

## (24) 液状化による側方流動地盤の挙動と物性に関する実験的研究

東京電力㈱ 土居 賢彦 佐藤 博  
東海大学 浜田 政則

### 1. はじめに

地盤の液状化現象が地震災害としてはじめて注目されたのは1964年に発生した新潟地震からである。その後の1983年の日本海中部地震等、中規模以上の地震の度に液状化現象による被害が発生し、構造物・ライフライン施設等を破壊し、市民生活に大きな支障を与えてきた。この液状化現象による被害の中でも地盤が数mも移動する側方流動による構造物被害は深刻である。

側方流動のメカニズムを解明するため、日本の4地震（1923年関東、1948年福井、1964年新潟、1983年日本海中部）による被害事例をもとに総合的に考察した結果<sup>1)</sup>、液状化した地盤は流体的な挙動を示すのではないかとの推測が示された。このため、以下に示す液状化した砂の流体的特性に関する実験、および、液状化地盤の側方流動に関する模型振動実験を行った。

### 2. 側方流動実験

#### (1) 実験方法

図-1に示す鋼製土槽に遠州灘周辺の浜砂（平均粒径0.24mm）を投入し、飽和した緩詰めめの砂層を製作した。この土槽は底部より水を圧入してボイリングを起こし、砂層を攪拌することによって相対密度をコントロールすることができ、非常に緩詰めめの砂層を繰り返し製作することが可能である。土槽中央底面に杭模型（外径26mmの塩化ビニルパイプ）を固定し、地表面に2%の勾配を設けた。この土槽を起振機で槽短辺方向に加振し、液状化させて側方流動を発生させた。

砂層の流動変位量の測定方法を図-2に示す。砂層中にプラスチック製のターゲット板を埋設し、これと巻取り式変位計をワイヤーで接続して側方流動量を測定した。流動変位量の測定精度については事前に予備実験を実施し、砂層中に円柱状に設置した着色砂の変位量がターゲット板の変位量と、ほぼ10%以内の誤差で一致することを確認している。

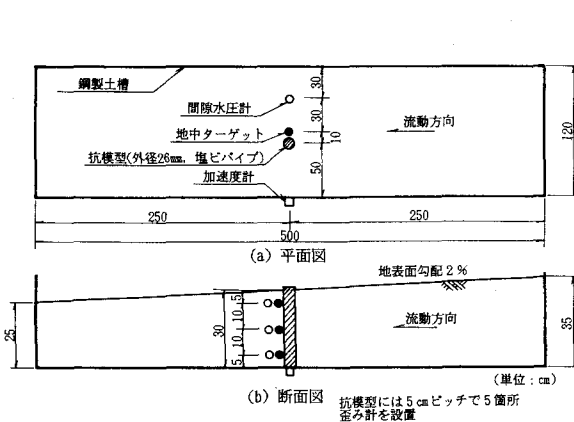
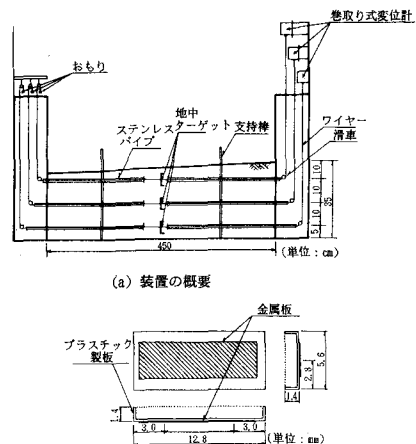


図-1 実験装置の概要



(b) 地中ターゲットの詳細図

図-2 流動変位量の測定方法

**(2) 実験結果**

砂層の相対密度13%・入力加速度166Galの場合（ケース1）、相対密度49%・入力加速度460Galの場合（ケース2）における、土槽の間隙水圧・流動変位量、これを微分して求めた流動速度、流動加速度ならびに杭模型に作用する荷重の経時変化を図-3に示す。但し、荷重は歪から曲げモーメントを求め、これを2回微分することにより算出した。

模型地盤は、加振後に液状化した時点で流動を開始し、地表面がほぼ水平になって停止する。流動量は深部で小さく、地表で大きくなっている。杭模型に作用する荷重の経時変化の形状は、流動変位、加速度に比べ流動速度の経時変化に類似しており、模型杭に流体的な外力が作用したものと推測される。

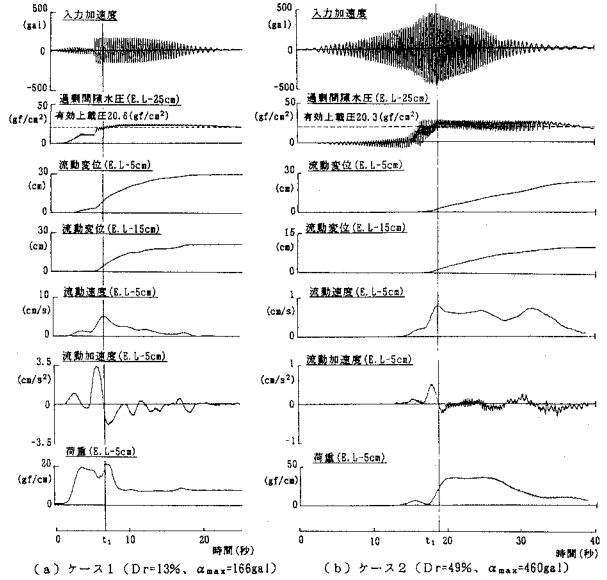


図-3 側方流動実験の結果

**3. 液状化している砂の物性に関する実験**

既往の地震被害事例の分析結果、並びに、前述の側方流動実験により、液状化した地盤は、流体的な挙動を示すことが推察された。ここでは、粘性流体との仮定の下に、液状化している砂の粘性流体としての物性を把握するために、2種類の要素実験を実施した。

**(1) 液状化土槽における鋼球の引き上げ実験**

**a. 実験方法および実験項目**

図-4に実験装置の概要を示す。実験装置はフレッシュコンクリートの粘性測定法に用いられている例を参考に製作した。直径100cm×高さ100cmの円筒土槽に豊浦標準砂（平均粒径0.17mm）を投入し、飽和した緩詰め砂層を製作した。土槽内の砂をボイリングにより攪拌しながら鋼球を任意の位置にセットする。これを起振機により加振し過剰間隙水圧の上昇量から完全液状化の状態を確認する。液状化の状態が継続していることを確認し、土槽中の鋼球をモーターにより任意の等速度で引き上げる。その時、ワイヤーに取り付けたロードセルにより鋼球に作用する荷重を、変位計により引き上げ距離を測定した。

実験項目を表-1に示す。球径・加速度・相対密度・引き上げ速度の4項目を変え、合計60ケースの実験を行った。

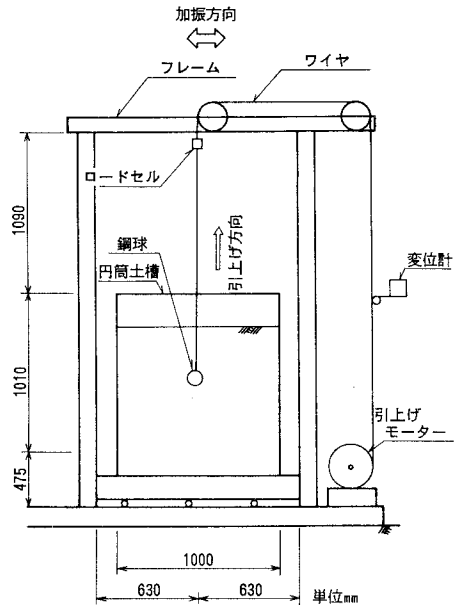


図-4 鋼球の引き上げ実験装置の概要

表-1 鋼球実験の実験ケース

球径 (mm)	入力加速度 (Gal)	相対密度 (%)	引き上げ速度 (cm/sec)
30, 50, 100	150, 250, 350	10, 30, 50	1, 3, 6

(2) 液状化土層中におけるパイプの横引き実験

a. 実験方法および実験項目

図-5に実験装置の概要を示す。長さ180cm×幅80cm×高さ100cmの鋼製土槽に豊浦標準砂を投入し、鋼球の引き上げ実験と同様に土槽内の砂を攪拌し、均等な緩詰め砂層を製作した。アームの先端に直径5cm×長さ70cmのアルミニウム製パイプを水平に取り付けてある。このアームを固定した可動式のスライド台をモーターで牽引してパイプを土槽内で移動させた。パイプに作用する荷重はパイプ表面に埋め込んだロードセルにより、パイプ長30cm区間で作用する荷重として検出した。実験は、振動台で土槽短辺方向に加振し、過剰間隙水圧の上昇量から完全液状化状態を確認した後パイプを移動させ、パイプに作用する荷重を測定した。

表-2に示すとおり、入力加速度・相対密度・パイプの移動速度の3項目を変え、合計23ケースの実験を行った。

(3) 実験結果

図-6に鋼球実験における、加速度が150Gal、380Galで他の条件が等しい場合の実験結果を示す。間隙水圧の結果より、砂層は完全液状化の状態を維持していることを確認している。液状化により鋼球に作用する荷重は、浮力により負側に変動しこれを基準にして鋼球の引き上げに伴いランダムに変化している。また荷重は入力加速度が大きい方が小さい結果となっている。

また、鋼球実験の予備実験において、鋼球の表面に埋め込んだ間隙水圧計により計測した鋼球表面の間隙水圧と荷重との関係を図-7に示す。鋼球の引き上げに伴い間隙水圧は漸減するものの、ランダムに変化しており、この変化と荷重の変化とは良く対応している。即ち、間隙水圧が減少した時、荷重はピークを示している。これは、鋼球の引き上げに伴い鋼球周辺の砂層が一時的に剛性を回復し、再び液状化状態に戻る、この様な状態の変化が繰り返し生じていることも考えられる。図-6において、荷重がランダムに変化するのはこのためである。また、入力加速度が大きい方が鋼球に作用する荷重が小さい結果となっている点については、入力加速度が大きいと、前述した鋼

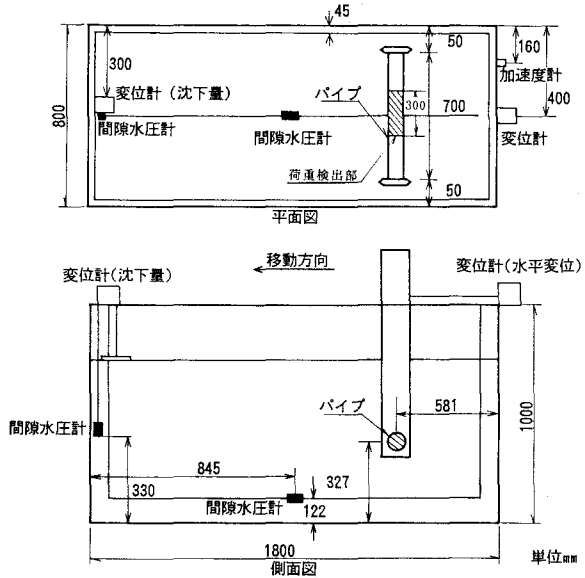


図-5 パイプの横引き実験装置の概要

表-2 パイプ実験の実験ケース

直径 (mm)	入力加速度 (Gal)	相対密度 (%)	横引き速度 (cm/sec)
50	80~500	25, 35, 45	1, 5

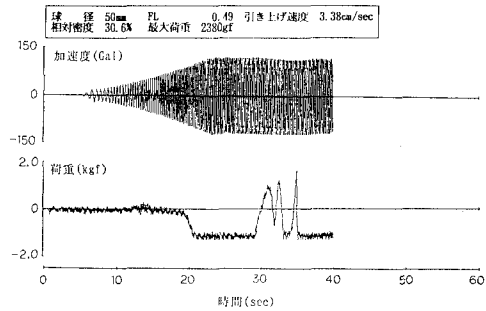


図-6 (a) 鋼球実験の結果 1

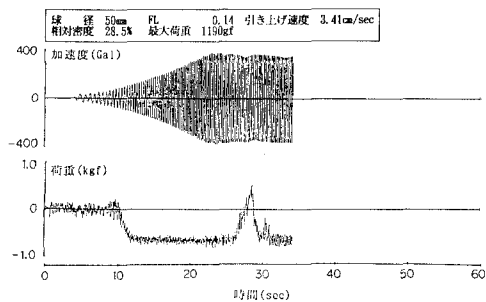


図-6 (b) 鋼球実験の結果 2

球周辺の砂層の剛性の回復が少なく、液状化状態を保つ程度が大きいと考えられる。これと同様のことは、相対密度を変化させた場合の実験ケースについても確認している。以上より、液状化している砂の物性を評価する上で液状化状態の程度を表す指標が重要になるものと考えられる。

従って、入力加速度と砂層の相対密度の双方の要因を考慮するために、液状化判定に用いられている  $F_L$  値を採用した。厳密には  $F_L$  値と諧定数の定義が異なる場合もあるが、本報告ではこれを模擬的に  $F_L$  値と表すこととした。また、試験体が液状化土中を等速度で移動した際、試験体に作用する流体力を示す指標として粘性係数を採用し両者の関係を整理した。なお、 $F_L$  値と粘性係数  $\eta$  の算定方法は以下の通りである。

$$F_L = \frac{0.0042 D_r g \delta_v'}{\alpha_{max} \delta_v}$$

$D_r$  : 相対密度 (%)

$\alpha_{max}$  : 土槽の最大加速度 ( $\text{cm}/\text{sec}^2$ )

鋼球実験の粘性係数  $\eta$  は液状化している砂が Newton 流体であるとの仮定より、Stokes の式を用いた。

$$\eta = \frac{F}{6\pi r V}$$

$r$  : 鋼球の半径 (cm)  $F$  : 粘性抵抗力 (gf)

$V$  : 鋼球の引き上げ速度 ( $\text{cm}/\text{sec}$ )

パイプ実験の粘性係数は試験体の形状がパイプ (円筒) であるため、層流状態における Lamb の式を用いた。

$$q = \frac{4\pi}{R_e (2.002 - \ln R_e)} \rho V^2 d \quad R_e = \frac{\rho V d}{\eta}$$

$\rho$  : 液状化時の砂の密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )  $q$  : 30cm 部単位長さ当たりの荷重 ( $\text{gf}/\text{cm}$ )

以上の条件に基づいて整理した結果を図-8 に示す。粘性係数が移動速度と投影面積に若干依存する傾向が見受けられるものの、実験方法が異なるにもかかわらず、概ね、相関性があり、 $F_L$  値により統一的に表現できると考えられる。また、液状化した砂の粘性流体としての性質 (粘性係数) は液状化の程度により変化している。即ち、液状化の程度 ( $F_L$  値を用いて表現した) が激しくなるにしたがい粘性係数が減少し、液状化層 (砂) の流動性が増加すると判断できる。

#### 4. まとめ

実験結果の荷重が時刻的に変動している。これは試験体に慣性力 (加速度) が作用している等の理由が考えられるため、実験記録を再検討することを考えている。

(参考文献) 1) Masahiko Doi and Masanori Hamada : A Summary of Liquefaction-Induced Ground

Displacements, Fourth Japan - U.S. Workshop, Vol.1, 1992

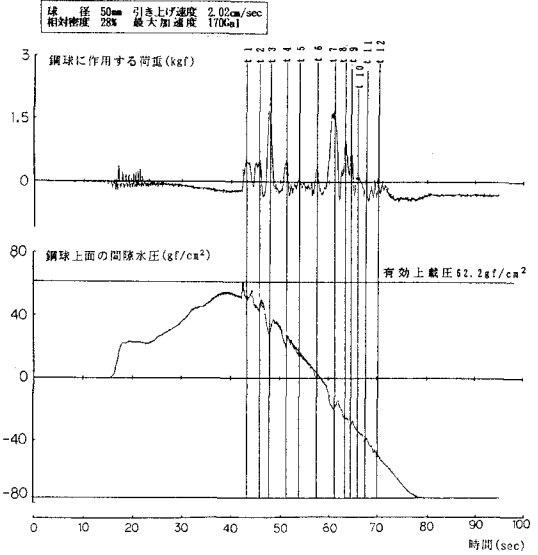


図-7 鋼球の引き上げ予備実験の結果

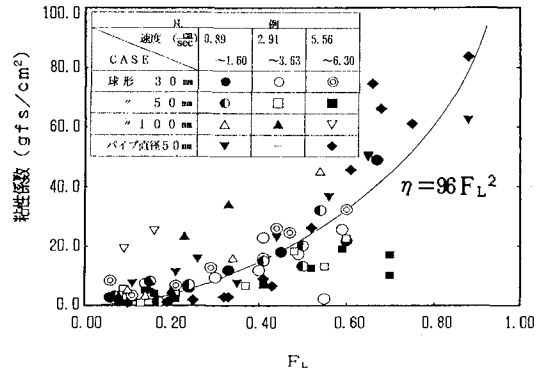


図-8 鋼球・パイプ実験の  $F_L$  値と粘性係数の関係

$V$  : 相対速度 ( $\text{cm}/\text{sec}$ )