

# 標準圧密試験結果を利用した二次圧密の予測

Prediction of secondary consolidation based on results of a standard oedometer test

いな 稲	だ 田	ます 倍	ぼ 穂*	あか 赤	いし 石	まさる 勝**
やま 山	だ 田	みち 道	お 男***	にた 似	ない 内	まさ 政
						やす 康

## 1. ま え が き

標準圧密試験末期に観察される二次圧密は、一定有効応力のもとで進行する土粒子骨格のクリープ、圧密試験機の側面摩擦および一次元圧密中の主応力差の増加などが主たる発生原因といわれている<sup>1),2)</sup>。この二次圧密現象は、標準圧密試験特有のものであり、実際地盤では長期にわたる一次圧密に包含され分離して表れないとされている。

しかし、軟弱地盤上の盛土工事現場の長期観測結果によれば、実際地盤においても二次圧密と思われる沈下が継続している場合がかなり多い。供用後のこのような二次圧密的沈下による影響は、極めて大きいので設計でも二次圧密をより適確に把握する必要があると思われる<sup>3)</sup>。

筆者らは、従来より正規圧密粘土の二次圧密を、一次元圧密中の主応力差の増加に伴う負のダイレイタンスの発生とその時間依存性によるものとして、二次圧密を考慮した一次元圧密解析法を報告している<sup>4)</sup>。今回この報告では、この解析法による二次圧密の予測に必要な土質定数を、簡便でかつ広く普及している標準圧密試験結果から求める方法を明らかにした。また標準圧密試験結果を用いた計算と現場における圧密沈下観測例を比較し、解析法の適用性を検討した。

## 2. 一次元圧密におけるダイレイタンスと二次圧密予測法

### 2.1 等価有効応力と体積変化

一次元圧密中の粘土要素に作用する最大・最小主応力増分の比  $K(=\Delta\sigma_3/\Delta\sigma_1)$  は、載荷直後の  $K=1$  から圧密とともに減少し、最終的には静止土圧係数  $K_0(=\Delta\sigma_3'/\Delta\sigma_1')$  に等しくなる<sup>2)</sup>。一次元圧密中に生じる体積ひずみ  $\Delta\varepsilon_v$  は、平均有効主応力の増分  $\Delta\sigma_m'=(\Delta\sigma_1'+2\Delta\sigma_3')/3$  と、 $K$  の減少によって増加する主応力差の増分  $\Delta\sigma_d(=\Delta\sigma_1'-\Delta\sigma_3')$  に伴う負のダイレイタンスによって生じる体積ひずみ、それぞれ  $\Delta\varepsilon_m$  と  $\Delta\varepsilon_d$  の和として表すことができる。また飽和

粘土中の間隙水が流出することによって消失した過剰間隙水圧に対応する有効応力増分を等価有効応力増分  $\Delta\sigma_e'$  と定義すれば、体積ひずみとの間に次の関係が得られる。

$$\Delta\varepsilon_v = \Delta\varepsilon_m + \Delta\varepsilon_d = m_v^* \cdot (\Delta\sigma_m' + D \cdot \Delta\sigma_d) \\ = m_v^* \cdot \Delta\sigma_e' \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $m_v^*$  は、等価有効応力に対して定義された体積圧縮係数、 $D$  はダイレイタンス係数である。

### 2.2 二次圧密予測法

一次元圧密中に生じるダイレイタンスの影響を考慮した一次元圧密解析を行うためこの報告では、三笠のひずみに関する一次元圧密方程式を用いる<sup>5)</sup>。

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 \varepsilon_v}{\partial z^2} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $c_v$  は圧密係数、 $t \cdot z$  はそれぞれ時間・位置座標である。

この三笠の圧密方程式を式(1)に示した体積ひずみと等価有効応力の関係を用いて誘導することは可能である。ただし、従来より一次元圧密において生じる体積ひずみは、最大有効主応力の関数として表されるのに対し、筆者らは、等価有効応力の関数と考えているので、式(2)の誘導時に使われる連続条件式が、それぞれ次のようになる。

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial \sigma_1'}{\partial z} \dots \dots \dots (2-a)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial \sigma_e'}{\partial z} \dots \dots \dots (2-b)$$

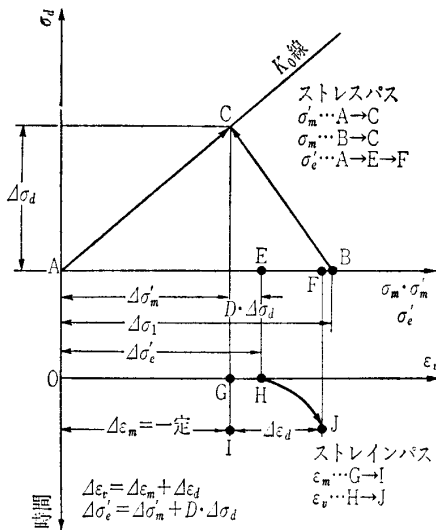
式(2)は、圧密中圧密係数が一定で、自重の影響や層厚の変化を考えない最も簡単な圧密方程式であるが、圧密中圧密荷重が一定という仮定を必要としないため、圧密荷重あるいは等価有効応力の変化を体積ひずみの境界値が時間とともに変化する境界値問題として取り扱うことができる。

いま一次元圧密中に発揮されるダイレイタンスを時間依存性とするれば、排水面に接する粘土要素の応力経路と体積ひずみの経時変化は、図—1に示すようになる。図—1において粘土要素に作用する圧密前後の平均有効応力  $\sigma_m'$  は、A、C点、載荷直後の平均全応力  $\sigma_m$  はB点で示される。したがって、一次元圧密中の有効応力経路は  $\overline{AC}$ 、全応力経路は  $\overline{BC}$  となる。また一次元圧密中に生じるダイレ

\*東海大学教授 工学部土木工学科

\*\*東海大学助教授 工学部土木工学科

\*\*\*(株)オオバ 土木設計部主任



図一 一次元圧密における応力経路と体積ひずみの経時変化

イタンシーのすべてが時間依存性であるならばK点とE点、G点とH点は一致することになる。

次にダイレイタンシーが体積ひずみ～時間関係に及ぼす影響を次の三種類の場合について検討する。

- (1)  $D=0$  ダイレイタンシーは生じない。
- (2)  $D=2/3$  ダイレイタンシーは生じるが時間に依存しない。
- (3)  $D=a \cdot \log(t/t_0)$   $a, t_0$  = 定数 ダイレイタンシーが時間の対数に比例して生じる。

ダイレイタンシーがこれら三条件のいずれかに従う場合、排水面に生じる体積ひずみの経時変化は、図一1において(1)  $\Delta\epsilon_d=0$  であるから  $\overline{HJ}$  と  $\overline{GI}$  は一致する。(2)  $\Delta\epsilon_d$  は正で、時間に依存しないため  $\overline{GI}$  と  $\overline{HJ}$  は平行である。(3)  $\Delta\epsilon_d$  が時間の対数に比例して増加する。  $\overline{HJ}$  間。またこれらに対応する圧密層全体の平均体積ひずみ～時間関係は、図一2に示すようになる。

図一2より(1)と(2)の体積ひずみ～時間関係は、Terzaghi (テルツァーギ) の圧密理論のそれと一致し、(3) では圧密時間のおおよそ20分以降で体積ひずみが時間の対数に比例

して生じるのが分かる。

従来、一次圧密と二次圧密は、それぞれ別個の現象として取り扱われてきたが、図一2の体積ひずみ～時間関係は、それらの現象が飽和粘土の体積減少過程という点から、全く同一の現象であることを意味していると考えられる。したがって、排水距離の大小によらずダイレイタンシーが時間の対数に比例して生じると仮定すれば、実際地盤の二次圧密の予測が可能と考えられる。

### 3. 解析に必要な土質定数の決定法

図一3は、標準圧密試験の体積ひずみ～時間関係を模式的に描いたものであり、このデータからダイレイタンシーの影響を考慮した一次元圧密解析に必要な土質定数を決定する。

2. の考察から二次圧密は、ダイレイタンシーの時間依存性によるものとし、ダイレイタンシー係数  $D$  は式(3)で表すように時間の対数に比例するものとする。

$$D = a \cdot \log(t/t_0) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $a$  は定数、 $t$  は時間、 $t_0$  はダイレイタンシーが発生し始める時間である。

体積ひずみが時間の対数に比例して生じる二次圧密領域では、圧密層内各点の有効応力はほぼ一定と考えられるので、二次圧密領域内の任意時間を  $t_s$  とすれば、二次圧密速度  $\alpha (= d\epsilon_v/d \log t)$  は、式(4)で表される。

$$\alpha = m_v \cdot a \cdot \log(10t_s/t_0) \cdot \Delta\sigma_d = m_v \cdot a \cdot \Delta\sigma_d \dots\dots\dots (4)$$

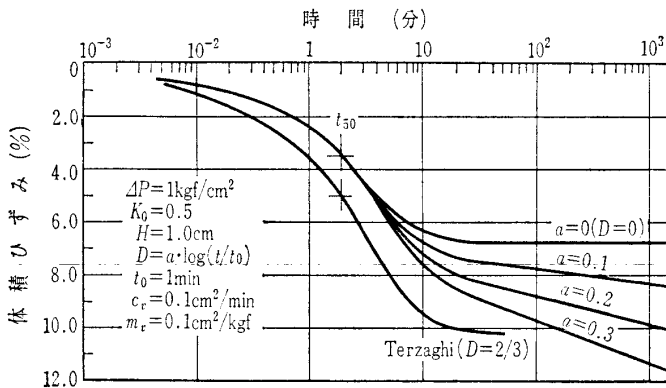
また時間  $t_s$  の体積ひずみ  $\Delta\epsilon_{vs}$  は式(1)より、

$$\Delta\epsilon_{vs} = m_v \cdot (\Delta\sigma_m' + a \cdot \log(t_s/t_0) \cdot \Delta\sigma_d) \dots\dots\dots (5)$$

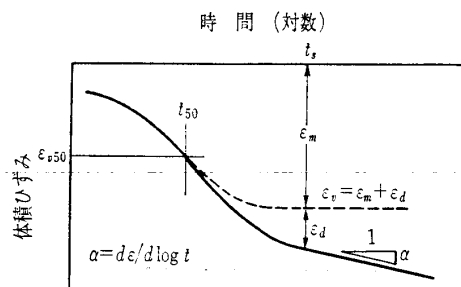
となる。式(4)、(5)より  $a$  を求め、 $a$  を式(4)に代入することによって  $m_v$  が決定できる。

$$a = \frac{\alpha \cdot \Delta\sigma_m'}{(\Delta\epsilon_{vs} - \alpha \cdot \log(t_s/t_0)) \cdot \Delta\sigma_d} \dots\dots\dots (6)$$

圧密係数  $c_v$  は、本来、等方圧密試験から求めるべきものと考えられるが、図一2から明らかなように、標準圧密試験程度の排水距離では、圧密度50%程度まで圧密量～時間関係はダイレイタンシーの影響をほとんど受けないので、圧密量～時間関係に曲線定規法を適用して  $c_v$  値を決定して差し支えないと考えられる。ただし、曲線定規のフィッティングは、圧密度50%までの定規を用いることが前提で



図二 体積ひずみ～時間関係



図三 一次元圧密における体積ひずみ～時間関係の模式図

ある。

#### 4. 二次圧密予測法の適用性

##### 4.1 室内圧密試験による検討

###### (1) 試料および実験方法

実験には、表—1 に物理的性質を示す7種類の練返し粘土試料を用いた。飽和試料を得るため液性限界付近まで加水し、十分練り返した試料を直径20cmの固定リング式大型圧密試験機を用い、圧密荷重  $P_0=0.1\text{ kgf/cm}^2$  で10日間圧密した。圧密後の粘土塊から標準圧密試験用供試体を採取し、7日間隔で圧密荷重  $P=0.4, 1.6, 6.4\text{ kgf/cm}^2$  を加え、圧密沈下量の経時変化を測定した。

###### (2) 実験結果と計算例

解析法の適用性を室内圧密試験結果を用いて検討する。図—4, 5 は試料A, Bの室内圧密試験結果から体積ひずみの経時変化をプロットしたものである。この試験結果から二次圧密速度  $\alpha$ 、時間  $t_s (=1440\text{ 分})$  における体積ひずみ  $\Delta\varepsilon_{vs}$  ならびに圧密荷重増分  $\Delta\sigma_m'$ 、 $\Delta\sigma_d$  を求め、前章に示した手順に従いダイレイタンシー係数や体積圧縮係数  $m_v^*$  など解析に必要な諸定数を求めた結果が表—2 である。

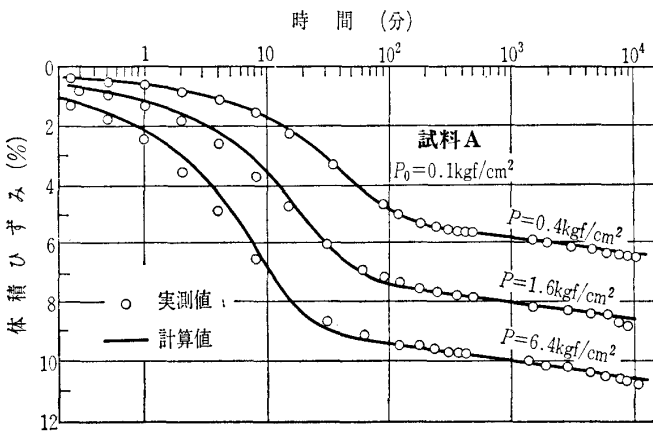
表—2 の諸定数を用い体積ひずみの経時変化を計算した結果が図—4, 5 中に実線で示してある。両図から明らか

表—1 試料の物理的性質

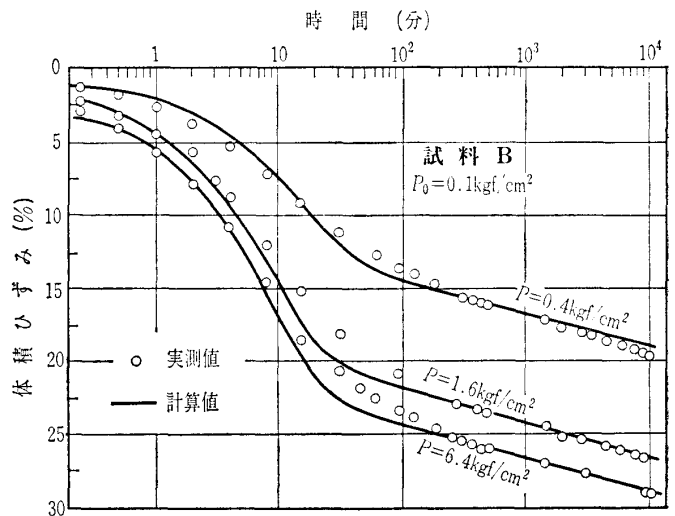
試 料	A	B	C	D	E	F	G
$G_s$	2.67	2.05	2.41	2.69	2.65	2.68	2.68
$w_L$ (%)	82.6	463.2	176.4	135.6	49.7	48.0	80.0
$w_p$ (%)	20.8	193.6	94.4	84.0	22.9	28.7	39.5
粘土分(%)	54.0	—	—	64.0	72.0	68.0	—
シルト分(%)	41.0	—	—	28.0	28.0	32.0	—
$Lig$ (%)	—	45.0	18.0	8.0	—	—	—
$K_0$	0.42	0.28	0.27	0.48	0.50	0.46	0.48

なように計算と実測による体積ひずみの経時変化はかなりよく一致している。ダイレイタンシーが時間の対数に比例して生じると仮定して計算した結果では、二次圧密領域で生じる体積ひずみのほとんどがダイレイタンシーによるものである。ダイレイタンシーによる体積ひずみは、一次圧密中にも生じているので本解析法によれば、一次圧密と二次圧密を特に分離せず一連の体積ひずみ～時間関係の一部として二次圧密が予測可能である。

また表—3 は全試料の二次圧密速度  $\alpha$  の実測値と計算値



図—4 試料Aの体積ひずみの経時変化



図—5 試料Bの体積ひずみの経時変化

表—2 解析に必要な諸定数(室内試験)

試 料	$P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\Delta\sigma_d$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\Delta\sigma_m'$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\Delta\varepsilon_{vs}$ (%)	$\alpha$ (%)	$\alpha$	$m_v^*$ (cm <sup>2</sup> /kgf)	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /min)
A	0.4	0.174	0.184	5.95	0.55	0.138	0.229	0.0097
	1.6	0.696	0.736	8.14	0.55	0.091	0.087	0.018
	6.4	2.784	2.944	10.09	0.58	0.074	0.021	0.0337
B	0.4	0.216	0.156	17.09	2.10	0.145	0.671	0.0244
	1.6	0.864	0.624	24.49	2.30	0.096	0.276	0.0271
	6.4	3.456	2.496	26.86	2.30	0.085	0.079	0.014

表—3 二次圧密速度の計算値と実測値の比較

試料 No.	荷 重		実測二次 圧密速度 (%)	計算二次 圧密速度 (%)	計算/実測
	$P_0$ kgf/cm <sup>2</sup>	$\Delta P$ kgf/cm <sup>2</sup>			
A—1	0.1	0.3	0.55	0.55	1.00
	0.4	1.2	0.55	0.56	1.01
	1.6	4.8	0.58	0.59	1.01
A—2	0.1	0.3	0.50	0.50	1.00
	0.4	1.2	0.53	0.53	1.00
	1.6	4.8	0.55	0.55	1.00
B—1	0.1	0.3	2.10	2.11	1.01
	0.4	1.2	2.30	2.30	1.00
	1.6	4.8	2.30	2.31	1.00
B—2	0.1	0.3	3.00	3.01	1.00
	0.4	1.2	2.90	2.92	1.01
	1.6	4.8	3.00	3.01	1.00
C—1	0.1	0.3	2.10	2.10	1.00
	0.4	1.2	2.00	2.00	1.00
	1.6	4.8	1.70	1.70	1.00
C—2	0.1	0.3	2.15	2.16	1.00
	0.4	1.2	2.30	2.31	1.01
	1.6	4.8	1.75	1.76	1.00
D	0.1	0.3	0.50	0.50	1.01
	0.4	1.2	0.80	0.80	1.00
	1.6	4.8	0.70	0.70	1.00
E—1	0.1	0.3	0.21	0.22	1.02
	0.4	1.2	0.28	0.28	0.99
	1.6	4.8	0.29	0.29	1.01
E—2	0.1	0.3	0.22	0.22	1.00
	0.4	1.2	0.30	0.30	1.01
	1.6	4.8	0.20	0.20	1.00
F—1	0.1	0.3	0.17	0.17	1.02
	0.4	1.2	0.33	0.33	1.00
	1.6	4.8	0.35	0.35	1.00
F—2	0.1	0.3	0.23	0.23	1.00
	0.4	1.2	0.35	0.36	1.02
	1.6	4.8	0.43	0.42	0.99
G—1	0.1	0.3	0.65	0.65	1.00
	0.4	1.2	0.55	0.56	1.01
	1.6	4.8	0.66	0.67	1.01
G—2	0.1	0.3	0.44	0.45	1.01
	0.4	1.2	0.45	0.45	1.00
	1.6	4.8	0.70	0.70	1.00

を比較したものである。両者は極めてよく一致しており、沖積粘土から泥炭まで二次圧密速度予測法として本解析法の幅広い適用性が認められる。

#### 4.2 現場圧密沈下観測例による検討

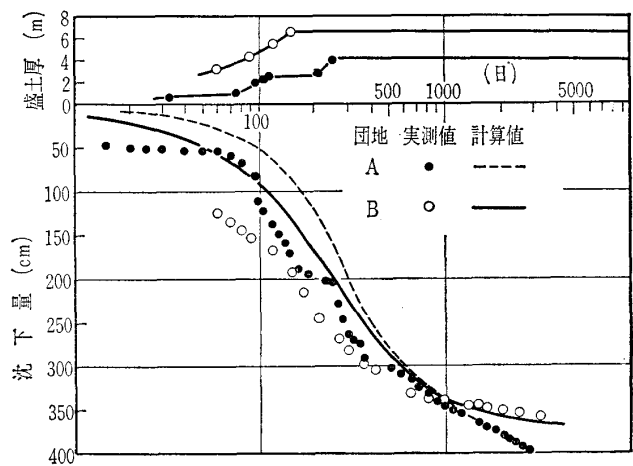
盛土工事終了後約 2000 日以上経過し、現在も二次圧密的沈下を継続している A, B 2 団地に隣接し、盛土を実施してない地点で試料を採取し、標準圧密試験を行う機会に恵まれた。そこでその試験結果を利用して無処理で盛土が施工された現場の二次圧密を含む圧密沈下量～時間関係を予測し、実測値と比較することを試みた。

A 団地：A 団地は、静岡県袋井市にある。団地は、太田川および原野谷川の沖積デルタ地帯に続く台地を南北に刻み込んだ沖積谷を全面的に盛土して造成された。谷中央の軟弱層は、約 14m 位の厚さがあり、上部は層厚 5 m 前後の泥炭層、下部はシルト層からなる。

B 団地：B 団地は、千葉県柏市にある。団地は、利根川支流によって形成された厚さ約 4 m の泥炭層と 1～9 m の砂質シルト層からなる軟弱地盤上に造成された。

現場の盛土荷重にほぼ等しい圧密荷重による圧密試験結果を用い、前章に示した手順に従い解析に必要な諸定数を決定した結果が表—4 である。またこれらの定数を用いて現場の圧密沈下量～時間関係を予測し実測値と比較したのが図—6 である。

図—6 から明らかなように圧密沈下速度については計算値と実測値の間にかなり大きなずれが認められる。この原因については、圧密係数決定上の問題ばかりでなく、盛土



図—6 現場圧密沈下量～時間関係と計算曲線の比較

表—4 現場の圧密沈下解析に用いた諸定数

団地	軟弱層厚 (m)	盛土荷重 (kgf/cm <sup>2</sup> )	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /min)	$a$	$m_v^*$ (cm <sup>2</sup> /kgf)
A	5.00 (泥炭層のみ)	0.458	0.179	0.39	0.824
B	3.80 (泥炭層)	1.04	0.090	0.18	0.254
	1.20 (シルト層)		0.037	0.08	0.134

施工中のせん断変形の影響がかなり大きいと考えられる。しかし、二次圧密速度はかなりよく一致しており、標準圧密試験の圧密量～時間関係を利用した解析法によって現場の二次圧密速度をかなりの精度で予測できそうである。

## 5. む す び

標準圧密試験で観測される二次圧密現象は、一次元圧密中に発揮される負のダイレイタンスの時間依存性によるものと解釈し、その影響を考慮した解析法によって二次圧密の予測が可能なことを報告した。

標準圧密試験の二次圧密を含めた圧密量～時間関係を利用して計算した二次圧密速度は、標準圧密試験で測定されるそれとほぼ一致する。すなわち本解析法によれば現場でも室内圧密試験とほぼ同等の二次圧密現象が生じることになる。

従来二次圧密は室内圧密試験特有の現象とされ実際の沈下解析では無視されてきたが、盛土施工後約 5 000 日経過した現在でも二次圧密的沈下が継続しているという高速道路の観測結果もあるので、今後更に室内ならびに現場の二次圧密現象の相互比較が必要と思われる。

## 参 考 文 献

- 1) 土質工学会編：土質工学ハンドブック，土質工学会，pp. 147～148, 1965.
- 2) 赤井浩一・足立紀尚：有効応力よりみた飽和粘土の一次元圧密と強度特性に関する研究，土木学会論文報告集，No. 113, pp. 11～27, 1965.
- 3) 日本道路公団土工試験室編：沈下事例集，1977.
- 4) 稲田倍穂・赤石 勝：ダイレイタンスを考慮した一次元圧密解析，土質工学会論文報告集，Vol. 20, No. 2, 1980.
- 5) 三笠正人：軟弱粘土の圧密，鹿島研究所出版会，pp. 3～19, 1963.

(原稿受理 1980. 12. 3)

技術手帳

# 磁 気 探 査

よし だ ひさ とし  
吉 田 寿 寿\*

磁気探査とは、陸上、海上あるいは空中で、地球磁場や地球磁場の変化を測定して、地下の磁性体の分布を求めることにより、地球内部の地質構造、岩質および資源などを調べる物理探査の一つの方法である。

磁気探査においては、一般に磁力計（あるいは磁気傾度計）を用いて探査区域の磁場を測る。この磁場は、地球本来の磁場（標準地球磁場）と地下の強磁性体物質による磁場との重ねであるので、これから標準地球磁場を差し引いたものを磁気異常と称している。

磁気異常は、地下の磁性体の分布によって生ずるものであるから、これに基づいて地下の磁性体の分布を推定する。

この方法は、金属鉱床特に磁鉄鉱床の探査に始まったが、その後非鉄金属鉱床や石油鉱床の基盤岩の探査に利用されるようになった。また、近年では、建設工事の地盤調査や埋没鉄類（機雷や爆弾）の探査にも広く用いられるようになったので、ここでは地盤調査や埋没鉄類の探査について説明する。

## 1. 測定機器

磁気探査には、直接磁力を測定する磁力計と磁力の変化

を測定する磁気傾度計がある。これらの機器のうち、一般に用いられているものを表—1に示す。

## 2. 地盤調査の実例

豊予海峡の海底地質の調査にセシウム磁力計を使用した実例について説明する。

測定方法として、観測船（自航船）にセシウムセンサーを木わくに取り付け、船尾よりロープでえい航し磁力値を観測する。この際、船位は電波測距機を用いる。そして観測された磁力値より磁気原図を作成し、国際標準地球磁場 (IGRF) を計算して、これを差し引き IGRF 残差磁気図を作成する。次にこの図を基にして、岩体の平面形状を抽出するためのフィルターとして鉛直2次微分を、また、ローパスのフィルターとして5次傾向面解析を行い、それぞれの磁気図を作成する。このような操作を行って解析された大略の地下構造は、浚渫やその他の調査から推定された地下構造を良く反映していることが分かった。すなわち、磁気異常帯が背斜や向斜の構造と対応し、更に強磁性岩である蛇紋岩の分布についても検討がなされた。

このように磁気探査は、他に実施される地質調査、ボーリング、海底土質採取および音波探査などの物理探査と併

\*日本物理探査機 代表取締役