

土粒子の沈降に基づくポスト液状化過程

鶴見哲也¹・中澤博志²・水本邦男³・渡邊啓行⁴

¹正会員 工修 株式会社システムプランニング東京 (〒143-0016 東京都大田区大森北 1-19-8-6F)

²正会員 工修 東京理科大学助手 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

³正会員 工修 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 関東支社 (〒135-0016 東京都江東区東陽 3-22-6)

⁴フェロー会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保 255)

1964年に発生した新潟地震以来、液状化の研究は主としてその発生条件の解明に重点がおかれてきた。また、近年では地震動作用中における液状化地盤の動的挙動の解明も進んでいる。一方で、過去の被害地震では地震動停止後も長時間にわたって地盤の液状化状態が続いていたことが目撃されているにも関わらず、ポスト液状化過程に着目した研究は非常に少ない現状にある。しかし、ポスト液状化過程の解明は液状化地盤の過渡的な挙動や構造物への被害を検討する上で重要な研究テーマであると考えられる。本研究では、ポスト液状化過程に関する既往の実験結果から、液状化が土粒子の沈降・再堆積現象であると捉え土粒子の沈降理論を誘導した。また、既往の実験について実施したシミュレーションにより理論の妥当性を検証した。

Key Words : *liquefaction, post-liquefaction, excess pore water pressure, dissipation, sedimentation*

1. はじめに

地震による砂の液状化に関する研究は1964年に相次いで起こったアラスカ地震と新潟地震を契機として活発に行われるようになったが液状化現象そのものはこれよりも前に認知されていた。1961年にFlorin and Ivanov¹⁾によって発表された論文¹⁾はこの分野における最も初期の研究成果の一つである。Florin and Ivanov¹⁾は砂地盤の液状化に伴う構造物の変位が液状化の継続する時間および液体のように振舞う液状化した地盤の粘性に大きく影響されると考え、様々な条件で行った土槽実験結果の考察から過剰間隙水圧の消散特性および消散時間についての検討を行っている。その中では液状化の発生に伴って生じる過剰間隙水圧が消散するのに、地盤条件によって違いはあるが、相当の時間を要することが示されている。実際、我が国で過去に発生した被害地震についての調査研究報告によると、地震動停止後も長時間にわたって液状化が継続していたことが知られている。例えば、新潟地震(1964)、日本海中部地震(1983)、鳥取県西部地震(2000)および芸予地震(2001)における被災者の目撃談^{2), 3), 4), 5)}によれば、地震が終わって暫くした後に地面から砂を含む地下水が噴き出す噴砂現象が発生し、それは数十分から数時間にわたって続いたとされている。また、新潟地震では地震後数分の間に昭和

橋の落橋が目撃²⁾された。さらに、鳥取県西部地震で液状化被害が著しかった竹内団地でも地震後に液状化による地盤の沈下や水平変位が目撃⁴⁾されている。このように、地震動停止後も液状化が長時間継続することや構造物に被害を及ぼすことが知られており、噴砂現象や液状化地盤の側方流動問題について考える場合には、これらが液状化に伴って発生するものであるから、液状化がどのようにして終息するのか、すなわちポスト液状化過程についても検討が必要であると考えられる。そこで、以下ではポスト液状化過程に関する研究について概観することにする。

ポスト液状化過程に関する研究は1961年のFlorin and Ivanov¹⁾に始まり、以来既に約40年経過している。ところが、今日までの研究の多くは液状化発生条件や液状化した土の動的挙動の解明を主たる目的としていたことから、これまでに報告されているポスト液状化過程に関する研究は数えるほどしかない現状にある。それら数少ない研究報告を見てみると、ポスト液状化過程の解明に対して土粒子の沈降現象または圧密現象のどちらかに着目した議論の展開がなされていることがわかる。まず、ポスト液状化過程を土粒子の沈降現象として捉えた研究としてFlorin and Ivanov¹⁾、Scott⁶⁾および大川⁷⁾が挙げられる。Florin and Ivanov¹⁾は、液状化現象を振動や衝撃などの外力によって砂の骨格が完全に崩壊して土粒子が間隙水中を

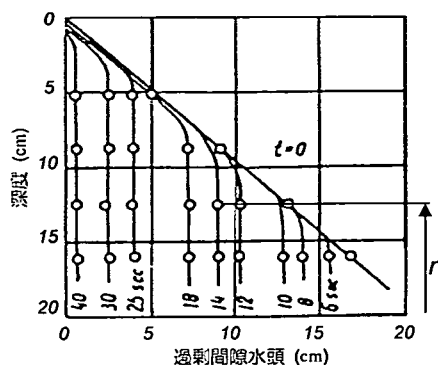


図-1 過剰間隙水圧の分布形状
(Florin and Ivanov¹⁾より抜粋)

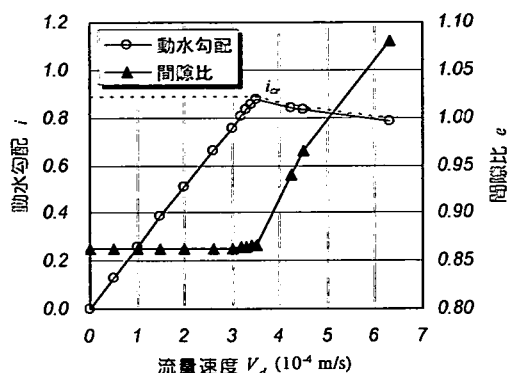


図-2 ボイリング実験結果 (吉見¹¹⁾)

沈降し元の状態より密になって再堆積する一連の現象と捉え、土槽実験で観察された過剰間隙水圧の消散特性を説明した。その中で、土粒子は再堆積するまでの沈降距離が短い液状化層底部から順次再堆積するから、ポスト液状化過程では土粒子が沈降中の液状化部分と既に再堆積して固まった部分の2つの部分が存在し、その境界（以下「再堆積面」）は時間の経過に伴って地表に向かって上昇することを示した。このため、液状化層上部ほど液状化状態が長時間続き沈下量も大きくなることなどを述べている。Scott⁶⁾もポスト液状化過程を土粒子の沈降・再堆積現象と考察して研究を行ったが、Scott⁶⁾は遠心載荷実験で観察された再堆積部分における過剰間隙水圧の消散特性に着目し、再堆積部分では粒状体の持つ圧縮性および有限の透水性に起因した圧密現象が生じる可能性があることを示した。ここで、Florin and Ivanov¹⁾の研究はポスト液状化過程の全体を説明しようとするものであったのに対して、Scott⁶⁾の研究は再堆積部分での過剰間隙水圧の消散特性に焦点をあてた研究であったと言える。大川⁷⁾は思考実験から液状化時に過剰間隙水圧が発生する物理的な原因が土粒子の沈降であるとした上で、液状化における粒径の影響、継続時間、ドレーン工法の効果、噴砂、地盤の移動、および、再液状化について考察している。他方、圧密現象の観点からポスト液状化過程を説明した代表的な研究として國生^{8), 9)}、大林・佐々木¹⁰⁾の研究がある。國生^{8), 9)}は円筒形土槽に構築した模型地盤を衝撃により一斉に液状化させる実験を行った。実験では透水性の悪い中間層の直下に水膜が生成されることが観測され、それが側方流動や再液状化現象に寄与する可能性を示唆している。さらに、実験で見られた過剰間隙水圧の消散特性および砂層の沈下特性について一次元の自重圧密解析によるシミュレーションを行い実験の結果を

説明できることを示した。大林・佐々木¹⁰⁾は均質な模型地盤に対して行った液状化実験から過剰間隙水圧の消散過程について、一次元圧密で近似するためには体積圧縮係数が変化すると捉えねばならないと述べている。

以上のように、ポスト液状化過程に関する研究は必ずしもその数は多くないが、土粒子の沈降現象または圧密現象という観点からのアプローチが図られ、過剰間隙水圧の消散および沈下特性に関する知見が得られてきている。このような現状の中で本研究は土粒子の沈降現象に着目した研究に位置付けられる。本論では先ず、國生⁸⁾の水膜実験⁸⁾について土粒子の沈降現象から実験結果を説明することができることを述べ、次いで土粒子の沈降運動について理論的なアプローチからの定式化を行った。さらに、提案した理論に基づいて國生⁸⁾の水膜実験⁸⁾のシミュレーション解析を実施し理論の妥当性を検証した。

2. Florin and Ivanov の研究

本研究は土粒子の沈降現象に着目してポスト液状化特性について検討を行ったものであり、その基本的な考え方はFlorin and Ivanov¹⁾に基づくものである。そこで本章ではFlorin and Ivanov¹⁾の研究について少し詳しく説明しておくことにする。

Florin and Ivanov¹⁾が実施したポスト液状化過程に関する実験の一つに、層厚20cmのきれいな砂からなる模型地盤に衝撃を加えて一斉に液状化させたものがある。図-1はその実験で観測された過剰間隙水圧（水頭）の消散状況を示している。液状化発生直後、過剰間隙水圧は三角形の分布形状を呈しその勾配は初期有効上載圧相当であると述べている。ただし、そ

のような勾配になる理由については明記されていない。過剰間隙水圧の消散過程では台形状の分布形状を変化させながら消散して行く様子が特徴的である。Florin and Ivanov¹⁾は消散過程における台形状の過剰間隙水圧分布について、深度方向に有効上載圧相当の勾配がある部分では未だ土粒子が沈降している状態にあり、深度方向への勾配がない部分では土粒子は既に再堆積し静止した状態にある、すなわち、台形状分布の鈍角の位置を境としてその上下で土粒子の運動状態が異なることを述べ再堆積面の存在を示した。この再堆積面は時間の経過に伴い液状化層底面から表面に向かって上昇することが図-1からわかる。したがって、液状化層の上部ほどより長時間にわたって液状化状態が継続することおよび沈下量がより大きいことが理解できる。

Florin and Ivanov¹⁾は再堆積面が液状化層底面からの高さ r まで到達するのにかかる時間 t をダルシー則を適用して次のように与えている。

$$t = \frac{1}{k} \frac{\gamma_w}{\gamma'} \frac{n_0 - n}{1 - n} r \quad (1)$$

ここに、 k : 透水係数、 γ_w : 水の単位体積重量、 γ' : 液状化前の土の水中単位体積重量、 n_0 : 液状化前の土の間隙率、および、 n : 再堆積後の土の間隙率である。この式の中で γ'/γ_w は、間隙の減少に伴って排出される間隙水の土粒子から見た見かけの流れの動水勾配であり、これはボーリング時の限界動水勾配 i_{cr} に相当する。すなわち、土粒子の沈降現象において $ki_{cr}t$ は時間 t の間に土粒子が沈降する距離を意味する。また、 $(n_0 - n)/(1 - n) \cdot r$ は層底面からの高さ r における沈下量つまり土粒子が再堆積するまでの沈降距離を意味している。

ここで、一般にダルシー則が適用される浸透問題では想定する系において水の流入出があるのに対し、土粒子の沈降問題では水の流入出がないので本来これらは異なる物理現象であるから、式(1)におけるダルシー則の適用性が問題となる。しかし、土粒子が沈降中にある部分の微小要素を考えると、そこでは水の流入出があるので現象の本質は類似していると言える。このことから、Florin and Ivanov¹⁾は沈降中の土粒子から見た間隙水の見かけの流れを浸透と見なしてダルシー則を適用したと考えられる。また、吉見¹¹⁾が示している豊浦砂のボーリング実験例(図-2)から限界動水勾配 i_{cr} までダルシー則が適用可能であることがわかる。以上から、ポスト液状化過程における土粒子の沈降現象の説明にダルシー則を適用することは可能であると考えられる。

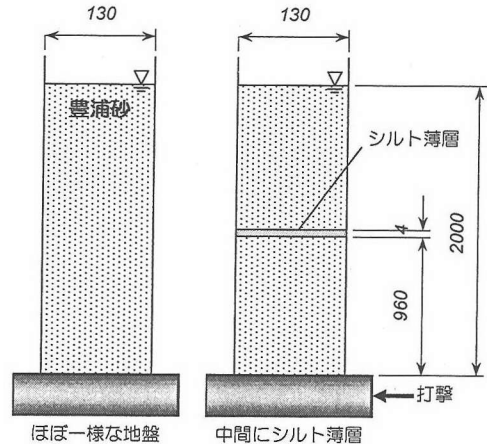


図-3 國生⁸⁾の実験模型 (単位: mm)

3. 國生の実験

(1) 実験および結果の概要

直径 13cm、高さ約 2m の円筒形土槽に豊浦砂等で模型地盤を作成し、土槽底部を一回打撃することによって地盤を一斉に液状化させその後の過剰間隙水圧の消散状況や地表面等の沈下を観測したものである。実験模型の概要を図-3に示す。

ほぼ一樣な模型地盤の実験で観測された過剰間隙水圧の消散状況を示した図-4には Florin and Ivanov¹⁾の実験結果と同じ消散特性が認められる。図-5に示す地表面の沈下の時刻歴では沈下が時間に比例して増大しており、これは地表面の沈下速度がほぼ一定であったことを示している。

模型地盤の中間に薄いシルト層を配置した実験で得られた過剰間隙水圧の消散状況を図-6に示す。透水性の悪いシルト薄層位置でかなり大きな動水勾配が生じているのが分かる。図-7は模型地盤の地表面における沈下、シルト薄層より下部の砂層上面における沈下およびシルト薄層直下に形成される水膜厚さの時刻歴である。液状化発生後約 20 秒で下部砂層上面の沈下が完了していることがわかる。この間水膜の厚さが増大しているが、その後は減少に転じている。また、地表面における時刻歴は2つの線形変化過程から構成されており、液状化発生から約 70 秒までとそれから沈下が完了する約 240 秒までの2つのほぼ一定な沈下速度が認められる。

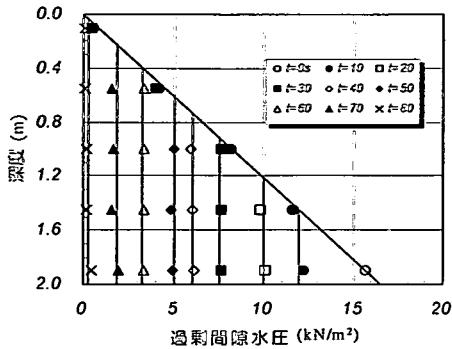


図-4 ほぼ一様な地盤における過剰間隙水圧の消散分布 (國生⁸⁾)

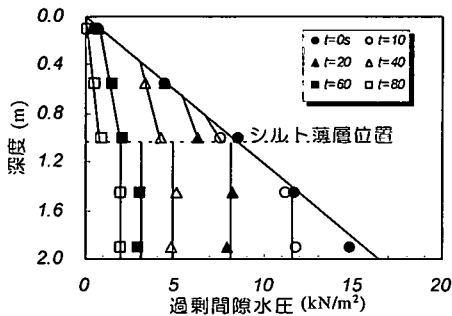


図-6 中間シルト層がある地盤における過剰間隙水圧の消散分布 (國生⁸⁾)

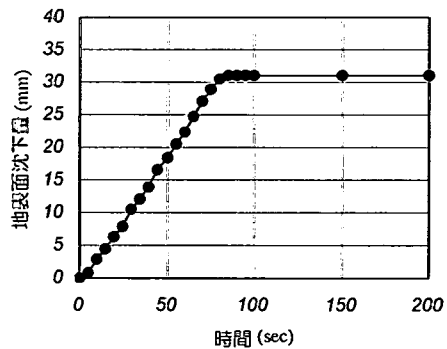


図-5 ほぼ一様な地盤における地表面沈下の時刻歴 (國生⁸⁾)

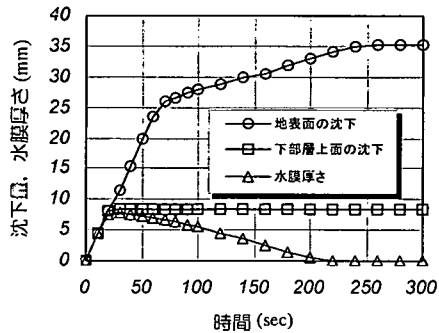


図-7 中間シルト層がある地盤における沈下と水膜厚さの時刻歴 (國生⁸⁾)

(2) 実験結果の解釈

図-8は、國生⁸⁾が実施した一次元の自重圧密によるシミュレーション結果である。下部砂層および地表面における最終沈下量についてはシミュレーションにより良好に再現されているが、この実験で特徴的な下部砂層に関する20秒付近の折れ点および地表面に関する2つの線形変化過程についての再現度は必ずしも十分ではないようである。

ここで、土粒子の沈降と再堆積に基づく考察によればそれらの折れ点の持つ意味を次のように解釈できる。すなわち、下部砂層上面付近の土粒子は初め等速で沈降し約20秒後に再堆積して静止する。他方、地表面付近の土粒子は初め有効応力のない状態で約70秒間等速沈降するが、沈降速度の遅いシルト薄層に上部砂層全体が堆積するとその後は上部砂層とシルト薄層が一体となってほぼ等速で沈降を続ける。そして、シルト薄層を含む沈降中の土塊が既に再堆積の完了した下部砂層上に堆積することによって全ての土粒子の運動が静止するとともに過剰間隙水圧が完全に消散する。

以上のように、沈下の時刻歴が線形変化過程を示すという実験事実に対して、線形圧密方程式の解は沈下が

指数関数的に増大するものである。したがって、ポスト液状化過程を圧密現象としてではなく土粒子の沈降現象として捉えた方が國生の実験結果とより整合的であると考えられる。

4. 土粒子の沈降理論

土粒子の沈降運動を定式化するにあたり、図-9のように層厚 H で地表面が水平で側方に無限に連続し粒径が均一で均質な飽和砂地盤を想定する。また、地震外力により層全体が一斉に液状化するものとする。ここで、既往の被害地震で目撃されたかなり長時間にわたる噴砂の継続が長時間にわたって液状化が継続していたことを裏付けると考えれば、長くてもたかだか1分程度の地震動を先の模型実験における衝撃と類似な外力と見なすことによって、地震動終息時刻と液状化発生時刻とが近似的に一致すると見なすことができる。

ポスト液状化過程において土粒子が未だ沈降中の薄層要素(厚さ dz)を取り出し、その単位面積当たりに作用する鉛直方向の力を示したものが図-10で

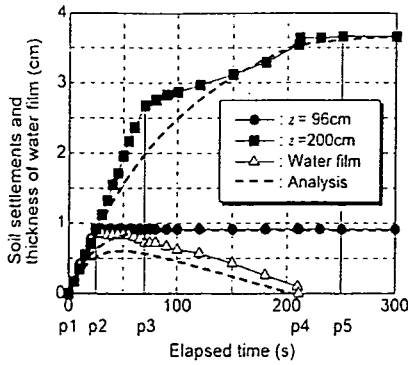


図-8 自重圧密シミュレーション解析結果 (國生⁹⁾より抜粋)

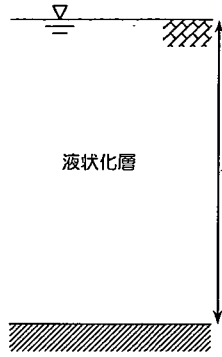


図-9 液状化地盤モデル

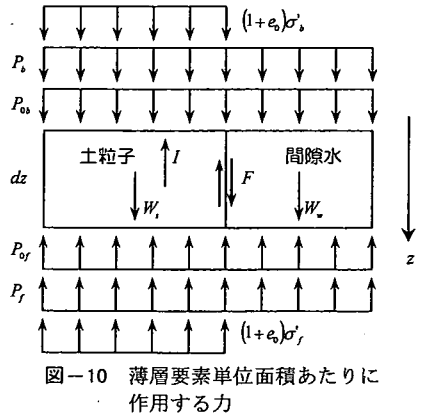


図-10 薄層要素単位面積あたりに作用する力

ある。図中、 W_s : 土粒子の重量、 W_w : 間隙水の重量、 P_0 : 静水圧、 P : 過剰間隙水圧、 σ' : 有効鉛直応力、 I : 土粒子の運動の慣性力および F : 土粒子と間隙水の相互作用力である。静水圧、過剰間隙水圧および有効鉛直応力の下添え字 f 、 b はそれぞれ土粒子の沈降方向に対して要素の前面・背面に作用する外力であることを示している。また、地表面を原点として深度方向に z 座標を取るものとする。

ここで、有効鉛直応力 σ' を考慮したのは國生の水膜実験で認められたように沈降速度の速い部分とその下位にある沈降速度の遅い部分に堆積して、土粒子は沈降中であっても有効鉛直応力を生じる場合が想定されるからである。この有効鉛直応力 σ' は土骨格に作用する単位面積当たりの力であるから、土粒子部分だけに作用する力は $(1+e_0)\sigma'$ となる。ここに、 e_0 : 液状化層の間隙比である。また、國生の実験結果 (図-5) から土粒子の沈降速度は液状化の発生とほぼ同時に等速状態となることが予見されるが、その理由をある程度明確にすることを目的として土粒子の運動の慣性力 I を考慮することとした。

図-10 において、土粒子部分についての運動方程式および間隙水部分についての釣合式を立て、それら 2 式から内力である土粒子と間隙水の相互作用力 F を消去することにより次式が得られる。

$$\rho_s \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \gamma' \left(\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \sigma'}{\partial z} \right) \quad (2)$$

上式において、 ρ_s : 液状化層の乾燥密度、 u : 土粒子の沈降変位および γ' : 液状化層の水中単位体積重量である。また、 $\partial P / \partial z = (P_f - P_s) / dz$ 、 $\partial \sigma' / \partial z = (\sigma'_f - \sigma'_s) / dz$ である。

土粒子から見た間隙水の見かけの流れについてダルシー則を適用することにより土粒子の沈降に関する次の運動方程式を導くことができる。

$$\rho_w \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\gamma_w}{k} \frac{\partial u}{\partial t} - \left(\gamma' - \frac{\partial \sigma'}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

ここで、上記運動方程式の慣性項について考える。液状化発生直後、土粒子が初速度ゼロから沈降を開始すると仮定した場合、この時の運動加速度は $\partial^2 u / \partial t^2 = \gamma' / \rho_s$ である。仮に、この加速度を保ったまま有効応力のない状態の等速沈降速度 $v_c (= k i_w)$ に到達するのにかかる時間 Δt を求めると $\Delta t = \rho_s k / \gamma_w$ となり、一般的な砂質土の物性として透水係数 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ (m/s) 程度を想定すれば Δt は大体 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 秒の値を採る。実際には、初速度ゼロから加速度 γ' / ρ_s で沈降を開始した土粒子は沈降速度を増すと水から受ける抵抗が大きくなり、最終的には土粒子に作用する重力と水の抵抗が釣り合って等速沈降状態となる。つまり、土粒子が等速沈降状態に至るまでにかかる実際の時間は先の Δt よりも幾分長くなるが、ここで考える液状化の継続時間に比べればはるかに短い時間であると考えることができよう。このことは、土粒子が液状化の発生とほぼ同時に等速状態にあったことを予見させる國生の実験 (図-5) から裏付けられる。したがって、式(2)において慣性項を無視することにより次式が導かれる。

$$\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \sigma'}{\partial z} = \gamma' \quad (4)$$

Florin and Ivanov¹⁾の実験結果に見られた過剰間隙水

圧の消散過程(図-1)を参照すると、この式の持つ意味を容易に理解できる。すなわち、土粒子が沈降中にある部分では有効応力が完全に失われ初期の有効上載圧相当の過剰間隙水圧の勾配を示すことから $\partial\sigma'/\partial z = 0$, $\partial p/\partial z = \gamma'$ となり式(4)の関係を満足する。他方、土粒子が再堆積した部分では過剰間隙水圧は深度方向に一定値を採ることから $\partial p/\partial z = 0$ であり、再堆積面以深の有効応力の勾配は明らかに $\partial\sigma'/\partial z = \gamma'$ であるから再堆積部分でも式(4)の関係を満足する。したがって、Florin and Ivanov¹⁾および國生の実験⁸⁾に見られた台形状の過剰間隙水圧分布を式(4)によって説明することができる。また、土粒子の沈降運動から導かれた式(4)は上向き浸透の釣合式と同じである。すなわち、着目する現象の違いはあるが土粒子と間隙水の相互作用は同等であることがわかる。

いま、再堆積後の地盤の状態もまた均質でありその時の間隙比が e であると仮定すれば、任意の時刻における再堆積面の z 座標 z_f は次式で与えることができる。

$$z_f(t) = H - \frac{v_c t}{\alpha}, \quad \alpha = \frac{e_0 - e}{1 + e_0} \quad (5)$$

また、再堆積面が z_f に到達するまでに掛かる時間については次式で与えることができる。

$$t = \frac{\alpha}{v_c} (H - z_f) \quad (6)$$

さらに、地表面の土粒子が再堆積するまでに掛かる時間を液状化継続時間 t_0 とすれば、

$$t_0 = \frac{\alpha}{v_c} H \quad (7)$$

と表すことができる。ここに、 αH : 地表面における沈下量, v_c/α : 再堆積面上昇する速度を意味している。

式(5)において定義した α は鉛直方向の地盤ひずみに相当するものであり、本研究では液状化層の沈下率と呼称する。式(7)からわかるように、沈下率 α の値は液状化の継続時間に寄与する要因の一つであるがこの値を厳密に評価することは容易ではない。しかし、実験的・経験的に α が採る値の範囲を推測することは可能であると考えられる。例えば、大林ら¹²⁾がガラスビーズおよび豊浦砂について行った実験結果によれば、液状化に伴って生じる鉛直方向の地盤ひずみは主として初期の間隙比に依存し、その最大値は 3~4%

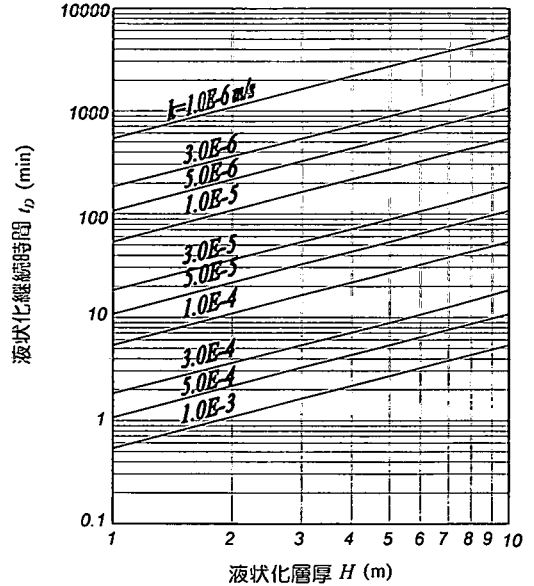


図-11 液状化継続時間のノモグラム
($\gamma' = 9 \text{ kN/m}^3, \alpha = 3\%$)

程度であることが示されている。また、新潟地震および兵庫県南部地震で観測された液状化に伴う沈下量が液状化層厚の 3%程度であったことが國生の論文⁸⁾に記述されている。これらのことから、沈下率 α は 3%程度前後の値を採るものと推測できよう。ここで、液状化層の水中単位体積重量を $\gamma' = 9 \text{ (kN/m}^3)$ 、沈下率 $\alpha = 3\%$ を仮定すると式(7)の関係を図-11 のように現すことができる。

5. 理論の適用

(1) 一様地盤への適用

一様な液状化地盤模型に関する國生の実験結果⁸⁾に対して先に誘導した理論を適用してみる。まず、図-5によれば、層厚 $H = 2\text{m}$ の液状化地盤に対して地表面での沈下量が 31mm であることから沈下率は $\alpha = 1.55\%$ となる。これは経験的・実験的に推測される 3% に比べるとやや小さい値であるが、その原因としては実験土槽の直径が小さいことや初期の状態が若干密であった可能性が想像される。また、液状化の継続時間は $t_0 = 80$ 秒程度であるから土粒子の沈降速度は $v_c = 3.88 \times 10^{-4} \text{ (m/s)}$ となる。次に、図-4から液状化発生直後の過剰間隙水圧の分布勾配より $\gamma' = 8.25 \text{ (kN/m}^3)$ を得る。これより、水の単位体積重量を $\gamma_w = 9.81 \text{ (kN/m}^3)$ とすると模型地盤の透水係数は $k = 4.61 \times 10^{-4} \text{ (m/s)}$ となる。この値は國生⁸⁾に示さ

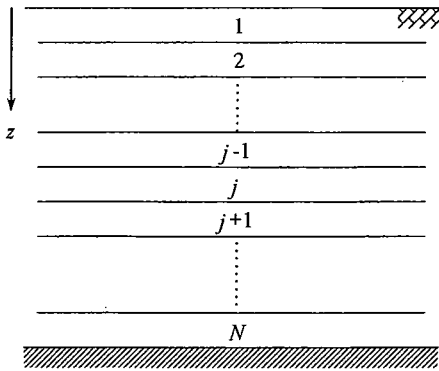


図-12 地盤の薄層分割

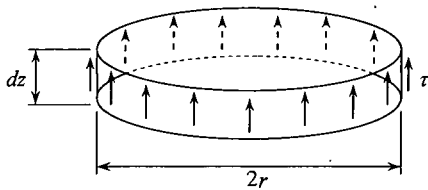


図-14 土と土槽の摩擦モデル

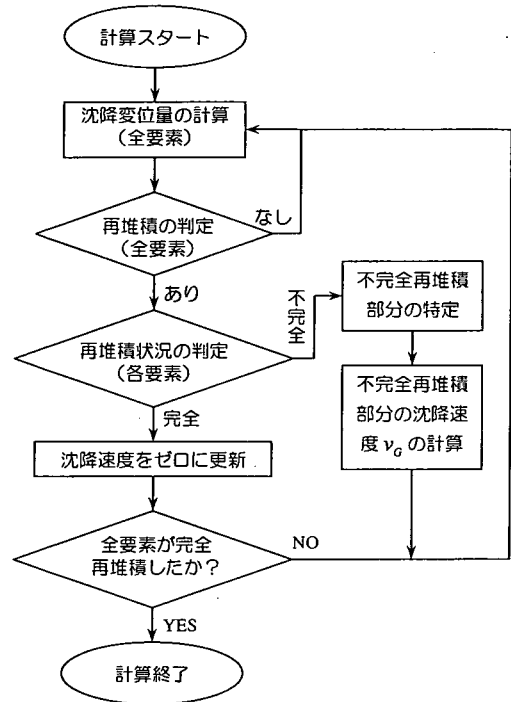


図-13 計算のフローチャート

れた値とほぼ一致するものであり妥当な値であると判断される。さらに、再堆積面上昇速度として $v_c/\alpha = 2.50 \times 10^{-2}$ (m/s) が得られる。

(2) 多層系地盤への適用

國生の実験⁸⁾のうち中間にシルト薄層のあるケースを対象としてシミュレーションを行い土粒子の沈降理論の適用性を確認することにより理論の妥当性を検証する。沈降理論の適用を多層地盤まで広げるためには数値計算法を構築することが必要である。そこで、以下では、先ず今回構築した数値解析法の概要を述べ、次いでシミュレーションの方法および結果について説明する。

a) 数値計算法の概要

図-12 に示すように側方に連続する水平な地盤を想定し薄層分割を施す。液状化発生時刻を $t=0$ とし数値計算においては $t=i\Delta t$ (Δt は計算時間間隔) とし時間を表現する。また、薄層要素 j の時間ステップ i における沈降変位量 u と沈降速度 v をそれぞれ u_j^i 、 v_j^i のように表記することとし、次ステップの沈降変位量を $u_j^{i+1} = u_j^i + v_j^i \Delta t$ により計算する。

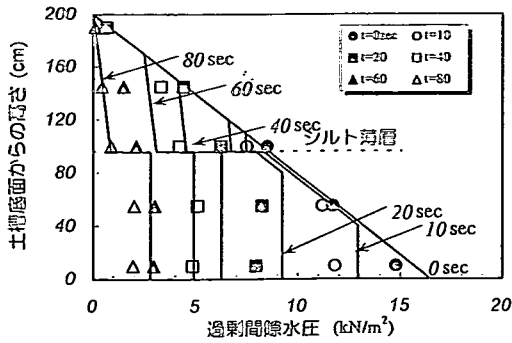
液状化発生直後から等速沈降し始めた薄層要素 j 内の土粒子は液状化層底面あるいは沈降速度の遅い直下の薄層要素上に堆積するというイベントが発生す

るまで有効応力のない状態で沈降を続ける。液状化前の薄層要素の間隙比 e_0 が再堆積後 e に変化するとすれば、厚さが dz の薄層要素は再堆積に伴って $\Delta h = \alpha dz$ だけ厚さが小さくなる。したがって、相隣り合う薄層要素間または最下位の薄層要素と液状化層底面の距離が元々の距離より Δh 以上接近したとき再堆積したと判定することにする。再堆積の判定条件は薄層要素 j について次のように表すことができる。

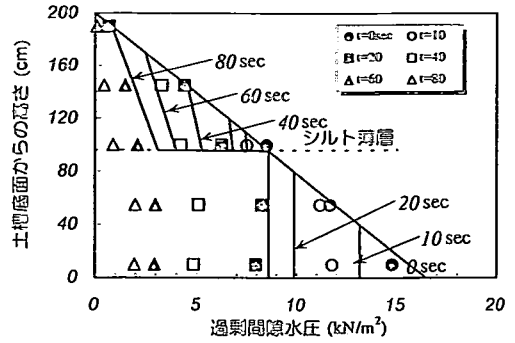
$$u_j^i - u_{j-1}^i \geq \Delta h_j = \alpha_j dz_j \quad (8)$$

数値計算の時間間隔 Δt のために上式の不等号が成立することになるが、この場合には薄層要素 j の沈降変位量を強制的に $u_j^i = u_{j-1}^i + \Delta h_j$ に修正することとする。

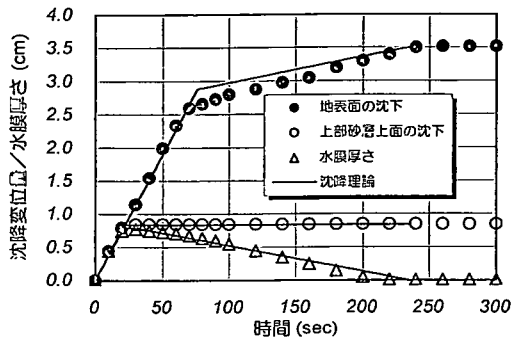
液状化層底面上あるいは既に再堆積して静止状態にある薄層要素上に薄層要素 j が再堆積したと判定された場合、薄層要素 j が完全再堆積したと表現することにする。他方、未だ沈降中にあり沈降速度の遅い直下の薄層要素上に薄層要素 j が再堆積したと判定された場合、薄層要素 j が不完全再堆積したと表現する。不完全再堆積部分は複数の薄層要素からなりそれらは一体となって沈降するが、そのときの速度は不完全再堆積部分を構成する薄層要素群の透水係数、単位重



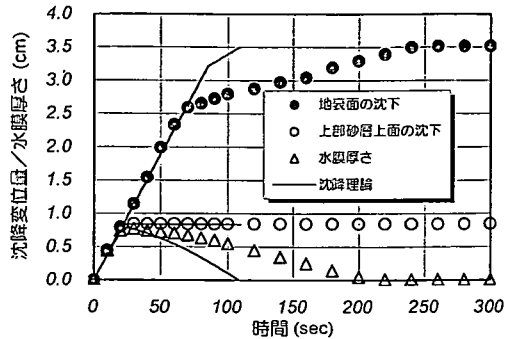
(a)



(a)



(b)



(b)

図-15 シミュレーション解析結果 (摩擦考慮)

図-16 シミュレーション解析結果 (摩擦なし)

量および層厚に応じて決定される。すなわち、 n 枚の薄層要素からなる不完全再堆積部分の時間ステップ i における沈降速度 v'_G は次式で与えることができる。

$$v'_G = k'_G \frac{\sum_{j=1}^n \gamma'_j dz_j}{\gamma_w \sum_{j=1}^n dz_j}, \quad k'_G = \frac{\sum_{j=1}^n dz_j}{\sum_{j=1}^n dz_j / k_j} \quad (9)$$

数値計算のフローチャートを図-13に示す。

b) シミュレーションの方法および結果

國生⁸⁾は水膜生成後の下部砂層内における過剰間隙水圧はシルト薄層で浅の部分の有効重量に相当する筈であるが、実験ではそれより小さい値へと過剰間隙水圧が低下し続けていること(図-6)について、その原因が有効応力を回復した上部砂層と土槽との摩擦によるものと述べている。そこで、本研究ではこの摩擦を考慮することとした。不完全再堆積した土と土槽との間の摩擦モデルを図-14に示す。この時、薄層要素 j に作用する摩擦力 f は

表-1 シミュレーション解析条件一覧

項目	砂層		シルト薄層
	上部	下部	
水中重量 γ' (kN/m ³)	8.25	8.25	5.00
透水係数 k (m/s)	4.5×10^{-4}	4.5×10^{-4}	1.0×10^{-6}
土圧係数 K_0	0.5	0.5	0.5
摩擦角 ϕ' (度)	14	14	5
沈下率 α (%)	2.56	0.88	0

$f_j = 2\pi r \tau_j dz_j$ と書ける。ここに、 r : 円形土槽の半径、 τ_j : 土と土槽の間に働くせん断応力であり、土圧係数を K_0 、土と土槽の摩擦角を ϕ' と表せば $\tau_j = K_0 \bar{\sigma}_j \tan \phi'$ である。

ただし、 $\bar{\sigma}_j = (\sigma'_{vj} + \sigma'_h) / 2$ で与えるものとする。このようにして与えられる摩擦力は本来境界力であるが、円盤型の薄層要素は変形することなく沈降すると仮定して物体力として取扱うこととし、第 j 層における

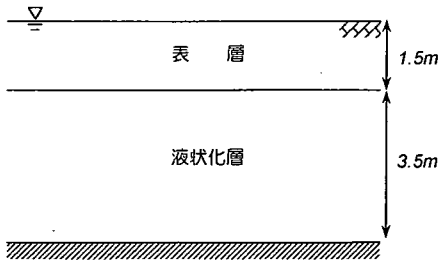


図-17 土層構成モデル

表-2 土層構成検討解析条件一覧

項目	表層		液状化層
	シルト質土	礫質土	
水中重量 γ' (kN/m ³)	7.0	10.0	9.0
透水系数 k (m/s)	1.0×10^{-6}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-5}
沈下率 α (%)	0	0	3

力の釣合いが常に次式を満足するように計算を実行した。

$$\frac{\partial P}{\partial z_j} + \frac{\partial \sigma'_j}{\partial z_j} = \gamma'_j - \frac{f_j}{\pi r^2 dz_j} \quad (10)$$

シミュレーション解析条件の一覧を表-1に示す。物性値は國生の論文⁸⁾を参考とし実験結果を説明し得るものでかつ現実的に採り得る値とした。数値計算における時間間隔は $\Delta t=1$ 秒である。数値解析の結果を図-15に示す。なお、上部砂層と土槽の摩擦を考慮しないときの解析結果を図-16に示す。

地表面の沈下の時刻歴には上部砂層と土槽との摩擦の考慮・不考慮の違いが顕著に現れている。実験で認められた液状化継続時間は約240秒であるのに対し、土槽との摩擦を考慮しない場合の液状化継続時間は110秒と短い(図-16(b))ことから、國生の実験では土槽との摩擦が実験結果に大きく影響していたことがわかる。この摩擦の影響を考慮することにより図-15(b)のとおり実験結果の特徴をより精度良く再現することが可能となった。過剰間隙水圧の分布を見ると土槽との摩擦を考慮しない場合には下部砂層が完全再堆積した後の過剰間隙水圧が8.7kPa程度以下にはならない(図-16(a))のに対し、摩擦を考慮した場合には実験で認められたような下部砂層位置における過剰間隙水圧の低下が再現されている(図-15(a))。

以上の結果から、國生の実験に対する土槽との摩擦効果を考慮したシミュレーションの結果はポスト液状化過程を土粒子の沈降・再堆積により説明することの妥当性に加えて、数値計算法が多層地盤に対して適用可能であることを示すのに十分な精度であったものとする。

6. 設計への適用に向けて

我々が実務で取り扱う地盤はこれまで対象としてきた地盤模型とは異なり複雑な土層構成をしている。たとえば、埋立て地盤では撒き出した土が水中で分級されるので深度方向への透水性分布は不均一となる。また、液状化の発生が特に懸念される沖積砂層の上には粘性土や造成盛土などが存在するのが通例である。土層の構成状態は液状化時に水膜の発生原因となったり Florin and Ivanov¹⁾が示したように液状化の継続時間を短縮したりする可能性がある。

そこで、土層構成によるポスト液状化過程の定性的な特徴を知るため図-17に示すような表層厚さ1.5m、液状化層厚さ3.5mの2層地盤をモデルとして解析を行った。地下水位は簡明に地表面とした。表層の地盤材料としてはシルト質土と礫質土を想定しており、粘着力のあるシルト質土および十分に転圧された礫質土であるとして沈下率 $\alpha=0\%$ を仮定した。液状化層の沈下率は経験的・実験的に推測される値として $\alpha=3\%$ を仮定した。表-2に計算条件を示す。なお、この検討では側方に無限に連続する地層を想定していることから、先のシミュレーションで考慮した土槽と不完全再堆積部分の摩擦力 f は存在しないので、 $f=0$ として数値計算を実行している。

まず、表層がシルト質土のケースの解析結果を図-18に示す。この時の計算時間間隔は $\Delta t=10$ 秒である。地表面の沈下の時刻歴を示した図-18(a)から、地表面沈下の継続時間は約41時間で沈下量は10.5cmである。また、液状化層表面の沈下の時刻歴より液状化層が約1時間で完全再堆積していたことがわかる。地表と液状化層表面の沈下量の差は表層直下に形成される水膜の厚さを示すものと言える。一方、図-18(b)に示す過剰間隙水圧の分布を見ると、始め液状化層内の過剰間隙水圧は速やかに消散するが液状化層が完全再堆積した時刻($t=64$ min)以降表層が再堆積するまでの40時間にわたって表層の有効重量に相当する過剰間隙水圧が残存している。この間、水膜上にある表層は

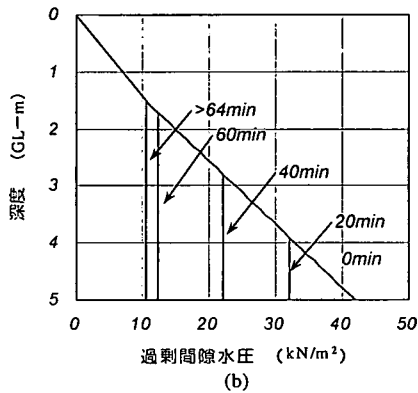
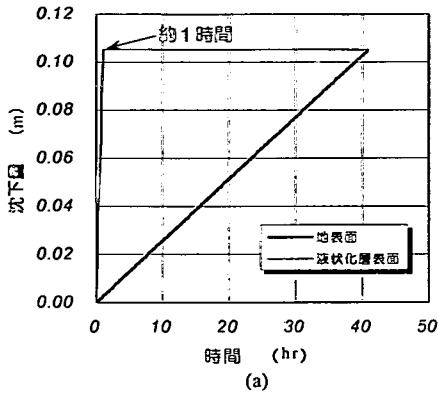


図-18 表層がシルト質土の解析結果

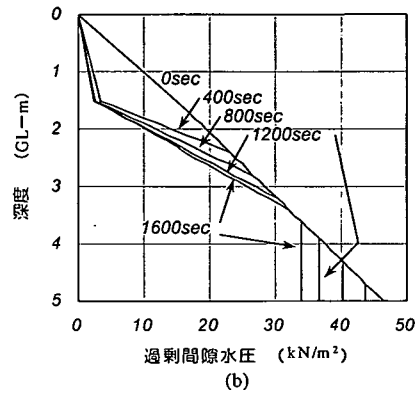
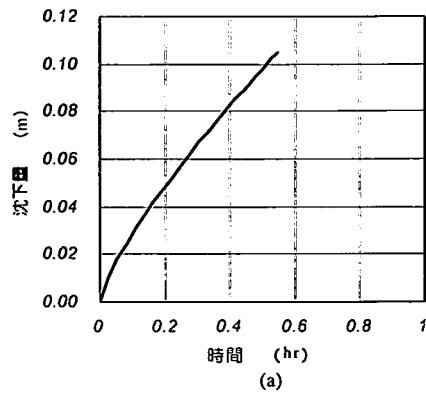


図-19 表層が礫質土の解析結果

非常に不安定な状態にあり著しく大きな水平変位を生じる可能性があると考えられる。また、水膜は表層の有効重量で被圧されているので水膜内の全水頭は地表面より高くなっている。このため、水膜内の水が液状化層表面付近の土粒子を巻き込みながら表層の弱部を通り抜けて噴砂の発生に至るものと考えられる。

次に、表層が礫質土のケースの解析結果を図-19に示す。この時の計算時間間隔は $\Delta t=5$ 秒である。地表面の沈下の時刻歴を示した図-19(a)から、地表面沈下の継続時間は30分強であり沈下量は10.5cmである。また、時間の経過とともに沈下速度が緩やかに減速している様子が伺える。一方、図-19(b)に示す過剰間隙水圧の分布を見ると、液状化層内では層底面への完全再堆積によって有効応力が回復する部分が上方へ、また沈降速度の速い表層が液状化層上に不完全再堆積することによって液状化層の上部が押し沈められ有効応力が生じる部分が下方へ広がって行く様子が認められる。表層がシルト質土のケースでは液状化層が完全再堆積するまでに約1時間を要したのに対し、表層が礫質土のケースでは液状化継続時間は30分程度

まで短縮されていることは特筆に値する。また、地表面の沈下の時刻歴に認められた沈下速度の緩やかな減速は液状化層上部において沈降速度の速い表層に押し沈められる部分の範囲が増大するためであると理解できる。

7. まとめ

本研究は、ポスト液状化過程に関する Florin and Ivanov および國生の実験結果に見られた過剰間隙水圧の消散特性および沈下特性についての考察に基づき、その現象を支配しているのが土粒子の沈降であることの力学的説明を試みたものである。本論における主要な研究成果は次のとおりである。

- 1) 土粒子の沈降運動に関する理論を誘導した。この理論は Florin and Ivanov の研究成果を包含するとともに、液状化層内の過剰間隙水圧の勾配が水中単位体積重量相当の勾配になることを力学的に説明するものである。

- 2) 國生の実験結果に対する土粒子の沈降理論の適用性をシミュレーションにより検証しポスト液状化過程を土粒子の沈降運動に基づいて説明することの妥当性を示した。
- 3) 液状化層上の地層の土質特性によって過剰間隙水圧の消散や沈下の特性が全く異なることを示し、ポスト液状化過程における地盤の過渡的挙動を考へるときには土層構成に起因した液状化の終息過程も考慮する必要があることを示唆した。
- 4) 吉田雅穂, 宮島昌克, 北浦勝, 武澤永純: 2000年鳥取県西部地震における竹内団地の液状化に関するアンケート調査, 第26回地震工学研究発表会講演論文集, Vol.1, pp.557-560, 2001.
- 5) 2001年芸予地震調査報告, 基礎地盤コンサルタンツ株式会社.
- 6) Scott, R. F.: Solidification and Consolidation of a Liquefied Sand Column, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.4, pp.23-31, 1986.
- 7) 大川秀雄: 液状化の発生メカニズムを考へる, 土木学会論文集, No.568/III-39, pp.13-20, 1997.
- 8) Kokusho, T.: Formulation of Water Film in Liquefied Sand and Its Effect on Lateral Spread, *J. of Geotech. and Geoenv. Eng., ASCE*, Vol.125, No.10, pp.817-826, 1999.
- 9) Kokusho, T.: Mechanism for Water Film Generation and Lateral Flow in Liquefied Sand Layer, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.5, pp.99-111, 2000.
- 10) 大林淳, 佐々木康: ポスト液状化地盤の体積圧縮特性とボーリング継続時間, 土木学会論文集, No.680/III-55, pp.169-182, 2001.
- 11) 吉見吉昭: 砂地盤の液状化 (第2版), 技報堂出版.
- 12) 大林淳, 佐々木康, 楠木勝也: 液状化した地盤における流体的挙動の継続時間: 土木学会第56回年次学術講演会概要集, III-A138 (CD-ROM)

上記の研究成果は沈降中の土粒子から見た間隙水の見かけの流れがダルシー則に従うことを前提条件としている。しかし、粒度特性によってはダルシー則が適用できない場合が想像される。この点については今後の研究課題としたい。

謝辞: 中央大学の國生剛治教授, 埼玉大学の小田匡寛教授, 齋藤正人助手, 東京大学のロランド・オレンセ助教授および基礎地盤コンサルタンツ(株)の吉原康伸氏に貴重なご意見・ご指導を賜りましたので、ここに深く感謝の意を表させて戴きます。

参考文献

- 1) Florin, V. A. and Ivanov, P. L.: Liquefaction of Saturated Sandy soils, *Proc. 5th ICSMFE*, Vol.1, pp.107-111, 1961.
- 2) 昭和39年新潟地震震害調査報告, 土木学会.
- 3) 1983年日本海中部地震震害調査報告書, 土木学会. (2002.3.18 受付)

POST-LIQUEFACTION PROCESS BASED ON THE SEDIMENTATION OF SAND PARTICLES

Tetsuya TSURUMI, Hiroshi NAKAZAWA, Kunio MIZUMOTO
and Hiroyuki WATANABE

A number of researches have been performed to identify the conditions under which the liquefaction occurs. Moreover, the characteristics of liquefied soils under seismic excitations have been investigated by recent studies. A little have been studied on the post-liquefaction process although its characteristics would be important for understanding the mechanism of the liquefaction-induced ground movement and the related damage to the structures. In this paper, therefore, a simplified post-liquefaction theory is derived based on the sedimentation of sand particles, and after its validity is confirmed by the simulation of the recent experimental works.