

液状化地盤上の模型盛土の沈下時刻歴

佐々木 康¹・大林 淳²・重山 忠成³

¹ 正会員 工博 広島大学教授 工学部第四類(〒739 東広島市鏡山1-4-1)

² 正会員 広島大学受託研究員(派遣元 不動建設)

³ 学生会員 広島大学大学院

地震時の地盤液状化による盛土の破壊例はこれまでに多く見られている。しかし、これらの被害状況について得られている詳細な情報は、主として地震後の観察記録に基づくものであり、盛土の変形がいつ始まり、どのように進行していくかについては、未だ不明な点が多い。そこで、液状化後の盛土基礎地盤の変形に着目し、小型土槽を用いた実験を行った。盛土の沈下時刻歴は高速ビデオカメラを用いて 1/100 秒ごとに追跡し、間隙水圧の時刻歴と併せて考察した。その結果、液状化により有効応力を失った初期の段階で最終沈下量の 30~50% の沈下が生じ、次いで沈下速度を低下しつつ沈下が継続し、その後は比較的緩やかに沈下が進行した後停止することが明らかになった。

Key Words : liquefaction, embankment, deformation of liquefied soil, time history of settlement

1. はじめに

地震時の地盤液状化による盛土の破壊例はこれまでに多く見られている。地盤液状化に伴う盛土の被害状況について得られている詳細な情報は、主として地震後の観察記録に基づくものであり、盛土の変形がいつ始まり、どのように進行していくかについては、未だ不明な点が多い。基礎地盤の液状化と構造物の変形との時間的な関係についてこれまでに確認されているものは定性的なものが多く、新潟地震で主要動の終了後 1~2 分後に昭和大橋が崩壊したという目撃証言¹⁾や、亀裂や噴砂が地震後も続いていたという証言などである。

地震時の盛土の変形は、①盛土自体の圧縮変形、②液状化地盤の強度低下による流動変形、③液状化後の水圧消散による圧縮からなると考えられる。著者らは、基礎地盤の液状化と盛土の沈下量の関係を定量的に把握し、盛土の変形メカニズムを解明するために、小型土槽を用いて基礎地盤の液状化による模型盛土の挙動について調べている。ここでは、実験から得られた模型盛土の沈下時刻歴を報告する。

2. 実験方法

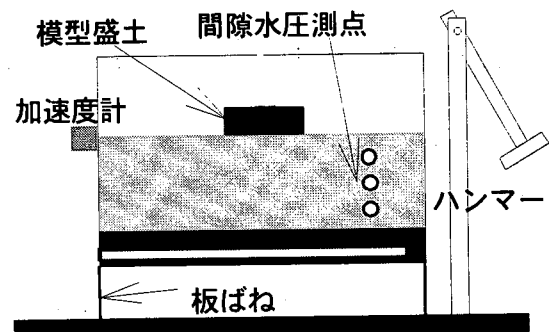


図-1 実験装置

図-1 のような板バネに支えられた小型土槽に豊浦標準砂 ($G_s=2.64$, $e_{min}=0.624$, $e_{max}=0.986$, $D_{50}=0.17$ mm) を水で飽和させた単層の模型地盤を作成した。模型地盤の相対密度は表-1 に示す通りで、初期液状化層厚は 14 cm とし、水位面は地表面に一致させている。液状化後の地盤の変形のみに着目し、実験条件の単純化を図るため、模型盛土は変形しない塩化ビニール製の直方体ブロック ($L=290$ mm, $B=175$ mm, $H=80$ mm, $W=5.79$ kg) とした。これを地盤上に静かに設置し、振り子式のプラスチックハンマーを用いた 1 回の打撃によって地盤を液状化させ

た。ハンマーの打撃により、土槽に200～300galの水平加速度を与え、その時の模型地盤の過剰間隙水圧、土槽の水平加速度、模型盛土の水平・鉛直加速度を測定した。過剰間隙水圧は初期液状化層厚の1/4、2/4、3/4の深さにおける値を測定した。さらに、模型盛土の動きを経時的に捉えるため、高速ビデオカメラを用いて模型盛土の沈下状況を毎秒100コマの速度で撮影した。用いたビデオカメラは株式会社ナック製のデジタルハイスピードカメラで、撮影した画像をデジタル化し半導体メモリに記憶させることにより高速撮影を可能としている。撮影した画像は任意の速度で再生できるため、コマ送りで再生することにより1/100秒ごとの変位を追跡することができる。ビデオカメラの性能上、最大撮影可能時間が限定されているため（フルフレーム100コマ/秒で約5秒間）、模型盛土の最終沈下量は土槽側面で別途計測した。

3. 実験ケース

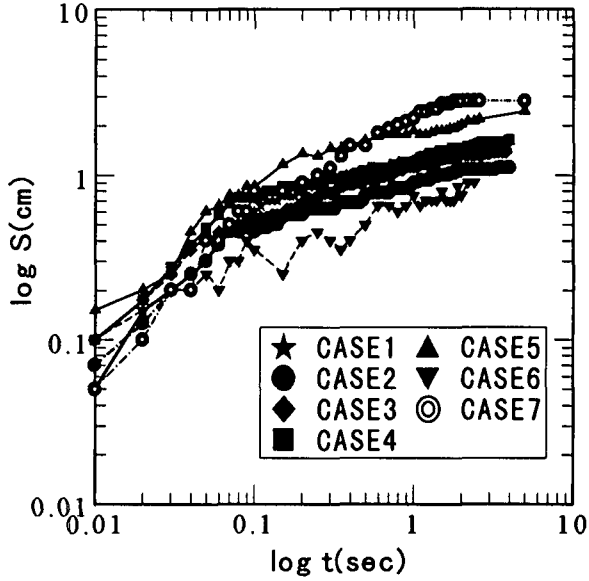
実施した実験ケースは表－1に示す7ケースである。初期相対密度は用いた砂重量と層厚の平均値によって計算した。

表－1 実験ケース

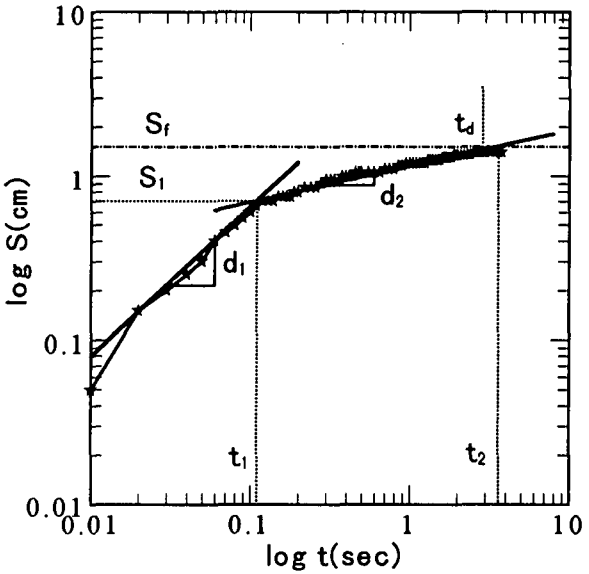
CASE No.	初期液状化層厚(cm)	相対密度(%)
1	13.7	42
2	13.3	56
3	13.5	48
4	13.7	41
5	14.6	28
6	14.1	43
7	14.6	28

4. 盛土の沈下時刻歴

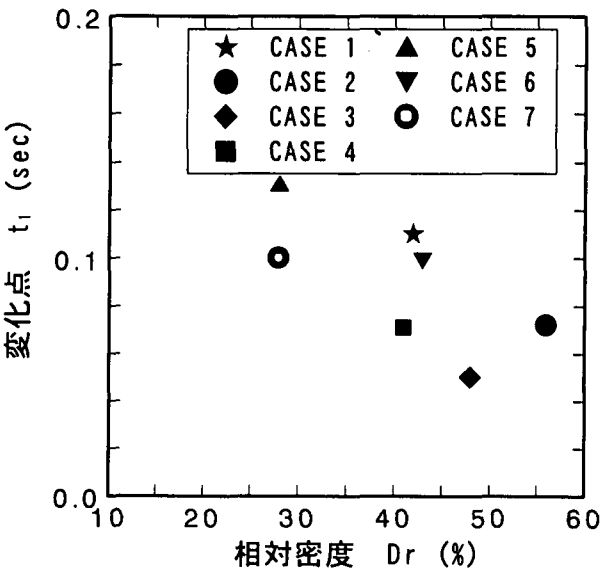
ビデオから読みとった模型盛土の沈下開始から約4秒後までの沈下～時間関係（両対数）を図－2に示す。どのケースにおいても、比較的初期の段階において沈下傾向の変化点が見られる。そこで、図－3に示すように $\log S \sim \log t$ 曲線の変化点を（ t_1 , S_1 ）とし、それぞれのケースについて求めた t_1 と初期相対密度との関係を図－4に示した。 t_1 は0.1秒前後に分布し、相対密度が小さいほど t_1 は大きい傾向にある。また、 t_1 までの沈下量（ S_1 ）の最終沈下量（ S_f ）に対する割合を同様に整理すると、図－5に示すようになり、最終沈下量の30%～50%



図－2 $\log S \sim \log t$ 関係



図－3 沈下特性の読み取り例(CASE1)



図－4 勾配の変化点と初期相対密度の関係

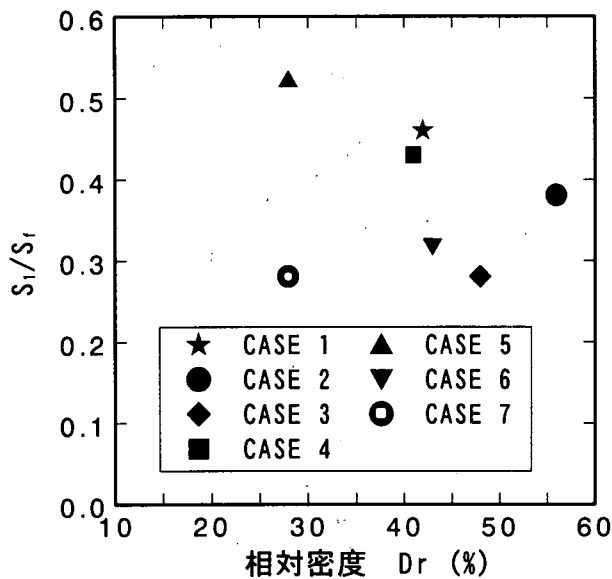


図-5 S_i/S_f と初期相対密度の関係

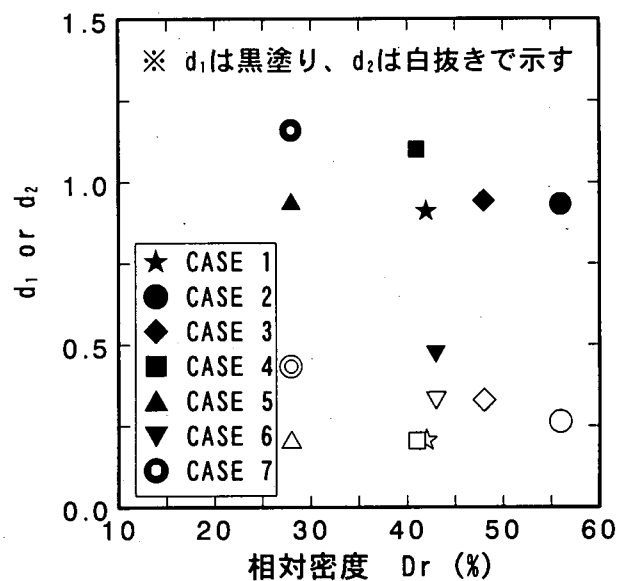


図-7 沈下勾配と初期相対密度の関係

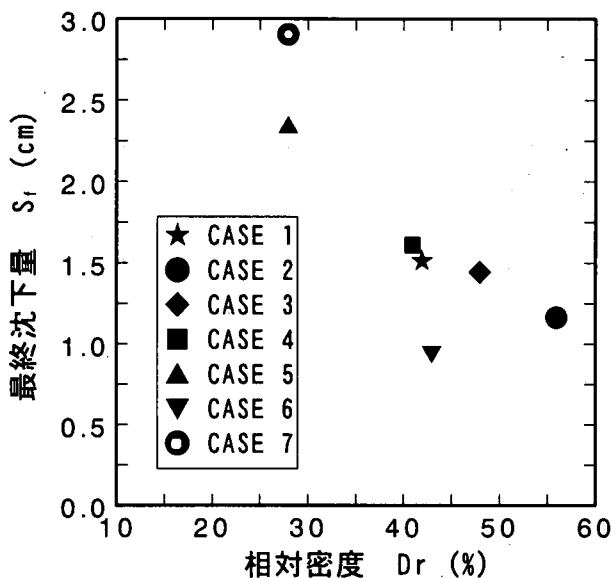


図-6 最終沈下量(S_f)と初期相対密度の関係

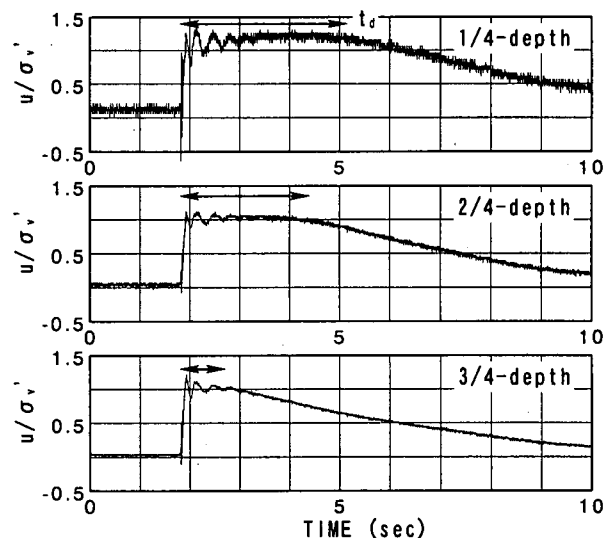


図-8 間隙水圧の時刻歴(CASE1)

の沈下が t_1 に終了している。また、初期相対密度が小さいほど S_i/S_f は大きい傾向が見られる。最終沈下量(S_f)は図-6に示すように初期相対密度が小さいほど大きい。

さらに、 $t < t_1$ 、 $t > t_1$ の二つの区間に分けて $\log S \sim \log t$ 曲線の勾配を図-7に整理した。初期勾配 d_1 は初期相対密度が低いとやや大きい傾向にあるが、概ね1.0前後の値であり、沈下量が S_i 前後の値になるまではほぼ時間に比例して沈下が進行することが判る。一方、 $t > t_1$ 区間の勾配 d_2 は0.2~0.4程度であり沈下は時間の0.2~0.4乗に比例して進行していることが判る。

図-3において勾配 d_2 からなる直線と $\log S = \log S_f$ なる水平線との交点を t_2 と定義すると、 t_2

は2~4秒程度で、このときの実測沈下量は S_f に達しておらず、 $\log S \sim \log t$ 曲線の勾配が最終段階(t_2 以降)で変化していることが判る。

基礎地盤の過剰間隙水圧に着目すると、図-8に示す通り、打撃後間隙水圧比が1になっていることから、目論見通り基礎地盤は $t \approx 0$ にて完全液状化の状態にあることが判る。時間の経過とともに過剰間隙水圧は深いところから減少をはじめますが、表層付近の浅いところでは、しばらくの間、間隙水圧比1の状態が継続する。(この時間を別報⁴⁾では高間隙水圧比継続時間としている)

盛土の沈下に見合うだけの地盤の変形は盛土直下から盛土両側に向かって流動する基礎地盤の変形によってもたらされる。得られた沈下と間隙水圧の時

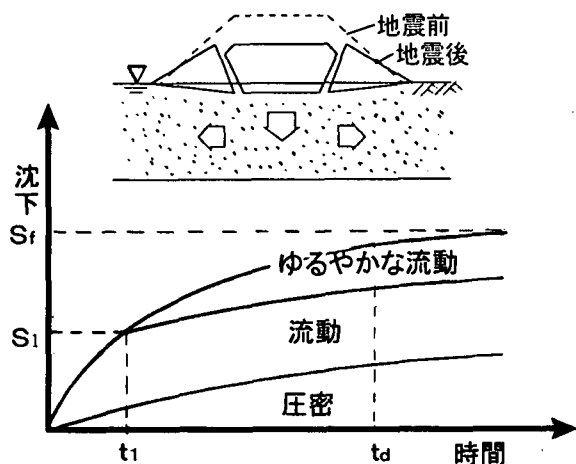


図-9 沈下量構成要因の模式図

刻歴から推測すると、盛土基礎地盤は有効応力を失った初期の段階のうち $0 < t < t_1$ 間で急激な流動を生じ、次いで $t_1 < t < t_2$ では、これよりやや遅い速度で流動を主体とした沈下が継続している。さらに、 t_2 付近から水圧の消散による沈下のみが継続し最終沈下へと至ると考えられる。 t_2 と高間隙水圧比継続時間 t_d の傾向が表-2 に示すように、ケース7を除いて概ね一致していることがこれを裏付けている。

この沈下プロセスにおける沈下量の構成要因を図-9 に模式的に示す。

表-2 各ケースの沈下特性

case	t_1	t_2	t_d	d_1	d_2	S_1	S_f
1	0.11	3.62	2.88	0.91	0.22	0.70	1.51
2	0.07	2.91	—*	0.93	0.26	0.44	1.16
3	0.05	2.25	3.38	0.94	0.33	0.41	1.44
4	0.07	4.51	3.89	1.10	0.20	0.70	1.61
5	0.13	7.03	8.40	0.93	0.20	1.05	2.33
6	0.10	2.97	3.50	0.48	0.34	0.30	0.95
7	0.12	2.40	6.03	1.16	0.43	0.80	2.90

(単位: t_1 , t_2 , t_d (秒), S_1 , S_f (cm))

* 間隙水圧の測定値なし

これらの考察をさらに進めるため、沈下と間隙水圧の時刻歴について比較した。

沈下開始から約4秒間の沈下量と測定された間隙水圧から求めた間隙水圧比との関係を図-10 に示す。 $t = 0.1$ 秒程度(前述の t_1)まで間隙水圧比は上昇を続け、 t_1 付近で1に達しているが、測定された間隙水圧記録はタイムラグを含んだものと考えられる。層厚の1/4深さにおける高間隙水圧継続時間の終了時では最終沈下量の約90%まで沈下している。

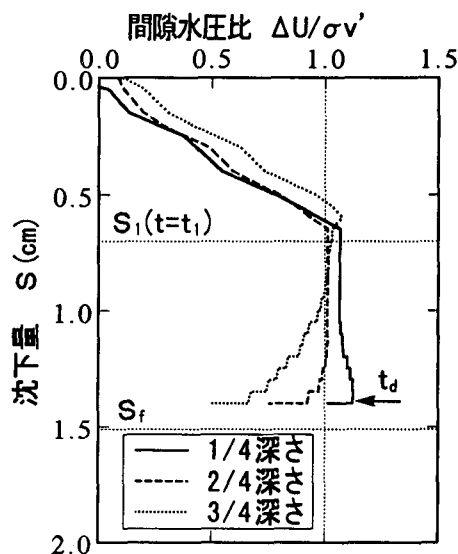


図-10 沈下と間隙水圧比の関係(CASE1)

5. まとめ

基礎地盤の液状化に伴う盛土の沈下挙動を、模型盛土を用いた小型土槽実験によって求めた。その結果、液状化に伴う沈下は有効応力を失った初期の段階で盛土直下から両側に向けての流動による沈下を生じ、次いでこれよりやや遅い速度で最終沈下量の90%まで沈下し、その後は比較的緩やかに沈下が進行する事が明らかになった。今後は、間隙水圧の測定方法を工夫するとともに、間隙水圧と沈下の関係について詳細に検討し、液状化時の沈下メカニズムについてさらなる考察を加えたい。

本研究を進めるにあたって、広島大学卒業生、宇高薫氏(現応用地質)、宮本康司氏(現前田建設工業)ならびに広島大学学生、白武寿和君、岡田拓也君、小方義昭君、竹中学君の協力を得た。また、高速度ビデオカメラの撮影に際しては広島大学地域共同研究センターの多大な協力を得た。末筆ながら感謝する次第である。

参考文献

- 1) 石原研而: 土構造物の耐震設計法の現状と問題点, 土と基礎, Vol.28, No.8, pp.3~8, 1980
- 2) 佐々木康・宇高薫・宮本康司: 液状化に伴う盛土の変形量, 土木学会中国支部研究発表会講演集, 1997
- 3) 佐々木康・宇高薫・宮本康司: 液状化の継続時間を考慮した盛土の被害予測手法に関する研究, 土木学会中国支部研究発表会講演集, 1997
- 4) 佐々木康・宇高薫・大林淳・重山忠成・宮本康司: 液状化地盤上の盛土の沈下速度, 第52回土木学会年次学術講演集, 1997(投稿中)