

## (58) 液状化センサーの開発

東京ガス(株)  
九州工業大学  
基礎地盤コンサルタンツ(株)

○清水 善久  
安田 進  
森本 巖

### 1. はじめに

1964年の新潟地震では、多くの場所で地盤が液状化し、水平移動・陥没・隆起等の地盤の変動によって、地中埋設管は破滅的な被害を受けた。<sup>1)</sup>そして、その後1983年に発生した日本海中部地震において、ガス導管などの埋設管の地震被害は地盤の液状化によるものが多いことが明らかにされた。<sup>2)</sup>従って、液状化可能性の高い複数の地点で液状化の発生が地震後短時間で判明すれば、被害地域や程度の予測が容易になり、適切な対策を迅速に実行することが可能となると思われる。

液状化の発生を短時間に直接的に知るためには地震中に地盤に発生する間隙水圧を測定するのが最も確実である。しかし既存の間隙水圧計は長時間の測定に対しては信頼性が低く、地震が発生した時にその機能を発揮し得ない可能性が十分考えられる。そのため大地震の際に地盤の液状化の発生と程度を迅速に測定するための機器(液状化センサー)を開発することが必要となってきた。

そこで、本研究では、今回考案した液状化センサーの原理及び本センサーの適用性検証のための実験結果について報告する。

### 2. 液状化センサーの原理

液状化センサーとは、地盤の液状化の発生とその程度を地震発生後、速やかに検知する機器をいい、次の条件を満たすことが必要である。①長時間信頼性を維持できること(耐久性)、②測定原理が簡単であること③液状化の程度を把握できる情報が得られること、④比較的安価で多数の地点に設置できること。

そこで上記の条件を備える可能性の高い測定原理として「地盤中に埋設した管の水位上昇量により液状化の発生・程度を検出する」方式を考案した。つまり液状化するおそれのあるゆるい砂層に、先端部に開口部と土砂の流入を防ぐためのフィルターを備えた中空管を貫入させ、地震時に発生する地盤の過剰間隙水圧によって生じる地下水の流れを開口部を通して中空管に導き、過剰間隙水圧の代わりに管内の水位上昇量を測定することにより液状化の発生・程度を検知するものである。(図1参照)なお、管内の水位上昇量は、地上の管頭に計測部を有する静電容量式レベル計等により測定できるため、間隙水圧計の如く複雑な計器が土中に存在せず、本原理を用いたセンサーは故障も少なくメンテナンスも容易であり、長期間の観測に適していると考えられる。従って、液状化センサーとしては上記の水位上昇量を測定する原理のものを試作していくこととし、その原理の液状化発生検知及び程度予測への適用性の検証を行うために、模型振動台実験及び小型ボーリング実験を実施した。

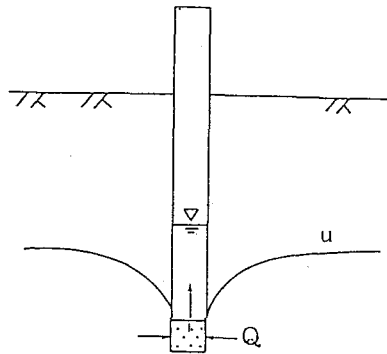


図1. 液状化センサー概略図

### 3. 振動台実験の方法及び結果・考察

①. 実験方法 図2に示すように口径11.8mm、46.5mmの2本の中空有孔パイプを模型地盤(長さ90cm、深さ50cm、幅60cm)中に埋設し、加振することにより所定の間隙水圧まで上げ、パイプの水位上昇量とその周辺の過剰間隙水圧を測定した。測定計器は間隙水圧計で、その埋設位置は同図に示すとおりである。また、FC(細粉分含有率)、液状化層厚、Dr(相対密度)等を変化させ実験を行った。

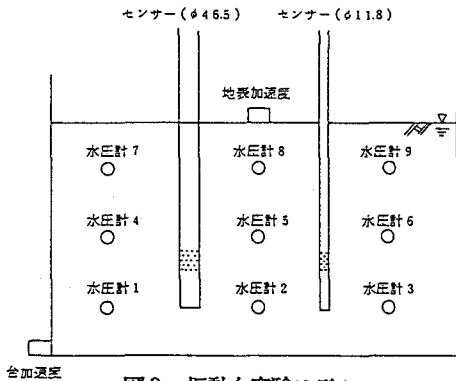


図2. 振動台実験モデル

②. 実験結果 振動台実験の結果を表1に示す。ここで、水位上昇量には振動台加振による水位上昇高さの最大値をとり、過剰間隙水圧比には、パイプ側面に設けた水の流入口と同一深さにある水圧計5の値を用いている。この振動台実験の結果を整理した結果、以下のことが明らかになった。

- a. 地盤中に発生する過剰間隙水圧が大きいほど水位は上昇し、両者の間にはほぼ比例関係があるといえる (図3参照)。
- b. 液状化層厚が大きいほど水位上昇量も大きくなる (図4参照)
- c. 砂の締め具合 (相対密度) は最大水位上昇量にあまり大きな影響を及ぼさないようだ (図5参照)。
- d. 細粒分が多い土ほど水位上昇量が小さいが、これは単に細粒分が多いと間隙水がパイプに集まるのに時間がかかるため、水位上昇量の最大値が記録時間内に納まらなかったためとも考えられる (図6参照)。

実験 No	水位上昇量 (mm)		$w/\sigma'$	$D_r$ (%)	$F_c$ (%)	層厚 (cm)
	$\phi 46.5$	$\phi 11.8$				
1	62.0	72.6	0.911	15	16.4	51
2	19.0	81.9	0.944	43	16.4	50
3	16.3	37.6	0.900	54.7	16.4	50
4	131.8	147.6	0.846	24	0	50
4'	105.8	171.4	0.871	19	0	51
5	105.9	182.6	1.017	32	8	50
6	31.0	50.3	0.878	17.8	16.4	30
7	78.0	138.2	0.923	24.3	16.4	50
8	50.7	62.0	0.482	23.7	16.4	50
9	36.5	48.6	0.198	10	16.4	50
10	12.6	15.1	0.791	24.6	16.4	50
11	40.9	50.5	0.874	29.0	16.4	49
12	5.8 (10.3)	6.1 (87.1)	0.840	16.4	16.4	49.5

注) ケース4' : ケース4と同一条件でGL-5mにビニールシートをひく

表1. 振動台実験結果一覧表

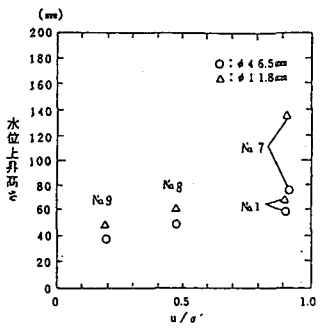


図3. 過剰間隙水圧比に対する水位上昇高さ

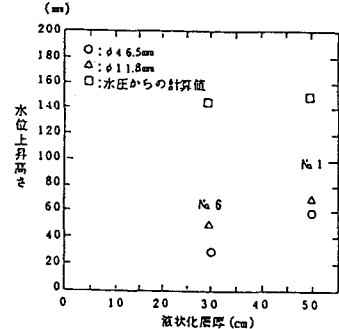


図4. 液状化層厚に対する水位上昇高さ

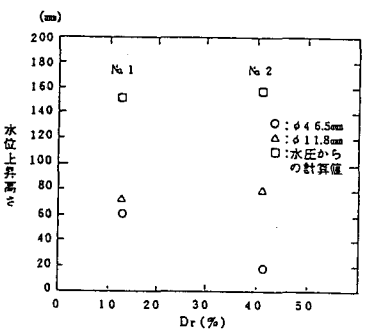


図5. 相対密度に対する水位上昇高さ

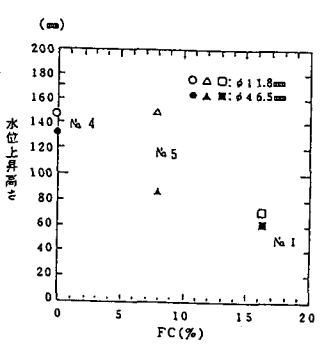


図6. 細粒含有率に対する水位上昇高さ

- e. 口径大 (46.5mm) のパイプの水位上昇量は口径小 (11.8mm) のパイプの約60%程度であるが (図7参照)、これはパイプ内に流入できる水の量が有限であるためと考えられる。
- f. 水位上昇の速度は過剰間隙水圧の上昇速度に比べてかなり遅く、過剰間隙水圧が一定値 (完全液状化) または減少傾向になった時点でもまだ一様に上昇する (図8参照)。

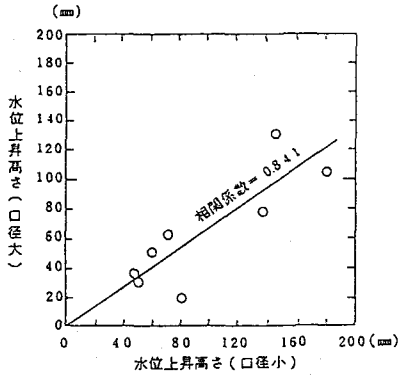


図7. 口径大と口径小の水位上昇高さ

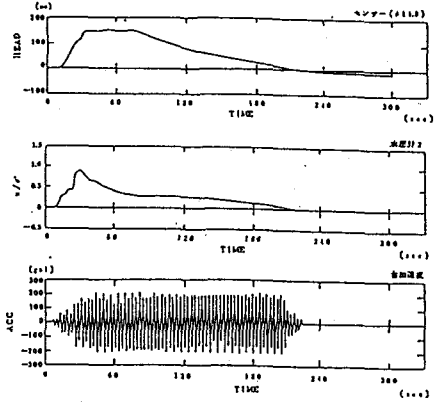


図8. 水位、間隙水圧、加速度の時刻歴の一例 (NO.4)

#### 4. ボイリング実験の方法及び結果・考察

①. 実験方法 小型土槽で間隙水圧上昇パターンを衝撃型、定常型に変化させたボイリング実験を行なった。図9に使用した土槽を示す。図中の○印が間隙水圧計の埋設位置であり、印上部の数字は水圧計番号である。液状化センサーの代用として、中空有孔パイプを土槽に立てた。パイプの直径は、46.5mmと11.8mmの2種類である。土槽内の水位は壁の高さに合わせ、注水時ここから溢れさせて一定とした。パイプ内の水位もここを原点としている。なお、土槽内の土の単位体積重量は、 $1.87\text{g/cm}^3$ であった。また、水圧上昇パターンを衝撃型とした場合の過剰間隙水圧比の時刻歴の一例を図10に、同じく定常型の一例を図11に示す。

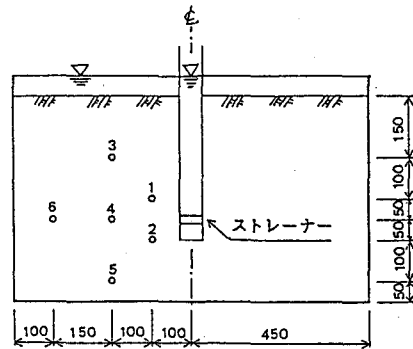


図9. ボイリング実験小型土槽 (mm)

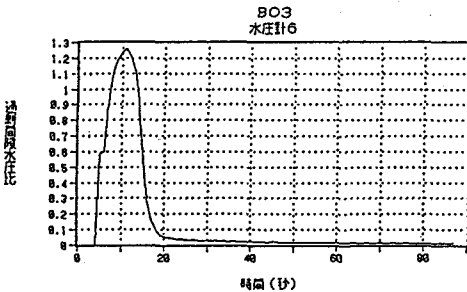


図10. 衝撃型水圧上昇パターン時  
過剰間隙水圧比時刻歴

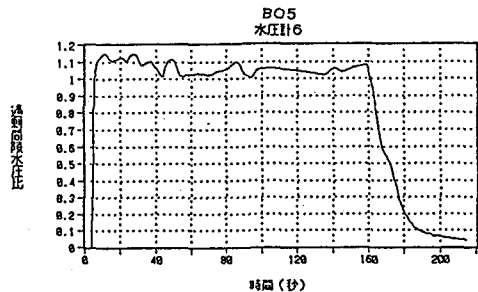


図11. 定常型水圧上昇パターン時  
過剰間隙水圧比時刻歴

②. 実験結果 ボイリング実験の結果を表2に示す。ここで、水圧計の値は中空管のストレーナーと同じ深さにある水圧計6のものとし、水位上昇量は、ボイリング実験中に測定された最大値とした。過剰間隙水圧とパイプ内水位の関係を図12に示す。図12により、a. 地盤中に発生する過剰間隙水圧が大きいほど水位は上昇する。 b. パイプの口径に関係なく、定常型水圧上昇パターン実験での水位上昇量は、衝撃型水圧上昇パターン実験の量に比して大きく、過剰間隙水圧相当水位（過剰間隙水圧から計算される理論値）ラインの近くまで水位が上昇しているのが確認できた。

No.	A' (γ' D)(mm)	水圧波形	水圧計6の結果	水位上昇量 (cm)
BO-1	46.5	衝撃型波形	$\Delta u/\sigma_v' = 1.064$	6.8
BO-2	46.5	衝撃型波形	$\Delta u/\sigma_v' = 1.198$	8.1
BO-3	46.5	衝撃型波形	$\Delta u/\sigma_v' = 1.260$	6.8
BO-4	46.5	衝撃型波形	$\Delta u/\sigma_v' = 1.656$	21.1
BO-5	46.5	定常型波形	$\Delta u/\sigma_v' = 1.1$	25.0
BO-6	46.5	定常型波形	$\Delta u/\sigma_v' = 0.7$	13.0
BO-7	46.5	定常型波形	$\Delta u/\sigma_v' = 1.1$	21.0
BL-01	11.8	衝撃型波形	$\Delta u/\sigma_v' = 1.036$	10.0
BL-02	11.8	衝撃型波形	$\Delta u/\sigma_v' = 1.004$	4.4
BL-03	11.8	衝撃型波形	$\Delta u/\sigma_v' = 1.122$	10.9
BL-04	11.8	衝撃型波形	$\Delta u/\sigma_v' = 1.097$	13.0
BL-05	11.8	定常型波形	$\Delta u/\sigma_v' = 0.8$	11.0
BL-06	11.8	定常型波形	$\Delta u/\sigma_v' = 1.0$	18.0

表2. ボイリング実験結果一覧表

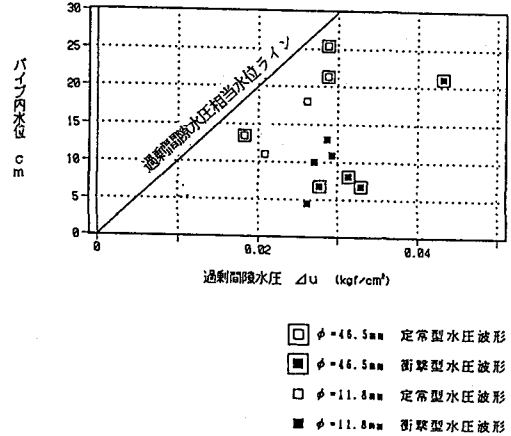


図12. 過剰間隙水圧とパイプ内水位の関係

## 5. まとめ

今回、地盤の液状化の発生と程度を迅速に検知できる、新しい測定原理「地盤中に埋設した中空管の水位上昇量により検知する方式」を採用した「液状化センサー」を考案した。その適用性検証のために、小型土槽を使用して振動台実験及びボイリング実験を実施した。両実験の結果、水位上昇量は過剰間隙水圧比にほぼ比例しており、本方式が液状化センサーとして有効であることが確認された。また、振動台実験によると、水位上昇量は液状化層厚、細粒分含有率、パイプの口径に影響を受けることが明らかになった。しかし、ボイリング実験によると、管内水位上昇量は、過剰間隙水圧の上昇パターンの影響を受け、定常型水位上昇パターンではパイプの口径に関係なく過剰間隙水圧相当水位にほぼ等しくなった。これは、図8に示すように、振動台実験では衝撃型水位上昇パターンと同様に、液状化後すぐに水圧が下がり、パイプ内の水位が上昇するのに十分な水圧の継続が無いため、結果的にパイプの口径が水位上昇量に影響を与えたものと考えられる。それに比して、ボイリング実験の定常型水位上昇パターン時は、水位上昇に必要な時間及び水量が十分にあり、パイプ口径に関係無く過剰間隙水圧相当水位近くまで水位上昇したものと考えられる。振動台実験においては透水距離が小さいため、短時間のうちに間隙水圧が消散してしまうが、実際の地盤では、振動台と比して透水距離が格段に大きいことと、通常は液状化層上部に非液状化層が存在するため、水圧の消散にかなりの時間を要するものと思われる。よって、地震時の実地盤の間隙水圧上昇パターンは定常型に近いと考えられ、過剰間隙水圧発生量相当の水位上昇がパイプの口径また土の種類に無関係に起こるのではないかと思われる。今後は、土の種類を変化させたボイリング実験により前記の事項の確認を行うとともに実規模大での実験を通して実際の地盤での液状化センサーの適用可能性を、より具体的に検証していく予定である。

〔参考文献〕 1). 日本ガス協会：新潟地震と都市ガス，1965 2). 日本ガス協会：日本海中部地震と都市ガス，1984 3). 安田，中根，森本，永瀬，福田：液状化による噴水高さ，第25回土質工学研究発表会，1990 4). S. YASUDA, I. MORIMOTO, Y. SHIMIZU: Development of Liquefaction Sensor, International Workshop on Remedial Treatment of Potentially Liquefiable Soils (1991), 2-6, pl ~p12.