

# 液状化地盤中の地震波を評価する



**井澤 淳**  
Jun Izawa  
鉄道地震工学研究センター  
地震動力学研究室長



**小野寺 智哉**  
Tomoya Onodera  
鉄道地震工学研究センター  
地震動力学研究室  
研究員



**伊吹 竜一**  
Ryuichi Ibuki  
鉄道地震工学研究センター  
地震動力学研究室  
研究員



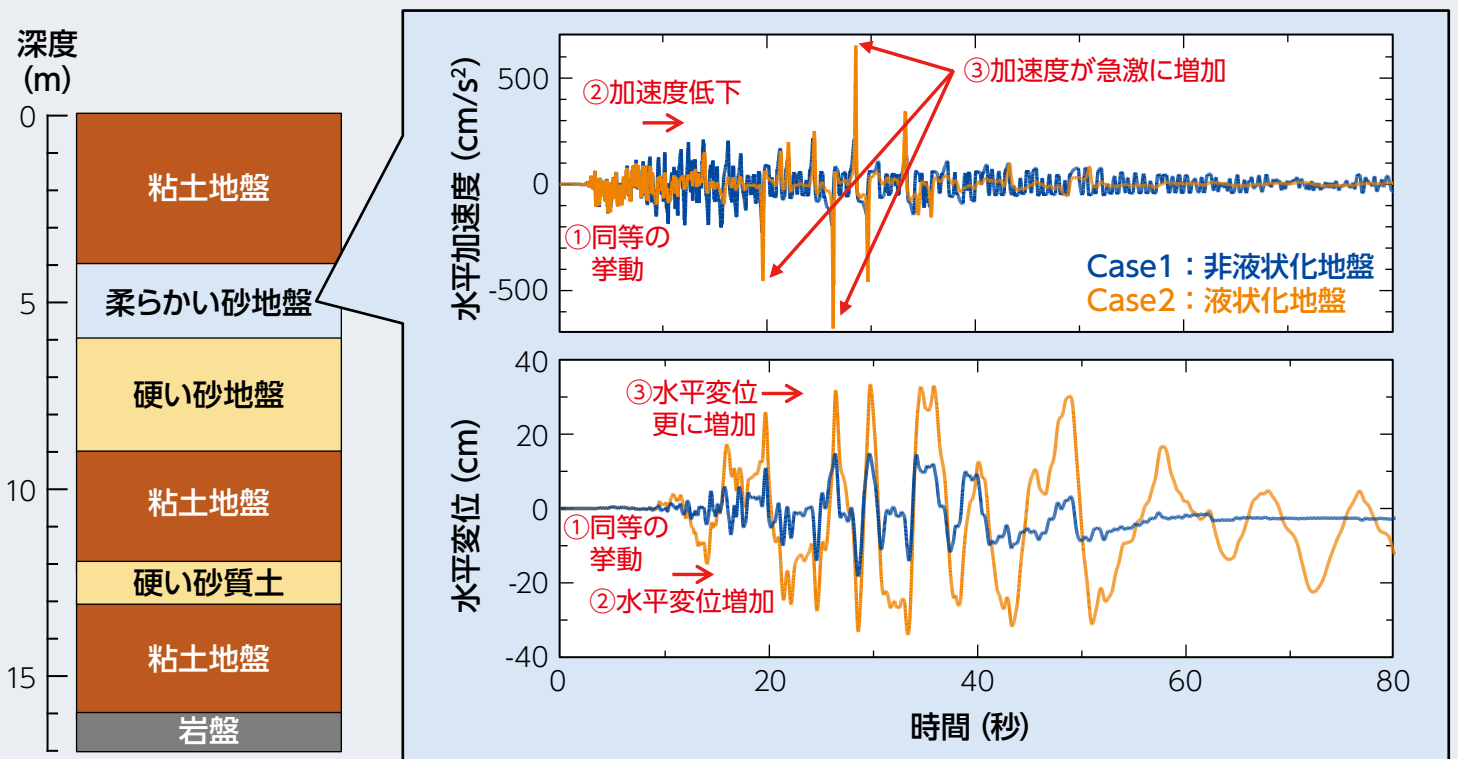
**山本 昌徳**  
Masanori Yamamoto  
鉄道地震工学研究センター  
地震動力学研究室  
研究員

## はじめに

地震は地中深くの岩盤で生じる断層破壊によって発生します。このとき発生する揺れ(加速度や変位)は、水面を伝わる波のように断層から地表面まで伝わるため「地震波」とよばれます。地中の地震波は、<sup>く</sup>杭基礎などの鉄道構造物に被害を及ぼす可能性があるため適切に算定

して構造物の耐震設計をする必要があります。このとき、柔らかい砂地盤内では「液状化」という現象が生じる可能性があり、非常に複雑な地震波が生じます。本稿では、液状化のメカニズムを解説するとともに、液状化地盤中の地震波を算定するための鉄道総研の取り組みを紹介いたします。

図1 非液状化地盤中と液状化地盤中の地震波の例



## 液状化地盤中の地震波

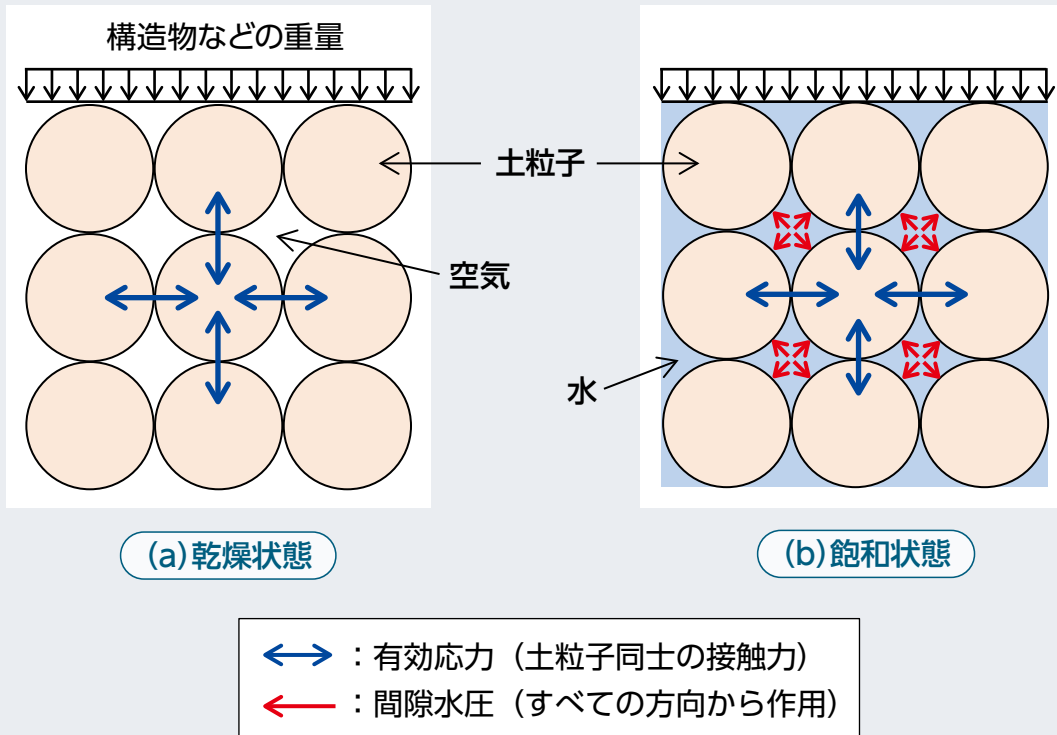
図1は柔らかい砂地盤の中を伝わる水平加速度と水平変位の地震波の例を示しています。Case1(青色)は液状化が発生していない地盤(非液状化地盤), Case2(橙色)は液状化が発生した地盤(液状化地盤)の例ですが、波の形が大きく異なっているのがわかります。Case2の液状化地盤の挙動に着目すると、10秒程度まではCase1とほぼ同じような挙動を示していますが(図中①), その後、加速度は小さくなり、変位が大きくなっています(図中②)。20秒付近から変位がさらに大きくなると、加速度が急激に増加していることもわかります(図中③)。このような地震波の変化の要因となる液状化の発生メカニズムについて地盤の挙動をもとに説明します。

### 地盤の有効応力

液状化の発生メカニズムを理解するために

は、まず、地盤の「有効応力」というキーワードを理解する必要があります。図2は構造物下の地盤について、水のない乾燥した状態(乾燥状態)と水の中にある状態(飽和状態)を模式的に示しています。乾燥状態の図2(a)を見ていただくとわかるように、構造物の重量を土粒子同士がお互いに接触する力で支えています。この土粒子同士の接触力を「有効応力」とよびます。一方で、飽和状態の土粒子には、構造物の重量のほかに水圧が作用します(図2(b))。この水圧を「間隙水圧」とよびます。間隙水圧は一般的には正の値で、土粒子同士を引き離す方向に作用するため、飽和状態の土の有効応力は、間隙水圧によって低下します。有効応力が低下すると構造物の重量を支える力が減ることになるため、有効応力が大きいと硬い地盤、小さいと柔らかい地盤と考えることができます。液状化は、地震中に地盤の有効応力が変化することによって生じます。

図2 地盤内の間隙水圧と有効応力



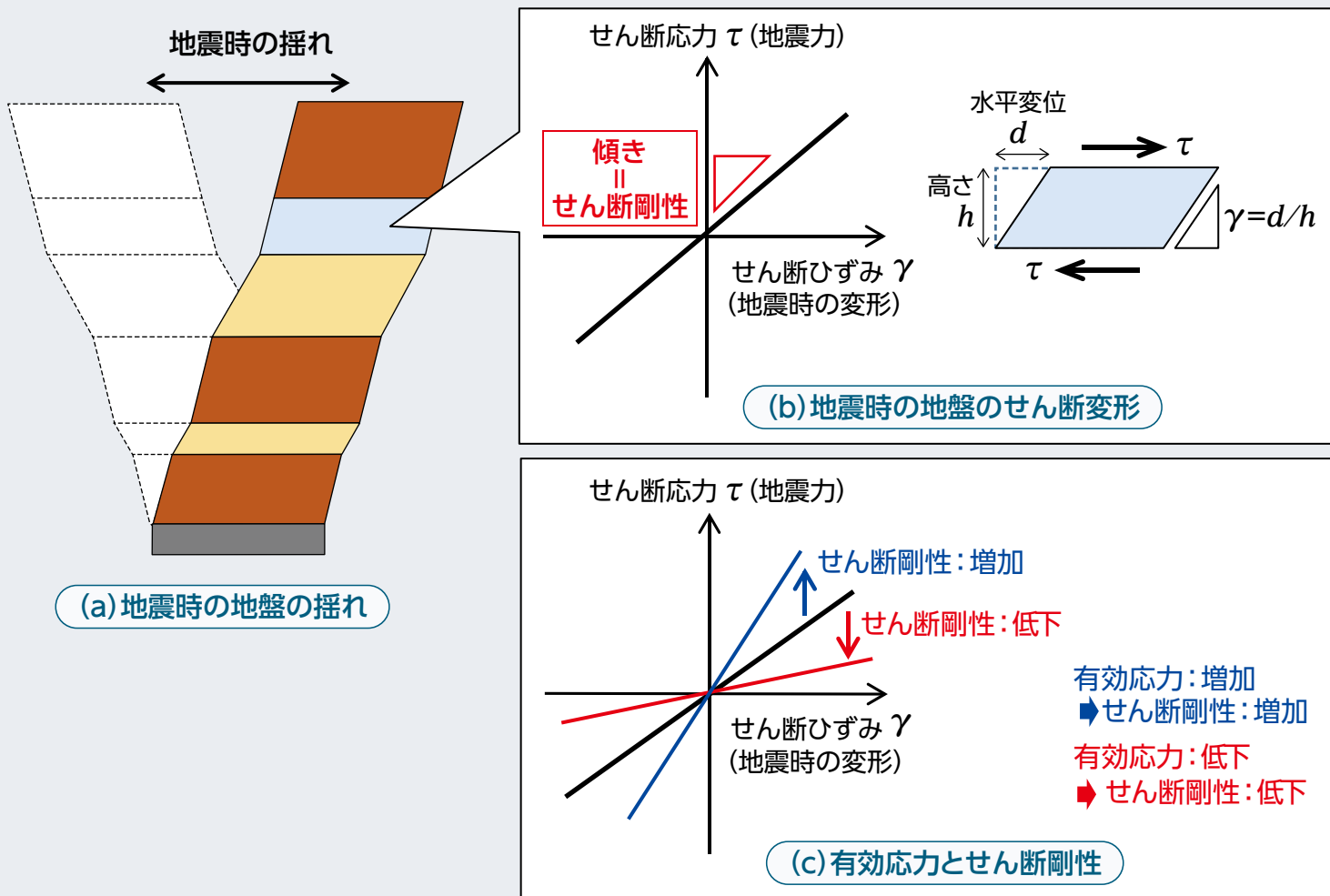


図3 地震時の地盤のせん断応力～せん断ひずみ関係

### 地盤のせん断変形

地震時の地盤の有効応力の変化は、地盤の「せん断変形」という挙動に起因します。せん断変形とは、図3(a)に示すように長方形の物体が平行四辺形に形を変えるような変形のことです。地震時の地盤内の各土層はせん断変形をする傾向にあります。このとき、図3(b)に示すようにせん断変形させる力をせん断応力 $\tau$ 、土層の高さ( $h$ )に対するせん断変形による水平変位( $d$ )の割合、すなわちせん断変形による傾きをせん断ひずみ $\gamma(=d/h)$ と言います。このせん断応力とせん断ひずみの関係の傾きは地盤の固さを表し、せん断剛性(または剛性)とよびます。せん断剛性が高いと地震時に早く揺れ、低いとゆっくり揺れる傾向にあります。言い換えると、剛性が高いと小さな変形で大きな加速度を示し、

剛性が低いと大きな変形で小さな加速度を示しながら揺れる傾向にあります。また、図3(c)に示すように、有効応力が低下するとせん断剛性も低下し、有効応力が増加するとせん断剛性も増加します。水で満たされた飽和地盤内では、せん断変形により間隙水圧が変化することで有効応力が変化し、せん断剛性も変わります。

### 地盤のせん断変形と有効応力

ここでは、地震中の地盤のせん断変形に伴う有効応力の変化を説明しますが、そのためには図4(a)に示すように乾燥状態の地盤の体積変化を知る必要があります。地震初期に地盤がせん断変形を受けると土粒子が空隙に沈みこもうとし、体積が収縮する傾向にあります。ただし、さらにせん断変形を受けると今度は土粒子

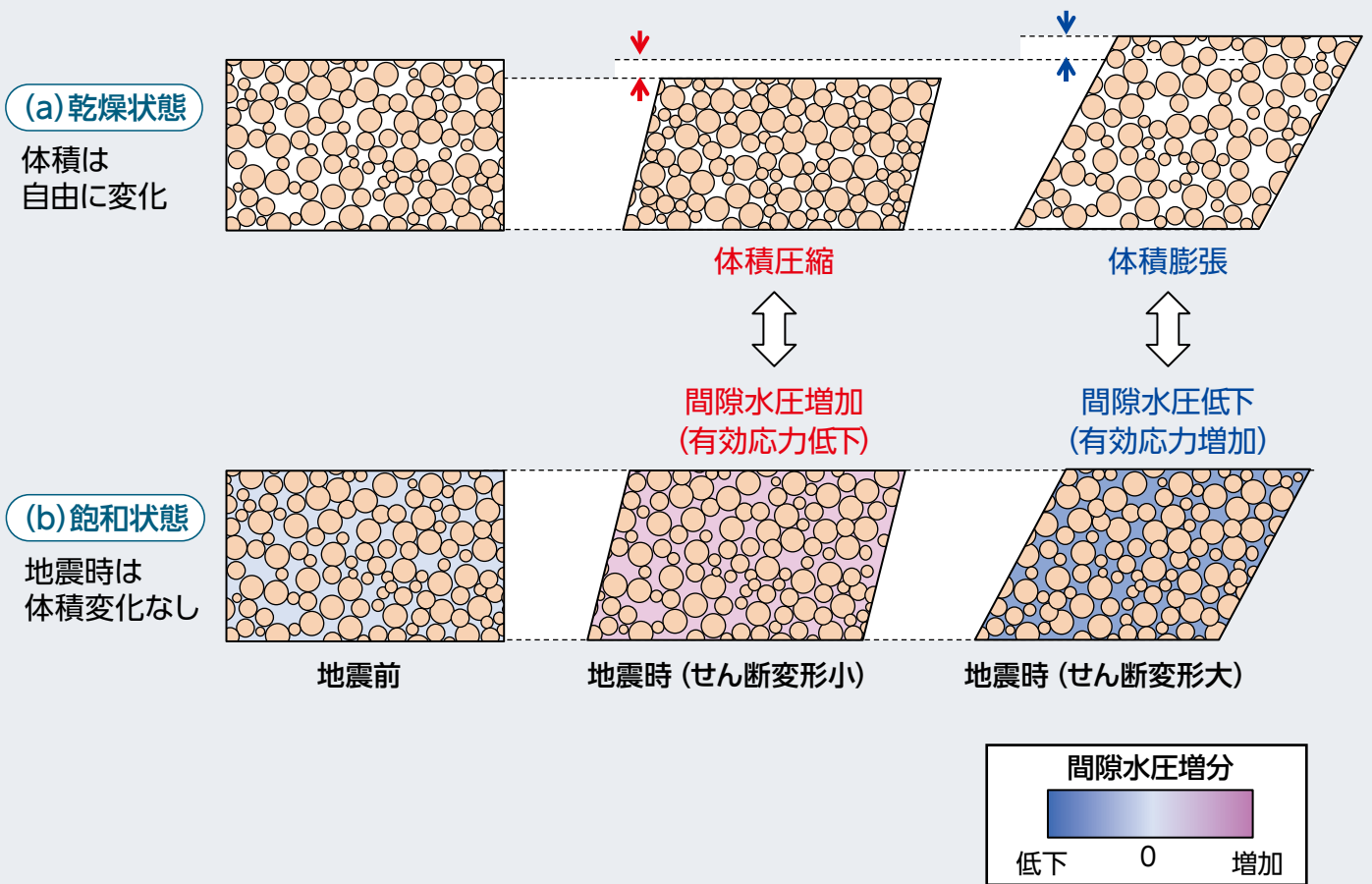


図4 せん断変形に伴う乾燥状態の体積および飽和状態の有効応力挙動

が周辺の土粒子に乗り上がるような挙動を示し、体積は膨張します。このようにせん断変形によって体積が変化するのは土の大きな特徴の一つです。一方、飽和状態で体積が変わる場合は、水が出入りする必要がありますが、地震時のような短い時間内では水が出入りすることができません。その代わりに間隙水圧が変化します(図4(b))。つまり、体積が収縮する代わりに間隙水圧は増加し、体積が膨張する代わりに間隙水圧は低下します。この間隙水圧の低下は、負の圧力(土粒子を引っ張る力)まで低下することもあり、せん断剛性の大きな増加につながります。

地震中の液状化地盤の挙動をまとめます。地震時初期に繰り返しせん断変形が生じると間隙水圧が増加し、有効応力が低下、それにとまな

てせん断剛性も低下します。有効応力がゼロに達し、せん断剛性がほぼ失われますが、この状態を液状化と言います。その後、せん断剛性が低下したことでせん断変形しやすくなり、せん断ひずみが増大すると有効応力が増加し、その結果、せん断剛性も増加します。これはサイクリックモビリティ<sup>®</sup>とよばれる現象で、加速度の急激な増加につながります。このように地震中のせん断変形に伴う有効応力の変化によって、液状化地盤中の地震波は複雑な挙動を示します。

#### サイクリックモビリティ

乾燥状態のせん断変形時に土粒子同士が互いに乗り上げる挙動を示す砂などが、非排水条件で繰返しせん断を受けることで負の間隙水圧が発生し、有効応力や剛性が回復する現象です。

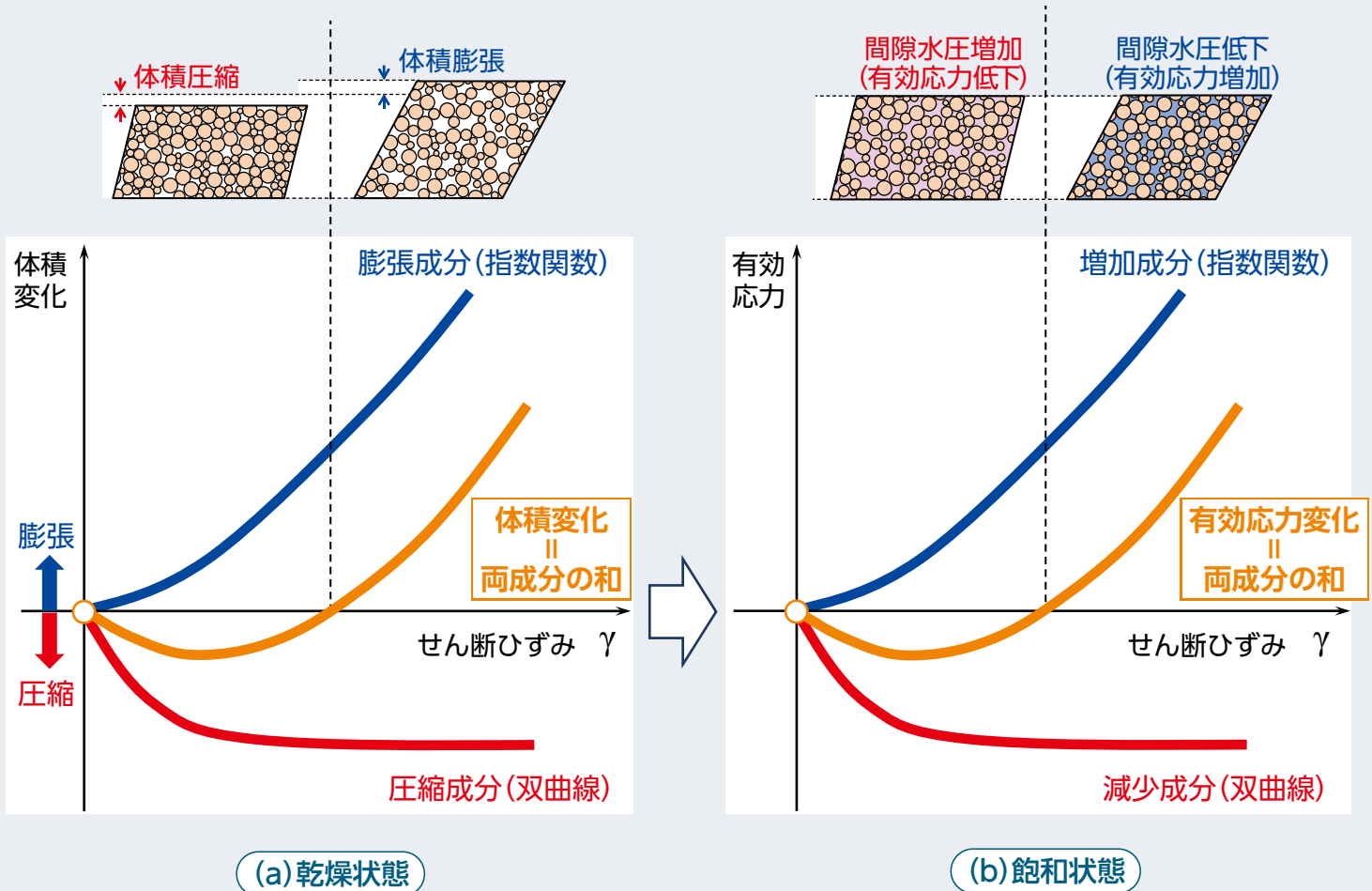


図5 せん断変形に伴う乾燥状態の体積および飽和状態の有効応力挙動のモデル化

### 液状化中の地震波を評価する

液状化地盤中の地震波を評価するためには、有効応力の変化を追跡できる解析が必要になります。そのような解析手法は有効応力解析手法とよばれており、これまでにさまざまな手法が提案されています。しかしながら、そのほとんどが複雑な理論を元に構築されており、理解しづらい手法でした。鉄道総研では、鉄道構造物の耐震設計に使用することを前提として、設計者が理解しやすい理論を元にした有効応力解析手法の開発を行ってきました。この解析手法では、まず、図5に示すように乾燥状態の地盤を想定し、せん断変形による体積圧縮を双曲線で、体積膨張を指数関数で示し、両者を足し合わせて全体の体積変化を計算します<sup>1)</sup>。この体積変

化を飽和地盤内の等価な水圧変化に換算することで、有効応力の変化を算定できます。このように、乾燥状態の地盤の挙動からモデル化することで、飽和状態の有効応力の変化をイメージしやすい有効応力解析手法になっています。

図1に示したCase2は飽和地盤を想定して鉄道総研で開発した有効応力解析手法を用いて計算した地震波、Case1は乾燥状態を想定して有効応力が変化しない場合の地震波になります。図6にこれらの地震波を有効応力の変化とともに示します。Case1は有効応力が変化していないことがわかります。一方の飽和地盤では、地震動初期に有効応力が低下し(図中①)、それともなって剛性が低下するため、乾燥状態と比較して加速度も低下傾向を示します

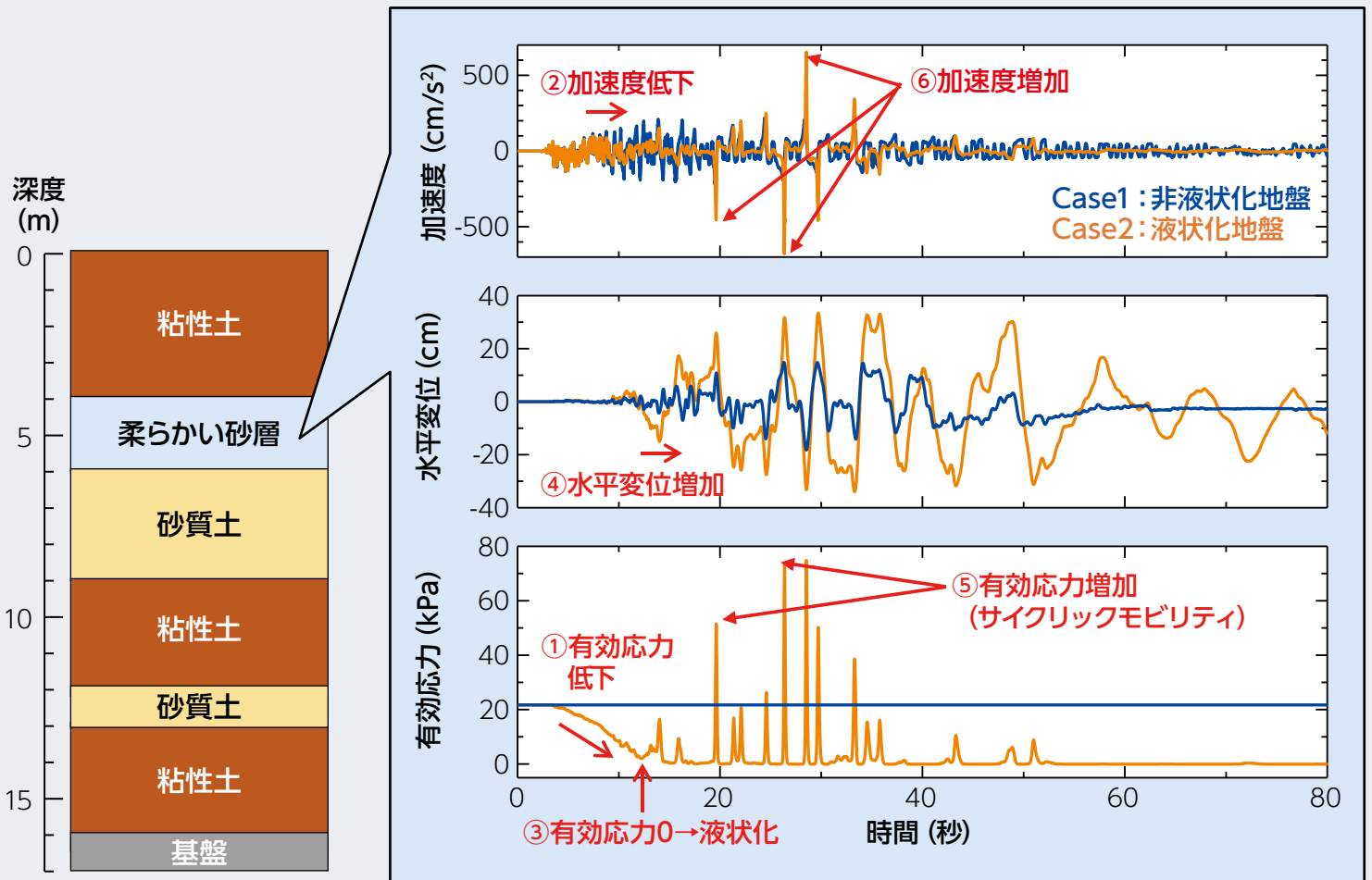


図6 非液状化地盤中と液状化地盤中の地震波と有効応力の関係

(図中②)。その後、12秒付近で有効応力がゼロまで達し、液状化に至っていることがわかります(図中③)。液状化に至ると水平変位が急増するため(図中④)、サイクリックモビリティによって有効応力が急激に増加し(図中⑤)、その結果、非常に大きな加速度が発生しています(図中⑥)。このように地震時の地盤のせん断変形に起因する有効応力の変化によって液状化が発生し、液状化地盤中の地震波が大きく変化することがわかります。

### おわりに

本稿では、砂地盤が液状化するメカニズムを説明するとともに、液状化地盤中の地震波を算定するための鉄道総研での取り組みを紹介しま

した。鉄道総研では振動台実験などの結果を計算結果と比較しながら、解析手法の高精度化も進めています<sup>2)</sup>。

鉄道網が発達している日本の大都市の多くは、液状化しやすい地盤が広く分布している沿岸部に位置しており、液状化被害が懸念されています。本稿で紹介したような解析手法を開発するとともに、液状化の対策工法<sup>3)</sup>や実務的な設計法などの整備も進めています。RRR

### 文献

- 1) 福武毅芳, 松岡元: 任意方向単純せん断におけるダイレイタンスの統一的解釈, 土木学会論文集, No.412/III, pp.143-151, 1989
- 2) 山本昌徳, 山内泰知, 神澤拓, 井澤淳: 液状化地盤中の杭基礎構造物の地盤—構造物—体海型モデルによる動的解析手法に関する検討, 第23回橋梁等の耐震設計シンポジウム, 2020
- 3) 井澤淳, 大西高明, 藤原寅士良, 館山勝: 低コストで液状化地盤を改良する, RRR, Vol.74, No.6, pp.8-11, 2017