

実地盤発破実験による液状化土の流動特性の解明

高橋 祐治¹・濱田 政則²・小林 智宏³・佐藤 貴俊³・田中 淳寛³

¹鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30)

²工博 早稲田大学 理工学部 土木工学科 教授 (〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1)

³早稲田大学大学院 理工学研究科 (〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1)

This report is written about the experiment of liquefaction for the real ground held at Tokachi port. The reification was caused with emalgion explosive and we collected the data. This kind of experiment is one of few experiments done with actual ground. We made 4% slope and did lateral flow experiment. In this report, we study the characteristics of liquefacted soil from the data such as pile behavior, effectiveness of ground improvement.

Key Words: Liquefaction, Liquefaction-induced flow, Viscosity, blasting, pile

1. はじめに

地震時の地盤災害の一つに地盤の液状化とそれに伴う側方流動がある。これまで、1964年に起きた新潟地震、1983年の日本海中部地震など多くの既往地震における側方流動の事例が調査されてきた。また、小型土槽を用いた遠心載荷場の実験や小型～大型土槽を用いた重力場の実験により、液状化発生メカニズムや液状化発生の予測法がかなり解明されてきており、さらには液状化が生じた後の地盤挙動の解明^{1), 2), 3)}がなされつつある。しかし、地盤材料は強い非線形性を持つことから、縮尺率の大きい小型模型による実験では実地盤と模型地盤との間の相似則が満たされない。そのため、相似則がほぼ満足されるような規模の模型による実験や実地盤における実験が必要とされる。

本論文は2001年11月13日、北海道十勝港の埋立地盤内で実施された発破振動による液状化実験のうちの側方流動に関する結果の報告である。

なお、この実験は独立行政法人港湾空港技術研究所を始めとする13機関が共同で行った「港湾・臨海部都市機能の耐震性向上に関する実物大実験」⁴⁾の1テーマとして実施されたものである。

2. 実験の概要

(1) 実験場の概要

十勝港の埋立地盤において、実物大の鋼矢板護岸を設置し、護岸背面地盤内に3次元的に配置したエマルジョン爆薬を時間差爆発させることにより地盤を振動させ、液状化状態を再現する。実験場の平面図を図-1に示す。実験場は本論文の対象である「側方流動領域」(図-1の下半分の領域)と「非側方流動領域」とからなる。側方流動領域の縦断図を図-2に示す。

側方流動領域の概要は以下のとおりである。

- ① 護岸は液状化によって大変位が発生するよう、地震震度 $k_h=0$ で設計されており、また、後述するように地盤内の発破終了後、タイロッドの切断の発破および矢板根入れ前部の発破が行われる。
- ② 護岸背面 25.2m の範囲は EL+3.0m の水平地盤で、その背面側 50m は 4%勾配の傾斜地盤となっている。側方流動領域の周囲は縁切りのため鋼矢板を打設してある。
- ③ 矢板前面の計画水深は EL-5.0m で、水位は EL+2.0m に設定されている。

(2) 地盤概要

図-1に示す位置の地盤の粒度分布を図-3、表-1に、スウェーデン式サウンディング試験の結果を図-4に示す。図-3には港湾の施設上の基準・同解説に示されている液状化の可能性のある範囲(均等係数の大きい砂 $U_c \geq 3.5$)を併せて示す。これらによると、EL-3.5m~EL-4.45mの範囲は細粒分が多いものの旧海底面 EL-4.5mより以浅のほぼ全層が「液状化の可能性あり」の範囲にある。

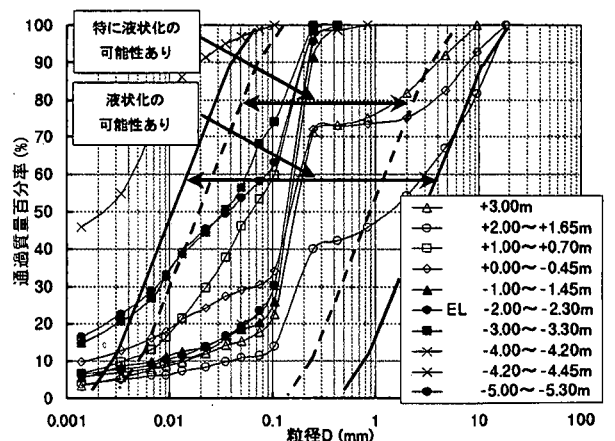


図-3 実験地盤の粒径加積曲線

実験前は台風などによる降雨の影響で地下水位が比較的高かったことに加え、実験当日の朝まで散水したことにより、側方流動域内の地下水位はEL+2.0m付近にあったと推定される。

表-2 実験で用いた土質材料の物理特性

EL (m)	比重 G_s	細粒分含有率 (%)	平均粒径 D_{50} (mm)	均等係数 (D_{60}/D_{10})
EL+3.00	2.688	18.6	0.1625	13.43
EL+2.00~+1.65	2.669	10.8	1.3870	77.41
EL+1.00~+0.70	2.696	17.0	0.0628	29.53
EL+0.00~-0.45	2.701	18.7	0.1462	109.25
EL-1.00~-1.45	2.696	71.0	0.1462	21.91
EL-2.00~-2.30	2.689	78.2	0.0372	—
EL-3.00~-3.30	2.703	74.2	0.0357	—
EL-4.00~-4.20	2.722	22.3	0.0024	—
EL-4.20~-4.45	2.738	74.2	0.1350	12.68
EL-5.00~-5.30	2.719	22.3	0.1367	16.74

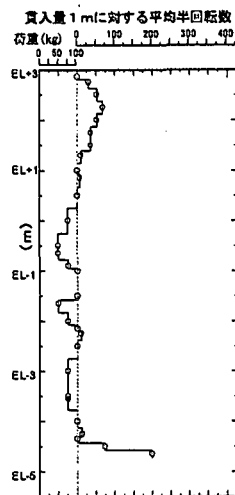


図-4 スウェーデン式サウンディングの結果

- : 発破
- ◎ : GPS
- △ : ボーリング位置
- △ : 間隙水圧計

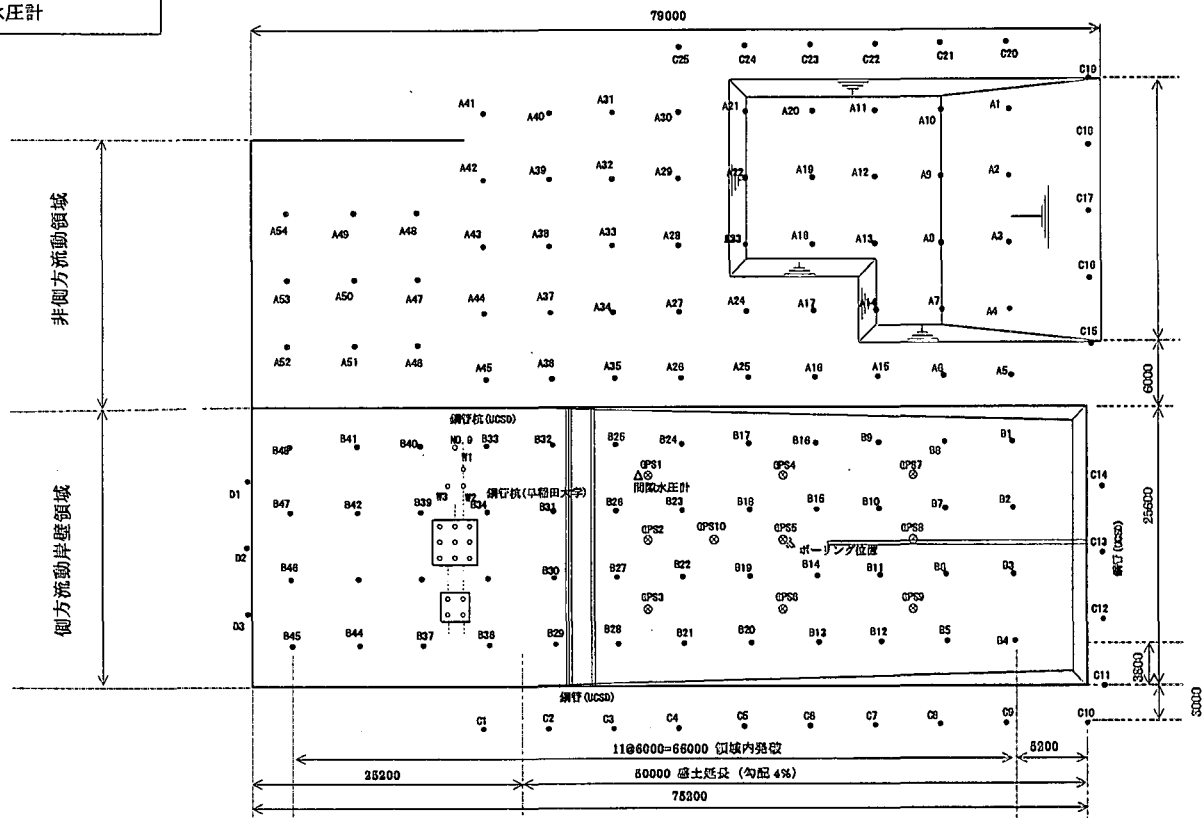


図-1 実験場平面図

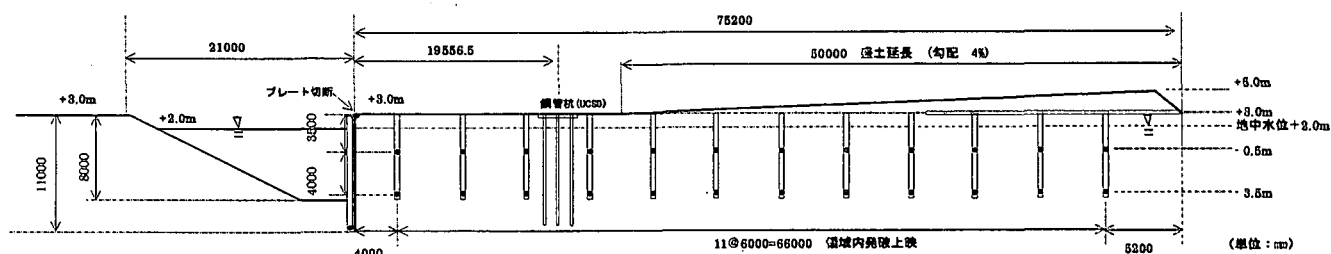


図-2 実験場縦断面図

(3) 計測項目

側方流動領域において筆者らが計測した項目を表-2に、配置図を前出の図-1に示す。本論文ではカリフォルニア大学サンディエゴ校（以下、UCSDと表す）が計測した間隙水圧および杭応力の一部を使わせていただいております、それらの計測位置も図-1に併せて示す。

表-2 計測項目

計測項目	計測方法	備考
地表面変位	GPS	GPS1~10
杭応力	ひずみゲージ	W1~W3
杭応力	ひずみゲージ	UCSD
間隙水圧	間隙水圧計	UCSD

(4) 発破工

発破は非側方流動域（系列A：54孔）、側方流動域（系列B：48孔）の間隙水圧上昇を目的とした「領域内発破」に引き続いて、振動の継続を目的に領域外周部（系列C：25孔）の「領域外発破」を行う。これらの発破完了後、側方流動領域の護岸の変位が出やすくなることを目的に、別系統の点火により、側方流動領域護岸のタイロッド連結プレート切断用成型爆薬および矢板前面根入れ部を起爆する。標準的な装薬の方法を図-5に、発破順序を図-6に示す。

各孔は上下2段（上段 EL-0.5m、下段 EL-4.5m）に爆薬を配置し、系列A、Bの各発破孔は下段の起爆 0.2 秒後に上段を起爆する。上段起爆 0.5 秒後に隣接する孔の下段を起爆する。系列Aの1孔目下段の起爆 0.1 秒後、系列Bの1孔目下段の起爆を行う。こうして連続的に行う系列A、Bの発破継続時間 37.3 秒の 0.5 秒後に系列Cの1本目下段の起爆を行う。系列Cでは下段起爆 0.5 秒後に上段を起爆し、その 0.5 秒後に隣接する孔の下段を起爆する。この繰り返しにより、系列Cの発破継続時間は 25.0 秒となり、系列A、Bと合わせて発破継続時間は 62.3 秒となる。各孔の薬量は下段 4kg、上段 3kg を基本とし、構造物に隣接する孔では発破による損傷を防ぐために薬量を減量する。系列A、B、Cの薬量に側方流動領域護岸根入れ部の薬量を加えた総薬量は 844.0 kg である。

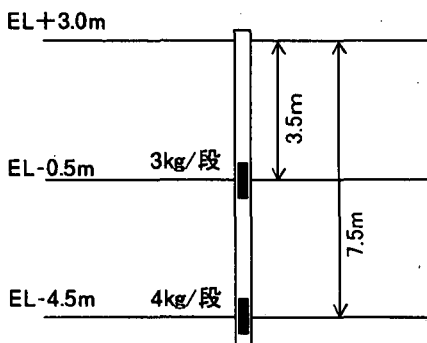


図-5 標準的な装薬の方法

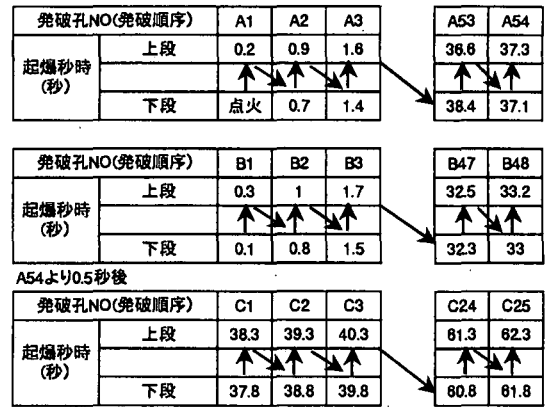


図-6 発破順序

3. 計測結果

(1) 地表面変位

GPS を用いて側方流動領域内斜面の地表面変位を計測した。発破終了約 30 分後の水平面内変位計測結果を図-7に示す。また、測点 GPS1 の X, Y, Z の各方向変位の経時変化を図-8に示す。ここで、X は斜面上下流方向、Y は斜面横断方向、Z は鉛直方向である。上流側の測点 GPS7, 8, 9 では下流側の測点に比べ、X 方向の変位量が小さく、Z 方向変位量が大きい。下流側の測点では X 方向変位が卓越しており、全体的には斜面の上流側から下流側へ変位がみられる。なお、GPS7, 8 の測点が Y 方向に移動しているのは、測点 GPS7 付近の地盤が Y 方向に崩壊していることによる。測点 GPS1 の変位の経時変化では、発破開始後 15~18 秒に測点周辺の発破の影響が現れているが、その後は発破継続時間とほぼ同じ 60 秒頃まで変位が漸増している。このような動きは計測不能となった GPS5 を除く他の全ての測点で同じである。

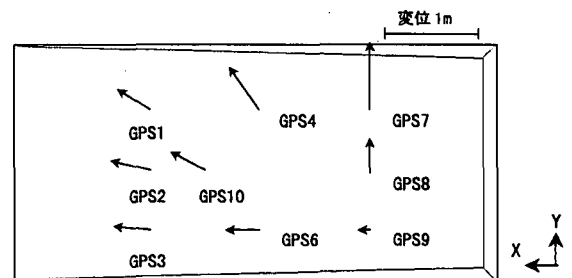


図-7 水平面内変位量（発破終了約30分後）

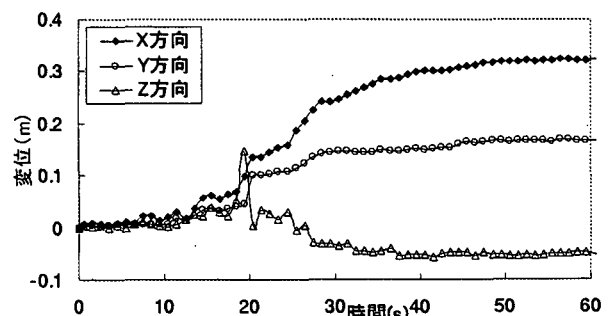


図-8 GPS1の変位の時刻歴

(2) 間隙水圧

GPS1 の測点近傍に埋設された間隙水圧計（設置深度-0.45m）の計測結果を図-9 に示す。水中単位体積重量 γ' を $1\text{gf}/\text{cm}^3$ と仮定した場合の有効応力をあわせて示す。発破開始直後から間隙水圧は上昇し、約 11 秒で完全液状化する。この時刻は GPS の変位が開始する時刻とほぼ一致する。完全液状化後も発破の衝撃を受けて間隙水圧は上昇し、間隙水圧計近傍の発破完了後、15 秒程度で発破前の有効応力とほぼ同じ大きさになっている。他の間隙水圧計では近傍の発破完了後の間隙水圧逸散が速いものの、図-9 と同様の挙動を示す。

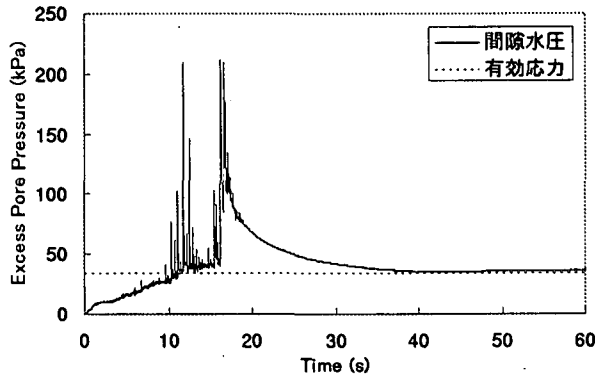


図-9 間隙水圧の時刻歴

(3) 杭応力

$\phi 318.5\text{mm}$, $t=10.3\text{mm}$ の鋼管杭を図-1 に示す位置に打設した。杭の支持層とみなせる旧海底面への根入れ深さは、杭 W1 が 1.2m, 杭 W2 が 1.35m, 杭 W3 が 1.4m, 杭 UCSD-No. 9 が 3.9m である。歪ゲージは杭の外周の図-10 に示す位置に貼り付けた。

発破開始後 $t=28, 32, 36$ 秒の杭 W2 および杭 UCSD-No. 9 の曲げモーメントを図-11 に示す。ここで、曲げモーメントは上流側引張りを正としている。

杭 UCSD-No. 9 に比べ、杭 W2 の曲げモーメントの値が約 1/2 と小さくなるのがわかる。杭 W1, W3 についても同様である。この要因としては、杭 UCSD-No. 9 の旧海底面への根入れが深く、固定度が高いこと、杭 W1~W3 には群杭の効果が出ていることなどが挙げられる。

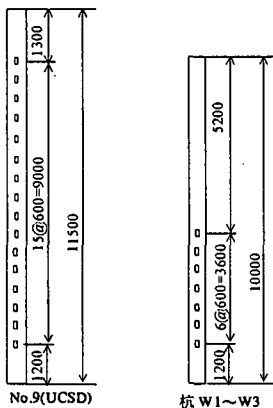
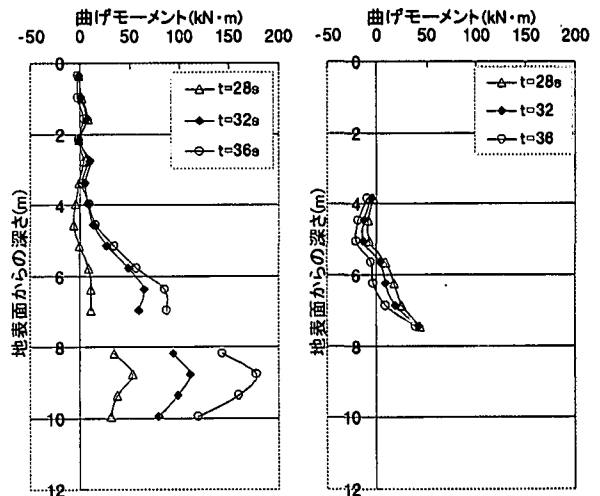


図-10 歪ゲージ貼り付け位置



(a) 杭 UCSD-No. 9

(b) 杭 W2

図-11 杭に作用する曲げモーメント

4. 液状化地盤の流動特性の検討

ここでは、実験より得られた地表面変位と速度を図-12に示すVoigt型の粘弾性モデルを用いて解釈することにより、液状化土の流動中の粘弾塑性的特性を考察する。地表面変位および速度には、測点GPS1の斜面上下流方向の流動を用いた。前述の通り、発破開始後15~18秒に測点周辺の発破の影響が現れているため、18.5秒以後の流動について検討する。

なお、図-17に示す地表面速度は、変位の時刻歴を3次関数で近似して求めたものである。

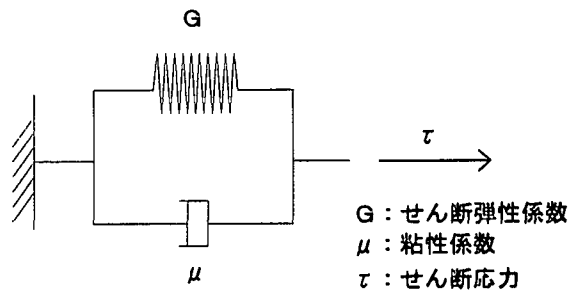


図-12 液状化土のVoigt型粘弾性体へのモデル化

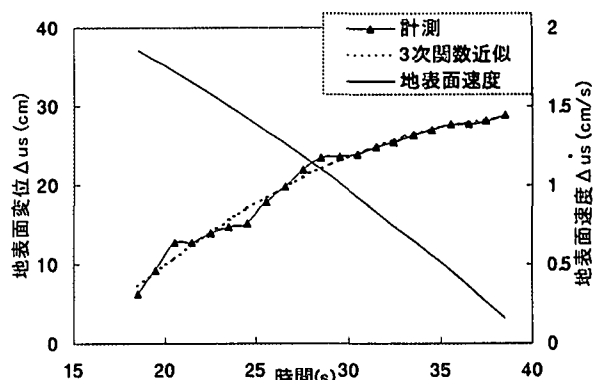


図-13 GPS1の地表面変位と速度の時刻歴

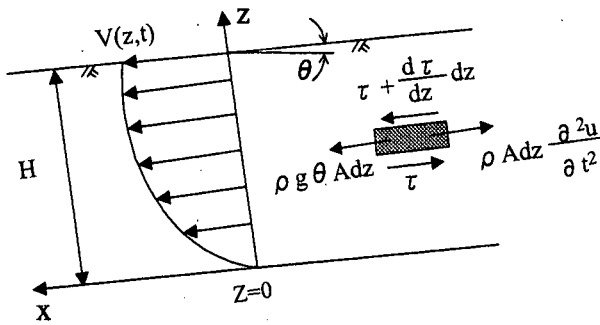


図-14 1次元の粘性流体の流れ

傾斜地盤の動きを図-14に示すような一次元の粘弾性体の流れと仮定する。図-14において深さzにおける微小切片の釣合いを考えれば、

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho g \theta \quad (1)$$

が得られる。上式においてu, τは深さzにおける地盤変位とせん断応力, ρ, θ, gはそれぞれ液状化土の密度, 地表面勾配および重力加速度であり, tは時間である。図-12のVoigtモデルにおけるせん断応力τとせん断ひずみγおよびせん断ひずみ速度γ̇の関係は、

$$\tau = G\gamma + \mu\dot{\gamma} \quad (2)$$

$$= G \frac{\partial u}{\partial z} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial t} \quad (3)$$

であり、これを式(1)に代入すれば

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \mu \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} - G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \rho g \theta \quad (4)$$

となる。地盤変位u(z,t)の解を

$$u(z,t) = \sum_{i=1,3,\dots}^{\infty} q_i(t) \cdot \sin \frac{i\pi}{2H} z \quad (5)$$

とおけば、

$$\ddot{q}_i(t) + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{i\pi}{2H} \right)^2 \dot{q}_i(t) + \frac{G}{\rho} \left(\frac{i\pi}{2H} \right)^2 q_i(t) = \frac{4}{i\pi} g \theta \quad (6)$$

が得られる。z=Hすなわち地表面の変位u_s(t)とし、簡略化のため式(5)の一次の変位モードだけを考えればu_s(t)=q_1(t)となり、

$$\ddot{u}_s(t) + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\pi}{2H} \right)^2 \dot{u}_s(t) + \frac{G}{\rho} \left(\frac{\pi}{2H} \right)^2 u_s(t) = \frac{4}{\pi} g \theta \quad (7)$$

となる。t=0において地表面の傾斜によって初期変位u_s0が生じていると考えれば

$$u_s(t) = u_{s0} + \Delta u_s(t) \quad (8)$$

となる。

実験ではΔu_s(t)を観測していることになる。式(7)をΔu_s(t)を用いて整理すれば

$$\begin{aligned} \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\pi}{2H} \right)^2 \Delta \dot{u}_s(t) + \frac{G}{\rho} \left(\frac{\pi}{2H} \right)^2 (\Delta u_s(t) + u_{s0}) \\ = \frac{4}{\pi} g \theta - \Delta \ddot{u}_s(t) \end{aligned} \quad (9)$$

を得る。左辺の第1項は粘性力を示し、第2項は弾性力を示す。今回の実験では、図-13に示すように変位の時刻歴Δu_s(t)および速度の時刻歴Δu̇_s(t)は求められている。速度の時刻歴をさらに数値微分することにより加速度の時刻歴Δü_s(t)を求めることができる。図-13に示した変位と速度の時刻歴を用い、最小2乗法により式(9)の左辺の粘性力と弾性力を同定する。この同定結果を図-15に示す。

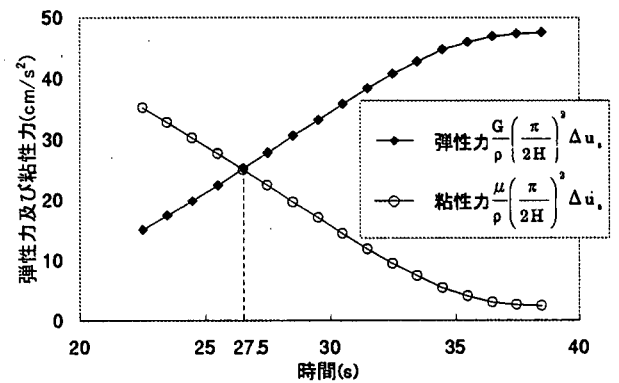


図-15 弾性力と粘性力の時刻歴

図-15によれば、27.5秒までは、粘性力に関する項が弾性力に関する項よりも大きく、発破開始後、まず粘性力が卓越していることが分かる。27.5秒以後は、粘性力の減衰に伴い、弾性力が卓越していく過程がみられる。このように液状化直後粘性力が卓越し、以後弾性力が回復していく過程は濱田らの模型実験²⁾においても検証されており、実地盤においても同様の傾向が確認された。

5. 杭応力の検討

ここでは、杭を弾性床上のはりとして仮定し、杭に作用する外力を検討する。杭のモデル図を図-16に示す。杭は下端固定とする。また、杭下端より4.6m以浅はひずみ計がなく、モデル化が困難であるため、ひずみ計で深さをモデル化し、最上段のひずみ計位置における曲げモーメントM_0およびせん断力S_0を外力として与える。

なお、図-16に示すはりには杭W2を取り上げ、地盤変位U_0には、杭W2近隣のGPS1の地表面変位を深さ方向に三角形分布とした値を用いた。

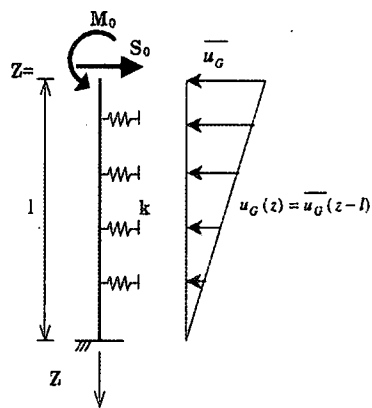


図-16 杭のモデル化

杭の単位長さあたりのばねの値を $k=1\text{kgf/cm}^2$ とした場合の杭の曲げモーメントを、ひずみ計から求めた曲げモーメントと比較して図-17に示す。解析値は実験値とよく一致している。

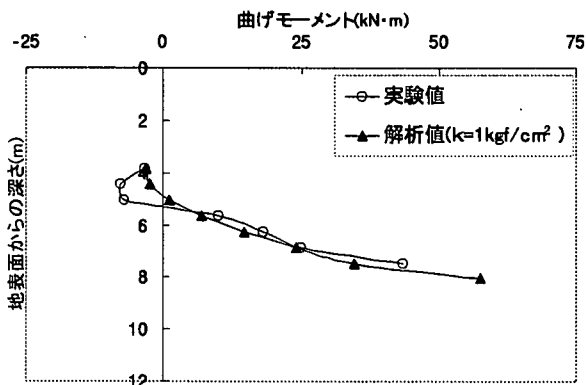


図-17 実験値と解析値の比較

6. おわりに (まとめと今後の課題)

本論文では十勝港の埋立地盤内で実施された発破振動による液状化実験のうちの側方流動に関連するデータとこれまでに行ってきた分析結果を報告した。これまでに得られた成果は以下のとおりである。

- ① 発破振動により、間隙水圧の上昇、液状化・側方流動が生じた。
- ② 振動台を用いた実験結果と同様、流動特性は、流動初期段階では粘性力が卓越し、時間の経過とともに粘性力が減少し、弾性力が増加・卓越することが確認できた。
- ③ 杭を弾性床の上のはりとしてモデル化し、ばねを介して流動変位を入力することにより、杭に生じる曲げモーメントを再現することができた。

また、今後検討すべき課題には以下がある。

- ① 実地震による間隙水圧間上昇は、せん断力によるダイレタンシーによって生じるが、今回実施した発破実験では衝撃圧によって生じる。この間隙水圧上昇メカニズムの違いが液状化・流動

化現象に及ぼす影響について検討する。

- ② 液状化層が深さ方向に時間的に変化する過程での流動特性の評価と流動変位量予測手法について検討する。
- ③ 杭に作用する流動圧の評価および側方流動に対する群杭の効果について検討する。

謝辞

実験遂行にあたっては「港湾・臨海都市機能の耐震性に関する実証実験」参加各機関に大変お世話になった。また、カリフォルニア大学サンディエゴ校 Ashford 助教授には貴重なデータをご提供いただいた。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 濱田政則, 若松加寿江: 液状化による地盤の水平変位の研究, 土木学会論文集, No. 596, pp. 189-208, 1998年6月.
- 2) 濱田政則ほか: 液状化地盤の水平変位量の予測法に関する研究, 第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム, pp. 267-272, 2001年3月.
- 3) 大友敬三: 地中構造物に及ぼす地盤側方流動の荷重特性評価, 土木学会論文集, No. 591, pp. 283-297, 1998年4月.
(独)港湾空港技術研究所: 港湾・臨海部都市機能の耐震性向上に関する実物大実験 配布資料, 2001年11月.