

砂地盤の液状化

東京理科大学 創域理工学部 社会基盤工学科 教授 塚本 良道 つかもと よしみち

理工学の多くの専門分野が、Scienceの側面とTechnologyの側面を持っていると思います。Technologyの発展には、Scienceによる現象の解明などが必要不可欠なのは、自明です。ここでは、私の専門とする地盤工学のうち、とくに砂地盤の液状化のScienceへ、ご招待したいと思います。

■ 土の力学からみた液状化

土は、粒径により区分されます【図1】。もっとも液状化しやすいのは砂とされ、礫混じりの砂や、シルト・粘土混じりの砂の液状化が報告されています。礫が多くなると、透水性がよくなり液状化せず、粘土が多くなると、粒状体の性質を失い、液状化しないわけです。

土の力学は、1960年代にK. Terzaghiにより Soil

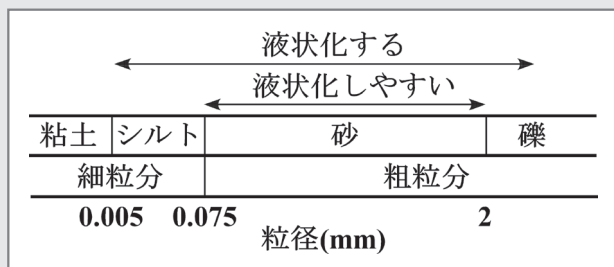
mechanicsとして体系化されました。土のせん断に関わる力学を支配する原理は、3つあります。1つめは、有効応力の原理です【図2】。地盤内の飽和した土要素は、周囲の土粒子と水の自重により、拘束圧 σ_0 を受けます。土粒子間の間隙水は、通常、静水圧状態にあり、静水圧に相当する間隙水圧 u_w を示します。有効応力 σ'_0 は、式(1)に示すように、拘束圧 σ_0 と間隙水圧 u_w の差で表わされ、土粒子間の力の伝播に寄与します。

$$\sigma'_0 = \sigma_0 - u_w \quad (1)$$

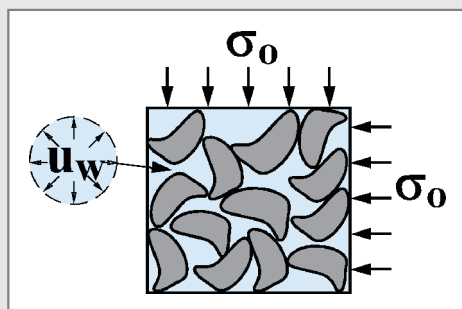
原理の2つめは摩擦則で、とくに砂については、式(2)のように、せん断強さ τ_f は、有効応力 σ'_0 により表わされます。

$$\tau_f = \sigma'_0 \tan \phi \quad (2)$$

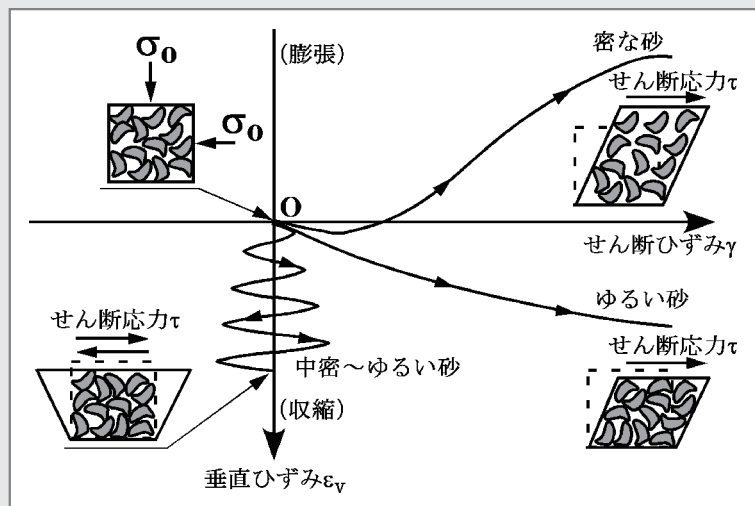
ここで、 ϕ は内部摩擦角と称されます。3つめは、ダイレイタンシー則です【図3】。砂に、一方向にせん断応力 τ が作用すると、せん断ひずみ γ の増加とともに、ゆるい砂は、圧縮側の垂直ひずみ ϵ_v が発生し、体積収縮します。一方、密な砂は、膨張側の垂直ひずみ ϵ_v が発生し、体積膨張します。繰り返しせん断応力が作用すると、せん断ひずみは正負の値の増減を繰り返しますが、ゆるい砂から中密の砂まで、圧縮



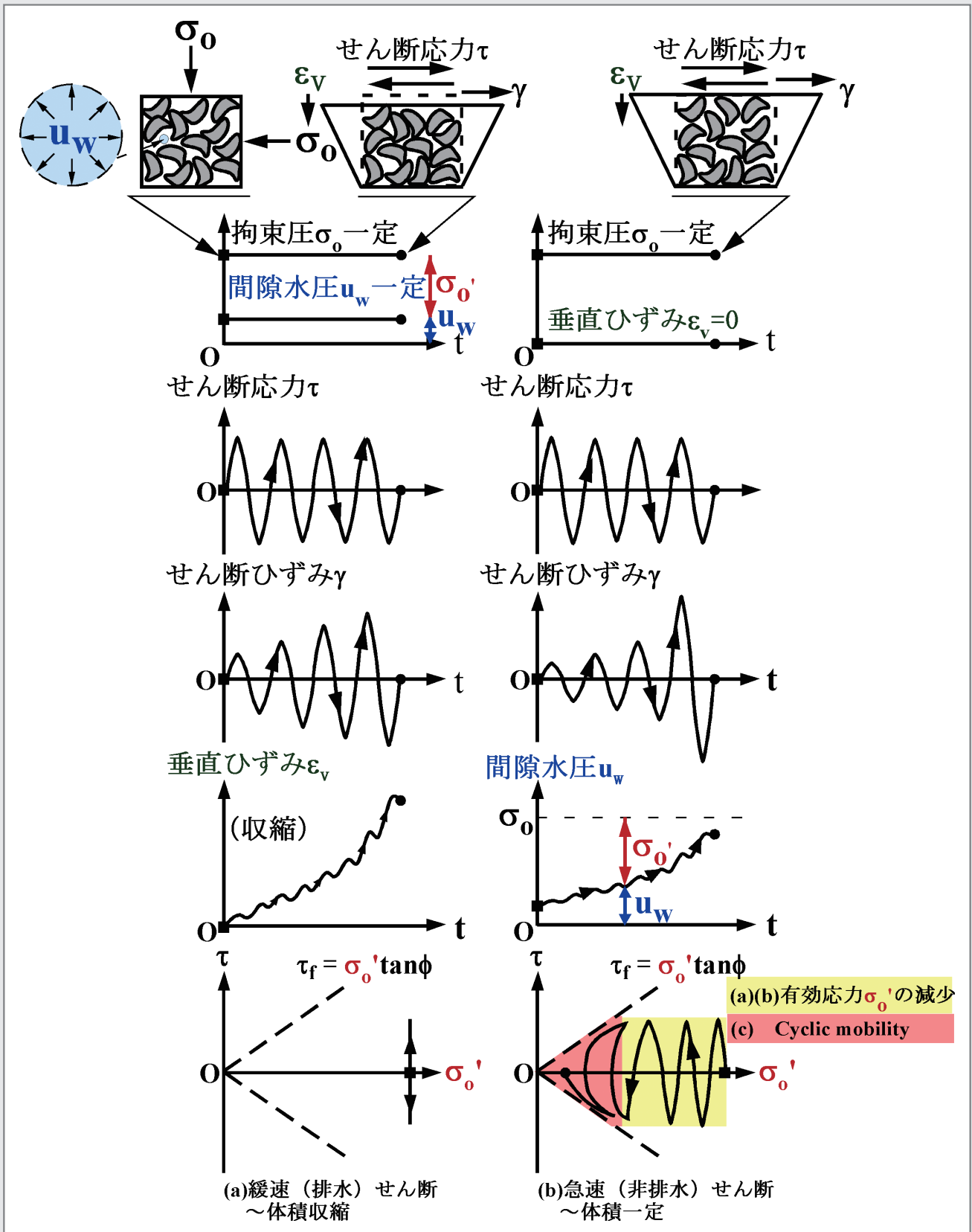
【図1】 粒径により礫・砂・シルト・粘土と区分



【図2】 土の力学の原理の1つめは有効応力



【図3】 土の力学の原理の2つめと3つめは摩擦則とダイレイタンシー則



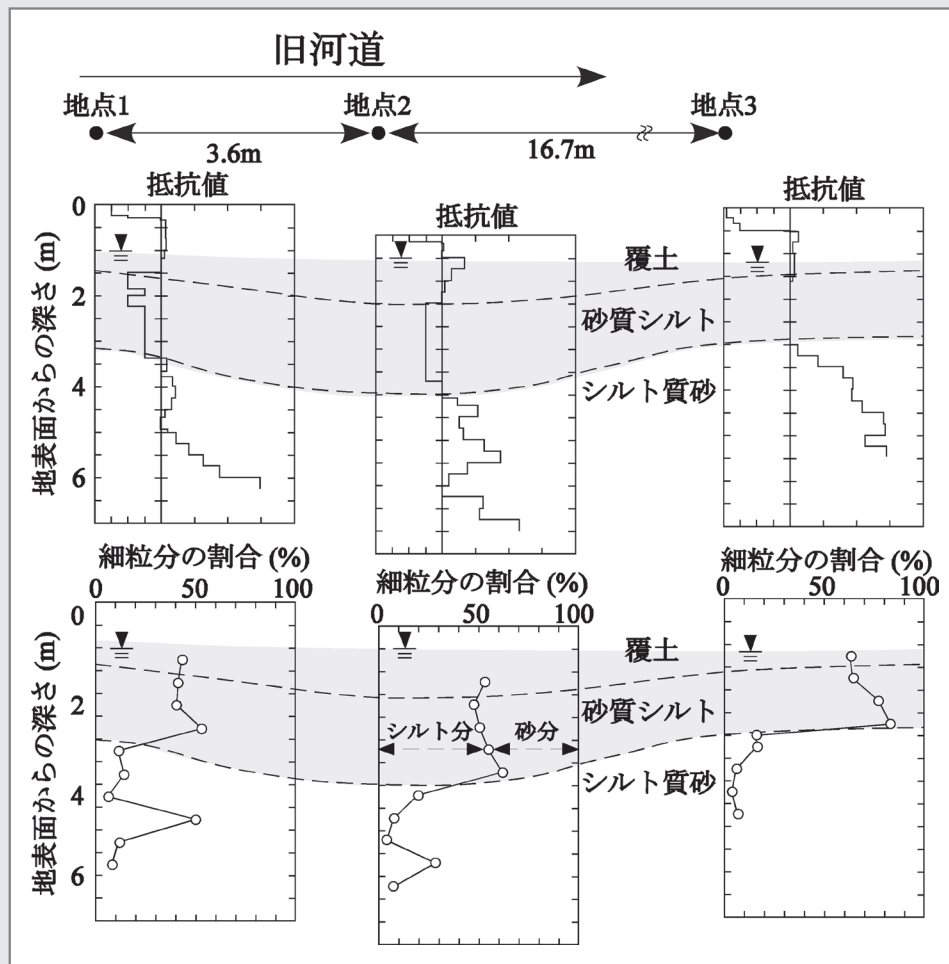
【図4】 砂のせん断挙動は常時と地震時で異なる

側の垂直ひずみ ϵ_v が繰り返し発生し、体積収縮を示すことが知られています。これら体積変化の傾向を表わすのが、ダイレイタンスー則です。

【図3】は、常時のゆっくりとせん断応力 τ が土要素

に作用する場合を表わしていますが、地震時のように、急速にせん断応力 τ が作用する場合を考えてみます

【図4】。常時では、間隙水の排水が生じるのに十分な時間があり、間隙水圧 u_w は一定のまま、垂直ひずみ



【図5】液状化する砂地盤は微地形が目安

ϵ_v が発生します。一方、地震時では、間隙水の排水（体積変化）が生じるのに十分な時間がなく、垂直ひずみ ϵ_v は一定のまま、間隙水圧 u_w が変化することになります。とくに、繰り返しせん断下では、常時に圧縮側の垂直ひずみ ϵ_v が発生しますから、地震時には間隙水圧 u_w の増加が生じることになります。間隙水圧 u_w の増加は、式（1）より、有効応力 σ'_o の減少をもたらします。【図4】の右下に示す有効応力経路は、最終的に、式（2）に示す破壊線に接し、正負の繰り返しせん断応力 τ の増減により、有効応力 σ'_o は減少・回復を繰り返す蝶々のような形状を示すに至ります。これを、Cyclic mobility と称します。砂地盤の液状化も、3つの原理により説明できるわけです。

■ 液状化する地盤

一般に、地下水位が高く、ゆるく堆積した砂地盤において液状化が生じやすいことが知られています。砂地盤がゆるく堆積した地点の把握には、微地形が目安になります。人々が多く生活を営む平野や低地には、

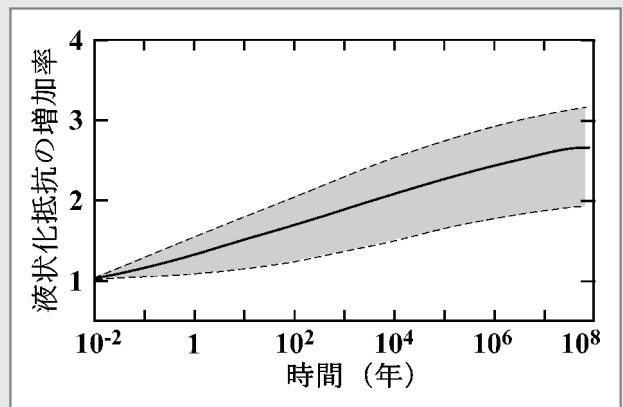
自然堤防、後背湿地（氾濫原）、三角州といった、様々な微地形が形成されています。また、埋立地などの人工地盤も多く存在しています。液状化の初動調査は、微地形の把握から始まるわけです。2011年東北地震では、関東地方においても、河川堤防のすべり崩壊が数多く発生しました。とくに、旧河道上に位置する地点において、数多く見られたことが知られています。私たちの研究チームも、地の利を活かして、多くの地点に調査に赴きました【図5】。【図5】は、簡易貫入試験の貫入抵抗値と、粒径0.075mm以下のシルト・粘土の細粒分含有率を表わしています。旧河道内は、くぼんだ地形をなしていて、地下水位が浅く、地表面に近いことがわかります。また、液状化した地層を見てみると、旧河道外では、粒径が砂より小さいシルトが多い層ですが、旧河道内では、砂が多く含まれることがわかります。粒径の大きい砂は、河道を運搬され堆積しますが、粒径の小さいシルトの一部は、河道を外れて氾濫し、堆積した様子がうかがえます。旧河道内の砂層の液状化により、上の河川堤防がすべり崩壊をしたわけです。

地盤は、時間の経過とともに、液状化しにくくなる傾向にあることが知られています【図6】。第三紀の砂岩や泥岩は、続成作用により、長い時間をかけて固結した堆積岩ですが、現在、平野や低地に存在する砂地盤も、様々な物理・化学・生物的作用を受けて、液状化しにくくなるわけです。平均で、100年で1.5倍液状化しにくくなる傾向が見てとれます。これを、年代効果と称します。この年代効果の評価は困難で、研究途上です¹⁾。年代効果をもたらす砂・シルト粒子の骨格構造のきめ細かな変化をとらえるには、地盤調査に広く利用される貫入試験は不向きで、弾性波探査の技術の利用も検討されてきています。

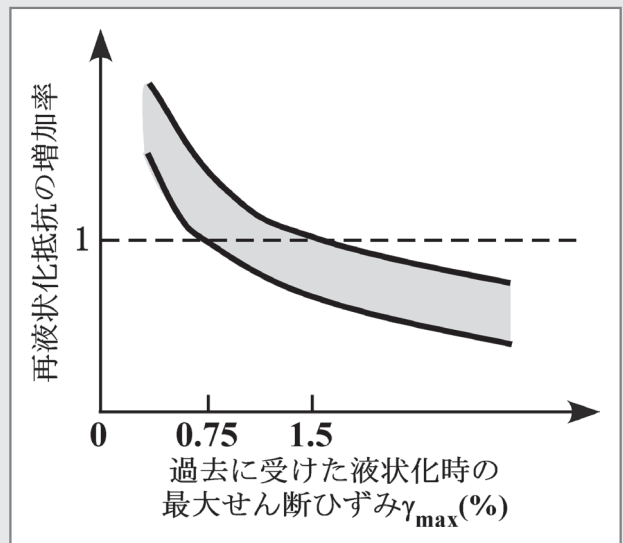
一方で、過去の地震で液状化した地点が、再び液状化する事例が数多く報告されています。砂地盤が液状化すると、間隙水圧は増加し、その後減少し、再び元に戻ります。この過程で、過剰な間隙水は地表面から排水され、地盤の沈下が生じます。沈下が生じるわけですから、砂粒子は密な配列に変わるわけです。地盤の密実化により、液状化は生じにくくなるように思われますが、実際には、再液状化現象が生じるわけです。室内試験により詳しく調べてみると、直近に地震時のような大きなせん断ひずみを受けると、砂粒子の骨格構造が、液状化に脆弱になることが分かってきました【図7】。実際の砂地盤は、年代効果による液状化しにくくなる傾向と、再液状化現象に見られる液状化しやすくなる傾向の、双方が相まった状態にあることとなります。

■ 液状化をもたらす地震動

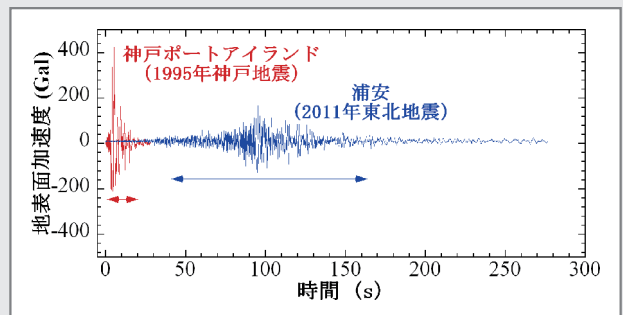
近年の地震を振り返ると、断層型地震である1995年神戸地震では、礫混じり砂のマサ土の埋立地である神戸ポートアイランドが、大規模に液状化しました。海溝型地震である2011年東北地震では、東京湾沿岸のシルト・粘土・砂からなる浚渫土の埋立地が、大規模に液状化しました。地盤の液状化は、どのような地震動で生じるのでしょうか【図8】。神戸地震は、主要動は短いです。最大地震加速度はかなり大きいことがわかります。一方、東北地震は、最大地震加速度はそれほど大きくありませんが、主要動が長いことがわかります。地盤の液状化は、強震動ばかりではなく、中規模地震動でも、主要動が長いと生じるわけです。つまり、地盤の液状化のしやすさの指標も、このような地震動の特性を考慮しなければなりません。米国発信の研究により、地震動の繰り返し回数



【図6】 地盤は時間とともに液状化しにくくなる



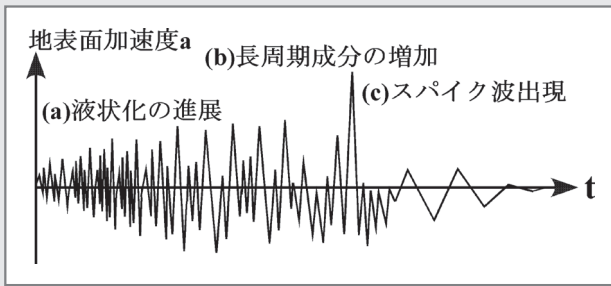
【図7】 地盤は液状化すると再び液状化しやすくなる



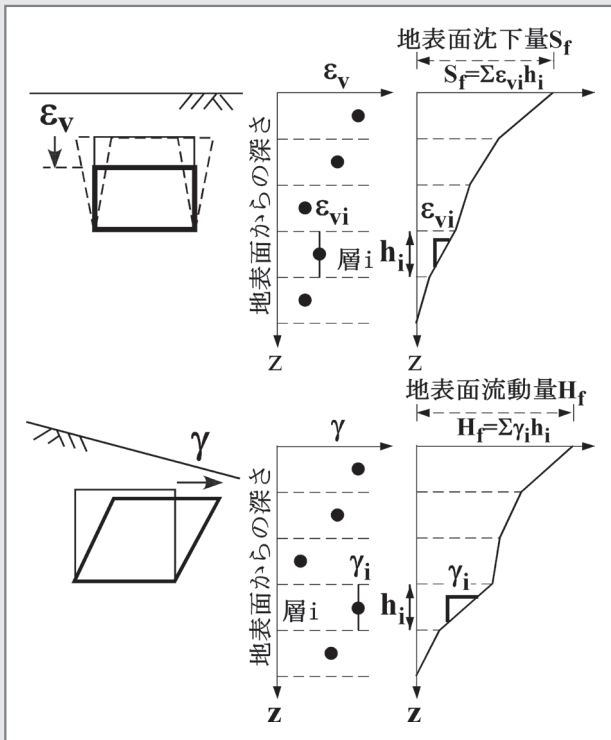
【図8】 中規模地震動でも継続時間が長いと液状化する

N_c は、地震のマグニチュードMに大きく依存する傾向が知られています。この地震動の特性を取り入れ、想定される地震のマグニチュードMに応じた地盤の液状化のしやすさの指標の推定が行なわれるようになりました²⁾。

現在、全国各地点における地震動記録の閲覧ができるようになりました³⁾。地震動記録を見るにあたって、当該地点における液状化の発生の有無を確認することが必要となります。地震加速度波形は、液状化の影響を受けることが知られているのです。液状化の進展に



【図9】液状化は地震動に現れる



【図10】平坦な地盤は沈下、傾いた地盤は流動

ともない【図9(a)】、地震加速度波形に長周期成分が卓越するようになり【図9(b)】、スパイク波が出現するようになります【図9(c)】。このスパイク波の出現は、【図4】の右下の有効応力経路に見られるように、正負の繰り返しせん断応力の増減にともなう有効応力の減少と回復により、せん断剛性が急激に繰り返し変化する事が起因していると考えられています。

■ 液状化の影響

砂地盤の液状化により、様々な地盤変状が生じます。平坦な地盤は沈下し、傾いた地盤は流動します【図10】。液状化による災害リスクを評価するには、これらの液状化による沈下量や流動量を適正に推定することが必要となります。地盤は、粒径や密度の異なる層をなしていますから、各層ごとに発生する体積ひずみ ϵ_v や残留せん断ひずみ γ を推定できれば、その深さ

方向の積分値として地表面沈下量 S_f や地表面流動量 H_f を推定できることとなります¹⁾。

【図11(a)】は、液状化した埋立地盤上の道路盛土が、すべり崩壊を起こした事例です。道路盛土は陥没し、埋立地盤は隆起し、弧を描くように、すべり崩壊が生じました。このような地盤の安定性に対する災害リスクを評価するには、想定される地盤のせん断抵抗を適正に推定することが求められます【図11(b)】¹⁾。

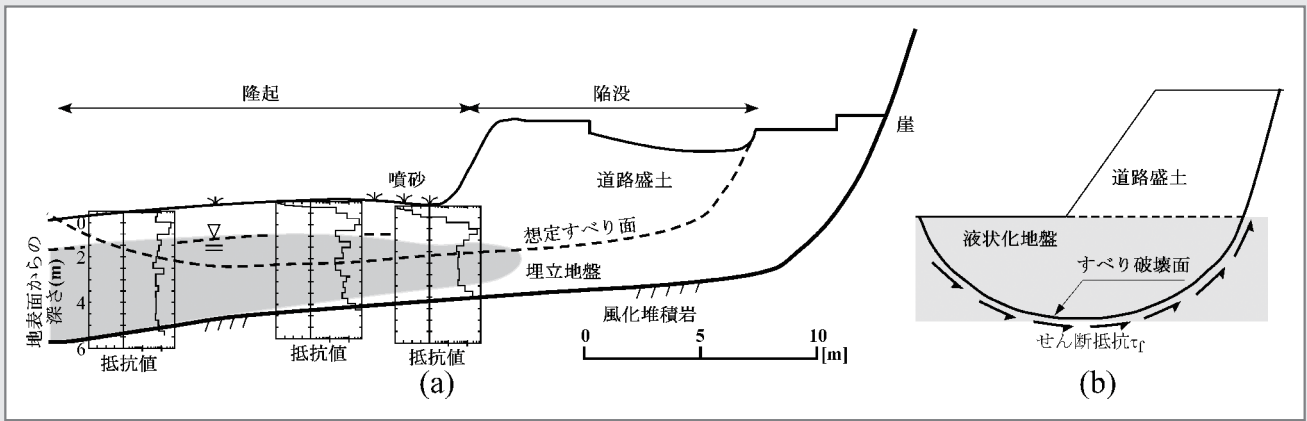
【図12】は、振動台模型試験から明らかになった、基礎の沈下をもたらす間隙水圧の発生と消散のプロセスを表わしています。‘深さ方向’に見てみると、液状化による間隙水圧の発生は、浅い層から深い層に進展し、その後の間隙水圧の消散は、深い層から浅い層に至り、一連のプロセスは終了しますが、【図12】は、‘水平方向’に見た浅い層でのプロセスを表わしています。【図12(a)】の加振中は、自由地表面下では、間隙水圧は100%まで増加していくのに対して、基礎直下では、基礎による高い拘束とせん断変形の抑制により、間隙水圧に大きな変化はありません。【図12(b)】の加振直後に至ると、自由地表面下では、深い層において消散した間隙水が浅い層に浸透するため、浅い層での間隙水圧は100%を保持したままとなります。一方、基礎直下では、加振中に自由地表面下と基礎直下で生じた間隙水圧の差を解消するように、自由地表面下の深い層で消散した間隙水が、基礎直下にも浸透し、基礎直下で間隙水圧が増加していきます。加振後時間が経つと、自由地表面下と基礎直下を含めた全域で、間隙水圧の消散が進展し、一連のプロセスが終了します【図12(c)】。これら3つの過程を通じて、各過程に相応した基礎の沈下が生じるわけです。

■ 液状化の実際

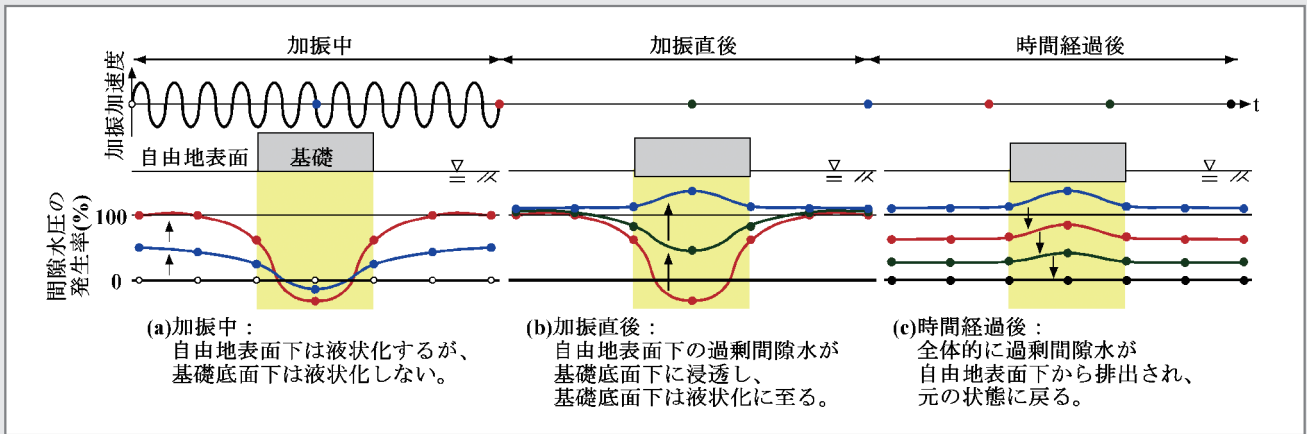
私たちは、実際に地盤が液状化したことを、地盤内の亀裂を通じて地表面に噴出する噴砂を見ることにより、目の当たりにします。【図13】は、トレンチ調査の例ですが、地表面には、グレー色の噴砂が確認されました。地表面から1.5mは茶褐色の層ですから、その下のグレー色のシルトや細砂が液状化し、地盤内の亀裂を通じて、地表面に出てきていることとなります。

■ まとめ

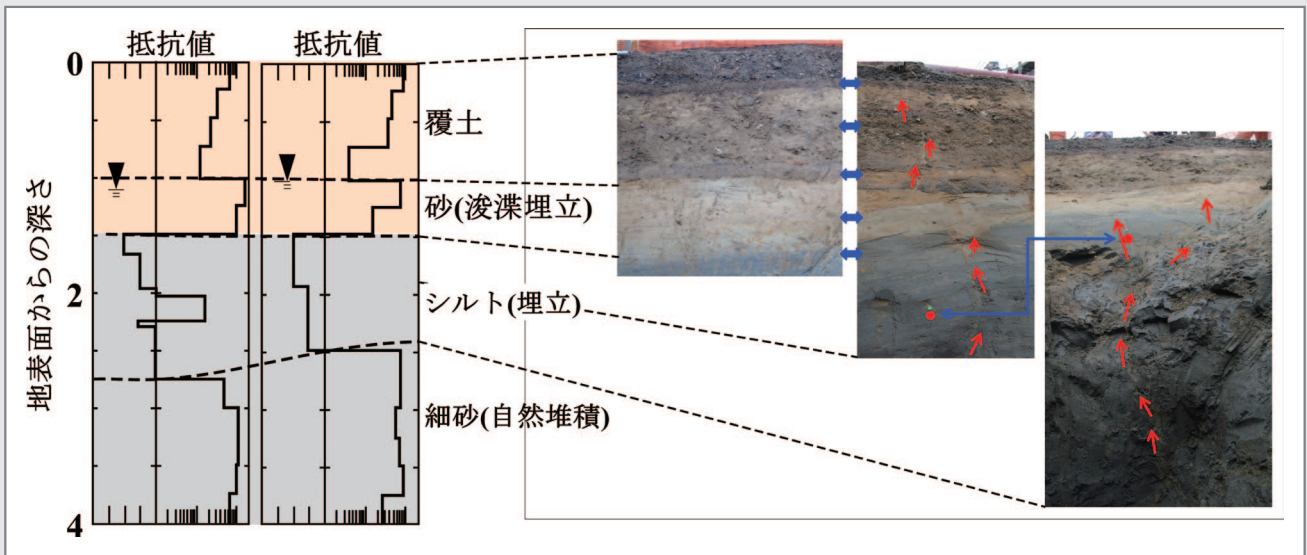
液状化に関わる現象の解明に、室内試験が大きく貢献できることを見ましたが、現地調査から学びと



【図 11】埋地地盤の液状化による道路盛土のすべり崩壊



【図 12】液状化は間隙水圧の発生と消散のプロセス



【図 13】噴砂は地盤内の亀裂を通して地表へ

ることも多いことを、併せて見てきました。液状化に関する研究課題は、山積しているのが現状です。

参考文献

- 1) Tsukamoto, Y. & Ishihara, K. (2022) Advances in Soil Liquefaction Engineering. Springer Series in Geomechanics and Geoenvironmental Engineering, Springer Nature Singapore.
- 2) Idriss, I.M. & Boulanger, R.W. (2008). Soil Liquefaction during Earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute MNO-12.
- 3) 防災科学技術研究所 K-NET 強震観測網 HP.
 - ・防災科学技術研究所 K-NET の地震動記録を利用しました【図 8】。ここに、謝意を表します。
 - ・本記事の趣旨を重んじ、不詳な点があることをお許しください。