

硬質な洪積砂層の液状化強度特性を考慮した 有効応力解析のパラメータ設定の検討

佐藤 恭兵¹・兵頭 順一²・新垣 芳一³・溜 幸生⁴・富田 真之⁵・
山田 理紗⁶・末広 俊夫⁷

¹正会員 東電設計株式会社 土木本部
(〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12 KDX 豊洲グランスクエア 9F)
E-mail: kyouhei.satou@tepsco.co.jp

²正会員 東電設計株式会社 土木本部 (同上)
E-mail: hyoudou@tepsco.co.jp

³正会員 東電設計株式会社 土木本部 (同上)
E-mail: shingaki@tepsco.co.jp

⁴正会員 東電設計株式会社 新領域研究開発推進室 (同上)
E-mail: etamari@tepsco.co.jp

⁵非会員 東京電力ホールディングス株式会社 技術戦略ユニット 土木・建築統括室
(〒100-8560 東京都千代田区内幸町 1-1-3)
E-mail: tomita.masayuki@tepcoco.jp

⁶正会員 東京電力ホールディングス株式会社 技術戦略ユニット 土木・建築統括室 (同上)
E-mail: yamada.risa@tepcoco.jp

⁷フェロー会員 東京電力ホールディングス株式会社 原子力設備管理部
(〒100-8560 東京都千代田区内幸町 2-1-6 日比谷パークフロント 8F)
E-mail: suehiro.toshio@tepcoco.jp

従来、液状化判定の対象とする土層は「沖積層である土層」や「地表面から 20m 以内の深さに存在する飽和土層」などの軟弱な地盤としている。近年、設計地震動の最大加速度の増大に伴い、一般的には液状化判定の対象にならない硬質な洪積砂層に関しても構造物の耐震性評価が求められることがある。硬質な洪積砂層を対象とした凍結サンプリング試料による液状化強度試験を実施すると、従来の軟弱な砂地盤と異なる挙動を示している。そこで、硬質な洪積砂層の液状化強度特性を分析するために、セメントを添加した再構成試料を用いた一軸圧縮試験や繰返し中空ねじりせん断試験を行い、硬質な洪積砂層の液状化強度特性の要因分析を行った。次に、硬質な洪積砂層の液状化強度特性を考慮した有効応力解析のパラメータ設定の検討を行った。有効応力解析における従来のパラメータ設定では、載荷回数に伴ってせん断ひずみは大きくなるものの、過剰間隙水圧が上昇しない材料を扱うことが難しかった。そのため、本研究ではひずみ空間多重せん断ばねモデルを用いてパラメトリックスタディを行い、その結果、硬質な洪積砂の液状化強度特性を考慮した適切な有効応力解析のパラメータ設定を行うことができた。

Key Words: *diluvial sand, liquefaction resistance, effective stress analysis, element test*

1. はじめに

1964年の新潟地震以降、液状化の研究は数多く行われ、その研究成果は各種基準に反映されてきた。また、平成 7 年(1995 年)兵庫県南部地震を契機として、我が国の耐震設計の指針類^{1,2)}は大幅に改訂された。さらに、平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震により、継続

時間が長い地震動に対して液状化による被害^{例えば 3)}が多く生じたため、液状化判定が改訂されている⁴⁾。各指針では、液状化の判定を行う土層の条件として「沖積層である土層」や「地表面から 20m 以内の深さに存在する飽和土層」のような軟弱な地盤を対象としている。例えば、道路橋示方書(V耐震設計編)・同解説⁴⁾では、「洪積層においては一般的にN値が高く続成作用により

液状化抵抗が高いことから、液状化の判定対象ではない」とされている。ここで、本研究で述べる沖積層は、完新世における堆積物および埋立土を示し、洪積層は更新世における堆積物を示す。

一方、密な砂は、一時的に有効拘束圧が0になっても、その後せん断力を加えると過剰間隙水圧が減少して有効拘束圧が回復し、有限の小さなひずみ振幅しか発生しない。この現象は“サイクリックモビリティ”といわれており、“液状化”と区別することもある⁹⁾。また、洪積砂層においても液状化の可能性について言及している報告^{例えば}も見られるが、いずれもN値が低い等の特徴がある地盤に限られている。

洪積砂層について、細粒分含有率と年代効果によって液状化強度が増加していることが報告されている。澤田ら⁹⁾は、チューブサンプリングによって採取された洪積砂層のなかで乱試料と再構成試料を用いた室内試験を実施し、堆積年代と細粒分含有率に応じて液状化強度が増加することを報告している。また、後藤ら⁹⁾は、排水条件下の繰返し載荷履歴や高温環境での圧密によって人為的に年代効果を付与した試料を作製し、液状化強度が上昇することを確認している。

近年、原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査¹⁰⁾において、液状化の構造物への影響評価が求められている。原子力発電所は極めて高い安全性を求められるため、一般的に液状化の判定の対象とならない洪積層に対して、安全性の確認が求められている。原子力発電所の耐震設計¹¹⁾では、試験結果に基づいた液状化強度特性を安全側に設定し、構造物への影響評価を実施されていることが多い。こうした評価には、例えば、地震時における地盤の有効応力の変化に応じた影響を考慮できる有効応力解析プログラム FLIP ROSE¹²⁾（以下、「FLIP」という。）が用いられている。FLIP では、繰返しせん断に伴い有効応力がゼロになり液状化する緩い砂からサイクリックモビリティの挙動を示す密な砂までを対象とした解析が実施されており、試験結果や被災事例の再現性からその適用性が確認されている¹³⁾。

一方、本研究で対象とする硬質な洪積砂層は、中期更新世の地層かつ深度20m以深に分布している硬質な砂層である。そのため、年代効果に伴う固結力があり、これに起因して液状化強度が上昇していると考えられる。このようなN値が50を超える硬質な洪積砂層について、液状化強度特性を解析的に設定した事例は、あまり見られない。表-1に一般的な砂と硬質な洪積砂層の液状化強度特性の特徴を示す。

本研究では、N値が50を超えるような硬質な洪積砂層で見られた液状化強度特性の特徴を模擬試料を用いた実験により検証した。さらにその特徴を有効応力解析において考慮できるパラメータの設定を試みた。

表-1 液状化強度特性の特徴

土質	液状化強度特性の特徴
[1] 緩い砂	比較的少ない繰返し載荷回数で有効応力が低下していき、最終的にゼロとなる。これに伴い、せん断ひずみが急増する現象が見られる。
[2] 密な砂	繰返し載荷に伴う有効応力の低下、せん断ひずみの増加が見られるが、有効応力がゼロに近づいてくると、載荷時に有効応力とせん断剛性が回復する現象（サイクリックモビリティ）が見られる。
[3] 硬質な洪積砂層	繰返し載荷に伴いせん断ひずみが徐々に増加していくが、有効応力の低下が緩やかであり、初期から載荷時に有効応力とせん断剛性が回復する現象（サイクリックモビリティ）が見られる。

2. 硬質な洪積砂層の基本物性および液状化強度特性

本研究で対象としている洪積砂層は、凍結サンプリングにより不かく乱試料が採取されている。

室内試験から得られている基本的な特性と液状化強度特性について示す。

(1) 基本物性

本研究で対象としている洪積砂層の基本物性を表-2に、粒径加積曲線を図-1に、基本物性に関する深度分布を図-2に示す。

N値が50以上で相対密度が100%以上と硬質な地盤であることがわかる。ここで、相対密度が100%を超えるのは、最大密度試験では自然地盤ほどに砂が締め固まらないことが影響していると考えられる。また、粒度分布

表-2 洪積砂層の基本物性（平均値）¹⁴⁾

N 値	細粒分含有率 (%)	相対密度 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)
50 以上	20	110	1.41

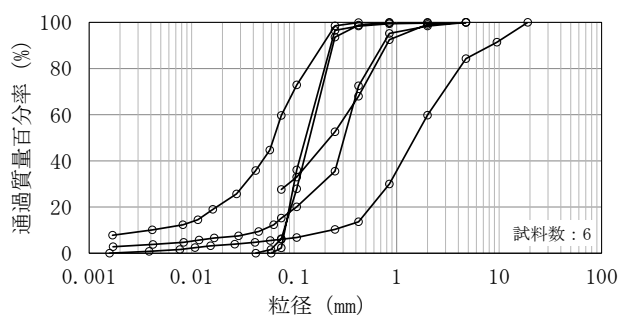


図-1 洪積砂層の粒径加積曲線¹⁴⁾

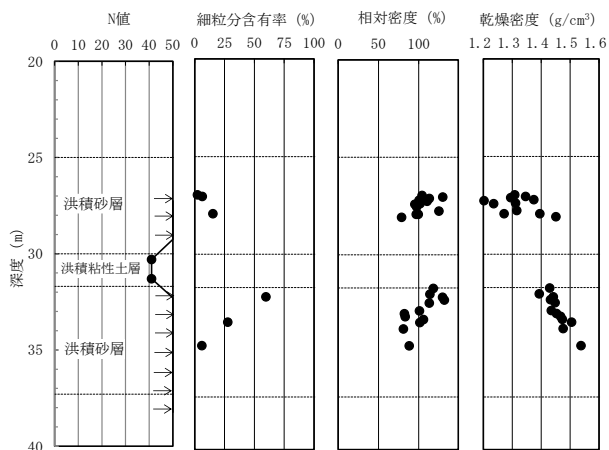


図-2 洪積砂層の基本物性に関する深度分布図¹⁴⁾

は、砂分を主体とし、0～10%の礫分を、0～30%の細粒分を含んでいる。試料によっては粒径幅が狭いものからある程度広いものまで分布している。

(2) 液状化強度特性

液状化強度試験結果から得られた洪積砂層の液状化強度曲線を図-3に、せん断ひずみおよび過剰間隙水圧比の時刻歴、有効応力経路、せん断応力-せん断ひずみ関係の一例を図-4に示す。なお、液状化強度試験は、土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法 (JGS 0543)¹³⁾および土の繰返し非排水三軸試験方法 (JGS 0541)¹⁵⁾を参考にした中空円筒供試体を用いた繰返し非排水ねじりせん断試験が実施されている。

液状化強度比 R_{L20} (両振幅せん断ひずみが 7.5%に達するまでの繰返し载荷回数が 20 回に対応するせん断応力比) が 0.57 と一般的な緩い砂と比べて大きいことが分かる。また、载荷回数に伴ってせん断ひずみは大きくなるものの、一般的な緩い砂とは異なり過剰間隙水圧が上昇しないといった特徴が見られる。

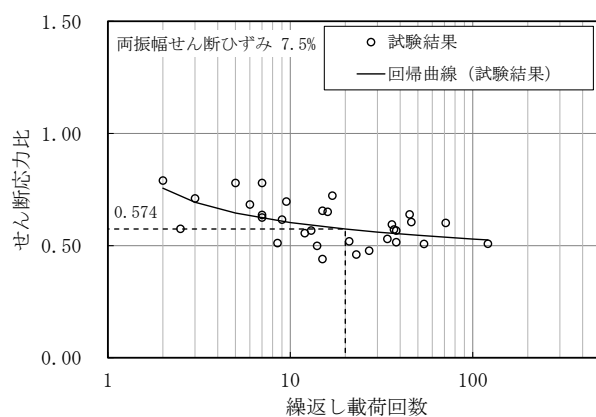
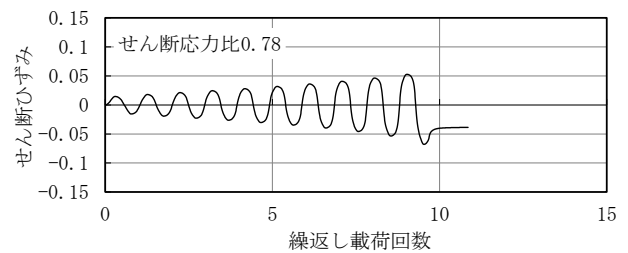
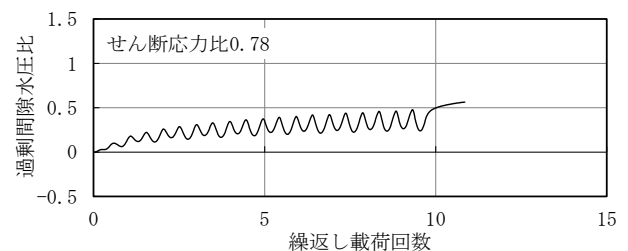


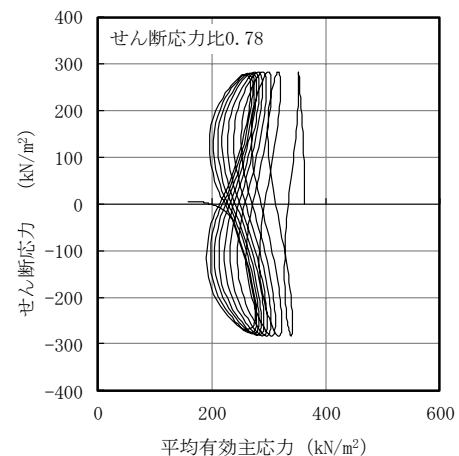
図-3 液状化強度曲線¹¹⁾



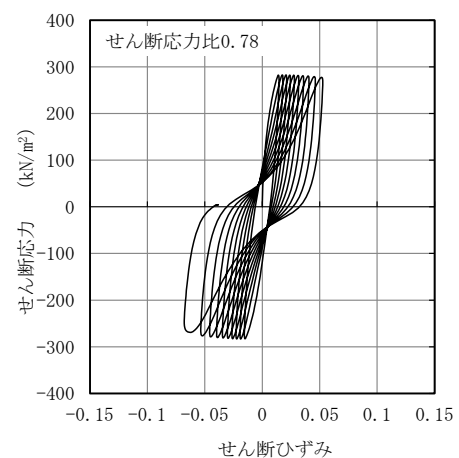
a) せん断ひずみの時刻歴



b) 過剰間隙水圧比の時刻歴



c) 有効応力経路



d) せん断応力-せん断ひずみ関係

図-4 洪積砂層の液状化強度試験結果の一例¹⁴⁾

3. 硬質な洪積砂層の液状化強度特性に関する実験的考察

著者らは、第2章で示した洪積砂層の液状化強度特性には堆積年代に起因した固結力が影響していると推察し、実験的に要因分析を行った。

(1) 模擬材料の作製

本研究では、洪積砂層の年代効果に伴う固結力に起因する見かけの粘着力を模擬するために、固化材としてセメントを混合した試料を作製した。

使用した材料は、7号珪砂および早強ポルトランドセメントである。7号珪砂の物理特性を表-3、粒径加積曲線を図-5に示す。早強ポルトランドセメントの化学成分を表-4に示す。ここで、セメントの混合による効果を確認するために実施した一軸圧縮試験結果を表-5に示す。なお、セメント無混合（7号珪砂）では供試体が自立しないため、一軸圧縮試験は実施しなかった。また、供試体の密度は、作製の容易さから相対密度60%を目標とし、養生期間は8日間とした。これらの結果より、セメント混合率3%の一軸圧縮強さがセメント混合率1%に対して約10倍となっており、液状化強度特性に対しても十分な効果があると推察されることから、本研究におけるセメントの混合率は3%とした。

模擬材料は、7号珪砂に所定の早強ポルトランドセメントと水を加え、均質になるように練り混ぜることで作製した。

表-3 7号珪砂の物理特性¹⁶⁾

土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	最大間隙比 e_{max}	最小間隙比 e_{min}
2.640	1.211	0.700

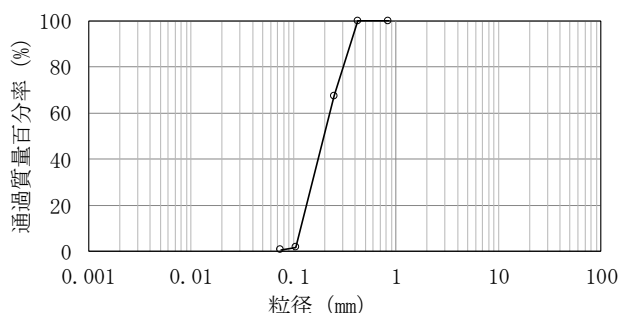


図-5 7号珪砂の粒径加積曲線¹⁶⁾

表-4 早強ポルトランドセメントの化学成分 (%)¹⁶⁾

強熱減量	酸化マグネシウム	三酸化硫黄	全アルカリ	塩化物イオン
1.2	1.4	3.0	0.53	0.012

表-5 一軸圧縮試験結果 (平均値)¹⁶⁾

セメント混合率 (%)	1	2	3
一軸圧縮強さ (kN/m ²)	34.0	144.7	329.2

(2) 供試体の作製

液状化強度試験に用いる中空供試体の作製方法について以下に示す。なお、供試体の寸法は、内径 60mm、外径 100mm、高さ 200mm である。また、固結力の有無の影響を確認するためにセメントを混合しない供試体も併せて作製した。供試体の密度は、前述の一軸圧縮試験と同様に作製の容易さから相対密度60%を目標とした。

- ① モールドを用いて7層に分けて中空供試体を作製する。（セメント混合の場合は湿潤突固め法、セメント無混合の場合は空中落下法）
- ② 供試体の乾燥を防ぐためモールド上面をラップで覆う。
- ③ 室内で3日間以上養生する。
- ④ 供試体をモールドから脱型する。（試験機に設置するまで乾燥を防ぐためラップで包装）

(3) 液状化強度試験

液状化強度試験として、第2章で示した洪積砂層と同様に土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法 (JGS 0543)¹⁵⁾および土の繰返し非排水三軸試験方法 (JGS 0541)¹⁵⁾を参考にした中空円筒供試体を用いた繰返し非排水ねじりせん断試験を実施した。

供試体を試験機に設置し、飽和・圧密させた後、ひずみ速度一定 (0.7%/min) で所定の応力に達したら反転するよう繰返しせん断を行った。

液状化強度試験の試験条件を表-6に、試験結果のうち液状化強度曲線を図-6に、せん断ひずみおよび過剰間隙水圧比の時刻歴、有効応力経路、せん断応力-せん断ひずみ関係の一例を図-7～図-8に示す。

図-6より、セメントの混合によって液状化強度比が大きくなっていることがわかる。

図-7より、セメント無混合（7号珪砂）の結果を見ると、繰返し載荷過程において、初期段階からせん断ひずみおよび過剰間隙水圧が上昇しており、液状化強度が小さい砂であることがわかる。これは一般的な緩い砂と同様の挙動である。

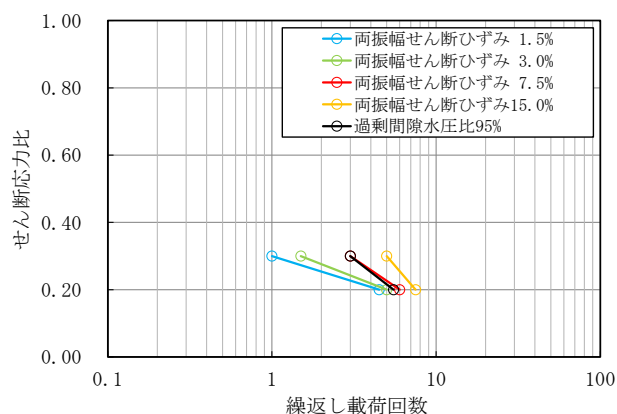
図-8より、セメント混合（混合率3%）の結果を見ると、繰返し載荷過程において、初期段階ではせん断ひずみの増加が緩やかであり、過剰間隙水圧もある程度は増加はするものの、載荷時には有効応力が回復し、サイクリックモビリティの挙動を示している。その後、ある繰返し回数に達すると、有効応力を保持したまま、せん断

ひずみが急増している様に見える。これは、表-5で示した一軸圧縮試験結果からもわかるようにセメントの混合による粒子間の固結力が影響していると考えられる。

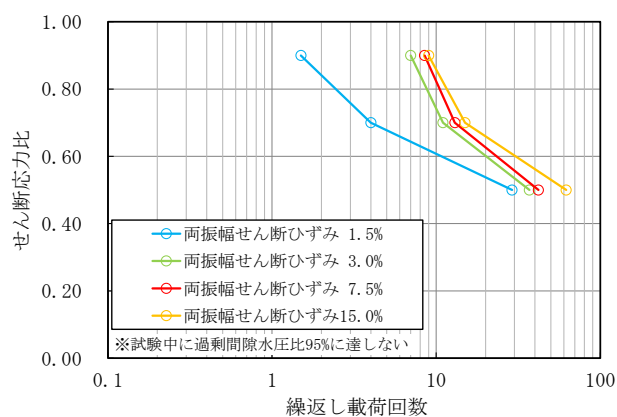
有効応力を保持したまません断ひずみが増加していく点について、第2章で示した洪積砂層と模擬試料の試験結果は定性的に同じ挙動を示している。

表-6 液状化強度試験の試験条件¹⁶⁾

相対密度 (%)	内径 (mm)	外径 (mm)	高さ (mm)	有効拘束圧 (kN/m ²)	背圧 (kN/m ²)
60	60	100	200	100	200

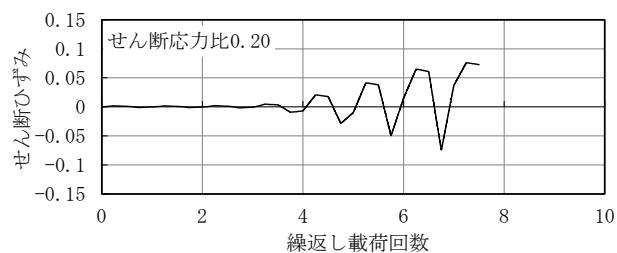


a) セメント無混合 (7号珪砂)

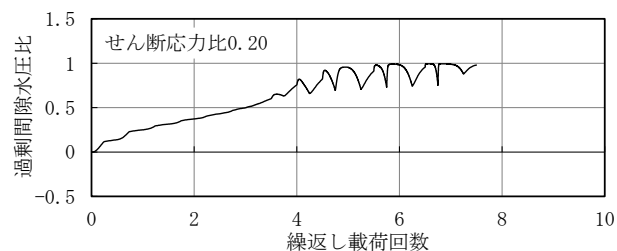


b) セメント混合 (混合率 3%)

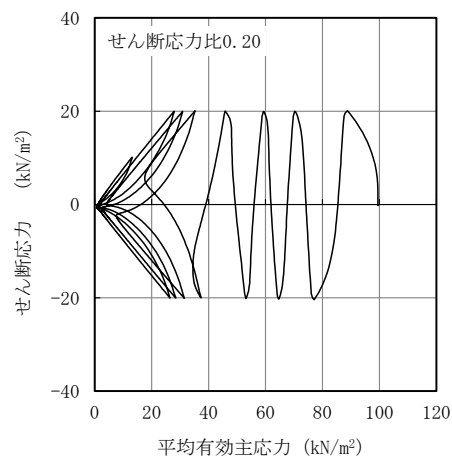
図-6 模擬試料の液状化強度曲線¹⁶⁾



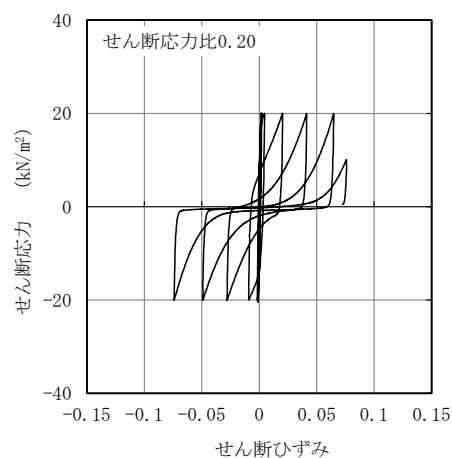
a) せん断ひずみの時刻歴



b) 過剰間隙水圧比の時刻歴

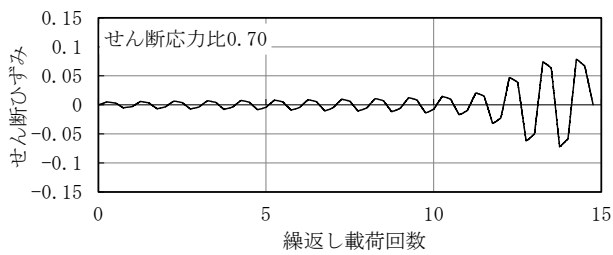


c) 有効応力経路

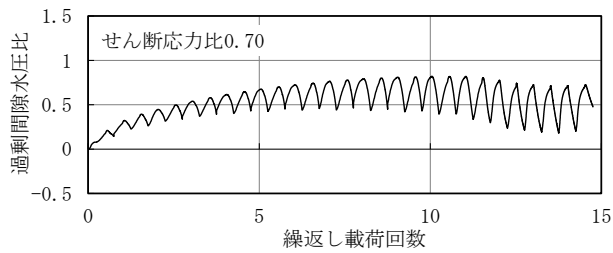


d) せん断応力～せん断ひずみ関係

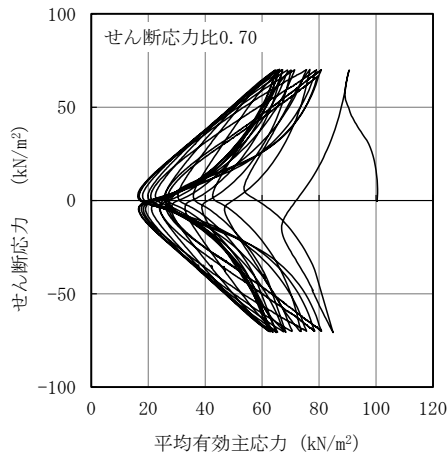
図-7 模擬材料の液状化強度試験結果の一例¹⁶⁾
(セメント無混合 (7号珪砂))



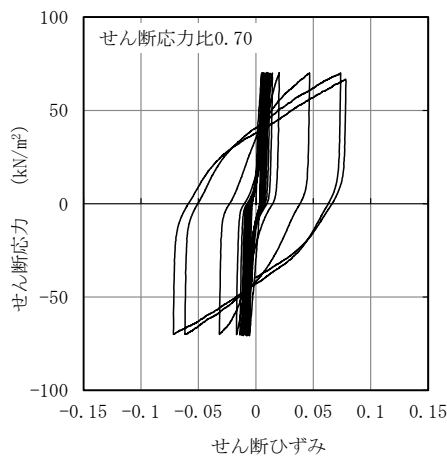
a) せん断ひずみの時刻歴



b) 過剰間隙水圧比の時刻歴



c) 有効応力経路



d) せん断応力～せん断ひずみ関係

図-8 模擬材料の液状化強度試験結果の一例¹⁶⁾
(セメント混合(混合率3%))

4. 洪積砂層の液状化強度特性を考慮した解析パラメータの設定

本章では、第2章で示した本研究で対象とする洪積砂層の液状化強度特性の特徴である载荷回数に伴ってせん断ひずみは大きくなるものの、過剰間隙水圧が上昇しないといった挙動を数値解析で再現するためのパラメトリックスタディを実施した。ここで、本研究では、試験結果から得られた挙動を要素特性として捉え、実務でよく用いられる一要素での液状化強度試験を模擬したシミュレーションによって解析パラメータの設定を行った。

本研究では、ひずみ空間多重せん断モデル^{17),18)}が導入された「FLIP ROSE ver7.4.1」を用いる。ひずみ空間多重せん断モデルの特徴を以下に示す。

- 繰返しせん断によるサイクリックモビリティ時に主応力軸の回転による変形量評価が可能である。
- 誘導異方性を考慮できる。
- 応力ひずみ関係は体積分とせん断成分を分離してダイレタンシーで関連づけている。

(1) 基本方針

FLIP では、物理特性、動的変形特性および液状化特性を規定する種々のパラメータの設定が必要である。

物理特性および動的変形特性を規定する種々のパラメータは、各種試験結果から得られる値を設定する。物理特性および動的変形特性を規定するパラメータを表-7に示す。

液状化特性を規定する種々のパラメータは、液状化強度試験結果から得られる液状化強度特性を再現するよう要素シミュレーションを行い設定する。液状化特性を規定するパラメータのうち共通としたパラメータを表-8に、液状化強度特性の調整に用いたパラメータを表-9に示す。なお、各パラメータの詳細については、参考文献 19)を参照されたい。

表-7 物理特性および動的変形特性を規定するパラメータ¹⁹⁾

質量密度	ρ	(g/cm ³)	1.91
間隙率	n		0.45
初期せん断剛性	G_m	(kN/m ²)	2.14×10^5
平均有効拘束圧	P_a	(kN/m ²)	200
ボアソン比	ν		0.33
減衰定数の上限値	H_{mx}		0.157
粘着力 ^{*1}	c'	(kN/m ²)	0.0
内部摩擦角 ^{*2}	ϕ	(°)	36.6

*1: FLIP では液状化を考慮する場合、粘着力はゼロとする必要がある。

*2: CU三軸試験より設定した値である。後述の検討ケースによっては値が変更となる。

表-8 液状化特性を規定するパラメータのうち
共通としたパラメータ

変相角	ϕ (°)	32.0
収縮的ダイレイタンスによる 体積ひずみの終局値	ϵ_d^{sm}	0.20
過剰間隙水圧上昇の初期におけ る収縮的ダイレイタンスを制 御するパラメータ	q_1	1.00
体積弾性係数の低減係数	r_k^{**}/r_k	0.50
過剰間隙水圧上昇から消散にお ける体積弾性係数の拘束圧依存 を表すパラメータ*	l_k	2.0
液状化フロントパラメータ S_0 の 下限値	S_l	0.005
基準ひずみ算定の際の S_0 の効き 方を調節するパラメータ	q_4	1.0
低減係数 r_{mp} を算定する際のせん 断ひずみに乗ずるパラメータ	r_γ	0.1
tmp 法において r_{mp} を 0 とする領 域を設定するためのパラメータ	r_{tmp}	0.5

* : 一般的に推奨値である「2.0」を用いることが多い。後述の検討ケ
ースによっては値が変更となる。

表-9 液状化特性を規定するパラメータのうち
液状化強度特性の調整に用いたパラメータ

収縮的ダイレイタンスを制御 するパラメータ	$r_{\epsilon_{dt}}$
収縮的および膨張的両ダイレイ タンスを制御するパラメータ	r_{ϵ_d}
過剰間隙水圧上昇の後半におけ る収縮的ダイレイタンスを制 御するパラメータ	q_2
液状化抵抗曲線の下限を制御す るパラメータ	c_1

要素シミュレーションは、1要素のFEMモデルを作成し、第2章の液状化強度試験と同様に等方圧密した後、応力制御による繰返しせん断を行う。いずれの過程も非排水条件で行う。要素シミュレーションの方法を図-9に示す。

(2) 検討ケース

検討ケースは、ケース①～③の計3ケースである。

ケース①は、前節で記した通り物理特性および動的変形特性を規定するパラメータを表-7に示すように各種試験結果に基づき設定し、表-9に示す液状化特性を規定するパラメータのみを調整するものである。なお、表-7に示す内部摩擦角は三軸圧縮試験結果より設定されている。

ケース②は、ケース①から表-7に示した動的変形特性を規定するパラメータのうち内部摩擦角を見直した上で、表-9に示す液状化特性を規定するパラメータを設定するものである。これは、ケース①では内部摩擦角を三軸圧

縮試験結果から得られる有効応力表示の強度定数から設定されており、これを液状化強度試験から得られる有効応力経路と比較すると、見かけの内部摩擦角と差異があることから、液状化強度試験から得られる有効応力経路における見かけの内部摩擦角を採用した場合について検討したものである。三軸圧縮試験結果から得られる内部摩擦角と液状化強度試験から得られる有効力経路における見かけの内部摩擦角の比較を図-10に示す。なお、いずれの内部摩擦角も粘着力ゼロを仮定した上での設定である。

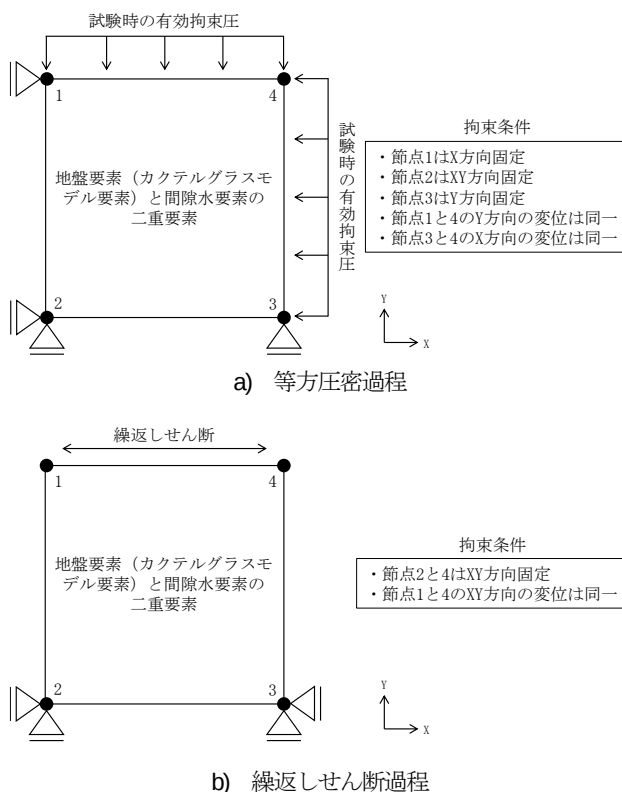


図-9 要素シミュレーションの方法

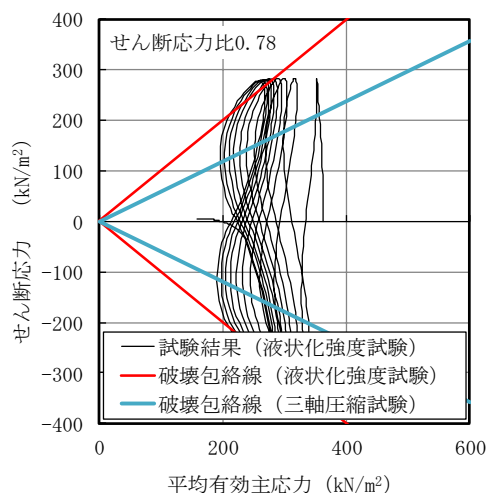
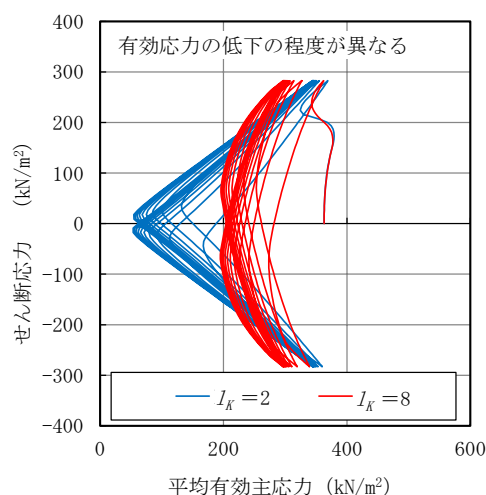
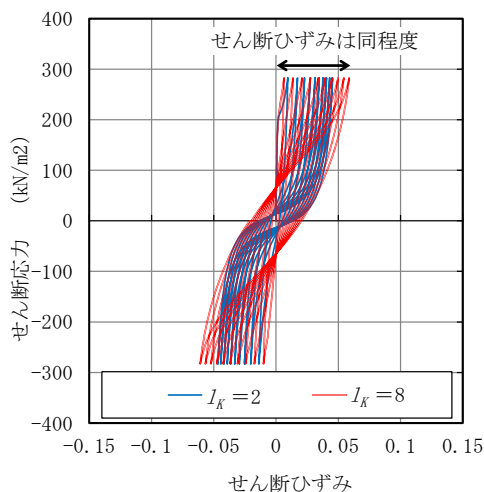


図-10 内部摩擦角の比較

ケース③は、ケース②から表-8 に示す液状化特性を規定するパラメータのうち過剰間隙水圧上昇から消散における体積弾性係数の拘束圧依存性を表すパラメータ l_k を見直した上で、表-9 に示す液状化特性を規定するパラメータを設定するものである。パラメータ l_k は、同じせん断応力で発生するせん断ひずみ量を変えずに、有効応力の低下を制御することができる。パラメータ l_k の効果を図-11 に示す。一般的にパラメータ l_k は、推奨値である「2.0」を用いることが多い。



a) 有効応力経路



b) せん断応力-せん断ひずみ関係

図-11 パラメータ l_k の効果

(3) 解析結果と考察

各ケースの解析パラメータの設定結果を表-10 に、要素シミュレーションの結果を図-12 に示す。いずれの設定結果も、液状化強度曲線、せん断ひずみの時刻歴、せん断応力-せん断ひずみ関係について試験結果を概ね再現できていることがわかる。過剰間隙水圧比の時刻歴と

有効応力経路については、ケース①とケース②では試験結果よりも有効応力の低下が大きくなっており、試験結果を上手く再現できていない。一方、ケース③では試験結果を概ね再現できていることがわかる。

したがって、表-9 に示すパラメータを調整することで、せん断応力-せん断ひずみ関係については概ね再現することができた。一方で、有効応力経路については試験結果と整合した内部摩擦角の設定および有効応力の低下の制御（パラメータ l_k の調整）により再現できた。特に、本研究で対象とした硬質な洪積砂層の液状化強度特性の特徴である載荷回数に伴ってせん断ひずみは大きくなるものの、過剰間隙水圧が上昇しないといった挙動については、有効応力の低下を制御できるパラメータ l_k の調整が有効であると考えられる。

表-10 パラメータの設定結果

ケース	①	②	③
ϕ (°)	(36.6)*	85.0	85.0
l_k	(2.0)*	(2.0)*	8.0
$r_{e,k}$	1.15	7.00	10.0
$r_{e,d}$	0.20	0.20	0.20
q_2	1.4	2.7	8.0
c_1	11.0	3.5	3.4

*：括弧内の数値は、(I)基本方針にて共通としたパラメータである。

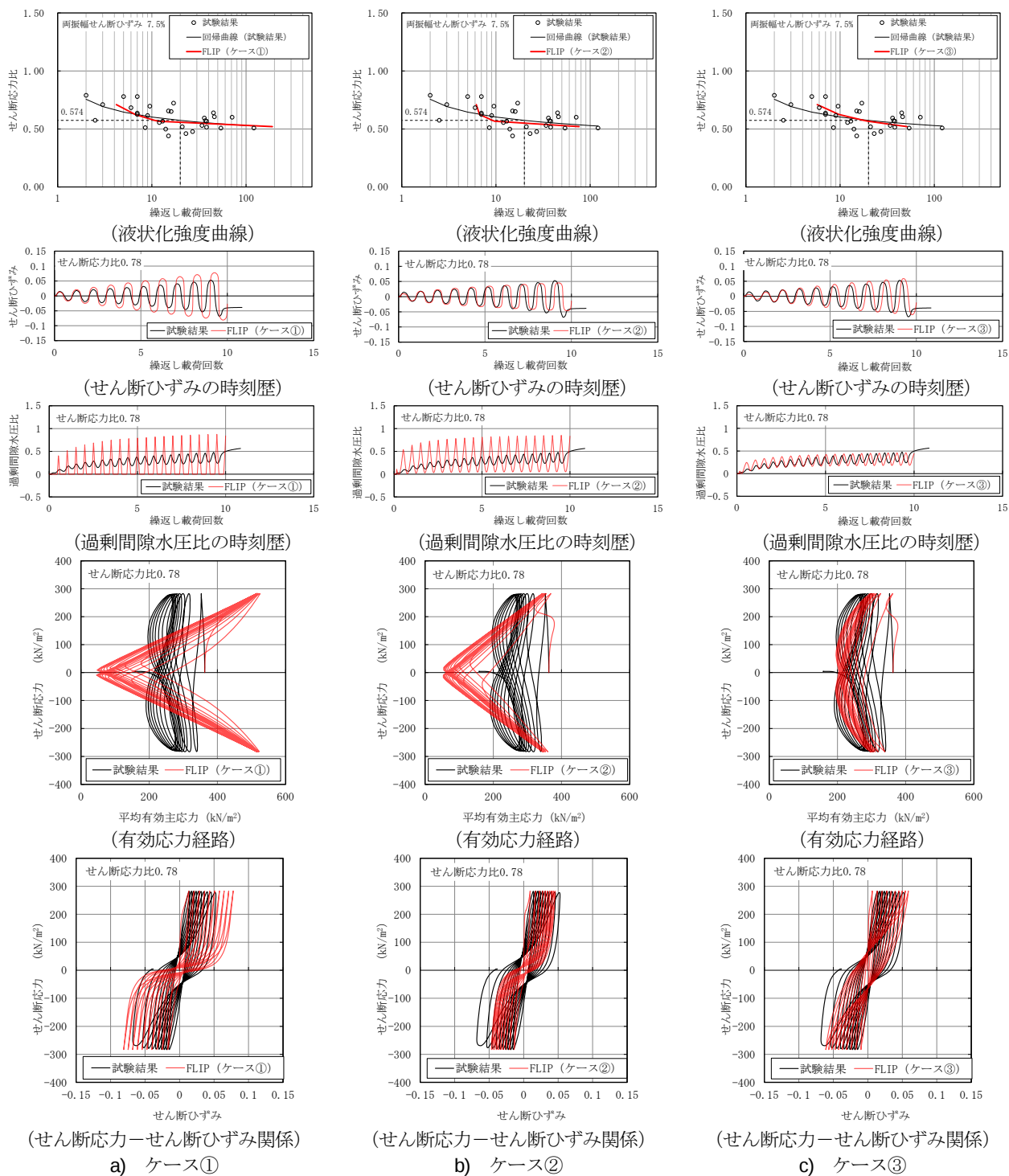
5. まとめ

本研究では、一般的には液状化検討の対象にならない硬質な洪積砂層の液状化強度特性について、室内実験と数値解析の観点から考察することを目的とした。対象材料の液状化強度比は一般的な緩い砂と比べ大きく、また、液状化強度試験において載荷回数に伴ってせん断ひずみは大きくなるものの、過剰間隙水圧が上昇しないという特徴が見られた。この液状化強度試験から得られた挙動について、要因分析およびその特性を考慮した有効応力解析のパラメータ設定の検討を行った。

(1) 硬質な洪積砂層の液状化強度特性に関する実験的考察

洪積砂層の固結力を模擬した試料を作成し、実験で対象材料の挙動を再現することにより、その要因について分析した。

模擬試料を用いた液状化強度試験を行った。模擬試料（セメント混合率 3%）の液状化強度試験結果の主な特徴を以下に示す。



※黒線：試験結果，赤線：FLIPによる解析結果（試験結果と同じ繰返し回数まで表示）

図-12 各ケースの要素シミュレーション結果

(2) 硬質な洪積砂層の液状化強度特性を考慮した解析 パラメータの設定

硬質な洪積砂層の液状化強度特性を数値解析で再現するためのパラメトリックスタディを実施した。本研究では、実務設計と同様にひずみ空間多重せん断モデルを用いた有効応力解析 (FLIP ROSE) による 1 要素のシミュレーションで検討した。ただし、局所的なひずみの増加を 1 要素で表現することはできないので、有効応力を保持したまません断ひずみが進展していく挙動をせん断ひずみ量を変えずに有効応力の低下を制御できるパラメータで代替することにした。

パラメトリックスタディは以下の 3 ケースを実施した。

- ① 各種試験結果に基づいてパラメータを設定したケース
- ② 液状化強度試験の有効応力経路に合わせて、内部摩擦角をケース①から見直したケース
- ③ 過剰間隙水圧上昇から消散における体積弾性係数の拘束圧依存性を表すパラメータ k をケース②から見直したケース

3 ケースとも液状化特性を規定するパラメータを調整することで、せん断応力-せん断ひずみ関係については概ね再現することができた。一方で、有効応力経路については試験結果と整合した内部摩擦角の設定および有効応力の低下の制御 (パラメータ k の調整) により再現できた。

(3) 今後の課題

本研究では、新たに有効応力解析 (FLIP ROSE) における洪積砂層のモデル化を行い、カクテルグラスモデルを用いて、洪積砂層の液状化強度特性 (せん断ひずみは大きくなるものの、過剰間隙水圧の上昇が緩やかな現象) を再現する解析パラメータを設定した。

しかしながら、本研究で対象とした硬質な洪積砂層の液状化強度試験結果は、試験数も限られており、材料も 1 種類のみであるため、今後は対象とする試験数および材料を増やして検討を行い、有効応力解析への適用性を確認する必要がある。また、模擬材料による液状化強度試験結果において、局所的にひずみが増加する現象が見られたことから、本試験を要素試験ではなく模型実験と考え、複数要素を用いたシミュレーションによる検討も実施していきたい。

謝辞： 模擬材料を用いた室内試験に関して東京大学・古関潤一教授より多くの御助言をいただきました。また、FLIP を用いた解析パラメータの設定に関して京都大学・井合進名誉教授より多くの御助言をいただきました。ここに記し深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書 (V 耐震設計編)・同解説，平成 14 年 3 月。
- 2) 社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，平成 19 年 7 月。
- 3) 浦安市液状化対策技術検討調査委員会：資料・議事概要 http://www.city.urayasu.lg.jp/shisei/johokokukai/shin_gikai/shichoukoushotsu/1002796/1002934.html (2020/7/8 閲覧)
- 4) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書 (V 耐震設計編)・同解説，平成 24 年 3 月。
- 5) 社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，平成 30 年 5 月。
- 6) 安田進：液状化の調査から対策工まで，鹿島出版会 1988。
- 7) 森伸一郎，池田悦夫：東京層砂層の液状化の痕跡調査と一考察，土木学会論文集 No.582, III-41, pp.247-263, 1997。
- 8) 澤田亮，川西智浩，大木基裕：洪積砂地盤における液状化強度の推定に関する一考察，地震工学研究発表会報告集 28 巻，2005。
- 9) 後藤茂，東畑郁生：排水条件下の繰返しせん断履歴や高温環境での圧密によって年代効果を付与した砂質土試料の液状化特性，地盤工学ジャーナル Vol.9, No.4, pp.707-719, 2014。
- 10) 原子力規制委員会：耐震設計に係る工認審査ガイド，平成 25 年 6 月。
- 11) 東京電力ホールディングス株式会社：第 836 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合における当社説明資料の掲載について，柏崎刈羽原子力発電所第 7 号機地盤の支持性能について (補足説明資料)，<https://www.tepco.co.jp/press/news/2020/pdf/200218b.pdf> (2020/7/27 閲覧)。
- 12) Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O. and Ueda, K. : Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geotechnics, Vol.35, No.3, pp.360-392, 2011。
- 13) FLIP 研究会 14 年間の検討結果まとめ WG : FLIP 研究会 14 年間の検討成果のまとめ (事例編)，<http://www.flip.or.jp/file/jirei.pdf> (2020/6/24 閲覧)。
- 14) 東京電力ホールディングス株式会社：原子力発電設備の新規制基準への対応と防災業務計画，(新規制基準適合性に係る審査会合説明資料) 資料 1-4 柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉 液状化影響の検討方針について，2017 年 1 月 24 日，https://www.tepco.co.jp/about/power_station/disaster_prevention/2017/pdf/nuclear_power_170124_04.pdf (2020/7/27 閲覧)。
- 15) 社団法人地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，2004。
- 16) 金井勇介，中瀬仁，富田真之，山田理紗，末広俊夫：セメント混合材を用いた硬質な洪積砂層の液状化強度特性に関する検討，第 40 回地震工学研究発表会，2020。(投稿中)
- 17) Iai, S., Kameoka, T. and Matsunaga, Y. : Numerical (Class A) prediction of Model No.12, Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems (VELACS), Balkema, pp.1035-1040, 1993。

- 18) Iai, S. and Ozutsumi, O. : Yield and cyclic behavior of a strain space multiple mechanism model for granular materials, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 29(4), pp.211-240, 2005.
- 19) 井合進, 飛田哲男, 小堤治 : 砂の繰返し载荷時の挙動モデルとしてのひずみ空間多重モデルにおけるストレスダイレイタンスー関係 : 京都大学防災研究所年報, 第 51 号 B, 平成 20 年 6 月.

PARAMETER SETTING STUDY ON NONLINEAR DYNAMIC EFFECTIVE STRESS ANALYSIS OF LIQUEFACTION RESISTANCE OF VERY DENSE DILUVIAL SAND

Kyohei SATO, Junichi HYODO, Yoshikazu SHINGAKI, Yukio TAMARI,
Masayuki TOMITA, Risa YAMADA and Toshio SUEHIRO

The soft ground consisting of the saturated alluvial sand deposit is usually examined for the soil liquefaction potential. Due to the recent increase in seismic design force, the liquefaction resistance of very dense diluvial sand is also sometimes required for the seismic-assessment of the important structure. It is confirmed that the frozen sample has different liquefaction characteristics from a liquefiable sand material in the laboratory test. Under undrained cyclic shear loading, the shear strain increased and the excess pore water pressure did not increase. We analyzed the characteristics on the basis of the simulant material experiment and the numerical simulation. By using the reconstituted soil-cement mixture, we conducted a uniaxial compression test and a cyclic torsional shear test on hollow cylindrical specimen, and confirmed the similar liquefaction characteristics. In addition, we were able to simulate numerically the characteristics by parameter setting of a strain space multiple mechanism model introduced into the effective stress finite element method.