

間隙圧計の動的応答特性

関口 秀雄・北 勝利・下村 泰造

DYNAMIC RESPONSE OF PORE PRESSURE TRANSDUCERS IN CENTRIFUGE WAVE TESTS

By Hideo SEKIGUCHI, Katsutoshi KITA and Taizo SHIMOMURA

Synopsis

This paper concerns the dynamic response of pore pressure transducers used in the centrifuge wave test with viscous scaling introduced. The frequency response of the miniature pore pressure transducer (Kyowa BP-2KDS Type) is firstly predicted within the theoretical framework proposed by Lee. The predicted performance is then examined experimentally by wave loading tests under the centrifugal acceleration of 50g. The pressure waveforms, measured by the fully saturated pore pressure transducer with the sintered bronze filtering cap (average pore size of $10\ \mu\text{m}$ and $40\ \mu\text{m}$), showed neither amplitude attenuation nor phase lag comparing to the actual pressure fluctuation, in case of the exciting frequency below 13Hz. In contrast, the substantial attenuation and phase lag are observed in the measured waveforms in case that air bubbles are entrapped in the dead space of the transducer. The dynamic response predicted by Lee's theory compared favourably with what has been measured. The results demonstrate that it is crucial for the accurate measurement of dynamic pore pressure fluctuation, to keep the pore pressure transducer and the filter in fully saturated condition.

1. はじめに

波浪実験や振動実験など遠心力場における動的実験では、時間相似則より通常重力場での現象と比較して、地盤応答周期が短くなる。特に飽和土を対象とした液状化実験では、高周波数で変動する間隙圧の正確な計測が肝要となる。

動的な流体圧変化を間隙圧計により計測する場合、センサ設置に伴う圧力場の変化、センサの内部構造、フィルターの浸透性、フィルターや液充填室内の気泡の混入などに起因して、真の圧力変動と計測された圧力変動の間に位相ずれや圧力減衰などの誤差が生じる。前野らは、間隙圧計の周波数応答特性に及ぼすフィルター浸透性や気泡混入形態の影響について、実験的検討を加えている¹⁾。その結果、フィルターやフィルターと圧力感受面間の液充填室が完全に飽和している場合、浸透性の高い金属フィルターを取付けた間隙圧計による計測圧力変動は、真の圧力変動と比較して振幅減衰や位相ずれが生じなかったのに対し、浸透性の低いセラミックフィルターを用いた場合には、計測値は真値と比較して著しい圧力減衰および位相遅れを伴うことを確認した。また、金属フィルターを用いた場合でも、液充填室内に気泡が混入していると振幅減衰および位相ずれが生じることを指摘している。Lee は、間隙圧計内の流体圧伝播を次元モデルにより表現し、これを用いて間隙圧計フィルターの浸透性や液充填室内の飽和度が間隙圧計の周波数応答特性に及ぼす影響について調べている²⁾。Phillips and Sekiguchi は、遠心力載荷実験で使用する小型間隙圧計の周波数

応答特性を実験的に調べると共に、Lee の理論による応答特性の解析結果との比較を行っている³⁾。

Phillips and Sekiguchi は、水を間隙流体とした遠心力場波浪実験を考慮して、水圧载荷による間隙圧計の周波数応答特性を求めているが、遠心力場における波浪伝播と圧密に関する時間相似率の整合性を考慮するためには、シリコンオイルなどの高粘性流体を間隙流体として用いる必要がある（粘性スケールリング）。本研究では、粘性スケールリングを導入した遠心力場波浪実験⁴⁾を念頭において、同実験で使用する間隙圧計（共和電業製 BP-2KDS 型）の周波数応答特性を Lee 理論より予測すると共に、同実験で対象となる周波数範囲（10Hz 以下）における応答特性を実験的に調べている。

2. Lee の理論による間隙圧計の周波数応答特性

2.1 間隙圧計の周波数応答理論解

Lee は、ダイアフラム式間隙圧計内部に気体と流体が分離して存在するとして、一次元圧力伝播モデルにより、間隙圧計外部の圧力変動に対する間隙圧計の受圧面で計測される圧力変動の振幅減衰と位相ずれに関する理論解を誘導した²⁾。

Lee の理論における間隙圧計の模式図を Fig. 1 に示す。Lee は理論解を誘導するにあたり、以下の仮定を設けている。

1. 感受面（ダイアフラム）は線形弾性円板である。円板周囲は剛に固定されている。
2. ダイアフラムのたわみは微小である。
3. ダイアフラム上のひずみゲージの剛性および質量は無視できる。
4. 圧力変動の振動数は、ダイアフラムの固有振動数に比べ、はるかに低い。
5. 流体は非圧縮性である。
6. フィルター部は完全に飽和している。間隙圧計が不飽和である場合、間隙圧計内の気泡は感受面とフィルター間の液充填室に集中して閉じ込められている（Fig. 1 参照）。
7. 液充填室内壁は剛であり、内壁と流体および気体間の摩擦は無視できる。
8. フィルター部と液充填室内の流体、および液充填室内の気体の運動は一次元的である。
9. フィルター内の流体運動はダルシー則に従う。

ダイアフラムに次式で表される圧力変動 p_v が作用しているとする。

$$p_v = P_v e^{i\omega t} \tag{1}$$

ここに、 P_v はダイアフラムで計測された（複素）圧力振幅である。一方間隙圧計外部における圧力変動 p_0 を式 (2) で表す。

$$p_0 = P_0 e^{i\omega t} \tag{2}$$

式 (2) において、 P_0 は真の（複素）圧力振幅である。

Lee によると、計測圧力振幅 P_v と真の圧力振幅 P_0 の間には、次式が成立する。

$$P_0 = P_v (H + iI) \tag{3}$$

$$H = \left[1 - \frac{\rho_f \omega^2 (T_p + S_r l) a^6}{192 r_e^2 D_p} \right] \cos(k a l) - \left[\frac{\rho_f \omega^2 (T_p + S_r l)}{\rho_{oc} \omega} + \frac{\rho_{oc} \omega a^6}{192 r_e^2 D_p} \right] \sin(k a l) \tag{4}$$

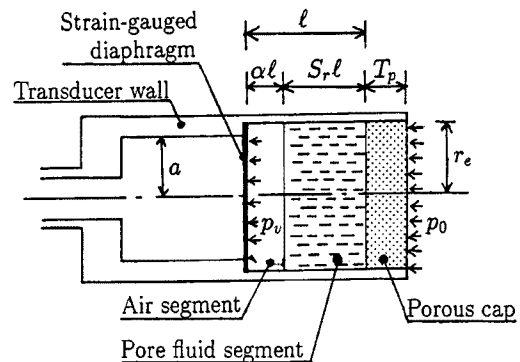


Fig. 1 Idealized cross section of a diaphragm pore pressure transducer (after Lee²⁾).

$$I = \frac{T_p \omega}{\kappa_b} \left[\frac{a^6 \cos(k \alpha l)}{192 r_e^2 D_p} + \frac{\sin(k \alpha l)}{\rho_0 c \omega} \right] \quad (5)$$

ただし、

$$D_p = \frac{E h^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (6)$$

ここに、 E ：ダイアフラムのヤング率、 ν ：ダイアフラムのポアソン比、

h ：ダイアフラム厚さ、 a ：ダイアフラム半径、

l ：液充填室長さ、 r_e ：液充填室半径、 T_p ：フィルター厚さ、

κ_b ：フィルターの浸透係数、 ρ_f ：流体密度、 ρ_0 ：気体密度、

c ：気体中の音波速度、 S_r ：液充填室の飽和度、 $\alpha = 1 - S_r$ 、

ω ：圧力変動の角振動数、 $k = \omega/c$ ：波数

である。

式 (4), (5), (6) より、真の圧力変動に対する計測圧力変動の振幅比（応答倍率） R_a 、および位相ずれ ϕ_a は、次式で表すことができる。

$$R_a = |P_v / P_0| = 1 / \sqrt{H^2 + I^2} \quad (7)$$

$$\phi_a = \arctan [I / H] \quad (8)$$

2.2 ミニチュア間隙圧計の周波数応答特性の解析

本実験で用いたミニチュア間隙圧計（共和電業製 BP-2KDS 型）の断面図を **Fig. 2** に示す。また解析で用いたパラメータを **Table 1** に示す。本間隙圧計の液充填室の半径は一定ではなく、ここでは液充填室の体積を長さで除することにより液充填室の平均断面積を求め、これより等価な液充填室半径を決定している。また、遠心加速度 50g 場における波浪実験での使用を考慮して、間隙流体として粘性 50cSt のシリコンオイルを想定している。

本解析及び後出の実験では、平均空孔径（目寸法） $40 \mu\text{m}$ および $10 \mu\text{m}$ の 2 種類のフィルターについて間隙圧計の応答特性を調べている。定水位浸透試験より求めた、各フィルターのシリコンオイルに対する浸透係数を **Table 2** に示す。

Lee の理論より予測した、目寸法 $40 \mu\text{m}$ のフィルター装着時における、ミニチュア間隙圧計の応答倍率 R_a と圧力変動の周波数の関係を **Fig. 3 (a)** に示す。液充填室内の飽和度 S_r が高い場合 ($S_r = 0.98, 0.99, 1.0$) には、周波数 10Hz 以下において振幅減衰はほとんど見られないのに対し、飽和度が低い場合 ($S_r = 0.9$) には周波数の増加とともに応答振幅比は減少し、周波数 10Hz において振幅比 $R_a = 0.59$ となる。一方目寸法 $40 \mu\text{m}$ のフィルター装着時における位相ずれと周波数の関係を **Fig. 3 (b)** に示す。周波数の増加とともに位相ずれは増大し、飽和度が比較的高い $S_r = 0.98$ の場合でも、10Hz で $\phi_a =$

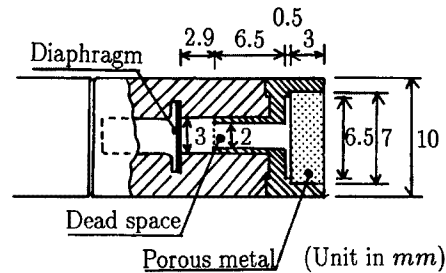


Fig. 2 Cross section of Kyowa BP-2KDS type miniature pore pressure transducer.

Table 1 Pore pressure transducer parameters

| | |
|-------------------------------------|--------------------------|
| Young's Modulus of Diaphragm, E | $1.11 \times 10^{11} Pa$ |
| Poisson's Ratio of Diaphragm, ν | 0.33 |
| Diaphragm Thickness, h | 0.08mm |
| Radius of Diaphragm, a | 2.525mm |
| Length of Dead Space, l | 9.9mm |
| Radius of Dead Space, r_e | 1.33mm |
| Thickness of Filtering Cap, T_p | 3.0mm |
| Pore Fluid Density, ρ_f | $960 kg/m^3$ |
| Air Density, ρ_0 | $2.45 kg/m^3$ |
| Sound Velocity in Air, c | 330m/s |

17度と大きな位相ずれが生じている。波浪による間隙圧応答実験での使用を考慮すると、変動間隙圧による液状化現象で問題となる地盤内間隙圧の位相遅れは10~20度であり⁵⁾、上述の位相ずれと同等となる。よって、遠心力場波浪実験により変動間隙圧による地盤の不安定化過程を追跡する場合には、間隙圧計を十分に脱気することが重要となる。

本間隙圧計の周波数応答特性に及ぼす、フィルターの浸透性および液充填室の飽和度の影響を Fig. 4 に示す。同図は、液充填室の飽和度をパラメータとして、フィルターの浸透係数と周波数10Hzにおける振幅減衰および位相遅れの関係を与えている。また同図中に、Table 2 に示した2種類のフィルターの浸透係数を矢印で示す。Fig. 4 よると、本間隙圧計の幾何形状およびダイヤフラム特性では、浸透係数が $\kappa_b < 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}/\text{Pa}$ のフィルターを採用した場合、液充填室やフィルター部を完全に飽和しても、フィルター装着による振幅減衰や位相ずれは避けられない。一方、フィルター浸透係数が $\kappa_b > 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}/\text{Pa}$ の場合には、液充填室内の飽和度 $S_r = 0.9$ の場合でも、振幅減衰は見られず位相ずれも小さい。

Table 2 Filter permeability to silicone oil with the viscosity of 50cSt

| Average Pore Diameter | Permeability |
|-----------------------|--|
| 40 μm | $5.3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}/\text{Pa}$ |
| 10 μm | $5.9 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}/\text{Pa}$ |

3. 間隙圧計の動的応答実験

3.1 実験概要

本研究では、ミニチュア間隙圧計の周波数応答特性に及ぼす、フィルター浸透性および液充填室内の混入気泡の影響を調べるために、次の2ケースについて実験を行った。

ケース1：液充填室およびフィルターが完全に飽和している場合
(フィルター目寸法 40 μm および 10 μm)

ケース2：フィルターは飽和しているが、液充填室に気泡が混入している場合
(フィルター目寸法 40 μm)

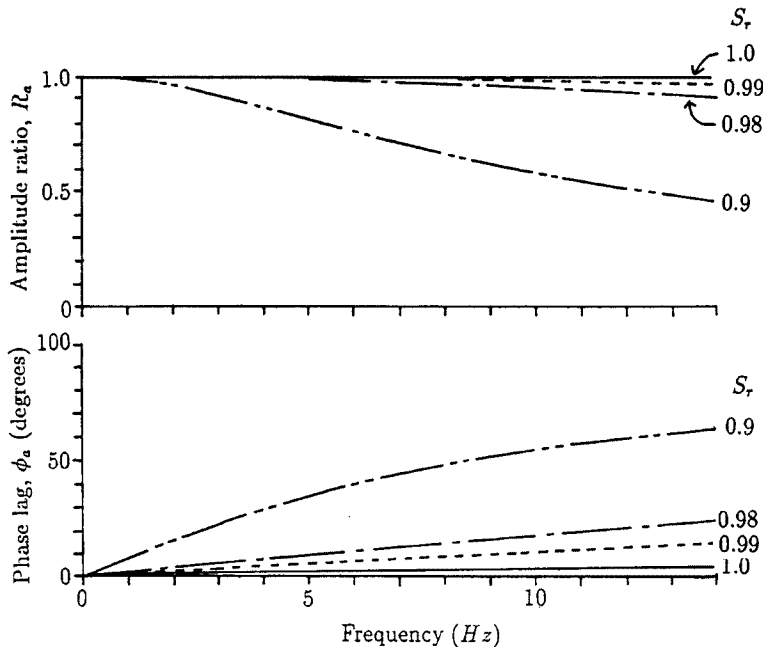


Fig. 3 Predicted frequency response (filter mesh size : 40 μm).

なお実験ケース2の終了後、シリコンオイル中で間隙圧計よりフィルターを分離した際、直径2～3mm程度の気泡が液充填室より排出し、液中を上昇することを目視した。液充填室の容積は55mm³であることより、遠心力場における液圧による気泡の圧縮を勘案して、実験ケース2における液充填室内の飽和度は $S_r = 0.8 \sim 0.95$ 程度であったと考えられる。

本実験で用いた、フラップ型造波水槽を Fig. 5 に示す⁴⁾。水路の大きさは長さ500mm、幅100mm、高さ150mmであり、50gの遠心力場では長さ25m、幅5m、高さ7.5mに相当する。端面より100mmの位置に造波板がヒンジ結合されている。水路底には間隙圧計を収納するためのアダプター (Fig. 5 中7) が4箇所に設置されている。造波装置は、1.5kW容量のACサーボモータを動力源とする。観測室内のポテンショメータで指定した周波数に従い、サーボコントローラがモータ (1) を駆動する。モータの回転運動は減速ギヤ (2)、偏心円盤 (3)、クランクシャフト (4) を介して、水路底面のヒンジ (6) を軸とした造波板 (5) の往復運動へと変換される。造波周波数は0～13Hzである。

造波水槽にシリコンオイル (50cSt) を所定の液深 (8cm) まで満たし、フィルターを間隙圧計から取り外した状態で、間隙圧計およびフィルターを水槽内のシリコンオイル中に浸す。造波水槽全体を脱気槽内に入れ、真空状態で2時間以上脱気した。次に水路底面の造波板より22cmおよび30cmの位置に、間隙圧計をそれぞれ2個設置した (Fig. 6 中P1, P2, P3, P4)。

間隙圧計 P1 および P3 には目寸法 100 μm のフィルターを、また間隙圧計 P2 および P4 には目寸法 40 μm もしくは 10 μm のフィルターを装着した。ケース2の場合、間隙圧計 P2 および P4 は脱気時にシリコンオイル内に浸さず、実験直前に液充填室内の気泡が逃げないようにフィルターを取付けた後、前出の所定位置に設置した。遠心加速度 50g のもとで、周波数 0.5Hz～13Hz の波浪を造波し、間隙圧計 P1～P4 により液圧変動を計測した。間隙圧計からの信号は、回転アーム上のデジタル動ひずみ計 (東京測器製 DRA-10A) にて A/D 変換された後、スリッピングを介して計測室内のパーソナルコンピュータへ転送される。デジタルデータのサンプリング頻度は、波浪の1周期あたり 60～120 データである。

3.2 実験結果と考察

(1) 実験結果の整理方法

予備実験より、フィルターおよび液充填室を十分に脱気した場合、当該の周波数範囲 (13Hz 以下) において、

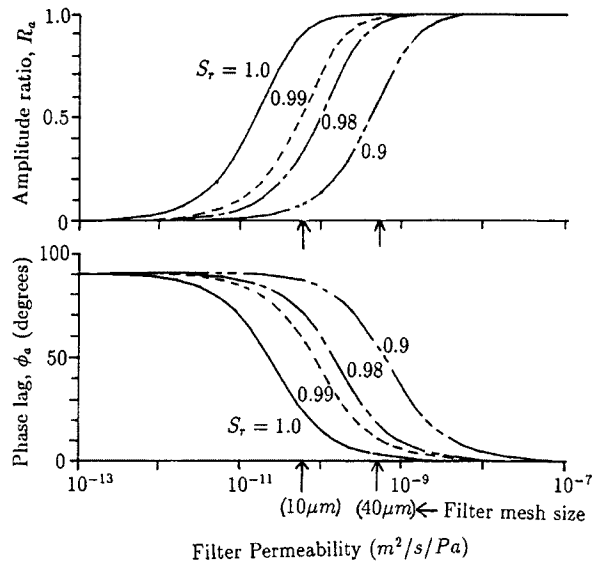


Fig. 4 Theoretical variation of amplitude attenuation and phase lag at 10 Hz with filter permeability.

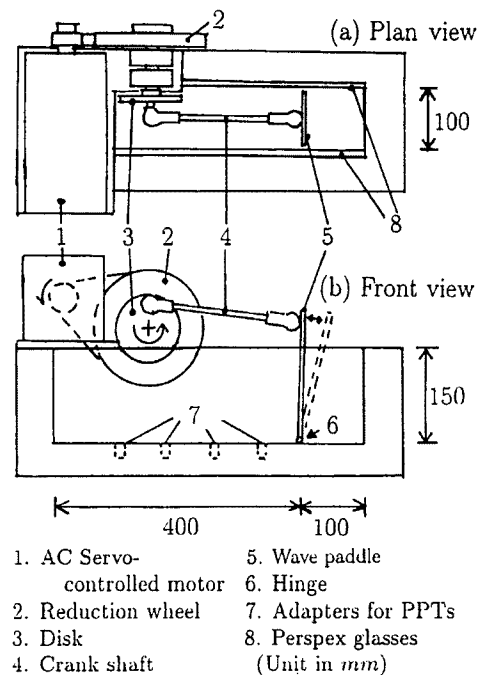


Fig. 5 Wave channel with wave actuator.

目寸法 $100\mu\text{m}$ のフィルターを装着した間隙圧計の応答は、フィルターを装着しない間隙圧計の応答と比較して、振幅減衰および位相ずれともに認められなかった。よって本研究では、目寸法 $100\mu\text{m}$ のフィルターを装着した間隙圧計により計測された流体圧変動を、真の流体圧変動とみなすこととする。

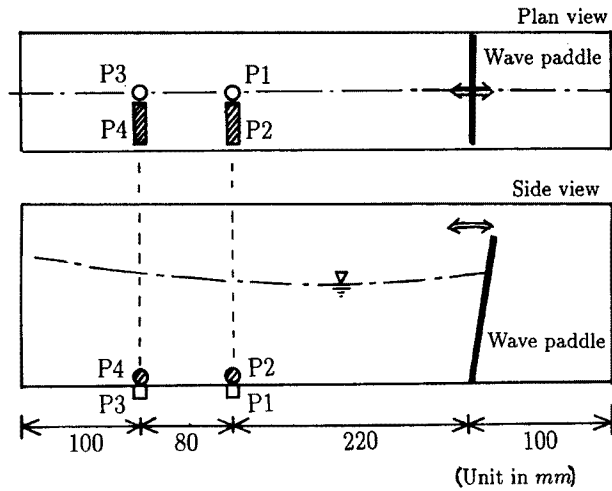
目寸法 $40\mu\text{m}$ のフィルターを装着した間隙圧計で計測した、液圧波形例を Fig. 7 (a) に示す。応答性が問題となる間隙圧計で計測した液圧変動の時刻歴を、1024 点について高速フーリエ変換することにより、卓越周波数、卓越周波数におけるフーリエ振幅 A_1 、および位相 ϕ_0 を求める (Fig. 7 (b) と Fig. 7 (c))。同様に、目寸法 $100\mu\text{m}$ のフィルターを装着した間隙圧計による計測結果より、'真' の流体圧変動の卓越周波数におけるフーリエ振幅 A_0 、および位相 ϕ_0 を求める。以上より、応答倍率 R_m および位相ずれ ϕ_m を、次式で計算する。

$$R_m = A_1 / A_0 \tag{9}$$

$$\phi_m = \phi_0 - \phi_1 \tag{10}$$

(2) フィルター浸透性の影響について (実験ケース 1)

実験ケース 1 で計測された、応答倍率 R_m および位相ずれ ϕ_m と卓越周波数の関係を Fig. 8 に示す。図中の○印および×印は、それぞれ目寸法 $40\mu\text{m}$ および $10\mu\text{m}$ のフィルターを装着した間隙圧計の周波数応答を示している (ともに実験値)。同図中には、飽和度 $S_r = 1.0$ として Lee 理論より求めた間隙圧計の周波数応答の予測結果を、実線 (フィルター目寸法 $40\mu\text{m}$) および破線 (フィルター目寸法 $10\mu\text{m}$) で示している。実験結果によると、目寸法 $40\mu\text{m}$ および $10\mu\text{m}$ のフィルターを装着した間隙圧計ともに、周波数によらず応答倍率は $R_m = 1.0$ である (Fig. 8 (a))。また位相ずれに着目すると、装着フィルターの目寸法に係わらず、 $\phi_m = 0$ である



P1, P3 : Pore pressure transducers (filter mesh size $100\mu\text{m}$)

P2, P4 : Pore pressure transducers (filter mesh size $40\mu\text{m}$ or $10\mu\text{m}$)

Fig. 6 Locations of pore pressure transducers.

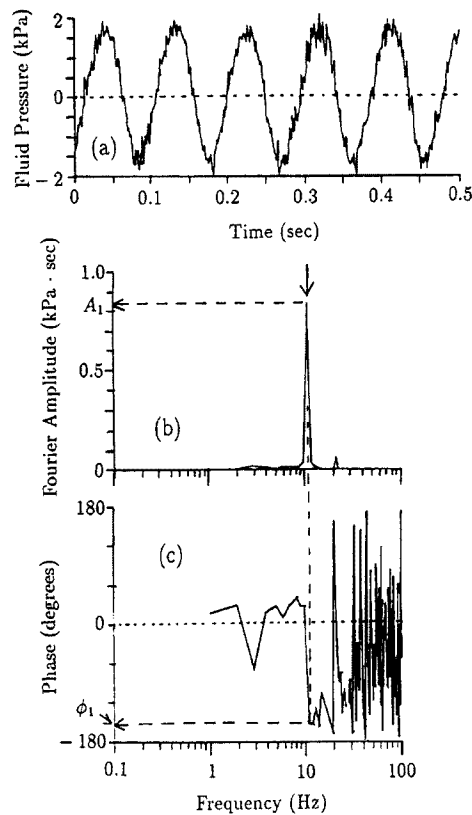


Fig. 7 Pressure waveform and Fourier spectrum measured with fully saturated pore pressure transducer (filter mesh size : $40\mu\text{m}$).

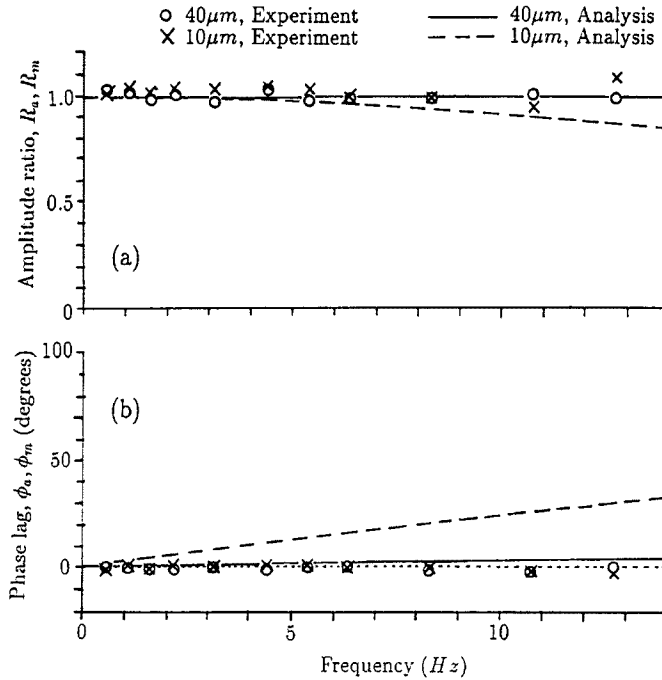


Fig. 8 Measured frequency responses of saturated pore pressure transducers.

(Fig. 8 (b)). 即ち、液充填室およびフィルター部を十分脱気した場合、本実験で用いた目寸法 10 μm および 40 μm の金属フィルターでは、10Hz 以下の周波数範囲における間隙圧計の動的応答性に及ぼすフィルターの影響は無視しうる。

Lee 理論による解析結果と実測値を比較すると、フィルター目寸法 40 μm の場合には、10Hz 以下の周波数範囲において振幅減衰および位相ずれは微小であり、実験で得られた応答特性とよく合致している。一方フィルター目寸法 10 μm の場合には、周波数 10Hz で応答倍率 $R_a = 0.91$ 、位相ずれ $\phi_a = 24$ 度であり、実験と比較して応答性を過小評価している。

(3) 液充填室内の気泡の影響について (実験ケース 2)

実験で観測された、液充填室に気泡が混入した場合における、間隙圧計 (フィルター目寸法 40 μm) の周波数応答特性を Fig. 9 に示す (同図中○印)。同図中には、実験ケース 1 で計測した液充填室が完全に飽和している場合の周波数応答 (×印)、および Lee 理論による解析結果を併せて示している。Lee 理論による解析では、実験後の目視による気泡径を考慮して、 $S_r = 0.95$ (Fig. 9 中実線) および $S_r = 0.8$ (Fig. 9 中破線) を採用した。

液充填室内に気泡が混入した場合、周波数 10.7Hz において実測応答倍率 (Fig. 9 (a)) は $R_m = 0.49$ であり、液充填室が飽和している場合と比較して大きな振幅減衰が見られる。一方位相ずれに着目すると、液充填室が不飽和の場合 $\phi_m = 37$ 度であり、気泡の混入により著しい位相ずれが生じている (Fig. 9 (b))。Lee 理論による不飽和間隙圧計の周波数応答特性と実測値を比較すると、応答倍率・位相ずれともに、実測値は $S_r = 0.95$ を仮定した場合の解析曲線と $S_r = 0.8$ とを仮定した場合の解析曲線の中間の値をとっており、実験結果と解析結果の間に良い対応が認められる。

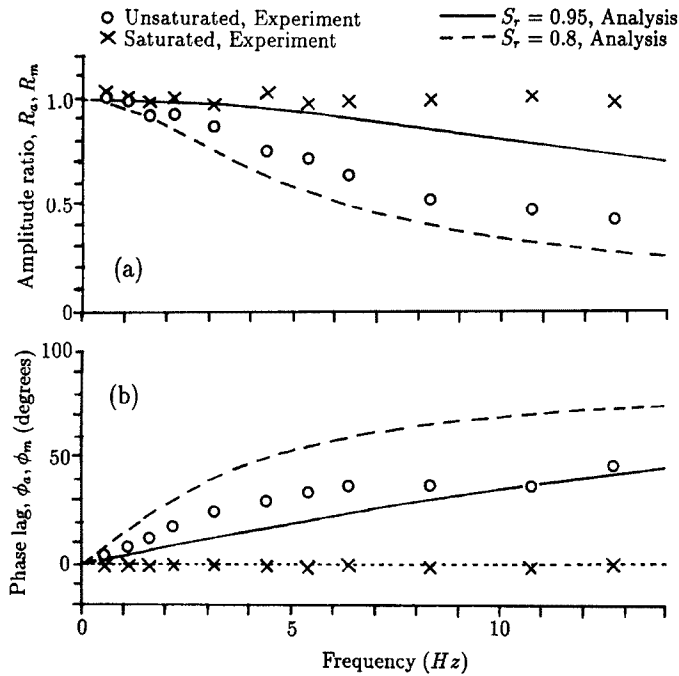


Fig. 9 Measured frequency response of unsaturated pore pressure transducer.

4. おわりに

本研究では Lee の理論による解析および実験により、粘性スケーリングを導入した遠心力場波浪実験で使用する間隙圧計の周波数応答特性を調べた。その結果、液充填室およびフィルター部が飽和している場合には、遠心力場波浪実験での周波数範囲 (10Hz 以下) において、本間隙圧計およびフィルター (目寸法 $40 \mu\text{m}$ および $10 \mu\text{m}$) の使用に問題がないことが確認できた。一方、液充填室内への気泡の混入により、間隙圧計の動的応答特性が著しく劣化することがわかった。また、Lee の理論より予測した間隙圧計の周波数応答特性と実測の周波数応答特性を比較したところ、両者の間に概ね良い対応を得た。

謝 辞

本研究を行うにあたり、共和電業株式会社・鈴木芳博氏には、間隙圧計の内部構造に関する資料を提供いただいた。ここに謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 前野賀彦・徳富啓二：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，海洋開発論文集，Vol. 5, 1989, pp.73-78.
- 2) Lee, F.-H. : Frequency Response of Diaphragm Pore Pressure Transducers in Dynamic Centrifuge Model Tests, Geotechnical Testing Journal, Vol. 13, No. 3, 1990, pp. 201-207.
- 3) Phillips, R and H. Sekiguchi : Water Wave Trains in Drum Centrifuge, Report CUED/D-Soils/TR249, Department of Civil Engineering, University of Cambridge, 1991.

- 4) Sekiguchi, H., K. Kita and O. Okamoto : Centrifuge Modelling of Wave-Induced Instability of Sand Beds, Proc. Third NTU-KU-KAIST Trilateral Seminar/Workshop on Civil Engineering, 1993, pp. 199-204.
- 5) 善 功企・山崎浩之・渡辺 篤：海底地盤の波浪による液状化および高密度化, '運輸省港湾技術研究所報告, 第26巻, 第4号, 1987, pp. 125-180.