^2} \quad (3a)$$

$$x=0 \quad \text{で} \quad \zeta_1 = \zeta_0; \quad x=R \quad \text{では} \quad \zeta_1 = 0 \quad (10a)$$

又 ζ_2 は x, t 兩方の函數であつて

$$\frac{\partial \zeta_2}{\partial t} = \frac{k}{x} \frac{\partial^2 \zeta_2}{\partial x^2} \quad (3b)$$

$$x=0 \quad \text{及び} \quad x=R \quad \text{で} \quad \zeta_2 = 0; \quad t=0 \quad \text{で} \quad \zeta_2 = \zeta_1 \quad (10b)$$

の如きものとすれば、明かに(11)式の ζ は(3)及(10)式を満足する。

ζ_1 は極めて簡単に定まり

$$\zeta_1 = \zeta_0 \left(1 - \frac{x}{R} \right) \quad (12)$$

であつて、定常状態になつたときの水位に當る。

ζ_2 は(3b)式からして x に關し微分しても t に就き微分しても同形なる様なものである筈だから、

$$\zeta_2 = Kc^{\beta t + \alpha x} = A e^{\beta t} \sin \alpha x + A' e^{\beta t} \cos \alpha x \quad (13)$$

として見る。之を (3_b) に代入すれば

$$\beta = -\frac{k}{\kappa} \alpha^2 \quad \alpha: \text{任意常數} \quad (14)$$

でさへあれば、確かに (3_b) を満足する。

又條件 $|\zeta_2|_{x=0} = 0$ によつて $A' = 0$ 。

條件 $|\zeta_2|_{x=R} = 0$ によつて $\sin \alpha R = 0$

$\therefore \alpha = n\pi/R; \quad n = 1, 2, 3, \dots$ 整数

仍つて一般には (13) 式の代りに

$$\zeta_2 = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin \frac{n\pi}{R} \cdot x \cdot e^{-\frac{k}{\kappa} \left(\frac{n\pi}{R}\right)^2 t} \quad (15)$$

最後の條件 $|\zeta_2|_{t=0} = \zeta_1$ によつて

$$\sum A_n \sin \frac{n\pi}{R} \cdot x = \zeta_1 = \zeta_0 \left(1 - \frac{x}{R}\right)$$

となるから、係數 A_n はフーリエ一級數の係數決定法により

$$A_n = \frac{2\zeta_0}{R} \int_0^R \left(1 - \frac{x}{R}\right) \sin \frac{n\pi}{R} \cdot x dx = \frac{2\zeta_0}{n\pi}$$

従つて $\zeta_2 = \frac{2}{\pi} \zeta_0 \sum_1^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{R} \cdot x \cdot e^{-\frac{k}{\kappa} \left(\frac{n\pi}{R}\right)^2 t}$ (16)

$$\therefore \zeta = \zeta_1 - \zeta_2 = \zeta_0 \left(1 - \frac{x}{R}\right) - \frac{2}{\pi} \zeta_0 \sum_1^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{R} \cdot x \cdot e^{-\frac{k}{\kappa} \left(\frac{n\pi}{R}\right)^2 t} \quad (17)$$

2. 不壓水中の横井

第1圖 (b) の如き不壓帯水層の有効空隙率を β 、原水位を H とすれば、基本式が

$$\text{運動式} \quad Q_x = -kh \frac{\partial h}{\partial x} = k(H - \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (1')$$

$$\text{連続式} \quad \frac{\partial Q_x}{\partial x} = -\beta \frac{\partial h}{\partial t} = \beta \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (2')$$

$$\therefore \frac{\partial \zeta}{\partial t} = cH \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(1 - \frac{\zeta}{H}\right) \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right] = cH \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} - \frac{c}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} (\zeta^2) \quad (3')$$

となつて、被壓水の場合とは多少の相違があるのである。

然し ζ が H に比して甚だ小さい場合は、(3') は ζ^2 の項を省けば

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = cH \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \quad \text{但し} \quad c = k/\beta$$

となるから、前節の D の代りに H 、 κ の代りに β/H を用ふるだけで、被壓水の場合の諸

式を其のまゝ不壓水にも適用し得ることがわかる。例へば帶水層が無限に廣い場合には第一近似解として

$$\zeta = \zeta_0(1 - \Phi(\xi)) \quad \text{但し} \quad \xi = \frac{x}{2\sqrt{cHt}} \quad (5')$$

ξ が H に比し夫れほど小さくない場合には、逐次近似算を行ふため上の様な ξ を用ひて (3') 式を普通微分方程式に直して置くが便利であるである。

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{d}{d\xi} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial t} = -\frac{x}{4\sqrt{cHt^3}} \frac{d}{d\xi}, \quad \frac{\partial}{\partial x} = \frac{d}{d\xi} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{1}{2\sqrt{cHt}} \frac{d}{d\xi}$$

であるから、(3') 式は

$$\frac{d^2 \zeta}{d\xi^2} + 2\xi \frac{d\zeta}{d\xi} = \frac{1}{2H} \frac{d^2(\zeta_0^2)}{d\xi^2} \quad (3'')$$

此の右邊は ξ^2 の項で小さいには違ひないから、* 其の中には既得の近似値を代入して下の如く解くのである。

第二近似解は(3'')式の右邊に(5')を代入し

$$\frac{d^2 \zeta}{d\xi^2} + 2\xi \frac{d\zeta}{d\xi} = \frac{4\zeta_0^2}{\sqrt{\pi}H} \left\{ \xi e^{-\xi^2} [1 - \Phi(\xi)] + \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-2\xi^2} \right\} \quad (18)$$

此の式の第一積分として得らるべき $\frac{d\zeta}{d\xi}$ は、上式の右邊を見るに、 $e^{-\xi^2}$ なる因子を含むべきことが察せられる。故に

$$\frac{d\zeta}{d\xi} = e^{-\xi^2} Z(\xi) \quad (19)$$

と假定して、 Z を定める。(19)を(18)式に代入すれば

$$\begin{aligned} \frac{dZ}{d\xi} &= \frac{4\zeta_0^2}{\sqrt{\pi}H} \left\{ \xi [1 - \Phi(\xi)] + \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\xi^2} \right\} \\ \therefore Z &= \frac{2\zeta_0^2}{\sqrt{\pi}H} \xi^2 - \frac{4\zeta_0^2}{\sqrt{\pi}H} \int_0^\xi \mu \Phi(\mu) d\mu + \frac{2\zeta_0^2}{\sqrt{\pi}H} \Phi(\xi) + C. \end{aligned}$$

茲に C は積分常數である。従つて(19)は

$$\frac{d\zeta}{d\xi} = \frac{2\zeta_0^2}{\sqrt{\pi}H} \xi^2 e^{-\xi^2} - \frac{4\zeta_0^2}{\sqrt{\pi}H} e^{-\xi^2} \int_0^\xi \mu \Phi(\mu) d\mu + \frac{2\zeta_0^2}{\sqrt{\pi}H} e^{-\xi^2} \Phi(\xi) + C e^{-\xi^2}$$

之を更に積分して、第二の積分常數を C' とすれば

* 第一近似解(5')は(3'')式の右邊を零として容易に得られる。

$$\zeta = \frac{2\zeta_0^2}{\sqrt{\pi} H} \int_0^\xi \mu^2 e^{-\mu^2} d\mu - \frac{4\zeta_0^2}{\sqrt{\pi} H} \int_0^\xi e^{-\lambda^2 d} \int_0^\lambda \mu \Phi(\mu) d\mu + \frac{2\zeta_0^2}{\sqrt{\pi} H} \int_0^\xi e^{-\mu^2} \Phi(\mu) d\mu + C\Phi(\xi) + C' \quad (20)$$

然るに右邊各項の積分は、部分積分法によつて實行すれば

$$\begin{aligned} \int_0^\xi \mu^2 e^{-\mu^2} d\mu &= -\frac{1}{2} \int_0^\xi \mu \frac{d e^{-\mu^2}}{d\mu} d\mu = -\frac{\xi}{2} e^{-\xi^2} + \frac{\sqrt{\pi}}{4} \Phi(\xi), \\ \int_0^\xi \mu \Phi(\mu) d\mu &= \left[\frac{\mu^2}{2} \Phi(\mu) \right]_0^\xi - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi \frac{\mu^2}{2} e^{-\mu^2} d\mu = \frac{\xi^2}{2} \Phi(\xi) + \frac{\xi}{2\sqrt{\pi}} e^{-\xi^2} - \frac{1}{4} \Phi(\xi), \\ \int_0^\xi e^{-\mu^2} \Phi(\mu) d\mu &= \int_0^\xi \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{d\Phi(\mu)}{d\mu} \Phi(\mu) d\mu = \frac{\sqrt{\pi}}{4} [\Phi(\xi)]^2 \\ \therefore \int_0^\xi e^{-\lambda^2 d} \int_0^\lambda \mu \Phi(\mu) d\mu &= -\frac{\xi}{4} e^{-\xi^2} \Phi(\xi) - \frac{1}{4\sqrt{\pi}} e^{-2\xi^2} \end{aligned}$$

是等を(20)式に入れ、更に條件(4)に合ふ様に C, C' を決定すれば

$$\zeta = \zeta_0 \left[1 - \Phi(\xi) - \frac{\zeta_0}{H} F_1(\xi) \right] \quad (21)$$

但し $F_1(\xi) = \left(\frac{\xi e^{-\xi^2}}{\sqrt{\pi}} + \frac{1}{\sqrt{\pi}} + \frac{1}{2} \Phi(\xi) \right) (1 - \Phi(\xi)) - \frac{1}{\pi} e^{-2\xi^2}$

で其の數値は第1表の如きものである。

第三次近似解を作るには(21)を(3')式の右邊に代入すればよい。更に高次近似値は順次同様の手段で得られ、

$$\zeta = \zeta_0 \left[1 - \Phi(\xi) - \frac{\zeta_0}{H} F_1(\xi) - \left(\frac{\zeta_0}{H} \right)^2 F_2(\xi) - \left(\frac{\zeta_0}{H} \right)^3 F_3(\xi) - \dots \right]$$

の様に ζ_0/H の冪級數として表はされる。 F_1, F_2, F_3 は皆 $\xi=0$ 及び $\xi=\infty$ では零となる如き函數である。

然し是等の近似解にもまして、最も簡便であり極めて精度の高いと考へられるものは、定常状態に於ける普通の公式を参考に置いて(5')式の兩邊に夫れぞれ $H+h \doteq 2H$ を掛けた

$$H^2 - h^2 = 2H\zeta_0(1 - \Phi(\xi)), \quad H - h = \zeta. \quad (23)$$

であらう。

又距離 R にて一定水位に保つ場合も、第一近似算としては(17)式に準じて計算してよい。即ち

$$\zeta = \zeta_0 \left(1 - \frac{v}{R} \right) - \frac{2}{\pi} \zeta_0 \sum_1^\infty \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{R} v e^{-cH} e^{-n\pi/R} t \quad (17')$$

第1表 $F_1(\xi)$ の數値

ξ	$F_1(\xi)$
0.0	0.0000
0.2	0.1244
0.4	0.1832
0.6	0.1843
0.8	0.1488
1.0	0.1059
1.2	0.0658
1.4	0.0369
1.6	0.0189
1.8	0.0088
2.0	0.0039
2.2	0.0016
2.4	0.0005
2.6	0.0001
2.8	0.0000
∞	0.0000

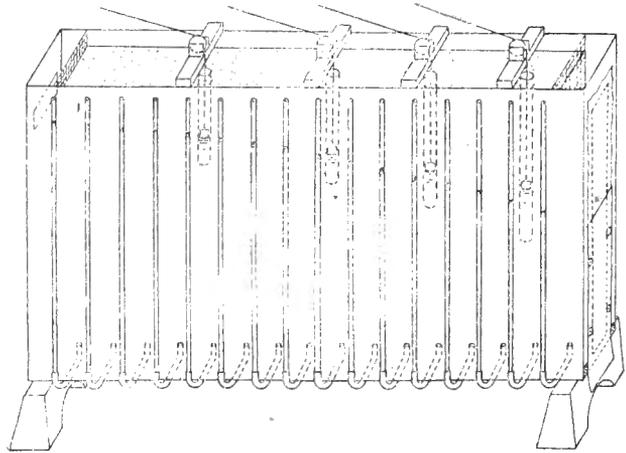
III. 模 型 實 験

以上の理論を検證すべき
 野外實測例を持たぬので、
 吾々は模型井を作つて之が
 檢證を試みた。

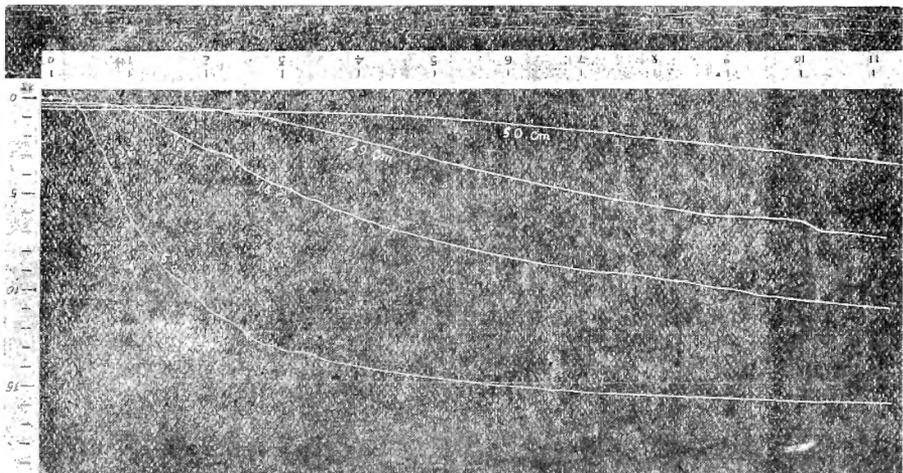
模型は幅 10 cm 長さ 80
 cm 深さ 33 cm のブリキ箱
 の兩端に少し餘裕を置いて
 金網框を立て、其の中間
 75 cm の長さに互り徑 0.5
 ~1 mm の川砂を填め帶水
 層とする。箱の左端面には

高さ約 30 cm の處に鈍端長方形の小窓を開け、其處の空所に水道水を適當に導入して常に一定水位を保つ様にし水源地を代表せしめる。又箱の右端面にも窓を開けるが此の窓は上下にも相當の間に互る。之に紙を張つて、其上を所望の部分だけ金屬製の蓋で締めつけて置く。それと沙との間の空積が井戸を代表する。即ち先づ左端より水道水を注入しつ

第2圖 模 井 模 型

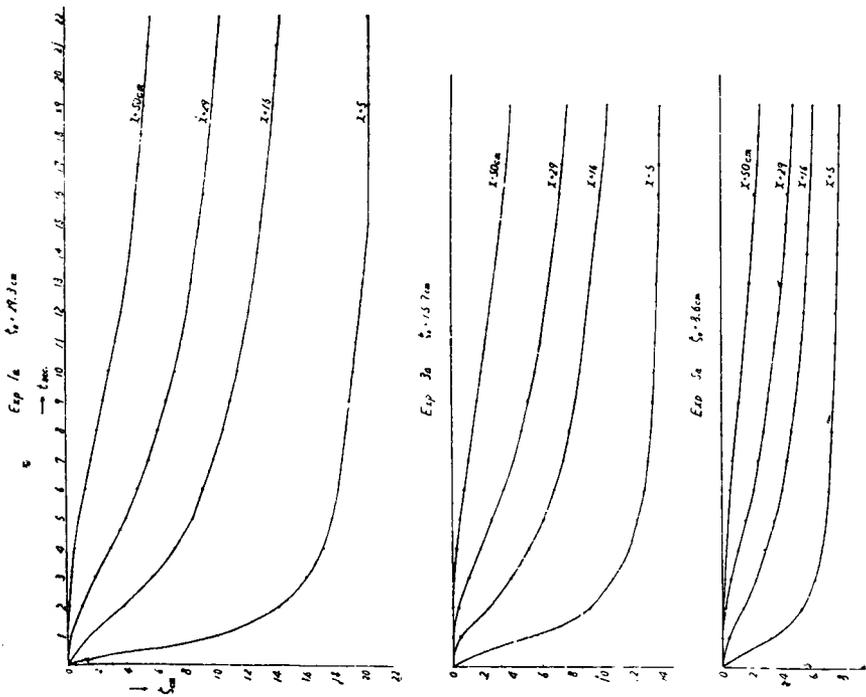
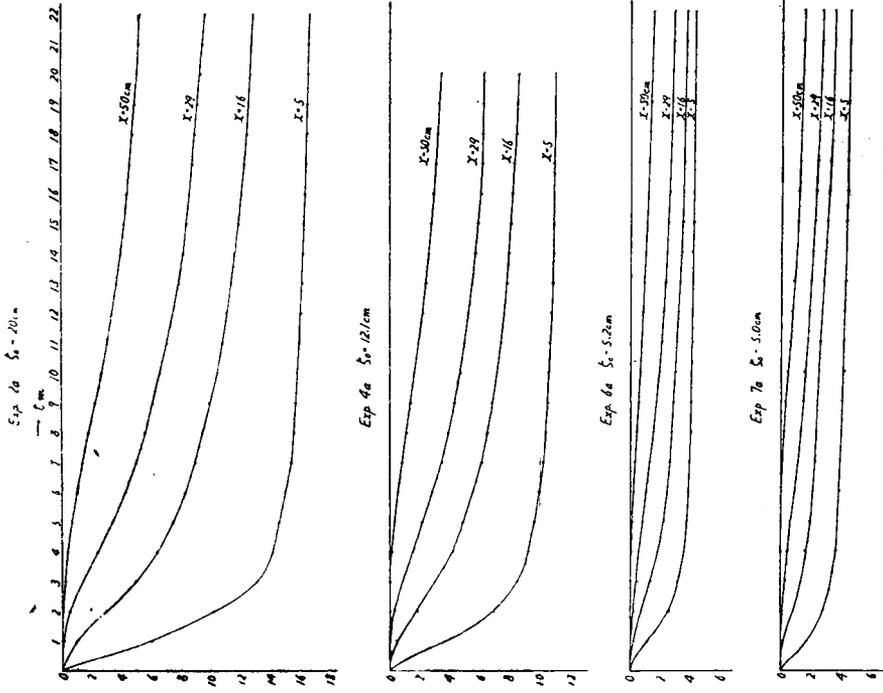


第3圖 表水面降下記象の例



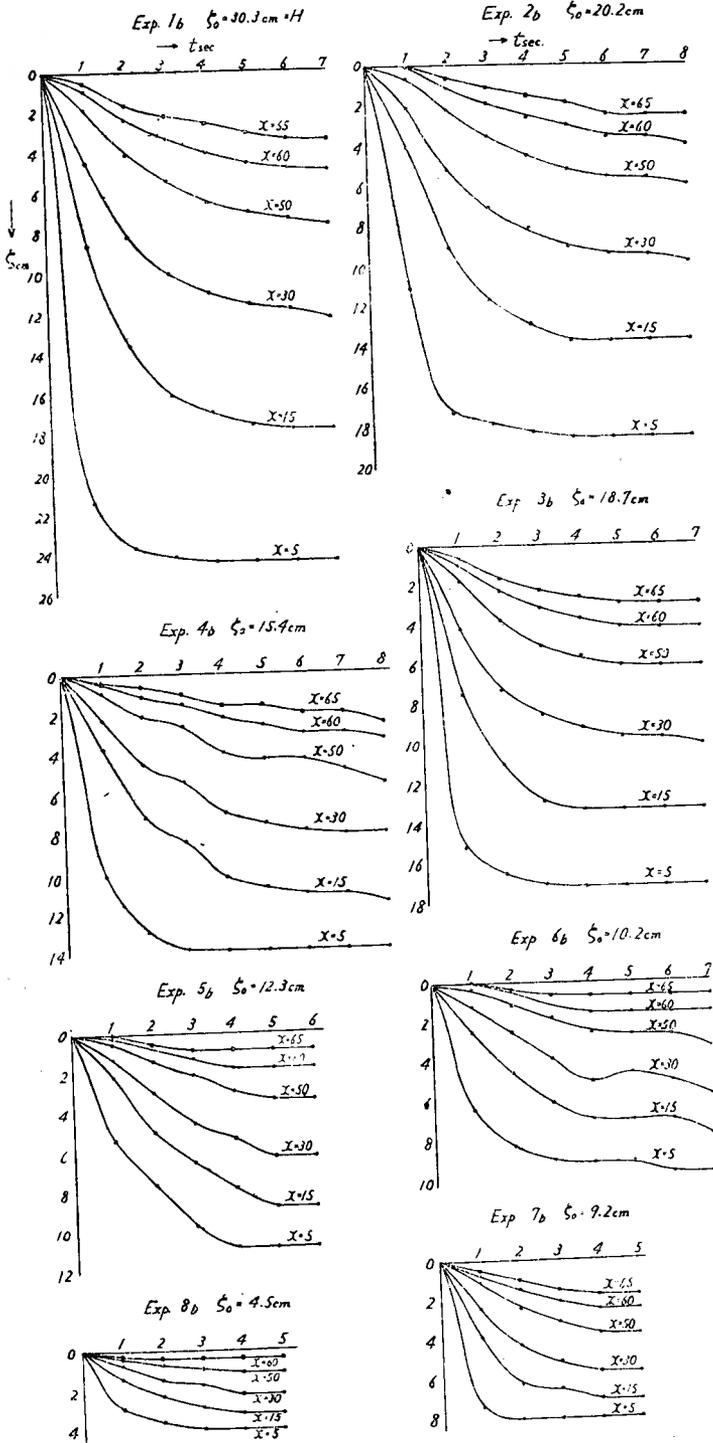
横井の揚水開始及び停止後の附近水位變化

第4圖 砂中水面及び底水頭各距離別の時間的降下 ζ (cm) (a) 表水面



横井の揚水開始及び停止後の附近水位変化

(b) 底水頭



横井の揚水開始及び停止後の附近水位変化

第2表 模型実験の結果

(a) 砂中水面降下

実験 番号	Exp. 1a $\zeta_0 = H = 29.3\text{cm}$				Exp. 2a $\zeta_0 = 20\text{cm}$ $H = 29.0\text{cm}$				Exp. 3a $\zeta_0 = 15.7\text{cm}$ $H = 29.5\text{cm}$				Exp. 4a $\zeta_0 = 12\text{cm}$ $H = 29.5\text{cm}$				Exp. 5a $\zeta_0 = 8.6\text{cm}$ $H = 29.2\text{cm}$			
	5	16	29	50	5	16	29	50	5	16	29	50	5	16	29	50	5	16	29	50
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	10.1	1.5	0.2	0	6.0	0.9	0.1	0	4.9	0.5	0	0	3.6	0.4	0	0	3.2	0.4	0	0
2	14.3	3.8	1.0	0.1	10.1	3.0	0.5	0.1	9.2	2.4	0.4	0	6.9	1.8	0.3	0	5.3	1.4	0.2	0.1
3	16.1	5.3	1.9	0.3	13.1	4.9	1.4	0.2	10.7	3.9	1.1	0.1	8.5	2.9	0.8	0	6.2	2.3	0.6	0.2
4	17.3	7.3	3.0	0.5	14.1	6.4	2.4	0.4	11.8	5.1	1.9	0.3	9.2	4.2	1.5	0.1	6.6	2.8	1.1	0.3
5	17.9	8.5	4.0	0.8	14.6	7.5	3.4	0.7	12.3	6.1	2.6	0.5	9.6	4.8	2.1	0.3	6.9	3.5	1.6	0.4
6	18.3	9.2	4.8	1.2	15.0	8.3	4.3	1.0	12.8	6.8	3.4	0.8	9.9	5.5	2.8	0.5	7.1	4.0	2.1	0.5
7	18.6	9.9	5.6	1.7	15.4	8.9	5.0	1.4	13.1	7.5	4.1	1.1	10.2	6.1	3.5	0.8	7.2	4.3	2.4	0.7
8	18.9	10.6	6.2	2.1	15.6	9.4	5.6	1.8	13.3	7.9	4.7	1.4	10.4	6.5	3.9	1.1	7.3	4.6	2.8	0.9
9	19.1	11.1	6.8	2.5	15.7	9.9	6.1	2.2	13.4	8.3	5.1	1.7	10.5	6.8	4.3	1.4	7.4	4.9	3.0	1.1
10	19.4	11.6	7.4	2.9	15.8	10.5	6.6	2.7	13.5	8.6	5.6	2.0	10.5	7.1	4.7	1.6	7.5	5.1	3.3	1.3
11	19.6	12.0	7.8	3.4	16.0	10.8	7.1	3.1	13.6	8.9	6.0	2.3	10.6	7.4	5.0	1.9	7.6	5.3	3.5	1.5
12	19.9	12.4	8.2	3.8	16.1	11.1	7.5	3.4	13.7	9.1	6.2	2.6	10.7	7.6	5.2	2.2	7.6	5.5	3.8	1.7
13	20.1	12.7	8.5	4.1	16.2	11.4	7.9	3.7	13.7	9.3	6.5	2.8	10.8	7.8	5.5	2.4	7.7	5.6	4.0	1.9
14	20.3	13.0	8.8	4.4	16.2	11.6	8.2	4.0	13.8	9.5	6.8	3.1	10.9	7.9	5.7	2.6	7.7	5.7	4.2	2.0
15	20.5	13.2	9.1	4.6	16.3	11.9	8.4	4.2	13.9	9.7	7.1	3.3	10.9	8.1	5.9	2.8	7.8	5.8	4.3	2.1
16	13.5	9.4	4.8		16.4	12.1	8.6	4.4	13.9	10.0	7.3	3.5	10.9	8.2	6.1	3.0	7.8	5.9	4.4	2.2
17	13.6	9.5	5.0		16.4	12.3	8.8	4.6	13.9	10.2	7.5	3.7	10.9	8.3	6.2	3.1	7.8	6.0	4.6	2.4
18	13.9	9.8	5.2		16.5	12.5	9.0	4.8	13.9	10.4	7.7	3.9	11.0	8.5	6.2	3.2	7.8	6.1	4.7	2.5
19	14.1	10.0	5.4		16.5	12.6	9.2	4.9	14.0	10.5	7.8	4.0	11.0	8.5	6.2	3.3	7.9	6.1	4.8	2.6
20	14.2	10.1	5.5		16.6	12.7	9.4	5.1					11.0	8.6	6.3	3.5				
21	14.3	10.3	5.7		16.6	12.8	9.5	5.2												
22	14.5	10.5	5.8		16.7	12.9	9.7	5.3												
定常	20.5	14.6	12.2	7.8	17.5	14.6	12.0	7.0	14.7	12.1	9.8	5.7	11.3	9.4	7.8	4.6	8.1	6.6	5.7	3.4

(c) 揚水停止後の回復

実験 番号	Exp. 6a $\zeta_0 = 5.2\text{cm}$ $H = 29.5\text{cm}$				Exp. 7a $\zeta_0 = 5.0\text{cm}$ $H = 29.6\text{cm}$			
	5	16	29	50	5	16	29	50
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1.1	0.2	0	0	1.7	0.1	0	0
2	2.5	0.7	0.2	0	2.8	0.8	0.1	0
3	3.1	1.3	0.4	0	3.3	1.3	0.3	0
4	3.5	1.8	0.5	0.1	3.6	1.6	0.4	0
5	3.7	2.2	0.8	0.1	3.7	1.9	0.6	0
6	3.8	2.4	1.0	0.2	3.9	2.1	0.9	0
7	3.9	2.6	1.3	0.3	3.9	2.3	1.1	0.1
8	4.0	2.7	1.5	0.4	4.0	2.4	1.3	0.2
9	4.0	2.9	1.7	0.5	4.0	2.4	1.5	0.3
10	4.0	3.0	2.0	0.6	4.2	2.5	1.6	0.4
11	4.1	3.1	2.1	0.7	4.2	2.6	1.8	0.6
12	4.1	3.2	2.2	0.8	4.2	2.7	1.9	0.7
13	4.1	3.3	2.3	0.9	4.3	2.8	2.0	0.8
14	4.1	3.4	2.4	1.0	4.3	2.9	2.1	1.0
15	4.2	3.5	2.5	1.1	4.3	3.0	2.2	1.1
16	4.2	3.5	2.6	1.2	4.4	3.1	2.3	1.1
17	4.2	3.6	2.6	1.2	4.4	3.2	2.4	1.2
18	4.2	3.6	2.7	1.3	4.4	3.3	2.5	1.3
19	4.2	3.7	2.8	1.4	4.4	3.4	2.5	1.3
20	4.2	3.7	2.8	1.4	4.5	3.4	2.6	1.4
21	4.3	3.7	2.9	1.5	4.5	3.5	2.7	1.4
22	4.3	3.7	2.9	1.5	4.5	3.5	2.7	1.5
定常	4.5	4.0	3.3	2.8	4.6	3.8	3.2	1.8

実験 番号	Exp. 1c (恢復実験) $\zeta_0 = 29.3\text{cm}$			
	5	16	29	50
0	20.5	14.6	12.2	7.8
10	17.9	13.9	12.0	7.7
20	15.5	12.6	10.3	7.2
30	13.7	11.2	9.3	6.7
40	12.4	10.4	8.4	6.1
50	11.1	9.5	7.7	5.6
60	10.1	8.8	7.1	5.1
70	9.2	8.0	6.5	4.7
80	8.5	7.2	5.9	4.3
90	7.7	6.5	5.5	4.0
100	7.0	5.8	4.7	3.6
110	6.5	5.1	4.1	3.2
120	5.5	4.5	3.6	2.9
140	4.2	3.3	2.7	2.2
160	3.1	2.5	2.1	1.6
180	2.2	1.8	1.4	1.1
200	1.5	1.1	1.0	0.7
220	1.0	0.8	0.7	0.5
240	0.7	0.4	0.4	0.3
300	0	0.1	0.1	0.1
定常	0	0	0	0

横井の揚水開始及び停止後の附近水位變化

(b) 底水頭降下

実験番号	$\frac{x}{L}$ $\frac{cm}{sec}$	\bar{x}															
		0.5	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	74.5
1b $\zeta_0 = 27.8$ cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	26.3	21.4	10.8	8.6	7.2	6.3	4.5	3.1	2.8	2.4	1.9	1.2	0.7	0.5	0.3	0
	2	27.6	23.7	16.5	13.6	11.6	9.9	8.2	6.5	5.8	5.0	4.1	2.9	2.4	1.7	0.9	0
	3	27.2	24.1	18.9	16.1	13.7	11.7	10.0	8.4	7.6	6.5	5.4	4.1	3.3	2.2	1.3	0
	4	27.2	24.4	19.9	16.9	14.5	12.6	11.0	9.5	8.6	7.5	6.3	4.9	4.0	2.6	1.5	0
	5	27.2	24.4	20.6	17.6	15.2	13.2	11.6	10.2	9.3	8.2	7.0	5.5	4.6	3.1	1.9	0
	6	27.2	24.3	20.8	17.8	15.4	13.2	11.8	10.4	9.7	8.4	7.3	5.8	4.8	3.4	2.1	0
	7	27.2	24.4	20.9	17.8	15.4	13.6	12.3	11.1	9.8	8.5	7.6	6.2	4.9	3.4	2.1	0
定常	27.2	24.4	20.9	17.8	15.4	13.6	12.3	11.1	10.0	8.8	7.6	6.2	4.9	3.4	2.1	0	
2b $\zeta_0 = 20.2$ cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	15.2	11.1	3.7	4.0	3.9	3.0	2.1	1.4	1.1	0.9	0.6	0.2	0	0	0	0
	2	18.6	17.3	9.6	9.1	7.9	7.0	5.2	4.1	3.5	2.9	2.2	1.5	1.2	0.7	0.2	0
	3	19.6	17.9	12.9	11.7	10.1	8.6	7.1	5.9	5.2	4.5	3.5	2.5	1.9	1.1	0.6	0
	4	19.9	18.3	14.6	12.9	11.1	9.6	8.1	7.2	6.2	5.3	4.5	3.1	2.6	1.6	0.9	0
	5	20.0	18.6	15.6	13.8	11.9	10.5	9.1	8.0	7.1	6.2	5.2	3.5	3.0	1.9	1.2	0
	6	20.0	18.6	16.1	13.8	12.4	10.9	9.5	8.5	7.5	6.5	5.6	4.6	3.6	2.5	1.6	0
	7	20.0	18.6	16.1	13.8	12.4	10.9	9.5	8.5	7.5	6.5	5.6	4.6	3.6	2.5	1.6	0
8	20.0	18.6	16.1	13.8	12.4	11.1	9.9	9.0	8.0	7.0	6.0	4.6	4.0	2.5	1.6	0	
定常	20.0	18.6	16.1	13.8	12.4	11.1	9.9	9.0	8.0	7.0	6.0	4.9	4.0	2.5	1.6	0	
3b $\zeta_0 = 18.7$ cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	15.2	9.0	7.5	6.5	5.5	4.1	2.8	2.7	2.3	1.8	1.4	1.0	0.6	0.2	0	0
	2	16.5	13.5	11.0	10.1	8.6	7.3	6.0	5.3	4.8	3.8	2.8	2.3	1.7	0.8	0	0
	3	17.1	14.6	12.9	11.2	9.9	8.5	7.4	6.9	6.0	5.1	4.1	3.2	2.3	1.3	0	0
	4	17.2	15.1	13.3	11.5	10.5	9.2	8.2	7.5	6.6	5.6	4.6	3.7	2.6	1.6	0	0
	5	17.2	15.1	13.3	11.2	10.8	9.7	8.7	8.0	7.1	6.1	5.1	4.2	3.0	1.6	0	0
	6	17.2	15.1	13.3	11.2	10.8	9.7	8.7	8.0	7.1	6.1	5.1	4.2	3.0	1.6	0	0
	7	17.2	15.1	13.3	11.2	10.8	10.1	9.0	8.0	7.1	6.1	5.1	4.2	3.0	2.0	0	0
定常	18.5	17.2	15.1	13.3	11.2	10.8	10.1	9.0	8.0	7.1	6.1	5.1	4.2	3.0	2.0	0	

実験番号	$\frac{x}{L}$ $\frac{cm}{sec}$	\bar{x}															
		0.5	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	74.5
4b $\zeta_0 = 15.4$ cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	12.5	10.1	4.2	3.7	3.5	3.0	2.3	1.6	1.5	1.1	0.9	0.8	0.5	0.4	0.3	0
	2	13.5	12.7	7.5	7.2	6.9	5.7	4.5	3.6	3.1	2.5	2.1	1.4	1.1	0.6	0.3	0
	3	14.8	13.8	9.5	8.4	7.5	6.2	5.4	4.9	4.1	3.3	2.6	2.2	1.5	1.0	0.6	0
	4	15.0	13.8	11.2	10.2	9.1	8.0	7.0	6.1	5.5	4.8	4.0	3.0	2.2	1.6	1.0	0
	5	15.2	13.9	12.0	10.7	9.6	8.6	7.5	6.6	5.9	5.1	4.3	3.4	2.6	1.6	1.0	0
	6	15.2	13.9	12.3	11.1	10.0	8.9	7.9	7.1	6.4	5.1	4.3	3.7	3.0	2.0	1.0	0
	7	15.2	13.9	12.6	11.1	10.4	8.9	8.1	7.1	6.6	5.6	4.9	3.7	3.0	2.0	1.0	0
8	15.2	13.9	13.0	11.6	10.4	9.1	8.1	7.5	6.7	6.7	5.6	3.7	3.4	2.6	1.0	0	
定常	15.2	13.9	13.0	11.6	10.4	9.1	8.1	7.5	6.7	6.7	5.6	3.7	3.4	2.6	1.0	0	
5b $\zeta_0 = 12.3$ cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	9.1	5.4	2.3	2.2	2.1	1.9	1.3	1.2	1.0	0.7	0.5	0.4	0.2	0	0	0
	2	11.4	7.6	5.0	5.0	4.5	3.8	3.0	2.6	2.0	1.9	1.4	1.0	0.8	0.6	0.3	0
	3	11.5	9.7	6.8	6.5	6.5	5.4	4.6	3.8	3.3	2.6	2.1	1.6	1.3	0.9	0.4	0
	4	11.9	10.8	8.2	7.8	7.0	6.0	5.3	4.9	4.2	3.6	3.0	2.2	1.8	0.9	0.4	0
5	11.9	10.8	9.8	8.8	8.4	7.3	6.3	5.5	4.9	4.2	3.4	2.7	1.8	0.9	0.4	0	
定常	11.9	10.8	9.8	8.8	8.4	7.3	6.3	5.5	4.9	4.2	3.4	2.7	1.8	0.9	0.4	0	
6b $\zeta_0 = 10.2$ cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	9.8	6.4	2.5	2.5	2.3	1.9	1.2	0.9	0.7	0.4	0.3	0.3	0	0	0	0
	2	10.0	8.3	4.6	4.6	4.3	3.8	2.6	2.2	1.9	1.6	1.2	0.7	0.5	0.4	0.4	0
	3	10.1	9.0	6.1	6.1	5.4	4.7	3.9	3.2	2.9	2.5	1.8	1.5	1.2	0.7	0.5	0
	4	10.1	9.2	7.5	7.0	6.2	5.6	5.1	3.9	3.5	3.1	2.6	2.0	1.6	0.7	0.5	0
	5	10.1	9.1	7.5	7.0	6.2	5.1	4.6	3.9	3.5	3.1	2.7	2.0	1.6	0.7	0.5	0
	6	10.1	9.7	8.3	7.0	6.6	6.2	5.1	4.8	4.1	3.1	2.7	2.0	1.6	0.7	0.5	0
7	10.1	9.7	8.4	7.9	7.1	6.6	5.8	4.8	4.1	3.9	3.4	2.5	1.6	0.7	0.5	0	
定常	10.1	9.7	8.4	7.9	7.1	6.6	5.8	4.8	4.1	3.9	3.4	2.5	1.6	0.7	0.5	0	

横井の揚水開始及び停止後の附近水位變化

実験番号	X_{cm} L. sec.	0.5	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	74.5
		7 _b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\xi_0 = 9.2 \text{ cm}$	1	8.6	7.4	4.7	3.8	3.6	3.2	2.9	1.9	1.7	1.6	1.1	0.9	0.8	0.5	0	0
	2	8.9	8.0	7.0	6.3	5.5	5.0	4.3	3.8	3.3	2.8	2.5	1.8	1.5	1.0	0.4	0
	3	9.1	8.0	7.8	6.5	6.1	5.5	5.1	4.3	4.1	3.8	3.1	2.5	2.1	1.5	0.4	0
	4	9.1	8.0	7.8	7.1	6.6	6.1	5.7	4.9	4.6	4.4	3.8	3.1	2.5	1.8	0.9	0
	定常	9.7	8.0	7.8	7.1	6.6	6.1	5.7	4.9	4.6	4.4	3.8	3.1	2.5	1.8	0.9	0
8 _b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\xi_0 = 4.5 \text{ cm}$	1		3.0	1.4	1.4	1.3	1.1	0.7	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0	0
	2		3.6	2.3	2.3	2.1	1.6	1.5	1.2	1.0	0.8	0.7	0.5	0.4	0.3	0	0
	3		4.0	3.0	2.9	2.7	2.1	1.7	1.5	1.4	1.2	0.9	0.7	0.4	0.3	0.1	0
	4	4.3	4.0	3.4	3.2	2.9	2.5	2.2	1.9	1.7	1.5	1.1	0.7	0.4	0.3	0.1	0
	定常	4.3	4.0	3.4	3.2	2.9	2.5	2.2	1.9	1.7	1.5	1.1	0.7	0.4	0.3	0.1	0

実験番号	X_{cm} L. sec.	0.5	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	74.5
		2 _c	0	27.3	25.1	22.9	20.7	18.9	17.3	16.0	14.8	13.2	11.8	10.2	8.5	6.8	5.1
(恢復実験)	20	19.8	19.0	15.0	14.9	16.0	14.9	13.3	13.2	11.7	10.7	9.2	7.7	6.2	4.2	2.6	0
	30	17.1	16.6	16.0	15.0	14.2	13.1	12.3	11.8	10.4	9.3	8.1	6.8	5.4	3.8	2.2	0
	40	15.1	14.7	14.1	13.3	12.6	11.9	11.2	10.3	9.4	8.5	7.4	6.0	4.9	3.6	1.9	0
	60	12.1	11.8	11.5	10.9	10.5	9.9	9.2	8.7	7.9	7.0	6.1	5.0	4.0	2.9	1.6	0
	80	10.2	10.1	9.9	9.4	8.9	8.4	8.0	7.4	6.8	6.0	5.2	4.4	3.5	2.3	1.2	0
	100	8.8	8.7	8.4	8.0	7.8	7.3	7.0	6.5	5.7	5.2	4.7	3.8	3.0	2.1	1.0	0
	120	7.8	7.6	7.3	7.0	6.8	6.3	6.1	5.8	5.0	4.7	3.9	3.2	2.7	1.9	0.8	0
	140	6.8	6.6	6.3	6.0	5.8	5.2	4.9	4.3	3.9	3.6	3.0	2.0	1.5	0.5	0	
	160	5.6	5.5	5.3	5.1	5.0	4.6	4.4	4.2	3.8	3.2	2.9	2.3	1.9	1.1	0.2	0
	180	4.7	4.6	4.5	4.3	4.1	4.0	3.8	3.4	3.1	2.8	2.2	1.9	1.4	1.0	0.1	0
240	2.0	1.9	1.8	1.7	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1	1.0	1.0	0.9	0.7	0.4	0	0	
290	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

、箱全部が同一水位となつた處で、右端の窓の紙を蓋の上端まで迅速に引剥けば、井戸水位を一定値まで急降下せしめた場合に相當するのである。又揚水停止の實驗は單に窓を上から蓋するだけで簡單に行ひ得る。

井戸揚水又は停止後の水頭は表水面及び底壓頭兩者を別々に測ることにした。底壓は第2圖に示す如く、底面に開口する測壓管を5cm間隔に16本立て、其の中の水面を活動寫眞に撮つて測つた。但し兩端の測壓管だけは、金網面より0.5cm内側に設けたから隣りの測壓管とは4.5cmの間隔になつて居る。又管の砂中開口部には金網をあて、沙の落込みを防ぐことは前論文の豎井模型と同様である。

沙中の水面を觀測するには、井戸側より夫々5, 16, 29, 50cmの處に2cm角の金網筒を砂中に挿入して觀測井とし、之に小浮子を浮べ、其の昇降を滑車を通じて煤煙紙上に記録せしめた。それと共に電氣クロノメーターを以てタイムマークを煤煙紙に入れること勿論である。第3圖は其の様な記象の例である。

是等の表水面降下記象と活動寫眞引伸しによる底水頭降下とから、各秒毎の水頭を読み

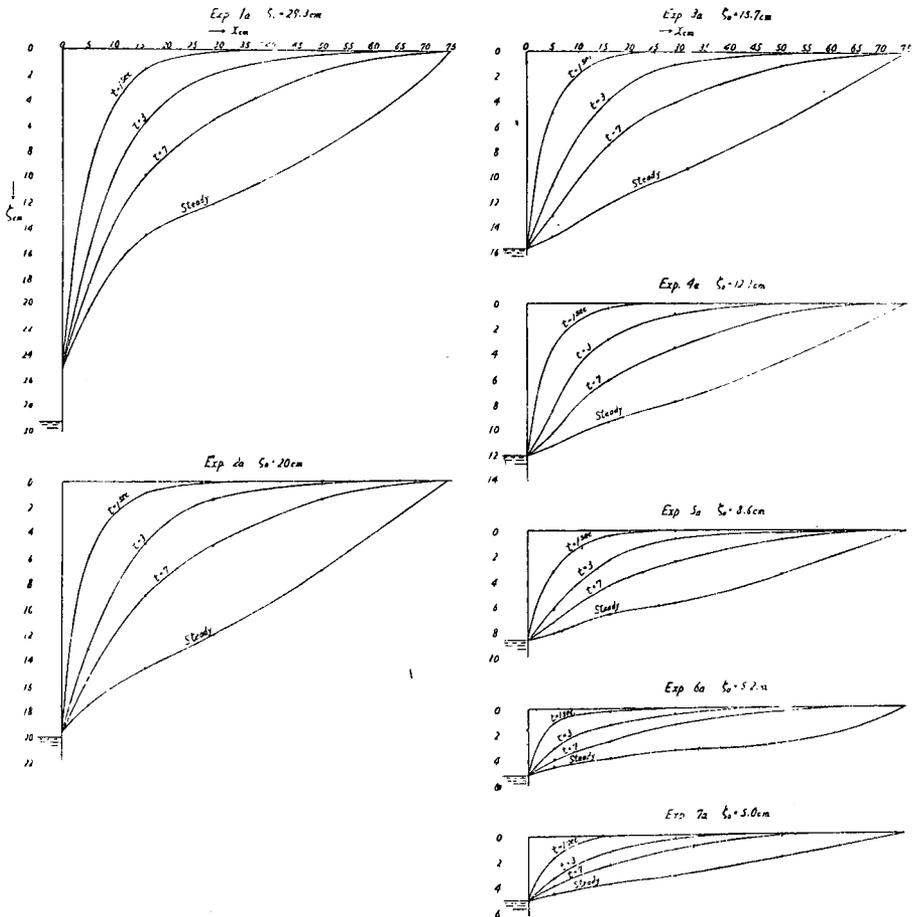
横井の揚水開始及び停止後の附近水位變化

取つたのが第2表である。實驗は、井内水面低下量を 5 cm 内外から 30 cm 前後まで種々に變へて、二十數回も行つたが、表には印刷の関係上僅かに其の内の若干を掲示した。

尙ほ第4圖は是等の結果から水位低下狀況が距離によつて如何に違ふかを見易い様に同一起點から描き始めたもので、第5圖は適當な時間毎の砂中水面及び底水頭分布を示したものである。たゞ残念なことには、實驗の人手不足の爲、表水面と底壓との變化を同一實驗中に測定することが出來ず、各別々に實驗したので、兩者を直接に並記し得ないのである。

實驗結果の検討 次は是等の結果を以て理論と對照して見る。

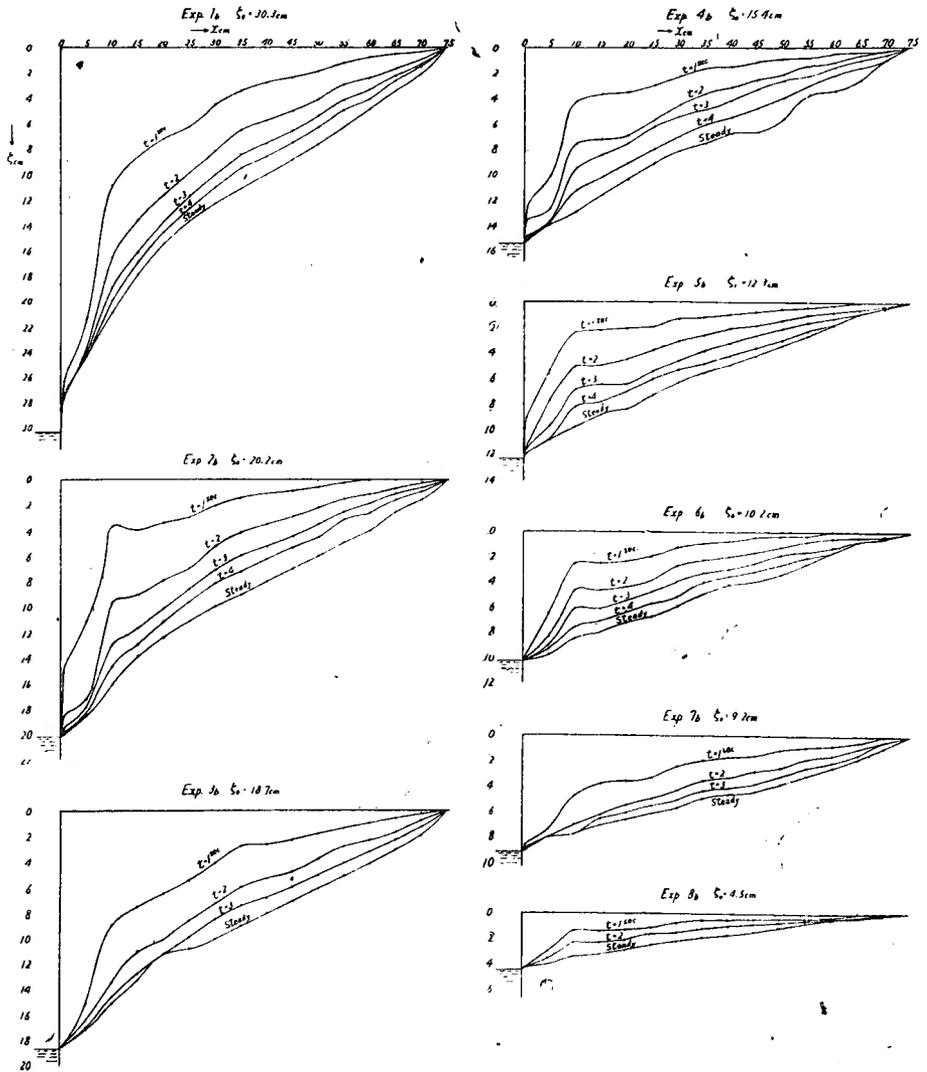
第5圖 砂中水面及び底水頭面の時間別形狀
(a) 砂中水面



横井の揚水開始及び停止後の附近水位変化

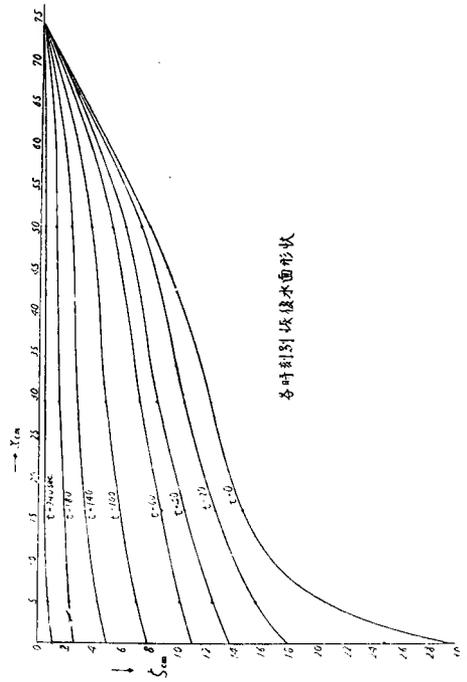
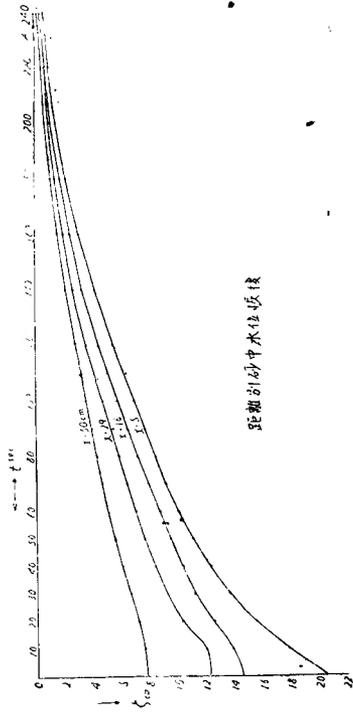
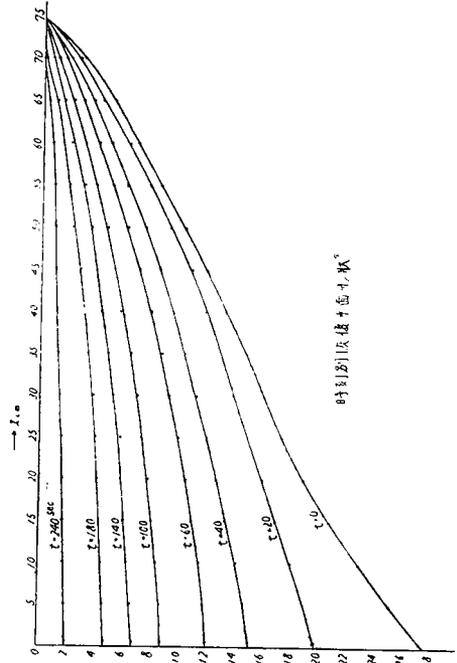
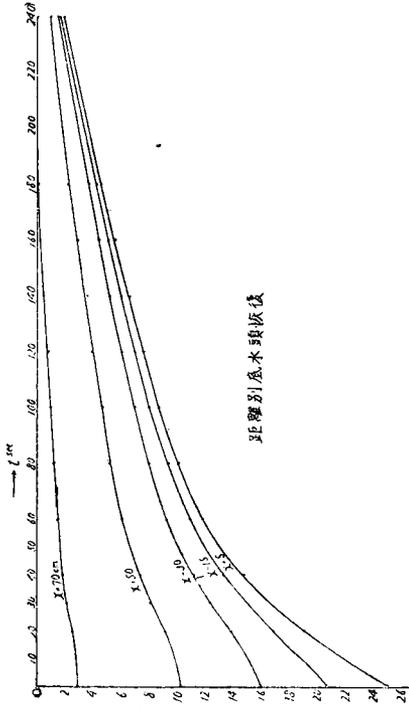
i) 先づ水位の最急降下時刻を検討する。第3圖の記象に明かな如く、井戸に近い距離5 cm では揚水開始と共に殆んど即座に水面が降下し始め、最急降下も 0.1 sec. に現はれるが、距離が遠くなるに従ひ、最初は極めて緩かに降下しつゝ、數秒後に最急降下となり、其の後は漸次緩かとなつて定常状態に近づく。それで各観測井の水面最急時刻を記象直接から又は一定時間間隔毎の水面降下量を求めて最大となる時を定めると、第3表が得られる。

第5圖 (b) 底 水 頭



横井の揚水開始及び停止後の附近水位變化

第5圖 (c) 揚水停止後の恢復



第 8 表 水面最急降下時 (揚水開始後, 秒)

實驗 番號	5	6	7	8	9	10	11	平均	x^2/t
最急降下時	餘り急速で判定困難なるも, 大體 0.1sec. 程度							0.1sec.	250
$x=5\text{cm}$	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.2	218
16	3.5	4.5	4.0	4.5	4.0	4.0	4.0	4.1	204
29	8.5	11.5	9.0	11.0	9.5	11.0	9.5	10.0	250
50									

即ち最急降下時刻 t は距離 x の二乗に比例して増大し, 理論式 (6) は被壓水に限らず不壓水にも成立つのである。尚ほ此の場合の帯水層厚 H は 29.5 cm で, x^2/t の平均は 229 であるから, 式 (6) を用ひて流通係数を算定すれば

$$cH = \frac{x^2}{6t} = 382, \quad c = 1.27 \text{ cm/sec.}$$

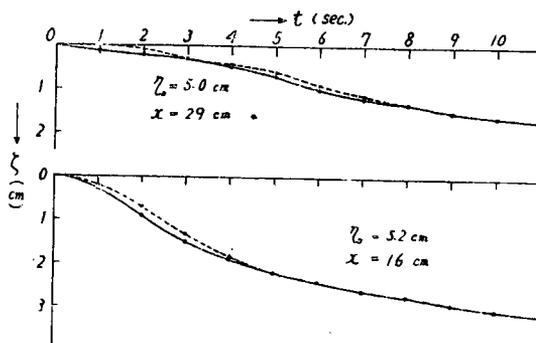
となり, 粒徑 0.5~1 mm の川沙としては眞とに妥當な値を得るのである。底水頭の最急降下時に就いても同様 (6) 式が成立つ。

ii) 次に一定點に於ける水位の時間的變化を式 (13) — (17) にて計算し

て見やう。計算は可なり面倒であるから, 表水面實驗 No. 6 の $x=29$ cm と No. 8 の $x=16$ cm に於ける二例だけを示すに止める。

途中の計算は紙幅の都合上略するが, 上の cH の値を使つて第 4 表の結果が出る。之を圖にすれば第 6 圖

第 6 圖 水面降下の計算値と實測との對照



の様になり, 實測との差は 0.2 cm を超えない。第一次近似算としては充分満足なる一致を示すといつてよい。

iii) 本文の理論では水の垂直運動を度外したから, 水頭は同一縦線上なら表面でも底でも同じでなくてはならない。然し事實は水平運動の外に垂直分速もあるから, 底水頭と表水面とは同一變化をしない。

即ち, 底水頭の時間的變化や水平分布狀況も大勢は表水面のそれと類似ではあるが, 然し常に表水位よりは其の降下が迅速で定常状態に達するにも遙に短時間で足りる。表水面が定常状態になるのは揚水の強さ如何によつて 15~30 秒を要したが, 底水頭の方は 7~8 秒

第4表 表水位降下の計算例

Ex. 6 $\begin{cases} R=75 \text{ cm}, x=29 \text{ cm} \\ \zeta_0=5.0 \text{ cm} \\ \zeta=\zeta_0(1-x/R)=3.1 \text{ cm} \end{cases}$

Ex. 8 $\begin{cases} R=75 \text{ cm}, x=16 \text{ cm} \\ \zeta_0=5.2 \text{ cm} \\ \zeta_1=\zeta_0(1-x/R)=4.1 \text{ cm} \end{cases}$

時間 $t(\text{sec.})$	ζ_2 (cm)	$\zeta(\text{cm})$	
		計 算	観 測
1	3.0	0.1	0
2	2.9	0.2	0.1
3	2.8	0.3	0.3
4	2.6	0.5	0.4
5	2.4	0.7	0.6
6	2.1	1.0	0.9
7	1.9	1.2	1.1
8	1.8	1.3	1.3
9	1.6	1.5	1.5
10	1.5	1.6	1.6

時間 $t(\text{sec.})$	ζ_2 (cm)	$\zeta(\text{cm})$	
		計 算	観 測
1	3.8	0.3	0.2
2	3.2	0.9	0.7
3	2.6	1.5	1.3
4	2.2	1.9	1.8
5	1.9	2.2	2.2
6	1.7	2.4	2.4
7	1.5	2.6	2.6
8	1.4	2.7	2.7
9	1.2	2.9	2.9
10	1.1	3.0	3.0

でよかつた。特に井戸附近だけなら4~5秒で定常状態になるのである。

iv) 第四に注意すべきは、砂中水面が井壁の内外で不連続なこと⁽²⁾で著者の前論文に一致する。尤も定常状態になつた後の不連続差は井戸水面低下量を著しく大にした場合だけに見られ、 $\zeta_0=29.3 \text{ cm}$ (實驗 5) のときは不連続差 4.5 cm もあり、 $\zeta_0=20 \text{ cm}$ のときは僅かに 0.6 cm に減じ、其以外の井水面低下によつては井壁内外の不連続は認め難くなる。⁽³⁾縦井の場合に較べると此の現象は餘程微弱である。底水頭も不連続に見えるが、之は井戸外僅か 0.5 cm に設けた水壓管が不適當な爲と思はれる。此の測値がある爲に底水頭分布状態が著しく不規則になるからである。

砂中水面の不連続は、水が水平運動の外に垂直分速を有するためであつて、前論文⁽⁴⁾に於て證明したところである。而して井水面を透水層下底まで降下する場合には

$$\text{井壁内外水面差} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{Q}{k} = \frac{H^2}{2\sqrt{2} R + 1}$$

又一般には

$$\text{水面差} = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{h_0^2 + \left(\frac{H^2 - h_0^2}{2R} \right)^2} - h_0 \right\}$$

(2) 野滿隆治: An advance in the theory of wells. 日本天文學及地球物理學輯報, 7 (1936) 159.

(3) 前出 (1).

(4) 前出 (2).

となるべきことが示されて居る。然るに我々の模型實驗では $R=75$ cm, $II=30$ cm であつて、實驗 1_a は $h_0=0$, 實驗 2_a は $h_0=30-20=10$ cm の場合である。仍つて夫れ夫れ上の二式から井壁内外の水面差を計算すると

$$\text{實驗 1}_a \text{ では } \frac{900}{2\sqrt{2 \times 75 + 1}} = 4.2 \text{ cm,}$$

$$\text{實驗 2}_a \text{ では } \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{100 + \left(\frac{900 - 100}{2 \times 75} \right)^2} - 10 \right\} = 0.7 \text{ cm}$$

となつて殆んど實測に一致する。其他の實驗では計算上 0.1 cm 以下となる筈であるが、事實水面差は認め難いのであつた。何れにしても縦井の場合に比し甚だ小さい。

其他此の模型實驗で注意を惹くのは

v) 表水位記象にも底水頭變化にも往々波状の振動が見られる。恐らく實在するものであつて、 t がフーリエ級數に展開される爲の現象だと思はれる。

vi) 揚水停止後の恢復は非常に長時間を要した。之は模型の井戸容量が地下流に比し相當大きい爲め、既述の如く其の補充に時間を費やすこと大なるによる。

vii) 水面又は底水頭勾配は、井戸より離れるに従ひ緩かになるが、給水端に近き所で再び多少急となつて、全體の形は鞍狀をなす。程度は豎井の場合ほどにはないけれども、兎も角同性質の現象である。此の理由の説明は著者に腹案があるが、後日に譲る。

IV. 結 論

以上の要點を下に摘記する。

1) 前論文の豎井理論に準じ、不壓水並びに被壓水中の横井につきて、揚水開始又は停止後の附近水位變化に對する理論を作つた。

2) 不壓水で有效空隙率 β が勤める役割を、被壓水では帶水層の壓縮率 κ が勤める。

3) 不壓水の場合は勿論被壓水の場合に比して多少複雑になる。然し井戸揚水が弱く井水面降下が原水厚に比して小なる間は近似的に不壓水の場合と全く同形の式にて表はされる。

但し有效空隙率に比して帶水層の壓縮率は著しく小なる爲、同一量の揚水に對しても、水位の低下量や影響の傳播速度は桁違ひに被壓水の方が大となる。従つて影響圏の大きさも亦然りである。

4) 揚水に伴ふ水位降下の最急となる時間 t は井戸からの距離 v の二乗に比例して増

大する。即ち

$$\text{不壓水 } t = \frac{\beta x^2}{6kH}; \quad \text{被壓水 } t = \frac{x_1^2}{6k}$$

なる關係がある。従つて井戸揚水試験により此の時間を測定すれば現場のまゝの有効空隙率又は帶水層の壓縮率を簡単に決定出来る。

5) 以上の理論を検證する爲に、模型横井を作つて實驗した。其の結果は大體に於て理論と一致する。特に揚水時の水位の時間的變化や其の最急降下時刻等は數量的に計算しても充分満足なる結果を示すのである。

6) 更に揚水極めて強烈にして、井水面が殆んど帶水層下底に近い場合には、定常状態に於ても井壁内外の水面が不連続階段狀となることを實驗的に明示した。此の問題は本文の理論外に屬するが、前論文の理論と對照したるに極めて満足なる一致を示した。

終りに本實驗の施行に當つては、土生片樟氏の協力を得た。厚く謝意を表する。