

まさ土の力学特性と 有効応力モデルによる要素シミュレーション

後藤 聡¹・森井 慶行²・Cubrinovski, Misko³・末岡 徹¹

¹正会員 工博 大成建設(株)技術研究所(〒245 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²正会員 工修 大成建設(株)技術研究所(〒245 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

³正会員 工博 基礎地盤コンサルタンツ(株)(〒102 東京都千代田区九段北1-11-5)

阪神・淡路大震災において、埋立地盤に多く使われていたまさ土の液状化がクローズアップされた。まさ土は均等係数が大きく礫を多く含むので、液状化に対する抵抗は大きいと考えられ、液状化特性は十分に把握されていなかった。そこで、再構成試料およびブロックにより採取された不攪乱試料のまさ土を用いて、1) 液状化試験、2) 非排水三軸圧縮試験、3) 排水三軸圧縮試験などの室内実験を実施し、まさ土の力学特性(静的および動的特性)を検討した。

さらに、これらの力学特性より、土の有効応力モデルのパラメータを決定し、繰り返し載荷時の応力・ひずみ関係および有効応力経路などの要素シミュレーションを行った。

Key Words : Masado, liquefaction, dynamic behaviour, effective stress model, CD tests, CU tests, steady state

1. はじめに

阪神・淡路大震災では、海岸線の埋立地および人工島において、大規模な液状化が発生した。花崗岩の風化残積土であるまさ土に関する研究は、斜面崩壊に関するものが多く、まさ土による埋立地盤の土質力学的性質に関する研究はあまり行われておらず、特に液状化のような動的性質に関してはほとんど明らかにされていなかった。

そこで、著者らはまさ土の基本的な液状化特性を調べるために、大型三軸試験機を用いたまさ土の液状化試験を実施した^{1) 2)}。たとえば、礫分が液状化特性に与える影響を調べるために、3種類の粒度分布についてまさ土の液状化試験を行い、同じ供試体作成方法であれば、液状化特性に大きな違いは認められなかった^{1) 2)}。しかし、用いた試料は全て再構成試料であったので、本報告ではブロックサンプリングによる不攪乱試料を用いた液状化試験を実施し、再構成供試体との液状化特性の相違を検討した。

また、本報告では、まさ土の静的せん断特性を把握するために、再構成まさ土の圧密非排水三軸圧縮試験(CU)および圧密排水三軸圧縮試験(CD)を行った。

最後に、室内試験で得られたこれらのまさ土の力学的特性から有効応力モデル(Stress-Densityモデル)³⁾の入力パラメータを決定し、液状化試験の要素シミュレーションを行った。

2. まさ土の力学特性

(1) 用いたまさ土の粒度分布および物理特性

用いた試料は、六甲山系のまさ土によって埋め立てられた埋立地より採取したものである。2地点において採

表-1 用いたまさ土の主な物理特性

	試料AH		試料PI		不攪乱
	粒度A	粒度B	粒度A	粒度B	
D _{max} [mm]	53.0	2.0	53.0	2.0	53.0
D ₆₀ [mm]	10.2	0.64	2.2	0.78	3.2
D ₅₀ [mm]	5.7	0.49	1.5	0.60	2.1
D ₁₀ [mm]	0.24	—	0.17	9.0	12.8
e _{min}	—	0.647	—	0.574	0.480*
e _{min}	—	1.240	—	1.106	0.959*
ρ _s [g/cm ³]	—	2.683	—	2.654	2.643*

※2mm以下の試料で求める

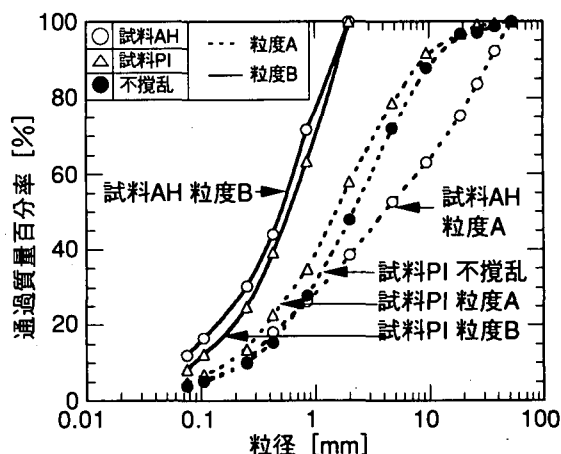


図-1 用いたまさ土の粒径加積曲線

取した試料をそれぞれ試料AH（芦屋浜埋立地より採取）、試料PI（ポートアイランド埋立地より採取）と呼ぶ。不攪乱試料は、ポートアイランドでブロックサンプリングした試料を現地でトリミングし所定の容器（直径7.5cm、高さ17cm）に収納した。その後、凍結し試験室まで運搬した。用いた再構成まさ土は、図-1に示すように、粒度A、粒度Bの2種類の粒度に調整して実験を行った。なお、粒度Aは50mmふるいを通過、粒度Bは2mmふるいを通過する試料である。不攪乱試料の粒度分布も図-1にあわせて示す。本報告では2種類の粒度Bの試料と不攪乱試料の実験結果についてのみ検討する。また、表-1に用いたまさ土の主な物理特性を示す。

（2）液状化試験

液状化試験に用いる再構成まさ土の供試体作成方法としては、①空中落下法、②突き棒法、③水中落下法および④突き固め法、などを用いて、作成方法の影響を検討した。以下に作成方法の概略を説明する。①空中落下法：漏斗を用いて高さ約1cmから試料を落下させる。②突き棒法：供試体を5層に分け、棒を用いて1層当たり120回突き固める。③水中落下法：モールド内に所定量の脱気水を注水した後、漏斗を用いて水面からの高さ10cmから試料を落下させる。④突き固め法：1Ecの締め固めエネルギーでランマーで突き固める。

表-2に、液状化試験における実験ケースと供試体作成時および圧密後の相対密度および乾燥密度の平均値をそれぞれ示す。不攪乱試料は、凍結状態で容器より押し出し三軸セルにセットし、0.5kgf/cm²の有効拘束圧で供試体を自立させ解凍した後、membrane penetrationの影響を少なくするために、供試体の表面の凹部にシリコンゴムを薄く塗り凹凸を極力無くした。その後、2重負圧法により飽和させ、有効拘束圧1.0kgf/cm²まで等方圧密し、非排水条件で繰返し載荷試験を行った。載荷周波数は0.01Hzである。不攪乱試料および再構成試料の供試体寸法は、直径75mm、高さ150mmである。

図-2に粒度B（2mmふるいを通過した試料）の軸ひずみ両振幅DA=5%時の繰返しせん断応力比と繰返し回数との関係を示す。図-2中には、試料（まさ土）の種類および作成方法が異なる供試体の試験結果がプロットされている。粒度Bの供試体の液状化強度は、不攪乱試料による結果を除いて同程度の液状化強度を示しており、その範囲は図-2においてハッチングで示すことができる。今回用いたまさ土では、試料の種類および作成方法の相違が液状化特性に与える影響範囲は、図-2中に示したハッチングの範囲内であり、ほとんど同程度の液状化強度を示すことが分かる⁴⁾。ただしせん断前の密度が他と比べて小さい水中落下法による供試体は、液状化強度も小さくなっている。

表-2 液状化試験における実験ケースと供試体の平均密度

試料名	作成方法	作成時 Dr(%) [ρ_d (g/cm ³)]	圧密後 Dr(%) [ρ_d (g/cm ³)]
芦屋浜まさ土 AH	空中落下	63.4 [1.44]	115.8 [1.73]
	突き棒	82.9 [1.53]	124.6 [1.79]
	突き固め	118.6 [1.75]	127.3 [1.81]
ポートアイランドまさ土 PI	突き棒	85.2 [1.61]	102.2 [1.70]
	水中落下	81.4 [1.59]	85.6 [1.61]
	不攪乱	80.5 [1.68]	81.6 [1.69]

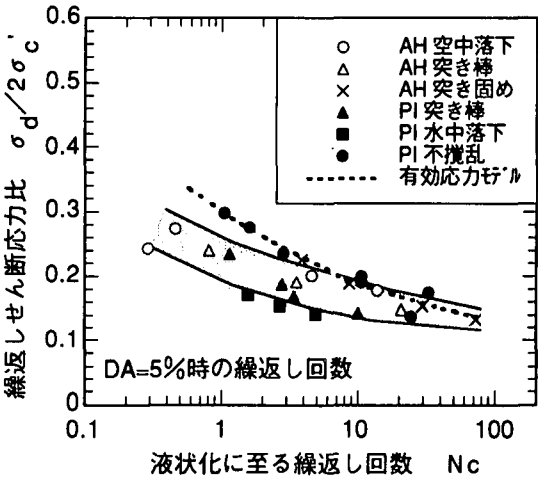


図-2 再構成まさ土と不攪乱まさ土の液状化強度曲線

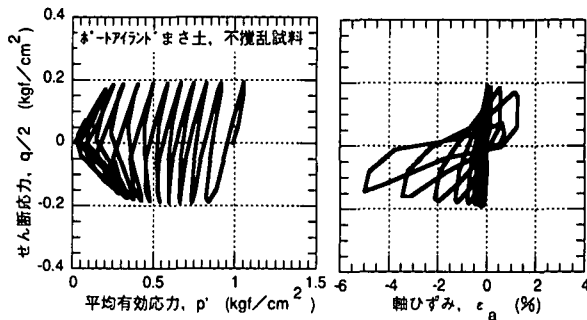


図-3 有効応力経路と応力・ひずみ関係

図-2には、不攪乱試料による液状化強度も同時に示すが、不攪乱試料の液状化強度は、ハッチング部分の上側に位置している。表-2に示すように、乾燥密度は水中落下法による供試体と同程度であるにも拘わらず、再構成試料の液状化強度より少し強い液状化強度を示すことが分かる。さらに、図-3には、不攪乱試料の有効応力経路と応力・ひずみ関係を示す。過剰間隙水圧が蓄積し、伸張側に軸ひずみが伸びていく砂の代表的な液状化現象が生じている。また、ここでは示していないが、再構成試料の液状化特性と不攪乱試料の液状化特性においても、有効応力経路や応力・ひずみ関係において、大きな相違は認められなかった。

(3) 静的試験

静的試験 (CD, CU) においては、①空中落下法および②突き棒法により供試体を作成した。

表-3に、静的試験における実験ケースと供試体の平均密度および初期有効拘束圧を示す。作成した供試体は、 0.5kgf/cm^2 の負圧により自立させ、 CO_2 および脱気水にて飽和させた。飽和完了後、所定の有効拘束圧 ($0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0\text{kgf/cm}^2$) まで等方圧密した。なお、有効拘束圧 0.1kgf/cm^2 の試験ケースについては、 0.05kgf/cm^2 の負圧により自立させ、 CO_2 および脱気水にて飽和させた。圧密完了後、B値が 0.96 以上であることを確認し、非排水条件で $0.05\%/min$ のせん断速度で三軸圧縮せん断試験を行った。また、 $0.007\%/min$ のせん断速度で、排水三軸圧縮試験も行った。再構成試料の供試体寸法は、直径 50mm 、高さ 100mm である。

図-4に、空中落下法で作成した供試体の非排水試験における応力・ひずみ関係の拘束圧依存性について示す。同様に、図-5に、突き棒法による応力・ひずみ関係の拘束圧依存性も示す。両者ともポートアイランドまさ土 (試料PI) を用いた試験結果である。応力・ひずみ関係をみると、空中落下法の場合は、軸ひずみが 15% 以上に達するとせん断応力はほぼ一定になっているが (図-4)、突き棒による場合は、軸ひずみが 15% 以上になってもせん断応力は増加している (図-5)。これは、表-3に示すように、供試体作成時の密度が異なるためである。次に、2つの作成方法において有効応力経路について見ると、有効応力経路のうち変局点までの経路はほぼ同様の経路を示しており、試料の作成方法の相違による有効応力経路の違いは認められない。芦屋浜のまさ土についても、図4, 5に示したような試験結果が得られた。

図-5に、突き棒法で作成した供試体のCD試験結果を示すが、体積ひずみは常に収縮であり、緩い砂に対応するようなダイレイタンス特性であることが分る。

3. 有効応力モデルによる要素シミュレーション

(1) 有効応力モデル

有効応力モデルとしては、Stress-Densityモデル³⁾を用いた。このモデルはステートインデックス⁵⁾という土の状態量を基に発展させたモデルである。構成則の説明は文献3)に詳しいが、基本的には、弾性状態における応力・ひずみ関係、応力-塑性せん断ひずみ関係、応力-ダイレイタンス関係などの弾塑性理論から成り立つ。せん断剛性と破壊応力比を、ステートインデックスの1次関数として表現し、さらにステートインデックスが土のせん断とともにカーレントに変動することなどがこのモデルの大きな特徴である。

表-3 静的試験における実験ケースと供試体の平均密度および初期有効拘束圧

試験条件	試料名	作成方法	初期有効拘束圧 [kgf/cm^2]	作成時 Dr(%) [$\rho_d(\text{g/cm}^3)$]
CD	AH	突き棒	0.5, 1.0, 2.0, 3.0	85.4 [1.55]
	PI	突き棒	0.5, 1.0, 2.0	109.0 [1.67]
CU	AH	空中落下	0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	62.4 [1.44]
		突き棒	0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	87.3 [1.56]
	PI	空中落下	0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	63.5 [1.50]
		突き棒	0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0	99.0 [1.68]

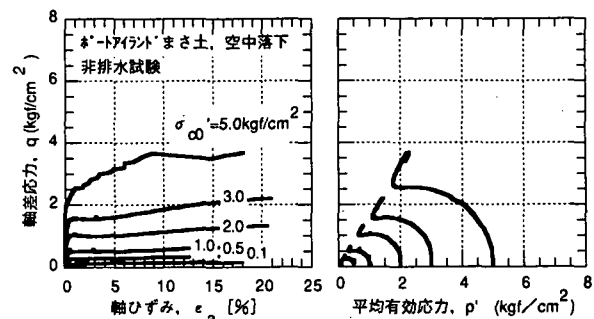


図-4 応力・ひずみ関係と有効応力経路 (CU, 空中落下)

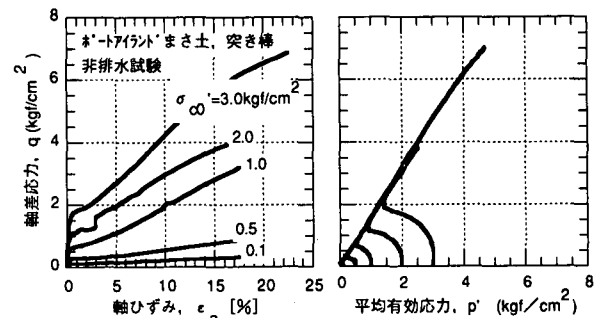


図-5 応力・ひずみ関係と有効応力経路 (CU, 突き棒)

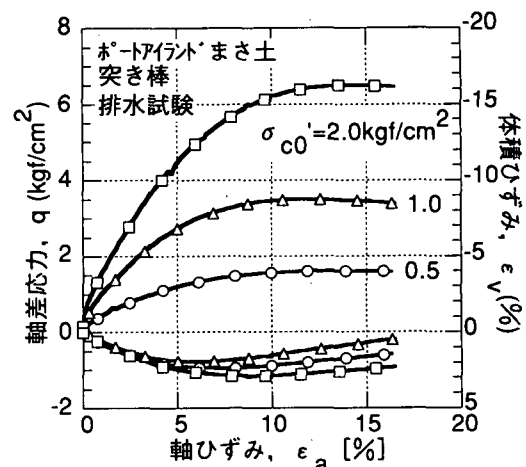


図-6 応力・ひずみ関係 (CD, 突き棒)

(2) 入力パラメータの決定

ステートインデックス I_s の定義を図-7に示す。この図に示すように、 I_s は、 e (間隙比) - p' (平均有効応力) 図において、現在の状態(C)が、極限間隙比(A)や定常状態(B)に対して示す相対的な位置関係を表す。まさ土の I_s を求めるために、前述したCDおよびCU試験結果について、せん断前の e - p' 上での状態と、せん断終了後(せん断ひずみが約20%)の状態を、ポートアイランドまさ土および芦屋浜まさ土についてプロットすると図-8のようになる。それぞれのまさ土に対して、空中落下法および突き棒法により作成した供試体の結果をプロットしているが、2種類の供試体作成法によらず、まさ土の種類によって定常状態ラインが異なるのが分る。ここでは、ポートアイランドにおける不攪乱試料の液状化試験結果をシミュレーションする目的で、ポートアイランドにおける定常状態ラインを用いる。せん断剛性および破壊強度と I_s の関係はCD試験結果から求めた。

(3) 要素シミュレーション結果

ポートアイランドでの不攪乱試料を用いた液状化強度曲線がフィッティングできるように、ダイレイタンシーパラメータを決定した。有効応力モデルにより計算された液状化強度曲線を図-2の破線で示す。この図より、不攪乱試料の液状化強度曲線をほぼ正確に再現していることが分かる。また、せん断応力が 0.2 kgf/cm^2 の時の有効応力経路および応力・ひずみ関係を図-9に示す。図-3の実験結果と比較すると、三軸供試体を用いた液状化試験に特有の、伸張側へひずみが増大する現象は再現できないが、有効応力経路についてはほとんど似ており、まさ土の繰り返しせん断挙動をかなり定性的にシミュレーションできることが分る。

4. まとめ

まさ土の液状化試験および静的試験から基本的な力学特性を把握した。さらに、これらの実験結果から有効応力モデルのパラメータを決定し、要素シミュレーションを行い、有効応力モデルと実験結果の妥当性を確認した。

参考文献

- 1) 森井慶行, 後藤聡, 谷澤房郎, 末岡徹: 粒度分布の相違がまさ土の液状化特性に与える影響について, 土木学会第51回年次学術講演会, pp.214~215, 1996.
- 2) 後藤聡, 谷澤房郎, 森井慶行, 末岡徹: ポートアイランドにおける埋立地盤の堆積および液状化特性, 大成建設技術研究所報, 第29号, pp.53~58, 1996.
- 3) Cubrinovski, M. (1993): A constitutive model for sandy soils based on a stress-dependent density parameter, Dr. Eng.

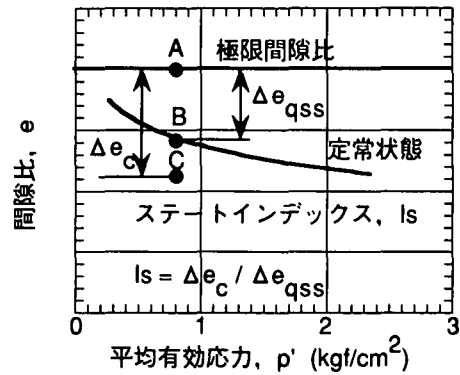


図-7 ステートインデックス I_s の定義

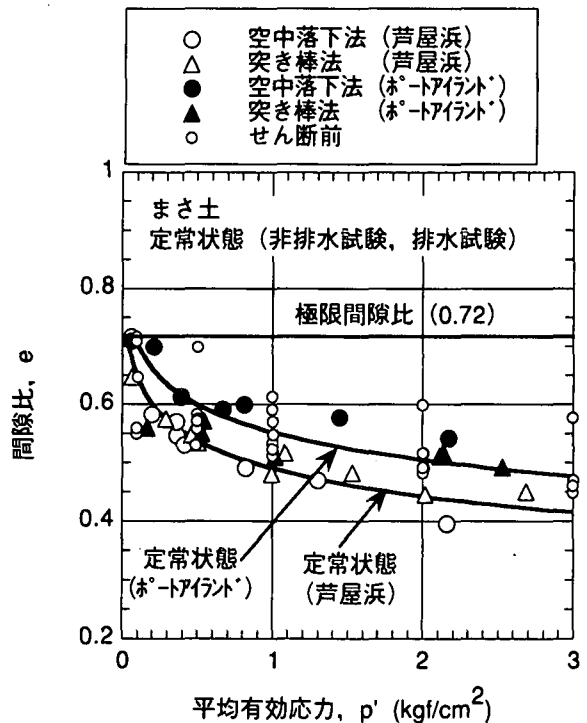


図-8 非排水および排水三軸圧縮試験における定常状態

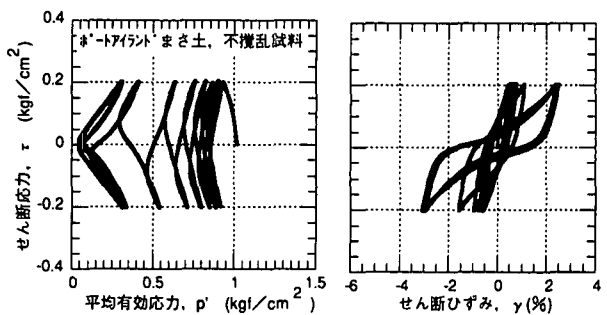


図-9 有効応力経路と応力・ひずみ関係 (有効応力モデル)

Thesis, Univ. of Tokyo.

- 4) 森井慶行, 後藤聡, 谷澤房郎, 末岡徹: 不攪乱および再構成まさ土の液状化特性, 第32回地盤工学研究発表会 (熊本), 1997. (投稿中)
- 5) Ishihara, K. (1993): Liquefaction and flow failure during earthquakes, 33rd Rankine lecture, Geotechnique 43, pp.351-415.