

円板バイモルフ型圧電セラミックを用いた豊浦砂の V_p 計測

清水建設(株)技術研究所 正会員 石川 明 天利 実
高坂信章 三宅紀治

1. 目的

地下水位以深の地盤を人工的に不飽和にし、既存建物や宅地などの液状化対策とする工法を筆者らは検討している。この工法を実現するためには、原位置の飽和度(S_r)のモニタリング手法の確立が不可欠であり、P波速度(V_p)計測はその1つの有力な手法と考えられる。このため、飽和度モニタリングとしての V_p の可能性を調べるために砂の V_p を計測するセンサーを開発した。本研究では、開発したセンサーを用いて水と豊浦砂の V_p を測定し、その性能について検証した結果について述べる。

2. 円板バイモルフ型圧電セラミックを用いたP波計測

従来、室内実験において、砂供試体のP波速度は打撃による起振で発生するP波を加速度計により受振する方法が一般的であった。これに対して、S波速度では短冊型のバイモルフ型圧電セラミック(ベンダーエレメント)による計測が一般的になりつつある。

圧電セラミックを地盤の弾性波速度の計測装置として用いる利点は、発振波の周波数を制御できること、安定した波を連続して発振できること、土槽内での波の発振・受振が容易な点などである。したがって、P波の計測でもこうした素子を利用する利点は大きい。

こうした考えに基づき、筆者らは図1に示す16mm、厚さ0.5mmの円板型のセラミックを組み込んだセンサーを製作した。この円板セラミックはその周辺部を固定しており、電圧負荷により太鼓の膜のようなモードで周期的な振動をおこす(図1)。なお、発振側セラミックには、電圧を負荷してから発振側のセラミックが振動するまでの遅れを計測するため10×10×0.5mmの方形のセルフモニタリング用セラミックを接着している。

このセンサーを図2に示すカラムに装着して V_p を計測した。カラムは内径104mmであり、測定距離を変えることができる。発振波は周波数1~5kHzの矩形波、発振電圧は最大50Vと設定した。

3. 水のP波速度計測

測定システムの妥当性を検証するために、測定媒体として水を用いた実験を行った。測定距離を50~350mmまで変化させP波到達時間を測定した結果、 $V_p=1455\text{m/s}$ が得られた(図3)。水の V_p は1500m/s(at23~27 理科年表)程度である。誤差は波形の読み取り精度等や測定時の水温に起因すると考えられるが、本システムで3%以内の精度で媒体の V_p を測定できることがわかった。

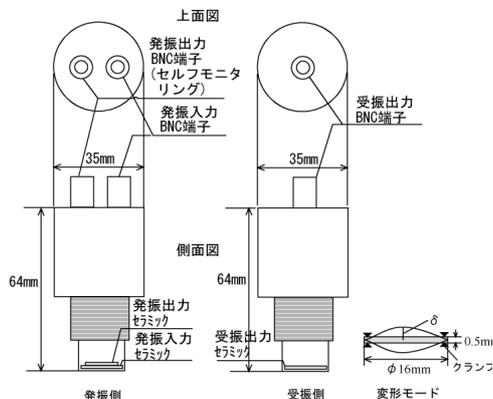


図1 バイモルフ型圧電セラミックを用いたP波発振、受振用センサ

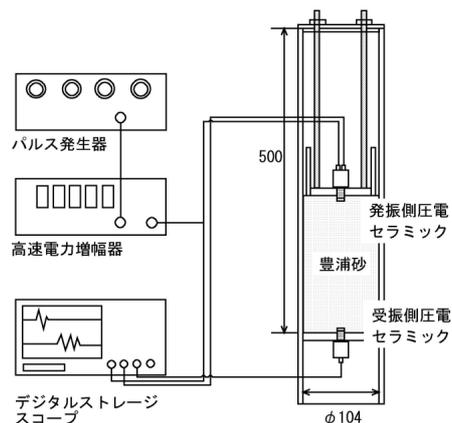


図2 P波測定システム

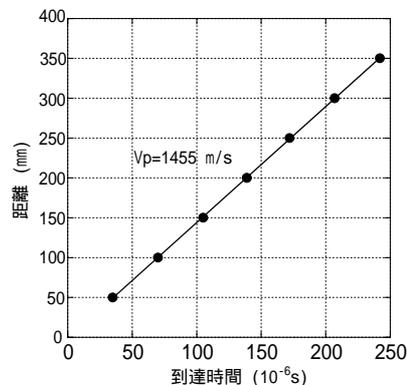


図3 水のP波計測結果

キーワード 不飽和, 飽和度, P波, 室内実験

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17 清水建設技術研究所 Tel 03-3820-5519

4. 豊浦砂のP波計測

表1および図4に豊浦砂の \$V_p\$ を計測した結果について示す。試料の状態は、乾燥、不飽和（乾燥状態から直接冠水）、飽和の3種類である。乾燥状態の豊浦砂は、測定距離が増加するにつれて \$V_p\$ が190~450m/sまで漸増した。これは、砂の堆積高さの変化に伴い拘束圧が増加したためと考えられる。

一方、乾燥状態から脱気しない水(D0=7~8 mg/l)を直接冠水させて作成した不飽和状態の場合、乾燥状態より \$V_p\$ が18~145 m/s遅くなる現象が観察された。飽和試料では測定距離に拘わらず \$V_p\$ =1610m/s程度であった。

受振側セラミックで観測された波形は、乾燥状態では初動が明瞭で減衰も比較的小さかった（図4（乾燥））。一方、直接冠水した場合や飽和の場合は受振波の初動は小さく、その後、振幅の大きいゆっくりした波形が観測された。また、乾燥砂と比べて波の減衰が大きかった（図4（直接冠水後）、（飽和））。

5. 計算結果との比較

多孔質弾性体の理論に基づくP波速度は(1)式で表される¹⁾。

$$\rho V_p^2 - \rho_d V_{pd}^2 = 1/n \left[\frac{S_r}{K_w} + \frac{(1-S_r)}{K_a} \right] \quad (1)$$

ここで、\$V_{pd}\$: 土骨格のP波速度、\$\rho\$: 土の密度、\$\rho_d\$: 土の乾燥密度、\$n\$: 間隙率、\$K_w\$: 気泡を全く含まない水の体積弾性係数(2.2 x 10⁶kPa)、\$K_a\$: 空気の体積弾性係数（絶対圧で表した間隙水圧100kPa）である。

この式に乾燥状態のP波速度 \$V_{pd}\$ を代入した計算値を図5のラインに示す。飽和(\$S_r=1\$)では実測値と計算値はよく一致した。

一方、冠水時の \$S_r\$ は本試験装置で直接計測できなかった。そのため、別途行ったカラム実験結果にもとづき \$S_r=0.9\$ と仮定して計算したところ、表1、図5ラインに示すように乾燥状態より \$V_p\$ が24~72 m/s遅くなった。\$S_r < 0.98\$ の範囲では体積弾性係数の変化が小さく、相対的に左辺の密度 \$\rho\$ の影響が大きくなる。そのため、不飽和の \$V_p\$ は乾燥状態より小さくなることを式(1)は示している。実測値はこの現象を測定したと考えられる。

6. おわりに

本研究では、円板バイモルフ型圧電セラミックを用いたセンサーを新たに開発し、そのセンサーを用いて水、豊浦砂を計測した。その結果、砂の \$V_p\$ を簡便に精度よく測定できることを確認した。

また、乾燥状態から直接冠水した場合、密度 \$\rho\$ の増加に伴う \$V_p\$ の低下現象について観測した。今後は本センサーを用いて、\$S_r\$ と \$V_p\$ の関係について調べていきたい。

参考文献) 1. 西尾伸也: “砂および砂礫の弾性波速度に与える飽和度の影響” 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.221-224

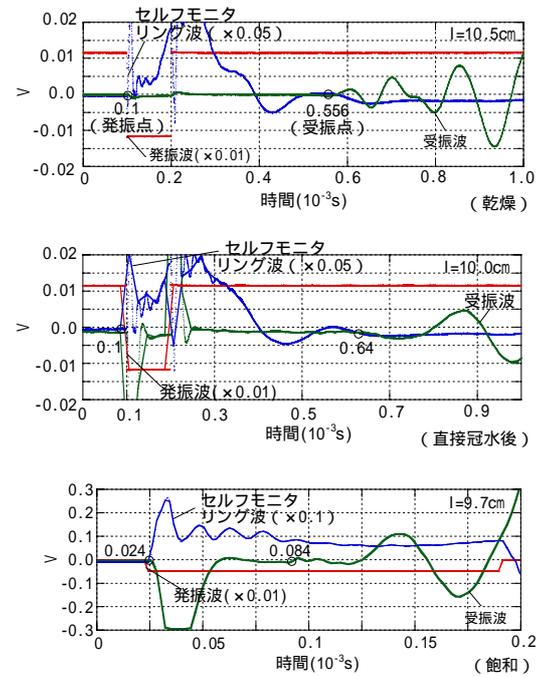


図4 観測された波形

表1 豊浦砂のP波測定結果

No.	豊浦砂条件	密度 (g/cm ³)	距離 (cm)	時間 (ms)	速度 (m/s)
1	乾燥	1.31	6.3	0.33	194
	冠水	1.82	5.8	0.33	176
	計算(\$S_r=0.9\$)	1.82	-	-	169
2	乾燥	1.41	10.5	0.46	228
	冠水	1.87	10.0	0.54	185
	計算(\$S_r=0.9\$)	1.87	-	-	204
3	乾燥	1.42	15.1	0.44	343
	冠水	1.87	14.5	0.62	234
	計算(\$S_r=0.9\$)	1.87	-	-	302
4	乾燥	1.40	20.6	0.44	468
	冠水	1.85	20.0	0.62	323
	計算(\$S_r=0.9\$)	1.85	-	-	392
5	飽和	1.91	9.7	0.06	1617
6		1.92	21.3	0.13	1614
7		1.91	32.3	0.20	1615

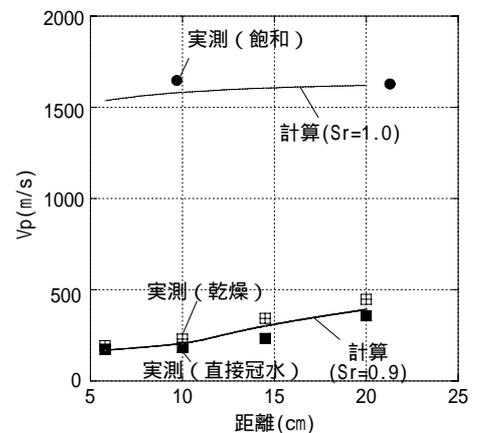


図5 \$V_p\$ 実測と計算結果