

海底地盤内の間隙水圧測定のためのフィルターの基本特性

舞鶴工業高等専門学校 正会員 前野 賀彦
株式会社 共和電業 同上 徳富 啓二

1. 序 論

わが国のような島国では国土の有効利用を必要としており、大深度地下空間開発、ウォーターフロント開発が脚光を浴びている。特に国土保全、海岸の埋め立て事業は、今後ますます大型化し外洋海域への展開が予想される。すでに関西新空港や東京湾岸道路の建設に際して人工島の建設が実施あるいは計画されており、今後原子力発電所や騒音を伴う各種工場・廃棄物処理場等の住環境から離れた立地を必要とする施設の建設が増加するものと予想される。これらの施設の建設に際しては、当然の事ながら海底地盤の安定性を充分検討した上で、設計および施工をする必要がある。特に、海洋構造物の設計を目的として、波浪による海底基礎地盤の液状化現象を解明するため有効応力理論に基づく安定解析法が各種提案されている。

このような現状を考えると、構造物基礎の安定性の評価に際しては、海底地盤内の間隙圧挙動を正確に把握する必要がある。そこで、各種力学試験と併せて地盤内の間隙圧の測定が行なわれてきた。しかし、残念なことに測定された間隙圧を用いた安定解析やシミュレーションに関する研究が数多く報告される中で、間隙圧変動を測定するためのフィルターを含めた間隙圧計の動的特性を検討した研究発表は皆無に近いのが現状である。

本研究では、海岸砂層中の間隙圧変動の測定に適した間隙圧計フィルターを開発し、加圧装置を用いて広範囲な周波数域におけるフィルターの基本特性を調べた。また、計測結果の周波数分析を行なうことにより、間隙圧計に使用する各種フィルターの位相特性および応答倍率を求め、それらと周波数の関係を検討した。さらに、位相特性についての理論的考察を行なうと共に測定精度の検討を行なった。

2. 間隙圧の動的測定に伴う問題点

間隙圧の動的測定時における間隙圧計の追従性による誤差は、真の地盤内間隙圧が計器に現われるまでの時間的遅れを意味するタイムラグにより評価されている。この原因としては、計器の据え付けによるものものと計器の構造に起因するものがある。前者は、計器の据え付け時にセンサ周辺で局所的に発生する過剰間隙圧の消散に要する時間であり、後者には、流体圧を土圧から分離する働きをするフィルターの特性、フィルターと圧力計ダイヤフラム間の液充填室の状態および圧力計本体の特性がある。

間隙圧の計測時のタイムラグの問題について報告されているものとしては、HvorslevやPenman等によるものがあるが、実際問題への適用に際してはタイムラグを規定する定数を実験により求めるか何等かの方法で推定する必要があり、現実的には意味をなさない。

理想的な状態では応答性に問題が無い間隙圧計も、それが設置される環境の影響を受け問題が生ずることが容易に想像される。その一例として、脱気水でフィルターや充填室を完全に満たしたとしても、計器の設置後に土中の有機物や微生物の働きにより液充填室に気泡が発生することやセンサ周辺の地下水あるいは海水等の水分がフィルターを通して侵入することが想定される。特に多孔質タイプではフィルターに気泡が付着したり、さらにフィルターと圧力計ダイヤフラム間の液充填室に気泡が侵入することが考えられる。また、一旦混入した気泡は、多くの場合フィルター外に脱気されない。この様にして付着・侵入した気泡は、間隙圧計の体積係数に大きな影響を与え、間隙圧の動的測定時における大きな誤差要因となる。すなわち、液充填室内に気泡が侵入することにより、フィルター内の微細毛管を通した水の出入りが増加し、毛管摩擦により圧力損失が発生する。フィルター中の微細な気孔を円管に近似して考えると損失圧は管軸長さ l と管内の平均速度 v の 2 乗に比例し、内径 d に反比例する事が知られており、体積 V の変化は d と l が一定とすると平均速度 v に比例して増加する事になり、体積変化の 2 乗で影響を与える事となる。

ここで述べた気泡の侵入という点に注目すれば、好ましいフィルターは、空気進入値の大きな値を有するセラミックを用い液充填室の容積変化が無視できるものか、または逆に充填室に気泡が発生しても容易に気泡を充填室の外に排除できるものである。しかし、間隙圧の動的測定という点からは、セラミックはその位相特性に問題があり静的な測定を除いてはフィルターの素材として不適当である。

以上の問題点を鑑みると間隙圧計フィルターの必要とする条件は、(1) 現場における脱気水の精製や脱気水中での間隙圧計の組立等が不要であること、(2) 構造的に簡単に地盤の土質特性に合わせた構成が可能であること、(3) 地盤中での取り付け設置が容易であること。そこで、新しいタイプのフレキシブルフィルターを開発した。このフィルターは、(1) 小口径の孔を有する板と共重合メッシュとを組み合わせたものであること、(2) 従来の金属フィルターの強度を持ち合わせていること、(3) メッシュが化学的に安定している

こと等の工夫により、気泡の発生を抑えることが可能で、フィルターと圧力計ダイヤフラム間の液充填室に気泡が発生しても貯りにくい構造となっている。また、構造的には極めて簡単であり、しかも土質の粒径等の特性に合わせて組合せを変更することが容易である。

3. フィルターの特性試験の概要

間隙圧計フィルターの特性試験は圧力容器における低サイクル加压装置を中心として行い、それらのフィルターのうち今回開発したフレキシブルフィルターの適用試験は室内造波水槽にて実施した。なお、各試験を通して周波数分析方法と応答倍率の算定方法を統一した。

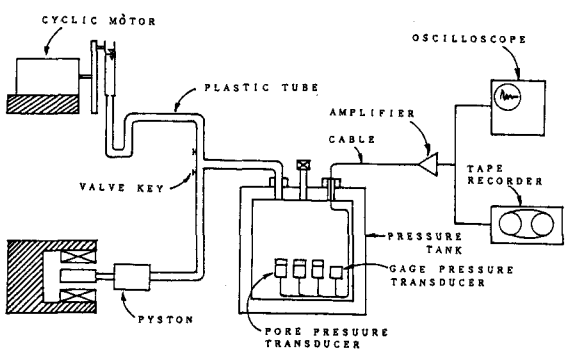


図-1 実験装置の概要

試験装置の概要を図-1に示す。加压装置は1 Hz以下と2 Hz以上20 Hzまで加压方法としては圧力チューブを分岐して異なる方法を用いた。すなわち、1 Hz以下を機械式の加压装置では波浪を近似する三角関数波形を与えることが困難であるため、無段可変速電動機を使用して円運動の水頭圧から三角関数波形を与えた。また、ピストンにより加振機に連結してあるシリンダ室を2 Hz以上20 Hzまで繰り返し加压した。

表-1 フィルターの基本特性

Kind of filter	Metal				Plastic	
	2	10	40	100	100	150
Average pore size (μm)	2	10	40	100	100	150
Mesh ratio (%)	44	44	40	33	58	65
Kind of filter	※ Ceramic				Flexible Porous φ 0.5, p=1 100 # × 3	
Average pore size (μm)	2.0	1.4	6.6	3.6	92	
Mesh ratio (%)	2.0	10.9	0.7	6.5	9.7	

※ Mesh ratio = Apparent mesh ratio × Effective mesh ratio

特性試験に使用したフィルターは現状の金属フィルター、今回開発したフレキシブルフィルター、多孔質セラミックフィルターおよびプラスチックフィルター

の4種類である。表-1に各種フィルターの基本的な特性を示した。

また、図-2に今回の試験に用いた間隙圧計の部品およびその組み立て図を示した。

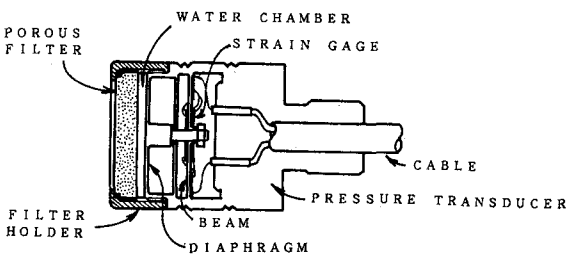


図-2 間隙圧計の組み立て図

さらに、図-3に新たに開発したフレキシブルフィルターの構造を示した。

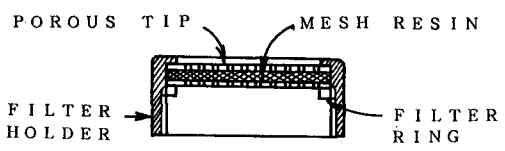


図-3 フレキシブルフィルターの構成図

フィルターホルダーに組み込まれた各種フィルターは、予めフィルター気孔にも充分脱気水を充填させるため真空ポンプを用いて脱気した。試験直前に脱気水内にてセンサを組み立て各々の試験を行った。また、応答性への気泡の効果を定量的に検討するため、4種類の金属フィルターを用いて、フィルター内に気泡が進入した場合とフィルターと圧力計ダイヤフラム間の充填室を気泡が占めた場合の2条件について試験を行った。さらに、通常の間隙圧計の設置状況にてフレキシブルフィルターと代表的な金属フィルターおよびセラミックフィルターとの比較試験を行なった。図-4に金属フィルターの試験条件を示した。

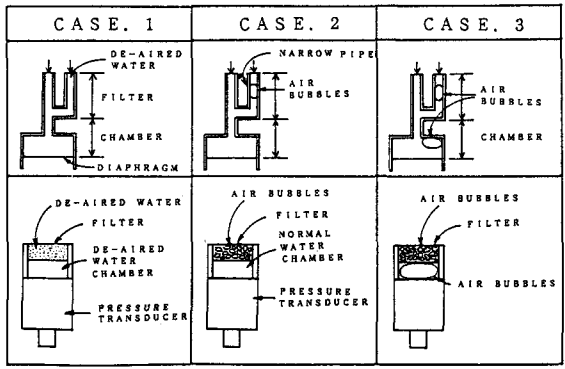


図-4 金属フィルターの試験条件の模式図

表-2 各フィルターの位相特性一覧

Kind of filter		Frequency (Hz)	0.5	1.0	2.0	5.0	8.0	10.0	15.0	20.0
Metal	pore size 2 μ m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10 μ m	0.1	0.2	0.3	1.0	1.5	1.8	2.8	3.6	-
	40 μ m	0.0	0.1	0.1	0.1	0.3	0.4	0.6	0.8	-
	100 μ m	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	-
	150 μ m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	-
Plastic	100 μ m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	-
	150 μ m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	-
Ceramic	Mesh ratio $\times$ pore size 6.5% $\times$ 3.6 μ m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.7% $\times$ 6.8 μ m	14.7	26.3	35.8	55.2	56.0	54.7	51.2	46.7	-
	10.9% $\times$ 1.4 μ m	22.1	36.8	50.3	57.1	54.1	50.6	43.7	20.5	-
	2.0% $\times$ 2.0 μ m	28.0	42.5	51.9	48.8	41.9	38.5	29.2	24.3	-
Flexible	Porous ϕ 0.5, p=1 100 μ $\times$ 2	53.8	67.1	66.2	3.3	8.7	8.5	8.1	5.1	-
	Porous ϕ 0.5, p=1 100 μ $\times$ 3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	-
	Porous ϕ 0.5, p=1 100 μ $\times$ 4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	-
	Porous ϕ 1.0, p=2 100 μ $\times$ 3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.1	-
	Porous ϕ 0.5, p=1 60 μ $\times$ 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	-
	Porous ϕ 0.5, p=1 40 μ $\times$ 3	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	-
	Porous ϕ 0.5, p=1 40 μ $\times$ 3	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	-
	Porous ϕ 0.5, p=1 40 μ $\times$ 3	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	-

unit: Deg.

表-3 各フィルターの応答特性一覧

Kind of filter		Frequency (Hz)	0.5	1.0	2.0	5.0	8.0	10.0	15.0	20.0
Metal	pore size 2 μ m	102.	102.	102.	102.	102.	102.	100.	102.	102.
	10 μ m	9	0	6	0	2	2	0	5	-
	40 μ m	102.	100.	106.	101.	100.	102.	100.	102.	-
	100 μ m	9	8	1	1	9	0	2	-	-
Plastic	100 μ m	100.	99.	100.	101.	101.	101.	101.	100.	-
	150 μ m	1	4	3	3	5	0	4	2	-
Ceramic	Mesh ratio $\times$ pore size 6.5% $\times$ 3.6 μ m	101.	101.	100.	100.	100.	100.	101.	100.	-
	0.7% $\times$ 6.8 μ m	4	6	6	9	4	2	1	1	-
	10.9% $\times$ 1.4 μ m	101.	100.	109.	101.	103.	101.	101.	100.	-
	2.0% $\times$ 2.0 μ m	3	8	9	2	0	5	9	3	-
Flexible	Porous ϕ 0.5, p=1 100 μ $\times$ 2	101.	101.	101.	101.	101.	99.	99.	100.	-
	Porous ϕ 0.5, p=1 100 μ $\times$ 3	9	3	4	5	9	8	5	7	-
	Porous ϕ 0.5, p=1 100 μ $\times$ 4	95.	87.	62.	33.	24.	19.	14.	16.	-
	Porous ϕ 1.0, p=2 100 μ $\times$ 3	6	7	1	9	0	4	9	3	-
	Porous ϕ 0.5, p=1 60 μ $\times$ 3	90.	75.	41.	27.	20.	28.	25.	9.	-
	Porous ϕ 0.5, p=1 40 μ $\times$ 3	6	2	2	1	7	9	7	5	-
	Porous ϕ 0.5, p=1 40 μ $\times$ 3	83.	63.	22.	19.	15.	14.	9.	8.	-
	Porous ϕ 0.5, p=1 40 μ $\times$ 3	8	8	6	6	1	4	0	8	-

unit: %

F F Tによる周波数分析により基準圧力計の卓越周波数と基準圧力計と各種フィルターを取り付けた間隙圧計との位相差を求めた。位相角分解能と周波数分解能とはサンプリング時間に相反する関係があり、むやみに一方の分解能を上げてても総合的な分解能向上にはつながらないので、F F Tは、加圧サイクルの500倍

を基準とした周波数でA/D変換を行った4096個のデータについて行った。同一フィルターを3個の間隙圧計に取り付け、約8波のデータを使用して変動幅を確認することとした。また、応答倍率の計算には、振幅確率密度の卓越した値を平均的な両振幅値として読みとった。また、応答倍率の定義は基準圧力計の読み取り値を基準として、各々の間隙水圧計の読み取りを百分率にて表示した。

4. フィルターの特性試験結果と考察

(1) 完全に脱気された条件における特性試験

今回開発したフレキシブルフィルターを装着した間隙圧計の周波数特性を確認するため、気泡の影響がない理想的な状態で間隙圧計の組み立てを行い、表-1に示す各フィルターについて動的特性試験を行なった。表-2、3にその試験結果を示す。

以上の結果のうちセラミックフィルターの位相遅れおよび応答倍率と周波数の関係を図-5、6示した。

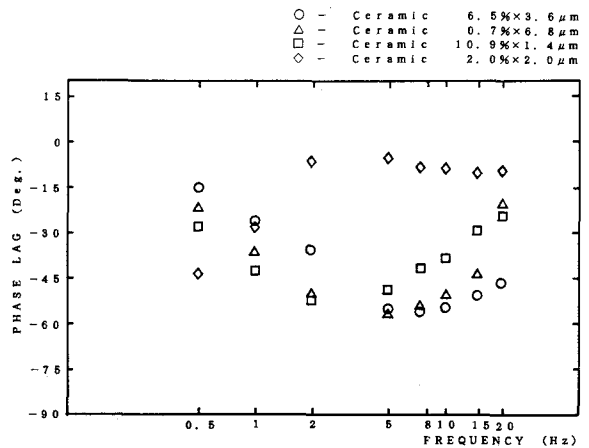


図-5 セラミックフィルターの位相特性

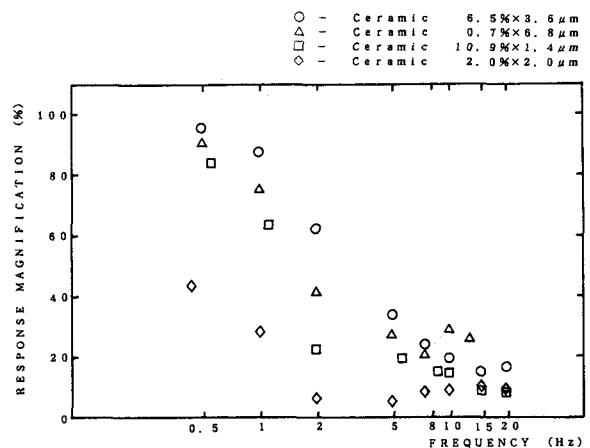


図-6 セラミックフィルターの応答特性

それによれば、セラミックフィルターについては、目寸法が特に微細であり、その分布もまばらであるため、0.5Hzですでに-15度から-54度の位相遅れがあり、

今回の実験において最もフィルター効果の大きい平均空孔直径 $2\mu\text{m}$ 、気孔率2%の実験結果においては、5Hz以上では次位相の波に打ち消されている。応答倍率についても同様に0.5Hzにて95%から悪いものですでに43%に減衰しており、加圧振動数に増加に伴ってさらに急激に減衰している。

金属フィルターについての実験結果によれば、応答倍率の周波数による減衰は認められなかった。位相遅れは、目寸法 $2\mu\text{m}$ のフィルターについて周波数0.5Hzで -0.1 度、20Hzで -3.6 度が確認された。また、プラスチックフィルターについては目寸法も大きいため、応答倍率および位相遅れへの周波数の影響は認められなかった。フレキシブルフィルターについては、特に脱気水等の充填等に注意を払わなかったが、応答倍率および位相遅れへの影響は認められなかった。

(2) 気泡の侵入による位相および応答特性の変化

先に述べたように、間隙圧の動的応答特性については、気泡の影響が最も大きな因子である。すなわち単位水圧が増すのに要する流入水量（体積係数）が気泡の混入により大きくなることにある。また、時間の経過に伴い気泡の量も変化することが予想され、検定を予め行なうことも困難である。今回は、この様な状態を室内にて再現するに当たって、次の2つの状態を想定した。その一つは、フィルター容積 0.60cm^3 中の空孔の50%に気泡として空気が残留していると仮定するものであり、他の一つは、フィルターと圧力計ダイヤフラム間の充填室の 0.254cm^3 の容積全体が空気で満たされているとしたものである。また、気体の圧力と体積の関係は一定温度において互いに反比例する事が知られている。気泡の混入量と気泡の混入に伴う体積係数増加量を表-4に示す。

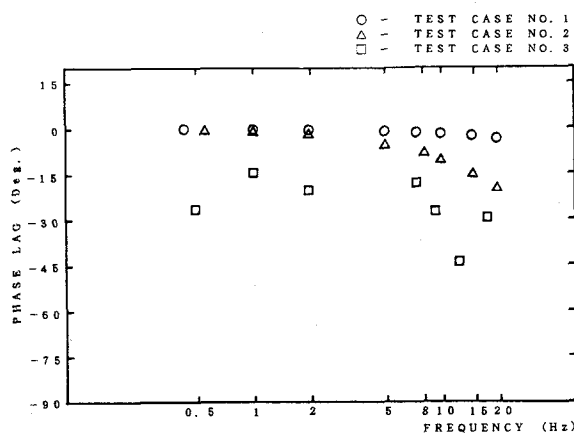
表-4 気泡の混入量と体積係数の関係

Test case		No. 2		No. 3	
kind of filter	pore size $2\mu\text{m}$	Volume of air bubble (cm^3)	Volume factor (cm^3/gf)	Volume of air bubble (cm^3)	Volume factor (cm^3/gf)
		(cm^3)	(cm^3/gf)	(cm^3)	(cm^3/gf)
Metal	10 μm	0.132	1.3×10^{-4}	0.986	3.7×10^{-4}
	40 μm	0.132	1.3×10^{-4}	0.986	3.7×10^{-4}
	100 μm	0.120	1.2×10^{-4}	0.974	3.6×10^{-4}
	100 μm	0.099	9.6×10^{-5}	0.953	3.4×10^{-4}

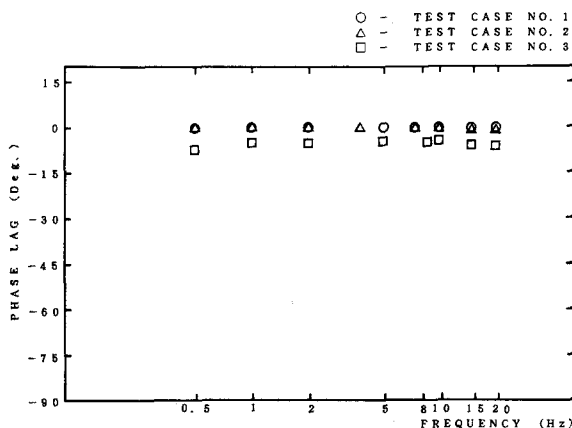
表-5 各種金属フィルターの位相特性

Frequency (Hz)		unit:deg.											
Test case	pore size $2\mu\text{m}$	0.5	1.0	2.0	5.0	8.0	10.0	15.0	20.0				
		0.6	1.0	2.2	5.6	8.3	10.4	15.3	19.9				
No. 2	10 μm	0.8	1.6	2.7	5.5	8.1	9.4	12.7	16.0				
	40 μm	0.1	0.1	0.1	0.3	0.5	0.6	1.0	1.1				
	100 μm	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.9	1.2	1.3				
	100 μm	26.6	14.3	20.3	83.3	18.1	27.8	44.0	29.3				
No. 3	10 μm	18.7	17.7	15.2	16.2	18.1	19.4	19.2	19.0				
	40 μm	12.8	10.7	11.7	9.7	10.0	9.9	9.8	13.0				
	100 μm	7.5	5.1	5.2	4.7	5.1	4.8	6.3	6.5				
	100 μm	7.5	5.1	5.2	4.7	5.1	4.8	6.3	6.5				

図-7、8に表-5で示した各種金属フィルターについての位相遅れに関する試験結果の中で代表的な $2\mu\text{m}$ と $100\mu\text{m}$ の金属フィルターについて先に述べた2つの実験条件における結果を示した。その結果によれば、フィルタのみの空気の混入した場合とフィルターおよびフィルターと圧力計ダイヤフラム間の液充填室の両者に空気が混入した場合とでは、体積係数のオーダーに大きな差はない（最小 $9.6 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{gf}$ 、最大 $3.7 \times 10^{-4} \text{cm}^3/\text{gf}$ ）。しかしながら、実際の間隙圧計の動的特性では、図-7、8に示すとおり2ケース共気泡による影響が認められる。



(a) 間隙径 $2\mu\text{m}$ の金属フィルター



(b) 間隙径 $100\mu\text{m}$ の金属フィルター

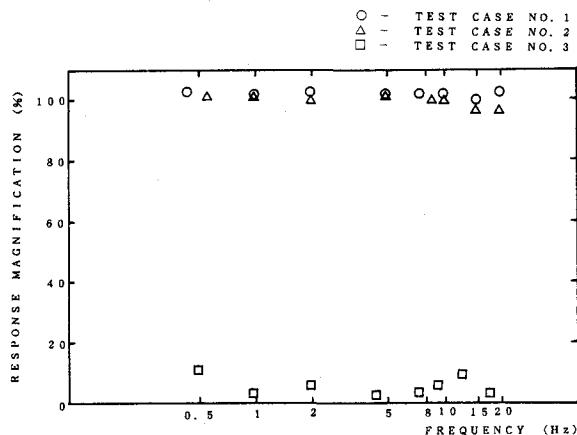
図-7 金属フィルターの位相特性

フィルターのみ気泡の混入した場合の試験によれば、目寸法 $2\mu\text{m}$ のフィルターを例にとると周波数20Hzで最大約20度の位相遅れが発生し、脱気水で充填した場合と比較して各フィルター共約5倍の位相遅れが発生していることが確認された。

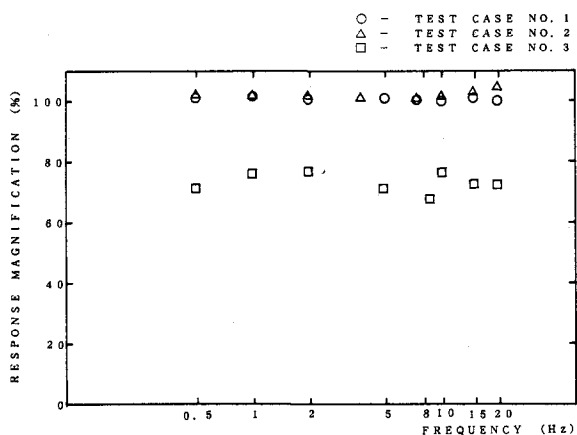
また、応答倍率は、気泡の混入の影響を受けているが、最大でも約5%の減衰である。これは、液充填室までつながっている気孔中の間隙経路は複数存在しており仮にその一部に気泡が存在するとしてもそれ以外のものは水パイプとして連結されていると見なすことができる。したがって、非圧縮性流体である水パイプ

を伝わって圧力が伝播するためと考えられる。

液充填室にまで気泡が侵入した場合には、体積係数のオーダーに変化は無いが、動的現象において圧縮性である気泡があたかもダンパの役目を果たし、毛管摩擦による圧力損失も加わり想定される以上の影響が現われている。例えば、目寸法 $2\mu\text{m}$ のフィルターでは、周波数 5Hz 以上で次周期の圧力波に影響されて波形が大きく乱れており、応答倍率も数%という結果になっている。



(a) 間隙径 $2\mu\text{m}$ の金属フィルター



(b) 間隙径 $100\mu\text{m}$ の金属フィルター

図-8 金属フィルターの応答特性

(3) 通常設置条件での特性試験

以上の考察の結果、セラミックフィルターについては、どのような注意を払っても、間隙圧の動的測定に際して最も大きな圧力減衰と位相遅れが生じ、波浪程度の低い周波数においても測定に適さないことが確認された。また、金属フィルターに代表される多孔質フィルターについても気泡の付着や混入により、その動的応答特性が大きく変化することが確認された。ここで、実際の現場を想定して真空ポンプを使用せずに細心の注意を払いながら湯さみの中で各種フィルターを組み立て試験を行なった結果を図-9、10に示す。また、金属フィルター組み立て時のみ極少量（約 0.01cm^3 ）

の気泡を液充填室に混入した。

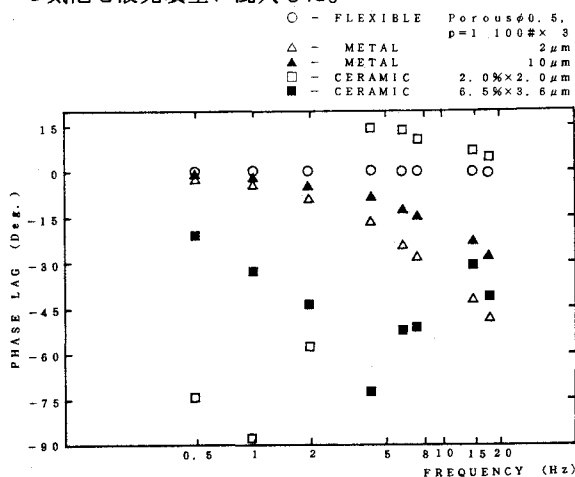


図-9 各種フィルターの位相特性

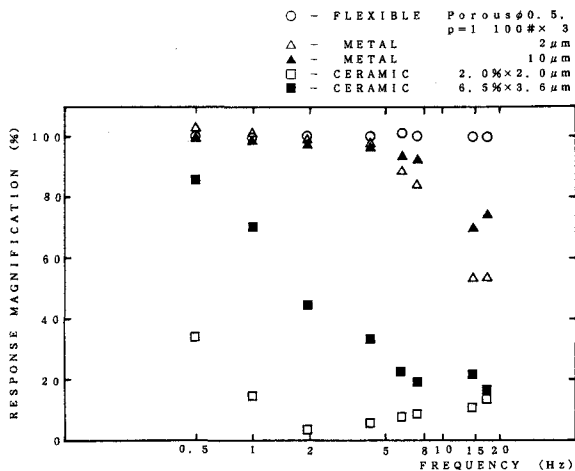


図-10 各種フィルターの応答特性

フレキシブルフィルターについては 15Hz 以上において若干の位相遅れの傾向が現われているが、特性的にも安定しており、実際の使用に際しては影響はない。応答倍率については問題なく、取り扱いも容易であることが確認された。

金属フィルターについての実験結果よれば、気泡の混入がフィルター段階に留まれば動的応答に問題になるほどの影響は無いが、液充填室に侵入し始めると動的応答に大きな影響を与えることが判明した。応答倍率において現象波形を5%の誤差範囲内で観測するためには目寸法 $2\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ のフィルターでは周波数約 5Hz 以下でないことが確認された。また、位相遅れについては比較的低周波である 0.5Hz からすでに問題となる。

セラミックフィルターについては、低周波の 0.5Hz で既に応答倍率が約30%から85%、位相遅れも約75度から20度と大きく、間隙圧の動的測定には適さないことが確認出来た。

(4) 造波水槽でのフレキシブルフィルタの適用例

加圧試験装置での結果を踏まえて、実際の波により

引き起こされる砂層中の間隙圧の測定を行った。試験装置は舞鶴工業高等専門学校土木工学科設置の造波水槽を用いた。また、福井県大飯郡高浜町難波江浜にて採取した砂を実験に用いた。この難波江砂の特性を表-6に示す。

表-6 難波江砂の特性

Uniformity coefficient	1.53
Specific gravity	2.70
Permeability	0.023cm/s
Effective grain size	0.114mm
Average grain size	0.160mm

間隙圧計は、砂層表面から3cmの深度、および以下10cm間隔に深度を深め5測点埋設し、砂層上に設置された波圧計との位相差および間隙圧を図-11、12に示した。この結果によれば、間隙圧の砂層中での減衰特性と位相特性をフレキシブルフィルターを用いることにより正確に把握できることが判明した。

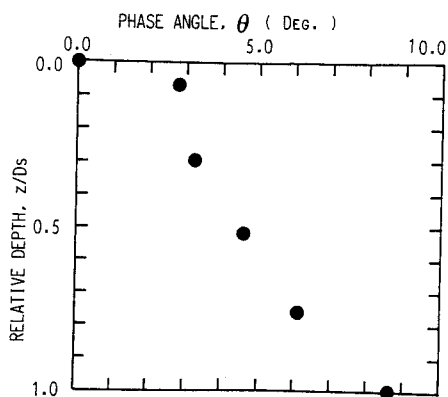


図-11 砂層中における間隙圧の位相特性

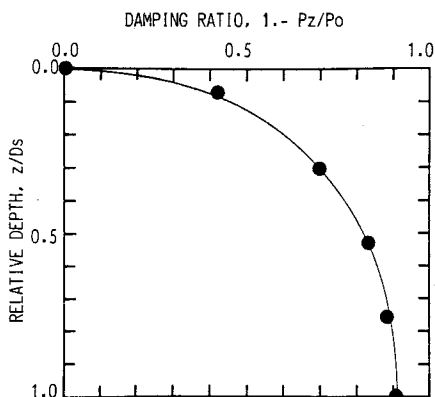


図-12 砂層中における間隙圧の減衰特性

5. 結論

以上の検討の結果、以下の結論を得た。

(1) 本研究により開発したフレキシブルフィルターは、その取り扱いが従来のフィルターと比較して容易であ

る上に特性も安定しており、海底地盤砂層中の間隙圧を位相遅れや応答の減衰を最小限に押え測定できることを確認した。

(2) 間隙圧の動的測定には、センサの小型化、高出力化が望ましいが、最も影響を与える因子は気泡のフィルター内および液充填室中への侵入による間隙圧計の体積係数の増加や変動であり、従来の金属・セラミック・プラスチックフィルターは発生した気泡を液充填室内に閉じこめてしまい問題が多いことが確認された。

(3) 飽和-不飽和土の静的な間隙圧を測定するために使用されているセラミックフィルターは、フィルター自体が動的現象に対して応答減衰と位相遅れを生ずるので動的な計測には適していないことが確認された。

(4) フィルター自体のフィルター効果については、目寸法が小さいものほど影響が大きいことが確認された。特に、セラミックフィルターについてはその製造上の特性もあり、通気孔率に大きく左右されることが確認できた。

(5) 気泡の侵入の効果については、フィルターまでの進入の段階では影響が少ないが、フィルターと圧力計ダイヤフラム間の液充填室まで気泡が侵入する段階では、たとえ微量であっても大きな位相遅れや応答の減衰が現われることが確認された。

以上の結論に基づけば、間隙圧の測定に際しては、単に間隙圧計に組み込まれる圧力計の性能のみを検討するのではなく、予め対象とする間隙圧変動の最大周波数と圧力の推定精度および地盤の特性を考慮する必要がある。フィルターおよび圧力計の性能を総合的に検討し十分な特性試験を行った後、対象とする現象に最も適した間隙圧計を選択して使用することが正確な観測に必要不可欠である。

本研究では、間隙圧計用フィルターの動的特性の検討結果を報告したが海洋環境において正確な間隙圧測定を長期間継続するためには、微生物や電食等の影響を検討する必要がある。

参考文献

- (1) 前野賀彦・長谷川高士：波浪作用下の海底地盤内の間隙水圧の特性、海洋開発論文集、Vol.1、pp. 151-156、1985。
- (2) 前野賀彦・長谷川高士：波浪による間隙圧の発達特性による海底砂層地盤の土質特性の推定、海洋開発論文集、Vol.2、pp. 61-66、1986。
- (3) 前野賀彦・長谷川高士：間隙圧の発達特性への砂層と水の境界付近のエネルギー損失の影響、海洋開発論文集、Vol.3、pp101-106、1987。
- (4) 前野賀彦・酒井哲郎・間瀬肇：波浪による砂層の液状化傾向と波形勾配との関係、海洋開発論文集、Vol.4、pp. 5-10、1988。
- (5) 土質工学会編：土質調査法、第11章 土圧・間隙水圧の測定、1987