

P波速度と誘電率の計測による 大型土槽地盤の飽和度評価

佐藤正義¹・石川明²・後藤茂³・高坂信章²・天利実⁴・小松満⁵

¹工博 防災科学技術研究所 特定プロジェクトセンター (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

²工修 清水建設技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

³工博 清水建設技術研究所 (同上)

⁴清水建設技術研究所 (同上)

⁵工博 岡山大学大学院自然科学研究科 (〒700-8530 岡山県岡山市津島中3-1-1)

When a large-scale dynamic test is executed, we have uncertainty for fully saturating sand layer because of the restriction of time and facility, i.e. we are forced to use non deaerated tap water as pore water and to built sand layer in their water. So the evaluating saturation is one of the key of this type of experiment. In this paper, we evaluated degree of saturation by the following three methods, P-wave velocity, dielectric constant and dissolved oxigin. As the results of measurement, V_p was between 1600~1900m/s, while dielectric constant was 17.7~21.5 under the water level. These two values suggest that sand made by the above method was almost saturated. Dissolved oxigin of pore water was decreased by 0.7~1.6 mg/l on 3 days, which was equivalent to $S_r=0.05\sim0.11\%$ decrease.

Key Words : degree of saturation, p-wave velocity, dissolved oxigin, dielectric constant

1. はじめに

地盤はその飽和状態に応じて動的特性, 特に液状化強度が大きく変化するため, 室内土質実験においては間隙空気を CO_2 置換し, 間隙水には脱気水を使用するなど試料の飽和には細心の注意を払う。一方, 大型土槽を用いた液状化実験では, 地盤作成装置や時間上の制約から間隙水として水道水を用い, 水中落下法により地盤を作成する場合が多い。したがって, この方法で作成した地盤の飽和度を評価しておくことは実験結果の評価をする上で重要である。水道水を用いた水中落下法により作成された砂地盤の飽和度(S_r)については, いくつかの土槽実験におけるP波速度(V_p)の測定から概ね飽和になると考えられている^{1),2)}。しかし, 室内土質実験と比べて厳密とは言い難い方法で作成した地盤が何故飽和に近い状態になるのかは解明されていない。したがって, S_r の評価パラメーターとして V_p を用いることの妥当性も含めて検討する必要がある。

本研究では水道水を用いた水中落下法で作成した地盤の S_r 評価を目的として, 従来計測されてきた V_p 波に加えて, 誘電率 ϵ , 間隙水の溶存酸素量 D_0 を大型土槽による液状化実験前後で計測した。 V_p 波計測には従来の装置より明確な受振波を得るためにドーナツ型圧電素子を使用し, かつ中心部にS波(V_s)測定用素子を取り付けた「P波&S波一体型のセンサー(P Sセンサー)」を用いた。また, 大型土槽実験における計測結果をキャリブレーションするため, 大型3軸試験により V_p 波と飽和度の関係, 誘電率 ϵ と飽和度の関係を求めた。

2. 飽和度評価の指標(計測項目)

ここでは, 本研究で用いた3種類の計測(V_p , ϵ , D_0)について説明する。

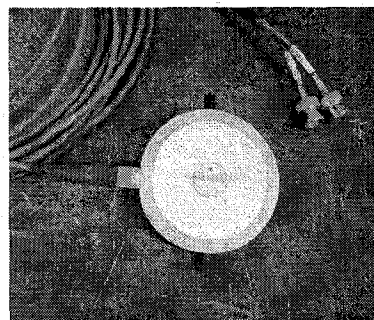


写真-1 P波&S波送受振用センサー

(1) V_p 波の計測

V_p と S_r との関係は既に多くの研究実績があり, $S_r>95\%$ で V_p は S_r に対する感度が高いこと, 飽和砂地盤では $V_p=1600\sim1900\text{m/s}$ の値を示すこと, などがわかっている。これらの再確認と測定精度向上を目的として V_p の測定を行った。実験で用いたP波とS波送受振用センサーを写真-1, 図-1に示す。P波用には外径60mm×内径20mm×厚さ0.55mmのドーナツ型圧電素子を用いた。この素子は外端部がプラスチック枠で固定されており, 電圧負荷により太鼓状に振動してP波を発生する。発振波の強さや振動モードの違いから, 従来一般的に用いられてきたベンダーエレメントより明確な受振波の初動が得られる。S

波用素子は15mm×30mm×0.55mmのベンダーエレメントから作られている。なお、計測ではP波速度計測用に周波数5kHzの矩形波、S波用に周波数3kHzの正弦波を用いた。

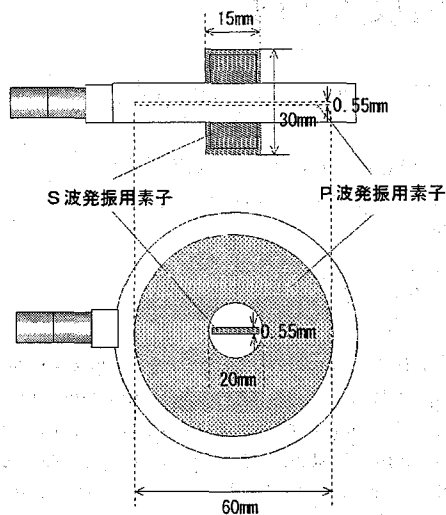


図-1 P波&S波発振振用センサー寸法図

(2) FDR法による誘電率 ϵ 計測

誘電率 ϵ は単位電界のもとで単位体積中に蓄えられる静電エネルギーの大きさを示す量である。FDR法はトラッキングジェネレーターで100MHz～1.7GHzの連続的な周波数をもつ電磁波を発生させ、プローブの入力端と先端で生じる反射電磁波の合成干渉波を周波数領域で測定する手法である(図-2)。測定された干渉波のピーク特性から(比)誘電率 ϵ は(1)式で求められる。

$$\epsilon = k \cdot \left(\frac{C}{2L \cdot \Delta f} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 ϵ : (比)誘電率、 k : 補正係数(純水 $\epsilon = 81.5$ またはアセトン $\epsilon = 20.7$ の計測により設定)、 L : 電極長 (m)、 C : 光の速さ ($= 3.0 \times 10^8$ m/s)、 Δf : 反射波スペクトルにおけるピーク間隔の周期(Hz)、である。

ϵ の値は、誘電損失がないとした場合には主として含水量に依存し、水 : 81、土粒子、岩 : 3～4、空気 : 1など定められた値を示す。Toppは4種類の土(粘土、砂質ローム、粘性ローム)の体積含水率($\theta = nSr$)と ϵ の関係を3次回帰式で示した³⁾。これによれば、回帰式に対する推定誤差は95%確率で $\epsilon = 1.07$ であり、土粒子の違いによる ϵ への影響は少ない。

本研究では、大型3軸試験機を用いて Sr - ϵ 関係を求め、Toppの式との整合性を調べるとともに、大型土槽地盤の ϵ を計測し、 ϵ による Sr 評価の可能性について調べた。

(3) 間隙水の溶存酸素量D0の測定

佐藤・後藤によって行われた実験³⁾によると、水

道水を砂の間隙中に静置しておく、水に溶解した酸素が地盤内に気泡として遊離し、結果として地盤の Sr (B値) が低下する。D0減少分がすべて気泡になると仮定すると、D0=1mg/lの低下は $Sr=0.07\%$ の低下に相当する。大型土槽実験でもこうした現象が生じるかを調べるため、D0を計測した。地盤内の所定の深度からポーラスストーンを通じてサイフォンの原理により採水し、市販の隔膜式ガルバニ電池方式のポータブル溶存酸素計を使ってD0を計測した(図-3)。

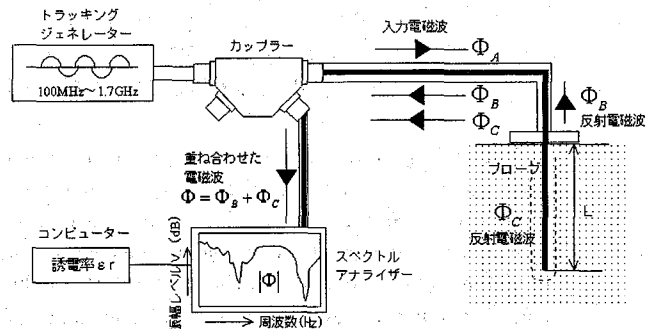


図-2 FDR法による誘電率計測システム

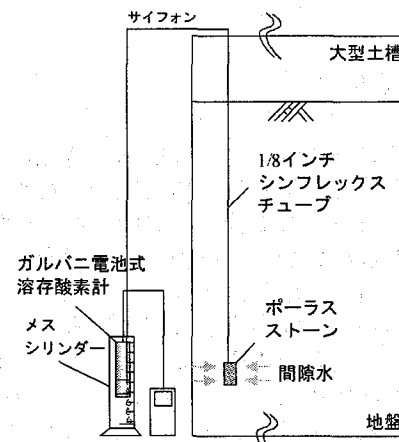


図-3 間隙水のD0計測方法

3. 大型3軸試験によるキャリブレーション

大型土槽実験に先立ち、大型3軸試験機を用いたキャリブレーションを予め行った。図-4に計測配置図を示す。直径30cm×高さ60cmの円柱供試体内に大型土槽実験と同じタイプのP Sセンサーを1対、FDRプローブを1つ設置した。試料として豊浦砂を用いた。まず、乾燥した豊浦砂を空中落下法でモールドに充填した。次に、拘束圧49kPaでD0=8.0～9.0の水道水を供試体下部から水頭差約1mで通水し、不飽和供試体を作成した。10～12時間放置後、有効拘束圧49kPaを保ちつつ背圧を49kPa/hの速度で490kPaまで増加させた。この間、量水計で間隙空気の圧縮量を測定し、ボイルの法則により Sr 変化を算出した。相対密度は $Dr=65\sim67\%$ であった。

図-5に計測結果を示す。VpはSrの上昇にしたがって増加し、最終的にはVp=1600m/sとなった。完全飽和からわずかにSrが落ちたSr=99.8%ではVp=1340m/sであり、飽和近傍ではSr変化に対するVpの感度が高かった。VsはSrによらずVs=194~222m/sのほぼ一定値を示した。一方、誘電率 ϵ はVpと同様にSrの増加に従って漸増し、飽和付近で $\epsilon=21.1$ となった。

図-6に実験から得られた $\theta-\sqrt{\epsilon}$ 関係とToppの回帰式から求めた $\theta-\sqrt{\epsilon}$ 関係を併記する。図から明かなように、Toppの式とは異なる線形関係を示している。この原因としては、本実験が比較的飽和に近い領域のみの計測であったこと、供試体の平均Srとプローブ周辺の局所的なSrが異なっていたこと、などが考えられる。この点については、さらに検討していく予定である。

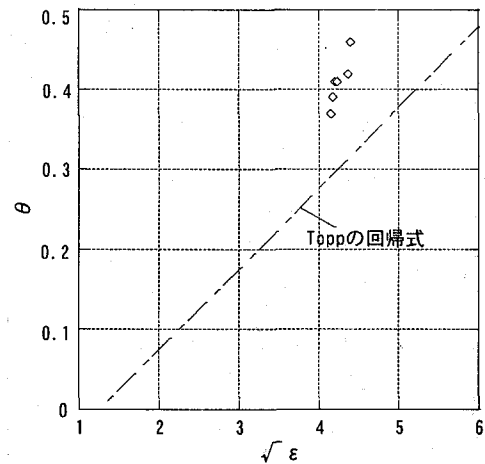


図-6 $\theta-\sqrt{\epsilon}$ 曲線 (豊浦砂)

3. 大型土槽内試料の飽和度評価

(1) 第一回計測結果

大型土槽実験では表-1、図-7に示す物性の霞ヶ浦砂を用いた。間隙水には水道水を使用した。予め土槽内に水道水を満ちし、バケットにより砂を落下させる水中落下法により地盤を作成した。

表-1 試料の物理的性質

試料	霞ヶ浦砂
土粒子の密度 (g/cm^3)	2.72
最大粒径 (mm)	4.75
均等係数	2.49
曲率係数	1.03
細粒分 ($<74 \mu\text{m}$) (%)	3.52
平均粒径 D_{50} (mm)	0.30
最大乾燥密度 (g/cm^3)	1.669
最小乾燥密度 (g/cm^3)	1.387

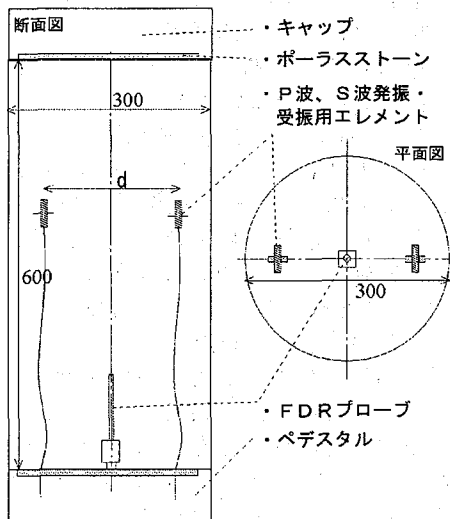


図-4 供試体寸法と計測配置

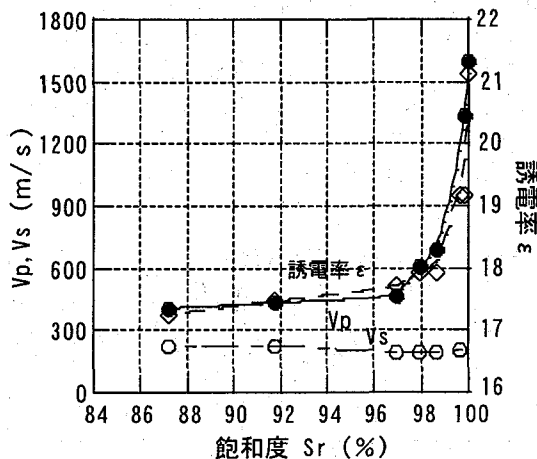


図-5 Sr-Vp, Vs, ϵ 曲線 (豊浦砂)

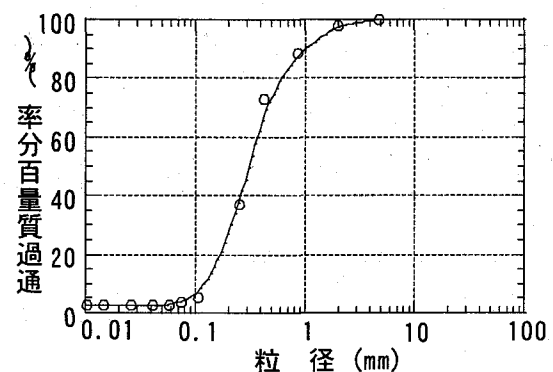


図-7 試料の粒径加積曲線

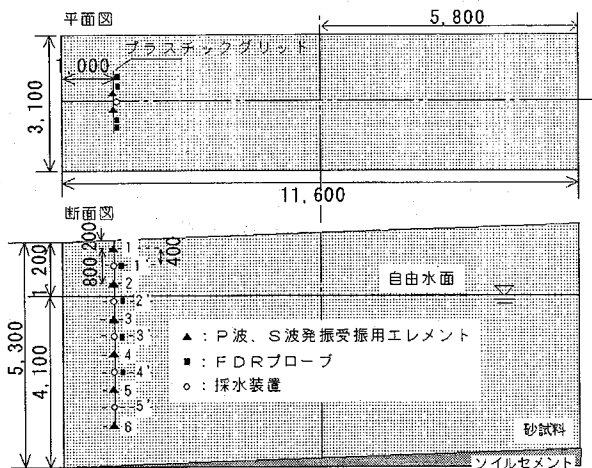


図-8 測定装置配置図

図-8に第1回計測における測定装置の配置図を示す。P Sセンサーは深度方向に6対、地表面-0.2mの位置から0.8mピッチでGL-4.2mまで設置した。また、FDRプローブと採水装置はP Sセンサーの中間深度に4深度設置した。測定位置での自由水面はGL-1.2mのため、深度が浅い2つのP Sセンサー(測点1, 2) および1つのFDRプローブと採水装置(測点1') は不飽和部分に位置している。第1回計測(5/19)は間隙水(水道水)のみ、第2回(5/23)は砂撒き直後、第3回(5/26)は加振直前、第4回(5/26)は加振直後、の計4回計測を行った。

表-2、図-9に測定結果を示す。5/19に計測した水道水のVpは1440m/sであった。水のVpは1500m/s前後であるため、本センサーで媒体のVpがほぼ正確に測定できている。

表-2 第1回測定結果

測点 番号	測定 深度 GL-m	測定 間隔 mm	第1回計測 (5/19) (水のみ)		第2回計測 (5/23) (砂撒き直後)		第3回計測 (5/26) (加振直前)		第4回計測 (5/26) (加振直後)	
			Vp m/s	Vs m/s	Vp m/s	Vs m/s	Vp m/s	Vs m/s	Vp m/s	Vs m/s
1	0.2	300 (Vp) 268 (Vs)	-	-	167	125	177	133	143	128
2	1.0		-	-	150	117	143	133	144	125
3	1.8		-	-	1613	100	1613	107	1442	156
4	2.6		-	-	1613	90	1613	107	1685	96
5	3.4		1442	-	1613	118	1613	125	1685	112
6	4.2		1442	-	1613	99	1613	97	1685	107
測点 番号	測定 深度 m		ε		DO		ε		DO	
				mg/l		mg/l		mg/l		mg/l
1'	0.6		-	-	3.0	-	3.1	-	3.1	-
2'	1.4		-	-	17.7	6.1	17.7	4.5	18.4	4.2
3'	2.2		-	-	-	3.6	19.2	2.5	19.7	2.6
4'	3.0		63	-	19.2	3.7	19.2	3.8	19.7	2.8
5'	3.8		-	7.7	-	5.1	-	4.4	-	3.9

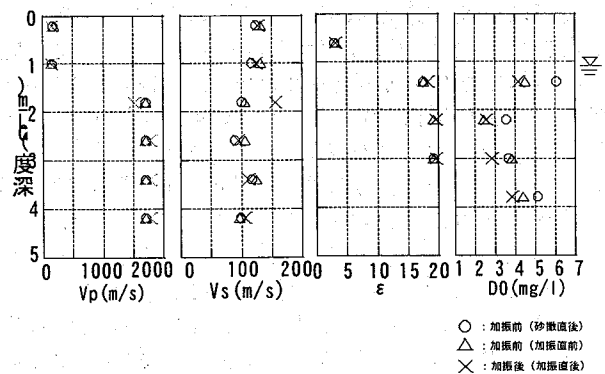


図-9 第1回測定結果

5/23以降は、自由水面より上部ではVp=140~180m/s、自由水面以深ではVp=1600m/s台であり、自由水面を境界としたVpの速度区分は明確であった。前述の大型3軸による実験結果から、Vp=1600m/s台は飽和に相当する値である。したがって、自由水面以深は飽和であったと推定される。

加振後のVpは浅い3センサーで低下し、深い3センサーでやや増加した。Vsは90~156m/sを示し、測点3で49m/s増加した以外は加振前後で大きな速度変化はなかった。計測に用いたP SセンサーはP波、S波ともに初動が非常に明確な受振波が得られ(図-10)、大型土槽地盤におけるVp, Vs評価用としての本センサーの有効性が示された。

同時に計測した誘電率εは、自由水面より上部ではε=3~3.1、下部ではε=17.7~19.7を示し、Vpと同様に自由水面を境界としたεの区分は明確であった。しかし、今回の実験では間隙率nを直接測定しなかったため、εからSrを評価することはできなかった。加振後はε=0.5~0.7増加し、地盤のnが増加する(密度が減少する)傾向を示した。

DOは測点4'以外、砂撒き完了直後(5/23)から加振直前(5/26)までの3日間で0.7~1.6mg/l減少した。さきに述べたように、水に溶解した空気が気泡として遊離したためと考えられる。ただし、飽和度に換算するとSr=0.05~0.11%の減少量に相当し、Vp, εの計測結果には影響を与えなかったと考えられる。

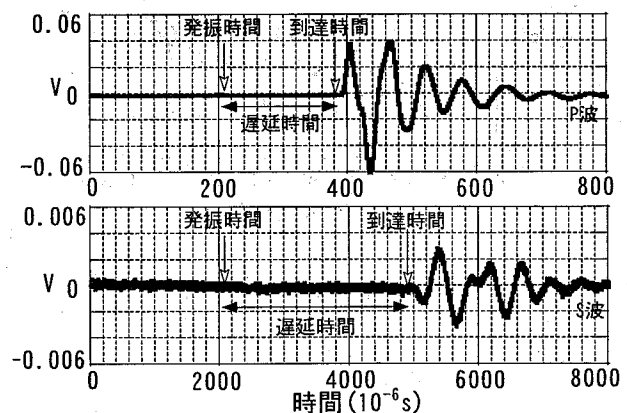


図-10 第1回計測時のP波、S波波形

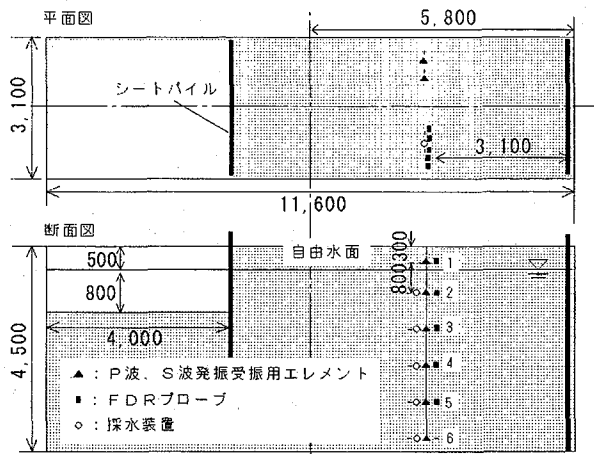


図-11 第2回計測装置配置図

(2) 第二回計測結果

図-11に第2回計測における測定装置の配置図を示す。第1回計測と計測項目、目的は同じである。P Sセンサーを深度方向に6対、地表面-0.3mから0.8mピッチでGL-4.3mまで設置した。FDRプローブと採水装置はP Sセンサーと同じ深度に5箇所設置した(表-3)。自由水面はGL-0.5mとしたため、最上部に設置したP SセンサーおよびFDRプローブは自由水面上の不飽和部分に位置している。第1回計測と同様に、間隙水(水道水)のみの計測(6/30)、砂撒き直後の計測(7/4)、加振直前の計測(7/7)、加振直後の計測(7/7)の計4回計測を行った。

表-3、図-12に測定結果を示す。6/30に計測した水道水の V_p は1500m/sであり、媒体の V_p を正確に測定した。7/4以降は自由水面より上部で $V_p=111\sim125$ m/s、自由水面以深では $V_p=1622\sim1875$ m/sとなった。この計測結果から第2回実験でも自由水面以深はほぼ飽和であると判断できる。加振後の V_p は測点2,3で上昇し、測点4~6でやや低下した。

表-3 第2回測定結果

測点 番号	測定 深度 GL-m	測定 間隔 mm	第1回計測 (6/30) (水のみ)		第2回計測 (7/4) (砂撒き直後)		第3回計測 (7/7) (加振直前)		第4回計測 (7/7) (加振直後)	
			V_p	V_s	V_p	V_s	V_p	V_s	V_p	V_s
			m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
1	0.3	300 (V_p) 268 (V_s)	-	-	125	71	125	68	111	84
2	1.1		-	-	1622	96	1714	84	1786	89
3	1.9		-	-	1714	81	1765	84	1786	86
4	2.7		-	-	1818	96	1875	103	1829	86
5	3.5		1500	-	1667	122	1714	122	1667	100
6	4.3		1500	-	1667	122	1714	122	1695	105
測点 番号	測定 深度 m		ε		D_0		ε		D_0	
			mg/l		mg/l		mg/l		mg/l	
1	0.3		-	-	-	-	3.9	-	7.4	-
2	1.1		-	-	19.2	4.7	20.6	3.7	21.5	3.6
3	1.9		-	-	19.5	4.8	19.5	3.8	20.6	3.6
4	2.7		-	-	20.3	3.5	20.3	3.5	20.3	-
5	3.5		-	-	19.5	5.2	19.5	3.9	20	3.5
6	4.3		61.4	5.4	-	4.1	-	3.8	-	-

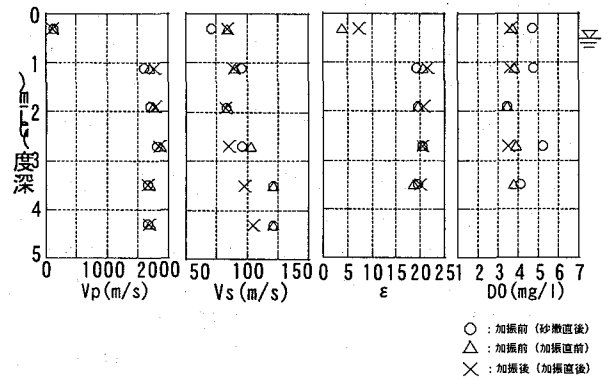


図-12 第2回測定結果

V_s は $V_s=68\sim122$ m/sであり第1回と大きな変化はない。しかし、加振前は深度が深いほど値が大きくなるのに対し、加振後は深度方向の値が平準化する傾向が見られ、加振前後の地盤剛性の変化がより顕著であった。

自由水面より上部では、 ε が加振前後で3.7から7.4と急増した。液状化により不飽和部分の含水率が増加したためと考えられる。自由水面下では $\varepsilon=19.2\sim21.5$ を示した。加振後は最大で $\varepsilon=1.1$ 上昇し、第1回実験結果と同様に n が増加する(密度が減少する)傾向を示した。

D_0 は測点3を除いて砂撒き完了直後から加振直前までの3日間で0.7~1.3mg/l減少し、第1回とほぼ同量の減少量を示した。 S_r に換算すると0.05~0.09%の減少に相当し、第2回実験においても時間経過とともに間隙にごく微量の気泡が遊離したと推定される。

5. 結論

本研究では、飽和度の測定法として従来行われていた V_p に加えて誘電率 ε 、溶存酸素量 D_0 による評価を試みた。 V_p 計測では従来より受振波の初動読み取り精度を高めるために、ドーナツ型圧電素子を用いたセンサーを使用した。以下に得られた結論を示す。

(1) 豊浦砂を用いた大型3軸実験において、新たに製作したP Sセンサーを用いて S_r - V_p 関係をキャリブレーションした。 S_r の増加とともに V_p が漸増する傾向を示した。 $S_r>97\%$ から急激に V_p が増加し $S_r=99.8\%$ で $V_p=1340$ m/s、 $S_r=100\%$ で $V_p=1600$ m/sとなった。飽和近傍で V_p が S_r に対して鋭敏な反応を示す従来の知見を確認した。

(2) 同時に求めた S_r - ε 関係は、 V_p と同様に S_r の増加に従って漸増し、飽和付近で $\varepsilon=21.1$ となった。 T_{opp} により提案されている回帰式とは異なる θ - ε 関係を示した。

(3) 大型土槽実験における自由水面以深の V_p は $V_p=1600\sim1900$ m/sであった。上記の大型3軸によるキャリブレーション結果から水面以深の地盤はほぼ

飽和であったと推定できる。

(4) 自由水面以深の ε は、第一回実験で $\varepsilon=17.7 \sim 19.7$ 、第二回実験で $\varepsilon=19.2 \sim 21.5$ であった。間隙率 n が未知のため、計測結果から S_r を直接求めることはできなかった。

(5) D_0 は1回目の実験で3日間放置後 $0.7 \sim 1.6 \text{ mg/l}$ 、2回目で $0.7 \sim 1.3 \text{ mg/l}$ 減少した。この原因として間隙水に溶解した空気が地盤内に微細な気泡として遊離した可能性が高い。 D_0 の低下量に相当する S_r 低下量は $0.05 \sim 0.11\%$ と計算されるが、この微量な S_r 変化に対する V_p 、 ε の低下現象は観測されなかった。

(6) 実験に用いた PS センサーは P 波、 S 波ともに初動が明確な受振波が得られ、大型土槽実験での適用性が確認された。地盤剛性の評価という点でも、同じ区間で V_p 、 V_s が評価できる利点は大きいと考えられる。

謝辞

本研究は、文部科学省振興調整費による総合研究「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」の一環として、「大規模地盤の振動実験における地盤作成法・計測技術の開発」のテーマで実施されたものであり、本プロジェクトの関係各位の多大な努力の基に進められていることに感謝いたします。

また、 PS センサーに関しては応用地質株式会社の中山栄樹、佐田憲彦氏によるところが大きい。深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 田村修次, 阿部秋男: P 波を用いた地盤の飽和度計測法の開発, 第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災向上に関するシンポジウム論文集, pp.249-254, 2000.3
- 2) 佐藤正義, 阿部秋男, 水野二十一, 田村修次: 液状化土槽実験における飽和度評価のための P 波測定と液状化時の地盤変位測定, 第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災向上に関するシンポジウム論文集, pp.89-94, 2001.3
- 3) Topp, G.C., J.L.Davis, and A.P.Annan: Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resource Research* 16(3):574-582.1980.
- 4) 佐藤正義, 後藤 茂: 土中間隙水での水道水の溶存酸素量と飽和度の変化, 土木学会第57回年次学術講演会, No.III-553, pp. 1105-1106, 2002.
- 5) 西垣誠, 小松満, 横田英嗣: 誘電法を用いた不飽和浸透特性の計測法, 日本地下水学会1998年春季講演会講演要旨, pp.40-45, (1998.5).