

水平および鉛直方向の透水係数の計測方法 —単孔式原位置透水試験による—

Proposed methods for field measurement of horizontal and vertical permeability of soil

にし がき まこと こう の い いち ろう
西 垣 誠* 河 野 伊 郎**

1. はじめに

地盤掘削工事を行う際に、その掘削地周囲の浸透特性を事前に計測しておき、掘削による地下水位低下の影響範囲や排水流量を予測する必要がある。近年では地下水の変化を予測する分野での研究が目覚ましい進歩をとげ、地盤の不均質性や異方性等を容易に考慮できる有限要素法等による浸透解析コードが開発され多くの実務設計に応用されている。

一方浸透解析に必要な地盤の浸透特性は、原位置において透水試験や揚水試験を実施することによって計測できる。これらの試験法の中で、単孔式原位置透水試験法は、帯水層の局所の透水係数を計測する試験法であるが、試験方法が揚水試験と比較してきわめて簡単で安価であることより、掘削地周囲の多くの地点での試験が可能であり、また成層地盤では各層の透水係数が求められるなどの利点を有しているため、現在多くの掘削地での浸透特性の調査法として用いられている。

しかし、従来の試験方法は地盤の透水性が等方であるとの仮定に立脚して提案されているものが多く、異方性の影響について検討されたものはきわめて少ない。しかしながら実際の地盤では、一見均質と考えられる砂層地盤においても堆積過程で細粒部と粗粒部が成層をなしたり、部分的に薄い不透水シームが介在することによって水平方向と鉛直方向の透水性が異なることが多い。このように透水に異方性がある地盤で原位置透水試験のチューブ法などから得た透水係数を基礎としてディープウェル等による排水設計を行うと、図-1に示すようにディープウェルでは主に水平方向の浸透となるために当初の設計より多い流量を排水する必要が生じることがある。また矢板を打設して釜場排水を行う場合には、矢板近傍では鉛直方向の浸透になるため排水流量がきわめて少なくなり、揚水試験より得られた透水係数による設計が逆に過大設計になることがある。

したがって、掘削での排水設計の精度を良いものにするには、地盤の透水に関する異方性を的確に把握しておかねばならない。異方性地盤の浸透特性を計測する方法として揚水試験ではすでに、不完全貫入井を用いて鉛直方向と水

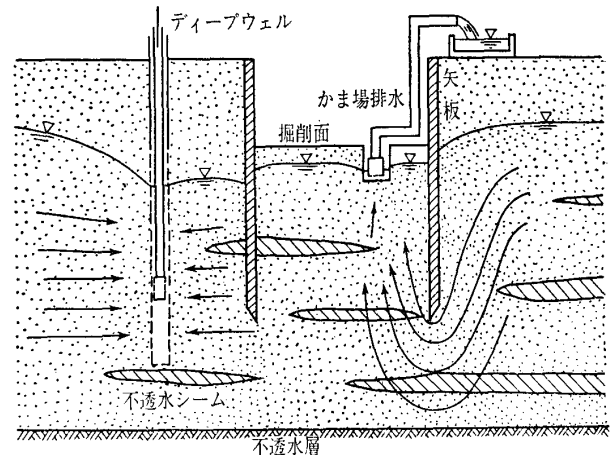


図-1 掘削地の断面図

平方方向の浸透を生じさせ、その観測結果より水平と鉛直の透水係数を求める方法が提案されている^{1)~4)}。しかし、原位置透水試験として頻繁に用いられる単孔式透水試験に関しては、確固たる方法がまだ提示されていない。

本研究では、単孔式透水試験により水平および鉛直方向の透水係数を計測する新たな方法に関して論述する。

2. 定圧注水試験

単孔式透水試験法は試験孔の形態によりオーガー孔法、ピエゾメーター法、チューブ法そしてパッカー法にわけられる⁵⁾。また、試験方法によっても、定流量や定水位で行う定常法と孔内の水位変動を計測する非定常法とに分類できる。このような方法の中で、まず最初に透水性の良い地盤や深い帯水層の透水性を測定するために用いられるパッカー法と岩盤内の透水性を求めるルジオン試験にしばしば用いられる多重パッカー法とを併用することにより、地盤および岩盤内の異方性の透水係数を求める方法について述べる。

図-2に示すパッカー法により異方性地盤の水平方向の透水係数(k_h)を求める解析式として Hvorslev (ボシュレフ) によって次式が提案されている⁶⁾。

$$k_h = \frac{Q_p}{2\pi(H_p - H_0)L} \sinh^{-1}\left(\frac{mL}{2r_0}\right) \\ \div \frac{Q_p}{2\pi H_p L} \ln\left(\frac{mL}{r_0}\right) \dots \dots \dots (1)$$

*岡山大学助教授 工学部土木工学科

**岡山大学教授 工学部土木工学科

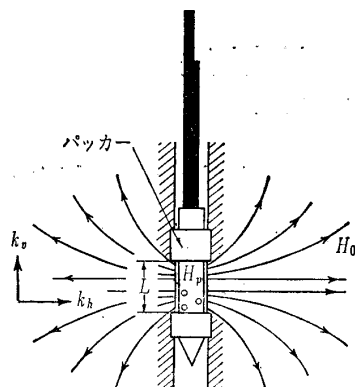


図-2 パッカー法

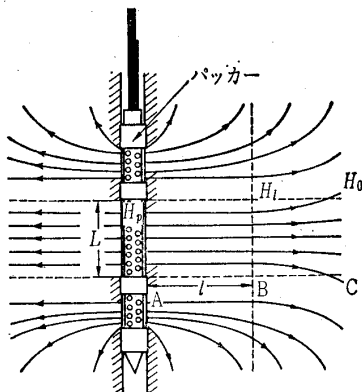


図-3 多重パッカー法

ここで

$$m = \sqrt{k_h/k_v} \quad \dots\dots\dots (2)$$

L , r_0 , H_p , H_0 は図-2 中に示す値であり, Q_p は注入流量である。(1)式より k_h を求めるには鉛直方向の透水係数 (k_v) が既知量でなければならない。Hvorslev は k_v の値は試料を採集して透水試験や圧密試験を実施して推定する方法を提案しているが, サンプリング中のかく乱や, サンプリング方法などの問題があるため, 別の試験方法により k_h の値を計測する方法を考案する必要がある。

岩盤内の水平方向の透水性を測定する方法として図-3 に示す多重パッカー法が Louis (ルイス) によって提案されている⁷⁾。この方法は図-3 に示すように三つの独立した試験区間をパッカーによって作り, それぞれに等しい圧力を作用させて定常透水試験を実施する。この方法によると中央のストレナを流出する浸透水は上下の浸透流によって鉛直方向への流れが制御されて水平方向の流れになる。Louis はこの方法による透水係数を求める次の式を提案している。

$$k = \frac{Q_L}{2\pi L(H_p - H_0)} \left\{ \ln\left(\frac{L}{r_0}\right) + \frac{1}{2} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

しかし, この(3)式は式の誘導過程において地盤の透水の異方性を考慮していない。すなわち, 図-3 に示すように中央のセルからの浸透は区間 l に至るまで円筒状であるが l を越えると円筒状浸透は乱れて鉛直方向の浸透の影響を受けると考えられる。したがって AB 区間の円筒状浸透は次

式となり,

$$H_p - H_l = \frac{Q_L}{2\pi L k_h} \ln\left(\frac{L}{r_0}\right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

また BC 区間では放射状浸透と考えると次式を得る。

$$H_l - H_0 = \frac{Q_L}{2\pi L k_h} \sinh^{-1}\left(\frac{\beta L}{2l}\right) \\ \div \frac{Q}{2\pi L k_h} \ln\left(\frac{\beta L}{l}\right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで β は(2)式の m に依存する関数と考える。(4)式と(5)式より多重パッカー法による解析式は次のように表せる。

$$H_p - H_0 = \frac{Q_L}{2\pi L k_h} \ln\left(\frac{\beta L}{r_0}\right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

(6)式の β の m に対する関数を求めるために有限要素法による軸対称浸透解析手法を用い, k_h/k_v の値を変化させて数値解析実験を行った⁵⁾。図-4 に β と k_h/k_v の関数を示すが, この図より次の近似式を求めた。

$$\beta = 2\sqrt{m} \quad \dots\dots\dots (7)$$

(7)式を(6)式に代入すると水平方向の透水係数は

$$k_h = \frac{Q_L}{2\pi L(H_p - H_0)} \ln\left(\frac{2L\sqrt{m}}{r_0}\right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

(8)式は多重パッカー法より得られる透水係数であり, この式と普通のパッカー法の(1)式より m を消去すると,

$$k_h = \frac{Q_p Q_L}{2\pi L(H_p - H_0)(2Q_p - Q_L)} \ln\left(\frac{4L}{r_0}\right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

(9)式中の Q_p , Q_L はパッカー法および多重パッカー法による注入流量である。すなわち, 多重パッカー法を実施して, 中央のセルからの注入流量 Q_L を求め, その後, 普通のパッカー法による試験を行って Q_p を測定すると, これらの値を(9)式に代入すると k_h は求められる。また, (1)式より k_v は次のように表せる。

$$k_v = \exp\left[\ln k_h \cdot \left(\frac{L}{r_0}\right)^2 - \frac{4\pi L k_h (H_p - H_0)}{Q_p}\right] \quad \dots\dots\dots (10)$$

(9), (10)式により k_h , k_v が求められるが, この方法の妥当性を検討する目的でボーリングによく用いられる孔径 ($\phi 86$ mm, $\phi 66$ mm) に関して多重パッカー法とパッカー法を併用した試験を有限要素法による浸透解析によりシミュレーションを行った。なお, 地盤は $k_h = 1.0 \times 10^{-3}$ cm/s と一定として, k_h/k_v の値が異なる場合を対象とした。こ

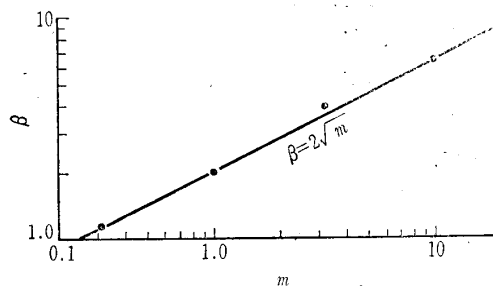
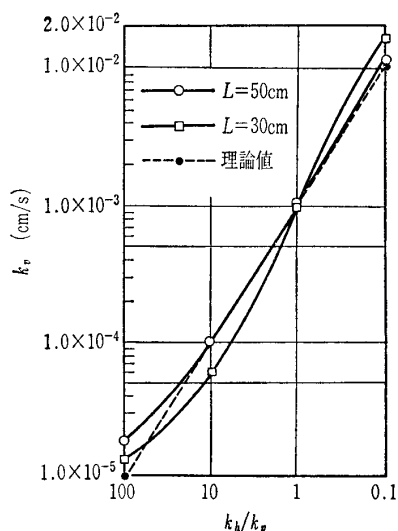
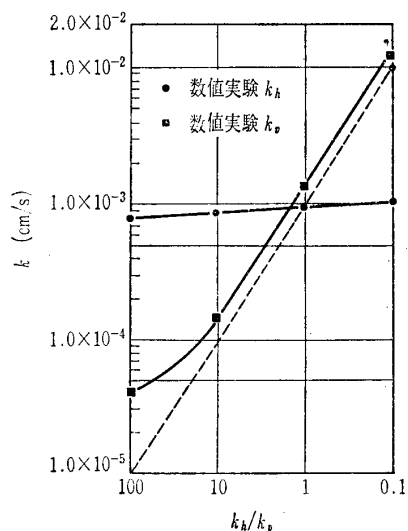


図-4 多重パッカー法の補正係数 (β) と異方性透水係数の比 ($m = \sqrt{k_h/k_v}$) の関係



図—5 多重パッカー法とパッカー法の併用より鉛直方向の透水係数を計算した例 ($r_0=3.3$ cm)

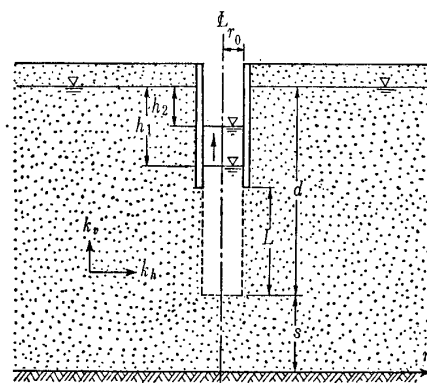


図—6 多重パッカー法とパッカー法の併用より水平と鉛直の透水係数を計算した例 ($r_0=4.3$ cm, $L=50$ cm)

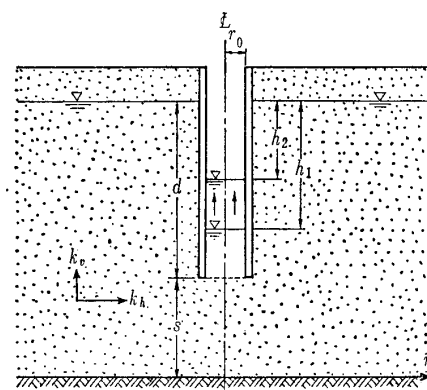
のようなモデルに対して Q_L , Q_p を求め, (9), (10)式より k_h , k_v を求めた結果を図—5, 6 に示す。 $r_0=3.3$ cm の試験孔では k_h/k_v の値が大きくなっても全体的に良い k_v の値が求められることがわかる。一方, $r_0=4.3$ cm では k_h/k_v が大きくなると求められる k_v に誤差が生じてくるのがわかる。しかし, k_h の値は妥当な値が得られており, ここで提案する方法は, 従来のパッカー法を少し変更するだけで異方性の透水係数が計測できることになり, きわめて有効な手法と考えられる。

3. 非定常による異方性地盤での透水試験

帯水層の透水性が低い地盤では定常法を用いることが困難であり, 図—7, 8 に示すピエゾメーター法やチューブ法による原位置透水試験が一般に用いられる。異方性帯水層でのピエゾメーター法による透水試験法の解析式として



図—7 ピエゾメーター法



図—8 チューブ法

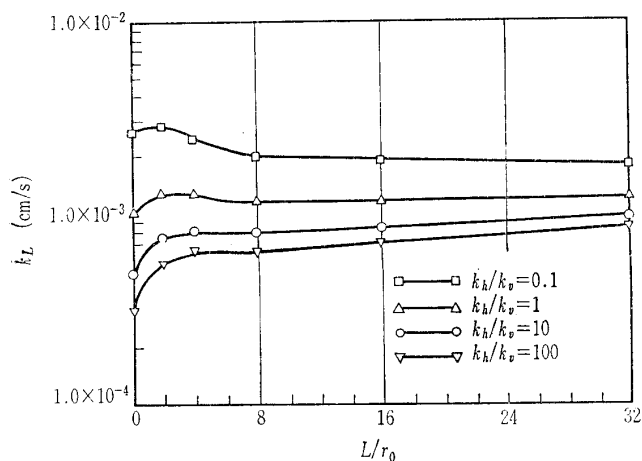
Hvorslevによって次式を提案している⁶⁾。

$$k_h = \frac{r_0^2 \sinh^{-1}\left(\frac{mL}{2r_0}\right) \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)}{2L(t_2 - t_1)} \dots\dots\dots (11)$$

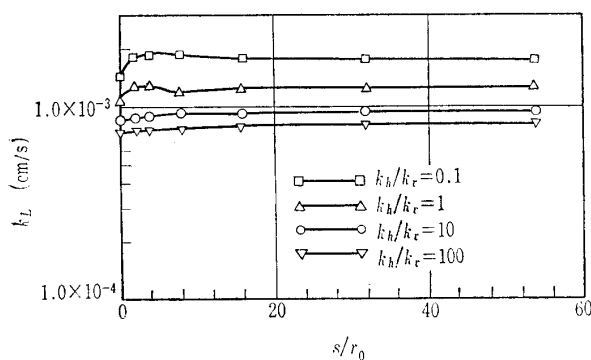
また, チューブ法による場合についても水平と鉛直の相乗平均透水係数が求められる式が提示されている。しかし, (11)式より k_h を定めることはパッカー法の場合と同様に式中の m の値が未知量であるために不可能である。

一般にピエゾメーター法から得られる透水係数(k_L)は水平方向の透水係数に近い値が求められると認識されており, チューブ法より求められる透水係数(k_t)は Hvorslev が指摘しているように相乗平均に近い値が求められる⁵⁾。したがって, これらの方法を併用することによって水平および鉛直方向の透水係数が計測できると考えられる。

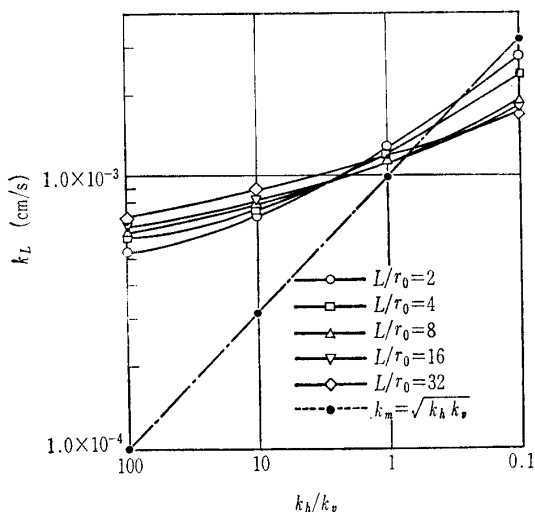
異方性地盤においてピエゾメーター法を実施する際, ストレーナ部の長さが長いほど鉛直方向の透水性の影響が少なくなると予測できることより, 異方性地盤でのピエゾメーター法による試験を有限要素法による浸透解析にてシミュレートを行った。なお水平方向の透水係数を 1.0×10^{-3} cm/s と一定とし, 鉛直方向の透水係数を変化させて異方性地盤とした。またシミュレート結果の孔内水位回復データより透水試験を計算するためには, Luthin (ルーシン) と Kirkham (キルクハム) によって提案されている式を用いた⁸⁾。



図—9 ピエゾメーター法におけるストレーナの長さ(L)と孔半径(r_0)の影響($S/r_0=32$)



図—10 ピエゾメーター法における試験孔底から不透水層までの距離の影響($L/r_0=32$)



図—11 異方性地盤においてピエゾメーター法より得られる透水係数($S/r_0=32$)

$$k_L = \frac{\pi r_0^2}{C_L(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (12)$$

ここで C_L は形状係数であり、Youngs (ヤング) によって数表が与えられている⁹⁾。

図—9 にストレーナの長さ L と k_L の関係を示すが L/r_0 が 8 以上になると、ほぼ水平に近い値を得ることがわかる。また図—7 の試験孔底から不透水層までの距離(S)の異方

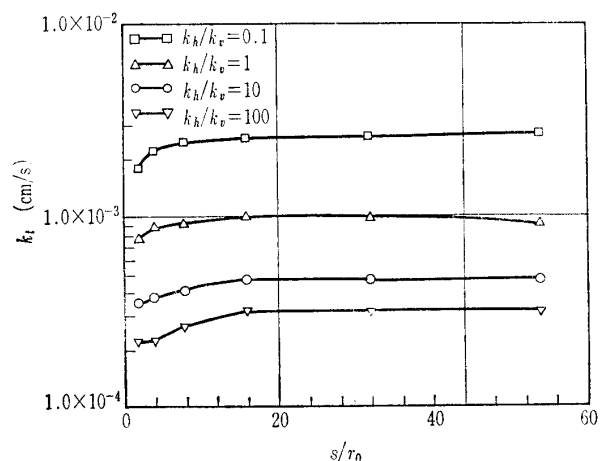
性地盤での影響も同様に数値解析により検討したが(図—10参照) S/r_0 が 16 以上になると得られる透水係数は一定の値となる。すなわち、一般に原位置透水試験に用いられる孔径は 11.6cm, 8.6cm, 6.6cm であることを考慮すると、 S の値が 90cm 以上であれば、試験孔の不完全貫入による影響が異方性地盤においてもきわめて少ないことになる。

図—9 を図—11 に示すように再整理すると、 L/r_0 が 8 以上の場合 m と k_L より k_h を求める次の近似関数を得ることができる。

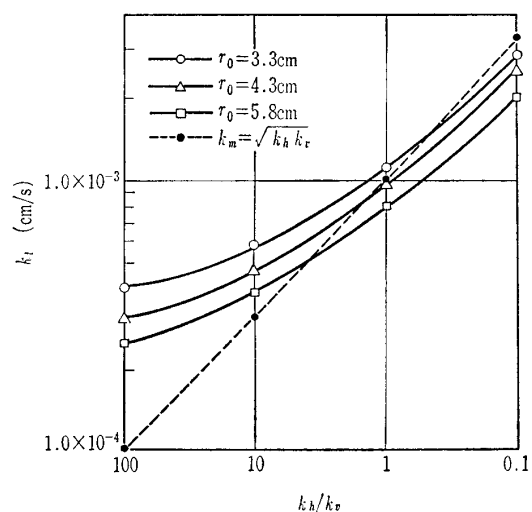
$$k_h = 0.8 m^{0.2} k_L \quad (13)$$

一方、チューブ法に関しても図—8 の孔底から不透水層までの距離(S)が異なる場合のシミュレーションを異方性帯水層について実施した。この場合にも水平方向の透水係数を $k_h = 1.0 \times 10^{-3}$ cm/s として鉛直方向の透水係数を変化させている。なお、ここで試験結果の解析式としては Schmid の次式が妥当であることより⁵⁾ 用いた。

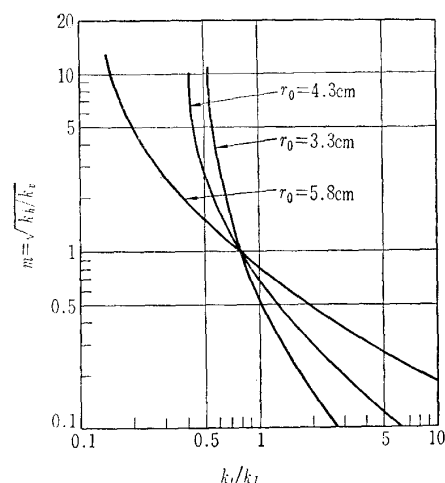
$$k_t = \frac{r_0}{4(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (14)$$



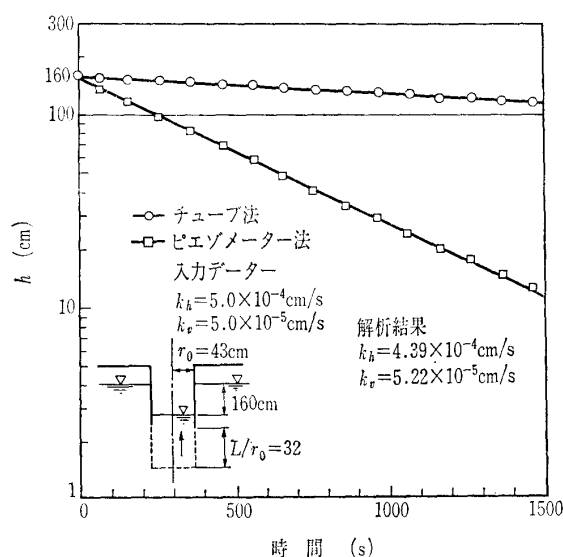
図—12 チューブ法における試験孔底から不透水層までの距離の影響



図—13 異方性地盤においてチューブ法より得られる透水係数($S/r_0=32$)



図—14 ピエゾメーター法とチューブ法の併用より得られる透水係数の比と異方性透水係数比の関係



図—15 ピエゾメーター法とチューブ法の併用により異方性の透水係数を計算した例

図—12にシミュレーションより求めた k_t を示すが、チューブ法においても S/r_0 が16以上になると k_t の値はあまり変化しないことがわかる。

図—13に、我が国でよく用いられる孔径について異方性地盤にてシミュレートした結果を示す。この図より、チューブ法の場合には、ピエゾメーター法に比較して異方性の影響を強く受けることがわかる。またその値は相乗平均に近いが、 k_h/k_v の値が大きくなると水平方向の透水性が卓越して、相乗平均からの誤差が大きくなる。

図—13より $\log k_t$ と $\log m$ が2次関数であると仮定すると、次のように求められる。

$$k_t = [m^{(2a-1)} \cdot \exp(2b \ln m)^2] \cdot k_h \quad (15)$$

a , b は r_0 に依存する値である。(15)式の k_h に(13)式を代入すると図—14に示す m と k_t/k_L の関係を得る。

すなわち、地盤に試験孔を打設し、その内部の土を除去して、最初にチューブ法を実施する。その後、試験孔の底

部を掘削してストレーナ部を設けてピエゾメーター法により試験を行う。このように同じ試験孔を用いて2種類の試験を行って k_t , k_L の値を求め、それらの比より図—14から m の値が定められる。 m と k_L の値を(13)式に代入して k_h を求め、この k_h と m の値より簡単に k_v の値が計算できる。

図—15にここで提示した方法により解析した例を示す。なお、解析に用いたデーターは数値解析により得た値を用いた。この図より、 $k_h = 4.39 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, $k_v = 5.22 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ と求められ、この結果は数値解析の入力データーに用いた値 ($k_h = 5.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, $k_v = 5.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$) にほぼ等しい値が得られていることになる。

4. おわりに

本報告では原位置透水試験法による異方性地盤の透水係数を求める新しい方法について述べた。今後、ここで提案した方法が実際の多くの調査に適用され改良されることを期待する。なお、現行の原位置透水試験法は、成層地盤の各層の透水性を計測する場合やグラウトの効果のチェックなどにきわめて有効であるが、まだまだ多くの適用上の問題を含んでいる。したがって、この試験の信頼性を高めるには、多くの問題点を順次解決して行く必要がある。また、このような研究の集積により、異方性等の取り扱いが可能な解析法や設計のニーズに対応した調査法が開発されると思う。

最後に本研究を行うにあたり土質工学会の「原位置透水試験に関する研究会」の委員各氏より貴重な御意見をいただきましたことをここに記して謝意を表します。また、データー整理に協力いただいたセンチュリリサーチセンターの榊原辰雄君（本学卒業生）に深く感謝する。

参考文献

- Hantush, M.S.: Analysis of data from pumping test in anisotropic aquifer, J. Geophys. Res., Vol. 72, No. 12, 1966.
- Kohno, I., M. Nishigaki: A method for determination of anisotropic coefficients of permeability and specific storage from pumping test data, Soils and Foundations, Vol. 19, No. 1, pp. 55~62, 1979.
- 西垣 誠：揚水試験結果の解析と排水量の推定法, 基礎工, Vol. 11, No. 12, pp. 14~21, 1983.
- 西垣 誠・進士喜英：異方性帯水層にて単一観測井を用いた揚水試験結果の解析法, 第19回土質工学研究発表会, pp. 1343~1346, 1984.
- 河野伊一郎・西垣 誠：原位置透水試験法の解析手法に関する研究, 土質工学会論文報告集, Vol. 23, No. 4, pp. 157~170, 1983.
- Hvorslev, M.J.: Time lag and soil permeability in ground water observations, U.S. Army, 1951.
- Louis, C.: Rock Hydraulics, B.G.R.M. Report, Orleans, 1974.
- Luthin, J.N. and Kirkham, D.: A piezometer method for measuring permeability of soil in situ below a water table, Soil Sci., Vol. 68, pp. 349~358, 1969.
- 西垣 誠：孔内加圧方式による単孔式原位置透水試験法, 地質と調査, 第1号, pp. 74~79, 1984.

(原稿受理 1984. 7. 18)