

湖水面などの変化に起因する自由地下水の 水位変動の解析に関する研究

松尾新一郎・河野伊一郎 共著

(土木学会論文集第 139 号・昭和 42 年 3 月所載)

【討 議】：宇野尚雄（岐阜大学工学部）

筆者はびわ湖水面変動による周辺地下水位の変動について調査研究した¹⁾こともある関係上、著者らの研究の内容については十分理解しているつもりであるが、筆者は著者らの考え方は若干異なった考え方をもっているため、この種の地下水位変動の解析に対する考え方について若干述べたいと思う。

本論文は「準深」という概念を提案して「湖水面などの変化に起因する自由地下水の水位変動の解析」を進めたものと理解される。筆者の疑問はつぎのようである。

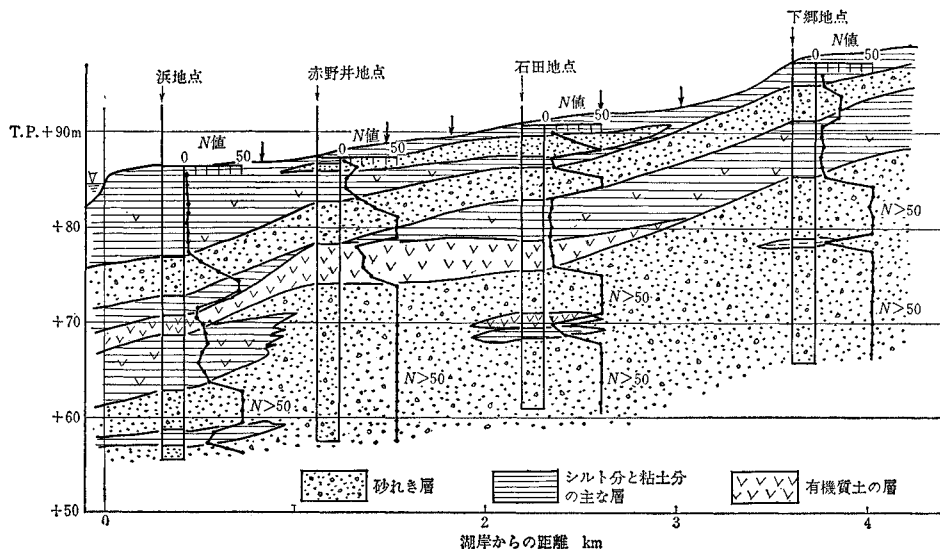
(1) 著者らの提案された「準深」というものは具体的に何を表現するものであるかという疑問。

「準深」は一応「仮定の透水層厚さ」と解釈されるが、著者らが一例として掲げているびわ湖東岸の野州川地区の地下水位変動の解析における「透水層厚さ」について述べるとつぎのようである。建設省の土質・地下水調査²⁾によると、本論文の縦断面 I の土質構成は図-1 のようであって、表層はかなりの厚さに難透水性の粘土層とシルト層があって、その下に薄い砂礫の滞水層が認められる。この地層図はボーリングによる土質柱状図の作成と併行して、各層での標準貫入試験による N 値と各

層の地下水圧を測定することにより、各層の土質・地下水の特徴をは握したうえで地層の断続を検討して作成されたものである。またボーリング地点の間隔は約 1 km であるため、その中間地点（図-1 で矢印をした地点）で実施された電気探査の結果も考慮されている。

著者らが計算されている「準深」と図-1 に示された現実の透水層とは全然違っている。最も顕著な相違は現実の地盤には被圧滞水層が現われているのに対して、「準深」なるものでは自由地下水と被圧地下水の区別が全くできないことである。自由地下水の性状と被圧地下水のそれとは著しく相違する。たとえば自由地下水の水位変化の伝ばは kH_0/β （ここに β は土の有効間げき率、 H_0 は実際の透水層厚さ）により影響されるのに対して、被圧地下水のそれは透水係数 k とその被圧層の圧縮率 κ との比 k/κ （もしろう水があるときは、ろう水の割合）により影響される。前者の値が $kH_0/\beta=10^2 \text{ m}^2/\text{day}$ のオーダーであるのに対して、後者の値は $k/\kappa=10^3 \text{ m}^2/\text{day}$ のオーダーといわれる。このような土質と地下水の性状を無視することになる「準深」というものは一体どんな物理的意味をもつのであろうか。

図-1 野州川南部の地層図



(2) 本解析法に用いられる条件に関する疑問

本解析法における明確な資料は一地点の「透水層厚さ」と全域にわたる地下水位（または地下水位勾配）であるが、複雑な地下水位変動に対して、不確定要素の多い、少数の資料にもとづく解析結果の信頼性をどのように考えればよいのか。一地点の選定場所を変えた場合にも同一の解析結果をうることができるという実証はあるのであろうか。表題に示された「自由地下水」というのも調査対象の地域の地下水が自由地下水であるか被圧地下水であるかは、詳細な現地調査によってはじめて明らかになるのではないか。この意味において、「……現地調査をする必要がなく、縦断の任意の一点においてのみ透水層厚さを調査し、……」というの、実際の地下水位変動を考えると、理解しがたいことであると筆者は考える。

【回答】：松尾新一郎・河野伊一郎（京都大学工学部）

広域にわたる地下水に関する研究において最もやっかいな問題の一つに境界条件の設定があげられる。自然の地下水流を Darcy の法則にあてはめて考える場合には、透水係数と透水層厚さ（または透水断面）の大きさおよびそれらの分布状態である。

従来、透水係数については揚水試験による算定やボーリングによる土質試料からの推定を行ない、透水層厚さについてはボーリングや電探、弾探によって求めている。しかし、本文においても述べているように、広域にわたる地下水の定量的な解析を行なう場合に必要これらの測定に対してはぼう大な労力と経費を要し、なおかつその精度も他の研究に比して低いといわねばならない。地下水調査の精度はオーダの問題として取り扱わなければならないといわれる所以である。

本研究のうちの準深という概念の導入については、そうした透水係数、透水層厚さ（これらは3次元的に不規則にしかも大きく変化している場合が多い）を全域にわたって測定せねばならない労力や経費を軽減せしめ、かつ合理的な境界条件を見出すことを第一のねらいとしている。すなわち、比較的測定しやすく、また測定精度も高い地下水位を重点的に調査し、その分布をより有効に解釈、利用して逆に地盤の透水性に関する境界条件を設定することである。たとえていうならば、一般に土質試料の透水性は土粒子の径と間げきの大きさおよびその分布によって変化する。しかし、それら個々の要素の複雑な構成を Poiseuille の法則などを駆使して微視的に考察するよりも、これら透水性に関与する諸要素をひとまとめにして透水係数という概念（Darcy の式の比例定数）で代表させる方が多くの場合便利である。全く同様に、地下構造の透水性をあらわす場合に透水係数、透水

一般に地下水の様相はその地域の地盤構成すなわち地形や地質などに支配される。地下水位変動の問題は一種の境界値問題であるから、境界条件を明確にしなければならないであろう。各流域における上流側の条件として、その地域の地盤構成の特殊性により、流量一定、水位一定または補給なし（溜まり水）などの条件が考えられる¹⁾。本論文では、この点についてとくに明記されていないようであるが、どのように解釈されるのであろうか。明確なご回答が示されることを期待します。

参考文献

- 1) 稲田 裕・赤井浩一・宇野尚雄 琵琶湖周辺の地質・地下水調査, 土木学会誌, Vol. 52, No. 4, pp. 24~30 (1967).
- 2) 「野州川・日野川地区土質・地下水調査報告書」, 建設省近畿地方建設局琵琶湖工事事務所・応用地質調査事務所, 昭和41年3月.

層厚さの大きさおよびそれらの分布などをひとまとめにした巨視的な概念であらわす方が便利な場合が多い。こうした意味において準深の意義が存在するのである。

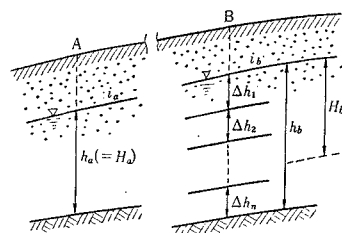
さて、討議は著者らの意図するところをいくつか誤解されて行なわれているようで、さらに本文で取り扱っていない問題にまで言及されているのでこの点を指摘しながら、改めて準深の基本的な考え方を簡単な具体例によって説明する。また本文とは離れるが、あえて討議者が論じておられる被圧地下水についても最後に述べる。

(1) 準深とは具体的にどんなものか、準深と透水層厚さとは異なっているのはどうしてか？

準深の定義は本文中の式(3)で示しているとおりである。その解釈については透水容量すなわち地下水の透しやすさをあらわすパラメーターである。もちろん討議者の理解しておられるように仮想の透水層厚さと考えてもよい。しかし、「仮想の……」である限り実際の透水層厚さではない。いま、ごく単純な地下構造の場合を具体例としてとりあげるとつぎのようになる。

説明図-1 に示すように同一縦断面上の A, B 両地

説明図-1 準深の具体例の説明図



層厚さの大きさおよびそれらの分布などをひとまとめにした巨視的な概念であらわす方が便利な場合が多い。こうした意味において準深の意義が存在するのである。

点を考える。A 地点における透水係数を k_a とし、深さ方向に変化しないものとする。同様に透水層厚さを h_a 、地下水位勾配を i_a とする。一方、B 地点においては透水係数 k_1, k_2, \dots, k_n の n 層が地下水流の方向と平行に滞積し、その滞積層の厚さをそれぞれ $\Delta h_1, \Delta h_2, \dots, \Delta h_n$ 、地下水位勾配を各層等しく i_b とする。簡単のため A、B 両地点における地下水量 q が等しい場合を考える

$$q = k_a \cdot i_a \cdot h_a \dots\dots\dots(1)$$

$$q = (k_1 \Delta h_1 + k_2 \Delta h_2 + \dots + k_n \Delta h_n) \cdot i_b \dots\dots(2)$$

いま、A 地点を基準地点に選んで A、B 地点の準深をそれぞれ H_a, H_b で表わすと式 (1)、(2) はそれぞれ式 (1)', (2)' となる。

$$q = k_a \cdot i_a \cdot H_a \dots\dots\dots(1)'$$

$$q = k_a \cdot i_b \cdot H_b \dots\dots\dots(2)'$$

式 (1) と式 (1)', 式 (2) と式 (2)' を対比させると式 (3)、式 (4) となる。

$$H_a = h_a \dots\dots\dots(3)$$

$$H_b = (k_1 \Delta h_1 + k_2 \Delta h_2 + \dots + k_n \Delta h_n) / k_a \dots\dots(4)$$

A 地点は基準地点であるから準深と透水層厚さが一致し、式 (3) が成立する。一方、B 地点において H_b は必ずしも $h_b (= \Delta h_1 + \Delta h_2 + \dots + \Delta h_n)$ と等しくない。また、 $k_1 = k_2 = \dots = k_n = k_b$ の場合には式 (5) となる。

$$H_b = (\Delta h_1 + \Delta h_2 + \dots + \Delta h_n) \cdot k_b / k_a \dots\dots(5)$$

すなわち、 $k_a = k_b$ のときには $H_b = h_b$ となる。

本文では上記の範囲をさらに $q_a \doteq q_b$ の場合に拡張して論じている。

他の例をあげると、透水係数の等しい I、II の土質試料について、おのおの土粒子の径と間げき比を測定してみると必ずしも等しくない。同様に等しい準深の A、B 地点での透水層厚さは必ずしも等しくない。

(2) 準深によって自由地下水と被圧地下水の区別ができないのではないか？

準深によって自由地下水と被圧地下水の区別ができるとは考えていない。自由地下水であるか被圧地下水であるかは準深の議論以前の問題である。本文の題目は「湖水面などの変化に起因する自由地下水 (Unconfined Groundwater) の水位変動の解析に関する研究」である。

自由地下水と被圧地下水は常に一線で区別できるものではなく漸時的なものであるが、いわゆる自由地下水と被圧地下水とは全く異なった取扱いを必要とする。ゆえに本題は、自由地下水の研究であることを明示しているのであり、被圧地下水は対象外である。

被圧地下水については本文の領域外であるが最後に若干の意見を加える。

(3) $k_b H / \beta, k / \kappa$ などの土質と地下水の性状を無規す

ることになるのではないか？

本文中、数度にわたって明記し (たとえば結論においては「本文では定常流として取り扱う場合を報告し、初期水位形から最終水位形を求める場合であって途中の変化過程は含んでいない。)、また解析方法をみても自ら明白なるように時間の関数ではなく、井戸理論でいえば平衡式に相当するものである。この場合には討議者が指摘されている β, κ については全く議論にならないのである。たとえば土質力学における圧密理論において最終沈下量の算定に圧密係数 C_v が直接関与しないのと同様である。

(4) 解析結果の信頼性についてどのように考えればよいか？

討議者のいわれる解析結果の意味を地下水位低下量の解析結果と解釈すれば以下のようである。

本文の図-10、11 に示すのは、考えている縦断面の基準地点 A において透水層厚さ h を $2h_a, h_a, h_a/2$ とした場合の解析結果を示している。すなわち h_a の測定精度と解析結果の信頼性をこれらの図から判断できる。また、本文の図-12、13 では $(q/k)_a$ の変化、すなわち基準地点 A の選び方による $(q/k)_a$ の差が水位変動量の解析結果におよぼす影響について検討した図と考えることができる。本文の解析例では上流と下流では $(q/k)_a$ の値が約 4 倍変化する場合であるが、これによる解析結果の差が非常に小さいことは信頼度の高いことを意味している。しかし信頼性がどの程度かという質問に対しては現地の状況によっていくぶん異なるため一概に論じられないが、調査地域において本文の図-10~13 を描けばおのずから h_a などの測定値に対応する信頼度をは握することができる。

(5) 自由地下水であるか被圧地下水であるかは詳細な現地調査によってはじめて明らかになるのではないか？

質問 (2) とも関連して議論の余地のないところである。討議者は「……現地調査をする必要がなく……」という文章をとりあげているが、全く現地調査をせずに地下水の性状がわかることなどありえない。討議者は広域、ないしは全域という語句をことさら見落している。討議者は広域の境界条件のは握にどんな手段を準備しておられるのであろうか。討議者自らも引用している著者らの文献 1) から、びわ湖周辺の地質構成、境界条件の複雑なことは十分承知しておられるはずである。その複雑な土質構成を超越して広域にわたる自由地下水の水位変動の一解析法を提示したのが本文である。

討議者の今回の誤解は準深によって自由地下水と被圧地下水の区別をも可能であると判断されたところから生じたものと考えられるが、本文はあくまで自由地下水を対象とした準深の取扱いに関する研究 (準深が被圧地下

水の場合に適用できないという意味ではない)であり主題に明示したとおりである。自由地下水か被圧地下水かはそれ以前の問題であり、現地調査によらなければならないのは当然である。

(6) 野洲川周辺の湖岸付近の一部は被圧地下水と考えられるが、解析例ではその考慮がなされていないのではないか？

討議者の示された図-1にあるように湖岸より約1kmは比較的厚い不透水層におおわれていて被圧地下水であると思われる。しかし著者らはつぎの理由により全域が自由地下水から成っているとして計算例を示している。

(i) 本文は野洲川デルタにおける地下水調査が主目的ではなく、自由地下水の水位変動の解析方法に関する研究であり、解析例は解析方法の理解を助けるために提示したものである。

(ii) 本文の断面Iに対して、自由地下水として求めた水位低下曲線(図-10または図-12)をみると湖岸より1kmまでは水位低下量の減衰は近似的に零である。これは後述するように被圧地下水を考慮した場合の結果とも一致する、すなわち、当地において湖岸より1kmの被圧地下水帯を無視していることはこの場合結果としてはさしつかえないのである。

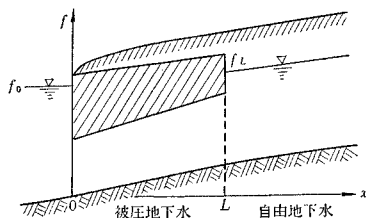
(7) 上流側の境界条件として流量一定、水位一定などの条件を与えるべきではないか？

本文では流量一定であり、地下水位変動の生起する領域よりさらに上流において水位一定であるから、とくに境界地点と境界値を与えなくともよいのである。これは「基本的な考え方」、「解析の順序」の項の内容から明らかであり、水位変動量の最大値を求めることになる。いま、地下水位変動のおよぶ領域内で地下水供給源が存在する場合を本解析法に組み入れるのは簡単な一応用問題となる。たとえば湖岸よりの距離Lにおいて地下水供給源が存在する場合には、 $x=L$ において $\Delta h=0$ となるように本文中の式(2): $(q/k)=C'$ の一定値を反復試行法によって決定する。その結果、水位変動の前後においては異なる (q/k) の値を用いることになる。その他の手順は全く同一である。

(8) 被圧地下水の場合の考察

被圧地下水帯における準深の定義も自由地下水の場合

説明図-2 被圧地下水帯の説明図



と全く同様に考えることができる(本文中の式(3))。しかし、地下水位変動の解析法については、本文の「自由地下水に対する方法」をそのまま用いることができないのは当然である。

説明図-2のような単純化した被圧地下水帯における平衡状態を考える。地下水流量qが一定の場合には、 $(f_L - f_0) = \text{const}$ となり、準深Hの値にかかわらず、0地点の水位変動量 Δh_0 はそのまま減衰せずにL地点に伝達されると考えてよい。被圧地下水帯と自由地下水帯の二重構造になっている場合、あるいは説明図-2のL地点において水位変動量 Δh_L が規制されている場合には被圧地下水帯中の流量 q' が初期の流量qと異なってくる。このような場合の被圧地下水の水位変動は以下のように算定できる。

$$\text{変動前: } q = k_a \cdot H \cdot \frac{df}{dx} \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{変動後: } q' = k_a \cdot H \cdot \frac{df'}{dx} \dots\dots\dots(7)$$

ここに、記号は本文と同じである。

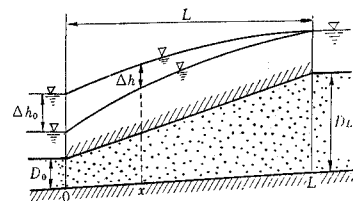
式(6)を $x=0$ において $f=f_0$ 、 $x=L$ において $f=f_L$ の条件で積分すると式(8)となる。

$$f = (f_L - f_0) \int_0^x \frac{1/H dx}{\int_0^L 1/H dx} + f_0 \dots\dots\dots(8)$$

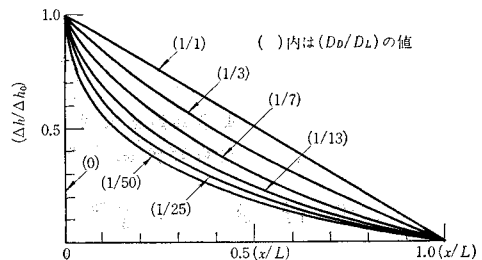
同様に式(7)を $x=0$ において $f'=f'_0$ 、 $x=L$ において $f'=f'_L$ の条件で積分すると式(9)となる。

$$f' = (f'_L - f'_0) \cdot \int_0^x \frac{1/H dx}{\int_0^L 1/H dx} + f'_0 \dots\dots\dots(9)$$

説明図-3 被圧地下水帯の模式図



説明図-4 (D_0/D_L) の値と水位変動の影響値の関係
 $(D_0/D_L) > 1$ の場合は、その逆数に対応する曲線と
 $(D_0/D_L) = 1$ の直線に対して対称である。



式(8), (9)より式(10)を得る。

$$\frac{f-f_0}{f_L-f_0} = \frac{f'-f_0'}{f_L'-f_0'} = \frac{\Delta h_0 - \Delta h}{\Delta h_0 - \Delta h_L}$$

$$= \frac{\int_0^x 1/H dx}{\int_0^L 1/H dx} \dots\dots\dots(10)$$

$$= F(x) \dots\dots\dots(11)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta h_L=0 \text{ の場合: } & \frac{\Delta h_1}{\Delta h_0} = 1 - F(x) \\ \Delta h_0=0 \text{ の場合: } & \frac{\Delta h_2}{\Delta h_L} = F(x) \end{aligned} \right\} \dots\dots(12)$$

式(12)を図示すると説明図-4となる。

いま一例として準深が上流に向かって1次関数で変化する場合 ($H=D_0+(D_L-D_0)(x/L)$, $L \geq x \geq 0$) について考えると式(11)となる。

$$\frac{\Delta h_0 - \Delta h}{\Delta h_0 - \Delta h_L} = \frac{\ln\{1+(x/L)(D_L/D_0-1)\}}{\ln(D_L/D_0)}$$

$\Delta h_1 + \Delta h_2 = \Delta h$ とおくと式(12)より式(11)が得られるが、これは0地点、L地点における水位変動の影響を重合せの方法によって求めうることを意味している。また式(10)は地下水位と水位変動量の相関について興味ある現象を示している。

土木学会論文集編集委員

- 委員長 ○西村俊夫
- 委員 青木康夫
- 〃 赤塚雄三
- 〃 秋山政成
- 〃 秋山成博
- 〃 阿部博俊
- 〃 岩橋洋一
- 〃 井島武士
- 〃 字井純馬
- 〃 字都一馬
- 〃 岡田明
- 〃 奥村樹郎
- 〃 川崎浩司
- 委員兼幹事 西脇威夫

- 副委員長 ○嶋祐之
- 委員 柏谷徳衛
- 〃 神田一郎
- 〃 ○神山尚男
- 〃 工藤哲夫
- 〃 国広隆一
- 〃 神月隆一
- 〃 是枝良夷
- 〃 合田健吉
- 〃 沢井彰雄
- 〃 清水佐

○印 部会長

- 委員 須田照
- 〃 田中淳七郎
- 〃 丹保憲仁
- 〃 高野博
- 〃 塚山隆一
- 〃 戸田嘉明
- 〃 中村英夫
- 〃 中野昭
- 〃 西山啓伸
- 〃 西中村和利
- 〃 二重作主

- 委員 沼田淳
- 〃 伯野元彦
- 〃 服部昌太郎
- 〃 福本晴士
- 〃 前田幸雄
- 〃 松浦義満
- 〃 三由武英
- 〃 宮田尚彦
- 〃 山口柏樹

昭和42年10月15日印刷
昭和42年10月20日発行

土木学会論文集第146号

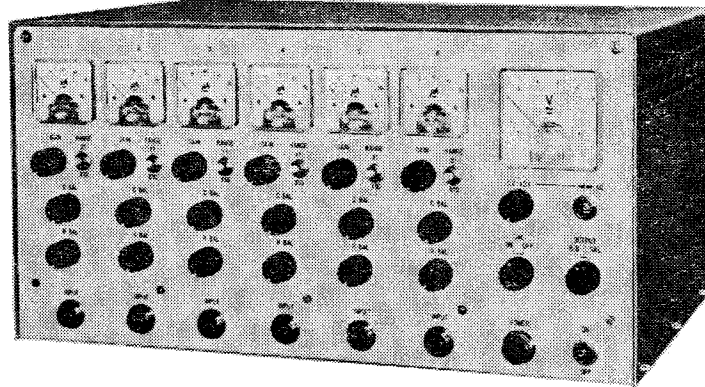
定価200円(〒20円)

編集兼発行者 東京都新宿区四谷一丁目
印刷者 東京都港区赤坂1-3-6

社団法人 土木学会 羽田 巖
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(361)代表 5138 番

水理実験波高解析にどうぞ!!



(CA-101型 水位計増幅器)

- ☆波高計(抵抗式)と記録器をつなげばOK
- ☆簡単な取扱いで直線性良好
- ☆価格低廉
- ☆豊富な納入実績を持っています

カタログ請求先

計測技研株式会社

東京都武蔵野市中町3丁目29番地19号
TEL (0422) (51) 8958

MARUI

短時間 厚さ及び構造物の弾性係数が判定 できる

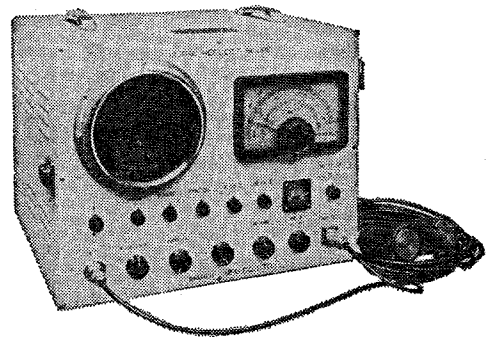
- ① 時間の節約になります (時代に即応)
- ② 正確な判断の参考資料となります
- ③ 無破壊で常に測定出来ます

用途

- 型枠取除き判定 (経済助力となる)
- ダム・コンクリート等の品質管理
- 道路隧道の厚さ及びボイドの判定
- コンクリートの経年変化・強度の推定等

営業品目

セメント・コンクリート・土質・アスファルト
水理各試験機・無破壊試験器・計量器・各種材料試験機



超音波反射測定器



株式会社

丸井製作所

本社 大阪市城東区蒲生町4-10番地
電話 大阪 931-3541番(代表)
東京出張所 東京都港区西新橋3-9-5(吉田ビル)
電話 東京 431-7563番

PARTNER K12 パートナー エンジンカッター 切る

■誰でも切れる

スターターを引張るだけで誰にでも簡単にエンジンがかけられます。切断作業は一人で行い、特別の熟練を要しません。

■どこでも切れる

小型で軽量ですから持ち運びに至便です。その割に馬力は強く、どの様な姿勢でも操作出来、どこでも切れます。

■何でも切れる

鉄、コンクリート、その他何でも切れます。ヒューム管、土管、鉄骨、鉄筋など土木建設、その他種々の業務の切断作業に威力を発揮します。

■はやく切れる

例えばコンクリート道路で3cmの深さ、15mの長さに要する切断時間はわずか約15分です。

■きれいに切れる

切口はきれいに切れます。切断作業の後バリトリとか仕上とかの必要はほとんどありません。

■安全に切れる

特にパートナーカッター用に製作したディスクを用いておりますので切断作業は極めて安全且、迅速に行えます。



- 鋳 鉄 管
- ダ ク タ イ ル 管
- ヒ ュ ー ム 管
- 道 路
- ワ イ ヤ ー ・ ケ ー ブ ル

日本アレン機械部

東京都豊島区巢鴨7丁目1875番地 TEL(944)1711(代)
本社 東京都千代田区内神田2丁目4-4 TEL(256)6551(代)
大阪支店 大阪市北区牛丸町55東洋ビル内 TEL(312)4571(代)
福岡営業所 福岡市露町149 TEL(53)1515
広島営業所 広島市三川町10-13 TEL(47)6351
北海道出張所 北海道苫小牧市菅羽町13の11 TEL(苫小牧)5016